

# 第一章 粒子的基本性质和分类

微观粒子的普遍性质：全同性；

内禀属性：不随粒子产生的来源和运动状态而变化。

一切内禀属性的总和是判别粒子种类的依据。



# 一、粒子的基本性质

## 1. 质量 (mass)

经典物理中：确定物体的质量是一个常数（静质量），不同物体的质量数值的变化是连续的。

量子物理中：微观粒子的质量是量子化的，不同粒子的质量谱是分立的。粒子的动质量

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

粒子的质量指静质量。对自由粒子或物理粒子，满足质壳条件：

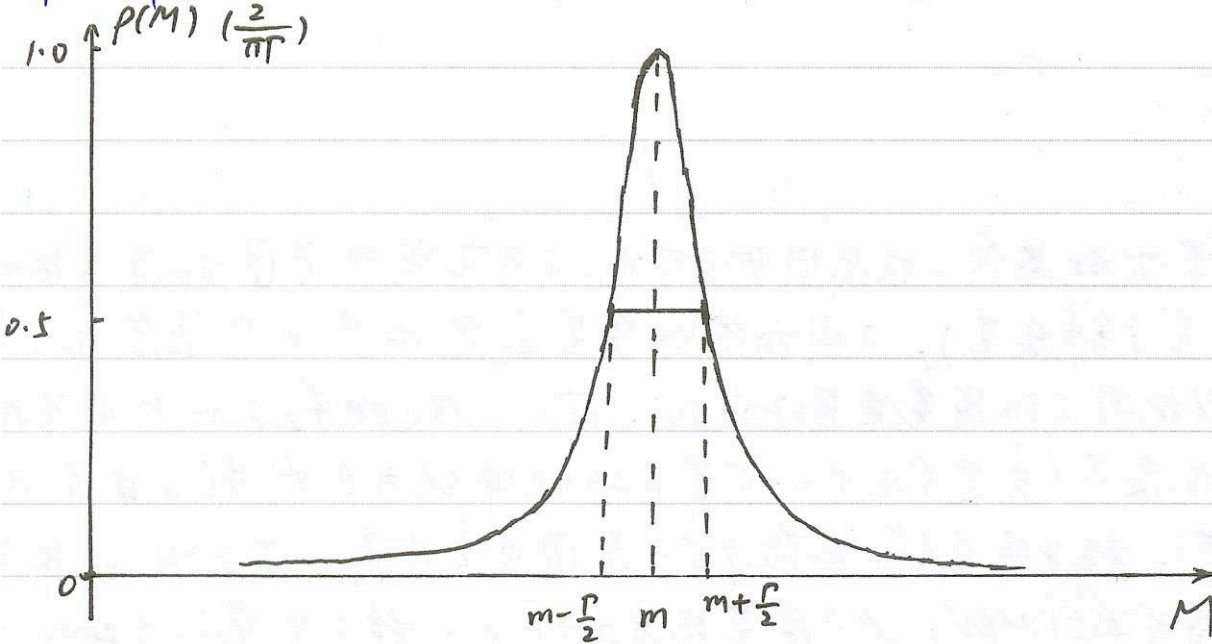
$$p^2 = m^2, \quad p = (E, \vec{p}).$$

不稳定粒子的质量：  $(m, \Gamma)$

粒子质量取值在  $m$  附近的概率密度为

$$\rho(M) = \frac{\Gamma}{2\pi[(M - m)^2 - \frac{\Gamma^2}{4}]}.$$

$M$  — 粒子质量的实验观测值。



$m$ 的物理意义:

粒子实测质量的期待值（最可几取值），称为粒子的质量。

粒子数对质量测量值 $M$ 的分布图。

$\Gamma$ 的物理意义:

质量的概率密度减到一半处 $M$ 的值为 $m \pm \frac{\Gamma}{2}$ ,

称为粒子的宽度。

# 一些粒子的质量:

光子:  $< 2 \times 10^{-33} \text{MeV}$

轻子: 电子  $0.511 \text{MeV}$ ;  $\mu$ 子  $105.7 \text{MeV}$ ;  $\tau$ 子  $1776.99 \text{MeV}$ ;

核子: 质子  $938.27 \text{MeV}$ ; 中子  $939.57 \text{MeV}$ ;

最重的顶夸克:  $173 \text{GeV}$ ;



## 2. 寿命和宽度

已发现的粒子中，除了 $\gamma, e^{\pm}, p, \bar{p}$ 及中微子外，其它各种粒子都要衰变。

粒子从产生到衰变之前存在的时间就是该粒子的寿命。

粒子寿命指粒子静止时的平均寿命。



常把不进行强作用衰变的所有粒子 ( $\tau > 10^{-20}\text{s}$ ) 都称为“稳定”粒子。

阅读：章乃森《粒子物理学》（上册）p63

粒子的宽度是粒子寿命的倒数，

$$\Gamma\tau = 1,$$

宽度的概率含义：单位时间内粒子衰变掉的概率。



## 影响粒子衰变 几率的因素

引起衰变的相互作用类型  
衰变前后粒子静质量差（衰变能 $Q$ 值）  
衰变粒子数目（相空间体积）

例：衰变能差不多(40 ~ 160MeV)的三体衰变过程

$$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+, \quad \text{强作用衰变}, \quad \tau \sim 10^{-23} \text{s},$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma, \quad \text{电磁作用衰变}, \quad \tau \sim 10^{-16} \text{s},$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-, \quad \text{弱作用衰变}, \quad \tau \sim 10^{-10} \text{s}.$$

衰变寿命的比值粗略反映三种相互作用强度的比值。

实验上如何测量不稳定粒子的寿命？



# 常见粒子的寿命:

光子  $\tau = \infty$

电子  $\tau > 2 \times 10^{22} \text{ a}$

$\mu$  子  $\tau = (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{ s}$

$\pi^{\pm}$  介子  $\tau = (2.6029 \pm 0.0023) \times 10^{-8} \text{ s}$

$\pi^0$  介子  $\tau = (8.4 \pm 0.6) \times 10^{-17} \text{ s}$

中子  $\tau = (896 \pm 10) \text{ s}$

质子  $\tau > 10^{31} - 3 \times 10^{32} \text{ a}$

粒子往往有多种衰变方式，如

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ \nu_\mu, & (\text{衰变道}) \\ \pi^+ \pi^0, \\ \pi^+ \pi^+ \pi^-, \\ \pi^+ \pi^0 \pi^0, \\ \pi^0 \mu^+ \nu_\mu, \\ \pi^0 e^+ \nu_e, \\ \vdots \end{cases}$$

单位时间内粒子衰变到第*i*衰变道的概率称为该衰变道的分宽度 $\Gamma_i$ 。

理论上可直接计算的量

$$\sum \Gamma_i = \Gamma, \quad R_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma} \cdot \text{一支比}$$

实验上可直接测量的量

# 近阈共振态:

一个不稳定粒子的某一衰变道:

$$M \rightarrow M_1 + M_2 + \cdots + M_i,$$

该衰变道的阈

若  $M < M_1 + M_2 + \cdots + M_i$ , 则  $M$  称为近阈共振态。

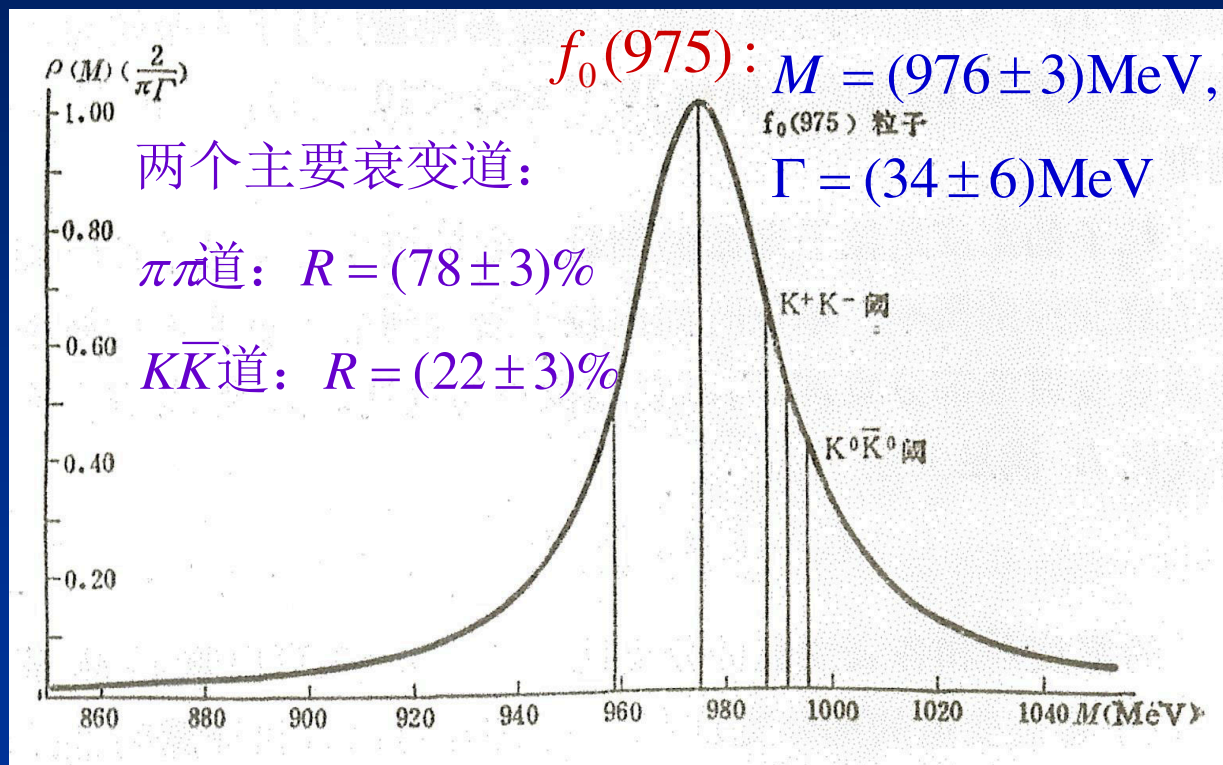
$$M_{K^+K^-} = 987\text{MeV},$$

$$M_{K^0\bar{K}^0} = 995\text{MeV},$$

$$M_{\pi\pi} = 270\text{MeV}.$$

$f_0(975) \rightarrow \pi\pi$ , 相空间大

$f_0(975) \rightarrow K\bar{K}$ , 相空间很小



$f_0(975)$ 和正反 $K$ 介子的相互作用应比和两个 $\pi$ 介子的相互作用强得多。


### 3. 电荷

- 电荷量子化

$$e = (1.60217733 \pm 0.000000049) \times 10^{-19} \text{ C}$$

电荷量子化的实验检验：

$$\frac{|q_p| - |q_e|}{|q_e|} < 10^{-21}, \quad (|q_n| = |q_p| - |q_e|)$$

电荷量子化的原因？  磁单级 (Dirac, 1931)

磁单极的磁荷

$$gq = n/2, \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

若宇宙中存在磁单级，则要求电荷一定量子化！  
寻找磁单级。

- 电荷守恒定律

$$\sum_i Q_i = \text{常数}, \quad (\text{对各种相互作用成立})$$

已发现粒子的电荷最大值为2, 如 $\Delta$ 重子:

$$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$$



## 4. 自旋

$$J = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$$

自旋量子化:  $J^2 = J(J+1)$ ,

$$J_i = j, j-1, j-2, \dots, -j+1, -j$$

粒子按自旋分类  $\left\{ \begin{array}{l} \text{费米子} \\ \text{玻色子} \end{array} \right.$

螺旋度(helicity): 粒子自旋在运动方向的投影  
(手征性)

$$\frac{\vec{S} \cdot \vec{k}}{|\vec{k}|}$$

粒子的螺旋度在不同参考系中可以不同。

$m=0$ 的粒子, 其螺旋度为好量子数。

## 5. 磁矩

$$\mu = g \frac{e}{2m} s$$

粒子电荷

$g$ 因子

对于任意自旋 $s \neq 0$ 的粒子，若它与电磁场的相互作用满足最小电磁作用原理，则理论上普遍有

$$sg = 1.$$

反常磁矩:  $\mu \neq \frac{e}{2m}$

# 几种常见粒子的反常磁矩

$$e: (1.001159652193 \pm 1.0 \times 10^{-11}) \frac{e}{2m_e}$$

$$\mu: (1.001165923 \pm 8 \times 10^{-9}) \frac{e}{2m_\mu}$$

$$p: (2.792847386 \pm 6.3 \times 10^{-8}) \frac{e}{2m_p}$$

$$n: (-1.91304275 \pm 4.5 \times 10^{-7}) \frac{e}{2m_p}$$

} 反常磁矩大

可能来源： 粒子有内部结构



## 二、粒子的分类（多种分类方法）

按自旋和统计性质分 { 费米子：自旋半奇数，服从费米-Dirac统计  
玻色子：自旋整数，服从玻色-爱因斯坦统计

按电荷分 { 带电粒子  
电中性粒子

按粒子是否稳定分 { 稳定粒子  
共振态



按粒子的  
相互作用  
性质分

强子

介子：自旋整数的强子  
重子：自旋半奇数的强子

轻子

带电轻子 ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ )  
中微子 ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )

规范玻色子

胶子 ( $g$ ) : 传递强作用  
光子 ( $\gamma$ ) : 传递电磁作用  
中间玻色子 ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ ) : 传递弱作用  
引力子 : 传递引力作用

强子：直接参与强相互作用的粒子；  
轻子：不直接参与强相互作用的粒子。

按轻子-夸  
克层次分  
类

规范玻色子

费米子

轻子

夸克

Higgs粒子