

对 10^{14} eV 以上初级宇宙线成份的推论

经才骝 丁林堽 朱清棋 荆贵茹

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

拟合 10^{14} eV 以下初级宇宙线核成份能谱的实验数据,并将它们一直外推到发生拐折的能量.按“刚度切割模型”,适当选择拐折能量,使分成份能谱之和与总粒子谱相符,来推论 10^{14} eV 以上初级宇宙线成份.所得能谱与相互作用模型无关.

一、引 言

10^{14} eV 以上的初级宇宙线成份,对于研究超高能作用具有重要的意义,它提供了天然的高能粒子源,如果对这种粒子源的性质(成份和能谱)了解得比较清楚,则有可能对高能宇宙线粒子在大气中的相互作用特征作出较为明确的判断.同时,初级成份和能谱带着宇宙线起源、加速、传播的讯息,具有重要的天体物理意义.在这个能区,总粒子能谱已通过广延大气簇射研究作了测量.但由于技术上的困难,分成份能谱还不能直接测定.进行超高能实验的各个研究组或者事先假定某种成份来分析实验结果,判断作用机制的特点,或者事先假定某种作用机制,根据实验数据来对成份作出推论.无论哪一种作法,目前都得不到确定的实验结果.因此,对这个能区的初级成份,存在两个极端的看法:一个是,在 10^{15} eV 以上铁核占大部分;另一个是,质子仍然为主.谁是谁非,至今仍在争论.

初级宇宙线研究中有两个突出的实验事实.一个是,在 10^{14} eV 以下,不同成份的能谱随能量增加逐渐变陡.质子和轻核在较低能量就取 -2.7 的微分谱指数;而铁核则到 10^{12} eV 以上才明显变陡.这个事实可归之于扩散效应,并由传播方程的扩散项来描写.如果采用扩散长度对能量的依赖为 $E^{-0.4}$,由此推出源微分谱指数应为 -2.3 .另一个是,总粒子谱在 10^{15} — 10^{16} eV 之间变陡,出现一个“膝”,微分谱指数由 -2.7 变到 -3.0 .为了解释“膝”,有不同的理论模式,例如加速机制的改变,磁陷落的破坏(或称“刚度切割模型”),光核过程的影响等^[1].其中,比较自然又比较常用的是“刚度切割模型”,它给出不同核成份能谱的拐折点与电荷数 Z 成正比.

本工作试图根据已有的初级宇宙线实验资料(100GeV/核子以下的分成份能谱和

$<10^{17}\text{eV}$ 的总粒子谱), 在 10^{14}eV 以下按照扩散效应把拟合实验数据的成份能谱外推, 在更高的能量按“刚度切割模型”, 选择适当的拐折能量, 使成份能谱之和与总粒子谱相符, 来推论 10^{14}eV 以上的初级宇宙线成份. 和其他实验组不同, 这里作出的成份推论不依赖于强子作用的模型.

二、方法和结果

将初级宇宙线分为八组: (1) 质子 p, (2) 氦 He, (3) 轻核 L(LiBeB), (4) 中等核 M(CNO), (5) 轻重核 LH($10 \leq Z \leq 16$), (6) 中等重核 MH($17 \leq Z \leq 20$), (7) 甚重核 VH($21 \leq Z \leq 25$),

(8) 铁核 Fe. 第三组对 10^{12}eV 以上能区的总粒子流强的贡献可以忽略, 不予处理.

在 10^{14}eV 以下, P 和 He 的谱取 [2], 其他各种成份取 [4] 的原始数据作拟合. 假定各种成份的能谱在发生拐折前都保持由 [2, 4] 所拟合的形式不变. 取质子谱的拐折点在 10^{15}eV , 而其他各种成份的拐折能量则按“刚度切割模型”取为与该种成份的平均电荷数 \bar{Z} 成正比. 拐折后不同成份的微分谱指数, 都取为 -3 [8]. 若各种成份的微分谱写为如下形式:

$$\frac{dN}{dE} = KE^{-\gamma} (\text{cm}^2 \cdot \text{S} \cdot \text{Sr} \cdot \text{GeV}/\text{核})^{-1}$$

则求得每种成份在拐折前后的 k 和 γ 以及拐折点的能量, 列于表 I. E 的单位为 $\text{GeV}/\text{核}$.

由表 1, 我们计算了在几个能量上, 初级宇宙线粒子的平均质量数 $\langle A \rangle$, 列于表 2.

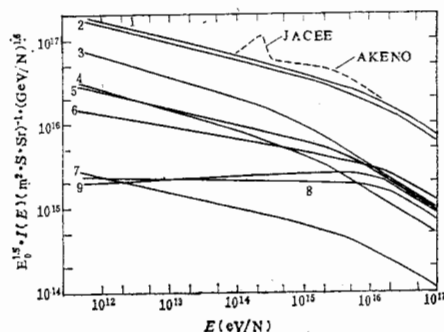


图 1 初级宇宙线积分能谱

1. 实验总粒子谱. 虚线是 JACEE 组和 AKENO 组实验. 2. 总粒子谱. 3. P 谱. 4. He 谱. 5. CNO 谱. 6. Fe 谱. 7. LH 谱. 8. MH 谱. 9. VH 谱. 2—9. 本工作推论的初级宇宙线总能谱及各种成份能谱.

表 1 不同化学成分的初级能谱

初级核种类	拐折前		拐折点能量 (eV)	拐折后		拐折后各种成份的相对比例 %
	K	γ		K	γ	
P	1.92	2.75	10^{15}	60.72	3	15.9
He	0.781	2.75	2×10^{15}	29.37	3	7.7
CNO	0.507	2.70	7×10^{15}	57.35	3	15.0
LH	0.507	2.70	1.2×10^{16}	67.42	3	17.6
MH	0.0076	2.47	1.7×10^{16}	51.63	3	13.5
VH	0.0125	2.52	2.3×10^{16}	42.71	3	11.2
Fe	0.185	2.65	2.6×10^{16}	72.85	3	19.1

表 2 初级宇宙线平均质量数随能量的变化

原初能量 (eV)	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	$10^{15.5}$	10^{16}	$\geq 10^{16.5}$
平均质量数 $\langle A \rangle$	12.5	14.1	16.0	18.3	21.3	24.7	27.7

由表 1、2, 可以看出, 随着初级粒子能量的增加, 重核的比例越来越大, 但并没有出现铁核为主的情况。因此, 我们推论的不同化学成份的初级谱, 既不同于质子为主的初级谱, 也不同于铁核占绝对优势的初级谱, 而是一种重核比例逐步上升但又没有哪一种核成份占有绝对优势的初级谱。

图 1 示出了各种成份的初级能谱以及由这些能谱相加所得的初级宇宙线总粒子谱。在同一图中, 还示出了由 [5] 中图 8 给出的总粒子谱以作比较由于我们只考虑了一些主要的核成份, 因此由成份谱相加得到的总粒子谱比实验的总粒子谱略低, 是自然的。在图 2 中, 画出了目前各个实验组对初级宇宙线总粒子能谱和成份能谱的测量结果, 以便与图 1 作比较。

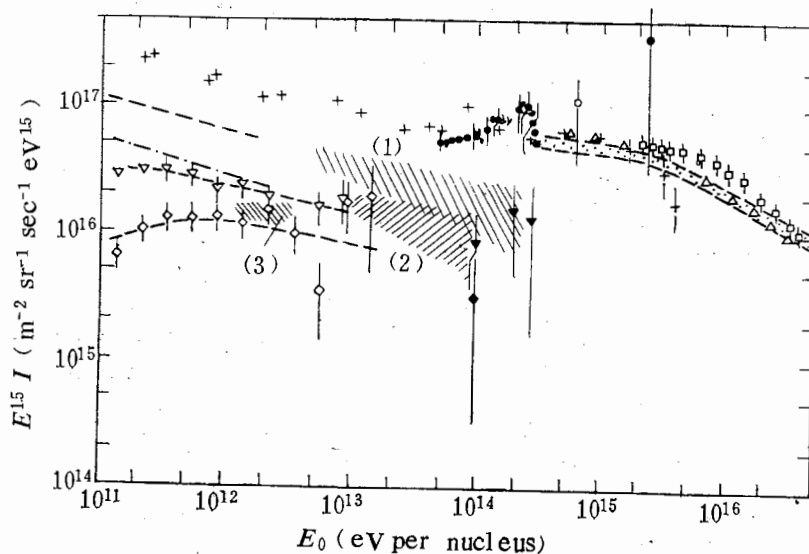


图 2 初级宇宙线能谱的实验测量结果。

总粒子谱: + Grigolov et al. (1972); \square YAKUTSK (1981); \triangle TIEN-SHAN (1981);
 \equiv AKENO (1983); \blacklozenge JACEE (1984)

成份谱: --- 质子, -.-.- 氦, Ryan et al. (1972); ∇ CNO, Simon et al. (1980);
 \blacktriangledown CNO, JACEE (1984); \diamond Fe, Simon et al. (1980); (3) \blacklozenge FeJACEE (1984);
 (1) 质子 JACEE (1984); (2), 氦 JACEE (1984).

三、讨 论

由图 1 可以看到, 在 $E_0 \leq 10^{14}$ eV 以及 $E_0 \geq 2.6 \times 10^{16}$ eV 的区域, 我们推论的总粒子积分流强与实验给出的流强基本吻合。在 $10^{14} - 10^{16}$ eV 的区域, 我们的总粒子谱与 10^{14} eV 以下 Grigorov 的实验结果的外推大致吻合。但与 JACEE^[5] 以及 Akeno^[6] 的实验结果还有明显的差别。JACEE 的结果在接近 10^{14} eV 处有一突起, Akeno 的谱也比较高。按照我们目前的假定, 单靠移动拐折点的位置, 要使推论的能谱在 $10^{14} - 10^{17}$ eV 的整个能区都与这两个实验结果相合是不可能的。反之, 如果实验事实确实可靠, 那么与本工作所使

用的方法相联系的初级宇宙线的起源、加速和传播机制就可能需要改变。这都有待实验与理论方面的进一步研究。

本文所研究的七种初级宇宙线成份中,有五种 (P, He, CNO, LH, Fe) 在拐折前的谱指数都在 -2.70 左右。按照宇宙元素丰度的分析,一般都认为这五种成份直接来自源区^[6],并称之为初级核。可以认为,在我们所讨论的能区,它们在星际空间传播过程中的扩散损失都已占主导地位。第五、第六种初级宇宙线核 (MH, VH) 通常被认为是次级核,它们是由初级核在星际空间传播期间发生的核作用中产生的。因此,其谱指数就可能与初级核的谱指数有些差异。对这些次级核的能谱,在按实验数据外推时,都假定它们已进入扩散损失占主导的能区,并将它们的能谱一直延续到发生拐折时的能量。

在用“刚度切割模型”时,如果把质子的拐折点选在 10^{15}eV 以下,则在拐折以后,推论的总粒子强度会明显低于实验得到的总粒子强度。例如,若质子的拐折点选在 10^{14}eV ,得到的总粒子流强仅为实验值的一半左右。有的实验组常常取质子的拐折点在 10^{14}eV ,也能得到与实验大致吻合的总粒子谱,是因为他们将铁组的谱指数取为 -2.4 左右,并按此一直外推到铁组的拐折点,从而导致 $> 15^{15}\text{eV}$ 铁核为主的初级能谱。但事实上,铁组的谱指数在 -2.4 左右只是反映了 10^{12}eV 以下的实验事实。在这里,扩散损失对铁核还未占主导地位。在大于 10^{12}eV 的能区,扩散损失逐渐占了主导地位,铁核的能谱就会变陡。我们对 Simon (1980) 给出的 10^{12}eV 以上铁组的实验数据作拟合,得到的谱指数并不在 -2.4 左右,而是 -2.65 。按这个谱指数外推,与 10^{14}eV JACEE^[5]组以及 Sood^[3] 的最新实验结果也不相矛盾。

参 考 文 献

- [1] A. M. Hillas Proc. of the Cosmic Ray Workshop, Uni. of Utah (1983) 1.
- [2] J. P. Wefel Proc. of the Cosmic Ray Workshop, Uni. of Utah (1983), 188.
- [3] R. K. Sood, *Nature* 301(1983), 44.
- [4] M. Simon et al., *Astrophys. J.*, 239(1980), 712.
- [5] JACEE Collaboration Proc. of Inter. Symp. on Cosmic Rays and Particles Phys. Tokyo, (1984), 468.
- [6] W. R. Webber in Composition and Origin of Cosmic Rays D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, (1983), 25.
- [7] M. Anienomori et al., Proc. of Inter. Symp. on Cosmic Rays and Particles Phys. Tokyo, (1984), 494.
- [8] N. Nagano et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, 10(1984), 1295.

A DEDUCTION ON PRIMARY COSMIC RAY COMPOSITION AND SPECTRA ABOVE 10^{14} eV

JING CAI-LIU DING LIN-KAI ZHU QING-QI JING GUI-RU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The spectra of primary cosmic ray nuclei are fitted from experimental data under 10^{14} eV and extrapolated to their bending energies. The primary cosmic ray composition above 10^{14} eV is deduced according to the rigidity cut off model by selecting an appropriate bending energy for proton so that the sum of various nucleus components is consistent with the experimental total particle spectrum. The method used is independent on the behaviour of hadronic interaction.