

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Física

A relação entre cancelamento de fluxo magnético
e fulgurações solares.

Silvia Helena Becker Livi

Tese realizada sob orientação do
Doutor Kepler de Souza Oliveira
Filho em preenchimento parcial
dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre

1994

Trabalho parcialmente financiado pelo CNPq e FINEP

Agradecimentos

Agradeço ao Dr. Harold Zirin e ao grupo de Astronomia Solar do Instituto de Tecnologia da California (Caltech), pela gentil acolhida. O Caltech foi escolhido pelo meu marido, Dr. Rogerio Livi, de modo que eu tivesse um bom ambiente de Astronomia enquanto ele fazia seu pós-doutorado em Física. Dele tive amplo apoio para desenvolver meu trabalho. Optei por me dedicar à análise digital de imagens, porque considerava que essa seria uma técnica valiosa que poderia ser aplicada não só ao estudo do Sol, mas a outros objetos astronômicos e mesmo em outros campos. Agradeço aos colegas do Departamento de Astronomia, e em especial ao Dr. Edemundo da Rocha Vieira, que deram respaldo para esse projeto.

Após um ano fui convidada por Sara Martin para investigar o que ela classificou de um projeto simples, que seria a busca de dipolos magnéticos emergentes (as regiões efêmeras que ela e Karen Harvey haviam descoberto), examinando séries de magnetogramas solares reproduzidos em fotografias. Esse projeto "simples" abriu um amplo questionamento científico, pois eu logo descobri diversos exemplos de um comportamento totalmente anômalo: ao invés de os polos magnéticos opostos crescerem e se separarem, como é característico das regiões efêmeras, eles se aproximavam e se reduziam. Esse fenômeno, que Sara já tinha começado investigar e que denominamos cancelamento, é o fio mestre desta tese. Sara Martin ajudou-me a desenrolar esse fio, dando valiosas sugestões e instigando-me, mais tarde, a explorar a relação entre cancelamento e fulgurações. Com ela eu aprendi a complicada nomenclatura dos fenômenos solares e por interferência dela consegui a doação de um projetor especial de 16 mm, que permitiu que eu continuasse o trabalho no Brasil.

Os programas para decodificar as imagens provenientes do Observatório Solar de Big Bear e a calibração dos magnetogramas estavam sendo desenvolvidos por Jingxiu Wang, um visitante proveniente da China. Juntos trabalhamos intensamente na análise do cancelamento e na elaboração de novos modos de analisar e apresentar os magnetogramas, através de técnicas digitais, mantendo enorme entrosamento a despeito da diferença de língua e de cultura.

O Dr. Kepler de Souza Oliveira Filho leu os artigos iniciais e aceitou orientar esta tese, auxiliando-me ativamente nas diversas etapas do trabalho e contribuindo com valiosas sugestões para aperfeiçoar os textos gerais sobre o Sol e o glossário. O Dr. Oscar Matsuura deu inúmeras sugestões para o glossário. Luiz Augusto Leitão da Silva sugeriu correções nas partes IV e V.

Agradeço também a Claudio Bevilacqua pela reprodução das fotos, a Zuleika Berto pela ajuda com a bibliografia e aos meus bolsistas de iniciação científica, em especial a Fabricio Ferrari e a Diego Chevarria, que fez os desenhos da parte final.

Sumário

I	Introdução	1
II	Esquema geral do Sol	3
III	Propriedades gerais do Sol	
	1) O Sol como estrela	5
	2) Geração de energia no Sol	5
	3) Convecção no Sol	6
IV	Revisão histórica da descoberta dos fenômenos solares	
	1) Introdução	9
	2) Primeiras observações das manchas solares	9
	3) O ciclo solar através dos tempos e sua influência	10
	4) Início das observações espectroscópicas	11
V	A atmosfera solar	
	1) Camadas observáveis do Sol: fotosfera, cromosfera, coroa ..	14
	2) Estrutura magnética da atmosfera solar	17
	3) Correspondência entre elementos da cromosfera e configuração magnética local	19
	4) Protuberâncias	20
	5) Modelos de Protuberâncias	21
	6) Padrões básicos de emergência, deslocamento e decaimento ..	22
VI	A relação entre cancelamento e fulgurações	
	1) A estratégia e a técnica de análise digital das imagens ...	24
	2) O comportamento dos campos magnéticos emergentes e em cancelamento	26
	3) Fulgurações solares	30
	4) O contexto teórico do estudo das fulgurações	32
	5) Configuração dos campos magnéticos e fulgurações solares ..	33
	6) A geometria dos campos magnéticos nos arredores do filamento e sua relação com o cancelamento	35
	7) Perspectivas e conclusões	40
VII	Referências bibliográficas.....	42
VIII	Apêndice Glossário	
IX	Apêndice Trabalhos publicados sobre o tema	

RESUMO

As fulgurações têm sido estudadas há muito tempo e continuam intrigando os cientistas solares. Nosso trabalho trata da relação entre fulgurações e cancelamento de fluxo. O cancelamento é um fenômeno observacional descoberto usando séries de magnetogramas na linha de visada, que consiste na aproximação e posterior desaparecimento de fluxo magnético nas zonas em que polaridades magnéticas opostas estão em aparente contato e mantém um alto gradiente de campo magnético. Alguns aspectos do trabalho incluem:

1. O estudo do Sol é relevante tanto no contexto das relações solares terrestres como no da física das estrelas.
2. Os magnetogramas são um recurso essencial para entender os fenômenos solares.
3. Os fenômenos solares em pequena escala são importantes em si e porque resultam em efeitos globais.
4. O cancelamento pode melhor ser estudado em conjuntos de magnetogramas de longo tempo de integração, de modo a registrar campos magnéticos muito fracos, mas sem perder a informação dos campos fortes.
5. O uso de imagens digitais e a quantificação do cancelamento através de técnicas de análise digital de imagens contribui para melhor esclarecer esse fenômeno.
6. O cancelamento não pode ser interpretado como mera submergência da linha de campo magnética, como se fosse o reverso da emergência.
7. Nosso estudo da emergência de campos magnéticos revelou que, nas regiões de fluxo emergente, ocorrem inúmeros "dipolos magnéticos elementares", que, além de se aglutinar formando dipolos maiores, sofrem significativo cancelamento.
8. O cancelamento interno que ocorre nas regiões de fluxo emergente deve contribuir para sua alta emissão.
9. Filamentos ocorrem em locais onde campos magnéticos de polaridade oposta convergem e onde se cancelam.
10. Circunstâncias identificadas como geradoras de alta incidência de fulgurações correspondem a circunstâncias favoráveis à ocorrência de cancelamento.
11. A escala de variação temporal dos campos magnéticos, inclusive o cancelamento, é muito lenta comparada com a escala temporal das fulgurações.
12. O cancelamento, interpretado como resultado da reconexão, poderia transformar fluxo magnético radial em fluxo magnético transversal, criando condições para a formação de filamentos.
13. A geometria que inferimos para a região dos filamentos e a evolução prevista pelas nossas observações permite que se proponha um cenário no qual a ocorrência de cancelamento leva a uma mudança da estrutura do filamento semelhante à prevista em modelos teóricos de fulguração.

ABSTRACT

Flares have been studied for a long time and continue to puzzle solar scientists. Our work is on the relationship between flares and flux cancellation. Flux cancellation is an observational phenomena discovered using series of magnetograms of the line-of-sight component. It consists of the encounter and further disappearance of magnetic flux where opposite magnetic polarities are in apparent contact with each other and maintain a high gradient of magnetic field. Some aspects of the research include:

1. The study of the Sun is relevant, both in the context of solar-terrestrial relationships as in the context of the physics of stars.
2. The study of magnetograms is essential to the understanding of solar phenomena.
3. Small scale solar phenomena are important by themselves as well as because they result in global effects.
4. Cancellation is better studied in sets of images with long integration times, in order to show weak magnetic fields, but in a way that the information on strong fields is not lost.
5. Using digital images and quantifying the cancellation with digital analysis techniques contributes to a better understanding of this phenomena.
6. The cancellation cannot be interpreted as mere submergence of magnetic field line, as if it was the reverse of emergence.
7. Our study of emerging magnetic fields showed that in the emerging flux regions many "elementary magnetic bipoles" occur and that, besides merging into bigger bipoles, they suffer significant cancellation.
8. The internal cancellation that happens inside emerging flux regions does contribute to their high emission.
9. Filaments occur in places where the opposite polarity magnetic fields converge and where they cancel.
10. Circumstances recognized as having high incidence of flares correspond to circumstances that favor the occurrence of cancellation.
11. The time scale of magnetic field changes, including cancellation, is extremely slow compared with the timescale of flares.
12. Cancellation, interpreted as reconnection, could transform radial magnetic flux into transversal magnetic flux, generating appropriate conditions for the formation of filaments.
13. The geometry inferred for the region of the filaments and the evolution predicted by our observations allow us to propose a scenario where cancellation leads to a change in the structure of the filaments similar to what is predicted by theoretical models of flares.

I - Introdução

Uma tese de doutorado tem seu núcleo principal de observações, cálculos, modelos e outros trabalhos, que pouco aparecem no texto, às vezes resumidos a um único número, e a elaboração da parte escrita, usualmente mero exercício acadêmico, já que a tese é pouco divulgada. Desejando que esse exercício acadêmico possa ter utilização maior, optei por escrever de modo mais amplo sobre o tema, situando-o tanto do ponto de vista histórico como no contexto geral da Física Solar, e anexar os trabalhos publicados sobre o assunto em que participei.

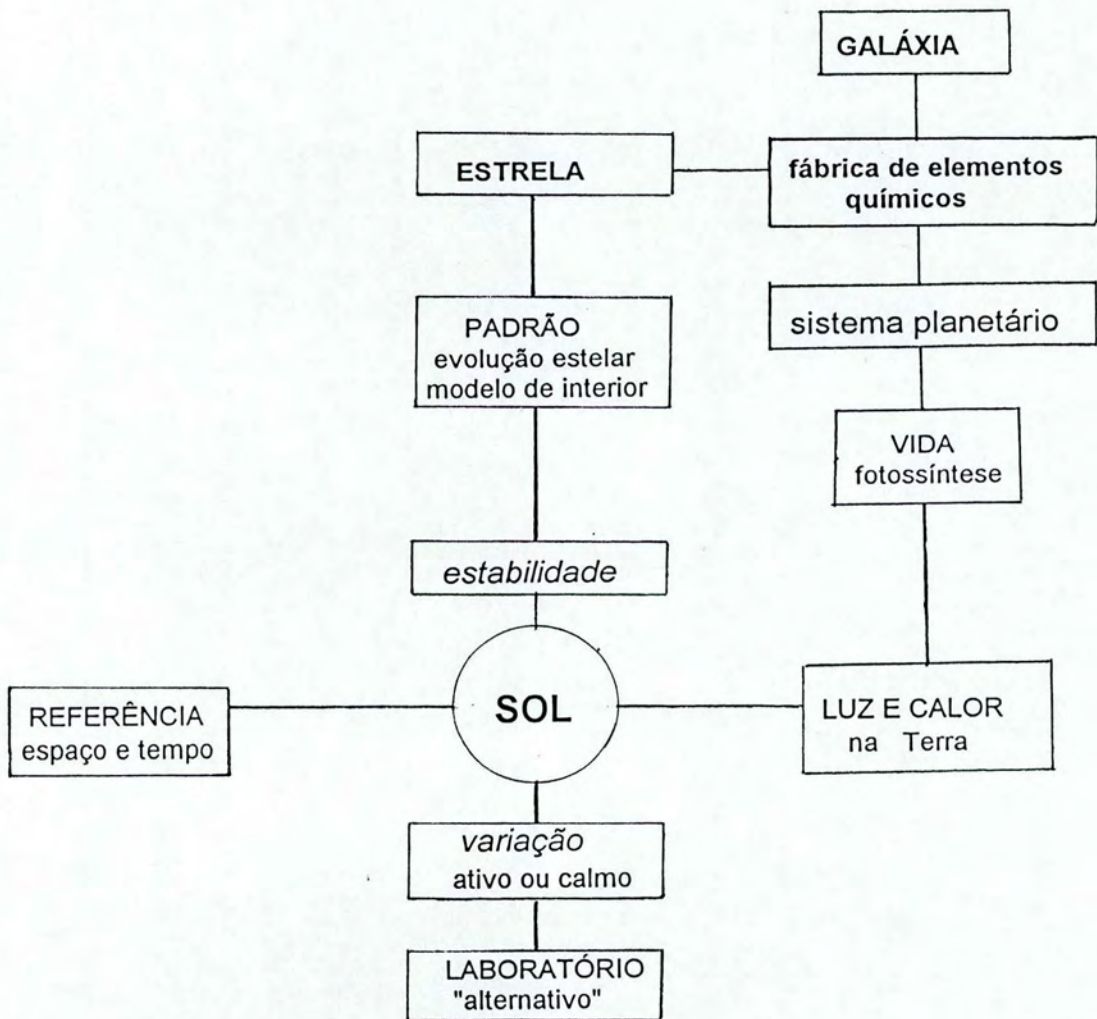
Apresento uma visão geral do Sol, uma revisão histórica das principais descobertas referentes ao Sol e um levantamento das principais características da atmosfera solar, situando o tema de modo abrangente. Os fenômenos observados são muito variados e sua nomenclatura extremamente vasta, pois variou significativamente ao longo do tempo, conforme os instrumentos e as interpretações oferecidas. Por isso considero que o reconhecimento dos fenômenos solares a que me refiro na tese e nos artigos possivelmente consistiriam na maior dificuldade na sua leitura. Além disso, tive o problema de encontrar termos adequados em português, por falta de literatura em nossa língua. Elaborei então um glossário, que se avolumou na medida em que inclui fenômenos que talvez não constem explicitamente nos artigos da tese, mas que descrevi a partir de minha experiência ao examinar as imagens do Sol e fazer as correlações entre filtrogramas e magnetogramas. Nesse sentido, a descrição desses fenômenos se integrou em meu trabalho de tese. Após ter abordado dessa forma uma proporção significativa de fenômenos na faixa óptica, decidi completar o glossário, incluindo outros aspectos dos fenômenos abordados e todos os fenômenos solares relativos à faixa óptica que pudesse identificar a partir de outros glossários ou de índices temáticos de livros. Desse modo o glossário ganhou independência do tema restrito da tese.

Os procedimentos de análise digital de imagens e os fenômenos mais diretamente ligados ao tema da tese, como fulgurações e configuração dos campos magnéticos são tratados na parte final, com as observações principais e as interpretações correntes. A evolução dos campos magnéticos foi descrita no Sol quieto em Livi et al. (1985) e numa região ativa em Martin et al. (1985), com

ênfase nos padrões em pequena escala e sua contribuição em escalas maiores. Estudamos a correspondência dos campos magnéticos com as fulgurações em diversos artigos (Martin et al. 1984; Martin, Livi e Wang 1985; Livi et al. 1989, Martin e Livi 1992), tendo estabelecido a relação com o fenômeno de cancelamento. Este foi estudado isoladamente no contexto de sol quieto (Livi et al., 1985, Wang et al., 1988, Martin e Livi, 1989) e de sol ativo (Martin, Livi e Wang, 1985). Também contribuimos no estudo da emergência de campos magnéticos na fotosfera solar (Martin et al., 1984, Barth and Livi, 1990). Este conjunto de artigos abrange o estudo da evolução dos campos magnéticos e das configurações magnéticas em que observamos a liberação de energia na atmosfera, tanto de modo brusco (fulgurações) como gradual. A relação entre as fulgurações e o cancelamento começa a ser reconhecida (Zirin 1989, Moore 1992). Este conjunto de trabalhos representa um estudo pioneiro do cancelamento e das relações entre fulgurações e campos magnéticos em cancelamento.

II Esquema geral do Sol

É comum que aspectos inerentes à relação Terra-Sol sejam misturados e confundidos com propriedades intrínsecas do Sol; constatei que a estrutura proposta em alguns currículos de primeiro grau trazia incorreções deste tipo. Mesmo os textos mais gerais e abrangentes têm estruturas muito diversas na apresentação, conforme seu enfoque e a especialidade de seu autor. Por isso considerei especialmente relevante explicitar um esquema conceitual geral sobre o Sol, que apresento a seguir. Após a versão inicial, cujo resumo foi apresentado em forma de texto na Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira em 1993, eu o reestruturei com base no depoimento de astrônomos e estudantes de Astronomia nela presentes. Ele salienta o contexto astronômico mais abrangente em que se situa o Sol e deve servir como orientação básica para os diversos aspectos que vão ser apresentados nos textos que seguem.



III - Propriedades gerais do Sol

1) O Sol como Estrela.

O Sol parece incômodo para os astrônomos estelares: além de impedir a observação das demais estrelas durante o dia e iluminar a Lua, atrapalhando as observações noturnas, mostra fenômenos que complicam as teorias simples elaboradas para as demais estrelas. Sendo pontuais mesmo nos mais poderosos telescópios, as estrelas em princípio poderiam ser tratadas como esferas perfeitas em equilíbrio.

Entretanto, mesmo criando problemas com seu comportamento complexo e inusitado, o Sol acaba fornecendo os parâmetros básicos para os modelos das demais estrelas, por permitir um estudo detalhado do espectro e da superfície, impossível em outros casos. Na medida que os instrumentos se aperfeiçoam, os fenômenos observados no Sol também são inferidos no comportamento de outras estrelas, indicando que o Sol é um objeto comum, em uma fase duradoura, denominada Sequência Principal. Entretanto, as estrelas apresentam grande variedade nas características básicas tais como massa (de 0,1 a 100 M_{\odot}), fases de evolução, composição química e binariedade, podendo formar pares e inclusive transferir massa entre si. Portanto, não é válido generalizar arbitrariamente os dados obtidos para o Sol.

2) Geração de energia no Sol

A energia emitida nas camadas externas do Sol é gerada em seu núcleo, onde se estima que a temperatura ($1,5 \times 10^7 K$) e a pressão são suficientemente altas para ocorrerem reações nucleares de fusão do hidrogênio. Nesse processo o resultado final é a combinação de quatro núcleos de hidrogênio (prótons) e dois elétrons para formar um núcleo de hélio (partícula alfa). O processo envolve uma cadeia de reações nucleares em que se formam elementos intermediários (deutério, hélio 3) que são destruídos nas reações subsequentes, de partículas de antimatéria (pósitrons) que imediatamente encontram seu correspondente (elétrons) e se aniquilam, liberando energia, e de partículas de massa desprezível (ou nula), os neutrinos, que escapariam do Sol. As reações nucleares ocorrem em uma razão extremamente lenta, produzindo

variações imperceptíveis na estrutura solar em vários milhões de anos. A energia liberada por reação corresponde à diferença de massa entre quatro hidrogênios ($4 \times 1,00828 = 4,03312$ unidades de massa) e um hélio (4,00392 unidades de massa), gerando um total de $6,6 \times 10^{14}$ J/kg de matéria processada, sendo processados 6×10^{11} kg de matéria por segundo. Os neutrinos contêm uma pequena fração da energia (2%) e a levam para fora do Sol porque atravessam imensa quantidade de matéria sem interagir, pois sua seção de choque é cerca de 10^{-41} cm^{-2} .

A maior parte da energia, inicialmente liberada como radiação gama, interage com a matéria ambiente. Os elementos de radiação (fótons) só conseguem atravessar poucos centímetros antes de sofrer a próxima interação e ser reemitidos em outra direção. Os fótons, inicialmente de alta energia (raios gama) logo se termalizam, isto é, se transformam em um número muito maior de fótons de energia menor. Depois de muitas colisões, a energia desses fótons seguirá uma distribuição estatística, característica da temperatura do ambiente. A densidade da radiação é tanto maior quanto maior a temperatura, de modo que a troca de radiação entre camadas causa um fluxo líquido de energia das camadas mais quentes (internas) para as camadas mais frias (externas). Desse modo a energia gerada no interior é lentamente transportada para camadas mais externas do Sol através da radiação. Entende-se que o equilíbrio será estabelecido de modo que a radiação não mais se acumula nas regiões centrais do Sol: apenas mantém sua alta temperatura. As condições físicas em cada camada permanecem praticamente sem alterações por períodos extremamente longos (milhões de anos). Assim sendo, se costuma tratar o Sol como formado de sucessivas camadas esféricas concêntricas em equilíbrio.

3) Convecção no Sol

O Sol é um tipo de estrela em que o transporte nas camadas internas é principalmente radiativo, mas nas mais externas (envelope) é convectivo, isto é, com o deslocamento sistemático de matéria mais quente para as camadas externas e da matéria fria para o interior. As células de convecção são evidenciadas no Sol pela granulação, visível em luz branca e com escala de aproximadamente 700 km e duração de vários minutos, e pela

supergranulação, detetada através do efeito Doppler, com escala de cerca de 30 000 km e muitas horas de duração. As células podem reduzir-se ou ampliar-se, dividir-se ou juntar-se, de modo que as fronteiras entre células deslocam-se lentamente e a superfície visível do Sol (fotosfera) é sempre delineada pelas células de convecção. Nos magnetogramas de alta sensibilidade é possível inferir a supergranulação tanto pelo movimento radial de pequenos elementos magnéticos internos à célula, como através da concentração dos campos magnéticos nas bordas da célula, criando a malha magnética ("magnetic network"). Através do efeito Doppler, que mostra o deslocamento radial da matéria, é possível confirmar que a supergranulação ocorre em toda a superfície, mesmo quando os campos magnéticos não são suficientemente intensos para demarcar as células.

A convecção, além de transportar energia, redistribui os elementos químicos na estrela. Como a própria matéria é transportada, a convecção mistura os elementos, homogeneizando a composição química das camadas. Dependendo da massa da estrela, o centro das estrelas é convectivo em determinadas fases, o que facilita o processamento das reações nucleares, pois haverá renovação do hidrogénio na região central mais quente, onde é transformado em hélio. Em fases subsequentes será reprocessado em carbono e outros elementos mais pesados. A energia liberada é transportada para as camadas mais externas por radiação ou por convecção. As camadas que foram convectivas continuam com uma distribuição homogênea dos elementos químicos, se não sofrerem reações nucleares posteriores. Em sua fase inicial, anterior às primeiras reações nucleares, a estrela contrai, transformando a energia gravitacional da queda em energia térmica e radiação. Nessa fase ela tende a ser completamente convectiva, levando a uma composição química inicial homogênea. Assim sendo, quando a radiação correspondente a determinado elemento químico, como o hidrogénio ou o cálcio, não tem brilho uniforme na superfície do Sol, as variações são interpretadas preferencialmente em termos de diferenças nas condições físicas a que estão submetidos esses elementos, como temperatura ou pressão, e não em termos de diferença de composição química. Podem ocorrer, entretanto, circunstâncias especiais em que haja maior difusão de alguns

elementos e que sua distribuição não seja rigorosamente homogênea.

Um papel importante atribuído à convecção é a criação de campos magnéticos através do deslocamento ordenado das cargas elétricas do plasma e da concentração posterior das linhas de campo magnético arrastadas junto com a matéria. Estrelas convectivas em suas camadas externas, como o Sol, mostram fenômenos interpretados como sendo decorrentes da existência de campos magnéticos, como manchas solares e fulgurações.

IV Revisão histórica do estudo do Sol.

1) Introdução

Desde as civilizações mais antigas se tem reconhecido a importância do Sol. As relações Terra-Sol determinam as condições existentes em nosso planeta, essenciais para a vida, e dependem tanto da posição estratégica da Terra como das características do Sol. Seu aspecto mais notável é a regularidade da trajetória aparente do Sol no céu e a constância de seu brilho e tamanho aparente. A variação do diâmetro aparente do Sol indica a excentricidade da órbita da Terra, que é pequena. O brilho do Sol, observado diretamente ou inferido a partir das condições vigentes na Terra, evidencia que o Sol tem se mantido praticamente constante por longos intervalos.

2) Primeiras observações das manchas solares

Antigos chineses e babilônios observaram um fenômeno inerente à natureza do Sol que passou quase despercebido na tradição ocidental até 1611: a existência de manchas em sua superfície visível (fotosfera). Em 1611 quatro cientistas as identificaram independentemente: Fabricius, Galileu, Scheiner e Harriot. Embora a motivação de Scheiner fosse a busca de um planeta interno a Mercúrio, seus estudos foram os mais completos e culminaram em 1630 com a publicação do "Rosa Ursina sive Sol". Galileu foi um dos primeiros a reconhecer que as manchas eram características do Sol, pois alteravam seu aspecto e se deformavam ao aproximar-se do limbo de modo incompatível com a aparência de planetas ou objetos semelhantes transitando sobre o disco solar. Galileu publicou "Istoria e Dimonstrazione intorno alle Macchie Solari" em 1613.

As observações desses precursores foram feitas com telescópios primitivos ou com câmara escura, mas permitiram que fossem descobertas algumas propriedades essenciais das manchas solares, a saber:

- mostram uma zona mais interna e mais escura, a umbra, e outra de brilho intermediário, a penumbra;
- giram com o Sol com um período sinódico aproximado de 27 dias;
- ocorrem em duas faixas aproximadamente equidistantes do equador solar, entre 5° e 45° de latitude (zonas reais);

- pela variação de seu movimento de rotação ao longo do ano, infere-se que o plano do equador solar não coincide com a eclíptica, estando inclinado em cerca de 7°;
- a rotação não é rígida e o período é menor no equador solar;
- têm variações significativas em uma rotação e evoluem, aparecendo, mudando de forma e desaparecendo;
- tendem a ocorrer em grupos.

Embora não fosse necessário maior instrumental para observar que o número de manchas visíveis varia periodicamente, essa característica só foi descoberta após dois séculos. Foi anunciada por Schwabe pela primeira vez em 1843, mas só teve reconhecimento ao ser publicada no Kosmos de Humboldt em 1851, quando o período médio de cerca de onze anos ficou estabelecido. Nesse interim foi obtido o primeiro daguerreótipo (fotografia primitiva) do Sol por Fizeau e Foucault e estabelecido o número relativo de manchas por Wolf em 1849. Seu valor é: $R = K (10 g + f)$, sendo:

K = fator de correção instrumental, característico para cada observatório, que leva em conta tamanho do telescópio, condições atmosféricas e observador;

g = número de grupos de manchas;

f = número de manchas individuais.

A partir de 1861 começa a fotografia sistemática de manchas solares em Kew, Inglaterra, mas em 1858 Carrington já havia descoberto a lei de deslocamento em latitude das manchas. A região onde as manchas ocorrem vai mudando ao longo do ciclo solar, ficando inicialmente em latitudes de até 40° nos dois hemisférios e depois surgindo cada vez mais perto do equador solar. A figura que representa graficamente a lei é chamada diagrama "borboleta" devido ao seu aspecto. Essa é uma propriedade essencial do ciclo de atividade solar.

3) O Ciclo Solar através dos tempos e sua influência.

As manchas são apenas a manifestação mais visível do ciclo solar que, por serem observáveis em luz branca, fornecem a mais extensa base de dados diretos de que podemos dispor. Reanalizando os registros antigos dos chineses é possível encontrar periodicidade semelhante à atual (Wittmann e Xu, 1987). A análise de registros históricos de auroras boreais também mostra que um ciclo auroral comparável ao atual existia na antiguidade, pelo

menos no século II AC (Stothers 1979). Por meios indiretos, através do estudo de anéis de troncos de árvores que foram abatidas há centenas de anos ou de rochas sedimentares com 680 milhões de anos (formação elatina na Austrália do Sul), encontram-se evidências de variações que seriam decorrentes do ciclo solar e que vêm se mantendo há longa data. (Williams, 1985). Isso indicaria que o ciclo solar contribui de modo sutil no ambiente terrestre. Entretanto, a interpretação dessas variações como decorrentes de variações intrínsecas ao Sol não é consensual e os ciclos na formação elatina foram reinterpretados como devidos a flutuações de marés (Sonnet et al. 1988). Os indícios de variações de clima na Terra com o ciclo solar são muito sutis, mostrando variações diferentes para distintas latitudes (Giovanelli 1984).

Ainda que as evidências da ocorrência do ciclo solar em épocas remotas sejam pouco conclusivas, não é plausível que ele seja uma característica apenas do momento atual ou que seja um fenômeno muito peculiar. Outras estrelas mostram variações semelhantes, indicando a existência de manchas em áreas muito mais extensas do que no Sol. (Torres, 1983)

O aumento do número de manchas é rápido, mas a queda é mais gradual; a duração do ciclo é variável, bem como o valor do pico. Entretanto parece que houve períodos em que o número total de manchas no Sol manteve-se muito baixo; é possível que esta tenha sido uma das causas do retardo na descoberta do ciclo solar. Esses períodos de inatividade teriam correlação ainda mais forte com variações climáticas do que o próprio ciclo de 11 anos; eles também são denominados mínimos, sendo mais conhecidos o de Maunder e o de Spörer.

4) Início das observações espectroscópicas.

A descoberta da ocorrência de linhas escuras no espectro do Sol foi feita por Wollaston em 1802 e independentemente por Fraunhofer em 1814, que iniciou o reconhecimento sistemático das mesmas. Mostrou-se que elas eram características dos elementos químicos da atmosfera solar. O estudo de Kirchhoff em 1859 permitiu sua interpretação.

Pierre Jules Janssen começou a estudar o espectro solar no início da década de 1860 e descobriu em 1868, que, com o auxílio de um espectroscópio, era possível ver protuberâncias fora de eclipse. Essa descoberta foi feita independentemente por Norman Lockyer. Em um breve intervalo durante a fase de totalidade de um eclipse aparece uma emissão avermelhada além do limbo do Sol, a cromosfera e, projetando-se além dela, as protuberâncias. A cromosfera tem um espectro de emissão.

A partir do estudo das linhas espectrais, propriedades físicas da atmosfera solar puderam ser determinadas. George Ellery Hale montou um laboratório espectroscópico no Monte Wilson, Califórnia, e estudou a dependência das intensidades das linhas com a temperatura. Obteve espectros da umbra, comparando-os com os provenientes da fotosfera adjacente, que usou como comparação; mostrou que manchas correspondem a regiões de temperatura mais baixa.

Com o desenvolvimento do espectroeliógrafo independentemente por Hale, Deslandres e Evershed, conseguiu-se imagens do Sol nas linhas espectrais. Hale sensibilizou placas fotográficas para poder registrá-las na linha H α . Uma dessas fotografias mostrava uma mancha com aspecto de vórtice, o que o teria levado a supor a possibilidade de que a eventual preponderância de íons positivos ou negativos pudesse dar origem a um campo magnético. Linhas duplas já haviam sido observadas em manchas e Zeeman recentemente descobrira o efeito que leva seu nome. Assim, Hale logo montou um romboide de Fresnel, que agia como uma lâmina de quarto de onda, e um prisma de Nicol (polarizador), acima da fenda do espectrógrafo. A intensidade relativa das componentes das linhas duplas revertia quando o Nicol era rotado por 90°, de acordo com o efeito Zeeman longitudinal, pois as duas componentes têm polarizações circulares opostas. Essas observações, obtidas em 25 de junho de 1908, demonstraram que as linhas eram duplas devido ao campo magnético.

Os estudos do grupo de Hale mostraram a dependência magnética do ciclo solar. Dipolos magnéticos emergem orientados quase paralelamente ao equador solar, mas há assimetria na orientação e na concentração dos campos magnéticos dos dipolos. As manchas maiores e mais compactas, que se formam primeiro e duram mais tempo, ocorrem na parte precedente em relação à rotação do Sol,

enquanto na maioria dos casos a parte seguidora tem manchas mais espalhadas ou sequer forma manchas. Apesar disso, o fluxo total de cada uma das polaridades deve ser igual, o que é confirmado pelas observações. Hale denominou de "manchas invisíveis" essas regiões em que os campos magnéticos estão menos concentrados. Elas correspondem a plages, que, sendo mais extensas, podem acumular igual fluxo magnético que as manchas.

A polaridade magnética da parte precedente de um hemisfério é oposta à polaridade precedente do outro hemisfério.

Há reversão das polaridades em ciclos solares sucessivos, de modo que a polaridade precedente de um ciclo será seguidora no seguinte. Deste modo um ciclo magnético completo teria 22 anos. A descoberta dessa reversão foi enunciada por Hale e Nicholson em 1925.

1) As camadas observáveis do Sol: fotosfera, cromosfera, coroa.

A divisão da atmosfera solar em fotosfera, cromosfera e coroa tem origem observacional. A fotosfera é a região visível em luz branca, de onde provém a maioria da luz. A nitidez do limbo e a impossibilidade de observar regiões mais internas mostram que a opacidade sofre significativa variação na fotosfera. Apenas nas linhas escuras de Fraunhofer e em determinadas faixas de rádio, as regiões superiores da atmosfera solar apresentam significativa opacidade; de um modo geral a radiação escapa sem alterações.

A superfície visível do Sol é um gás ionizado. Os elementos escuros (manchas) ou brilhantes (fáculas) são regiões distinguíveis devido ao seu contraste. As fáculas, por exemplo, são mais notáveis no limbo. As camadas aparentes do Sol formam a fotosfera, que é extremamente fina e dá a impressão que o Sol tem uma superfície bem definida. Isso é apenas um efeito óptico, não havendo descontinuidade na densidade nem em composição química ou temperatura. Ao nos referirmos à "superfície" do Sol, temos em vista basicamente um efeito de opacidade.

A fotosfera compreende uma região onde as condições são tais que a opacidade das camadas mais baixas é muito alta, de modo que um fóton emitido abaixo da fotosfera tem alta probabilidade de ser absorvido, mas os fótons reemitidos para fora da fotosfera facilmente escapam, porque as camadas acima são transparentes para a luz visível. Embora a opacidade seja uma função da frequência da luz, sua variação nesse caso não é muito significativa, de modo que as camadas mais internas são opacas a todos os tipos de radiação, que provém no máximo de 400 km de profundidade. Apenas os neutrinos, que são emitidos em algumas das reações nucleares que ocorrem no núcleo do Sol, sofrem tão poucas interações que podem escapar. Sua dificuldade em interagir com qualquer tipo de matéria, entretanto, torna muito difícil sua detecção, que seria uma maneira de testar as teorias referentes ao interior do Sol. Há séria contradição, pois o número de neutrinos calculado pela teoria é significativamente maior que o obtido nas observações, inclusive com alguns indícios de variação com o ciclo solar. Uma das possibilidades é que os neutrinos tenham propriedades ainda

não reconhecidas, sofrendo efeitos que os fariam ressonar entre um tipo e o outro ao longo do caminho. Até o momento, os neutrinos têm trazido mais controvérsias que elucidações.

As camadas acima da fotosfera, a cromosfera e a coroa, são visíveis em eclipses. Também podem ser detectadas em rádio. A cromosfera é muito rarefeita para emitir em luz branca, mas quando o disco da Lua tapa a fotosfera durante um eclipse, aparece um anel avermelhado devido principalmente à emissão dos átomos de hidrogênio, na linha H α . O espectro da cromosfera é um espectro de emissão, chamado relâmpago ("flash"), por sua curta duração ao ser observado durante eclipses. O centro da linha H α tem um comprimento de onda de 656,3 nm ou 6563 Å, vermelho intenso. Ele é emitido pelos átomos de hidrogênio, quando o elétron passa do nível 3 (2º estado excitado) para o nível 2 (1º estado excitado). Essa é a linha fundamental da série de Balmer, que corresponde às transições de níveis superiores para o primeiro estado excitado. Os fótons emitidos nas transições para o estado fundamental (série de Lyman) não são visíveis na região óptica porque o comprimento de onda emitido é ultravioleta.

Como o hidrogênio é o elemento mais comum na atmosfera solar, os fótons H α emitidos na fotosfera sempre irão interceptar algum átomo de hidrogênio da cromosfera, excitando-o. Após, os átomos da cromosfera reemitirão os fótons H α em todas as direções. Por isso, o espectro contínuo proveniente da fotosfera terá uma significativa redução de fótons de comprimento de onda 6563 Å que, após serem absorvidos pela cromosfera, em sua maior parte foram reemitidos em outra direção. Desse modo, quando a Lua tapa apenas a fotosfera, os fótons reemitidos pela cromosfera na linha H α e em outras linhas de emissão podem ser detetados. Usando um espectroscópio ou um filtro muito estreito, para isolar uma dessas linhas, obtém-se uma imagem da cromosfera do Sol, denominada, respectivamente, espectroeliograma ou filtrograma.

A emissão da coroa, a camada mais externa e de menor densidade, é muito tênue para ser observada junto com a luz solar espalhada pela atmosfera da Terra. A coroa aparece durante os eclipses totais do Sol, ou se for usado um instrumento especial, o coronógrafo, que cobre a fotosfera e tenta isolar os fótons provenientes da coroa, usando filtros em linhas coronais.

Deve ser colocado em locais altos, onde a perturbação devida à atmosfera da Terra seja mínima. A coroa também é detetada com instrumentos no espaço, em raios X ou outras emissões em que a contribuição da fotosfera não é significativa. Ao contrário do esperado, a temperatura da cromosfera aumenta com a altura, e a temperatura da coroa é superior a 10^6 K. Ainda não há explicação convincente para esse fenômeno, que parece ferir a lei básica de que o calor não pode fluir de um corpo mais frio para um mais quente. Entretanto, como a energia necessária para elevar a temperatura de um determinado volume da coroa é muito pequena devido à sua baixíssima densidade, não falta energia na fotosfera, em diversas formas. L. Biermann, E. Schatzmann e M. Schwarzschild sugeriram que a fonte seria a energia mecânica dos movimentos convectivos. O problema é achar um mecanismo efetivo de transferência, que não pode depender simplesmente da diferença de temperatura, como ocorre no transporte radiativo. Os processos envolvendo ondas acústicas, que se propagariam para cima e se dissipariam eventualmente foram a explicação básica inicialmente aceita, mas vem sendo contestados atualmente. As dificuldades de elaboração teórica dos modelos é grande, mas os que incluem detalhes hidrodinâmicos mostram que as ondas se dissipariam logo ou seriam refletidas antes de atingir alturas coronais.

Do lado observacional, novas evidências surgiram com as imagens em raios X e ultravioleta distante, obtidas acima da atmosfera terrestre. Verificou-se que a coroa é muito estruturada e que a emissão se concentra principalmente em arcos que delineiam os campos magnéticos acima das regiões ativas. Nos primeiros modelos de aquecimento da coroa o papel dos campos magnéticos era considerado pouco relevante. O problema ainda não foi resolvido, mas atualmente é difícil escapar da evidência, obtida através da comparação entre as medidas em raios X e os campos magnéticos, que estes devem ter um papel importante, se não essencial. Entretanto, os processos que envolvem campos magnéticos e sua dissipação, como as fulgurações, ainda não foram suficientemente esclarecidos e as medidas em raios X só complicaram o cenário tradicional. Ao aumentar a resolução das medidas dos campos magnéticos ficou contundente que os modelos idealizados, em que a coroa era tratada como esfericamente simétrica e as fulgurações como um arco único,

têm poucas condições de representar os aspectos essenciais do problema, pois o confinamento do material nos arcos coronais e a evolução e interação entre arcos é ingrediente básico nas observações.

2) Estrutura magnética da atmosfera solar.

Os campos magnéticos na fotosfera do Sol são bastante concentrados nas regiões ativas, com valores entre 2000 e 4000 gauss nas manchas. Isso é possível de medir com um espectrógrafo, através da separação Zeeman das componentes longitudinais, que são circularmente polarizadas em sentidos opostos e deslocadas simetricamente em relação à posição normal da linha na ausência de campo magnético. O deslocamento Zeeman é diretamente proporcional ao campo magnético e ao quadrado do comprimento de onda normal da linha.

Os campos magnéticos mais fracos, que ocorrem entre as regiões ativas e em elementos das próprias regiões ativas, têm a separação Zeeman entre componentes significativamente menor que a largura das linhas usadas para realizar as medidas. Para obter magnetogramas (imagens dos campos magnéticos) através do efeito Zeeman nesses casos é necessário construir magnetógrafos especiais. Neles são obtidas as diferenças da intensidade das duas componentes circularmente polarizadas em direções opostas em uma faixa estreita de comprimentos de onda situada na asa de ambas as linhas, onde a intensidade das linhas varie o máximo com o comprimento de onda. O magnetógrafo separa as duas componentes circularmente polarizadas em direções opostas através de uma lâmina de quarto de onda (ou um KDP, que é um analisador eletro-óptico) e de um polarizador linear (um prisma de Nicol). É possível demonstrar que, no caso de efeito Zeeman em uma linha de absorção e nas condições de campo fraco, a diferença de intensidade entre as componentes Zeeman será proporcional à componente do campo magnético na linha de visada e ao quadrado do comprimento de onda normal da linha. (Bray e Loughhead, 1965). Para obter uma imagem que represente a intensidade e a polaridade magnética em cada ponto é feita a diferença entre a imagem na componente circularmente polarizada em um sentido e o negativo da imagem na componente circularmente polarizada em sentido oposto

(Zirin, 1988). Se o campo magnético na linha de visada for nulo, obtém-se cinza médio nesse local. Escolhendo-se apropriadamente as polarizações, obtém-se em branco os campos magnéticos positivos (para fora do Sol) e em negro os campos negativos (para dentro do Sol). Essa é a representação usual.

Os filtrogramas na linha H α mostram a estrutura da cromosfera do Sol. Como a densidade e a temperatura são mais baixas na base da cromosfera, a densidade de energia térmica é menor que a magnética. O campo magnético da fotosfera tem continuidade na cromosfera, onde, embora divirja levemente, a energia magnética torna-se dominante. As estruturas nas linhas cromosféricas delineiam o campo magnético, permitindo que se infira sua direção. Essa informação complementa os magnetogramas usuais, que fornecem apenas o valor do fluxo magnético na linha de visada.

Os campos magnéticos são varridos pelos movimentos convectivos e se acumulam nas bordas das células de convecção. O "congelamento" dos campos magnéticos pela matéria ocorre quando a condutividade elétrica é alta e a energia térmica (linearmente proporcional à densidade e à temperatura) é bem menor que a energia magnética (proporcional ao quadrado do campo magnético). Na cromosfera essas concentrações de campo magnético são notáveis por terem maior brilho e serem rodeadas por fibrilas ("fibrils"), que são pequenas fibras alongadas, geralmente escuras, que se distribuem em volta dos elementos magnéticos. O conjunto das fibrilas ao redor desses elementos magnéticos formam as rosetas ("rosettes"). As linhas de força, delineadas pelas fibrilas, tendem a ser radiais na base da cromosfera, mas se inclinam, formando arcos. Como é comum que uma polaridade magnética domine extensas zonas da superfície solar, as linhas de força geralmente ultrapassam várias células até chegar ao elemento de polaridade oposta onde retornam às regiões internas do Sol. Nos filtrogramas não é possível seguir todo o seu traçado, pois as fibrilas marcam apenas as regiões mais baixas da cromosfera, mas é possível inferir o que ocorre examinando o arranjo e a simetria individual das rosetas. Com a experiência acumulada observando a evolução dos elementos em filtrogramas e magnetogramas e fazendo sua correspondência, foi sendo estabelecida a estrutura básica da atmosfera solar.

3) Correspondência entre elementos da cromosfera e configuração magnética local.

As fibrilas, geralmente escuras, delineiam os campos magnéticos, mas apenas as bases e as pernas dos arcos são aparentes, porque em geral as fibrilas não se estendem de modo visível até elementos magnéticos de polaridade oposta. Geralmente as fibrilas deixam de ser visíveis em distâncias inferiores a uma célula da malha ("network") e as células são limitadas por elementos magnéticos de mesma polaridade. Entretanto, se no outro lado a polaridade magnética for oposta, o arco terá tipicamente a extensão de uma célula. Esse último caso Foukal (1971) denomina de "thread" (fio). Quando a malha não é limitada por elementos magnéticos de polaridade oposta, os elementos ultrapassam diversas células e são chamados "filaments" (filamentos). Fibrilas, fios e filamentos indicam conexões magnéticas. Os filamentos tendem a se destacar mais que as fibrilas e os fios, por seu maior contraste e extensão. A extensão dos filamentos é muito variável; os grandes filamentos se estendem por parte considerável de um hemisfério solar. Os grandes filamentos tendem a ocorrer em uma configuração magnética peculiar, pois parecem separar zonas de polaridade magnética oposta. Esses filamentos são acumulações de matéria mais fria e densa, acima das regiões de inversão de polaridade magnética. Quando a rotação solar os desloca na direção do limbo, podemos inferir sua estrutura. Além do limbo solar são vistos como protuberâncias baixas e alongadas.

Existem várias estruturas de aspecto filamentar que são genericamente denominadas filamentos, mas não evidenciam a mesma configuração magnética. Entre elas estão os sistemas de filamentos em arco ("arch filament systems") que são sistemas de arcos quase paralelos ligando polaridades magnéticas opostas e ocorrem na fase de emergência de regiões ativas, e os aros pós-fulguração ("post-flare loops"), que são estruturas em aro ligando as duas bandas de uma fulguração, que se elevam a altitudes muito superiores às dos filamentos e ocorrem após fulgurações de duas bandas. Ambos ligam diretamente regiões adjacentes de polaridades magnéticas opostas.

A grande variedade de termos na nomenclatura básica dos

fenômenos solares dificulta muito o iniciante. Independente dos domínios dos termos, entretanto, é necessário acumular experiência correlacionando magnetogramas e filtrogramas para reconhecer os padrões nas diferentes imagens. O movimento relativo de separação, o brilho intensificado das estruturas básicas, a direção das estruturas filamentosas ligando polaridades magnéticas opostas e seu alto contraste geralmente indicam campos emergentes; a intensidade em H α geralmente diminui quando o campo magnético pára de crescer. Filamentos separando polaridades opostas ocorrem nas fases seguintes, tanto internamente às regiões ativas, como separando-as dos campos adjacentes de polaridade magnética oposta. Uma discussão mais completa da configuração magnética dos filamentos está apresentada no item 5) modelos de protuberâncias e na parte VI.

4) Protuberâncias.

Do ponto de vista observacional, "qualquer nuvem visível em H α acima do limbo do Sol pode ser denominada protuberância" (Zirin, 1988). Isso inclui os filamentos propriamente ditos, tanto os de regiões ativas como os formados entre campos magnéticos remanescentes de regiões que já decaíram, bem como material associado a fulgurações. Esses últimos incluem os aros pós-fulguração ("post-flare loops"), as vagas ("surges"), matéria ejetada ao longo de linhas magnéticas que retornam pela mesma trajetória, e os borrifos ("sprays"), que são ejetados e escapam da atmosfera, geralmente se fragmentando. As protuberâncias caracterizadas a seguir não incluem esses fenômenos, que têm natureza completamente diferente.

As condições físicas das protuberâncias são peculiares: elas têm densidades e temperaturas semelhantes às da cromosfera, mas persistem na coroa. Uma protuberância típica possui temperatura entre 6 000 e 9000 K e densidade eletrônica de 10^9 a 10^{12} cm $^{-3}$, com a pressão de gás entre 10^{-2} e 1 dina cm $^{-2}$. Um campo magnético de apenas 5 G geraria uma pressão magnética de 1 dina cm $^{-2}$. Assim sendo, a pressão magnética em geral deve superar a pressão gasosa (proporcional à densidade e à temperatura), mas no caso limite a pressão gasosa talvez não seja suficiente para garantir a sustentação da protuberância. As observações indicam padrões

organizados nos campos de velocidades, que variam em forma e amplitude durante uma hora (Wiik, Heinzel, Schmieder, 1992).

As protuberâncias quiescentes podem durar várias rotações solares, alterando pouco sua forma básica. Sequências de imagens ("time-lapse films") mostram que há constante movimento de matéria ao longo dos arcos e linhas, com material elevando-se e caindo constantemente. Os arcos descem até a fotosfera em algumas colunas ou pernas ("legs"), mas nem sempre o material é igualmente brilhante em todas as alturas. É importante lembrar que a ausência de conexão evidente ou o desaparecimento parcial ou total de um arco não pode ser necessariamente entendido como inexistência ou alteração da linha de força magnética. Se as condições do plasma não forem adequadas, o material não terá suficiente contraste para ser observado. Assim é importante acumular o máximo de informações em todas as regiões do espectro. Observações em raios X e em radio, além das obtíveis com coronógrafos e em eclipses auxiliam a completar o conhecimento da estrutura da atmosfera solar.

5) Modelos de protuberâncias

Atribui-se a estabilidade das protuberâncias à uma estrutura magnética que permite a sustentação de material frio nas regiões quentes da coroa. Esse material pode ser oriundo da cromosfera, que é suficientemente densa e fria para provê-lo, ou se originar por condensação e esfriamento de material da coroa. Na protuberância, ele tenderá a se deslocar ao longo das linhas de força da configuração magnética, ficando relativamente isolado do material quente da coroa. Na coroa o transporte dominante é radiativo.

Uma característica básica da configuração magnética das protuberâncias quiescentes é que elas se situam ao longo da "linha neutra" ou, mais adequadamente, linha de inversão de polaridade magnética. Medido na fotosfera, o campo magnético longitudinal se anula, tendo polaridade magnética oposta em cada lado da linha de inversão magnética. O campo magnético transversal não apresenta ligações diretas entre polaridades opostas, como se esperaria de um campo magnético potencial, mas se alinha ao longo da linha de inversão, como se tivesse havido intenso cisalhamento nas linhas de campo magnético ("magnetic shear"). Embora se possa imaginar

que tal configuração deva ocorrer porque as bases das linhas magnéticas na fotosfera se deslocaram em movimento de cisalhamento, isto é em sentidos opostos nos dois lados da protuberância, as observações mostram que há um movimento de convergência dos elementos magnéticos de polaridades opostas que provém de cada lado da protuberância de maior magnitude que os movimentos laterais.

6) Padrões básicos de emergência, deslocamento e decaimento

Os padrões básicos de movimento observados nos magnetogramas da componente na linha de visada da fotosfera do Sol estão sucintamente descritos a seguir. Cada um desses movimentos cria um padrão de distribuição dos campos magnéticos com uma escala a eles peculiar.

a) movimentos radiais atribuídos à convecção, além do que causa a granulação, a saber:

a1) movimentos radiais de supergranulação atribuídos a padrões de convecção com escala de cerca de 30 000 km de diâmetro, que marcam a malha;

a2) movimentos ordenados preferencialmente radiais ao redor de manchas solares, identificados nos magnetogramas através dos fragmentos magnéticos em movimento, que deixam um "fosso" de campos mais fracos ao redor da mancha;

b) movimentos organizados ao longo de um eixo, atribuídos à emergência:

b1) padrões de emergência em pequena escala, formados por dipolos magnéticos elementares em aglomerados organizados, que surgem com orientação preferida e se movimentam no sentido de afastamento das polaridades magnéticas opostas, como se arcos provenientes do interior estivessem emergindo na superfície visível com orientação estabelecida, definida previamente. Tais dipolos magnéticos elementares são os menores elementos magnéticos observados em regiões ativas, não mostrando diferenças essenciais entre os que formam regiões efêmeras complexas, os que geram pequenas regiões ativas com manchas e poros, ou os que originam regiões de fluxo emergente em regiões ativas já existentes. Esses dipolos magnéticos têm o mesmo aspecto que as menores regiões efêmeras observadas, isto é, parecem um dipolo simples (Barth e Livi,

1990). Como a detecção em ambos casos está limitada essencialmente pela resolução e sensibilidade dos magnetógrafos atuais, não podemos distingui-los adequadamente e confirmar se eles têm a mesma natureza.

b2) padrões de emergência em larga escala, capazes de formar grandes regiões ativas pela emergência sucessiva de aglomerados organizados de dipolos magnéticos.

b3) o aparecimento sistemático de diversas regiões ativas na mesma longitude origina complexos de atividade ainda maiores. A estrutura dos dipolos magnéticos observados na superfície do Sol parece obedecer a padrões que se repetem semelhantemente em diversas escalas.

c) movimentos sistemáticos globais, como rotação diferencial e circulação meridional ou peculiares à assimetria:

c1) movimentos gerais de rotação diferencial que distorcem as regiões ativas, pois elementos em latitudes diferentes se deslocam com velocidade radial diferente;

c2) deslocamentos devido à circulação meridional, característica básica do ciclo solar, que tende a deslocar elementos em maiores latitudes na direção dos pólos e os da faixa equatorial na direção do equador;

c3) padrões peculiares não necessariamente incluídos nas categorias acima, em pequena ou em larga escala, que poderiam explicar a assimetria entre a zona precedente e a seguidora nas regiões ativas e o surgimento eventual de regiões de polaridades magnéticas invertidas;

d) evolução e decaimento conforme o encontro entre polaridades magnéticas opostas, que ocasiona o cancelamento e desaparecimento do fluxo magnético da fotosfera, ou seja:

d1) diferentes padrões de evolução das regiões ativas, conforme o comportamento dos polos magnéticos opostos na emergência, a distribuição dos campos magnéticos adjacentes pré-existentes no local, e a distribuição das células de convecção, que fragmentam os campos magnéticos, distribuindo-os nos limites da célula;

d2) decaimento através do cancelamento, que ocorre quando elementos de polaridade magnética oposta confluem.

VI A relação entre cancelamento e fulgurações.

1) A estratégia geral e a técnica de análise digital das imagens.

Esta tese abrange a descrição de alguns fenômenos fundamentais que ocorrem no Sol, como emergência e cancelamento, e que vem contribuindo para que surjam novas idéias sobre o seu comportamento. Especial importância foi dada ao que ocorre em pequena escala espacial e curtos intervalos de tempo. Embora com as técnicas tradicionais de obtenção de magnetogramas possam passar despercebidos, esses eventos de menor intensidade têm importância na reconfiguração dos campos magnéticos pois, por serem muito freqüentes, seu efeito é considerável.

No Observatório Solar de Big Bear, a técnica de obtenção dos magnetogramas era digital, mas essa característica se perdia pois eles ficavam registrados em filme, perdendo as vantagens de linearidade e as condições de serem analisados numericamente. Foi necessário então construir um programa de análise de imagens capaz de tratar as imagens digitais diretamente das fitas magnéticas onde eram eventualmente registradas e de integrar os valores dos pixels das regiões de interesse, que foram demarcadas por polígonos arbitrários. O desenvolvimento desse conjunto de programas especiais mostrou-se necessário por vários motivos:

a) os "pacotes" de programas então disponíveis, e que tentamos usar, eram especiais para análise de dados de radioastronomia, contendo diversas etapas desnecessárias para a análise de dados óticos;

b) os elementos que queríamos isolar tinham forma bastante complexa, sendo necessário delimitá-los por uma figura geométrica com características mais arbitrárias que as existentes naqueles programas;

c) os magnetogramas continham valores positivos e negativos, correspondentes às polaridades magnéticas opostas, e queríamos integrar separadamente os valores de mesma polaridade. Desse modo poderíamos calcular ao mesmo tempo o fluxo magnético de ambas as polaridades de um elemento dipolar relativamente isolado de seus vizinhos, ou, quando os limites de um elemento eram muito complexos, deixar que no polígono que o delimitava estivessem incluídos elementos de polaridade oposta, que não seriam

anulados, uma vez que o somatório dos valores de polaridades opostas era calculado separadamente. Também incluímos no programa um valor mínimo ("threshold"), tal que os pixels com valor menor não eram incluídos no somatório. Desprezando esses valores muito baixos tínhamos um modo unívoco de calcular o fluxo magnético, independente da forma exata do polígono que usávamos para delimitar os elementos, desde que eles não incluíssem partes de elementos vizinhos. Esse valor "de fundo" geralmente correspondia a um campo magnético médio de 5 gauss.

d) O sistema que registrava os valores dos pixels dos magnetogramas tinha apenas 8 bits, o que dava um intervalo dinâmico muito pequeno para a análise que desejávamos fazer. Assim, o número de imagens digitais que podiam ser acumuladas até que o pixel de valor mais alto ficasse saturado era relativamente pequeno. Para poder observar os níveis mais baixos deixávamos que o sistema acumulasse imagens digitais por um tempo muito mais longo que o de saturação dos picos dos elementos de maior fluxo magnético. Em princípio, poderíamos deixar que essas regiões de saturação ficassem com um valor máximo uniforme, mas Sara Martin já tinha criado uma maneira que nos permitia inferir o valor dos pixels dessas regiões saturadas, conseguindo acumular os valores em 10 bits e após registrando apenas os 8 bits menos significativos. Os magnetogramas adquiriam um aspecto de "curvas de nível" nas regiões de pico de fluxo magnético por pixel, que era bem mais difícil de interpretar na primeira visualização, mas que nos permitia aumentar significativamente o intervalo dinâmico dos magnetogramas. Nosso programa tinha, entretanto, que "reconstruir" os valores reais a partir dos valores registrados em 8 bits. Esse programa foi feito em colaboração com Jingxiu Wang e incorporado no sistema de análise digital dos magnetogramas.

Também foram elaborados programas para representar os magnetogramas através de curvas "isogaussianas", isto é, que delineavam as regiões cujos pixels tivessem o mesmo valor de fluxo magnético integrado na área do pixel. É importante salientar que a técnica usada para obter os magnetogramas não permite que se obtenha diretamente o campo magnético local, mas apenas o fluxo magnético, pois o campo magnético é integrado na área do menor elemento da imagem (pixel). Por isso procuramos usar uma escala no

telescópio que desse maior resolução espacial às imagens, mesmo tendo que nos limitar a uma região relativamente reduzida do disco solar. Em alguns dos turnos observacionais dos quais participei compensamos essa perda com uma estratégia de alternadamente adquirir imagens em regiões contíguas. Para isso era necessário considerar também a variação temporal dos elementos, de modo que a diferença na evolução dos elementos se mantivesse muito pequena entre quadros. Em outros tentamos obter conjunto de dados com o máximo número possível de imagens digitais, que mais tarde foram tratadas correlacionando-as e adicionando-as pixel a pixel para salientar os elementos de menor fluxo magnético.

As técnicas de análise foram desenvolvidas para investigar o comportamento dos campos magnéticos solares. Além da análise digital, sempre mantivemos a sistemática usual do observatório de obter as seqüências de imagens em filme (35 mm) que era usado para reproduzir as fotos para os trabalhos, e em cópias em 16 mm, que eram manuseadas para examinar visualmente a evolução das estruturas nos magnetogramas, junto com os dados em H α , geralmente obtidos em dois conjuntos em comprimentos de onda levemente diferentes: um no centro da linha, outro em uma das asas. Também são costumeiramente adquiridas imagens em luz branca, com o telescópio refletor de 26 polegadas, encapsulado em vácuo, embora em algumas ocasiões ele tenha sido usado para obter magnetogramas. Um telescópio dessa abertura geralmente não chega a apresentar vantagens frente aos refratores de menor abertura, pois o "seeing" (efeito da atmosfera terrestre) distorce as imagens demasiadamente e a técnica de obter um grande número de imagens individuais de curta exposição para escolher as de alta qualidade não se pode aplicar nos magnetogramas em que se devem acumular muitas imagens para obter um sinal significativo.

2) O comportamento dos campos magnéticos emergentes e em cancelamento.

Essas técnicas foram desenvolvidas para estudar o comportamento dos campos magnéticos na fotosfera, privilegiando a evolução rápida observável em pequena escala. Nessa época, magnetogramas obtidos no Marshall Space Flight Center levaram à interpretação que os elementos magnéticos poderiam evoluir como se

as polaridades magnéticas não estivessem relacionadas. (Topka e Tarbell, 1987) Seria possível que o fluxo magnético de uma polaridade crescesse sem a correspondente alteração na outra? Monopolos magnéticos elementares nunca foram detetados; obviamente não se espera que ocorram nessa escala. Os fenômenos de plasma parecem desafiar o senso dos estudiosos do eletromagnetismo clássico, mas não se supõe que firam as leis de Maxwell. Como a evolução dos elementos magnéticos era tanto mais rápida quanto menores em tamanho e em fluxo magnético, suspeitamos que alguns dos fenômenos inusitados se deviam apenas à falta de resolução e sensibilidade dos instrumentos. Foi então feito um programa especial de observação, buscando detetar os campos mais fracos e guardando o maior número possível de imagens na forma digital. O tratamento em computador das imagens digitalizadas permitiu aproveitar ao máximo a alta sensibilidade do magnetógrafo, detetando elementos em menor escala. Partimos em geral da concepção que pequenos dipolos emergentes ou em cancelamento seriam os responsáveis por esse comportamento e procuramos tratar os dados de modo a identificá-los.

No trabalho "Ephemeral regions versus Pseudo-ephemeral regions" (Martin et al. 1984b) foi analisado o comportamento de regiões efêmeras, pequenas regiões ativas, com aspecto dipolar e curta duração. Mostramos que elas não podem ser identificadas em um único magnetograma e caracterizamos seu comportamento:

- a) surge um dipolo magnético com os elementos de polaridade oposta adjacentes um ao outro;
- b) o dipolo cresce e tende a aumentar em fluxo magnético;
- c) a separação entre os máximos aumenta.

Os pares de elementos com polaridades opostas de fluxo magnético semelhante que, examinados em um magnetograma, tinham aparência de regiões efêmeras mas não evoluíam como elas, foram denominados "pseudo-regiões efêmeras". Seu comportamento era o oposto: os elementos de polaridade magnética oposta se aproximam e reduzem seu fluxo magnético. A esse fenômeno denominamos cancelamento. Esse estudo foi feito em locais afastados das regiões ativas, portanto característicos do "Sol quieto" e com uma série de imagens obtidas em filme das quais um número muito reduzido havia sido registrado na forma digitalizada. Através

dessas imagens pudemos mostrar que o gradiente magnético ao longo do eixo das regiões efêmeras tende a ser menor que nas regiões em cancelamento. (Figura 7 de Martin et al. 1984b). Essa característica fornece um indício para separar esses dois tipos de fenômenos, mas não é suficiente e não pode ser quantificada porque o gradiente depende fortemente das condições do instrumento e da atmosfera. Aliás, o problema da variação da qualidade das imagens ao longo do dia complica bastante este tipo de trabalho. Quando queríamos caracterizar os elementos em cancelamento, procuramos escolher conjuntos de imagens nos quais as regiões em que houvessem elementos isolados indicassem aumento no fluxo magnético desses elementos, indicando aumento da qualidade das imagens ao longo do tempo. Assim, a redução do fluxo magnético característica do cancelamento não poderia ser atribuída a uma deterioração da qualidade das imagens ao longo do tempo. Desse modo podíamos mais facilmente argumentar que o cancelamento era um fenômeno intrínseco da atmosfera solar. Também se podia salientar o fato que o gradiente aumentava à medida que os elementos de polaridade oposta se aproximavam, ao mesmo tempo que o fluxo magnético se reduzia, o que não se espera que ocorra quando a qualidade das imagens se deteriora, pois nessas condições os contornos ficam menos nítidos e o gradiente diminui. Este trabalho, além de analisar o cancelamento numericamente, levantava um alerta para o problema de identificação de elementos dipolares como sendo regiões efêmeras e sua posterior correlação com outros fenômenos, por exemplo, pontos brilhantes em raios X ou pontos escuros na linha de He em λ 10830. Também procuramos distinguir as regiões efêmeras e os pares de polaridades opostas em cancelamento nos filtrogramas H α . Isso é bastante difícil tendo em vista que analisamos elementos de "pequena escala", cujas fibrilas têm curta duração e pouco contraste, portanto só são nítidas em imagens de alta qualidade. Mesmo assim, a partir dos elementos analisados pudemos inferir que os dipolos em cancelamento costumam ter filamentos ou conjuntos de fibrilas que separam as polaridades magnéticas opostas, ao contrário dos sistemas de filamentos em arco típicos das regiões de fluxo emergente que fazem uma ponte entre polaridades magnéticas opostas.

Para o trabalho dedicado ao estudo detalhado do cancelamento

no Sol quieto (Livi et al. 1985) obtivemos um conjunto especial de dados em seqüências com o menor intervalo possível entre as imagens guardadas em forma digital. Assim sendo pudemos verificar a evolução característica do cancelamento em distintos elementos. Ficou evidente a dificuldade de tratar isoladamente um fenômeno no Sol, principalmente nas zonas denominadas "quietas", onde os campos magnéticos são fracos e variam rapidamente. Mostramos como as regiões efêmeras têm o balanço de fluxo magnético entre polaridades alterado pela ocorrência de cancelamento em um de seus polos. Estudamos o cancelamento entre elementos magnéticos que se deslocam radialmente a partir do centro da malha devido à supergranulação, denominados intramalha ("intranetwork"). Confirmamos que as propriedades do cancelamento não dependem do tipo de elemento envolvido.

O conhecimento das propriedades do cancelamento é importante para que ele possa ser reconhecido mesmo quando a redução de fluxo magnético em ambas as polaridades não é evidente.

Embora o cancelamento pareça o inverso da emergência, as regiões efêmeras não costumam reverter seu movimento de separação e cancelar-se. O que se observa normalmente é o cancelamento de um dos polos da região efêmera com elementos adjacentes de polaridade oposta. Os dois polos das regiões efêmeras devem estar conectados entre si. Não tendo evidências que os elementos em cancelamento estejam diretamente conectados magneticamente e tendo em vista que o cancelamento está associado à liberação de energia, preferimos a interpretação de que, durante o cancelamento, há reconexão magnética acima da fotosfera. Supomos que a parte superior das linhas reconectadas se eleva e que o pequeno arco inferior submerge abaixo da fotosfera, de modo que o fluxo magnético na fotosfera se reduz. Essa interpretação está ilustrada na Figura 1.

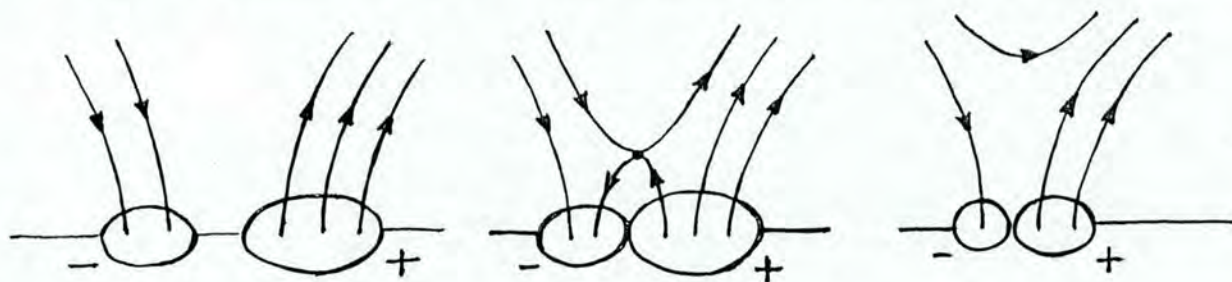


Figura 1. Representação do cancelamento como reconexão.

3) Fulgurações solares

Fulgurações são fenômenos de curta duração (minutos a horas), caracterizados pelo aumento brusco de brilho em uma região da superfície, nas proximidades de uma região ativa. A primeira fulguração registrada foi observada em luz branca em 1° de setembro de 1859 independentemente por Carrington e Hodgson, acima de um grande grupo de manchas solares, tendo durado cerca de cinco minutos, mas é raro que a intensidade permita detecção em luz branca. A emissão ocorre em ampla faixa, desde 0,002 Å (2×10^{-11} cm, correspondendo à energia de 6,1 MeV) até mais de 10 km (10^6 cm, correspondendo à frequência de 30 kHz), podendo ser contínua, em linhas, ou uma combinação de ambos.

Os diferentes tipos de radiação vêm de diferentes alturas acima da fotosfera solar e de regiões distintas, sendo observados com várias técnicas. Observações na linha H α vem sendo tradicionalmente feitas em diversos observatórios com alta resolução (menos de 1").

A linha H α é essencialmente cromosférica; a altura média das fulgurações observadas no limbo é aproximadamente 7.000 km acima da base da cromosfera, mas cerca de 30% delas ocorre tão baixo que sequer são observadas no limbo (a cromosfera é essencialmente opaca no limbo abaixo de 3.000 km), enquanto 25% tem altura além de 10.000 km, alguns variando entre 30.000 km e 50.000 km. As protuberâncias associadas podem ser ainda mais altas e os efeitos das fulgurações se propagam no meio interplanetário, atingindo a Terra. Assim sendo, além de sua relevância intrínseca como ciência básica, o estudo das configurações magnéticas geradoras de fulgurações pode ser importante no lado prático da previsão de ocorrência dos eventos.

A emissão líquida na linha H α na fase de máximo de uma fulguração extensa (área de 25 graus quadrados heliocêntricos) é da ordem de 10^{26} erg/s. Como a energia usualmente emitida nessa área em todo o espectro visível é cerca de 4×10^{29} erg/s, mesmo as maiores fulgurações não podem ser observadas em luz branca integrada, a menos que haja emissão no contínuo, o que raramente acontece. Entretanto no ultravioleta extremo (EUV), em raios X e nas regiões de radio do espectro, a emissão da fulguração excede ou é comparável à energia emitida por todo o disco solar (Svestka,

1976). Nessas faixas do espectro é possível observar fulgurações mesmo com equipamento de baixíssima resolução, que integra o disco inteiro, devido à menor emissão do Sol em comparação com o espectro visível. A reduzida resolução espacial nessas faixas é compensada pela alta resolução temporal obtida com alguns equipamentos; em ondas de rádio tem sido observadas variações muito rápidas, da ordem de dezenas de microsegundos. (Kaufmann et al. 1984). Assim sendo, as diversas faixas do espectro fornecem informações complementares. Infelizmente, como as observações dos diversos instrumentos geralmente não são coordenadas e as condições ideais de observação raramente coincidem nos diferentes observatórios, a maioria dos dados se restringe a uma região do espectro.

Nas fulgurações solares mais poderosas, mais de 10^{32} erg são dissipados em uma área de 3×10^{19} cm² durante 10^3 ou 10^4 segundos. Nesses casos é comum que sejam eruptivos, isto é, que grande parte da energia seja liberada durante ejeções de matéria, como protuberâncias eruptivas e vagas ("surges").

O fluxo de energia médio é da ordem de 10^9 erg cm⁻² s⁻¹, mas na fase impulsiva inicial, que dura apenas 100 s, o fluxo de energia é da ordem de 10^{10} a 10^{11} erg cm⁻² s⁻¹.

Mesmo considerando apenas um aspecto restrito da fulguração, "rápido abrilhantamento em H α ", observacionalmente se trata de um fenômeno tão intrincado que sua bibliografia é confessadamente indigesta (Sturrock e Coppi 1966). As diversas fases das fulgurações (gradual e impulsiva), as classes de fulguração (compacta, confinada, térmica, eruptiva), suas relações (empáticas, homólogas), seus componentes (bandas, núcleos, aros pós-fulguração, vagas, arcos fulgurando, borrifos) e fenômenos relacionados (erupção de filamento, onda Moreton, ejeção de massa na coroa, tempestade geomagnética), além das classificações gerais (importância de fulguração e índice compreensivo de fulguração) estão explicados no glossário.

4) O contexto teórico do estudo das fulgurações

Do ponto de vista teórico, o assunto é igualmente vasto, incorporando várias áreas, sendo necessário explicar diversos aspectos:

- a) criação de condições de fulguração (flare build-up);
- b) instabilidade;
- c) liberação de energia;
- d) movimentos globais;
- e) aceleração de partículas;
- f) radiação.

Parece haver consenso de que a energia da fulguração provém primordialmente dos campos magnéticos, tanto que Priest (1981) detalha as etapas como segue:

- a) mostrar que uma particular configuração estável tem suficiente energia magnética para suprir a ocorrência da fulguração;
- b) achar meios de converter essa energia, com suficiente rapidez, em calor, energia cinética global e energia de partículas;
- c) demonstrar como a liberação é engatilhada;
- d) explicar a fase anterior à fulguração, a fase de "flash" e a fase principal da fulguração;
- e) descrever os diversos efeitos secundários da liberação de energia (H α , raios X e emissão em rádio).

Os processos básicos continuam desconhecidos tanto na teoria como na prática, ainda não havendo modo confiável de prever quando e onde uma fulguração irá ocorrer. A energia é liberada de diversas formas, mas o aumento de brilho na cromosfera visível na linha H α é o mais estudado. Embora devamos reconhecer que os campos magnéticos locais não precisam ser obrigatoriamente muito intensos, havendo casos em que as fulgurações ocorrem longe de manchas solares (spotless-flares), podemos dizer que elas sempre ocorrem em regiões ativas. Do ponto de vista observacional, verifica-se que as fulgurações se originam ou estão centradas em regiões de configuração magnética peculiar, a linha de inversão de polaridade magnética (indevidamente denominada "linha neutra"). O detalhamento das circunstâncias leva a tantos caminhos aparentemente díspares, que não é possível distinguir com firmeza quais os aspectos mais relevantes, que caracterizariam todas as fulgurações. Os modelos preferidos se tem alternado, ora propondo

liberação em um único arco magnético, ora exigindo interação entre pelo menos dois arcos. Recentemente as fulgurações têm sido classificadas em confinadas, que se limitam a um arco, e eruptivas.

Este trabalho ocorre em uma época de contestação das concepções originadas a partir de observações em baixa resolução e de restrições impostas aos modelos para permitir um tratamento matemático. Os campos magnéticos, quando incluídos, eram considerados uniformes. Nos casos mais elaborados, se considerava um arco único, estático, geralmente suposto semicircular. Mas o que se descortinava nas imagens, tanto nos instrumentos montados em telescópios em terra, como nos levados ao espaço, era inusitado. A coroa é altamente estruturada nas imagens em raios X; os elementos do dito "Sol quieto", quando comparados com a evolução das manchas solares, que pouco mudam durante um dia, variam rapidamente, mudando de posição, forma e fluxo magnético.

A energia de uma fulguração seria proveniente, em última instância, da energia mecânica da zona de convecção, mas há vários tipos de teorias dentro do princípio que a energia da fulguração seria armazenada "in situ" no campo magnético da coroa, ou que o campo magnético serve como condutor do fluxo de energia que supre a fulguração.

5) Configuração dos campos magnéticos e fulgurações solares.

Este estudo é dedicado à parte observacional da relação entre campos magnéticos e fulgurações, tendo sido realizado basicamente com magnetogramas da componente na linha de visada em linhas fotosféricas e filtrogramas H α . Nossas observações do fluxo magnético são feitas na fotosfera e as fulgurações observadas na linha H α , onde podemos ver os filamentos e as bandas da fulguração na cromosfera, que são os elementos mais tradicionalmente usados, por permitirem resolução espacial adequada e aquisição de dados em quantidade mais significativa.

A maioria dos trabalhos sobre fulgurações solares vinha enfocando os casos mais intensos e energéticos, com a justificativa de serem os mais difíceis de explicar do ponto de vista teórico. Essa abordagem também convinha instrumentalmente, permitindo que se observe a configuração magnética correspondente

mesmo com magnetógrafos pouco sensíveis. Entretanto novos procedimentos experimentais foram modificando a imagem dos campos magnéticos no Sol e mostrando a importância dos fenômenos em pequena escala, inclusive quando efeitos globais importantes para o ciclo solar são considerados. Esse é o caso do cancelamento, que foi estudado através de séries de magnetogramas de alta sensibilidade.

Mesmo considerando os elementos em pequena escala, a evolução dos campos magnéticos medidos na fotosfera solar é gradual, não havendo qualquer observação direta de variações do campo magnético na escala de tempo da fulguração. Fulgurações são fenômenos de curta duração em que grande quantidade (até 10^{32} ergs) de energia pode ser liberada, e ocorrem em regiões ativas. Embora não seja imediata a correlação entre as variações do campo magnético e a ocorrência de fulgurações, os campos magnéticos são a única fonte capaz de prover a quantidade necessária nos eventos mais intensos. Por outro lado, a quantidade de energia liberada na fulguração é uma pequena fração da energia magnética disponível, comparável com a imprecisão na medida do campo magnético. A associação de fulgurações às regiões ativas do Sol vem sendo feita observacionalmente há longa data.

Torna-se essencial estudar as regiões ativas e investigar a configuração magnética que favorece as fulgurações e as circunstâncias que as detonam. Tal estudo sofre várias limitações observacionais. Os campos magnéticos são observados na fotosfera solar, embora só muito raramente a fulguração atinja a fotosfera.

Confrontando os magnetogramas e os filtrogramas H α vemos que as fulgurações iniciam em locais onde ocorre cancelamento ou onde inferimos sua ocorrência através das propriedades do cancelamento. (Martin et al. 1985) O cancelamento ocorre onde campos magnéticos de polaridades opostas confluem, mantendo um alto gradiente de campo magnético. Estudos anteriores já haviam identificado alta incidência de fulgurações em locais de alto gradiente de campo magnético (Severny 1958, 1960) e em associação com a emergência de campos magnéticos. (Rust, 1972). Propomos que a emergência de campos magnéticos é um fator importante na incidência de fulgurações através da criação de locais de cancelamento. As polaridades opostas das regiões de fluxo emergente tendem a

afastar-se entre si, propiciando seu encontro com campos magnéticos adjacentes. Quando campos magnéticos de polaridades opostas confluem, criam-se as condições adequadas para o cancelamento. Assim sendo, propomos que o cancelamento está mais diretamente relacionado com as fulgurações que a emergência.

8) A geometria dos campos magnéticos nos arredores do filamento e sua relação com o cancelamento.

Nos locais de cancelamento é comum surgir um filamento, ao longo da linha de inversão de polaridade magnética. A geometria das linhas de força é conhecida através da orientação das fibrilas e das rosetas nos dois lados do canal de filamento. Imediatamente adjacente aos filamentos, as rosetas são bastante assimétricas, o que lhes dá um aspecto de cometas. Nesse caso as linhas de campo magnético das rosetas devem estar inclinadas com a vertical. Como nos lados opostos do canal de filamento as "caudas" das rosetas são orientadas em sentidos opostos, a inclinação dos campos magnéticos deve ser oposta nos dois lados. Essa geometria também é inferida através das fibrilas nos dois lados do filamento. Deduz-se que os campos magnéticos ocorrem quase paralelamente ao filamento e que se inclinam em sentidos opostos nos dois lados. Martin (1992) propõe que o ambiente dos filamentos é uma "discontinuidade rotacional", um tipo de geometria que também é observada em plasmas no meio interplanetário. A formação dos filamentos coincide com a convergência, encontro e cancelamento dos elementos de polaridade magnética oposta provenientes dos dois lados do filamento e que estão ancorados em extremos opostos do filamento. Desse modo as rosetas e fibrilas ficam inclinadas em sentidos opostos nos dois lados do filamento. Em nosso trabalho o cancelamento é interpretado como uma reconexão dos campos magnéticos próximos da fotosfera, com o desaparecimento da componente radial e criação correspondente de uma componente transversal ao longo do filamento.

A configuração global dos campos magnéticos coronais é inferida de outras fontes, tais como fotografias da coroa durante eclipses e dados em raios X. Ela compreende uma arcada que liga diretamente os campos magnéticos de polaridade magnética oposta. Indícios dessa arcada são os aros pós-fulguração em $H\alpha$, nas

regiões mais baixas, e seus correspondentes em raios X, em maiores alturas. Note-se que o filamento corre perpendicularmente à arcada e abaixo da mesma. Uma propriedade importante dos campos magnéticos coronais é a alta velocidade de Alfvén (proporcional diretamente ao campo magnético e inversamente a 4π vezes a raiz quadrada da densidade - o que daria valores na coroa de centenas a milhares de km/s) para propagar distúrbios magnéticos. Toda a mudança que ocorre em uma parte do sistema afetará rapidamente suas outras partes ao longo das linhas de força.

Novas linhas de força seriam continuamente incorporadas aos campos magnéticos que formam o filamento, em consequência da contínua convergência e cancelamento de elementos magnéticos provenientes dos dois lados do filamento e orientados em sentidos opostos. O cancelamento e correspondente perda de ancoramento na fotosfera é um ponto importante para desestabilizar o filamento. Outro é a criação de torções e enrolamentos entre as diversas linhas de força que sofrem cancelamento ao longo do filamento, afastando-o da geometria potencial de mínima energia. A seguir mostramos como torções e enrolamentos nas linhas de força são conseqüências naturais do ambiente ao redor de filamentos.

Em cada lado do filamento os campos magnéticos são unipolares e estão distribuídos nas bordas das células de supergranulação que criam a malha magnética. O cancelamento vai ocorrer nos locais de encontro de elementos magnéticos de polaridades opostas que se concentram nos bordos da malha, em diversos locais ao longo do filamento (Martin, 1990). O movimento na direção do filamento sempre tem irregularidades devido à convecção; elementos que eram adjacentes vão afastar-se, ficando em lados opostos da malha e chegando em tempos diferentes à região central onde ocorre cancelamento. A razão de cancelamento também será distinta ao longo do filamento em consequência das variadas condições locais. Desse modo, linhas de campo magnético inicialmente adjacentes vão ficar separadas e vão cancelar-se em tempos bastante distintos. Supondo que elas fossem originalmente paralelas, teremos como resultado do seu movimento previo ao cancelamento que elas vão ficar enroladas e torcidas quando perderem o ancoramento com a fotosfera após cancelarem.

O papel do cancelamento na criação de torções e enrolamentos é muito importante. Apesar disso, trabalhos teóricos continuam propondo movimentos fotosféricos ao acaso ou rotacionais como causa dos enrolamentos e torções que mais tarde podem levar à uma fulguração. Nossa experiência observando o movimento dos elementos magnéticos em magnetogramas de alta sensibilidade mostra, entretanto, que os movimentos rotacionais propostos não ocorrem comumente e que resultados semelhantes podem muito facilmente ser explicados com os deslocamentos observados levando em conta o cancelamento. É interessante notar que, mesmo que o movimento fosse perfeitamente regular, a configuração inferida para o filamento criaria naturalmente uma torção correspondente a um movimento de meia volta. Isso é decorrente do fato que são as linhas mais internas, adjacentes à linha de inversão de polaridade magnética, as primeiras a sofrerem cancelamento e reconexão. Assim, se originalmente tínhamos várias linhas paralelas nos dois lados do filamento e se elas se reconectarem aos pares, começando pelas mais internas, no final o par mais interno ficaria ligado no meio da nova estrutura, mas as linhas adjacentes a seguir estariam ancoradas em locais cada vez mais afastados do centro, uma de cada lado, como se o sistema se tivesse torcido por meia volta. A evolução do cancelamento e correspondente torção das linhas está na Figura 2, na página seguinte.

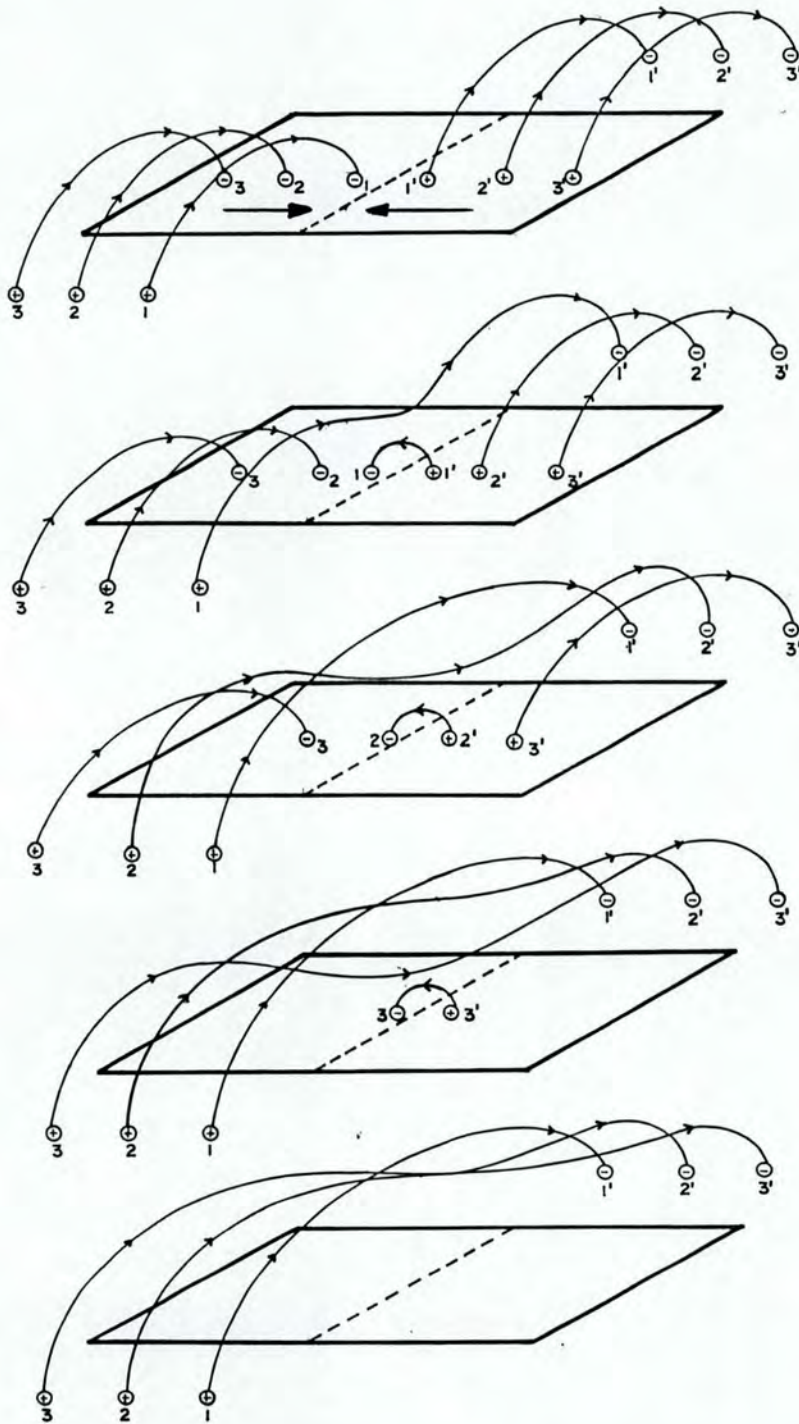


Figura 2. Esquema da configuração magnética de protuberância.

Os pés das linhas de força, ancoradas na fotosfera, convergem para a região central onde a polaridade magnética se inverte. As flexas indicam o sentido do movimento e os sinais + representam a polaridade magnética positiva; os sinais - a negativa. A linha tracejada corresponde à linha de inversão de polaridade magnética. Inicialmente se reconectam os pontos 1 e 1', após reconectam-se 2 e 2', e assim por diante. A parte superior da linha se levanta e o pequeno arco inferior submerge abaixo da fotosfera. O abaulamento da linha magnética favorece que a matéria circundante se deposite. O movimento de confluência dos arcos e posterior reconexão causam uma torção de 180 graus nas linhas magnéticas.

O sistema do filamento e da arcada acima do mesmo vai evoluir na medida que o cancelamento ocorre. Como nunca observamos o cancelamento se reverter, o desaparecimento da componente radial e o acúmulo de campos magnéticos transversais no filamento acima dos locais de cancelamento é inexorável. Esse acúmulo vai alterar o equilíbrio de todo o sistema coronal com a elevação do filamento. Nosso trabalho incorpora as propostas de que as fulgurações ocorram quando houver uma reconexão rápida entre as linhas da arcada que se distendeu com a elevação do filamento. Sucessivas alterações desse equilíbrio levam a um cenário em que o filamento erupciona e ocorre uma fulguração. Ele leva em conta o comportamento das fulgurações em raios X e outras radiações que não podemos observar. Assim sendo, não podemos desenvolver mais detalhadamente essa parte do processo.

Assim nosso trabalho (Martin e Livi 1992) liga eventos observados na fotosfera (como o cancelamento), com outros que ocorrem nas camadas mais altas da coroa, usando os modelos baseados nas evidências observacionais disponíveis. É conhecido de fotos de eclipse que protuberâncias quiescentes são situadas abaixo de cavidades coronais, acima das quais ocorrem de um a cinco aros coronais concêntricos e um elmo coronal que se abre nas camadas mais externas. Isso indica uma mudança de regime de uma estrutura fechada na baixa coroa para uma estrutura aberta dominada pelo fluxo radial do vento solar.

Fotos em raios X obtidas pela Skylab (Serio et al., 1978), mostram bandas longas e escuras ao longo da linha de inversão de polaridade magnética. Uma fração de 0,2 a 0,5 dessas bandas escuras contém filamentos ou segmentos de filamentos;

As dimensões médias desses filamentos são:

comprimento: 60×10^4 km (de 20 a 300×10^4 km),

espessura: 6×10^4 km,

altura superior: 5×10^4 km,

Nas bandas escuras sem filamento, a pressão gasosa seria $0,04 \text{ din cm}^{-2}$ e a densidade eletrônica seria cerca de $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, mas a metade em áreas com filamento. Isso poderia indicar que o material circundante se condensa para formar os filamentos. As dimensões dessas áreas e as densidades calculadas, entretanto, deixam essa possibilidade em aberto, pois alguns dados pareceriam indicar que

não haveria material suficiente na cavidade, enquanto outros argumentam o contrário. Como a densidade da coroa é bastante baixa, a possibilidade de condensar material a partir de camadas mais altas é pouco favorecida. Nós propomos que, ao ocorrer o cancelamento e a reconexão correspondente, uma certa quantidade de material poderia ser "catapultada" para cima ao longo das linhas de campo magnético que se reconectaram.

Para um maior detalhamento desse cenário seria necessária uma maior investigação da estrutura global do filamento, principalmente do acoplamento entre as estruturas cromosféricas e da coroa. O número de fotos obtidas em eclipse que mostram essas cavidades é reduzido; a simetria entre a protuberância e a parte externa do elmo coronal não é muito acentuada: eles tendem a estar descentrados e a se inclinar em relação à vertical: de 30 a 50 graus em período de mínimo e de cerca de 20 graus em máximo, mas os arcos fechados tendem a ter um centro comum e a ter um movimento de expansão; uma das velocidades inferidas é de 2 km/s.

Para complementar adequadamente os dados é necessário obter fotografias de um mesmo filamento em perspectivas diversas. Isso é extremamente difícil. Tendo em vista a grande distância entre a Terra e o Sol, nossa perspectiva é praticamente fixa. Entretanto a evolução de filamentos quiescentes é relativamente lenta e podemos inferir sua estrutura observando-os durante sua rotação no Sol.

A grande dificuldade em confrontar esse modelo com observações está em obter ao mesmo tempo imagens da cromosfera e da coroa.

7) Perspectivas e conclusões

Em 3 de novembro de 1994 haverá um eclipse total do Sol cuja totalidade será de quase 4 minutos, próximo do limite entre Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Em princípio será possível a realização de experimentos para observar os filamentos que estarão no limbo por ocasião do eclipse durante sua passagem pelo disco solar. Complementando os dados do eclipse, deverão ser obtidas nos dias imediatamente anteriores e posteriores imagens em H α bem como magnetogramas na linha de visada, de modo que possamos inferir a evolução da estrutura magnética nos dias anteriores e possamos confrontar a estrutura inferida com as imagens obtidas durante o

eclipse. Além disso, talvez seja possível confrontá-las também com imagens em raios X obtidas por satélites. Desse modo poderíamos verificar melhor a configuração proposta.

No trabalho (Martin e Livi 1992) em que exploramos o papel do cancelamento nas fulgurações propomos um cenário no qual:

- a) o cancelamento é interpretado como uma reconexão de campos magnéticos em camadas relativamente baixas da atmosfera solar;
- b) essa reconexão causaria a transferência de fluxo magnético dessas camadas para as camadas superiores da coroa, onde se acumularia energia nos filamentos;
- c) a energia acumulada seria liberada quando o filamento erupcionasse, gerando uma "fulguração eruptiva", isto é, tanto os eventos observados em H α na cromosfera e baixa coroa, como outros a ela eventualmente associados. Não temos condições de observar eventos tais como ejeções de massa na coroa com os instrumentos disponíveis no Observatório Solar de Big Bear, pois seriam necessários coronógrafos ou observações de satélites.

VII. Referências Bibliográficas

- BARTH, C., LIVI, S. H. B. Magnetic bipoles in emerging flux regions on the sun. *Rev. Mexicana Astron. Astrophys.* v.21, p. 549-551, 1990.
- BRAY, R. J., LOUGHHEAD, R. E. *Sunspots*. New York: John Wiley, 1965.
- FOUKAL, P. Morphological relationships in the chromospheric Ho fine structure. *Solar Phys.* v.19, p.59-71, 1971.
- GIOVANELLI, R. *Secrets of the sun*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- KAUFMANN, P. O programa brasileiro de física solar e resultados sobre a energética das explosões solares. *Ciência e Cultura*, v.36, n.3, p. 367-375, 1984.
- LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, J. Cancellation of magnetic flux I: on the quiet sun. *Australian J. Phys.*, v.38, p.855-873, 1985.
- LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, H., AI, G. The association of flares to cancelling magnetic features on the sun. *Solar Phys.* v.121, p.197-214, 1989.
- MARTIN, S. F. Conditions for the formation of prominences as inferred from optical observations. *Lecture Notes in Physics*, Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- MARTIN, S.F. 1992. An observational-conceptual model of the formation of filaments. In: SVESTKA, Z, JACKSON, B. V., MACHADO, M. E. (Eds.) *Eruptive Solar Flares*, Berlin: Springer-Verlag, p. 331-332, 1992, (Lecture Notes in Physics, 399).
- MARTIN, S. F., BENTLEY, R.D., SCHADEE, A. ANTALOVA, A., KUCERA, A., DEZSO, L, GESTELYI, L., HARVEY, K. L., JONES, H, LIVI, S. H. B., WANG, J., Relationships of a growing magnetic flux region to flares. *Adv. Space Res.* v. 4, n. 7, p. 61-70, 1984.
- MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B. Cancelling magnetic fields in the solar atmosphere. In: AGU CHAPMAN CONFERENCE, 1989, Hamilton, Bermuda, PRIEST, E. R. et al. (Conv.) *Physics of magnetic flux ropes*, p. 142-145.
- MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B. The role of cancelling magnetic fields in the buildup to erupting filaments and flares. In: SVESTKA, Z, JACKSON, B. V., MACHADO, M. E. (Eds.) *Eruptive Solar Flares*, Berlin: Springer-Verlag, 1992, p. 33-45 (Lecture Notes in Physics, 399).
- MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B., WANG, J., SHI, Z., Ephemeral regions vs. pseudo-ephemeral regions. In: PROCEEDINGS of workshop on measurements of solar vector magnetic fields. Washington, NASA, 1984. p. 403.
- MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B., WANG, J. Cancellation of magnetic flux II: in an active region. *Australian J. Phys.*, v. 38, p. 929-959, 1985.

- MOORE, R. Triggering of eruptive flares: destabilization of the preflare magnetic field configuration. In: SVESTKA, Z., JACKSON, B. V., MACHADO, M. E. (Eds.) *Eruptive Solar Flares*, Berlin: Springer-Verlag, 1992, p. 69-78. (Lecture Notes in Physics, 399).
- PRIEST, E.R. *Solar flare magnetohydrodynamics*. New York: Gordon and Breach, 1981.
- SERIO, S., VAIANA, G. S., GODOLI, G., MOTTA, S., PIRRONELLO, V., ZAPPALA, R. A. *Solar Phys.*, v. 59. p. 65, 1978.
- SEVERNY, A. B. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.* v. 20, p.22, 1958.
- SEVERNY, A. B. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.* v. 22, p.12, 1960.
- RUST, D. M. *Solar Phys.*, v. 25, p.141, 1972.
- STOTHERS, R. Solar activity cycle during classical antiquity. *Astron. Astrophys.* v.77, p. 121-127, 1979.
- STURROCK, P. A., COPPI, B. A new model of solar flares. *Astrophys. J.* v. 143, n. 1, p. 3-22, 1966.
- SVESTKA, Z. *Solar flares*. Dordrecht: D. Reidel, 1976.
- TOPKA, K., TARBELL, T. High spatial resolution magnetic observations of an active region. In: KEIL, S. (Ed.) *Small scale dynamical processes in quiet stellar atmospheres*. Sunspot: Sacramento Peak, 1987. p. 278.
- TORRES, C. A. de O. Manchas estelares. *Ciência Hoje* v.2, n.9, p.42-50, 1983.
- WANG, J. SHI, Z., MARTIN, S., LIVI, S. H. B. The cancellation of magnetic flux on the quiet sun. *Vistas in Astronomy* v.31, p.79-83, 1988.
- WIJK, J. E., HEINZEL, P., SCHMIEDER, B. Determination of plasma parameters in a quiescent prominence. *Astron. Astrophys.* v. 260, p.419-430, 1992.
- WILLIAMS, G. E. Solar affinity of sedimentary cycles in the late precambrian elatina formation. *Australian J. Phys.* v.38, n. 6, p. 1027-1043, 1985.
- WITTMANN, A. D., XU, Z. T. A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 70, p. 83-94, 1987.
- ZIRIN, H. *Astrophysics of the sun*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- ZIRIN, H. *Solar Flares*. BBSO Preprint 0300, Big Bear Solar Observatory, May 1989.

1) Introdução.....	1
2) Lista dos termos em inglês e equivalentes em português	3
3) Glossário	9
4) Referências bibliográficas	65

1) Introdução

Por sua proximidade, o Sol é a única estrela que permite uma investigação de fenômenos atmosféricos com alta resolução, o que é feito em luz branca ou isolando faixas estreitas correspondendo às principais linhas cromosféricas, como H α , H e K do Cálcio, D3 do Hélio, e outras. Os fenômenos observados nas diversas faixas do espectro visível estão relacionados entre si e com os das demais faixas do espectro. Vários foram descobertos no início das observações telescópicas, a partir de 1609, muitos na época em que se construíram os primeiros espectroeliógrafos, cerca de 1900, outros tantos mais recentemente, na faixa de rádio, ou, através de instrumentos no espaço, em ultravioleta e raios X. A cada inovação instrumental surgiam novas características a identificar.

Nem sempre é possível definir as correspondências com precisão e, mesmo quando isso é feito, geralmente os termos equivalentes continuam sendo usados por razões históricas ou para identificar o tipo de observação efetuada. Isso cria uma extensa nomenclatura, que se torna uma grande dificuldade para o iniciante. No caso da literatura em português, o problema aumenta pela pouca tradição de pesquisa na área, a conseqüente falta de textos especializados. Atualmente sofremos fortemente influência do inglês, sendo comum adaptar os termos diretamente, sem preocupação de traduzi-los. Nessa categoria estão os termos flare, flash, prominence, spray e muitos outros. Entretanto, ainda no início deste século estávamos dominados pela literatura em francês, língua em que se publicou importantes trabalhos originais, que levaram ao reconhecimento internacional de alguns termos, os quais se mantiveram nessa língua, como "plage", "disparition brusque" e "structure magnetique evolutif". O francês também serviu de base na adaptação dos termos para o português, como em protuberâncias. Além disso, temos a antiga tradição clássica, mantendo as denominações em latim, como macula e facula, estabelecidas desde as primeiras observações telescópicas por Galileu, Scheiner e outros precursores, que também nomearam zona real.

Em meus trabalhos usei principalmente dados obtidos na faixa do visível, só eventualmente complementando com ultravioleta ou

raios X. Senti absoluta necessidade de estabelecer um critério para criar versões em português das denominações dos fenômenos que foram apresentados. Minha preferência seria manter na língua original os que internacionalmente se estabeleceram desse modo, mas optei por acentuar as palavras e usar as regras de nossa língua para formação de plurais: uso então mácula (com plural máculas, ao invés de maculae), fâcula, fâculas, etc. Fiz o mesmo com a palavra francesa plage, mantendo-a, embora nada signifique em nosso idioma, sem traduzir para praia. Nesse e noutros casos, listei ambas palavras, colocando a explicação na que considero mais adequada.

Finalmente, com os novos termos criados em inglês, usei o critério de traduzí-los mais ou menos literalmente, procurando, de preferência, deixar claro seu significado. Quando tive que escolher, mantive o termo mais tradicional, obedecendo ao uso estabelecido internacionalmente. Há casos, entretanto, em que a escolha é arbitrária: malha ou rede; faixa ou banda ? Procurei verificar qual a escolha feita em trabalhos anteriores (malha), mantendo-a. Além disso, escolhi termos parecidos com o espanhol (banda, protuberância). Infelizmente a literatura disponível é extremamente reduzida e as traduções não tem sido cuidadosas. A despeito de seus inúmeros erros e inconsistências, consultei o Dicionário Enciclopédico de Astronomia e Astronáutica, de R. R. Mourão, tendo colocado neste glossário todos os termos referentes a fenômenos solares intrínsecos que lá encontrei, identificando a fonte. Vasculhei também livros e dicionários especializados procurando arrolar todos os termos da área que encontrava.

Como há vários especialistas em radioastronomia solar no país, e eu não trabalhei com radiotelescópios, não me preocupei em esgotar os termos específicos dessa área. O mesmo se aplica aos fenômenos solares terrestres. Dentro do campo restrito que enfoquei, entretanto, busquei listar a maioria das denominações apresentadas para os fenômenos importantes, com explicações bastante extensas, especialmente quando alguns termos tiveram diferentes significados ao longo do tempo. Espero que este trabalho se mostre suficientemente útil e completo para adquirir vida própria, independente desta tese.

2) Lista dos termos em inglês e seus equivalentes em português:

AFS	- sistema de filamentos em arco
AR	- região ativa
arcade	- arcada
arch	- arco
active	- ativo
active longitudes	- longitudes de alta atividade
active region	- região ativa
active sun	- sol ativo
activity center	- centro de atividade
arch filament system	- sistema de filamentos em arco
blast wave	- onda Moreton (= Moreton ou "flare wave")
bright point	- ponto brilhante
bright rings	- anéis brilhantes (ao redor de manchas)
bright surge	- vaga brilhante
BSD	- vaga brilhante no disco
BSL	- vaga brilhante no limbo
burning prairie	- termo antigo para o conjunto dos espículos
burst	- erupção, explosão (em radiofrequências)
bushes	- aspecto das rosetas perto do limbo = moita
butterfly diagram	- diagrama borboleta
cancellation	- cancelamento
canopy	- dossel
Carrington longitude	- longitude Carrington
CFI	- índice de fulguração compreensivo
chromosphere	- cromosfera
chromospheric network	- malha cromosférica
CME	- ejeção de massa na coroa
complex of activity	- complexo de atividade
compact	- compacta (veja confined)
confined	- confinada (classe de fulguração)
comprehensive flare index	- índice de fulguração compreensivo
corona	- coroa
coronagraph	- coronógrafo
coronal	- coronal, relativo à coroa
coronal condensation	- condensação coronal
coronal green line	- linha verde da coroa
coronal hole	- buraco coronal

coronal loop	- aro coronal
coronal mass ejection	- ejeção de massa na coroa
coronal rain	- chuva coronal
coronal streamer	- estrutura coronal
coronal transient	- transientes na coroa
coronal whip	- chicote coronal
crinkle	- ruga (ou dobra); estruturas em U
delta	- delta (refere-se a mancha solar)
differential rotation	- rotação diferencial
disappearing solar filament	- erupção de filamento
disk	- disco (do sol)
disparition brusque	- erupção de filamento
DSD	- vaga escura no disco
EFR	- região de fluxo emergente.
ejective	- ejectiva
elementary magnetic bipoles	- dipolos magnéticos elementares
Ellerman bombs	- bombas de Ellerman
emerging flux region	- região de fluxo emergente
erupting arch	- arco em erupção (não é termo padrão)
erupting filament	- filamento em erupção
eruption chromosphérique	- erupção cromosférica = fulguração solar
eruptive	- eruptiva (classe de fulguração)
eruptive prominence	- protuberância eruptiva
Evershed effect	- efeito Evershed
Evershed flow	- corrente de Evershed, efeito Evershed
evolving magnetic feature	- estrutura magnética evolutiva
F component	- componente F da coroa (coroa F)
F corona	- coroa F
f-spot	- mancha seguidora
FTA	- arcos de transição
facula	- fácula
facular granules	- grânulos faculares
fibril	- fibrila
fibrilles	- fibrilas
filament	- filamento
filament channel	- canal de filamento
filament eruption	- erupção de filamento
field transition arches	- arcos de transição
filigree	- filigrana

filtergram	- filtrograma
flare	- fulguração (em H α e genérico)
flare loops	- aros pós-fulguração
flare wave	- onda Moreton (= Moreton ou flare wave")
flaring arches	- arcos fulgurando
flash phase	- fase relâmpago (de uma fulguração)
flash spectrum	- espectro relâmpago
flocculus	- flóculo
flux cancellation	- cancelamento de fluxo
follower spot	- mancha seguidora
footpoints	- pés (intersecção fotosfera ou cromosfera)
fragmentation	- fragmentação (de manchas ou elementos)
FTA	- arcos de transição
geomagnetic storm	- tempestade geomagnética
Gleissberg period	- período de Gleissberg (de 90 anos)
gradual	- gradual (referente à fulguração)
grain	- grão (brilhante em CaII, escuro em H α)
granulation	- granulação
granule	- grânulo
Hale's law	- lei de Hale (de polaridade magnética)
halo	- halo (também nome antigo da coroa solar)
helmet streamer	- elmo coronal (estrutura em forma de elmo)
high-speed stream	- corrente de alta velocidade
homologous flares	- fulgurações homólogas
hot spots	- pontos quentes (nos centros de atividade)
importance (of flare)	- importância (de fulguração)
impulsive	- impulsiva (referente à fulguração)
IN	- intramalha
K component	- componente K da coroa (coroa K)
K corona	- coroa K
kernel	- núcleo
L component	- componente L da coroa
leader spot	- mancha precedente
light-bridge	- ponte de luz
limb	- limbo
limb darkening	- escurecimento do limbo
loop	- aro
loop prominence system	- aro pós-fulguração = "post flare loops"
macrospicule	- macroespículas

M region	- região M (corresponde a buraco coronal)
macula	- mácula
magnetic inversion line	- linha de inversão de polaridade
magnética	
magnetogram	- magnetograma
Maunder minimum	- mínimo de Maunder
merging	- aglutinação
meridional circulation	- circulação meridional
meridional flow	- circulação meridional
mesogranulation	- mesogranulação
moat	- fosso
mottle	- salpico
Moreton wave	- onda de Moreton
mound prominence	- protuberância em monte
moustache	- bomba de Ellerman
naked	- nua (referente a manchas)
network	- malha
neutral line	- linha neutra, (de inversão de polaridade)
neutral region	- região neutra; superfície neutra
oscilação de 5 minutos	- 5 minute oscillation
P-spot	- mancha precursora
p-sunspot	- mancha solar precursora
penumbra	- penumbra
photosphere	- fotosfera
plage	- plage
plagette	- plagete, diminutivo de plage
plage corridor	- corredor de plage
pleochroid halo	- coroa solar
plume	- pluma
polar crown	- coroa de filamentos polares
polar plume	- pena polar
polar streamer	- pena polar
pore	- poro
post-flare loop	- aro pós-fulguração
precursor	- precursor
preflare	- pré-fulguração
preheating	- pré-aquecimento
prominence	- protuberância
proton flare	- fulguração com protons energéticos

quiescent	- calmo, quiescente
quiet	- quieto
quiet sun	- sol quieto, sol quiescente
quiet sun region	- região de sol quieto
remote brightening	- brilho remoto = "remote patch"
remote patch	- elemento remoto (de uma fulguração)
reversing layer	- camada de reversão
ribbon	- banda (de fulguração)
royal zone	- zona real
rosette	- roseta
rudimentary	- rudimentar (relativo à penumbra)
R zones	- zonas R (na coroa)
satelites	- satélites (referente a manchas)
SG	- supergranulação
SID	- distúrbio ionosférico repentino
smoothed sunspot number	- número alisado de manchas solares
snowplow model	- modelo limpa-neve (de manchas solares)
solar activity	- atividade solar
solar connection	- conexão solar
solar cycle	- ciclo solar; ciclo de atividade solar
solar maximum	- máximo de atividade solar
solar minimum	- mínimo de atividade solar
solar rotation rate	- razão da rotação solar
solar activity	- atividade solar
solar wind	- vento solar
spectroheliograph	- espectroeliógrafo
spectrohelioscope	- espectroelioscópio
spicule	- espículo
spray	- borrifo
Spörer's law	- lei de Spörer
sudden ionospheric disturbance	- distúrbio ionosférico repentino
sunspot	- mancha solar
sunspot group	- grupo de manchas solares
sunspot number	- número de manchas solares
sunspot prominence	- aro pós-fulguração (termo antigo)
sunspot radiation	- radiação de mancha solar
supergranulation	- supergranulação
supergranulation cell	- célula de supergranulação
superpenumbra	- superpenumbra

surge	- vaga
sympathetic flare	- fulguração empática (com afinidade)
thermal	- térmica (referente à fulguração)
thread	- fio
two-ribbon flare	- fulguração de duas bandas
umbra	- umbra
umbral granule	- o mesmo que "umbral dots"
umbral dots	- pontos brilhantes na umbra
umbral flashes	- oscilação de 150 segundos na umbra
unipolar magnetic region	- região magnética unipolar
white corona	- coroa branca
white light flare	- fulguração de luz branca
winking filament	- filamento piscando
Wilson effect	- efeito Wilson
WLF	- fulguração em luz branca
Wolf number	- número de Wolf

GLOSSÁRIO:

Aglutinação = "merging" - processo em que elementos inicialmente separados se juntam. Observa-se na formação de manchas a partir de poros, e em magnetogramas na concentração de elementos magnéticos de mesma polaridade que se acumulam, somando seu fluxo magnético, o que pode levar à formação de poros.

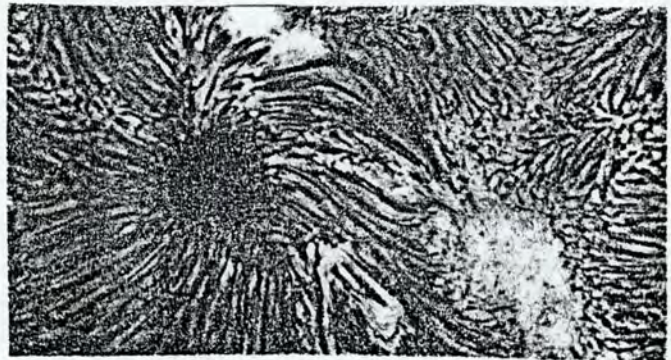
AFS (arch filament system) = sistema de filamentos em arco.

Anéis brilhantes rodeando manchas solares = "bright rings around sunspots" - zona brilhante difusa além da penumbra, com limites indefinidos, que circunda manchas solares bem desenvolvidas, mais notável em luz violeta.

AR (active region) = região ativa.

Arcada = "arcade" - conjunto de arcos quase paralelos entre si, que ligam polaridades magnéticas opostas.

Arco de transição = "field transition arch" - elemento de um sistema de arcos escuros (em $H\alpha$) que formam uma arcada ligando elementos de polaridades magnéticas opostas de uma região ativa, cruzando diretamente a linha de inversão de polaridade.



Arco em erupção = "erupting arch" - protuberância solar em forma de arco, na fase de erupção. (não é uma classe padrão)

Arco fulgurando = "flaring arch" - componente de algumas fulgurações em que material em emissão é visto subindo para a coroa, onde percorre uma trajetória em arco e desce, retornando à cromosfera em outro ponto. Observado em $H\alpha$, pode estar associado a material emitindo em raios X, que geralmente precede a maior parte do material em $H\alpha$. Martin e Svestka (1988) relatam que o ponto (pé) onde retorna pode brilhar mesmo antes de ser visível a

chegada da emissão em raios X duros, mas emissão adicional pode ocorrer quando a emissão em raios X o atinge. Arcos fulgurantes se assemelham às vagas ("surges"), mas enquanto nelas a maioria do material retorna à cromosfera pela mesma trajetória, nos arcos conseguem atingir máxima altura e seguir ao longo do arco, retornando em outro ponto da cromosfera. Nos borrifos, por outro lado, a maior parte do material tem velocidade superior à de escape, não permanece colimado e não retorna à cromosfera, sendo ejetado no meio interplanetário.



2330:00



2336:30



2338:30



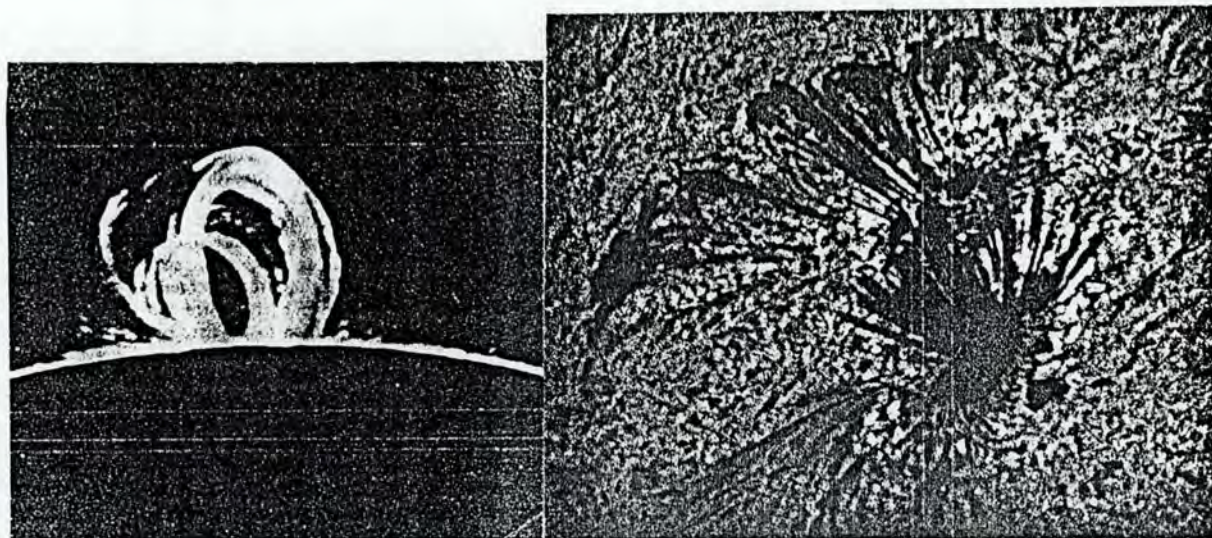
2342:30

Aro coronal = "coronal loop" - aro que atinge a coroa, mais visível em EUV (ultravioleta distante) e em raios-X moles nas regiões ativas ou interconectando regiões ativas, algumas vezes associados a arcos ou aros em H α ; duram várias horas. Alguns cruzam o Equador solar.

Aro pós-fulguração = "post-flare loop" ou "flare loop" - o mesmo que protuberância em aro; elemento de um "loop prominence system".

- aros que aparecem nas fulgurações de duas bandas ligando as duas faixas brilhantes nos dois lados da linha de inversão de polaridade magnética e formando uma arcada vista em H α como filamentos escuros e/ou brilhantes. Consiste em aros sucessivos, que iniciam com um rápido aumento de brilho acima dos aros já existentes, com desenvolvimento dos nódulos na região mais alta e posterior deslocamento ao longo das linhas de campo magnético. Esses sistemas de aros são formados em alturas cada vez maiores, atingindo 100 000 km. Duram várias horas e são muito brilhantes em H α . Em alguns casos a temperatura ultrapassa 1 000 000 K. Também é visível em outras linhas coronais. Embora o conjunto se eleve, a primeira condensação visível ocorre no topo e a matéria desce pelos aros em direção à fotosfera, com velocidades típicas de 100 km/s. Nem sempre são visíveis em H α , mas as observações em raios X

indicam que eles sempre estão presentes nas fulgurações.



Imagens em $H\alpha$ (centro) e $H\alpha + 0,8 \text{ \AA}$

Assimetria azul = "blue asymmetry" - em uma fulguração, quando há maior intensidade no lado azul (de menor comprimento de onda), que no vermelho (de maior comprimento de onda) da linha. Muito rara em $H\alpha$, onde predomina assimetria vermelha, é observada em raios X, quando a intensidade das linhas em raios X mole aumenta em resposta à liberação impulsiva de energia.

Assimetria vermelha = "red asymmetry" - em uma fulguração, a maior intensidade e extensão da banda na asa vermelha e no centro da linha que na asa azul. Essa assimetria é bastante frequente e pode ser observada tanto porque o perfil da linha é mais brilhante no vermelho, como por deslocamento Doppler para o vermelho devido à matéria estar se afastando do observador. O deslocamento para o vermelho só ocorre quando a intensidade ótica da fulguração ou do elemento específico observado está aumentando.

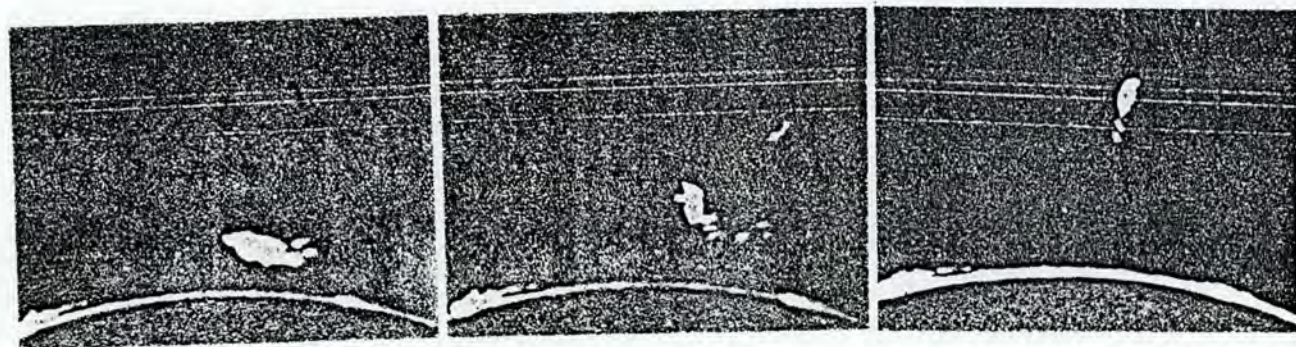
Atividade solar = "solar activity" - o conjunto dos fenômenos transitórios que ocorrem no sol, dos quais os mais característicos são as manchas, as fáculas e as fulgurações, que aparecem inicialmente em altas latitudes solares, mas que depois vão surgindo em latitudes cada vez mais baixas, aproximando-se do equador solar. Varia em ciclos de 8 a 12 anos.

Ativo = "active" - refere-se à época de máximo de atividade solar ou à região em que há muita atividade no Sol. Ver região ativa.

Banda = "ribbon" - zona brilhante característica de uma fulguração, observada em linhas cromosféricas como H α . As mais tradicionais fulgurações têm duas bandas, que se formam simultaneamente nos dois lados da linha de inversão de polaridade magnética, nos pés dos aros pós-fulguração. Bandas H α são vistas vários minutos antes dos aros pós-fulguração, quando eles são visíveis. As bandas delineiam as plages e não necessariamente são simétricas; há casos de geometrias complicadas, com mais de uma linha de inversão de polaridade magnética e três ou mais bandas. As bandas geralmente se afastam entre si, na medida que núcleos brilhantes se formam no seu perímetro externo nos dois lados da linha de inversão de polaridade magnética. Concomitantemente, novos arcos se formam no topo do conjunto dos aros pós-fulguração, em alturas cada vez maiores, enquanto os aros mais baixos desvanecem.

Bombas de Ellerman = "Ellerman bombs" - pontos brilhantes que duram algumas dezenas de minutos, notáveis em filtrogramas nas asas da linha H α , mas não no centro da linha. Pela forma das linhas de emissão ganharam a denominação francesa de "moustaches", isto é, bigodes. Ocorrem principalmente nas regiões de fluxo emergente e ao redor das manchas solares, na região dos fragmentos magnéticos em movimento. Isso indicaria conexão com padrões de emergência dos campos magnéticos, mas sua ligação com a configuração magnética local não está estabelecida. Interpretações sugeridas incluem "pequenas fulgurações na região mais baixa da atmosfera" (De Jager). Entretanto, há diferenças entre bombas de Ellerman e fulgurações muito fracas: na curva de luz, pois têm a subida e descida abrupta; na maior largura das linhas, que seria devido a efeito Doppler com velocidades até 200 km/s, e na assimetria azul das linhas (as fulgurações tem assimetria com maior brilho na asa vermelha da linha).

Borrifo = "spray" - material emitido durante uma fulguração, com velocidade superior à de escape da cromosfera (670 km/s), usualmente observado em H α além do limbor. O material geralmente se fragmenta e muda rapidamente de forma; apenas uma parte ínfima retorna. Isso a distingue da vaga ("surge"), em que a maioria do material retorna pela mesma trajetória, permanecendo compacta.



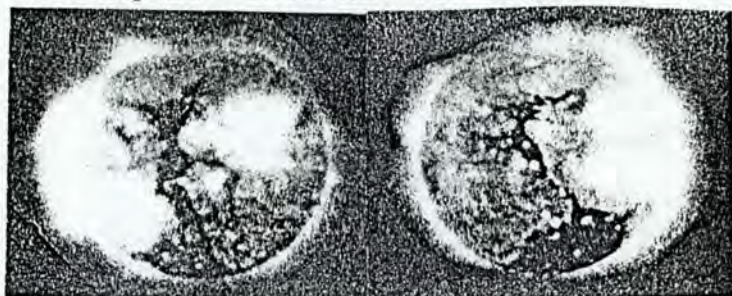
Imagens no vermelho, 27, 28 e 32 minutos após início.

Brilho remoto = "remote brightening" ou "remote patch" ou "peripheral flare patch" - elemento periférico de uma fulguração, afastado da zona de inversão de polaridade onde se situam as bandas principais. A emissão é atribuída a distúrbios que se propagam ao longo de arcos coronais que se conectam com o centro da fulguração.

BSD = "bright surges on disk" - vagas brilhantes em contraste com o disco solar.

BSL = "bright surges on limb" - vagas brilhantes que se movem mais de 0,15 raios solares além do limbo. (além do limbo todas as protuberâncias são brilhantes; no disco podem ser brilhantes ou escuras).

Buraco coronal = "coronal hole" - região da coroa onde a emissão é extremamente baixa em EUV (ultravioleta extremo) e raios X. Está associada a extensas áreas de campo magnético fotosférico unipolar fraco, com topologia "aberta" ou divergente, isto é, cujas linhas de força se estendem para a região externa da coroa e são arrastadas pelo vento solar. São a fonte do vento solar de alta velocidade e aparecem mais frequentemente nos polos solares, onde são maiores e mais estáveis.



21 ago

16 set 1973

imagem em raios X

Calmo = "quiet" (em "quiet sun") - estado do sol quando suas emissões se reduzem à componente de base; corresponde sensivelmente ao período de atividade mínima (Mourão). O termo "quiet" também é usado para regiões onde não há atividade, embora em época de sol ativo; como equivalente de zona fora das regiões ativas; veja quieto.

Canal de filamento = "filament channel" - região alongada, delimitada por um padrão de fibrilas paralelas em ambos os lados, mas alinhadas em sentidos opostos em cada lado, que marcam a zona de inversão de polaridade magnética onde irá ocorrer ou onde existiu um filamento. A estrutura magnética do canal de filamento corresponde à que ocorre em um filamento, com os campos magnéticos ao longo da linha de inversão, mas a matéria pode ser insuficiente para que o filamento seja observado. Canais de filamento sem matéria podem se estender além dos filamentos ou ligar vários filamentos.

Camada de reversão = "reversing layer" - camada da atmosfera solar imediatamente acima da fotosfera, com gases mais frios e menos densos que produzem as linhas escuras do espectro no Sol e em outras estrelas.

Cancelamento = "cancellation" ou "flux cancellation" - fenômeno observado em séries de magnetogramas (na componente da linha de visada), visualizado como a redução do fluxo magnético nos elementos de polaridade magnética oposta que se encontram em aparente contato. A redução é gradual e de valor absoluto semelhante para ambas as polaridades e geralmente continua até o desaparecimento do elemento de menor fluxo magnético. O cancelamento ocorre entre elementos magnéticos de qualquer natureza que se movimentam de modo a entrar em aparente contato. Dipolos em cancelamento ilustrados no verbete regiões efêmeras.

Centro ativo = equivalente a centro de atividade.

Centro de atividade = "center of activity" - o conjunto das estruturas e dos fenômenos visíveis que acompanham a formação de um grupo de manchas solares. Os fenômenos são interrelacionados.

pois a duração das manchas é menor que a do centro: na descrição de Kiepenheuer (p.432), em um centro típico, as manchas duram cerca de 50 dias, as fáculas se dissolvem em cerca de 100 dias e o centro é observável durante 270 dias, pelo filamento que permanece e que migra na direção do polo, incorporando-se à coroa polar. A duração e tamanho dos centros de atividade são variados, mas não parecem mostrar variação sistemática com o ciclo solar. A evolução dos centros de atividade também se reflete na coroa.

CFI = índice compreensivo de fulguração.

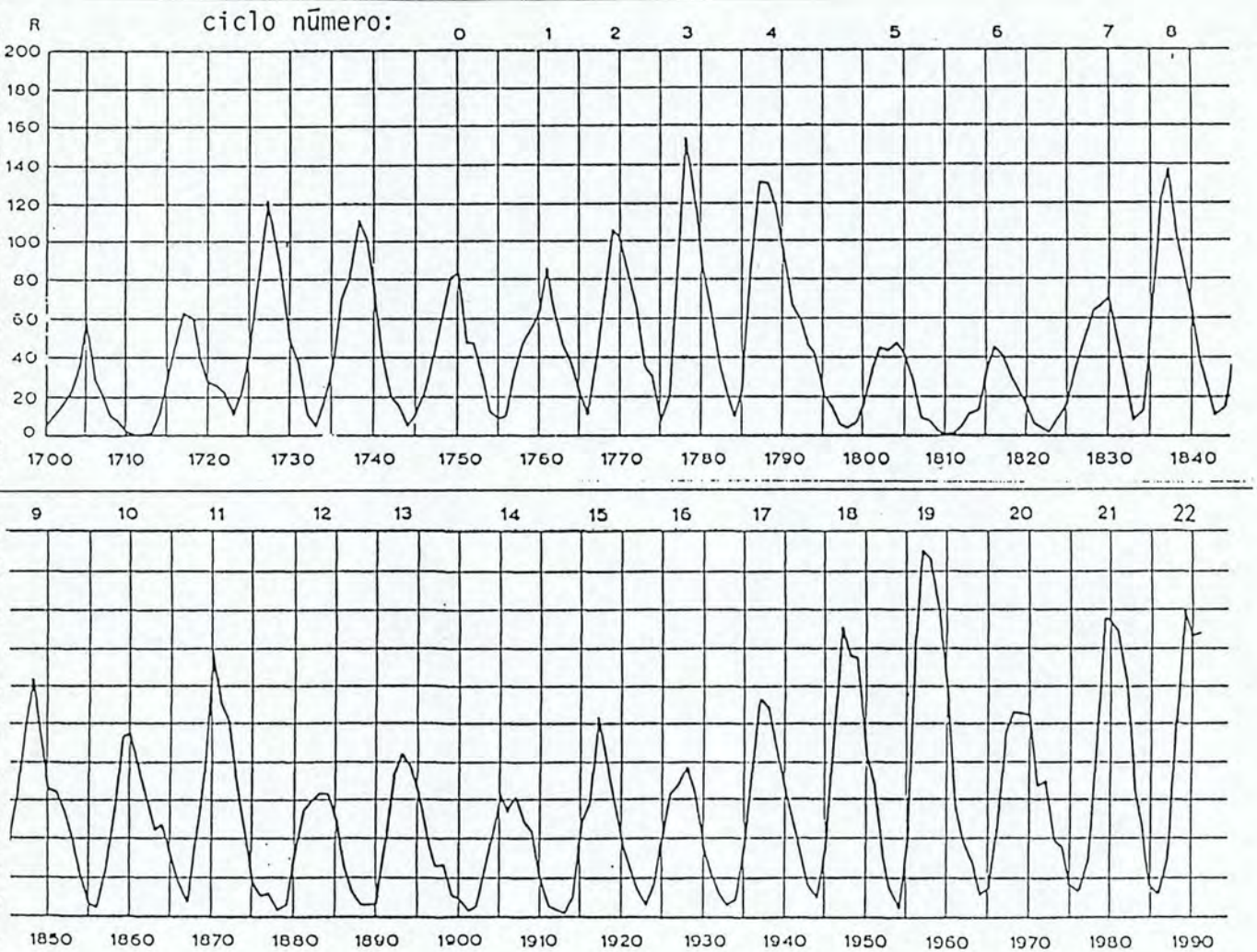
Chicote coronal = "coronal whip" - fenômeno observado na coroa, em emissão na linha verde (5302 Å do Fe XIV); com movimentos transversos rápidos de estruturas magnéticas finas, que corresponderia à reconexão magnética entre um arco e a perna de uma linha magnética que se estende por grande altura na coroa, resultando em um abrilhantamento ao longo da região em que a linha reconectada se recolhe.

Chuva coronal = "coronal rain" - material que se observa em Ho condensando-se na coroa e caindo na cromosfera na direção de manchas solares; geralmente observado no limbo.

Ciclo de atividade solar = ciclo solar.

Ciclo solar = "solar cycle" - variação quase-periódica na atividade solar e da latitude solar onde surgem os fenômenos, dos quais o mais notável é o número de manchas. O período medido entre os meses de número mínimo de manchas varia de 8 a 13 anos, com um valor médio de 11,2 anos, mas como a polaridade magnética dos grupos de manchas se inverte em cada ciclo, o verdadeiro ciclo magnético do sol compreende 22 anos. O ciclo solar é melhor representado pelo diagrama borboleta (ilustração no verbete correspondente). Nele se nota que o surgimento de manchas em altas latitudes, correspondente ao novo ciclo, ocorre concomitantemente com o aparecimento próximo do equador de grupos de manchas do velho ciclo. Assim sendo, durante um intervalo perto do mínimo coexistem regiões ativas correspondentes à atividade de dois.

ciclos magnéticos distintos.



Classificação dos grupos de manchas solares = "sunspot group classification" - classificação de Zurich modificada:

A : um único poro ou grupo de poros que não mostram configuração bipolar (em um sentido morfológico, não magnético).

B : grupo de poros em configuração bipolar;

C : grupo bipolar em que uma mancha possui penumbra;

D : grupo bipolar cujas manchas principais têm penumbra, mas pelo menos uma tem estrutura simples e a dimensão do grupo não ultrapassa 10° em longitude heliográfica;

E : um grande grupo bipolar em que ambas as manchas principais têm penumbra e estrutura complexa; possui inúmeras manchas entre as principais; tem dimensões superiores a 10° ;

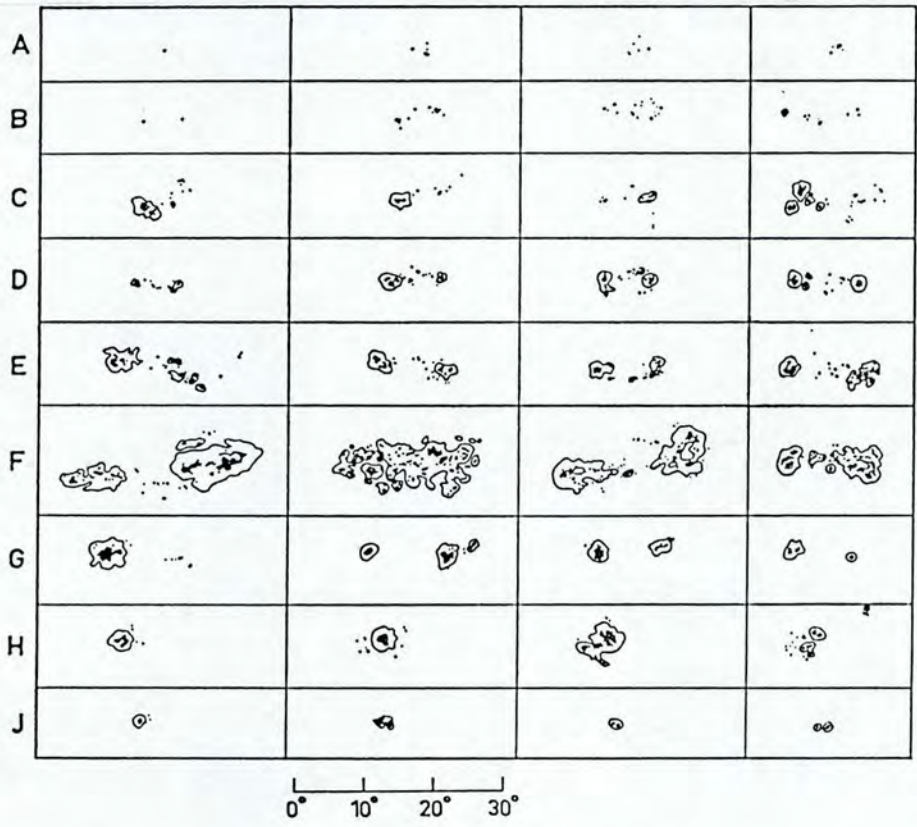
F : grupo bipolar muito grande, com dimensões além de 15° ;

G : grande grupo bipolar com dimensões entre 10° e 15° , que não contém pequenas manchas entre as principais;

H : uma mancha com penumbra e diâmetro superior a $2,5^\circ$;

J : uma mancha com penumbra e diâmetro inferior a $2,5^\circ$.

A classificação de Zurich para grupos de manchas é essencialmente evolucionária. Todos os grupos, independente do tamanho que atingirão, iniciam e terminam na classe A; alguns grupos passam por todas as fases, mas a maioria nunca atinge grandes dimensões, sendo comuns as seqüências A B C D C H J A ou A B C B A; vários sequer chegam a desenvolver manchas com penumbra, restringindo-se às classes A e B; outros nunca ultrapassam a classe A. A atividade associada a fulgurações ocorre mais frequentemente nos grupos D, E e F. (Bray e Loughhead, 1965, p.227)



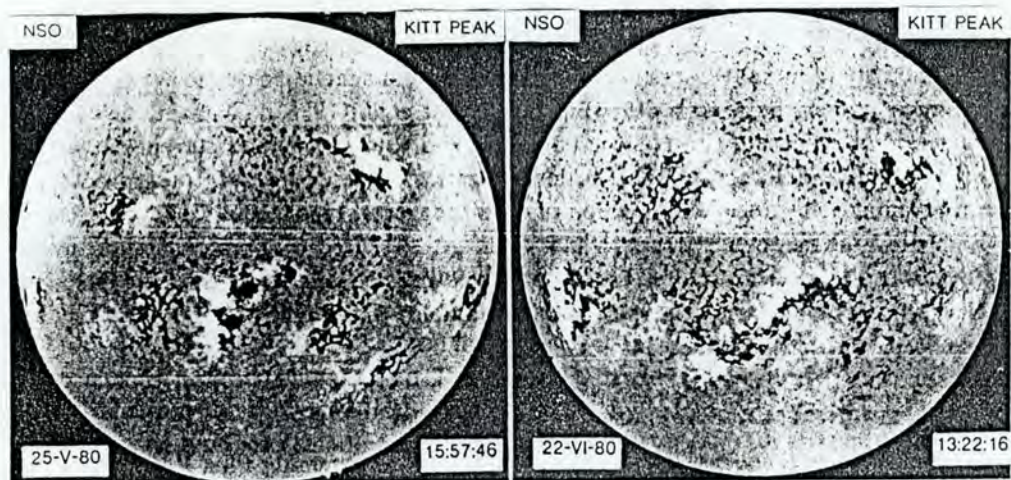
Classificação de Zurich para grupos de manchas, com quatro exemplos de cada classe. Oeste fica a esquerda. A escala indica graus de longitude heliográfica.

CME (coronal mass ejection) = ejeção de massa na coroa.

Compacta = "compact" - tipo de fulguração: veja fulguração compacta.

Complexo de atividade = "complex of activity" - estruturas mais complexas e de maior duração que as regiões ativas usuais, que se formam em certas longitudes solares em que as regiões ativas recorrem freqüentemente, surgindo onde ainda existem remanescentes

de regiões ativas anteriores, criando um centro de atividade de maior duração.



Um grande complexo de atividade cruzando o meridiano central em rotações solares sucessivas, em maio e junho de 1980.

Condensação coronal = "coronal condensation" - região da coroa que emite a radiação mais intensamente.

Conexão solar = "solar connection" - relação entre o Sol e as estrelas; pressupõe que o Sol é uma estrela típica e que os fenômenos nele observados servem de guia para o estudo de outras estrelas (pelo menos as de mesma classe espectral e de luminosidade). Essa concepção teve sucesso em determinar atividade e ciclos como os solares em outras estrelas. Fulgurações do tipo solar têm sido observadas apenas em estrelas com envelopes convectivos.

Configuração magnética evolutiva = "evolving magnetic feature" = originário do francês: "structure magnétique évolutif" - configuração magnética dipolar em que uma das polaridades cresce em fluxo magnético ao mesmo tempo em que a polaridade oposta decresce. Esse comportamento não é possível em um dipolo isolado, mas ocorre quando um polo de uma região ativa cresce adjacente a uma polaridade magnética oposta e ocorre cancelamento consecutivo. Os dois polos estarão em aparente contato e o cancelamento deverá estar ocorrendo em ambas as polaridades, mas essa configuração ocorrerá se o aumento do fluxo magnético do dipolo em crescimento sobrepujar a redução devida ao cancelamento. A configuração magnética evolutiva ocorre na fase de emergência e é reconhecida como alta produtora de fulgurações.

magnética evolutiva ocorre na fase de emergência e é reconhecida como alta produtora de fulgurações.

Confinada = "confined" - veja fulguração confinada

Coroa = "corona" - uma envoltura brilhante e difusa, de contorno irregular e estrutura radial, visível em eclipses solares totais. Também pode ser revelada com o uso de coronógrafos. É a camada mais externa da atmosfera solar, de baixa densidade (inferior a 10^9 cm^{-3}) e alta temperatura (10^6 K). Seu aspecto varia com o ciclo solar, tendo baixa intensidade e pouca extensão no mínimo, quando mostra raios, e muito maior intensidade e extensão no máximo. A coroa se estende por muitos raios solares e passa para um regime de expansão, formando o vento solar.

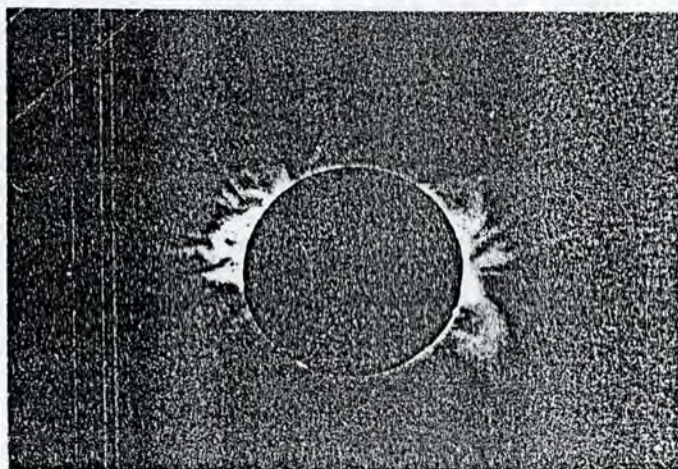


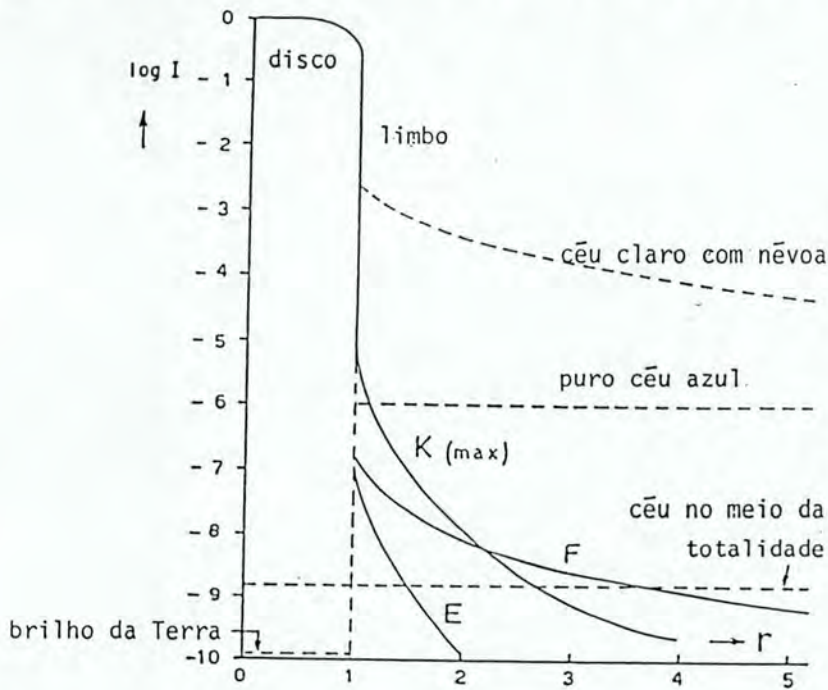
Imagem da coroa em luz branca

Coroa branca = "white corona" - coroa solar com espectro contínuo semelhante à fotosfera solar, resultado da reflexão da luz fotosférica.

Coroa E = "E corona" - a componente da coroa correspondente à luz combinada das linhas de emissão. Veja ilustração dos componentes da coroa após coroa K.

Coroa F = "F corona" - a parte mais externa da coroa branca do Sol; não é polarizada e mostra linhas de absorção do espectro fotosférico. É concentrada no plano da eclíptica (luz zodiacal interna). Veja ilustração das componentes da coroa após coroa K.

Coroa K = "K corona" - a parte mais interna da coroa branca do Sol; é polarizada e não tem linhas de absorção. É observada em todos os ângulos de posição e interpretada como luz contínua devido ao espalhamento de elétrons. Na figura a seguir estão ilustrados os componentes da coroa observados em eclipse.



Intensidade relativa das componentes da luz da coroa em função da distância ao centro do Sol, r , em raios solares.

Coroa de filamentos polares = coroa polar

Coroa polar = "polar crown" - um conjunto de filamentos em altas latitudes (superiores a 50°), que forma uma faixa irregular quase contínua ao redor do Sol nessas latitudes.

Corônio = "coronium" - pretense elemento químico que geraria as linhas de emissão da coroa solar, mais tarde identificadas como de elementos altamente ionizados, principalmente ferro e cálcio.

Coronógrafo = "coronagraph" - instrumento para observar a coroa quando não há eclipses. Usa um disco, maior que o disco solar, para obstruir o Sol. Consta de um telescópio cuidadosamente desenhado com discos e anéis obstrutores para evitar as luzes parasitas, especialmente as difratadas pelo bordo da objetiva. Pode usar filtros monocromáticos ou polarizadores para isolar as linhas coronais.

Corredor de plage = "plage corridor" - espaço na plage cromosférica que coincide com a linha de inversão de polaridade, marcado por um conjunto de fibrilas ou pequenos filamentos que ligam os lados opostos.

Corrente de alta velocidade = "high speed stream" - regiões do vento solar com o dobro das velocidades típicas do vento solar e com menor densidade, que se originam nos buracos coronais.

Corrente de elmo = "coronal streamer" ou "coronal helmet" - elmo coronal.

Cromosfera = "chromosphere" - camada entre a fotosfera e a coroa do Sol, visível como um arco vermelho brilhante, durante eclipses, poucos segundos antes do reaparecimento da fotosfera do Sol. Na velocidade média dos eclipses, 310 km ou 0,44" no Sol são cobertos ou descobertos em 1 segundo. A cromosfera apresenta linhas de emissão: muitas duram menos de 2 segundos, estando restritas aos 500 km mais baixos. As linhas mais intensas persistem cerca de 40 segundos, portanto atingem 14 000 km. É observável com auxílio de um espectroscópio mesmo fora de eclipse, onde é notável no limbo, mostrando espessura variada. Seu perfil irregular dificulta uma distinção precisa entre a cromosfera e as protuberâncias, que se projetam além desta. Abetti (1955) sugere que se considere como protuberâncias apenas as elevações que se projetam mais de 30" acima do nível médio da cromosfera. As características da cromosfera devem ser estabelecidas excluindo-se as protuberâncias, sendo comum dividi-la em baixa e alta cromosfera. Na baixa cromosfera o hidrogênio é predominantemente neutro, com temperaturas de 5 000 K a 6 000 K; na alta cromosfera o hidrogênio está ionizado e as temperaturas sobem até 300 000 K ou mais. A cromosfera é observável no centro de linhas como H α , mostrando estrutura irregular, onde dominam componentes alongados, alinhados entre si por influência do campo magnético. A densidade e temperatura da cromosfera são tais que o campo magnético se torna dominante (plasma congelado no campo). A temperatura aumenta para fora.

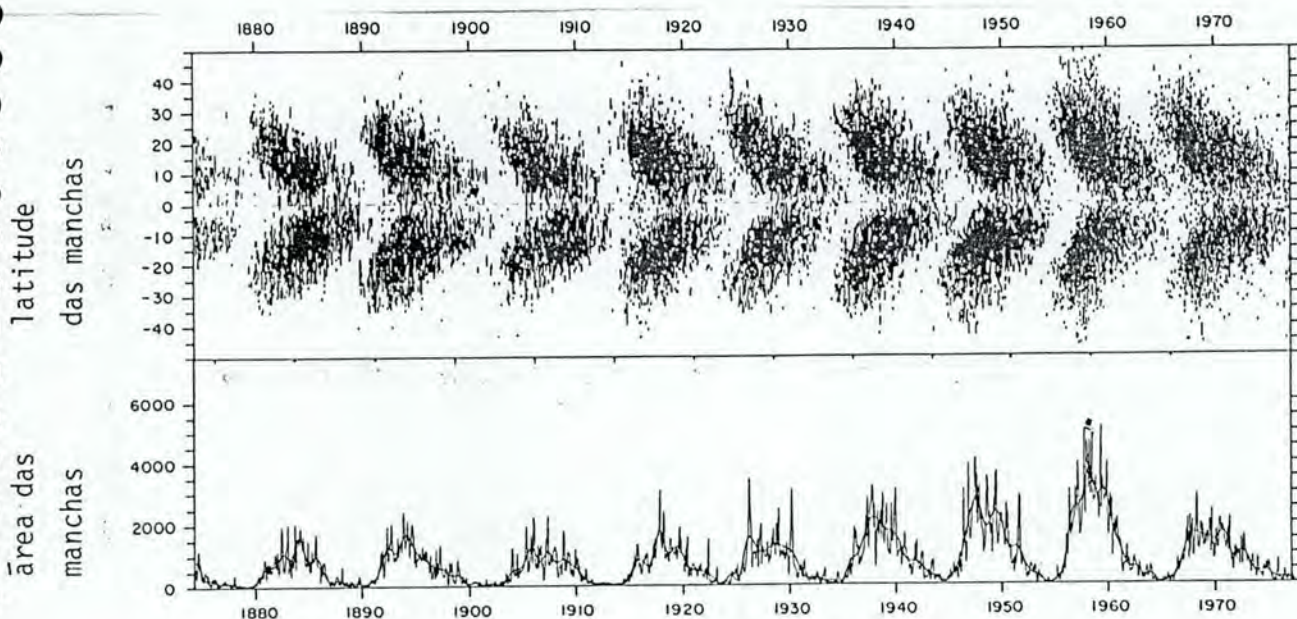
Compacta = veja fulguração compacta

Confinada = veja fulguração confinada

Delta = "delta" - classe magnética de mancha solar, em que a umbra central é formada por duas regiões de polaridades opostas rodeadas por uma penumbra única. Tende a ser altamente prolífica em fulgurações.

Detonador = gatilho

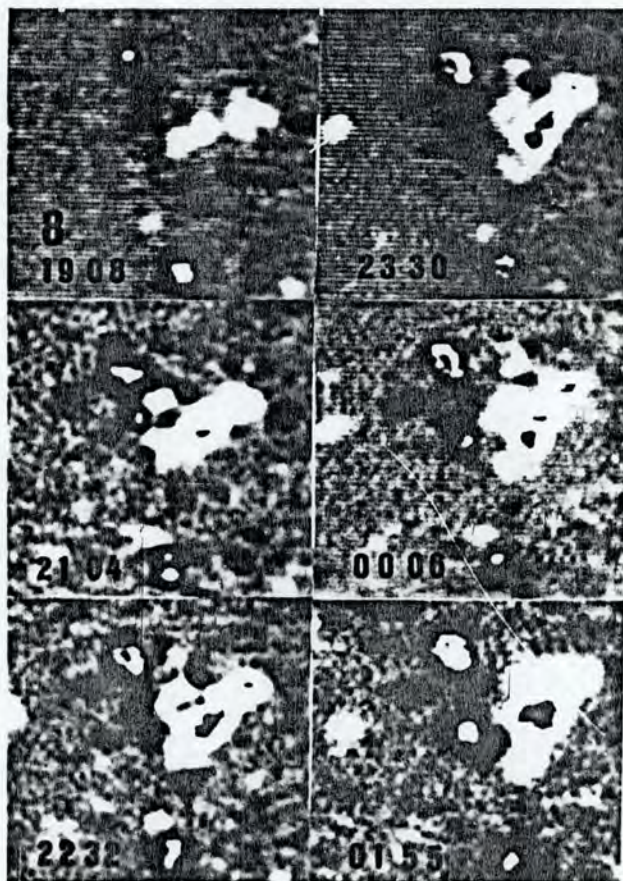
Diagrama borboleta = "butterfly diagram" - um gráfico da latitude em que é observado um fenômeno característico da atividade solar, geralmente manchas, como função do tempo. Mostra a tendência das regiões ativas surgirem cada vez em latitudes menores no decorrer de um ciclo solar.



Dinâmica = veja fulguração dinâmica

Dipolos magnéticos elementares = "elementary magnetic bipoles" - os menores elementos dipolares observados no Sol, identificáveis em séries de magnetogramas como duas polaridades opostas, de fluxo magnético semelhantes, que surgem juntas mas se afastam perdendo a identidade em pouco tempo por interação de cada um dos polos com elementos vizinhos. Aparecem em sucessão, com orientação preferencial de modo que os polos opostos tendem a migrar em sentidos opostos, acumulando fluxo magnético. O conjunto, que cresce formando uma região de aspecto geral dipolar, tem zona central com mistura de polaridades enquanto novos dipolos magnéticos elementares surgirem. Foram detetados na fase de

emergência das regiões ativas, tanto nas que surgem no cinturão de atividade, como nas regiões efêmeras. As regiões efêmeras sem subestrutura, que parecem formadas por um único dipolo, são os menores elementos magnéticos identificáveis como dipolos elementares. Entretanto, mesmo regiões efêmeras muito pequenas, que duram poucas horas e não formam poros, apresentam caráter complexo quando as condições de observação são excelentes. Como os menores dipolos observados estão no limite instrumental de detecção, não é possível afirmar que esses dipolos elementares sejam os menores elementos dipolares, nem que as menores regiões efêmeras sejam constituídas de um único deles. Os dipolos elementares indicam um padrão de emergência comum a regiões ativas de todos os tamanhos, desde as regiões efêmeras sem poros até as grandes regiões ativas.



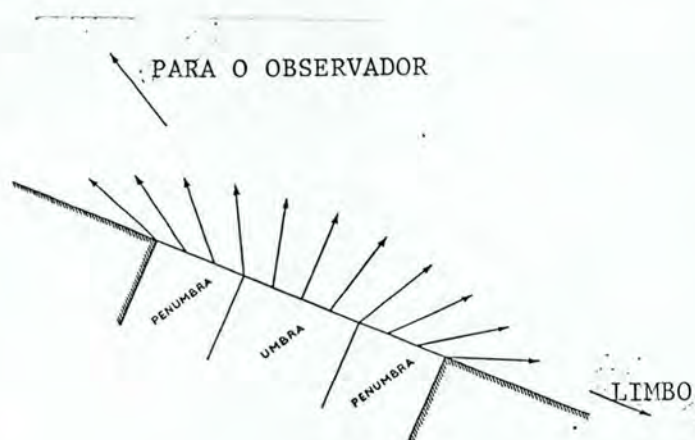
magnetogramas de região efêmera

Distúrbio ionosférico repentino - "sudden ionospheric disturbance" SID = desaparecimento repentino dos sinais de radio transmitidos em onda curta na Terra, devido a alterações da ionosfera, que ocorrem após fulgurações no Sol. Foram atribuídas ao acréscimo da emissão Ly α nas fulgurações, mas hoje considera-se dominante o efeito da radiação X mole.

Dobra = ruga

Dossel = "canopy" ou "magnetic canopy" - região acima da fotosfera, entre manchas ou em outros locais onde o campo magnético é bastante intenso, mas se mantém quase paralelo à

superfície. Geralmente não são detetados nos magnetogramas na linha de visada, exceto em circunstâncias especiais, como nas circunvizinhanças de manchas solares fora do centro do disco solar, quando a inclinação das linhas de campo magnético pode ser detetada, pela diferente distorção da simetria da mancha, comparada com a observada em luz branca. Nos casos extremos, observa-se uma inversão de polaridade próxima ao limbo, que é um efeito aparente causado pela inclinação das linhas de campo magnético, de modo que, ao invés da componente ser na direção do observador, torna-se contrária.

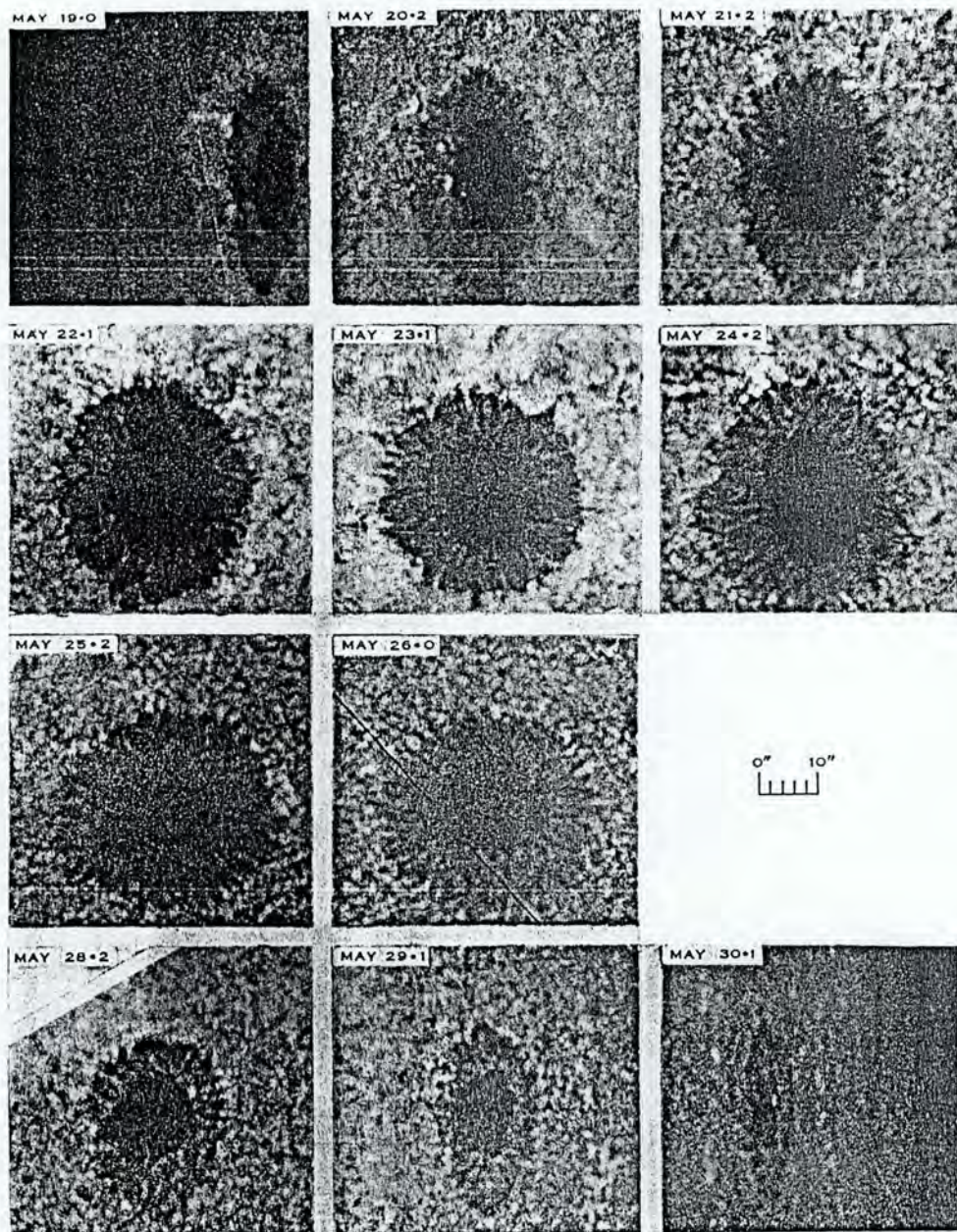


O esquema a esquerda ilustra a inclinação nas linhas de força de uma mancha solar e mostra que, para um observador na direção indicada, há uma aparente reversão da polaridade magnética da região próxima ao limbo. O magnetograma, à direita, tem uma mancha regular de polaridade negativa (contorno preto), próxima ao limbo, que fica à direita. A região branca à direita da mancha corresponde à reversão aparente da polaridade magnética da mancha. Essas linhas inclinadas formam o dossel.

DSD = "dark surge on disk" - vagas escuras em contraste com o disco solar. Há casos em que são brilhantes contra o disco.

Efeito Evershed = "Evershed effect" - movimento radial ao redor das manchas solares, com velocidade de poucos km por segundo, para fora da umbra na fotosfera, mas para dentro na cromosfera. Descoberto no Observatório de Koidakanal, na Índia, por Evershed, que observou o espectro de manchas afastadas do centro do disco e notou que as linhas espectrais indicavam movimento na direção do observador no lado da mancha próximo ao centro e para longe do observador no lado do limbo.

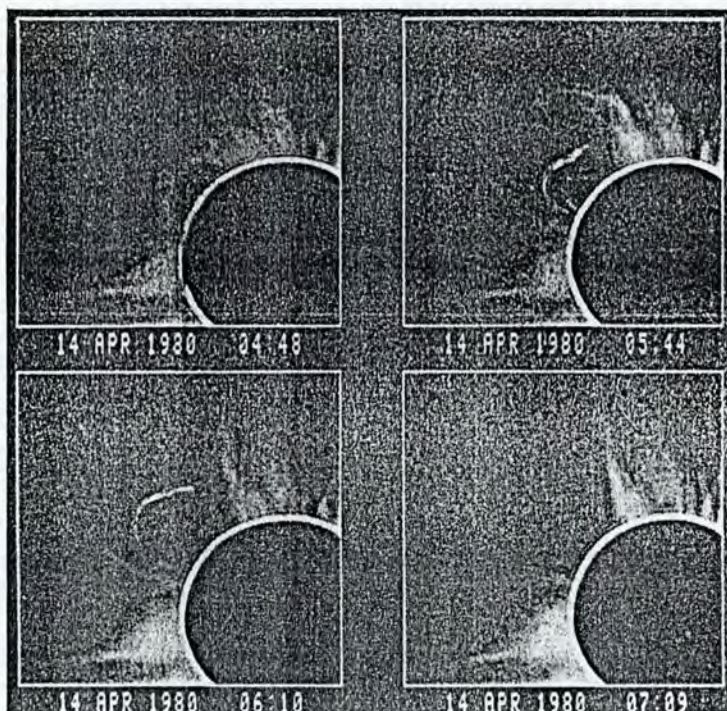
Efeito Wilson = "Wilson effect" - desigualdade na extensão radial da penumbra de manchas quando observadas muito próximas ao limbo do Sol, em que a parte próxima do limbo é muito mais extensa que a próxima do centro do disco solar. Foi observado pela primeira vez em 1759 por A. Wilson, que supôs que a umbra seria uma depressão na mancha. O entendimento atual é que o efeito é resultado da diferente opacidade da umbra e da penumbra, de modo que a umbra, sendo transparente, permite a visão de parte da penumbra próxima do limbo.



Mudanças na aparência de uma pequena mancha regular durante sua passagem do limbo leste ao oeste. Cada fotografia foi orientada de modo que a projeção tem máxima redução na horizontal.

EFR (emerging flux region) = região de fluxo emergente.

Ejeção de massa da coroa = "coronal mass ejection" - CME - concentrações de massa deslocando-se na alta coroa, atingindo velocidade superior à de escape. Observando com coronógrafos no espaço e espaçonaves, se verificou serem relativamente frequentes (da ordem de uma por dia), podendo transportar considerável massa (de 10^{-16} M /ano até comparável ao vento solar, 10^{-14} M /ano). Seus efeitos podem atingir a Terra.



Ejectiva = veja fulguração ejectiva ou protuberância ejectiva (borrifo).

Elmo coronal = "coronal helmet" - estrutura na coroa, vista em eclipse ou com coronógrafo, que compreende uma base em arco, envolvida por uma região em forma de cúspide, que se estende para fora do sol até cerca de dois raios solares. Tem a parte interna limitada por arcos que ligam polaridades opostas, em cujo interior se situa uma cavidade com menor emissão. Dentro dessa cavidade, na cromosfera, geralmente encontram-se protuberâncias. A parte externa do elmo é aberta, com linhas que se estendem pelo campo magnético interplanetário. São observados em luz branca e em linhas. Na ilustração da coroa solar há um elmo coronal à direita.

Equador solar = "solar equator" - círculo máximo no Sol, determinado pelo movimento de rotação solar observado nas manchas e outros traçadores (fáculas, filamentos). O equador solar está inclinado $7^{\circ} 10',5$ em relação à eclíptica, com nodo ascendente $73^{\circ} 47'$.

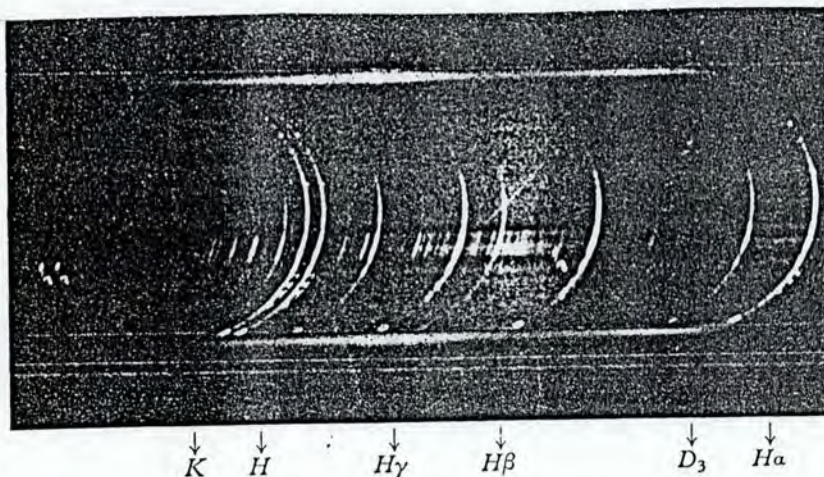
Erupção de filamento = "filament eruption" ou "disparition brusque" (do francês, com uso internacional) - desaparecimento de um filamento, que inicialmente ascende lentamente e depois erupciona, ejetando a matéria que estava no canal de filamento. Em geral a erupção é acompanhada de uma fulguração de duas bandas, uma de cada lado do filamento.

Erupção solar = do francês "eruption chromosphérique" (erupção cromosférica) - equivalente a fulguração solar. Alguns autores consideram erupção como termo mais amplo, de modo que fulguração ficaria restrito às observações em $H\alpha$ ou à cromosfera. Entretanto a tendência atual, que seguimos aqui, é considerar "flare" (fulguração) como termo genérico, aplicável ao conjunto dos fenômenos observados em todos os comprimentos de onda, e em todas as camadas da atmosfera solar, e "burst" (erupção) para as manifestações em rádio. "Burst" é mais usado quando apenas a variação temporal do fenômeno é registrada. Poderia ser aplicado a erupção de filamento ("filament eruption").

Eruptiva = "eruptive" - veja fulguração eruptiva ou protuberância eruptiva.

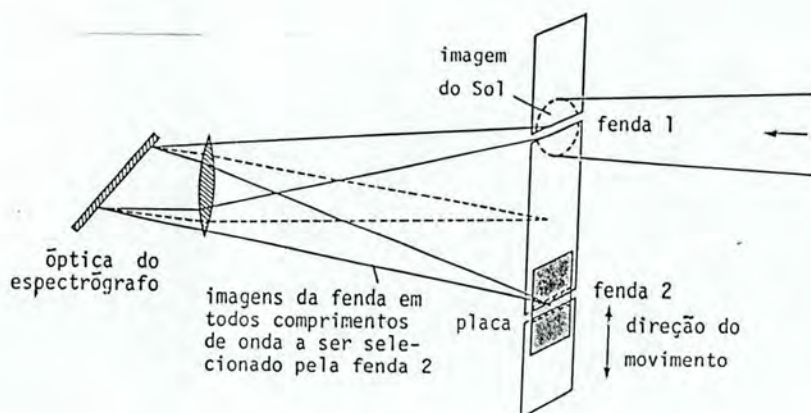
Espectro de Flash = o mesmo que espectro relâmpago.

Espectro relâmpago = "flash spectrum" - espectro de emissão que é observado quando a fotosfera solar está totalmente eclipsada, nos poucos segundos em que a cromosfera do Sol é visível como um arco.



Espectro relâmpago obtido com um prisma objetivo. O espectro contínuo da coroa pode ser visto no topo e na base.

Espectroeliógrafo = "spéctroheliograph" - instrumento ótico que usa um espectrógrafo e uma fenda para isolar uma linha espectral e que varre todo o disco solar ao deslocar simultâneamente a fenda de entrada e uma fenda antes de uma placa fotográfica que irá registrar a imagem do sol. Foi inventado em 1891 independentemente por G. E. Hale e por H. A. Deslandres. Pode se obter resultado semelhante usando filtros monocromáticos, como os contruídos por B. Lyot.



Espectroeliograma = "spectroheliogram" - imagem do Sol em uma linha espectral (geralmente $H\alpha$ do hidrogênio ou K do cálcio) obtido com um espectroeliógrafo.

Espectroelioscópio = "spectroheliroscope" - instrumento semelhante ao espectroeliógrafo, desenvolvido por Hale em 1923 e mais tarde modificado de modo que a varredura do Sol fosse feita por dois prismas que giram em seu eixo óptico, enquanto as fendas ficam fixas. Serve para observações visuais.

Espectroscópio de protuberância = "spectroscope for prominences" - espectroscópio especial para a observação de protuberâncias nos bordos do Sol, geralmente com uma fenda curva na forma do limbo solar. O instrumento se baseia na descoberta feita simultâneamente em 1868 pelo francês J. Janssen, que observava na Índia e pelo inglês por N. Lockyer, na Inglaterra, por ocasião de um eclipse total do Sol. Eles notaram que, se a fenda do espectroscópio for colocada paralelamente ao bordo do Sol, será possível observar protuberâncias mesmo fora de eclipse, uma vez que seja escolhida uma faixa adequada do espectro, usualmente $H\alpha$, e o adaptaram para esse fim. (Mourão, 1987)

Espículos = "spicules" - estruturas alongadas na cromosfera observadas acima do limbo, pouco inclinadas em relação à radial, de curta duração (4 a 10 minutos), que parecem ser ejetadas em velocidades de 20 a 30 km/s e atingem cerca 9000 km, onde desaparecem ou retornam. Supõe-se que seguem as linhas de força do campo magnético e que correspondem aos salpicos observados no disco; alguns usam o termo espículo indistintamente para ambos fenômenos.



Espículos observados na asa vermelha (HQ + 1 A)

Estruturas magnéticas evolutivas = "evolving magnetic features" - EMF - elementos isolados observáveis em magnetogramas que variam em fluxo magnético. Quando formam um par adjacente de polaridades opostas, em que uma cresce e a outra decresce, estão fortemente correlacionados com a ocorrência de fulgurações.

Explosões = "explosions" - refere-se a fenômenos transientes associados ou semelhantes às fulgurações solares (ver erupção solar). Também é usado como termo mais geral ou, às vezes, para as observações em radio. Não é específico e é pouco usado.

FTA (Field Transition Arch) - arco de transição.

Faculae = "faculae" - (plural de facula, do latim) - "facula" significa "pequena tocha"; termo usado por C. Scheiner e por Galileu para as fâculas e que é mantido na literatura em outras línguas.

Fâculas = "faculae" (plural de "facula", do latim) - zonas brilhantes irregulares, de estrutura ramificada, distribuídas sobre grandes áreas nas vizinhanças de grupos de manchas, visíveis na fotosfera apenas perto do limbo, mas observáveis na cromosfera desde o limbo até o centro do disco, sendo particularmente notáveis na linha K do cálcio. Fâculas fotosféricas e cromosféricas correspondem ao mesmo fenômeno em diferentes alturas. As cromosféricas, observadas na linha de cálcio, seriam

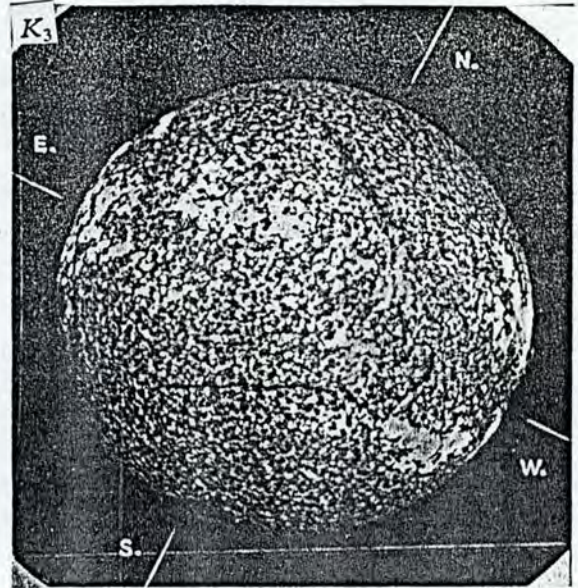
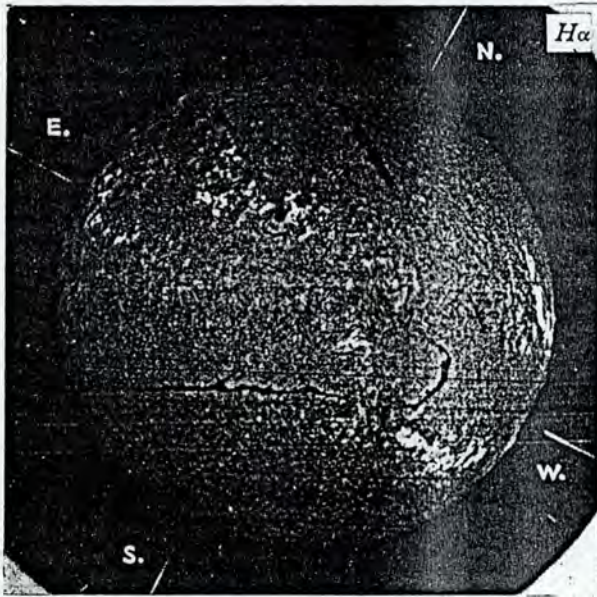
equivalentes ao francês "plages faculaires". Foram denominadas "floculi" por Hale, que julgava haver diferenças notáveis entre essas "núvens de cálcio" e as fâculas. Abetti (1955) inclui os "dark flocculi" ou filamentos, considerando que "floculi" e protuberâncias seriam "muito relacionados, se não o mesmo fenômeno". Embora protuberâncias e filamentos sejam o mesmo fenômeno, não têm relação direta com as fâculas.

As fâculas surgem antes e persistem após o desaparecimento das manchas. Tanto podem ser encontradas em conjuntos densos chamados plages, como podem estar dispersas na malha intensificada (Zwaan, 1981, p. 167). Tal distinção já estava expressa por Kuiper (1954): essas regiões concordam em geral com a posição das "plages faculaires", mas são comumente menores em área; cada área de fâcula em luz branca corresponde a uma "plage faculaire", mas o inverso não é necessariamente verdade, o que pode ser devido ao menor contraste na luz branca. Estando geralmente associadas às manchas solares, seriam componentes das regiões ativas. Há entretanto fâculas em altas latitudes, o que levou Abetti (1955) a separá-las nas que compreendem os dois cinturões de atividade, que se deslocam ao longo do ciclo solar, e as de zonas que ficam perto dos polos e que seriam mais estacionárias. Também encontramos as fâculas classificadas em três tipos. Quando observadas no contínuo ou nas asas da linha, com resolução espacial moderada, as fâculas e os elementos da malha são pouco notáveis, só aparecendo brilhantes perto do limbo. Observações em resolução espacial muito alta (menor que 0."5) permitem visualizá-las em todo o disco. Elas correspondem a regiões de campo magnético intenso, porém inferior ou menos concentrado que o das manchas.

Fibrilas = "fibrils" - estruturas filamentosas menores, menos estáveis e de menor contraste que os filamentos, notáveis em luz monocromática, principalmente H α . Em conjunto, formam uma estrutura de elementos quase paralelos, que se mantém ao redor das manchas, das fâculas ou em canais de filamentos, embora a duração dos elementos individuais seja de poucos minutos. As fibrilas permitem inferir a direção dos campos magnéticos transversos, pois delineiam os campos magnéticos na baixa cromosfera, mas se limitam à parte inferior das linhas de força, isto é, às pernas dos arcos que ligariam polaridades opostas na fotosfera. Fibrilas podem ser vistas na ilustração de filamento.

Fibrilhas = equivalente a fibrila.

Filamento = "filament" - estrutura alongada, escura contra o disco. mais longa e de maior contraste que as fibrilas. Geralmente se situam na linha de inversão de polaridade magnética e são constituídos de inúmeros fios que delineiam campos magnéticos transversais. Vistos no limbo aparecem como protuberâncias brilhantes. Correspondem a massa gasosa suspensa acima da fotosfera por campos magnéticos. Costumam ter longa duração, e tendem a se mover lentamente na direção dos polos.

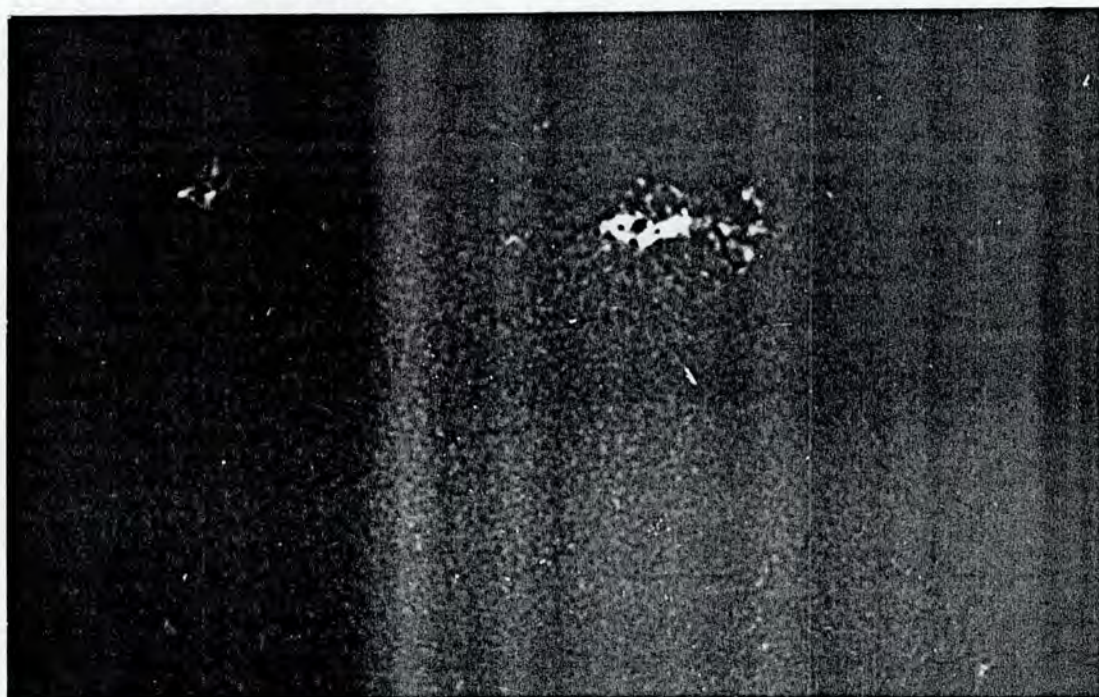


Filamento piscando - "winking filament" - observacionalmente, o aparecimento e desaparecimento repetido de um filamento quando observado com um filtro estreito; é interpretado como resultado de oscilação do filamento, pois o efeito Doppler causado pelas variações de sua velocidade faz com que ele entre e saia consecutivamente da faixa de comprimento de onda do filtro com o qual está sendo observado.

Filigrana = "filigree" - estrutura fina intrincada, que consiste em pontos ou segmentos alongados brilhantes, cuja menor dimensão não ultrapassa 300 km, coespacial com as separações entre os grânulos e que ocorre nas fáculas e nos elementos da malha, visível principalmente nas asas da linha H α .

Filtrograma = "filtergram" - imagem do sol em uma faixa muito estreita do espectro, usualmente centrada em H α , obtida através de um filtro monocromático de Lyot ou de um filtro interferencial.

Filtrograma $H\alpha$ = "H α filtergram" - Imagem centrada na linha $H\alpha$ do hidrogênio. As características evidenciadas nas imagens dependem da faixa de comprimento de onda selecionada. A mais tradicional é centrada na linha $H\alpha$, com alguns Angstroms de largura, mas informações suplementares podem ser obtidas nas asas da linha, deslocando até 2 Å, tanto para o azul como para o vermelho. Quanto mais longe do centro da linha $H\alpha$, menor será a absorção e o contraste das estruturas cromosféricas: as imagens vão se assemelhando às obtidas em luz branca, onde regiões mais profundas são detetadas. Matéria em movimento, entretanto, será revelada pois os comprimentos de onda que ela absorve se deslocam para o vermelho quando o material se afasta do observador, e para o azul quando se aproxima do observador (efeito Doppler). O deslocamento Doppler ($\Delta\lambda$) do comprimento de onda central (λ) é proporcional à velocidade v conforme a fórmula (não relativística) $\Delta\lambda/\lambda = v/c$, onde c é a velocidade da luz. Quando um filamento erupciona, a medida que ganha velocidade, desaparece nas imagens no centro da linha e aparece na da asa azul cuja velocidade corresponde ao comprimento de onda da observação. Oscilações em filamentos se revelam quando eles "piscam", isto é, aparecem e desaparecem alternadamente. O desaparecimento do filamento significa que a componente de sua velocidade na linha de visada ultrapassou a faixa de observação ou que a matéria se dispersou ou saiu do campo de visão do instrumento.



Filtrograma em $H\alpha$ mostra regiões ativas brilhantes, a central em fulguração, e filamentos escuros. A estrutura irregular da cromosfera é notável.

Fio = "thread" - estrutura filamentar semelhante a fibrila, mas que tem extensão igual a uma célula de supergranulação e une dois extremos da célula com polaridades magnéticas opostas. Ela nesse caso demarcaria um arco magnético completo, enquanto as fibrilas delinham apenas uma das suas extremidades. (Foukal, 1971) Também se usa fio para designar sub-estruturas de filamentos.

Flare = termo em inglês para fulguração.

Floco= equivalente a flóculo.

Flóculo = "flocculus" (do latim)- singular de flóculos.

Flóculos = "flocculi" - termo obsoleto para "núvens" na atmosfera solar, que podem ser brilhantes ou escuras em espectroeliogramas.

Flóculos brilhantes = "bright flocculi" - denominação obsoleta; seriam núvens de cálcio na parte alta da atmosfera. Atualmente entende-se que a composição química da atmosfera é quase homogênea e que os flóculos brilhantes são equivalentes a plages.

Flóculos escuros = "dark flocculi" - são geralmente alongados e curvos e aparecem nas proximidades das manchas. São mais notáveis nas linhas de hidrogênio. Originalmente entendidos como núvens de hidrogênio, hoje seriam classificados como filamentos ou fibrilas.

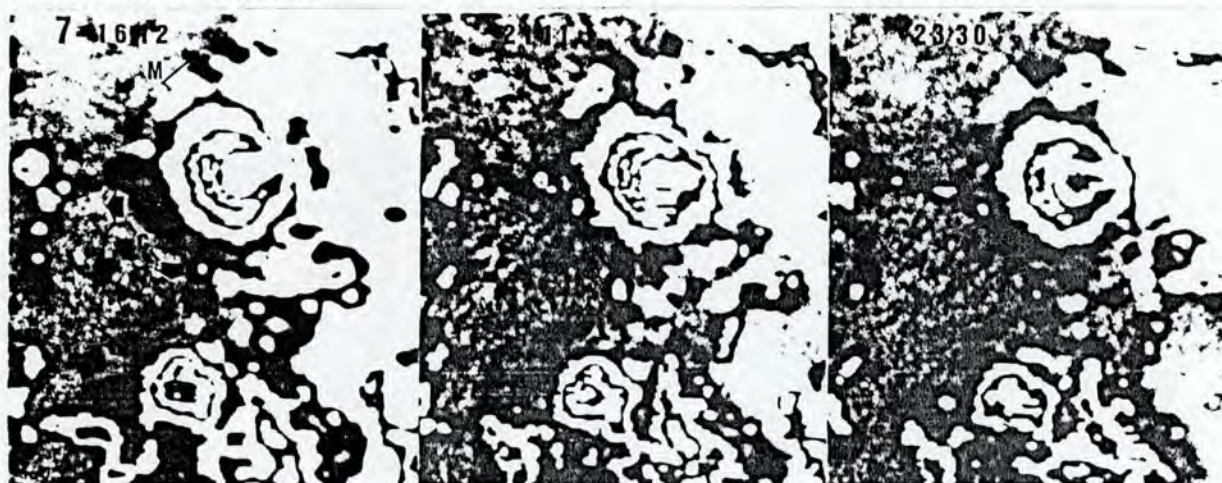
Fosso = "moat" - zona de campos magnéticos fracos ao redor de uma mancha solar, onde ocorrem os fragmentos magnéticos em movimento. Ilustração nesse verbete.

Fotosfera = "photosphere" - a camada do Sol visível em luz branca, e em todo o ótico, correspondendo à mais baixa região da atmosfera. Bastante fina, (cerca de 600 km, como se evidencia pela nitidez do limbo solar) com temperatura de 5700K e densidade de 10^{17} cm^{-3} .

Fragmentação = "fragmentation" - processo em que um elemento aparentemente íntegro se desintegra em outros menores. Quando os elementos da malha magnética se fragmentam, o fluxo magnético na linha de visada do conjunto se conserva. Nas regiões onde haviam regiões ativas com manchas ficam as plages que se dispersam,

formando a malha intensificada, que vai ocupando uma área cada vez maior. A posterior dispersão pode gerar extensas regiões magnéticas de mesma polaridade dominante. A fragmentação de manchas é um fenômeno mais complexo que envolve a criação de fragmentos magnéticos em movimento.

Fragmento magnético em movimento = "moving magnetic feature" - MMF - campos magnéticos fracos de ambas as polaridades, que surgem no limite da penumbra e se afastam radialmente de uma mancha solar. Seu caráter não está bem estabelecido; podem ser dipolares, mas os de maior fluxo magnético geralmente tem a polaridade da mancha. Também são observados na linha de Ca, como elementos escuros com movimento radial.



Magnetogramas com uma mancha maior, acima, com fragmentos magnéticos em movimento ao redor (exceto a direita, por efeito de dossel). As flexas indicam a direção radial do movimento de alguns deles. A mancha menor, abaixo, também tem fragmentos magnéticos em movimento ao redor. Em volta de ambas os campos magnéticos são fracos, formando o fosso.

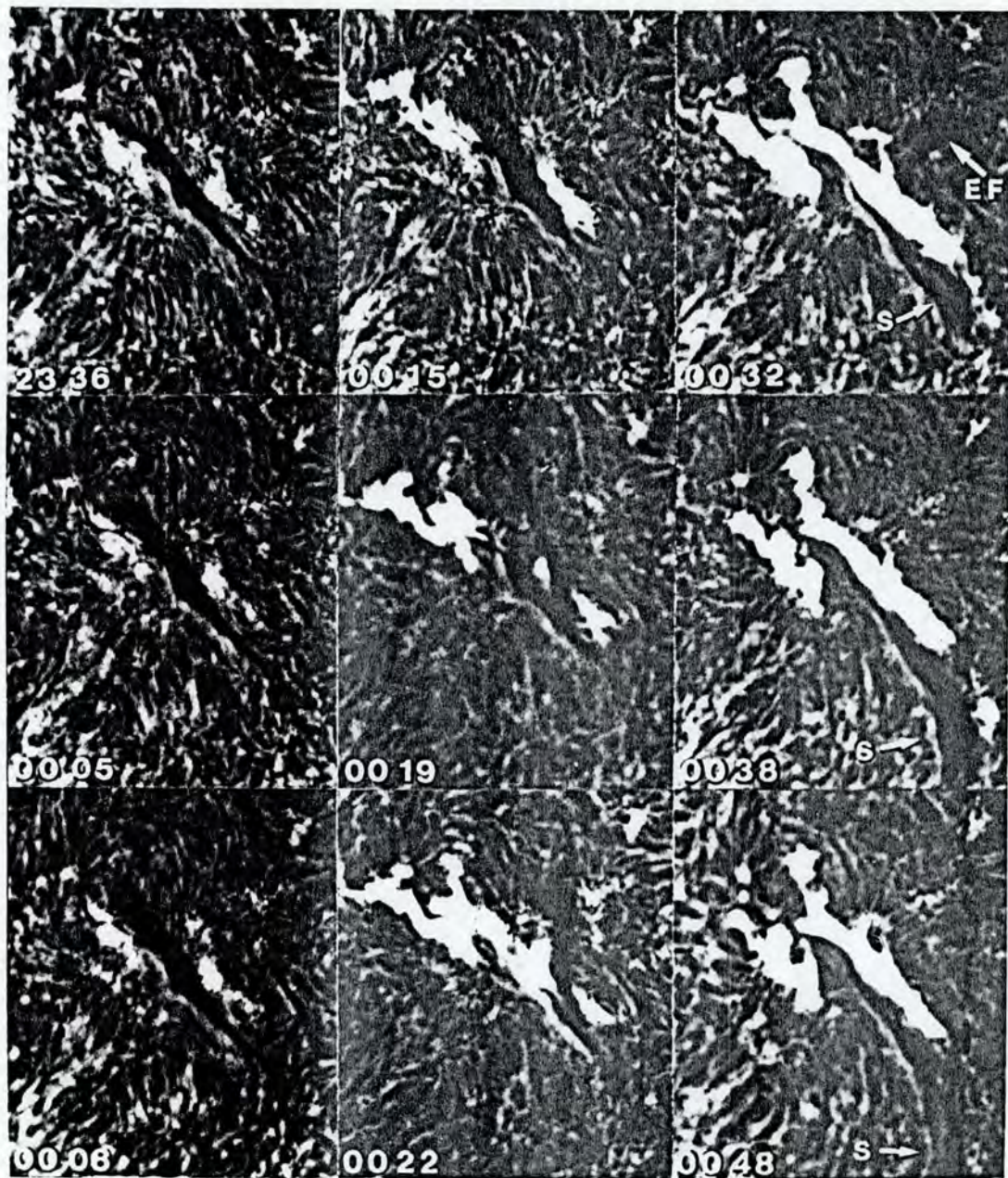
Fulguração = "flare" (espanhol: fulguracion, italiano: brillamenti; francês: éruption chromosphérique) - evento de curta duração (minutos a horas), em que há brusco aumento de brilho em uma região, que geralmente se espalha para zonas vizinhas, podendo criar perturbações que se deslocam por longas distâncias ao longo da superfície do Sol ou se propagam radialmente ou com o vento solar, inclusive atingindo a Terra. Só raramente têm intensidade suficiente para serem observados no contínuo (fulgurações em luz branca). Isso ocorreu em 1° de setembro de 1859 quando Carrington e Hogson fizeram independentemente o primeiro registro conhecido. A maioria das observações são feitas em H α , mas o fenômeno se revela nas outras linhas cromosféricas e em diversos comprimentos de onda, desde radio e microondas até raios X moles e duros, sendo

também observada a emissão de partículas no meio interplanetário. As fulgurações iniciam nas imediações da linha de inversão de polaridade magnética em regiões ativas e muitas vezes envolvem a erupção de um filamento. São classificadas por sua intensidade, pela evolução temporal ou fase (veja: impulsiva, relâmpago, gradual), pela morfologia, pelo tipo de espectro, levando em conta determinada linha ou uma faixa espectral, ou por combinações dessas.

Fulguração compacta = "compact flare" - categoria morfológica, originalmente definida para observações em raios X, em que a região emissora se restringiria a um único arco. Tipicamente tem curta duração (10^3 s) e pouca energia (10^{30} ergs). Seria oposta às fulgurações de duas bandas, que têm uma morfologia mais complexa, maior duração e energia. O termo "compacto" é observacional; essa classificação poderia incluir fulgurações de duas bandas muito pequenas para serem resolvidas. O termo "confinado", é preferido como oposto teórico a fulgurações de duas bandas ou "dinâmicas" ou "eruptivas".

Fulguração confinada = "confined flare" - fulguração que não é eruptiva, isto é, a energia liberada permaneceria restrita ao arco original, sem erupção posterior. Teria apenas uma fase, não havendo posterior injeção de energia, e se manteria sempre "compacta". Seu oposto: dinâmica ou eruptiva.

Fulguração de duas bandas = "two-ribbon flare" - tipo morfológico de fulguração, que tem duas faixas de emissão cromosférica, iniciando junto à zona de inversão de polaridade onde existe (ou poderia existir) um filamento. Elas primeiro aumentam significativamente em área e brilho, depois a região interna vai retornando ao brilho normal enquanto as faixas continuam se afastando entre si, pois em sua periferia continuam surgindo novos focos de alto brilho, delineado as regiões de campos magnéticos mais intensos (plages). Nem sempre é fácil identificar as bandas, havendo casos onde ocorrem mais de duas bandas. Essas fulgurações têm tipicamente energia superior a 10^{32} ergs e duram mais de 10^4 segundos. Considera-se que há continua liberação de energia durante esse tipo de fulguração. Além das bandas, que se situam na cromosfera, elas sempre têm pelo menos mais um componente, os aros pós-fulguração.



Erupção de filamento e fulguração.

Conjunto de filtrogramas HQ mostra, a partir das 23 36 UT (tempo universal) do dia 7 de junho de 1985, o filamento (escuro) se elevando e ficando mais espesso num de seus extremos. Concomitantemente, vemos uma fulguração (brilhante e superesposta), que inicia no extremo onde o filamento se elevou e se estende à medida que o filamento erupciona. A erupção ocorre por partes, o que é bem visível às 00 19 UT (8 de junho) - imagem central. Resquícios do filamento em erupção são indicados por EF na imagem às 00 32 UT (8 de junho). A fulguração é do tipo "de duas bandas", mas há notada assimetria nos dois lados, correspondente à assimetria da plage nos dois lados da linha de inversão de polaridade que o filamento delinea. Note que as duas bandas brilhantes se estendem e se afastam entre si. O material escuro da parte baixa do filamento, que não erupcionou inicialmente, aparece às 00 32 sendo ejetado como uma vaga (surge), indicada por S nas três imagens da última coluna. (Martin, 1989).

Fulguração dinâmica = "dynamic flare" - fulgurações com erupções que resultam em ejeção de massa; correspondem às fulgurações de duas bandas, com arcos pós-fulguração e ejeção de massa na coroa. (termo equivalente: eruptiva; oposto: confinada ou compacta). Nessas fulgurações há contínua liberação de energia durante a fase gradual.

Fulguração ejetiva = "ejective flare" - fulguração associada à ejeção de massa na coroa.

Fulguração em luz branca = "white light flare" - componente de fulgurações que são visíveis no contínuo ótico ou em luz integrada. A emissão em luz branca ocorre no interior das bandas brilhantes em H α e coincide com a fase impulsiva da fulguração. (Svestka, 1981) O contínuo em emissão é raro e seria causado por feixes de partículas energéticas ao atingir a baixa atmosfera; as fulgurações desse tipo geralmente são muito fortes em raios X, radio e na emissão de partículas.



Fulguração eruptiva = "eruptive flare" - similar a fulguração dinâmica. Refere-se à fulguração que romperia a estrutura magnética original, gerando uma fulguração de duas bandas ou (segundo Svestka) ao fenômeno em que a estrutura magnética se rompe de modo semelhante ao que ocorreria em uma fulguração de duas bandas, com ejeção de massa na coroa, mesmo que a emissão H α ou a erupção do filamento típicas da fulguração de duas bandas não seja observada, por escassez de matéria nas regiões onde a protuberância se depositaria. Em compensação, ocorre a ejeção de massa na coroa. É uma generalização da fulguração de duas bandas além das observações em H α . (Oposto: fulguração confinada).

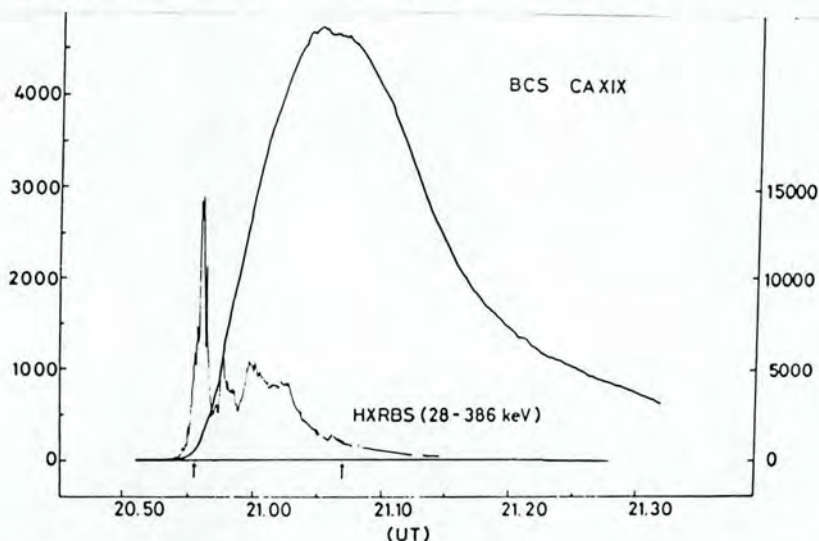
Fulguração gradual = veja gradual

Fulguração impulsiva = veja impulsiva

Fulgurações empáticas (afins) = "sympathetic flares" - fulgurações quase simultâneas, que ocorrem em locais distintos do Sol com frequência muito superior ao acaso, o que indica que estão relacionadas.

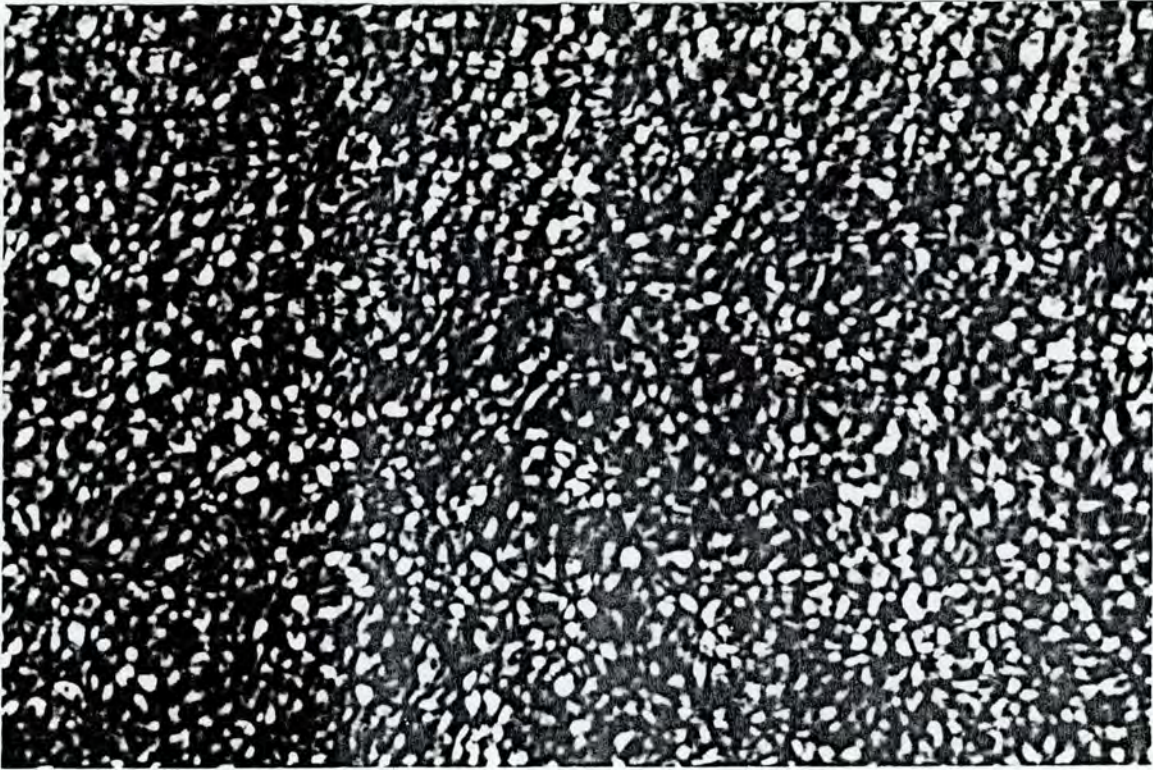
Gatilho = "trigger" - o processo que desencadeia a fulguração. Observações indicam forte correlação com emergência de campos magnéticos, mas o processo de cancelamento pode estar mais diretamente ligado à ocorrência de fulgurações que a emergência, pois esta gera posterior cancelamento. Não há consenso se existe um único fenômeno que leva à perda final de estabilidade. Há casos em que o detonador parece ser a perturbação gerada por outra fulguração (fulgurações empáticas ou afins).

Gradual = "gradual" - diz-se de uma fase, componente ou tipo de fulguração em que o aumento de intensidade é lento e o brilho se mantém por longo tempo, decaindo lentamente e tendo duração superior a 10 minutos. Uma característica dessa fase é a emissão de uma componente térmica de raios X moles, com energia dos fótons menor que 20 keV e uma temperatura da ordem de 10^7 K.



Curva de luz da componente gradual em raios X moles (BCS CaXIX) e da componente impulsiva em raios X duros (HXRBS 28-386 keV) da fulguração de 21 de maio de 1980 observada com o satélite SMM (Solar Maximum Mission). Note que o lento aumento em raios X moles lembra a integral da curva em raios X duros (Neupert, 1968).

Granulação = "granulation" - estrutura celular com diâmetro médio da ordem de 700 km, visível em toda a fotosfera em alta resolução.



Granulação (imagem em luz branca)

Grânulo = "granule" - elemento da granulação visível em toda a fotosfera solar, também chamado grão de arroz. Tem forma poligonal, cerca de 700 km de diâmetro médio e poucos minutos de duração. É decorrente de um padrão de convecção, que forma uma rede poligonal de tamanho variado de 200 a 2000 km de diâmetro. O interior brilhante representa o topo das células, onde o plasma sobe, enquanto os limites escuros são as regiões onde o plasma desce e os campos magnéticos se concentram. São mais fáceis de observar no centro do disco, mas ocorrem em toda a superfície.

Grânulo facular = "facular granule" - granulação observada nas fáculas, mais notável próxima do limbo solar, semelhante à granulação fotosférica.

Grão = "grain" = pontos brilhantes observados em K_{2v} .

Grão de arroz = "rice grain" - equivalente a grânulo.

Grão de café = "coffee grain" - denominação dada por J. Rosch para caracterizar a granulação solar na fase que antecede o aparecimento de manchas solares em determinada região (Mourão).

Grupo de manchas = "sunspot group" - conjunto de manchas solares relacionadas, que usualmente formam uma estrutura magnética dipolar.

Homóloga = "homologous" - característica de fulgurações que se repetem no mesmo local de uma região ativa e que têm estrutura e desenvolvimento semelhantes. Pode se referir à fulguração ou a um componente dela que se repete, como ocorre com vagas ("surges").

Importância de fulguração = "flare importance" - classificação de fulgurações baseada no tamanho da região brilhante durante o máximo brilho em H α . Suas categorias após janeiro de 1966 são:

S - subfulguração ("subflare") menos de 2,0 graus quadrados;

1 - importância 1: de 2,1 a 5,1 graus quadrados;

2 - importância 2: de 5,2 a 12,4 graus quadrados;

3 - importância 3: de 12,5 a 24,7 graus quadrados;

4 - importância 4: igual ou acima de 24,8 graus quadrados.

Um grau quadrado corresponde a $(12\ 140\ \text{km})^2$, igual a 48,5 milionésimos do hemisfério solar visível. Antes de 1966 S era designado 1⁻ e 4 era 3⁺.

Impulsivo = "impulsive" - fase, componente ou tipo de fulguração em que a intensidade aumenta de modo muito brusco, e diminui rapidamente, durando de poucos segundos a alguns minutos. Em geral ocorre no início da fulguração e está associada a uma componente não térmica de emissão de raios X duros, com energia dos fótons acima de 20 keV ($\lambda < 0,1\ \text{nm}$) e também em microondas com frequências acima de 10 Ghz. A emissão é localizada em regiões pequenas e bem definidas, com diâmetros de 3000 a 10 000 km, denominadas núcleos (kernels) da fulguração. Pode estar superposta a uma fase ou componente gradual. Ilustração de componente impulsiva está no verbete "gradual".

Índice compreensivo de fulguração = "comprehensive flare index" - CFI - sistema criado por Helen Dodson Prince e Ruth Hedeman (Dodson e Hedeman, 1971), que leva em conta várias faixas do espectro para avaliar a importância de uma fulguração.

CFI = A + B + C + D + E, onde:

A = importância da radiação ionizante, indicada pelo SID associado (escala de 1 a 3)

B = importância da fulguração em H α (1 a 3; 3 para classes 3-4)

C = log (fluxo rádio de 10.7 cm, em unidades de $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)

D = efeitos dinâmicos no espectro em rádio: explosão tipo II = 1; tempestade no contínuo = 2, explosão tipo IV = 3.

E = log (fluxo em 200 MHz nas unidades de C)

Intergranular = "intergranular" - relativo ao espaço entre os grânulos.

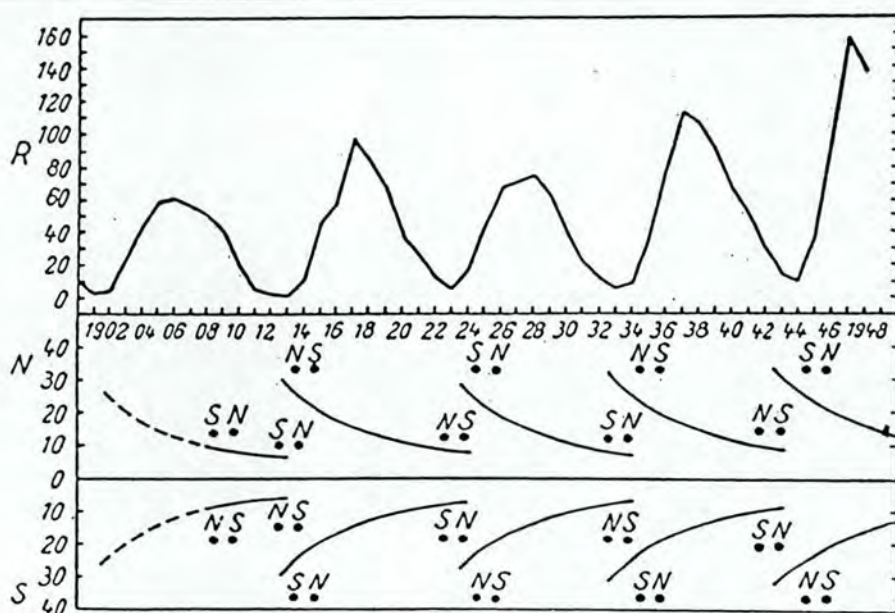
Intermalha = "internetwork" - o mesmo que intramalha.

Intramalha = "intranetwork" - IN- região interna à malha de supergranulação; campos magnéticos fracos de ambas as polaridades, que surgem na parte central dessa região e que se movem radialmente até atingir os limites da malha, onde se acumulam ou cancelam, conforme sejam de mesma polaridade ou polaridade oposta. Ao surgir, os elementos não formam uma unidade dipolar como nas regiões efêmeras, embora, em média, o fluxo magnético de ambas as polaridades seja balanceado.

Jato coronal = "coronal jet" - estrutura especial da coroa solar que aparece sob a forma de prolongamentos radiais que partem da região inferior da coroa. Estão geralmente associados a uma região ativa ou a uma protuberância quiescente. (Mourão)

Lei de Spörer = "Spörer's law" - deslocamento durante o ciclo solar da latitude média onde surgem as manchas, na direção do equador. Essa característica, descoberta por Carrington com base em observações de 1853 a 1861 e confirmada por Spörer em 1879, é representada graficamente no diagrama borboleta.

Lei de Hale = "Hale's law" - lei que indica a polaridade magnética das regiões ativas durante o ciclo solar: as manchas precedentes tem polaridade oposta às manchas seguidoras e sua orientação é a mesma em cada hemisfério e oposta no outro hemisfério. Essa orientação preferencial muda no ciclo solar seguinte, de modo que o mesmo ciclo magnético só se repete após 22 anos. Assim, se a polaridade magnética precedente no hemisfério norte em um ciclo for positiva ou norte, como ocorreu em 1937 (ciclo de número 17) no ciclo seguinte (18) será negativa ou sul. Desse modo, em todos os ciclos pares, o hemisfério norte terá polaridade precedente negativa ou sul e o hemisfério sul terá polaridade precedente positiva ou norte, ocorrendo o oposto nos ciclos ímpares.



Acima, curva do número de manchas solares; abaixo, migração dos grupos de manchas e sua polaridade magnética.

Lei de Joy = "Joy's law" - Joy mostrou que o eixo de grupos de manchas tem uma inclinação média de $5,6^\circ$ em relação à linha leste-oeste, com a mancha precedente mais próxima do equador solar, ao estudar 2633 grupos de manchas desenhados por Carrington e Spörer. (Zirin, 1988, p. 307)

Limbo = "limb" - contorno de um astro; o limite do disco solar, correspondendo ao nível em que a atmosfera do Sol se torna transparente para a luz visível.

Linha neutra = "neutral line" - equivalente a "linha de inversão de polaridade magnética".

Linha de inversão de polaridade magnética = "magnetic inversion line" - limite entre duas regiões de polaridade magnética inversa, que, em projeção, se identifica como uma linha onde a componente longitudinal do campo magnético se anula; os campos magnéticos são geralmente transversais e é comum a presença de filamentos.

Longitude de alta atividade = "active longitude" - longitudes do Sol onde a recorrência de regiões de fluxo emergente é muito freqüente e a probabilidade de formação de regiões ativas é maior, gerando complexos de atividade.

Longitude Carrington = "Carrington longitude" - um sistema de longitudes fixas que rota com o Sol, geralmente (mas imprecisamente) usado como longitude heliográfica.

Longitude heliográfica = "heliographic longitude" - sistema de longitude que gira em uma razão fixa de $13,2^\circ/\text{dia}$ (valor médio da rotação do meridiano central observado com manchas solares).

Macroespículas = "macrospicules" - espículas gigantes que tem sido observadas na região polar da atmosfera solar. Atingem 40 000 km de altura em poucos minutos, quatro vezes superior que as espículas comuns; seu tempo de vida é mais longo, de 40 a 50 minutos; sua temperatura média é de 50 000 K.

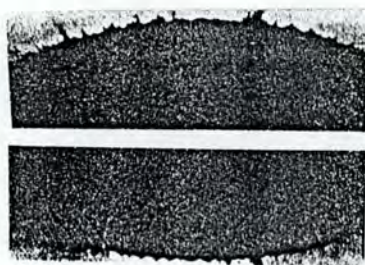


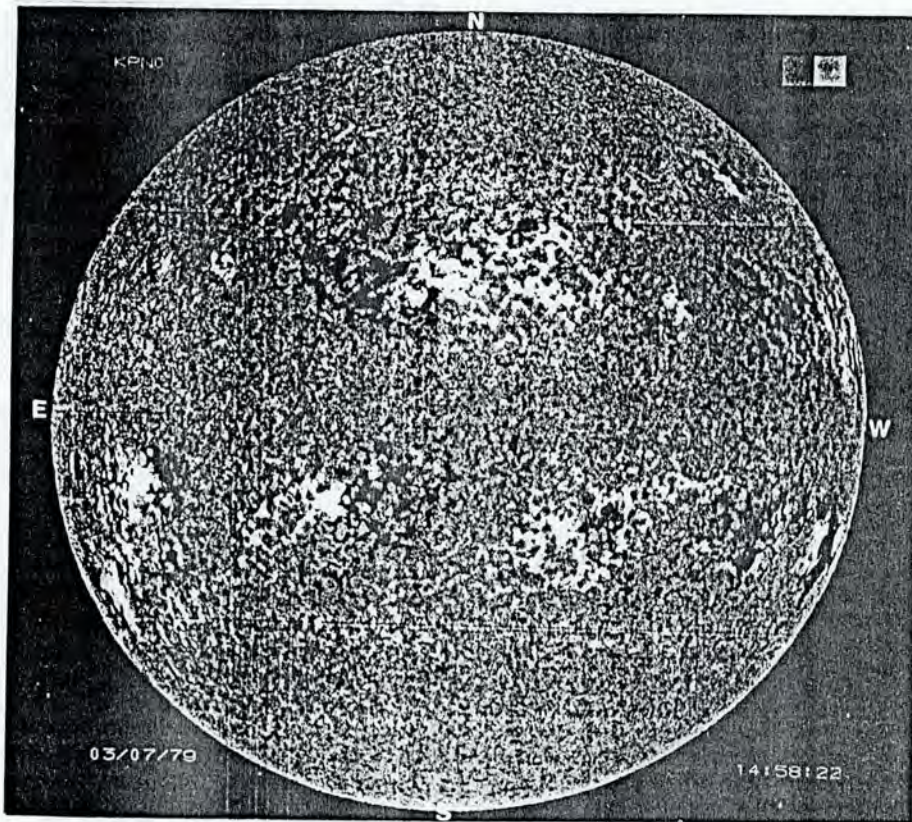
imagem em HeII 304 A mostra macroespículas em ambos polos

Mácula = "macula" (do latim, significa mancha) - uma mancha escura no Sol ou em outro corpo luminoso; termo fora de uso.

Magnetógrafo = "magnetograph" - aparelho para medir o campo magnético; instrumento para mapear o campo magnético do Sol baseado no efeito Zeeman.

Magnetograma = "magnetogram" - gráfico da amplitude de uma ou mais componentes do campo magnético, em função do tempo ou do espaço.

Magnetogramas solares são mapas da intensidade e polaridade do campo magnético solar, geralmente da componente longitudinal na fotosfera, obtidos através da diferença em intensidade das componentes com polarização circular oposta originadas devido ao efeito Zeeman longitudinal. Como os magnetógrafos detetam o campo magnético integrado para a resolução efetiva do instrumento, o valor obtido é o fluxo magnético naquele elemento de área (em geral cerca de 1" x 1"). Há indícios, obtidos através da comparação de diversas linhas espectrais, que os campos magnéticos reais estão concentrados em estruturas muito menores que atingem kilogauss. Geralmente a polaridade negativa ou sul é representada em negro e a positiva ou norte em branco, sendo a intensidade do campo longitudinal indicada pelos níveis de cinza, até um máximo de branco ou de negro.

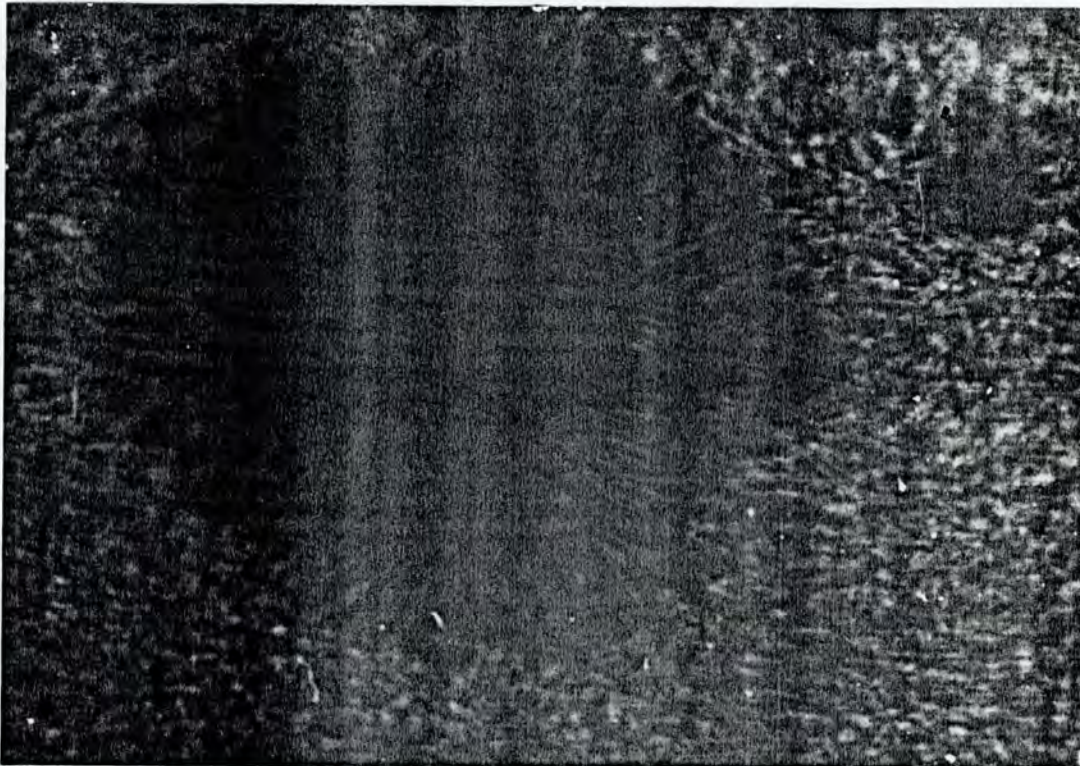


Magnetograma do Sol inteiro.

Malha = "network" - estrutura celular cujo diâmetro médio é cerca de 30 000 km, prevalente na superfície do Sol e que é marcada por diferenças de brilho na fotosfera observadas em algumas linhas de absorção, formando a malha fotosférica, ou em diversas linhas cromosféricas ou da região de transição (H α , H e K do CaII e outras), correspondendo à malha cromosférica. Está relacionada com a supergranulação, um padrão de convecção observável através de

dopplergramas e que arrasta os campos magnéticos para as bordas das células, onde se acumulam, formando um padrão celular, geralmente fragmentado, de campos magnéticos mais intensos, sendo então chamada malha magnética. A correspondência entre a malha magnética e a supergranulação é mais notável nas regiões em que o fluxo magnético é mais intenso. Nos centros de atividade a malha magnética fica bem delineada, sendo chamada malha intensificada ("enhanced network"). A malha pode ser discernida facilmente nas imagens, como no magnetograma acima.

Mancha solar = "sunspot" - região escura, por ter temperatura inferior e irradiar menos que o resto da fotosfera, de forma arredondada e poucos milhares de quilômetros de diâmetro. É a mais notável inhomogeneidade na fotosfera do Sol e corresponde aos mais altos campos magnéticos fotosféricos, entre 2000 e 3500 gauss (Bray e Loughhead, 1965). Geralmente surge em grupos com estrutura dipolar e associada a outros elementos, formando as regiões ativas. Sua duração varia entre poucas horas, para os pequenos poros, e várias rotações solares, para as grandes manchas com penumbra, que chegam a dezenas de milhares de km.



Máximo Medieval = "Medieval Maximum" ou "Grand Maximum" - período de 1120 a 1280 AD em que o número de manchas no Sol teria sido extraordinariamente grande e que teria correspondido a um clima bastante quente.

Máximo solar = "solar maximum" - época do ciclo solar em que o número médio mensal de manchas solares atinge o máximo. Os mais recentes ocorreram em dezembro de 1979 e em julho de 1989. Esse máximo teve outro pico no 1º semestre de 1990 e foi o que teve subida mais repentina.

Mesogranulação = "mesogranulation" - uma estrutura celular de tamanho intermediário entre a granulação e a supergranulação (escala de 7 Mm) descoberta por November et al. (1981). Analisando dopplergramas, Wang (1989) encontra estrutura nessa escala, mas o padrão de velocidades não mostra propriedades compatíveis com convecção celular e não se mantém coerente por mais de uma hora. Usando fotometria bidimensional de espectrogramas e fotografias diretas da granulação, Abdussamatov (1993) acha distribuição espacial estatisticamente não homogênea dos grânulos e grandes aglomerados granulares em células mesogranulares de 6 a 9".

Mínimo de Maunder = "Mauder minimum" - período de 1645 a 1715 em que o número de manchas registradas foi muito pequeno, conforme descoberto por Maunder em 1893. Outros índices, como a ocorrência de auroras confirmam que atividade solar foi muito reduzida. Há indícios que fenômenos semelhantes ocorreram em outras épocas e que esses longos períodos de inatividade do sol estão relacionados com variações climáticas na Terra.



Mínimo de Spörer - período entre 1400 e 1510, em que o número de manchas no Sol teria sido muito reduzido.

Mínimo solar = "solar minimum" - quando o número médio mensal de manchas é mínimo. Os mínimos regulares se sucedem em intervalos de

cerca de 11 anos, seguindo o ciclo solar. Os últimos mínimos regulares ocorreram em junho de 1976 e em setembro de 1986. Também se denomina "mínimo" a períodos mais extensos, compreendendo muitos ciclos, quando as manchas só muito raramente seriam detetadas, de modo que a própria ocorrência do ciclo se tornaria difícil de identificar: veja Mínimo de Maunder ou de Spörer. Cogita-se que esses períodos correspondem a épocas de clima muito rigoroso, em que as geleiras avançam.

Moustache = termo francês para bomba de Ellerman, baseado na aparência da linha espectral, que parece um bigode (moustache, em francês), por ter maior intensidade nas asas.

Núcleo da fulguração = "flare kernel" - componente muito compacta e brilhante em H α , correspondendo à região onde há maior emissão de raios-X duros e ao local onde a fulguração inicia. Em H α a emissão desses núcleos geralmente tem duração curta, mas se renova à medida que as bandas da fulguração se espraiam. Ela pode ser tão intensa quanto à das duas faixas extensas de emissão.

Número de Wolf = "Wolf number" - termo histórico para número de manchas solares, originário do procedimento geral, que R. Wolf iniciou em 1849 para computar o número de manchas no sol.

Número de manchas solares = "sunspot number" - R - índice diário de atividade solar, definido como $R = k (10 g + s)$ onde
s = número de manchas individuais
g = número de grupos de manchas e
k depende do observatório (= 1 para Zurique)

Número médio (mensal ou anual) de manchas solares = ("monthly" ou "annual") "mean sunspot number" - índice de atividade média, obtido a partir de R, mas considerando a média mensal ou anual.

Número alisado de manchas solares = "smoothed sunspot number" - média ponderada, obtida considerando tanto o período vigente (geralmente mensal), como o que antecede e o que segue, aos quais é atribuído peso menor. O valor médio nos últimos ciclos do número máximo de manchas no Sol foi 116 ± 37 anos.

Número do ciclo solar = "solar cycle number" - números sucessivos atribuídos ao ciclo solar, começando arbitrariamente pelo que teve máximo em junho de 1761.

Onda Moreton = "Moreton wave" ou "blast wave" ou "flare wave"-distúrbio que se propaga horizontalmente na atmosfera solar como uma frente brilhante de emissão difusa, após uma fulguração intensa. Desloca-se ao longo do disco solar com velocidade típica de 1000 km/s, sendo mais facilmente detetada na asa da linha H α . Pode causar a erupção de filamentos no seu caminho.

Penumbra = "penumbra" - componente das manchas solares maiores, é uma região de brilho intermediário na periferia da umbra. Tem estrutura radial, com longas fibrilas escuras e brilhantes que partem da umbra, delineando os campos magnéticos divergentes. Tende a ser simétrica nas manchas maiores, mas pode ser assimétrica, envolvendo só um lado, nas manchas menores e irregulares. Observe a penumbra na ilustração da mancha solar.

Período de Gleissberg ou período de 90 anos - componente periódico com duração aproximada de 90 anos que modularia o ciclo solar, fazendo que o número máximo de manchas de ciclos sucessivos seja diferente, alternando-se em cerca de 8 ciclos de 11,2 anos. Alguns atribuem 80 anos a esse período. Outros períodos também se salientam nos periodogramas: 5, 8, 10, 22 e 180 anos.

Pernas = "legs" - parte inferior, quase radial e pouco curva dos arcos ou das protuberâncias, na qual geralmente desce matéria, que atinge a fotosfera nos "pés".

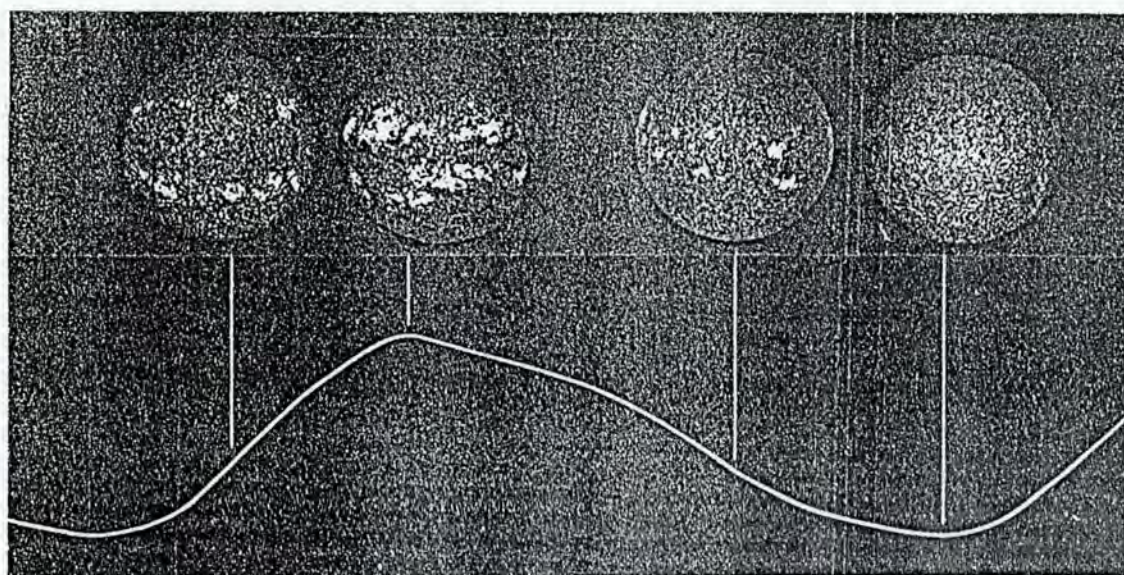
Pés = "footpoints" - pontos, geralmente brilhantes, que marcam a interseção das pernas dos arcos ou aros com a fotosfera.

Plaga = termo adaptado do francês; veja plage.

Plaga facular = sinônimo de fácula de região ativa; ver plage.

Plage = "plage" (significa praia em francês) zona brilhante de forma irregular, em regiões ativas, que pode ser observada nos

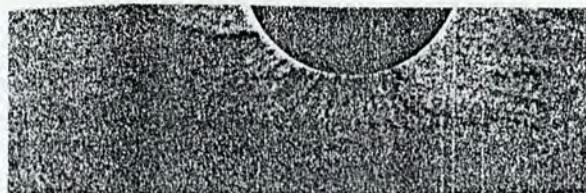
núcleos centrais das linhas, em extensa faixa de comprimentos de onda, tais como $H\alpha$ e $H\beta$, H e K do Ca II. Sua aparência na diversas regiões da mesma linha difere bastante: são brilhantes no centro de $H\alpha$, mas tornam-se escuras em relação aos arredores nas asas dessa linha; em $H\beta$ são sempre escuras em relação às regiões vizinhas. Podem se referir às fâculas (no francês "plage faculaire") em observações nas linhas cromosféricas e em regiões ativas, sendo sinônimo de fâculas de regiões ativas. Mas também podem significar elementos da fâculas, correspondendo então a cada uma das concentrações de campo magnético suficientemente intensas para parecer distintamente brilhantes na cromosfera, mas não tão concentradas que forme manchas ou poros. Nessa conceituação, as fâculas cromosféricas das regiões ativas seriam um conjunto de plages; as demais fâculas seriam um conjunto de elementos da malha intensificada. Entretanto, não há uma separação bem definida entre elas, pois a malha intensificada é formada principalmente pelos remanescentes de regiões ativas que lentamente se dispersam; a própria fâcula polar também teria origem nos campos magnéticos de regiões ativas, que tendem a migrar em direção aos polos. Observando um filtrograma de disco inteiro, entretanto, é fácil notar a diferença de intensidade dos dois tipos de fâculas, as das regiões ativas e as do resto do disco. Modernamente usa-se o termo para emissão em todas regiões do espectro, correspondendo às várias alturas da atmosfera. A plage em raios X, "X-ray plage" e a plage em rádio, "radio plage", ocorrem em alturas coronais baixas; as de ondas métricas, na coroa mais distante.



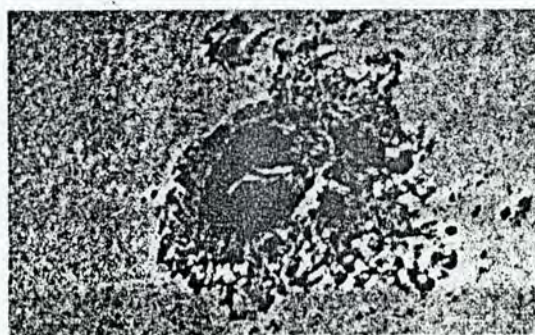
Espectroheliogramas na linha de cálcio mostram a variação em área e latitude nos diferentes estágios do ciclo solar, indicados pela curva inferior

Plagete = "plagette" - pequena plage, geralmente menos brilhante; termo usado como diminutivo de plage; as características são comuns.

Pluma polar = "polar plume" - estrutura da coroa solar que consta de filamentos finos que partem dos polos e se estendem radialmente, divergindo levemente ao seguir o campo magnético geral do sol.



Ponte de luz = "light bridge" - uma faixa luminosa estreita que penetra ou cruza a umbra de uma mancha solar, observada em luz branca. Geralmente se desenvolve lentamente e dura vários dias, sendo sinal de divisão da mancha e dissolução da região. As mais brilhantes ocorrem na fase mais ativa do grupo de manchas, associadas a plages brilhantes.



Ponto Brilhante = "bright point" - elemento brilhante no limite de resolução do instrumento; como a resolução depende do comprimento de onda e do instrumento, não se tratam usualmente do mesmo fenômeno. Em $H\alpha$, um transiente de área menor que 20 milionésimos do hemisfério solar. Pontos brilhantes em K_{2v} também são denominados grãos (grains), estatisticamente tem propriedades semelhantes aos grãos escuros em $H\alpha$; logo pontos brilhantes em K_{2v} corresponderiam a elementos escuros e não aos pontos brilhantes em $H\alpha$; a emissão ou ocorre em K_{2v} ou em K_{2r} , raramente em ambas as asas.

Ponto brilhante em raios X = "X-ray bright point" - observados com o Skylab e instrumentos em foguetes, ocorrem em todo o Sol, inclusive nos buracos coronais. Sua correspondência com outros fenômenos ainda não foi bem estabelecida; a resolução em raios X é inferior. Inicialmente foram identificados com regiões efêmeras, pois em muitos casos correspondiam a elementos dipolares nos magnetogramas e tinham duração de várias horas ou poucos dias, compatível com as regiões efêmeras. Mais tarde verificou-se que em

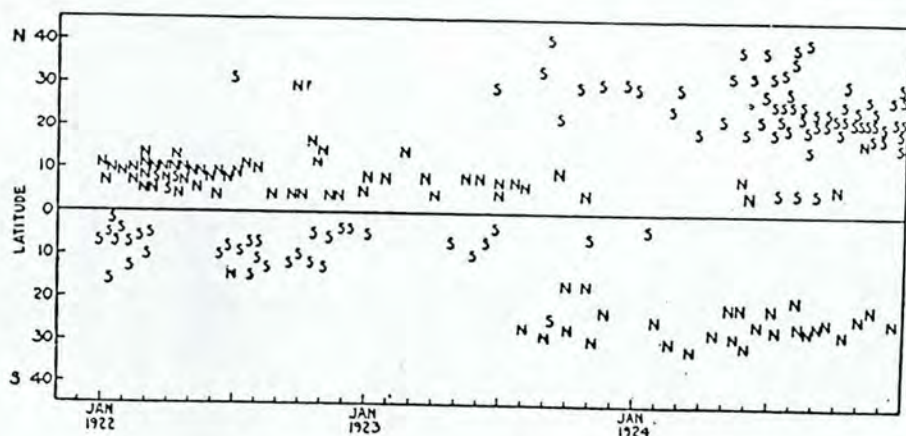
geral não eram regiões efêmeras verdadeiras, mas "encontros" de elementos de polaridade oposta de origens diversas, inclusive casos em que um dos polos de região efêmera se aproximava de elementos de polaridade oposta, mas ainda não sabemos as circunstâncias que levam à liberação de energia em raios X. Na ilustração do buraco coronal podemos ver os pontos brilhantes.

Poros = "pore" - manchas sem penumbra, pequenas (1" a 3"), mais escuras que os espaços escuros intergranulares. Tem curta duração (dezenas a poucas centenas de minutos), podendo aumentar e se transformar em uma mancha com penumbra ou diminuir e desaparecer.

Praia = ver plage.

Preaquecimento = "preheating" - aquecimento gradual do plasma que antecede uma fulguração.

Precedente ou líder = "preceeding", Parte da frente ou a oeste de uma região ativa, tendo como referência o movimento de rotação do Sol; a polaridade magnética a ela correspondente, tendo em vista a orientação usual do ciclo solar vigente, que é oposta em cada hemisfério e se alterna em ciclos consecutivos, conforme a lei de Hale.



Polaridade magnética e latitude para manchas p (precedentes).

Precursor = "precursor" - atividade nas imediações do local onde uma fulguração irá ocorrer, antecedendo a fase impulsiva que caracteriza seu início. A ativação de protuberâncias, que corresponde à elevação gradual do filamento e ou sua oscilação (filamento piscando) é o mais reconhecido. Também são arrolados:

campos magnéticos cisalhados, movimento rápido e não usual das manchas, brilho excessivo na região.

Pré-fulguração = "pre-flare" - estágio da região ativa que leva necessariamente à ocorrência de uma fulguração; processo gradual que cria as condições para a ocorrência posterior da fulguração. Envolve invariavelmente regiões ativas, portanto campos magnéticos intensos e aquecimento do plasma. Nessa fase é observada a lenta ascensão do meio ou de um dos extremos do filamento, acompanhada do aumento de absorção. Além disso arrola-se: emergência de fluxo magnético, rápido movimento de manchas solares, "cisalhamento" dos campos magnéticos e cancelamento dos campos magnéticos junto à linha de inversão de polaridade. Há pouco consenso de quais desses são necessários ou suficientes para levar à fulguração, de modo que processos tidos como precursores também são listados como pré-fulguração. Entretanto, os termos tem um sentido bastante distinto, pois o precursor está estatisticamente ligado à fulguração, mas não necessariamente indica que ela ocorrerá.

Proeminências (termo derivado do inglês) = protuberâncias.

Protuberâncias = "prominences" - regiões brilhantes que se projetam acima do disco solar, podendo atingir alturas de até 300.000 km, sendo visíveis durante eclipses ou com o uso de espectroscópio. Como seu espectro se assemelha ao da cromosfera, algumas vezes são consideradas fenômenos comosféricos, mas pela sua altura ocorrem na coroa. Podem subsistir por várias rotações solares, mesmo após todas as manchas de uma região ativa terem desvanecido. As protuberâncias vistas contra o fundo escuro do céu são brilhantes; os filamentos projetados sobre a fotosfera brilhante parecem escuros, mas ambos são o mesmo fenômeno. Observacionalmente, qualquer estrutura brilhante que se projete acima do limbo poderá ser denominada protuberância, mesmo que se trate de matéria ejetada por uma fulguração e não tenha a estrutura nem a configuração magnética de uma protuberância típica, que será vista como filamento no disco. Por isso os dois termos continuam a ser usados. Em ambos os casos só podemos ver a projeção em duas dimensões, mas os dados se completam: à medida que o Sol rota, o plano de projeção vai se alterando, o que revela seus diversos aspectos: a medida que a protuberância brilhante se projeta no disco vai surgindo um filamento escuro. Vista de cima,

como filamento no centro do disco, parece uma longa fibra; vista no limbo mostra uma estrutura de arcos, com outros componentes que delineiam uma estrutura complexa e diversificada. Algumas vezes tem limites mais definidos e uniformes na parte superior, e são mais irregulares na parte inferior, onde descem projeções ou pernas ("legs") ao longo dos arcos mais definidos, mas outras vezes tem arcos inferiores bem delineados e uma estrutura superior em cortina, que se eleva verticalmente. Geralmente mostram continuidade com a estrutura cromosférica, com base na fotosfera, onde estariam os pés (footpoints), mas alguns arcos não estão preenchidos de matéria visível até a base. Uma protuberância bem desenvolvida tem cerca de 200 000 km de extensão, 40 000 km de altura e menos de 6 000 km de espessura. (Kiepenheuer, p.395) A configuração magnética da fotosfera indica que os filamentos estão acima da linha de inversão de polaridade, em zona de baixo campo magnético radial, denominada "canal de filamento", onde os campos magnéticos são predominantemente transversais e ao longo do filamento.

Protuberância ativa = "active prominence" - protuberância que está se alterando rapidamente ou oscilando, indicando provável erupção em breve.

Protuberância em aro = "loop prominence" ou "flare^s loop" ou "post-flare loop" - o mesmo que aro pós-fulguração)

Protuberância eruptiva = "eruptive prominence" - protuberância que erupciona durante uma fulguração. A diferença entre borrifos e protuberâncias eruptivas no limbo não é fácil, mas enquanto os borrifos tendem a alcançar a velocidade de escape característica dentro de um ou dois minutos após o início do fenômeno, as protuberâncias eruptivas começam a ascender lentamente e acelerar para altas velocidades apenas numa fase posterior. Entretanto, quando muitos eventos são estudados, parece haver uma transição contínua entre esses dois tipos de erupção (Svestka, 1981, p.111). Tandberg-Hansen, Martin e Hansen (1980) concluíram que a maioria dos borrifos tem origem em protuberâncias em erupção (Martin, 1989).

Protuberância eruptiva no limbo = "eruptive prominence on limb" (EPL) - uma protuberância solar é ativada e ascende além do limbo.



Uma protuberância erupciona além do disco numa fulguração.

Para ressaltar a protuberância, que é muito menos intensa que o disco solar, é feita uma composição com imagens do disco e do perímetro do Sol em diferentes tempos de exposição, ambas na linha HQ. As outras protuberâncias se projetam pouco além do disco; no disco elas correspondem aos filamentos escuros. A fulguração é muito brilhante em contraste com o disco. As demais zonas brilhantes são plages.

Elementos escuros em contraste com o disco:

- manchas solares redondas (junto a plages);
- filamentos (longos e bem escuros);
- fibrilas (mais curtos e com pouco contraste)

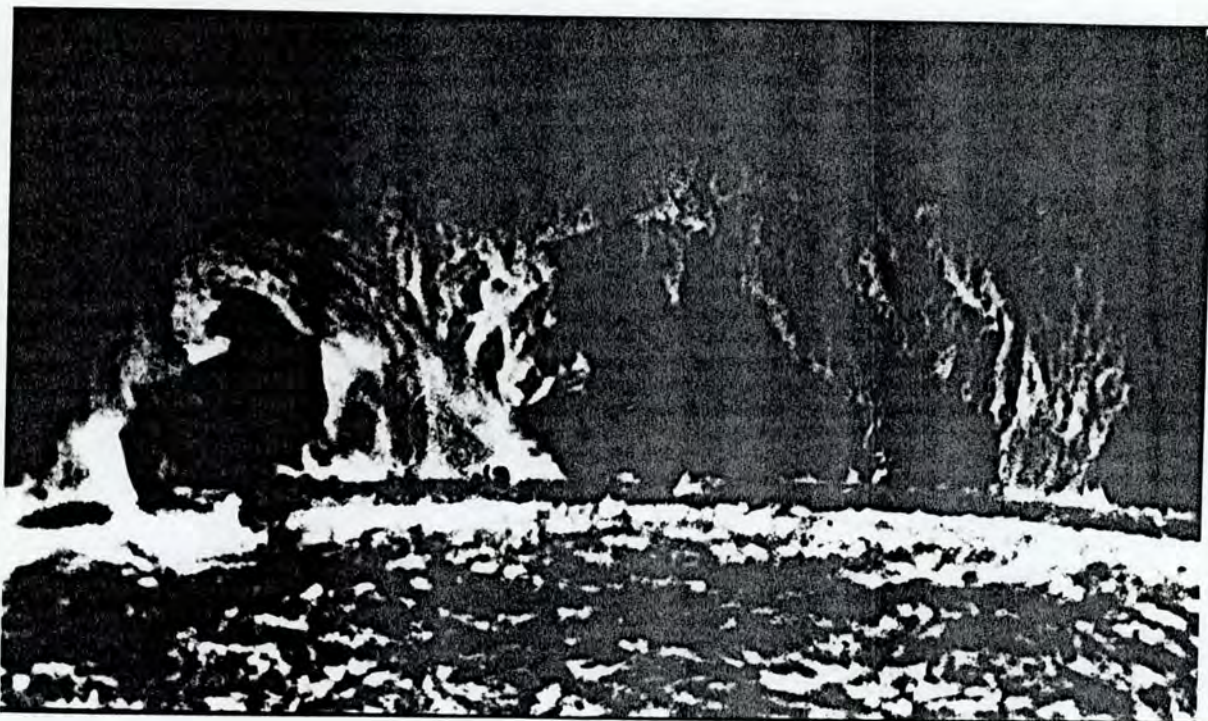
Elementos mais brilhantes que o disco:

- plages
- fulguração

Nota-se globalmente na imagem:

- escurecimento do limbo (decréscimo gradual da intensidade luminosa do centro para o bordo).
- duas zonas paralelas ao equador solar (zonas reais), com regiões brilhantes (plages);
- os filamentos são mais longos e mudam de direção quando se aproximam do polo.

Protuberância quiescente = "quiescent prominence" - as protuberâncias mais persistentes, que sofrem menos alterações e que podem durar até 6 ou 8 rotações. Tem forma de funis ("funnels") ou aros ("loops") quando associadas a manchas solares (Bray e Loughhead, p. 253) ou de cortina ("curtain"), troncos de árvores ("tree trunks"), árvores ("tree"), sebes ("hedgerows"), arcos ("arches") ou montes ("mounds") que se estendem por centenas de milhares de km no disco solar. Os elementos individuais estão em constante movimento, deslocando-se ao longo dos arcos, embora a forma geral da protuberância se mantenha estável. Elas devem ser sustentadas primordialmente pelos campos magnéticos, o que se depreende não só por sua forma, como pelo estudo dos longos filamentos escuros visíveis no disco, que tem uma configuração magnética bem determinada e são o mesmo fenômeno em diferente perspectiva. A ilustração a seguir mostra um exemplo de protuberância quiescente.



Quiescente = "quiescent" - referente à fase pouco ativa de um fenômeno solar - protuberância quiescente é aquela que mostra pouco movimento em larga escala e se mantém por longos períodos (meses) sem alterações notáveis. Ocorre em áreas de Sol quieto, entre regiões ativas ou em altas latitudes solares onde regiões

ativas raramente surgem. Note-se que "quiescente" se refere a uma fase ou época, enquanto "quieto" se refere a local.

Quietos = "quiet" - referente à qualquer zona do Sol não ocupada por regiões ativas, isto é, onde manchas e fenômenos relacionados estão ausentes e os campos magnéticos são mais fracos. Também se aplica aos fenômenos que ocorrem em toda a superfície do Sol, independente da fase do ciclo solar. Inclui regiões de alta latitude ou muito próximas do Equador solar onde nunca há regiões ativas, bem como as latitudes intermediárias, nas longitudes onde não hajam regiões ativas no momento. O termo "quieto", usado em oposição a "ativo", mostra-se inadequado, pois os elementos se alteram muito rapidamente, devido às oscilações de 5 minutos e aos padrões de convecção. Os campos magnéticos fracos fora das regiões ativas estão em constante alteração. São considerados do "sol quieto" os fenômenos que ocorrem em todas as latitudes, independente da fase do ciclo solar, o que inclui regiões ativas efêmeras cuja vida média é de poucas horas, raramente aparecendo no dia seguinte, e que não chegam a formar manchas. Sua variação em latitude e durante o ciclo solar é bem mais regular que a dos fenômenos característicos das regiões ativas, mas ainda não foi estabelecido um critério que mostre um comportamento bimodal das regiões ativas normais e efêmeras.

R - número de manchas solares visíveis em determinado instante.

R_{max} - número máximo de manchas atribuído a um ciclo solar.

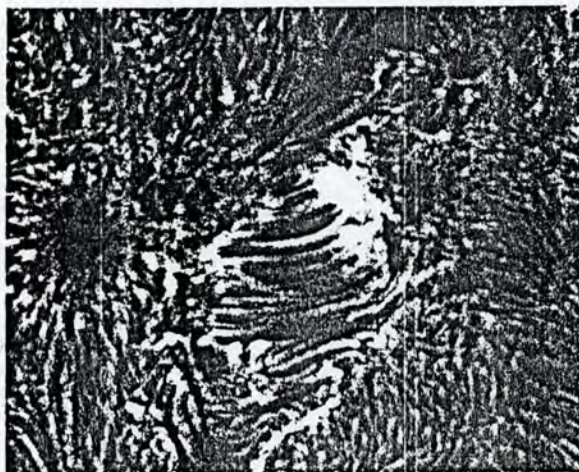
Reações nucleares em fulgurações = "nuclear reactions in flares" - linhas atribuídas a várias reações nucleares são observadas em raios X; a mais brilhante geralmente ocorre em 2,2 MeV, emitida quando neutrons são capturados por protons para formar deuterons.

Rede = malha (fotosférica, cromosférica ou magnética)

Região ativa = "active region" - tradicionalmente, qualquer parte da atmosfera solar que exhibe excesso de emissão H α . Zona onde está ocorrendo a formação de manchas solares e demais fenômenos característicos da atividade solar, como fáculas (em luz branca), plages, fulgurações, protuberâncias (nas linhas cromosféricas) e emissão nas diversas faixas do espectro, que estão associados a

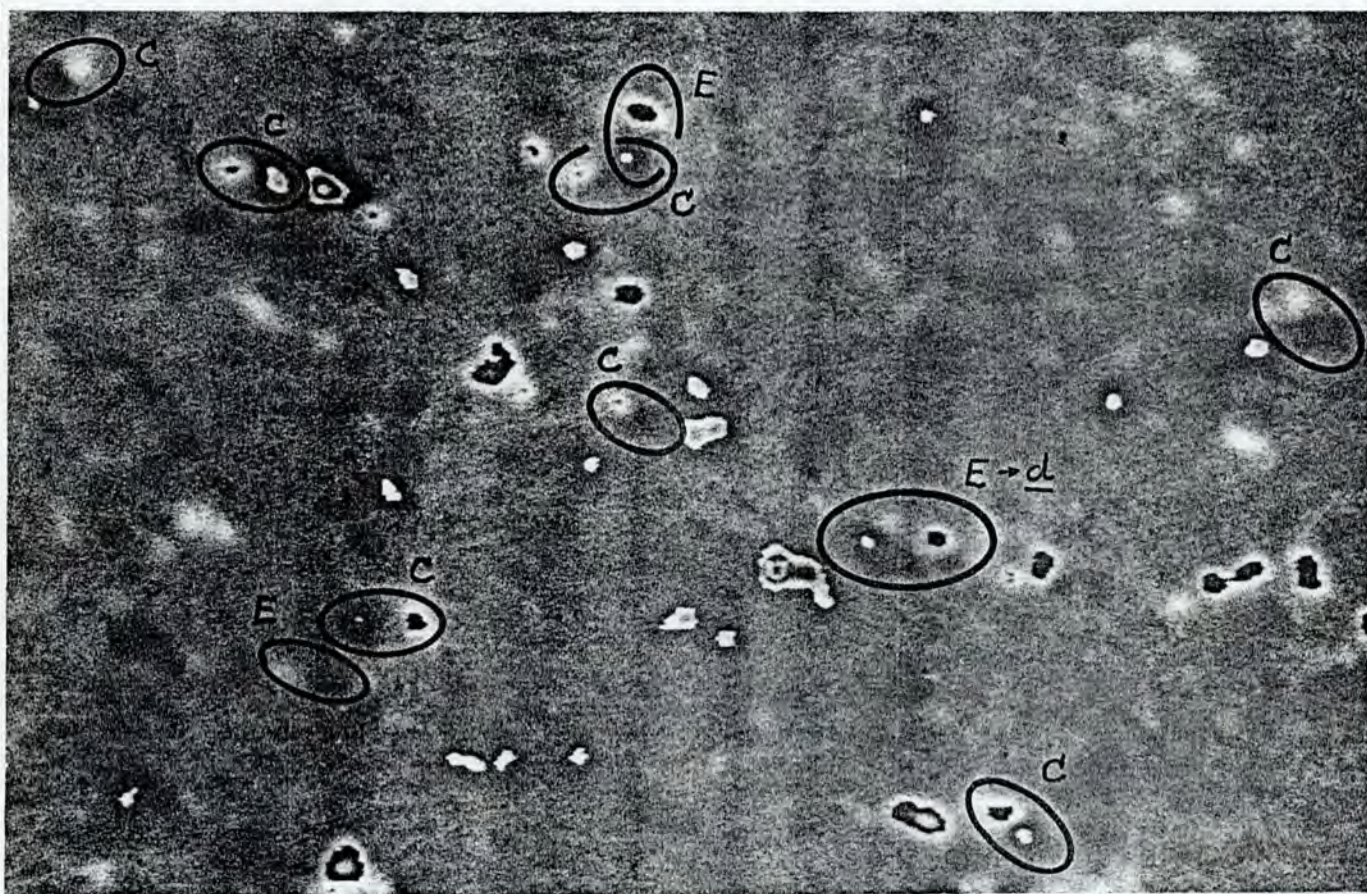
intensos campos magnéticos. Forma estrutura magnética dipolar, geralmente orientada quase paralelamente ao equador solar. Uma região ativa típica contém uma ou mais manchas, mas, mesmo antes de formar manchas, fica extremamente brilhante. Nessa fase é denominada região de fluxo emergente. Na parte precedente geralmente se formam as manchas maiores e mais estáveis. Em alguns casos, novas regiões de fluxo emergente surgem nas imediações, aumentando a duração e tamanho do conjunto, que pode se tornar um complexo de atividade e sobreviver por várias rotações solares. Em geral, as manchas diminuem e se fragmentam, restando inicialmente alguns poros e finalmente apenas uma plage dipolar, que vai se espalhando devido à convecção e à circulação meridional, até se tornar indistinguível das outras partes da superfície, formando grandes áreas unipolares. Não há um critério consensual para distinguir regiões ativas de regiões efêmeras, que foram inicialmente denominadas regiões ativas efêmeras (ephemeral active regions), mas que, na medida que ocorrem em toda a superfície do sol e em todas as fases do ciclo, tendem a ser classificadas como fenômeno de sol "quieto".

Região de fluxo emergente = "emerging flux region" - EFR - a fase de crescimento de uma região ativa, caracterizada em H α pela presença de uma plage dipolar brilhante com os polos opostos ligados por sistemas de filamentos em arco. Os magnetogramas revelam grupos organizados de dipolos elementares.



Região de protuberância ativa - porção do limbo solar onde se deslocam protuberâncias ativas. (Mourão 1987)

Região efêmera = "ephemeral region" - ER - região ativa de curta duração. Foram classificadas inicialmente como fâculas bipolares na linha de Cálcio com menos de dois dias de duração, mas atraíram maior atenção quando observadas em magnetogramas como bipolos com fluxo magnético da ordem de 10^{18} Mx e pequenas dimensões. Geralmente não atingem o estágio de formarem manchas ou poros, mas podem mostrar caráter complexo, contendo múltiplos polos magnéticos como a região d. Tendo sido definidas por sua duração, incluem casos com poros em um ou ambos os polos magnéticos. Sua distribuição inclui altas latitudes, ao contrário das regiões ativas típicas, sendo até classificadas como características do "sol quieto", apesar de não ter sido encontrado critério independente capaz de distingui-las das demais regiões ativas. A seguir mostramos um magnetograma com pequenas regiões efêmeras e com dipolos em cancelamento; as inversões preto/branco representam campos mais intensos. Uma montagem de magnetogramas com a evolução de uma região efêmera complexa está em dipolos magnéticos elementares.

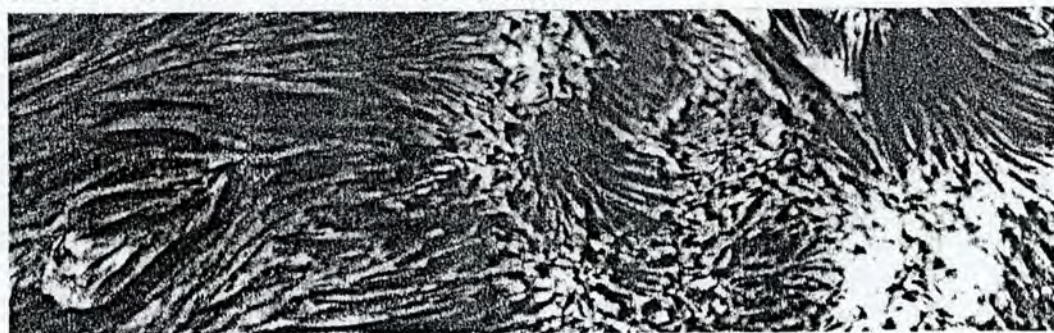


Magnetograma com pequenas regiões efêmeras, indicadas por E, que podem ser confundidas com dipolos em cancelamento (C)

Região M = "M region" - região do Sol designada por J. Bastels, que seria responsável pela produção de distúrbios magnéticos recorrentes no período sinódico de rotação solar, mas que não estava associada a manchas ou qualquer outro fenômeno visível no Sol. Corresponde aos buracos coronais observados em raios X.

Relâmpago = "flash" (procure espectro relâmpago para "flash spectrum") - fase em que há um rápido aumento na intensidade e largura da linha $H\alpha$; dura tipicamente 3 minutos. Priest (1981) alerta que a fase relâmpago não deve ser confundida com a fase explosiva, pois nessa última há um aumento não usual na área da fulguração, sendo a mesma extremamente rara.

Roseta = "rosette" - conjuntos de fibrilas que se estendem radialmente a partir de um elemento da malha, em região de campos magnéticos fracos. Às vezes quase circulares, em outras são assimétricas, parecendo ter a forma de cometa.



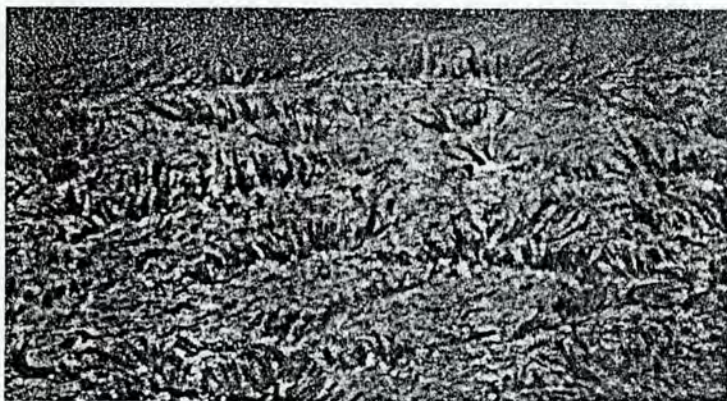
Rotação diferencial = "differential rotation" - DR - padrão de rotação dependente da latitude, que é observado no Sol e outros corpos gasosos. A rotação é mais rápida no Equador Solar, onde o período (sinódico) é de cerca de 25 dias, e mais lenta em latitudes maiores, chegando a atingir 34 dias no equador solar. Os parâmetros da rotação como função da latitude ϕ : $A + B \sin^2 \phi + C \sin^4 \phi$ dependem do fenômeno traçador, sendo:

- A = 14,38 ; B = 2,80 ; C = 0 para manchas solares;
- A = 14,4 ; B = 1,5 ; C = 0 para filamentos;
- A = 14,37 ; B = 2,30 ; C = 1,62 para campos magnéticos;
- A = 14,24 ; B = 0,4 ; C = 0 para buracos coronais.

Ruga = "crinkle" - pequena estrutura brilhante em U, mais notável na asa da linha $H\alpha$, em fotografias de excepcional qualidade. Seu conjunto forma a filigrana e dá um aspecto difuso à granulação nas regiões da malha em que se concentram os campos magnéticos. São levemente menores que os grânulos.

Rudimentar = "rudimentary" - tipo de penumbra caracterizada por uma estrutura granular de pouca extensão e incompleta, que não chega a rodear a umbra. Ocorre nas fases de decaimento e de formação da penumbra. Penumbra rudimentar pode ser vista na ilustração de mancha solar.

Salpico = "mottle" - estruturas cromosféricas alongadas irregulares que, vistas contra o disco em H α , tanto podem ser brilhantes como escuras. Seriam correspondentes aos espículos, que aparecem no limbo, pois tem distribuição de velocidades semelhante, que indica matéria que é ejetada e retorna, em princípio ao longo de uma linha de campo magnético. A distribuição de velocidades inferida para ambas as estruturas é semelhante, mas análises cuidadosas mostram que não há ajuste perfeito, o que deixa o problema em aberto. Os salpicos formam uma estrutura que delinea a malha cromosférica.



Salpicos na asa vermelha da linha do hidrogênio (H α + 1 A)

Satélites = "satellite" - referente a manchas solares que são pequenas e se encontram nos arredores de uma mancha grande.

Seguidora = "following", parte da região ativa que segue ou fica atrás em relação ao movimento de rotação solar; também se refere à polaridade magnética correspondente.

SID = "sudden ionospheric disturbance" - distúrbio ionosférico repentino.

Sistema de filamentos em arco = "arch filament system" - AFR - conjunto de filamentos que formam arcos quase paralelos, com alto contraste, que surgem nas regiões de fluxo emergente ligando as

polaridades magnéticas opostas, delineadas por plages brilhantes. O sistema se mantém enquanto o fluxo magnético está aumentando (novos dipolos emergem na mesma região), mas cada um dos arcos individuais tem curta duração. Os novos arcos vão se formando em orientação levemente diferente, de modo que o eixo principal da região ativa gira.

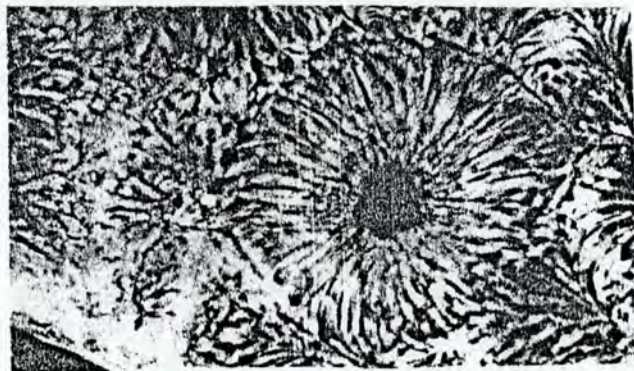
Sobressalto = " ? " - aumento brusco, em geral de fraca duração (de ordem do segundo), de intensidade de emissão solar no domínio das frequências radioelétricas. (Mourão 1987)

Supergranulação = "supergranulation" - SG - estrutura celular com tamanho médio da ordem de 30 000 km, correspondente a um padrão de convecção maior que a granulação comum, que pode ser identificado diretamente em dopplergramas, mostrando velocidades horizontais de 0,3 a 0,4 km/s. Os campos magnéticos acumulam nas fronteiras entre as células e formam a malha magnética, mas os dois padrões não são necessariamente iguais, pois a malha magnética pode não ficar suficientemente demarcada quando os campos são muito fracos. Também determina o padrão de brilho da cromosfera (malha cromosférica). Não foram detetadas diferenças significativas na supergranulação devido à fase do ciclo solar ou à localização.

Supergrânulo = "supergranule" - cada um dos elementos da malha de supergranulação, que dura várias horas ou um dia.

Surge = (significa vaga ou onda) - termo inglês que se internacionalizou, pois também é usado na literatura especializada em francês; veja vaga.

Superpenumbra = "superpenumbra" - região ao redor das manchas solares além da penumbra, que tem brilho fotosférico normal, mas em H α mostra um anel com estrutura radial filamentar. A superpenumbra é delineada por fibrilas radiais = "superpenumbral fibrils". O padrão tende a aumentar com velocidade típica de 200 m/s.



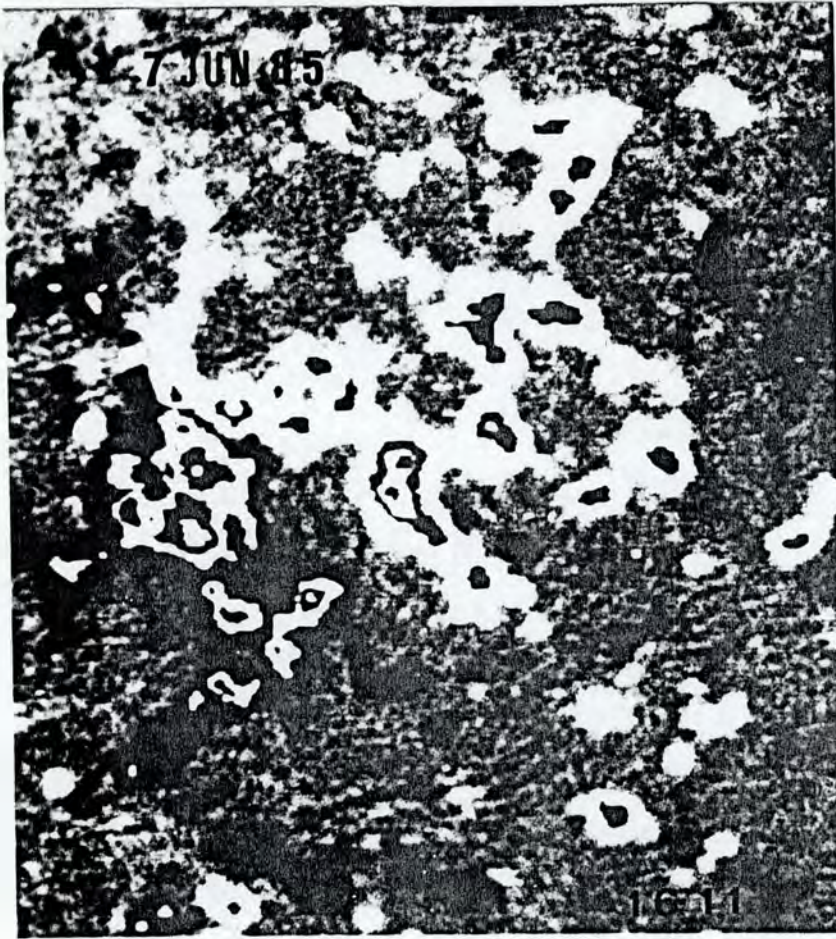
Tempestade geomagnética = "geomagnetic storm" - distúrbio súbito e violento mostrando variações erráticas na agulha magnética e algumas vezes interferência séria nas comunicações de rádio, telégrafos e telefone, defeitos nas linhas de alta tensão. Envolve todo o campo magnético da Terra, distinto das variações diurnas regulares, e é geralmente associado à atividade no Sol, tais como fulgurações e ejeções de massa na coroa. Há um atraso de cerca de um dia entre a ocorrência do fenómeno solar e sua consequência na Terra, o que corresponde a velocidades da ordem de 1 200 km/s. Correlacionando esses fenómenos encontramos duas classes de eventos: os que são recorrentes com a rotação do Sol e correspondem a passagem da extensão dos campos magnéticos abertos dos buracos coronais pela Terra, e os distúrbios causados pela erupção dos campos magnéticos solares em fulgurações ou ejeções de massa na coroa.

Térmico = "thermal" - diz-se do tipo ou componente da fulguração em que o alargamento das linhas é consistente com a temperatura média dos elétrons derivada das razões entre as linhas observadas na mesma região espectral.

Transiente coronal = "coronal transient" - mudança rápida na coroa, principalmente plasma se movendo para fora; podem estar associados a fulgurações.

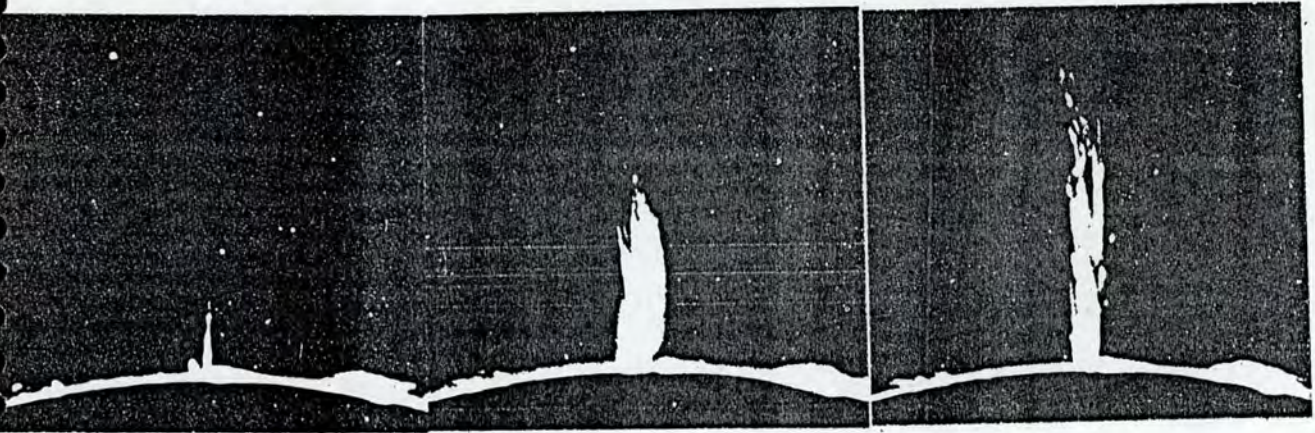
Unipolar = "unipolar" - refere-se à região extensa cujos campos magnéticos tem uma polaridade dominante, o que ocorre devido à difusão dos campos magnéticos de cada uma das polaridades de uma região ativa por zonas extensas, devido à convecção e às correntes meridionais. A malha magnética é bem definida, e a malha cromosférica é brilhante no centro da linha H α e na linha K de cálcio. Na asa da linha H α a malha pode ser escura, em contraste, e delimitada por salpicos. Os buracos coronais ocorrem nessas regiões e correspondem a uma estrutura magnética "aberta", que se estende no espaço interplanetário (embora necessariamente as linhas magnéticas tenham que retornar ao Sol). A ilustração a seguir é um magnetograma com regiões unipolares.

Um magnetograma com regiões unipolares é apresentado na próxima página.



Vaga = "surge" (significa vaga ou onda) - tipo de protuberância onde o material é ejetado de modo abrupto, permanece colimado e retorna na mesma trajetória, supostamente ao longo de uma linha de força do campo magnético. Detetado em H α com velocidades típicas de 50 a 200 km/s, pode ter forma linear radial ou ser em forma de leque; às vezes retorna em trajetória paralela à da subida. Sua altura máxima varia de 20 000 a 200 000 km e a duração é de 10 a 30 minutos. A vaga seria precedida por uma expansão difusa de parte de uma fulguração, ou pela formação de pequena região brilhante, que vai ficando transparente e desvanecendo no local onde surge a protuberância. Não há indícios de brilho ao material retornar. Em contraste com o disco, as vagas podem ter partes brilhantes e partes escuras, ser totalmente escuras = "dark surge on disk" - DSD, ou brilhantes = "bright surges on disk" - BSD, mas são sempre brilhantes no limbo = "bright surges on limb" - BSL -, que se movem mais de 0,15 raios solares além do limbo. Vagas são muito comuns em fulgurações e se repetem no mesmo local da região ativa. Pode ocorrer emissão em UV ou raios X coincidente. As configurações magnéticas associadas a elas são: manchas satélites, estrutura (configuração) magnética evolutiva e

fragmentos magnéticos em movimento.



Vento solar = "solar wind" - fluxo de partículas (protons e eletrons) e campos magnéticos, que é continuamente gerado nas regiões externas da coroa e se desloca no espaço interplanetário com velocidade típica de 350 km/s.

WLF = "white light flare" - fulguração em luz branca

Zonas reais = "real zones" - faixas de latitude intermediária na superfície solar (entre 5° e 40°) dos dois lados do equador, onde ocorrem as manchas solares. Termo histórico, usado por Galileu e Scheiner. São notáveis no diagrama borboleta.

Referências Bibliográficas e Bibliografia

- ABDUSSAMATOV, H. I. The fine structure of solar granulation and its relationship to large-scale photospheric structures. *Astron. Astrophys.* 272, p. 580-586, 1993.
- ABETTI, G. *The sun*. London: Faber and Faber, 1955.
- ATHAY, R. G. The solar chromosphere. In: *NEW FRONTIERS IN ASTRONOMY: Readings from Scientific American*. San Francisco: Freeman, 1975, p. 88-97.
- ATHAY, R. G. Variations in chromospheric structure and mass motions. In: THOMAS, R. N., ATHAY, R.G. (Eds.) *Physics of the solar chromosphere*. New York: Interscience, 1961, p. 45-77.
- BRAGA, N. C. Os sinais do sol e as telecomunicações. *Saber Eletrônica*, v. 24, n. 191, p. 56-59, 1988.
- BRAY, R. J., LOUGHHEAD, R. E. *Sunspots*. New York: John Wiley, 1965.
- BROWN, J. C., SMITH, D.F., SPICER, D.S. Solar flare observations and their interpretations. In: JORDAN, S. (Ed.) *The sun as a star*. Washington: NASA, 1981. p. 181-227.
- DE JAGER, C., SVESTKA, Z. May 1980 flare review. *Solar Phys.* v.100, n.1/2, p. 435-463, 1985.
- DODSON, H. W., HEDEMAN, E. R. WDC-A Report UAG-14, 1971.
- FOUKAL, P. Morphological relationships in the chromospheric H α fine structure. *Solar Phys.* v.19, p.59-71, 1971.
- GAIZAUSKAS, V. Observations of the fine structure of the chromosphere. In: LITES, B. V. (Ed.) *Chromospheric diagnostic and modelling*. Sunspot: National Solar Observatory, 1985, p. 25-47.
- GIOVANELLI, R. *Secrets of the sun*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- HAISCH, B., RODONO, M. (Ed.) *Solar and stellar flares*. Dordrecht: Kluwer, 1989.
- HOPKINS, Jeanne. *Glossary of astronomy and astrophysics*. Chicago: University of Chicago Press, 1976.
- JORDAN, S. (Ed.) *The sun as a star*. Washington: NASA, 1981.
- KAUFMANN, P. O programa brasileiro de física solar e resultados sobre a energética das explosões solares. *Ciência e Cultura*, v.36, n.3, p. 367-375, 1984.
- KIEPENHEUER, K. O. Solar activity. In: KUIPER, G. P. (Ed.) *The Sun*. Chicago: University of Chicago Press, 1953.
- KUIPER, C. P. (Ed.) *The sun*. Chicago: University of Chicago Press, c1953.
- LITES, B. V. (Ed.) *Chromospheric diagnostic and modelling*. Sunspot: National Solar Observatory, 1985.
- LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, J. Cancellation of magnetic flux I: on the quiet sun. *Australian J. Phys.*, v.38, p.855-873, 1985.

- LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, H., AI, G. The association of flares to cancelling magnetic features on the sun. *Solar Phys.* v.121, p.197-214, 1989.
- MARTIN, S. F. Mass motions associated with solar flares. *Solar Phys.* 121, p.215-238, 1989.
- MARTIN, S. F. Elementary bipoles of active regions and ephemeral regions. *Mem. S. A. It.*, v.61, n.2, p. 293-315, 1990.
- MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B., WANG, J. Cancellation of magnetic flux II: in an active region. *Australian J. Phys.*, v. 38, p. 929-959, 1985.
- MOURÃO, P. R. de F. *Dicionário enciclopédico de astronomia e astronáutica*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1987.
- MULLER, R. (Ed.) *High resolution in solar physics*. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- NEUPERT, W. M. *Astrophys. J (Letters)* v. 153, 159, 1968.
- NOVEMBER, L. J., TOOMRE, J., GEBBIE, K.B. *Astrophys. J.* 245, L123, 1981.
- PASACHOFF, J. M. *Contemporary astronomy*. Philadelphia: Saunders, 1977.
- PASACHOFF, J. M. The Solar Corona. In: *NEW FRONTIERS IN ASTRONOMY: Readings from Scientific American*. San Francisco: Freeman, 1975, p. 71-80.
- PRIEST, E.R. *Solar flare magnetohydrodynamics*. New York: Gordon and Breach, 1981.
- PNEUMAN, G.W., ORRALL, F.Q. Structure, dynamics and heating of the solar atmosphere. In: STURROCK, P. A., HOLZER, T. E., MIHALAS, D. M., ULRICH, R. K. *Physics of the sun*. Dordrecht: D. Reidel, 1986, p. 71-134.
- RIGHINI, G. Survey of photospheric and chromospheric phenomena. In: Rossi, B. (Ed.) *Space exploration and the solar system*. New York: Academic Press, 1964.
- SCHMIEDER, B., RAADU, M. A., WIJK, J. E. Fine structure of solar filaments. *Astron. Astrophys.* v. 252, p. 353-365, 1991.
- SPITZ, A., GAYNOR, F. *Dictionary of astronomy and astronautics*. New York: Philosophical Library, 1959.
- STURROCK, P. A. Solar flares. In: STURROCK, P. A. (Ed.) *Plasma astrophysics*. Dordrecht: D. Reidel, 1967.
- STURROCK, P. A., HOLZER, T.E., MIHALAS, D. M., ULRICH, R. K. *Physics of the sun*. Dordrecht: D. Reidel, 1986.
- SVESTKA, Z. *Solar flares*. Dordrecht: D. Reidel, 1976.
- SVESTKA, Z. Flare observations. In: PRIEST, E. R. (Ed.) *Solar flare magnetohydrodynamics*. New York: Gordon and Breach, 1981. p. 47-137.
- SVESTKA, Z., JACKSON, B. V., MACHADO, M. E. (Eds.) *Eruptive solar flares*. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

- TANDBERG-HANSSSEN, E., EMSLIE, G. The Physics of solar flares. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- TORRES, C. A. de O. Manchas estelares. *Ciência Hoje* v.2, n.9, p.42-50, 1983.
- WANG, H. Do mesogranules exist ? submitted to Solar Physics, BBSO Preprint 0297, Big Bear Solar Observatory, jan. 1989.
- WILSON, P. R. *Solar Phys.*, v.106, p.1-28, 1986.
- WINGLEE, R. M., KIPLINGER, A. L. Developments in observations and theory for solar cycle 22. Boulder: University of Colorado, 1989.
- WINGLEE, R. M., DENNIS, B. R. Max '91 /SMM solar flares: observations and theory. Boulder: University of Colorado, 1990.
- WITTMANN, A. D., XU, Z. T. A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 70, p. 83-94, 1987.
- ZIRIN, H. The solar atmosphere. In: STURROCK, P. A. (Ed.) *Plasma astrophysics*. New York: Academic Press, 1967.
- ZIRIN, H. *Astrophysics of the sun*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- ZWAAN, C. Solar magnetic structure and the solar activity cycle. Review of observational data. In: JORDAN, S. (Ed.) *The sun as a star*. Washington: NASA, 1981, Cap. 6, p. 163-179.

IX. Apêndice. Trabalhos publicados.

1)

MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B., WANG, J., SHI, Z., Ephemeral regions vs. pseudo-ephemeral regions. In: PROCEEDINGS of workshop on measurements of solar vector magnetic fields. Washington, NASA, 1984, p. 403.

2)

MARTIN, S. F., BENTLEY, R.D., SCHADEE, A. ANTALOVA, A., KUCERA, A., DEZSO, L, GESTELYI, L., HARVEY, K. L., JONES, H, LIVI, S. H. B., WANG, J., Relationships of a growing magnetic flux region to flares. *Adv. Space Res.* v. 4, n. 7, p. 61-70, 1984.

3)

LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, J. Cancellation of magnetic flux I: on the quiet sun. *Australian J. Phys.*, v.38, p.855-873, 1985.

4)

MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B., WANG, J., Cancellation of magnetic flux II: in an active region. *Australian J. Phys.*, v. 38, p. 929-959, 1985.

5)

WANG, J. SHI ,Z., MARTIN, S., LIVI, S. H. B. The cancellation of magnetic flux on the quiet sun. *Vistas in Astronomy* v.31, p.79-83, 1988.

6)

MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B. Cancelling magnetic fields in the solar atmosphere. In: AGU CHAPMAN CONFERENCE, 1989, Hamilton, Bermuda, PRIEST, E. R. et al. (Conv.) *Physics of magnetic flux ropes*, p.142-145.

7)

LIVI, S. H. B., MARTIN, S. F., WANG, H., AI, G. The association of flares to cancelling magnetic features on the sun. *Solar Phys.* v.121, p.197-214, 1989.

8)

BARTH, C., LIVI, S. H.B. Magnetic bipoles in emerging flux regions on the sun. *Rev. Mexicana Astron. Astrophys.* v. 21, p. 549-551, 1990.

9)

MARTIN, S. F., LIVI, S. H. B. The role of cancelling magnetic fields in the buildup to erupting filaments and flares. In: SVESTKA, Z, JACKSON, B. V., MACHADO, M. E. (Eds.) *Eruptive Solar Flares*, Berlin: Springer-Verlag, 1992, p. 33-45. (Lecture Notes in Physics, 399).

EPHEMERAL REGIONS VS. PSEUDO EPHEMERAL REGIONS

S. F. Martin, S. H. B. Livi,*

J. Wang** and Z. Shi**

BBSO #0236

* Visiting Astronomer from Instituto de Fisica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 90,000 Porto Alegre, Brazil

** Visiting Associates from Beijing Observatory, The Academy of Science, Beijing, China

To Be Included in Proceedings of Workshop on Measurements of Solar Vector Magnetic Fields, MSFC, 15-18 May 1984.

Solar Astronomy

California Institute of Technology

July 1984

ABSTRACT

Our new studies of the quiet sun reveal that ephemeral active regions constitute a minority rather than a majority of all the short-lived, small-scale bipolar features on the sun. We retain the definition of an ephemeral region as a feature which appears to originate as a compact bipole and grows as a unit in total flux for at least a short time after its birth. In contrast to the recognized patterns of growth and decay of ephemeral regions, we illustrate various examples of the creation of other temporary bipoles nicknamed "pseudo ephemeral regions." We show that the pseudo ephemeral regions are the consequence of combinations of small scale dynamic processes of the quiet sun including: (1) fragmentation of network magnetic fields, (2) the separation of opposite polarity halves of ephemeral regions as they grow and evolve, and (3) the coalescence of weak network or intra-network magnetic fields. In long-exposure videomagnetograms (~1 min.), having spatial resolution of 2-5 arc seconds, the pseudo ephemeral regions outnumber the real ephemeral regions by about a factor of 2. These new observations offer the possibility of resolving the discrepancies that have arisen in the association of ephemeral regions with X-ray bright points. We suggest that many X-ray bright points may be related to those pseudo ephemeral regions which have begun to exhibit magnetic flux loss. We also suggest that vector magnetograms should reveal distinct differences between real and pseudo ephemeral regions similar to the differences that are sometimes seen in H α filtergrams. H α images show the opposite polarities of some ephemeral regions to be connected by fibrils or arch filaments. In contrast, the pseudo ephemeral regions sometimes reveal a fibril, like a small filament, dividing the opposite polarity fields, but no well-defined fibrils connecting the opposite polarities.

I. INTRODUCTION

Ephemeral regions are small, short-lived bipolar magnetic fields. They were recognized and characterized by their short lifetimes in CaII filtergrams years before their magnetic nature became known (Harvey and Martin 1973). Their name was adopted from the tabulations of active regions in Solar Geophysical Data (SGD); short-lived small CaII plages listed for only one or two days are designated as "ephemeral" (for example, see SGD 1963 to 1965). CaII plages are now more frequently called by the more general name "active regions" and hence small Ca plages are now known as "ephemeral active regions" or just "ephemeral regions."

In this paper we clarify the currently recognized properties of ephemeral regions as seen in magnetograms and H α filtergrams. The H α properties of these regions are especially important because H α observations are currently our only direct source of information on the magnetic field component of ephemeral regions parallel to the solar surface; current-day vector magnetographs are not sufficiently sensitive to detect most ephemeral regions.

We further clarify the properties of ephemeral regions by comparing them with other features which can look like ephemeral regions but do not evolve like ephemeral regions. We call these "pseudo" ephemeral regions.

II. THE DATA

We have previously shown that long exposure videomagnetograms from Big Bear Solar Observatory are effective for studying ephemeral regions and other magnetic fields on the quiet sun (Martin 1983). Exposure of a videomagnetogram consists of many successive scans of the TV camera used as the primary detector in the videomagnetograph. The quiet sun images illustrated in this paper consist of 1024 or 2048 scans, which respectively require scan times of 68 or 138 sec. The final digitized image may be recorded both on magnetic tape and as a photographic image

from the initial display on a television monitor. Magnetograms in both of these formats are illustrated in this paper.

III. EXAMPLES OF EPHEMERAL REGIONS AND PSEUDO EPHEMERAL REGIONS

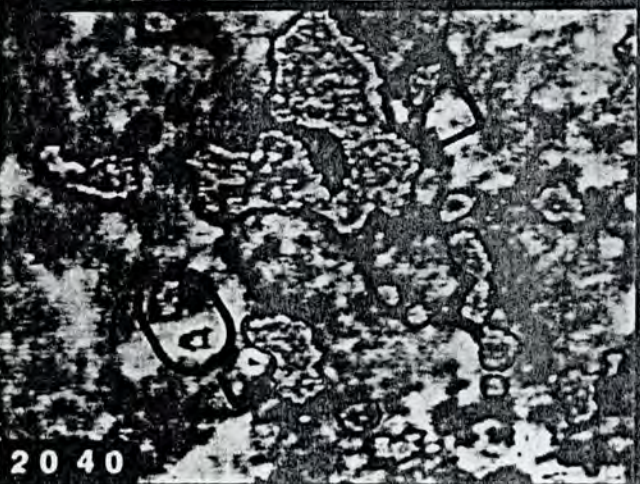
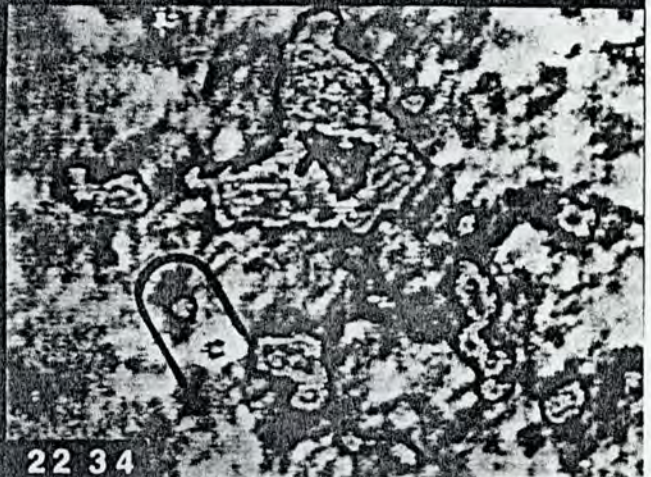
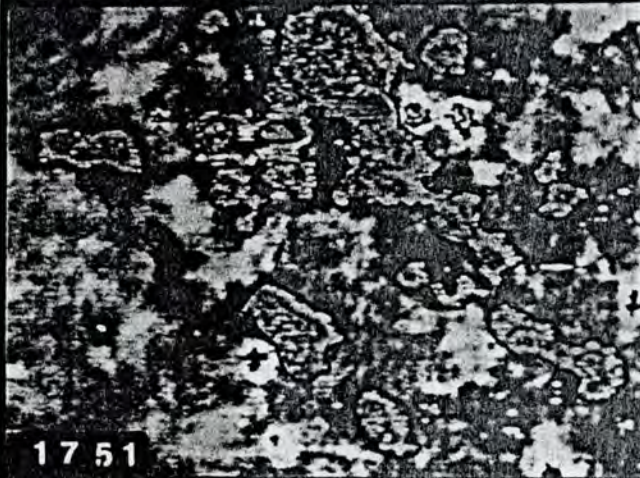
The properties by which we define ephemeral regions are illustrated by an example in Figure 1. The figure shows small sections of a single field of view taken during an 8 hour observing day on 4 September 1983. The oval in the second frame, 1930 (UT) in the left column of images, encloses a new ephemeral region not seen in the earlier image at 1751. The periphery of the positive pole is white and the periphery of the negative pole is black. The grey contour within the negative pole is not a polarity reversal. It is a contour intentionally included to show that the magnetic signal has reached saturation. By the next frame, 2040 UT, the bipole has increased in total flux as seen by the appearance of additional saturation contours within each pole. Saturation contours of negative polarity are grey and saturated contours of positive polarity are white. This example illustrates the three defining properties of ephemeral regions:

- (1) a new bipole with opposite polarity fields adjacent to each other
- (2) growth of the bipole
- (3) separation of the maxima of the opposite polarity fields from each other

Fig. 1 - The evolution of the new ephemeral active region enclosed in the oval (1930) can be compared to the pseudo ephemeral region enclosed in the rectangle in the upper right. As the ephemeral region grows, the pseudo ephemeral region exhibits "cancellation," the mutual loss of magnetic flux in closely spaced features of opposite polarity. Another example of cancellation of a small positive polarity (white) fragment of field with negative polarity (black) network magnetic field is enclosed within the corner of the rectangle to the lower right of the ephemeral region.

4 SEP 1983

30,000 km



A useful, non-defining property that is often but not always seen is:

- (4) continued separation of the opposite poles

Note that the definition of an ephemeral region can include:

- (5) emergence of one or both poles within pre-existing network
- (6) a lack of exact simultaneity in the appearance of the opposite polarities (assumed to be an effect of field geometry or limited spatial resolution)

In contrast to ephemeral regions, we illustrate features which temporarily look like ephemeral regions but lack the above defining properties of ephemeral regions.

The first example of such a pseudo ephemeral region is marked by a rectangle in Figure 1. In the first two frames at 1751 and 1930, the bipole looks exactly like the ephemeral region enclosed in the oval at 1930 UT. However, as we follow its evolution in the subsequent frames, we see that it is a disappearing bipole. The flux in both polarities is rapidly reducing relative to neighboring fields. We categorize this feature as a "pseudo ephemeral region," an apparent bipole that does not exhibit any of the defining properties of ephemeral regions except that it appears temporarily to resemble an ephemeral region. This type of pseudo ephemeral region reveals new, important distinctions from real ephemeral regions: (1) the opposite polarity fields move together, (2) they show a mutual loss in magnetic flux (cancellation), and (3) the gradient of the magnetic field between the centers of opposite polarity increases with time and typically exceeds the intra-pole gradient of ephemeral regions.

Small-scale, adjacent opposite polarity magnetic features are very common on the quiet sun. The corner of the rectangle to the lower right of the ephemeral region (Fig. 1) encloses a fragment of positive polarity field adjacent to network of negative polarity. It does not look like an ephemeral region because of the very large imbalance of flux in the adjacent opposite polarities. However, even in this example, if our only available image were the one at 1751, we could not be certain that the

positive polarity was not one of the halves of an ephemeral region which had its opposite pole buried in the negative polarity network. However, the next several frames show that this is not an ephemeral region. The first sign that this feature is not a new ephemeral region is the steady loss of flux in the positive pole. Concurrently there appears to be loss of flux in the negative polarity indicated by the indentation of the negative flux at the point of contact with the small positive fragment of magnetic field. The positive fragment has only a small point left at 2150 and has completely disappeared by 2234.

During a day's observation of the quiet sun, we typically observe many such examples of the mutual loss of flux in closely-spaced opposite polarity fragments of magnetic field. Since there are several possible physical processes which might adequately describe this phenomenon, we choose at present to use the observational term "cancellation" and to defer introducing interpretations of the cancellation process until the observational properties are more completely established. Only a few examples of cancellation have been previously mentioned in the literature (Martin 1983; Komle 1979; Martin and Harvey 1976). In the context of this paper, the observation of cancellation is a new and significant means of differentiating pseudo ephemeral regions from real ephemeral regions.

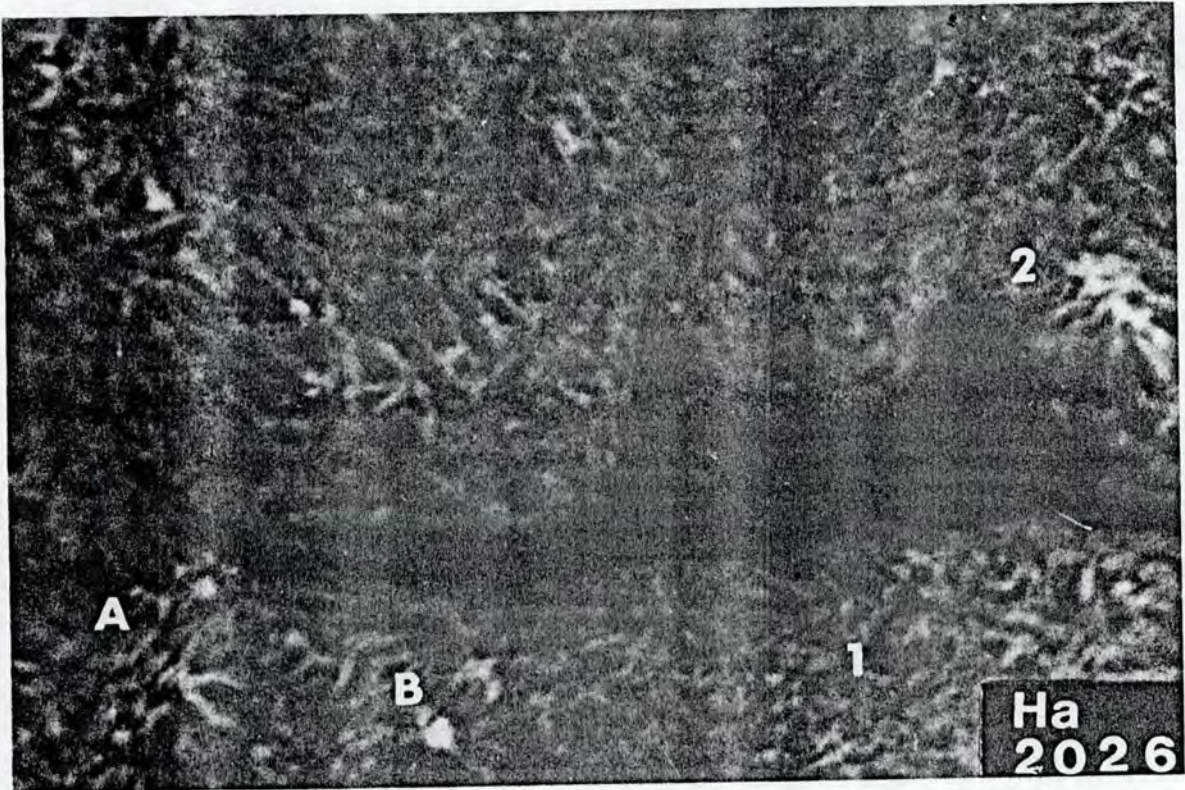
Next we illustrate examples of pseudo ephemeral regions whose origin can be traced. One of the most common ways for a pseudo ephemeral region to form is simply by the collision of opposite polarity fragments of network. This class of pseudo ephemeral region is expected to frequently occur in filament channels (whether or not a filament is present in the channel) because filaments and filament channels always occur at boundaries between areas of opposite polarity network magnetic fields. An example is shown in Figure 2.

Figure 2 shows the full field of the videomagnetograph in the upper

Fig. 2 - Pseudo ephemeral region 1 shows a small filament dividing the opposite polarity fields as cancellation occurs. Cancelling feature 2 shows no unique signature in H α . Non-cancelling bipolar regions A and B reveal fibrils or arch filaments connecting their opposite polarities.

4 SEP 1983

30 000 km



section and, in the lower section, the corresponding H α filtergram. The network magnetic field is dominantly negative above the filament and positive below it. The site of the approaching network fields of opposite polarity is designated by the "1" in the lower right corner just below the filament.

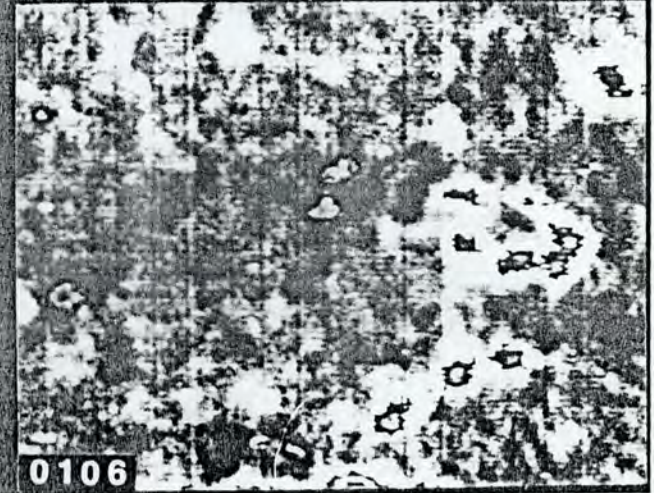
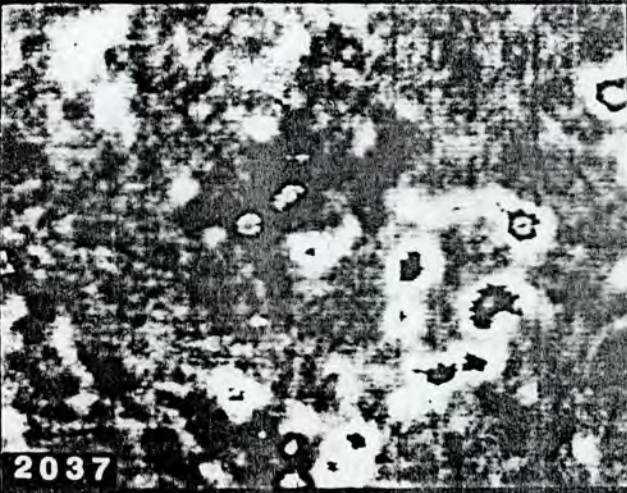
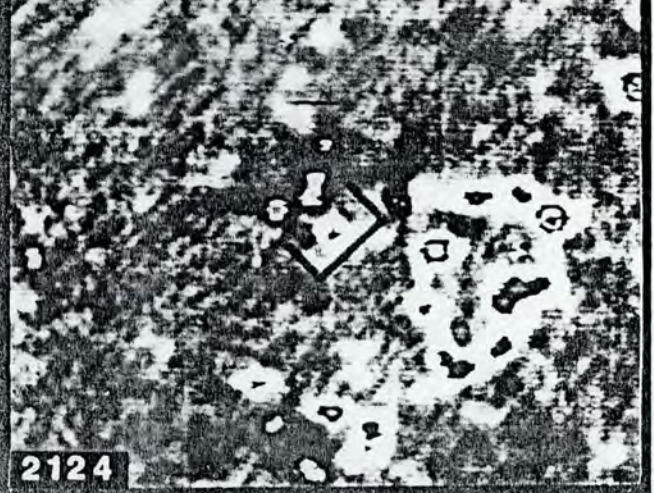
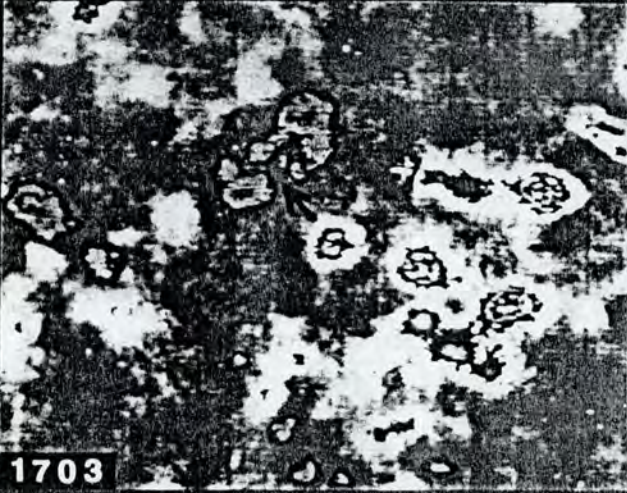
Figure 3 shows a sequence of images in a limited window immediately around this pseudo ephemeral region, 1 in Figure 2. The positive pole of the pseudo ephemeral region is enclosed within the open-ended rectangle in the image at 2231. Tracing the two halves of the pseudo ephemeral regions backward in time, we see that at 1703 the pseudo ephemeral region fields originated from clumps of network field of opposite polarity. The distance between the maxima of the fragments that became the pseudo ephemeral region was 10,000 km at the beginning of the observing day (1703). Following the sequence of images in Figure 3, forward in time, we see that the opposite polarity fields come into contact between 2124 and 2231. The relative velocity of approach of the two fragments between 1703 and 2231 is 0.5 km/sec. The fields appear to be in contact when the separation of the maxima within the opposite polarities is between 3800 and 4500 km. After their collision, it is only a short time, less than two hours and 35 minutes time gap between the last two frames, until the smaller of the two fragments of opposite polarity flux has completely disappeared.

Another common way in which a pseudo ephemeral region can form is by the encounter of one half of an ephemeral region with a fragment of network or intra-network magnetic field. An example is shown in Figure 4. A growing ephemeral region is enclosed by the oval. The opposite polarities are seen to separate from each other at a relatively rapid rate of 0.3 km/sec. The positive pole either follows or pushes an adjacent

Fig. 3 - The open-ended rectangle marks the site of a pseudo ephemeral region which originates from opposite polarity fragments of network coming together. The arrow indicates the direction of motion of the lower (positive) fragment. The H α structures corresponding to this pseudo ephemeral region and other features are shown in Figure 2.

4 SEP 1983

30 000 km



fragment of positive field into an area of strong network magnetic field of negative polarity. The negative pole of the ephemeral region, during the 6 hour interval shown here, is moving in the opposite direction toward a small clump of weak positive field. This weak positive fragment is either a fragment of intra-network magnetic field or a very weak fragment of network field. At 1935 we see that the negative pole of the original ephemeral region is now adjacent to both the positive fragment and a weak negative fragment. At 2045, the negative pole of the ephemeral region and the adjacent background field of similar polarity are seen to be merging. In the final frame at 2238, the merged negative fields are abutted against the positive polarity fragment, resulting in the creation of a pseudo ephemeral region. In addition to the formation of a pseudo ephemeral region, we have illustrated in this figure the phenomenon of coalescence of magnetic fields of similar polarity, a common phenomena occurring both in the network and intra-network magnetic fields.

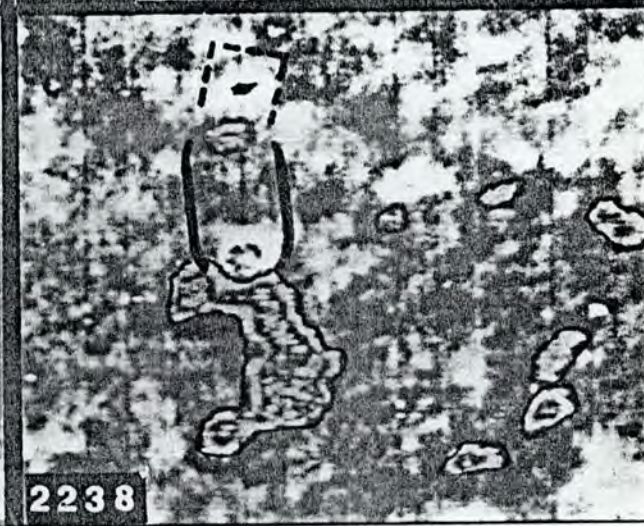
Figure 5 also illustrates both the coalescence of similar polarity magnetic field and the splitting of opposite polarity network field to form a pseudo ephemeral region. In this example, the videomagnetograms are shown in the form of isogauss contours. The contour levels that are shown are 10, 20, 40 and 80 gauss. Several fragments of negative polarity network or intra-network magnetic field (thinner lines) are seen in the lower part of the first frame. These fragments merge to form a single unit with simultaneous concentration of the field (second frame).

Fig. 4 - The negative half (black) of a growing, separating ephemeral region (in oval) is seen moving toward opposite polarity (white) network magnetic field and forms the "pseudo ephemeral region" within the open ended rectangle at 2238. The positive half of the ephemeral region pushes an adjacent positive field fragment toward a large clump of negative polarity network where field "cancellation" has the opportunity to begin.

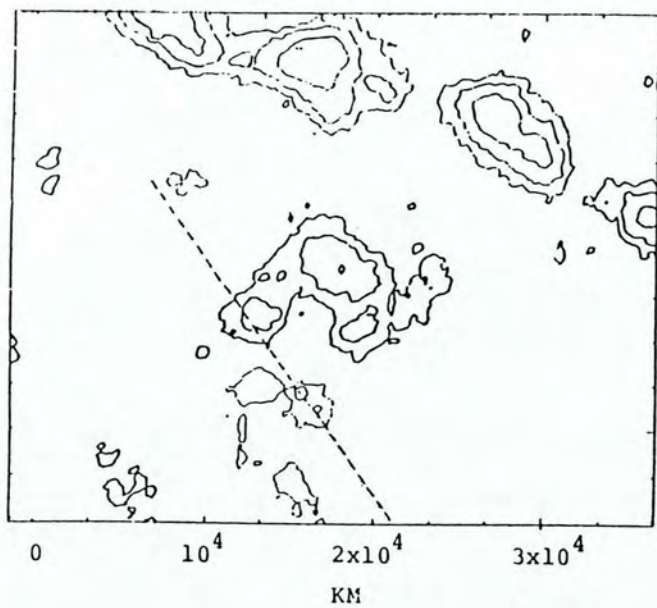
Fig. 5 - (turn one page) A pseudo ephemeral region is formed from the coalescence of positive polarity magnetic field fragments and the simultaneous approach of a network fragment of opposite polarity. Contour levels are 10, 20, 40, and 80 gauss.

4 SEP 1983

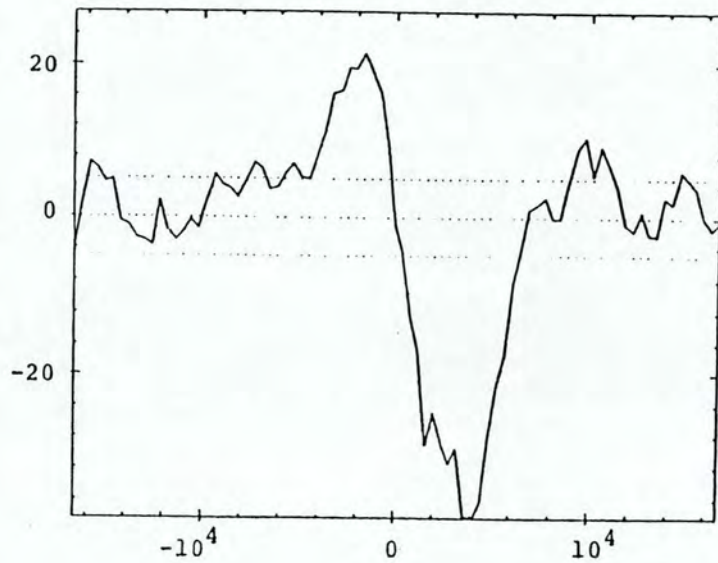
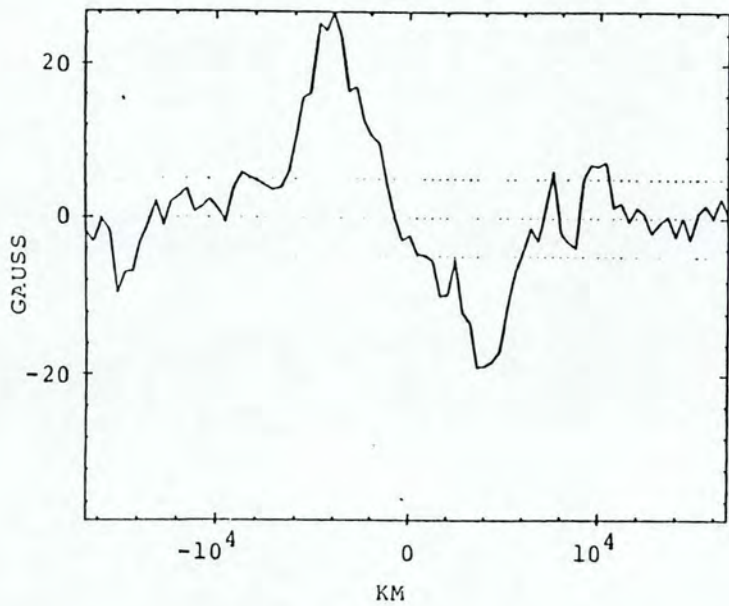
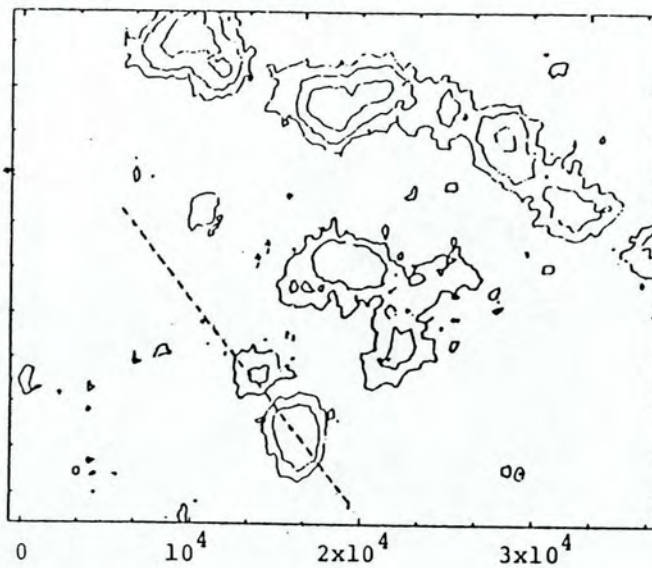
30 000 km



1836 Oct. 14



2135 Oct. 14



Concurrently, an adjacent positive polarity fragment of network field (thicker lines) splits away from its adjoining network and in the second frame is seen to have moved toward the concentration of negative field. The result is a pseudo ephemeral region. The lower frames show a cross section of the magnetic flux (the dashed line in the upper frames) across components of the pseudo ephemeral region. In the lower part of Figure 5, the cross section profile of the positive flux in the pseudo ephemeral region is seen to be approximately the same in both frames while the negative polarity coalescence results in an apparent increase in peak flux.

IV. ASSOCIATED H α STRUCTURES

We are also studying concurrent H α data to learn whether ephemeral regions and pseudo ephemeral regions can be distinguished from each other by means of the appearance of H α structures and to learn the direction of the the component of the magnetic field parallel to the solar surface in both ephemeral regions and pseudo ephemeral regions. We have found no invariable association with any specific H α structure but we are beginning to see some trends in the data as illustrated in Figure 2.⁴ Some, but not all, opposite polarity components of ephemeral regions are seen to be connected by distinct long fibrils or arch filaments. Examples are the small region A and B in the lower left. We have found no examples where comparably long, obvious fibrils connect the opposite polarities of cancelling magnetic fields of the pseudo ephemeral regions. The cancelling pseudo ephemeral region "1" in the lower right of Figure 2 shows a small filament or fibril dividing rather than connecting the opposite polarities. Such dividing fibrils, however, are not invariably observed. No unique structure is associated with cancelling feature "2" in the right side of this figure. To date, we have found no definite signatures whereby ephemeral regions or pseudo ephemeral regions can always be identified in H α .

Some pseudo ephemeral regions are associated with microflares. An example is shown in Figure 6, a superposition of H α and 10 gauss contours. A new, small ephemeral region is labelled ER in the first frame. As it grows, the negative (dashed lines) of the ephemeral region collides with adjacent positive polarity (solid lines) network and a small two point micro-flare occurs at the junction of the ephemeral region and opposite polarity network. This relationship to the associated magnetic fields is exactly the same as described by Marsh (1978) in his study of ephemeral region flares. We only emphasize the newly recognized process of cancellation. We also call attention to the fact that the time scale of cancellation is on the order of a few hours for small-scale quiet sun features while microflares are typically seen only for a few minutes in the chromosphere. However, if microflares are analogous to larger flares, the coronal part of the microflares could last ten times longer than the chromospheric part of the event.

V. ASSOCIATED FEATURES AT OTHER WAVELENGTHS

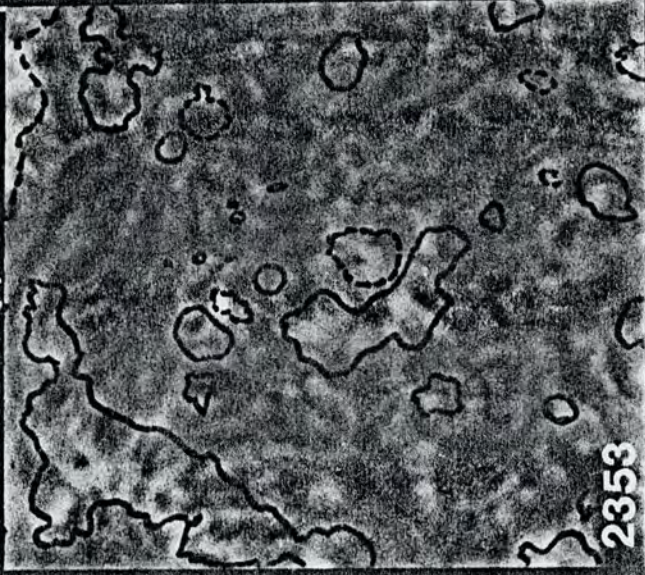
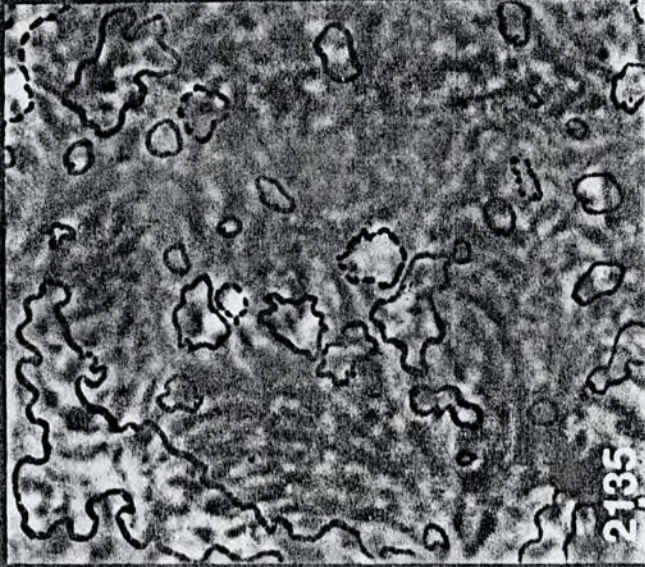
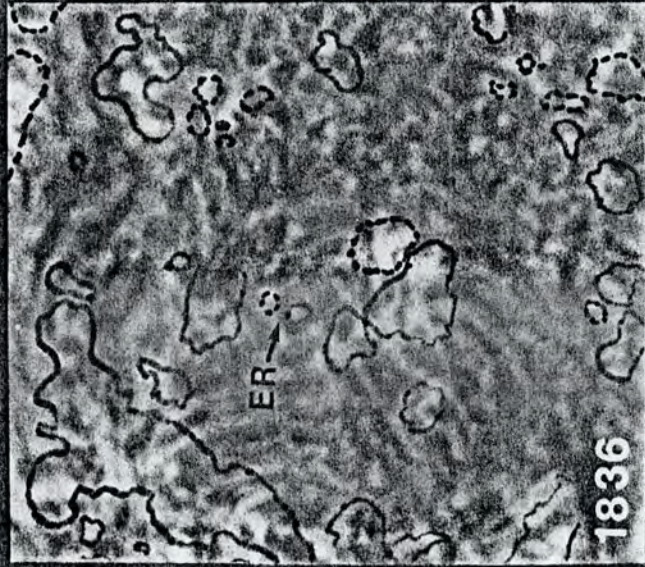
We anticipate that pseudo ephemeral regions, during the stage of cancellation, may have more or less steady signatures at radio, ultra-violet and soft X-ray wavelengths, if the cancellation represents slow reconnection or any other type of slow conversion of magnetic energy to other forms of energy. In addition, at these wavelengths, we expect transient signatures associated with microflares.

The cancelling pseudo ephemeral regions are excellent new candidates for a direct association with many X-ray bright points which are also known to produce tiny flares (Golub *et al.* 1974). If our hypothesis is

Fig. 6 - The positive (dashed contour line) and negative (solid contour line) poles of the small ephemeral region (ER) separate from each other between 1836 and 2135. After the positive pole collides with a fragment of negative polarity network, a two point microflare occurs (2135). Meanwhile, the negative pole of the ephemeral region undramatically merges with network of the same polarity.

14 OCT 1983

30 000 km



10 gauss

correct, many more X-ray bright points may be associated with pseudo ephemeral regions than with real ephemeral regions. The association with ephemeral regions would in many cases still be very close since many pseudo ephemeral regions are the consequence of one-half of an ephemeral region colliding with network magnetic fields. Additionally, we do not rule out the possible association of some X-ray bright points with real ephemeral regions; we only note some new possible associations. The circumstance of two mutually cancelling ephemeral regions would be an excellent candidate for association with X-ray bright points, although it is relatively rare.

A principal difficulty with previous hypotheses (Harvey et al. 1975; Golub et al. 1977; Golub 1980) of a one to one association between ephemeral regions and X-ray bright points was the uncertainty of whether there were sufficient small-scale, uncounted, ephemeral regions to match one for one with the X-ray bright points. The existence of cancelling pseudo ephemeral regions, as well as many cancelling magnetic features which would not be mistaken for ephemeral regions, offers a sufficient number of distinct magnetic features to account for all X-ray bright points.

Our hypothesis that many X-ray bright points may not be the counterparts of ephemeral regions is in direct contradiction to the assumption of Golub (1980) that X-ray bright points represent emerging magnetic flux. We emphasize the importance of the simultaneous observation of quiet sun magnetic fields at X-ray, optical and radio wavelengths.

VI. DISCUSSION

Out of hundreds of ephemeral regions observed from birth, we have not yet observed a single one in which the growing and separating opposite polarity fields reverse their direction of motion, come together, and disappear, except in one case in which there is also evidence that two ephemeral regions mutually cancel each other. Thus we must suspect that the cancellation of an ephemeral region within itself is something that

either does not happen or is extremely rare. We therefore have a sharp distinction between ephemeral regions and pseudo ephemeral regions that can be used to distinguish these two phenomena when the origin of the fields has not been observed. A few hours observation is sufficient to determine if the fields are moving together and cancelling, are stationary or unchanging, or growing and separating. However, we also need to point out that some circumstances are ambiguous, especially when an ephemeral region grows in the middle of network magnetic fields. In these cases, we usually observe a more rapid growth in the half of the ephemeral region that is the same polarity as the network and less rapid apparent growth in the half of the ephemeral region that is opposite in polarity to the network. We interpret the slowly growing half as due to growth and concurrent cancellation of that half of the ephemeral region. In such cases it is clear that the growth rate of the ephemeral regions must exceed the rate of flux loss due to cancellation. Otherwise ephemeral regions would not be found amidst the network fields. Outside of the network there is no requirement for the ephemeral region growth rate to exceed the flux loss of cancelling features in general. The consequence of these differences is that we expect to find a minimum size for ephemeral regions that occur coincident with network. Additionally, the lifetime of such ephemeral regions occurring in or very near network are thus greatly shortened in comparison to ephemeral regions that do not occur either in or very close to network fields.

Pseudo ephemeral regions cover the entire range of total fluxes found in ephemeral regions. This is not surprising since elements of opposite polarities covering a wide range of magnetic flux may move together on the sun. In contrast to the ephemeral regions, pseudo ephemeral regions do not originate as new bipolar fields. They constitute opposite polarity fragments of magnetic fields that have previously constituted network and intra-network magnetic fields, separate halves of ephemeral regions or any combination of these sources. They are brought together by the motions of the network magnetic fields along the boundaries of supergranule cells, by convection within the supergranule cells, and by the growth and separation of the opposite polarity halves of real ephemeral regions. Even though the opposite polarity halves of the pseudo ephemeral regions originate

from separate sources, it is noted that they often have some properties in common:

- (1) cancellation of the opposite polarity fields when they come within a critical distance from each other (cancellation is here defined as a mutual decrease of the magnetic field of both features)
- (2) increasing gradient between the opposite polarities
- (3) continued motion of the opposite polarities towards each other as the cancellation proceeds, resulting in a continued concentration and reduction of the total flux of the pseudo ephemeral regions

The above properties of pseudo ephemeral regions are all characteristics not shared by isolated ephemeral regions. Since they are evolutionary characteristics, one or more hours of observation may be required to correctly identify whether any apparent bipole is a new ephemeral region or whether it is a pseudo ephemeral region. However, the gradient of the magnetic field in the region between opposite polarities can be used to identify some cancelling pseudo ephemeral regions with only a single magnetogram. In Figure 7, we illustrate both a real ephemeral region, in the middle of the field, and a pseudo ephemeral region, in the lower right. In the second frame at 0027 UT, the steepness of gradient of the pseudo ephemeral region alone is sufficient evidence that this feature is not a real ephemeral region. In Big Bear magnetograms the gradient measured in the polarity inversion line between points separated by about 2000 km will very seldom exceed 0.01 gauss/km in a real ephemeral region.

We also note that the maxima in each polarity of the magnetic field in the ephemeral region are centered nearly symmetrically within the contours of lower field strength. In the pseudo ephemeral region, we observe that the maxima in opposite polarities crowd towards each other as the gradient of the field increases. Because of these very obvious characteristics, it is easier to identify pseudo ephemeral regions than real ephemeral regions, especially in data sets with low time resolution.

VII. DIRECTIONS OF CONTINUING RESEARCH

The existence of the pseudo ephemeral regions presents additional factors not accounted for in previous estimates of the number of ephemeral regions that truly exist on the whole sun at any one time. We now recognize that the numbers of ephemeral regions, that can be counted on a set of data, depends on:

- (1) the spatial resolution of the telescope used
- (2) the instrumental sensitivity coupled with exposure time
- (3) the spacing of observations (continuous time-lapse observation, one per minute, affords the ability to recognize more ephemeral regions than more widely spaced observations such as once an hour or once a day)

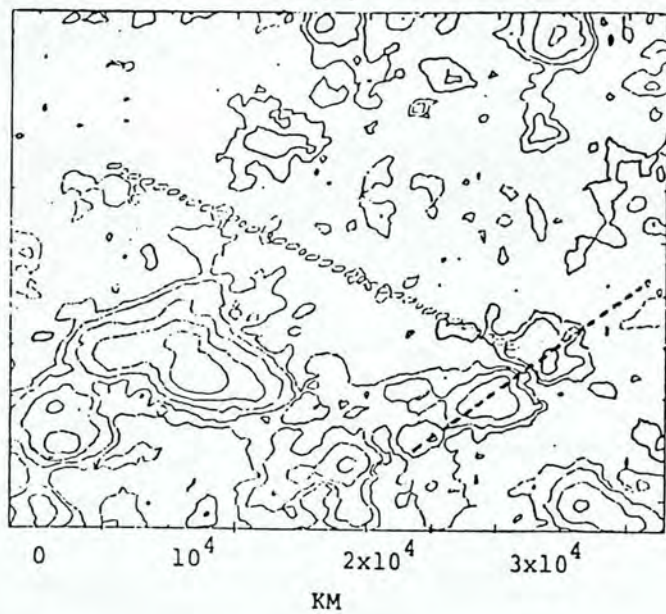
and the following solar factors:

- (4) the distribution of network magnetic fields over the solar surface
- (5) the time in the solar cycle

The primary limitation in making new estimates of the² daily numbers of ephemeral regions, on the entire sun from limited magnetograms, is item (4) above, our yet incomplete knowledge of the interaction of ephemeral regions with the network. We need to know whether or not there is any preference for ephemeral regions to occur in the presence of network magnetic fields as we might suspect from the results of Garcia de la Rosa

Fig. 7 - An important distinguishing characteristic of pseudo ephemeral regions is increasing field gradient. The appearance of the pseudo ephemeral region is shown in contrast to the real ephemeral region which appears in the center of the second frame. The magnetic field near the polarity inversion line separating the two halves of the pseudo ephemeral region is characterized by higher gradient than near the polarity inversion line in the real ephemeral region. Contour levels are 5, 10, 20, 40, and 80 gauss.

2251 Sep. 4



0027 Sep. 5

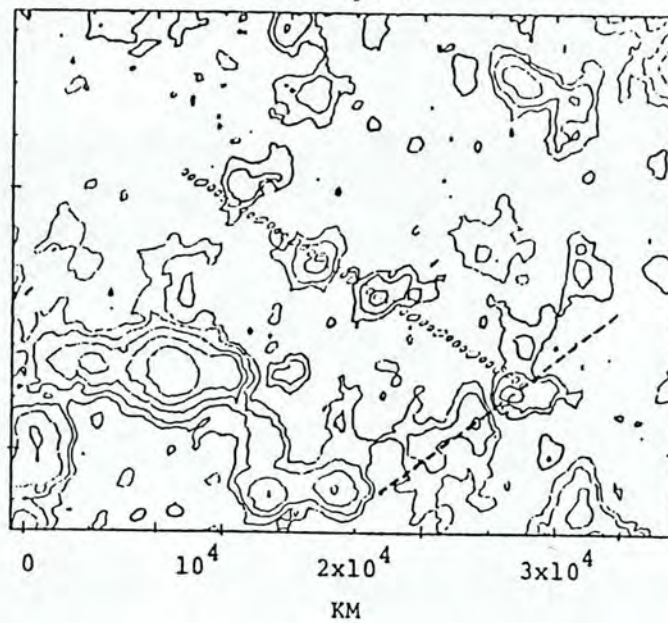
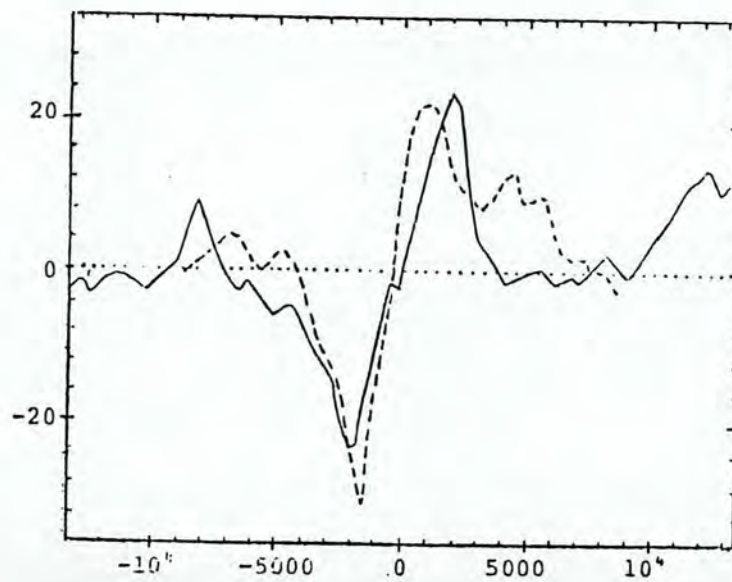
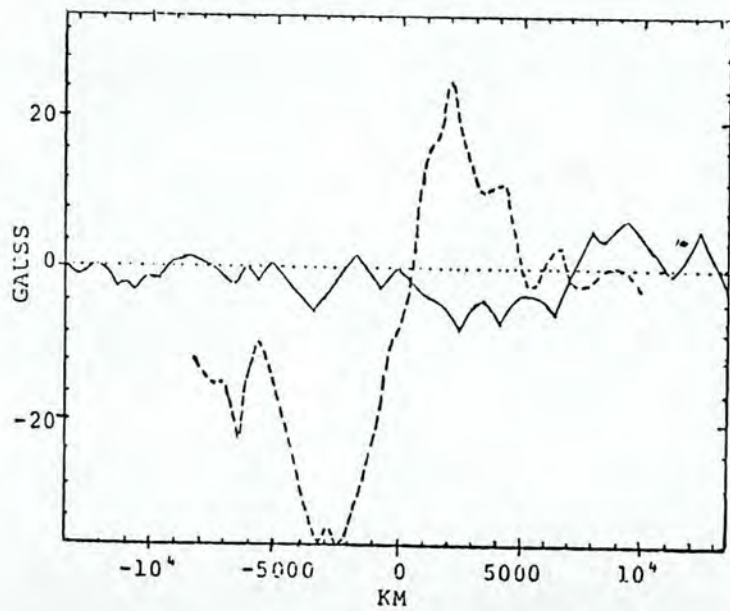


Figure 7



(1983), Martin *et al.* (1983), Harvey *et al.* (1983), and Liggett and Zirin (1984). We also need to know the distribution of the rates of separation of the opposite polarity components of ephemeral regions and the rates of cancellation of ephemeral regions. All of these unknowns limit our ability to extrapolate to find the population of ephemeral regions on the full sun from limited field observations. However, these are only temporary limitations which we are attempting to solve through the continued analyses of the data on hand and the acquisition of additional data.

VIII. CONCLUSIONS

We have found that ephemeral active regions can be differentiated during their growth stage from other apparent bipoles on the sun by their characteristic evolution. Ephemeral regions are new bipolar magnetic fields that originate with their opposite polarities adjacent or very close to each other. Ephemeral regions typically show a growth stage in which the maxima of the opposite polarity fields separate as a function of time.

Pseudo ephemeral regions can either be unchanging, stationary bipolar fields or opposite polarity fragments of magnetic field which have moved together and exhibit cancellation of both polarities at their mutual boundary. Our study of limited fields of the quiet sun shows that pseudo ephemeral regions with cancellation outnumber pseudo ephemeral regions with little or no cancellation, and pseudo ephemeral regions outnumber the real ephemeral regions by about a factor of two.

The origin of the magnetic fields of pseudo ephemeral regions can be from:

- (1) fragmentations of very old network magnetic fields,
 - (2) from relatively new concentrations of intra-network fields,
 - (3) from halves of ephemeral regions which are no longer recognizable,
- or

(4) from any combination of the previous three possibilities.

In H α the opposite polarity fields of some ephemeral regions are connected by fibrils and the opposite polarities of some pseudo ephemeral regions are divided by small filaments. Most ephemeral regions and pseudo ephemeral regions are difficult to recognize in H α photographs without the aid of magnetograms. Micro flares occur in at least some pseudo ephemeral regions. This evidence of energy release is consistent with our hypothesized association of many X-ray bright points with pseudo ephemeral regions and other cancelling magnetic features. We further expect distinct radio signatures from pseudo ephemeral regions, at least during the occurrence of microflares.

Acknowledgments

J. Wang and Z. Shi express their appreciation to Dr. H. Zirin for the extension of their visit at Caltech. The authors thank A. Patterson for many helpful discussions on observing technique and for presenting the paper at MSFC. The contribution of S. F. Martin to this paper was supported by NASA Contract NAGW 255. Facility and observational support at Big Bear Solar Observatory was provided under NASA Contract NGL 05 002 034 and NSF Grant ATM 8211002.

References

- Garcia de La Rosa, J. I. 1983, Solar Phys. 89, 51.
- Golub, L., Krieger, A. S., Silk, J. K., Timothy, A. F., and Vaiana, G. S. 1974, Ap. J. 189, L93.
- Golub, L., Krieger, A. S., Harvey, J. W., and Vaiana, G. S. 1977, Solar Phys. 53, 111.
- Golub, L. 1980, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A297, 595.
- Harvey, K. L., and Martin, S F. 1973 Solar Phys. 32, 389.
- Harvey, J. W., Harvey, K.L., and Martin, S. F. 1975, Solar Phys. 40, 87.
- Komle, N. 1979, Solar Phys. 64, 213.
- Liggett, M., and Zirin, H. 1984, Solar Phys., submitted.
- Marsh, K. 1978, Solar Phys. 64, 93.
- Martin, S. F. 1983, Proceedings of the Symposium on "The Small-scale Dynamics in Stellar Atmospheres," Sacramento Peak Observatory, 25-29 July 1983.

Presented at the Symposium on the Analysis of Data Obtained
During the Solar Maximum Year, 25-28 June 1984, held during
XXV COSPAR, Graz, Austria

RELATIONSHIPS OF A GROWING MAGNETIC FLUX REGION TO FLARES

S.F. Martin,¹ R. Bentley,² A. Schadee,³ A. Antalova,⁴

A. Kucera,⁴ L. Dezso,⁵ L. Gesztelyi,⁵ K.L. Harvey,⁶

H. Jones,⁷ S.H.B. Livi,⁸ J. Wang⁹

BBSO #0241

1. Solar Astronomy 264-33, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA.
2. Mullard Space Science Laboratory, University College London, Holmburg St. Mary, Dorking, Surrey, England.
3. Space Research Laboratory, 21 Beneluxaan, 3527 H.S., Utrecht, The Netherlands.
4. Astronomical Institute Slovak Academy of Sciences, 059 60 Tatranska Lomnica, Czechoslovakia.
5. Heliografizikai Obszervatoriuma, Magyar Tudomanyos Akademia, H-4010 Debrecen, Hungary.
6. Solar Physics Research Corporation and Visiting Astronomer, National Solar Observatories, Tucson, Arizona, USA.
7. NASA Goddard Space Flight Center and Visiting Astronomer, National Solar Observatories, Tucson, Arizona, USA.
8. Instituto de Fisica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 90000 Porto Alegre, Brazil.
9. Beijing Observatory, Academia Sinica, Beijing, People's Republic of China.

Published in Advances in Space Research, V. 4, No. 7, pp. 61-70, 1984

Solar Astronomy

California Institute of Technology

March 1985

ABSTRACT

Some sites for solar flares are known to develop where new magnetic flux emerges and becomes abutted against opposite polarity pre-existing magnetic flux (review by Gaizauskas¹). We have identified and analyzed the evolution of such flare sites at the boundaries of a major new and growing magnetic flux region within a complex of active regions, Hale No. 16918. This analysis was done as a part of a continuing study of the circumstances associated with flares in Hale Region 16918, which was designated as an FBS target during the interval 18 - 23 June 1980. We studied the initiation and development of both major and minor flares in H α images in relation to the identified potential flare sites at the boundaries of the growing flux region and to the general development of the new flux. This study lead to our recognition of a spectrum of possible relationships of growing flux regions to flares as follows:

- (1) intimate interaction with adjacent old flux - flare sites centered at new/old flux boundary,
- (2) forced or "intimidated" interaction in which new flux pushes old field having lower flux density towards a neighboring old polarity inversion line where a flare then takes place,
- (3) "influential" interaction - magnetic lines of force over an old polarity inversion line, typically containing a filament, reconnect to the new emerging flux; a flare occurs with erupting filament when the magnetic field overlying the filament becomes too weak to prevent its eruption,
- (4) inconsequential interaction - new flux region is too small or has wrong orientation for creating flare conditions,
- (5) incidental - flare occurs without any significant relationship to new flux regions.

INTRODUCTION

Many studies in recent years claim or suggest a relationship between emerging magnetic flux regions and solar flares (reviews by Gaizauskas¹ and Priest²). In most cases the references are not to isolated magnetic flux regions (active regions) but to the development of new magnetic flux within pre-existing active regions. One of our goals in the continuing study of FBS target, Hale Region 16918 has been to investigate and clarify the nature of this relationship between newly developing magnetic flux and the occurrence of flares. In the previous work (Martin et al.³), we found a statistical relationship between the sites of 66% of the flares and the sites of 17 new magnetic flux regions observed over a period of 8 days. Because the statistical study leaves many questions unanswered about the physical circumstances of the association, we take a different approach in the present work. We investigate in detail how the new magnetic flux regions interact with the magnetic field of the pre-existing active region and then study where the flares occur and where they do not occur in relation to the interaction of the new and old magnetic field. The day to day evolution of H α , magnetic field, and velocity field data in this complex as a whole, without regard to the sites of new magnetic flux, has been described by Athay, Jones and Zirin⁴.

THE IDENTITY OF A NEW FLUX REGION

In this paper we show the details of only the largest new magnetic flux region, designated as region F in the previous paper (Martin et al.³). Figure 1 depicts the daily growth of the new flux region in H α . The new region is first seen on 19 June very near the polarity inversion line of the pre-existing complex of active regions. (See Gaizauskas⁵ for the previous evolution of the complex.) The approximate boundaries of the new flux region are shown by a combination of solid and dashed lines. The solid lines show the sites where part of the new magnetic flux is abutted against opposite polarity flux of the pre-existing active region. At these sites, the boundaries of the new region are very definite and are often clearly marked by filaments. The arrows in Figure 1 indicate that

these are also key sites for the initiation of many flares. The dashed sections of line show only the approximate location where new and old magnetic flux of the same polarity have merged. At these places, no definite boundary exists that can be followed from day to day because the magnetic fields of similar polarity intermingle and leave no trace of their previous migration.

We note that this secondary emergence of new flux has all of the same properties of any new active region that could occur on the quiet sun. During the first day it reveals the characteristic arch filament system (Bruzek⁶; Weart⁸) and sunspots. The sunspot evolution is illustrated in Figures 2 and 3.

THE IDENTITY OF KEY FLARE SITES

Early on 19 June, there is only one key flare site, S_1 in Figure 1, specifically on the boundary of the new flux region. However, by the end of 19 June, a second potential flare site, S_2 , has developed. The second flare site becomes insignificant by 20 June and a third site, S_3 , has developed due to the westward growth of the new magnetic flux and concurrent westward motion of sunspot 1.1 in Figure 2. On 21 June, a fourth key flare site develops after the secondary emergence of a small new flux region within the large new flux region. Most of the key flare sites on the boundary of the major new flux region are recognizable by bright plage separated only by a thin filament. Sometimes the filament is broken exactly where the plages of opposite polarity are close together. In all of the key flare sites marked by arrows in Figure 1, compression of the magnetic flux along the polarity inversion line occurs and is due to the growth of the new flux region. We confirm the conclusions of Bumba et al.⁹ that compression of fields of opposite polarity is a situation that leads to high flare incidence.

Another situation that leads to high flare incidence was described by Martres et al.¹⁰. This is the circumstance of "evolving magnetic features" in which an increase in magnetic flux occurs on one side of a polarity inversion line while a decrease occurs in the adjacent opposite

polarity field. This condition of evolving magnetic features is more obvious when we analyze the associated sunspot growth and decay patterns. In Figure 2 the birth of the sunspot group of the new flux region is seen on 19 June, and by 20 June, the spots of the new region already contain the highest flux within the complex. Concurrent with this rapid spot growth, the nearby pre-existing spots, 2.1, 2.11, 2.12 and 2.b, are rapidly disappearing, an important sign of decrease in the total magnetic flux of the old flux region. Flare site S_1 lies between the growing spots of the new flux region and the adjacent decaying sunspots and is thus a prime example of an evolving magnetic feature.

In Figure 3⁴ the actual sites of flares occurring between 1500 on 21 June and 0100 on 22 June are shown as dark gray areas superposed on a set of isogauss contours from Kitt Peak Observatory magnetograms. Positive polarity contour lines are wider than negative polarity contour lines. The flares are shown for intervals within 2 hours or less of the time that the magnetograms were acquired. For comparison with the flare locations, the approximate boundary of the new flux region is shown by the dashed contour on the last magnetogram as in Figure 1. Figure 3 illustrates the tendency for most of the flares to cluster around the border of the new flux region. However, we note that the sites of flares that occurred during this interval were definitely not all confined to the key flare sites on the boundary of the new flux region shown in Figure 1.

In Figures 4 and 5, we compare a flare that occurs at key flare site S_1 , the evolving magnetic feature, to a subsequent flare that occurs around the old polarity inversion line to the southeast of the new flux region, not an evolving magnetic feature (lower left in Figures 1 and 4). In Figure 4 the brightest flare segments are seen to begin below the sunspot at site S_1 . As the flare grows, additional flare points that have appeared within the new flux region (1859:44) are complemented by additional flare points approximately equidistant from S_1 but to the southeast of S_1 . Finally, we note a third stage of the flare at 1911:03 in which complementary flare segments appear in opposite polarity fields at the extreme right and left sides of this image and the subsequent images. These outermost parts of the flare are also approximately

equidistant from the initial flare site. The pattern of flare development suggests that the conjugate pairs of successive flare elements seen here in the chromosphere should be connected by successively longer and higher flare loops in the corona.

Within 5 hours of the occurrence of the flare in Figure 4, an importance 2 flare takes place at some but not all of the same chromospheric sites. This next flare, shown in Figure 5, does not display homology with the earlier flare in the sense of starting at the same site. Instead it is seen to begin along the polarity inversion line of the old field to the southeast of the new flux region. It spreads in both directions along the polarity inversion line to form a major classic two ribbon flare. In Figure 5, the contours within the square represent soft X-ray emission detected by the flat crystal spectrometer (FCS) of the X-Ray Polychromator (XRP) aboard the Solar Maximum Mission (SMM) satellite. The highest contours in the soft X-ray images are initially centered over the new magnetic flux region but later appear over the polarity inversion line of the old pre-existing active region. Because long-lived X-ray sources often persist for hours after at least some flares, we think that the early peak in the soft X-ray image should be associated with the remnants of at least one earlier soft X-ray flare and that the lesser peaks in the X-ray flux to the southeast are the ones that should be identified with the start of this major flare on 21 June.

The alignment of the FCS and H α images from Big Bear Solar Observatory was achieved through the superposition of sunspots in both types of images. The alignment is shown in the upper two images in Figure 5. The dashed contours represent the sunspots in the FCS images. The FCS sunspots are superposed on images at H α + 1.0 Å. This alignment can then be transferred to the H α centerline images for comparisons of the flare emission by first aligning H α features common between the 1A (upper row) and 1/2A (middle row) and then between the 1/2A (middle row) and H α centerline images (lower row). Since the field of HXIS (outer box with indented corners) is also known relative to the FCS and XRP field, it is then possible to align the HXIS and H α images accurately.

The correspondence between the H α flare ribbons and the HXIS X-rays in the lowest energy band is shown in Figure 6 for three successive times during the 21 June major flare. The peak of the HXIS X-rays coincides well with the XRP X-rays. Since there is only a single dominant peak in all of the X-ray images and the peak straddles the flare ribbons in H α , we conclude that the X-ray emissions are dominantly coming from a loop system overlying the polarity inversion line. An H α loop system was subsequently observed during the later phase of the event in H α . Both the chromospheric and coronal data sets confirm our assertion that this major flare did not start at any of the key flare sites along the boundary of the emerging flux region.

Less than one day after the large flare on 21 June, illustrated in Figures 5 and 6, another substantial flare did occur exactly on the boundary of the new flux region. This flare, beginning at 19:10, is shown in Figure 7. The flare starts at key flare site S₄, (Figure 1) where relatively bright opposite polarity plage is very close together and filaments extend in both directions from this site. The H α flare develops in opposite directions from the key flare site in such a way that it can be imagined to be the footpoints of flare loops that are excited at successively higher points in the corona, but still centered approximately vertically above the key flare site. This flare is regarded as a primary consequence of the growth of the new flux which plays a key role in the build-up of the circumstances for the flare to occur.

The next major flare to occur in this complex grew to encompass the same flare site as in Figure 7 but was initiated at the key flare site S₃, further west along the same polarity inversion line. This flare is illustrated in Figure 8 along with a diagram made at the Debrecen Observatory that shows the previous and subsequent positions of the closest sunspot of the emerging flux region. Figure 8 also shows the previous and subsequent positions of the filament at and near the flare site.

In order for the sunspot illustrated in Figure 8 to move approximately parallel to the neutral line, the spot must push outlying flux of similar polarity toward the key flare site. Due to this westward motion, we also expect the gradient of the magnetic field to be increasing - at least until about midday on 22 June after which time the spot area is seen to decrease. The increasing gradients at this key flare site and the key site of the 21 June, 1910 flare are confirmed in the series of 62 area scan magnetograms acquired at Kitt Peak Observatory on 21 June. From the earliest magnetogram at 1637 until the flare at 1910, the gradient close to the polarity inversion line is building up as opposite polarity peaks of magnetic field come closer together. Due to minor distortions from data line to data line in the magnetograms we are not yet certain whether the gradient continues to increase during the flare at 1910. However, after this flare it is clear that the opposite polarity peaks in the field continue to move closer together. In addition, the length of opposite polarity contact along the inversion line is increasing. The negative polarity moves toward and into the weaker parts of positive polarity field. These changes are related to the westward migration of the leading polarity, negative sunspot of the new flux region as shown in Figure 8. Less than 13 hours after the last magnetogram at 2323 on 21 June, the major flare on June 22 began.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

We have found that the flares in this complex have differing relationships to the growth of a new major flux region. The flares having the closest relationship to the new flux region are those that straddle the boundary between the new and pre-existing magnetic flux regions. The flares at 1859 on 20 June (Figure 4) and 1910 on 21 June (Figure 7) are of this type. Another group of flares originate at sites west of the emerging flux region where the relatively rapid motion of the leading polarity field (Figure 2) pushes the pre-existing field of similar polarity towards an opposite polarity field. The 22 June flare (Figure 8) is among this group of flares. The major flare on 21 June does not fit either of the above categories. There is little motion of the trailing sunspots toward the old polarity inversion line around which the flare begins. However,

the magnetic field configuration suggests that magnetic reconnection could readily occur between the positive field associated with the trailing sunspots of the emerging flux region and the adjacent negative polarity pre-existing field. This offers a third possible relationship to the new flux region. If the trailing, positive polarity fields of the new flux region slowly or intermittently reconnect with the negative fields of the old region, this reconnection would effectively "steal" old flux previously connected to its conjugate field over the adjacent old polarity inversion line. As the previous magnetic configuration changes, the filament along the old polarity inversion line reacts and begins to ascend into the corona. Finally the magnetic configuration in the corona changes from metastable to unstable and the flare occurs. Although we lack data to show direct evidence of such changes in the coronal magnetic field, we suggest that many flares associated with erupting filaments or "disparition brusques" occur as in this last scenario. As evidence of this third relationship, we cite the unusually high incidence of disparition brusques in the vicinity of new and growing active regions found by Bruzek⁷ and confirmed by Hermans and Martin¹².

Although the emerging flux region described here had affected the flare productivity of the complex in these several ways described, we do not claim that all emerging flux regions are effective in generating the conditions necessary for flares. Especially when the rate of growth of a new emerging flux region is slow or the orientation is such that similar polarities of new and old flux can merge, we would not expect flares to occur. Additionally, we think that it is feasible for flare conditions to be generated in the absence of emerging flux.

ACKNOWLEDGEMENTS

The acquisition of filtergrams by Big Bear Solar Observatory was made possible by NASA grant 05-002-034 and NSF grant ATM-7911139. KLH acknowledges support under NSF grant ATM-8319589. The contribution of SFM was supported by AFOSR grant 82-0018.

REFERENCES

1. V. Gaizauskas, SMM Workshop on Solar Flares, to be published by NASA, USA.
2. E. Priest, SMM Workshop on Solar Flares, to be published by NASA, USA.
3. S.F. Martin, L. Dezso, A. Antalova, A. Kucera, and K.L. Harvey, Adv. Space Res., 2, 39-51 (1983).
4. J. Athay, H. Jones, and H. Zirin, submitted to Astrophys. J. (1984).
5. V. Gaizauskas, Adv. Space Res., 2 (1983).
6. A. Bruzek, Solar Phys., 2, 451 (1967).
7. A. Bruzek, Zeit Astrophys., 31, 199 (1952).
8. S. Weart, Astrophys. J., 177, 271 (1972).
9. V. Bumba, L. Krivsky, M.J. Martres, and I. Soru-Iscovici, IAU Symp., 35, 311 (1968).
10. M.J. Martres, R. Michard, I. Soru-Iscovici, and T. Tsap, IAU Symp., 35, 318 (1968).
11. M.J. Martres, R. Michard, I. Soru-Iscovici, and T. Tsap, Solar Phys., 5, 187 (1968).
12. L.M. Hermans and S.F. Martin, Proceedings of the Workshop on Solar Terrestrial Predictions, Observatory of Paris at Meudon, 18-22 June 1984.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Photographed in H α at Big Bear Solar Observatory. The major new flux region developing in an active region complex is outlined by dashed lines and key flare sites at the boundary of this region are labeled S₁, S₂, S₃, and S₄.

Fig. 2. Photographs from the Debrecen Solar Observatory show the decay of sunspots 2a⁺, 2.12, 2.b₂, 2.b₁, 2.1, and 2.11 simultaneous with the growth of spots 1.a and 1.1 and subsequent associated spots of the new flux region illustrated in Figure 1.

Fig. 3. Magnetograms from Kitt Peak Observatory on 21 June 1980 with areas of all flares superposed (dark gray) from 1500 on 21 June until 0100, 22 June. For comparison, the outline (dashed contour) of the new flux region is shown on the last magnetogram. Positive contour lines are thicker than negative contour lines.

Fig. 4. This flare starts at key flare site S₁ (Figure 1) and spreads nearly symmetrically in time to progressively equidistant sites from S₁. By 1911:03 the flare has spread to the extreme sides of the active region complex. This late flare emission is relatively low in intensity. The pattern of development of the flare in the chromosphere would be consistent with the successive excitation of coronal flare loops at increasing heights above S₁.

Fig. 5. X-ray contours (solid curved lines) are shown superposed on H α images from the San Fernando Observatory at 3 wavelengths at the start of the flare (column 1) and during the rise of the flare to maximum (column 2). The relative positions of the soft X-rays from XRP on the SMM satellite and the flare in H α was found by aligning the sunspots recorded both in XRP (FCS images) and in the wings of H α (top row) H α + 1.0 Å. This alignment is then transferred to H α + 0.5 Å (middle row) on to H α centerline images (lower row). The soft X-rays are seen to center over the polarity inversion line between the flare ribbons in H α .

Fig. 6. Soft X-rays from the HXIS lowest energy band are shown relative to the flare ribbons in H α . The alignment was achieved as in Figure 5 with the additional knowledge of the position of the HXIS field relative to the XRP field also shown in Figure 5. A single peak in the HXIS X-rays is also centered over the polarity inversion line between the flare ribbons but southeast of the major new flux region.

Fig. 7. This flare beginning at 1910:01 coincides with key flare site S₄ (Figure 1). It spreads progressively along the boundary of the new flux region until it reaches the dominant opposite polarity sunspots. This flare, like the one in Figure 4, develops in a symmetrical pattern with successive chromospheric elements forming at nearly equidistant locations with respect to the key flare site. This pattern would be consistent with the successive excitation of coronal flare loops at progressively higher altitudes above the key flare site as a function of time.

Fig. 8. Motions of the leader sunspot within the major new flux region and changes in the position of the neighboring polarity inversion line (filament) are shown prior to and after the major flare on 22 June 1980. The diagram, made at the Debrecen Observatory, corresponds to the central part of the filtergram on the top. The initiation site of this flare is centered at the place where the filament position was fixed during this 3 day interval. This site is identified as key flare site S₁ in Figure 1.

| 70 000 km |

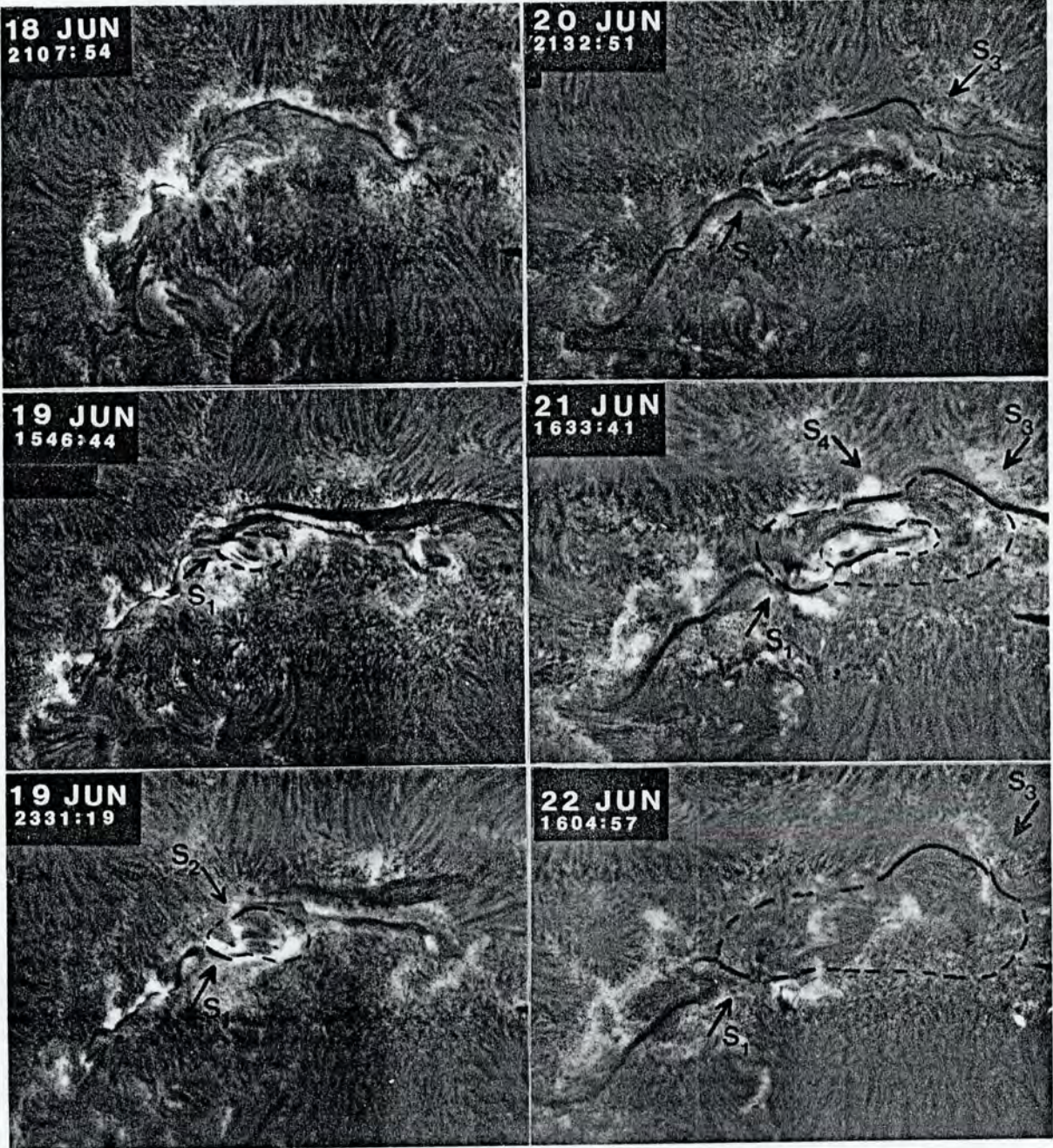


Figure 1

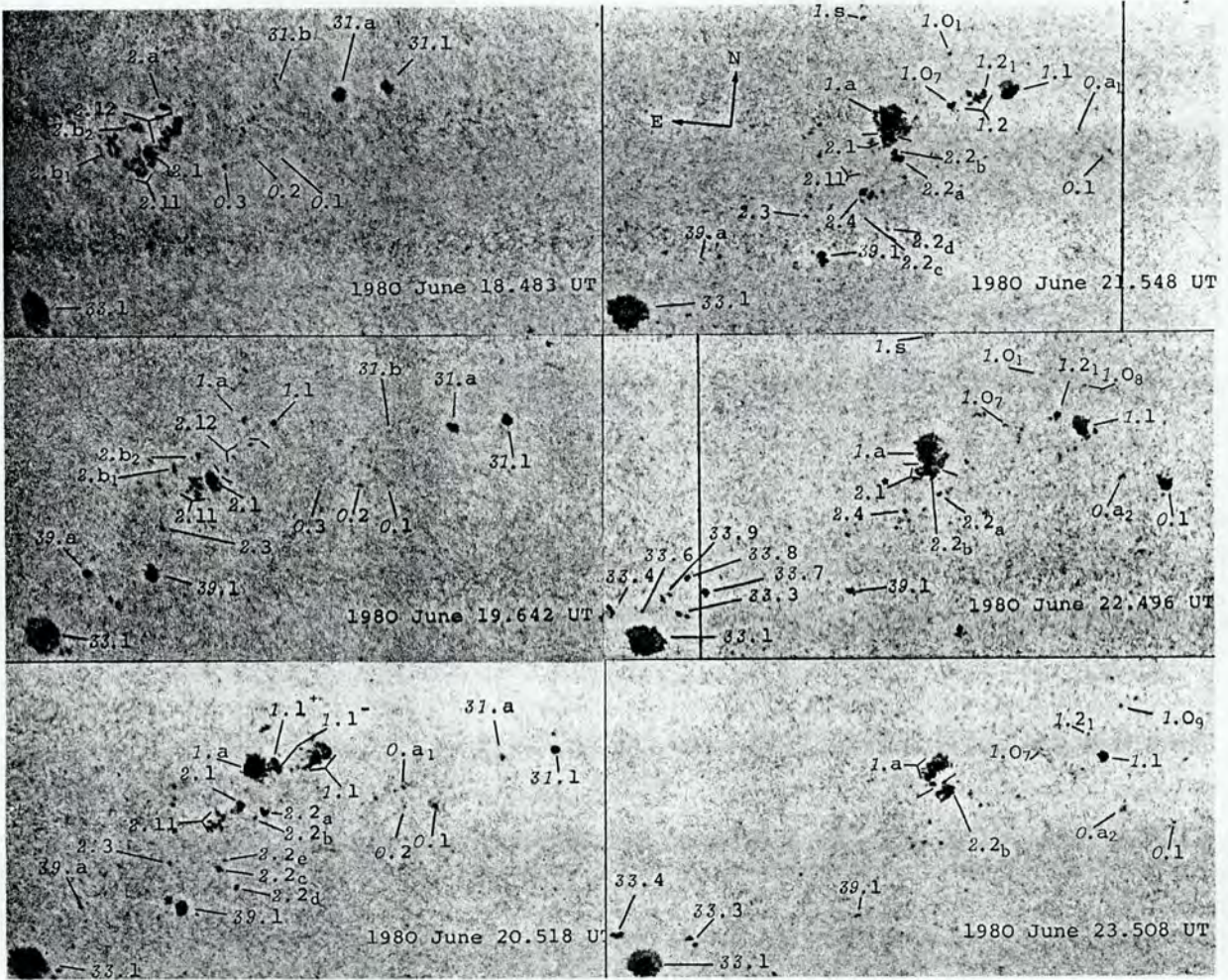


Figure 2

20 JUN 1980

| 70 000 km |

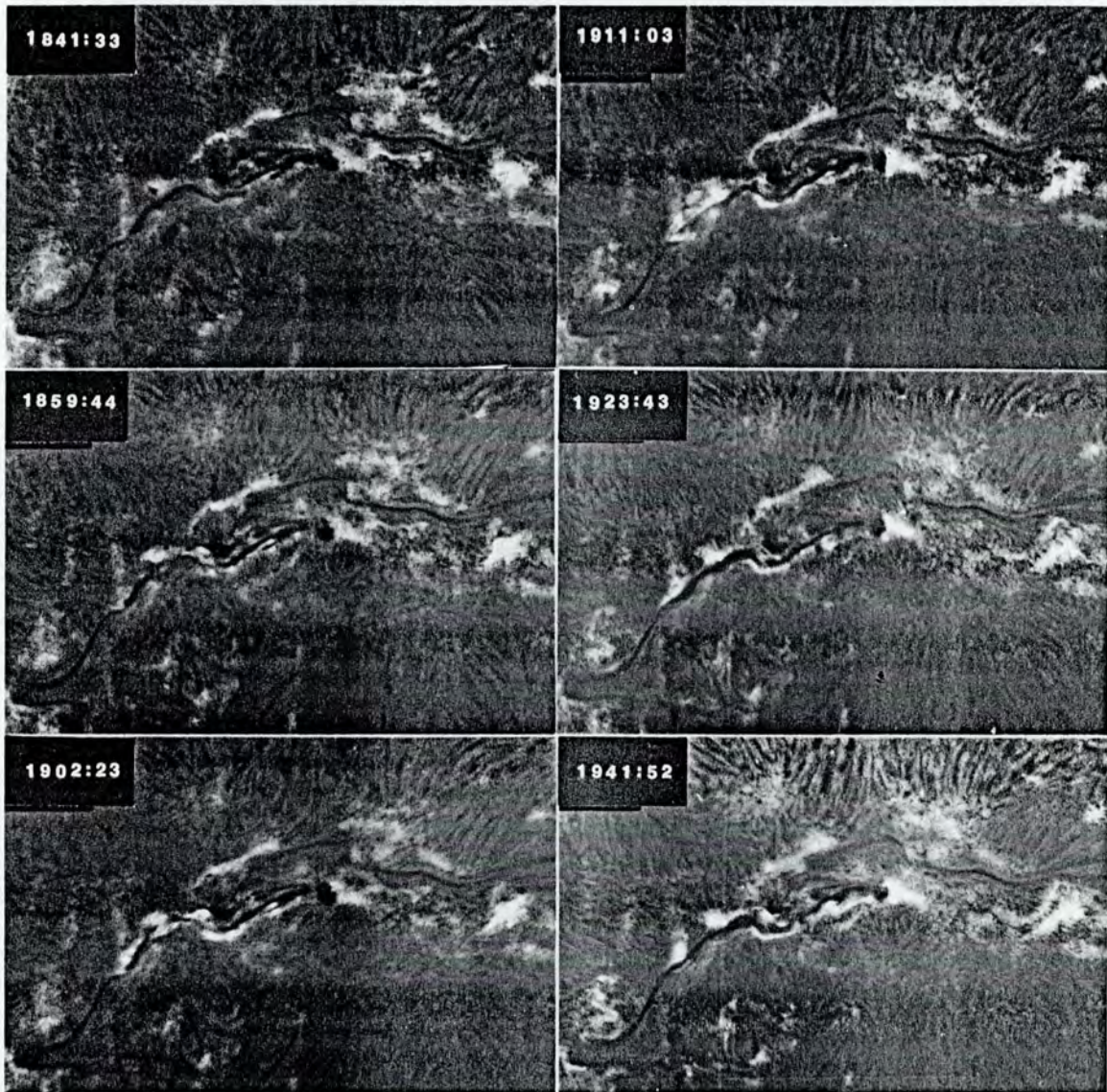


Figure 3

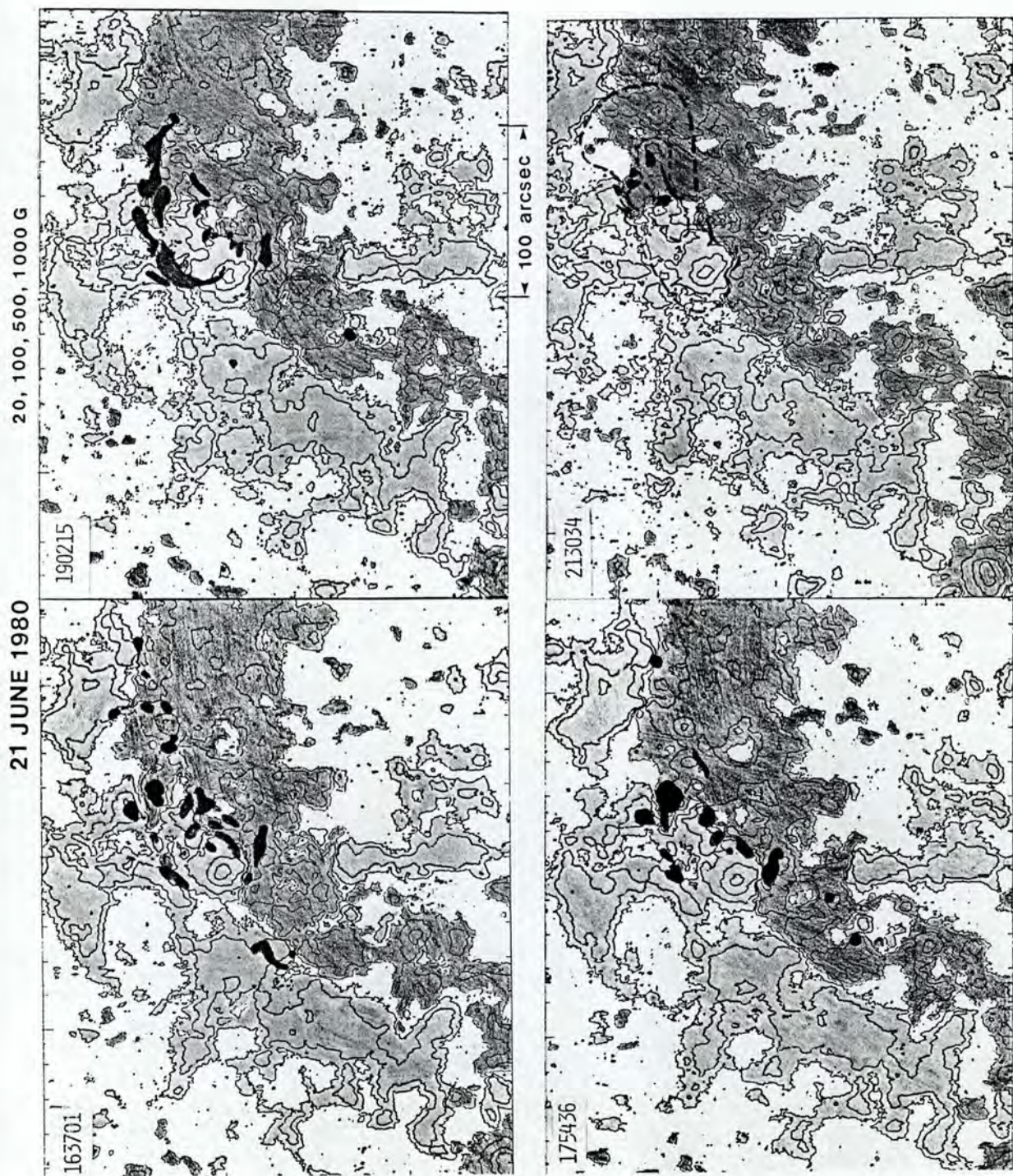


Figure 4

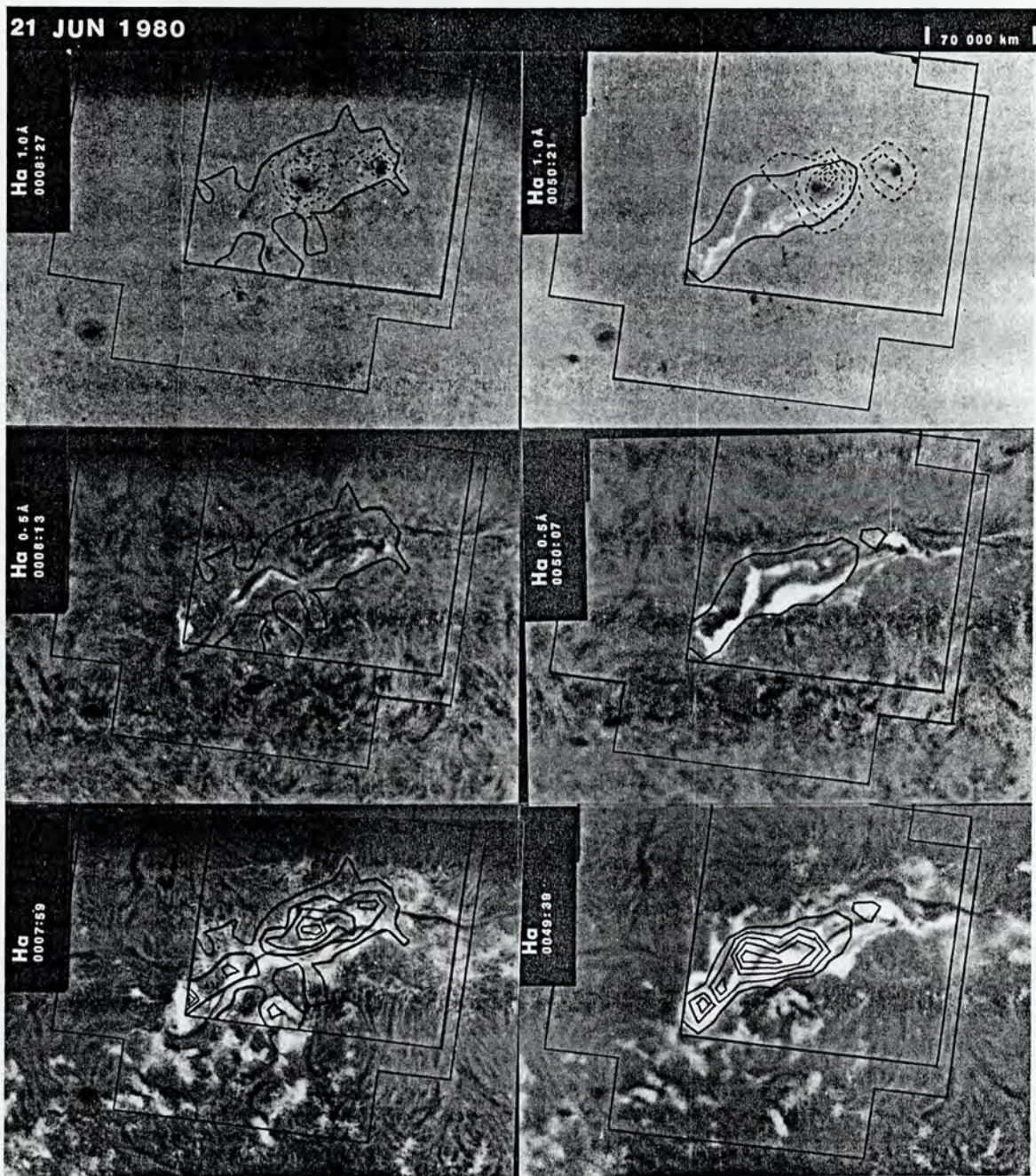


Figure 5

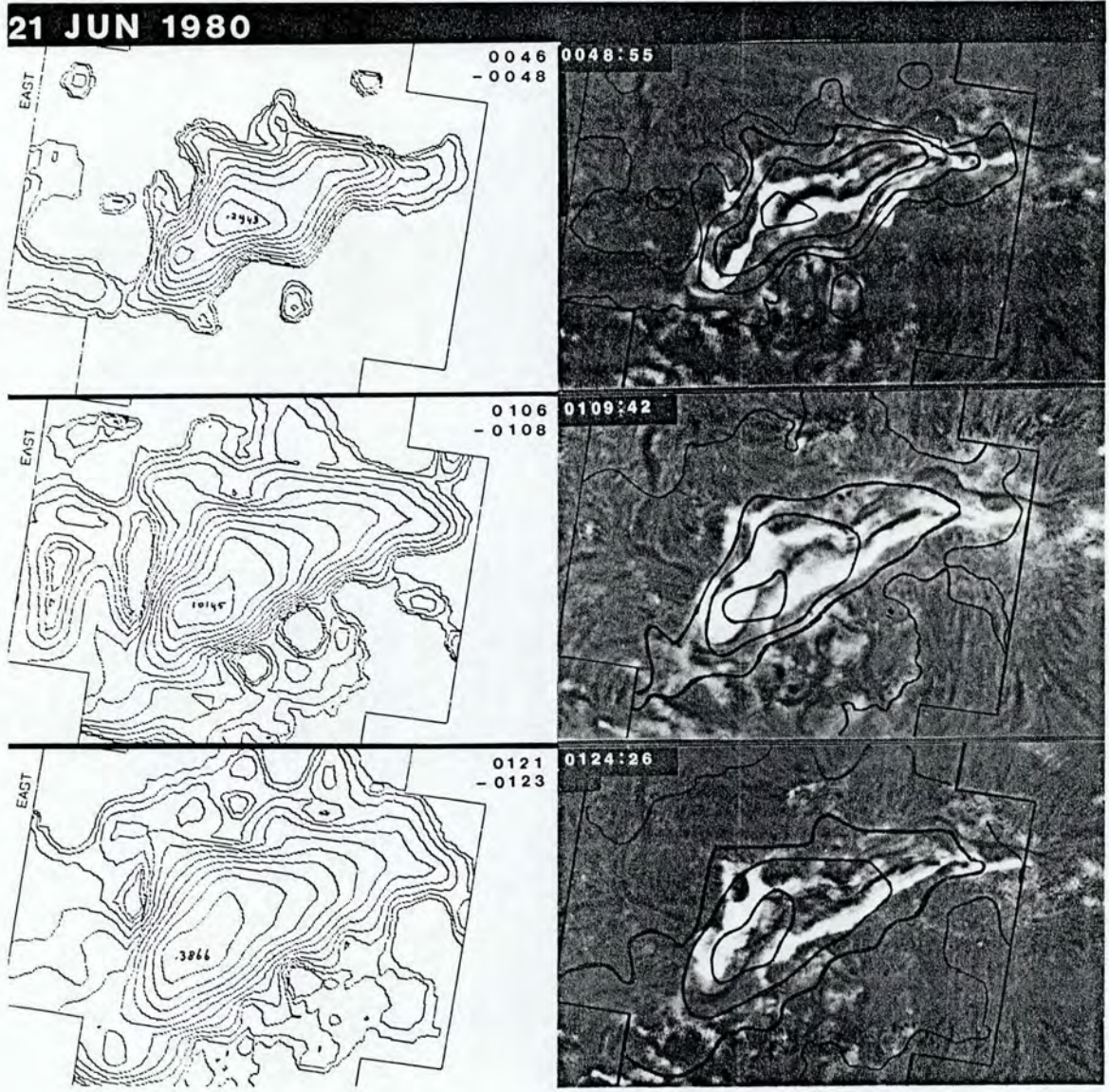


Figure 6

21 JUN 1980

70 000 km

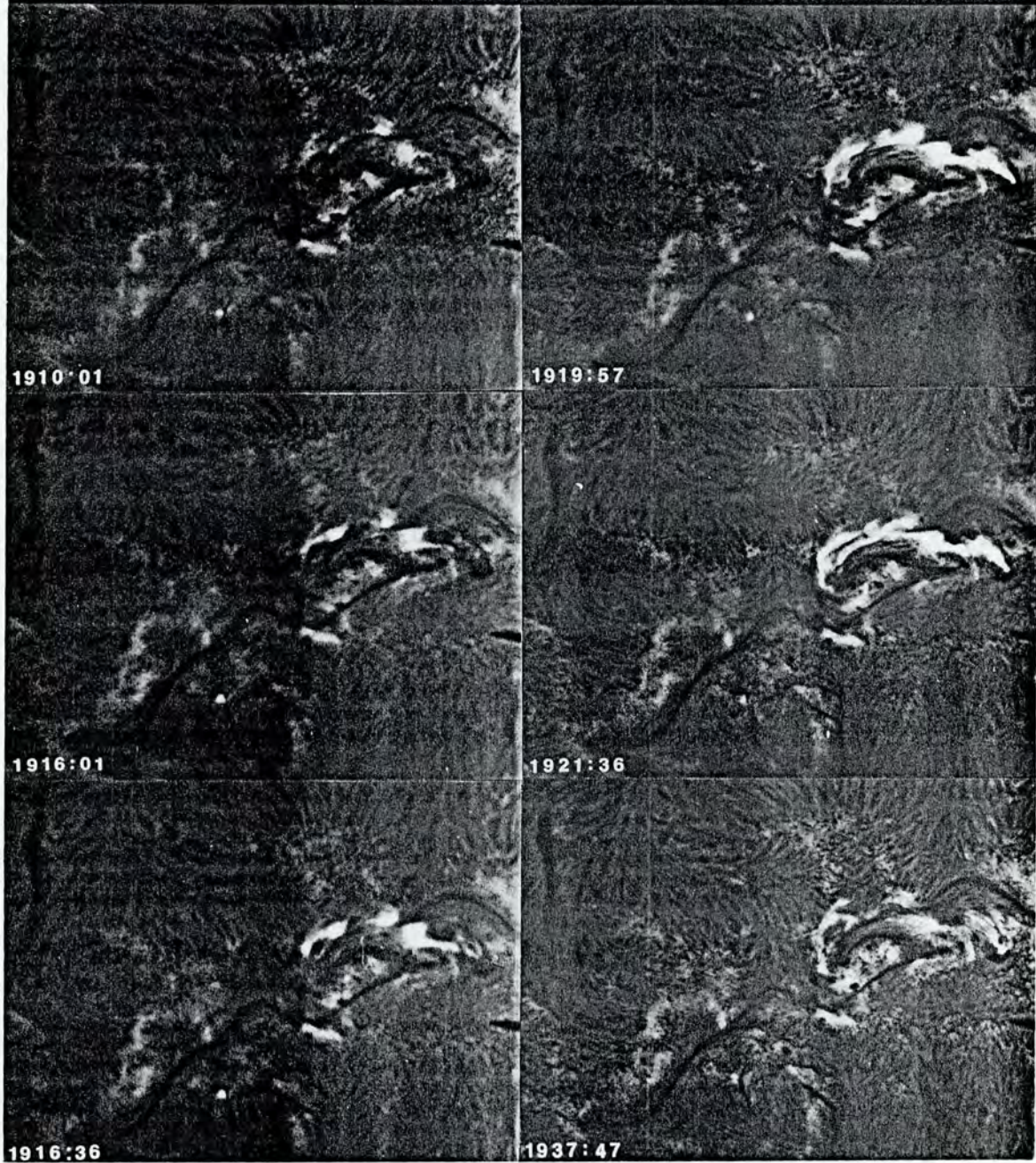


Figure 7

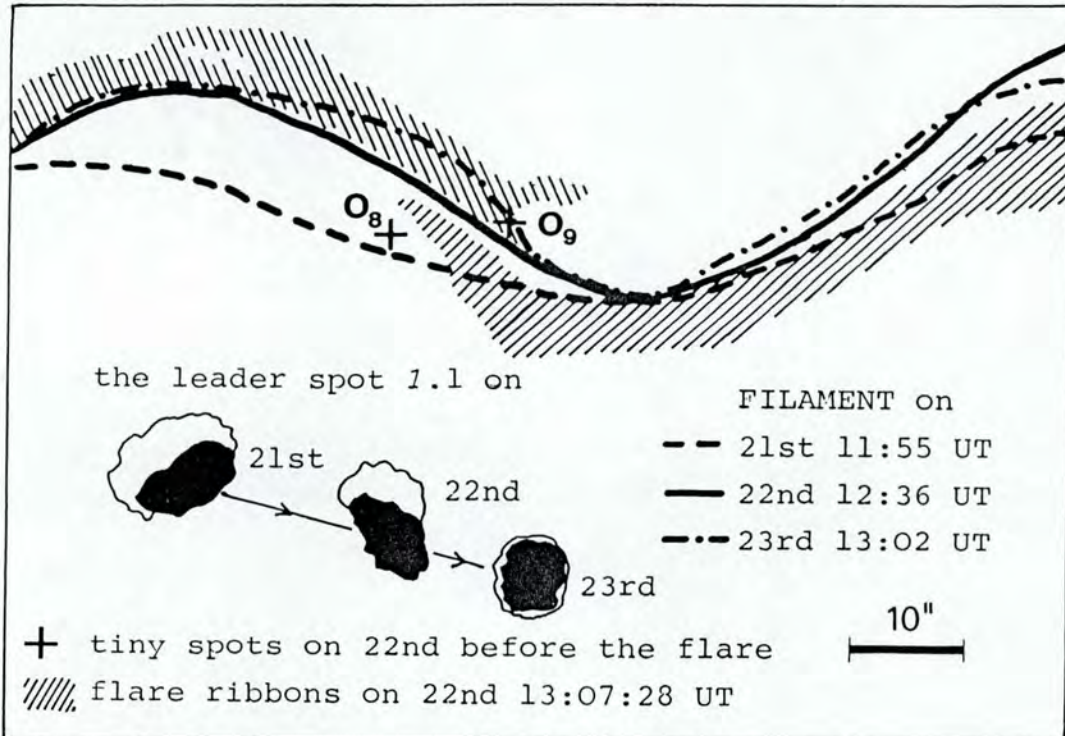
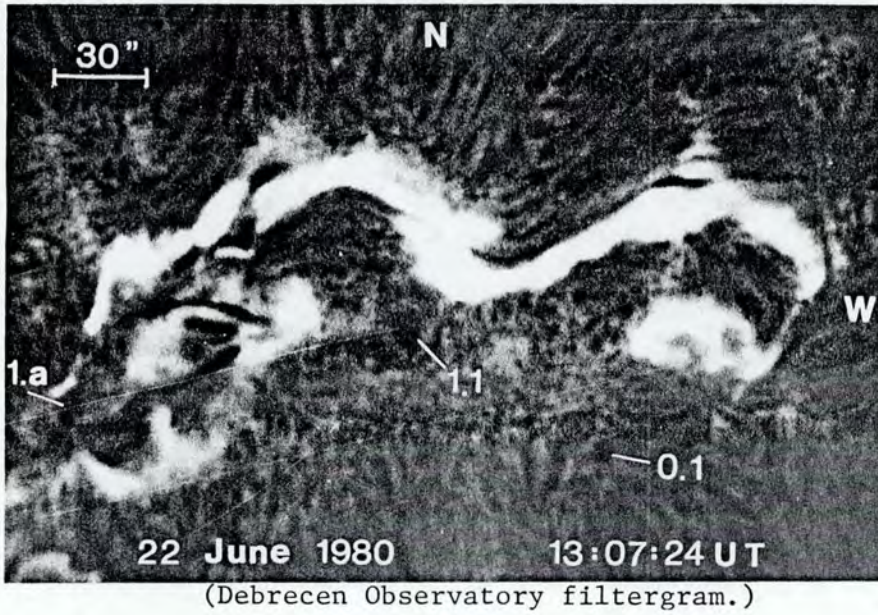


Figure 8

The Cancellation of Magnetic Flux. I On the Quiet Sun*

S. H. B. Livi,^{A,B} J. Wang^{A,C} and S. F. Martin^A

^A Solar Astronomy 264-33,
California Institute of Technology,
Pasadena, CA 91125, U.S.A.

^B Visiting Astronomer, Instituto de Física,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, Brazil.

^C Visiting Associate, Beijing Observatory,
Beijing, China.

Abstract

We studied the disappearance of magnetic flux in an area of the quiet Sun from digital and photographic magnetograms recorded at 2.5 min intervals for many hours on 9 July 1984 at the Big Bear Solar Observatory. We limited the quantitative part of the analyses to features which had a total of 10^{17} Mx (1 Mx = 10^{-8} Wb) or greater and at least a 20 G (1 G = 10^{-4} T) contour, and which changed by more than 10% of the maximum measured flux during the 5.5 hours of most consistent image quality during the observing day. Sixteen examples of flux disappearance and three ephemeral regions met these criteria. The disappearance of flux in these examples occurred only in closely spaced features of opposite polarity. The mutual disappearance of magnetic flux in closely spaced features of opposite polarity is herein defined as 'cancellation'. The 16 examples of cancellation were observed in combinations of network features, intranetwork features, and ephemeral regions. In two of the three ephemeral regions, an imbalance of magnetic flux between the two poles within each of the ephemeral regions was created, at least in part, by the cancellation of one pole with an adjacent feature of opposite polarity. Many smaller cancellations are clearly recognized below the threshold that we established for our initial measurements. We conclude that cancellation is the dominant way in which magnetic flux is observed to disappear on the quiet Sun.

1. Introduction

Using the videomagnetograph at the Big Bear Solar Observatory, we are able to record the frequent emergence and disappearance of small magnetic features on the quiet Sun. In the time-lapse videomagnetogram films obtained, many examples are shown of both the emergence and disappearance of magnetic flux. Additionally, continuous motions and interactions take place between combinations of the strong network magnetic fields, the weak intranetwork magnetic fields and ephemeral regions. Some of these phenomena and interactions recorded in the films have been described in our previous papers (Martin 1984; Martin *et al.* 1985a; Wang *et al.* 1985; Zirin 1985, present issue p. 961).

Our primary emphasis in the present paper is on presenting new quantitative measures of the line-of-sight component of the magnetic flux for examples of

* Paper presented at the R. G. Giovanelli Commemorative Colloquium, Part II, Tucson, Arizona, 17-18 January 1985.

disappearing magnetic features recorded both photographically and digitally on 9 July 1984. Our examples include the partial disappearance of the new magnetic flux from ephemeral regions. As a background, in the next section, we first present recent photographic images illustrating the appearance, disappearance, and interactions of magnetic features on the quiet Sun.

2. Background: The Appearance, Disappearance, and Interactions of Magnetic Flux on the Quiet Sun

The series of images in Fig. 1 reveals several typical aspects of the behaviour of magnetic features on the quiet Sun. The frames in Fig. 1 were selected from the time-lapse videomagnetogram film taken on 13 October 1984. Each frame is only a small area from the magnetograms. Zirin (1985) shows the whole field of view of the videomagnetograph on this day in Fig. 2 of his paper (see p. 964). Zirin also presents details about the videomagnetograph and the data acquisition. In Fig. 1 of our paper, the contours seen in the middle of the magnetic features are created each time the memory of the digital image processor becomes saturated. The outermost contour is estimated to be between 40 and 80 G and each successive inner contour represents higher fields by a factor of 2. The polarity of each feature is revealed by the colour outside the most external contour; positive polarity fields are white and negative are black. Each frame in Fig. 1 and subsequent figures are labelled in universal time (UT).

The initial appearance and early evolution of two ephemeral regions are shown within the ovals in Fig. 1. The first ephemeral region, F1, is one of the smallest ephemeral regions recorded to date with the videomagnetograph. At 1823, the second, larger ephemeral region is seen immediately below the first ephemeral region. The larger of the two ephemeral regions, labelled F2, is the same as feature '3' marked on Fig. 2 in Zirin's (1985) paper. The fact that the positive pole is stronger could be attributed to the previous existence of positive field at the place where the positive pole emerged. The subsequent growth in flux is readily recognized by the increase in area and in magnetic field strength of both poles.

Both ephemeral regions in Fig. 1 show the typical separation of their poles as a function of time until another magnetic feature of opposite polarity is encountered. The relative mean speed of separation in both cases was 0.6 km s^{-1} . The encounter of the negative pole of F1 with an adjacent positive fragment of magnetic flux, Z1, is seen in Fig. 1 in the frames at 1823 and 1907. At 1940, the negative poles of the two ephemeral regions begin to merge and by 2057, the two negative poles are indistinguishable. Thus, both negative poles of the ephemeral regions have encountered the same fragment of positive magnetic flux, Z1. Such encounters of small opposite polarity fragments of magnetic flux are almost always accompanied by obvious loss of magnetic flux in both of the encountering features. In this situation, the loss of flux in the positive magnetic feature is clearly seen by 2057. The loss of magnetic flux in the negative poles is masked by their merger. This example was selected for illustration because it reveals the complex interactions that often take place between magnetic features on the quiet Sun. It provides a background of the behaviour that must be taken into account when analysing the digital magnetograms illustrated in the remainder of this paper.

We do not confirm the disappearance of magnetic flux where only one polarity is involved (Topka and Tarbell 1984). We attribute the lack of confirmation to the higher

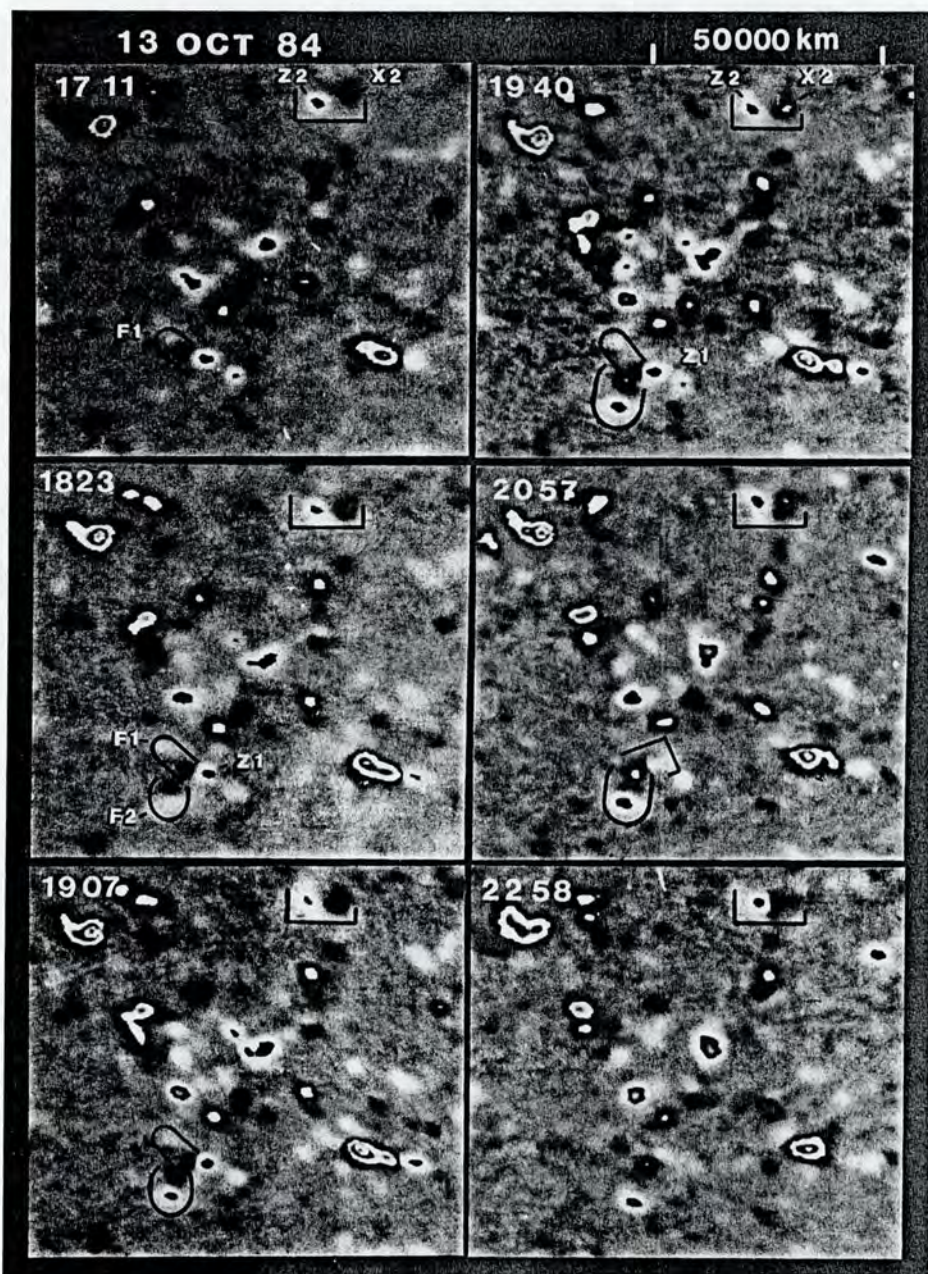


Fig. 1. In this videomagnetogram, the positive (white) and negative (black) polarity are identified outside of the contours. The first contour represents flux between 40 and 80 G and each successive inner contour represents a doubling of the field strength. The opposite polarity components of two ephemeral regions, F1 and F2, are seen to separate from each other. Due to this motion, the negative (black) poles of F1 and F2 encounter the adjacent fragment of positive magnetic flux Z1 at 1907 and 2057 respectively. The loss of flux in the negative poles after the encounter is masked by their merger but obvious loss of flux is seen in Z1 by 2057. Another example of opposite polarity fragments of flux approaching each other (1711-2057) and then cancelling (2258) is shown within the partial rectangle in the upper part of each frame.

magnetic sensitivity of the magnetograms that we have used in our studies. If we used magnetograms of lower sensitivity, it is clear in some situations that we might arrive at different results. For example, suppose the spatial resolution and sensitivity of the magnetograms in Fig. 1 had been less—sufficient to allow us to resolve and detect the larger, but not the smaller of the two ephemeral regions. In such a circumstance, we would have recognized only the encounter of the negative pole with the adjacent positive fragment. Then we might have erroneously concluded that the encounter resulted in the destruction of the positive flux and the simultaneous enhancement of the negative pole. Thus, our interpretation of observed flux changes should always take into account the possibility of the cancellation and merging of small fragments of magnetic flux below the threshold of detectability of the magnetograph.

For contrast with the two ephemeral regions, we also show, within the partial rectangles at the top of each frame in Fig. 1, an apparent dipolar feature. This feature initially looks similar to an ephemeral region but does not behave like one. It consists of two isolated, opposite polarity fragments, Z2 and X2, moving toward each other, a pattern of motion that has not yet been observed for any isolated ephemeral region. There is no certain change in the magnetic flux of these approaching features of opposite polarity at least until they come into contact as shown in the last frame at 2258. Because of the constancy in magnetic flux in Z2 and X2 before the last frame, these features serve as a good reference against which the ephemeral region changes and interactions can be compared.

The features described in Fig. 1 confirm our previous observations which have shown that isolated newly emerging ephemeral regions consistently exhibit properties that differ from the magnetic features that disappear (Martin *et al.* 1985*a*). Ephemeral regions do not disappear as units. Each pole individually disappears (loses magnetic flux) only when it encounters another magnetic feature of opposite polarity as illustrated in Fig. 1. Alternatively, the poles of an ephemeral region equally often encounter and merge with magnetic features of the same polarity without loss of magnetic flux. The defining characteristics of ephemeral regions are (1) appearance as a bipolar unit, (2) growth of both poles (which may be unequal if opposite polarity flux has been encountered) and (3) separation of the negative and positive pole from each other as a function of time, if opposite polarity flux has not been encountered. In contrast to these properties of ephemeral regions, the disappearance of magnetic flux on the quiet Sun is characterized by: (1) the approach of opposite polarity fragments of flux from different sources, (2) increasing magnetic field gradient between the opposite polarity fragments, which most often continues after the initial encounter, and (3) the slow and steady loss of magnetic flux in both of the encountering features. We henceforth use the term 'cancellation' to describe this type of disappearing magnetic flux. Our specific definition of cancellation is 'the mutual loss of magnetic flux in closely spaced features of opposite magnetic polarity'.

The disappearance of the line-of-sight magnetic flux in closely spaced magnetic features of opposite polarity has been previously described by Kömle (1979), Martin (1984), Martin *et al.* (1985*a*) and Wang *et al.* (1985). The properties of ephemeral regions were first described by Harvey and Martin (1973) and were further amplified by Tang *et al.* (1983) and Martin *et al.* (1985*a*).

In this paper, we use the term 'merge' only to describe magnetic features having the same polarity and which move together. Merging is accompanied by neither apparent loss nor gain in total magnetic flux of the merged features. We use the term

'encounter' only to describe opposite polarity fragments which move into apparent contact. Encounters are usually accompanied by cancellation.

The opposite polarity components of cancelling features have been shown to originate from fragments of network, ephemeral region and intranetwork magnetic fields (Martin 1984). Wang *et al.* (1985) have shown that it is convenient to label and classify cancelling features according to the origin of their components. In this paper, we use the following notation for labelling features:

Network fields	Ephemeral regions	Intranetwork fields	Unknown source
N = negative	E = neg. pole	I = negative	X = negative
P = positive	G = pos. pole	K = positive	Z = positive
	F = both poles		

Every cancelling feature is identified by a combination of two of the above letters. Additionally each letter is followed by a number which identifies each specific feature in the illustrations.

3. The 9 July 1984 Data from the Videomagnetograph

On 9 July 1984, continuous magnetograms were taken as on 13 October 1984 illustrated in Fig. 1. However, on this day a special effort was made to record all of the data digitally on magnetic tape as well as photographically. Two sample isogauss maps of one-quarter of the field of view of the magnetograph are shown in Fig. 2. The maps are constructed from the two digital images selected at a time interval of 2.5 hr to show the large amount of magnetic field changes that are observed during a fraction of an observing day.

Two distinct sites where the magnetic flux is disappearing at the time of the first frame in Fig. 2 are marked by partial rectangles. A new ephemeral region, F4, is enclosed in the oval in the second frame of Fig. 2. Some relatively high concentrations of intranetwork magnetic flux are labelled I1, I2, I3, I4, K1, K2, K3 and K4. The means of identification of these features by their evolution are discussed in the following sections. In this section, we discuss the general character of the data and our methods of analysing it.

This data acquired on 9 July 1984 has much better temporal resolution than was available for the previous quantitative studies (Wang *et al.* 1985). The typical interval between images was 2.5 min with several interruptions from 8 to 30 min and one longer gap of 64 min during which the calibration was made. The total series consists of 192 images recorded between 1440 UT (9 July) and 0058 UT (10 July). Each image corresponds to 2048 integrated video frame pairs. Real signal was recorded down to at least the 5 G level. The levels shown in Fig. 2 and all subsequent figures are 5, 10, 20, 40, 80, 160 and 320 G. Thicker lines are positive magnetic fields; thinner lines are negative fields. The strong network fields above 80 G are sufficiently stable that they can be correctly identified as being the same features between the early frame at 1845 and the later frame at 2114. However, even the relatively stable network features, N1 and P1, are seen to change shape. The positive feature, identified by P1, is seen to be more round in the first image and more elongated in the second. An opposite change in shape took place in N1. Initially it was elongated and had two

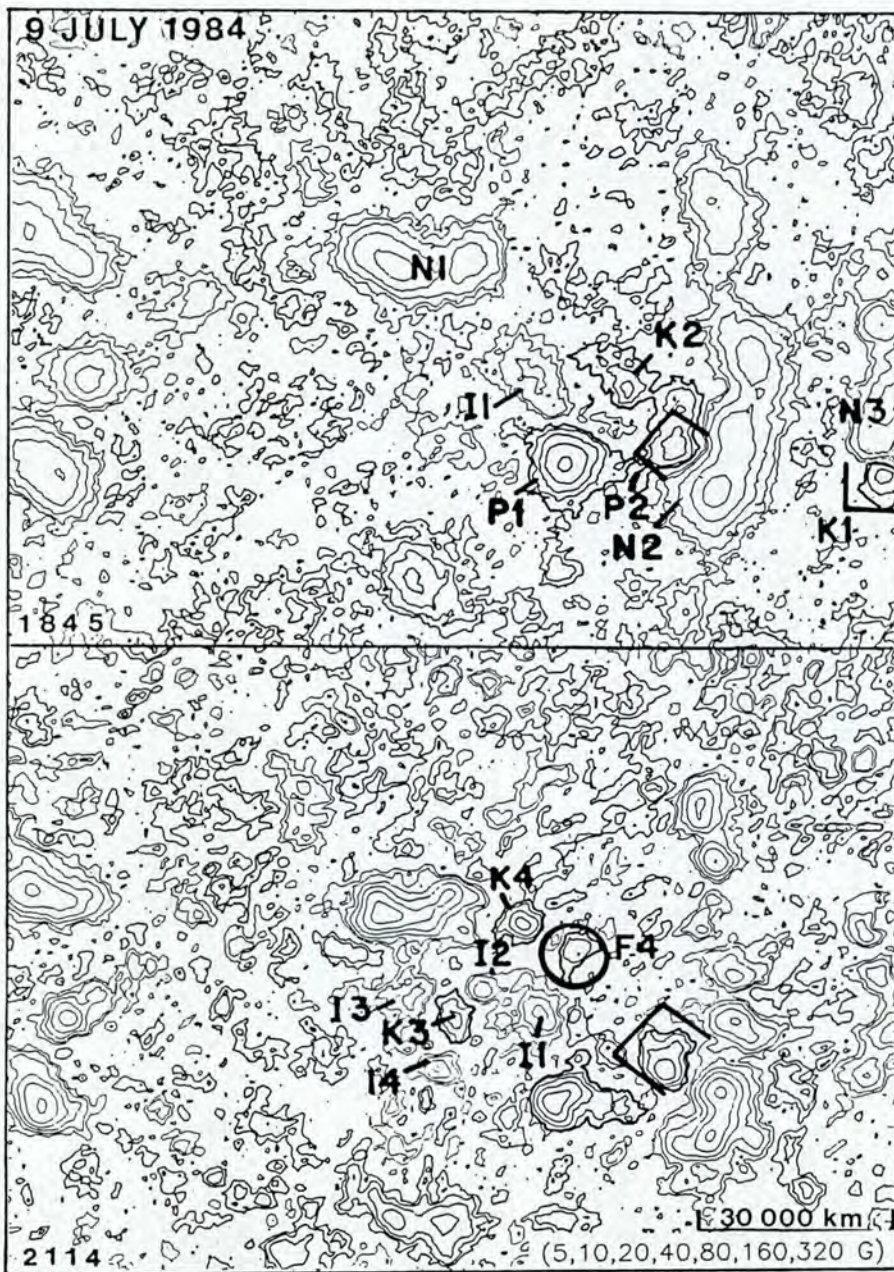


Fig. 2. These digital magnetograms show one-quarter of the total field of view used for the videomagnetograph at the Big Bear Solar Observatory on 9 July 1984. Positive fragments of magnetic flux are shown by thicker lines than the negative flux. Network fragments such as N1 and P1 change shape in the 2.5 hr interval between these two images, but are readily recognized at the same positions. However, in the same interval, many new intranetwork fragments form such as I2, I3, I4, K3 and K4. A new ephemeral region is enclosed within the oval. Two major sites where magnetic flux is disappearing (cancelling) are enclosed within the partial rectangles.

local maxima. By the end of the interval under study, N1 was almost round (also seen in Fig. 5 as the network fragment in the upper left corner of each frame).

We initially analysed all of the photographic images as a movie and reviewed many individual digital images to identify the magnitude of changes that could be attributed to seeing and instrumental errors. The qualitative and quantitative analyses presented in this paper were made from 90 images between 19:00 and 00:30 UT during which the data were most uniform. The changes in all features within a $200'' \times 150''$ field of view could be consistently studied as a function of time. Even during this interval small changes over the entire images due to changes in the atmospheric image quality, the sensitivity of the magnetograms and in the balance of the opposite polarity fields could be seen. A small empirical correction was made to retain a constant ratio of positive to negative flux in the weak background fields. Another minor empirical correction was made to each of the measured images to retain approximately constant flux for the images as a whole. These corrections were made for separate research on the intranetwork magnetic fields. The corrections were found to be negligible to the results presented here because we limited the measurements in this study to the largest and most conspicuous examples of disappearing magnetic flux.

The features N1 and P1 were selected as reference features. For several hours they remained relatively isolated from other fragments of magnetic flux comparable in magnitude with the cancelling magnetic features that we selected for study. Network magnetic fields such as N1 and P1 usually do not change appreciably in total flux as long as they remain isolated from other fragments of flux. The degree of isolation is relative. On a small scale, all fragments of network are subject to continuous mergers with intranetwork magnetic flux of the same polarity and cancellation with intranetwork magnetic flux of opposite polarity (Martin 1984; Wang *et al.* 1985). After correction of the data for the changing sensitivity, P1 retained a total flux of $(8.6 \pm 0.5) \times 10^{18}$ Mx and the total flux of N1 stayed within $(3.1 \pm 0.1) \times 10^{19}$ Mx. The flux of P1 and N1, and all of the other features in this study, were calculated from 22 frames evenly distributed in time during the 5.5 hr interval.

In contrast to the relative stability of the network fragments in Fig. 2, it is seen that the smaller intranetwork fields, having peak contours of 5 and 10 G, are entirely changed during this interval. The sensitivity of the Big Bear videomagnetograph is sufficiently high that very weak fields of mixed polarity can be detected everywhere on the Sun as previously shown in magnetograms from Kitt Peak (Livingston and Harvey 1975; Harvey 1977; Sivaraman and Livingston 1982) and from the Lockheed Solar Observatory (Smithson 1975). Here, we do not plot fields below the 5 G level because we do not choose to discuss the nature of the intranetwork fields in this paper, aside from illustrating their role in cancellation. We need to identify their presence because the strongest intranetwork fields seen in these magnetograms develop fields on the order of 40 G or more and can become as strong as the weak ephemeral regions or small fragments of magnetic flux that split off from the more concentrated network magnetic fields. The intranetwork magnetic fields cancel and merge in the same way as the stronger magnetic fields. Some of the examples in this paper are relatively high concentrations of intranetwork magnetic fields which cancel with network magnetic fields.

During the intervals of isolation, the fluxes of the reference features P1 and N1 did not vary more than 10%. Although some of the changes are due to interaction with intranetwork magnetic fields, we attribute most of these variations to seeing,

telescope guiding errors, and changes in the transparency of the Earth's atmosphere. These effects combine together to give apparent changes in the sensitivity of the magnetograms. For example, in Fig. 3, a sensitivity change is seen from the average gain of one contour in most of the features in the frames between 2006 and 2102. To be certain that we are investigating real changes in magnetic flux, we included in the quantitative part of this study only features which initially had or developed a total flux of 10^{17} Mx or greater, initially had or developed a 20 G contour, and changed by more than 10% of the maximum flux measured for each feature. The change of 10% or more was selected as a criterion because the most stable, isolated network fields, N1 and P1, did not show variations greater than 10% in 22 frames selected for their measurement during the 5.5 hr interval under study. During the 5.5 hr of data analysed, 16 conspicuous examples of disappearing magnetic features and three examples of ephemeral regions fulfilled these criteria. All of these features revealed a consistent pattern of change (either steady increase or decrease in magnetic flux and area) during many consecutive magnetograms, in contrast to the reference network features.

All of the 16 examples of disappearance happened in closely spaced opposite polarity fields and thus fit our definition of flux disappearance by cancellation. Since our initial purpose in this study is simply to accurately describe observations, we have chosen to avoid terms such as 'annihilation' or 'submergence' that would imply some physical model or knowledge of what happened to the cancelled flux. Zwaan (1978, 1984) and Parker (1984) have mentioned ways that magnetic flux can physically be removed from the photosphere.

4. Examples of Cancellation of Magnetic Flux on the Quiet Sun

Fig. 3 shows the evolution of various cancelling features whose sites are labelled by partial rectangles on the second frame at 2006. The feature K5/I5 in the lower left is a typical cancelling feature. The opposite polarity fragments first move together resulting in an increasing magnetic field gradient until 2102. The beginning of the cancellation is masked by the larger degree of smearing of the features before 2006, possibly because of seeing effects. The decrease in the magnetic flux of both polarities is evident by 2219. By this time there is obvious reduction in both the area and number of contours in K5 and I5. The cancellation continues until the complete disappearance of the positive half, K5. The feature K5 reduced from 1.0×10^{18} Mx to below detection between 19:01 and 00:29 UT at an average rate of 0.2×10^{18} Mx hr⁻¹.

The interval during which the magnetic flux is cancelling is most often recognized in these images because the magnetic field gradient at the cancellation sites usually becomes higher than between any other two features of opposite polarity. High magnetic field gradients in the range 0.01 – 0.03 G hr⁻¹ (Wang *et al.* 1985) are very often evidence of cancellation, although it has not been shown that all sites of high gradient are necessarily the sites of cancelling features.

The increasing gradient is evidence of the migration of unresolved magnetic structures. Without such migration during the cancellation, the magnetic field gradient would decrease rather than increase.

Concurrent with observing increasing magnetic field gradients in cancelling features, we often also observe the coalescence of adjacent flux of the same polarity. Coalescence often accompanies the migration of neighbouring magnetic flux toward a cancellation

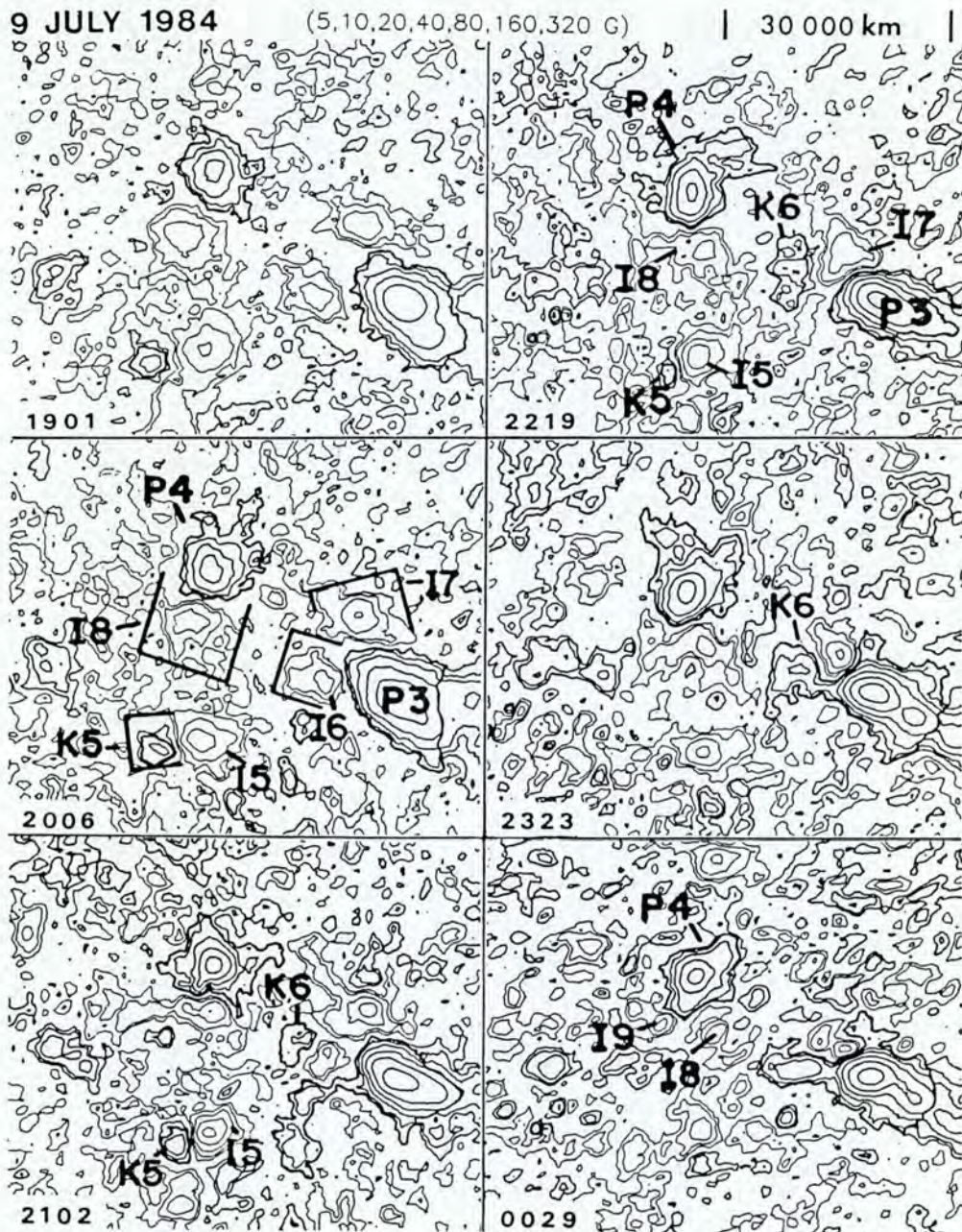


Fig. 3. Four major sites of cancellation are marked by the partial rectangles. Cancellations I6/P3 and I7/P3 involve the same positive network fragment. K5/I5 is a cancellation between intranetwork fields that continues until K5 completely disappears. I8/P4 is an example of intermittent cancellation due to the migration and changes of I8. K6 is a newly appearing fragment which resulted from the migration, coalescence, and concentration of weaker intranetwork magnetic flux.

site. In Fig. 3, I5 is a good example of the coalescence of the magnetic flux during cancellation. It becomes more compact but retains a peak field of at least 40 G throughout most of the period of cancellation with K5. The feature K5 does not show coalescence, but there is no scattered weak positive flux around K5 to coalesce with it. Hence K5 seems to disappear more rapidly than I5. Our observation of these changes indicates the desirability of understanding the nature of the fine structure of solar magnetic fields. Other examples of flux migration, coalescence, and increasing magnetic field gradients respectively within and around cancelling features are shown in Wang *et al.* (1985).

Features I6 and I7 are also cases of the simple continuous cancellation of two fragments of negative magnetic flux at adjacent sites on the border of a single larger area of positive network flux, P3; I6 disappears first around 2219 while I7 loses flux at a slower rate and has not completely disappeared by the last frame at 0029 in Fig. 3. At 1901, I7 has a flux of -3.0×10^{18} Mx. By 0029, its flux has reduced to -0.8×10^{18} Mx at an average rate of 0.4×10^{18} Mx hr⁻¹. Feature I6 cancels faster, reducing from -2.1×10^{18} Mx at 19:01 UT to -0.7×10^{18} Mx at 20:47 UT, at an average rate of 0.8×10^{18} Mx hr⁻¹.

Features I6 and I7 are typical cases in which the comparable loss of flux in the adjacent, larger network fragment P3 participating in the cancellation is not obvious for two reasons: (1) the loss in total flux is a small percentage change of the network fragments, and (2) network fields change shape to fill in the flux lost at cancellation sites (Wang *et al.* 1985). In these images on 9 July 1984 and most of our quiet Sun observations to date, the magnetic flux changes need to be greater than 10% of the fragments of flux involved in order to be detectable.

Left of the division between I6 and I7 is an area of increasing positive flux, labelled K6. The development of K6 is worth a brief description and comment because it represents a kind of flux change on the quiet Sun which needs to be better observed and understood. It originates from the development and merger of weak intranetwork fields. In Fig. 3, the origin of K6 is not obvious because too few frames are presented to show the evolution of this feature. In the time-lapse film, however, the negative fields of I6 and I7, as well as K6, are all seen to be concentrations of flux having their origin in the intranetwork space.

The cancellation example I8/P4 in Fig. 3 is an example in which the cancellation is not simple and continuous. The period of increasing gradient only lasts about two hours and then it decreases. The negative flux migrates to the right relative to the positive flux and splits to form two smaller concentrations of flux by 0029. Cancellation begins again with P4 for the negative knot of magnetic flux to the left, I9, as the field gradient increases between that knot and the positive fragment P4.

On the right side of the frames in Fig. 4 (1901) are two large network fragments, P5 and N4, that are cancelling. Concurrent with the decrease in flux, there is evidence in both P5 and N4 of continued migration toward each other. In P5, the centre of the highest contour gradually comes closer to the polarity inversion line. The feature N4 develops a secondary maxima which also moves toward the polarity inversion line. There is no evidence of new flux near this polarity inversion line between P5 and N4. We deduce that it is only the motion of the opposite polarities towards each other that builds the magnetic field gradient at a higher rate than can be reduced in cancellation. From the motion, we also deduce that the site of flux loss is localized at or close to the polarity inversion line.

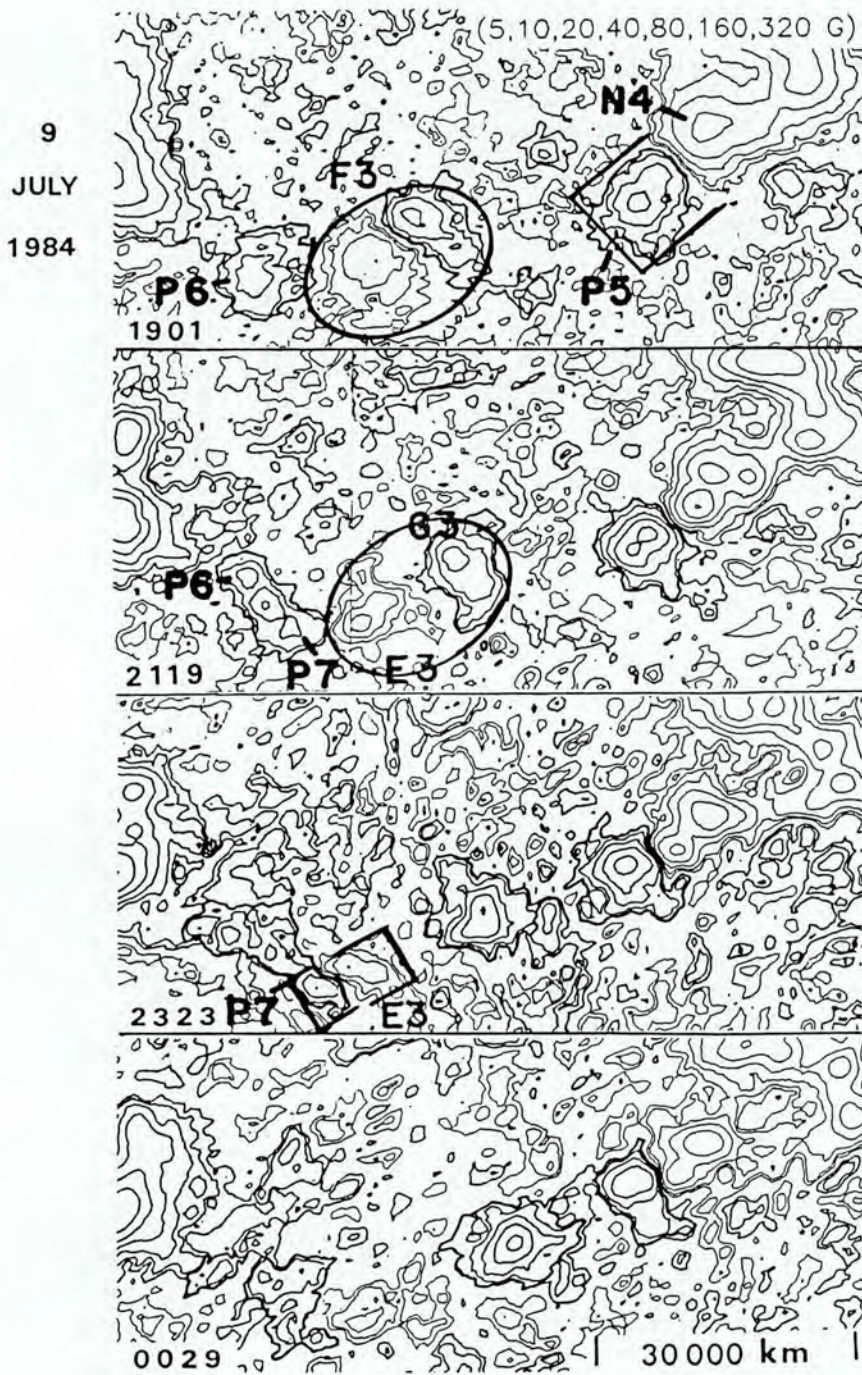


Fig. 4. A newly developed ephemeral region F3 is seen in the first frame. At its poles, E3 (negative) and G3 (positive) separate from each other, and E3 encounters a fragment of flux P6 that was moving toward the network fragment in the upper left of the frames. The encountered fragment splits; the upper knot, P6 continues its established migration while the lower knot, P7, begins to cancel with E3. Cancellations P7/E3 and P5/N4 show characteristic high magnetic field gradients that accompany the loss of magnetic flux.

5. Effects of Cancellation on Ephemeral Regions

Fig. 4 shows the development of an ephemeral region, F3, enclosed in the oval in the first frame, and a related cancellation. This ephemeral region was born between 17:22 and 18:26 UT, the largest gap in our data. At 1905 the positive flux was 4.0×10^{18} Mx and the negative flux was -4.9×10^{18} Mx. During its subsequent growth, the more isolated positive pole G3 continued to increase in flux, while the negative pole E3 moved toward a neighbouring fragment of opposite polarity network, P6. The fragment P6 had been migrating towards another network fragment in the upper left of Fig. 4. During its migration, P6 split into two knots, P6 and P7; P6 is seen to continue the migration to the upper left, while P7 seems to be attracted to E3. Then E3 and P7 become a pronounced cancelling feature at 2323. In this example of cancellation, the decrease in flux is clearly shared by both E3 and P7 (2119). Concurrent with this mutual reduction of flux is a mutually increasing magnetic field gradient. This example very well illustrates how the magnetic field gradient at the cancellation site of one pole of an ephemeral region typically increases while the magnetic field gradient between the poles of the ephemeral region decreases. In this example, the cancellation of E3/P7 ceases by 0029. The cessation of cancellation is seen to be accompanied by a reduction of the magnetic field gradient. The feature P7 is reduced to 0.5×10^{18} Mx at 0029, while E3 decreased to -2.9×10^{18} Mx. The loss of flux in both components of the cancellation is the same within the accuracy of our measurements. If the absolute value of the flux lost by P7 is added to the residual of E3 after cancellation, the sum is nearly the same as the flux in the non-cancelling pole of the ephemeral region G3.

Table 1. Magnetic fluxes (in 10^{18} Mx) of ephemeral region F4 and fragment K4 identified in Fig. 5

Time	K4 (Positive)	E4 (Neg. pole)	G4 (Pos. pole)
2119	1.7	-0.42	0.48
2128	1.8	-0.9	1.3
2201	1.2	-1.1	3.2
2236	0.8	-0.8	3.2
2301	0.8	-0.6	2.1
2320	0.6	-0.4	2.0

Fig. 5 is a more drastic example of the effects of cancellation on an ephemeral region. This is the same ephemeral region F4 shown soon after its birth in Fig. 2 (2114). In Fig. 2, there is an obvious imbalance in magnetic flux between the two poles of the ephemeral region. The series of images in Fig. 5 suggests to us that the initial imbalance is due to its emergence in a background field of weak positive polarity magnetic flux. The effect of the background field can be the cancellation of some of the negative flux of F4 as it emerged and the addition of flux to the positive pole of F4. At 2119 (Fig. 5), the measured fluxes are -0.4×10^{18} Mx for the negative pole and 0.5×10^{18} Mx for the positive pole. Adjacent to the negative pole is a positive feature K4, whose flux is 1.7×10^{18} Mx. The fluxes of the ephemeral region and the adjacent positive fragment K4 are given in Table 1 corresponding to the six middle frames in Fig. 5.

The degree of imbalance between the positive and negative poles of F4 increases for at least two apparent reasons: (1) cancellation of the negative pole with K4 and (2)

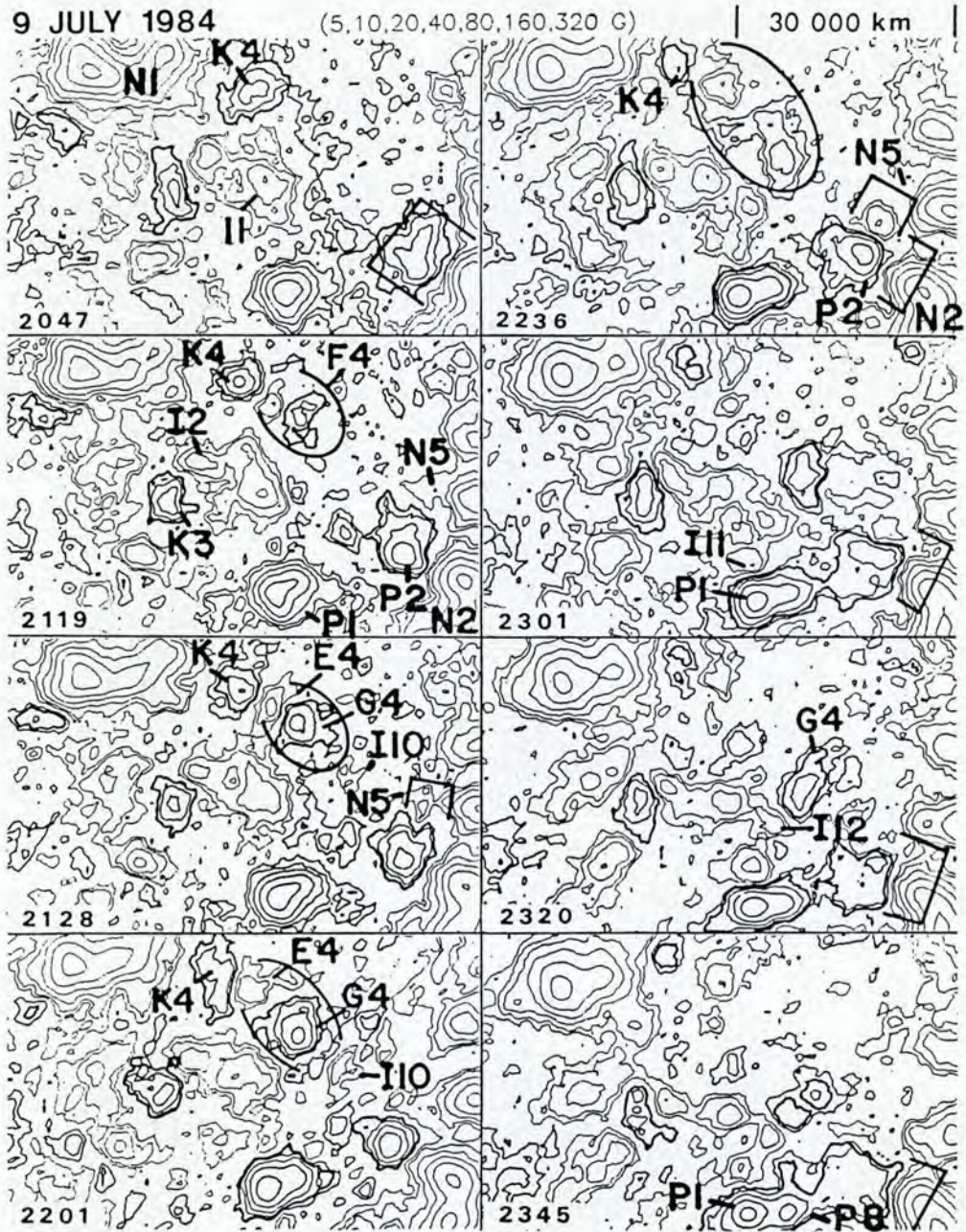


Fig. 5. As the new ephemeral region F4 grows, its negative pole E4 also is seen to cancel with intranetwork knot K4, from 2047 until 2236. The positive pole G4 merges with other positive intranetwork flux and then cancels some of its flux with negative intranetwork fragment I10. Two knots of negative flux, I11 and I12, separate from I1 and migrate respectively towards P1 and G4 to form new minor sites of cancelling magnetic flux. Intranetwork knots, I2 and K3 (2119) also form a minor cancellation site. Network knot N5 separates from a large fragment of negative network at 2119 and migrates to form a new cancellation site on the border of P2 (2236).

merging of the positive pole with intranetwork flux. By 2128, the negative pole E4 encounters the adjacent larger fragment of positive flux K4 and begins to cancel with it. However, the growth rate of the ephemeral region exceeds the rate of cancellation with K4. By 2128, the positive pole G4 has 1.3×10^{18} Mx and the negative pole -0.9×10^{18} Mx. By 2201, both the positive and negative pole have reached their maximum flux, but the non-cancelling positive pole has almost three times the flux of the cancelling negative pole. In this case the positive pole has a differential gain in flux over the negative pole by much more than the flux lost in cancellation. The images in Fig. 5 suggest that this excess flux in G4 might be due to its continued merger with positive intranetwork flux as it moves away from E4. This is somewhat speculative, because G4 and whatever background positive flux it accumulated must also cancel with negative intranetwork flux such as I10. Because we have not yet shown the reliability of our measurements for the intranetwork fields, we are guessing that the interactions of G4 with intranetwork flux added more positive flux to G4 than was subtracted from it in cancellation. These observations introduce the real complexity in addressing the question of flux balance in ephemeral regions or any small-scale fields on the Sun.

The magnetic flux increase in G4 is similar to the inexplicable flux increases observed by Wilson and Simon (1983). Our observations reveal the importance of detecting and analysing the character of intranetwork magnetic flux. In Fig. 3, K6 shows that clumps of intranetwork flux alone can develop surprisingly high values of peak flux.

In Fig. 5, the poles of F4 separate as a function of time as in any typical ephemeral region. In this example, the average rate of separation was 1.5 km s^{-1} . Also, as usual for ephemeral regions, F4 stops growing at about the time that a gap of no magnetic flux develops between the two poles as seen at 2201. However, G4 continues to move away from E4. It encounters and quickly cancels the minor flux fragment I10. During this same time (after 2201), the cancellation between E4 and K4 ceases for no obvious reason. With the cessation of cancellation, the gradient of the magnetic field at the cancellation site reduces and the two previously cancelling fragments then slowly drift apart.

Previously, Martin (1984) reported that cancellation generally continues until the smaller of two cancelling features completely disappears. However, here we have shown the example of E4 in Fig. 5 in which the cancellation ceased before the complete disappearance of the smaller knot of flux K4. We ask why the cancellation sometimes ceases? Is it different because the cancellation takes place within a network cell rather than on the boundary of a cell? Is there no longer a force that drives the pole of an ephemeral region into a neighbouring fragment? Could the motion be interrupted as a consequence of magnetic reconnection? These and many other questions remain to be answered about the interactions of magnetic flux on the quiet Sun.

6. Cancellation and its Relationship to Transport of Magnetic Flux

In many of the cases of cancellation on 9 July 1984, the previous motion of one or both polarities were observed in the time-lapse film before the beginning of the cancellation. This motion is primarily responsible for the building of high magnetic field gradients on either side of the polarity inversion line around which the flux disappearance takes place.

In Fig. 5, it is also informative to follow the whole negative structure I1 (2047) to the left of G4 in the middle of the frames. It changes configuration continuously and stretches toward the positive neighbouring features, creating cancelling sites. It well exemplifies the interaction of fields nearly everywhere on the Sun. The movement of opposite polarities toward each other is so common that it is difficult to attribute it to pure 'random walk' of the solar photospheric fields. For example, between 1845 (Fig. 2) and 2047 (Fig. 5) part of I1 moved left to form a cancellation site I2/K3 at about 2320; another fragment I11 breaks away and moves down to cancel with P1 by 2301; yet another knot I12 moves into position to cancel with G4 around 2320. We have not attempted to measure the rate of flux disappearance in these minor examples of cancellation.

The feature N5 on the right side of the frames in Fig. 5 is another good example of the transport of flux. This event resembles the motions of the network described by Smithson (1972) as taking place in the form of sudden squirts of flux from one point to another over distances of 5000 to 20000 km in intervals of a few hours. Numerous examples of this mode of rapid transport of flux over short distances are seen in the Big Bear Observatory magnetograms (Martin 1984; Wang *et al.* 1985; Martin *et al.* 1985*b*, present issue p. 929).

In Fig. 5, N5 is the tongue of magnetic flux that extends to the left at 2119. A 10 G contour at 2128 shows that flux has been added to the tongue which has moved further away from its source network field at 2201. The knot N5 has completely separated from its source field at 2236 and has entered into cancellation with the positive fragment P2, also associated with cancellation P2/N2. The cancellation of N5 is nearly complete by 2320. In the last frame at 2345, the remaining weak fragment of flux near the previous site of N4 is a new minor concentration of intranetwork magnetic flux that was previously moving toward N5.

The transport of flux towards an established cancellation site is common. During the cancellation P2/N2 in Fig. 5, P1 has developed a second maximum P8 (2345) that is beginning to break away from P1 and move toward the positive magnetic flux being cancelled at P2/N2. This migration of flux can result in the enhanced concentration of magnetic flux at P2/N2, the building of increased magnetic field gradients and possibly increased cancellation of the flux at P2/N2. Note the lengthening of zone of increased magnetic gradient during the cancellation at P2/N2. Also, if G4 continued its migration in its established direction, it could also merge with P2 and continue the cancellation with N2. Due to the transport of magnetic flux as in these examples, cancellation at a site can be renewed or continued.

7. Discussion

The average rate of flux loss for the 16 largest cancellations was 1.1×10^{18} Mx hr⁻¹. The measured rates varied from 10^{17} to 4×10^{18} Mx hr⁻¹. In one sense the number of cancelling features and average rate of cancellation here determined could be higher than typical since the average distance between strong network fields is small. On the other hand, the number of ephemeral regions in this particular field was relatively low and this factor might result in a lower number of cancellations than on other areas of the quiet Sun. The values given here are approximate and refer to a particular region and time.

The area of the quiet Sun that we analysed has enhanced network with some well-defined cells. In the field of view there are approximately 18 supergranule cells

with an assumed average diameter of 30 000 km. The mean rate of cancellation for the major fragments of flux, having at least a 20 G contour, is 10^{18} Mx per supergranule cell per hour. The mean rate of flux gain due to the birth and growth of ephemeral regions is 0.3×10^{18} Mx per supergranule cell per hour. Thus, it might appear that the rate of flux loss exceeded the rate of flux gain by a factor of 3 within this field of view. However, ascertaining the true net rate of flux loss or gain, even in a limited field, is a more complex problem than comparing the rates of gain and loss above an arbitrary threshold. Many of the measured cancellations were concentrations of intranetwork magnetic flux. Presumably, these cancellations are offset by an equal amount of opposite polarity concentration of flux which merged and added to the network and ephemeral regions. A more meaningful approach to determining the relative mean loss and gain of flux on an area of the quiet Sun would be to compare the flux lost only in network/network cancellations with the gain in flux in ephemeral regions. However, adequate statistical sampling of network/network cancellations would require studying a much larger field of view than obtained for this set of data on 9 July 1984. We necessarily leave to future studies the question of obtaining meaningful measures of the net gain or loss of magnetic flux on the quiet Sun at given times during the solar cycle.

The origin of some of the intranetwork concentrations was observed to be a merger of weaker intranetwork fields of the same polarity. We deduce that most of the weak intranetwork fields observed in this set of data are concentrations of yet smaller unresolved fragments of magnetic flux.

The concentrations of intranetwork magnetic flux sometimes cancelled with other intranetwork fields or ephemeral regions before further migration. Most concentrations of the intranetwork flux migrated until they met network magnetic flux and either cancelled or merged with the network flux. Because of the tendency for opposite polarity fields to migrate together, we suggest that the apparent attraction and migration of opposite polarity intranetwork and network features towards each other before and during cancellation might be a cause for the non-radial motion of some intranetwork features (Livingston and Harvey 1975).

It is interesting, and possibly informative, to note the relative rapidity of magnetic flux loss by cancellation alone. The sum of all the positive and negative flux in our field of view was 2.2×10^{21} Mx. At the observed mean rate of cancellation of 1.8×10^{19} Mx hr⁻¹ for the entire field, only 120 hr or 5 days would be required to eliminate all of the flux in the field of view, under the unreal assumption that the Sun could generate only enough opposite polarity flux appropriately distributed to cancel the existing magnetic field at the observed rate. This means the rate of appearance of new flux in the form of just intranetwork concentrations and ephemeral regions is impressively high. The quiet Sun magnetic fields must constitute a large reservoir of magnetic energy.

8. Effects and Consequences of Cancellation

In this study we have learned that intranetwork magnetic fields quite commonly develop strong concentrations of magnetic flux yielding knots of flux having field strengths up to 40 G or more. These concentrations may last for several hours. They eventually cancel or add to the network, ephemeral regions or other intranetwork fields. We presume that equal amounts of opposite polarity intranetwork flux merge and cancel with other magnetic fields, although no systematic study has yet been

attempted. (In our data the smallest known intranetwork fields are not resolved.) If the intranetwork fields are generated and cancelled on a short time scale, these fields have no long-term net effect on the larger scale fields. However, in the short term, high concentrations of intranetwork magnetic flux might have a larger effect on the migration of network fields than previously suspected. Also, due to the merging of fields having the same polarity, some of the intranetwork fields can endure longer than previous studies have indicated (see the review by Stenflo 1976).

We have shown that cancellation can have a large effect on ephemeral regions. One of the effects of cancellation is the creation of an apparent imbalance in the magnetic flux of ephemeral regions if the ephemeral region appears at the site of pre-existing flux. The example we have shown is the ephemeral region in Fig. 4. In addition, ephemeral regions can lose a large fraction of their total flux after encounter with adjacent fragments of flux of opposite polarity. Thus, cancellation is an essential and large factor that should be accounted for in the correct measurement and calculation of the amount of magnetic flux that the Sun generates at any time in the solar cycle. This consideration applies to active regions as well as the ephemeral regions on the quiet Sun. In complexes of activity, we expect that very large amounts of magnetic flux are cancelled concurrent with its generation or emergence (Martin *et al.* 1985*b*). The situation is analogous to ephemeral regions on the quiet Sun. For simple isolated active regions, the total flux developed might be negligibly affected by cancellation during the growth phase. However, active region magnetic flux develops in complexes of activity where we expect cancellation to play a large role in the amount of measured flux and in its configuration.

The fact that ephemeral regions can cancel during their emergence implies that, in areas of strong network, one pole of small ephemeral regions might be completely cancelled in a very short time. If ephemeral regions occur with equal frequency at all longitudes on the Sun, we might expect to find a deficiency of ephemeral regions in areas of enhanced network, because the smallest ephemeral regions might be cancelled before they could be recognized. At present we do not know whether ephemeral regions have any inherent preference or lack of preference to form or emerge in the enhanced network or any other special zones on the Sun. To correctly determine any spatial preference for formation, one also needs to evaluate either the size distribution or the rate of cancellation of any ephemeral region sample.

We expect the cancellation of network magnetic fields with other network magnetic fields to have the largest effect on the long-term distribution of the residual background fields on the Sun. Any systematic migration of network fields accompanied by cancellation would slowly change the global distribution of positive and negative flux on the Sun as a whole. We speculate that the continuously changing patterns of the background fields (McIntosh 1981) are probably due in part to cancellation.

Other discussions of the importance of understanding how magnetic flux can and does disappear have been given by Zwaan (1978) and Boris *et al.* (1984).

9. Summary

The disappearance of magnetic flux has been studied quantitatively for quiet Sun features which had or developed at least a 20 G contour. Loss of magnetic flux was observed only at sites where opposite polarity fragments of flux had encountered one another. When the change exceeded 10% of the features measured, the flux loss could

be observed in both closely spaced features of opposite polarity. This type of mutual loss of magnetic flux in closely spaced features of opposite polarity has been defined as 'cancellation'. The mean rate of flux loss per feature in the 16 largest examples of cancellation was approximately 10^{18} Mx hr⁻¹.

Three ephemeral regions were observed from birth. In two of the three ephemeral regions, an imbalance in the magnetic flux of the poles within each region was observed to be created by the cancellation of one pole with adjacent fragments of magnetic flux of opposite polarity. In one of these examples, the imbalance was further enhanced by the merger of the other pole with intranetwork magnetic field of the same polarity.

In many cases the cancellation of flux was seen to be preceded by the transport of the magnetic flux fragments towards each other. The transport appeared to be associated with at least one of the following types of motion: (1) the convective flow of intranetwork fields from cell interiors to cell boundaries, (2) the growth and separation of the poles of ephemeral regions, (3) the migration of network, presumably along the boundaries of network cells, and (4) the direct motion of opposite polarity features towards one another.

Cancellation is commonly accompanied by a gradual increase in the gradient of the magnetic fields adjacent to the observed points of encounter of the cancelling fragments. The increasing gradients appear to be a consequence of the continued migration and coalescence of small fragments of magnetic flux towards a cancellation site.

The emergence and cancellation of magnetic flux was also observed within the intranetwork cells. The spontaneous appearance of intranetwork fields of both polarities was observed. By the merger of magnetic flux having the same polarity, the formation of concentrations of intranetwork field into fragments with fields up to 40 G or more was seen. A few of these concentrations were of the same order of magnitude as the poles of the ephemeral regions observed in the same set of data.

Acknowledgments

We thank the Big Bear Observatory staff for the extra effort required in continuously recording the digital data analysed in this paper. S. H. B. Livi and J. Wang express their appreciation to H. Zirin for making this research possible during their respective extended visits at Caltech. S. F. Martin acknowledges the support of the Air Force Office of Scientific Research under grant AFOSR-82-0018.

References

- B84 Boris, J. P., DeVore, C. R., Golub, L., Howard, R., Low, B. C., Sheeley, N. R., Jr, Simon, G. W., and Tsinganos, K. C. (1984). 'Solar Terrestrial Physics—Present and Future'. Proc. NASA/NSF Solar-Terrestrial Workshop, June 1983, West Virginia (Eds B. M. Buttler and K. Papadopoulos), Ch. 3, pp. 3–18 (NASA: Washington, DC).
- H 77 Harvey, J. W. (1977). In 'Highlights of Astronomy', Vol. 4, Part II (Ed. A. E. Muller), p. 223 (Reidel: Dordrecht).
- HM 73 Harvey, K. L., and Martin, S. F. (1973). *Sol. Phys.* 32, 389.
- K 79 Kömle, N. (1979). *Sol. Phys.* 64, 213.
- Livingston, W. C., and Harvey, J. W. (1975). *Bull. Am. Astron. Soc.* 7, 346 (Abstract).
- McIntosh, P. S. (1981). In 'The Physics of Sunspots' (Eds L. E. Cram and J. H. Thomas), p. 7 (Sacramento Peak National Observatory: Sunspot, NM).
- M 84 Martin, S. F. (1984). Proc. Symp. on Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres (Ed. S. L. Keil), p. 30 (National Solar Observatory: Sacramento Peak, NM).

- M⁸⁵ Martin, S. F., Livi, S. H. B., Wang, J., and Shi, Z. (1985a). Proc. Workshop on Vector Magnetic Fields, May 1984, Marshall Space Flight Center, Alabama, p. 403 (NASA: Washington, DC).
- M Martin, S. F., Livi, S. H. B., and Wang, J. (1985b). *Aust. J. Phys.* **38**, 929.
- Parker, E. N. (1984). *Astrophys. J.* **280**, 423.
- Sivaraman, K. R., and Livingston, W. C. (1982). *Sol. Phys.* **80**, 227.
- Smithson, R. C. (1972). Ph.D. Thesis, California Institute of Technology.
- Smithson, R. C. (1975). *Bull. Am. Astron. Soc.* **7**, 346 (Abstract).
- Stenflo, J. O. (1976). In 'Basic Mechanisms of Solar Activity', IAU Symp. No. 71 (Eds V. Bumba and J. Kleczek), p. 69 (Reidel: Dordrecht).
- Tang, F., Harvey, K., Bruner, M., Kent, B., and Antonucci, E. (1983). *Adv. Space Res.* **2**, 65.
- Topka, K., and Tarbell, T. (1984). Proc. Symp. on Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres (Ed. S. L. Keil), p. 278 (National Solar Observatory: Sacramento Peak, NM).
- Wang, J., Shi, Z., Livi, S. H. B., and Martin, S. F. (1985). *Sol. Phys.* (in press).
- Wilson, P. R., and Simon, G. (1983). *Astrophys. J.* **273**, 805.
- Zirin, H. (1985). *Aust. J. Phys.* **38**, 961.
- Zwaan, C. (1978). *Sol. Phys.* **60**, 213.
- Zwaan, C. (1984). Proc. Meeting on High Spatial Resolution in Solar Physics, September 1984, Toulouse (Ed. R. Muller), p. 263 (Springer: Berlin).

Manuscript received 12 June, accepted 22 October 1985

The Cancellation of Magnetic Flux. II In a Decaying Active Region*

S. F. Martin,^A S. H. B. Livi^{A,B} and J. Wang^{A,C}

^A Solar Astronomy 264-33,
California Institute of Technology,
Pasadena, CA 91125, U.S.A.

^B Visiting Astronomer, Instituto de Fisica,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, Brazil.

^C Visiting Associate, Beijing University,
Beijing, China.

Abstract

An active region was studied in detail during its period of decay from 3 to 8 August 1984 using H α filtergrams and videomagnetograms acquired at the Big Bear Solar Observatory. The decay was initiated by a process of fragmentation in which very small knots of magnetic flux separated from larger concentrations of flux. The fragmentation was observed at discrete locations around the periphery of both the dominant areas of negative and positive field, but possibly occurred more frequently in the main polarity inversion zone. The fragmentation and migration of knots of magnetic flux were common predecessors to the disappearance of flux.

The disappearance of magnetic flux was always observed when the small fragments of flux encountered other small fragments or concentrations of flux of opposite polarity. This type of disappearance of magnetic flux, called 'cancellation', is shared by both polarities of magnetic field. It was deduced that the disappearance of flux occurred either at or within 5 arcsec of the apparent dividing line between the opposite polarities. Cancellation was the only observed means of major loss of flux in the photospheric magnetic fields of the active region. Approaching fragments of opposite polarity flux always collided and, after apparent collision, permanent loss of magnetic flux was subsequently and invariably observed. Thus, cancellation is a highly predictable phenomenon.

All of the 22 flares observed during the decay of this region were initiated around the sites where magnetic flux was cancelling or was deduced to be cancelling during the flares. The intervals of time during which magnetic flux was decreasing at the flare sites was very much longer than the duration of the flares. Abrupt changes in magnetic flux on the time scales of the H α flares were not observed. Several flares started at a site of disappearing flux but spread to other locations of plage where no loss of flux was observed during the flares. We hypothesize that cancellation was a necessary condition, but not the only necessary condition, for flares to occur in this active region.

1. Introduction

When large active regions decay, it is well known that some of their magnetic flux gradually spreads over increasingly large areas of the Sun. In contrast to this picture, Zirin (1984) has recently shown an example of a decaying active region in which the areas of opposite polarity flux, as a whole, come back together and disappear. In addition, Wallenhorst and Howard (1982), Wallenhorst and Topka (1982), Wilson

* Paper presented at the R. G. Giovanelli Commemorative Colloquium, Part II, Tucson, Arizona, 17-18 January 1985. Part I, *Aust. J. Phys.*, 1985, 38, 855.

and Simon (1983), and Topka and Tarbell (1984) have shown that some flux of only one polarity seems to mysteriously disappear *in situ*.

During August 1984 at the Big Bear Solar Observatory, we recorded videomagnetograms and H α filtergrams of the growth and decay of an active region of modest size (number 19425, Solar Geophysical Data). Remarkably, this active region displayed all three of the modes of decay cited above with the exception that the disappearance *in situ* always consisted of flux of both polarities. The most dramatic part of the decay was the opposite polarity flux reconverging and disappearing around the primary polarity inversion line in the active region. However, we also found during our analyses of the data that some of the magnetic flux of the active region dispersed around the periphery of the region.

At the Colloquium we illustrated the evolution of this active region from 31 July to 8 August and its dramatic disappearance of magnetic flux in a time-lapse film of videomagnetograms taken on 2, 3, 4 and 5 August. Then, we further illustrated the details of the magnetic flux disappearance using selected magnetograms and H α filtergrams from 3 to 8 August as illustrated in the present paper. The significant changes in the magnetic field of the active region take place on a relatively small scale. Following the details of the small-scale changes in the active region in the figures, however, is much more laborious than viewing the same changes in the time-lapse film. We also recognize that various readers will have differing degrees of interest in the fine observational detail. Therefore, we have organized the paper so that the following sections can be read independently as follows: Section 2 discusses the general evolution of the active region, while Section 3 presents a chronological description of the details of the disappearance of magnetic flux. Section 4 summarizes and discusses the primary results, including changes preceding the disappearance of flux, the disappearance of magnetic flux, and the association of H α features and events with disappearing magnetic flux. The conclusions are presented in Section 5.

2. General Evolution of the Active Region

The general pattern of evolution of the active region as a whole is illustrated in Figs 1 and 2. The region was born near the east limb on or before 30 July 1984 at a latitude of S17. Its apparent transit of the Sun's central meridian was early on 5 August. The sunspots in the region reached their maximum area on 2 August; the positive polarity sunspots began their decay by 3 August; the negative polarity sunspots declined in area throughout 4 August and all of the sunspots had disappeared by 5 August.

Fig. 1 shows the active region during its maximum development and throughout its decay in sections taken from the daily full-disc Kitt Peak magnetograms from 2 to 8 August 1984. The magnetograms are shown in the form of contour maps made by us at Caltech using the digital data from Kitt Peak supplied on magnetic tape by staff members of the National Solar Observatory in Tucson. The contours given are the 20, 40, 80, 160 and 320 G levels ($1 \text{ G} \equiv 10^{-4} \text{ T}$). In all illustrations here solar north is at the bottom and east is to the right. The leading negative polarity field is to the west (left) of the trailing positive polarity field in the most common orientation for southern hemisphere active regions during the current solar cycle.

The active region stopped growing by 3 August. On 4 August, the opposite polarities ceased expansion and, in fact, are seen in Fig. 1 to have partially reconverged towards the centre of the region. There is also a notable elongation of the region in the north-south direction. The apparent general decline of the magnetic flux

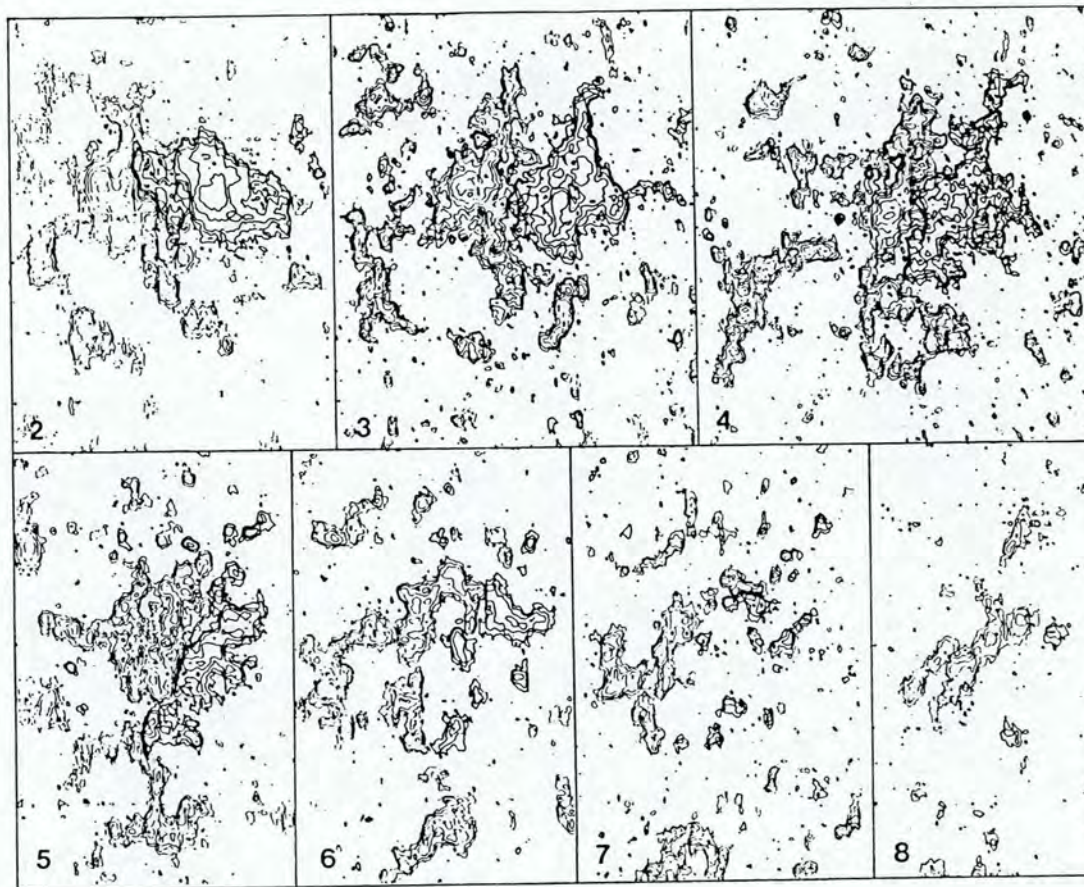


Fig. 1. General pattern of decay of an active region is illustrated in sections from Kitt Peak daily, full-disc, digital magnetograms over the period 2-8 August 1984. Positive polarity flux is shown by lines thicker than the negative polarity. The rapid disappearance of the magnetic flux of the region occurs from 3 to 8 August.

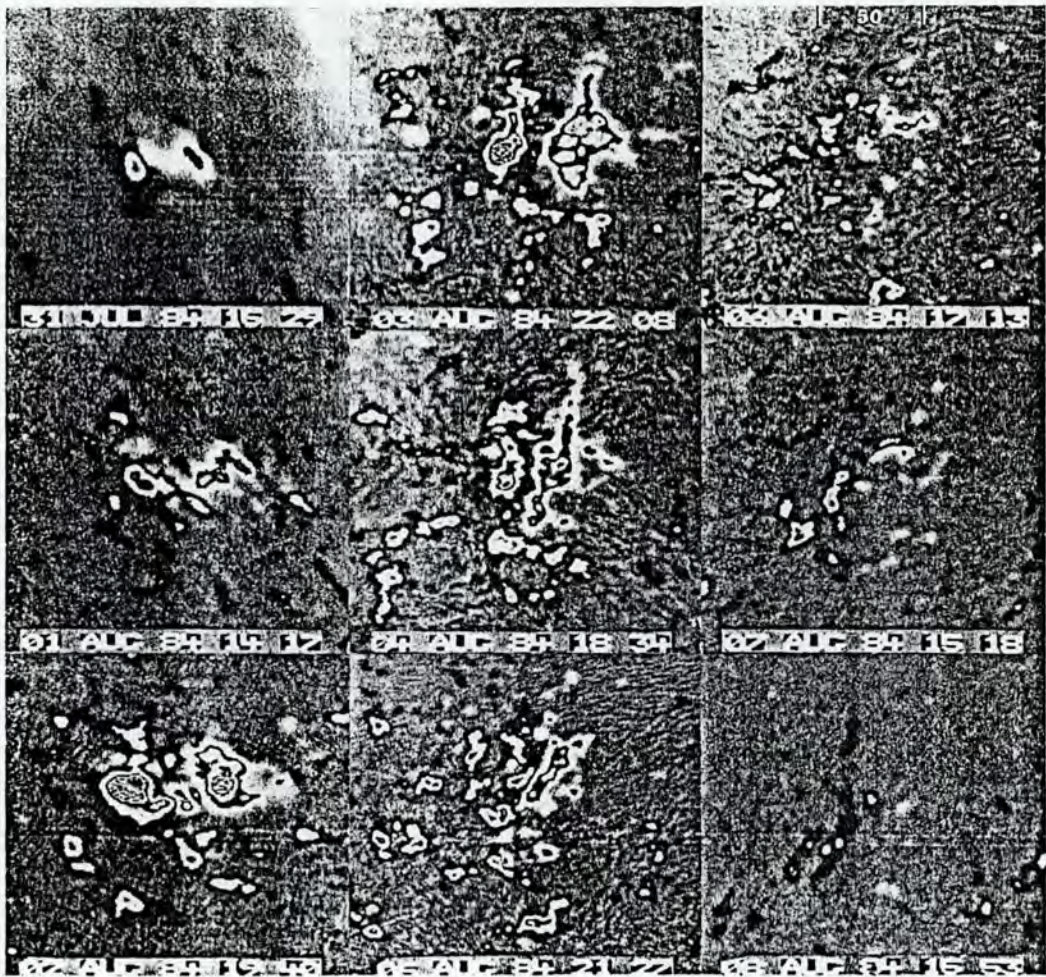


Fig. 2. Videomagnetograms from the Big Bear Solar Observatory show the evolution of an active region from its early stage of growth on 31 July 1984 until its very late stages of decay on 8 August. The order of the sequence is shown from top to bottom in columns. Negative polarity is black and positive is white. The contours within each polarity begin at approximately 50 G, with each successive contour representing a doubling of the field strength. The contouring system breaks down in the strongest fields containing sunspots.

of the region continues until 8 August. Each day a large fraction of flux is lost until, on 8 August, only two small isolated fragments of positive polarity remain among the scattered network of negative polarity. Cloudy weather terminated our obtaining any further information on the fate of the last two fragments of positive polarity flux both at Big Bear or from Kitt Peak. From each daily Kitt Peak magnetogram, we measured the total flux in the concentrated fields in the central part of the region where the fields appeared to change markedly in total flux from day to day. The total magnetic flux consistently declined after 3 August. During the phase of decay from 4–8 August, the average rate of magnetic flux lost from the Kitt Peak magnetograms is 1.3×10^{20} Mx per day or 5×10^{18} Mx hr⁻¹.

In Fig. 2 we show a series of photographic magnetograms from the Big Bear Solar Observatory depicting the general evolution of the active region beginning on

31 July and continuing to 8 August. In this illustration and the remaining illustrations in this paper, the time sequences are given in order first from top to bottom and secondly from left to right. The universal time (UT) given on or adjacent to each photograph is ending time of the magnetogram. Negative polarity is black and positive polarity is white, except within the contours. The polarity of any contoured feature is distinguished by whether the feature is black or white around the periphery of the lowest contour. In this data set, the first contour represents approximately 50 G. Each successive inner contour represents a doubling of the field strength with each change from black to white or white to black. The method of generating the contours is described more completely in the paper by Zirin (1985, present issue 961).

The active region did not appear to be unusual until it began to partially reverse its pattern of growth on 4 August. We note again the elongation of the region in the north-south direction after the decay phase has become apparent on 4 August. However, the decay phase begins on 3 August with disappearance of the positive polarity sunspots; this is indirectly indicated in Fig. 2 by the reduction in the peak flux and the spreading of the positive polarity (white). In addition to the north-south elongation of both polarities, the decay phase differs from the growth phase in another respect; the flux does not become as compact and does not reconverge to a single central site as it disappears.

3. Chronological Description of Details of the Disappearance of Magnetic Flux

(a) Detailed Description of the Early Phase of Decay

In Fig. 3, we illustrate examples of the fragmentation of large concentrations of magnetic flux and examples of the migration and disappearance of small knots of flux. The six images in Fig. 3 were selected from the original film at intervals of about 1 to 2 hr throughout the observing day on 3 August. We first call attention to the deviations from the overall simple bipolar character of the active region as a whole. The polarity inversion zone in the middle of the region shows some mixing of opposite polarity fragments of magnetic field. Around the main concentration of negative field, other small fragments of both polarities can be seen. Magnetic flux loss takes place at nearly every site where small positive or negative fragments move into apparent contact with opposite polarity field. Most of the flux loss appears to happen exactly in the same way as on the quiet Sun (Livi *et al.* 1985; Part I, present issue p. 855).

Positive fragment P1 in the first frame of Fig. 3 is a clear example of the disappearance of magnetic flux in a fragment for which we have no previous history. It was already losing flux when the daily observations began. In the first frame of Fig. 3, it is nearly surrounded by negative flux. It is seen to gradually lose flux throughout the day and, by 0021, it has almost disappeared completely.

This sequence in Fig. 3 is especially effective in showing the reality of the flux loss because the general sensitivity of the magnetograms is seen to be increasing throughout this day. Under this condition, we can be certain that any consistent reduction in magnetic flux observed in many frames of the original film is not due to variations in the quality of the data throughout the day. The slow sensitivity increase is apparent from the increasing area within the contours. It is important to examine isolated fragments of flux of either polarity, especially around the periphery of the region in Fig. 3 and the subsequent illustrations. In all areas where there is no contact

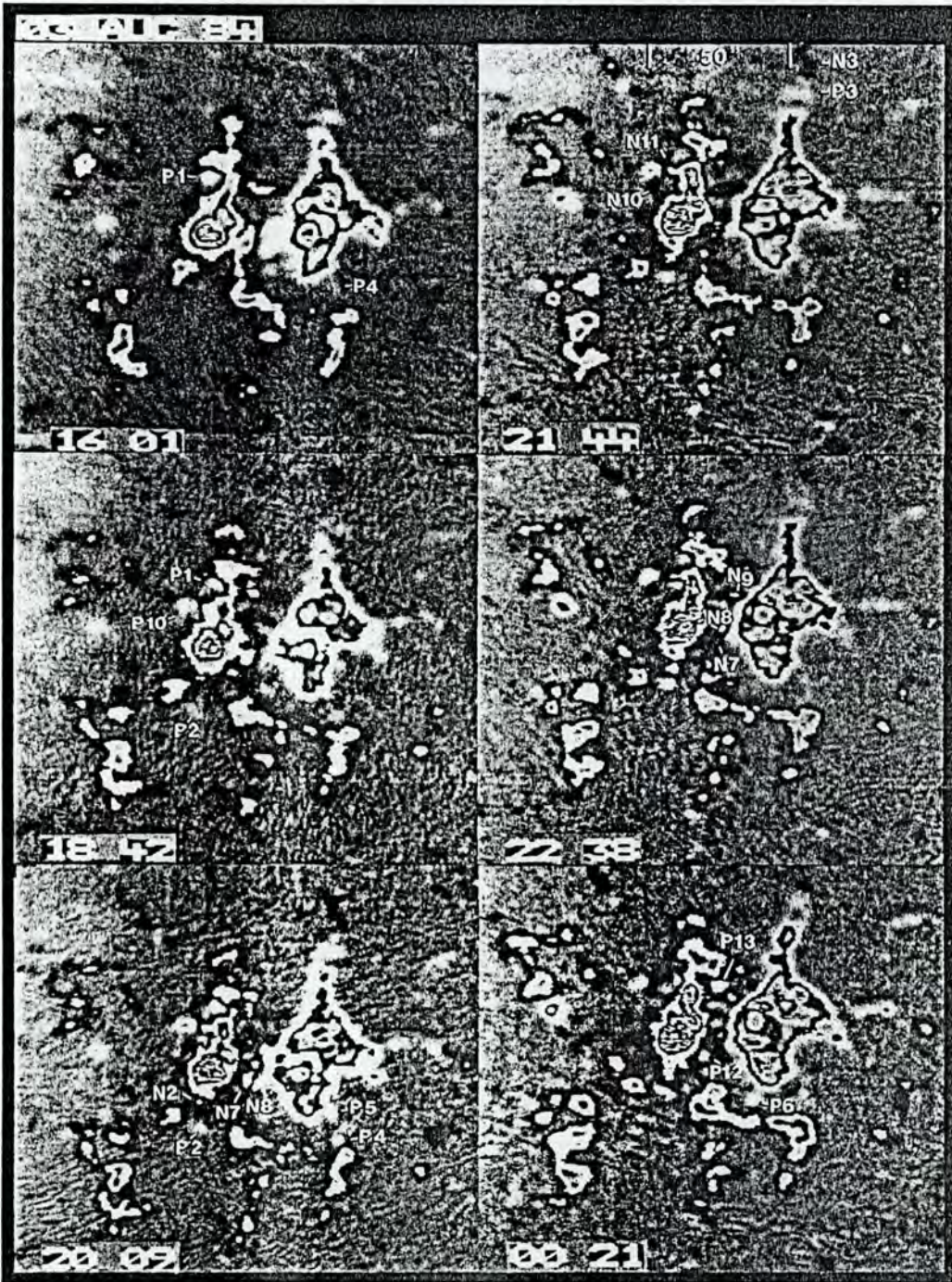


Fig. 3. Early changes in the decay of the magnetic fields take place in very small fragments denoted by P and N respectively for positive and negative. Positive fields are white and negative are black. P1 is a disappearing fragment; P2, N2 and P3, N3 are approaching fragments of opposite polarity; P4, P5 and P6 are knots breaking away from the main concentration of positive flux; N7, N8, N9, N10 and N11 are knots breaking away from the main concentration of negative flux; P10, P12 and P13 (also possibly negative knots N10–N11) are moving magnetic features emanating from the main concentration of negative polarity containing the sunspot.

between positive and negative fields, no major flux loss can be seen although minor changes in the shape of the isolated single polarity fragments do occur; the changes in shape are due partially to real migration of the flux and partially to changes in image quality from frame to frame. The examples of changes in the magnetic flux illustrated and discussed in this paper can be observed on many successive frames of the original film as well as in the digital magnetograms recorded on magnetic tape. The illustrated changes in magnetic flux, consistently observed over the course of many successive frames, are greater in magnitude than both the instrumental and background variations.

An example of fragmentation and pre-disappearance motion is illustrated by fragments N2 and P2 (2009) respectively. P2 exists as a very faint positive fragment (or unresolved collection of fragments) below the main concentration of negative flux, while N2 is a negative fragment that is beginning to break away from the main concentration of negative flux at 2009. In the remainder of the series, N2 is seen as a successively elongated appendage of the main concentration of negative flux. As N2 moves towards P2, P2 is also slowly migrating towards N2. By the last frame, 0021, the two opposite polarity features are in contact. Flux loss is expected to begin at this stage. The images in Fig. 4, from the next day's observations, verify the disappearance of P2.

In Fig. 3, above the main concentration of positive polarity is another site where one or more knots of flux, designated as P3 at 2144, moves away from the main concentration and towards an opposite polarity fragment N3. P3 and N3 are somewhat diffuse in appearance and may be a collection of unresolved fragments which coalesce as the opposite polarities migrate towards each other. The two fragments come into contact by the end of the observing day (0021 in Fig. 3).

In Fig. 3, P4, P5 (2009) and P6 (0021) are other examples of the fragmentation of flux located just below the main concentration of positive field. In the first frame (1601), P4 is still an appendage to the main concentration. It separates from the main concentration before the time of the second frame at 1842 and, by 2009, it is in contact with the negative flux toward which it was moving. It is disappearing by 2144, but its demise is not clear because it is followed by additional weak fragments of positive flux, notably P5, moving in its wake. Since there is no build-up of positive flux at the junction with the negative flux, we infer that flux is being lost when it comes into contact with the negative flux. At 0021, to the left of P4 and P5, is yet another example, P6, of a fragment of flux beginning to separate from the main concentration of positive polarity.

Fragmentation seems to occur with the highest frequency from the main concentrations of flux near the main polarity inversion zone. At 2009, N7 and N8 are representative examples of fragments that have separated from the main concentration of negative flux and are in contact with less distinct fragments of positive flux. They slowly lose flux during the remainder of the observing day as they also migrate closer to the positive flux. Note that the inner contour of N7 disappeared altogether by 0021. While N7 and N8 are losing flux, just above them, N9 in frame 2238 is seen to have migrated into contact with the positive flux.

Where the magnetic field is highly concentrated, especially in the middle of the region, the fragmentation and the disappearance is more difficult to see than around the periphery of the region. Sometimes, in the middle of the region, the fragmentation appears only as slowly changing appendages of both polarities. The fragmentation

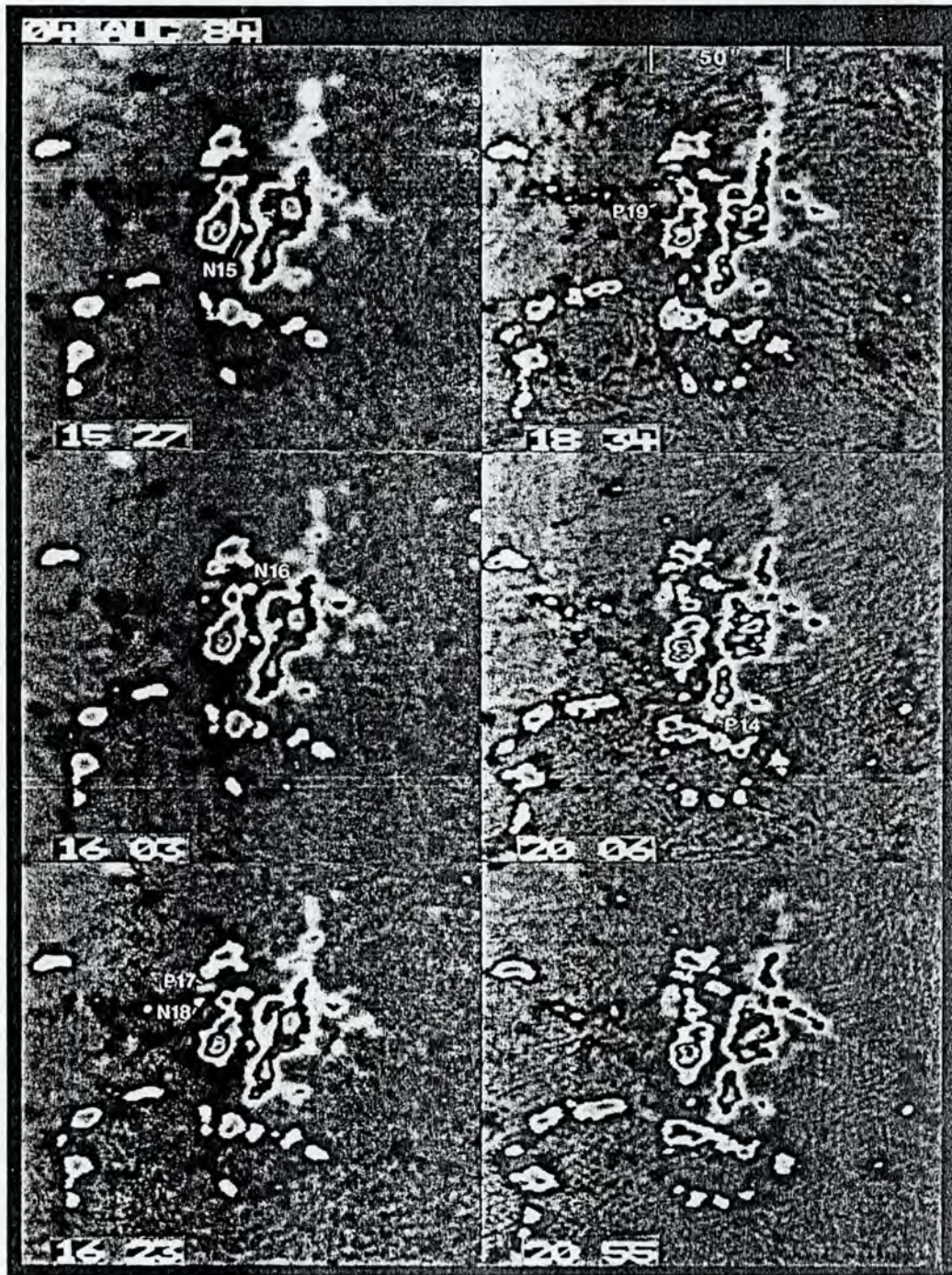


Fig. 4. P14 (2006) and N15 (1527) are knots of flux that follow in the same paths as P6 and N8 on the previous day in Fig. 3. Part of N16 (1603) intrudes into the adjacent area of positive polarity. P17 (1623) disappears as it moves into negative polarity flux. N18 (1623) is also cancelled completely by P19 (1834). Both N18 and P19 are part of a collection of the final 'moving magnetic features' emanating from the negative concentration of magnetic flux containing the final dying sunspot.

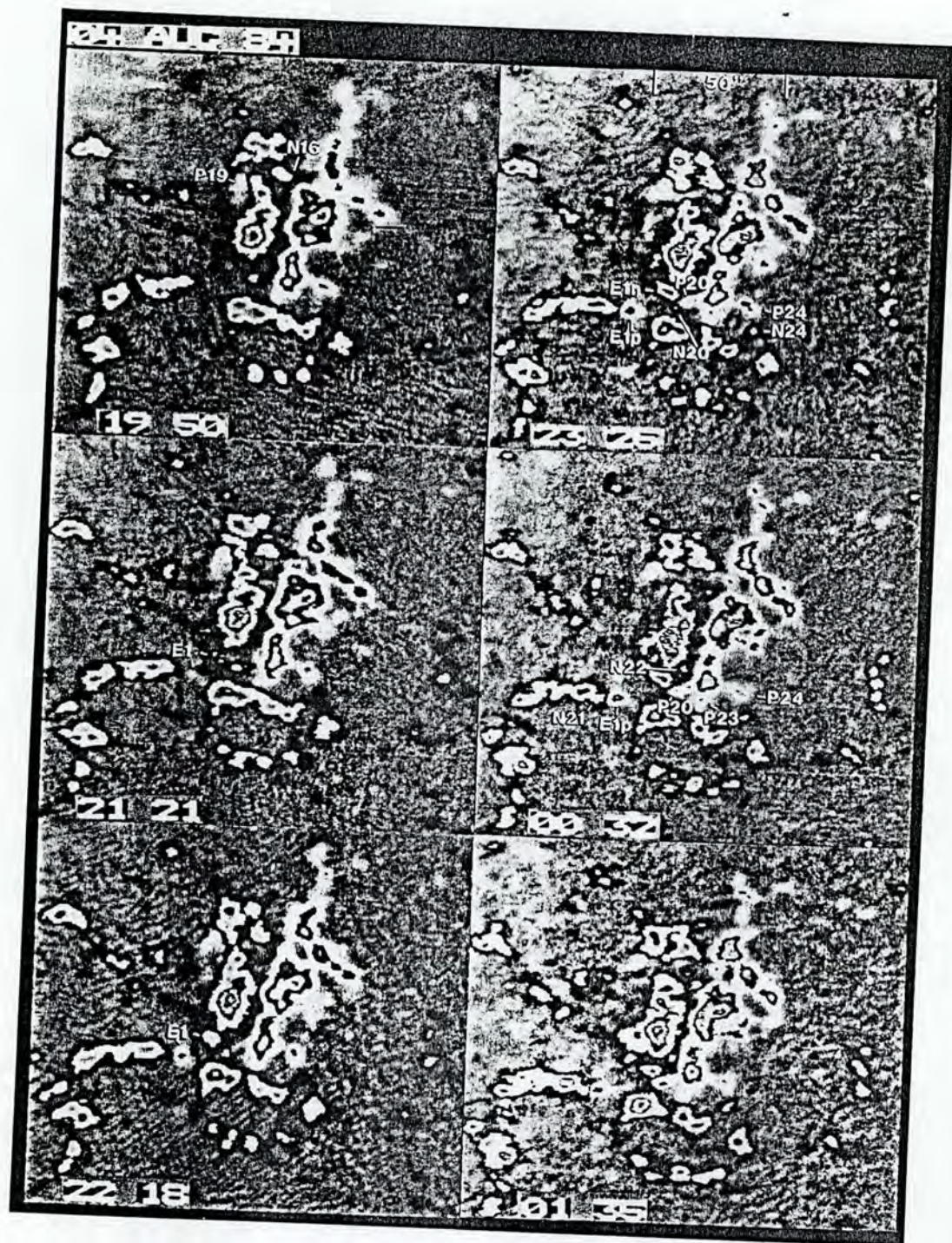


Fig. 5. E1 is a new growing ephemeral region first seen at 2121 in this series continuing from Fig. 4. P20 (2325) cancels with N20 and moves into contact with E1n at 0135. N21 (0032) breaks away from a concentration of network and collides with E1p. N22, P23, P24 and N24 are knots that break away from larger concentrations of flux and move towards opposite polarity field.

often results in the temporary interleaving of the positive and negative fragments or appendages in the middle of the region. This is very noticeable in the last frame of Fig. 3. In some circumstances, we cannot immediately see evidence of the loss of flux because the percentage change of flux can be too small to be detected. However, in most circumstances, the disappearance of flux can be inferred because of two observed conditions: (1) there is no long-term progressive build-up of flux in the polarity inversion zones and (2) the separated fragments typically do not reverse direction.

There is one striking difference between the fragmentation of the positive flux which contains only tiny sunspots and the negative polarity field which contains a larger decaying sunspot on 3 August (Fig. 3). The fragmentation from the negative concentration containing the sunspot consists of features of both polarities. These fragments are the 'moving magnetic features' described by Harvey and Harvey (1973). P10 (1842), P12 and P13 (0021) are examples of positive polarity moving magnetic features which spontaneously appear and emanate from the perimeter of the dying sunspot within the concentration of negative flux. Fragments N10 and N11 follow P10.*

Figs 4 and 5 show respectively further details of the changes in magnetic flux during the first and second halves of the observing day on 4 August. The most conspicuous overall change in the active region, since the previous observing day, is the reduction in distance between the main negative and positive concentrations of flux. By comparing frames of equivalent quality on 3 and 4 August, it is also obvious that there has been a substantial reduction in flux by 4 August. We can surmise that the fragmentation and loss of flux in the centre of the region has been substantially greater than the fragmentation and loss of flux around the periphery of the region. Additionally, there has been a general, slow migration of the opposite polarity fields towards each other. This general migration has followed in the same directions as illustrated for the individual moving knots of magnetic flux seen in the centre of the region on the previous day, 3 August.

In Figs 4 and 5, we point out many new examples of opposite polarity fragments moving together and disappearing. At the same site as P6 on the previous day (Fig. 3), another positive fragment P14 (2006) is seen to break away from the primary positive concentrations of flux and move into contact with the negative flux below. At approximately the site of N7 and N8 on the previous day, N15 (1527 in Fig. 4) is seen to be separating from the main negative concentration. Between 1834 and 2055, N15 gradually disappears. N16 (1603) which is at or close to the site of N9 on the previous day, breaks away from the main negative concentration of flux and follows the course of an obvious but weak protrusion of negative flux into the neighbouring positive flux. Continuing in Fig. 5, we see that flux is lost in the protrusion of N16 into the positive flux and that the protrusion disappears by 2218. These examples on 4 August are continuing the same pattern of fragmentation, motion, and flux loss as on the previous day. However, N16 reveals a different component of motion. It is slowly migrating towards the upper part of the field of view as well as toward the positive polarity. In Fig. 5, N16 is seen to merge with the negative field above it. Concurrently, it may be shedding very small fragments of its flux, at the threshold

* In this paper we label the moving magnetic features in the same way as other fragments with a P for positive, or N for negative, followed by a number. Opposite polarity features which come into contact are labelled with the same number. Otherwise, the number following the N or P only denotes the approximate order in which each fragment is mentioned.

of our detection in these images, in the direction of the adjacent positive field. We suspect that a lot of action may be taking place in the weaker magnetic flux below our sensitivity threshold and spatial resolution in this set of data.

Fragments P17, N18 (1623) and P19 (1834) on 4 August (Fig. 4) appear to be additional examples of moving magnetic features all following approximately the same path. The larger positive fragment P19 almost completely cancels the negative fragment N18 and continues its motion toward the negative field above it. P19 joins the remnant of P17; it may also be the composite of several smaller knots of flux. Continuing through frames 2121, 2218 and 2325 in Fig. 5, it appears that the rapidly moving P19 is able to force the displacement of the more stable negative flux in its direction of motion until about 2325. After this time, P19 is obviously losing flux and some of the adjacent negative flux reoccupies its original position as these features interact with each other.

Another interesting change in the vicinity of the positive fragment P19 is the opening of a lane of little or no magnetic flux between it and the main concentration of positive flux. The lane is first seen in Fig. 5 at 2325 and it becomes slightly wider thereafter.

In addition to flux migration and disappearance from the existing flux of the active region, Fig. 5 reveals the development of a new ephemeral region. The characteristics of ephemeral regions are reviewed in Livi *et al.* (1985). The evolution of E1 is shown in the second to the sixth frames of Fig. 5. The separation of its opposite polarities occurs rapidly between 2121 and 2218. By 2218 the negative half, E1n, has merged with the nearby negative field, but its location is still identifiable. As the two halves of the ephemeral region continue their initial motion, we observe interesting coincidental changes in the pre-existing opposite polarity flux at the extremities of the ephemeral region at 2325. To the right of E1n, a pronounced appendage of positive polarity flux P20 has moved towards an existing negative fragment N20 in the general direction, but a little below, the negative field of E1n. At 2325, loss of flux is apparent in N20. By 0032, N20 has almost completely disappeared but the flux that we assume was lost in P20 is being replaced by positive flux flowing along the appendage established first by P20. The magnetic field gradient increases as the appendage of positive polarity moves close to E1n. The stage is set for flux disappearance between E1n and renewed P20 by the last frame at 0135.

At the other end of the ephemeral region at 2325, the positive pole E1p has come close to the pre-existing negative field to its left. By 0032, the adjacent negative field has developed an appendage, N21, extending into contact with E1p. Again the stage is set for loss of flux. E1p has already lost flux by 0135, which is obvious from its reduced size, while E1p and N21 have completely disappeared by the beginning of the next observing day, as shown in the series of magnetograms in Fig. 6.

To the right of E1n in Fig. 5, there are several significant sites where other fragments move toward concentrations of opposite polarity flux. Fragment N22 (0032) has separated from the main concentration of negative polarity and moves towards the concentration of positive polarity to its right. The appendage of positive flux P20 that moved to meet the negative pole of E1 is the most rapidly moving and last of three appendages that develop from the concentration of positive flux just below the centre of the frames in Fig. 3. The adjacent appendage P23 to the right of P20 was initiated by P14 (Fig. 4) while the third appendage P24 further to the right follows the path established by P4 and P5 (2009, Fig. 3).

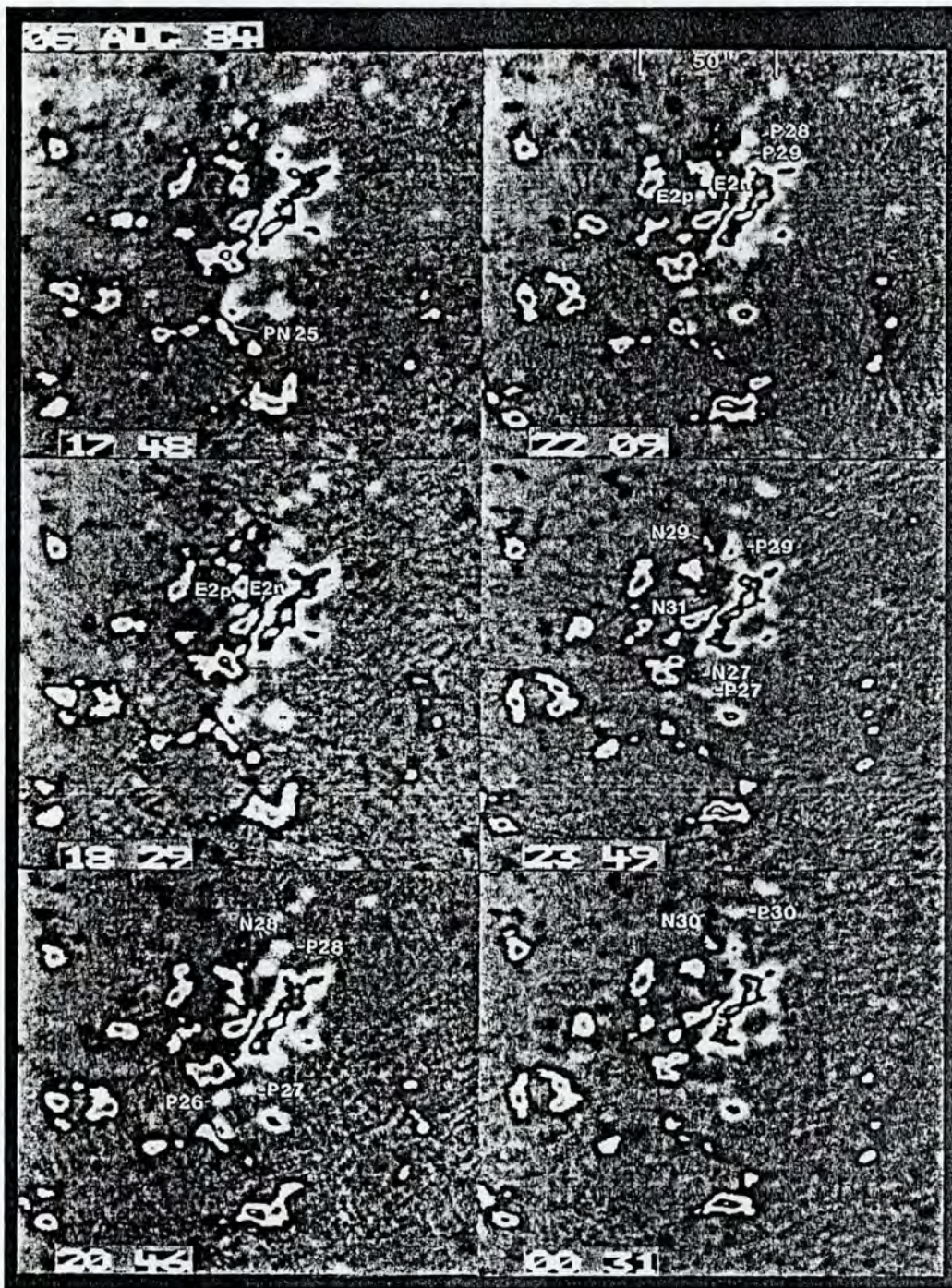


Fig. 6. PN25 (1748) is an example of very rapid cancellation in which both polarities are seen to lose flux. P26 (2046) moves up in the field and cancels with a concentration of negative flux. N27 (2349) breaks away from the same concentration of negative flux and moves toward P27. N28 cancels with P28 while P29 merges with P28. N29 begins to cancel with P29. P30 moves toward N30. E2p and E2n (1829) are the poles of an ephemeral region. Both poles cancel with adjacent fields of opposite polarity (2209).

By the beginning of the next observing day, 5 August, shown in Fig. 6, radical change has also taken place in this part of the active region. A large amount of both positive and negative flux has disappeared. Only two fragments of positive flux remain in the vicinity of the concentration of flux with its three appendages P20, P23 and P24 (see Fig. 5). The negative flux is clearly reduced and the remaining negative fragments have shifted in position. In this part of the region, there is only one site, PN25, where opposite polarity fields are in contact.

In Fig. 6 and in the subsequent text, we designate sites of cancellation as PN (positive-negative) followed by a consecutive number which continues to designate the order in which the features are described in this paper. If referring to either half of a cancelling feature, such as PN25, we use either P25 or N25 to denote whether we refer to the positive or negative half.

At all of the sites where we observe and can measure flux loss during our observing day, the loss takes place in exactly the way as illustrated by example PN25 in Fig. 6. PN25 is seen to lose flux very rapidly. By 2349, P25 has completely disappeared and the flux of N25 is obviously much reduced. Between 1748 and 1829, prior to the interval of obvious flux loss, P25 was a part of a slightly larger concentration of flux which separated into two fragments. The upper fragment is designated as P26 (2046). This splitting is already distinguishable at 1829. P26 moves up to meet a larger concentration of negative flux. Flux loss at PN26 is evident by 2349 and the fragment P26 has completely disappeared by 0031. At 2349, to the upper right of P26, fragment N27 is seen to be breaking away from the same concentration of flux with which P26 is cancelling. N27 begins to migrate towards P27.

In the case of PN25, flux loss is initiated about the time that the centre or peak of flux in the smaller fragment is 5 arcsec or less from the first contour (50 G) of the larger concentration. As the magnetic flux is disappearing, a relatively high magnetic field gradient is established and maintained between the two polarities until all of the flux of the smaller fragment is completely gone. This behaviour is consistent with the way that flux disappears in much smaller cancelling fragments. From this behaviour we conclude that the site of disappearance is at or within a few arcsec of the dividing line between the opposite polarities, and that the disappearance of the flux in this narrow zone is accompanied by continued migration of the opposite polarity fields together until the smaller fragment has completely disappeared.*

As a first step in estimating the rate of flux loss in the whole active region due to cancellation, we measured the rate of flux disappearance in P25 and P26 because these are relatively isolated and distinct examples of flux disappearance at different rates. The measurements were made from digital magnetograms from the Big Bear Solar Observatory which were recorded about once an hour throughout the observing

* For brevity and clarity in continuing our discussion of the observations, we call this type of observed loss in magnetic flux 'cancellation' and assign it the specific definition: 'the apparent mutual loss of magnetic flux in closely spaced features of opposite polarity'. We choose to use this term because the root word 'cancel' means to remove the effectiveness of something or alternatively that one factor offsets the effect of another. 'Cancel' does not mean 'destruct' and 'cancellation' is not synonymous with 'annihilation'. It is an appropriate observational term because it has a more precise meaning than 'disappear', yet it does not imply that we pretend to know exactly how the magnetic field is removed from the photosphere. Our intention is to leave the theoretical interpretation to be addressed subsequent to the presentation of the observations. The questions of whether the cancelling magnetic fields are really being submerged, expelled outward, annihilated, or some combination of these interpretations remain open.

By the beginning of the next observing day, 5 August, shown in Fig. 6, radical change has also taken place in this part of the active region. A large amount of both positive and negative flux has disappeared. Only two fragments of positive flux remain in the vicinity of the concentration of flux with its three appendages P20, P23 and P24 (see Fig. 5). The negative flux is clearly reduced and the remaining negative fragments have shifted in position. In this part of the region, there is only one site, PN25, where opposite polarity fields are in contact.

In Fig. 6 and in the subsequent text, we designate sites of cancellation as PN (positive-negative) followed by a consecutive number which continues to designate the order in which the features are described in this paper. If referring to either half of a cancelling feature, such as PN25, we use either P25 or N25 to denote whether we refer to the positive or negative half.

At all of the sites where we observe and can measure flux loss during our observing day, the loss takes place in exactly the way as illustrated by example PN25 in Fig. 6. PN25 is seen to lose flux very rapidly. By 2349, P25 has completely disappeared and the flux of N25 is obviously much reduced. Between 1748 and 1829, prior to the interval of obvious flux loss, P25 was a part of a slightly larger concentration of flux which separated into two fragments. The upper fragment is designated as P26 (2046). This splitting is already distinguishable at 1829. P26 moves up to meet a larger concentration of negative flux. Flux loss at PN26 is evident by 2349 and the fragment P26 has completely disappeared by 0031. At 2349, to the upper right of P26, fragment N27 is seen to be breaking away from the same concentration of flux with which P26 is cancelling. N27 begins to migrate towards P27.

In the case of PN25, flux loss is initiated about the time that the centre or peak of flux in the smaller fragment is 5 arcsec or less from the first contour (50 G) of the larger concentration. As the magnetic flux is disappearing, a relatively high magnetic field gradient is established and maintained between the two polarities until all of the flux of the smaller fragment is completely gone. This behaviour is consistent with the way that flux disappears in much smaller cancelling fragments. From this behaviour we conclude that the site of disappearance is at or within a few arcsec of the dividing line between the opposite polarities, and that the disappearance of the flux in this narrow zone is accompanied by continued migration of the opposite polarity fields together until the smaller fragment has completely disappeared.*

As a first step in estimating the rate of flux loss in the whole active region due to cancellation, we measured the rate of flux disappearance in P25 and P26 because these are relatively isolated and distinct examples of flux disappearance at different rates. The measurements were made from digital magnetograms from the Big Bear Solar Observatory which were recorded about once an hour throughout the observing

* For brevity and clarity in continuing our discussion of the observations, we call this type of observed loss in magnetic flux 'cancellation' and assign it the specific definition: 'the apparent mutual loss of magnetic flux in closely spaced features of opposite polarity'. We choose to use this term because the root word 'cancel' means to remove the effectiveness of something or alternatively that one factor offsets the effect of another. 'Cancel' does not mean 'destruct' and 'cancellation' is not synonymous with 'annihilation'. It is an appropriate observational term because it has a more precise meaning than 'disappear', yet it does not imply that we pretend to know exactly how the magnetic field is removed from the photosphere. Our intention is to leave the theoretical interpretation to be addressed subsequent to the presentation of the observations. The questions of whether the cancelling magnetic fields are really being submerged, expelled outward, annihilated, or some combination of these interpretations remain open.

day. P25 lost flux at the average rate of $5 \times 10^{18} \text{ Mx hr}^{-1}$, while P26 lost flux at the much slower and more typical rate of $(1-2) \text{ Mx hr}^{-1}$. Assuming an equal rate of flux loss in the negative polarity concentrations with which P25 and P26 were cancelling, a conservatively estimated rate of cancellation for a small element exemplified by P26 and its unresolved negative counterpart is $2 \times 10^{18} \text{ Mx hr}^{-1}$. A high rate of flux loss is $10^{19} \text{ Mx hr}^{-1}$, as exemplified by P25, one of the fragments which in the time-lapse films appears to cancel rapidly. Assuming that the lower rate of $2 \times 10^{18} \text{ Mx hr}^{-1}$ is typical, only 2.5 sites of cancellation of this magnitude need to exist on average throughout the decay phase to account for all of the observed loss of flux during the decay phase of the active region, as measured from the Kitt Peak magnetograms ($5 \times 10^{18} \text{ Mx hr}^{-1}$). Since it has been shown in Figs 3-6 that several cancellation sites frequently can be observed at the same time, we conclude that the general phenomenon of cancellation is of the correct order of magnitude to account for the flux that has disappeared from the photosphere during the decay phase of this active region. To verify this estimate a detailed accounting of all the measurable cancelling features in this active region is planned for a subsequent paper.

In most of the examples cited thus far, the cancellation of flux was preceded by fragments breaking away from larger concentrations of flux. Sometimes, however, cancellation is preceded or accompanied by the merging of knots of flux of the same polarity. An example of the coalescence of fragments preceding and accompanying cancellation is shown in the upper part of the active region in Fig. 6. A cluster of fragments of negative polarity merges throughout the day. One of the fragments, labelled N28 at 2046, moves into contact with adjacent P28. N28 cancels completely with P28 by the end of the day and loss of flux is also apparent in P28. In addition, while N28 is cancelling with P28, P29 can be seen to merge with P28 between 2209 and 2349. Merging of the negative polarity fragments to the left of P29 also can be seen to slowly take place during the day. At 2349, we denote the merged cluster of negative fragments as simply N29 and the merged positive fragments as P29. By the last frame at 0031, N29 and P29 have almost moved sufficiently close for cancellation to begin. By the beginning of the next observing day (see Fig. 11 in the next subsection), all of P29 has completely disappeared along with most of N29.

Fig. 6 also reveals the dramatic effect of the fragmentation of the main concentration of negative flux. The main concentration has entirely dissipated at the site where the decaying sunspot was present on 3 August. In Fig. 6, the site of the previous concentration appears to be the centre of one or more newly forming network cells. The small concentrations of flux around the periphery of the cell are, on average, equivalent in magnitude and peak flux to the scattered negative flux in the rest of the field of view.

In the centre of the region and to the left of the polarity inversion line in Fig. 6, we observed the appearance of a new ephemeral region E2, whose poles are labelled E2p and E2n at 1829 in Fig. 6. The negative pole is growing in the upper end of a larger area of adjacent negative flux. The ensuing separation of the two poles, E2p and E2n (2209), is typical behaviour for ephemeral regions, as already shown for E1 in this paper and for other examples in the paper by Livi *et al.* (1985). E2p moves left and upward into adjacent negative flux, while E2n moves right into the main concentration of positive flux. Steady, obvious loss of flux occurs in E2p and the adjacent negative flux. The negative flux with which E2p is cancelling becomes identifiable as fragment N31 at 2349. By 0031, E2p has almost disappeared. In the

other pole of the ephemeral region E2n, flux loss is not obvious. However, it can be seen in Fig. 6 that E2n forces a slight change in the shape of the interface with the positive flux. The polarity boundary appears to be locally shifted to the right as E2n moves right. In such cases where cancellation is expected along the main polarity inversion line, flux change cannot immediately be seen because it is a small percentage change in a large concentration of flux. In these cases, flux loss can only be verified after a sufficient length of time during which the percentage change increases enough to be recognized and measured. By the next observing day, it is seen that E2p and E2n are gone, as well as all of the concentrations of flux around E2p and E2n.

Before proceeding to the description of the magnetic field changes in the late stage of decay of the active region, we present in Figs 7–10 events seen in H α filtergrams that occurred at the sites of cancelling magnetic flux. In Fig. 7, we show a small flare at the site where N16 in Fig. 4 (2006) protrudes into neighbouring positive flux. The site of the flare in Fig. 7 is enclosed with a dashed oval on both the H α image and the magnetogram. The flare is seen to straddle N16, its protrusion into the neighbouring positive field, and the adjacent positive field below the protrusion. Fig. 5 shows the series of magnetograms for several hours after this flare and reveals the flux loss indicated by the absence of the protrusion of N16. By 2325, the positive flux at the flare site below the protrusion has moved to occupy the previous site of the protrusion. Although magnetograms were acquired continuously throughout the flare, we found no impulsive changes in the line-of-sight magnetic field either at or around the flare site during its lifetime. The loss of flux is a gradual change taking place in a period of several hours encompassing the interval of the flare, in agreement with the findings of Harvey *et al.* (1971).

In Fig. 8, the larger dashed oval encompasses a low intensity flare centred at the site where P20 meets N20. At the same time in Fig. 8, a microflare also coincides with E1p and a fibril or flare loop in absorption connects E1n and E1p. These features are enclosed within the smaller dashed oval.

A flare is seen in Fig. 9 around the site where the negative pole of the ephemeral region E2n (Fig. 6) pushes into the neighbouring positive flux.⁵ One of the flare elements appears to lie over the positive flux adjacent to E2n and the other over the negative flux just below E2n. Due to the high concentration of magnetic flux, the small percentage reduction in flux, expected where E2n pushes into the neighbouring positive field, is not seen in the magnetograms in Fig. 6. However, it is clear in the magnetograms that there is a slow build-up of magnetic field gradient, beginning before the flare and continuing after the flare and through the remainder of the observing day. By the next day, a large amount of both positive and negative field have disappeared. We infer that a slow loss of flux, which in other cases is distinct when observing small fragments, must be taking place as the gradient of the field increases on this day. The change in gradient and loss of flux occur in exactly the same way as illustrated for PN25 (Fig. 6, 1748–2209), where the field gradient also increases as the flux obviously disappears.

These examples of flares around the sites where ephemeral regions meet a pre-existing magnetic field, confirm the finding of Marsh (1978) that 'ephemeral region flares' do not occur between the poles within the ephemeral regions, but rather are related to the sites where their poles encounter opposite polarity magnetic flux. However, some flare configurations that we have observed in relation to ephemeral regions obviously differ from the configuration suggested by Marsh (1978). In the

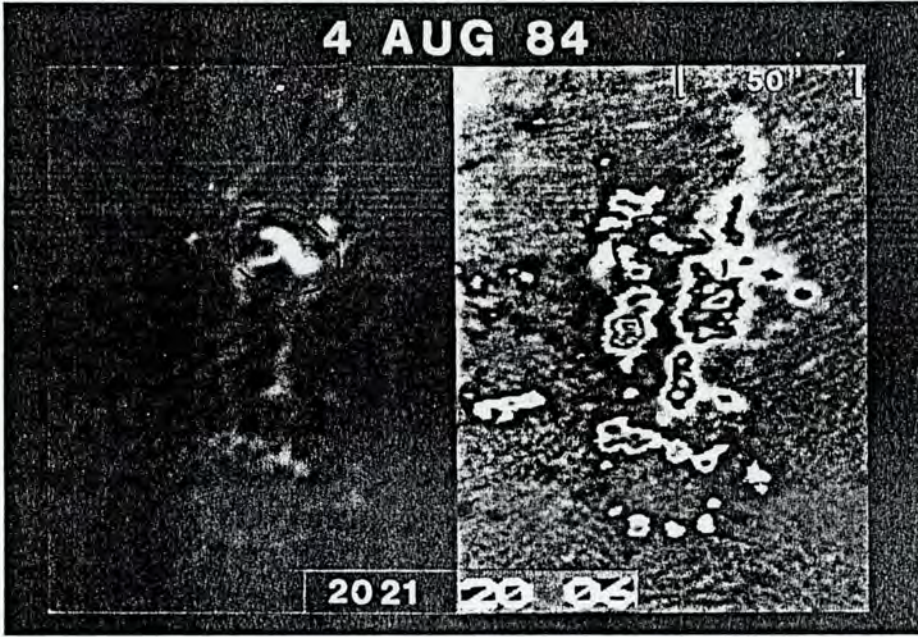


Fig. 7. A flare in $H\alpha$ (left image) occurs where a negative fragment intrudes into a positive polarity field and loses flux. The $H\alpha$ image is intentionally over-exposed to better show the flare in contrast to the $H\alpha$ plage and background.

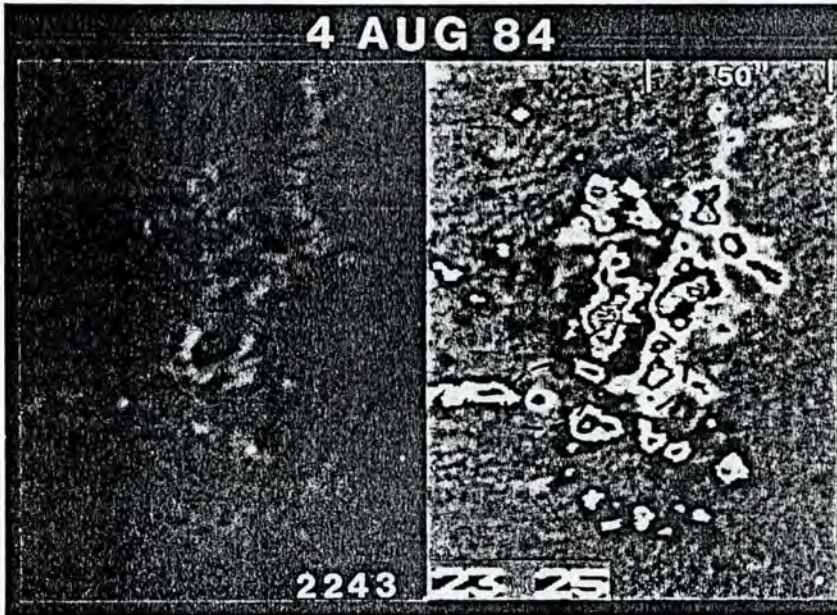


Fig. 8. A weak flare in $H\alpha$ (left image) occurs around the site where positive flux, P20 (see Fig. 5), moves into negative fragments. The larger of the two closest negative fragments is the negative pole of ephemeral region E1 in Fig. 4. Concurrent with this flare in the larger dashed oval, a microflare is seen in the positive half of ephemeral region E1, shown in the smaller of the two dashed ovals.

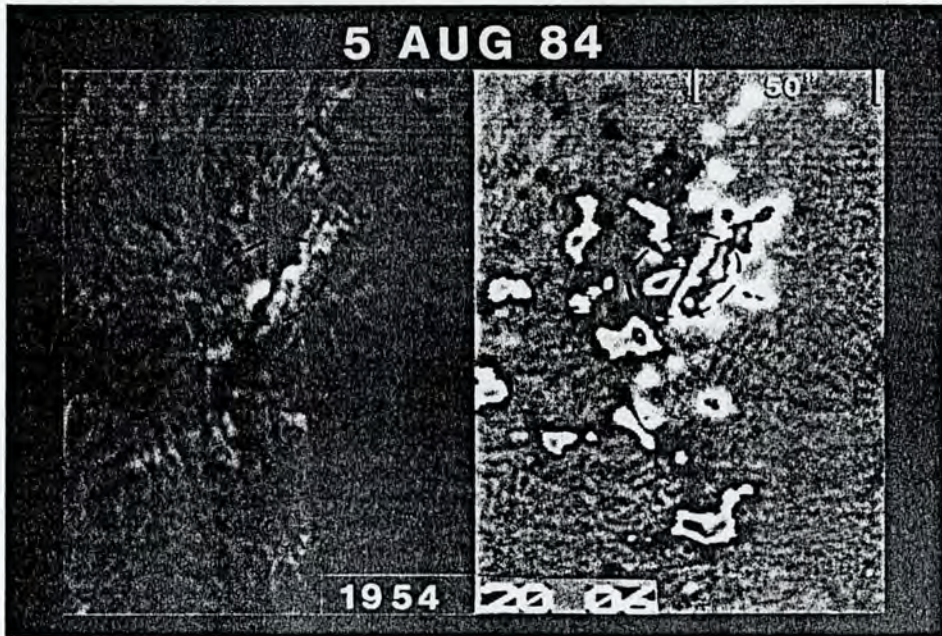


Fig. 9. A flare occurs where E2n in Fig. 6 moves into the main polarity inversion line.

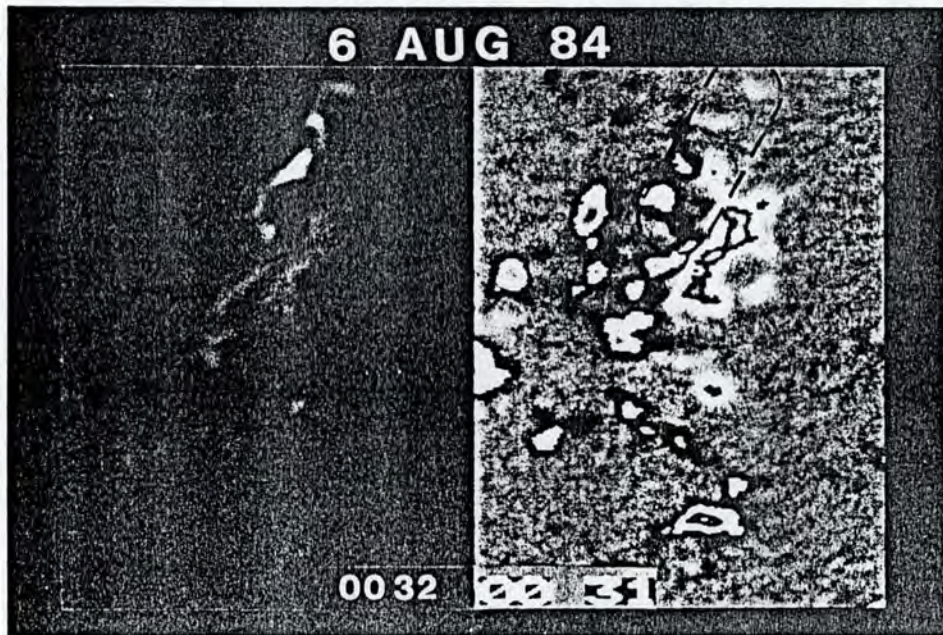


Fig. 10. This flare in H α occurs after P29 has moved into contact with N29 and also after the cancellation P28 and N28 in Fig. 6.

Marsh model, the chromospheric flare foot points would be connected by coronal flare loops extending from one pole of the ephemeral region to the closest adjacent opposite polarity field. It is clear in some of our magnetic field and $H\alpha$ images that one chromospheric foot point of the flare occurs near or on one pole of the ephemeral region, as suggested by Marsh, but that the other flare foot point is found in an opposite polarity field further from the site of collision of the ephemeral region pole with opposite polarity field. The flare in Fig. 9 is such an example.

In Figs 5 and 6 respectively, E1 and E2 are the only ephemeral regions identified during the decay phase of this active region. In both cases, the net effect, after the eventual complete cancellation of both poles of the ephemeral regions with neighbouring magnetic field, has been the removal of magnetic flux from the photosphere.

Another example of a flare at the site of approaching and cancelling fields of opposite polarity is shown in Fig. 10. The flare starts near the juncture of N29 and P29, where N28 previously cancelled with part of P28, while P28 was merging with P29 as shown in Fig. 6. The flare is brightest around the site of PN29. However, we note in this case, the outer extensions of the flare, near the ends of the encompassing oval in Fig. 10, are in adjacent areas. The lower end of the flare lies in negative flux including N31 (see Fig. 6). The upper part of the flare extends across two fragments of weak positive flux.

From these observations it appears that flares might represent a rapid readjustment of the magnetic field necessitated by cancellation.

(b) Detailed Description of the Late Phase of Decay

Our designation of the days from 6–8 August as the late phase of decay is partially arbitrary, but we make this distinction because there are several general differences worth noting between this phase and the earlier phase of decay from 3–5 August. First, the active region has evolved entirely into a cellular structure. The effects of convection in contributing to the motion of the magnetic fields has become obvious in the 6 August magnetograms in Fig. 11. Secondly, major flux loss has unquestionably occurred. In the late phase, there is a smaller number of sites of fragmentation, merging, and cancellation. However, the processes of fragmentation, migration, and the disappearance of magnetic flux continue in the same way as observed during the early phase.

In Fig. 11, examples of merging fragments are P32 and P33. Cancellation takes place between P33 and N33. Another site of cancellation is between P34 and N34. An example of fragmentation can be seen at the right side of the remaining highest concentration of positive flux, where P35 has almost become a separate fragment by 1942. P36 and N36 (1942) are approaching fragments of opposite polarity where flux loss will predictably occur before the next observing day.

In $H\alpha$, large changes were also noted on 6 August, as shown in Fig. 12. Most notably, strands of a filament have formed concurrently with the opening of the region into a cellular network. The filament strands display mass motion and associated structural change throughout the day. At 2105, the filament appears very dense. This is a prelude to its eruption with the occurrence of a flare beginning at 2120 as seen in Fig. 13. Two additional images of the filament are shown in Fig. 13 to show its position relative to the flare and its degree of change before the flare. The flare importance rating should be only about 1N (normal) or 1F (faint) on the commonly

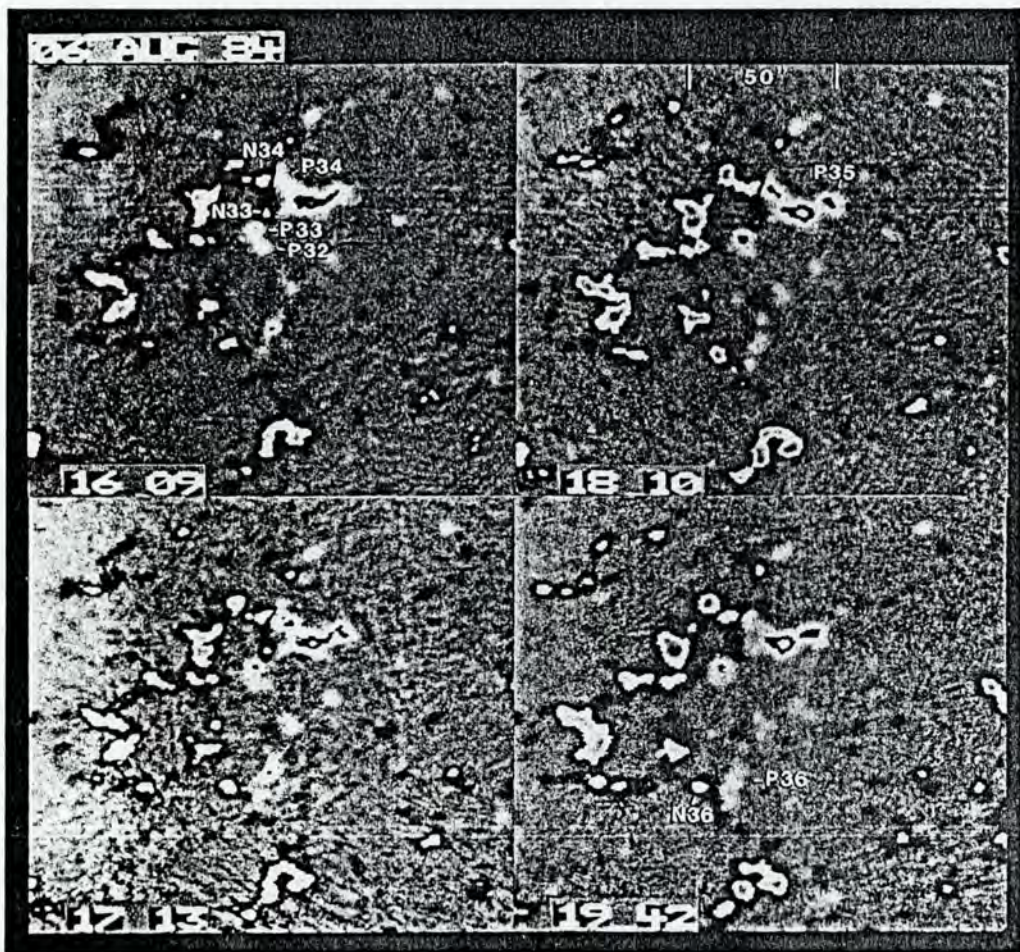


Fig. 11. P32 and P33 are merging fragments; N33 cancels with P33 and N34 cancels with P34. P35 (1810) establishes its identity as a separate fragment breaking away from a larger concentration of positive flux.

used relative scale of 1 to 4 in area. However, in relation to the previous flares in this active region, it is a major flare in the sense that it brightens almost every fragment of plage in the whole active region. Flare points are even seen over the network in the lower right of the image at 2139, an area of old network that was not a part of this active region.

The significance of the flare in Fig. 13 is that it is not unusual. It is a common 'garden variety' two ribbon flare; the ribbons are discontinuous rather than continuous as should be expected when the underlying network and plage is also fragmented (Tang 1985). The filament eruption was also not unusual. It was continuously recorded on film at a 15 s interval through a $1/4 \text{ \AA}$ passband $H\alpha$ filter. The filament was observed to erupt in the most common style. At the start of the eruption, the centre of the filament first expanded outward with the extreme ends retaining their footing. Then it developed the classic arch form as it disappeared from view against the solar disc.

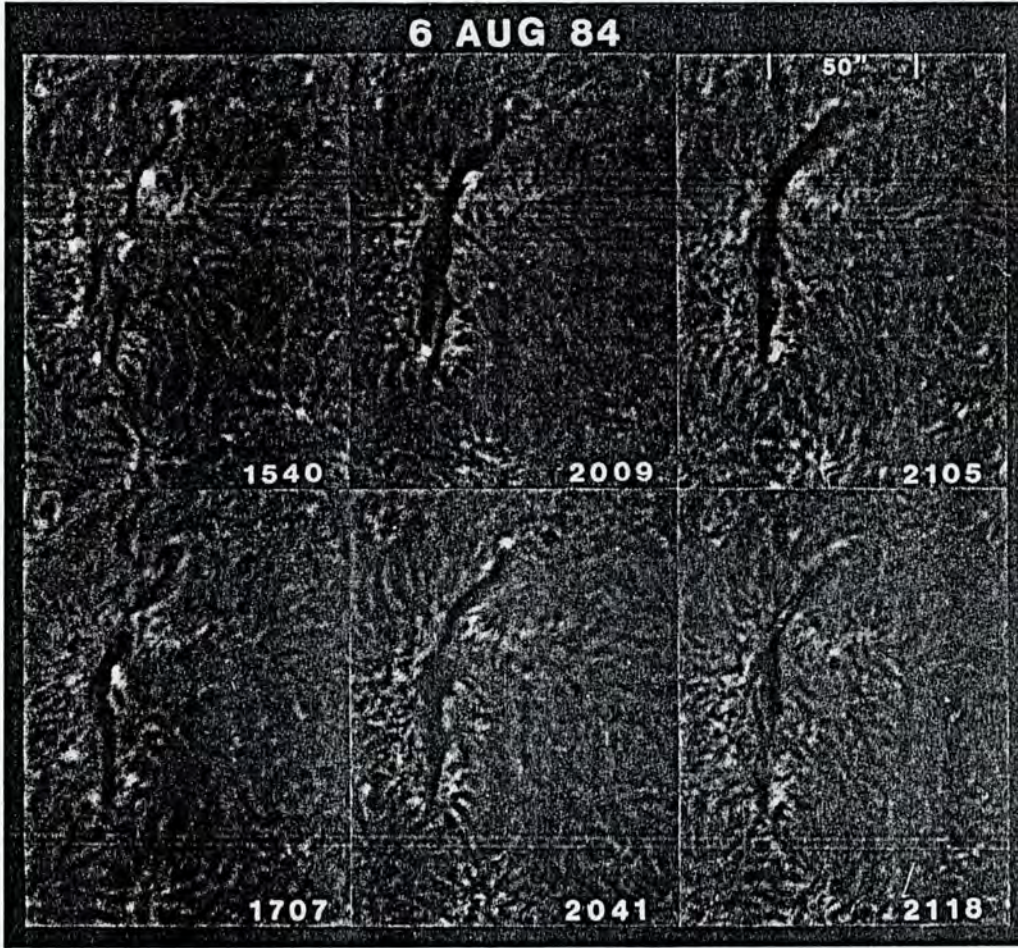


Fig. 12. A filament is able to form where gaps have developed between the fragments of flux of opposite polarity. Development of the filament accompanies the cancellation of magnetic flux.

Three important factors are seen in the association of this flare in Fig. 13 with the underlying pattern and changes in the photospheric magnetic field: (1) the flare starts at the main site where magnetic flux is disappearing, as seen in the line-of-sight fields in the photosphere; (2) the flare is brightest in the vicinity of the cancellation sites; and (3) the flare foot points develop throughout the active region where no magnetic flux is being lost at the time of the flare. The first two factors are important because they are common to all of the flares observed in this active region during its decay phase. Hence, we need to learn if these factors are common to flares in general. The third factor is significant because it offers possible evidence of the storage of energy in the active region as a whole, or alternatively of the possibility of the transport of flare energy from a localized site to the remainder of the active region.

The active region magnetic fields continue to decay in the established pattern on 7 and 8 August, as seen in Fig. 14. Only two distinct sites of flux loss are visible at the beginning of the observing day on 7 August. Flux is decreasing at PN37 and PN38 in Fig. 14. At 1739, PN38 is recognized to be two cancelling sites. The site to the right is identified as PN39. By 2224, PN39 ceases to be a cancelling site because the

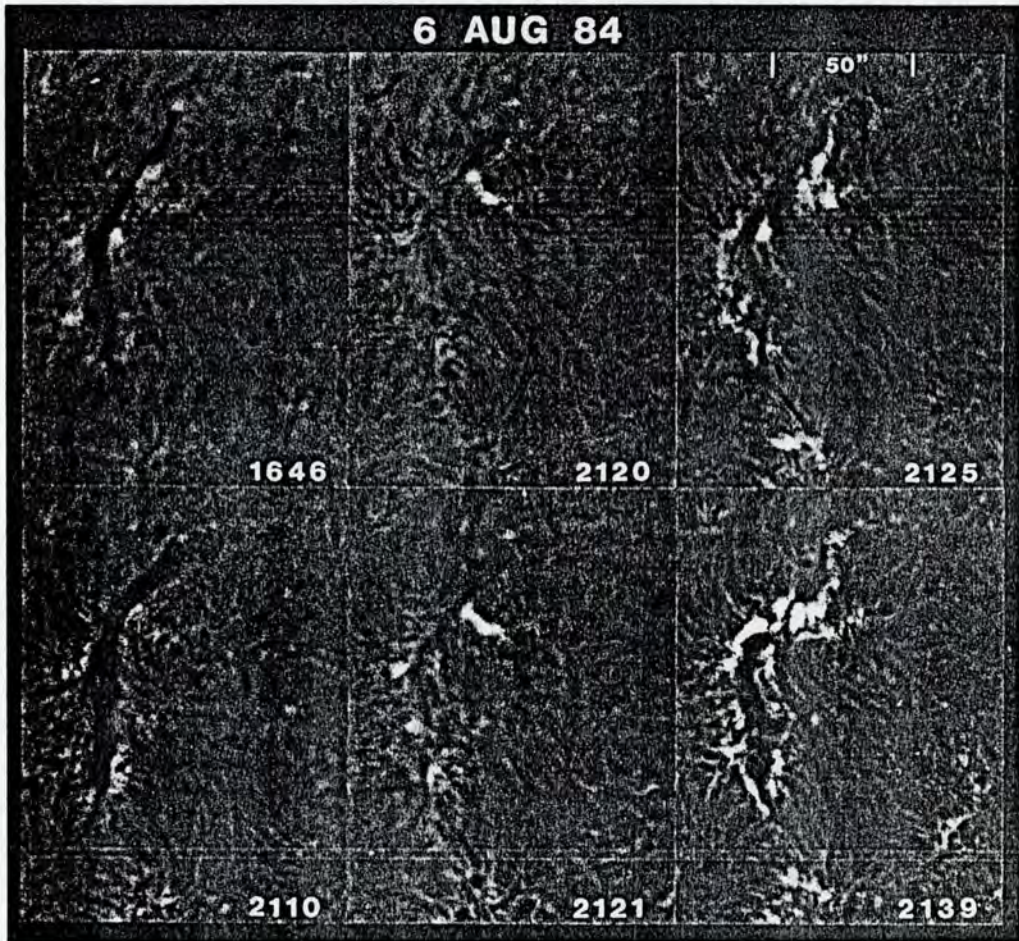


Fig. 13. The active and developing filament in Fig. 12 ends its short-lived existence by erupting in association with the flare beginning at 2120. The flare begins near cancelling fields N34 and P34 in Fig. 11 and spreads throughout the remainder of this decaying active region.

negative part of PN39 has completely disappeared. N40 approaches P39 to initiate a new site of cancellation designated as PN40 at 2356. Another very minor site of flux loss, PN41, also develops late in the day (2356).

In Fig. 15, we illustrate four successive flares at 1505, 1550, 1712 and 1902, which involve cancellation sites PN38 and PN39 in Fig. 14. Minor filament activity also is seen. We specifically note at 1902, the formation of a small active filament between PN38 and PN39 just as the cancellation is nearly complete. The filament remains active until the flare at 2156 involving the fields near PN40. In the final frame of Fig. 14, we observe a faint flare and surge at PN41.

The last frame in Fig. 14 is from 8 August, more than 17 hours after the preceding frame on 7 August. By 8 August, only two isolated fragments of positive flux remain. The site of this decayed active region was observed for a few hours on 8 August. During the relatively short interval that the site of this decayed active region was observed, no significant change was seen in the magnetograms and no further transient events were observed in $H\alpha$.

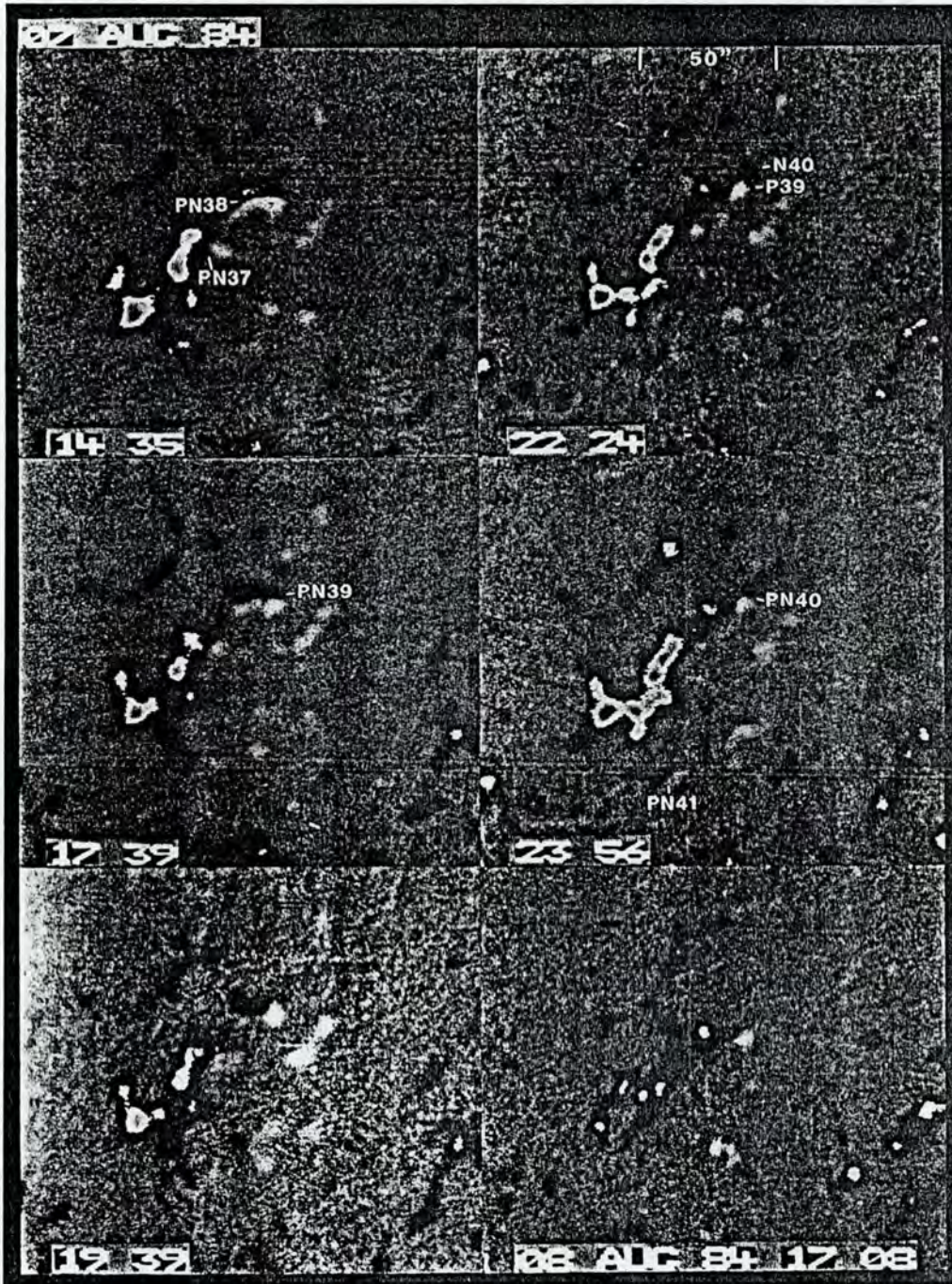


Fig. 14. Final sites of magnetic field cancellation observed are PN37, PN38, PN39, PN40 and PN41 on 7 August. The last frame is the following day 8 August. The remaining fragments of positive flux are at least temporarily isolated but probably eventually collide with surrounding negative flux to totally remove all flux of this active region from the Sun.

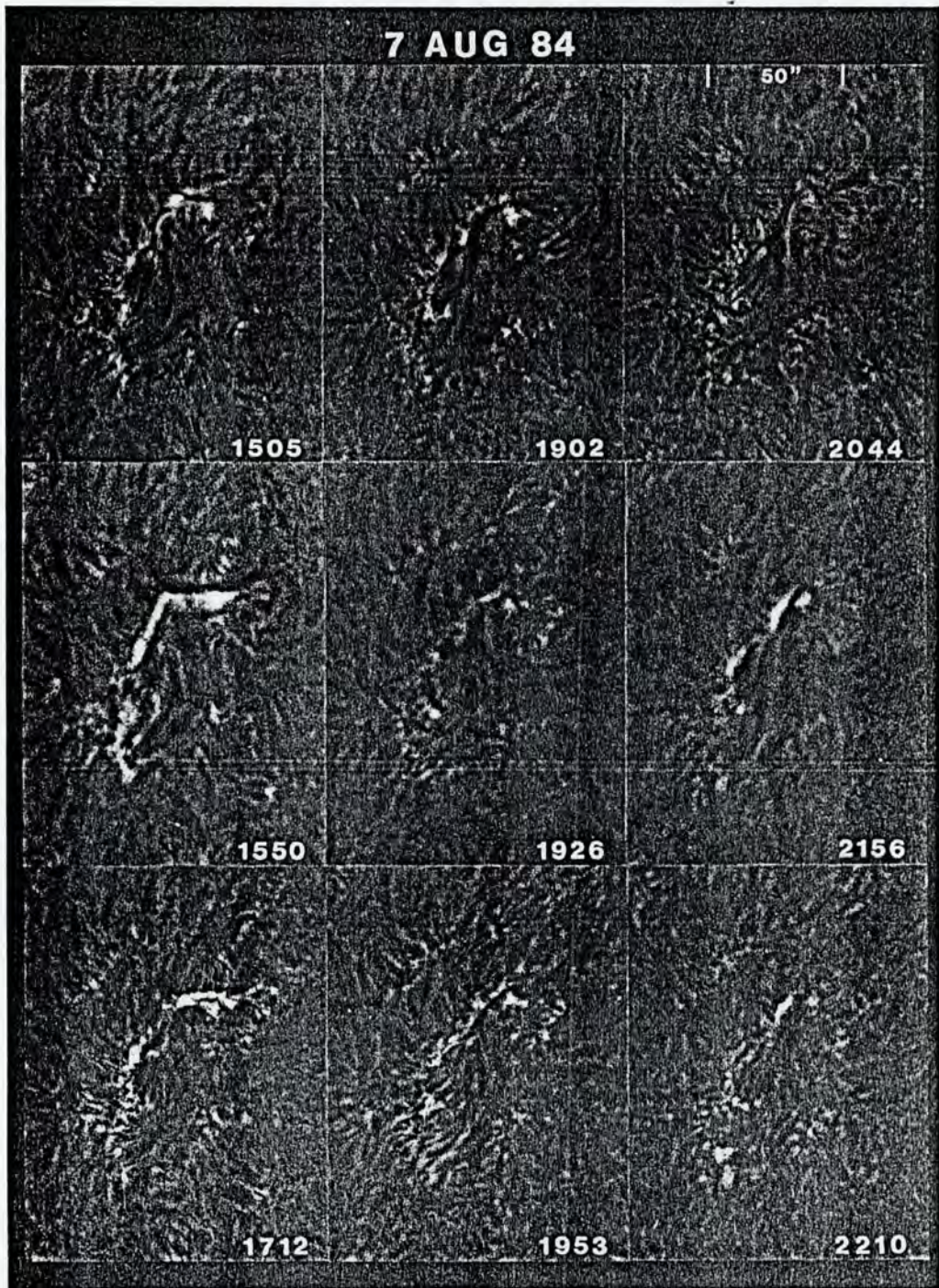


Fig. 15. Sequence showing that flares and minor filament activity continue in association with the cancellation sites in Fig. 14, even though very little magnetic flux remains. By 8 August, all H α activity ceased when the cancellation of flux also temporarily ceased.

Table 1 lists the approximate time of maximum of all of the flares observed during the decay of this region. The decay phase begins on 3 August. The primary cancelling fragments directly beneath or beside the brightest flare elements are listed in columns to the right of each column of flare times. It is seen that all of the flares are spatially related to one or more of the sites of cancelling magnetic flux.

Table 1. Flare time and related cancellation sites during the decay of active region 19425

3 August		4 August		5 August		6 August		7 August	
Time	Site	Time	Site	Time	Site	Time	Site	Time	Site
2129	N9	1813	N16	1954	E2n	2012	P/N36	1435	PN38 PN39
2146	N9	1830	N16	2131	PN25 P27	2140	P/N34	1528	PN37 PN38 PN39
		2023	N16	0032	P/N29 N30 E2p	<0046	P/N34 P/N33	1719	PN38
		2142	E1n P20			0107	P/N33	1808	PN37
		2243	E1n P20					2156	PN37 PN40
		(2247)	E1p						
		2325	E1n P20					2201	PN41
		(2343)	E1p						
		0050	N22						
		Number of flares per observing day:							
2		7		3		4		6	
		Total number of flares observed: 22							

We end our description of the details of the decay of this active region, having illustrated an inescapable association between the cancellation of magnetic flux and solar flares commonly observed in $H\alpha$. Since the time scales of flares and cancelling fragments of magnetic flux are different, we are left with fundamental puzzles. Is magnetic flux accumulating in the transverse component of the field when it is disappearing in the line-of-sight component? How much magnetic energy is converted to flare energy?

Where all of the cancelled flux goes and exactly how it is lost remain open theoretical questions which need to be addressed. A more detailed quantitative analysis is being carried out as a follow-on to this presentation, which is primarily a qualitative description. Our following observational summary and discussion is just a beginning step in suggesting factors that need further investigation.

4. Summary and Discussion of the Primary Results

(a) Changes Preceding the Disappearance of Magnetic Flux

Fragmentation of magnetic flux. The first significant process observed during the decay of the active region was the fragmentation of the two main concentrations of positive and negative magnetic flux. At discrete locations around the periphery of

each pole of the region, small and initially unresolved fragments of magnetic flux were seen to separate from larger concentrations of flux and thereby reveal their identity as discrete knots of flux. The motion associated with the small knots was often, but not always, in the direction of a feature of opposite polarity. In the negative half of this active region, the fragmentation from the strongest concentration of magnetic flux containing a sunspot was seen to be synonymous with the generation of 'moving magnetic features' around sunspots as previously described by Harvey and Harvey (1973). The knots identified as moving magnetic features consisted of either polarity, but otherwise were not recognized to be different from other fragments that originated from concentrations of flux not containing a sunspot. The majority of the fragments were very small with low values of total flux, typical of the 'knots' described by Zwaan (1978) having a flux of 10^{19} Mx or less. Such knots might correspond to a cluster of several facular points.

Fragmentation appears to be a recurrent sporadic occurrence, rather than a continual streaming or uniform flow of magnetic flux from one site to another. At a given location it is highly directional. The fragmentation that occurs around the entire periphery of the active region was confined to the apparent boundaries of network cells.

In the early stages of the decay of the specific active region described here, fragmentation and subsequent losses of flux seemed to happen more frequently in the polarity inversion zone in the middle of the active region than within any equivalent area around the periphery of the region. The fragmentation around the periphery of the region is confined to the boundaries of network cells. However, in the polarity inversion zone between the main concentrations of negative and positive magnetic flux, the fragmentation and ensuing migration do not appear to be confined to a pattern resembling network boundaries, at least when decay of the region first begins. In the early stage of decay, there is no distinct polarity inversion line in the middle of the region. Rather, there is a zone of interleaving of opposite polarity fragments which is continuously changing (see Fig. 3, 0021 UT). However, in the late stages of decay, when cell structure is evident in the middle of the region, the fragmentation does appear to be confined to specific paths that probably coincide with the boundaries of network or supergranule cells. In addition to fragmenting, knots of magnetic flux of similar polarity are equally able to merge with other knots and lose their individual identity within the resolution of our magnetograms. In this paper, we restrict our use of the word 'merge' to the apparent joining of fragments of the same polarity. When fragments merge, there is no apparent loss in total flux. The fragmentation and merging of the knots of flux in the decaying active region is the same as the splitting and joining of fragments of magnetic network on the quiet Sun (Martin 1984). During the decay phase of the active region, we note that fragmentation is dominant while on the quiet Sun the occurrences of fragmentation and merging are more nearly equal in number.

The net result of the fragmentation and migration of the magnetic flux of this active region was that the centroids of the opposite polarity fields moved together during the decay of the region.

Migration of fragments of magnetic flux. All of the reasons for the migration of magnetic flux are not definitively revealed by our study, but the data allow us to identify some factors that could lead to the observed motions. Possibly the most

important factor contributing to fragmentation and subsequent motion of knots of flux during the decay of the region is the action of convection around and beneath the active region. The sites of formation of new supergranule cells could make a significant difference in how much of the flux is able to flow into the polarity inversion zone. If supergranules develop exactly in the zone, they might inhibit the motion of opposite polarity fields towards each other, leaving the flux to be dispersed mostly outward around the periphery of an active region. However, if the new supergranules form within the concentrations of flux, they might push opposite polarity fields together and limit the amount of outward dispersal of magnetic flux. The latter is a conceivable circumstance for the region described in this paper, because this region is unusual in its rapidity of decay and in the minor role that outward dispersal plays in its general pattern of decay. The effect of supergranules on the migration of flux warrants further study in this and other decaying regions.

Another possible factor contributing to migration is induced motion related to the local cancellation of flux. When flux disappears, however it happens, we might expect a local drop in magnetic pressure at the site of flux loss. If a drop in magnetic pressure occurs, adjacent flux could be induced to move toward that site to re-establish magnetohydrodynamic equilibrium. The continued migration of additional knots of flux toward some sites of disappearing magnetic flux might be explained in this way.

Under some conditions there is evidence of an attraction of opposite polarity fields, a situation anticipated by Gold and Hoyle (1960). If motion is induced by magnetic attraction, two necessary conditions are suspected: (1) that the opposite polarity fields first move within a critical distance of each other, a distance not yet observationally specified, but probably less than the approximate average diameter of a supergranule cell (30 000 km), and (2) that the opposite polarity fields are not magnetically connected, at least initially. An especially good example of apparent attraction presented here is the motion of pre-existing flux towards both poles of ephemeral region E1, as shown in Fig. 5.

In the case of newly emerging active regions or ephemeral regions there is an inherent motion associated with the growth of the regions. This motion can be just due to the pre-existing loops of the active region emerging through the photosphere. In the case of ephemeral regions, however, this motion often continues after the region stops growing and results in a widening space of intranetwork field between the poles of the ephemeral region. The inherent motion associated with the growth of newly emerging magnetic flux regions is not obviously inhibited by convective motion associated with supergranules. However, pre-existing network or any other fragments of relatively strong flux can block or inhibit this motion associated with the growth of new flux, as shown for ephemeral regions on the quiet Sun by Wang *et al.* (1985).

(b) Disappearance of Magnetic Flux

Our observations confirm the speculation by Zwaan (1978) that 'apparently magnetic flux disappears from the photosphere whenever opposite polarities meet'. Throughout the decay phase of the active region studied in detail, the disappearance of magnetic flux was only seen or deduced to happen at or within a few arcsec of the junction of opposite polarity fields which had migrated together. The magnetic flux was seen to disappear within and around this active region in exactly the same way as we have

already observed on the quiet Sun and in other active regions (Martin 1984; Wang *et al.* 1985). We conclude that Zwaan's deduction is true in general for all solar fields.

It is relevant to the interpretation of how the flux disappears to know the possible origin of the fields and the circumstances that bring opposite polarity fields into juxtaposition. For the active region studied, the opposite polarity fields originated from four possible sources: (1) fragments of network or older active region fields present before the development of the active region under study, (2) fragments of the active region, (3) new ephemeral active regions developing within the active region, and (4) 'moving magnetic features' (MMFs) from the decaying sunspot—some of which are opposite in polarity to the spot (Harvey and Harvey 1973). Sources (1), (2) and (3) are just active regions that have originated at different times in the same field of view. We regard them as independent sources of field which initially contribute to the total flux in the field of view. Source (4), the MMFs, are presumably not independent fields, but rather are thought to be part of the flux of the active region and represent some type of topological change in the geometry of the magnetic field as a sunspot decays (Harvey and Harvey 1973). We list them as a fourth source because they represent opposite polarity fields that we observe to disappear in the same way as the opposite polarity fields from any of the other three sources.

The disappearance of magnetic flux takes place in a specific way that we call 'cancellation'. The term 'cancel' implies no physical model of how the flux disappears. It is a descriptive term which we define as 'the mutual apparent loss of magnetic flux in closely-spaced features of opposite polarity' (in observations of only the line-of-sight component of magnetic fields). Cancellation is almost invariably preceded by prior motion of the opposite polarity fragments towards each other. When the pre-cancellation phase is observed, we often see that the fragments involved in cancellation were preceded by a period during which one or both features moved toward the other with no apparent loss of flux until the fragments were within a few arcsec of each other. From the pre-cancellation migration patterns of isolated fragments and their subsequent motion during cancellation, we deduce that the observed loss of flux occurs at or within a few arcsec of the interface between the opposite polarity fields.

Before opposite polarity features first move into apparent contact, the gradient of the magnetic field is seen to be about the same everywhere around their periphery. That gradient is presumably the decrease of field from a point source or cluster of point sources of magnetic field, whose real strength is unknown and depends on the true size of the magnetic elements. The measured flux from the source magnetic field is smeared by seeing and telescope guiding errors. Hence, the true gradient is reduced to an apparent gradient which we can observe and measure. In our magnetograms, having spatial resolution of 2–3 arcsec, cancellation begins when opposite polarity fragments appear to come into contact. At the same time we observe a steepening of the apparent magnetic field gradient between the opposite polarity fragments. As the cancellation proceeds, the gradient seems to increase to some limiting value which may depend on the speed of prior motion or the quantity of flux involved in the cancellation.

The half-rate of magnetic flux loss per cancelling feature is of the order of 10^{18} Mx hr⁻¹. This amount of flux loss is easily seen and measured for small knots

having a total flux less than 10^{19} Mx. This amount of flux loss is sufficiently small that it is difficult to detect at the boundaries of larger concentrations of flux under circumstances where there are no apparent resolved fragments of flux. Two factors inhibit our detection of flux loss under these circumstances: (1) variations in image quality make it difficult to detect small percentage changes in large features with high concentrations of flux, and (2) adjacent flux moves towards the cancellation sites thereby obscuring the local loss of flux. However, in many circumstances, we were still able to deduce that cancellation was taking place because of several observational factors: (1) after a critical magnetic field gradient was reached at a given polarity inversion zone, there was no further build-up of flux near the polarity inversion line or zone; (2) after a sufficient length of time, such as by the next observing day, and assuming that several successive cancellations of knots of magnetic flux took place, the percentage change in the large concentrations became high enough to easily detect the loss of flux; and (3) cancellation was the only type of major flux disappearance seen during the decay of the region—isolated features of single polarity remained relatively constant in flux magnitude in contrast to the flux at junctures of opposite polarity fields which showed substantial net loss of magnetic flux over intervals of a few hours to a day.

Cancellation often takes place simultaneously at several sites. It occurs sporadically on approximately the same time scales as the preceding fragmentation. The measured rate of disappearance can vary substantially depending on the quantity of flux in a fragment and the number of fragments that are cancelling at any given time. The rates of disappearance can also vary, possibly as a function of the nature of the source fields and their rate of motion or rate growth prior to cancellation. The largest measured rate of cancellation in the decaying region was 5×10^{18} Mx hr⁻¹ for the positive half of a relatively large fragment that could have been composed of several knots of magnetic flux. The cancellation ended in 3–4 hr upon the complete disappearance of the positive field. Assuming that an equal amount of flux of both polarities disappeared, this cancellation alone was losing flux at a rate of 10^{19} Mx hr⁻¹, twice the average hourly rate measured from the Kitt Peak daily magnetograms and found to be 5×10^{18} Mx hr⁻¹. At a more typical rate of cancellation of 2×10^{18} Mx hr⁻¹, the steady loss of flux at a continuous average of 2.5 sites would account for the total flux loss during the main phase of decay of the region. Thus, the phenomenon of cancellation alone is estimated to be of the correct order of magnitude to account for all of the flux that disappeared during the decay of this active region. A detailed accounting of all of the measurable loss of flux in the many fragments within this active region is planned for a subsequent paper.

Cancellation can be interpreted as the removal of magnetic flux from the photosphere in several ways. Zwaan (1978) mentioned two possibilities. Both involve reconnection to create loops that would either be pulled out of the photosphere or below the photosphere depending on the height at which reconnection occurs. In Zwaan (1984), the case of simple submergence without reconnection was also outlined. Parker (1984) mentioned the possibility that magnetic fields can 'cancel' as a third means of removal of magnetic flux from the photosphere, in addition to submergence and outward expulsion. Parker's use of the term cancel was not explained; he argued only for the case of simple submergence.

In our view, there are at least two additional alternative interpretations of cancellation: (1) collapse of the magnetic fields due to local annihilation of the electric

currents that are the source of the magnetic fields and (2) apparent loss of magnetic flux due to changes in the topology of the magnetic field, such that the observed line-of-sight component becomes a transverse component of the magnetic field.

The correct interpretation of cancellation is not yet known. The question at least partially hinges on knowing whether the components of cancelling fields are: (1) parts of the same magnetic field, i.e. parts of a true magnetic bipole; (2) parts of separate magnetic fields that collide without reconnection; or (3) parts of separate magnetic features that collide and undergo magnetic reconnection.

We have examined many $H\alpha$ images corresponding to our videomagnetograms in seeking the correct interpretation of cancellation. Unfortunately, in existing sets of data, we have only partial evidence of which fragments are magnetically connected to other fragments. Sometimes flare loops reveal the magnetic connections, although these may be temporary. $H\alpha$ fibrils also sometimes give us clues. We have found an apparent lack of fibrils connecting fragments of magnetic field that are cancelling. However, this does not constitute proof of the absence of direct magnetic connection, because of a possible local increase in temperature which would prohibit the existence of cool fibril structures at the cancellation sites. The possibility of slow reconnection further complicates the picture, because we cannot know even for ephemeral regions whether their poles remain magnetically connected parts of a bipole, or whether soon after birth each pole reconnects to other flux in its vicinity. Transverse magnetic field measures in the photosphere and chromosphere, as well as direct observations of coronal fields or structures, are needed to determine how the magnetic field is configured at any given point in time. Knowledge of the three-dimensional structuring of the field as a function of time is necessary to observationally verify exactly how the flux disappears. Simultaneous velocity and magnetic field observations should also be helpful in learning the correct interpretation of cancellation.

(c) Spatial and Temporal Association of Solar Flares and Disappearing Magnetic Flux

All of the 22 flares observed during the decay phase of this active region were initiated around the sites where photospheric magnetic fields were cancelling or inferred to be cancelling. All of the flares were small, classed as subflares or microflares, except one flare of importance 1 which spread throughout the entire active region. There were also many other brightenings around the cancellation sites not sufficiently large or well defined in time to identify as specific events. Distinct flares were observed at most, but not all, of the sites of cancelling fields. Notably, during the late phase of decay, all of the cancellation sites were associated with one to three flares each (see Table 1 in Section 3). Additionally, when flares were observed, the brightest part of the flares were always close to the sites of cancelling fields. However, several flares extended to areas where no cancellation was taking place.

The time scales of cancellation and flares are notably different. Small-scale cancellation takes place over periods of several hours, whereas flares occur impulsively in periods of a few minutes. The time occurrence of flares relative to the cancellation is not obvious in viewing the time-lapse film of magnetograms, because there were no impulsive or short-lived changes in the magnetic field at the times of the flares.

Further study is required on the details of the spatial and temporal associations of flares and disappearing magnetic flux. From our knowledge of these associations to date, we hypothesize that cancellation was a necessary condition, but not the only necessary condition for flares to occur in this active region.

5. Conclusions

At least three processes were found to be significant contributors to the decay of the specific active region studied. The first observed process was fragmentation of concentrations of flux by the breaking away of very small knots at the periphery of the concentrations. Second was a preferential migration of opposite polarity fragments towards each other, although fragmentation was found to occur in all directions around the periphery of the primary concentrations of positive and negative magnetic flux. The third and most significant process was the observed disappearance of magnetic flux at or within a few arcsec of the interface between opposite polarity fragments of flux. This type of disappearance of magnetic flux, called cancellation, was the only kind of major and real loss of flux observed in the active region.

Cancellation most typically involves small knots of flux; the few large knots that cancel probably are clusters of small unresolved knots. The cancellation observed in this active region occurred in the same way as the cancellation of magnetic flux fragments on the quiet Sun (Livi *et al.* 1985). However, the rate of cancellation is sometimes greater than on the quiet Sun. The rate of flux loss at a single site can be as much as 10^{19} Mx hr⁻¹ and possibly greater. The frequency and rate of cancellation was estimated to be sufficient to account for all of the magnetic flux lost during the decay of the active region.

The consequence of cancellation for the active region illustrated in this paper was the effective removal of the equivalent of its entire flux from the photosphere. Thus, this active region made no net contribution to the long-lived network fields of the quiet Sun. However, it should have resulted in the redistribution and replacement of the pre-existing long-lived network.

The *in situ* disappearance of flux of one polarity in magnetograms of lower sensitivity than shown here can be due to two phenomena. First, it can be due to the lack of detection of the many small knots of flux that cancel with larger, more easily detected concentrations of flux. Secondly, it can be due to small knots of flux breaking away from larger knots. If a magnetograph does not detect these small fragments due to inadequate spatial resolution and magnetic sensitivity, one could conclude that the disappearance of flux is inexplicable.

The mechanism of the observed cancellation of flux needs to be ascertained through additional observational and theoretical investigations. Observationally, an important question is whether the cancelling flux can be a consequence of the line-of-sight component of the magnetic field temporarily changing into the transverse component.

The formation of several short-lived filaments was observed upon the cessation of cancellation at some sites. All of the flares observed during the decay of the active region were initiated at the sites of cancelling fields. However, the time scale of flares differs radically from that of cancellation. Cancellation is a slow and long enduring change, in contrast to the impulsiveness of flares. This spatial and temporal association may be significant to the interpretation of cancellation and to flare theory.

Acknowledgments

We express our appreciation to the observing staff at the Big Bear Observatory during the summer of 1984 for their spirit of cooperation in obtaining the long sequences of data described in this paper. We also thank A. Patterson for writing the

essential programs for the image processor at Big Bear which was used in reregistering the time-lapse films presented at the Colloquium. We are especially grateful to H. Zirin whose tireless efforts, in promoting improvements in the videomagnetograph over the last several years, made possible the acquisition of the magnetograms. Support of the Observatory staff came from NSF grant ATM-82 11002 and NASA grant NGL 05-002-034. The contribution of S. F. Martin was supported by a grant from the Air Force Office of Scientific Research, AFOSR-82-0018.

References

- Gold, T., and Hoyle, F. (1960). *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 120, 7.
- Harvey, K. L., and Harvey, J. W. (1973). *Sol. Phys.* 28, 61.
- Harvey, K. L., Livingston, W. D., Harvey, J. W., and Slaughter, C. D. (1971). In 'Solar Magnetic Fields', IAU Symp. No. 43 (Ed. R. Howard), p. 422 (Reidel: Dordrecht).
- Livi, S. H. B., Wang, J., and Martin, S. F. (1985). *Aust. J. Phys.* 38, 855.
- Marsh, K. A. (1978). *Sol. Phys.* 59, 105.
- Martin, S. F. (1984). Proc. Symp. on Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres (Ed. S. L. Keil), p. 30 (National Solar Observatory: Sacramento Peak, NM).
- Parker, E. N. (1984). *Astrophys. J.* 280, 423.
- Tang, F. (1985). *Sol. Phys.* (in press).
- Topka, K. P., and Tarbell, T. (1984). Proc. Symp. on Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres (Ed. S. L. Keil), p. 278 (National Solar Observatory: Sacramento Peak, NM).
- Wallenhorst, S. G., and Howard, R. F. (1982). *Sol. Phys.* 76, 203.
- Wallenhorst, S. G., and Topka, K. P. (1982). *Sol. Phys.* 81, 33.
- Wang, J., Shi, Z., Livi, S. H. B., and Martin, S. F. (1985). *Sol. Phys.* (in press).
- Wilson, P. R., and Simon, G. (1983). *Astrophys. J.* 273, 805.
- Zirin, H. (1984). *Astrophys. J.* 291, 858.
- Zirin, H. (1985). *Aust. J. Phys.* 38, 961.
- Zwaan, C. (1978). *Sol. Phys.* 60, 213.
- Zwaan, C. (1984). Proc. Meeting on High Spatial Resolution in Solar Physics, September 1984, Toulouse (Ed. R. Muller), p. 263 (Springer: Berlin).

THE CANCELLATION OF MAGNETIC FLUX ON THE QUIET SUN

Wang Jingxiu Shi Zhongxian
Beijing Astronomical Observatory, China

Sara F. Martin
Solar Astron., California Institute of Technology, USA

Silvia H.B. Livi
Instituto de Fisica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ABSTRACT

The mutual loss of magnetic flux in closely spaced, opposite polarity magnetic fields is herein defined as "cancellation". The combination of two cancelling components is referred to as a cancelling magnetic feature. In this paper, a classification scheme for cancelling magnetic features according to the origins of their two halves is proposed; the observed properties of flux cancellation are summarized. The cancellation appears to be the observational evidence of magnetic reconnection taking place in or above the photospheric layer.

1. INTRODUCTION

As the way the majority of magnetic flux on the quiet sun is observed to disappear, the flux cancellation has been extensively described and illustrated by us with the time-lapse magnetograms acquired at Big Bear Solar Observatory (Martin, 1984; Wang et al., 1985; Livi et al., 1985; Martin et al., 1985). Our working definition of cancellation is the apparently mutual loss of magnetic flux at or near the boundary between adjacent magnetic fields of opposite polarity as seen in line-of-sight magnetograms. As this term implies there are always two components of opposite polarity involved in the process. These two components are referred to as a cancelling magnetic feature.

In this paper, we present a classification scheme for cancelling magnetic features, summarize their observed properties and discuss the significance and possible mechanism of flux cancellation.

2. CLASSIFICATION SCHEME

As in Martin (1984, 1987) and Zirin (1987), we describe all quiet

sun magnetic fields as either network, parts of ephemeral regions or intranetwork magnetic fields. The definitions that we use are the same as in Martin (1987).

We found that magnetic flux of one polarity from any above source is able to cancel with opposite polarity fields from other similar or different source when there is no evidence that the cancelling components are magnetically connected. Cancelling features composed of different source fields appear to be somewhat different in character. Therefore it is natural to propose a classification scheme for cancelling features according to the origins of their two halves. There are six classes of cancelling features:

Class Origins of two halves of cancelling features

N-N	network	--	network
E-N	ephemeral region	--	network
I-N	intranetwork	--	network
I-I	intranetwork	--	intranetwork
I-E	intranetwork	--	ephemeral region
E-E	ephemeral region	--	ephemeral region

The first three classes are most commonly seen. Since the intranetwork fields are too close to the detection limit of present day videomagnetographs, the I-I and I-E features could not be studied seriously. The I-N features studied are only distinct examples. Few E-E features have been found.

3. SUMMARY OF OBSERVED PROPERTIES

An E-N cancelling feature is shown in Fig. 1 as an instructive guide for our summary to be given later on. The upper part of the figure is iso-gauss maps, the lower part is flux density distribution along the lines shown above. At 18:35 an ephemeral region marked by a letter 'E' emerged near a strong positive network (in thicker line) as a tiny bipole. With the separation and development of the ephemeral region, its negative pole (in thinner line) began to collide and cancel with the positive network before 21:23. An increasing gradient and an indented polarity inverse line can be seen clearly. The average rate of flux loss from 21:23 to 23:51 is 2.2×10^{18} Mx/h. A microflare appeared on both sides of the polarity inverse line around 21:23. While the negative pole was cancelling

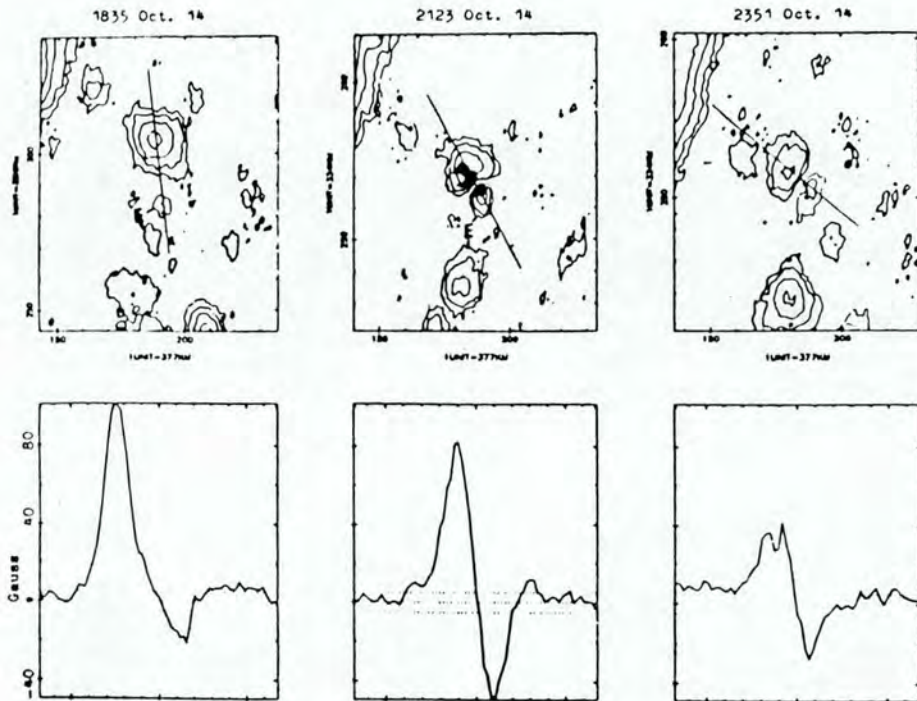


Fig. 1 An E-N Cancelling Magnetic Feature

with the upper positive network, the positive pole was merging with the lower one of similar polarity. The net result of the process seems to transport a large amount of flux from the upper network noncontinuously to the lower one, and to make the ephemeral region lack balance in flux between two poles.

Based on an analysis of more than 200 cancelling features, we may summarize their common properties as follows:

- (1) The systematic approach of opposite polarities toward each other at a speed of .3-.6 km/s;
- (2) The setting up of a high magnetic field gradient of .02-.03 gauss./km between the cancelling components;
- (3) The initiation of cancellation when opposite polarities come within several arcsec. of each other;
- (4) The continued concentration and reduction of the total flux results from the continued motion of the opposite polarities toward each other;
- (5) The concurrent decrease in maximum field strength and the area for both polarities;
- (6) The gradual rather than impulsive flux disappearance with

an average rate of $1-2 \times 10^{18}$ Mx/h;

(7) The absence of fibrils in $H\alpha$ directly linking the two cancelling components of any cancelling feature.

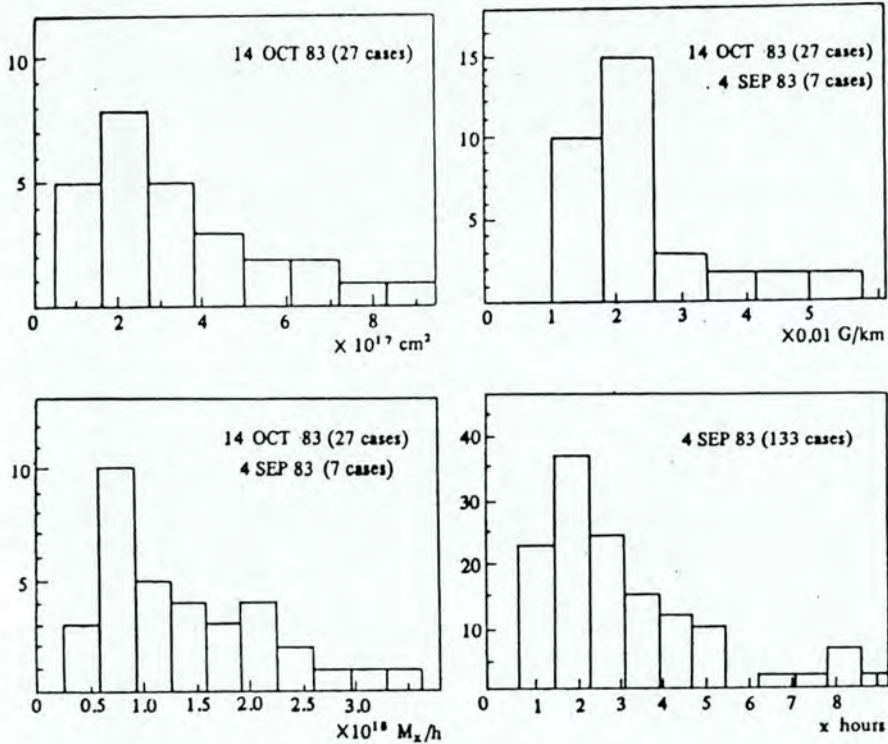


Fig.2. (a) Area at maximum gradient (c) Gradient between cancelling components
(b) Rate of flux loss (d) Life time of cancelling features

In some cases microflares, small-scale eruptive filaments, and/or He 10830 Å dark points are observed to make their appearance related to cancelling sites.

The number of detectable cancelling features per supergranule per 6-8 hours varies from 1 to 8 primarily with ability of videomagnetograph to record weak fields, secondarily with the spatial and temporal resolution of the data.

In Fig.2a,b,c,d, we show the histograms of the total area, the rate of flux loss, the maximum gradient and the lifetime of cancelling features derived from the well-calibrated magnetograms on Oct.14, 1983 and partly calibrated magnetograms on Sep. 4, 1983 which have

adquate temporal resolution of $\lesssim 30$ minutes. The distribution in the left extreme is not meaningful since the inadequate sampling of small features. The general similar appearance of the histograms suggest that the total area, the rate, the maximum gradient, and the lifetime may all be interrelated.

4. DISCUSSION

The most likely mechanism of cancellation seems to be the magnetic reconnection. We suggest that the cancellation might provide the observational evidence of magnetic reconnection in or above the photographic layer. In this regard we would like to call particular attention to E-N cancelling features. When one pole of an ephemeral region is cancelling with some pre-existing flux of opposite polarity, the magnetic field lines to or from the other pole must reconnect to somewhere else.

Irrespective of the mechanism, or mechanisms involved cancellation is observed to be the most common mode of flux disappearance away from the photosphere, and a primary factor in the redistribution of magnetic flux on the quiet sun. The cancellation may play an important role in flux diffusion across the solar surface and may provide the heating of the upper atmosphere by release of magnetic energy.

REFERENCES

- Livi, S.H.B., Wang, J., Martin, S.F., (1985) Aust. J. Phys., **85**, 855.
Martin, S.F., (1984) in Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres, ed. by Keil, p.30.
Martin, S.F., Livi, S.H.B., Wang, J. (1985) Aust. J. Phys., **85**, 929.
Martin, S.F., (1987), Solar Phys., in press.
Wang, J., Shi, Z., Martin, S.F., Livi, S.H.B., (1985) Solar Phys., submitted.
Zirin, H., (1987) Caltech Astrophys. Preprint BBSO # 0267.

Extended Abstracts

AGU Chapman Conference on:

Physics of Magnetic Flux Ropes

Hamilton Bermuda

March 27-31, 1989

Conveners

E. R. Priest, L. C. Lee and C. T. Russell

CANCELLING MAGNETIC FIELDS IN THE SOLAR ATMOSPHERE

Sara F. Martin
Big Bear Solar Observatory
California Institute of Technology
Pasadena, CA 91125, U.S.A

Silvia H.B. Livi
Instituto de Fisica
Universidade do Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre 90 049, Brazil

Extended Abstract

The term 'cancellation' refers to a specific way that magnetic flux is observed to disappear when seen on magnetograms showing the line-of-sight component of solar magnetic fields. The definition of cancellation used to date is "the mutual disappearance of closely-spaced magnetic fields of opposite polarity at their common boundary" (Martin et al. 1985; Livi et al. 1985; Wang et al. 1988). Because there are several alternative physical interpretations to explain how the magnetic flux actually disappears (Zwaan 1985, 1987), we choose to remain neutral in presenting data and to use the term 'cancellation' strictly as an observational term that implies no particular physical interpretation. We hope that studies of the entire range of circumstances in which cancellation takes place on the sun will lead to an understanding of the physical processes that cause cancellation.

Cancellation has been observed in most circumstances in which opposite-polarity photospheric magnetic fields move together irrespective of their identity as active regions, ephemeral active regions, network or intranetwork magnetic fields. Because there are large differences in the magnitudes of these various categories of solar magnetic fields, we have found that it is preferable to investigate cancellation on the quiet sun separately from the so-called 'active sun' or 'active regions'. The cancellation of quiet sun magnetic fields can be divided into the categories listed in Table 1 with the assumption that these are always circumstances of opposite polarity fields moving together. A general review of solar magnetic fields is given by Zwaan (1987) and a comprehensive description of these quiet sun fields and some of their interactions has been presented by Martin (1988).

Table 1.

	Intranetwork ⁻	Network ⁻	Ephemeral Region ⁻
Intranetwork ⁺	I ⁺ /I ⁻	I ⁺ /N ⁻	I ⁺ /E ⁻
Network ⁺	N ⁺ /I ⁻	N ⁺ /N ⁻	N ⁺ /E ⁻
Ephemeral Region ⁺	E ⁺ /I ⁻	E ⁺ /N ⁻	E ⁺ /E ⁻

Intranetwork/Intranetwork (I+/I-) cancellations are probably the most common category of cancellation because these fields are a few arc seconds or less in diameter and are continuously produced in large numbers within the solar convection cells known as 'supergranules'. The intranetwork fields of both signs first appear near source sites near the centers of the supergranule cells and flow approximately radially to the boundaries of the cells. Their mean speed is in the same range as the velocity of supergranules measured from Dopplergrams (Wang 1988). This indicates that the intranetwork magnetic fields are simply transported by the convective flow from the centers to the boundaries of the supergranule cells.

Although I+/I- cancellations are observable within the supergranule cells, they are currently most easily detected at the boundaries of adjacent cells because that is where the fields from adjacent cells meet and because of the tendency for the line-of-sight component of the intranetwork fields to strengthen as they approach the cell boundaries. For the intranetwork fields, cancellation almost invariably begins to occur wherever and whenever opposite-polarity patches of field appear to come into contact; that is, at locations where magnetic fields of the order of a few Gauss have moved within a few arc seconds of each other. Intranetwork fields typically disappear at rates in the range of 10^{17} - 10^{18} Maxwells per hour (Livi et al. 1985; Wang et al. 1988). Once cancellation begins, it usually continues at a steady rate until the smaller of the two, (I+ or I-) completely disappears. This is consistent with the idea that the intranetwork fields are driven together by the convective flow.

It should be mentioned that the merging and adding of fields of the same polarity occurs just as often as the cancellation of opposite polarity fields. The merging or coalescence of intranetwork fields at the cell boundaries can result in the temporary accumulation of flux at the cell boundaries. Magnetic fields that have accumulated at the boundaries of supergranule cells have a characteristic pattern that is known generally as 'the network'. Although Giovanelli (1982) made a distinction between the mixed polarity network and areas of unipolar network, most references to the network are to the large areas of unipolar network that are the dispersed residual fields of decayed active regions.

The second most common category of cancellation is intranetwork/network (I/N). However, within limited areas of positive unipolar network, most of the cancellations are I-/N+ and in other areas of negative unipolar network, the cancellations are predominately I+/N-. In areas of mixed polarity network, the I+/N- and I-/N+ cancellations tend to be approximately equal in number but not as numerous as the I+/I- cancellations.

Network/network cancellations (N+/N-) mostly occur at the boundaries between areas of positive and negative unipolar network.

A unique feature of such boundaries is that the formation of quiescent filaments occurs at these locations and only at these locations. Active region filaments are analogous in that they also only form at boundaries of positive and negative fields as seen on magnetograms of the line-of-sight component. This association gives us a clue that the process of cancellation might be one that also leads to the formation of filaments. Van Ballegoijen and Martens (1989) have recently developed a new model for filaments that is based on cancellation. This model is consistent with the interpretation of cancellation as magnetic reconnection at the photosphere. It is a challenging model not only because it is the first to be based on observable photospheric magnetic field dynamics but also because it leads to a specific interpretation of cancellation. This model might be the key to the understanding of both filaments and cancellation.

Cancellations of ephemeral region poles with network fragments (E+/N- and E-/N+) and ephemeral region poles with intranetwork patches (E+/I- and E-/I+) and the more rare cancellations between two adjacent ephemeral regions (E+/E-) are also circumstances that offer clues about the nature of cancellation. Ephemeral regions are new, small bipoles whose opposite polarities as a whole grow and spread apart with time. As ephemeral regions grow, they necessarily encounter the ubiquitous network and intranetwork magnetic fields. Most encounters immediately result in the cancellation and merging of the ephemeral region fields with the external network and intranetwork fields. The cancellations do not significantly differ in appearance from the other I/I, I/N or N/N cancellations. However, the magnitude of magnetic flux can be higher, the cancellation boundaries longer, and the rate of cancellation higher. This might be due to fact that ephemeral regions display their own internal velocity field and expand into the neighboring fields.

The details of cancellation in a decaying active region was studied by Martin et al. (1985). They found that every flare the decaying region began at sites of cancelling fields. Recent observations confirm the common occurrence of flares at sites where the magnetic field has a history of cancellation (H. Wang et al. 1988; Livi et al. 1989). Martin et al. (1985) and Livi and Martin (1989) suggest that the association of flares to cancelling fields is an indirect relationship in which the cancelling fields are significant primarily to the flare build-up and only secondarily and indirectly to the energy release during a flare. Their conclusion is based on the many observations which show no significant change in the rate of cancellation of photospheric magnetic fields during flares. If flares occur because of magnetic field reconnection, as now commonly thought, it must be a an entirely different type of magnetic reconnection than that proposed Priest (1987) as an explanation of cancellation or that proposed by van Ballegoijen and Martens (1989) to explain the formation of filaments via reconnection related to cancellation.

The new unified theory of magnetic field reconnection developed by Priest and Forbes (1986) offers new insight and new possibilities for the interpretation different types of dynamic solar phenomena. They show that various known types of magnetic reconnection fit into an overall spectrum of reconnection regimes. On one end of the reconnection spectrum they describe a very slow 'magnetic pile-up' reconnection which has properties in common with cancelling magnetic fields. On the other end of the spectrum are the fast modes of reconnection often associated with flares. The prospects of achieving greater physical understanding by relating these regimes of reconnection to cancelling magnetic fields, to the dynamics of filament formation, and to flares currently appears promising.

Acknowledgments

The contribution of SFM was supported by the Air Force Office of Scientific Research under grant AFOSR-87-0023.

References

- Giovanelli, R.G.: 1982, *Solar Phys.* 77, 27.
- Livi, S.H.B., Wang, J. and Martin, S.F.: 1985, *Australian J. Phys.* 38, 855.
- Livi, S.H.B., Martin, S.F. and Wang, H.: 1989, submitted to *Solar Phys.* (paper presented at I.A.U. Colloquium No. 104, Stanford University, August 1988).
- Martin, S.F. 1988, *Solar Phys.* 117, 243.
- Martin, S.F. Livi, S.H.B. and Wang, J.: 1985, *Australian J. Phys.* 38, 929.
- Priest, E.R.: 1987, in *The Role of Fine-Scale Magnetic Fields on the Structure of the Solar Atmosphere*, (Ed. E. Schroter, M. Vazquez, A. Wyller) Cambridge University Press,
- Priest, E.R. and Forbes, T.G.: 1986. *J. Geophys. Res.* 91, 5579-5588.
- van Ballegooijen, A.A. and Martens, P.C.H.: 1989, submitted to *Solar Physics*, (paper presented at I.A.U. Colloquium No. 104, Stanford University, August 1988).
- Wang, H.: 1988, *Solar Phys.* (accepted)
- Wang, H., Zirin, H., Patterson, A., Ai, G., and Zhang, H.: 1988, submitted to *Astrophys. J.*
- Wang, J., Shi, Z., Martin, S.F. and Livi, S.H.B.: 1988, *Vistas in Astronomy*, 31, 79.
- Zwaan, C.: 1985, in R. Muller, *Lecture Notes in Physics*, Vol. 233, Springer-Verlag, Berlin, p.263.
- Zwaan, C.: 1987, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 25, 83.

THE ASSOCIATION OF FLARES TO CANCELLING MAGNETIC FEATURES ON THE SUN

SILVIA H. B. LIVI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 90 049 Porto Alegre RS, Brazil

SARA MARTIN and HAIMIN WANG

Big Bear Solar Observatory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, U.S.A.

and

GUOXIANG AI

Beijing Astronomical Observatory, Beijing, China

Abstract. Previous work relating flares to evolutionary changes of photospheric solar magnetic fields are reviewed and reinterpreted in the light of recent observations of cancelling magnetic fields. In line-of-sight magnetograms and H-alpha filtergrams from Big Bear Solar Observatory, we confirm the following 3 associations: (a) the occurrence of many flares in the vicinity of emerging magnetic flux regions (Rust, 1974), but only at locations where cancellation has been observed or inferred; (b) the occurrence of flares at sites where the magnetic flux is increasing on one side of a polarity inversion line and concurrently decreasing on the other (Martres *et al.*, 1968; Ribes, 1969); and (c) the occurrence of flares at sites where cancellation is the only observed change in the magnetograms for at least several hours before a flare (Martin, Livi, and Wang, 1985). Because cancellation (or the localized decrease in the line-of-sight component of magnetic flux) is the only common factor in all of these circumstances, suggest that cancellation is the more general association that includes the other associations as special cases. We propose the hypothesis that cancellation is a necessary, evolutionary precondition for flares. We also confirm the observation of Martin, Livi, and Wang (1985) that the initial parts of flares occur in close proximity to cancellation sites but that during later phases, the flare emission can spread to other parts of the magnetic field that are weak, strong, or not cancelling.

1. Review of Previous Work

The association of flares with observed photospheric magnetic fields has been made previously in terms of configurations and evolutionary changes. The earliest studies of flare positions relative to photospheric magnetic fields by Severny (1958, 1960) showed that flares occurred near polarity inversion lines (previously also called neutral lines or $H = 0$ lines). The centering of flares around polarity inversion lines was confirmed by Martres *et al.* (1968a) and Smith and Ramsey (1967). Michard (1971) also noted that when the initial H-alpha brightenings have more than one knot, they are located on two different polarities, on both sides of the inversion line, rather than directly on it.

Specific flare-related magnetic field changes were reported by Martres *et al.* (1968a, b). They studied an active region in which all the flares occurred where magnetic flux was increasing on one side of the polarity division line while it was decreasing on the other side.

The frequent association of flares with emerging magnetic flux regions was first noted by Rust (1972, 1974), verified by Vorpahl (1973), and subsequently elaborated on by these and many other authors (Martin *et al.*, 1983; Priest *et al.*, 1986; and references

therein). When opposite polarity fields come into close contact because of the emergence of new magnetic flux in pre-existing active regions, a steep magnetic field gradient builds on the magnetic inversion line between the new flux and the pre-existing flux. The association of flares with high magnetic field was also made by Severny (1960) and confirmed by Martres, Michard, and Soru-Iscovici (1966).

Although many flares happen in association with new flux, it is also known that flares occur in the absence of emerging flux (Martin *et al.*, 1984). Martin, Livi, and Wang (1985) studied a decaying region and found that all of the observed flares began at sites where magnetic flux was cancelling. Cancellation is the gradual and mutual decrease of magnetic flux at the boundary between closely-spaced opposite polarity magnetic fields as seen in line-of-sight photospheric magnetograms (Martin, 1984; Livi, Martin, and Wang, 1985). Magnetic flux is observed to gradually decrease in both polarities as the magnetic fields migrate together and a high magnetic field gradient is observed as long as the fields are cancelling. In many cases the fragment with less magnetic flux completely disappears. To date cancellation has only been observed in magnetograms of the line-of-sight component which leaves the physical interpretation of cancellation open to several possible interpretations (Zwaan, 1987).

2. The Data

We illustrate examples of flares and cancelling magnetic fields from observations taken from 8–11 July, 1988 in an active region that crossed the central meridian during this interval. The data obtained on this active region are especially well-suited for the study of magnetic field changes and flares because: (1) the magnetograms were of high quality due to good seeing; (2) collaborative observations of the magnetic fields were taken at the Huairou Solar Observing Station of the Beijing Astronomical Observatory and at the Big Bear Solar Observatory; (3) the active region was located near the Sun's central meridian which is favorable for the acquisition and interpretation of line-of-sight magnetograms; and (4) the active region produced many small flares and a few large ones during the observing hours at Big Bear Solar Observatory.

The magnetograms used in the illustrations are mostly from the Big Bear Solar Observatory because the study is centered around flares observed at the Big Bear Solar Observatory. Unfortunately, H α filtergrams are not yet taken at the Huairou Observatory. However, the videomagnetograms taken at Huairou are important in the evaluation of long-term changes before and after major flares; magnetograms from both sites have been matched in scale and sensitivity during the processing of the data. On all of the magnetograms negative magnetic polarity is presented in black and positive in white. Observing hours at Huairou Observatory are from approximately 01:00 until 12:00 UT and observing hours at Big Bear Observatory are from approximately 15:00 until 02:00 UT during the early summer.

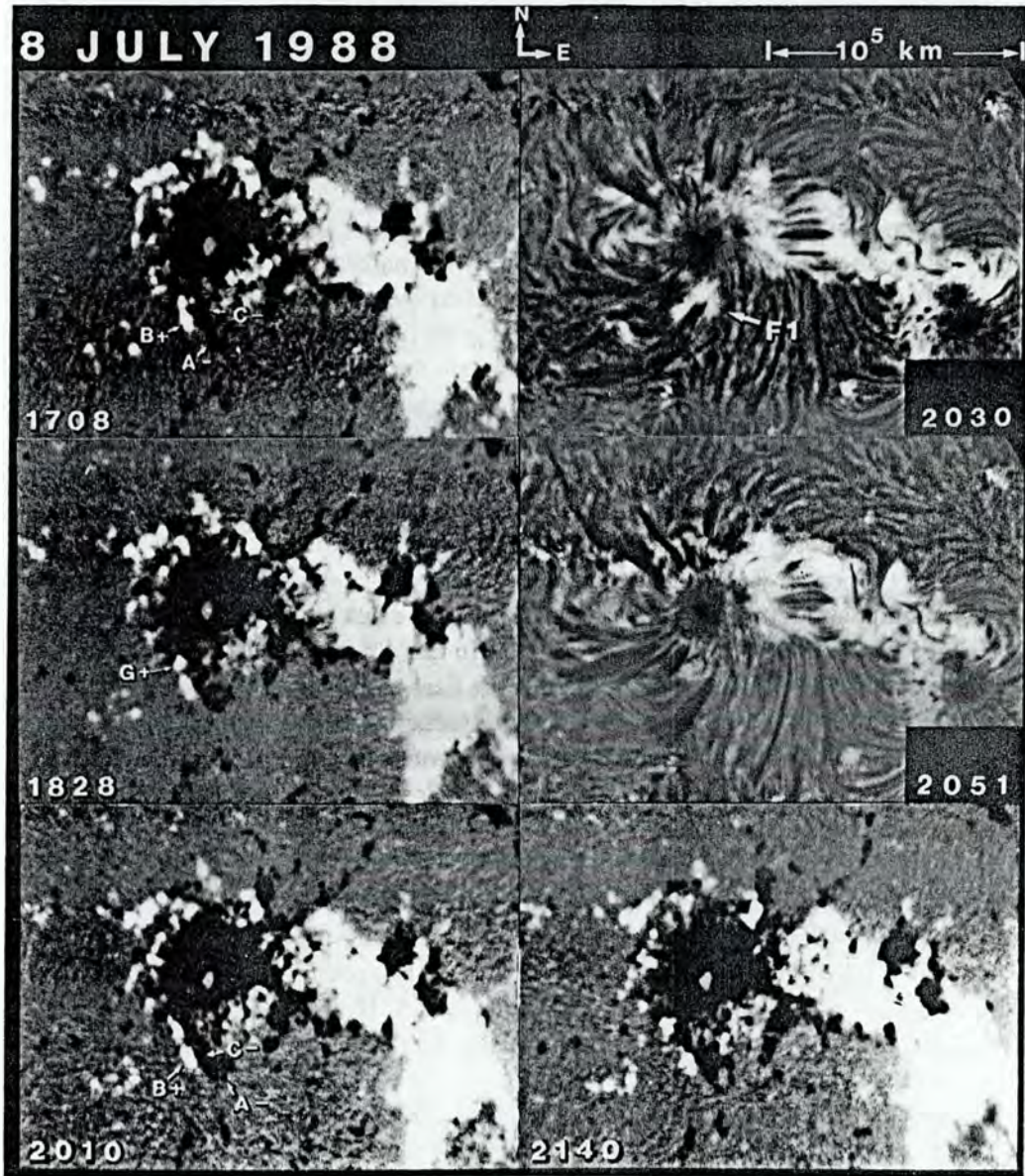


Fig. 1. The flare, F1, in the upper right frame, corresponds in position to the site of converging patches of magnetic field labelled A^- , B^+ , and C^- . All of these patches of flux are identified as part of a system of Moving Magnetic Features (MMFs) which originate near the penumbral boundary and flow approximately radially away from the associated sunspot. As they move away from the sunspot, A^- , B^+ , and C^- converge. B^+ and C^- begin to cancel each other when they come into contact but the slow reduction in magnetic flux becomes apparent only in the continuation of this series in Figure 2 where it is seen that the area of B^+ is decreasing. The expected equivalent loss of flux in C^- is not seen because it merges with A^- and other negative magnetic flux closer to the sunspot.

3. New Examples of Flares and Their Relationship to Cancelling Magnetic Fields

In Figure 1, $H\alpha$ filtergrams in the upper right and middle right reveal a flare, labelled F1, at 20:30 UT and the aftermath of the flare at 21:40. The flare occurs just below the sunspot near the middle of the images. The videomagnetograms in the left side show the magnetic field configuration for over 3 hours prior to the flare. The final magnetogram in the lower right corresponds to approximately one hour after the flare. We have put arrows and labels on the illustrations to identify the patches of photospheric magnetic flux that correspond to the site of the flare. Then we trace the same magnetic fields backward and forward in the time to see their evolution before and after the flare. The flare, F1, occurs above the photospheric magnetic flux patches marked $A-$, $B+$, and $C-$. Our system of labelling in this paper is to use letters to designate specific patches of magnetic field and to follow the letter with $+$ or $-$ to eliminate any ambiguity about whether the arrow points to a positive polarity patch (white) or a negative polarity patch (black). Tracing $A-$, $B+$, and $C-$ back in time we see that a convergence of these elements occurs between 17:08 and 18:28. This convergence brings $B+$ and $C-$ into contact. The convergence of magnetic flux of opposite polarity usually leads to cancellation at about the time that patches of magnetic flux appear to come into contact (Martin, 1984; Martin, Livi, and Wang, 1985). In this circumstance in Figure 1, it is not clear that cancellation has begun until after the flare. Although the visible effect of the cancellation is marginal in Figure 1, a definite reduction in the area of $B+$ is evident in the continuation of this time series of magnetograms in Figure 2. The cancellation is not yet conspicuous in the negative polarity because of the convergence of additional negative flux from the sunspot moat.

In Figure 2, a second flare, F2, is visible at 23:04. One part of this second flare F2a coincides with flare F1 in Figure 1. In Figure 2 at 22:21, negative patch $D-$ has moved into juxtaposition with $B+$ to form a new cancellation site. At 23:41, another new patch, $E+$, has coalesced from smaller patches of new positive flux. $D-$ is cancelling with both $B+$ and $E+$. By the end of series at 00:42, $D-$ has almost completely disappeared. These changes are taking place at the site of the part of the flare labelled F2a.

Another part of the flare, F2b, is to the left and closer to the sunspot. This part of the flare lies above and adjacent to a cluster of magnetic fields that have also emerged in the sunspot moat. To the upper left of $E+$, lie two other patches, $F-$ and $G+$. Tracing the previous evolution of $G+$ back through the magnetograms in Figure 1, we see that it was previously adjacent to $B+$ at 18:28 but has moved nearly tangential to the spot and has initially gained flux. This behavior differs from most of the small positive and negative magnetic knots around the spot that are called Moving Magnetic Features or MMFs (Harvey and Harvey, 1973). Most MMFs form near the outer penumbra of the sunspot and flow radially away from the spot. We re-examined the time-lapse videomagnetogram film and found that $G+$ and $C-$ comprised a new bipole (an ephemeral region) whose $+$ and $-$ components move away from each other as their fluxes increase. Thus $G+$, while growing, was also moving perpendicular to the outward

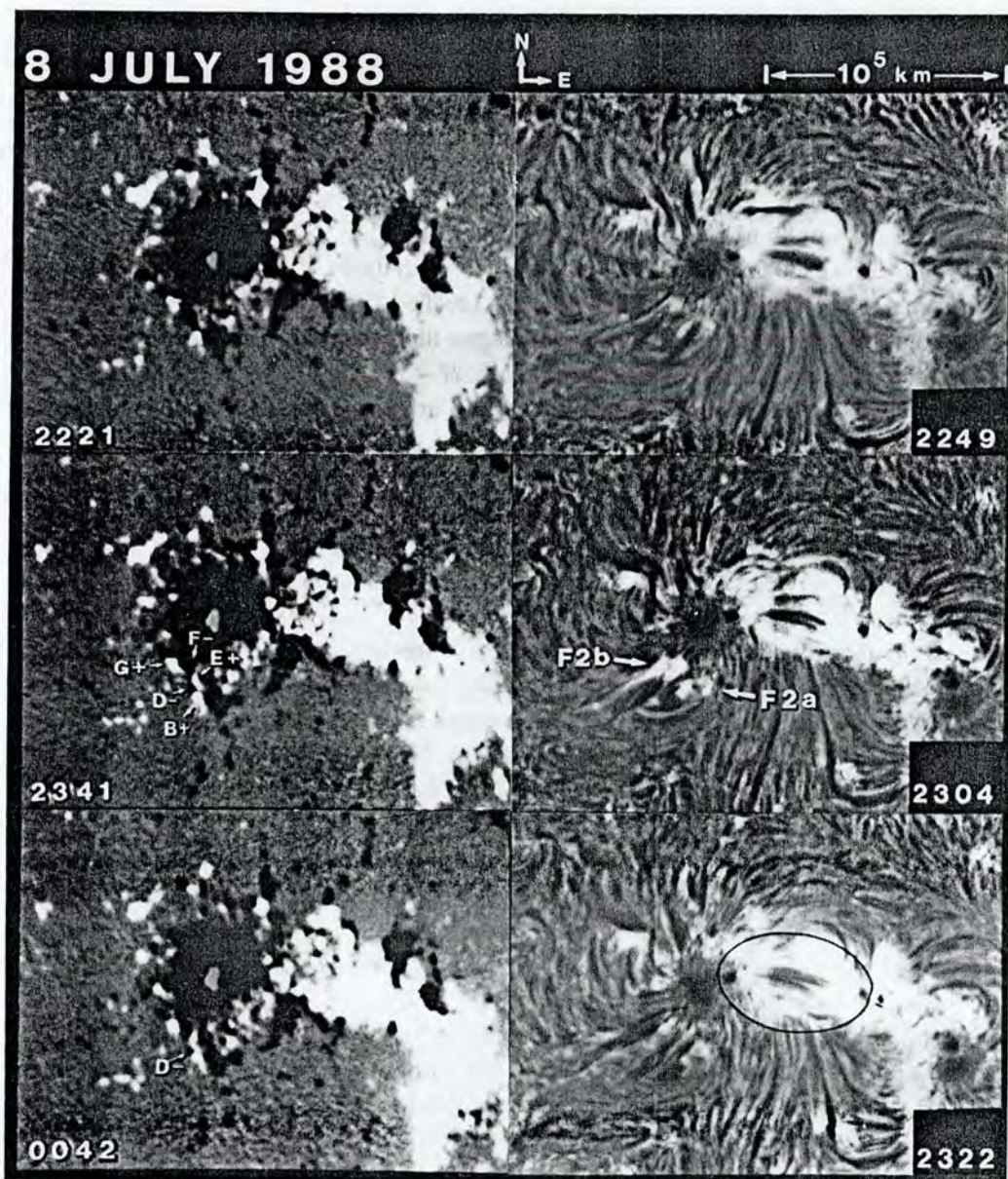


Fig. 2. Another flare, F2 at 2304, is seen at and adjacent to the site of the Flare F1 in Figure 1. The part labelled F2a is at the same site of cancelling magnetic features as in Figure 1. However, a new patch, D^- , has moved into position to cancel with B^+ . D^- is also cancelling with another new patch, E^+ , and has almost disappeared by the end of the sequence. The other part of the flare, F2b, corresponds to magnetic patches G^+ and F^- . F^- is negative polarity Moving Magnetic Feature (MMF) that is flowing away from the sunspot. However, G^+ is component of a small bipole, an ephemeral region, whose other initial negative pole is the patch labelled C^- in Figure 1. As the ephemeral region grows, its poles, G^+ and C^- , migrate in opposite directions approximately tangential to nearly circular moat of MMFs that radially emanate from the sunspot. G^+ , therefore, is moving approximately orthogonally to the MMFs that originate near the penumbral boundary. It encounters and cancels with negative polarity MMF labelled F^- before, during and after the flare.

flow of other patches within the moat. Since most of the nearby encountered flux is negative, we infer that $G+$ was probably growing and cancelling at the same time, as we have observed for ephemeral regions on the quiet Sun (Livi, Martin, and Wang, 1985; Martin, 1988). We conclude that this part of the flare, F2b, corresponds to a special dynamic circumstance within the sunspot moat including flux growth, flux cancellation and unusual motions. The other part of the flare, F2a, lies above photospheric magnetic fields that are simply converging and cancelling.

In Figure 3, we illustrate the sites of two other small flares, F3 and F4, in the H-alpha filtergrams. F3 coincides with flux patches, labelled $J+$, $I-$, and $H-$ in the first magnetogram before the flare. In the time-lapse film, we found that $J+$ and $I-$ are MMFs that are flowing away from the sunspot. $H-$ is a small part of the larger of two, magnetically complex emerging flux systems that are encompassed by ovals in the last H-alpha image. (The emerging flux system can also be identified in Figures 1 and 2 from the east-west aligned system of arch filaments. In the last H-alpha image in Figure 2 an oval is drawn around the emerging flux system.) $H-$ is growing and moving towards the sunspot to its left. As it does so, it encounters and merges with $I-$ moving to the right. $J+$, also moving to the right away from the sunspot, and $H-$, moving to the left toward the sunspot, also encounter each other. This forceful encounter of opposite polarity magnetic fields moving towards each other results in cancellation. This example of cancellation is very noticeable from the rapid decrease and disappearance of $J+$, respectively, during and after the time of the small flare. Any loss of flux in $H-$ during the encounter with $J+$ cannot be seen because $H-$ is a large and growing clump of flux. Hence, this example is like the cases studied by Martres *et al.* (1968a, b) in which they were able to associate flares with flux that was increasing on one side of a polarity inversion line and decreasing on the other. In observations from Big Bear Solar Observatory, we find the pattern observed by Martres to be the general case in situations where emerging flux develops in existing active regions. Thus, the association made by Martres *et al.* is synonymous to the association of many flares with emerging flux subsequently discussed and illustrated by Rust (1974).

We make the new point that in circumstances of emerging flux as just illustrated, cancellation also occurs and this occurrence is highly predictable. For example, in the last frame in Figure 3, we note that a new cluster of MMFs is approaching $H-$. Hence, a new cancellation site can be anticipated between the cluster of positive MMFs and the new flux $H-$. Figure 4 shows the development of the new cancellation site and a new corresponding patch of bright plage.

Flare F4, seen in the H-alpha filtergram at 18:39, corresponds to the tiny fragments $K+$ and $L-$ and $M-$. All are MMFs moving away from the positive-polarity trailing sunspot seen just above the time insert in the lower right of the H-alpha images. It appears that $L-$ and $M-$ simply overtake $K+$ and cancel with it. By approximately two hours after the flare, $K+$ no longer exists and only residual flux of $L-$ and $M-$ can be seen at the site of the little flare.

Flares F5 and F6 are shown in H α filtergrams in the right side of Figure 4. Flare F5 has two components that lie near, but not on, a small cancelling field, $N-/O+$. The

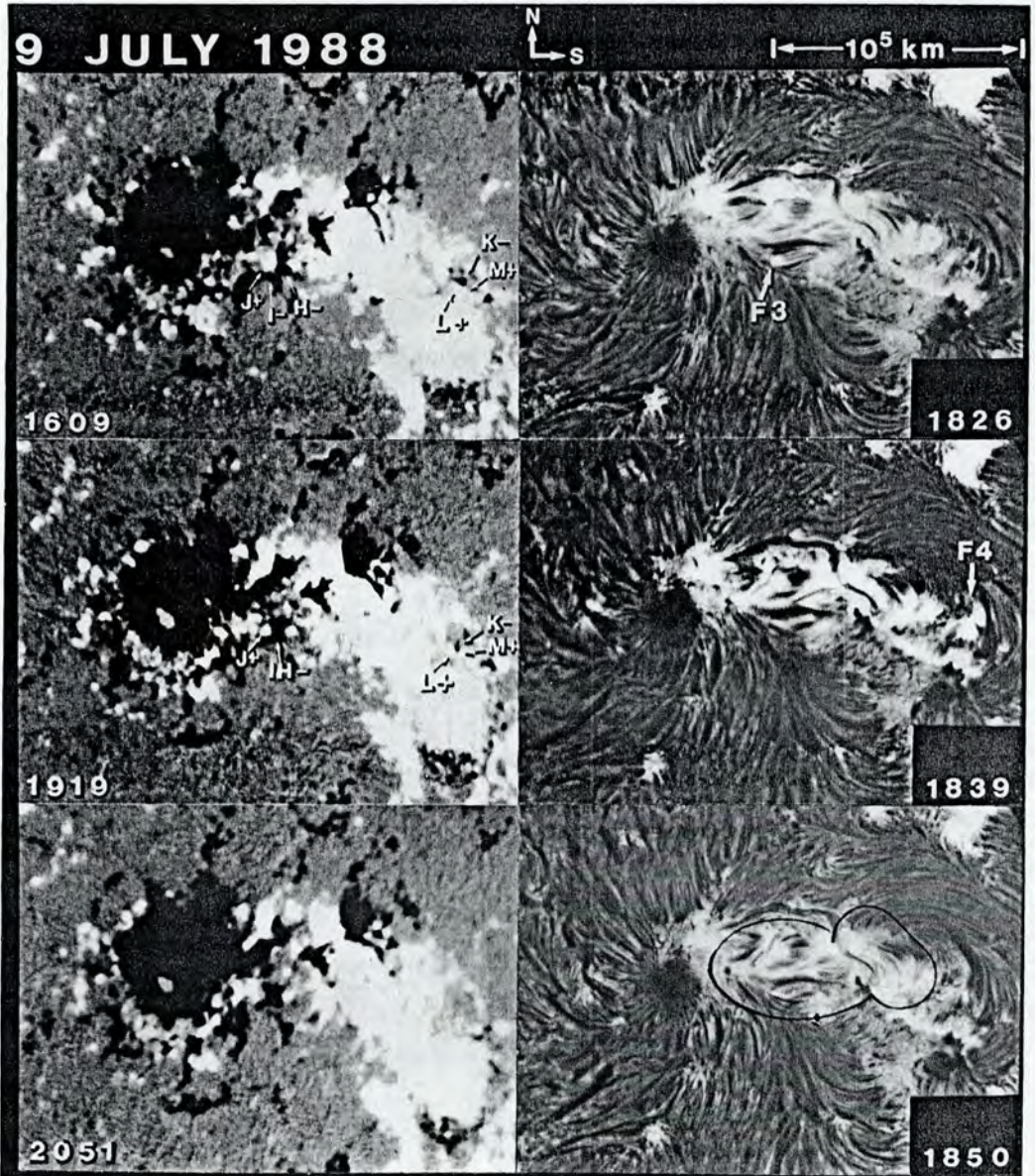


Fig. 3. Subflares F3 and F4 in the upper right and right middle frames are typical of other sites in this active region where small flares can occur. F3 corresponds to the magnetic field patches labelled $J+$, $I-$, and $H-$ in the first magnetogram. $J+$ and $I-$ are both MMF patches while $H-$ is part of the larger of two complex emerging flux systems that are enclosed within the ovals in the lower right. The larger emerging flux system was already present on the previous day and is the area within the oval in the lower right of Figure 2. The encounter of $J+$ with the merged fields of $I-$ and $H-$ results in flux cancellation which is seen by the reduction and disappearance of $J+$ by the time of the last magnetogram at 2051. Subflare F4 corresponds to the cancelling MMFs, $L+$ and $M+$ with $K-$. $K-$ also disappears completely by the end of the sequence.

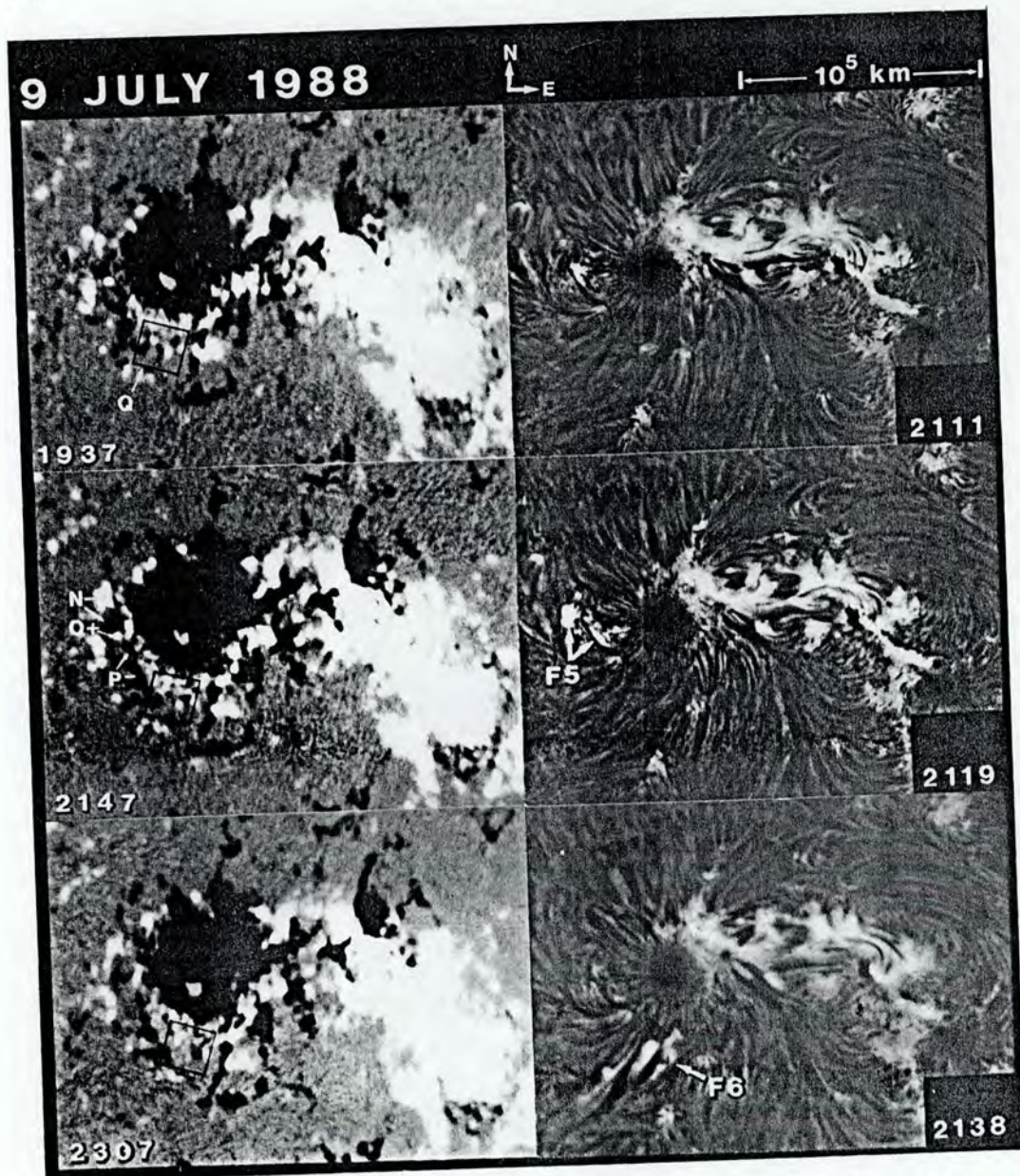


Fig. 4. The subflare F5 in the middle right is another example of a small flare which is related to changes in MMFs to the left of the negative polarity sunspot. The larger flare segment lies just to the left of cancelling feature, $N-/O+$, and the smaller segment corresponds to $P-$. Thus these two chromospheric components of the flare occur on opposite sides of a cancelling feature rather than coinciding with it. The other flare, F6, seen below the sunspot in the last frame, corresponds to a cluster of very small MMFs with the square labelled Q . Both of these examples, F5 and F6, show that flares are not necessarily coincident with strong magnetic fields.

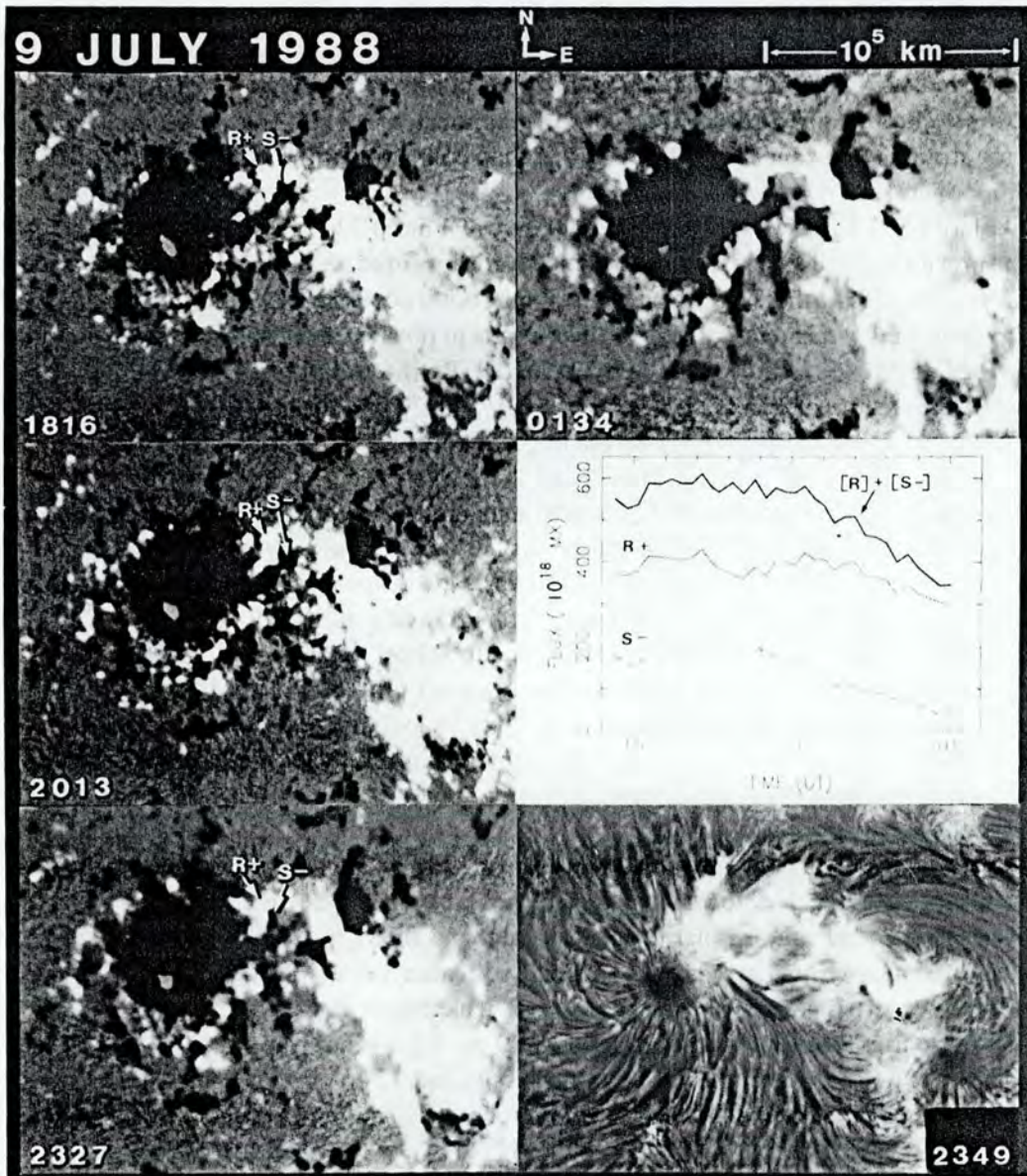


Fig. 5. The large flare in the lower right has spread to all of the areas of enhanced plage seen in the previous figures. It corresponds to all of the complex magnetic configuration within both emerging flux regions shown within the ovals in the lower right of Figure 2. In this illustration we label just two patches of magnetic flux, $R+$ and $S-$ that are cancelling during this flare. The loss of flux can be seen in the reduced area of $S-$ and the lower part of $R+$. Measurements of the rate of cancellation of $R+$ and $S-$ are shown in the graph. From 20:00 until 01:00 UT, the mean rate of cancellation in just this small area is $3 \times 10^{19} \text{ Mx hr}^{-1}$.

left component of F5 lies just left of $N-$ where there appears to be no magnetic field. The time-lapse film, however, shows that this is a site of the convergence of weak positive flux. The other flare component corresponds to the negative fragment, $P-$. If the two chromospheric parts of this flare are connected by loops in the corona, then this flare straddles the cancelling feature, rather than coinciding with either or both cancelling components, $N-$ and $O+$.

Flare F6, in Figure 4, is near the sites of flares F1 and F2 in Figures 1 and 2. However, the previous cancelling fields have completely disappeared and new ones have developed among the MMFs that have emanated from the outer penumbral border of the associated sunspot. In the magnetograms, F6 corresponds in position to the cluster of small, weak cancelling MMFs within the square labelled Q . By the end of this series, only one tiny cancelling feature remains.

The last frame in Figure 5 shows the largest flare observed in this active region during observing hours at the Big Bear Solar Observatory. The image at 23:40 is at $H\alpha - 0.6 \text{ \AA}$ during the rise of the flare to maximum and the image at 23:49 is at line center at flare maximum. The magnetograms in Figure 5 show the preflare magnetic field configuration for over 5 hours prior to the flare and a final image about one hour after the start of the flare. Because of the high flux density and the large amount of flux present, this interval shown in Figure 5 is still too short to illustrate most of the growth from emerging flux and simultaneous cancellation of flux at the boundaries where the new flux meets the pre-existing flux of opposite polarity. However, a conspicuous cancellation occurs at site $R+$ and $S-$ marked in the upper parts of the frames in Figure 5. A reduction in the area of $S-$ and the lower part of $R+$ can be seen. $R+$ and $S-$ are also sufficiently separated from adjacent flux that they could be measured. A gradual loss of flux at a mean rate of $3 \times 10^{18} \text{ Mx hr}^{-1}$ is shown in the graph on the right side of Figure 5. A much longer time series is needed to see the effects of cancellation around the other major polarity inversion lines to the right where two larger areas of negative polarity field are partially embedded within strong positive fields. Therefore, we include two illustrations, Figures 6 and 7, which show the long-term evolution of the magnetic flux for nearly 48 hours from early on 9 July until the end of 10 July. Using Figures 1 and Figure 8 along with Figures 6 and 7, one can trace the continuous evolution of the active region fields for approximately 80 hours except during a time gap during the first 15 hours of 11 July.

Figure 6 begins with images taken at the Huairou Solar Observatory and ends with images from Big Bear Solar Observatory nearly 24 hours later. Examples of the disappearance of magnetic flux are seen in negative polarity patches $T-$, $U-$, and $V-$. All three patches disappear before 16:09. Concurrently, several negative polarity patches grow in the middle of the region and converge to form the patch $W-$. Another new negative patch, $X-$, associated with the second new flux system, is first apparent at 20:13. $X-$ grows and merges with the large patch of negative flux to its upper left, while also cancelling with the intermediate area of positive flux. Note also in Figure 7, that $W-$ (from Figure 6) grows until about 15:27. Thereafter $W-$ begins to fragment and cancel with the adjacent flux. It is reduced in area by about 50% by the end of

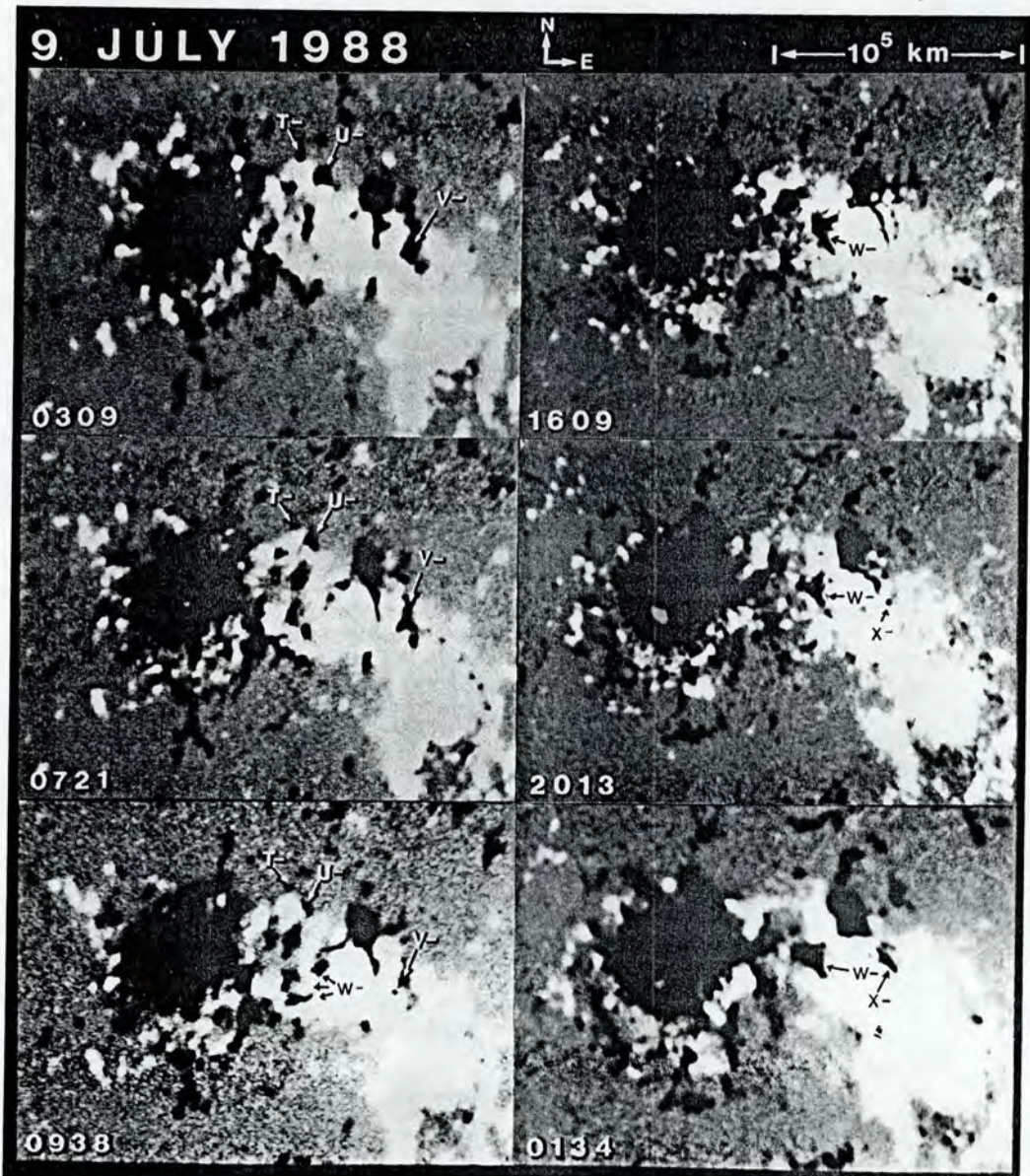


Fig. 6. This illustration encompasses a longer time interval around the major flare shown in Figure 5 in order to show the type of changes in flux that both precede and occur during that major flare. In this series from early on 9 July until early on 10 July, it is possible to identify many sites where the magnetic flux is either cancelling or growing because of the emergence of the new flux regions shown within the ovals in the lower right of Figure 3. Sites $T-$, $U-$, and $V-$ are negative field patches where the magnetic flux is decreasing and $W-$ and $X-$ are other negative patches where the magnetic flux is seen to increase. The first 3 images on the left are from the Huairou Observatory and the last 3 images on the right are from the Big Bear Solar Observatory.

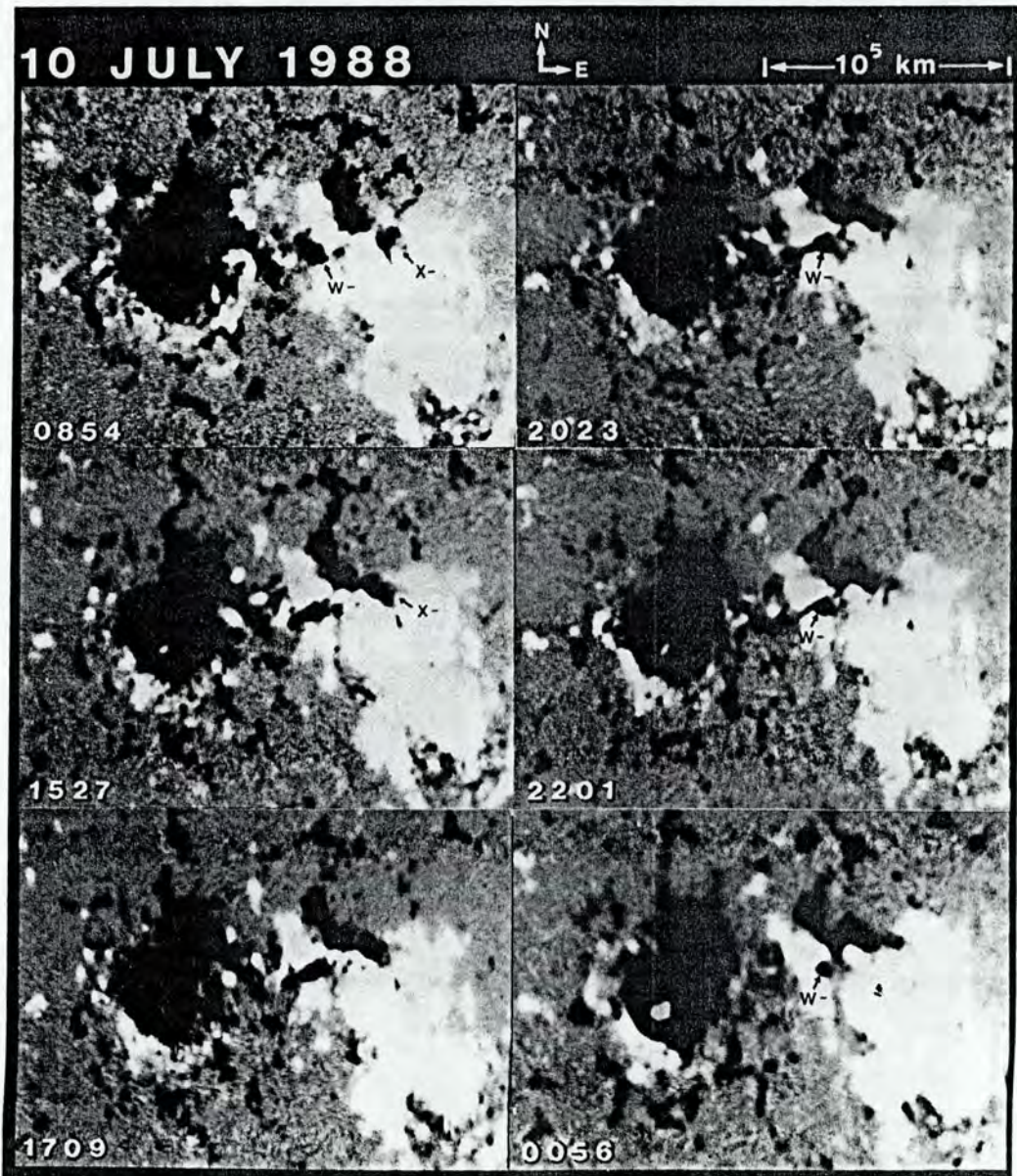


Fig. 7. This series of magnetograms continues from Figure 6. The area $W-$ continues to grow until about 15:27. Even during the growth stage, cancellation can be seen at the left border of $W-$, with small patches of neighboring positive polarity flux. Magnetic flux disappears to the left of $W-$ from about 20:13 in the preceding series in Figure 6 until the end of Figure 7. $W-$ ceases its overall growth at about 15:27 and thereafter it slowly shrinks as it is cancelled by the surrounding positive polarity flux. The comparable reduction in the positive flux around $X-$ is not conspicuous until the next day seen in Figure 8. Then it is seen in Figure 8 that most of the positive and negative flux in between the sunspots on the left and right has cancelled prior to the occurrence of the next observed major flare.

10 July. By the next day, 11 July, seen in Figure 8, it has completely disappeared along with the majority of the other negative polarity flux in the trailing polarity of this active region.

In Figures 6 and 7, we have labelled only the largest and most conspicuous sites of flux growth and disappearance. Many smaller sites of growth and disappearance can be found. The purpose was to show that much flux emergence and concurrent disappearance is taking place in the active region in the general area of the major flare shown in Figure 5. These changes are taking place before, during and after the major flare. In such complex situations as illustrated in Figures 6 and 7, it is not readily apparent that the magnetic flux disappears by cancellation of negative and positive flux. This process is much more clearly seen either in small active regions (Livi, Wang, and Martin, 1985) or during the decay phase of active regions (Martin *et al.*, 1985), illustrated in Figure 8 for example.

Figure 8 exemplifies the cancellation of flux associated with a major flare in a magnetically simple situation. Because the active region has decayed and the overall flux density is lower in the middle of the active region, we chose to make the final illustration from the original magnetograms. The contours are generated by reversing the color (black to white and *vice versa*) each time that the 8-bit memory is filled in the image processor. Hence, the polarity is determined by the color (black or white) outside of the lowest contour. Where the flux density is not too high, the original contoured magnetograms show the changes in magnetic flux just as well as the reduced magnetograms for which the contours have been removed.

In Figure 8, positive patch $AA+$ and negative patch $BB-$ slowly and simultaneously diminish during the 7-hour interval shown. As they diminish, tiny fragments such as $a1+$ and $a2+$ break away from the patch $AA+$. Other tiny fragments from neighboring patches of opposite polarity flux similarly separate from larger patches such as $CC-$ and $DD-$. Examples are $c1-$, $c2-$, and $d1-$.

All of these fragments except $c2-$ have cancelled with neighboring flux by the end of the day: $c2-$ migrated toward $BB+$ as $c1-$ was cancelling; $c2-$ then replaced $c1-$ and began cancelling with $BB+$ between 20:17 and 22:28. The study of Martin *et al.* (1985) demonstrated that this process of fragmentation and cancellation can take place continuously along a primary polarity inversion zone within a decaying active region. Where the flux density and magnetic field gradients are high, such as between $AA+$ and $BB-$, the fragmenting elements are usually not resolved. However, the rate of cancellation is measurable. The cancellation is then seen as simply a steady, slow decrease in the area and the magnetic flux. $AA+$ and $BB-$ clearly diminish throughout the day while maintaining approximately the same magnetic field gradient across their common boundary.

The flare in Figure 8 began around the primary cancellation site in the middle of the active region. Then the flare spread to the areas of single polarity both east and west of the cancellation site.

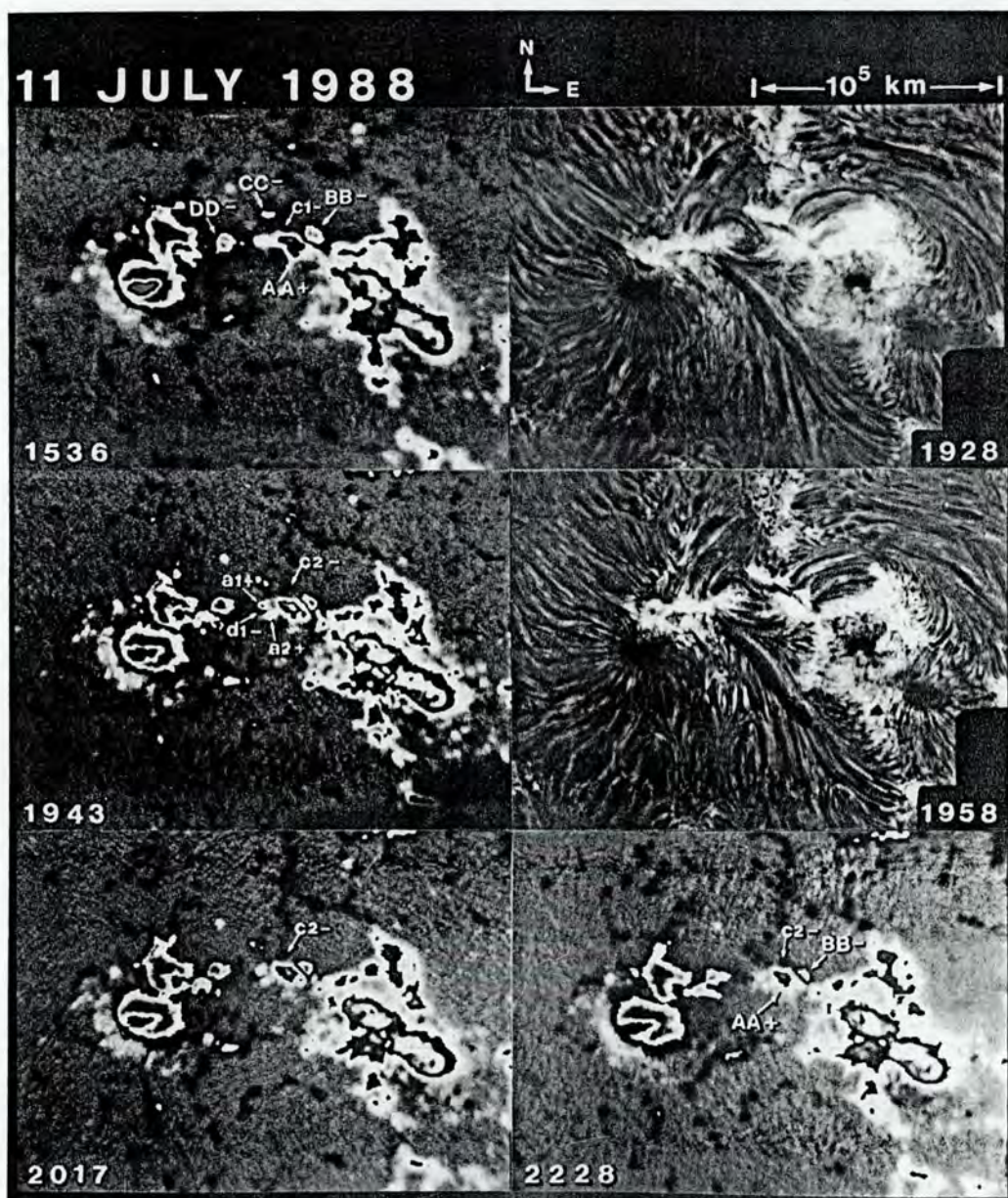


Fig. 8. This series continues from Figure 7 but the magnetograms are shown in their original format as taken at the Big Bear Solar Observatory. The strongest fields of each polarity lie within the contours which are created by reversing the color from black to white at successive levels of saturation of the magnetograph signal. Hence, the polarity is determined by whether the area around the perimeter of each contour is white (positive) or black (negative). The major flare in the upper right is shown at maximum at 19:28 and in its decaying phase at 19:58. The one remaining major site of cancellation is between $AA+$ and $BB-$. The cancellation is seen from the shrinking of the contours within $AA+$ and $BB-$. In addition, minor cancellation sites develop around the periphery of $AA+$ and $BB-$ as very small magnetic field fragments split off of $AA+$ and $BB-$ and from the neighboring areas such as the ones labelled $CC-$ and $DD-$. The cancellation of $d1-$ with $a1+$ and $a2+$ is seen to the left of $AA+$. The successive motion of small fragments, $c1-$ and $c2-$, toward $AA+$ are seen prior to their cancellation with $AA+$.

4. Discussion

The different circumstances that have been previously considered relevant in flare production might appear contradictory or irrelevant: adjacent decreasing and increasing evolving magnetic features (Ribes, 1969), emerging magnetic flux (Rust, 1974), cancelling magnetic flux (Martin, Livi, and Wang, 1985), magnetically complex regions (Smith and Howard, 1968), high magnetic field gradients (Severny, 1960), bright regions (Dizer, 1969), delta spots (Zirin and Liggett, 1987), sunspot motions (Zirin and Lazareff, 1975), to cite just a few early representative papers. However, there are common factors in all of these situations: they either indicate cancellation sites or show the collision of opposite polarity features which will lead to cancellation. Tanaka (1975), referring to flares in August 1972 and July 1974, writes: 'all sunspot motions indicate a collision between the two polarities'. Evidence now suggests that sunspot motion or emerging flux alone will not lead to flares. Their role is the forcing together of opposite polarity fields which in turn induces cancellation. Higher cancellation rates are expected with faster motions and higher concentrations of magnetic flux.

As illustrated above, a spatial relationship between cancellation and flares is now becoming more clear: flares begin at or near opposite polarity features that are cancelling. Flares often occur when magnetic flux is emerging, but now we think that they only occur if emerging fields also collide with opposite polarity leading to cancellation. Previous observations of emerging flux regions were unable to reveal the loss of flux that occurs on the same side of a polarity inversion line where growth or increase is also seen; they could only show the loss in flux on the opposite side of the polarity inversion line from the emerging side (Martres *et al.*, 1968a, b; Ribes, 1969). It was, therefore, observed that flares occurred around the polarity inversion lines where flux increased on one side and decreased on the other. The many previous associations of flares with emerging flux and the more specific association of flares at sites of both increasing and decreasing flux are entirely valid and still apply to many of our present-day observations, as in some of the examples above, which have saturation effects, inadequate resolution or inadequate sensitivity to detect the decrease in flux on both sides of polarity inversion lines. The new association of flares with cancelling magnetic fields thus does not invalidate previous results. It is only a more general association that encompasses the previous associations.

Since the paper of Martin, Livi, and Wang (1985), which first discussed the association of cancelling fields to flares, we have not yet found any flares at sites where cancellation was not observed or inferred, provided that we have acquired observations with sufficiently high resolution and sensitivity (on order of 10 G). Therefore, we propose that cancellation is a necessary, evolutionary condition for the occurrence of flares. This does not imply that all cancellation necessarily leads to flares nor that it is the only necessary condition.

The significance of the association of flares to cancelling magnetic fields is most clearly understood by studying flares that happen at cancellation sites in the absence of emerging flux and comparing these to circumstances when emerging flux is present.

From these comparisons, we have come to understand that emerging flux is not the primary reason for flares but that in many circumstances it plays an important, but secondary, role in forcing opposite polarity flux together. It is not yet known when a flare should happen during the cancellation process or if flares happen in all circumstances where cancellation takes place.

We speculate that gradual releases of energy might happen in all cancellation sites because they tend to be brighter than similar isolated magnetic features of single polarity. It might be that cancellation leads to flares only in special circumstances. There might be other necessary conditions such as a sheared magnetic configuration which has not been discussed in this paper. This is even expected because of the observation that filaments also form at cancellation sites (Martin, 1986) and filaments are generally recognized to represent sheared magnetic field configurations. In addition, there are many studies that have shown associations between filament orientation, sheared configurations, filament eruptions, and flares. These topics are outside the scope of this paper but are still fertile areas of research in understanding flare build-up (Gaizauskas and Švestka, 1987).

A new theory on the formation and eruption of prominences by van Ballegoijen and Martens (first presented at this Colloquium; unpublished) was stimulated by previous observations of cancellation and the formation of filaments at cancellation sites. By interpreting cancellation as magnetic reconnection at the photosphere, van Ballegoijen and Martens developed a model whereby part or all of the disappearing photospheric line-of-sight component is reconfigured into an increased transverse magnetic field component and, hence, disappears.

The site of increased transverse component becomes the filament. With continued cancellation, the magnetic field in the filament expands outward, eventually becomes unstable, and erupts. The instability that triggers the eruptions can be the same instability that results in solar flares. In this scenario, cancellation is a key part of the preflare build-up. At present, this theory and our observations of the relationship of cancelling fields to solar flares are remarkably consistent.

5. Summary

The examples cited above and many others found during our search through the time-lapse movies from the Big Bear Solar Observatory, show that cancellation happens with magnetic fields spanning a wide range of magnetic field strengths. It is shown that flares of all magnitudes begin adjacent to cancellation sites, whether the associated active region as a whole is developing or decaying. Both small and big flares are initiated near cancelling sites, from the microflares associated with ephemeral regions to the kernels of the great flares.

By reinterpreting previous results on emerging or increasing magnetic flux regions in terms of their possibility to induce cancellation, the apparent conflict between the various circumstances of flares with changing magnetic fields is resolved. Cancelling magnetic flux is observed or deduced to be the common denominator among all

observed associations of flares to changing magnetic fields. In particular, flares have been observed when cancellation has been observed or inferred to occur concurrently with emerging magnetic flux, as well as in circumstances of verified absence of increasing magnetic fields during the decay of active regions. Additionally, flares cease occurring in decayed active regions when cancellation sites disappear. Therefore, we propose cancelling magnetic fields to be a necessary evolutionary condition for the initiation of solar flares. However, cancellation is still considered an indirect precondition to flares because the time-scale of cancellation is slower than the time-scale of flares. More studies will be necessary to know if all flares are preceded by cancellation and if observed cancellation corresponds to physical processes that result in stored energy which can be later released in flares.

Acknowledgements

S.H.B.L. expresses appreciation to Dr Harold Zirin for providing the opportunity to work in his solar astronomy group. Support for the Big Bear Solar Observatory staff who took the data for this paper came from NASA grant NGL 05 002 034 and NSF grant ATM-8513577 and Contract AFOSR-87-0023. The travel of S.H.B.L. to the IAU Colloquium 104 was supported by a grant from CNPq (Brazil). The contributions of S.F.M. and H.W. were made under Contract AFOSR-87-0023 from the Air Force Office of Scientific Research.

References

- Dizer, M.: 1969, *Solar Phys.* **10**, 416.
 Gaizauskas, V. and Švestka, Z.: 1987, *Solar Phys.* **114**, 389.
 Harvey, J. H. and Harvey, K. L.: 1973, *Solar Phys.* **28**, 61.
 Livi, S. H. B., Wang, J., and Martin, S. F.: 1985, *Australian J. Phys.* **38**, 855.
 Marsh, K.: 1978, *Solar Phys.* **59**, 105.
 Martin, S. F.: 1980, *Solar Phys.* **68**, 217.
 Martin, S. F.: 1984, S. Keil (ed.), *Small-Scale Dynamic Processes in Quiet Stellar Atmospheres*, p. 30.
 Martin, S. F.: 1986, *Coronal and Prominence Plasmas*, NASA Conf. Publ. 2442, p. 73.
 Martin, S. F.: 1988, *Solar Phys.* **117**, 243.
 Martin, S. F., Livi, S. H. B., and Wang, J.: 1985, *Australian J. Phys.* **38**, 929.
 Martin, S. F., Dezső, L., Antalová, A., Kučera, A., and Harvey, K. L.: 1983, *Adv. Space Res.* **2**, 39.
 Martin, S. F., Bentley, R. D., Schadee, A., Antalová, A., Kučera, A., Dezső, L., Gesztelyi, L., Harvey, K. L., Jones, H., Livi, S. H. B., and Wang, J.: 1984, *Adv. Space Res.* **4**, 61.
 Martin, S. F., Livi, S. H. B., Wang, J. and Shi, Z.: 1985, *Measurements of Vector Magnetic Fields*, NASA Conf. Publ. 2374, May 1984, Marshall Space Flight Center, Alabama, NASA, Washington, DC, p. 403.
 Martres, M. J., Michard, R., and Soru-Iscovici, I.: 1966, *Ann. Astrophys.* **29**, 249.
 Martres, M. J., Michard, R., Soru-Iscovici, I., and Tsap, T.: 1968, in K. O. Kiepenheuer (ed.), 'Structure and Development of Solar Active Regions', *IAU Symp.* **35**, 318.
 Martres, M. J., Michard, R., Soru-Iscovici, I., and Tsap, T.: 1968b, *Solar Phys.* **5**, 187.
 Michard, R.: 1971, in R. F. Howard (ed.), 'Solar Magnetic Fields', *IAU Symp.* **43**, 359.
 Priest, E. R., Gaizauskas, V., Hagyard, M. J., Schmahl, E. J., and Webb, D. F.: 1986, *Energetic Phenomena on the Sun*, NASA Conf. Publ. 2439, pp. 1-1 to 1-79.
 Ribes, E.: 1969, *Astron. Astrophys.* **2**, 316.

- Rust, D. M.: 1972, *Solar Phys.* **25**, 141.
- Rust, D. M.: 1974, *Flare-Related Magnetic Field Dynamics*, HAO Conference held in Boulder, Colorado, p. 243.
- Severny, A. B.: 1958, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.* **20**, 22.
- Severny, A. B.: 1960, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.* **22**, 12.
- Smith, S. F. and Howard, R. F.: 1968, in K. O. Kiepenheuer (ed.), 'Structure and Development of Solar Active Regions', *IAU Symp.* **35**, 33.
- Smith, S. F. and Ramsey, H.: 1967, *Solar Phys.* **2**, 158.
- Tanaka, K.: 1975, *Solar Phys.* **47**, 247.
- Vorpahl, J.: 1973, *Solar Phys.* **28**, 115.
- Zirin, H.: 1988, *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 343.
- Zirin, H. and Lazareff, B.: 1975, *Solar Phys.* **41**, 425.
- Zirin, H. and Liggett, M. A.: 1987, *Solar Phys.* **113**, 267.
- Zwaan, C.: 1987, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 83.

MAGNETIC BIPOLES IN EMERGING FLUX
REGIONS ON THE SUN

Clarissa S. Barth and Silvia H. B. Livi

Departamento de Astronomia - Instituto de Fisica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ABSTRACT. We analyse magnetograms and H-alpha filtergrams of an Emerging Flux Region. Small bipoles have been observed on the magnetograms emerging between opposite polarities. Separation velocities of the opposite poles for 45 bipoles observed on June 9, 1985 have been measured and are in the range $0.5 < V_s < 3.5$ km/s. A significant magnetic flux increase in the region was observed due to contributions from the emerging bipoles.

RESUMEN. Se analizan magnetogramas y filtrogramas en H-alfa de una region de flujo emergente. Se observan pequenos dipolos en los magnetogramas emergiendo entre polaridades opuestas. Se midieron velocidades de separacion de polos opuestos para 45 bipolos observados en junio 9 de 1985 y estan en el intervalo $0.5 < V_s < 3.5$ km/s. Se observo un aumento significativo del flujo magnetico en la region debido a contribuciones de los bipolos emergentes.

Key words: SUN-CHROMOSPHERE — SUN-MAGNETIC FIELDS

I. INTRODUCTION

We study the birth of bipoles in Emerging Flux Regions (EFR) on the Sun using H-alpha filtergrams and line-of-sight magnetograms obtained on June 7-13, 1985 at the Big Bear Solar Observatory by Sara Martin. Emerging Flux Regions are defined as the first stage of active regions and are recognized on H-alpha filtergrams as two bright plages connected by Arch Filament Systems. The bright plages correspond to the higher magnetic field patches and usually separate from each other as they grow.

On the first day of emergence, (June 9, 1985) the Emerging Flux Region was oriented East-West, extending for 60000 km in Solar longitude and 40000 km in latitude. On the day before the appearance of the Emerging Flux Region, the photospheric magnetic fields on the site were very weak. No sign of perturbation could be identified on the previous days. Three pores formed overnight between 02:00 UT and 15:30 UT, June 9; two more were detected during the observing day (from 15:30 UT June 9, to 01:00 UT June 10). The tendency to increase in complexity occurred very soon after the region birth due to new bipoles emerging in and near the region. During the whole day, the fine structure in the magnetic field was maintained by successive emergence of small bipoles.

On the next day a new bipolar region emerged on the following part and the total span in longitude reached more than 90000 km. Following the development of the region on June 9, 1985 we verified the successive appearance

of small bipoles in the middle of the region. The opposite poles of each individual bipole moved apart, tending to separate faster at the beginning, as observed in Ephemeral Active Regions.

Ephemeral Active Regions are small bipolar regions that are first seen as a small compact unit with almost balanced magnetic flux that grows as the opposite poles separate. Bright plages and organized fibril structures or Arch Filament Systems are seen on the H-alpha filtergrams corresponding to bigger Ephemeral Active regions and some might even develop pores. Ephemeral Active Regions are characteristically small, extending over 20000 to 40000 km and having areas less than 7×10^8 km² (Harvey and Martin 1973). Ephemeral Active Regions were defined by their short lifetimes and the region observed on 9 July 1985 lasted during the following days and was too big to be classified as ephemeral. The smallest Ephemeral Active Regions appear on the limit of detection of the better magnetograms; as the opposite poles separate from each other without clear increase in magnetic flux they lose their identity in a few hours interacting with surrounding fields; their identification based strictly on H-alpha is difficult. Each individual bipole within the region behaved as an Ephemeral Region and had a short lifetime, but they are a substructure of the region and Ephemeral Regions are independent entities.

II. ANALYSIS OF THE MAGNETIC BIPOLES

We studied the behavior of 45 of these bipoles verifying: the point of appearance, the separation velocity, the orientation and the fate of the opposite poles after the separation.

EMERGENCE : we define the center of emergence as half the distance between the opposite poles at the moment of appearance of the bipoles, and we mark this point for each bipole observed. We noted that the centers of emergence come one after the other, forming well-defined lines, in regions among larger structures of opposite polarities.

VELOCITIES : for each bipole, we plot the distance between the opposite poles vs time. We noted that the separation velocity decreases as the poles get apart. Then, we calculated the maximum separation velocity (the steepest portion of the distance vs time graphic) and we obtained velocities in the range $0.5 < V_s < 3.5$ km/s, with a mean of $\langle V_s \rangle = 1.7$ km/s. Previous data indicated $V_s = 2$ km/s (Born 1974) and 5 km/s (Chou and Wang 1986) for the separation of the peaks of the whole Emerging Flux Region. We found that the "preceeding" poles tend to move faster than the "following" poles.

ORIENTATION : the new sets of bipoles appear with different orientations and contribute to change the general orientation of the whole region. A similar effect was observed by Weart (1970) in H-alpha filtergrams: the main cause of rotation of the Arch Filament System was not the rotation of the individual arches, but the emergence of new arches with different orientation and the vanishing of the old ones.

FATE OF OPPOSITE POLES : we observe the opposite poles of each bipole verifying the occurrence of cancellations or additions to elements of the same polarity (mergings). We observed that 28% of the poles cancel, whereas 72% merge. This clearly indicates a flux increase in the region due to the contribution of the emerging bipoles.

Due to cancellations and mergings, the magnetic flux of opposite poles is not balanced, as observed by Livi et al. (1985) for Ephemeral Regions. These processes also contribute to the loss of identity of individual bipoles in a few hours. As a whole, the complex emergence of small bipoles in the middle of the region contribute to a continuous increase of magnetic flux in both polarities.

This analysis is relevant because the appearance of bipoles is just beginning to be observed in detail. As quoted by Zirin (1989): "I have searched for, but never found, small magnetic flux elements spreading to the two ends of the bipole; subsequent loops are independent entities." In founding the elements searched by Zirin, we might explain why the separation velocities observed by Chou and Wang (1987) were not correlated with the magnetic flux as expected theoretically: the buoyance might have to be applied to individual small bipoles that have much less magnetic flux than the whole region, but not smaller separation speed. Besides the 45 bipoles that have been measured, others can be distinguished, but are too small and short lived to be followed in detail.

We are grateful to Sara F. Martin for the data. The Big Bear Solar Observatory is supported by NASA grant NGL05002034 and NSF grant ATM8513577. C. S. Barth has a student fellowship from CNPq. This work was partially supported by CNPq and FINEP, Brazil.

REFERENCES

- Born, R. 1974, *Solar Phys.*, 38, 127.
Chou, D. and Wang, H. 1987, *Solar Phys.*, 110, 81.
Harvey, K. L. and Martin, S. 1973, *Solar Phys.*, 32, 389.
Livi, S. H. B., Wang, J. and Martin, S. 1985, *Aust. J. Phys.*, 38, 222.
Weart, S. R. 1970, *Ap.J.*, 162, 987.
Zirin, H. 1988 "Astrophysics of the Sun", Cambridge Univ. Press.

THE ROLE OF CANCELLING MAGNETIC FIELDS IN THE BUILDUP TO ERUPTING FILAMENTS AND FLARES

Sara F. Martin
Big Bear Solar Observatory
Solar Astronomy 264-33
California Institute of Technology
Pasadena, CA, USA

Silvia H. B. Livi
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, Brazil

Abstract

We present a scenario for understanding the role of cancelling magnetic fields in the build-up to eruptive solar flares. The key intermediate step in this scenario involves the formation of a filament magnetic field in the corona above a photospheric polarity inversion where cancelling magnetic fields are observed. The formation of a filament magnetic field is accomplished in several recent models by first interpreting the cancelling fields as a visible effect of a slow, steady magnetic reconnection. This reconnection results in a reconfiguring of the magnetic field; line-of-sight pairs of closely-spaced opposite-polarity fields disappear from the photosphere thereby accounting for the cancellation; simultaneously the horizontal component is increased in the corona above the polarity inversion. The new and increasing horizontal component is synonymous with the building of a magnetic field where mass can accumulate to form a filament. If the magnetic reconnection continues for a sufficient length of time, the changing equilibrium between the growing filament magnetic field and the overlying, coronal magnetic field will result in a very slow, simultaneous ascent of both the filament magnetic field and the overlying coronal magnetic field with greater motion in the outer, weaker coronal field. This upward stretching of the magnetic fields eventually results in a closer spacing of oppositely-directed coronal magnetic fields (resembling a tangential discontinuity) beneath the filament. As depicted in some flare models, magnetic reconnection then suddenly occurs in the corona beneath the filament; flare loops form in the lower part of the reconnected field and a coronal mass ejection and erupting filament comprise the upper part of the reconnected field. To illustrate the observable phases of this scenario, we describe the build-up to two simple eruptive flares in a small active region.

1.0 INTRODUCTION

In a cancelling magnetic feature, both positive and negative line-of-sight magnetic fields are observed to disappear at a common boundary. One of the earliest papers on cancelling magnetic fields suggested that a relationship might exist between these disappearing magnetic fields and the occurrence of solar flares. Martin, Livi and Wang (1985) found that all 22 of the observed 22 flares in the active region were initiated around the sites of cancelling magnetic fields. However, the relationship was believed to be an indirect one because the time-scale of cancelling fields is very much slower than the time-scale of the flares. Thus, if a physical relationship exists between the sites of disappearing magnetic fields and flares, the role of the cancelling magnetic fields was expected to be of an evolutionary nature; the cancelling magnetic fields might somehow aid in altering the magnetic field geometry in such a way that flares would be initiated above the sites of the cancelling photospheric magnetic fields.

The possibility of a physical relationship between the evolution of cancelling magnetic fields and the sporadic occurrence of flares was further analyzed by Livi et al. (1989). They verified the earlier findings of Martin et al. (1985) that flares often occur at sites where the only observable change in the magnetic field is cancellation. In addition, Livi et al. (1989) sought to understand the occurrence of flares in relation to emerging, evolving, and cancelling magnetic fields. Previous papers had already documented the association of many flares to specific evolutionary changes in the magnetic fields of active regions (Martres, Michard and Soru-Iscovisci 1968); and with emerging magnetic flux regions (Rust, 1972 and 1974, Marsh, 1978; Martin et al., 1983, 1984). Following the latter findings, Livi et al. (1989, Figures 3,6 and 7) recognized that most flares associated with emerging flux occur at the boundaries where the newly emerging flux is impacting previously existing magnetic flux of opposite polarity. Their examples are consistent with the finding of Martres, Michard and Soru-Iscovisci (1968); flares occurred at polarity inversions where the magnetic flux was increasing on one side of the inversion and decreasing on the other side. Livi et al. (1989) concluded that the probable common denominator in all of these associations was the disappearance of magnetic fields. In surveying the data from Big Bear Solar Observatory from Sep. 1985 through July 1988, they were also unable to find any flares which definitely were not initiated at sites where cancellation could be occurring. This led Livi et al. to hypothesize the existence of a meaningful physical association between the evolution of cancelling magnetic fields and flares although the stages in the association were not yet well-defined.

During the last 6 years, it was also recognized that filaments form at polarity inversions where magnetic fields are cancelling. (Martin et al., 1985; Martin, 1986; Hermans and Martin, 1986; Martin 1990). Martin (1990) presented the hypothesis that converging and cancelling magnetic fields were necessary conditions for the formation of filaments (prominences). Three models of filament formation now incorporate the cancelling magnetic fields as an essential observational input (van Ballegoijen and Martens, 1989; Kuijpers, 1990; Martin, this volume). The present

paper discusses how these new concepts of filament formation also lead to the eruption of filament magnetic fields and to the simultaneous occurrence of solar flares and coronal mass ejections.

2.0 AN INTERPRETATION OF CANCELLING MAGNETIC FIELDS

Although both flares and filaments occur at polarity inversions where magnetic fields are cancelling, the time-scale and spatial scales of cancelling magnetic features are much more closely related to filaments than to flares. The physical relationship between cancelling magnetic fields and filaments is not immediately obvious. The cancelling magnetic fields are observed close to the photosphere while filaments form and evolve in the corona. Cancelling fields are decreasing line-of-sight fields; filaments contain mostly horizontal fields which can be either decreasing or increasing. The rate of filament formation, however, points to the likely physical link between cancelling fields and filaments (Martin, 1990). Filaments form quickly at polarity inversions where the cancellation is relatively rapid and filaments form slowly where cancellation is also relatively slow. This finding raises the vital question: Could the horizontal field of the filaments appear at the expense of the disappearing line-of-sight fields? This is exactly what is proposed in the new generation of filament models based on cancelling magnetic fields.

All of these models propose that magnetic reconnection acts to convert line-of-sight magnetic fields into transverse magnetic fields. The disappearance of magnetic fields (cancellation) is depicted as either the upward or downward transport of magnetic field through the layer of atmosphere represented in near-photosphere magnetograms. For purposes of discussing the flare build-up, details of these models are not important. Their common significant thread is an increasing horizontal component of magnetic field in the corona, along and above the polarity inversion in the photosphere and chromosphere.

3.0 THE FLARE BUILD-UP

3.1 Hypothesized Physical Processes

Irrespective of which filament model one might favor, there are at least 3 important implications of the idea that magnetic field accumulates in the corona where filaments can form:

(1) the accumulating horizontal component of magnetic field in the corona is directly related to the amount of magnetic field that has disappeared at the photosphere;

(2) the magnetic energy content of the photosphere is reduced because the magnetic flux has disappeared; at the same time, the total energy content in the

coronal magnetic field system above the cancellation sites is increased because the resulting magnetic field configuration in and around the filament site becomes increasingly concentrated and stressed with the successive reconnections;

(3) the accumulation of filament magnetic fields in the corona is a one-way process. The filament magnetic field cannot be destroyed nor can it be retracted because of its large scale (van Ballegoijen and Martens, 1989). It also cannot initially be expelled from the sun due to line-tying. It remains beneath the overlying and surrounding magnetic fields which already exist in the corona above those polarity inversions (Martin, 1990).

Thus we identify the accumulating magnetic field along coronal filament channels as the central site of energy storage for the flare build-up.

An important property of the coronal magnetic fields is the high Alfvén speed for propagating magnetic disturbances. Thus, communication takes place rapidly between all parts of a system. Every small or large change that happens in one part of the system can rapidly affect other parts of a coronal system. Consequently, small but continuous readjustments of the whole system will occur. We therefore anticipate a tendency of an outward expansion of the whole system. That change can be initially viewed as taking place in discrete steps. First the weaker, outer parts of the system expand as a consequence of the increasing inner filament fields. Then the filament magnetic field will also rise slightly in response to the outward expansion of the outer coronal field until a new equilibrium is established. However, in reality the filament magnetic field is continuously increasing and so the equilibrium state of the whole system is continuously shifting. This outward expansion eventually results in a region of oppositely directed magnetic field components beneath the rising filament. The field in that region then approximates the configuration of a tangential discontinuity. This configuration is highly favorable for magnetic reconnection to occur in the corona and hence is invoked as the starting point for some magnetic reconnection models of solar flares (review by Svestka and Cliver, 1992, these proceedings). To complete our scenario, we suggest that rapid reconnection takes place in accord with variations of the Kopp and Pneuman model (1976, Svestka, Martin and Kopp, 1981; Svestka and Cliver, 1992); flare loops form in the lower solar atmosphere; the upper part of the reconnected field is identified with the 'coronal mass ejection' and is expelled from the sun. The central part of the filament magnetic field is part of the expelled plasmoid.

3.2 Examples of the Flare Build-up

The gradual build-up to solar flares is examined with least confusion by observing the evolution of small active regions such as the one illustrated in Figures 1 and 2. The region was born between 2300 on 3 October and 1600 on 4 Oct. 1990 and was observed at Big Bear Solar Observatory (BBSO) from 4-9 Oct. 1990. In Figures 1 and 2, H-alpha center-line images are in the left column and videomagnetograms in the

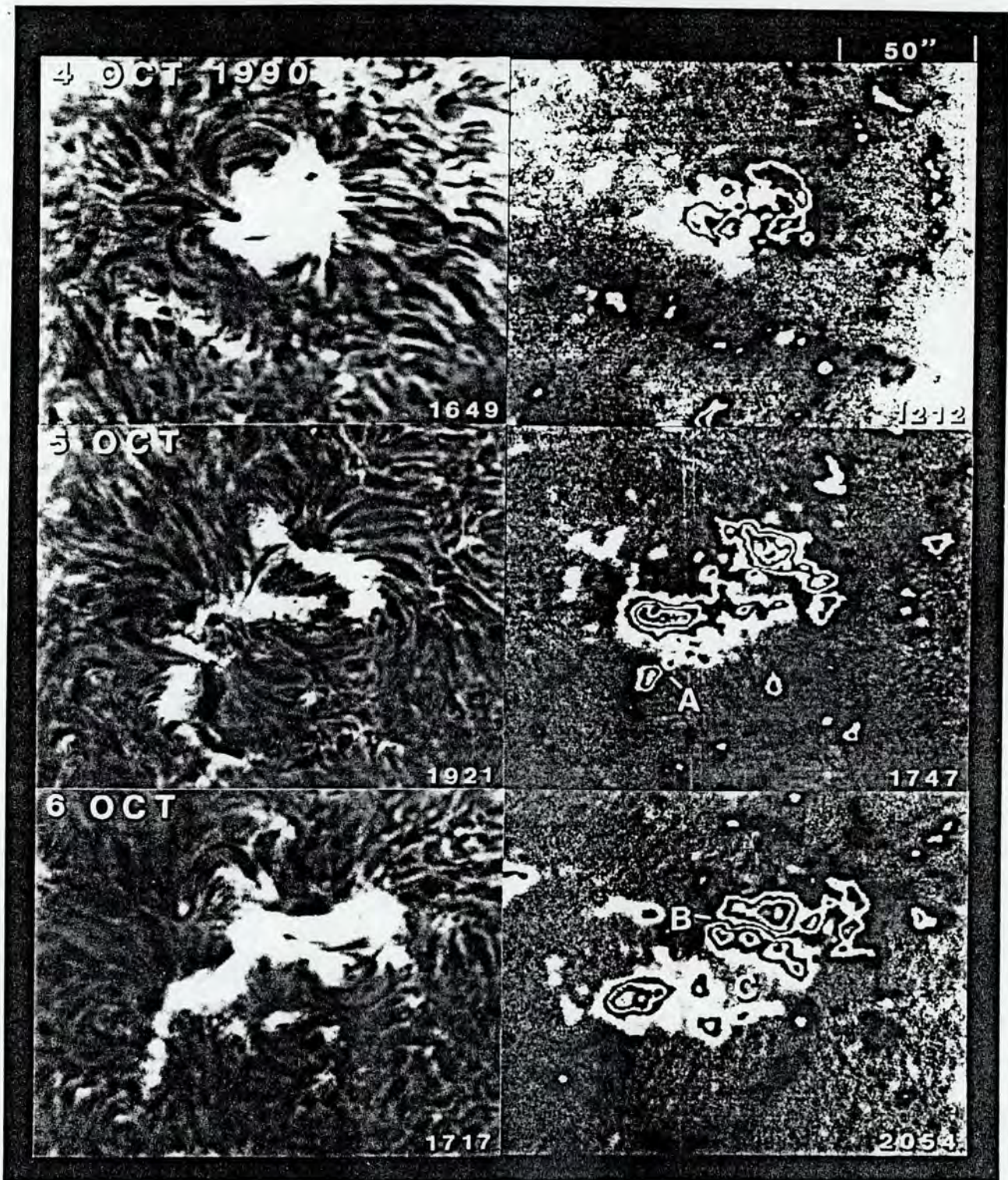


Fig. 1. The new active region, first seen on 4 Oct. 1990, has already reached its maximum magnetic flux by the morning of 5 Oct. and the intensity of the region has accordingly dropped as seen in the H-alpha images on the left. However, by 6 October, in the magnetograms on the right, a large section of the positive polarity flux (white areas and enclosed contours) reversed its direction of motion and moved into contact with the negative polarity flux (black areas and enclosed contours). The magnetic fields along this boundary are cancelling; this magnetic flux disappearance can be seen by comparing 6 Oct. with 7 Oct. in Figure 2.

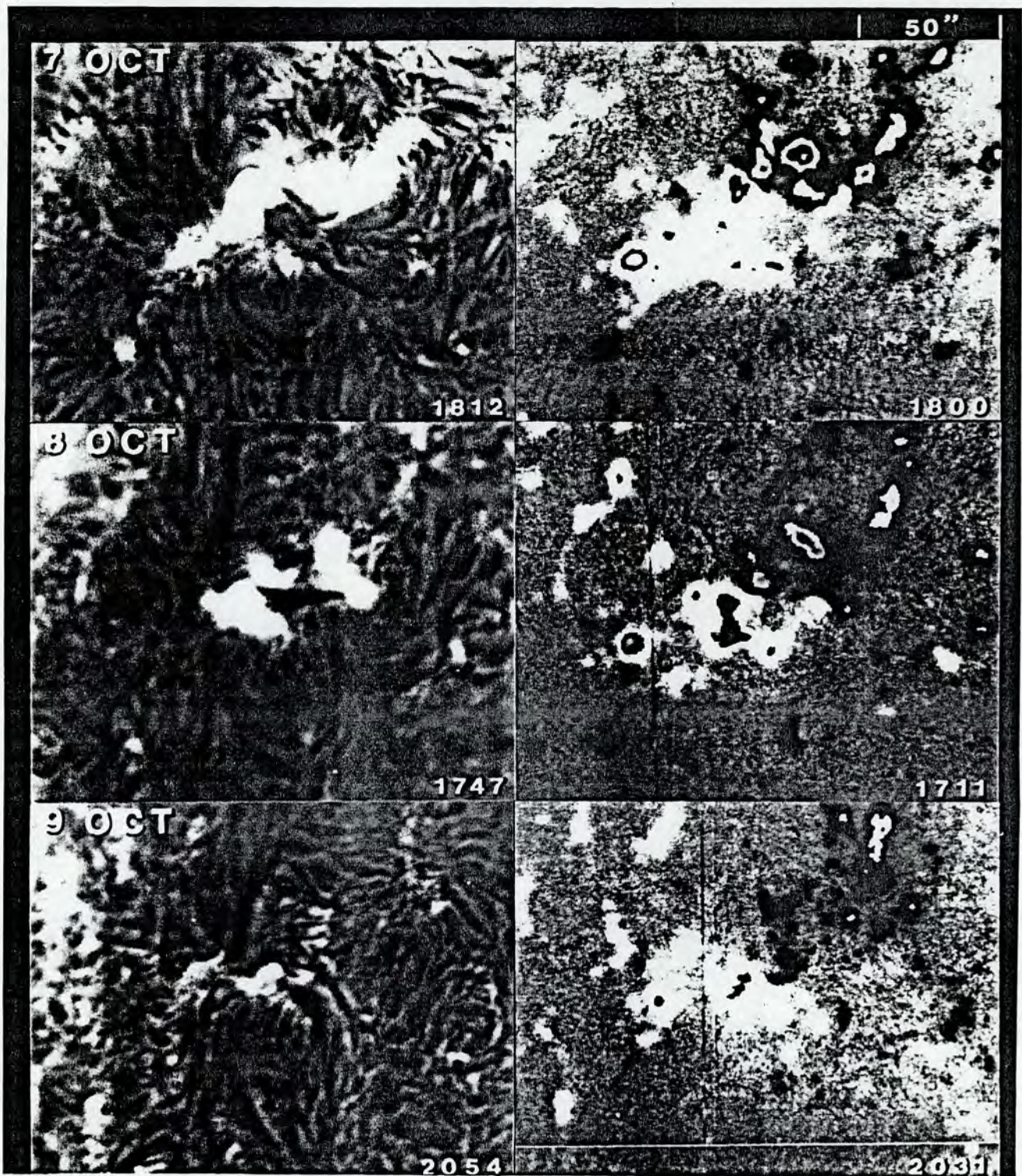


Fig. 2. The decrease in magnetic flux in the active region is seen, in the time-lapse sequences of this data, to be due to cancellation of the flux at all of the boundaries where the opposite polarities meet. At each major cancellation boundary, filaments can be seen. The redistributions of magnetic flux between 5 and 9 October appear to be related, at least in part, to the evolution of supergranules.

right column. In addition, H-alpha filtergrams at -0.6A were recorded on film continuously throughout the 4-9 October interval with wavelength scans through the H-alpha line being made about once an hour. H-alpha filtergrams were also recorded in time-lapse mode on videotape at a 2 sec interval.

During the evolution of this region, there are two polarity inversions, labelled A and B on the magnetograms in Figure 1, where cancelling magnetic fields can be seen and where filaments form. The first conspicuous site of cancellation is at the lower border of the region where the strong positive magnetic flux of the active region expands and encounters the neighboring negative polarity patch of network magnetic field at the site marked A. A filament had already formed at this site by the beginning of the observing day on 5 Oct. at 1530 UT. At that time the positive polarity flux from the active region and the negative network patch seen in Figure 1 were moving close together. Around 1800 UT, cancellation began at this site and continued throughout the rest of the observing day (which ended at 2347 UT) and was still occurring there at the beginning of the next day. The loss of flux is evident by comparing the magnetograms on 5 and 6 Oct. in Figure 1.

At 2205 UT on 5 Oct, above the cancellation site A in Figure 1, the filament existing there steadily began to appear in the blue wing (H-alpha-0.6A) as usually happens before an eruption. It rapidly became more conspicuous until about 2250, but only to the right of the cancelling site. Then it faded from view and disappeared by 2252. We attribute this disappearance to an acceleration of this section of the filament out of the passband of the filter. However, most of the filament was laterally displaced as it erupted. Consequently, the filament was continuously observable at centerline H-alpha during the rise of the flare. The flare emission began about 2259 at H-alpha center-line and at 2305 at H-alpha-0.6A. As the flare developed, additional laterally-displaced filamentary mass came into view. This structure is seen to the left of the low chromospheric part of the flare.

The second filament formed by the morning of 6 October along the main polarity inversion of the active region. In Figure 1, it is seen amidst the bright plage and at the site of the highest magnetic field gradient in the active region. It is narrow and not very dark, as is sometimes the case for filaments above sites with these characteristics. The evolution of the active region radically changed before the formation of this filament.

During 4 October, the early evolution of the region was characteristic of a simple bipolar growing flux region; the opposite polarities of the region gradually separated as the new flux emerged in the center of the region. By 5 October, the appearance of small new knots of flux had ceased. A large section of the positive polarity field reversed its direction of motion. This section then gradually moved back toward the negative polarity flux. (Positive flux is white outside of the contours and negative is black.) Small patches of positive and negative flux were cancelling during the day. During the night between 5 and 6 Oct., the entire section of positive polarity flux, above C on 6 Oct. in Figure 1, encountered the

5 OCT 90

50''

2317

2307

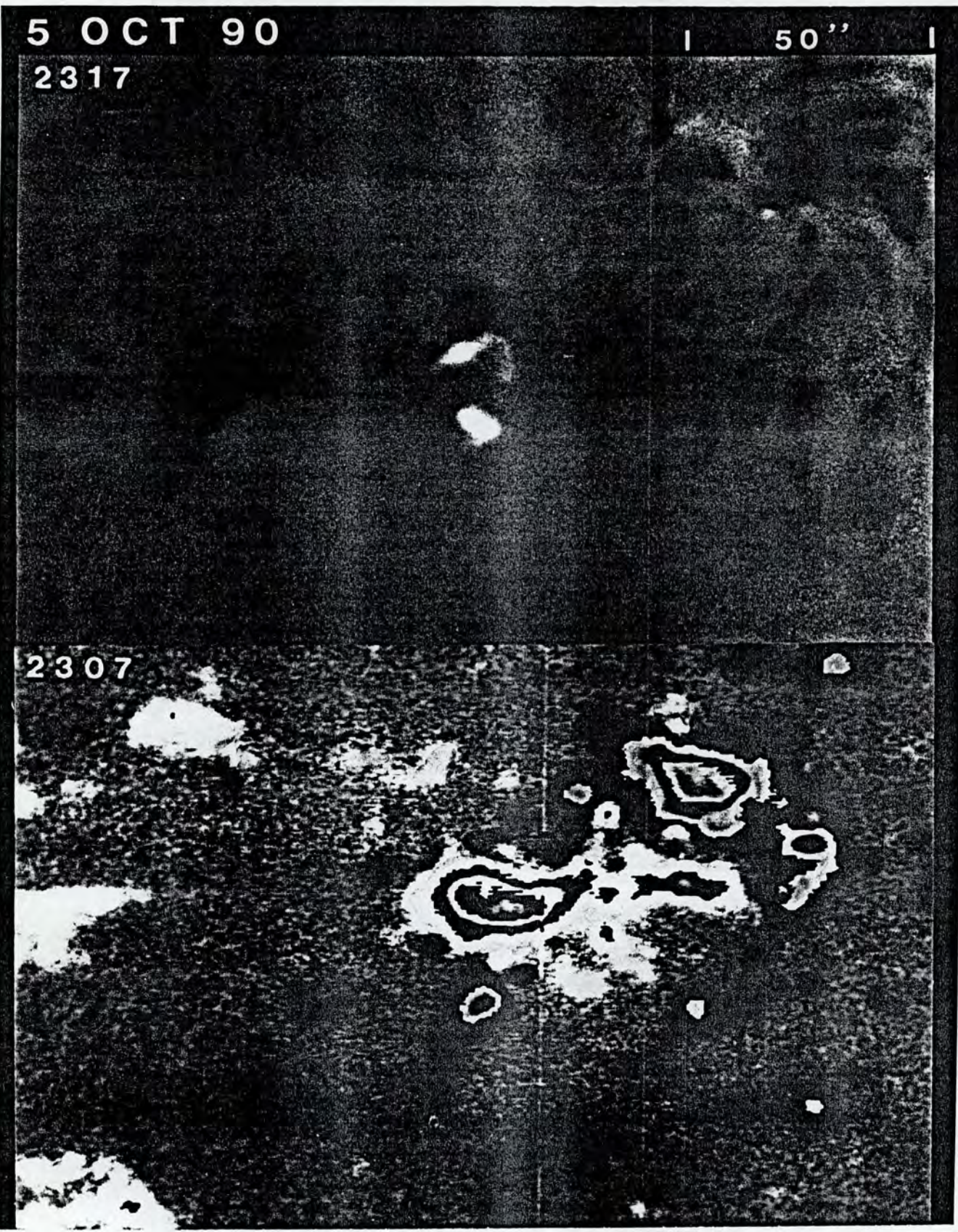


Fig. 3. The first eruptive flare is located at the lower border of the active region where the positive polarity flux of the region (white including contours) has encountered negative polarity network (black including contours). The erupting filament is seen to the left of the flare; the images are at H-alpha-0.6A.

negative polarity flux thereby forming the polarity inversion with high field gradient as seen at site B, also on Oct. 6 in Figure 1. A supergranule cell, at C, is seen in the region between the components of positive flux. It is possible that the growth of this cell forced the segment of positive flux back toward the negative flux.

By the beginning of 6 October, the filament had formed. Also, the plage around the encountering and cancelling fields was very bright, a characteristic of many areas around cancellation sites. At 1837, a classic two-ribbon flare began in concert with the abrupt disappearance of the filament mass along the polarity inversion. The flare is seen at maximum development at Ha-0.6 A in Figure 4. At the center of the H-alpha line, the emission was observed to spread over the entire active region. In addition, extensive faint emission continued to appear on the quiet sun to the east and northeast from 1858 until at least 1912 UT (lower right of the flare in Figure 4 but not seen in this image at H-alpha-0.6A).

Evidence of the erupting filament in this example is tenuous. However, from 1824 until the beginning of the flare at 1837, absorbing mass was becoming increasingly visible at H-alpha-0.6A in the east end of the filament channel. It abruptly disappeared from view at the start of the flare, probably because this mass was accelerated out of the passband of the filter. Very little lateral motion was detected during its disappearance as would be expected if the eruption occurred in the line-of-sight. Additional matter in the remainder of the filament channel also disappeared as the flare began. This is not compelling evidence of a filament eruption. However, new filament mass already began accumulating along the polarity inversion during the decay of the flare which is typical of active regions following a filament eruption. Although there was little filament mass to be expelled in this event, we still interpret it as an eruptive flare.

There is some evidence that an earlier flare, starting at 1649 along the main polarity inversion, could have been a less energetic, slow eruptive flare. The absorption along the polarity inversion was more conspicuous and exhibited a more classic preflare enhancement than the one preceding the more energetic one two hours later. The filament began to disappear rapidly in the interval from 1648 until 1652 just as the flare was beginning. This is typical for filament eruptions that are visible in the line-of-sight. Also new filament mass began to accumulate in the filament channel during the decay of the less energetic flare.

It is plausible that more eruptive flares could have occurred at this site during the BBSO night hours because more than 50% of the magnetic flux along the polarity inversion had disappeared by the morning of 7 Oct. Additionally, a filament was observed to steadily darken at H-alpha-0.6 A before the end of the observing day (2154 on 6 Oct). Many other small flares were observed at BBSO throughout 4-9 Oct. but without evidence of filament eruption.

The small active region in which the eruptive flares occurred was relatively isolated from other active regions and there were no other sites of emerging flux

6 OCT 90

| 50'' |

1849



1849

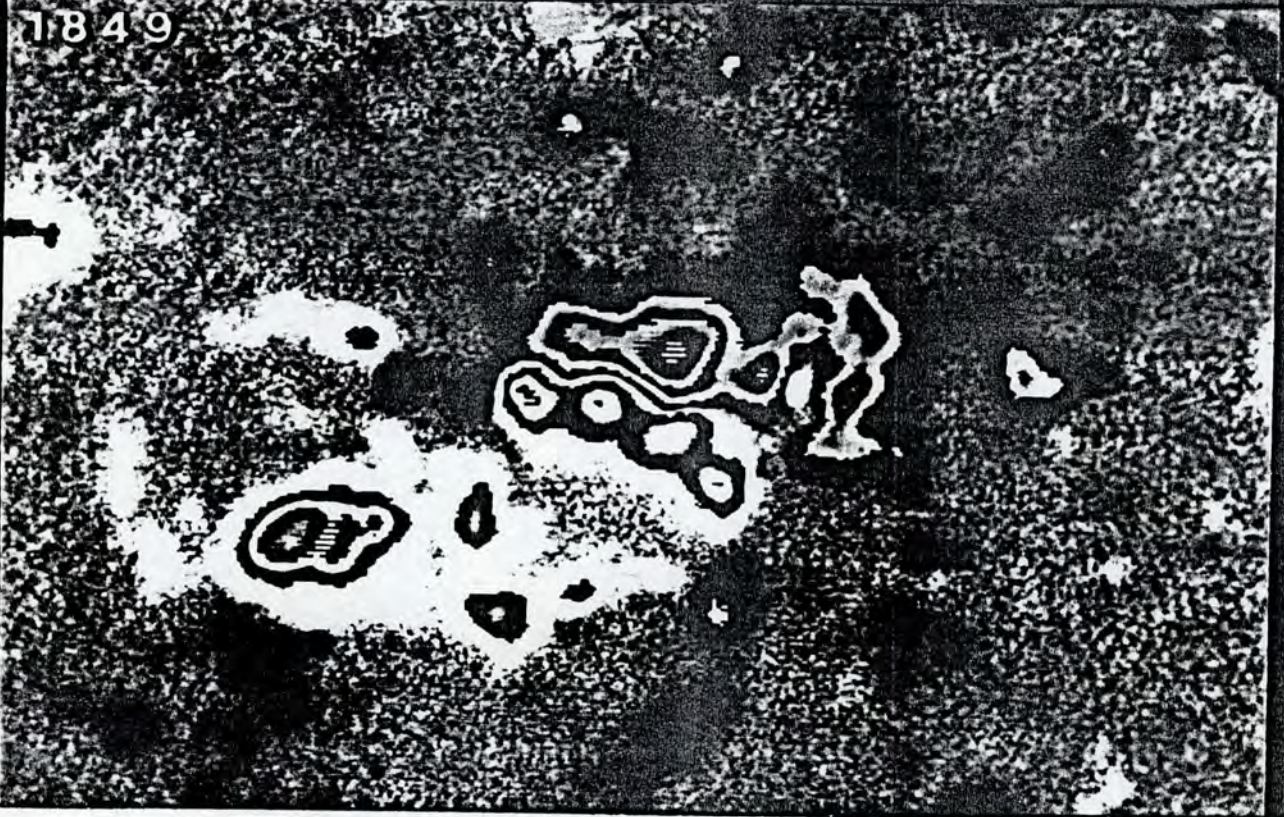


Fig. 4. The brightest emission of this second eruptive flare is in the ribbons centered around the site of rapidly cancelling magnetic fields at the site of highest magnetic field gradient seen in the magnetogram below. The erupting filament was Doppler-shifted out of the filter passband minutes before these images.

within this region at the times of the flares. Thus, we do not suspect that the formation of the filaments, their eruption, and the ensuing flares were influenced strongly by any factors other than the evolutionary changes in magnetic flux. We therefore propose that these flares are examples of the scenario of flare build-up described in the previous section.

4.0 DISCUSSION AND IMPLICATIONS OF THE CONCEPT

In the picture of the flare build-up presented here, the formation of a filament magnetic field is an essential ingredient. We place emphasis on the filament magnetic field rather than its mass because it is not evident that the mass accumulated in the coronal filament channel is significant to the eruption of the filament magnetic field. The filament mass could vary for many reasons. However, the filament magnetic field has no reason to fluctuate; in our picture, it can only increase in proportion to the cancelling fields that are observed. Further, the filament magnetic field can erupt even if there is little or no visible mass in this magnetic field. We suggest that the flare in Figure 4 illustrates this point.

The flare build-up begins with the first cancelling magnetic fields along a polarity inversion and continues either steadily or intermittently as the cancellation is observed to be either steady or intermittent. For this reason, we suggest that the rates of cancelling magnetic flux and the total quantities of cancelling magnetic flux - in relation to a surrounding system magnetic flux - will prove to be useful parameters in flare forecasting. However, this concept is presented only in its simplest form, without taking into consideration external influences or complex magnetic field geometries.

5.0 SUMMARY

The concepts presented in this paper are broad in scope and consist only of a rough outline of the stages that we conceive for the build-up to eruptive flares. Many observational and conceptual details could be added to make the picture more complete. Our primary objective here is only to formulate a concept of the flare build-up. The key stages in this build-up are:

- (1) the converging flow of the photospheric footpoints of opposite polarity magnetic fields towards a common boundary (polarity inversion);
- (2) the observed cancellation of magnetic flux, interpreted as a result of magnetic reconnection which concurrently leads to the disappearance of line-of-sight magnetic flux near the photosphere and to the building of a mostly horizontal filament magnetic field in the corona above the polarity inversion;
- (3) the distending of the corona in a large region around and including the filament magnetic field;

(4) the onset of rapid coronal reconnection beneath the distending filament; this is synonymous with the flare 'trigger', the flare being viewed in the broad sense as all of the consequences of that secondary rapid reconnection.

In this concept of the flare build-up, there is a net transfer of energy from the photosphere into the corona where energy is stored in the magnetic fields associated with filaments and in the surrounding corona. The key signature of that transfer of energy is cancelling magnetic flux observed in near-photosphere magnetograms; that transfer is considered to be a consequence of magnetic reconnection in the low solar atmosphere. The magnetic reconnection is evidently driven by convective flows in the photosphere or by flows related to newly developing active regions.

Acknowledgements

This research was supported by the Air Force Office of Scientific Research under grant AFOSR 90-006. The authors thank V. Gaizauskas for critical reading of the manuscript.

REFERENCES

- Recely, F. and Harvey, K.L.: 1986, *Solar Terrestrial Predictions*, Proceedings of a Workshop, Meudon, France, 1984, (eds.) P.A. Simon, G. Heckman and M.A. Shea, Published by NOAA (Boulder, CO, USA) and Air Force Geophysics laboratory, (Bedford, MA, USA), p.204.
- Hermans, L.M. and Martin, S.F.: 1986, *Coronal and Prominence Plasmas*, (ed.) A. Poland, NASA Conf. Publ. 2442, p. 369.
- Kopp, R.A. and Pneuman, G.W.: 1976, *Solar Phys.* 50, 85.
- Kuijpers, J.: 1990, *Plasma Phenomena in the Solar Atmosphere*, 1989 Cargese workshop, eds. M.A. Dubois, F. Bely-Dubau, D. Gressillon, Les Editions de Physique, BP 112, 91944 Les Ulis Cedex, France, pp. 227-242.
- Livi, S.H.B., S.F. Martin, Wang, H. and Ai, G.: 1989, *Solar Phys.* 121, 197.
- Marsh, K.: 1978, *Solar Phys.* 59, 105.
- Martin, S.F.: 1986, *Coronal and Prominence Plasmas*, (ed.) A. Poland, NASA Conf. Publ. 2442, p. 73.
- Martin, S.F.: 1990, Lecture Notes in Physics 363, *Dynamics of Quiescent Prominences*, Springer-Verlag, p. 1.

- Martin, S.F., Dezso, L., Antalova, A. Kucera, A. and Harvey, K.L.: 1983, *Adv. Space Res.* 2, 39.
- Martin, S.F., Bentley, R.D, Schadee, A., Antalova, A., Kucera, A., Dezso, L., Gesztelyi, L., Harvey, K.L., Jones, H., Livi, S.H.B. and Wang, J.: 1984, *Adv. Space Res.* 4, 61.
- Martin, S.F., Livi, S.H.B., and Wang, J.: 1985, *Australian J. Phys.* 38, 929.
- Martres, M. J., Michard, R., Soru-Iscovici, I., and Tsap, T.: 1968, *IAU Symp.* 35, 318.
- Martres, M. J., Michard, R., Soru-Iscovici, I., and Tsap, T.: 1968, *Solar Phys.* 5, 187.
- Rust, D.M.: 1972, *Solar Phys.* 25, 141.
- Rust, D.M.: 1974, *Flare-related Magnetic Field Dynamics*, HAO Conference held in Boulder, Colorado, p. 243.
- Svestka, Z. and Cliver, E.W.: 1992, these proceedings.
- Svestka, Z., Martin, S.F. and Kopp, R.A.: 1980, *Solar and Interplanetary Dynamics*, (eds) M. Dryer and E. Tandberg-Hanssen, p 217.
- van Ballegooijen, A.A. and Martens, P.C.H.: 1989, *Astrophys. J.* 343, 971;