

級联簇射的研究*

唐 孝 威

提 要

作者和 Ю. Д. Прокошкин 测量了高能正电子的級联曲綫。找出了級联曲綫的近似經驗公式。提出了几种測定高能电子(或 γ 量子)能量的新方法。

一、引 言

級联簇射的严格理論,是长时期以来理論物理学家深感兴趣的問題。С. З. Беленький, Л. Д. Ландау, И. Е. Тамм, W. Heitler, J. R. Oppenheimer, B. Rossi 等人(参見文献 [1] 及其所引文献)都进行过这种理論研究。用电磁作用的基本理論,可計算級联簇射的空間分布和能譜特性,計算它們的平均值和起伏。例如計算能量为 E_γ 的入射 γ 量子所产生的級联簇射中,在吸收片厚度 t 处,能量大于 E 的电子数目 $n(E_\gamma; E; t)$ 。

但是,目前严格的級联理論,都只适用于入射粒子能量极高的情形(入射 γ 量子的能量必須比物質的临界能量大几个数量級)。在重元素的物質中,应当考虑产生电子对的截面随着 γ 能量而变化、以及簇射粒子在物質中的散射效应,理論計算就更加困难。直到最近,С. З. Беленький 和 И. П. Иваненко^[2]才利用矩解法(метод момента),比較精确地算出了級联曲綫。

R. R. Wilson^[3]則曾經用 Монте-Карло 方法計算过能量 50 到 500 兆电子伏电子(和 γ 量子)在鉛中的級联曲綫。J. C. Butcher 和 H. Messel^[3]也用这方法計算了能量 50 到 50000 兆电子伏电子(和 γ 量子)在空气和鉛中的級联曲綫。这些用 Монте-Карло 方法算出的結果比較可信。

二、实 驗 测 量

曾經有許多实验,測量級联簇射;但絕大多数实验是用宇宙綫粒子做的。由于原始粒子能量測量不准,实验結果不能和理論計算作精确的比較。赵忠尧、王淦昌等^[4]都曾做过級联簇射的实验。

在高能加速器上,利用单能电子束进行的系統实验,到現在为止,主要有二个:一个是 A. Kantz 和 R. Hofstadter 做的^[5]($E_e = 185$ 兆电子伏),一个是 Ю. Д. Прокошкин 和作者^[6,7]做的($E_e = 101, 294, 407$ 兆电子伏)。

A. Kantz 等研究 185 兆电子伏单能电子和物質的作用。他們測量了 C、Al、Cu、Pb 等元素中簇射能量的分布。但他們測量的是能量損失,而不是級联曲綫中簇射电子的数目。

我們所做实验的装置如图 1 所示。联合原子核研究所六米同步迴旋加速器的高能 γ 量子束,經過准直,射到鉛靶(厚度 1 毫米)上。在靶中产生电子对。用分析磁鉄和計数管

* 1961 年 3 月 1 日收到。

望远镜,选择出单能电子束作实验. 改变磁场强度,使电子束能量在 50 到 500 兆电子伏之间变动;能量分散度约 2—3%.

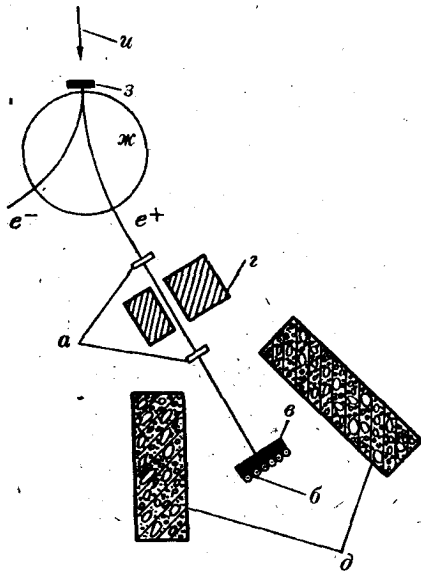


图 1 级联簇射实验仪器安排的示意图。
a 是计数管望远镜; b 是一排低效率计数管;
e 是厚度为 t 的吸收片; z 是铅准直器; d 是屏蔽体; e^+ 是正电子束; K 是分析磁铁;
3 是铅靶; u 是高能 γ 量子束。

面积为 20×20 厘米²的吸收片放在计数管望远镜后面. 探测器用可控制脉冲供电氩素管(低效率计数管)^[8]. 计数管前加铝片清除慢电子,探测能阈大约是 7 兆电子伏. 改变吸收片厚度 t , 测量吸收片飞出的快电子数 $n(t)$.

我们用能量等于 101 ± 2 , 294 ± 10 和 407 ± 10 兆电子伏的正电子,射入铅和铜吸收片,测量了级联曲线. 实验时探测器计数率约 200 次/分钟,本底计数小于 1%.

在图 2 中,是我们实验点和 R. R. Wilson^[3] 计算曲线的比较;结果大体符合. 他们计算的,是高能电子穿入铅板后飞出的正负电子平均数目. 飞出电子满足: 能量 > 8 兆电子伏、飞出角度在 30° 以内的条件. 这些条件和我们的实验条件相近,因而可以直接比较. 由此我们还定出了:铅中每一辐射单位相应的厚度,等于 5.6 ± 0.2 克/厘米².

图 3 是二种不同元素(Pb 和 Cu)的级联曲线. 令级联曲线顶峰位置是 t_{max} , 顶峰高度(即顶峰上簇射电子数目)是 n_{max} . 按照近似的级

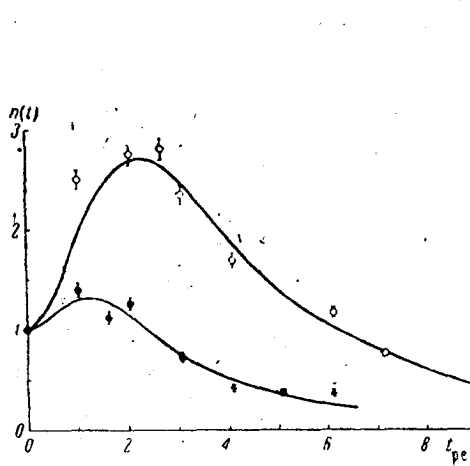


图 2 高能正电子在铅中产生的级联曲线. 黑点是能量 101 ± 2 兆电子伏的正电子. 白点是能量 294 ± 10 兆电子伏的正电子. $t_{p.e.}$ 是用辐射单位表示的深度. 每一辐射单位铅相当于 5.6 克/厘米².

图中的曲线是 R. R. Wilson^[3] 对于 100 和 300 兆电子伏电子计算的结果.

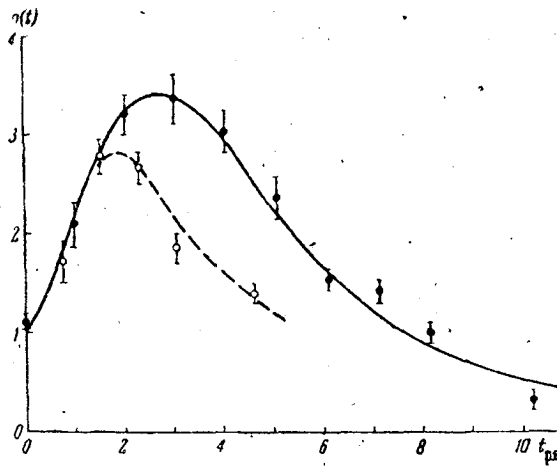


图 3 能量 407 ± 10 兆电子伏正电子产生的级联曲线. 点表示我们的实验结果: 黑点是在铅中, 白点是在铜中. $t_{p.e.}$ 是用辐射单位表示的深度. 每一辐射单位铅相当于 5.6 克/厘米², 每一辐射单位铜相当于 11.5 克/厘米².

图中实线是从 R. R. Wilson 的计算曲线^[3]推出的. 虚线是实验点的连线.

联理論^[1], 二种元素的 t_{\max} 的比值和 n_{\max} 的比值分别等于:

$$\frac{t_{\max \text{ Pb}}}{t_{\max \text{ Cu}}} = b_1 \frac{\ln(E_e/\varepsilon_{Kp, \text{Pb}})}{\ln(E_e/\varepsilon_{Kp, \text{Cu}})} \quad (1)$$

$$\frac{n_{\max \text{ Pb}}}{n_{\max \text{ Cu}}} = b_2 \frac{\varepsilon_{Kp, \text{Cu}}}{\varepsilon_{Kp, \text{Pb}}} \left[\frac{\ln(E_e/\varepsilon_{Kp, \text{Cu}})}{\ln(E_e/\varepsilon_{Kp, \text{Pb}})} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中 b_1 和 b_2 是理論校正系数, E_e 是入射电子能量. $\varepsilon_{Kp, \text{Pb}}$ 和 $\varepsilon_{Kp, \text{Cu}}$ 分别是 Pb 和 Cu 的临界能量. $E_e = 407$ 兆电子伏时, 算出 t_{\max} 的比值等于 1.7, 和实验值 1.5 ± 0.2 符合. 同时算出, n_{\max} 的比值 ≈ 1.5 , 和实验值 1.20 ± 0.25 也相近. 这证明了: 对于我们所用的元素和 E_e 值, 近似的級联理論所给出的关系式(1)和(2)是正确的.

三、經驗公式

我们在处理級联曲线数据时, 找到了一些简单有用的經驗公式^[2]. 經驗公式 $n^*(t)$ 表示的是: 在能量为 E_0 的 γ 量子(或者电子)产生的級联簇射中, 在铅吸收片厚度 t 处, 能量大于 7 兆电子伏的平均电子数目. 用 * 符号表示从我們經驗公式算出的 n 值, 以区别于实验测得的值 $n(t)$.

对于入射 γ 量子, 經驗公式是:

$$n^*(t)_\gamma = 1.08\alpha t^{0.6\alpha} e^{-0.6t} \quad (3)$$

对于入射电子, 經驗公式是:

$$n^*(t)_e = (1 + 1.08\alpha t^{0.6\alpha}) e^{-0.6t} \quad (4)$$

二式中 $\alpha = \ln\left(\frac{E_0}{25}\right)$, E_0 是入射粒子(电子或光子)能量(单位是兆电子伏), t 是用輻射单位来量度的长度.

图 4 中許多曲线就是用經驗公式(4)算出的級联曲线. 可以看出, 它们近似地和实验点符合. 曲线的尾部符合得比較差, 但如在公式中加入 $e^{-0.2t}$ 因子后会更好些. 依据經驗公式(3), 我們曾經指出 R. R. Wilson 計算結果的一个錯誤^[7], 即对于 $E_\gamma = 500$ 兆电子伏的級联曲线, 他所发表的结果是不正确的.

經驗公式(3)、(4)十分简单. 它们只包含参数 α 和 t ; 因而級联曲线的特性和入射粒子能量有明显的函数关系. 从这一点出发, 得到其他一些經驗公式:

(1) 我們利用这二个公式算出了 t_{\max} 和 n_{\max}^* 的經驗公式. 对于入射 γ 量子:

$$t_{\max}(E_0)_\gamma = \alpha \quad (5)$$

$$n_{\max}^*(E_0)_\gamma = 3(\alpha/e)^{0.6\alpha+1} \approx 0.008E_0 \quad (6)$$

E_0 是 γ 量子能量(兆电子伏). 函数 $t_{\max}(E_0)_e$ 和 $n_{\max}^*(E_0)_e$ 相似于式(5)(6), 但是形式复杂些. 这些结果见图 5.

(2) 級联曲线所包含的面积 $I = \int n(t)dt$ 是一个有用的物理量. 我們对經驗公式(4)进行积分以后, 得到了 I 的經驗公式(对于铅).

$$I(E_0)_e = k_1 E_e \quad (7)$$

E_e 用兆电子伏作单位. 常数 $k_1 \approx \frac{1 \text{ 个快电子} \times \text{輻射单位}}{20 \text{ 兆电子伏}}$.

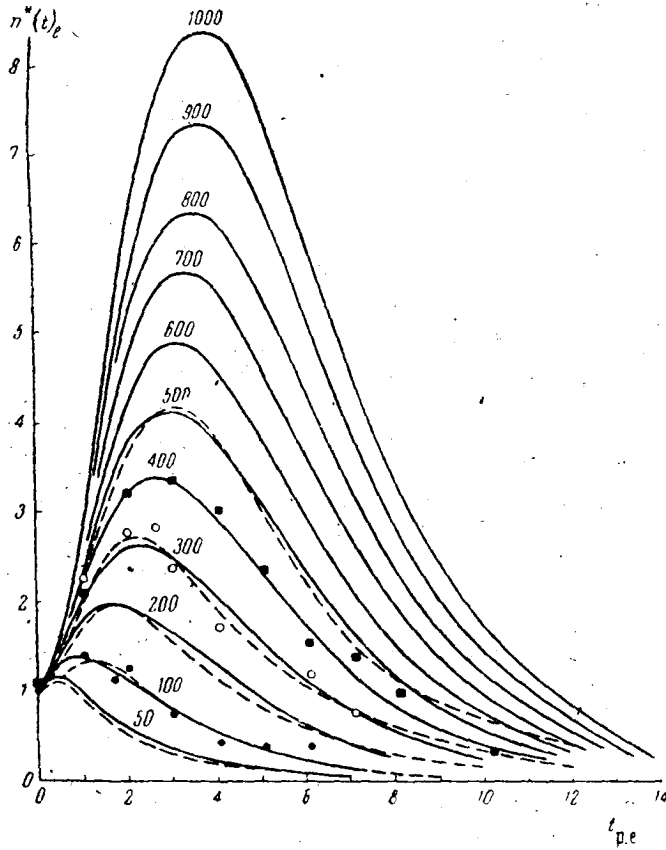


图 4 高能电子在铅中的级联曲线。点是我們的实验結果，实綫是經驗公式計算的結果，曲綫上面数字表示入射电子能量(兆电子伏)。虛綫是 R. R. Wilson 用 Monte-Kaplo 方法算出的結果。

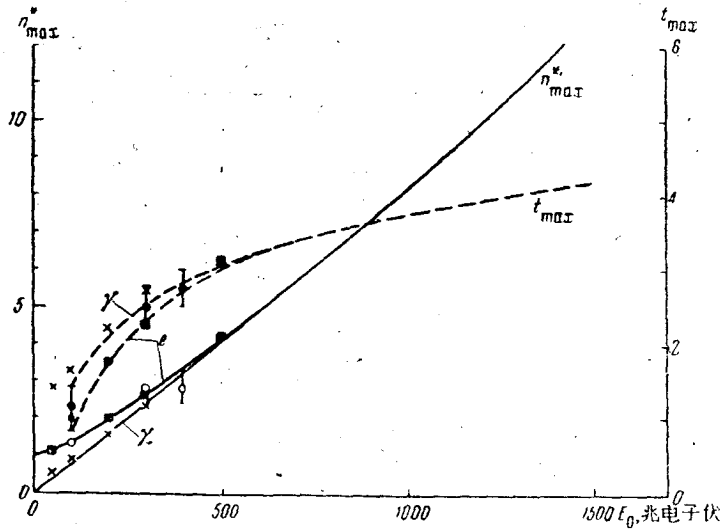


图 5 不同能量 E_0 的 γ 量子和电子在铅中产生级联簇射。图示级联曲线頂峯位置 t_{max} 及頂峯高度 n^*_{max} 。实綫是 n^*_{max} (从經驗公式算出) 和入射电子 (用 e 表示) 能量或 γ 量子 (用 γ 表示) 能量 E_0 的关系。虛綫是 t_{max} (从經驗公式算出) 和 E_0 的关系。

图中的点是我們的实验結果及 R. R. Wilson 的一些計算結果。 E_0 用兆电子伏为单位。

(3) 我們还注意到: 从一定厚度鉛吸收片飞出的平均电子数 n_i , 是入射电子能量 E_e 的单值函数. 利用經驗公式算出的結果见图 6. 图中簇射电子数 n_i 不象在級联曲綫中对于 t 画出, 而是对于 E_e 画出. 每条曲綫所用的 t , 分别是固定值. 特別当鉛吸收片厚度 $t = 3$ 輻射单位时, n_i 在很大 E_e 范围中(50 到 1000 兆电子伏)和 E_e 成綫性关系. 这时有經驗公式:

$$n_{i=3}(E_e) = k_2 E_e \quad (8)$$

E_e 用兆电子伏作单位. 常数 $k_2 \approx \frac{1}{120}$ 个快电子/兆电子伏.

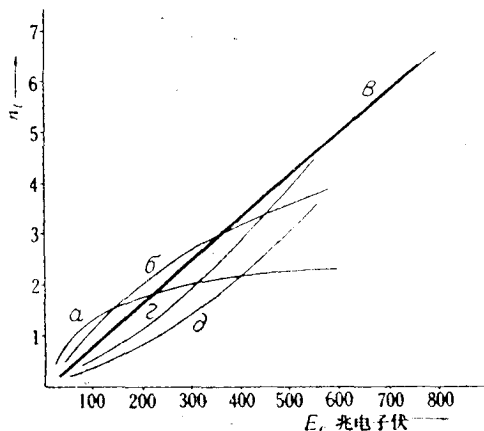


图 6 厚度等于 t 的鉛吸收片后面飞出的簇射电子平均数 n_i 和入射电子能量 E_e 的关系. E_e 用兆电子伏为单单位. t 是用輻射单位表示的鉛吸收片厚度. 在各条曲綫中, t 分别固定.

a— $t = 1$ 个輻射单位.

b— $t = 2$ 个輻射单位.

c— $t = 3$ 个輻射单位.

d— $t = 4$ 个輻射单位.

e— $t = 5$ 个輻射单位.

每一輻射单位鉛相当于 5.6 克/厘米²鉛.

四、实际 应用

高能电子(或 γ 量子)在物质中产生級联簇射, 这一现象可以应用来探测高能电子(或 γ 量子). R. Hofstadter^[5] 曾經建議用重介質做探测器, 把整个級联簇射全部吸收在内. 测定了探测器吸收的簇射能量后, 能够定出入射电子(或 γ 量子)的能量.

級联簇射在物质中发展的情况, 还随着入射电子(或 γ 量子)的能量而不同. 在这个基础上, 我們提出了几个测定高能电子(或 γ 量子)能量的新方法^[7].

以测定高能电子的能量为例: 第一, 一定能量的单能电子产生一定样式的級联曲綫 $n(t)$. 反过来, 只要测量了单能电子束造成的級联曲綫 $n(t)$, 就可以确定它的能量. 第二, 一定能量的单能电子射入固定厚度的鉛吸收片, 产生一定数目的平均电子数 n_i . 反过来, 用了固定厚度吸收片后, 只要测量了单能电子束造成的 n_i 值, 就可以确定电子束能量. 第三, 利用公式(8), 可以测出具有能譜 $F(E_e)$ 的电子束的平均能量. 电子束能譜 $F(E_e)$ 归一化后, 便得

$$\int F(E_c) dE_c = 1.$$

因而束的平均能量 $\langle E_c \rangle$ 等于

$$\langle E_c \rangle = \int E_c F(E_c) dE_c \quad (9)$$

当铅吸收片厚度 $t = 3$ 辐射单位时, 这电子束产生的平均电子数是 $\langle n_i \rangle$:

$$\langle n_i \rangle = \int n_{i=3}(E_c) F(E_c) dE_c = k_2 \langle E_c \rangle \quad (10)$$

所以, 虽然电子束具有能谱, 只要测量了 $\langle n_i \rangle$ 值, 就可以直接求出电子束的平均能量 $\langle E_c \rangle$.

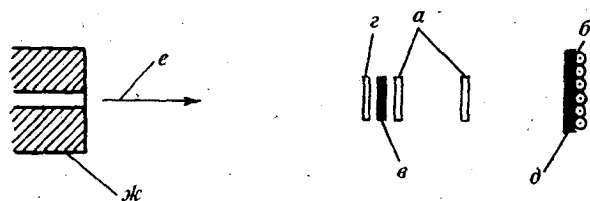


图 7 测量 γ 量子束平均能量 $\langle E_\gamma \rangle$ 所用的实验装置. a 是计数管望远镜; b 是一排低效率计数管; $в$ 是 2 毫米厚的铅转化片; z 是反符合计数管; d 是厚度等于 t 的铅吸收片; e 是我们测量的 γ 量子束; $лс$ 是准直孔道.

测量具有能谱的 γ 量子束的平均能量, 原理同此. 但先要用一个转化片(конвертор), 使入射 γ 量子产生电子对(产生的电子数, 共约 2 个, 准确的平均值可由计算得到). 再利用上面办法测量电子能量.

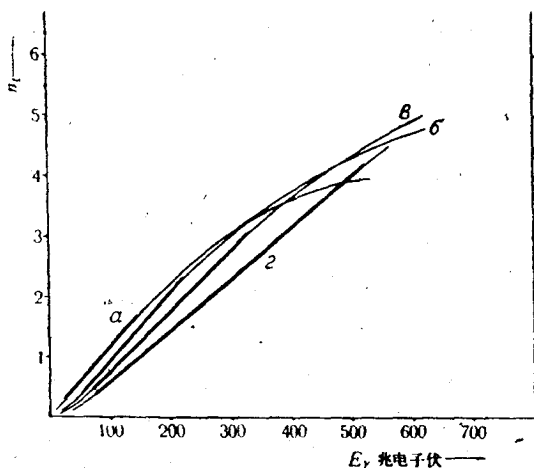


图 8 用图 7 的实验装置时, n_i 和 E_γ 的关系. E_γ 是入射 γ 量子的能量, 用兆电子伏为单位. t 是用辐射单位表示的铅吸收片厚度. 在各条曲线中, t 分别固定.

- a — $t = 1.5$ 个辐射单位.
- $б$ — $t = 2$ 个辐射单位.
- $в$ — $t = 2.5$ 个辐射单位.
- z — $t = 3$ 个辐射单位.

作者和 Ю. Д. Прокошкин 用这种方法测量了 670 兆电子伏高能质子轰击铍靶时, 产生 π^0 介子所造成的 γ 量子束平均能量. 所用的实验装置见图 7. 这一装置的刻度曲线, 见图 8 所示. 当铅吸收片厚度 $t = 3$ 辐射单位时, 飞出的平均电子数 n_i 和 E_γ 之间有很好的直线性关系.

我们通过 $\langle n_i \rangle$ 的测量, 求得了 γ 量子束的平均能量 $\langle E_\gamma \rangle$.

用 θ 表示 γ 量子飞出方向和入射质子方向间的夹角. 在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 180^\circ$ 时量得的 $\langle E_\gamma \rangle$ 见下面附表, 表中将 $\langle E_\gamma \rangle$ 和用电子对磁谱仪测得的数据 $\langle E_\gamma^* \rangle$ 比较. 这二种结果, 在实验误差范围之内互相符合.

在很多情况下, 并不要求详细测量 γ 能谱的形状, 只要量出 γ 能谱的平均能量就够

了。由于所用的实验装置十分简单可靠,上面这种新方法是很有实用价值的。

| θ | $\langle E_{\gamma} \rangle$ 兆电子伏 | $\langle E_{\gamma^*} \rangle$ 兆电子伏 |
|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 0° | 170±15 | 190±10 |
| 180° | 70±5 | 80±5 |

参 考 文 献

- [1] С. З. Беленький, Лавинные процессы в космических лучах, Гостехиздат (1948). Б. Россия. Частицы больших энергий, Гостехиздат (1955).
- [2] С. З. Беленький, И. П. Иваненко, *УФН*, **LXIX** вып. 4 (1959), 591.
- [3] R. R. Wilson *Phys. Rev.* **86** (1952) 261; J. C. Butcher, H. Messel, *Nucl. Phys.* **20** (1960), 15.
- [4] С. У. Чжао (赵忠尧), *Phys. Rev.* **75** (1949), 581; 王淦昌等: *物理学报* **11** (1955), 421.
- [5] A. Kantz, R. Hofstadter, *Nucleonics*, **12**, No. 3 (1954), 36.
- [6] Ю. Д. Прокошкин, Тан Сяо-вэй (唐孝威), *ЖЭТФ*, **36** (1959), 10.
- [7] Ю. Д. Прокошкин, Тан Сяо-вэй (唐孝威), *Приборы и техника эксперимента*, **3** (1959), 32.
- [8] В. В. Вятняков, Тан Сяо-вэй (唐孝威) А. А. Тяпкин, *УФН*, **LXXII**, вып. 1 (1960), 133.

THE INVESTIGATION OF CASCADE SHOWERS

S. W. TANG

ABSTRACT

Cascade curves for high energy positrons are measured by Y. Plokoskin and the writer. Empirical formulas approximating the cascade curves were determined. Some new methods determining the energy of high energy electrons (or γ quantas) were suggested.