

寻找超出标准模型 新物理

陈绍龙
华中师范大学

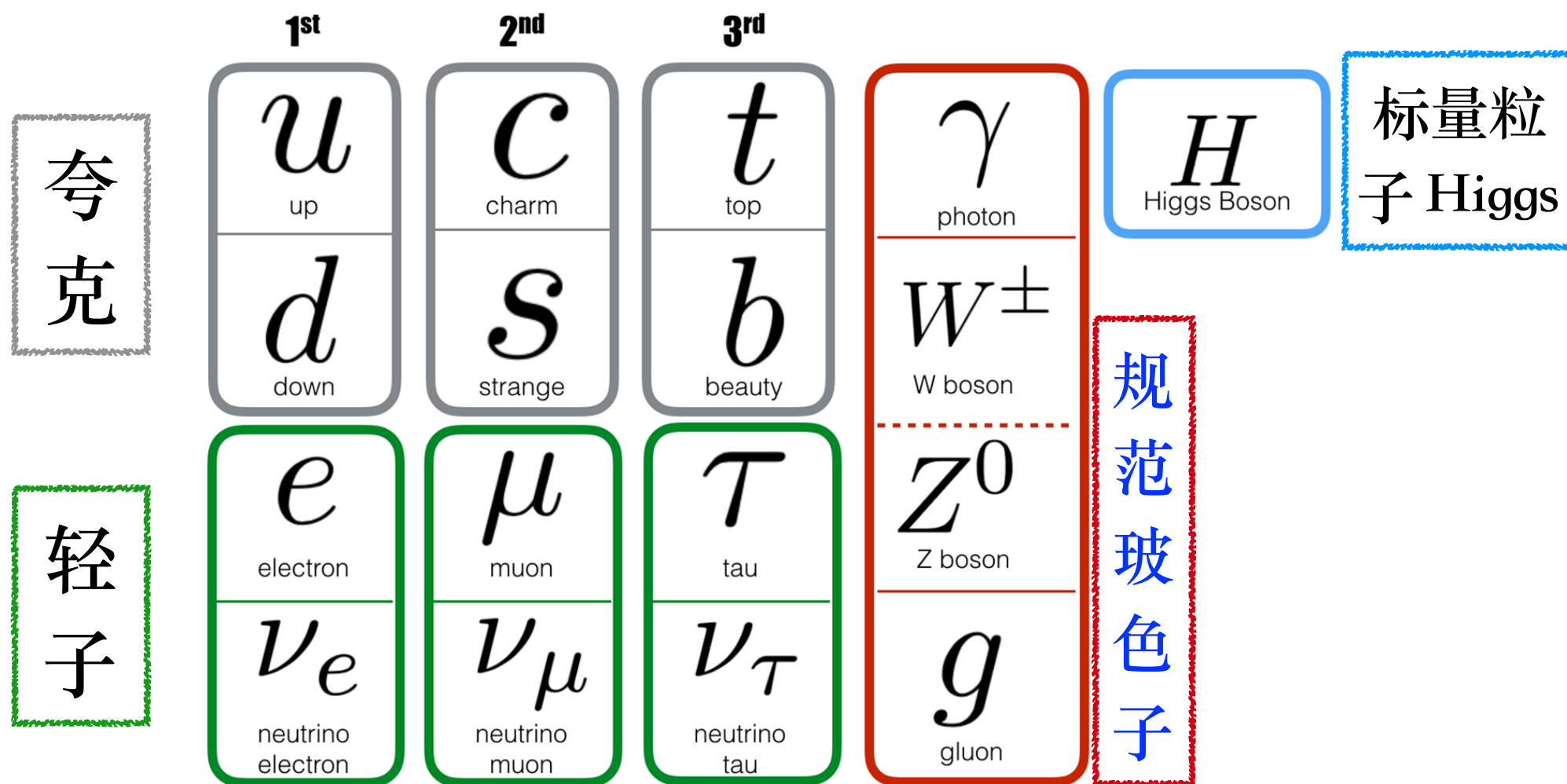
ISTEP 2018, 武汉大学, 7/17/2018

粒子物理： “基本粒子和基本相互作用”

粒子物理标准模型

规范对称性

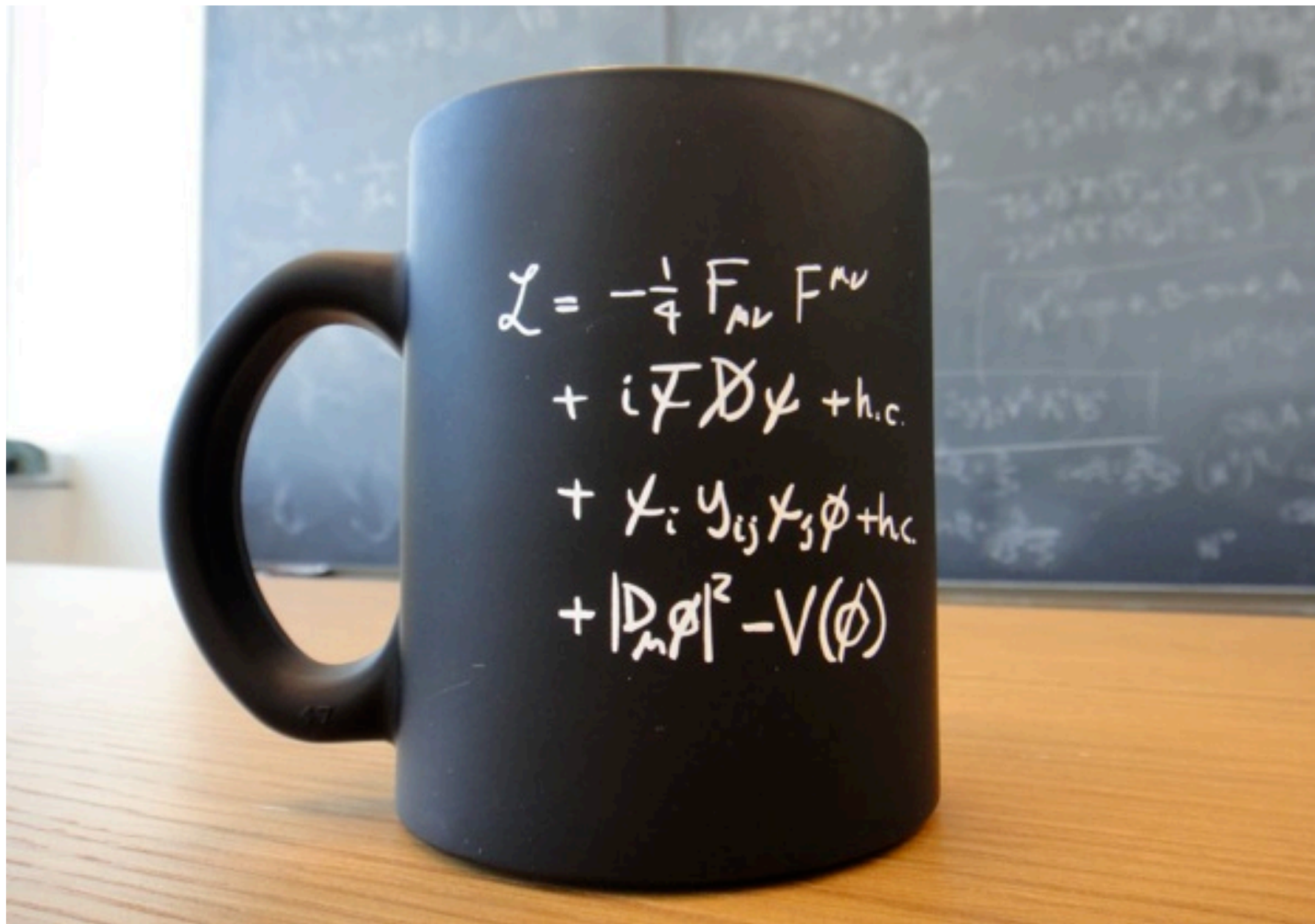
$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$



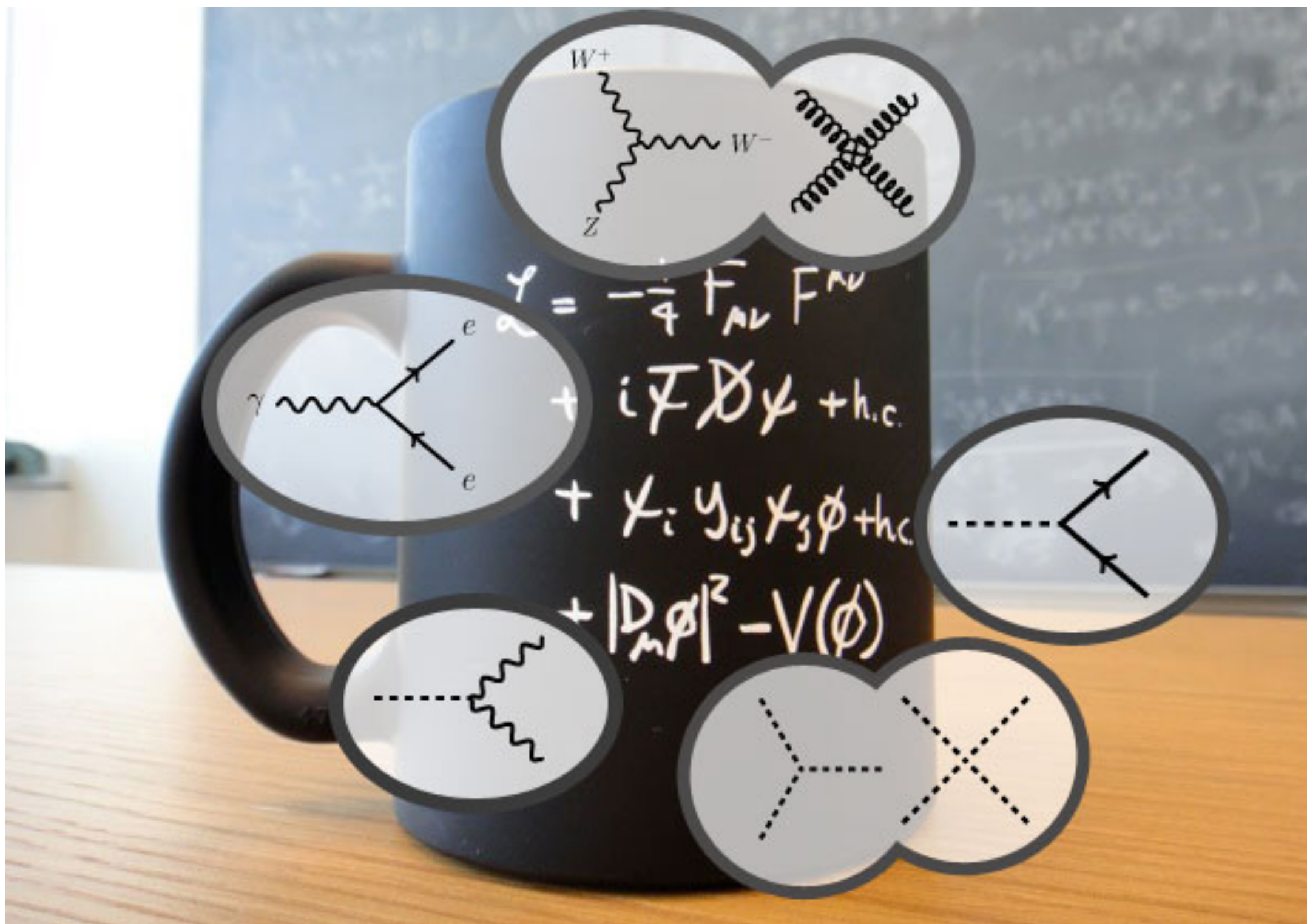
三代费米子

强、弱、电磁相互作用

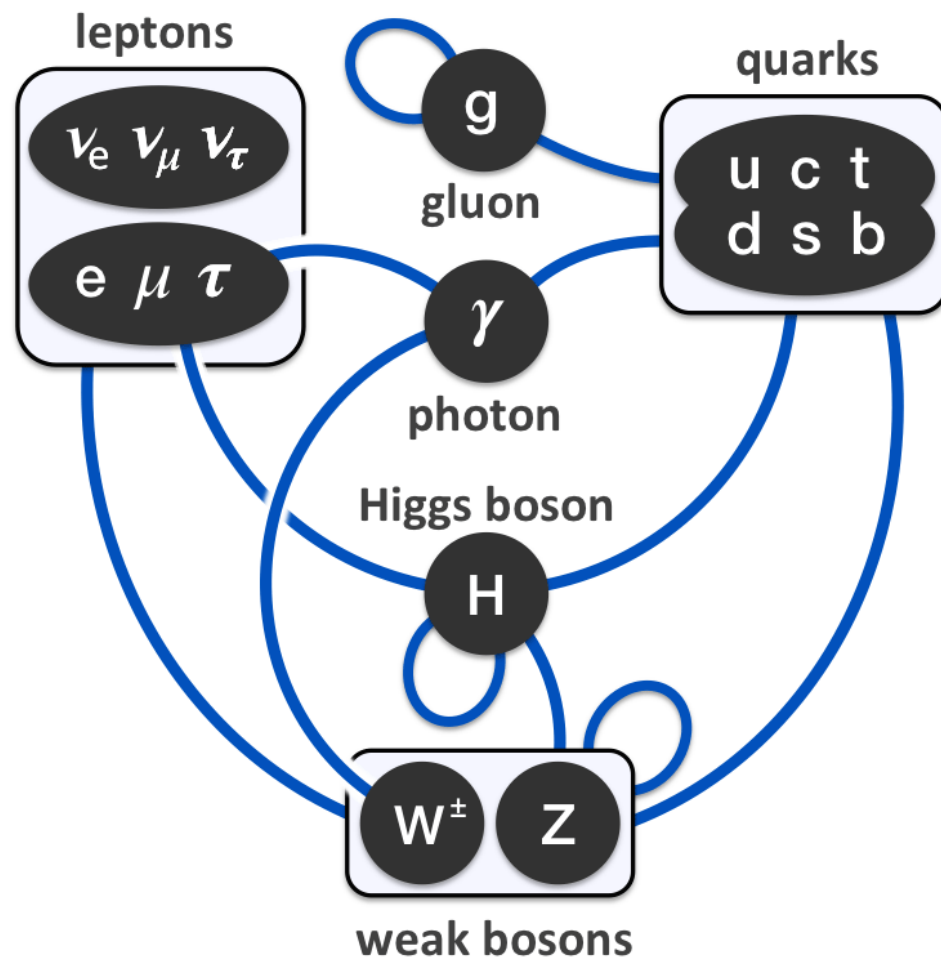
标准模型拉氏量



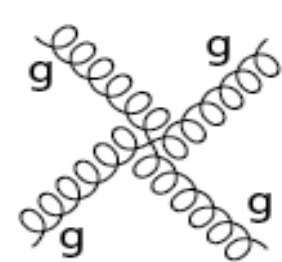
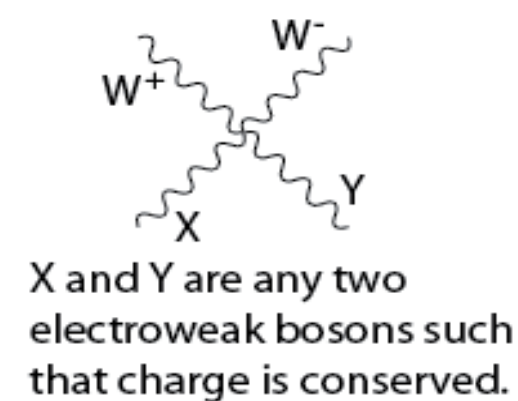
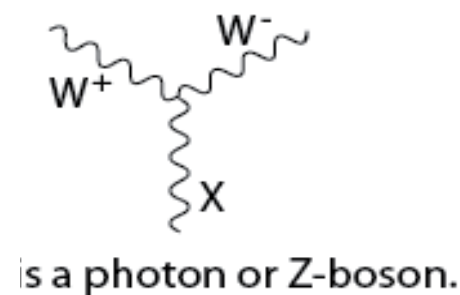
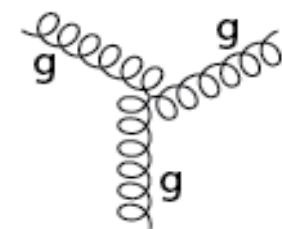
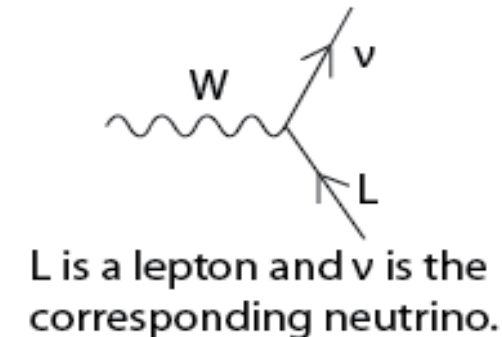
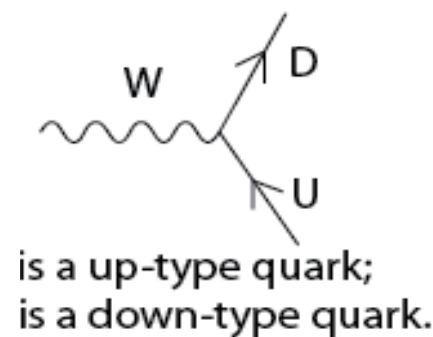
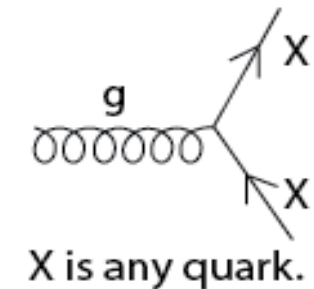
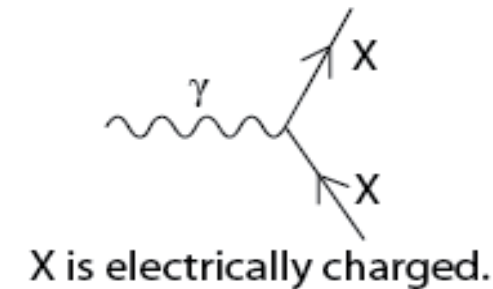
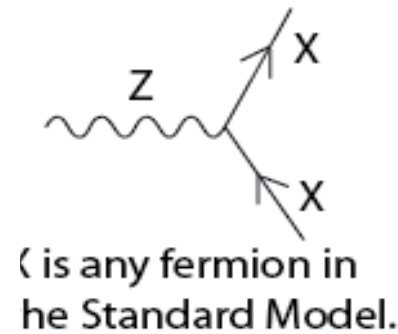
标准模型拉氏量



标准模型中的相互作用



Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



粒子物理标准模型

- 基于 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 规范对称性;
- 三代夸克和轻子: 6 味夸克, 3 味带电轻子, 3 味中微子;
- 夸克和胶子禁闭于强子 (介子、重子、...) 中;
- 夸克味混合: KM 机制, CP 破坏跟 CKM 混合矩阵中相位有关;
- 基本粒子相互作用中重子数和轻子数守恒;
- ...

标准模型

是一个被实验“成功”检验的理论！

所谓问题?

- 为什么是三代费米子?
- 费米子的质量等级为何相差很大?
- 为什么规范对称性是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$?
- 为什么重子数和轻子数守恒?
- 为什么 C, P, CP 对称性破缺?
- 中微子质量从何而来?
- 暗物质是什么?
- 宇宙中正反物质为何不对称?
- ...

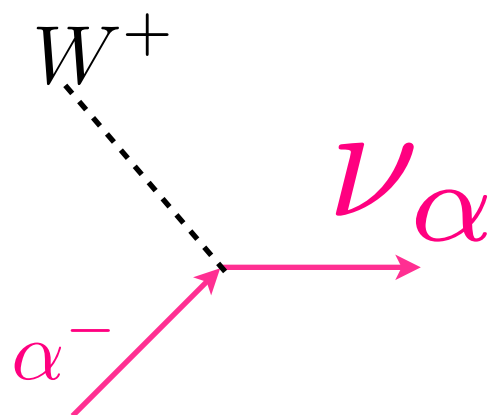
超出标准模型外的物理迹象

(I) 中微子是有质量粒子:

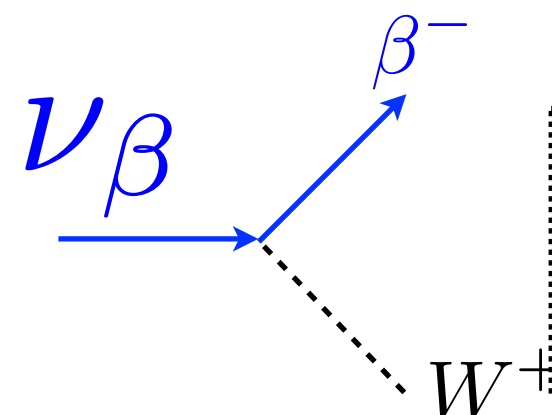
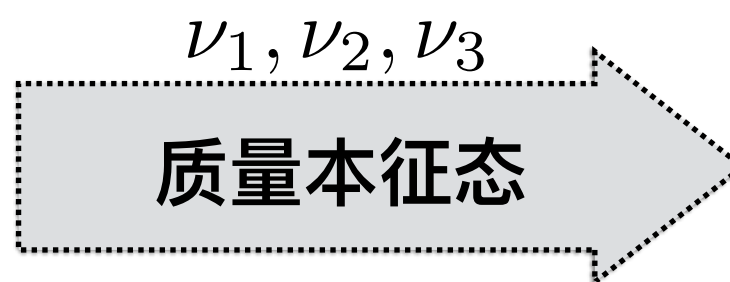


中微子振荡

弱作用
本征态



中微子源



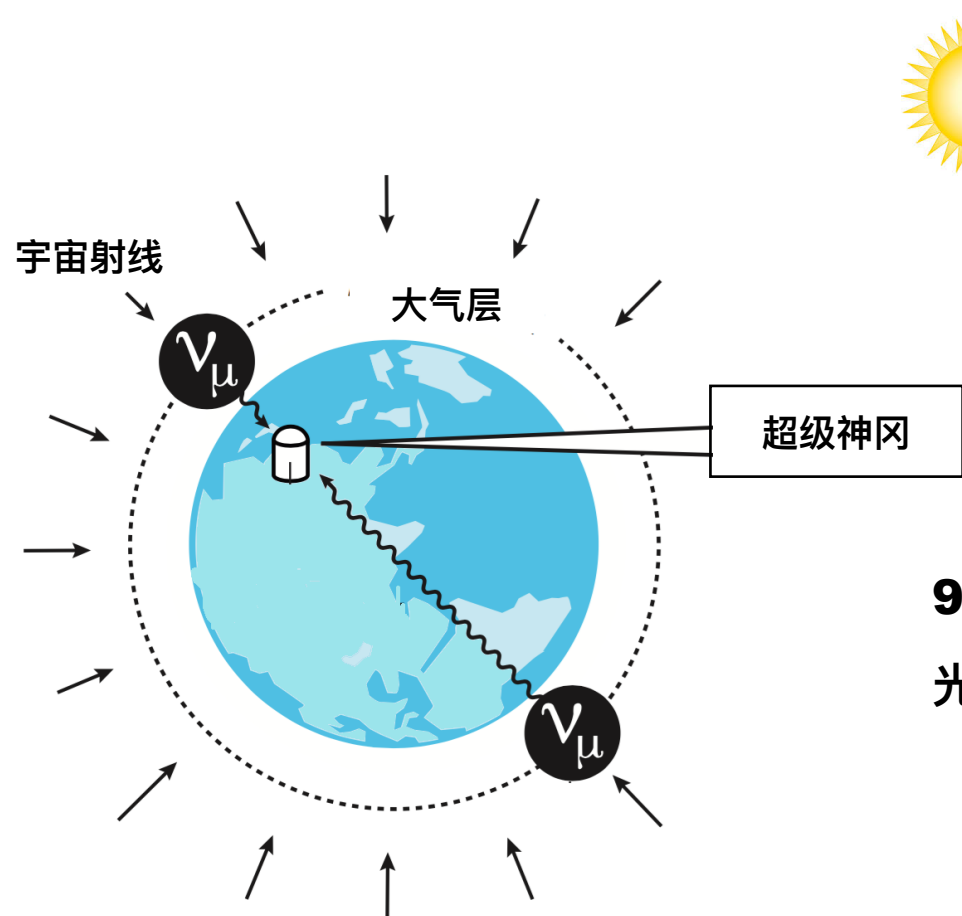
中微子探测器

弱作用
本征态

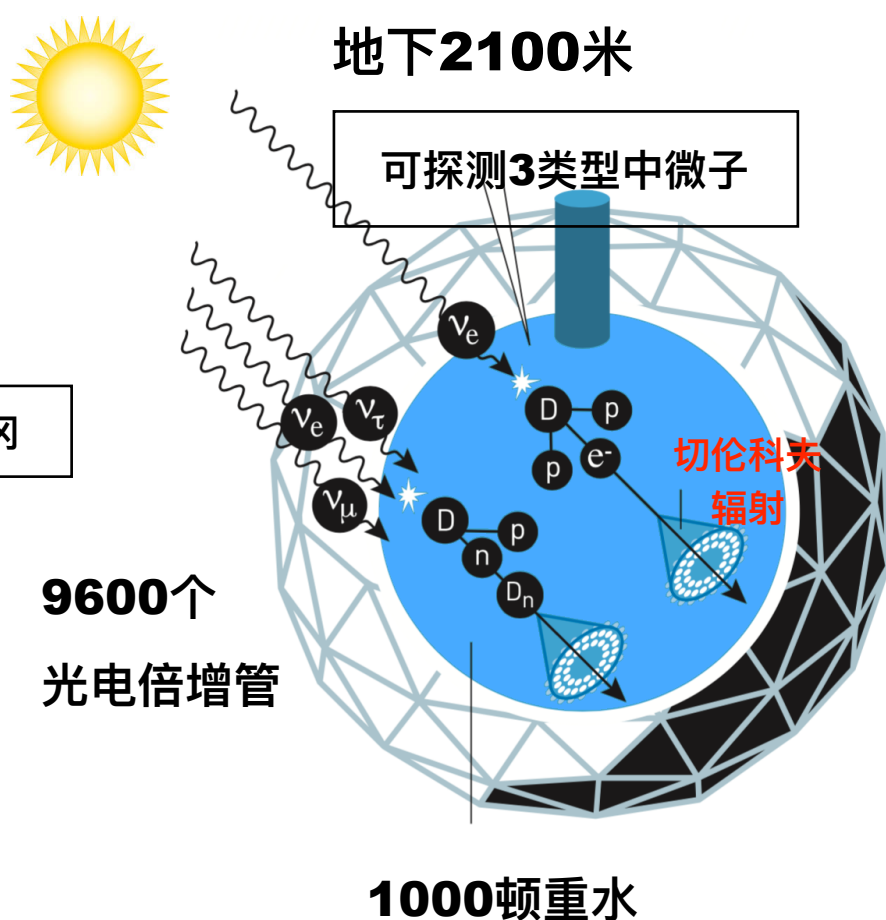
超出标准模型外的物理迹象

(I) 中微子是有质量粒子:

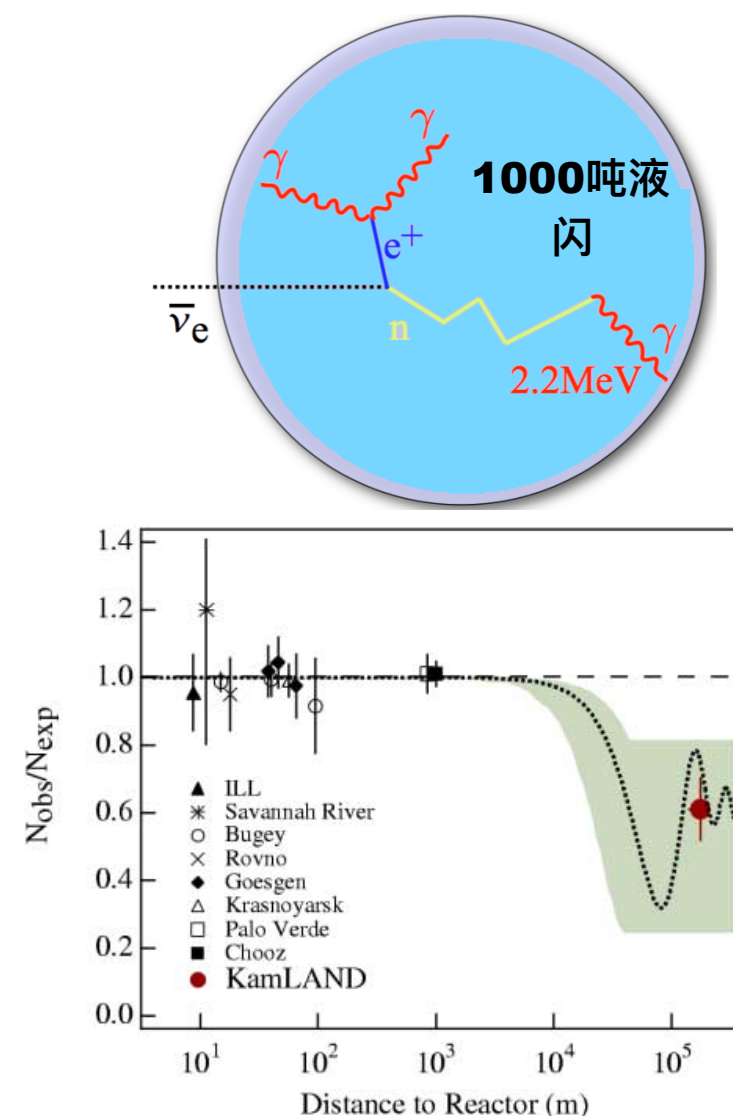
在太阳中微子、大气中微子、反应堆中微子实验中发现了中微子存在不同味之间的振荡现象



Super-Kamiokande



SNO

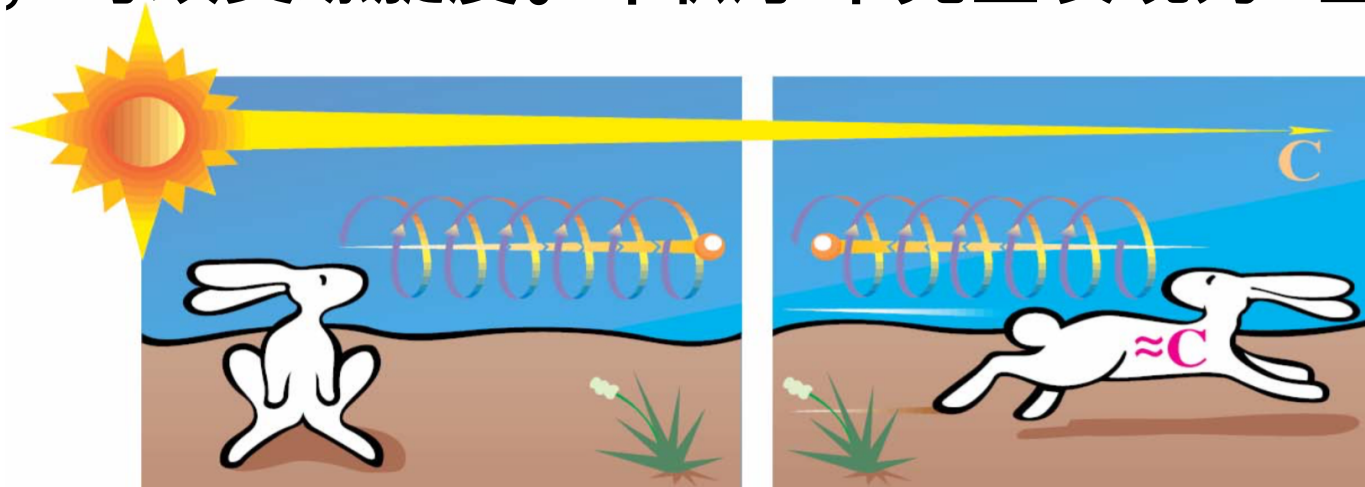


KamLAND

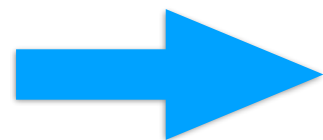
超出标准模型外的物理迹象

中微子传播过程中存在振荡现象说明中微子具有质量。

螺旋度不是**Lorentz**不变，可以随参考系变换变化，有质量粒子低于光速运动，可改变螺旋度。中微子不完全表现为“左撇子”。



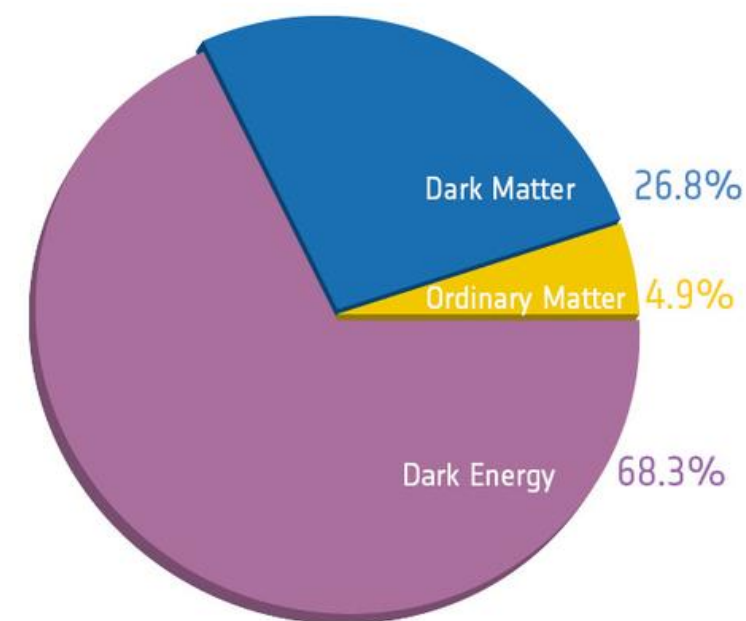
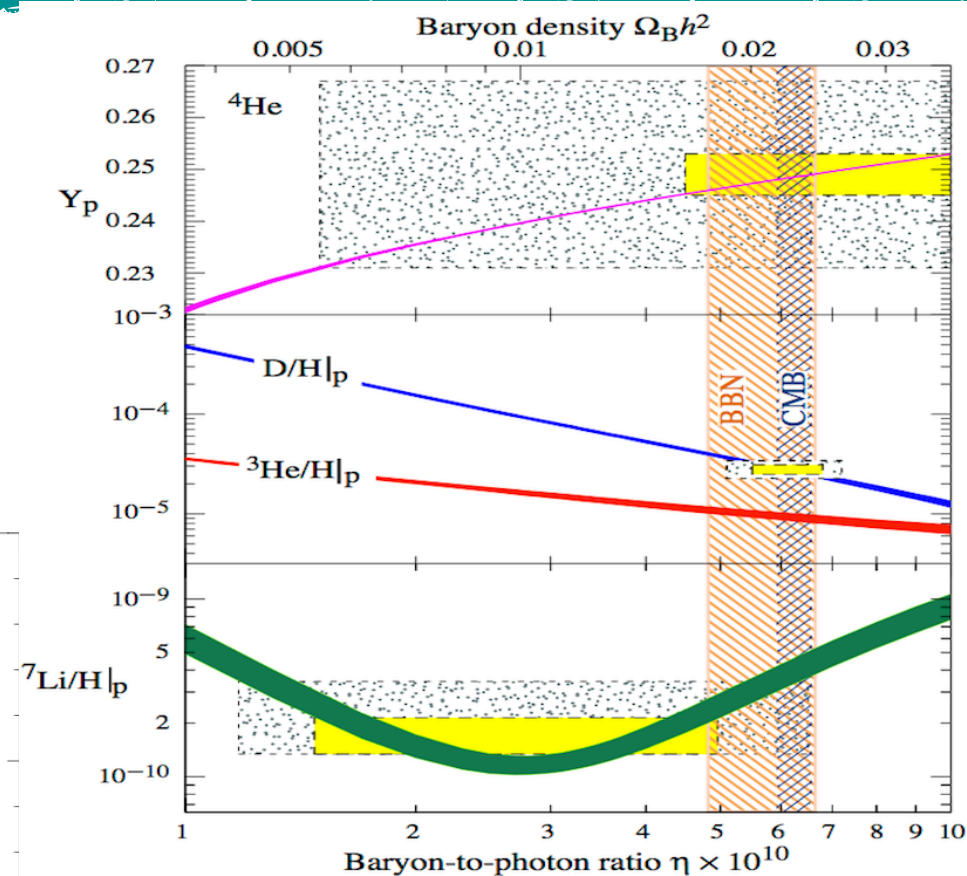
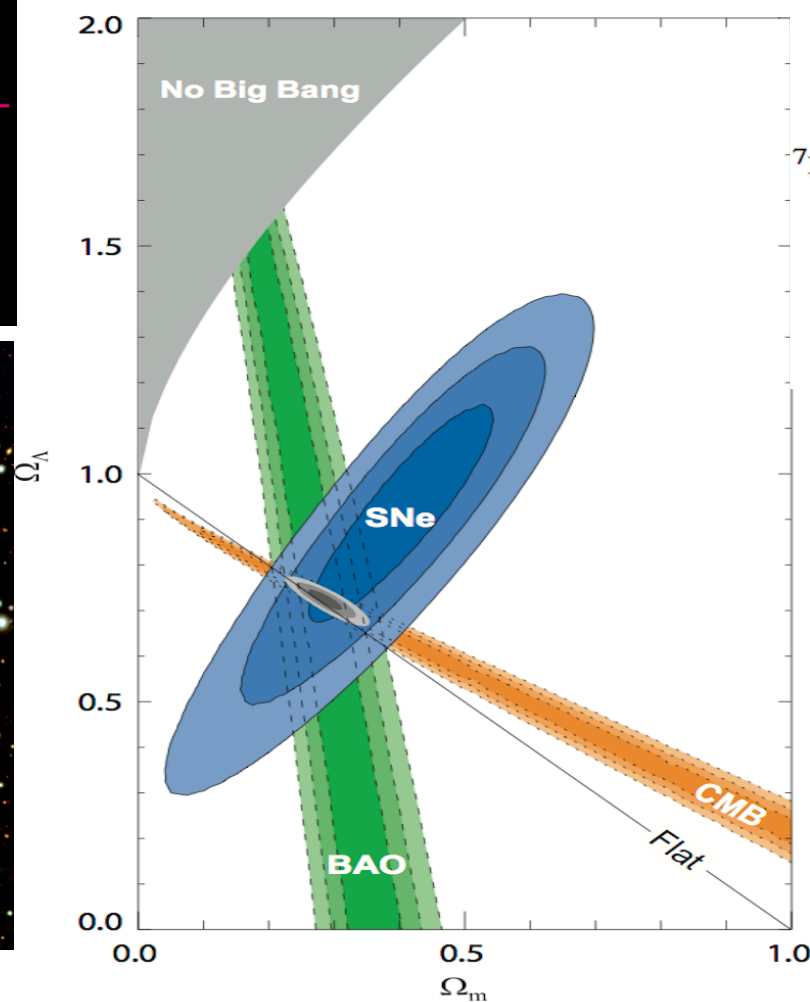
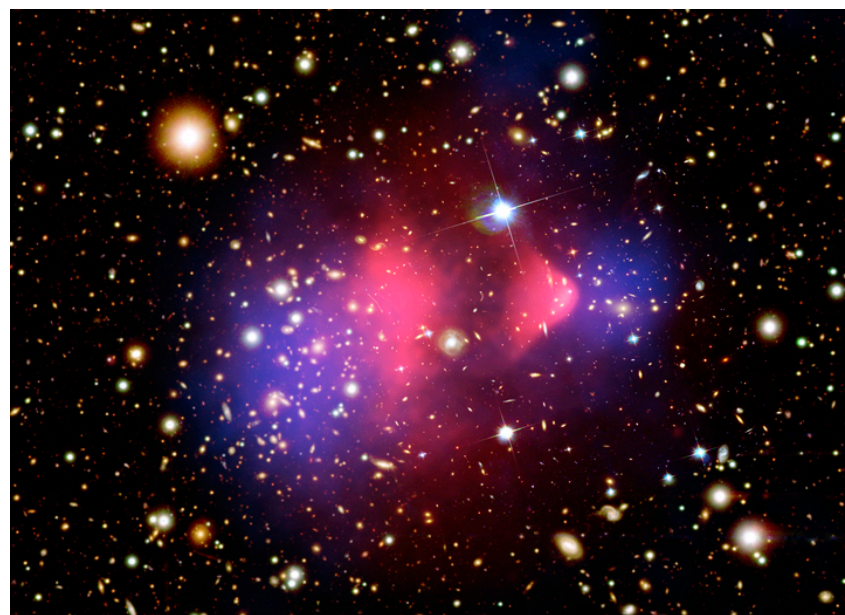
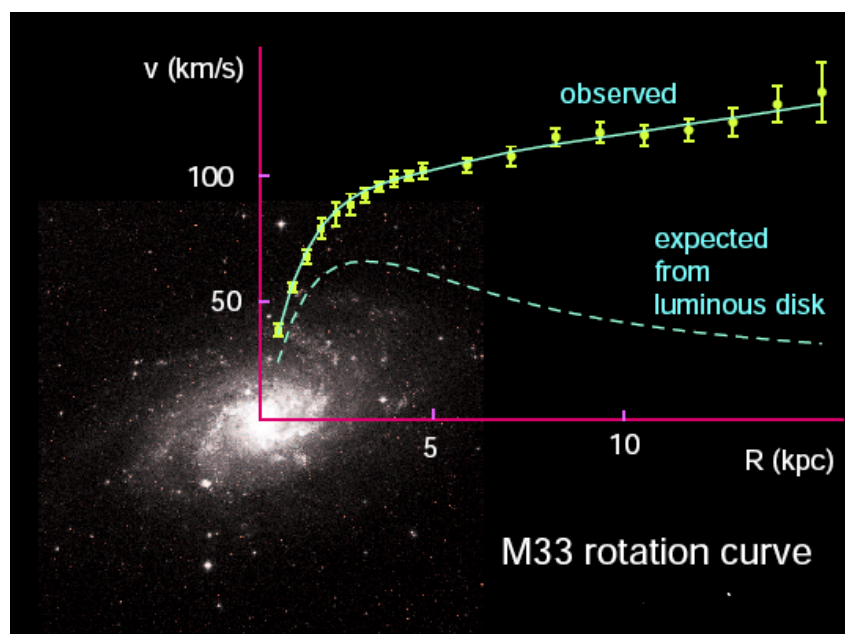
最小标准模型，只有左手中微子，中微子质量为零。



需要超出标准模型外的新物理

超出标准模型外的物理迹象

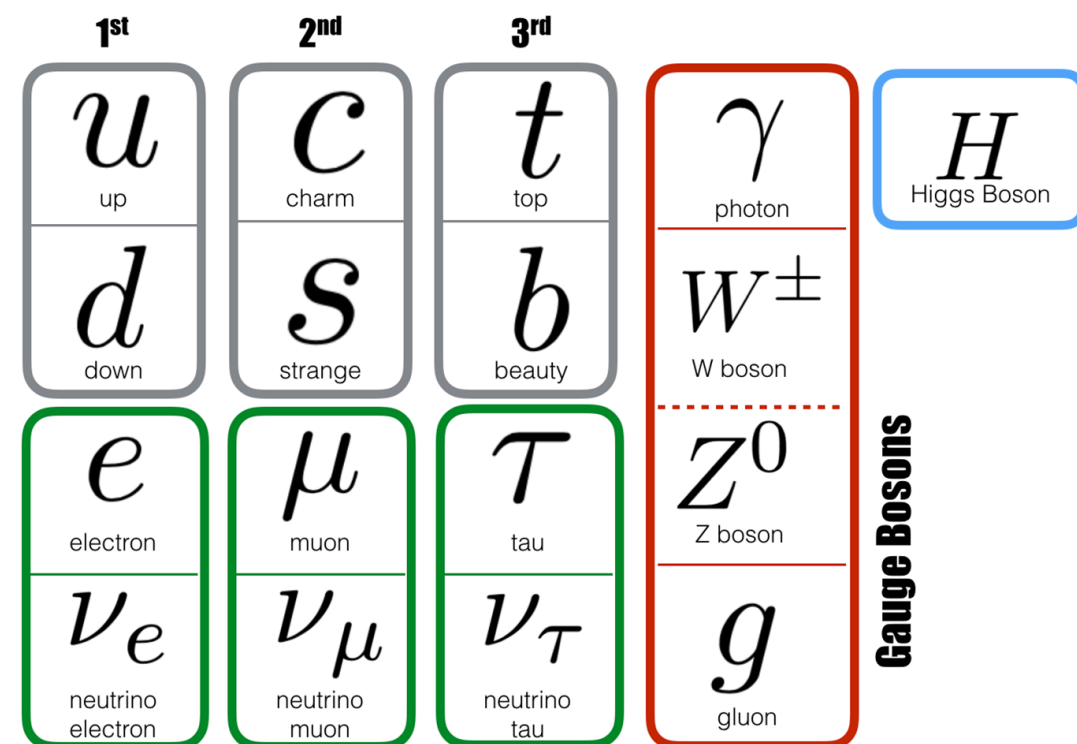
(II) 暗物质是什么粒子?



超出标准模型外的物理迹象

(II) 暗物质是什么粒子?

存在引力相互作用；
电中性或极弱电磁作用；
非重子物质；
和普通物质相互作用较弱；
非相对论性运动（“冷”暗物质）；
稳定粒子或粒子寿命大于宇宙寿命；



标准模型中没有合适的暗物质粒子候选者。

超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

10,000,000,002

物质

10,000,000,000

反物质

超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

10,000,000,002

物质

10,000,000,000

反物质



超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

•
我们

物质

难以置信的
精确相消
(0.00000000002)

超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

10,000,000,001

物质

10,000,000,001

反物质

超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

10,000,000,001

物质

10,000,000,001

反物质



超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

•
我们

物质

物理机制
导致不对称
(**0.0000000002**)

超出标准模型外的物理迹象

(III) 宇宙中正反物质不对称

Sakharov 三条件：

- 1，重子数破坏；**
- 2，电荷共轭 (**C**) 和电荷共轭宇称 (**CP**) 对称性破坏；**
- 3，不可逆过程，脱离平衡态；**

重子起源：需要除标准模型夸克部分 **KM 机制外的 **CP** 对称性破缺起源。**

超出标准模型新物理

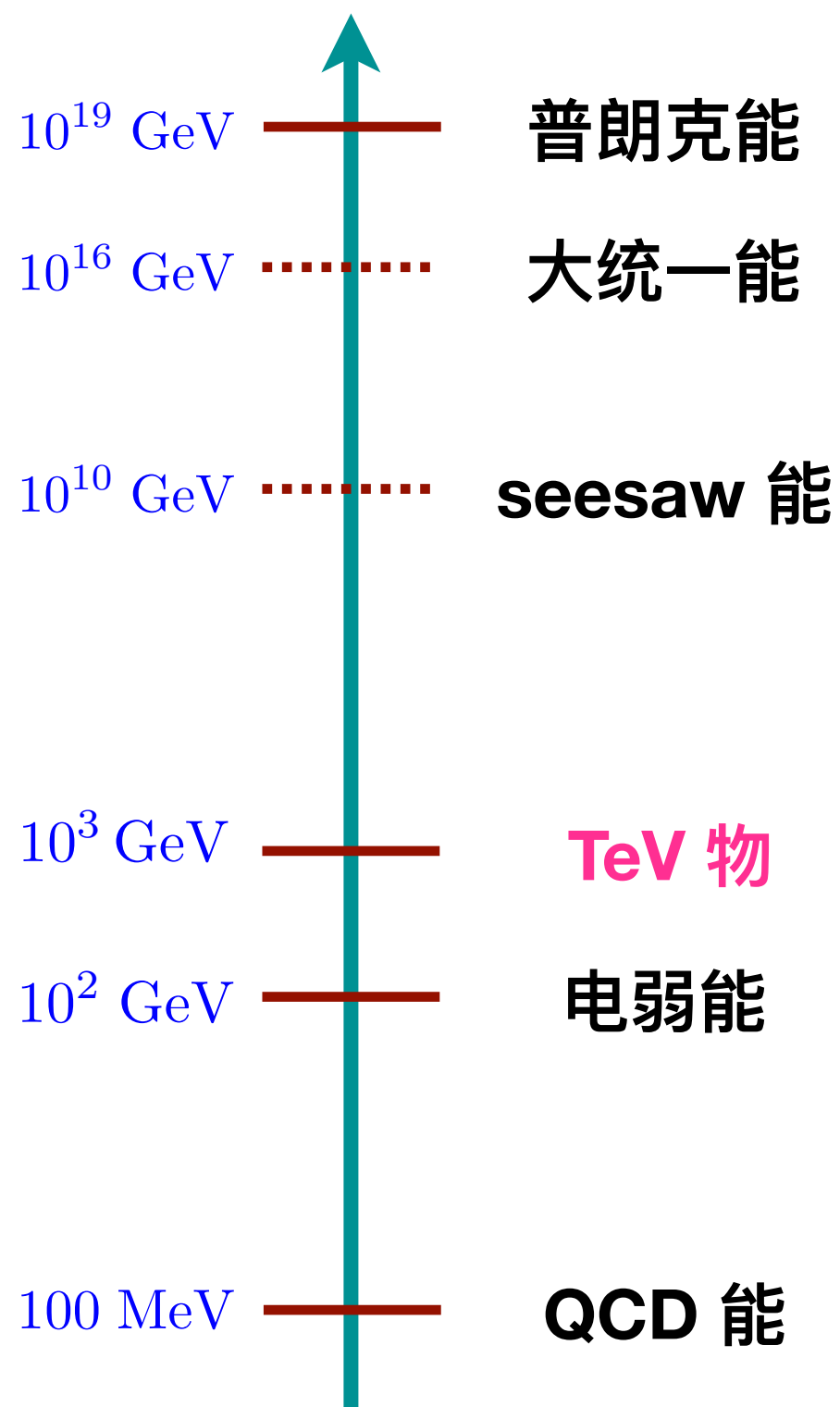
理论：

- 新的粒子：扩充费米子，规范玻色子，Higgs, ...
- 新的规范对称性：扩充对称性，更大的对称群，...
- 新的时空结构：额外的维度，...

实验：

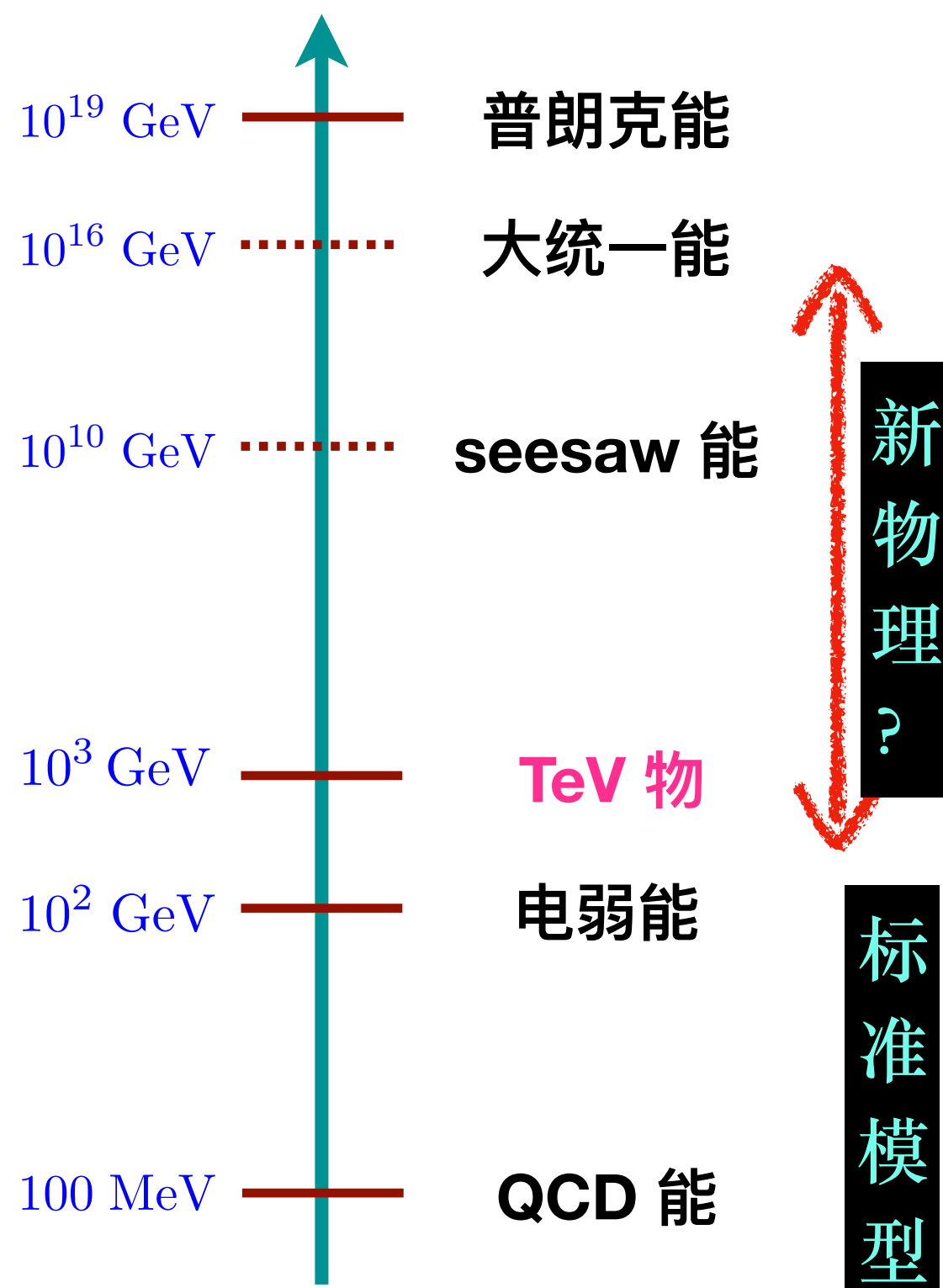
- 发现新的共振态；
- 发现新的相互作用形式；

超出标准模型新物理

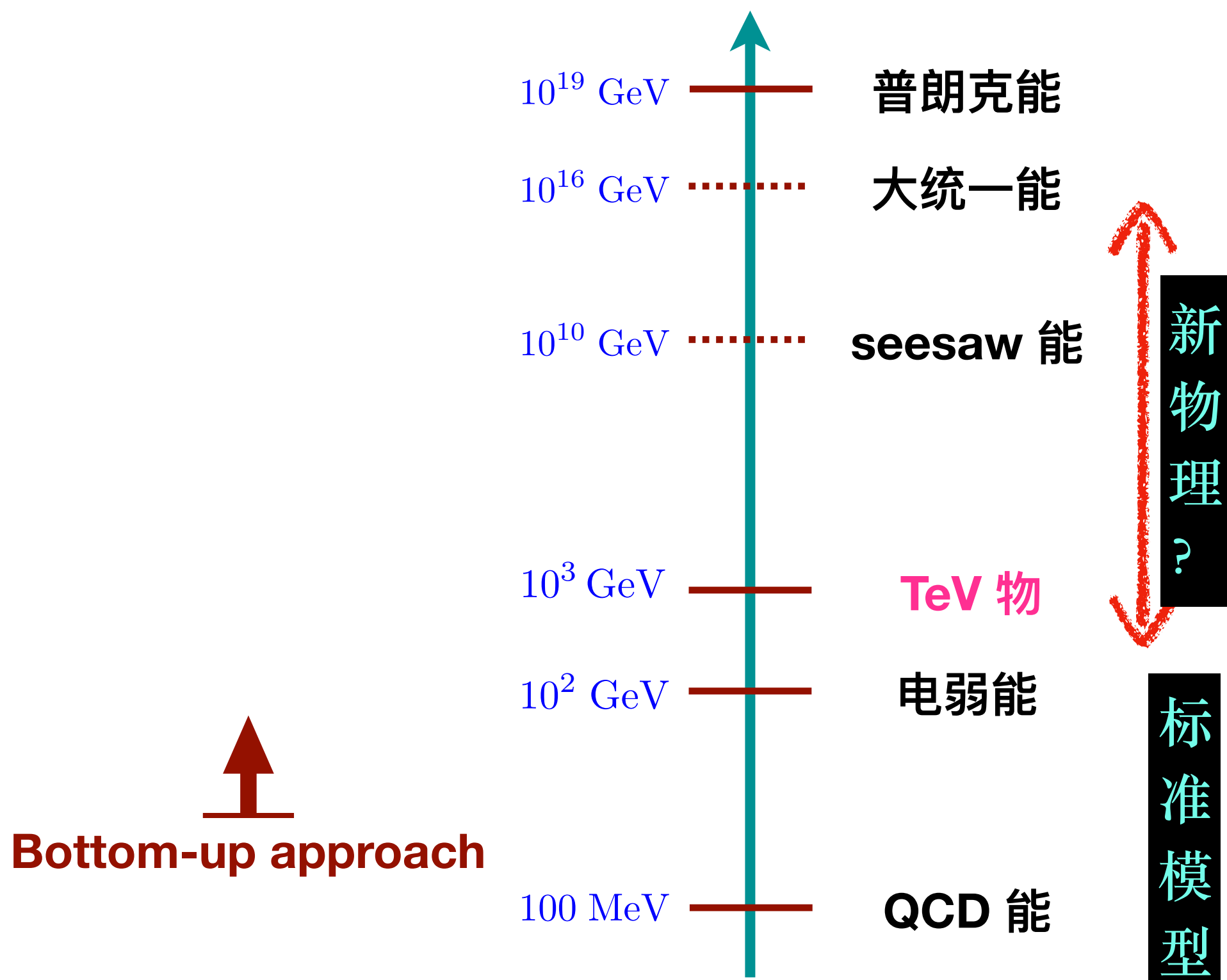


标准模型

超出标准模型新物理

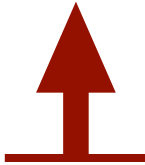


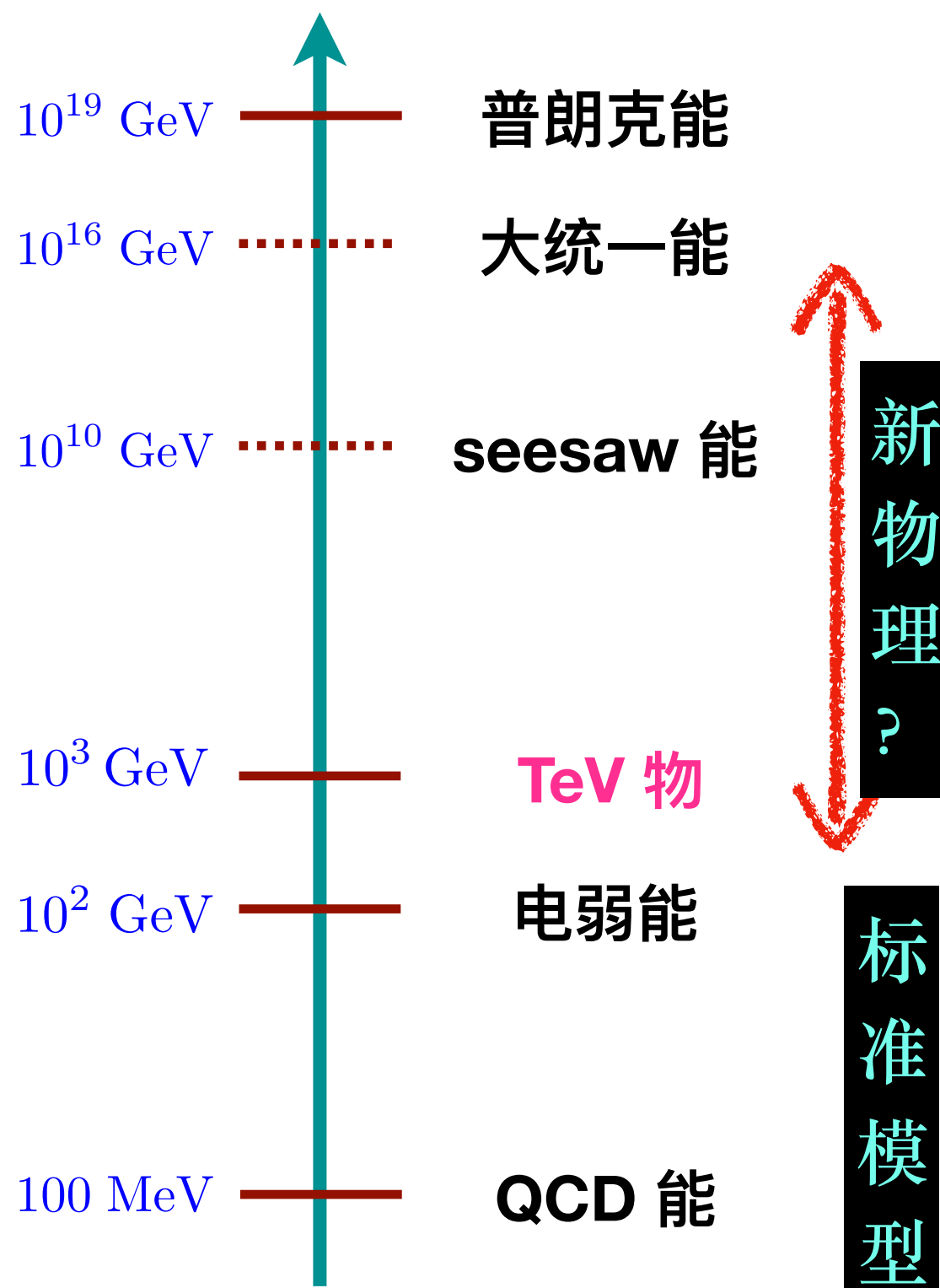
超出标准模型新物理



超出标准模型新物理

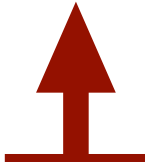
加入额外粒子：
第四代费米子，
seesaw 模型，
双二重态 Higgs 模型，
Leptoquarks，
Z prime, W prime，
dark photons，
...

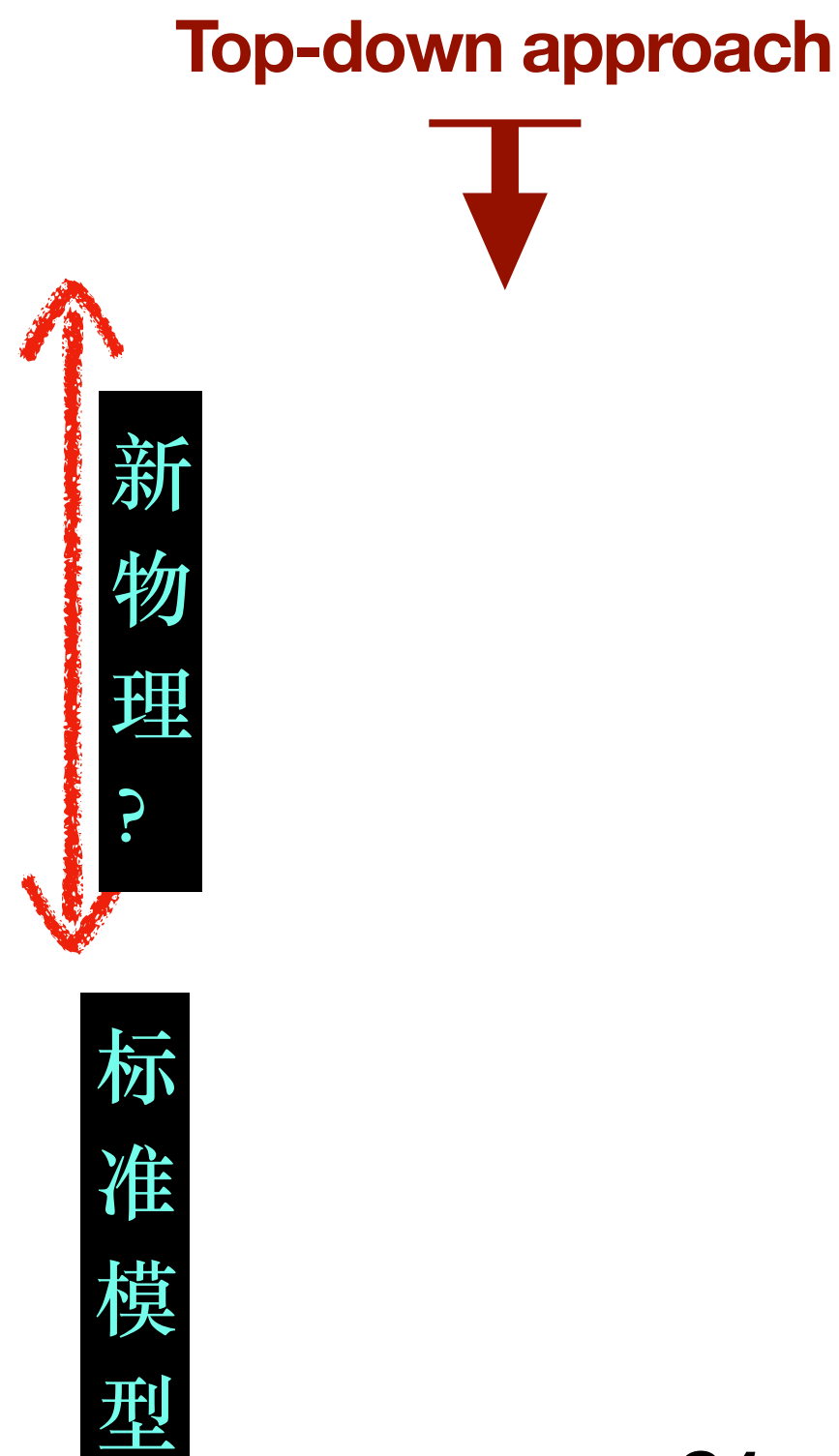
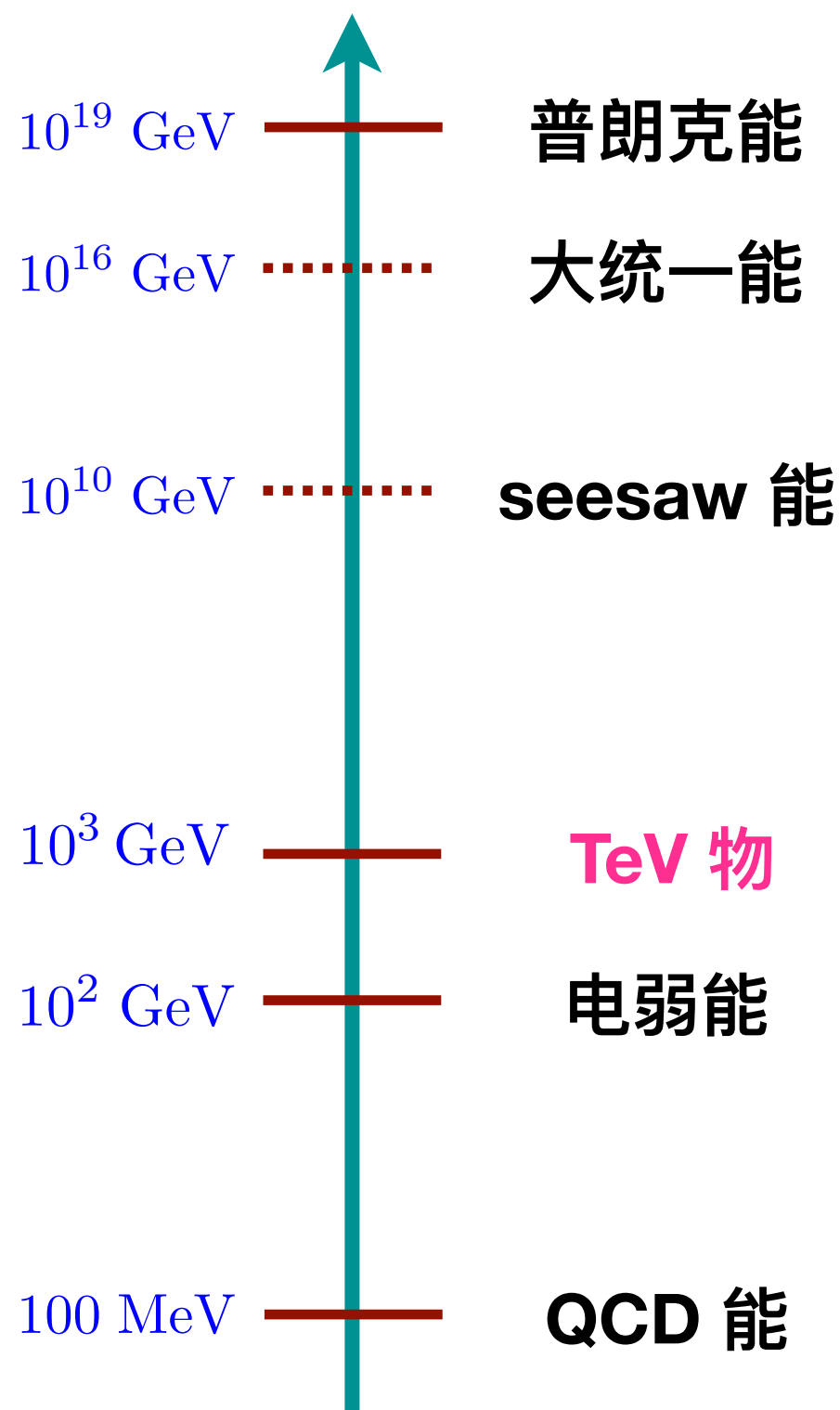

Bottom-up approach



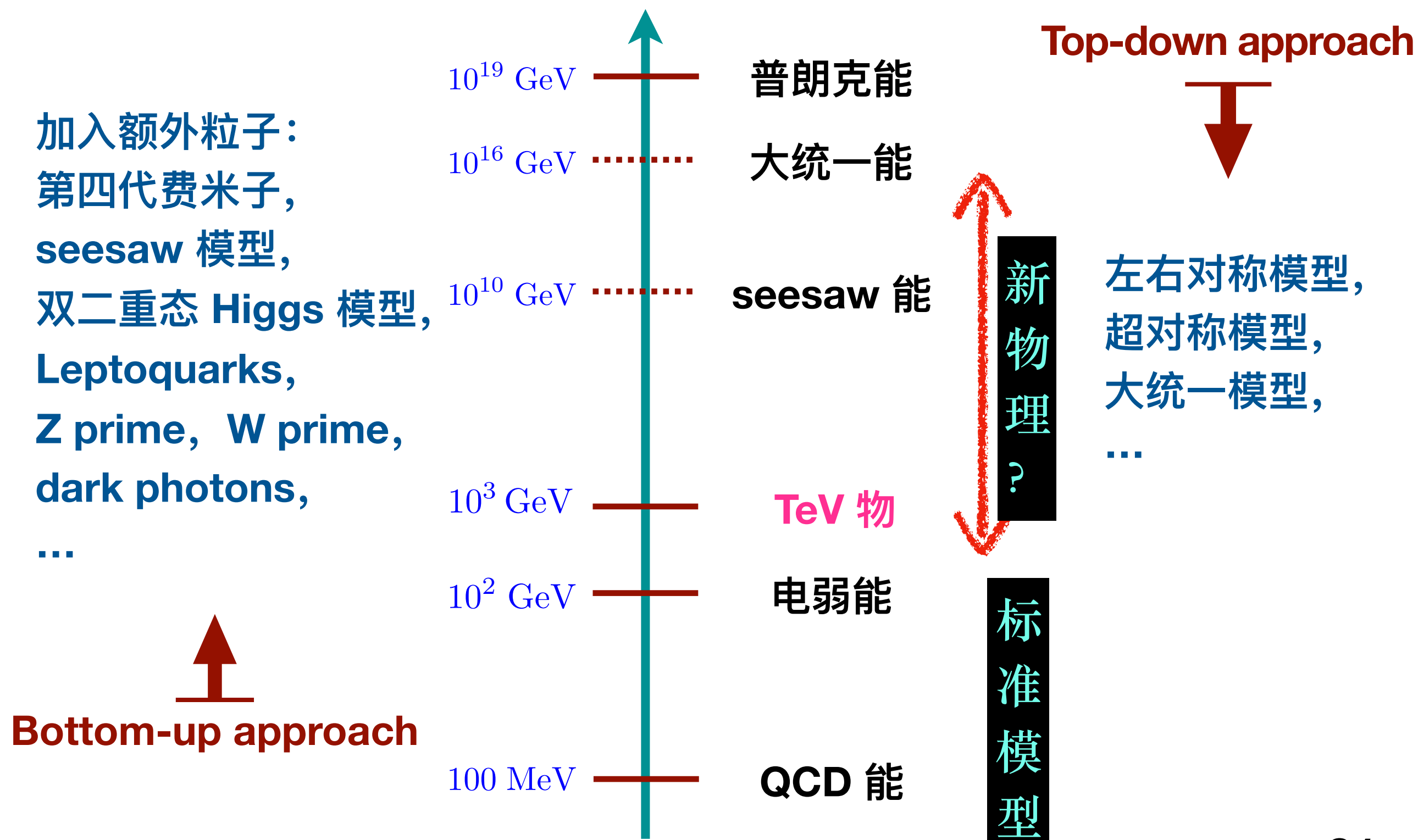
超出标准模型新物理

加入额外粒子：
第四代费米子，
seesaw 模型，
双二重态 Higgs 模型，
Leptoquarks，
Z prime, W prime，
dark photons，
...


Bottom-up approach



超出标准模型新物理

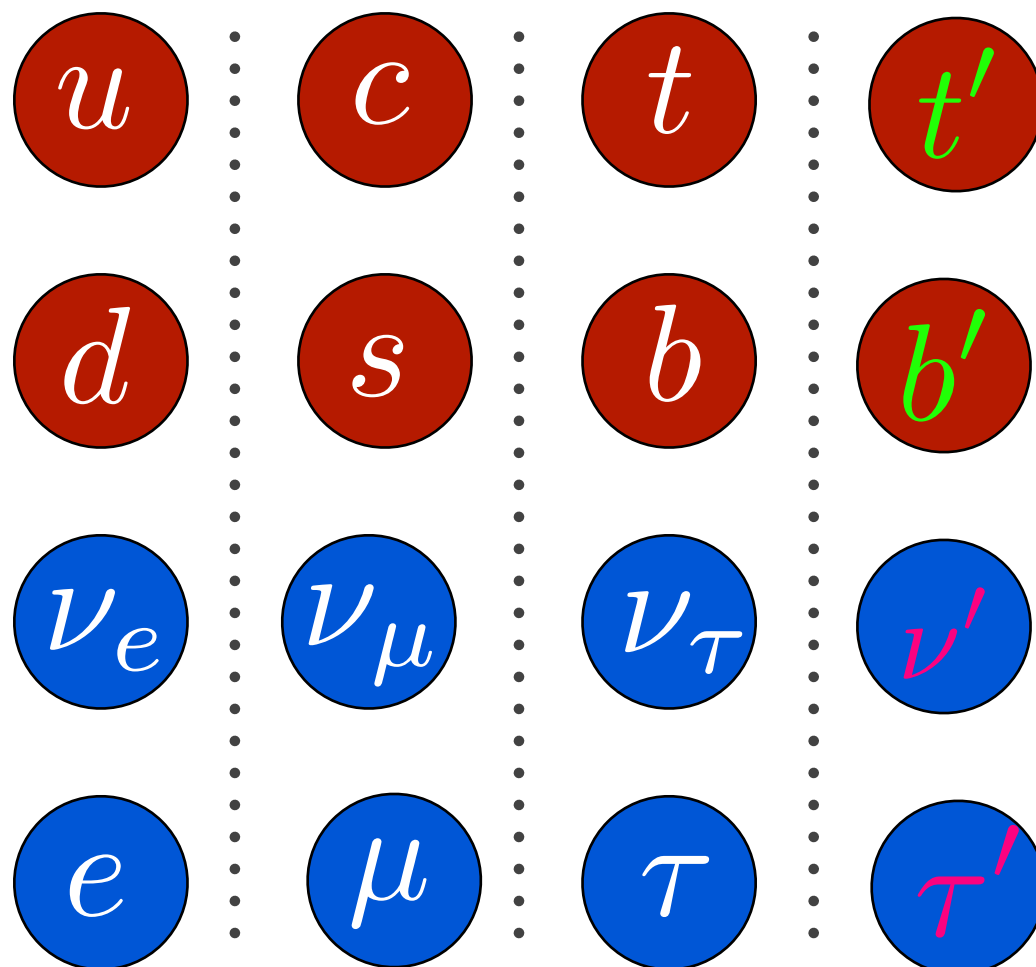


第四代费米子

扩充费米子部分

夸克

轻子



- 是否存在更多代的费米子？
- Z 粒子不可见衰变宽度说明，额外代的轻中微子质量要大于 Z 粒子一半。
- 夸克混合矩阵改变，三代 CKM 矩阵的幺正性测量会给出标准模型夸克和第四代夸克混合的限制。
- 更多的 CP 相位。
- ...

Extend Higgs Sector

扩充 Higgs 部分

例如：加入另外一个弱二重态 Higgs, (Two Higgs Doublet Model, 2HDM)

有不同的实现形式，导致不同的唯象学。

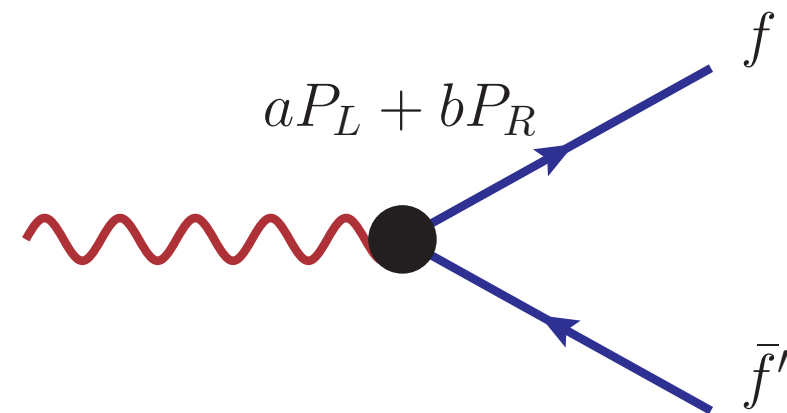
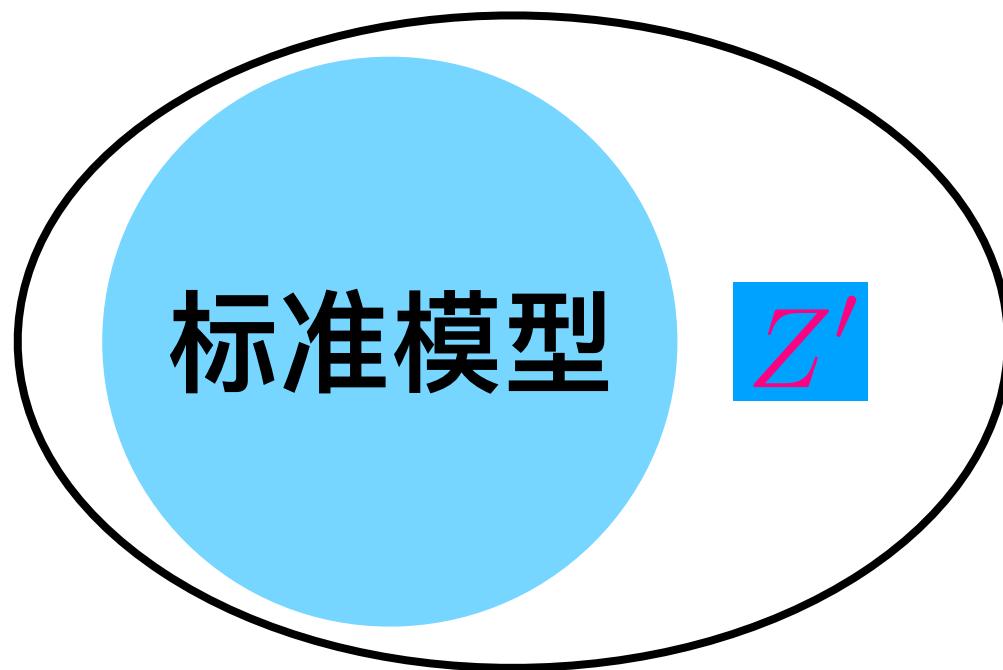
Model	u_R^i	d_R^i	e_R^i
Type I	Φ_2	Φ_2	Φ_2
Type II	Φ_2	Φ_1	Φ_1
Lepton-specific	Φ_2	Φ_2	Φ_1
Flipped	Φ_2	Φ_1	Φ_2

有 5 个的物理 Higgs 粒子，3个中性的，2个带电荷；
可以包含 CP 对称性自发破坏机制。

Z prime

扩充 规范玻色子

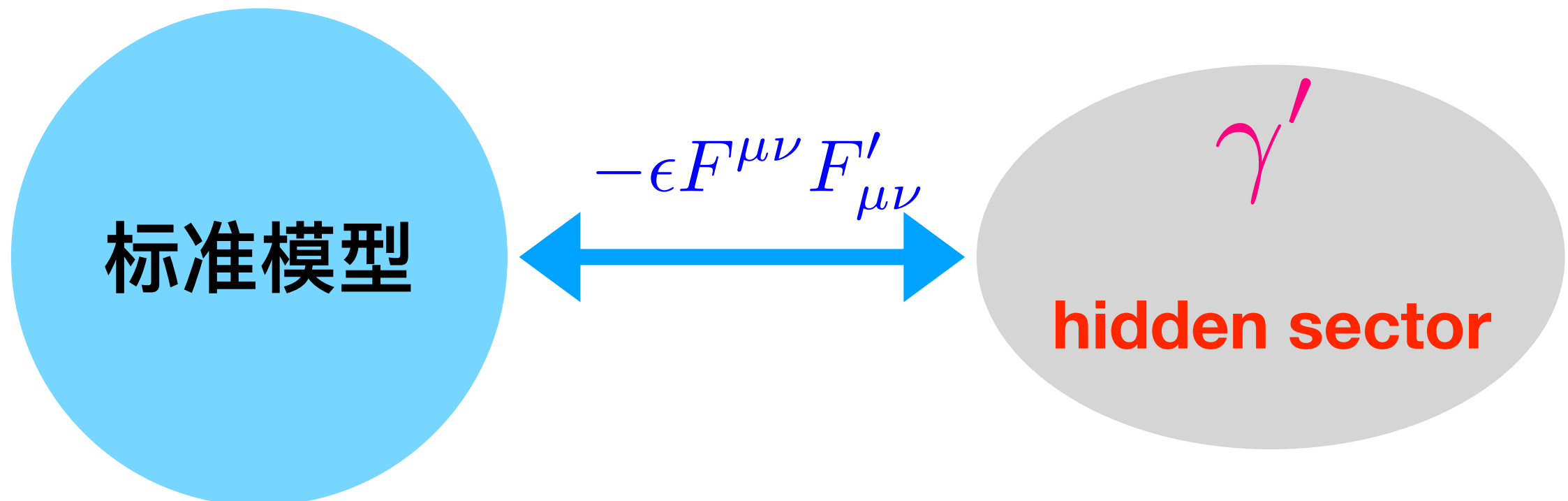
- 可来自于额外的规范对称性，例如 U(1)、左右对称模型、大统一模型等。



leptophobic, leptophilic, lepton flavor violating, lepton non-universal, topphilic, quarkphobic, ...导致较丰富的低能唯象。

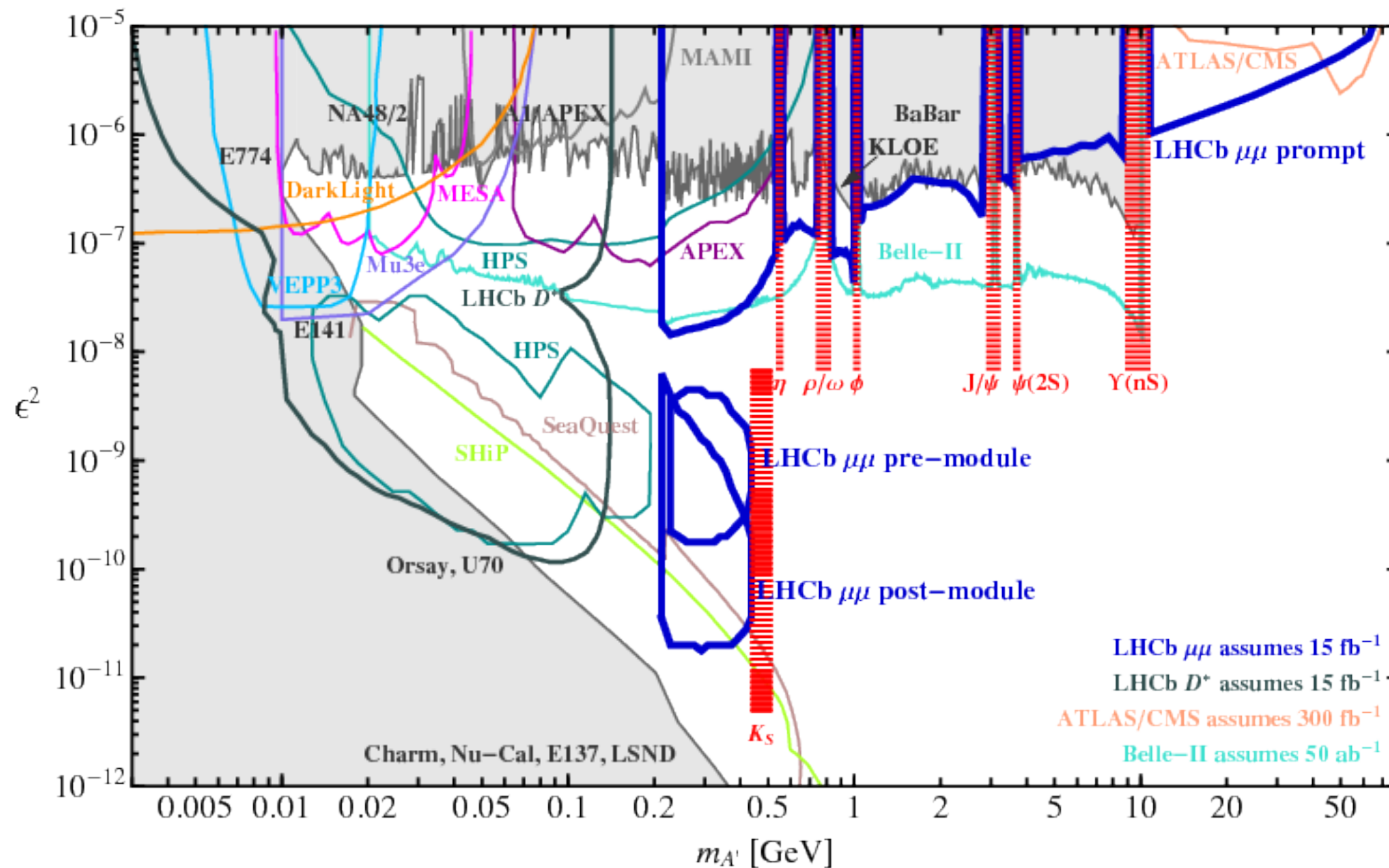
Dark photon

Connecting with the dark sector.



例如：light dark photon, 通过 kinetic mixing 和 photon 耦合。

Dark photon



arXiv:1603.08926

中微子质量

Dirac 质量

$$\mathcal{L} = -m\bar{\psi}\psi = -m\bar{\psi}_L\psi_R + h.c.$$



$$Q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \sim (3, 2, 1/3)$$

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \sim (1, 2, -1)$$

$$u_R \sim (3, 1, 4/3)$$

$$d_R \sim (3, 1, -2/3)$$

$$e_R \sim (1, 1, -2)$$

$$\mathcal{L} = -y_E \bar{L}_L \Phi e_R - y_d \bar{Q}_L \Phi d_R - y_u \bar{Q}_L \tilde{\Phi} u_R + h.c.$$

Majorana 质量

$$\mathcal{L} = -m\bar{\psi}_L^c \psi_L$$



量子“荷”破坏 $\Delta = 2Q(\psi)$

中微子可以有 Majorana 质量，不破坏电荷守恒，但轻子数被破坏。

中微子质量

(1) Dirac 质量:

$$Q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \sim (3, 2, 1/3)$$

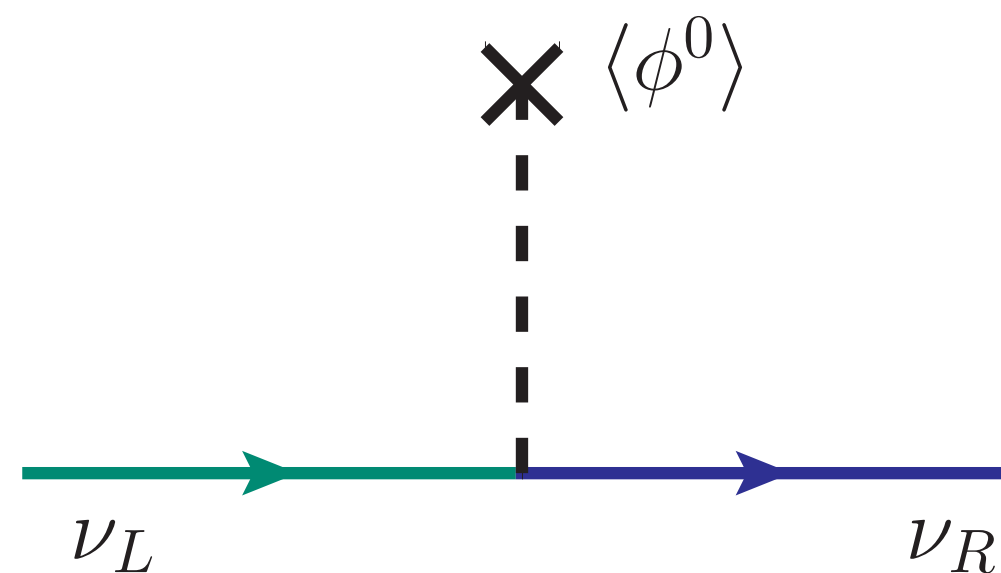
$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \sim (1, 2, -1)$$

$$u_R \sim (3, 1, 4/3)$$

$$d_R \sim (3, 1, -2/3)$$

$$e_R \sim (1, 1, -2)$$

$$\underline{\nu_R \sim (1, 1, 0)}$$



$$m_\nu \bar{\nu}_R \nu_L + h.c.$$

$$\mathcal{L} = -y_E \bar{L}_L \Phi e_R - y_d \bar{Q}_L \Phi d_R - y_u \bar{Q}_L \tilde{\Phi} u_R - \underline{y_\nu \bar{L}_L \tilde{\Phi} \nu_R} + h.c.$$

中微子质量

(1) Dirac 质量:

$$Q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \sim (3, 2, 1/3)$$

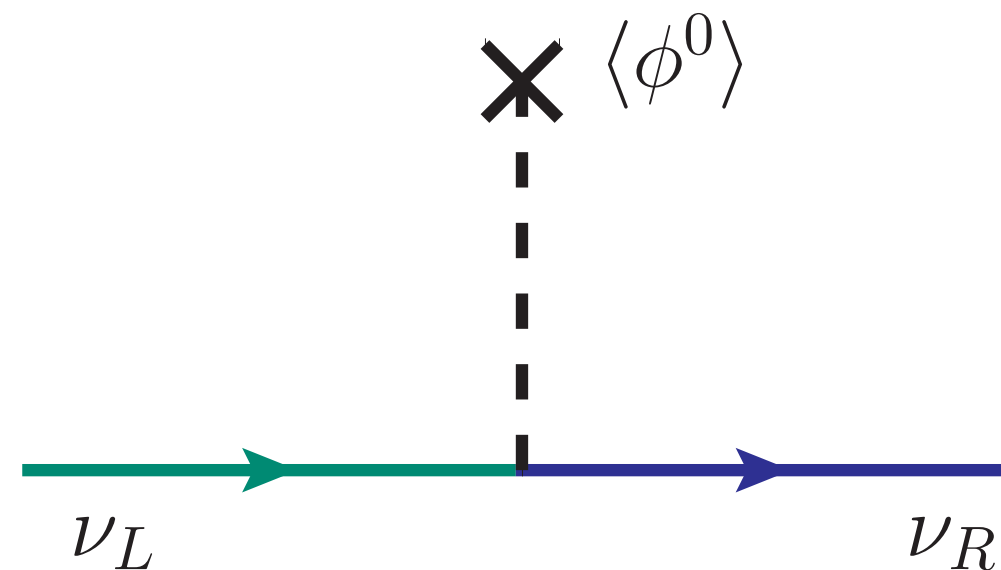
$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \sim (1, 2, -1)$$

$$u_R \sim (3, 1, 4/3)$$

$$d_R \sim (3, 1, -2/3)$$

$$e_R \sim (1, 1, -2)$$

$$\underline{\nu_R \sim (1, 1, 0)}$$



$$m_\nu \bar{\nu}_R \nu_L + h.c.$$

$$\mathcal{L} = -y_E \bar{L}_L \Phi e_R - y_d \bar{Q}_L \Phi d_R - y_u \bar{Q}_L \tilde{\Phi} u_R - \underline{y_\nu \bar{L}_L \tilde{\Phi} \nu_R} + h.c.$$

为什么中微子质量远小于其他（带电）费米子质量？

中微子质量

(2) Majorana 质量:

将新物理效应写成低能有效算子

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{\mathcal{O}^{d=5}}{\Lambda} + \frac{\mathcal{O}^{d=6}}{\Lambda^2} + \dots$$

Weiberg 算符: 温伯格 (1979) 指出只存在一个 5 维算子, 真空自发对称性破缺后可提供中微子 Majorana 质量。

$$\frac{\mathcal{O}^{d=5}}{\Lambda} = \frac{(\bar{L}^c H)(LH)}{\Lambda}$$

$$[\psi] = \frac{3}{2}, [H] = 1$$

$$\mathcal{L}_m = -\frac{(\bar{\nu}^c \nu \phi^0 \phi^0)}{\Lambda} \Rightarrow \boxed{m_\nu = \frac{v^2}{\Lambda}}$$

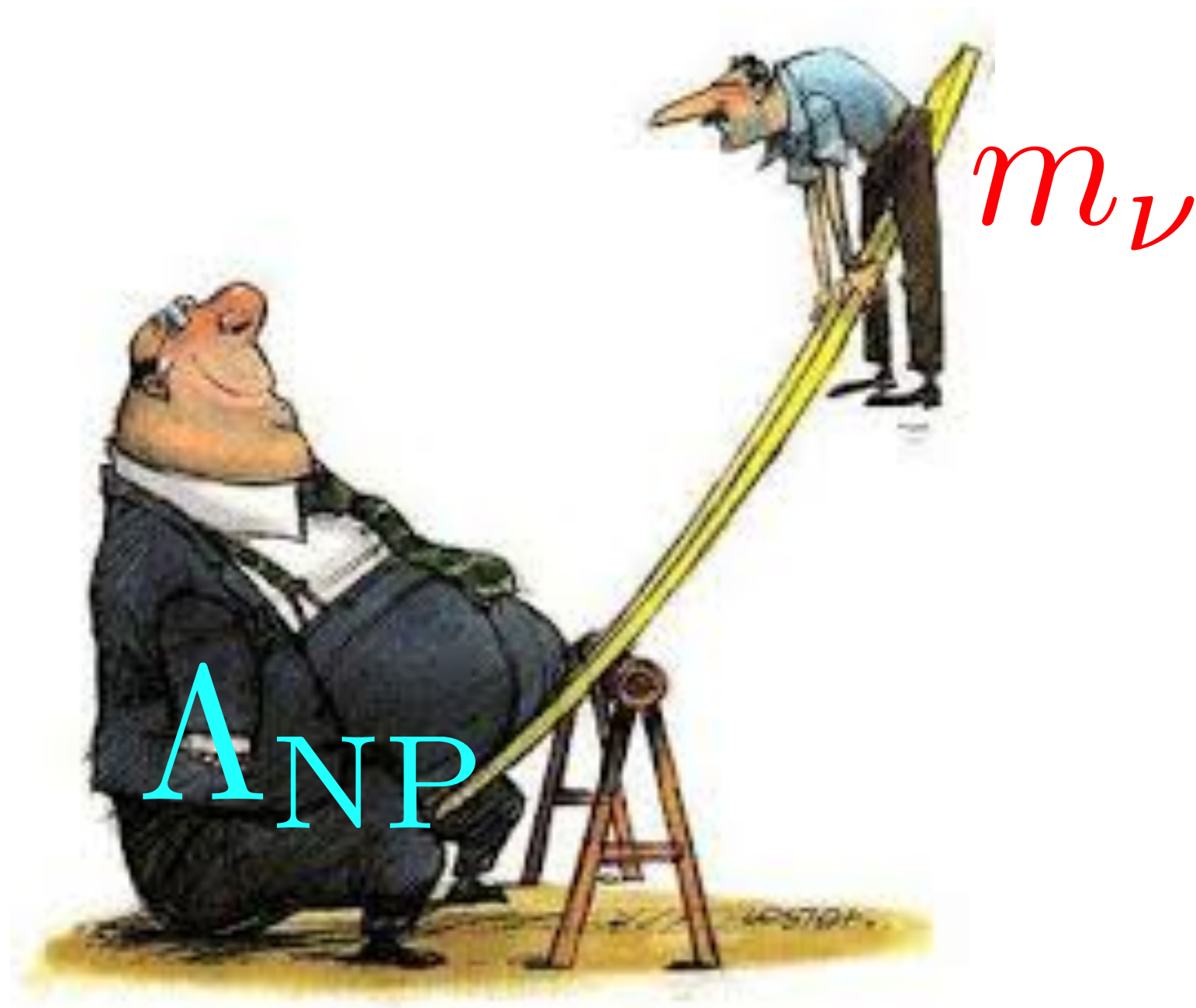
$$\langle \phi^0 \rangle = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

跷跷板机制 seesaw mechanism



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

中微子质量反比于新物理自由度，可回答为什么中微子质量远小于其他费米子质量。

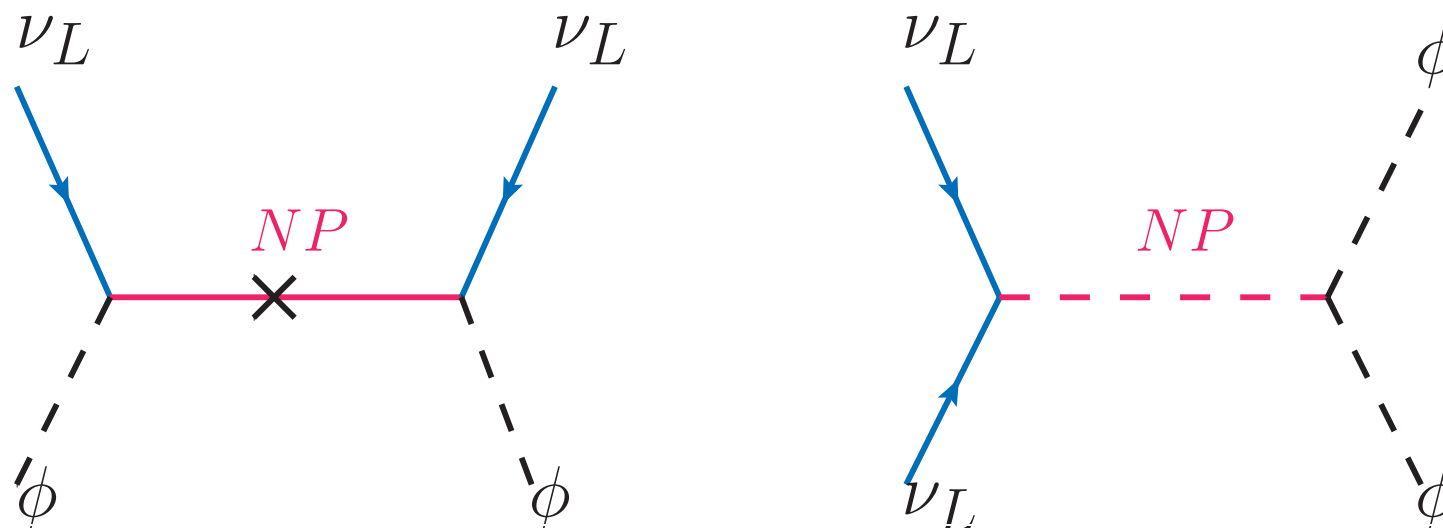


如何模型实现和实验检验？

中微子质量：跷跷板机制

模型实现方式

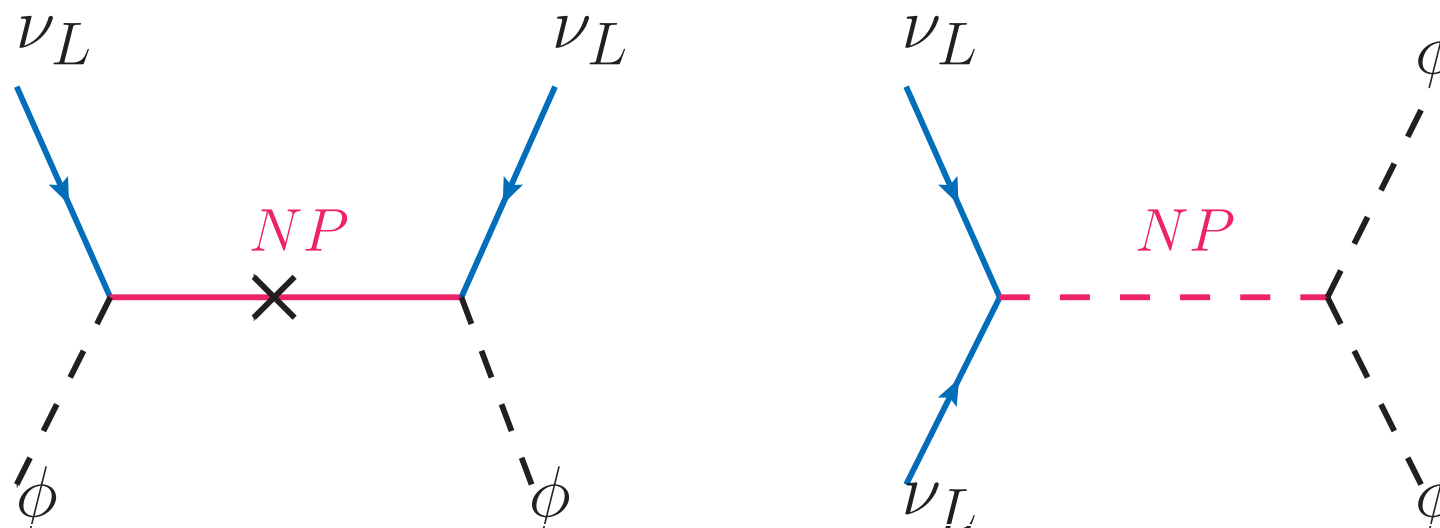
树图



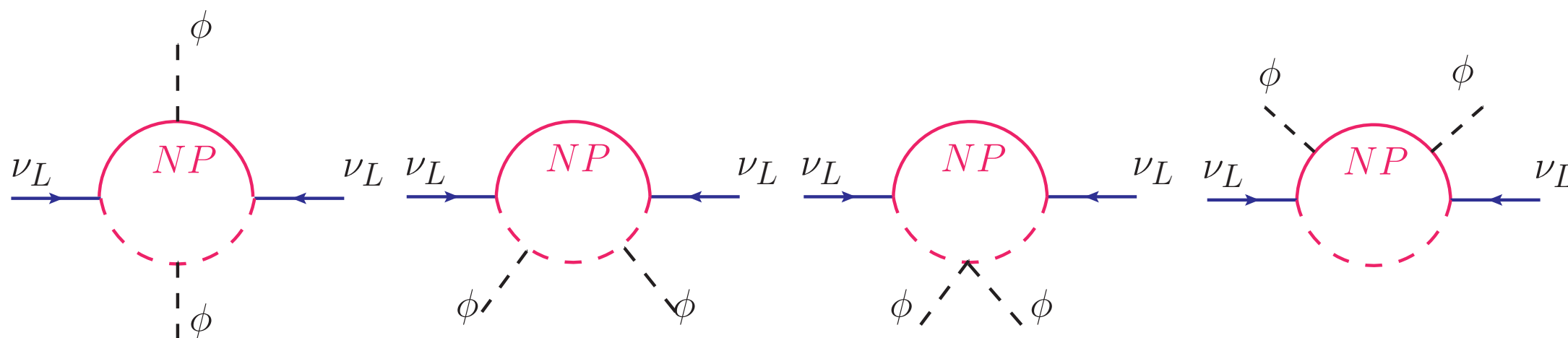
中微子质量：跷跷板机制

模型实现方式

树图

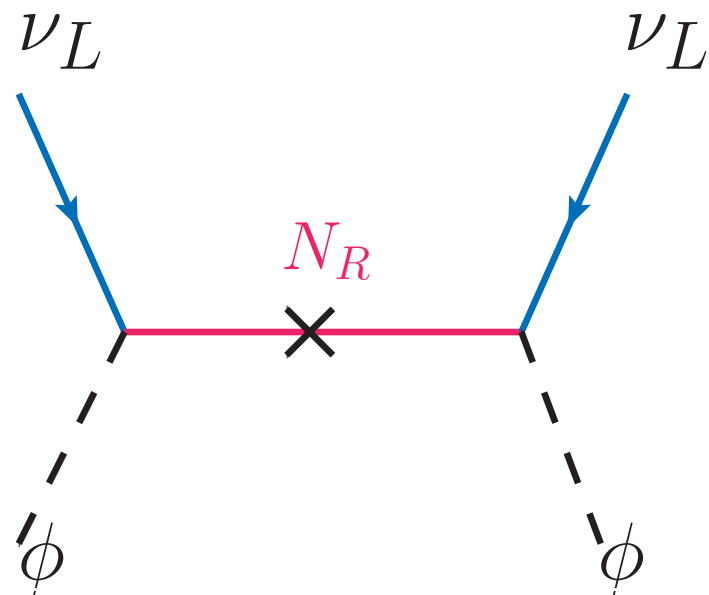


单圈图



中微子质量：跷跷板机制

Type I seesaw



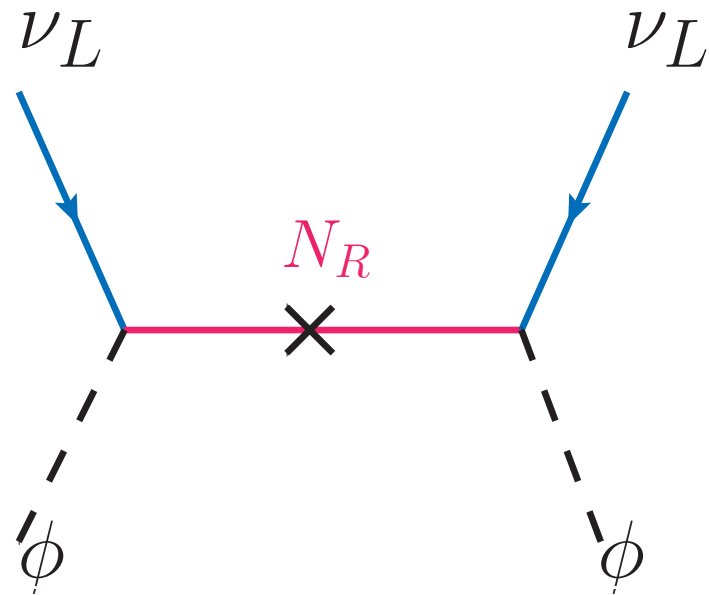
加入单态右手中微子

$$-\mathcal{L} = y \bar{L}_L \tilde{\Phi} N_R + \frac{1}{2} M_N \bar{N}_R^c N_R + h.c$$

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_N \end{pmatrix} \quad m_\nu = \frac{m_D^2}{M_N}$$

中微子质量：跷跷板机制

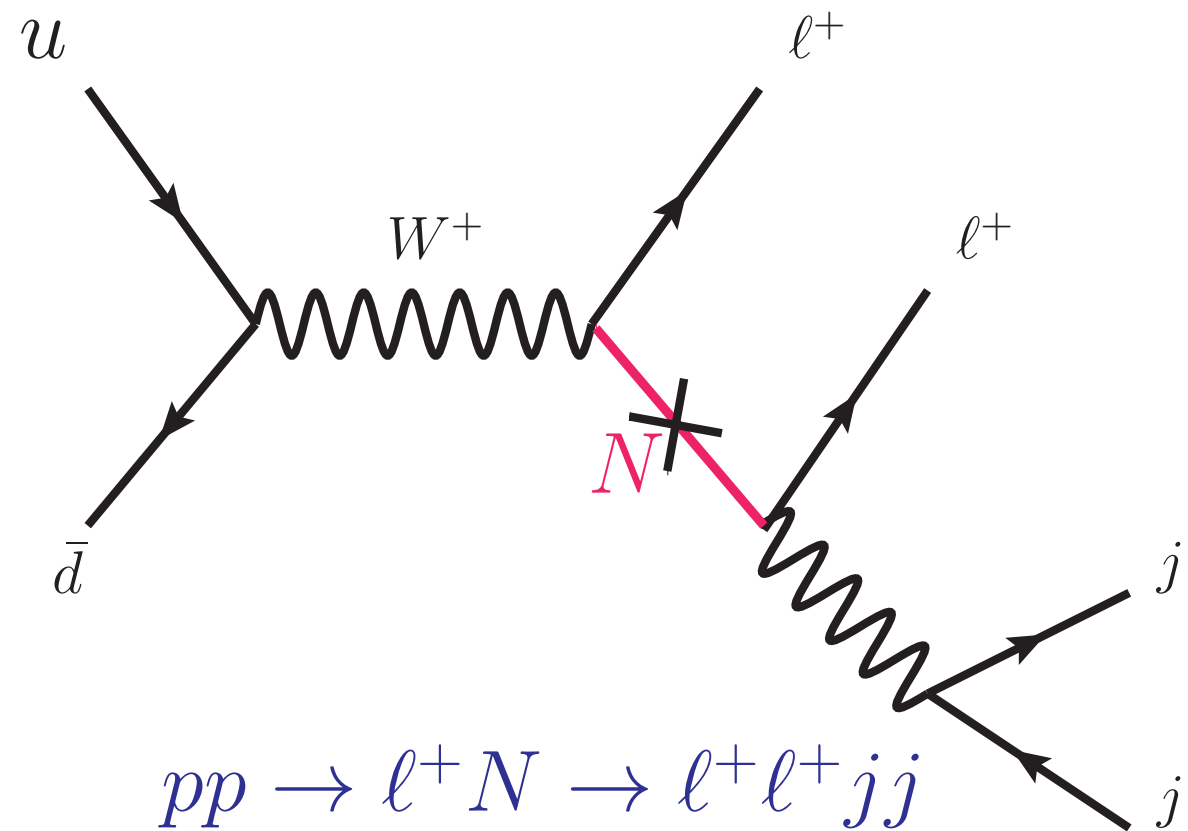
Type I seesaw



加入单态右手中微子

$$-\mathcal{L} = y\bar{L}_L\tilde{\Phi}N_R + \frac{1}{2}M_N\bar{N}_R^cN_R + h.c$$

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_N \end{pmatrix} \quad m_\nu = \frac{m_D^2}{M_N}$$

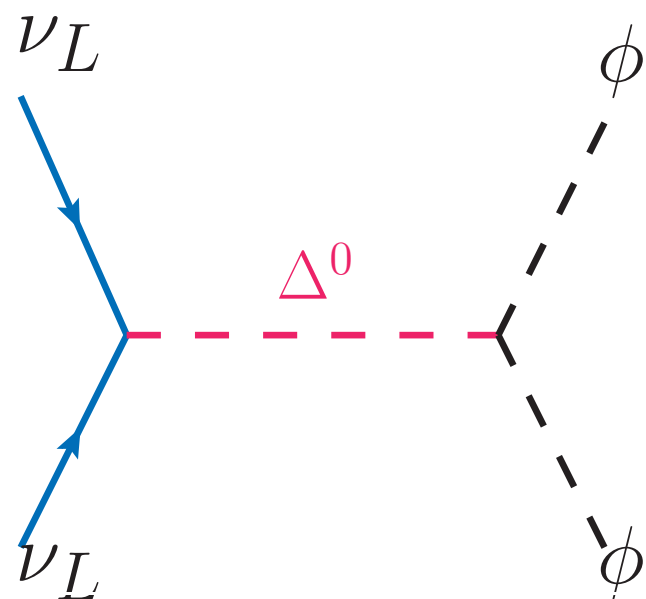


$$pp \rightarrow \ell^+ N \rightarrow \ell^+ \ell^+ jj$$

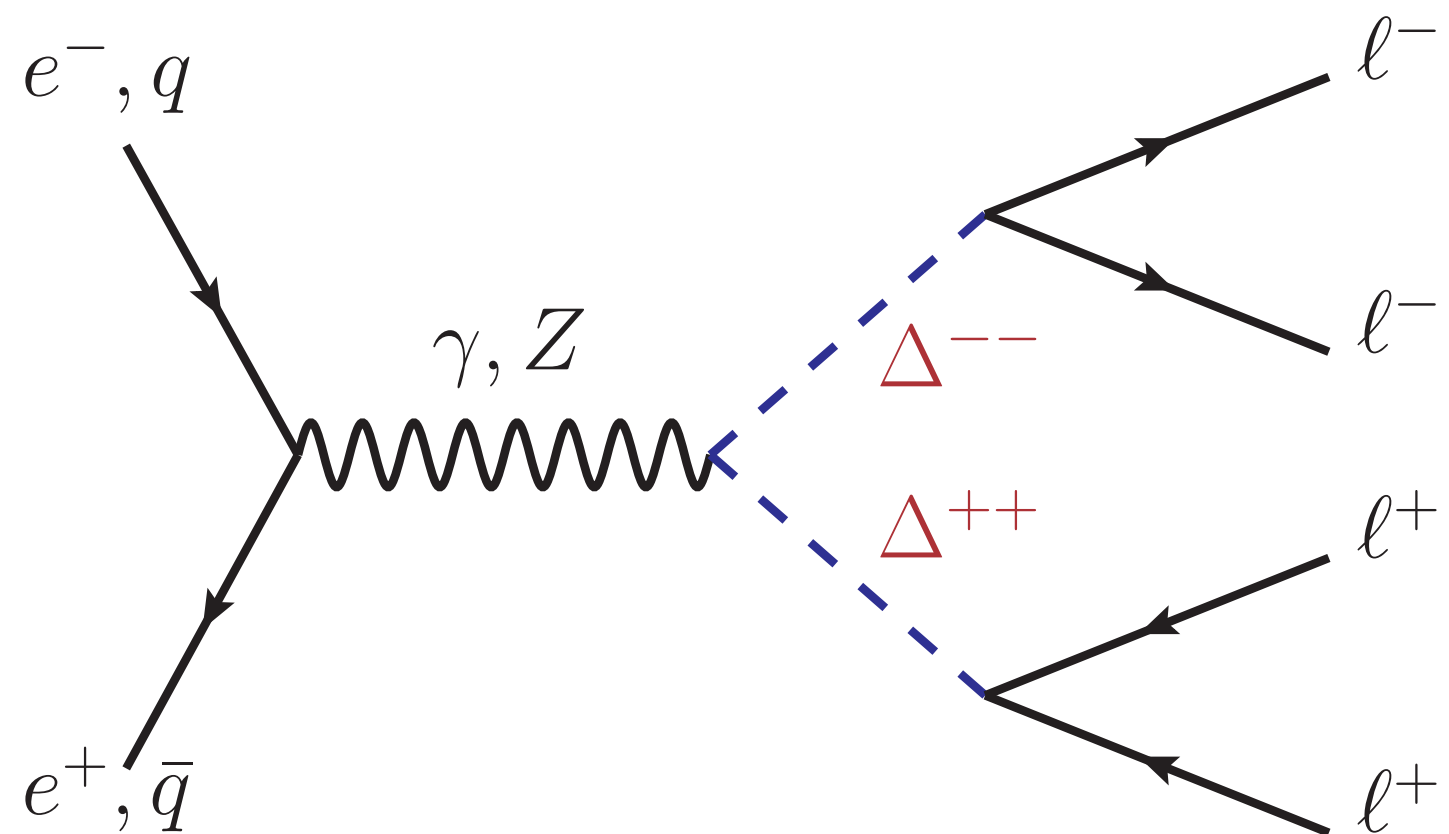
对撞机寻找

中微子质量：跷跷板机制

Type II seesaw

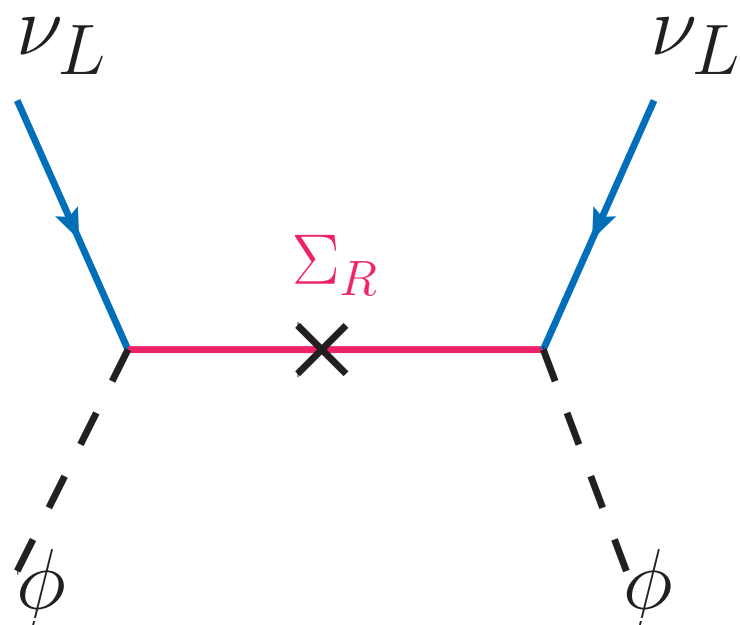


加入弱三重态 Higgs

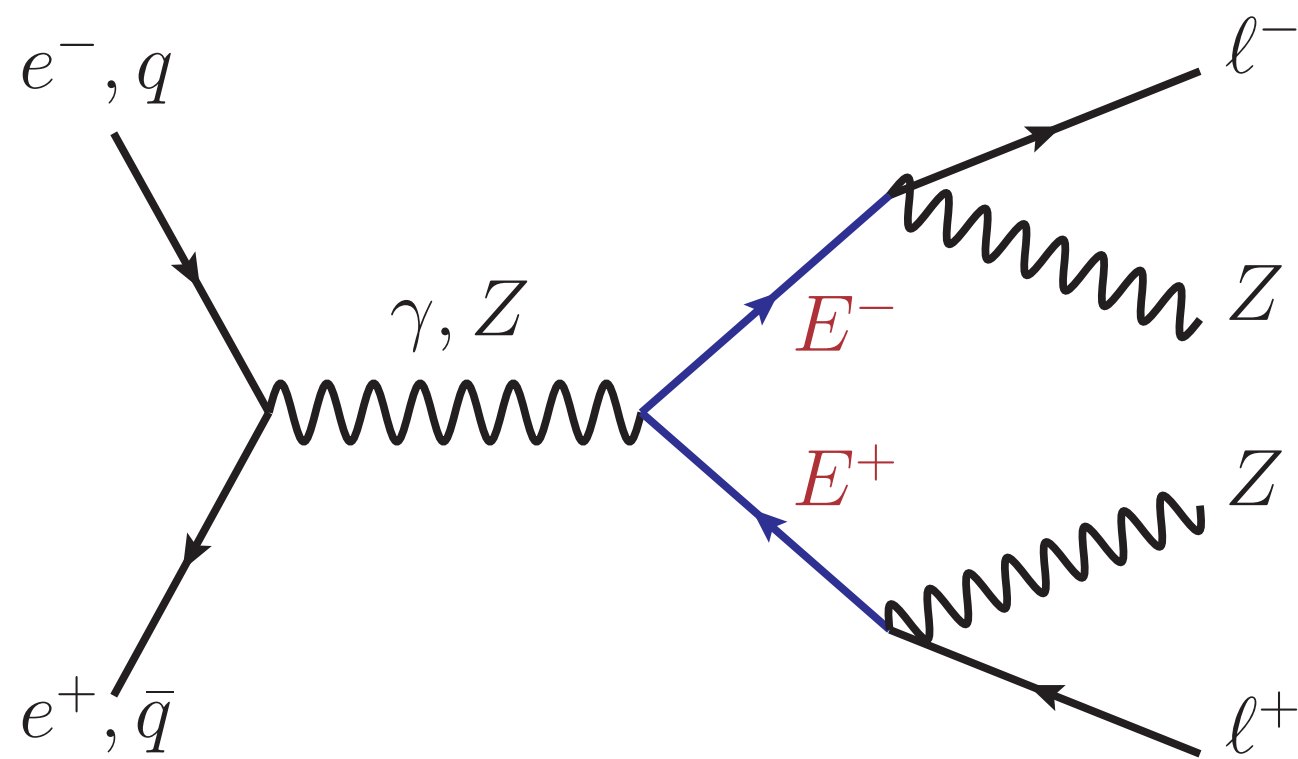


中微子质量：跷跷板机制

Type III seesaw



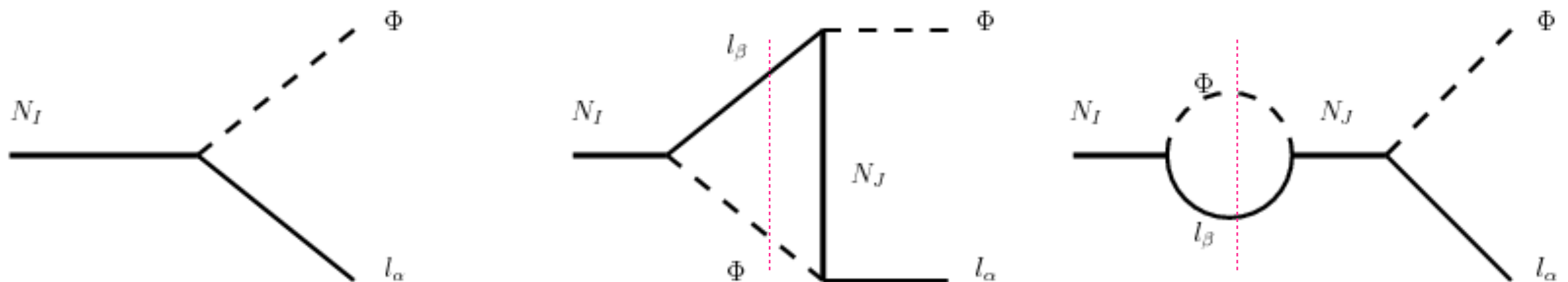
加入弱三重态轻子



Leptogenesis: 宇宙正反物质不对称起源



— 轻子**CP**破坏效应，可以提供一种机制。极重的右手惰性中微子宇宙早期衰变过程中产生净轻子数，转化为净重子数。

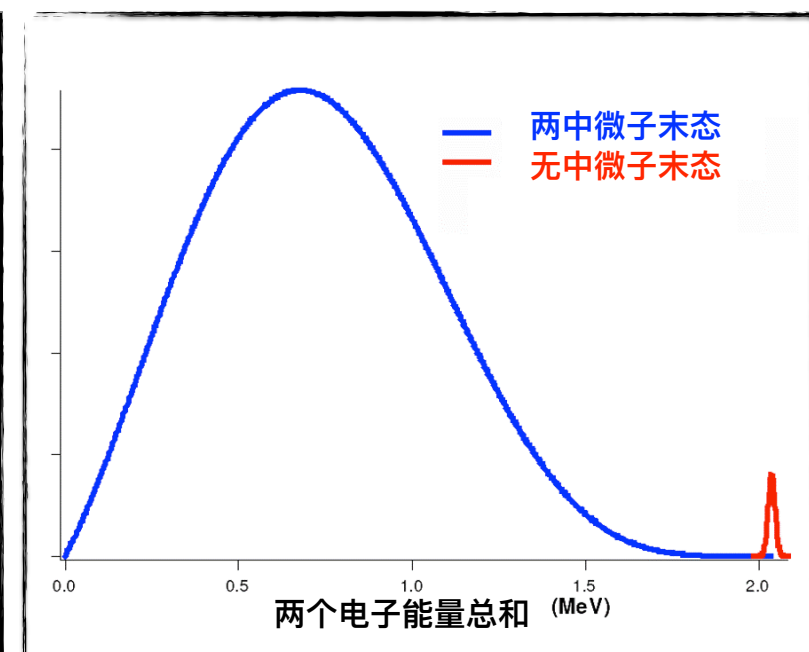
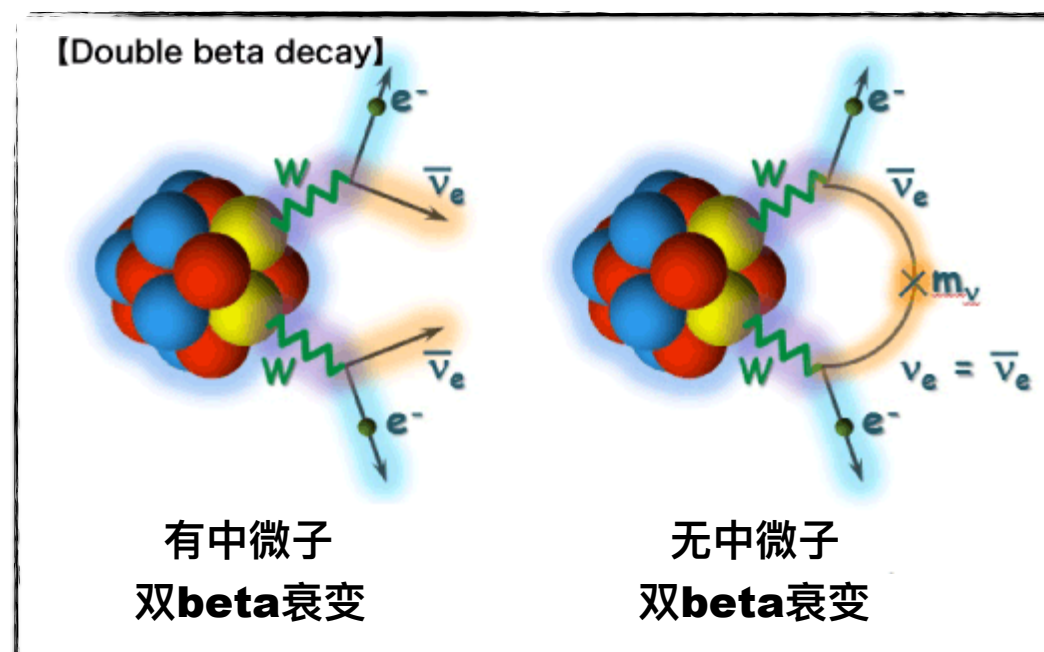
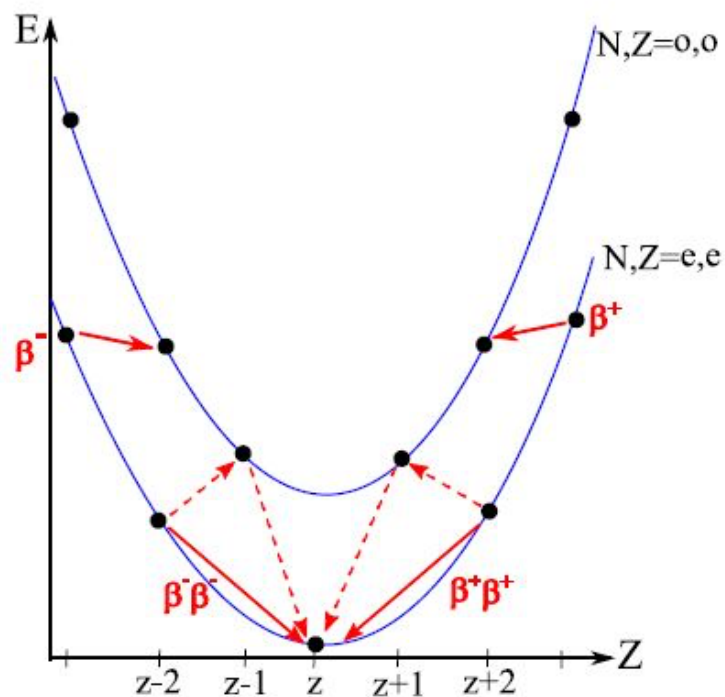


— 解释宇宙正反物质不对称 + 中微子质量：一石二雕。

中微子：Dirac 还是 Majorana 粒子？



要检验轻中微子是否是 Majorana 粒子，也可通过无中微子双贝塔实验



左右手对称模型 Left-Right Symmetric Model



扩充规范对称性

$$SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_{B-L} \xrightarrow{M_{W_R}} SU(2)_L \otimes U(1)_Y \xrightarrow{M_{W_L}} U(1)_{EM}$$

- 1, 扩充了规范对称性, 三个额外规范玻色子; $W_R^\pm, Z'$
- 2, 为自发破坏规范对称性, 需要扩充 Higgs 部分; $H^\pm, A^0, h^0, \delta^\pm, \dots$
- 3, 需加入右手中微子; N_R

$$Q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \quad Q_R = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$$
$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L, \quad L_R = \begin{pmatrix} N \\ e \end{pmatrix}_R$$

- 试图解释为什么低能（带电）弱相互作用是左手？弱作用中宇称不守恒。
- 同时模型中中微子存在质量。

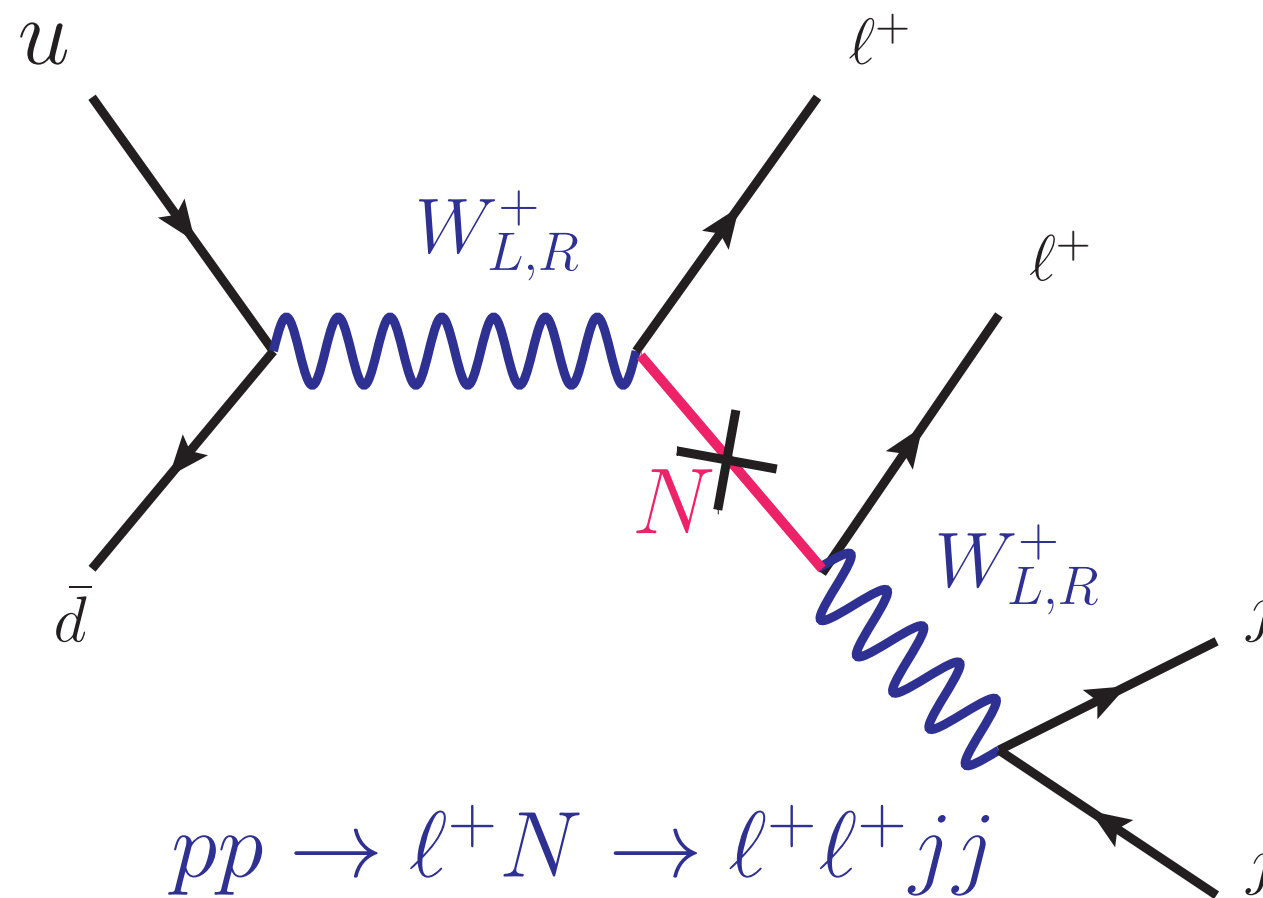
左右手对称模型 Left-Right Symmetric Model



中微子质量：

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D^T & m_R \end{pmatrix} \Rightarrow m_\nu = m_L - m_D m_R^{-1} m_D^T$$

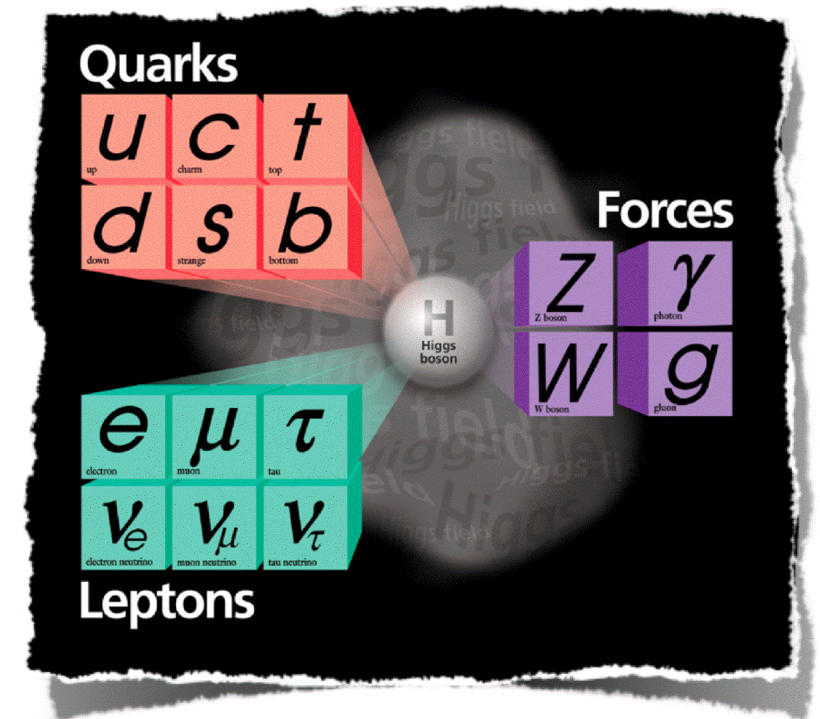
对撞机寻找：



新的粒子，
新的相互作用形式

暗物质

- 标准模型中无合适的暗物质粒子；
- 暗物质具有中性、稳定（寿命长），非重子性质；



稳定性： 不衰变或者寿命长于宇宙年龄；

标准模型中粒子稳定性：

- (1) 光子：无质量，最轻的玻色子；
- (2) 中微子：最轻的费米子；
- (3) 电子：最轻的带电粒子，电荷守恒； $U(1)_Q$ 对称性
- (4) 质子：标准模型具有偶然的 $U(1)_B$ 对称性；

暗物质

稳定机制:

(一) 稳定不衰变:

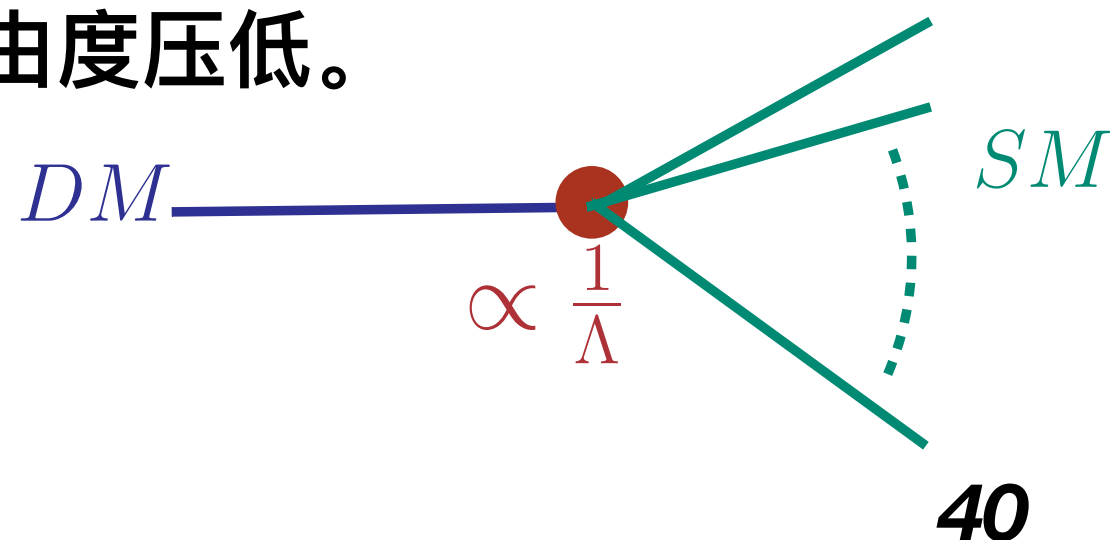
一般采用加入额外对称性 Z_2 或具有残余 Z_2 对称性。

	Z_2
标准模型	+
暗物质	-

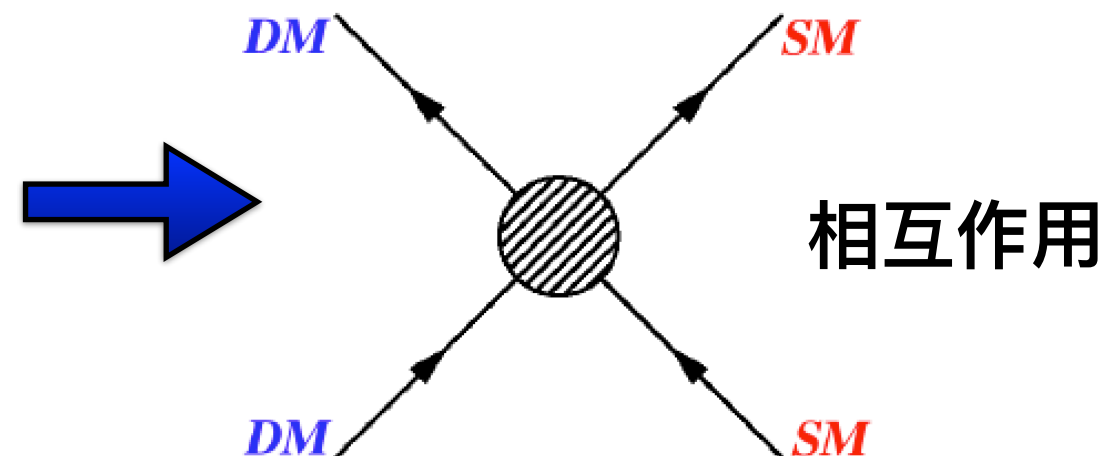
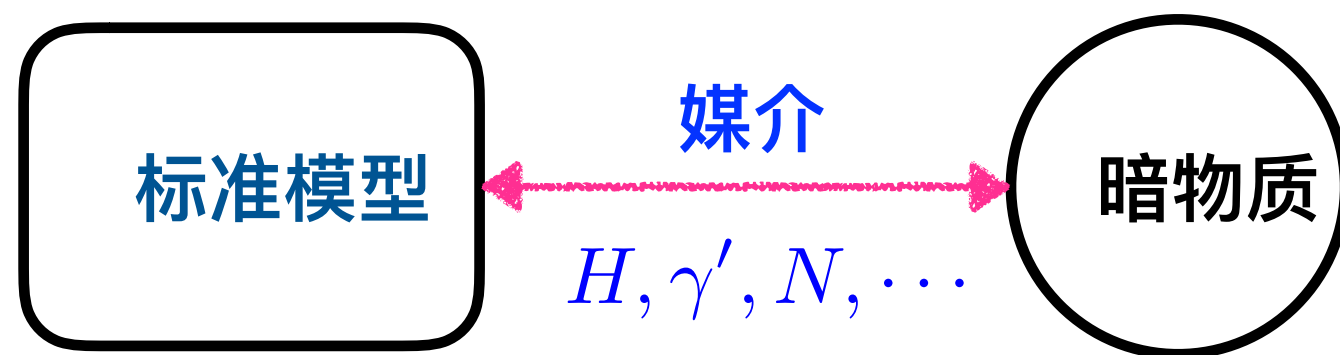
流行或常见的暗物质候选者称为 **WIMPs** (“未卜”粒子)
Weakly Interacting Massive Particles

(二) 长寿命衰变:

和标准模型粒子相互作用被高能标自由度压低。



WIMPs 暗物质残余丰度



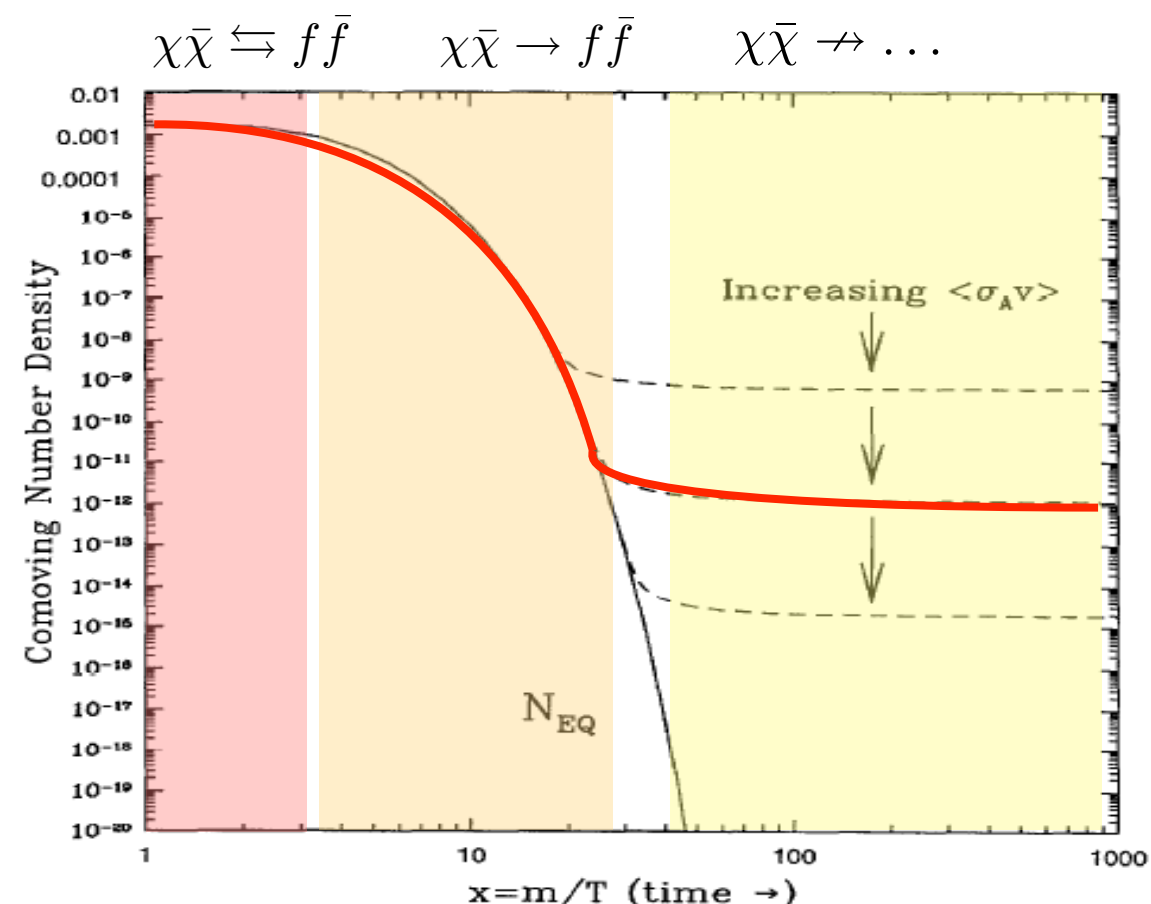
暗物质粒子热退耦

热平衡:

$$n_{\chi}^{eq} = g \left(\frac{mT}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-m/T}$$

热退耦:

$$\Gamma_{\text{anni}} = n_{\chi} \langle \sigma_A v \rangle \sim H(T_f)$$



WIMPs 暗物质残余丰度

暗物质残余丰度:

$$\Omega_{\chi} h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma_A v \rangle} \sim 0.113 \pm 0.003 \text{ (WMAP)}$$

合适残余丰度需要:

$$\sigma v \sim 0.1 \text{pb}$$

典型弱相互作用 (“WIMP miracle”):

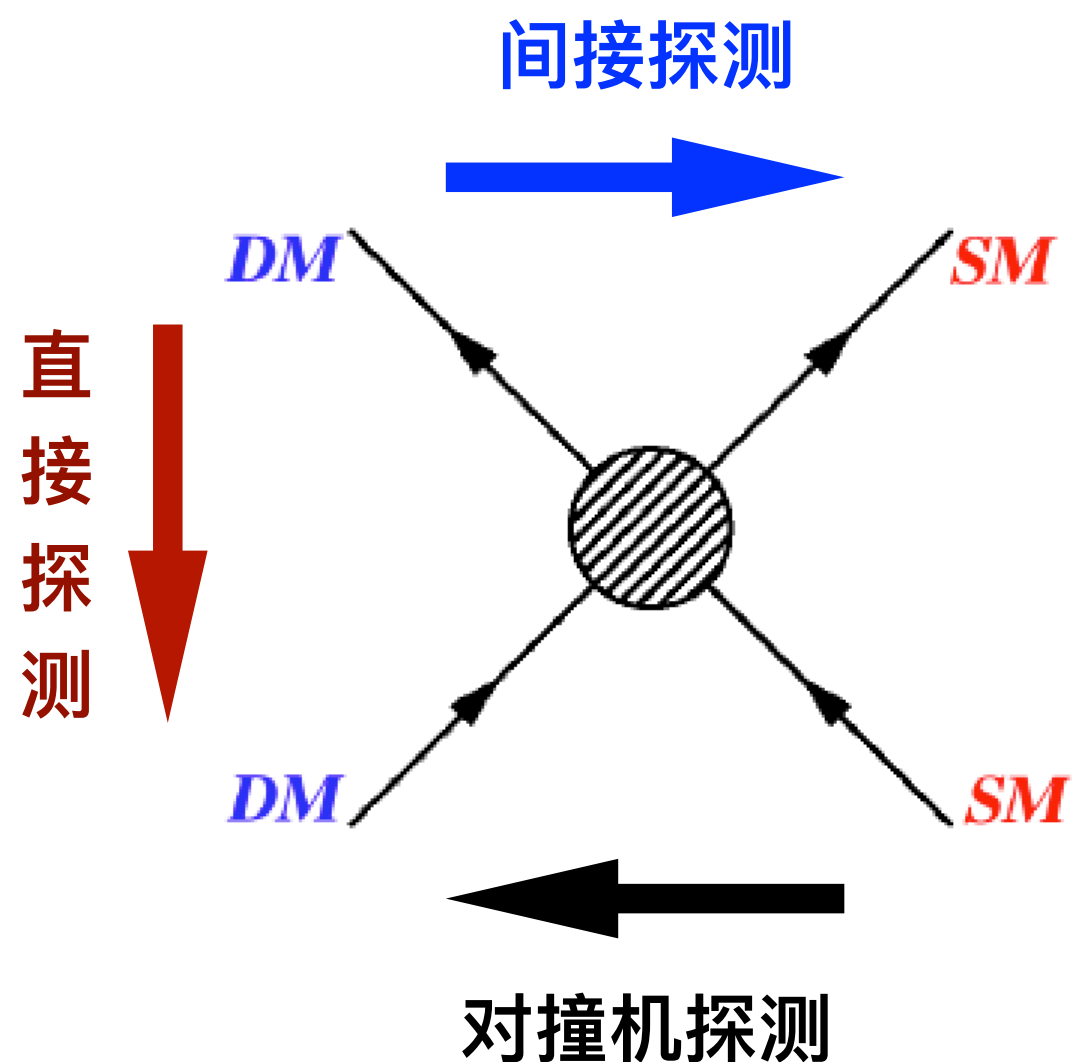
$$\sigma \sim \frac{\alpha_{\text{weak}}^2}{\Lambda_{\text{weak}}^2} \sim 0.1 \text{pb} \quad v_{\text{weak}} = 246 \text{ GeV}$$

寻找 WIMPs 暗物质“黄金时代”:

随着实验技术发展, 现在我们处于探测 WIMPs 暗物质“黄金时代”, 包括暗物质直接探测、间接探测、对撞机探测。

暗物质探测

暗物质探测一般分为三类：

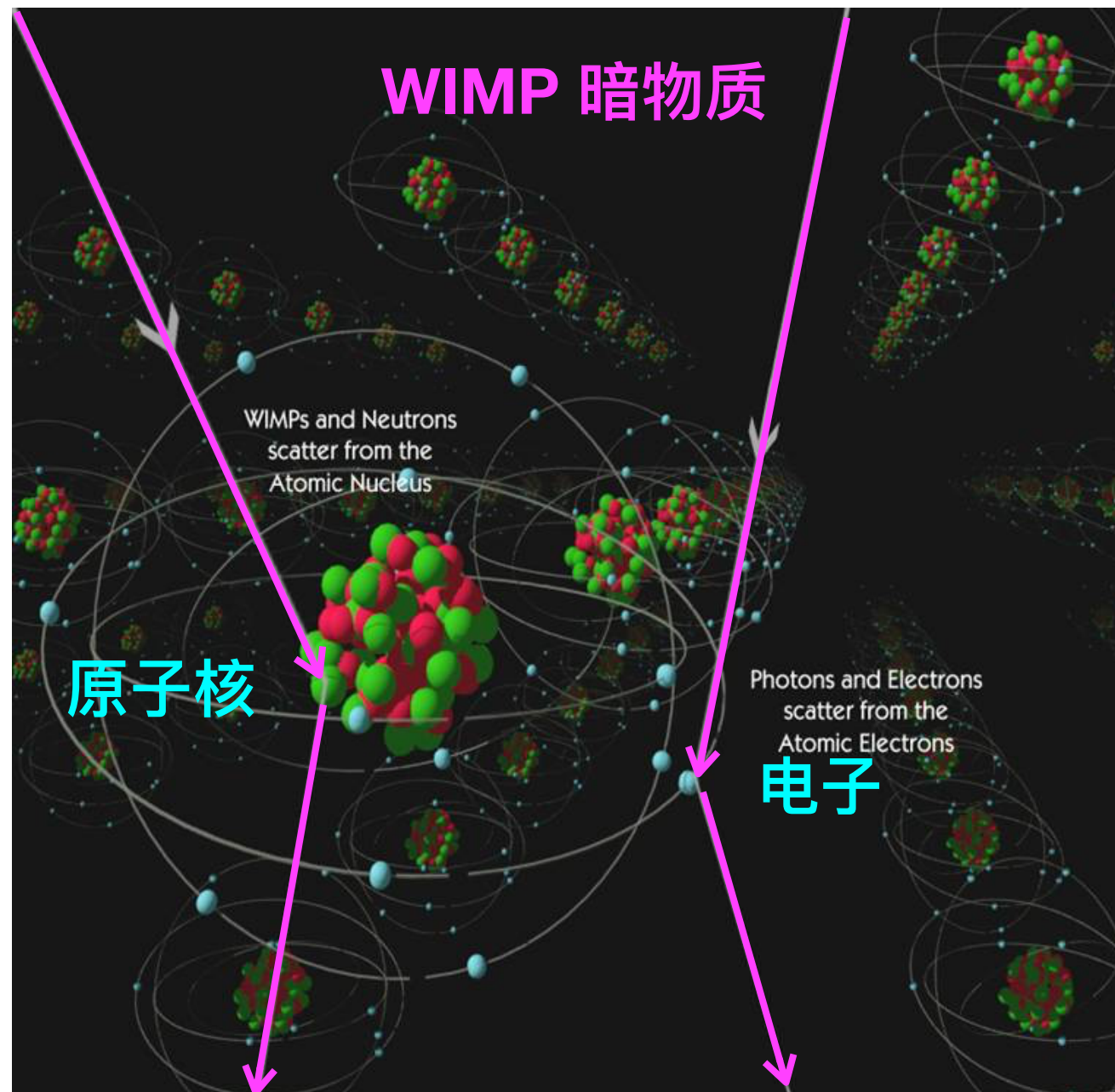


1. 直接探测，暗物质和探测器材料发生弹性碰撞；

2. 间接探测，在暗物质密度高区域暗物质发生自湮灭，探测湮灭产物

3. 对撞机探测，在对撞机上产生暗物质，暗物质表现为“消失的能动量”，类似于中微子。

暗物质直接探测



暗物质和探测器原子（原子核或电子）发生弹性散射，原子得到额外动能，表现：

发热、发光、电离

暗物质直接探测

- 寻找原子核受到暗物质散射后的反冲:

$$E_r = \frac{|\vec{q}|^2}{2m_N} = \frac{\mu^2 v^2 (1 - \cos \theta)}{m_N} \lesssim (1 - 50) \text{keV}$$

- 事例数: $N_{\text{Target}} \cdot n_\chi \cdot \sigma_{\chi N} v \cdot \text{Time}$ (需要足够大的探测器)
- 能谱: **counts/kg/keV/date**

$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{1}{m_N} \frac{\rho_0}{m_\chi} \int_{v_{\min}}^{v_{\text{esc}}} \frac{d\sigma}{dE_r} v f_\oplus(\vec{v}, t) d^3\mathbf{v}$$

$$v_{\min} = \sqrt{m_N E_r / (2\mu^2)}$$

minimal velocity to create recoil E_r

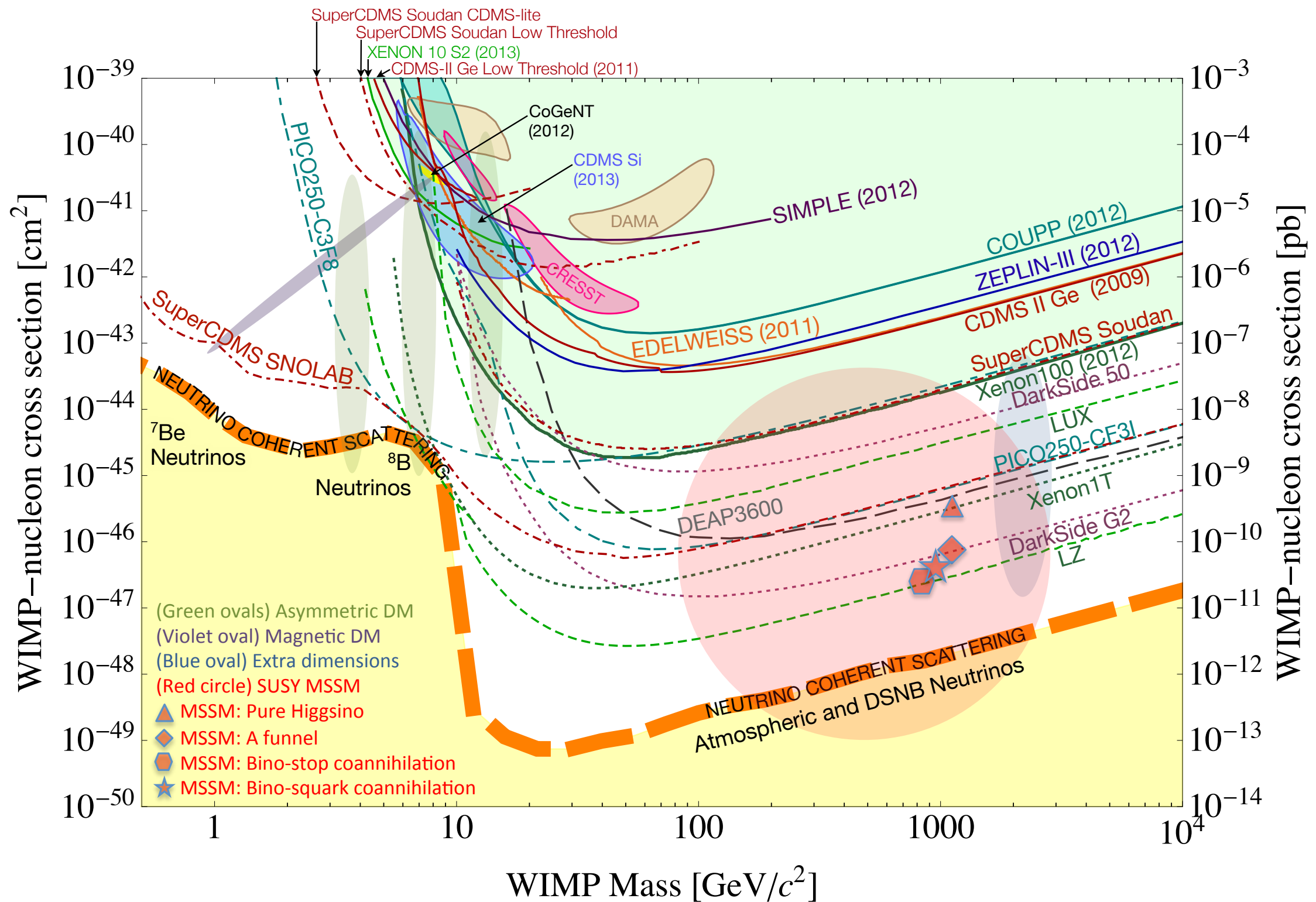
$$\rho_0 \sim 0.3 \text{GeV}/\text{cm}^3$$

local DM density

$$f_\oplus(\vec{v}, t)$$

velocity distribution

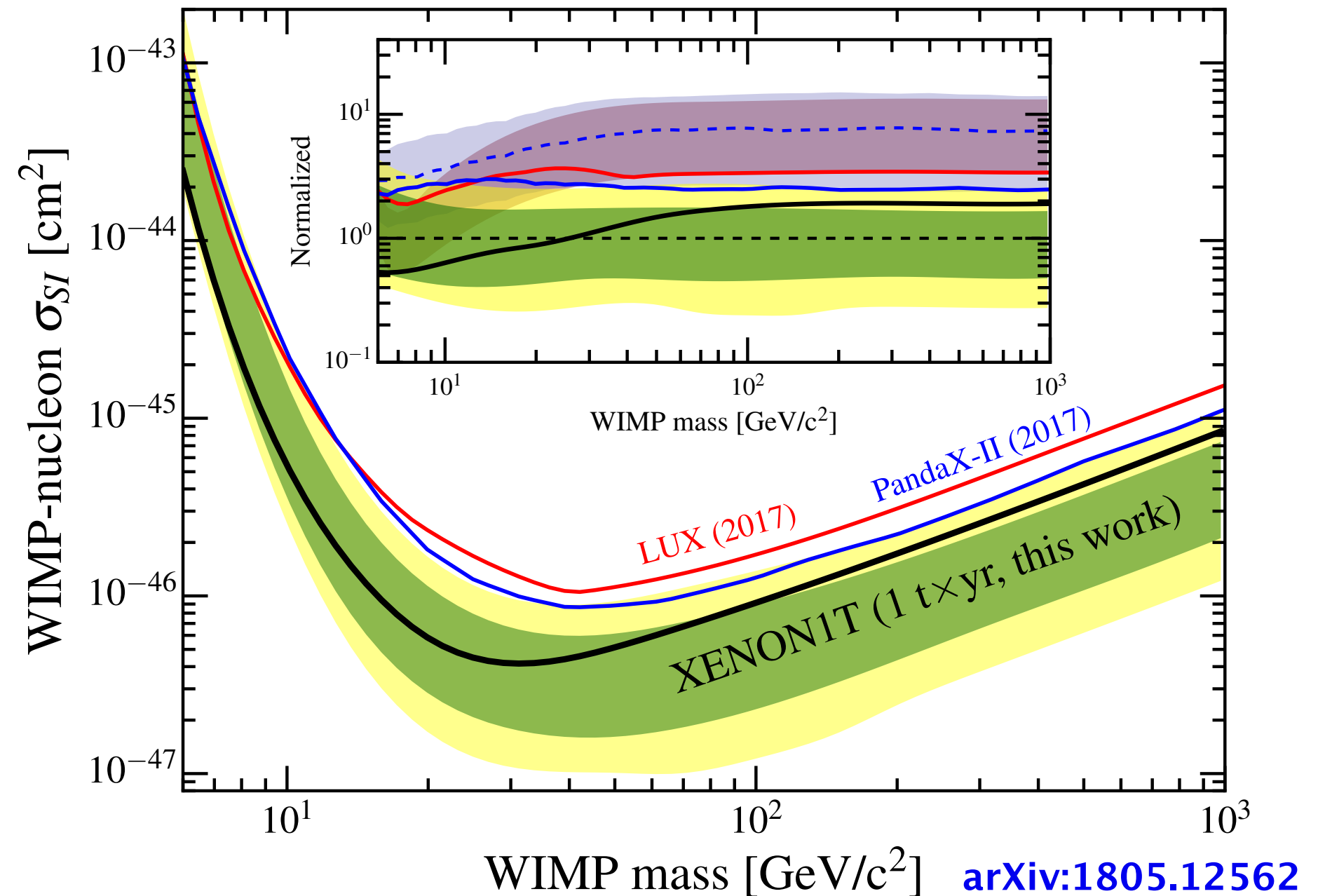
暗物质直接探测



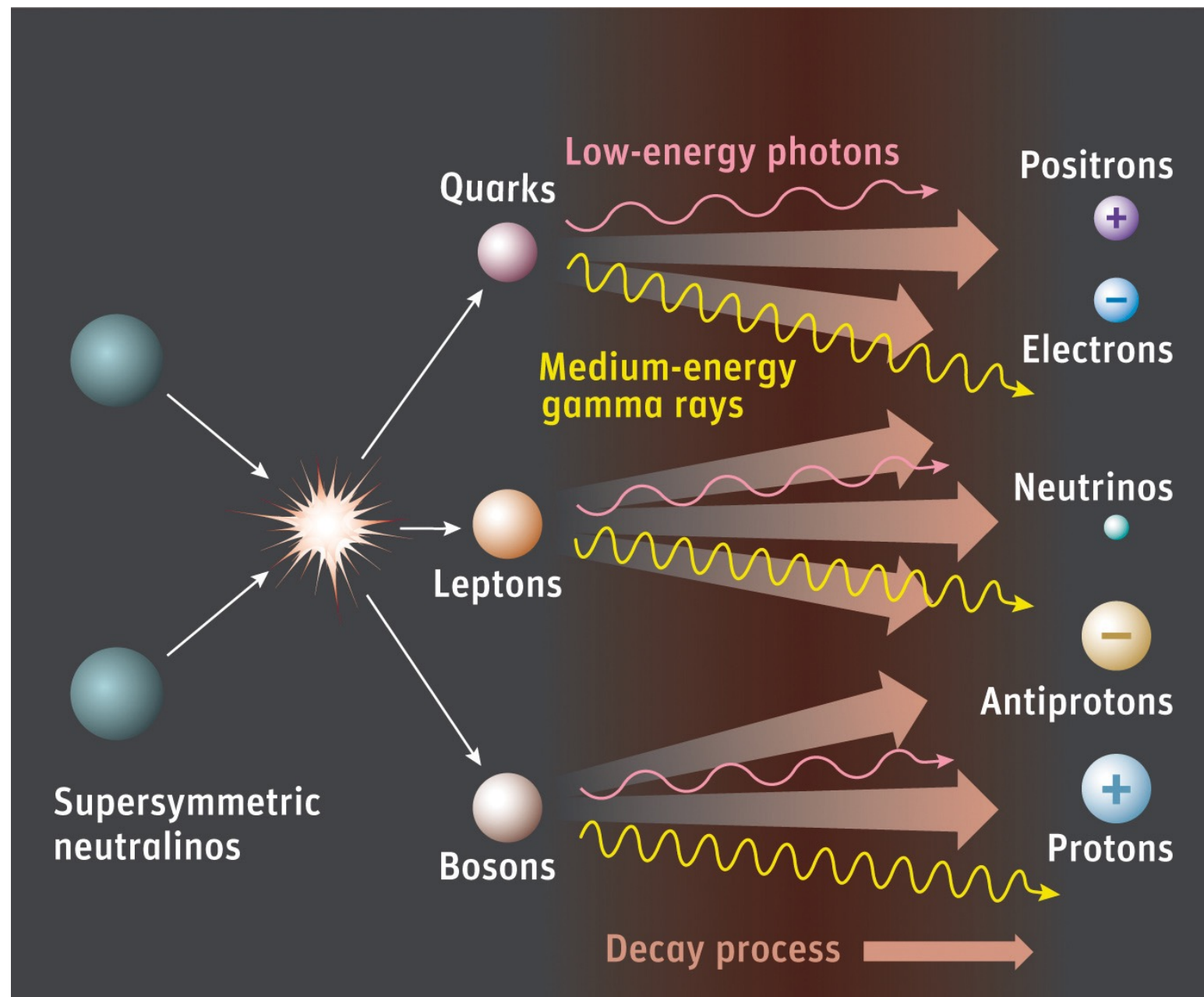
暗物质直接探测

还没有发现暗物质！

实验给出对暗物质
和原子核弹性散射
截面大小的限制。



暗物质间接探测

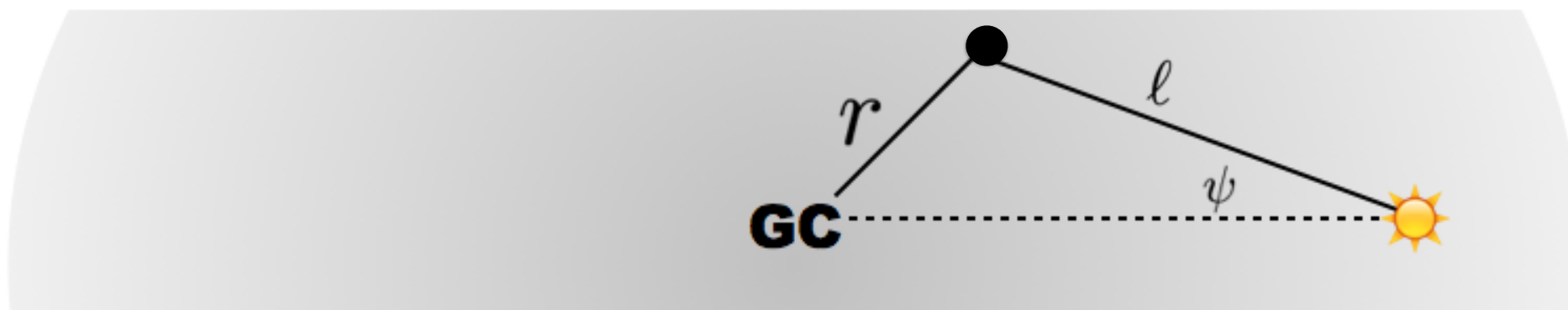


探测暗物质在密度高区域自湮灭产物

1. 伽玛射线：从银心、矮星系...；
2. 正反电子、正反质子等宇宙射线
3. 从星体来的中微子，如太阳、地球等。

暗物质间接探测

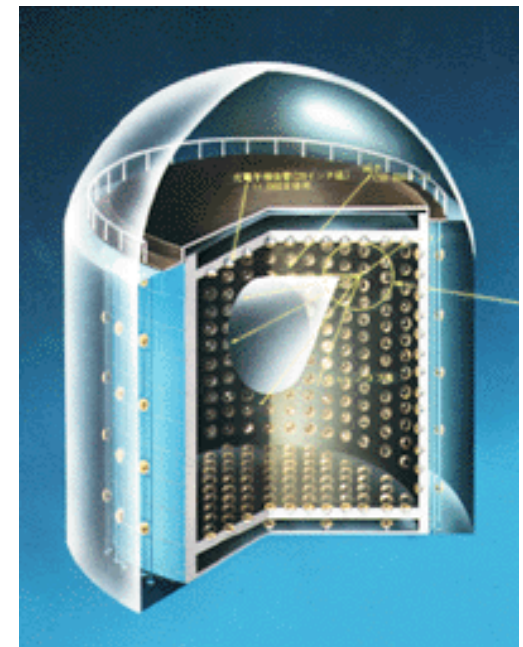
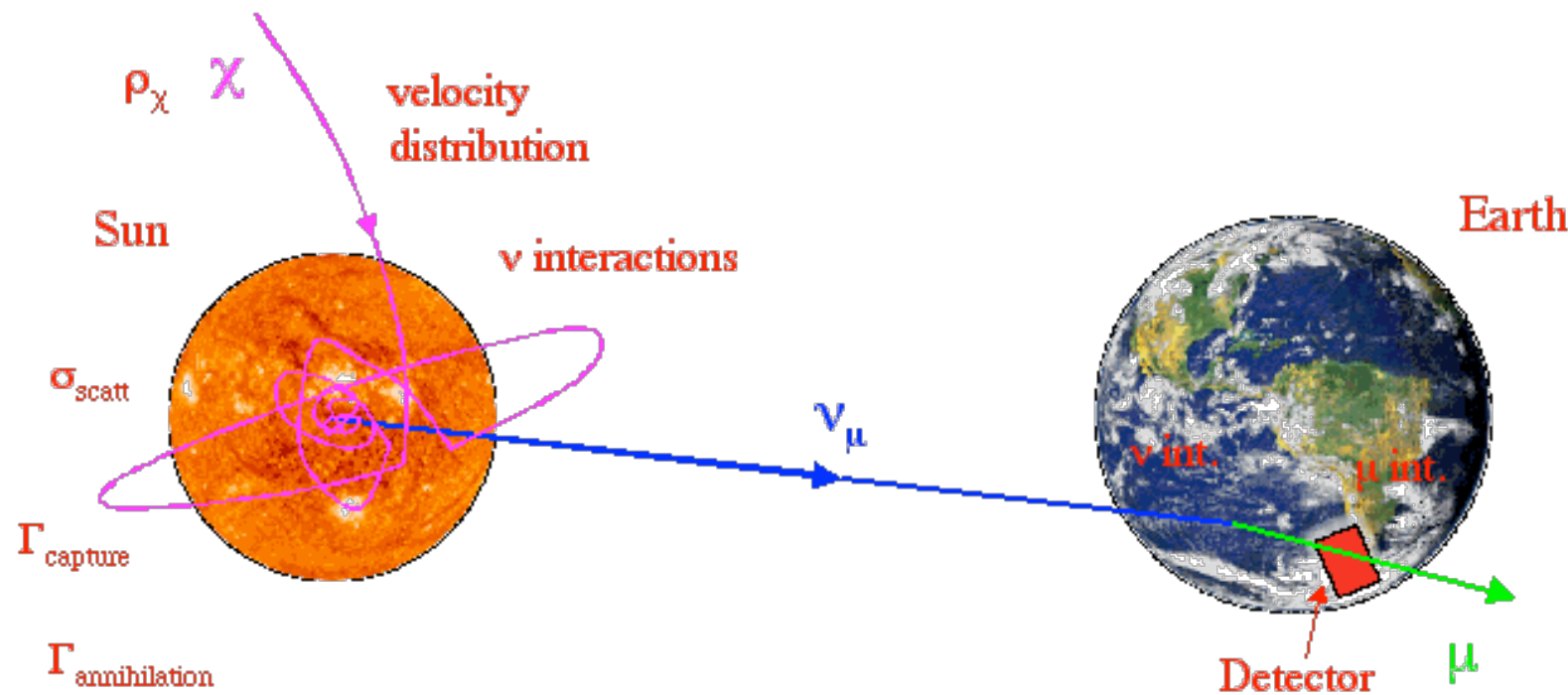
例如：从暗物质湮灭过程产生的伽马射线



$$\Phi(E, \psi) = \frac{\langle \sigma v \rangle}{m_\chi^2} \frac{dN}{dE_\gamma} \frac{1}{4\pi} \int d\Omega \int_{l.o.s.} d\ell \rho[r(\ell, \psi)]^2$$

实验：Fermi LAT, HESS, ...

从星体中发现暗物质



暗物质被太阳俘获积聚并自湮灭

$$\frac{dN}{dt} = C_{\odot} - C_A N^2 \Rightarrow N(t) = \sqrt{\frac{C_{\odot}}{C_A}} \tanh(\sqrt{C_{\odot} C_A} \cdot t)$$

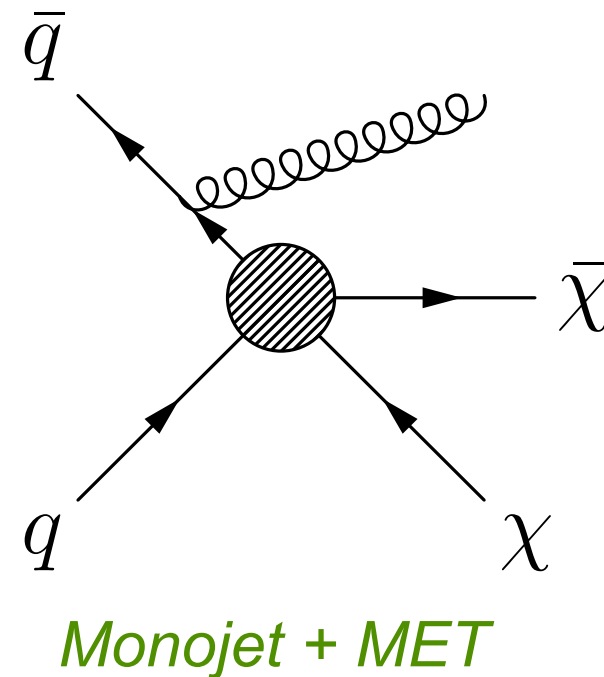
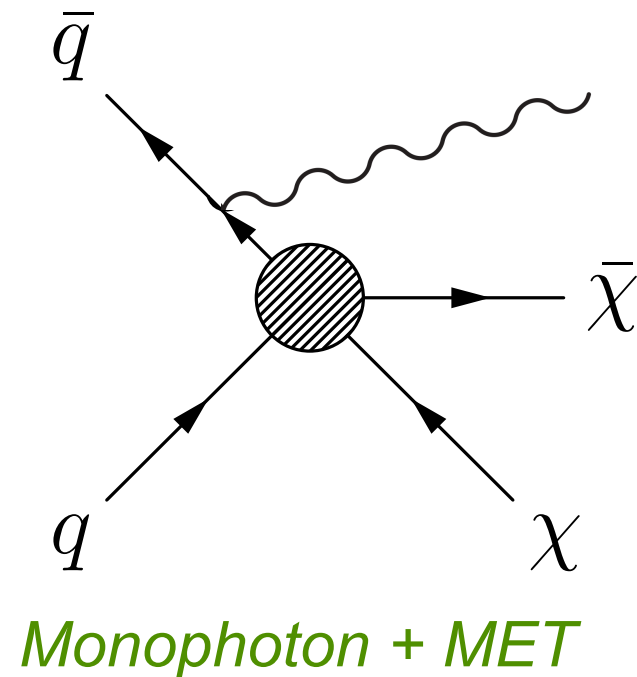
若俘获过程和自湮灭达到平衡

$$\Gamma_A = C_{\odot}/2$$

暗物质对撞机探测

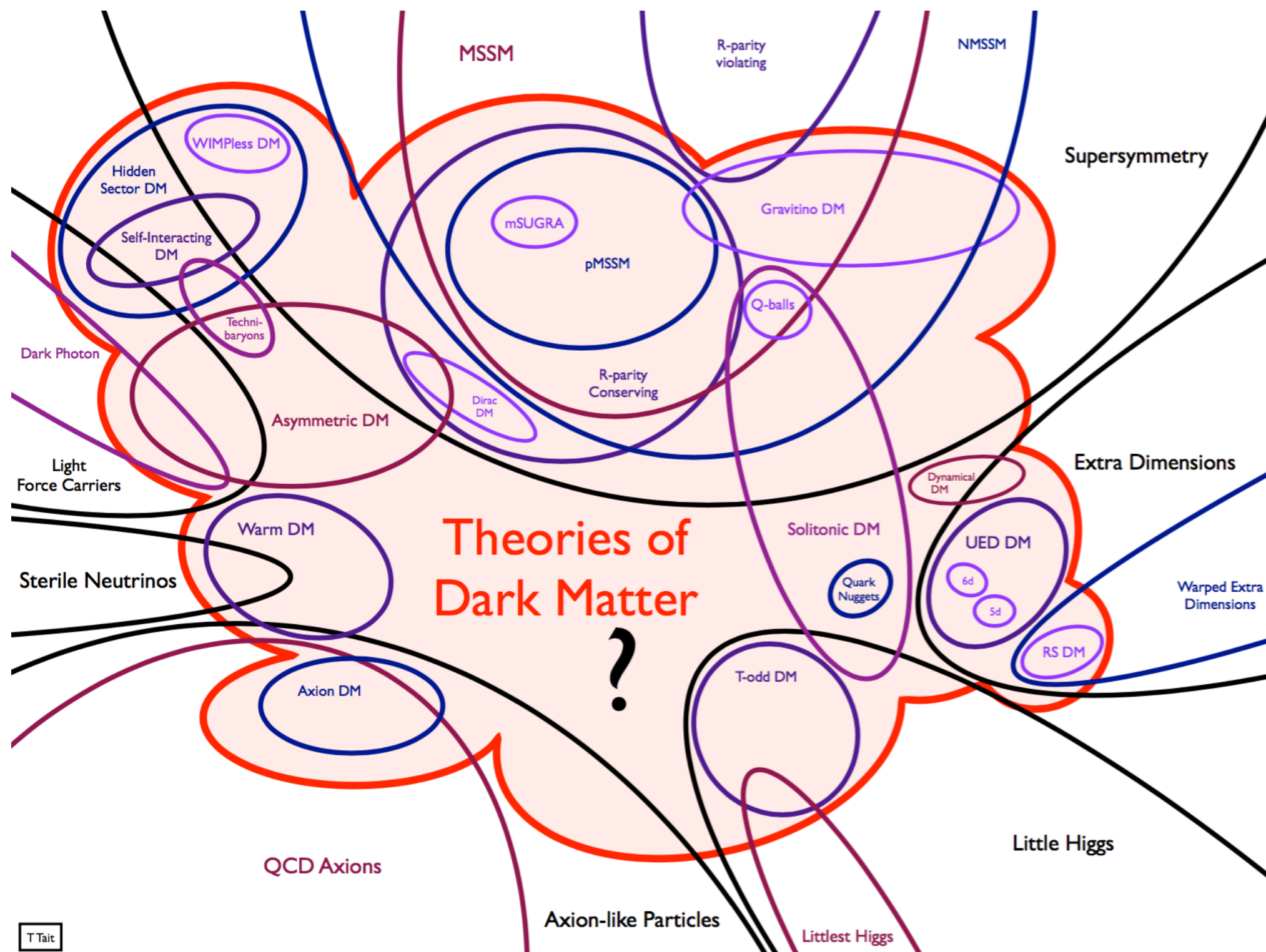
- 在对撞机上产生暗物质，寻找消失的能动量。

(1) 简单情况: monojet/mono-photon + missing ET



(2) multi-jets/leptons + missing ET: 如在超对称粒子寻找中。

暗物质模型



T Tait

暗物质模型

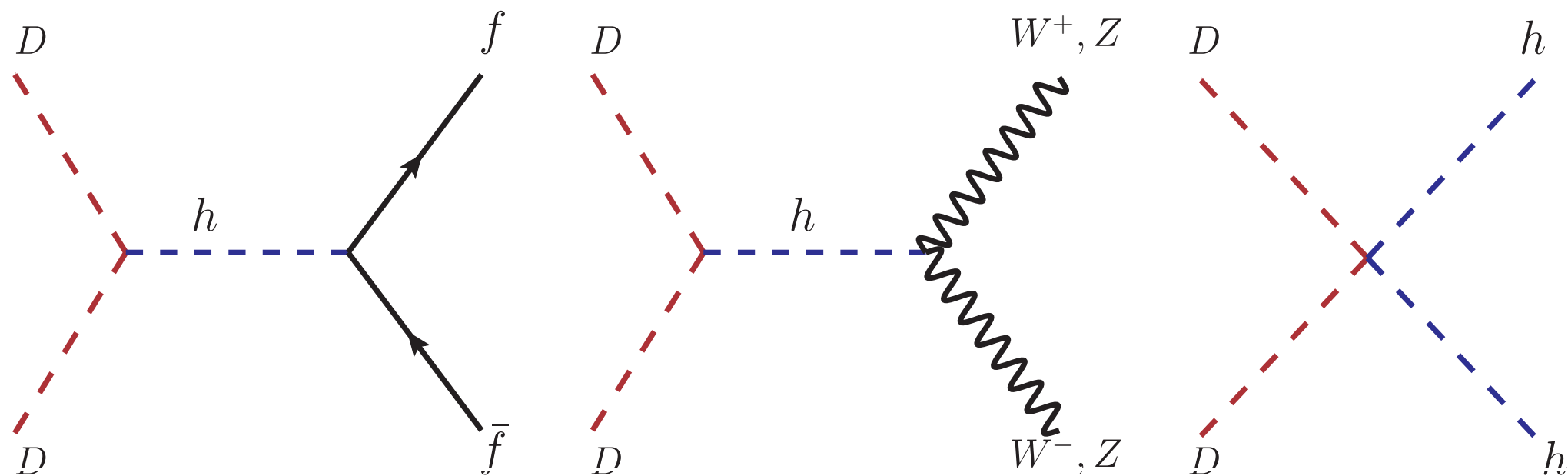
- 超出标准模型理论中自洽包括了暗物质候选者，如超对称理论等；
- 具有其他产生机制的暗物质模型 (freeze in, non-thermal...);
- 跟中微子物理相关的暗物质模型 (sterile neutrino, “scotogenic” neutrino mass, ...);
- 跟重子起源相结合的暗物质模型 (Asymmetric DM, ...);
- 跟强作用 CP 破缺相结合的暗物质 (axion) ;
- 由暗物质唯象学启发的暗物质模型 (inelastic DM, isospin-violating DM, resonant DM, ...);
- 考虑特别媒介粒子的简化暗物质模型 (Higgs portal, U(1)’ portal, neutrino portal ,...);
- 特殊相互作用形式的暗物质 (form factor, momentum dependent, ...);
- ...

暗物质模型

最简单情况:

标准模型 + (具有 $Z_2=-1$ 对称性的) 实标量粒子 D

$$\mathcal{L}_D = \frac{1}{2} \partial^\mu D \partial_\mu D - \frac{1}{4} \lambda D^4 - \frac{1}{2} m_0^2 D^2 - \lambda D^2 H^\dagger H$$



暗物质模型

Inert Doublet Higgs Model:

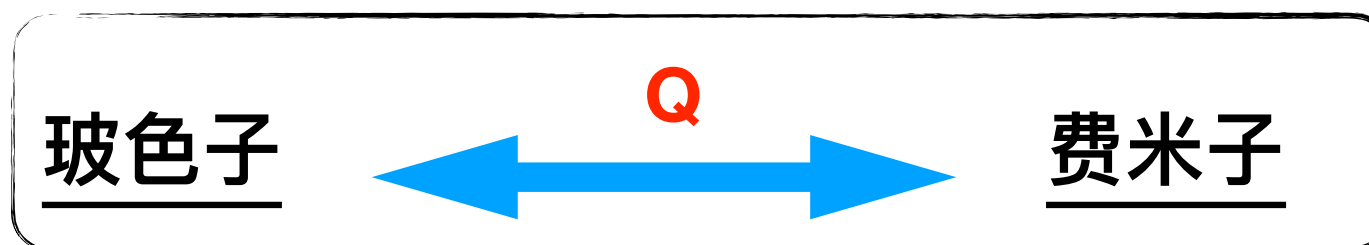
- 加入两个弱 $SU(2)$ 二重态 Higgs: H_1, H_2
- 其中 H_2 具有 $Z_2=-1$ 对称性;
- H_1 得到真空期待值, H_2 真空期待值为零;
- 最性的 inert 中性粒子为暗物质;
- 有相对更丰富的唯象学。

超对称理论 Supersymmetry



受到最多关注的暗物质候选粒子来自于超对称理论的中性规范伴随粒子：**neutralino**

在 Poincare 群对称性的基础上加入额外一个对称性操作，该操作将粒子的自旋改变。

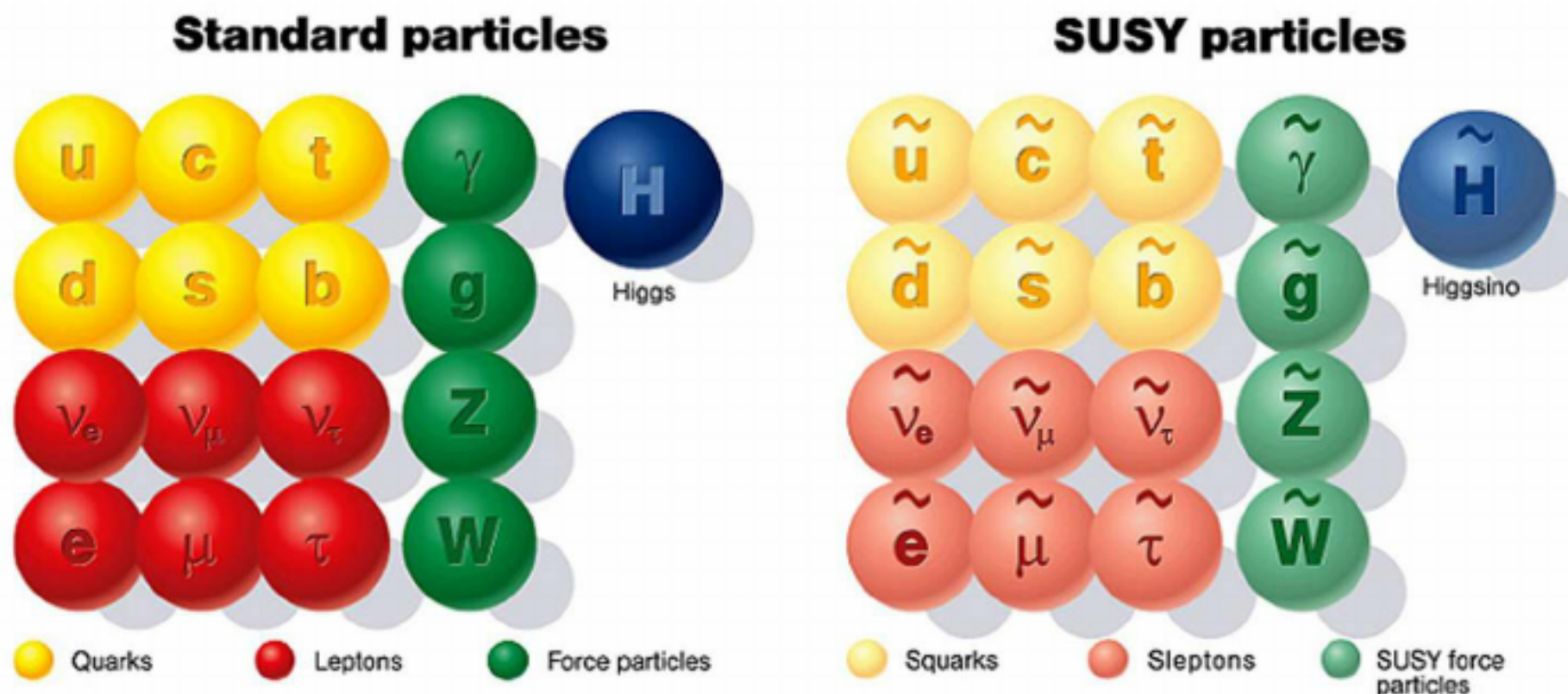


超对称理论 Supersymmetry

受到最多关注的暗物质候选粒子来自于超对称理论的中性规范伴随粒子：**neutralino**

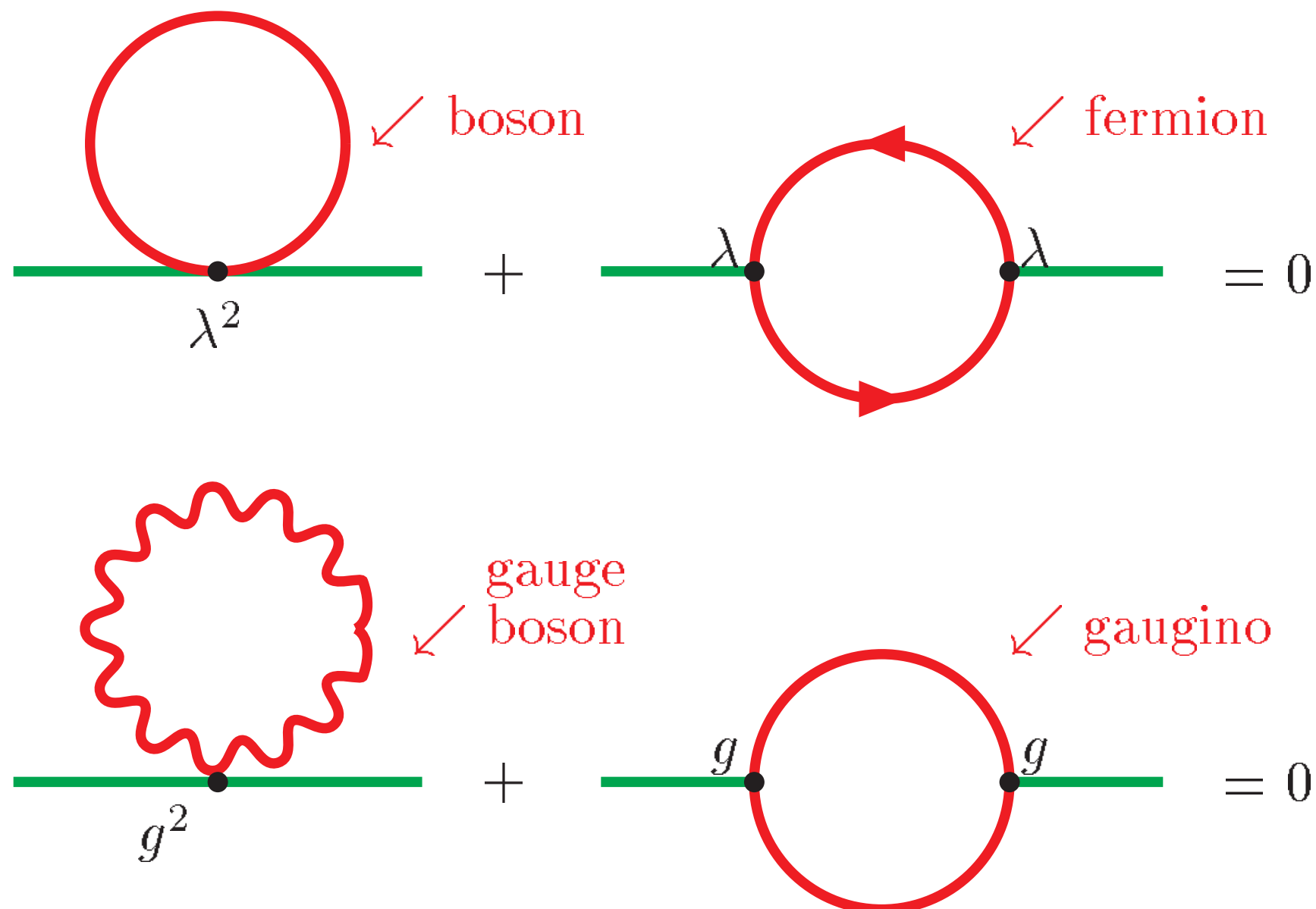
在 Poincare 群对称性的基础上加入额外一个对称性操作，该操作将粒子的自旋改变。

玻色子 $\xleftrightarrow{Q}$ 费米子



超对称理论

- 标量粒子 (Higgs 粒子) 质量量子修正导致的所谓“等级”问题 (hierarchy problem)

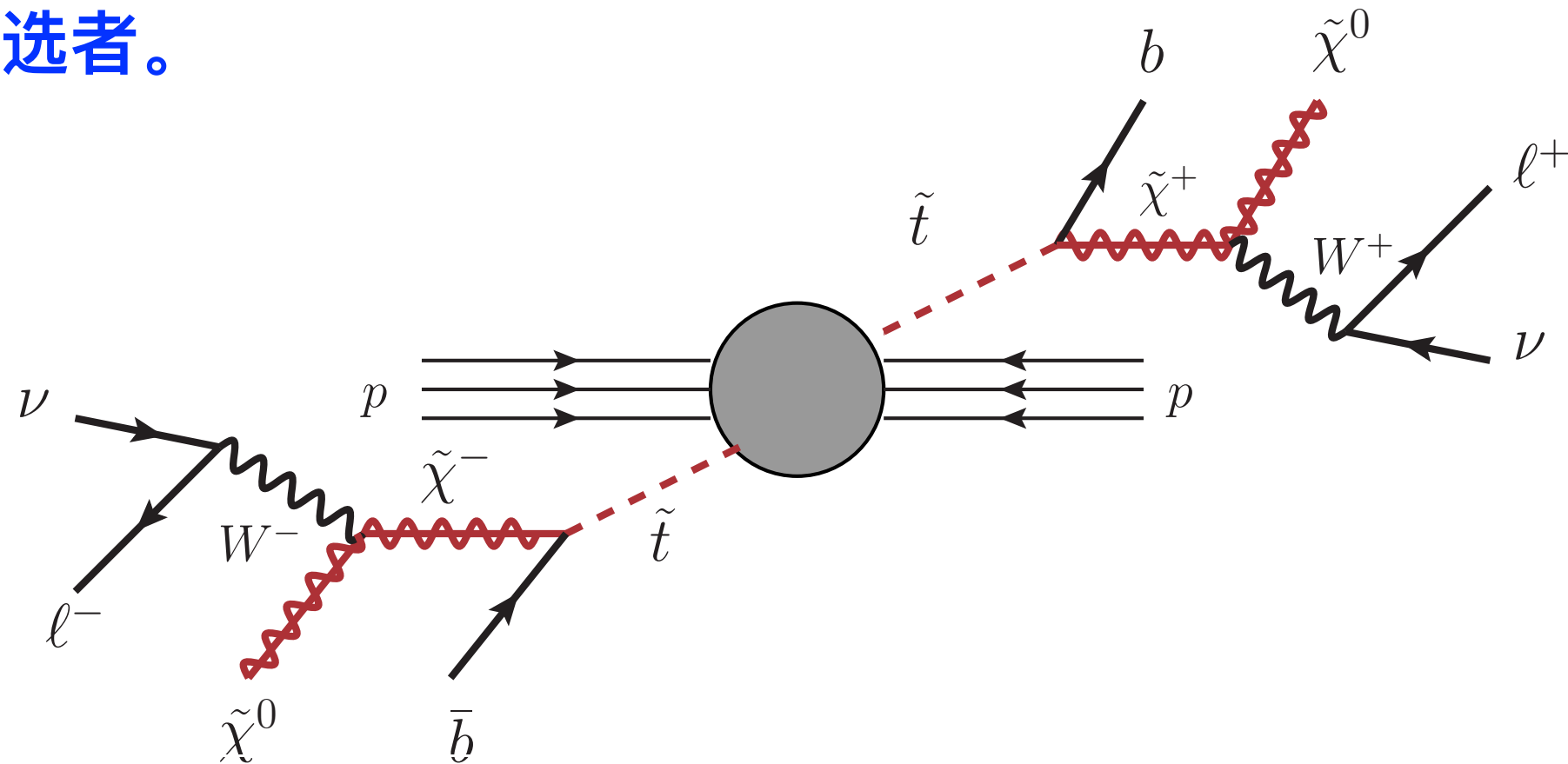


暗物质

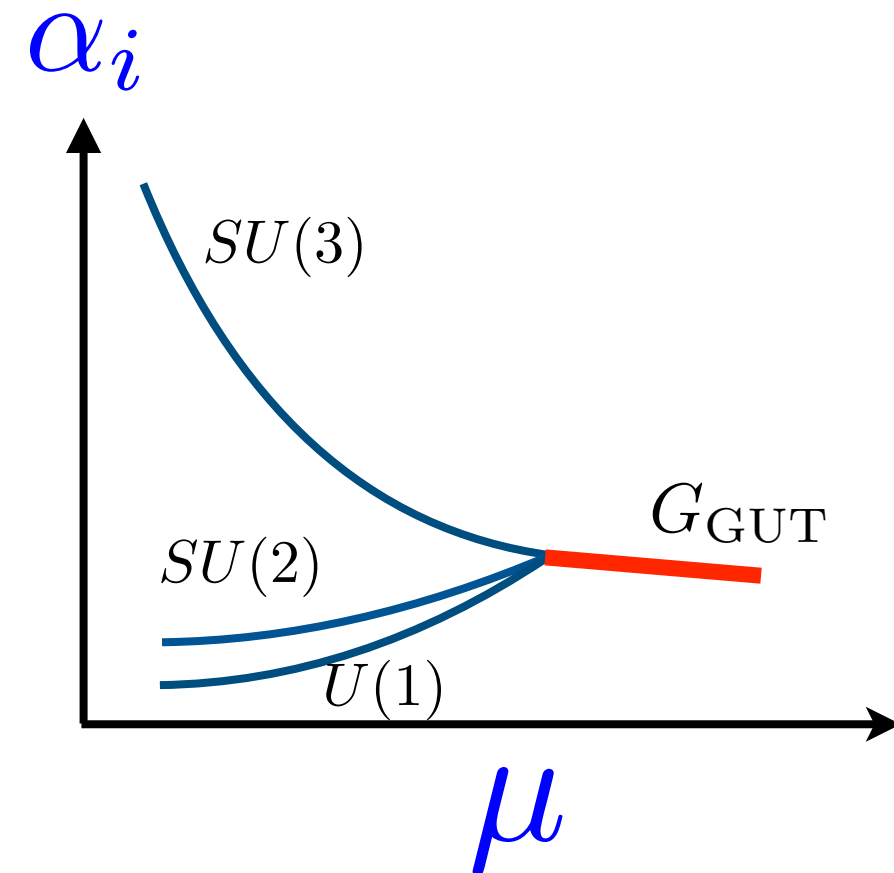
- R-parity

$$R\text{-parity} \quad R_p = (-1)^R = \begin{cases} +1 & \text{for ordinary particles ,} \\ -1 & \text{for their superpartners .} \end{cases}$$

最小的超对称 (Lightest supersymmetric particle, LSP) 是合适的暗物质获选者。



大统一理论 Grand Unified Theory (GUT)



大统一理论 Grand Unified Theory (GUT)



SU(5) GUT:

$$SU(5) \supset SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

SU(5) 有 $(5^2-1=24)$ 个生成元，有24个规范玻色子，可以包含8个胶子，3个弱规范玻色子和1个光子。还有额外12个规范玻色子，传递夸克和轻子之间的相互作用，称为 Leptoquark。

费米子:

$$5^* = (d_1^c, d_2^c, d_3^c, e^c, \nu_e)_L$$

$$10 = (u_1^c, u_2^c, u_3^c, u_1, u_2, u_3, d_1, d_2, d_3, e^c)_L$$

质子衰变 $p \rightarrow e^+ \pi^0$

质子寿命短于实验下限，模型被排除。

大统一理论 Grand Unified Theory (GUT)



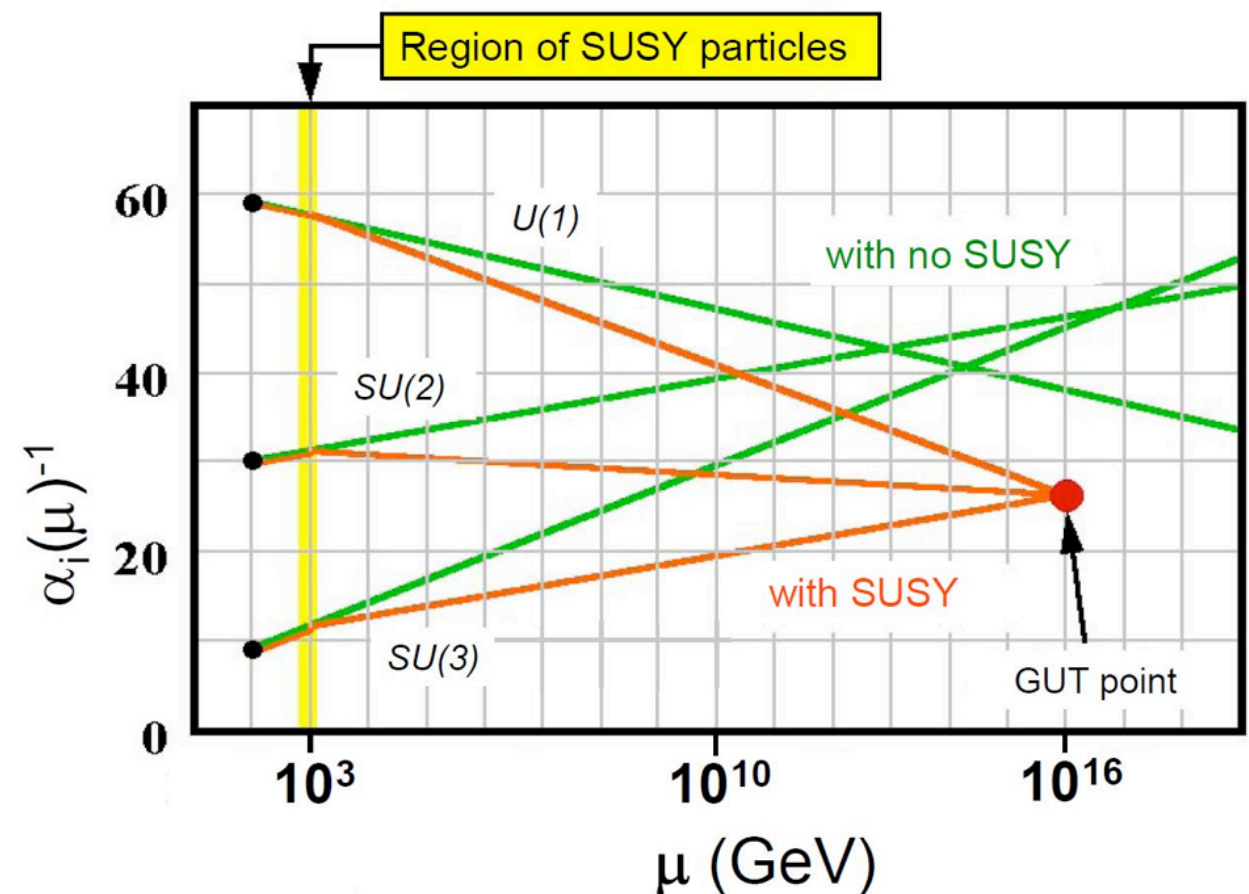
SO(10) GUT:

SO(10) 具有16维表示，一个很好容纳标准模型费米子的维数。

$$16 = (u_1, u_2, u_3, d_1, d_2, d_3, e, \nu; u_1^c, u_2^c, u_3^c, d_1^c, d_2^c, d_3^c, e^c, \nu^c)_L$$

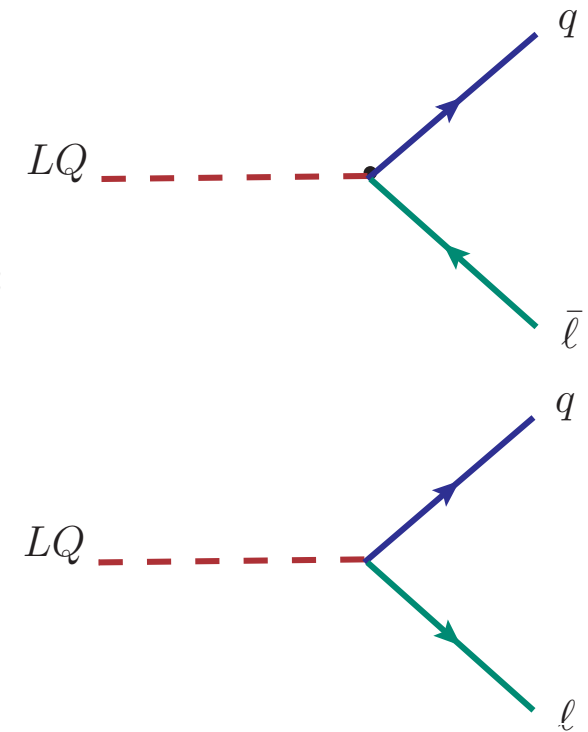
中微子有质量；

质子衰变，但寿命长于实验限制。



Leptoquark

$(SU(3), SU(2), U(1))$	Spin	Symbol	Type	F
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3}, 1/3)$	0	S_3	$LL(S_1^L)$	-2
$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, 7/6)$	0	R_2	$RL(S_{1/2}^L), LR(S_{1/2}^R)$	0
$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, 1/6)$	0	$\tilde{R}_2$	$RL(\tilde{S}_{1/2}^L), \overline{LR}(\tilde{S}_{1/2}^{\overline{L}})$	0
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 4/3)$	0	$\tilde{S}_1$	$RR(\tilde{S}_0^R)$	-2
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$	0	S_1	$LL(S_0^L), RR(S_0^R), \overline{RR}(S_0^{\overline{R}})$	-2
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, -2/3)$	0	$\bar{S}_1$	$\overline{RR}(\bar{S}_0^{\overline{R}})$	-2
$(\mathbf{3}, \mathbf{3}, 2/3)$	1	U_3	$LL(V_1^L)$	0
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{2}, 5/6)$	1	V_2	$RL(V_{1/2}^L), LR(V_{1/2}^R)$	-2
$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{2}, -1/6)$	1	$\tilde{V}_2$	$RL(\tilde{V}_{1/2}^L), \overline{LR}(\tilde{V}_{1/2}^{\overline{R}})$	-2
$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, 5/3)$	1	$\tilde{U}_1$	$RR(\tilde{V}_0^R)$	0
$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, 2/3)$	1	U_1	$LL(V_0^L), RR(V_0^R), \overline{RR}(V_0^{\overline{R}})$	0
$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, -1/3)$	1	$\bar{U}_1$	$\overline{RR}(\bar{V}_0^{\overline{R}})$	0

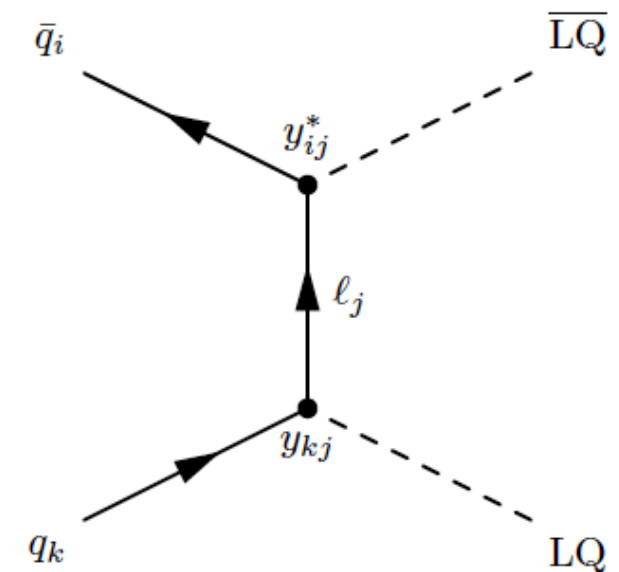
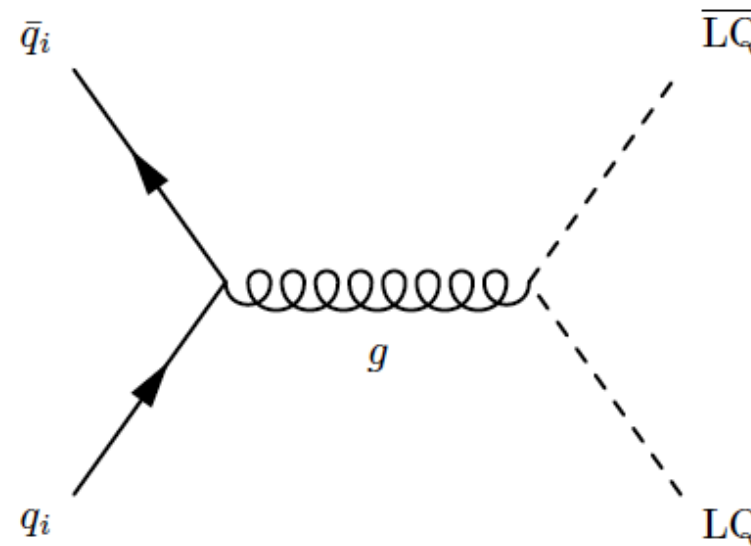
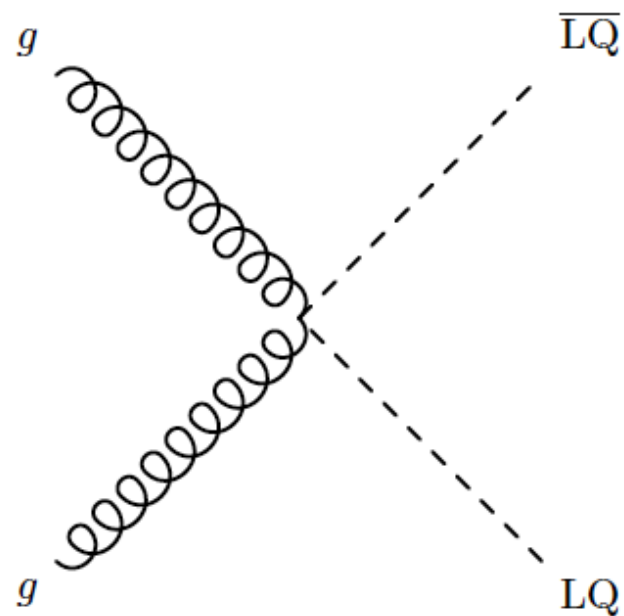


1603.04993

Leptoquark

导致丰富低能唯象，如用来试图解释 LHCb 等实验测量的 R_K , R_D 值。

强子对撞机探测：



LHC exotics 寻找



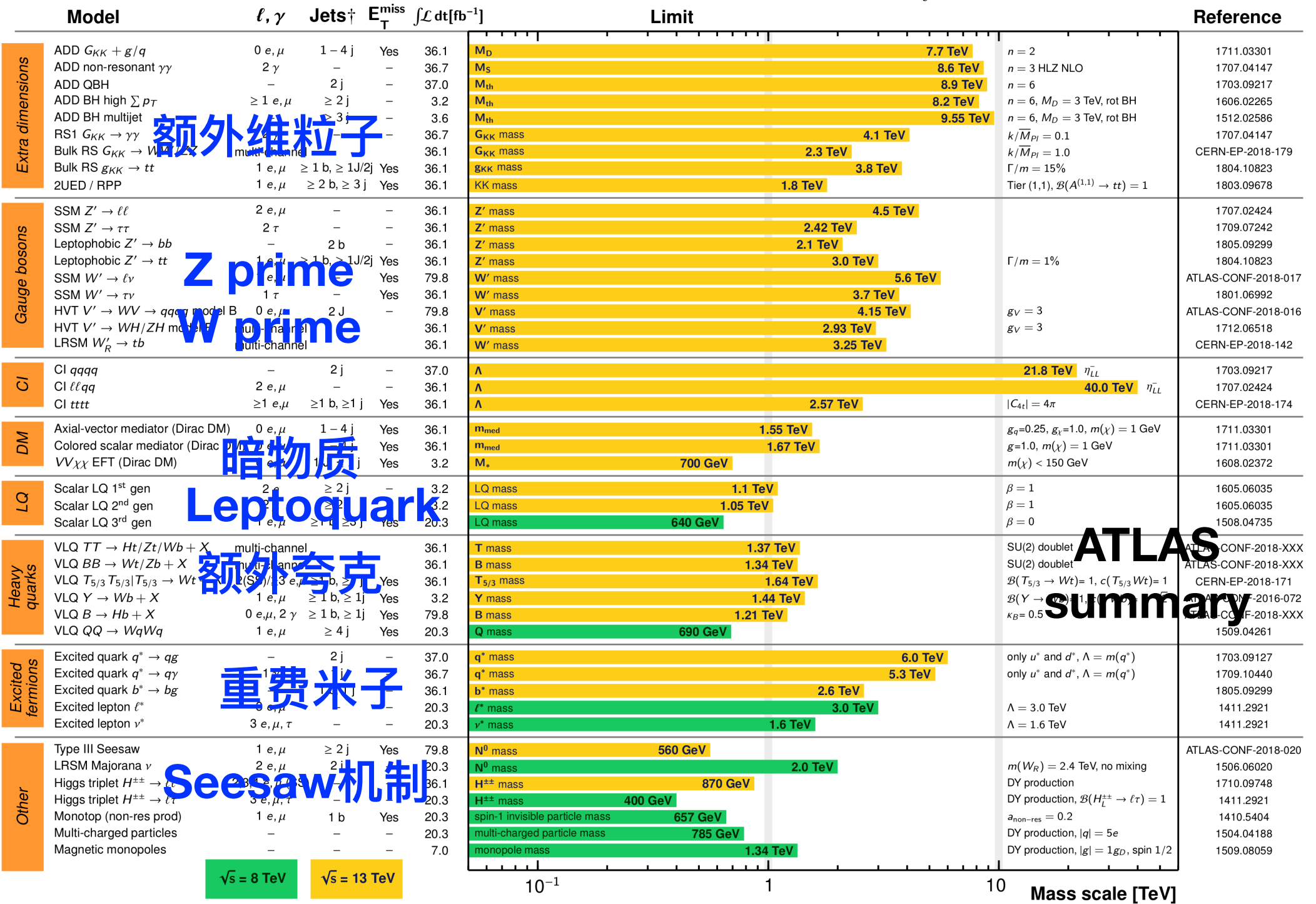
ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: July 2018

ATLAS Preliminary

∫L dt = (3.2 – 79.8) fb⁻¹

√s = 8, 13 TeV



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

† Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

ATLAS summary

LHC SUSY 寻找

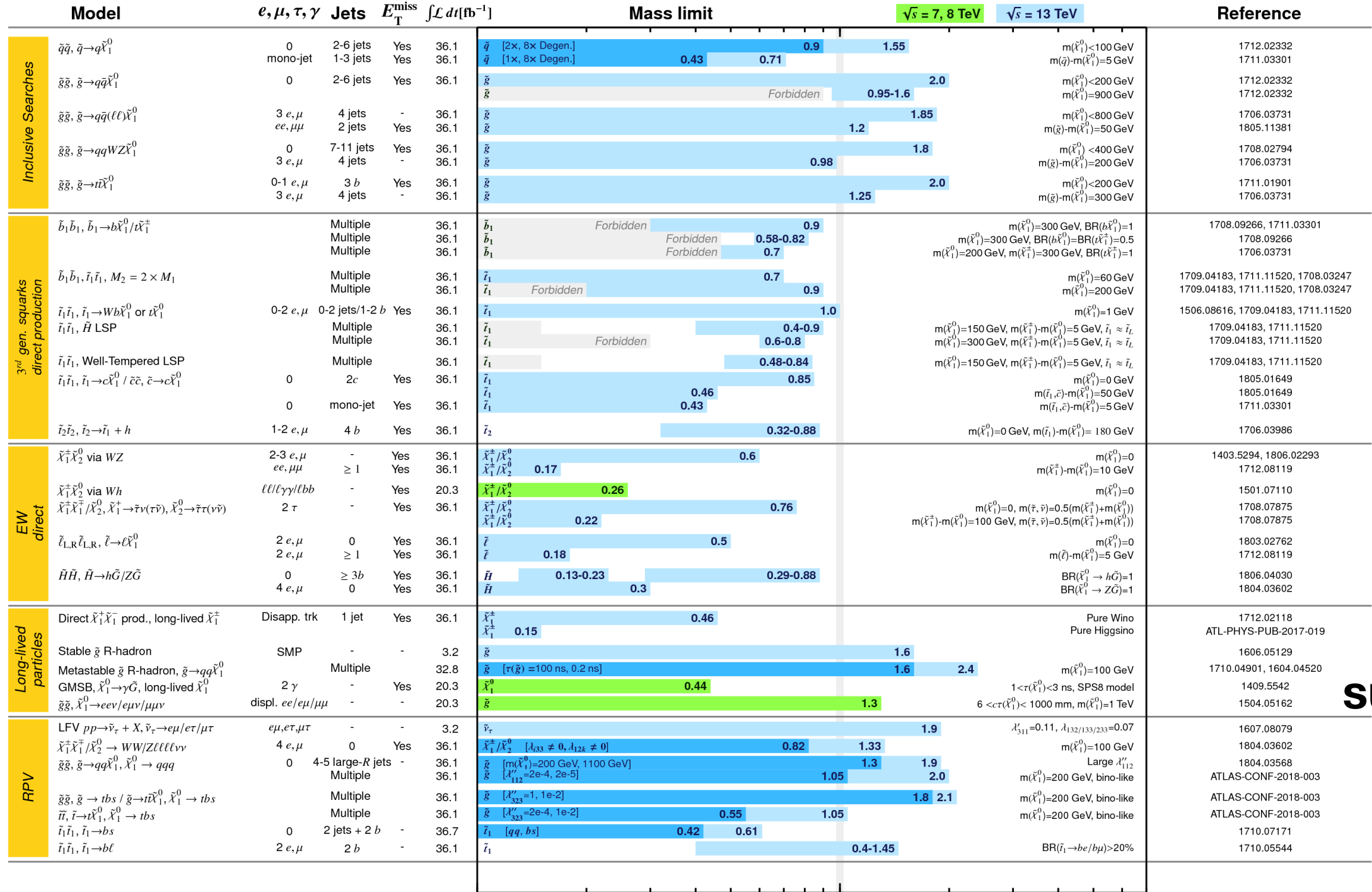


ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

July 2018

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8, 13$ TeV



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10⁻¹ 1 Mass scale [TeV]

ATLAS
summary

新物理寻找之路

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”

— 屈原《离骚》

“道路是曲折的，前途是光明的”

— 佚名

新物理寻找之路

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”

— 屈原《离骚》

“道路是曲折的，前途是光明的”

— 佚名

祝好运！