

# 粒子物理标准模型简介

曹庆宏

北京大学物理学院 和  
北京大学高能物理中心



北京大学



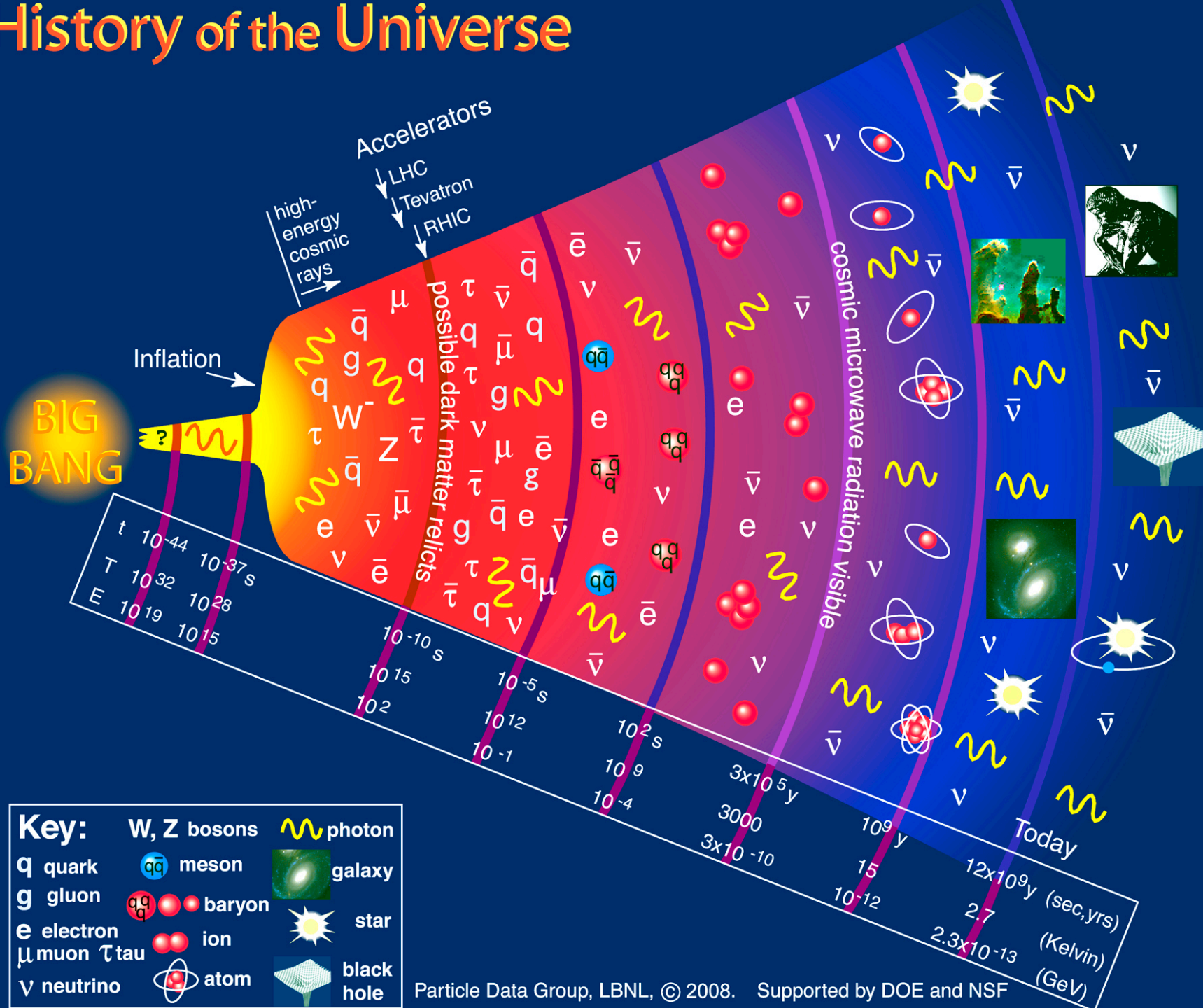
我是谁？

我从哪来？

我到那去？



# History of the Universe



# 宇宙的标准模型

---

- General Relativity  
(Einstein)
- Cosmological Principle  
(The three-space of constant time are homogeneous and isotropic, at all time)
- Particle Physics  
(To describe particle content of the early universe)

# 推荐读物

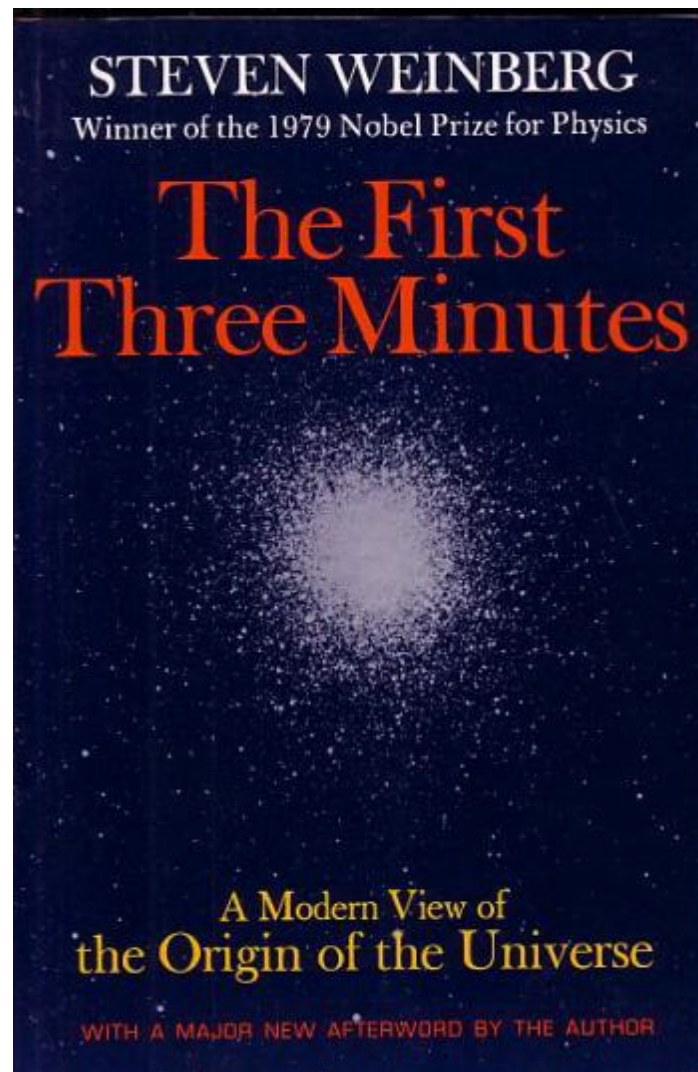
---

*The First Three Minutes*

by

Steven Weinberg

Describes the history of the early universe, and the history of how we learned about the early universe.



# 科学研究的目的是简化

- 为何世间万物有共同的特征？
- 人们逐渐意识到物质世界是由自然界的**基本组成成分**所构造的。



物体

规律

物

理

量纲

尺度

自由度

因子化



“何为世界基本组分？”  
和  
“它们如何相互作用？”

# 基本粒子物理 或 高能物理

研究自然界的  
基本相互作用（力）



# 自然界的最基本组分

---

20世纪初人们认为自然界最基本的组分是原子。

# 原子是基本组分吗？

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F			Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl			Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I			Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At			Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub								
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

元素周期表 —— 不同原子可以具有相似的化学性质

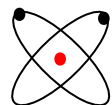
原子具有内部结构！

# 原子核与电子

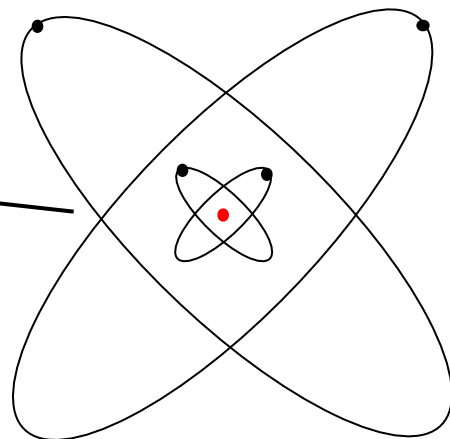
原子由更加基本简单的组分构成

H																		He
Li	Be										B	C	N	O	F		Ne	
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl		Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub							
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Helium

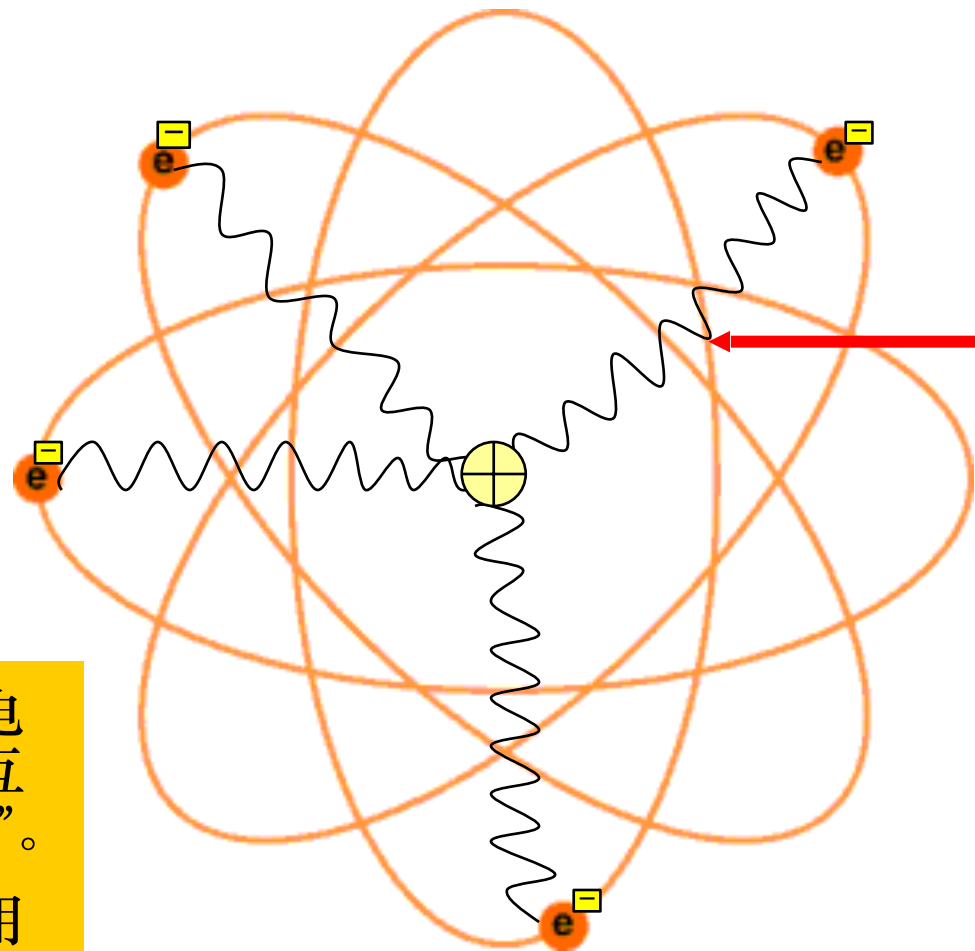


Neon



所有原子都是由  
原子核和外层电子构成

# 光子将原子紧密结合起来



电磁吸引势是由原子核与电子之间交换光子产生的

(量子电动力学  
Quantum  
Electrodynamics,  
简称为QED)

我们将原子核与电子之间的电磁相互作用称为“库仑力”。

传递电磁相互作用的量子就是光子。

Feynman, Schwinger, Tomonaga  
1965 Nobel Prize

# 原子核是否为基本组分？

---

原子核周围密布带负电的电子云。为了探测原子核（或原子）的内部结构，人们使用高能粒子轰击原子核来进一步“看清”其内部的性质。

人们发现原子核是由质子（proton，带有正电荷）和中子（neutron，电中性）组成。

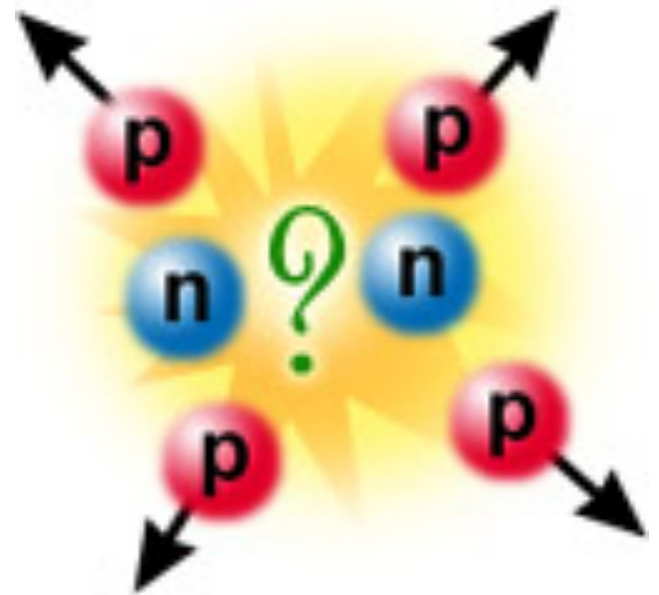
Proton: Rutherford 1911  
neutron: Chadwick 1932



# 核力将核子们束缚成团

通过交换光子，电磁力将原子核和电子紧密结合成原子。

类似地, 1935年汤川秀树提出：  
核子之间交换Pion介子从而  
束缚成团。

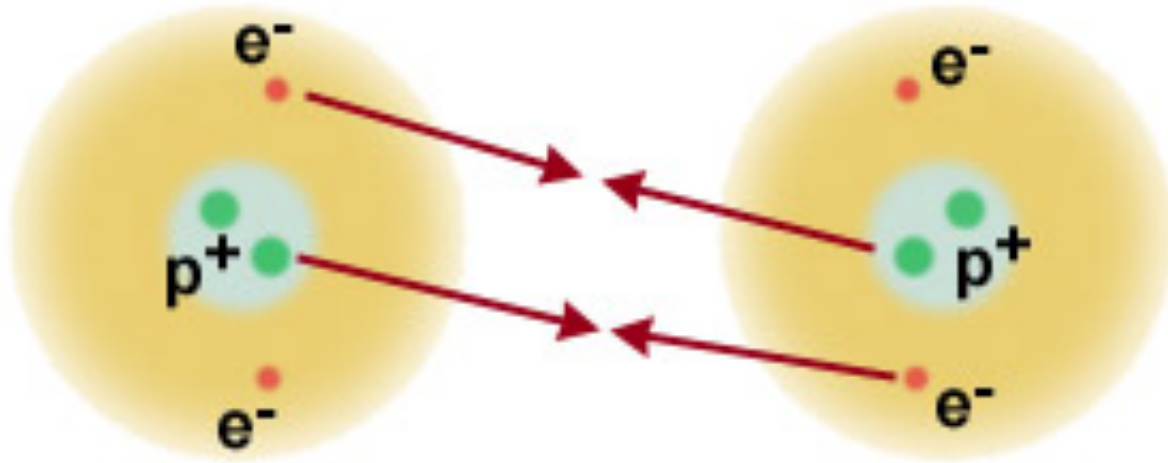


1947年Powell发现荷电Pion介子。

Yukawa, 1949 Nobel Prize

# 电中性原子如何形成稳定分子？

剩余电磁相互作用（Residual electromagnetic force）使得不同原子抱团形成稳定分子。



原子内部电子与其他原子的原子核之间的电磁相互作用

世间万物稳定存在仅仅是因为电子和质子的电荷相反！

神奇吧？

# 粒子动物园

1937前我们对于自然界的认识是异常简单的：

物质是由质子、中子和电子组成。

但上个世纪60年代，人们突然发现超过60个新粒子(其中大部分都不是基本粒子)，例如

$K^0$

(Rochester, Butler, 1947)

$K^+$

(Powell, 1949)

$\pi^0$

(Neutral pion, 1950)

物理学家寻找这些新粒子之间是否存在类似“元素周期表”的模式

如果存在某种模式，那就意味着这些新粒子不是自然界的基本组分。



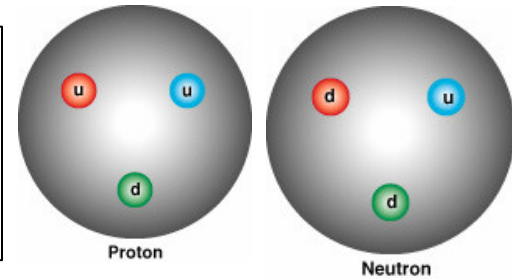
# 质子和中子是基本组分吗？

盖尔曼 (Gell-mann) 发现质子、中子、Pion和Kion等粒子背后的隐藏模式，他称之为“八正法”(The Eightfold Way)，也即朴素的夸克(Quark)模型。

质子和中子包含了更基本的组分——夸克。

Proton = ( u u d )     u = up quark

Neutron = ( u d d )     d = down quark



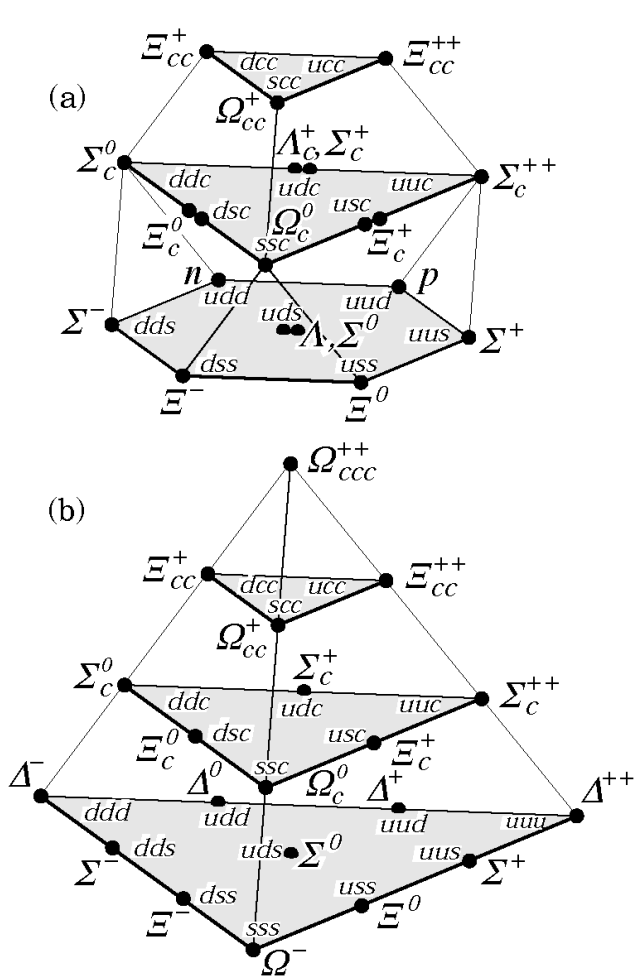
其他新粒子(例如pion、kion ...) 都是由夸克组成的。

重子(Baryon): (qqq)

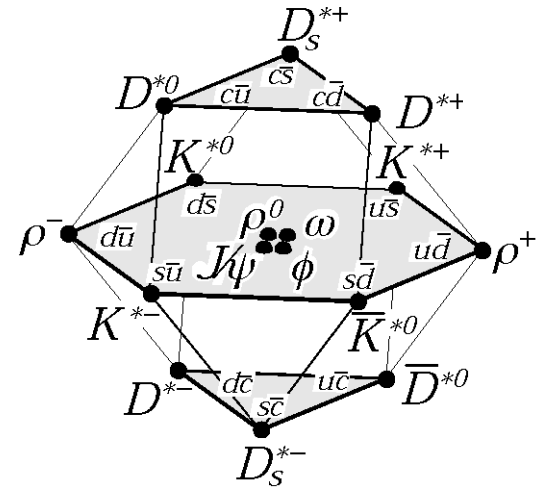
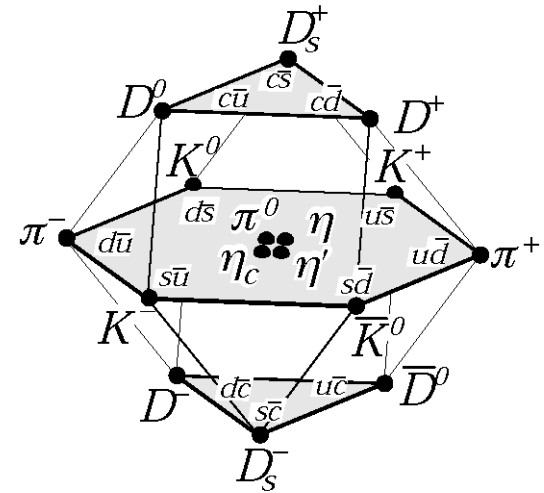
介子(Meson): (q $\bar{q}$ )

Gell-Mann  
1969 Nobel Prize

# 强子谱内的SU(3)模式



预言了存在  
Ω粒子，  
并且估算出  
其质量

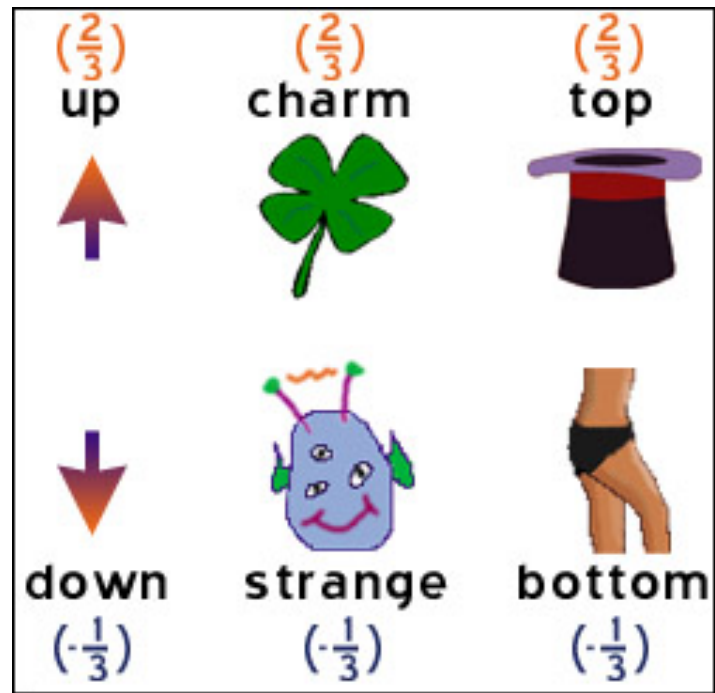


# 夸克 (Quark)

自然界存在3对 (6种) 夸克。

**上**(up)夸克和**下**(down)夸克是质子和中子的主要组成成分，从而也是大部分物质的组分。

其他4种夸克是在高能散射实验或宇宙线观测实验中被发现的。



1974, 丁肇中和Richer发现粲夸克(charm quark), 11月革命.

1977, Lederman发现底夸克 (bottom quark).

1995, 美国费米实验室发现顶夸克 (top quark).

# 胶子将夸克粘在一起

夸克具有电荷,也带有另一种荷——色荷(color charge)。

两个带有色荷的粒子之间存在非常强烈的作用力,因此通常将这种力命名为“强力”(strong force)。

强力将夸克黏在一起形成强子,因此传播强力的媒介粒子被称作为胶子 (gluon) 。



# 强力到底有多强?

夸克束缚势:

$$V(r) \sim -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$



$$m_{\text{proton}} \sim 10^9 \text{eV}$$

$$r_{\text{proton}} \sim 10^{-15} \text{m}$$

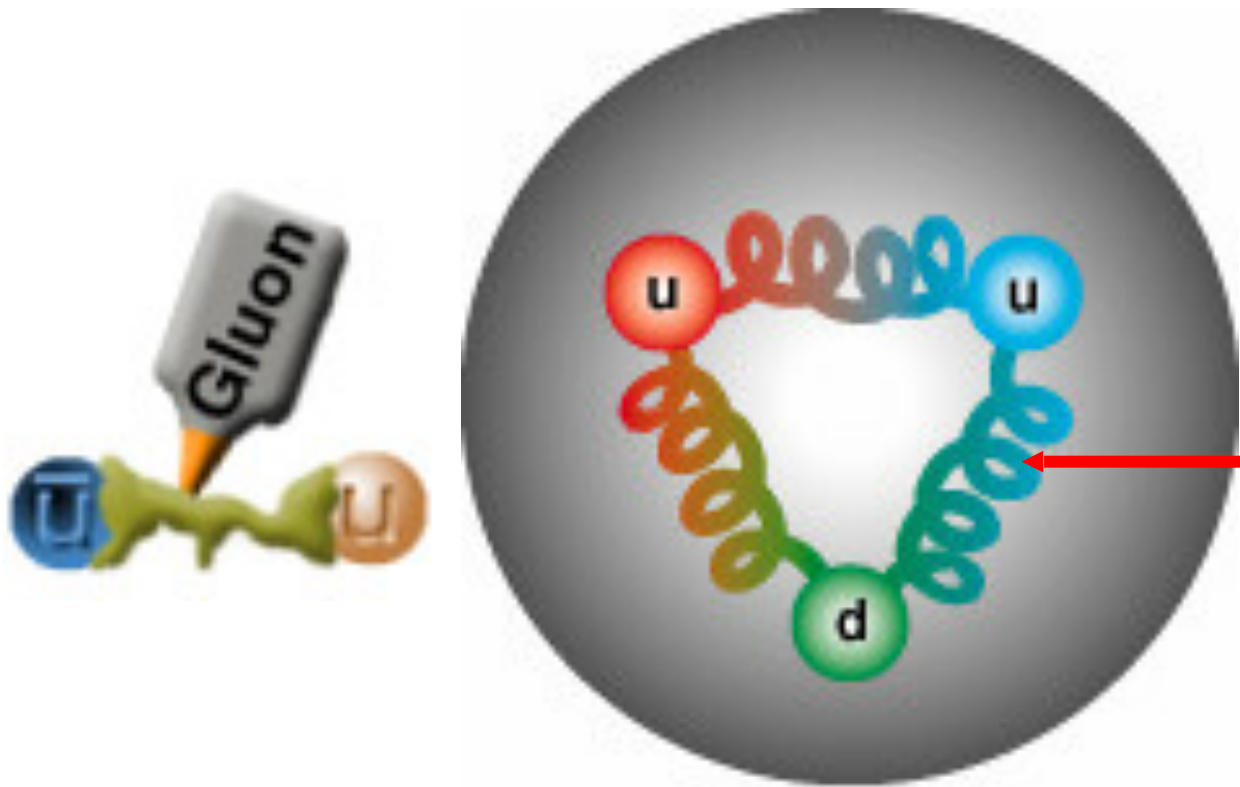
**k**: 色力强弱

$$m_{\text{proton}} \simeq kr_{\text{proton}} \quad \longrightarrow \quad k \sim \frac{10^9 \text{eV}}{10^{-15} \text{m}} \sim \frac{10^{24} \text{eV}}{\text{m}}$$

$$1N = \frac{1 \text{kg m}}{\text{s}^2} \sim 2.2 \times 10^{12} \text{eV}^2$$

$\longrightarrow k \sim 10^5 N \sim$  地球上10吨货物的重量

# 胶子将夸克粘在一起



夸克间交换胶子的  
相互作用是

量子色动力学

Quantum  
Chromodynamics  
(QCD)

高能作用具有  
渐进自由性质

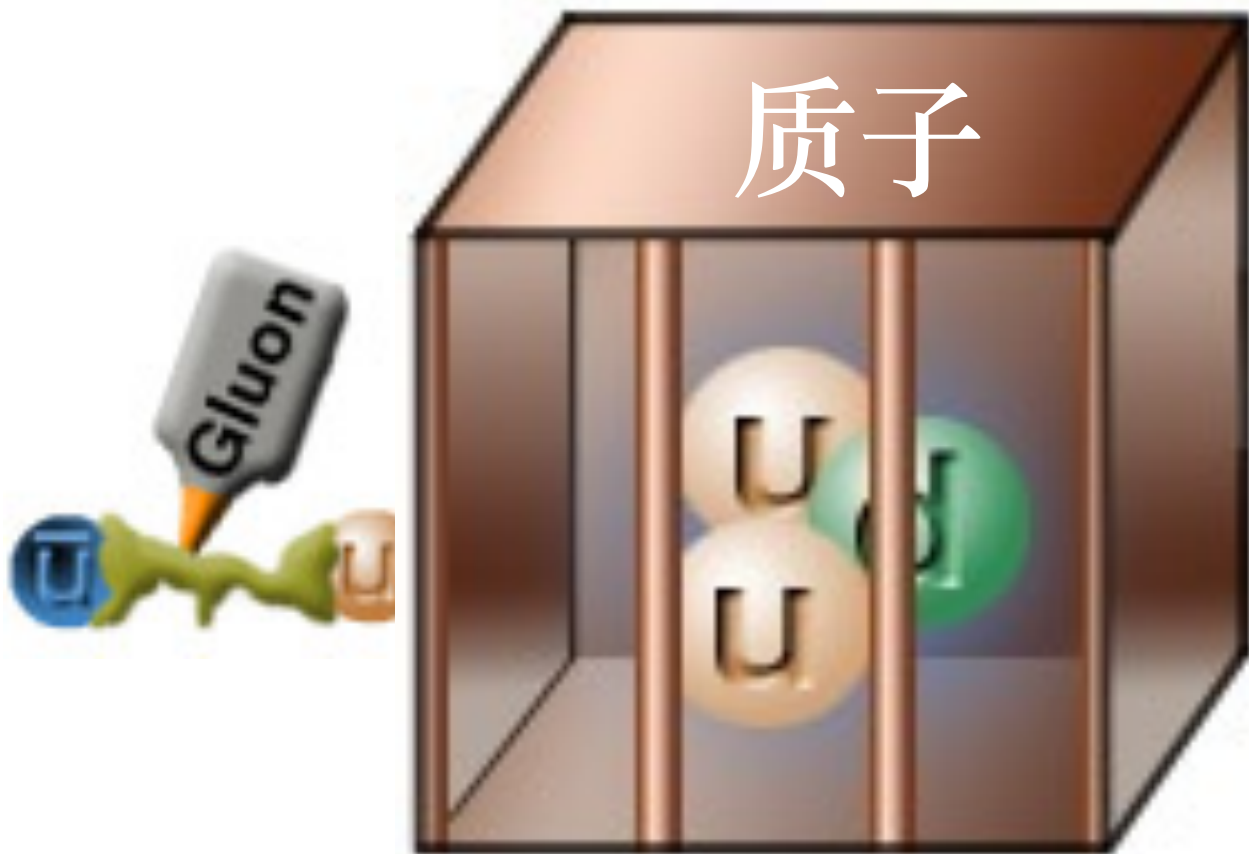
Gross, Wilczek,  
Politzer, 1973

1973年DESY(PETRA)确认胶子存在

$$e^+e^- \rightarrow 3\text{jets}$$

Gross, Wilczek, Politzer,  
2004 Nobel Prize

# 胶子将夸克粘在一起



低能时强力异常强，  
将夸克完全束缚在  
质子中，使得我们  
无法观测到自由夸克。

(红外色紧闭)

This is one of the “million dollar questions!”

1973年DESY(PETRA)确认胶子存在  
 $e^+e^- \rightarrow 3\text{jets}$

Gross, Wilczek, Politzer,  
2004 Nobel Prize

# 核力起源

---

现在重新看一下核力！

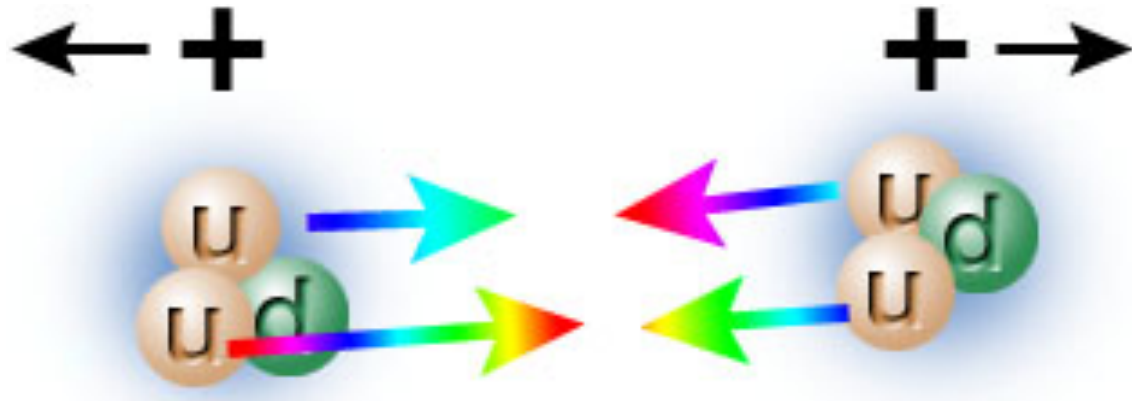
原子核包含多个质子和中子。中子不带电，但荷电的质子之间存在强烈的电磁排除力。为何原子核没有四分五裂呢？

显然，电磁相互作用无法将核子们束缚起来。还有什么相互作用（力）？



# 剩余强胶子力

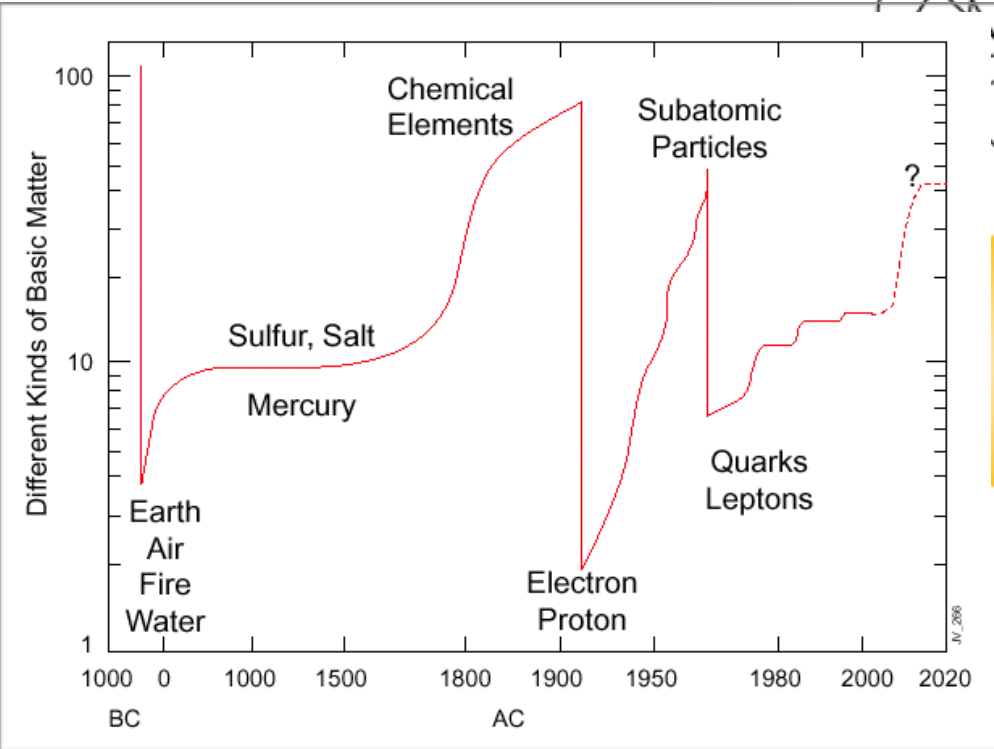
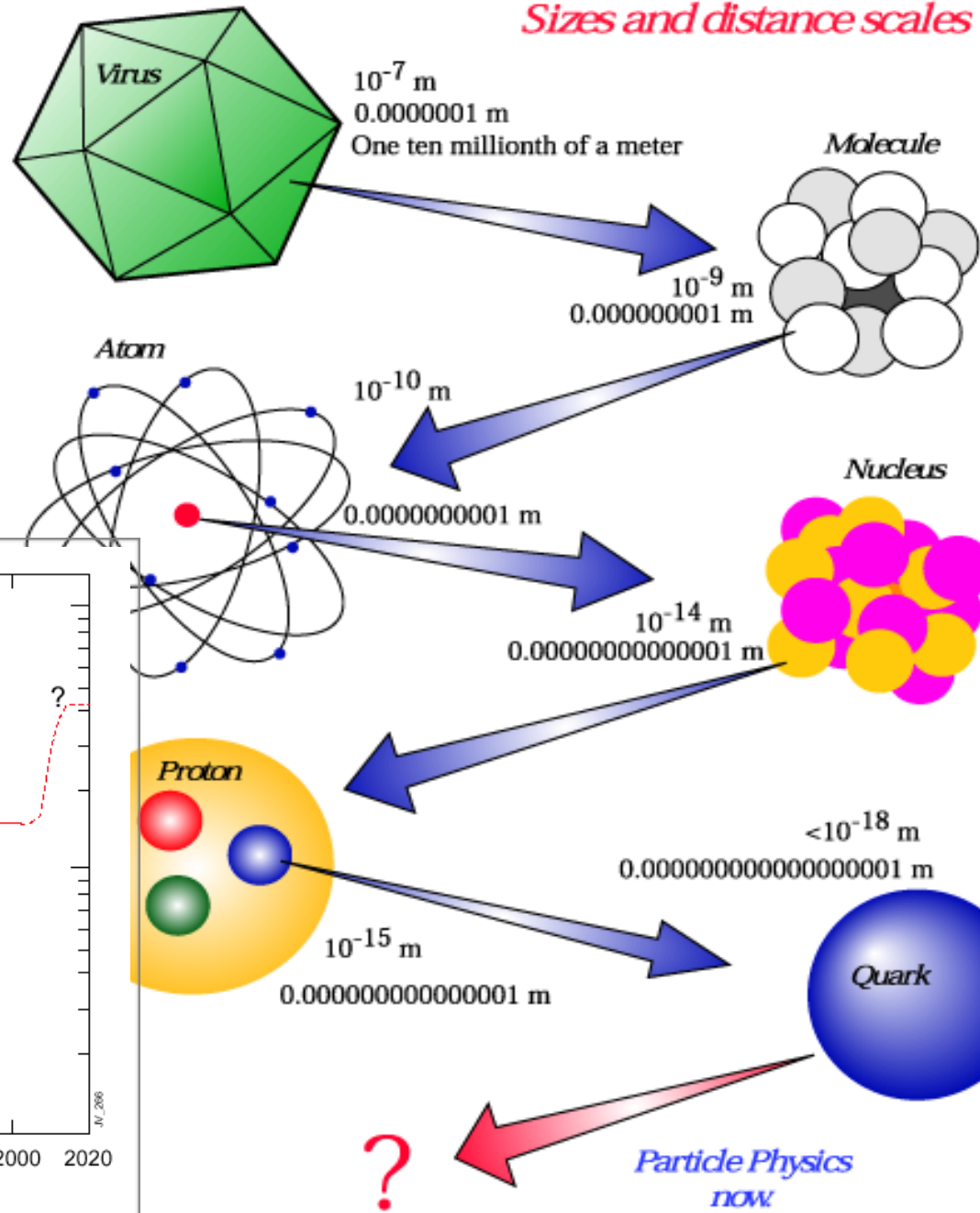
虽然夸克具有色荷，但夸克组成的强子是**色中性的**（不带有色荷），因此强力仅仅发生在夸克尺度上。这也是我们日常生活中不会注意到强力的原因。



强子内部夸克和其他强子内部夸克之间的剩余强胶子力使得质子和中子克服排斥电子力后抱成一团。

# 历经千年风雨， 我们终于知道...

*Sizes and distance scales*



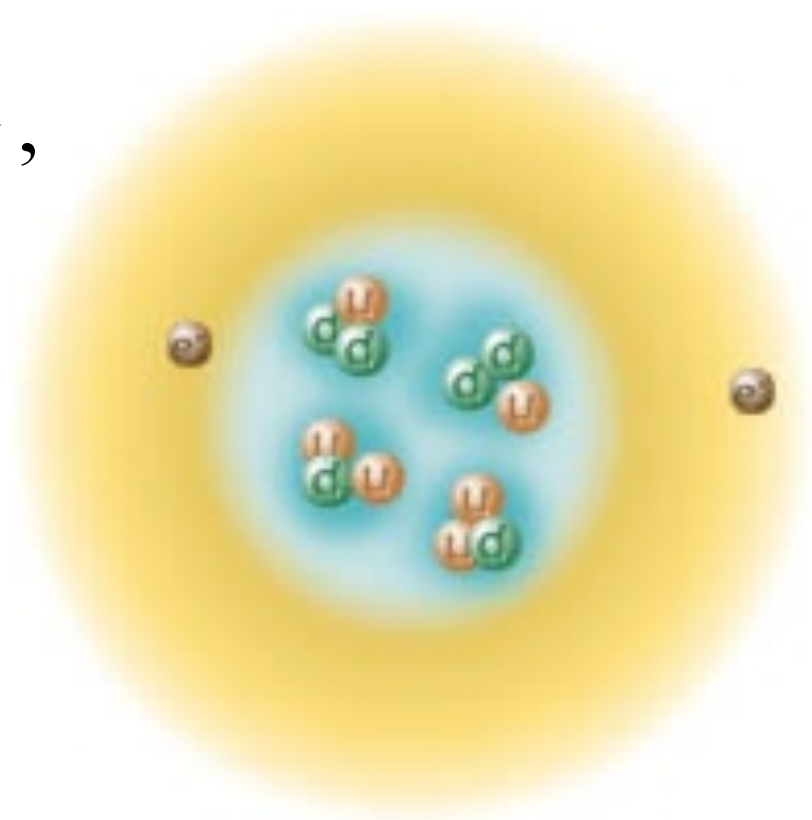
# 小结：现代原子模型

---

电子和原子核组成原子，

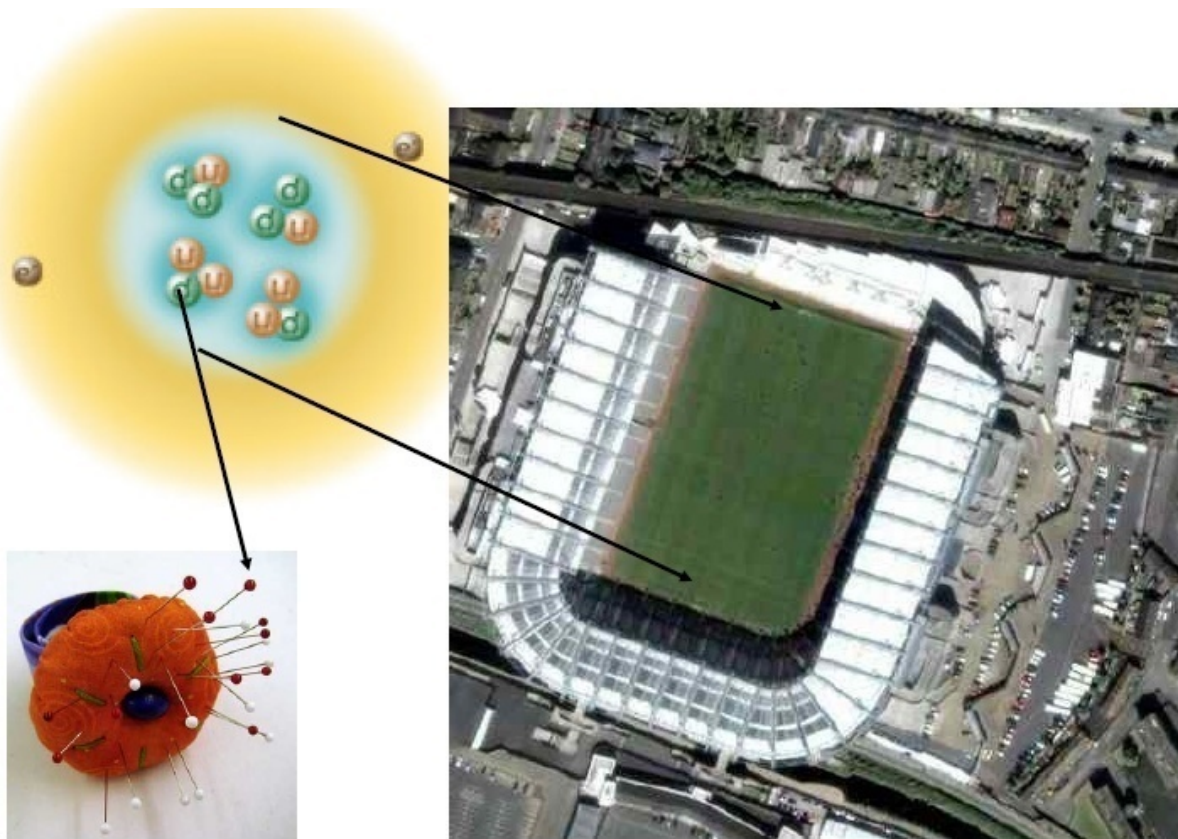
原子核由核子  
(质子和中子) 组成，

核子则是由夸克构成。



# 原子内部99.999999999%空间都是空的!

假设质子和中子直径是1厘米，那么电子和夸克的尺寸将比我们头发直径还要小。此时原子直径将比30个足球场还要大。



$$r_{\text{atom}} \sim 10^{-10} \text{m}$$

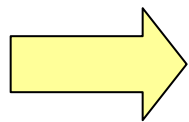
$$r_{\text{proton}} \sim 10^{-15} \text{m}$$

$$r_{e^{\pm}, q} < 10^{-18} \text{m}$$

# Empty Space ?

---

- 原子内部的“小宇宙”大部分都是空无一物的。
- 事实上，质子中3个组分夸克 ( **u u d** ) 仅仅占据质子体积的十亿分之一 ( $10^{-9}$ )。



Lots of “Emptiness”

空空如也背后的真实物理是什么？

# 质量起源于相互作用

---

夸克对于质子 (uud) 质量的贡献是非常少的，  
仅占质子质量的1.3%左右。

99.7%的质子质量起源于3个夸克之间的相互作用。

(质量是动能和势能)

Nambu (Nobel Prize 2008)

这些能量所转换的质子质量可用Einstein质能关系  
计算：

$$E = M c^2$$

光速  $c = 3 \times 10^8 \text{m/sec}$

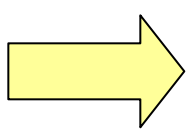
---

# 空心的质子

---

质子内部超过99.9999999%的空间都是空的！

但绝大部分的质子质量却是源于这些空无一物之处。



空 非 空

“Emptiness” is not “void”.

质量即能量  
(色 即是 空)

“色即是空”的关键所在是

反物质

Anti-matter



# 反物质

狄拉克(Dirac)的电子理论(1920's)结合了量子力学和狭义相对论预言了:

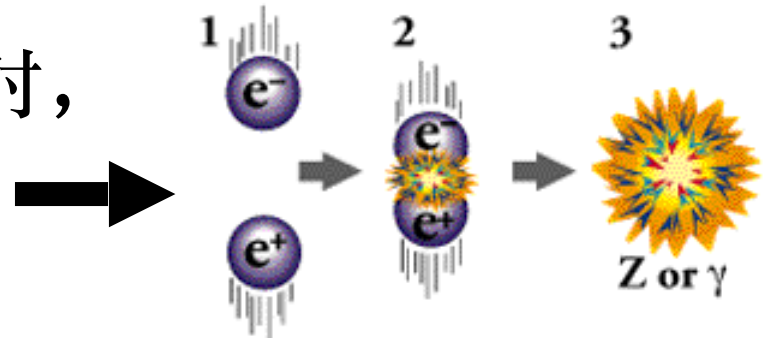
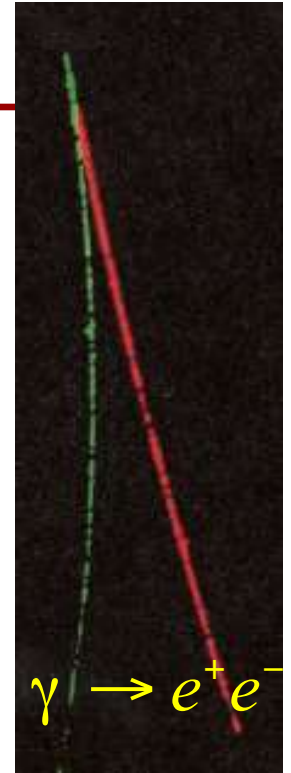
每种物质粒子都具有相应的反物质粒子, 简称为反粒子。

纯能量可以产生一对粒子和反粒子。

空即是色。

当物质粒子和反物质粒子相遇时, 湮没对方后转化纯能量。

色即是空。



# 反物质存在的实验证据

The production and properties of positrons

*Nobel Lecture, December 12, 1936*

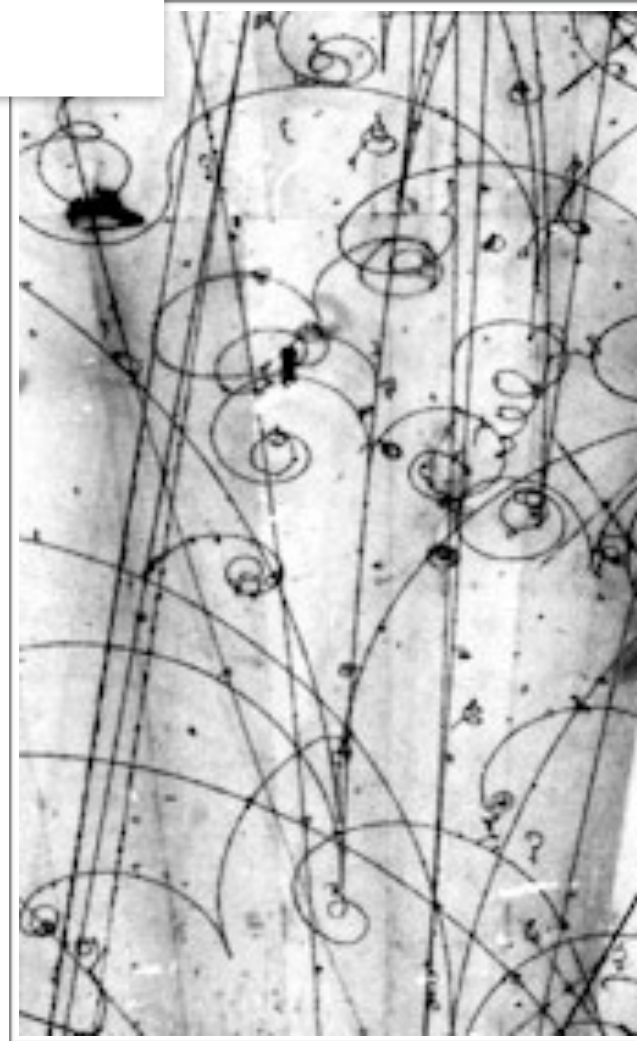
Carl D. Anderson

质子轰击靶核产物的云雾室照片。

云雾室置放于强磁场中，  
带电产物发生偏转并留下穿行轨迹，  
相反电荷粒子的偏转方向相反。

如何判断是否存在反物质？

- 1) 正电子（反电子）偏转方向和电子相反。
- 2) 正负电子源于光子，光子无径迹，  
因此正负电子突然出现并发生反向偏转。

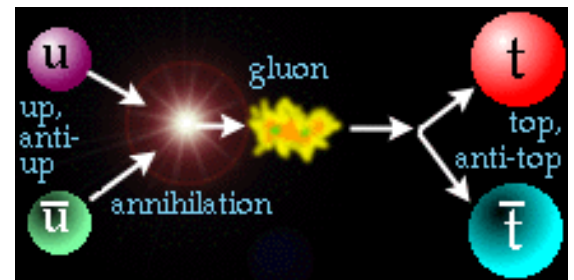


# 正反物质湮没

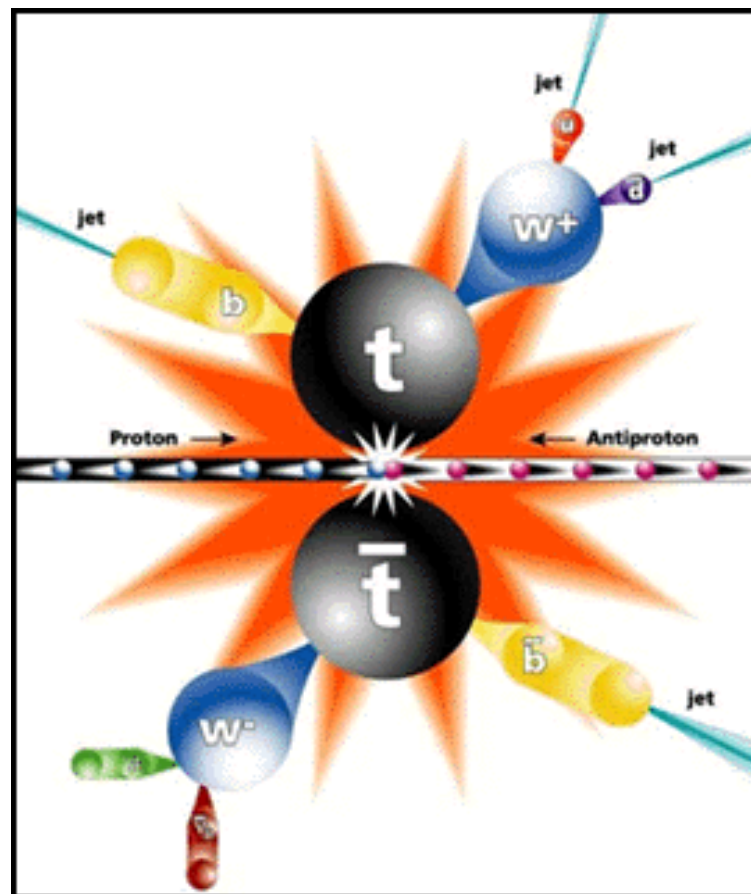
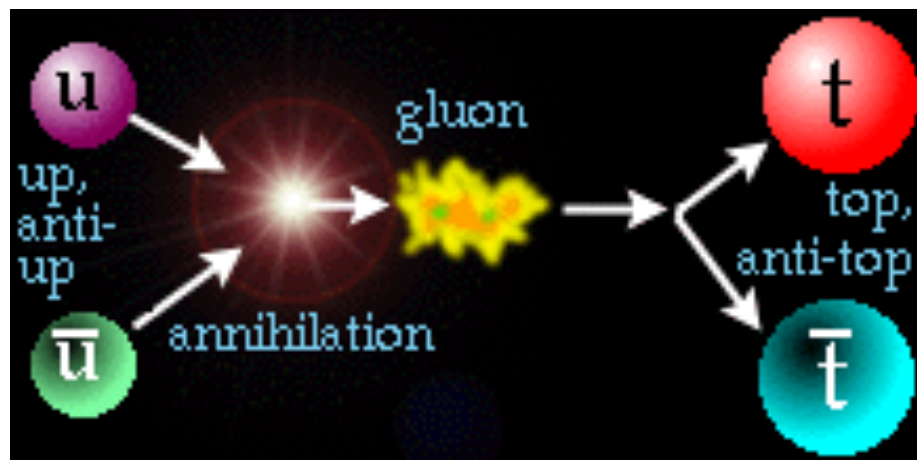
通过湮没，正负物质完全转化为能量。

湮没过程中，正负物质粒子发生相互作用后转化为相同能量的力的载体粒子（胶子、光子或W/Z粒子）。这些媒介粒子再继续和其他粒子发生相互作用。

已经退役的美国费米实验室的Tevatron对撞机就是将极高能量的正反质子湮没后产生新的大质量粒子。



# Top Quark and Anti-Top Quark Pair Production at Hadron Collider



1995年费米实验室  
首次发现顶夸克

# 反物质？ 纯能量？ 这是嘛？

---

反物质听起来很奇怪，它完全违背我们对宇宙认识。

我们的世界完全是由物质组成。

如果电荷完全相反的物质和反物质具有相同份额，为什么我们生活在物质主导的世界中。

反物质那里去了？

# 早期宇宙中物质和反物质

10,000,000,001

物质

10,000,000,000

反物质

# 目前宇宙中物质和反物质

• 我们  
难以置信的  
精确相消  
(0.00000000001)

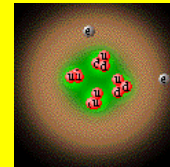
物质

反物质

This is one of the “million dollar questions!”



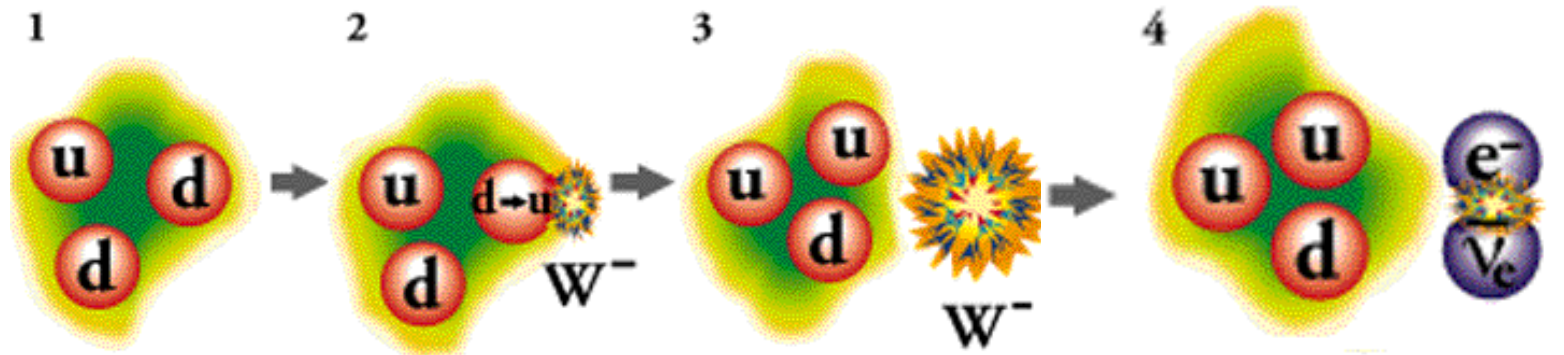
*I think I finally  
understand  
atoms*





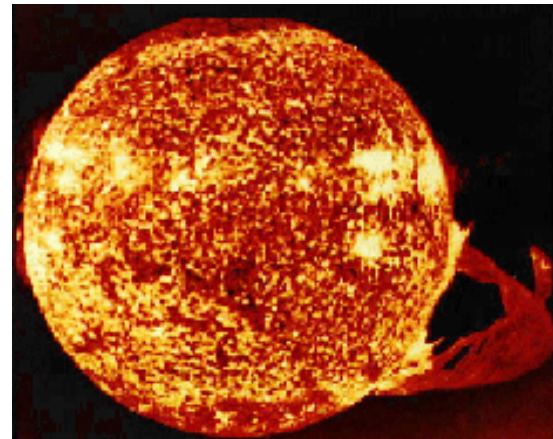
# Nothing lasts for ever

自由中子是不稳定的，平均寿命是15分钟，衰变到质子、电子和中微子(类似电子，但是电中性)。

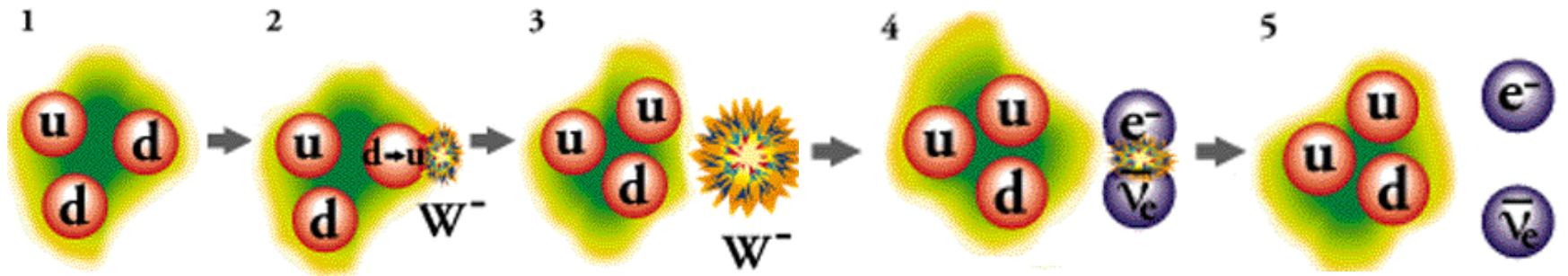


中子衰变过程进行的非常缓慢  
(相互作用微弱)。

但无此弱相互作用，  
太阳不会发光！



# 中子弱衰变和弱力



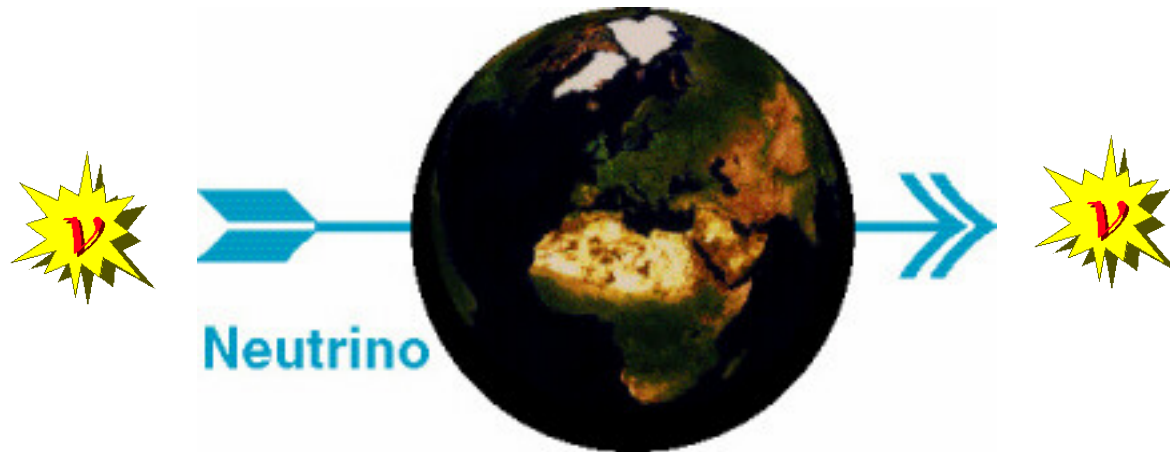
- 在夸克层面，中子中的1个底夸克（down）衰变到上夸克（up），同时辐射出一个W玻色子。
- **重W玻色子是弱相互作用（或弱力）的媒介粒子。**
- 因为W玻色子非常重（比质子要重80倍），此衰变过程需经过长时间后方能令量子涨落获取足够多的信息来实现衰变，从而导致“弱”衰变——长寿的中子。
- 最终W玻色子衰变到电子和中微子。

# 太阳中微子

---

Question: How many neutrinos from the Sun are passing through your fingernail in one second?

Answer: 40 billion! – day and night since neutrinos can pass right through the Earth without interacting

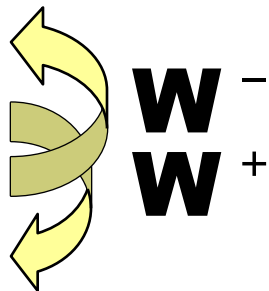
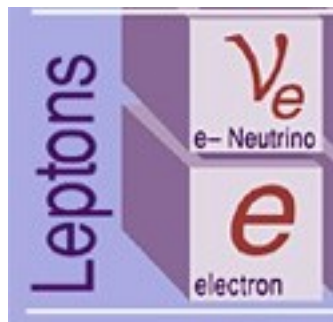
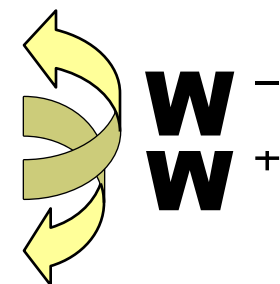
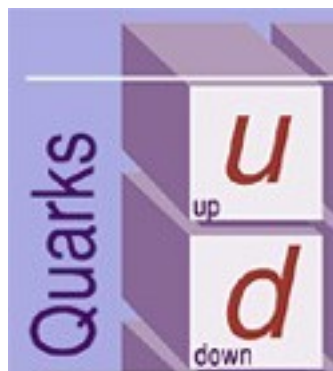


(1956 Cowan, Reines)

predicted by Pauli, 1933

---

# W玻色子：左手的炼丹师



Just like rifle bullets, quarks and leptons spin as they whizz along



The quarks and leptons can only see W particles if they spin to the left!

This shatters mirror symmetry!  
( Lee and Yang, Nobel prize 1957)

Electroweak theory predicted a heavy version of the photon called the  $Z^0$  which was discovered in 1983 (Rubbia, van der Meer).

# 现在我们知道

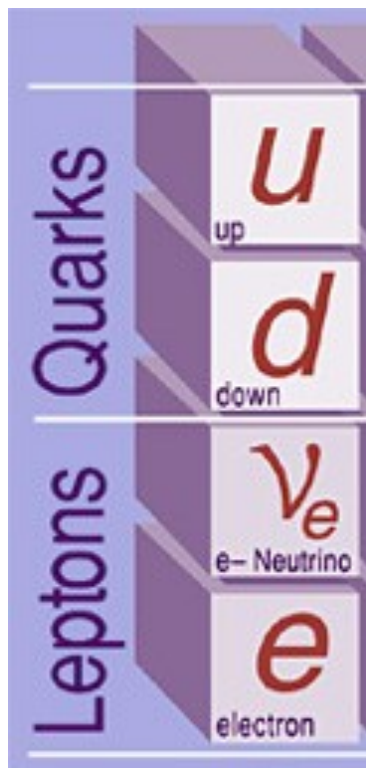
## 物质的基本组分

### 和

这些基本组分在最基本层面上的相互作用形式。

# 夸克和轻子

---



# 夸克和轻子

Quarks	$u$ up	$c$ charm
	$d$ down	$s$ strange
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon

# 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			



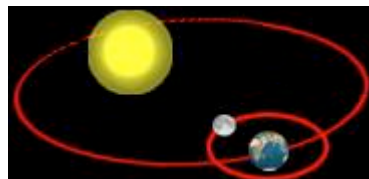
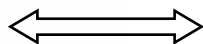


# 自然界中四种力

## 1 重力



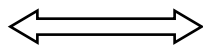
牛顿



## 2 电磁



法拉第



## 3 弱相互作用

Beta 衰变  
Muon 衰变



时间尺度:  $10^{-12} \sim 10^3$  秒

## 4 强相互作用

紧紧地结合核子  
粒子对撞



时间尺度:  $10^{-23}$  秒

# 物质场：轻子

- 不参与强相互作用
- 整数或零电荷
- 味:

$e^-$	“电子”	(1897)	在原子中
$\mu^-$	“Muon” ( $206 m_e$ )	(1937)	在宇宙射线中首次观测到
$\tau^-$	“Tau” ( $17m_\mu$ )	(1975)	在SLAC观测到 (Stanford Linear Accelerator Center)
$\nu_e$	“electron 中微子”	(1956)	泡利以之解释Beta衰变中能量不守恒 (1930)
$\nu_\mu$	“Muon 中微子”	(1962)	
$\nu_\tau$	“Tau 中微子”	(2000)	

# 物质场：夸克

- 参与强相互作用

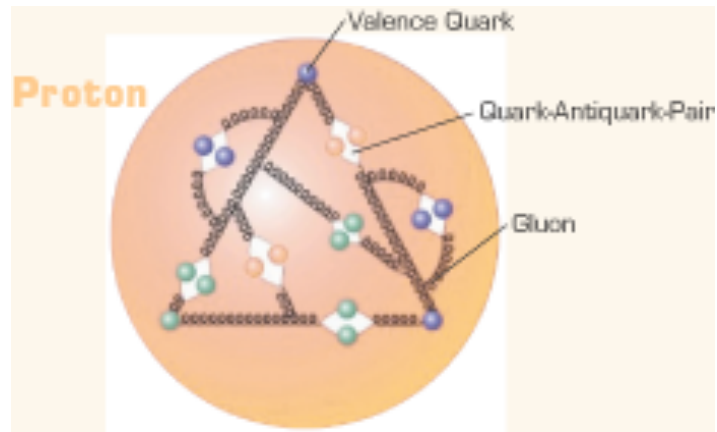
- 带分数电荷

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} 2/3 \\ -1/3 \end{array} \right\} \times \text{Proton charge}$$

- 质子和中子的组成成分  
(udd)      (uud)

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$  “up”  
“down”

- 味:      u      “up”  
          d      “down”  
          s      “strange”  
          c      “charmed”  
          b      “bottom”  
          t      “top”



- 第一次实验证据:

Stanford Linear Accelerator Center  
(Giant Electron Microscope)

(1974)

(1977)

“Beauty”

1995

“Truth”

@ Fermilab (Tevatron)

# 相互作用传播子

## 相互作用（通过交换自旋为1的规范玻色子）

电磁相互作用 (QED)

光子 (无质量)

$\gamma$

强相互作用 (QCD)

胶子 (无质量)

(1979)

$g$

弱相互作用

$W^\pm$  和  $Z$  规范玻色子

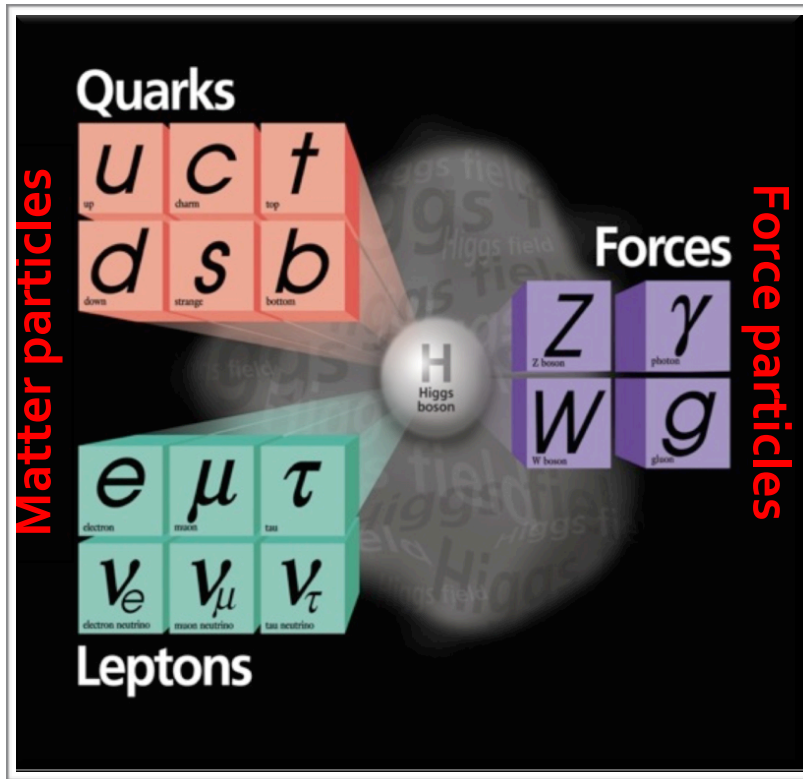
(1983)

有质量  $M_W = 80.4 \text{ GeV}$

$M_Z = 91.187 \text{ GeV}$

$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

# 粒子物理的标准模型



集百年物理之大成  
(1895-2012)

新“元素周期表”

20世纪自然科学的  
卓越成就之一

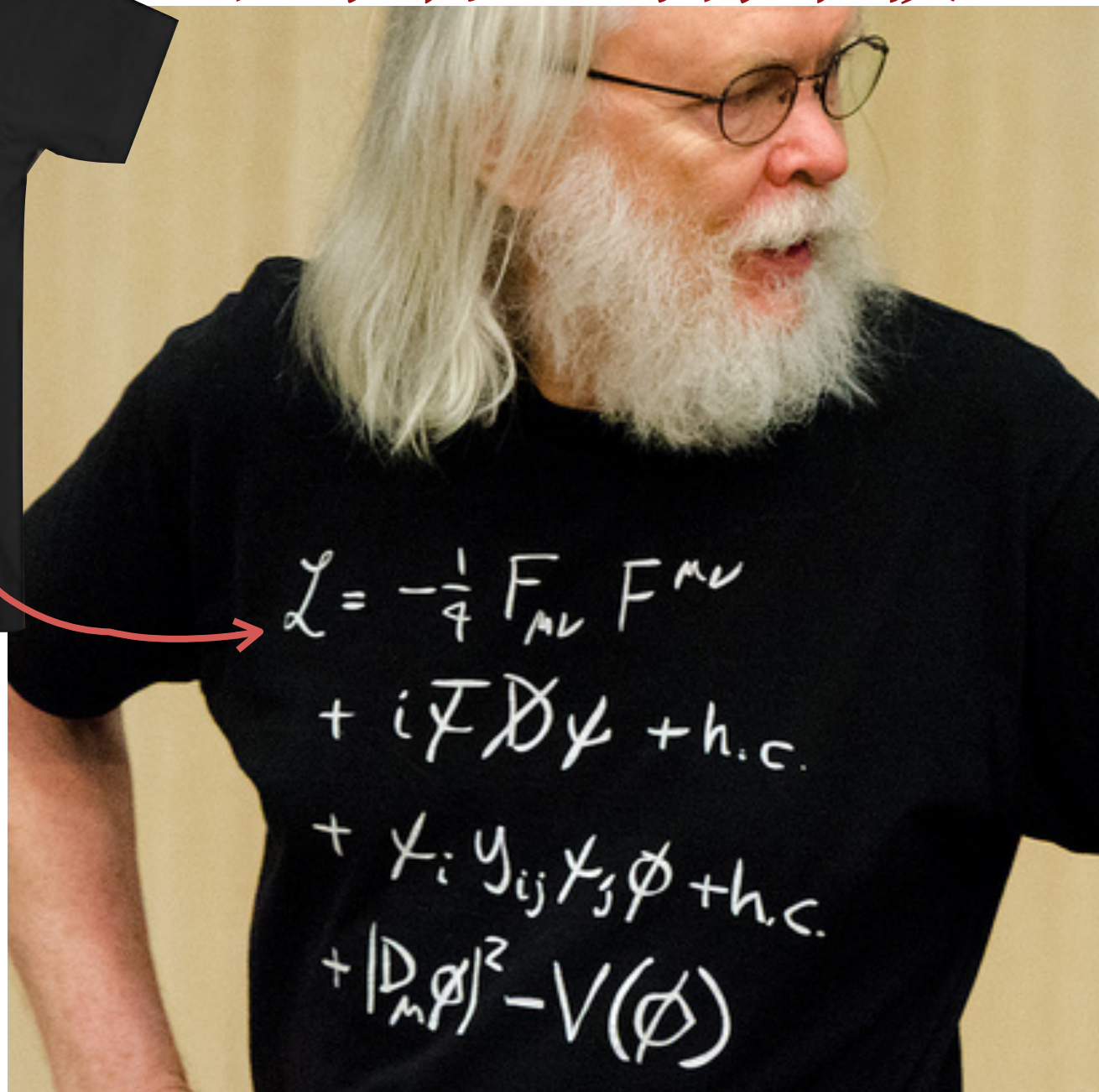
宇宙万物可用一个简单优雅公式描述

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
& -\partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& -M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
& -igc_w \left[ \partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -igs_w \left[ \partial_\nu \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -\frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w [\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] \\
& -\frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
& -\frac{1}{2}ig \left[ W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[ W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& +\frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M \Lambda_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& -\phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w \Lambda_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 \\
& +2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
& +\frac{1}{2}ig^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \nu^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
& -\bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w \Lambda_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
& +\frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[ (\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[ (\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[ (e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ -\phi^+ (\nu^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ H (e^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[ -m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[ m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
& -\frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{\chi}^+ (\partial^2 - M^2) \chi^+ + \bar{\chi}^- (\partial^2 - M^2) \chi^- \\
& +\bar{\chi}^0 \left( \partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) \chi^0 + \bar{\Upsilon} \partial^2 \Upsilon + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \Upsilon) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^0 - \partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^+) \\
& +igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \Upsilon - \partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) + igs_w \Lambda_\mu (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{\chi}^+ \chi^+ H + \bar{\chi}^- \chi^- H \\
& +\frac{1}{c_w^2} \bar{\chi}^0 \chi^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{\chi}^+ \chi^0 \phi^+ - \bar{\chi}^- \chi^0 \phi^-) + \frac{1}{2c_w} igM (\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-)
\end{aligned}$$

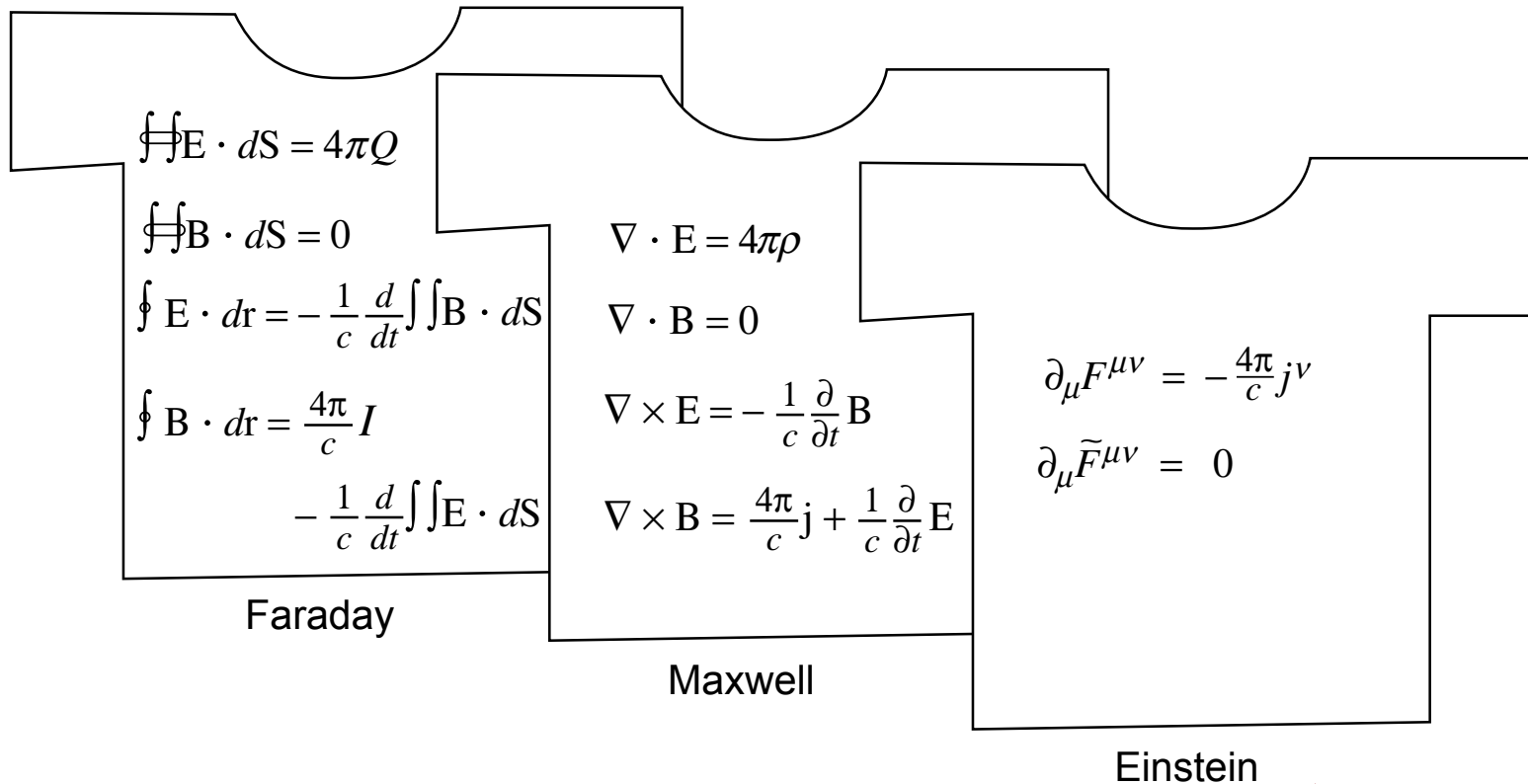
# 粒子物理的标准模型



简单  
优雅



# 麦克斯韦方程组

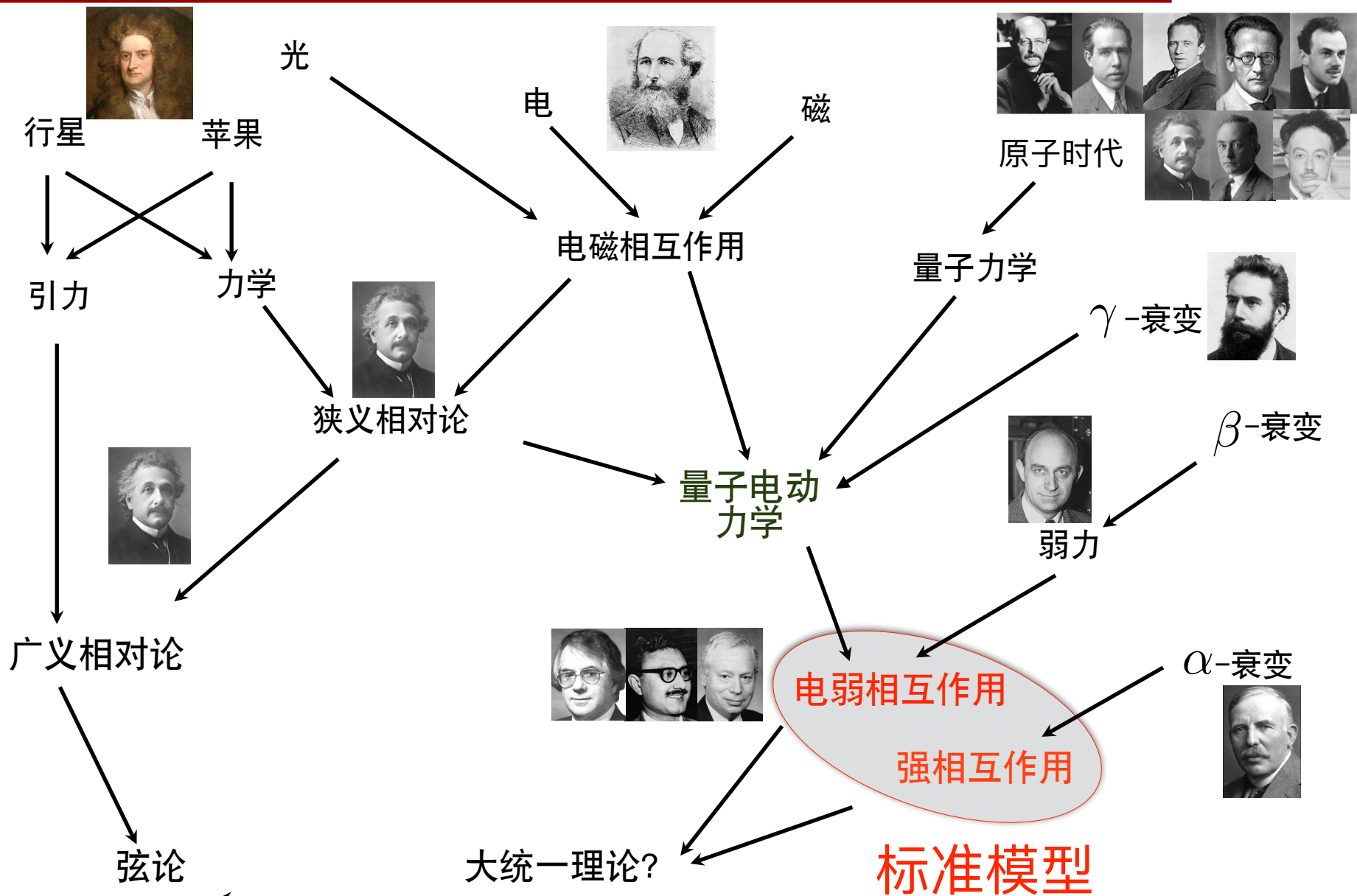


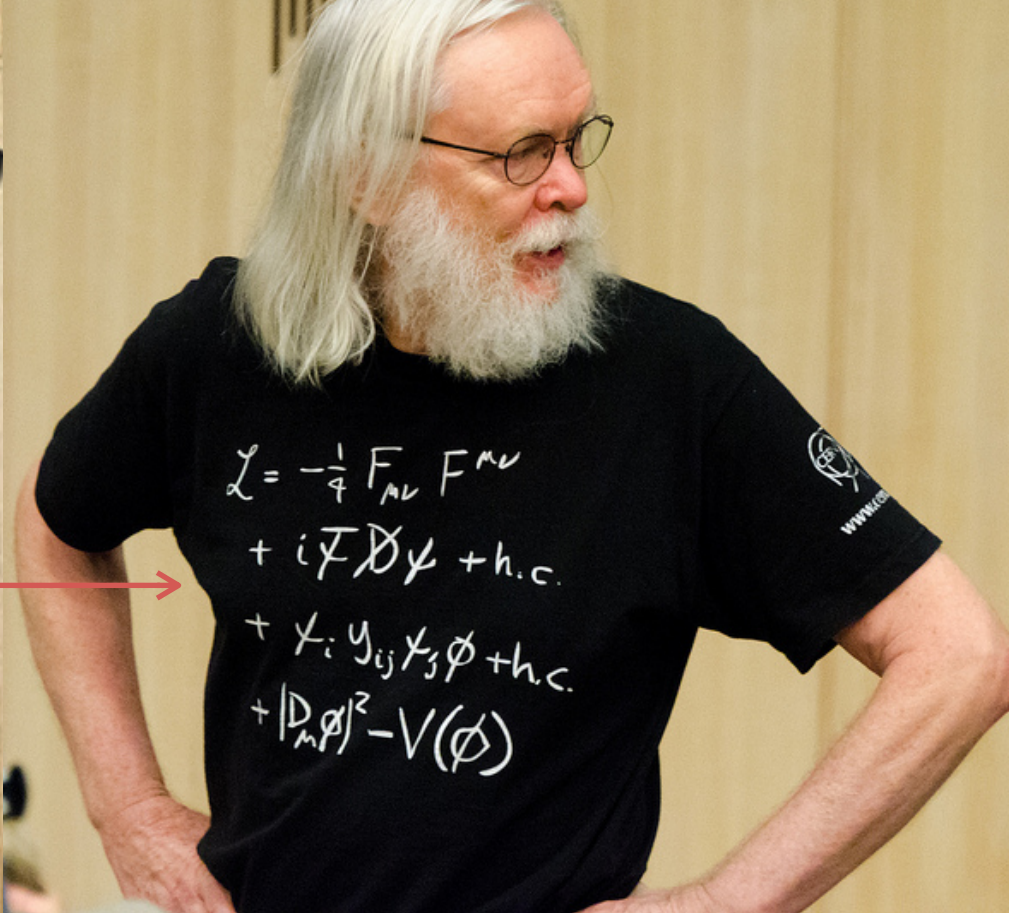
## 电磁学进化史

1864年10月27日麦克斯韦所写的方程组包含：  
283种符号，20个变量，20个方程



# 物理学的统一之路





$$\underbrace{SU(3)_{\text{Color}}}_{\text{QCD}} \otimes \underbrace{SU(2)_{\text{Left}} \otimes U(1)_{\text{Hyper charge}}}_{\text{WEAK} \oplus \text{QED}}$$

(Strong Interaction)      (Unification of Weak and Electromagnetic)

代价：所有粒子的质量都为零

# 粒子物理的标准模型

## 新“元素”周期表

夸克

轻子

$u$	$c$	$t$	$\gamma$
$d$	$s$	$b$	$g$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
$e$	$\mu$	$\tau$	$W$

自旋1/2

自旋1

电磁

强

弱

希格斯粒子

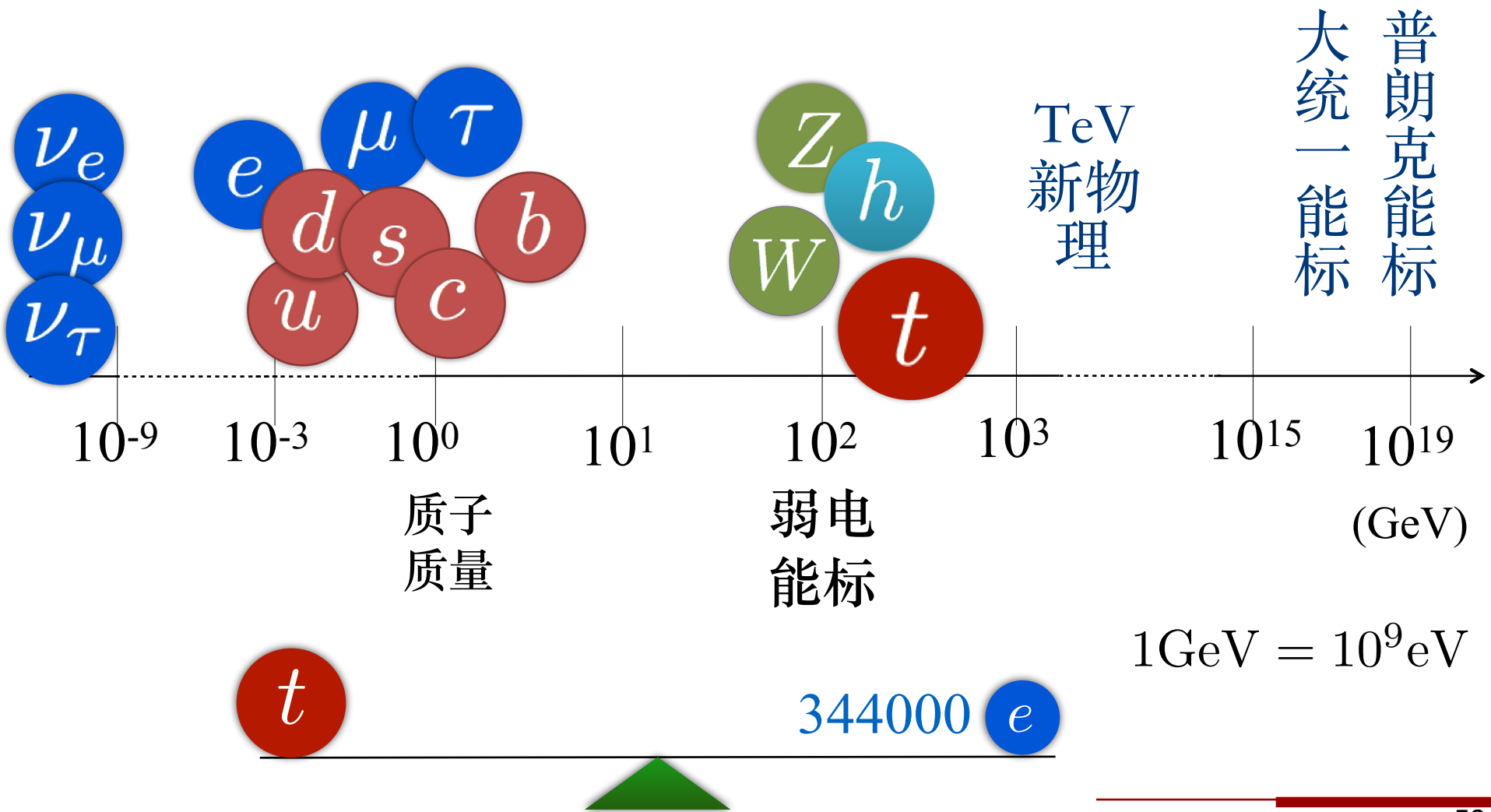
$h$  自旋0

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$   
规范对称性

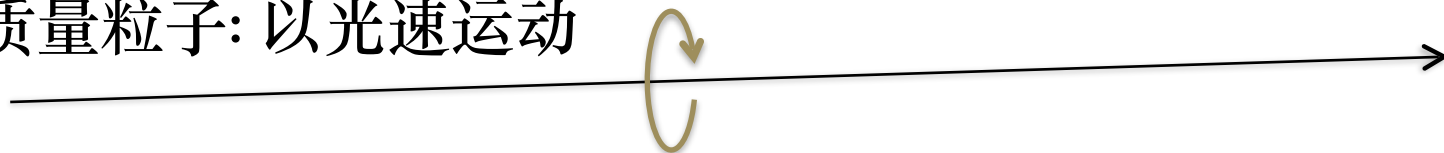
# 标准模型的两大疑难

电弱对称性破缺起源 和 味对称性破缺起源  
(W和Z质量) (费米子质量)

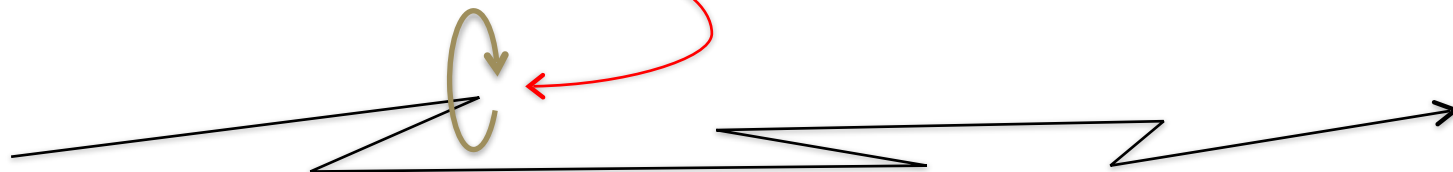


# 有质量粒子的速度要小于光速

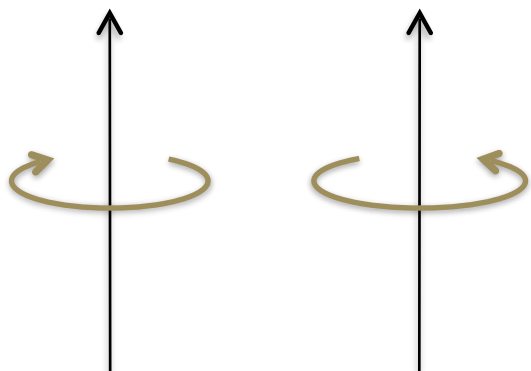
无质量粒子: 以光速运动



螺旋度翻转



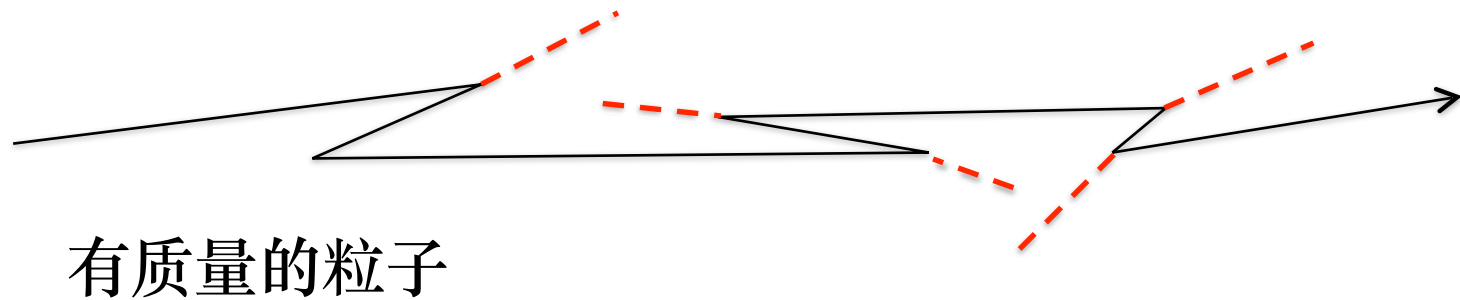
有质量粒子: 速度小于光速



螺旋度 = 自旋沿着运动方向的投影

# 有质量粒子的速度要小于光速

---

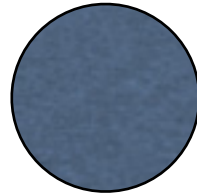


密布全空间的粒子：  
希格斯粒子

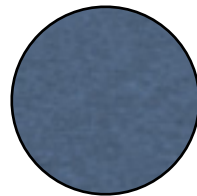
# 对称性自发破缺

---

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



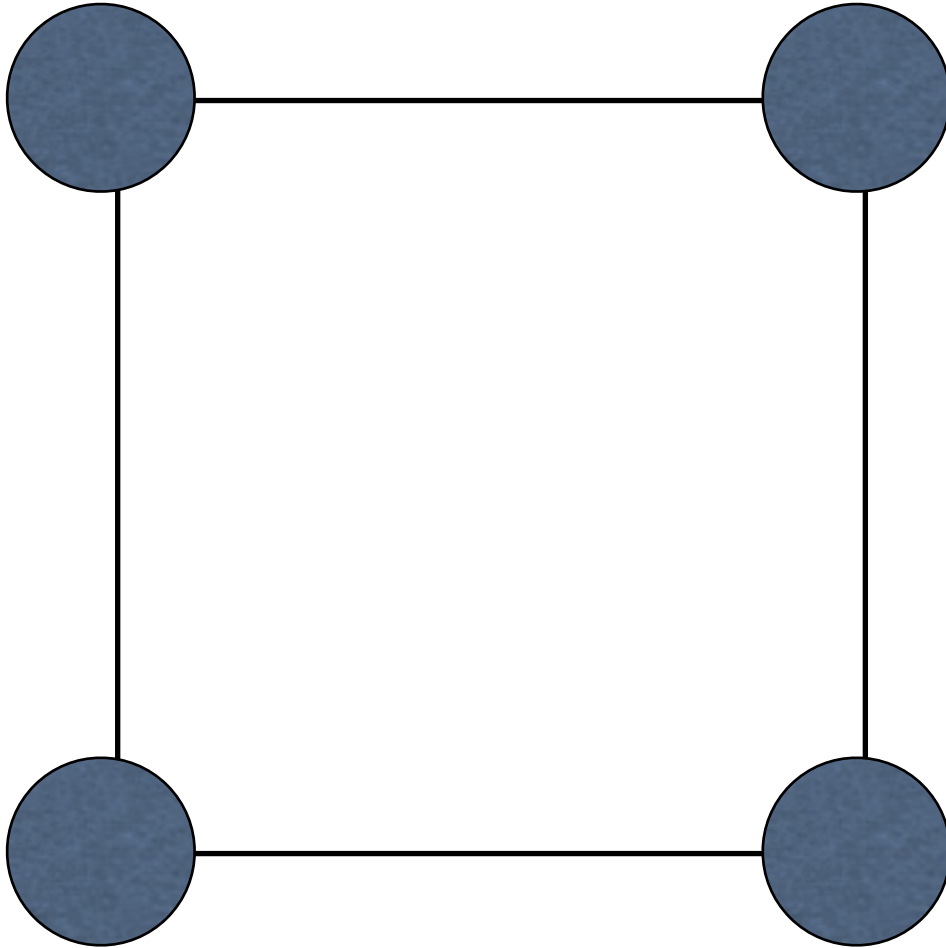
将4个城市  
联系起来  
所需的  
最小路径?



# 对称性自发破缺

---

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



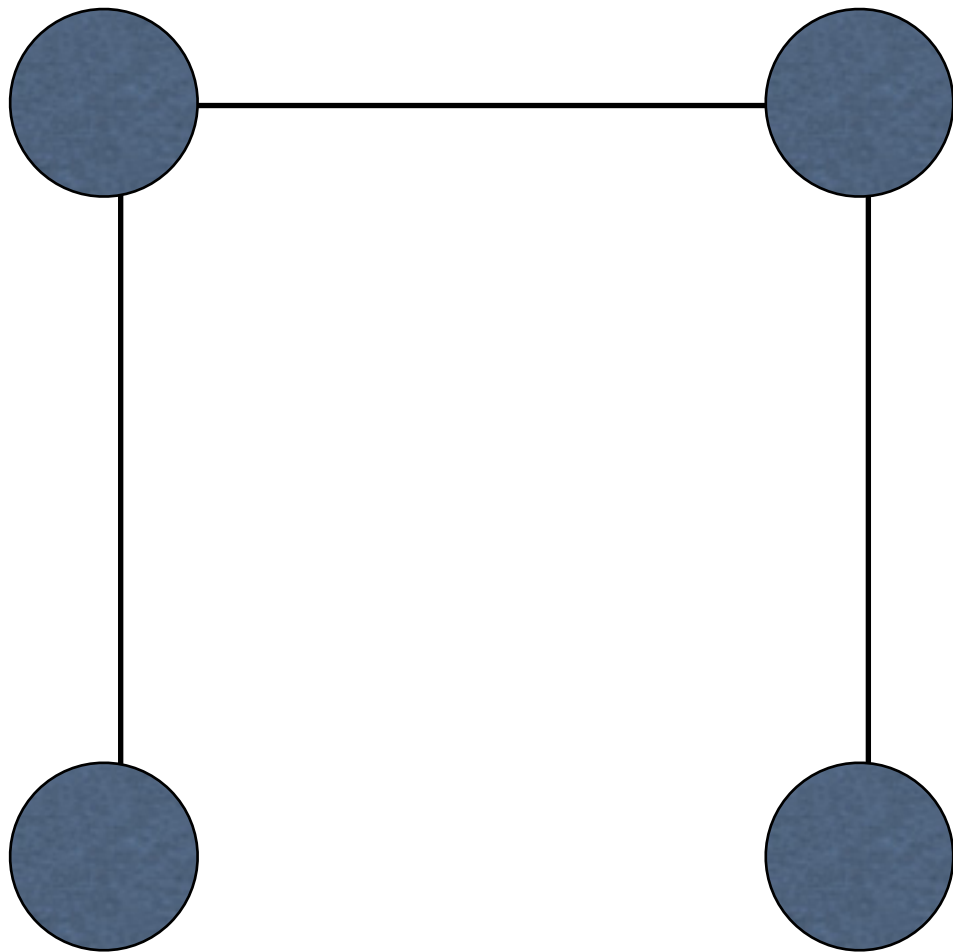
需要花费  
4个单位



# 对称性自发破缺

---

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)

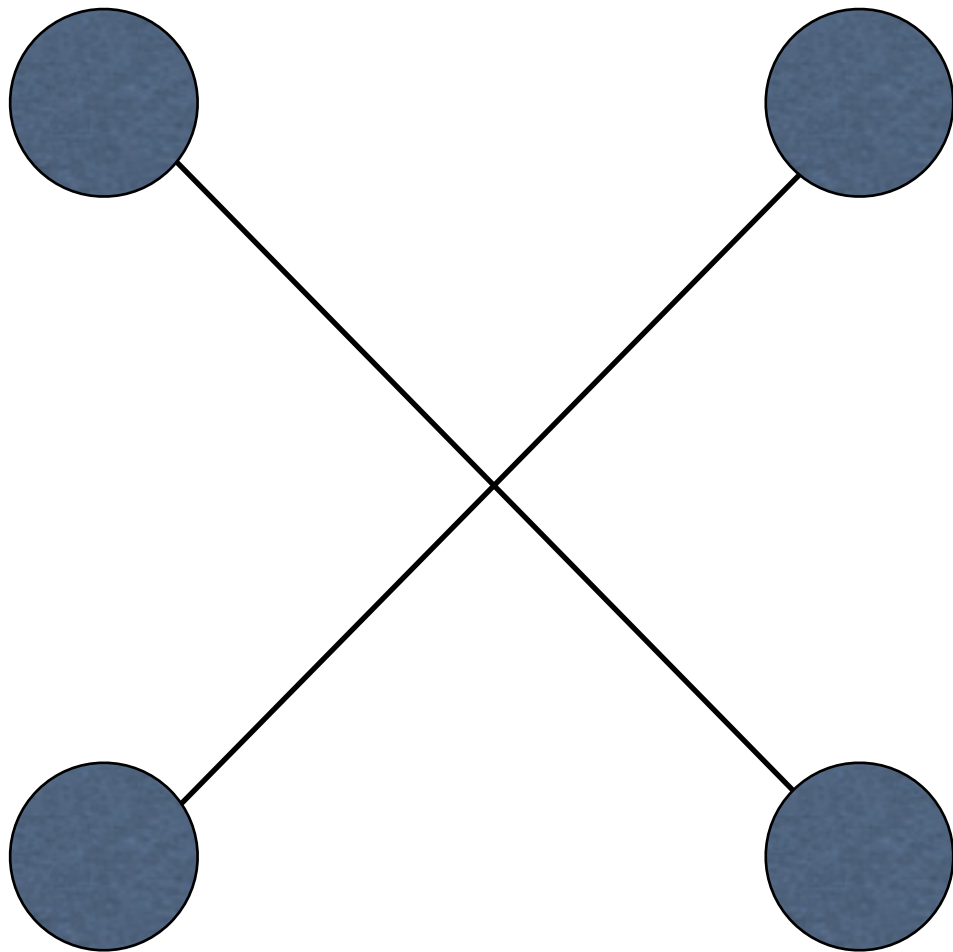


需要花费  
3个单位

# 对称性自发破缺

---

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)

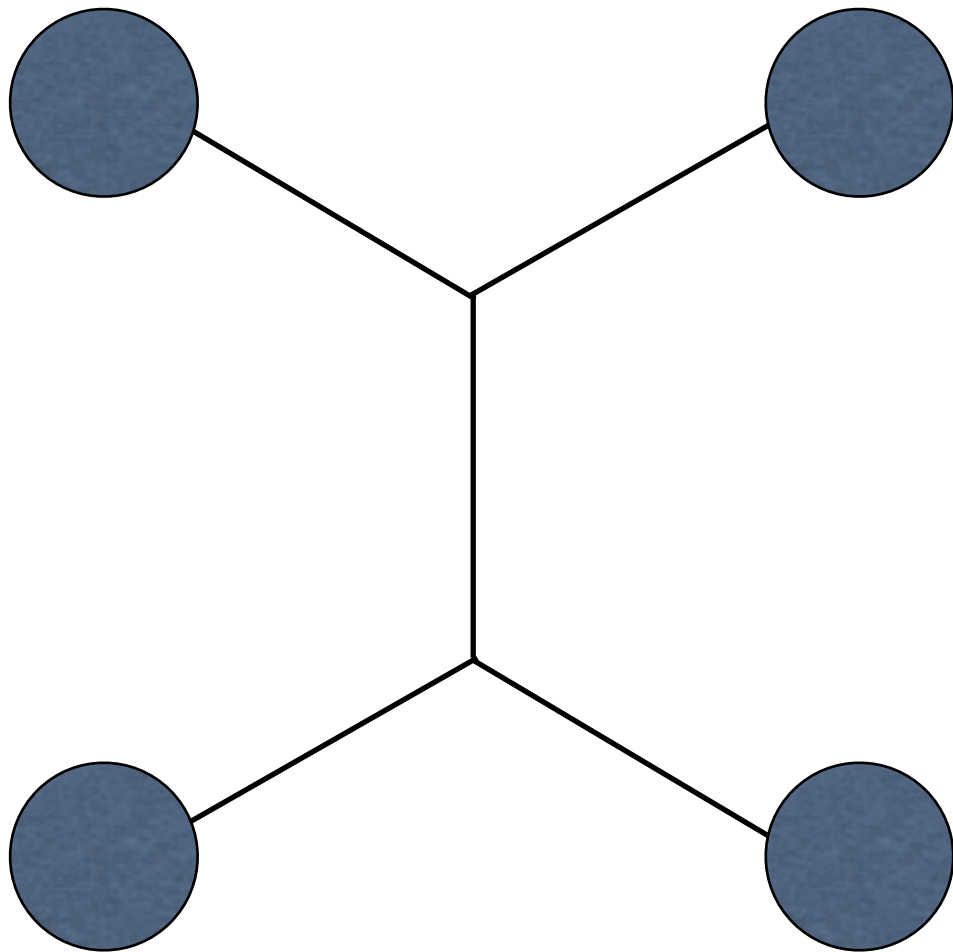


需要花费  
 $2\sqrt{2}$ 个单位

# 对称性自发破缺

---

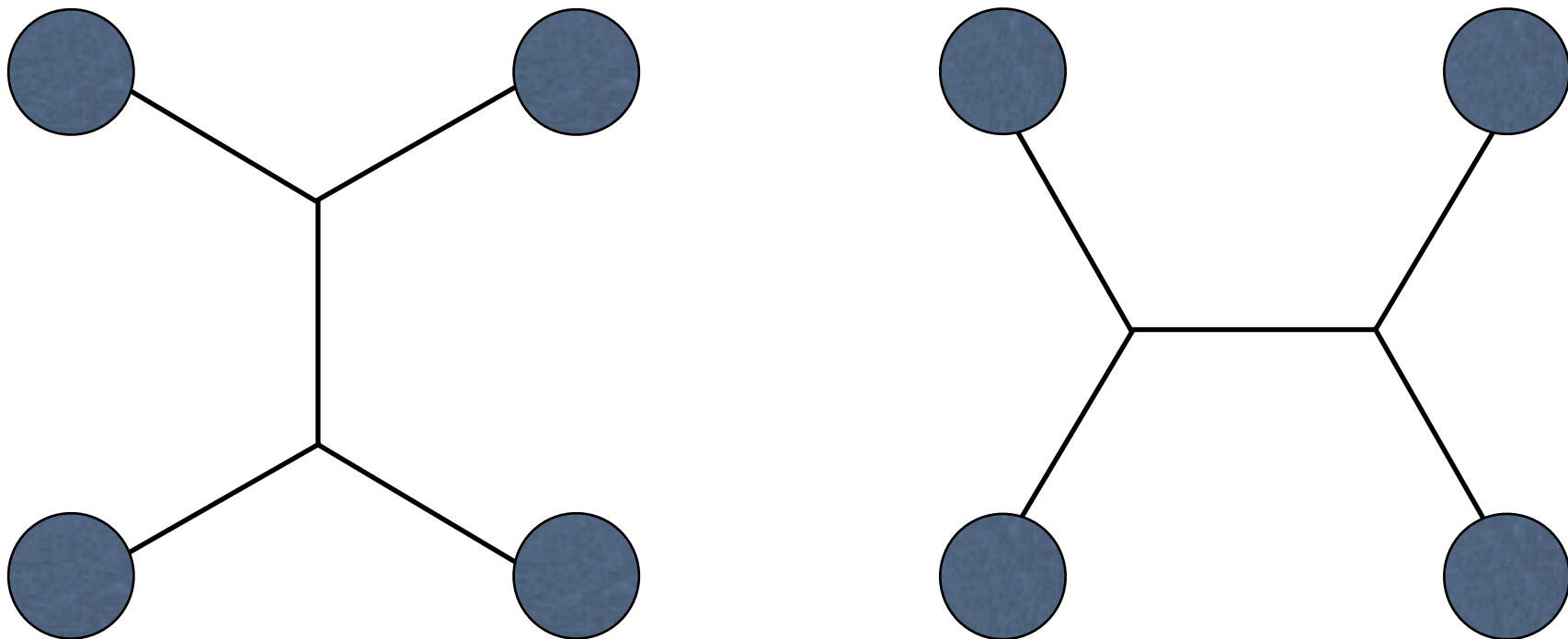
(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



需要花费  
 $1 + \sqrt{3}$ 个单位

# 对称性自发破缺

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



两种方案之和还具有原始对称性

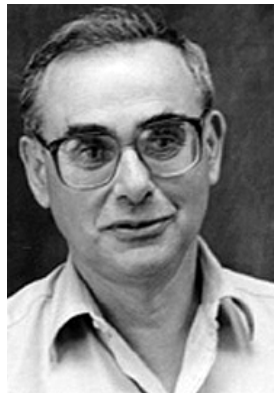
# Nambu-Goldstone玻色子



(1960)

2008  
Nobel  
Prize

Yoichiro  
Nambu

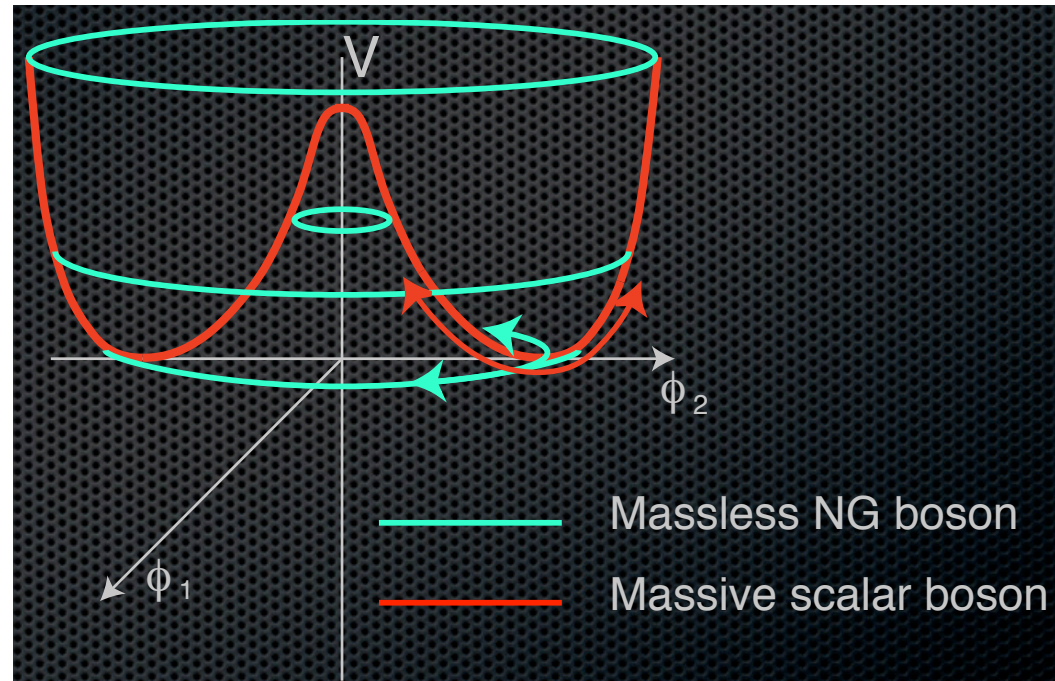


(1961)

Jeffrey  
Goldstone

$$V(h) = -\mu^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2$$

$$H = \begin{pmatrix} G^\pm \\ v + h + G^0 \end{pmatrix}$$



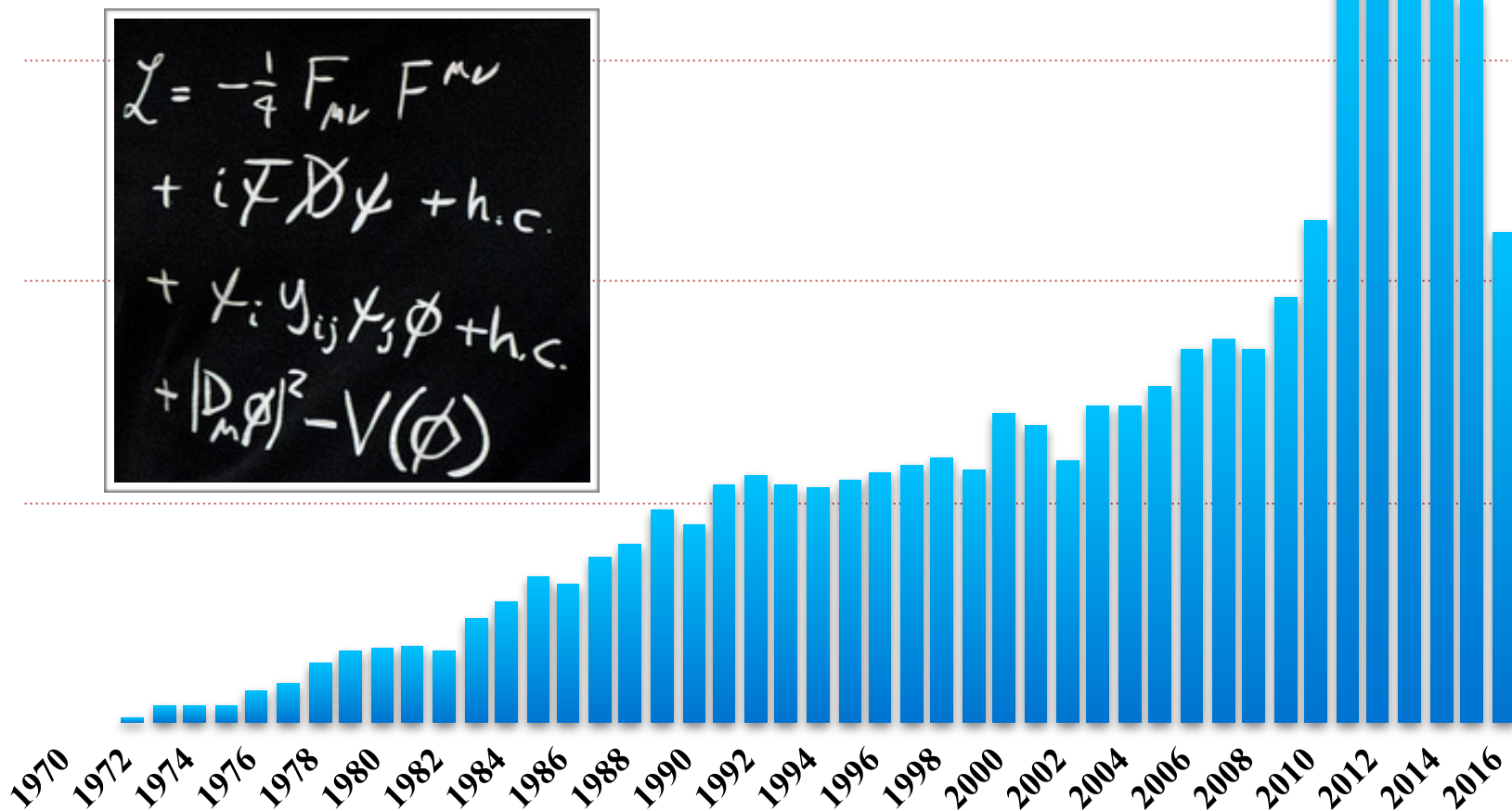
Goldstone, Salam, Weinberg (1962)

# 质量起源 (1964-2012)

希格斯物理相关的发表文献  
(from <http://inspires.net>)

1600篇

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$



# 寻找希格斯粒子

---

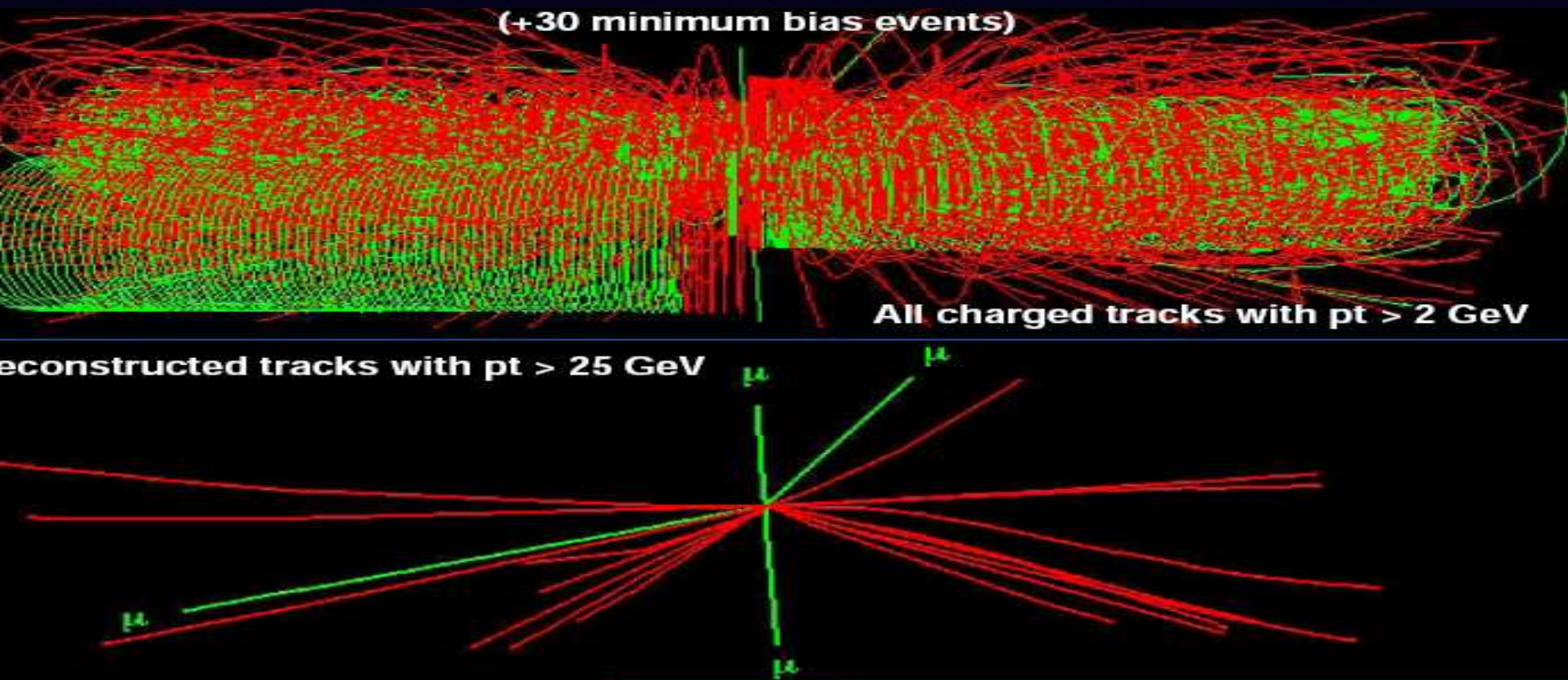
**“We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm, and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small.**

**For these reason we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.”**

J. Ellis, M.K. Gaillard, D.V. Nanopoulos,  
Nucl. Phys. B 106 (1976) 292

---

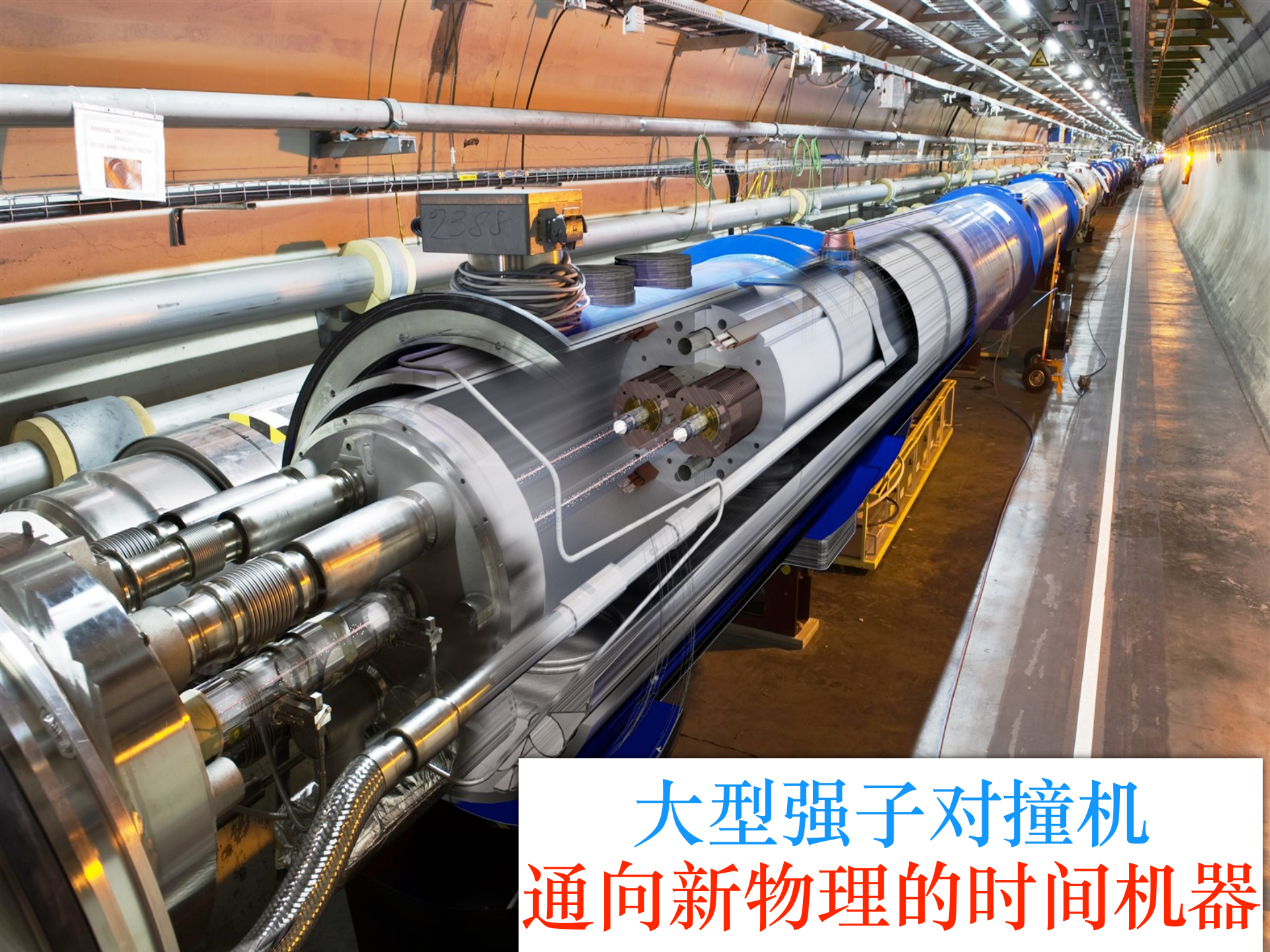
# 发现希格斯粒子是理论+实验 共同不懈努力完成的



$$h \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

Higgs decay in 4 muons  
1 in  $10^{13}$  events

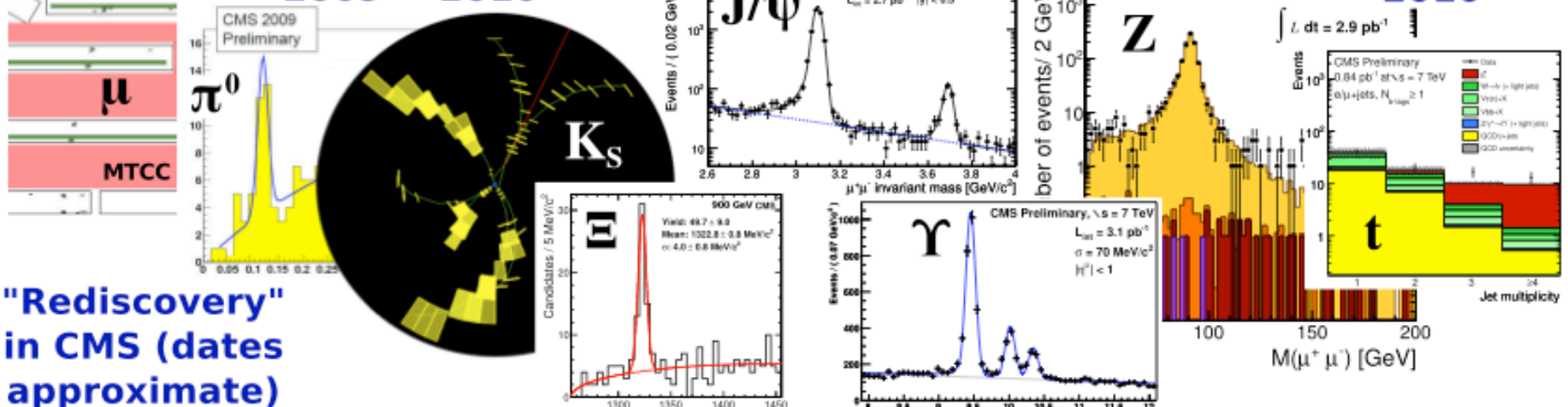
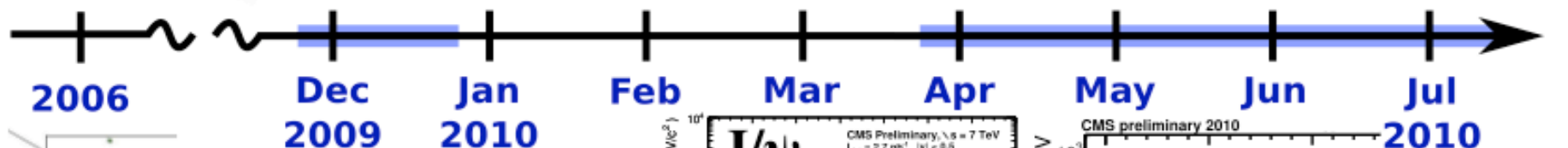
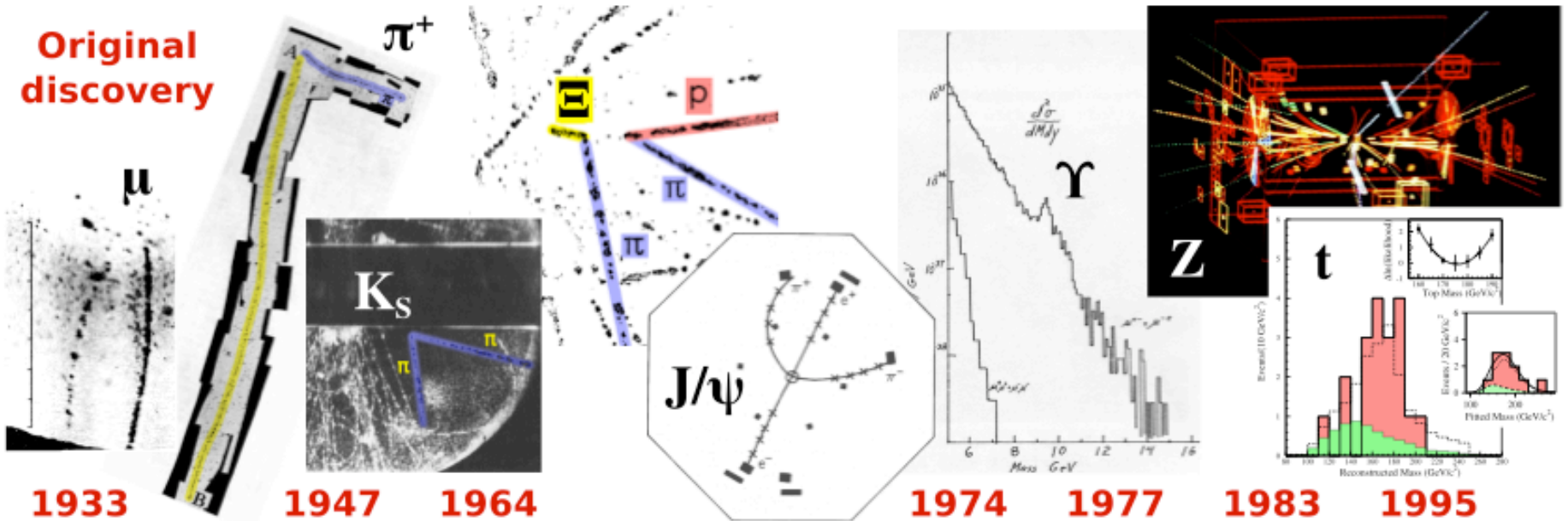




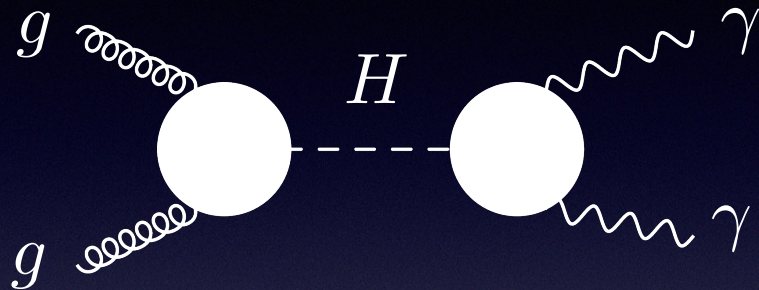
大型强子对撞机  
通向新物理的时间机器

# discovery of the Standard Model

## Incandela



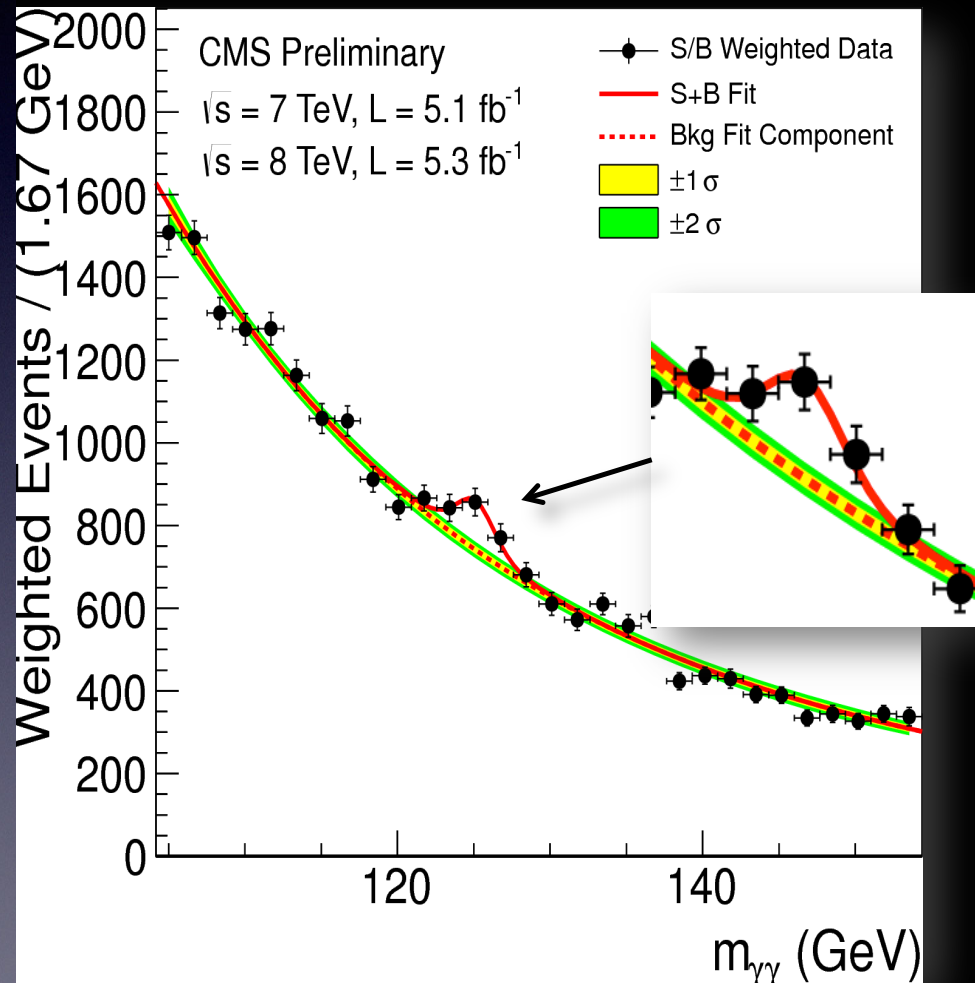
# 大型强子对撞机上的曙光： 125GeV的希格斯粒子



125GeV附近的鼓包是  
数百个双光子所构成的  
不变质量谱

所需的质子碰撞次数是

$10^{15} = 1,000,000,000,000,000$



# 历经近半个世纪 我们终于知道 基本粒子的 质量起源 (1964 - 2012)

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

SU(3) x SU(2) x U(1)  
规范对称性

# Summary

---

- The world is made up of **quarks** and **leptons**
- These particles interact through **4 different forces**
- The **Standard Model of Particle Physics** works but is limited in what it can do.
- The **Standard Model of Cosmology** works our universe is expanding with acceleration.
- We are still missing several pieces of the puzzle
- Work is underway to fill in the holes

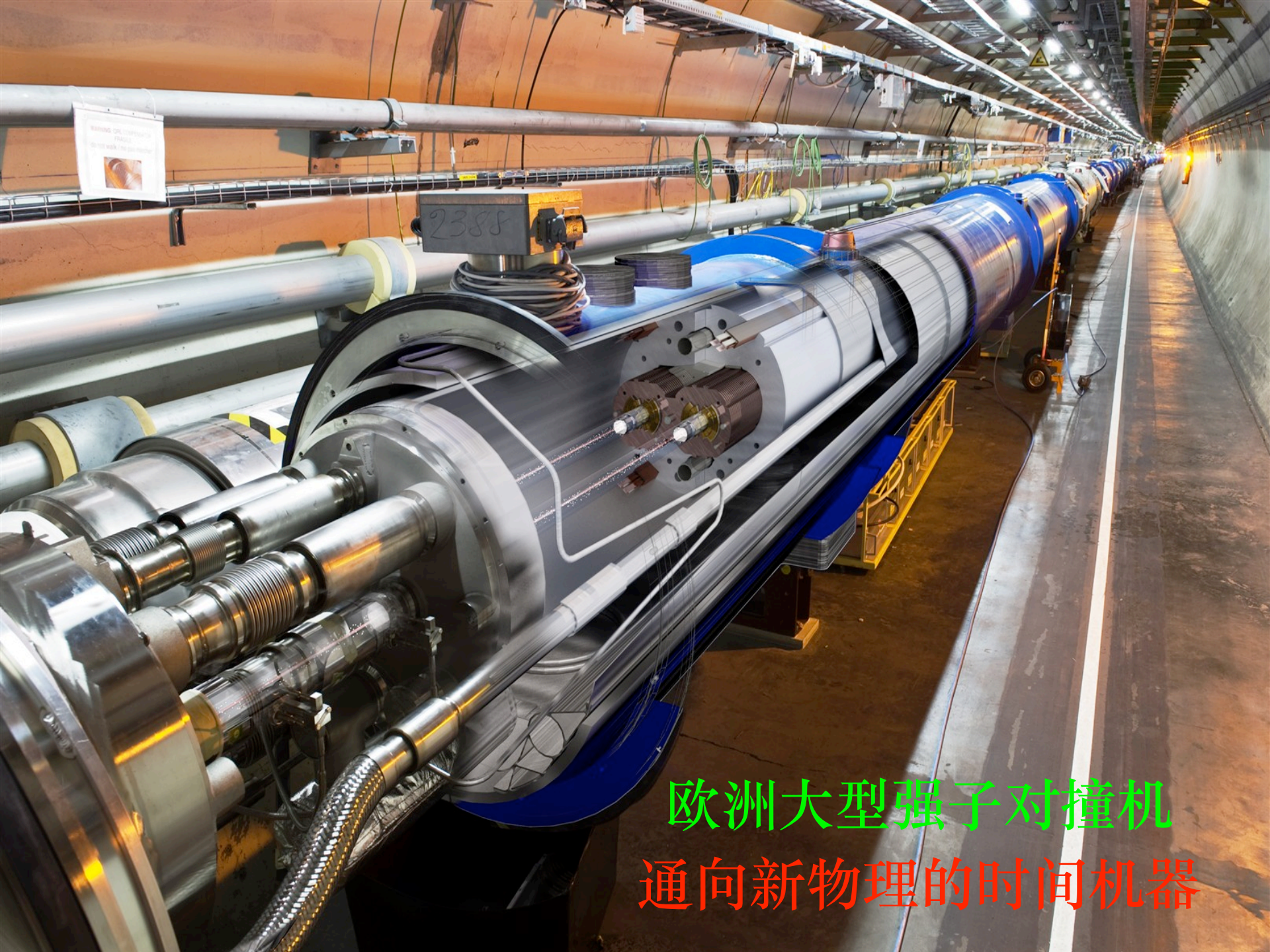
**Pretty cool stuff !**

---

# 天问

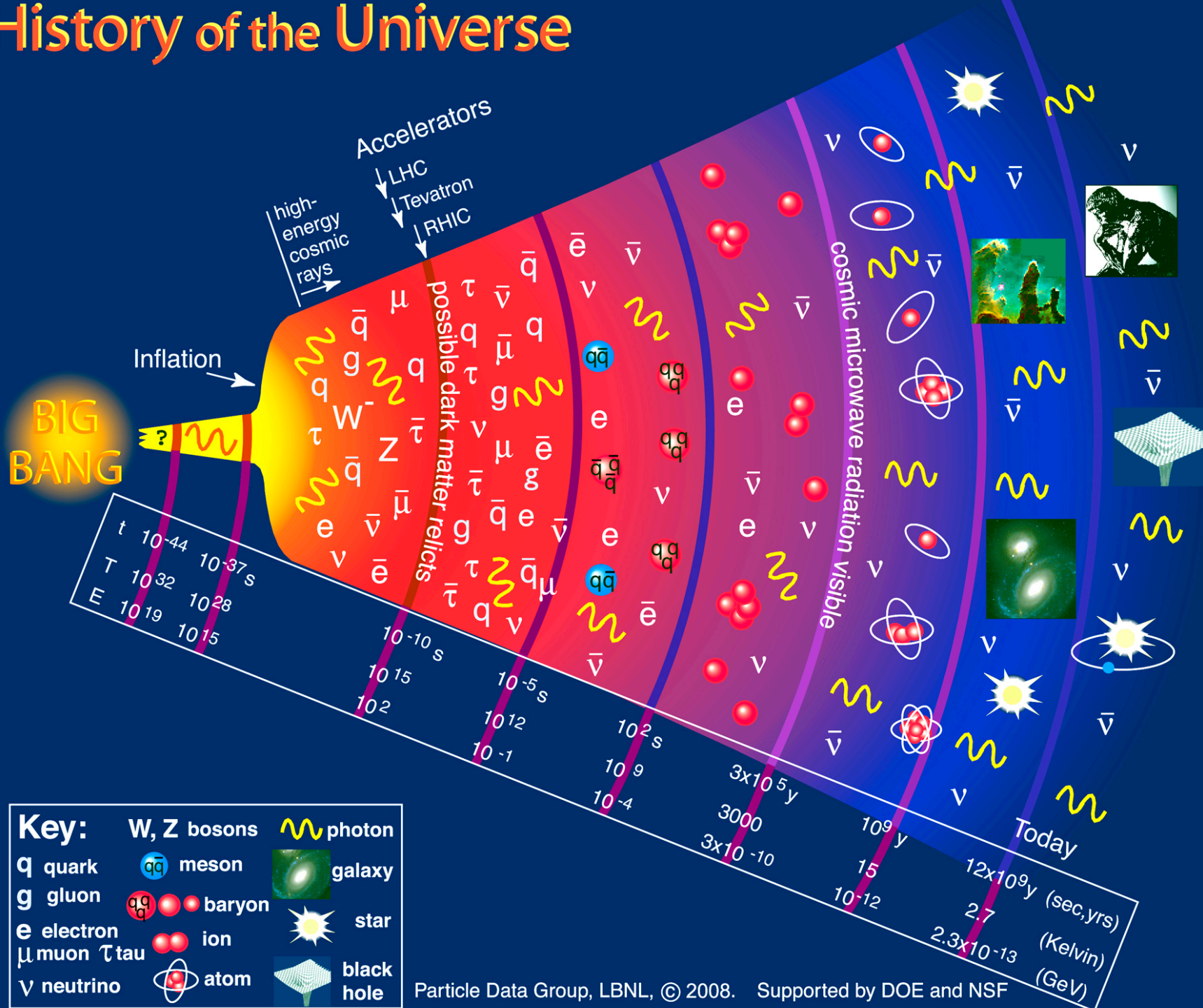


- 为什么希格斯粒子质量为 $125\text{GeV}$ ?
- 费米子和玻色子质量起源是否相同?
- 大CP破坏产生机制?
- 为何仅有3代夸克和轻子?
- 是否有4代物质场粒子?
- 能否把自然界所有的力统一为1种?
- 是否存在新的相互作用?
- 夸克和轻子是否有内部结构?
- 暗物质的内禀属性及其相互作用?
- 什么是暗能量?
- 是否有额外的空间维度?
- .....



欧洲大型强子对撞机  
通向新物理的时间机器

# History of the Universe







谢谢！