

# TeV能区新物理

曹庆宏

北京大学理论物理研究所

1. 何为高能粒子物理?
2. 高能物理实验技术
3. 粒子物理标准模型
4. 为什么需要新物理?

物体

规律

物

理

量纲

尺度

自由度

因子化

# 不同小尺度的物理规律

厘米:

流体 (经典流体力学)

$10^{-5}$ 厘米:

分子 (分子运动学)

$10^{-8}$ 厘米:

原子 (量子力学)

$10^{-13}$ 厘米:

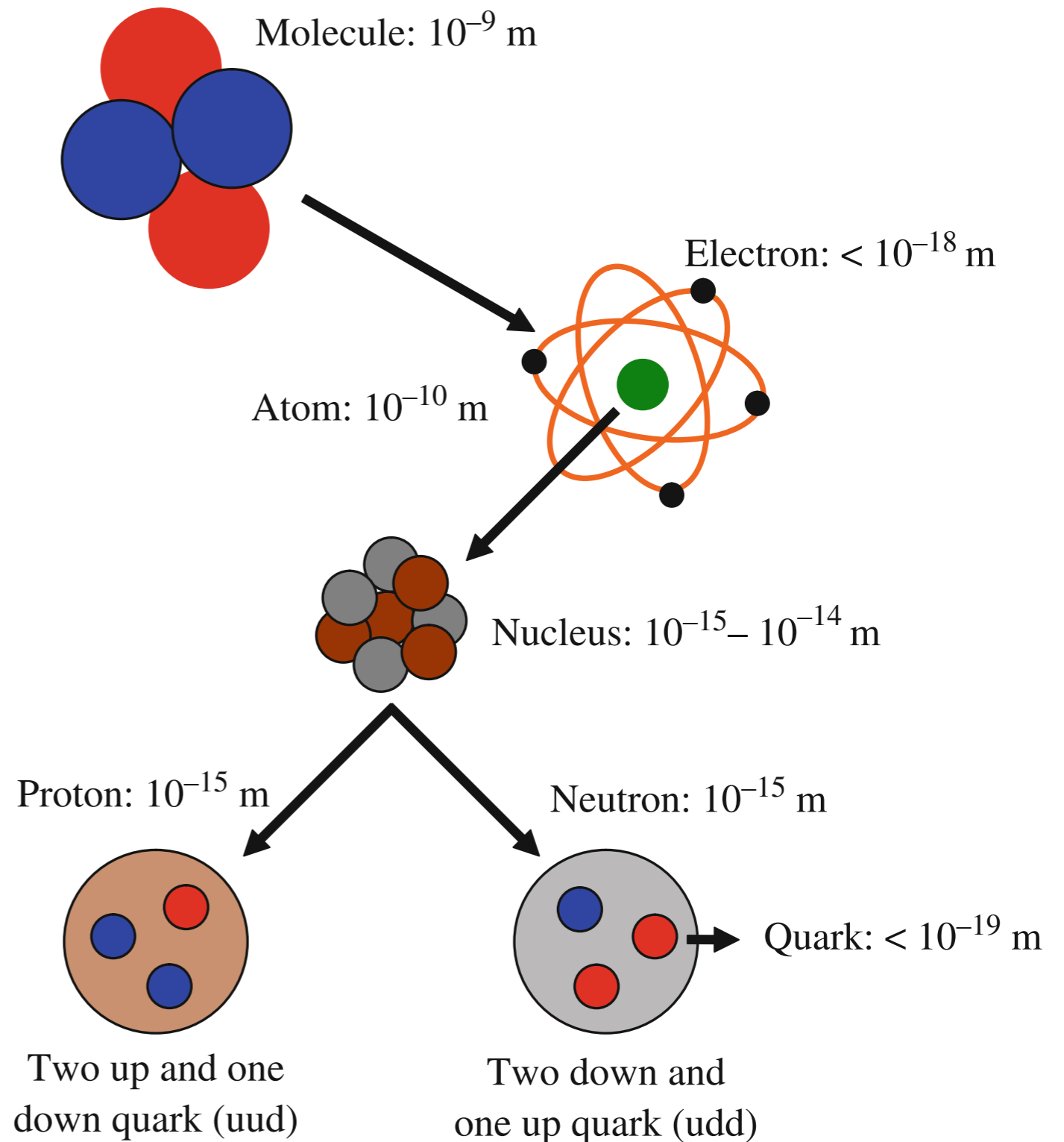
核子 (核物理)

$10^{-13} \sim 10^{-18}$ 厘米:

夸克 (量子色动力学)

$10^{-33}$ 厘米:

弦理论 (陈斌老师)



# 自然单位制：微观世界语言

高能物理中大部分情形下，基本粒子间的相互作用仅仅发生在极高能量和极短距离

$$\hbar = c = k_B = 1$$

$$[\text{长度}] = [\text{时间}] = [\text{质量}]^{-1} = [\text{温度}]^{-1} = [\text{能量}]^{-1}$$

$\hbar$  量子性质

$c$  相对论性质

$k_B$  热力学性质

需要仔细处理  
微观世界的理论结论  
推广到  
宏观世界的观测量

什么是粒子物理  
或高能物理？

我是谁？

我从哪来？

我到那去？

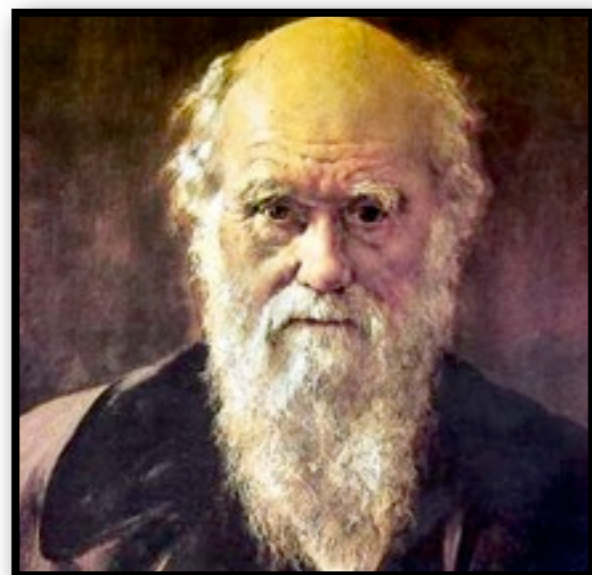


# 我是谁？

哲学家



生物学家



# 我从哪来？

# 我到那去？

历史学家

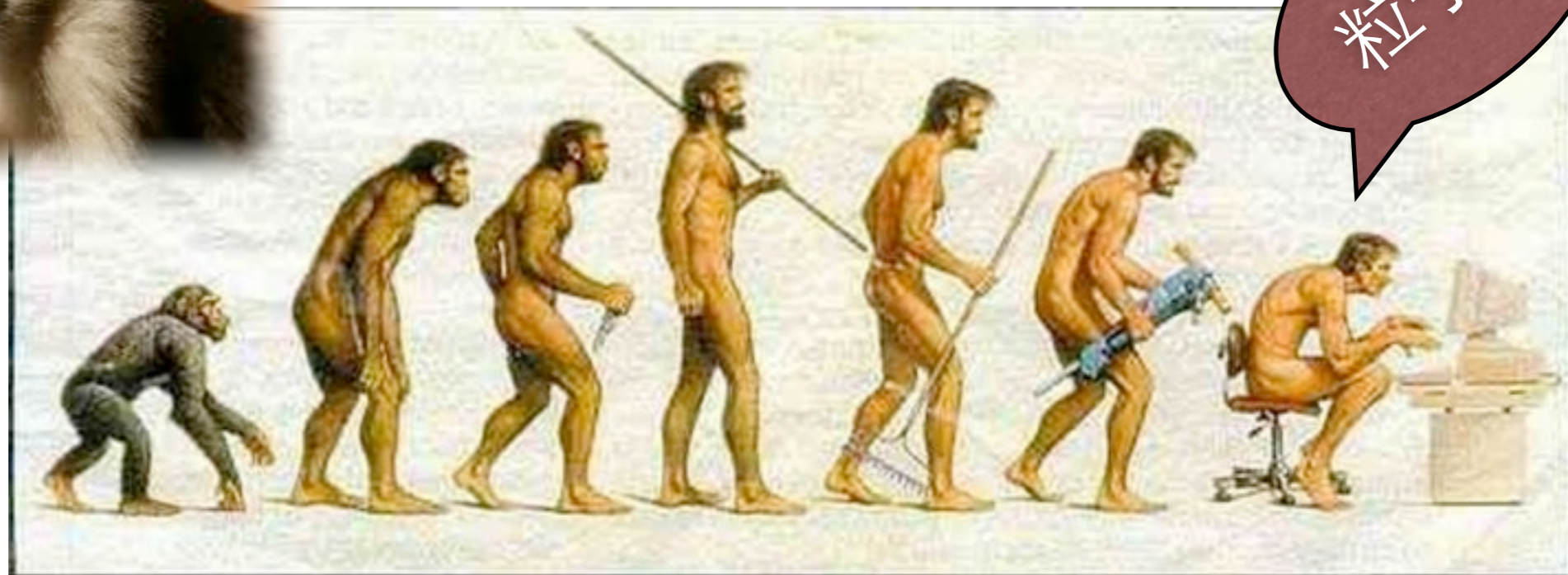


“世界是由什么组成的？”

“它们是怎样组成这个世界？”

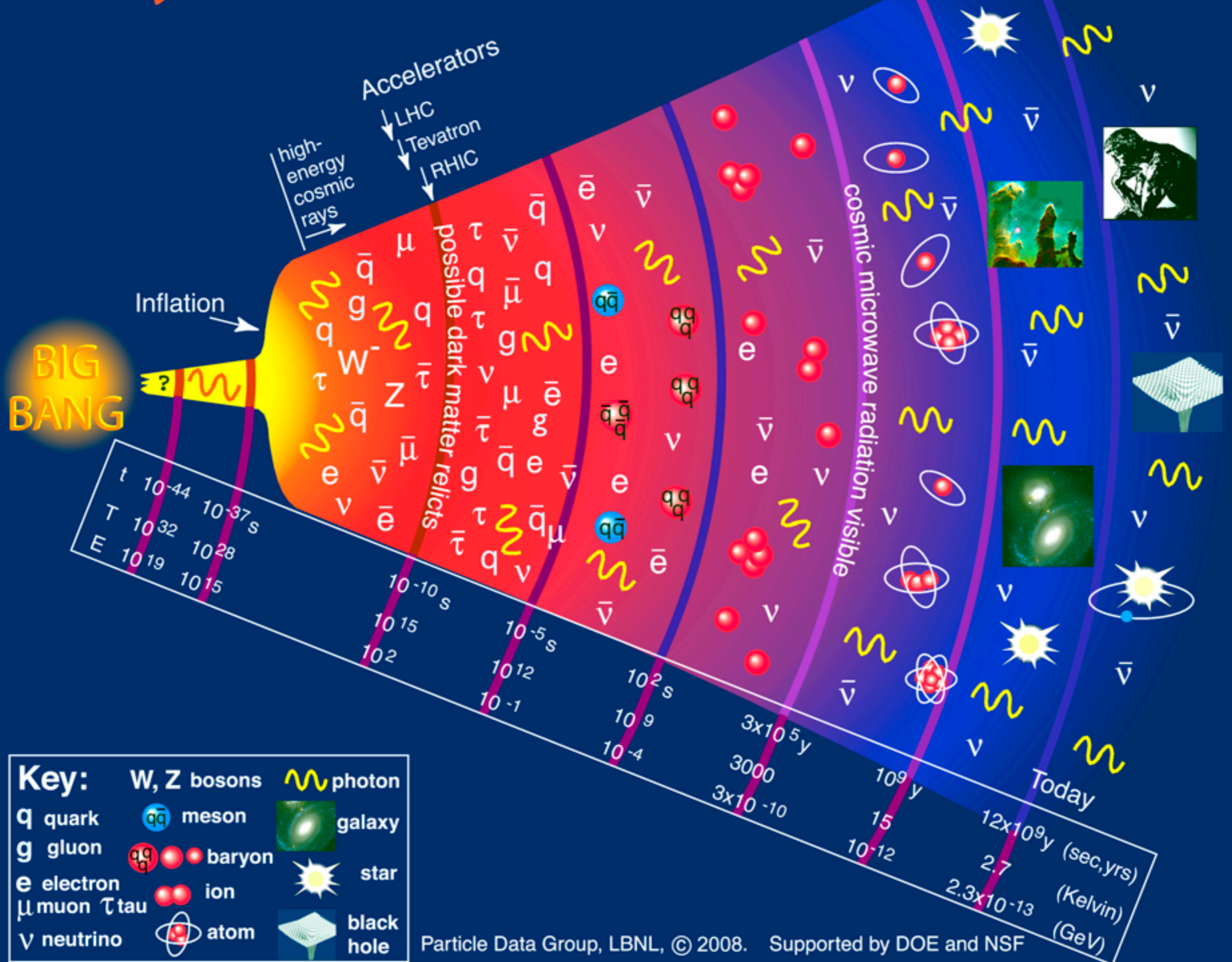
“宇宙如何演化？”

物理学家

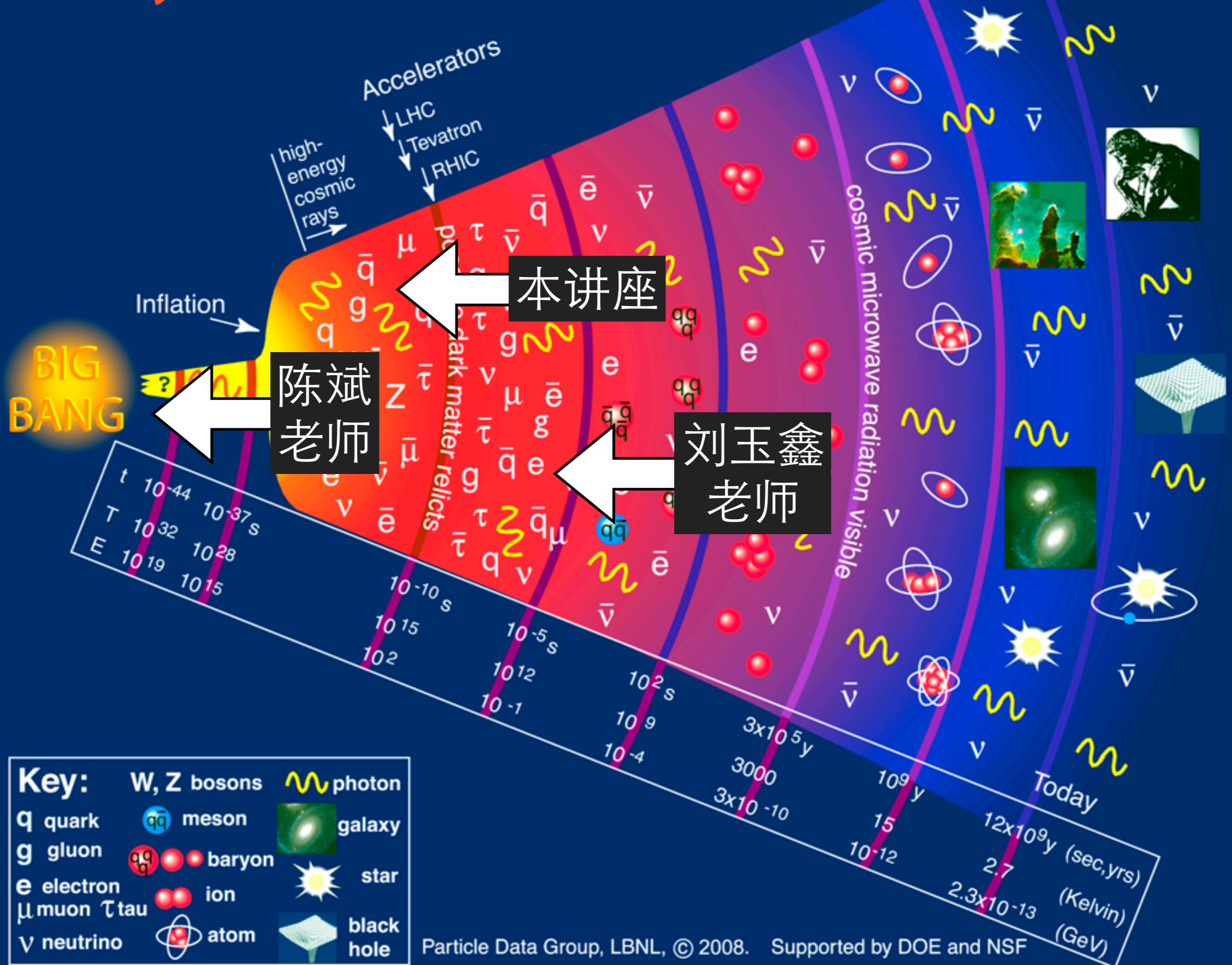




# History of the Universe



# History of the Universe



本讲座

陈斌老师

刘玉鑫老师

# 高能物理的 实验手段

高能理论研究的数次革命都是基于  
**实验物理技术的革命性突破**，  
特别是加速器和探测器技术的成熟。

# 能量和空间尺度

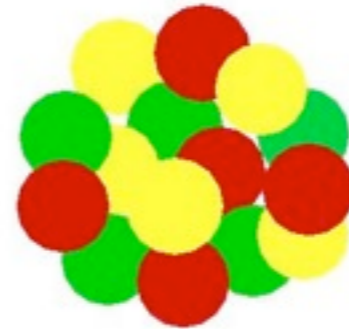
加速器： 强力的“显微镜”

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

# 投石问路：高能散射实验

固定靶实验

$$E_{\text{cm}} \propto \sqrt{E_{\text{in}}}$$



对撞机实验

$$E_{\text{cm}} \propto E_{\text{in}}$$

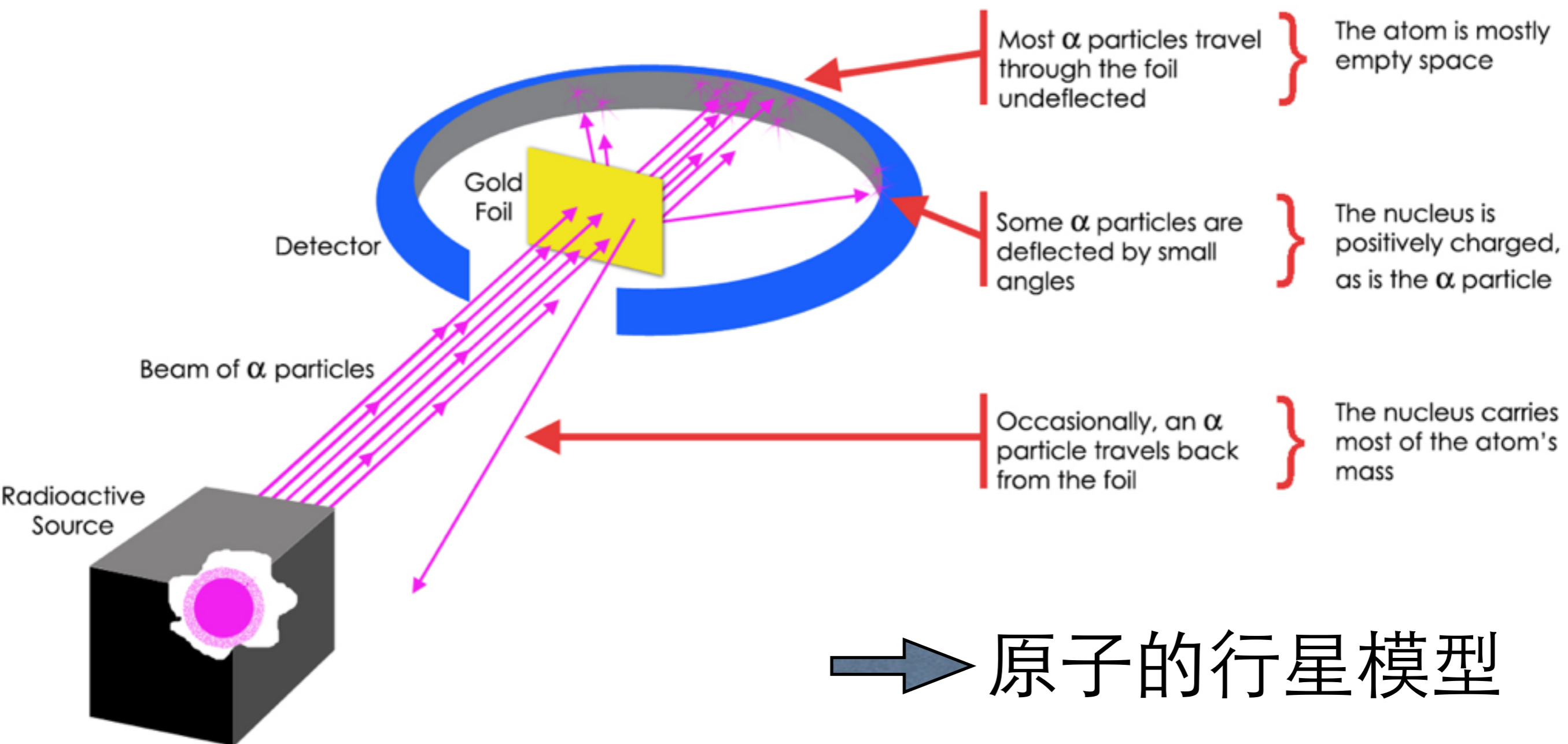


# 卢瑟福散射实验

对撞实验鼻祖

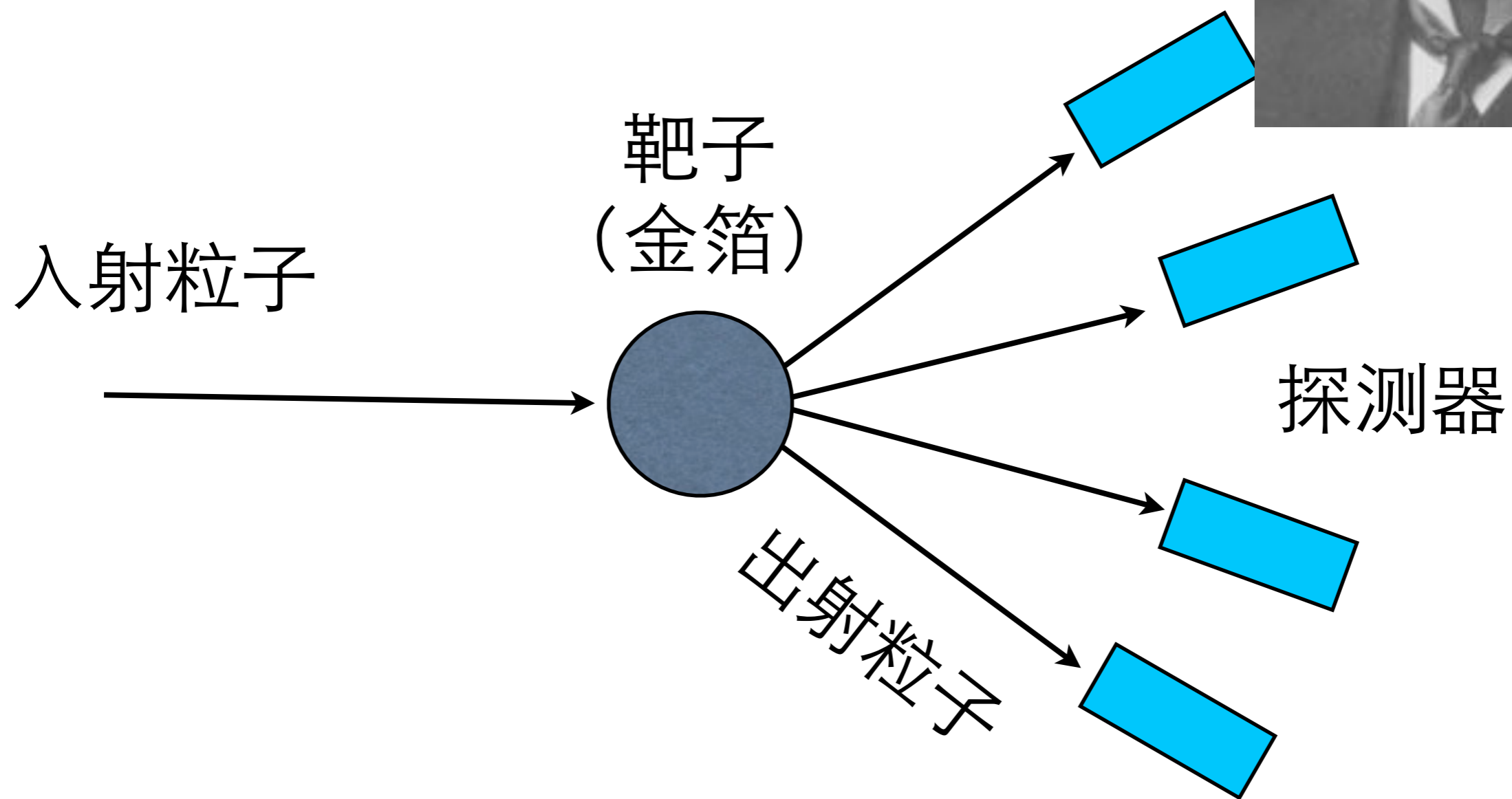
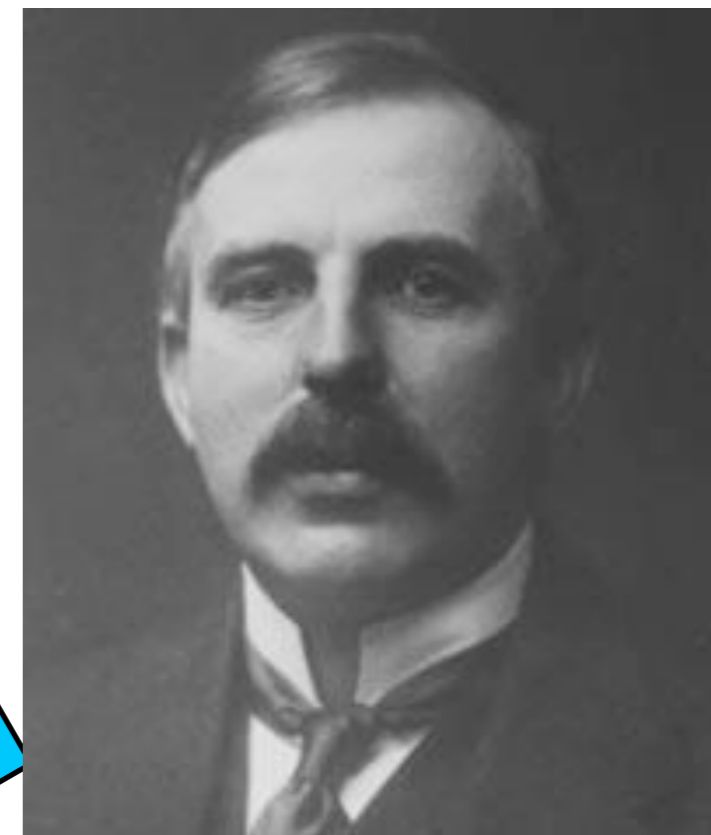


## Rutherford's Gold Foil Experiment



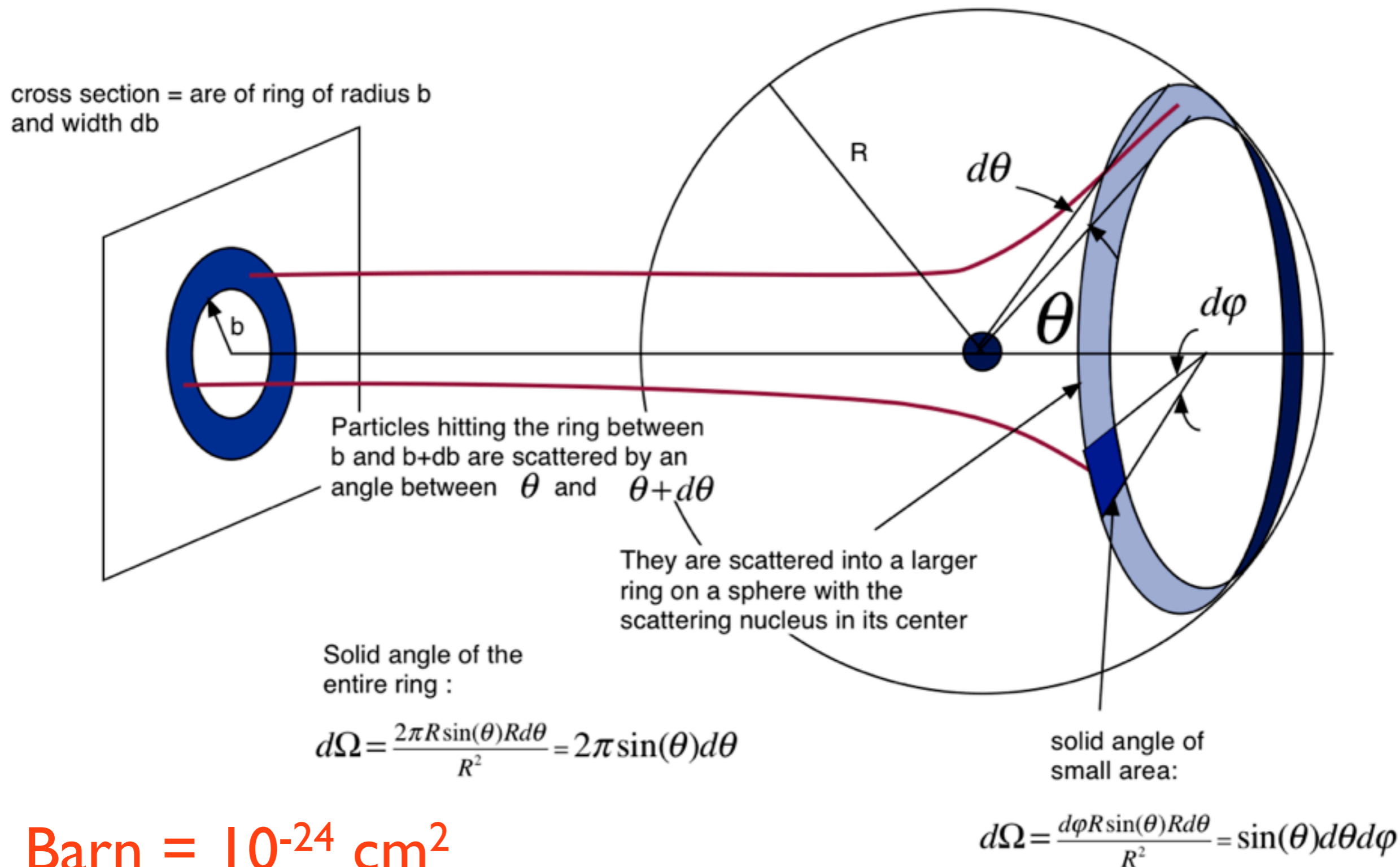
# 卢瑟福散射实验

对撞实验鼻祖



# 散射截面

粒子束和靶或另一粒子束之间相互作用的有效面积



1 Barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>



# 加速器和对撞机

二战之后高能物理才成为一门公认的学科  
(富人的游戏)



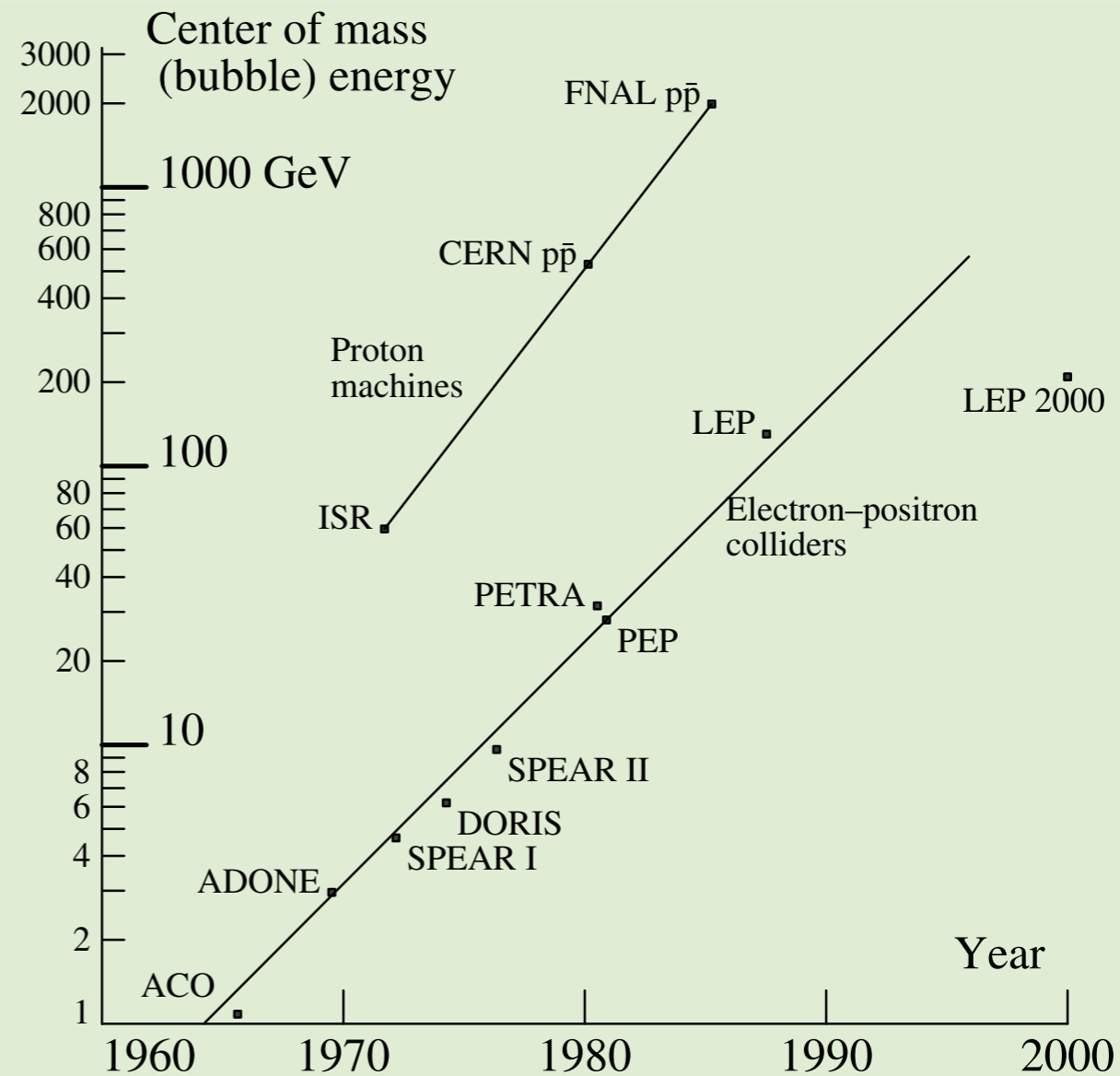
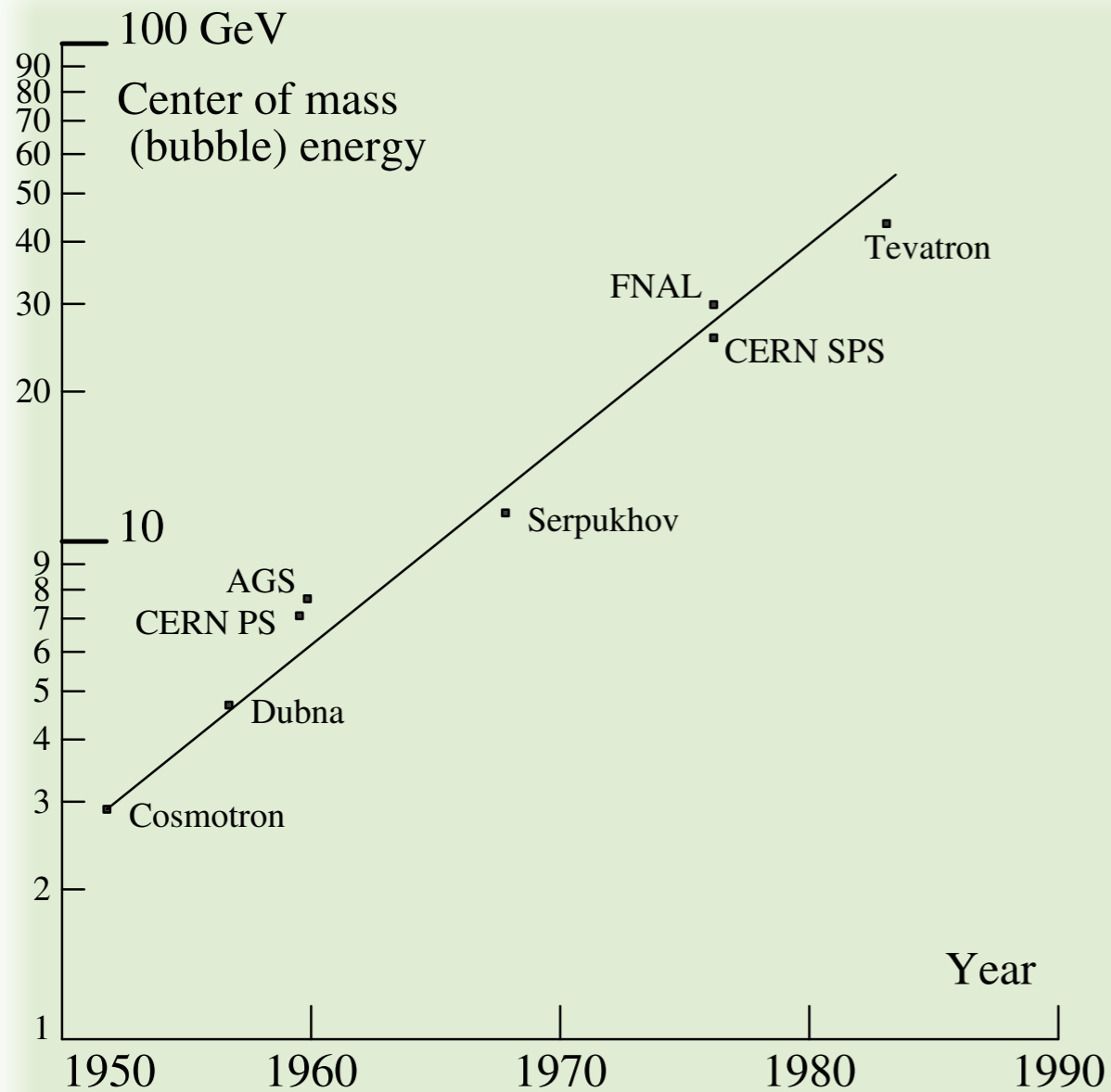
# 加速器和对撞机

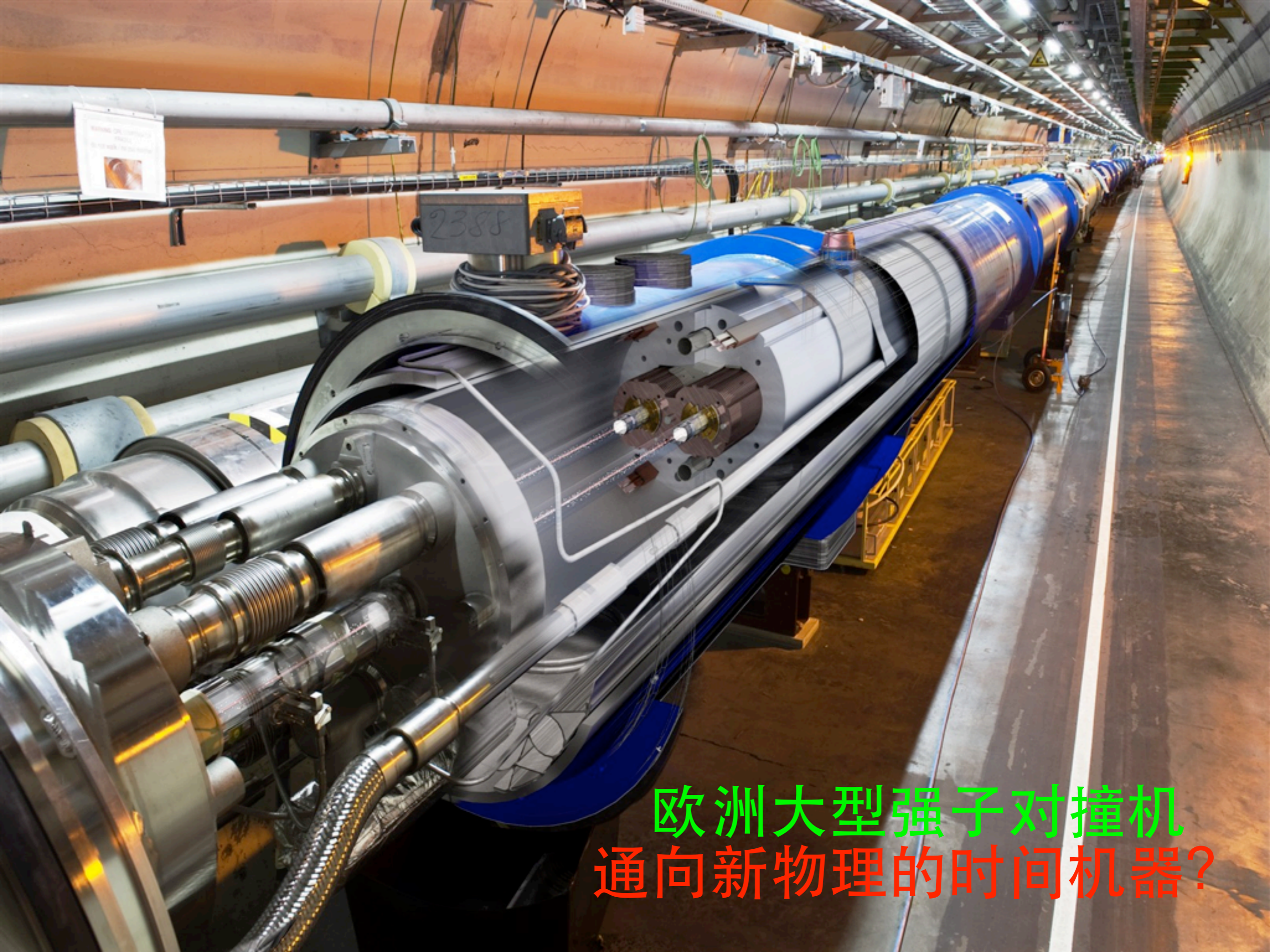
二战之后高能物理才成为一门公认的学科  
(富人的游戏)

能量上限由机器的环半径和磁场强度决定

- ▶ 上世纪50年代, 半径~10-20米 (房子中)
- ▶ 上世纪60年代, 半径~100米 (地下)
- ▶ 上世纪70年代, 半径~1000米 (地下)
- ▶ 上世纪80年代, 半径~4000米 (地下)

# 对撞机年表

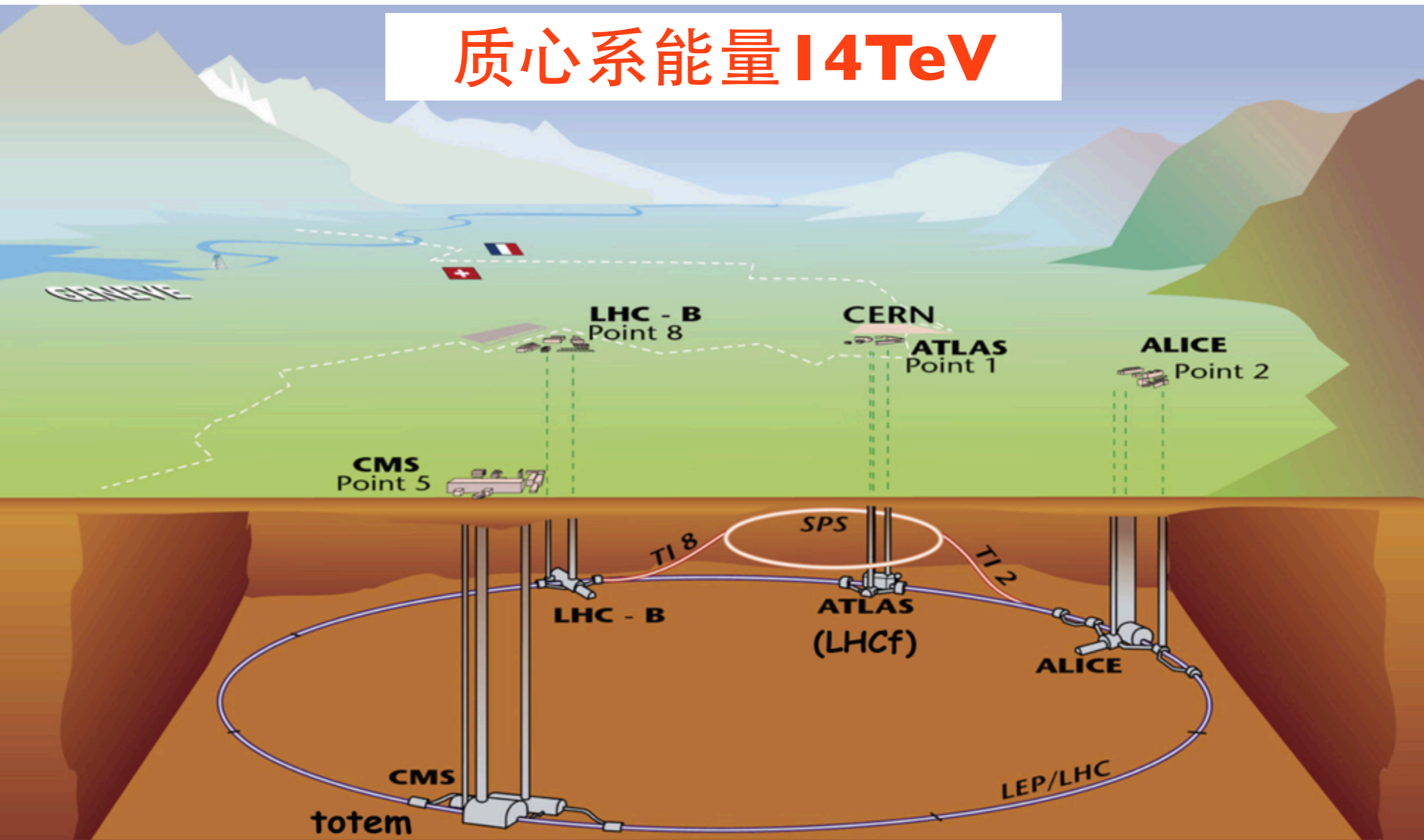


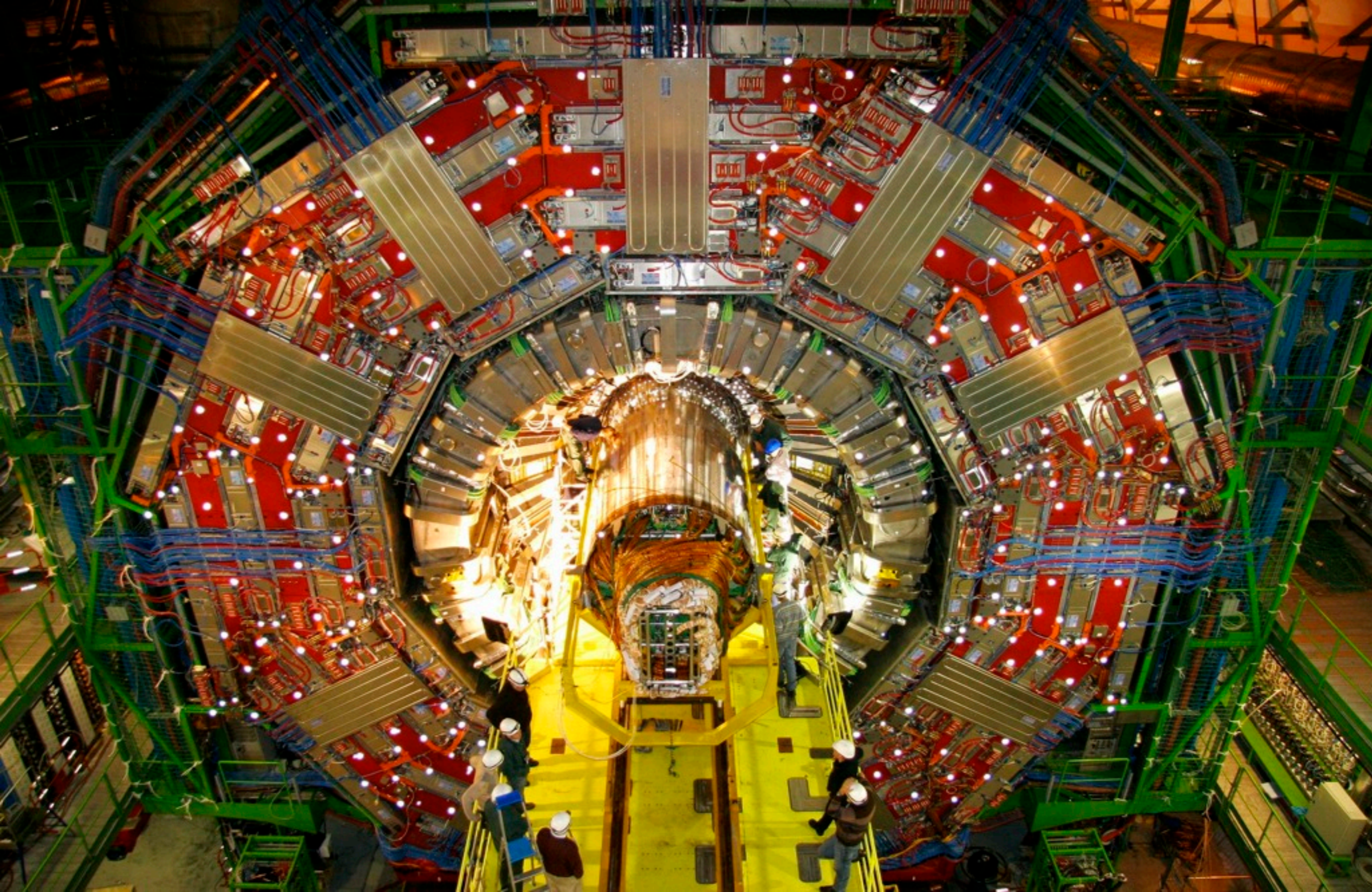


欧洲大型强子对撞机  
通向新物理的时间机器？

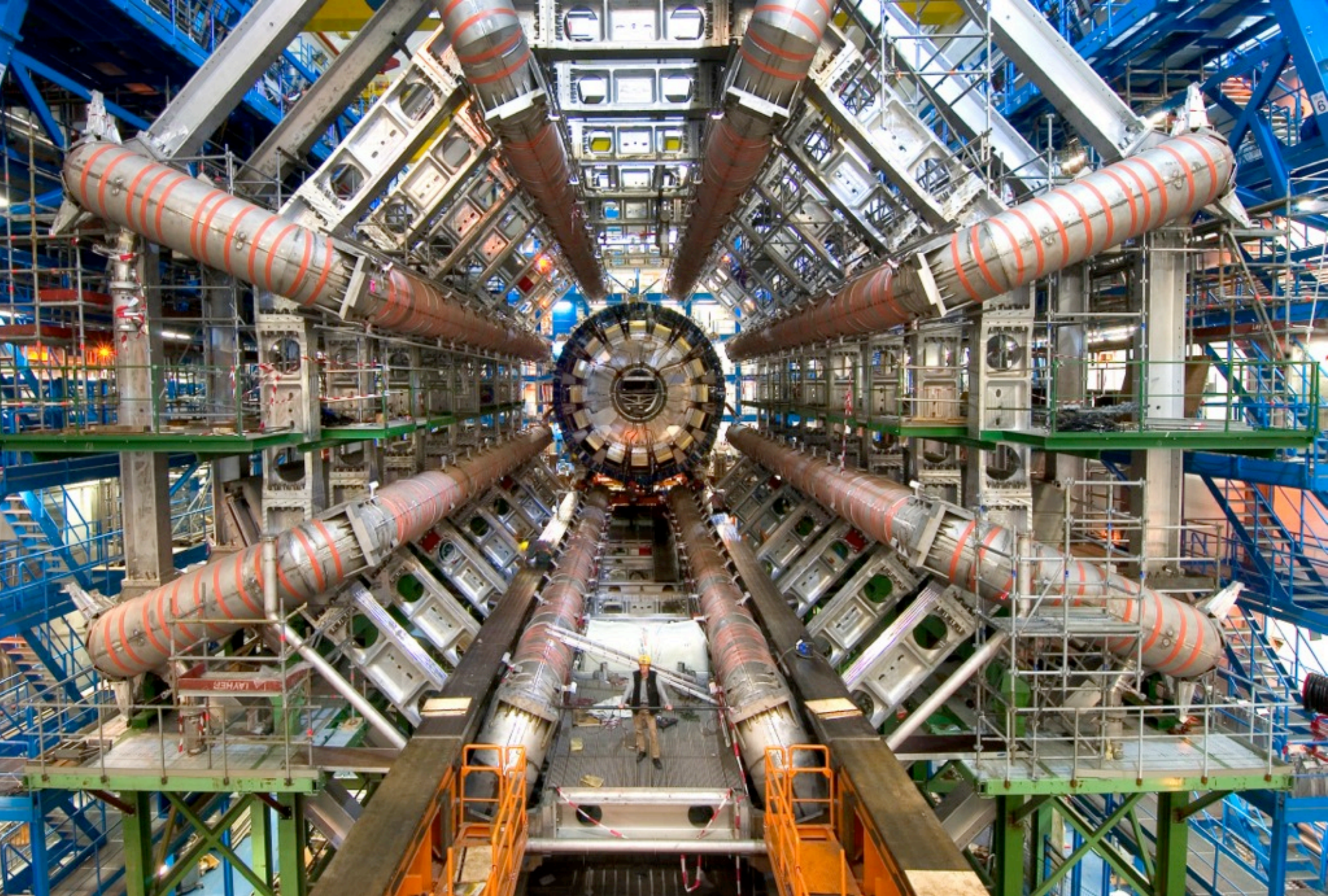
# 大型强子对撞机

质心系能量 **14 TeV**





**CMS: 长21米, 高15米, 宽15米, 12.5千吨**



**ATLAS: 长46米, 高25米, 宽25米, 7千吨**

# 粒子物理的 标准模型

(集400年物理之大成)



# 神奇数字

3

2

1

$$2 \times \bar{2} = 3 + 1$$

$$3 \times \bar{3} = 8 + 1$$



“世界基本组成成分为何？”

和

“它们如何相互作用？”

# 基本粒子物理 或 高能物理

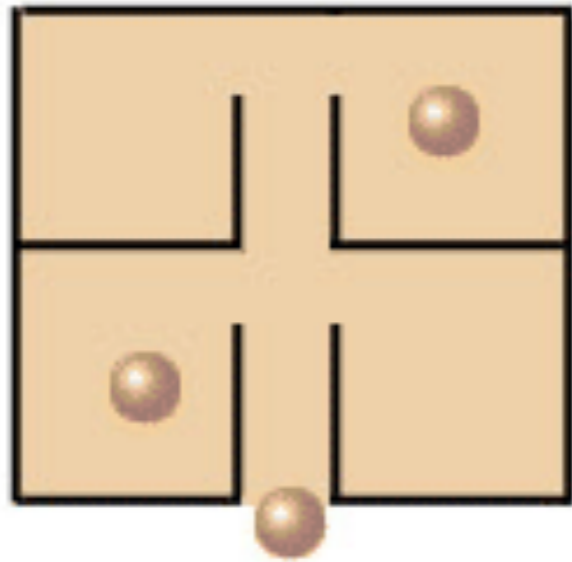
研究自然界的  
基本相互作用（力）

# 费米子和玻色子

费米子：

遵守**Pauli**不相容原理

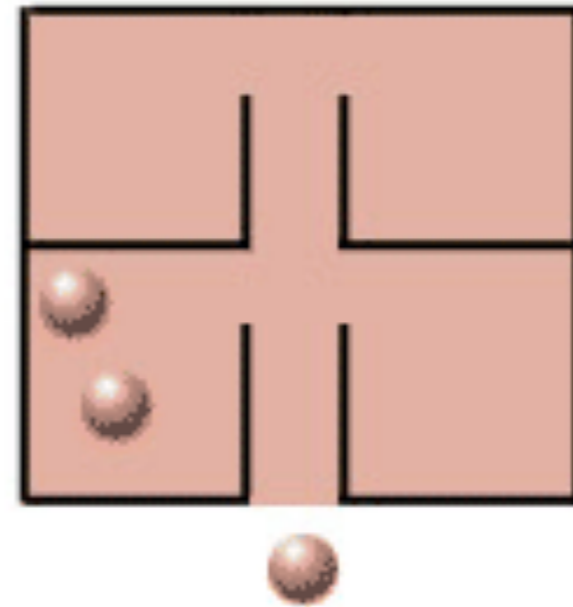
自旋为半整数



玻色子：

不遵守**Pauli**不相容原理

自旋为整数



# 物质场粒子：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” ( $17 m_\mu$ )	(1975)	在SLAC观测到 (Stanford Linear Accelerator Center)
$\nu_e$	“Electron 中微子”	(1956)	泡利以之解释Beta衰变中能动量不守恒 (1930)
$\nu_\mu$	“Muon 中微子”	(1962)	
$\nu_\tau$	“Tau 中微子”	(2000)	

# 物质场粒子：夸克

- 参与强相互作用
- 带分数电荷

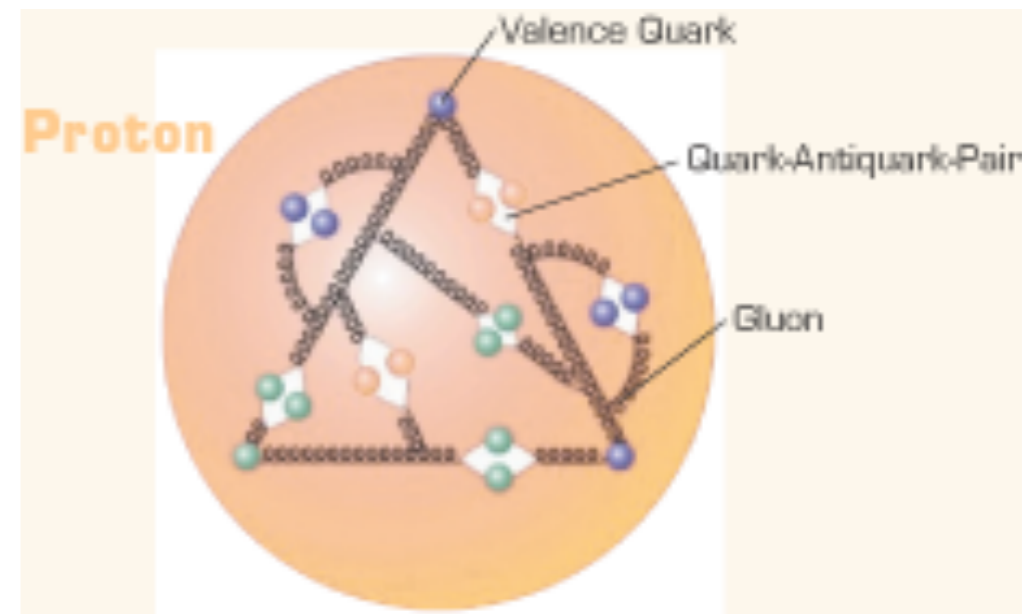
$$Q = \left\{ \begin{array}{l} 2/3 \\ -1/3 \end{array} \right\} \times \text{Proton charge}$$

- 质子和中子的组成成分  
(udd) (uud)

( u ) “up”  
( d ) “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)

1995

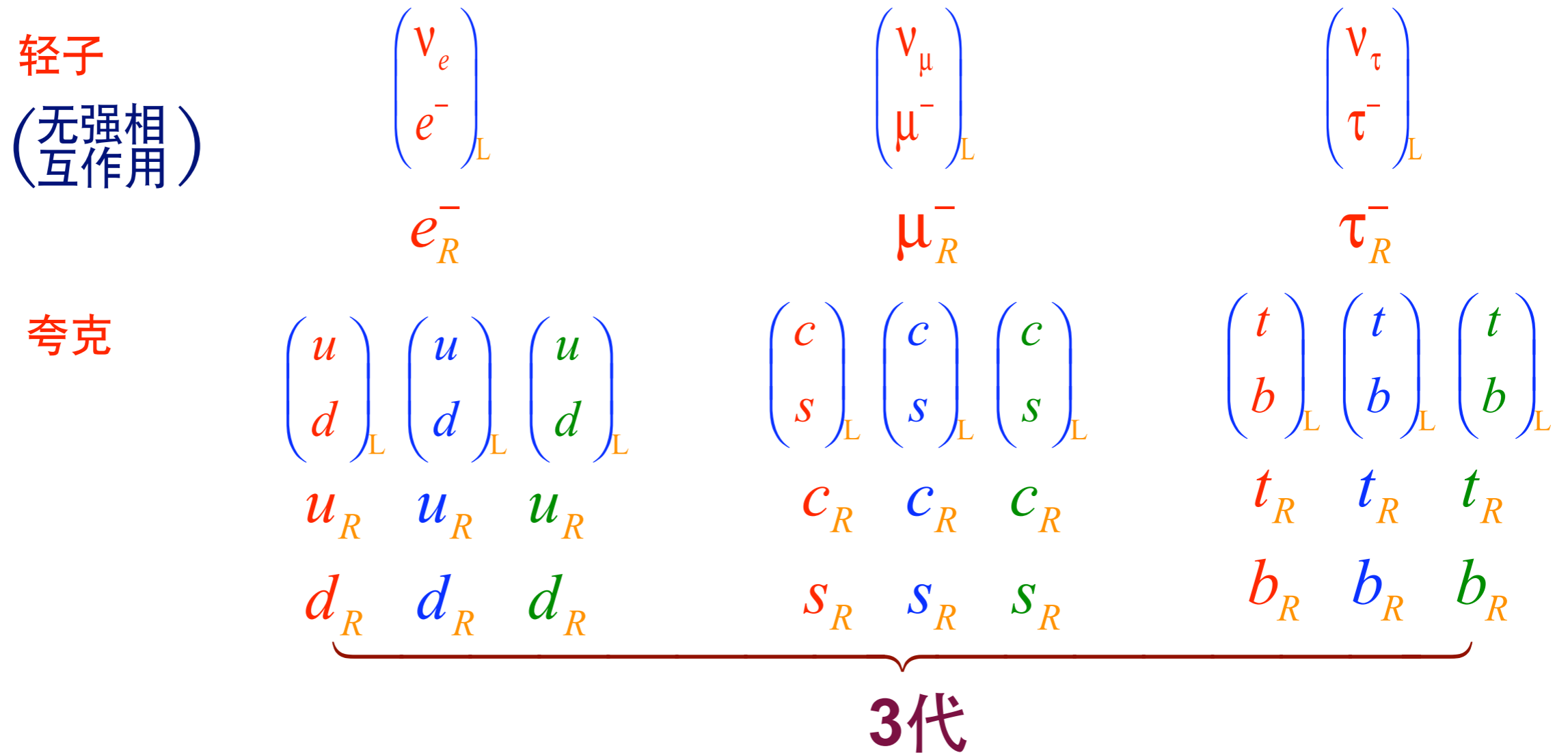
@ Fermilab (Tevatron)

“Beauty”

“Truth”

# 标准模型的物质场

- 费米子 (自旋 1/2)



- 标量场 (自旋为 0)

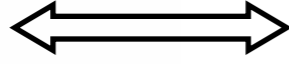
希格斯玻色子：唯一知道不同代的粒子间不同之处的粒子  
(希格斯机制 —— 对称性自发破缺)

# 自然界中四种力

## 1 重力



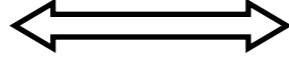
牛顿



## 2 电磁

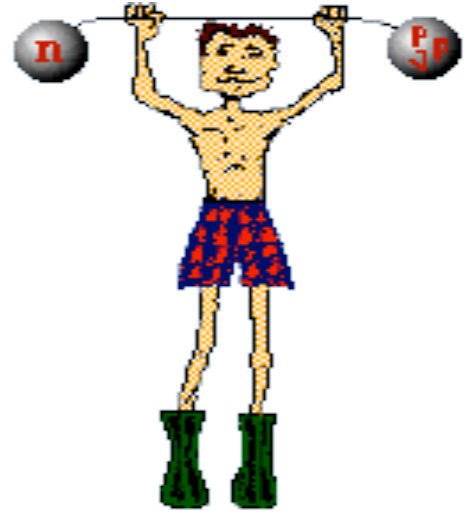


法拉第



## 3 弱相互作用

Beta 衰变  
Muon 衰变



时间尺度:  $10^{-12} \sim 10^3$  秒

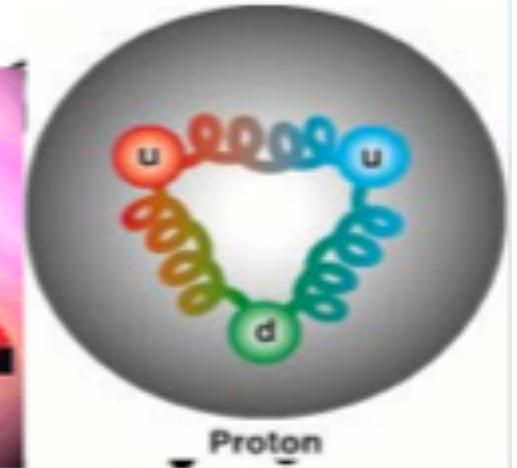
## 4 强相互作用

将核子紧紧  
结合起来

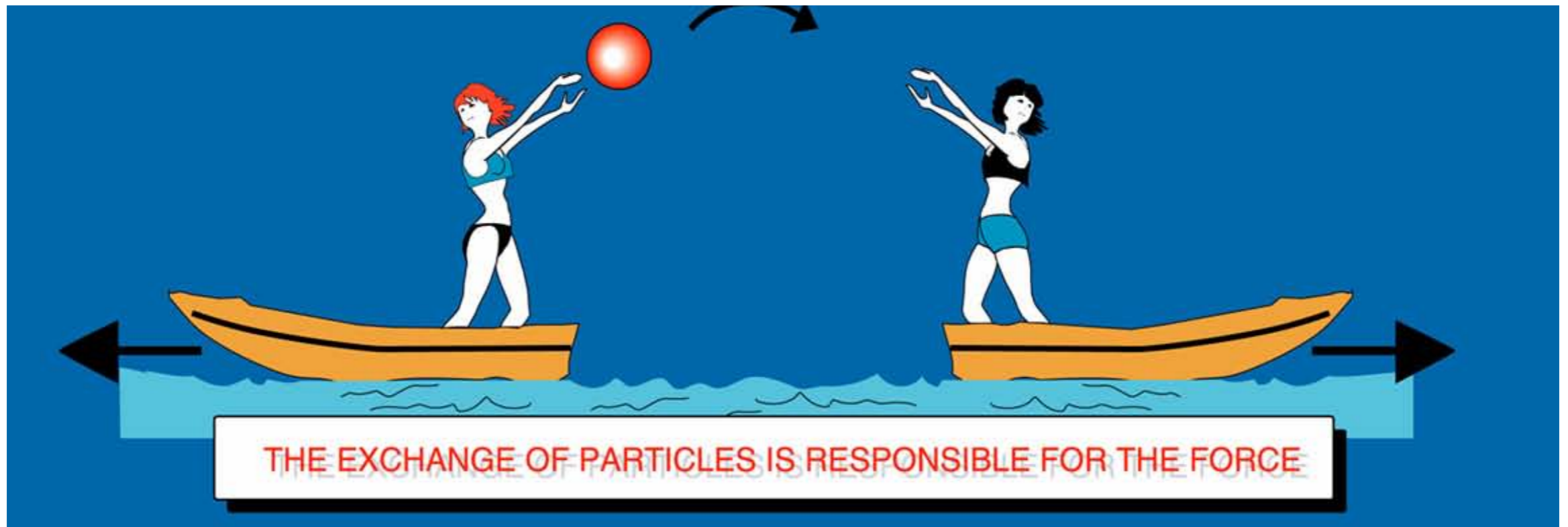


时间尺度:  $10^{-23}$  秒

# 相互作用传播子



	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





# 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)

强相互作用 (QCD)

胶子 (无质量) (1979)

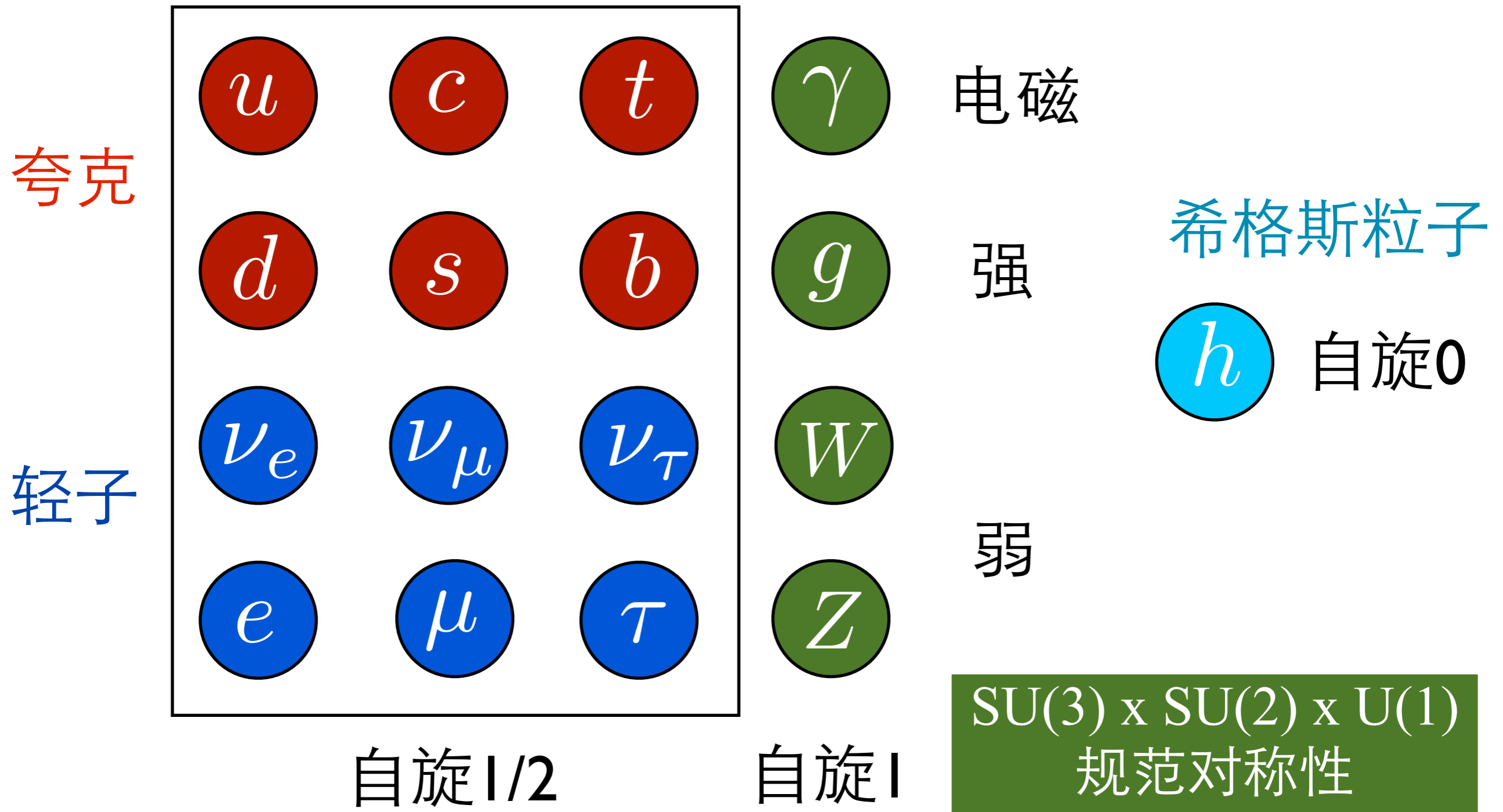
弱相互作用

$W^\pm$  和  $Z$  规范玻色子 (1983)

(有质量  $M_W = 80.4 \text{ GeV}$   $M_Z = 91.187 \text{ GeV}$   $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ )

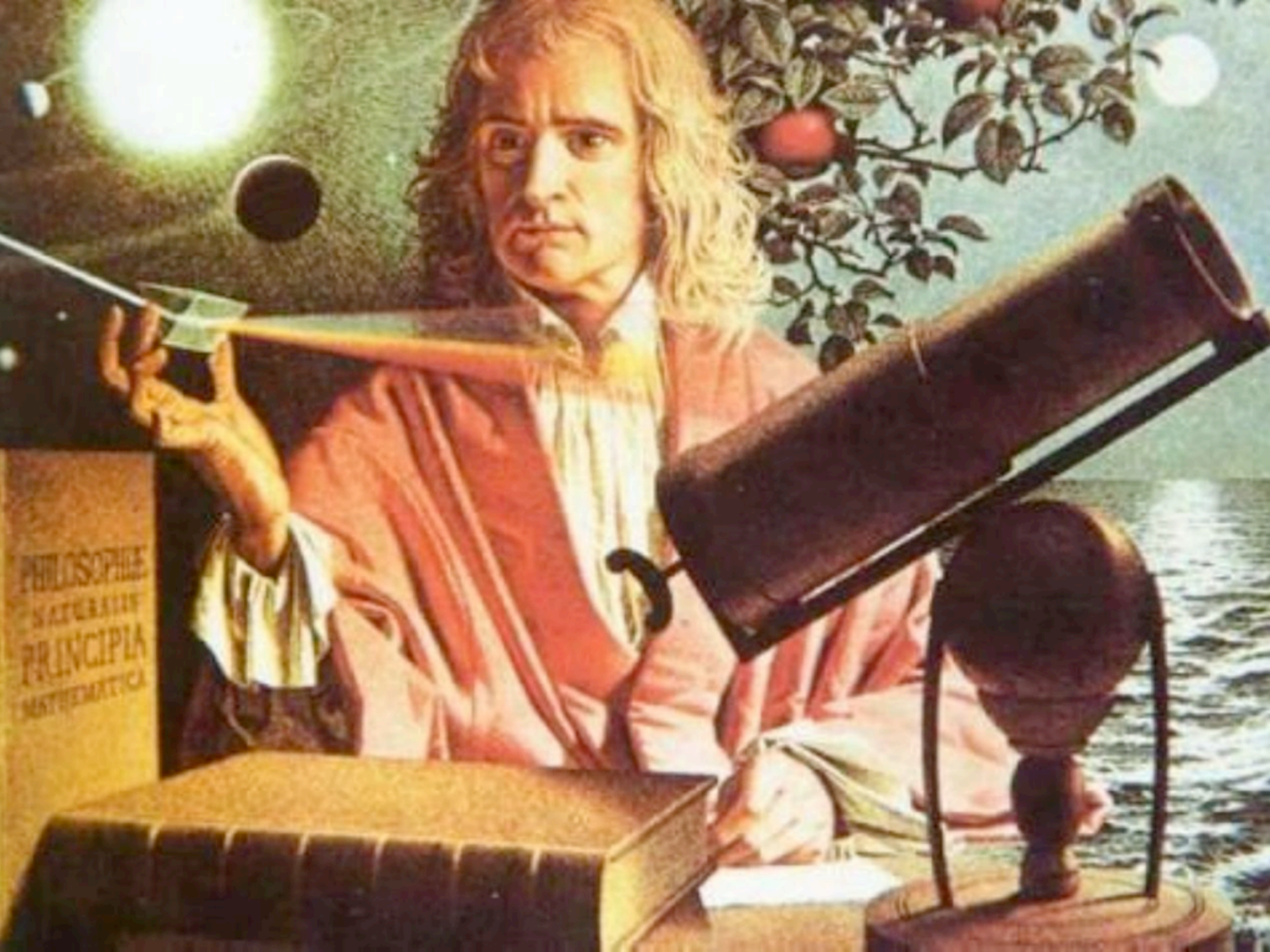
# 粒子物理的标准模型

已知基本粒子谱



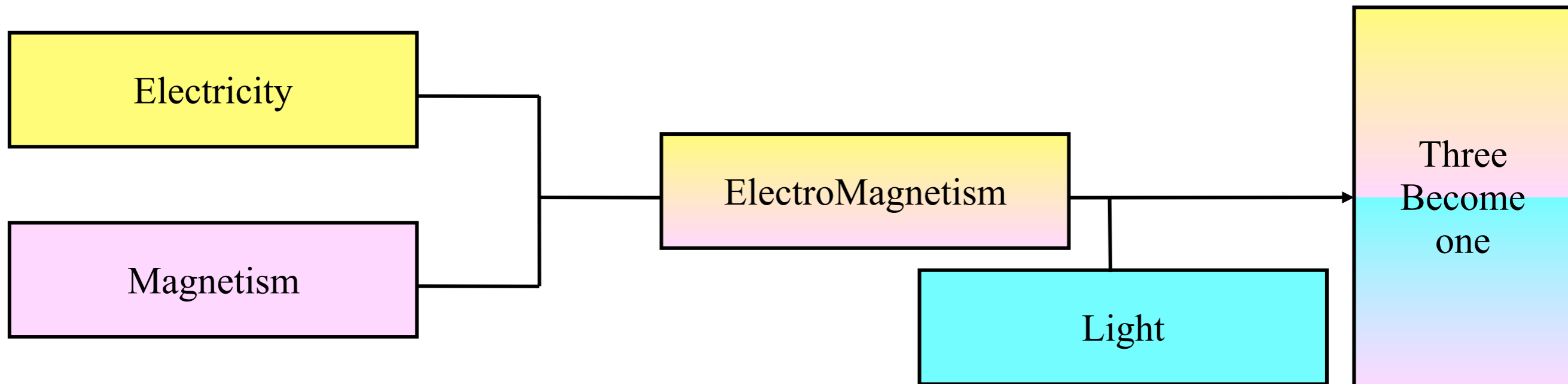
# 规范统一之路

*Is there an underlying simplicity  
behind vast phenomena in Nature?*



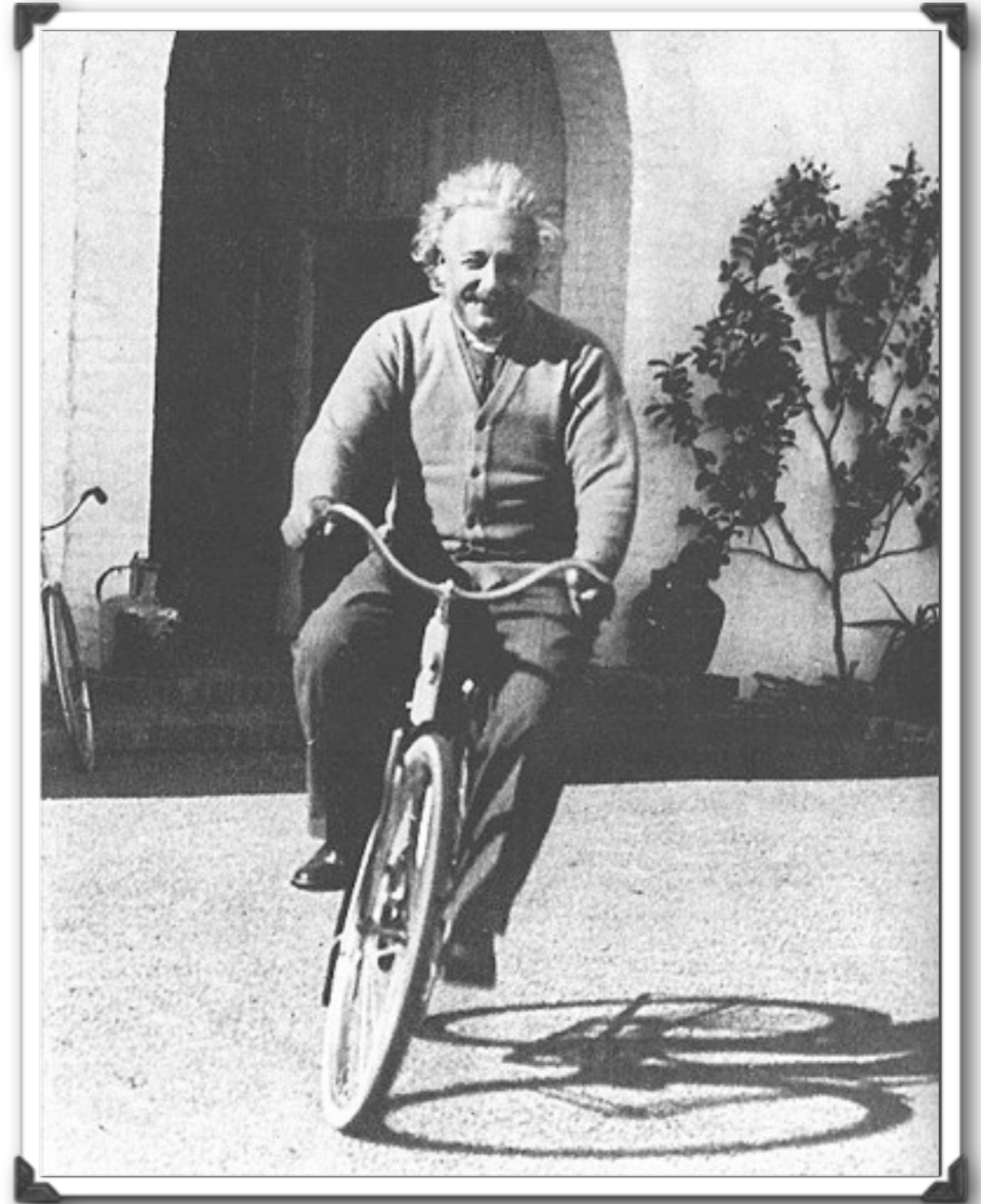
# 麦克斯韦：电磁学

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{D} &= \rho & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

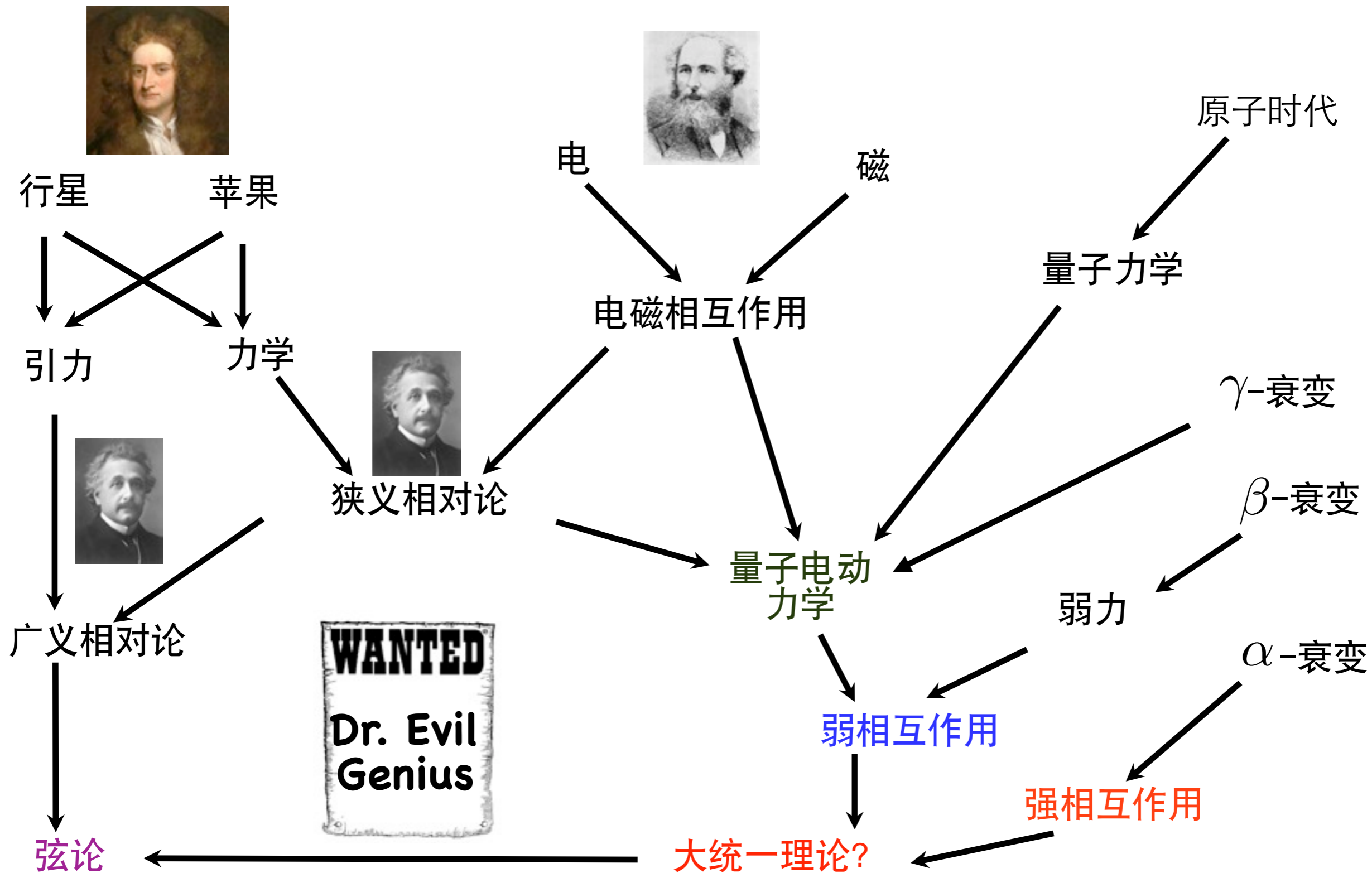


# 爱因斯坦的统一之梦

- *Einstein dreamed to come up with a unified description*
- *But he failed to unify electromagnetism and gravity (GR)*



# 物理统一之路



# 工具：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



# 标准模型的规范对称性

$SU(3)_{\text{Color}}$

QCD

(Strong Interaction)

$\otimes SU(2)_{\text{Left}} \otimes U(1)_{\text{Hyper charge}}$

WEAK  $\oplus$  QED

Unification of  
Weak and Electromagnetic

对称性自发破缺

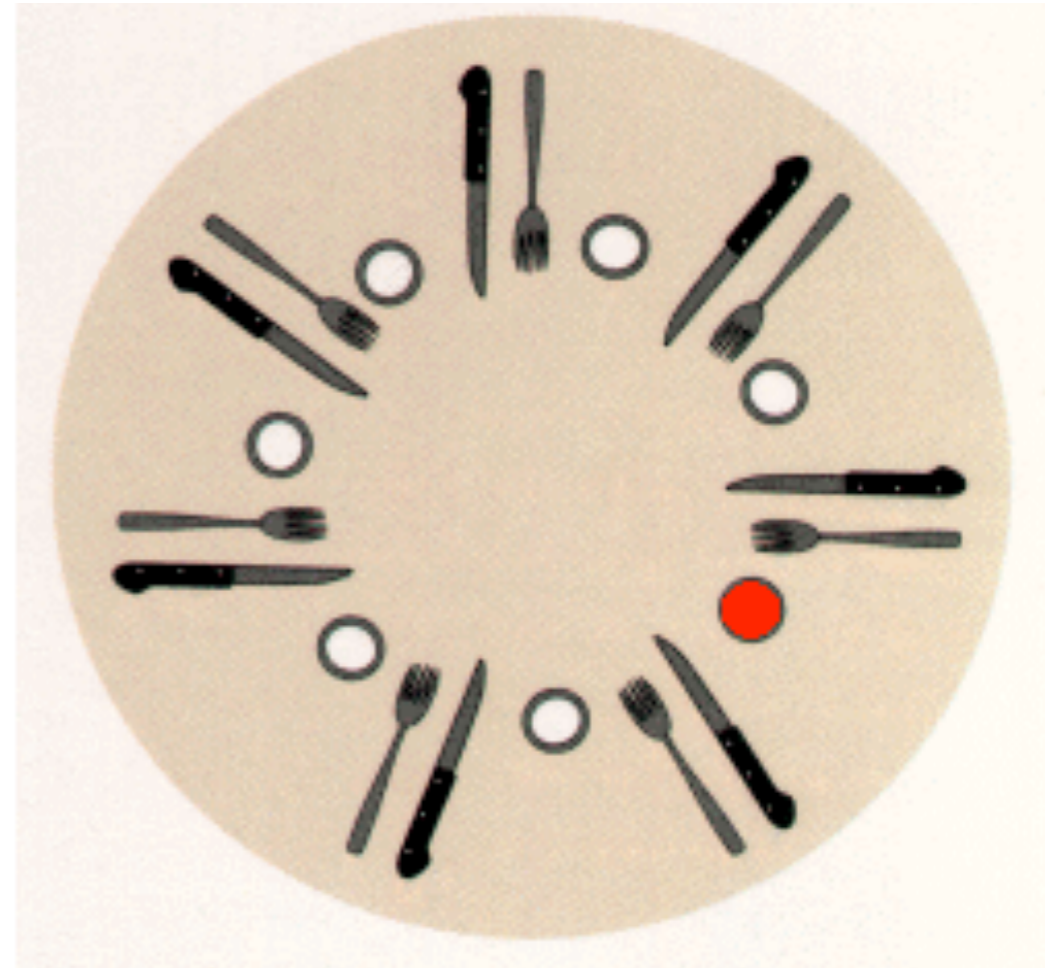
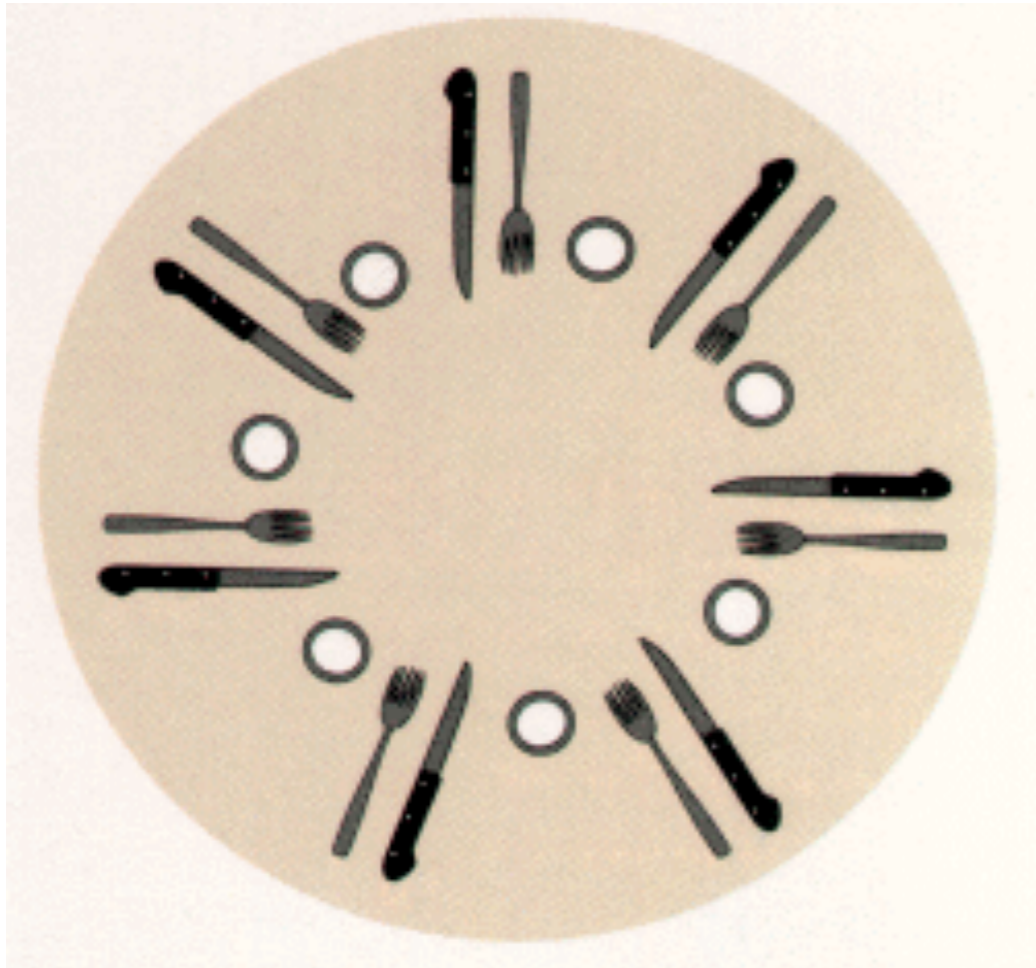
(希格斯机制)



$U(1)_{\text{E.M.}}$

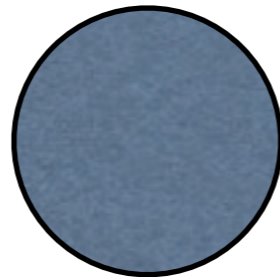
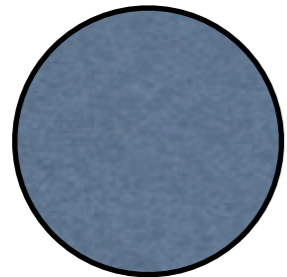
量子电动力学  
(电磁相互作用)

# 对称性自发破缺

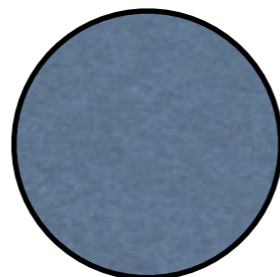
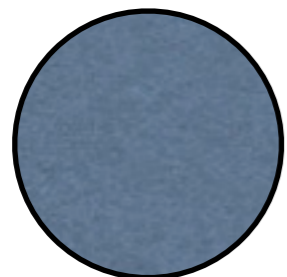


# 对称性自发破缺

(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)

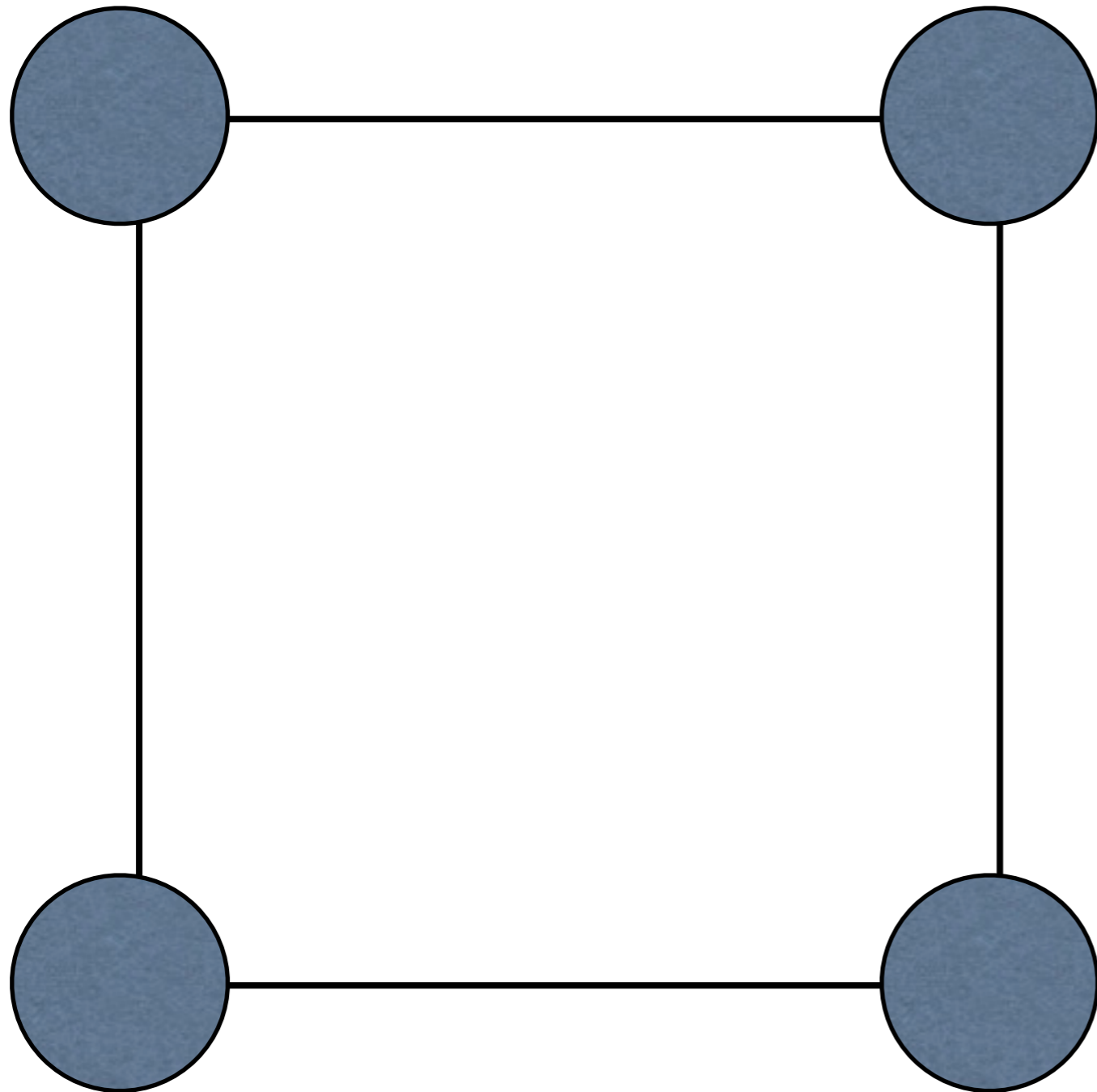


将4个城市  
联系起来  
所需的  
最小路径?



# 对称性自发破缺

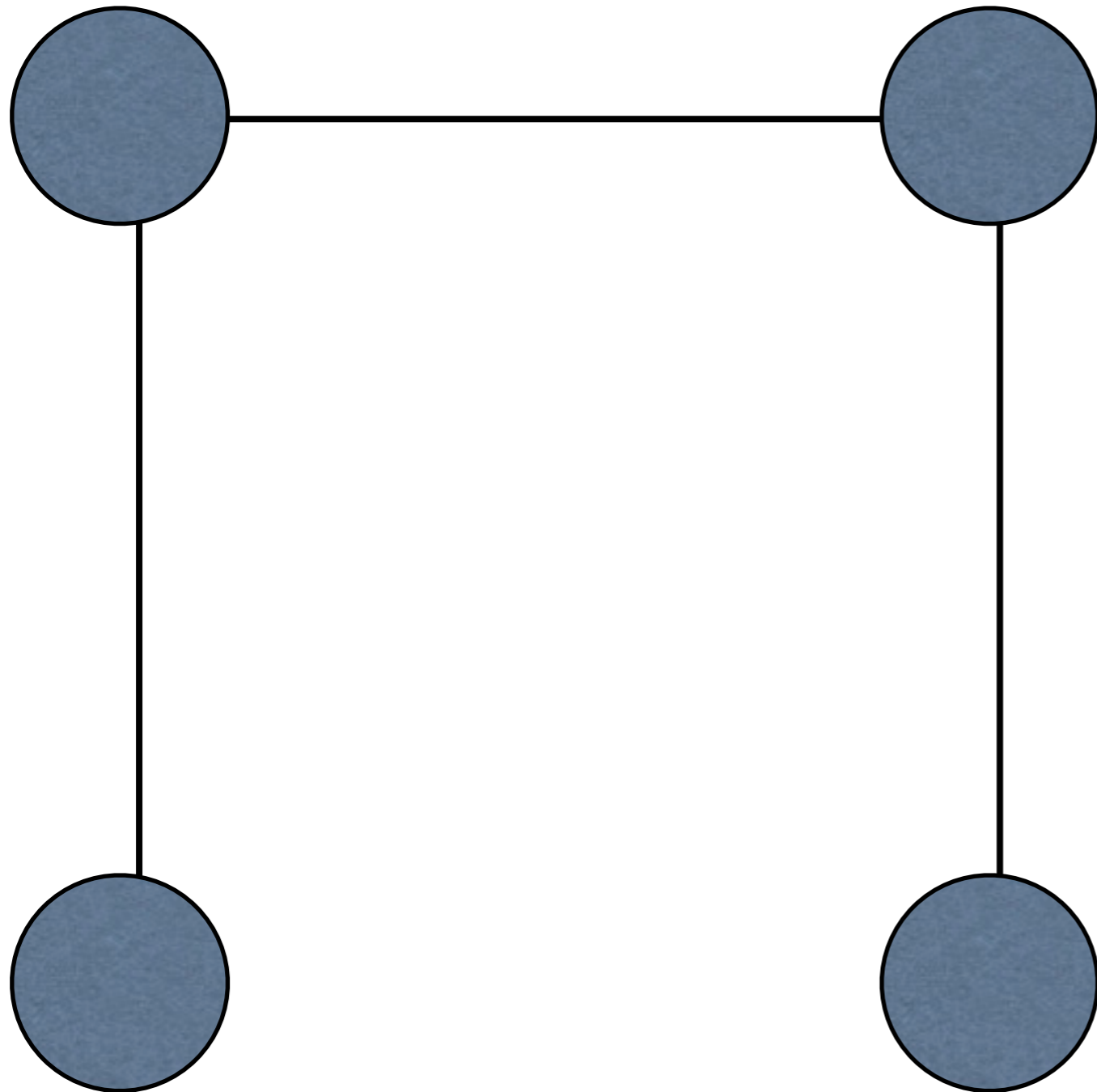
(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



需要花费  
4个单位

# 对称性自发破缺

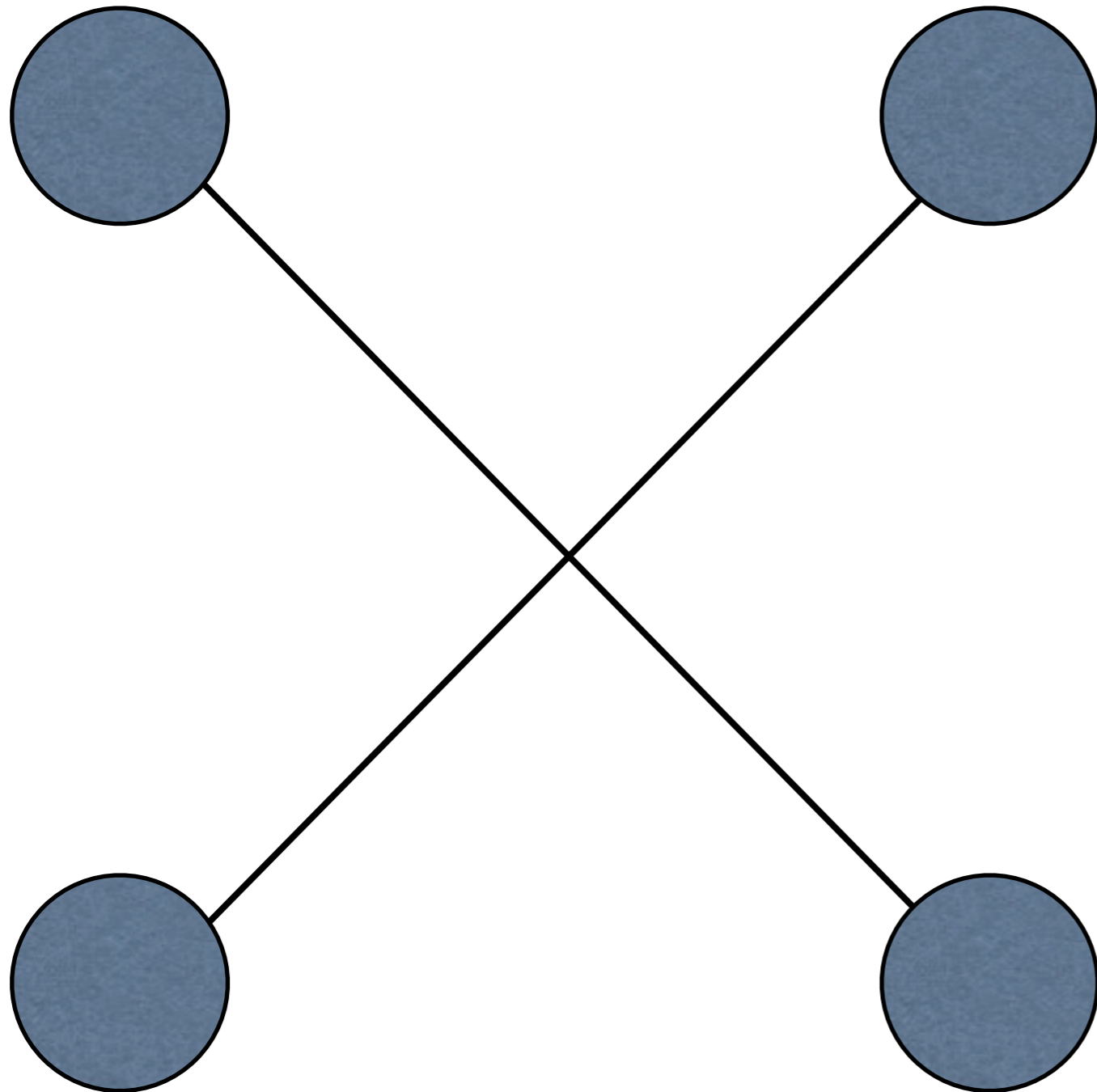
(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



需要花费  
3个单位

# 对称性自发破缺

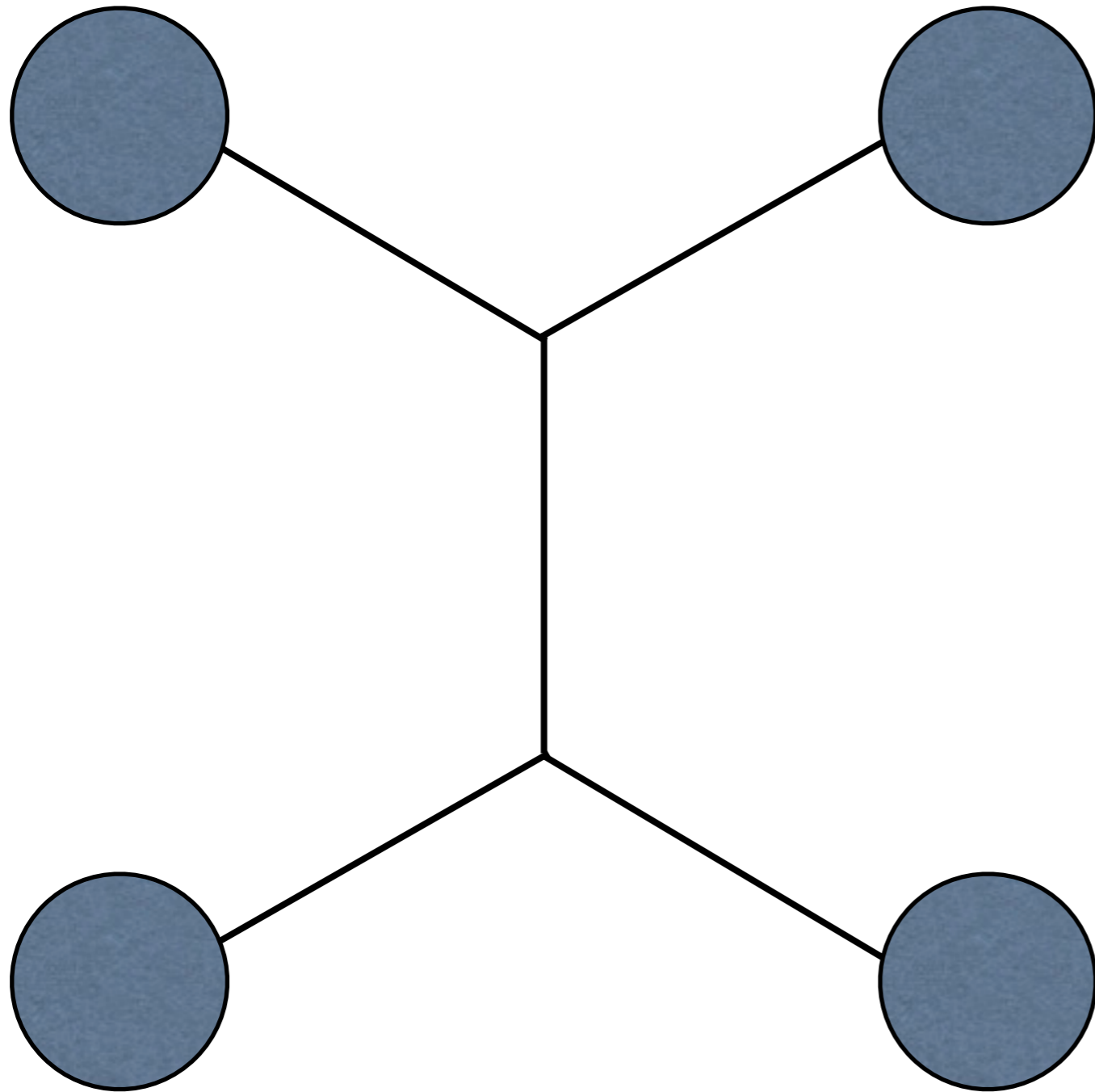
(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



需要花费  
 $2\sqrt{2}$  个单位

# 对称性自发破缺

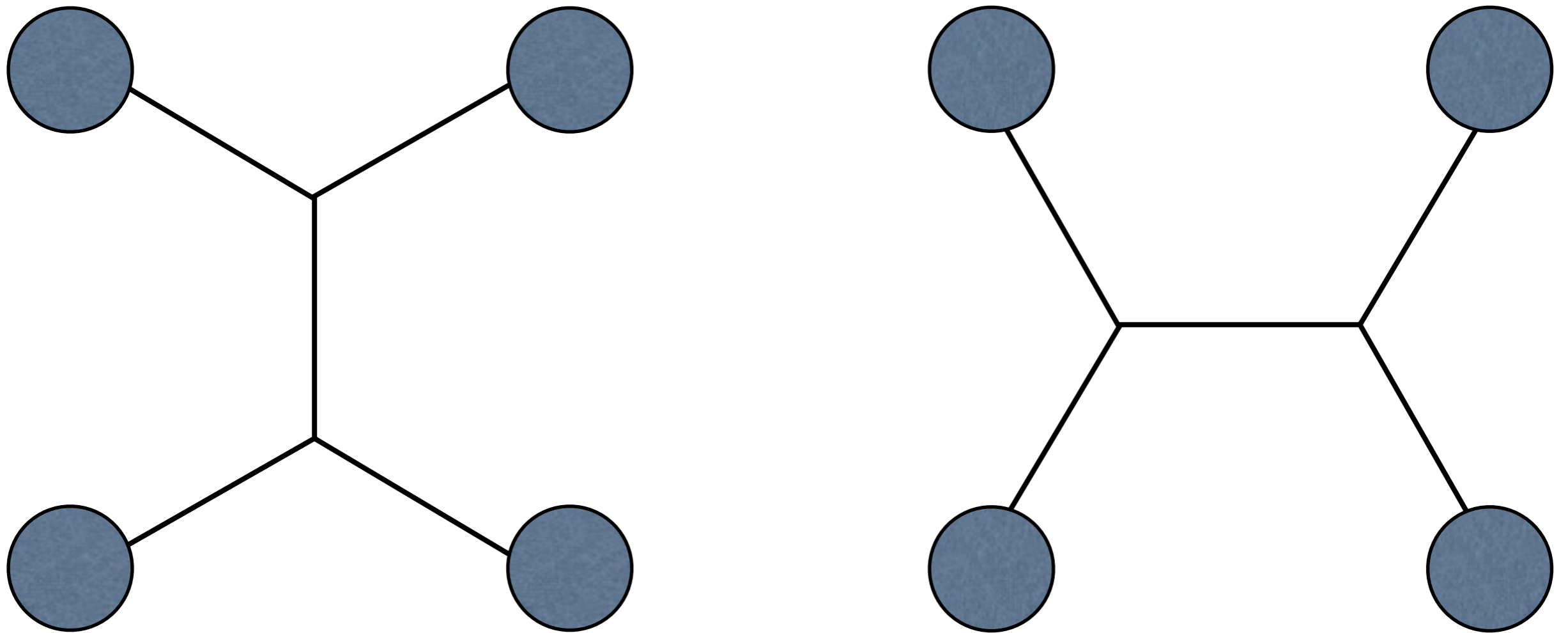
(具有高对称性的系统的解具有较低对称性)



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)

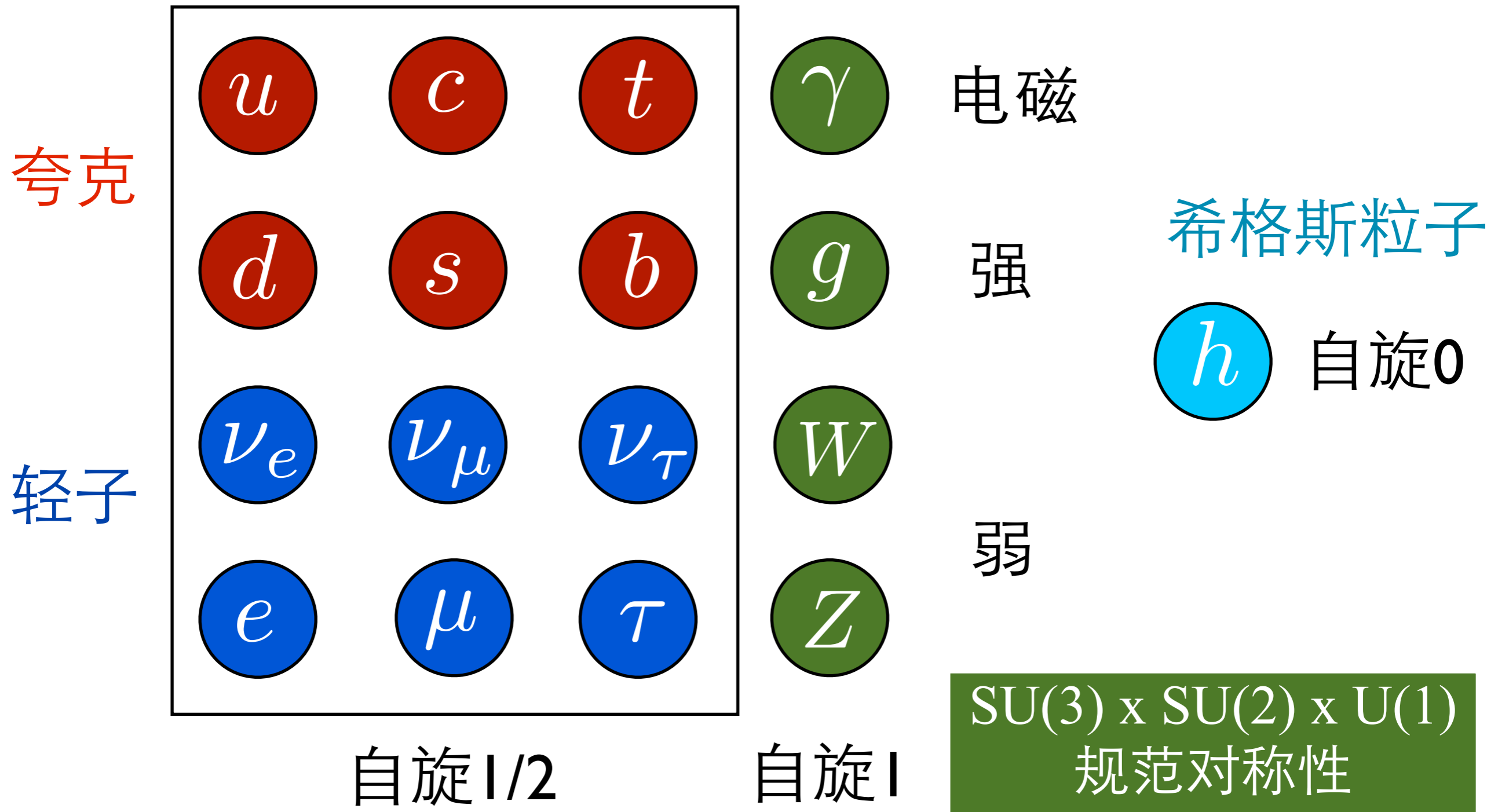


两种方案之和还具有原始对称性



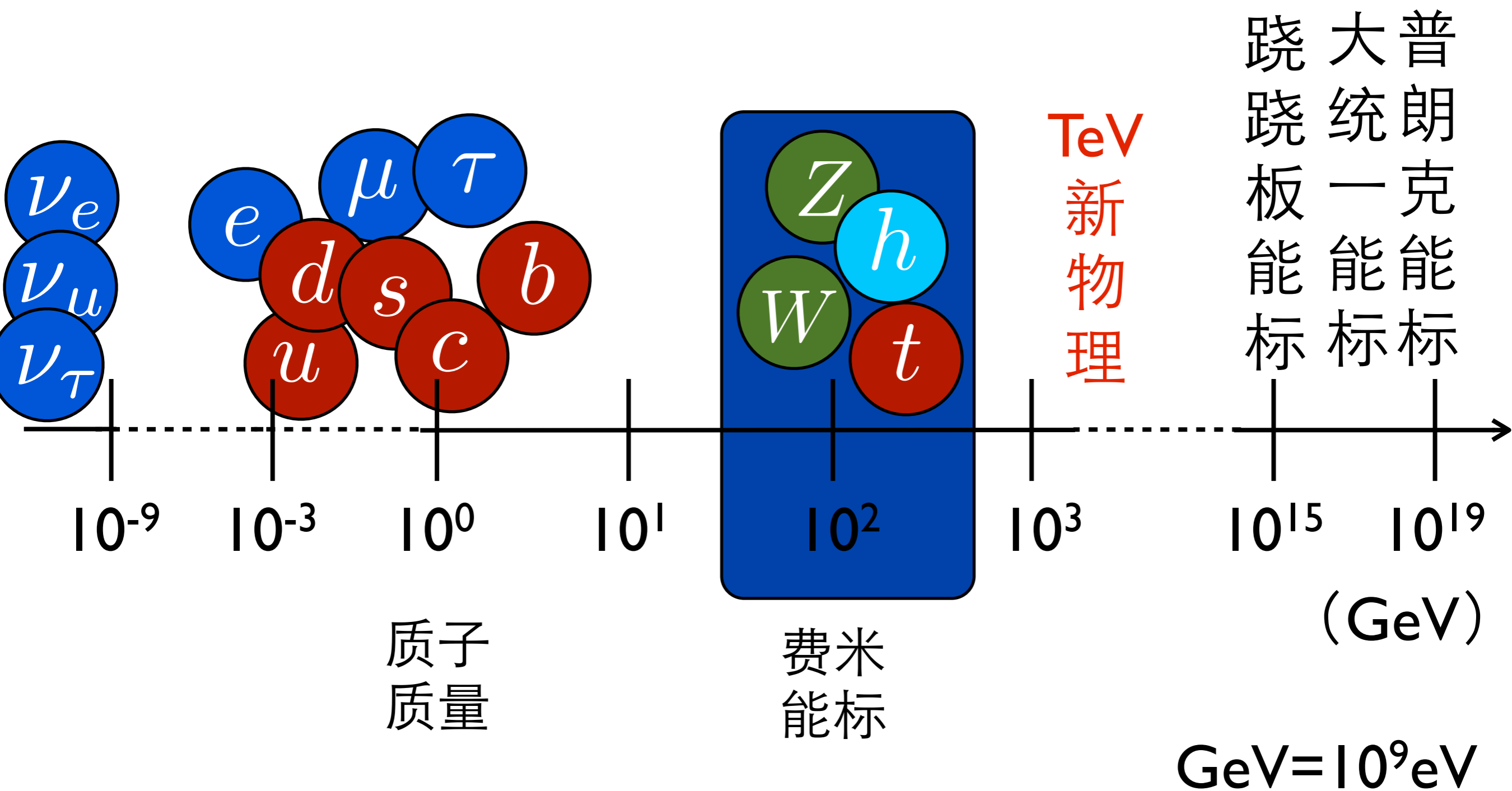
# 粒子物理的标准模型

已知基本粒子谱



# 标准模型中的两大疑难

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)



# 标准模型的希格斯机制

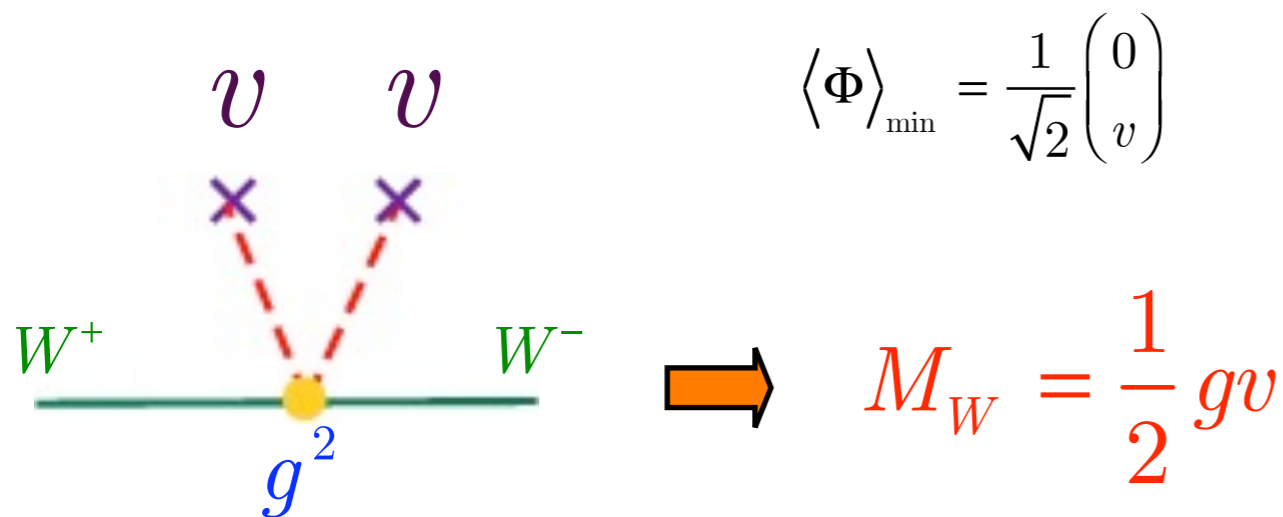
电弱对称性破缺起源 和 味对称性破缺起源  
( $W$  和  $Z$  质量) (费米子质量)

在标准模型中，这两种对称性破缺是  
通过引入一个基本的  
标量场 (希格斯玻色子)  
来实现

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

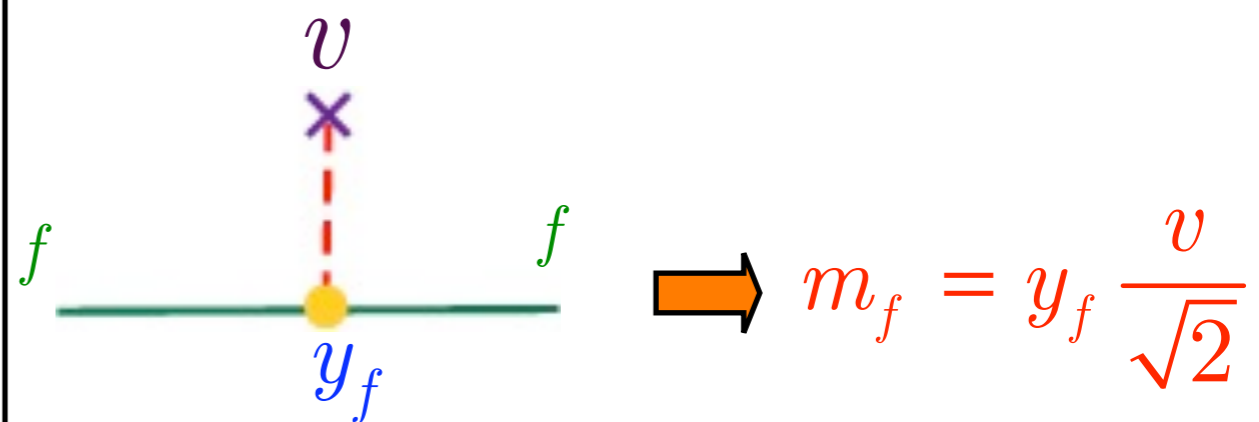
产生  $M_W$  和  $M_Z$

$$\mathcal{L}_\Phi = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

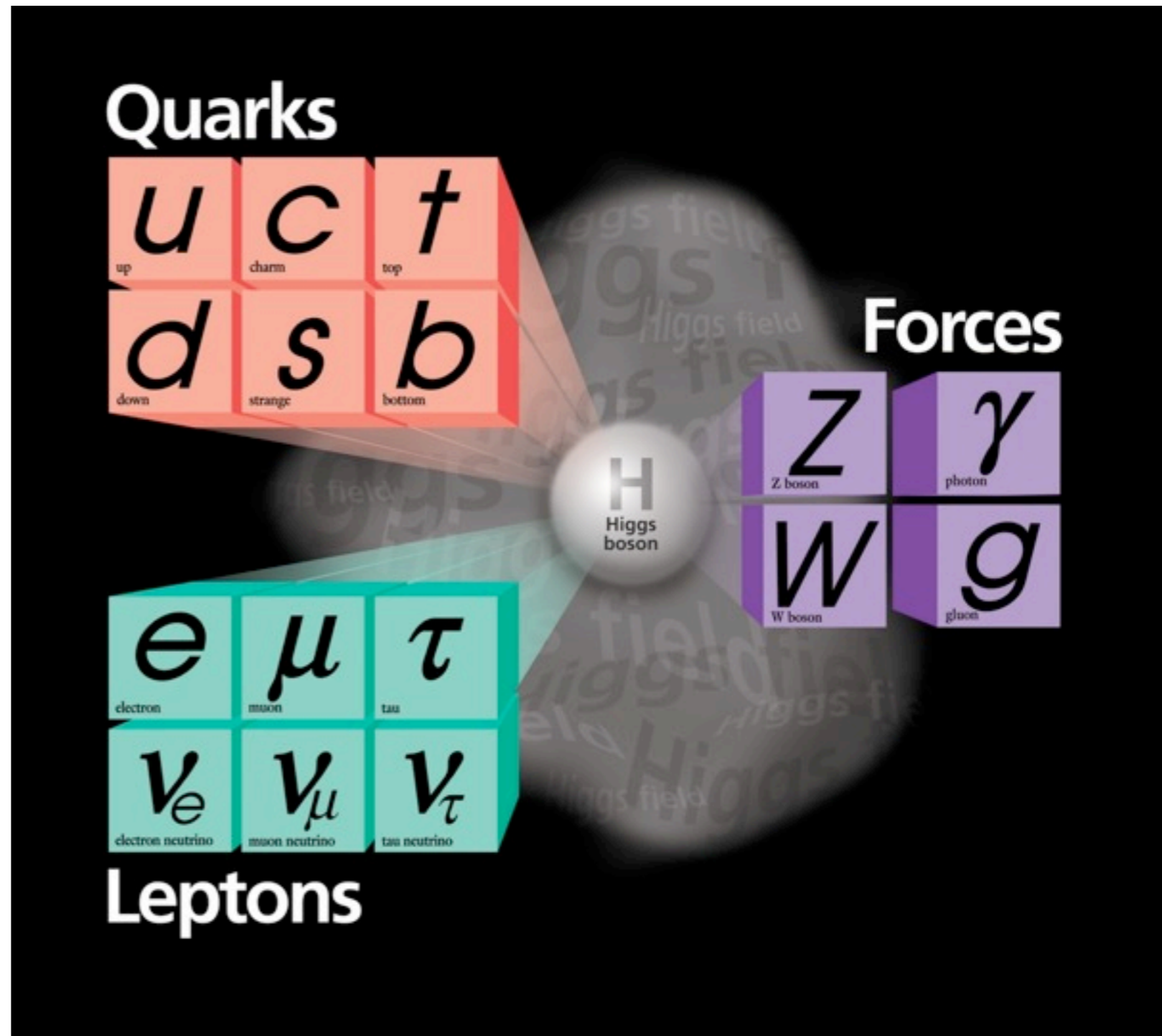
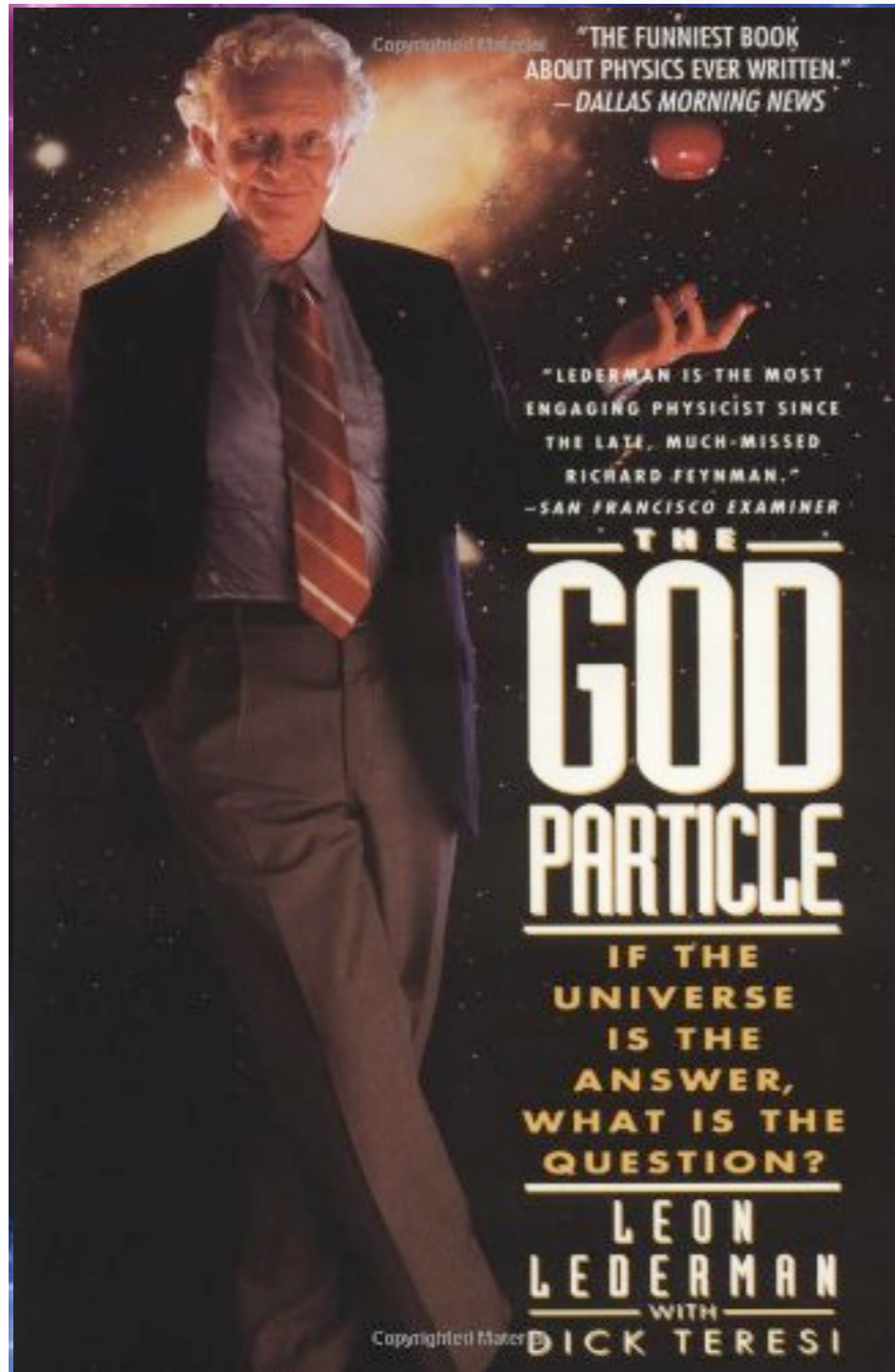


产生  $m_f$

$$y_f \bar{F}_L \Phi f_R + h.c.$$



# Higgs: the ~~Goddamn~~ Particle



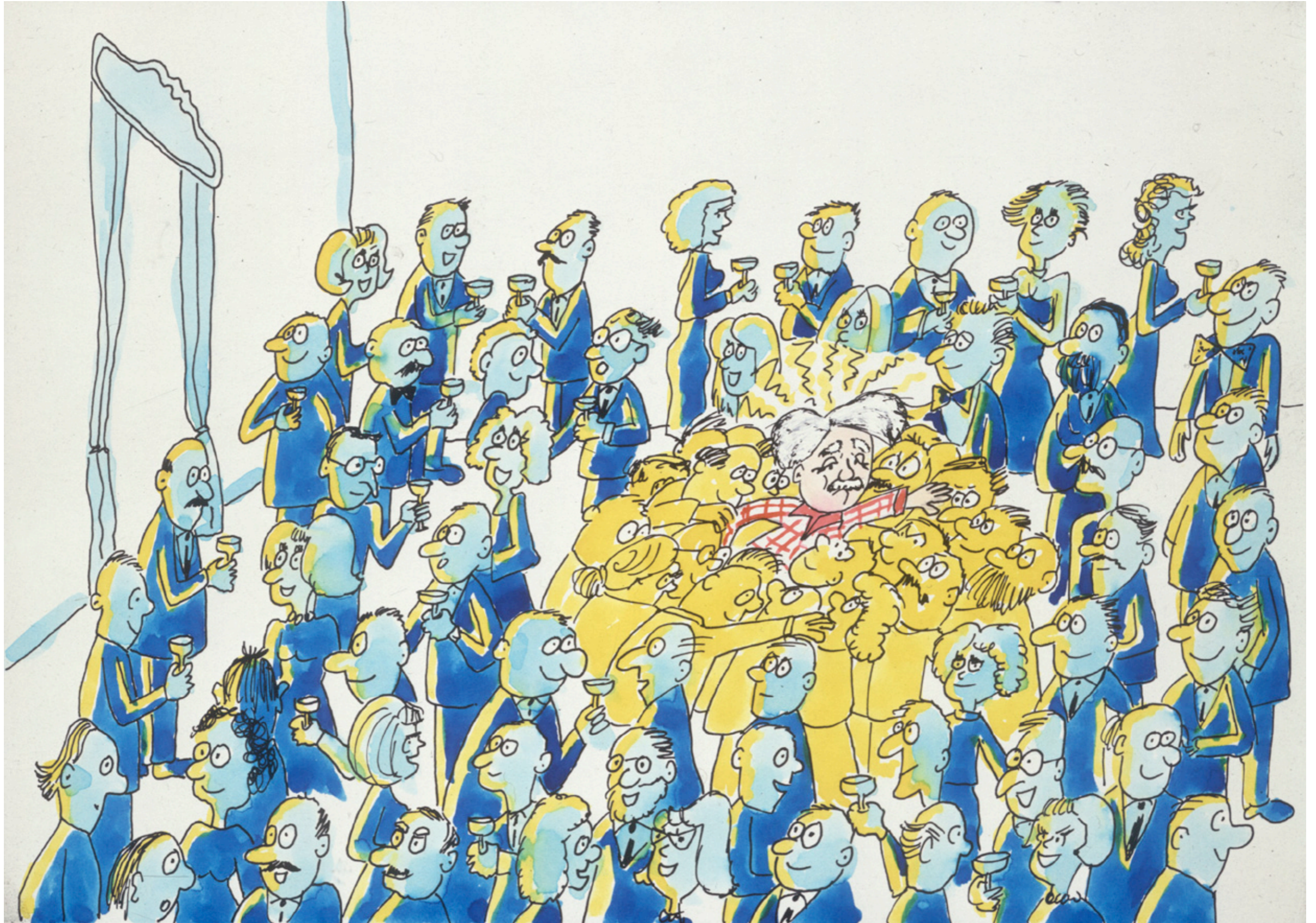
# 标准模型的希格斯机制



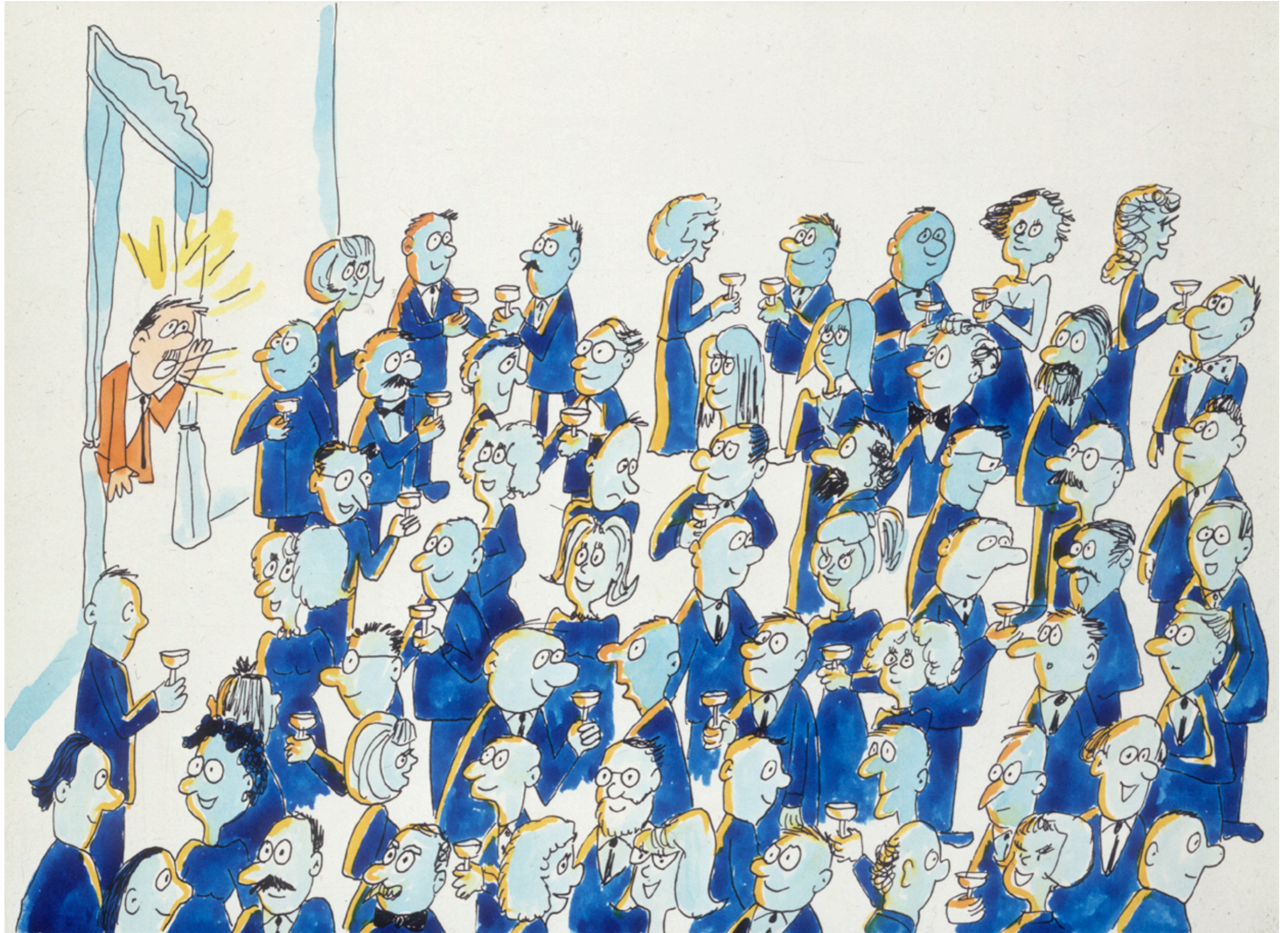
# 标准模型的希格斯机制



# 标准模型的希格斯机制



# 标准模型的希格斯机制





# 标准模型的希格斯机制



# 见证奇迹的历史时刻

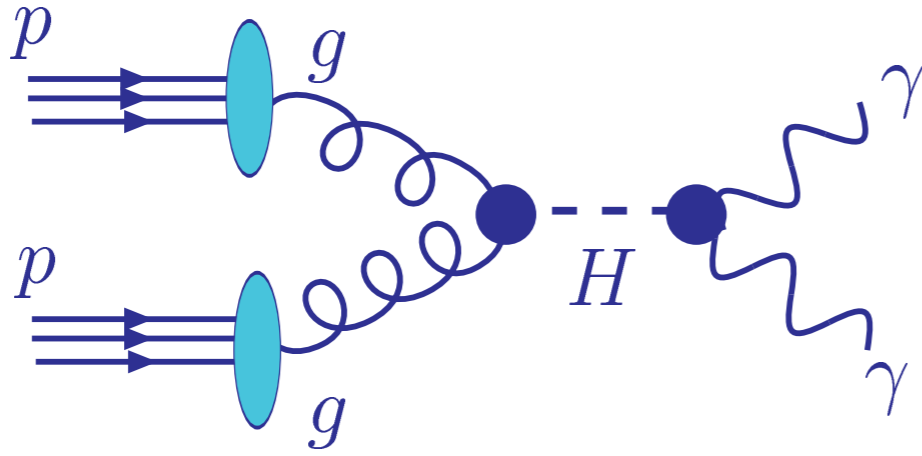
July 4<sup>th</sup>, 2012



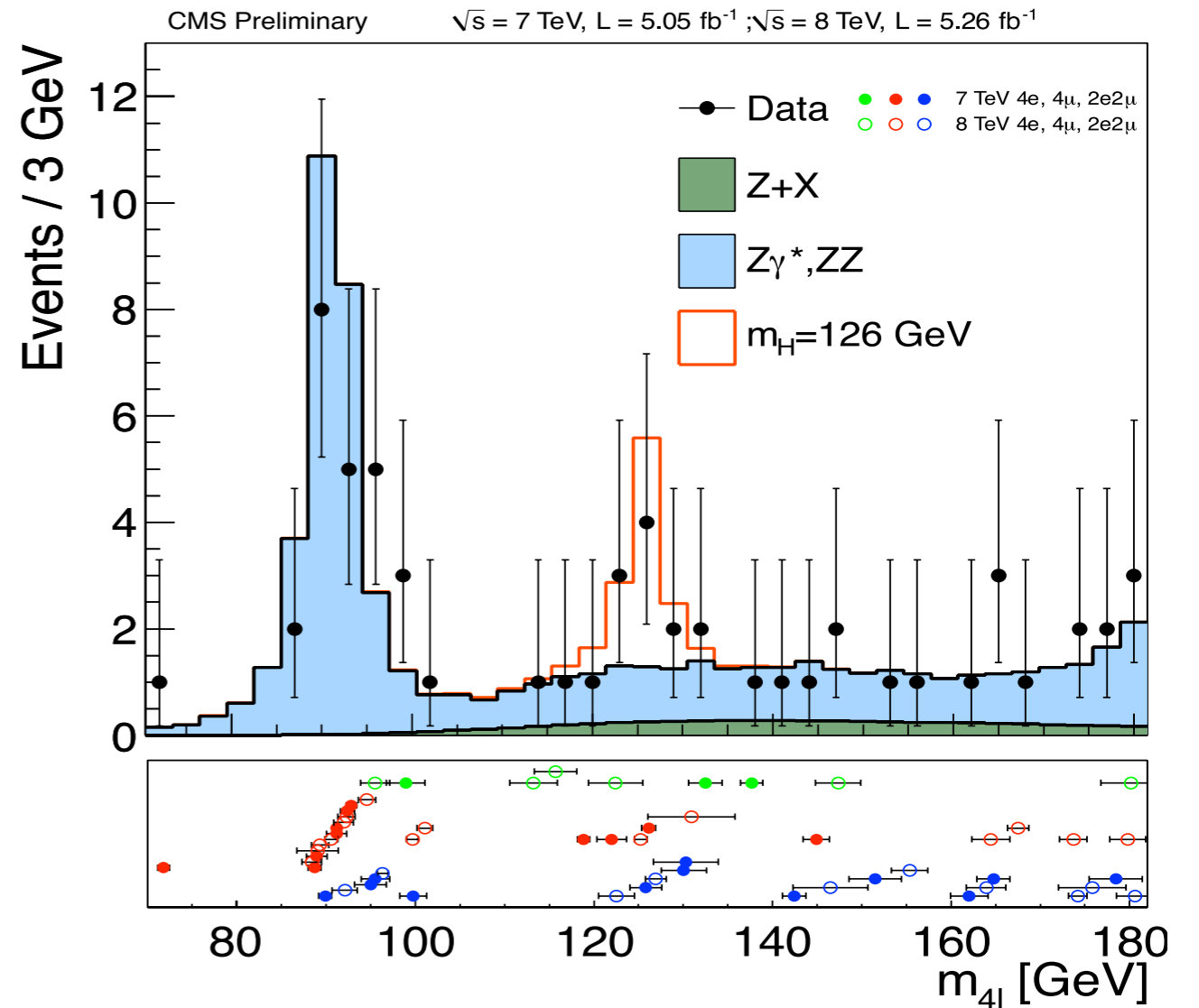
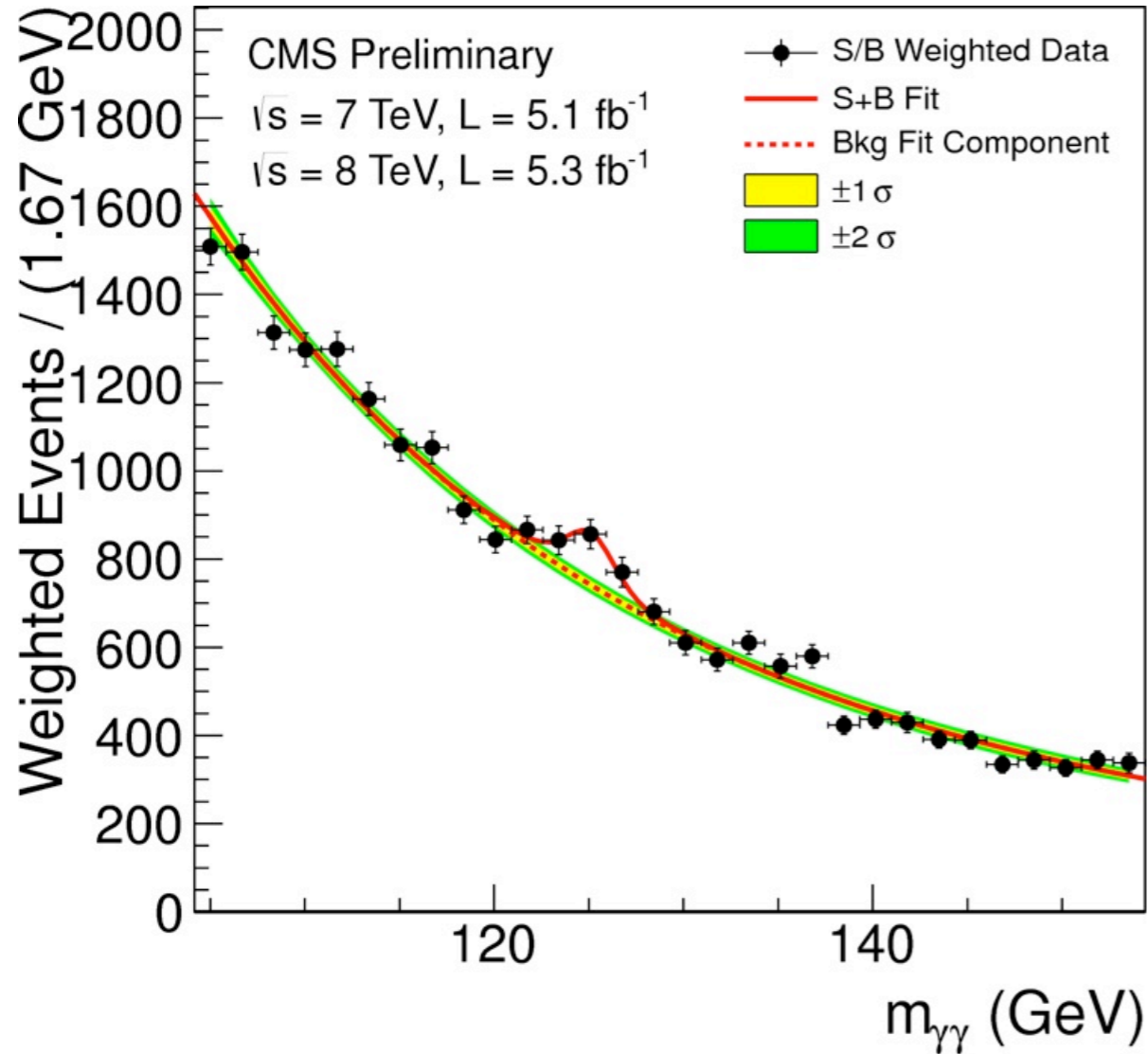
我们终于验证  
基本粒子的  
质量起源  
(1964 - 2012)



# 希格斯信号

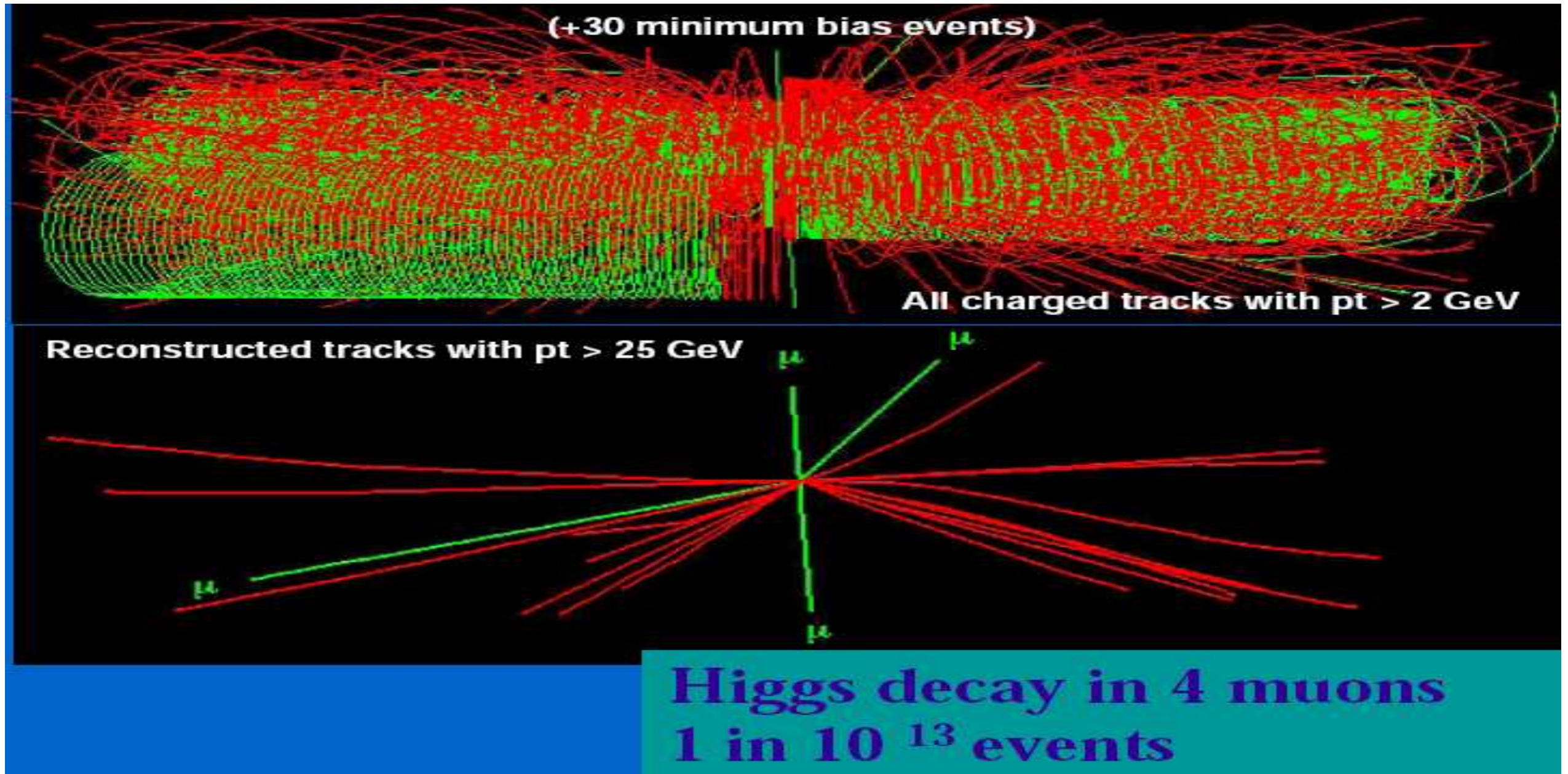


实验信号寻找  
末态两个光子的  
共振峰



# 耗时48年?! 为什么?

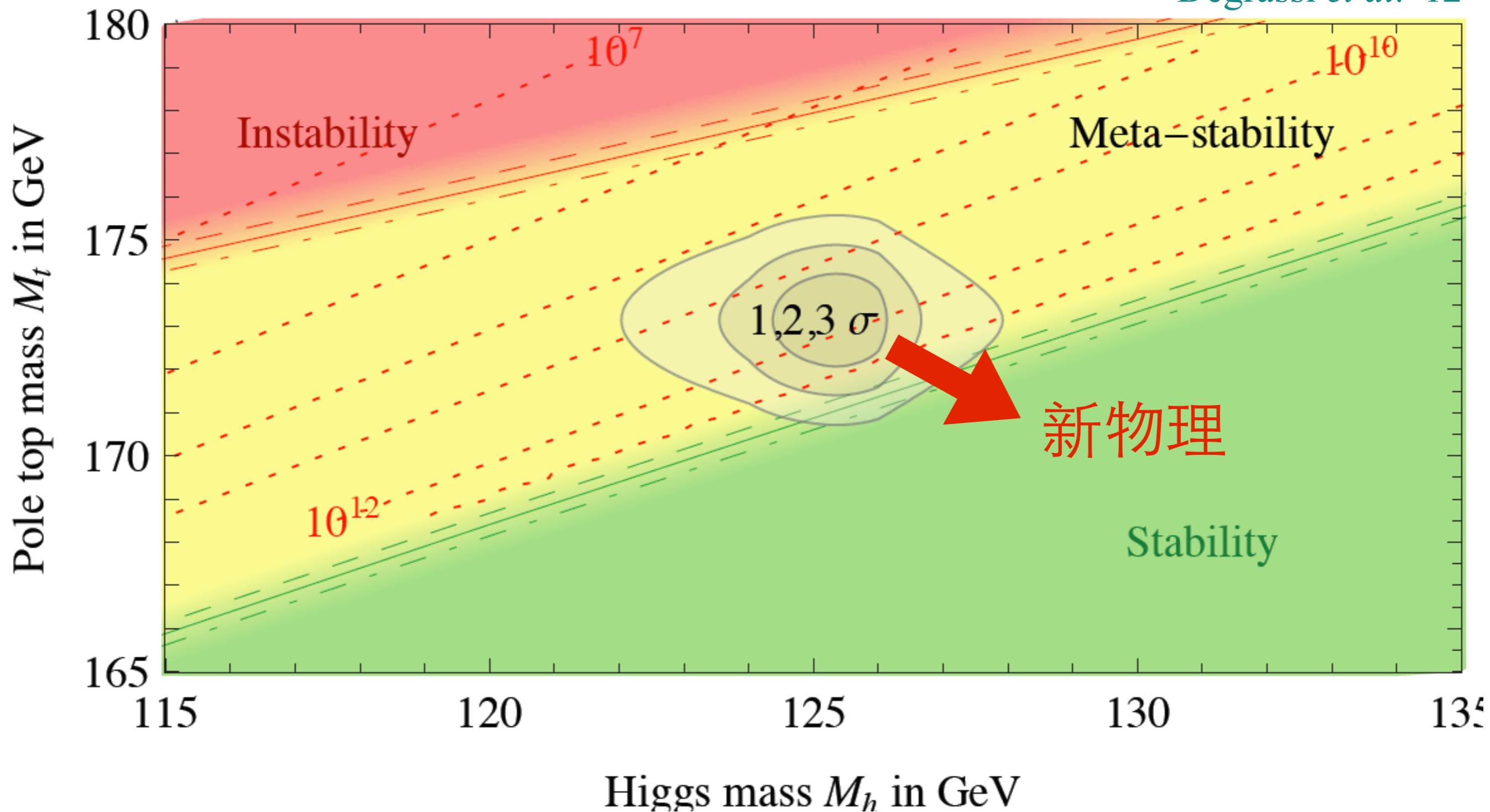
一个希格斯粒子产生和衰变的事例



# 希格斯粒子和真空稳定性

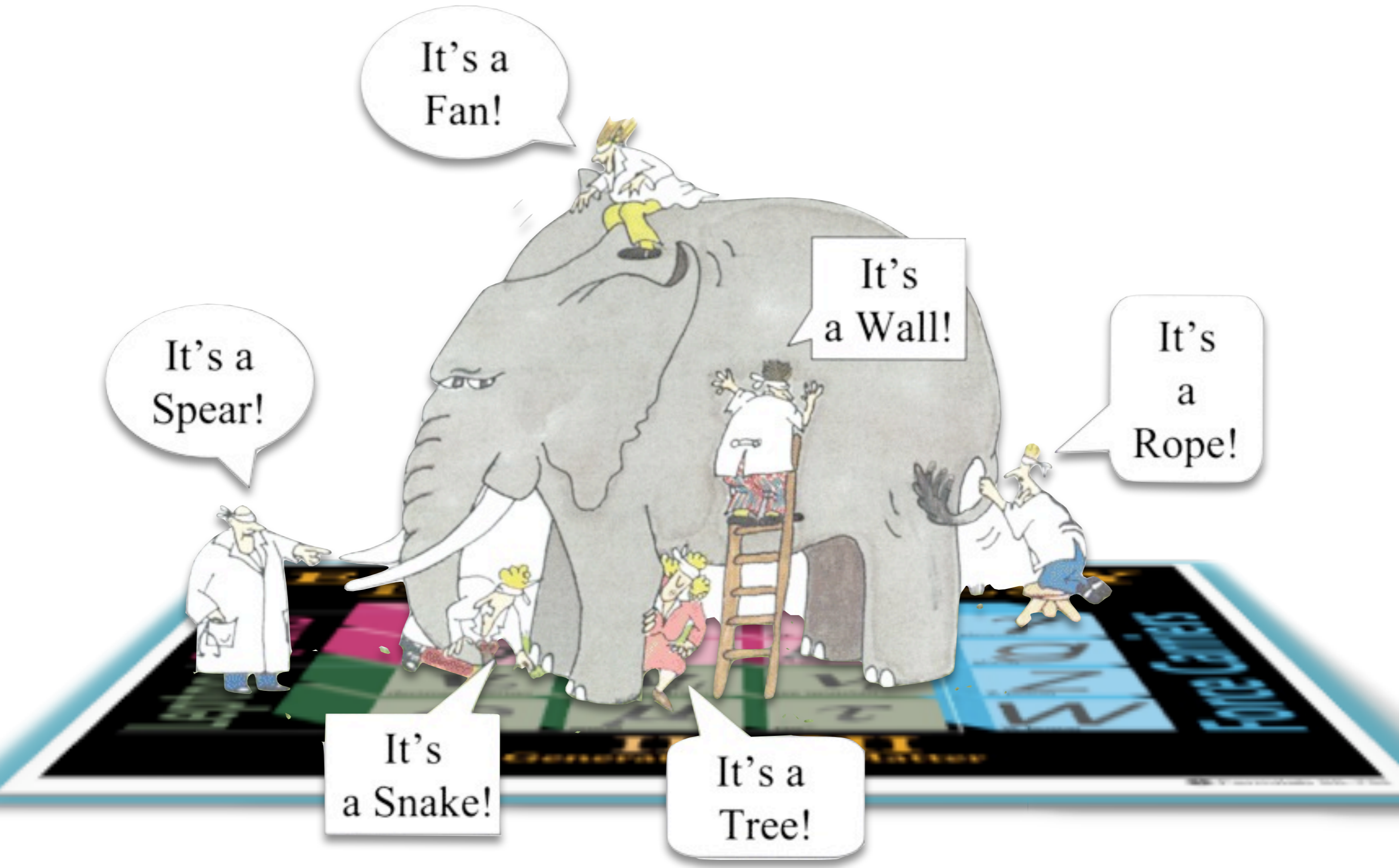
$$m_H \simeq 125 \text{ GeV}$$

Degrassi *et al.* '12

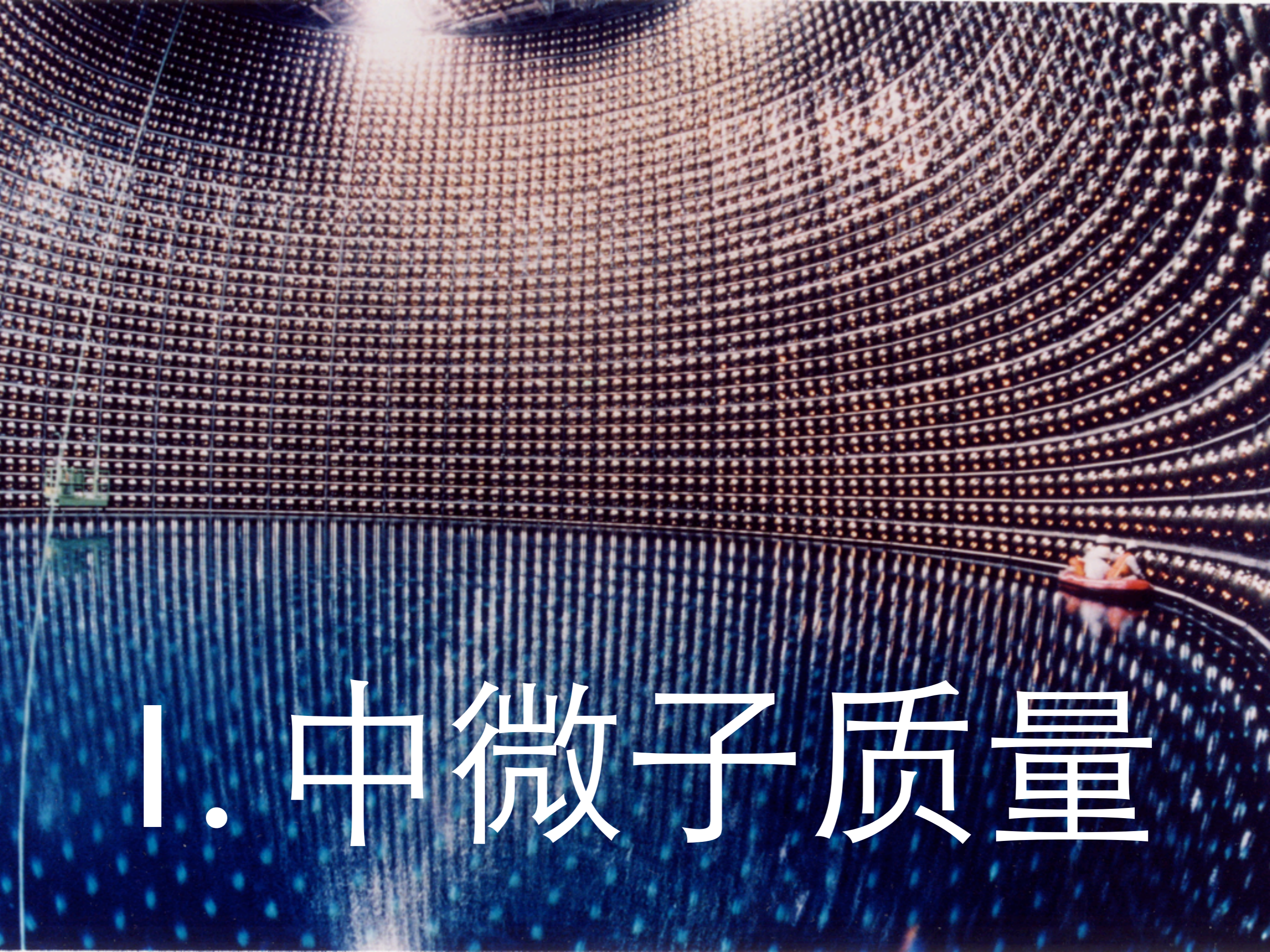


超出标准模型  
之外的新物理

# 新物理探索：盲人摸象







# I. 中微子质量

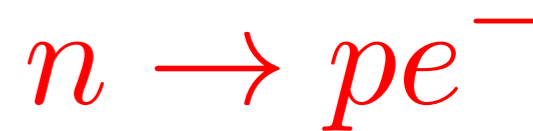
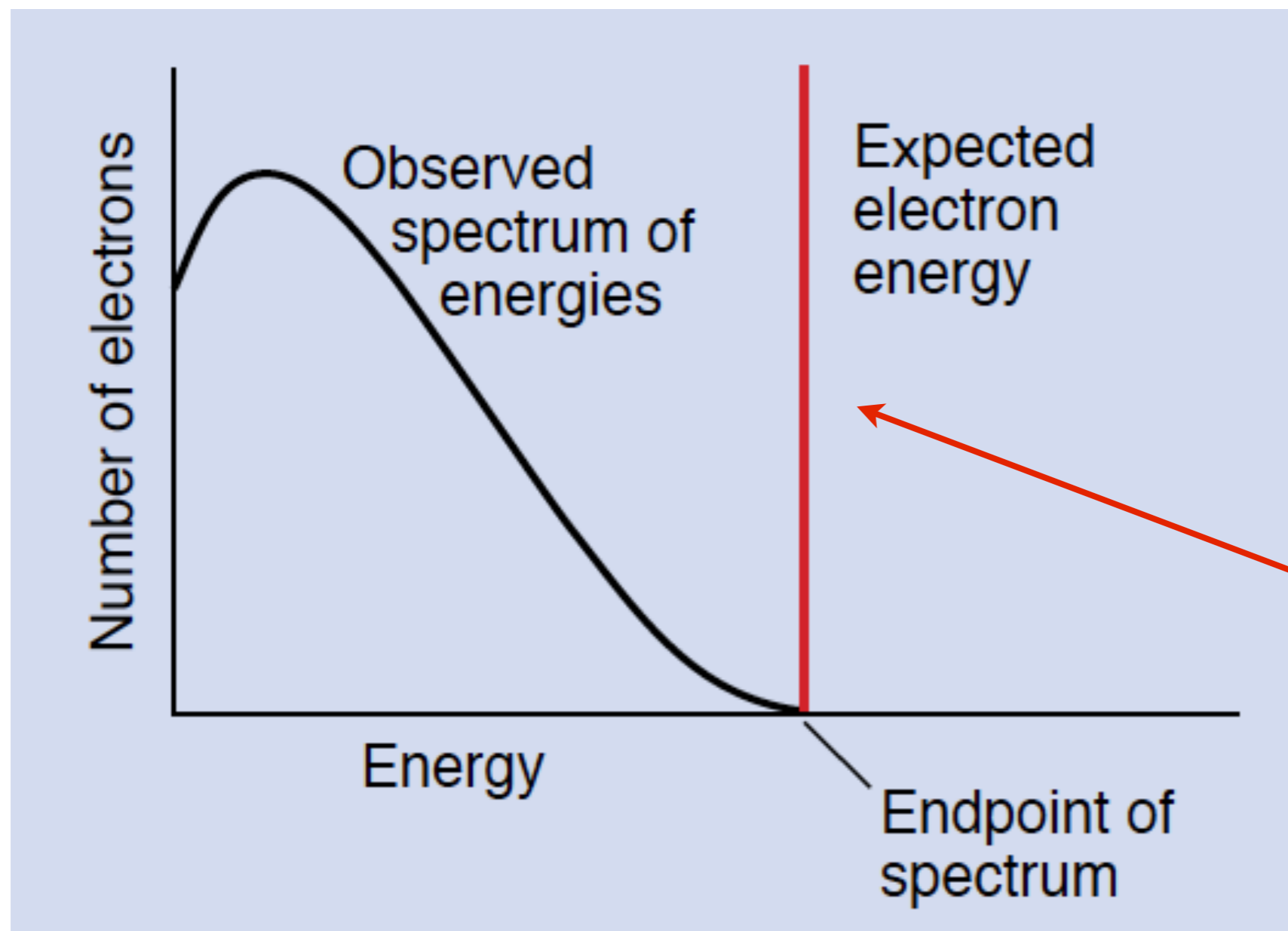
# 泡利和中微子



Beta-衰变



(1930)



# 泡利和中微子



## 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

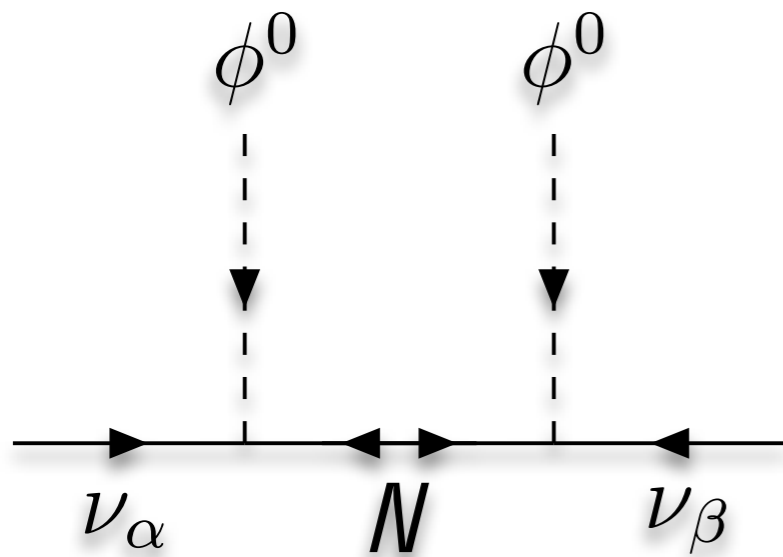
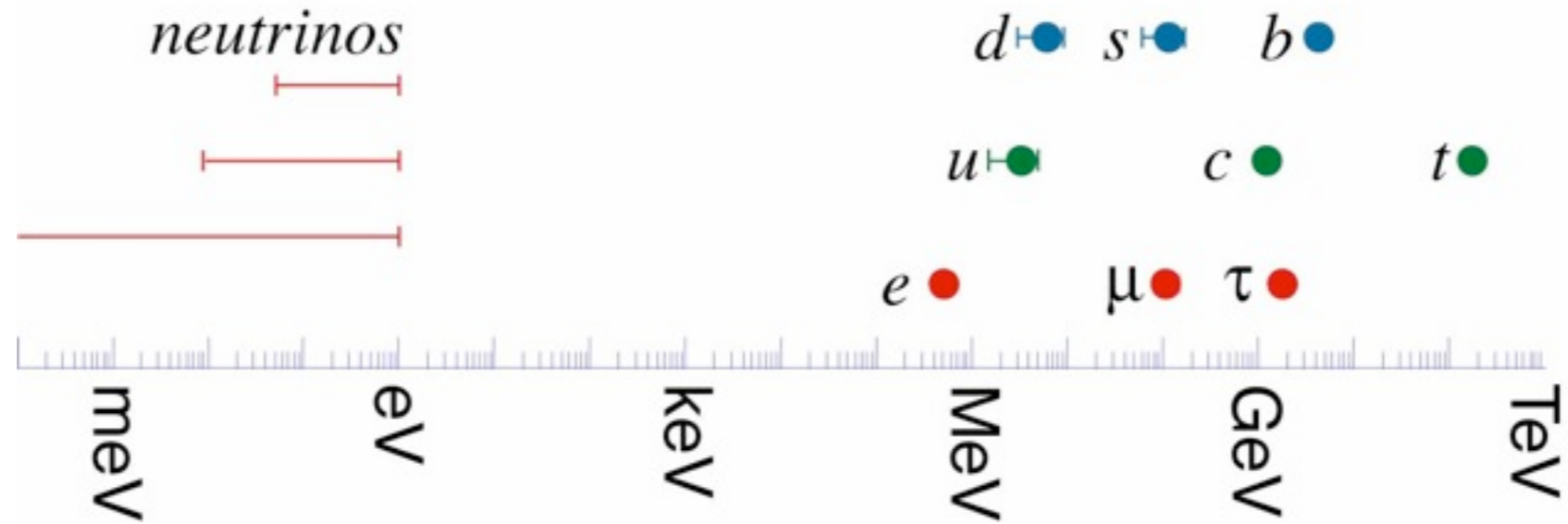
Dear radioactive ladies and gentlemen,

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-

# 中微子历史

- 1930 泡利猜测存在一个中性粒子——Neutron (中子)
- 1932 查德威克发现中子
- 1933 费米将泡利的“neutron”改为“Neutrino”
- 1956 Reines和Cowan发现了中微子
- 1957 Bruno Pontecorvo建议中微子“震荡”
- 1962 Steinberger, Lederman和Schwartz发现  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$
- 1968 发现太阳中微子“丢失”
- 1975 Perl和Reines发现Tau轻子
- 1998 日本Super-Kamiokande实验发现中微子震荡
- 2000 费米实验室的DONUT合作组发现Tau-中微子

# 中微子质量起源



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



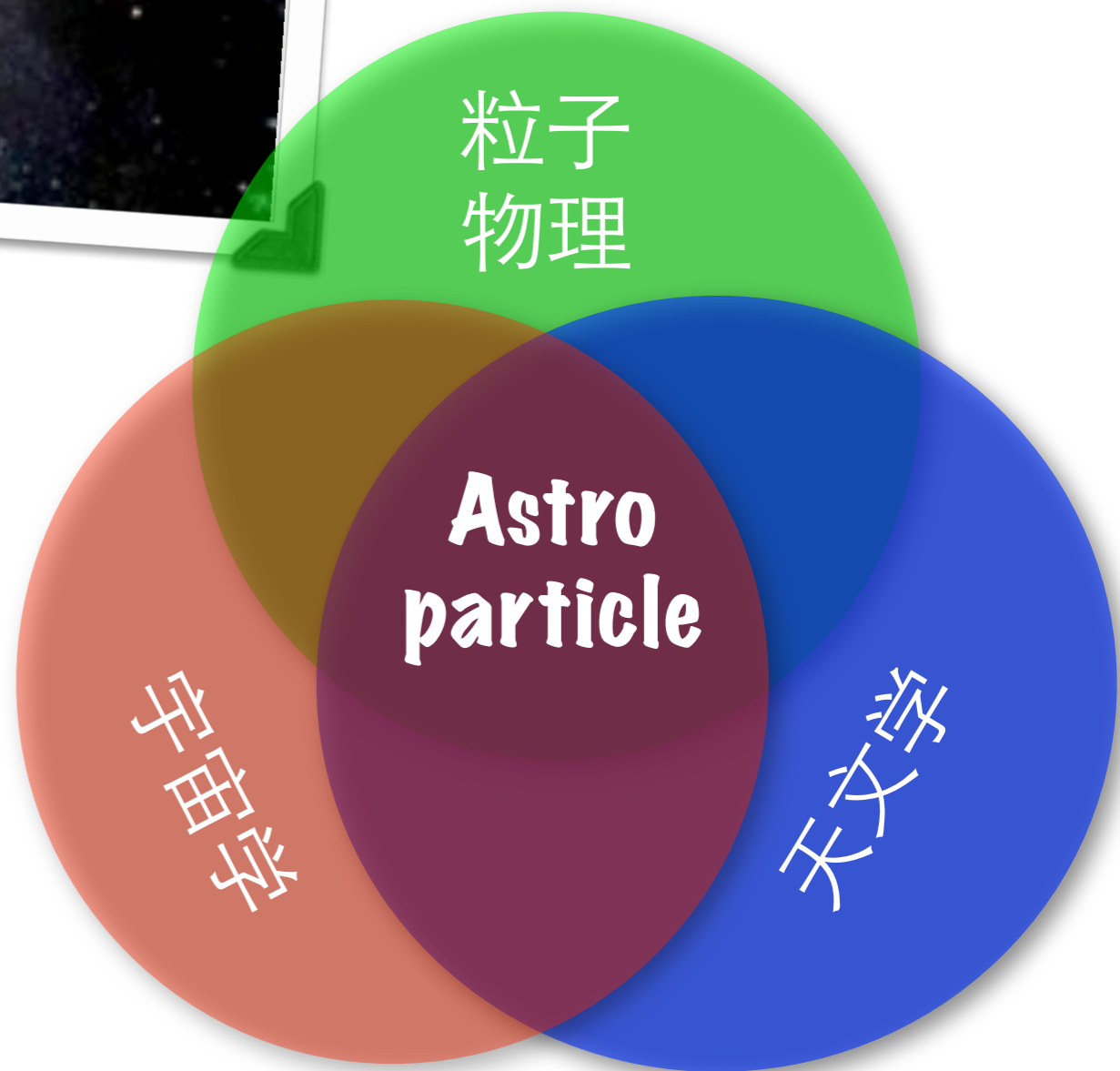
跷跷板机制也意味着  
中微子是一个通向更高能标的窗子



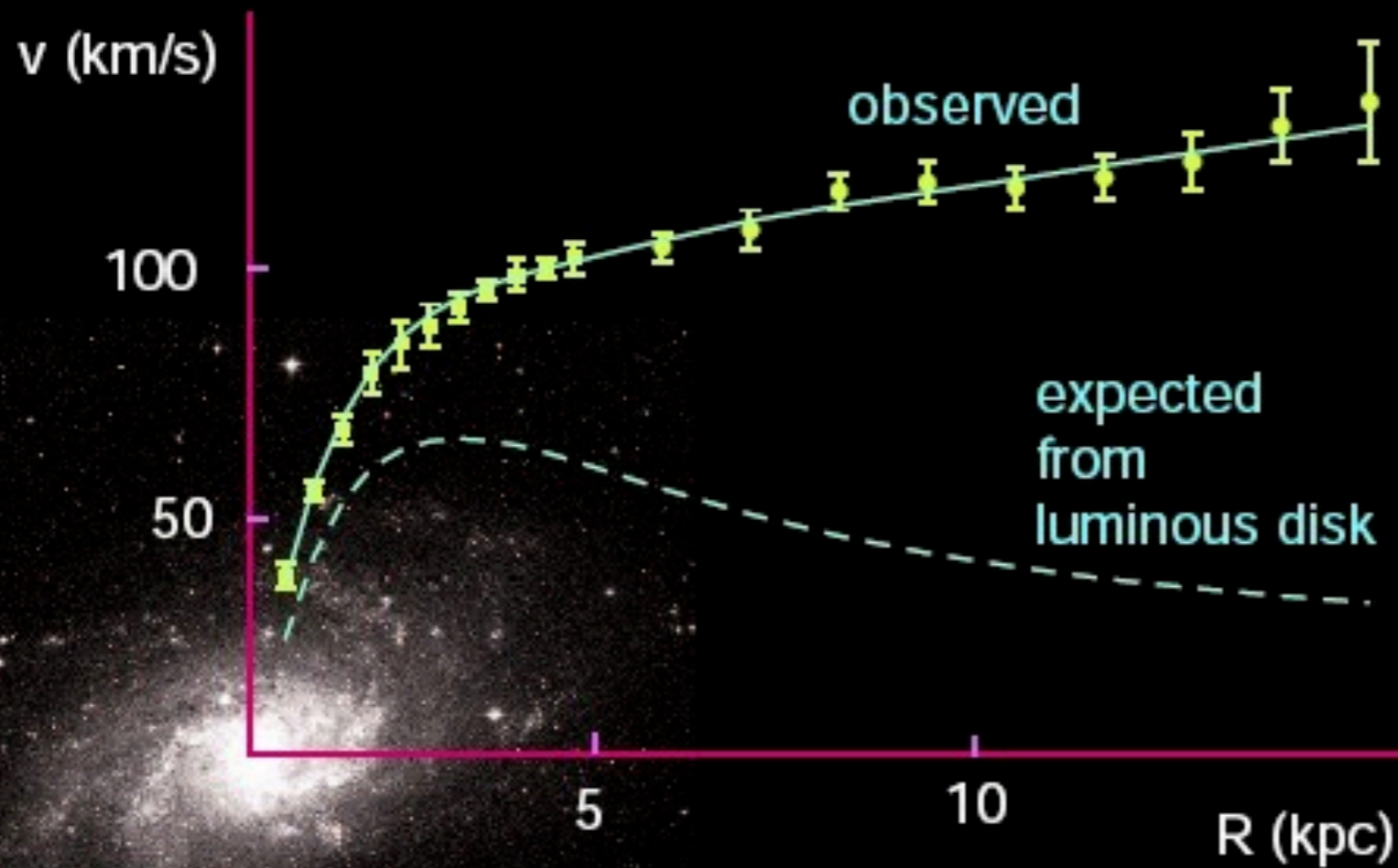
粒子  
物理

# 2. 暗物质

(粒子宇宙学)



# 暗物质 (Dark Matter)



星体旋转曲线

M33 rotation curve



**Fritz  
Zwicky  
(1933)**



**Vera  
Rubin  
(1970's)**

# 暗物质

## 已知信息:

不发光物质 (无电磁相互作用)

寿命非常长或绝对稳定

非重子

大质量

## 未知信息:

质量和自旋

相互作用形式

种类和数目

**更糟的是，我们甚至不知道  
“什么是我们不知道的”**



# 暗物质

## 已知信息:

不发光物质 (无电磁相互作用)

寿命非常长或绝对稳定

非重子

大质量

## 未知信息:

质量和自旋

相互作用形式

种类和数目



**更糟的是，我们甚至不知道  
“什么是我们不知道的”**

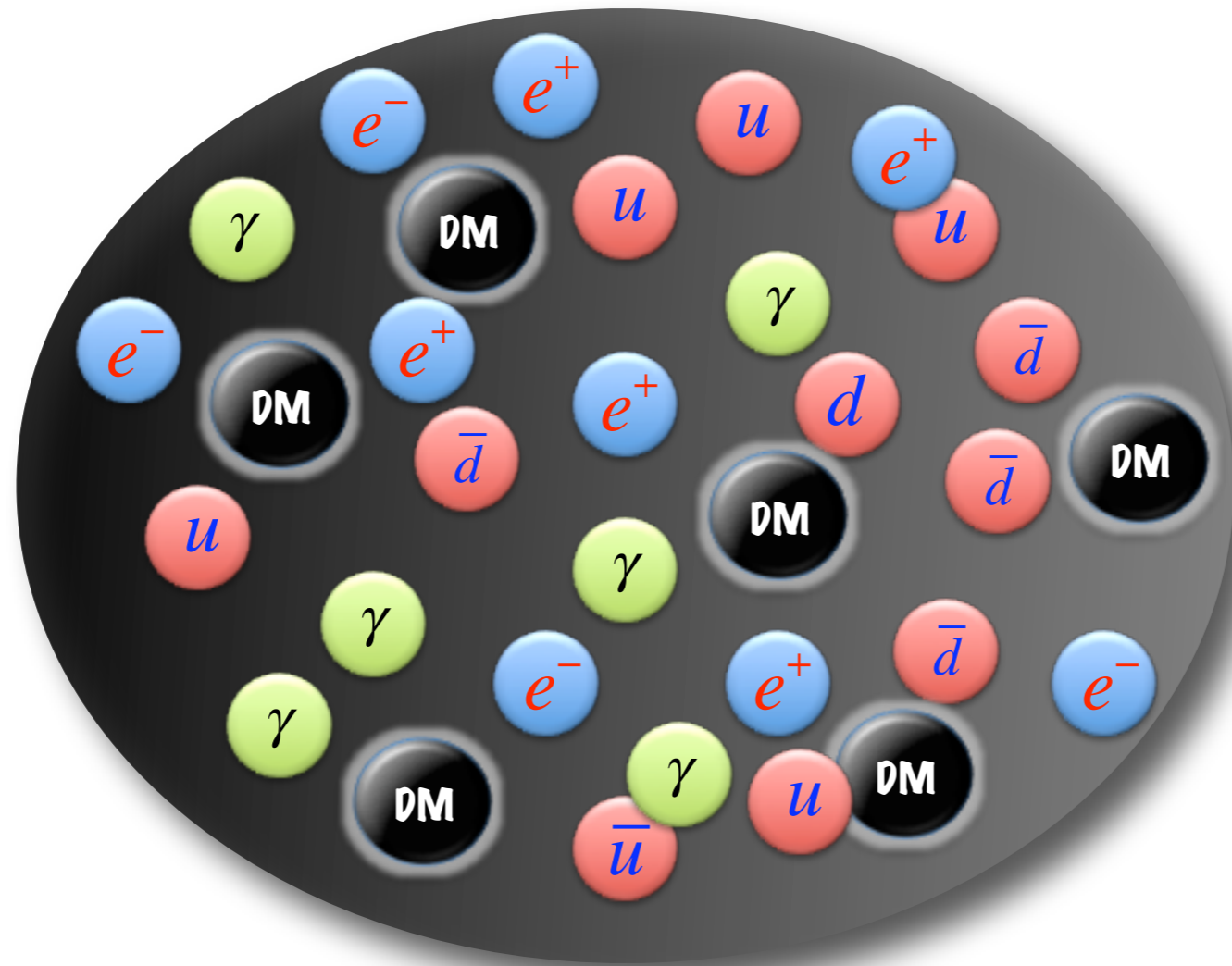
# 暗物质候选者之一

作用力微弱的大质量粒子

(Weakly interacting massive Particle)

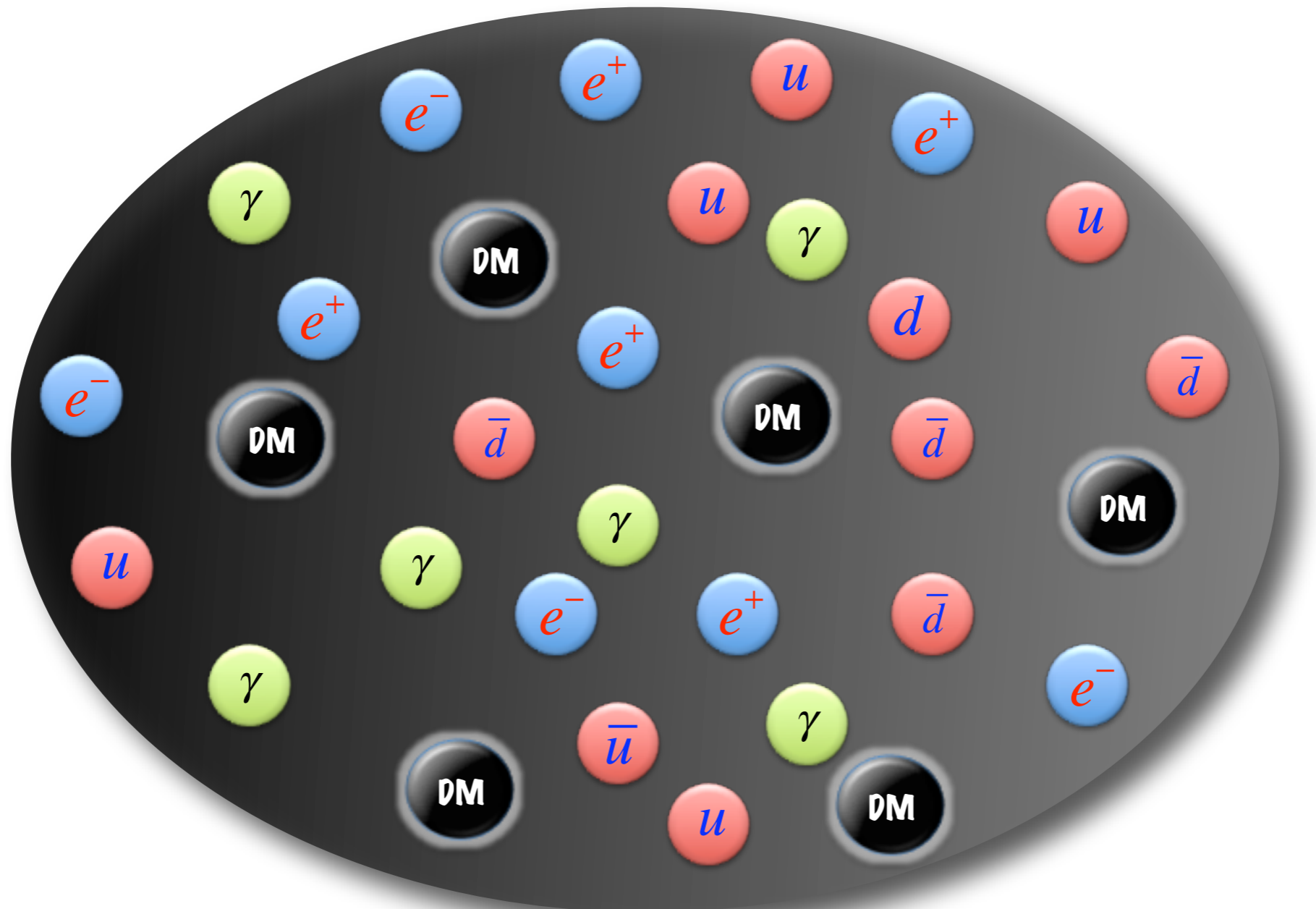
# 暗物质残留丰度

1) 宇宙早期暗物质和可见物质处于热力学平衡态



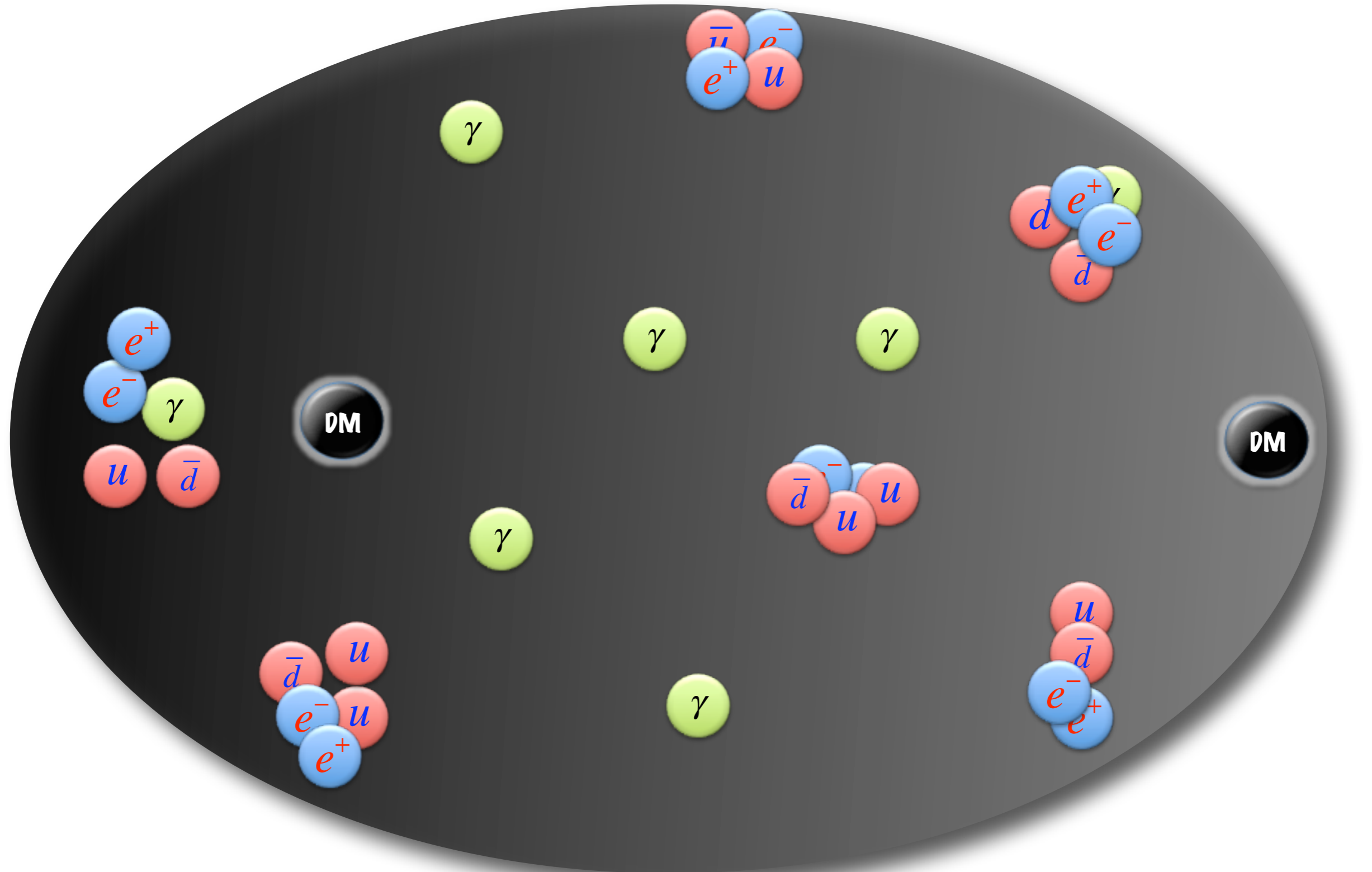
# 暗物质残留丰度

2) 宇宙膨胀 (温度降低, 暗物质变为非相对论性)



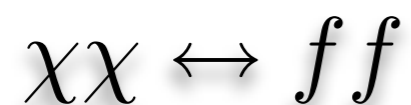
# 暗物质残留丰度

## 3) 暗物质热力学退耦



# 暗物质残留丰度

1. 暗物质和可见物质处于热力学平衡态

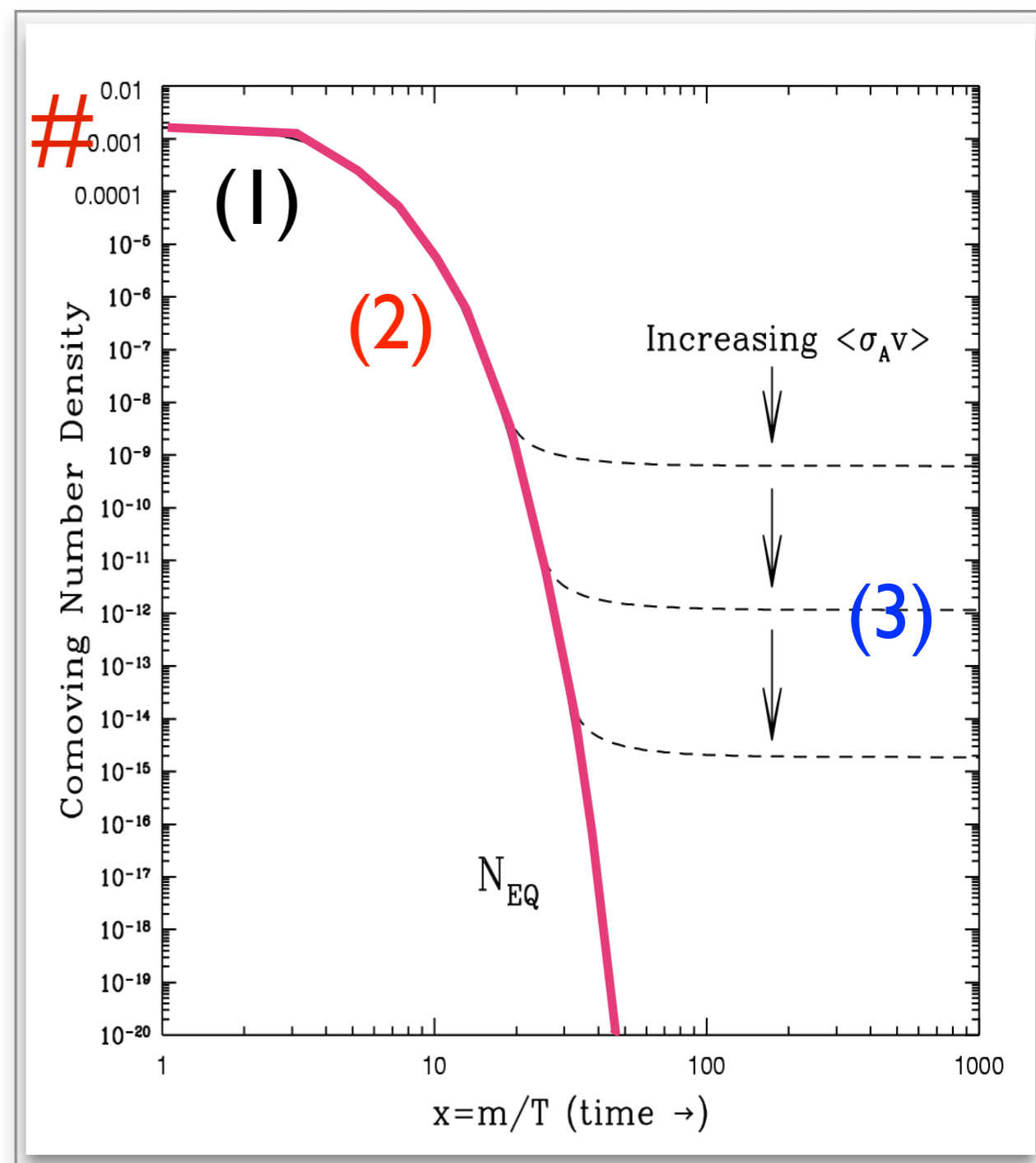


2. 宇宙膨胀冷却

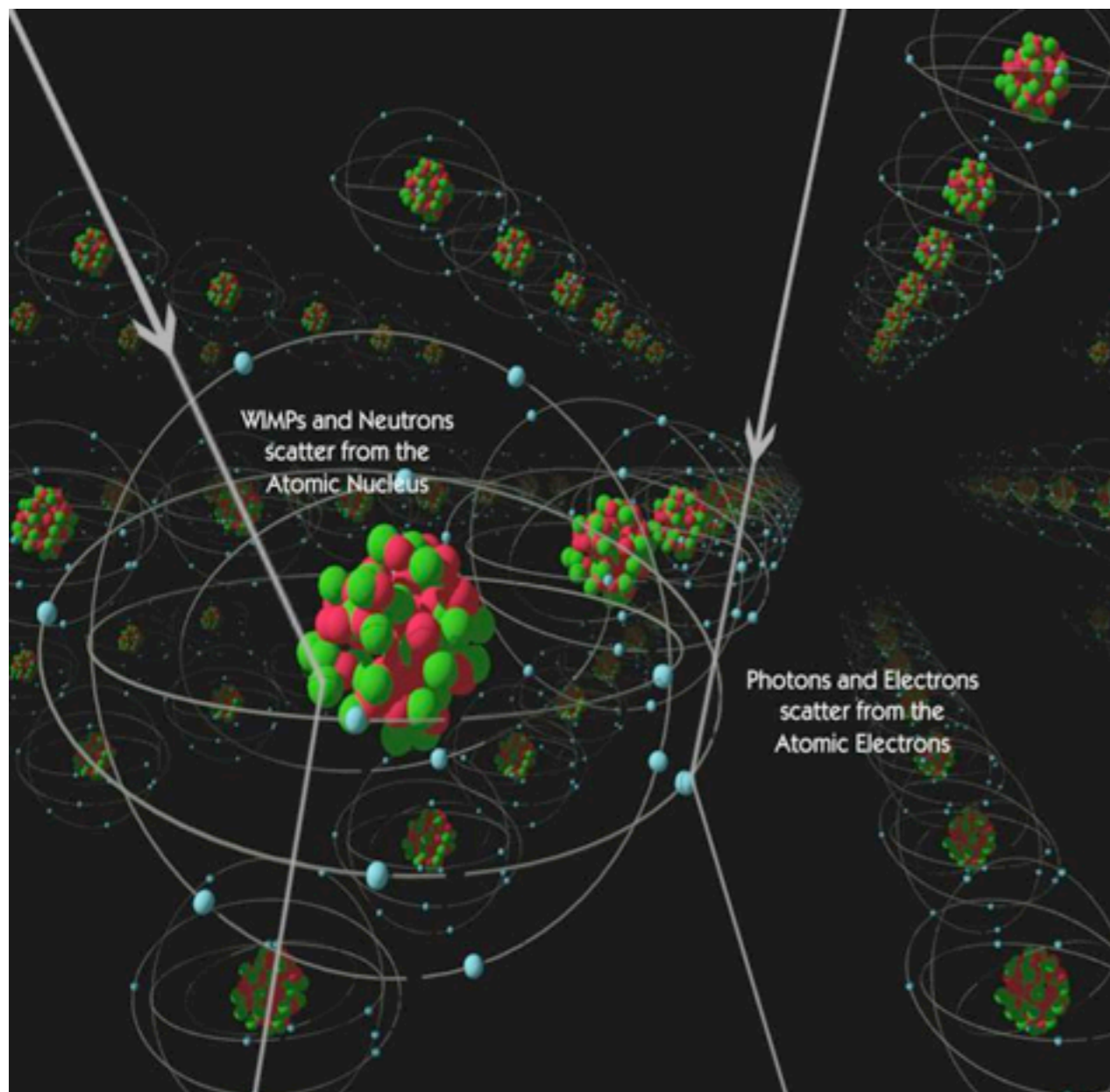
$$N = N_{EQ} \sim e^{-\frac{m}{T}}$$

3. 暗物质从热库中退耦

$$N \sim \text{Constant}$$

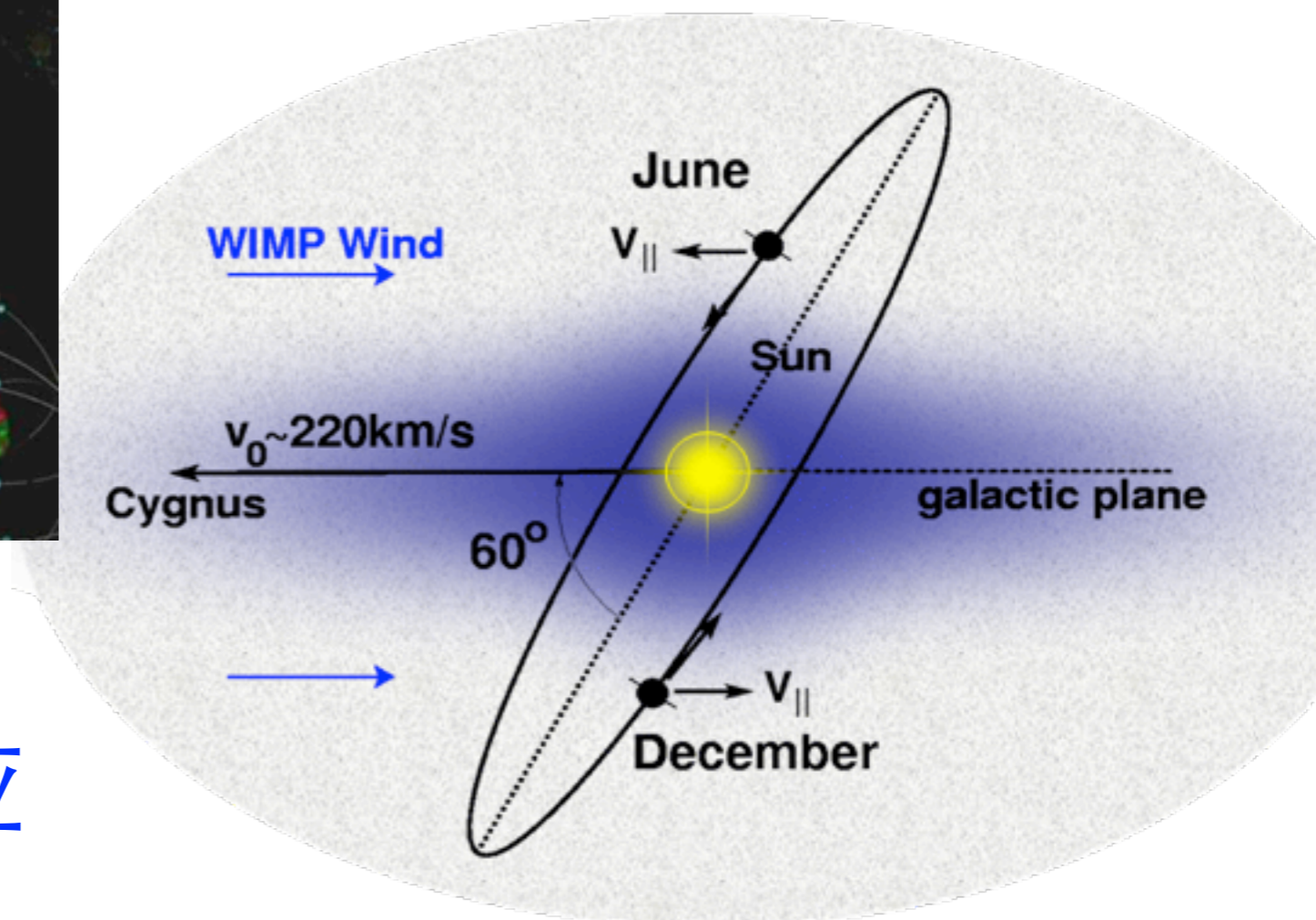


# 暗物质直接探测

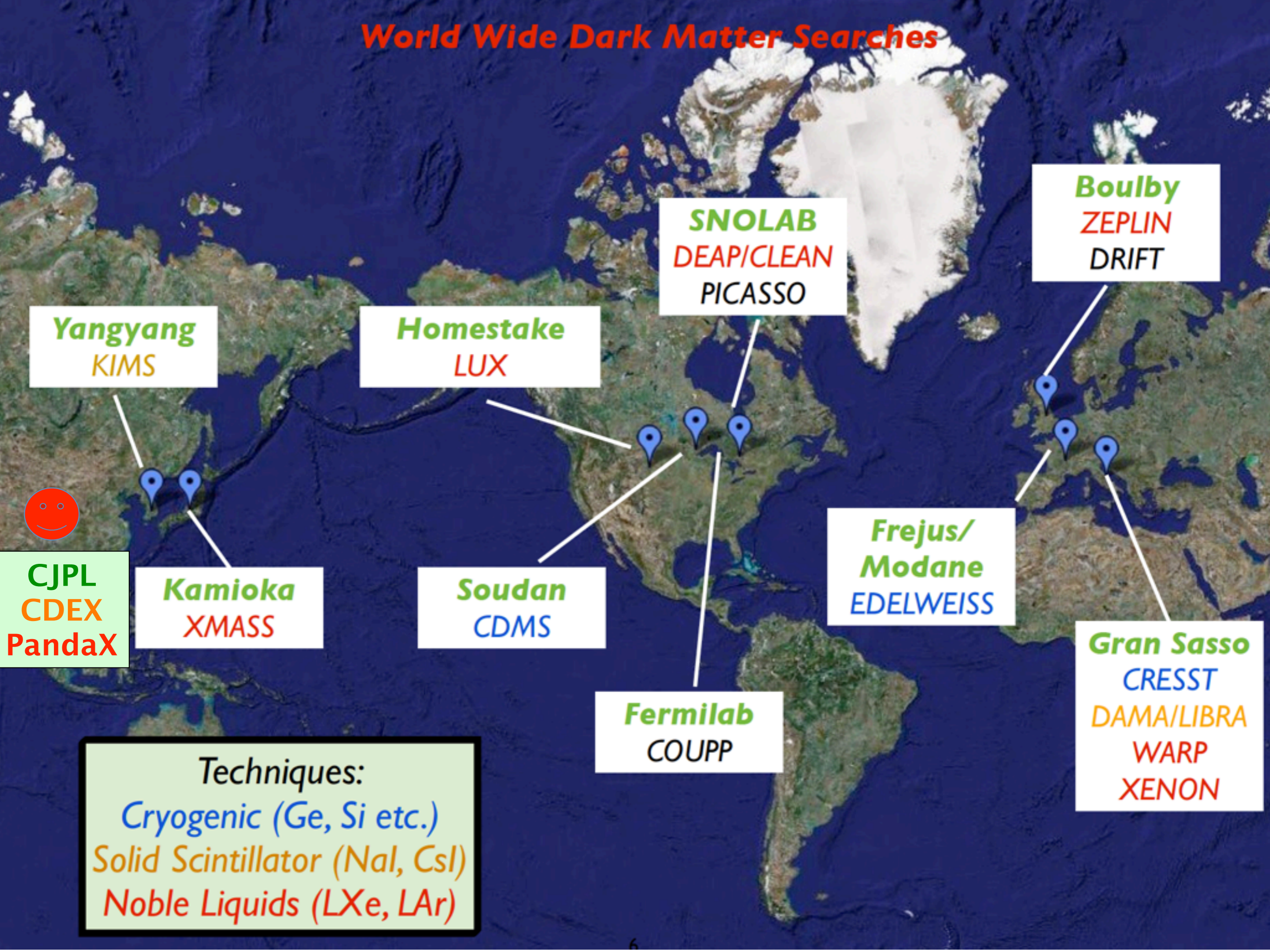


- 直接探测暗物质和原子的弹性散射。
- 信号：热，光，电

年调制效应



# World Wide Dark Matter Searches



**Yangyang**  
KIMS

**Homestake**  
LUX

**SNOLAB**  
DEAP/CLEAN  
PICASSO

**Boulby**  
ZEPLIN  
DRIFT

**Kamioka**  
XMASS

**Soudan**  
CDMS

**Frejus/  
Modane**  
EDELWEISS

**Fermilab**  
COUPP

**Gran Sasso**  
CRESST  
DAMA/LIBRA  
WARP  
XENON

**CJPL**  
CDEX  
PandaX

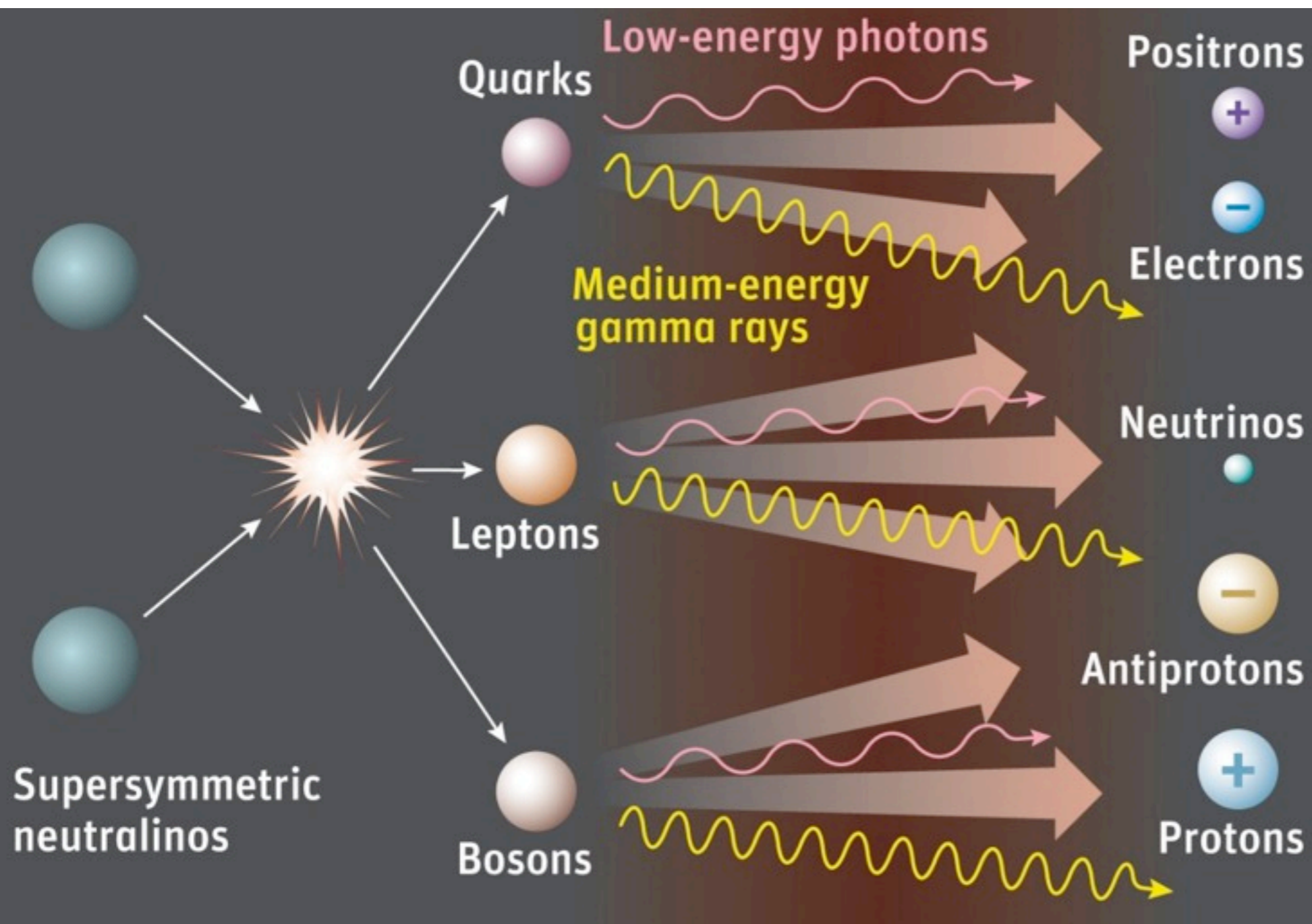
Techniques:  
Cryogenic (Ge, Si etc.)  
Solid Scintillator (NaI, CsI)  
Noble Liquids (LXe, LAr)





# 暗物质间接测量

暗物质在宇宙中湮灭产生正反电子，正反质子，光子，中微子



An illustration depicting the annihilation of matter and antimatter. On the left, a blue silhouette of a human figure contains three gold circles with plus signs (+), representing matter. On the right, an orange silhouette of a human figure contains three green circles with minus signs (-), representing antimatter. Both figures reach towards a central point where a bright, fiery red and orange explosion occurs, emitting a large burst of white light rays. The background is dark, making the central explosion and the figures stand out.

# 3. 物质和反物质 不对称之谜

# 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)

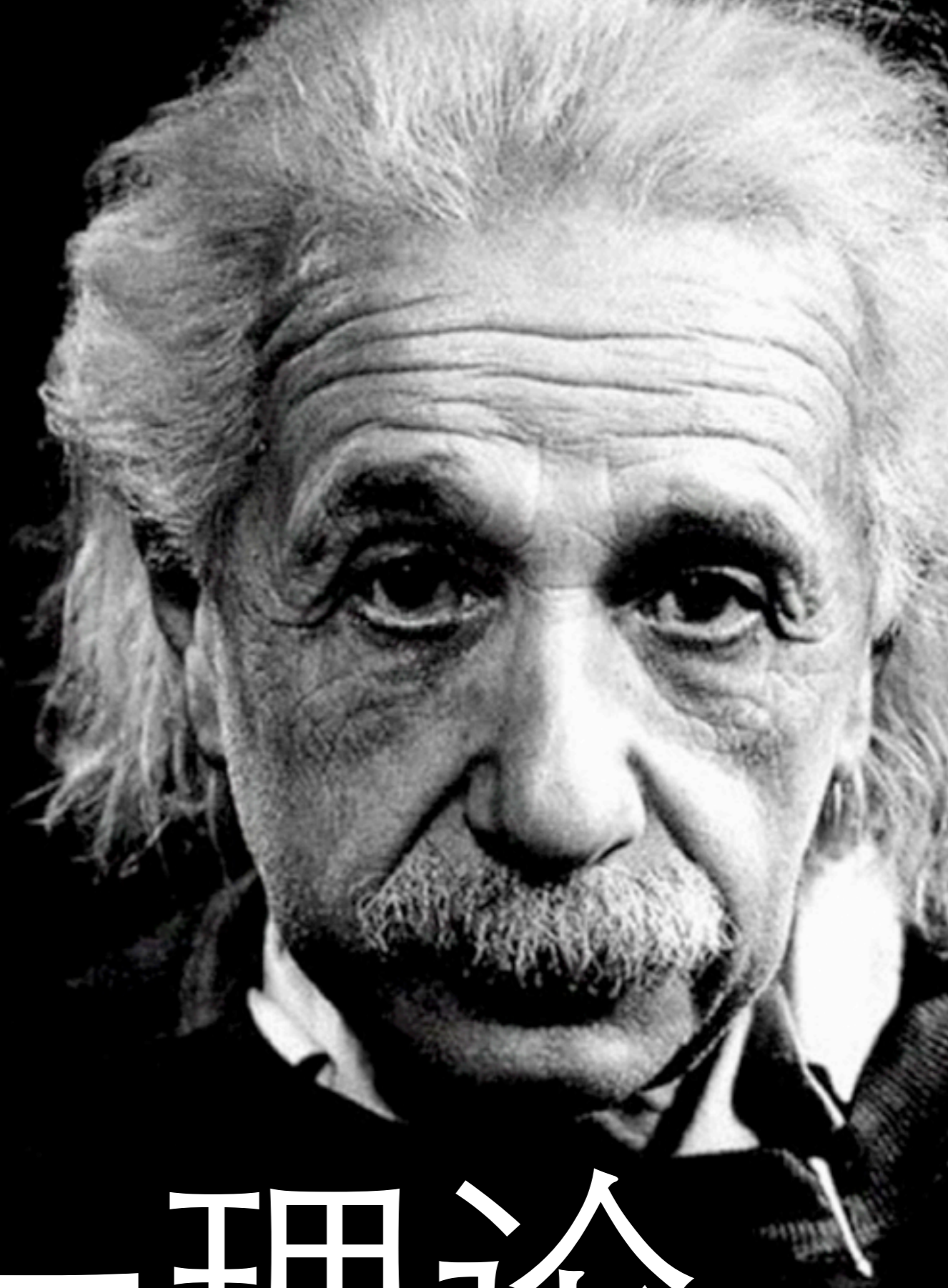
物质

反物质

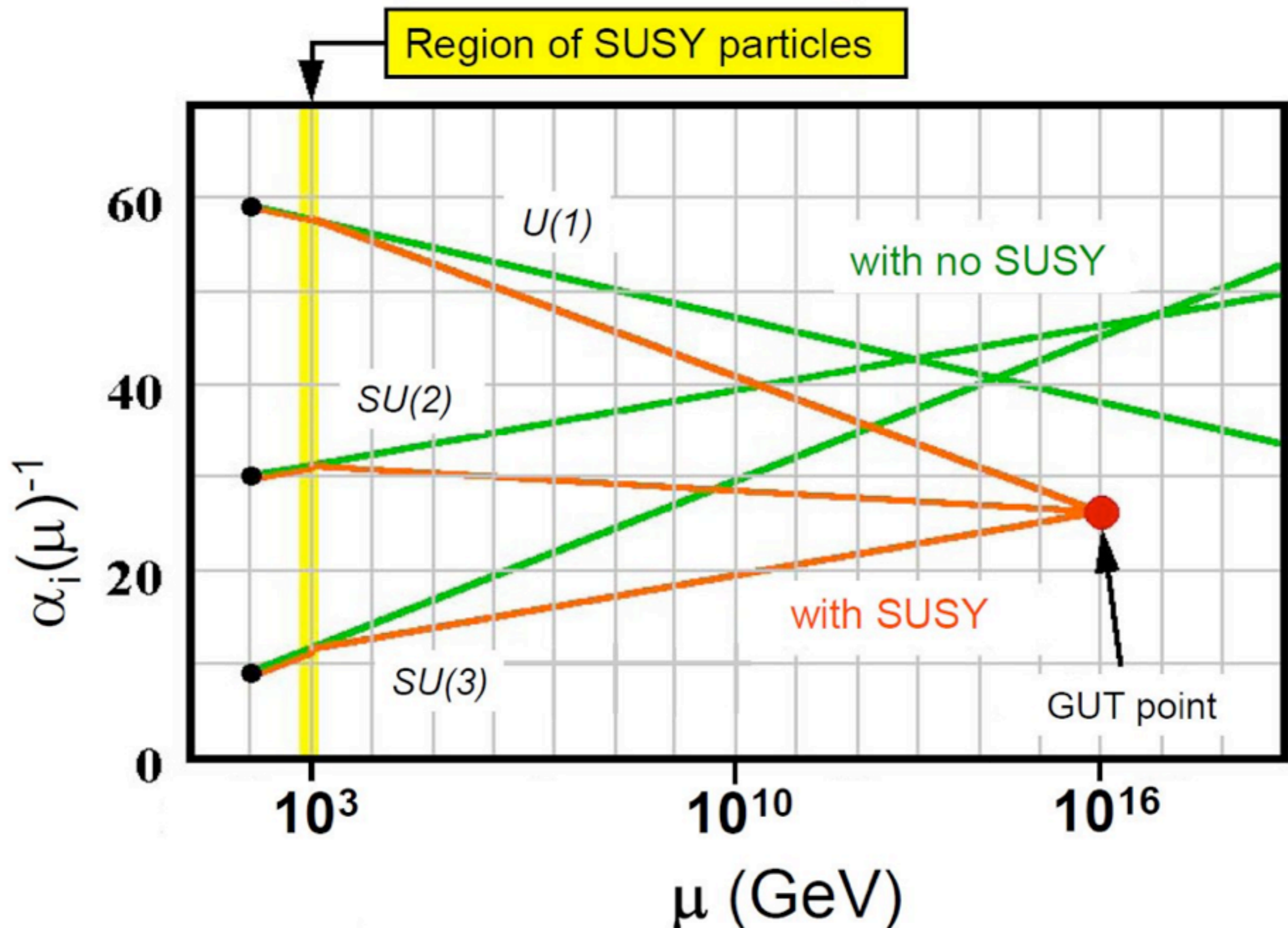
Two things are  
infinite. The Universe  
and human stupidity.

... and I'm not sure  
about the Universe.

# 4. 大统一理论

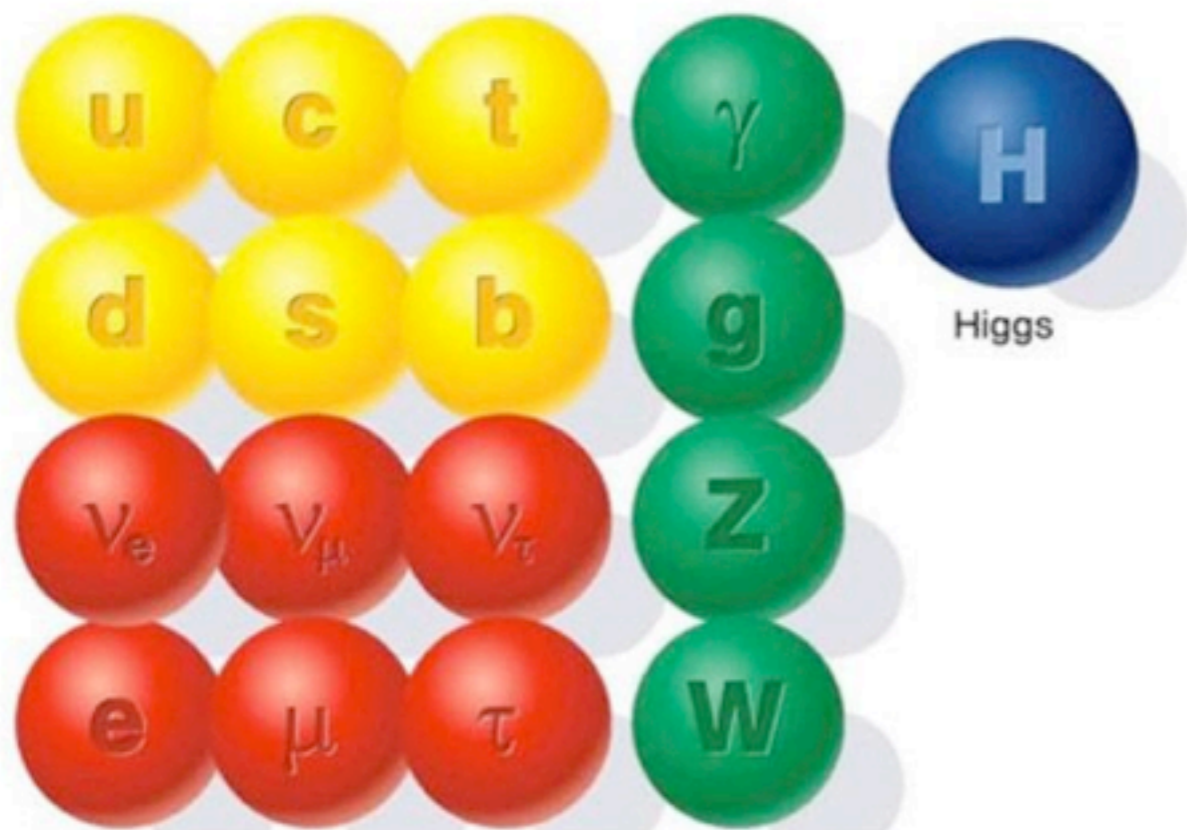


# 规范统一



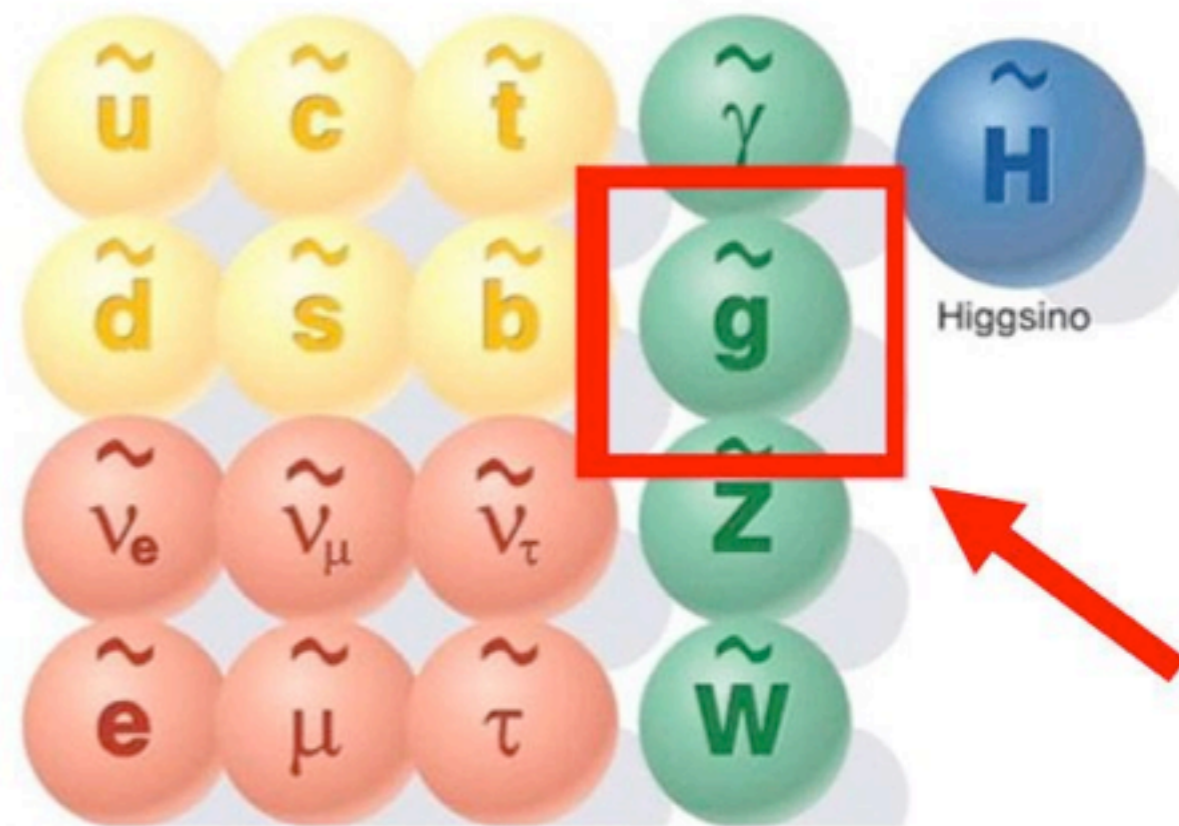
# 超对称模型

The known world of Standard Model particles



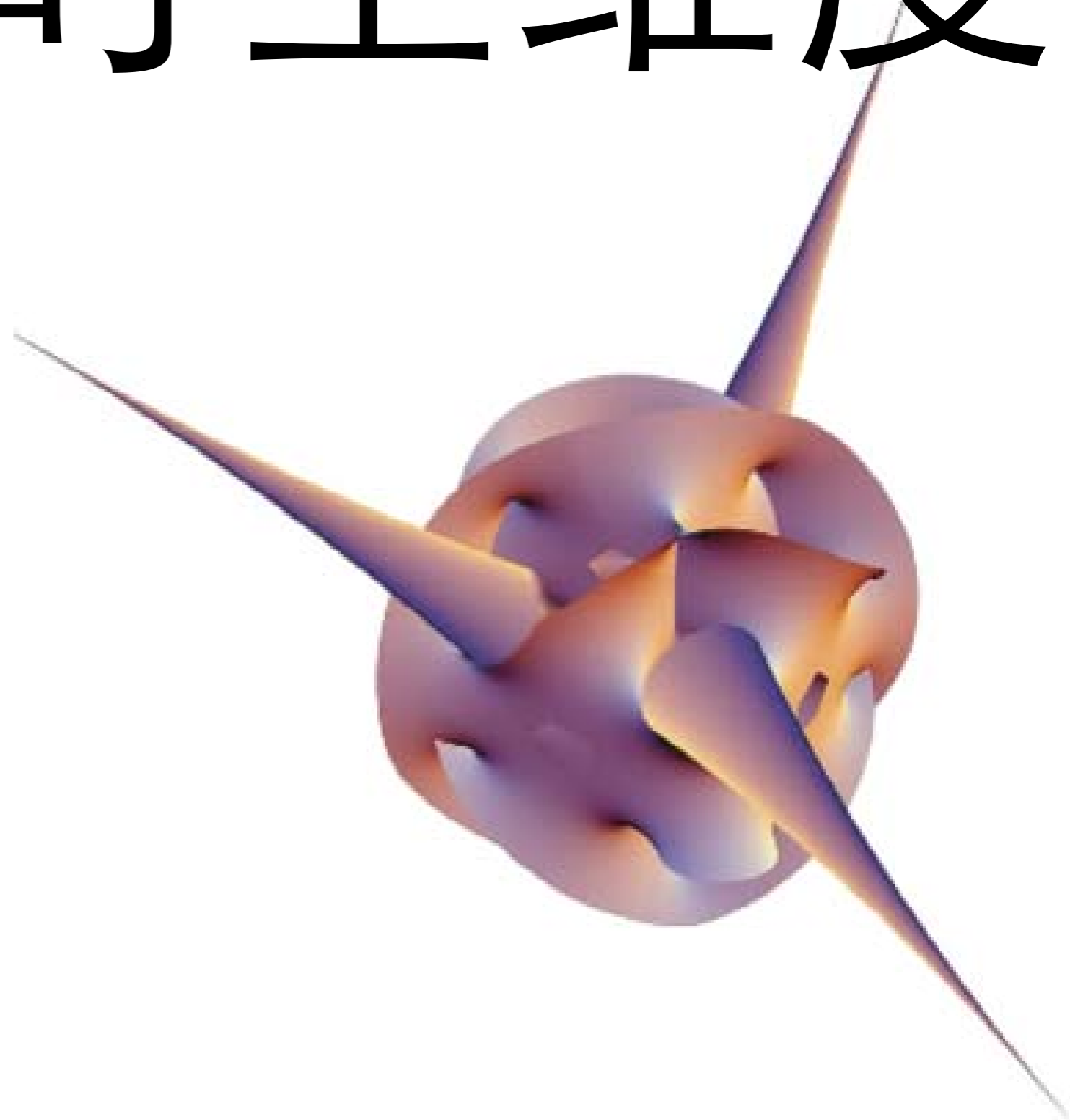
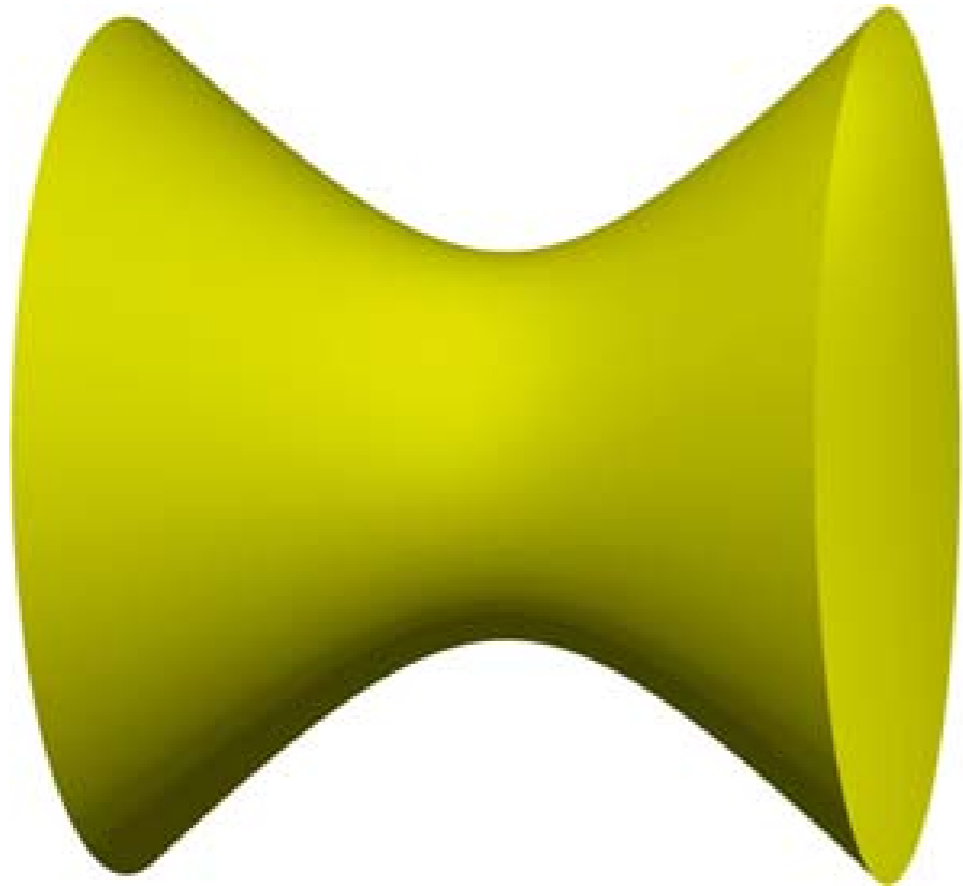
- quarks
- leptons
- force carriers

The hypothetical world of SUSY particles



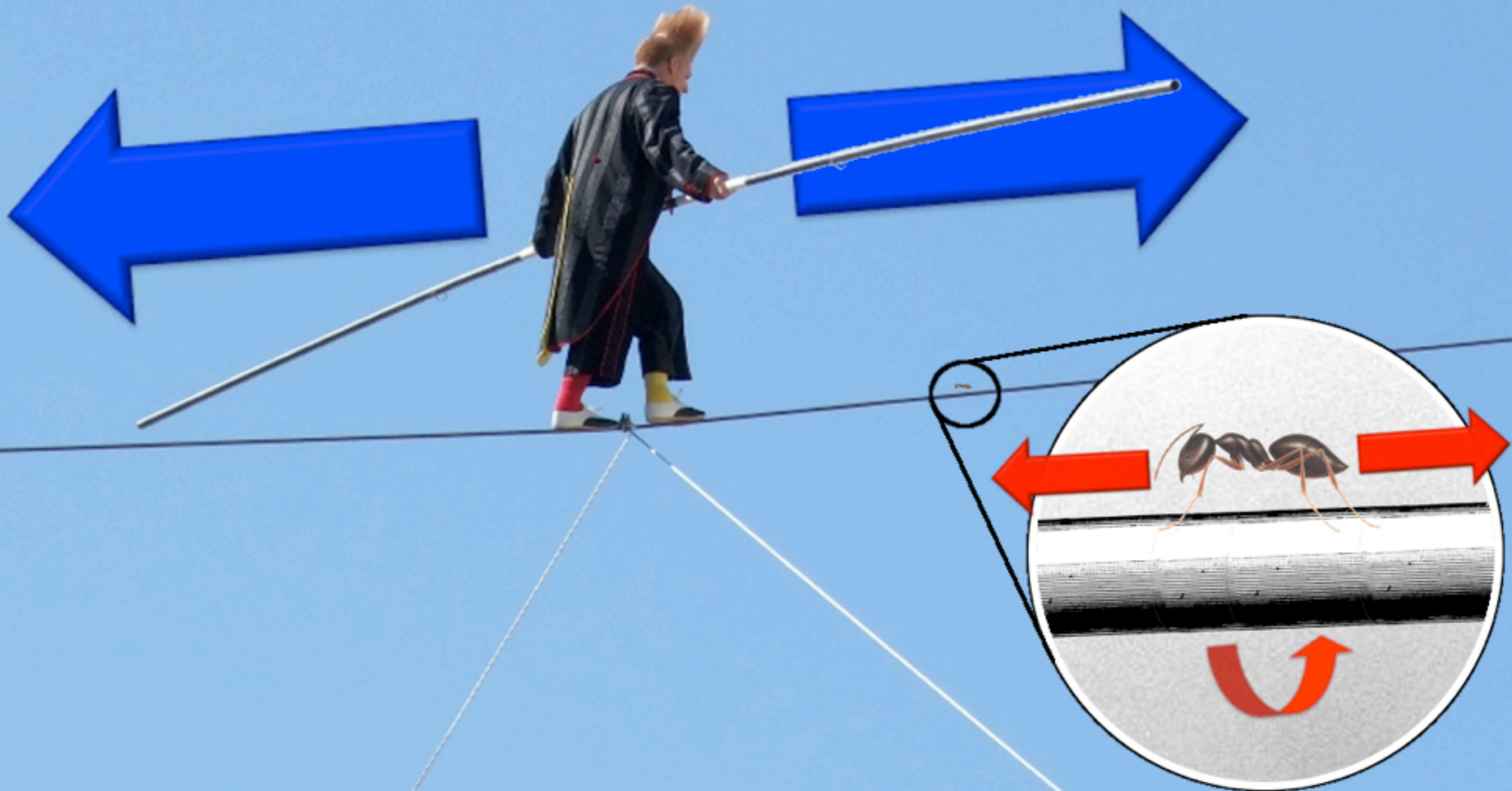
- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

# 5. 额外时空维度





# 时空：最熟悉也最陌生



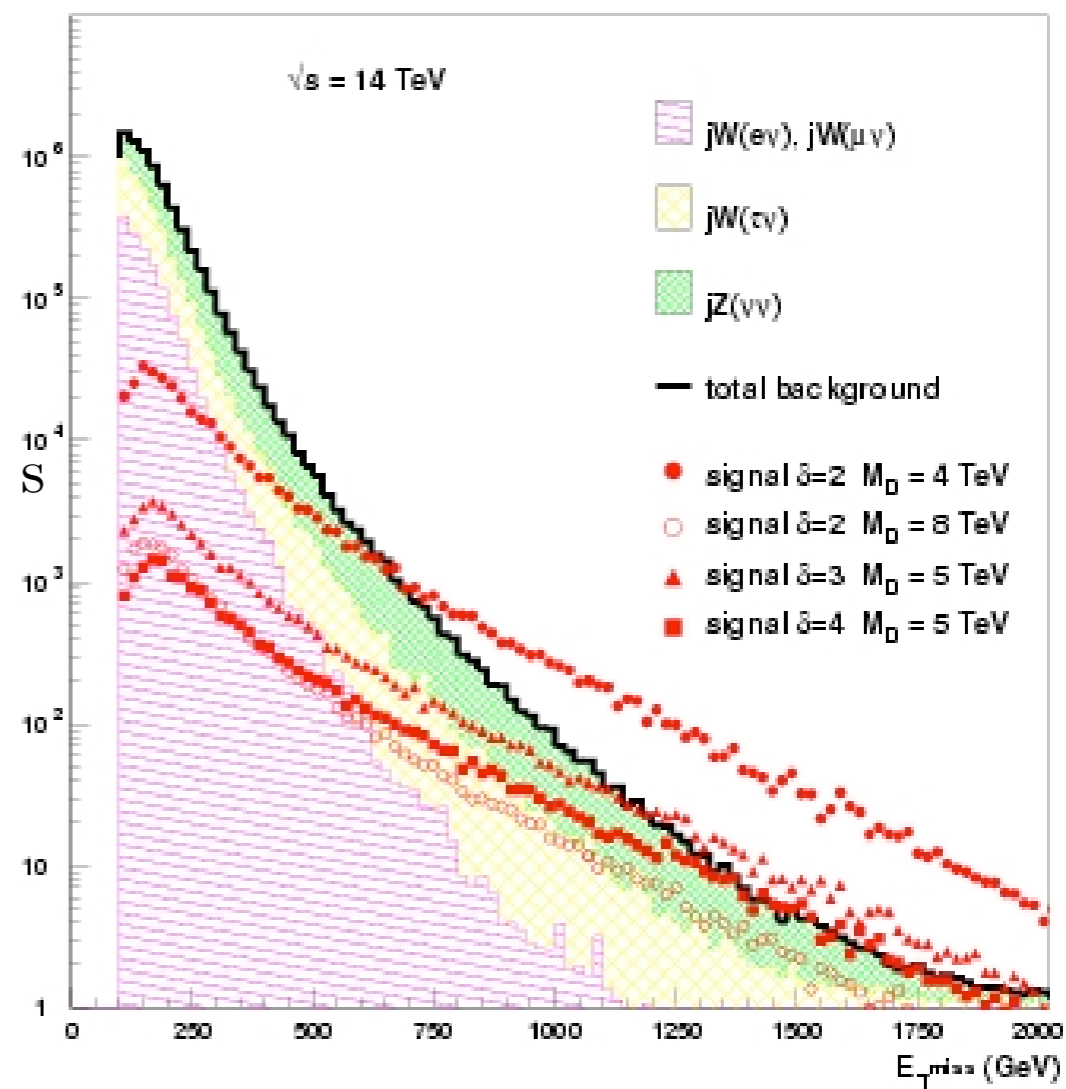
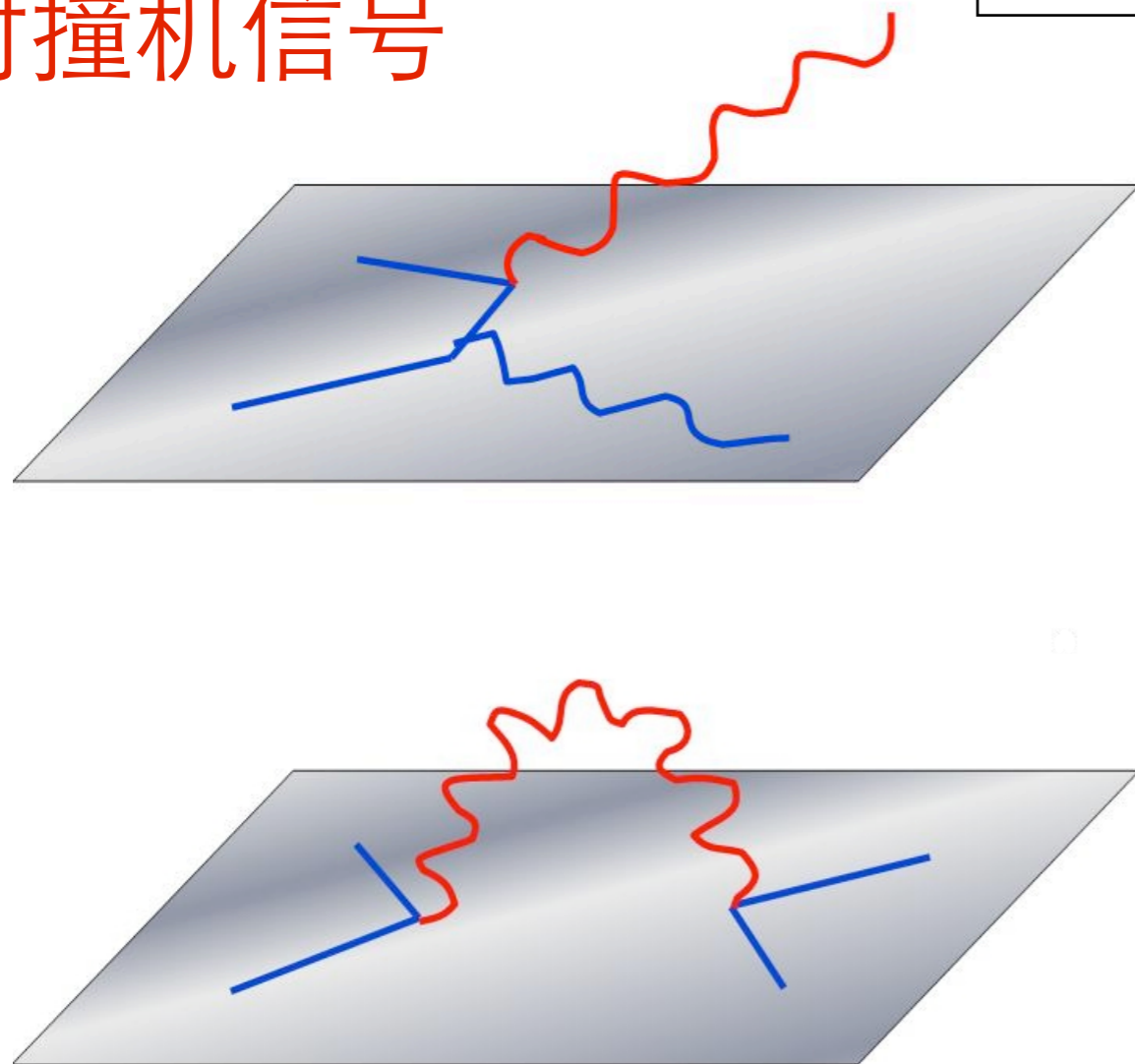
# 大型强子对撞机信号

## 大额外维模型 (Large Extra Dimensions)

已知的基本粒子都生活在平常的(3+1)维时空中，  
仅有引力可以在额外维空间中传播

对撞机信号

$$p\bar{p} \rightarrow g G_N (G_N \rightarrow \cancel{E}_T) \longrightarrow \text{jet} + \cancel{E}_T$$

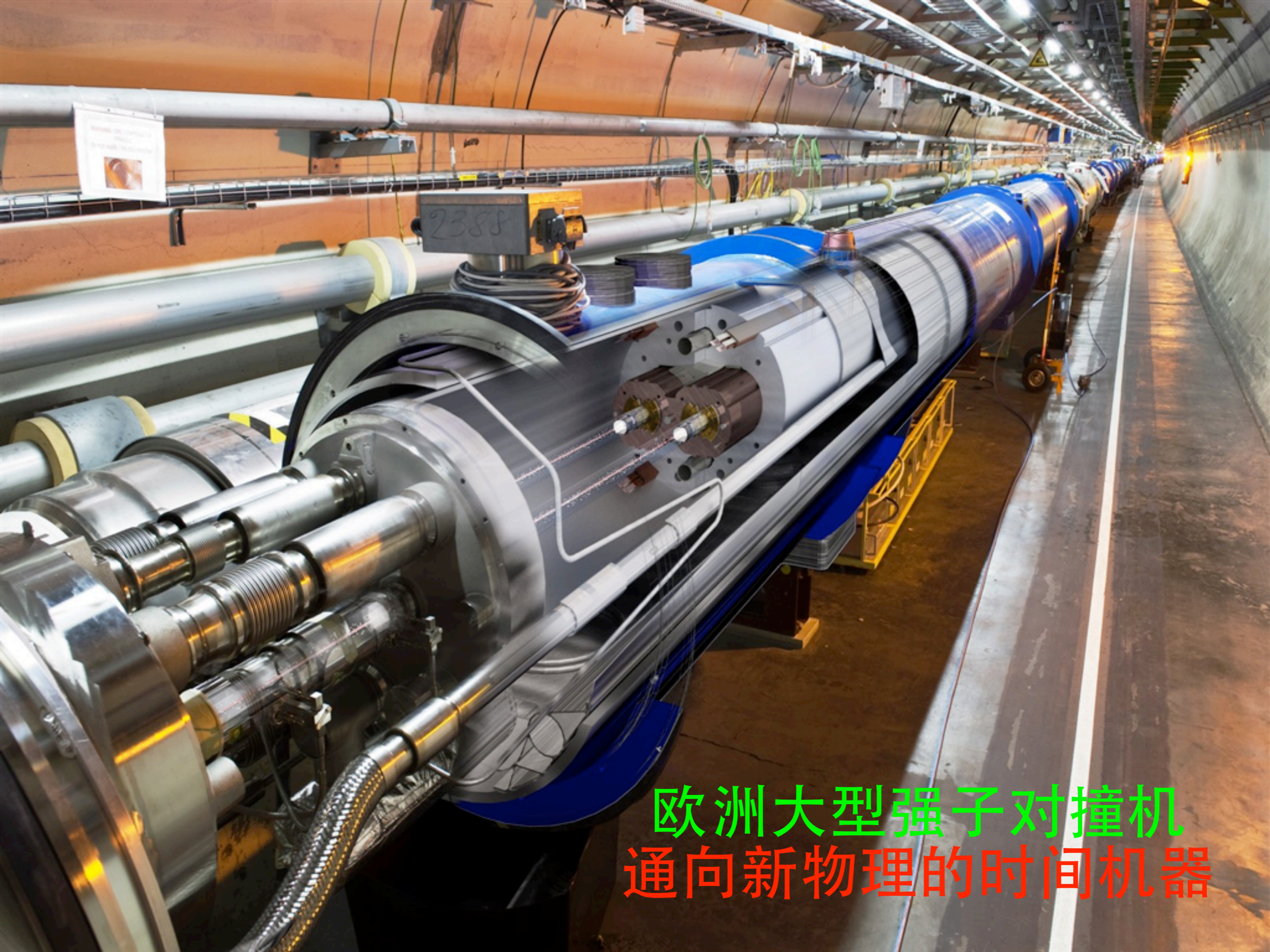


总结

# 天问



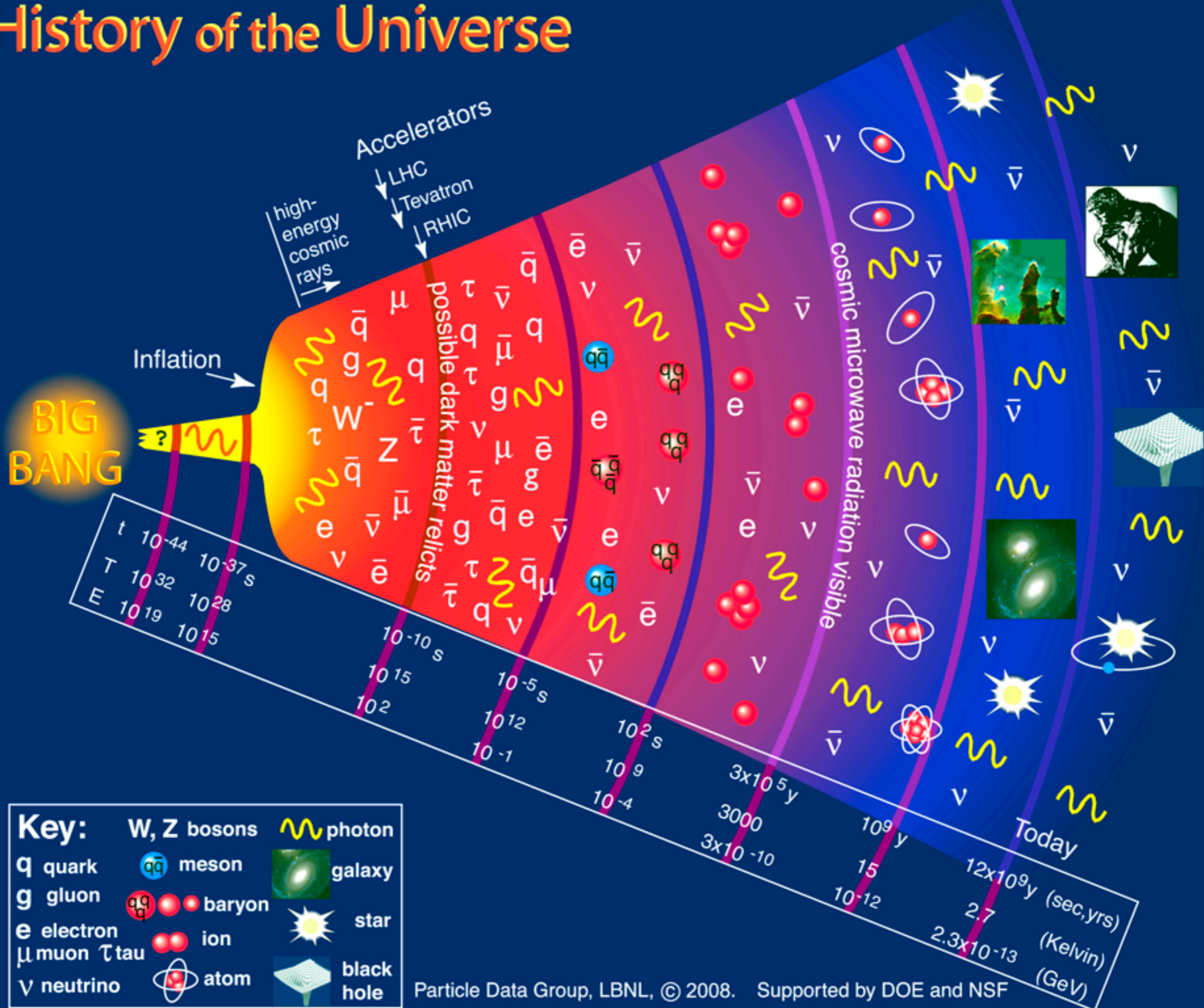
为什么希格斯粒子质量为 $125\text{GeV}$ ？  
费米子和玻色子质量起源是否相同？  
大CP破坏产生机制？  
为何仅有3代夸克和轻子？  
是否有4代物质场粒子？  
能否把自然界所有的力统一为1种？  
是否存在新的相互作用？  
夸克和轻子是否有内部结构？  
暗物质的内禀属性及其相互作用？  
什么是暗能量？  
是否有额外的空间维度？  
.....



2388

欧洲大型强子对撞机  
通向新物理的时间机器

# History of the Universe





生逢其时，何其幸也！

欢迎大家来我所  
一起探索奋斗



如果说我比别人看得更远些，  
那是因为我站在了巨人的肩上。

—— 牛顿（1672）

我没有别人看得更远，  
那是因为巨人站在我的肩上。

谢谢！