

# 粒子物理简明教程

## 第一节 概述

余钊焕 (Zhao-Huan Yu)

ARC Centre of Excellence for Particle Physics at the Terascale,  
School of Physics, the University of Melbourne



THE UNIVERSITY OF  
MELBOURNE

2017 年 3 月



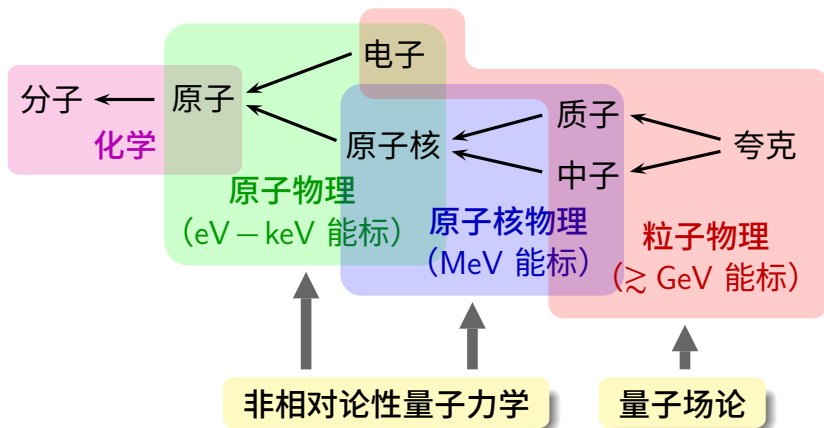
**CoEPP**  
ARC Centre of Excellence for  
Particle Physics at the Terascale

## 主要参考书

- ① 杜东生, 杨茂志, 《粒子物理导论》, 科学出版社, 2015。
- ② 肖振军, 吕才典, 《粒子物理学导论》, 科学出版社, 2016。
- ③ F. Halzen, A. D. Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons Inc., 1982.
- ④ L. B. Okun (translated from Russian by V. I. Kisin), *Leptons and Quarks*, North Holland Publishing Co., 1980.
- ⑤ 章乃森, 《粒子物理学》, 科学出版社, 1985。
- ⑥ D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, 4th edition, 2000.

# 粒子物理学

**粒子物理学**，又称“基本粒子物理学”或“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**。



# 基本相互作用

物质是有结构的，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。按照现在的认识，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相互转化。

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

描述相互作用性质的要素：

- **源**：决定相互作用的种类
- **相互作用常数**：决定相互作用的强度
- **媒介粒子**：传递相互作用的粒子，是相互作用场的量子
- **力程**：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**： $\frac{G_N}{4\pi\hbar c} = 5.34 \times 10^{-40} (\text{GeV}/c^2)^{-2}$
- 引起的束缚态：**行星系（如太阳系）、恒星系（如银河系）、星系团**

目前尚未解决引力的量子化问题，所以一般不将引力归入粒子物理学范畴。



仙女座星系



后发座星系团

# 电磁相互作用

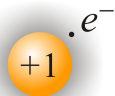
所有**带电粒子**都参与电磁相互作用。

- 电磁相互作用的源是**电荷**，媒介粒子是**光子**

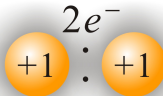
- 相互作用常数可用**精细结构常数**表示： $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.036}$

- 引起的束缚态：**原子、分子**

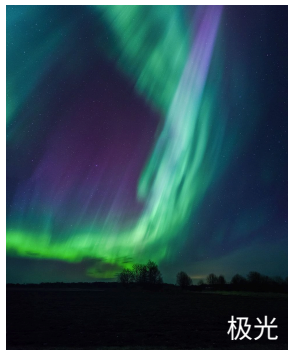
19 世纪中叶，麦克斯韦将**电**和**磁**统一在**电动力学**的方程组中。20 世纪中叶，**量子电动力学**被建立起来，它是第一个自洽的相对论性量子理论。



·H  
氢原子



H:H  
氢分子



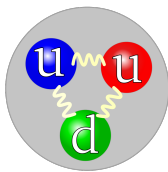
极光

# 强相互作用

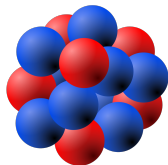
原子核内部核子（质子和中子）间的作用力可以抵消质子间的同性电磁排斥力，使原子核稳定存在。这说明核子间存在不同于引力和电磁相互作用的另一种相互作用，它的强度还强于电磁相互作用，因而被称为**强相互作用**。描述强相互作用的基本理论是**量子色动力学**。

- 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**： $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c} = \mathcal{O}(1)$
- 引起的束缚态：**介子**、**重子（包括核子）**、**原子核**

由胶子传递的夸克间强相互作用可称为色相互作用，它使夸克结合成介子和重子。核子间强相互作用是色相互作用的剩余作用。这类似于分子间的范德瓦尔斯力，它的根源是电磁相互作用。强相互作用的力程很短，约为  $10^{-15}$  m，故作用范围仅在相邻核子之间。



质子



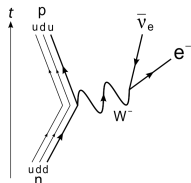
原子核

## 弱相互作用

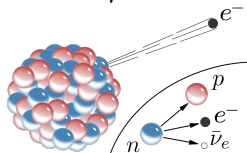
原子核的  $\beta$  衰变的半衰期为几秒到几年,  $\pi^\pm$  介子和  $K_S^0$  介子的寿命分别为  $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$  和  $8.9 \times 10^{-11} \text{ s}$ , 这些作用时间与典型的电磁或强相互作用时间相比, 要长  $10^5 - 10^{20}$  倍。这意味着支配这些衰变的是一种非常弱的相互作用, 称为**弱相互作用**。它与电磁相互作用一起, 由**电弱统一规范理论**描述。

- 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
- 作用常数是**费米常数**:  $\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1.166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
- 作用太弱且力程极短, 不会引起束缚态

$W^\pm$  和  $Z^0$  的质量分别为  $80.4$  和  $91.2 \text{ GeV}/c^2$ , 比质子质量大两个量级。这么大的质量严重地压低了  $\text{GeV}$  以下能标的衰变过程, 表现为相互作用时间很长且力程极短。当相互作用能标远高于  $Z^0$  的质量时, 弱相互作用的强度与电磁相互作用相当。



中子  $\beta$  衰变



原子核  $\beta$  衰变



## 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	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c}$	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	$\frac{G_F(m_p c^2)^2}{(\hbar c)^3}$	$\frac{G_N m_p^2}{4\pi\hbar c}$
	$\sim 1 - 10$	$\sim 1/137$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-40}$
媒介粒子	胶子	光子	$W^\pm$ 和 $Z^0$	引力子?
力程	1 fm	$\infty$	1/400 fm	$\infty$
典型作用时间	$10^{-23}$ s	$10^{-16}$ s	$10^{-10}$ s	/
典型束缚态	强子	原子	/	星系

说明：质子可以同时参与四种基本相互作用。表中，为了给出弱相互作用和引力的**无量纲相互作用强度**，以质子质量  $m_p = 0.938 \text{ GeV}/c^2$  为基准进行估算。

# 基本粒子

**基本粒子**指没有发现内部结构的粒子：

## ● 三代费米子

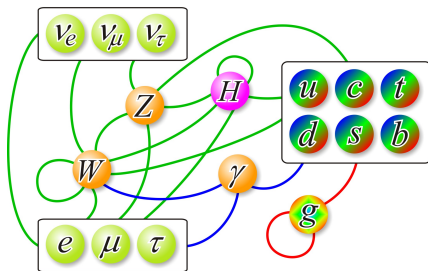
- 带电轻子：电子 ( $e$ ),  $\mu$  子 ( $\mu$ ),  $\tau$  子 ( $\tau$ )
- 中微子：电子型中微子 ( $\nu_e$ ),  $\mu$  子型中微子 ( $\nu_\mu$ ),  $\tau$  子型中微子 ( $\nu_\tau$ )
- 上型夸克：上夸克 ( $u$ ), 粲夸克 ( $c$ ), 顶夸克 ( $t$ )
- 下型夸克：下夸克 ( $d$ ), 奇夸克 ( $s$ ), 底夸克 ( $b$ )

## ● 矢量玻色子

- 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：Higgs 粒子 ( $H^0$ )

研究基本粒子间的**强**、**电磁**、**弱**相互作用建立起来的量子色动力学和电弱统一理论，合起来称为粒子物理**标准模型**。  
 (“标准模型”有时狭义指代电弱统一理论)

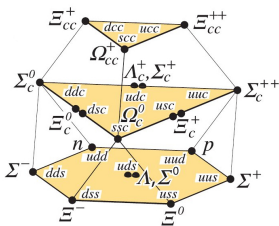


标准模型基本粒子及相互作用

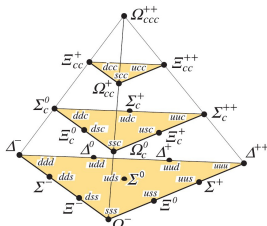
# 复合粒子

**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  
例如，氘，氚， $^3\text{He}$ ， $^4\text{He}$
- **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  $n(udd)$ ， $\Lambda^0(uds)$

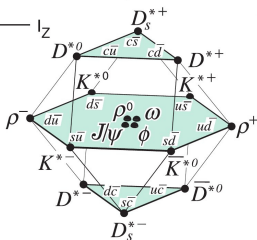
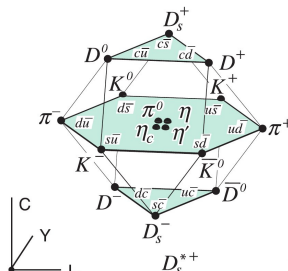


自旋 1/2 重子二十重态



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

❶ **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，除非有一些对称性保证衰变不能发生。

• **未观测到衰变的粒子**：质子  $p$ ，正负电子  $e^\pm$ ，光子  $\gamma$ ，三代中微子  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

• **寿命长于  $10^{-10}$  s 的粒子**（相对稳定，产生后能够深入粒子探测器）：

$\mu^\pm, \pi^\pm$  介子， $K^\pm$  介子，中子  $n$ ， $\Lambda^0$  重子， $K_L^0$  介子等

• **寿命为  $10^{-12} - 10^{-10}$  s 之间的粒子**（产生后能够飞行一段探测器可分辨距离）：

$\tau^\pm, K_S^0$  介子， $D^0$  介子， $D^\pm$  介子， $B^0$  介子， $B^\pm$  介子等

• **寿命短于  $10^{-12}$  s 的粒子**： $W^\pm, Z^0, t, H^0, \pi^0$  介子， $\rho^0$  介子， $\rho^\pm$  介子等

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

❸ **正反粒子**：反粒子是粒子的共轭态，质量、寿命和自旋与正粒子相同，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

- ④ **电荷**：粒子的电荷是量子化的，以电子的电荷量绝对值  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  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。不过，夸克具有分数电荷，上型夸克的电荷为  $+2e/3$ ，下型夸克的电荷为  $-e/3$ 。夸克组成的强子仍然具有整数电荷。
- ⑤ **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， $\eta$  介子等
  - **矢量玻色子**（自旋为 1）：光子，胶子， $W^\pm$ ， $Z^0$ ， $\rho$  介子， $J/\psi$  介子， $\Upsilon$  介子等
- ⑥ **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

# 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	$c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$	$1\text{ s} = 2.998 \times 10^8\text{ m}$
约化普朗克常数	$\hbar = 1.055 \times 10^{-34}\text{ J s}$	$1\text{ s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\text{ MeV}$
玻尔兹曼常数	$k_B = 1.381 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$	$1\text{ K} = 8.617 \times 10^{-5}\text{ eV}$

自然单位制下，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**。

- 粒子物理学中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  $1\text{ fm}^{-1} = 197.3\text{ MeV}$
- 狭义相对论中的能动量关系表达成  $E^2 = m^2 + |\mathbf{p}|^2$ ，其中  $m$  为静止质量
- 质能关系表达成  $E = \gamma m$ ，其中洛伦兹因子  $\gamma = (1 - v^2)^{-1/2}$

# 有理化的自然单位制

精确结构常数  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$  没有量纲，因此它的数值在任何单位制下都应该是  $1/137.036$ 。从而，自然单位制不可能将  $\hbar$ 、 $c$ 、 $\epsilon_0$  和  $e$  这四个常数同时归一化。在粒子物理学中，时常再取真空介电常数  $\epsilon_0 = 1$ （洛伦兹-亥维赛单位制），同时可得真空磁导率  $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2) = 1$ 。这样一来，不同于高斯单位制，**麦克斯韦方程组**中不会出现无理数  $4\pi$ ：

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

此时的单位制称为**有理化**的自然单位制。

- $4\pi$  因子出现在库仑定律中，点电荷  $Q$  的库仑势表达成  $\Phi = \frac{Q}{4\pi r}$
- 精确结构常数表达成  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$ ，单位电荷量  $e = \sqrt{4\pi\alpha} = 0.3028$  没有量纲

# 粒子物理简史：早期 (1895 年至 1928 年)

- ① 1895 年, W. Röntgen 发现 **X 射线 (光子)** [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 年诺物奖]。
- ③ 1896 年, C. Wilson 发明**云室**, 以探测电离辐射中的带电粒子 [1927 年诺物奖]。
- 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 年诺物奖]。
- 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 年诺物奖]。
- 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 年诺物奖]。
- 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)

- ⑧ 1912 年, V. Hess 发现**宇宙线** [1936 年诺物奖]。
- ⑨ 1913 年, N. Bohr 建立原子的**量子理论** [1922 年诺物奖]。
- ⑩ 1922 年, A. Compton 发现 **Compton 效应**, 进一步证实光的粒子性 [1927 年诺物奖]。
- ⑪ 1924 年, L. de Broglie 提出电子的**波动性**假说 [1929 年诺物奖]。
- ⑫ 1925 年, W. Pauli 提出**不相容原理** [1945 年诺物奖]。
- ⑬ 1925 年, W. Heisenberg, M. Born 和 P. Jordan 建立**量子力学的矩阵形式** [1932 年和 1954 年诺物奖]。
- ⑭ 1926 年, E. Schrödinger 提出 Schrödinger 方程, 建立**量子力学的波动形式** [1933 年诺物奖]。
- ⑮ 1927 年, W. Heisenberg 提出**不确定性原理**。
- ⑯ 1928 年, P. Dirac 提出 **Dirac 方程** [1933 年诺物奖] 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 年诺物奖]。
- 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 年诺物奖]。
- 4 1932 年, C. Anderson 用云室在宇宙线中发现正电子 [1936 年诺物奖]。
- 5 1933 年, E. Fermi 用 Fermi 相互作用理论解释  $\beta$  衰变 (后因通过实验研究中子轰击产生的感生放射和慢中子引发的核反应获 1938 年诺物奖)。
- 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 年诺物奖]。
- 7 1936 年, C. Anderson 和 S. Neddermeyer 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 年诺物奖]。

## 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治 [1965 年诺物奖]。
- ⑪ 1952 年, D. Glaser 发明气泡室 [1960 年诺物奖]。
- ⑫ 1954 年, 杨振宁和 R. Mills 提出非交换群的规范理论。
- ⑬ 1954 年至 60 年代, L. Alvarez 发展的液氢气泡室技术和数据分析方法使 Bevatron 上的实验发现大批共振态 [1968 年诺物奖]。
- ⑭ 1955 年, E. Segrè 和 O. Chamberlain 在 Bevatron 上发现反质子 [1959 年诺物奖]。
- ⑮ 1956 年, F. Reines 证实中微子的存在 [1995 年诺物奖]。
- ⑯ 1956 年, 李政道和杨振宁提出弱相互作用中宇称不守恒 [1957 年诺物奖], 随后由吴健雄在  $^{60}\text{Co}$  衰变实验中证实。

## 粒子物理简史：成熟期 (1957 年至今)

- 1962 年, L. Lederman, M. Schwartz 和 J. Steinberger 发现  $\mu$  子型中微子 [1988 年诺物奖]。
- 1964 年, J. Cronin 和 V. Fitch 发现中性  $K$  介子衰变时存在 CP 破坏 [1980 年诺物奖]。
- 1964 年, M. Gell-Mann (后因对基本粒子分类及相互作用的研究获 1969 年诺物奖) 和 G. Zweig 分别独立提出夸克模型。
- 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 年诺物奖]。
- 1961 年至 1968 年, S. Glashow, S. Weinberg 和 A. Salam 建立电弱统一理论 (标准模型) [1979 年诺物奖]。
- 1968 年, G. Charpak 发明多丝正比室 [1992 年诺物奖]。
- 1971 年至 1972 年, G. 't Hooft 和 M. Veltman 提出电弱统一理论的重整化方法 [1999 年诺物奖]。

## 粒子物理简史：成熟期 (1957 年至今)

- ⑧ 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 年诺物奖]。
- ⑨ 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 年诺物奖]。
- ⑩ 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 年诺物奖]。
- ⑪ 1975 年, M. Perl 发现  $\tau$  子 [1995 年诺物奖]。
- ⑫ 1977 年, L. Lederman 领导的实验组发现**底夸克**。
- ⑬ 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 年诺物奖]。
- ⑭ 1995 年, CDF 和 DØ 实验组在 Tevatron 上发现**顶夸克**。
- ⑮ 1998 年至 2001 年, 梶田隆章和 A. McDonald 发现**中微子振荡** [2015 年诺物奖], 从而推断中微子具有质量。
- ⑯ 2012 年, ATLAS 和 CMS 实验组在 LHC 上发现 **Higgs 玻色子**。