

# 粒子物理简介

## 第一节 概述

余钊煥

中山大学物理学院

<https://yzhxxzxy.github.io>



2021 年 9 月

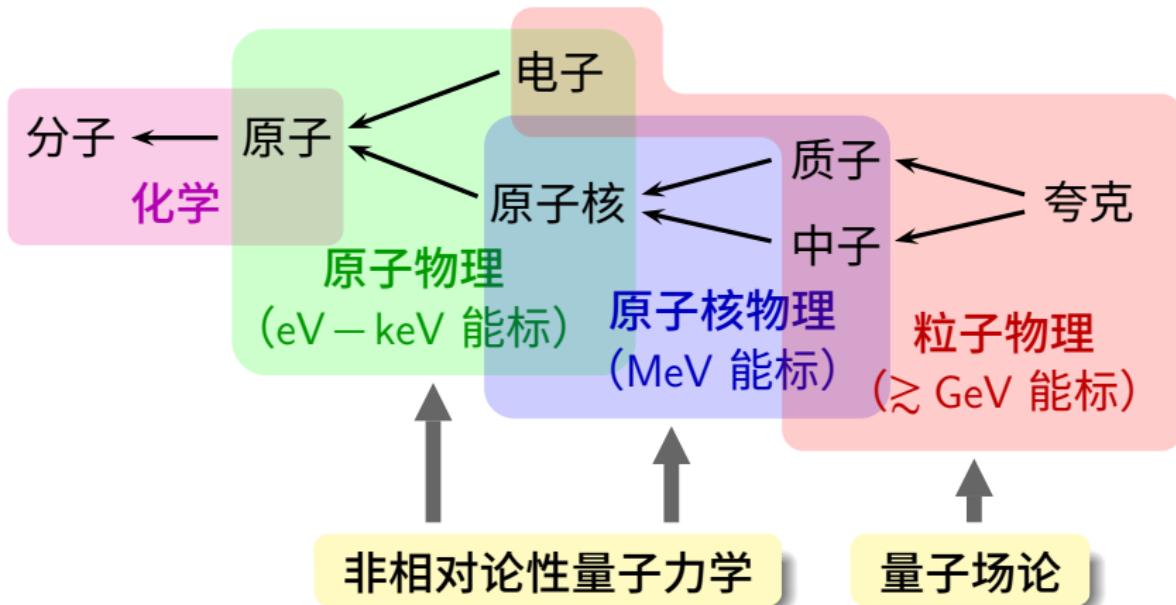


# 粒子物理参考书

- ① Particle Data Group (PDG), *Review of Particle Physics*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) [<https://pdglive.lbl.gov>]
- ② D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Wiley-VCH, 2nd edition, 2008 (有中译本)
- ③ 杜东生, 杨茂志, 《粒子物理导论》, 科学出版社, 2015
- ④ 肖振军, 吕才典, 《粒子物理学导论》, 科学出版社, 2016
- ⑤ F. Halzen, A. D. Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons Inc., 1982
- ⑥ L. B. Okun (translated from Russian by V. I. Kisin), *Leptons and Quarks*, North Holland Publishing Co., 1980
- ⑦ T. K. Gaisser, R. Engel, E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2016

# 粒子物理学

粒子物理学，也称为高能物理学，是研究物质的基本结构和基本相互作用的科学，理论基础是结合量子力学和狭义相对论的量子场论



# 自然单位制

在粒子物理学中，为简便起见，经常采用**自然单位制**，取  $c = \hbar = k_B = 1$

常数	国际单位制	自然单位制引起的数值关系
光速	$c = 299\ 792\ 458\ \text{m/s}$	$1\ \text{s} = 2.998 \times 10^8\ \text{m}$
约化普朗克常数	$\hbar = \frac{h}{4\pi} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV} \cdot \text{s}$	$1\ \text{s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV}$
玻尔兹曼常数	$k_B = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV/K}$	$1\ \text{K} = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV}$

在自然单位制中，**长度量纲与时间相同**，是**能量量纲的倒数**，**能量、质量、动量和温度**具有相同量纲，可将能量单位**电子伏特 (eV)** 视作**唯一基本单位**

粒子物理常见的长度单位是**费米** ( $1\ \text{fm} = 10^{-15}\ \text{m}$ )，它与能量单位 MeV 的关系是  $1\ \text{fm}^{-1} = 197.3\ \text{MeV}$

狭义相对论**能动量关系**表达成  $E^2 = m^2 c^4 + |\mathbf{p}|^2 c^2 = m^2 + |\mathbf{p}|^2$ ，其中  $m$  为**静止质量**

**质能关系**表达成  $E = \gamma mc^2 = \gamma m$ ，其中 **Lorentz 因子**  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}}$

# 有理化的自然单位制

 精细结构常数  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$  没有量纲，在任何单位制下数值为  $\frac{1}{137.036}$

 自然单位制不可能将  $\hbar$ 、 $c$ 、 $\epsilon_0$  和  $e$  这四个常数同时取为 1

 在粒子物理学中，时常再取**真空介电常数**  $\epsilon_0 = 1$ ，则**真空磁导率**  $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} = 1$

 这是电磁学中洛伦兹－亥维赛单位制的取法

 不同于高斯单位制，此时**麦克斯韦方程组**中不会出现**无理数**  $4\pi$ ：

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

 因此，这样的单位制称为**有理化**的自然单位制

  $4\pi$  因子出现在**库仑定律**中，点电荷  $Q$  的静电势表达成  $\Phi = \frac{Q}{4\pi r}$

 精细结构常数表达成  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$ ，**单位电荷量**  $e = \sqrt{4\pi\alpha} = 0.3028$  没有量纲

# 基本相互作用

人类对物质间相互作用的认识随着对物质结构的深入研究而不断加深

按照目前的认识，组成物质的基本单元是**粒子**，自然界中存在四种**基本相互作用**，支配着粒子的**运动和转化**

- ① 引力相互作用
  - ② 电磁相互作用
  - ③ 强相互作用
  - ④ 弱相互作用
- } 最先认识的两种**长程作用**，与日常生活最为相关
- 短程作用，将夸克束缚在核子中、核子束缚在原子核中
- 短程作用，引起原子核的  $\beta$  衰变

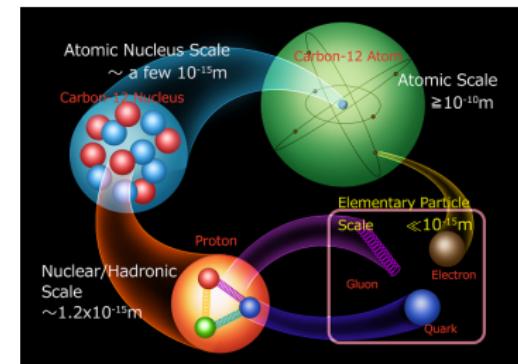
描述相互作用**性质**的要素

**源** 手指决定相互作用的种类

**相互作用常数** 手指决定相互作用的强度

**媒介粒子** 手指传递相互作用的粒子

**力程** 手指相互作用的有效范围



# 引力相互作用

所有物质都参与引力相互作用

引力的源是质量，假想中的媒介粒子叫引力子

相互作用常数是牛顿引力常数： $\frac{G_N}{4\pi} = 5.34 \times 10^{-40} \text{ GeV}^{-2}$

引起的束缚态：行星系（如太阳系）、恒星系（如银河系）、星系团

目前尚未确立成熟的、得到实验检验的量子引力理论



# 电磁相互作用

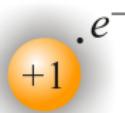
 所有带电粒子都参与电磁相互作用

 电磁相互作用的源是电荷，媒介粒子是光子

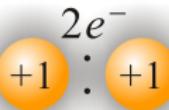
 电磁相互作用常数是精细结构常数

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.036}$$

 引起的束缚态：原子、分子



氢原子



氢分子



极光

 19世纪中叶，麦克斯韦将电和磁统一在电动力学的方程组中

 20世纪中叶建立起量子电动力学，它是第一个自洽的量子场理论

# 强相互作用

原子核内部质子和中子（统称核子）之间的作用力可以抵消质子之间的同性电磁排斥力，使原子核稳定存在

核子间存在不同于引力和电磁相互作用的另一种相互作用，它的强度还强于电磁相互作用，称为强相互作用

描述强相互作用的基本理论是量子色动力学

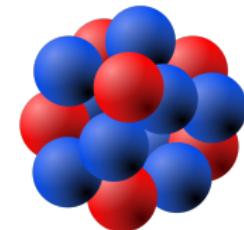
强相互作用的源是色荷，媒介粒子是胶子

相互作用常数是强耦合常数： $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim \mathcal{O}(1)$

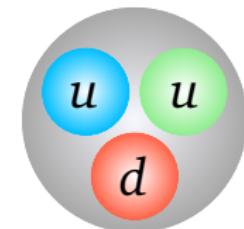
引起的束缚态：介子、重子、原子核

核子间强相互作用是夸克间强相互作用的剩余作用，类似于分子间的范德瓦尔斯力（电磁力的剩余力）

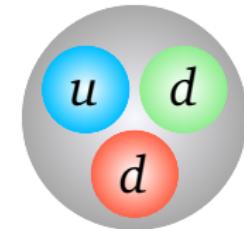
强相互作用的力程很短，约为  $10^{-15}$  m，作用范围仅在相邻核子之间



原子核



质子



中子

# 弱相互作用

🐉 原子核  $\beta$  衰变半衰期为几秒到几年， $\pi^\pm$  和  $K_S^0$  介子寿命为  $2.6 \times 10^{-8}$  s 和  $8.9 \times 10^{-11}$  s，这些作用时间与电磁或强作用的典型时间相比，要长  $10^5 - 10^{20}$  倍

🐬 支配这些衰变的相互作用**非常弱**，称为**弱相互作用**

🐉 电磁和弱相互作用由**电弱规范理论**统一描述

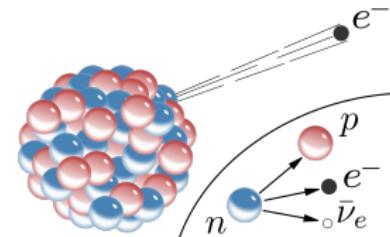
🐖 弱相互作用的源是**弱同位旋**和**弱超荷**，媒介粒子是  $W^\pm$  和  $Z^0$  玻色子

🐶 相互作用常数是**费米常数**： $G_F = \frac{g^2}{4\sqrt{2}m_W^2} = 1.166 \times 10^{-5}$  GeV $^{-2}$

🦁 弱相互作用强度太弱，力程极短，通常**不会引起束缚态**

✨  $W^\pm$  和  $Z^0$  玻色子的质量分别为 80.4 和 91.2 GeV，比质子质量大 2 个量级，严重**压低** GeV 能标以下的衰变过程，导致弱衰变寿命较长

🌙 当相互作用能标远高于  $Z^0$  质量时，弱作用强度与电磁作用**相当**



原子核  $\beta$  衰变

# 基本相互作用对比

	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力
源	色荷	电荷	弱同位旋、弱超荷	质量
相互作用强度	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$	$G_F m_p^2$	$\frac{G_N m_p^2}{4\pi}$
	$\sim \mathcal{O}(1)$	$\sim 1/137$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-40}$
媒介粒子	胶子	光子	$W^\pm$ 和 $Z^0$	引力子?
力程	1 fm	$\infty$	$\frac{1}{400}$ fm	$\infty$
典型作用时间	$10^{-23}$ s	$10^{-16}$ s	$10^{-10}$ s	$\gtrsim$ yr
典型束缚态	强子	原子	/	太阳系

🌹 质子参与四种基本相互作用；为了给出弱相互作用和引力的无量纲相互作用强度，上表以质子质量  $m_p = 0.938$  GeV 为基准进行估算

# 电磁势能和弱势能

电荷异号的两个粒子距离为  $r$  时，对应的**库仑势能**是  $V_{\text{EM}}(r) \sim -\frac{\alpha}{r}$

电磁势能与距离成**反比关系**

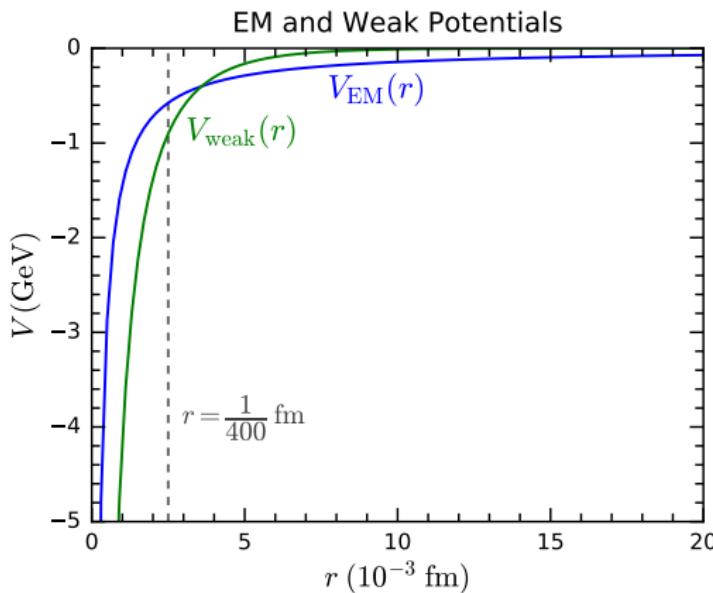
**弱相互作用引起的弱势能**为

$$V_{\text{weak}}(r) \sim -\frac{g^2}{4\pi r} \exp(-m_W r)$$

**$g$**  是弱耦合常数

距离大于  $\frac{1}{m_W} \simeq \frac{1}{400} \text{ fm}$  之后，

**指数因子**使弱相互作用迅速衰减



# 强势能



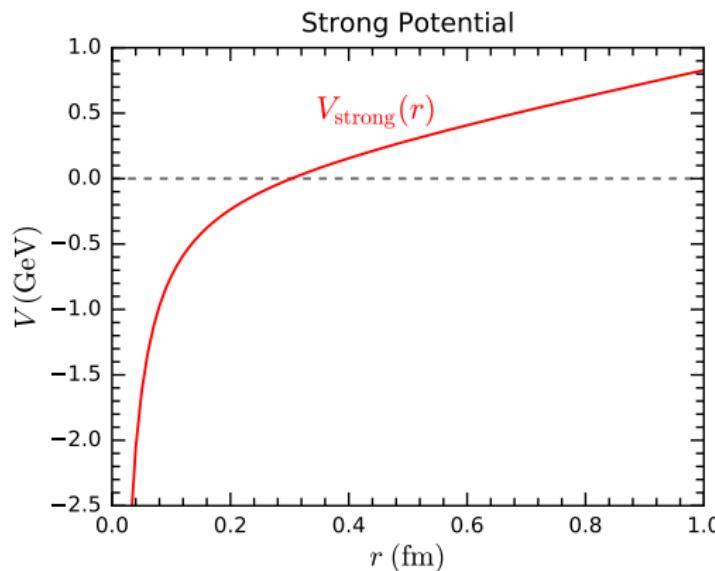
夸克间强相互作用引起的**强势能**为  $V_{\text{strong}}(r) \sim -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$

线性项系数  $k \sim 0.2 \text{ GeV}^2$

短距离处，**库仑项**主导，行为与电磁和弱作用类似，但相互作用强度更大

长距离处，**线性项**主导，导致**夸克禁闭**

在宏观距离上，不可能将带有**色荷**的粒子分开，因而所有强子都是**色中性的**



# 基本粒子

🌰 基本粒子指没有发现内部结构的粒子

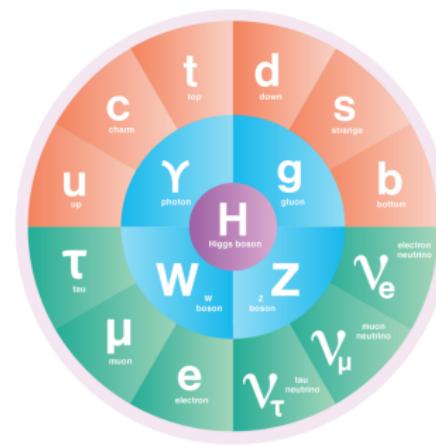
🍊 第一代、第二代、第三代费米子（自旋为  $1/2$ ）

- 带电轻子：电子 ( $e$ )， $\mu$  子 ( $\mu$ )， $\tau$  子 ( $\tau$ )
- 中微子：电子型中微子 ( $\nu_e$ )， $\mu$  子型中微子 ( $\nu_\mu$ )， $\tau$  子型中微子 ( $\nu_\tau$ )
- 上型夸克：上夸克 ( $u$ )，粲夸克 ( $c$ )，顶夸克 ( $t$ )
- 下型夸克：下夸克 ( $d$ )，奇夸克 ( $s$ )，底夸克 ( $b$ )

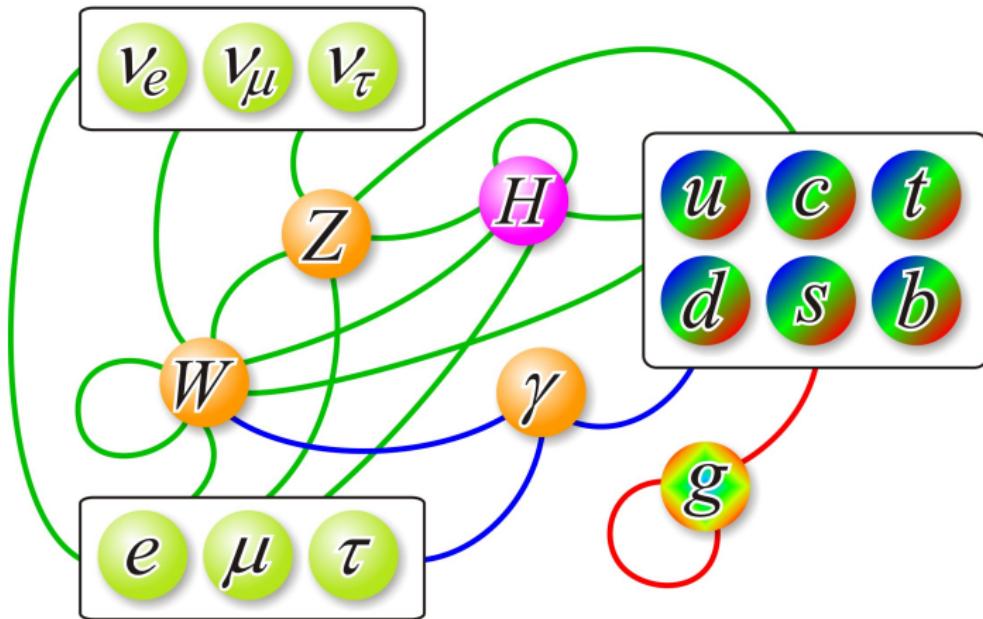
🍆 矢量玻色子（自旋为 1）

- 电弱规范玻色子：光子 ( $\gamma$ )， $W^\pm$ ， $Z^0$
- 强规范玻色子：8 种胶子 ( $g$ )

🍍 标量玻色子（自旋为 0）：希格斯玻色子 ( $H^0$ )



# 基本粒子的相互作用



研究基本粒子间强、电磁、弱相互作用建立起来的量子色动力学和电弱规范理论，合起来称为粒子物理**标准模型**，它是一个  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  规范场论

# 粒子物理标准模型

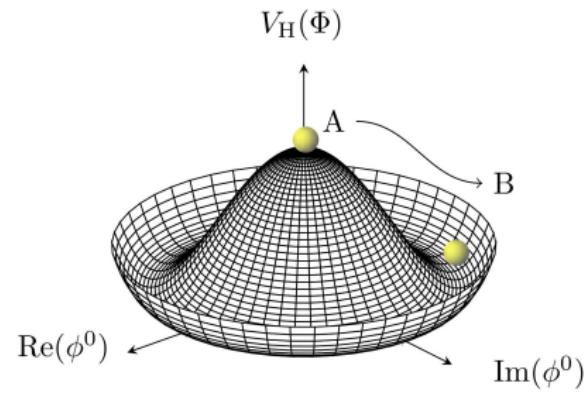
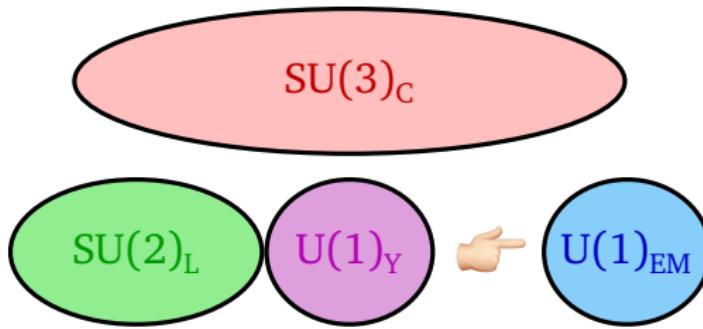


粒子物理**标准模型**是一个  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  规范场论

模型中有三代费米子，每一代包含一种上型夸克、一种下型夸克、一种带电轻子和一种中微子，规范玻色子传递费米子间相互作用

  $SU(3)_C$  部分描述**强相互作用**，称为**量子色动力学**，规范玻色子是**胶子**

  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  部分描述夸克和轻子的电磁和弱相互作用，称为**电弱规范理论**；理论中有一个**希格斯标量二重态**，引起规范群的**自发对称性破缺**，使  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  群破缺为  $U(1)_{EM}$  群



# 基本粒子质量起源

🍔 电弱对称性破缺前，电弱理论中存在 4 个无质量的规范玻色子和 4 个希格斯自由度；左手费米子和右手费米子都没有质量，具有不同量子数

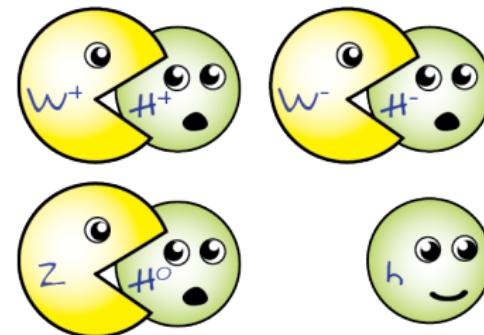
🍕 破缺后，3 个规范玻色子与 3 个希格斯自由度结合，从而获得**质量**，成为  $W^\pm$  玻色子和  $Z^0$  玻色子，传递**弱相互作用**

🍰 剩下的 1 个无质量规范玻色子是**光子**，传递**电磁相互作用**

🌭 与希格斯二重态的汤川耦合导致左手和右手费米子组合成狄拉克费米子，并获得质量

Ϙ 在标准模型中，中微子没有右手分量，因而没有获得质量

🥐 1998 年实验发现中微子振荡，证明**中微子具有质量**，因此需要扩充标准模型才能正确描述中微子物理



希格斯玻色子

# 复合粒子



**复合粒子**指具有内部结构的粒子



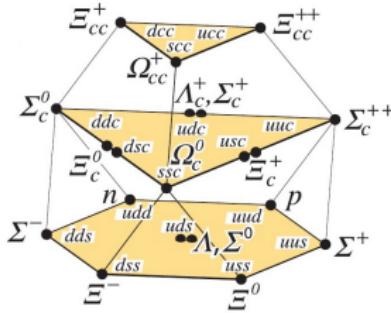
**原子核**: 由质子和中子组成 (如氕, 氘,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ )



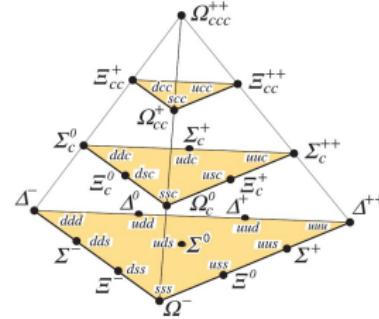
**强子**: 由夸克组成的强相互作用束缚态

- **介子**: 由一个正的价夸克和一个反的价夸克组成  
例如,  $\pi^+(u\bar{d})$ ,  $\pi^-(d\bar{u})$ ,  $\pi^0((u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2})$

- **重子**: 由三个价夸克组成  
例如, 质子  $p(uud)$ , 中子  $n(udd)$ ,  $\Lambda^0(uds)$

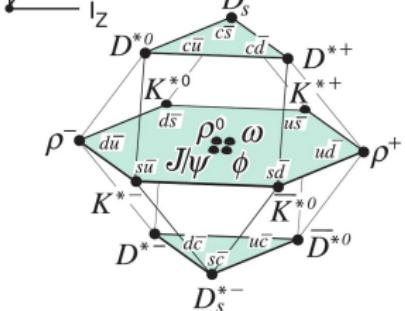
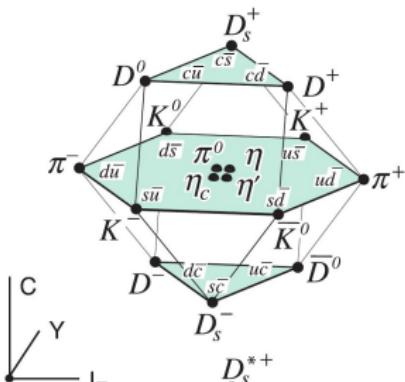


自旋 1/2 重子二十重态



自旋 3/2 重子二十重态

**赝标量介子十六重态**



矢量介子十六重态

# 粒子基本性质

 **稳定性**: 大多数粒子是不稳定的

 较重的粒子可能通过强、电磁和弱相互作用衰变成较轻的粒子

 有些**对称性**会禁戒某些衰变过程

 **未发现衰变的粒子**: 质子  $p$ , 正负电子  $e^\pm$ , 光子  $\gamma$ , 三代中微子  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

 **性质参数**: 质量、寿命(或衰变宽度)、自旋、电荷、磁矩、其它量子数

 **正反粒子**: 反粒子是粒子的共轭态

 反粒子的质量、寿命、自旋与正粒子相同，所有内部**相加性量子数**(如电荷、重子数、奇异数等)的大小与正粒子相同，符号却相反

 所有内部相加性量子数均为 0 的粒子称为**纯中性粒子** (如光子、 $Z^0$ 、 $\pi^0$  等)，它的反粒子是它本身



# 粒子基本性质

**电荷**: 粒子的电荷是量子化的, 以电子电荷量的绝对值  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C 为基本单位, **电荷守恒定律**严格成立

大多数粒子的电荷是  $e$  的**整数倍**

夸克具有**分数**电荷, 上型夸克的电荷为  $+\frac{2}{3}e$ , 下型夸克的电荷为  $-\frac{1}{3}e$

夸克组成的强子仍然具有**整数**电荷

**玻色子**: 自旋为整数, 如 0、1、2 等, 服从**玻色—爱因斯坦统计**

**标量玻色子** (自旋为 0):  $H^0$ ,  $\pi$  介子,  $K$  介子,  $\eta$  介子,  $D$  介子,  $B$  介子等

**矢量玻色子** (自旋为 1): 光子, 胶子,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ ,  $\rho$ ,  $J/\psi$ ,  $\Upsilon$  等

**费米子**: 自旋为半整数, 如  $1/2$ 、 $3/2$ 、 $5/2$  等, 服从**费米—狄拉克统计**

**自旋为  $1/2$  的费米子**: 带电轻子, 中微子, 夸克, 质子, 中子,  $\Lambda^0$  重子等

**自旋为  $3/2$  的费米子**:  $\Delta$  重子,  $\Omega^-$  重子,  $\Omega_{ccc}^{++}$  重子等

# 粒子物理简史：早期（1895 年至 1928 年）

- ① 1895 年，W. Röntgen 发现 **X 射线** [1901 年诺贝尔物理学奖]。
- ② 1896 年，H. Becquerel 发现天然**放射性**，随后 P. Curie 和 M. Curie 进一步研究放射性 [1903 年诺贝尔奖]。
- ③ 1896 年，C. Wilson 发明**云室**，以探测电离辐射中的带电粒子 [1927 年诺贝尔奖]。
- ④ 1897 年，J. Thomson 证实阴极射线由**电子**构成，并测定电子的电荷—质量比 [1906 年诺贝尔奖]。
- ⑤ 1901 年，M. Planck 提出能量的**量子化**假说以解释黑体辐射实验 [1918 年诺贝尔奖]。
- ⑥ 1905 年，A. Einstein 提出光的量子化假说，即**光子**的概念，成功解释光电效应 [1921 年诺贝尔奖]。
- ⑦ 1911 年，E. Rutherford 根据  $\alpha$  粒子与金属箔的大角度散射实验提出原子的**核式结构**（他对元素蜕变及放射化学的研究获 1908 年诺贝尔化学奖）。

# 粒子物理简史：早期（1895 年至 1928 年）

- ⑥ 1912 年，V. Hess 发现宇宙线 [1936 年诺贝尔奖]。
- ⑦ 1913 年，N. Bohr 建立原子的量子理论 [1922 年诺贝尔奖]。
- ⑧ 1922 年，A. Compton 发现 Compton 效应，进一步证实光的粒子性 [1927 年诺贝尔奖]。
- ⑨ 1924 年，L. de Broglie 提出电子的波动性假说 [1929 年诺贝尔奖]。
- ⑩ 1925 年，W. Pauli 提出不相容原理 [1945 年诺贝尔奖]。
- ⑪ 1925 年，W. Heisenberg、M. Born 和 P. Jordan 建立量子力学的矩阵形式 [1932 年和 1954 年诺贝尔奖]。
- ⑫ 1926 年，E. Schrödinger 提出 Schrödinger 方程，建立量子力学的波动形式 [1933 年诺贝尔奖]。
- ⑬ 1927 年，W. Heisenberg 提出不确定性原理。
- ⑭ 1928 年，P. Dirac 提出 Dirac 方程 [1933 年诺贝尔奖] 作为描述电子的相对论性方程，为解决方程的负能量问题而假设正电子的存在。

# 粒子物理简史：发展期（1929 年至 1956 年）

- ① 1929 年，E. Lawrence 发明回旋加速器 [1939 年诺贝尔奖]。
- ② 1930 年，W. Pauli 为解释  $\beta$  衰变实验中的能动量守恒和自旋角动量守恒而提出中微子假说。
- ③ 1932 年，J. Chadwick 证实中子的存在 [1935 年诺贝尔奖]。
- ④ 1932 年，C. Anderson 利用云室在宇宙线中发现正电子 [1936 年诺贝尔奖]。
- ⑤ 1933 年，E. Fermi 用 Fermi 相互作用理论解释  $\beta$  衰变（后因实验研究中子轰击产生的感生放射性和慢中子引发的核反应获 1938 年诺贝尔奖）。
- ⑥ 1935 年，汤川秀树提出核力的唯象理论，认为核子间相互作用由假想的介子传递 [1949 年诺贝尔奖]。
- ⑦ 1936 年，C. Anderson 和 S. Neddermeyer 利用云室在宇宙线中发现  $\mu$  子。
- ⑧ 1947 年，C. Powell 发展乳胶照相法，在宇宙线中发现  $\pi$  介子 [1950 年诺贝尔奖]。

# 粒子物理简史：发展期（1929 年至 1956 年）

- ⑨ 1948 年，C. Lattes 和 E. Gardner 用回旋加速器人工产生  $\pi$  介子。
- ⑩ 1946 年至 1950 年，朝永振一郎、J. Schwinger 和 R. Feynman 使量子电动力学在任意阶上自洽 [1965 年诺奖]。
- ⑪ 1952 年，D. Glaser 发明气泡室 [1960 年诺奖]。
- ⑫ 1954 年，杨振宁和 R. Mills 提出非阿贝尔规范理论。
- ⑬ 1954 年至 60 年代，L. Alvarez 发展的液氢气泡室的技术和数据分析方法使得 Bevatron 加速器上的实验发现大批共振态 [1968 年诺奖]。
- ⑭ 1955 年，E. Segrè 和 O. Chamberlain 在 Bevatron 加速器上发现反质子 [1959 年诺奖]。
- ⑮ 1956 年，F. Reines 证实中微子的存在 [1995 年诺奖]。
- ⑯ 1956 年，李政道和杨振宁提出弱相互作用中宇称不守恒 [1957 年诺奖]，随后由吴健雄等人在  $^{60}\text{Co}$  衰变实验中证实。

# 粒子物理简史：成熟期（1957 年至今）

- ① 1962 年，L. Lederman、M. Schwartz 和 J. Steinberger 发现  $\mu$  子型中微子 [1988 年诺贝尔奖]。
- ② 1964 年，J. Cronin 和 V. Fitch 发现中性  $K$  介子衰变时存在 CP 破坏 [1980 年诺贝尔奖]。
- ③ 1964 年，M. Gell-Mann (后因对基本粒子分类及相互作用的研究获 1969 年诺贝尔奖) 和 G. Zweig 分别独立提出夸克模型。
- ④ 1964 年，P. Higgs、F. Englert 和 R. Brout 提出通过自发对称性破缺赋予规范玻色子质量的机制 [2013 年诺贝尔奖]。
- ⑤ 1961 年至 1968 年，S. Glashow、S. Weinberg 和 A. Salam 建立电弱规范理论（标准模型）[1979 年诺贝尔奖]。
- ⑥ 1968 年，G. Charpak 发明多丝正比室 [1992 年诺贝尔奖]。
- ⑦ 1971 年至 1972 年，G. 't Hooft 和 M. Veltman 提出电弱规范理论的重整化方法 [1999 年诺贝尔奖]。



# 粒子物理简史：成熟期（1957 年至今）

- ⑥ 1973 年，丁肇中和 B. Richter 分别独立发现  $J/\psi$  介子，意味着粲夸克的存在 [1976 年诺贝尔奖]。
- ⑦ 1973 年，D. Gross、F. Wilczek 和 D. Politzer 发现量子色动力学的渐近自由特性 [2004 年诺贝尔奖]。
- ⑧ 1973 年，小林诚和益川敏英发现弱 CP 破坏的来源要求存在第三代夸克 [2008 年诺贝尔奖]。
- ⑨ 1975 年，M. Perl 发现  $\tau$  子 [1995 年诺贝尔奖]。
- ⑩ 1977 年，L. Lederman 领导的实验组发现底夸克。
- ⑪ 1983 年，C. Rubbia 和 S. van der Meer 领导的实验组发现  $W^\pm$  和  $Z^0$  规范玻色子 [1984 年诺贝尔奖]。
- ⑫ 1995 年，CDF 和 DØ 实验组在 Tevatron 对撞机上发现顶夸克。
- ⑬ 1998 年至 2001 年，梶田隆章和 A. McDonald 发现中微子振荡 [2015 年诺贝尔奖]，从而推断中微子具有质量。
- ⑭ 2012 年，ATLAS 和 CMS 实验组在 LHC 对撞机上发现希格斯玻色子。