

粒子物理简介



曹庆宏
北京大学

The PARTICLE ZOO
Sewing the fabric of spacetime

本报告主要基于华中师范大学陈绍龙教授课件

哲学家



生物学家



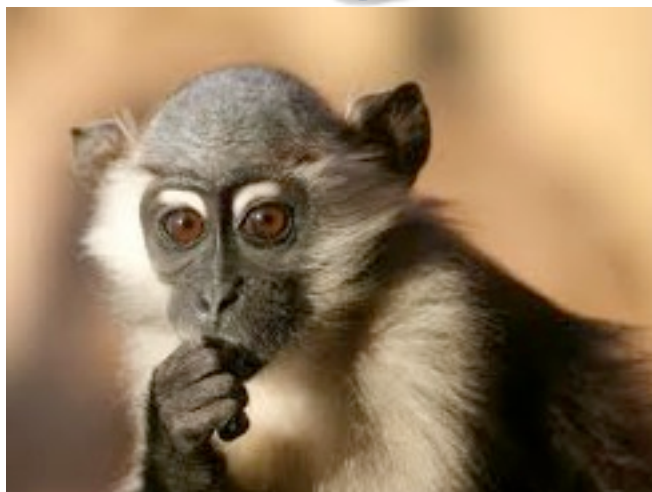
历史学家



“世界是由什么组成的？”

&

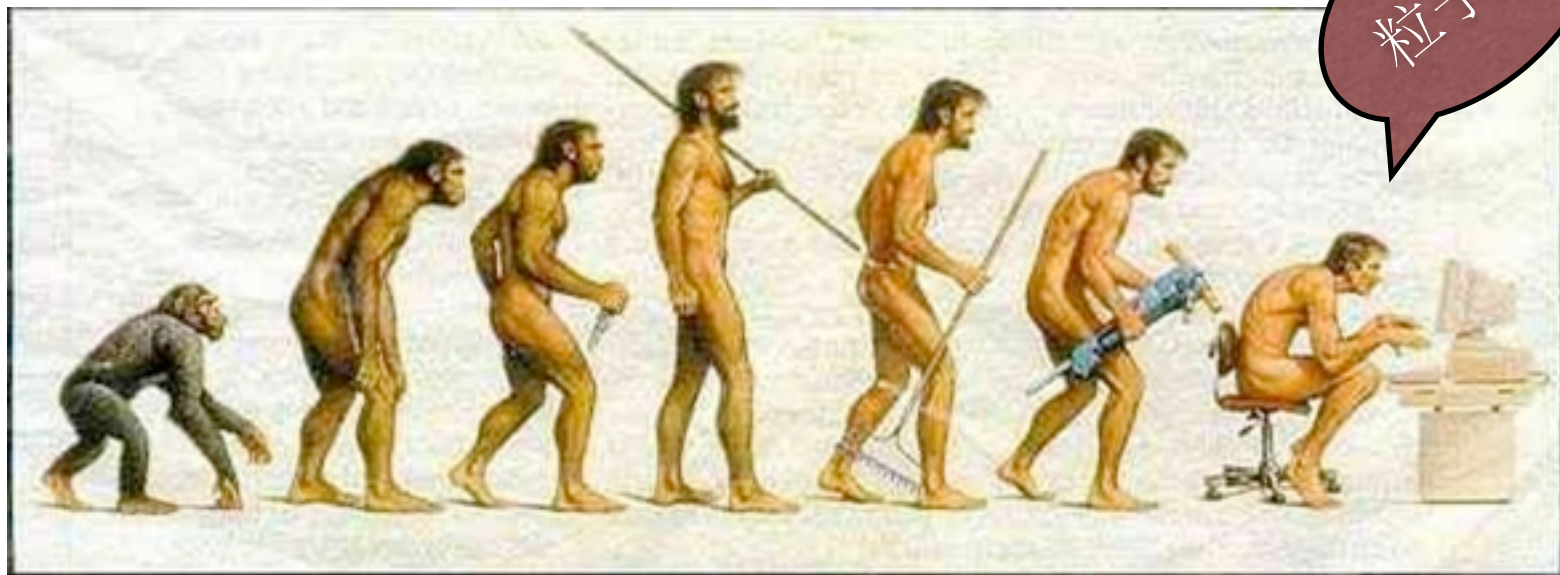
“它们是怎样组成这个世界？”



物理学家

粒子物理或高能物理

研究自然界的基本组成及其的相互作用





四基本元素



五行



恩贝多克利
490-430 B.C., 希腊哲学家

原子论

- 古希腊哲学家 “原子论”

By convention there is color,

By convention sweetness,

By convention bitterness,

But in reality there are **atoms and space**.

-Democritus (c. 400 BCE) (德谟克利特)

原子论

- 1802年，道尔顿正式提出了所有物质是由原子组成的理论；
- 1869年门捷列夫的元素周期表加深了原子论的设想。

周期表	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 氢																	2 He 氦
2	3 Li 锂	4 Be 铍											5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
3	11 Na 钠	12 Mg 镁											13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氩
4	19 K 钾	20 Ca 钙	21 Sc 钪	22 Ti 钛	23 V 钒	24 Cr 铬	25 Mn 锰	26 Fe 铁	27 Co 钴	28 Ni 镍	29 Cu 铜	30 Zn 锌	31 Ga 镓	32 Ge 锗	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪
5	37 Rb 铷	38 Sr 锶	39 Y 钇	40 Zr 锆	41 Nb 铌	42 Mo 钼	43 Tc 锝	44 Ru 钌	45 Rh 铑	46 Pd 钯	47 Ag 银	48 Cd 镉	49 In 铟	50 Sn 锡	51 Sb 锑	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙
6	55 Cs 铯	56 Ba 钡	57-71 镧系	72 Hf 铪	73 Ta 钽	74 W 钨	75 Re 铼	76 Os 锇	77 Ir 铱	78 Pt 铂	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 铊	82 Pb 铅	83 Bi 铋	84 Po 钋	85 At 砹	86 Rn 氡
7	87 Fr 钫	88 Ra 镭	89-103 镧系	104 Rf 铻	105 Db 铪	106 Sg 𬭩	107 Bh 𬬻	108 Hs 𬬿	109 Mt 𬮀	110 Ds 𬮁	111 Rg 𬮂	112 Cn 𬮃	113 Nh 𬮄	114 Fl 𬮅	115 Mc 𬮆	116 Lv 𬮇	117 Ts 𬮈	118 Og 𬮉
			57 La 镧	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 铈	68 Er 铈	69 Tm 铥	70 Yb 镱	71 Lu 镥	
			89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钚	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锿	99 Es 镄	100 Fm 钔	101 Md 镆	102 No 钆	103 Lr 镈	

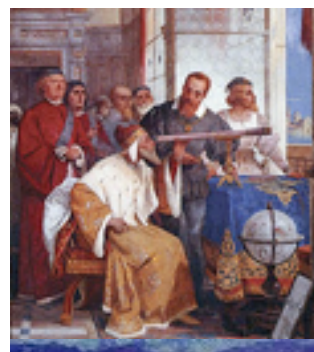
■ 碱金属 ■ 碱土金属 ■ 镧系元素 ■ 钪系元素 ■ 过渡金属
■ 主族金属 ■ 副族金属 ■ 非金属 ■ 卤素 ■ 惰性气体

原子是基本的么？

粒子物理学

物质基本结构和基本相互作用

从极小到极大



原子是基本的么？

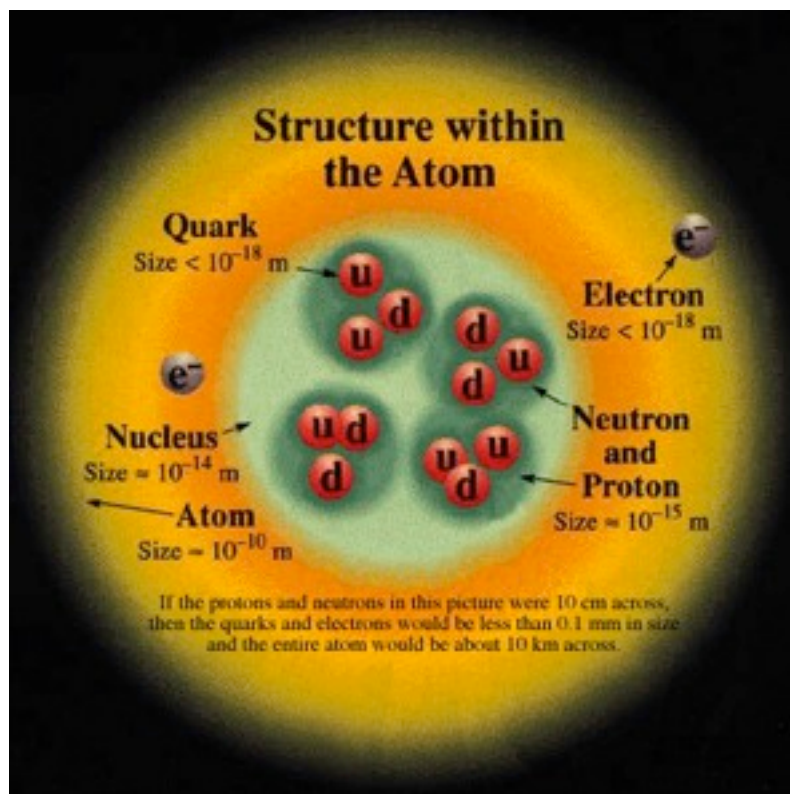
- Joseph Thomson (1906 Nobel) 发现了原子中存在负电荷，质量很轻的电子，认为原子是有质子和被束缚的电子组成。

[George Thomson (1937 Nobel) 证明了电子波动性。(电子衍射)]

- 卢瑟福 (Rutherford, 1908 Nobel) 实验证明了质子集中在紧密的原子核中。
- 1932年，Chadwick (1935 Nobel) 发现了中子。

原子核是质子和中子组成，电子在原子核外运动
(卢瑟福实验，玻尔模型)

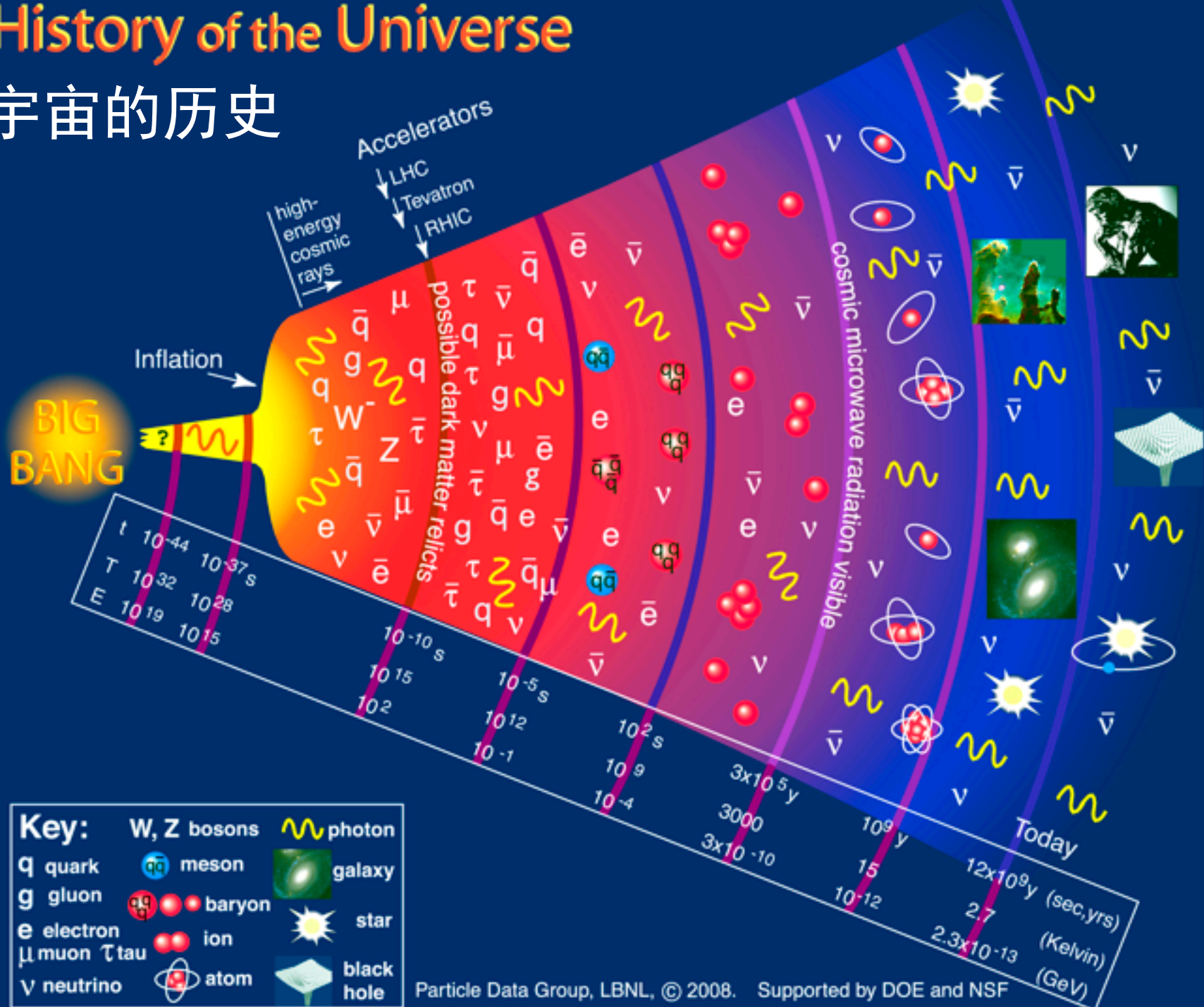
原子核是基本的么？



质子和中子是由夸克组成

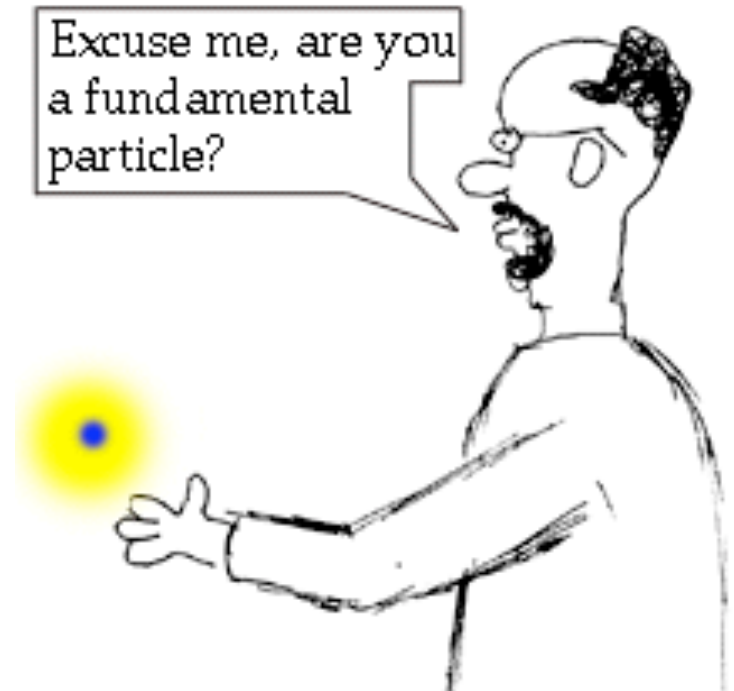
History of the Universe

宇宙的历史



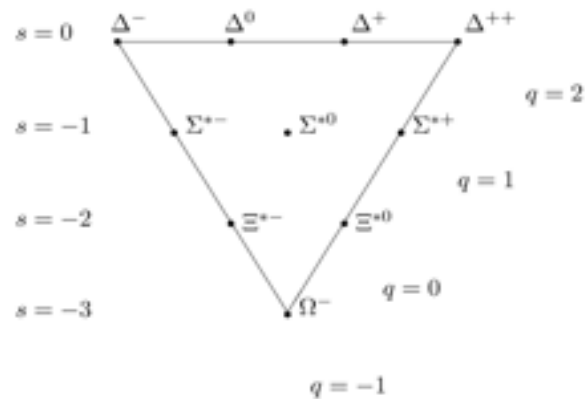
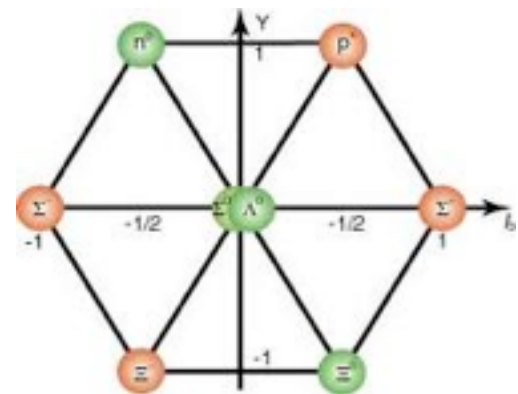
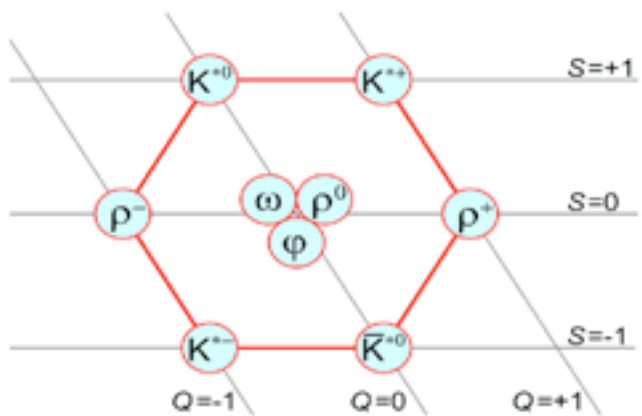
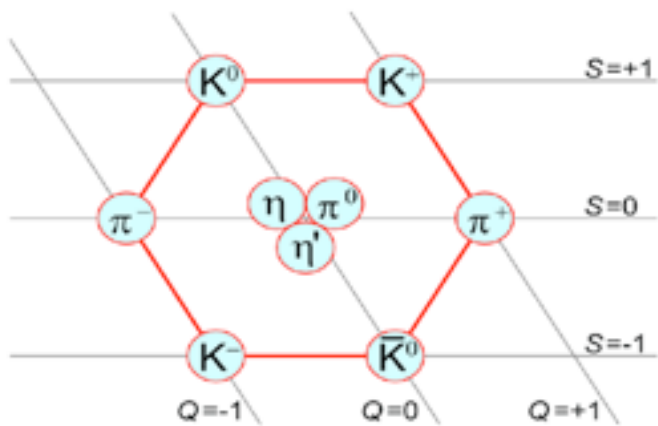
寻找基本粒子

- 粒子物理学家一直在寻找基本粒子。
- 宇宙射线， 加速器
- 人们已经发现**200**多种粒子，当然大多数不是基本粒子，是复合粒子。



Quark 模型

盖尔曼-西岛 (Gell-Mann and Nishijima)



味 SU(3):

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8$$

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

粒子物理标准模型

- 6种夸克 (quarks)
- 6中轻子 (leptons): (比如电子)
- 规范波色子: (比如光子) 传递相互作用



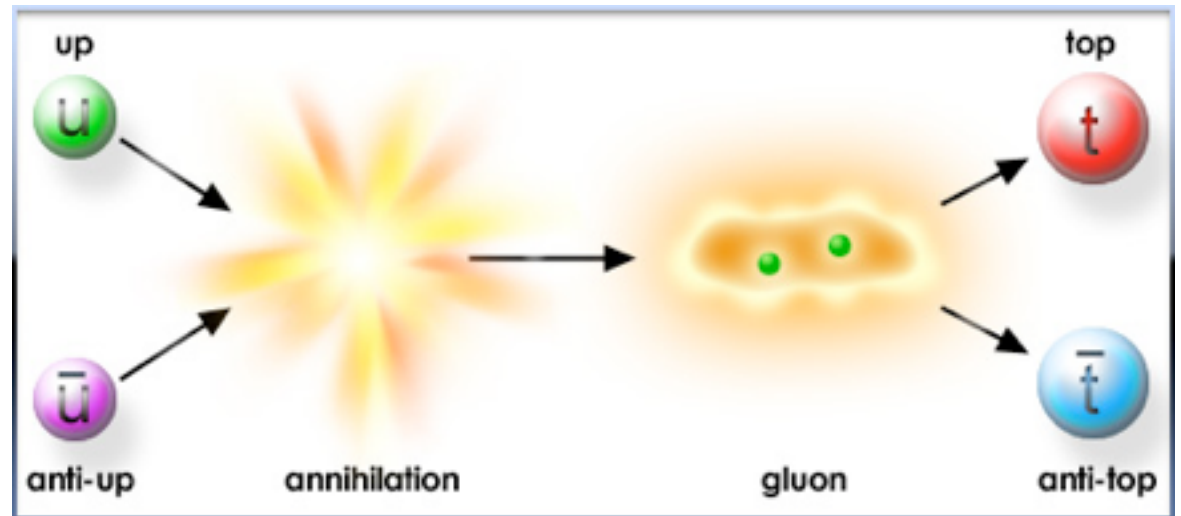
夸克和轻子



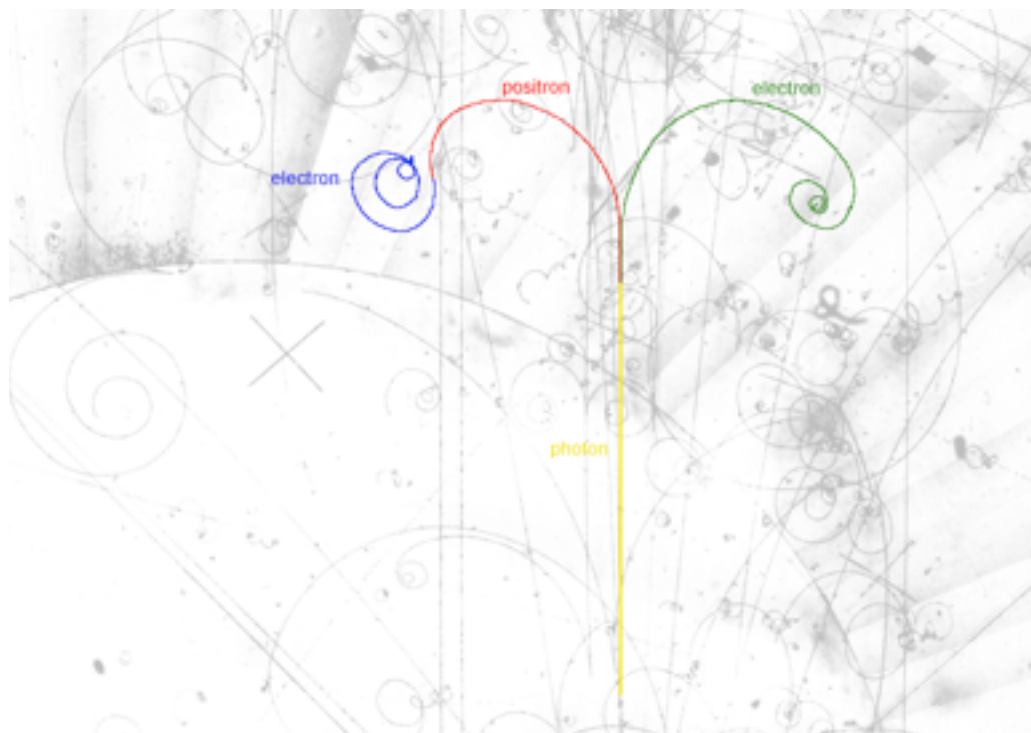
物质由夸克和轻子组成，每种夸克和轻子都有相应的反物质

粒子和反粒子

粒子和反粒子除了不同电荷，其他性质一样。当物质碰到反物质，湮灭变成能量。



反粒子?



Fermi 实验室15英尺气泡云室实验相片



Quark

$\left(\frac{2}{3}\right)$
up



$\left(\frac{2}{3}\right)$
charm



$\left(\frac{2}{3}\right)$
top



$\left(-\frac{1}{3}\right)$

down



$\left(-\frac{1}{3}\right)$

strange

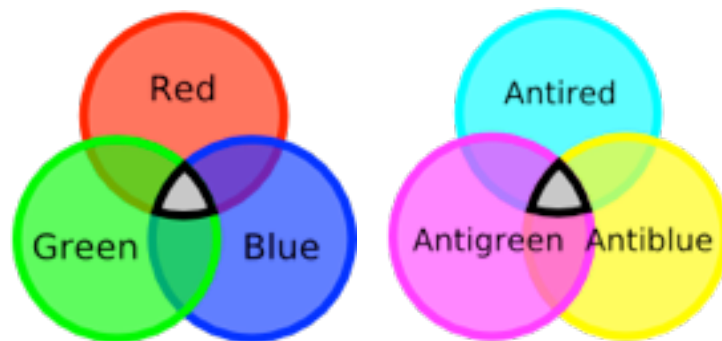


$\left(-\frac{1}{3}\right)$

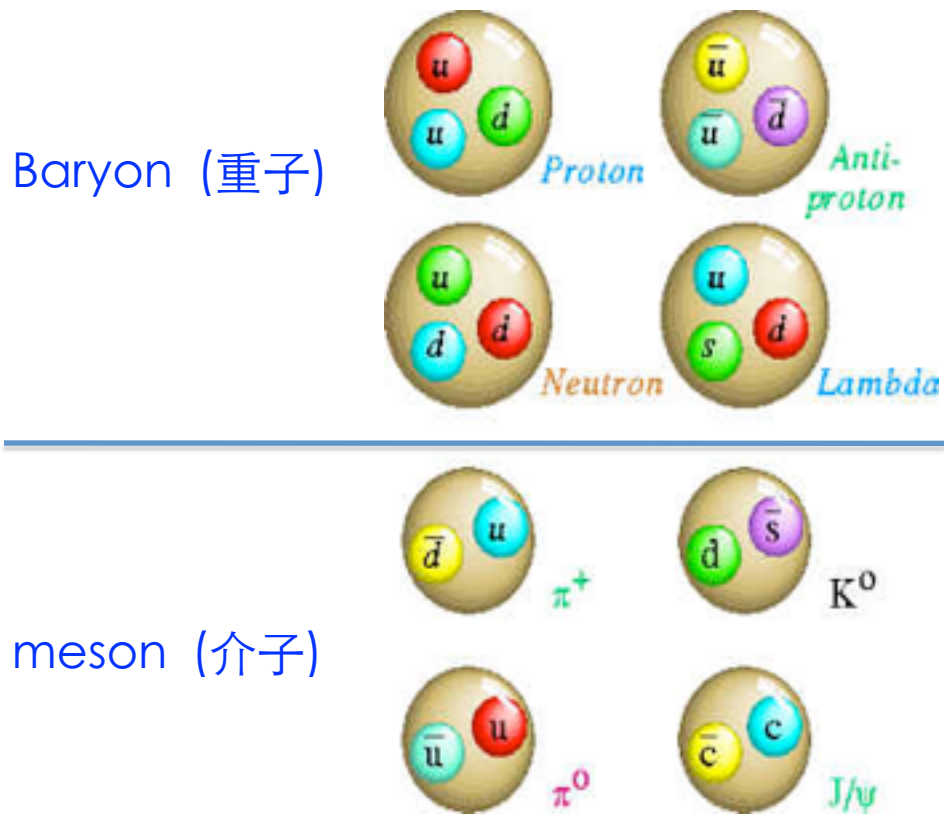
bottom



- 6 种夸克和反夸克 (6个味)
(上, 下, 粲, 奇异, 顶, 底)
- 分数电荷: $(\frac{2}{3}, -\frac{1}{3})$
- 3个颜色 (red, green, blue)



强子 (Hadron)



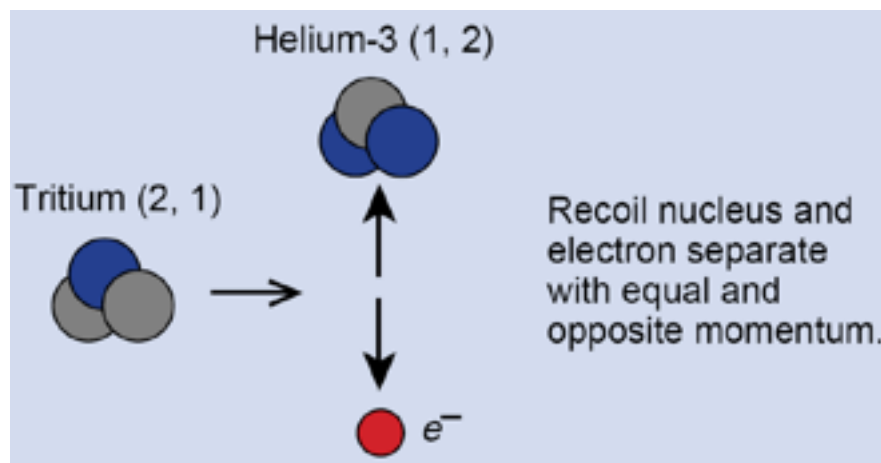
颜色SU(3):

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8$$
$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

中微子 (Neutrino)

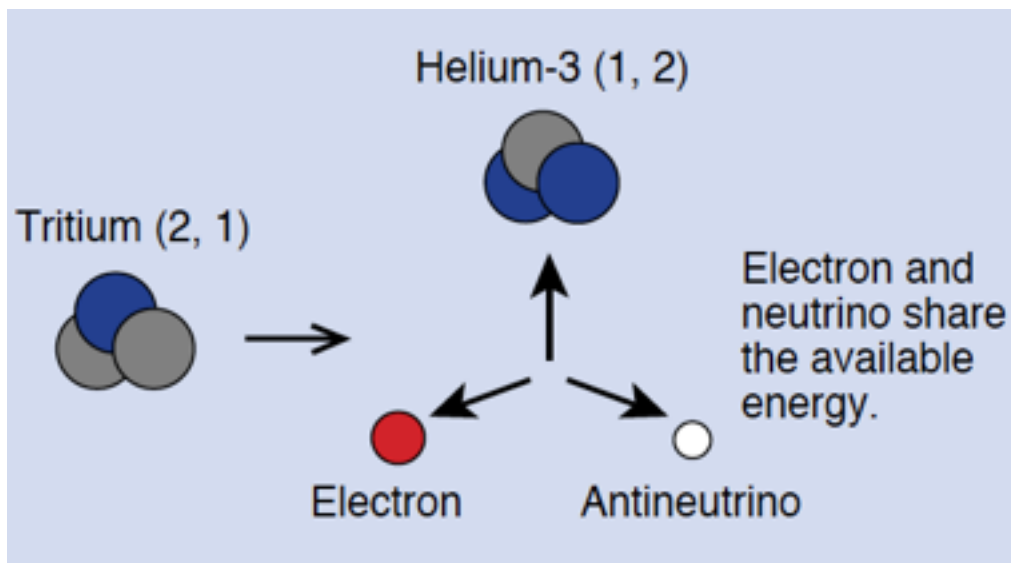
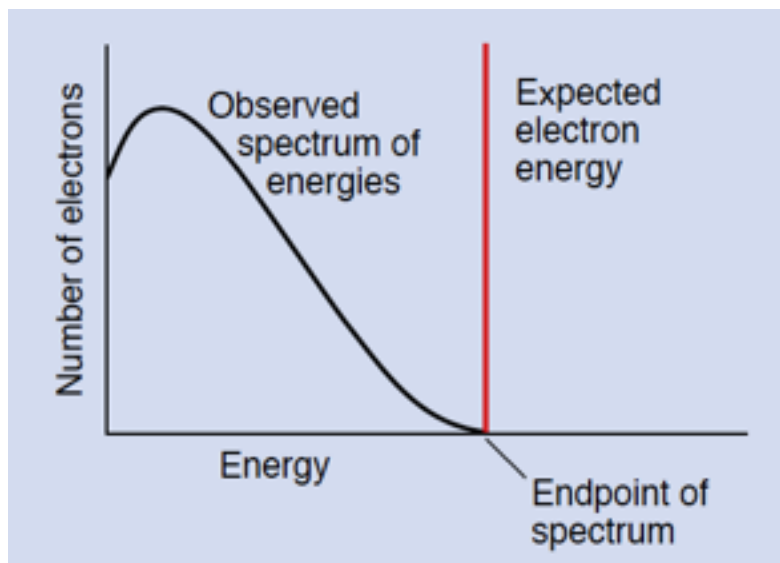
轻子中除了带电的电子，缪子muon，tau子，还有各自的中微子。

1930年， only known particle: **electron & proton**
Beta Decay (氚到氦3)



中微子 (Neutrino)

3 体衰变和中微子假设



中微子 (Neutrino)

Wolfgang Pauli 1930

Letter to the physical Institute of the Federal
Institute of Technology, Zurich



The Desperate Remedy

4 December 1930
Gloriastr.
Zürich

Physical Institute of the
Federal Institute of Technology (ETH)
Zürich

Dear radioactive ladies and gentlemen,

to save the "exchange theorem"* of statistics and the energy theorem. Namely [there is] the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons,** which have spin 1/2 and obey the exclusion principle, and additionally differ from light quan-

中微子 (Neutrino)

1932年, Chadwick 发现了中子。

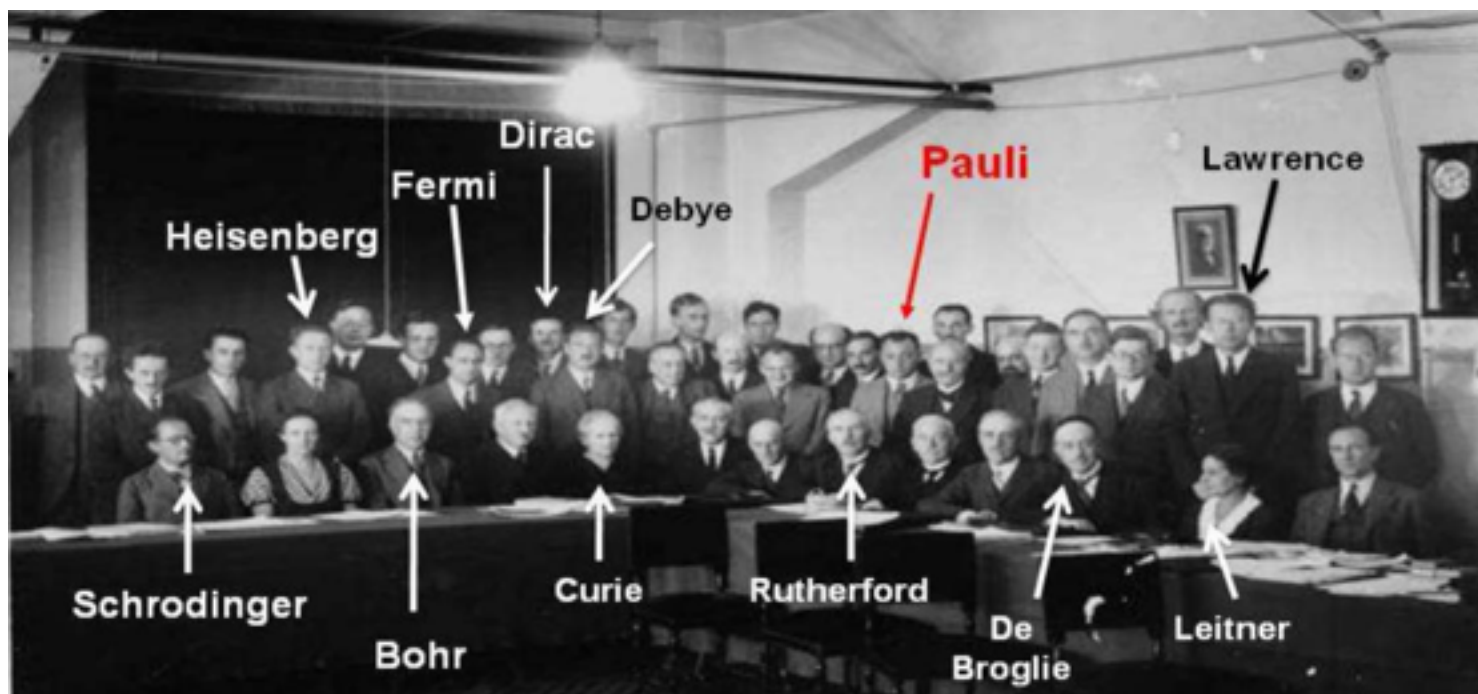
Pauli 说的 “neutron” 被Fermi改成 “little neutral one”, 成为今天常说的

“Neutrino”

中微子 (Neutrino)

Solvay 1933 Physics Conference (Brussels, Belgium)

Pauli 报告了他的中微子设想



王淦昌 (Kan-Chang Wang)

王淦昌最早提出用K电子俘获来探测中微子。

A Suggestion on the Detection of the Neutrino

KAN CHANG WANG

*Department of Physics, National University of Chekiang Tsunyi,
Kweichow, China*

October 13, 1941

IT is known that the presence of the neutrino cannot be detected by its own ionization effect. It appears that the only hope of getting evidence of its existence is by measuring the recoil energy or momentum of the radioactive atom. Crane and Halpern¹ have, by measuring the momentum and energy of the emitted β -ray and the recoil atom with a cloud chamber, obtained evidence pointing toward the existence of the neutrino. However, owing to the smallness of the ionization effect of the recoil atom, it seems worth while to consider a different method of detecting it.

15年后，Reines 和 Cowan利用这个建议，在1956年探测到了中微子，得到了1995年的Nobel 物理奖。

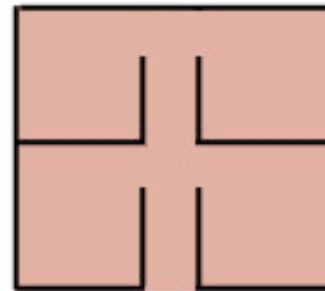
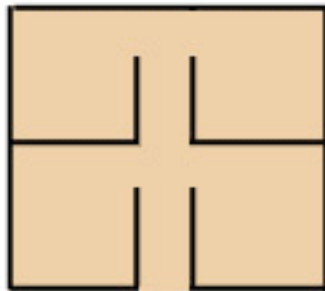
Fermion and Boson

费米子：

遵守Pauli不相容原理

玻色子：

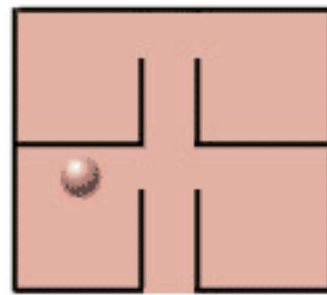
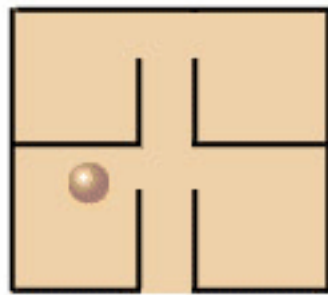
不遵守Pauli不相容原理



Fermion and Boson

费米子：
遵守Pauli不相容原理

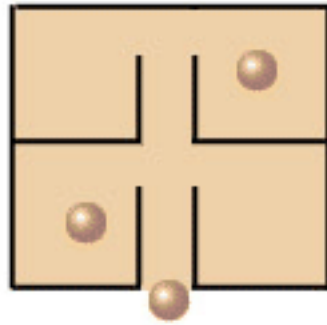
玻色子：
不遵守Pauli不相容原理



Fermion and Boson

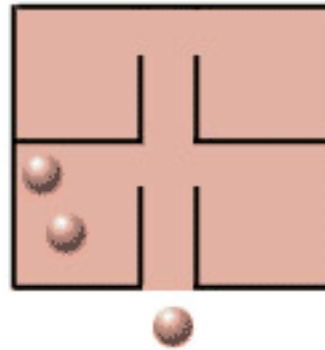
费米子：

遵守Pauli不相容原理



玻色子：

不遵守Pauli不相容原理



Fermion and Boson

费米子：

遵守Pauli不相容原理

自旋为 $1/2$ 的奇数倍粒子

玻色子：

不遵守Pauli不相容原理

自旋为整数粒子

基本相互作用

相互反应：引力，斥力，衰变，湮灭，...

伽利略，牛顿，麦克斯韦，法拉第，...

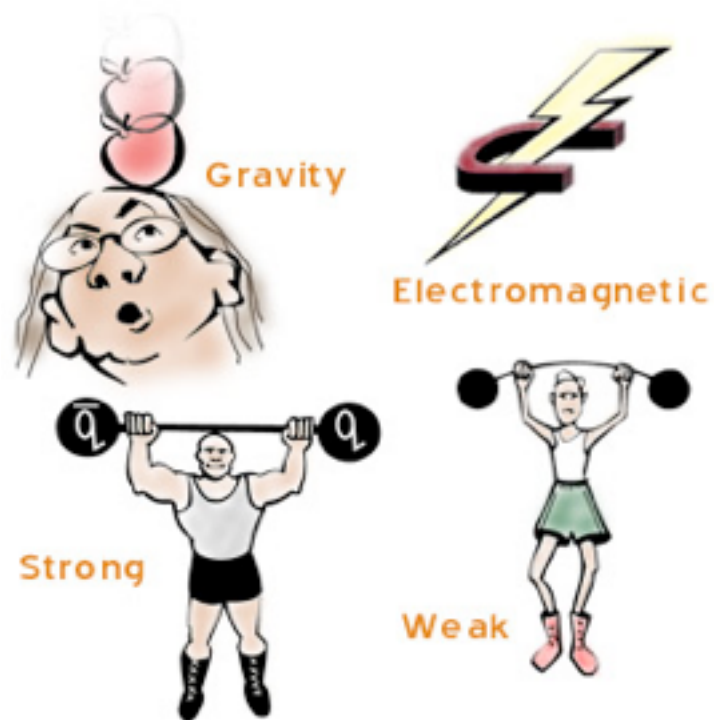
四种基本相互作用：

引力

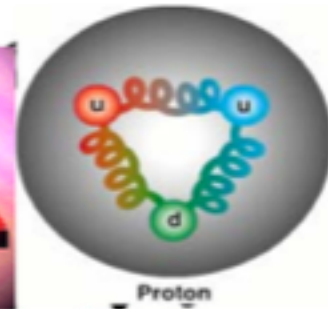
电磁力

强相互作用

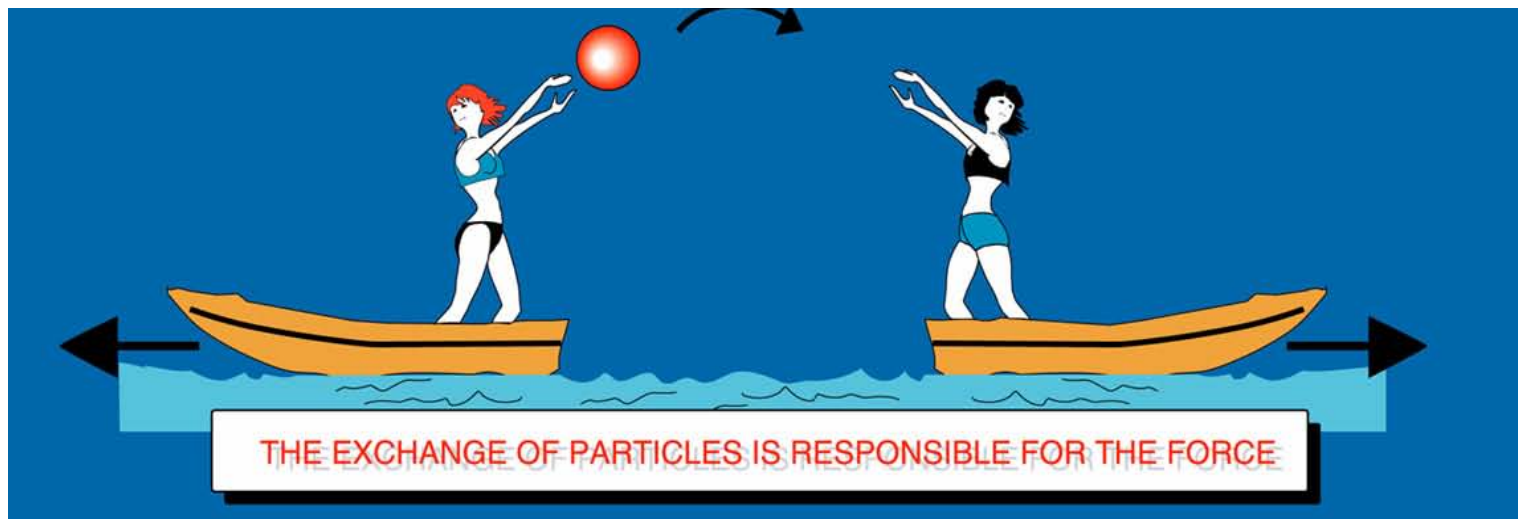
弱相互作用



传递力的中间玻色子



	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons



麦克斯韦电磁统一



James Clerk Maxwell (~1864)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{D}} = \rho$$

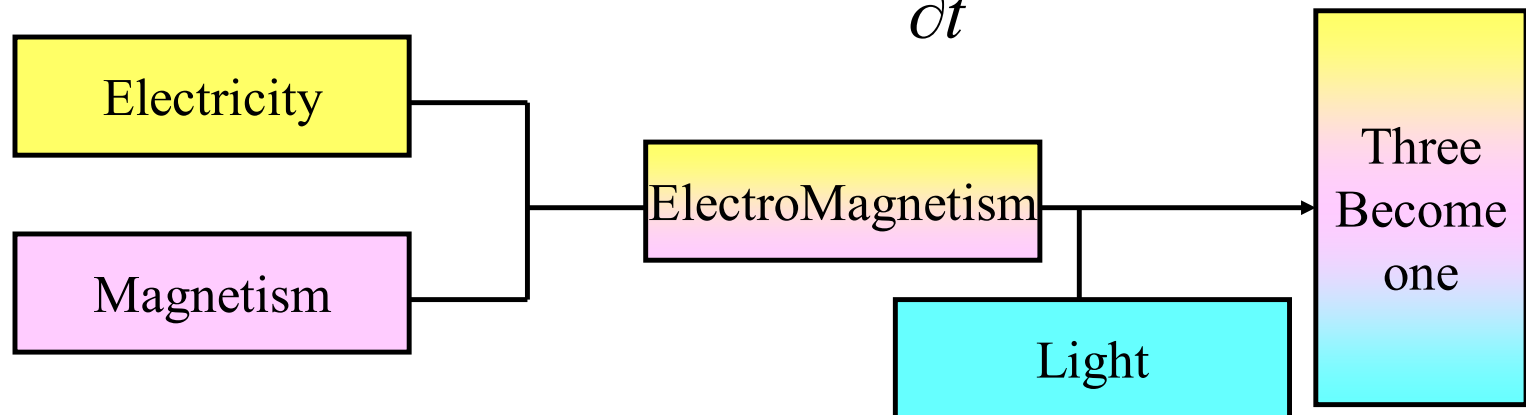
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$$

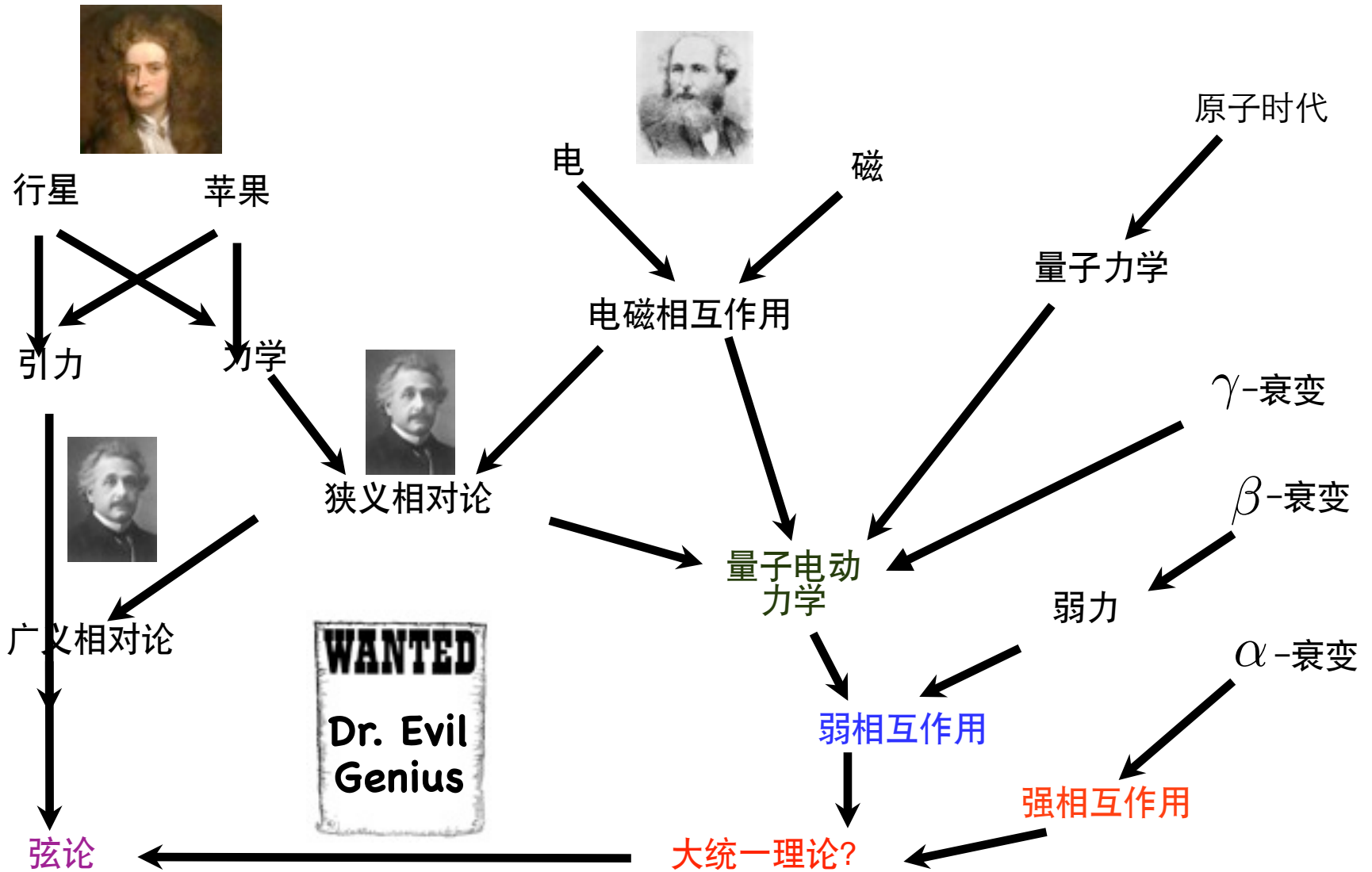
$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$$

Modern Language

$$\square \Phi^\mu = \frac{J^\mu}{c\epsilon_0}$$



统一之路



如何实现统一：对称性

1) 不可观测

无法观测的物理量

绝对位置 \vec{p}

绝对时间 E

绝对方位 $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$

绝对左右 P

绝对未来 T

绝对电荷 C

2) 无法区分

一个物体变换为另一个物体

整体对称性：同位旋

时空对称性

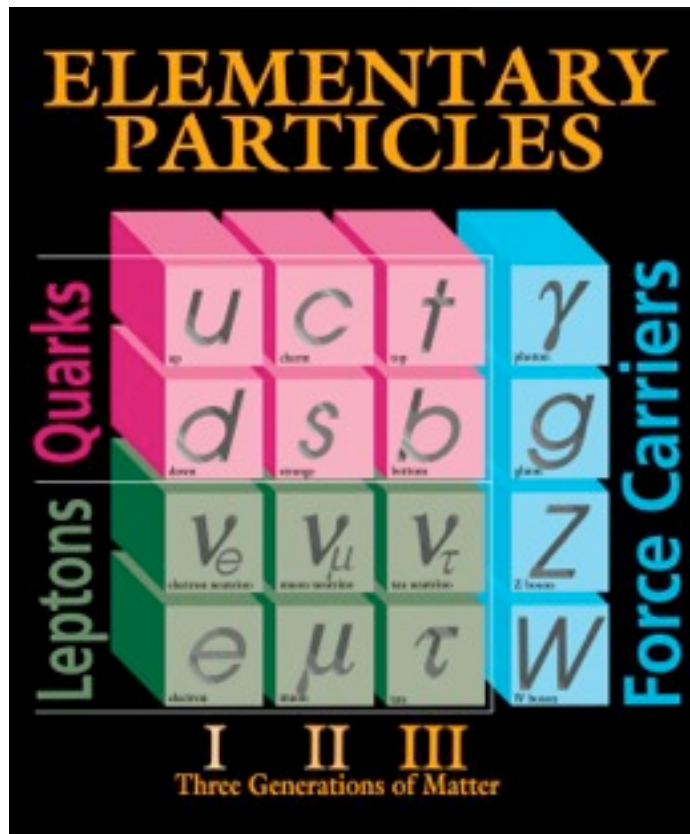
→ 等价性

→ 完美但却无聊的世界



在微观世界中，
等价的相互作用，力的载体为无质量的粒子

粒子物理标准模型



Symmetry:

$$\underbrace{SU(3)_C}_{\text{QCD}} \times \underbrace{SU(2)_L \times U(1)_Y}_{\text{Electroweak}}$$

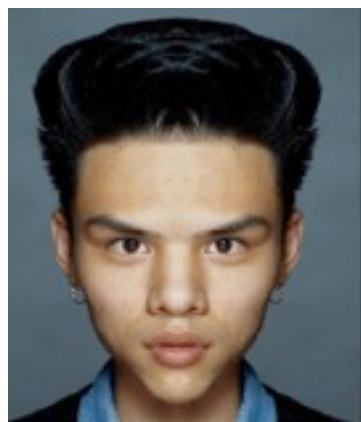
↓
Spontaneously Broken
to QED

电磁力：光子

强相互作用：胶子

弱相互作用：W，Z中间玻色子

难题：对称性破缺

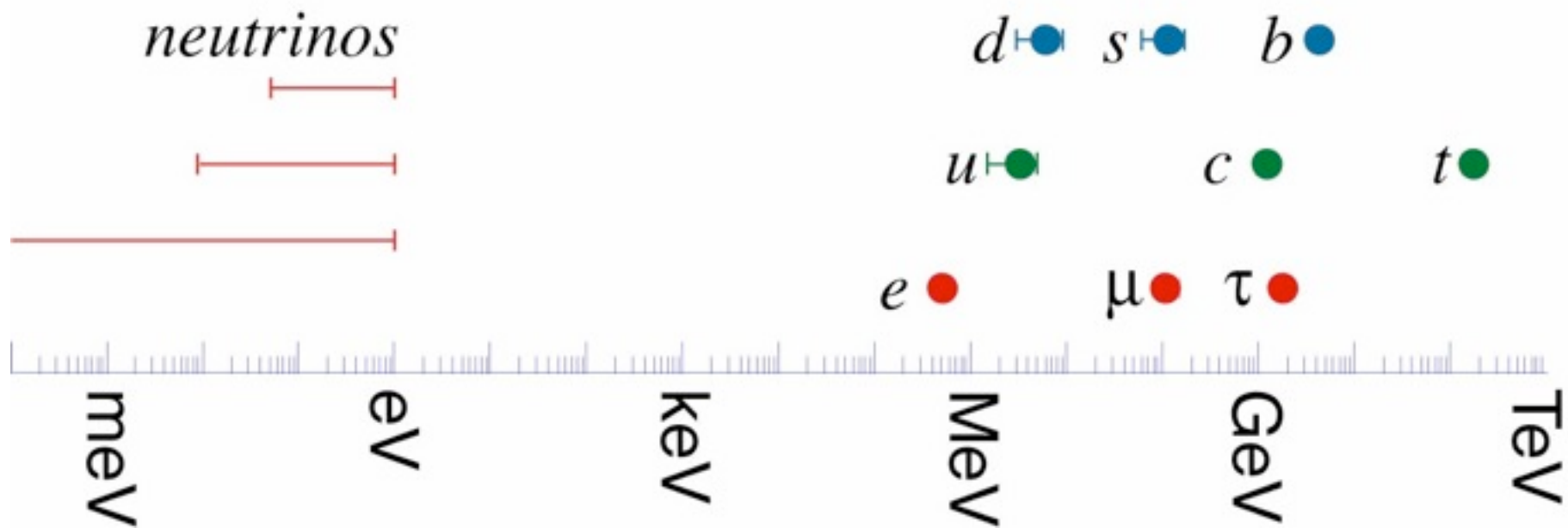


SB
→
←
But
which?



To reach the perfect worlds, better to understand our diverse world

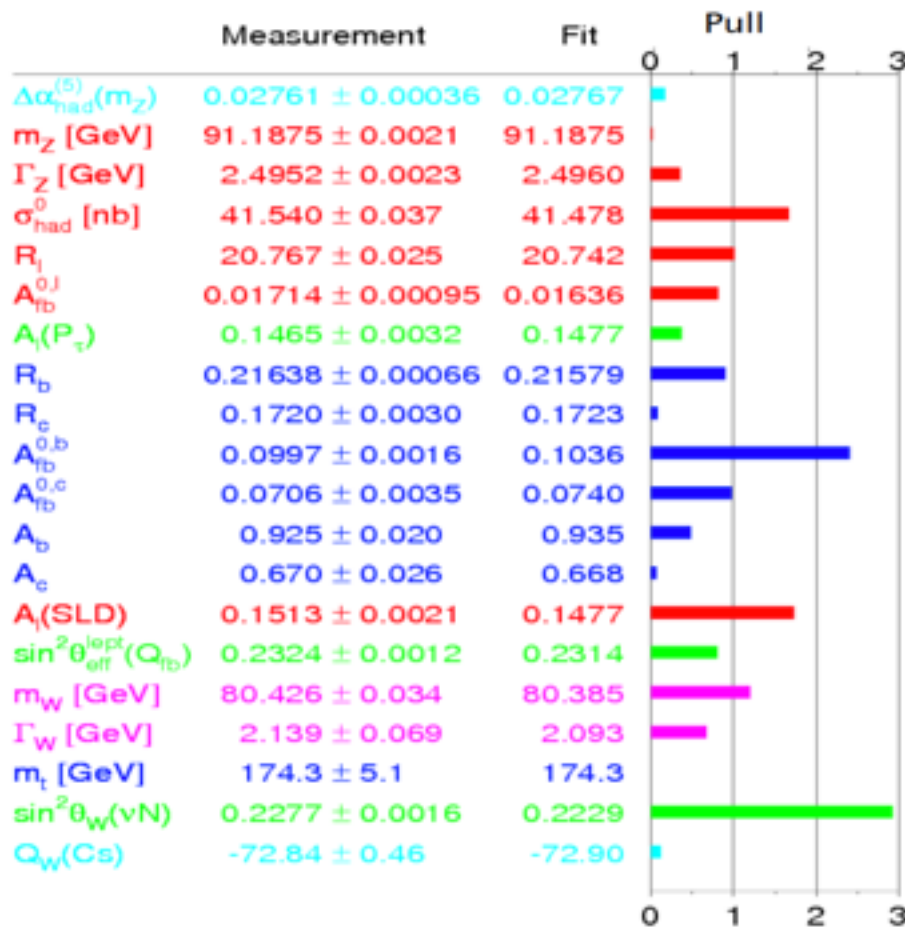
基本粒子质量谱



一个质子重 1GeV

被成功检验的标准模型

W, Z中间玻色子, 胶子, 底夸克, 顶夸克, tau中微子等粒子在标准模型建立后被发现。



在能标100GeV下
0.1%以下精度被检验。

The “God” Particle: Higgs

Higgs 粒子是粒子物理标准模型的基石。

理论上提出Higgs 粒子存在是为了解释标准模型中大部分基本粒子有质量——质量起源。

欧洲大型强子对撞机 (the Large Hadron Collider) 正是为了寻找Higgs而建立。

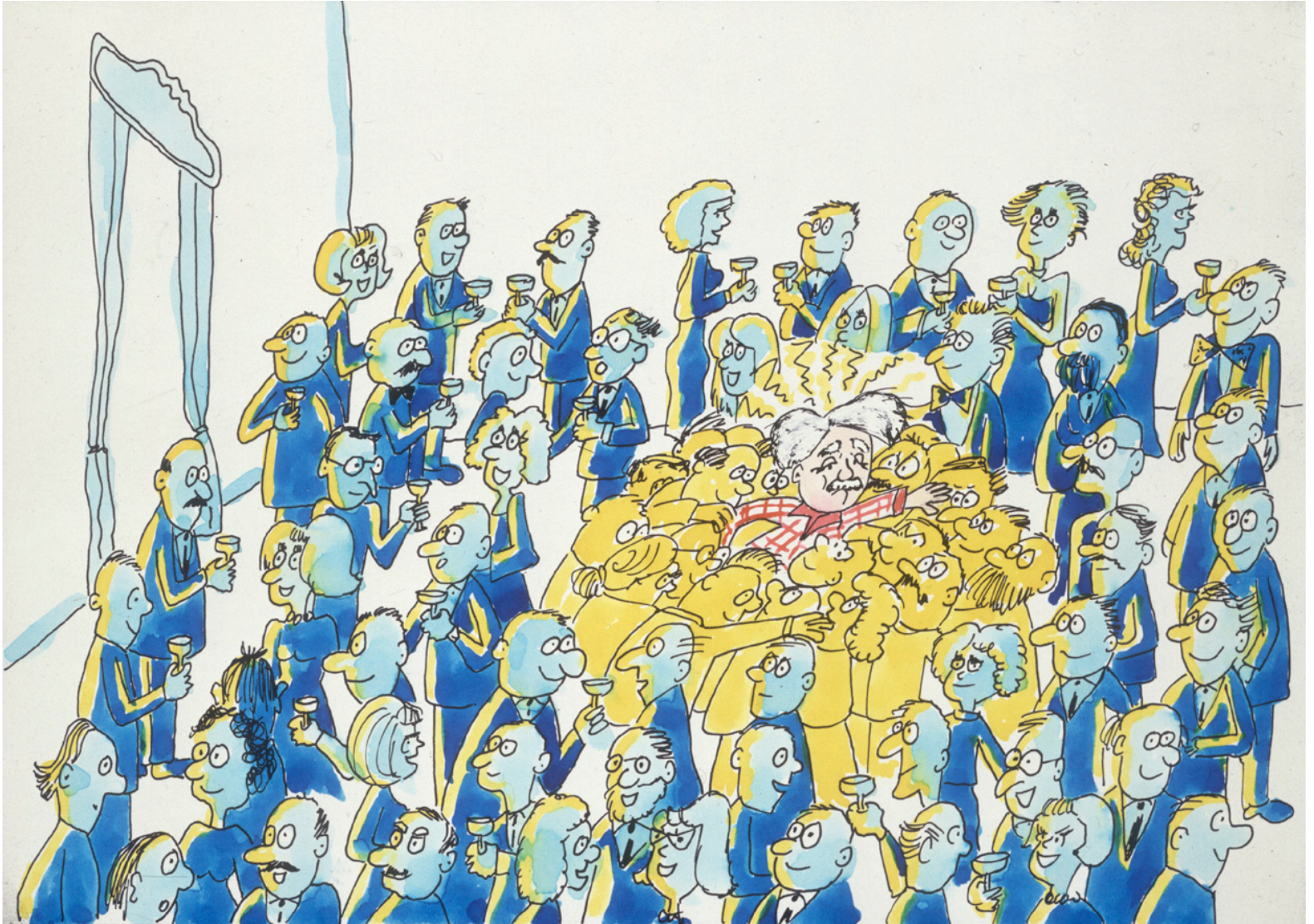
希格斯机制



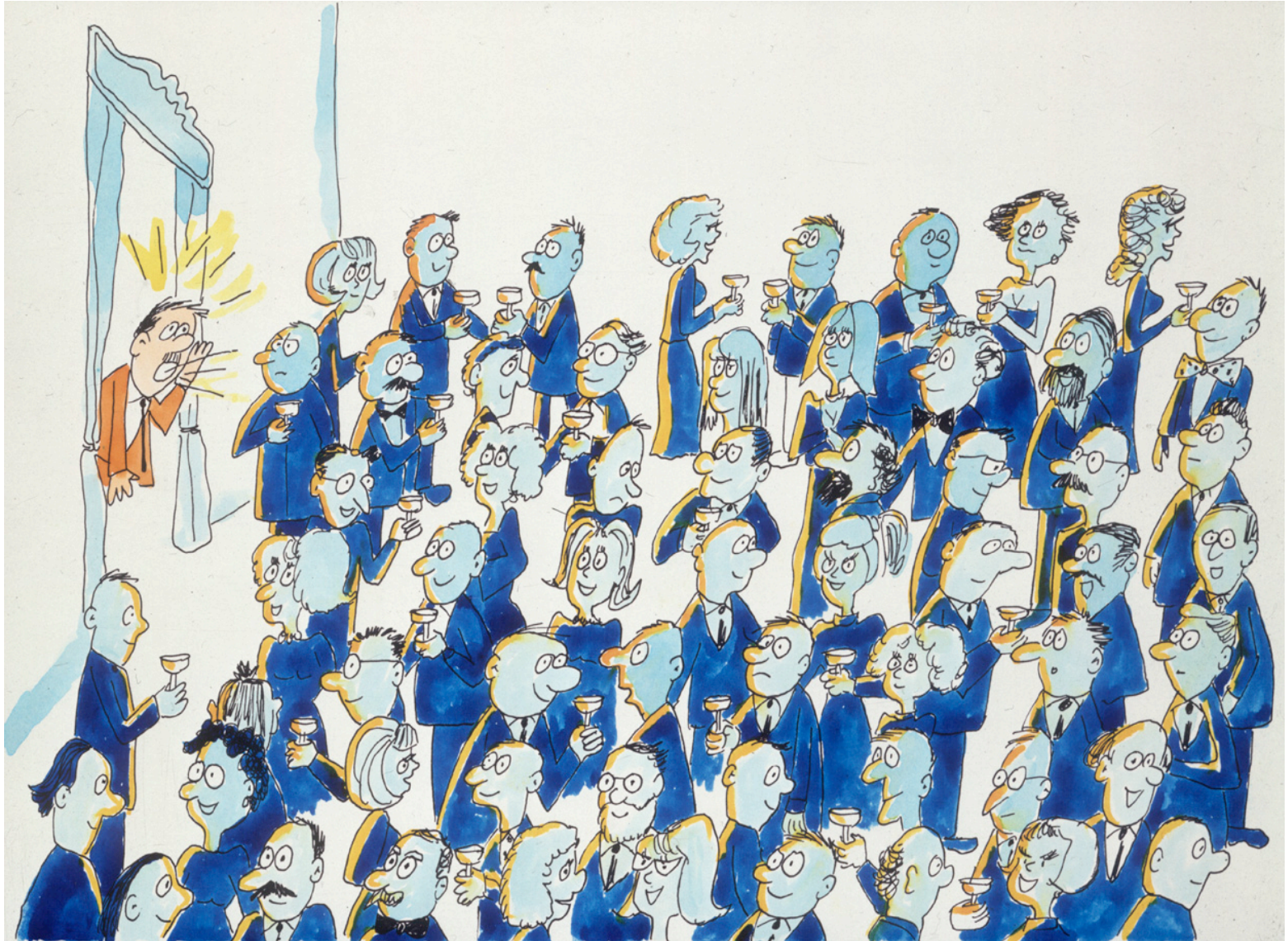
希格斯机制



希格斯机制



希格斯机制



希格斯机制



History is not just a thing of the past!

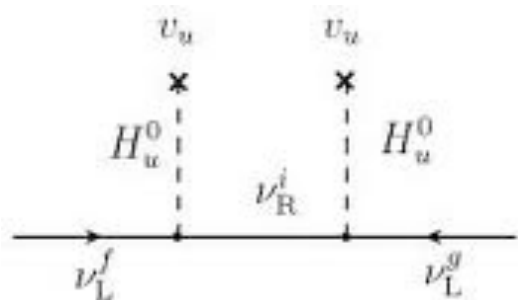
July 4th, 2012



标准模型：成功但不完整

- 引力
- 中微子有质量
- 宇宙中正反物质不对称
- 暗物质粒子
-

中微子质量和跷跷板机制

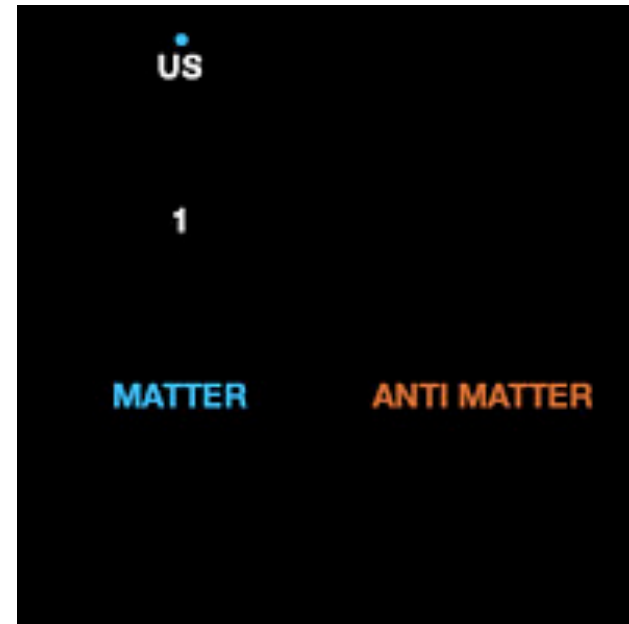


$$m_\nu \propto \frac{v^2}{M_N}$$



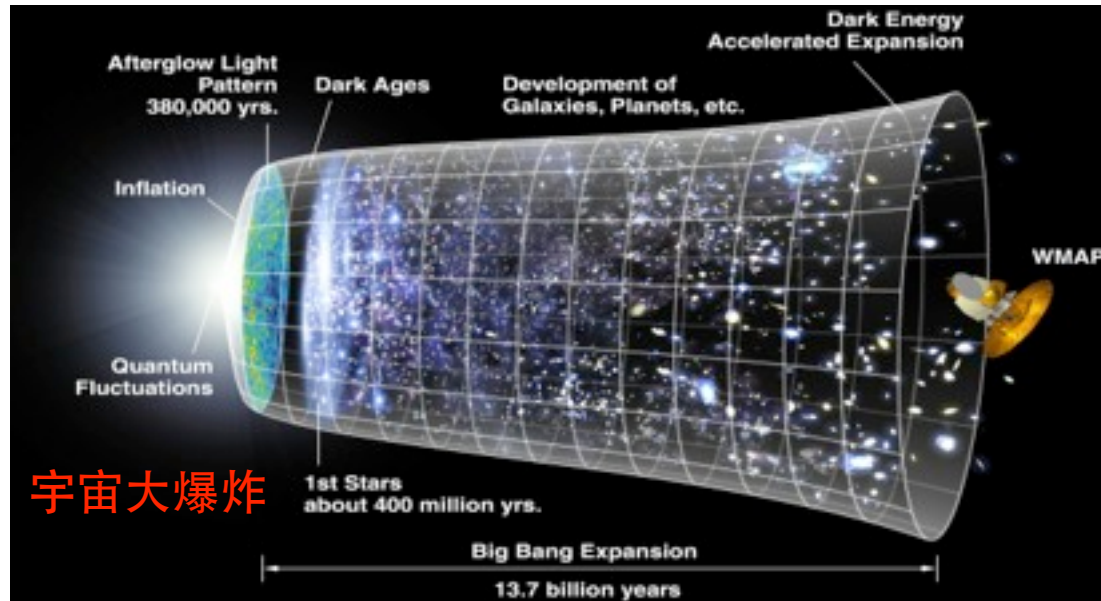
跷跷板机制也意味着是一个通向更高能标的窗子

宇宙正反物质不对称



正物质世界意味着宇宙早期有很小的正反不对称么？

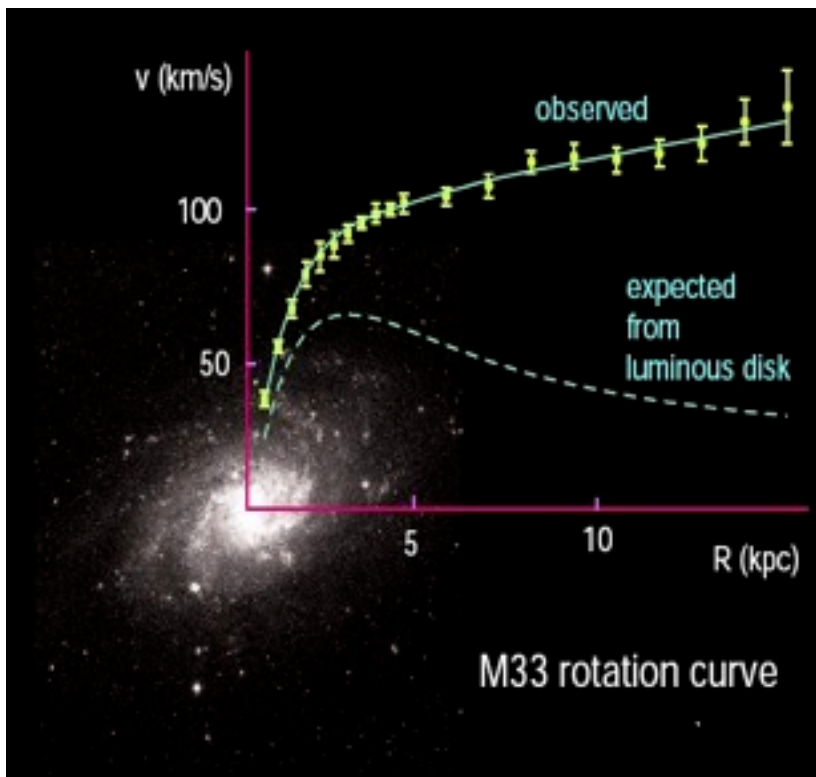
重子物质起源



三个重子起源条件：重子数破坏，电荷宇称破坏，热平衡退耦

超出标准模型！

暗物质 (dark matter)

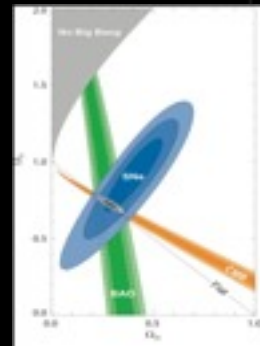
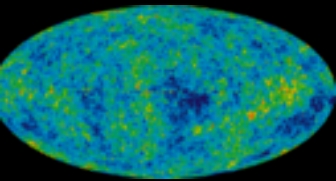
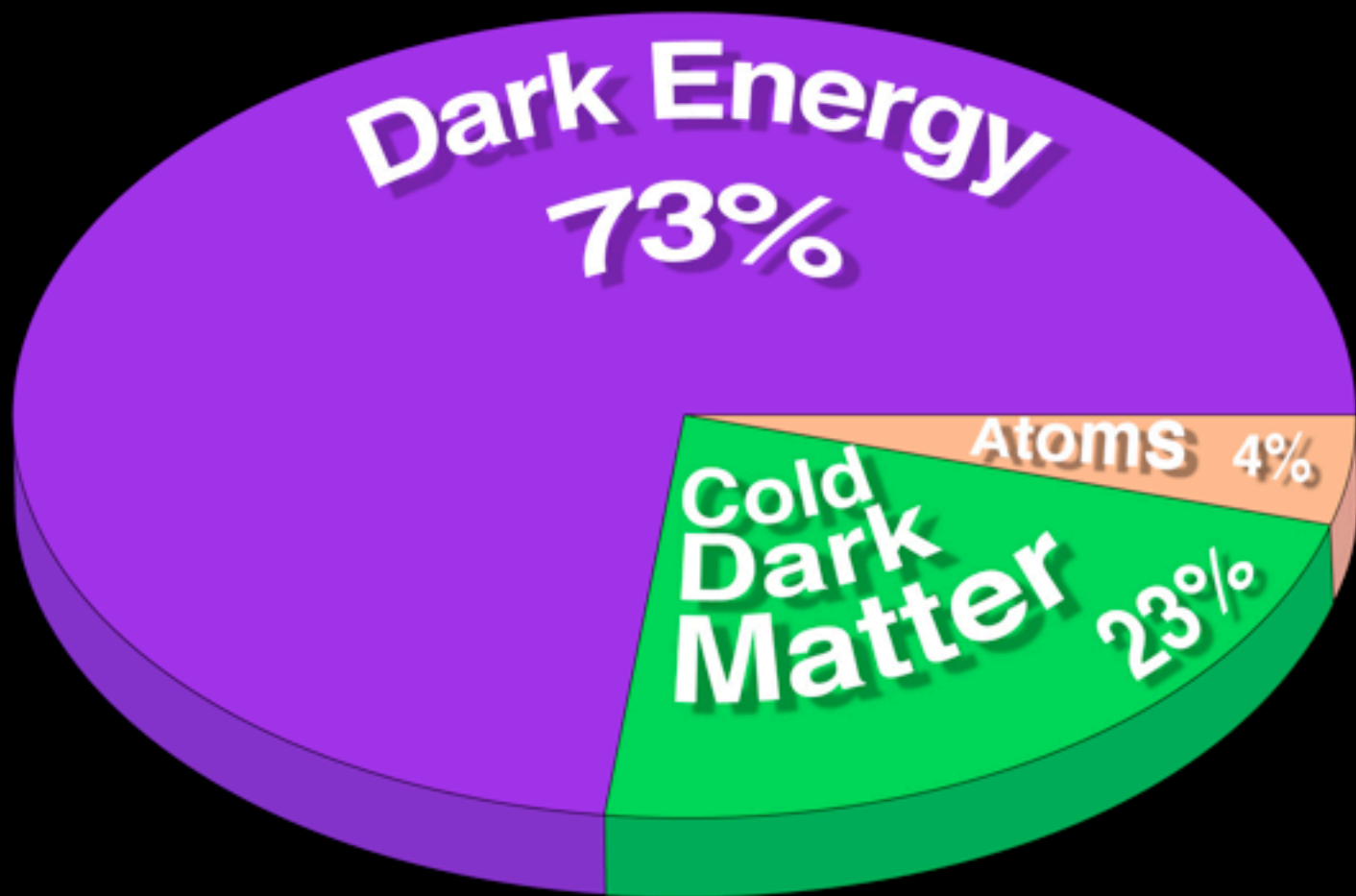


星体旋转曲线



Fritz Zwicky
1933

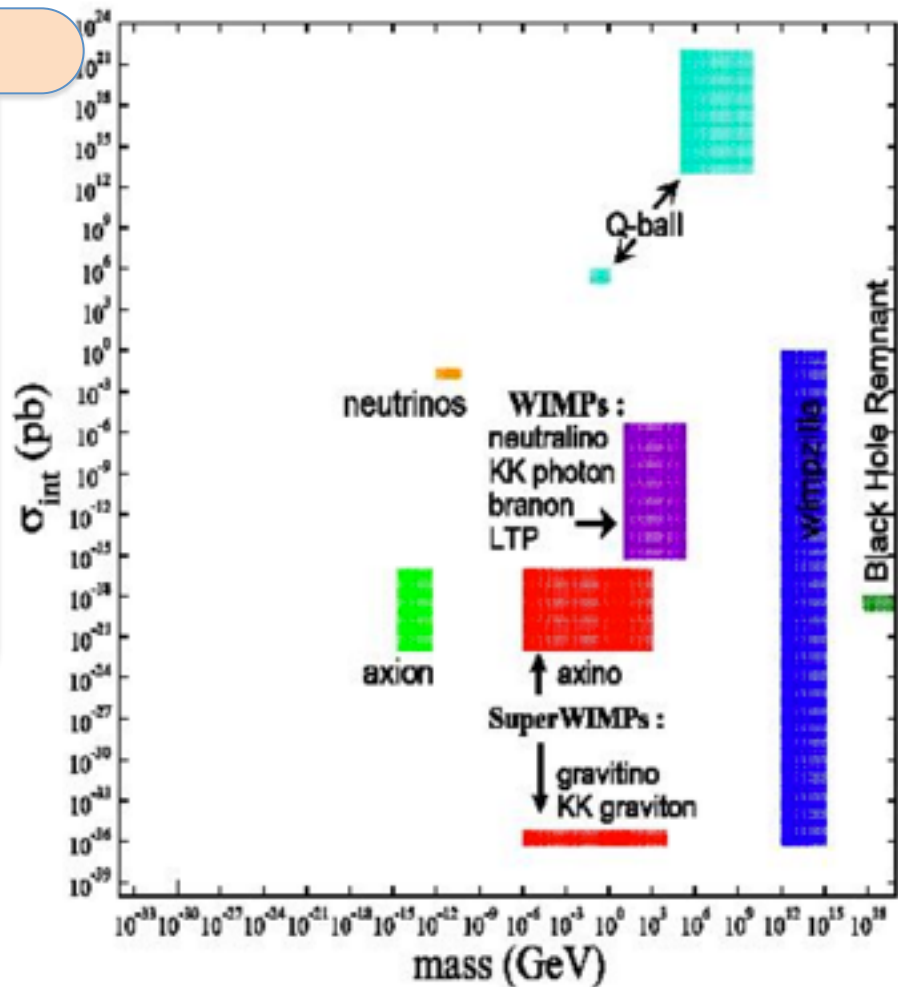
Vera Rubin
1970's



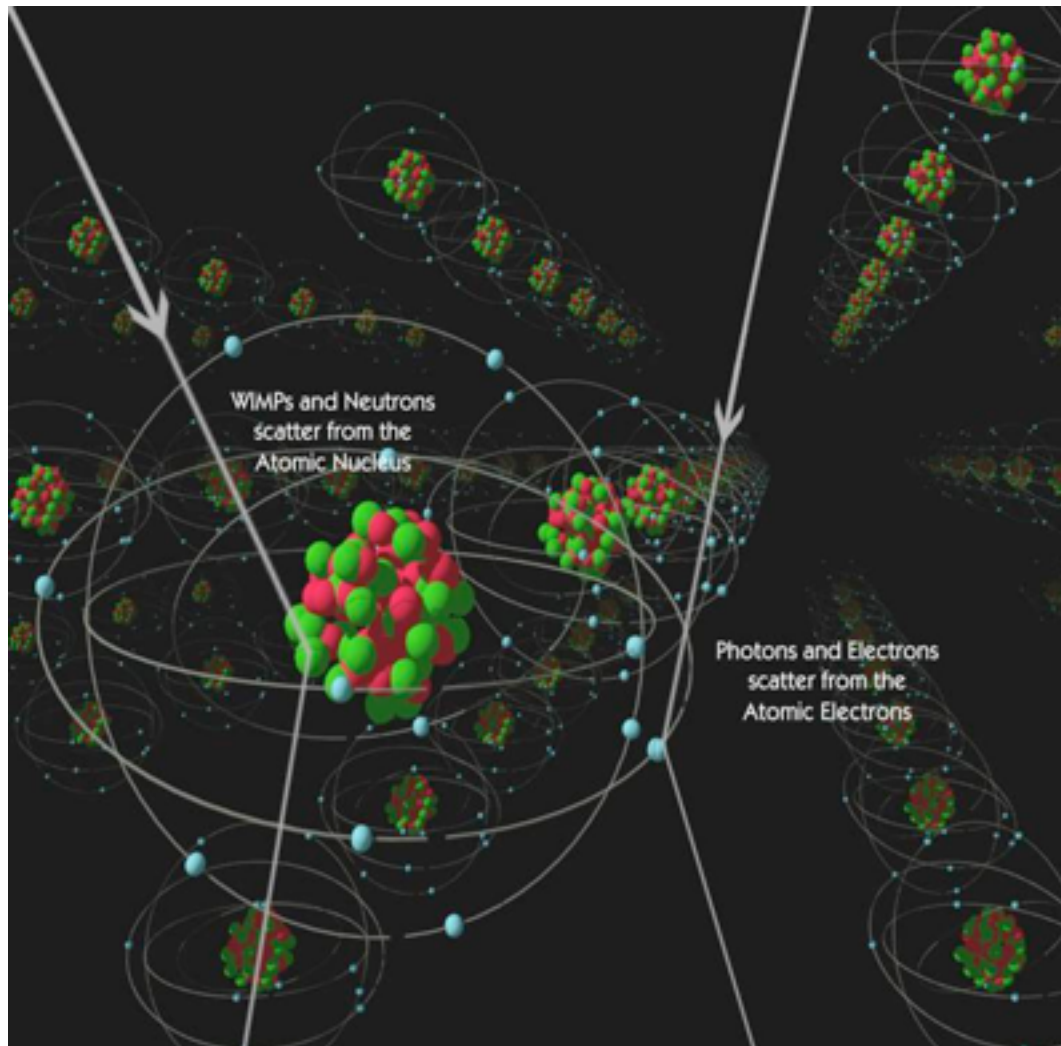
暗物质性质

- 电中性
- 不是重子物质
- 有质量，非相对论
- 相互作用很弱
- 稳定或者寿命很长

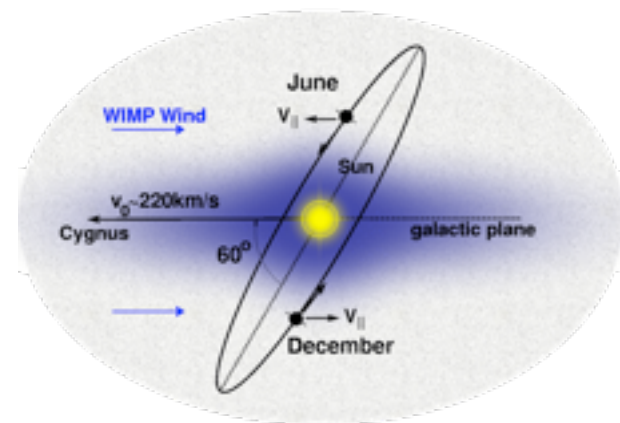
暗物质是什么粒子？



暗物质直接探测

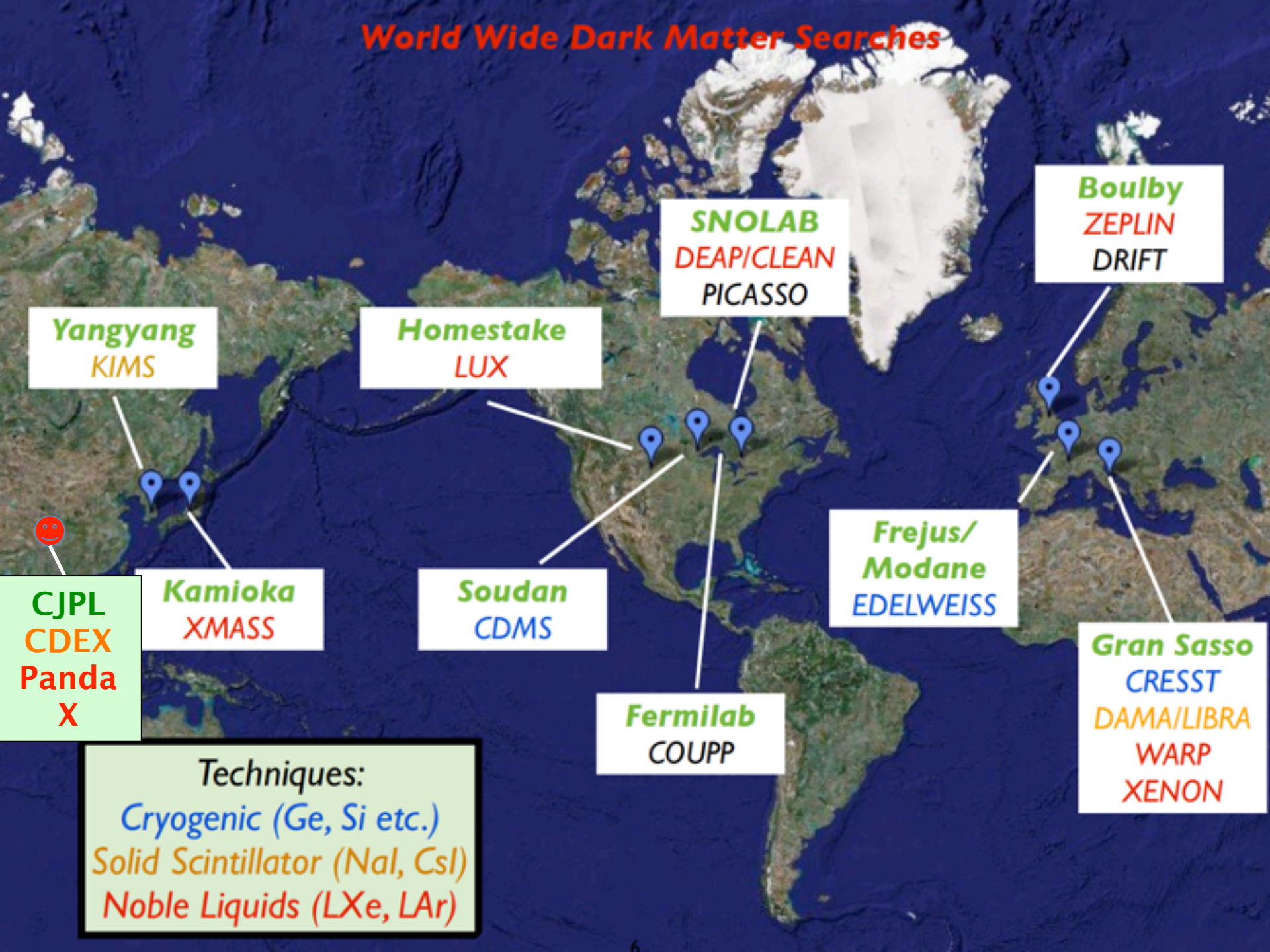


- 直接探测暗物质和原子的弹性散射。
- 信号：热，光，电



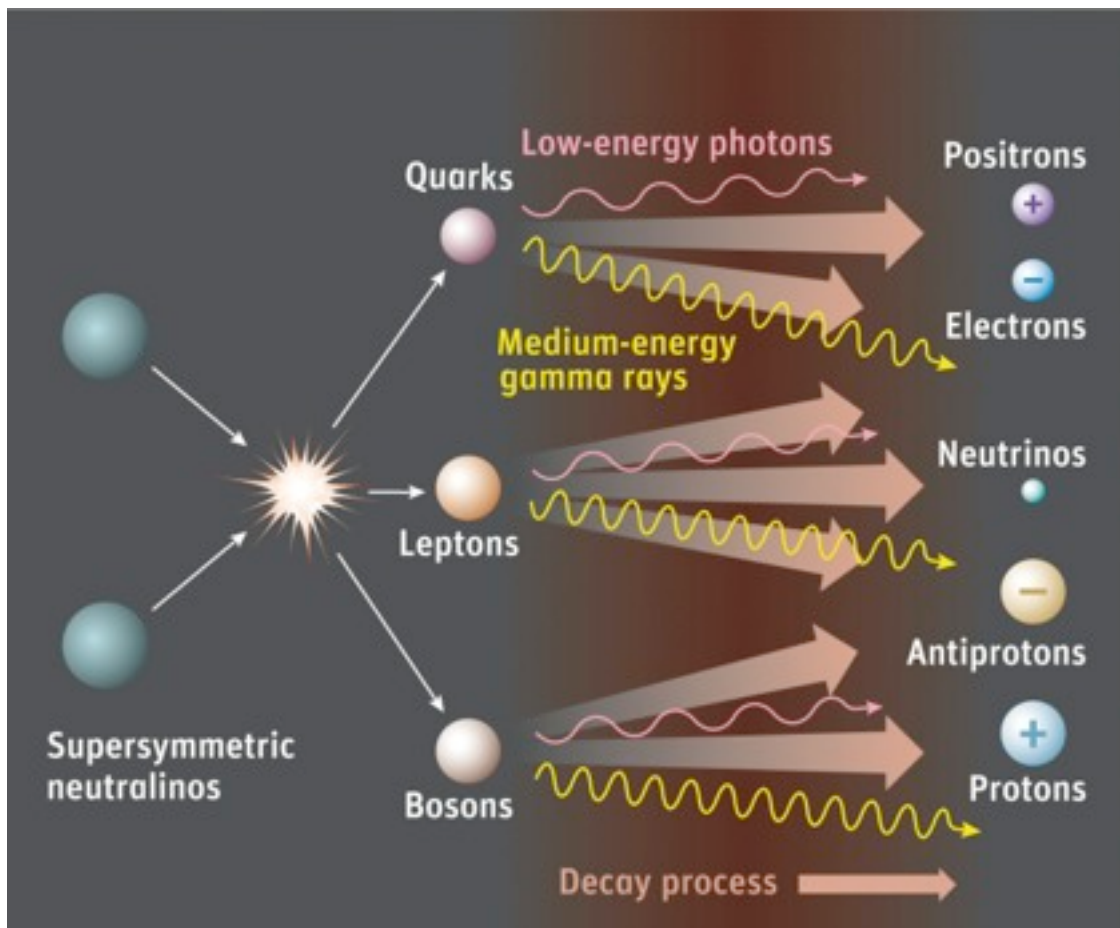
年调制效应

World Wide Dark Matter Searches



Techniques:
Cryogenic (Ge, Si etc.)
Solid Scintillator (NaI, CsI)
Noble Liquids (LXe, LAr)

暗物质间接探测



暗物质在宇宙中湮灭产生正反电子，正反质子，光子，中微子

还有别的基本相互作用？

存在别的基本对称性么？

暗物质是什么粒子？

有几种暗物质粒子？

有几个Higgs粒子？

质量是怎么来的？

中微子能告诉我们什么？

新物理在哪个能标？

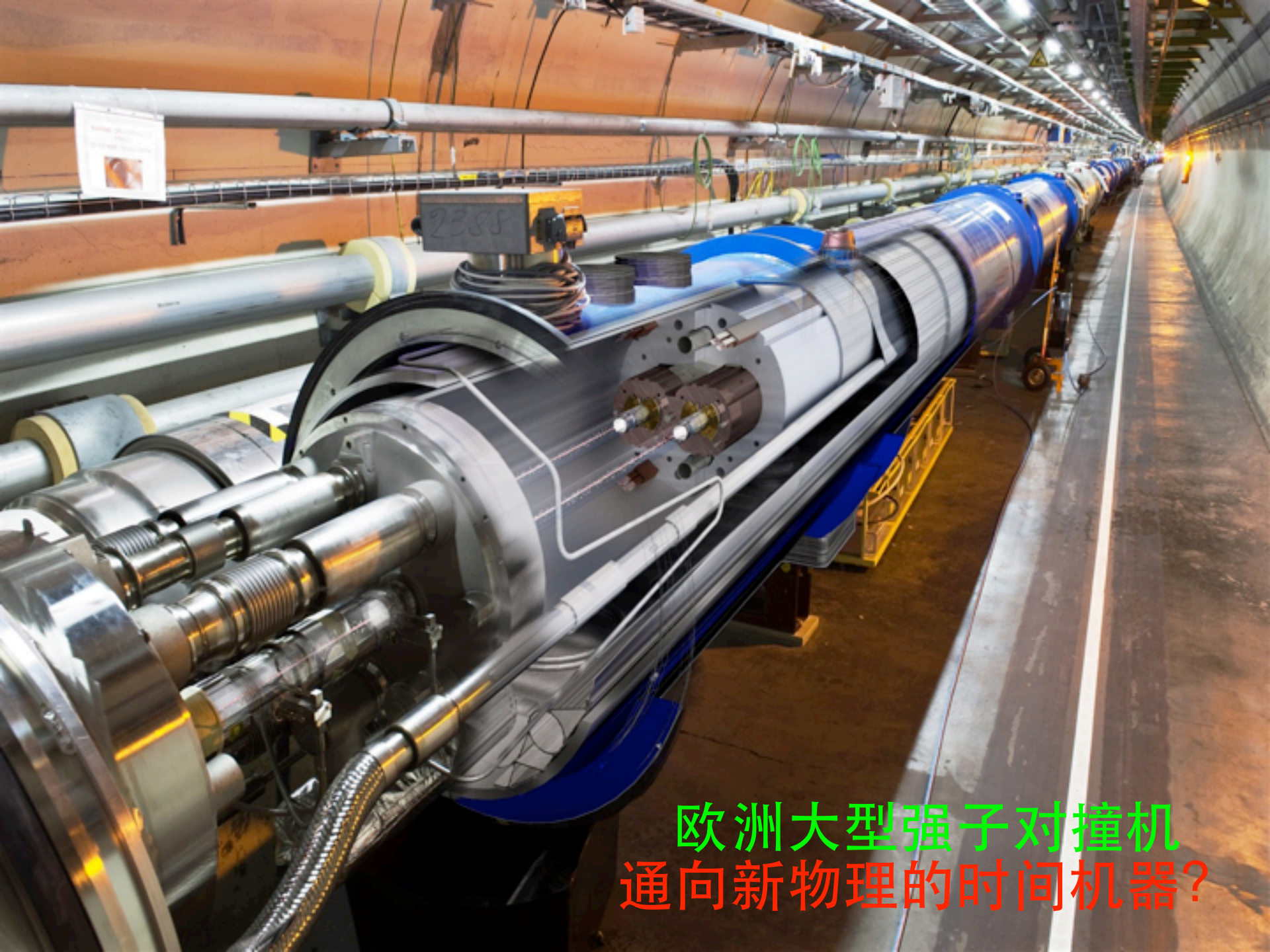
相互作用能统一吗？

反物质遭遇到了什么？

暗能量可以被了解么？

宇宙是怎么形成的？





欧洲大型强子对撞机
通向新物理的时间机器？

能量和尺度

加速器：强力的“显微镜”

高能加速的粒子束，帮助我们看清细微的结构

$$E \sim \frac{1}{x}$$

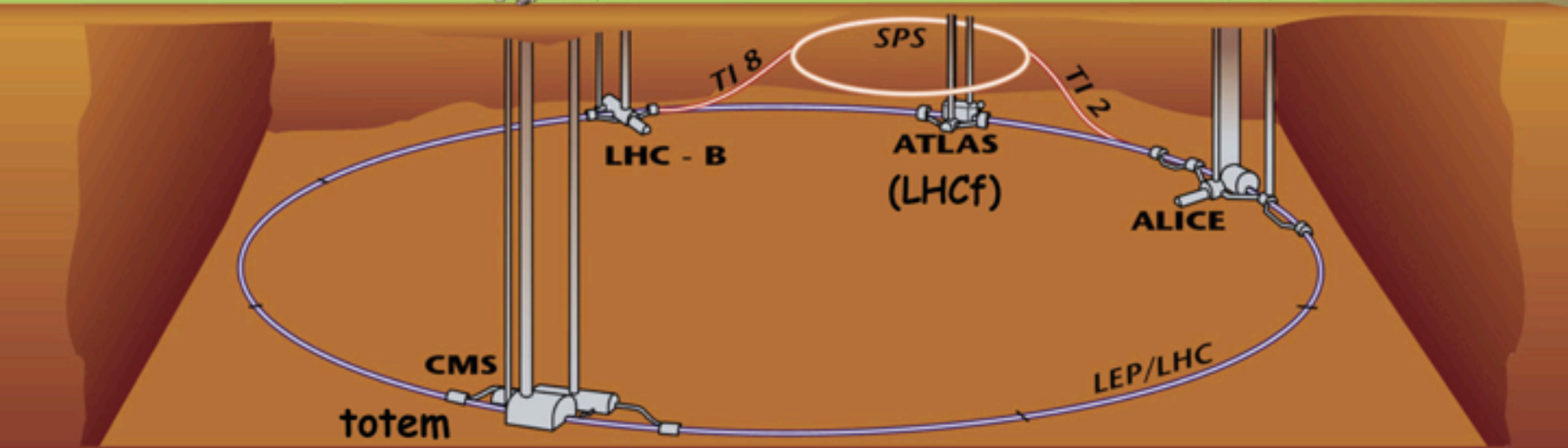
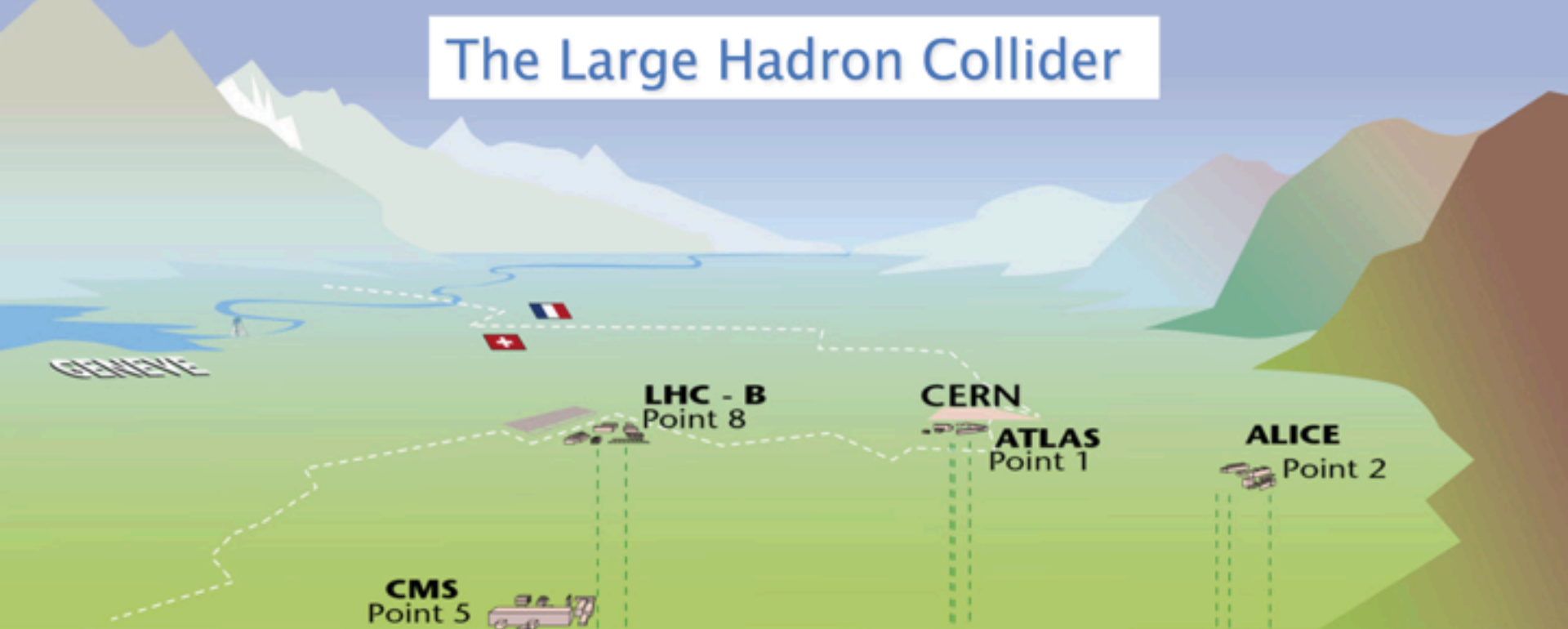


低能量粒子束



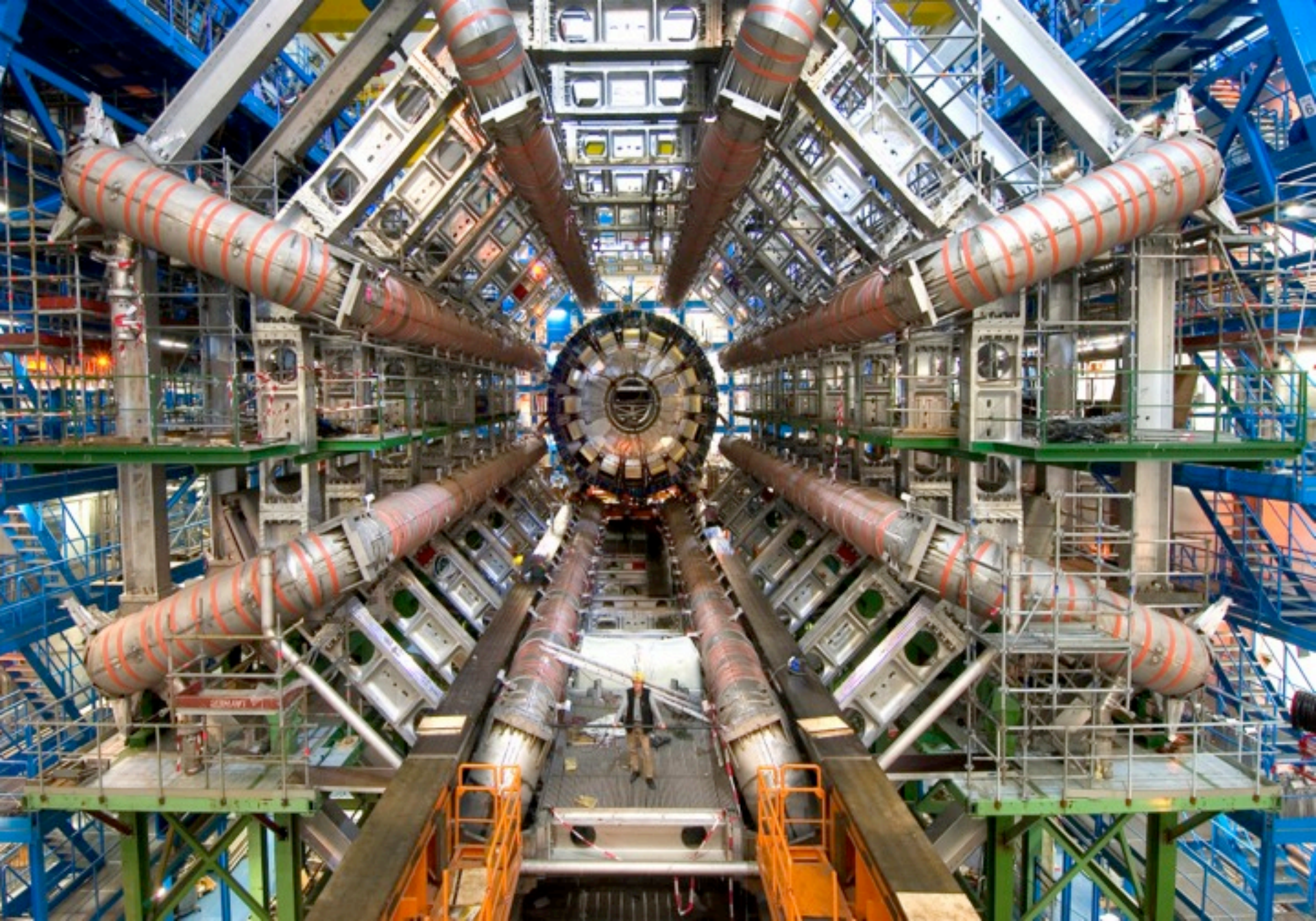
高能量粒子束

The Large Hadron Collider





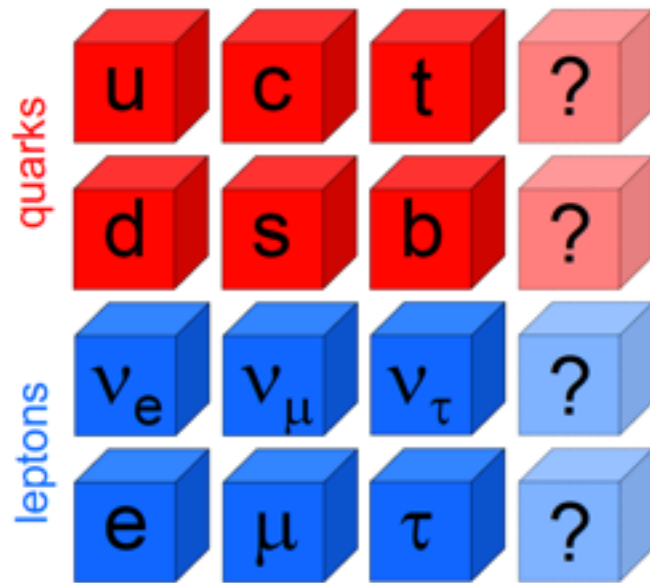
CMS: 长21米, 高15米, 宽15米, 12.5千吨



ATLAS: 长46米, 高25米, 宽25米, 7千顿

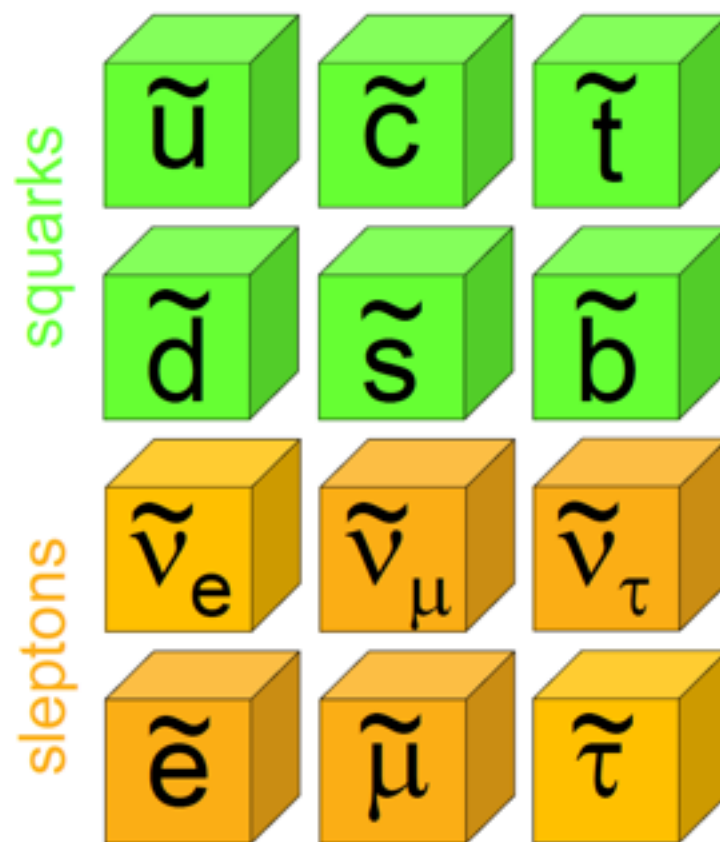
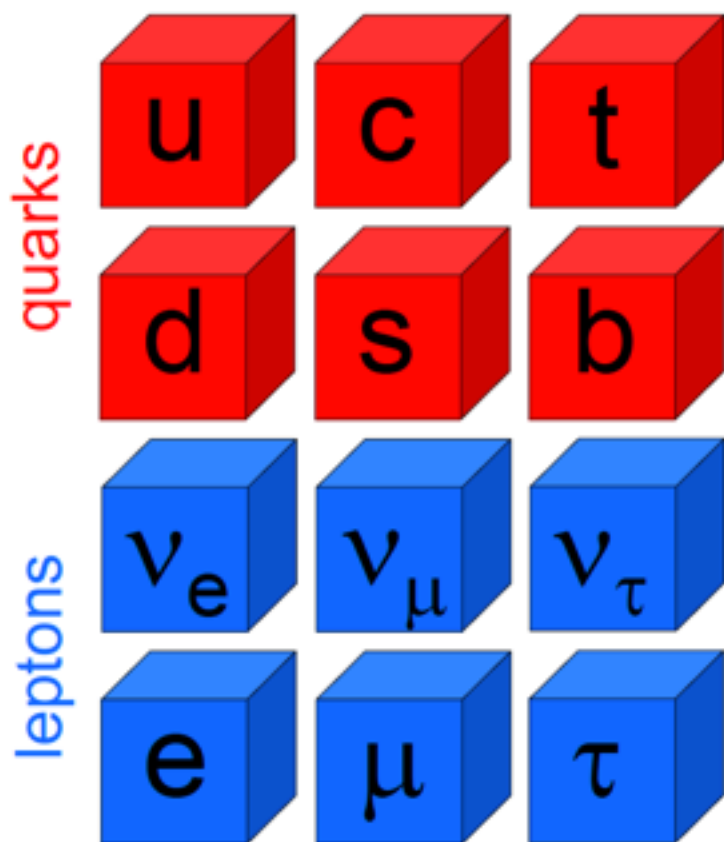
LHC

- The “God” Particle: Higgs粒子
- 暗物质?
- 寻找第四代粒子?



LHC

- 寻找超对称粒子?



The Golden Age

- 粒子物理非常的成功，辉煌的过去。
- 更高能量，亮度，灵敏度的加速器和非加速器实验，一个黄金时代的到来。