

超高能现象研究进展

霍安祥

宇宙线超高能核作用现象的研究,一直在高于加速器的能区进行.能量大于 10^{14} eV 的实验装置有三类:(1)高山大面积乳胶室,主要研究工作在 10^{14} — 10^{16} eV 能区;(2)广延大气簇射(EAS)阵列(10^{14} — 10^{20} eV 能区),这方面的设备包括一般常规 EAS 阵列、测量 EAS 的大气荧光的复眼装置和测量 EAS 大气的契伦科夫装置,它们又可以联合观测;(3)地下实验,主要用来观测 μ 子和中微子,还有深水地下 μ 子和中微子的观测装置(DUMAND 装置),它们主要用来研究宇宙线与大气核作用的现象和天体现象(10^{13} — 10^{16} eV 能区).

宇宙线可提供能量很高的粒子,但粒子流极弱,初级能谱为幂谱下降形式, $I(>E) = AE^{-\gamma}$, $\gamma = 1.6$ — 1.7 , 适合于研究作用截面为毫巴(mb)数量级的现象.此外,超高能现象的研究对天体物理有重要意义.下面分三方面来介绍超高能现象研究的新进展.

1. 强子与强子和核作用在 SPS 对撞机能量的现象

七十年代,ISR 对撞机上高能 p-p 作用现象的研究证实了当时宇宙线已取得的一些重要结果,如核作用截面随初级粒子能量上升和次级粒子中大横动量现象等. SPS 对撞机上的实验结果证实了在 10^{14} eV 能区高山乳胶室 C 喷注(强子与核作用)给出的核作用截面,以及次级粒子多重数与初能的关联 $\langle n_{ch} \rangle \simeq a + b \ln s + c \ln^2 s$ 等.

目前,西欧高能实验中心的质子与反质子 SPS 对撞机的质心系总能量为 $E_{CM} = 540$ GeV,相应于实验室系的能量为 $E_L = 1.5 \times 10^{14}$ eV. 这个能区已与宇宙线超高能研究的能区相衔接.因此,加速器方面的实验结果可以用外推的方法同更高能区的宇宙线的实验进行比较,从而找出新的规律.

强子相互作用中(如质子与反质子作用)观测某一末态粒子的单举微分截面 $E(d^3\sigma/dp^3)$ 一般是粒子 a 在质心系的横动量 p_{\perp} 和快度 y 的函数.西欧中心 UA1 和 UA2 两组测量了来源于 π^0 介子衰变的 γ 光

子的产生,结果表明 p_{\perp} 的分布与能量有明显关系(图 1). 在 $p_{\perp} = 10$ GeV/C 处,质心系 $E_{CM} = 540$ GeV (SPS) 比 $E_{CM} = 63$ GeV (ISR) 时的不变截面高出 1000 倍.

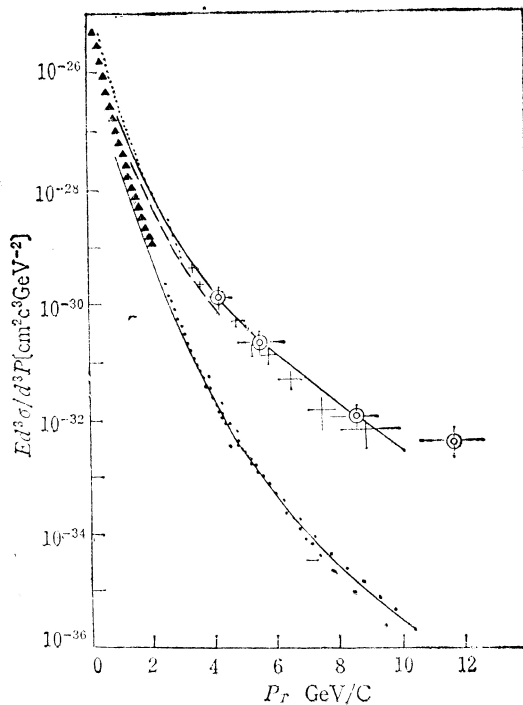


图 1 γ 产生的不变截面与 p_{\perp} 的关联

至于各种粒子的横动量分布,UA2 组结果表明,如下式表达分布曲线:

$$E(d^3\sigma/dp^3) = Ae^{-Bp_{\perp}}$$

则不同粒子的 B 与 $\langle p_{\perp} \rangle$ 的关系如表 1 所示, $\langle p_{\perp} \rangle$ 值随粒子的质量增大而有微弱的增长.

过去在低能区进行的实验给出 $\langle p_{\perp} \rangle \simeq 0.3$ GeV/C, 因此可见,随着初级粒子的能量增加, $\langle p_{\perp} \rangle$ 值也有一个慢的增长.

表 1 不同粒子的 B 、 $\langle p_{\perp} \rangle$ 值

粒子类型	$B(\text{GeV}/c)^{-1}$	$\langle p_{\perp} \rangle (\text{GeV}/c)$
p^{\pm}	3.0 ± 0.2	0.66 ± 0.04
K^{\pm}	3.7 ± 0.3	0.55 ± 0.05
π^{\pm}	4.6 ± 0.1	0.44 ± 0.01

UA 1 组在分析了 $\langle p_{\perp} \rangle$ 这一变量与多重数之后, 得到 $\langle p_{\perp} \rangle$ 和次级粒子多重数 n_s 之间有一个正关联 (图 2), 而这种关联首先是在宇宙线实验中观测到的. 图 3 表明了宇宙线高山乳胶室 C 喷注中的低多重数 (●)、高中多重数 (○) 和很高多重数 (□) 三种类型的实

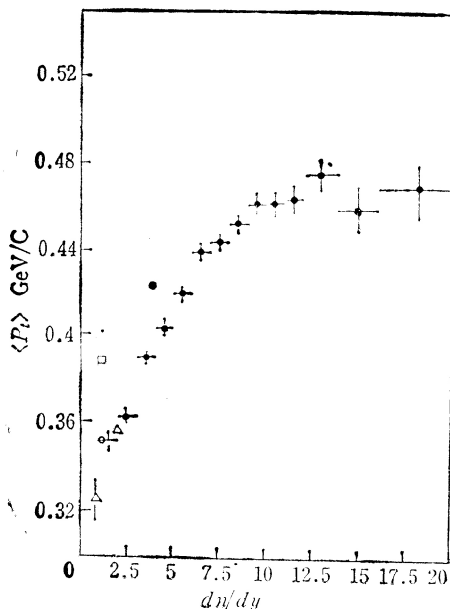


图 2 带电强子的 $\langle p_{\perp} \rangle$ 与 dn/dy 的关联

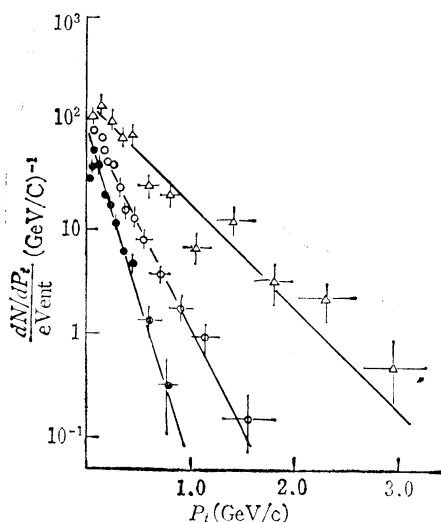


图 3 p_{\perp} 与多重性的关联

验观测结果,其得出的结论与前述实验是一致的.

大量实验表明次级粒子的快度分布有费曼标度无关性,为了解释这一现象的产生机制,有各种不同的理论假设,其中之一是费曼的类似韧致辐射机制. 这一机制预言: 如果将不变截面用快度为变量表示, 在快度为零左右的中心区将有一平坦的部分, 称为中心平台区. 这一平台在能量高到一定程度才会出现, 以后随着初能的增加而向两边加宽. 但是, 实验结果 (图 4) 表明从 ISR 对撞机能区到 SPS 对撞机能区中心平台高度增加 60%, 而分布宽度仅有一个小的增宽, 约为 20%.

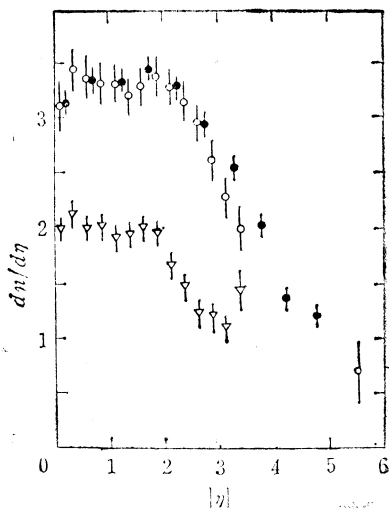


图 4 次级粒子快度分布

UA 5 组测量了光子的快度分布, 他们的实验给出的光子快度分布在中心平台比带电粒子高得多. 对 $|\eta| < 5$ 的带电粒子快度分布进行积分后, 得到的带电粒子平均多重数 $\langle n_{ch} \rangle = 26.5 \pm 1$. 而光子的平均多重数为 $n_{\gamma} = 34 \pm 2$. 光子过量部份集中在 $|\eta| < 2.5$ 的区域. 光子的快度分布的中心平台比带电粒子

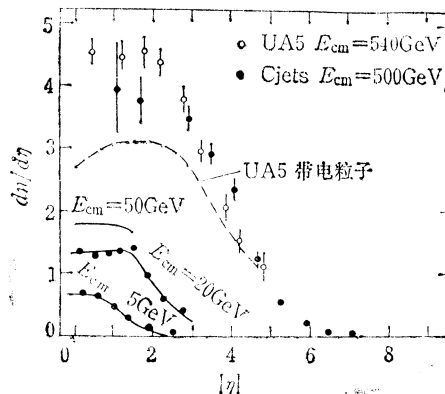


图 5 光子的快度分布

要窄。这些数据表明在图 5 中，图中也列入了宇宙线和加速器低能区的数据，宇宙线和 SPS 对撞机在相同能区的实验结果是一致的。

关于平均光子的多重数和初能的依赖关系，UA 5 的数据与宇宙线 Chacaltaya 组的 C 喷注结果也是符合的。

由于质心能量的提高，利用加速器实验可对宇宙线奇特现象的研究进行验证和补充。例如“Centauro”事例。Chacaltaya 组曾多次报道在宇宙线与大气核的作用中存在着一种非常类型的强子作用事例，这种事例的特征是次级粒子中强子数目非常多，几乎没有光子 ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$)。利用 SPS 对撞机，UA1 和 UA2 两组分别测量研究了 Centauro 现象存在的可能性。在上限为 $1\mu\text{b}$ 的产生截面时，没有获得这种事例。另外，UA 2 组利用他们的谱仪寻找自由夸克，没有证据说明有自由夸克存在。

2. 利用高山乳胶室研究 $10^{14} - 10^{16}\text{eV}$ 能区的核作用现象

乳胶室是研究超高能簇射的一种探测器。它的结构简单，面积容易扩大，有长期连续灵敏的性质，曝光可长达一年以上。乳胶室的基本结构是金属板（铅或铁）和 X 光片相互交替叠合而成。我国在甘巴拉山（海拔 5500 米）建立的乳胶室是在 4 个辐射长度的金属板下插入 X 光片感光层，在感光层中使用了不同灵敏度的 X 光片。为了定标粒子的能量，在少数乳胶室单元的感光层中加入了电子灵敏核乳胶板。

甘巴拉山乳胶室分薄室（厚度一般为 14 个辐射长度）、厚室（30 个辐射长度）二类。当高能 γ 光子和电子进入乳胶室，电磁级联簇射就会在金属板中发展。如果 γ 光子或电子的能量够高，在级联簇射轴附近次级电子达到一定的密度，X 光片在显影后即显出一个肉眼可见的黑斑。根据不同层中 X 光片上的黑斑的黑度，可以得到黑度与深度的过渡曲线，在与理论计算曲线比较之后，即可得到这一 γ 光子或电子的能量。

γ 光子和电子在乳胶室中形成的簇射是无法区别的，统称为“ γ 线”，其能量记为 E_γ 。高能强子是通过在乳胶室中核作用中次级粒子中的 π^0 介子和可能导致 γ 光子的粒子引起的电磁簇射而被记录下来。测得的强子引起簇射的能量，并不是强子的全部能量 E_h ，被记录的能量为 E_h^γ ， $E_h^\gamma = K_\gamma E_h$ ， K_γ 是强子转换为 γ 光子的非弹性系数。

发生在乳胶室上方的超高能强子与大气核作用，经过在大气中的级联过程，将有一束近于平行的 γ 线和强子射入乳胶室。它们之间相对位置可以根据其不同层中 X 光片上的黑斑的位置测量出来。我们把在乳胶室中记录到空气中核作用产生一束平行的簇射叫做“族”，只包括 γ 线的叫“ γ 族”，包含了强子的“族”，称

为“强子族”。

测量“ γ ”族的绝对流强与各种作用模型模拟计算结果比较，可对几种强作用模型提供一些信息。如果用 M 代表混合重初级成分（在初能为 10^{14}eV 时，取 20% 质子、68% Fe 和 32% 其他成分， 10^{15}eV 时，取 9% 质子、68% Fe 和 23% 其他成分），P 代表质子占主导，S 代表碎裂区的标度无关，F 代表火球模型，I 代表截面随能量增长 ($\sigma \propto E^\delta$ ， $\delta = 0.06$)，从四个高山站实验数据同各种模型比较（图 6）可看出：不考虑截面上升的任何一种模型都会给出过高的族强度，考虑了截面上升之后，实验结果与 PFI 和 MSI 模型比较接近。这说明单从族的强度分析难于决定哪一种模型更正确。这就产生了两种可能性，或者是碎裂区标度无关成立，同时初级成分以重核为主。另一种可能性是碎裂区标度无关破坏，初级成分主要是质子。不管那一种情况，至少在 10^{16}eV 能区，强子的非弹性截面都将继续增长。

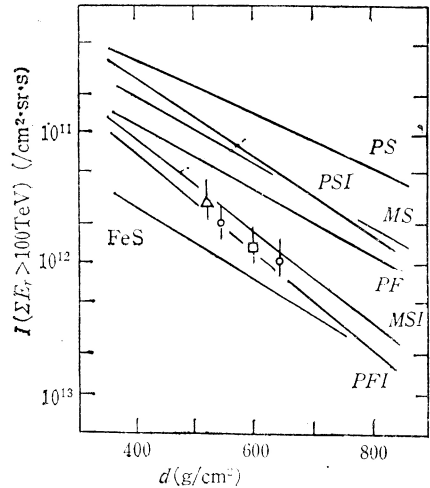


图 6 在不同大气深度 $\Sigma E_\gamma > 100\text{ TeV}$ γ 族的流强

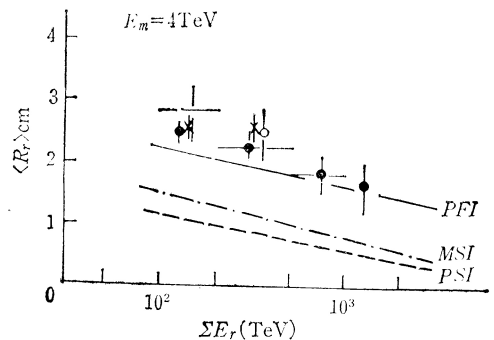


图 7 γ 族横向扩展的平均值

族中的 γ 线或强子与族的能量中心之间距离 R 的分布，称谓族的横向分布，这一分布与强子核作用中次级粒子的横动量分布有密切关系。次级粒子多重数也

有影响。电磁级联过程中的电子在大气中的多次散射虽有影响，但与前者相比是很小的。另一个影响比较大的是初级成分。产生作用点高度差别对于横向扩展带来的影响就更为明显。为了避开高度的影响，可讨论大量族事例的平均横向扩展 $\langle R_r \rangle$ 。图 7 表明了三个实验组在不同能区 $\langle R_r \rangle$ 对 $\Sigma E_r(\text{TeV})$ 的依赖(族的能量 $\Sigma E_r > 100 \text{ TeV}$, γ 线的阈能为 $E_m = 4 \text{ TeV}$)。可以看出三个实验组的结果是一致的。同时与模型进行了比较。其中 MSI 模型使用了 $\langle p_\perp \rangle = 330 \text{ MeV/C}$, PFI 模型取 $\langle p_\perp \rangle = 400 \text{ MeV/C}$ 。为了使模型更接近实验数据,都需要适当增加 $\langle p_\perp \rangle$ 值。在 10^{13} eV 附近 $\langle p_\perp \rangle$ 为 500 MeV/C 时, MSI 模型能够较好地描写实验的 R 分布。 $\langle p_\perp \rangle$ 略高于 400 MeV/C 的 PFI 模也能很好地描述族的 R 分布。

在族事例中,常看到一些高能簇射聚在一起,形成两个或多个彼此分离的团,这就是所谓团状结构现象,图 8 表示了一个 γ 族事例组团的例子。

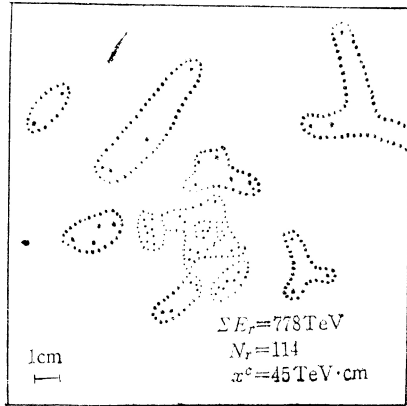


图 8 一个 γ 族事例的组团例子

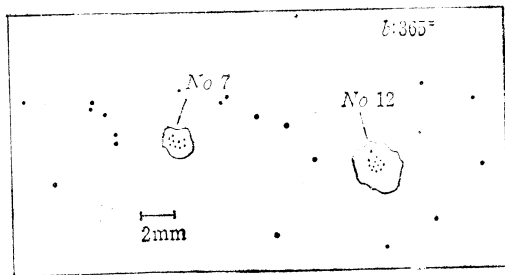


图 9 甘巴拉山乳胶室的 365 号事例靶图

在团状结构现象中,最突出的是双团现象,它约占 $\Sigma E_r > 100$ 的族事例的 10%。图 9 是甘巴拉山乳胶室观测到的双团事例之一。

最早对这一现象的解释是巴西-日本组提出的一种未知重粒子(名为 Geminon)的衰变。丁林垚等用蒙特卡罗方法模拟族现象,在其中计入了夸克-夸克硬

散射及夸克经过强子化产生喷注的过程,证明一部份 $X_{12} = \sqrt{E_1 E_2} R_{12} \lesssim 500 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$ 的两团事例(R_{12} 是能量为 E_1, E_2 两团事例间的距离)可以由夸克-夸克硬散射得到。 $X_{12} > 500 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$ 的一部份事例还不能由此模型解释。这是在质子入射的情况下模拟的,当计入原子核入射时,这个模型可以产生较多的双团事例, X_{12} 可以增加到 $1000 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$ 。对于这个特点,其它模型在质子入射的情况下是不能有效地产生双团事例的。最近他们又采用 QCD 喷注对族现象进行了模拟计算,已获得 $X_{12} = 1960 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$ 的双团事例。他们给出的中心区强子 p_\perp 分布与 SPS 对撞机上实验结果相符合。并指出:在 SPS 对撞机能区, $p_\perp > 3 \text{ GeV/C}$ 的强子几乎都是由分子的硬散射产生的。

另一有趣的现象是能量 $\Sigma E_r \geq 1000 \text{ TeV}$ 的大族事例,根据 Monte-Carlo 模拟计算可以知道这种事例的初能为 10^{16} eV 或者更高。因此希望从这样大族的分析研究中能直接提供粒子作用的特征。这方面的研究能使人们研究乳胶室观测到的现象和广延大气簇射之间的关联。

由于这类事例较难得到,现在有能力 $\Sigma E_r \geq 1000 \text{ TeV}$ 的事例总共才几十个,低空事例就更少。这些事例的一个共同特征可能是具有极高的快度密度。

$$dn_r/d\eta \geq 50$$

在较低 SPS 对撞机能区上的实验结果也表明快度随着能量的上升而增加。

随着被观测族的能量的增加,族的 γ 线愈来愈集中在一个很小区域。族事例中心部份在 X 光片将出现一个较大的黑斑,黑斑周围有一黑度略低的晕出现(相当于 10^6 个电子/ cm^2)。关于这方面的分析研究,由于事例数太少,还未能提供较充分的信息。

3. 广延大气簇射研究的几个问题

由于宇宙线超高能初级粒子的流强极低,为了研究超高能核作用,就把实验室扩大到以大气层为靶的尺度的规模。对于广延大气簇射(EAS)的观测通常是用布置在地面上的各种粒子探测器作符合取样来完成的。这种设备称为“阵列”。它的覆盖面积从 0.1 平方公里到几百平方公里。

整个大气层约为 13 个平均核作用长度和 30 个辐射长度。入射的超高能宇宙线粒子与大气原子核相互作用,以级联的形式在大气中发展为广延大气簇射。在核级联和电磁级联过程中,粒子的数目将达到几百万个至几十亿个粒子。其中 90% 以上是电子和 γ 光子,其次是 μ 子和强子成分,以及由它们产生的大气契伦科夫光子、大气荧光和射电。在大气层中,EAS 的每种成份都有一个产生和衰减的过程,有其空间和时间分布,并各有能谱的变化。所得到的观测测量与粒子性质以及核作用参量的关联。一般是基于与各种假定

的核作用模型和电磁级联理论模拟计算比较而实现的。

EAS 的纵向发展依赖于粒子的能量、初级成分、强作用的特性(多重数、次粒子的能量分布、非弹性系数和作用截面等)。这些参量的研究通常是通过 EAS 的普通阵列来进行的。

另外两种观测 EAS 现象的是契仑科夫光和大气荧光的装置,前者可以得到单个 EAS 的纵向发展图像,后者是对 EAS 荧光亮度的纵向发展的观测。这两种观测受着夜间空中条件的影响,大气荧光的夜光条件要求更苛刻。

10^{17} eV 能区以上 EAS 的纵向发展,许多实验室进行了广泛的研究。近两年来,在 EAS 中的电子的大气契仑科夫光和 μ 子的到达时间分布的研究,进行了一系列的实验。下边给出了 Chacaltaya (5200 米高度)和 Akeno (900 米)两组的观测结果:

初能大于 10^{17} eV 的 EAS 中, μ 子在早期阶段的纵向发展表明是非常快的。 μ 子到达时间分布的上升时间 t_r 和 FWHM (t_w) 非常短,并符合多重数 $\langle n \rangle \propto E^{1/2}$ 的规律。

在初能 10^{17} eV 附近, Akeno 组在距 EAS 轴 200—250 米之外观测到 μ 子到达时间的分布与多重数 $E^{1/2}$ 规律相符合。这些结果均表明了 EAS 早期阶段 μ 子有非常快的纵向发展。

能量在 2×10^{15} eV 至 2×10^{17} eV 的 EAS 中电子在早期阶段发展也很快。能量为 10^{17} eV 时, EAS 的大气契仑科夫光的到达时间分布的 t_r 和 t_w 是非常短的,其分布与提高了 $E^{1/2}$ 的多重性规律相符合。在低一些能区内, t_r 和 t_w 就更短。这说明在早期阶段电子的纵向发展也是极快的。

Akeno 组也研究了 2×10^{15} eV 至 3×10^{17} eV 能区 EAS 的电子纵向发展: 在 10^{17} eV 附近, 大气契仑科夫光到达时间的分布 t_r 和 t_w 与 $E^{1/3}$ 至 $E^{1/4}$ 多重数规律的预期相一致。在低于 10^{16} eV 能区, 则与提高了的多重数 $E^{1/2}$ 规律预期相符合。这说明 EAS 中电子簇射纵向发展在晚期比早期要快。

为了解释上述观测结果,核作用中有种成分级粒子的模型已提出。

横向分布是 EAS 观测的基础,它主要是由于强作用中次级粒子的横动量而使簇射粒子向横向扩展,因此可以给出许多物理信息。EAS 中次级粒子的横向分布(主要是电子)可分为三个区域,轴附近区比较复杂,近轴区可用 NKG 函数给出较满意的分布,远轴区服从 R^{-2} 的规律,图 10 表明了距轴 100—400 米垂直方向 EAS 中带电粒子的横向分布幂指数与簇射大小 N_s 的依赖。实验结果与初级粒子为质子的 CKP 模型的模拟计算有很好的符合。而与初级粒子为质子时的 scaling 模型则相差很远。从图 10 还可以看到, n 随着

N_s 大小增加有一个微弱上升。

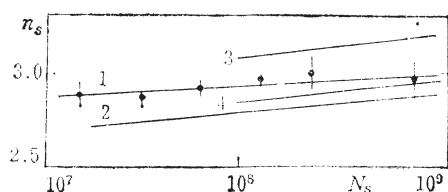


图 10 簇射的横向分布平均幂指数与 EAS 簇射大小 N_s 的依赖关系

最近, Kiel 组在综合分析他们的 EAS 实验数据时,发现了能量 $E \geq 2 \times 10^{15}$ eV 的 γ 射线来源于 CygX-3 的 X 射线源。X 射线双星 CygX-3 不仅发射 X 射线, SAS-2 卫星观测到 30—100 MeV γ 射线发射,有些组也观测到 TeV 能区的 γ 射线。而且最近英国 Leeds 大学 EAS 组证实了 CygX-3 是 Kiel 组观测到的能量 $E_0 \geq 10^{15}$ eV 的 γ 射线源。这个结果对我们了解 CygX-3 这类星体和解决宇宙线起源都有重要意义。

在我国云南站观测到“一个可能的重质量荷电粒子事例”的前后以及在随后一个相当时期各层国际宇宙线会议上均有关于长寿命、重粒子正结果的报道。这些工作主要是利用 EAS 阵列来测量迟到粒子,并用量能器测量该粒子在其中的能量损失,从而给出重粒子的质量下限,一般为 5—8 GeV/ C^2 。

最近 Sakuyama 等利用 Akeno 组的 EAS 阵列并在其中安装了由两个 1 m^2 的塑料闪烁体组成的望远镜,在这两个塑料闪烁体之间放置了 1m 厚的混凝土和 3 cm 的铅板作为吸收物。望远镜具有很好的时间分辨利用这个时间特性和望远镜距 EAS 轴之间的距离,从延迟爆丛(爆丛粒子数选择大于 8 和 10 两种事例)平坦的横向分布及延迟爆丛的总数和 EAS 大小之间的关联得到两种不同质量的重粒子。一种是质量为 40—60 GeV/ C^2 , 寿命为 10^{-7} — 10^{-6} sec; 另一种重粒子质量为 1—14 TeV/ C^2 其寿命为 $(0.3—0.4) \times 10^{-6}$ sec。