

Estudo do Fluxo de Múons em Física de UHECRs

Felipe Leite Antunes¹, Magno V. T. Machado¹



¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS



Resumo

Neste trabalho propomos investigar a física pertinente à determinação do fluxo de múons gerados em eventos de raios cósmicos de altíssima energia (UHECRs). Aqui focamos na interação destes com prótons e também sua geração em processos de reação eletrofracos de neutrinos. Fornecemos curvas teóricas baseadas no modelo desenvolvido por E. Berger *et al.* [1], para a função de estrutura do próton, que respeita teoremas de unitarização das seções de choque hadrônicas. Este modelo foi extrapolado para altíssimas energias e pode ser generalizado para colisões lépton-núcleo.

Introdução

Espalhamento Inelástico Profundo (DIS)

É o espalhamento inelástico em altas energias entre um lépton-nucleon, caracterizado pelos quadrimomento do lépton incidente, do lépton espalhado e do nucleon. A mediação é feita pela troca de um bóson, o qual transfere para o nucleon um quadrimomento igual à diferença entre os quadrimomento dos léptons. Esta é a técnica usada para sondar a estrutura interna de uma partícula.

Funções de Estrutura

Uma função de estrutura busca parametrizar nosso desconhecimento sobre a estrutura interna do nucleon (próton ou nêutron), dada a virtualidade Q^2 do bóson virtual que funcionará como sonda. A função de estrutura considerada aqui, proposta por E. L. Berger et al. é expressa como:

$$F_2^p(x, Q^2) = \frac{F_p}{x_p^p(Q^2)(1-x_p)^3} x^p(Q^2)(1-x)^3, \quad x \geq x_p$$

$$F_2^p(x, Q^2) = (1-x) \left(\frac{F_p}{1-x_p} + A(Q^2) \ln \left(\frac{x_p(1-x)}{x(1-x_p)} \right) + B(Q^2) \ln^2 \left(\frac{x_p(1-x)}{x(1-x_p)} \right) \right), \quad x \leq x_p$$

Método

- 1) Realizou-se uma revisão bibliográfica na física de raios cósmicos, com ênfase nos processos de interação lépton-próton.
- 2) Foi construído um programa num CAS (sistema algébrico computacional), e reproduzidas as seções de choque presentes na literatura (Refs. [1] e [2]).
- 3) O programa foi adaptado para calcular a seção de choque para interações lépton-próton.
- 4) O modelo para função de estrutura, apresentado em [2], foi utilizado utilizado para obter a seção de choque total para interação múon-próton em altíssimas energias.

Resultados

Seção de choque diferencial

Para a seção de choque diferencial lépton-nucleon (interação de lépton com a matéria), consideramos a expressão geral para a troca de fóton virtual em termos das funções de estrutura:

$$\frac{d^2 \sigma^{lA}}{dx dy} = \frac{4\pi}{m_{pr} E y} \left(\frac{\alpha}{x} \right)^2 \frac{F_2^A}{y} \left[1 - y - \frac{m_{pr} xy}{2E} + \left(1 - \frac{m_l^2}{m_{pr} E xy} \right) \left(\frac{y^2 + 2 m_{pr} xy / E}{2(1+R^A)} \right) \right]$$

No nosso modelo, nos restringimos ao caso $A=1$, então esta equação pode ser escrita como

$$\frac{d^2 \sigma^{lp}}{dx dy} = \frac{4\pi}{m_{pr} E y} \left(\frac{\alpha}{x} \right)^2 \frac{F_2^p}{y} \left[1 - y - \frac{m_{pr} xy}{2E} + \left(1 - \frac{m_l^2}{m_{pr} E xy} \right) \left(\frac{y^2 + 2 m_{pr} xy / E}{2} \right) \right]$$

Para calcular a seção de choque total e fazermos a extrapolação proposta, foi criado um programa no software Mathematica (Fig.1), de forma a permitir uma fácil generalização para outros casos de interesse, como no cálculo da seção de choque de neutrinos, reproduzindo com sucesso resultados presentes nos artigos referenciados ao final do trabalho (Figs. 2 e 4), e apresentando novas curvas teóricas (Fig.3).

Ultrahigh Energy Muon Scattering

Clear[{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z}],

Parâmetros (onde usamos Q=Q², C=1 e h=1)

A0 = 0.0000000000000000
A1 = 1.0000000000000000
A2 = 3.0000000000000000
B0 = 0.0000000000000000
B1 = 0.0000000000000000
B2 = 0.0000000000000000
C = 1.0000000000000000
E = 1.0000000000000000
E0 = 0.0000000000000000
E1 = 0.0000000000000000
E2 = 0.0000000000000000
F0 = 0.0000000000000000
F1 = 0.0000000000000000
F2 = 0.0000000000000000
G = 0.0000000000000000
H = 0.0000000000000000
I = 0.0000000000000000
J = 0.0000000000000000
K = 0.0000000000000000
L = 0.0000000000000000
M = 0.0000000000000000
N = 0.0000000000000000
O = 0.0000000000000000
P = 0.0000000000000000
Q = 0.0000000000000000
R = 0.0000000000000000
S = 0.0000000000000000
T = 0.0000000000000000
U = 0.0000000000000000
V = 0.0000000000000000
W = 0.0000000000000000
X = 0.0000000000000000
Y = 0.0000000000000000
Z = 0.0000000000000000

Funções A(Q²) e B(Q²)

A[Q_2] := 1 + A0 + A1 Log[Q_2] + A2 Log[Q_2]^2
B[Q_2] := B0 + B1 Log[Q_2] + B2 Log[Q_2]^2

Funções de estrutura

F[Q_2, x] := F0 + F1 Log[Q_2] + F2 Log[Q_2]^2 + F3 Log[Q_2]^3 + F4 Log[Q_2]^4
G[Q_2, x] := G0 + G1 Log[Q_2] + G2 Log[Q_2]^2 + G3 Log[Q_2]^3 + G4 Log[Q_2]^4
H[Q_2, x] := H0 + H1 Log[Q_2] + H2 Log[Q_2]^2 + H3 Log[Q_2]^3 + H4 Log[Q_2]^4
I[Q_2, x] := I0 + I1 Log[Q_2] + I2 Log[Q_2]^2 + I3 Log[Q_2]^3 + I4 Log[Q_2]^4
J[Q_2, x] := J0 + J1 Log[Q_2] + J2 Log[Q_2]^2 + J3 Log[Q_2]^3 + J4 Log[Q_2]^4
K[Q_2, x] := K0 + K1 Log[Q_2] + K2 Log[Q_2]^2 + K3 Log[Q_2]^3 + K4 Log[Q_2]^4
L[Q_2, x] := L0 + L1 Log[Q_2] + L2 Log[Q_2]^2 + L3 Log[Q_2]^3 + L4 Log[Q_2]^4
M[Q_2, x] := M0 + M1 Log[Q_2] + M2 Log[Q_2]^2 + M3 Log[Q_2]^3 + M4 Log[Q_2]^4
N[Q_2, x] := N0 + N1 Log[Q_2] + N2 Log[Q_2]^2 + N3 Log[Q_2]^3 + N4 Log[Q_2]^4
O[Q_2, x] := O0 + O1 Log[Q_2] + O2 Log[Q_2]^2 + O3 Log[Q_2]^3 + O4 Log[Q_2]^4
P[Q_2, x] := P0 + P1 Log[Q_2] + P2 Log[Q_2]^2 + P3 Log[Q_2]^3 + P4 Log[Q_2]^4
Q[Q_2, x] := Q0 + Q1 Log[Q_2] + Q2 Log[Q_2]^2 + Q3 Log[Q_2]^3 + Q4 Log[Q_2]^4
R[Q_2, x] := R0 + R1 Log[Q_2] + R2 Log[Q_2]^2 + R3 Log[Q_2]^3 + R4 Log[Q_2]^4
S[Q_2, x] := S0 + S1 Log[Q_2] + S2 Log[Q_2]^2 + S3 Log[Q_2]^3 + S4 Log[Q_2]^4
T[Q_2, x] := T0 + T1 Log[Q_2] + T2 Log[Q_2]^2 + T3 Log[Q_2]^3 + T4 Log[Q_2]^4
U[Q_2, x] := U0 + U1 Log[Q_2] + U2 Log[Q_2]^2 + U3 Log[Q_2]^3 + U4 Log[Q_2]^4
V[Q_2, x] := V0 + V1 Log[Q_2] + V2 Log[Q_2]^2 + V3 Log[Q_2]^3 + V4 Log[Q_2]^4
W[Q_2, x] := W0 + W1 Log[Q_2] + W2 Log[Q_2]^2 + W3 Log[Q_2]^3 + W4 Log[Q_2]^4
X[Q_2, x] := X0 + X1 Log[Q_2] + X2 Log[Q_2]^2 + X3 Log[Q_2]^3 + X4 Log[Q_2]^4
Y[Q_2, x] := Y0 + Y1 Log[Q_2] + Y2 Log[Q_2]^2 + Y3 Log[Q_2]^3 + Y4 Log[Q_2]^4
Z[Q_2, x] := Z0 + Z1 Log[Q_2] + Z2 Log[Q_2]^2 + Z3 Log[Q_2]^3 + Z4 Log[Q_2]^4

Integrando a seção de choque

Calculando as integrais nos seus respectivos ranges: $\int_{E_{min}}^{E_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} d^2 \sigma$ e $\int_{E_{min}}^{E_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} d^2 \sigma dxdy$

Integrando a seção de choque
Integrate[F[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[G[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[H[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[I[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[J[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[K[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[L[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[M[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[N[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[O[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[P[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[Q[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[R[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[S[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[T[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[U[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[V[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[W[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[X[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[Y[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}] + Integrate[Z[Q_2, x] dx, {x, x_min, x_max}];

Plotando individualmente as funções que entram na seção de choque.

Plot[A[Q_2], {Q_2, 10^14, 10^15}, PlotStyle -> {Red, Solid}];
Plot[B[Q_2], {Q_2, 10^14, 10^15}, PlotStyle -> {Green, Solid}];

Plot[F[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Blue, Dotted}];

Plot[G[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Magenta, Dotted}];

Plot[H[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Cyan, Dotted}];

Plot[I[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Black, Dotted}];

Plot[J[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Red, Dotted}];

Plot[K[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Green, Dotted}];

Plot[L[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Blue, Dotted}];

Plot[M[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Magenta, Dotted}];

Plot[N[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Cyan, Dotted}];

Plot[O[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Black, Dotted}];

Plot[P[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Red, Dotted}];

Plot[Q[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Green, Dotted}];

Plot[R[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Blue, Dotted}];

Plot[S[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Magenta, Dotted}];

Plot[T[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Cyan, Dotted}];

Plot[U[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Black, Dotted}];

Plot[V[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Red, Dotted}];

Plot[W[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Green, Dotted}];

Plot[X[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Blue, Dotted}];

Plot[Y[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Magenta, Dotted}];

Plot[Z[Q_2, x], {Q_2, 10^14, 10^15}, {x, 0, 1}, PlotStyle -> {Cyan, Dotted}];

Fig. 1. Programa produzido no Mathematica. Calcula a seção de choque total (integrada) para colisões lépton-próton.

Figuras

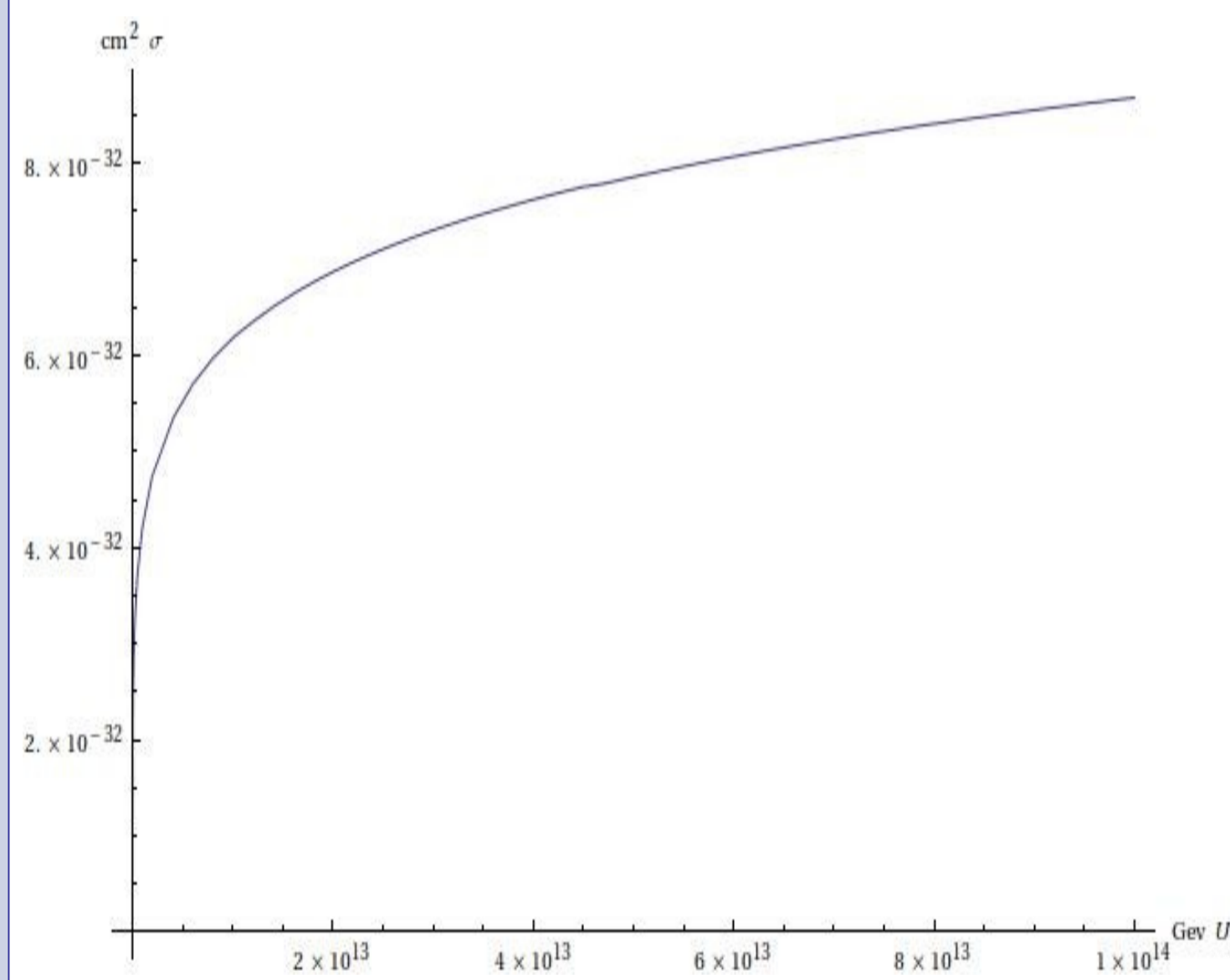


Fig. 2: Como teste, reproduzimos resultados já apresentados na literatura [1], apresentando a seção de choque de colisões neutrino-próton.

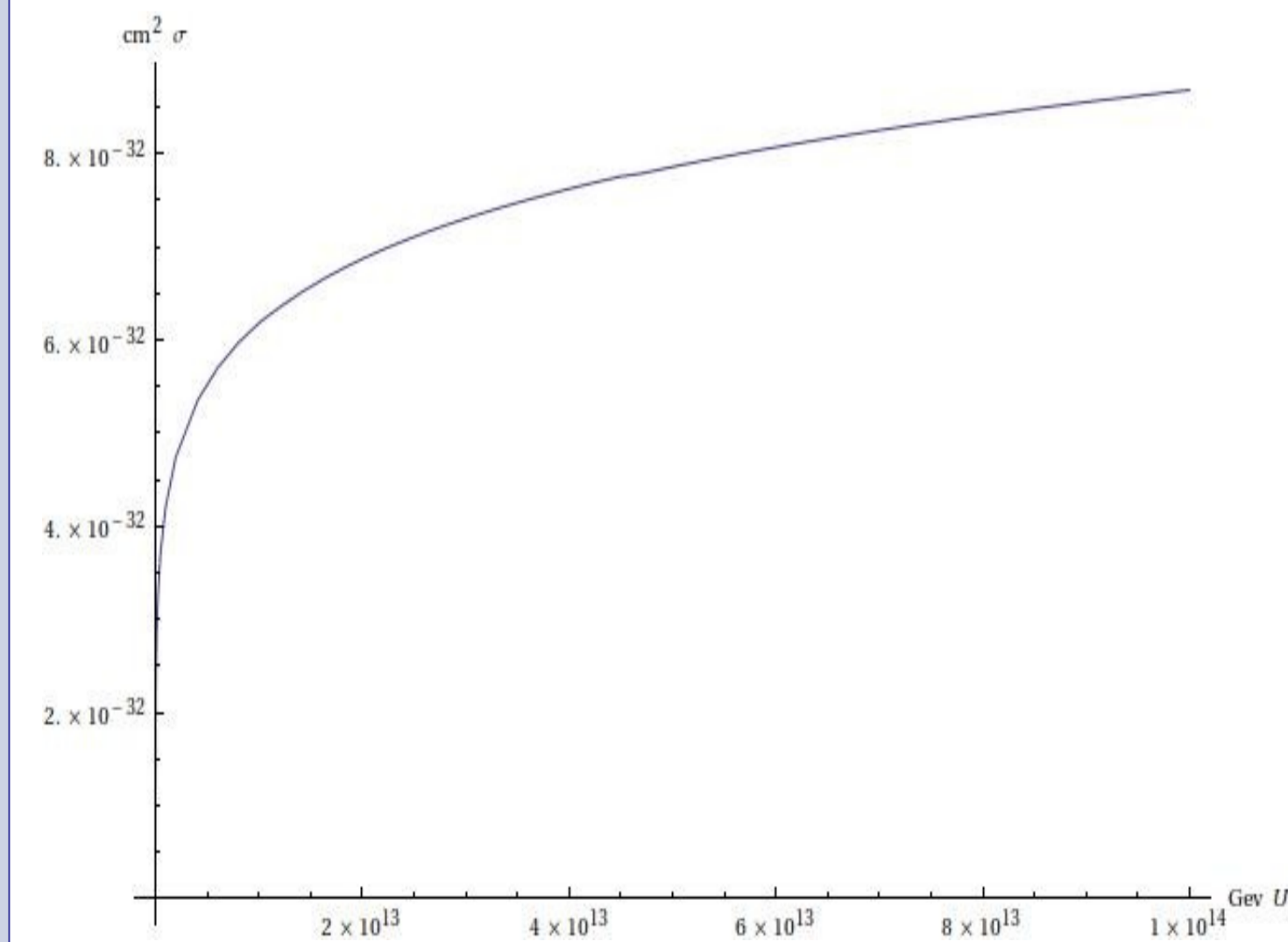


Fig.3: Resultado obtido modelo teórico [1], mostrando intervalos de energia que abrangem seções de choque para colisões de múon-próton originados na interação de raios cósmicos ultra energéticos.

Figuras (cont.)

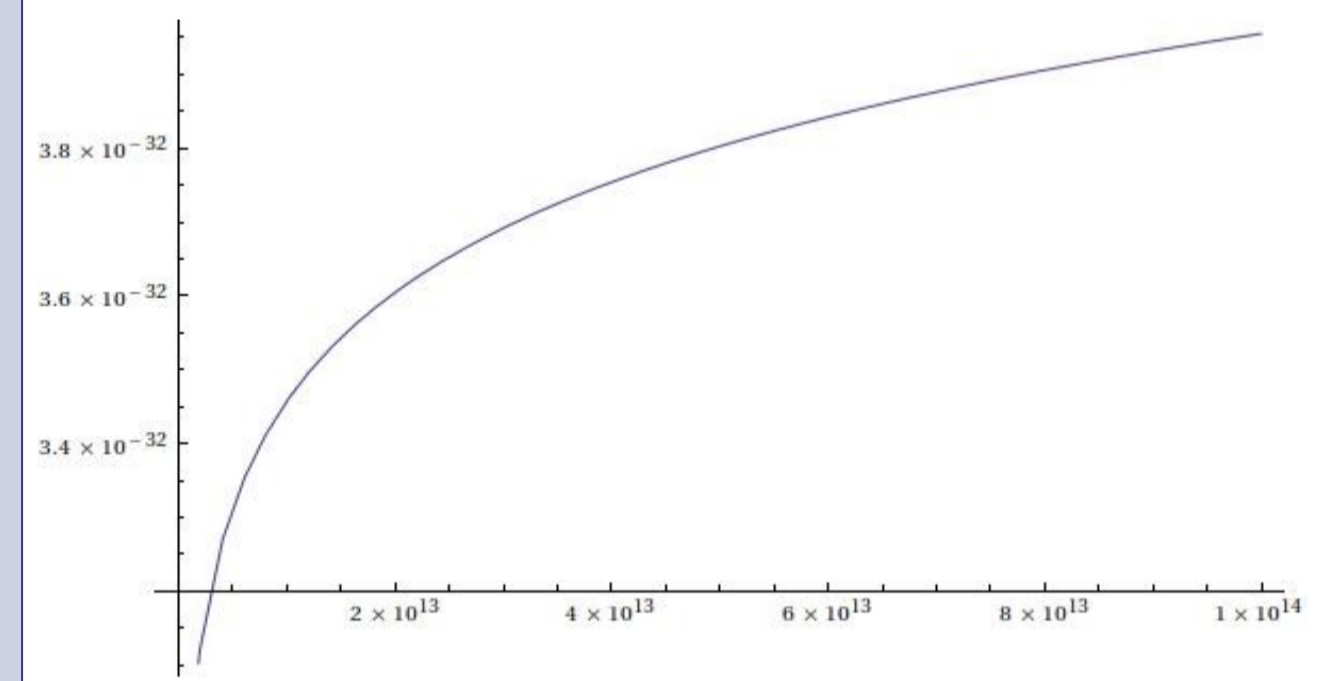


Fig. 4: Sessão de choque para um modelo baseado em escalonamento geométrico [2], baseado em física de saturação partônica (em unidades de cm² como função da energia do lépton em unidades de GeV).

Conclusões

A contribuição dada para a física de raios cósmicos, aqui analisada, é a obtenção da seção de choque para colisões múon-próton e da geração destes em colisões neutrino-nucleon, em altas energias. Além disso, foi criado um programa simples e de fácil adaptação, que permite a verificação e/ou reprodução de modelos compatíveis.

Referências

- [1]Edmond L. Berger, Martin M. Block, Douglas W. McKay, and Chung-I Tan, "Ultrahigh energy neutrino scattering," PHYSICAL REVIEW D 77, 2008 .
- [2]N. Armesto,C. Merino, G. Parente, and E. Zas, "Charged current neutrino cross section and tau energy loss at ultrahigh energies," PHYSICAL REVIEW D 77, 2008

Agradecimentos

Ao meu orientador Magno V. T. Machado por toda ajuda, e ao CNPq pelo financiamento.