



## Y 粒 子

(十五)

1977年7月在欧洲物理学会举办的“希达佩斯粒子物理讨论会”上,美国哥伦比亚大学的列昂·莱德曼教授首次宣布发现了 $\Upsilon$ 粒子。他的这一宣布在会上引起了极大的震动,成为这次会议的要闻之一。新发现的粒子的质量约为三年前所发现的 $J/\psi$ 粒子的三倍左右。它的发现同 $J/\psi$ 粒子一样,也是人们完全没有预料到的。这里有个戏剧性的插曲:当莱德曼教授在会上宣读这一发现时,城市突然停电了,灯灭了,电车也停了。莱德曼教授风趣地评论道,“这可能是上帝给的一个信号——他认为我们太接近他的秘密了”。

作出这一发现的实验是在美国费米实验室由莱德曼教授领导的哥伦比亚大学-费米实验室-石溪纽约州立大学合作组完成的。他们使用了一个质量分辨率很好(约2%)的双臂磁谱仪,测量在400GeV质子-核

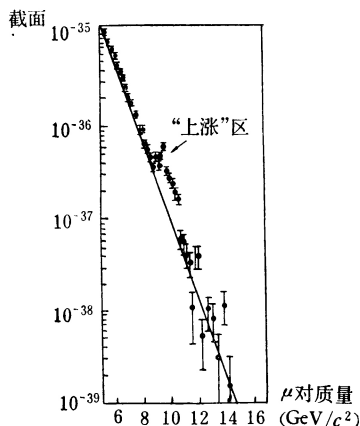


图1 400GeV质子-核碰撞中所产生的 $\mu$ 子对质量谱。在9.5GeV处明显可见在平滑的连续谱背景上的一个很强的“上涨”,从而发现了新粒子 $\Upsilon$ 。

早在66—67年,领导这一实验的莱德曼教授所在的哥伦比亚大学实验组就设计了利用布鲁克海汶实验室30GeV质子加速器在核子-核相互作用中寻找 $\mu$ 子对的实验。他们认为这是寻找一些“隆起”并探测小距

离行为的一个好的途径。由哥伦比亚大学与布鲁克海汶实验室合作的这个实验,虽然后来没有作出新粒子一类的重大发现,但人们都清楚地记得,在他们测得的 $\mu$ 子对质量谱中在3GeV附近在平滑的连续谱背景上出现的一个弯弯,这就是后来人们常常谈及的“肩膀”。限于当时谱仪的分辨率不够高,从统计上未能识别出这

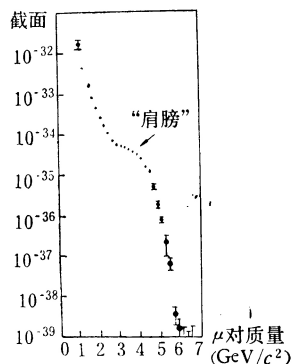


图2 29.5GeV质子-核碰撞中所产生的 $\mu$ 子对质量谱。在3GeV附近谱的形状似“肩膀”,限于谱仪的分辨率较差,未能识别出这是一个新粒子。

是一个新粒子(见图2)(实际上,这正是后来(74年)由丁肇中教授和里希特教授共同发现的 $J/\psi$ 粒子。)看来这是非常令人惋惜的,但无疑这对后来的寻找新粒子的实验是一个很大的启发。

在某种意义上可以说,后来在费米实验室由莱德曼教授所领导的哥伦比亚-费米实验室-石溪纽约州立大学合作的实验就是他们当初在布鲁克海汶的实验的继续。不过随着探测技术的发展,他们所使用的谱仪的性能已大大得到改进,尤其是有了较好的质量分辨率,而这正是实验成败的关键。

他们的实验从1975年9月开始,起初是在质子-核相互作用中寻找电子对,以后遂改为寻找 $\mu$ 子对。到77年5月底,在 $\mu$ 子对的质量谱中9.5GeV附近的结构变得明显起来。他们进行了一系列检验,以保证所观察到的“上涨”是真实的。使用不同的磁铁电流取得数据,“上涨”没有变动。通过对 $J/\psi$ 和 $\psi'$ 粒子的测量进一步肯定了仪器的质量标准及分辨率,同时也

为了对寻找新粒子的实验能有个较为全面的了解,对整个实验作一下历史的回顾也许是有意

\* “上涨”以及下文的“隆起”、“峰”和“共振”,在质量谱的分析中,常用来表示新粒子存在的迹象。

监督了设备的稳定性。说来也巧，就在实验进行过程中，他们发现磁铁电流附近常打火，为了防止损坏电子学探测器，他们特意请来了欧洲灭火专家。打火消除后，迅速将设备擦洗干净，继续实验，发现“上涨”仍在原来的质量处出现。所以有人说，他们的实验还经受了“火”的考验。

一个月以后，共探测到 9000 多个高质量  $\mu$  子对事例，在“上涨”区以外，得到的是一个平滑的连续谱，它近似地按  $e^{-M}$  下降，这里  $M$  是以 GeV 为单位的有效的  $\mu$  子对质量，而在 8.8GeV 到 10.6GeV 之间的“上涨”区，由连续谱预期有 350 个事例，但实际上测得了 770 个事例。多出来的事例可以拟合为一个单高斯分布的峰，其中心在 9.5GeV 处，宽度为 1.2GeV；也可拟合为两个窄峰，其中心分别在 9.44GeV 和 10.17GeV 处，其宽度则由仪器的分辨率（大约 0.5GeV）所决定。简单的分析认为单共振拟合统计上不大可能，因为 1GeV 的自然宽度将要求强子衰变在数量上大大超过  $\mu$  子衰变，这将导致该粒子的产生截面可与  $J/\psi$  粒子相比，实际上并非如此，所以存在两个窄峰的可能性很大。

莱德曼教授称这个粒子为  $\Upsilon$ ， $\Upsilon$  是一个迄今很少使用的希腊字母，其英文译名为 Upsilon，它的意思是狭窄的  $\nu$ ，中文音译为宇普西隆。后来的实验确实搞清楚这一结构是由  $\Upsilon$ 、 $\Upsilon'$ 、 $\Upsilon''$  及  $\Upsilon'''$  等几个窄峰组成的。看来，这正合了命名者的本意。

到 77 年 10 月，数据已积累到在布达佩斯会议上宣布时的三倍，两个峰已可清楚地分开： $\Upsilon$  在 9.4GeV， $\Upsilon'$  在 10GeV。三个峰的拟合分析也预测在 10.4GeV 处可能有第三个窄峰，但不能十分肯定。

从上述可以看出，寻找  $\Upsilon$  粒子的实验与前几年在质子加速器寻找  $J$  粒子的实验有着相当类似的实验条件。不同的是， $J/\psi$  粒子当年是在质子加速器上和正负电子对撞机上同时作出的，而现在的  $\Upsilon$  粒子的发现却只有一家质子加速器的实验作出。原因何在呢？原来当时（77 年）最大的正负电子对撞机（如 SLAC 的 SPEAR 及 DESY 的 DORIS，它们在  $J/\psi$  家族的粒子的发现及性质测定方面曾起了很大的作用）的质心能量都低于 10GeV，更大的正负电子对撞机（如 SLAC 的 PEP 及 DESY 的 PETRA）都正在建造中。这就出现了质子加速器的轻子对实验一家独揽  $\Upsilon$  粒子实验的局面。

正是在质子加速器的  $\Upsilon$  粒子实验的刺激下，德国的 DESY 实验室下决心并尽了最大努力要在尽可能短的时间内将原有的正负电子对撞机 DORIS 加以改造，由原来的双环多束团机改为单环单束团机，并在 78 年 4 月达到了质心能量 10GeV。接着很快由 DORIS 上的两个实验组同时测到了  $\Upsilon$  (9.46) 粒子，并较精确地测定了它的电子衰变宽度的数值。同年 7 月，DORIS 能量提高到 10.2GeV，当时在 DORIS 上的两个实验组很快测到了  $\Upsilon'$  (10.02) 粒子，较精确地测定了  $\Upsilon'$  粒

子与  $\Upsilon$  粒子的质量差及电子衰变宽度等数值。

在理论上，由于  $\Upsilon$  粒子的长寿命，它与  $J/\psi$  粒子一样被解释为一种新的夸克（b 夸克，有人称之为“美”夸克，有人称之为“底”夸克）与其反夸克的束缚态。夸克反夸克系统的标准的非相对论位势模型可将  $\Upsilon$  粒子的电子衰变宽度与夸克的电荷联系起来。用上述 DESY 实验中测得的电子衰变宽度数据与理论比较，可确定 b 夸克的电荷为  $-1/3$ 。

三个 DESY 的实验组分析了  $\Upsilon$  和  $\Upsilon'$  的强作用衰变中的喷注结构，表明  $\Upsilon$  直接强作用衰变的特性（如角分布、平均球度等）与量子色动力学的三胶子模型一致，同时支持胶子的自旋为 1。

自莱德曼教授领导的实验组发现  $\Upsilon$  粒子以后，在费米实验室和西欧中心（CERN）的许多实验组也陆续在质子-核或  $\pi$  介子-核以及交叉储存环（ISR）上的质子-质子相互作用的轻子对实验中找到了  $\Upsilon$  粒子，为  $\Upsilon$  粒子在强子碰撞中的产生提供了更丰富的实验数据。

最新的有关  $\Upsilon$  粒子的实验结果来自康奈尔电子储存环（CESR）的两个实验组。（其中一个实验组也有莱德曼教授本人参加。）该储存环是由原来的康奈尔 12GeV 电子同步加速器改建而成的。CESR 计划早就酝酿，而在 77 年下半年，由于  $\Upsilon$  粒子的发现，对该储存环的建造起了很大的推动作用，因为在能区上它刚好填补了原有的两个对撞机与正在建造的两个大对撞机之间的空白，且刚好落在  $\Upsilon$  能区之上。故它的建成预期会对  $\Upsilon$  粒子性质的研究极为有利。CESR 计划于 77 年 10 月批准，工作高速进行，至 79 年底即正式建成并开始实验工作。不出所料，关于  $\Upsilon$  粒子很快就得到了结果，而且非常漂亮。机器运转后不久，CESR 上的两个实验组就已十分清楚地测得  $\Upsilon$ 、 $\Upsilon'$  及  $\Upsilon''$ 。随后不久两个实验组又分别测得  $\Upsilon'''$ 。他们精确地测得了各粒子的质量及电子衰变宽度等数值。

目前所发现的 4 种粒子  $\Upsilon$ 、 $\Upsilon'$ 、 $\Upsilon''$ 、 $\Upsilon'''$  在理论上被认为是 b 夸克与其反夸克  $\bar{b}$  的四种束缚态，即  $1^3S_1$ 、 $2^3S_1$ 、 $3^3S_1$ 、 $4^3S_1$  态。如果  $\Upsilon$  家族也和  $J/\psi$  家族一样，那么，还有相当多的成员有待发现，而且每个态的量子数等也需实验测定。此外，寻找一类新的“B 粒子”（即含有 b 夸克的介子或重子）也有大量实验工作可做。

通观整个寻找  $\Upsilon$  粒子的实验可以看出，正是  $e^+e^-$  对撞机上的实验和质子加速器上的强子碰撞实验互相补充，互相促进，将近年来高能物理实验推向了一个新的阶段。重轻子和  $\Upsilon$  粒子的相继发现，使我们对粒子世界的了解又深入了一层。目前，人们正为寻找与重轻子  $\tau$  相应的中微子  $\nu_\tau$  和第六个夸克（“t”夸克，有人称之为“真”夸克或“顶”夸克）做着巨大的努力。

薛生田