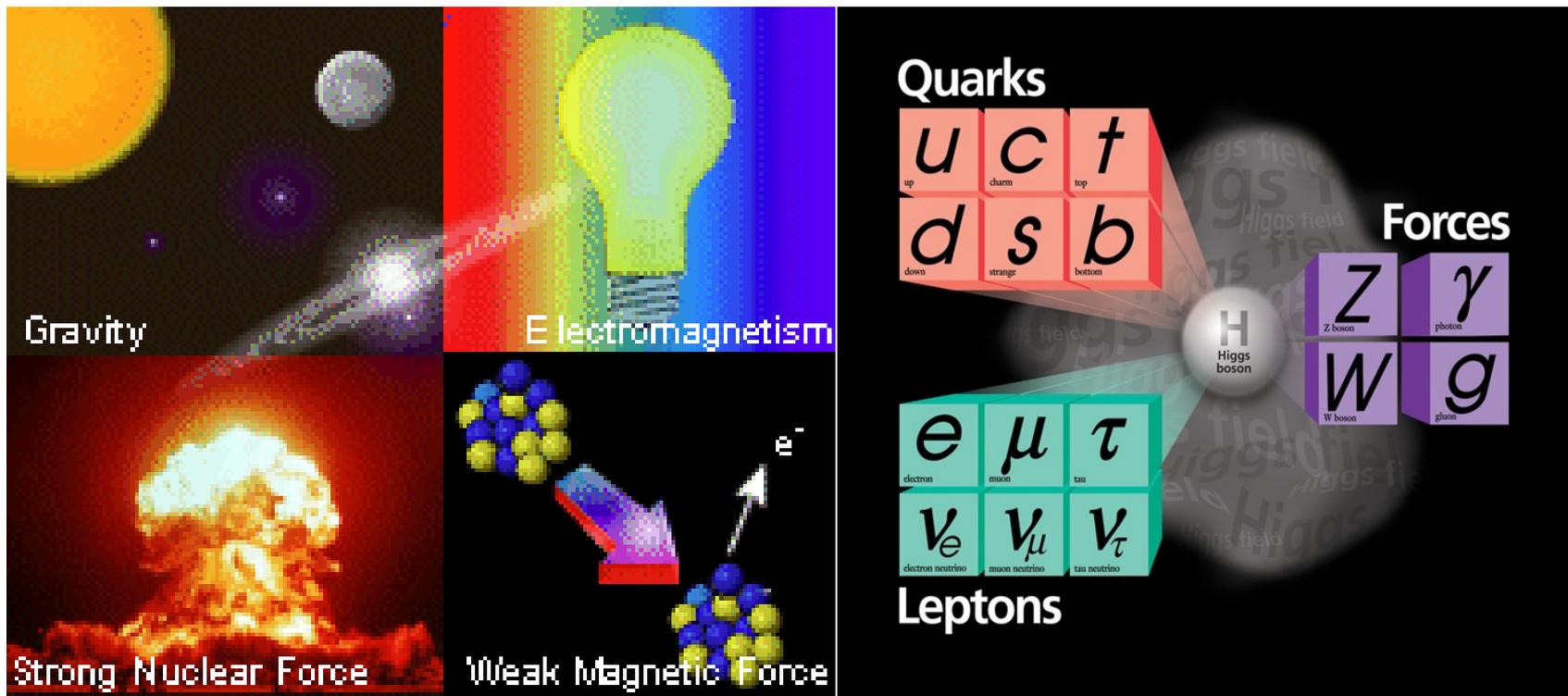
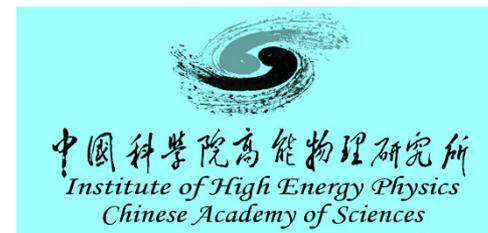


# (中国) 高能物理展望

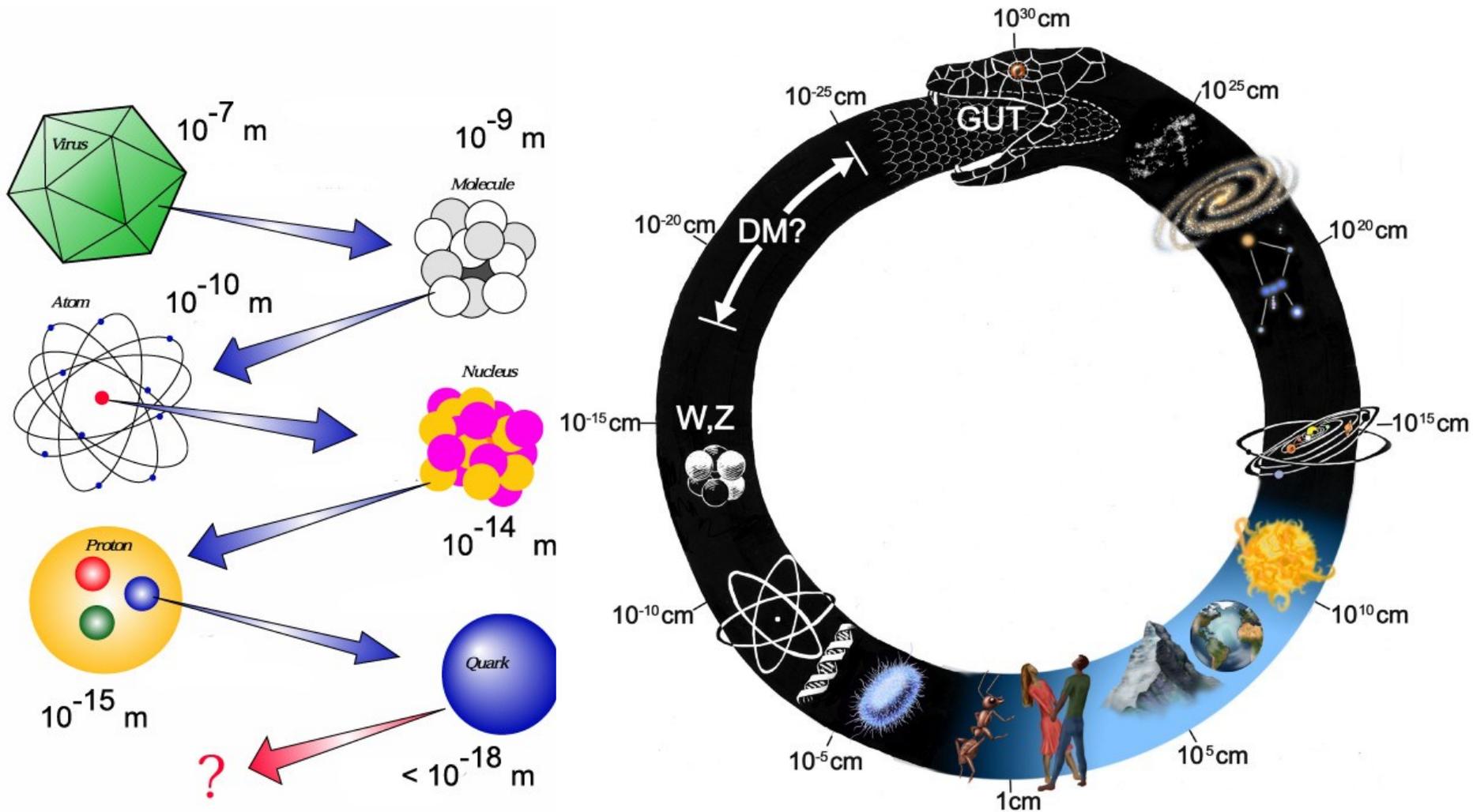


李亮

上海交通大学物理与天文系



# 宇宙之谜



© 2006 Abrams and Primack, Inc.

# 人类解答：透过现象看本质

微观

极小：基本粒子 → 高能物理

次小：质子，中子  
原子，原子核  
粒子 → 中高能物理  
核物理、原子物理  
等离子、凝聚态物理

介观

较小：分子 → 化学，分子物理

大分子/基因 → 生物学

人 → 医学、生理学

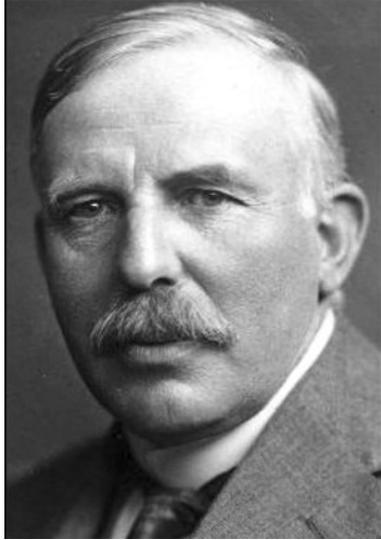
人群 → 心理学、社会学

宏观

大尺度：星球 → 地质学，天文学

极大：星系/宇宙 → 宇宙学

# 极小与极大: Reductionism



**Ernest Rutherford (1871-1937)**

[Nobel Laureate in Chemistry, 1908]

**There is only one science, and it is physics; all the rest is stamp collecting.**



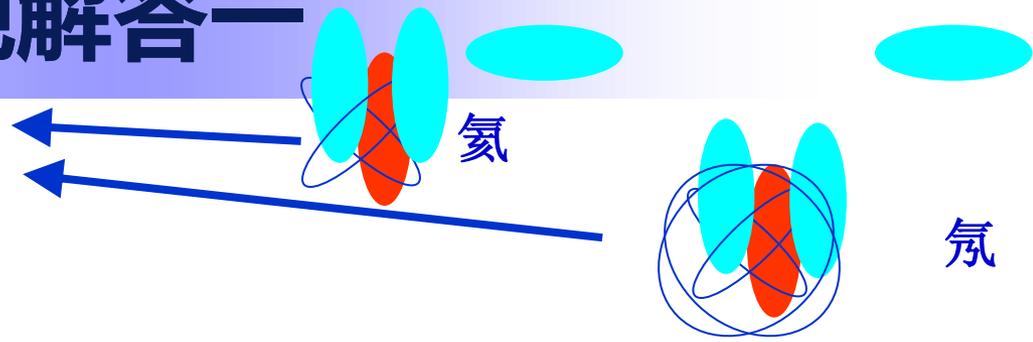
**Steven Weinberg**

[Nobel Laureate in Physics, 1979]

**...by reductionism, ...these things ultimately are the way they are because of the fundamental principles of physics.**

# 微观解答一

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

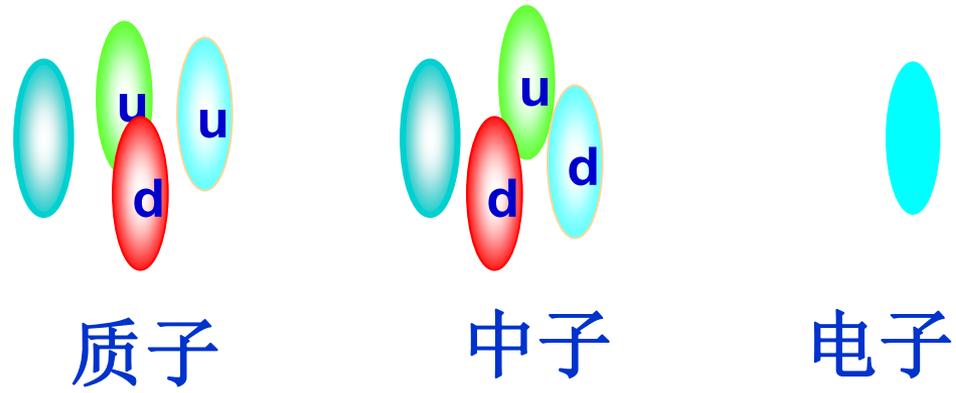


物质由分子、原子构成  
原子由质子、中子、电子构成

**ELEMENTARY PARTICLES**

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

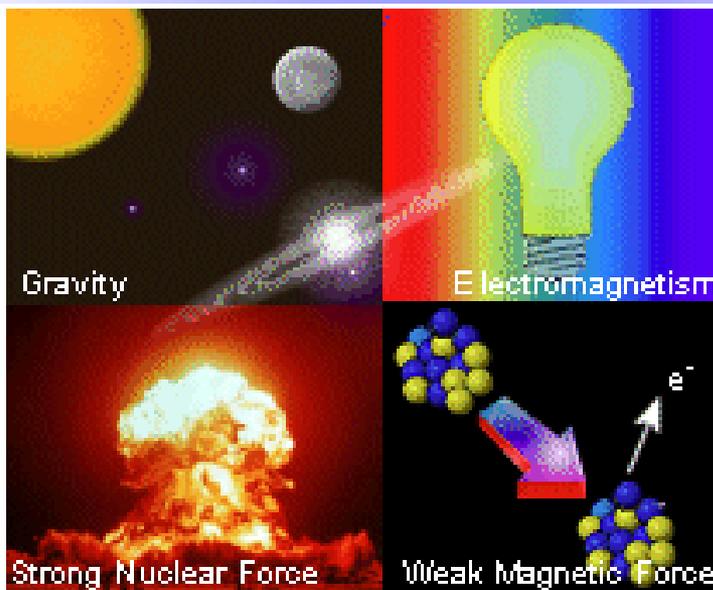
I II III  
Three Generations of Matter



质子、中子由夸克组成  
胶子把夸克“捆”在一起  
光子把原子“捆”在一起

# 微观解答二

引力:  $10^{-40}$



电磁力:  $10^{-2}$

↑↓ 统一: 电弱相互作用力

强相互作用力: 1

弱相互作用力:  $10^{-6}$

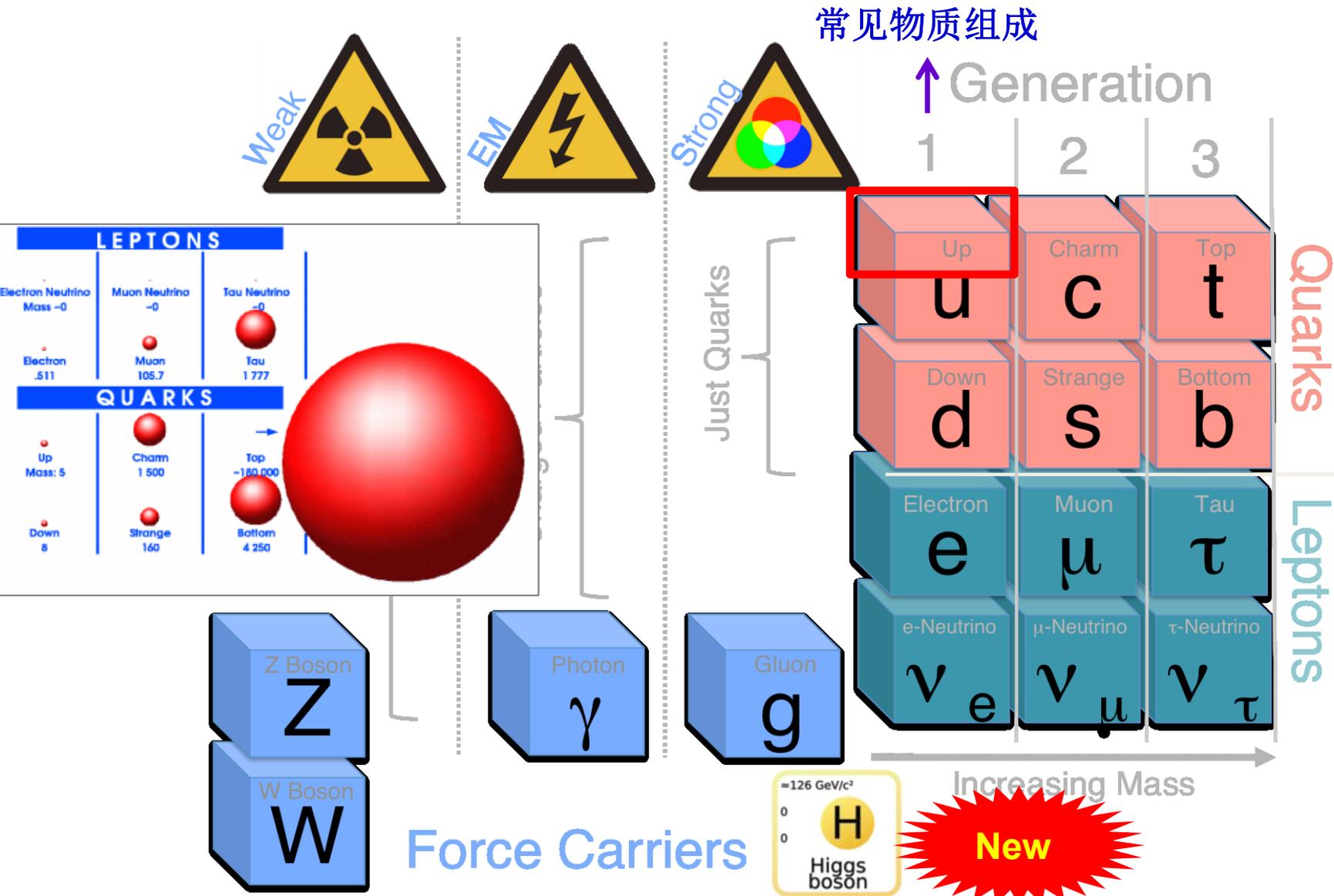
## 目前答案

- 物质由基本粒子夸克和轻子组成，基本粒子间通过交换波色子来相互作用
  - 夸克和轻子都有三个家族，质量递增分布，每个基本粒子都有其反粒子
  - 交换介子为：无质量的光子、胶子，有质量的W/Z粒子和未知的引力子
- 四大相互作用力
  - 基本粒子尺度上考虑强相互作用和电弱相互作用，宏观尺度上考虑引力

## 成功但不完整答案

- “The most accurate theory ever developed, in any field”
- 电子g-2实验测量结果和理论预测结果吻合到万亿分之一( $10^{-12}$ )

# 基本粒子和标准模型



# 基本粒子不能解决所有问题



**Philip W. Anderson:** [Nobel Laureate in Physics, 1977]

**More is different (1972)**

...at each new level of complexity, entirely **new properties** appear, and the understanding of this behavior requires research as **fundamental in its nature as any other.**

物理规律是有层次的

并不是知道了底层的规律就解决了所有问题

“多了就不一样了”！

研究基本粒子解决的是最基本的科学问题！

# 基本的科学问题

- 是否还有更多(三个家族以上)基本粒子？基本粒子之间是如何相互作用以形成现今的宇宙的？
  - 质量
    - 质量的来源是什么？为什么基本粒子的质量相差这么大？
  - 电荷
    - 正物质和反物质是对称产生吗？如果是，那么为什么现在宇宙中正物质这么多？
  - 相互作用（大统一理论 **GUT-Grand Unification Theory**）
    - 引力靠什么传播？为什么引力那么弱？理论的自然性？
- 为什么**96%**宇宙物质都不可见？
  - 何谓**暗物质**？何谓**暗能量**？
- 从已知到未知：研究现有基本粒子并探寻未知新粒子新物理

# 基本的科学方法

## 基本方法：做实验

- 物理是一门实验科学

- 能量前沿

  - 对撞机物理

- 亮度前沿

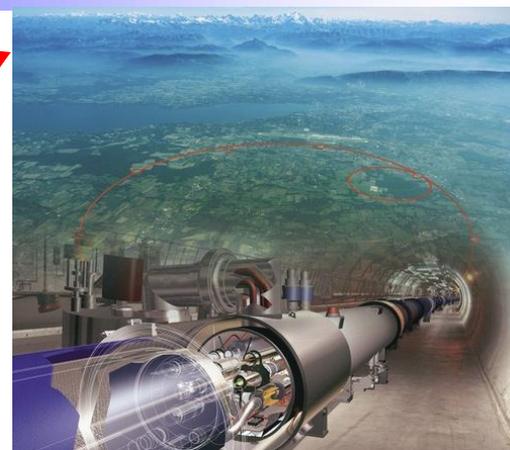
  - 非对撞机物理

  - 中微子物理，核物理

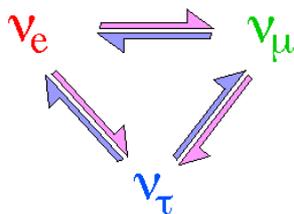
- 天文前沿

  - 天文望远镜

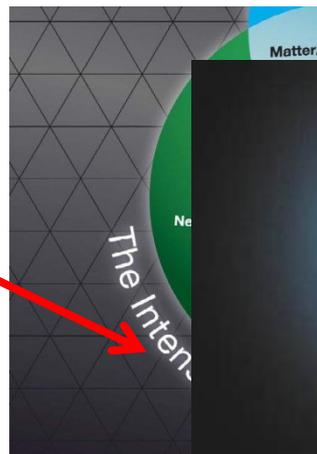
  - 暗物质和暗能量探测



对撞机



基本粒子特性



暗物质实验

加速器物理

非加速器物理

# 基本粒子和诺贝尔物理学奖

1969



Murray Gell-Mann

1979



Sheldon Glashow Abdus Salam

1999



Gerard 't Hooft

2002



Martinus Veltman

2004



David Gross

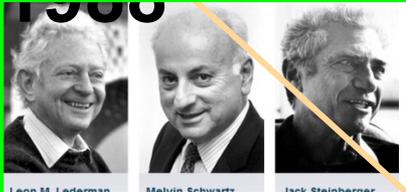


David Politzer



Frank Wilczek

1988



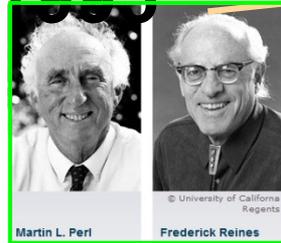
Leon M. Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger

1976



Burt Richter Sam Ting

1995



Martin L. Perl Frederick Reines

1906



Joseph John Thomson

1936



Carl David Anderson

1957



Chen Ning Yang

1957



Tsung-Dao Lee

1980



James Watson Cronin

1980



Val Logsdon Fitch

2008



Yoichiro Nambu



Makoto Kobayashi



Toshihide Maskawa

1965

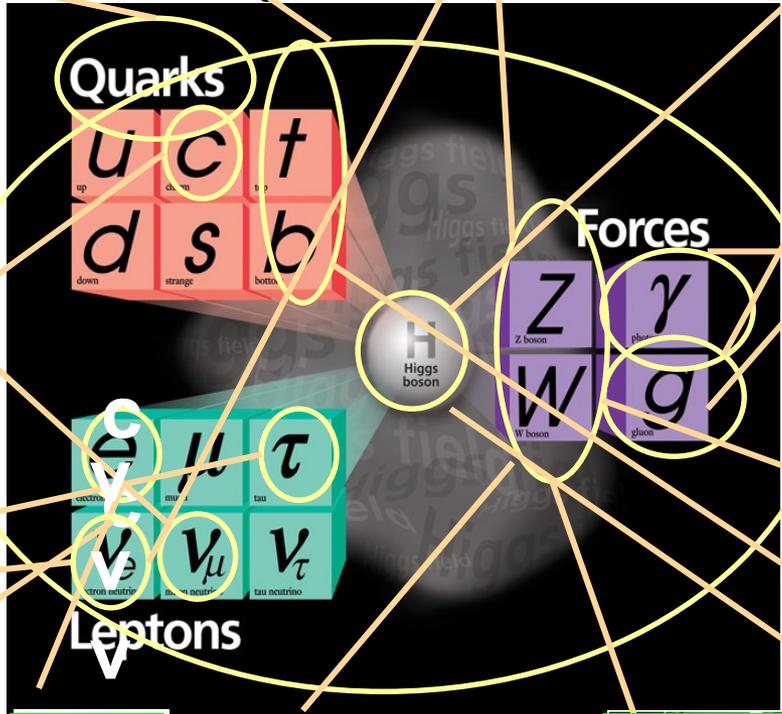


Sin-Itiro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman

1984



Carlo Rubbia Simon van der Meer



Future High Energy Phy

, L. L.

# 对撞机物理

粒子物理是物理学乃至自然科学中的前沿科学

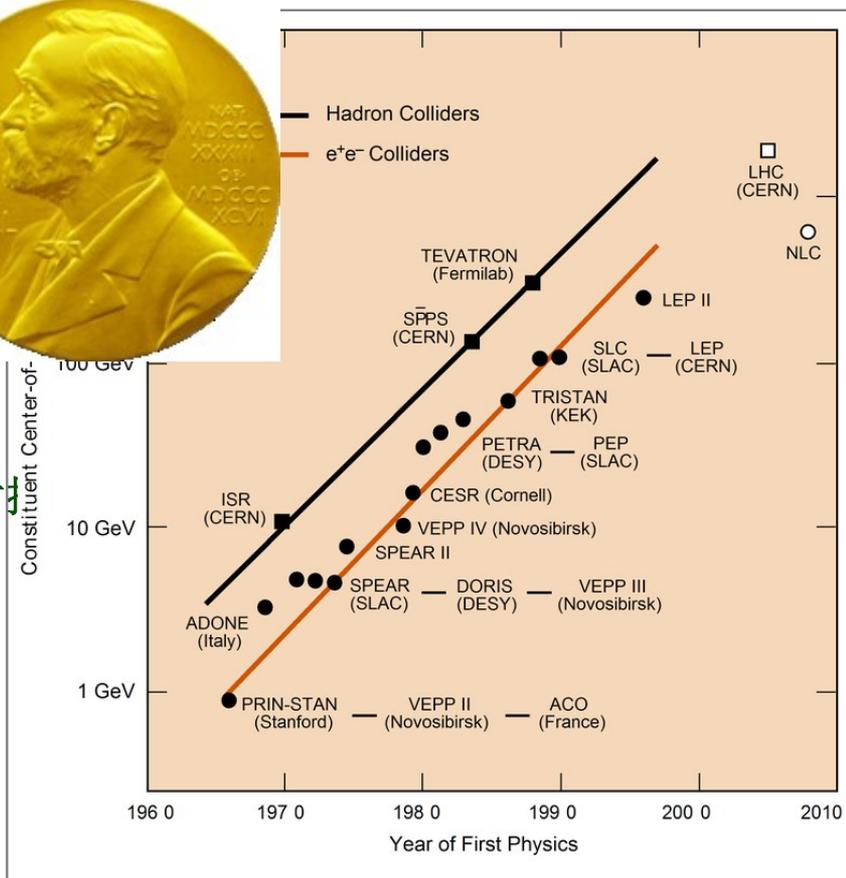
- 探索宇宙的本源以及物质的最深处
- 百年历史诞生数十位诺贝尔物理奖获得者
- 标准模型每个粒子均有诺贝尔奖诞生
  - **Zoo of Noble Prize!**

对撞机物理是高能物理的至关重要分支

- 人造的可控的实验环境提供最佳的实验发现机遇
  - 最近几次粒子物理的诺贝尔奖获得者大多和对撞机物理有关: **Higgs discovery!**
- 对撞机以及非对撞机物理密切相关, 互补关系
  - 希格斯粒子
  - 超对称模型和新物理的探寻
  - 暗物质
  - 中微子物理

对撞机物理方兴未艾

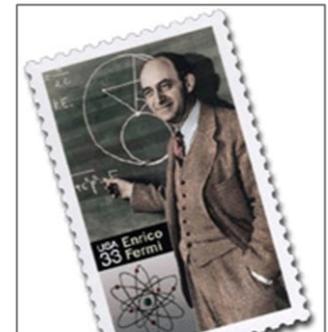
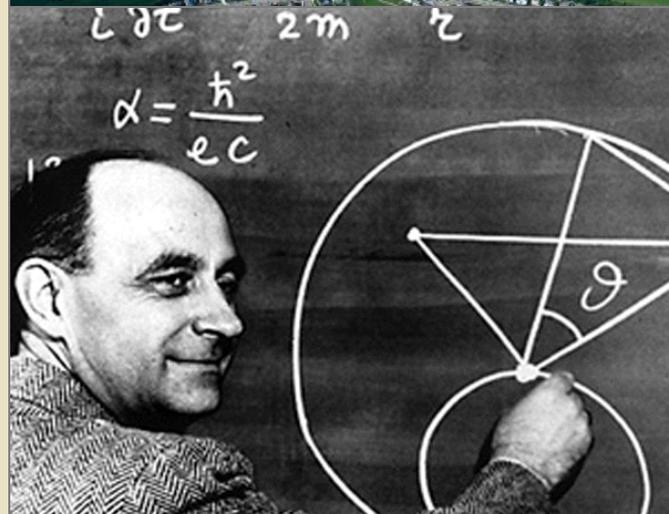
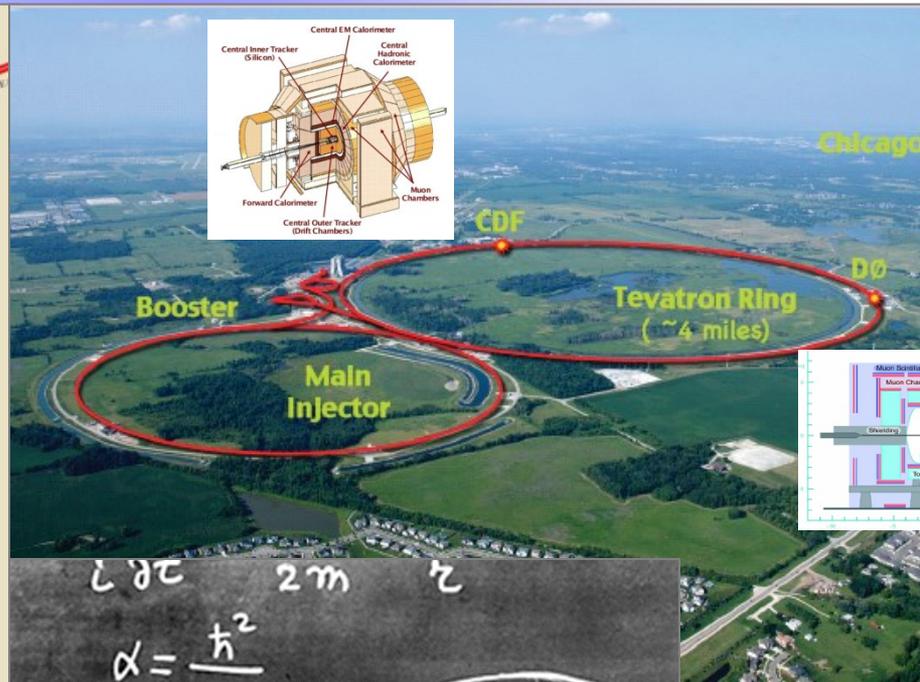
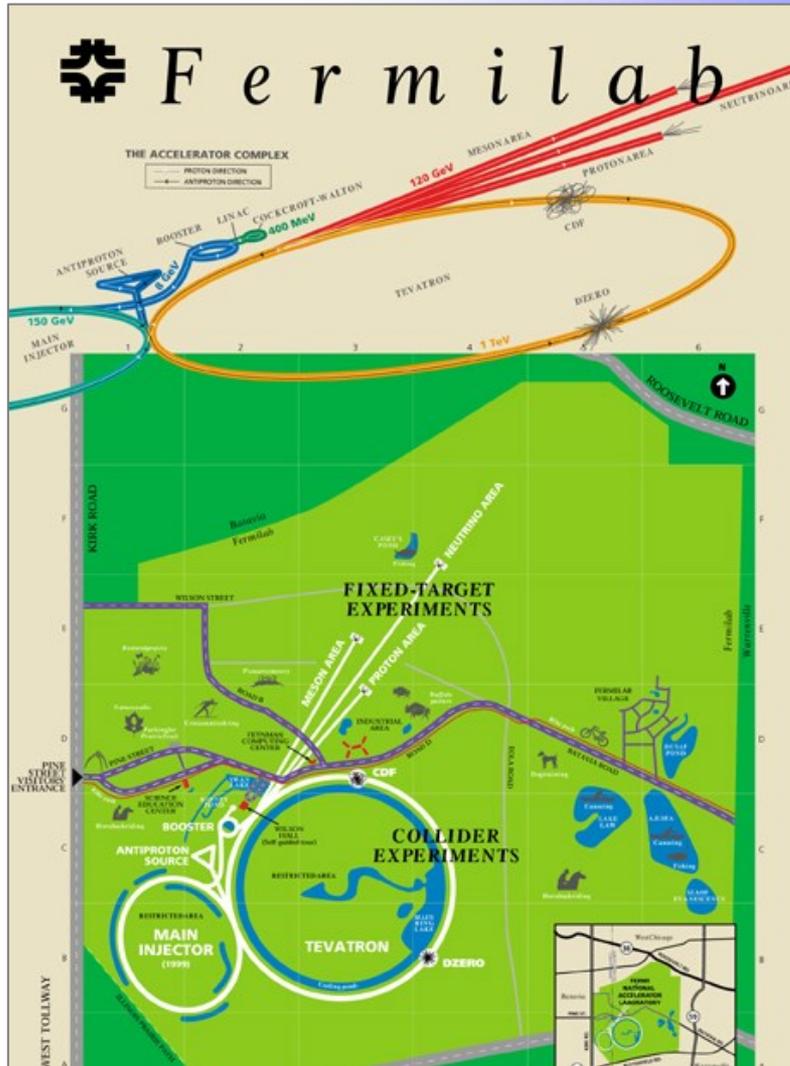
- 现有对撞机的升级和改造
- 下一代对撞机和加速器的研发: **ILC/CEPC/SPPC**
- 亮度和能量前沿齐头并进!



$$E=MC^2, \lambda=\hbar/p$$

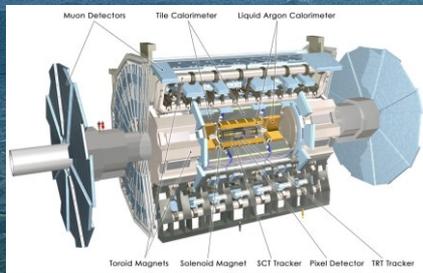
能量越高质量越大  
能量越高尺度越小

# 费米实验室(Fermilab)



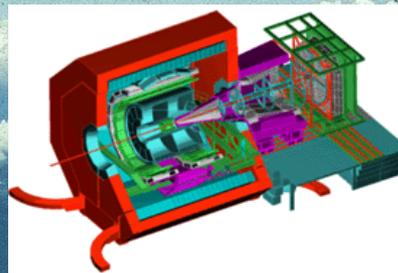
**Tevatron: 4英里公里环形圈, 史上第一个万亿电子伏特能级对撞机 (2TeV)  
1995年3月发现顶夸克! 2009年3月发现单顶夸克!**

# 欧洲核子能中心(CERN)

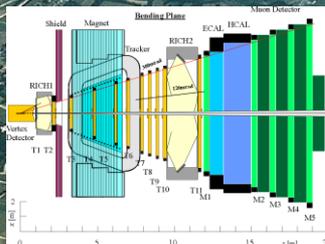


**ATLAS**

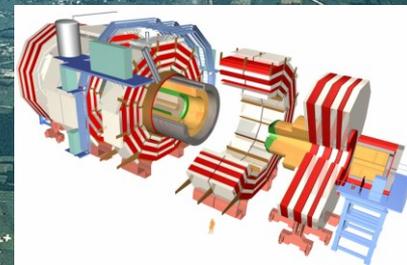
**CERN**



**ALICE**



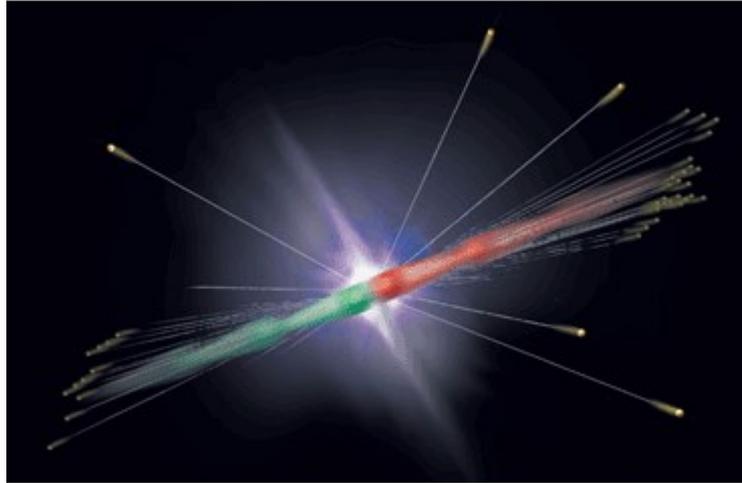
**LHCb**



**CMS**

**LHC: 27公里环形圈, 史上最高能量对撞机(14TeV)  
2012年7月发现希格斯粒子!**

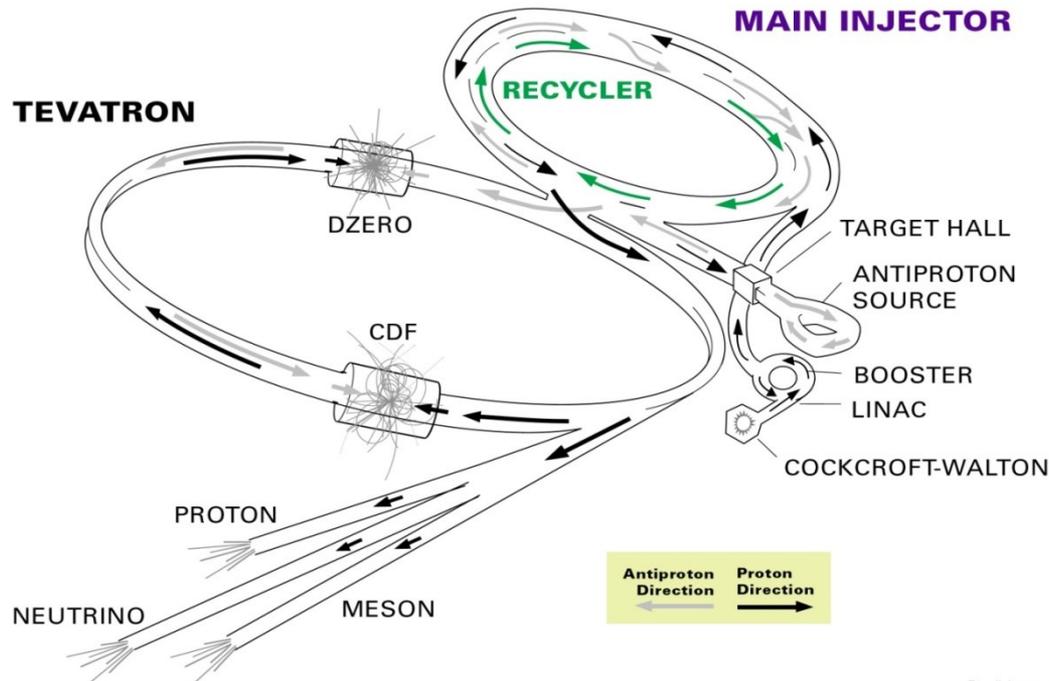
# 对撞能量



- **$E=MC^2$ , 1 GeV = 1,000,000,000 电子伏**
  - 相当于**10亿个电池串联**, **1TeV** (万亿电子伏特) 是**GeV**能量的一千倍
  - 能量越高则可供产生的粒子种类越多!
  - 宇宙射线能量从**10MeV**至**10GeV**不等, 个别极高能量可达**1000TeV**
- **费米实验室加速器物理能量升级过程: 万亿伏特对撞机 Tevatron**
  - **1968**年开始
  - **1972年200GeV** → **1976年500 GeV**
  - **1983年900GeV**
  - **2001年980GeV** → 总共**1.96TeV**
  - 世界最高能量质子和反质子对撞机, **1995**年发现顶夸克, **2009**年发现单顶夸克!

# 加速器 (电源)

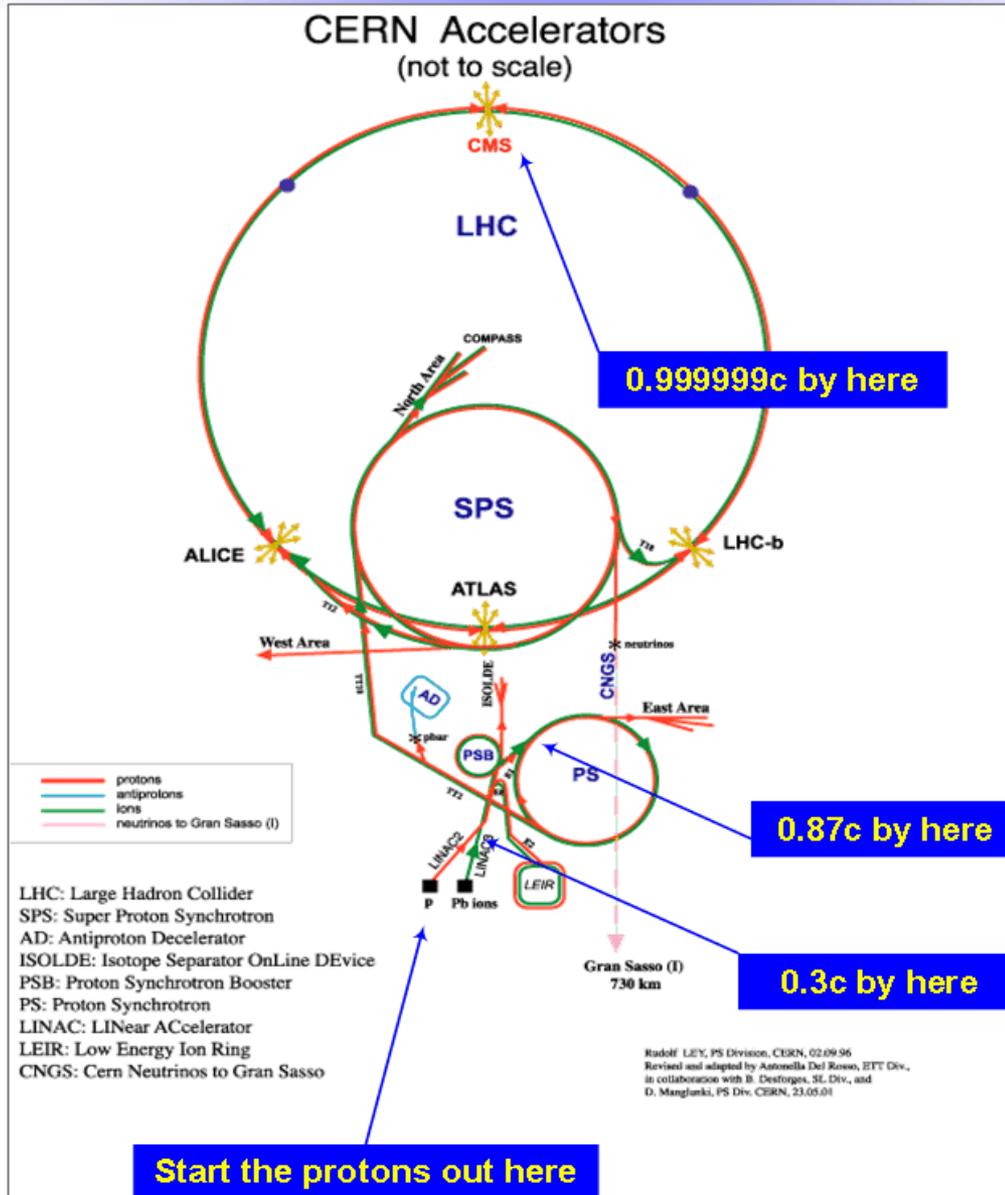
FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



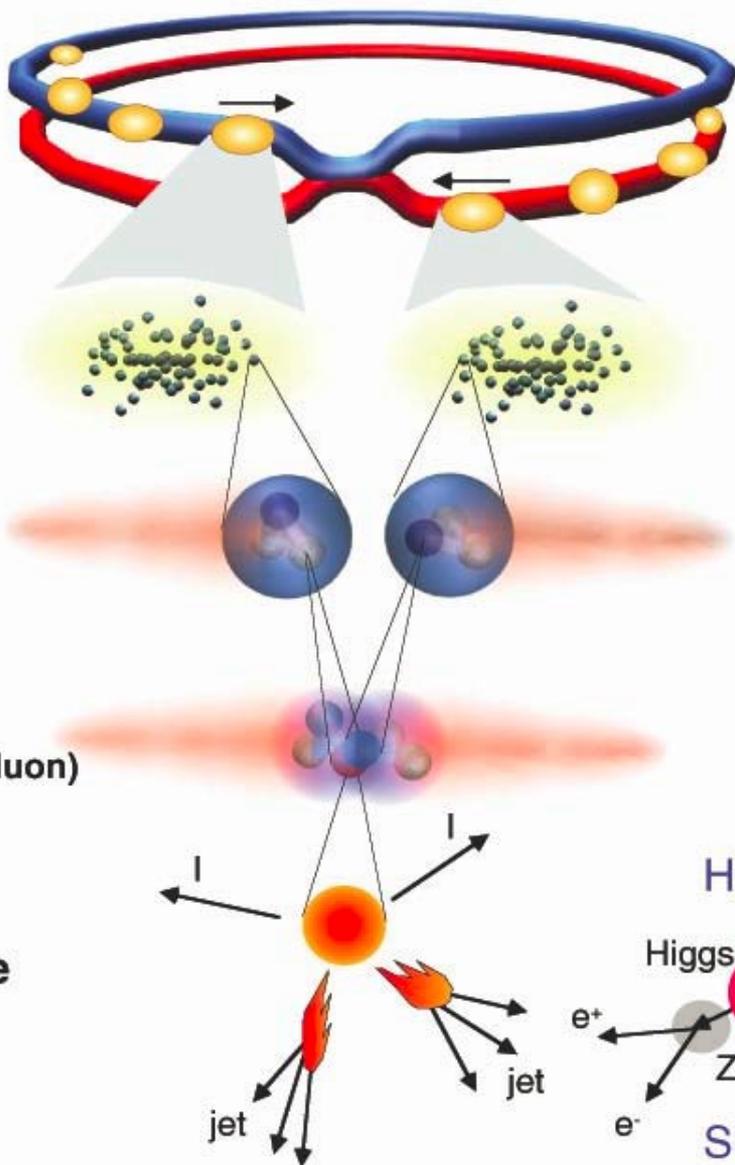
Fermilab 00.625



# 分布加速(CERN Accelerator)



# LHC: 质子-质子对撞



**Proton-Proton** 2835 bunch/beam  
**Protons/bunch**  $10^{11}$   
**Beam energy** 7 TeV ( $7 \times 10^{12}$  eV)  
**Luminosity**  $10^{34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

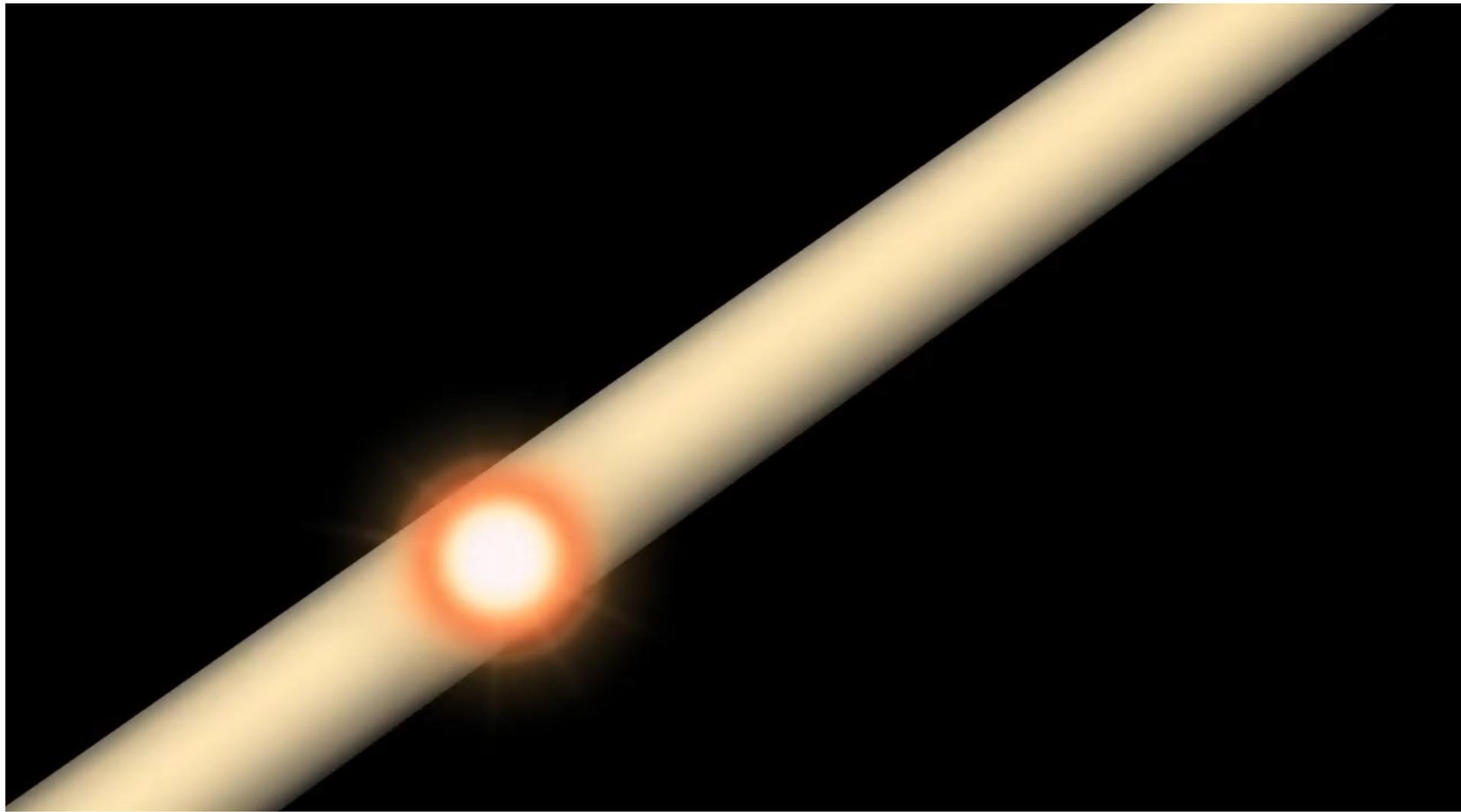
**Crossing rate** 40 MHz

**Collisions**  $\approx 10^7 - 10^9$  Hz

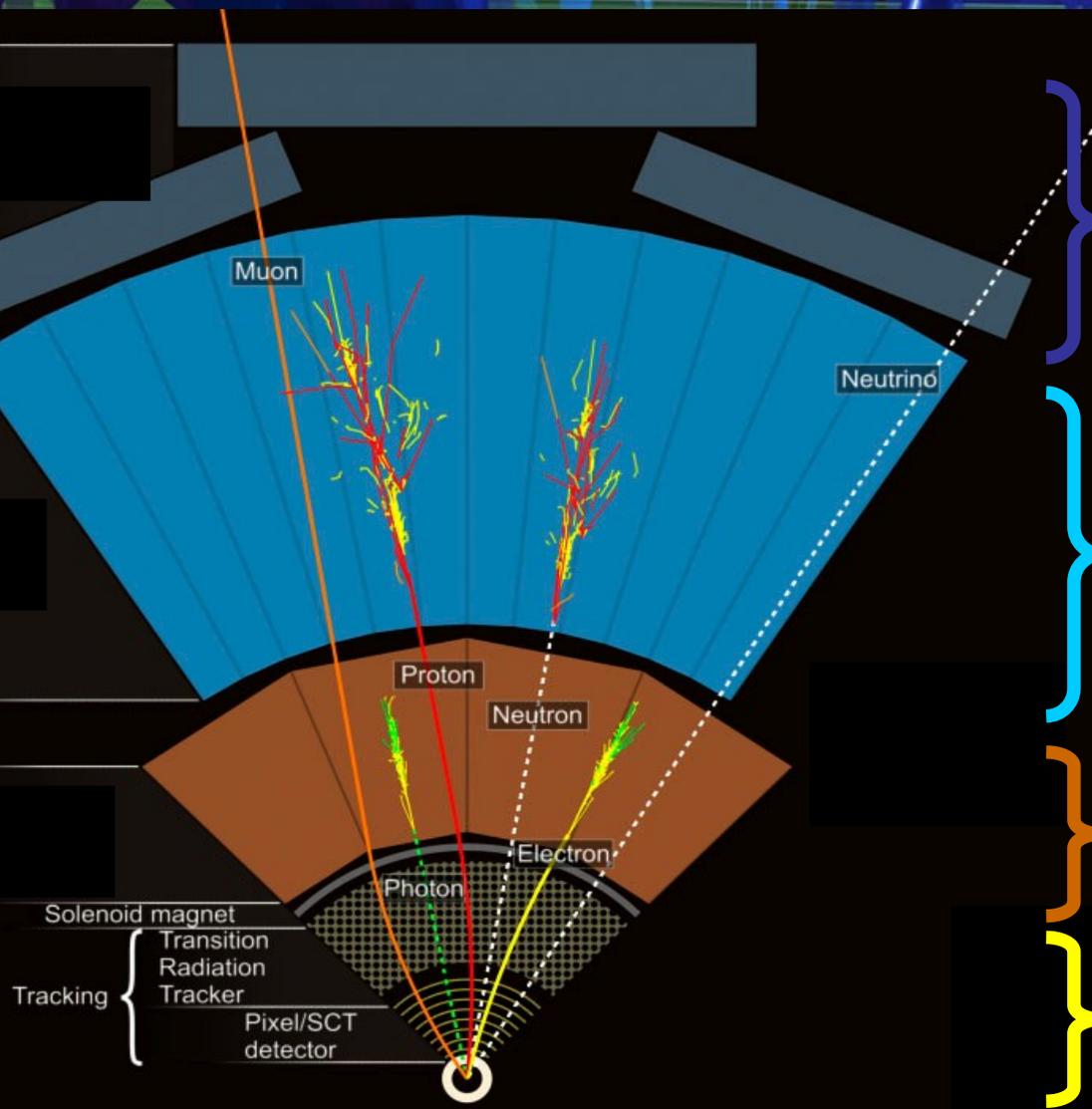
为什么要对撞如此频繁？  
 寻找感兴趣的物理过程：  
**Higgs  $\rightarrow$  ZZ\*  $\rightarrow$  4l** 通过对撞产生几率为10万亿分之一

**Selection of 1 in  
 10,000,000,000,000**

# 对撞事件(Collision Event)



# 探测器（高精度照相机100M MP）



缪介子探测器：  
缪介子的动量和轨迹测定

强子量能器：  
粒子流,中微子或其它能  
量损失的测定

电磁量能器：  
电子,光子的测定

轨迹探测器：  
带电粒子的动量和轨迹  
碰撞定点的标定

# 对撞事件（相片）

夸克对

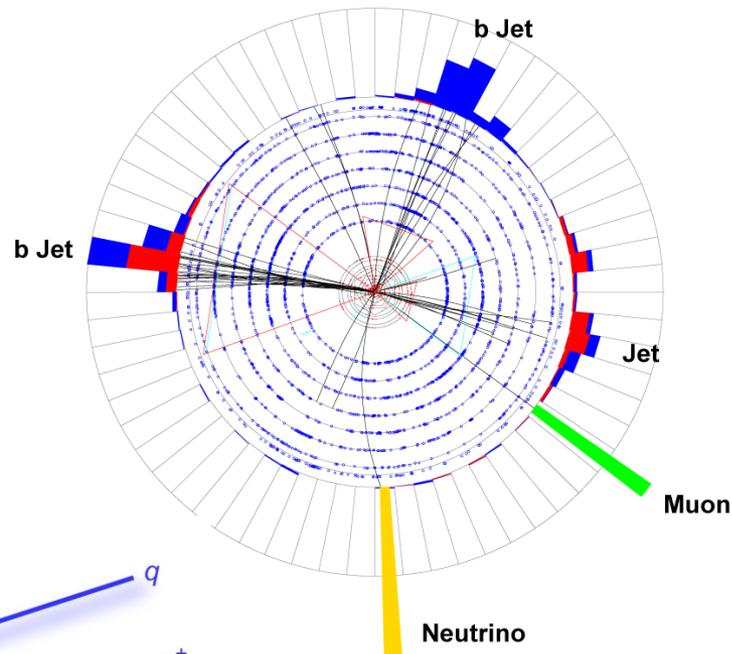
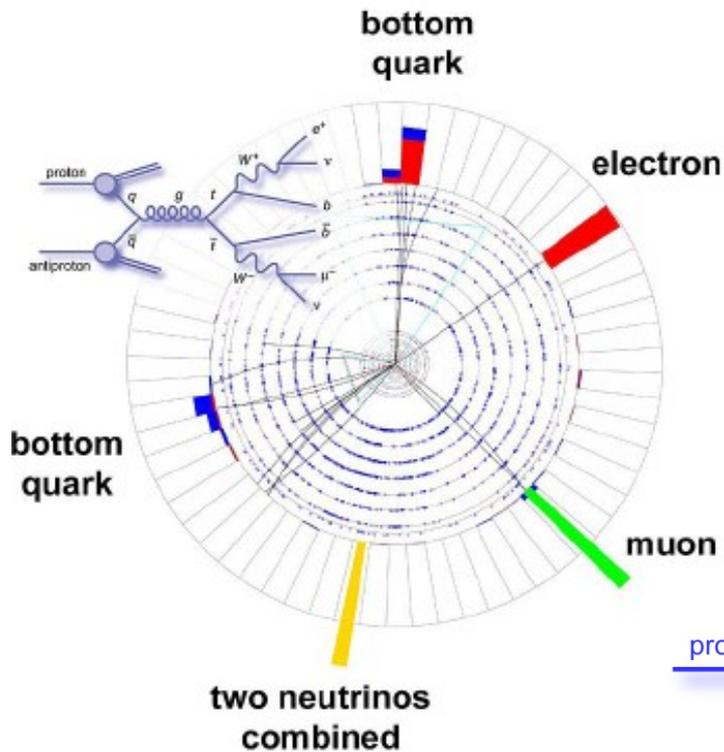
单顶夸克

DØ Experiment Event Display

Single Top Quark Candidate Event,  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  Analysis

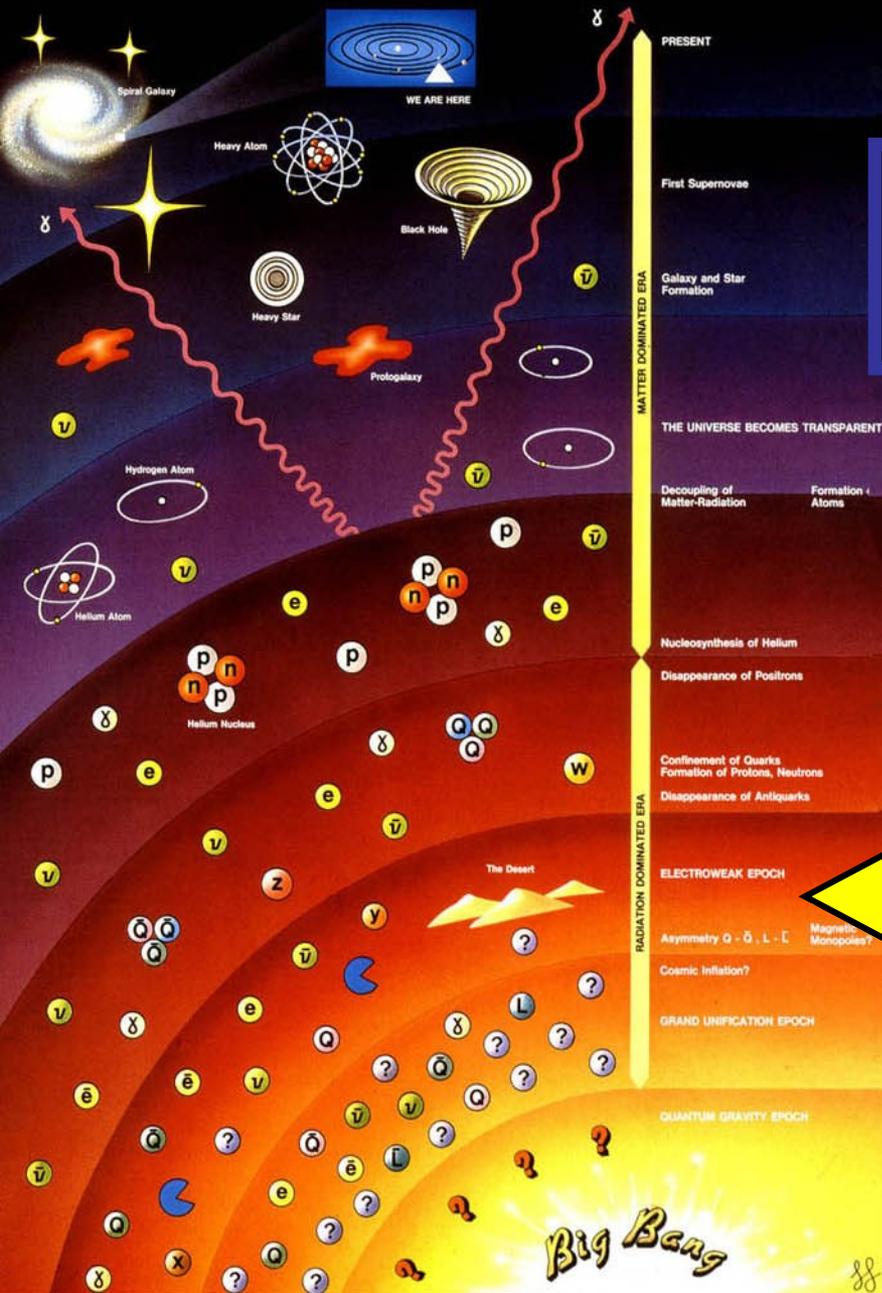
Run 223473 Evt 27278544 Sun Jul 23 19:21:41 2006

ET scale: 28 GeV



费曼图

# History of the Universe

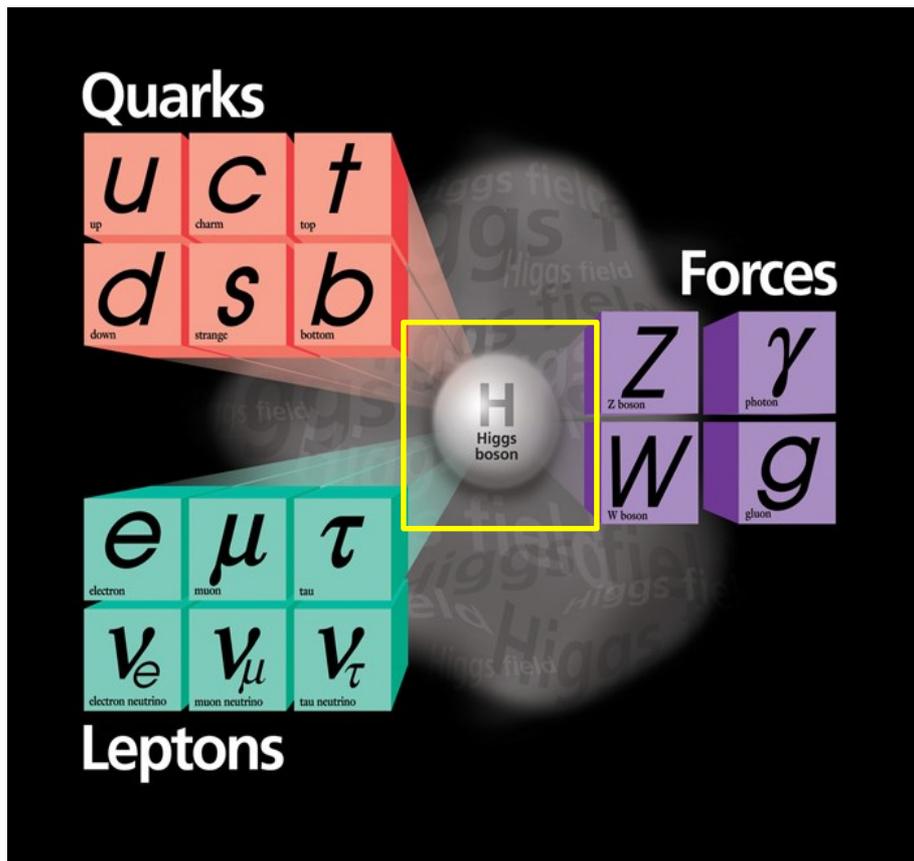


宇宙一直处于不可逆的演化过程中  
新奇粒子的海洋一去不复返  
如何反转时间箭头？

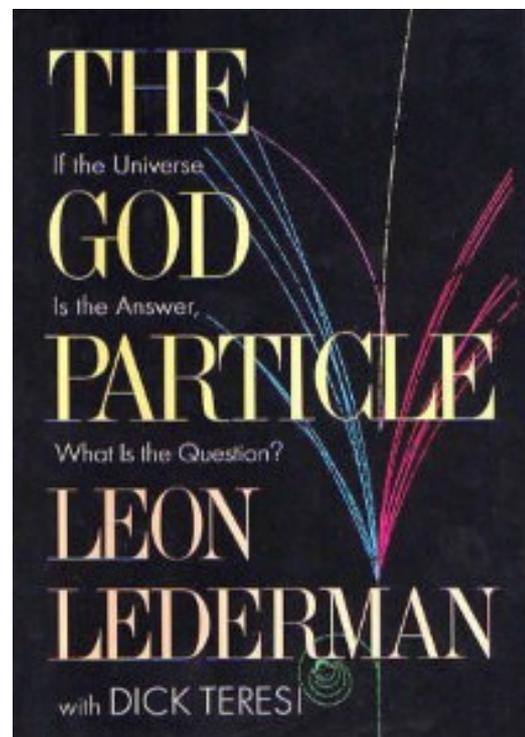


通过模拟宇宙大爆炸初期的  
能量环境探索宇宙诞生  
以及演化的奥秘

# 探索基本粒子质量的起源



→ **Higgs** 玻色子用来解释基本粒子的质量来源，是粒子物理标准模型中最后被发现的关键粒子，常被媒体称为“上帝”粒子。



→ 寻找**Higgs** 玻色子是大型国际高能对撞机实验( LEP, Tevatron, LHC) 的主要物理目标之一。

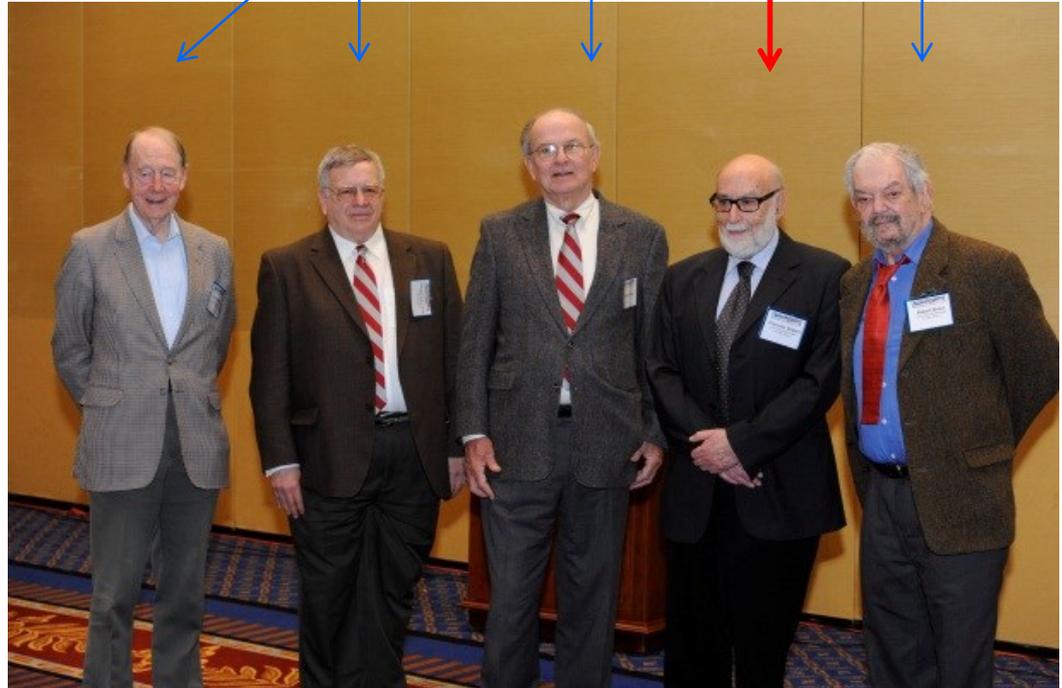
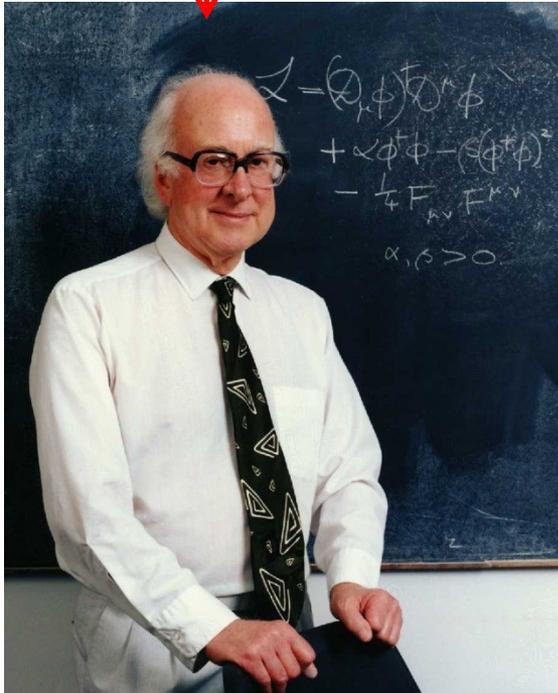
# 希格斯机制(Higgs Mechanism, 1964)

## ➤ J. J. Sakurai Prize for Theoretical Particle Physics (2011)

Peter W. Higgs  
Phys. Lett. 12 (1964.9.15) 132  
PRL 13 (1964.10.19) 508

F. Englert, R. Brout  
PRL 13 (1964.8.31) 321

G.S. Guralnik, C.R. Hagen and  
T.W.B. Kibble, PRL 13 (1964.11.16) 585



# 质量来源: 希格斯机制

对称性自发破缺

Goldstone Boson  
(无质量)

黑格斯粒子  
(有质量)

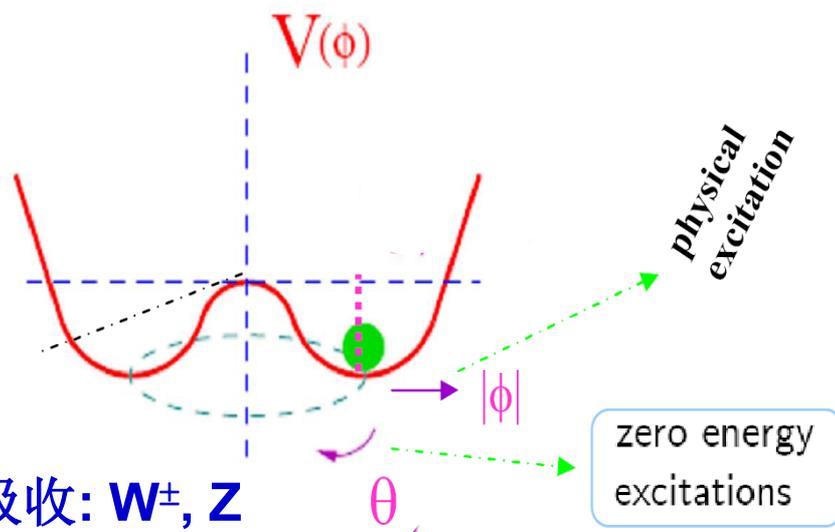
- 质量和电荷一样是粒子的一种属性

- 不同粒子质量来自于和希格斯场的相互作用

- 质量与引力相关  
(好比电荷与电磁)

被规范玻色子吸收

Massive Gauge Boson



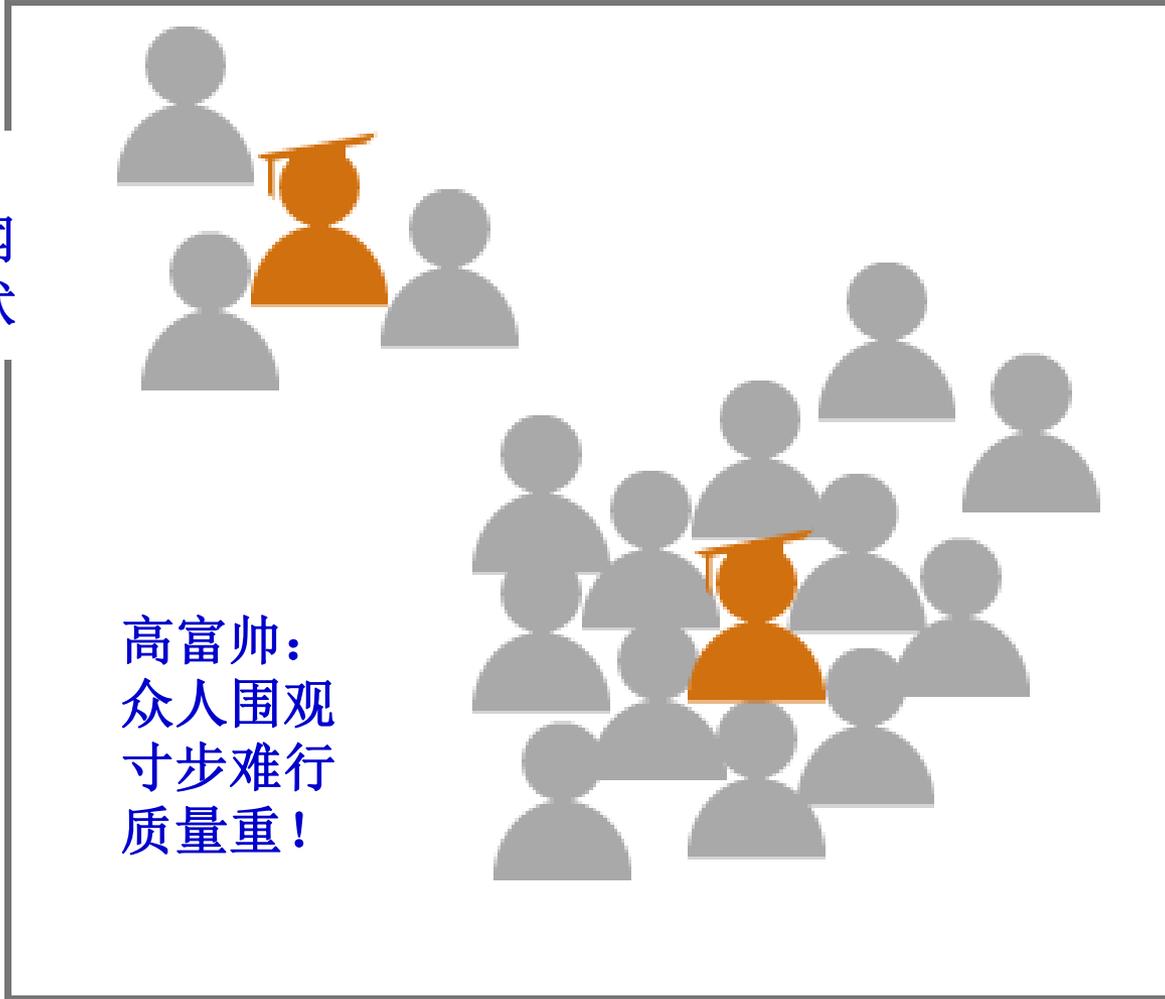
“只有质量排斥”

希格斯粒子是真空中物理激发态  
其他三个零能激发态被规范玻色子吸收:  $W^\pm, Z$

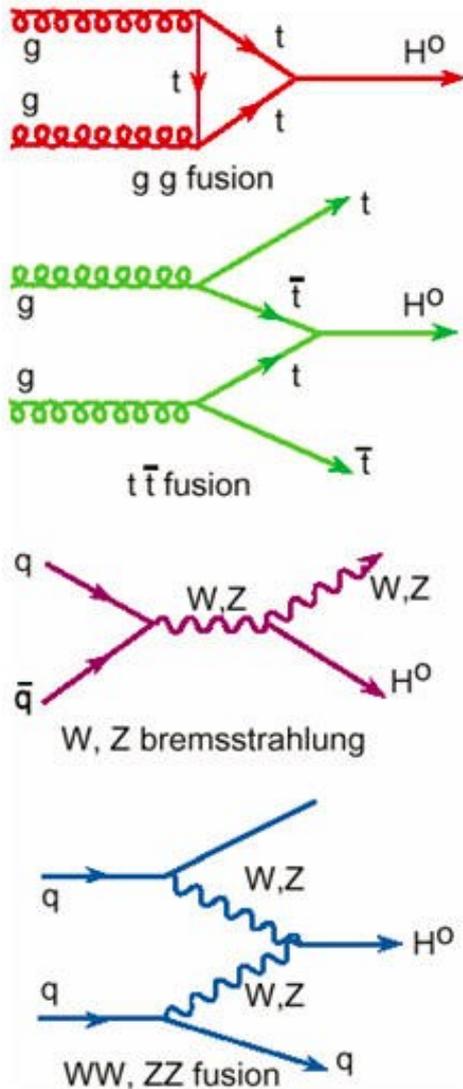
# 质量来源: 希格斯机制

吊丝:  
默默无闻  
轻松潜伏  
质量轻!

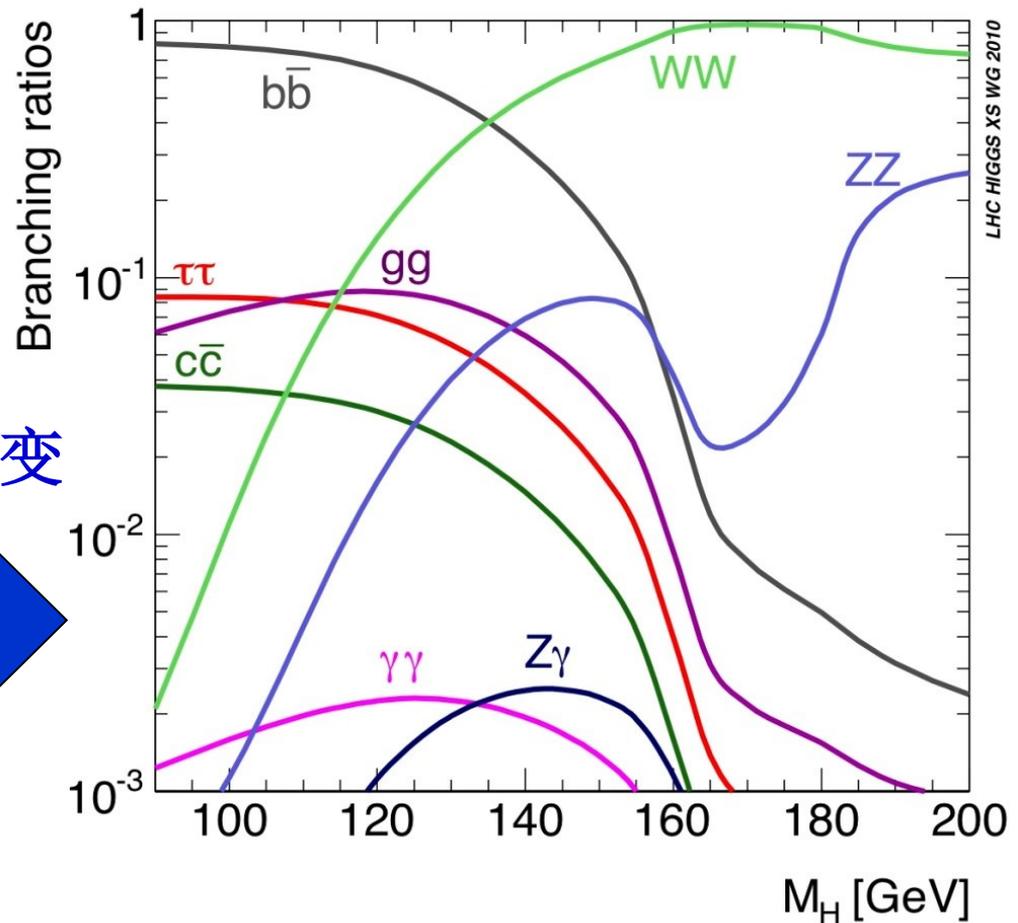
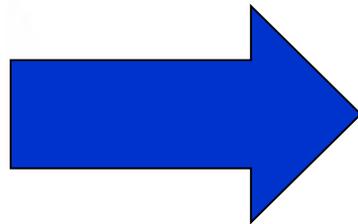
高富帅:  
众人围观  
寸步难行  
质量重!



# 寻找希格斯粒子



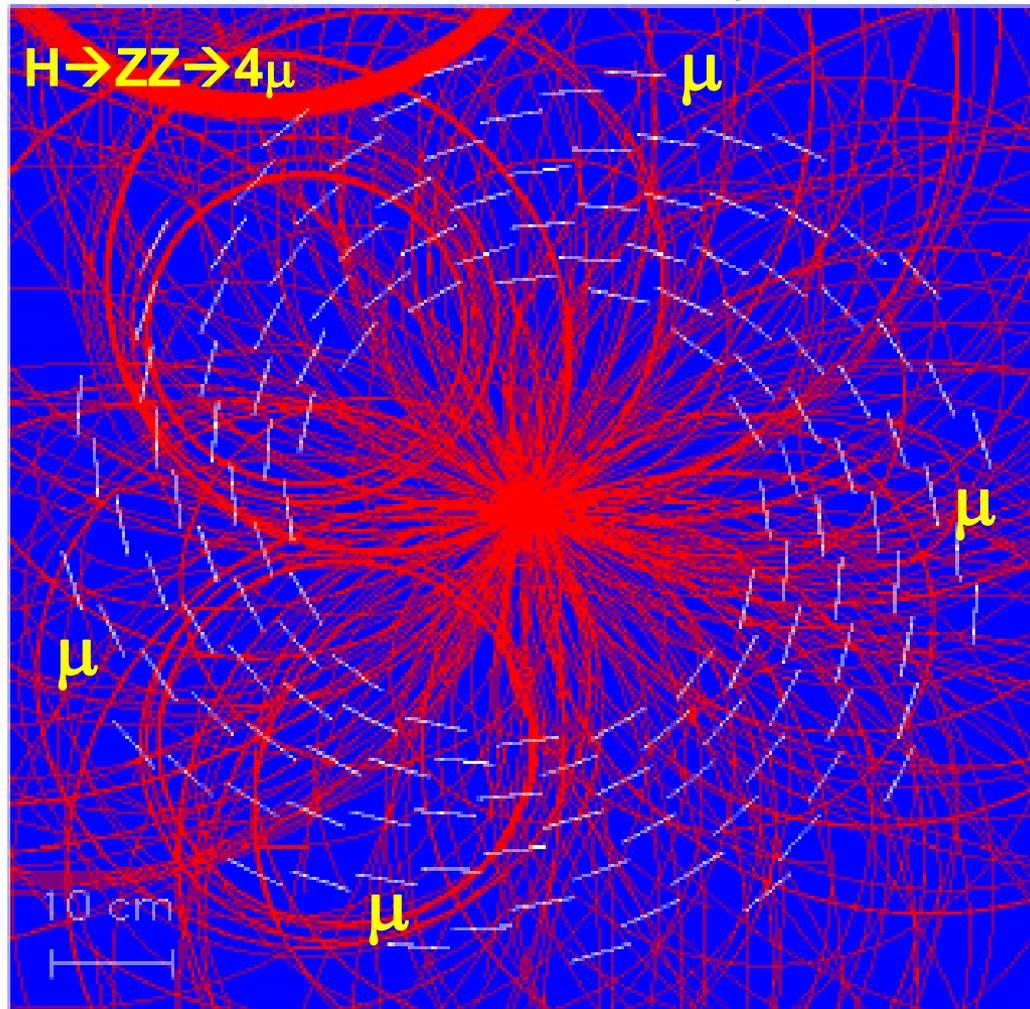
从产生到衰变



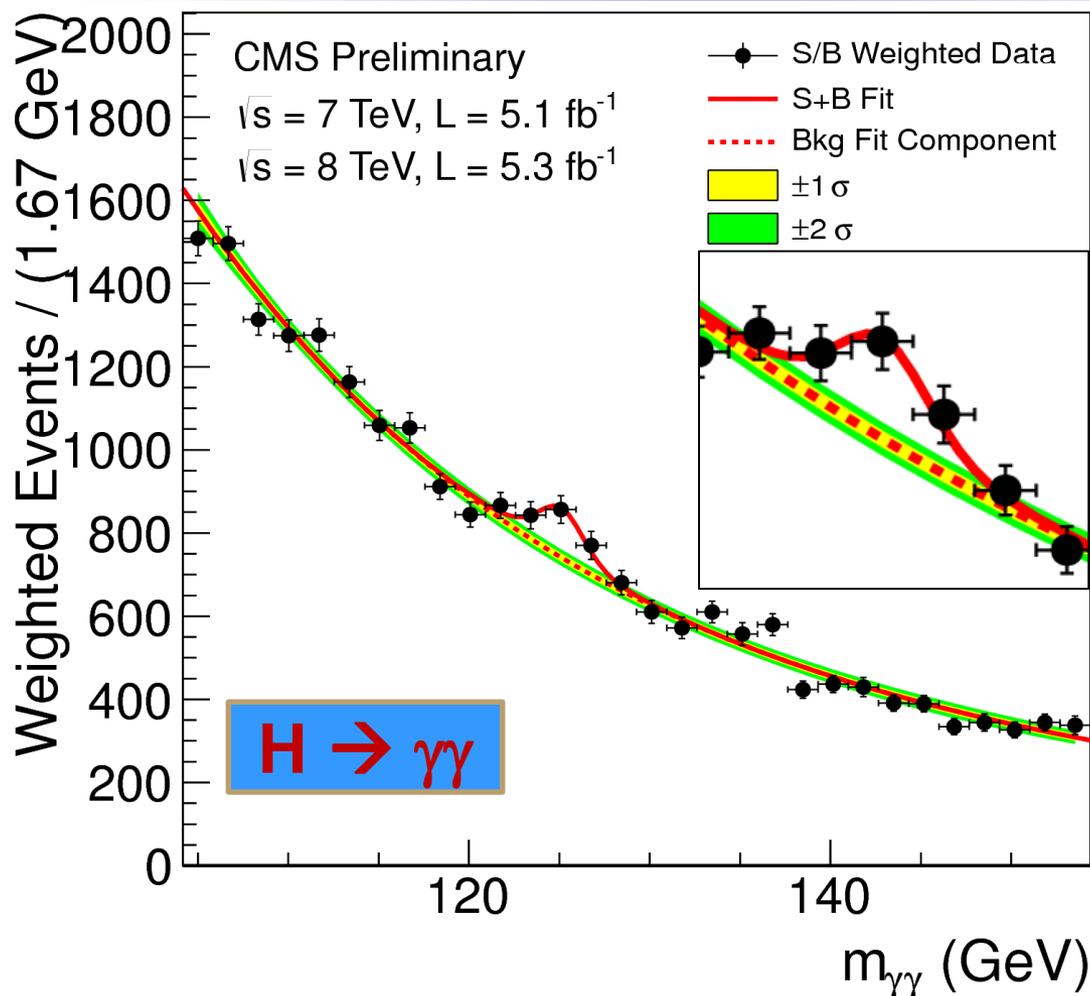
- **Higgs**粒子的产生需要较高能量，是稀有事件
- 在 $10^{12}$ 个“事件”中大约能有一个**Higgs**粒子产生
- 还有大量其它事件也产生类似的衰变产物(“背景”)

# 复杂背景 (Pileup)

大量复杂的背景事件对实验探测、对撞事件重建以及粒子鉴别等实验数据分析过程都提出了重大挑战!

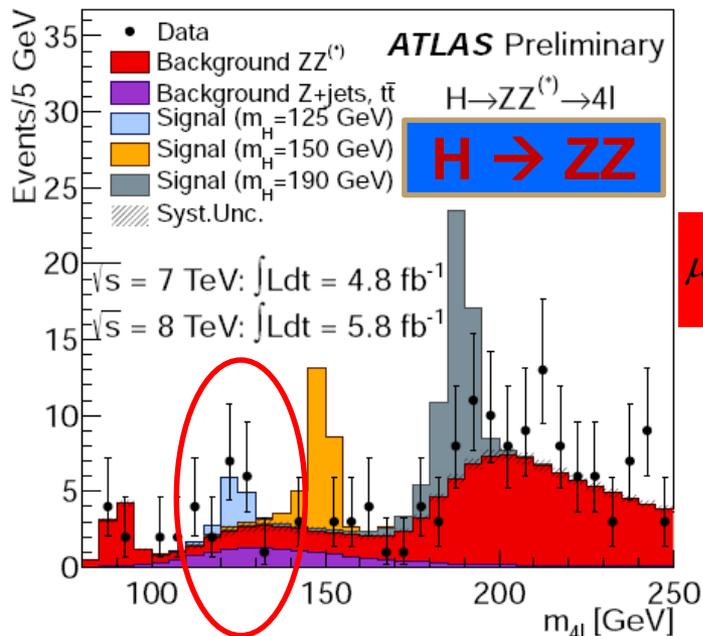
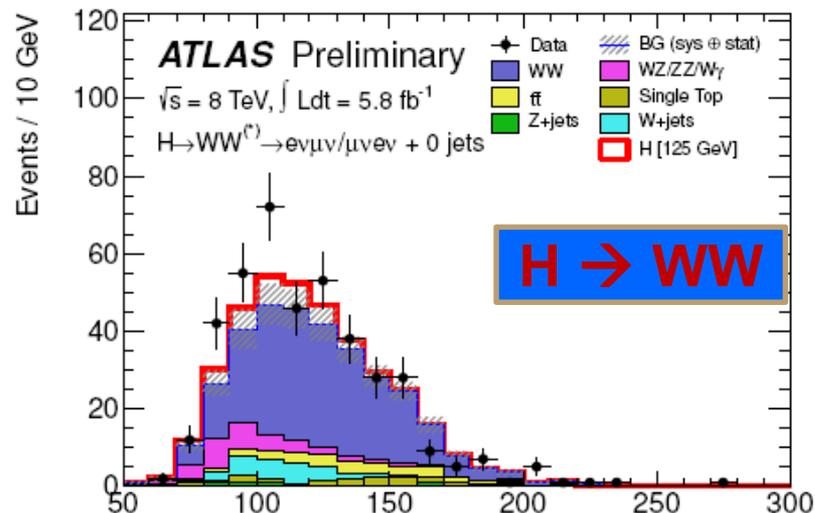
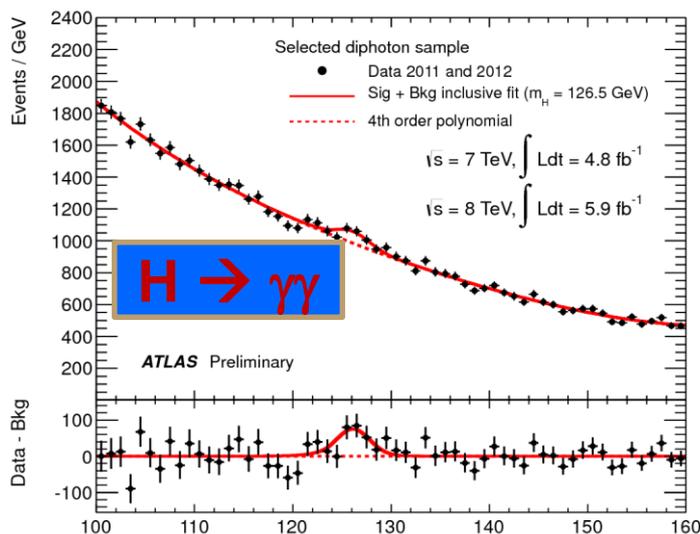


# 希格斯粒子存在的证据

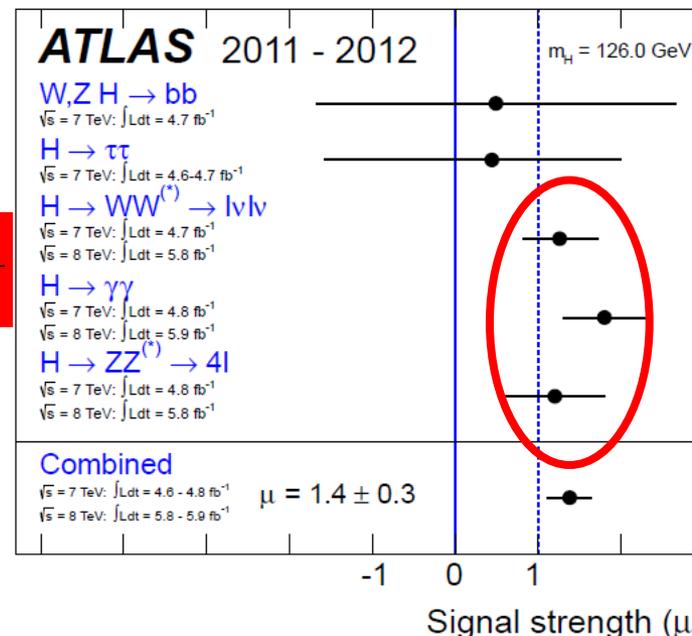


- 通过对比实际观测数据(“Data”)和理论预测结果
- 看是与有Higgs(红色)还是与没有Higgs(黄绿色)更加符合
- 利用统计工具进行定量分析判断：区分细微差别，还要考虑到测量误差！

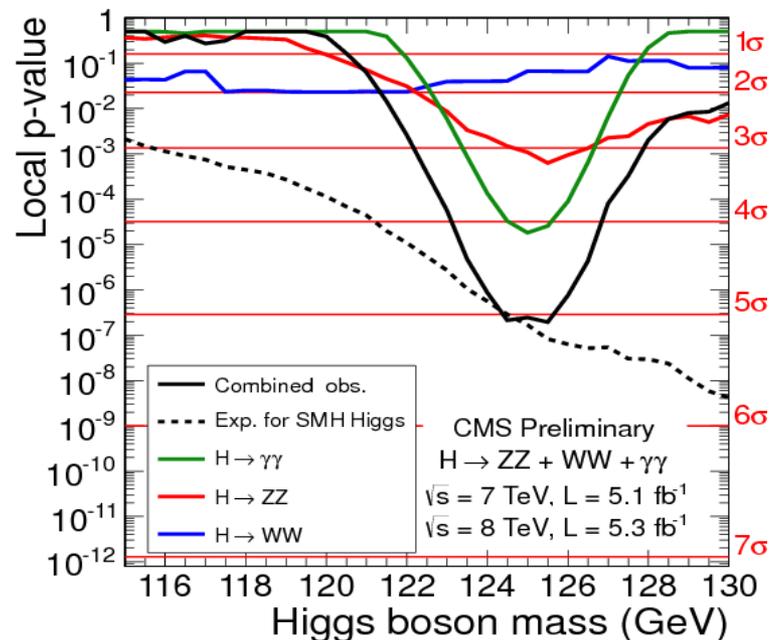
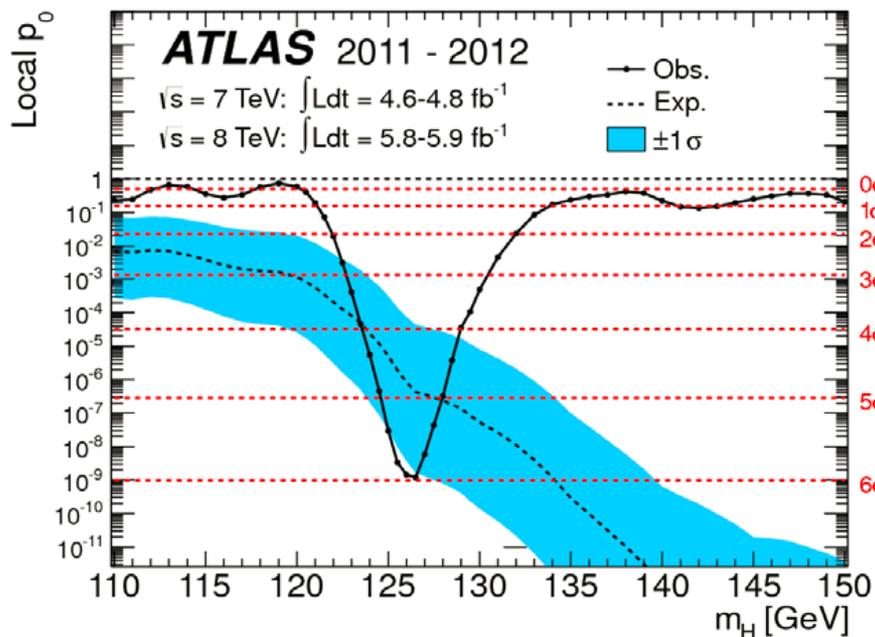
# 希格斯粒子存在的证据



$$\mu = \frac{\sigma \cdot Br}{(\sigma \cdot Br)_{SM}}$$



# 希格斯粒子的发现



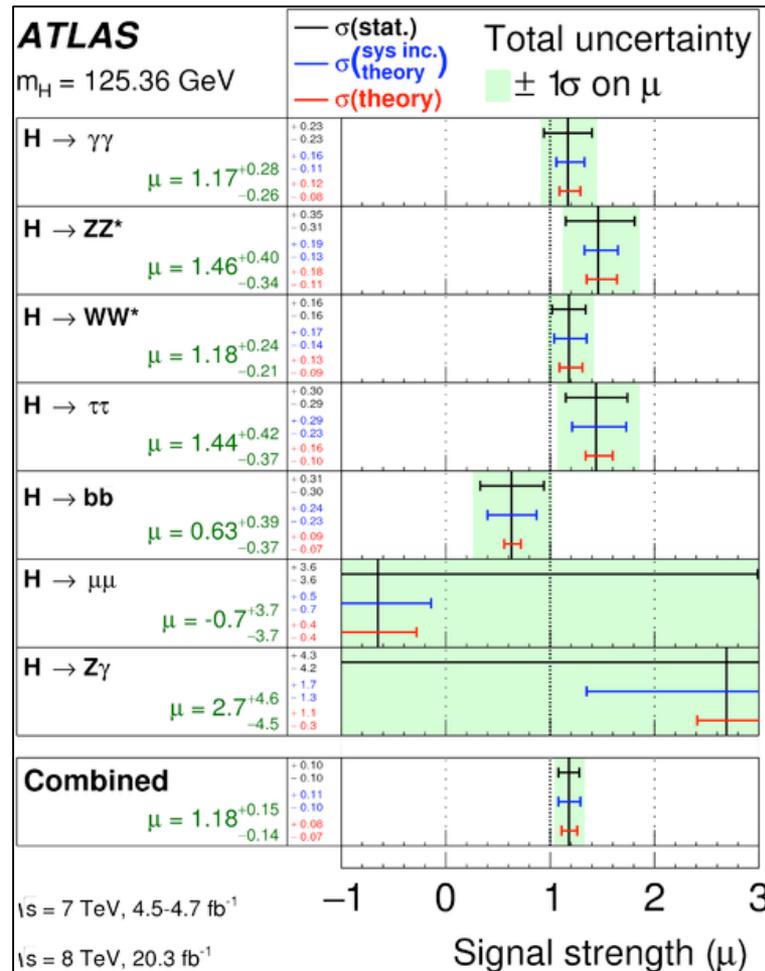
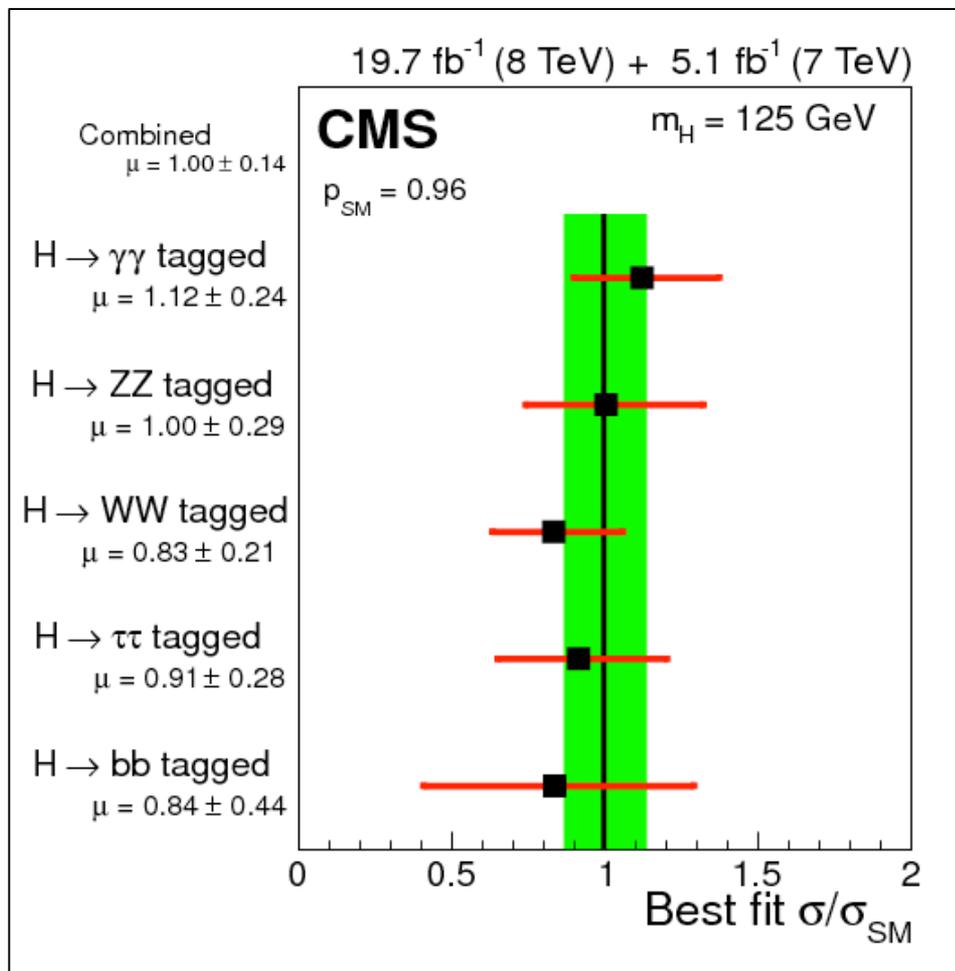
- Significance  $6.0\sigma$  (exp  $5.0\sigma$ )
- $M_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4 \text{ GeV}$

- Significance  $5.1\sigma$  (exp  $5.2\sigma$ )
- $M_H = 125.3 \pm 0.4 \pm 0.5 \text{ GeV}$

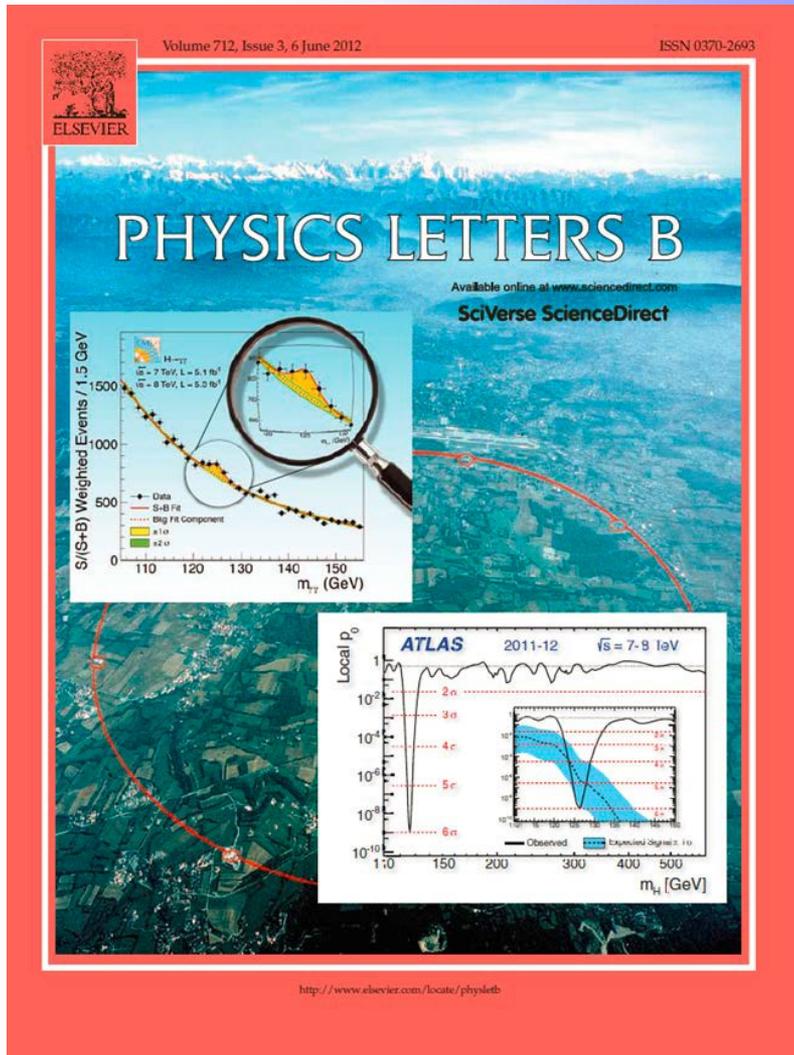
- 测量的可信度(Significance)由正态分布标准方差 $\sigma$ 表示,  $3 \text{ sigma} \sim 99.7\%$
- 国际上宣布“发现”结果的可信度标杆是  $5 \text{ sigma} \sim 99.9999426697\%$
- **2012 ICHEP大会上 ATLAS和CMS公布独立发现希格斯粒子!**
- 初步结果得到了后续实验数据的进一步确认

# 希格斯粒子的发现

- Signal strength ATLAS :  $\mu = 1.18^{+0.15}_{-0.14}$
- Signal strength CMS:  $\mu = 1.00 \pm 0.14$
- Signal significance:  $> 10\sigma$



# 希格斯粒子的发现



Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29 (ATLAS)  
Phys. Lett. B 716 (2012) 30-61 (CMS)

<http://www.sciencemag.org/site/special/btoy2012/>



**News on the Higgs discovery  
are all over the world.**

# PRESS COVERAGE

after July 4<sup>th</sup> seminars at CERN

CERN black board, Jul 2012

# 标准模型预言的希格斯粒子

- **ATLAS**和**CMS**实验结果表明目前找到的希格斯粒子的已知性质正如标准模型所预言：自旋为 **0**且宇称为偶。

	<b>ATLAS</b>	<b>CMS</b>
<b>Mass</b>	$125.36 \pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$	$125.02^{+0.26}_{-0.27}(\text{stat})^{+0.14}_{-0.15}(\text{syst})$
<b>Data favors <math>0^+</math> vs</b>		
<b>Spin <math>0^-</math></b>	<b>97.8% CL</b>	<b>99.8% CL</b>
<b>Spin 1</b>	<b>99.7% CL</b>	<b>99.9% CL</b>
<b>Spin <math>2^+</math></b>	<b>99.9% CL</b>	<b>99.4% CL (100%gg)</b>

- **耦合强度:**
  - 希格斯对波色子的耦合强度测量精度**10%**
  - 希格斯对费米子对耦合强度不为**0** ( $>5\sigma$ )
- **更多反应道**
  - **VBF production  $> 5\sigma$  (ATLAS+CMS)**
  - **ttH  $\sim 4\sigma$  ( $<2\sigma$  expected)**

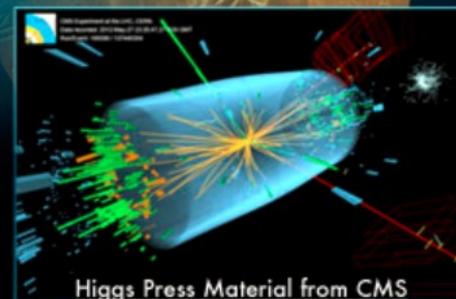
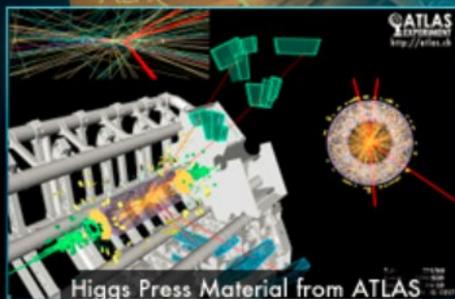
# 希格斯机制获2013年诺贝尔物理奖

Congratulations to Professors

François Englert & Peter Higgs

for the

2013 Nobel Prize in Physics



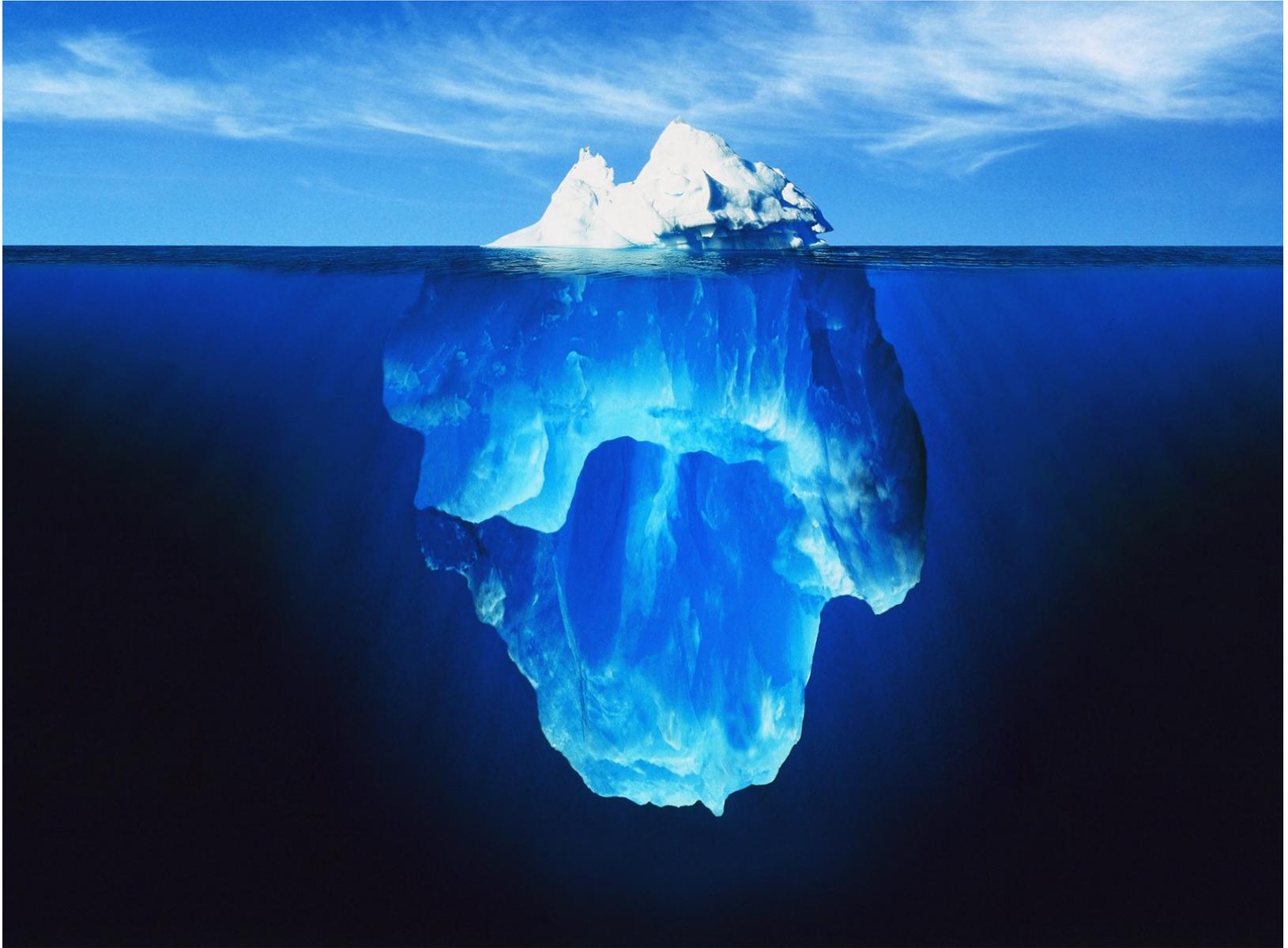
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by **the ATLAS and CMS experiments** at CERN’s Large Hadron Collider”

中国组在探测器建造和希格斯粒子的发现中做出了重要贡献

**ATLAS**实验组：高能所、科大、南大、山大、上海交通大学

**CMS**实验组：高能所、北大

# 希格斯粒子发现之后



# 奇特的希格斯粒子：成功和挑战

## 希格斯粒子非一般基本粒子

- 它与所有基本粒子都有相互耦合作用（**Coupling**），其相互作用大小决定了其他粒子的质量大小
- 所有其他基本粒子的自旋均为1（波色子）或1/2（费米子）
- 希格斯粒子的自旋为0
  - 不仅是新的基本粒子，而且是新的类型！
- 物理学史上第一次有了从低到高能级甚至超高能级都适用的自治理论
  - 标准模型理论的自然性疑难更加亟待解决

## 希格斯粒子的发现是物理学最近半个世界最重要的发现之一

- 开辟了一个新时代
- 希格斯粒子就是新物理：希格斯粒子在被发现以后仍然充满了未知
  - 耦合作用强度？自旋为0？真空不稳定性？对宇宙演化过程影响？
- 中微子相关：微小质量来源？与Higgs作用？
- 暗物质相关：Higgs portal？

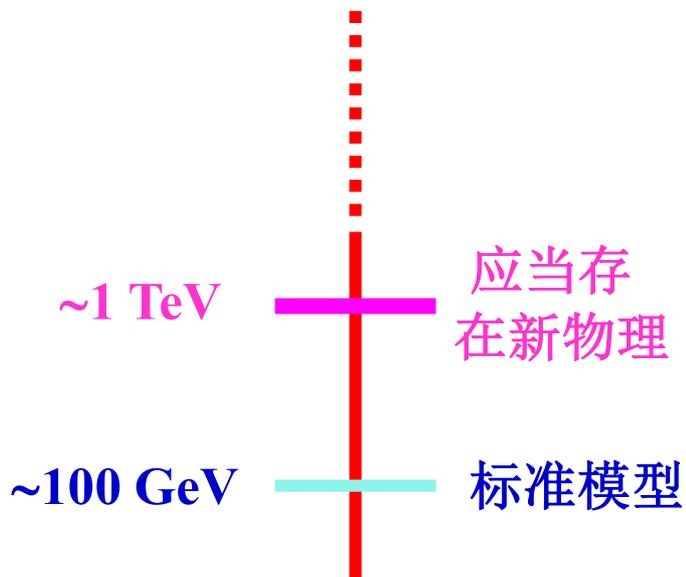
# 理论疑难：自然性问题

$10^{15}$  GeV ——— 大统一

If SM valid up to GUT scale, the theory has extreme fine-tuning !

$$m_h^2 = m_0^2 - \delta m_h^2$$

100 GeV      参数       $\Lambda^2 / 52$



- 在地球上拿枪瞄准月球上的一只兔子
- 在光滑的镜面上竖立起一根很尖的针

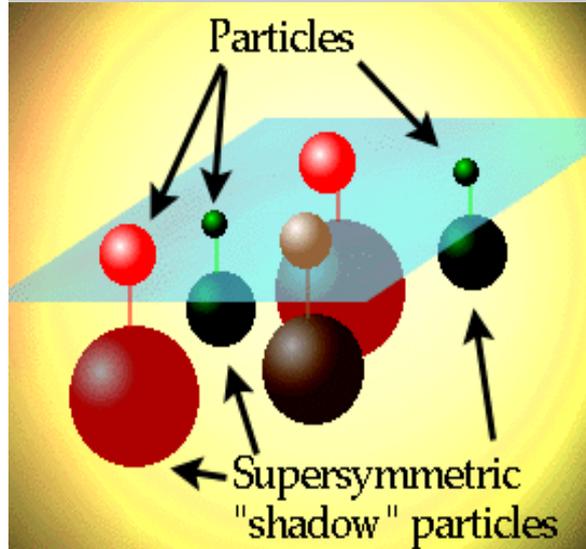
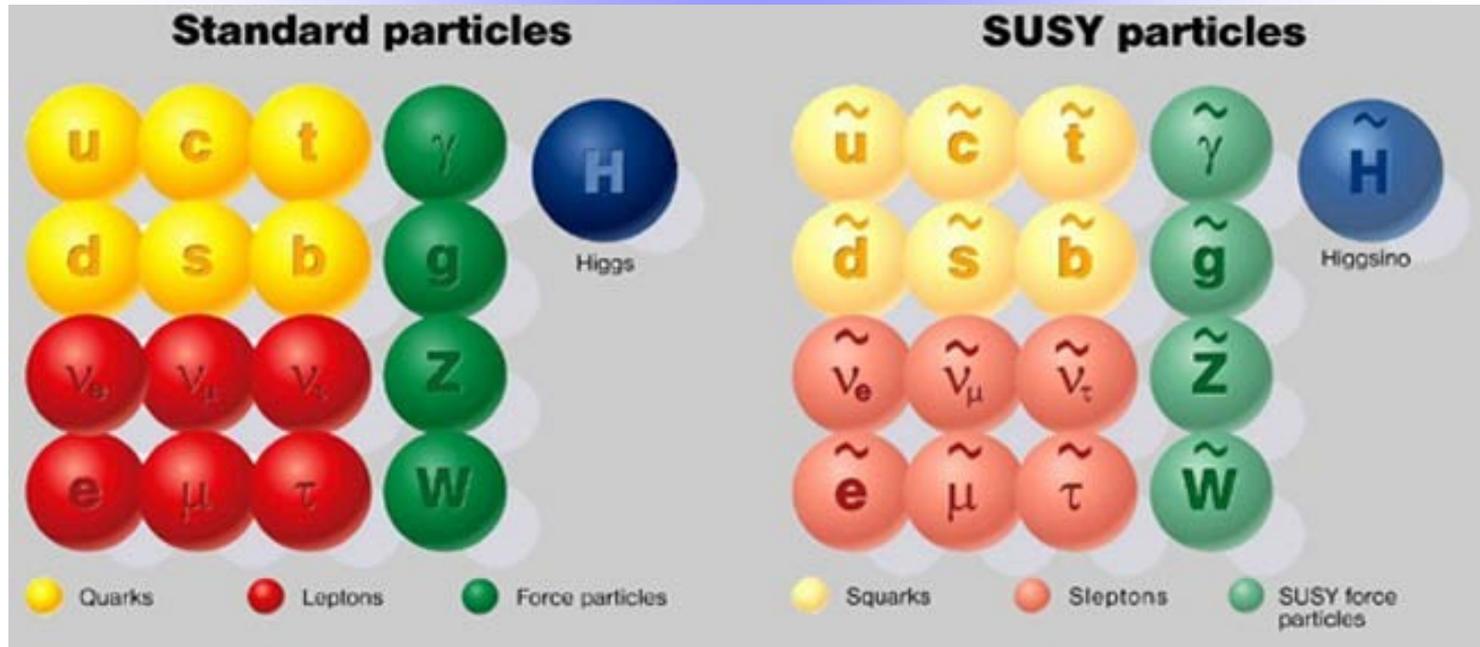
类比：1693年，牛顿回答‘引力定律怎样跟静态宇宙自治’：

As hard as to make the sharpest needle stand upright on its point upon a looking-glass

This “unnatural” state of affairs could be set by a divine power.

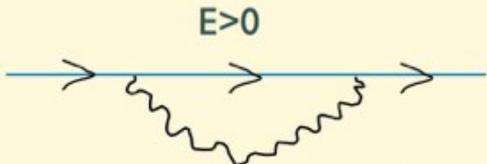
[Slide from J.-M. Yang]

# 超对称理论



- 每个已知粒子都有一个“超对称”伙伴
- 新粒子和已知粒子都可以用统一理论描述
- 统一自然界所有力和所有粒子，解释宇宙演化过程以及暗物质(隐藏的“超对称粒子”)
- 理论上很有吸引力，没有自然性问题，但尚缺乏实验证据
- 有可能这些粒子都很“重”或者难以被探测到

# 超对称理论为何自然？



$E > 0$

$$\Delta(m c^2)_{\text{Coulomb}} \sim \frac{e^2}{r}$$

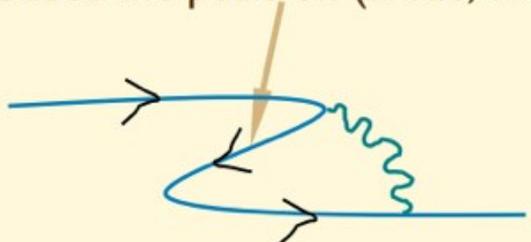
Requiring:

$$\Delta m < m = 0.5 \text{ MeV}$$

➔

$$\Lambda \equiv 1/r < 5 \text{ MeV}$$

Introduce the positron (Dirac, 1931)



$$\Delta(m)_{E > 0 \oplus E < 0} \sim e^2 m \log(\Lambda/m)$$

which is a correction of only 10% even at scales of the order of the Plank mass:

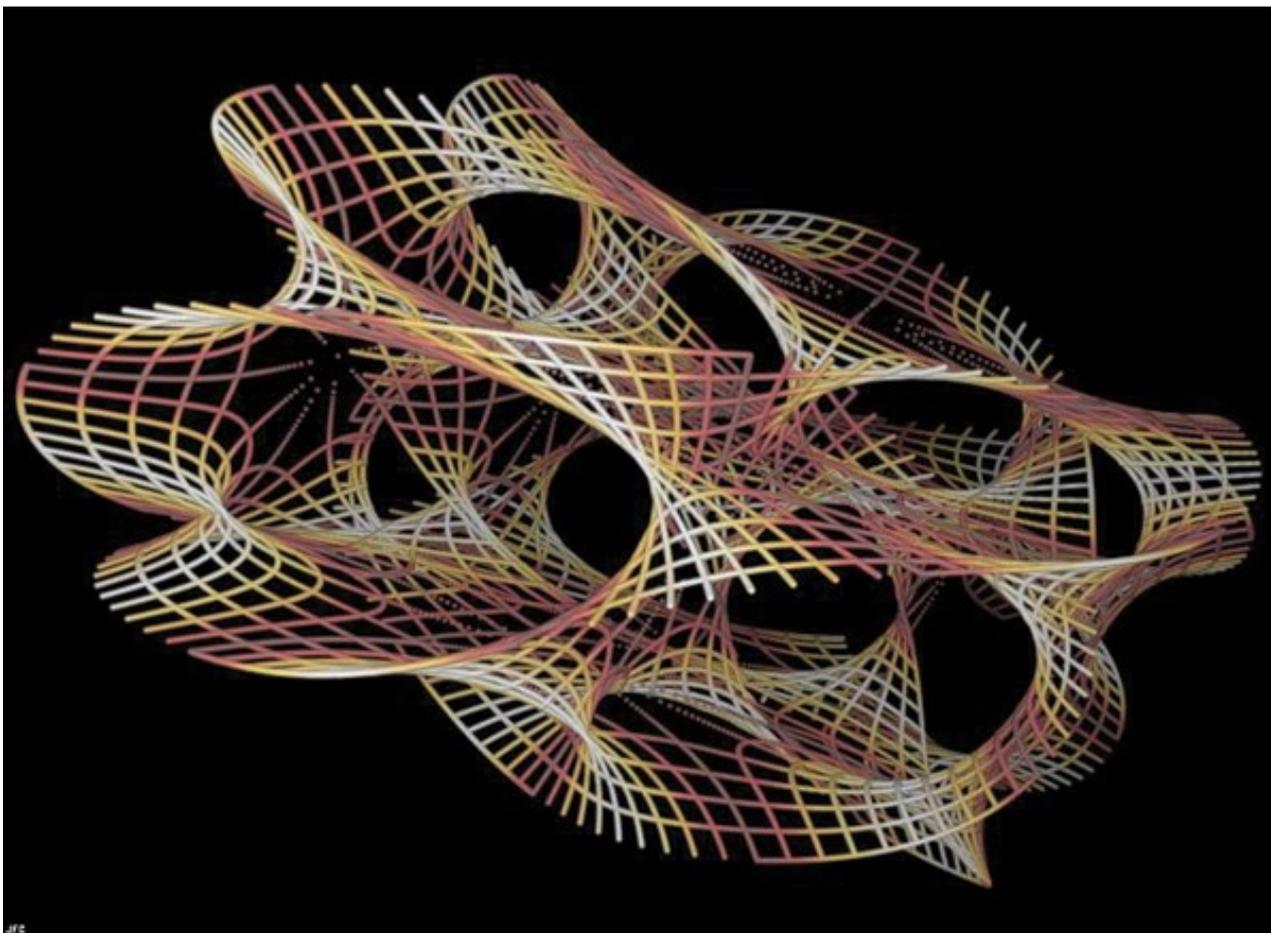
$$\Delta(m)_{E > 0 \oplus E < 0} \sim 0.1 m$$

at

$$\Lambda = 10^{19} \text{ GeV}$$

与电子和反电子做类比，任何基本粒子也存在相对的超对称粒子，因为两个粒子对质量/能量修正的抵消作用，“自然而然”的使得物理规律在普朗克尺度下皆适用

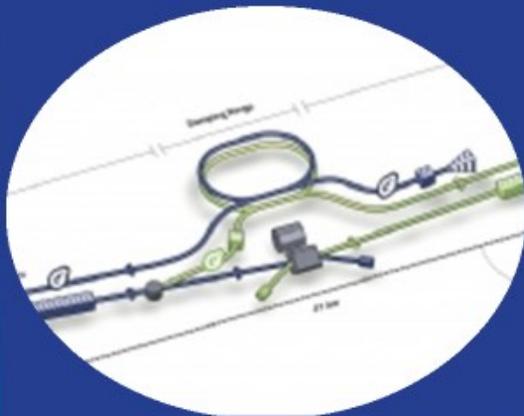
# 探索物质最深层次的结构



- 所谓基本粒子可能是多维空间下(做周期性运动的)弦
- 多维空间仅在宇宙诞生初期或者能量极高时可以观测到
- 高能碰撞机将有助于探索物质最深层次的结构

# Linear Colliders

ILC  
CLIC  
SLC-type  
Adv.  
Concepts



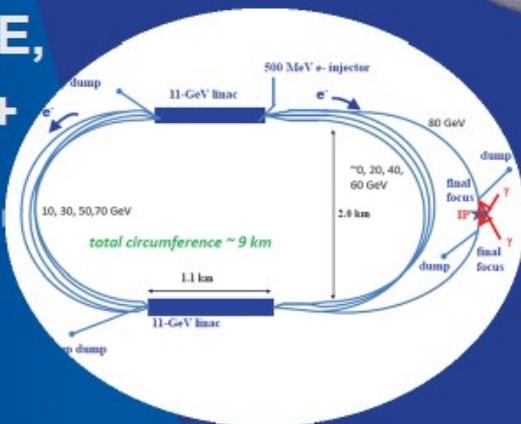
# Circular e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Colliders

LEP3  
TLEP  
Super-Tristan  
FNAL  
Site-filler  
IHEP, +  
...



# Higgs Factories

SAPPHIRE,  
CLICHÉ, +  
...



# $\gamma$ - $\gamma$ Colliders

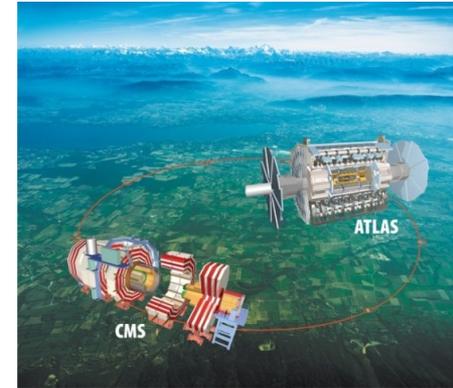


# Muon Colliders

# 后希格斯时代 – “希格斯工厂”

**质子质子对撞机**：能量高，发现新粒子能力强，但有大量强子本底，难以作精密测量

- LHC (大型强子对撞机) @ 14 TeV, 300 fb<sup>-1</sup>
- HL-LHC (高亮度LHC) @ 14 TeV, 3000 fb<sup>-1</sup>
- HE-LHC (高能量LHC) @ 33 TeV (27km, CERN)
- SPPC (超级质子对撞机) @ 50–70 TeV (50–70km, 中国)



**正负电子对撞机**：能量低，低本底，精密测量

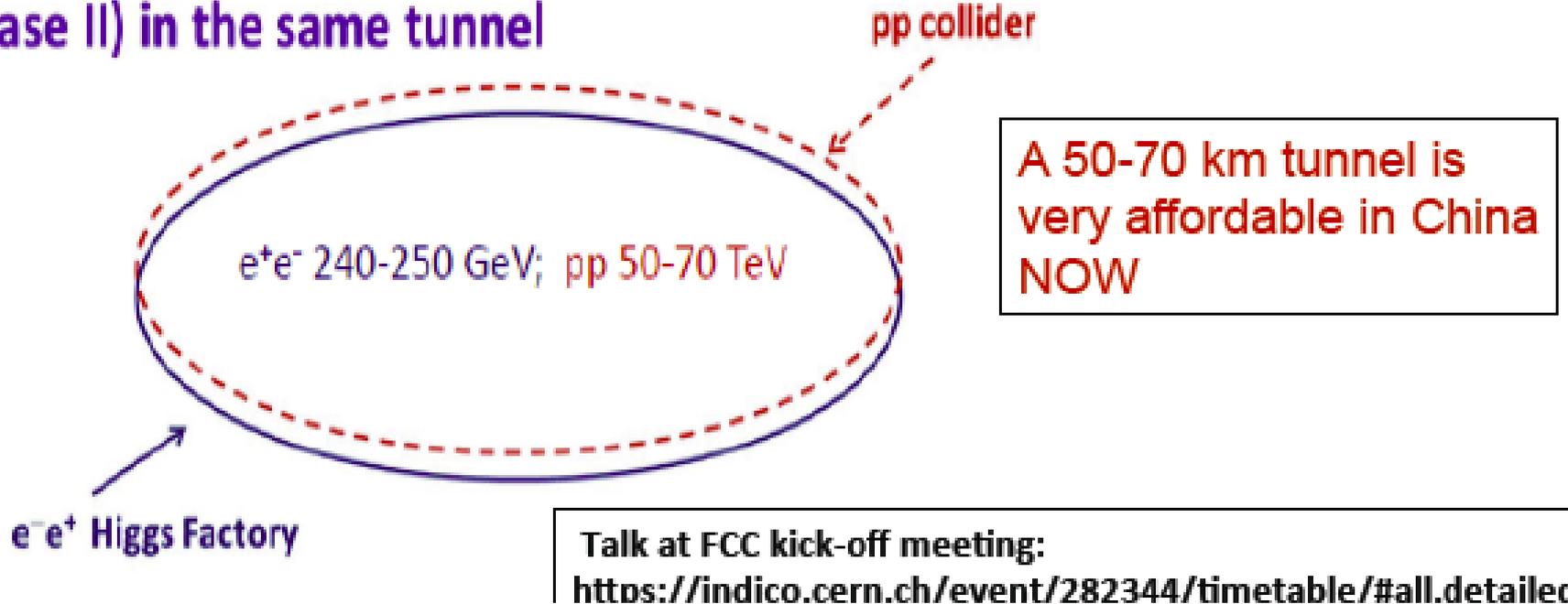
- ILC (国际直线对撞机, 日本) @ 250/500/1000 GeV
- FCC (未来环形对撞机, CERN, 欧洲) @ 250/350 GeV
- CEPC (环形对撞机, 中国) @ 250 GeV

<http://cepc.ihep.ac.cn/>



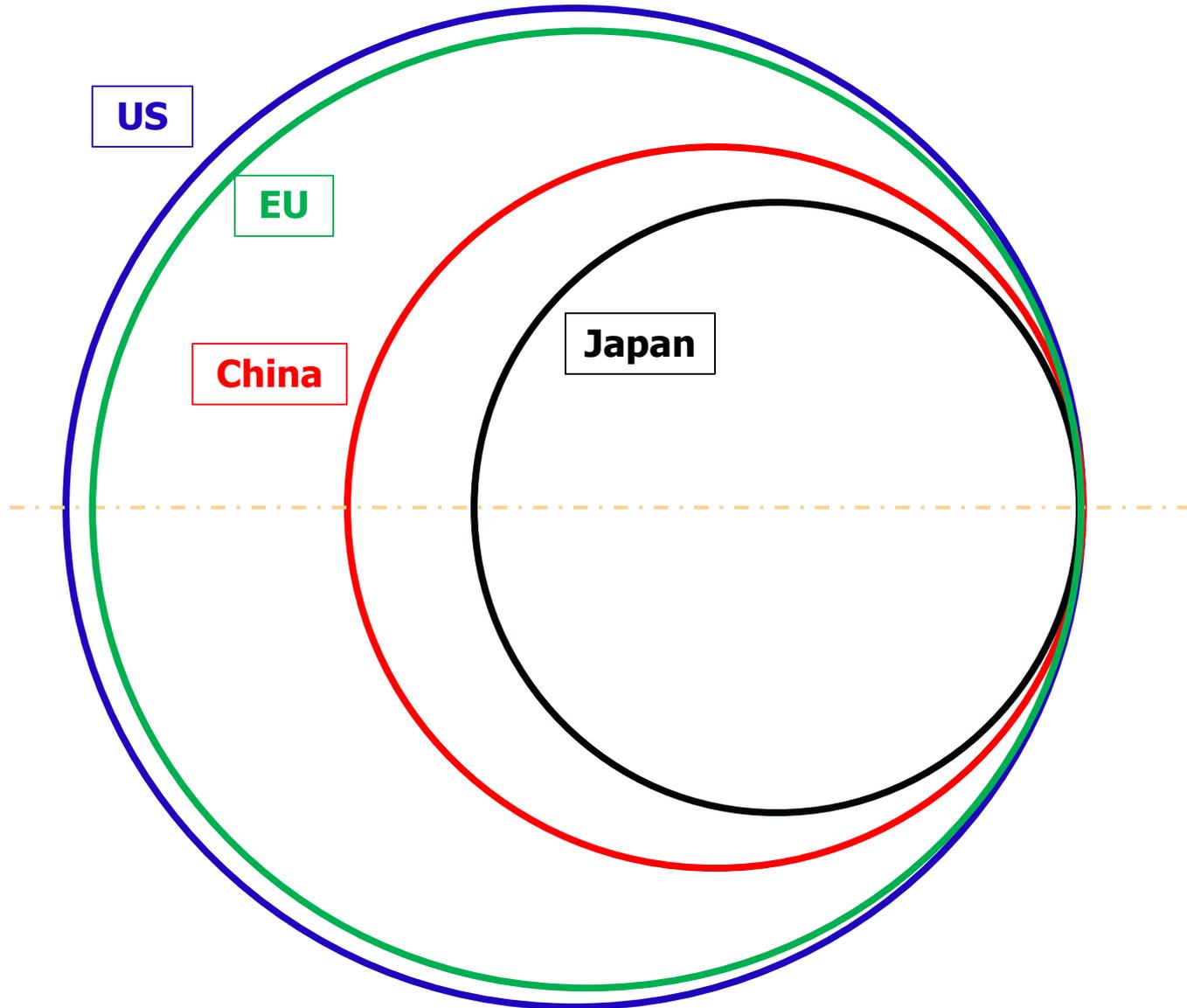
# CEPC + SPPC

- Thanks to the discovery of the low mass Higgs boson, and stimulated by ideas of Circular Higgs Factories in the world, CEPC+SppC configuration was proposed in Sep. 2012
- Circular Higgs factory (phase I) + super pp collider (phase II) in the same tunnel

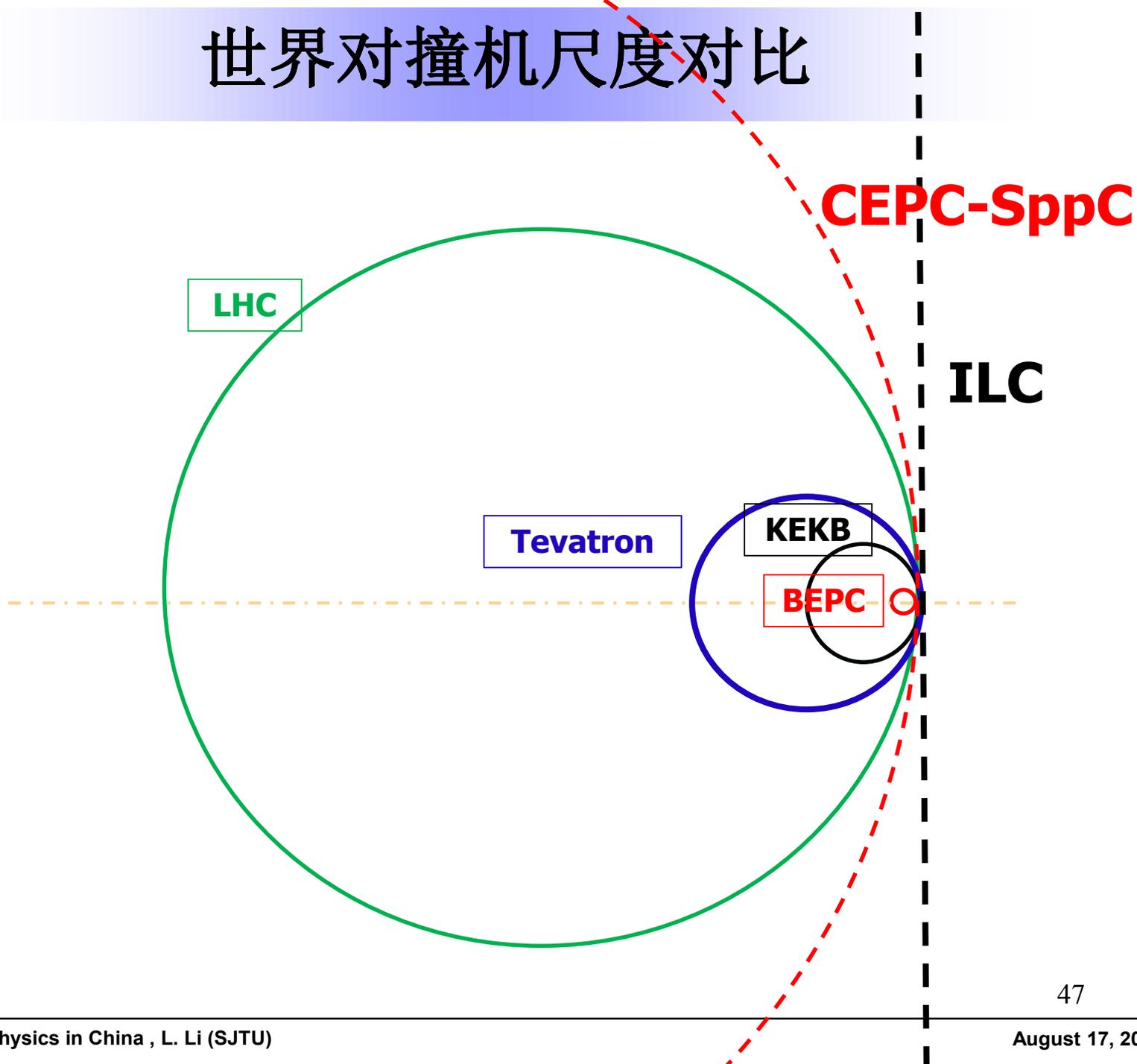


**CEPC: Circular Electron-Positron Collider**  
**SPPC: Super Proton-Proton Collider**

# 世界经济实力对比



# 世界对撞机尺度对比



# 环形正负电子对撞机(CEPC) - 超级质子 质子对撞机(SPPC) 项目正式启动

- 2013年9月13日在北京召开启动会，成立Institutional Board (IB)，项目执行委员会(Steering Committee)，项目经理，理论、实验和加速器组召集人。
- 2013年12月17日成立高能物理前沿研究中心 (Center for Future High Energy Physics)，聘Princeton大学教授 Nima Arkani-Hamed 任中心主任。



## CEPC 初步时间表:

- 2015年: 项目黄皮书(pre-CDR/CDR)
- 2015年争取纳入到十三五规划里
- 2015-2020年: 预研项目建议书(TDR)
- 2021-2027年: 开始CEPC工程建设
- 2028-2035年: 开始CEPC运行取数
- 2036-2042年: SPPC启动工程建设

## CEPC 造价估计:

- 200亿人民币, 分7年建造, 约占2013年中国GDP(57万亿)的万分之0.5。
- BEPC造价2.5亿, 占中国当年(1984)GDP的万分之一。
- LHC造价100亿美元占欧洲的万分之三。

# 中国粒子物理实验规划

		现在 Current	未来 Future
加速器物理 Accelerator-based	亮度前沿 Precision frontier	北京谱仪 BESIII 国际合作项目 (International projects) : 粲子g-2、 Belle II、 PANDA、 COMET	环形正负电子对撞机 超级质子对撞机 CEPC → SppC
	能量前沿 Energy frontier	大型强子对撞机 LHC	国际直线对撞机 ILC
非加速器物理 Non-accelerator-based	地下实验 Underground	大亚湾中微子实验 Daya Bay	江门中微子实验 JUNO
		四川锦屏地下暗物质实验 PandaX, CEDX Majorana中微子搜索 EXO	锦屏暗物质实验二期 PandaX2. CEDX2 nEXO
	地表实验 Surface	西藏羊八井宇宙线实验 ARGO/ASg	高海拔宇宙线观测站 LHAASO
空间实验 Space	阿尔法磁谱仪 AMS	高能宇宙辐射探测设施 HERD	
	硬X射线调制望远镜卫星 HXMT 暗物质粒子探测卫星 DAMPE	X射线天文望远镜 XTP	

# 上海交大高能实验组

## 对撞机方向

- 保持LHC研究热度：Higgs的量子属性、寻找 SUSY、暗物质粒子
- 积极参与中国CEPC-SPPC预研：
  - Higgs以及新物理信号产生、模拟、重建和分析
  - 电磁量能器和强子量能器的预研，模拟，材料选型、尺寸和性能的优化等

## 暗物质方向

- 境屏山PandaX项目持续推进：将来升级到500公斤液氙甚至更高
- 积极推动其他途径多方面探测暗物质信号：对撞机、缪子g-2

## 亮度前沿方向

- 加大现有投入和升级：缪子g-2、中微子实验等
- 紧抓下一代高能物理实验方向：轻子转换实验、稀有衰变实验

## 广泛的国内外合作研究、联合培养机会

欢迎到上海交大学习和工作！  
感兴趣的同学请联系我  
liangliphy@sjtu.edu.cn

