

第十二章 原子核的亚核子物理

从前面的章节中知道，人们在**1913**年认识原子核，**1919**年发现质子，**1932**年发现中子。从那时起，原子核被视为由质子和中子（核子）在核力的作用下组成。

但很快人们就发现以核子为基础的核结构理论局限性很大。理论上，对核力的描述完全是经验性的，对 β 衰变等的解释也不能在传统核结构的框架下解决。实验上，在宇宙线和较高能量的加速器实验中，发现了大量的不同于核子的新的粒子。这样，就产生了亚核子的概念。亚核子物理曾经就是指粒子物理，但随着时间的推移，粒子物理逐渐推进到更深入和更基本的层次上。我们在这儿使用的**亚核子物理**，是**比核子层次更深入的核物理（如强子物理）和粒子物理的概括**。

入门性质的粗略的介绍。

§ 12.1 粒子与高能碰撞

寻找物质世界的最基本单元和基本相互作用，一直是物理学的最前沿——粒子物理的根本任务。由于不断有更深的物质层次被发现，因此粒子的概念是随时间变化的。人们曾使用“基本粒子”的说法，但现在已不多见，原因是不断出现“基本粒子”不基本的现象。

在二十世纪三十年代的时候，粒子的概念主要是指**电子、中子、质子、光子和中微子**。三十年代末四十年代初，宇宙线实验中发现了 μ 子和 π 介子，**1947年**又发现了奇异粒子。后来随着加速器能量的提高，大量新粒子被观察到。对这些粒子进行分类，找出它们结构上的规律性，是五、六十年代粒子物理的一项基础性工作。如同对元素的性质进行分类和排队导致了对原子结构的认识一样，对粒子的分类也直接促成了对粒子更深层结构的认识。**1964年**，盖尔曼(M. Gell-Mann)和兹韦格(G. Zweig)各自独立的提出了强子结构的夸克模型，在以后几十年的理论和实验研究中得到支持。

与此同时，关于相互作用的规范场理论（强相互作用的量子色动力学、电磁与弱相互作用的弱电统一理论）取得很大成功。目前，人类对于物质世界基本结构和基本相互作用的认识已达到一个比较完整的阶段，在科学上的意义不亚于原子论的建立。

直接给出目前已比较成熟的基本知识。

1. 粒子的分类与物质结构

基于标准模型，物质世界的基本的粒子可以分为：

物质粒子 { 夸克（自旋 $1/2$ 、带色、参与强作用）
轻子（自旋 $1/2$ 、不带色、不参与强作用）

场粒子 规范玻色子

直今为止，共发现了六种夸克，被称为六种“味”（flavors）。

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Q

$2e/3$

$-e/3$

B

$1/3$

$1/3$

代

1

2

3

每味夸克又可带红、兰、绿三种颜色之一。每一种夸克都对应着一种反夸克(Q、B反号)。所以总的夸克数是36。

由夸克组成的**重子数不为0**的粒子称为**重子**，比如质子（**uud**）和中子（**udd**）的 **$B=1$** 。

由夸克和反夸克组成的粒子 **$B=0$** ，称为**介子**。

实验观测到重子数是守恒的。

强子（参与强相互作用） $\left\{ \begin{array}{l} \text{重子} \\ \text{介子} \end{array} \right.$

至今的实验表明，任何带色的粒子都不能是自由粒子，而是被束缚在整体上无色的强子内部，这就是所谓的**色禁闭或夸克禁闭现象**。正是这种现象，使夸克的组合方式受到许多限制。也是由于夸克的禁闭，使得自由夸克质量的定义变得不明确，我们到后面再来讨论这个问题。

到目前为止发现的轻子也是6种味，也可分为三代：

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} Q \\ 0 \\ -e \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} L_i \\ 1 \\ 1 \end{matrix}$$

代 1 2 3

可以分别定义电轻子数 L_e 、 μ 轻子数 L_μ 和 τ 轻子数 L_τ ，至今的实验观测表明它们各自守恒。







每一种轻子都对应一种反轻子(Q、 L_i 反号)，因此共有12种轻子。

自由轻子的质量列在表中。中微子的质量只是给出了上限，不排斥其为0。尽管许多物理学家相信中微子有非0的质量，但在实验上确定非常困难，原因是中微子既不参与强相互作用，也不参与电磁相互作用，很难进行精确测量。







ν_e	$< 8 \text{ eV}/c^2$	e	$0.51 \text{ MeV}/c^2$
ν_μ	$< 0.25 \text{ MeV}/c^2$	μ	$105.6 \text{ MeV}/c^2$
ν_τ	$< 35 \text{ MeV}/c^2$	τ	$1776.9 \pm 0.5 \text{ MeV}/c^2$

Particles

Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	 -1	Tau Neutrino	 0
Muon	 -1	Muon Neutrino	 0
Electron	 -1	Electron Neutrino	 0

Quarks

Bottom	 -1/3	Top	 2/3
Strange	 -1/3	Charm	 2/3
Down	 -1/3	Up	 2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

The particle drawings are simple artistic representations

传递相互作用的粒子(场粒子) :整数自旋, 被称为规范玻色子。

相互作用和规范玻色子

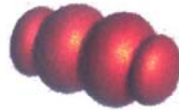
相互作用	作用于	规范玻色子
引力作用	所有粒子	引力子 (无质量、自旋2)
电磁作用	所有带电粒子	光子 (无质量、自旋1)
弱作用	夸克、轻子、电弱规范玻色子	W^{\pm} 、 Z^0 (重粒子、自旋1)
强作用	所有带色荷粒子 (夸克和胶子)	8种胶子 (无质量、自旋1)

规范玻色子的反粒子也是表中的粒子，比如 W^+ 和 W^- 互为反粒子， Z^0 的反粒子就是它本身。引力子与物质的作用太弱因而无法单独测出，它们的存在和性质都是由理论给出的。除引力子外，其它规范玻色子都已实际发现了。我们对光子已很熟悉。1979年在德国汉堡的PETRA正负电子对撞机上发现了胶子，其性质与理论预言的一样。八十年代粒子物理最重大发现，是探测到电弱统一理论早就预言的 W^\pm 和 Z^0 玻色子。规范玻色子的预言和发现当属人类最重要的科学成就之列。

Forces

Strong

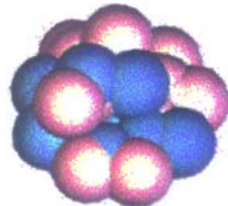
Gluons (8)



Quarks



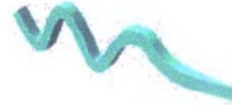
**Mesons
Baryons**



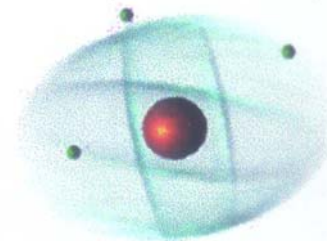
Nuclei

Electromagnetic

Photon



**Atoms
Light
Chemistry
Electronics**



Gravitational

Graviton ?



**Solar system
Galaxies
Black holes**

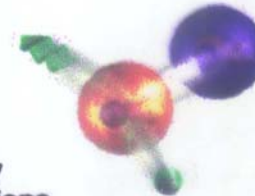


Weak

Bosons (W,Z)



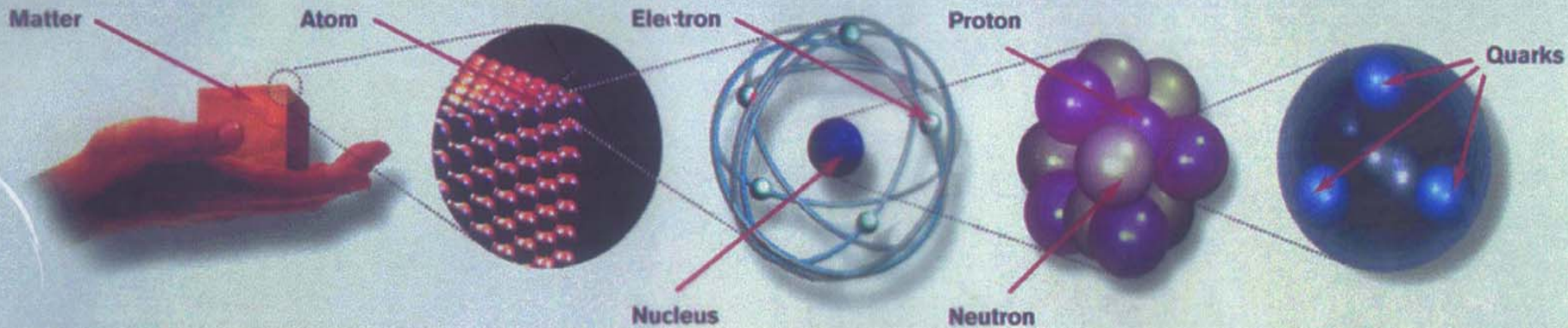
**Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun**



The particle drawings are simple artistic representations

当今人们对物质的微观结构有了新的整体性的认识：夸克通过强作用（由胶子传递）而被束缚成强子；色中性的强子之外的剩余强相互作用就是核力，它将核子束缚成原子核；带正电的原子核与带负电的电子（轻子）通过电磁相互作用（由光子传递）结合成原子；电中性的原子之外的剩余电磁相互作用将原子束缚成分子；分子构成了各种材料。这就是基于标准模型的物质结构的整个框架。

完全稳定的粒子只有质子、电子、光子和中微子，以及它们的反粒子。









Matter particles

All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS				
FIRST FAMILY	Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		Electron neutrino Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	
SECOND FAMILY	Muon A heavier relative of the electron, it lives for two millionths of a second		Muon neutrino Created along with muons when some particles decay	
THIRD FAMILY	Tau Heavier still, it is extremely unstable; it was discovered in 1975		Tau neutrino not yet discovered but believed to exist	

QUARKS					
Up	Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one		Down	Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two	
Charm	A heavier relative of the up; found in 1974		Strange	A heavier relative of the down; found in 1964	
Top	Heaviest still		Bottom	Heavier still, measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory	

Force particles

These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

Gluons
Carriers of the **strong force** between quarks



Felt by: quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the **strong force**


Photons
Particles that make up light; they carry the **electromagnetic force**



Felt by: quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of **electro-magnetic force**

Intermediate vector bosons
Carriers of the **weak force**



Felt by: quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the **weak force**

Gravitons
Carriers of **gravity**



Felt by: all particles with mass

All the weight we experience is the result of the **gravitational force**

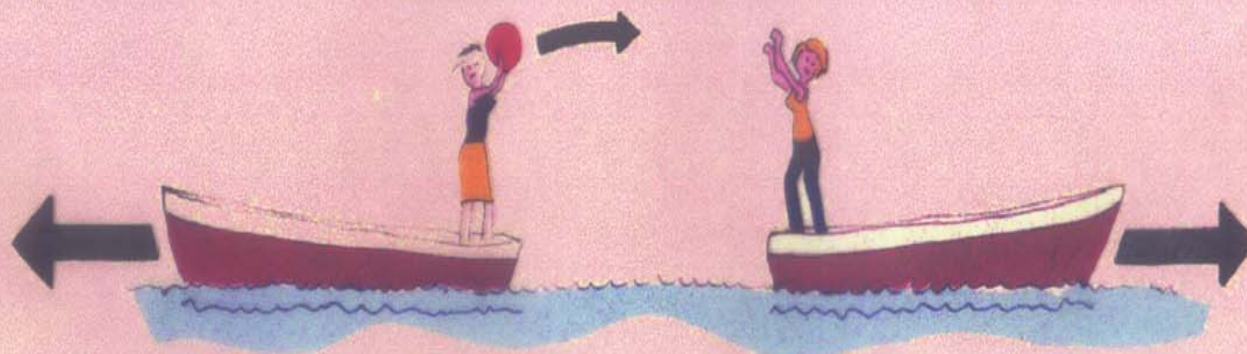
2. 相互作用与费曼图

粒子的运动和变化离不开相互作用。在经典力学中，我们知道，运动规律由牛顿方程，或等效的哈密顿或拉格朗日方程来描写，相互作用以力或作用势的形式进入方程。在量子力学中，描写运动规律的是 $H\Psi=i\hbar\partial\Psi/\partial t$ ，相互作用也是出现在哈密顿量 H 中。量子力学中的运动就是状态波函数的变化，实际要运算的是截面和跃迁概率等量，常用的办法是从薛定谔方程出发，写出相应的矩阵元并加以计算。

粒子物理涉及到的是微观高能的问题，需要既是量子化又是相对论的理论，这就是量子场论，它要求相互作用场的量子化和引入相应的传播相互作用的粒子。相互作用发生时，是一份一份的物理量以一定的速度在空间传播，这实际上就是相互作用粒子的概念。

THE FORCES IN NATURE

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN:
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO-MAGNETIC FORCE	$\sim \frac{1}{1000}$	PHOTON (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim \frac{1}{100000}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITON ?	HEAVENLY BODIES



THE EXCHANGE OF PARTICLES IS RESPONSIBLE FOR THE FORCES

(1) 量子场论基础上的相互作用

量子场论认为，每一种粒子都对应着一种场。不同的场在空间相互重叠。场的能量最低态称为基态。所有的场均处于基态时为物理真空。场的激发表现为粒子，不同的激发状态对应于粒子的不同模式和数目。场的互为复共轭的两种激发表现为粒子和反粒子。

规范场理论是一种特殊的量子场论，它要求所采用的拉格朗日量具有特殊的规范对称性。重要的是，这种对称性的要求“自然”导致相互作用的引入，因此，人们把这种理论称为相互作用的规范理论，规范性也成了理论合理性的一个重要标志。举一个简单的例子。在量子力学中，我们知道物理观测量只依赖于波函数的绝对值的平方 $|\Psi|^2$ 。因此，我们要求量子理论在如下的变换下不变：

$$\psi(\vec{x}, t) \rightarrow \psi'(\vec{x}, t) = e^{-i\chi(\vec{x}, t)} \psi(\vec{x}, t)$$

其中 $\chi(\vec{x}, t)$ 是相因子，它在各时空点上可以取不同的值，这种相变换也被称为局域规范变换。奇怪的是，自由粒子的薛定谔方程并不满足这种规范不变性。也就是说，如果一个自由粒子的波函数 Ψ 满足薛定谔方程：

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{x}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{x}, t) \quad (12.1-2)$$

可以推知由(12.1—1)式定义的 Ψ' 并不满足上述方程。对于带电荷 q 的粒子在电磁场中的运动，我们知道薛定谔方程应当改写为：

$$\frac{1}{2m} \left(-i\hbar \nabla - \frac{q}{c} \vec{A} \right)^2 \psi = \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial t} - qV \right) \psi \quad (12.1-3)$$

\vec{A}, V 是电磁场的势。此时，对于下面的协同变换，带电磁作用势的薛定谔方程不变：

$$\left. \begin{aligned} \psi(\vec{x}, t) &\rightarrow \psi'(\vec{x}, t) = e^{-i\chi(\vec{x}, t)} \psi(\vec{x}, t) \\ \vec{A} &\rightarrow \vec{A}' = \vec{A} - \frac{\hbar c}{q} \nabla \chi \\ V &\rightarrow V' = V + \frac{\hbar}{q} \frac{\partial \chi}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (12.1-4)$$

这一结果可以被解释为：理论的“相”变换不变性的要求，导致必须引入特定的相互作用势，也就是引入特定的相互作用粒子。这种相与势的协同变换就是一种简单的规范变换。

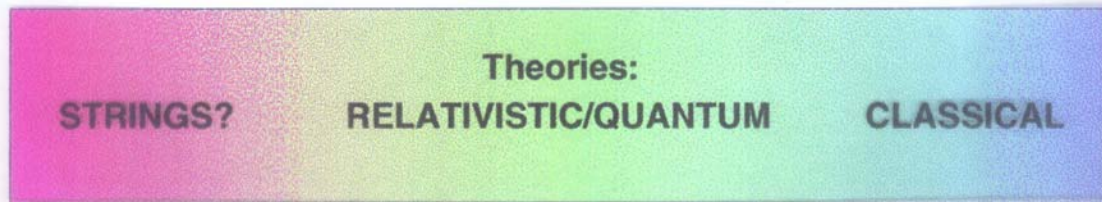
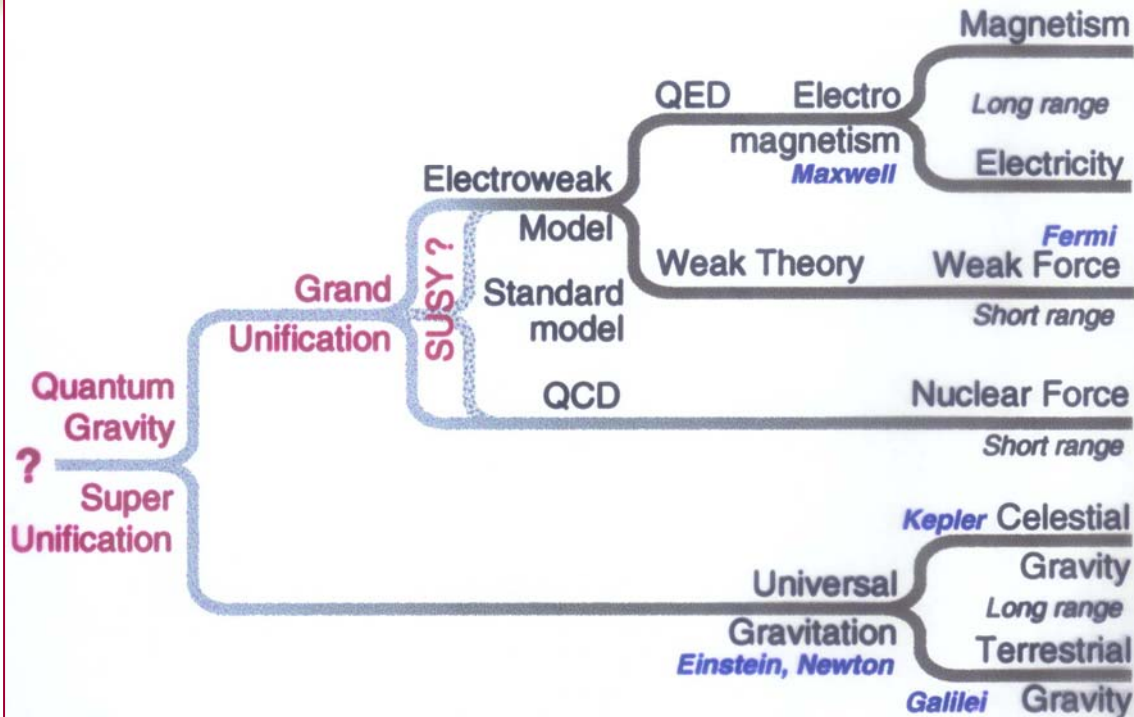
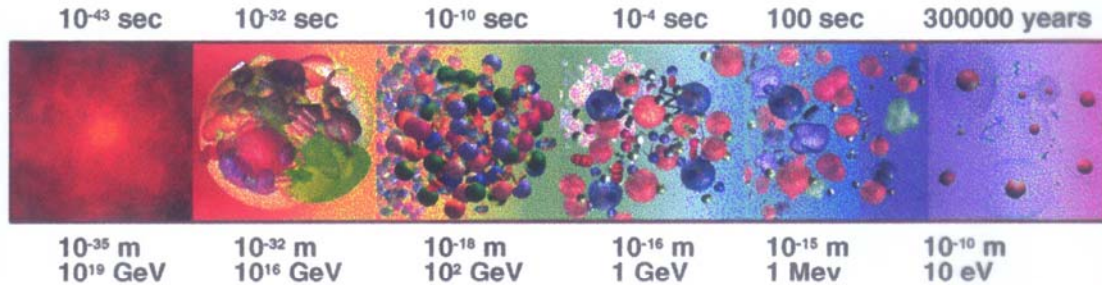
为描写当今粒子物理的实验事实，需要三种内秉规范变换不变性。所有粒子都具有 $U(1)$ 对称性，即局域的相变换不变性。所有粒子也都有 $SU(2)$ 对称性。 $U(1)$ 与 $SU(2)$ 对称性导致电弱统一的规范理论，预言了四种相互作用粒子，就是 γ 光子、 Z^0 及 W^\pm 玻色子。 Z^0 及 W^\pm 粒子都是在电弱理论建立之后有目的的找到的，是规范理论成功的重要证据。所有粒子也都具有 $SU(3)$ 对称性，相对应的规范玻色子是八种胶子，由胶子传递的相互作用就是强相互作用，描写它的规范理论称为量子色动力学（QCD）。这里的 $U(1)$ 、 $SU(2)$ 、 $SU(3)$ 是用群来表示的三组内秉变换。

目前对相互作用认识的状况

表12.3 已知的相互作用力

作用力	1970年的理论	1990年代的理论	未来?
引力作用	非量子理论	未变	?
电磁作用	量子电动力学 (QED)	电弱统一理论 (EW)	大统一 理论?
弱作用	非规范理论		
强作用	非规范理论	量子色动力学 (QCD)	

Summary



由于历史的原因，电弱统一理论和量子色动力学被成为“标准模型”，它的特征是规范的量子场理论。至今为止的实验事实与标准模型符合的很好。这促使人们相信：可以在理论的层面对物理规律的真实性作出某种先导的判断，即一个“真实”的理论应当是可以按照量子场论的要求写出具有一定规范对称性的拉格朗日量，并且由此导出的物理观测量都是有限的。

(2) 费曼图

从上面的介绍知道，相互作用都是由粒子的交换来实现的。这种过程可以用图形来形象的表示，被称为费曼图。费曼图采用一些基本的规定：

a) 时间轴向上或向右，即以下面或左面代表初态，上面或右面代表末态；

b) 用实线——代表物质粒子（费米子），用波纹线代表光子，用虚线-----代表W和Z玻色子，用卷线代表胶子；

c) 正粒子（ e^- , μ^- , p , n 等）用沿时间轴的箭头表示，反粒子（ e^+ , μ^+ , 等）用逆时间轴的箭头表示；

d) 费曼图一般由外线、内线和顶点构成。外线表示入射或出射粒子，即初末态实粒子，其一端接顶点，另一端开放。内线两端都接顶点，反映中间过程，往往表示虚粒子（传播相互作用）。顶点是几条线的交点，也是相互作用的发生点。

费曼图不仅用于直观表示，而且可用于定量估计各种反应和衰变的概率，不过对这些定量规则的介绍已超出了本书的范围。

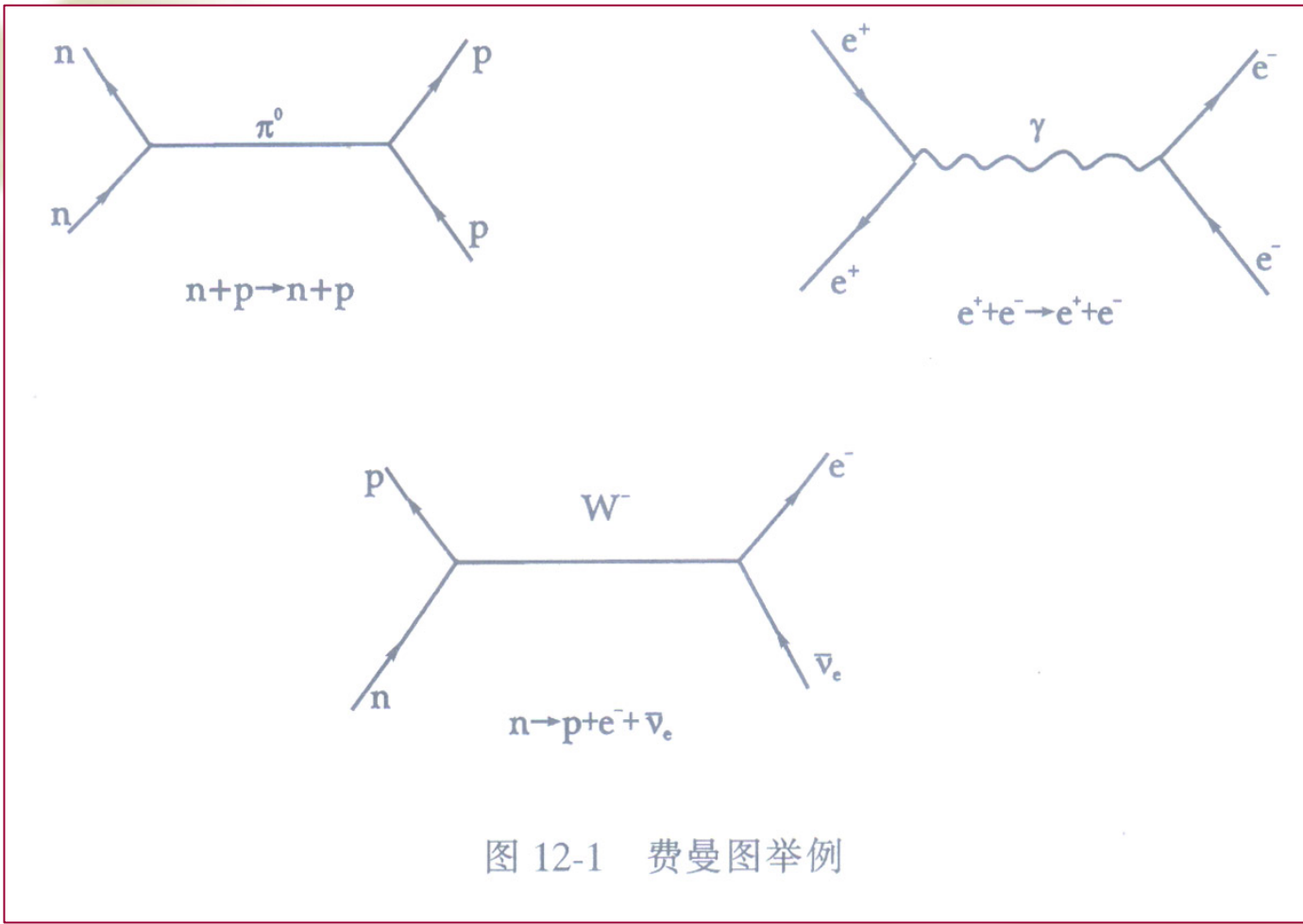


图 12-1 费曼图举例

3. 高能碰撞

$$\hat{\lambda} = \hbar / p = \hbar c / pc = \hbar c / E \approx 200\text{MeV} \cdot \text{fm} / E$$

要求波长为**fm**量级，则碰撞能量应在上百**MeV**。而如果要研究夸克层次上的结构，则要求碰撞能量有上百**GeV**。

另外，人们在实验中发现的粒子，绝大部分寿命很短，在自然界中并不存在。为了有效的研究这些粒子，首先需要大量地产生它们。由于众多的粒子质量很大而尺度很小，产生和研究它们就需要很高的能量。为此，人们通常把粒子物理又称作是高能物理。

宇宙射线:

宇宙射线中存在着一些特殊的粒子，如太阳中微子；并且存在着能量极高的粒子（可达 10^{21}eV ），比人工加速所能达到的能量（ 10^{12}eV 量级）高得多。因此，宇宙射线始终是研究粒子物理、天体物理等的重要工具。

但由于宇宙线中高能粒子的强度非常弱，因此实验很难做。在地面上观察到的宇宙射线，不仅包括直接来自宇宙空间的初级射线，也包括和大气层中的原子核发生反应后形成的次级射线。

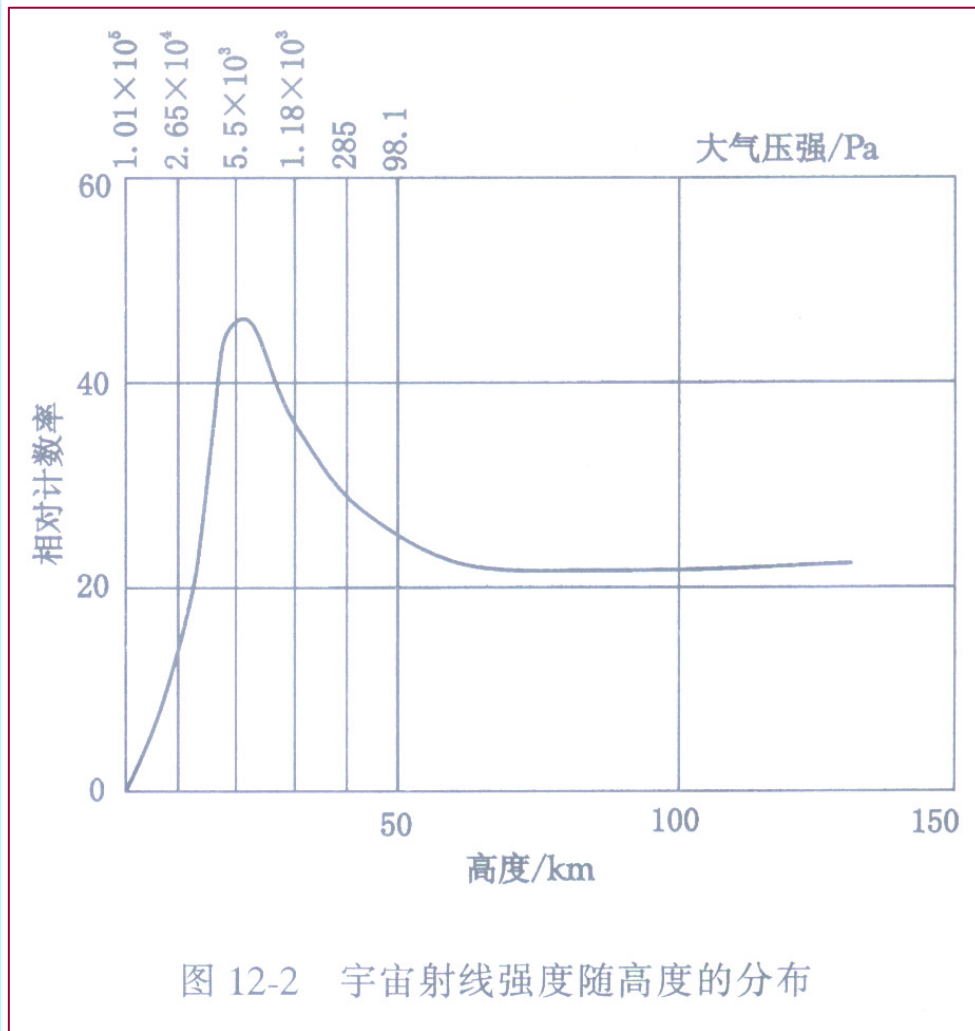
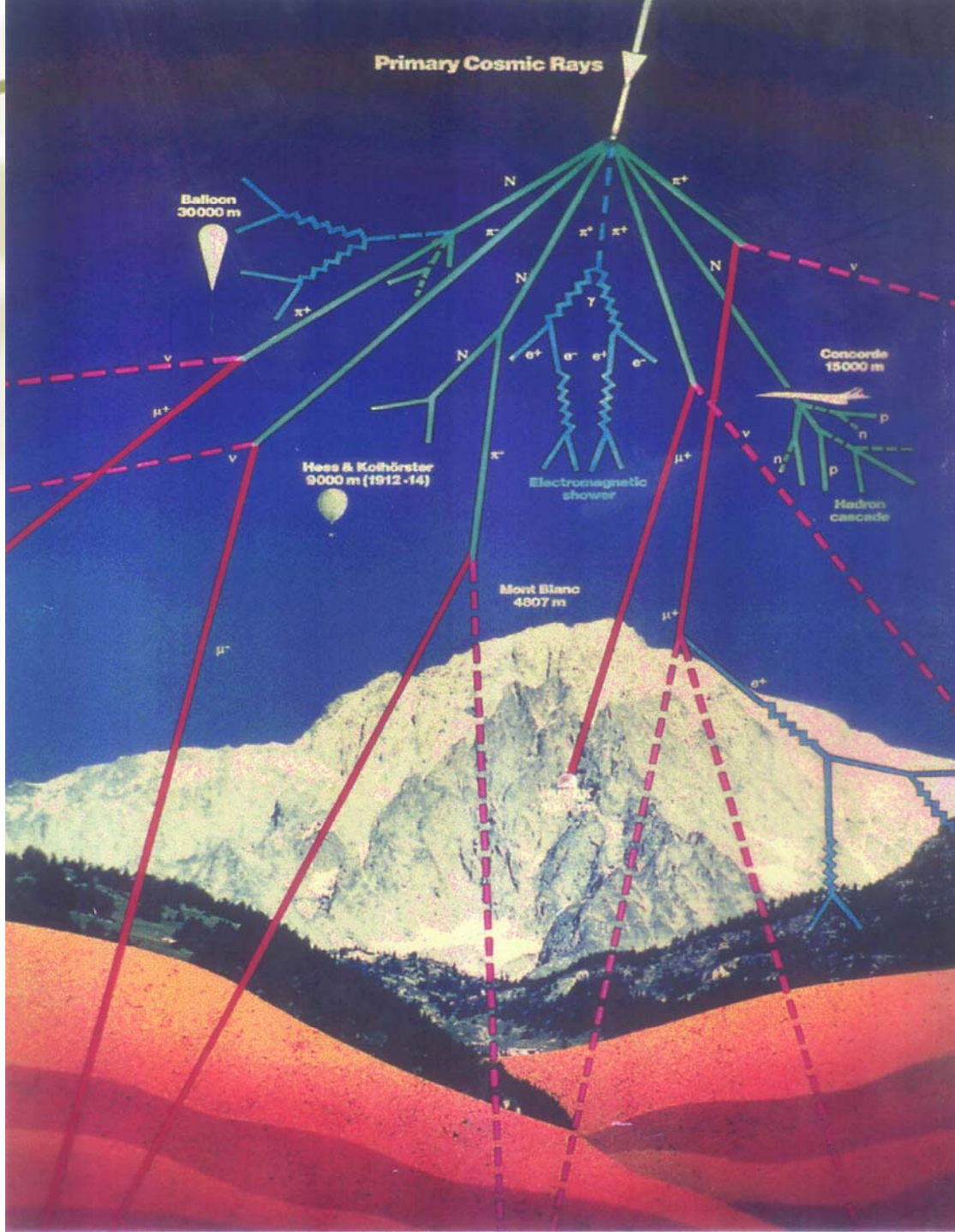


图 12-2 宇宙射线强度随高度的分布





羊八井ARGO实验室 已安装的RPC 羊八井ARGO实验室 已安装的RPC



当前的羊八井宇宙线观测站

宇宙线最强处在离地面约**20**公里高的地方，比地表的射线强约**50**倍。在**50**公里以上的高空，几乎全是初级射线，强度大约为**3000** $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 。大气下层宇宙射线强度的减弱是由于大气的吸收作用。

初级宇宙射线中有质子、 α 粒子和少数更重的原子核等，它们的起源是核天体物理的重要问题。大气层中的次级宇宙射线包括质子、 π^\pm 介子、 μ^\pm 轻子、电子、光子等。由于 μ 子的穿透力最强，因此到海平面处的带电粒子主要是 μ 子。

我国高能物理工作者在西藏羊八井设立的宇宙射线探测基地，已经成为世界上最好的宇宙线实验室之一。

当今用于实验的高能粒子，主要还是由高能加速器提供的，其种类包括直线加速器、同步加速器、对撞机等。从物理实验的角度看，加速器有四个性能是最重要的。

粒子种类。任何长寿命的带电粒子原则上都可以被加速。但实际上，根据研究的目的和技术实现的难度，高能物理中主要加速正负电子和正反质子，近年来也有不少加速重离子的。采用初级粒子打靶后产生次级粒子的办法，人们还可获得中微子、 π 介子、 K 介子、光子、 μ 子等束流。

加速能量。我们在前面已经分析了，粒子物理需要的碰撞能量是GeV到TeV量级。加速器能量的提高受到许多技术方面的限制。比如用直线加速器，能量的提高会使得长度增加。而采用环行加速器时，对电子而言，韧致辐射造成的能量损失限制了能量的提高，要达到100GeV以上是非常困难的。

流强或亮度。流强用于在固定靶实验中表示每秒钟入射的粒子数。在对撞机实验中，亮度定义为单位时间内碰撞发生的次数 N 与相互作用截面 σ 之比： $L=N/\sigma$ 。它的意义是单位时间内单位面积上粒子相互穿越的次数。显然，亮度包含了对撞机的流强和聚焦对准等许多技术因素，它的单位常用 $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-2}$ 。在固定靶实验中，也可采用亮度的概念，显然， $L=I \varepsilon$ 。

可用能或质心系能量。按照相对论关系，两粒子a和b的四维动量之和的平方是洛仑兹变换不变的：

$$s=(E_a + E_b)^2 - (\mathbf{p}_a c + \mathbf{p}_b c)^2 = (E'_a + E'_b)^2 - (\mathbf{p}'_a c + \mathbf{p}'_b c)^2 = E_c^2$$

对高能实验，假定 $E \gg m$ ，在固定靶实验中，可以推知，可用能正比于实验室能量的开平方，也就是说，在能量很高时，可用能随实验室能量增加很慢。而在对撞实验中，假定对撞粒子的质量和能量相同，则质心系能量就是对撞束的实验室能量之和，即所有实验室能量都是可用的。

对高能碰撞产物的探测，也是非常复杂的事情。由于粒子物理感兴趣的事例的概率（截面）非常之小，因此通常需要在接近 4π 的立体空间进行探测。由于高能碰撞下有大量粒子产生，因此需要同时鉴别和记录大量性质很不一样的粒子。又由于高能产物的穿透力很强，因此探测物质需要有相当的纵深。这几方面的要求，决定了高能物理探测器必然是庞大、复杂和昂贵的。大型的高能探测系统一般都包含以下几个部分：

(1) **磁铁**。大多数探测系统都整个的或部分的包含在一个大型磁铁内，从而可以根据径迹在磁场中的偏转来确定带电粒子的动量。

(2) **径迹探测器**。大多数探测系统都用气体室等测量带电粒子径迹的空间位置。

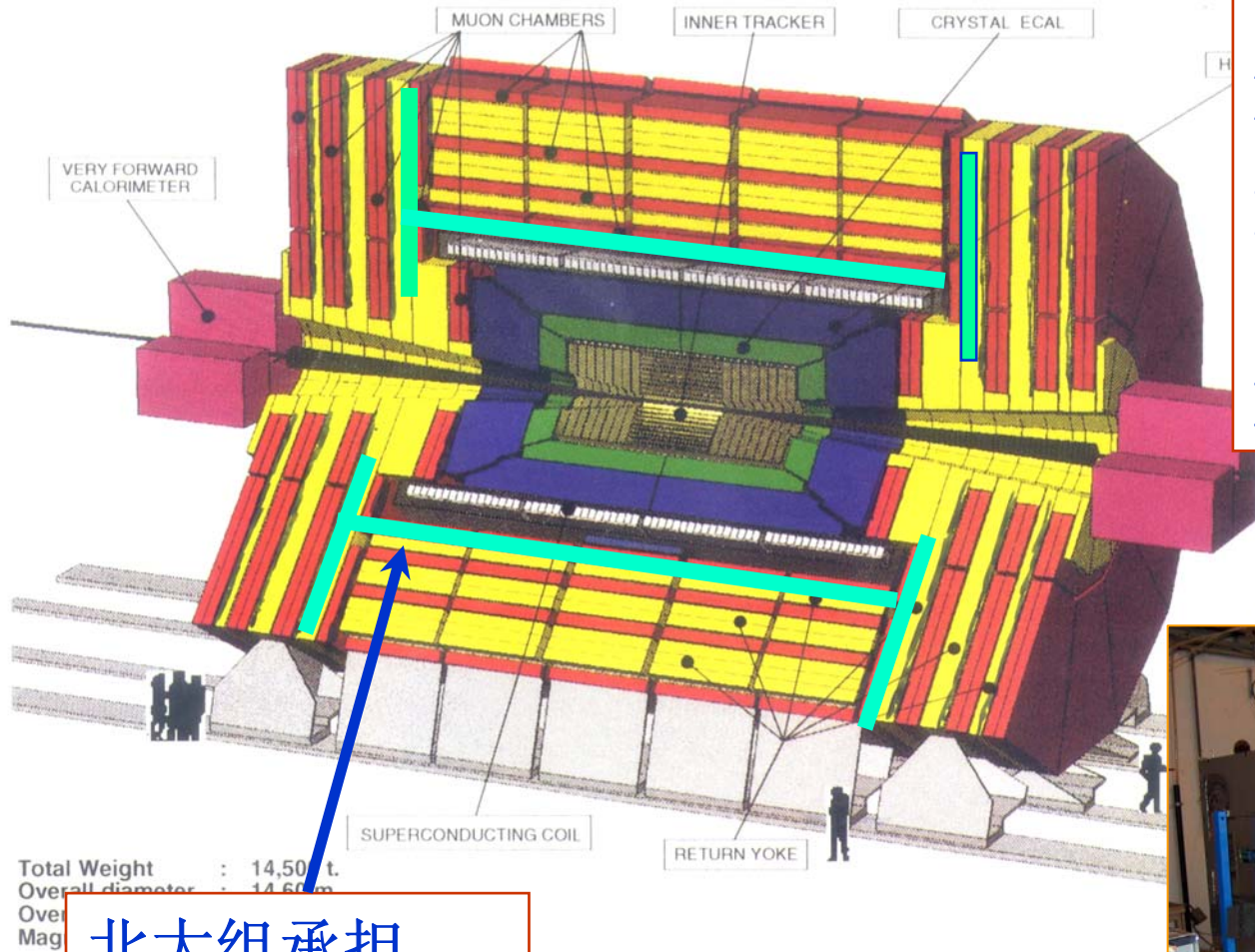
(3) **量能器**。它们用适当的材料吸收粒子的能量并给出正比的信号。一般分别设置电磁量能器和强子量能器，它们各自采用对电子光子敏感或对强子敏感的材料。

(4) **顶点探测器**。通常指放在碰撞点周围的空间分辨率极高的探测器，用于确定极短寿命的粒子的衰变顶点。

(5) **μ 子探测器**。 μ 子是长寿命粒子，且不参与强相互作用，电离能损也很小（因为质量大），因此具有很强的穿透力。一般是在量能器之外放置专门的 μ 子探测器。

(6) **电子学与计算机**。高能探测系统通常在极短的时间内（纳秒量级）产生数以百万计的信号。这对信号的同步，触发，实时处理和记录提出了极高的要求。因此，高能物理实验一直是最先进的电子和计算系统发展的重要推动力。

LHC-CMS 探测器



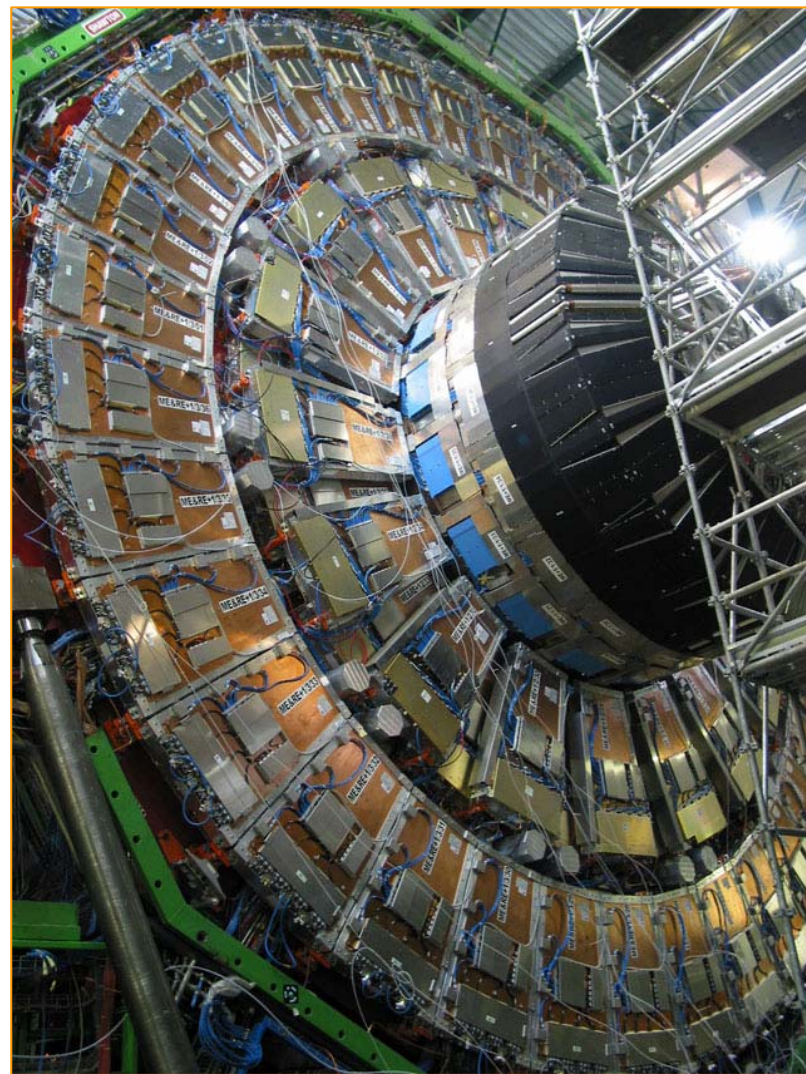
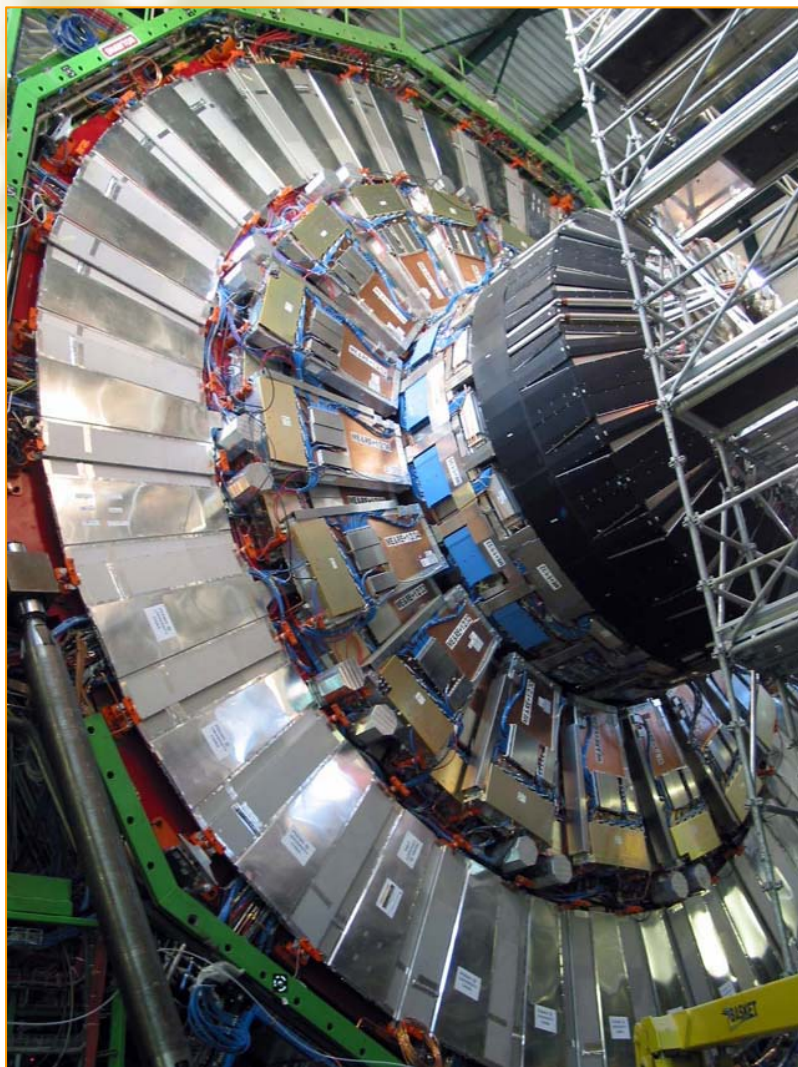
- Magnet
- Tracker
- EM Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Muon detector

北大组承担

Fig. 1.1: Three-dimensional view of the CMS detector.



- RE1/3探测器在CMS端部铁基座上安装 (2006.2.13)

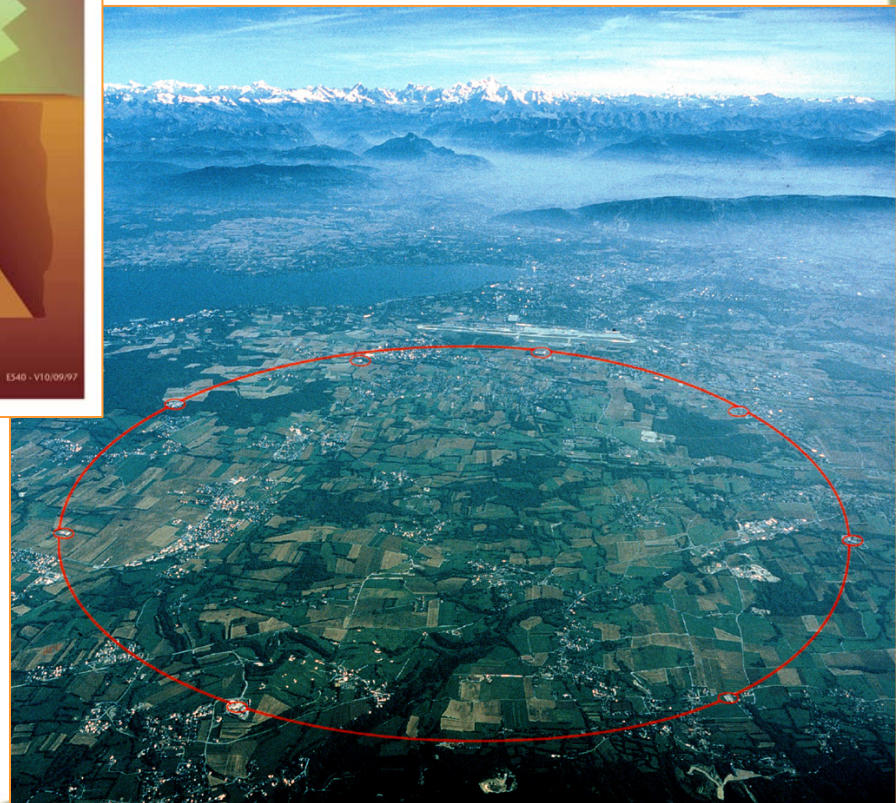
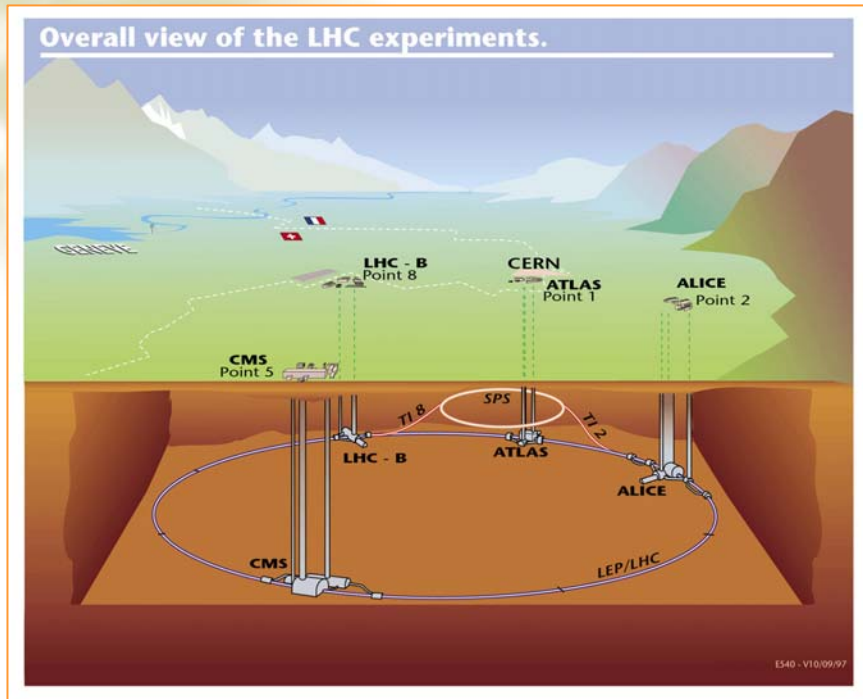


高能物理实验设施的建设和运行要耗费大量的人力物力，是典型的大科学，因此往往需要依靠整个国家或许多国家共同的力量来建设。目前世界上最大型的高能实验中心如：

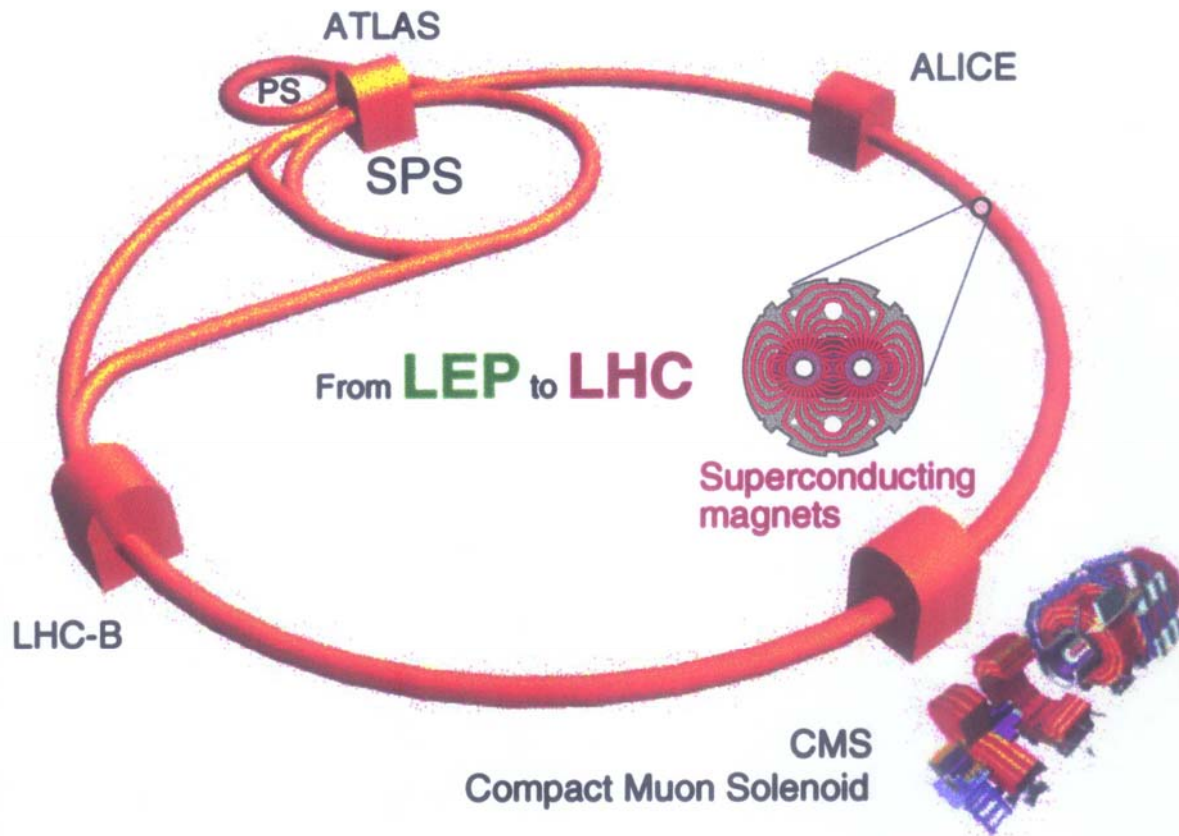
在瑞士日内瓦的欧洲核子中心（CERN）（图12-2），由欧共体成员国共同主办，也吸收其他国家参加。它在1971年建成了能量 $2 \times 31.5 \text{ GeV}$ 、亮度 $3.1 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的pp对撞机ISR；1982年建成了能量 $2 \times (270 \sim 500) \text{ GeV}$ 、亮度 $1 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的对撞机SPS，随后在其上观察到了W和Z玻色子，现在仍用于中微子和K介子物理等；1989年建成了能量 $2 \times 60 \text{ GeV}$ 、亮度 $1.6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的 e^+e^- 对撞机LEP-I，1996年升级为能量 $2 \times 175 \text{ GeV}$ 、亮度 $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的LEP-II，用于W和Z物理等研究，并对限定Higgs玻色子的质量范围起了重要作用；目前正利用LEP的环线建设大型强子对撞机LHC（质子和重离子对撞），预计将在2007-2010年分阶段投入使用，质子碰撞能量 $2 \times 7 \text{ TeV}$ 、亮度 $> 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，这将是人类在一定时期内加速器能量和亮度的极限，主要用于研究Higgs粒子、超对称粒子、CP对称性破缺、b和t夸克物理等，中国政府已投资参与这个目前世界上规模最大的国际合作项目。

≈ 2007-2010 年，在 CERN 建成大型强子对撞机 LHC。

★ 寻找 Higgs!!



The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e ⁺ e ⁻	200 GeV	10 ³² cm ⁻² s ⁻¹
LHC	p p	14 TeV	10 ³⁴
	Pb Pb	1312 TeV	10 ²⁷

在美国意大利诺州的费米国家实验室，1986年建成了能量 $2 \times 1000 \text{ GeV}$ 、亮度约 $10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的对撞机TEVATRON，后升级到亮度约 $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。1994年确定t夸克质量。

在美国纽约的BNL国家实验室，在32GeV的质子和重离子同步加速器的基础上，2000年建成了相对论重离子对撞机RHIC，它提供每核子 $2 \times 250 \text{ GeV}$ 的Au对撞束，亮度约 $2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，主要用于研究夸克-胶子等离子体。还将提供能量 $2 \times 250 \text{ GeV}$ ，亮度约 $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的极化质子对撞束。

在美国加利福尼亚州斯坦福大学的SLAC国家实验室，1987年建成了能量 $2 \times 50 \text{ GeV}$ 、亮度约 $6 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的 e^+e^- 直线型对撞机SLC。2000年在原有的PEP对撞机基础上建成了b工厂。

在美国的康奈尔大学，1979年建成了能量 $2 \times 8 \text{ GeV}$ 、亮度约 $5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的 e^+e^- 对撞机，后来进一步提高亮度，用于研究b物理。

在德国汉堡的**DESY**国家实验室，1990年建成了**30 GeV**的 e^- 与**800 GeV**的 p 对撞机**HERA**，质心能量**317 GeV**、亮度约 **$10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** 。

在中国北京的**BEPC**国家实验室，1988年建成了能量 **$2 \times (2.2 \sim 2.8) \text{ GeV}$** 、亮度约 **$10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** 的 e^+e^- 对撞机，1992年以很高的精度测定 τ 轻子质量，是国际上 τ -粲物理研究中心。目前正在计划升级到亮度约 **$10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** 。

在日本筑波的**KEK**国家实验室，1986年建成了能量 **$2 \times 30 \text{ GeV}$** 、亮度约 **$10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** 的 e^+e^- 对撞机**TRISTAN**，2000年在此基础上建成**b工厂**，亮度达到 **$10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$** 以上。