

超高能核作用中的环状事例与相变

荆贵茹 丁林地 朱清棋 经才骞

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

对高山乳胶室环状事例的运动学特征进行了分析, 表明这种事例联系于超高能核作用中碎裂区一个窄的速度范围内的多粒子产生, 可能与核-核作用的相变有关。采用一种相变模型对超高能核作用的大气级联进行模拟, 在高山乳胶室观测条件下, 得到了具有环状形态的事例。

一、引 言

自1979年以来, 在宇宙线和加速器实验中陆续报道过一些由高能强子或原子核引起

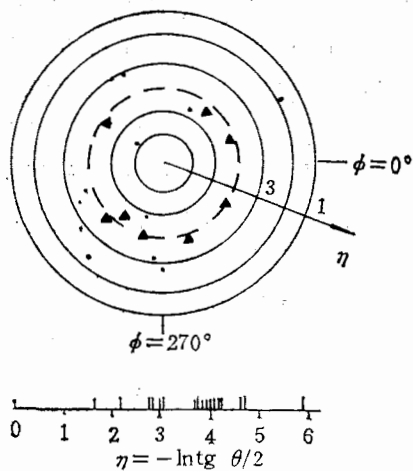


图1 P-N事例的赝快度 η 和方位角 ϕ 的关系

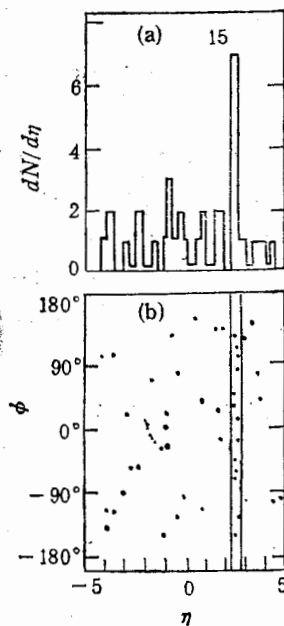


图2 (a) “spike”事例的 η 分布 (U45) (b) 方位角 ϕ 和 η 关系

的, 有多个次级粒子集中在一个小的赝快度间隔内的事例^[1,2]. 这些粒子相对于入射强子方向的方位角是随机的, 在垂直于入射粒子平面上的投影呈环状结构, 通常叫做“环状事例”(ring-like event). 图 1 是一个例子^[2], 9 个粒子出现在赝快度 $\eta \sim 4$ 的一个环上. 1984 年, $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ 的 $\bar{P}P$ 对撞机报道的“spike”事例, 也具有类似的特征. 图 2 是其中的一个例子^[3], 在 $\eta \simeq 2-3$ 区间有 15 个粒子, 超出平均值 3 倍多.

对这类事例已经有一些解释, 例如 Čevenkov 胶子辐射^[4], 退禁闭辐射^[5], 或者夸克-胶子相中的“热斑”(hot-spot)^[6]. 但也有的工作认为它们只不过是普通强子作用的涨落,

用解释普通强子作用的 TFM 模型^[7] 或 cluster 模型^[8] 都有可能产生这种事例.

最近, 甘巴拉山乳胶室也报导了一个超高能环状事例^[9]. 图 3 是这个事例的横向分布. 由图 3 看到, 约有 200 个能量高于 3 TeV 的粒子集中在离能量中心约 7 mm 处的一个环内, R 分布在这里冒起一个峰, 而在 R 较小处出现一个凹的部分, 相应于事例的中心部位出现了粒子空缺. 图中虚线表示与环状事例的能量和粒子数相类似的普通族事例的横向分布. 这个环状事例与普通事例的差别是很明显的. 本文试图对这类事例的产生机制进行初步分析.

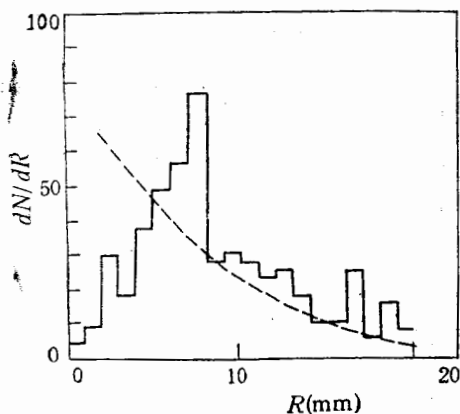


图 3 甘巴拉山乳胶室环状结构事例的 R 分布

二、高山乳胶室环状事例的运动学特征

工作[9]根据高山乳胶室的放置位置、靶层厚度、记录阈能以及初级宇宙线的能谱、强度和超高能核作用在大气层中传播的性能, 对高山乳胶室的实验特征作了分析. 结果表明: 乳胶室所记录的“族”事例, 90% 以上的粒子是超高能作用中碎裂区的粒子. 图 4 给出超高能作用中次级粒子的赝快度分布(带模拟点), 直方图表示能被乳胶室记录的粒子的祖先粒子的 η^* 分布. 这个图表明, 除了 η^* 大的少量粒子外, 大部分粒子(阴影部分)都将在大气层中耗散, 不能被高山乳胶室记录. 因此, 首先可以确定, 高山乳胶室记录的环状事例是超高能作用碎裂区的现象.

由图 4 还可以看到, 在超高能作用中能被乳胶室记录的粒子的祖先, 其质心系赝快度 $\eta^* \geq 4$, 即质心系发射角 $\theta^* \leq 2^\circ$, η^* 的分布呈前后对称的单峰分布, 宽度 $\Delta\eta^*$ 约为 4 个快度单位. 如果把 $\eta^* > 4$ 的区域划分为三个小区域 a, b, c (图 5), 则定性可以近似认为:

- 1) 区域 a 的粒子能量最高, 经过大气传播被乳胶室记录的效率 $\sim 100\%$, 它们的发射角最小, 一般对应于事例靶图中的最核心部分;
- 2) 区域 b 的粒子能量次高, 传播后约有 50% 的粒子能被乳胶室记录, 它们的发射角稍大, 对应于事例的核心外层部分;
- 3) 区域 c 的粒子能量较低, 传播后只有大约 20% 的粒子能被记录, 它们的发射角较

大, 对应于事例的外围部分。

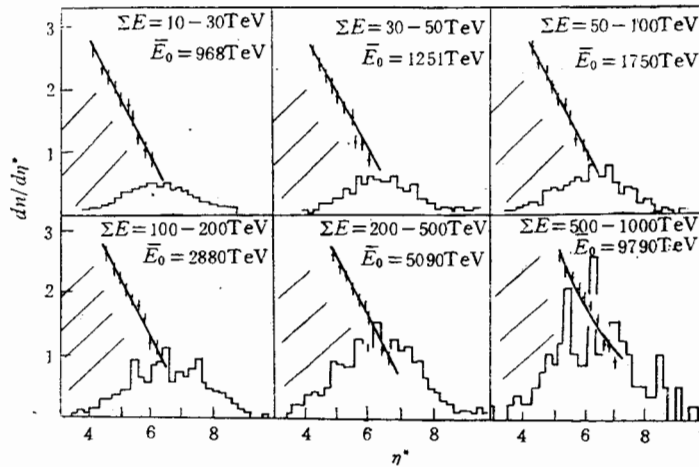


图 4 首次作用中次级粒子的赝快度 η^* 分布

因此, 如果一个乳胶室事例的核心部分没有粒子(或粒子很少), 则很可能在超高能作用中的区域 a 没有粒子(或很少); 如果在核心外层集聚了较多的粒子, 那么区域 b 的快度密度应该有反常的增加(图 6)。

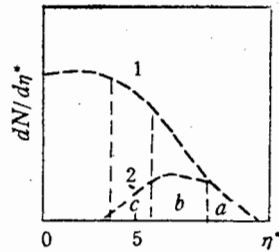


图 5 首次作用中次级粒子的 η^* 分布示意图

1. 普通强子的 η^* 分布;
2. 能被乳胶室记录的强子 η^* 分布

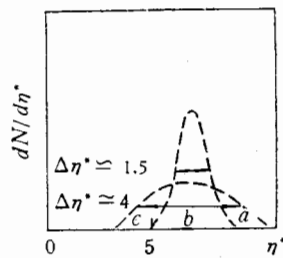


图 6 首次作用中能被乳胶室记录的次级粒子的 η^* 分布示意图

超高能的核-核作用一次可以产生几百个、上千个次级粒子。如果这种作用是普通的核作用, 则由于统计涨落造成的区域 a 的空缺和区域 b 的反常增高, 其几率是十分小的。对 115 个观测能量大于 1000 TeV 的、用普通核作用模型模拟出的族事例作了扫描, 没有发现环状的事例。在这里, 我们考虑另外一种可能性: 在某些特殊条件下, 例如在对心碰撞(碰撞参量 $b \simeq 0$) 的条件下, 次级粒子数达到极大。这些粒子产生于核物质之中, 其中速度很高的一部分与人射核一起前进, 它们具有横动量, 会在核内发生多次再散射。散射的结果, 高能量的粒子能量变低了, 低能量的粒子能量增高了, 内部温度相对均匀了, 人射核就成为一个热的强子物质的等离子体。如果这个等离子体的能量密度足够高(例如高于普通核物质能量密度的 5—10 倍), 就会发生相变, 形成夸克-胶子等离子体火球。这个火球作为一个整体, 其赝快度仍在碎裂区, 并且将出现在区域 b 。在火球衰变成普通强子之

子算
2
er
高由子
R
一粒粒
环试
强表
给子
都环
度个
认
射
角
较

后,这些强子的 η^* 分布就会表现出区域 a 的空缺和区域 b 的增高。在各向同性衰变的假定下,火球产物的 η^* 的分布宽度将只有 ~ 1.5 个快度单位。所有这些特点,正好解释了碎裂区环状事例的形成。

还存在一种可能性: 当着一个乳胶室事例具有两团或多团特征时, 能量中心往往位于没有粒子的空白区域, 但是, 这时的能量中心并不一定是入射中心, 次级粒子的方位角分布也很不均匀, 因此并不是环状事例的情况。

三、相变火球的模拟计算

采用 R. Anishetty 等提出的核-核作用相变火球形成的模型^[10], 用 Monte-Carlo 方法模拟宇宙线的不同原子核与空气核的对心碰撞过程, 并按照高山乳胶室观测条件, 处理次级粒子的传播和记录。参照乳胶室环状事例观测能量, 入射核的初能应在 10^{17} eV 量级。对核子-核子作用过程, 采用单衍射和非单衍射过程的 Monte-Carlo 模拟方法^[11]。次级粒子中对弹丸碎裂区火球有贡献的粒子, 需满足以下条件:

$$P_i \leq m_i \frac{R}{R_p} [\gamma_{FB} + (\gamma_{FB}^2 - 1)^{1/2}],$$

$$P_i > P_i \frac{R_p}{R},$$

其中 R, R_p 分别是弹丸核和质子的半径; m_i 是次级粒子有效质量; P_i 和 P_i 分别是次级粒子在弹丸静止系中的纵动量和横动量; γ_{FB} 是火球相对于弹丸静止系的 Lorentz 因子。

火球的质量 $M_{FB} = (E_{FB}^2 - P_{||FB}^2)^{1/2}$, 其中 $E_{FB}, P_{||FB}$ 分别是火球在弹丸静止系的能量和纵动量, 火球的能量密度

$$\rho_{FB} = 0.15 \times [\gamma_{FB} + (\gamma_{FB}^2 - 1)^{1/2}] M_{FB} / A$$

其中 A 是弹丸核的原子量。当 $\rho_{FB} > 0.75 \text{ GeV/fm}^3$, 即认为此火球由普通核物质相变为夸克-胶子等离子体。

火球的衰变, 采用在火球静止系各向同性发射的机制。次级粒子的能量取自平均值为 0.4 GeV 的指数分布。衰变粒子的多重数由火球质量和能量守恒决定。

四、结果和讨论

模拟计算的结果表明, 在对心碰撞的条件下, 中等重量的核与空气核碰撞产生的弹丸碎裂区火球比较容易达到相变条件, 并且通过大气传播有可能形成外观明显的环状事例。

图 7 是一个例子。在这里入射核 $A = 34, E_0 = 1.7 \times 10^{17} \text{ eV}$, 与空气核 ($A = 14.5$) 碰撞, 取作用核子数为 28, 参加核子数为 6。在首次核-核作用中形成的弹丸碎裂区火球有 $M_{FB} = 67 \text{ GeV}$, $\rho_{FB} = 0.9 \text{ GeV/fm}^3$, $\gamma_{FB} = 1.7$, 火球在靶静止系的快度 $\eta \approx 15$ 。模拟的环状事例有 3600 TeV 的观测能量, 总粒子数 480, 有一个半径约 1 cm 的环, 其 R 分布见图 8, 与图 3 有类似的特征, 环内粒子的方位角分布是随机的。

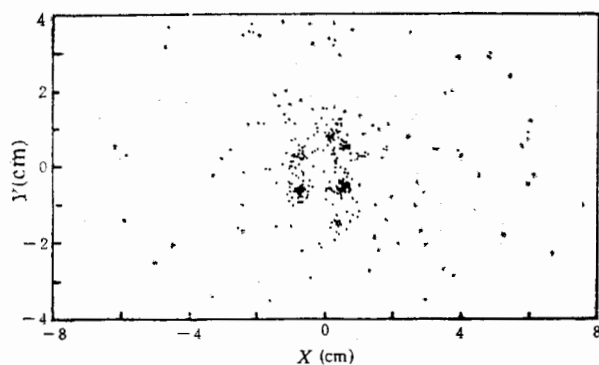


图 7 模拟的环状事例的靶图

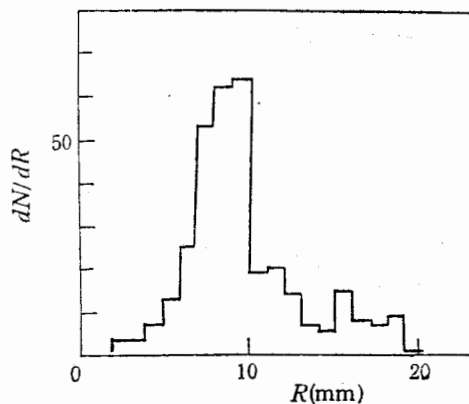


图 8 模拟的环状事例的 R 分布

以上分析表明,超高能核-核作用中在碎裂区形成的相变火球,是乳胶室环状事例的一种可能的解释。要作出更为确定的结论,还需要在实验和理论两方面深入研究和比较。目前,应该分析环状事例的粒子成分和能谱特征。

感谢何泽慧先生,霍安祥、任敬儒、况浩怀同志的有益讨论。感谢高能所计算中心 VAX 11/780 机组的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] I. M. Dremin et al., 17th ICRC Vol. 5(1981), 149.
- [2] I. M. Dremin et al., 19th ICRC Vol. 6(1985), 145.
- [3] J. G. Rushbrook CERN-EP/85—178 November 1st, 1985.
- [4] I. M. Dremin, *JETP Lett.*, 30(1979), 152.
- [5] I. M. Dremin, *JETP Lett.*, 34(1981), 617.
- [6] L. McLerran, *Phys. Reports*, 88(1982), 379, J. D. Bjorken, *Phys. Rev.*, D27 (1983), 40.
- [7] 孟大中, 高能多重产生理论工作讨论会的报告, 北京大学, 1984年12月.
- [8] Huo Anxiang, BIHEP-CR-86-02.
- [9] Ding Linkai et al., *Kexue Tongbao*, 18(1986), 1374.
- [10] R. Anishetty, P. Koehler and L. McLerran, *Phys. Rev.*, D22, (1980), 2793.

[11] He Yudong et al., *Journal of Yunnan University*, 8(1986), 165.

RING-LIKE EVENT OBSERVED IN SUPERHIGH ENERGY INTERACTION AND PHASE TRANSITION

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

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

ABSTRACT

The kinematical analysis of the ring-like event observed in mountain emulsion chamber shows that this kind of events might relate to the multi-particle production within a narrow rapidity interval of the fragmentation region in the superhigh energy interactions, therefore possibly relate to the phase transition in the nucleus-nucleus interaction. The air cascade showers induced by superhigh energy nucleus-nucleus interactions are simulated by a transition model. Under the condition of the emulsion chamber experiment, the ring-like event is obtained.

齐
2
能
加
仅
设

几
于
本
和
种