

从电子到 Higgs 玻色子

粒子物理的发展：实验发现与量子理论的共舞

袁簡鵬 C.-P. Yuan

Michigan State University

September 16, 2026 @ 中国科学技术大学 · 合肥

(感谢中科大的 高怡吉 和 王品爻 同学帮忙整理 ppt 文件)

一个核心问题

物质世界由什么构成？

- 古代：原子论（Democritus）
- 19 世纪：Dalton 原子论
- 20 世纪：电子、质子、中子
- 今天：标准模型

每次我们以为到底了，实验又打开新一层。



Democritus和他的原子论

本次演讲的三条线索

1. 实验发现

- 阴极射线、散射、云室、加速器、LHC

2. 量子理论

- 量子化 → 量子力学 → 量子场论 → 规范理论

3. 人物与思想

- Planck、Einstein、Bohr、Dirac、Feynman、Higgs

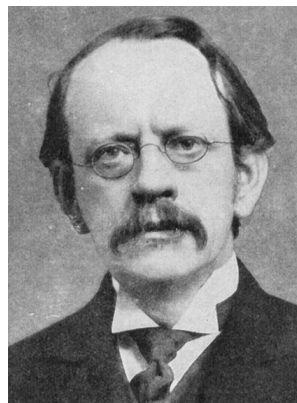
请记住这个循环：实验异常 → 理论危机 → 革命 → 新实验。

1897，阴极射线

J.J. Thomson 与电子的发现

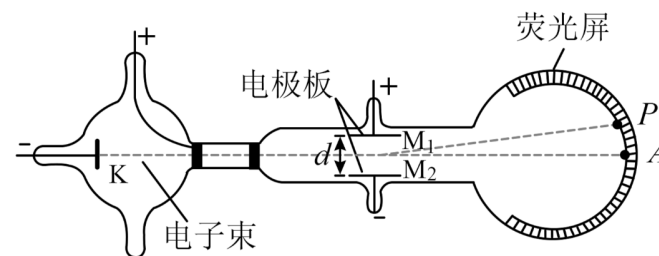
- 阴极射线是什么？粒子还是波？
- 测量 e/m 比 约为氢离子的1836倍！
- 结论：存在比原子小得多的带负电粒子

这是第一个“基本粒子”。



Joseph John Thomson
(1856 - 1940)

射线向正极偏移，其组分粒子带负电



Thomson阴极射线管实验示意图。实验观测到阴极射线偏移 to P点，确定了射线具有负电，并进一步计算了其组成粒子的荷质比。

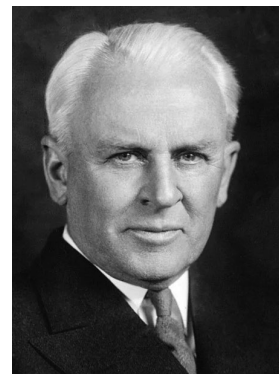
Millikan 油滴实验

精确测定电荷

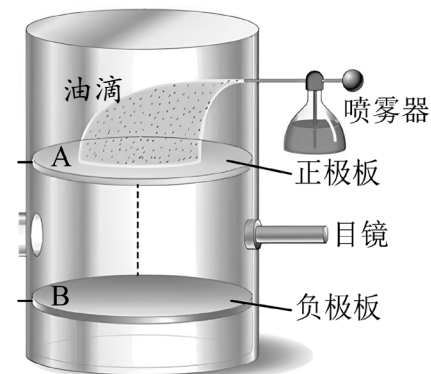
- 1909 年油滴实验
- 电荷是量子化的：

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

注意，“量子化”最早出现在电荷上。



Robert Andrews Millikan
(1868 - 1953)



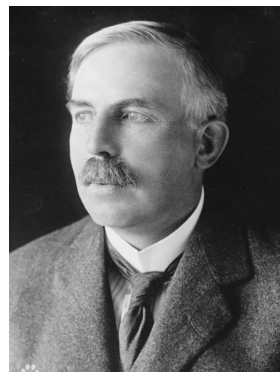
Millikan油滴实验示意图。

Rutherford 金箔散射

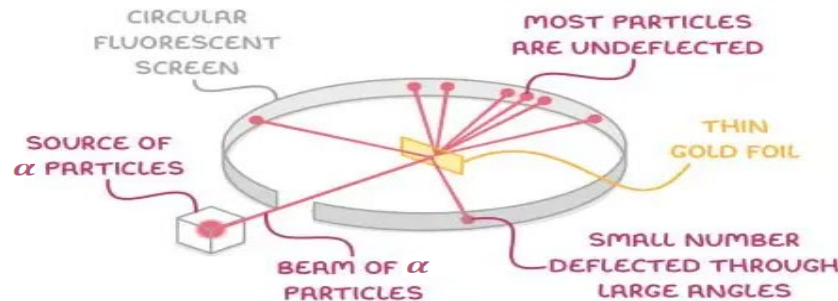
发现原子核

- 1911 年 α 粒子散射
- 大部分穿过，少数大角度反弹
- 原子中心有致密带正电的核

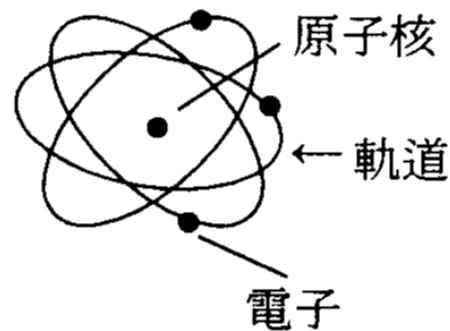
原子不是均匀的，而是“空旷的太阳系”。



Ernest Rutherford
(1871 - 1937)



Rutherford α 粒子散射实验示意图。实验观测到大部分粒子穿过金箔，仅小部分出现大角度散射。推测原子仅中心有致密的核。

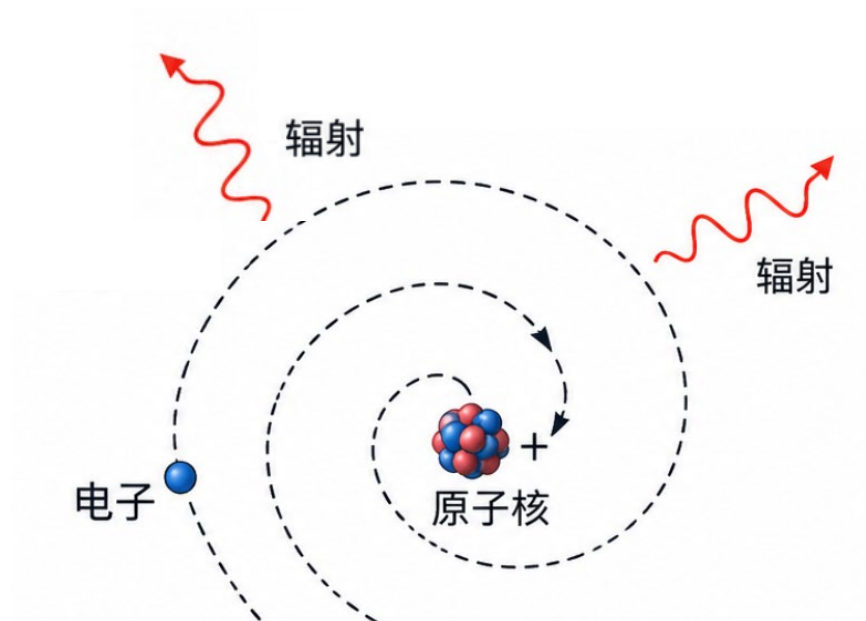


经典物理的危机

为什么原子不崩溃？

- 加速电子应辐射电磁波
- 电子应螺旋落入原子核
- 原子却稳定存在

经典电磁学在这里彻底失效。

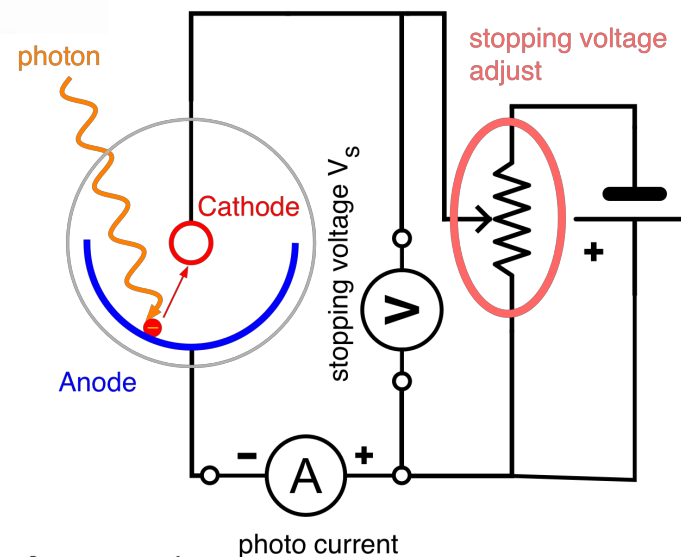
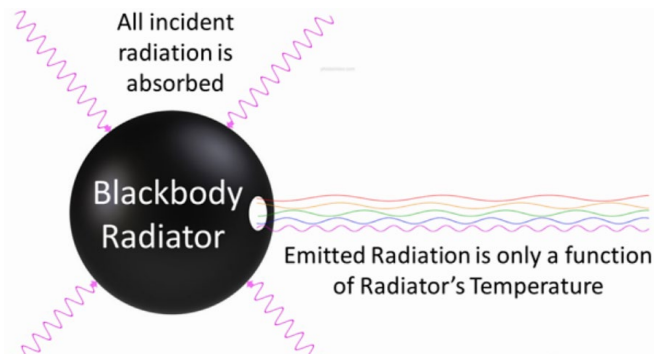


需要新物理

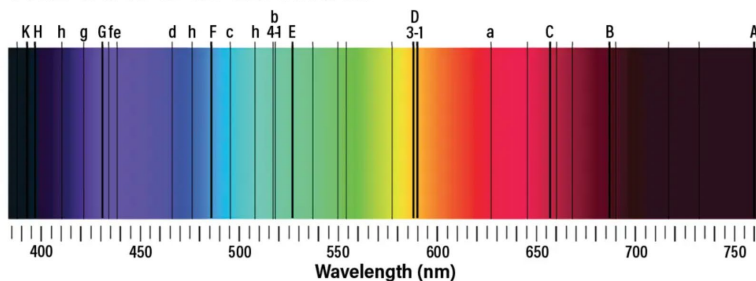
从“连续”到“离散”

- 经典物理无法解释原子稳定性
- 黑体辐射、光电效应、光谱线
- 量子化即将登场

接下来，量子革命开始。



THE SUN'S SPECTRUM

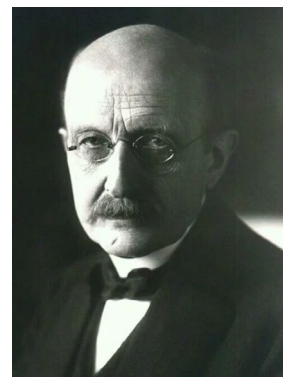
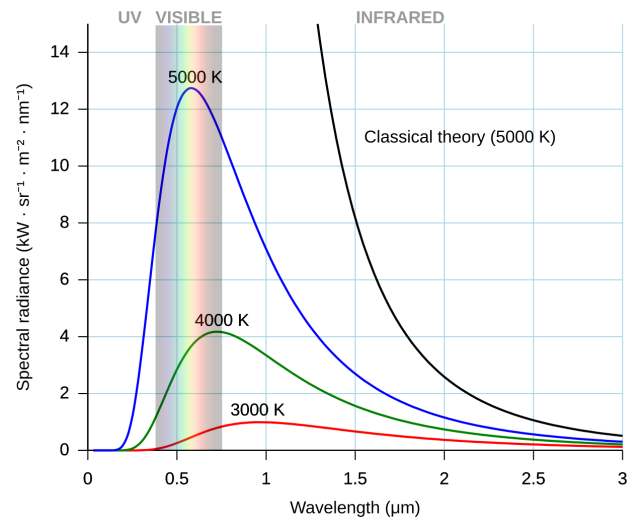


1900，黑体辐射与“紫外灾难”

Planck 的难题

- 经典理论预言：短波辐射能量无穷大
- 实验：能量在短波处下降
- 理论与实验严重矛盾

这是量子力学的起点。



Max Planck
(1858 - 1947)

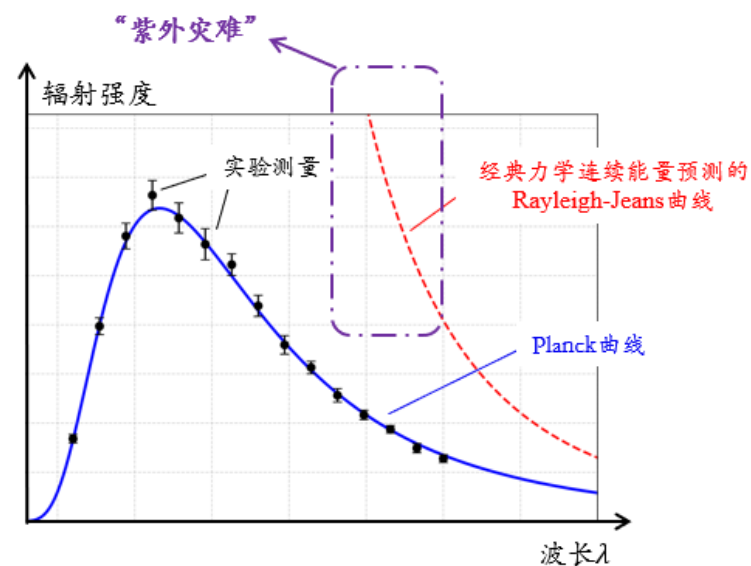
Planck 的量子化假设

$$E = h\nu$$

- 能量只能以离散“量子”形式发射/吸收
- $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Planck 本人起初也不安

他自己称这是“绝望之举” (an act of desperation)。

- 并不认为电磁波（光）本身是量子化的



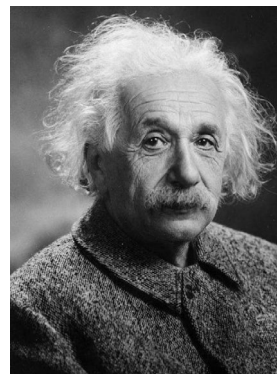
黑体辐射实验数据与理论曲线图

Einstein 1905: 光量子

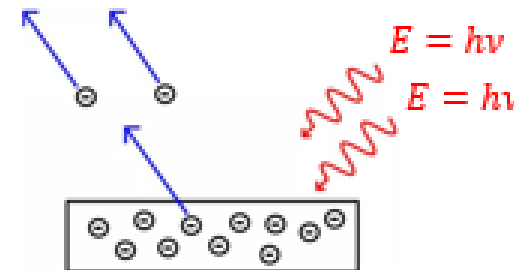
光电效应

- 光本身就是量子（光子）
- $E = h\nu$
- 解释截止频率
- 爱因斯坦因此获 1921 诺奖

量子化从“辐射”推广到“光”。



Albert Einstein
(1879 - 1955)



光量子假说示意图。红色线代表光子。单个光子被电子吸收后电子脱离金属。光子数越多，光强越强。

Bohr 原子模型

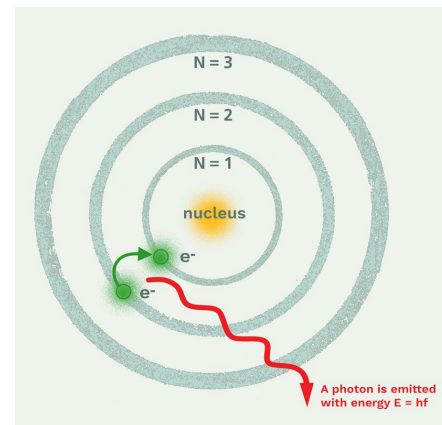
角动量量子化

- 1913 年氢原子模型
- 电子只能在特定轨道
- 解释氢光谱线

这是量子化第一次成功解释原子。



Niels Bohr
(1885 - 1962)



$$h\nu = \Delta E \text{ (能级间隔)}$$

$$L = nh/2\pi$$

三个实验，一场革命

实验逼迫理论革命

实验	理论
黑体辐射	Planck
光电效应	Einstein
光谱线	Bohr

理论不是凭空来的，是实验逼出来的。

思想转折

从连续到离散

- 能量、电荷、角动量都量子化
- 经典世界观被打破
- 新物理范式确立

这是 20 世纪物理最深的观念转变。

$$q = ne$$

$$E = nh\nu$$

$$L = \frac{nh}{2\pi}$$

1925–1926，两条路径

Heisenberg 与 Schrödinger

- 矩阵力学 vs 波动力学
- Schrödinger 最早尝试证明等价
- Dirac 揭示“表示”关系
- von Neumann 给出严格数学证明

同一套量子力学，两种语言。



Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



Erwin Schrödinger
(1887 - 1961)

$$x_{mn}(t) = x_{mn} e^{i\omega_{mn}t}, \omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}$$

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$$\dot{x} = \frac{1}{i\hbar} [x, H]$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r})$$

不确定性原理

Heisenberg 1927

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

- 不是仪器问题，是自然本性
- 改变了“测量”的含义

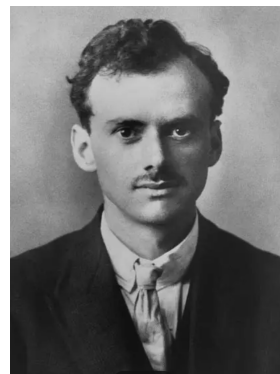
这改变了我们对自然的理解。

Dirac 方程与反物质

1928，相对论量子力学

- Dirac 方程统一量子力学与狭义相对论
- 预言正电子
- 数学预言新粒子

数学走在了实验前面。



Paul Dirac
(1901 - 1976)

$$(i\hbar c \gamma^\mu \partial_\mu - mc^2)\psi = 0$$



$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

负能解：反电子（正电子）

1932，正电子发现

反物质真实存在

- Anderson 在宇宙线中发现正电子
- 物质 $\leftrightarrow$ 反物质对称性
- 理论预言被实验证实

这是理论预言的伟大胜利。

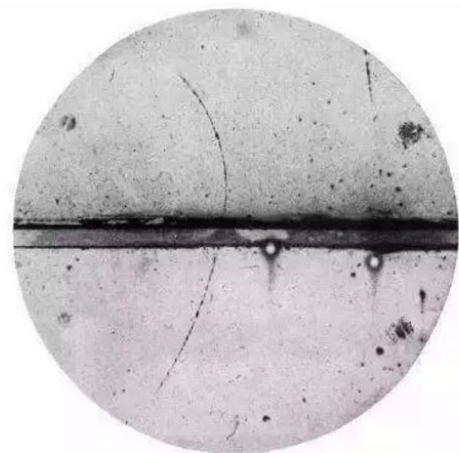


赵忠尧
(1902 - 1998)

- 观测到电子与正电子湮灭
- 诺奖“遗珠”



Carl David Anderson
(1905 - 1991)



Anderson 观测到的正电子径迹

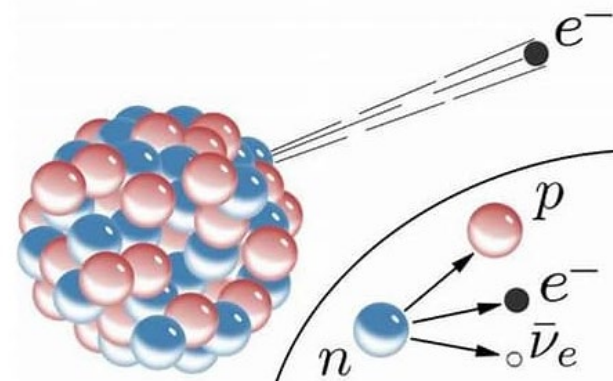
- 直接观测到正电子的轨迹
- 是第一个被发现的反物质

量子力学的局限

还不能描述产生与湮灭

- 量子力学描述固定粒子数
- 但实验中粒子会产生、消失
- 需要新框架

需要量子场论。



β 衰变示意图。中子衰变成质子、电子、以及反电子中微子。

相对论性量子力学的不足

系列实验结果无法被相对论性量子力学解释

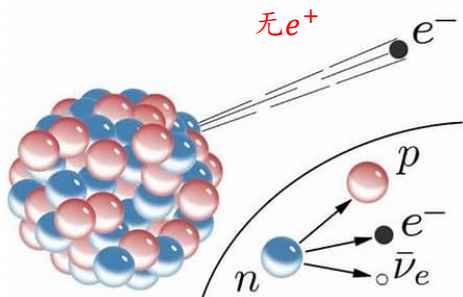
β 衰变中的粒子数可变行为

Dirac海理论模型本质上是粒子数守恒的，电子的凭空产生必然伴随着空穴的出现。

β 衰变中观测到了电子的产生，却没有发现正电子。



电子数不守恒！
Dirac海的假设出现问题

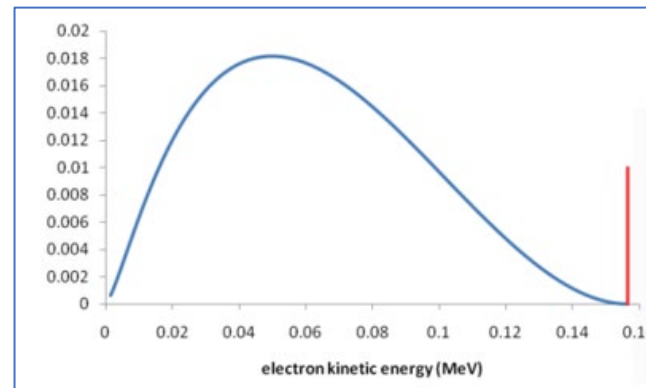


β 衰变示意图。中子衰变成质子、电子、以及反电子中微子。

β 衰变中的连续能量谱

当时人们认为 β 衰变是中子衰变为质子和电子，但是两体末态电子应有确定能量。

实验观测到电子能谱连续：



β 衰变中电子行为无法用现有理论解释！

Bohr: 能量不守恒？

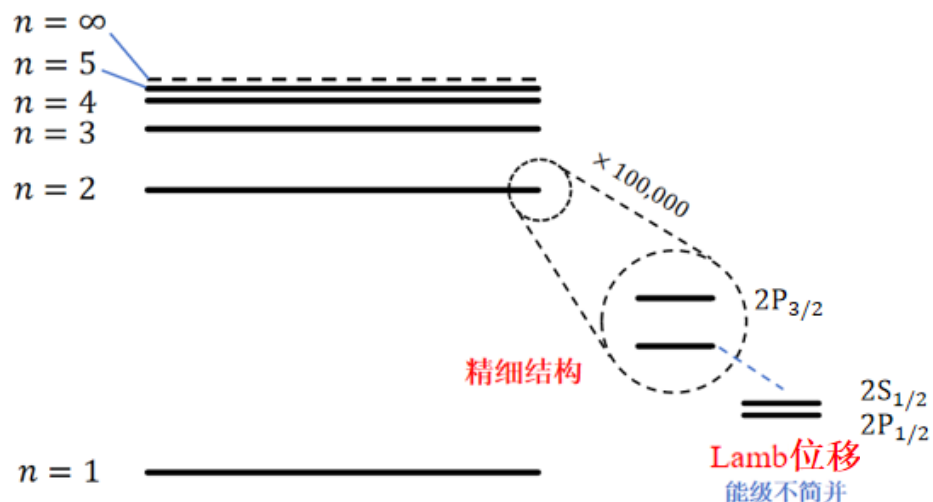
Pauli: 有第三个小质量、看不见的粒子（1930）

1956年，电子中微子被证实存在

相对论性量子力学的不足

系列实验结果无法被相对论性量子力学解释

氢原子光谱的Lamb位移



$$\frac{\Delta E}{h} = \Delta \nu(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = 1057.8576 \pm 0.0021 \text{ MHz}$$

Lamb位移示意图。相对论性量子力学要求 $2S_{1/2}$ 能级和 $2P_{1/2}$ 能级具有相同的能量，但是实验发现二者间存在能量的差异。这表明相对论性量子力学并不完善。

电子的反常磁矩

电子磁矩 $\vec{\mu}$ 和角动量 $\vec{J}$ 具备关系: $\vec{\mu} = -g \cdot \frac{e}{2m_e} \vec{J}$

- Dirac理论给出的 g 因子严格等于2
- 实验观测到的结果存在显著偏离:

$$g = 2.00236 \pm 0.00006$$

这些现象需要由量子场论解释，比如，直接描述粒子间电磁相互作用的量子电动力学

光子 $\rightarrow$ 光子场

量子场论诞生

场才是基本

- 1927 Dirac: 场量子化

把经典电磁场做正则量子化 (second quantization)
引入光子的产生、湮灭算符

- 粒子是场的激发
- 现代粒子物理的语言

这是现代粒子物理的基础。

$$\hat{A}(x) \sim \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \left[a_{\mathbf{k}\lambda} e^{-ikx} + a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger} e^{ikx} \right]$$

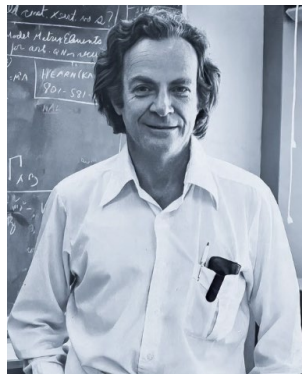
$$|k, \lambda\rangle \sim a_{\mathbf{k}\lambda}^{\dagger} |0\rangle$$

QED 与重整化

Feynman、Schwinger、Tomonaga

- 1940s 量子电动力学
- 解决无穷大：重整化
- 极其精确的理论

QED 是最精确的理论之一。



Richard Phillips Feynman
(1918 - 1988)



Julian Seymour Schwinger
(1918 - 1994)



朝永振一郎
(1906 - 1979)

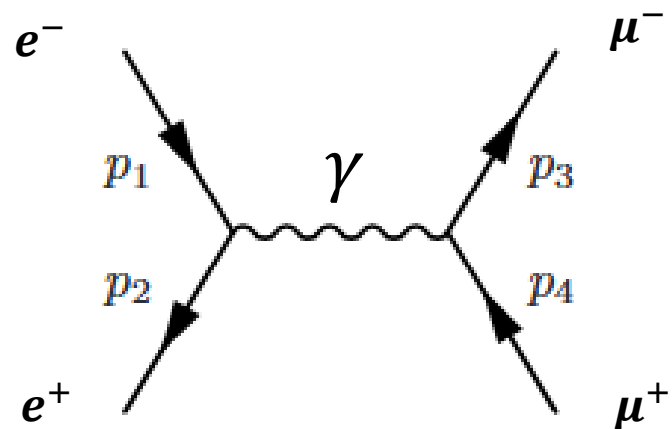
$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi - e\bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi$$

Feynman 图

画出来的物理

- 顶点、传播子、外线
- 直观计算相互作用
- 物理学家用图思考

这是粒子物理的“视觉语言”。



量子电动力学的建立

量子场论的困境与复兴

发散问题使量子场论陷入困境

- 1930年，Oppenheimer在计算束缚电子自能时得到的结果是发散的。
- 同年，Waller在计算自由电子自能时也得到了发散。
- 1933年，Dirac在计算真空因外部源而发生极化时发现了新的无穷大。
-

这些问题使物理学家一度对场论失去了信心。

Shelter岛会议与场论的复兴

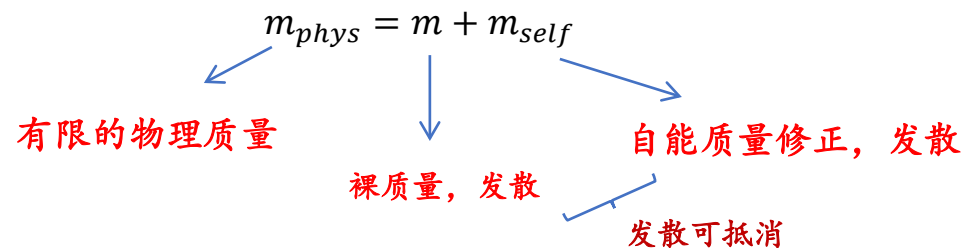
转折点：1947年Shelter岛会议

重要实验证据：

- 电子反常磁矩
 - Lamb位移
- } 或来自辐射修正
发散背后存在物理
必须设法解决

关键理论实践：

- Kramers的质量重整化思想：



会议结束后的火车上，Bethe根据质量重整化思想计算了Lamb移位，获得了很接近的结果。

量子电动力学的辉煌成就

人类最精确的理论

电子反常磁矩的精确预测

电子磁矩 $g \neq 2$ 。该偏差 $a_e = \frac{g-2}{2}$ 由量子涨落引起。

现QED已可将其计算到极其精确的水平：

精确数值比对（单位： $\times 10^{-12}$ ）：

- 实验值¹： $a_e = 1,159,652,180.59 \pm 0.13$
- 理论值²： $a_e = 1,159,652,181.61 \pm 0.23$

完全一致！

¹ Phys. Rev. Lett. 130, 071801 (2023)

² Atoms 7, 28 (2019)

Lamb位移的高度吻合

氢原子中 $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$ 能级之间存在能量差异。

QED考虑系列涨落后，计算结果和实验测量高度吻合：

精确数值比对： $\Delta E = h\Delta\nu$

- 实验值³： $\Delta\nu(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = 1057.8298 \pm 0.0032 \text{ MHz}$
- 理论值⁴： $\Delta\nu(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = 1057.83412 \pm 0.00026 \text{ MHz}$

³ Science 365, 1007–1012 (2019)

⁴ Annalen der Physik 531, 1800324 (2019)

规范对称性

U(1)局域对称性：构造量子电动力学的基本原则

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi - e\bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi$$

U(1)局域对称性: $\psi \rightarrow e^{i\alpha(x)}\psi$, $A_\mu \rightarrow A_\mu - \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha(x)$, $\mathcal{L}_{QED}$ 不变

- 1929年Weyl提出将“局域对称性”提升为构造相互作用的基本原则

非阿贝尔 (non-abelian) 规范理论

- 1954年, 杨振宁和Mills从U(1)推广到非阿贝尔群U:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\text{Tr}(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}) + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi$$

$$D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu^a(x)T^a \quad F_{\mu\nu} = \frac{i}{g}[D_\mu, D_\nu] \quad T^a: \text{群U的生成元}$$

- 1971年, 't Hooft在导师Veltman的指导下证明:

非阿贝尔理论可重整!

有自发对称性破缺的非阿贝尔理论依然可重整!

QCD: SU(3)

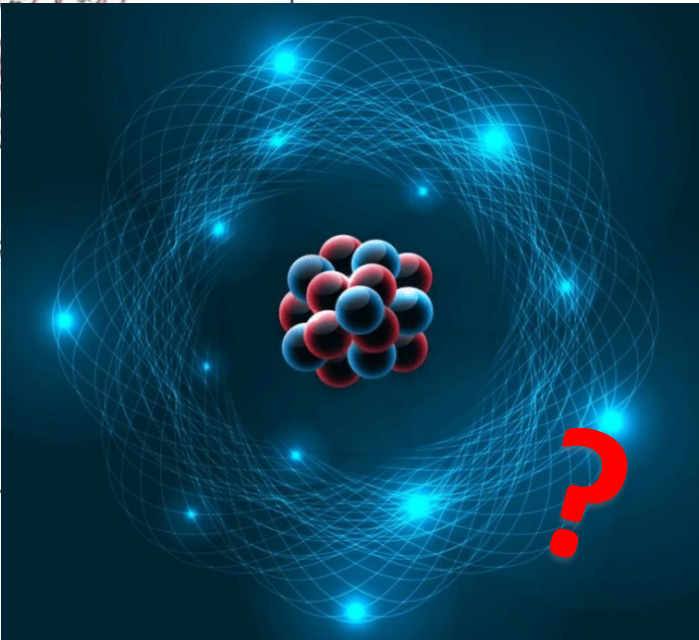
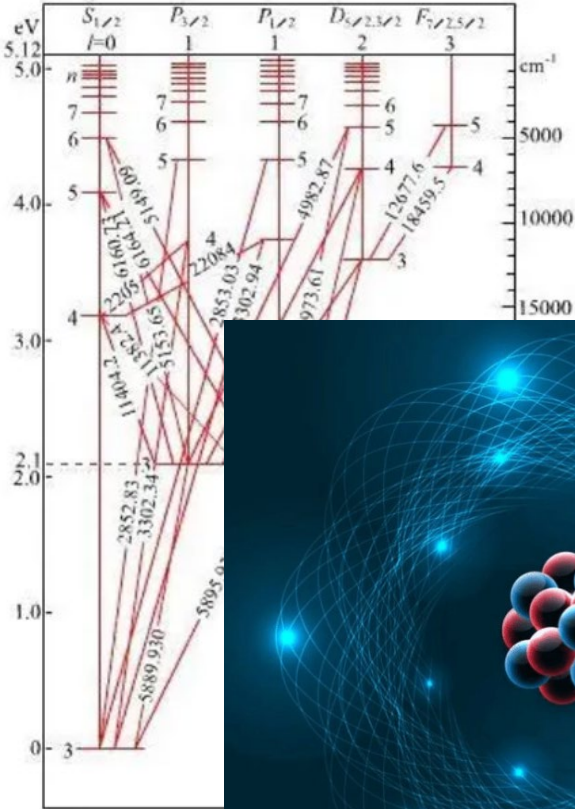
EW: SU(2)_L × U(1)_Y → U(1)_q

电子、光子以外的探索

从原子光谱的故事

我们认识到了电子和光子的关系用QED描述

原子核内部是什么样子？



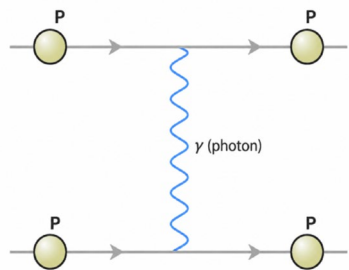
原子核：质子+中子

1932年，Chadwick 发现中子 (α 粒子轰击铍)

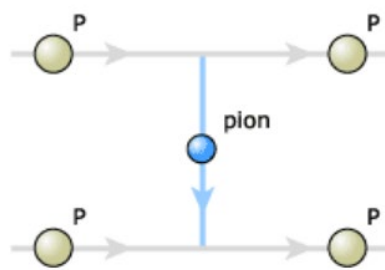
- 中子不带电，质量与质子非常接近
(1920 年， Rutherford 提出中子假说)
- Heisenberg: 质子中子是核子的两种量子态，引入同位旋量子数区分
- 质子，中子由远强于电磁力的核力束缚，且具有短程性

1935年，汤川秀树 (Yukawa) 提出核子交换介子产生核力

- 类似电磁相互作用交换光子，强相互作用交换有质量的介子
- 介子质量在100 – 200MeV



$$V(r) \propto -\frac{e^2}{r}$$



James Chadwick (1891-1974)



汤川秀树 (1907 - 1981)

$$V(r) \propto -\frac{g^2 e^{-mr}}{r}$$

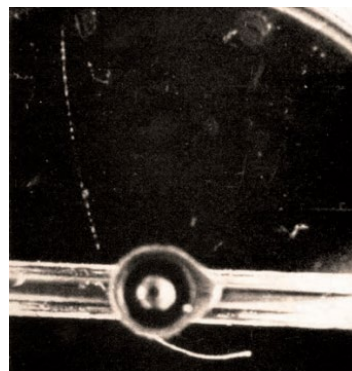
$$R \sim \frac{\hbar}{mc} \quad (\text{约 } 1\text{-}2 \text{ fm})$$

宇宙线中的新粒子

μ 子、 π 介子、K介子

- 1930s–1950s 宇宙线发现
- “Who ordered that?” — Rabi
- 粒子越来越多

粒子“动物园”开始膨胀。



宇宙线中的 μ 径迹



π 介子衰变径迹

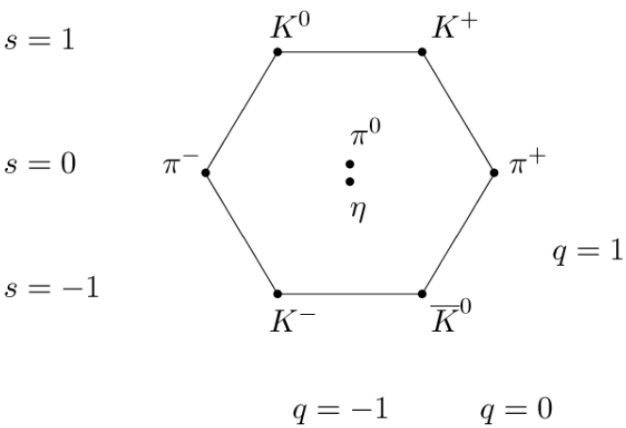
加速器时代

粒子“动物园”

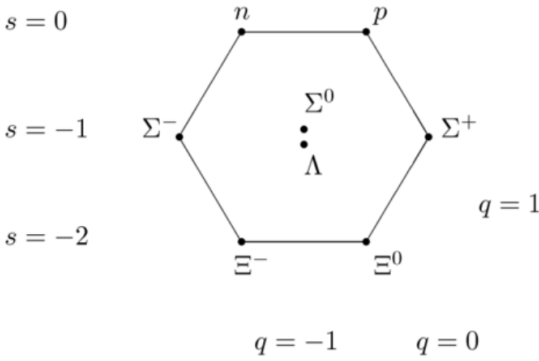
- 1950s–60s 加速器发现大量奇异粒子
- 强子、共振态
- 它们都是基本的吗？

需要更深层的结构。

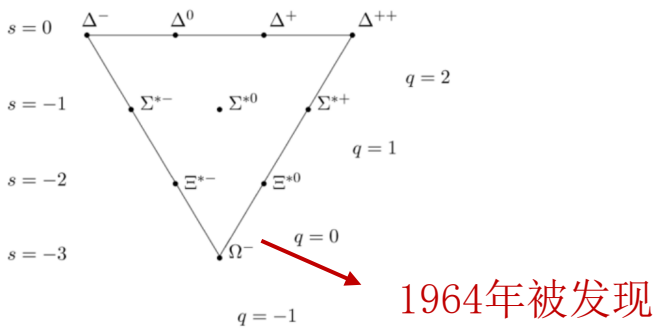
介子八重态



重子八重态



重子十重态



Gell-Mann和Ne`eman根据电荷，奇异数，自旋分类强子，并预言 Ω^-

夸克模型

Gell-Mann 与 Zweig, 1964

- 质子、中子由夸克组成
- u、d、s 三种味道
- 从“基本粒子”到“复合粒子”

| 质子 = uud。

quark	name	electric charge Q/e	isospin I_3	} spin- $\frac{1}{2}$ fermion
u	up	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	
d	down	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	
s	strange	$-\frac{1}{3}$	0	

u、d、s 夸克的量子数

Gell-Mann和Greenberg提出颜色自由度

色荷：红，蓝，绿

- $\Delta^{++}: uuu$ 基态：空间部分对称+自旋部分对称+味道部分对称

违反Pauli不相容原理！

- Gell-Mann假设每种夸克有三种颜色态： $\psi_{1,2,3}$ (红，蓝，绿)

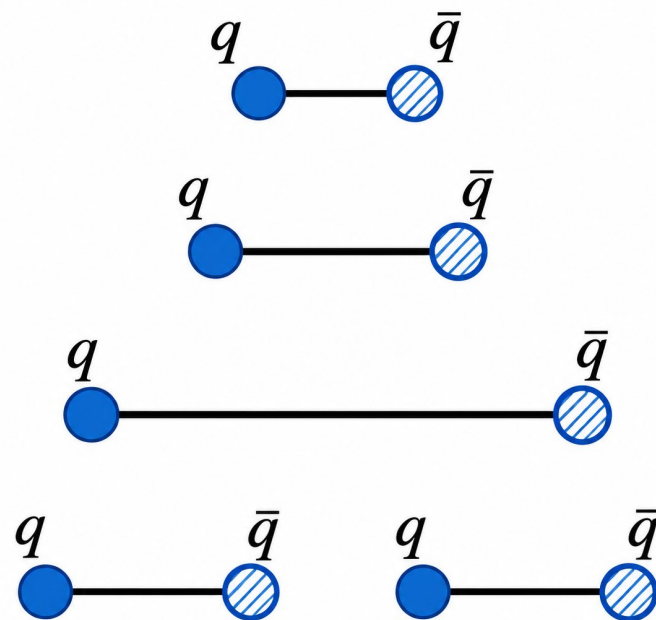
$$\Delta^{++} \sim \epsilon_{ijk} \psi_i \psi_j \psi_k, \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

颜色部分波函数取完全反对称形式，则整个波函数完全反对称

- 三个颜色态张成 $SU(3)$ 的三维基本表示空间
- $\epsilon_{ijk} \psi_i \psi_j \psi_k$ 在 $SU(3)$ 变换下不变，称 $\Delta^{++}(1232)$ 色中性。

色禁闭

- 所有观察到的强子都是色中性



深度非弹性散射

SLAC 实验验证夸克

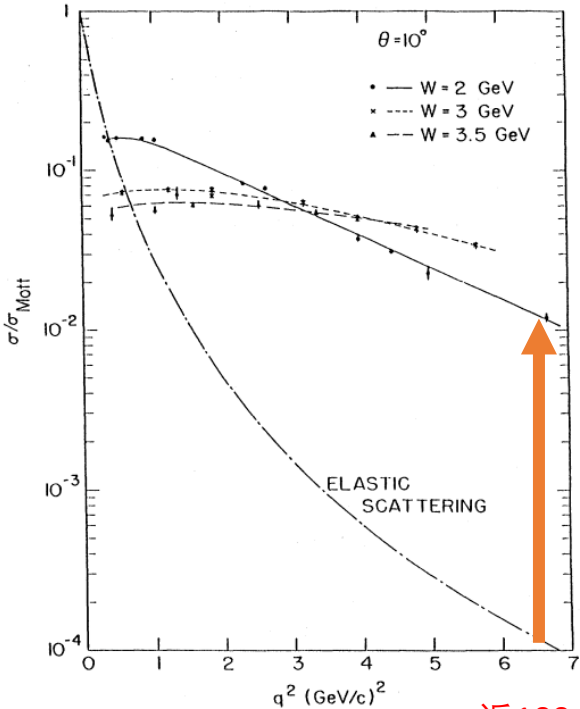
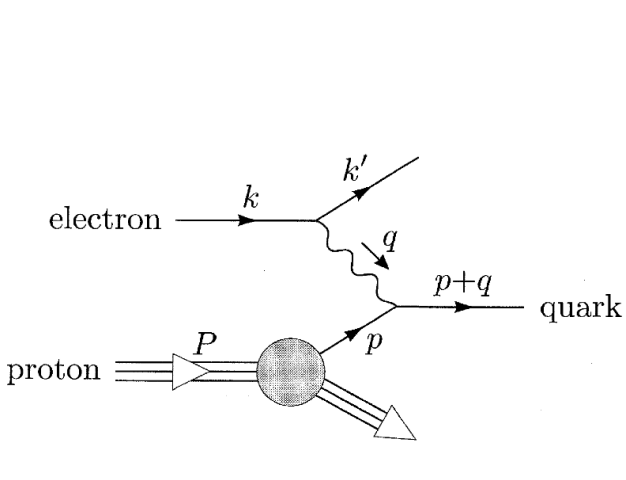
- 电子打质子，发现点状组分
- 夸克真实存在
- 实验再次确认理论

实验是理论的最终裁判。

1969年SLAC-MIT电子-质子深度非弹性散射

近似自由的点状结构

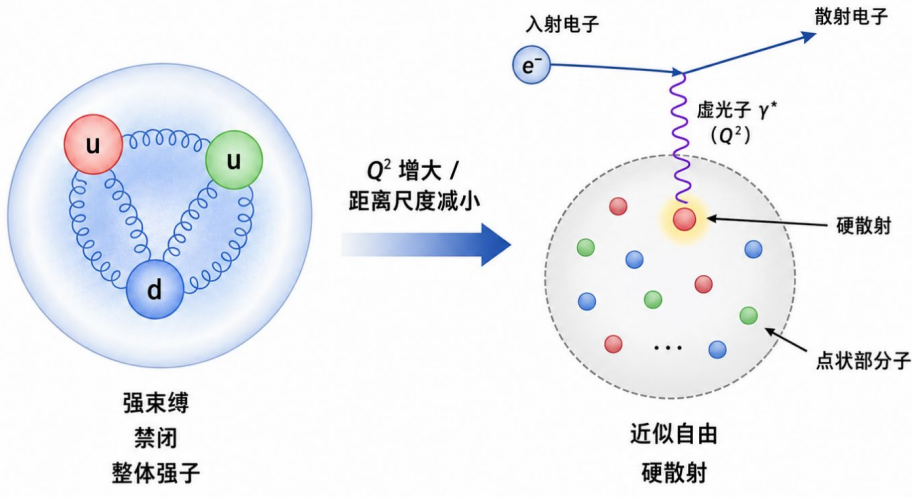
- 高能电子直接将核打碎，研究散射电子的分布
- 在固定Bjorken标度 x 下，与电子与点粒子的散射截面行为一致



近100 倍的差距

Feynman部分子模型

- 质子由部分子组成，部分子动量占质子动量的比例是 x
- 电子与自由的部分子散射



量子色动力学 QCD

夸克与胶子

- 1970s 强相互作用理论
- 渐近自由
- 夸克禁闭

夸克永远被囚禁在强子内。

QCD：渐近自由的理论

量子色动力学（QCD）

- 1972年Gell-Mann与Fritzsch将SU(3)颜色对称性提升为局域规范对称性

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\text{Tr}(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}) + \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi$$
$$D_\mu = \partial_\mu - ig_s A_\mu^a(x)T^a \quad F_{\mu\nu} = \frac{i}{g_s}[D_\mu, D_\nu]$$

T^a即是SU(3)生成元，g_s是QCD的耦合系数

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \sum_f \bar{q}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) q_f$$
$$+ g_s \sum_f \bar{q}_f \gamma^\mu T^a q_f G_\mu^a$$
$$- \frac{1}{4} (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a) (\partial^\mu G^{a\nu} - \partial^\nu G^{a\mu})$$
$$- g_s f^{abc} (\partial_\mu G_\nu^a) G^{b\mu} G^{c\nu}$$
$$- \frac{g_s^2}{4} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G^{d\mu} G^{e\nu}.$$

SU(3)有8个生成元，得到8种规范玻色子，称为胶子

QCD渐进自由

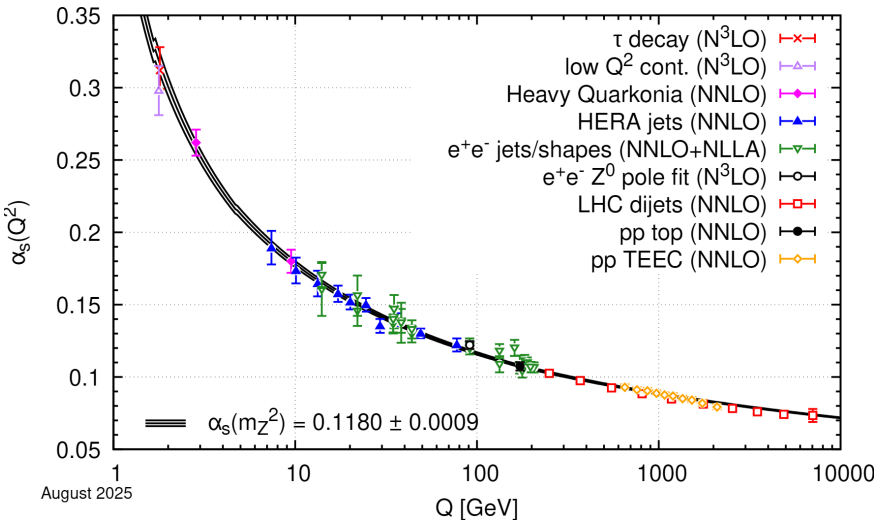
- 1973年，Gross和Wilczek以及Politzer计算了QCD的β函数：

$$\beta = \mu \frac{dg_s}{d\mu} = -\frac{g_s^3}{16\pi^2} \left(11 - \frac{2}{3}N_f \right) + \dots$$

- 目前认识共6种夸克，上式小于0 β < 0

能标升高时，g(μ) → 0，渐进自由

能标降低，g越大，耦合强，理论变得非微扰

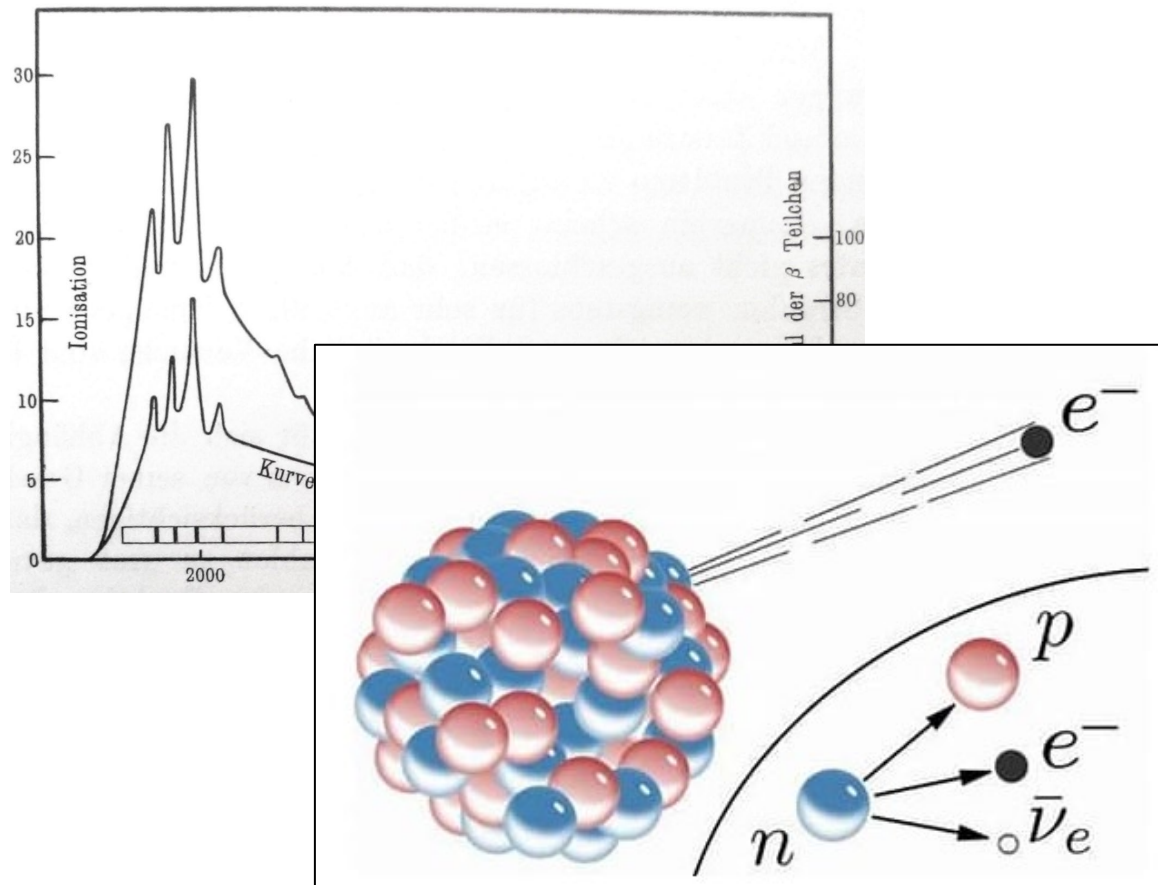


弱相互作用的探索

从核子间子的相互作用，强子谱，电子与质子的深度非弹性散射实验

强子由夸克组成，夸克之间的相互作用由胶子传递

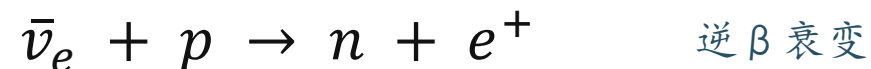
β 衰变是怎么回事？



中微子的实验发现

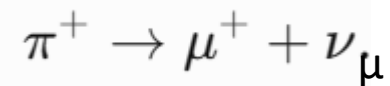
1956反应堆实验

- 利用核反应提供大量电子反中微子
- Reines和Cowan利用Savannah River Nuclear Reactor发现了：

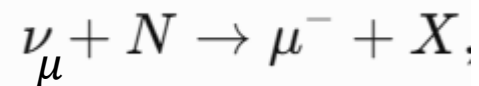


1962加速器产生中微子

- Lederman、Schwartz、Steinberger在Brookhaven上利用 π 介子衰变产生高能缪子中微子束



- 实验发现主要产生：



- 没有相应数量的电子事件，证明： $\nu_\mu \neq \nu_e$
- 促成轻子家族结构：

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}.$$

弱相互作用宇称不守恒

1956：李政道，杨振宁检查宇称不守恒

- $\tau - \theta$ 之谜

$$\theta^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+ \quad P = +1$$

$\tau - \theta$ 是同一个粒子，宇称不守恒

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad P = -1$$

宇称守恒， $\tau - \theta$ 不是同一个粒子

(τ^+, θ^+ 实际是 K^+ 介子！)

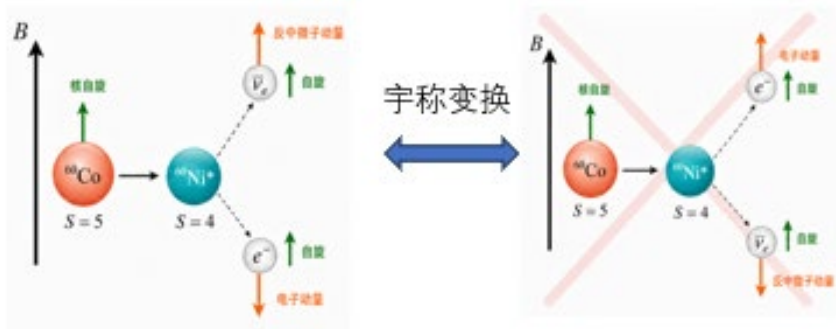
τ^+, θ^+ 质量，寿命，电荷完全一致



杨振宁，李政道：弱相互作用宇称守恒没有经过充分检验。

1957：吴健雄实验

- 吴健雄等人把 ^{60}Co 原子核在低温下极化，观察 β 衰变电子相对于核自旋的发射方向



- 几乎同时，在 $\pi - \mu - e$ 衰变链中也发现了宇称不守恒



左手粒子的弱相互作用

左手耦合的四费米理论

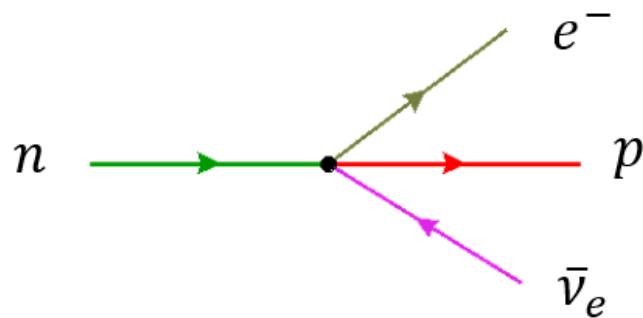
- 1934年, Fermi 已经提出四费米子相互作用
- 宇称不守恒实验表明: 左手粒子发生弱相互作用

Sudarshan, Marshak(1957)以及Feynman, Gell-Mann(1958)

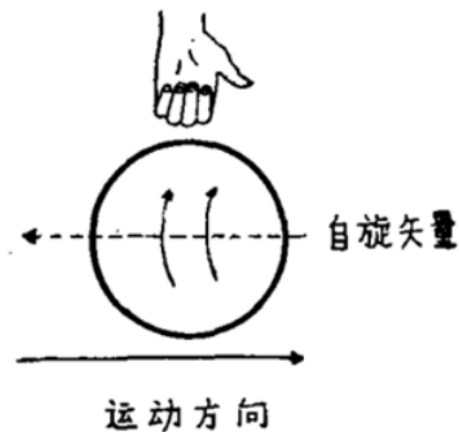
$$\mathcal{L}_F = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} J_\mu^\dagger(x) J^\mu(x) \quad J^\mu(x) = \bar{\psi}_{f_L} \gamma^\mu \psi_{i_L}$$

1958: 中微子螺旋度测量

- Goldhaber、Grodzins和Sunnyar测得中微子的螺旋度:
(经由“电子俘获”+ 随后 γ 射线圆偏振的测量)
- 意味着自然界中的中微子是左手的

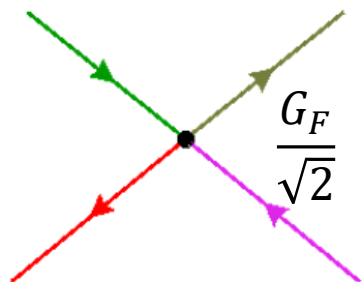


统一描述了 β 衰变, μ 衰变, π 衰变



V-A四费米的问题

低能成功，高能灾难

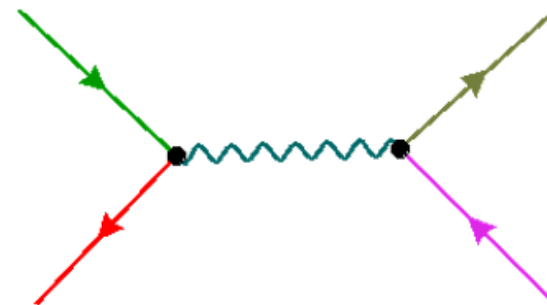


高能下么正性破坏

$$q^2 \ll m_W^2, \frac{g^2}{m_W^2}$$


有质量的玻色子

$$\mathcal{L} = g A_\mu(x) \bar{\psi}_{f_L} \gamma^\mu \psi_{i_L}$$



有质量的玻色子 W 传递相互作用

$$\frac{g^2}{q^2 - m_W^2}$$

$q^2 \gg m_W^2, \frac{g^2}{q^2}$, 高能时散射振幅被压低

电弱统一

Glashow、Weinberg、Salam

- 1961–1967 电弱统一理论

Weinberg 预言中性弱相互作用（中性流）的存在，以及传递它的 Z 玻色子。

- 电磁力与弱力统一
- 自然界的基本力可以统一

这是标准模型的第一步。

电弱统一理论

- 左手粒子: $SU(2)$ 对称性 所有粒子: $U(1)_Y$ 对称性

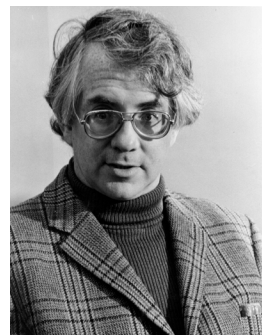
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\text{Tr}(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}) + \bar{\psi}_L i\gamma^\mu D_\mu^L \psi_L + \bar{\psi}_R i\gamma^\mu D_\mu^R \psi_R$$
$$D_\mu^L = \partial_\mu - ig \frac{\tau^i}{2} W_\mu^i(x) - ig' \frac{Y_L}{2} B_\mu(x) \quad D_\mu^R = \partial_\mu - ig' \frac{Y_R}{2} B_\mu(x)$$

- 带电玻色子: $W_\mu^\pm$
- 中性玻色子: W_μ^3 和 B_μ

光子: $A_\mu = \cos\theta_W B_\mu + \sin\theta_W W_\mu^3$

预言Z玻色子: $Z_\mu = \cos\theta_W W_\mu^3 - \sin\theta_W B_\mu$

$$g\sin\theta_W = g'\cos\theta_W = e$$



Glashow



S. Weinberg



A. Salam

质量问题

规范玻色子为何有质量？

- 规范对称性要求无质量
- 但 W、Z 很重
- 理论的核心难题

对称性与质量矛盾。

Higgs 机制

1964，自发对称性破缺

- Higgs 场充满真空
- 粒子与 Higgs 场耦合获得质量
- 质量不是固有，而是相互作用的结果

这是标准模型的关键机制。

电弱统一理论

Higgs机制

- 1964年, Englert–Brout、Higgs以及Guralnik–Hagen–Kibble: Higgs机制给规范玻色子产生质量

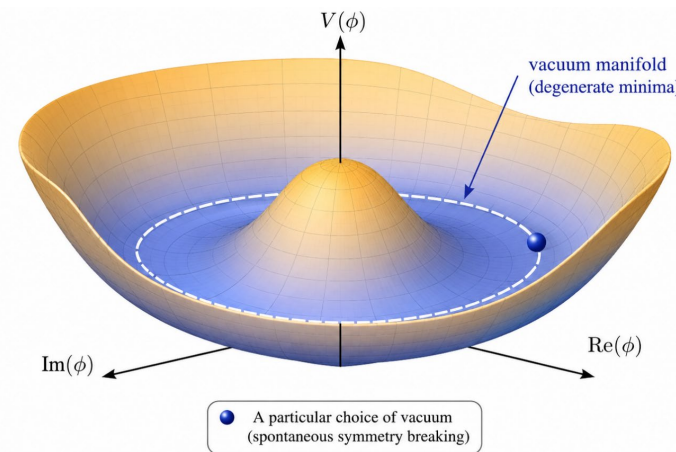
$$\mathcal{L} = D_\mu \phi^\dagger D^\mu \phi - V(\phi), V(\phi) = \lambda \left(\phi^\dagger \phi - \frac{v^2}{2} \right)^2$$
$$\mathcal{L}_{Yukawa} = -\lambda_e \bar{L} \phi e_R - \lambda_d \bar{Q} \phi d_R - \lambda_u \bar{Q} (i\tau_2 \phi^*) u_R + \dots$$

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \phi^+ \\ H + \phi^0 \end{pmatrix} \right)$$

$$SU(2)_L \times U(1)_Y$$



真空具有 $U(1)_q$ 对称性



在真空处做展开

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{4} \left[g^2 (W_\mu^+)^2 + g^2 (W_\mu^-)^2 + \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} (Z_\mu)^2 \right] + \dots$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = -\frac{\lambda_e}{\sqrt{2}} v \bar{e} e - \frac{\lambda_d}{\sqrt{2}} v \bar{d} d - \frac{\lambda_u}{\sqrt{2}} v \bar{u} u + \dots$$

$$m_W = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{m_W}{\cos \theta_W}$$

当然还会留下Higgs场 H , 质量: $m_H^2 = 2\lambda v^2$

CP 破坏——对称性并非绝对

- 1956 李政道、杨振宁：弱相互作用中宇称不守恒 (θ - τ 之谜，带电 K^+ 介子)
- 1957 吴健雄实验：钴-60 β 衰变验证 $\rightarrow$ 同年诺贝尔奖
- 1964 Cronin & Fitch：中性 K 介子衰变中发现 CP 破坏 $\rightarrow$ 1980 诺贝尔奖
- 1973 Kobayashi、Maskawa：CKM 矩阵，三代夸克是 CP 破坏的必要条件

Cabibbo 在1963年提出二维（两代）的夸克混合

- 2001 Belle / BaBar：B 介子大 CP 不对称，验证 Kobayashi-Maskawa 理论 $\rightarrow$ 2008 诺贝尔奖

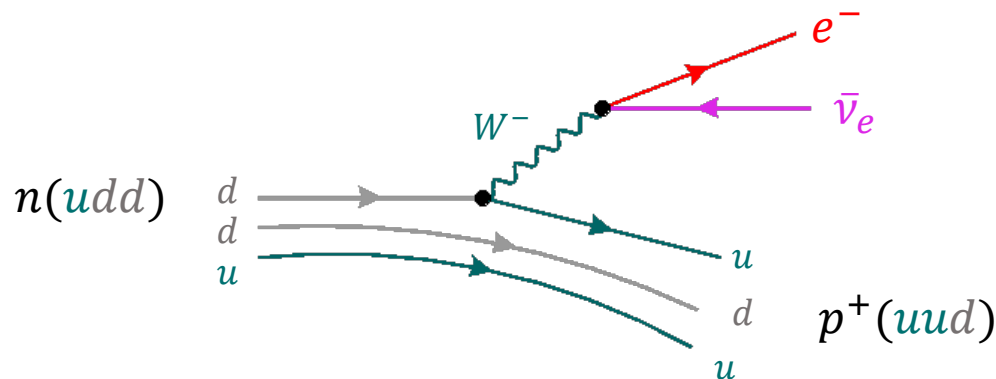
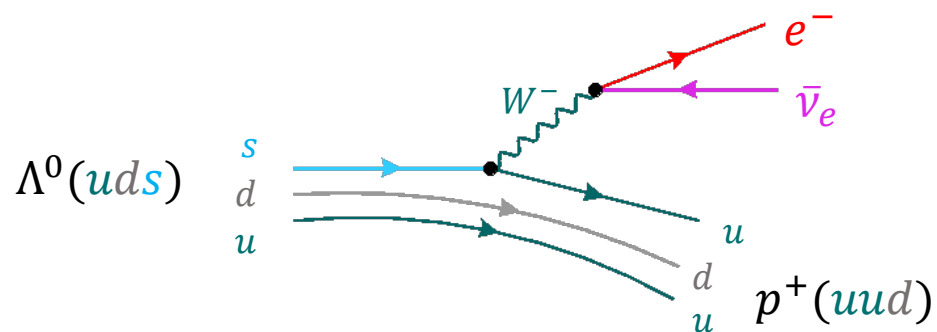
弱相互作用区分左右与物质-反物质；这种微小不对称，可能造就了宇宙中物质的存在。



味道混合

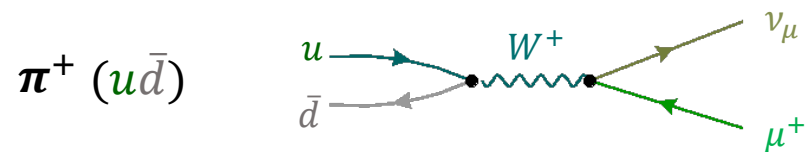
1963: Cabibbo (夸克“混合”)理论

- 为何奇异介子 Λ 的 β 衰变表现出的有限弱耦合比理论预期小四五倍?

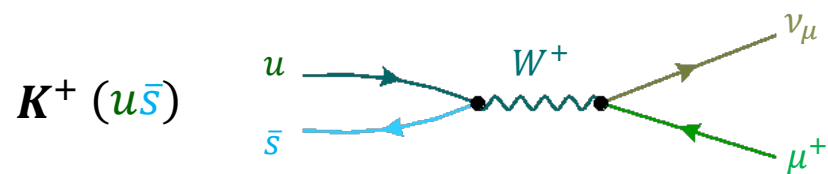


Cabibbo: $\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{u}_L \gamma^\mu d_L W_\mu^+ \rightarrow \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{u}_L \gamma^\mu (d_L \cos\theta_C + s_L \sin\theta_C) W_\mu^+$

“质量本征态”不等于“弱作用本征态”



$$\frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu)} = \frac{f_K^2 m_K}{f_\pi^2 m_\pi} \left[\frac{1 - m_\mu^2/m_K^2}{1 - m_\mu^2/m_\pi^2} \right]^2 \tan^2 \theta_C$$

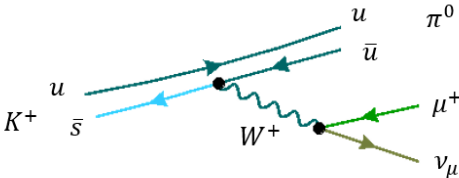


Cabibbo分析出 $\theta_C \sim 15^\circ$ $\sin\theta_C \simeq 0.23$

味道混合

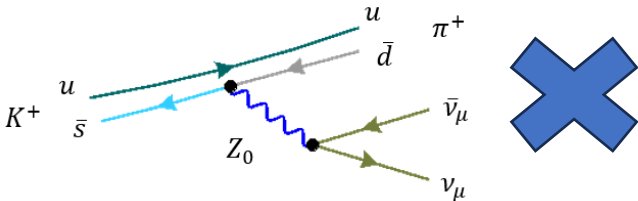
1970, GIM (Glashow-Iliopoulos-Maiani) 机制

$$\frac{\sigma(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})}{\sigma(K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu)} < 10^{-5}$$



FCNC(flavor-changing neutral current)

味道改变中性流



- 1964, Glashow和Bjorken提出存在第四个夸克以组成两组弱双重态

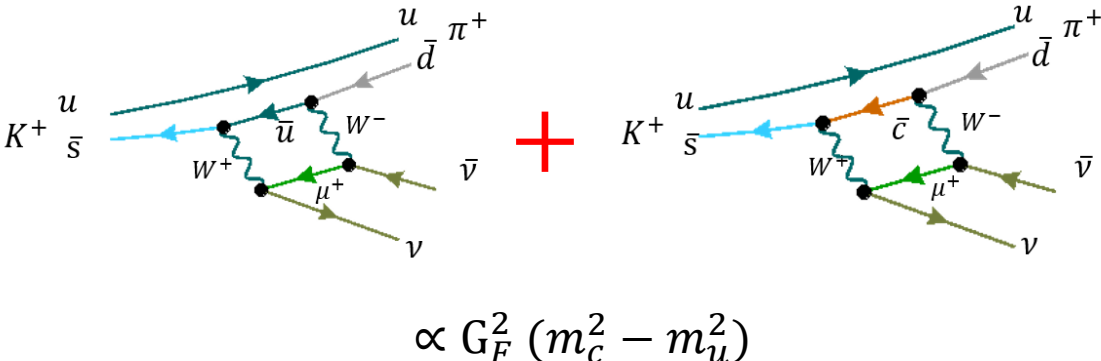
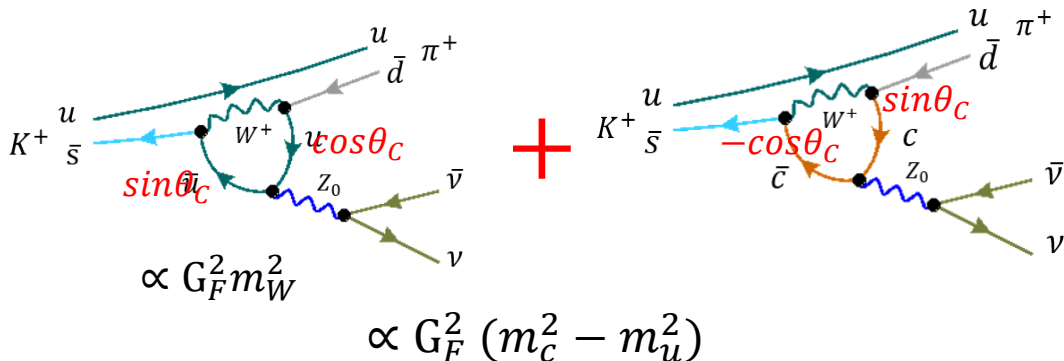
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad Q_L^1 = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad Q_L^2 = \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad ?$$

- 1970: Glashow、Iliopoulos 和 Maiani 指出, charm 的引入可通过 $u - c$ cancellation 强烈抑制 FCNC

$$\begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}_L \rightarrow \begin{pmatrix} d_\theta \\ s_\theta \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}_L$$

$$(\bar{d}_\theta \gamma_\mu d_\theta + \bar{s}_\theta \gamma_\mu s_\theta) Z^\mu = 0$$

FCNC树图贡献为0!



FCNC圈图被 $u - c$ 强烈抵消 (if $m_c \sim \text{GeV}$) !

1973 年: Kobayashi–Maskawa机制:CKM矩阵以及CP破坏

夸克的质量本征态 $\neq$ 弱作用的本征态

采用弱作用本征态时: $\mathcal{L}_{Yukawa} = -\lambda_d^{ij} \bar{Q}_{Li} \phi d_{Rj} - \lambda_u^{ij} \bar{Q}_{Li} (i\tau_2 \phi^*) u_{Rj} = -(M_d)_{ij} \bar{d}_{Li} d_{Rj} - (M_u)_{ij} \bar{u}_{Li} u_{Rj}$

- 变换为质量本征态（则质量矩阵变为对角矩阵）：

$$\psi'_L = V_{fL} \psi_L \quad \psi'_R = V_{fR} \psi_R$$

$$\mathcal{L}_{CC} \sim \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{u}_{Li} \gamma^\mu d_{Li} W_\mu^+ + \cdots \rightarrow \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{u}_{Li} \gamma^\mu (V_{uL}^+ V_{dL})_{ij} d_{Lj} W_\mu^+ \quad V_{ckm} = V_{uL}^+ V_{dL} \quad \text{对中性流 } V_{uL}^+ V_{uL} = 1, \text{即树图没有味道混合}$$

1973年: CKM 矩阵相位导致CP破坏

- CKM矩阵会有 $\frac{N(N+1)}{2} - 2N + 1$ 个不可约相位，此相位将可能造成CP破坏
- 至少三代夸克， $N = 3$ ，才能产生一个相位使得弱CP破坏！
预言存在第三代夸克（顶夸克和底夸克）的存在。

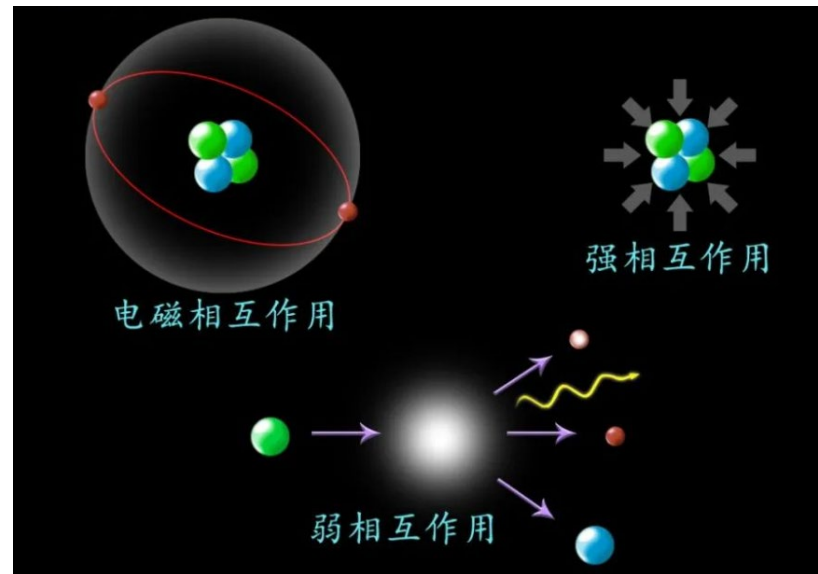
1964年，Cronin 和 Fitch 首次从中性K介子的衰变中观察到 CP 对称性被破坏。

标准模型框架

物质的基本组成

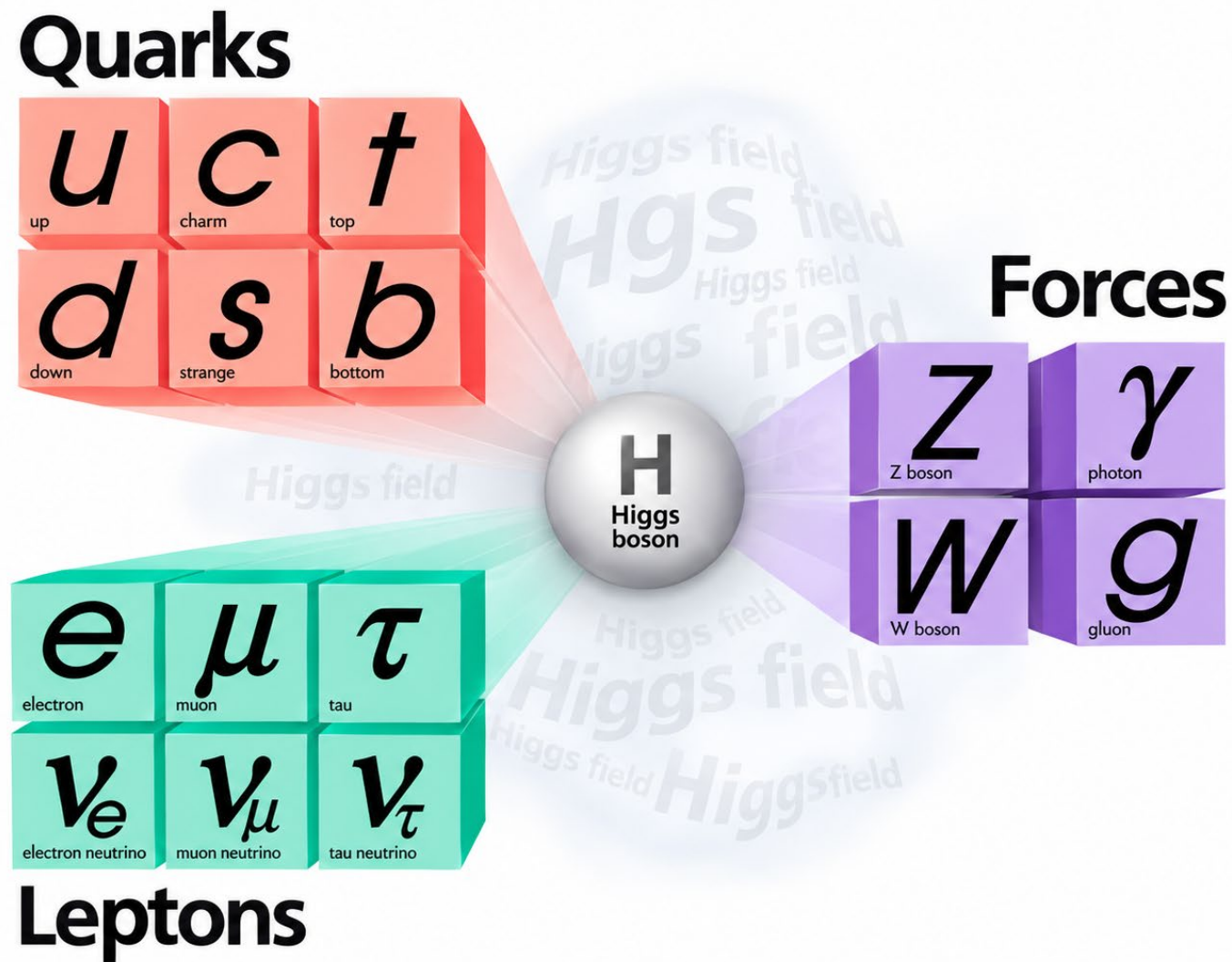
- 12 种费米子 (6 夸克 + 6 轻子)
- 4 种规范玻色子
- Higgs 玻色子

这是 20 世纪物理的巅峰之一。



电磁、强与弱相互作用

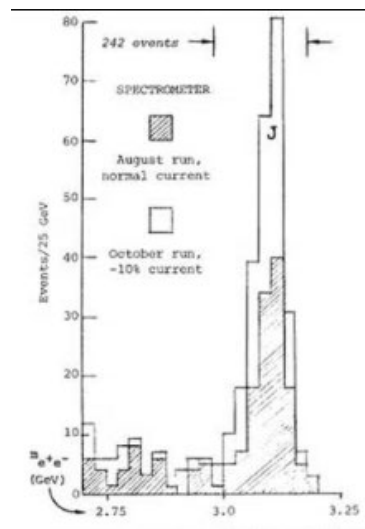
标准模型中的粒子总结



实验验证

粲夸克、 τ 轻子、底夸克

- 1974年11月, 丁肇中, Burton Richter 发现 J/ψ 粒子 (SLAC)
 $J/\psi = c\bar{c}$
- 1975年,发现 τ 轻子 (SLAC)
- 1977年,发现底 (bottom) 夸克: $\Upsilon = b\bar{b}$ (Fermilab)



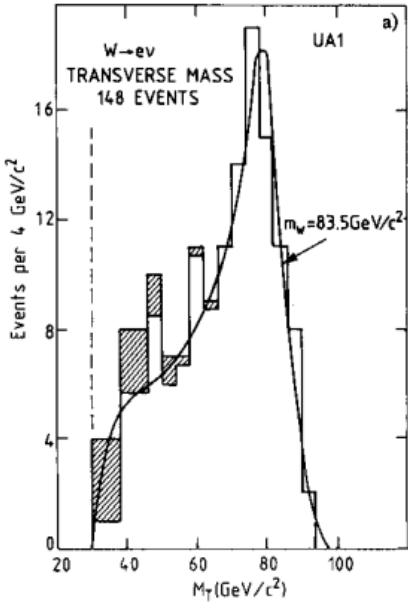
Burton Richter (左) 丁肇中 (右)
发现 J/ψ 粒子

实验验证

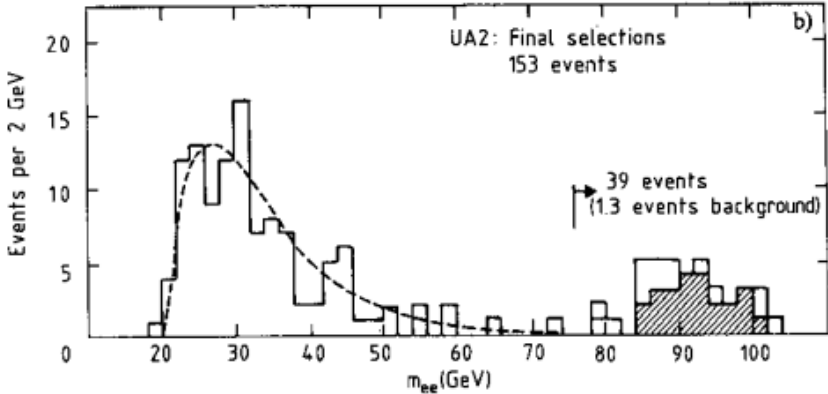
W/Z、顶夸克

- 1983 W 和 Z 玻色子发现 (CERN)
- 1995 顶夸克发现 (Fermilab)
- 标准模型一个个被验证

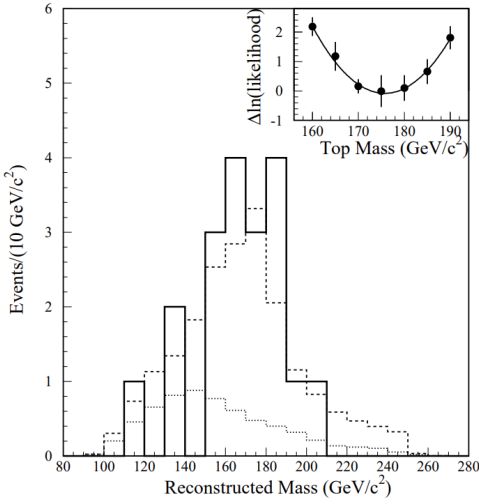
理论预言不断被证实。



W玻色子



Z玻色子



Top夸克

最后一块拼图

Higgs 玻色子

- 直至 2000 年，继 τ 中微子的发现后，唯一尚未发现的粒子
- 质量起源的关键
- 全世界在等它

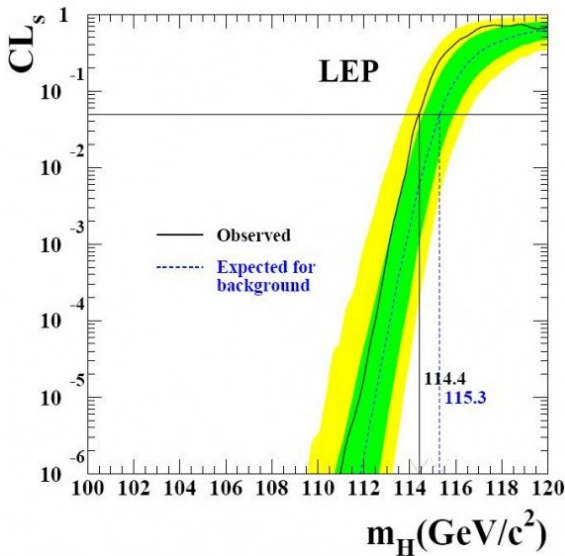
标准模型的最后一块拼图。

寻找 Higgs

LEP、Tevatron、LHC

- LEP 排除低质量
- Tevatron 接近但不够
- LHC 设计目标

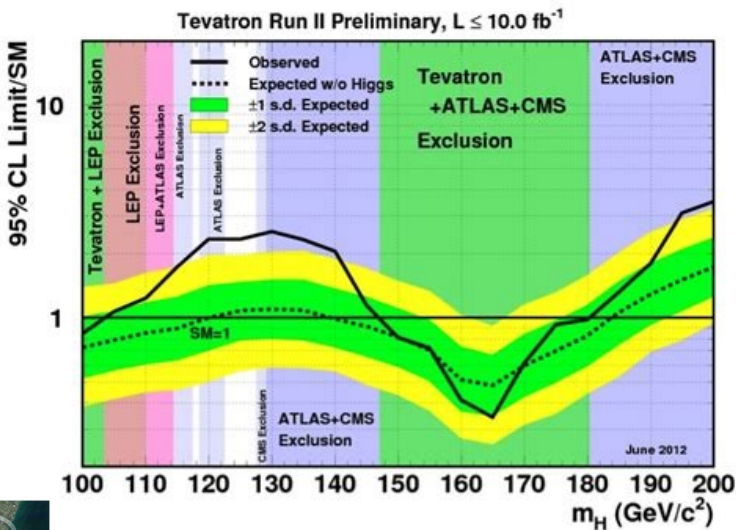
这是一场全球合作。



LEP: e^+e^- 对撞 $\sqrt{s} \leq 209\text{GeV}$

$m_H > 114.4\text{GeV}$ 95%CL

Tevatron: $p\bar{p}$ 对撞, $\sqrt{s} = 1.96\text{ TeV}$
 2.9σ excess, 115-135 GeV



LHC: pp 对撞, $\sqrt{s} = 7, 8, 13.6\text{ TeV}$

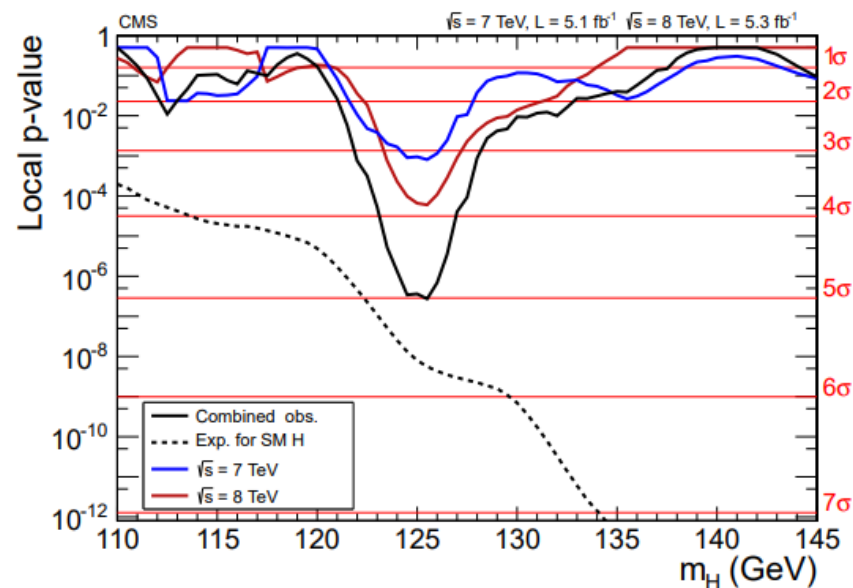
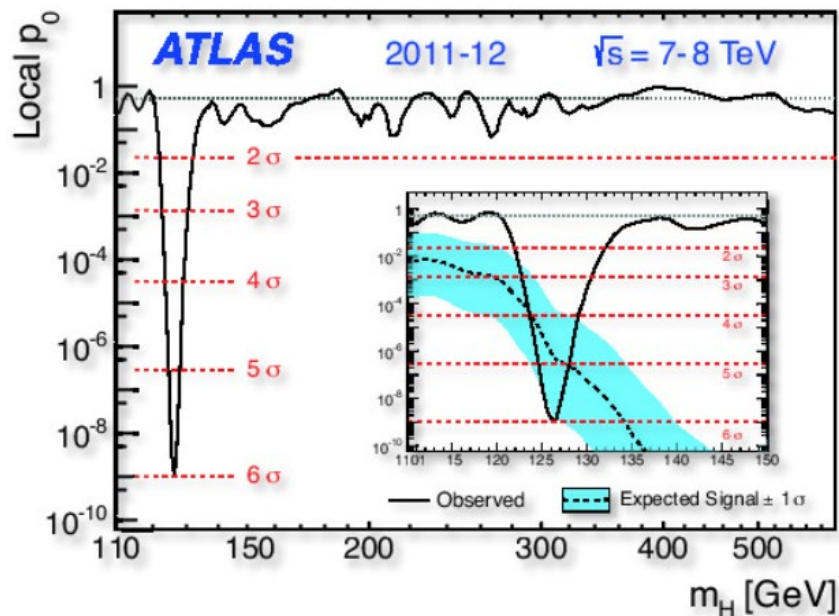


2012 年 7 月 4 日

ATLAS 与 CMS 宣布发现

- ~ 125 GeV 新粒子
- 5σ 显著性
- 粒子物理的历史时刻

这是粒子物理的历史时刻。



确认 Higgs

2013 年确认自旋/宇称

- 符合 Higgs 预期
- Higgs 与 Englert 获 2013 诺奖
- 理论等了 48 年

理论等了 48 年。

科学方法启示

大科学合作

- 数千科学家、数十国家
- 5σ 标准 （由于纯粹的统计涨落而呈现的几率，只有约 $1/3,5000,000$ ）
- 理论与实验相互引导

现代粒子物理是大科学。

标准模型中的参数总结

规范对称性: $SU(3)_{\text{color}} \times SU(2)_{\text{Left}} \times U(1)_{\text{Hypercharge}}$

g_3, g_2, g_1
 λ, μ

$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_S, \alpha_{em}, \theta_{\text{Weak mixing}} \\ V \text{ (Higgs场真空期望值)} \\ m_H \text{ (Higgs玻色子质量)} \end{array} \right\}$

这些观测量可由下述替代:

$\alpha_S, \alpha_{em}, G_F, m_Z, m_H$

3个轻子质量

(e, μ, τ) 中微子质量设为0

6个夸克质量

(u, d, s, c, b, t)

4个参数描述夸克质量本征态与弱作用本征态的混合(CKM矩阵相关)

3个混合角 和 1个CP破坏相位

1个参数描述强CP破坏

1个强CP破坏相位

总共19个参数

目前所有实验数据与标准模型预测吻合

中微子振荡实验表明中微子具有质量; 但我们可以用标准模型包含这一事实:

- Dirac中微子: 3代中微子质量 + 3个混合角 + 1个CP破坏相位
- Majorana中微子: 3代中微子质量 + 3个混合角 + 3个CP破坏相位

Higgs 之后

标准模型完成了吗？

- 所有粒子都已发现
- 但问题更多了
- 这不是终点

这不是终点。

标准模型中的未解之谜

尽管标准模型取得了巨大成功，但它仍然是不完整的

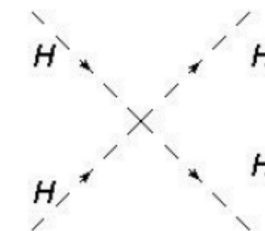
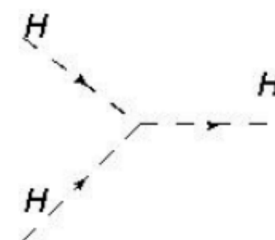
待解决的问题之一：

- Higgs玻色子

$$\mathcal{L} = D_\mu \phi^\dagger D^\mu \phi - V(\phi), \quad V(\phi) = \lambda \left(\phi^\dagger \phi - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

我们捕捉到了 Higgs 玻色子，测量了它的质量，电荷，自旋和宇称，并且测量了它和诸多其它粒子的耦合强度，但是我们尚未能精确地验证 Higgs 玻色子的自我耦合机制。亦即：验证 Higgs “势能”。这对于验证粒子物理的标准模型是极其重要的。

我们必须在未来的实验中精准的测量 H-H-H 和 H-H-H-H 的耦合强度。



超越标准模型的问题

尽管标准模型取得了巨大成功，但它仍然是不完整的

待解决的问题： 2023 P5 Report (2023)

- 中微子：质量实际值？是否为Majorana粒子？
- Higgs玻色子：Hierarchy Problem？
- 暗物质是什么？
- 为什么正反物质有不对称性？
- 物质粒子为何恰好有三代？
- 引力如何被引入量子场论框架？
-

标准模型很可能是一个更深层次理论的一部分！



探索超越标准模型的新物理

粒子物理的未解之谜推动着未来实验计划与设施研究

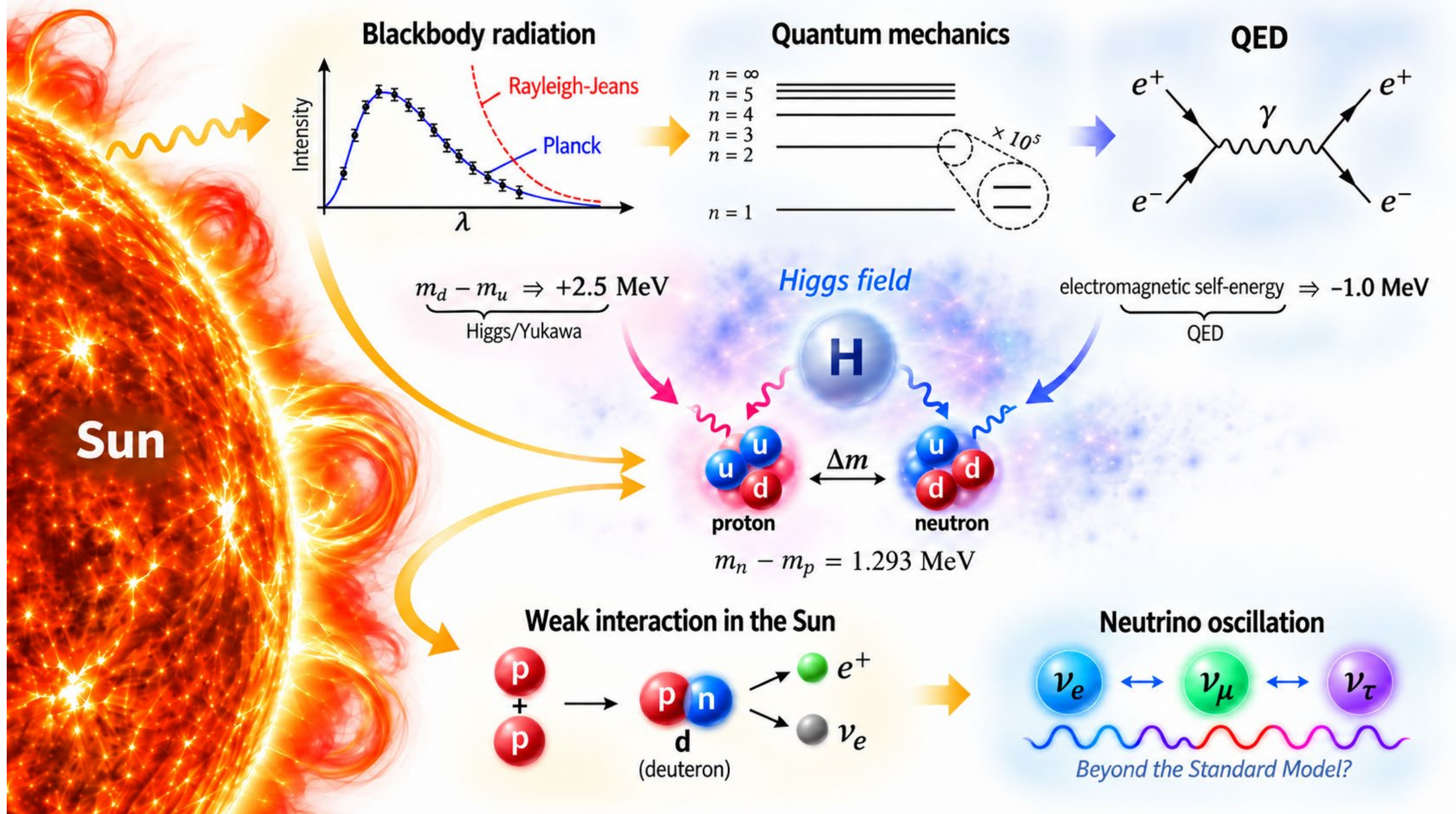
- 深层地下中微子实验 (DUNE) 第二阶段
- 高亮度大型强子对撞机 (HL-LHC)
- 第三代暗物质直接探测实验 (G3)
- 未来环形对撞机 (FCC)
-

发展逻辑回顾

实验与理论的共舞

- 实验异常 → 理论危机 → 量子革命 → 新实验 → 新理论
- 从电子到标准模型
- 粒子物理的方法论

这就是粒子物理的方法论。



未解之谜与寄语

下一个突破可能来自你们

- 中微子质量、暗物质、暗能量
- 引力量子化、超对称、大统一
- 为什么是这些粒子？为什么这些质量？
- CP 破坏与宇宙物质-反物质不对称

谢谢，欢迎提问。