

研究简报

宇宙空间的次级反质子流强的计算

覃克宇

(中国科学院高能物理研究所)

摘要

利用最近的实验结果,计算了宇宙线与星际物质碰撞产生的反质子流强.把这计算结果与 Golden 等人的实验结果比较指出:在宇宙空间中很可能存在原初反质子.

一、序言

宇宙线与星际物质碰撞产生的反质子,称为次级反质子.前几年,有人计算过这种反质子的流强^[1-3].他们的计算都是假设宇宙线穿过的星际物质为常数5克/厘米².近几年,天体物理实验进一步证实了宇宙线穿过的星际物质并不是常数,而是随着宇宙线能量的增大而减少^[4].因此,有必要用最近的实验结果计算宇宙线与星际物质碰撞产生的反质子流强.

一直到1979年6月,Golden等人才第一次探测到宇宙空间中存在的反质子^[5].把他们的实验结果与此计算结果比较,表明:在宇宙空间中很可能存在原初反质子.

二、宇宙线与星际物质碰撞产生的次级反质子的流强

计算产生的次级反质子流强的实验依据如下:

1. 加速器 p-p 碰撞产生反质子 \bar{p} 的单举反应:

$$p + p \rightarrow \bar{p} + X, \quad (1)$$

实验规律如图1所示^[6].

2. 产生反质子的不变截面 $Ed^3\sigma/dp^3$ 随横向动量 p_T 的变化可表为^[2]:

$$Ed^3\sigma/dp^3 = g(y)e^{-bp_T}. \quad (2)$$

3. 初级宇宙线穿过星际物质的平均厚度 $L(E')$ 与初能 E' 的关系为^[4]:

$$L(E') = (7.2 \pm 1.2)(E' - m)^{-(0.30 \pm 0.06)} \text{克/厘米}^2 \quad (3)$$

这儿 E' 是宇宙线质子的总能量, m 是质子的质量, 皆用 GeV 量度 (采用 $\hbar = c = 1$ 单位)

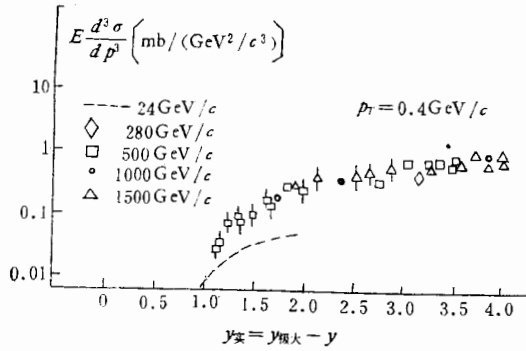


图1 在各种ISR能量上(和实验室动量24GeV/c处), $p + p \rightarrow \bar{p} + \chi$ 的不变单举截面 $E d^3 \sigma / d p^3$ 的实验结果(图上标出的是实验室动量).

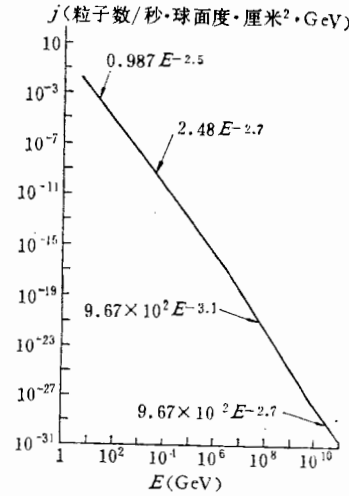


图2 初级宇宙线质子的微分能谱(参考表1).

制).

4. 初级宇宙线谱可表示为:

$$j(E') = \eta E'^{-(\gamma+2)}, \tag{4}$$

上式中的参数 η 与 γ 列于表1中,并在图2中画出这个微分能谱.

在(2)式中, y 是产生的反质子 \bar{p} 在实验室坐标系中的快度,定义为:

$$y = \frac{1}{2} \ln [(E + p_L)/(E - p_L)]. \tag{5}$$

上式中, p_L 和 E 分别表示产生反质子 \bar{p} 在实验室坐标系中的纵向动量和总能量.

表1 原初宇宙线质子微分能谱(4)的参数 η 和 γ

E' (GeV) 的范围	5-100 ⁽⁷⁾	100-3x10 ⁶ ⁽⁸⁾	3x10 ⁶ -10 ¹⁰ ⁽⁹⁾	10 ¹⁰ 以上 ⁽¹⁰⁾
η (粒子数/秒 · 球面度 · 厘米 ² · GeV)	0.987	2.48	9.67x10 ²	9.67x10 ⁻²
γ	1.5	1.7	2.1	1.7

积分(2)式得:

$$\frac{d\sigma}{dy} = \left(\frac{2\pi}{b^2}\right) g(y). \tag{6}$$

由实验结果参数化 $g(y)$, 有^[2]:

$$g(y) = A_1 \exp[-A_2/y^\alpha], \tag{7}$$

当入射质子能量 $E' < 50\text{GeV}$ 时, $A_1 = 3.3$ 毫巴/GeV², $A_2 = 4.7$, $\alpha = 1.1$; 当 $E' \geq 50\text{GeV}$ 时, $A_1 = 6.8$ 毫巴/GeV², $A_2 = 5.2$, $\alpha = 1.6$.

用参考(2)的方法,得出宇宙线与星际物质碰撞产生次级反质子的流强 $j_{\bar{p}}(E)$ 为:

在上式
((p_T)^2 -
向动量:
产生

用:
列于表

从
可近似

(
在这个

宇
之比 α (

$\alpha(E) \equiv$

=

19;
12.5GV.
了与之

在相同

$$j_{\bar{p}}(E) = \frac{28.8N_0K}{W(e^y - e^{-y})A_H} \left(\frac{2\pi}{b^2}\right) \times \left\{ \int_{y'=y_{\min}}^{2y} \eta \left(\frac{m}{2}\right)^{-(\gamma+0.30)} (e^{y'} + e^{-y'} - 2)^{-0.30} g(y' - y) e^{-\gamma y'} dy' + \int_{y'=2y}^{\infty} \eta \left(\frac{m}{2}\right)^{-(\gamma+0.30)} (e^{y'} + e^{-y'} - 2)^{-0.30} g(y) e^{-\gamma y'} dy' \right\}, \quad (8)$$

在上式中, N_0 是阿伏伽德罗常数, $K = 10^{-27}$ 是从毫巴变换到厘米²的变换因子, $W = (\langle p_T \rangle^2 + m^2)^{1/2}$, $m = 0.938\text{GeV}$ 是核子的质量, $\langle p_T \rangle = 0.5\text{GeV}/c$ 是产生反质子的平均横向动量, $b = 2/\langle p_T \rangle$, A_H 是氢的克原子量。

产生反质子能量大于 E 的积分能谱可写为:

$$J_{\bar{p}}(>E) = \int_E^{\infty} j_{\bar{p}}(E) dE. \quad (9)$$

用实验给出的结果,对 (8) 式进行数值计算,将计算结果代入 (9) 式计算。计算结果列于表 2 中,并在图 3 中画出了产生反质子的微分能谱和积分能谱。

三、计算结果,与实验比较及其讨论

(4) 从数值计算结果可看出,在 $20 \leq E \leq 3 \times 10^5\text{GeV}$ 能区中,产生反质子的微分流强可近似表示为:

$$j_{\bar{p}}(E) \simeq 4.0 \times 10^{-4} E^{-3.0} \quad (10)$$

(粒子数/秒·球面度·厘米²·GeV).

(5) 在这个能区中,产生反质子的积分流强为:

$$J_{\bar{p}}(>E) \simeq 2.0 \times 10^{-4} E^{-2.0} \quad (11)$$

(粒子数/秒·球面度·厘米²).

宇宙线与星际物质碰撞产生的反质子与原初质子之比 $\alpha(E)$ 为:

$$\alpha(E) = \frac{j_{\bar{p}}(E)}{j_p(E)} = \begin{cases} 4.0 \times 10^{-4} E^{-0.5}, & 20 \leq E \leq 100\text{GeV}, \\ 1.6 \times 10^{-4} E^{-0.3}, & 100 < E \leq 3 \times 10^6\text{GeV}. \end{cases} \quad (12)$$

(6) 1979 年 6 月 Golden 等人探测的反质子在 5.6 到 12.5GeV/c 的刚度区,相应于 5.68 到 12.5GeV 能区。为

了与之比较,计算这一区间中产生的反质子的积分流强 $\Delta J_{\bar{p}}$, 为:

$$\Delta J_{\bar{p}} = \int_{E_1=5.68}^{E_2=12.5} j_{\bar{p}}(E) dE = 3.0 \times 10^{-6} \text{ (粒子数/秒·球面度·厘米}^2\text{)}. \quad (13)$$

在相同能区中,积分 (4) 式,得原质子的积分流强 ΔJ_p 为:

$$\Delta J_p = \int_{E_1=5.68}^{E_2=12.5} j_p(E') dE' = 3.4 \times 10^{-2}. \quad (14)$$

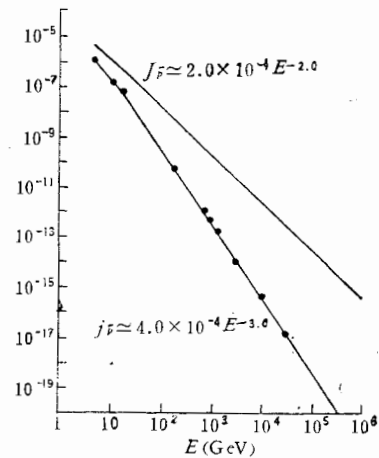


图 3 在宇宙空间中,碰撞产生的次级反质子的微分流强 $j_{\bar{p}}$ (粒子数/秒·球面度·厘米²·GeV) 和积分流强 $J_{\bar{p}}$ (粒子数/秒·球面度·厘米²).

(10)
以上
 7×10^{-2}
1.7

(7)
 $E' \geq 50\text{GeV}$
 $j_{\bar{p}}(E)$ 为:

表2 宇宙线与星际物质碰撞产生的次级反质子的微分流强 $j_{\bar{p}}$ (粒子数/秒·球面度·厘米²·GeV) 和积分流强 $J_{\bar{p}}$ (粒子数/秒·球面度·厘米²)

$E(\text{GeV})$	5.68	7.8	10	12.5	20	40	70	100
$j_{\bar{p}}$	9.8×10^{-7}	5.2×10^{-7}	3.0×10^{-7}	1.8×10^{-7}	5.0×10^{-8}	6.4×10^{-9}	1.2×10^{-9}	4.0×10^{-10}
$J_{\bar{p}}$	4.2×10^{-6}	2.7×10^{-6}	1.8×10^{-6}	1.2×10^{-6}	5.1×10^{-7}	1.3×10^{-7}	4.1×10^{-8}	2.0×10^{-8}
$E(\text{GeV})$	200	700	1000	1344	3000	10000	30000	300000
$j_{\bar{p}}$	5.1×10^{-11}	1.2×10^{-12}	4.0×10^{-13}	1.7×10^{-13}	1.4×10^{-14}	4.1×10^{-16}	1.4×10^{-17}	1.3×10^{-20}
$J_{\bar{p}}$	5.0×10^{-9}	4.1×10^{-10}	2.0×10^{-10}	1.1×10^{-10}	2.2×10^{-11}	2.0×10^{-12}	2.2×10^{-13}	2.2×10^{-13}

在 5.68—12.5GeV 能区中,产生反质子对原初质子之比 $\alpha_{\bar{p}}$ 为:

$$\alpha_{\bar{p}} = \frac{\Delta J_{\bar{p}}}{\Delta J_p} = 8.8 \times 10^{-5}. \quad (15)$$

由于计算中依据的实验数据有误差: (a) 初级宇宙线穿过的星际物质的平均厚度 $L(E')$, 用 (3) 式拟合有 30% 的相对误差^[4]; (b) 初级宇宙线谱用 (4) 式表示时也有 30% 的相对误差^[7]; (c) $g(y)$ 用 (7) 式表示时也带来 20%—30% 的相对误差^[2]. 因此,在 (15) 式中含有约 60% 的相对误差. (15) 式应写为

$$\alpha_{\bar{p}} = 8.8(1 \pm 60\%) \times 10^{-5}. \quad (16)$$

Golden 等人^[5]的实验结果指出 $\alpha_{\text{总}} = \bar{p}/p = (5.2 \pm 1.5) \times 10^{-4}$. 于是有

$$\frac{\alpha_{\bar{p}}}{\alpha_{\text{总}}} = 0.17 \pm 0.11. \quad (17)$$

因为

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{初}} &= \alpha_{\text{总}} - \alpha_{\bar{p}}, \\ \frac{\alpha_{\text{初}}}{\alpha_{\text{总}}} &= 1 - \frac{\alpha_{\bar{p}}}{\alpha_{\text{总}}}, \end{aligned} \quad (18)$$

由 (17) 和 (18) 两式可以看出: 在 5.6GV/c—12.5GV/c 刚度区间中,宇宙线与星际物质碰撞产生的次级反质子最多只占总反质子的百分之二十八,而原初反质子要占总反质子的百分之七十二以上.

在计算产生的次级反质子过程中,我们略去了产生的反质子与星际物质碰撞而湮灭的几率,也略去了初级宇宙线与星际物质碰撞产生的质子对 $\alpha_{\bar{p}}$ 的影响. 这些因素对 $\alpha_{\bar{p}}$ 的影响很小. 进一步考虑这些因素, $\alpha_{\bar{p}}$ 变得稍小一点. 所以,并不影响我们得出结论: 根据计算推测,在宇宙空间很可能存在原初反质子.

参 考 文 献

- [1] T. K. Gaisser and R. H. Maurer, *Phys. Rev. Lett.*, **30** (1973), 1264.
- [2] S. N. Ganguli and B. V. Sreekantan, *J. Phys. A.*, **9** (1976), 311.
- [3] G. D. Badhwar et al., *Astrophys. Space Sci.*, **37** (1975), 283.
- [4] J. A. Lezniak and W. R. Webber, *Astrophys. J.*, **223** (1978), 676.
- [5] R. L. Golden et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979), 1196.
- [6] M. Antinucci et al., *Lett. Nuovo Cimento*, **6** (1973), 121.
- [7] A. M. Hillas, *Phys. Reports*, **20C** (1975), 59.

[8]

[9]

[10]

CA

U
duced
result
quite

- [8] A. K. Das and A. K. De, *J. Phys. G.*, **5** (1979), 445.
 [9] A. A. Watson, 第十四届国际宇宙线会议文集, **12**(1975), 4019.
 [10] D. D. Krasilnikov, 第十四届国际宇宙线会议文集, **12** (1975), 4347.

CALCULATION OF THE SECONDARY ANTIPROTON FLUX IN COSMIC SPACE

QIN KE-YU

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Using recent experimental results, we calculate the antiproton flux which is produced by the collisions of cosmic rays with the interstellar matter. This calculated result is compared with the experimental result of Golden et al. It is shown that it is quite possible that primary antiproton exists in cosmic space.

15)

度
也有
在

(16)

(17)

(18)

物质
反质

湮灭
对 α_p
结论: