

新粒子的发现

张肇西

(中国科学院高能物理研究所)

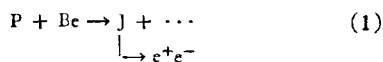
出人意料的特点

一年来国外高能物理方面先后发现了七个粒子^[1],它们的质量很重,是氢原子的三到四倍,它们的量子数很平常。但是有很突出的特点:其中最早发现的两个粒子出人意料地稳定,即寿命 $\tau \sim 10^{-20}$ 秒(通常质量这样大而量子数很平常的粒子寿命应为 10^{-24} 秒左右)。由于这一点,当它们一发现,立刻引起了国内外的理论和实验工作者的极大兴趣,并对它们进行了大量的研究。现已取得了一些进展。目前总的情况是:虽然离弄清楚它们的本质还有一段距离,给出的可能的解释还很多,但是有一点是公认的,即这七个粒子不同于以前的粒子,其差别是具有原则意义的。这七个粒子的发现,对研究基本粒子的“一分为二”的规律无疑会提供重要线索,它们将会进一步揭示基本粒子的内在矛盾。

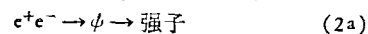
发现的途径

七个新粒子都是用测量宽度的方法发现的。实验上对于寿命很长和很短的粒子是用不相同的方法测量寿命的。对于寿命很长的粒子做法是:在足够高的能量下产生它们,并使它们能跑一段距离后才衰变,通过测量跑过的距离和速度,推算出它们的寿命;再通过研究它们的径迹和衰变产物定出质量和量子数。对于寿命很短的粒子,由于产生出来后,跑极小的距离就衰变了,用上述方法测量它们的寿命是不可能的,只好根据量子力学测不准原理,测量粒子质量的宽度来推算粒子的寿命(量子力学测不准原理告诉我们,粒子的寿命 τ 和宽度 Γ 是不独立的,有反比关系 $\tau \cdot \Gamma = \hbar$)。再通过研究衰变产物定质量和量子数(这点两种方法是共同的)。对于最近发现的新粒子,即使是寿命最长的粒子,仍不能用前一种方法测量寿命,而只能用后一种测量宽度的方法推知寿命。

七个新粒子中第一个发现的粒子是两个研究组同时发现的。一组称它为J粒子,通过下述过程



发现的。其中入射的质子能量为30 GeV。这组实验做法是精确测量(1)式中的电子对(e^+e^-)的动量,从而可推知电子对的不变量 $m_{e^+e^-}$ (即J粒子的静止质量),实验的结果如图1。可见在 $m_{e^+e^-} = 3.1$ GeV附近有一很尖锐的高峰,表明J粒子的存在。另一组称 ψ 粒子,是在正负电子对撞机上,通过下述过程



发现的。实验结果如图2,可以看到在 e^+e^- 的质心能量 $E_{c.m.} = 3.095$ GeV处,三个反应(2a), (2b)和(2c)的截面都有极大,表明 ψ 粒子存在。由于没有统一的名字,下文我们用J/ ψ 代表这一粒子。

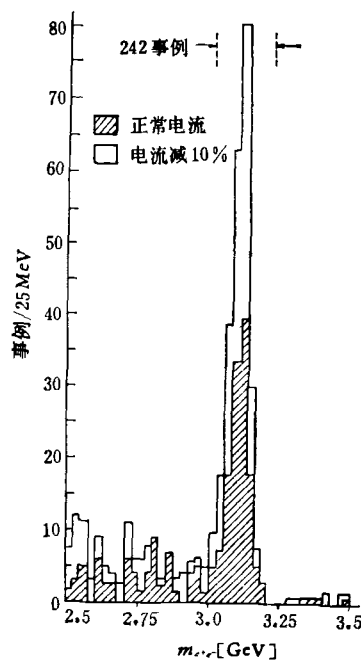


图1 发现J粒子的实验结果

J/ ψ 粒子的宽度 Γ 和质量 m 的比很小, $\Gamma/m \sim 10^{-3}$,这两组的实验仪器精度都没有达到足够高,因此图1和图2中直接读出的宽度并不是粒子的宽度 Γ ,而是由于仪器的分辨率不够被大大展宽的宽

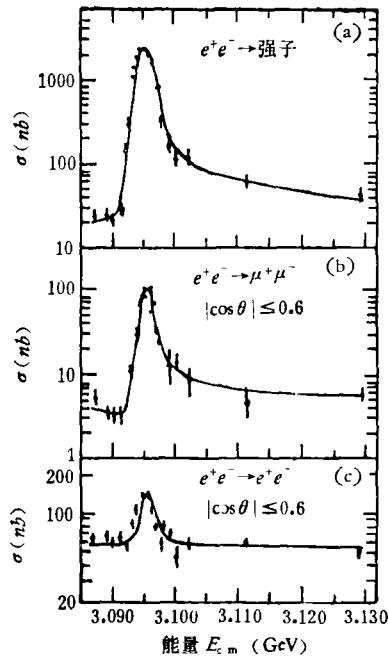


图2 发现 ψ 粒子的实验结果

度¹⁾,这点是需要在此特别说明。 J/ψ 粒子的存在很出人意外,实验又很困难,为慎重起见,这两个实验组在正式发表他们的发现之前做了不少检验工作。从图1上我们还能看到所做检验工作的痕迹。图中没有划斜线的事例,就是他们所做的检验之一,即把探测器中的电流减少10%所得到的事例。

J/ψ 粒子由于是两个组独立地同时发现,很快又被别的实验室证实,所以 J/ψ 粒子发现不久就完全肯定下来了。另一个粒子[下面介绍的 $\psi'(3.7)$ 粒子]也是由于在发现之后很快又被别的实验证实,所以也早就肯定了。而七个粒子之中另外的五个粒子情况就大不一样了,有的是不足粒子还需要进一步研究[下面介绍的 $\psi''(4.1)$, $\psi'''(4.4)$ 两粒子]。有的事例数少,宽度不能定下来,随着事例数的增加,它们是否存在都是问题。只是因为这五个粒子的发现多少有些在意料之中,才对它们的存在不太怀疑。

新粒子的主要性质

这七个粒子的质量和量子数可以类似原子核物理的能级纲图给出一个纲图来(见图3)。由于实验上它们的量子数没有完全定下来,它们的衰变道也没有完全测出来,即使是已测量出来的道,分支比也没有完全测下来,因此所给的“能级纲图”是示意的,只供参考。其中四个量子数为 $J^{PC} = 1^{--}$ 的粒子,它们全能由正负电子对撞产生出来,它们发现的较早,发现者给了它

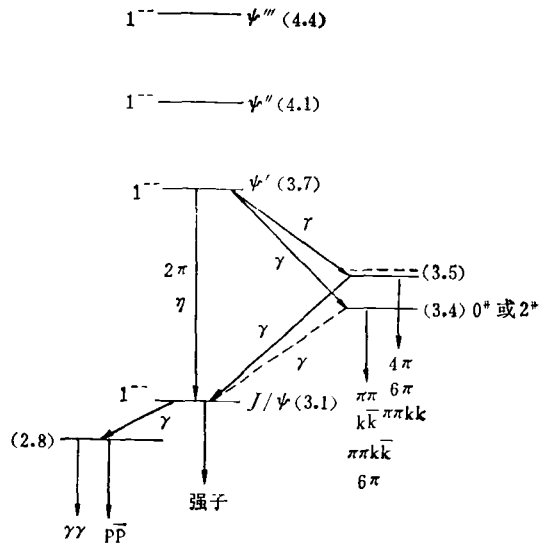


图3 图中括号()内的数值是粒子的质量(GeV),量子数的计法为 $J^{PC}(I^G)$

们名称: J/ψ , ψ' , ψ'' , ψ''' 。另外的三个粒子是最近发现的,没有命名,图中用质量来表示它们,即(2.8), (3.4)和(3.5)三个粒子。

四个 1^{--} 的粒子实验上比较容易产生,数据积累得多些,它们的主要数据可列表如下^[2]:

粒子名称	$J/\psi(3.1)$	$\psi'(3.7)$	$\psi''(4.1)$	$\psi'''(4.4)$
质量(GeV)	3.095	3.684	4.1	4.4
$J^{PC}(I^G)$	$1^{--}(0^-)$	$1^{--}(0^-)$	$1^{--}(\ ?)$	$1^{--}(\ ?)$
$\Gamma_e = \Gamma_\mu(\text{keV})$	4.8 ± 0.6	2.2 ± 0.3	$1.8 - 3.3^*$	$0.4 - 0.8^*$
$\Gamma_{\text{强子}}(\text{keV})$	59 ± 14	220 ± 56	未给	未给
$\Gamma_{\text{总}}(\text{keV})$	69 ± 15	225 ± 56	未给	未给

* 北京大学高崇寿等同志建议改进扣除本底的方法,改进这两数值。

除上表给出的数据外,还有两个实验数据比较重要,需要进行专门的介绍。

1. 实验已测定 $\psi'(3.7)$ 粒子衰变到 $J/\psi(3.1)$ 粒子的分支比和 $\psi'(3.7)$ 粒子经 2π 介子和 η 介子衰变到 $J/\psi(3.1)$ 粒子的分支比^[3]:

$$\frac{\Gamma(\psi' \rightarrow J/\psi + 2\pi)}{\Gamma_{\text{总}}(\psi')} = 0.32 \pm 0.04, \quad (3)$$

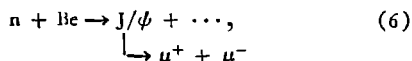
$$\frac{\Gamma(\psi' \rightarrow J/\psi + \eta)}{\Gamma_{\text{总}}(\psi')} = 0.04 \pm 0.02, \quad (4)$$

$$\frac{\Gamma(\psi' \rightarrow J/\psi + \dots)}{\Gamma_{\text{总}}(\psi')} = 0.57 \pm 0.08 \quad (5)$$

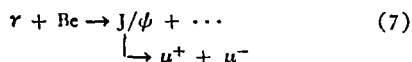
1) J/ψ 粒子的宽度是靠过程(2)通过测量给出的共振曲线(见图2)下所包括的面积推算出来的。

以上数据表明 $J/\psi(3.1)$ 和 $\psi'(3.7)$ 两粒子之间联系较强, $\psi'(3.7)$ 粒子到 $J/\psi(3.1)$ 粒子的衰变属于强衰变。

2. 最早发现的 J/ψ 粒子实验上研究较多。对于发现这一粒子的两个过程 (1) 和 (2a, 2b, 2c) 已积累了大量事例, 因此 J/ψ 粒子的许多量子数已定下来, 其中对于过程 (1) 还不完全地测出了 J/ψ 粒子的产生几率对入射 P 的能量依赖关系。(1) 和 (2a, 2b, 2c) 两个过程, 还有人做了下列过程的实验^[4]:



和



其中以 (7) 式光生实验比较重要, 因为能从光生实验推知 J/ψ 粒子与核子之间的相互作用的强弱。现在这实验的初步结果告诉我们: J/ψ 粒子与核子之间的总截面近于 1 毫靶。它虽然比 π 介子与核子的总截面 (~ 24 毫靶) 小一个数量级, 但是仍属于强作用的量级。因此现在大家一般认为 J/ψ 粒子是强子。不过在推 J/ψ 粒子与核子的总截面过程中还有一些不确定的因素, 所以尚需进一步做实验——进行一系列的在不同原子核上的光生实验, 研究在原子核内 J/ψ 粒子与核子的多次散射, 可以最后肯定 J/ψ 粒子是否是强子^[1]。

目前给出的几种可能的理论解释

一年来理论的进展是首先排除了这些新粒子是重轻子的束缚态和重光子的可能性。后来由于有了光生 J/ψ 粒子的实验, 也排除了它们是传递弱作用的中间玻色子的可能性(最后排除这一可能如前面指出的, 还需做一系列在不同原子核上的光生实验)。在新粒子发现后, 我国理论工作者就是这样, 首先进行了这方面的系统的研究^[5], 现在证明这些分析是正确的。

在确认这些新粒子是强子的基础上, 理论上进一步研究了它们与原来强子的关系问题。

在新粒子发现之前, 人们已知道强子有一百多种, 而且已有 $SU(3)$ 理论, 把它们很有规律地分成八个一组, 十个一组。 $SU(3)$ 分类理论是很成功的, 它预言的结果与实验非常符合。经过深入研究, 人们认识到 $SU(3)$ 理论的成功是因为它正确地反映了基本粒子的内部组成——这一百多种强子都是由三种层子组成的。那么对于新近发现的这些粒子 $SU(3)$ 理论还能应用吗? 答案是不能! 因为在 $SU(3)$ 理论里非常难于解释新的七个粒子之中最先发现的两个粒子 (J/ψ 和 ψ') 的寿命为什么那么长, 宽度那么窄。因此新粒子的发现表明需要打破 $SU(3)$ 理论的框框, 增加层子的种类。实践证明, 如果这样做了, 是不难解释新粒子的特殊行为。

增加层子的种类的途径基本上可分为两大类: 一是 $SU(4)$ 理论^[6]和沿这一方向的推广—— $SU(n)$ ($n = 5, 6, 7, \dots$) 理论^[7]; 二是 $SU(3) \times SU(3)$ 理论^[8]。它们解释 $J/\psi(3.1)$ 和 $\psi'(3.7)$ 两种粒子宽度很小的事实概括起来如下: $SU(4)$ 理论认为层子有四种——原来 $SU(3)$ 理论中已有的三种层子再加一种带有“魅数”的层子, $J/\psi(3.1)$ 和 $\psi'(3.7)$ 粒子基本上是由带有“魅数”的正反层子组成的束缚态。由于具有“魅数”的层子在强子内的等效质量比以前三种大得多, 从而使 J/ψ 和 ψ' 粒子质量很大。另一方面 J/ψ 和 ψ' 粒子的质量又小于一个具有“魅数”的正(反)层子和不具有“魅数”的反(正)层子组成的束缚态即具有魅数的强子的两倍质量, 因此能量禁戒了 J/ψ 和 ψ' 粒子衰变到有“魅数”的正反强子的各种可能的强作用过程。对于 J/ψ 和 ψ' 粒子衰变为全不具有“魅数”的原来的强子的各种可能的强作用过程, 显然必须使等效质量很大的具有魅数的正反层子湮灭掉。经验证明这类过程要受到很强的压制(对于 J/ψ 和 ψ' 粒子要压低 10^3 — 10^4 倍), 所以 J/ψ 和 ψ' 粒子的总宽度 $\Gamma_{\text{总}}$ 很小, 只是由于 J/ψ 和 ψ' 粒子中还混进一点不带“魅数”的正反层子成分, 因此使得 J/ψ 和 ψ' 粒子衰变到强子的宽度 $\Gamma_{\text{强}}$ 有一定的大小。对于 $SU(n)$ 理论要增加 $(n-3)$ 种层子, 精神同 $SU(4)$, 不再赘述^[9]。对于 $SU(3) \times SU(3)$ 理论是假设层子共有九种, 原先 $SU(3)$ 理论是 $SU(3) \times SU(3)$ 理论的一半自由度没有激发的特殊情况。在这种特殊情况下是无法区分 $SU(3)$ 和 $SU(3) \times SU(3)$ 两种理论的, 因此过去把九种层子误认为三种。现在发现的新粒子在 $SU(3) \times SU(3)$ 理论来看是从前未激发的自由度现在开始激发了。新粒子中的 J/ψ 和 ψ' 粒子带有非可加量子数, 这些量子数在强作用下要守恒, 禁戒了各种强衰变过程, 使 J/ψ 和 ψ' 的宽度很窄。以上两类理论都有成功和困难之处, 最主要的困难是辐射衰变的宽度太大^[10]。目前实验还不能肯定这两类理论哪种正确哪种不正确或全不正确。这两类理论除了把已发现的粒子都填充了进去, 同时预言了大量的新粒子。它们所预言的新粒子是否真被发现, 将是这些理论正确与否的判据^[1]。

1) 国内有同志正在做这方面的理论计算。

2) $SU(n)$ 理论与 $SU(4)$ 的不同在于粒子的填充和预言的新粒子不同, 而且能改进 $\Gamma_{\text{强}} \approx \Gamma_{\text{总}}$ 的理论值和使 $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ 增大——实验要求比 $SU(4)$ 理论值大。

3) 理论所预言的这些粒子, 质量并不太高 (> 1.5 GeV), 是目前的高能加速器所能达到的能区, 它们难于被实验发现的原因在于它们的寿命“不长也不短”。估计在 10^{-13} — 10^{-14} 秒左右。对于目前的探测技术, 这样的寿命用直接测寿命和测宽度的方法都是很困难的, 所以发现这些粒子的关键是提高探测技术。

理论方面除了以上两类以外,特别是国内一些理论工作者经过认真研究指出还存在一种可能性,即新粒子和以前已知的强子可能没有上述两类理论那样紧密的联系,它们可能自成一族^[1]。目前在这方面的探索才开始,还在进一步深入研究之中。

参 考 文 献

- [1] Aubert, J. J. et al., *Phys. Rev. Letters*, **33**(1974), 1404.
Augustin, J. E. et al., *Phys. Rev. Letters*, **33**(1974), 1406.
Abrams, G. S. et al., *Phys. Rev. Letters*, **33**(1974), 1453.
Augustin, J. E. et al., *Phys. Rev. Letters*, **34**(1975), 764.
1975年8月斯坦福轻子、光子会议上的报告。
- [2] 1975年8月斯坦福轻子、光子会议上的报告。
- [3] Abrams, G. S. et al., *Phys. Rev. Letters*, **34**(1975), 1181.
- [4] Knapp, B. et al., *Phys. Rev. Letters*, **34**(1975), 1040.
Knapp, B. et al., *Phys. Rev. Letters*, **34**(1975), 1044.
- [5] 习成, 韦芑, 李综, 《科学通报》, **20**(1975), 32.
- [6] 吴济民, 黄涛, 《科学通报》, **20**(1975), 184.
朱重远, 《物理学报》, **24**(1975), 351 (包括SU(3)×SU(3)的内容)。
- [7] 李小源, “U(6)对称和新层子方案”, 《物理学报》, **25-1**(1976)。
- [8] 习成, 卞震, 李综, 《科学通报》, **20**(1975), 28.
卞震, 李综, 梁疏, 《科学通报》, **20**(1975), 35.
李综, 卞震, 习成, 《物理学报》, **24**(1975), 372.
- [9] 东方晓, 杜东生, 吴济民 “SU(4)结构模型下J(3100)和 $\psi(3700)$ 的电磁衰变”, 《物理学报》, **24-6**(1975).
吴丹迪, 李铁中, 张肇西, 黄涛, 谢治成, “场流关系和新粒子的一些衰变宽度”, 《物理学报》, **25-1**(1976)。
- [10] 文献[5].
张肇西, “中性赝标介子的双光子湮灭和它们的可能的混合”, 《物理学报》, **25-1**(1976).
罗辽夏, 陆焱, 《物理学报》, **24**(1975), 145.



1. 粒子质量的宽度

对于不稳定的基本粒子,其质量是不确定的。当我们测量它的质量时,一般会得到围绕某一极大值的基本上是左右对称的分布。当仪器的分辨率够高时,这一分布到极大一半处的宽度定义为粒子质量的宽度。用希腊字母 Γ 代表。文中已介绍它与粒子寿命 τ 之间根据量子力学有 $\tau \cdot \Gamma = \hbar$ 的关系,其中 $\hbar = 1.0546 \times 10^{-27}$ 尔格·秒。

2. 能级纲图

原子物理和原子核物理中把原子和原子核能级按高低和量子数等特点排列起来,并注明这些能级间的各种衰变的图示称为能级纲图。基本粒子物理中把各种粒子看成能级,同样按质量的高低等特点做出同样的纲图来。

3. 衰变道和分支比

粒子的衰变产物通常是不唯一的。衰变到不同的产物的过程称为不同的衰变道。粒子衰变时各衰变道的几率是不同的,每个道的几率对于总的衰变几率之比称为分支比。

4. 总截面及其单位毫靶

在微观物理中,粒子碰撞引起的反应的几率都用截面来表示。总截面即各种反应截面的总和。由于原子核半径在 10^{-12} 厘米的量级,因此在微观物理中用 10^{-24} 厘米²做截面的单位,称为1靶,所以1毫靶 = 10^{-27} 厘米²。

5. 强子

基本粒子中的一大类粒子。它们的特点是互相之间有强相互作用(强作用是一种比电磁作用的强度大两至三个数量级的基本相互作用),所以称它们为强子。例如强子有 π 介子,质子,中子,……。

6. 重轻子

基本粒子中的另一大类粒子。它们的特点是不参加强相互作用,目前已知的轻子有正、反电子,正、反 μ 介子,电子性的正、反中微子, μ 介子性的正、反中微子共八种。但最近有理论预言除上述八种轻子外,还可能存在质量大不稳定的轻子,定名为重轻子。

7. 重光子

电磁波的量子称为光子,它是传递电磁作用的粒子,静止质量为零。但近年来理论上预言有可能存在静止质量很大的传递电磁作用的粒子,定名为重光子。

8. 中间玻色子

基本粒子之间的相互作用,除了强相互作用和电磁相互作用以外还存在一种称为弱作用的基本相互作用。在目前实验所能达到的能量区域内它比电磁相互作用弱好多个数量级。原子核的 β 衰变就是弱作用引起的现象。从弱作用的理论建立以来,就提出弱作用很可能也应存在类似于传递电磁相互作用的光子的粒子,负责传递弱作用,称它为中间玻色子。