

宇宙射线乳胶室实验确定事例能量的面积法

④
31-36

白光治

(重庆建筑大学基础科学系 630045)

0572.1

A 摘要 讨论了宇宙射线乳胶室实验确定事例能量的常规方法,指出了它应用于强子事例和一些特殊事例时的困难。为解决这个问题可以建立一个新的方法,它被称为面积法。研究了这种新方法的理论基础和它的应用。

关键词 宇宙射线乳胶室, 事例能量确定, 面积法 宇宙线

中图法分类号 O572.1

宇宙射线是来自宇宙的高能粒子流。高山宇宙射线乳胶室实验是在 10^{14} — 10^{17} eV 能区研究超高能相互作用的重要手段,特别是在加速器能量尚未达到的能区和对撞机难于进行实验的碎裂区,乳胶室几乎是目前唯一的研究手段。因此,甘巴拉等几个大型宇宙射线乳胶室实验结果受到世界高能物理学界的普遍重视。事例能量确定是乳胶室实验的重要工作,为此已建立了一套系统的程式和方法。宇宙射线的组成主要可分为 $\gamma(e)$ 成分、强子成分和 μ 子成分等。由于这些成分在乳胶室中的行为不完全相同,因此必须对于确定能量的方法用于各种成分事例的情况作仔细的考察。作者曾提出利用 $D-t$ 图中 $D-t$ 曲线与横轴所围图形面积确定事例能量的方法^[1],它可以适用于更广泛的情况。

1 乳胶室工作原理

乳胶室是由感光层(核乳胶片和 X 光片)与吸收层(铅板或铁板)交替迭叠而成的粒子簇射探测器。它可以置于高山上以探测来自宇宙这个天然大加速器的超高能粒子。这种实验装置既是径迹仪,又是量能器。它对于粒子路径的测量精度可达毫米级,对于喷注簇射在乳胶室中沉积能量测量误差为 20%。

乳胶室对宇宙射线各种成分的探测原理稍有不同。

1.1 对 $\gamma(e)$ 成分的探测原理

进入乳胶室的 γ 射线或高能电子和乳胶室的吸收层(也称为作用层)作用而反复发生高能电子的韧致辐射和高能光子的对产生以及库仑散射等效应而形成电子—光子级联簇射(电磁级联),结果产生大量的 γ 光子和电子,这些光子和电子可在感光层的乳胶层中造成潜影(引起感光),经过处理后感光层中的核乳胶片上可观测到电子径迹, X 光片上则出现黑度可测的黑斑。由于电磁级联簇射在物质中的纵向发展和横向发展可用三维电磁级联理论来描述,因此可

收稿日期:1995-07-05

白光治,男,1938年生,教授

国家自然科学基金资助项目

由各层 X 光片上的黑斑位置和黑斑黑度 (或核乳胶片上的电子径迹密度) 来确定探测到的宇宙射线 $\gamma(e)$ 的入射天顶角、方位角、位置和能量。被乳胶室记录的粒子称为事例。

1.2 对强子成分的探测原理

宇宙射线中的强子如果进入乳胶室则会和乳胶室的作用层中的原子核发生强相互作用。由于非弹性散射和多重产生以及次级强子的同类作用的反复发生, 使强子数不断增殖而形成核级联簇射。核作用的次级粒子中的 π^0, η^0 等会衰变而出现高能 γ 光子, 这些 γ 光子继而产生电磁级联簇射。可见, 由 $\gamma(e)$ 引起的电磁级联和由强子引起的核级联—电磁级联最终都会使感光层感光而被记录下来。但是, 与 γ 簇射的单纯电磁级联不同, 强子簇射的核级联可引发多个起始点不一定相同的电磁级联。这样, 乳胶室记录的强子事例是多个起始点各异的电磁级联簇射的叠加。

1.3 对 μ 子成分的探测原理

高能宇宙射线 μ 子主要来自宇宙射线中次级 π, κ 介子的衰变, 由于 μ 子与物质的作用截面小, 故乳胶室对 μ 子的探测效率很低。高山乳胶室实验为区分出 μ 子, 常选取大天顶角 ($\theta > 65^\circ$) 事例。因而这样决定的 μ 子在乳胶室中穿过的层数很少, 一般只有一层。这就使我们不可能用确定 $\gamma(e)$ 事例能量的方法来确定 μ 子事例。确定 μ 子事例主要利用簇射的横向发展, 有它自己的一套程式^[2]。宇宙射线 μ 子与乳胶室的作用主要是 μ 子的韧致辐射, 直接对产生、在核上的非弹性散射和打击电子过程等而引发电磁级联使感光层感光。本文不讨论确定 μ 子事例能量的方法。

2 乳胶室事例能量测定——最大黑度法

目前事例能量测定是根据簇射在乳胶室内发展在 X 光片上留下的黑斑的最大黑度来标定, 这种方法我们简称为最大黑度法。

入射的宇宙射线 γ 或 e 引起的电磁级联簇射在室内的发展可以由三维电磁级联理论描述。由于乳胶室是研究作用在碎裂区的情况, 故可以采用西村纯的轴近似方法来计算。因为乳胶室是非单一物质构造, 可引入冲淡因子 d 和衰减因子 g 来修正, d 和 g 是由室结构决定的常数。对于倾斜入射的事例还需引入倾斜因子 $\beta, \beta \approx [\cos \theta]^{-1/2}$, θ 为事例的入射天顶角。我们假定乳胶室的感光层都同时包装有核乳胶片和 X 光片。那么, 初能为 E 的 $\gamma(e)$ 以天顶角 θ 射入乳胶室, 在距簇射起始点深度为 t (以辐射长度 $C.U.$ 为单位), 在离辐心半径为 r 的范围内, 有核乳胶片上存在的电子径迹数可以表示为

$$N(E r/k, t; d, g, \beta) = AF(s) \frac{H_1(s)}{s} |2\pi [a\lambda'_1(s)t + \frac{1}{s^2} \left(\frac{F'(s)}{F(s)}\right)^{1/2} \left(\frac{Er}{kdg\beta}\right)^2 \exp[a\lambda_1(s)t + bs]]$$

并满足

$$a\lambda'_1(s)t + \ln \frac{Er}{kdg\beta} + b - \frac{1}{s} + \frac{F'(s)}{F(s)} = 0$$

$F(s)$ 是 s 的慢函数:

$$F(s) = \frac{6}{7} \frac{3s^2 + 11s + 14}{(s+1)(s+2)(s+3)}$$

其中 s 是簇射的年龄参数, A, a, b 均为常数。而 $H_1(s), \lambda_1(s), \lambda_1'(s), \lambda_1''(s)$ 已经由 Rossi 等计算了^[1]。

根据上述近似公式则可以得到 $N_e - E - t$ 曲线。图 1 为甘巴拉乳胶室合作组使用的铁乳胶室的半径 $R = 50 \mu\text{m}$, $\text{tg}\theta = m = 0.50$ 的电子数—初能—深度的关系曲线 ($N_e - E - t$ 曲线)。这些曲线分别表示了初能 E 为 2、3、5、7、10、15、20、30 TeV。这样可以由半径 R 内的电

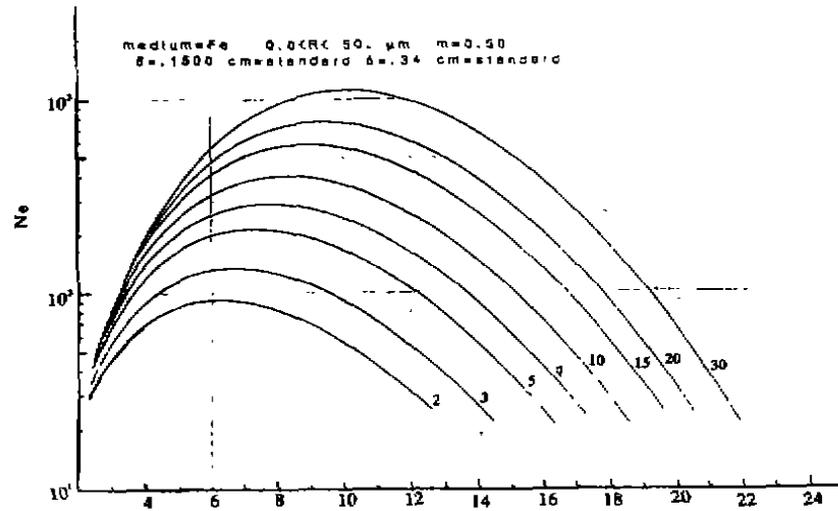


图 1 甘巴拉组的 Fe 室 $N_e - E - t$ 曲线

子径迹数来确定事例的能量。然而, 测量电子径迹数是非常烦杂而费时费力的工作, 它限制了乳胶室实验规模, 因此都用测量 X 光片上事例黑斑黑度来代替它。这可使测量速度提高千倍, 并容易实现测量的自动化。为此, 需要建立 X 光片黑斑黑度与核乳胶片上相应事例的电子密度之间的关系。这种关系对于不同型号的 X 光片和不同的处理条件是完全不同的。例如, 对于天津高银量 III 型 X 光片, 用日本小西六樱花 Konidol - X 显影配方在标准条件 (10 分钟, 20℃) 处理, 黑度 D 与电子径迹密度 ρ 之间的关系可表示为:

$$D = D_0 \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + (\alpha(\theta)\rho)^{0.6}} \right]^4 \right\}$$

式中 $D_0 = 5.5$, $\alpha(\theta) = 1.12 \cdot 10^{-9} (1 + 0.205 \text{tg}\theta)$ 。

这样, 通过数值计算或 Monte - Carlo 模拟计算则可以得到适用的 $D - E - t$ 曲线。图 2 为甘巴拉组使用的一张铁乳胶室 $D - E - t$ 曲线。其实验条件是日本 N 型双面 x 光片, 黑度测量孔隙为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 事例入射天顶角 θ 使 $m = \text{tg}\theta = 0.50$, 并在标准条件下 1 TeV 事例的最大黑度 $D_{\text{max}}(1 \text{ TeV}) = 0.070$ 。

我们的实验程序是: 对于实际的事例, 测量各层 X 光片上事例斑的黑度, 据此拟合出 $D - t$ 曲线, 得出此曲线决定的最大黑度 D_{max} , 用这个 D_{max} 与标准 $D - E - t$ 曲线上的 D_{max} 比较则可得到事例的能量 E 。同时, 我们还可以根据实际 $D - t$ 曲线与标准 $D - E - t$ 曲线的横向位置变动, 决定此事例的簇射起始点相对于乳胶室的位置。

实际上, 由于实验条件不可能完全标准和完全相同, 另外还受潜影退化等不定因素的影

响, 每一批实验得到的 $D_{max} - E$ 关系是不可能完全相同的。因此, 对每一批实验都要测定电子径迹密宽与黑度的关系, 作出 $D_{max} - E$ 曲线(定标曲线)。根据此曲线则可由 D_{max} 确定事例能量 E 。

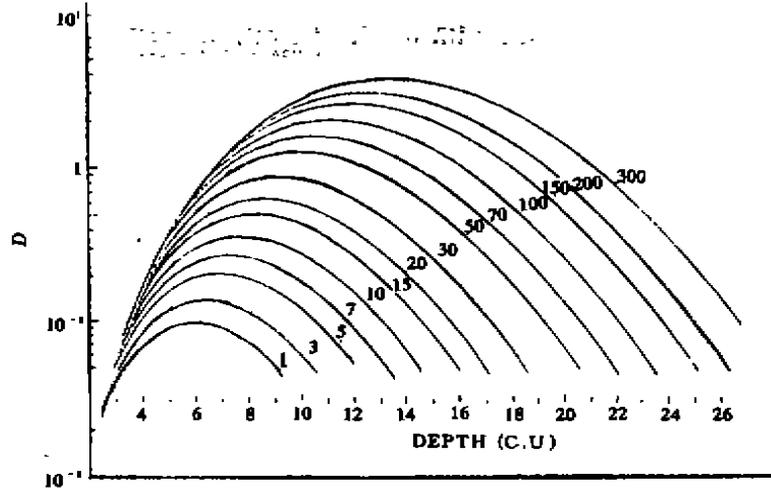


图 2 甘巴拉组的 Fe 室 $D - E - t$ 曲线

3 事例能量测定——面积法

对于 $\gamma(e)$ 事例用上述最大黑度法确定能量是可靠的和方便的, 但对于强子事例用此方法则不一定妥当。前边曾指出: 强子簇射是由核级联过渡到电磁级联, 它有别于 γ 簇射的单纯电磁级联。因此它们在乳胶室中得到的 $D - t$ 曲线是有区别的。我们曾经指出过这种区别, 即对于相同的最大黑度 D_{max} , 强子事例的 $D - t$ 曲线的半宽度 (FWHM) 较 $\gamma(e)$ 事例的要宽一些, 并可用这个差别来区分出强子事例^[4]。另外, 有一些事例的 $D - t$ 分布与标准情况差别

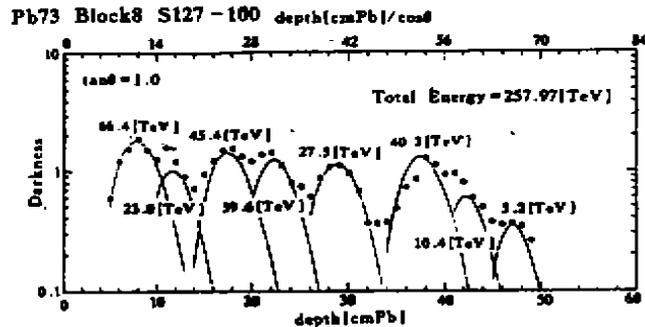


图 3 帕米尔厚铅室的一个典型事例, 黑度呈波浪式分布

很大^[1,5]。图3为帕米尔组厚铅室得到的一个事例的 $D-t$ 分布情况,它的 $D-t$ 曲线为波浪形^[5]。在处理这类事例时,如仍用常规的最大黑度法确定事例能量显然是不适宜的:首先不可能按标准曲线形式作出拟合曲线,如果硬性作出也必然超过实验误差允许的范围;其次用这样不恰当的拟合曲线的最大黑度定出的能量显然不能代表事例真实能量或观测能量。

乳胶室实验测得的能量实际上是高能粒子沉积在乳胶室的能量,这个能量应该对应于在乳胶室中簇射的总电子径迹长度 Le 。 Le 是包括在感光层和吸收层的所有电子径迹长度的迭加。一般来说,电子径迹密度是距轴的距离 r 和簇射深度 t 的函数 $\rho(r, t)$ 。在深度 t 处的电子径迹数

$$Ne(t) = \int_0^{\infty} 2\pi r \rho(r, t) dr$$

总电子径迹长度

$$Le = \int_0^{\infty} Ne(t) dt$$

上两式的积分上限是形式的,实际上只需取不太大的值。实验时,是在感光层抽样并测量出 $Ne(t)$ 。通过这些测量值可在 $Ne-t$ 坐标系内作出 $Ne-t$ 曲线,该曲线与横轴所围面积就是总电子径迹长度 Le 。

在感光层为 X 光片时,利用 ρ 和 D 之间的关系可知,总电子径迹长度 Le 对应于 $D-t$ 图上 $D-t$ 曲线与横轴所围的面积 S 。

$$S = \int_0^{\infty} D(t) dt$$

可见事例的观测能量可以用上述面积 S 来确定。在实际操作时,由于最大黑度法已有一套完善的程式和计算机程序,我们只需要对各种型号的 X 光片建立起各种入射天顶角的 $D-t$ 曲线的 D_{max} 与相应 S 之间的定量关系,就可以通过 S 找到 D_{max} 进而得到事例观测能量。图4就是由图2得到的 $D_{max}-S$ 关系曲线。这样,就可以测量 S , 通过 $D_{max}-S$ 曲线找到对应的 D_{max} , 再利用原有的程序得到事例的观测能量。这种方法我们简称面积法。

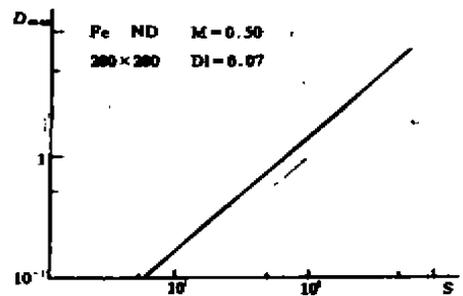


图4 甘巴拉铁室的 $D_{max}-S$ 关系曲线,与图2对应

在作 $D-t$ 拟合曲线时,最大黑度法用类似于标准曲线形式的 $D-t$ 曲线,而面积法采用最小二乘法作出尽可能接近实验点的光滑曲线。这种 $D-t$ 曲线形状不一定类似于标准 $D-t$ 曲线,它甚至可以是波浪形的,但它的两端必须与横轴相交,而左边交点的 t 值就是该事例的起始点深度。

由于强子簇射的复杂性,很难对强子事例作出标准的 $Ne-E-t$ 曲线和 $D-E-t$ 曲线。过去我们都是由 γ 事例的标准 $D-t$ 曲线去拟合强子事例,并由最大黑度法定出能量。由前面的讨论可知这种方法必然使误差增大。对于一些特殊的事例,一般采用多个不同起始点深度的 $\gamma(e)$ 的 $D-t$ 曲线迭加去拟合(图4)^[1,5],这样作很麻烦,也难用计算机自动操作,并且在实验允许的误差范围内,常常迭合是非唯一的。面积法避开了这些困难,用它可以确定各种

类型的事例。并很容易实现自动测量和计算机自动计算。

参 考 文 献

- 1 白光浴. 几个观测能量大于 30 TeV 的单斑事例. 第五届全国宇宙线会议文集, 1990, 116
- 2 范晓静等. 用高山乳胶室观测大天顶角超高能 μ 子. 高能物理与核物理, 1991, 15(2), 103
- 3 任敬儒. 乳胶室实验使用的黑度 - 能量转换曲线的计算. 山东大学学报(自然科学版), 1982, (3): 76
- 4 China - Japan EC collaboration, proceeding of international symposium on cosmic Ray superhigh energy interactions, 1986, 3-33
- 5 S Hasegawa, proceeding of V III international symposium on very high energh cosmic ray interactions, 1994, 115

(编辑·刘家凯)

On the Area Method Determining Energies of Events in Cosmic Ray Emulsion Chamber Experiments

Bai Guangzhi

(Department of Natural Sciences, Chongqing Jianzhu University)

Abstract In this paper the regular method determining energies of events that used in cosmic ray emulsion chamber experiments are discussed. The difficulties, which appear when this method is applied to harden events and some exceptional events, are pointed out. It is necessary to establish a new method determining energies of events so as to solve this problem. An area method has been proposed and its theoretic foundations and applications are studied.

Key Words cosmic ray emulsion chamber, Determining event energy, area method