

量子场论

第 1 章 预备知识

1.1 节和 1.2 节

余钊焕

中山大学物理学院

<https://yzhxxzxy.github.io>

更新日期：2024 年 3 月 13 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**

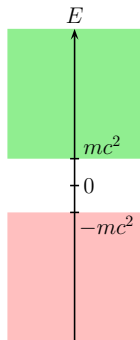
🍒 能量 E 可**正** ($mc^2 \leq E < \infty$) 可**负** ($-\infty < E \leq -mc^2$)

☁️ 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**

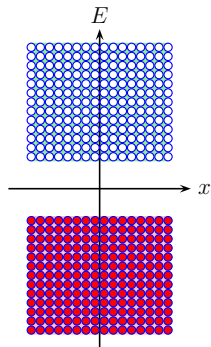
🌿 为进一步**解决负能量困难**，Paul Dirac 提出**空穴理论**

🍄 **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

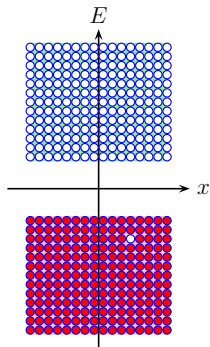
所有 $E > 0$ 的态都未被电子占据

🍋 **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 \mathbf{x} 定义一个算符 $\hat{\Phi}(\mathbf{x})$

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

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


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



量子场论


! 这里 Hilbert 空间上的量子算符用 $\hat{}$ 符号标记，但在量子场论中经常**省略** $\hat{}$ 符号

量子场论

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

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


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

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





量子场论

! 这里 Hilbert 空间上的量子算符用 $\hat{}$ 符号标记，但在量子场论中经常**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

🐰 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

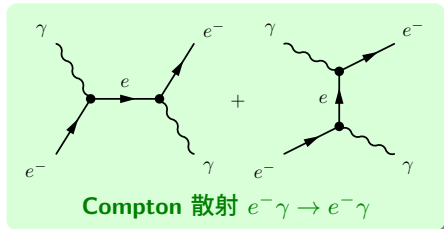
🌑 通过 Feynman 图和 Feynman 规则计算相互作用过程的不变振幅

🌑 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

☀️ 量子电动力学：电磁场、电子场

★ 电磁相互作用顶点 Feynman 规则

$$= ie\gamma^\mu$$





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

🐮 狭义相对论中的**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 $E = \gamma m c^2 = \gamma m$ ，**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** $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ 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

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 ：


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

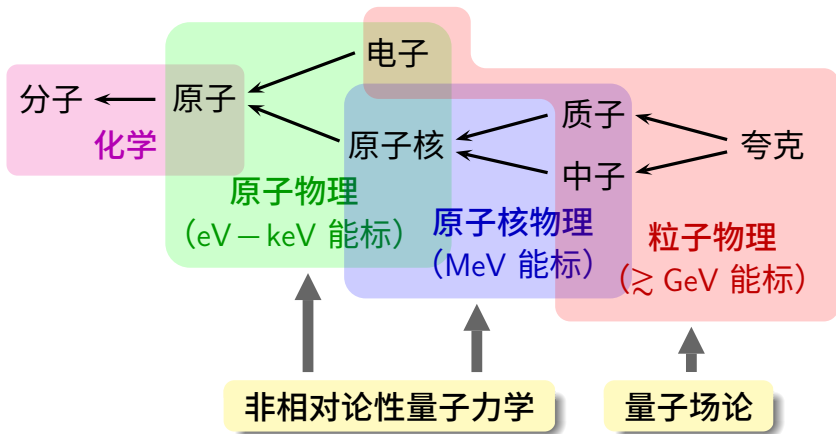
 因此，这样的单位制称为**有理化**的自然单位制

 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**

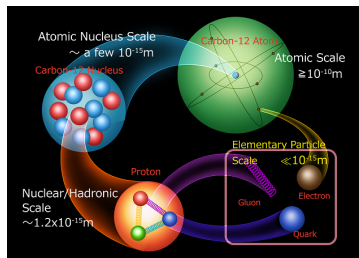


基本相互作用


 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**  **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 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**  **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 β 衰变

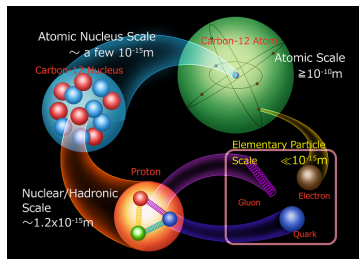
 描述相互作用**性质**的要素

 **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

 **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 **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

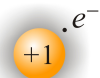
🐬 所有**带电粒子**都参与**电磁相互作用**

🐷 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**

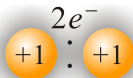
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.036}$$

🐱 引起的束缚态：**原子、分子**



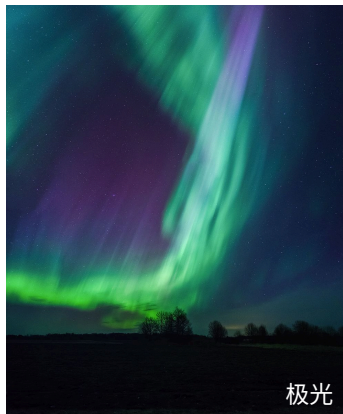
·H

氢原子



H:H

氢分子





极光

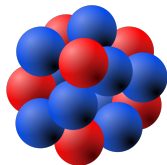
🐯 19 世纪中叶，Maxwell 将**电**和**磁**统一在**电动力学**的方程组中

🐲 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**

🐉 描述强相互作用的量子场论是**量子色动力学**

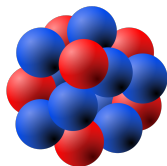
🐷 强相互作用的源是**色荷**，媒介粒子是**胶子**

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

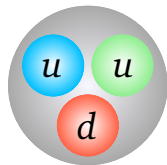
🦁 引起的束缚态：**介子、重子、原子核**

✨ 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）

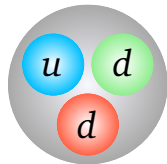
👉 强相互作用的**力程很短**，约为 $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ，作用范围仅在相邻核子之间



原子核





质子

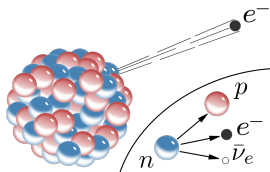


中子

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

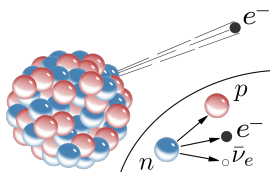
🐱 弱相互作用的源是**弱同位旋**和**弱超荷**, 媒介粒子是 W^\pm 和 Z^0 玻色子

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

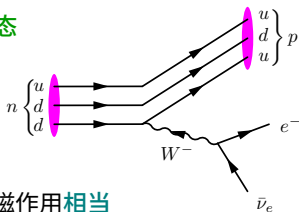
🦁 弱相互作用强度太弱, 力程极短, 通常**不会引起束缚态**

✨ 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**




原子核 β 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	∞	$\frac{1}{400}$ 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), **粲夸克** (c), **顶夸克** (t)

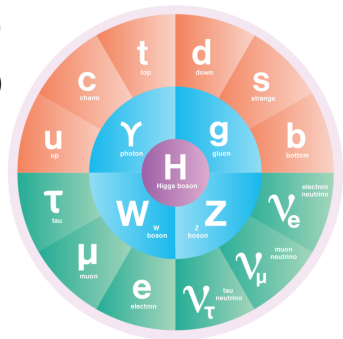
🟦 **下型夸克**: **下夸克** (d), **奇夸克** (s), **底夸克** (b)

🍆 **矢量玻色子** (自旋为 1)

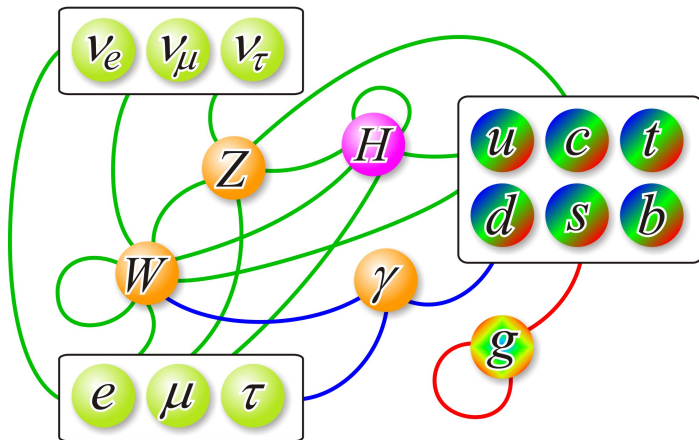
🟦 **电弱规范玻色子**: 光子 (γ), W^\pm , Z^0

🟦 **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