

关于超高能宇宙线作用的非弹性度

丁 林 坤

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

分析了超高能宇宙线的核子-空气核和核-空气核作用的非弹性度, 并讨论了核碰撞几何对它的影响。

引 言

广延空气簇射 (EAS) 和高山乳胶室 (MEC) 实验都观察到了超高能宇宙线核级联穿过大气层传播时的快速衰减。为解释这一现象, 讨论得最多的, 是在 10^{15} eV 以上强子作用碎裂区 Feynman Scaling 破坏和初级宇宙线重核为主这两种可能性。这里, 我们将分析与快速衰减有关的另一个可能的因素, 即核子-空气核 (N-Air) 和核-空气核 (A-Air) 作用的非弹性度随能量的增加。

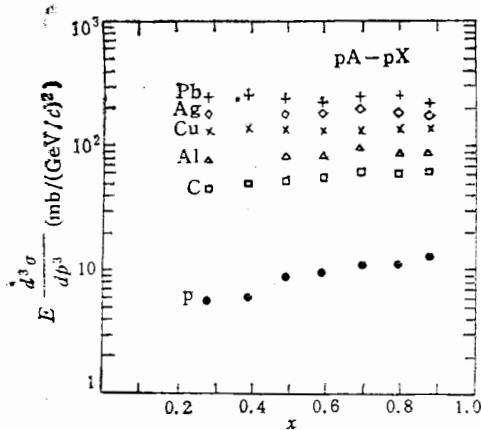


图1 入射动量为 $100\text{GeV}/c$, $p_t = 0.3\text{GeV}/c$ 时的 $pA \rightarrow pX$ 的不变截面对 x 的关系

在较低能量的加速器实验中, 测量了质子-核 (p-A) 碰撞中领头粒子的 x (Feynman 变量) 分布。图 1 是一个例子, 给出入射动量为 $100\text{GeV}/c$, $p_t = 0.3\text{GeV}/c$ 时, $pA \rightarrow pX$ 过程的单举不变截面对 x 的依赖^[1]。这意味着领头粒子的 x 分布随 A 增加而变陡, 平均弹性度随 A 增加而减小。基于这些测量, Jones 指出, p-C 碰撞的平均弹性度应为 0.31 ^[2], 而不是 0.5 。Gaisser 等进一步指出, p-Air 的平均弹性度应为 0.37 ^[3]。自那以后, 在宇宙线 N-Air 作用的一些模拟中所使用的平均非弹性度 $\langle K \rangle$, 都取得比 N-N 作用的相应 $\langle K \rangle$ 值高 $20-30\%$ 。

从一种朴素的考虑出发, N-A 碰撞的平均非弹性度比 N-N 碰撞的大, 可归结于在前一情况下, 基本的 N-N 碰撞 (或简称二元碰撞) 的次数通常大于 1, 并且随着 A 增加而增加。我们还注意到, 对于给定的弹丸和给定的靶核, N-A 作用和 A-A 作用的二元碰撞次数还随入射能量增加而增加。这将在高能区

引起一个更大的非弹性度。

下面,使用新建立的一种核碰撞几何^[4],来分析 N-A 和 A-A 作用中 $\langle K \rangle$ 随能量的增加。

核碰撞几何

CERN SPS 和 BNL 重离子实验数据的分析表明: 高能 A-A 作用的主要特征强烈依赖于核碰撞几何。引入一个确定的核碰撞几何,采用独立 N-N 作用图象,并采用一种能够描写 N-N 作用的模型, A-A 作用实验分布的一些主要特征,诸如横向能量分布、前向能量分布和多重数分布等,原则上都能得到解释。

引文[4]的作者们适当修改原子核电荷分布的皮层厚度,取作核的核子密度分布。考虑核子具有一个硬心结构,用 Monte Carlo 方法随机地决定一个核中各个核子的位置。用一个质子从一个随机的方向和一个随机的瞄准参量射击一个用计算机产生的靶核,并用一个重迭函数决定二元 p-N 碰撞的几率。结果表明,实验测得的 p-A 作用截面可由一个适当的核子密度分布得到。在这个核子密度分布上迭加一个质子电荷分布(由质子形状因子给出),可重现核的电荷分布。这就支持了所采用的核子密度分布。

我们采用这个已经建立的核碰撞几何,来研究在更高能量的 N-Air 和 A-Air 作用中,受伤核子数和二元碰撞数随能量的改变。为确定起见,取非常接近平均空气核的 ^{14}N 为靶核。考虑三个入射能量: $200\text{GeV}/n$, $150\text{TeV}/n$ 和 $100000\text{TeV}/n$ 。第一个能量是当前重离子束流所达到的最高能量。在这个能量,截面是实测值,核碰撞几何的建立经过了检验。第二个能量在 p-p 或 \bar{p} -p 碰撞情况下,正好是 S \bar{p} pS 相应的静止靶能量。在这个能量,仔细测量了 \bar{p} -p 截面。这个能量也是与 EAS 和 MEC 实验相联系的大气宇宙线作用的常见能量。第三个能量的引入,是为了分析一种极端情况,它与超高能宇宙线在大气层中的首次作用有关。对前两个能量,分别取 $\sigma_{\text{N}^{14}\text{N}}^{\text{inel}} = 31$ 和 52mb ,对第三个能量,按引文[5]取 $\sigma_{\text{N}^{14}\text{N}}^{\text{inel}} = 80\text{mb}$ 。

在入射能量为 $200\text{GeV}/n$ 的计算中,已知使用不同的重迭函数(灰盘、高斯分布或程函函数)不导致二元碰撞平均数的明显差别,只要这些函数中的参量都由实验的总截面和弹性截面决定^[4]。为了简单,在以下的计算中只采用灰盘重迭函数。

结 果

图 2 是 Monte Carlo 计算给出的 p- ^{14}N 作用中,二元 p-N 碰撞次数 ν 的分布。 ν 的平均值列于表 1。图 3 是 ^{14}N - ^{14}N , ^{28}Si - ^{14}N 和 ^{56}Fe - ^{14}N 作用中弹丸受伤核子数 N_{wnp} 的分布。相应的平均值 $\langle N_{\text{wnp}} \rangle$, 二元碰撞次数的平均值 $\langle N_{\text{bc}} \rangle$ 以及比值 $\langle N_{\text{bc}} \rangle / \langle N_{\text{wnp}} \rangle$

表 1 p- ^{14}N 作用的 $\langle \nu \rangle$

E	200 GeV	150 TeV	100000 TeV
$\langle \nu \rangle$	1.69	2.09	2.63

列于表 2.

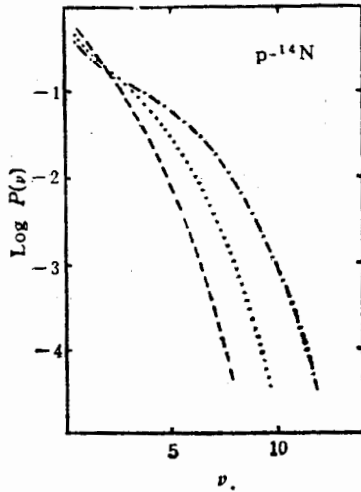


图 2 $E = 200\text{GeV}$ (虚线), 150TeV (点线)和 100000TeV (点划线)的 $p-^{14}\text{N}$ 作用中,二元 $p\text{-N}$ 碰撞次数 ν 的分布

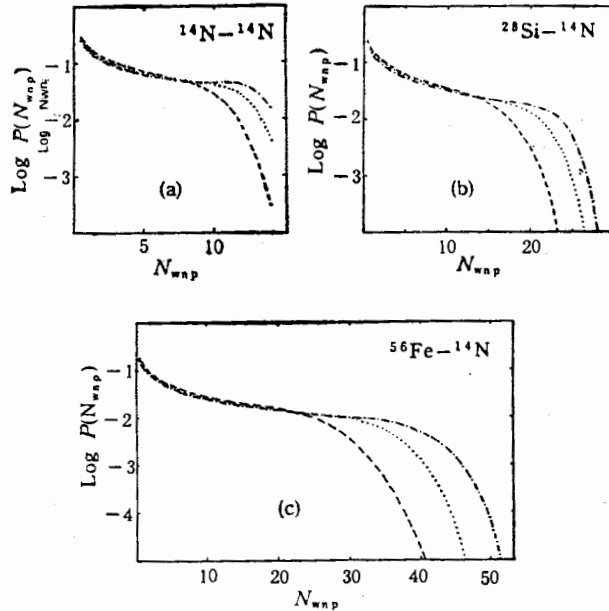


图 3 $E = 200\text{GeV}$ (虚线), 150TeV (点线)和 100000TeV (点划线)的 $A-^{14}\text{N}$ 作用中,弹丸受伤核子数的分布

(a) $^{14}\text{N}-^{14}\text{N}$, (b) $^{28}\text{Si}-^{14}\text{N}$, (c) $^{56}\text{Fe}-^{14}\text{N}$.

表 2 在 ^{14}N , ^{28}Si 和 ^{56}Fe 与 ^{14}N 靶碰撞的情况, $\langle N_{\text{wnp}} \rangle$, $\langle N_{\text{bc}} \rangle$ 和它们的比值

弹丸核	^{14}N			^{28}Si			^{56}Fe		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\langle N_{\text{wnp}} \rangle$	4.01	4.67	5.20	5.69	6.78	7.70	8.51	10.4	11.8
$\langle N_{\text{bc}} \rangle$	6.76	9.72	13.5	9.51	14.0	20.0	14.4	21.5	30.5
$\langle N_{\text{bc}} \rangle / \langle N_{\text{wnp}} \rangle$	1.69	2.08	2.60	1.67	2.06	2.60	1.69	2.09	2.59

讨 论

按照引文 [1]、[2]、[3], 我们假定 $100\text{GeV}/c$ 的 $p\text{-Air}$ 作用的 $\langle K \rangle$ 比 $p\text{-p}$ 作用高 30%, 并假定 $\langle K \rangle$ 随 A 的增加来自 $\langle \nu \rangle$ 随 A 的增加, 那么, 由于 $\langle \nu \rangle$ 对能量的依赖 (见表 1), 在 150TeV , $p\text{-Air}$ 作用的 $\langle K \rangle$ 应该再增加 $\sim 10\%$, 到 100000TeV , 应该再增加 $\sim 20\%$.

这就是说, 如果取 0.5 为 $p\text{-N}$ 作用的平均非弹性度, 则对 $p\text{-Air}$ 作用, 100GeV 时的平均非弹性度应为 ~ 0.65 , 150TeV 时应为 ~ 0.70 , 100000TeV 时应为 ~ 0.80 .

现在来看 $A\text{-Air}$ 作用. 以超高能宇宙线模拟中常用的重迭模型 (superposition model) 为例, 其中假设入射核在一次碰撞中完全散裂, 没有介子产生, $\langle K \rangle$ 实际上是 0.

从表 2 的最后一行看到, 在 A-Air 碰撞中, 每一个弹丸受伤核子平均经历的二元碰撞次数, 与表 1 给出的 p-Air 作用的 $\langle \nu \rangle$ 几乎相等。利用这一性质, 可以如下估计 A-Air 碰撞的平均非弹性度: $\langle K \rangle \approx \langle K_{p\text{-air}} \rangle \cdot \langle N_{w,ap} \rangle / A$, 其中 $\langle K_{p\text{-air}} \rangle$ 是 p-Air 碰撞的平均非弹性度。若取 p-N 作用的平均非弹性度为 0.5, 取 100GeV 时 p-Air 作用的平均非弹性度为 0.65, 则由表 2 的资料, 在 150TeV 时, $\langle K \rangle$ 应该是 0.13 (铁核) 到 0.23 (氮核), 100000TeV 时, 是 0.17 (铁核) 到 0.30 (氮核)。当入射核轻于氮核时, $\langle K \rangle$ 的值还要大一些。

综上所述, N-Air 作用的 $\langle K \rangle$ 随能量增加而增加, A-Air 作用的 $\langle K \rangle$ 大于 0, 并且也随能量增加而增加。这一事实, 必将与超高能宇宙线作用在大气层传播中的快速衰减现象有关。因此, 在利用 EAS 和 MEC 的实验数据研究超高能作用特征和初级宇宙线成分时, 这将是制约其它的模型参量的一个重要因素。

本工作是在瑞典 Lund 大学完成的。作者感谢 Bo Andersson 教授的邀请和瑞典自然科学研究委员会的支持, 还感谢与 Gösta Gustafson 的讨论。

参 考 文 献

- [1] D. S. Barton et al., *Phys. Rev.*, **D27**(1983), 2580.
- [2] L. W. Jones, 17th ICRC V. 5(1981), 17.
- [3] T. K. Gaisser et al., 17th ICRC V. 5(1981), 174.
- [4] 丁林垲, Bo Andersson, G. Gustafson 和 E. Stenlund, 《高能物理与核物理》V. 14(1990), 303.
- [5] G. B. Yodh, *Physics Simulation at High Energy*, edited by V. Barger, T. Gottschalk and F. Halzen, World Scientific, 1987, p. 153.

ON THE INELASTICITY OF SUPERHIGH ENERGY COSMIC RAY INTERACTIONS

DING LINKAI

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

ABSTRACT

The inelasticity of p-air and A-air interactions of superhigh energy cosmic rays is analysed and the influence of the nuclear collision geometry is investigated.