

原初宇宙线核成分与乳胶室 团状结构现象

丁林地 荆贵茹

(中国科学院高能物理研究所)

贵茹 (129)

.....

贵亮 (135)

鄂生 (142)

王佩 (150)

鹏程 (160)

.....

佩英 (170)

世耀 (178)

承先 (186)

扬国 (197)

益忠 (203)

飞 (217)

向军 (223)

.....

hofer (229)

玄 (236)

泽森 (245)

克宇 (257)

如琳 (262)

郁芳 (265)

雪生 (269)

摘 要

在原初核入射的情况下,用夸克-夸克散射和普通强子作用的 CKP 模型模拟大气中的超高能作用. 结果表明,核入射比质子入射可以产生较多的两团结构事例,团之间的分隔也较宽. 但是,由于不同粒子产生两团事例的能区不同,分析表明,对两团事例的贡献仍主要来自质子和氦核. 地磁场对团状结构没有重要的影响与实验相比,预期可能存在更大横动量产生的过程.

一、引 言

工作^[1]定性证明,在 10^{15} — 10^{16} eV 的超高能作用中由夸克-夸克散射所形成的大横动量强子喷注,经过大气层中的传播,能够形成乳胶室实验所观察到的那种具有两团结构形态的事例. 这说明,宇宙线超高能实验上所讨论的大横动量现象,联系于深一层粒子的相互作用. 但是,与实验相比,用夸克散射模型模拟出的两团事例,两团间的分隔不够宽,事例率也偏低. 这个事实导致一种自然的推论:在超高能强子作用中,除了存在强子组成的作用外,还可能存在更大横动量的产生过程,从而联系于更深层的结构. 利用宇宙线数据,应能对这一可能性作出估计. 为此,需要首先分析原初核成分对团状结构现象有多大的贡献.

工作^[2]表明,在普通强子作用的 scaling 模型里,增加原初宇宙线的重核比例,可以得到较多的两团事例. 还表明,多重数较高的 CKP 模型^[3],对产生两团事例不如 scaling 模型好. 但问题在于,乳胶室的大多数实验结果却是支持 CKP 模型的^[4]. 我们决定维持普通核作用的 CKP 模型,加进夸克-夸克散射机制,分别对氦核和铁核在大气中引起的超高能作用作蒙特卡罗模拟,着重研究在质子和不同原子核入射的条件下,产生两团事例的差别.

一些作者提出,在核入射的情况下,地磁场可能对团状结构的形成有一定的贡献^[5]. 对此,本工作也予以检验.

二、模拟方法

1. 原子核与空气核的碰撞

对每种核成份的原初宇宙线能谱,均取指数为 -1.7 的积分幂谱.

参照核-核作用实验,将所有的核划分为八类: P(氢核)、He(氦核)、L(轻核)、M(中等核)、LH(轻重核)、MH(中重核)、VH(甚重核)和 Fe(铁核). 不同核与空气核碰撞的平均自由程 λ_i 依赖于入射核的质量 A_i , 取如下经验公式

$$\lambda_i = 80 A_i^{-0.44} \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

λ_i 的数值和相应的截面值见表 1.

表 1 各种核与空气核碰撞的平均自由程和作用截面

核	P	He	L	M	LH	MH	VH	Fe
平均质量数	1	4	8	14	24	34	50	56
$\lambda_i(\text{g/cm}^2)$	80	43.5	32.0	25.0	19.8	17.0	14.3	13.6
$\sigma_i(\text{mb})$	300	571	709	861	1054	1211	1423	1494

2. 原子核的碎裂

宇宙线粒子与核乳胶和 $(CF_2)_n$ (平均原子量与空气相近)相作用的实验表明^[6],较重的核并非在一次碰撞中都碎裂为核子,而是碎裂为一个或一个以上较轻的核与一些核子(其中一部分与空气核子发生非弹性作用产生 π , 另一部分不作用);较轻的核在下一碰撞中又碎裂为更轻的核. 按照文^[6]所给的空气中各种核的碎裂参量,推出核-核碰撞中各种核的碎裂几率(表 2).

每个次核能量 E 取作

$$E = \frac{A_f}{A_i} E_0$$

其中 E_0 是初核总能, A_i 、 A_f 分别是初核和次核的质量数.

在一次核-核碰撞中,发生非弹性作用的平均核子数为

$$\langle N_i \rangle = \frac{\sigma_{PA}}{\sigma_{A_i A}} A_i$$

其中 σ_{PA} 、 $\sigma_{A_i A}$ 分别为质子和核 A_i 与空气核 A 作用的截面(见表 1). N_i 由二项式分布抽样决定.

核碎片以及不发生非弹性作用的核子,其横动量分布为:

$$f(p_T) dP_T \propto P_T \exp(-P_T^2/2\sigma^2) dP_T$$

其中 $\sigma = 50 \text{ MeV}/c$.

3. 强子作用

核子及 π^\pm 与空气核子作用产生大横动量喷注的几率,以及夸克散射过程的具体处理均见文章^[7].

初

普
样^[7]、

4.

在
理论的

5.

大
乳胶室
份全

6

研
中穿女
总观
“两团

1

在 550
以上

1)

表 2 核-核碰撞中各种初核碎裂为不同次核的几率

初核 \ 次核	p	n	He	L	M	LH	MH	VH
Fe (VH)	0.435	0.435	0.082	0.012	0.008	0.011	0.010	0.007
MH	0.432	0.432	0.079	0.011	0.013	0.028	0.005	
LH	0.436	0.436	0.064	0.017	0.032	0.015		
M	0.427	0.427	0.093	0.031	0.022			
L	0.445	0.445	0.093	0.017				
He	0.5	0.5						

普通强子作用的平均自由程、非弹性系数、平均多重数 (真实多重数按 KNO 分布取样^[7])、次级 π 的动量分布及横动量分布, 亦见文章^[1]。

4. 电磁成份的传播

在核碎裂、夸克碎裂及普通强子作用中产生的 π^0 介子, 衰变为两个 γ 后, 用电磁级联理论的 A 近似法处理 γ 在空气中的级联簇射。

5. 跟踪和记录

对每一类和每一次作用产生的次级粒子 (核、核子、 π^\pm 或电磁成份) 只要其能量大于乳胶室的记录阈, 就进行跟踪, 直到它们到达 5500 米或 3800 米观测面。到达后的电磁成份全部被记录, 强子成份以 37% 的几率被记录 (相应于乳胶室厚度为 28 个辐射长度)。

6. 地磁场的影响

确定一个固定的南北向, 所有带电粒子, 按照其电荷和能量 $E(\text{TeV})$, 以及在大气层中穿行的路程 $l(\text{cm})$, 分别在地磁场 H (高斯) 中向东西偏转 $\sim l^2 \cdot H/E \cdot 10^{10} (\text{cm})$ 。

三、模拟结果

如文^[1], 仍和 Chacaltaya 乳胶室所发表的两团事例^[8]作比较。设 E_1 、 E_2 分别为两团的总观测能量, R_{12} 为两团能量中心的距离, $\langle r_1 \rangle$ 、 $\langle r_2 \rangle$ 分别为两团按能量计权的平均半径。“两团事例”的选择标准为:

$$E_1 + E_2 \geq 80 \text{TeV}$$

$$R_{12} \geq 5\langle r_1 \rangle \text{ 及 } 5\langle r_2 \rangle$$

$$\chi_{12} = \sqrt{E_1 E_2 R_{12}} \geq 100 \text{TeV} \cdot \text{cm}$$

1. 对总能为 $1.2 \times 10^{15} - 2 \times 10^{16} \text{eV}$ 的氦核取样 4584 次 (相应的原初核子数 18,336)。在 5500 米高度, 得到总观测能量¹⁾ $\Sigma(E_\gamma + E_\gamma^{(\gamma)}) \geq 100 \text{TeV}$ 的族事例 225 个, 其中满足以上选择标准的两团事例 19 个, 8 个由夸克散射的大横动量喷注形成, 11 个由普通强子

1) E_γ 是乳胶室记录的能量, $E_\gamma^{(\gamma)}$ 是强子在乳胶室中作用通过电子或光子表现出来并被乳胶室记录的能量。

轻核)、M
与空气核碰

Fe
56
13.6
1494

表明^[6], 较重
与一些核子
在下次碰
核碰撞中各

项式分布抽

的具体处

作用形成. 这些两团事例的总观测能量在 100—300 TeV 之间, 原初能量在 2×10^{15} — 1.8×10^{16} eV 之间.

2. 对总能为 5.6×10^{15} — 5.6×10^{16} eV 的铁核取样 760 次, 又对总能为 1.68— 5.6×10^{16} eV 的铁核取样 369 次(相应的原初核子数共 63224 个). 在 5500 米高度, 共得到总观测能量 $\Sigma(E_T + E_k^{(T)}) \geq 100$ TeV 的族事例 311 个, 其中满足以上选择标准的两团事例 25 个, 11 个由夸克散射的大横动量喷注形成, 14 个由普通强子作用形成. 这些两团事例的总观测能量在 100—400 TeV 之间, 原初能量在 1.6 — 4.2×10^{16} eV 之间.

四、结论和讨论

1. 在氦核入射情况, 两团结构的事例率为 $\sim 8.4\%$; 铁核入射情况, 为 $\sim 8.0\%$. 其中, 近一半 (43%) 由夸克散射的大横动量喷注形成, 一半由普通强子作用形成. 而在质子入射情况, 只有 $\sim 5\%$ 的两团事例, 绝大部分是夸克散射形成^[1]. 这说明, 氦以上的原子核入射, 相当于同时入射一束核子, 不用夸克散射的机制, 本身就可以形成约 5% 的两团事例率. 氦和铁是宇宙线核成份的两个极端, 它们的两团事例率没有明显差别, 表明这个参量对氦以上不同核成分的混合比例并不灵敏.

表 3 列出了工作^[1]及本工作所得到的两团事例的初能区间. 可以看到, 两团事例是一个特定能区的现象. 在较低的能区, 得不到 $\Sigma(E_T + E_k^{(T)}) \geq 100$ TeV 的族; 在较高能量, 一般将形成多团结构和 Helo 事例. 随着入射核的质量数增加, 按每核子能量计算, 这个能区变低; 但按总能计算, 这个能区变高, 而且按量级范围衡量, 这个能区变窄. 由于宇宙线能谱陡降效应, 应该说, 实验上观察到两团事例, 铁核贡献很小, 主要还是质子和氦形成的.

表 3 两团事例的初能区间

核	初 能 (eV)	
	每核子能量	总 能
P	10^{15} — 10^{16}	10^{15} — 10^{16}
He	5×10^{14} — 4.5×10^{15}	2×10^{15} — 1.8×10^{16}
Fe	2.8×10^{14} — 10^{15}	1.6×10^{16} — 4.2×10^{16}

若假定原初宇宙线是混合成份, 在 10^{15} eV 以上, 铁核占了 65%, 轻核到甚重核占 21%, 氦核占 4.3%, 质子只占 8.7%. 但由于“混合原初”的积分幂谱指数, 在大于 10^{15} eV, 指数取为 ~ 2 . 按表 3 的能区算出对两团事例有贡献的原初核, 质子仍占 78%, 氦核占 9%, 轻核到甚重核占 7.5%, 铁核只占 5.5%. 即, 在混合原初的假定下, 按核成分计数的两团事例率约为 6%.

因此, 在夸克散射的大横动量机制中计入原子核入射, 两团事例率比质子入射时的 5% 稍有增加.

2. 图 1 列举了 Chacaltaya 实验和本工作及工作^[1]得到的两团事例的 $E_1 + E_2$ 与 χ_{12} 的关系. 在质子入射情况, 夸克散射所形成的两团事例, 其 χ_{12} 值不超过 500 TeV · cm. 在

核入
核入
400T
子在
量过
量产
大 χ_{12}
因此

布,
的).
事例
别, i

$10^{15} - 1.8 \times$

$0.68 - 5.6 \times$

共得到总观
与两团事例
些两团事例

0%。其中，
而在质子入
上的原子核
% 的两团事
，表明这个参

两团事例是
疾；在较高能
子能量计算，
区变窄。由于
还是质子和氮

$\times 10^{16}$

2×10^{16}

核到甚重核
在大于 10^{15}eV
78%，氮核
核成分计数
比质子入射时

$E_1 + E_2$ 与
 $10 \text{TeV} \cdot \text{cm}$

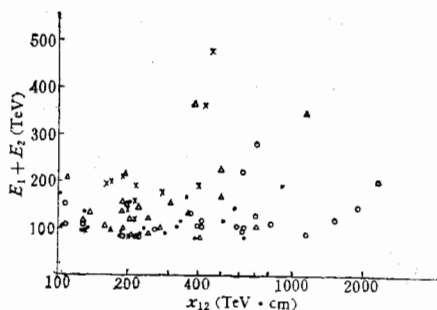


图 1 两团事例 χ_{12} 与 $E_1 + E_2$ 关系

× 质子入射； ● 氮核入射； Δ 铁核入射；
○ Chacaltaya 实验

核入射情况，普通强子作用所形成的两团事例，其 χ_{12} 值也没有超过 $400 \text{TeV} \cdot \text{cm}$ 。但在核入射加上夸克散射所形成的两团事例中， χ_{12} 可增到 $\sim 1000 \text{TeV} \cdot \text{cm}$ 。图 1 中 $\chi_{12} > 400 \text{TeV} \cdot \text{cm}$ 的九个模拟事例，全是夸克散射形成的。这说明，由核碎裂所形成的次级粒子在空间分布上的散开，虽可造成两团分离的大横动量假象，但它毕竟不是真正的大横动量过程，不能产生大的 χ_{12} 值。而具有大的 χ_{12} 值的那些两团事例，一定联系于真正的大横动量产生过程。考虑到实验上两团事例的 χ_{12} 值可超过 $2000 \text{TeV} \cdot \text{cm}$ ，比本工作所得到的最大 χ_{12} 还大一倍，即便改用 QCD 理论部分子散射的 P_T^4 截面，也达不到这样大的 χ_{12} 值，因此，可能存在一种更大横动量的产生过程。

这个结论还可以由图 2 看到。图 2 列出了三家乳胶室实验的两团事例的积分 χ_{12} 分

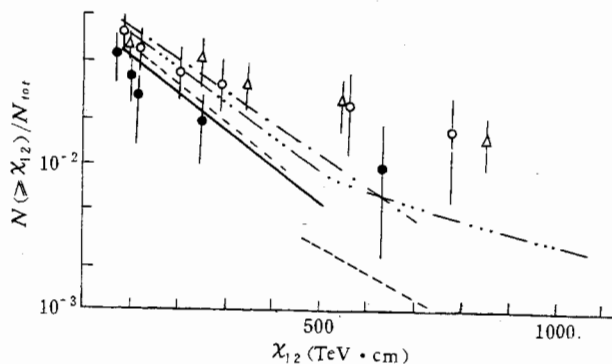


图 2 两团事例的积分 χ_{12} 分布

— P + CKP + q - q 散射 - - - M + CKP + q - q 散射
- · - 纯 α ····· 纯 Fe Δ Famir ○ Chacaltaya ● Fuji

布，几条曲线表示不同原初粒子入射的蒙特卡洛模拟结果(纯氮和纯铁只是做比较画上去的)。可以看出，与实验相比，两团结构的总事例率已经不是很大的问题，主要是 χ_{12} 大的事例少，使得直线的坡度过陡。

3. 对一些具有两团形态的事例加上地磁场重做模拟，所得到的靶图没有发生明显差别，证明地磁场对两团事例的形态和参数没有重要的影响。

4. 两团事例的特点是外观清晰，易于辨识。但这类事例只是一个特定能区的现象。

要研究更高能区的大横动量现象,不得不分析多团结构以及晕状(Halo)结构的事例。现
行分析多团事例的组团方法,计算量太大需要改进。

本工作的计算是在高能物理所320机上完成的,感谢机组对本工作的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Ding Lin-Kai et al., 17th ICRC V5 (1981), 324.
- [2] M. Akashi et al., 17th ICRC V5 (1981), 278.
- [3] G. Cocconi, *Nucl. Phys.*, B28 (1971), 341.
- [4] M. Akashi et al., ICR-Report-87-81-3; K. Kasahara et al., 16th ICRC 13 (1979), 76.
- [5] K. Kasahara et al., 16th ICRC, 13(1979), 70.
- [6] P. S. Freir et al., *Astrophysics and Space Science*, 38(1975), 429.
- [7] P. Slattery, *Phys. Rev.*, D7 (1973), 2073.
- [8] C. M. G. Lettes et al., *Phys. Reports.*, No. 3(1980), 65.

NUCLEAR COMPONENTS OF PRIMARYS COSMIC RAYS AND CLUSTER PHENOMENA IN EMULSION CHAMBER EXPERIMENTS

DING LIN-KAI JING GUE-RU

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

ABSTRACT

Under the condition of primary nucleus incidence, the ultrahigh energy interactions in the atmosphere are simulated using quark-quark scattering and CKP model of ordinary hadronic interactions. The results show that nuclei can produce more two-cluster events than proton and the distance between the two clusters to nucleus incidence is also wider. Because the energy regions of producing two-cluster events for different primary particles are different the main contribution to two-cluster events is still due to protons and heliums. There is no important effect in forming duster structure from geomagnetic field. Comparing with experimental data it is expected that there might exist some new production process with larger P_r .

分明
远角
统时

在
迹仪
构
分辨
好
列,同
性。

从
闪烁
计
20 × 2
大
角度
并
归并
种
因素
做
离线

本文