

超高能初级宇宙线的各向异性

徐春娴

(中国科学院高能物理研究所)

摘要

本文研究宇宙线粒子的各向异性度. 在无界银河点源模型下, 推导出一次谱各向异性度的表达式, 然后用所得公式考查附近 11 个超新星遗迹 (SNR) 各自造成的各向异性度并研究合成的各向异性度随能量的变化趋势. 计算结果表明, 该模型能说明在 $5 \times 10^{15} \text{eV}$ 以上各向异性度的 $E^{0.5}$ 律. Compton-Getting 效应将产生一附加的各向异性, 它是能量无关的并矢量迭加到点源合成的各向异性度上去. 显然, 现在测到的 $10^{11} - 10^{14} \text{eV}$ 之间的各向异性是由 Compton-Getting 效应贡献的. 取该能段实验测得的微分谱指数 $\gamma = 2.67$, 得到地球相对于宇宙线背景的运动速度为 $\sim 35 \text{km/s}$.

一、引言

宇宙线的组成成份、能谱以及各向异性是宇宙线物理研究的基本的、重要的课题. 因为这些问题总是联系到宇宙线的传播、起源等根本性问题. 但在相当长的时间内, 关于这几个问题的实验资料是不完全的, 甚至是含混的. 例如, 关于高能宇宙线能谱的许多实验资料是不能鉴别其成份的; 而关于各种宇宙线核的单独能谱无论从核的种类上或是从能量范围来看都是很不完全的. 至于各向异性度甚至有相反的实验

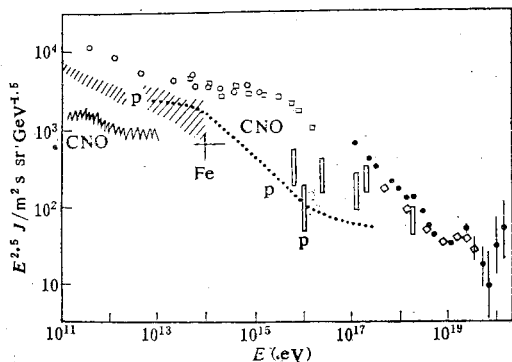


图 1 宇宙线能谱的实验资料. 10^{13}eV 以上是通过 EAS 实验并在一定作用模型下推导出来的. 而在这能量以下是通过卫星上的量能器实验测得的. 在 $10^{14} - 10^{12} \text{eV}$ 之间有个重叠测量区域.

- Proton-4
- Tien Shan
- Haverah park
- ◇ Yakutsk.

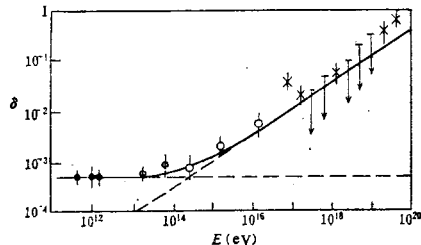


图 2 宇宙线各向异性度实验结果. 全部由 EAS 实验分析得到

报导^[1-2]。但经过多年的实验努力,情况在不断好转,趋于一致的实验结果正在出现。现在已经有一些关于初级质子,铁核等的实验资料^[3-6],图1给出所得资料的一部分。从广延空气簇射(EAS)实验获得了一些各向异性度的资料^[7-9],这些资料显示出,在 5×10^{15} eV以上各向异性度随 $E^{0.5}$ 上升的规律,见图2。

下面我们仅就一次谐波的各向异性度进行一些讨论。

二、各向异性的表达

实验上,初级宇宙线一次谐波的各向异性度表达为:

$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

其中 I_{\max} 是在最大通量方向上,初级宇宙线的强度, I_{\min} 则是在最小通量方向上,宇宙线的强度。由此可见,各向异性涉及到某个特殊方向,可以用一矢量 δ 来表示。在这种情况下强度 I 可以写成^[14]

$$I = I_0(1 + \delta \cos\theta) \quad (2)$$

这里 θ 是以 δ 为极轴的球坐标的极角, I_0 是方向无关的强度。

在扩散模型下,通量 F 能写成下式,

$$F = \int I \cdot d\Omega = D|\nabla N| \quad (3)$$

I 是方向强度, $d\Omega$ 为某一方向上的立体角元, D 是扩散系数而 ∇N 则是粒子空间密度的梯度。

由等式(2)和(3)可以得到

$$\delta = \frac{3D}{4\pi I_0} |\nabla N| \quad (4)$$

另一方面,我们又知道,粒子的空间密度与该点的强度有下述关系。

$$N = \int \frac{I}{V} d\Omega \quad (5)$$

这里 V 是宇宙线粒子的速度。假设 V 是局域方向无关的,则有

$$N = \frac{1}{V} \int I d\Omega = \frac{4\pi I_0}{V} \quad (6)$$

把(6)式代入(4)式得到

$$\delta = \frac{3D}{VN} |\nabla N| \quad (7)$$

由(7)式可以看到,只要粒子的空间密度是非均匀的(即 $\nabla N \neq 0$)就会造成各向异性,其方向是沿其梯度方向。反之,从各向异性度的研究也可以推知宇宙线的空间分布,从而找到宇宙线起源的线索。以上各式是导出一次谐波各向异性度的通常做法^[10]。

由于通常人们相信宇宙线粒子主要是由质子构成的(其实只在 10^{15} — 10^{16} eV是尚待实验进一步证实),所以这里按质子的情况进行讨论。这里还认为,地球附近的初级宇宙线是由银河系内大量的分立点源所贡献。

据文 [11], 一个暴发点源的非定态密度分布有下述形式,

$$N_i = \frac{N_0 E^{-\Gamma}}{(4\pi D t_i)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{r_i^2}{4D t_i} - B(E)t_i\right\} \quad (8)$$

其中 Γ 是原初发射微分谱指数, r_i 是以点源 i 为中心的径向距离, D 是扩散系数, 在初级近似下取 $D = 1.66 \times 10^{15} E_{\text{eV}}(\text{cm}^2 \text{s}^{-1})$. 而 $1/B(E)$ 相应于 p-p 非弹作用寿命, $B(E) = 3 \times 10^{-17} [35.3 - 2.2 \ln E + 0.3(\ln E)^2](\text{s}^{-1})$.

由 (8) 式可知, 粒子密度是以源为中心的二维高斯分布, 所以在空间某一点(例如在地球上)的观测密度 N 可以分成两部分

$$N = N' + N'' \quad (9)$$

其中 N' 是“近处”点源所贡献, 它在观测点附近的梯度变化是不可忽略的. 而 N'' 是“远处”点源所贡献, 它在观测点附近的梯度近似为零 ($\nabla N \simeq 0$). 又因为 N_i 的高斯宽度正比于 $E^{1/2}$, 所以能量越高, 应作为“近处”点源考虑的范围就越大.

据 (7) 和 (8) 式, 得到只有一个“近处”点源时造成的各向异性度

$$\delta_i = \left(\frac{3r_i}{2ct_i}\right) \frac{N_i}{N} \mathbf{r}_{0i} \quad (10)$$

而由若干个“近处”点源造成的各向异性度则是,

$$\delta = \sum_i \left(\frac{3r_i}{2ct_i}\right) \frac{N_i}{N} \mathbf{r}_{0i} \quad (11)$$

这里 \mathbf{r}_{0i} 是从地球指向第 i 个点源的单位向量.

若地球相对于宇宙线背景运动, 则会出现一附加的各向异性度 δ_c , 称做 Compton-Getting 各向异性, 它是与能量无关的, 只与微分谱指数 γ 和运动速度有关^[12],

$$\delta_c = (\gamma + 2) \frac{\mathbf{V}_E}{C} \quad (12)$$

这里 \mathbf{V}_E 是地球的运动速度. 因此最后合成的各向异性度可以写为,

$$\delta_F = \delta_c + \sum_i \left(\frac{3r_i}{2ct_i}\right) \frac{N_i}{N} \mathbf{r}_{0i} \quad (13)$$

三、讨论及结论

由于缺乏全部超新星遗迹的有关空间分布和时间分布的资料, 所以在这一阶段, 我们用所得公式定性地讨论一些问题, 也用它来详细讨论个别超新星造成的各向异性度, 以便从中找到解决问题的线索.

1. 上述讨论不包括所有 $\left(\frac{r_i}{ct_i}\right) > 1$ 的宇宙线点源, 因为这些点源不满足信息传递的因果律. 就是说这些点源的粒子尚未到达观测点, 对该点的空间密度和各向异性度均无贡献.

2. 由实验得知宇宙线的强度大体为

$$\text{当 } E \leq 5 \times 10^6 \text{ GeV, } I = 2.8 \times 10^4 E_{\text{GeV}}^{-2.66} (\text{m}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{Sr} \cdot \text{GeV})^{-1}$$

$$E > 5 \times 10^6 \text{ GeV, } I = 2.6 \times 10^7 E_{\text{GeV}}^{-3.1} (\text{m}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{Sr} \cdot \text{GeV})^{-1}$$

与此相应的空间密度为

$$E \leq 5 \times 10^6 \text{ GeV}, N = \frac{4\pi I}{C} = 1.2 \times 10^{-3} E_{\text{GeV}}^{-2.66} (\text{m}^{-3})$$

$$E > 5 \times 10^6 \text{ GeV} \quad N = 1.1 E_{\text{GeV}}^{-3.1} (\text{m}^{-3})$$

分别把地球附近 11 个超新星遗迹^[13]的 r_i, t_i, N_i 以及观测值 N 代入 (10) 中, 并取 $N_0 = 1.32 \times 10^{15}, \Gamma = 1.2$ (相应于一个点源发射 $0-10^{19} \text{ eV}$ 粒子的总能量约为 $\sim 10^{50} \text{ erg}$), 计算结果见图 3. 由图 3 可以看到对于能量低于 10^{14} eV , 每个点源造成的各向异性度均低于 6×10^{-5} , 而在 $5 \times 10^{15} \text{ eV}$ 以上, 各 δ_i 都近似随 $E^{0.4}$ 上升. 因此不管 δ_i 的方向如何分

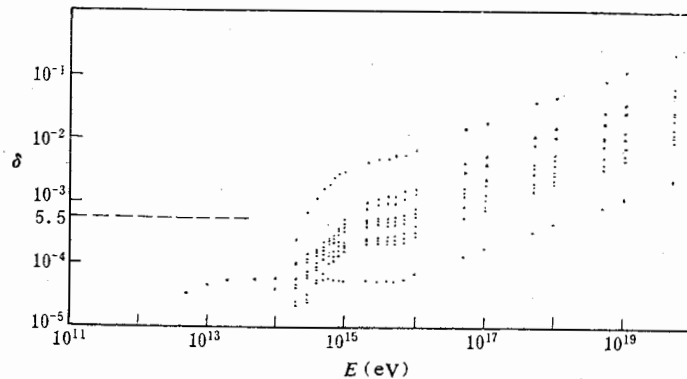


图3 按(10)式计算的 11 个 SNR 各自造成的各向异性度 $|\delta_i|$, 图中水平虚线是实验测得的该能段各向异性大小.

布, 总有 $\sum_i \delta_i$ 随 $E^{0.4}$ 上升的规律.

3. 由实验资料知道, 在 $10^{11}-10^{14} \text{ eV}$ 间的各向异性度是 $\sim 5.5 \times 10^{-4}$, 且是能量无关的. 因此我们能得出这样的结论: 低于 10^{14} eV , Compton-Getting 各向异性度是主要的, $\delta_F \simeq \delta_c = 5.5 \times 10^{-4}$. 又据 (12) 式, 以及在这能段 $r = 2.66$, 所以得到地球相对于宇宙线背景的速度约为 $\sim 35 \text{ km/s}$.

表 1 离太阳系 1KPC 之内的 SNR

源名	年龄 t_i (10^4 年)	距离 r_i (KPC)
CTB 72	3.2	0.7
Cyg. Loop	3.5	0.6
HB 21	2.3	0.8
CTB 1	4.7	0.9
CTB 13	3.2	0.6
HB 9	2.7	0.8
S 149	4.3	0.7
Monoceros	4.6	0.6
Vela	1.1	0.4
Lupus	3.8	0.4
Loop 1	3.0	0.05

4. 据对 11 个 SNR 的计算, 似乎能量高过 $5 \times 10^{15} \text{ eV}$ 以上, 总各向异性度的方向是固

定不变的。但实际上能量越高,需要把它当作“近处”点源的数目就越多,所以最终各向异性度方向随能量还是会有些变化的。但是,如果这 11 个 SNR 已是主要源了,则方向的变化不会很大或基本不变。

作以下简单归纳:

我们用无界银河的点源模型并考虑到 Compton-Getting 效应,讨论了 10^{11} — 10^{19} eV 的宇宙线粒子的一级各向异性度。发现在 10^{14} eV 以下, Compton-Getting 各向异性度是占绝对优势的;而在 5×10^{15} eV 以上,附近 11 个 SNR 做了巨大贡献。在 10^{14} — 5×10^{15} eV 之间,是这二类各向异性度的迭加,或称为混合贡献区。该模型能较好地说明高于 10^{15} eV 以上,各向异性度随 $E^{0.5}$ 上升的趋势。

感谢李惕碛、黄无量及丁林埏同志所做的有益讨论和建议,也感谢朱清棋同志在计算中所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Efimov et al., *18th ICCR*, 2 (1983), p. 149.
- [2] L. Horton et al., *18th ICCR*, 2 (1983), p. 153.
- [3] "Proceeding of the cosmic ray workshop" University of Utah edited by T. K. Gaisser 10—14, Jan. 1983
- [4] T. H. Burnett et al., *18th ICCR*, 2(1983),p. 105.
- [5] G. Cunningham et al., *18th ICCR*, 2 (1983), p. 157 .
- [6] Stamenov. J. N et al., *18th ICCR*, 2 (1983), p. 111.
- [7] Linsley. J and Watson. A. A, *15th ICCR*, 12 (1977), p .203.
- [8] D. M. Edge et al., *J. Phys. G*, 4(1978), p. 113.
- [9] J. F. Ormes, *18th ICCR*, 2 (1983), p. 187.
- [10] V. L. Ginzberg and V. S. Ptuskin *Reviews of Modern Physics*, 46 No. 2 Part 1 (1976).
- [11] 徐春娴,空间科学学报. 5(1985), p. 123.
- [12] 徐春娴,空间科学学报, 4(1984), p253—256.
- [13] J. Nishimura et al., *16th ICCR*, 1 (1979), p. 488.
- [14] P. Kiraly et al., *Rivista Del Nuovo Cimento*, 2 (1979), p. 1.

THE ANISOTROPY OF COSMIC RAY PARTICLES IN THE ENERGY RANGE 10^{11} — 10^{19} eV

XU CHUN-XIAN

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

ABSTRACT

A study of the anisotropy of primary cosmic rays is presented. The expression of the anisotropy is derived in a model of statistical discrete sources in an infinite galaxy. Using these derived formulas, the amplitudes of the first harmonic anisotropies caused by eleven supernovae nearby the Earth are estimated individually and the trend of the resultant anisotropy is investigated. It is found that the expected results can account for the power law of $E^{0.5}$ of the anisotropy above the energy 5×10^{15} eV. The Compton-Getting effect can cause an additional anisotropy which is independent of energy and added to the resultant anisotropy of these discrete sources. It is apparent that the anisotropies available in the low energy range 10^{11} — 10^{14} eV are caused by the Compton-Getting effect. Taking the differential spectrum index $\gamma=2.67$ measured in the same energy bound we get the streaming velocity of 35 km/s with respect to the cosmic ray background.