

银河宇宙线的起源和初级质子谱

徐 春 娴

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文采用无界银河系的爆发点源各向同性弥散的模型研究了初级质子的输运方程。用加速器实验得到的 $P-P$ 碰撞截面的最新资料和一个合理的扩散系数,得到了该方程的解,进而讨论了该解的一些特点以及诸多类似点源对地球附近质子谱的可能贡献。该模型所预期的质子谱能较好地说明实验结果。

一、引 言

宇宙线研究已有 70 多年的历史,虽然人们做了大量的关于初级宇宙线粒子的辨认、能谱测量以及各向异性度的观测和分析^[1-7],但对于这些观测结果的解释至今仍无肯定的答案。

宇宙线的起源、加速和传播确实是一个很复杂的问题。因为观测到的宇宙线成份和能谱是由产生谱及传播过程共同决定的;而传播又受星际介质和磁场分布的影响。可是关于介质和磁场分布,人们并不很清楚。作为这方面的理论,它必须能解释各种粒子的来源和能量来源、加速机制及传播特点,还要能说明一些主要的观测特征,例如:初级宇宙线的能谱形状在 $10^{10}-10^{15}$ eV 基本上是单一幂律谱,在大约 10^{15} eV 左右能谱有拐折;在 $10^{11}-10^{14}$ eV 间近于常数的低各向异性以及在约 10^{15} eV 以上一阶各向异性幅度随能量变化的 $E^{0.5}$ 律;还要对宇宙线各种成份的相对丰度及绝对通量做出解释。遗憾的是直到今天人们没能找到满意的模型能同时解决上述问题。

一般认为,能量在 $10-10^9$ GeV 的宇宙线是银河系内起源的,而能量高于 10^9 GeV 的宇宙线则是银河系外起源的。人们也普遍接受这样的观点:宇宙线是以弥散的形式传播的,各种不同的机制导出扩散系数对能量的不同的依赖关系;但通常扩散总是使原初发射谱变陡。而宇宙线的低各向异性为银河宇宙线的扩散模型提供了依据。

对于宇宙线能谱的拐折,基本上有两类解释。一类是在漏箱模型下,假设不同核的逃逸起始刚度不同,重核比轻核的起始刚度高,但流量较低,因此形成了观测上的能谱拐折^[8];另一种是在封闭银河模型下,假设拐折是由于主要源的刚度截止造成的^[9],后者也可以看成是逃逸时间为无穷的漏箱模型。本文从研究一个宇宙线点源的输运方程入手、用无界银河下的点源模型来研究这一问题,所以基本上属于第二类。与同类工作相比^[10-11],

本工作在各项的取舍和参数的取值上都做了新的尝试、或者是用了新的实验资料。最后，得到了方程的非定态解，进而用此解来讨论宇宙线观测能谱的特点。

二、质子的输运方程及其解

本文认为 $10-10^9$ GeV 的初级宇宙线主要由银河系内分立点源的瞬态爆发所提供。它们在爆发时抛射出大量粒子，并以该点源为中心球对称弥散，在地球附近观测到的宇宙线是若干类似点源的总贡献。这些宇宙线粒子在空间形成了一个宇宙线晕，它可以远大于银盘厚度。

对于单个点源产生的宇宙线空间密度分布仍有下式成立^[12]：

$$\frac{\partial N}{\partial t} - D \nabla^2 N + \frac{\partial}{\partial E}(NW) + BN = Q. \quad (1)$$

这里 $N(E, \mathbf{r}, t)$ 是 t 时刻 $\mathbf{r}$ 处的粒子数密度，是能量的函数，有时也称作能态函数。 D 是扩散系数。第三项是由于能量损失造成的粒子数密度的变化率， W 是能量损失率， $W = \frac{dE}{dt}$ 。第四项是负源，这是由于作用或逃逸引起的， Q 为源项。

对于宇宙线质子做下述近似处理：

(1) 忽略能量损失。

(2) 负源仅仅由于质子的非弹作用造成， $B = cn_H \sigma_{inc}$ 。这里 c 为光速， n_H 为空间氢的数密度， σ_{inc} 是 $P-P$ 非弹作用截面。从加速器实验得知^[13]，从 $10-1.5 \times 10^{16}$ GeV $P-P$ 的总作用截面如图 1 所示；且 $\sigma_{inc} \simeq 0.8 \sigma_{Tot}$ ，因此，利用这些资料拟合出的 $P-P$ 非弹性截面表达式为

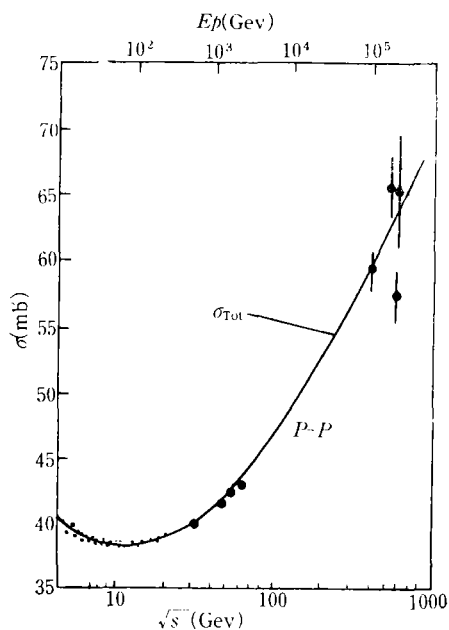
$$\sigma_{inc} = A' + B' \ln E_p + C' (\ln E_p)^2 (\text{mb}). \quad (2)$$

这里 E_p 为实验室系入射质子的总能量， $A' = 35.3$ ， $B' = -2.2$ ， $C' = 0.3$ 。因此得到

$$B(E) = 3 \times 10^{-17} [35.3 - 2.2 \ln E + 0.3 (\ln E)^2] \quad (1/s). \quad (3)$$

这里已取 $n_H \simeq 1/\text{cm}^3$ ，并把关系式(3)外推到更高能区来用。

(3) 相应于不同的扩散机制，导出的扩散系数表达式很不相同，甚至会有量级的差别。近年来，人们倾向于宇宙线与磁流波的共振散射模型。就是说质子或电子在磁场中的回旋运动可以与磁流波起耦合作用，当两者频率接近时，会发生共振散射。扩散或散射则是这种耦合所导致的荷电粒子的各向同性化。适合于磁流波模散射参量的表达式已在



$\sqrt{s}$ 为质心系总能量， E_p 是入射质子能量，曲线是 $(\lg s)^2$ 形式的拟合曲线

图 1 加速器实验得到的 $P-P$ 总截面随能量的变化

Fig. 1 The data of total cross-section of $P-P$ from accelerator experiments. Where $\sqrt{s}$ is the total energy in CMS. E_p is the energy of injected proton. The Curve is fitted by $(\lg s)^2$

Melrose 的文章中^[14]给出,张和祺等人^[15]做了进一步假设,推导出扩散系数 D 可以表达为

$$D = \frac{1}{12\pi} \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{\bar{B}}{e} \frac{mc^2}{\Lambda \epsilon_B}.$$

上式可改写为

$$D = \frac{Pc}{12\pi e \Lambda \epsilon_B} \frac{\bar{B}c}{\epsilon_B}. \quad (4)$$

若取基本平均场强 $\bar{B} = 3\mu\text{G}$, 扰动能量密度为平均场的百分之一, 即 $\Lambda = 0.01$, 而基本场的能量密度 $\epsilon_B \simeq 0.3 \text{ eV/cm}^3$, 于是

$$D = AP = 1.67 \times 10^{15} P_{\text{eV}/c} (\text{cm}^2/\text{s}). \quad (5')$$

这里 P 是以 $\left(\frac{\text{eV}}{c}\right)$ 为单位的粒子动量, 对于能量大于 10GeV 的质子, $Pc \simeq E$, 所以 D 也可以表达为

$$D = 1.67 \times 10^{15} E (\text{cm}^2/\text{s}). \quad (5)$$

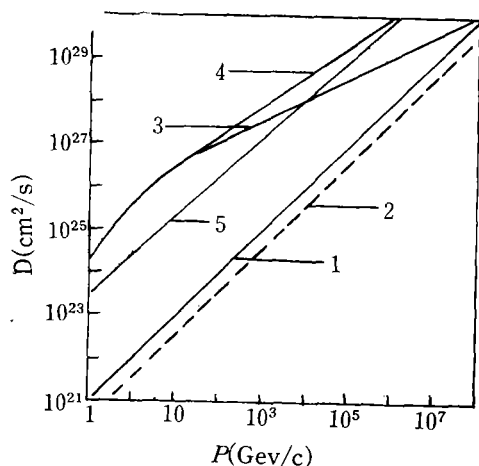
实际上,宇宙线与磁流波的散射,它的扩散系数一般有如下形式 $D = AE^{\frac{1+\nu}{2}}$, 一般用 $D \propto E^{0.5}$. 但最近 HEAO-3 实验表明幂指数有上升的倾向, 因此有人认为 $D \propto E^{0.7}$ 能较好地解释实验结果^[16]. 图 2 给出关于扩散系数不同取值的比较, 可以看到本文的取值在高能时更接近于指数为 0.7 的结果.

(4) 位于 r_0 的一个点源, 在 t_0 时刻抛出一幂律分布的粒子, 其数目分布为 $N_0 E^{-\Gamma}$, 即 $Q = N_0 E^{-\Gamma} \delta(\mathbf{r}_0) \delta(t_0)$.

在上述四条假设下, 对方程(1)做变换: $N = \mathcal{N} e^{-Bt}$, 便得到方程(1)的解:

$$N(E, \mathbf{r}, t) = \frac{N_0 E^{-\Gamma}}{(4\pi D t)^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{r^2}{4Dt} - Bt \right\}. \quad (6)$$

这里 t 是点源从爆发到观测的时间, 也就是超新星遗迹的年龄, r 是以点源为原点的径向距离. 虽然, 从数学上说, (6)式对任何 r 、 t 值都是有意义的, 但考虑到信息传递的因果律, 只有距地球距离 r 与其年龄之比 $\left(\frac{r}{t}\right) < c$ 的点源, 才对地球附近观测到的宇宙线有贡献.



直线 1、2 是取回旋半径 r_g 作为平均自由程下限时的扩散系数, $D = \frac{cr_g}{3}$. 直线 1 相应于 $B = 3\mu\text{G}$, 直线 2 $B = 10\mu\text{G}$. 曲线 3 $D = 10^{26} \beta P^{0.5}$, 曲线 4 $D = 10^{26} \beta P^{0.7}$, 直线 5 $D = 1.67 \times 10^{15} P$.

图 2 扩散系数 D 各种不同取值的比较

Fig. 2 The diffusion coefficient compared to every variety of the assumed diffusion coefficient. Line 1 and line 2 are for $D = \frac{cr_g}{3}$, Where r_g is Larmor radius. Line 1 corresponds to $B = 3\mu\text{G}$ and line 2 $B = 10\mu\text{G}$. Curve 3 for $D = 10^{26} \beta P^{0.5}$, Curve 4 for $D = 10^{26} \beta P^{0.7}$ and line 5 for $D = 1.67 \times 10^{15} P$ adopted in the paper.

三、讨 论

由(6)式可以得到以下结论:单独一个点源造成的宇宙线空间密度分布是一个两维的高斯分布,其原点在点源所在位置.随时间的推移,高斯宽度随 $t^{1/2}$ 上升,也随 $E^{1/2}$ 加宽.

在地球附近的观察者,能较早地接收到某一点源发射的高能粒子,而在晚些时候才能收到该源的低能粒子.在 t 时刻、距点源 r 处的观察者所能接收到的该源发射的宇宙线的最小能量(或叫拐点能量)满足下式:

$$\begin{aligned} \frac{r^2}{4AEt} &= (\Gamma + 1.5) + cn_H t (B' + 2C' \ln E) \times 10^{-27} \\ &= (\Gamma + 1.5) + 3t(-2.2 + 0.6 \ln E) \times 10^{-17}. \end{aligned} \quad (7)$$

表 1 给出距地球 1kpc 之内的超新星遗迹的年龄,距离及拐点能量.

表 1 距地球 1kpc 之内的 11 个超新星遗迹的年龄、距离和拐点能量

源 名	年龄 $t(10^4\text{y})$	距离 $r(\text{kpc})$	拐点能 $E_{re}(\text{eV})$
CTB 72	3.2	0.7	2 10^{15}
Cyg. Loop	3.5	0.6	10^{15}
HB 21	2.3	0.8	3 10^{15}
CTB 1	4.7	0.9	2 10^{15}
CTB 13	3.2	0.6	10^{15}
HB 9	2.7	0.8	2 10^{15}
S 149	4.3	0.7	10^{15}
Monoceros	4.6	0.6	7 10^{14}
Vela	1.1	0.4	10^{15}
Lupus	3.8	0.4	4 10^{14}
Loop 1	3.0	0.05	10^{15}

对于年龄极大的宇宙线点源,它们的宇宙线粒子数密度分布的高斯宽度趋于无穷,也就是在空间上是趋于均匀分布,而核作用导致的衰减又使它的通量很低.因此这类源对宇宙线的贡献是均匀分布的、流量较小的宇宙线背景.另外还有一类源,虽然它们的距离满足 $r < ct$,但它们距地球已是相当远了,观测流量是由其分布的高斯尾巴所贡献,因此流量小且在观测点附近的粒子密度空间梯度不大.上述两类点源的贡献可粗略地用一个背景宇宙线密度 N_B 来代替.

这样一来就可以认为地球附近的质子是附近少数点源与背景宇宙线的综合贡献:

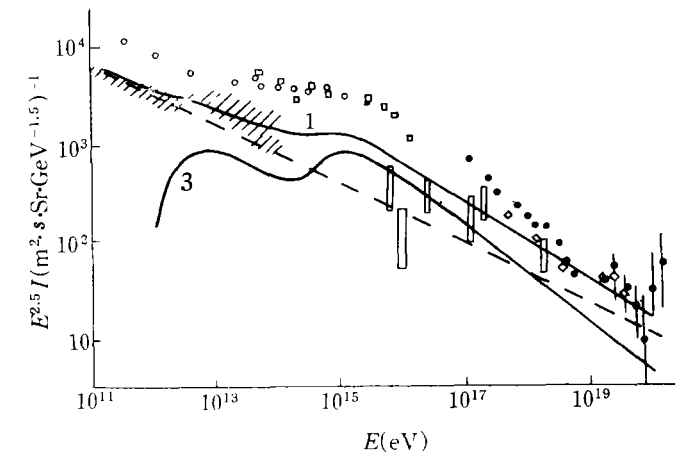
$$N = N_B + N_D,$$

这里 N_D 为少数点源所贡献的部分,即 $N_D = \sum_i N_i$. N_i 的表达式见(6),它代表第 i 个点源的贡献,其中 r 、 t 代入各点源的具体值(见表 1).另外在弥散传播的假设下有

$$N = \frac{4\pi I}{c},$$

因此可以算出由 11 个点源所给出的宇宙线强度 I_D . 宇宙线的总强度为 $I = I_D + I_B$. 图 3 是预期谱与观测谱的比较. 这里拟合参数取 $\Gamma = 1.5$, $N_0 = 4 \times 10^7$, 相应于爆发

时的能量释放约 10^{49} erg, $I_B = 2.5 \times 10^4 E_{\text{GeV}}^{-2.8} (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Sr} \cdot \text{GeV})^{-1}$.



○ Proton-4, □ Tien Shan, ● Haverah Park, ◇ Yakutsk,
曲线 1 是 11 个超新星所贡献的强度总和, 虚线代表背景强度, 曲线 2 表示预期的原初质子微分谱。斜线区域和 □ 是质子的实验结果, 其余是混有其它核类的实验资料。

图 3 初级宇宙线微分谱

Fig. 3 The differential spectrum of primary cosmic rays
Curve 1 is the sum of intensities contributed by eleven supernovae. The dashed line represents the background I_B . Curve 2 is the predicted differential spectrum of primary protons. Shaded area and sign □ are the data of protons, the rest are somewhat contaminated by other nuclei.

拟合曲线是对质子做的, 对于 10^{18} eV 左右的实验点被认为全部是质子。拟合参数 Γ 、 N_0 和 I_B 的选取虽带有一定任意性, 但物理上的要求却给它以严格的限制。例如, 点源拐点能的存在, 使它们对 10^{12} eV 以下的能谱几乎无贡献, 因此 10^{11} — 10^{12} eV 间的实验资料就大体上限定了 I_B , 考虑到对高能端能谱的影响, 只是使它有了个有限的变化范围。类似地, N_0 、 Γ 的选取一方面要能在数学上拟合实验点、同时在物理上应与超新星爆发的能量释放不矛盾, 也应该与已知物理过程所能产生的谱形不矛盾。

在此特别要强调的是扩散系数 D 的具体形式并不很影响我们的讨论, 因为作为方程 (1) 解的 (6) 式在形式上对 $D \propto E^\delta$ 的表达是一样的。为拟合最终实验结果, δ 的不同将主要影响参数 Γ , 也涉及 N_0 值, 但 Γ 从 1.5 变到 0.5 并不产生不可解释的矛盾, 因为原初产生谱并无直接观测量, 况且产生一个 $\propto E^{-2}$ 的幂谱也并不令人费解。

由 (6) 式和多点源贡献假设可以得知, 初级质子强度的变化时标 $\tau > \frac{1}{cn_H \sigma_{\text{inc}}} \simeq 10^7$

年, 因此在 $\sim 10^6$ 年时间内宇宙线不会有超过 1/3 的强度变化, 这与观测事实相吻合。在作者的另一篇文章将看到该模型也能对观测到的各向异性做出解释。

简而言之, 本文把许多超新星爆发作为能源和粒子源, 把带电粒子与磁流波的共振散射作为弥散机制, 在无界银河系里的一点 (地球) 来研究宇宙线的绝对强度、能谱形状及其

随时间变化的规律。在一些合理的假设和参数选取后发现,该模型能解释高能宇宙线的观察特征:在 $\sim 10^{14}\text{eV}$ 以下近似为单幂律,在 $\sim 10^{15}\text{eV}$ 附近能谱有拐折,在 10^{15}eV 以上为更陡的幂律谱。它也能说明宇宙线在较长时间内的不变性,还能解释宇宙线的各向异性问题。

在本工作进行中得到李惕碛、黄无量同志的帮助以及张和祺同志的启发,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Hillas, A. M., *Proc. 16th ICRC*, Vol. 6, p. 7, 1979.
- [2] Grigorov, N. L. et al., *Proc. 12th ICRC*, Vol. 5, p. 1746, 1971.
- [3] Greisen, K., *Progress in Cosmic Ray Physics* (Ed. by J. G. Wilson, Vol. 3, p. 1, 1956).
- [4] Nikolskii, S. I., *Proc. 5th Interamerican Seminar on Cosmic Rays*, Vol. 2, p. 1, 1962.
- [5] Antonov, R. A. and I. P. Ivanenko, *Proc. 14th ICRC*, Vol. 8, p. 2708, 1975.
- [6] La Pointe et al., *Can. J. Phys.*, Vol. 46, p. S68, 1968.
- [7] Cunningham, G. et al., *Ap. J. Letter*, Vol. 236, p. L71, 1980.
- [8] Hillas, A. M., *Proc. of the Cosmic Ray Workshop* (Ed. by T. K. Gaisser), University of Utah, p. 1, 1983.
- [9] Peters, B. and N. Westergaard, *Astrophys. Space Sci.*, Vol. 48, p. 21, 1977.
- [10] Forman, M. A. et al., *17th ICRC*, Vol. 9, p. 238, 1981.
- [11] Ramaty, R. et al., *Phys. Rev. Letters*, Vol. 24, p. 913, 1970.
- [12] Osborne, J. L., *Origin of Cosmic Rays* (Ed. by J. L. Osborne and A. W. Wolfendale), D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, p. 203, 1974.
- [13] Battiston, R. et al., *CERN/EP*, No. 111, 1982.
- [14] Melrose, D. B., *Solar Phys.* Vol. 37, p. 353, 1970.
- [15] 张和祺等, *空间科学学报*, 第 1 卷, 第 15 页, 1981.
- [16] Ormes, J. F., *18th ICRC*, Vol. 2, p. 187, 1983.

The Origin of Galactic Protons and the Spectrum of Primary Protons

Xu Chun-xian

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

Abstract

By using an isotropic diffusion statistic model with explosive discrete sources in an infinite galaxy, the transport equation for galactic cosmic ray proton is investigated. The non-steady state solution of the equation is obtained utilizing the very recent data of cross-section of $P-P$ interaction and a reasonable diffusion coefficient. Then some features of the solution and the possible contribution to the proton spectrum from lots of this kind of sources are discussed. The expected spectrum can account for the experimental data quite well.