

量子场论

第1章 预备知识

1.1 节和 1.2 节

余钊煥

中山大学物理学院

<https://yzhxxzxy.github.io>

更新日期：2023年9月3日



量子场论参考书

- ① M. D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model*, Cambridge University Press, 2014
- ② M. E. Peskin, D. V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Addison-Wesley, 1995
- ③ M. Srednicki, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, 2007
- ④ B. G. Chen, D. Derbes, D. Griffiths, B. Hill, R. Sohn, Y.-S. Ting (editors),
Lectures of Sidney Coleman on Quantum Field Theory, World Scientific Publishing, 2019
- ⑤ L. H. Ryder, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, 1996
- ⑥ W. Greiner, J. Reinhardt, *Field Quantization*, Springer, 1996
- ⑦ W. Greiner, J. Reinhardt, *Quantum Electrodynamics*, Springer, 2008
- ⑧ W. Greiner, B. Müller, *Gauge Theory of Weak Interactions*, Springer, 2009

量子场论参考书

- ⑨ W. Greiner, S. Schramm, E. Stein, *Quantum Chromodynamics*, Springer, 2006
- ⑩ 郑汉青,《量子场论》(上下册), 北京大学出版社, 2018
- ⑪ 李灵峰,《量子场论》, 科学出版社, 2015
- ⑫ Ta-Pei Cheng, Ling-Fong Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984
- ⑬ S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Volume 1 *Foundations*, Cambridge University Press, 1995 (有中译本)
- ⑭ S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Volume 2 *Modern Applications*, Cambridge University Press, 1996
- ⑮ S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Volume 3 *Supersymmetry*, Cambridge University Press, 2000

1.1 节 量子场论的必要性

 在**量子力学**基础课程中，量子化的对象通常是由**粒子**组成 的动力学系统

 考虑到**狭义相对论**效应，单粒子波函数 $\psi(\mathbf{x}, t)$ 由 **Klein-Gordon 方程**描述

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(\mathbf{x}, t) = (-\hbar^2 c^2 \nabla^2 + m^2 c^4) \Psi(\mathbf{x}, t) \quad (1926 \text{ 年})$$

 $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ 是约化 Planck 常数， c 是光速， m 是粒子的静止**质量**

1.1 节 量子场论的必要性

在**量子力学**基础课程中，量子化的对象通常是由**粒子**组成 的动力学系统

考虑到**狭义相对论**效应，单粒子波函数 $\psi(\mathbf{x}, t)$ 由 **Klein-Gordon 方程** 描述

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(\mathbf{x}, t) = (-\hbar^2 c^2 \nabla^2 + m^2 c^4) \Psi(\mathbf{x}, t) \quad (1926 \text{ 年})$$

$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ 是约化 Planck 常数， c 是光速， m 是粒子的静止**质量**

自由粒子的**能量**为 $E = \pm \sqrt{|\mathbf{p}|^2 c^2 + m^2 c^4}$ ，其中 \mathbf{p} 为**动量**

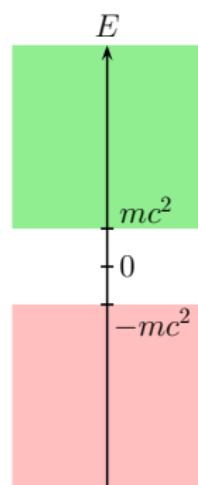
能量 E 可**正** ($mc^2 \leq E < \infty$) 可**负** ($-\infty < E \leq -mc^2$)

即使初始能量为正，粒子也可能跃迁到**负能态**

能量可取**负无穷大**意味着**稳定基态不存在** **负能量困难**

粒子的**概率密度** $\rho = \frac{i\hbar}{2mc^2} \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\partial \Psi^*}{\partial t} \Psi \right)$ 在不同空间

区域中也可**正**可**负** **负概率困难**



Dirac 方程和空穴理论

 Klein-Gordon 方程包含波函数对时间的二阶导数  负概率困难

 只包含对时间一阶导数的相对论性方程  Dirac 方程 (1928 年)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{x}, t) = (-i\hbar c \boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + mc^2 \beta) \Psi(\mathbf{x}, t)$$

 保证概率密度正定和概率守恒，**不存在负概率困难**

 Dirac 方程描述自旋为 **1/2** 的费米子，如**电子**

Dirac 方程和空穴理论

Klein-Gordon 方程包含波函数对时间的**二阶**导数 负概率困难

只包含对时间**一阶**导数的相对论性方程 **Dirac 方程** (1928 年)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{x}, t) = (-i\hbar c \boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + mc^2 \beta) \Psi(\mathbf{x}, t)$$

保证概率密度正定和概率守恒, **不存在负概率困难**

Dirac 方程描述**自旋为 1/2** 的费米子, 如**电子**

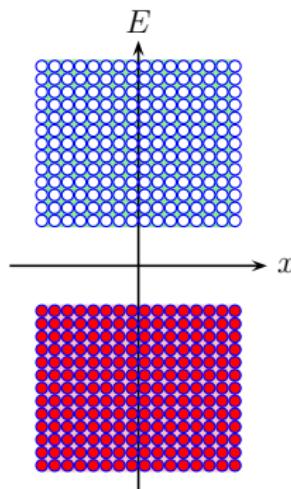
为进一步**解决负能量困难**, Paul Dirac 提出**空穴理论**

真空态: 所有 $E < 0$ 的态都被电子占据

所有 $E > 0$ 的态都未被电子占据

Pauli 不相容原理阻止电子从 $E > 0$ 的态跃迁到 $E < 0$ 的态

激发态电子的**能量总是正的**



Dirac 方程和空穴理论

💡 Klein-Gordon 方程包含波函数对时间的**二阶**导数 ➡ 负概率困难

🍀 只包含对时间**一阶**导数的相对论性方程 ➡ **Dirac 方程** (1928 年)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{x}, t) = (-i\hbar c \boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + mc^2 \beta) \Psi(\mathbf{x}, t)$$

👉 保证概率密度正定和概率守恒, **不存在负概率困难**

🌻 Dirac 方程描述**自旋为 1/2** 的费米子, 如**电子**

🌿 为进一步**解决负能量困难**, Paul Dirac 提出**空穴理论**

🍄 **真空态**: 所有 $E < 0$ 的态都被电子占据

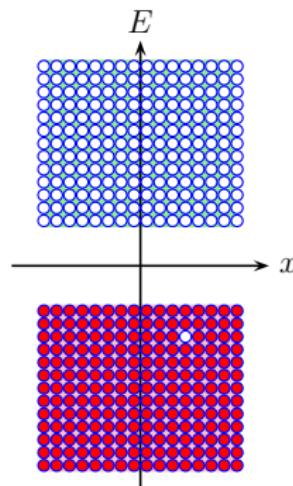
所有 $E > 0$ 的态都未被电子占据

🍋 **Pauli 不相容原理**阻止电子从 $E > 0$ 的态跃迁到 $E < 0$ 的态

👉 激发态电子的**能量总是正的**

🍓 如果**负能海**中缺失一个电荷 $-e$ 、能量 $-|E|$ 的电子, 即产生一个**空穴**, 则空穴的行为等价于一个电荷 $+e$ 、能量 $+|E|$ 的**反粒子**, 称为**正电子**

🍉 1932 年, Carl Anderson 在实验中发现正电子



空穴理论的问题

😔 Dirac 空穴理论面临的问题

- 🦖 为何没有观测到**无穷多个负能电子**具有的无穷大电荷密度所引起的电场？
- 🦕 Dirac 方程一开始作为描述**单粒子波函数**的方程提出来，但 Dirac 的解释却包含了**无穷多个粒子**
- 🌀 Dirac 方程只能描述自旋 $1/2$ 的费米子，不能描述像光子和 α 粒子这样具有**整数自旋**的玻色子，因而**负概率困难**仍然存在
- 🦄 玻色子不满足 Pauli 不相容原理，空穴理论无法解决玻色子的**负能量困难**

空穴理论的问题

😔 Dirac 空穴理论面临的问题

- 🦖 为何没有观测到**无穷多个负能电子**具有的无穷大电荷密度所引起的电场？
- 🦕 Dirac 方程一开始作为描述**单粒子波函数**的方程提出来，但 Dirac 的解释却包含了**无穷多个粒子**
- 🌀 Dirac 方程只能描述自旋 $1/2$ 的费米子，不能描述像光子和 α 粒子这样具有**整数自旋**的玻色子，因而**负概率困难**仍然存在
- 🦄 玻色子不满足 Pauli 不相容原理，空穴理论无法解决玻色子的**负能量困难**
- 🤔 用**相对论性波函数方程**描述单个粒子会遇到这么多困难，是否意味着处理这些问题的**基础本身就不正确**呢？

时间和空间

量子力学的一条**基本原理**：**观测量**由物理 Hilbert 空间中的**厄米算符**描写

！**时间**显然是一个**观测量**，却没有用一个厄米算符来描写它

在 **Schrödinger 绘景** 中，系统的量子态依赖于**时间参数 t** ，这是时间的概念进入量子力学的方式，但并没有假定 t 是某个厄米算符的本征值

另一方面，粒子的**空间位置 x** 则是**位置算符 \hat{x}** 的本征值

时间和空间

🔑 量子力学的一条**基本原理**: 观测量由物理 Hilbert 空间中的**厄米算符**描写

❗ **时间**显然是一个观测量, 却没有用一个厄米算符来描写它

⌚ 在 **Schrödinger 绘景** 中, 系统的量子态依赖于**时间参数 t** , 这是时间的概念进入量子力学的方式, 但并没有假定 t 是某个厄米算符的本征值

🐬 另一方面, 粒子的**空间位置 x** 则是**位置算符 \hat{x}** 的本征值

🍎 **量子力学**对时间和空间的处理方式是**截然不同的**

🍏 在**狭义相对论**中, **Lorentz 对称性**将时间和空间混合起来, 两者统一处理

👉 在结合量子力学与狭义相对论的过程中容易出现**困难**

时间和空间

🔑 量子力学的一条**基本原理**: 观测量由物理 Hilbert 空间中的**厄米算符**描写

❗ **时间**显然是一个观测量, 却没有用一个厄米算符来描写它

⌚ 在 **Schrödinger 绘景** 中, 系统的量子态依赖于**时间参数 t** , 这是时间的概念进入量子力学的方式, 但并没有假定 t 是某个厄米算符的本征值

🐬 另一方面, 粒子的**空间位置 x** 则是**位置算符 \hat{x}** 的本征值

🍎 **量子力学**对时间和空间的处理方式是**截然不同的**

🍏 在**狭义相对论**中, **Lorentz 对称性**将时间和空间混合起来, 两者统一处理

👉 在结合量子力学与狭义相对论的过程中容易出现**困难**

❓ 如何在量子力学中**平等地**处理时间和空间?

✗ 途径 1: 将时间提升为一个厄米算符, 但这样做在实际操作中非常困难

⚓ 途径 2: **将空间位置降格为一个参数**, 不再由厄米算符描写

量子场论

 在 Schrödinger 绘景中，对每个空间点 x 定义一个算符 $\hat{\Phi}(x)$

 所有这些算符的集合 $\{\hat{\Phi}(x)\}$ 称为**量子场算符**

 在 Heisenberg 绘景中，量子场算符 $\hat{\Phi}(x, t) = e^{i\hat{H}t/\hbar} \hat{\Phi}(x) e^{-i\hat{H}t/\hbar}$ 依赖于**时间** t

 量子化的对象是由依赖于时空坐标参数 (x, t) 的**场**组成动力学系统

量子场论

！ 这里量子算符用 $\hat{}$ 符号标记，为简化记号，在量子场论中经常**省略** $\hat{}$ 符号

量子场论

 在 Schrödinger 绘景中，对每个空间点 x 定义一个算符 $\hat{\Phi}(x)$

 所有这些算符的集合 $\{\hat{\Phi}(x)\}$ 称为**量子场算符**

 在 Heisenberg 绘景中，量子场算符 $\hat{\Phi}(x, t) = e^{i\hat{H}t/\hbar} \hat{\Phi}(x) e^{-i\hat{H}t/\hbar}$ 依赖于**时间** t

 量子化的对象是由依赖于时空坐标参数 (x, t) 的**场**组成动力学系统

量子场论

！ 这里量子算符用 $\hat{}$ 符号标记，为简化记号，在量子场论中经常**省略** $\hat{}$ 符号

 相对论性的 Klein-Gordon 方程和 Dirac 方程描述**自由量子场的运动**

 真空态是量子场的基态，包含**任意多个粒子**的态则是量子场的激发态

 量子场论平等地描述正粒子和反粒子，由正反粒子的产生算符和湮灭算符表达出来的**哈密顿量是正定的**，不再出现负能量困难

 不再将 ρ 解释成单粒子概率密度，而将它解释为单位体积内正粒子与反粒子的数量之差，即**粒子数密度**，因此不存在负概率困难

量子场的相互作用

 粒子是量子场的激发态，**一种粒子对应于一个量子场**

 粒子之间的相互作用来源于**量子场的相互作用**

 在一个粒子物理理论中，需要先定义理论中的**粒子类型**，再用相应的量子场写出 Lorentz 不变的**拉氏量**，由此推出一套 **Feynman 规则**

 画出相互作用过程的 **Feynman 图**

 通过 Feynman 图和 Feynman 规则计算相互作用过程的**不变振幅**

 进而计算相互作用过程的散射截面、衰变宽度等**物理观测量**

量子场的相互作用

兔 粒子是量子场的激发态，一种粒子对应于一个量子场

兔 粒子之间的相互作用来源于量子场的相互作用

月 在一个粒子物理理论中，需要先定义理论中的粒子类型，再用相应的量子场写出 Lorentz 不变的拉氏量，由此推出一套 Feynman 规则

月 画出相互作用过程的 Feynman 图

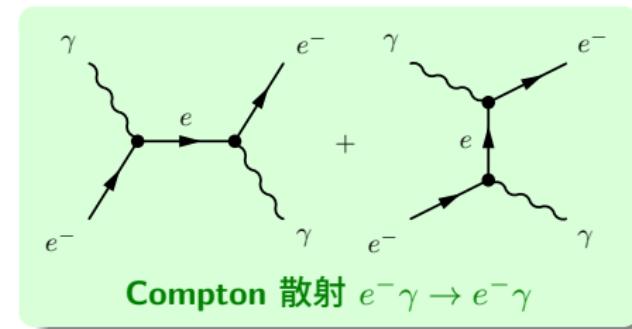
月 通过 Feynman 图和 Feynman 规则计算相互作用过程的不变振幅

日 进而计算相互作用过程的散射截面、衰变宽度等物理观测量

日 量子电动力学：电磁场、电子场

★ 电磁相互作用顶点 Feynman 规则

$$\mu \quad = ie\gamma^\mu$$



1.2 节 自然单位制

 在量子场论中，经常采用**自然单位制**，取 $c = \hbar = 1$

| 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 Planck 常数 | $\hbar = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV} \cdot \text{s}$ | $1\ \text{s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV}$ |

 由 $1 = \hbar c = 1.973 \times 10^{-11}\ \text{MeV} \cdot \text{cm}$ 得 $1\ \text{cm}^{-1} = 1.973 \times 10^{-11}\ \text{MeV}$

 $1\ \text{GeV}^{-1} = 6.582 \times 10^{-25}\ \text{s} = 1.973 \times 10^{-14}\ \text{cm}$

 在自然单位制中，速度没有量纲；长度量纲与时间相同，是能量量纲的倒数；能量、质量和动量具有相同量纲；可将能量单位**电子伏特 (eV)** 视作**唯一基本单位**

1.2 节 自然单位制

 在量子场论中，经常采用**自然单位制**，取 $c = \hbar = 1$

| 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 Planck 常数 | $\hbar = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV} \cdot \text{s}$ | $1\ \text{s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV}$ |

 由 $1 = \hbar c = 1.973 \times 10^{-11}\ \text{MeV} \cdot \text{cm}$ 得 $1\ \text{cm}^{-1} = 1.973 \times 10^{-11}\ \text{MeV}$

 $1\ \text{GeV}^{-1} = 6.582 \times 10^{-25}\ \text{s} = 1.973 \times 10^{-14}\ \text{cm}$

 在自然单位制中，速度没有量纲；长度量纲与时间相同，是能量量纲的倒数；能量、质量和动量具有相同量纲；可将能量单位**电子伏特 (eV)** 视作**唯一基本单位**

 Klein-Gordon 方程化为 $\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + m^2 \right) \Psi(\mathbf{x}, t) = 0$

 狹义相对论中的**能动量关系**表达成 $E^2 = m^2 c^4 + |\mathbf{p}|^2 c^2 = m^2 + |\mathbf{p}|^2$

 质能关系表达成 $E = \gamma mc^2 = \gamma m$ ，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** $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$ 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 、 ε_0 和 e 这四个常数同时取为 1

 在量子场论中，时常再取**真空介电常数** $\varepsilon_0 = 1$ ，则**真空磁导率** $\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} = 1$

 这是电磁学中 Lorentz–Heaviside 单位制的取法

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 、 ϵ_0 和 e 这四个常数同时取为 1

 在量子场论中，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 Lorentz–Heaviside 单位制的取法

 不同于 Gauss 单位制，此时**真空 Maxwell 方程组**中不会出现**无理数** 4π ：

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

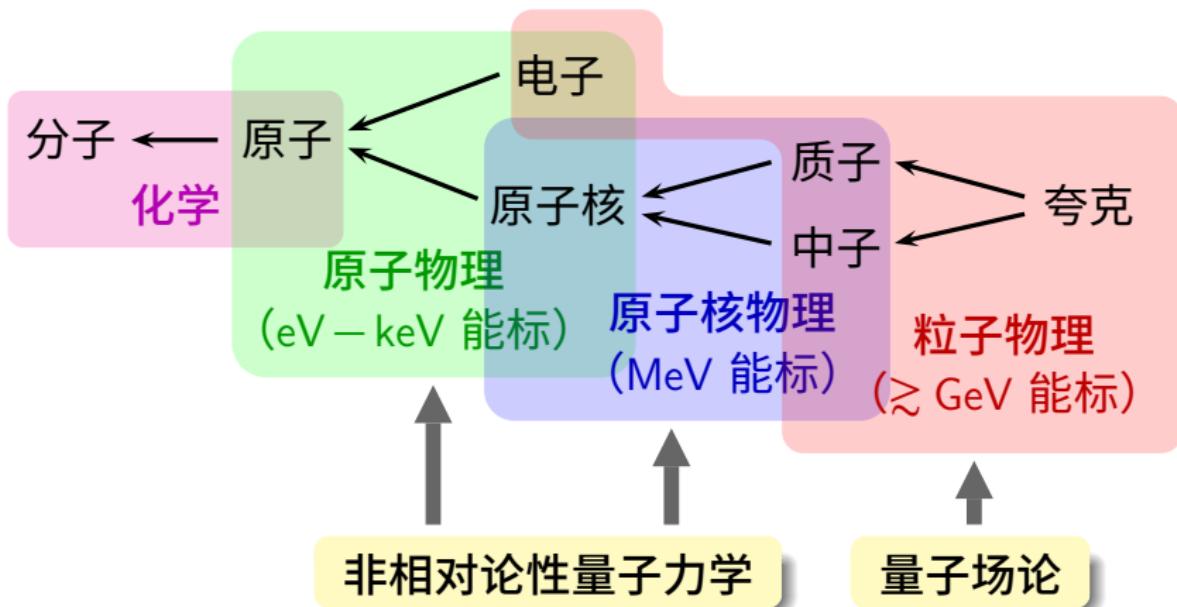
 因此，这样的单位制称为**有理化**的自然单位制

 4π 因子出现在 **Coulomb 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

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

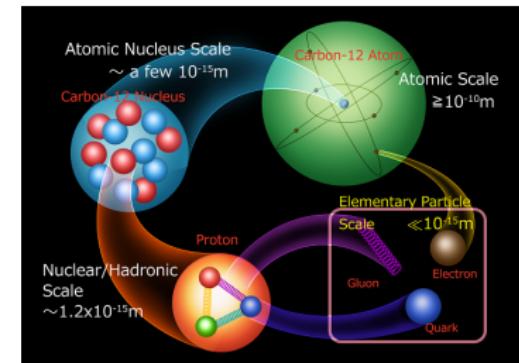


基本相互作用

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 } 最先认识的两种长程作用，与日常生活最为相关
- ③ 强相互作用 手指 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 手指 短程作用，引起原子核的 β 衰变



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 } 最先认识的两种长程作用，与日常生活最为相关
- ③ 强相互作用 手指 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 手指 短程作用，引起原子核的 β 衰变

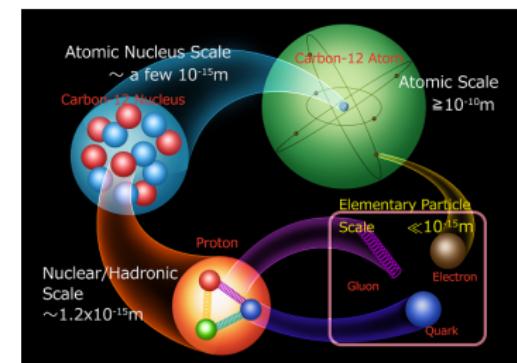
描述相互作用性质的要素

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 **Newton 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、得到实验证实的**量子引力理论**



电磁相互作用

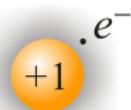
所有带电粒子都参与电磁相互作用

电磁相互作用的源是电荷，媒介粒子是光子

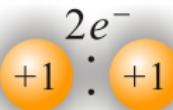
电磁相互作用常数是精细结构常数

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

引起的束缚态：原子、分子



氢原子



氢分子



极光

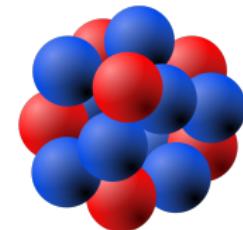
19世纪中叶，Maxwell 将电和磁统一在电动力学的方程组中

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**



原子核

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

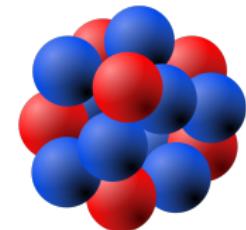
强相互作用的源是色荷，媒介粒子是胶子

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

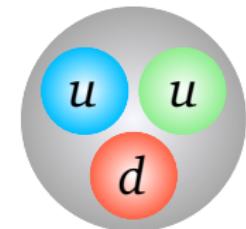
引起的束缚态：介子、重子、原子核

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 van der Waals 力（电磁力的剩余力）

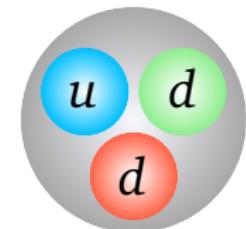
强相互作用的力程很短，约为 10^{-15} m，作用范围仅在相邻核子之间



原子核



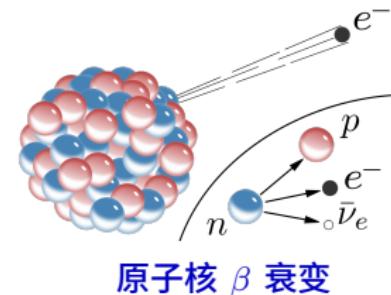
质子



中子

弱相互作用

- ⌚ 原子核 β 衰变半衰期为几秒到几年， π^\pm 和 K_S^0 介子寿命为 2.6×10^{-8} s 和 8.9×10^{-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**



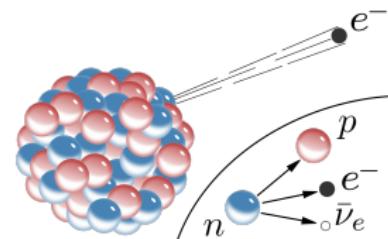
原子核 β 衰变

弱相互作用

 原子核 β 衰变半衰期为几秒到几年， π^\pm 和 K_S^0 介子寿命为 2.6×10^{-8} s 和 8.9×10^{-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



原子核 β 衰变

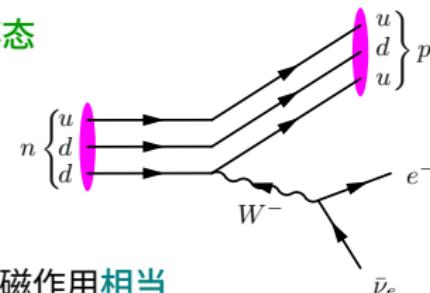
 弱相互作用的源是**弱同位旋**和**弱超荷**，媒介粒子是 W^\pm 和 Z^0 玻色子

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

 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**



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 | ∞ | $\frac{1}{400}$ fm | ∞ |
| 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

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 $1/2$)

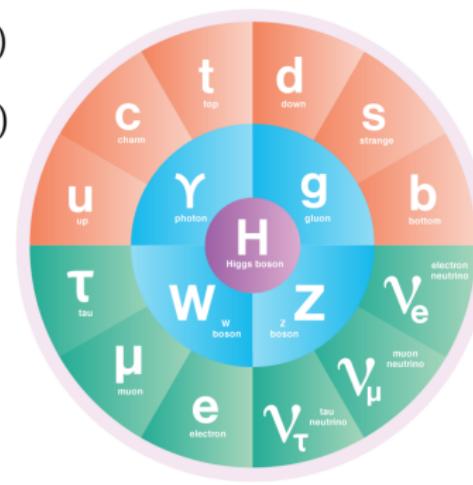
- 带电轻子: 电子 (e) , μ 子 (μ) , τ 子 (τ)
- 中微子: 电子型中微子 (ν_e) , μ 子型中微子 (ν_μ) , τ 子型中微子 (ν_τ)
- 上型夸克: 上夸克 (u) , 粽夸克 (c) , 顶夸克 (t)
- 下型夸克: 下夸克 (d) , 奇夸克 (s) , 底夸克 (b)

● **矢量玻色子** (自旋为 1)

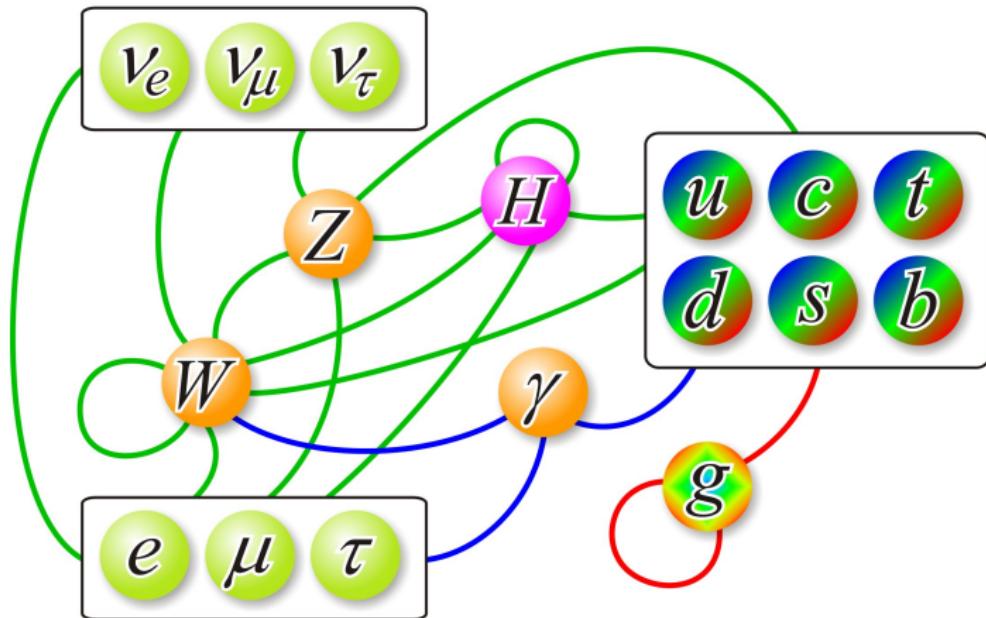
- 电弱规范玻色子: 光子 (γ) , W^\pm , Z^0

- 强规范玻色子: 8 种胶子 (g)

● **标量玻色子** (自旋为 0): Higgs 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