



课程



左 雄

中科院高能所

校园宇宙线观测联盟技术组





校园宇宙线观测暑期学校

感受国之重器，从宇宙线观测开始

7月23-24日 北京

主办单位

校园宇宙线观测联盟

支持单位



国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心
National HEP Data Center



大气保护了生命 ——广延大气簇 射

主讲人：左雄



01 大气保护了生命

02 广延大气簇射的发现历程

03 什么是广延大气簇射

04 如何探测广延大气簇射

05 总结



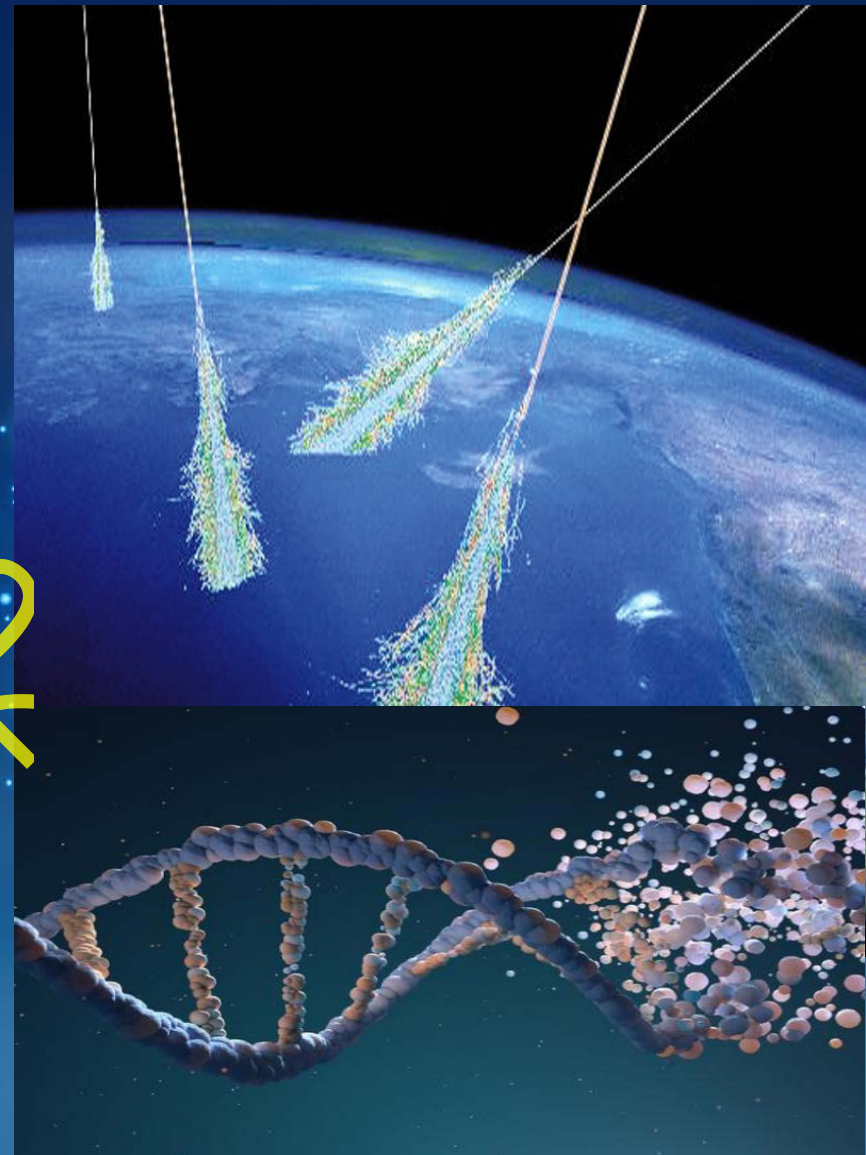
01

大气保护了生命



- 高空飞机上的辐射量是地面的 30-60 倍;
- 近地航天器的辐射量竟高达地面的 100-150 倍;
- 地磁场抵挡了绝大多数的低能 ($<1\text{GeV}$) 宇宙线;
- 大气充当护盾;
- ~每秒每平米 10^5 个粒子@ 1GeV ;
- ~每秒每平米160个粒子@海平面;
- 没有大气层的保护, 强辐射下的生物 DNA 和细胞发生不可逆的损害, 地球生物承受灭顶之灾

课堂知识问答1: 常见的辐射种类有哪些?



02

广延大气簇射的发现历程



赫斯等人观测到的辐射是否就是原初宇宙线信号？

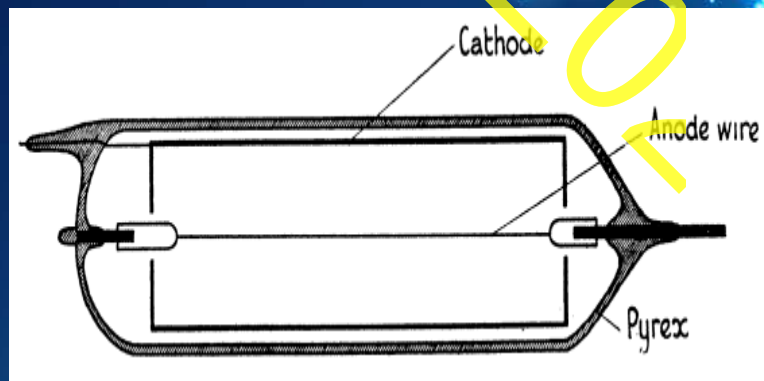
1928年云雾室、盖革计数器和符合测量技术发展，shower（簇射）概念被提出

不同的径迹明显来自于同一顶点，即称为属于一个簇射

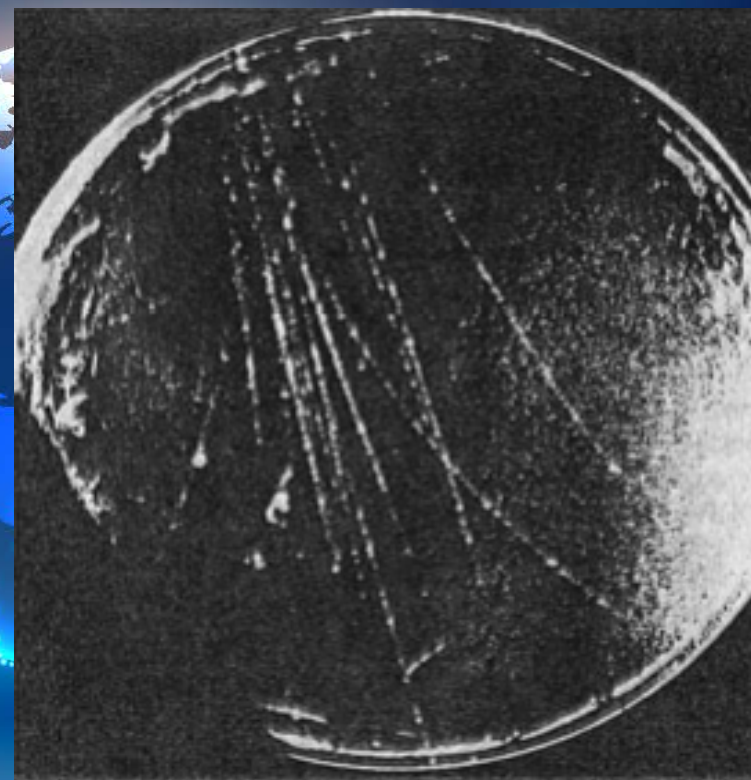
1932年，罗西等人测量结果表明，粒子的级联可以被三角排布的三个盖革计数器符合观测到

1933年，布莱克特和欧凯里尼观察到了打在云雾室附近的单个高能宇宙线粒子相互作用引起的多粒子径迹，他们称这样倍增过程为showers

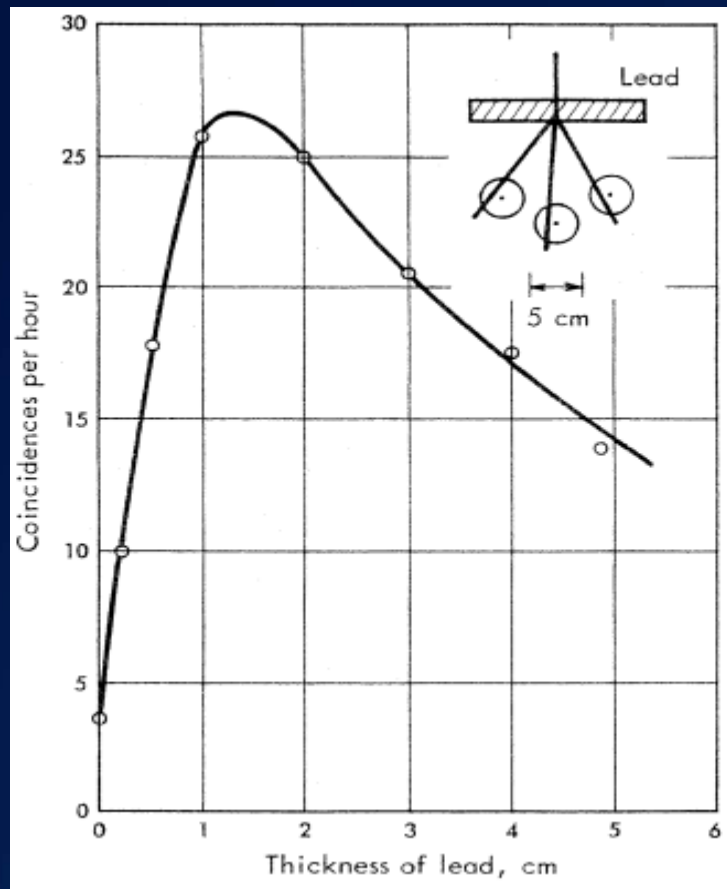
越来越多的独立的实验测量清晰地表明，簇射中的粒子有一个共同的源



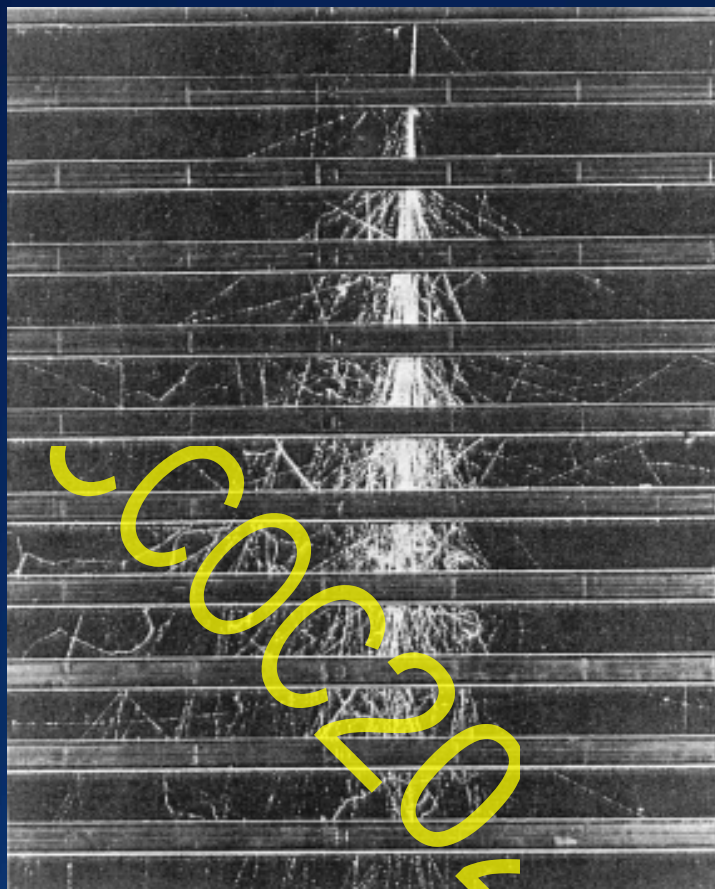
盖革-米勒计数器，射线在管内电离放大产生电脉冲被记录



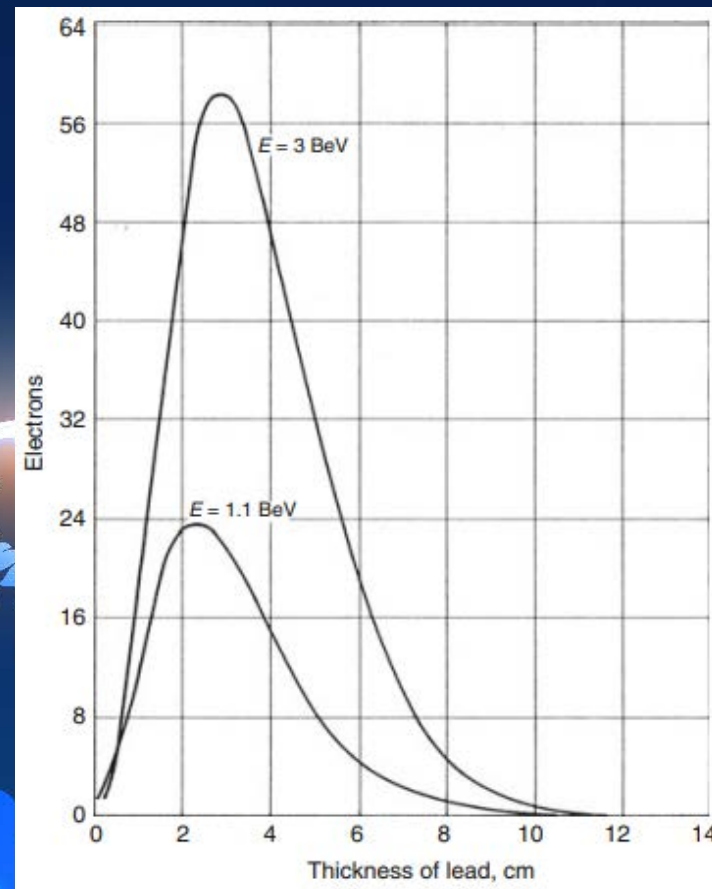
布莱克特和欧凯里尼建立的云室测量结果



当时普遍的想法是大气中的穿透辐射是原初宇宙线。罗西曲线的结果表明这是错的，簇射中的辐射更易在铅层中被吸收



高能电子或光子穿过多层黄铜板的云雾室，簇射发展过程被观测到



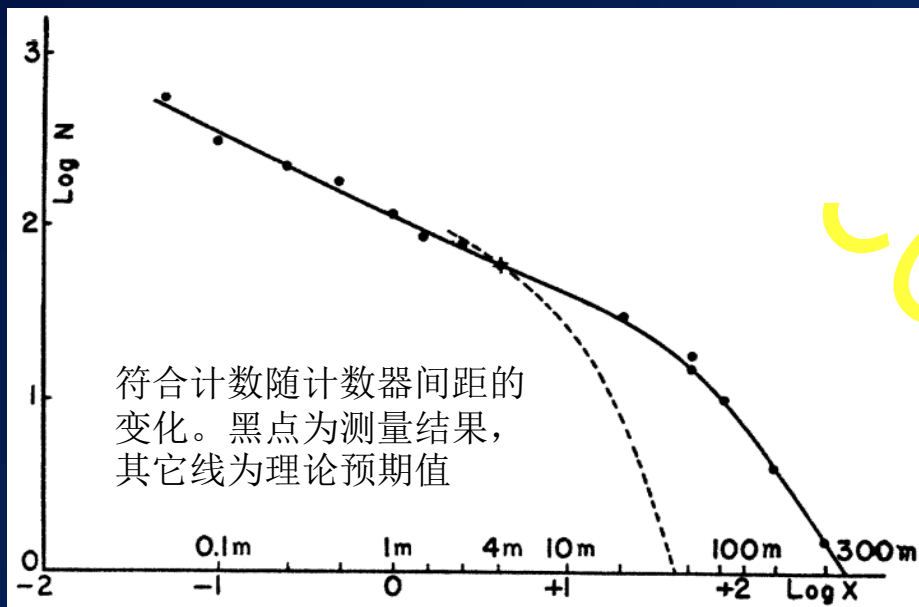
20世纪30年代，量子电动力学的成熟，完美解释了电磁级联簇射发展过程

"it looked as if...occasionally on the instruments very extended corpuscular showers came that produced coincidences between counters even rather far one from the other. Unfortunately I had no time to closer study this phenomenon".

与广延大气簇射的发现失之交臂！

1933年，意大利物理学家罗西在东非观测东西效应时就发现可能有扩展的粒子簇射到达并同时击中多个计数器

1946年，罗西和查才品领导的小组创建了首个探测广延大气簇射的探测器阵列（下图），开创了宇宙线研究的新天地



1938年，法国物理学家奥格尔通过在海拔3000多米的地方进行试验（上图），发现了原初(来自太空)宇宙线在进入大气时产生具有明显时间与空间效应的“粒子雨”过程，宣布发现了广延大气簇射；进一步测量得到了次级粒子的能量在 10^7eV 以上，结合次级粒子数目的估计可以得到原初宇宙线的能量在 10^{15}eV 以上



罗西与查才品领导的小组进行首次广延大气簇射结构的测量实验

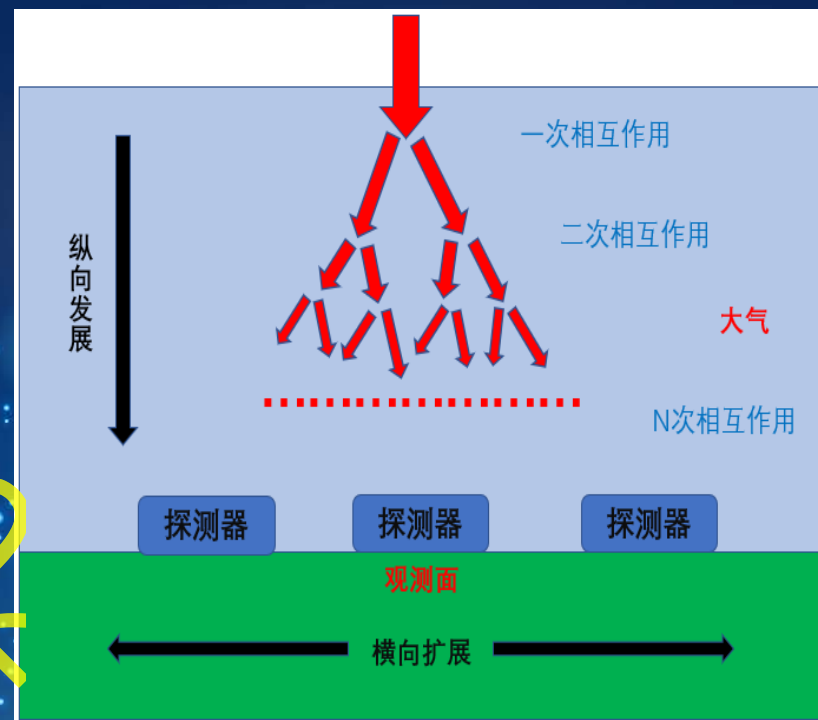
03

什么是广延大气簇射



3 什么是广延大气簇射

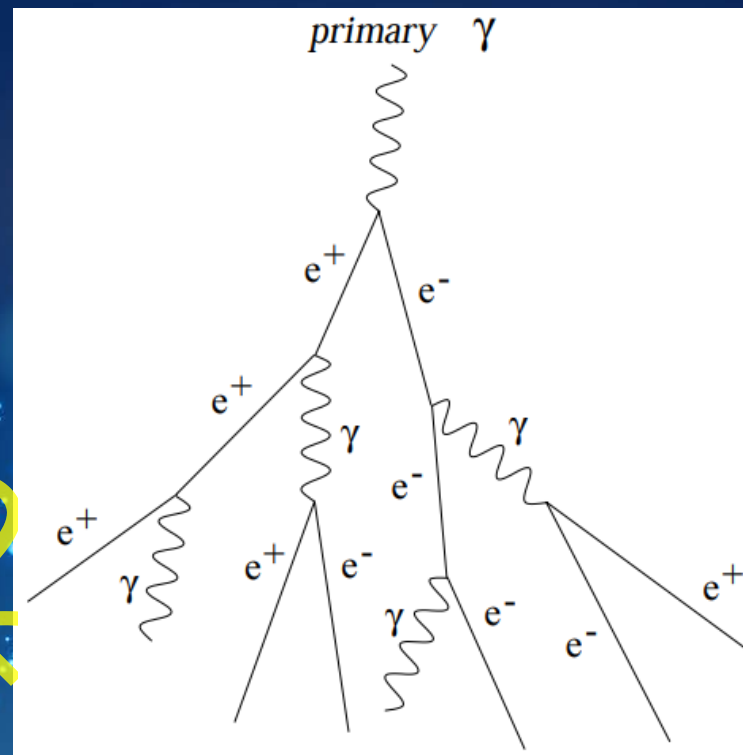
- 高能原初宇宙线与大气原子核碰撞产生次级粒子 $\Rightarrow$ 次级粒子继续与空气核碰撞产生新粒子.....;
- 多次倍增 $\Rightarrow$ 数目巨大的低能次级粒子;
- 一场瞬间 (10^{-9}s) 粒子“阵雨”;
- 电磁级联簇射和强子级联簇射



广延大气簇射示意图

3.1 电磁级联簇射

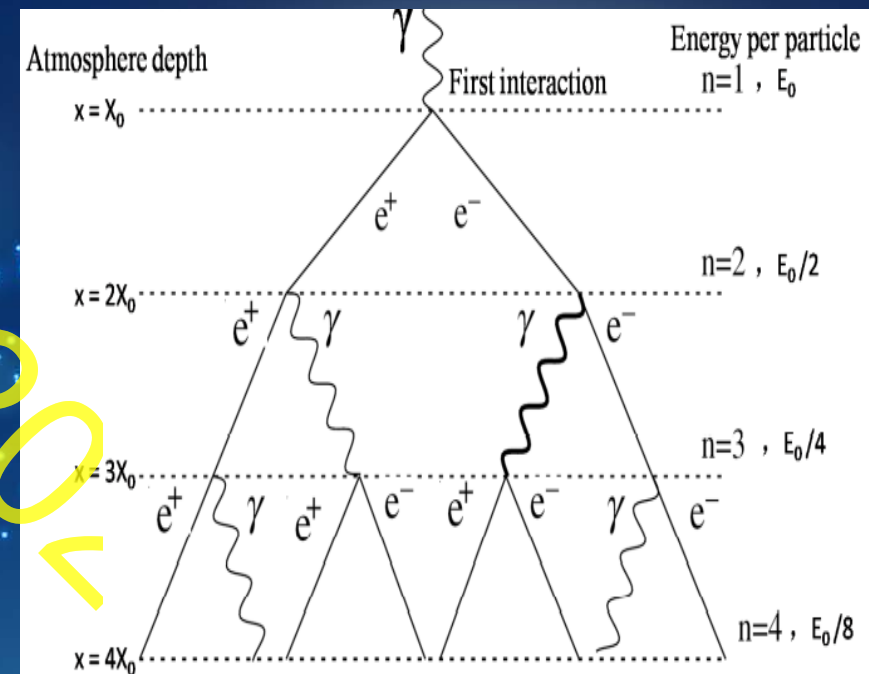
- 电子对产生：
 - $\gamma + (Z, A) \rightarrow e^+ + e^- + (Z, A)$
- 电子韧致辐射：
 - $e^\pm + (Z, A) \rightarrow e^\pm + \gamma + (Z, A)$
- 临界能量 E_c （电子的辐射能损和电离能损相等时的电子能量）处，簇射发展到极大；
- 此后电子的电离能损开始占主导地位，次级粒子数目快速衰减致使簇射走向衰落；
- 库仑散射=>横向扩展



电磁级联簇射示意图

3.1 电磁级联簇射简化模型

- 电子韧致辐射长度 (L_{br}) 近似等于光子的对产生长度 (L_{pair})，即 $L_{br}=L_{pair}=L_0$ ；
- 能量被2个次级粒子均分：
 - $X_0 = \ln 2 \times L_0$ ；
- 原初宇宙线粒子能量 E_0 ：
 - $E_0 = N \times E_c = 2^n \times E_c$ ；
 - $X_{max} = n \times X_0 = \ln(E_0/E_c) / \ln 2 \times \ln 2 \times L_0 = \ln(E_0/E_c) \times L_0$

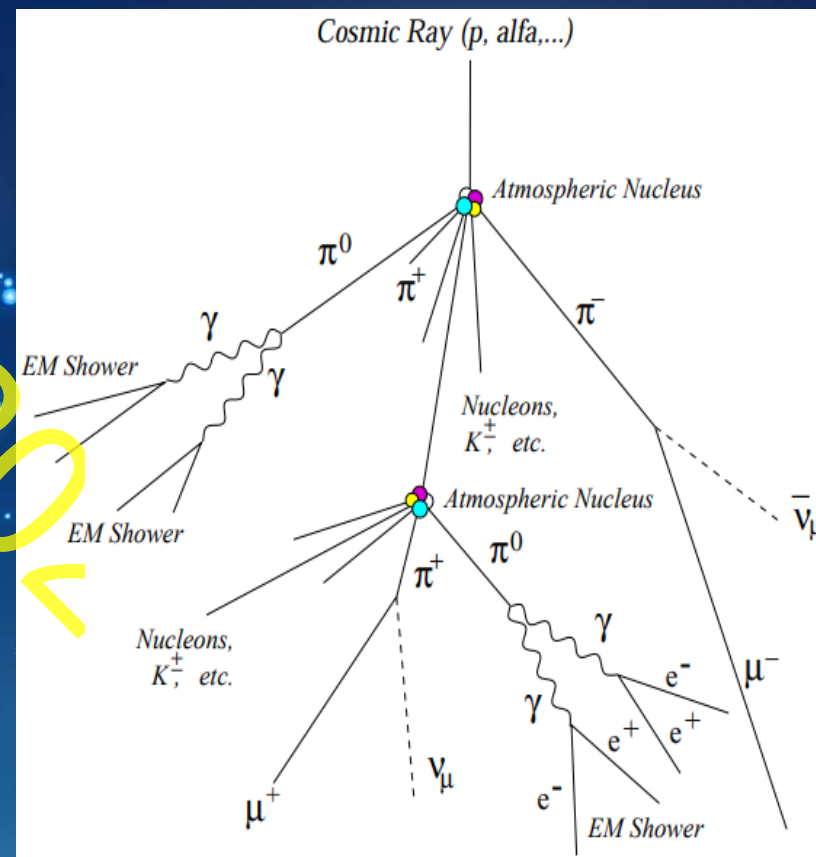


Heitler 模型中的电磁级联簇射示意图

$$N \propto E_0, \quad X_{max} \propto \ln E_0$$

3.2 强子级联簇射

- 核子—核子碰撞的产物：次级核子和 π 介子（ $\pi^\pm$ 、 π^0 ），还有少量的 κ 介子（ $\kappa^\pm$ 、 κ^0 ）和超子；
- 次级产物中的强子或者继续与空气核发生相互作用，或者发生衰变产生更多的次级粒子：
 - $\kappa^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - $\kappa^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$
 - $\kappa^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$
 - $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
- 次级粒子能量低于阈能 E_c^π （ $\sim 20\text{GeV}$ ，衰变开始占主导地位）时，强子级联簇射达到极大，随后快速衰落；
- 次级 π^0 衰变至双光子，继而引发电磁级联

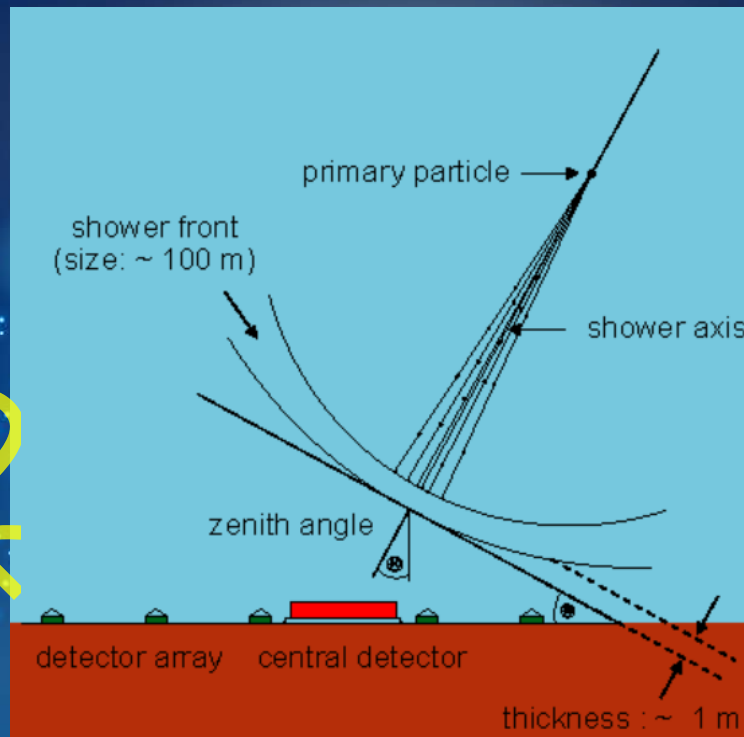


强子级联簇射示意图

课堂知识问答2：强子级联簇射和电磁级联簇射有哪些明显的不同？

3.3 次级粒子

- 接近光速沿原初宇宙线方向前进，散播在数百平方米到数百平方公里的面积上；
- 次级粒子呈圆盘状（前锋面），圆盘的中心厚度约为1米，密度最大，圆盘的边缘可扩展到百米；
- 粒子种类众多，最基本的有三种，电子、 γ 光子和 μ 子；
- 电子和 γ 光子在簇射发展极大处占主导，能量较低（MeV量级）；
- μ 子在海平面占主导，能量更高（大多为1 GeV以上），穿透力强



簇射前锋面示意图

课堂知识问答3：宇宙线发现初始年代里，科学家们测量到的辐射是原初宇宙线粒子还是次级粒子？

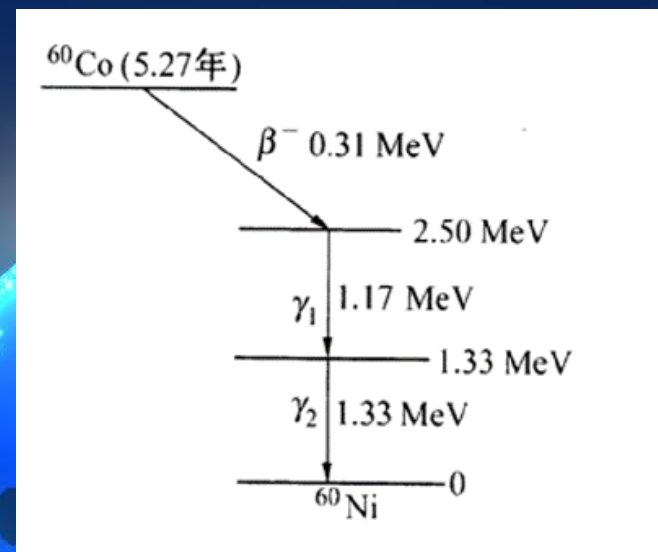
04

如何探测广延大气簇射



4 如何探测广延大气簇射 - - 符合法

- 符合法是研究相关事件的一种方法，相关事件是指两个或两个以上同时发生的事件，也叫符合事件；
- 具有内在因果关系的符合为真符合，没有因果关系的随机事件也存在偶然符合；
- ^{60}Co 接连放出的 β 与 γ 射线为真符合，而两个 ^{60}Co 同时衰变，一个放出的 β 射线，和另一个放出的 γ 射线的符合，则被称作偶然符合；
- 地面宇宙线实验中，会设置多重符合实现簇射的测量。在一定的时间和空间窗口内“着火”探测单元（即探测到次级粒子）个数大于某个值时，则记为一次有效的簇射事例



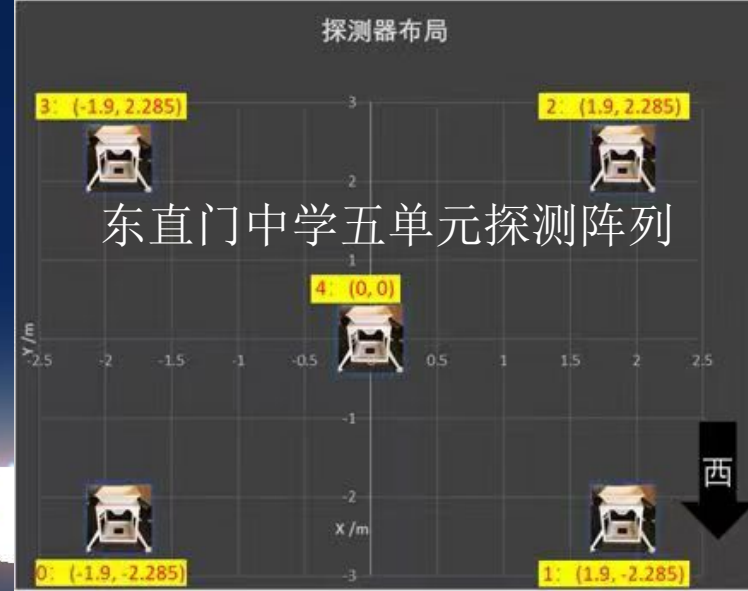
^{60}Co 的衰变图

$$n^{(k)} = (f^{(k-1)} + f_k) n^{(k-1)} n_k$$
$$f^{(k)} = f^{(k-1)} f_k / (f^{(k-1)} + f_k)$$

k 重偶然符合的计数率公式

4 如何探测广延大气簇射 - - 重建 (1)

- 通常是多个探测单元记录单个宇宙线事例的次级粒子分布信息和相对时间信息 => 重建出簇射事例的方向、入射位置和能量信息;
- 多个探测器单元探测到信号作为一个宇宙线事例的测量; 降低偶然符合概率, 提高真符合概率;
- 重心法是比较快速简单的芯位重建方法;
- 初步的能量重建中, 利用所有探测单元的粒子数加起来, 用来估计簇射的大小, 推断出原初宇宙线粒子的能量

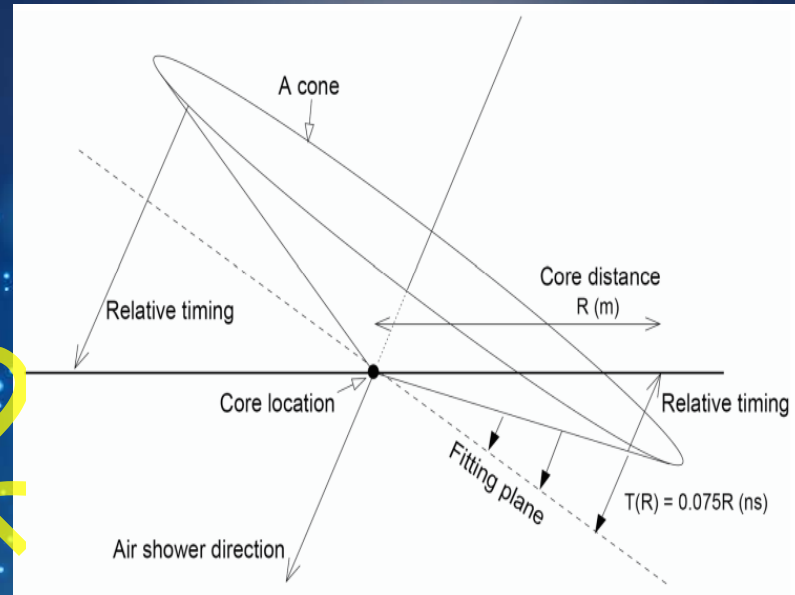


$$X_{core} = \frac{\sum_i \omega_i x_i}{\sum_i \omega_i} \quad Y_{core} = \frac{\sum_i \omega_i y_i}{\sum_i \omega_i}$$

利用重心法重建芯位, 其中 (X_{core}, Y_{core}) 为芯位坐标, (x_i, y_i) 是第 i 个着火探测器的坐标, 权重 ω_i 由探测单元的粒子密度决定

4 如何探测广延大气簇射 - - 重建 (2)

- 利用探测器着火的相对时间分布，可以重建出原初宇宙线的方向 $\vec{e} = (l, m, n)$ ，其中 l, m, n 是方向余弦，满足 $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ ；
- 簇射事例的前锋面可以用锥面来描述（右上）。以此构建 χ^2 公式（右下），其中 x_i, y_i, z_i 是第 i 个探测单元的坐标， t_i 为第 i 个探测单元的时间， w_i 为第 i 个探测单元的权重，权重用该探测单元的粒子密度估计， R_i 为第 i 个探测单元的位置到芯位的距离， α 为锥面角因子， c 是光速， t_0 为簇射前锋面到达坐标原点的时间。拟合实验数据得到相应的方向参数值

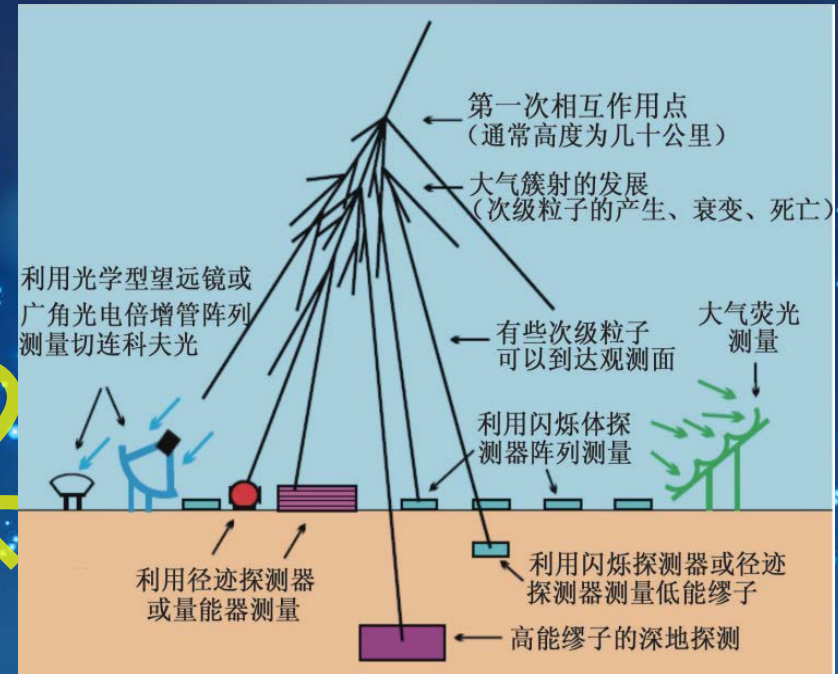


重建簇射方向模型示意图

$$\chi^2 = \sum_i w_i (c(t_i - T_0) - lx_i - my_i - nz_i - c \cdot \alpha R_i)^2$$

4 如何探测广延大气簇射 - - 地面宇宙线实验

- 地面广延簇射阵列（如ARGO实验、LHAASO实验）：铺设大面积的带电粒子探测器；宽视场、有效曝光时间长且探测效率高；
- 大气切仑科夫成像望远镜（如HESS，MAGIC，VERITAS 实验）：相对论带电次级粒子的速度超过空气中光的速度时，就会产生切仑科夫光。较好角分辨和能量分辨；
- 大气荧光望远镜（如HiRes实验和AUGER）：次级粒子电子会激发大气中的氮气，在退激过程中会发出各向同性的荧光。荧光产额很低，常用于极高能宇宙线（ $>10^{17}\text{eV}$ ）观测中

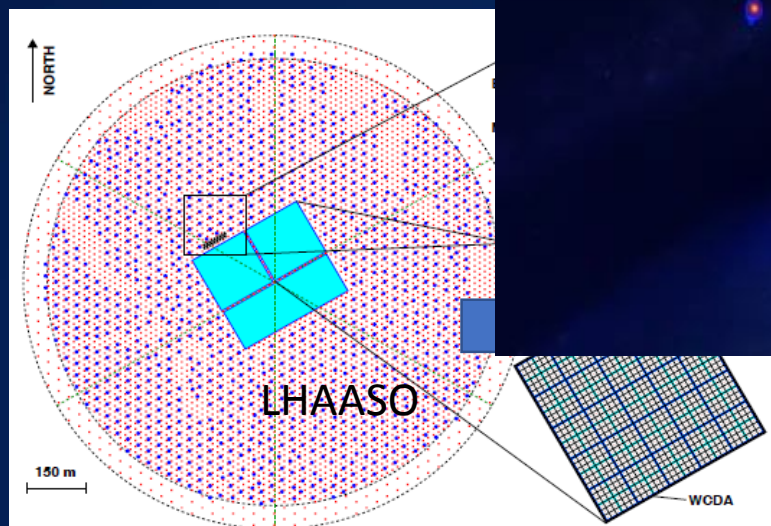


广延大气簇射过程及各种探测手段示意图

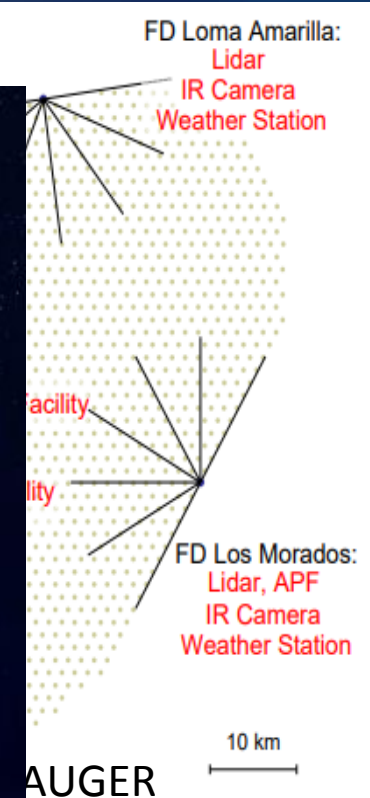
4 如何探测广延大气簇射 - - 地面宇宙线实验



2021年5月17日发表在
《Nature》杂志上



LHAASO（高海拔宇宙线观测站）在银河系内发现大量超高能宇宙加速器，并记录到最高1.4PeV伽马光子，这是人类观测到的最高能量光子，改变了人类对银河系的传统认知，开启“超高能伽马天文学”时代



05

总结

COCC2021



5.1 课程总结

- 由于地球大气层的存在，高能原初宇宙线通过与大气相互作用产生了广延大气簇射，转换成了数量巨大的低能次级粒子。随后低能次级粒子在大气中继续损耗，最终只有少部分到达人类生活的场所，这样的一个过程极大地保障了人类的正常生活。
- 人类对广延大气簇射的探测已经持续了近90年，从最初的几个盖革-弥勒计数器的符合测量，到目前先进的数量庞大的多种探测器手段的复合精确测量，我们对广延大气簇射的认知还在不断地深入过程中。

5.2 教学总结

- 教学目标：
 - 1、知识目标：
 - (1) 广延大气簇射的发现历史；
 - (2) 广延大气簇射的物理过程；
 - (3) 广延大气簇射的探测方法；
 - (4) 了解符合的概念；
 - 2、能力目标：
 - (1) 培养学生探究问题时，从现象出发，提出猜想，设计实验方案来论证猜想的能力。
 - (2) 训练学生通过现象探究本质的能力。
 - 3、德育目标：
 - (1) 通过广延大气簇射的发现过程，说明科学研究的长期性，延续性和艰巨性，渗透科学发现的方法论教育。
 - (2) 培养学生的猜想、归纳和动手能力。
- 教学重点：
 - 从放射性元素衰变理解符合测量，从广延大气簇射发现的历史进一步理解原初宇宙线与次级宇宙线的关系，理解级联过程，对宇宙线的能量有大概认知。
- 教学难点：
 - 符合测量，广延大气簇射的物理过程理解。
- 教学准备：
 - 盖革-弥勒计数管、东直门中学5个单元组成的探测器阵列。

