

IV Workshop Nova Física no Espaço
20-25 de Fevereiro de 2005, Campos do Jordão - SP

PROCURA DE ANTIMATÉRIA NOS RAIOS CÓSMICOS

K. Choque Talavera

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE
São José dos Campos - SP

- ▣ Introdução
- ▣ Antiprótons nos raios cósmicos
- ▣ Procura experimental da antimatéria nos raios cósmicos

- ☞ **Antimatéria:** → previsão teórica do pósitron, Dirac, 1928
 - primeira identificação do pósitron, Anderson, 1932
 - detecção do antipróton, Chamberlain et al., 1955
- ▢▢▢▢▢ **Física de partículas:** → invariança C, P, T
 - invariança do número bariônico B
 - invariança do número leptônico L
- ▢▢▢▢▢ **Teoria do *Big Bang*:** → expansão do Universo, Hubble, 1929
 - radiação de fundo 2.7 °K, Penzias e Wilson, 1965
 - abundância do hidrogênio e hélio, Gamow, 1946

Simetria matéria-antimatéria no Universo primordial?

O que aconteceu com a simetria matéria-antimatéria durante o final do *Big Bang* para chegar na forte assimetria bariônica do Universo observado hoje?

👉 Assimetria bariônica

$$\eta \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \sim 3 \times 10^{-10}$$

$n_b, n_{\bar{b}}$, densidades de bárions e antibárions

$n_\gamma \sim 412 \text{ cm}^{-3}$, fótons da RCFM

$n_b \gg n_{\bar{b}}$ ao menos nossa vizinhança

$n_b = n_{\bar{b}}$ no universo primordial?

👉 Condições de Sakharov, 1967

1. não conservação B
2. não conservação C e CP
3. afastamento do equilíbrio térmico

Como estudamos se o Universo é ou não simétrico em matéria-antimatéria?

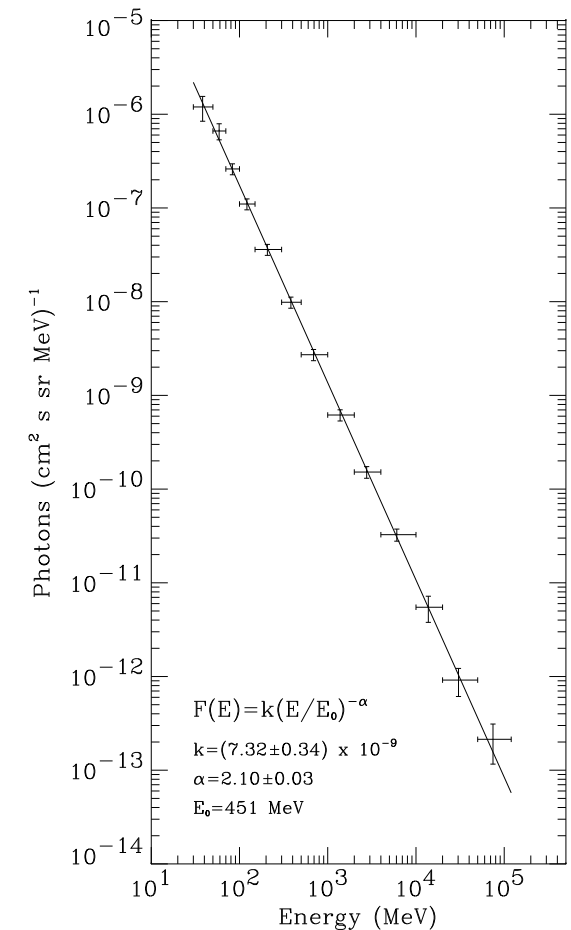
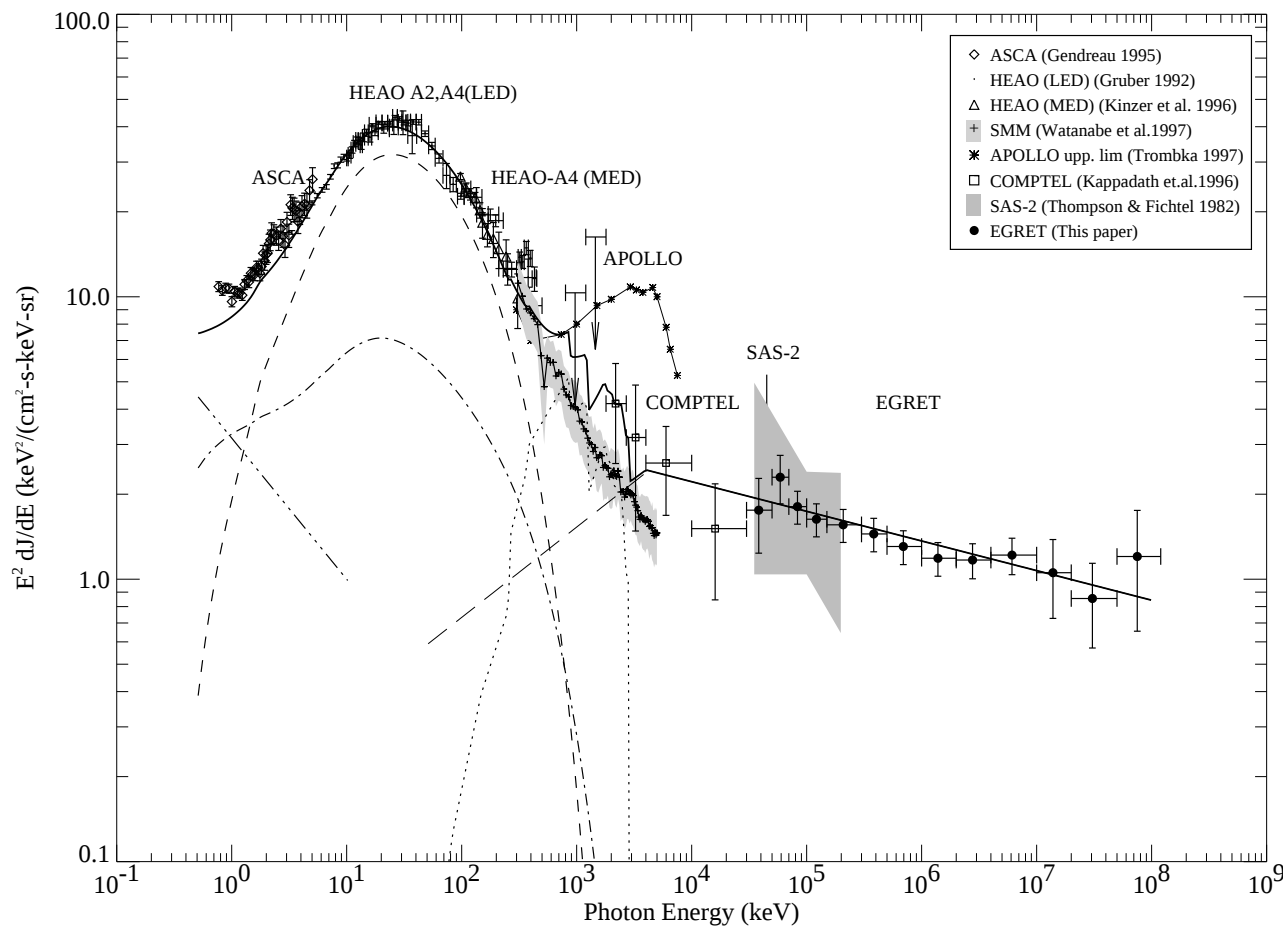
Teoria:

- Universo de matéria e antimatéria
 - domínios de matéria-antimatéria distantes
 - antimatéria em pequenas quantias
- Universo livre de antimatéria
 - bariogênese: quebra de simetrias nas interações
 - bariogênese GUT
 - bariogênese electrofraca
 - bariogênese de Affleck-Dine

Observações:

- indireta: → estudando o espectro de raios- γ difuso
- direta: → estudando o espectro de antiprótons (e pósitrons) nos RC
 - procurando antinúcleos nos RC

indireta: raios- $\gamma \rightarrow$ aniquilações, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, distorção no espectro em 70MeV
 $\rightarrow$ grande fundo
 RCFM $\rightarrow$ anisotropias desde vazios entre domínios de mat.-antimat.



direta:

e^+ → grande fundo desde muitas fontes secundárias
→ difícil determinar a contribuição desde fontes extragalácticas.

$\bar{p}$ → relativamente abundantes
→ grande fundo até ~ 10 GeV (desde, p +MIS)
→ possível prova em muito altas energias (> 100 GeV)

$\bar{N}$ → nem ideia da sua abundância
→ não há fundo
→ modulação galáctica (> 100 GeV/n)

Fonte secundária



RC → 90 % prótons
→ 9 % núcleos de hélio
→ < 1 % núcleos pesados

MIS → 1 cm^{-3} hidrogênio
→ 0.1 cm^{-3} hélio
→ 0.008 cm^{-3} oxigênio

processo mínimo:

$$pp \rightarrow pp\bar{p}p$$

energia limiar:

$$T_{\text{th}} = 6m_p$$

energia mínima:

$$T_{\bar{p}} \approx \frac{m_p^2}{E_p - 6m_p}$$

processo geral:

$$pA \rightarrow \bar{p}X$$

Equação de transporte:

$$\frac{\partial N_{\bar{p}}}{\partial t} + \nabla \cdot [(\vec{u} - D\nabla) N_{\bar{p}}] + \frac{N_{\bar{p}}}{\tau_{\bar{p}}^{\text{int}}} + \frac{\partial}{\partial E} [b(E) N_{\bar{p}}] = Q_{\bar{p}}$$

$N_{\bar{p}}(E, \vec{r}, t)dE$, densidade de antiprótons

$\frac{\partial N_{\bar{p}}}{\partial t} = 0$, no regime estacionário

$\nabla \cdot [(\vec{u} - D\nabla) N_i] \rightarrow N_i/\tau_{\text{esc}}$, modelo de propagação *Leaky Box*

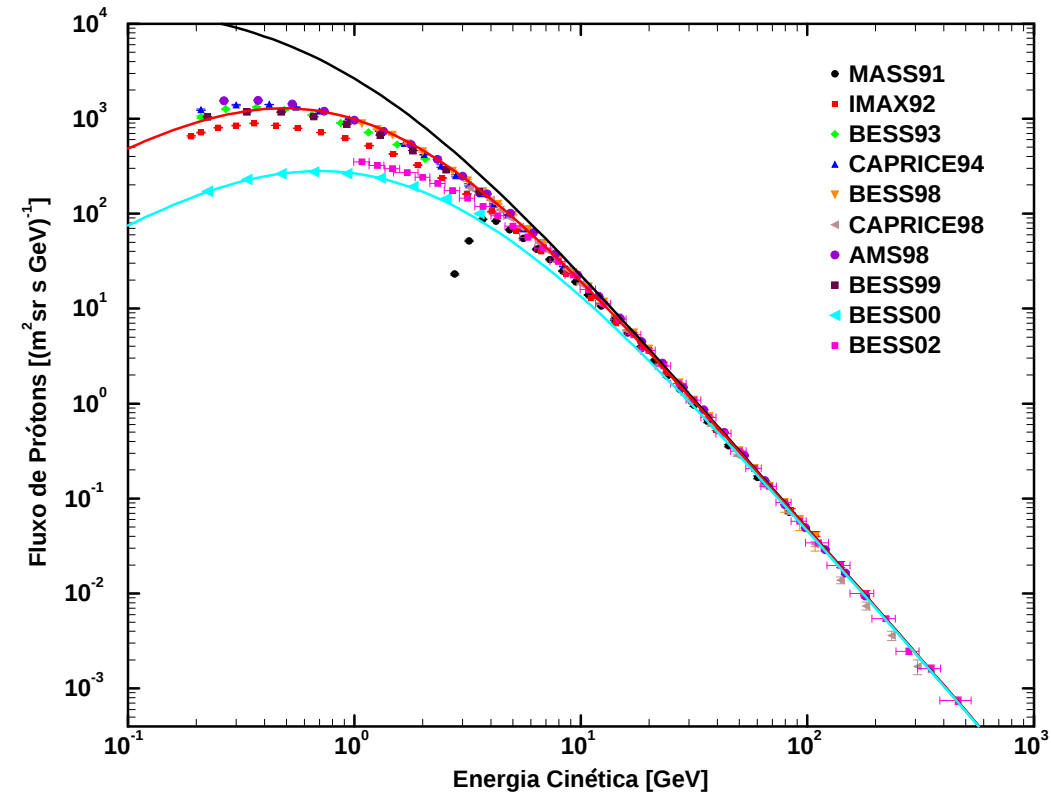
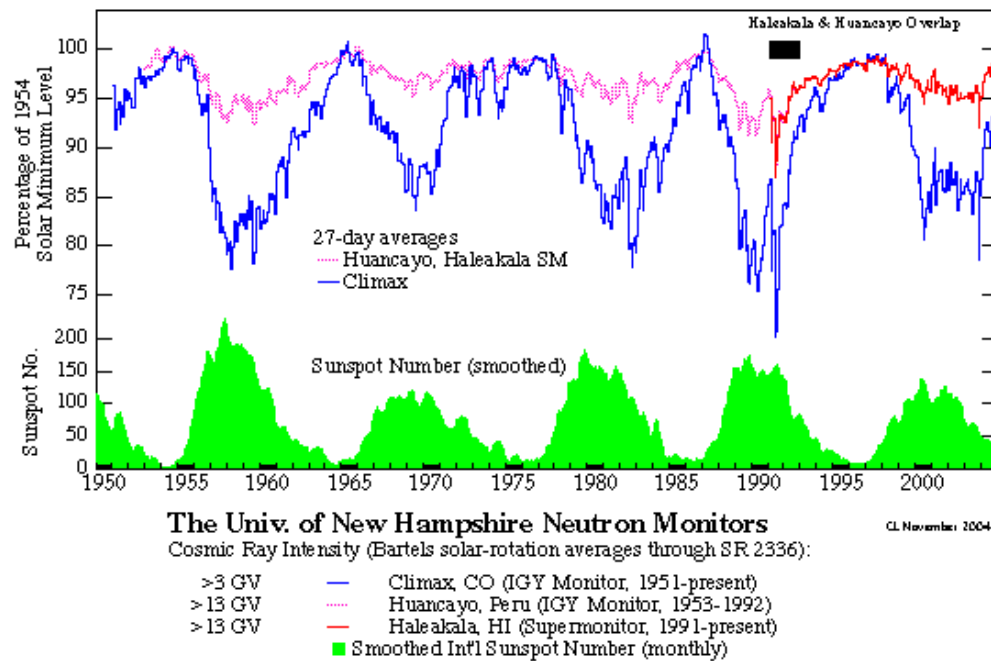
$\frac{1}{\tau_{\bar{p}}^{\text{int}}} = \frac{v_{\bar{p}} \rho_A \sigma_{\bar{p}A}}{m_A}$, tempos característicos de interação inelástica e aniquilação

$b_{\bar{p}}(E) = \frac{dE}{dt}$, perdas de energia por ionização

$Q_{\bar{p}}(E, \vec{r}, t)$, função fonte

Fluxo de RC antiprótons:

$$F_{\bar{p}}(E, \vec{r}) = \frac{1}{4\pi} v_{\bar{p}} N_{\bar{p}}(E, \vec{r})$$



Equação de transporte de raios cósmicos na heliosfera:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - (V + \langle v_D \rangle) \cdot \nabla f + \nabla \cdot (K_s \cdot \nabla f) + \frac{1}{3} (\nabla \cdot V) \frac{\partial f}{\partial \ln R}$$

$f(R, \vec{r}, t)$, função de distribuição dos RC (antiprótons)

R , rigidez; $V \sim 400$ km/s, velocidade do vento solar no plano galáctico

v_D , velocidade de deslocamento

K_s , coeficiente de difusão

Aproximação Force Field:

$$F_{1 \text{ UA}}(T_r - \Phi) = \frac{(T_r - \Phi)(T_r - \Phi + 2m)}{T_r(T_r - 2m)} F_r(T_r)$$

$F_{1 \text{ UA}}$, fluxo diferencial de $\bar{p}$ em 1 UA

F_r , fluxo diferencial de $\bar{p}$ em $r \sim 100$ UA

$\Phi = (Z/A)\phi$, intensidade da modulação solar

$\phi = 0.54$ GV, mínima atividade solar

$\phi = 0.7$ GV, período de transição

$\phi = 1.3$ GV, máxima atividade solar

Secundárias:

$$Q_{\bar{p}}(E, r) = 4\pi \int \Gamma_{pA}(E) \frac{dn_{\bar{p}}}{dE_{\bar{p}}}(E_{\bar{p}}, E_p) F_p(E_p) dE$$

Decaimento de antinêutrons:

$$Q_{\bar{p}}^{\bar{n}}(E, r) = 4\pi \int \Gamma_{pA}(E) \frac{dn_{\bar{n}}}{dE_{\bar{p}}}(E_{\bar{p}}, E_p) F_p(E_p) dE$$

Terciárias:

$$S_{\bar{p}}(E, r) = 4\pi \int \Gamma_{\bar{p}A}(E) \frac{dn_{\bar{p}}}{dE_{\bar{p}}}(E'_{\bar{p}}, E_{\bar{p}}) F_{\bar{p}}(E'_{\bar{p}}) dE'$$

Interações

próton-hidrogênio	alfas-hidrogênio	antiprótons-hidrogênio
próton-hélio	alfas-hélio	antiprótons-hélio
próton-oxigênio	alfas-oxigênio	antiprótons-oxigênio

$$F = A \times E^{-\alpha}$$

próton

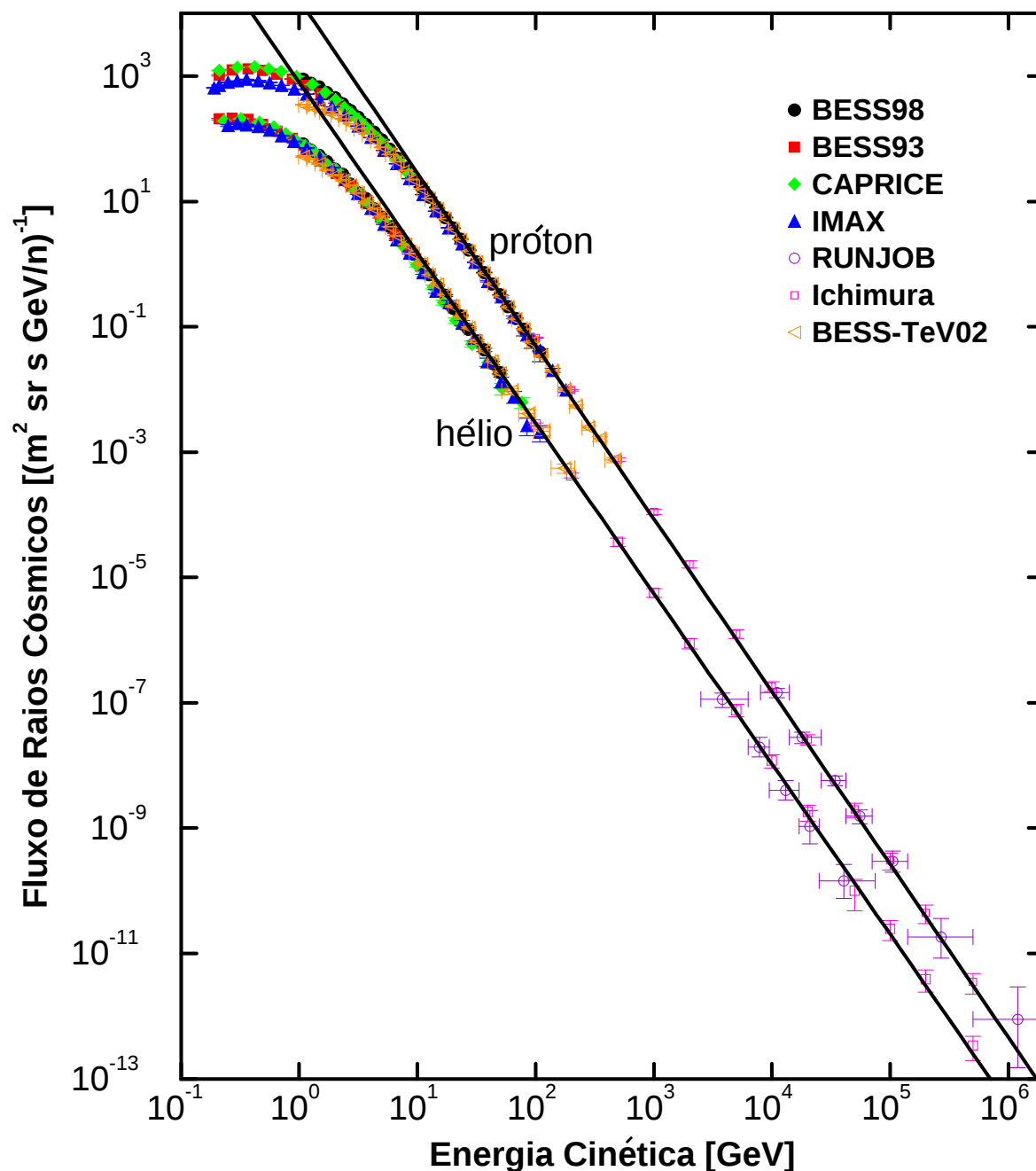
$$A = 1.64 \times 10^4 \text{ (m}^2 \text{ sr s GeV)}^{-1}$$

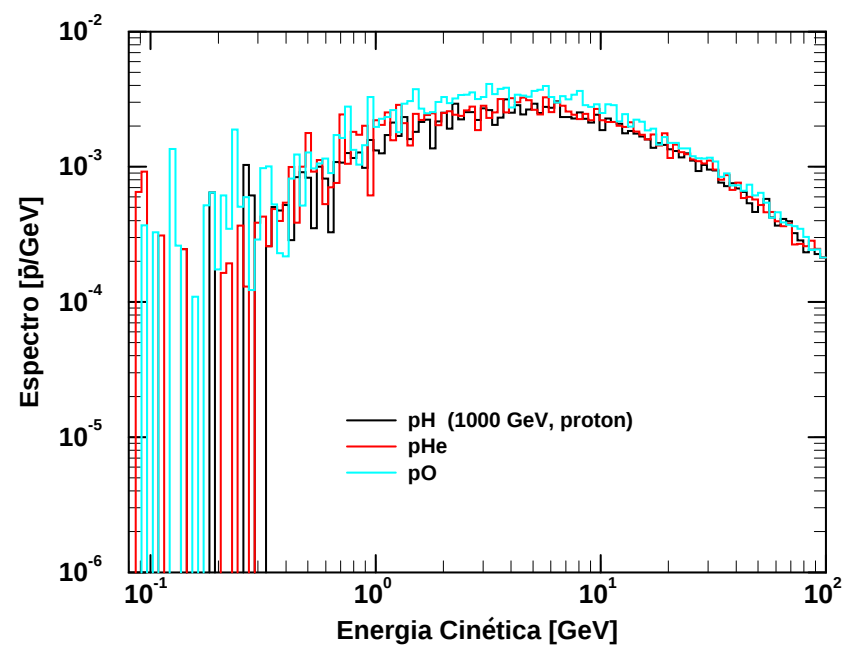
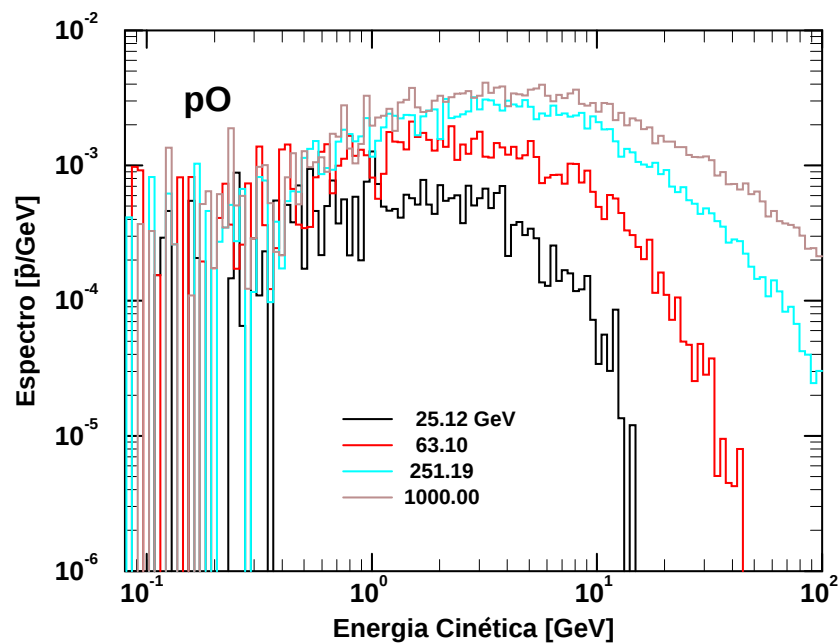
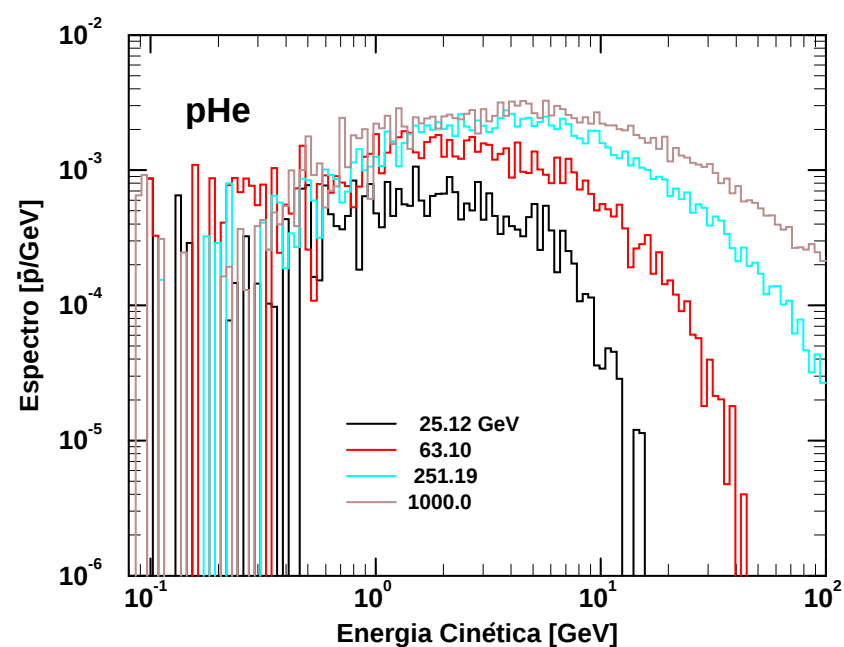
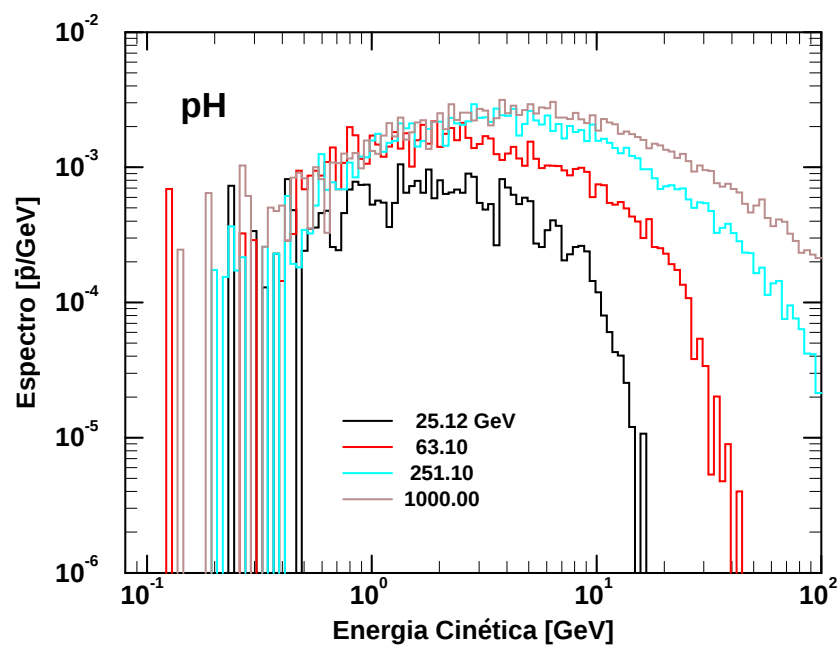
$$\alpha = 2.76$$

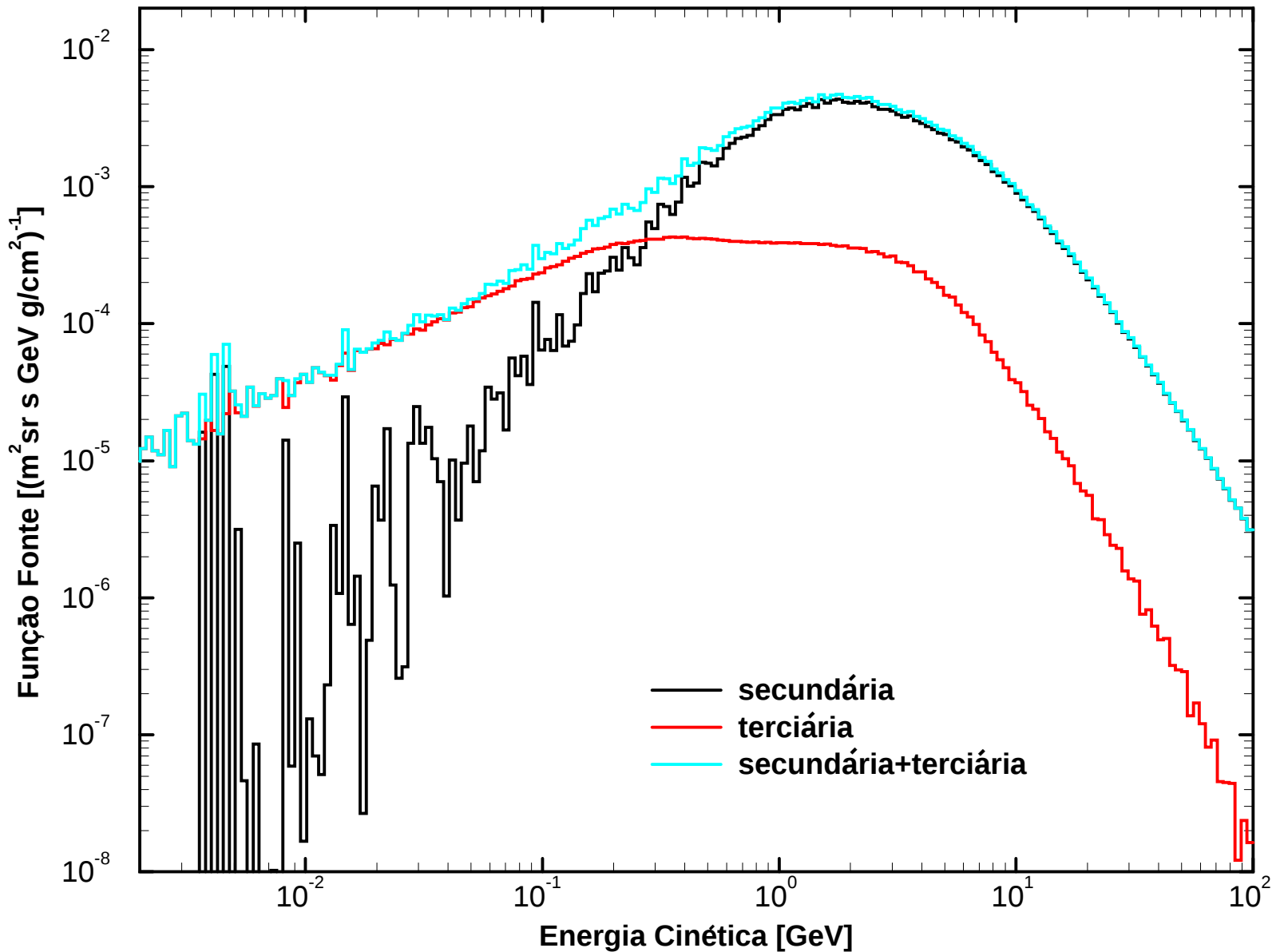
partículas alfa

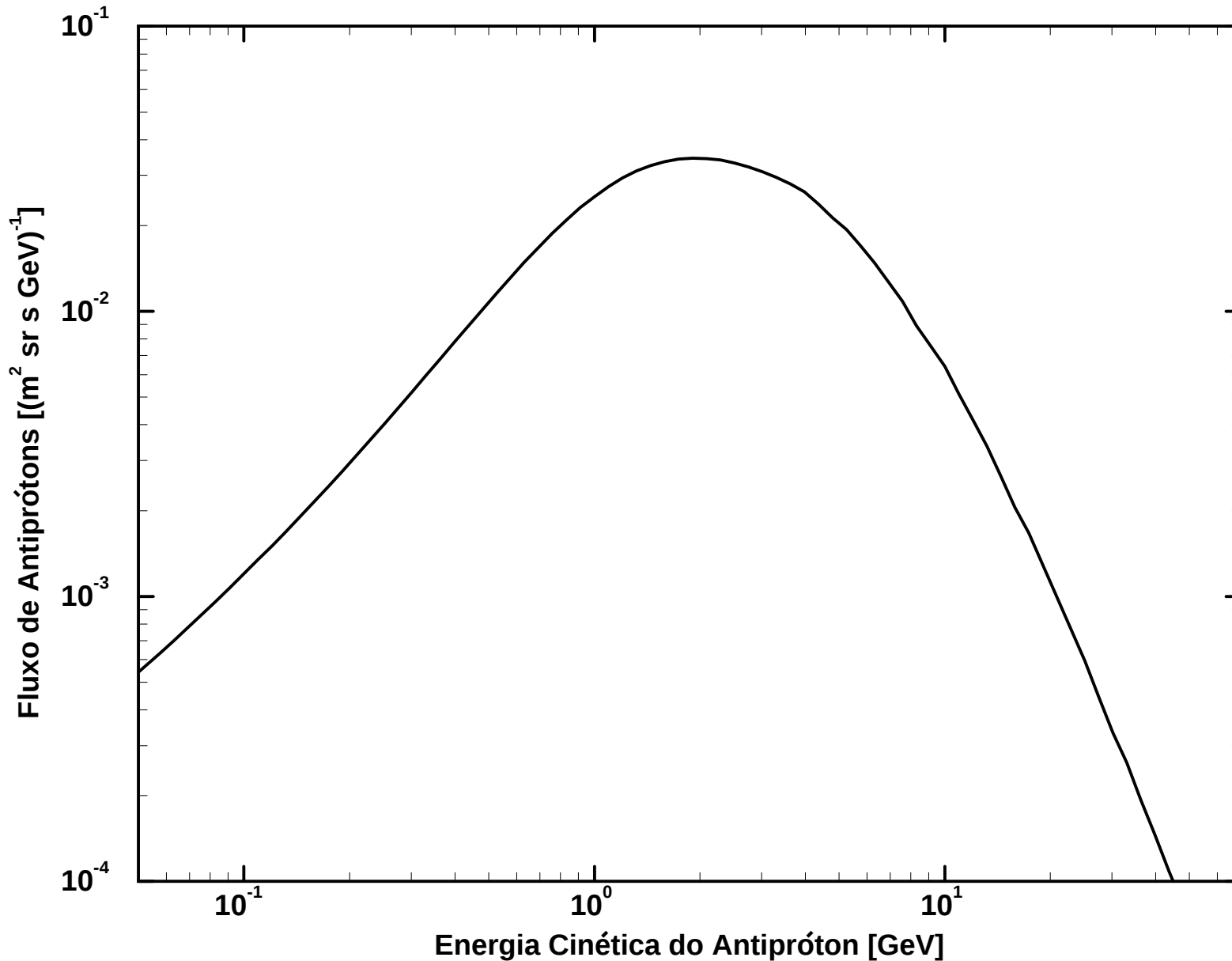
$$A = 7.03 \times 10^3 \text{ (m}^2 \text{ sr s GeV)}^{-1}$$

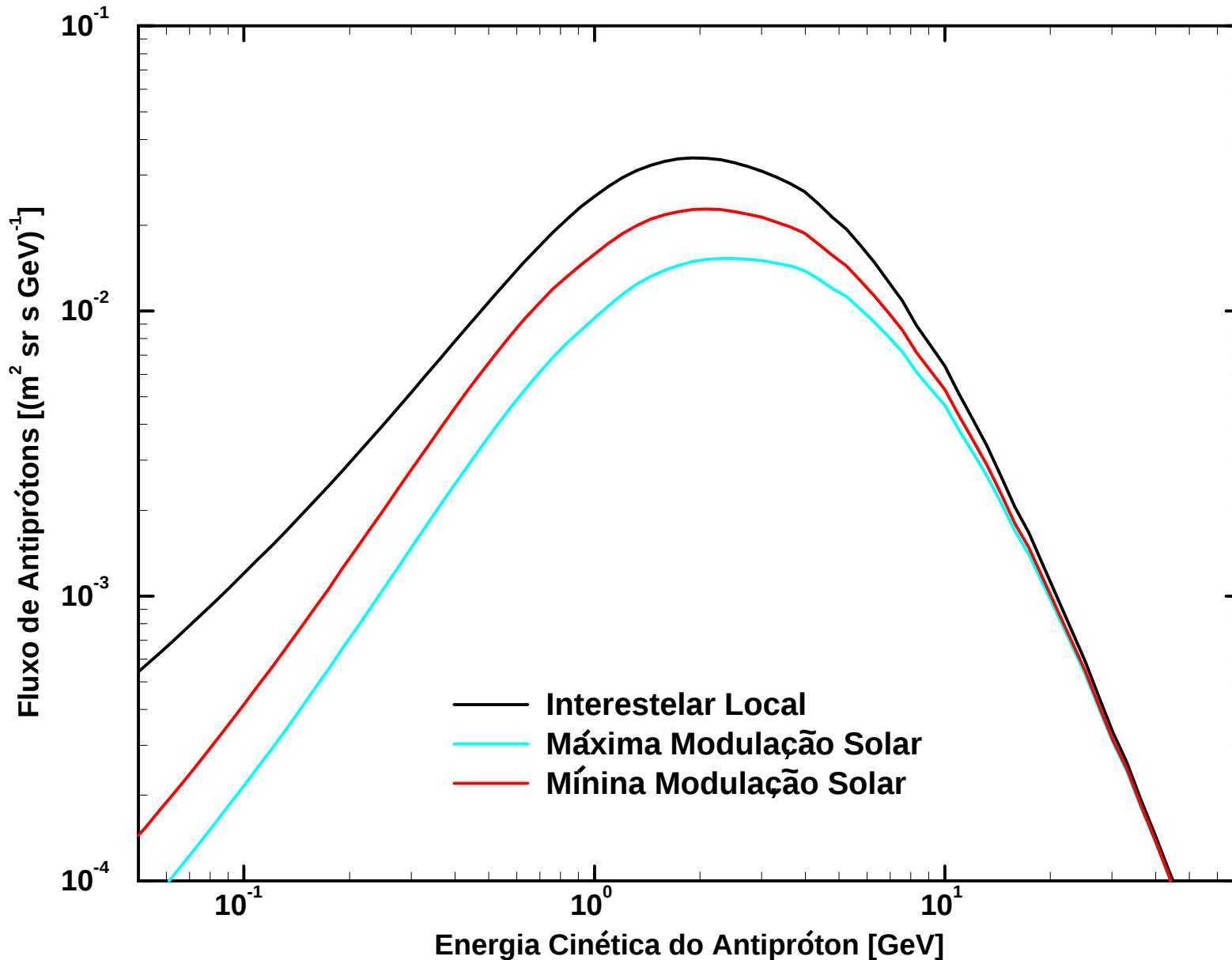
$$\alpha = 2.69$$

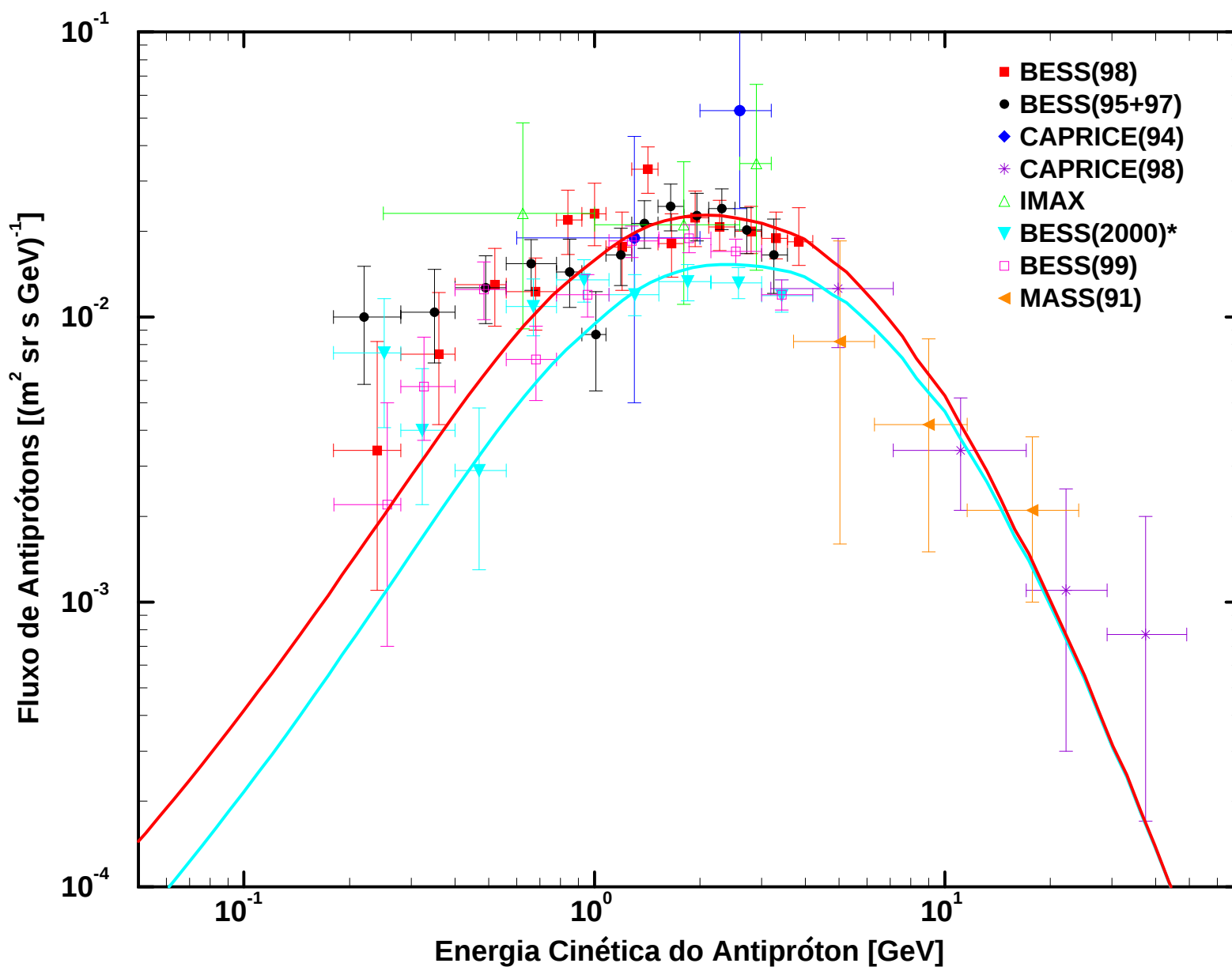


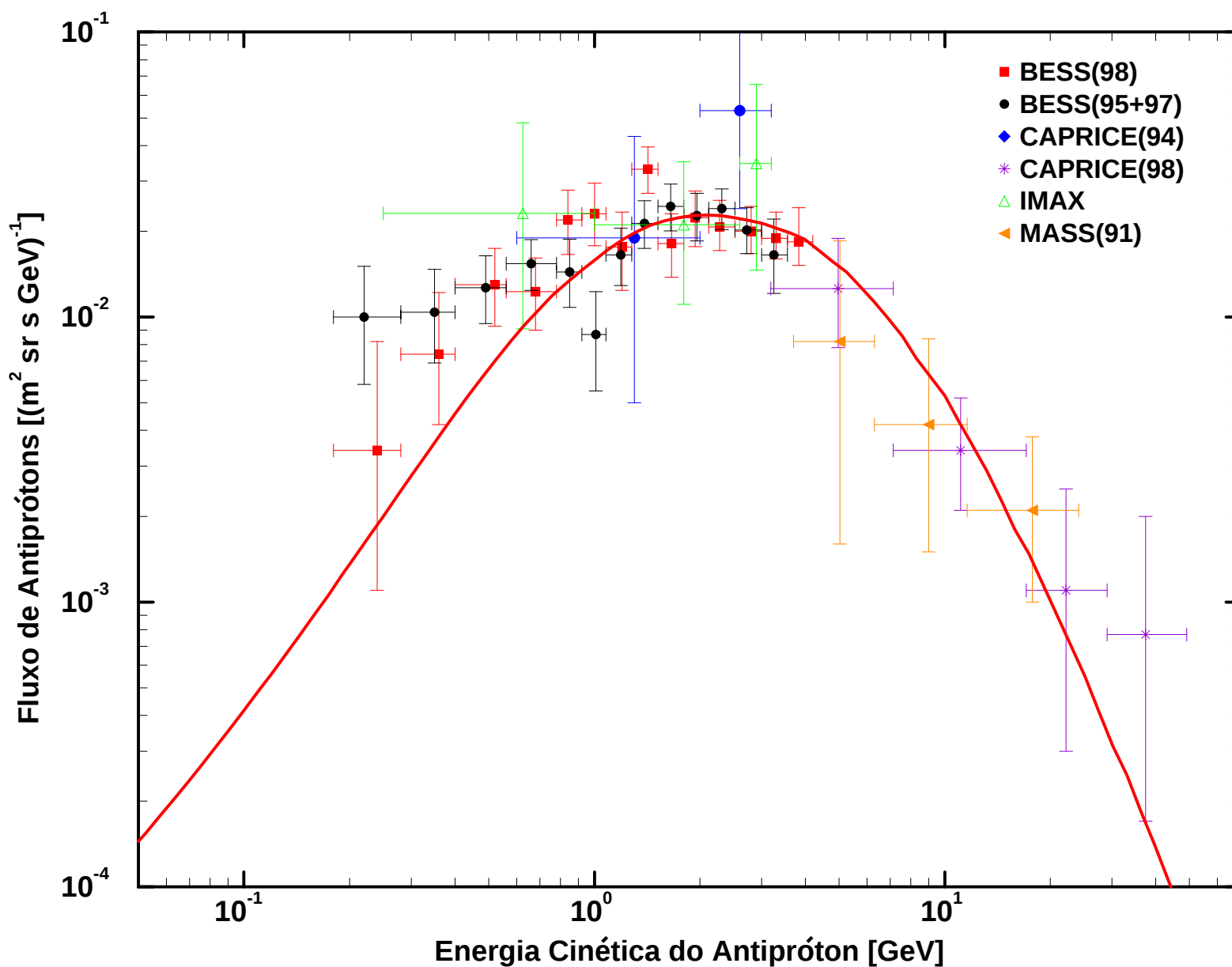


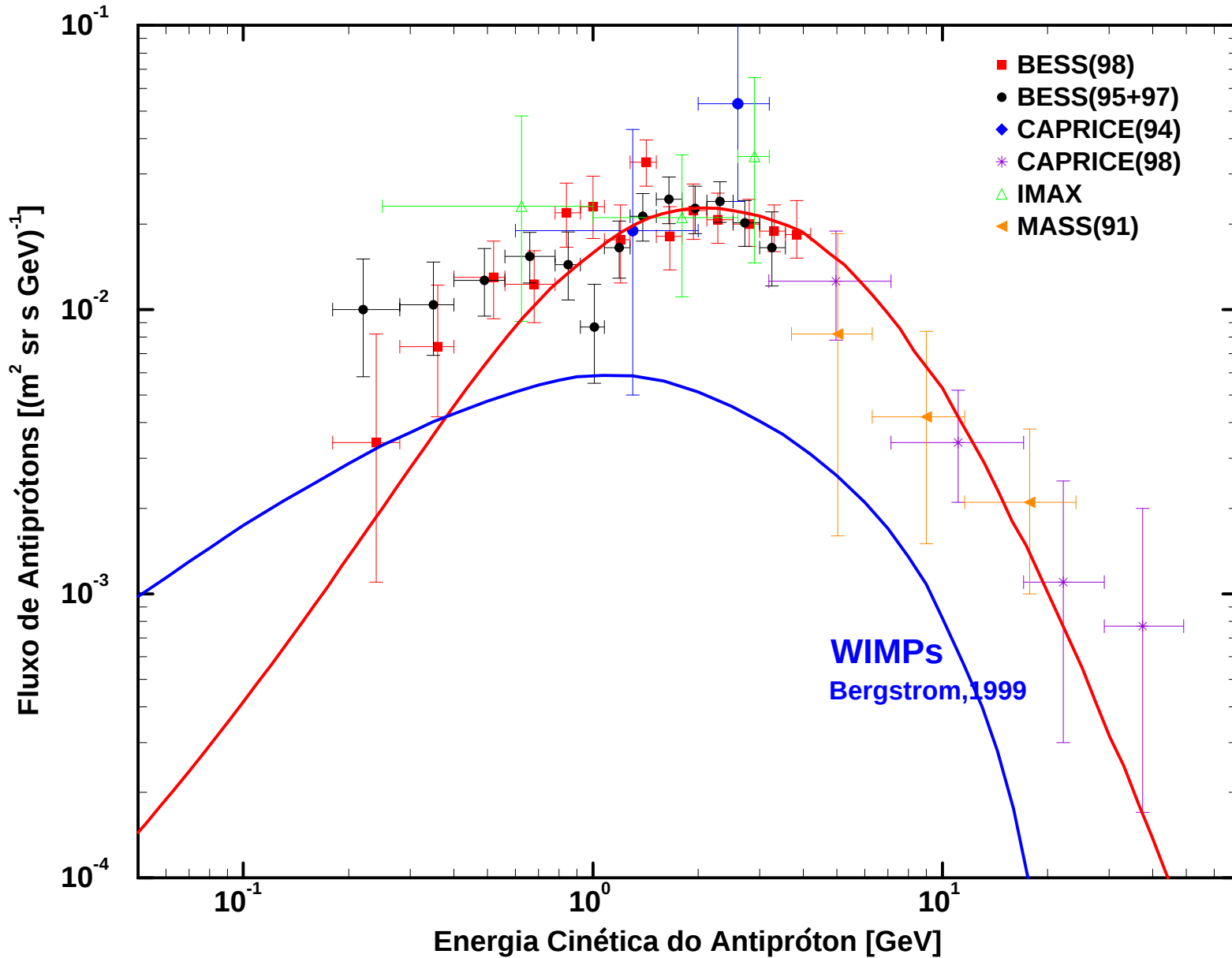


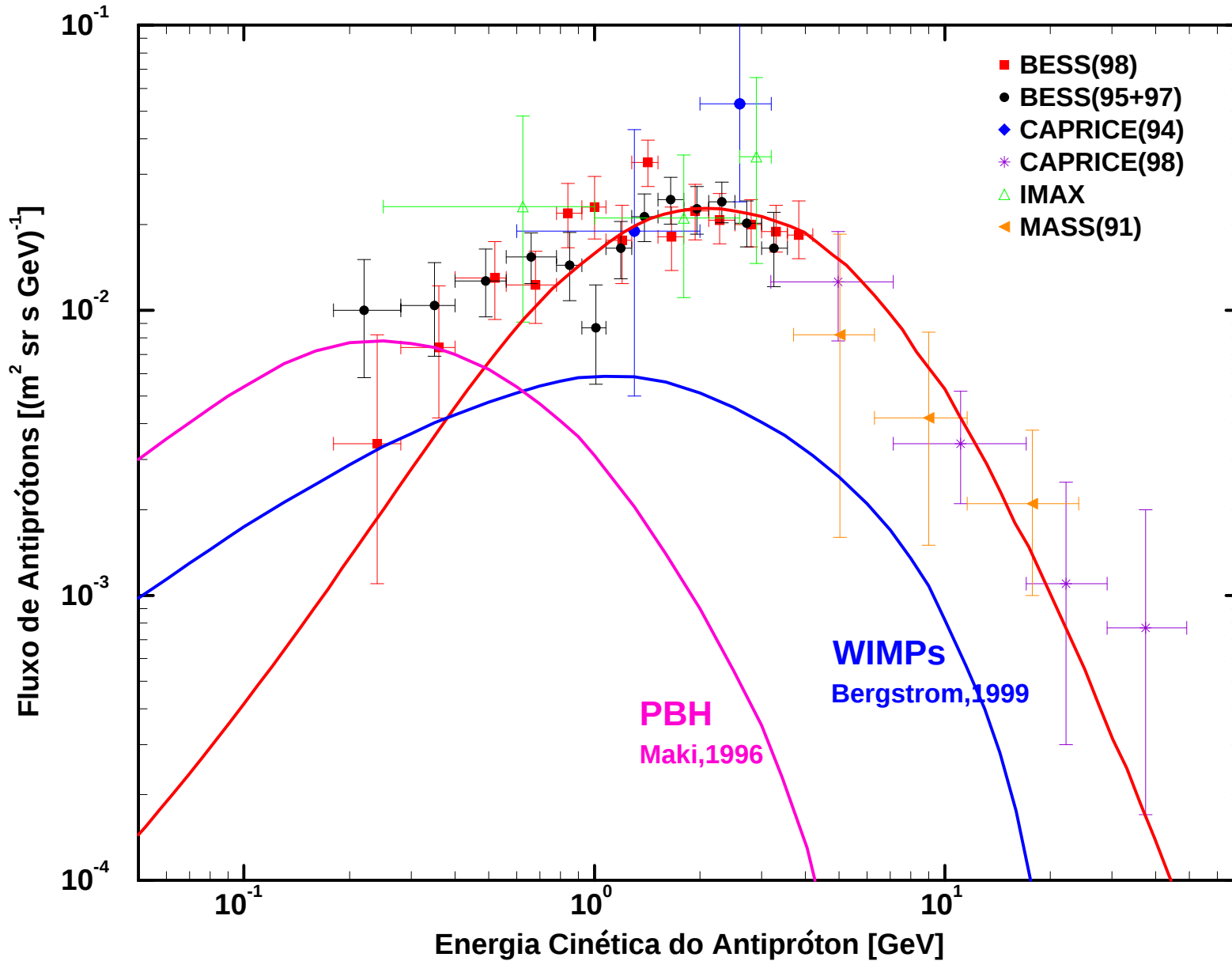






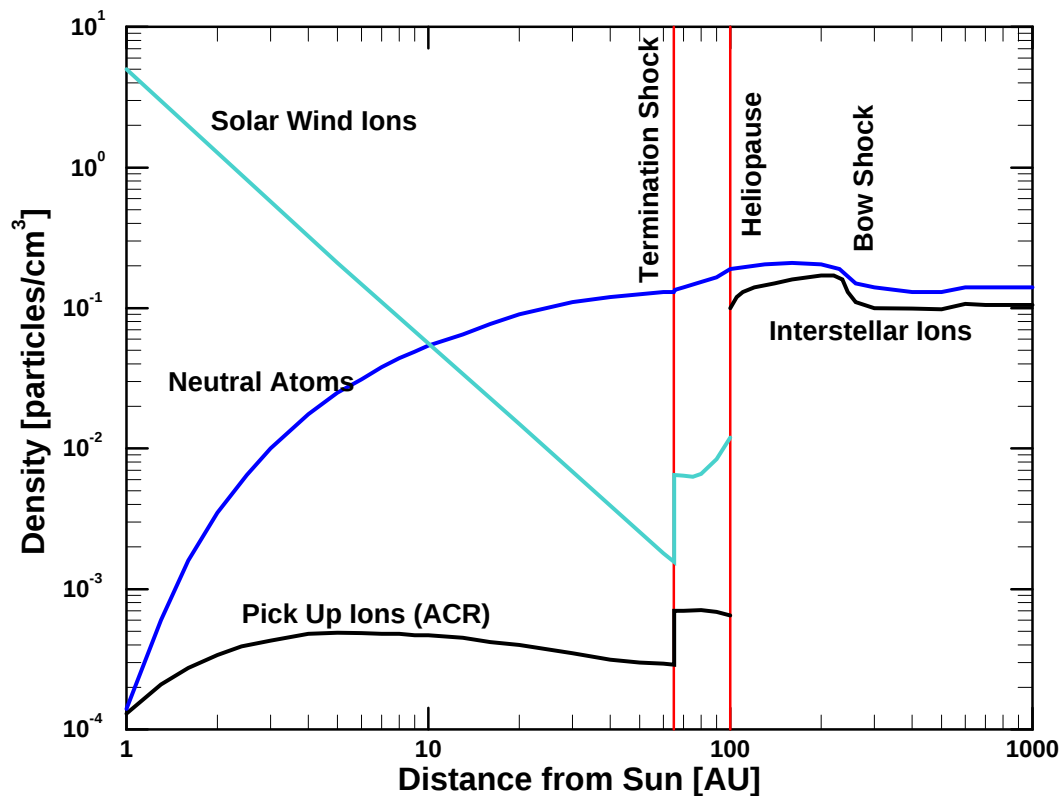




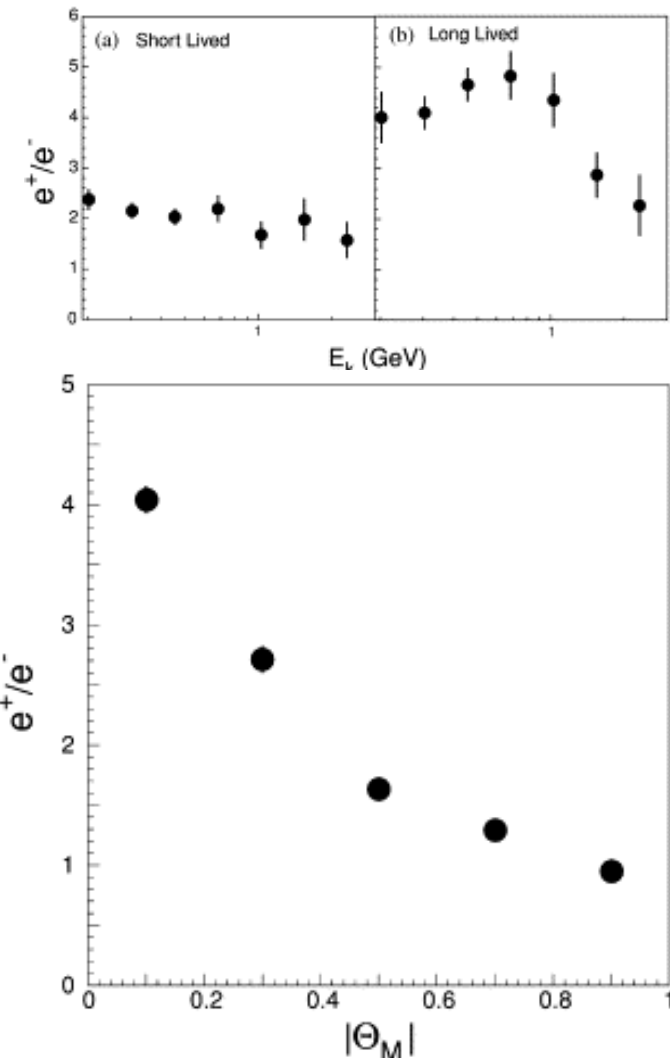


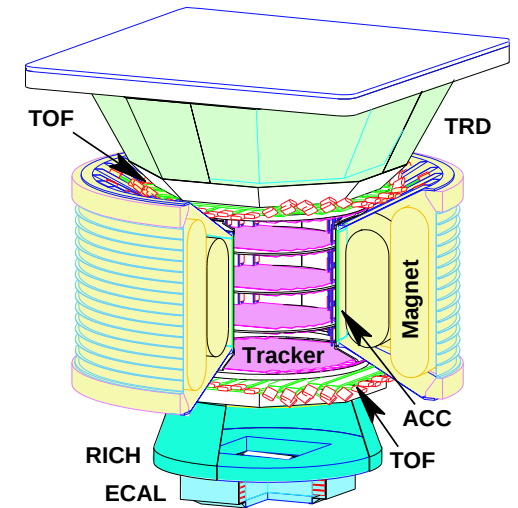
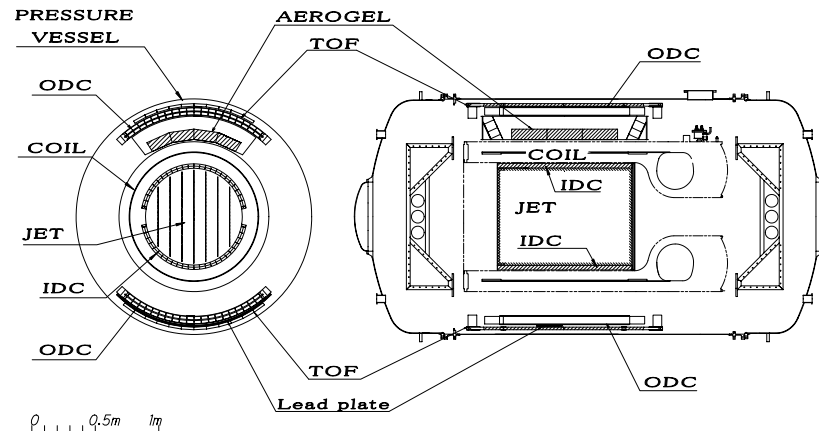
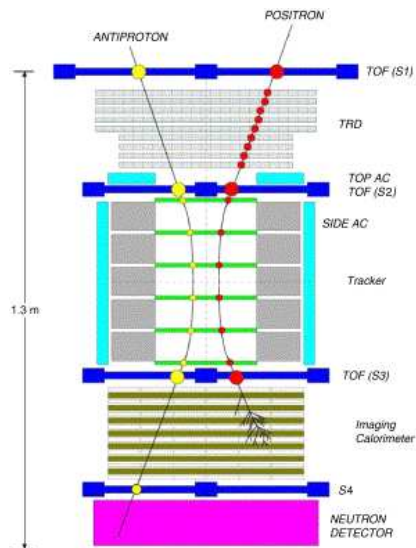
re-aceleração no choque terminal? antiprótons na magnetosfera?

ACR, Zanck et al., 1999



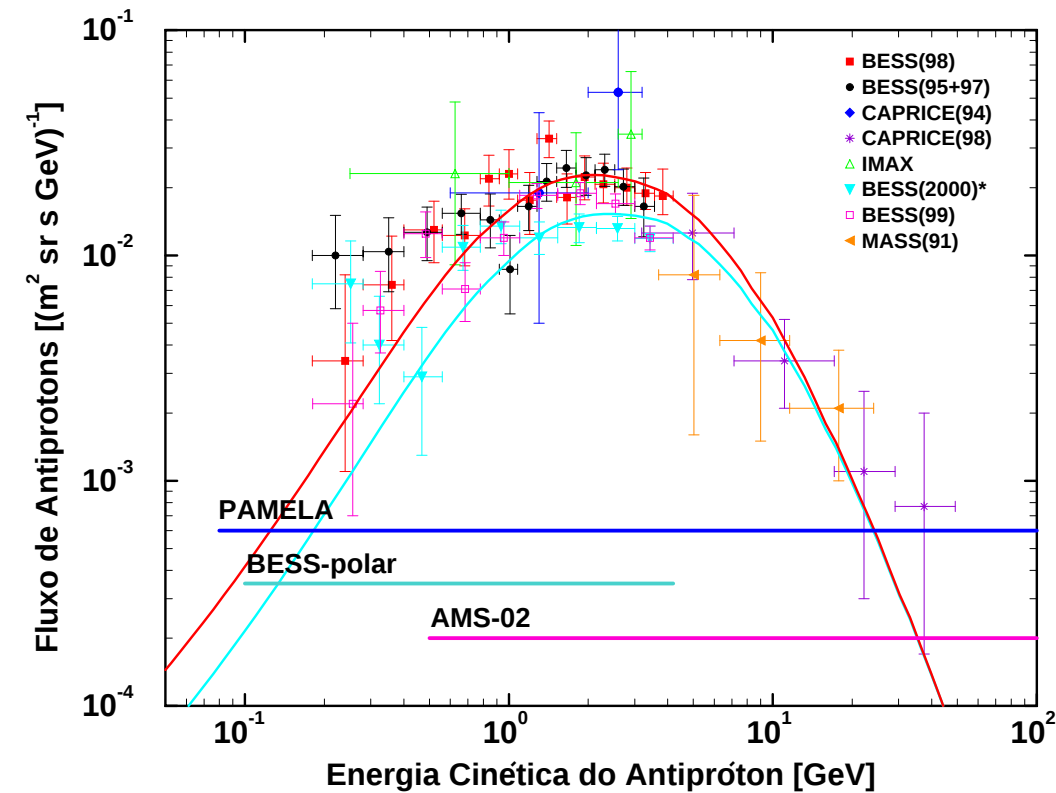
pósitrons, AMS-01, 320-390 km, 1998



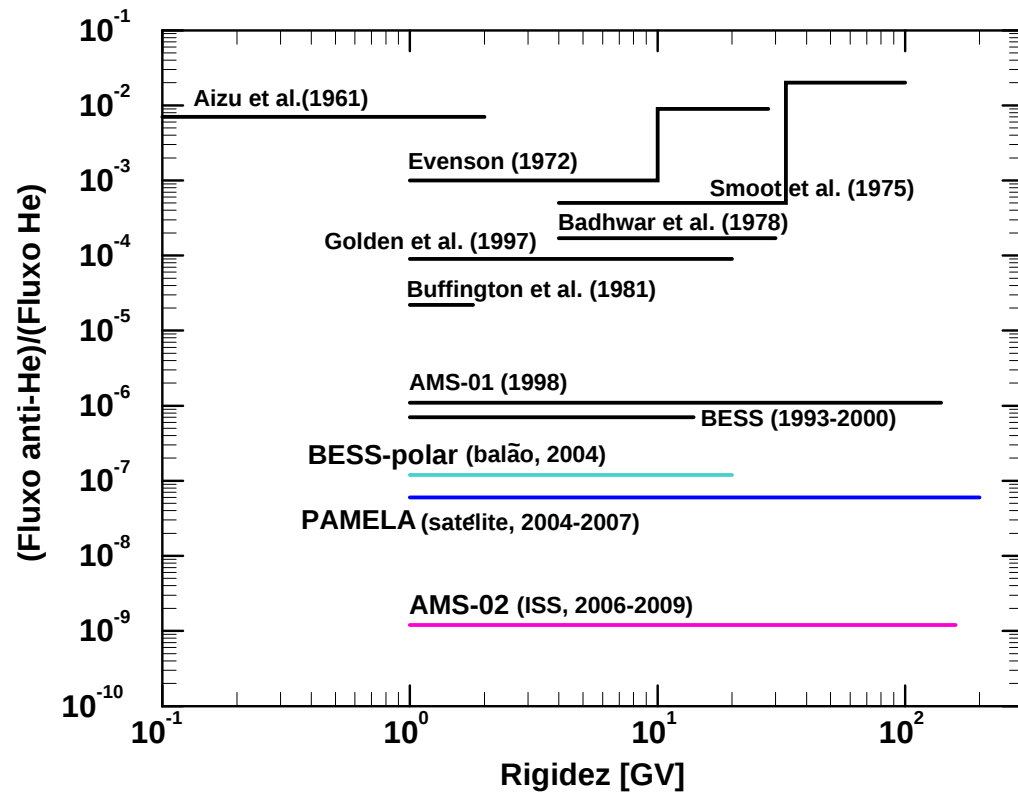


Projeto	PAMELA	BESS-polar	AMS-02
veículo	satélite	BLD	ISS
tempo	3 anos	10-20 dias	3-5 anos
altitude	300-600 Km	37 Km (5 g/cm^2)	320-390 Km
órbita	70.4°	$> 70^\circ$ latitude sul	51.7°
aceptancia	$0.0021 \text{ m}^2 \text{ sr}$	$0.3 \text{ m}^2 \text{ sr}$	$0.3 \text{ m}^2 \text{ sr}$
$\bar{p}$ energia	0.08-190 GeV	0.1-4.2 GeV	0.5-300 GeV
número de He	4×10^7	$(1 - 2) \times 10^7$	2×10^9
lançamento	2005	2004 (2006/2007)	2005

Antiprótons



Antihélio



obrigado.....