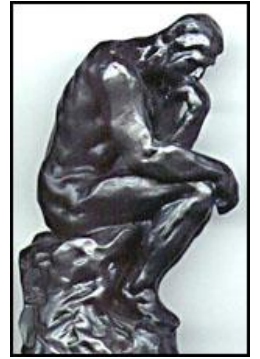




# 概论、预备知识

(introduction,  
preliminary notions)

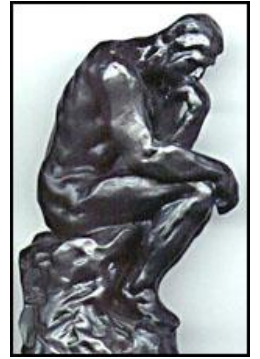


- § 1. 概论：基本粒子和相互作用
- § 2. 自然单位制
- § 3. 相对论运动学
- § 4. 碰撞和衰变
- § 5. 辐射粒子与物质的相互作用
- § 6. 高能粒子来源
- § 7. 粒子探测器



# 概论、预备知识

(introduction,  
preliminary notions)



- § 1. 概论：基本粒子和相互作用
- § 2. 自然单位制
- § 3. 相对论运动学
- § 4. 碰撞和衰变
- § 5. 辐射粒子与物质的相互作用
- § 6. 高能粒子来源
- § 7. 粒子探测器

# § 1. 概论：基本粒子和相互作用 (Elementary Particles and Interactions)

- 粒子物理是研究基本粒子和其相互作用的学科。

— “基本” 具有 “与时俱进” 的意义

→ 粒子物理永远是科学的最前沿学科！

Bob Wilson (first Director of Fermilab), when asked by a Congressional Committee *"What will your lab contribute to the defense of the US?"*, replied *"Nothing, but it will make it worth defending"*.

– C.H.Llewellyn Smith, *The use of basic science*,  
<http://public-archive.web.cern.ch/public-archive/en/About/BasicScience1-en.html>

## 清华大学高能物理研究中心

Center for High Energy Physics, Tsinghua University

### 导航 Contents:

中心简介 About TUHEP  
学术委员会 Committee  
中心成员 People  
研究方向 Research  
招聘信息 Employment  
发表文章 Publication  
论文查阅 Thesis  
文件下载 File Download  
讲义文档 Training

### 链接 Links:

Neutrino Research  
Internal Site  
External Site  
Web Mail  
TU Net  
Campus Map  
TU e-Library  
INSPIRE  
e-Print arXiv  
Rev.Part.Phys.  
Nobel Prize in Physics  
JSPS  
Geant4  
Geant4@in2p3


## 庆祝高能物理研究中心成立十周年! (2004-2014)

AFTER THE HIGGS DISCOVERY:  
WHERE IS FUNDAMENTAL PHYSICS GOING

**希格斯粒子发现之后:  
基础物理学向何处发展**

和世界一流物理学家对话  
FACE TO FACE DIALOGUE WITH WORLD LEADING PHYSICISTS

Moderator: Shing-Tung Yau (Harvard Univ. & Tsinghua Univ., USA, Fields Medalist)  
主持人: 丘成桐 (美国哈佛大学 & 清华大学, 菲尔兹奖获得者)



### 新闻 News:

--> All Events

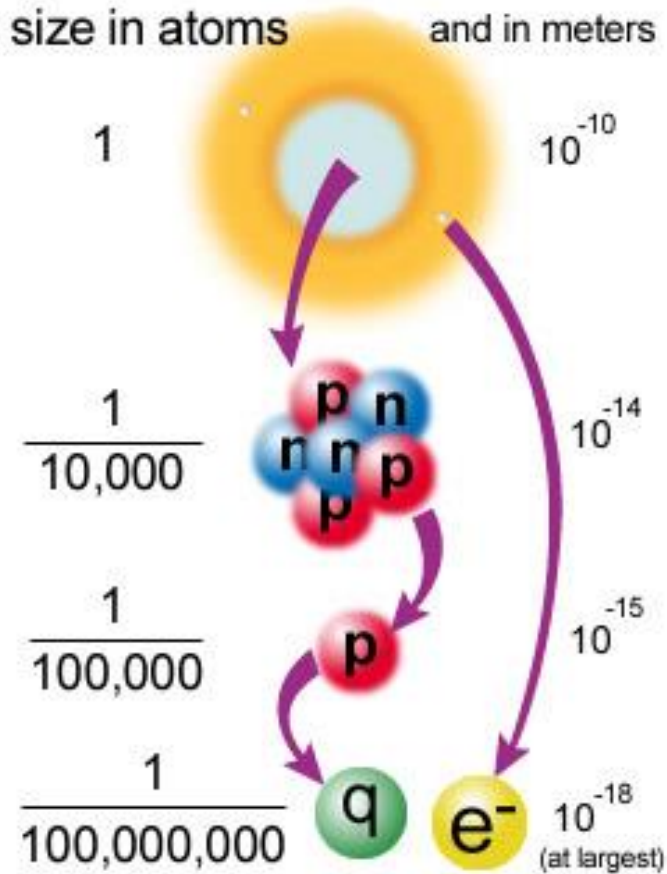
- 希格斯粒子发现之后: 基础物理学向何处发展——和世界一流物理学家对话 (After the Higgs discovery: where is fundamental physics going ---- Face to face dialogue with world leading physicists)  
时间地点: 2月23日(周五)19:30-21:30, 主楼报告厅

### Highlights:

- Prof. Rolf-Dieter Heuer (Director-General of CERN) and Prof. Felicitas Pauss (Coordinator of External Relations of CERN) visit Tsinghua University
- TeV Working Group in China
- CCAST-Tsinghua School on Calorimetry for International Linear Collider
- 2008 Nobel Prize in Physics ( Report from ScienceNet )
- The Coming Revolutions in Particle Physics by Prof. Chris Quigg ( English , Chinese )
- ILC Physics Summary
- Large Hadron Collider (LHC) @ 2008
- Overview on IPMU by Hitoshi Murayama
- International Linear

视频: <http://webcast.ihep.ac.cn:8080/engage/ui/watch.html?id=405e141e-a8f4-4096-b173-bf5c5ce120df>

- 夸克和轻子



Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
Leptons	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

“elementary” particles

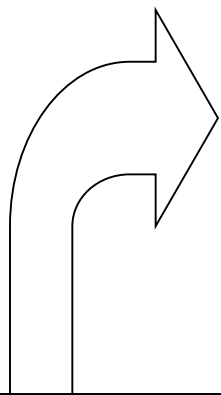


# Matter Constituents

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

$$\pi^+ = (u\bar{d})$$



Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
$e$ electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

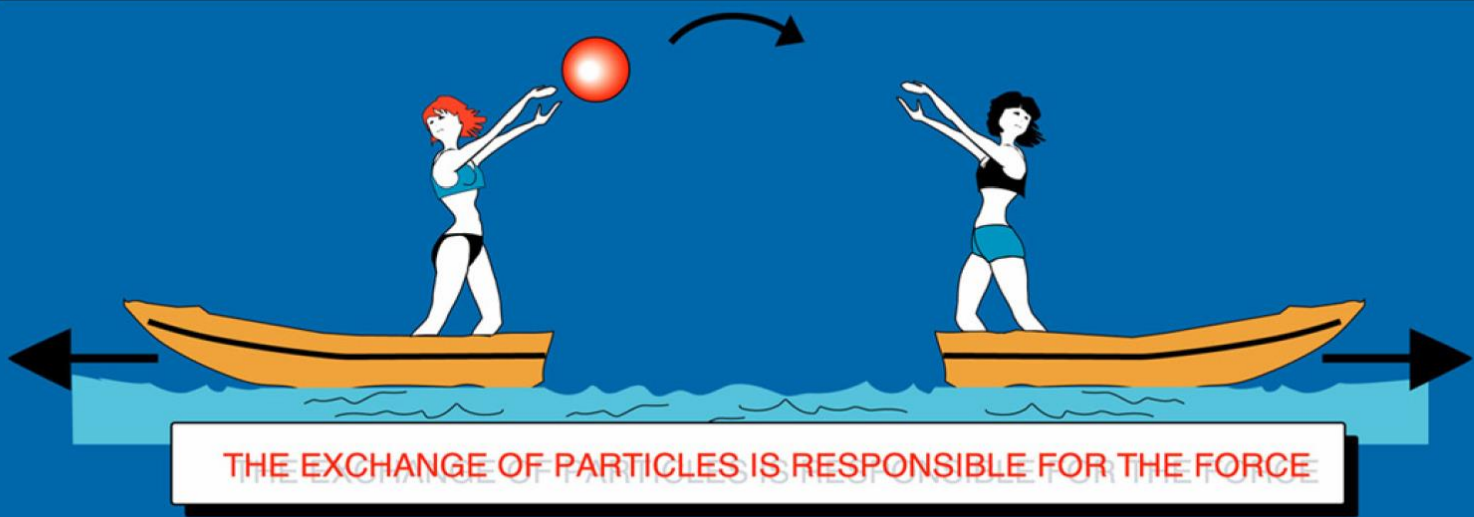


- 为什么3代 ?
- 质量的起源 ?

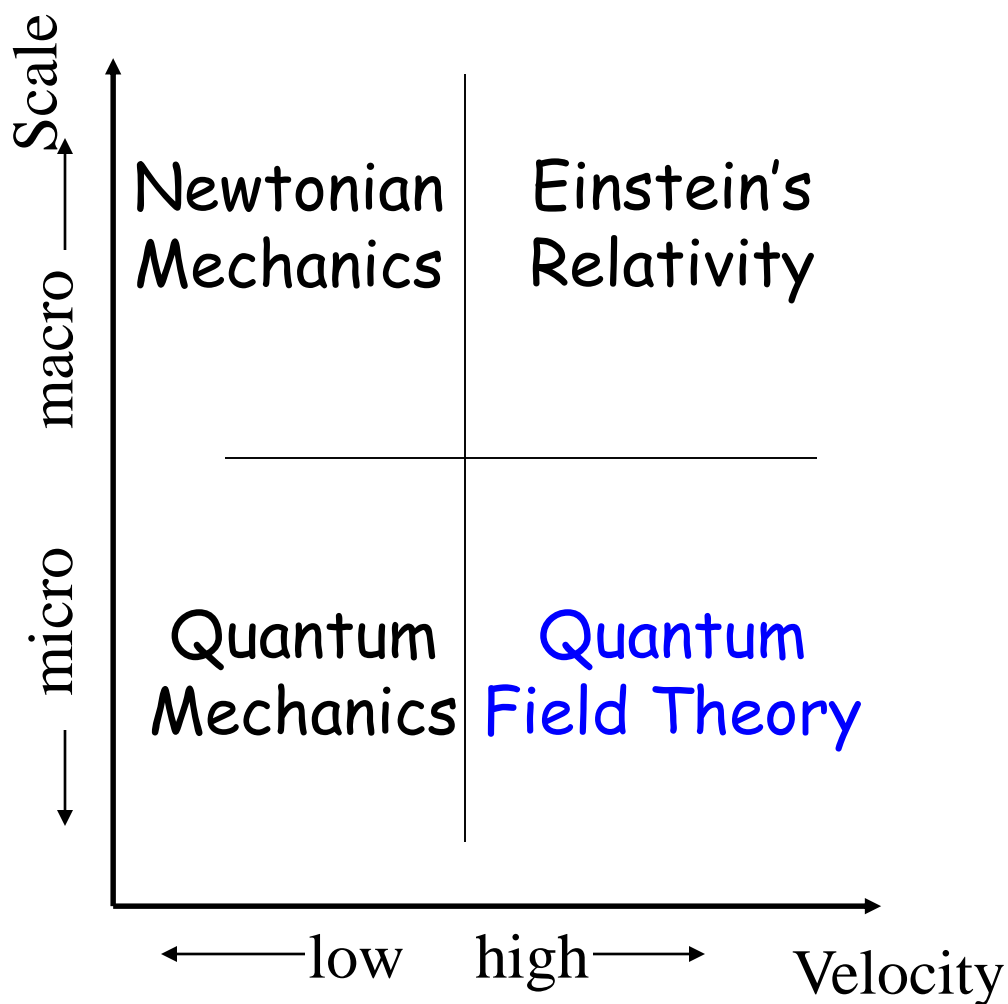
当代粒子物理最重要的问题

• 相互作用

TYPE	INTENSITY OF FORCES ( DECREASING ORDER )	BINDING PARTICLE ( FIELD QUANTUM )	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS ( NO MASS )	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS ( NO MASS )	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ ( HEAVY )	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS ( ? )	HEAVENLY BODIES



- 基本粒子运动的特点



- 微观

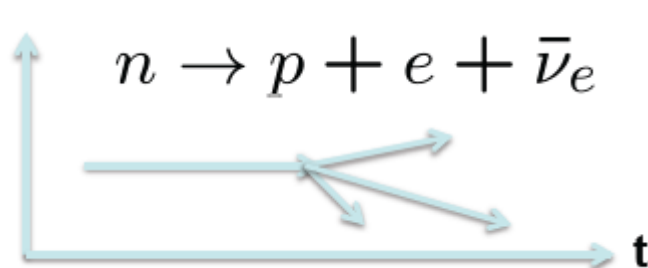
- 高速

- 产生和湮灭

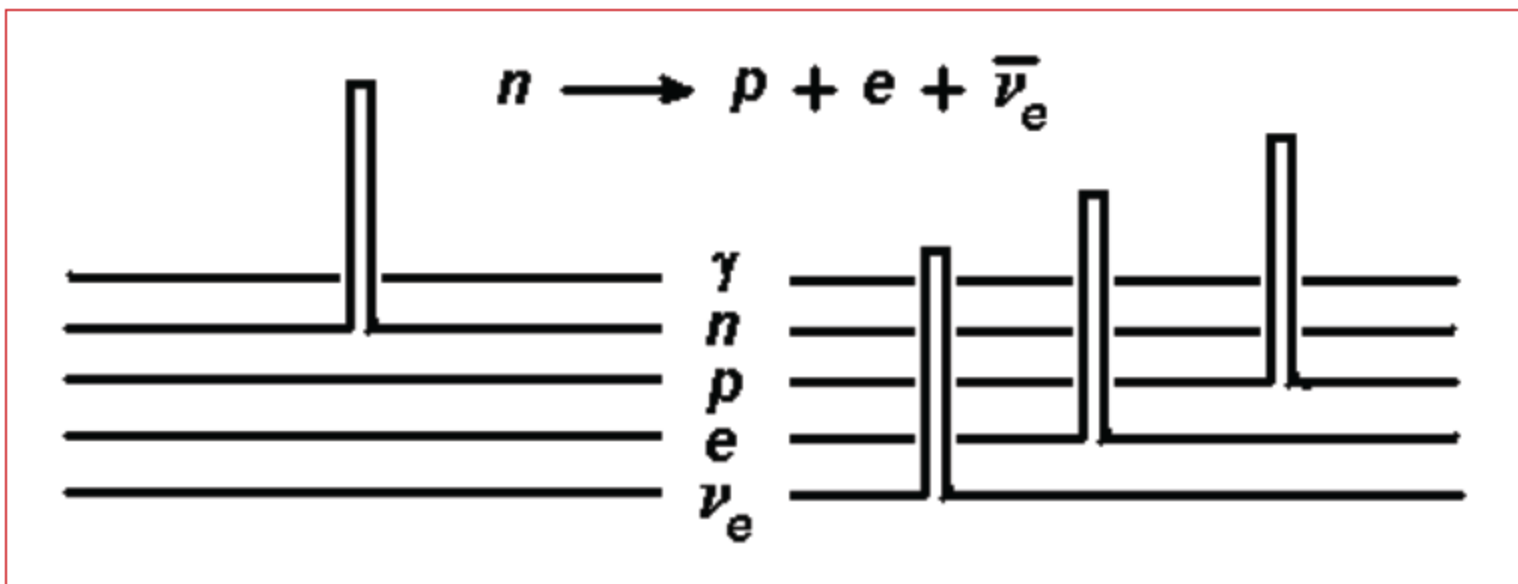


•量子场论：从一个例子谈起…

— 如何理解下面的衰变过程(\*)



$$\begin{aligned}\tau &\rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \\ &\rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \\ &\rightarrow \dots\end{aligned}$$



(\*)选自：高崇寿、曾谨言著 《粒子物理和核物理讲座》

## •量子场论的基本概念

—每种粒子对应一种场，场没有不可入性，对应各种不同粒子的场在空间中相互重叠地充满全空间。

—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。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。

—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。

- 当代粒子物理所研究的“粒子”

- 夸克和轻子

- 传递相互作用的规范玻色子 (gauge bosons)

$$g, \gamma, W^{\pm}, Z^0, \dots$$

- Higgs 粒子

- 其它基本粒子 ( ? )

- 关于复合粒子的研究也是非常重要的内容

$$p, n, \pi, K, \eta, \rho, \phi, \omega, J/\psi, \dots$$

- ♣ 它们本身的性质提供了基本粒子间相互作用的信息;

- ♣ 由于“夸克禁闭”，实验上经常通过研究

$$e^{\pm} + p, \bar{p} + p, p + p$$

- 等反应过程来研究强相互作用的性质。

- **Particle Data Book**

- 粒子数据组每逢双年更新出版一本*Review of Particle Physics*，里面全面收集了全世界粒子物理方面的实验数据及有关资料。

- 同时出版一本把其中主要内容集中起来的小本的手册*Particle Physics Booklet*。

- 这两本资料可以向全世界从事粒子物理工作的同行免费提供，凡需要的人须要个人直接向粒子数据组索要。

- 要求学会使用这本手册（网页）！

<http://pdg.lbl.gov>

# 本课程参考书

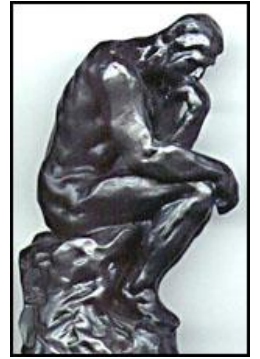
- [0] **A. Bettini, *Introduction to Elementary Particle Physics*,  
Cambridge University Press, 2014**
- [1] **M. Thomson, *Modern Particle Physics*,  
Cambridge University Press, 2013**
- [2] 高崇寿、曾谨言著, 《粒子物理与核物理讲座》, 高等教育出版社, 1990
- [3] **D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*,  
4<sup>th</sup> edition, Cambridge University Press, 2000**
- [4] 高崇寿著, 《群论及其在粒子物理学中的应用》, 高等教育出版社, 1992
- [5] **I. S. Hughes, *Elementary particles*, 3<sup>rd</sup> edition,  
Cambridge University Press, 1991**
- [6] **F. H. Halzen and A. D. Martin, *Quarks and Leptons:  
An Introductory Course in Modern Particle Physics*,  
John Willey & Sons, Inc., 1984**
- [7] **Fayyazuddin & Riazuddin, *A Modern Introduction to  
Particle Physics*, 2<sup>nd</sup> edition, World Scientific 2000**





# 概论、预备知识

(introduction,  
preliminary notions)



- § 1. 概论：基本粒子和相互作用
- § 2. 自然单位制
- § 3. 相对论运动学
- § 4. 碰撞和衰变
- § 5. 辐射粒子与物质的相互作用
- § 6. 高能粒子来源
- § 7. 粒子探测器

## § 2. 自然单位制 (Natural Units)

There is a story about two Hungarian aristocrats who decided to play a game in which the one who calls the largest number wins.

“Well,” said one of them, “you name your number first.”

After a few minutes of hard work the second aristocrat finally named the largest number he could think of.

“Three,” he said.

Now it was the turn of the first one to do the thinking, but after a quarter of an hour he finally gave up.

“You’ve won,” he agreed.

George Gamow, 《One Two Three... Infinity》

- 国际单位制 (**Système International d'Unité, SI**) 对描述粒子物理现象 (微观、高速) 很不方便, 如:

$$\begin{aligned}c &\approx 2.998 \times 10^8 \text{ms}^{-1} \\m_p &\approx 1.67 \times 10^{-27} \text{kg} \\r_p &\sim 10^{-15} \text{m}\end{aligned}$$

公式中经常出现两个物理学常数

$$c, \hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$$

希望选取一个单位制, 在这个单位制下上述两个常数的值可以比较“简单” → 自然单位制。

## • 两种单位制的转换

$$[P_i] \quad (i = 1 \cdots n)$$

$$[Q_j] \quad (j = 1 \cdots n)$$

$$[Q_j] = q_j \prod_{i=1}^n [P_i]^{a_{ij}}$$

物理量的表达:

$$P = p \prod_{i=1}^n [P_i]^{\alpha_i}$$

$$= q \prod_{j=1}^n [Q_j]^{\beta_j}$$

$$= q \prod_{j=1}^n \left\{ \prod_{i=1}^n q_j [P_i]^{a_{ij}} \right\}^{\beta_j}$$

$$\ln p + \sum_{i=1}^n \alpha_i \ln [P_i]$$

$$= \ln q + \ln \prod_{j=1}^n q_j^{\beta_j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \beta_j \ln [P_i]$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} \beta_j = \alpha_i & (i = 1 \cdots n) \\ q = p / \prod_{j=1}^n q_j^{\beta_j} \end{cases}$$

# • SI 和 Natural Units 转换

$$\Rightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} \beta_j = \alpha_i & (i = 1 \cdots n) \\ q = p / \prod_{j=1}^n q_j^{\beta_j} \end{cases}$$

NU:  $E^2 = p^2 + m^2$

$E \rightarrow E/\text{GeV}$

$p \rightarrow p/\text{GeV}/c^{-1}$

$m \rightarrow m/\text{GeV}/c^{-2}$

?

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

$\hbar = 1$

$c = 1$

NU:  $E^2 = p^2 + m^2$

SI 单位制

自然单位制

物理量举例

	[GeV]	[ $\hbar$ ]	[c]	$E$	$p$	$m$	
[M]	1	1	0	1	1	1	$\alpha_i$
[L]	2	2	1	2	1	0	
[T]	-2	-1	-1	-2	-1	0	
$a_{ij}$	GeV	$\hbar$	c				
	$q_j$			1	1	1	$\beta_i$
				0	0	0	
				0	-1	-2	

$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$\hbar = 1.05457168(18) \times 10^{-34} \text{ J s}$

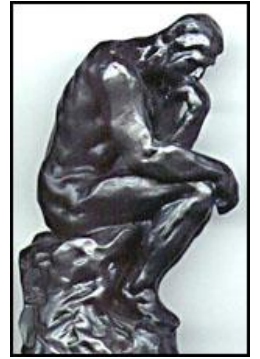
$\text{GeV} = 1.60217653(14) \times 10^{-10} \text{ J}$





# 概论、预备知识

(introduction,  
preliminary notions)



- § 1. 概论：基本粒子和相互作用
- § 2. 自然单位制
- § 3. 相对论运动学
- § 4. 碰撞和衰变
- § 5. 辐射粒子与物质的相互作用
- § 6. 高能粒子来源
- § 7. 粒子探测器

# § 3. 相对论运动学 (Relativistic Kinematics)

- 记号和度规

一个事件由四维时空（Minkowski 空间）的逆变矢量描述

$$x^\mu = (t, x, y, z)$$

定义相应的协变矢量为

$$x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu = (t, -x, -y, -z)$$

重复上下指标约定求和

其中度规张量定义为

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- 洛伦兹变换 (Lorentz boosts)

在一个以速度  $v_f$  沿  $x$  轴运动的参考系中, 时空点  $(t, x, y, z)$  变换为  $(t^*, x^*, y^*, z^*)$ , 变换关系称为 Lorentz boosts

$$\begin{pmatrix} t^* \\ x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_f & -\gamma_f \beta_f & 0 & 0 \\ -\gamma_f \beta_f & \gamma_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

其中

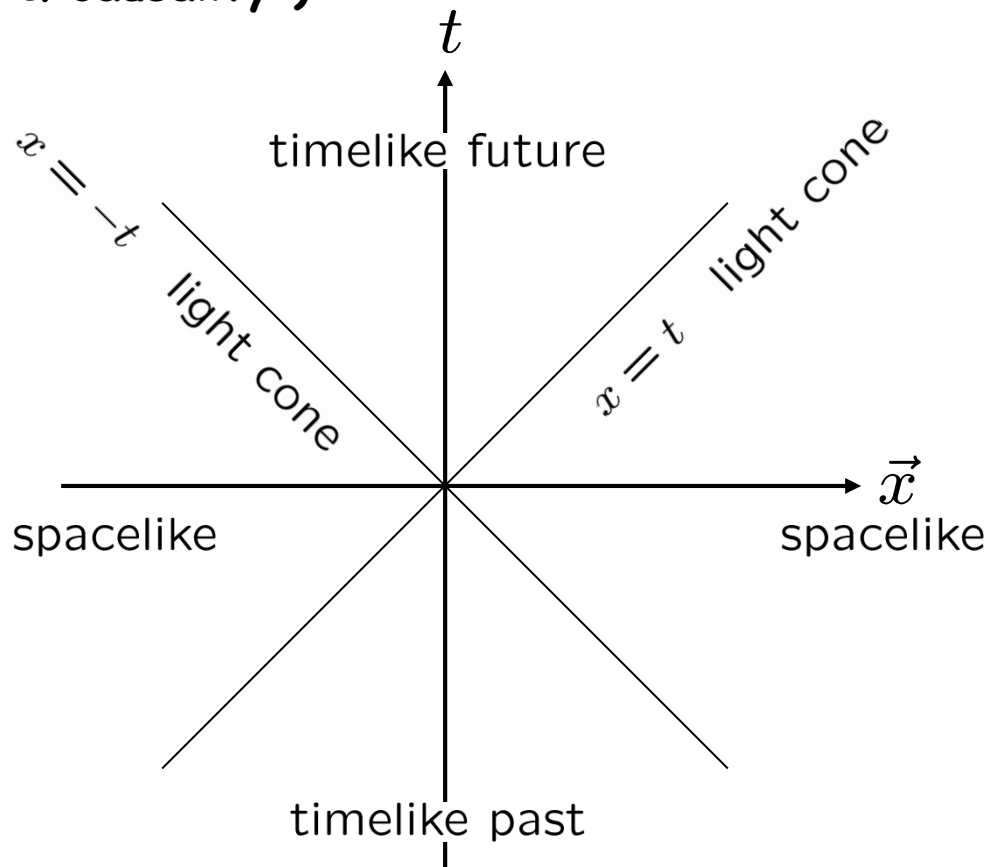
$$\beta_f = \frac{v_f}{c}, \quad \gamma_f = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_f^2}}$$

垂直于运动方向的坐标不变!

- 光锥和因果律 (light cone & causality)

设事件1发生在原点

$$(t, \vec{x}) = (0, \vec{0})$$



具有类空间隔的事件之间不可能有因果联系！（关于量子场论是如何满足此要求，参考 M. E. Peskin, *Quantum Field Theory*, pp.27-29 中的讨论。）

- 矢量 (vectors)

— 有4个分量的物理量，如果具有与时空坐标同样Lorentz变换性质，称为**4-矢量**，或**矢量**。

【例】能量和动量组成矢量

$$p^\mu = (E, \vec{p})$$

在运动参考系中的变换关系

$$\begin{pmatrix} E^* \\ p_{||}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_f & -\gamma_f \beta_f \\ -\gamma_f \beta_f & \gamma_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ p_{||} \end{pmatrix}, \quad \vec{p}_{||}^* = \vec{p}_{||}$$

$$\beta_f = \left| \vec{\beta}_f \right| \quad p_{||} = \frac{\vec{\beta}_f}{\left| \vec{\beta}_f \right|} \cdot \vec{p} \quad \vec{p}_T = \vec{p} - \frac{\vec{\beta}_f}{\left| \vec{\beta}_f \right|} p_{||}$$



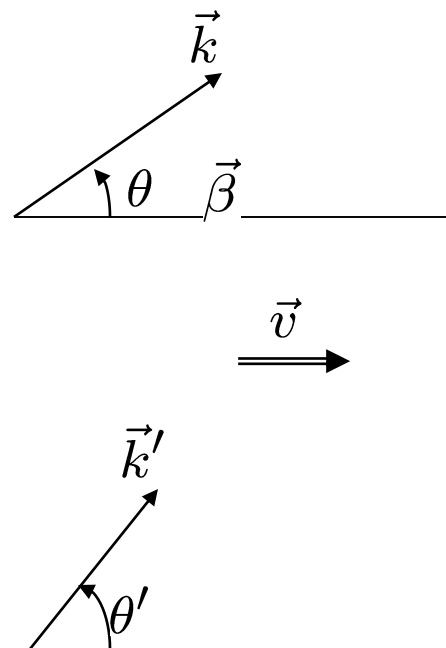
## 【例】角频率和波矢组成矢量

$$k^\mu = (\omega, \vec{k})$$

（因为波的相位  $\phi = k \cdot x = (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})$  是不变量！）

相对光源运动的观察者看到

$$\begin{aligned}\omega' &= \gamma \omega (1 - \beta \cos \theta) \\ \tan \theta' &= \frac{\sin \theta}{\gamma (\cos \theta - \beta)}\end{aligned}$$



即使在横向（ $\theta = \frac{\pi}{2}$ ）依然可以  
看到频率变化！ — 相对论多普勒频移（relativistic Doppler shift）

【例】速度  $\vec{v}$  的Lorentz变换可以从动量的变换关系得到

$$\begin{aligned}\vec{\beta}^* &= \frac{\vec{p}^*}{E^*}, & \vec{\beta} &= \frac{\vec{p}}{E} \\ E^* &= \gamma_f E - \beta_f \gamma_f p_{||} \\ p_{||}^* &= -\beta_f \gamma_f E - \gamma_f p_{||} \\ \vec{p}_{T}^* &= \vec{p}_T\end{aligned}$$

可以得到：

$$\begin{aligned}\beta_{||}^* &= \frac{p_{||}^*}{E^*} = \frac{\beta_{||} - \beta_f}{1 - \beta_{||}\beta_f} \\ \vec{\beta}_{T}^* &= \frac{\vec{p}_{T}^*}{E^*} = \frac{\vec{\beta}_T}{\gamma_f (1 - \beta_{||}\beta_f)}\end{aligned}$$

横向速度在变换前后并不相同？

速度不是某个4-矢量的空间分量！

- 快度和赝快度 (rapidity and pseudo-rapidity)

粒子沿某一方向的快慢也可以用快度  $y$  来描写, 定义如下

$$\tanh y = \beta_{\parallel}$$

快度  $(-\infty, +\infty)$  是速度  $[-1, +1]$  投影的单调函数, 在速度绝对值很小时,

$$y = \beta_{\parallel}$$

在纵向洛伦兹变换下, 快度的变换规律为

$$y^* = y - y_f$$

其中  $y_f$  是两个参考系之间的相对快度。

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_{\parallel}}{E - p_{\parallel}} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \beta_{\parallel}}{1 - \beta_{\parallel}}$$

还可以得到:

$$p_{\parallel} = m_T \sinh y$$

$$E = m_T \cosh y$$

其中  $m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$  称为横质量, 在纵向 Lorentz 变换下不变

实验分析中, 常用赝快度  $\eta$  代替快度, 定义为

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

其中  $\theta$  为粒子运动方向与标准方向 (纵向正方向) 的夹角。

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{|\vec{p}| + p_{\parallel}}{|\vec{p}| - p_{\parallel}}$$

如果  $m \ll p_T$ , 快度与赝快度相差很小。

- 粒子的运动定律 (the law of motion of a particle)

牛顿第二定律  $\vec{F} = d\vec{p} / dt$  在相对论情形仍然适用，其中

$$\vec{p} = m\gamma\vec{\beta}$$

$$\vec{F} = d\vec{p} / dt = m\gamma\vec{a} + m\frac{d\gamma}{dt}\vec{\beta} = m\gamma\vec{a} + m\gamma^3(\vec{a} \cdot \vec{\beta})\vec{\beta}$$

这里力分为两项：第一项平行于加速度，第二项平行于速度

从上式可求出加速度

$$\vec{F} - (\vec{F} \cdot \vec{\beta})\vec{\beta} = m\gamma\vec{a}$$

仅在两种情况下力与加速度方向相同：

(1) 力与速度方向相同： $\vec{F} = m\gamma^3\vec{a}$

(2) 力与速度方向垂直： $\vec{F} = m\gamma\vec{a}$



- 不变量或标量 (invariants or scalars)

— 在Lorentz变换下不变的量（与参考系无关）称为**不变量**或**标量**。

【例】矢量的“缩并”构成不变量

$$a \cdot b \equiv a^\mu b_\mu$$

【例】粒子的不变质量 (invariant mass)

$$m^2 = p \cdot p = E^2 - p^2$$

【例】质点运动的“原时 (proper time) ”

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$ds = dt\sqrt{1 - \beta^2}$$

- 实验室系和质心系 (lab frame and center-of-mass frame)

两个粒子组成的系统（碰撞或者衰变末态），质心系总能量

$$\begin{aligned} E_{cm} &= \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} \\ &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2(1 - \beta_1\beta_2 \cos \theta)} \end{aligned}$$

其中 $\theta$ 为两粒子运动方向夹角。

对打靶实验，第二个粒子静止，质心系能量为

$$E_{cm} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_{1lab}m_2}$$

通常  $E_{1lab} \gg m_1, m_2$  ， 所以  $E_{cm} \approx \sqrt{2E_{1lab}m_2}$

实验室中观测质心运动速度  $\beta_c = \frac{p_{1lab}}{E_{1lab} + m_2}$

相应的质心运动因子  $\gamma_c = \frac{E_{1lab} + m_2}{E_{cm}}$

- $n$  个粒子反应的不变量

考虑一个粒子的衰变或两个粒子碰撞所产生的反应，如果初态和末态共涉及 $n$ 个粒子，考察由这 $n$ 个粒子的四维动量

$p_i^\mu$ ,  $i=1,2,\cdots n$  可以组成多少个**Lorentz** 不变量

由于能动量守恒，这 $n$ 个四维动量中只有 $n-1$ 个是独立的，它们能构成的**Lorentz**不变量  $p_i^\mu p_{j\mu}$  共有 $n(n-1)/2$ ，但其中 $n$ 个是 $n$ 个粒子的质壳条件，还有 $n(n-3)/2$ 可以变化

$n$	4	5	6	7	8	9
衰变末态粒子数	3	4	5	6	7	8
反应末态粒子数	2	3	4	5	6	7
独立不变量个数	2	5	9	14	20	27

不变量个数随 $n$ 增加迅速增长。

对二体到二体的反应，用 $i = 1, 2$ 标记初态的两个粒子， $3, 4$ 标记两个末态粒子，可以构成三个Lorentz不变量：

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2 = m_1^2 + m_3^2 - 2E_1E_3 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_3$$

$$u = (p_1 - p_4)^2 = (p_2 - p_3)^2 = m_1^2 + m_4^2 - 2E_1E_4 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_4$$

它们中只有两个是独立的，实际上它们满足关系：

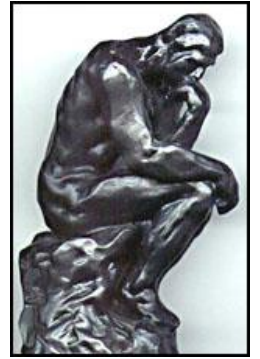
$$s + t + u = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2$$

$s$ 为质心系总能量的平方， $t$ 和 $u$ 称为四维动量转移的平方



# 概论、预备知识

(introduction,  
preliminary notions)



- § 1. 概论：基本粒子和相互作用
- § 2. 自然单位制
- § 3. 相对论运动学
- § 4. 碰撞和衰变**
- § 5. 辐射粒子与物质的相互作用
- § 6. 高能粒子来源
- § 7. 粒子探测器

# § 4. 碰撞和衰变

## (Collisions and decays)

粒子物理处理两种过程：碰撞和衰变  
跃迁矩阵元：

$$M_{fi} = \langle f | H_{\text{int}} | i \rangle$$

碰撞：  $a + b \rightarrow c + d + \dots$

关注反应的散射截面 (**cross section**)  $\sigma$

衰变：  $a \rightarrow b + c + d + \dots$

关注衰变率 (**decay rate**)  $\Gamma$

本质上都是计算单位时间发生相互作用的次数