

粒子物理

第一讲：简介

曹庆宏

北京大学物理学院理论物理所

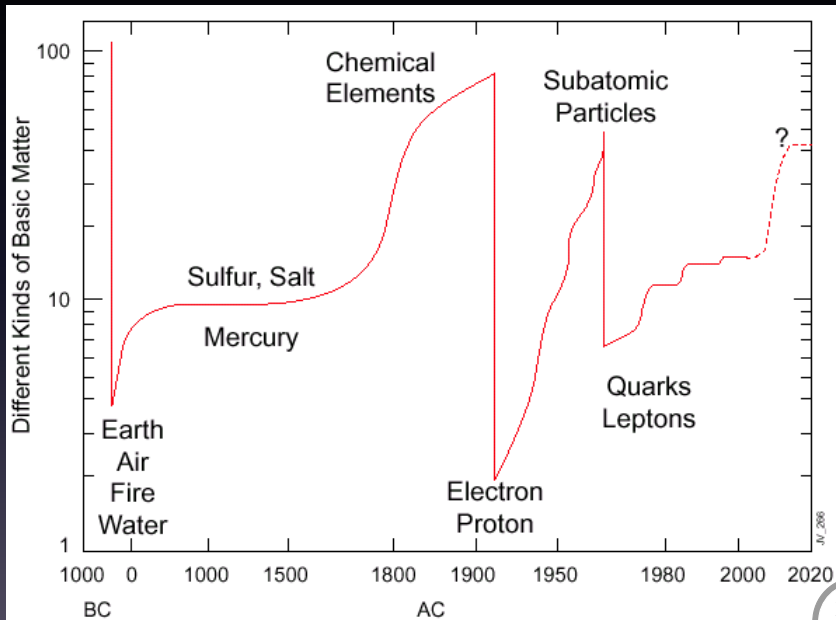
（本节内容部分取自朱世琳老师的科普报告）

粒子物理回答两个核心问题:

1) What are the elementary constituents of Matter?

2) What are the forces that control their behavior at the most basic level?

History of Constituents of Matter



课程安排

▶ 课程内容：

- 粒子物理的起源和发展，相对论性运动学，粒子探测技术和实验装置，对称性及其应用，量子电动力学简介，弱电理论简介和实验检验，量子色动力学简介和检验，标准模型和弱电对称性自发破缺
- 待定内容：大统一理论简介，中微子混合和质量起源，暗物质模型和探测，超对称模型和检验

▶ 课程目的：

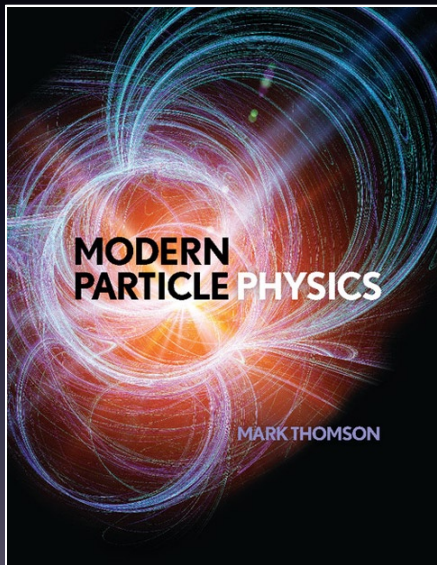
- To Know why it is interesting; To know the basic ideas and terminology; To do simple calculations

▶ 成绩计算：

- 作业（30%），期末考试（70%）
- 周三课后交作业，周一返还。
- 迟交、晚交、不交作业者不得分
- 作业雷同者全记零分

教材：《Modern Particle Physics》 by Mark Thomson

Published by Cambridge University Press, 2013



- ▶ 注意：课程并不局限于教材
(最好的教材始终都是尚未出版的)
- ▶ 陈申见老师讲义
(内事不决问百度)
- ▶ Particle Data Group Review:
<http://pdg.lbl.gov>

其他参考教材

- ▶ 粒子物理与核物理讲座，高崇寿和曾谨言，高等教育出版社（1990）
- ▶ 群论及其在粒子物理学中的应用，高崇寿，高等教育出版社（1992）
- ▶ 粒子物理导论，杜东升和杨茂志，科学出版社（2015）
- ▶ The Experimental Foundations of Particle Physics, by Robert N. Cahn, Gerson Goldhaber
- ▶ Modern Elementary Particle Physics, by Gordon L. Kane
- ▶ Introduction to elementary particle physics, by Alessandro Bettini
- ▶ Introduction to Elementary Particle, by David Griffiths
- ▶ Quarks and Leptons: An Introduction Course in Modern Particle Physics, by Francis Halzen, Alan D. Martin
- ▶ Introduction to High Energy Physics (高能物理学导论), by Donald Perkins

课程内容

1. 粒子物理简介
2. 粒子物理基本概念：
单位制、狭义相对论和量子力学、衰变宽度和散射截面
3. 狄拉克方程
4. 基本粒子相互作用
5. 正负电子湮灭
6. 正负电子弹性散射
7. 深度非弹散射
8. 对称性和夸克模型
9. 量子色动力学
10. 弱相互作用
11. 轻子的弱相互作用
12. 中微子质量和混合
13. CP 破坏
14. 电弱统一
15. 标准模型精确检验
16. 希格斯粒子
17. 超出标准模型的新物理
暗物质、大统一理论。。。

2014 年期末考题

请判断本课程是否是你心目中的粒子物理课程

一. (35 分) 简答题

1. 请叙述自然界中的四种基本相互作用，并比较各种相互作用的强弱。(3 分)
2. 请在自然单位制中将室温用 GeV, sec (秒) 和 fm (费米) 表示。(3 分)
3. 在美国费米实验室的 Tevatron 对撞机上 $p\bar{p} \rightarrow W^+$ 的散射截面是 $\sigma = 10 \text{ nb}$ ，并且实验亮度为 $\mathcal{L} = 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。请问，一年内 ($\sim 10^7 \text{ s}$) 中可以产生多少个 W^+ 玻色子? (3 分)
4. 请说明光子质量项 $m_\gamma^2 A_\mu A^\mu$ 破坏 $U(1)$ 规范对称性。(3 分)
5. 请说明深度非弹散射过程 $e^-p \rightarrow e^-X$ 中观测到的 Bjorken 标度不变性，并阐述如何使用费曼部分子模型解释此标度不变性。(5 分)
6. 考虑正负电子对撞机上 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 对产生过程，请在同一图形中画出 $N_\nu = 3$ 和 $N_\nu = 4$ 两种情况下的 $\mu^+\mu^-$ 的不变质量分布，其中 N_ν 是无质量中微子的种类数目。(3 分)
7. 请说明为什么 τ^- 轻子衰变道 $\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e$ 的分支比是 20%。(5 分) (提示：画出费曼图分析)
8. 请说明实验上如何发现下列粒子 (任选 5 个): (10 分)
(1) 电子; (2) μ 轻子; (3) τ 轻子; (4) π 介子; (5) 粲夸克;
(6) 底夸克; (7) 顶夸克; (8) 中微子; (9) W 玻色子;
(10) Z 玻色子; (11) 希格斯粒子; (12) 胶子。

二. (15 分) 请说明下面那些过程是可以发生并通过何种相互作用发生。如果某过程被禁戒, 请说明原因。

$$\begin{aligned}
 e^+ \mu^- &\rightarrow e^- \mu^+ & , & & \mu^+ &\rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \\
 p &\rightarrow n e^+ \nu_e & , & & \Lambda &\rightarrow p \pi^- \\
 \pi^+ n &\rightarrow \Lambda K^+ & , & & pp &\rightarrow pp \bar{p} \bar{p} \\
 e^- e^+ &\rightarrow \mu^- \mu^+ & , & & p &\rightarrow e^+ \gamma \\
 \pi^- &\rightarrow \mu^- \nu_\mu & , & & K^+ &\rightarrow \pi^+ \gamma
 \end{aligned}$$

三. (10 分) 实验上观测到强衰变过程 $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, 但没有观测到 $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 衰变过程。请据此推导出 ρ 的量子数: (1) G -宇称, (2) 自旋, (3) 内禀宇称; 并提供禁戒 $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 衰变过程的三种不同原因。

四. (10 分) 在未来质心系能量为 1000 GeV 的正负电子直线加速器上, 我们期望可观测到一对正反顶夸克事例,

$$e^+ e^- \rightarrow t \bar{t}, \quad t \rightarrow W^+ b, \quad \bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}.$$

1. 请画出顶夸克对产生过程的费曼图。(1 分)
2. 请说明顶夸克对事例的衰变末态中可以存在 2 个, 4 个或 6 个夸克, 并给出每种情况出现的几率。(4 分)
3. 考虑如下两种末态: (1) 4 个夸克、 μ^+ ; (2) 2 个夸克、 e^- 、 μ^+ , 请画图说明如何在探测器上观测这两种末态。(5 分)

五. (8分) R_X 值测量在粒子物理中具有异常重要的作用, R_X 定义如下:

$$R_X \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow X)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}.$$

考虑下列各种新物理奇异粒子, 假设这些奇异粒子仅参与 QED 相互作用。当正负电子对撞机具有足够高的能量可以产生一对新物理粒子时, 请计算相应的 R 值:

1. R_L : $SU(2)$ 弱同位旋二重态的新轻子 L , 设其超荷为 $Y = +3$,

$$L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix}$$

2. $R_{Q'}$: $SU(2)$ 弱同位旋三重态的新夸克 Q' , 设其超荷为 $Y = +4/3$

$$Q' = \begin{pmatrix} Q'_1 \\ Q'_2 \\ Q'_3 \end{pmatrix}$$

六. (22分) 仅考虑 QED 理论。在非极化的正负电子对撞机上, 忽略电子质量时, $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 的散射振幅模方为

$$|\overline{\mathcal{M}}|^2 = \frac{2e^4 Q_\tau^2}{(p_1 \cdot p_2)^2} [(p_1 \cdot p_4)(p_2 \cdot p_3) + (p_1 \cdot p_3)(p_2 \cdot p_4) + m_\tau^2(p_1 \cdot p_2)]$$

其中 $p_{1,2,3,4}$ 分别是 e^-, e^+, τ^-, τ^+ 的动量, Q_τ 是 τ 轻子电荷。

1. 令质心系能量为 \sqrt{s} , 设 e^- 和 e^+ 分别沿 $+\hat{z}$ 和 $-\hat{z}$ 方向入射。请推导 e^+e^- 质心系中末态 τ^- 的空间极化角 (θ) 的微分散射截面, 并计算总散射截面。(8分)
2. 计算前后不对称性

$$A_{FB} \equiv \frac{\sigma(\cos \theta > 0) - \sigma(\cos \theta < 0)}{\sigma(\cos \theta > 0) + \sigma(\cos \theta < 0)}$$

并解释物理原因。(2分)

3. 如果光子仅仅和左手手征性的带电轻子相互作用, 在忽略电子和 τ 轻子质量的情况下, 请通过螺旋度振幅分析给出散射振幅模方。(2分)
4. 接上问, 请写出末态 τ^- 的空间极化角的微分散射截面, 并计算 A_{FB} 。(2分)
5. 如果 τ^\pm 自旋为零, 请说明 τ^- 极化角微分散射截面在前后方向处为零。(2分)
6. 如果光子自旋为 0, 请给出末态 τ^- 的空间极化角微分分布。(2分)
7. 请写出强子对撞机上 $\tau^+\tau^-$ 产生过程的散射截面。(2分)
8. 考虑 τ 质量不可忽略的情况。当 $m_\tau = 500 \text{ GeV}$, 请分析在 $\sqrt{s} = 2000 \text{ GeV}$ 的质子-反质子强子对撞机上价夸克和海夸克的贡献大小; 当 $m_\tau = 1 \text{ GeV}$ 时重复上面分析。(2分)

1. 何为粒子物理？

粒子物理：探索物质微观结构的前沿学科

- ▶ 物理学是在人类探索自然的奥秘中形成的学科，物理学研究宇宙间物质存在的基本形式，物质的性质、物质的运动规律、物质之间如何相互作用、相互转化以及各种物质形态内部结构的基本规律。
- ▶ 人类在探索自然奥秘的过程中，一个重要的基本问题是探索物质**微观**结构的基本规律。
- ▶ 另一个重要的基本问题是探索物质大范围结构（**宇观**）的基本规律。这方面的前沿学科是天体物理学和宇宙学。
- ▶ 再一个重要的基本问题是探索**宏观**物质结构复杂系统运动的基本规律，这涉及近代物理学的各个前沿分支。

探索微观结构？

- ▶ 例如当把一把铁尺分割成两块时，每一块仍表现出铁的性质，除了数量上减少外，别的并没有什么不同。这样的分割原则上可以一直继续下去，问题在于是不是可以无限分割下去，是不是分割到一定程度就不能再分了。
- ▶ 上上世纪物性学和物理化学的研究发展表明物质的微观结构并不是物质宏观结构简单地缩小，各种物质都是由分子构成的，分子的性质是物质物理性质和化学性质的基础。
- ▶ 如果把单个分子再加以分割，物质的物理性质和化学性质就会明显地变化。
- ▶ 这表明物质微观结构与宏观结构不同，不能从宏观世界规律直接推广到微观来认识微观世界的规律性。

粒子物理的诞生

- ▶ 二十世纪以来，物理学在探索物质微观结构基本规律方面不断地取得进展。
- ▶ 二十世纪初，研究原子的相互作用和原子的内部结构，产生了原子物理学。
- ▶ 从二十世纪初到三十年代，探索物质微观结构的前沿学科是原子物理学；
- ▶ 三十年代到四十年代是原子核物理学；
- ▶ 五十年代到现在是粒子物理学。
- ▶ 下一步。。。

More is Different!

- ▶ 物质世界是有层次的，反映物质世界的物理学规律也是有层次的。
- ▶ 每一层次的物理都植根于更深层次的物理学，同时每一层次的物理规律又不能还原为更深层次物理规律的简单积累和叠加。
- ▶ 每个层次的物理都在真实的意义上不可穷尽。
- ▶ 原子物理学、原子核物理学、粒子物理学这三个学科反映了物质微观结构的不同层次，每一层次物质运动规律有其特有的特点。
- ▶ **Physics at different scales never talk to each other!**

物理能量标度

探索物质微观结构的前沿学科和微观粒子能量变化尺度有关

- ▶ 原子物理学的能量变化尺度是电子伏 (eV);
- ▶ 原子核物理学的能量变化尺度是兆电子伏 ($\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$);
- ▶ 粒子物理学的能量变化尺度是吉电子伏 ($\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$) 以上, 甚至太电子伏 ($\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)。

探索物质微观结构前沿学科发展的特点

- ▶ 探索物质微观结构前沿学科的发展有一些共同的特点。
- ▶ 它们研究的对象都是当时人类认识的微观最小客体，研究的内容包括互相联系的两个方面：
 - 微观最小客体的性质、运动、相互作用、相互转化的规律；
 - 微观最小客体内部结构规律。
- ▶ 原子物理学从一开始就是从研究原子结构问题展开的，也就是说，上述两个方面紧密联系同时开展起来。原子核物理学也是从一开始就从研究原子核结构问题展开的。
- ▶ 粒子物理学则是研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科，是研究粒子内部结构规律的学科。

粒子物理学是四十年代开始从原子核物理学中分出来的，前期的发展大体上到五十年代。粒子物理学在六十年代取得了两个重大的突破性进展。

一个重大的突破性进展是强子结构理论的确立。

- ▶ 六十年代以前，粒子物理学中并没有得到显示粒子有内部结构的直接实验证据，理论上对粒子的处理是把粒子看作一个“点”来处理的，并且取得很大的成功。
- ▶ 这样粒子物理学在当时研究的主要是场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律。
- ▶ 六十年代中，高能物理实验的进展给出了能够直接参与强相互作用的粒子即强子是有内部结构的直接证据；理论上建立了强子结构理论，并且得到实验的验证。

另一个重大的突破性进展是电磁相互作用和弱相互作用统一理论的成功。

电磁相互作用和弱相互作用的统一

- ▶ 在物理学的发展过程中，一直在探讨从实验研究中认识的各种相互作用之间的联系，是否可以把它们统一起来。
- ▶ 物理学上的第一次统一来自牛顿的万有引力以及牛顿三定律，发现天上人间满足统一的运动规律
- ▶ 第二次突破是在经典物理范围内把电相互作用和磁相互作用统一起来成为电磁相互作用。
- ▶ 六十年代中实现了第三次突破，实现了把电磁相互作用和弱相互作用统一起来成为电弱相互作用。
 - 由于电磁相互作用和弱相互作用的强度不同，力程不同，实验行为不同，把它们统一起来所遇到的困难和问题要比把电相互作用和磁相互作用统一起来成为电磁相互作用复杂得多。

“强子结构理论的确立”和“电磁相互作用和弱相互作用的统一”，这两个重大的突破性进展标志着粒子物理学的发展成熟。

从整个发展过程来看，粒子物理学从一开始就作为研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科而出现，但作为研究粒子内部结构规律的学科则实际上到了六十年代才充分发展起来。

2. 粒子世界的尺度特征

什么是粒子？

- ▶ 二十世纪初，物理学的发展弄清楚了原子的直径大体上是 $10^{-10}m$ 的量级，原子是由原子核和在原子核周围运动的电子组成的。
- ▶ 进一步的发展中又认识到原子核的直径是 $10^{-15}m$ 的量级，原子核又是由若干个质子和中子组成的。
- ▶ 电子、光子、质子、中子就是人们最早认识的一批基本粒子。
- ▶ 对基本粒子性质的实验研究主要是观察基本粒子在相互碰撞时的行为，碰撞能量愈高，能够辨认的空间距离愈小。如果用动量为 p 的粒子去碰撞别的粒子，这入射粒子运动的物质波的波长为 h/p ，可以用波长被 2π 除来估算这粒子碰撞所能辨认的距离。在当时，由于实验上没能测出这些基本粒子的大小，被认为可能是物质微观结构的最小单元，因此被称为基本粒子。

在这之后，凡是和这些粒子可以相互作用和相互转化并在当时的实验认识水平上被认为同属于物质微观结构最小层次的粒子，统称为基本粒子。

20 世纪 50 年代，加速器能量已经达到 3.3GeV ，这表明粒子碰撞所能分辨的空间尺度小到 0.06 费米的范围。随着实验能量的不断提高，实验和理论研究的发展，测出质子的电磁半径 (也就是电荷分布半径) 为 $0.8 \times 10^{-15}\text{m}$ 。以后又定出 π 介子的电磁半径也是同一量级，比质子略小。

这些结果显示，某些基本粒子肯定不能被看作是点粒子，它们有一定的大小并有内部结构。加速电子的高能碰撞实验却表明，尽管能量不断提高，如现在已经提高到 10^2GeV 的量级，但仍然完全可以把电子当作点粒子来对待。这表明如果电子的半径不为零的话，其值应小于 10^{-18}m 。这些进展显示，已有的基本粒子并不属于同一层次。因此，现在已经把基本粒子改称粒子，基本粒子物理学改称粒子物理学。

粒子运动的特点

粒子物理学是研究场和粒子的性质、运动、相互作用、相互转化规律的学科，是研究粒子内部结构规律的学科。粒子的运动性质有其特有的特点，主要表现在三点上：

1. 所有的粒子都是微观尺度的客体，都具有量子性；
2. 粒子运动时，速度的变化常达到可以和光速相比拟的量级，相应能量的变化常达到相当于甚至远大于粒子静止能量的量级，运动是相对论性的；
3. 粒子运动时，常表现出粒子之间的相互转化，粒子数目是可变的，反映出自由度数是可变的。

粒子物理学中所研究的物理规律必然是既能反映微观粒子的量子性，又能反映高速运动的相对论性，还能体现粒子可以产生或湮没的过程。

问题：人体内就存在接近光速的运动, 在哪里?

理论物理基础

- ▶ 量子性和相对论性要求对粒子运动规律的理论描述必须在量子力学和相对论的基础上。
- ▶ 自由度数可变要求理论描述应该以具有无穷多自由度的系统即“场”的理论为基础。

能同时体现上述三方面特点的是相对论性量子场论:

微观	高速	粒子数可变
量子性 h	相对论性 c	无穷多自由度
量子力学	相对论	场论

理论描述的基础



相对论性量子场论

自然单位制

粒子物理研究中所遇到的物理量，都是有直接微观含义的物理量，或者是通过统计性质和微观含义相联系的物理量。这些量都可以通过几个基本的物理量表达出来，基本物理量及其单位的不同选取，就构成了不同的单位制。粒子物理学中常常采用自然单位制。

微观物理学中涉及的基本物理量原来有长度、时间、质量、电荷、温度等五种。为了减少独立的基本物理量的数目，规定以真空的介电常数为无量纲的数 1 来定义电荷，从而使电荷不再是基本的物理量。利用 Boltzmann 常数

$$\begin{aligned}k_B &= (1.3806503 \pm 0.0000024) \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \\ &= (8.617342 \pm 0.000015) \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1},\end{aligned}$$

规定其值为无量纲的 1。这样温度和能量将具有相同的量纲，可以用同一单位来度量，这时原有的温度和能量的换算关系为

$$1\text{eV} = (11604.506 \pm 0.020)\text{K}$$

- ▶ 利用真空光速 $c = 2.99792458 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$, 规定其值为无量纲的 1。这样时间和长度将具有相同的量纲, 可以用同一单位来度量, 这时原有的时间和长度的换算关系为

$$1s = 2.99792458 \times 10^8 m$$

- ▶ 利用 Planck 常数

$$\begin{aligned} \hbar &= (1.054571596 \pm 0.000000082) \times 10^{-34} J \cdot s \\ &= (6.58211889 \pm 0.00000026) \times 10^{-22} \text{MeV} \cdot s. (1) \end{aligned}$$

规定其值为无量纲的 1, 则时间和能量的倒数将具有相同的量纲, 可以用同一单位来度量, 这时原有的时间和能量单位的关系为

$$1(\text{MeV})^{-1} = (6.58211889 \pm 0.00000026) \times 10^{-22} s$$

自然单位制: $\hbar = c = k_B = 1$

在这些规定下, 只剩一种独立的量纲, 它可以由长度、时间、能量或其它任何一种有量纲的物理量中选取。在粒子物理学中通常选质量 (能量) 为基本量纲, 质量和能量的单位用 GeV 或 MeV。

在自然单位制中各物理量的量纲如下表所示:

- ▶ 量纲 = M^0 : 速度, 角动量, 电荷, ...
- ▶ 量纲 = M : 质量, 能量, 动量, 温度, ...
- ▶ 量纲 = M^{-1} : 长度, 时间, ...
- ▶ 量纲 = M^{-2} : 截面,

在自然单位制中, 有时又采用费米 (fm) 作为长度的单位, 它与 GeV 的关系为:

$$1 \text{ fm} = (5.06773124 \pm 0.00000020) \text{ GeV}^{-1}$$

示例

例如在能量高达 60 GeV 的电子碰撞实验中的运动行为仍然和电子是一个点状的带电粒子的行为相符合，这样给出电子的电磁半径应小于 R_0 。

R_0 可以由能量为 $E = 60 \text{ GeV}$ 的粒子的波长来估计。由于电子的静止质量约为 $m = 0.511 \text{ MeV}$ ，远小于能量，粒子的动量可以估计为

$$p = \sqrt{E^2 - m^2} \approx 60 \text{ GeV}.$$

相应的约化 Compton 波长为

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{p} = \frac{1}{60 \text{ GeV}} \\ &= 0.0033 \text{ fm} = 3.3 \times 10^{-18} \text{ m}.\end{aligned}$$

由此给出电子的电磁半径应小于 $3.3 \times 10^{-18} \text{ m}$ 。

示例：耦合常数

- ▶ 精细结构常数 α 为无量纲量，其值为 $\alpha^{-1} = (137.03599976 \pm 0.00000050)$ 。 α 的表达式对应于两种定义电荷的方式，分别为 $\alpha = e^2/4\pi$ 和 $\alpha = e^2$ 。
- ▶ 采用了自然单位制后，理论表述时就不再出现普适量 k_B 、 c 、 \hbar ，这样处理时就可以大大简化。
- ▶ 仍然保留的普适量只剩下牛顿引力常量 G_N 。从牛顿引力常量可以给出一个质量量纲的量

$$\begin{aligned} M_P &= G_N^{-1/2} = (1.221047 \pm 0.000079) \times 10^{19} \text{ GeV} \\ &= (2.17671 \pm 0.00014) \times 10^{-8} \text{ kg} \end{aligned}$$

称为 Planck 质量，这大约等于 1.3×10^{19} 个质子的质量，是一个很大的量。

3. 粒子相互作用

场论中场和粒子的基本图象

量子场论给出了一个新的基本物理图象，概括如下：

1. 每种粒子对应一种场，对应各种不同粒子的场在空间中相互重叠地充满全空间。例如：

光子	电子	中微子	介子	质子	中子
电磁场	电子场	中微子场	介子场	质子场	中子场

2. 场的能量最低状态称为**基态**。场的激发状态表现为出现相应的粒子，场的不同激发状态表现为粒子的数目和运动状态不同。例如，电子场的激发状态可以表现为一个电子，也可表现为多个电子。场处于基态时由于不能释放出能量，不能输出信号，从而不表现出直接的物理效应，亦即不表现为出现粒子。因此场和粒子之间，场是更基本的，粒子只是场处于激发状态的表现。

在物理学的发展过程中，人们对于物质存在形式的认识也是在不断变化的。

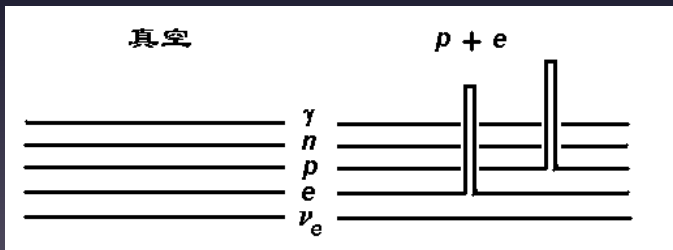
- ▶ 最初认识微粒是物质存在的基本形式，微粒在空间占有一定有限的体积，有不可入性。微粒有质量，有能量，有动量，有角动量。
- ▶ 后来人们又认识到场不能只看作是为了描述物理规律方便而引入的概念，场本身也是物质存在的基本形式。场也有质量，有能量，有动量，有角动量，这些性质和微粒是一样的。
- ▶ 但是场是充满全空间的，没有不可入性，这些性质和微粒不一样的。到这时，微粒和场被认为是物质存在的两种基本形式。
- ▶ 现在量子场论则明确给出，物质存在的两种形式中，场是更基本的，粒子只是场处于激发状态的表现。

3. 一般说来，场用复量描写，与此相应，场的激发也用复量描写。

- ▶ 互为复共轭的两种激发状态表现为粒子和反粒子互换的两种物理状态。例如，电子场的一种激发状态表现为一个电子，与之成复共轭的激发状态表现为一个能量相同的正电子。
- ▶ 如果某场用实量描写，与此相应，场的激发也用实量描写，这时复共轭就是它自身，粒子就是它自身的反粒子。

4. 所有的场都处于基态时为物理真空。

- ▶ 由此可见，真空并不是“真”的“空”无一物。真空态时，全空间充满各种场，只是由于所有场都处于能量最低状态而不可能表现出任何释放出能量从而给出信号的物理效应。
- ▶ 用示意图来描绘场论的基本物理图象，用一条线代表一种场，水平直线代表场处在基态，水平线上的隆起峰代表场的激发，表现为一个粒子。左边为真空，即所有场都处于基态的情形，右边为有一个质子和一个电子的状态。



场论中相互作用的基本图象

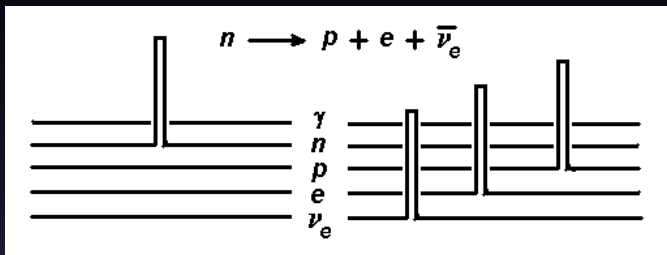
- ▶ 相互作用存在于场之间，无论是处于基态还是处于激发态的场都同样地与其它场相互作用。
- ▶ 粒子是场处于激发状态的表现，因此粒子间的相互作用来自场之间的相互作用。场之间的相互作用是粒子转化的原因。

场论对粒子间的相互作用的机理给出了清楚的图象。现在考虑中子的衰变过程 ($n \rightarrow pe^{-}\bar{\nu}$)。

- ▶ 自由中子为什么会自动衰变？
一个自然的回答是中子通过相互作用而衰变。
- ▶ 再问中子和谁相互作用？
自然的回答是中子和质子、电子以及中微子相互作用。
- ▶ 然而当中子存在时，质子、电子以及中微子还不存在。而当质子、电子以及中微子存在时，中子却已经不存在了。中子和质子、电子以及中微子没有一个时刻同时存在，它们之间又如何相互作用呢？

场论框架对中子衰变的解释

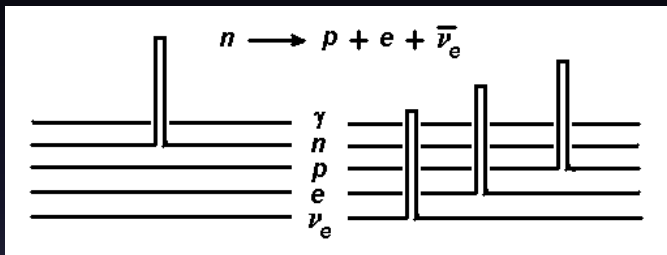
场论中自然地解决了上述的物理图象和物理概念上的矛盾



- ▶ 开始时，中子场处于激发状态，表现为存在一个中子，而质子场、电子场和中微子场则处于基态，表现为没有质子、电子和中微子（或相应的反粒子）。

场论框架对中子衰变的解释

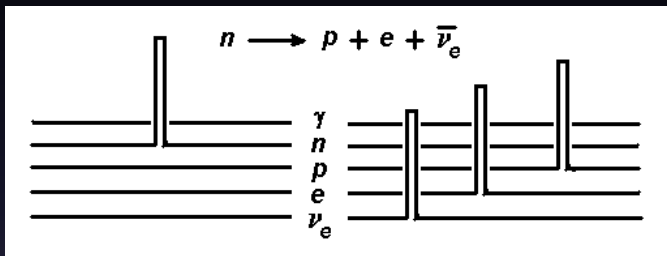
场论中自然地解决了上述的物理图象和物理概念上的矛盾



- ▶ 经过中子场与质子场、电子场和中微子场之间的弱相互作用，中子场可以跃迁到基态把激发能量传过去而引起质子场、电子场和中微子场的激发。
- ▶ 表现为中子消失而产生了一个质子、一个电子和一个反中微子。这就是中子衰变过程的场论图象。

场论框架对中子衰变的解释

场论中自然地解决了上述的物理图象和物理概念上的矛盾



- ▶ 在这个图象中，衰变过程得以发生的原因是场之间的弱相互作用。
- ▶ 正因为中子场与质子场、电子场和中微子场之间存在弱相互作用的联系，才使中子场的激发状态的改变引起质子场，电子场和中微子场激发状态的改变而表现为中子衰变过程。

四种基本相互作用

实验上现已确知粒子之间的相互作用有四种：

引力相互作用	弱相互作用
电磁相互作用	强相互作用

- ▶ 这些相互作用都是随着作用的距离增加而减弱：
 - 引力相互作用力和电磁相互作用力随着距离的平方成反比而变化，属于长程力；
 - 弱相互作用力和强相互作用力则随着距离更快地减弱，是短程力。
- ▶ 相互作用力程反映远程相互作用能达到的范围，与当距离增大时相互作用减弱的行为有关，并不与近距离时相互作用强弱变化的行为有明显的依赖关系。
- ▶ 场论的研究给出，远距离的基本相互作用都是通过交换媒介粒子来实现的。例如电磁相互作用就是通过交换光子来实现的。

正由于作用力程的差别，在宏观物理现象中，人们早就认识到了引力相互作用和电磁相互作用，而弱相互作用和强相互作用则是到了原子核物理学中才被直接认识到它们的存在。

因为质子是一种可以同时参与所有相互作用的粒子，所以我们采用质子作为代表来讨论四种相互作用的比较。

- ▶ 考虑两个质子相距 $r = 2.5 \times 10^{-15}m$ ，这是原子核内相邻两个核子的典型距离。这时两个质子之间四种相互作用的强度表现出数量级上的明显差别。
- ▶ 还可以采用在同一入射动量 $p_L = 100 \text{ GeV}$ 下，四种相互作用典型反应过程的反应截面之比来标志相互作用强度之比。

强、弱、电磁、引力相互作用强度比较

	强作用	电磁作用	弱作用	引力作用
力程	10^{-15} m	∞	10^{-18} m	∞
宏观表现	无	有	无?	有
作用强度	0.15	0.0073	6.34×10^{-10}	5.9×10^{-39}
典型反应	π^+p	γp	νp	无
截面 (mb)	25	0.11	6.7×10^{-8}	
媒介粒子	介子, 胶子	光子 (γ)	W^\pm, Z 粒子	引力子?
自旋	0, 1	1	1	2

强相互作用

强相互作用的原始媒介粒子是八种胶子，它们传递的原始相互作用称为色相互作用，实验上看到的强相互作用是色相互作用的剩余作用。

这情况类似于分子之间的 Van der Waals 力，它的原始来源是电磁相互作用，但即使是中性分子之间也可以有 Van der Waals 力，这是因为它是复杂电磁相互作用的剩余作用，不能简单的归结为交换一个光子。

同样地强相互作用也不能简单的归结为交换一个胶子，特别是在能量不是非常高时，强相互作用的媒介粒子主要是介子。

现在实验上还没有观察到自由胶子，并且现有理论也认为单个自由胶子不能够独立存在，只能存在于强子内部或在反应过程中出现并起作用而被间接察觉到。

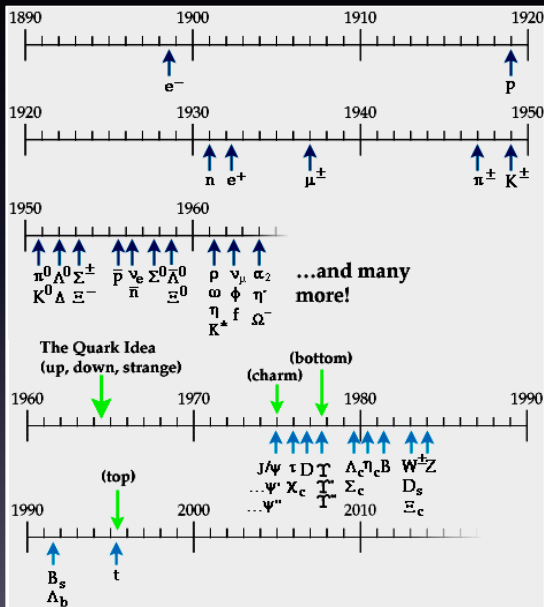
规范相互作用——本课程的重点

胶子、光子、 W^+ 、 W^- 、 Z^0 粒子和引力子都是规范粒子，它们传递的相互作用都是规范相互作用。

- ▶ 胶子的质量为零，原则上每个胶子有两个独立的极化状态。
- ▶ 光子的质量为零，它有两个独立的极化状态，它传递的是长程力。
- ▶ 引力相互作用远比其它相互作用要弱，尽管在宏观范围内对引力相互作用已经研究得相当清楚，但是在粒子物理学范围里，还没有能直接对引力相互作用进行实验研究，当然也还没有能直接从实验中得到引力子存在的证据。
- ▶ 引力子如果存在的话，按现有理论，它的质量也为零。虽然它的自旋应为 2，但仍然只有两个独立的极化状态，它传递的也是长程力。
- ▶ W^+ 、 W^- 、 Z^0 粒子的质量都很重，自旋为 1，都有三个独立的极化状态，并且由于质量都很重，传递的是力程很短的短程力。

4. 自然界的基本粒子

自然界基本粒子是随时间演化的



自然界中已知的基本粒子

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	γ photon
	d down	s strange	b bottom		
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau		
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	W W boson
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		
					GAUGE BOSONS

标准模型中的物质场

标准模型中基本“物质”场是点粒子、自旋为 1/2 的费米子

标准模型中共有三代费米子：

每一代都是其他的复制品，仅质量不同而已。

	轻子			夸克		
		Q	M (GeV)		Q	M (GeV)
第一代	e^-	-1	0.0005	d	$-1/3$	0.3
	ν_1	0	~ 0	u	$+2/3$	0.3
第二代	μ^-	-1	0.106	s	$-1/3$	0.5
	ν_2	0	~ 0	c	$+2/3$	1.5
第三代	τ^-	-1	1.77	b	$-1/3$	4.7
	ν_3	0	~ 0	t	$+2/3$	172

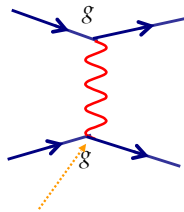
我们不知道为什么有三代费米子？是否只有三代？

标准模型中的“力”

力的传播源于交换自旋为 1 的规范玻色子

★ Forces mediated by the exchange of **spin-1 Gauge Bosons**

Force	Boson(s)	J^P	m/GeV
EM (QED)	Photon γ	1 ⁻	0
Weak	W^\pm / Z	1 ⁻	80 / 91
Strong (QCD)	8 Gluons g	1 ⁻	0
Gravity (?)	Graviton?	2 ⁺	0



- Fundamental interaction strength is given by charge g .
- Related to the dimensionless coupling “constant”

α

e.g. QED $g_{em} = e = \sqrt{4\pi\alpha\epsilon_0\hbar c}$

(both g and α are dimensionless,

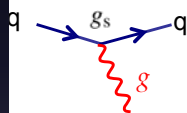
★ In Natural Units $g = \sqrt{4\pi\alpha}$ but g contains a “hidden” $\hbar c$

★ Convenient to express couplings in terms of α which, being genuinely dimensionless does not depend on the system of units (this is not true for the numerical value for e)

标准模型中的相互作用顶点

- ★ Interaction of **gauge bosons** with **fermions** described by SM vertices
- ★ Properties of the **gauge bosons** and **nature of the interaction** between the bosons and fermions determine the properties of the interaction

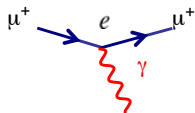
STRONG



Only quarks
Never changes
flavour

$$\alpha_s \sim 1$$

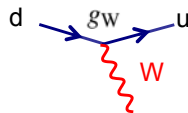
EM



All charged
fermions
Never changes
flavour

$$\alpha \simeq 1/137$$

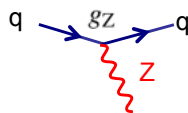
WEAK CC



All fermions
Always changes
flavour

$$\alpha_{W/Z} \sim 1/40$$

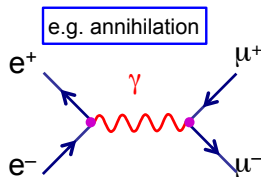
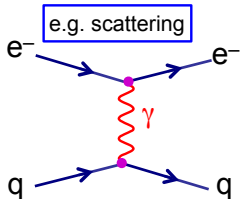
WEAK NC



All fermions
Never changes
flavour

费曼图

★ Particle interactions described in terms of Feynman diagrams



★ IMPORTANT POINTS TO REMEMBER:

- “time” runs from left – right, **only** in sense that:
 - ◆ LHS of diagram is initial state
 - ◆ RHS of diagram is final state
 - ◆ Middle is “how it happened”
- anti-particle arrows in $-ve$ “time” direction
- Energy, momentum, angular momentum, etc. conserved at **all interaction vertices**
- All intermediate particles are “virtual”
i.e. $E^2 \neq |\vec{p}|^2 + m^2$ (handout 3)

