

J 粒子是怎样发现的

章 溱 森

1974 年 12 月美国《物理评论快报》第 23 期,同时刊登了三篇通讯。第一篇是美国麻省理工学院丁肇中教授科研组当年 11 月 12 日宣布的,在布鲁克海文实验室 30GeV 交变梯度同步加速器上,利用大型精密双臂谱仪,通过测量高能质子打击铍靶产生 e^+ , e^- 对的有效质量谱,发现质量 $3.1 \text{ GeV}/c^2$, 寿命相当长的重粒子,他们称之为 J 粒子。第二篇是美国斯坦福大学瑞其特教授科研组和加利福尼亚大学阿尔拉姆等人 11 月 13 日宣布的,在斯坦福直线加速器中心的电子-正电子对撞机上,利用劳伦兹实验室磁探测器测量 e^+e^- 电子湮没,发现了同一个重粒子,但他们称之为 ψ 粒子。第三篇则是意大利弗拉斯卡蒂实验室,在知道布鲁克海文发现 J 粒子的消息后,立即提高了其安东尼

加速器极限工作能量 ($2 \times 1.5 \text{ GeV}$)。他们室三个科研组从不同角度研究了 J 粒子的性质,而在 11 月 18 日寄出初步实验结果,赶上在同一期快报上发表。这样从产生 (测量 e^+e^- 湮没共振峰) 和衰变 (测量衰变产物的有效质量谱) 两种过程同时发现了同一个新粒子,而且又迅速得到证实,使结果十分肯定,在“基本”粒子发现史上是罕见的。这是一次完全出乎预料的实验发现,立刻轰动了物理界,打破了粒子物理学十年来的沉寂,冲开了当时传统观念的束缚,在物理学的最前沿,开辟了新的阵地,引起了连锁反应,致使近两三年来粒子物理实验工作捷报频传,新粒子和新现象不断发现,理论文章也似潮水般的涌现,高能物理领域又呈现了一片朝气蓬勃的景象。

由于这一发现的实验工作十分艰巨,同时在“基本”粒子理论上具有重要意义,因而丁肇中教授和瑞其特教授获得了 1976 年度诺贝尔物理学奖金。下面扼要地介绍丁肇中科研组这方面的实验工作。

(一) 丁肇中教授研究组早期的实验工作

丁肇中教授科研组十多年来着重研究高能 γ 光子和类光子粒子间的相互作用,主要是想检验量子电动力学在多么小的围范内仍能正确地描述电磁现象。他们研究过矢量介子 ρ 、 ω 、 ϕ 等,这些都是介子共振态,寿命都很短,约 10^{-23} — 10^{-24} 秒,共振宽度分别为

$$\Gamma_\rho \simeq 100 \text{ MeV}, \Gamma_\omega \simeq 10 \text{ MeV}, \Gamma_\phi \simeq 5 \text{ MeV},$$

它们的量子数均为:

$$J(\text{自旋})=1, C(\text{电荷共轭})=-1, P(\text{宇称})=-1,$$

这些粒子的电磁性质和光子完全相同,只是质量较重。

$$m_\rho = 770 \text{ MeV}/c^2, \quad m_\omega = 783.8 \text{ MeV}/c^2,$$

$$m_\phi = 1019.6 \text{ MeV}/c^2$$

因此也称为重光子。

这种实验的困难在于①事件发生的几率(截面)非常小。当他们作实验时,加速器流强开到最大,入射束达到每秒 10^{11} 光子时,平均每天才出现一个所测量的事件。要取得实验结果的初步数据,就需要加速器开动大半年的时间,同时要求仪器有非常好的长期稳定性和可靠性。还需要有严格的检查监督制度,说明仪器经常在正常工作着。丁肇中组为了保证结果的可靠性,建立了一系列严格的校核制度,每隔 30 分钟检查一次仪器各点的工作电压,每隔 24 小时校验一次谱仪,即使加速器停工维修时,也从不关闭仪器上的任一个电源,他们认真地对待实验过程中每一个步骤,多年来形成了一套严格的工作作风。②在入射束很强的实验中,产生的强子对比电子对多很多倍,这就要求仪器一方面能够把 e^+ 、 e^- 对 100% 地记录下来,同时,尽可能不记录强子对,比方说,在仪器中通过上亿次强子对时,最多错记上一对,即要求强子对的排除比大于 10^8 。③为了能测量出窄的共振峰,既需要仪器的质量分辨率高(小于 $5 \text{ MeV}/c^2$),又需要仪器的质量接收度大($\sim 2 \text{ GeV}/c^2$),以便能更快地寻找共振峰。多年的实验工作,使他们积累了在宽质量区间中,测量窄共振宽度的高灵敏度实验设备和工作经验。为他们完成发现 J 粒子的实验工作,打下了良好的基础。

(二) J 粒子实验的物理思想

1974 年 J 粒子发现以前, u 、 d 、 s 三层子的理论能够很好的说明当时已经发现的所有强子,共振态的组成以及一些粒子的相互作用现象。特别是 1964 年发现了 ω^- 粒子后,理论预示的粒子都已被找到,就像元素周期表的所有空格都已被实验发现的元素填满,门捷列夫理论已经完满地得到证实,原子的问题基本上已经弄清楚了一样。“基本”粒子物理也被某些人认为发展得差不多了,因此,形成了十年的停滞状态。但是,丁肇中教授没有被当时风行一时的观念所束缚。他认为很难想象只有三个重光子(ρ 、 ω 、 ϕ)存在,而且质量都在 $1 \text{ GeV}/c^2$ 附近。经过讨论,他们决定作一个大型的实验,弄清楚在能量更高的范围内,到底还有那些重光子存在。从 1971 年起他们即着手通过探测 e^+ 、 e^- 对,在有效质量直到 $5 \text{ GeV}/c^2$ 范围内,普查可能存在的重光子。

具体的实验方法是:将加速器中 30 GeV 的质子束引出来打击铍靶,对所产生的次级粒子,通过偏转磁场进行电荷和动量分析。带正电和负电的粒子经过偏转分别进入双臂谱仪的两个臂。两个臂的符合事件说明在靶片处产生了正、负粒子对。是不是 e^+ 、 e^- 对呢?

可以用每个臂中的计数器进行判断。在动量 P 确定的粒子束中,用气体契仑柯夫计数器测出粒子的速度 v , 根据 $P = mv$, 即可确定粒子的质量 m 。这样就可以辨认是不是电子。如果再用簇射计数器测出粒子的能量 E , 则根据 $E^2 = P^2c^2 + m^2c^4$, 可以进一步判断是不是电子。在肯定了记录的是 e^+ 、 e^- 对之后, 根据测得 e^+ 、 e^- 能量 E_1E_2 , 动量 P_1P_2 和夹角 θ , 即可按相对论公式算出有效质量 m_{ec} 。从多次测到的 e^+ 、 e^- 对算出有效质量分布曲线, 可以看出是不是有前所未有的新粒子, 并能具体地算出它的质量和寿命。

这个实验用高能质子束来做, 好处是: 初级束强度高, 强作用截面大, 产生新粒子的机会多。但另一方面高能质子-质子相互作用, 可能的反应方式很多, 会产生大量的 π 介子、核子对、奇异粒子和共振态等, 这些粒子又会衰变成各种强子或轻子。这样各种各样的带电粒子对很多, 要在极短的时间内 ($\approx 10^{-9}$ 秒), 在极端复杂的相互作用事例中, 挑选出所设想的 e^+ 、 e^- 对是很困难的。因此在研制实验设备时, 他们考虑:

(a) e^+ 、 e^- 衰变是电磁作用, 应小于强子产额约 10^6 倍, 即需要在百万个本底中挑选出一个事件, 因此要求仪器提供强子对排除比大于 10^8 。即在一亿个强子对通过仪器时, 只允许错记一对。

(b) 需要在质子束流强为 $10^{11} - 10^{12}$ 质子/秒的条件下工作, 才能取得足够的数。因此要求探测器可以适应高强度工作条件。实际上他们是在布鲁克海文交变梯度同步加速器引出束流, 每个脉冲中约有 2×10^{12} 质子, 聚焦成 3×6 mm 光点下工作的。

(c) 根据过去在德国 DESY 时的工作经验, 他们认为在大束流下工作, 并要求质量分辨率好, 质量接收度大, 最好是设计大型精密双臂谱仪。但研制这种谱仪技术要求高, 耗资巨大, 很多人反对。他们没有为这些议论所困扰, 坚持了原来的设计, 研制成功了大型双臂谱仪, 坚持进行了这个实验。

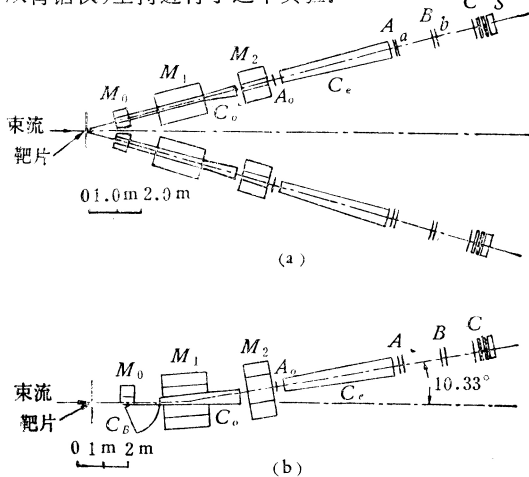


图1 (a) 平面图 (b) 侧面图

(三) 大型精密双臂谱仪

图1给出双臂谱仪的平面和侧面示意图。

让磁场在垂直方向偏转粒子束, 以测量其动量 P , 而用双臂在水平方向测量产物的夹角 θ 。这种“ $P\theta$ ”独立概念, 使谱仪设计简单, 并有较好的质量分辨率。

M_0, M_1, M_2 是偶极磁铁, 使不同动量的次级粒子偏转不同角度。电子质量比 μ 子、强子质量轻约 200—2000 倍, 因而在同样动量下, 电子的速度要快得多。例如, 动量为 $10 \text{ MeV}/c$ 的电子速度比动量为 $2.7 \text{ GeV}/c$ 的 π 介子速度要快。用气体阈式契仑柯夫计数器 C_0, C_e 可以 100% 的记录 $10 \text{ MeV}/c$ 以上的所有电子、正电子, 而排除 $2.7 \text{ GeV}/c$ 以下的所有 π^\pm 介子。簇射计数器 S 进一步测定粒子能量, 多丝正比室则是用来确定事件中的粒子数目和飞行方向的。

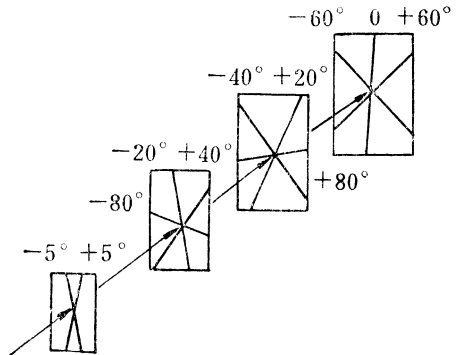


图2 正比室中各面丝极相对方位图

探测系统各个部分都是经过仔细考究的。例如:

(a) 靶由九块厚 1.78 毫米的铍片组成, 每两片相隔 7.5 厘米, 在一片靶上产生的次级粒子, 进入谱仪系统时, 不会通过别的靶片。这种装置可以帮助我们排除偶然符合。

(b) 磁铁系统 M_0, M_1, M_2 将各个计数器隔开, 使粒子望远镜系统不直接“看”到靶片。这样可以避免直接照射下的强本底。设备安装就绪后, 用赫尔探头仔细的测量了磁场分布, 测点总数达 10^5 以上。

(c) 多丝正比室 A_0, A, B 和 C 中包括 8000 根镀金细丝, 细丝直径 20 微米, 间距 2 mm, 各有其放大记录系统, 11 块板丝极的方位都有一定的安排, 例如, 最后三块其丝极各差 60° (图 2)。这种方法对于分类径迹情况, 剔除不能使各个平面都着火的软中子及 r 射线很有用。多丝正比室可在 20 兆周下工作, 每个臂上同时能分辨的粒子数目高达八个。所有 8000 根丝都能正常工作是很重要的, 因为在正式测量中, 如果有一根丝出毛病要修理时, 就需要搬动上千吨水泥块。

(d) 契仑柯夫计数器 C_0, C_e 和簇射计数器 S 提供强子对排除比 $> 1 \times 10^8$ 。

气体契仑柯夫计数器 C_e 中有球面镜直径达 1 米,

C_0 中椭球面镜尺寸为 1.5×1.0 米, 计数器内部充以氢气, 因原子序数低, 可能被打出的电子数目极少, 计数器内壁涂黑, 只有沿束流方向的电子发射出来的契伦柯夫辐射, 才能被聚焦到光电倍增管的光阴极上. 使用放大倍数及效率都很好的光电倍增管 (RCA31000M 型), 在计数器内充以氦气作辐射体时 (这时预期平均有 2—3 个光电子), 可以看到单个光电子峰.

簇射计数器是利用厚辐射体, 使光子或带电粒子在计数器中产生簇射, 通过光辐射使能量完全损失在辐射体中, 而用光电倍增管将此能量测量出来. 两种簇射计数器: 一种用铅玻璃制成, 三个辐射长度厚, 两层正交放置, 各有 12 个或 13 个单元. 另一种用铅有机玻璃制成, 10 个辐射长度厚. 两种计数器细分成约 100 个单元, 可以帮助从假径迹中鉴别出来电子径迹.

(c) 防护屏蔽. 由于在强束流下进行工作, 要将庞大体积的探测系统防护好, 这个实验专用的防护屏蔽材料有一万吨水泥, 一百吨铅, 五吨铀和五十吨含氢物质. 在合理的安排布置后, 保证了工作区域辐射计量的安全水平, 使他们有可能在 10^{12} 质子/脉冲的条件下进行工作.

(四) 实验结果

1974 年 4 月完成了准备工作, 仔细调整了仪器, 保证对电子对的记录效率为 100%. 同年夏, 在高质量 ($4—5\text{GeV}$) 区间, 取得了一些数据后, 8 月末调整了磁铁中的电流, 选择在有效质量 $2.5—4.0\text{GeV}/c^2$ 之间进行测量, 立刻看到真正的电子对, 最使人惊奇的是大部分对都集中在 $3.1\text{GeV}/c^2$ 附近很窄的峰内. 经仔细的分析, 得到峰宽度小于 $5\text{MeV}/c^2$ (图 3). 为了确证这个峰是新粒子产生的, 而不是实验中的假象或计算错误, 他们进行了多方面的实验检验和计算校核. 最后肯定, 的确是发现了一个新粒子, 起名为 J 粒子.

新粒子发现后没有当即发表. 丁肇中教授想继续弄清楚一些问题, 看看究竟还有多少新粒子存在, 又作了两个多月的实验, 在组内外很多人的推动下, 他才决定单独发表 J 粒子的结果. 并打电话把 J 粒子的发现情况告诉了意大利的弗拉斯卡蒂实验室. 原来弗拉斯卡蒂实验室也正在研究这方面, 他们闻讯后立刻设法提高了能量, 在 15 日即看到了 J 粒子的信号. 11 月 18 日赶上了在同期快报上发表他们的初步结果. 进一步研究后, 很快确定了共振峰宽度仅为 $\sim 60\text{KeV}/c^2$, J 粒子寿命比 ρ 介子长了约 1000 倍, 这是在强作用中难以理解的现象, 必须假定 J 粒子具有一种前所未有的新量子数, 限制了强作用衰变的发生, 而且还需引入第四种层子来解释 J 粒子的结构, 这就使“基本”粒子冲出了 u, d, s 三种层子的模型, 开辟了新的领域*.

* 参看 1978 年第 2 期“ $SU(3)$ 对称性”一文, 文中的 p, u, λ 层子即本文的 u, d, s 层子.

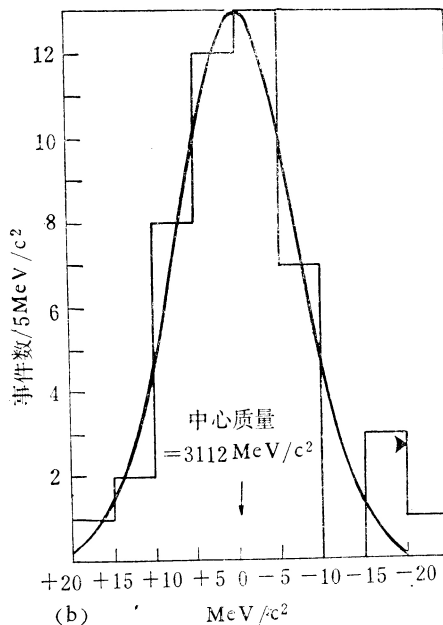
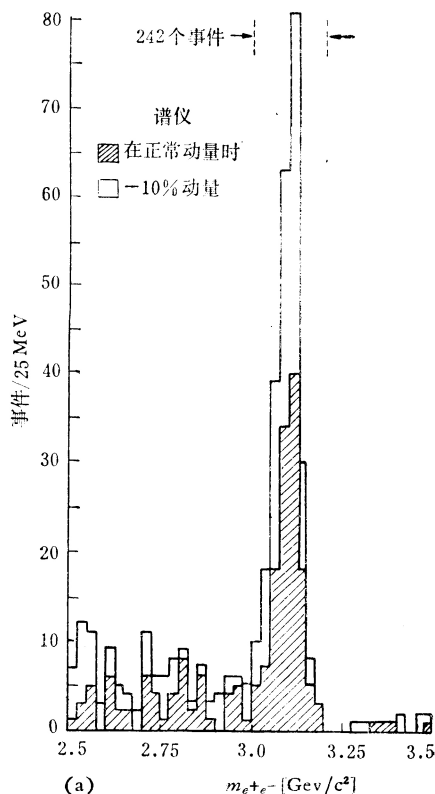


图 3 (a) 在 $2.5 < m_{e^+e^-} < 3.5\text{GeV}/c^2$ 区间, e^+, e^- 电子对有效质量谱. 阴影部分对应于正常磁铁电流下测得的事件; 非阴影部分对应于比正常磁铁电流少 10% 时测得的事件.

(b) J 粒子谱宽度测量. 所测宽度小于 $5\text{MeV}/c^2$

在 J 粒子发现的消息传出后, 很多人从不同角度也都找到 J 粒子的存在, 而且还找出一系列 J 粒子的激发态, 衰变中间态等. 很多新现象强烈暗示 J 粒子可能是一对新类型的正反层子的束缚态.

J 粒子的发现和第四种层子(粲层子 c)的引入, 不会是粒子物理的终结, 而是一个新的开端. 近年来不仅在粲介子、粲重子方面取得了不少新的成果, 而且在质量 $10\text{GeV}/c^2$ 附近又发现一族 γ 新粒子, 可能需要第五种层子才能解释它们. 1976年丁肇中教授在其诺贝尔奖金讲演最后说:

1. 我们知道光子可能转化为 ρ 、 ω 及 ϕ 介子, 质量约 $1\text{GeV}/c^2$. 又能转化为 J 粒子及其不同状态, 质量

$3-5\text{GeV}/c^2$. 在能量更高时, 又将发生什么问题呢? 可能不会是新的类光子系列不存在吧!

2. 发现 J 粒子后, 需要四种层子以解释迄今看到的现象, 如果高能区域中再发现更多系列的粒子, 将需要多少层子呢?

3. 如果我们需要一大族层子, 那么它们还是组成自然界的真实基本单元吗? 为什么至今一个还没有被发现过呢?

物质是无限可分的, 科学研究工作是没有止境的! J 粒子的发现促使我们对“基本”粒子的认识前进了一步, 但物质结构这一层次中的问题, 还远没有被搞清楚, 实验和理论工作都还在积极的进行着.