

粒子物理实验中的质量测量

叶云秀

在核物理实验中，原子核的质量可以用质谱仪(计)、核乳胶，也可以用核反应的能量平衡等方法来测量。在高能物理实验中，由于粒子的能量高、速度快、寿命短，需要有一些新的方法。云室、气泡室等探测器曾起过重要作用。但当能量越来越高，不少新粒子的寿命越来越短，如许多共振态粒子的寿命在 10^{-22} — 10^{-24} 秒的范围，它们在这些径迹室中留下的径迹将是非常短的，即使令它们以光速运动，留下的径迹也只有 3×10^{-14} 米— 3×10^{-16} 米，如果它们为中性粒子，则粒子本身在这些探测器中不能留下径迹，除非观察其衰变产物。基于以上情况，我们介绍几种对高能粒子质量测量的方法。

一、不变质量谱法

我们先来看 1974 年在实验上是如何发现 J/ψ 粒子的，是如何测得其质量的。在布鲁克海文实验室的质子加速器上，质子束打在铍靶上，观察

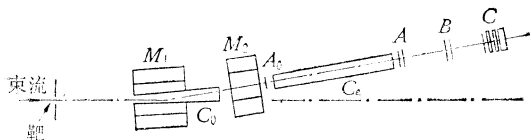
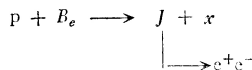


图 1 双臂谱仪的一臂 M_1, M_2 : 磁铁; C_0, C_e 契伦柯夫计数器; A_0, A, B, C : 多丝正比室

反应，这里 J 是要观察的粒子。实验设备是一个双臂谱仪，其中的一臂如图 1 所示，每一臂相对于束流方向为 14.6° 。两臂各测得 J 粒子衰变的 e^+e^- 的能量和动量，用不变质量谱法把这两个粒子的能量、动量与衰变母体的质量联系起来，求得两粒子的不变质量分布，

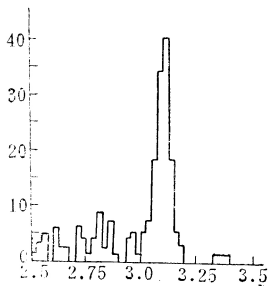
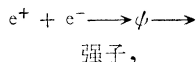


图 2 J/ψ 粒子的不变质量谱

在 3.1 GeV 处得到了一个尖锐的峰，这个峰值位置就是一个新的共振态，即新粒子 J ，如图 2 所示。同时在斯坦福直线加速器中心，用 e^+e^- 对撞湮灭反应



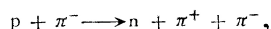
强子，

观察产生强子终态的截

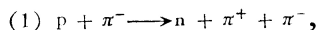
面，同样在 3.1 GeV 处得到一个尖锐的共振峰。这就是著名的 J/ψ 粒子的发现。

何为“不变质量”？为什么测量衰变产物的能量、动量可以得到母粒子的质量？我们以下述的粒子反应来加以说明。

观察共振态产生实验



以上反应可用 π^- 束入射到氢气气泡室来做，终态 n, π^-, π^+ 可由两种过程形成：



相应的费曼图为图 3(a)。

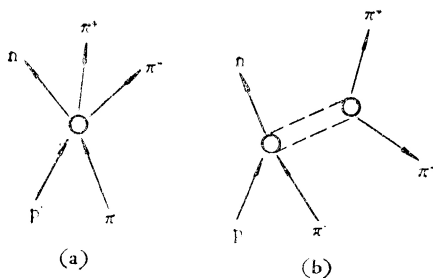
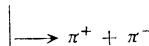
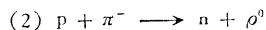


图 3 $p\pi^-$ 反应费曼图

相应的费曼图为图 3(b)。第一种反应过程无中间态，三个粒子按统计法则分配能量和动量，由其中任意两个

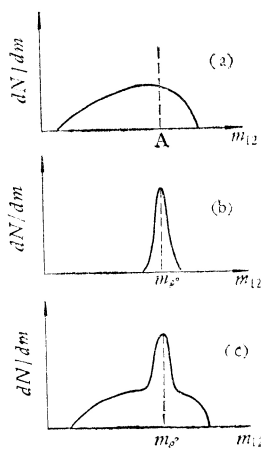


图 4 不变质量谱的三种情况

个粒子(如 $\pi^+\pi^-$)的能量和动量按不变质量法则得出的相应质量没有固定值，事例数 N 按质量的分布为一个光滑的连续分布，如图 4(a) 所示。第二种反应过程通过了中间态 ρ^0 。 ρ^0 衰变为 $\pi^+\pi^-$ ，这时的 π^+, π^- 不再与 n 统计地分配能量和动量，而仅由 ρ^0 的质量决定。由能量、动量守恒定律得知， ρ^0 的能量和动量应分别等于衰变产物的能量、动

量和。由动力学的计算得知, ρ^0 的质量为

$$m_\rho = \{m_1^2 + m_2^2 + 2[E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)]\}^{1/2}.$$

衰变产物 π^+ 、 π^- 的质量 m_1 、 m_2 是已知的, 实验上测出这两个粒子的能量 E_1 、 E_2 , 动量 p_1 、 p_2 和它们相对于 ρ^0 飞向方向的角度 θ_1 、 θ_2 , 即可求得 ρ^0 的质量 m_ρ . 当反应为全部通过中间态过程进行时, 则在相空间中的不变质量谱为一峰状分布, 如图 4(b) 所示. 当反应部分通过中间态, 部分不通过中间态时, 不变质量谱将如图 4(c) 所示.

以反应产物的部分粒子或全部粒子的能量、动量关系表示的质量称为不变质量, 或叫有效质量, 写成一般形式为 $M^2 = \left(\sum_i E_i\right)^2 - \left(\sum_i p_i\right)^2$

在相空间里描绘的质量分布称为不变质量谱.

测量不变质量, 必须通过大量事例的测量得到.

二、丢失质量谱法

在测量短寿命介子时, 如衰变过程中只包含一个中性粒子, 如 $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, 则可通过测不变质量谱, 得

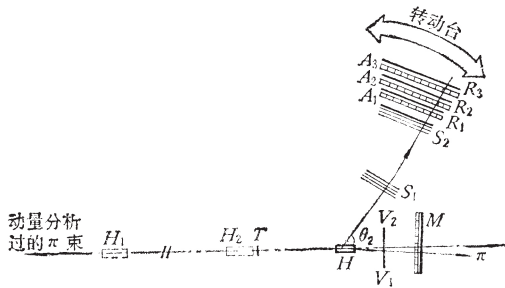


图 5 CERN 的丢失质量谱仪

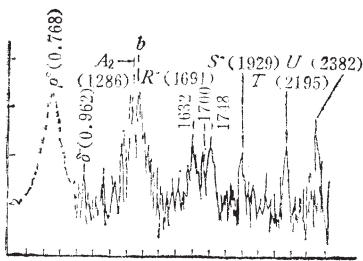
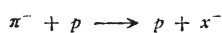


图 6 $\pi^-p \rightarrow p(MM)^-$ 反应中的丢失质量

到衰变母体的质量; 当衰变产物中包含一个中性粒子时, 如 $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$, 这时中性介子的质量可通过次级带电粒子与原始粒子之间的能量、动量的不

平衡得到. 有时, 引入一个中性介子, 能量、动量就可得到平衡. 但是, 在有些情况, 引入单个 π^0 不能使能量、动量平衡, 需引入多个中性介子. 显然, 要判断在反应中存在多少个 π^0 介子是不可能的, 所做的只能是从丢失的能量和动量推断出丢失粒子的有效质量, 称之为丢失质量. 如 π^- 束打到质子靶上, 有如下反应



π^- 可以为以下多种情况: 或为 π^- , 或 $\pi^-\pi^0$, 或 $\pi^-\pi^0\pi^0$, 或 $\pi^-\pi^+\pi^-$ 等等. 我们称 π^0 、 $\pi^0\pi^0$ 为相对于 $p\pi^-$ 的丢失质量, 也可称 $\pi^0\pi^-$ 为相对于 p 的丢失质量, …… 与不变质量的测量相类似, 要知道丢失质量 $M(x)$, 必须精确地测定初级入射粒子和丢失粒子所对应的带电粒子的能量、动量和方向.

第一个丢失质量谱仪是西欧中心 (CERN) 建造的, 如图 5 所示. π^- 束经动量分析, 打到固定靶 (氢靶) 上, 产生的反冲质子动量 (能量) 由 s_1 与 s_2 之间的飞行时间来测定, 它的运动方向 (θ_2) 由火花室测定. 描绘出反冲质子的运动质量谱, 则得到相对于 p 的丢失质量谱. 同样, 当又测出次级粒子 π^- 的动量 (能量) 时, 则给出相对于 $p\pi^-$ 的 π^0 、 $\pi^0\pi^0$ …… 的丢失质量.

许多有价值的工作可用丢失质量谱仪完成. 图 6 是丢失质量谱仪的一个测量结果. 由 π^-p 反应, 得到了 ρ^- 介子、 A_2 及 A_2 的“双结构” (“b” 所示的位置) 以及 R 、 S 、 T 等丢失质量.

三、奇异原子光谱法

所谓奇异原子, 是相对于正常原子而言的. 原子核外的负电粒子是电子的原子为正常原子, 由其它负电粒子代替电子的原子都称为奇异原子, μ^- 、 π^- 、 Σ^- 等等负电粒子都可充当该角色. 形成这些原子的过程也很简单, 负电粒子束通过某些物质时, 首先被慢化, 而后被原子或分子俘获到轨道上, 且通过发射俄歇电子或 X 射线而级联跃迁到最低能级, 形成一个“稳定原子”.

由激发态跃迁到较低能态直至跃迁到稳定态的过程中, 奇异原子与正常原子一样, 它们发射光子. 光谱线的波长与能级、核外负电粒子的质量之间有一定关系. 在正常原子中有

$$\nu = \frac{2\pi^2 m_e z^2 e^4}{h^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

这里 ν 为原子所发射的光子频率, h 为普朗克常数, c 为光速, m_e 为电子质量, z 为原子序数, e 为电子电荷, n 为原子所处的某个较高能级, k 为原子跃迁到某个较低能级. 当实验能测出光子能量, 即光子频率 ν , 且得知能级 k 、 n 的知识后, $\frac{2\pi^2 m_e z^2 e^4}{h^3 c}$ 就唯一地确定了. 当核为氢核时, 则 $\frac{2\pi^2 m_e z^2 e^4}{h^3 c}$ 定义为氢原子的里德堡常数 R_H . 同样, 实验上测定奇异原子的 ν_s 和 k_s 、 n_s 后, 则 $\frac{2\pi^2 m_s z^2 e^4}{h^3 c} = R_s$ 就确知, 当 $z = 1$ 时, 则有 $R_H/R_s = m_e/m_s$. 这里 m_s 为奇异原子核外负电粒子的质量. 电子质量 m_e 精确已知, R_H 也有很高的精度, 如 1974 年, R_H 值测得为 $109737.3143\text{cm}^{-1}$, 标准偏差

为 $1/10^9$, R_x 也可得到相应的精度, 因而不难确定 m_x . 1965 年, 用这种方法测得 π^- 介子的质量为 $139.580 \pm 0.015 \text{ MeV}$, 1975 年测得 μ^- 质量为 105.65876 MeV , 这是测量 $\pi^- \mu^-$ 质量最精确的方法之一.

四、磁矩法

原子核或一个带电粒子, 不仅具有电荷, 而且有自旋, 因而具有磁矩. 我们知道, 电子的磁矩 $\mu_e = g_e(c\hbar/2m_e c)$, 核子(质子)的磁矩为 $\mu_p = g_p(c\hbar/2m_p c)$, 这里 m_e 、 m_p 分别为电子和质子的质量, g_e 、 g_p 分别为电子和质子的回旋磁比. 这里我们可以看到, 磁矩的大小直接与粒子的质量有关. 因此, 如果能精确测定磁矩和 g 值, 那么不难知道相应粒子的质量.

在测量 μ^+ 的质量中, 最精确的测量方法之一就是磁矩法. μ 子的磁矩为

$$\mu_\mu = g_\mu(c\hbar/2m_\mu c)$$

由此可得

$$m_\mu/m_e = \frac{\mu_e g_\mu}{\mu_\mu g_e} = \frac{\mu_e}{\mu_p} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_\mu} (g_\mu/g_e).$$

引入 μ_p 是因为电子和 μ 子的磁矩都是相对于质子磁矩测得的. μ_e/μ_p 的测量精度达 $1/10^8$, g 值的测量精度达 $1/10^9$. 1976 年, 由该法测得质量比

$$m_\mu/m_e = 206.76851.$$

即 $m_{\mu^+} = 105.65941 \text{ MeV}$. 根据 CPT 守恒理论预言, 应有 $m_{\mu^+} = m_{\mu^-}$, 所以 m_{μ^+} 的质量就作为 μ 子的质量

测量粒子质量, 还有一些其它方法, 如测量粒子的动量和射程来确定质量, 或用全吸收效应测出粒子能量(动能和总能量)定出质量, 等等, 这里不再一一介绍.