

中国科学院大学研究生课程

粒子物理基础

中国科学院高能物理研究所
理论物理研究室

陈 莹

电话: 13552559685

Email: cheny@ihep.ac.cn

课程介绍

- **课程内容:**

主要讲解物质是由什么构成的，构成物质的最小单元是如何相互作用如何相互转化的。

- **教学目标:**

通过本课程的学习，希望学生了解粒子物理的标准模型。按目前的认识水平，构成物质的最小单元是夸克和轻子；自然界存在强相互作用，电磁相互作用，弱相互作用和引力相互作用。此外课程还将跟踪粒子物理实验的最新进展。学生可以通过本课程的学习，为进一步从事粒子物理的研究打下坚实的基础。

- **课程要求:**

电动力学、量子力学、狭义相对论基础。

内容设置

第一章 引言

粒子物理是一门什么样的学科？为什么研究粒子物理？

粒子物理学的历史

自然界的四种基本相互作用

粒子的分类

第二章 粒子的运动学性质和粒子物理实验

运动性质：粒子的质量、寿命、电荷、自旋、磁矩等；

运动描述：能量和动量、实验室系和质心系、

运动学不变量、Dalitz图等。

n 体相空间：

第三章 对称性和守恒定律

连续对称性——Neother 定理

自旋和轨道角动量；同位旋概念的引入

相加性量子数：奇异数、重子数、粲数、底数，同位旋第三分量

离散对称性——相乘性量子数：

正反粒子共轭变换 (C)、G变换、空间反射变换 (P)

CP变换 (CP) ——中性K介子系统、全同粒子交换变换

第四章 强相互作用和强子性质

夸克模型：组成物质的基本单元——夸克

介子和重子：按照SU(3)对称性的表示分类（十重态，八重态）

重夸克和重夸克偶素

深度非弹性碰撞和部分子模型

强相互作用的描述——量子色动力学（色禁闭和渐近自由）

第五章 电弱统一理论——“标准模型”(Standard Model)

弱相互作用 β 衰变

三代轻子：轻子的普适性，轻子数守恒

弱相互作用低能有效理论——费米 V-A 理论

标准模型——电弱统一理论+Higgs机制（质量来源）
(+量子色动力学)

主要参考书

1. 章乃森, 《粒子物理学》, 科学出版社, 北京, 1985。
2. 唐孝威等, 《正负电子物理》, 科学出版社, 北京, 1995。
3. 高崇寿, 曾谨言, 《粒子物理和核物理讲座》, 高教出版社, 北京, 1994。
4. D.H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*,
Addison- Wesley Publishing Company Inc, 1972, 1982, 1987, 2000.
5. 高崇寿, 《群论及其在粒子物理学中的应用》, 高教出版社, 北京, 1992。
6. 粒子数据表 *Review of Particle Physics* (Particle Data Group)
(<http://pdg.lanl.gov>)
7. B.R. Martin and G. Shaw, *Particle Physics* (3rd edition),
A John Wiley and Sons, Ltd, Publication

第一章 引言

粒子物理是一门什么样的学科？

为什么研究粒子物理？

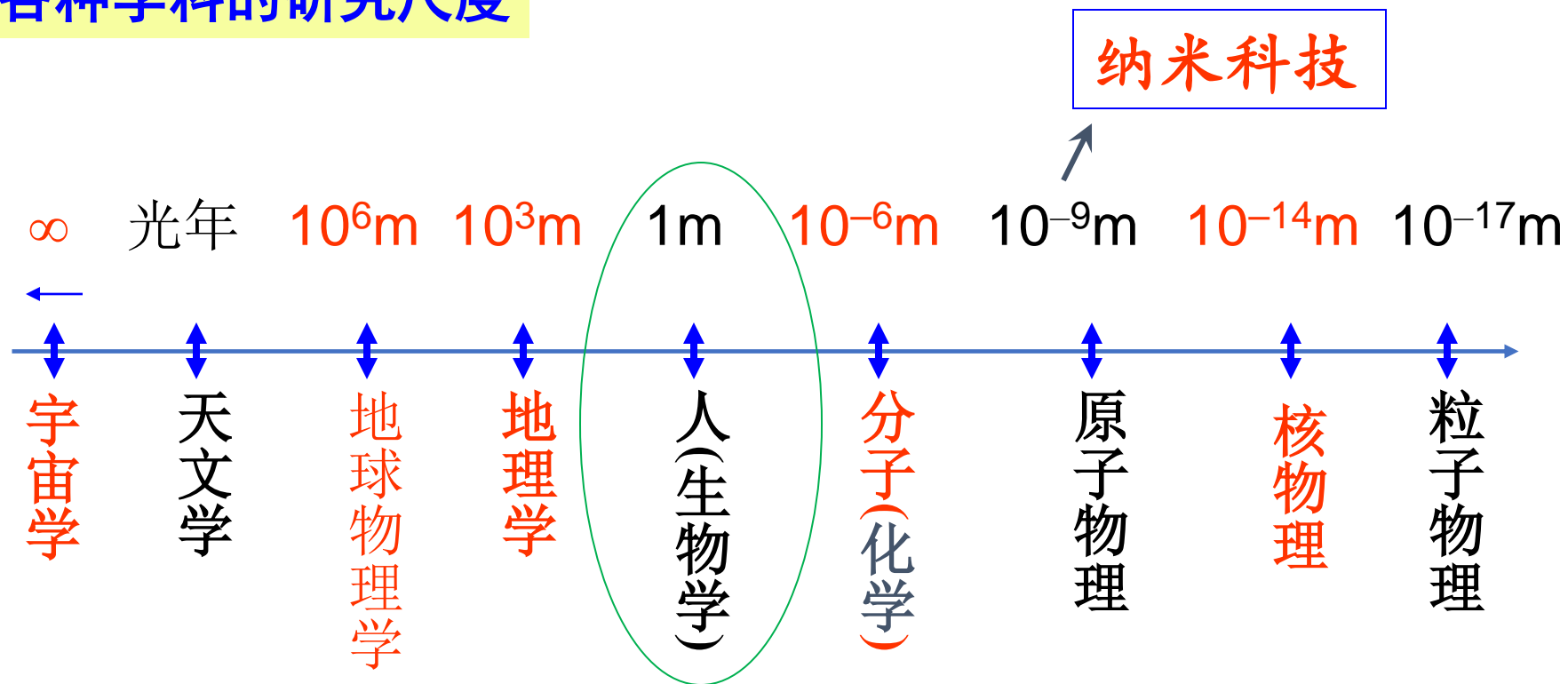
粒子物理学的历史

自然界的四种基本相互作用

粒子的分类

第一节 粒子物理是一门什么样的学科

一、各种学科的研究尺度

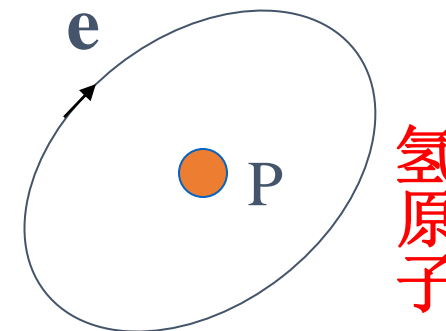


粒子物理是探索物质微观结构最前沿的学科。

1. 原子物理

原子是由原子核和电子组成的

原子的半径 $\sim 10^{-8}$ 厘米
原子核半径 $\sim 10^{-12}$ 厘米

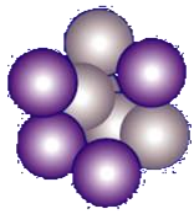


$$E_{bin}^e \sim 10 \text{ eV} \ll m_e \sim 0.5 \times 10^6 \text{ eV} = 0.5 \text{ MeV}$$

- 打碎原子需要大约**10eV**可以了-----电磁作用
- 研究原子内部构造及其规律的学科称为
“**原子物理**”（又称低能物理）---纳米科技
- 理论工具：**量子力学**（相对论和非相对论）
多体问题
微扰理论

2. 核物理

原子核有内部结构——



由**质子** (proton, 简记为 **p**) 和**中子** (neutron, 简记为 **n**) 构成。质子和中子合称核子 (**nucleon**, 简记为 **N**)。原子核中每个核子的平均结合能:

$$\bar{E}_{\text{bin}}^N \approx 10 \text{ MeV} = 10^7 \text{ eV} \ll m_p \sim 940 \text{ MeV}$$

$$\bar{E}_{\text{bin}}^N / E_{\text{bin}}^e \sim 10^6$$

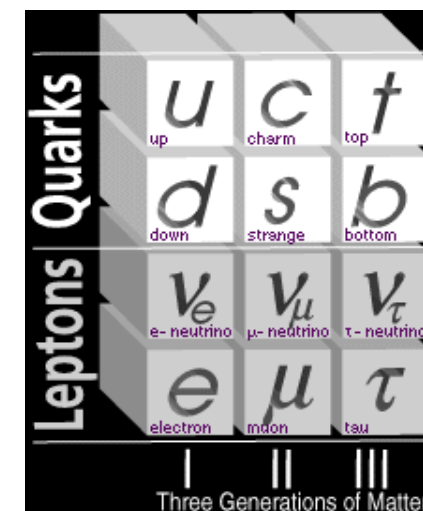
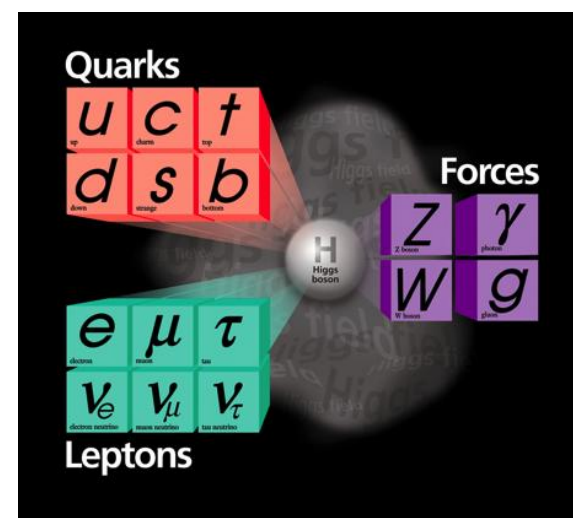
量子力学原理仍然可用于原子核, **但微扰理论**不能用了。

核理论不完整!

2. 粒子物理

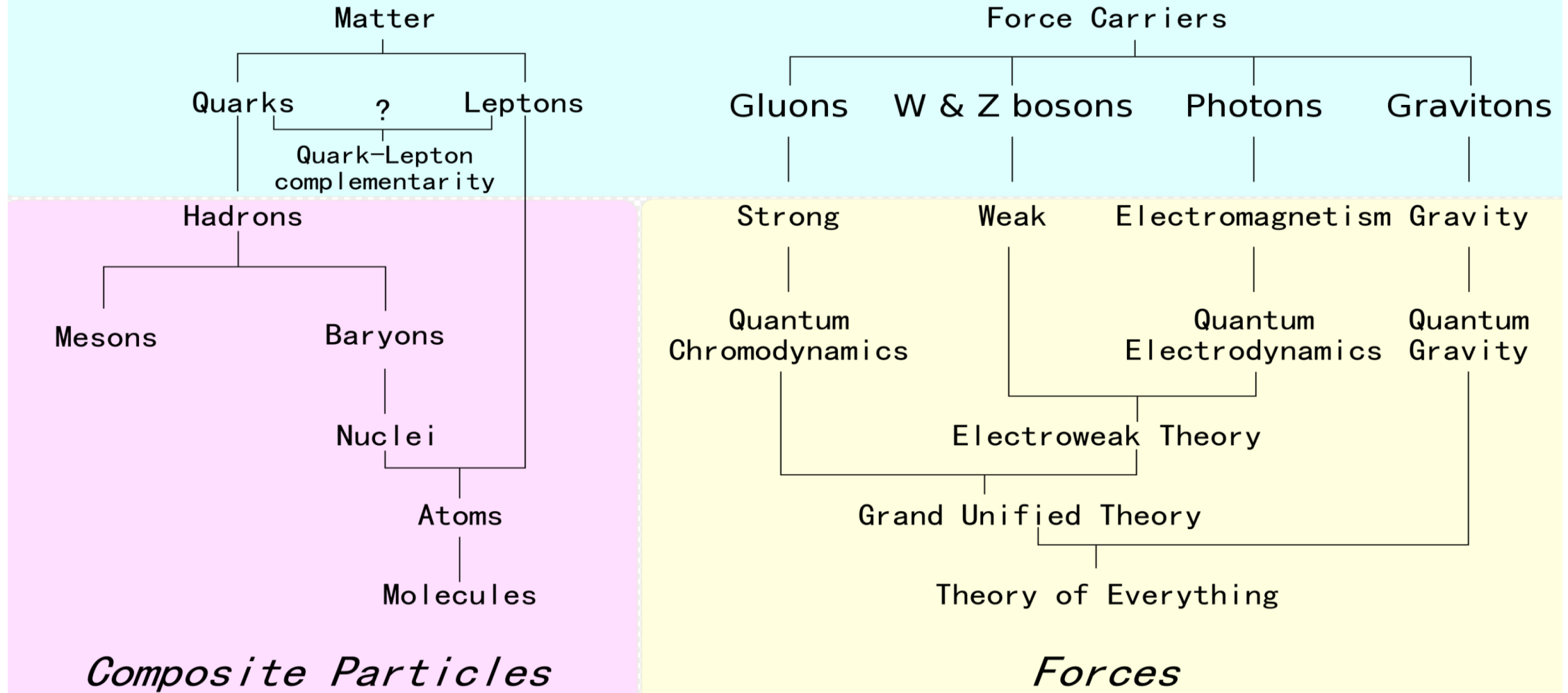
1947年前，我们只知道很少的“粒子”，如质子、中子、电子、 μ 子等，人们认为这些粒子就是构成物质的最小单元，称之为“基本粒子”。此后，在宇宙线实验和粒子加速器实验中发现了大量的粒子： π^\pm ， π^0 ， K^\pm ， K^0 ， K^0 ， Λ ， Σ ， Ξ ， Δ …约几百种。有的寿命很短，产生出来很快就衰变成别的粒子。

细致的实验和理论研究发现，这些粒子也有结构。粒子物理就是研究这些基本粒子的性质及其相互作用的学科。



标准模型中的基本粒子

Elementary Particles



第二节 粒子物理历史回顾

- 19世纪末20世纪初，麦克斯韦方程统一了电和磁。
- 科学家（包括物理大家）认为，物理学走到了尽头，只剩下修修补补的小事情。
- 但是蔚蓝的天空还有两朵“小小的乌云”：
 - 传播光的介质“以太”没有找到；
 - 黑体辐射与紫外灾难
- 但正是这两朵小小的乌云引发了物理学的革命——相对论和量子理论

- 几十年来高能物理实验研究和理论探索对提高人类认识水平做出了重大贡献。
- 从1901年开始颁发诺贝尔奖起，已有一百多位物理学家获得了诺贝尔物理奖。
- 其中有41位与粒子物理有关，是物理学中获诺贝尔奖最多的一门分支。

—— 物理学的20世纪

(一):粒子物理的萌芽(1895-1932)

- 1895年, W.K. Röntgen发现X射线(光子), 因此荣获1901年诺贝尔物理学奖。A.H. Becquerel, P. Curie和M. Curie发现了放射性, 共享了1903年的诺贝尔物理学奖。
- 1898年, J.J. Thomson证实了电子的存在, 由于对气体导电理论的贡献和实验研究的成果, 他荣获了1906年的诺贝尔物理学奖。
- 1905年, A. Einstein提出的光电效应使得光的“粒子”性——光子的概念被人们接受, 他因此获得了1921年的诺贝尔物理学奖。
- 1911年, E. Rutherford根据 α 被金属箔散射的实验现象提出原子的核式结构, 并因此获得诺贝尔化学奖
- 1913年, N. Bohr建立了原子的量子理论, 因此获得1922年的诺贝尔物理学奖。
- 1930年, W. Pauli根据原子核 β 衰变的实验提出了中微子的假设, 并由于他提出的泡利不相容原理荣获1945年诺贝尔物理学奖
- 1932年, J. Chadwick证实了中子的存在, 因此获得1935年诺贝尔物理学奖。同年C.D. Anderson在云雾室中发现了正电子, 由此获得1936年诺贝尔物理学奖
- 在此阶段, 基本粒子包括光子、正负电子、质子、中子和假设的中微子。

(二):粒子物理的发展(1932-1964)

- 1930年, E.O. Lawrence提出带电粒子加速的新原理——**回旋加速器** (Cyclotron)。他因此获得1939年的诺贝尔物理学奖。
- 1935年, Yukawa提出核作用力的唯象理论——**核力的介子理论**。1949年的诺贝尔物理学奖。
- 1936年, C.D. Anderson用云雾室发现了宇宙线中的**缪子** (μ)。
- 1938年, E. Fermi因研究**中子引起的各种反应**的贡献获得1938年的诺贝尔物理学奖。
- 1943年, O. Stern发展分子束方法的贡献和发现**质子的反常磁矩**获得1943年的诺贝尔物理学奖。
- 1947年, C.F. Powell利用乳胶照相法在宇宙线中发现的 **π 介子**, 获得1950年的诺贝尔物理学奖。
- 1948年, 美国的劳伦斯-伯克利实验室利用同步回旋加速器(Synchro-Cyclotron)**人工产生了 π 介子**。

- 1953年，F. Reines等探测到**中微子的存在**。同年，BNL新的加速器“Cosmotron”投入运行，证实了1947年在云室中发现的V形衰变的径迹是一种新的**“奇异”粒子**的产物。Gell-Mann和Nishijima给这类粒子指定了一个新的量子数“奇异数”。
- 1955年，W.E. Lamb和P. Kusch因在1947年实验发现**氢光谱的精细结构位移**（**Lamb Shift**）和**电子磁矩的精密测量**获得本年度的诺贝尔物理学奖。同年，E.G. Segre和O. Chamberlain在Berkeley的Bevatron上发现了**反质子**的存在，从而分享了1959年的诺贝尔物理学奖。
- 1957年，杨振宁和李政道发现**宇称不守恒**，并因此分享了1957年的诺贝尔物理学奖。
- 1960年，新的探测技术——**气泡室**在新粒子发现中的重大作用，发明者D.A. Glaser获1960年的诺贝尔物理学奖。

(三):粒子物理的成熟时期(1964至2000)

- 1964年, M. Gell-Mann等人提出强子结构的**夸克模型**。Gell-mann获1969年的诺贝尔物理学奖。同年, S.L. Glashow, S. Weinberg和A. Salam从规范理论出发建立的**弱电统一理论——标准模型**, 从而分享了1979年的诺贝尔物理学奖。V.L. Fitch和J.W. Cronin实验研究 K^0 介子的衰变, 观察到**CP (T) 对称性的破坏**, 因而分享了1980年的诺贝尔物理学奖
- 1965年, R.P. Feynman, J.S. Schwinger和朝永振一郎 (Tomonaga, Shinichiro) 对**量子电动力学理论**发展方面的贡献分享1965年的诺贝尔物理学奖。
- 1968年, L.W. Alvarez因发表了氢气泡室的数据分析从而发现了大量的**新的粒子态——共振态**荣获该年度的诺贝尔物理学奖。

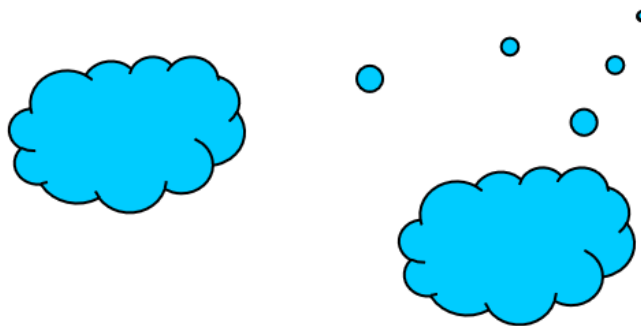
- 1973年，**弱作用中性流**在CERN的中微子试验中观测到。中微子实验在揭示和推进弱电统一理论及其发展方面有重要功绩，其开创者L. Lederman和J. Steinberger分享1988年的诺贝尔物理学奖。
- 1974年，丁肇中和B. Richter分别独立发现了新的 **J/ψ 粒子**，宣告了**粲(charm)夸克**的问世。他们分享了1976年的诺贝尔物理学奖。
- 1983年，C. Rubbia在正反质子对撞实验中找到了**弱作用的媒介粒子W和Z**，Rubbia 和S. van der Meer分享了1984年的诺贝尔物理学奖。
- 1979-1986年，正负电子对撞实验中，强子末态的**喷注分析**，为强相互作用的传播者——**胶子的存在**提供了实验证据。

(四):21世纪初的粒子物理

- 标准模型已经基本建立。
- 各种实验结果都与标准模型预言基本符合。
- 2012年，欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机观察到了类似标准模型的Higgs粒子，质量约为125 GeV,这是对标准模型正确性的有力支持。
- 中微子振荡实验确认中微子具有（微小）质量,这是目前唯一超出标准模型的实验现象。
- 2012年3月中美合作的中国大亚湾反应堆中微子实验精确测量了电子中微子和 τ 中微子的混合角，这是一个重大实验进展，对未来对中微子质量排序以及宇宙正反物质不对称等问题的研究有重要意义！
- 随着加速器能量的提高，新的实验难度越来越大 ----资金困难。
- 高能物理的未来？ ILC? CEPC/SPPC?

数朵乌云在飘荡：

- ♠ 物质的最小单元是什么？
- ♥ 质量的起源在哪里？
- ◆ 轻子和夸克为什么有三代？
它们的质量差别为什么那么大？
- ♣ 中微子质量究竟有多小？
- ♠ 正物质和反物质不对称？
- ♥ 有没有其它形式的物质——暗物质、暗能量？
(可见物质5%，暗物质27%，暗能量68%)
- ♣ Higgs物理？ CP破坏起源。。。
- ♣ 夸克禁闭？？



当前，高能物理的三个前沿——

1. 高能量前沿

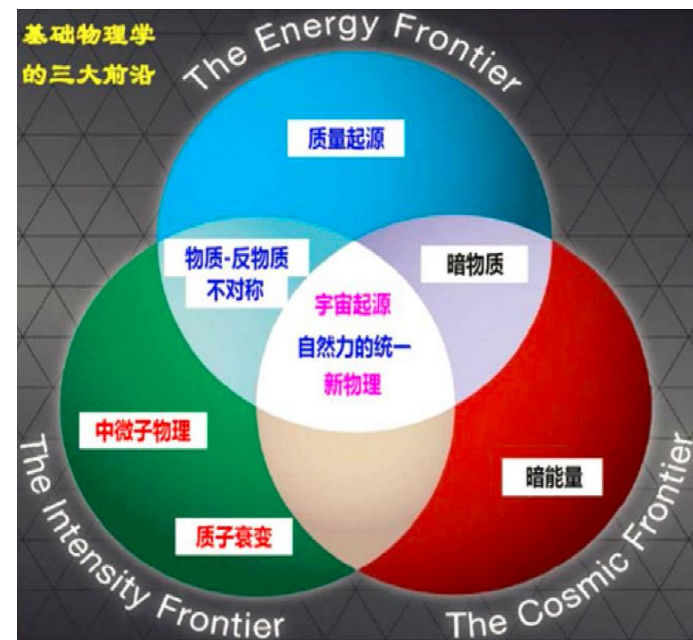
- 以欧洲核子中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）及其探测器（ATLAS, CMS, LHCb）的物理实验为代表
- 中国正在讨论的环形正负电子对撞机（CEPC）

2. 高亮度前沿

- 在粲物理能区的BEPCII/BESIII, 在B物理能区的Belle II
- 中微子实验（美国TUNE, 中国大亚湾、江门中微子实验；muon反常磁矩测量等）

3. 宇宙学前沿

宇宙线测量，宇宙起源和演化、暗物质暗能量等



第二节 自然界的四种相互作用

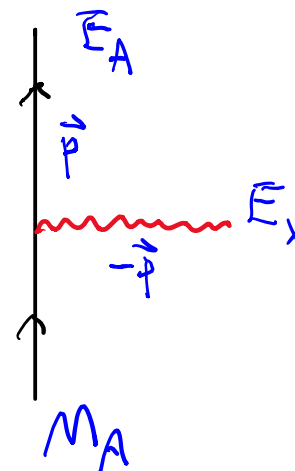
- 物质是有结构的；组成物质的基本单元是粒子。就目前所知，自然界支配粒子运动和相互转化的相互作用有四种：电磁相互作用，引力，强相互作用和弱相互作用。
- 相互作用的描述：
 - 源（荷）——决定相互作用的种类、强弱等性质；
 - 力程：相互作用的有效作用范围；
 - 媒介：从场论角度来看，相互作用是通过相互作用场的量子——媒介粒子来传递。

相互作用力程 (量子力学版本——测不准原理)

$$\Delta E = E_X + E_A - M_A c^2 \rightarrow \begin{cases} 2|\vec{p}|c & |\vec{p}| \rightarrow \infty \\ m_X c^2 & |\vec{p}| \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$\Delta E \geq m_X c^2$$

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar \rightarrow \Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \sim \frac{\hbar}{m_X c^2} \quad R \sim c \Delta t \leq \frac{\hbar}{m_X c} \quad \text{康普顿波长}$$



$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

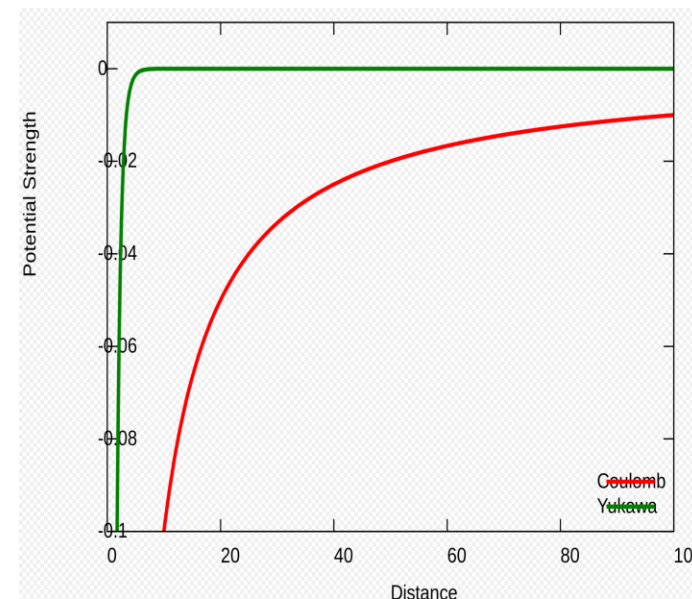
$$E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \quad \vec{p} \rightarrow -i\hbar \vec{\nabla}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi = c^2 \left(\nabla^2 - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \phi$$

静态势: $\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad \nabla^2 \phi(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) \phi(r) = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi(r)$

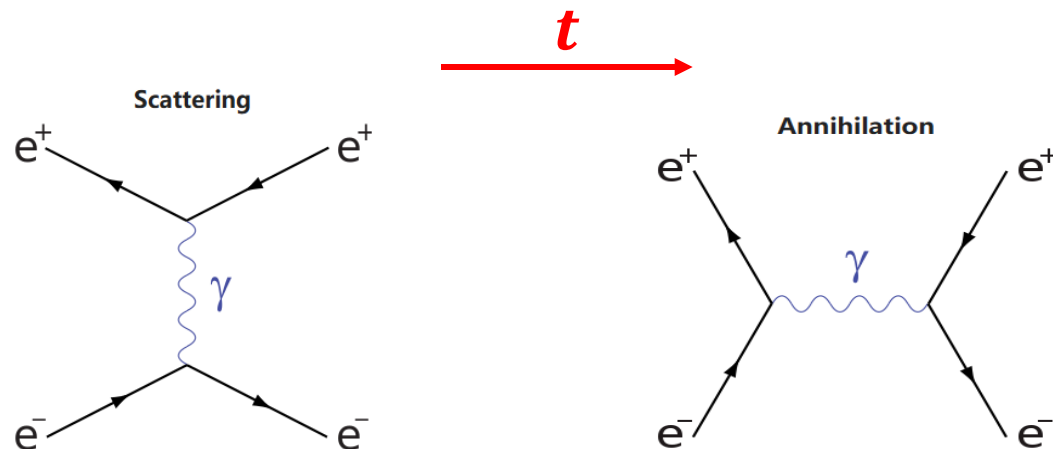
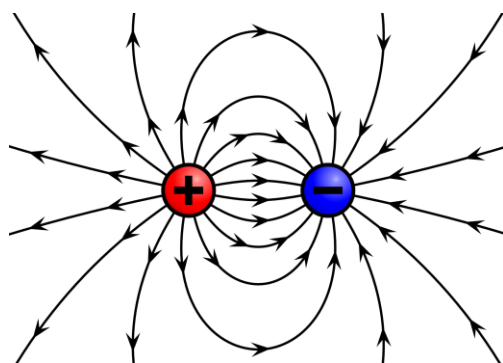
Yukawa 势

$$\phi(r) = -\frac{g_0^2}{4\pi r} e^{-\frac{r}{R}}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$



(一) 电磁相互作用

- 我们日常生活中最常见到的相互作用从本质上说都起源于电磁相互作用。
- 电磁相互作用的荷是电荷（精细结构常数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137}$ ）。
- 电磁相互作用通过光子传递。



- 电磁相互作用是长程相互作用，即力程 $L = \infty$

电磁相互作用 \rightarrow 麦克斯韦方程 \rightarrow 量子电动力学

(二) 引力

- 引力的“荷”是质量：

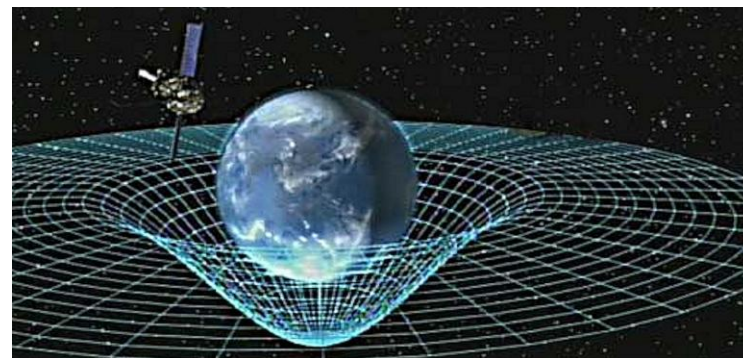
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

- 传递引力相互作用的媒介粒子是引力子——引力的量子化？
- 引力是长程相互作用，即力程 $L = \infty$ 。
- 广义相对论——引力的几何化——物质的存在引起时空弯曲。

如何协调？

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

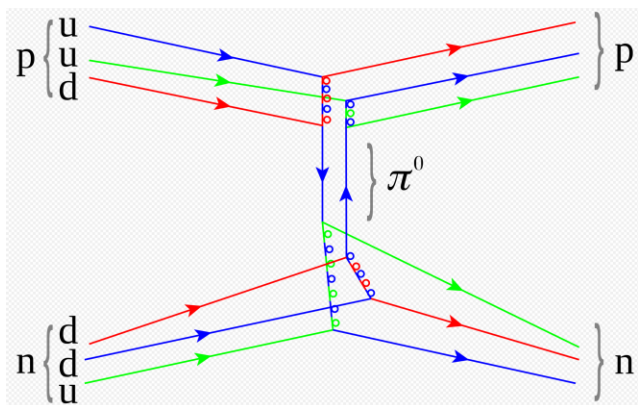
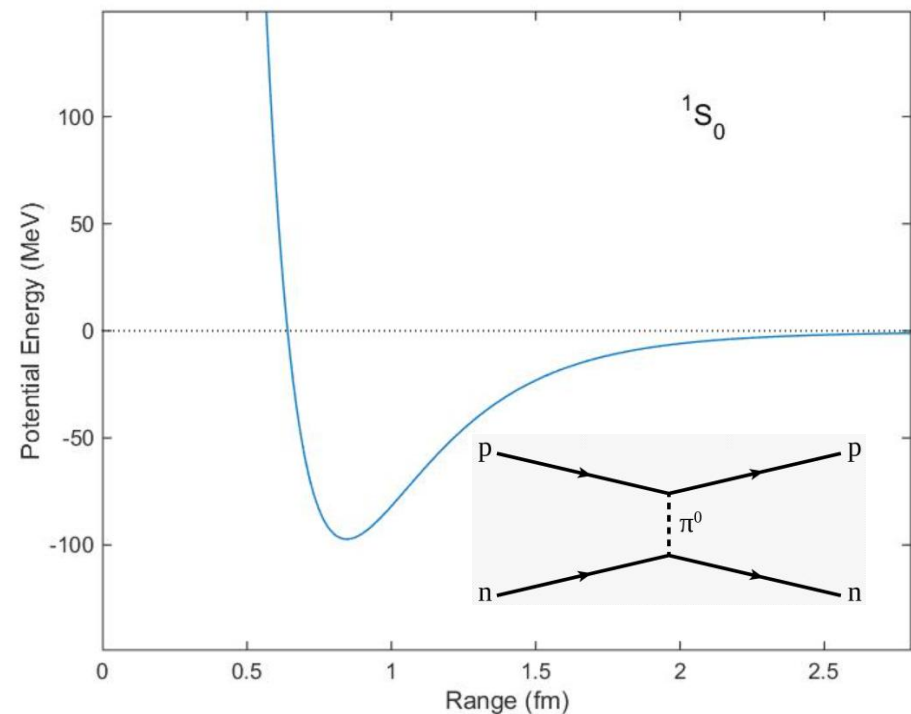
- ✓ $G_{\mu\nu}$: 爱因斯坦引力张量
- ✓ $g_{\mu\nu}$: 时空度规张量
- ✓ $T_{\mu\nu}$: 能动量张量
- ✓ Λ : 宇宙常数
- ✓ $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$: 爱因斯坦引力常数



引力相互作用 → 万有引力 → 广义相对论 → 量子化（超弦？）

(三) 强相互作用

- **核力**：核内核子间作用力可以抵消质子间电磁力的排斥作用而使核稳定存在，说明核子间有不同于万有引力和电磁力的新型相互作用力存在，而且作用强度很强。
- **强相互作用**：由粒子散射实验知道其强度大约比电磁力的强度大两个数量级，故称作强相互作用力。
- **量子色动力学**：目前认为，描述强相互作用的正确理论是量子色动力学。



核力示意图：

- ✓ 排斥心 ($r < 0.7 \text{ fm}$): **Pauli 不相容原理**
- ✓ Yukawa 吸引力 ($r > 0.8 \text{ fm}$)

$$V = -\frac{\alpha_s}{r} e^{-m_\pi r}, \quad \alpha_s \sim O(1)$$

注：在自然单位制 ($\hbar = c = 1$) 下，

强相互作用的荷和耦合常数 ($\pi N \rightarrow \pi N$ 弹性散射截面)

$$\sigma_{\pi N} \propto g_s^4 \sim \alpha_H^2 (4\pi \bar{\lambda}_N^2) \approx (10 \sim 100) \text{ mb} \quad \boxed{1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ bar} = 10^{-31} \text{ m}^2}$$

核子的康普顿波长 $\bar{\lambda}_N = \frac{\hbar}{m_N c} = \frac{1}{m_N} \sim (1 \text{ GeV})^{-1} \approx 0.2 \text{ fm},$

$$\alpha_H^2 \approx \frac{(10 \sim 100) \text{ mb}}{4\pi \bar{\lambda}_N^2} \approx \frac{(10 \sim 100) \text{ mb}}{4\pi \times (0.2 \text{ fm})^2} \approx \frac{(1 \sim 10) \text{ fm}^2}{0.5 \text{ fm}^2} \approx \mathbf{2 \sim 20}$$

$$\frac{\sigma_{\pi N}}{\sigma_{p\gamma}} \approx \frac{\alpha_H^2 (4\pi \bar{\lambda}_N^2)}{\frac{2}{3} \alpha^2 (4\pi \bar{\lambda}_N^2)} \approx \left(\frac{\alpha_H}{\alpha} \right)^2 \frac{3}{2} \sim \frac{10 \sim 100}{2 \times 10^{-4}}$$

$$\alpha_H^2 \sim \alpha^2 \cdot (10 \sim 100) \times 10^4 \times \frac{1}{3} \approx 2 \sim 20$$

$$\alpha_H \sim \mathbf{O(1)}$$

(四) 弱相互作用

- 弱相互作用最初是通过观察原子核的 β 衰变得来的
- 弱相互作用特征时间较长, 说明相互作用较弱:

$$\beta \text{ 衰变速率: } w_\beta \sim G_F^2 \frac{|\mathcal{M}_\beta|^2}{2\pi^3} \frac{E_0^5}{30}$$

$$\mu \text{ 衰变速率: } w_\mu = G_F^2 \frac{m_\mu^5}{192\pi^3}$$

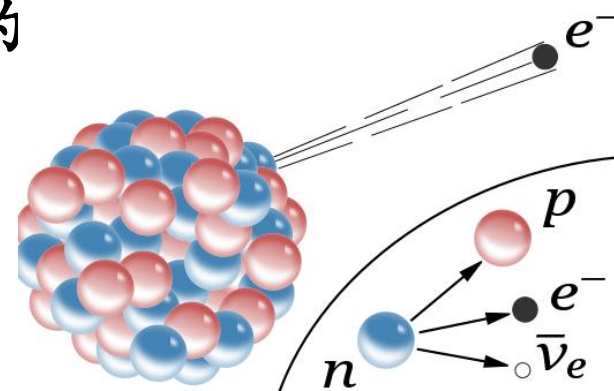
$$G_F \approx 1.13 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

用“弱荷”在相距核子康普顿波长 ($\bar{\lambda} = \frac{1}{m_N}$) 时的弱

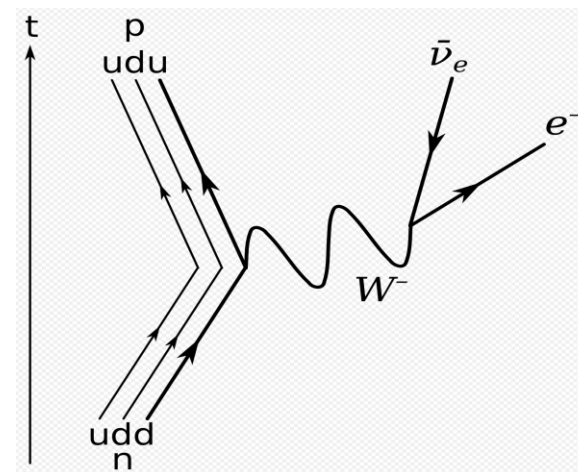
作用势能和核子的静止质量之比定义弱耦合常数 α_W

$$\alpha_W = \frac{g_W^2}{4\pi} \sim \frac{G_F}{\bar{\lambda}^2} = G_F m_N^2 \sim 10^{-5}$$

- 电弱统一理论: $SU(2) \times U(1)$ + Higgs 机制



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

质子是一种可以同时参与四种相互作用的粒子，所以我们采用质子作为代表来讨论四种相互作用的比较。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。其中 $M_p = 938\text{MeV}$ 是质子质量。

	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
源(荷)	色荷	电荷	弱超荷	质量
作用常数	$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi\hbar c}$	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	$\frac{G_F(M_p c^2)^2}{(\hbar c)^3}$	$\frac{G_N M_p^2}{4\pi\hbar c}$
作用强度	$O(1)$	1/137	1×10^{-5}	5×10^{-40}
媒介粒子	胶子	光子	W^\pm, Z 玻色子	引力子
力程	1 fm	∞	1/400 fm	∞
典型作用时间	$1 \times 10^{-23}\text{sec}$	$1 \times 10^{-16}\text{sec}$	$1 \times 10^{-10}\text{sec}$	——

第三节 粒子的分类

(一) 按相互作用分类

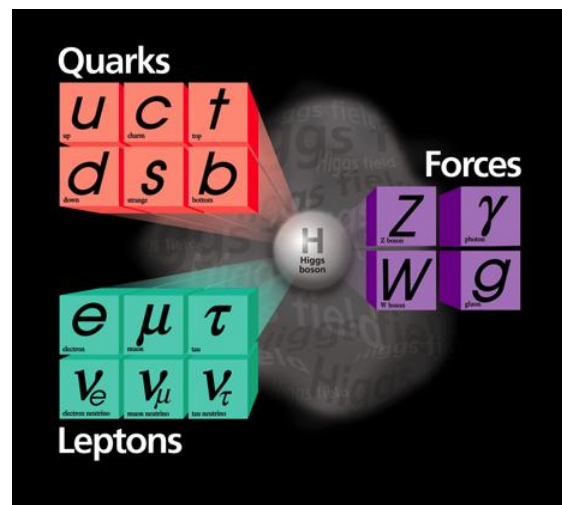
- 已经发现的粒子按它们参与各种相互作用的性质分类。
- **规范玻色子——传递相互作用的媒介粒子**。从场论语来说，相互作用可以通过定域规范场(gauge field)来描述，规范场的量子就是规范玻色子。粒子的相互作用就是通过交换规范玻色子来交换能量和动量等。

光子

引力子

胶子

W^{\pm}, Z 粒子



- **轻子**：不直接参与强相互作用的粒子，它们可以直接参与电磁相互作用和弱相互作用。现在发现的轻子共有六种，连同相应的反粒子共12种，它们的自旋都是1/2。

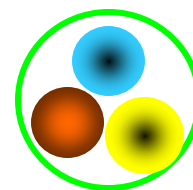
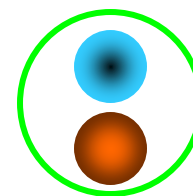
$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix},$$

- **强子**——直接参与强相互作用的粒子。它们又分为两类：

介子：自旋为整数，重子数为零的强子，如 $\pi, K, \rho, \omega \dots$

重子：自旋为半整数，重子数为1的强子 如 $p, n, \Lambda \dots$

- 现已发现的粒子绝大多数是强子。
- 强子也是目前粒子物理研究的重点对象之一。



- **Higgs粒子**——目前基本上已经被实验观测到。

在电弱统一理论中，为破缺 $SU(2) \otimes U(1)$ 对称性而人为引入了Higgs机制。这个机制通过引入基本标量场，成功地解决了规范玻色子和费米子的质量来源问题，同时预言了基本标量粒子——Higgs粒子的存在和它的质量。

(二) 按稳定性分类

- 稳定粒子和共振态

现已发现的粒子中，只有11种粒子可能是真正稳定粒子，这就是光子；三种中微子和它们的反粒子，电子，正电子，质子和反质子。

粒子物理学中并没有按粒子是否真正稳定来对粒子进行分类，因为虽然粒子是否真正稳定在实验上的表现是明显的，然而从粒子的内部属性来看，不一定是最重要的标志。

例如“ $e-\mu-\tau$ 疑难”源起于这三个带电轻子的相互作用性质上难以找到差异，然而从它们的寿命来看，电子是稳定的， μ 子的寿命是 $(2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6}s$ ， τ 子的寿命是 $(3.04 \pm 0.09) \times 10^{-13}s$ ，差别是明显的，而这些差别的来源是因为它们质量上的不同，粒子物理学中把粒子按衰变性质和行为分为稳定粒子和共振态两类：不能通过强相互作用衰变的粒子称为稳定粒子；可以通过强相互作用衰变的粒子称为共振态。

一般说来，通过强相互作用衰变的寿命短，通过电磁相互作用和弱相互作用衰变的寿命则要长得多，似乎可以用寿命的长短来区分稳定粒子和共振态。

然而实际情况要复杂得多。现已发现的粒子中，寿命最长的和寿命最短的粒子都属于稳定粒子。现已发现的最不稳定的稳定粒子是top 夸克。Z粒子和W粒子（它们都是弱衰变）。对于Z粒子，现在实验测得平均寿命为 $(2.59 \pm 0.3) \times 10^{-25} s$ 。

除了top 夸克，Z粒子和W粒子外，其它的稳定粒子的平均寿命都很长（ $\tau \geq 5.8 \times 10^{-20} s$ ）。现已发现的最稳定的共振态是Y(10355)粒子，它的平均寿命为 $2.53 \times 10^{-20} s$ ，远长于Z粒子的平均寿命。

(三) 夸克、轻子和媒介粒子——相互作用的基本自由度

- 强子是有结构的——强子是有夸克和反夸克（以及胶子？）构成的。

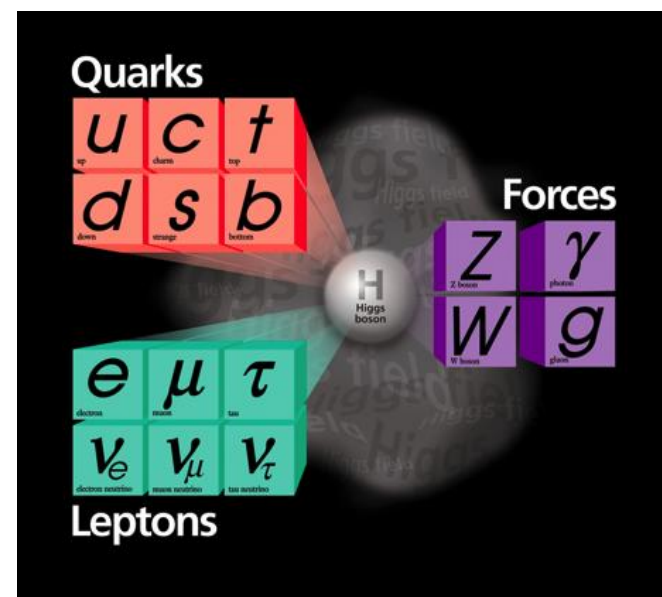
- 三代夸克：

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

- 三代轻子

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

- 媒介粒子： γ, W^\pm, Z, g



(五) 粒子物理理论研究的工具

- 微观 → 量子性 → 量子力学
- 高速(光速) → 相对论性 → 相对论
- 粒子数可变 → 自由度数可变 → 场论
→ 相对论性量子场论

1. 有效理论

- 牛顿力学是量子力学的低能有效理论
- 麦克斯韦电动力学是量子电动力学(QED)的低能有效理论
- 量子电动力学和费米弱相互作用是弱电统一理论的有效理论
- 标准模型(弱电统一理论+QCD)是 (?) 理论的有效理论?

2. 电弱统一理论

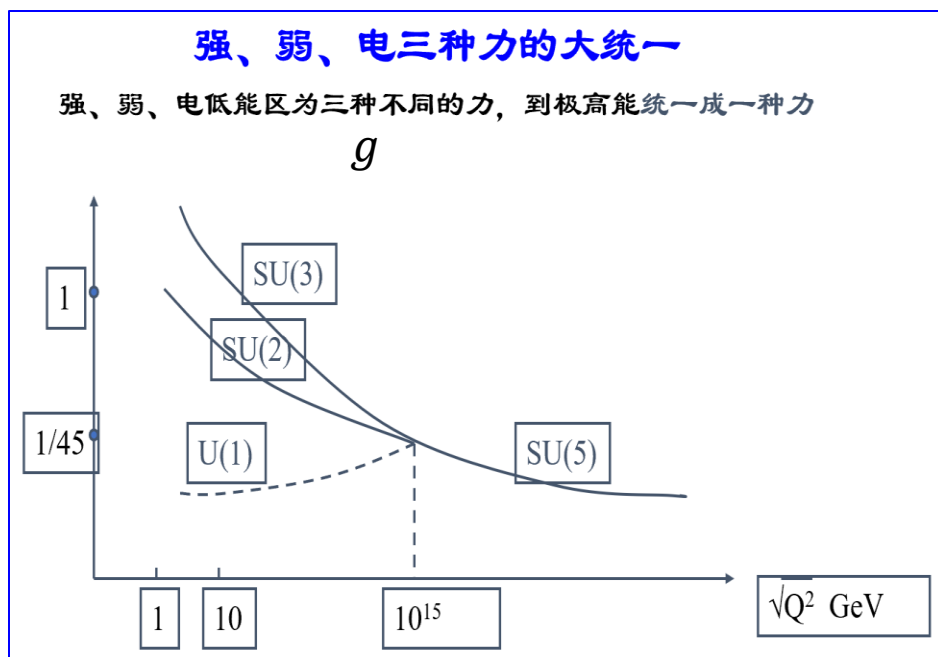
- 第一个统一理论是麦克斯韦做的
- 电和磁统一在一起 ---- 麦克斯韦方程组
“以太”？ → 相对论
- 1960s, Glashow, Weinberg, Salam, 用 $SU(2) \times U(1)$ 群的规范场
- 电磁相互作用和弱相互作用统一在一起
统一尺度在 200 GeV, 预言的Higgs粒子已经找到 →
- 还有没有新物理？

3. 标准模型

- 量子色动力学+弱电统一理论 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 被称为标准模型
- 现在的主要加速器实验都与标准模型相当符合
- 终极理论？

4. 大统一理论

- 在电弱统一理论的基础上，把**电磁**、**弱**相互作用、**强**相互作用统一起来的理论——三种作用都是用规范场理论来描写的。
- 例如 **SU(5)** 大统一理论
- **超对称大统一**理论等——缺乏实验证据（质子衰变）
- **SO(10)** 大统一模型还有可能对。



- ✓ 一个规范对称性具有一个普适的耦合常数
- ✓ 每个耦合常数随能标跑动
- ✓ 在大统一能标 **$O(10^{16})$ GeV**，标准模型的三个耦合常数可以重合（需要超对称）
- ✓ 也许可以用一个大规范群描述

$$\text{SU}(5) \supset \text{SU}(3) \otimes \text{SU}(2) \otimes \text{U}(1)$$

$$\text{SO}(10) \supset \text{SU}(5) \otimes$$

$$\text{SU}(3) \otimes \text{SU}(2) \otimes \text{U}(1)$$

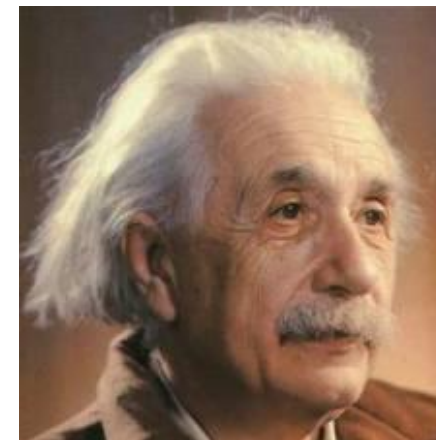
- ✓ **SU(5) GUT 已排除，大统一尚未完成。**

5. 超大统一理论

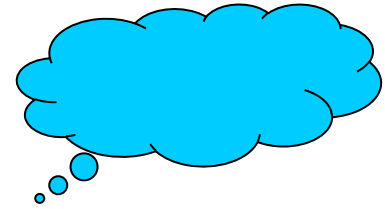
- 把**电磁、弱、强**相互作用和**引力**相互作用统一起来的理论。
- ——前三种作用都是用规范场理论来描写的，而引力理论不是。
- 引力量子化很困难。
- 微观尺度的引力理论，没有实验证据——从宏观经典理论延伸过来的。
- 爱因斯坦后半生一直致力于超大统一，把三种**规范相互作用几何化**，以利于与**广义相对论**描写的引力理论统一，没有成功。

超大统一的可能性：

- ✓ 引力相互作用的大小正比于质量。
- ✓ 规范相互作用的强度——**结合能**是引力作用的“荷”。
- ✓ 例如强相互作用的结合能→给出原子核的主要质量。
- ✓ 电磁相互作用的结合能+电子和原子核的质量→原子的质量。



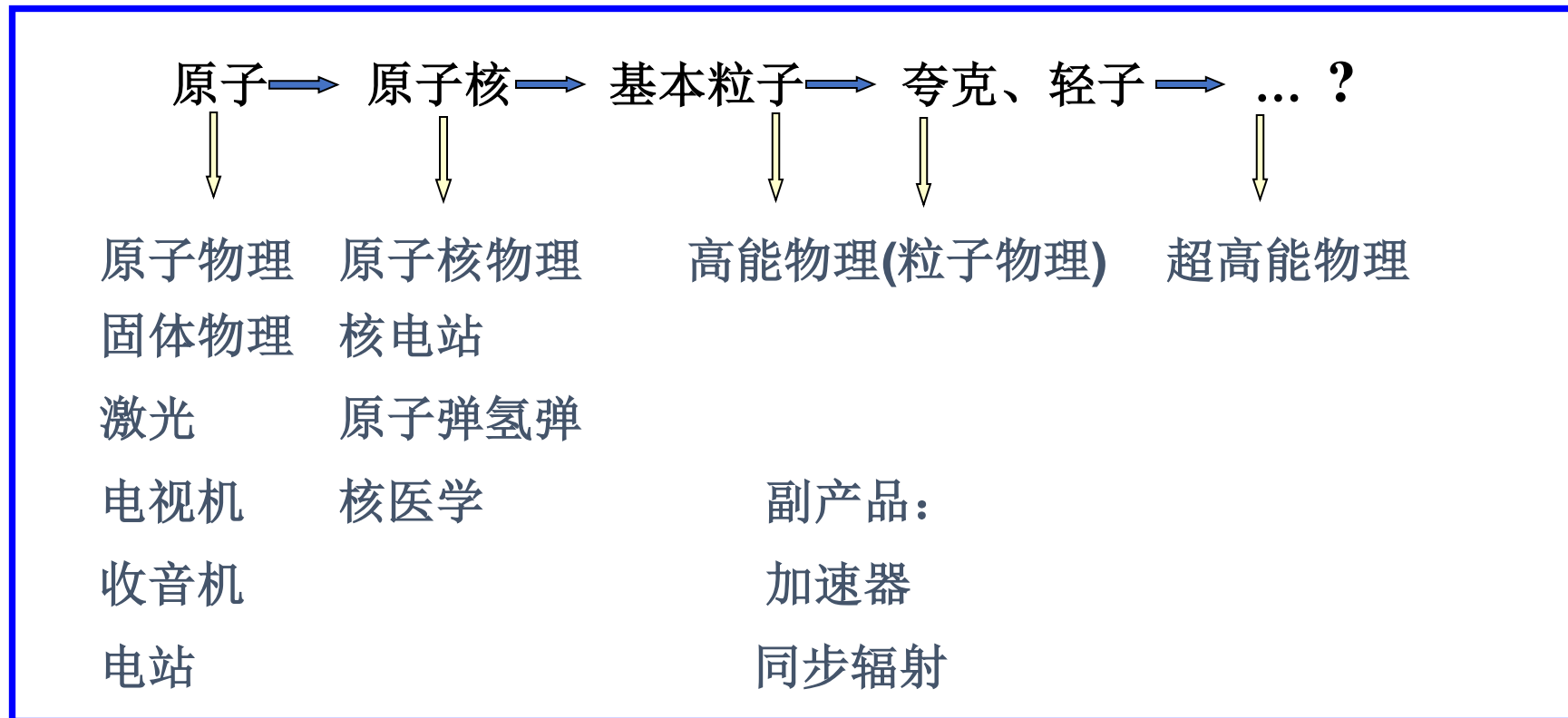
天体的演化● 大爆炸以后，



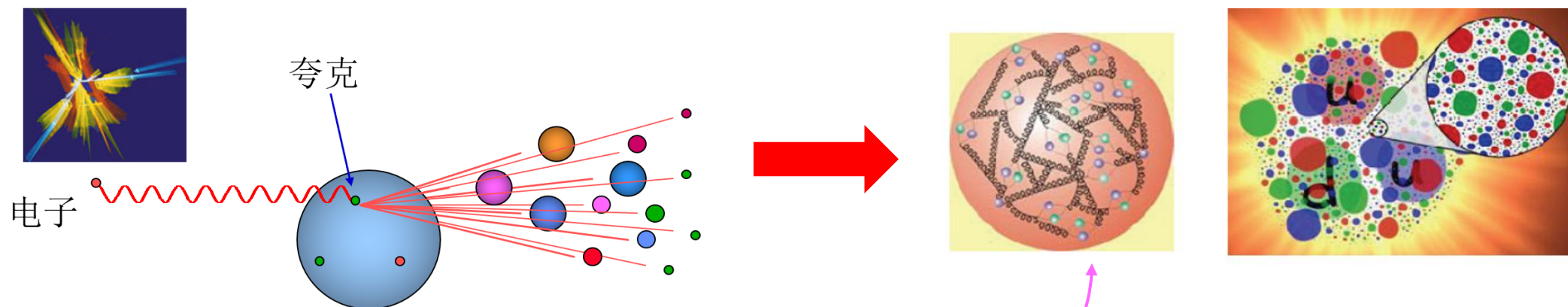
宇宙时间	主要事件	温度
0	奇点，宇宙大爆炸	
10^{-43}秒	普朗克时间，四种力统一	10^{20}GeV
10^{-36}秒	粒子大统一开始破缺	10^{15}GeV
10^{-10}秒	弱电统一开始破缺	10^2 GeV
10^{-6} 秒	强子（核子）开始形成	1 GeV
10^2 秒	轻原子核（氦）形成	1 MeV
10^{12} 秒	中性原子形成	1 eV
10^{17} 秒	最早的星系开始形成	

第四节 高能物理实验

研究基本粒子内部构造及其相互作用规律需要几百 GeV 甚至更高的能量
(测不准原理: $\Delta x \Delta p \sim \hbar$)。



（一）高能对撞机实验室是研究粒子内部结构及相互作用的重要方法



只有高能电子才能达到核子的内部与夸克相互作用，从而揭示核子的内部结构和相互作用性质 $E = Mc^2$

德国的 DESY，美国 Jefferson Lab，等等；

美国计划建造的 Electron-Ion Collider，简称EIC；

中国正在推动的 EicC

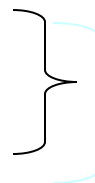
(二) 新世纪的高能物理实验

- 正在建造的两个超级B介子工厂：
日本KEK的Belle II，意大利Cabibbo研究所
- 正在运行的CERN的LHC, BEPCII,
- 很多的中微子实验：日本超级神冈、中国大亚湾中微子实验等
- 寻找暗物质的很多地下和天上实验：如锦屏山地下实验室
- 计划中的直线加速器ILC, CEPC/SPPC?

1. B介子工厂

美国 SLAC

日本 KEK



3.5 GeV e^+ + 8 GeV e^- 对撞

研究 CP破坏起源, P 宇称 (空间反演)

C 正反粒子变换 T (时间反演)

P, C 破坏都已发现, CP破坏 也已发现;

CPT不变性一直很好。

2. 2TeV质子-反质子对撞机



美国芝加哥费米实验室

3. 高能宇宙射线实验

—粒子物理
最初最有效的
实验观测
手段，现在
仍然在应用
中—西藏羊
八井观测站
(海拔4000
米)



4. 粒子物理-核物理交叉研究

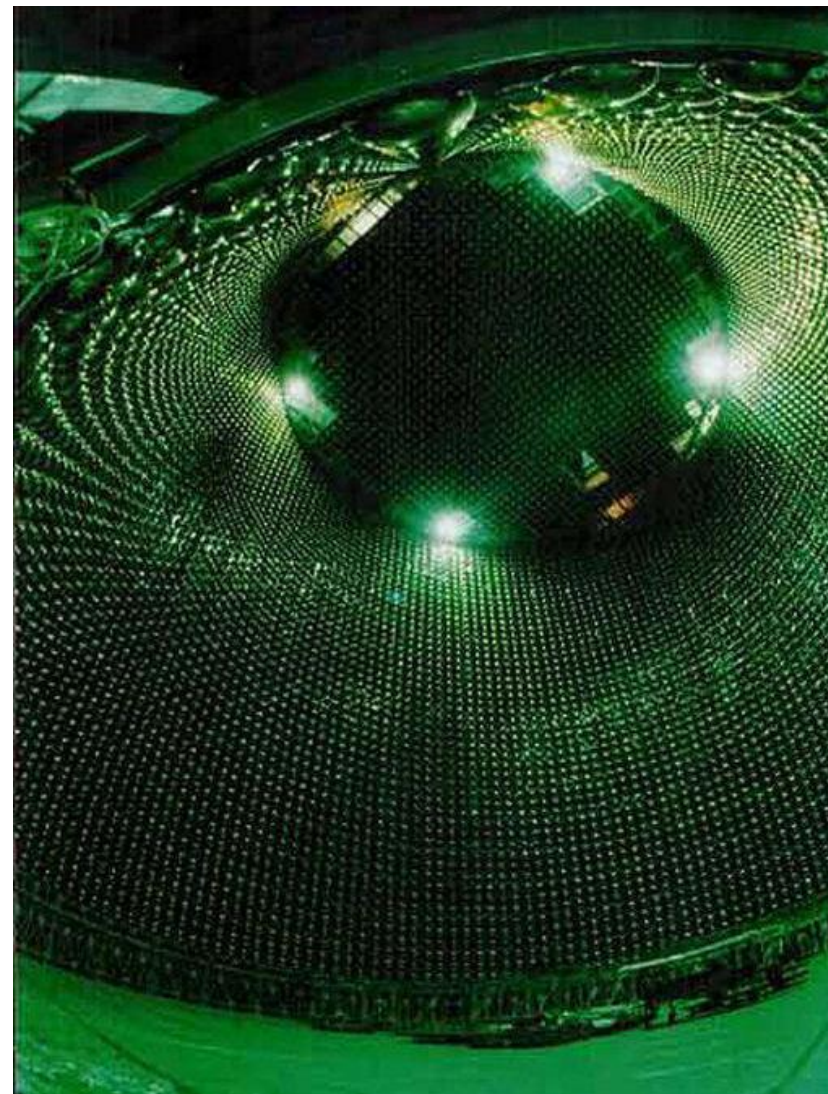
Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

布鲁克
海汶的
RHIC-
重离子
对撞机



5. 中微子实验

——日本神冈的中微子探测器，位于地底下**1000**米，**探测器**为高**42**米、直径**39**米的大水缸



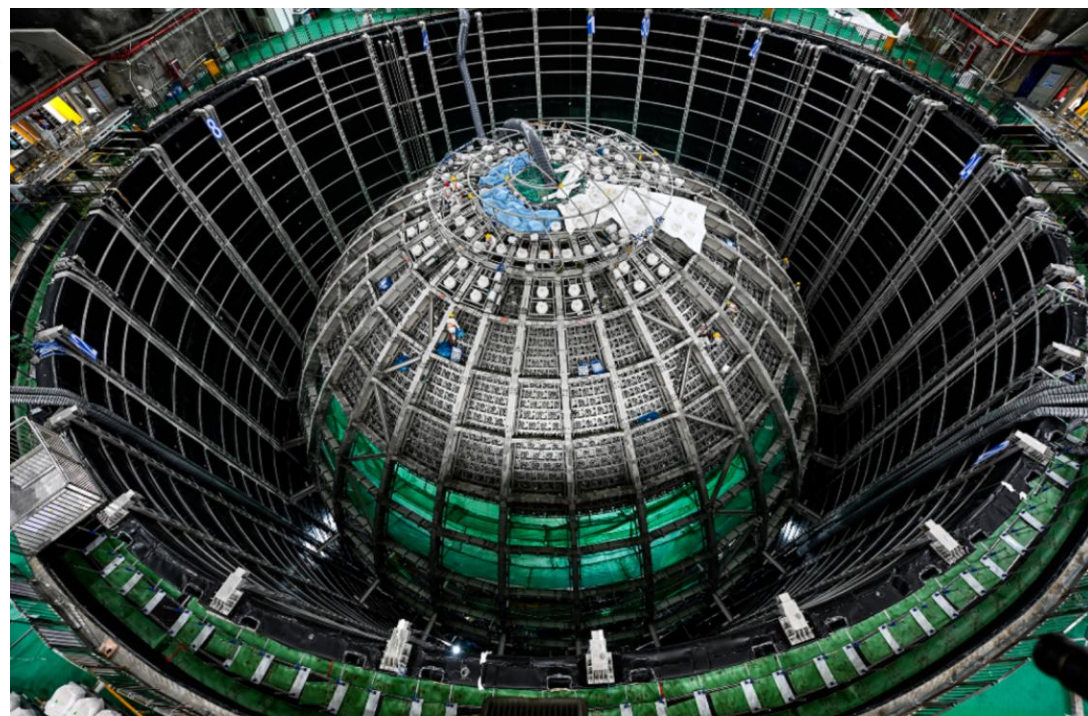


大亚湾中微子实验（深圳）



39

江门中微子实验（地下700米）



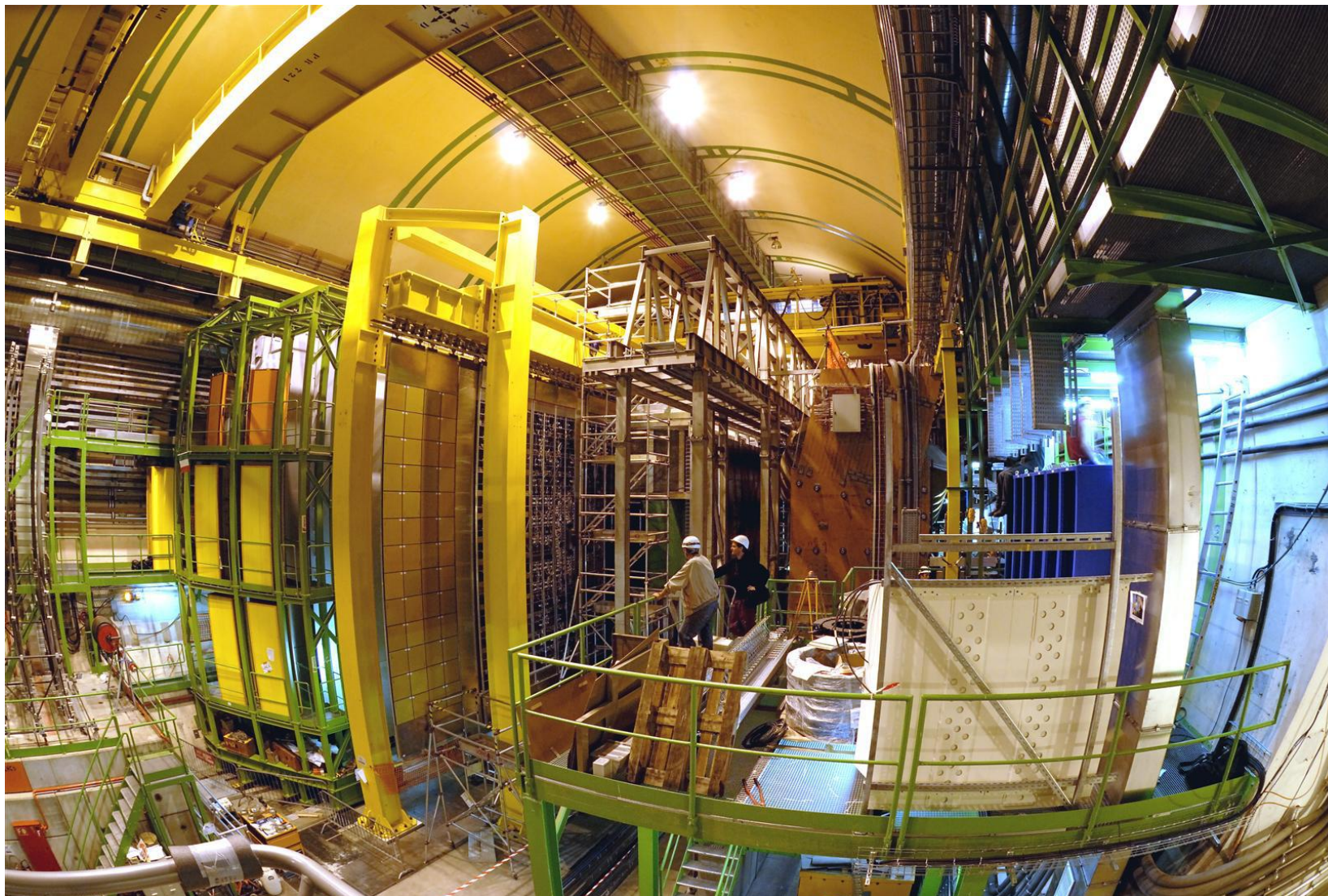
6. 大型强子对撞机 (Large Hadron Collider)

欧洲核子中心LHC储存环周长27公里

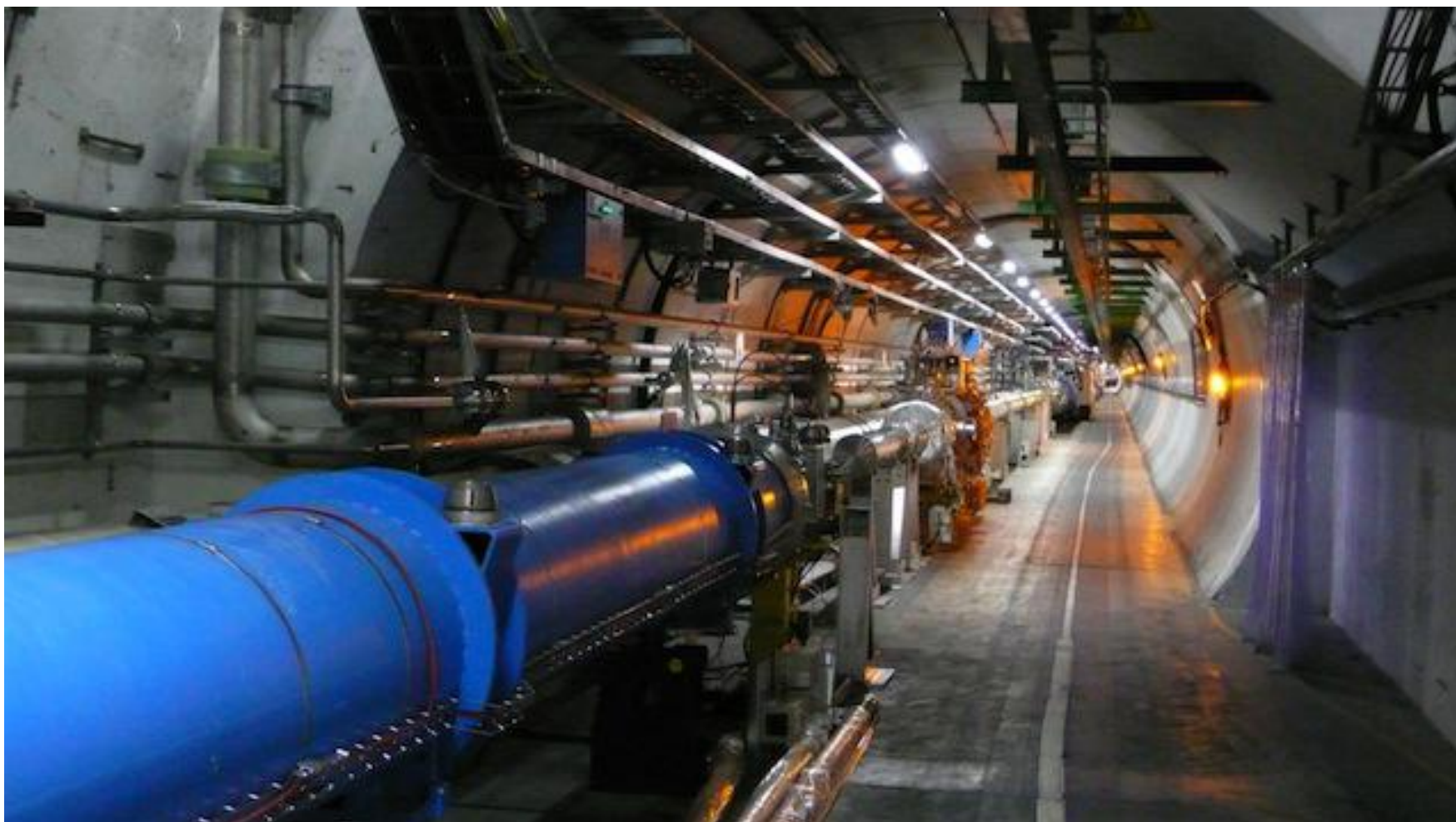
质子-质子对撞, 14TeV



2008年的LHCb



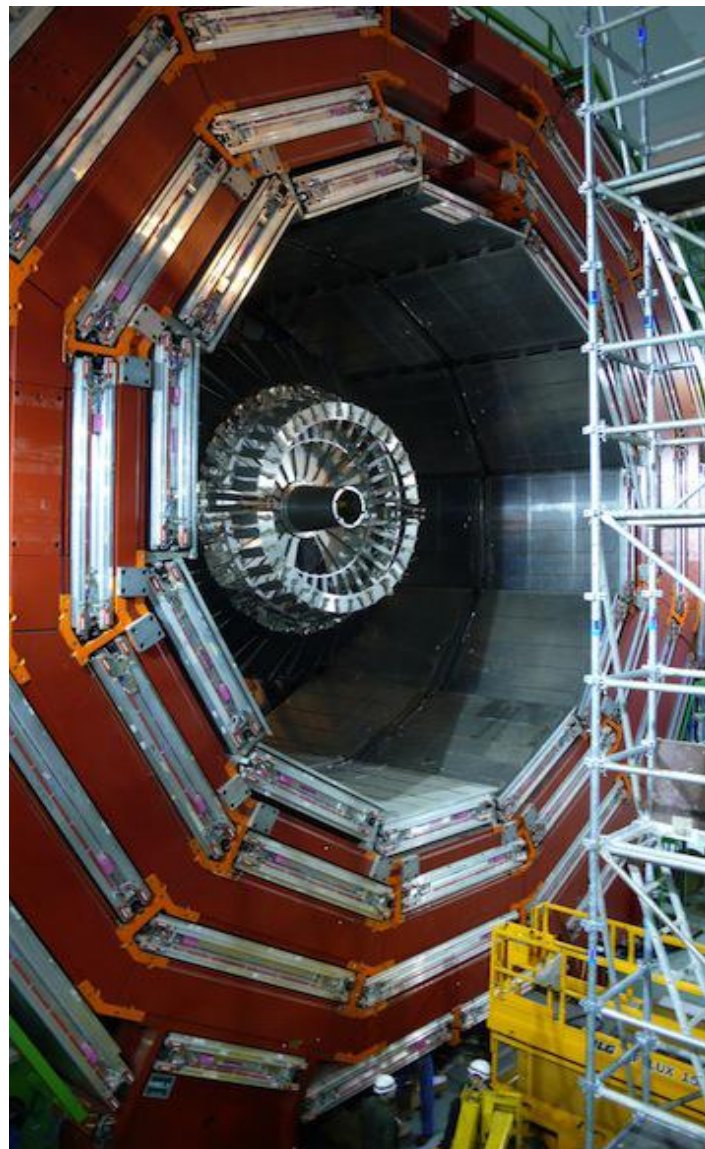
LHC隧道 (150米的地下)



2008年 ATLAS



CMS

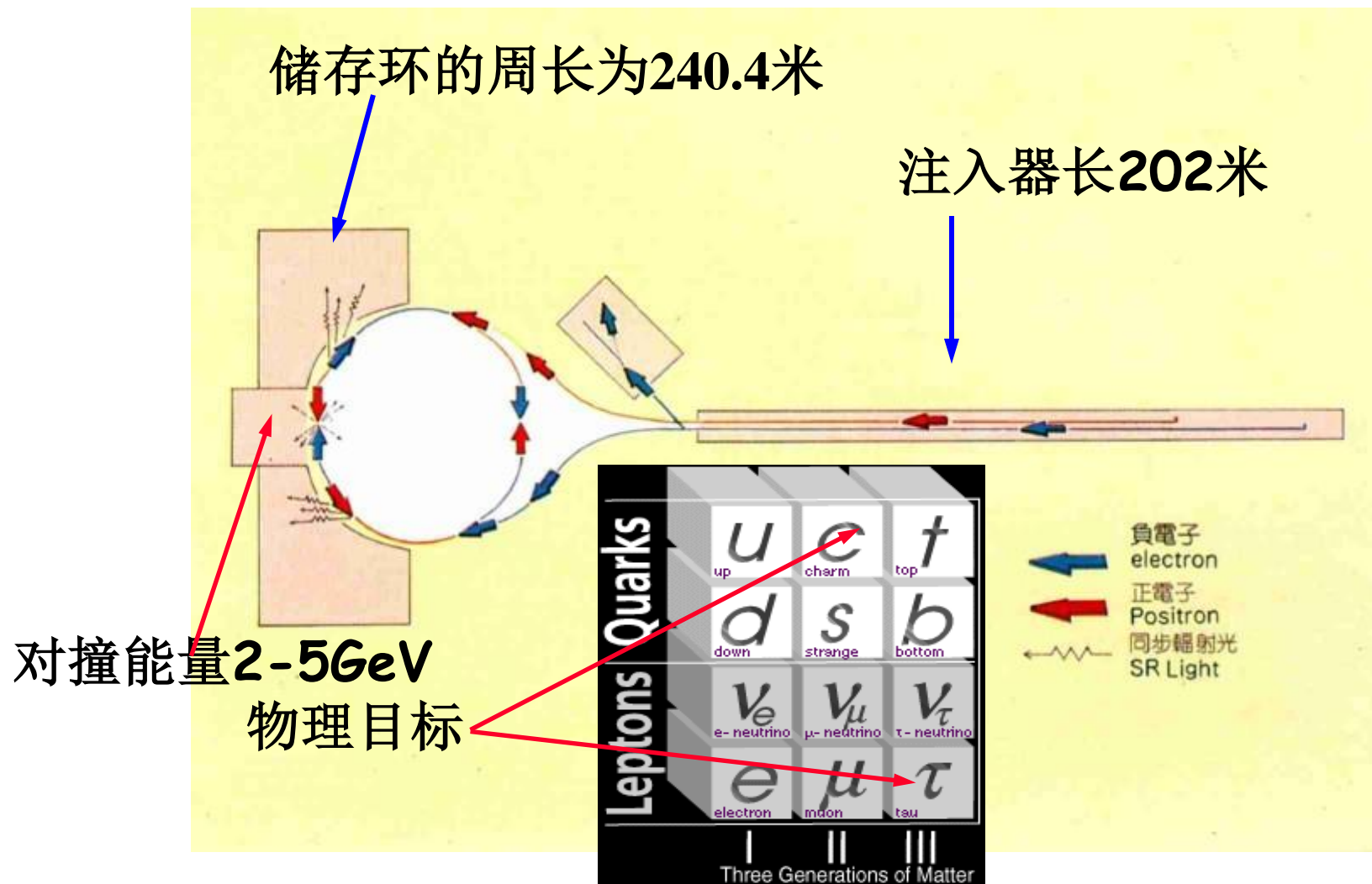


7. 北京正负电子对撞机 (BEPCII/BESIII)

Beijing Electron-Positron Collider (BEPCII) and Beijing Spectrometer (BESIII)



北京正负电子对撞机 (BEPC) 示意图



结 语

自然界的奥秘是无穷无尽的！

1. 宇宙往大的方向延伸是无限的！

宇宙观测已达到 > 100亿光年的尺度

1光年 = 光线走一年的距离 $\approx 9.5 \times 10^{12}$ 公里 $\sim 10^{13}$ 公里
= 十万亿公里

没有看到“边”

2. 宇宙往小的方向延伸也是无限的！

微观 往小走

实验中可看到千万亿分之一厘米 ($\sim 10^{-15}$ 厘米) 也没寻到“头”，
还可往小走……