

π^- 介子星裂探測器^{*†}

A. Ф. 杜納耶切夫 (A. Ф. Дунайцев)

Ю. Д. 布羅高舒金 (Ю. Д. Прокошкин) 唐孝威

摘 要

負 π 介子和許多其他粒子不同,它們在介質中停止处有效地产生星裂,从而释放出大量的能量。我們利用了这种現象来选择性地探測負 π 介子。

星裂探測器是个計数管望遠鏡。它由二个符合閃爍計数管組成。其中第一管是普通的閃爍計数管,它記錄透过粒子的效率是 100%。第二管的工作电压放得較低,使之只記錄負 π 介子在晶体中引起星裂而生的大的光脉冲;它記錄透过粒子的效率極低。第二管用能譜分析性能好的光电倍加管,由高稳定的电源来供应。

用星裂探測器可以迅速測量負 π 介子的射程和能量。例如对强度为 10^3 /秒的負 π 介子束,測量能量只需 15 分鐘。

这种探測器記錄粒子时有选择性。它只記錄星裂,而不記錄其他停止的带电粒子(例如負 μ 介子)。实验証明參看圖 7。我們所用的星裂探測器,对負 π 介子的灵敏度,比对負 μ 介子的灵敏度至少要大 20 倍。

一、前 言

π^- 介子在介質中停止时常常伴随着星裂反应(原子核吸收 π^- 介子而散裂),这时放出的能量值接近于 π 介子靜質量,即 140 兆电子伏。这和輕粒子及带正电的強作用粒子根本不同:輕粒子(例如 μ 介子和电子)不能产生大能量星裂,而带正电的強作用粒子(例如質子和正 π 介子等)只是在飞行中引起星裂,而且几率很小。簡單的星裂探測器,便是用閃爍計数管的晶体做介質,既用它来使粒子停止在内,发生星裂,又用它来記錄星裂所生的脉冲。創造这种对于其他粒子不灵敏、而对于 π^- 介子有选择本領的星裂探測器,在原則上是毫无問題的。因为只要提高对閃爍計数管輸出脉冲的甄別閾,就可以調节記錄其他粒子的效率到任意小。但是与此同时,記錄星裂的效率也会降低(当然降低得并不太快)。能不能創造出效率够高的有实用意义的星裂探測器呢?本文从实验上来回答这个問題。

重要的是比較 π^- 介子及其他粒子(例如 π^+ 介子)在閃爍晶体中所生的脉冲振幅譜。如果这二类脉冲譜的很大部分不相重迭,那么高效率星裂探測器的可能性就可以实现。

二、脉 冲 譜

我們用圖 1 的設備来測定脉冲譜。負 π 介子束是联合原子核研究所核子問題實驗室

* 1960 年 7 月 21 日收到。

† 关于这个探測器的簡單报导,參見文献[1]。

加速器内产生的。图示能量 170 兆电子伏的 π^- 介子束经过准直器后,通过碳吸收片。用

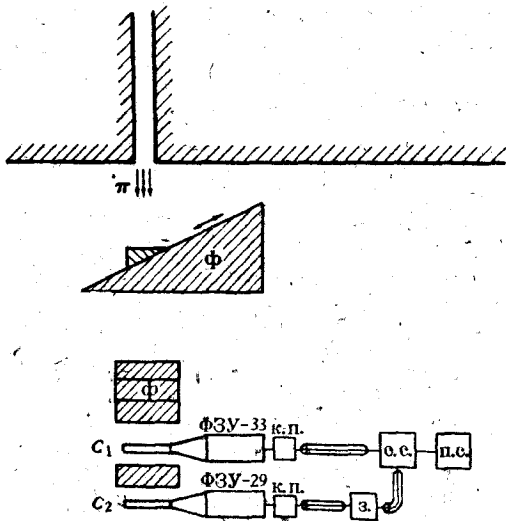


图1 探测器安排示意图。 C_1C_2 ——闪烁计数管。
K. П.——阴极跟随器。 C. C.——符合电路。
П. С.——定标器。 3——可变延迟线(达 5×10^{-8}
秒)。在电压 V_2 值不同时,要调节可变延迟线来补
偿计数管 C_1C_2 脉冲间的时间差异。 Φ ——慢化
介子所用的吸收片。

二个接到符合的闪烁计数管所组成的望远镜,记录慢化了的 π^- 介子。二管都用塑料晶体,大小是 $6 \times 6 \times 1.5$ (厘米)³。第一管用光电倍加管 $\Phi 3V-33$, 时间性能好。第二管用光电倍加管 $\Phi 3V-29$, 振幅分析性能好。所用电桥式符合电路,是由半导体二极管 $D-2A$ 组成的。符合电路分辨时间约 10^{-8} 秒。它决定于短路成形电缆的长度。符合电路输出脉冲送到振幅分析器 $AAO-1$ 的控制电路,而第二管 C_2 输出的受分析脉冲则送到振幅分析器的输入处。

测量了在不同厚度吸收片时的脉冲振幅谱(图 2a)。图中(I)是相对论性粒子透过晶体 C_2 时的脉冲谱。(II)是 π^- 介子能量几乎已全部失去,但仍未在 C_2 中停止时的脉冲谱。(III)是多数 π^- 介子在 C_2 中停止时的脉冲谱。在(III)中,全部入射负 π^- 介子中约 20% 在晶体中停止,其他的透过

晶体。透过的 π^- 介子脉冲谱形状应当和图 2a 中(II)相象,所以在(III)中除去(II)(加上相应的归一化),就可以分析出纯粹由于停止 π^- 介子的脉冲谱(图 2b)。

π^- 介子在晶体中停止时,释放能量的过程有连续的二步:第一步是 π^- 介子停止而有

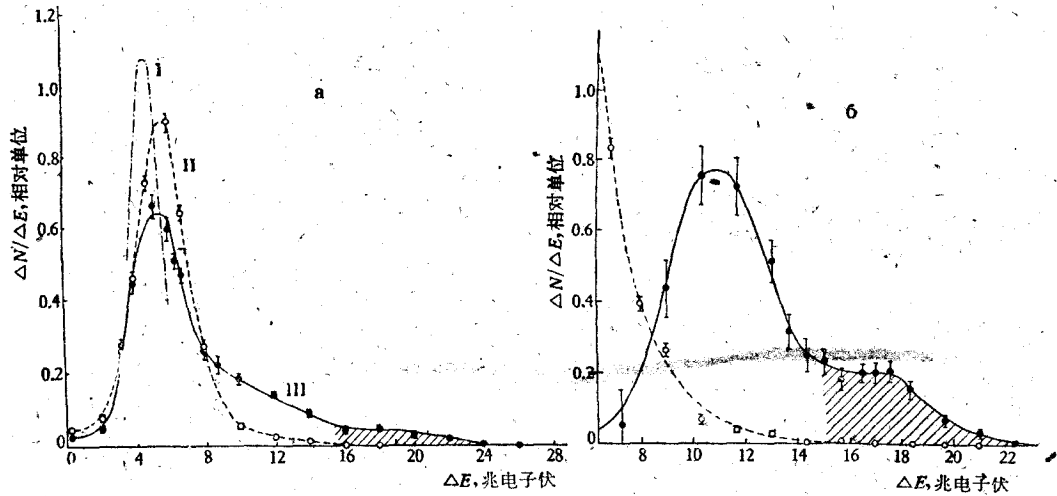


图2 计数管 C_2 中的脉冲谱。横轴是 π^- 介子在晶体中放出的能量值。所有脉冲谱都归一化到相同面积。

图中划着斜线的面积表示星裂脉冲谱中和停止粒子脉冲谱不相重叠的部分。

- a) I——相对论性 π^- 介子透过晶体时产生的脉冲谱。所用 π^- 介子的剩余射程是 50 克/厘米² 碳,射程起伏是 ± 4 克/厘米²。II——所用 π^- 介子剩余射程是 10 克/厘米² 碳。III——所用 π^- 介子剩余射程是零。b) 王: 停止在晶体中的 π^- 介子的脉冲谱。⊙: 曲线 II 的一部分。

电离损耗(在我们的条件下,约是 10 兆电子伏);第二步是 π^- 介子被原子核吸收引起星裂,裂片飞散而在晶体中留下一部分能量. 这二步各自产生脉冲谱,即“停止粒子脉冲谱”和“星裂脉冲谱”. 图 2b 中的脉冲谱是二者的迭合. 只有 π^- 介子才有“星裂脉冲谱”,而 π^- 介子和 π^+ 介子的“停止粒子脉冲谱”,则都是一样的(在 μ 介子时,这个谱略略移向小脉冲方面).

我们用平均能量相同(70 兆电子伏)、而且射程起伏相同的 π^- 和 π^+ 介子束做实验,比较了 π^- 介子和 π^+ 介子的脉冲谱. 结果表明,停止 π^- 介子的脉冲中,约有三分之一的比起“停止粒子脉冲谱”的最大脉冲还高. 这部分脉冲在图 2 中用斜线标出. 由此可知,星裂探测器记录停止的 π^- 介子的效率,将是很高的(约 30%).

三、效 率

选取 π^- 介子星裂的方法,可以是对计数管 C_2 输出脉冲加甄别阈,使小脉冲不能到达符合电路;也可以是降低加在这个光电倍增管上的电压 V_2 . 图 3 表示电压 V_2 减小时,探测器特性曲线的变化(所用的 V_2 值,都只有相对的意义). 这特性曲线是望远镜计数数目对于 π^- 介子穿过物质层厚度 R (包括吸收片和晶体)的关系. 实验所用 π^- 介子的平均射程是 62.5 克/厘米² 碳,相当能量是 170 兆电子伏. 射程起伏(包括统计起伏及束的非单能性)等于 ± 4 克/厘米².

电压 V_2 高时 ($V_2 \geq 1400$ 伏),透过及停止的 π^- 介子记录效率都接近于 1,且在 V_2 略变化时几乎不变. 这时曲线 $N(R)$ 即是积分射程分布曲线. 电压 V_2 小于 1400 伏后曲线形状有很大变化. 吸收片厚度 $R \leq 50$ 克/厘米² 的一段中,望远镜只记录透过的 π^- 介子. 吸收片厚度 $58 \leq R \leq 66$ 克/厘米² 的一段中,望远镜除透过的 π^- 介子外,还记录在晶体 C_2 中停止的 π^- 介子. 当 V_2 减少时前一段中计数率降低比后一段中要快得多. 随着 V_2 减小,曲线 $N(R)$ 形状发生变化,一直继续到 $V_2 = 1100$ 伏. 电压 V_2 再减少时,“尖峰”形状不再变化. 在吸收片厚度不同的几段中,计数率 N 都同样地随 V_2 的减少而减少. 这时曲线 $N(R)$ 实际上和微分射程分布曲线相一致.

很容易从 π^- 介子射程分布曲线和量到的 $N(R)$ 曲线,求出对于透过 π^- 介子(ϵ_0)及停止 π^- 介子(ϵ_{st})的记录效率. 计算这些效率(图 4)时,除了用图 3 曲线外,还用了能量为

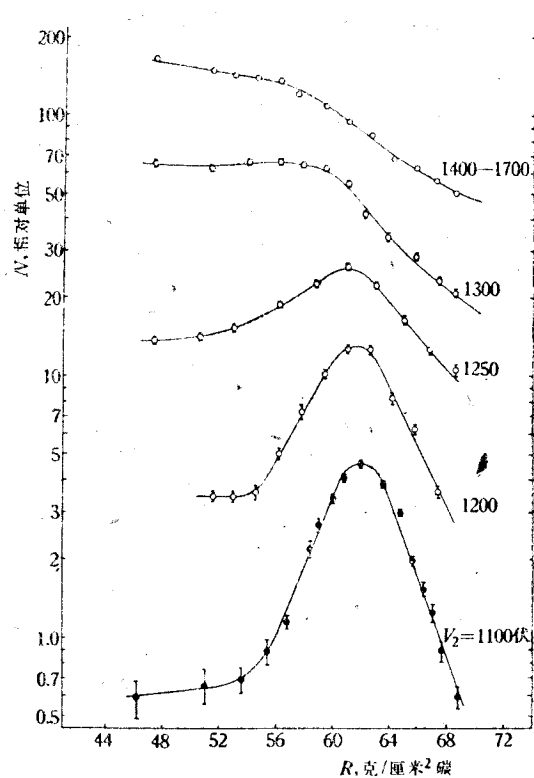


图 3 不同电压值 V_2 下的 $N(R)$ 曲线.

67 兆电子伏 π^- 介子束的类似实验曲线。从图 4 可以看出,在起初,效率 ϵ_0 随电压而减小得比 ϵ_{st} 的减少快得多,这结果是和图 2 脉冲谱相应的。在低电压时,比值 ϵ_{st}/ϵ_0 的增长变慢了。在 $V_2 \lesssim 1100$ 伏的区域中,这个比值已和 V_2 无关(图 5)。比值 ϵ_{st}/ϵ_0 的这种性质

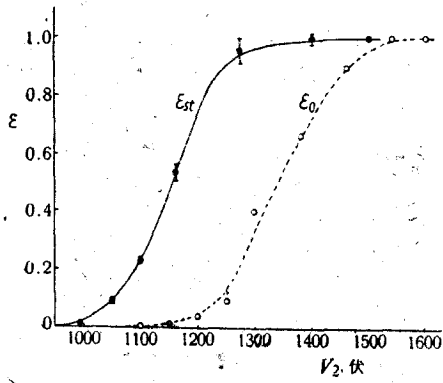


图 4 探测器效率。●— ϵ_{st} , ○— ϵ_0 。
效率 ϵ_0 是用剩余射程为 10 克/厘米² 碳的 π^- 介子测量的。

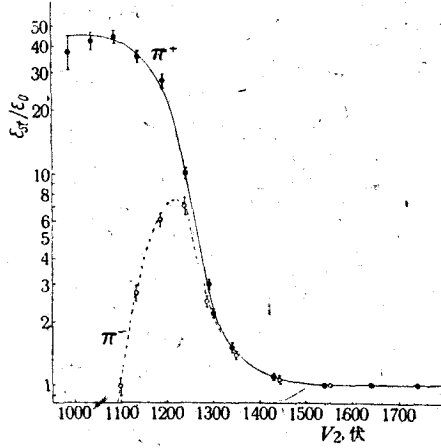


图 5 ϵ_{st}/ϵ_0 的比值。
●— π^- 介子, ○— π^+ 介子。

是可以理解的,因为 π^- 介子既在物质中停止时产生星裂,又在飞行中产生星裂。这二个过程的几率比,对于我们所用的晶体说,约等于 50。

如果探测器是用来记录 π^+ 介子(图 5), 比值 ϵ_{st}/ϵ_0 随电压 V_2 变化的情形就不同了。 π^+ 介子和 π^- 介子不同,它们只在飞行中才产生星裂。在 V_2 大时,探测器对“停止粒子脉冲谱”都能有效地记录,所以这时 π^+ 及 π^- 介子的 ϵ_{st}/ϵ_0 值相符合。当电压低到探测器只能记录星裂时, π^+ 介子的记录效率 ϵ_{st} 就降低,而相应的比值 ϵ_{st}/ϵ_0 也就很快地变小。

比较图 5 曲线可知:在电压 $V_2 \lesssim 1100$ 伏时,望远镜开始起星裂探测器的作用。相应于这个电压的效率 ϵ_{st} 大约是 30%。此值和前面从脉冲谱得到的估计相一致。必须指出,在晶体中停止的 π^- 介子的记录效率 ϵ_{st} ,显然和打到探测器上的 π^- 介子的记录效率 (w)

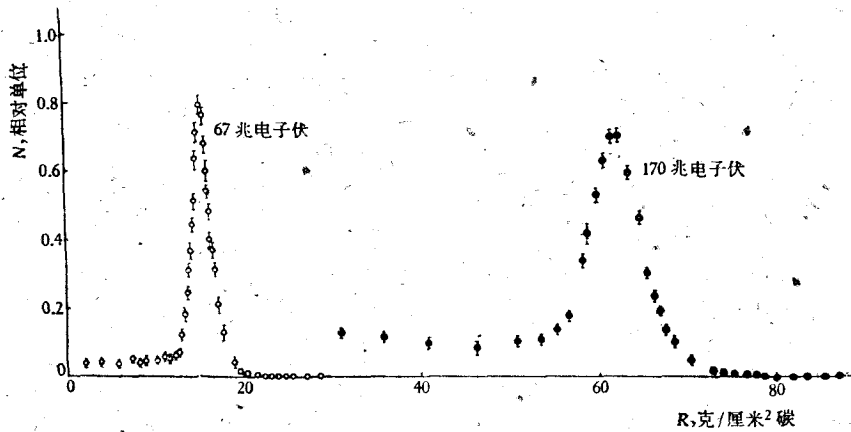


图 6 能量是 67 兆电子伏(○)和 170 兆电子伏(●)的 π^- 介子束的射程曲线。 $V_2 = 1100$ 伏。

不同。在我們的条件下， w 比起 ϵ_{st} 要小得多。这是由于：1) 介子在穿过探测器吸收片时减少，以及 2) 所用晶体厚度比較薄。如果用厚晶体，厚度相当于介子射程的起伏，那么第二个因素便消失。这时比值 w/ϵ_{st} 在 π^- 介子能量为 65 兆电子伏时約为 70%，在 π^- 介子能量为 170 兆电子伏时为 40%。厚晶体的星裂探测器可以用于 π^- 介子记录效率需要高的实验中。

图 6 表示用星裂探测器量得的典型射程曲线。曲线是在二个不同的 π^- 介子束上量得的，它们的平均能量分别是 67 兆电子伏和 170 兆电子伏。

四、选择本领

星裂探测器只记录停止 π^- 介子产生的大能量星裂，而对其他不产生这种星裂的粒子不灵敏。这选择本领可以用选择系数 K 来标志。 K 是停止 π^- 介子记录效率和其他粒子记录效率的比值。“其他粒子”可以指停止在晶体中的（这时 K 写作 K_{st} ），也可以指透过探测器的（这时 K 写作 K_0 ）。

μ^- 介子和电子——它们在飞行中或停止时都不产生大能量星裂（ μ^- 介子在原子量大的物质中停止时，可产生星裂，但放出的能量很少）。所以用减小电压 V_2 的方法，可以调节选择系数 K_{st} 和 K_0 到任意大，而且 $K_0 \gg K_{st}$ 。图 7 表示用星裂探测器量到的 170 兆电子伏 π^- 介子及其中所含 μ^- 介子的一部分射程曲线。假若 μ^- 介子的记录效率和 π^- 介子一样，也就是说，假若 $K_{st} = 1$ ，那么量到的曲线 $N(R)$ 在大厚度时将会有象图中虚线表示的结果。但实验上这部分并没有任何隆起，因而可以推论 $K_{st} \geq 30$ 。可见当电压 $V_2 = 1100$ 伏时（接近于星裂探测器的边缘时），对 μ^- 介子已经有很大的选择系数 K 。显然这个结果对 μ^+ 介子同样是适用的。电子穿过晶体时能耗更小，所以对电子的选择系数 K ，应当比 μ^- 介子还大。

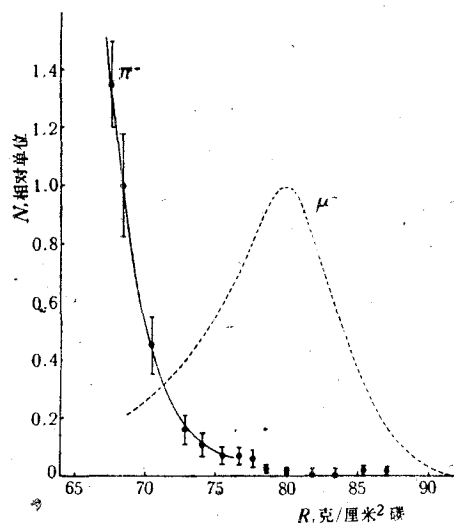


图 7 图示星裂探测器对于 μ^- 介子不灵敏， \bullet 表示测量的射程曲线，虚线表示 μ^- 的实际射程曲线。
 $V_2 = 1100$ 伏。

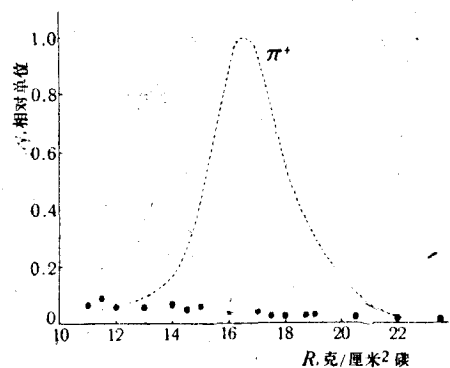


图 8 同图 7。但对于 π^+ 介子。平均能量是 67 兆电子伏。

π^+ 介子——实验表明了, 对于透过的 π^+ 介子, 结果和对于透过的 π^- 介子一样, 即 $K_0 \approx 50$. 对于其他核反应活泼的粒子, K_0 也应当相同. 因为他们都在飞行中产生星裂, 几率也相近. 对 π^+ 介子, K_{st} 值接近于对 μ 介子的 K_{st} 值(见图 8), 同样也可以用减低电压 V_2 的方法来使 K_{st} 变大.

重粒子——对于比 π 介子更重的粒子, 星裂探测器的灵敏度还没有测量过. 但是可以预料, 当粒子质量增大时, K_{st} 值会减小.

五、其他形式

(一) 停止粒子探测器

上面已经说过, 望远镜只在电压 V_2 等于 1100 到 1150 伏以下, 才起星裂探测器的作用. 如果再增加电压 50 到 100 伏, 属于“停止粒子脉冲谱”的脉冲, 也开始被望远镜所记录. 这时, 如图 4, 5 所表示的, 停止粒子记录效率 ϵ_{st} 可以近于 1, 而同时比值 ϵ_{st}/ϵ_0 仍旧很大. 望远镜起了停止粒子探测器的作用. 它和星裂探测器的区别是, 它对 π^- 介子, π^+ , μ^+ , μ^- 介子的灵敏度都相同(图 9).

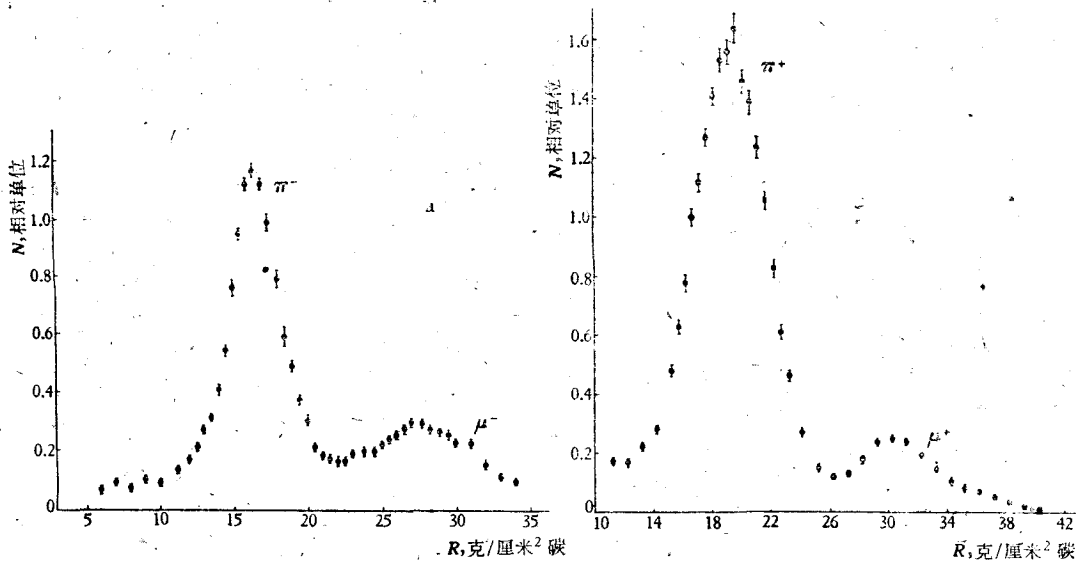


图 9 用停止粒子探测器量到的射程曲线.

- a) 动量是 150 兆电子伏/C 的 π^- 介子和 μ^- 介子束 (π^- 介子的能量是 67 兆电子伏)
 b) 动量是 163 兆电子伏/C 的 π^+ 介子和 μ^+ 介子束.

$$V_2 = 1250 \text{ 伏.}$$

当 π 介子束强度 $\approx 10^4$ /秒时, 停止粒子探测器的计数率可达每秒几百次. 这么大的计数率使得测量射程曲线 $N(R)$ 的过程可以自动化. 在实验过程中用这种方法可很快测定粒子束的能量. 我们将符合电路输出接到自动扫描器的积分电路, 而且使自动扫描器的马达的转动和改变吸收片厚度(图 1)的马达同步. 图 10 表示这样量得的典型的射程曲线. 测量所需的全部时间总共只要几分钟.

(二) 单管計数方法

当用星裂探測器在 π^- 介子束上工作时, 第二管 C_2 记录的脉冲数目很多, 且比其它本底脉冲多得多. 这就使得简化星裂探測器成为可能. 我们将望远镜中第一管 C_1 去掉, 而把定标器输入头直接接到管子 C_2 的输出. 用这种简化探測器量到的 70 兆电子伏 π^- 介子的射程曲线, 和实际的射程曲线差异很少. 但是, 这种单管計数的星裂探測器, 恐不能用于更困难的本地条件下, 例如在引出的质子或中子束上工作.

(三) 普通計数管望远镜接法

即是把 C_2 計数管换上类似于 C_1 的計数管 (时间分析性能好而脉冲分析性能较差的). 当然, 这时得不到很大的如图 5 的 ϵ_{st}/ϵ_0 比值, 而只得到 10 至 20 的比值. 但在实用上这是很方便的, 就可以用普通閃爍望远镜, 而不必加上任何重大的改动. 为了粗略测定 π^- 介子的射程曲线起见, 只要用改变第二管閾值的方法, 就可以把普通的計数管望远镜改成星裂探測器.

六、結 論

星裂探測器的性能可总结如下: 它的工作电压区域分成根本不同的三部分. 第一, 低电压区域 (星裂探測器区), 电压小于 1100 伏左右, 望远镜起星裂探測器的作用. 它可以把在晶体中停止的 π 介子和其他停止或透过的粒子, 有效地区别开来. 对我们选用的光电倍增管說, 这个区域的范围是 150 到 200 伏寬. 第二, 中电压区域 (停止粒子探測器区), 电压在 1200 到 1270 伏. 这时探測器一視同仁地记录停止的 π 介子和 μ 介子 (包括正介子及負介子). 第三, 高电压区域 (普通計数管望远镜区), 电压大于 1400 伏时, 探測器不再有任何选择本领, 它的工作特性如同“普通”的計数管望远镜一样.

这种探測器还可以用来作为能譜仪, 特别是在周围本底很大的条件下, 測量 π^- 介子能譜.

最后要指出, 星裂探測器的实用价值很大. 它十分简单, 安装容易, 工作稳定. 在一年的工作过程中, 我們所用星裂探測器的参数沒有发生什么变化.

参 考 文 献

- [1] А. Ф. Дунайцев, Ю. Д. Прокошкян., Тан Сяо-Вэй (唐孝威) Приборы и техника эксперимента 1960. (印刷中). 及唐孝威: Proceeding of the International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation p. 592, (1959) CERN, Geneva.

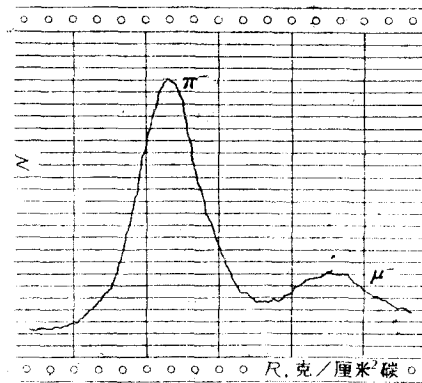


图 10 用自动记录积分器记录下来的射程曲线。
 $V_2 = 1250$ 伏。

STAR-DETECTOR FOR π^- -MESONS

А. Ф. Дунайцев, Ю. Д. Прокошкин

S. W. TANG

ABSTRACT

In contrast to many other particles π^- -mesons at their stop-point effectively produce stars with large energy release. This phenomena has been used by us for selected detecting of π^- -mesons. The star-detector for π^- -mesons represents a simple telescope of two scintillation counters set in coincidence. The first counter is an ordinary counter with 100% efficiency for passing particles. The second counter of the star-detector works at a comparatively low voltage supply. Hence it detects the large light impulses only, produced in the scintillator as the result of π^- -stars. Its efficiency for the detecting of passing particles is very low. The photomultiplier of the second counter works as a spectrometric one with highly stabilized voltage supply. Using this detector one may quickly (in 15 minutes, the π^- -beam intensity being 10^3 per sec) measure the range and energy of π^- -mesons.

The star-detector has the selected sensitiveness to π^- -mesons, its sensitiveness to π^- -mesons being at least 20 times larger than that to μ^- -mesons (see fig. 7).