

J/ ψ 粒子的发现

许国材

(广东教育学院物理系, 广州 510303)

林木欣

(华南师范大学物理系, 广州 510631)

本文回顾了 J/ ψ 粒子的发现过程, 分析了这项发现对粒子物理学发展的重大意义, 并对发现 J 粒子的产生实验、发现 ψ 粒子的形成实验及发现 γ 粒子的实验进行了简要的评述。

1974年11月11日, 美国两个实验室同时宣布独立地发现了一个新粒子。在当时已发现的粒子中, 这是质量最大的强子共振态, 它的寿命比一般强子共振态大三个数量级。这个发现使粒子物理学家感到震惊, 并强烈地推动了实验和理论的发展。在粒子物理学界中, 这个事件被称为“十一月革命”。

一、J 粒子的发现^[1]

在美国纽约布鲁克海文国家实验室(BNL)发现 J 粒子的, 是华裔美籍物理学家丁肇中(1936—)为首的马萨诸塞理工学院(MIT)小组。1962年丁肇中在密执安大学获得博士学位后, 以福特基金会研究员的身份到欧洲核子研究中心(CERN)工作。1965年, 他回美国哥伦比亚大学任教, 并在哈佛大学的剑桥电子

这一定量的结果立即说服了奥斯特瓦尔德, 他于1909年在他所著的《普通化学概论(Grundriss der allgemeinen Chemie)》第四版序言中写道: “我现在相信, 我们最近已获得有关物质是离散的, 或具有颗粒本性的实验证据, 这是原子假设徒然寻找了数百甚至上千年的。一方面, 气体离子的分离和计数实验使 J. J. 汤姆孙长期而光辉的研究获得成功的荣誉; 另一方面, 由许多研究者, 其中起决定性作用的是 J. 皮兰, 确证了布朗运动与动理学的要求相符。这些成

加速器(CEA)上进行光子同靶核碰撞产生 e^+e^- 对的实验。1966年, 他到汉堡的德国电子同步加速器(DESY)上进行 e^+e^- 对产生截面的测量, 用以检验量子电动力学。他们观察到明显偏离量子电动力学的效应, 认为这是由于重光子 ρ_- 的强作用而引起的。此后, 他们的注意逐渐转到通过检测 e^+e^- 对来研究重光子的性质。1969年, 丁肇中转到 MIT 工作, 仍继续从事这项研究。

所谓重光子是指量子数与光子的量子数相同的介子, 即其 $J^{PC} = 1^{--}$ 。因为这些介子的自旋 $J = 1$, 它们也被称为矢量介子。它们的空间反演宇称 P 和电荷共轭宇称 C 均取负号。当时已发现的重光子有: $\rho(770)$, $\omega(783)$ 及 $\phi(1020)$ 。它们的质量为 $M_\rho = (769 \pm 3) \text{MeV}$, $M_\omega = (782.6 \pm 0.2) \text{MeV}$, $M_\phi = (1019.5 \pm 0.1) \text{MeV}$ 。它们都是可以通过强作用衰变的强子共

就使那位最谨慎的科学家认为, 现在来谈论物质原子性的实验证明, 已变得合法了。于是, 原子假设已上升到成熟的科学理论的地位, 可以作为我们《普通化学》知识现状的导论, 在教科书上占有一席之地了。”是什么力量使这位固执的学者突然信服了? 在那个时候, 关于原子内部结构的深入研究刚刚开始, 原子的具体图象还是不大清楚的。我想是确凿的实验数据和严谨的科学理论的定量符合, 给与了人们以信心。

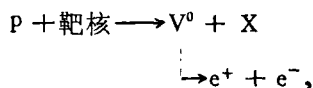
振态,寿命为 10^{-23} — 10^{-24} s 的数量级。按测不准关系,粒子寿命和能量测不准量(共振宽度)成反比,因而习惯用共振宽度来表征强衰变粒子的寿命。重光子的共振宽度为

$$\Gamma_\rho \simeq 154 \text{ MeV},$$

$$\Gamma_\omega \simeq 9.9 \text{ MeV},$$

$$\Gamma_\phi \simeq 4.22 \text{ MeV}.$$

丁肇中小组认为,在 5 GeV 的范围内,可能还会找出另外的重光子。他们拟定寻找新粒子的方案是:用质子束流轰击靶核以产生中性矢量介子,然后探测由这种粒子所衰变出的 e^+e^- 对,



式中 V^0 是待寻的新粒子, X 表示任意强子。1972 年,他们有机会到 BNL 的交变梯度同步加速器 (AGS) 上做这实验。AGS 是一台固定靶质子加速器,入射束流最大能量为 33 GeV,最大质心能量为 8 GeV。自 1961 年建成以来,在其上已经发现 ν_μ , ϕ 及 Ω^- 粒子等。

丁肇中小组花了两年时间来准备实验,包括研制大型精密双臂谱仪和布置实验区。他们对实验设备提出了以下要求:

1. 考虑到重光子通过电磁过程衰变为 e^+e^- 对,其产额只有各种强子对的 10^5 分之一,因此要求探测器的强子对排除比大于 10^8 ,即当一亿个强子对通过仪器时,只允许错记一对。

2. 为了在很宽的质量范围内找窄的共振态,要求有好的质量分辨率和充分大的质量接受度。他们的实验装置的质量分辨率为 5 MeV,在每个磁场电流设置值下的质量接受度为 2 GeV。

3. 为了获得足够多的 e^+e^- 对,要求束流强度达 10^{11} — 10^{12} 质子/s,因此探测器必须能经受这样的工作条件,而且实验区要有良好的屏蔽。

他们利用测量衰变产物的不变质量谱的方法来寻找共振态,即鉴别 e^+e^- 对,并测量 e^+ 与 e^- 的能量、动量及其夹角,然后计算出这 e^+e^- 对的不变质量(也称有效质量),

$$m_{e^+e^-} = \sqrt{2m_e^2 + 2(E_1E_2 - P_1P_2\cos\theta_{12})}.$$

由多次测量作出不变质量的分布曲线,若出现共振峰,则可判定共振态的存在,并可测出其质量及共振宽度。

1974 年 4 月,他们完成了实验的布置,在 5 月之前又进行了例行调节,并花了 100 多个小时进行多项检查。他们先在 4—5 GeV 范围内测定一些数据,发现在这个能区内 e^+e^- 对不多。8 月底,他们调整了磁铁,使谱仪能接受 2.5—4 GeV 的不变质量,发现有较多的 e^+e^- 对,并且大部分在 3.1 GeV 处形成一个窄峰。为了确保观测到的窄峰是真正的效应而非仪器偏差或计算机读出误差造成的,他们把磁铁电流减小 10%,测定另外一套数据。这样做,可使粒子进入探测器的不同部分。结果是,窄峰仍然是在 3.1 GeV 处出现(见图 1)。他们还测得这个峰的宽度小于 5 MeV。

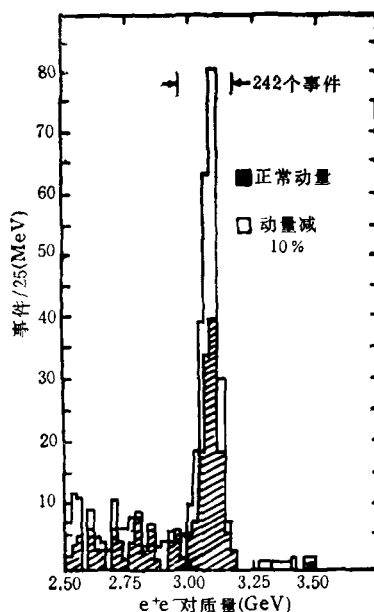


图 1 发现 J 粒子的实验结果

经过多方核对后,丁肇中小组确认,他们发现了一个新粒子,他们把它命名为 J 粒子。

二、 ψ 粒子的发现^[2]

在美国加利福尼亚州斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 发现 ψ 粒子的, 是美国物理学家 B. Richter (1931—) 领导的 SLAC-LBL 合作组 (LBL 即劳伦斯伯克利实验室)。1956 年, Richter 在 MIT 取得博士学位后, 随即到斯坦福高能实验室工作, 参加过 1958 年斯坦福大学与普林斯顿大学合作的 500 MeV e^-e^- 对撞机的建造。此后, 他便成为对撞机的热情建造者和实验者。1972 年, 他负责的 SLAC 的 e^+e^- 对撞机 SPEAR 建成并投入运行。它的质心能量 (8 GeV) 和亮度都处于当时 e^+e^- 对撞机的最高水平。SLAC 与 LBL 合作建成了可鉴别和测定强子、 μ^\pm 和 e^\pm 的磁探测器 MARK I。

MARK I 于 1973 年 2 月建成, Richter 合作组便着手测量 e^+e^- 对撞产生强子的截面。其他对撞机已进行过这方面的工作, 而且为了理论分析的方便, 都是测量比值

$$R = \frac{e^+e^- \rightarrow \text{强子的截面}}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \text{ 的截面}}$$

Richter 合作组测量 e^+e^- 的不同质心能量下的 R 值, 从 2.4 GeV 开始, 每次调高 200 MeV 测一个数据, 一直测到 4.8 GeV。1974 年 7 月, Richter 在伦敦国际高能会议上总结了当时对 e^+e^- 湮没产生强子过程的认识, 并把在各对撞机测得的 R 值作出图示。这次会议对 R 值随能量变化的复杂关系感到困惑。理论物理学家 J. Ellis 列举了当时有过的 23 种理论模型, 给出了各不相同的 R 值计算结果。会议上还看不出解决这问题的出路。

1974 年初, Richter 合作组发现在 3.2 GeV 处 R 值稍有反常 (比邻近处的值约高 30%), 然而当时未引起重视。这年夏季, SPEAR 停机三个月, 准备调整到 5—9 GeV 的能区运行。10 月中旬, 当他们复查数据时, 发现在 3.1 GeV 处有反常, 在八轮实验中有两轮显示有高出 3—5 倍的截面。因此, 他们下决心把对撞机调回 3.1

GeV 附近能区进行仔细测量, 并于 11 月 9 日取得了在 3.1 GeV 处存在窄共振峰的证据 (见图 2)。

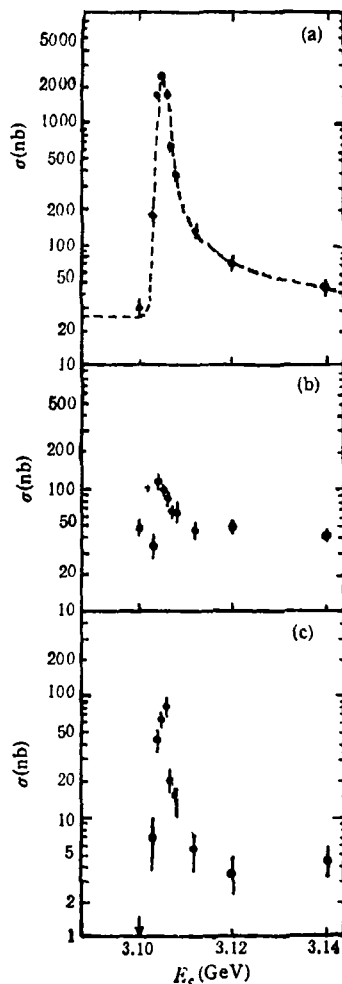


图 2 发现 ψ 粒子的实验结果
(a) 多强子末态; (b) e^+e^- 末态; (c) $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ 及 K^+K^- 末态

Richter 合作组把 3.1 GeV 处的共振态命名为 ψ 粒子。接着, 他们继续寻找类似的共振态, 十天后又宣布在 3.7 GeV 处发现了 ψ' 粒子。

Richter 等人发现的 ψ 粒子与丁肇中等人发现的 J 粒子是同一种粒子。但是, 他们对这粒子的命名未能取得一致意见, 为了尊重发现者的愿望, 又不致被误认为是两种粒子, 于是采取了 J/ ψ 这样特殊的记号。

三、发现 J/ψ 粒子的重大意义

J/ψ 粒子被发现后,世界各地的加速器和对撞机都对此进行研究,不仅确认了 J/ψ 的存在,而且又发现了一批 J/ψ 族粒子,并且对它们的性质进行了细致的研究,得出了如下的结果。

1. 精细地确定了 J/ψ 的质量为 (3096.9 ± 0.1) MeV, 共振宽度非常小, 只有 0.063 ± 0.009 MeV; 而 ψ' 的质量为 (3686.0 ± 0.1) MeV, 共振宽度为 (0.215 ± 0.040) MeV。
2. 确认 J/ψ 及 ψ' 的量子数 $J^{PC} = 1^{--}$ 。
3. 确定 J/ψ 及 ψ' 是强子, 且确定其衰变为强子的机制主要是高度禁戒的强衰变。
4. 确认 ψ' 是 J/ψ 的激发态, 且发现一批同族的粒子, 如表 1 所示。

表 1

粒子记号	质量 (MeV)	共振宽度 (MeV)	量子数 (J^{PC})
$\psi(3770)$	3770 ± 3	25 ± 3	1^{--}
$\psi(4030)$	4030 ± 5	52 ± 10	1^{--}
$\psi(4160)$	4159 ± 20	78 ± 20	1^{--}
$\psi(4415)$	4415 ± 6	43 ± 20	1^{--}
$\chi(3415)$	3415.0 ± 1.0		0^{++}
$\chi(3510)$	3510.0 ± 0.6		1^{++}
$\chi(3555)$	3555.8 ± 0.6		2^{++}
$\eta_c(2980)$	2981 ± 6	< 20	0^{-+}

为了解释 J/ψ 族粒子的特性,物理学家进行了大量的理论分析,发现原有的 u, d 和 s 三夸克模型不能容纳这批新粒子,而扩充为包含 c(粲)夸克的四夸克模型却获得了成功。

在电弱统一理论的发展过程中,为了解决不存在奇异数改变的中性流的困难, Glashow 等人于 1970 年提出了存在第四种(粲)夸克的假设(GIM 机制)^[3]。在 J/ψ 发现的前夕, Gaillard 及 Lee 根据 K_L^0 及 K_S^0 的质量差,估计粲夸克质量约为 1.5 GeV ^[4]。Gaillard 等人还写出题为《粲的探寻》的论文^[5],考察了在 e^+e^- 湮没中隐粲态 ($c\bar{c}$) 的产生,并根据 Zweig 经验规则(或称 OZI 规则,即在强衰变中,不连续

夸克图比连续夸克图的禁戒程度高),预言这些态有较长的寿命。与此同时, Appelquist 与 Politzer^[6] 利用强相互作用的量子色动力学研究了重夸克系统的性质。他们认为,由于强作用的渐近自由性质,可用库仑势描写夸克间的相互作用,而对于质量大的夸克,非相对论量子力学仍然适用。J/ψ 发现后,他们首先提出的粲子偶素 ($c\bar{c}$ 束缚态)模型受到了高度的重视。J/ψ 族粒子的主要性质可用这个模型得到解释。

1. J/ψ 和 ψ' 寿命特别长的问题得到了解释。

J/ψ 和 ψ' 由于质量不足以衰变为两个质量最小的显粲粒子 ($D^0[u\bar{c}]$ 及 $\bar{D}^0[\bar{u}c]$), 而只能通过三胶子衰变为不含粲的强子, 据计算这种强衰变的几率很小, 而 $\psi(3770)$ (或记为 ψ'') 的质量高于产生 $D^0\bar{D}^0$ 的阈能, 可以通过单个软胶子衰变为 $D^0\bar{D}^0$, 这种强衰变几率较大, 因而其寿命与一般强子共振态差不多。这是可以在 Zweig 规则的基础上得到解释的。这种解释所预言的 D^0 粒子, 终于在 1976 年 6 月在 SPEAR 上被发现了 ($m_D = 1864.7 \pm 0.6 \text{ MeV}$)。

2. J/ψ 族粒子的能级得到了解释。

改进的粲子偶素模型要考虑夸克的禁闭性质, 远距时的相互作用势取线性形式。如果把自族相互作用考虑进去, 应用非相对论量子力学进行计算, 得到的能级与 J/ψ 族粒子能级的实验数据能较好地符合。图 3 是用类似于电子偶素的符号 ($^{2S+1}L_J$) 标记能级, 利用

$$P = (-1)^{L+1}$$

和 $C = (-1)^{L+S}$, 可以验证各态的量子数。

3. R 值随能量的变化得到了解释。

J/ψ 族粒子被发现后, 在 3—4.5 GeV 的范围内陆续找到六个共振态。把这些共振态的影响除去后, R 对 e^+e^- 质心能量的关系显示为几个大致不变的坪。按三色四夸克模型计算, 在 2—3.7 GeV 范围内要考虑 u, d, s 夸克的影响, $R \approx 2$ 。而在 3.7 GeV 以上, 还要考虑 c 夸克的影响, $R \approx \frac{10}{3}$ 。实测的 R 值较大, 1978

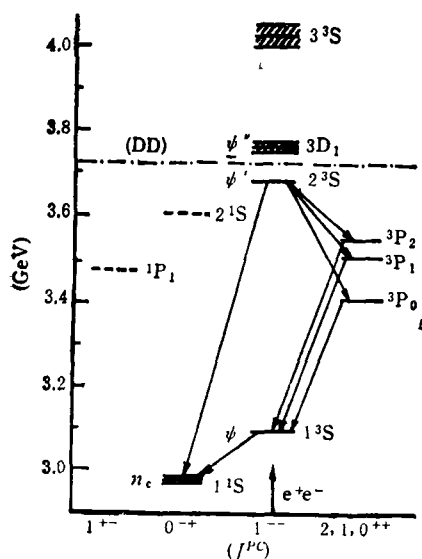


图3 粲子偶素的能级

年已证实 τ 轻子的存在, 而它可衰变为强子, 使 R 值变大。这样, R 的复杂关系得到了解释, 并且再一次证实三种色荷的假设是正确的。

由此可见, J/ψ 的发现实际上证实了一种新夸克的存在, 并且引出十多个含粲粒子的发现。在理论方面, 无论从量子色动力学还是从电弱统一理论的分析, 都取得与实验比较相符的结果。 J/ψ 的发现所开创的粒子物理研究的新局面, 使人们对夸克模型、量子规范场论都增强了信心, 为粒子物理的“标准模型”的建立作出了重大贡献。丁肇中和 Richter 为此获得了 1976 年的诺贝尔奖金物理学奖。

四、有关实验的讨论

J/ψ 粒子是由两组物理学家使用不同的设备、利用不同的过程所发现的同一粒子。丁肇中小组利用强子碰撞产生众多粒子, 然后从中通过测量衰变产物寻找新粒子, 这类实验称为产生实验。而 Richter 合作组让 e^+e^- 湮没后形成一个新粒子, 这类实验称为形成实验。

实际上, 50 年代末期的固定靶加速器已有足够能量产生 J 粒子, 但是已产生的 J 粒子与大量其他粒子混杂在一起, 背景十分复杂。只

有当有了明确的实验思想、高性能的谱仪和熟练的实验技能时, 新粒子才能找出来。早在 1968 年, 就在丁肇中所使用的 AGS 上, L. Lederman 小组差一点就发现了 J 粒子^[7]。他们所做的双轻子实验原理与丁肇中的类似, 只是他们测量了 $\mu^+\mu^-$ 对, 而非 e^+e^- 对。他们为了提高仪器的其他指标而降低了质量分辨率。他们的实验结果表明, 在 3.5 GeV 附近有某种特殊的变化趋势(有人称之为 Lederman 肩膀), 但无法判别该处是否存在共振峰(见图 4)。后来, Lederman 遗憾地说: “由于我们的分辨率 $\Delta m/m$ 仅为 14%, 世界被迫等了六年才找到 J/ψ ”^[7]。这个 1968—69 年的实验在 1974 年被 Aubert 等人用基于多丝正比室的磁谱仪来重复。这肩膀被高分辨率琢磨成名为 J 粒子的塔形峰^[8]。丁肇中小组在设计谱仪时, 也有人说: “在所研究的能量范围内不会有窄共振峰, 把分辨率确定为 5 MeV 徒然增加仪器的造价。但是丁肇中认为, 在实验中不应过于相信理论论证, 只有坚持按原计划制造谱仪, 才有可能发现 J 的共振峰。事后才知道, J 的共振宽度意外地窄, 他们的谱仪对测定共振宽度仍然显得分辨率不够高。

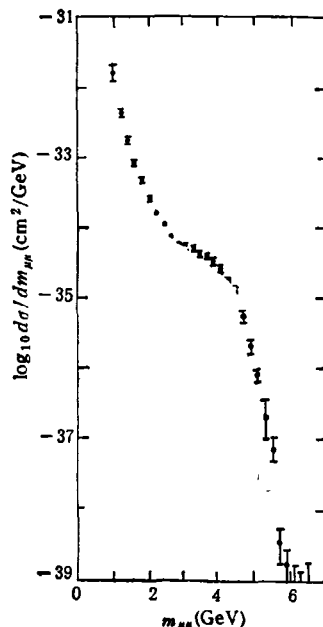


图4 Lederman 双轻子实验的结果

利用 e^+e^- 对撞机上的形成实验来探寻矢量介子, 常常需要在很大范围里改变对撞的 e^+e^- 的能量。当未发现共振态的迹象时, 只能按“粗扫描”的方式来改变对撞粒子的能量。例如, Richter 合作组最初每次改变 200 MeV 的质心能量, 这就极易错过发现共振峰的机会。所以, 他们初期未发现在 2.4—4.8 GeV 范围内有共振峰。幸好他们及时地抓住了几次反常的迹象, 重新在 3.1 GeV 附近仔细测量, 终于发现了 ψ 。发现 J/ψ 后, 继续在 e^+e^- 对撞机上研究这族粒子是比较有利的, 因为形成实验没有强

子背景, 进行测量和分析都比较容易。所以, 发现 J/ψ 后, 有关粲粒子性质的研究结果大都是在 e^+e^- 对撞机上获得的。

1989年6月, 我国新建成的 e^+e^- 对撞机 BEPC 上的北京谱仪 BES, 已记录到 J/ψ 衰变产生的强子事件。今后, 我国在粲物理的研究方面将会作出应有的贡献。

J/ψ 发现后三年, 历史又有一次重演。1977年, Lederman 小组在美国费米实验室 (FNAL) 的 500 GeV 质子同步加速器中, 进行了类似于丁肇中的实验^[7,8]。他们测量 $\mu^+\mu^-$ 对时, 发现在质心能量 9.5 GeV 处出现共振峰, 他们把这共振态命名为 Y 粒子。不久, 他们发现共振区是三个态的叠加。但是, 由于他们谱仪的分辨率为 200 MeV, 因此只能确定各共振峰宽度小于 100 MeV (以后知道只有几十 keV)。图 5 给出 Lederman 小组的实验结果。为了从形成过程研究这些粒子, 在几个 e^+e^- 对撞机上人们设法把质心能量调高到这能区。1978年6月, DESY 的 e^+e^- 对撞机 DORIS 也发现了 Y 粒子。此后, 人们利用 e^+e^- 对撞机对 Y 族粒子进行了细致的研究, 发现 Y 族粒子与 J/ψ 族粒子有很多相似的性质。经分析后确定, Y 族粒子是第五种 (底) 夸克及其反夸克的束缚态。底 (b) 夸克的质量约为 5 GeV, 类似的显底粒子 (例如 $B^0[b\bar{d}]$, $m_{B^0} = 5274.2$ MeV) 已被发现。由此可见, J/ψ 的发现对 Y 族粒子的发现及对 b 夸克的研究都有极大的启发作用。

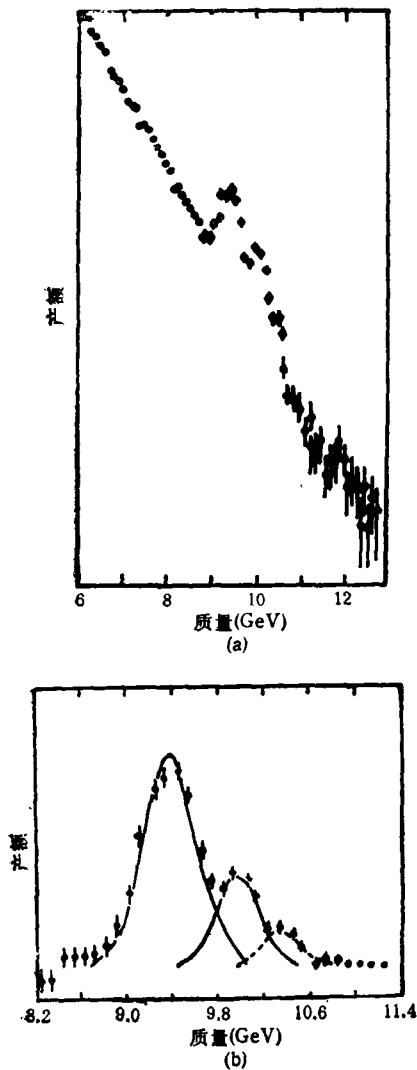


图 5 发现 Y 粒子的实验结果
(a) 连续背景下的峰; (b) 除去连续谱后 Y , Y' 及 Y'' 三个峰

- [1] B. Aubert et al, *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 1404, S. C. C Ting, *Rev. Mod. Phys.*, **49** (1977), 235
- [2] J. E. Augustin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **33**(1974), 1406; B. Richter, *Rev. Mod. Phys.*, **49**(1977), 251; G Goldhaber, *Adventure in Experimental Physics*, World Sci. Education, Princeton, N. J., **5**(1976), 131.
- [3] S. L. Glashow et al. *Phys. Rev. D*, **2**(1970), 1285.
- [4] M. K Gaillard and B. W. Lee, *Phys. Rev. D*, **10** (1974), 897.
- [5] M. K. Gaillard et al. *Rev. Mod. Phys.*, **47**(1975), 277.
- [6] T. Appelquist and I. D. Politzer, *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 43.
- [7] L. M. Lederman, *Les Houches session 37*, North-Holland Publishing Company, (1981), 828.
- [8] L. M. Lederman, *Rev. Mod. Phys.*, **61**(1989) 547.