



谭有恒

为了四化的实现，人们正在加速各种自然资源的开发和利用。然而，有一种来自天外的物质资源，却并不为很多人所熟悉或留意。那是一种高能粒子流，它们“不远万里”，多半经过 10^6-10^8 年的长途“旅行”，前赴后继永无休歇地光临地球。它成分丰富（拥有周期表上几乎所有元素的裸核）、能域广阔（约18个数量级的能量强度），是宏观宇宙的物质样品，也是微观世界的敲门砖，这就是“宇宙射线”。

在宇宙线中，有一些能量高于当今最大加速器的粒子流，习惯上称它们为超高能宇宙线。其中已知的能量最高者，一单个粒子就具有约50焦耳的巨额能量，洛伦茨因子达 10^{11} 。

勿容置疑，在 $10^{14}-3 \times 10^{20}$ eV 广阔的超高能区里，许多新粒子、新特征、新现象将会出现，物质结构的更深层次将有机会显示自己。鉴于历史上高能宇宙线的研究导致了基本粒子物理学的出现，人们正在希望利用天公无偿赐予的超高能宇宙线作“炮弹”，去进一步轰开微观世界更深层次的仍然紧闭的神秘的大门。

不过，宇宙线远不像加速器束流那样单一和可控。对具体的超高能衰变和反应来说，初级宇宙线的能量、方向和种类事先都不知道，须从后果来推断前因，好比从坍塌的城堡去复原城堡本身一样，这就增加了分析的难度和结论的二义性。一般说来，它更适宜于探索性的、定性的研究，同时是取得超高能天文信息的唯一途径。那么，超高能宇宙线又是怎样被人们观测和研究呢？

看不见的“礼花”

初级宇宙线在宇宙空间旅行时，由于星际物质稀少，发生核碰撞的机会是很少的，当来到地球上空约20

公里以后，它们会突然感到这儿的物质太密，于是就不得不在一连串应接不暇的遭遇中改变自己、表现自己。

包围着地球的大气层，为到来的超高能宇宙线提供了宽广的表演舞台。除极少量初级超高能质子能成为幸存者突入到高山高度而外，其余的都不可避免要与空气中的原子核相碰撞，发生超高能核作用，产生数十、数百乃至数千个次级粒子，碰撞之后，它们自己变成激发重子携带着原有能量的大部分在原有方向继续前进，继续与空气发生一系列的核碰撞，各次核作用的次级粒子绝大多数是强作用粒子，它们也将再与空气原子核发生高能碰撞再产生再多的强作用粒子。与此同时，由于次级粒子中的 π^0 介子会衰变成两个光子，它们经过电磁作用，发展成为电磁级联，增殖出大量的电子—光子来。次级粒子中心 π^\pm 在核级联中不断耗散能量，它的衰变几率将变得大于作用几率，于是 μ 子被产生。此外，这么多相对论性荷电粒子在空气介质中行进，以窄角发射大气契仑可夫光；在路途中的氮、氧原子会被其激发，在退激时发射出各向同性的

大气荧光。以上这些现象的总和，被称为广延大气簇射（简称EAS）造成这种壮观现象的主要过程见图1所示。一朵节日礼花在夜空中绽放又消失，要持续十几秒钟时间，只涉及几十米的空

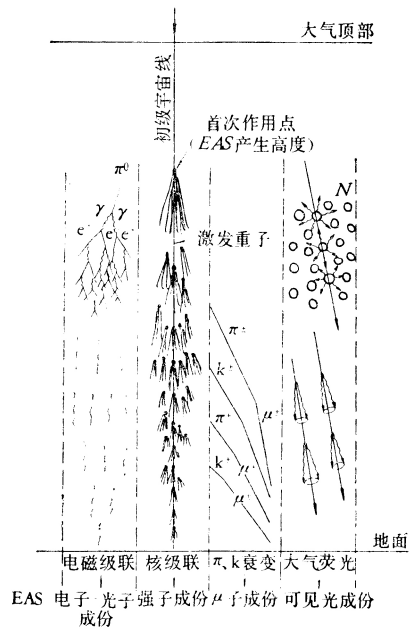


图1 广延大气簇射

间范围。一个超高能初级宇宙线粒子在大气中繁衍出千千万万的EAS次级粒子飞抵地面，持续时间虽短得多($10^{-5}-10^{-4}$ 秒)，但其激烈壮观的程度却是礼花所无法比拟的。不过，要把EAS比作“礼花”的话，它是看不见的、天公送来的“礼花”。倘若肉眼能看见EAS事件，我们就将看见一个扁盘状的密集粒子群以光速自天而降，扁盘的亮度、亮度分布和几何尺寸，在行进过程中都是发展变化着的，粒子们也是不断更新着的。扁盘外缘直径100—若干千米，粒子总数 10^5-10^{12} 。一切人类已知的和未知的粒子及微观过程，都有机会在

EAS 中露面或扮演某种角色。但作为 EAS 粒子主体的是电子、 μ 子、强子、光子。(由于探测上的困难,一般不去谈论 EAS 的中微子成分。)它们都各有其自己的兴衰史(但在大气中, EAS μ 子成分只有兴旺发达史,它的明显衰减发生于地下深处,)有各自的能谱及空间、时间分布。这些全是 EAS 发展状态的函数,受控于原初宇宙线的性质和超高能作用的主要特征。

因此,通过 EAS 现象,人们可以研究超高能宇宙线和超高能相互作用的主要特征,是近期内人类研究 $> 10^{15}\text{eV}$ 能区的主要途径,研究 $> 10^{17}\text{eV}$ 能区的唯一途径。

以“株”待“兔”的高山乳胶室

寓言中的“守株待兔”是徒劳的,然而在宇宙线研究中却是确有收获的,因为宇宙线是机会均等地降临任何地面的。然而,由于初级宇宙线的流强随能量的增高以负幂律下降,所以能用于宇宙线超高能研究的设备只能是大面积化的,高山乳胶室就是其中的一种。

这里说的乳胶室(简称 EC),与传统的乳胶室(“乳胶叠”)不同,它并不含有或只含有少量的核乳胶,一般只由 X 光片和吸收物(铅、铁等)交替叠置而成。因为这里要守候的是能量很高的粒子,一般 X 光片的灵敏度就够了,且可减少背景。能量 $E_\gamma > 10^{12}\text{eV}$ 的光子或电子在室内产生的电磁簇射,能在 X 光片上形成肉眼可见的黑斑,测量各层片子上的黑斑黑度可以推断 E_γ 。由于强子和 γ 在空气中衰减得很厉害,所以用于超高能研究的乳胶室,应尽可能大的面积,放置在尽可能高的高山上。

高山 EC 常能在几十厘米内记录到一些平行入射的 γ 。虽然是纯被动的探测器,不能算出时间先后,但由于大事件非常稀少,所以可安全地认为它们是同时事件,被称作“ γ 族”。它是发生在室上方大气中的某超高能核作用的产物。无疑,这个核作用是某个 EAS 核级联中的一个;考虑到能谱的陡下降,它特别可能是靠近 EAS 轴心的或核级联初期的一个。

日本-巴西合作的 Chacaltaya 山(5200 米)乳胶室、苏联帕米尔(4350 米)乳胶室,日本富士山(3750 米)乳胶室,中-日合作的干巴拉山(5500 米)乳胶室,已积累了 $4400[\text{米}^2 \cdot \text{年}]$ 的总实验量,获得了总能量 $\Sigma E_\gamma \geq 10^{14}\text{eV}$ 的 γ 族约一千例及一些 $\Sigma E_\gamma \geq 10^{15}\text{eV}$ 的 γ 族,使高山 EC 的研究能区遍及 $10^{14} \sim 10^{16}\text{eV}$ 。这里最突出的现象是某些各具特色的特殊型事例,及约 10% 的 γ 族呈双团或多团结构;另外横动量 $P_t \geq 5\text{GeV}/c$ 的报道也已不鲜见。

撒网取样的 EAS 阵

观测研究 EAS 全貌的设备是 EAS 阵列。它是以一种规律布置在野外的许多大面积积极探测器组成的

粒子探测器群。它着重于对 EAS 的全貌作取样观测,可以较经济地实现大面积化和自动化数据采集。

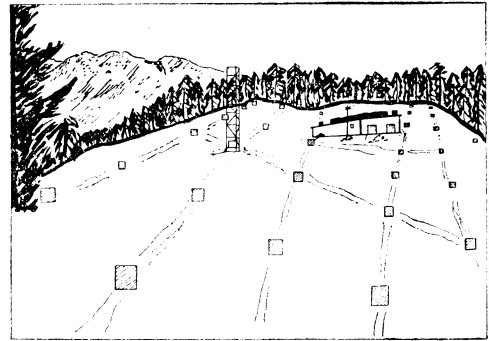


图 2 EAS 阵列一瞥

尽管阵列探测器可以各种各样,具体布置不尽相同,但任何阵列都须具有三个基本条件。① 有一群具有足够的线性动态范围的探测器,以在任何心距下取样电子密度(个别大阵列,只作 μ 子取样)。② 有一组块时间探测器测定到达方向。③ 有一套“全天候”的专用电子学系统管理和服务于阵列的长期稳定的自动化运转。这样的阵列是基础阵列,因为它的观测量如簇射轴在观测平面上的坐标、簇射的方向、表征簇射年龄的参数、簇射在观测水平拥有的总粒子数及初粒子能等是一个 EAS 的最基础的参数。具有多种探测器的复合阵列,可同时观测多种 EAS 成分的空间和时间分布、能谱、各种次粒子成分的相对含量及彼此的关联。

EAS 纵向发展,一向被看作是键数据。簇射的发展受控于初级粒子的性质和最初几次核作用的行为特征。高多重数、上升截面,必然造成 EAS 的快发展、早衰老;初级重核将比质子在高得多的地方发生首次核作用,并把能量分散给它分裂成的核子和碎片,从而导致 EAS 更早的发展和衰老。

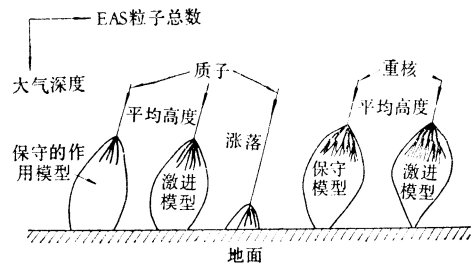


图 3 EAS 纵向发展与初级成分和超高能核作用模型的关系示意图

目前有关纵向发展的工作主要是一些状态参数的测量;关于纵向发展曲线的直接测量,实验上要难些。海平面的阵列只能看到簇射的衰老阶段(除非是特大的簇射);要直接观测稍早一点的阶段,就必须上山。现在的问题是:① 缺乏高高度处的纵向发展数据,虽然高高度数据可能具有强的成分——模型分辨力。有人

建议作一个国际合作的喜马拉雅山（在 6500 米左右）实验，不过实行起来并不那么容易。② 以往的数据是各家一小段，很难把它们合理地联合起来。如果能由同一个实验组用同一套设备，在几个不同的高度去测得一组统一的 EAS 纵向发展曲线，曲线的长度和统一性将可帮助我们排除某些二义性，而对初级宇宙线和超高能作用模型得到更为确切的认识。我国有着优越的高山工作条件，应当争取作出我们应有的贡献。

EAS + EC 联合实验

高山乳胶室的工作能区 (10^{14} — 10^{16} eV) 已与 EAS 能区的低端相重合，人们自然要问：它们能否联合观测？一当实现联合观测，将有什么新鲜的信息产生？

让我们把它们的一些特点罗列于下表。

我们看到，二者在物理目标和分析手段上都 very 一致，差别在于两个方面。其一是探测器类型、观测和研究方法上的。其二是二者取材上的差异，虽说都是

	EAS 研究	EC 研究
探测器	各种主动式探测器	被动式的 X 光片乳胶室
观测手段	使用自动触发记录的 EAS 阵，对 EAS 粒子作取样观测，去重建 EAS 整体。	用大面积的高山乳胶室，记录 EAS 中发生在室的上方的某近轴核作用的部分图象。
研究方法	通过大量事例的统计分析，研究 EAS 的平均行为和涨落行为。许多项目的物理分析需要模拟计算。	通过对该核作用产物中 π^0 的后代的空间和能量分布的测量，重建该核作用的主要面貌。物理分析须用模拟计算。
事例来自	几乎所有的 EAS，“无偏选择”。	部分易于在高山产生大 r 族的 EAS
物理目标	获取初级超高能宇宙线本身及超高能核作用主要特征的信息	获取超高能作用主要特征及初级宇宙线成分的信息。

EAS，只是全体和局部的区别，然而这种差别却可能具有更重要的意义，是值得人们认真注意和能动地加以利用的。

让我们分别站在 EC 和 EAS 的立场，来考察一下两个平时不大为人们注意的问题吧。

1. 高山乳胶室记录的大 r 族主要发生于什么样的 EAS 之中？

由于乳胶室本身没有时间分辨本领，人们不可能知道它所记录的大 r 族诞生于何年月日，出身于哪个 EAS 事例及这个 EAS 的特征参数是怎样的。然而可以想像，由于超高能宇宙线具有非单一的元素成分和六个量级跨度的连续能谱，并非任何 EAS 都有均等的机会在高山高度产生大 r 族。因为重核在大气中的核作用平均自由程较短（例如铁核的约为质子的 $1/6$ ），在高空就发展了 EAS，除非是初能特别高的重核 ($E_0 \gg \Sigma E_r$)，否则由于能量被众多的 EAS 次粒子所分散，是

很难有余力在高山高度创生出大的 r 族的（例如 r 总能量 $\Sigma E_r \geq 10^{14}$ eV 的）。又由于初级宇宙线流强随能量上升以负幂律减少，不可能想像高能重核对 r 族的记录会有显著的贡献。质子在大气中的平均自由程长，作用高度涨落大，有相当的机会穿透到大气深处才发展成 EAS。正是这些初能偏低又未得到充分发展的年少的 EAS，充当了产生 EC 大 r 族的“主力军”。

2. 伴随有大 r 族产生的 EAS 有何特点？

一些模拟计算已显示它与全体 EAS 的平均特征有明显的不同。有关情况可归纳如下表。

不难看出，在伴随有大 r 族的 EAS 之中，p-EAS 和重核-EAS 之间在 EAS 参数及其关联上存在显著的差别。那么，如果我们能挑出那些有着 r 族的 EAS 来，或者为每个 EC 大 r 族事例找到它所由出生的那个 EAS 并测出其特征参数来，我们将能有效地研究初级宇宙线的成分；也可利用小 N 、小 S 作判据，挑出一批由纯质子产生的 EAS 及其中大的 r 族来，研究质子与

EAS 参数	普通 EAS	伴随有大 r 族的 EAS	
		初粒子为质子 (p-EAS)	初粒子为重核 (重核—EAS)
$E_{0min}-A$ 关联	无关	E_{0min} 低	高; $A \nearrow, E_{0min} \nearrow$
ΣE_r-N 关联		无关	$N \nearrow, \Sigma E_r \nearrow$
$N-E_0$ 关联	$N \propto E_0$	无关	$N \propto E_0$
$S-N$ 关联	$N \nearrow, S \searrow$	$N \nearrow, S \nearrow; S < \bar{S}$	$N \nearrow, S \nearrow; S \lesssim \bar{S}$
$I(>N)$	陡下降	缓慢下降	陡下降

表中符号注释：

E_0 ，EAS 初粒子的能量，即 EAS 总能量。

E_{0min} ，产生该种 EAS 的最小 E_0 。

A ，初级宇宙线(裸核)的质量数。

N ，在某观测水平该 EAS 的荷电粒子总数，称 EAS “大小”。

S ，EAS 的年龄参数，愈小愈“年青” $S=1$ 为“壮年”

空气核的超高能作用，从而避免了历来因初级成分不清而带来的麻烦。与此同时，我们将能弄明白目前的 EC 数据与 EAS 数据在超高能作用的物理结论上存在分歧的真正原因(EC 数据被解释为超高能作用与加速器能区的外推无明显差别，但宇宙线中重核要占重要的比例；而许多 EAS 数据则要求作用特征有明显的改变)。

要实现上述理想，就需要把大面积的乳胶室放在 EAS 阵列的中央，作一个 EAS + EC 联合实验。实现联合实验的关键在于通过一个起桥梁作用的装置使被动式记录的 EC 与主动式的 EAS 阵列记录挂上钩。到目前，只有两个日本组作过一点小规模联合实验尝试。若进一步以数百平方米乳胶室规模实现 EAS + EC 联合实验可能会得到很有价值的结果。