

超出标准模型之外的新物理

1) 假想理论实验的启示

曹庆宏

北京大学物理学院

2016年7月14日于清华大学

报告提纲

- 1) 标准模型回顾
- 2) 为什么寻找标准模型之外的新物理?
- 3) 中微子质量
- 4) 暗物质粒子起源
- 5) 新物理粒子、模型及其对撞机信号

标准模型和新物理

- 标准模型的建立历史（树图么正性）

我们为什么相信希格斯粒子一定存在？（韩涛老师课件）

- 标准模型的理论问题：

- ★ 等级性问题（自然性问题）——量子涨落引起的麻烦
是不是问题？如果是，如何解决？

- 1) 超对称：弱动力学模型

- 2) 小希格斯模型：强动力学模型

- ★ 统一模型

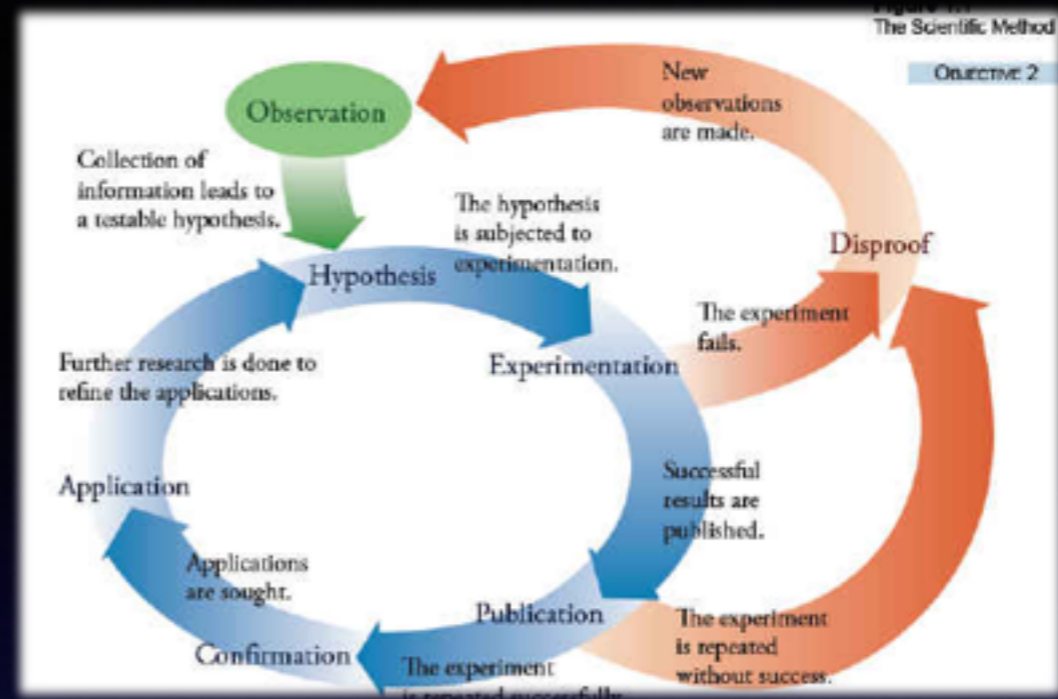
是不是问题？如果是，如何解决？

- 新物理的实验证据：中微子振荡和暗物质存在

- 它们是否和粒子物理有关？

- 是否是基本粒子？如果是，那么理论如何解释？

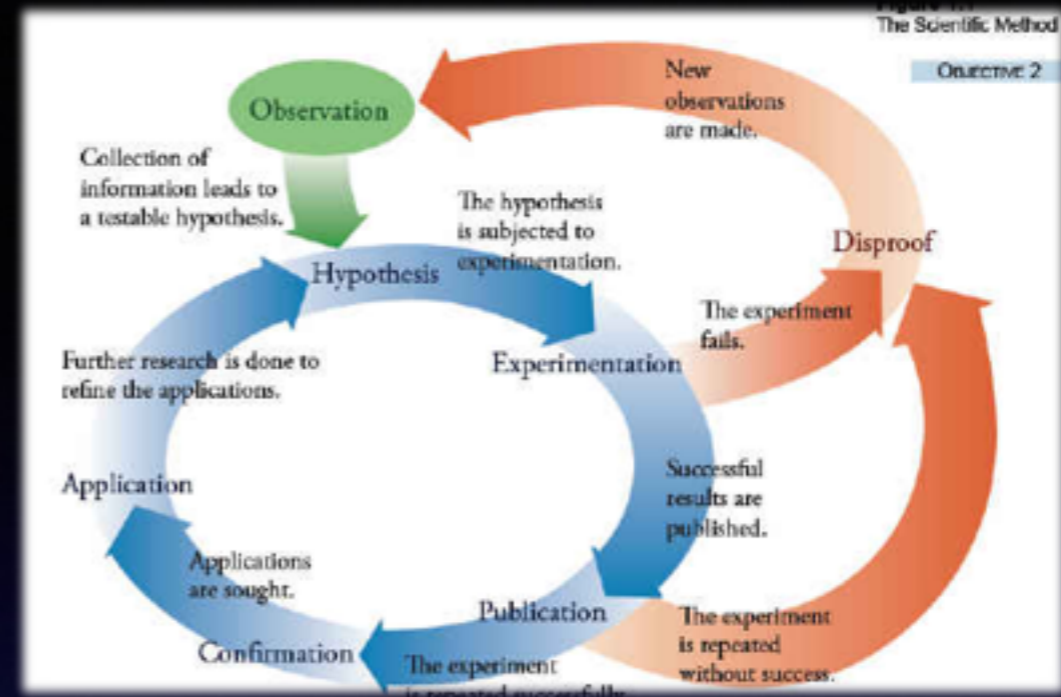
物理学是实验科学，历史上理论和实验一直处于共生、螺旋上升状态。



当遇到理论无法解释的实验现象，人们构造新物理模型解释实验，并预言进一步研究的新实验信号。

但如果没有实验数据的情况下，理论家如何做？

物理学是实验科学，历史上理论和实验一直处于共生、螺旋上升状态。

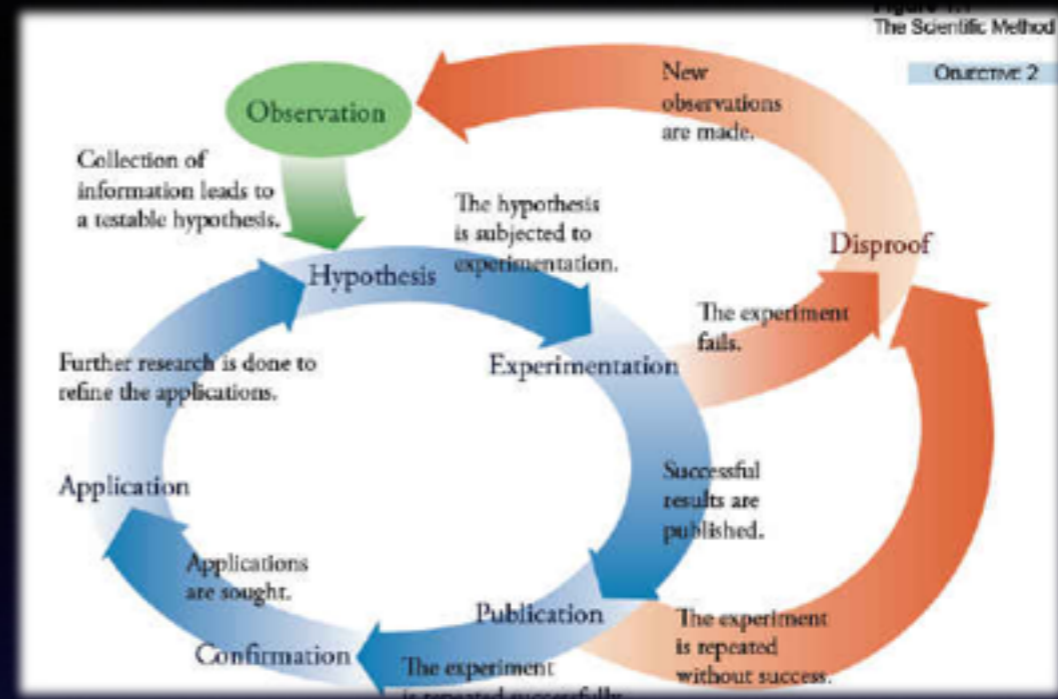


当遇到理论无法解释的实验现象，人们构造新物理模型解释实验，并预言进一步研究的新实验信号。

但如果没有实验数据的情况下，理论家如何做？



物理学是实验科学，历史上理论和实验一直处于共生、螺旋上升状态。



当遇到理论无法解释的实验现象，人们构造新物理模型解释实验，并预言进一步研究的新实验信号。

但如果没有实验数据的情况下，理论家如何做？



假象的理论实验

散射振幅的么正性

(理论家的实验工具)

树图水平上的么正性讨论

么正性：几率相加等于1的时髦说法
(量子力学几率诠释的要求)

几率守恒：产出不能大于输入

本节讲座：

从树图么正性出发理解标准模型的建立
(Just for fun)

树图水平上的么正性讨论

么正性：几率相加等于1的时髦说法
(量子力学几率诠释的要求)

几率守恒：产出不能大于输入

本节讲座：

从树图么正性出发理解标准模型的建立
(Just for fun)

问题：这对新物理研究有什么启示？

树图水平上的么正性讨论

么正性：几率相加等于1的时髦说法
(量子力学几率诠释的要求)

几率守恒：产出不能大于输入

本节讲座：

从树图么正性出发理解标准模型的建立
(Just for fun)

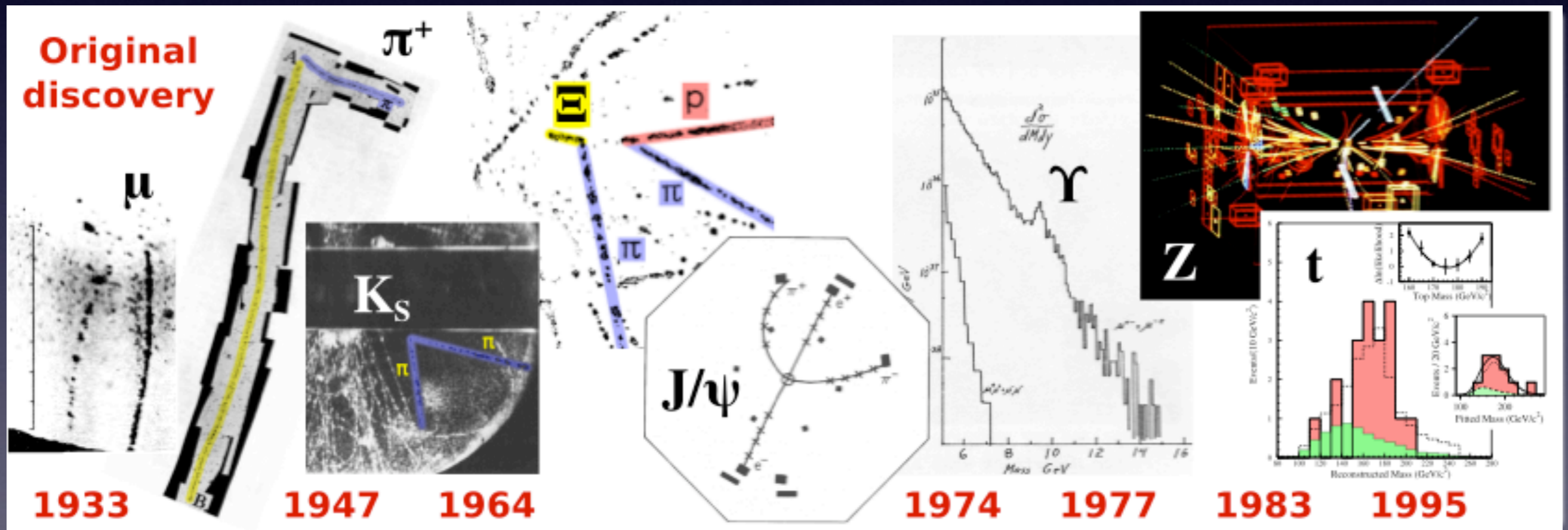
问题：这对新物理研究有什么启示？

目前没有，但建议了可能的实验方案

物质场：自然界大厦的砖瓦

自然界的基本成分是随时间演化的

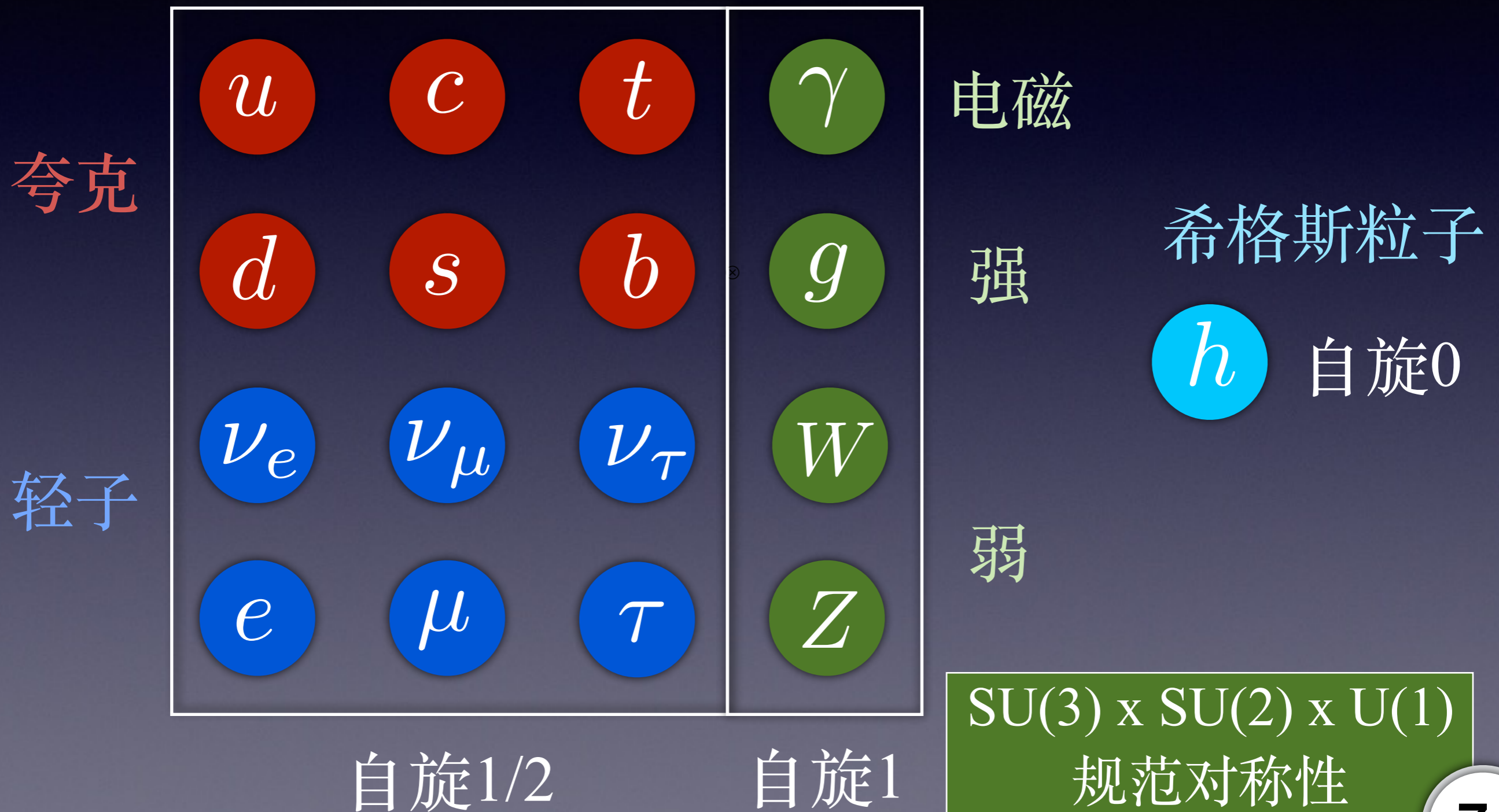
- 质子，反质子，电子，正电子和光子
- pion介子告诉我们：核子不是基本的
- muon轻子告诉我们：自然界很复杂



我们并不了解自然界为什么会有这些基本组分，也不清楚它们的数目，但每个新粒子的发现都会带来粒子物理的变革

粒子物理的标准模型

已知的基本粒子谱



粒子物理的标准模型如何计算

量子力学

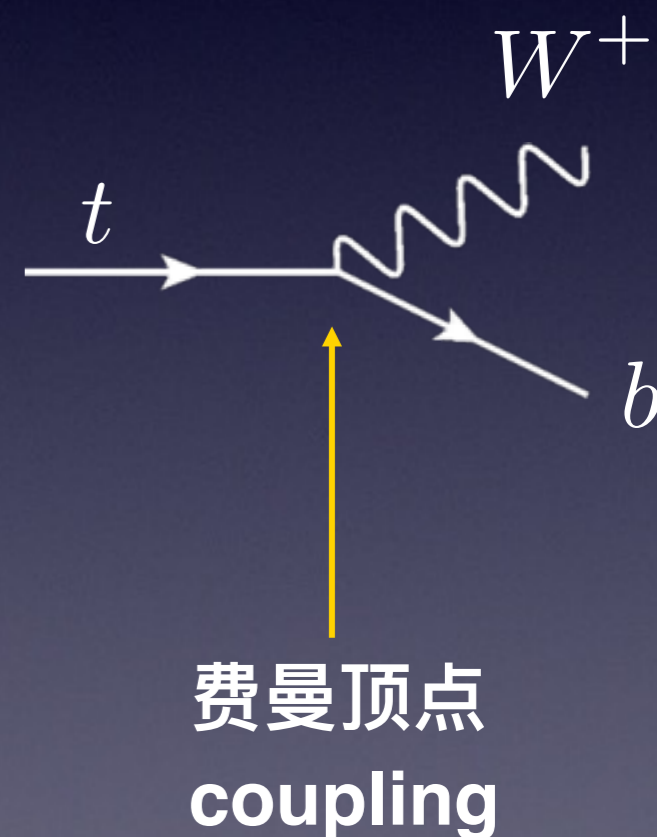
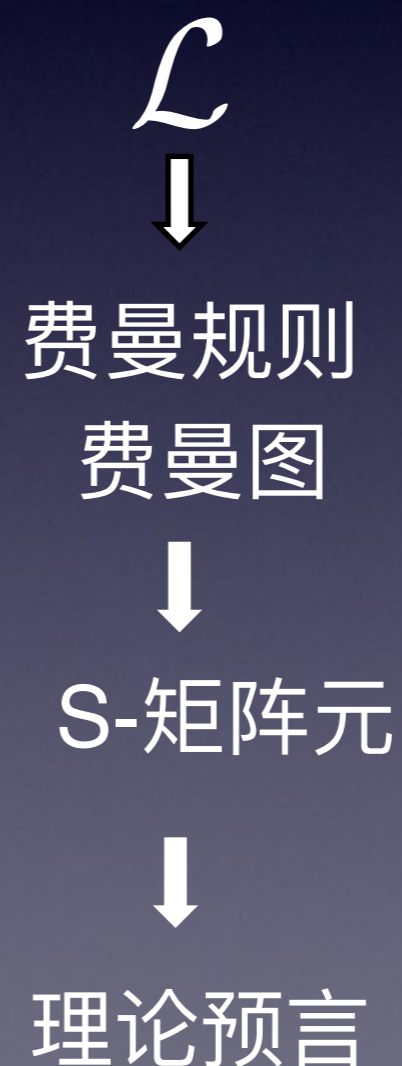
薛定谔方程：

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

1. 找出描述系统的哈密顿量 H
2. 将 H 代入薛定谔方程
3. 做理论计算

相对论性量子场论

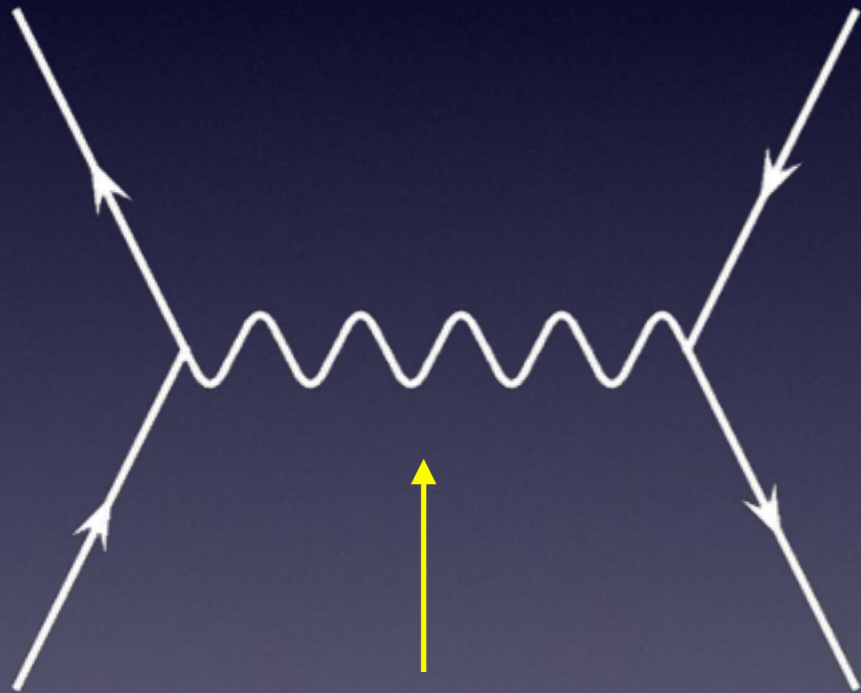
标准模型给出描述相互作用的拉格朗日量 (\mathcal{L})



费曼图：理论粒子学家的最爱

树图

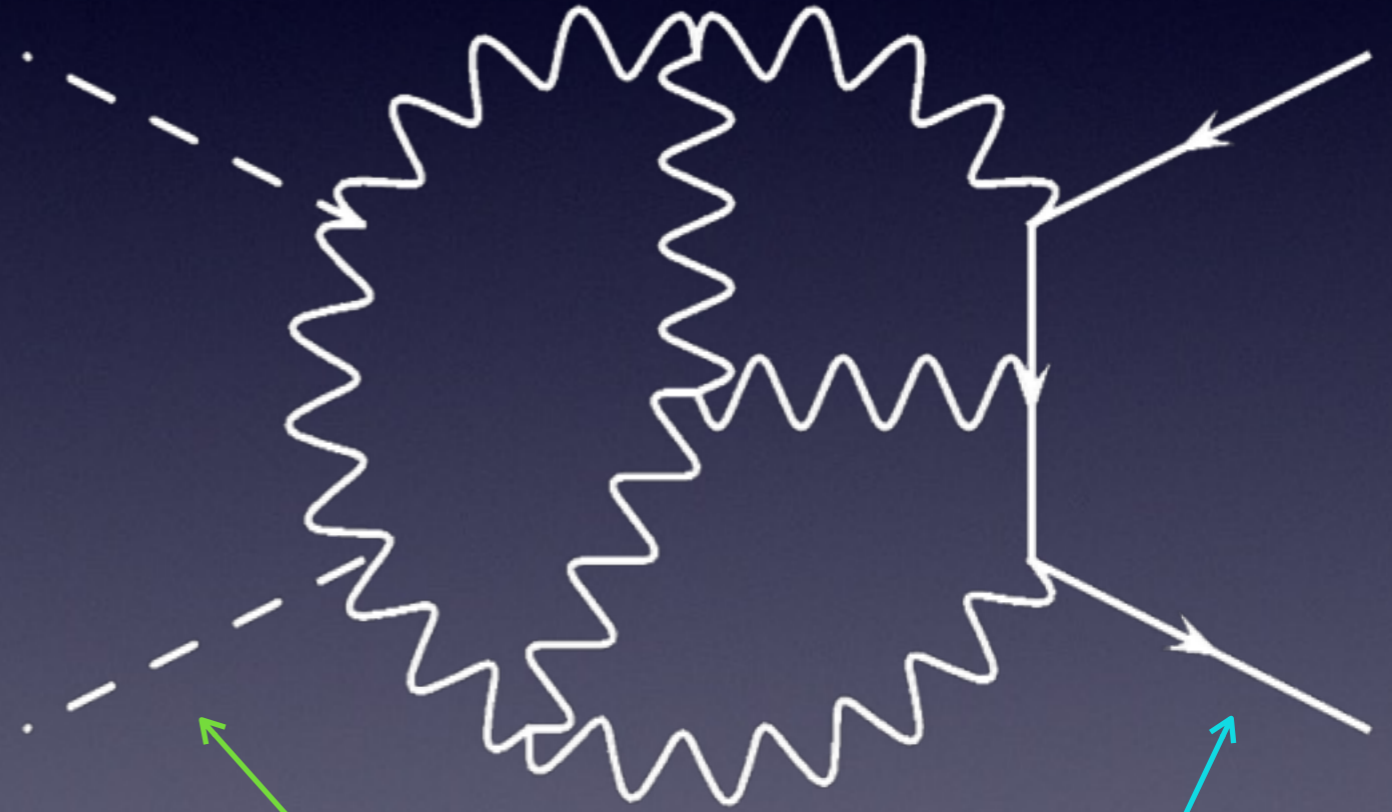
(玻恩水平)



矢量玻色子
自旋=1

圈图

(微扰论展开)



标量粒子
自旋=0

费米子
自旋=1/2

自然单位制：微观世界语言

大部分情形下，粒子间的相互作用
仅仅发生在极高能量和极短距离

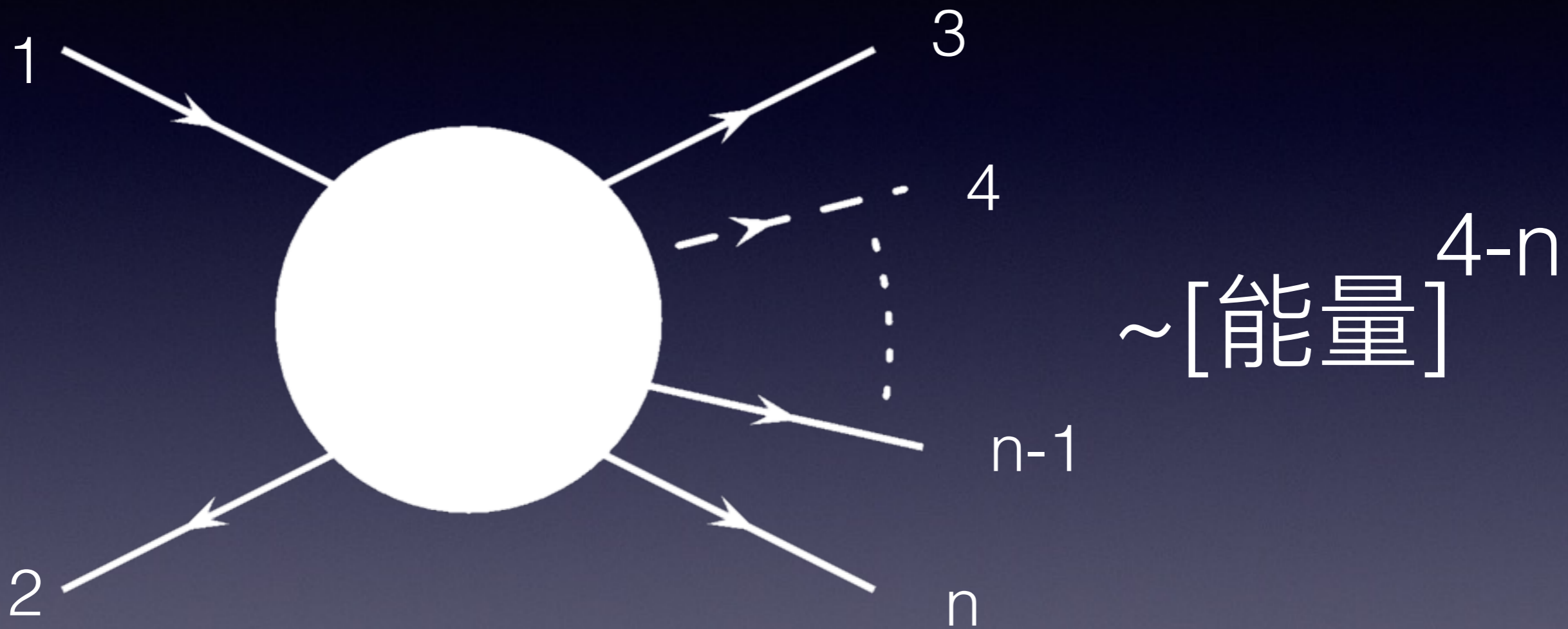
$$\hbar = c = k_B = 1$$

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

神奇的	\hbar	量子性质	长度=动量 ⁻¹
自然界	c	相对论性质	长度=时间
常数	k_B	热力学性质	温度=能量

散射振幅的量纲




$$1 + 2 \rightarrow 3 + 4 + \dots + n$$

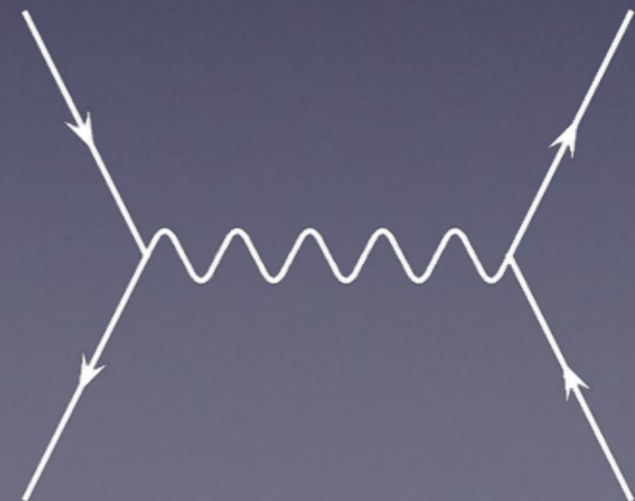
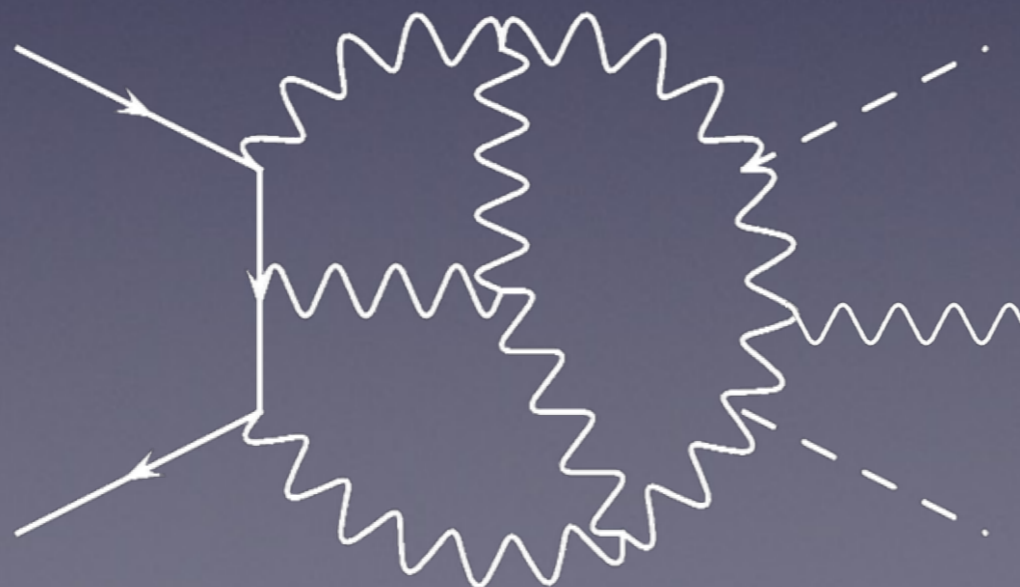


2到2散射过程 $a + b \rightarrow c + d$

$M_{a+b \rightarrow c+d}$ 无量纲

基本粒子的高能行为

自旋	入射/出射	虚	端点
 0 (标量子)	1	$\frac{1}{E^2}$	$\frac{1}{E^2}$
 1/2 (费米子)	\sqrt{E}	$\frac{1}{E}$	$\frac{1}{E}$
 1(玻色子)	E	1	$\frac{1}{E^2}$



规范理论保证费曼图无发散的高能行为

规范对称性保证不同图形在高能区的坏行为彼此相消

$$\sum_n A_n \sim \sum_{n,k} c_n^k E^k \longrightarrow \sum_n c_n^k = 0$$

单个图形在高能区都有坏的行为，散射几率随能量增加而破坏几率守恒，但自然界巧妙地运用**规范对称性**将不同图形之间的坏行为相互抵消掉。

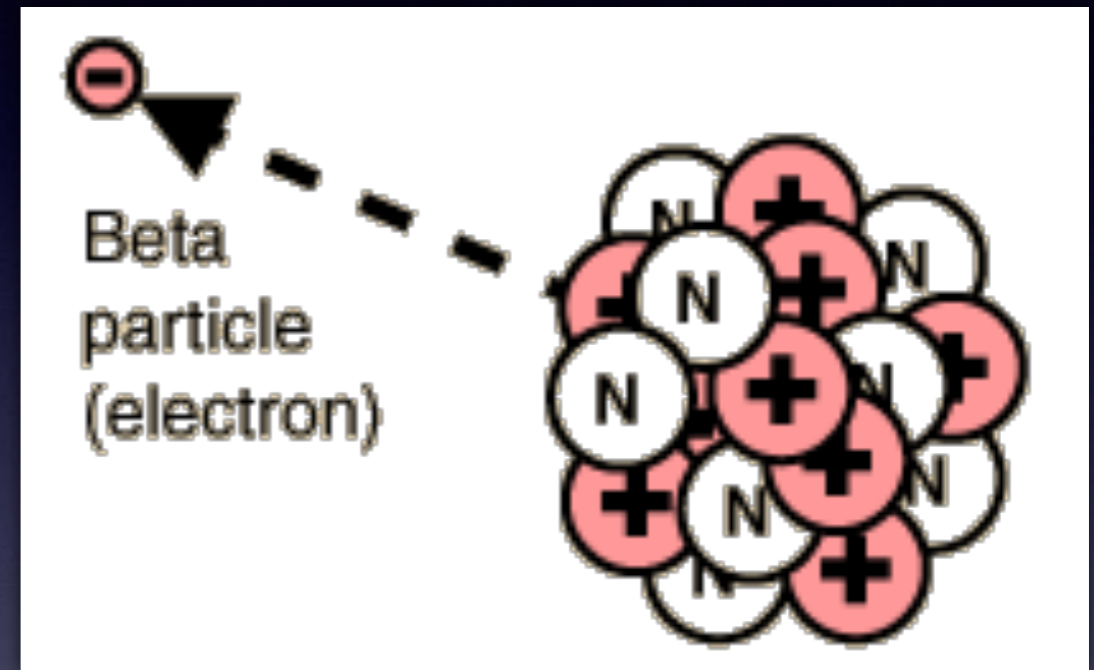
有时人们需要引入新的粒子来产生新的图形，而这一旦被实验证实就会引起整个领域的巨大变革

费米理论

$$A \rightarrow B + e^{-}$$

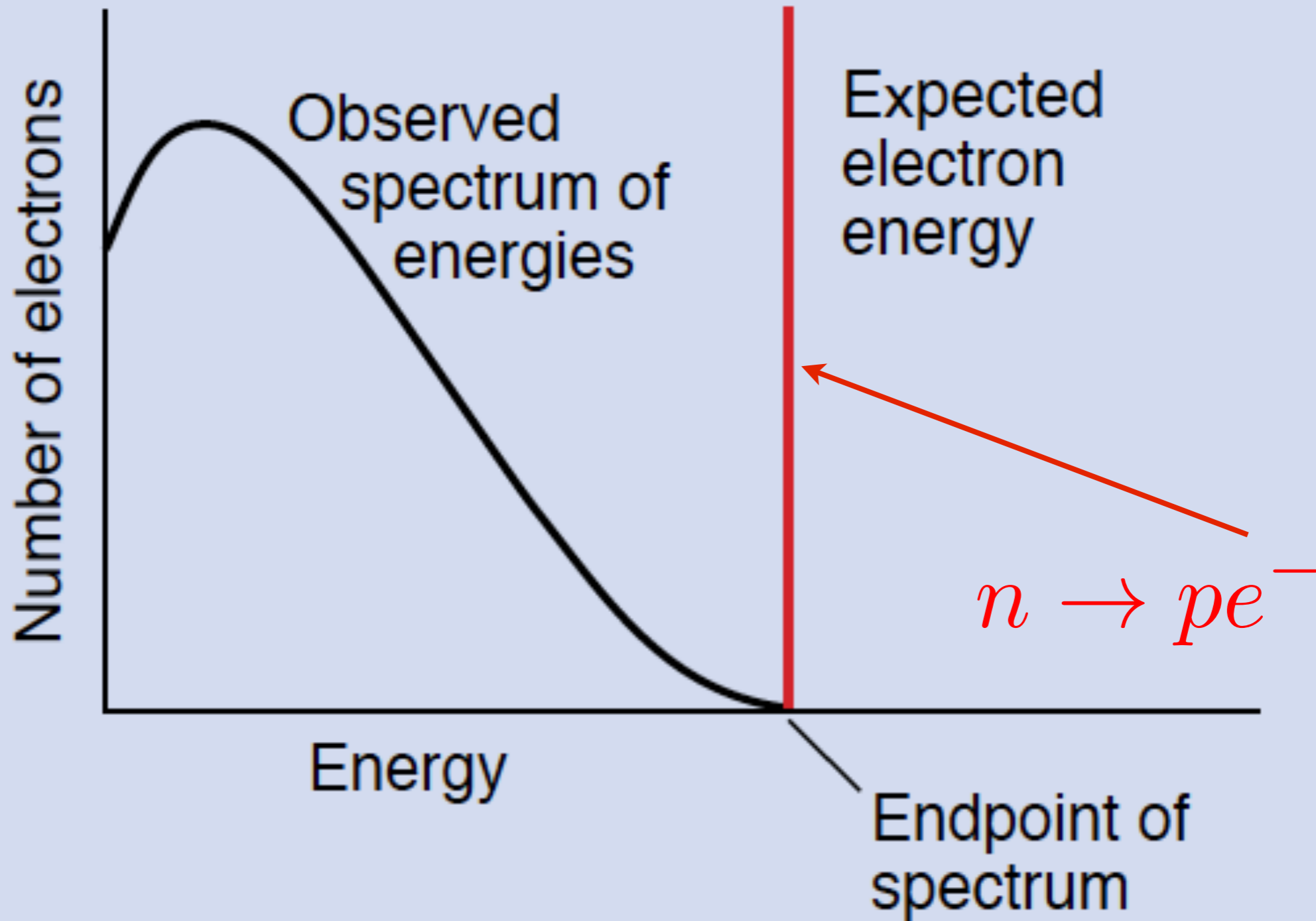
$$(Z, N) \rightarrow (Z + 1, N - 1) + e^{-}$$

\textcircled{N}	$m_n = 939.5656 \text{ MeV}$
$\textcircled{+}$	$m_p = 938.2723 \text{ MeV}$
$\textcircled{-}$	$m_e = 0.510999 \text{ MeV}$
	$0.7823 \text{ MeV} = Q \text{ for } n \rightarrow p + e^{-}$



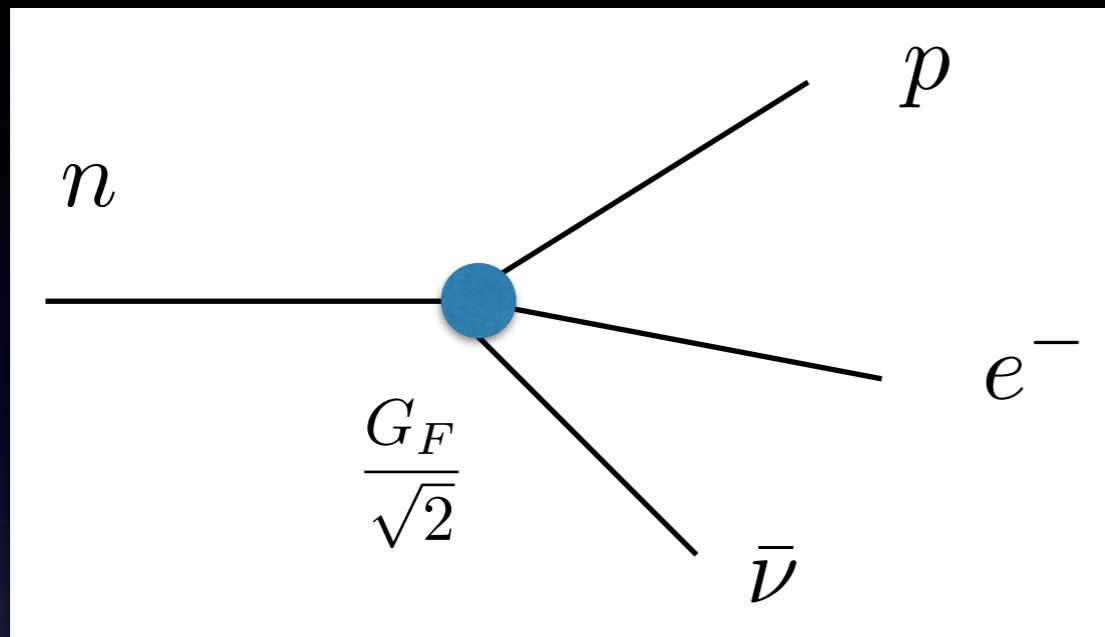
能动能量守恒要求：两体衰变的末态粒子能量是固定数值

费米理论



但实验结果显示电子能量是连续谱

费米理论



$$M_{fi} = G_F [\bar{\psi}_n \gamma^\mu \psi_p] [\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu]$$

$$G_F \sim 10^{-5} (\text{GeV})^{-2}$$

整个理论和QED相似
但力程为零

费曼-盖尔曼的V-A理论

$$[G_F] = \text{GeV}^{-2}$$

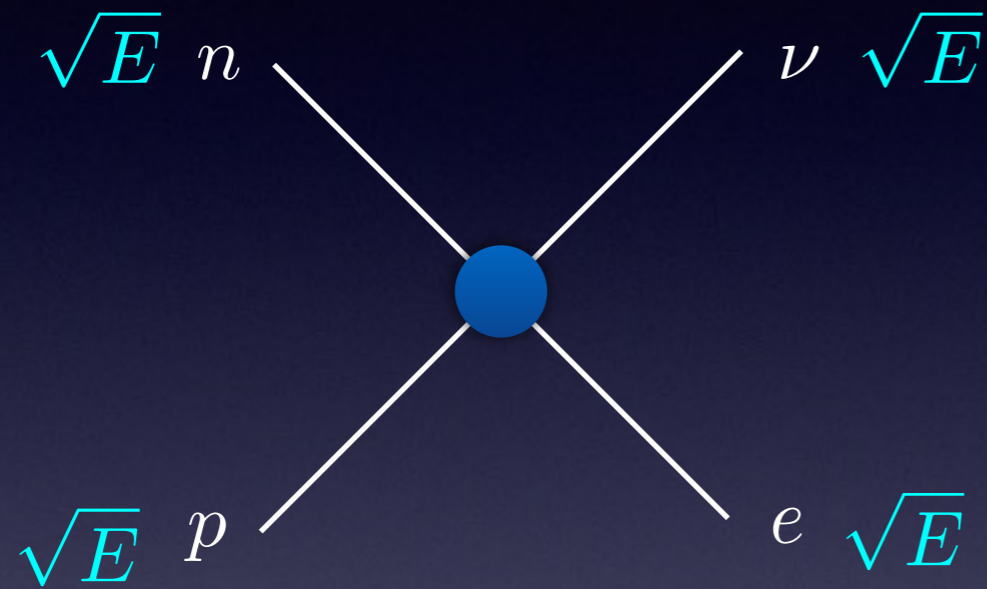
常数

$$G_F \bar{\psi}_n \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_p \bar{\psi}_e \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \psi_\nu$$

人们就知道这些理论只是有效模型，因为违背了么正性。

费曼-盖尔曼的V-A理论

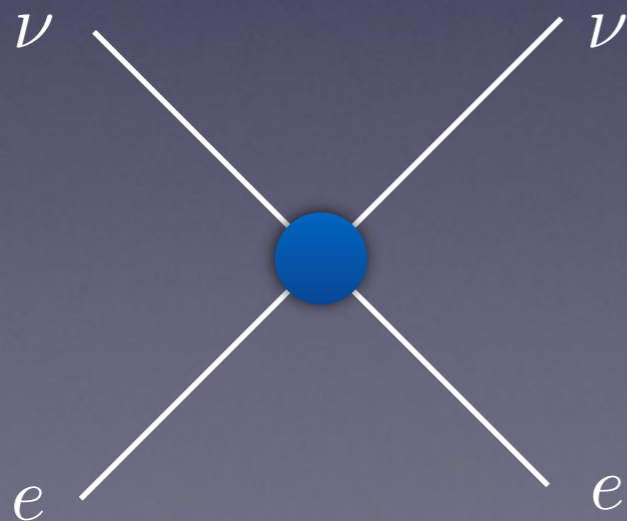
$$G_F \bar{\psi}_n \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_p \bar{\psi}_e \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \psi_\nu$$



$$\sim G_F (\sqrt{E})^4 \sim G_F E^2$$

当能量趋于无穷时，
散射截面发散

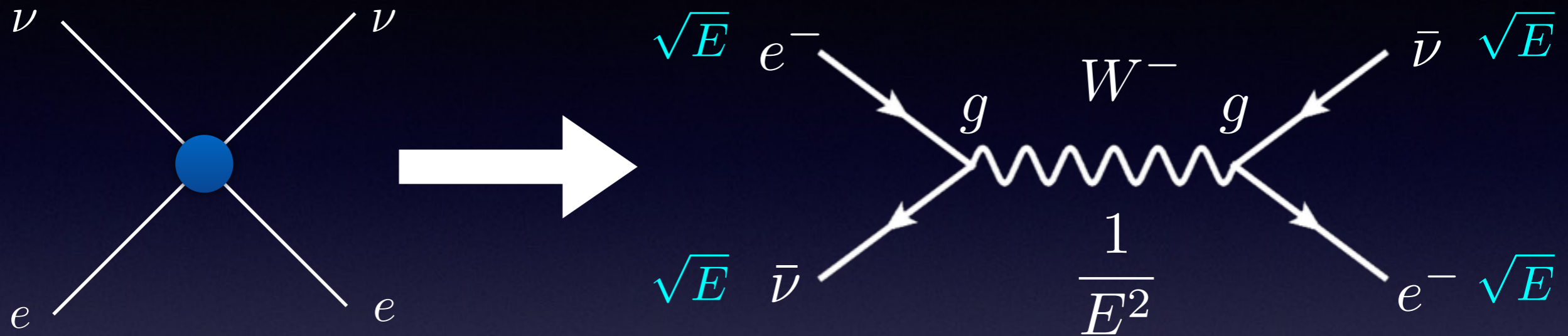
假想
实验



当能量趋于无穷时，

$$\sigma(e^- \nu \rightarrow e^- \nu) \rightarrow \infty$$

中间玻色子模型

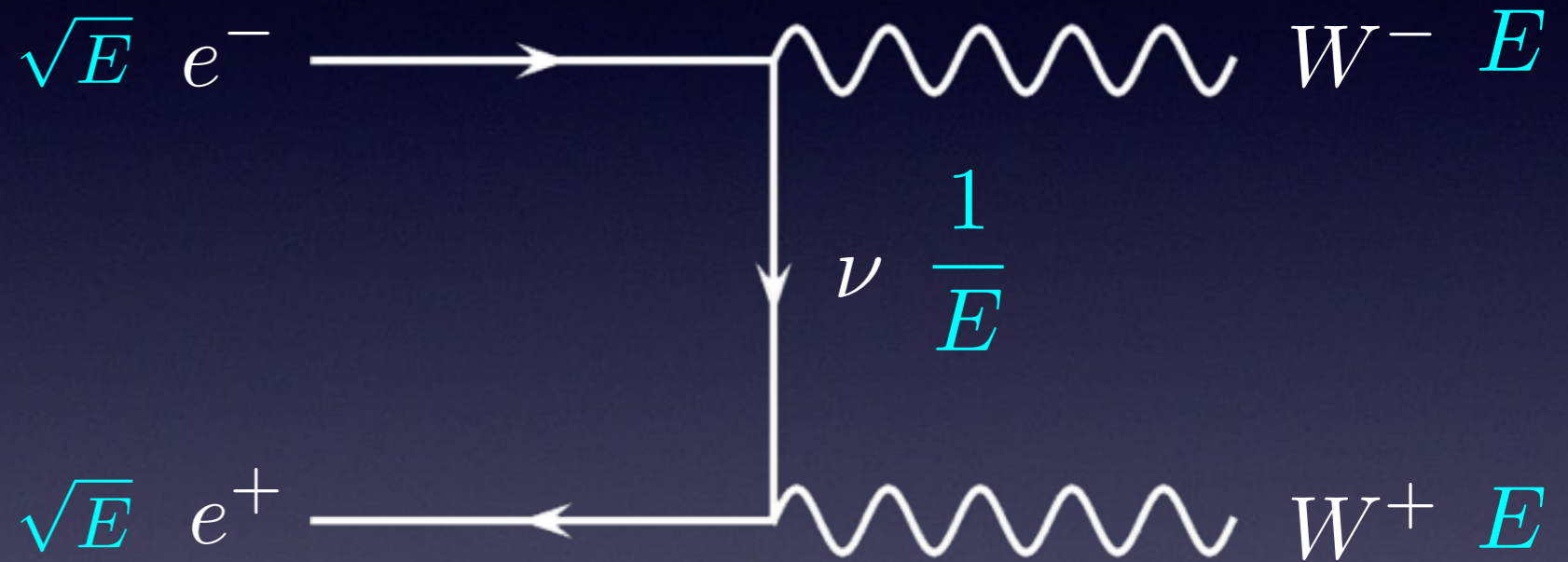
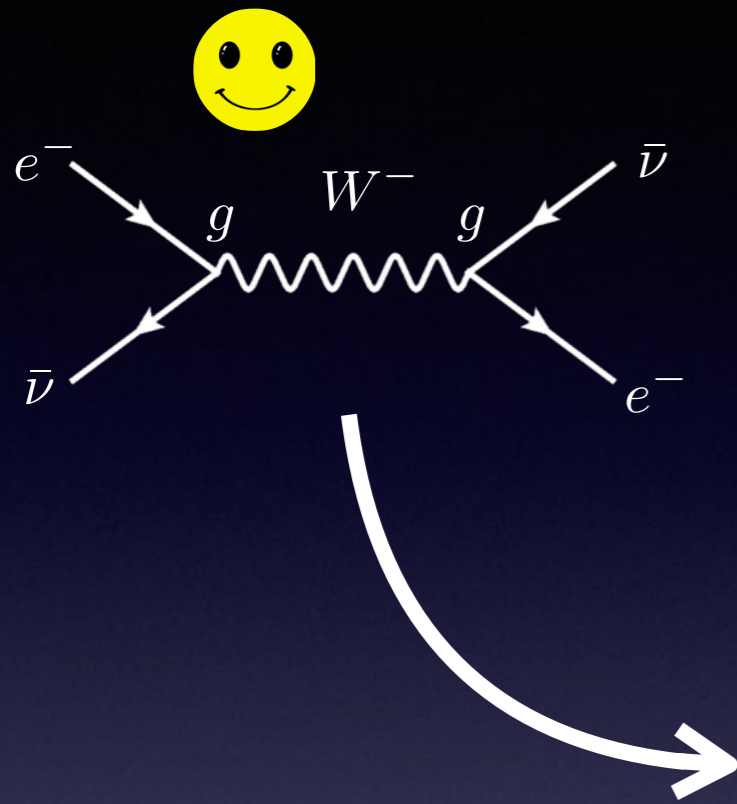


$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{(\sqrt{E})^4}{E^2} \sim E^0$$

当能量趋于无穷时，散射振幅不发散



中间玻色子模型



$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2} \frac{(\sqrt{E})^2}{E} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$



两种解决方案

Diagram 1: $\sqrt{E} e^-$ and $\sqrt{E} e^+$ annihilate into a neutrino ν loop. The loop emits $W^- E$ and $W^+ E$. The neutrino propagator is $\frac{1}{E}$.

$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

Diagram 2: $\sqrt{E} e^-$ and $\sqrt{E} e^+$ annihilate into a W^0 boson. The W^0 boson then decays into $W^- E$ and $W^+ E$. The W^0 propagator is $\frac{1}{E^2}$. The vertices are labeled g and $g'E$.

$$\mathcal{M} \sim gg' \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E^2 m_W^2} E \sim gg' \frac{E^2}{m_W^2}$$

Diagram 3: $\sqrt{E} e^-$ and $\sqrt{E} e^+$ annihilate into a neutrino ν loop. The loop emits $W^- E$ and $W^+ E$. The neutrino propagator is $\frac{1}{E}$.

$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

Diagram 4: $\sqrt{E} e^-$ and $\sqrt{E} e^+$ annihilate into a doubly-charged lepton X . The X then emits $W^- E$ and $W^+ E$. The X propagator is $\frac{1}{E}$. A red box next to X contains the text "两倍电荷轻子".

$$\mathcal{M} \sim -g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim -g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

中间玻色子模型

$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

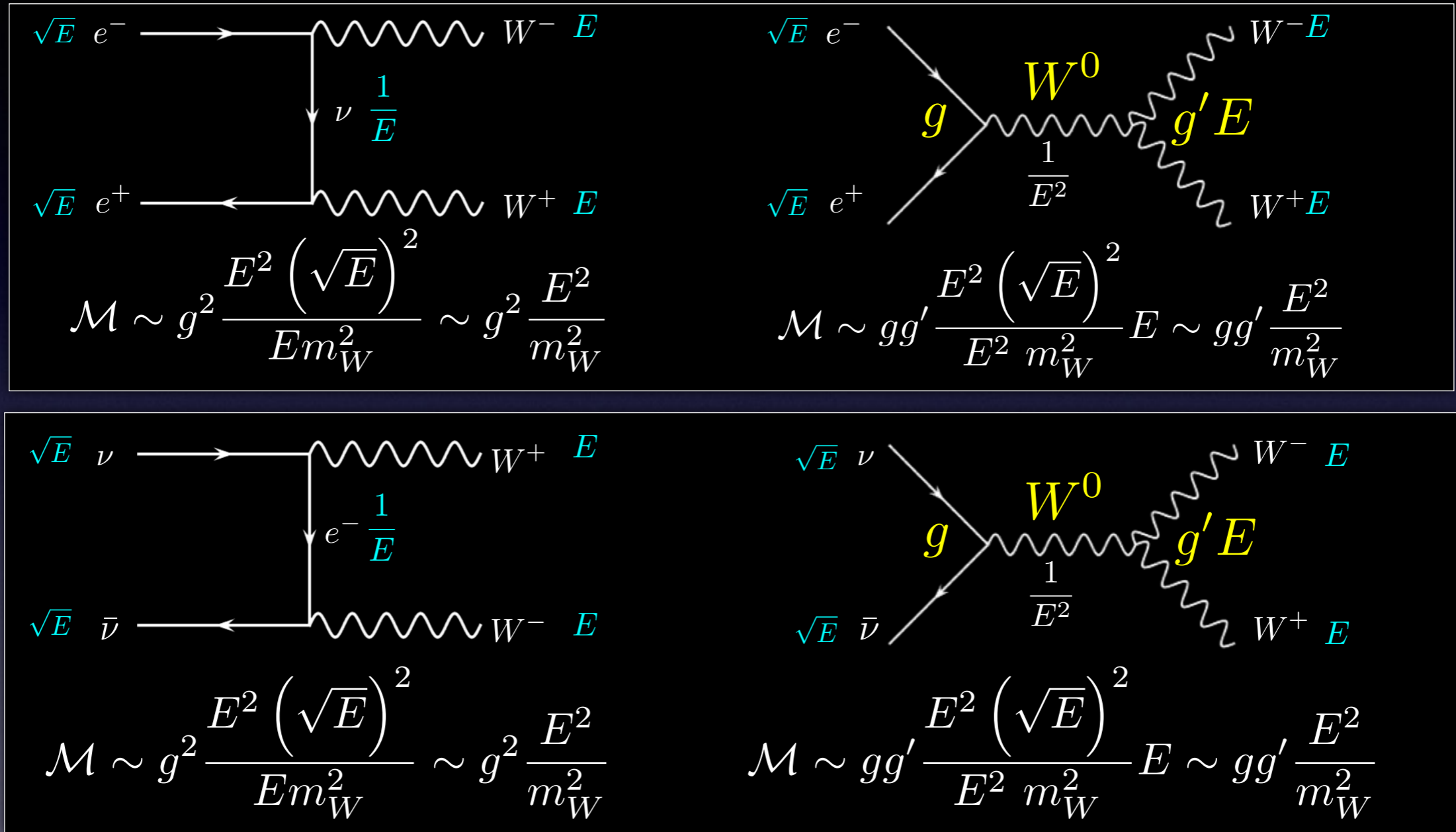
$$\mathcal{M} \sim gg' \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E^2 m_W^2} E \sim gg' \frac{E^2}{m_W^2}$$

$$\mathcal{M} \sim g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

$$\mathcal{M} \sim -g^2 \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E m_W^2} \sim -g^2 \frac{E^2}{m_W^2}$$

自然界青睐“中性矢量玻色子”

最简原则



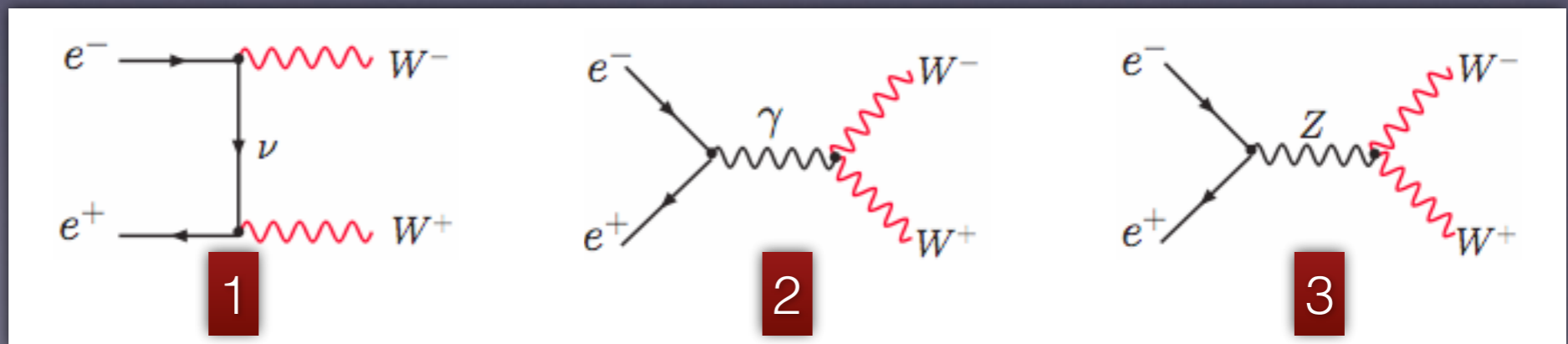
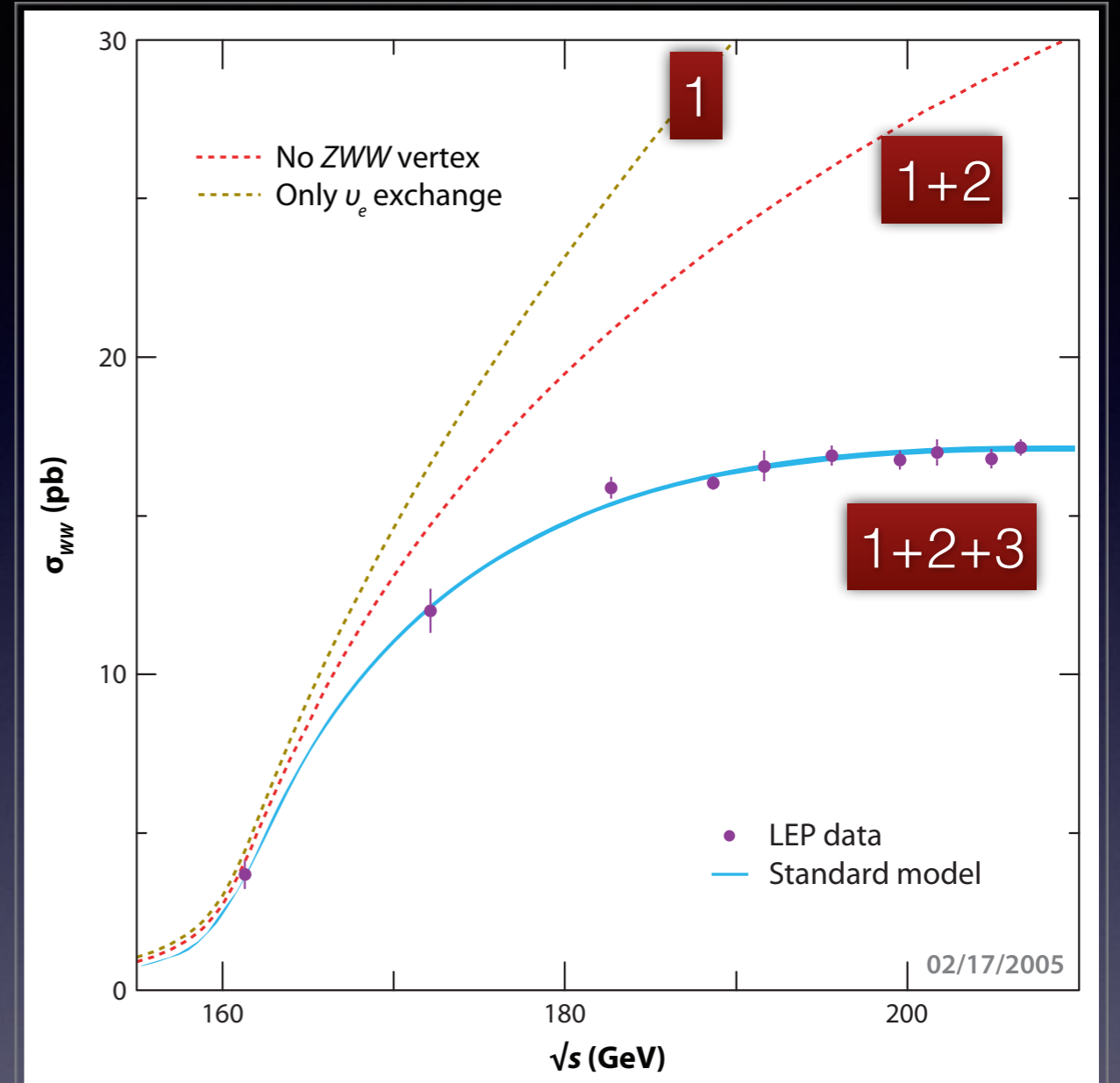
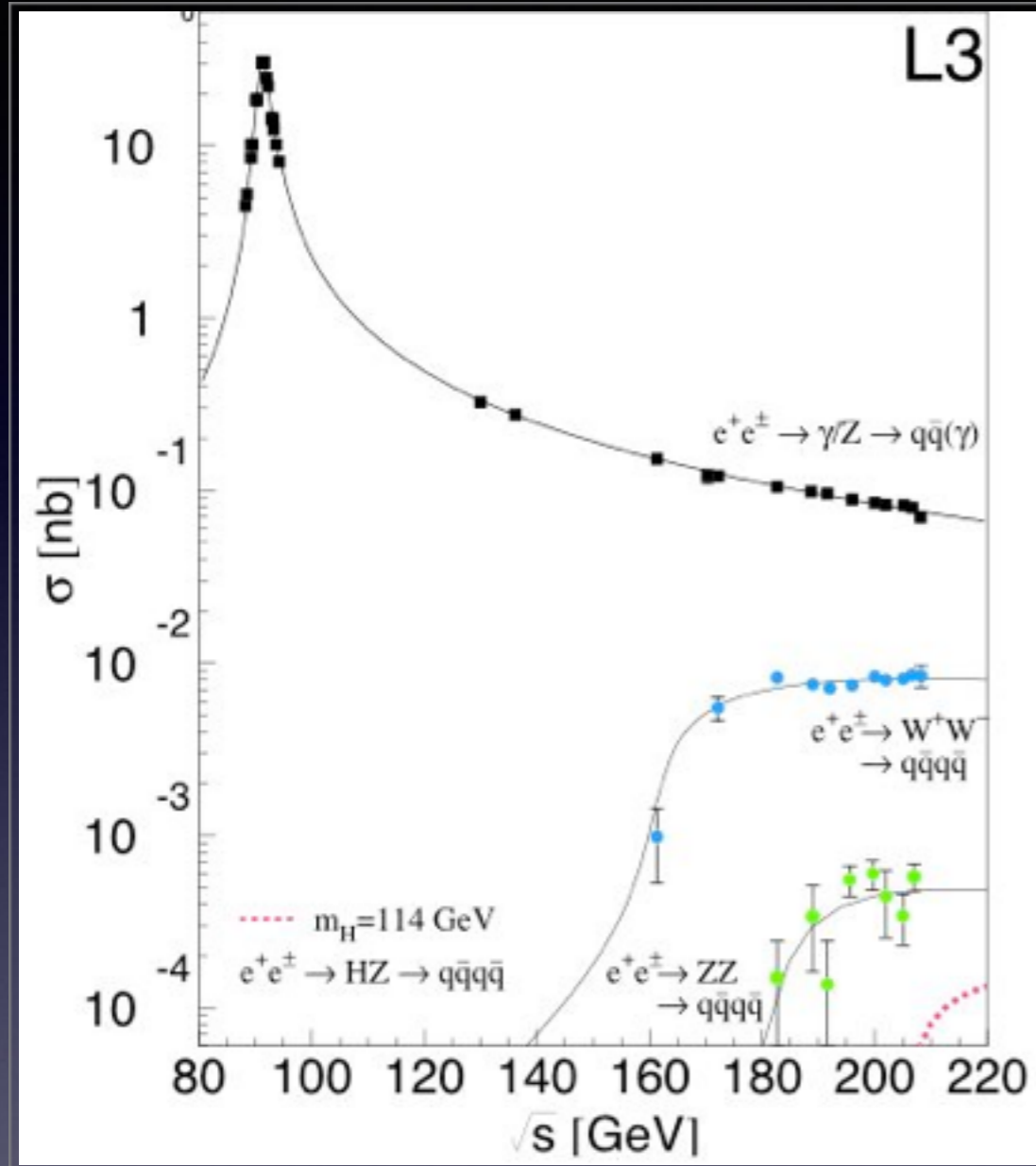
1) 中性矢量玻色子和电子相互作用，
也和不带电的中微子相互作用

不是电磁相互作用

相互作用的
耦合常数
大小相同

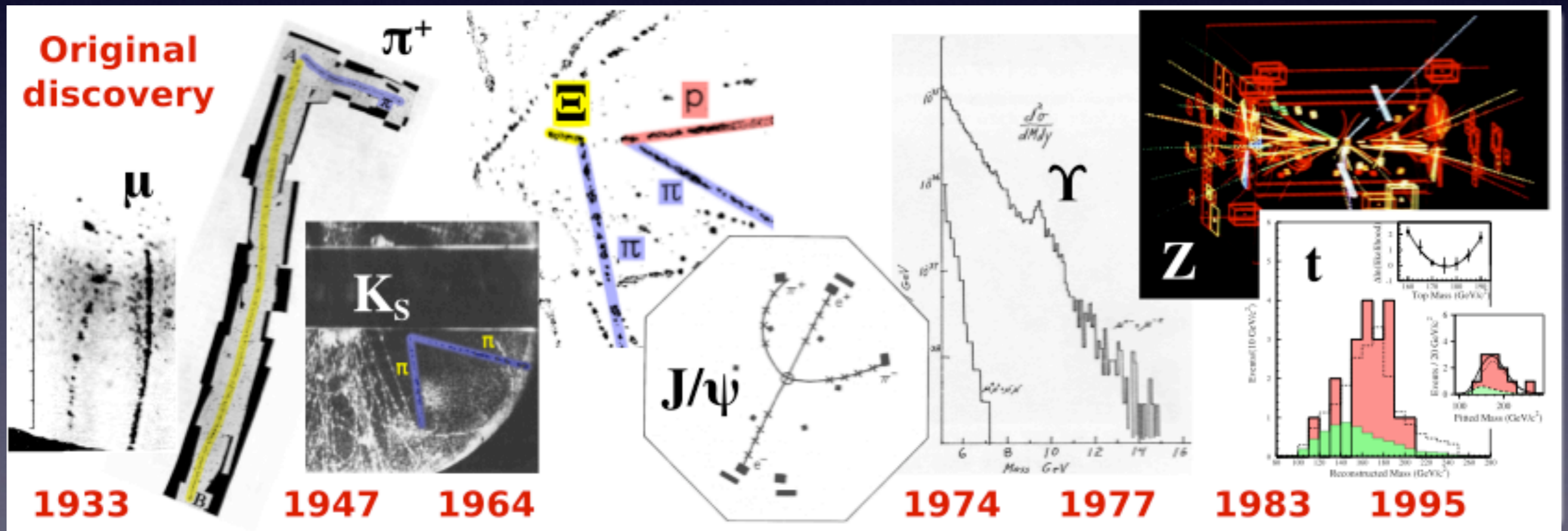
2) 中性矢量玻色子和带电规范玻色子相互作用

标准模型中轻子弱电相互作用



夸克的弱相互作用

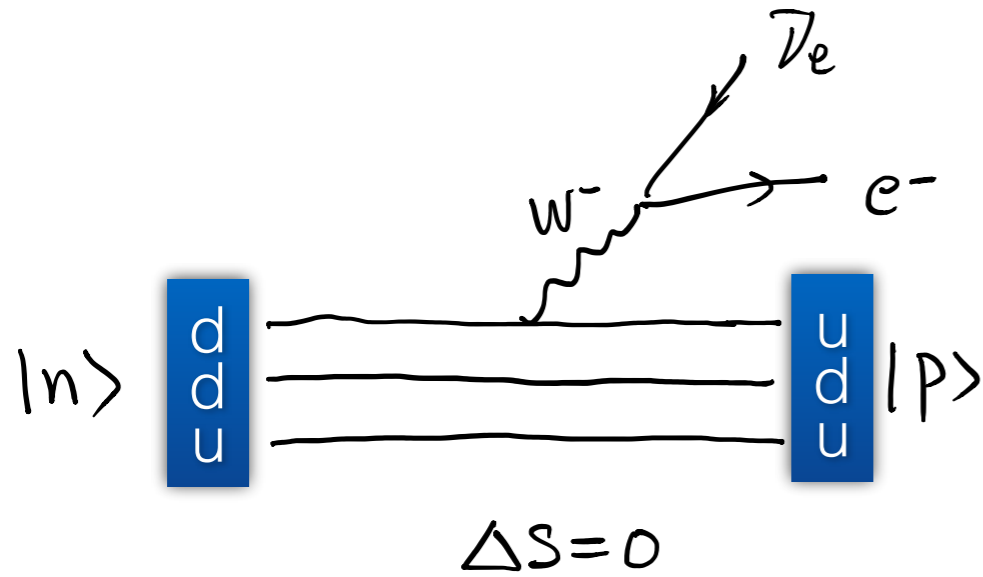
(理论先预言粲夸克)



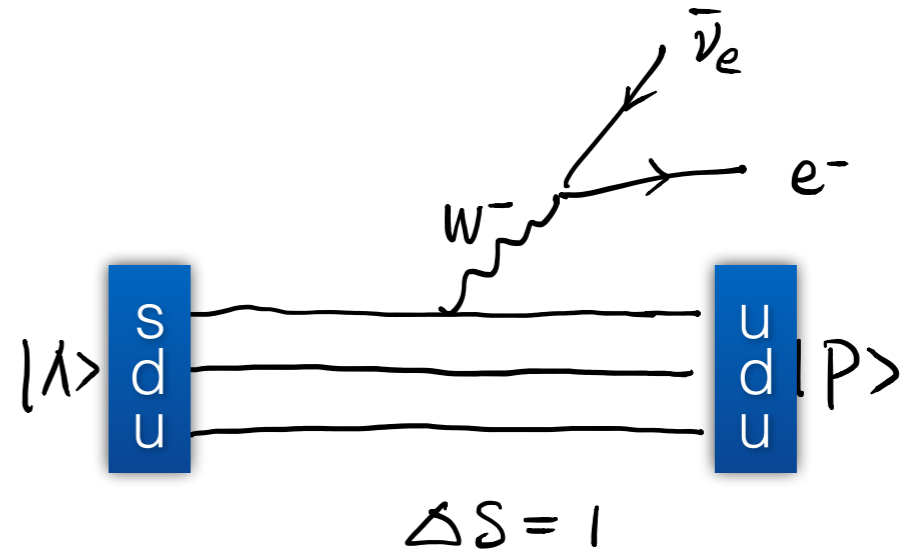
粲夸克

实验上发现：轻子部分的带电流是普适的，但夸克部分不是

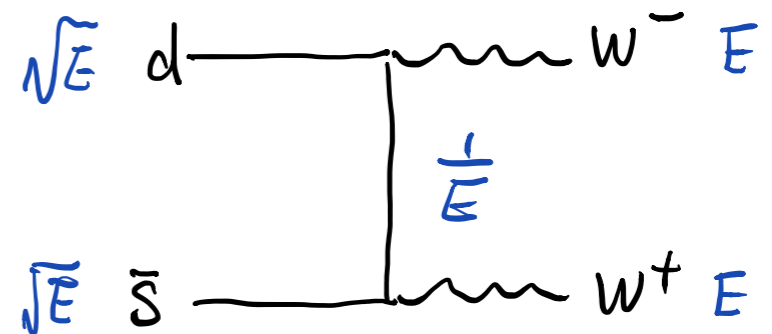
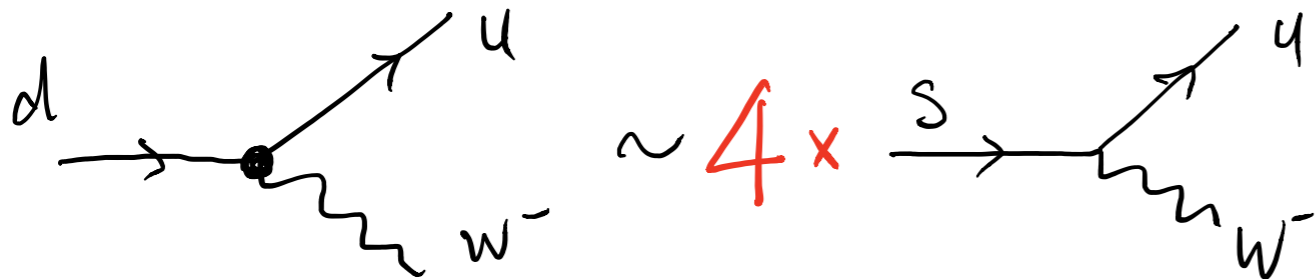
$$n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$$



$$\Lambda \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

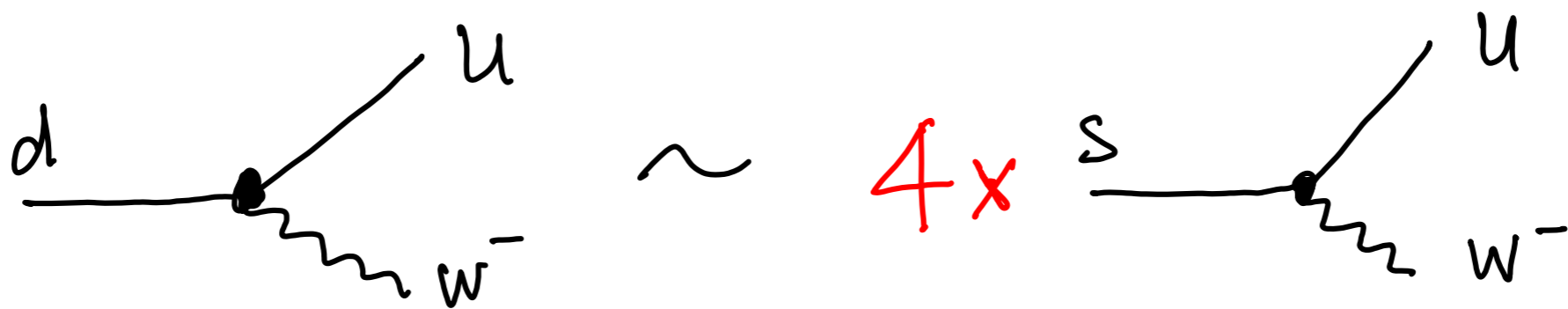


在奇异强子的 beta 衰变过程中观测到



$$M \sim \frac{E^2 (\sqrt{E})^2}{E} \sim E^2$$

问题：如何理解 $G_{udW} \neq G_{usW}$ 和 $d\bar{s} \rightarrow W^+W^-$ 的破坏性破坏？



Cabibbo 混合理论 (1963)

相互作用本征态
不是质量本征态

$$d'_W = \cos\theta_c d_L + \sin\theta_c s_L$$

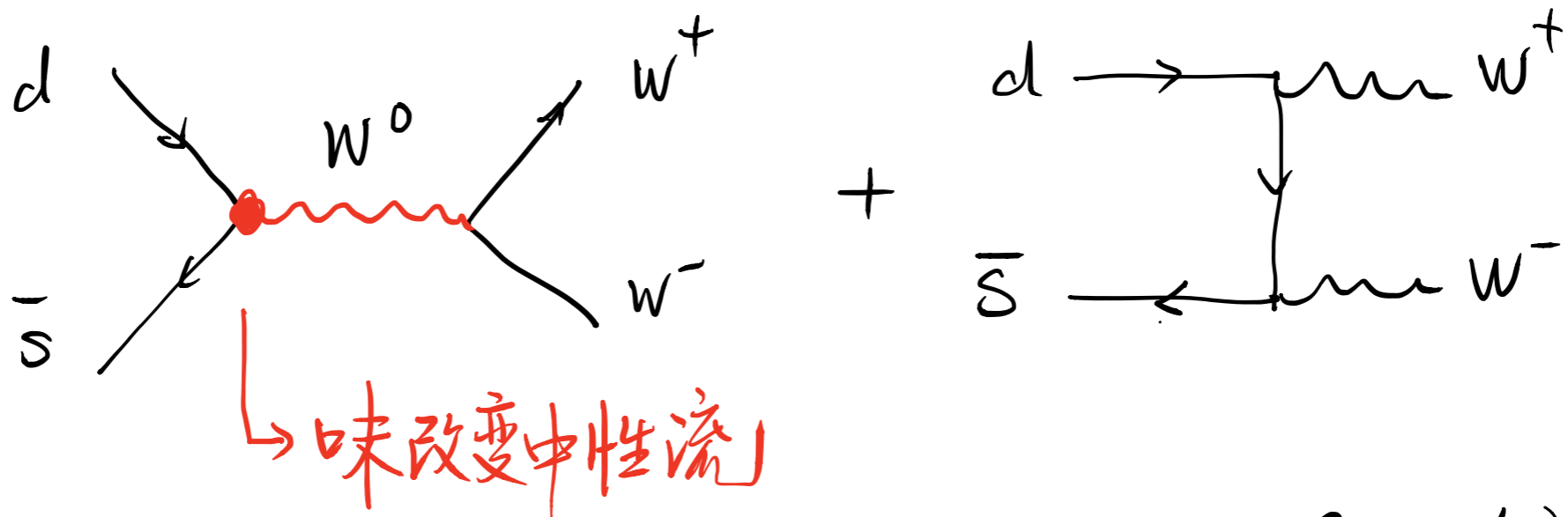
\swarrow Cabibbo angle

$$\begin{aligned}
 M &\propto G_F \bar{e}_L \gamma_\alpha \nu_{eL} \bar{d}'_L \gamma^\alpha u_L \\
 &= G_F \bar{e}_L \gamma_\alpha \nu_{eL} \bar{d}_L \gamma^\alpha u_L \cos\theta_c \\
 &\quad + G_F \bar{e}_L \gamma_\alpha \nu_{eL} \bar{s}_L \gamma^\alpha u_L \sin\theta_c
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \sin\theta_c &= 0.221 \\
 \cos\theta_c &= 0.974
 \end{aligned} \right\} \text{可解释实验结果}$$

高能安全理论:

1) 方案1: 引入中性流



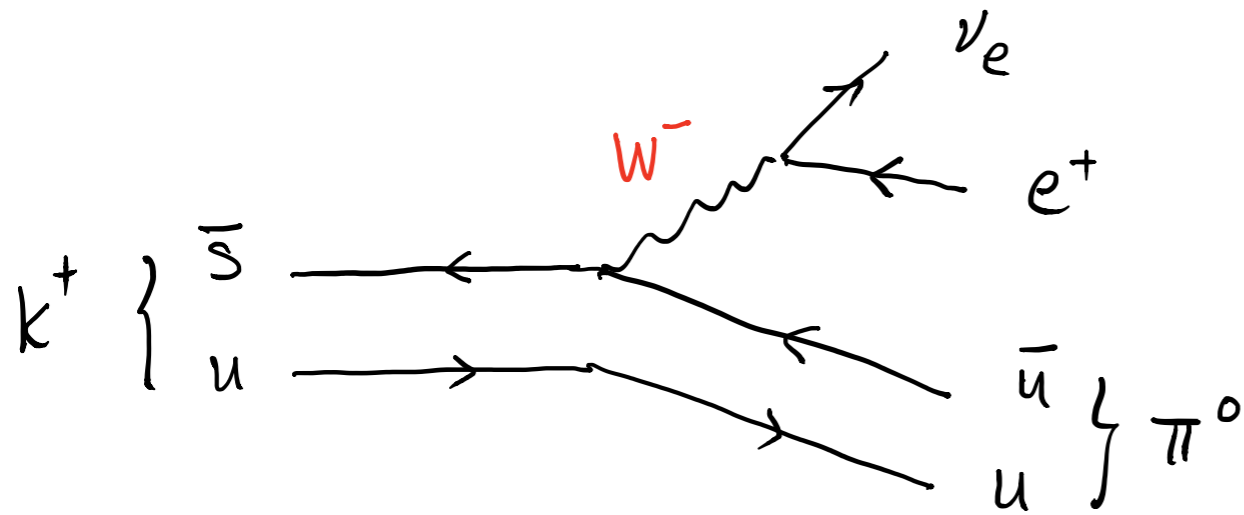
(Flavor Changing Neutral Current)

这种味改变中性流正是 Cabibbo 理论的不足之处

$$\bar{d}'_L \gamma^\alpha d'_L = C_\theta^2 \bar{d}_L \gamma^\alpha d_L + S_\theta^2 \bar{s}_L \gamma^\alpha s_L \quad \text{— 味守恒}$$

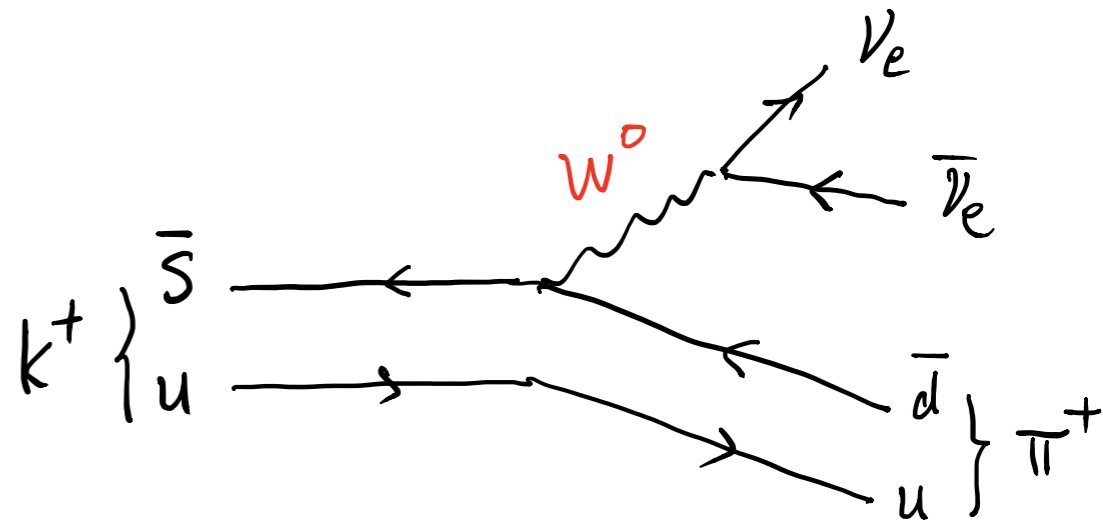
$$+ C_\theta S_\theta [\bar{d}_L \gamma^\alpha s_L + \bar{s}_L \gamma^\alpha d_L] \quad \text{— 味改变}$$

实验并不支持味改变中性流

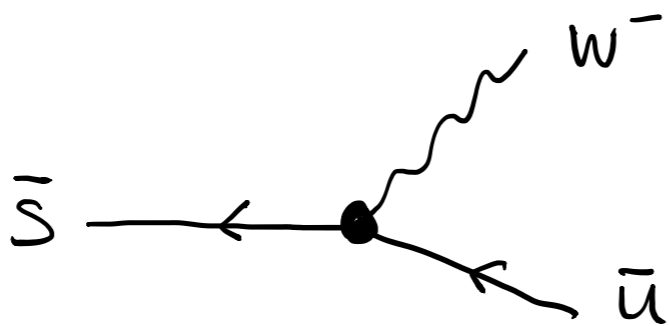


$Br \sim 10^{-2}$

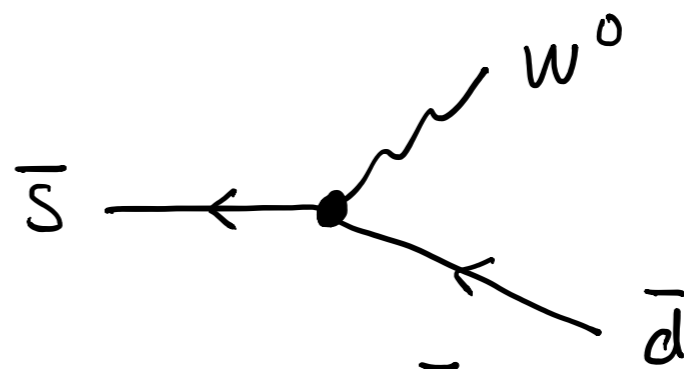
\gg



$Br \sim 10^{-10}$



$G_F S_\theta \bar{s}_L \gamma^\alpha u_L$



$G_F C_\theta S_\theta \bar{d}_L \gamma^\alpha s_L + h.c.$

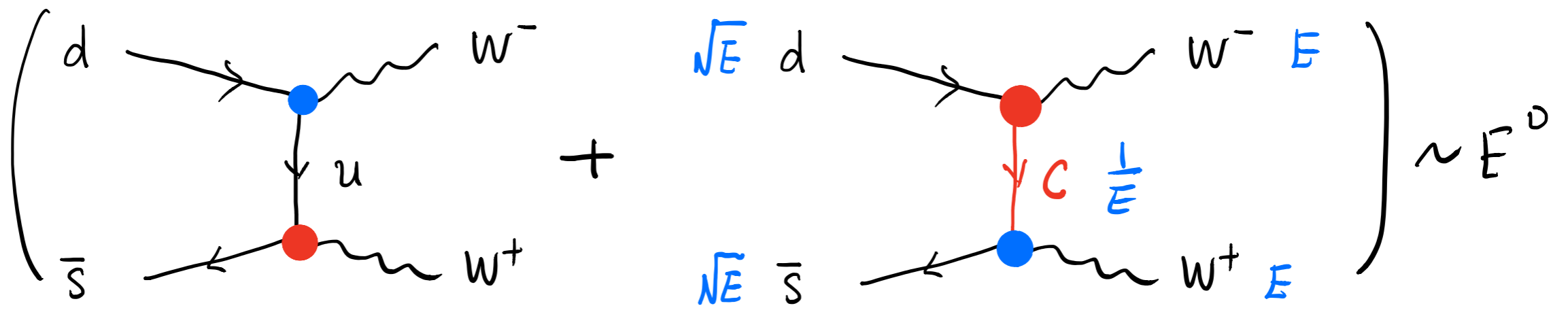
Cabibbo 混合角

$S_\theta \approx 0.22$

$C_\theta \approx 0.974$

这两个顶点的大小应该相近

高能安全理论 方案2



1970年GIM等人提出: 存在尚未被发现的第4种夸克 - charm quark

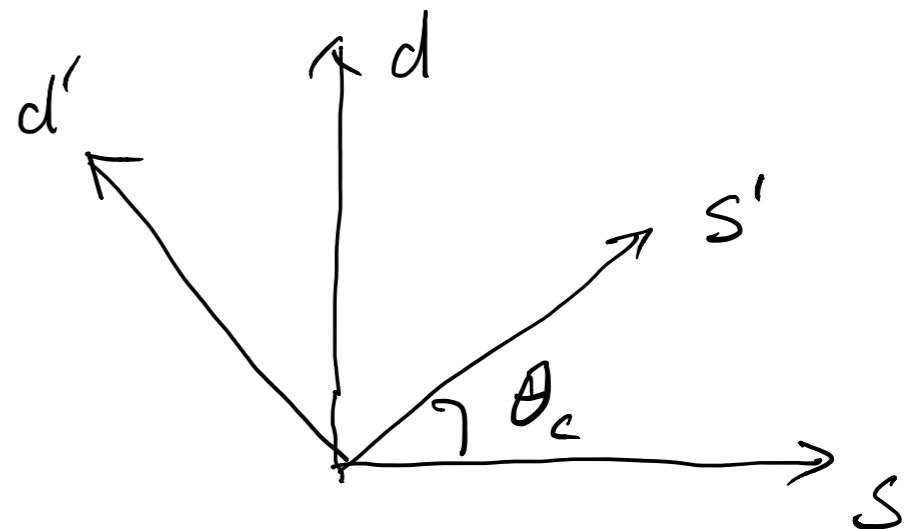
GIM机制 $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$

$$\bar{S}'_L \gamma^\alpha S'_L = S_\theta^2 \bar{d}_L \gamma^\alpha d_L + C_\theta^2 \bar{s}_L \gamma^\alpha s_L - S_\theta C_\theta [\bar{d}_L \gamma^\alpha s_L + \bar{s}_L \gamma^\alpha d_L]$$

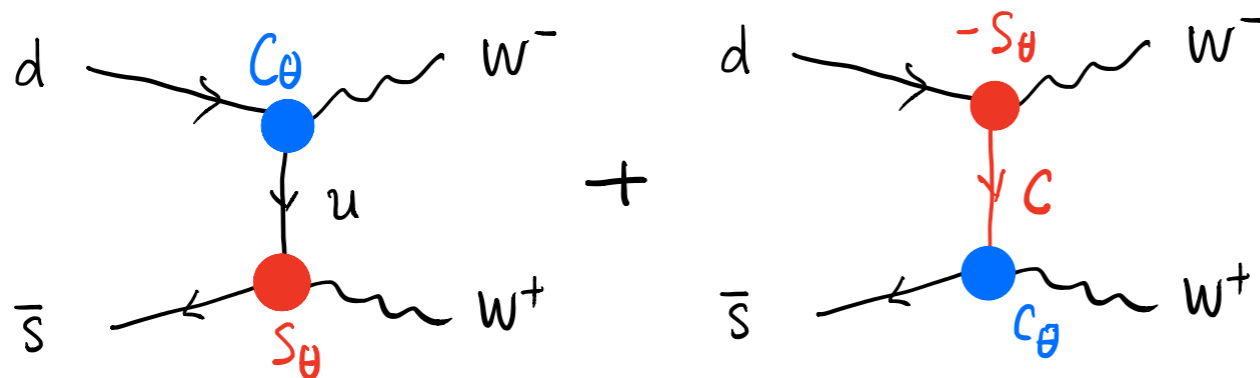
作业: 验证

中性流
味守恒

$$\begin{aligned} \bar{S}'_L \gamma^\alpha S'_L + \bar{d}'_L \gamma^\alpha \bar{d}'_L \\ = \bar{d}_L \gamma^\alpha d_L + \bar{s}_L \gamma^\alpha s_L \end{aligned}$$

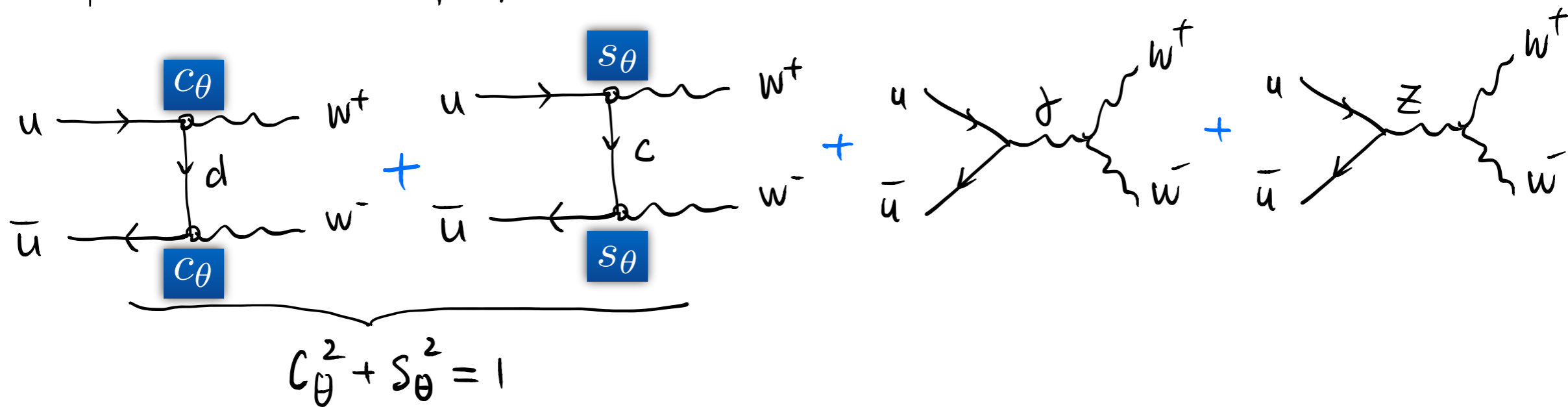


高能安全性:

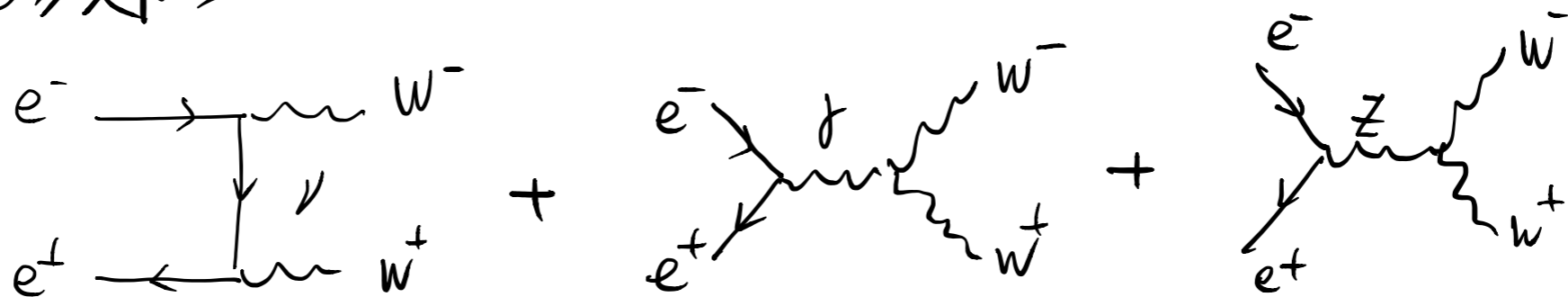


相互抵消 E^2 发散

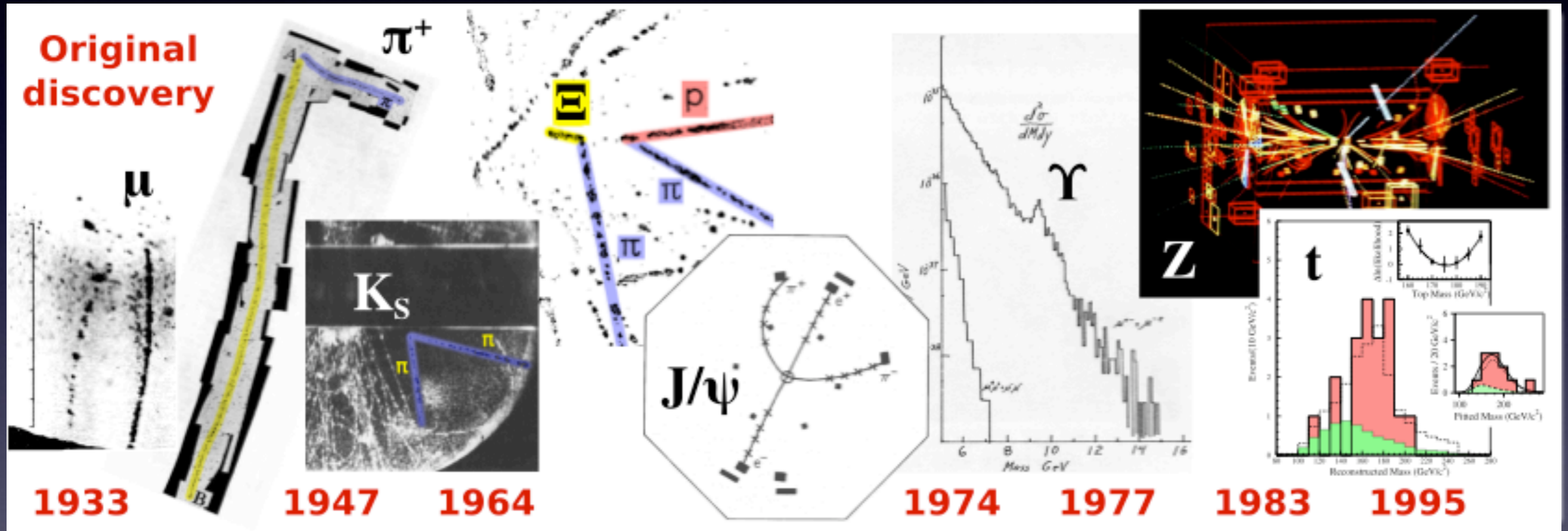
此外 $\bar{u}u \rightarrow w^+w^-$ 散射



这和轻子部分类似



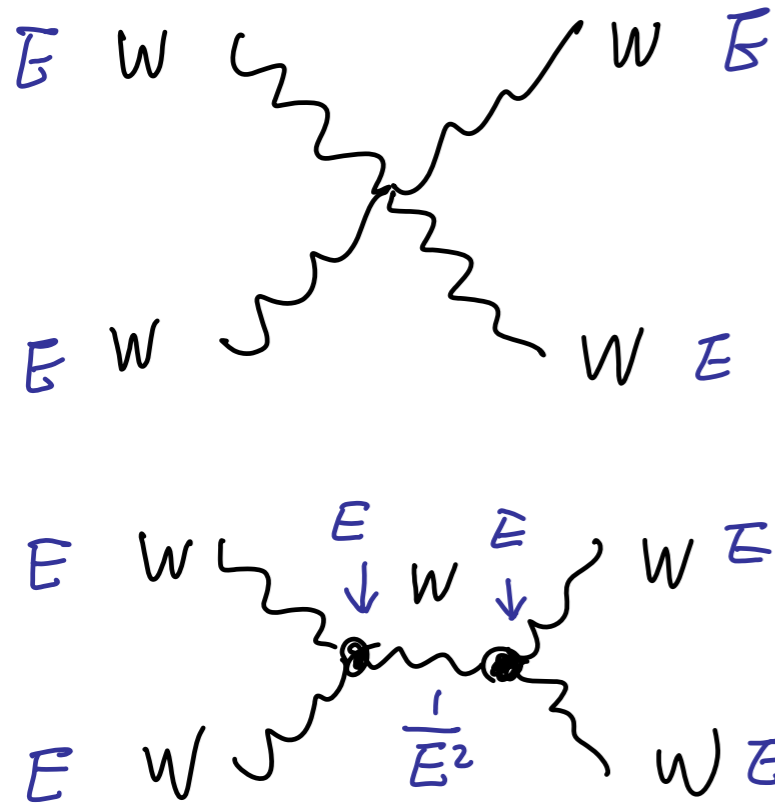
希格斯粒子一定存在



或者,

我们必定要观测到TeV能标附近的新物理效应

WW 散射



$$M \sim E^4$$

规范不变性
将之抵消

$$M \sim \frac{E^4 \times E^2}{E^2} \sim E^4$$

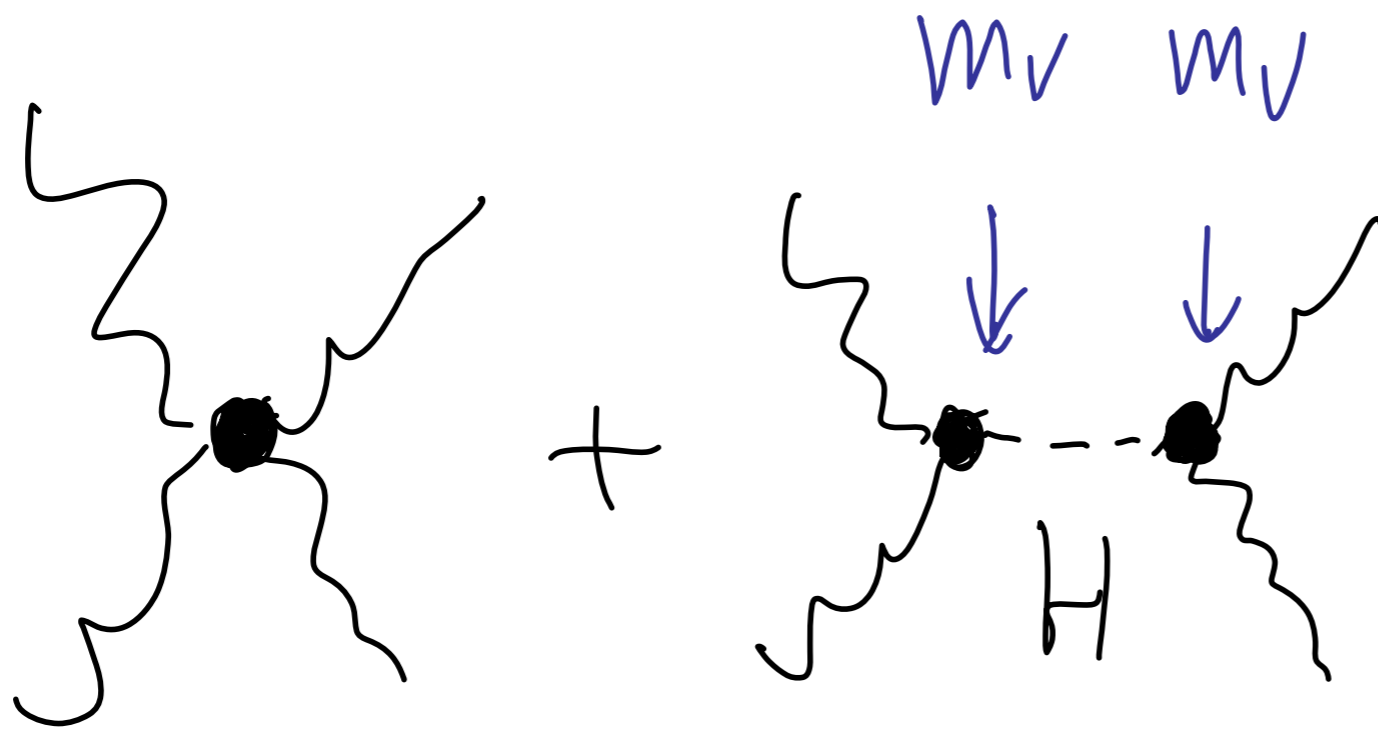
消除 E^4 的坏行为, 我们还有 E^2 的高能区行为

$$\left(\text{Diagram: a circle with diagonal lines, connected to external wavy lines} \right) \sim \underline{M_V^2} E^2$$

要求存在一种粒子, 此粒子和规范玻色子作用要正比于 $M_V \rightarrow$ Higgs boson

$$\left(\text{Diagram with a shaded circle and wavy lines} \right) \sim \underline{M_V^2} E^2$$

↳ 要求存在一种粒子，此粒子和规范玻色子作用要正比于 M_V → Higgs boson

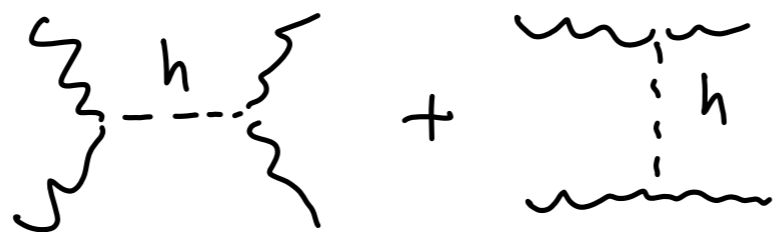


抵消掉 E^2 的坏行为

*) 为什么2012年前人们相信TeV能区一定有新物理现象?
(包含Higgs在内)

或者, 为什么我们相信LHC一定可以找到希格斯或与其等效的新物理?

假设希格斯很重, 取极限 $(s, m_H^2) \gg (m_W^2, m_Z^2)$



$$M(W_0^+ W_0^- \rightarrow W_0^+ W_0^-) = -\sqrt{2} G_F M_H^2 \left(\frac{s}{s-m_H^2} + \frac{t}{t-m_H^2} \right)$$

$\hookrightarrow M_H$ 很大时破坏么正性

J=0 分波:

$$a_0(W_0^+ W_0^- \rightarrow W_0^+ W_0^-) = \frac{-G_F M_H^2}{8\pi\sqrt{2}} \left[2 + \frac{M_H^2}{s-M_H^2} - \frac{M_H^2}{s} \ln\left(1 + \frac{s}{M_H^2}\right) \right]$$

$$\xrightarrow{s \gg M_H^2} -\frac{G_F M_H^2}{4\pi\sqrt{2}}$$

TeV么正限制

$$\frac{G_F M_H^2}{4\pi\sqrt{2}} \leq 1 \quad M_H^2 \leq \frac{4\pi\sqrt{2}}{G_F} \leq 1.5 \text{ TeV}^2$$

$$M_H \leq 1.2 \text{ TeV}$$

在LHC探测范围之内

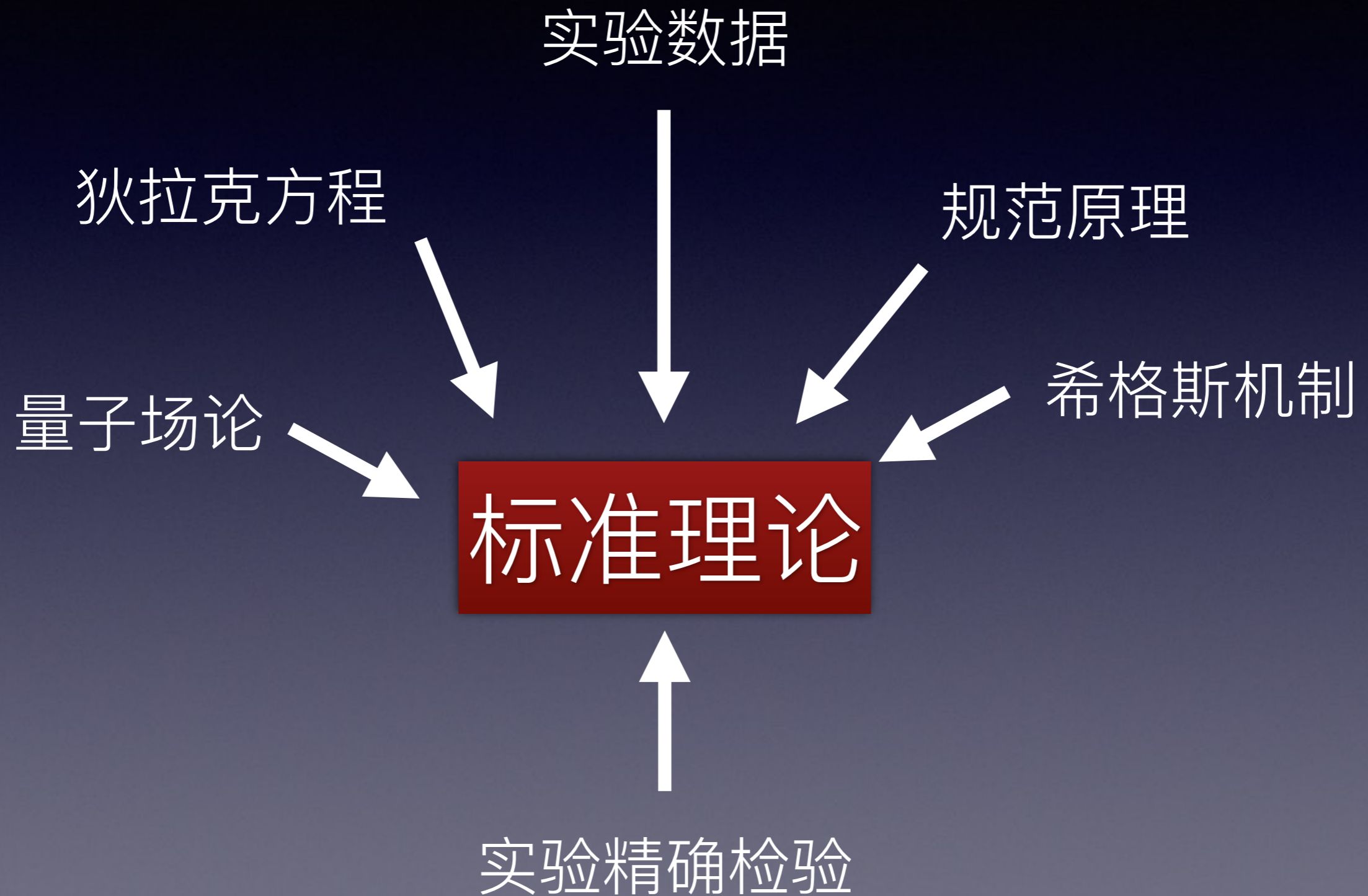
如果 $M_H \ll \text{TeV}$ (已被实验证实了)

弱相互作用在所有能量都是弱耦合的,
微扰论一直适用

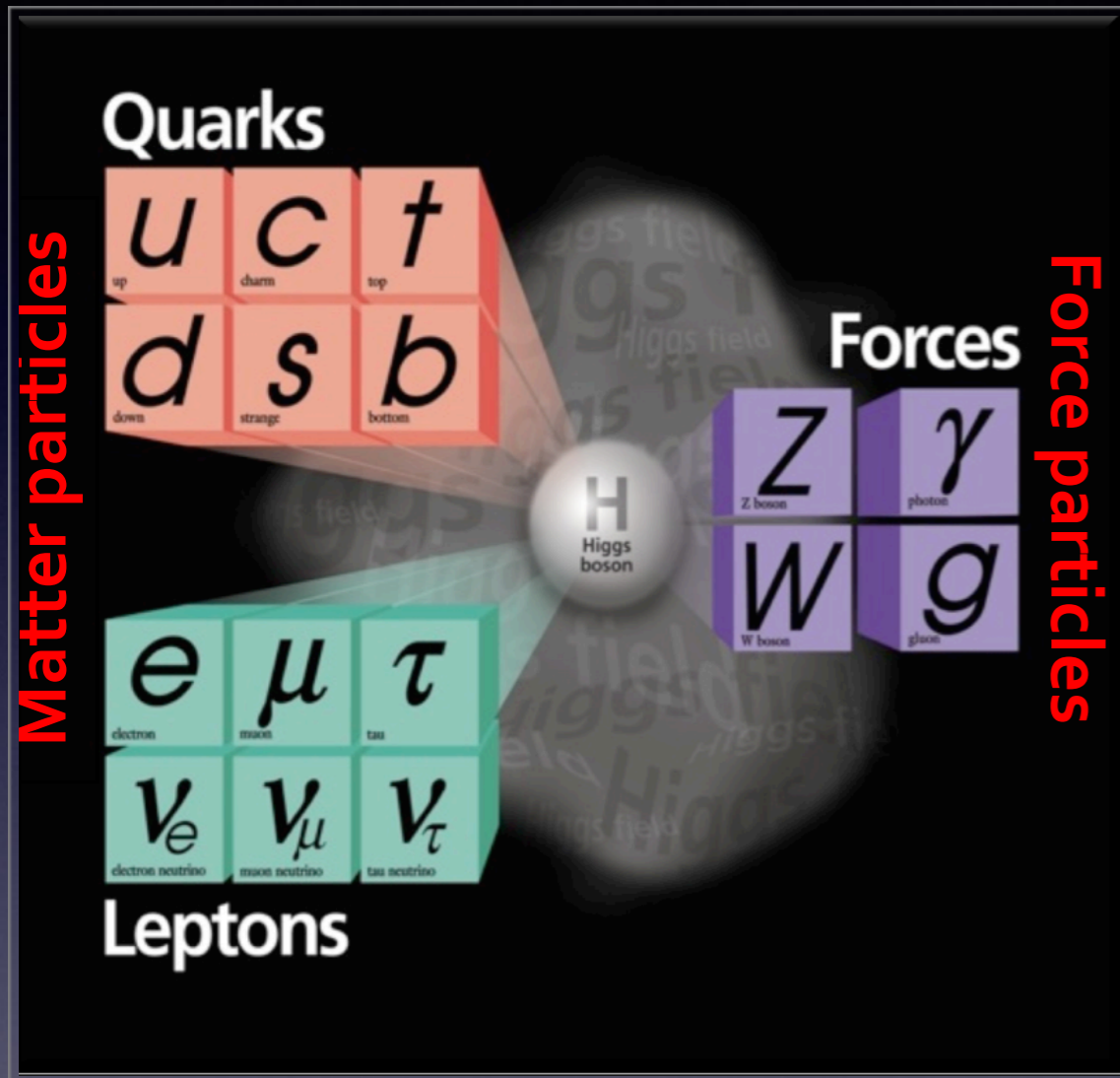
如果 $M_H \sim \text{TeV}$

W^\pm, Z, H 等粒子在TeV能标都强烈耦合
会出现大量的规范玻色子对的共振态

粒子物理的标准模型



粒子物理的标准模型



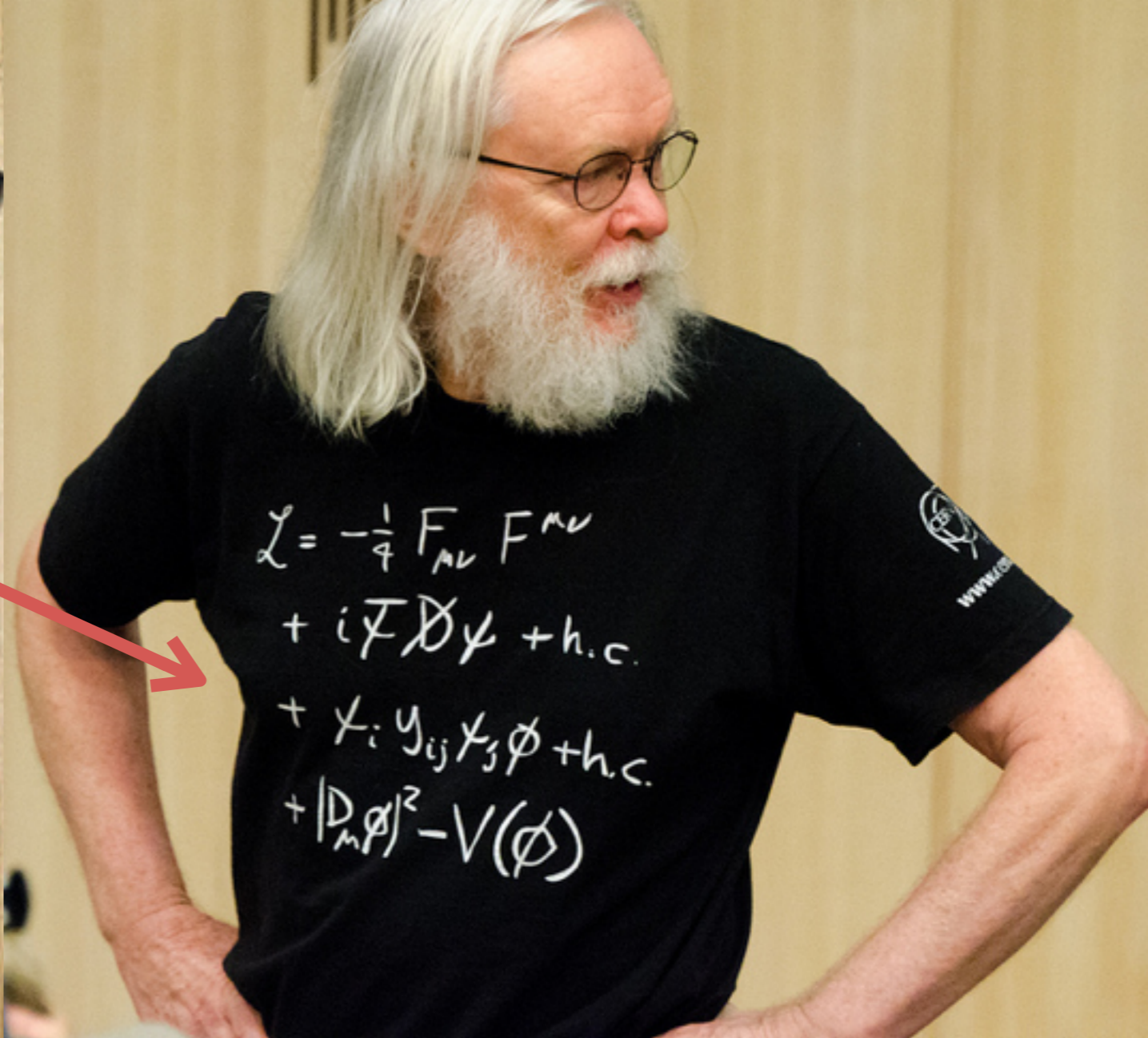
集百年物理之大成

新“元素周期表”

20世纪自然科学
的卓越成就之一

宇宙万物可以用一个简单公式描述

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



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

QCD

(Strong Interaction)

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

WEAK \oplus QED

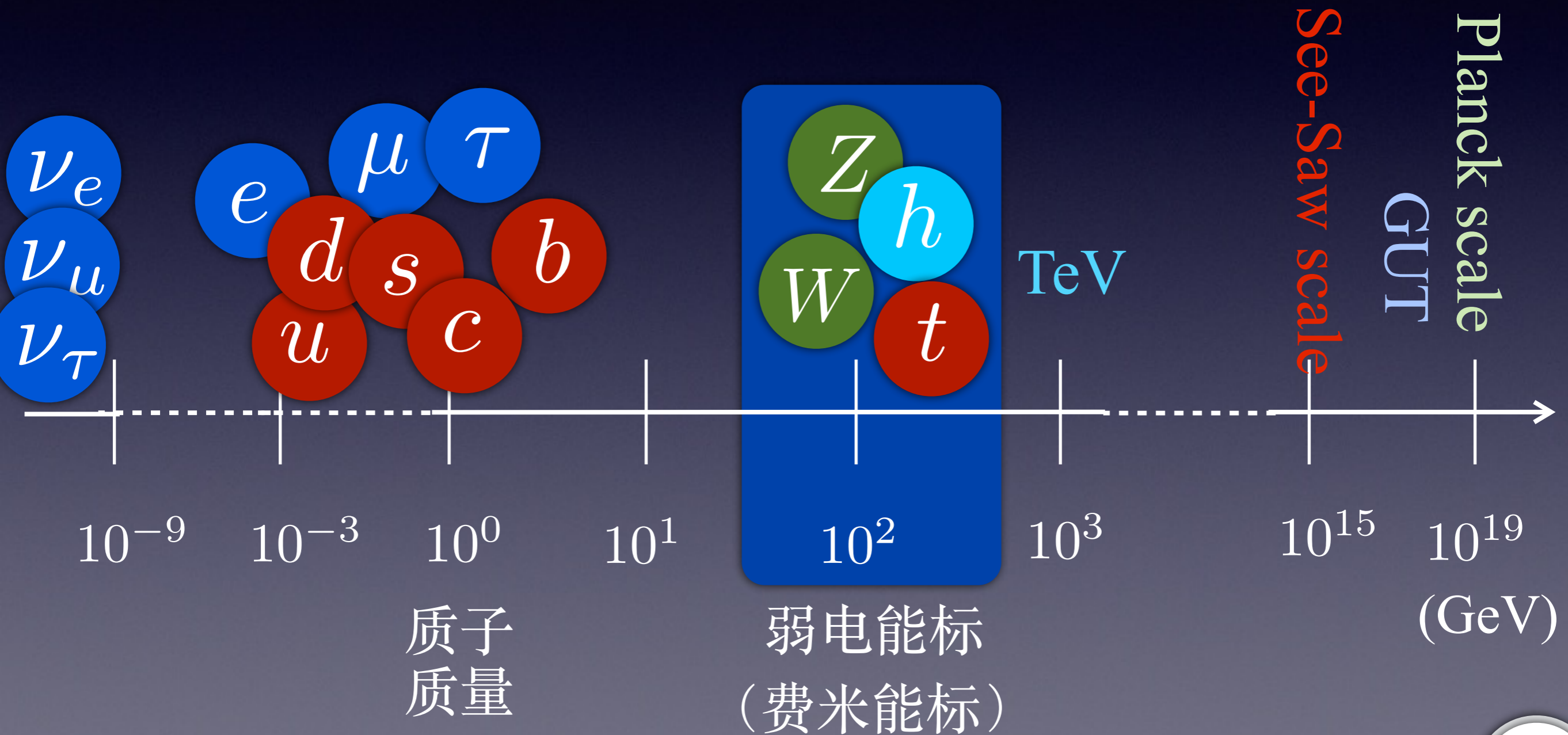
Unification of
Weak and Electromagnetic

为什么寻找新物理？

(标准模型有什么不妥之处吗？)

标准模型的不足之处

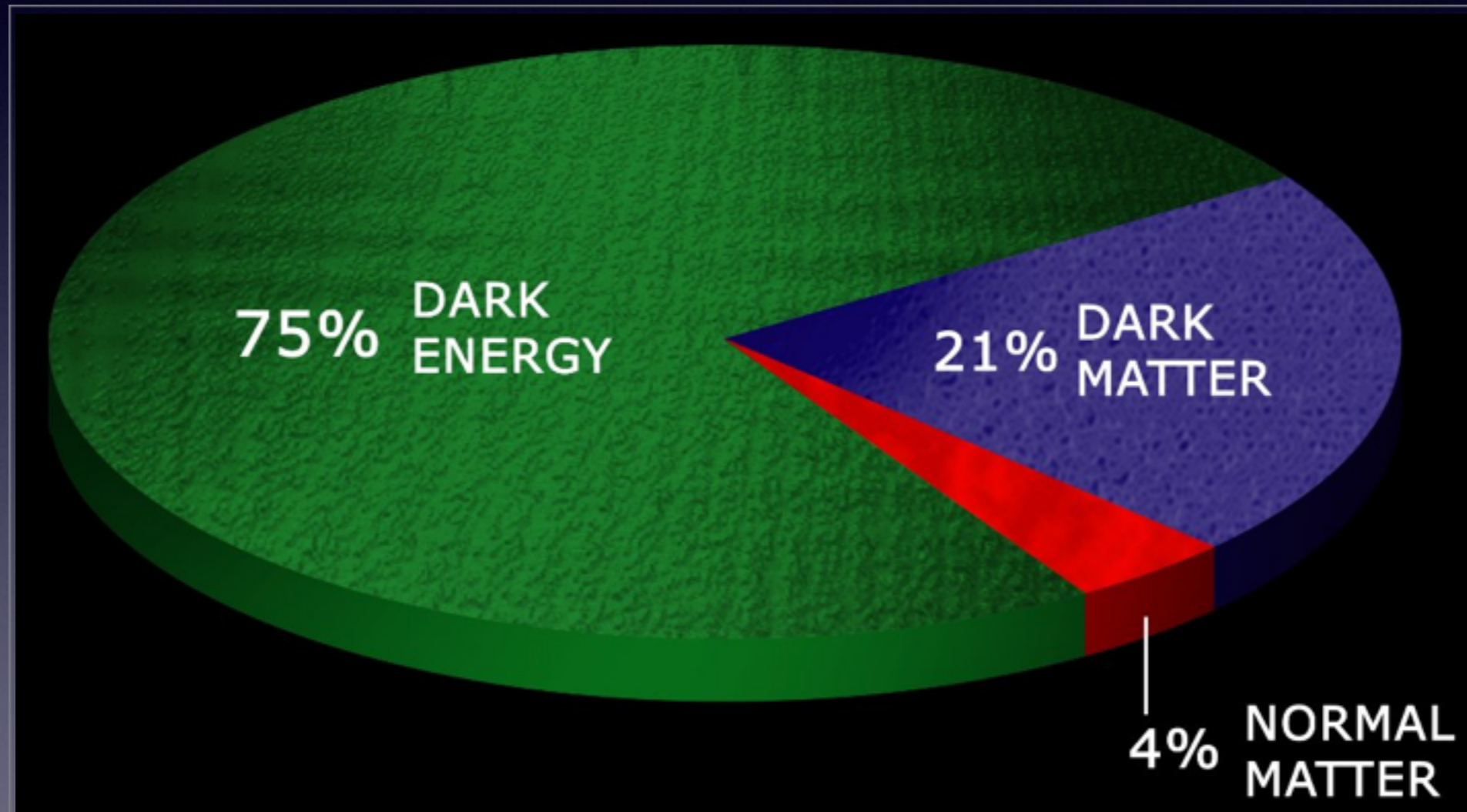
- 1) 标准模型的粒子谱具有非常大的质量差异和中微子质量起源



标准模型的不足之处

2) 暗物质的粒子物理起源

标准模型中没有暗物质候选者



我们仅仅了解宇宙的5%

标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想

行星

苹果

电

磁

标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



行星

苹果

电

磁

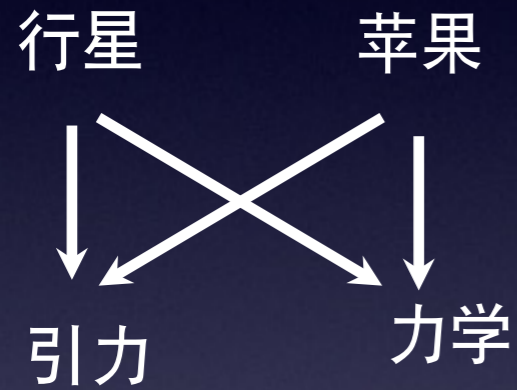


引力

力学

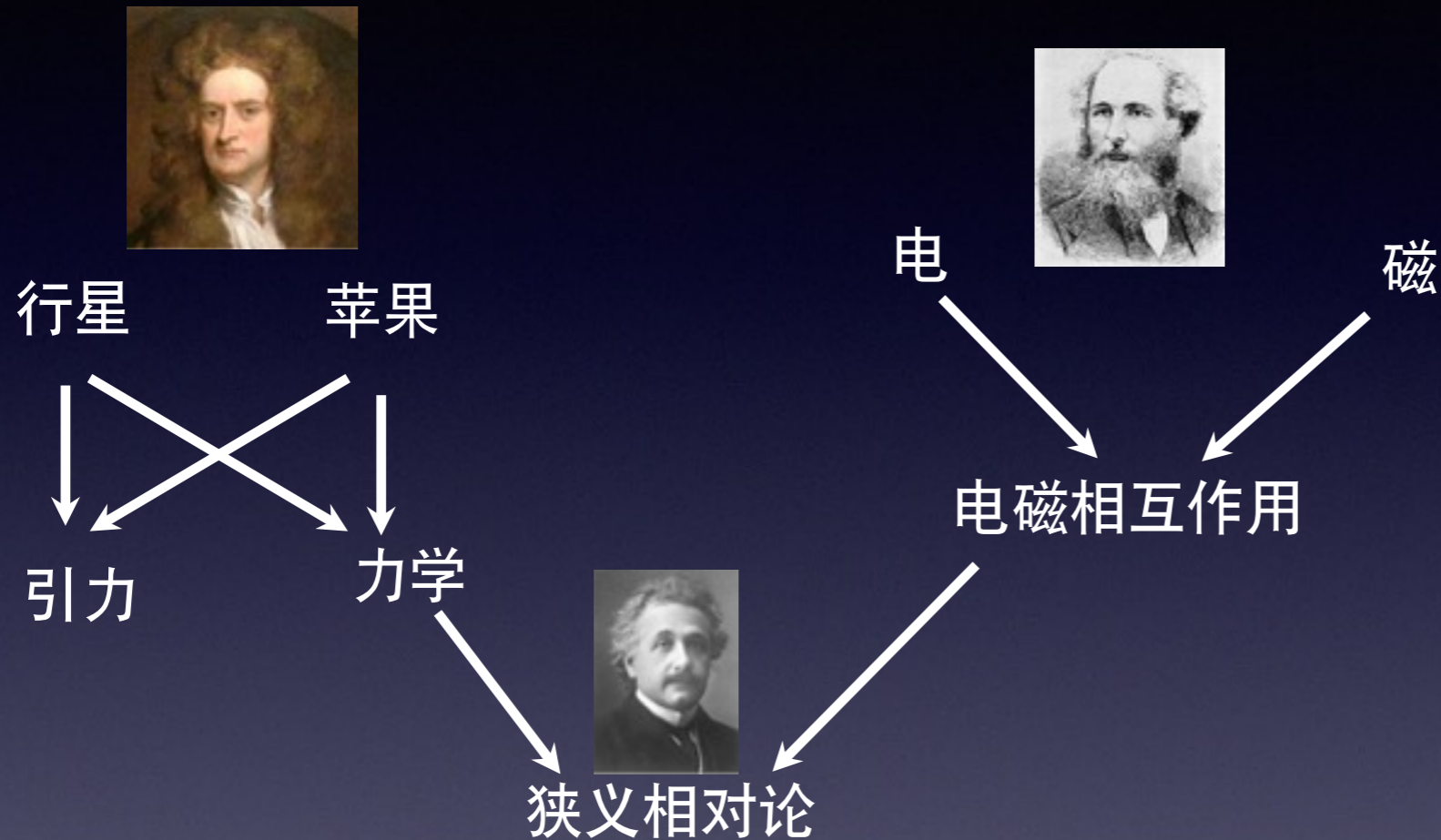
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



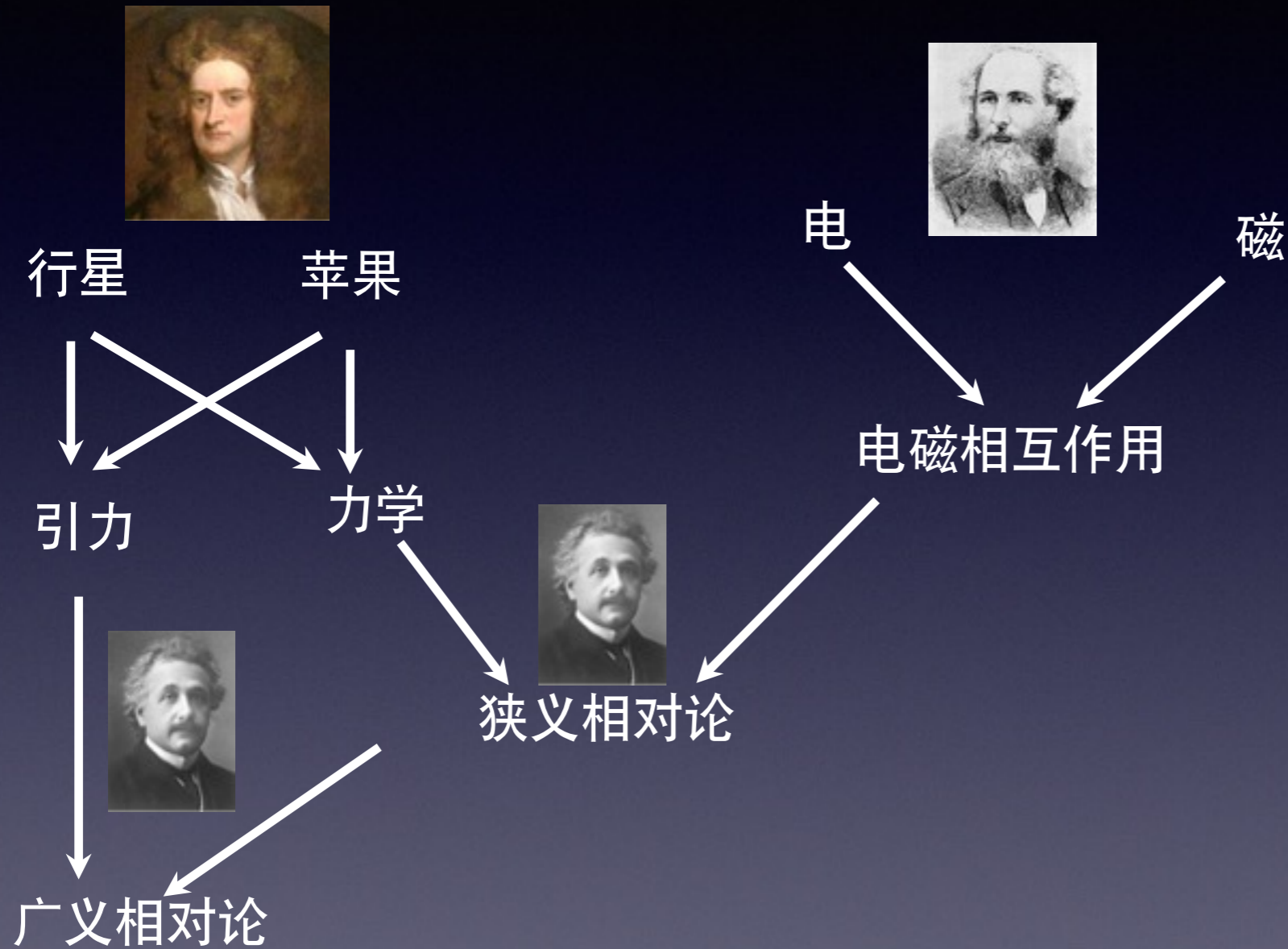
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



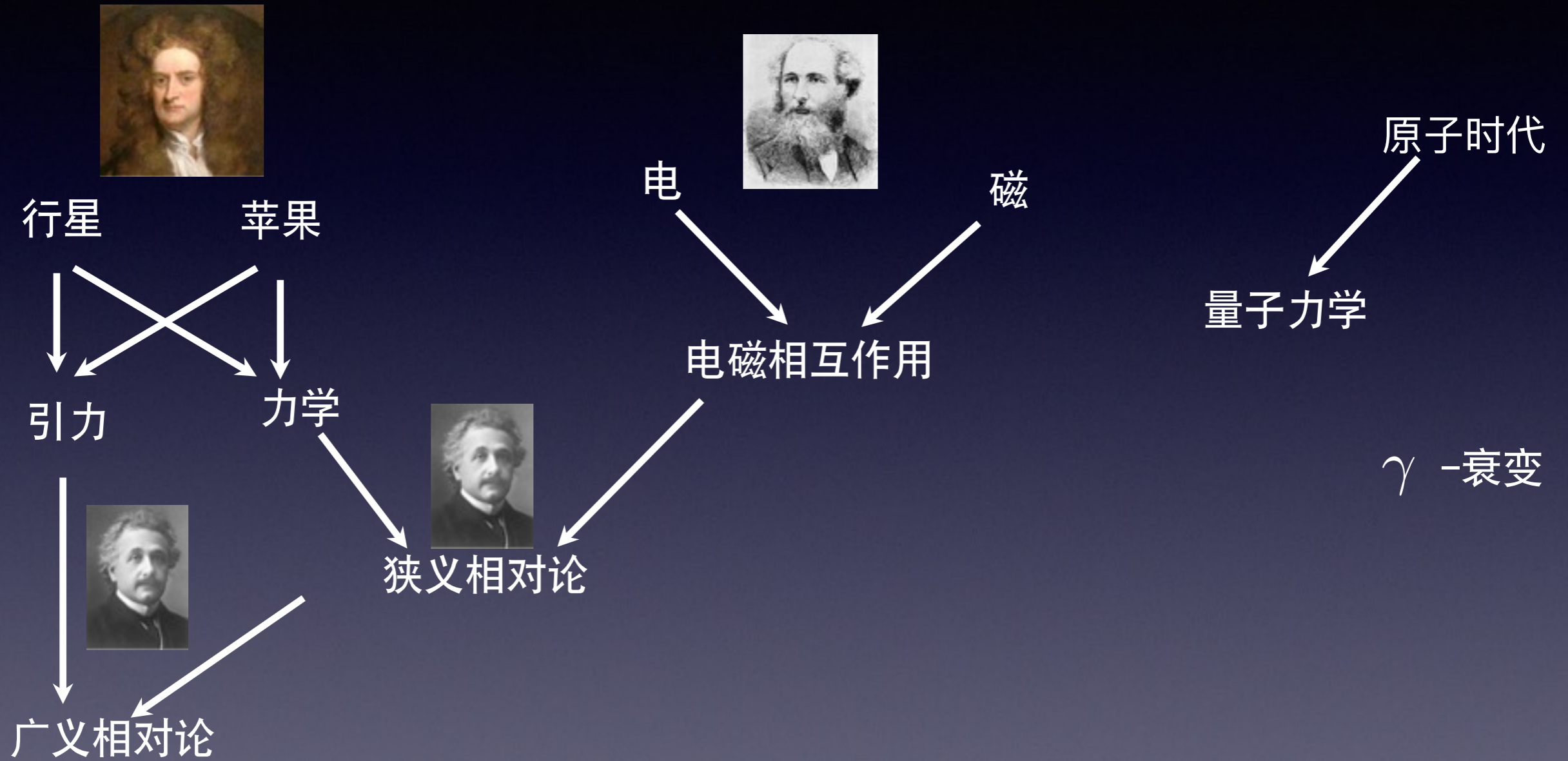
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



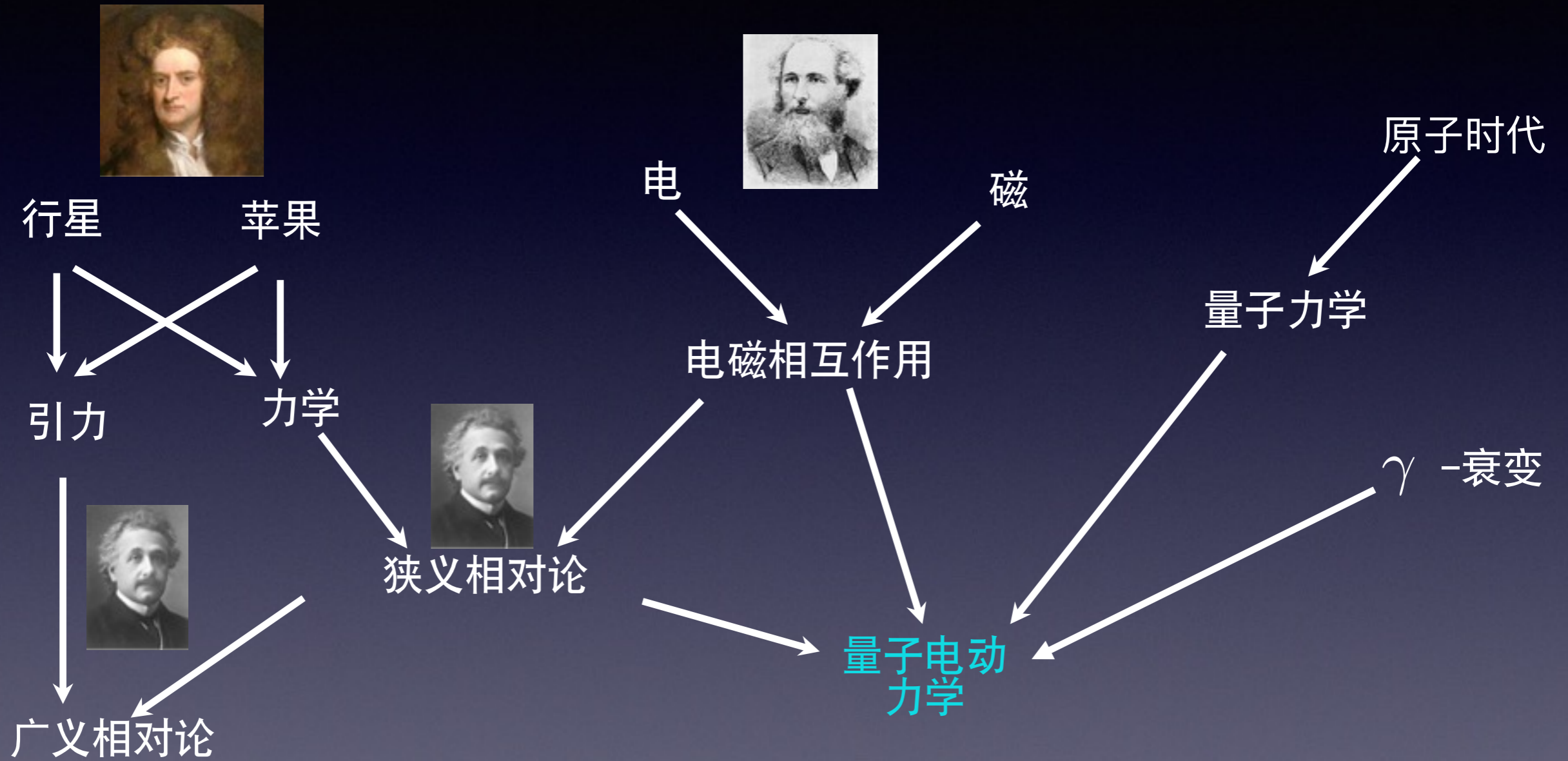
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



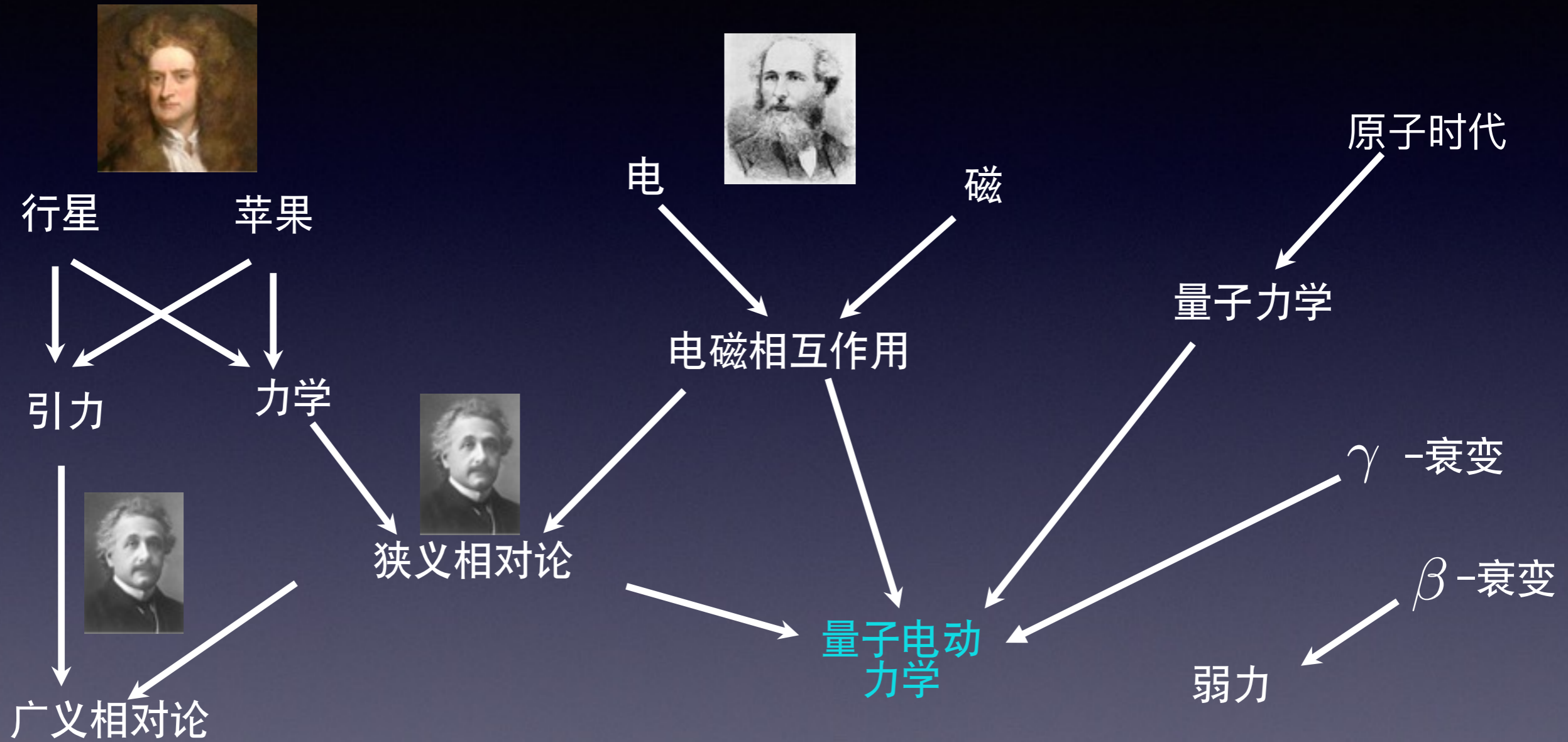
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



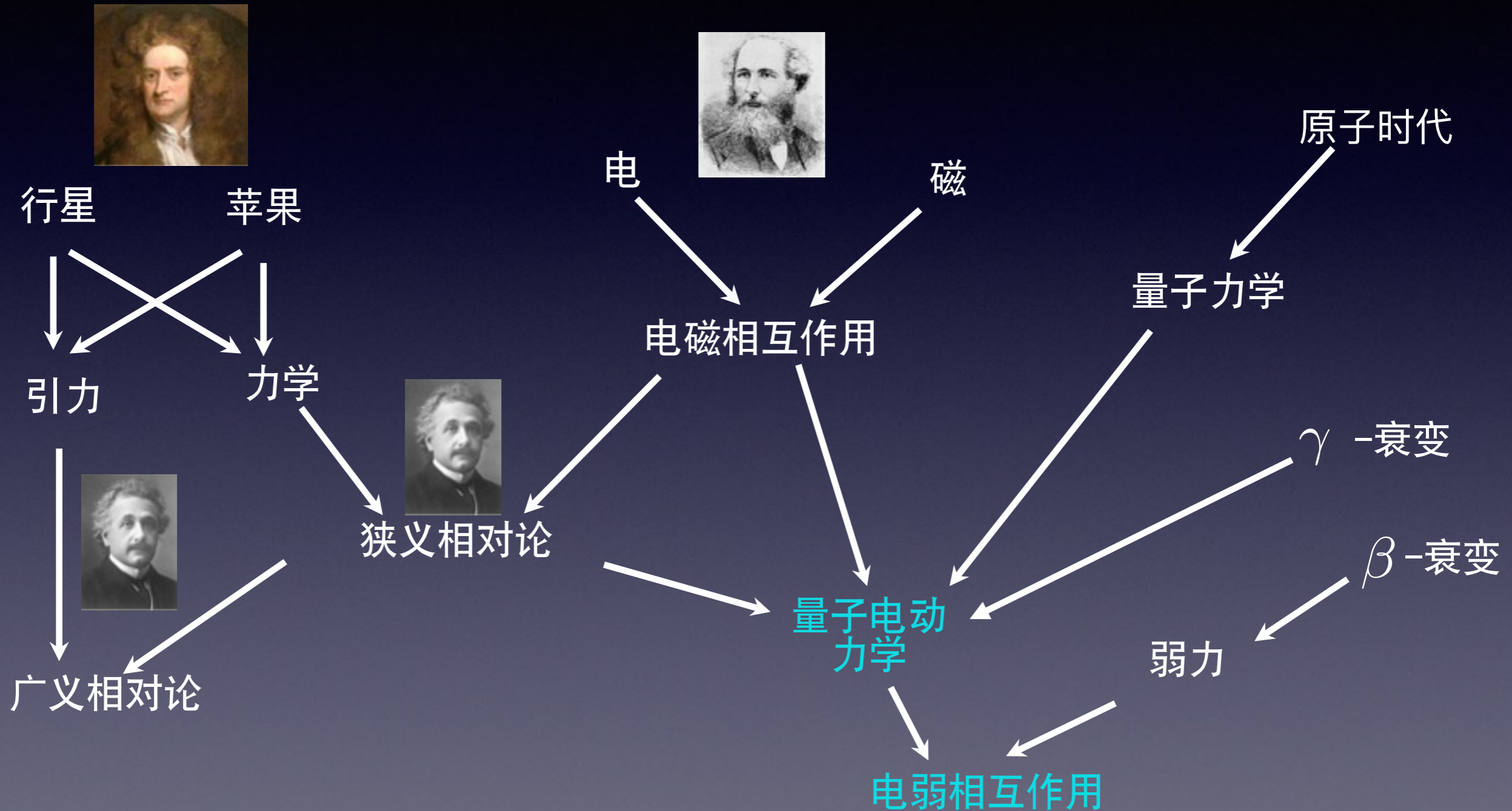
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



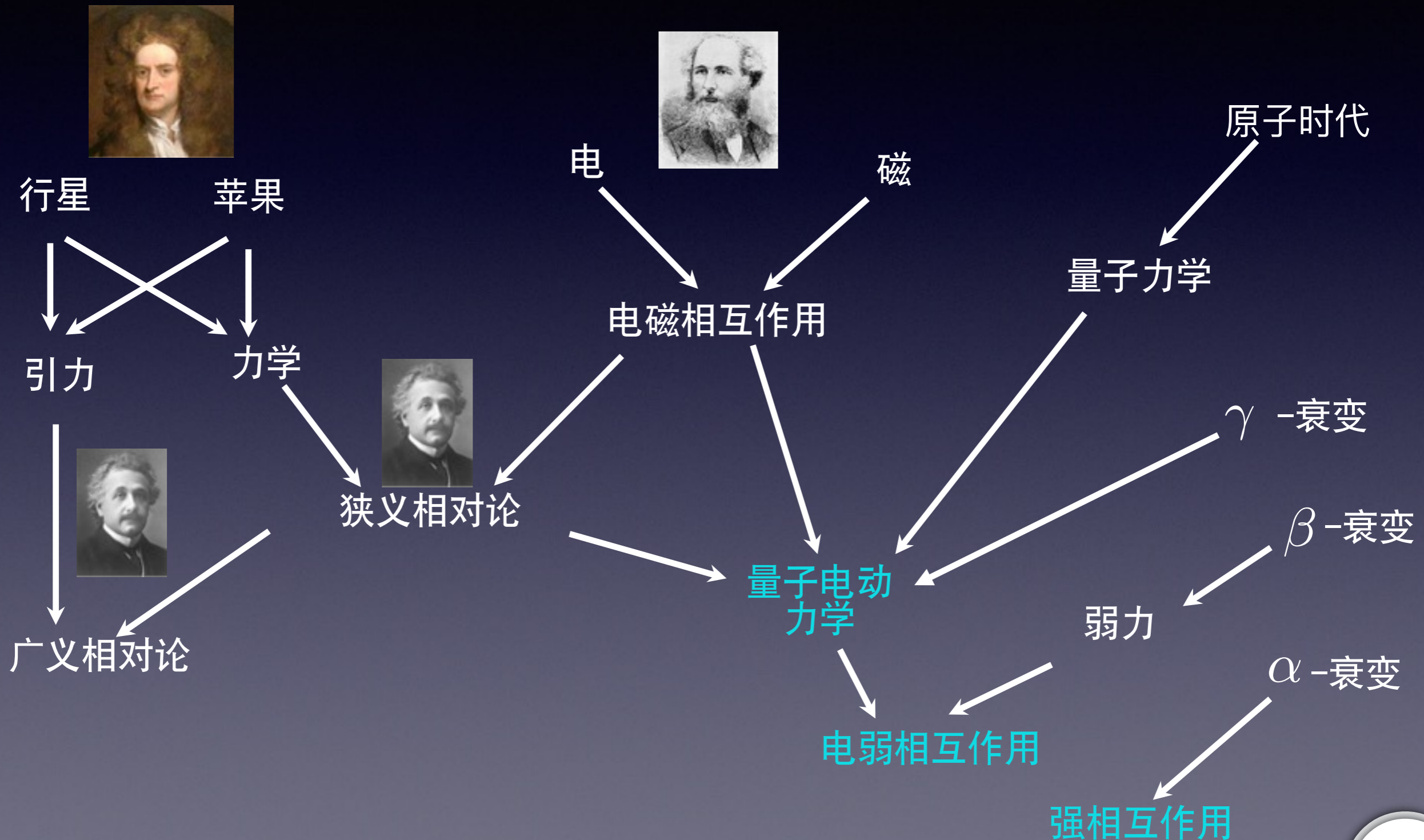
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



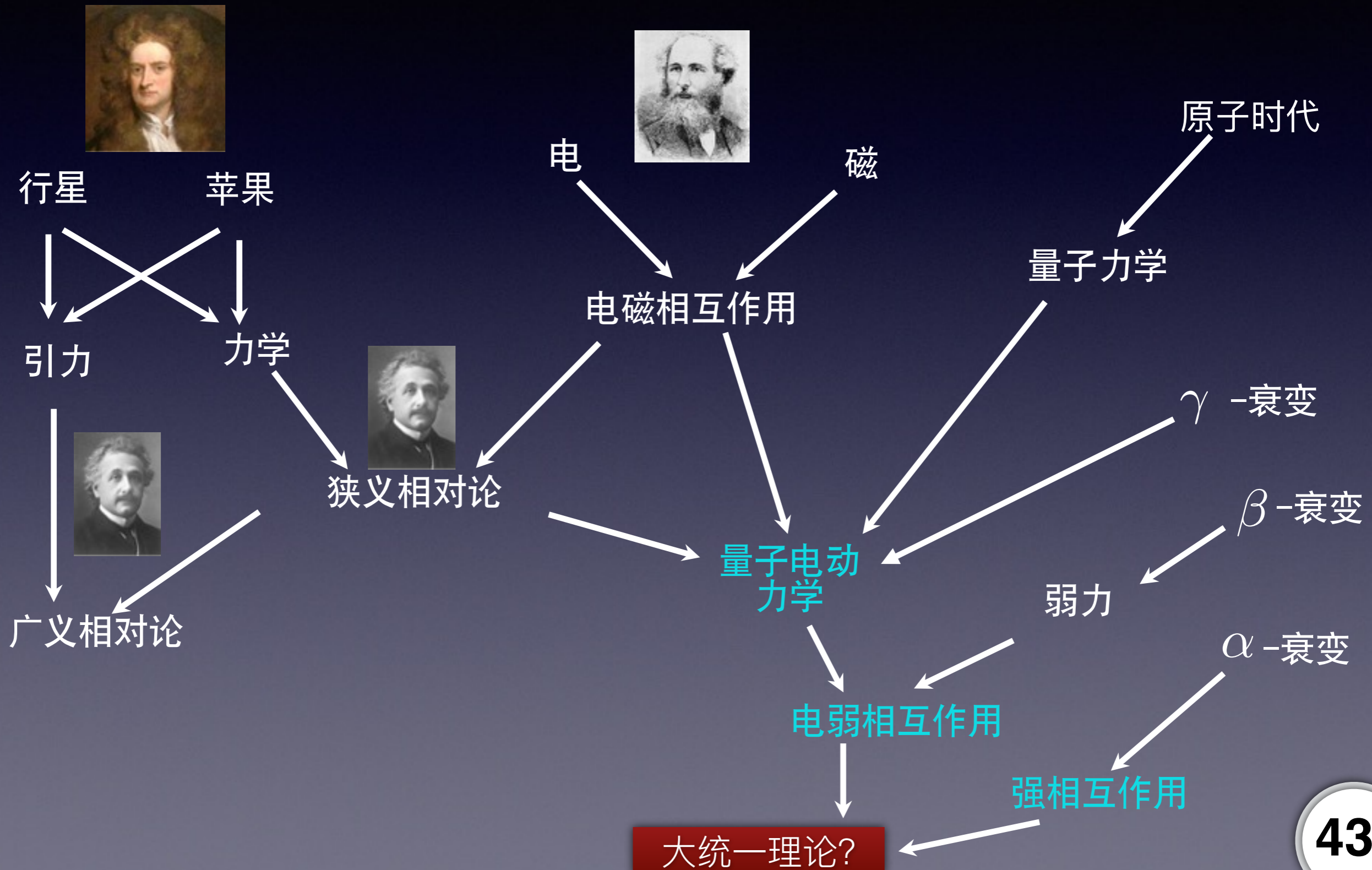
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



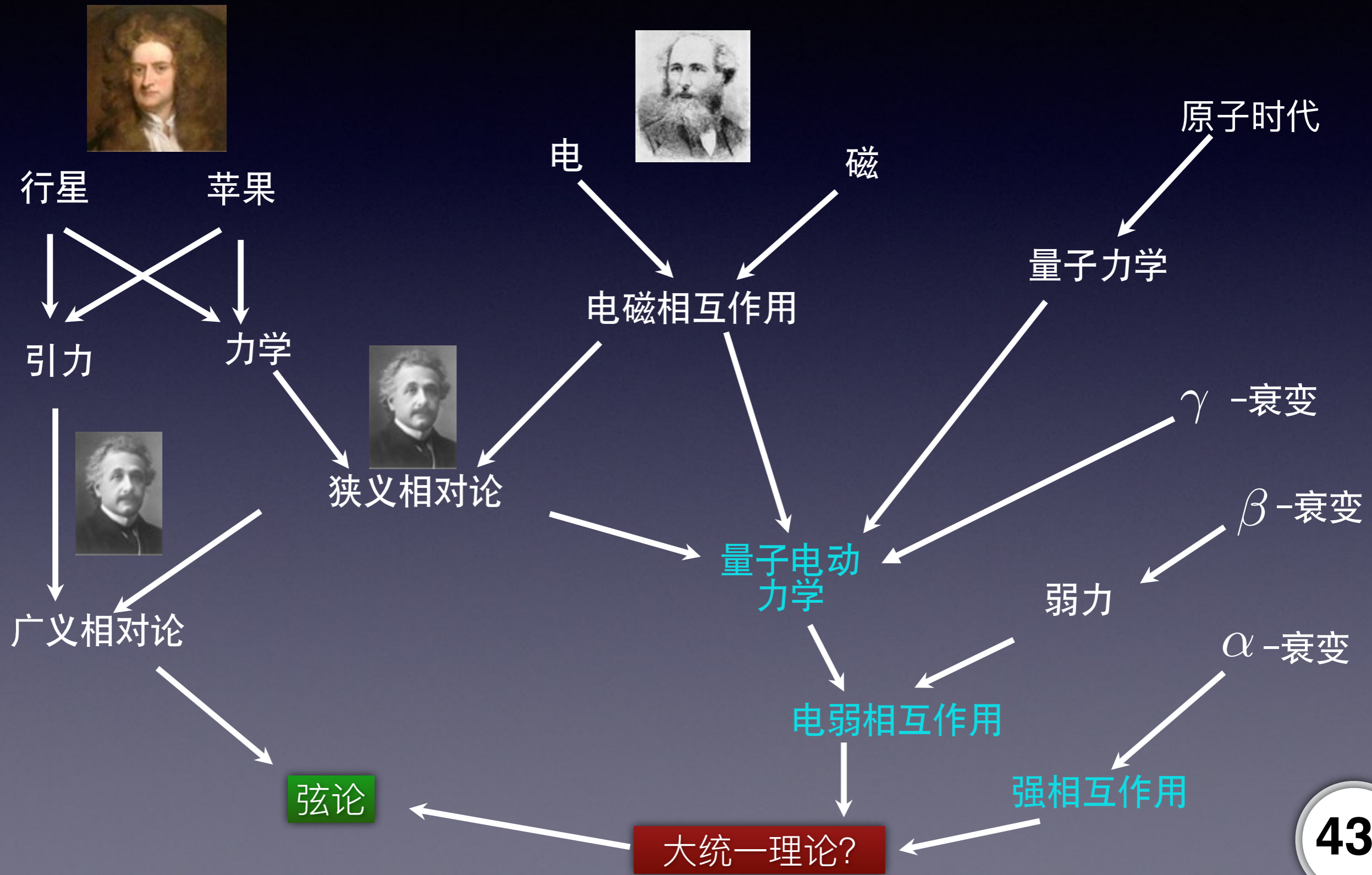
标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想



标准模型的不足之处

3) 物理学家的梦想

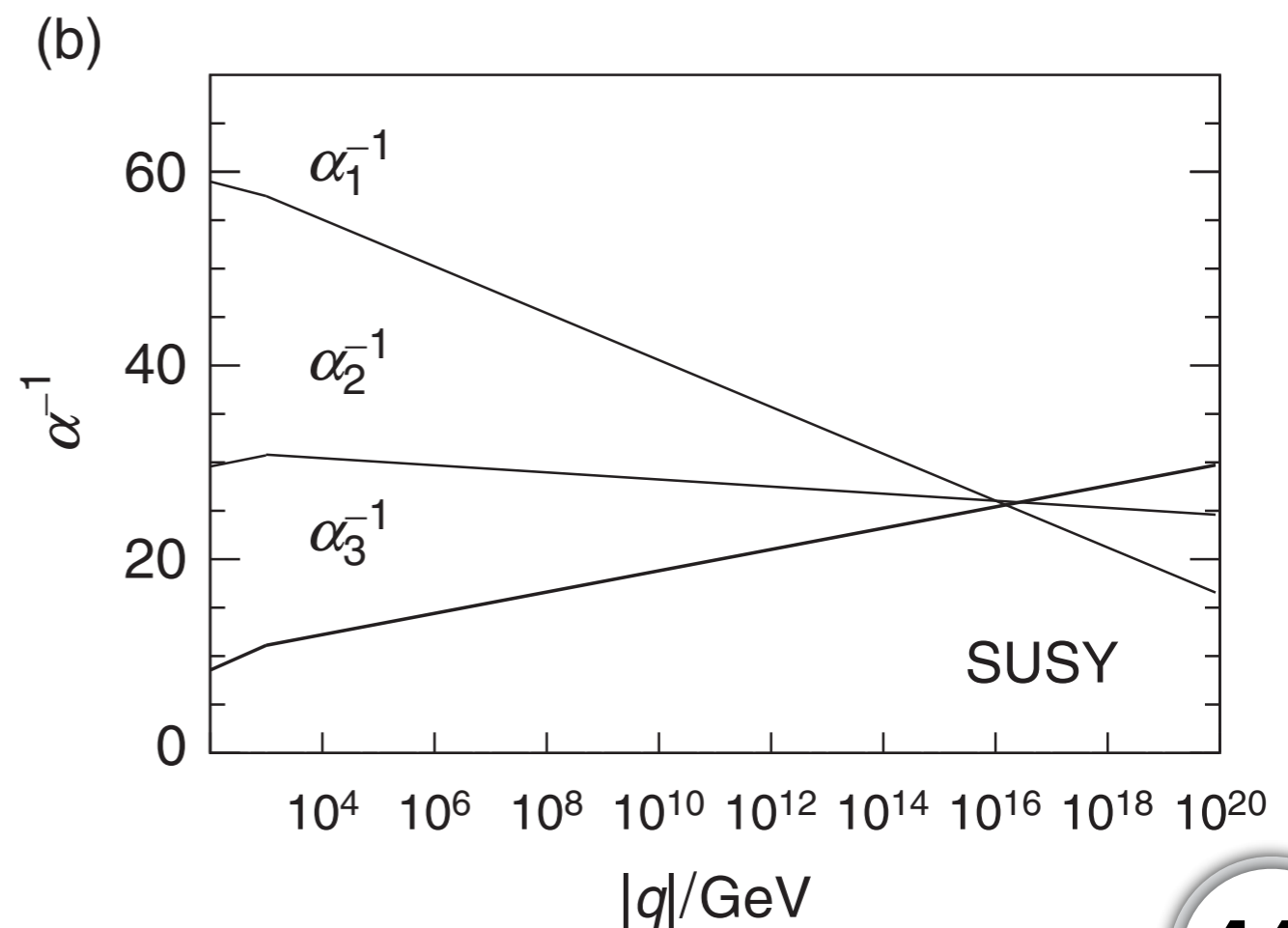
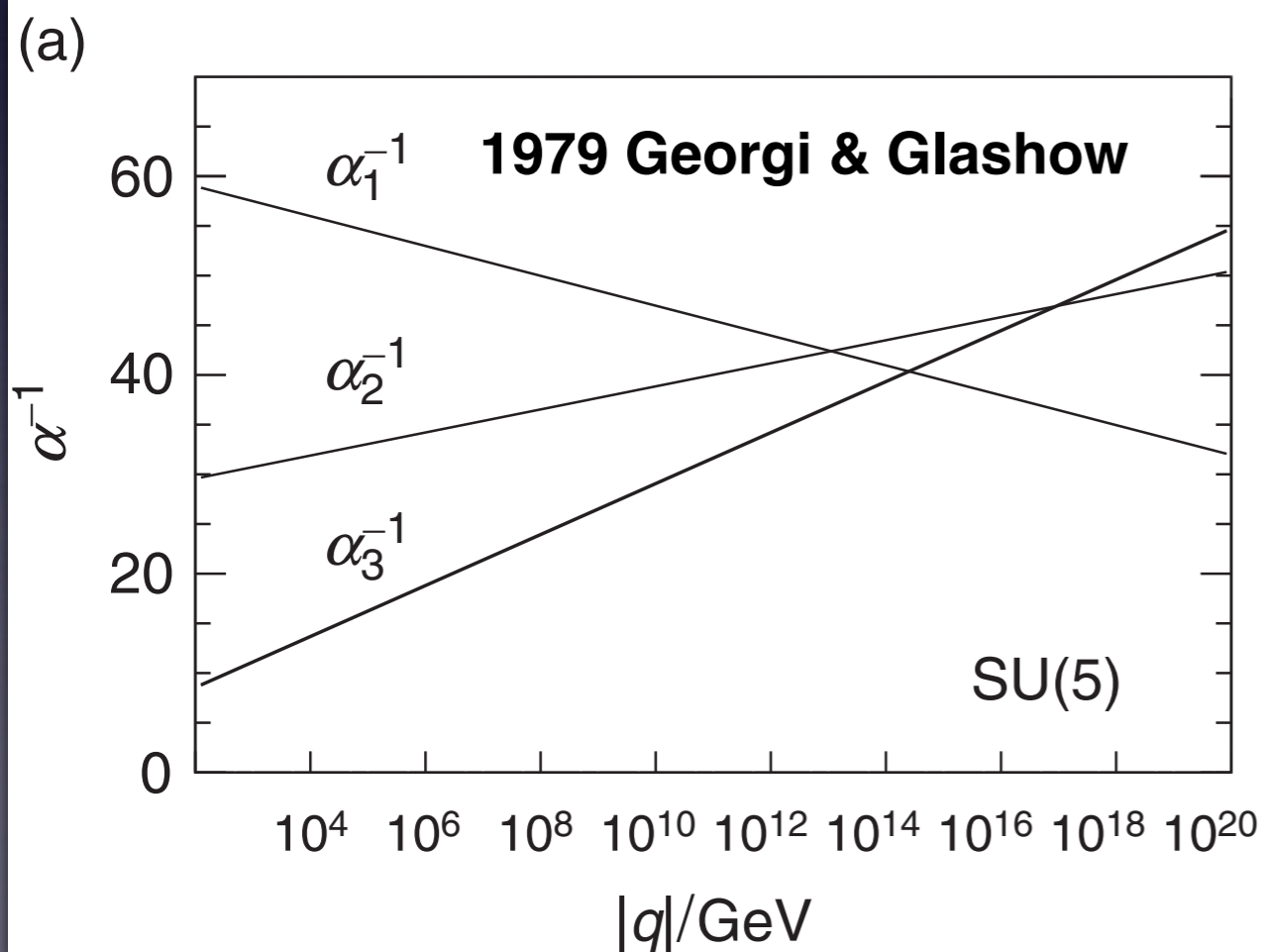


标准模型的不足之处

3) 大统一理论：标准模型三种作用力无法统一

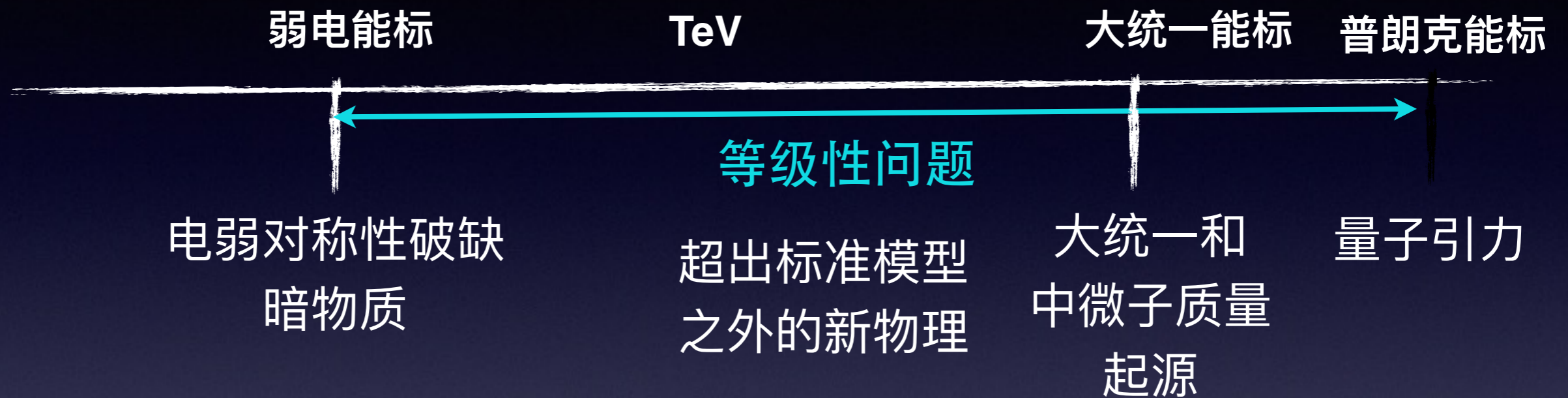
$$\alpha^{-1} : \alpha_W^{-1} : \alpha_S^{-1} \approx 128 : 30 : 9$$

$$[\alpha_i(q^2)]^{-1} = [\alpha_i(\mu^2)]^{-1} + \beta \ln\left(\frac{q^2}{\mu^2}\right)$$



标准模型的不足之处

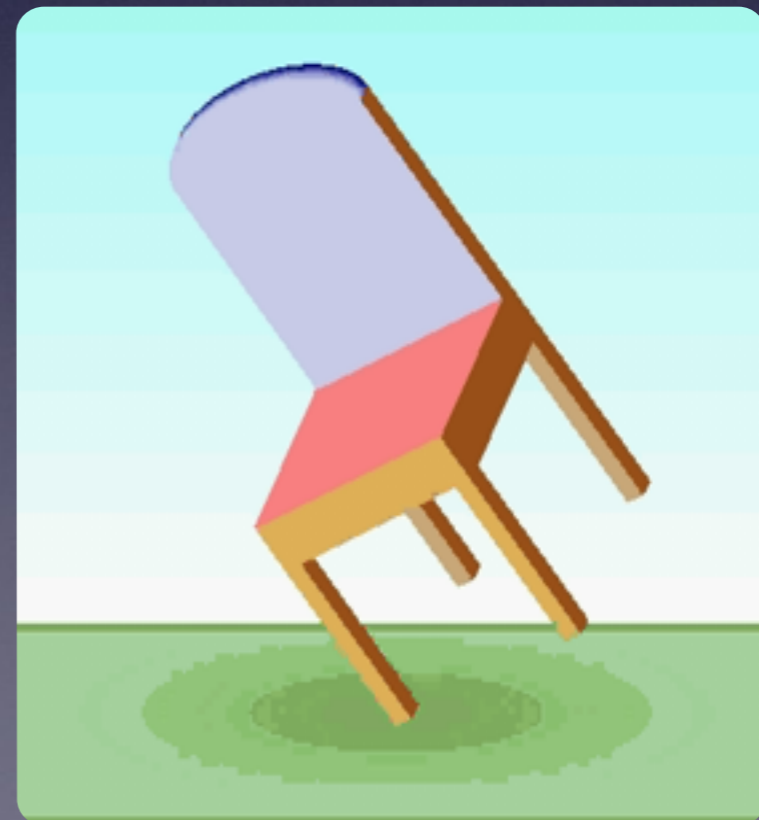
4) 等级性问题 (精细调节问题)



如果到大统一能标时标准模型都成立，那么理论将存在异常大的精细调节问题！

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

125 **bare** $\Lambda^2 / 52$



下节课，我们将重点讨论
各种新物理模型以及它们在
对撞机上的实验信号

超出标准模型之外的新物理

2) 新物理的实验信号

曹庆宏

北京大学物理学院

2016年7月15日于清华大学

问题：新物理应该包含哪些新元素？

物质和辐射

问题：新物理应该包含哪些新元素？

物质和辐射

新费米子（新夸克、新轻子）

新规范玻色子（带电的和中性的）

新标量粒子（带电的和中性的）

高自旋粒子（引力子？）

高激发态（复合粒子）

。 。 。

新物理模型

MSSM

NMSSM

Techicolor

Composite Higgs

Supersymmetry

理论家的贡献

Excited quark



Little Higgs Model

Fourth Generation

String

Extra dimension

Two Higgs Doublet Model

Seesaw mechanism

Dark Matter

Twin Higgs

Deconstruction

Private Higgs

Grand Unification

Chiral symmetry

新物理模型

MSSM

NMSSM

Technicolor

Composite Higgs

Supersymmetry

理论家的贡献

Excited quark



Little Higgs Model

Fourth Generation

Extra dimension



Seesaw mechanism

Dark Matter

Twin Higgs

Grand Unification

新物理模型

MSSM
Supersymmetry

NMSSM

Technicolor

Composite
Higgs

理论家的贡献

Little Higgs
Model

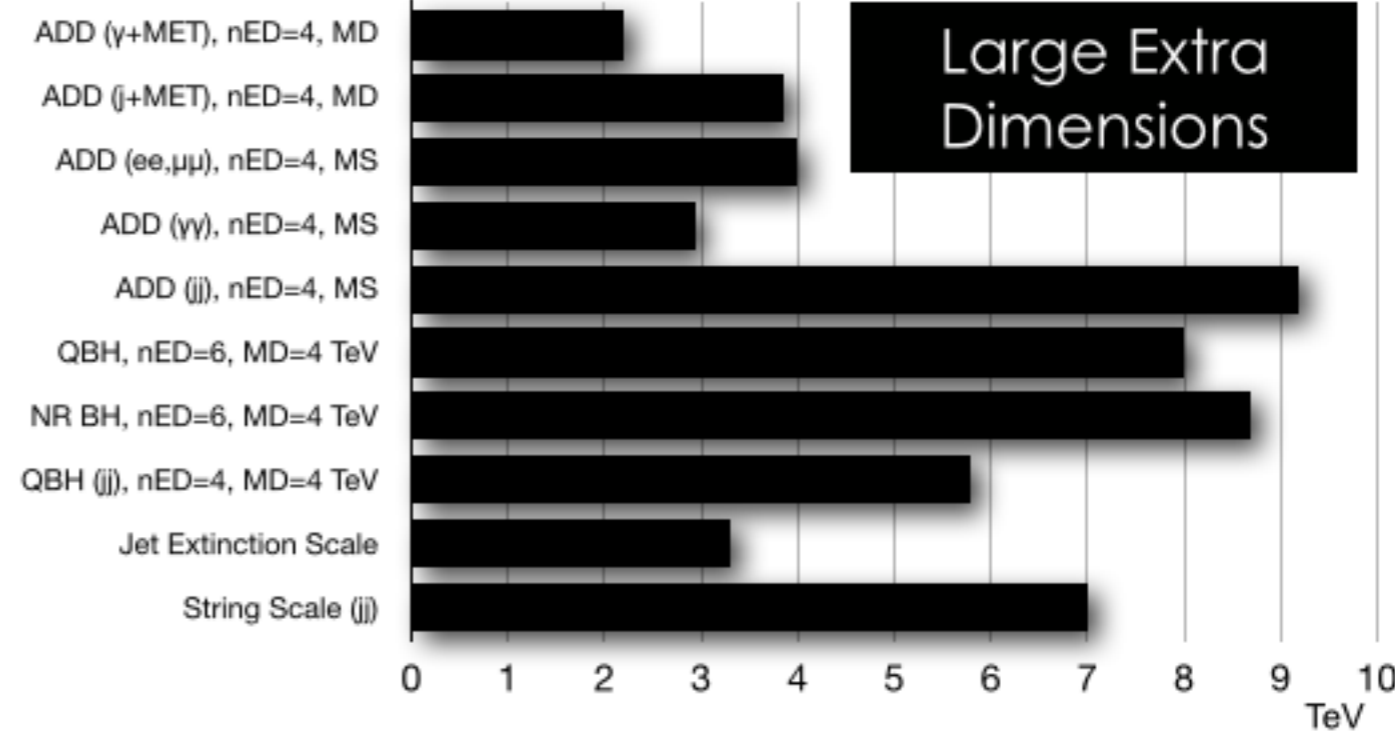
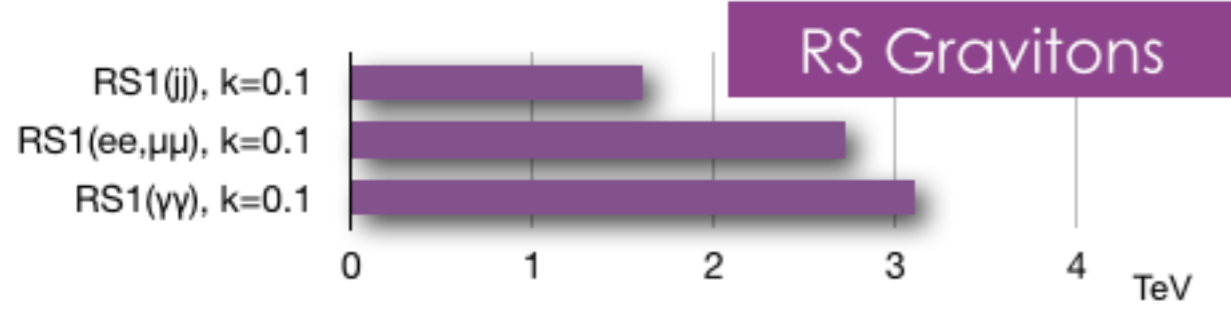
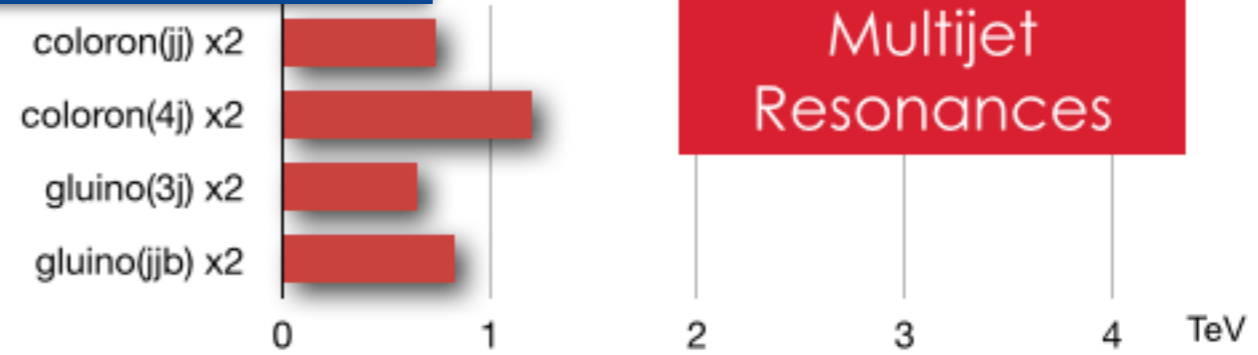
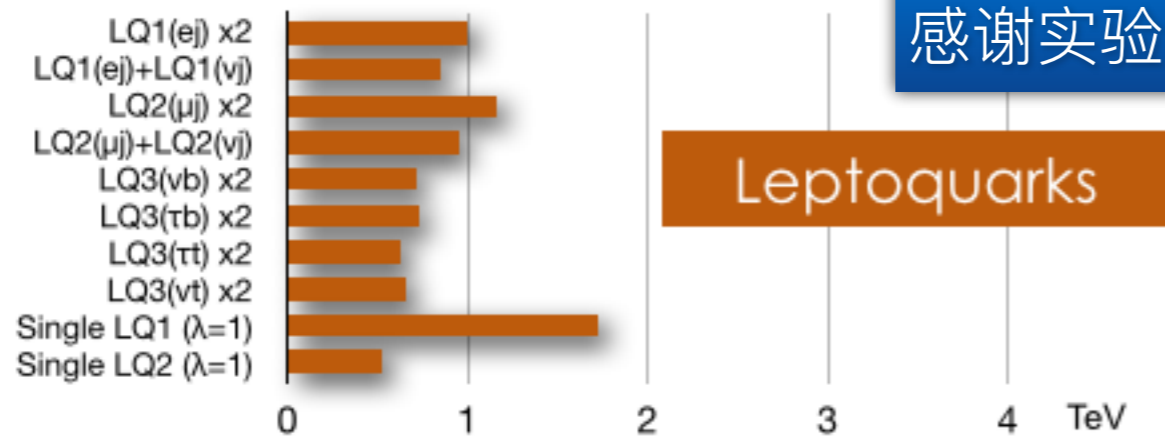


Twin Higgs

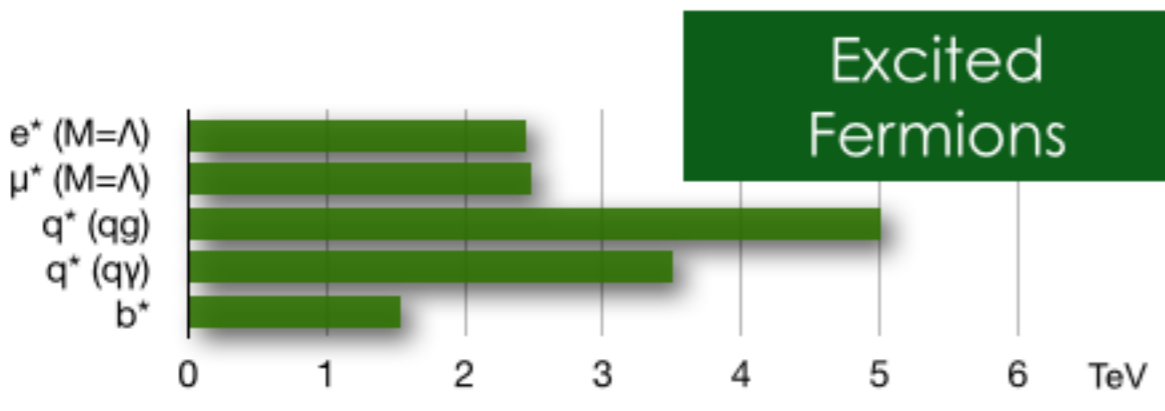
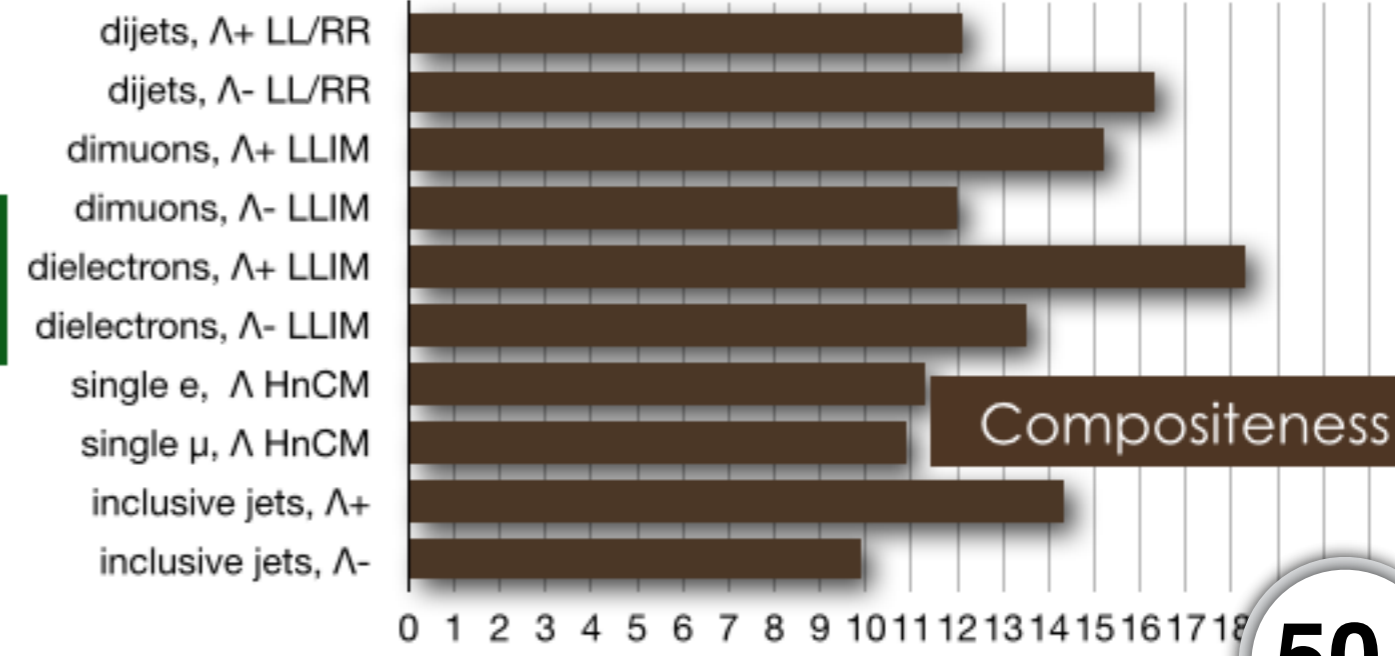
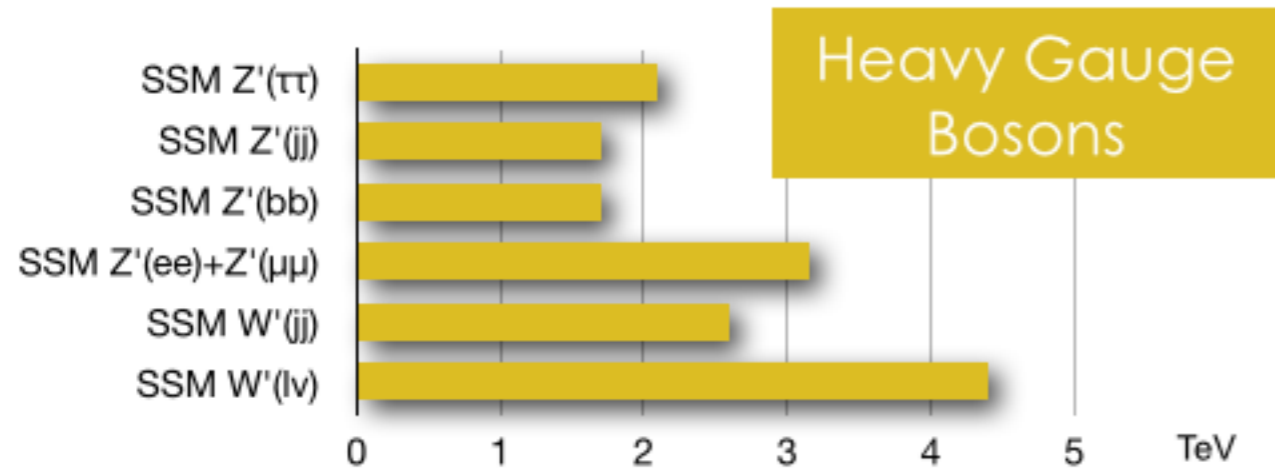
and Unification

Ch...

感谢实验物理学家的不懈努力



CMS Preliminary



Model	ℓ, γ	Jets [†]	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	-	$\geq 1 j$	Yes	3.2	M_D 6.58 TeV	$n = 2$ 1604.07773
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	20.3	M_S 4.7 TeV	$n = 3$ HLZ 1407.2410
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1 e, \mu$	$1 j$	-	20.3	M_{th} 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006
	ADD QBH	-	$2 j$	-	3.6	M_{th} 8.3 TeV	$n = 6$ 1512.01530
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	M_{th} 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3$ TeV, rot BH 1606.02265
	ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	3.6	M_{th} 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3$ TeV, rot BH 1512.02586
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	20.3	G_{KK} mass 2.68 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1405.4123
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2γ	-	-	20.3	G_{KK} mass 2.66 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1504.05511
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1 e, \mu$	$1 J$	Yes	3.2	G_{KK} mass 1.06 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2015-075
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	-	$4 b$	-	3.2	G_{KK} mass 480-770 GeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ 1606.04782
	Bulk RS $g_{KK} \rightarrow tt$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	20.3	g_{KK} mass 2.2 TeV	BR = 0.925 1505.07018
2UED / RPP	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 4 j$	Yes	3.2	KK mass 1.46 TeV	Tier (1,1), BR($A^{(1,1)} \rightarrow t\bar{t}$) = 1 ATLAS-CONF-2016-013	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	3.2	Z' mass 3.4 TeV	ATLAS-CONF-2015-070
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2τ	-	-	19.5	Z' mass 2.02 TeV	1502.07177
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	$2 b$	-	3.2	Z' mass 1.5 TeV	1603.08791
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1 e, \mu$	-	Yes	3.2	W' mass 4.07 TeV	1606.03977
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\nu\nu$ model A	$0 e, \mu$	$1 J$	Yes	3.2	W' mass 1.6 TeV	$g_V = 1$ ATLAS-CONF-2015-068
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qqqq$ model A	-	$2 J$	-	3.2	W' mass 1.38-1.6 TeV	$g_V = 1$ ATLAS-CONF-2015-073
	HVT $W' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu bb$ model B	$1 e, \mu$	$1-2 b, 1-0 j$	Yes	3.2	W' mass 1.62 TeV	$g_V = 3$ ATLAS-CONF-2015-074
	HVT $Z' \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu bb$ model B	$0 e, \mu$	$1-2 b, 1-0 j$	Yes	3.2	Z' mass 1.76 TeV	$g_V = 3$ ATLAS-CONF-2015-074
	LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$1 e, \mu$	$2 b, 0-1 j$	Yes	20.3	W' mass 1.92 TeV	1410.4103
	LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$0 e, \mu$	$\geq 1 b, 1 J$	-	20.3	W' mass 1.76 TeV	1408.0886
CI	CI $qqqq$	-	$2 j$	-	3.6	Λ 17.5 TeV	$\eta_{LL} = -1$ 1512.01530
	CI $qq\ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	3.2	Λ 23.1 TeV	$\eta_{LL} = -1$ ATLAS-CONF-2015-070
	CI $uutt$	$2 e, \mu$ (SS)	$\geq 1 b, 1-4 j$	Yes	20.3	Λ 4.3 TeV	$ C_{LL} = 1$ 1504.04605
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$\geq 1 j$	Yes	3.2	m_A 1.0 TeV	$g_q=0.25, g_t=1.0, m(\chi) < 250$ GeV 1604.07773
	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu, 1 \gamma$	$1 j$	Yes	3.2	m_A 710 GeV	$g_q=0.25, g_t=1.0, m(\chi) < 150$ GeV 1604.01306
	$ZZ_{\chi\chi}$ EFT (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1 J, \leq 1 j$	Yes	3.2	M_s 550 GeV	$m(\chi) < 150$ GeV ATLAS-CONF-2015-080
LQ	Scalar LQ 1 st gen	$2 e$	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.1 TeV	$\beta = 1$ 1605.06035
	Scalar LQ 2 nd gen	2μ	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.05 TeV	$\beta = 1$ 1605.06035
	Scalar LQ 3 rd gen	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$ 1508.04735
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	T mass 855 GeV	T in (T,B) doublet 1505.04306
	VLQ $YY \rightarrow Wb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	Y mass 770 GeV	Y in (B,Y) doublet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Hb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	B mass 735 GeV	isospin singlet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2/\geq 3 e, \mu$	$\geq 2/\geq 1 b$	-	20.3	B mass 755 GeV	B in (B,Y) doublet 1409.5500
	VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	$1 e, \mu$	$\geq 4 j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV	1509.04261
$T_{5/3} \rightarrow Wt$	$1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 5 j$	Yes	20.3	$T_{5/3}$ mass 840 GeV	1503.05425	
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1γ	$1 j$	-	3.2	q^* mass 4.4 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1512.05910
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2 j$	-	3.6	q^* mass 5.2 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1512.01530
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	$1 b, 1 j$	-	3.2	b^* mass 2.1 TeV	1603.08791
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	1 or $2 e, \mu$	$1 b, 2-0 j$	Yes	20.3	b^* mass 1.5 TeV	$f_L = f_t = f_R = 1$ 1510.02664
	Excited lepton ℓ^*	$3 e, \mu$	-	-	20.3	ℓ^* mass 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0$ TeV 1411.2921
	Excited lepton ν^*	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	ν^* mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6$ TeV 1411.2921
Other	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1 e, \mu, 1 \gamma$	-	Yes	20.3	a_T mass 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana ν	$2 e, \mu$	$2 j$	-	20.3	N^0 mass 2.0 TeV	$m(W_R) = 2.4$ TeV, no mixing 1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$ (SS)	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 551 GeV	DY production, BR($H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$)=1 1412.0237
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, BR($H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$)=1 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1 e, \mu$	$1 b$	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$ 1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q = 5e$ 1504.04188
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g = 1g_D$, spin 1/2 1509.08059

√s = 8 TeV √s = 13 TeV

10⁻¹ 1 10 Mass scale [TeV]

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Lower bounds are specified only when explicitly not excluded.

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter i (I).

新物理模型的组分

- 1) 中微子质量：味物理
- 2) 暗物质：粒子宇宙学、超对称模型
- 3) 新费米子：第四代，新夸克，新轻子
- 4) 新规范玻色子：新的对称性（新的力）
- 5) 新标量粒子：电弱对称性破缺机制
- 6) 额外时空维度（如果时间允许）

1) 中微子质量起源

—— 跷跷板机制

See-Saw Mechanics

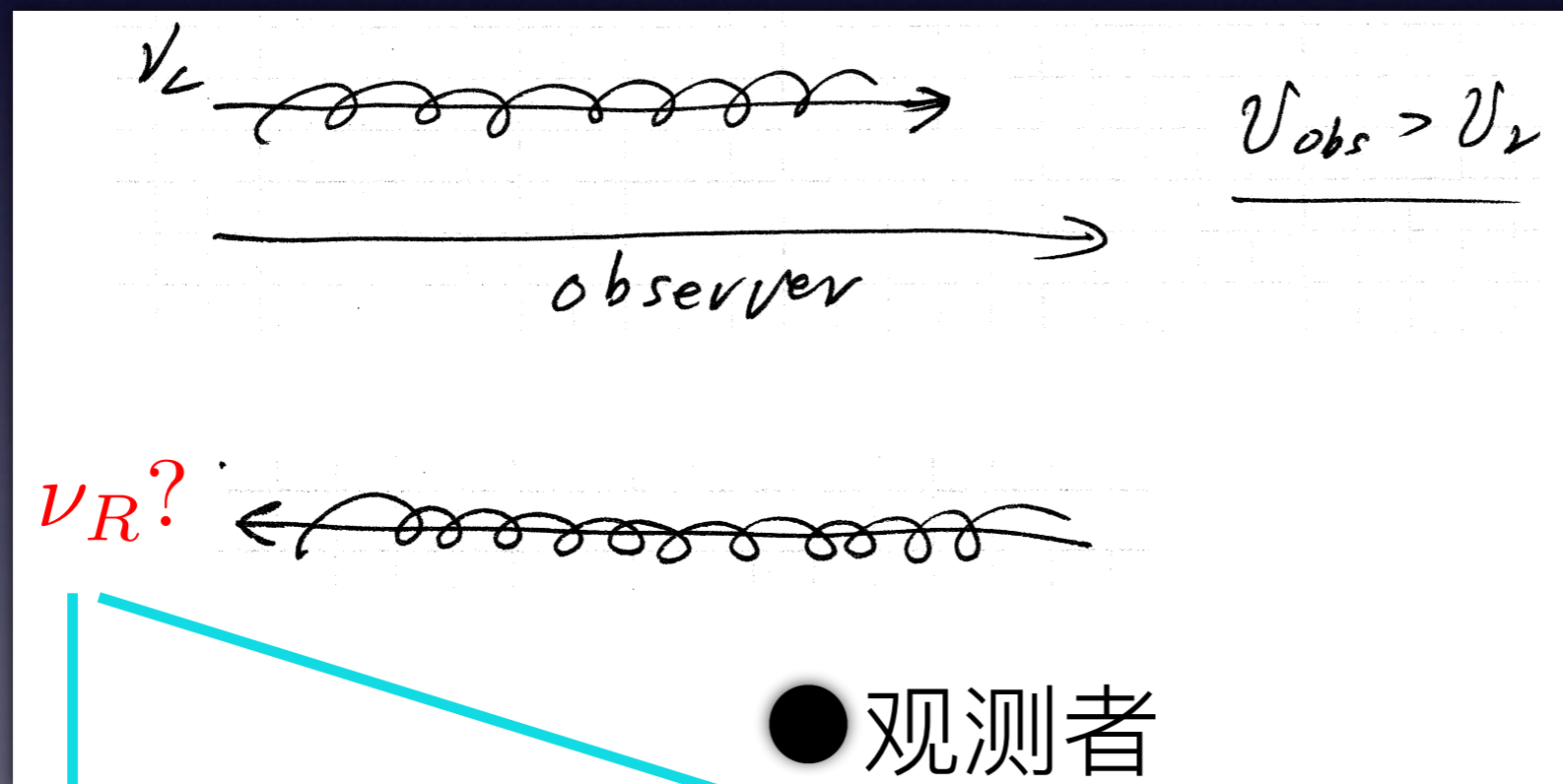


有质量的中微子

中微子不能以光速运动 \rightarrow 螺旋度不再是好量子数

洛伦兹不变性要求：右手中微子 ν_R

$$m\bar{\psi}_L\psi_R$$



最小标准模型中
没有右手中微子

New particle ν_R
(Dirac)

ν_L^T old anti-neutrino
(Majorana)

右手中微子

* Dirac型中微子

$$m\bar{\psi}_L\psi_R$$

* Majorana型中微子

$$m\bar{\psi}_L^c\psi_L$$

尚未观测到 ν_R

很重

相互作用微弱

不需要引入新的物质场

No fundamental distinction
between neutrinos and
anti-neutrinos

为何中微子质量如此之小?

跷跷板机制 —— 简单优雅的解决方案

1) 加入一个新的 ν_R , (SM + ν_R)

SM neutral not gauged under SU(2)xU(1)

2) 对角化中微子质量矩阵

$$\begin{pmatrix} \nu_L & \nu_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix}$$

→ $m_\nu = \frac{m_D^2}{M} \sim \frac{\text{TeV}^2}{M} \sim \text{eV}$

→ $M \sim \frac{\text{TeV}^2}{\text{eV}} = \frac{(10^3 \text{ GeV})^2}{10^{-9} \text{ GeV}} = 10^{15} \text{ GeV}$

跷跷板机制的种类

探测新物理的强力工具 — 有效场论

BSM (Λ)

SM (m_W)



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}}^{(4)} + \frac{O^{(5)}}{\Lambda} + \frac{O^{(6)}}{\Lambda^2} + \dots$$

High dimensional operator

$$O^{(5,6,\dots)}$$

are made of SM fields
with respect to the SM symmetry
 $SU(2) \times U(1)_Y$

温伯格中微子质量算符

1979年温伯格指出标准模型中只存在一个量纲为5的算符
可以给中微子质量

$$\frac{(L\Phi)^2}{\Lambda} \quad L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix} \quad [L] = \frac{3}{2}$$
$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad [\Phi] = 1$$

$$\mathcal{L}_{m_\nu} = -\frac{f_{ij}}{2\Lambda} (\nu_i \phi^0 - \ell_i \phi^+) (\nu_j \phi^0 - \ell_j \phi^+) + h.c.$$

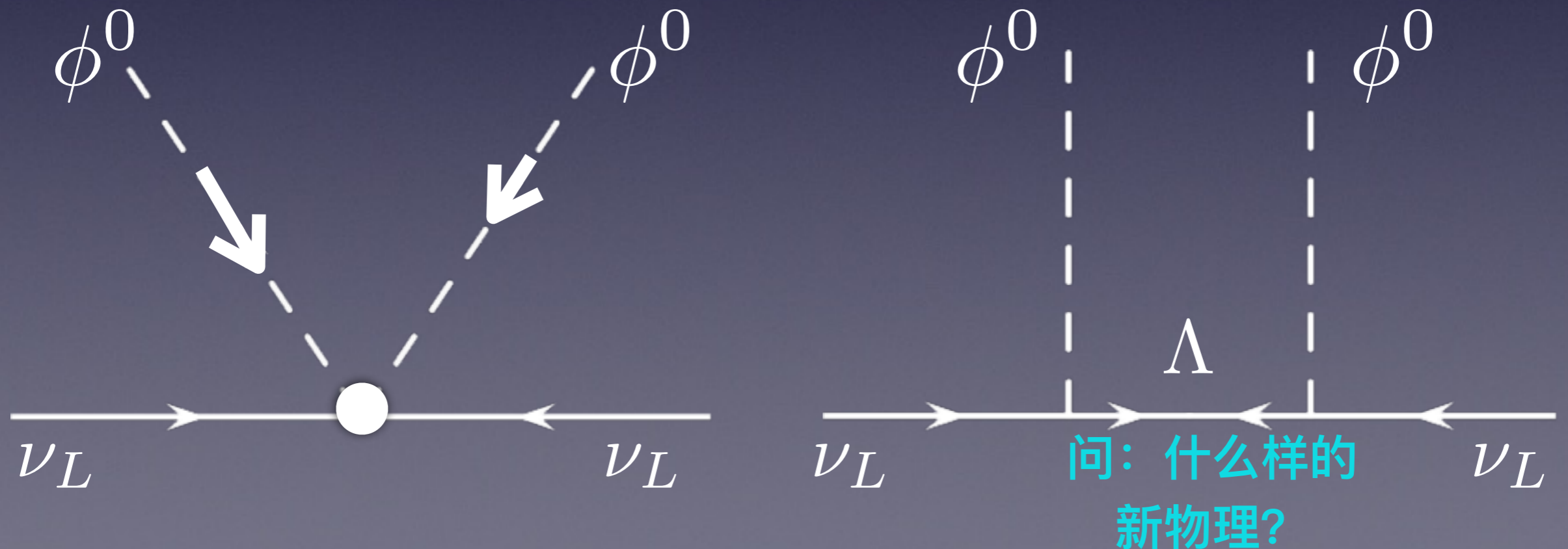
$$\Rightarrow (m_\nu)_{ij} = \frac{f_{ij} \langle \phi^0 \rangle^2}{\Lambda} = \frac{f_{ij} v^2}{\Lambda}$$

温伯格中微子质量算符

1979年温伯格指出标准模型中只存在一个量纲为5的算符
可以给中微子质量

$$\mathcal{L}_{m_\nu} = -\frac{f_{ij}}{2\Lambda} (\nu_i \phi^0 - \ell_i \phi^+) (\nu_j \phi^0 - \ell_j \phi^+) + h.c.$$

$$\Rightarrow (m_\nu)_{ij} = \frac{f_{ij} \langle \phi^0 \rangle^2}{\Lambda} = \frac{f_{ij} v^2}{\Lambda} \quad \begin{array}{l} [\phi] = 1 \\ [\nu] = 3/2 \end{array}$$



温伯格算符

$$\frac{(L\Phi)^2}{\Lambda}$$

角动量耦合

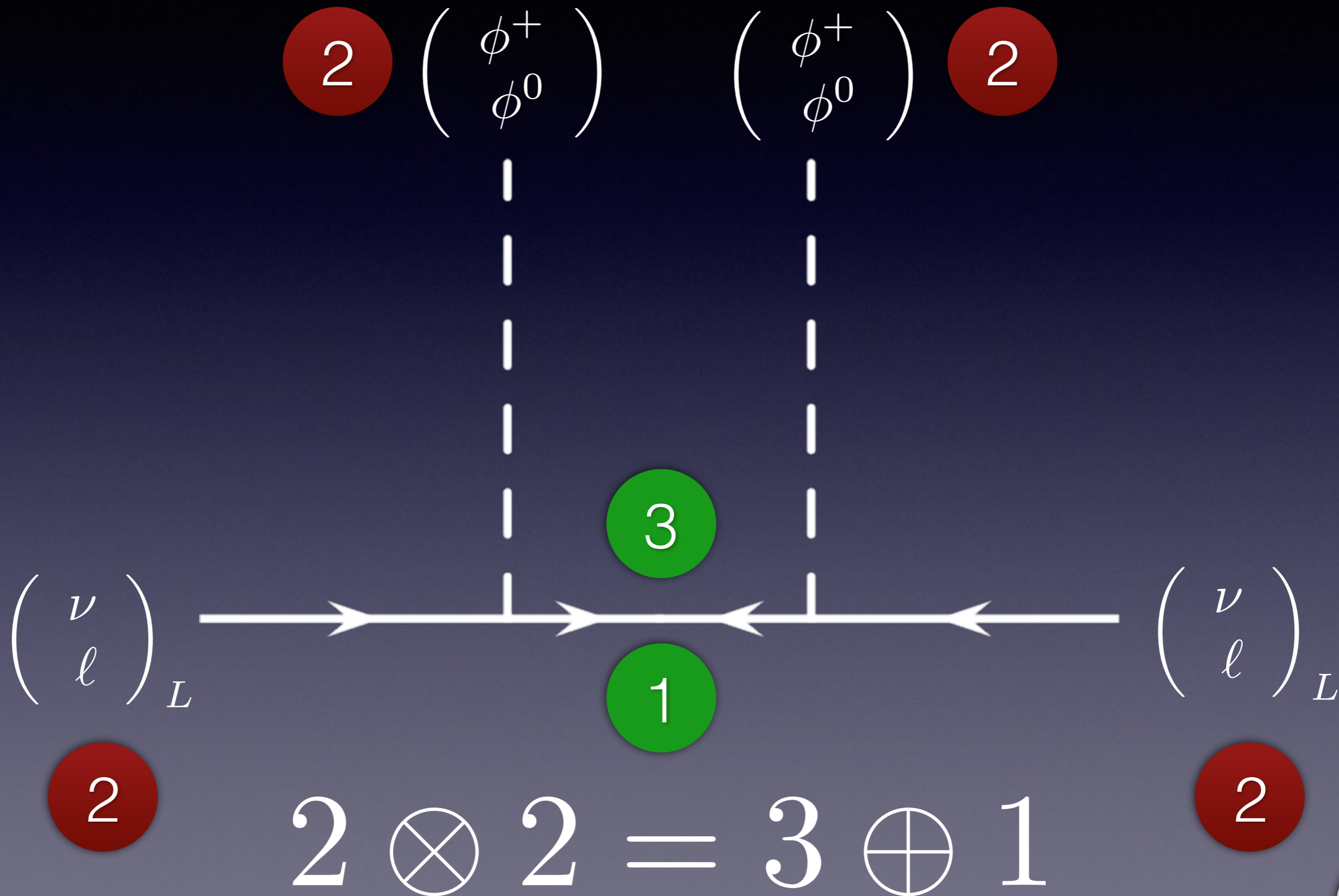
$$\begin{pmatrix} \uparrow \\ \downarrow \end{pmatrix}_1 \otimes \begin{pmatrix} \uparrow \\ \downarrow \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} \uparrow_1 \uparrow_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow_1 \downarrow_2 + \downarrow_1 \uparrow_2) \\ \downarrow_1 \downarrow_2 \end{pmatrix} \oplus \frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow_1 \downarrow_2 - \downarrow_1 \uparrow_2)$$

标准模型 SU(2)xU(1)

$$(L\Phi) = \begin{pmatrix} \nu \\ \ell \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2}\nu\phi^+ \\ \underline{\nu\phi^0 + \ell\phi^+} \\ \sqrt{2}\ell\phi^0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} \underline{\nu\phi^0} - \ell\phi^+ \end{pmatrix}$$

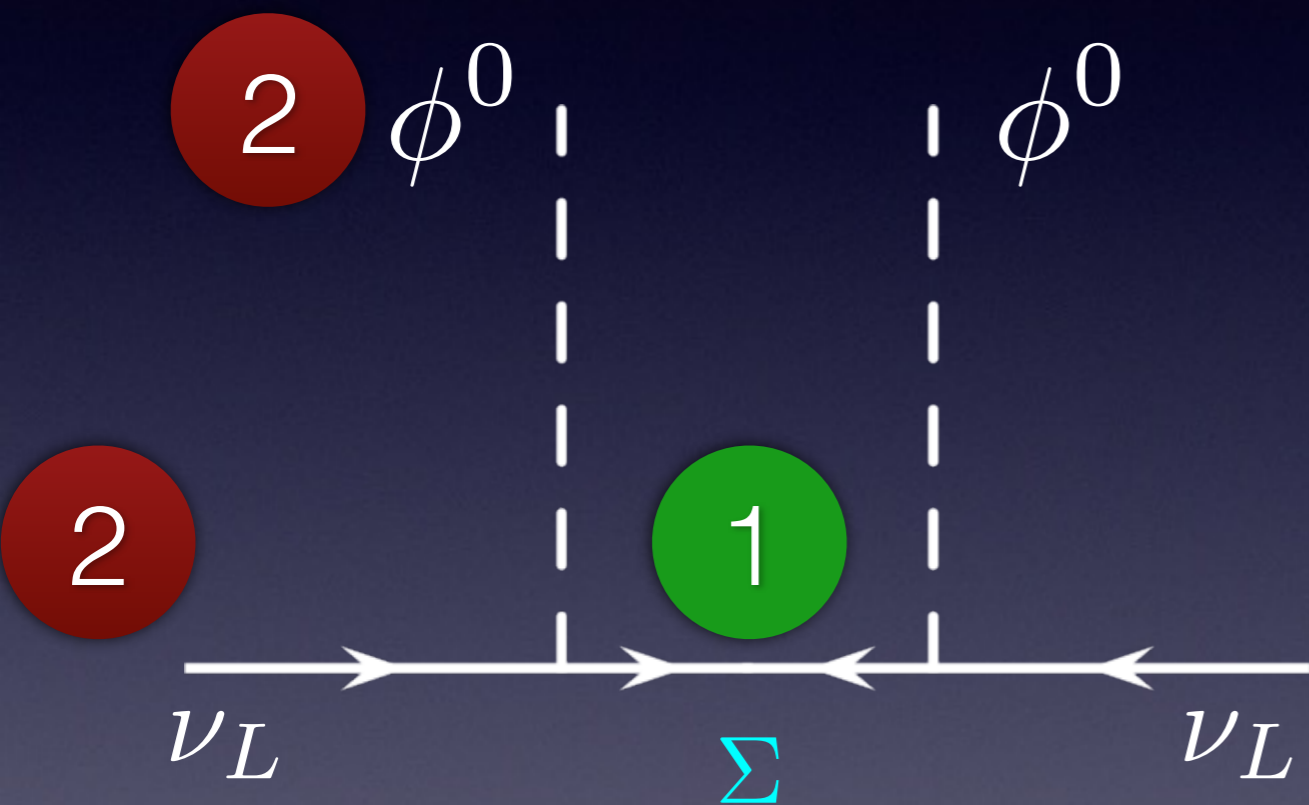
$$2 \otimes 2 = 3 \oplus 1$$

树图跷跷板机制

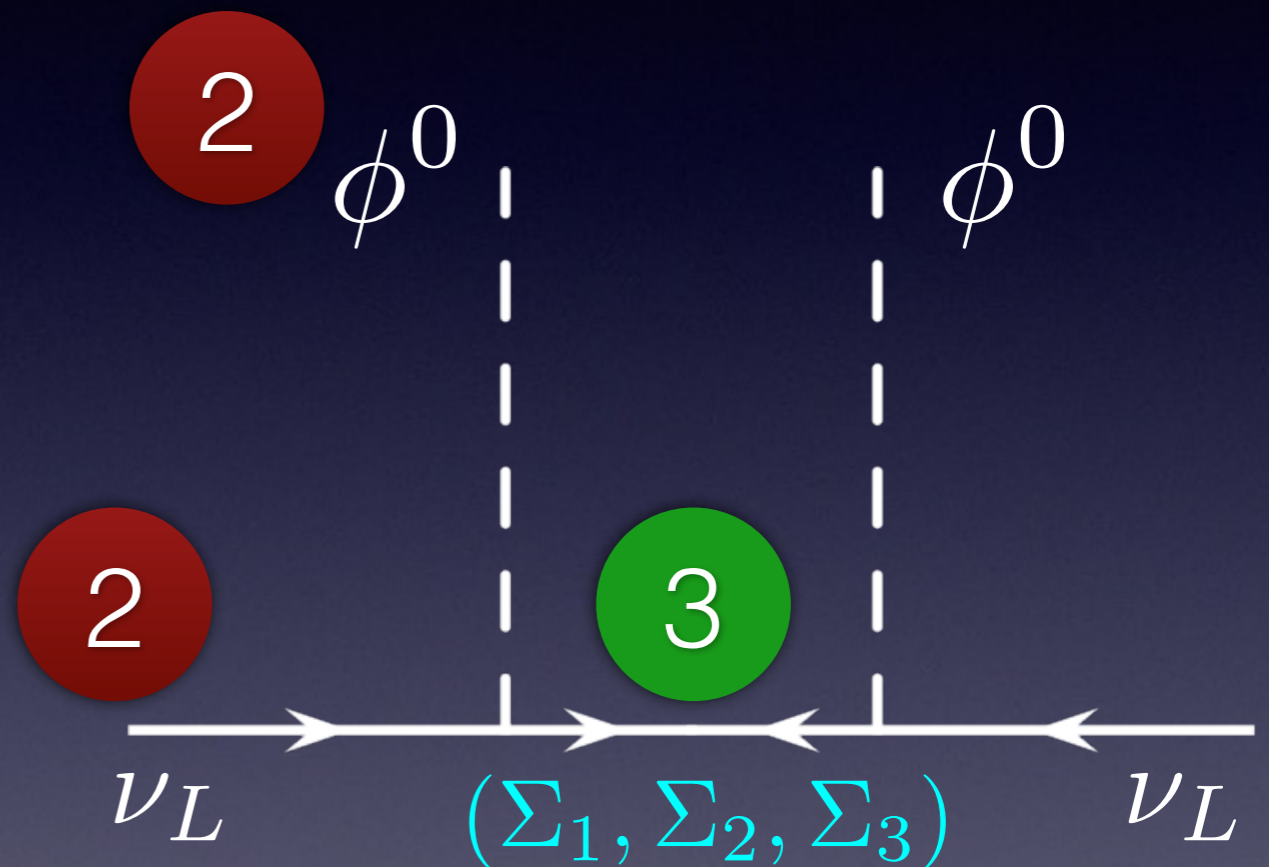


树图跷跷板机制：第1和第3类

第1类



第3类



角动量耦合

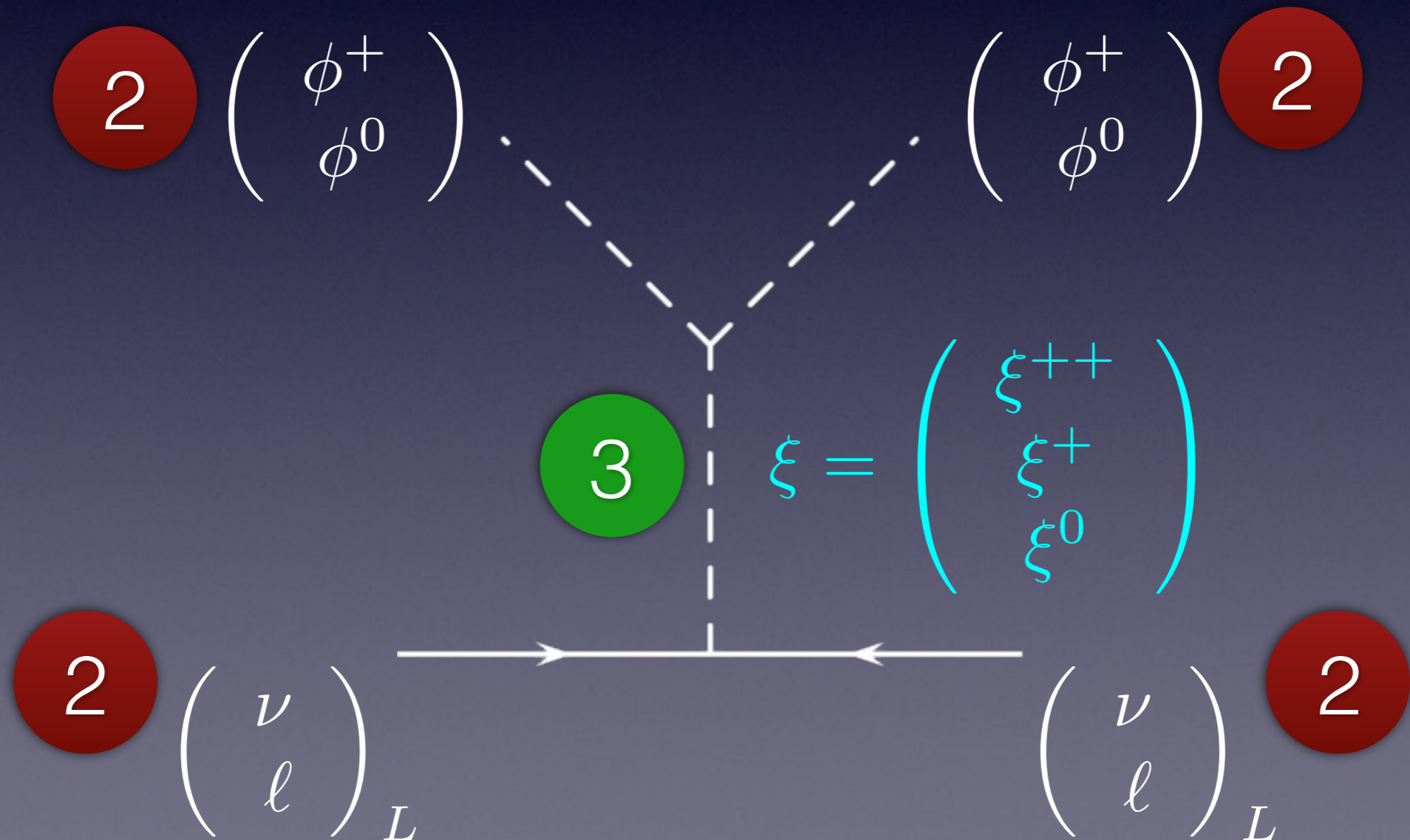
$$\vec{J} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2$$

$$|J| = |L_1 - L_2|, \dots, L_1 + L_2$$

树图跷跷板机制：第2类

$$(LL) = \begin{pmatrix} \nu \\ \ell \end{pmatrix}_i \otimes \begin{pmatrix} \nu \\ \ell \end{pmatrix}_j = \begin{pmatrix} \overline{\nu_i \nu_j} \\ \nu_i \ell_j + \ell_j \nu_i \\ \ell_i \ell_j \end{pmatrix} \oplus (\nu_i \ell^j - \ell_i \nu_j)$$

相互作用
非质量项



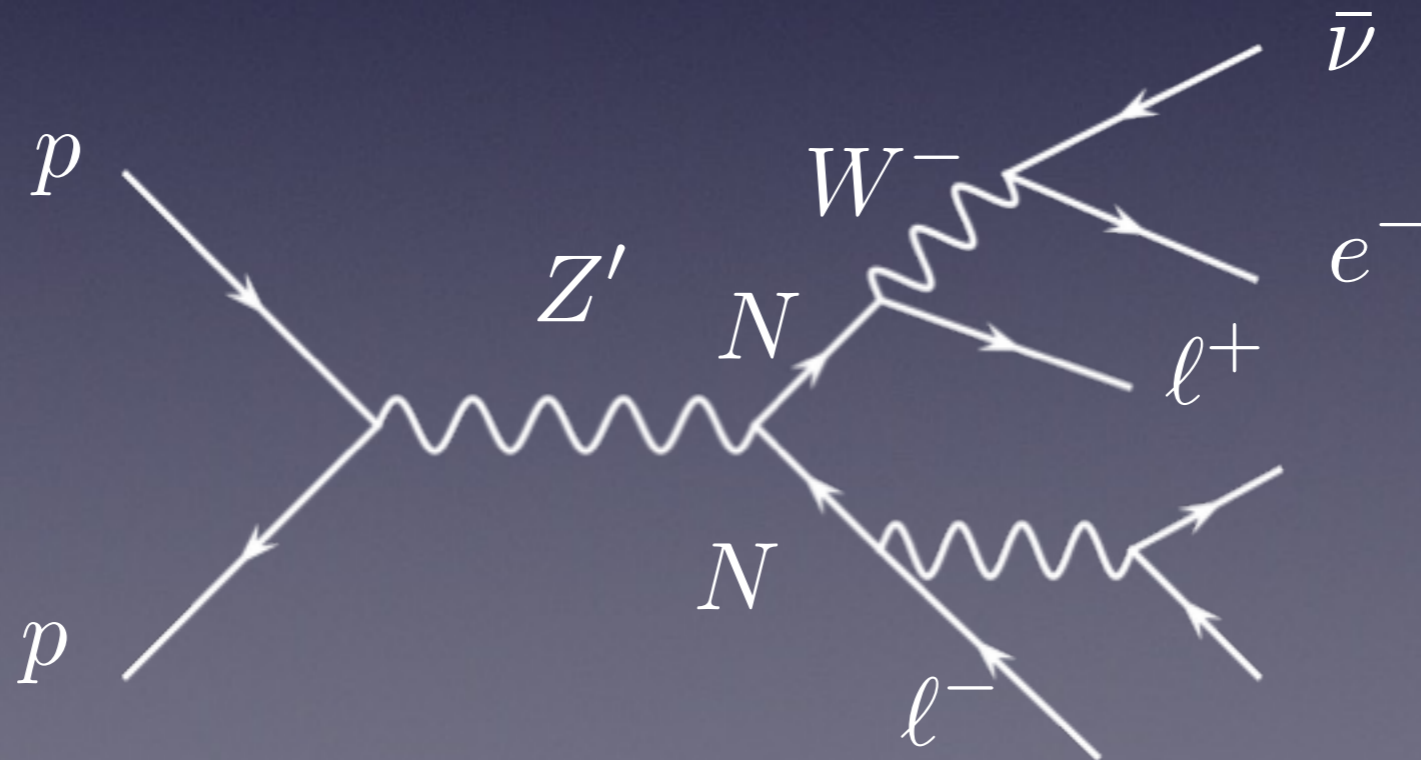
中微子跷跷板模型的对撞机信号

第1类和第3类树图跷跷板模型：

困难：跷跷板能标非常高， $\sim 10^{15}$ GeV

右手中微子非常重，耦合微弱，难以探测

方法之一：引入 $U(1)_{B-L}$ 的超对称扩充模型，
将跷跷板能标压低到TeV



中微子跷跷板模型的对撞机信号

第2类树图跷跷板模型:

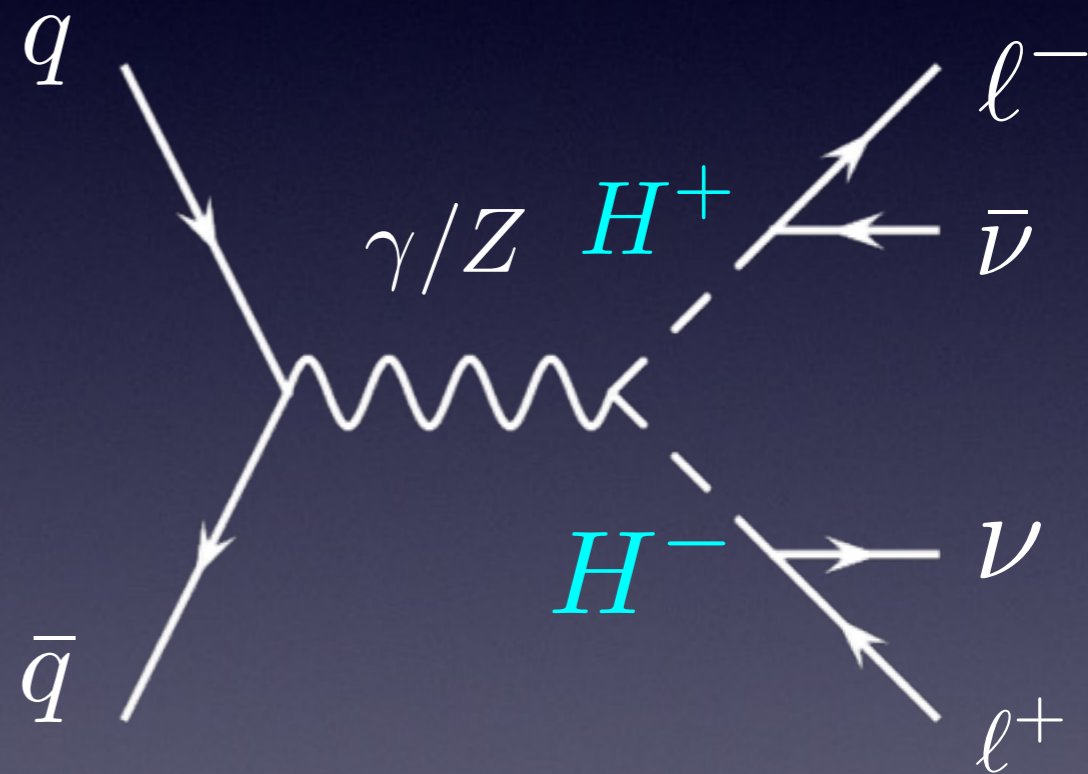
* 轻的标量三重态粒子



同号轻子

构成的共振态

非常干净的信号

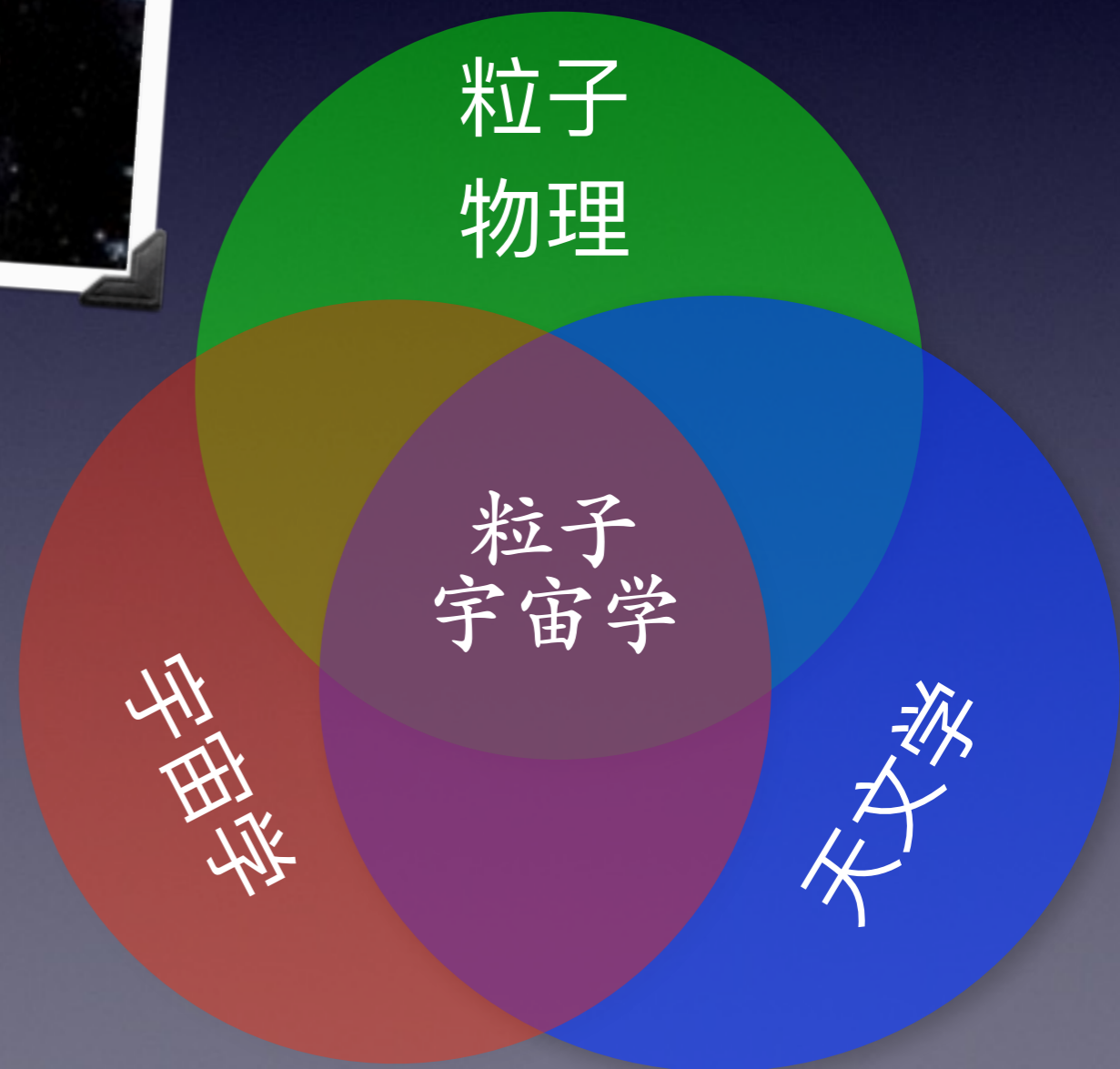


丢失动量

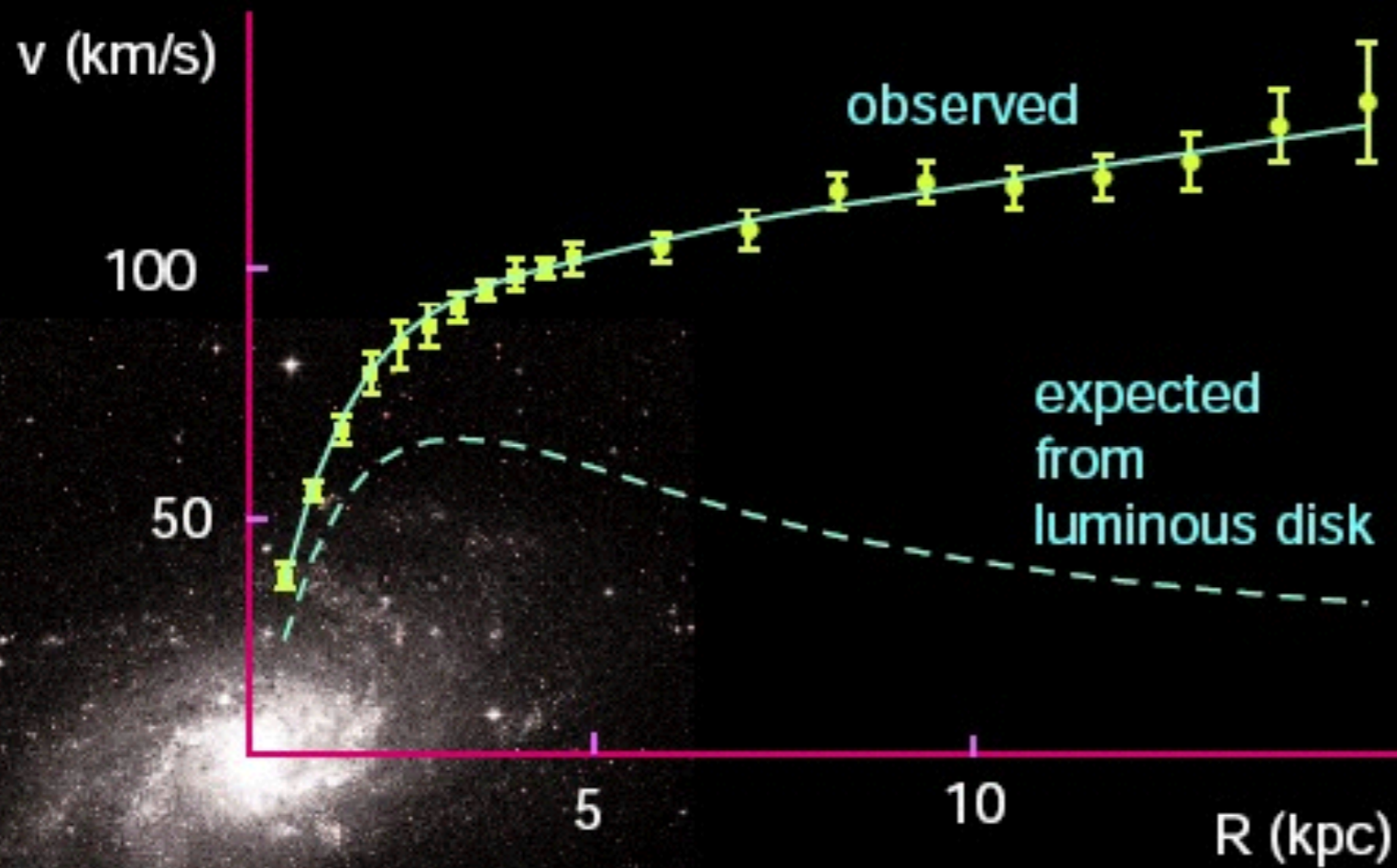
* 重标量三重态粒子唯象学依赖于衰变分支比



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

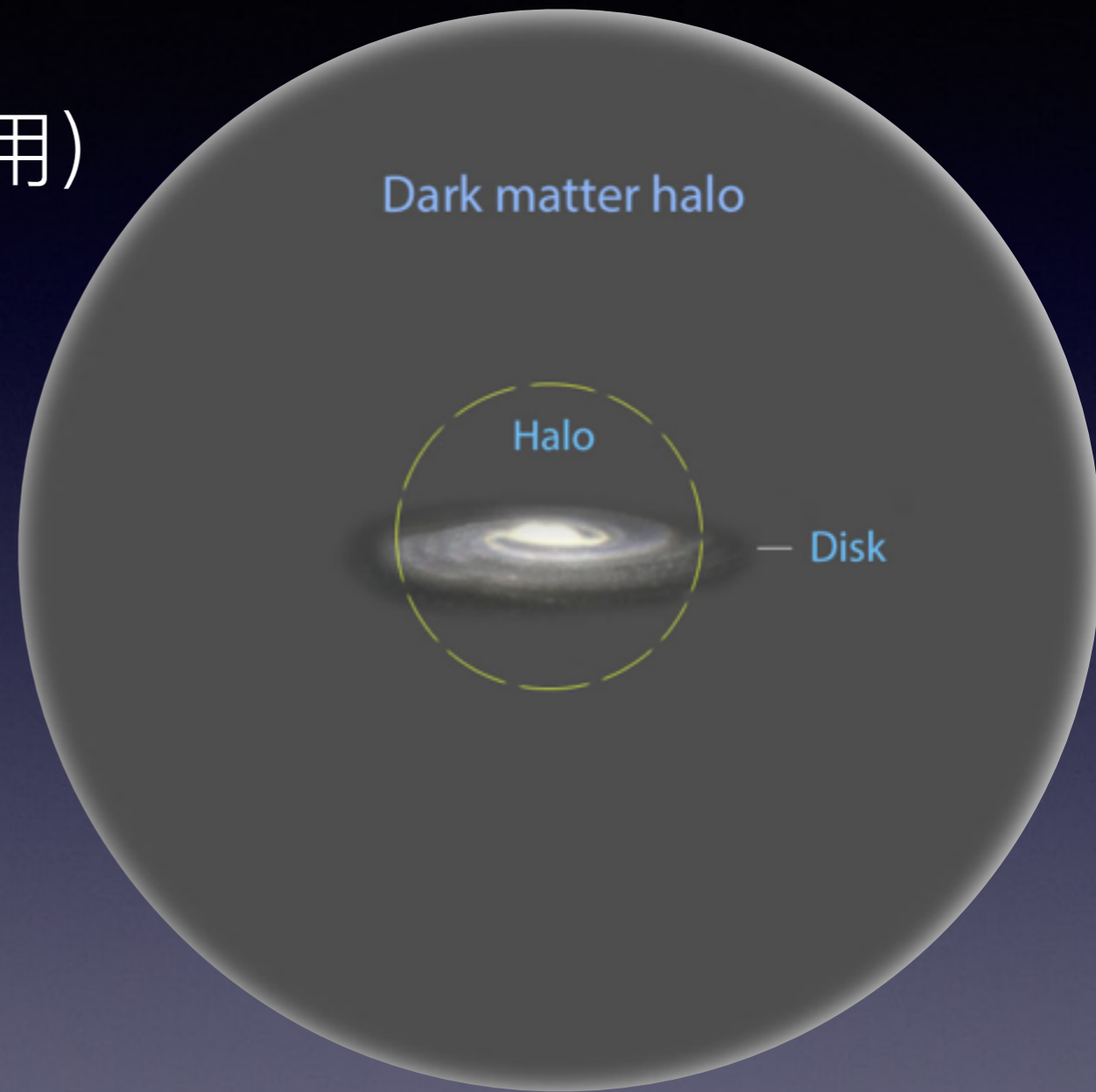
大质量

未知信息：

质量和自旋

相互作用形式

种类和数目



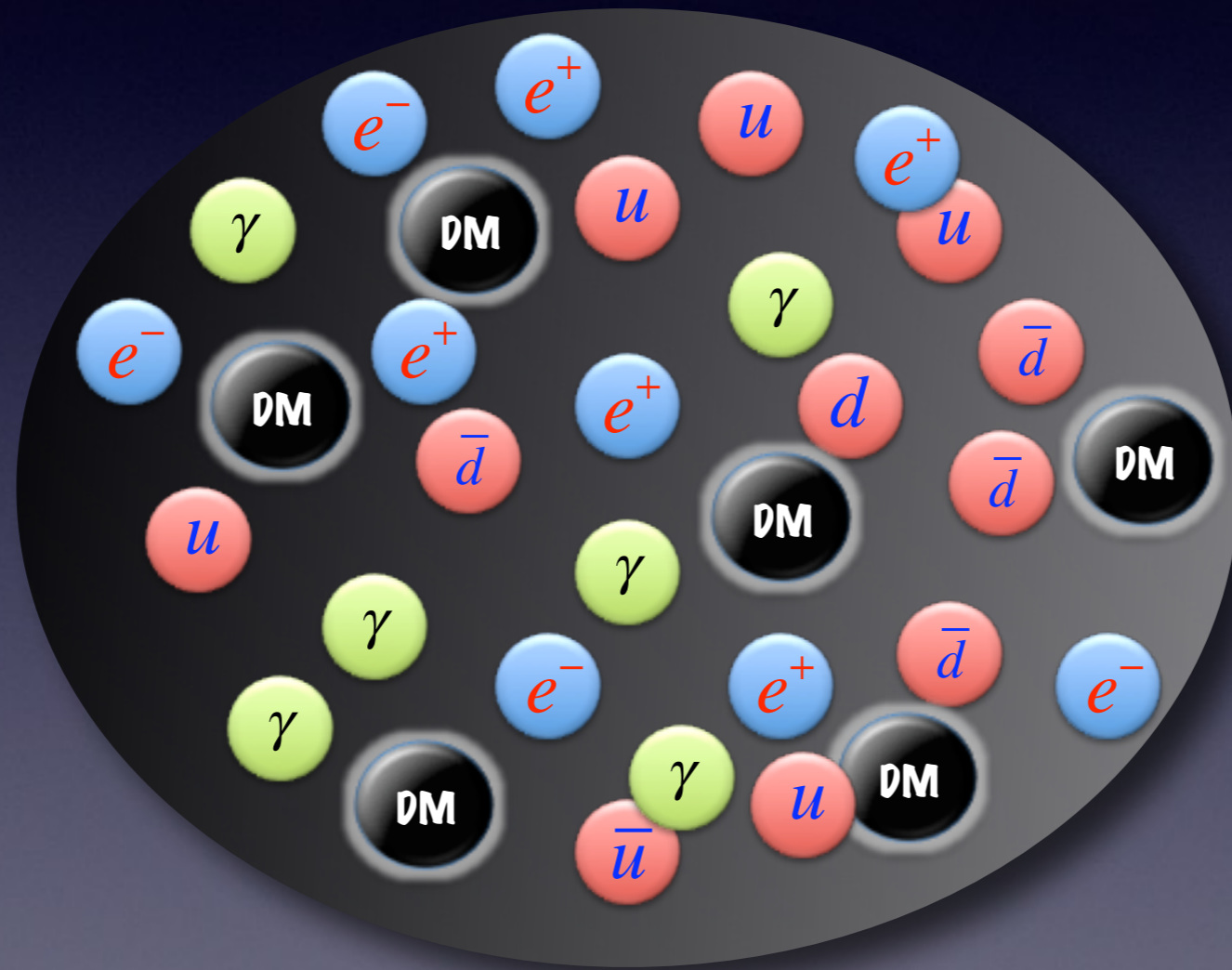
更糟的是，我们甚至不知道
“什么是我们不知道的”

暗物质候选者之一

作用力微弱的大质量粒子
(Weakly interacting massive Particle)

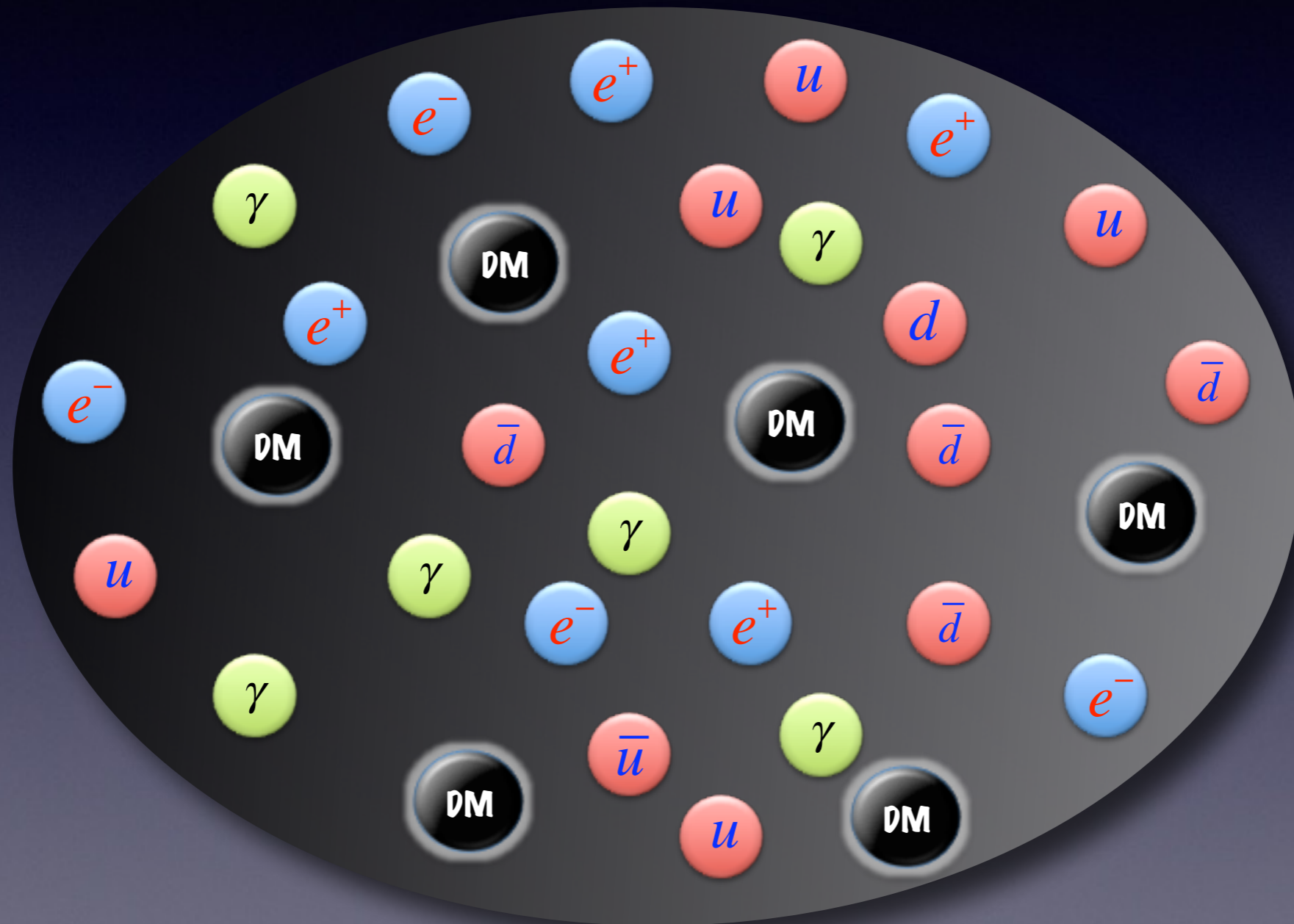
暗物质残留丰度

1) 宇宙早期暗物质和可见物质处于热力学平衡态



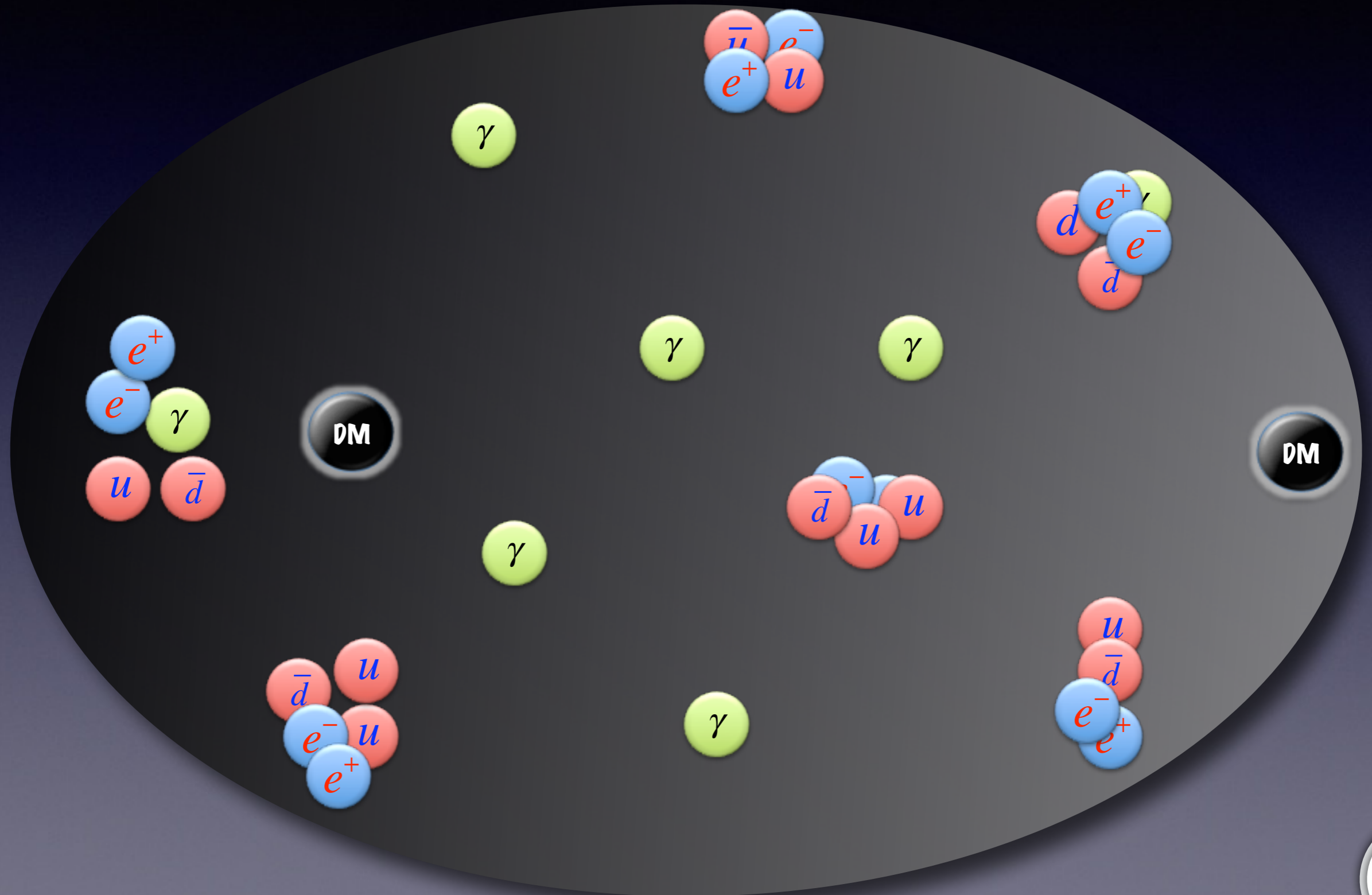
暗物质残留丰度

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



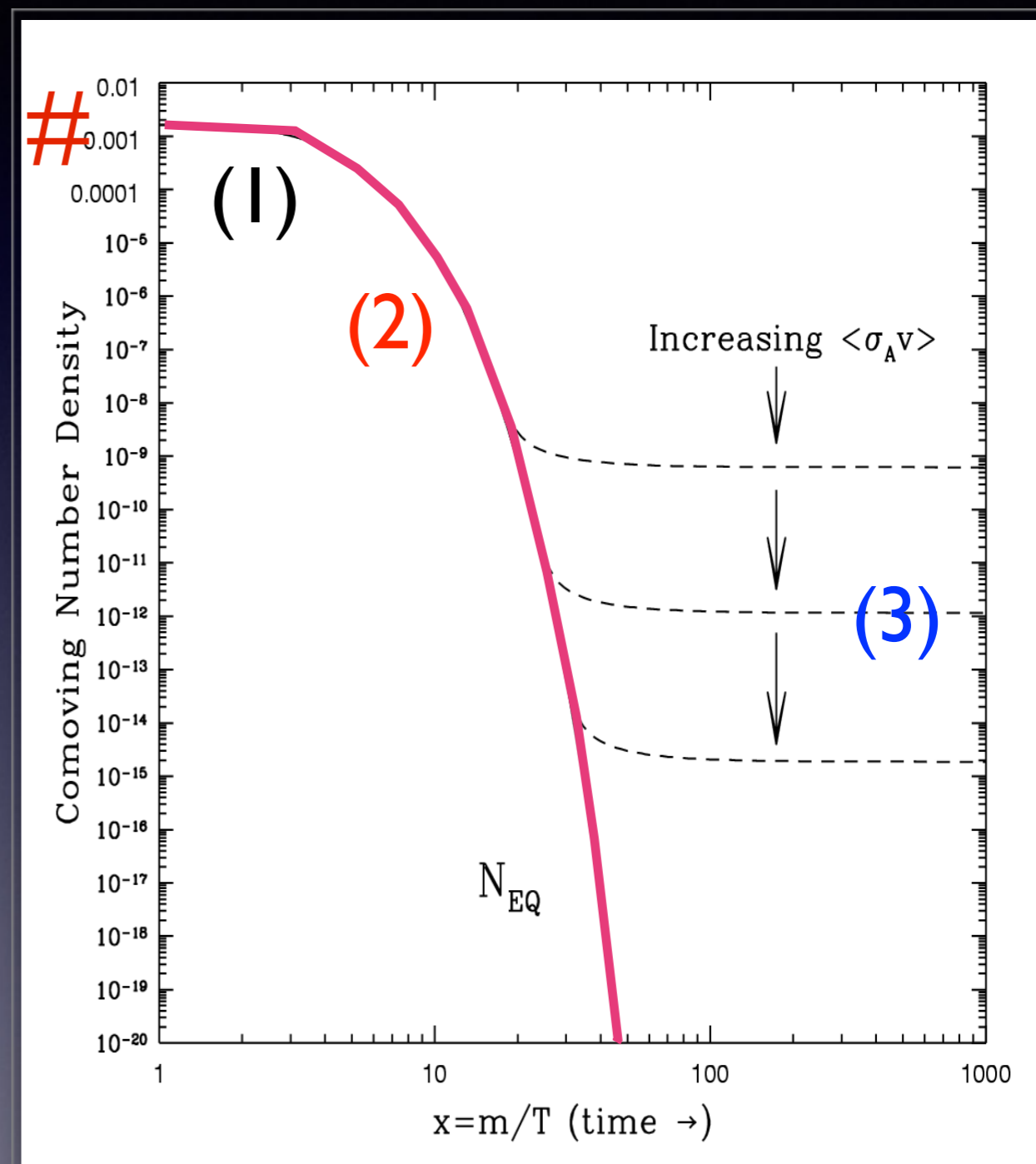
2. 宇宙膨胀冷却

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

3. 暗物质从热库中退耦

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

$$\text{脱耦温度 } T_F \simeq \frac{m_\chi}{20}$$

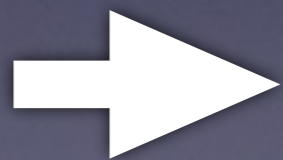


WIMP奇迹

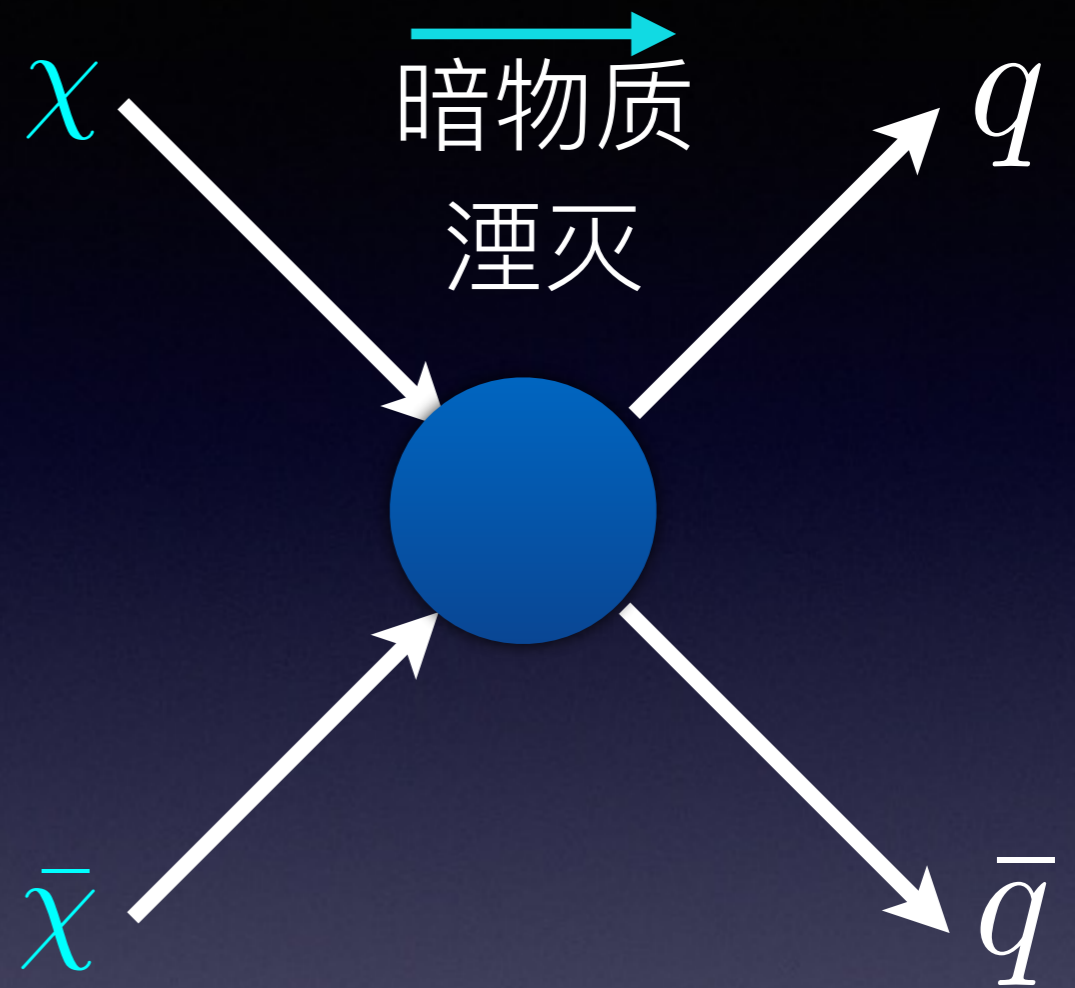
$$T_F \simeq \frac{m_\chi}{20}$$

$$\Omega h^2 \simeq \frac{0.1 \text{ pb}}{\langle \sigma(\chi\chi \rightarrow qq)v \rangle} = 0.1$$

$$\langle \sigma(\chi\chi \rightarrow qq)v \rangle \propto \frac{g^4}{m_\chi^2} \sim \text{pb}$$



$$g \sim g_{\text{weak}} \quad m_\chi \sim m_W$$

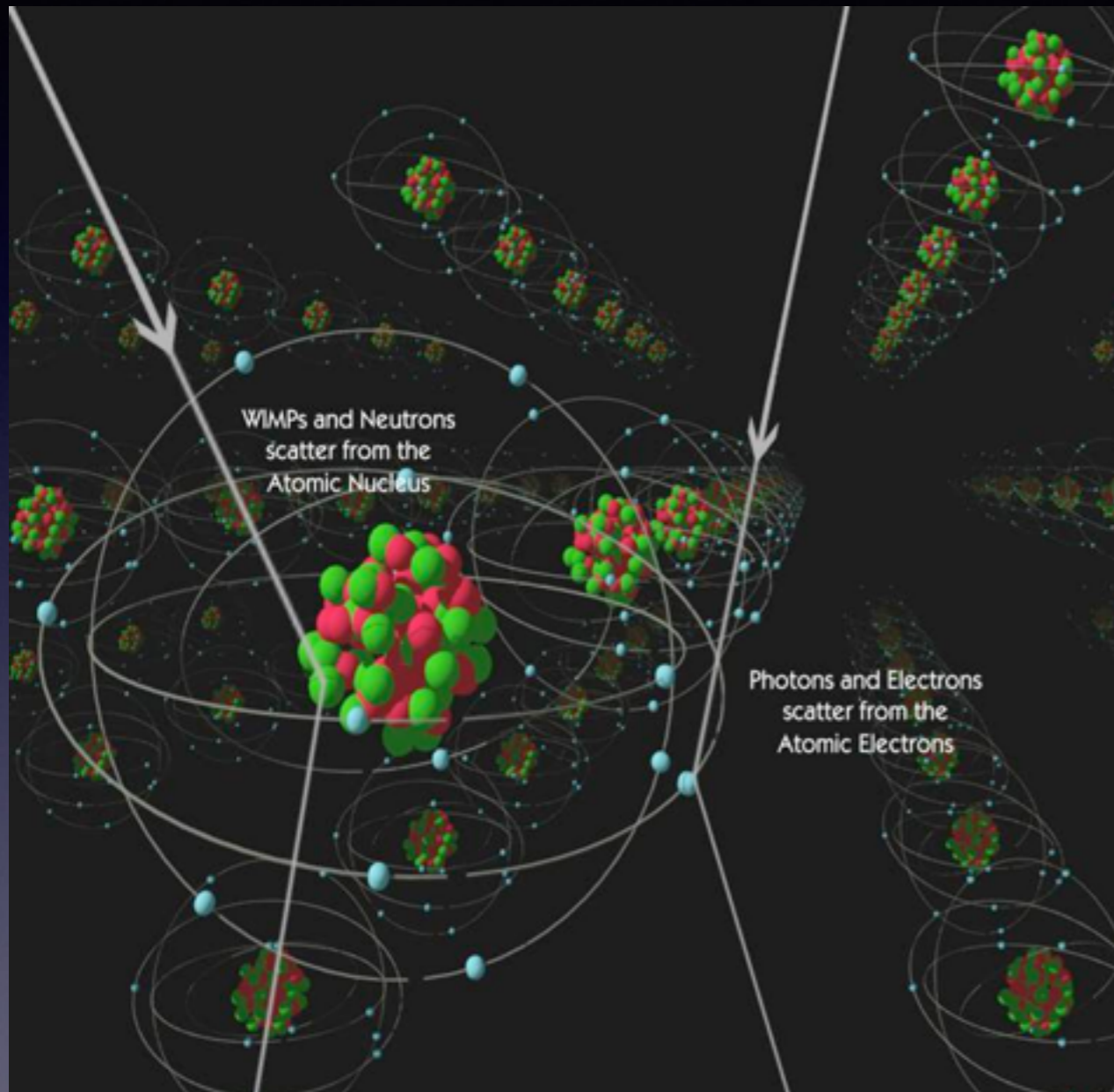


Weakly interacting massive particles at the weak scale!

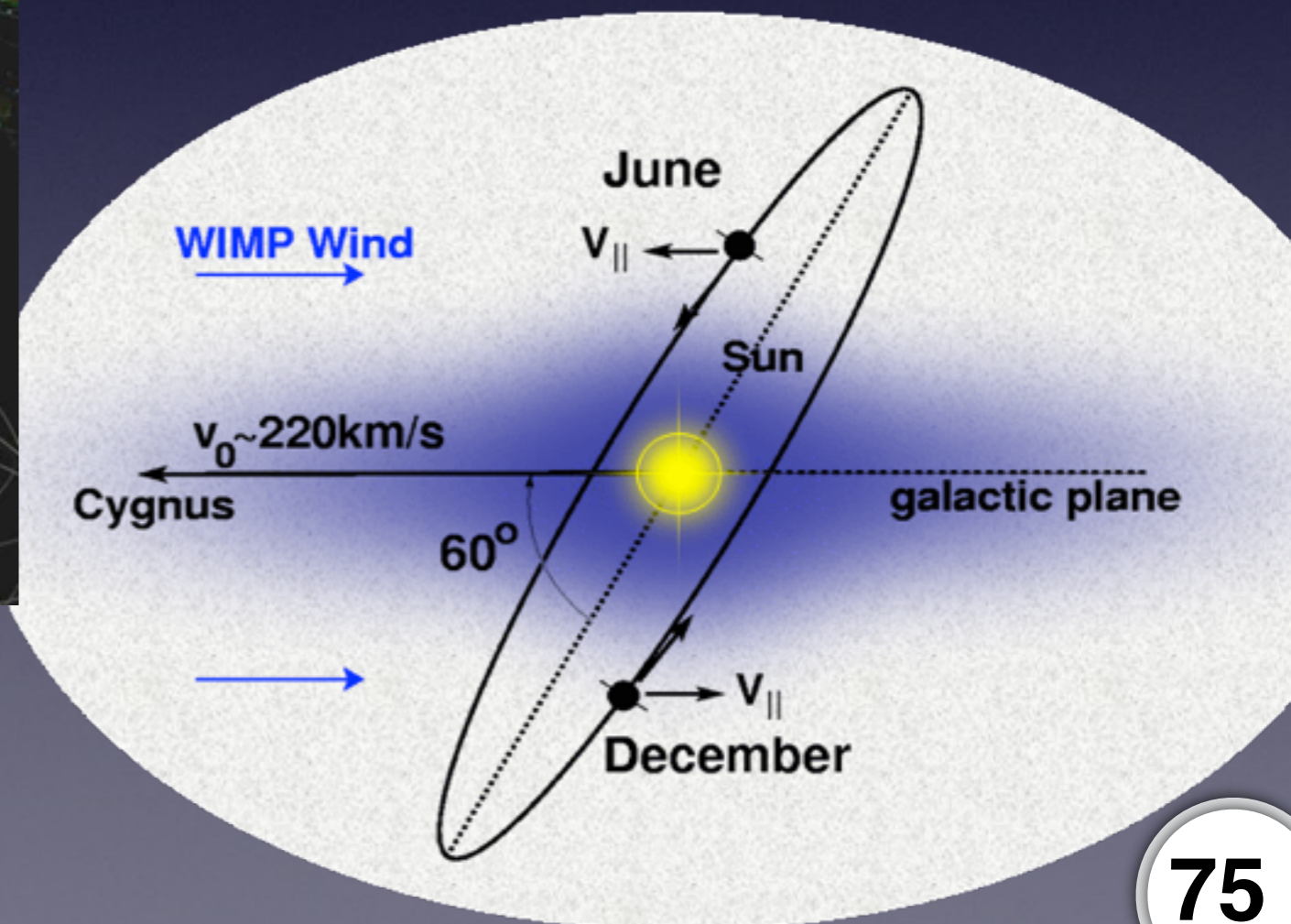
神奇的巧合！理论家的最爱！

暗物质直接探测

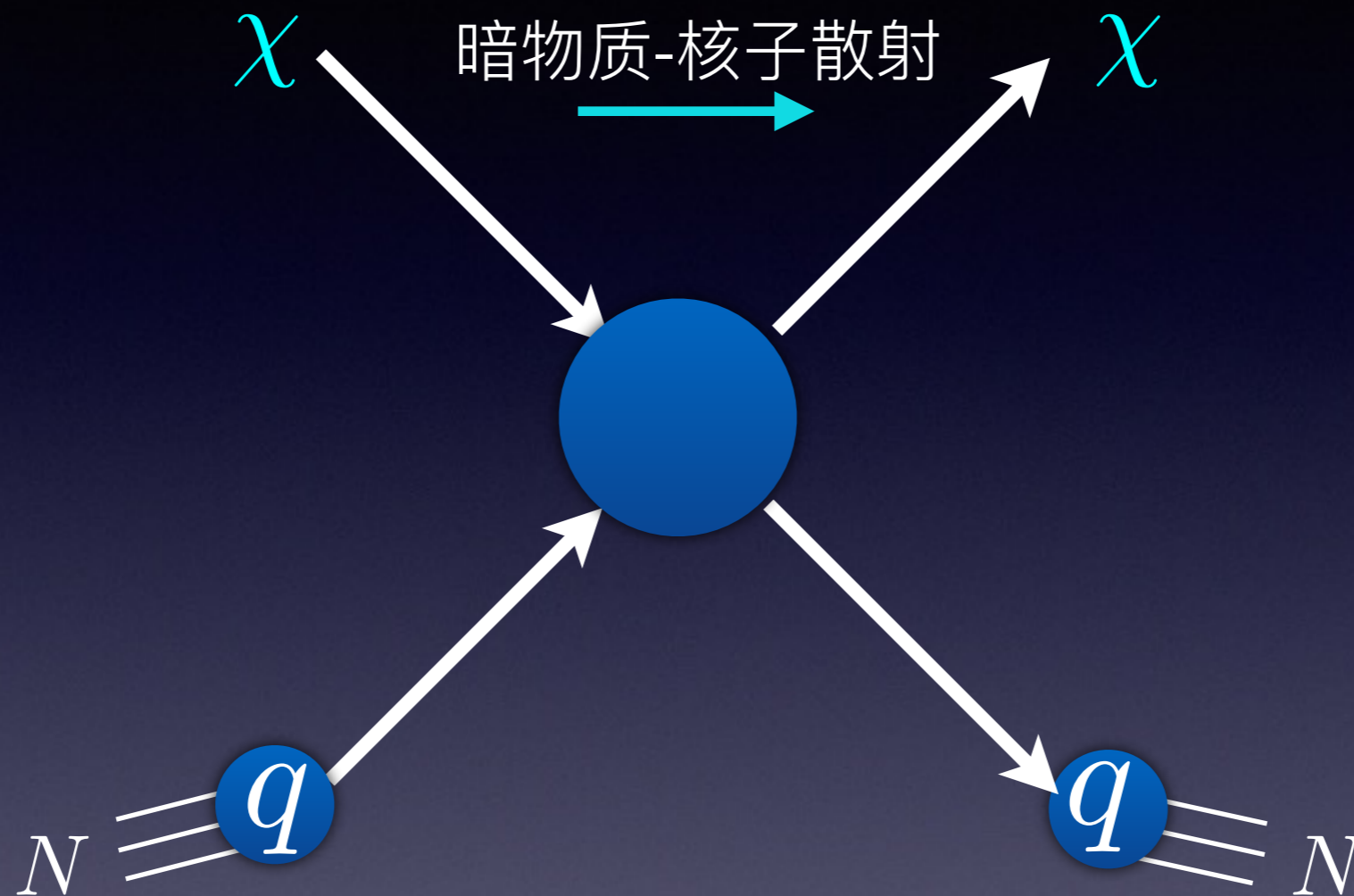
- 直接探测暗物质和原子的弹性散射。
- 信号：热，光，电



年调制效应



暗物质直接探测



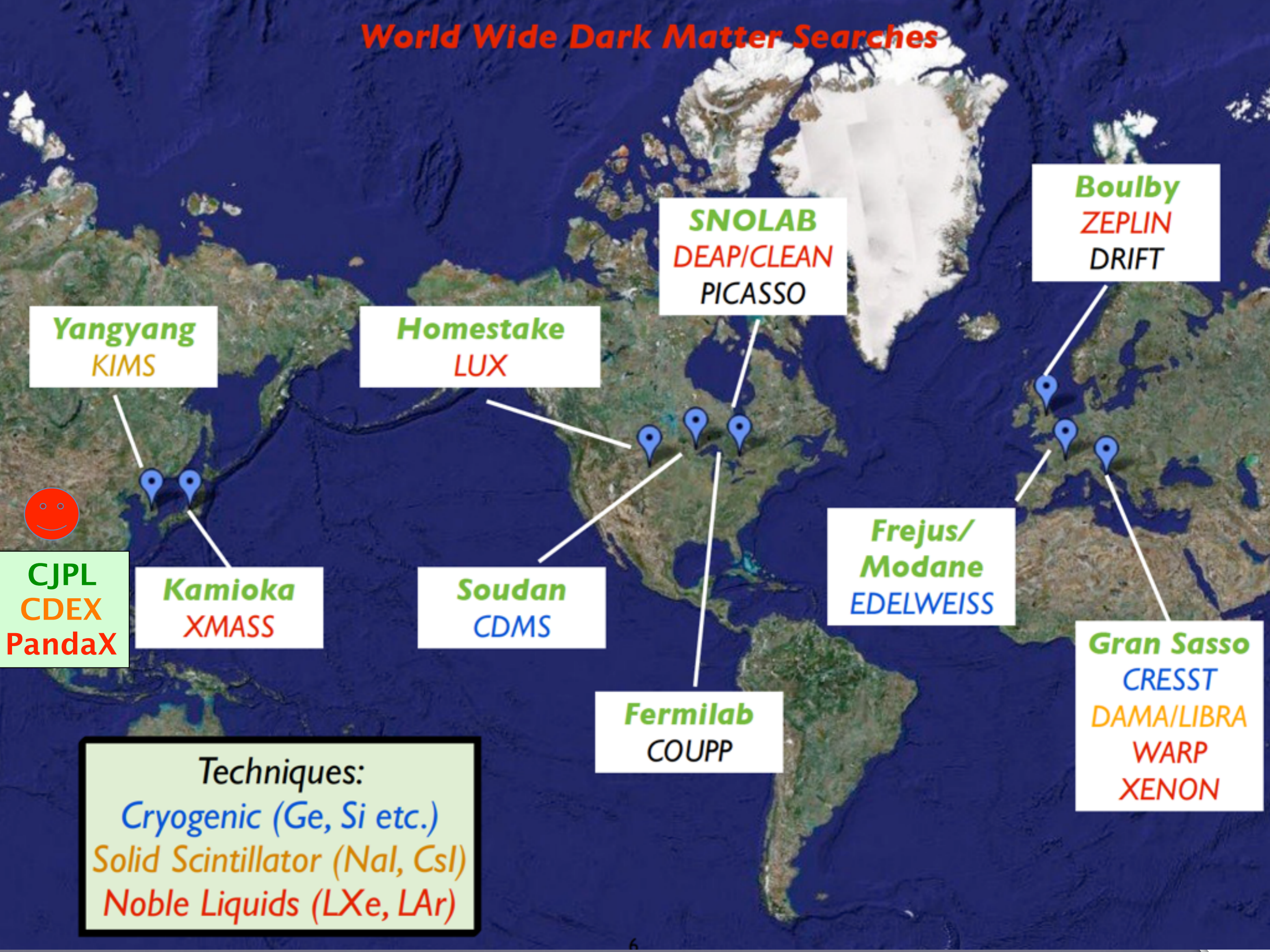
自旋无关的散射

$$\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi\bar{q}\gamma^{\mu}q$$

自旋相关的散射

$$\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q$$

World Wide Dark Matter Searches



Yangyang
KIMS

Homestake
LUX

SNOLAB
DEAP/CLEAN
PICASSO

Boulby
ZEPLIN
DRIFT



CJPL
CDEX
PandaX

Kamioka
XMASS

Soudan
CDMS

**Frejus/
Modane**
EDELWEISS

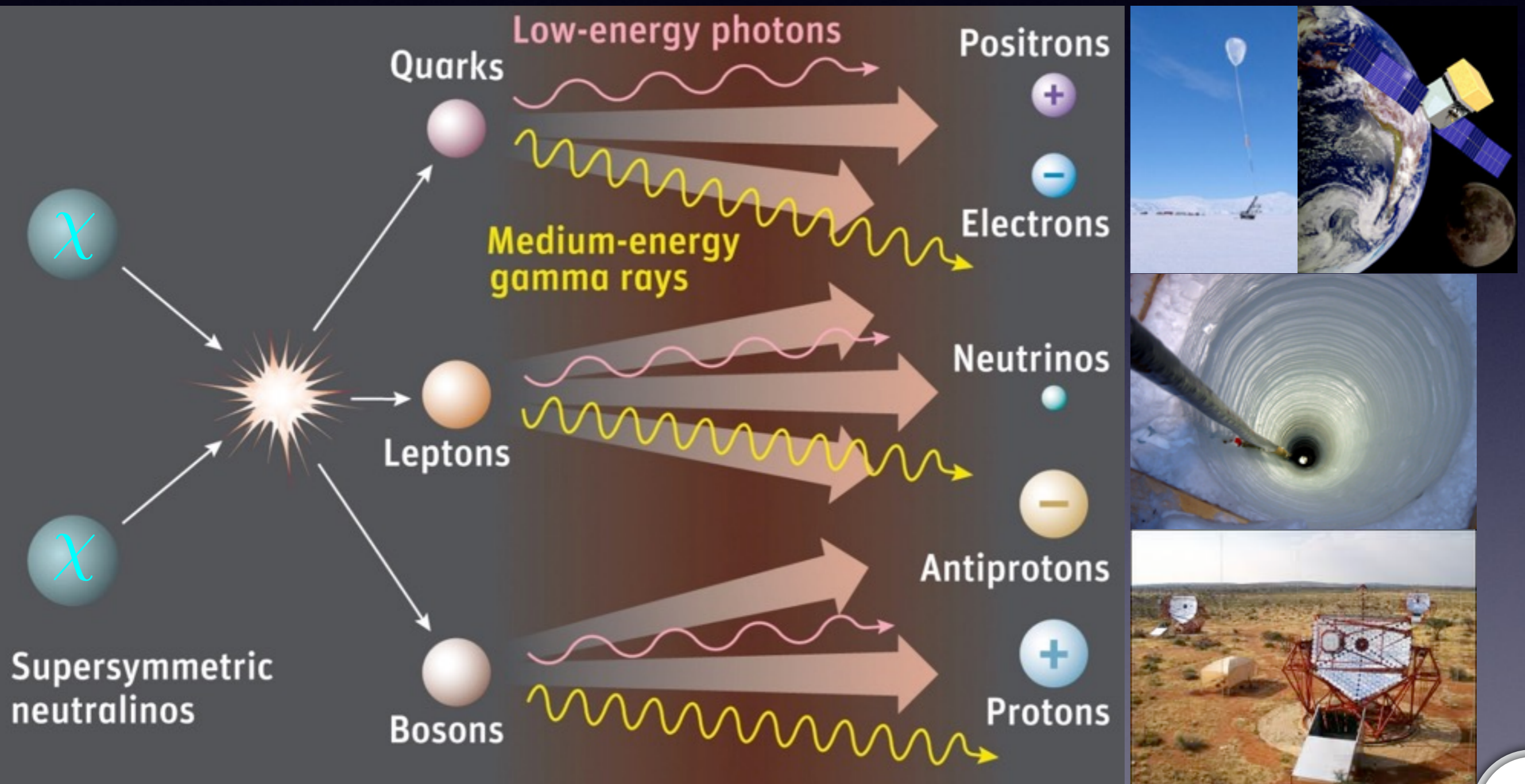
Gran Sasso
CRESST
DAMA/LIBRA
WARP
XENON

Fermilab
COUPP

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

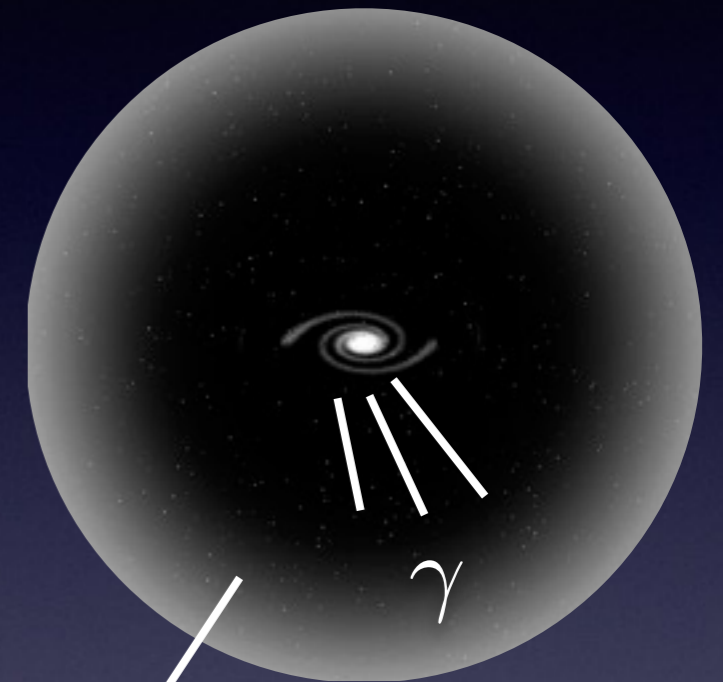
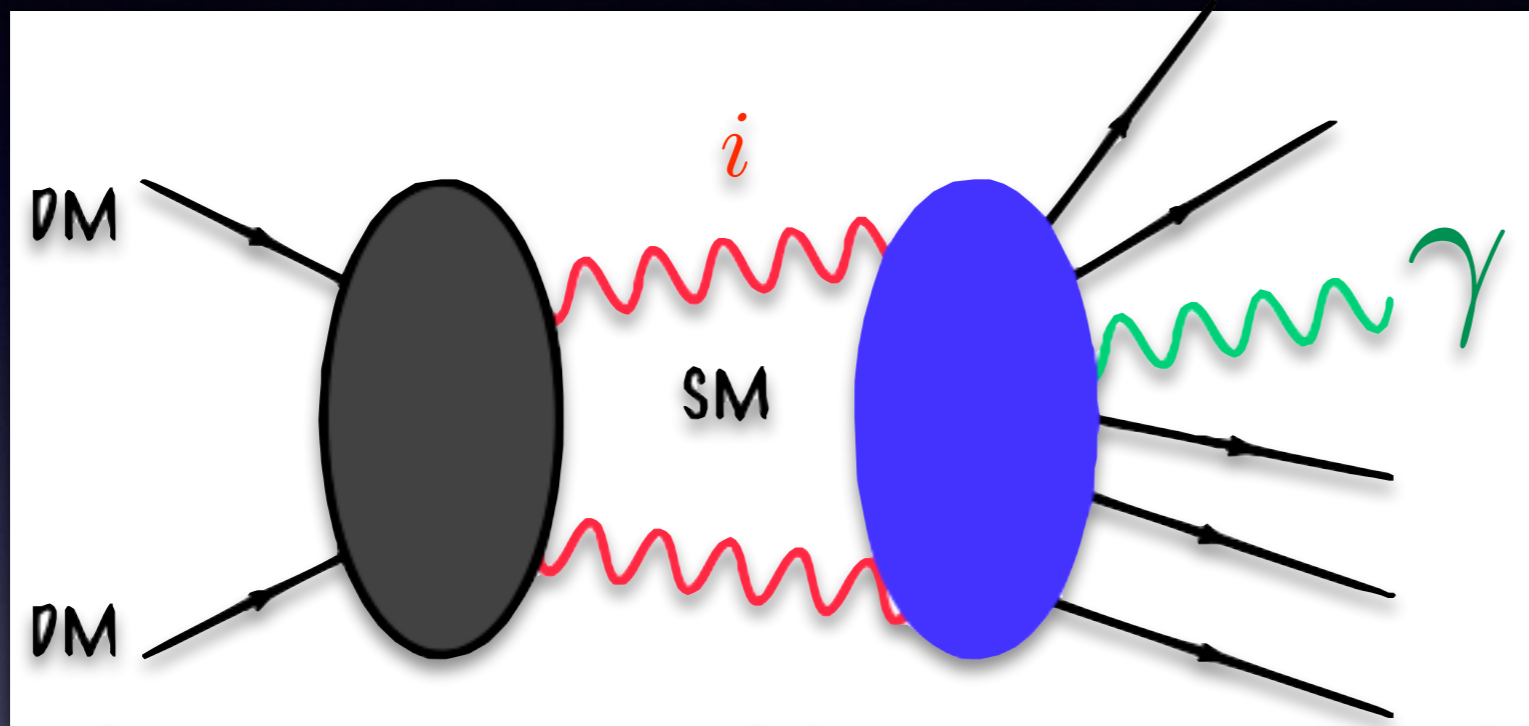
暗物质间接测量

暗物质在宇宙中湮灭产生正反电子，正反质子，光子，中微子



Cosmic Gamma-Ray

$\eta\eta \rightarrow WW, ZZ, \dots$ in the Galactic halo

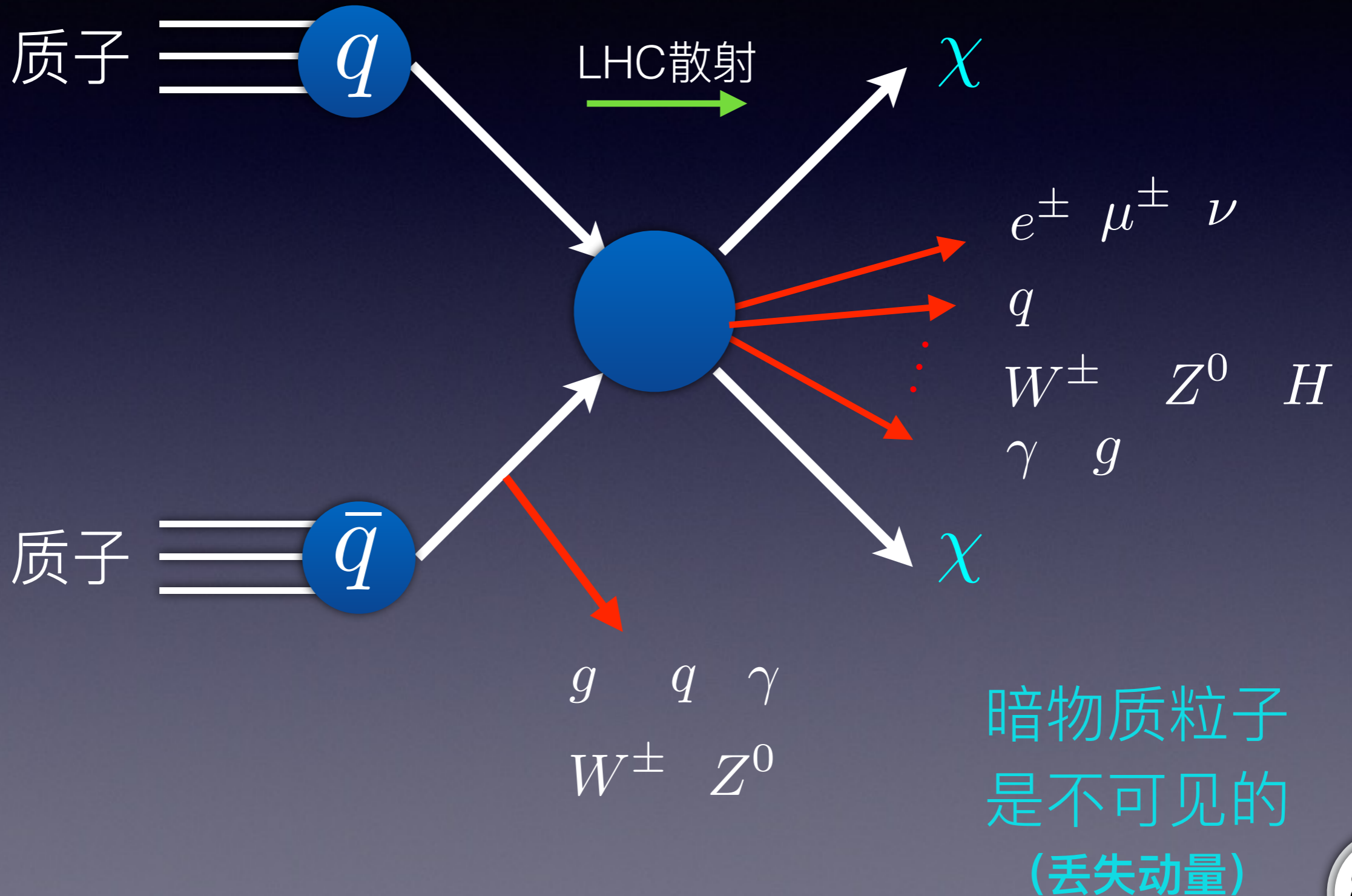


$$\frac{d\Phi}{d\Omega dE} = \sum_i \langle \sigma v \rangle_i \frac{dN_i}{dE} \frac{1}{4\pi m_{DM}^2} \int_{l.o.l} \rho^2 dl$$

Particle
Physics

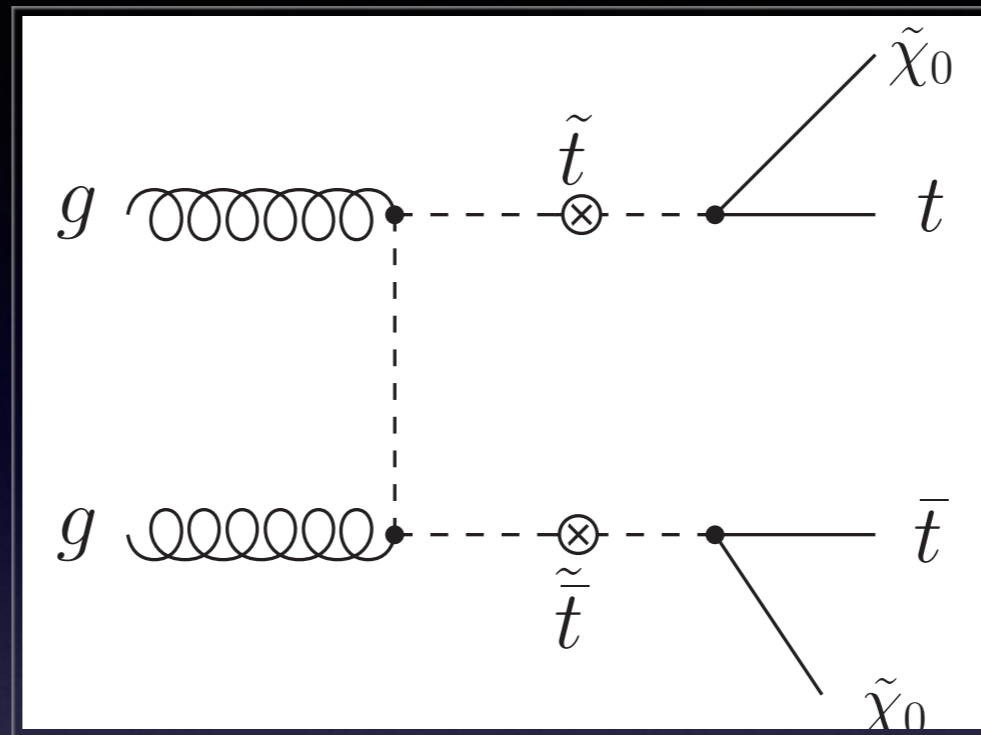
Astrophysics

暗物质对撞机信号



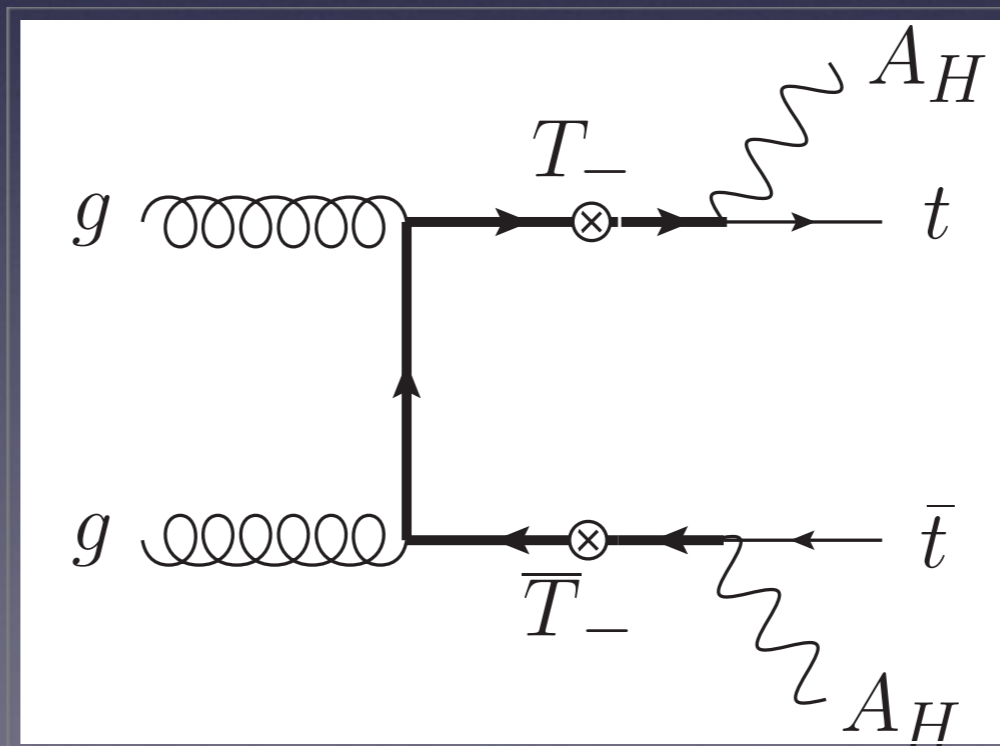
暗物质对撞机信号示例

- ▶ Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model (MSSM)



spin 0

- ▶ Little Higgs Model with T-parity (LHT)
- ▶ Universal Extra Dimension Model (UED)



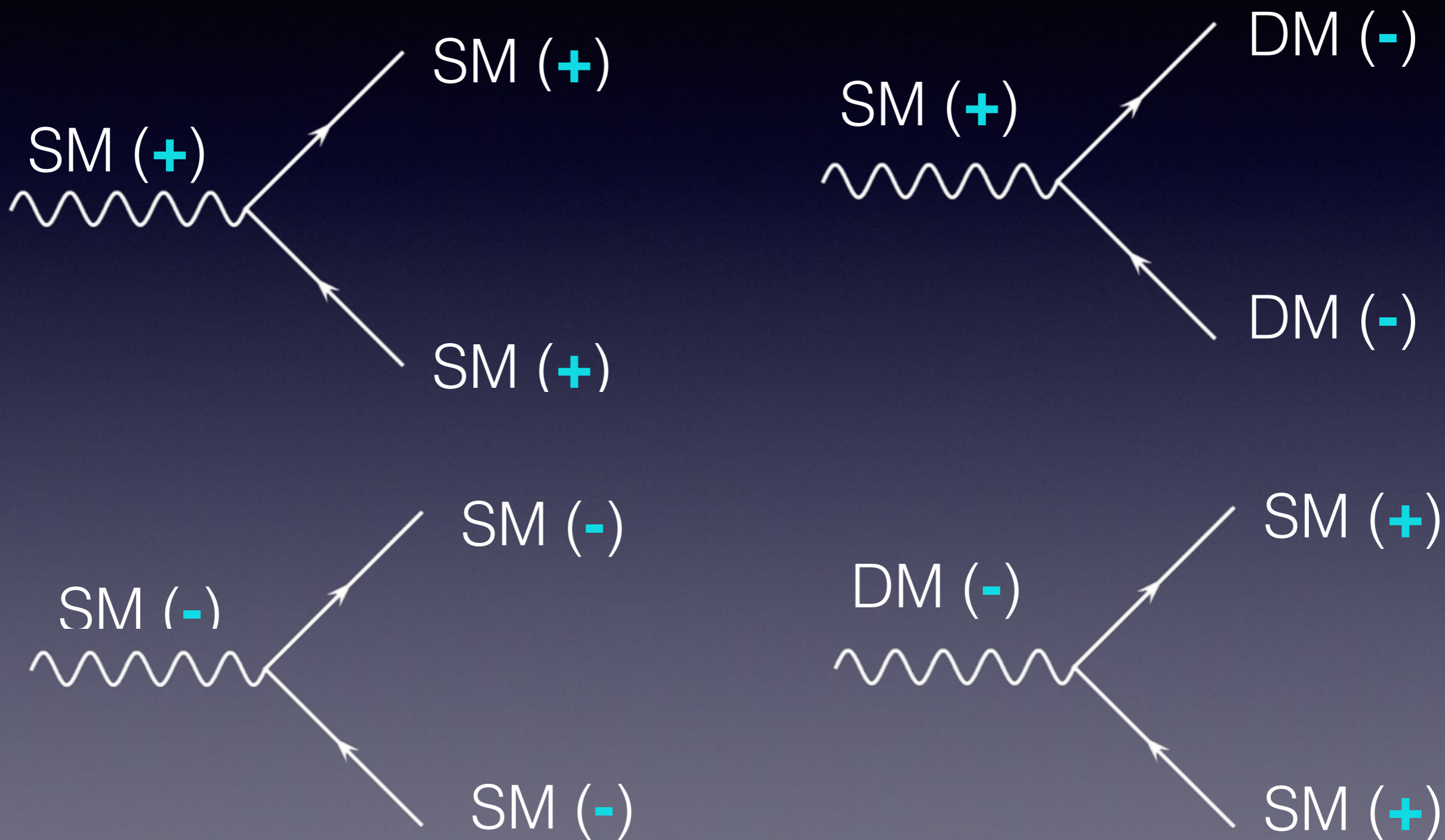
spin 1/2

暗物质的稳定性

(示例：超对称模型)

暗物质的稳定性

通常通过引入离散对称性(例如 Z_2)来保证暗物质的绝对稳定

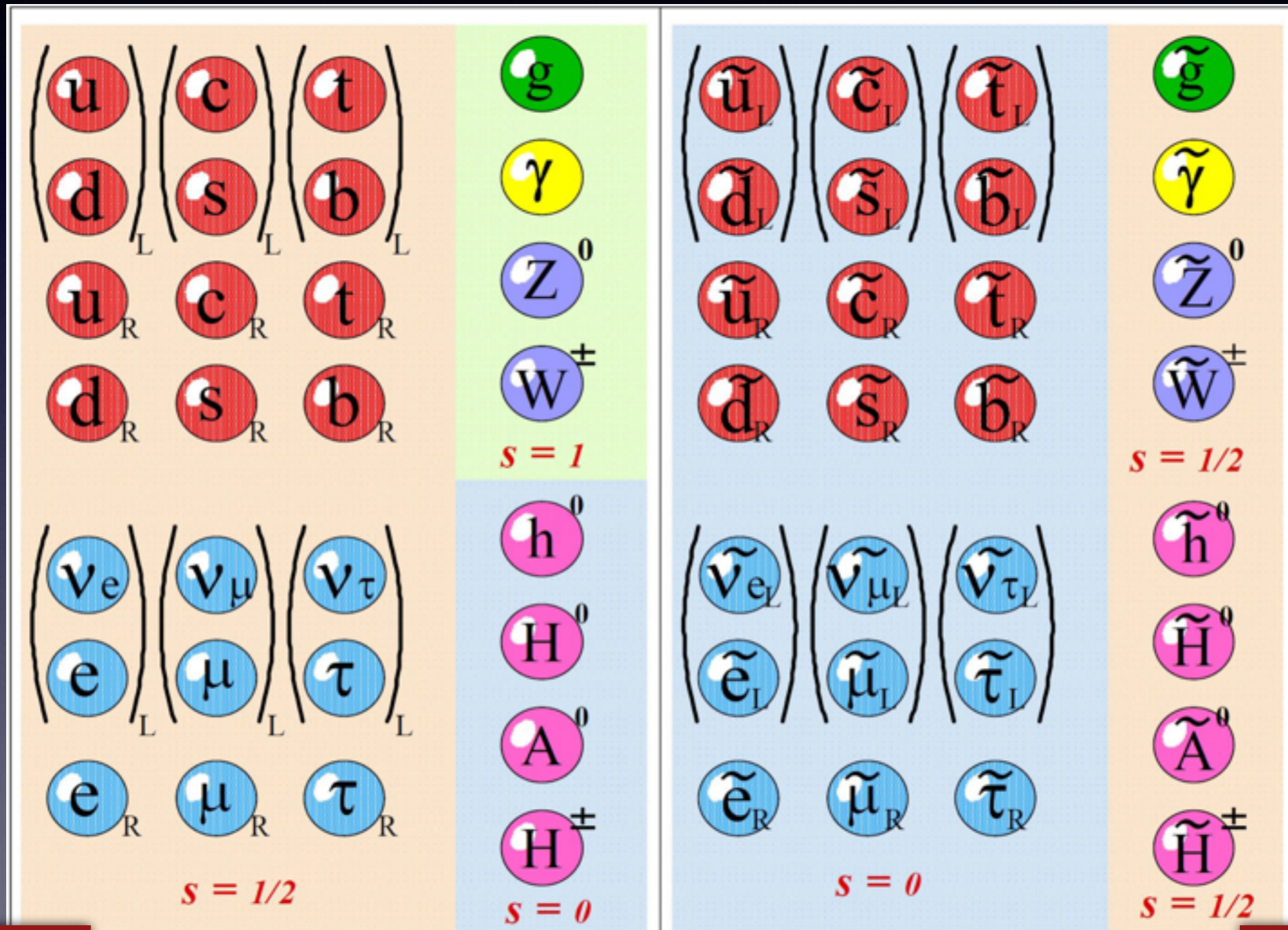


SM不能是 Z_2 -odd

暗物质不能衰变到标准模型粒子

R-宇称守恒的超对称理论

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S}$$



R宇称为正

Existing particles

SUSY particles (MSSM model)

R宇称为负

最小超对称模型：5个标量粒子

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} H_1^0 \\ H_1^- \end{pmatrix} \quad \Phi_2 = \begin{pmatrix} H_2^+ \\ H_2^0 \end{pmatrix}$$

$$\langle \Phi_1 \rangle = \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \langle \Phi_2 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad \longrightarrow \quad h, H, A, H^+, H^-$$

Count degree of freedom:

Massless gauge bosons have 2 transverse d.o.f.

Massive gauge bosons also have longitudinal d.o.f.

Before SSB

Massless $W_\mu^{i=1,2,3}, B_\mu$ 8

Complex Φ_u, Φ_d 8

Total 16

After SSB

Massive W^\pm, Z 9

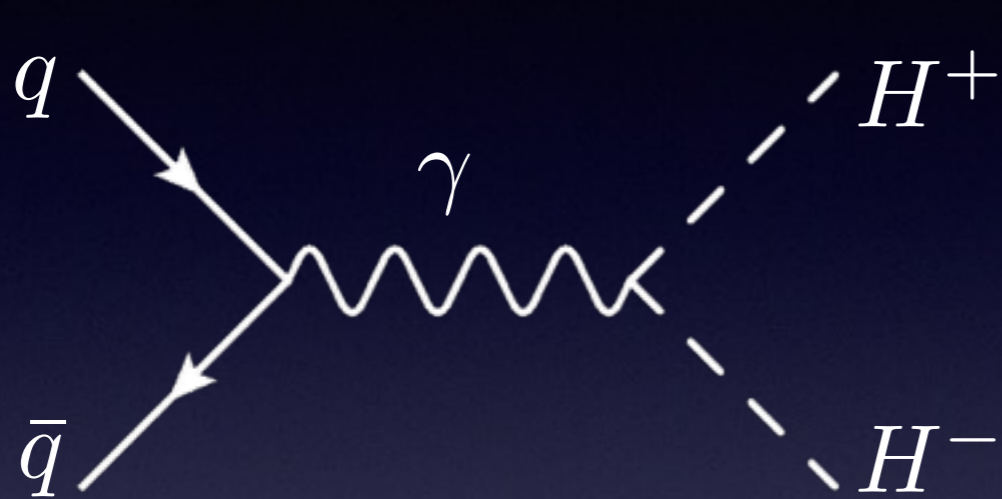
Massless γ 2

Complex h, H, A, H^\pm 5

Total 16

荷电的希格斯粒子：确凿无疑的新物理信号

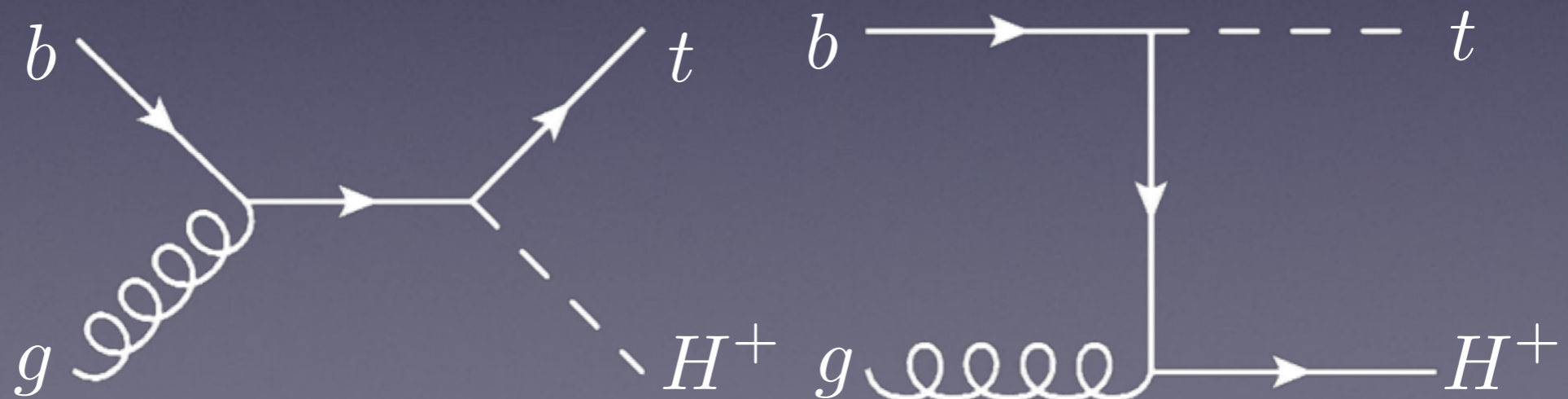
$H^\pm H^\mp$ production



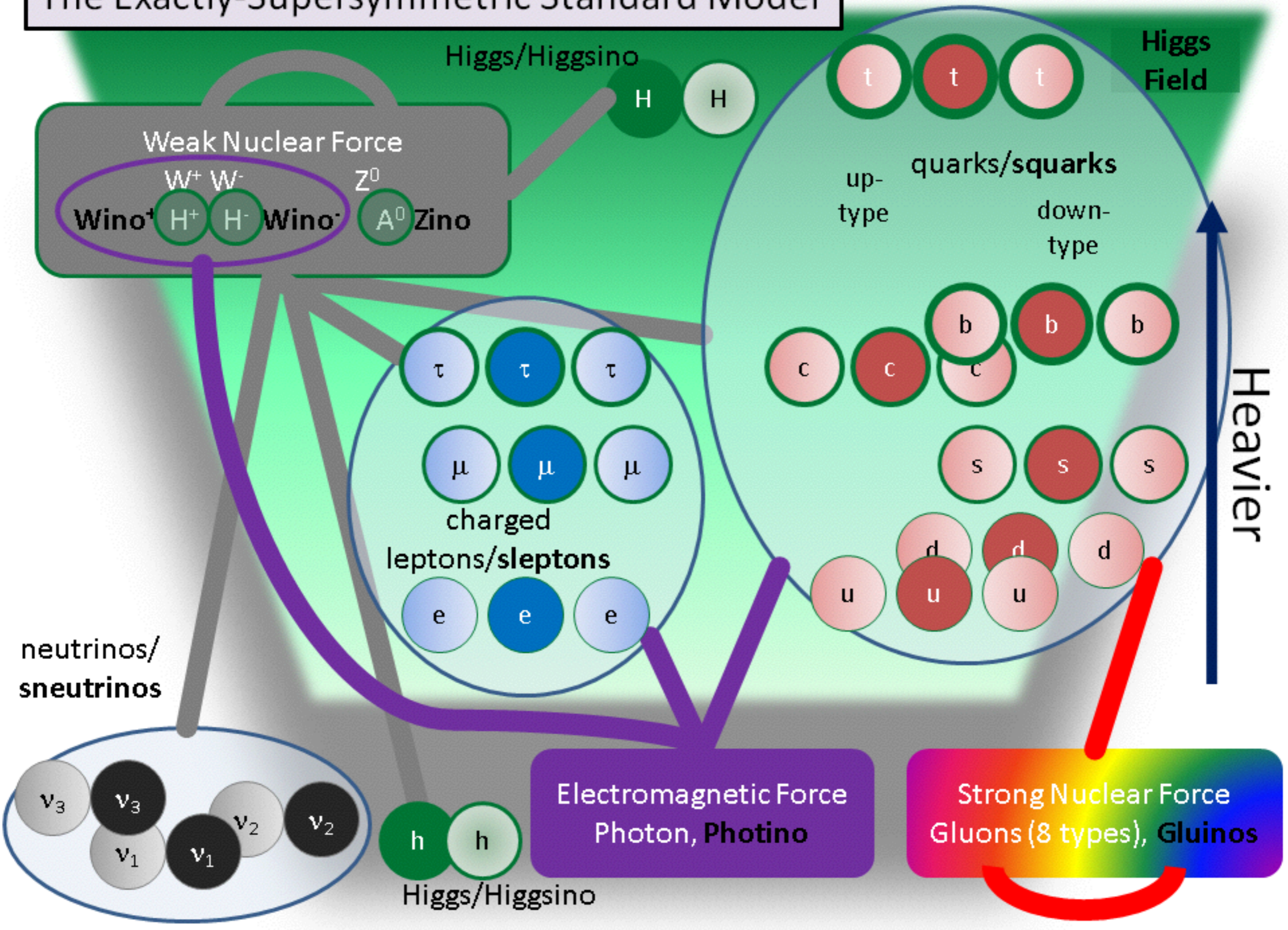
$H^\pm A/H/h$ production



$H^- t$ production



The Exactly-Supersymmetric Standard Model



The Minimal Realistic Version of the Supersymmetric Standard Model

Gluinos

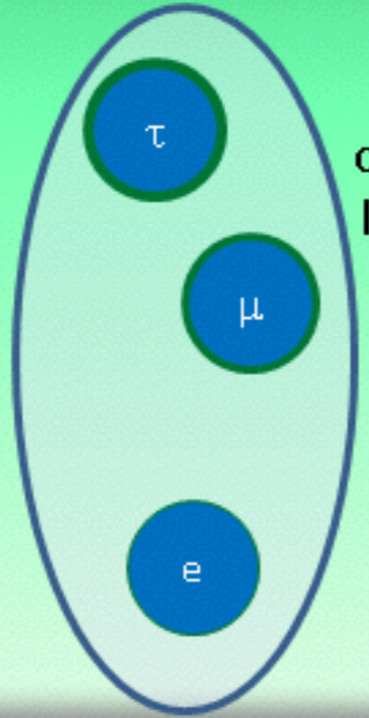
2 Charginos
4 Neutralinos

Weak Nuclear Force
 $W^+ W^- Z^0$

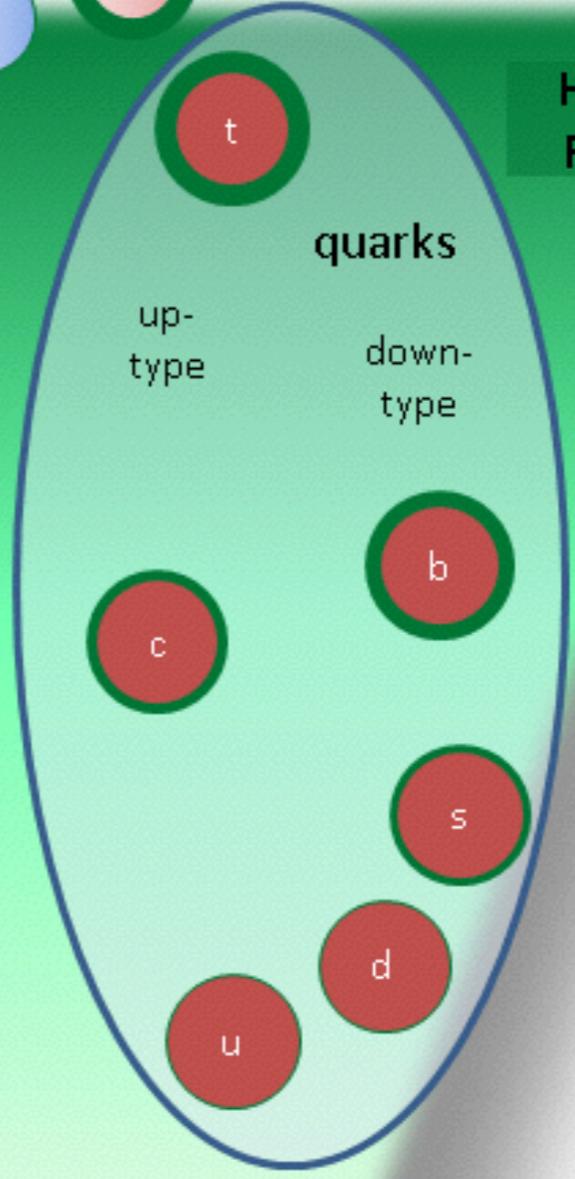
5 higgs particles

sleptons/
sneutrinos

Higgs Field



charged leptons



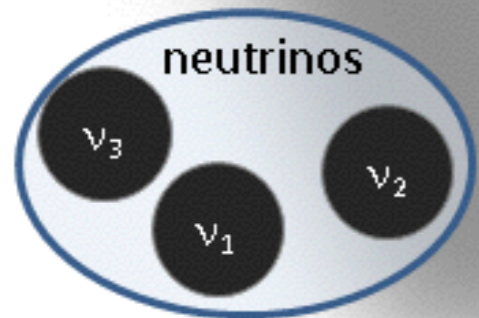
quarks

up-type

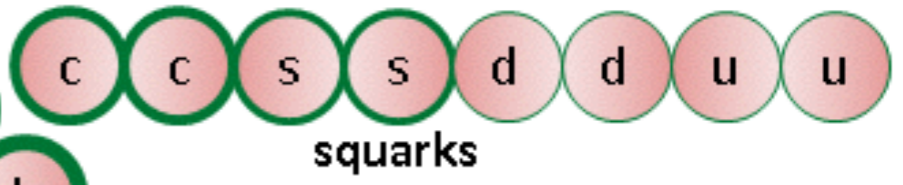
down-type

Strong Nuclear Force
Gluons (8 types)

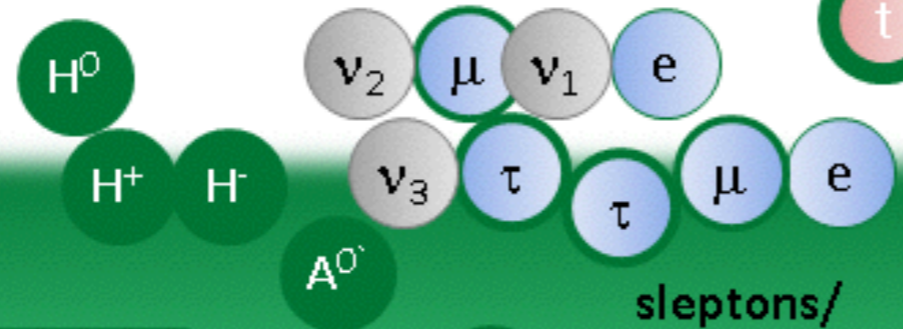
Electromagnetic Force
Photon



neutrinos



squarks



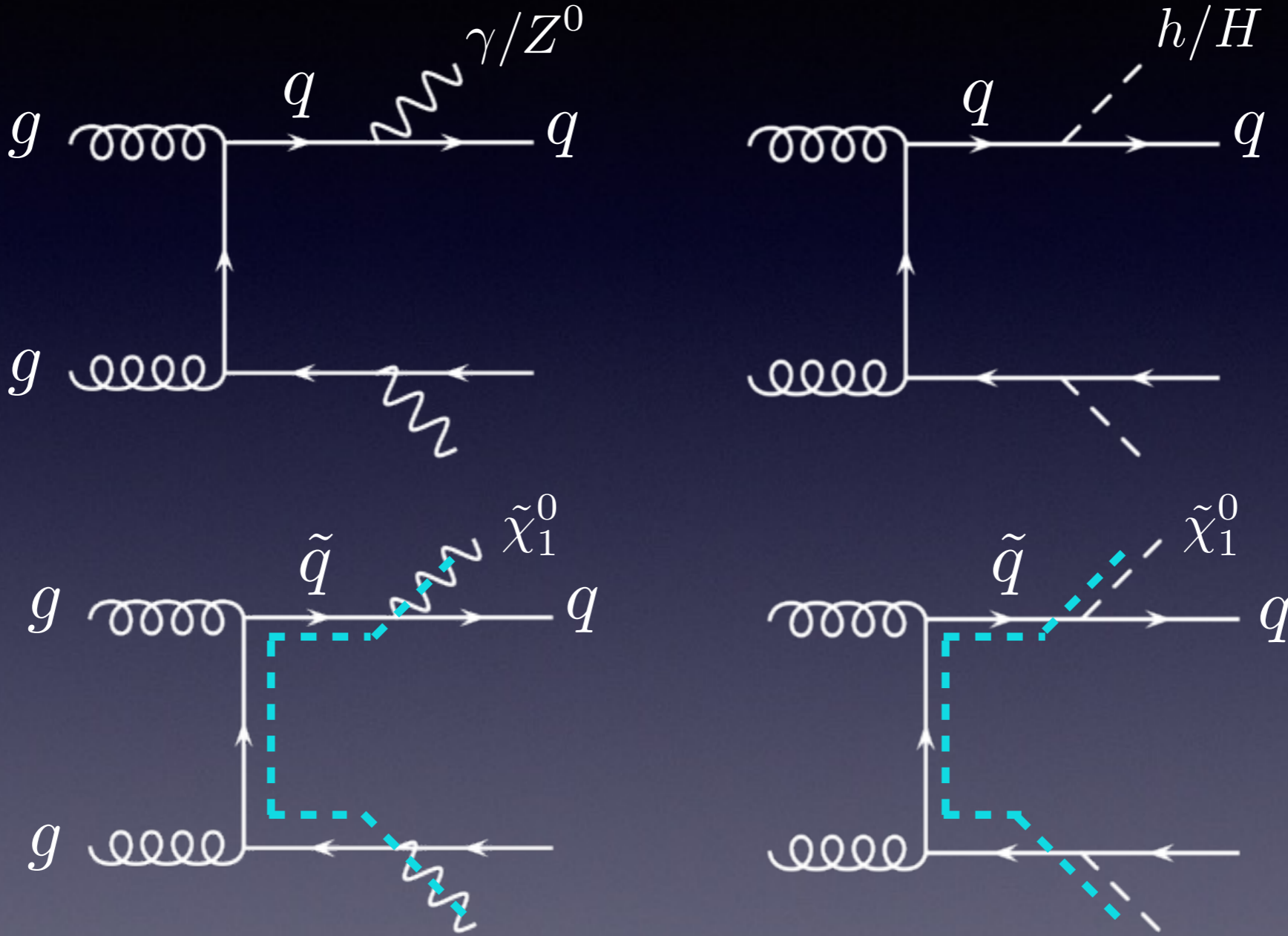
sleptons/
sneutrinos



Supersymmetry "Breaking"

Neutralino: Lightest SUSY Particle (LSP)

暗物质候选者

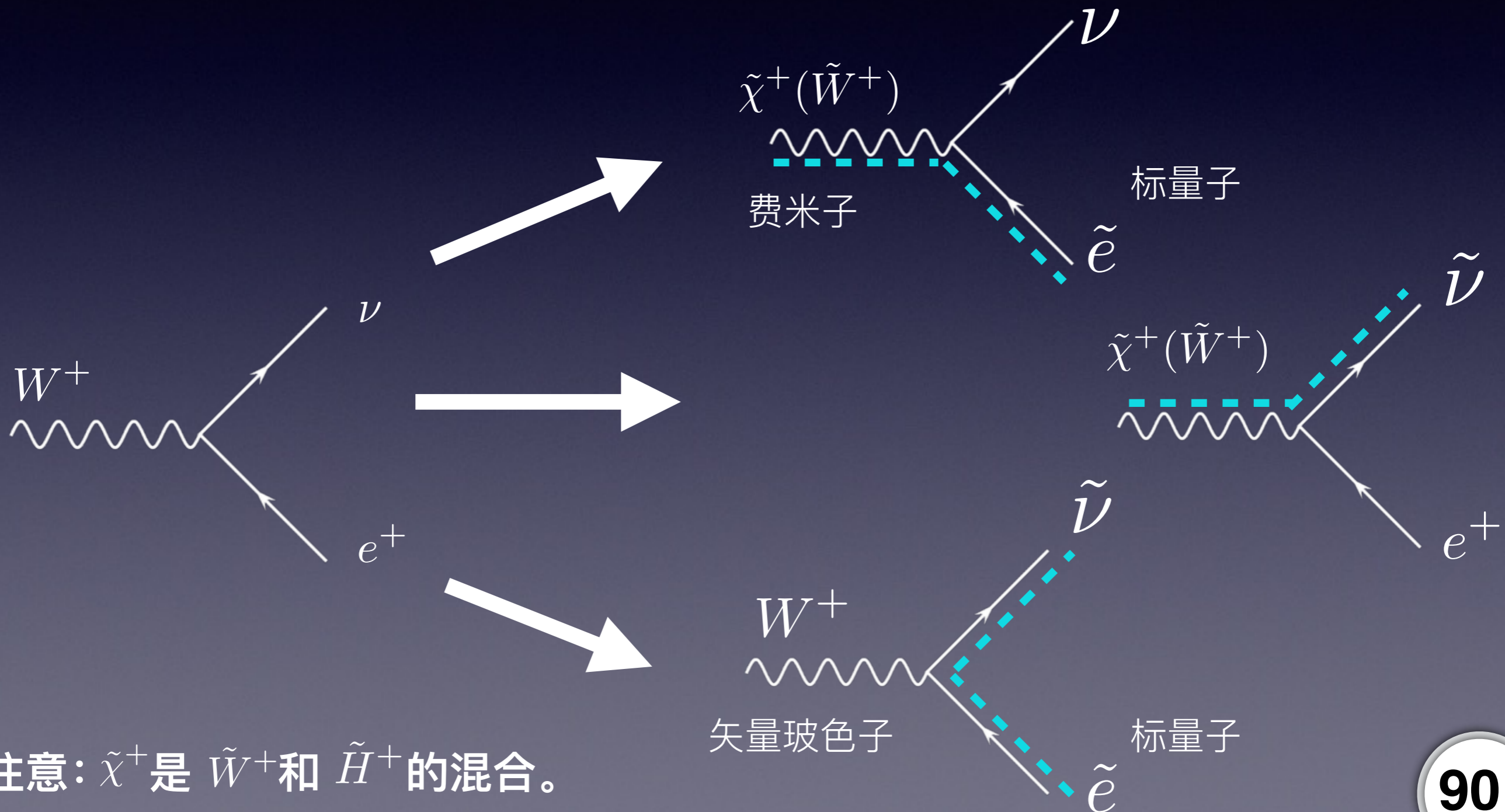


$$\left(\tilde{B}_1, \tilde{W}_3, \tilde{H}_u, \tilde{H}_d \right) \xrightarrow[\text{对角化}]{\text{质量矩阵}} \left(\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 \right)$$

如何理解R宇称守恒的MSSM费曼图

(R宇称的SUSY线)

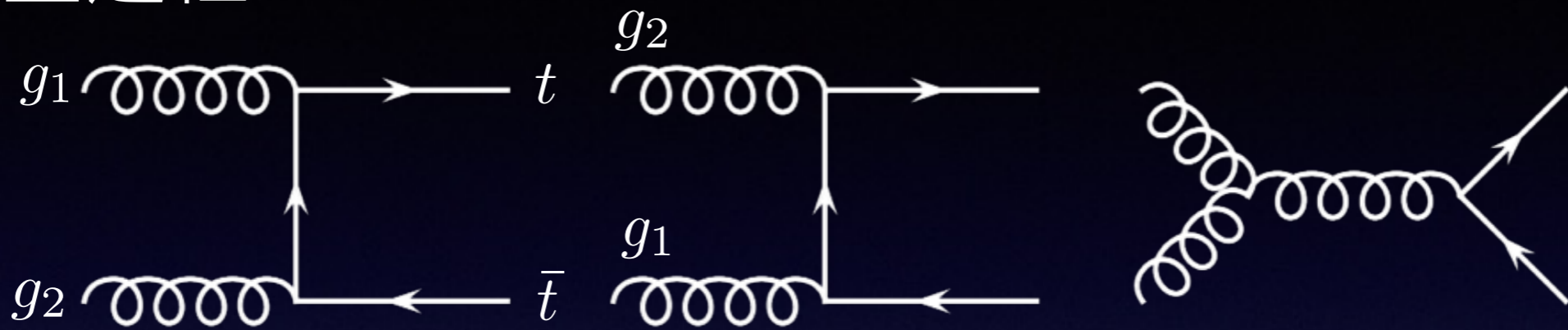
大部分的费曼图可以通过标准模型的图形得到



注意: $\tilde{\chi}^+$ 是 \tilde{W}^+ 和 \tilde{H}^+ 的混合。

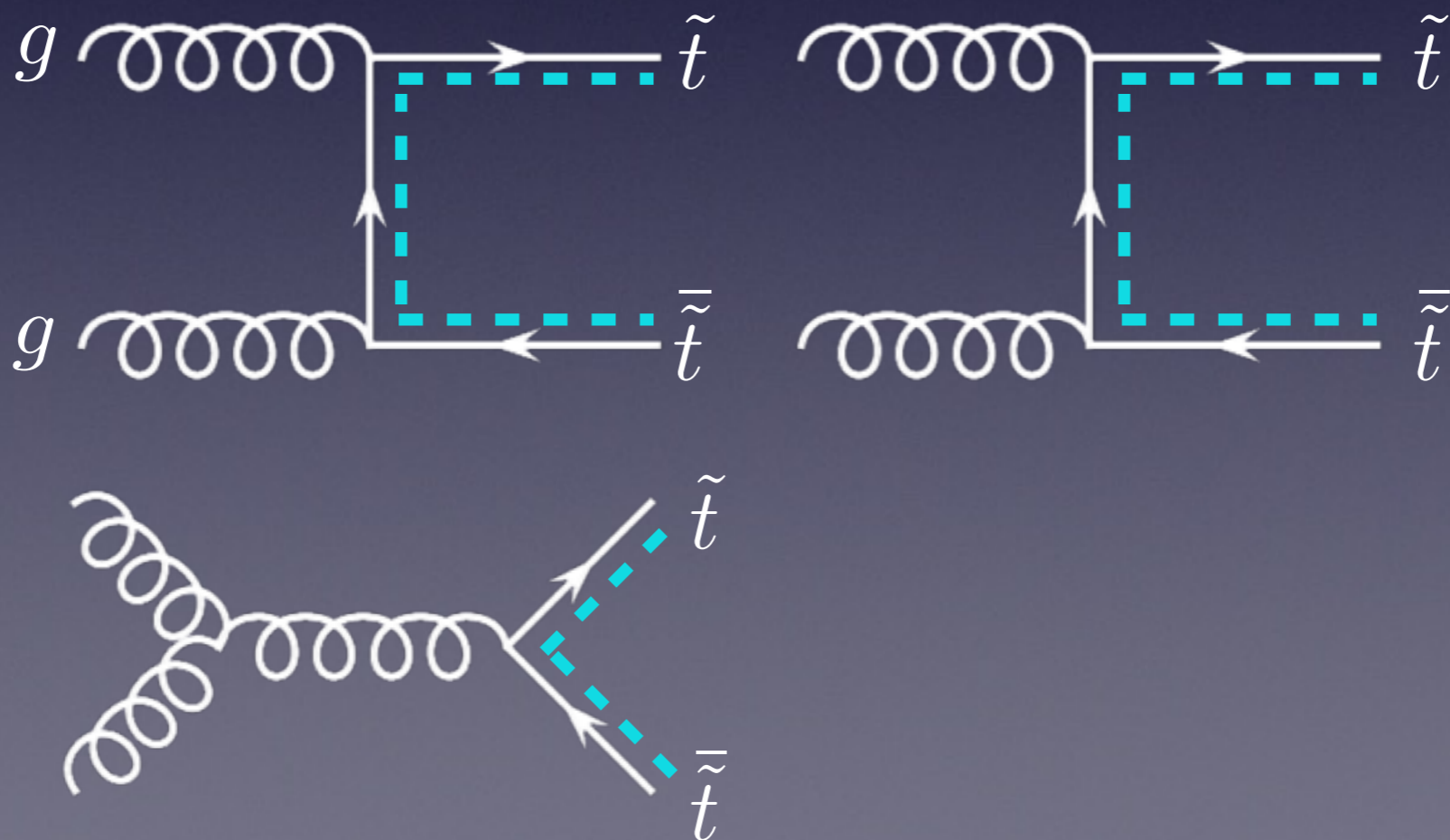
顶夸克对产生和其超对称伴子过程

标准模型过程 $gg \rightarrow t\bar{t}$



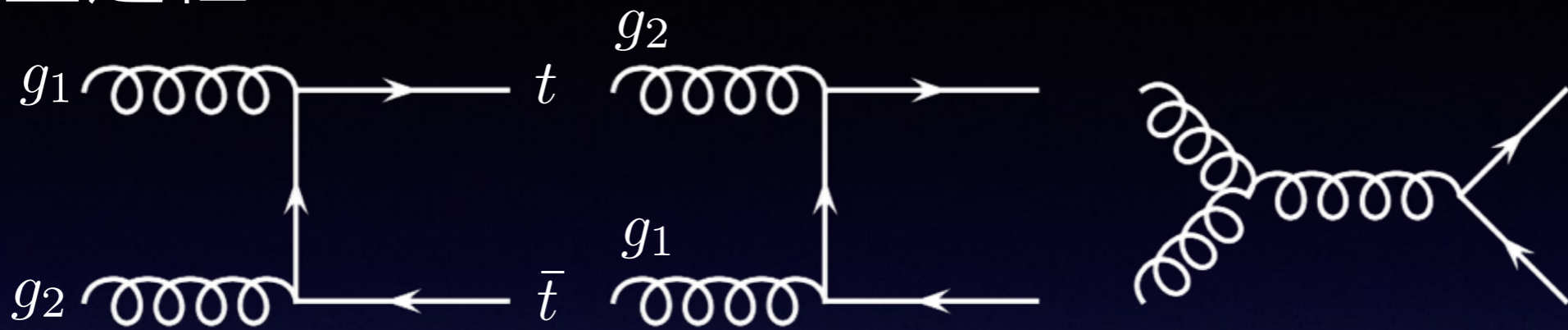
最小超对称模型过程 $gg \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$

(暂不考虑stop夸克的混合)



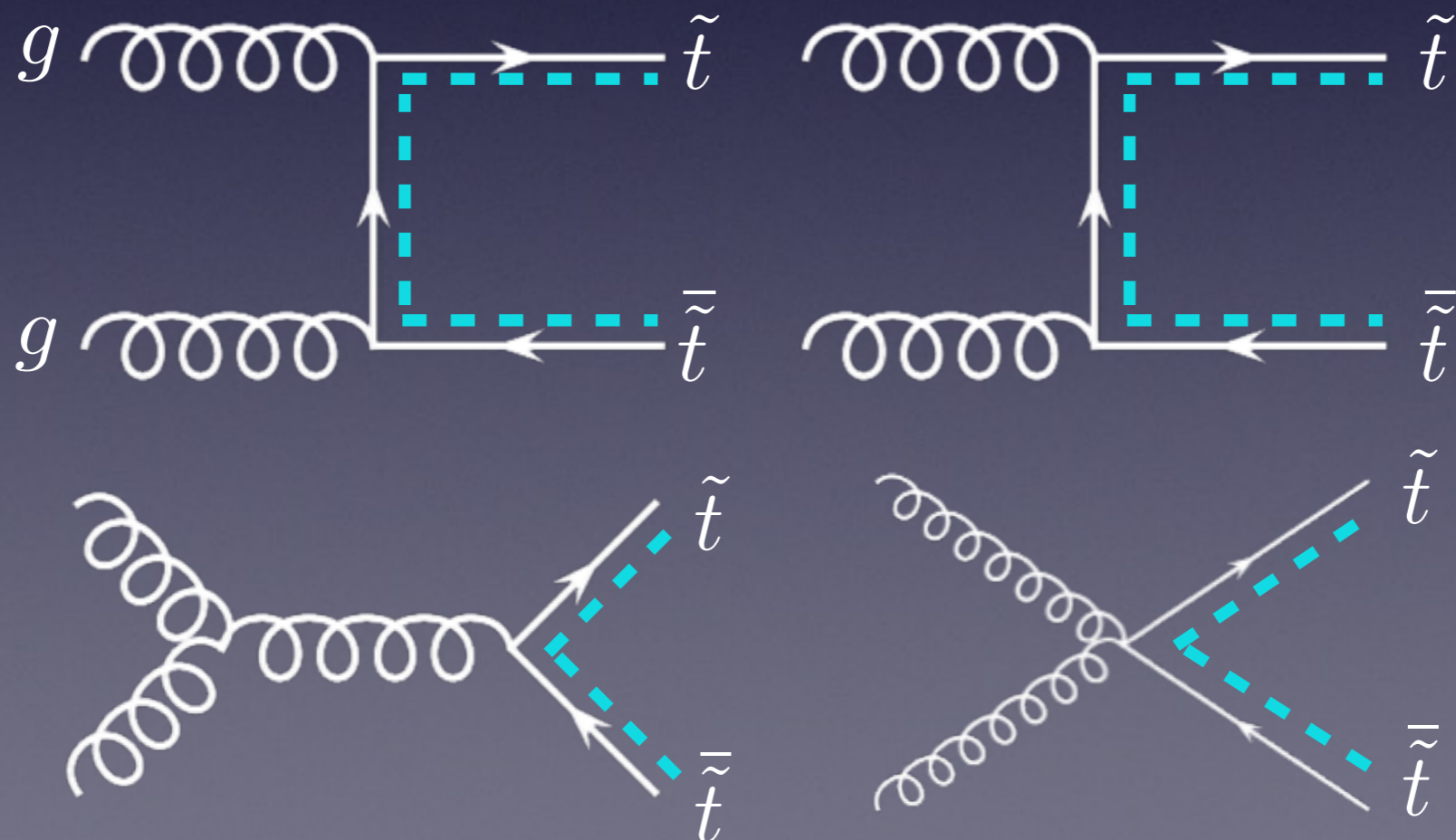
顶夸克对产生和其超对称伴子过程

标准模型过程 $gg \rightarrow t\bar{t}$



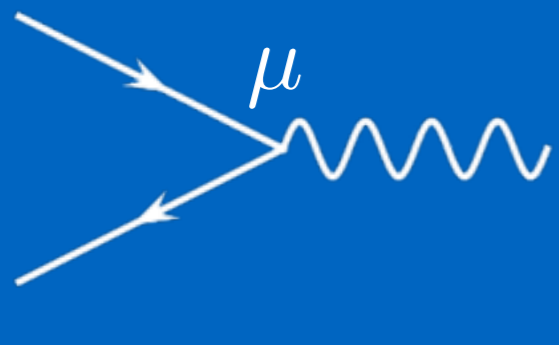
最小超对称模型过程 $gg \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$

(暂不考虑stop夸克的混合)



一般性的费曼顶点结构

忽略有关的
耦合常数和
李群因子




$$\gamma^\mu (a + b\gamma_5)$$

$$[a] = [b] = 0$$



$$a + b\gamma_5$$

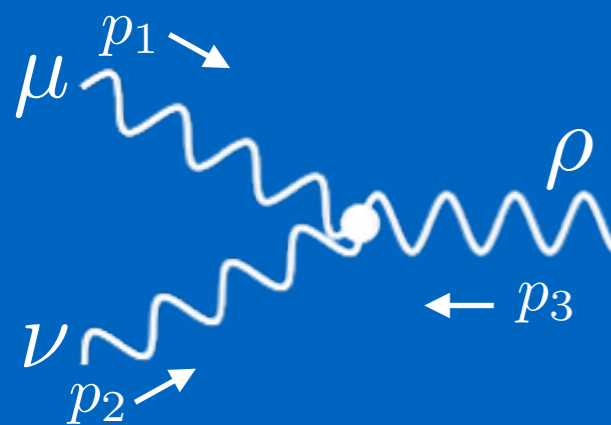


$$p_1^\mu - p_2^\mu$$



$$g^{\mu\nu} M$$

$$[M] = 1$$



$$g^{\mu\nu} (p_1 - p_2)^\rho$$


$$+ g^{\nu\rho} (p_2 - p_3)^\mu$$

$$+ g^{\rho\mu} (p_3 - p_1)^\nu$$



$$g^{\mu\rho} g^{\nu\sigma} - g^{\mu\sigma} g^{\nu\rho}$$

+依序循环



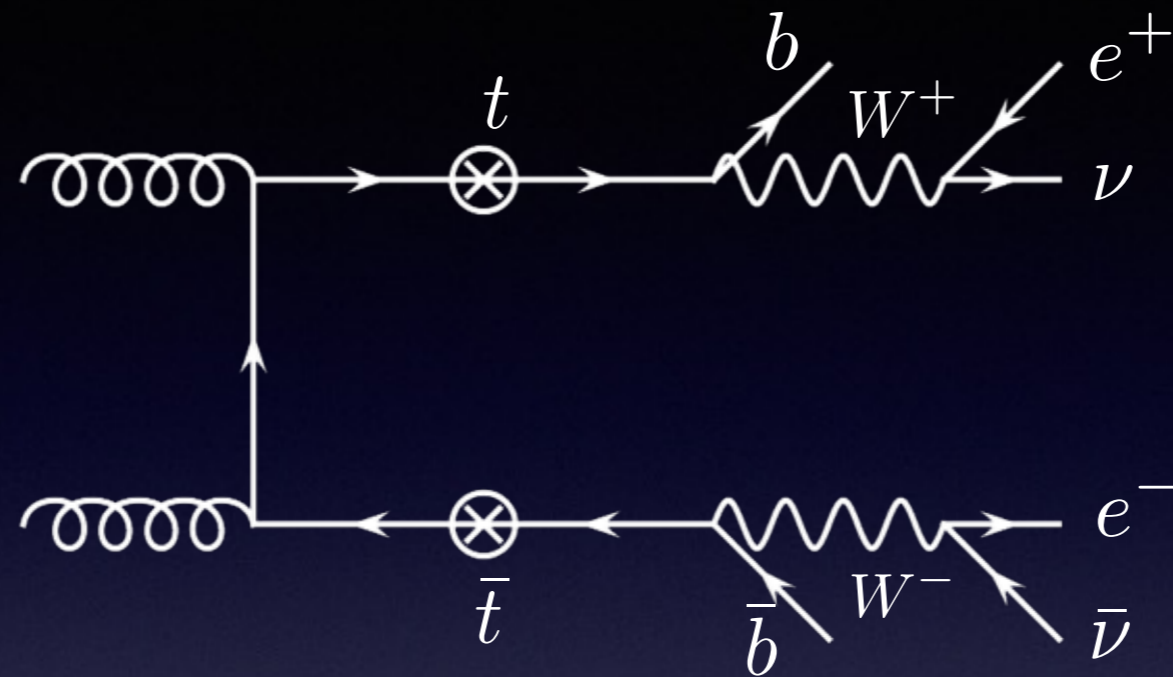
$$M$$



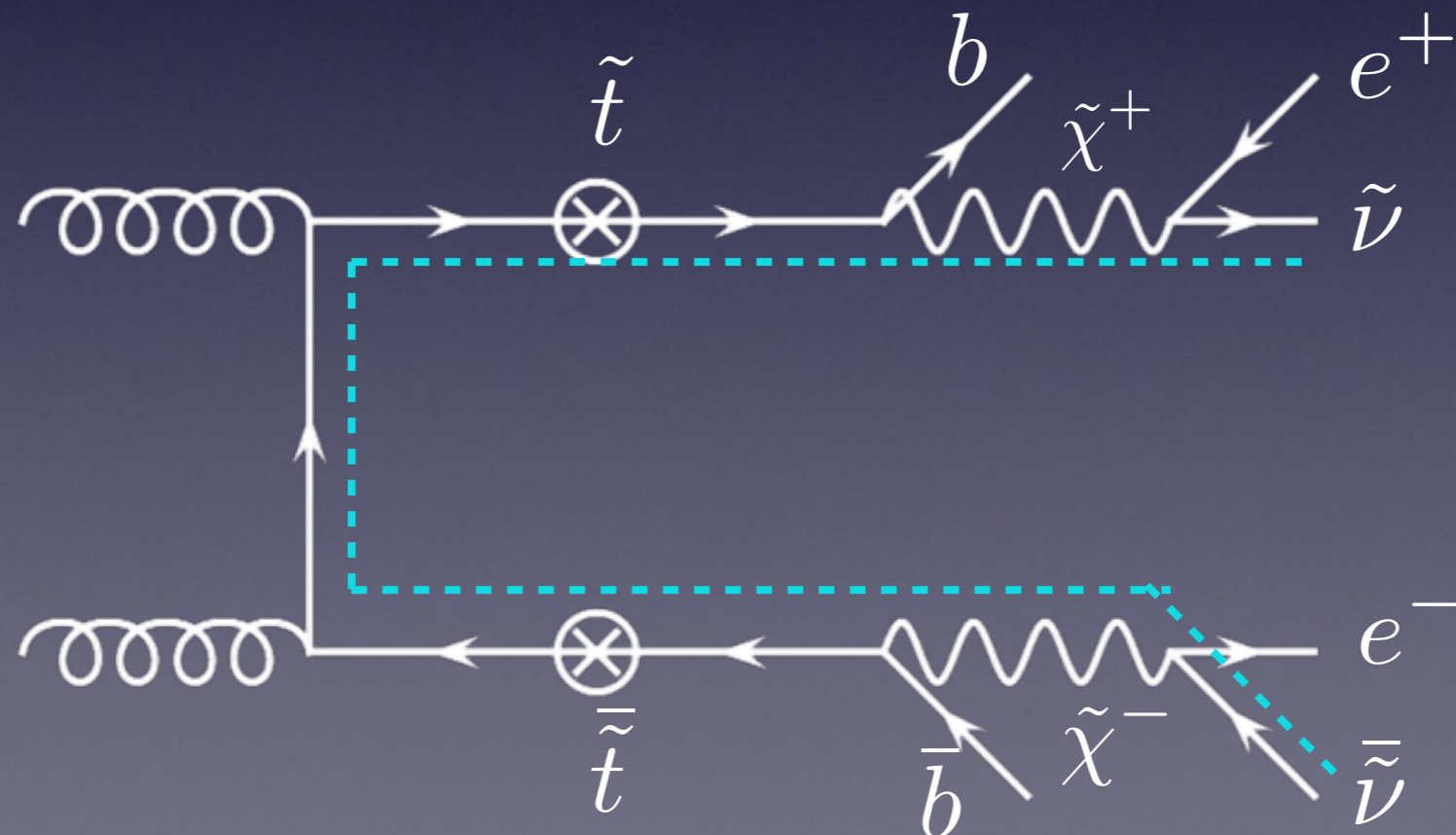
$$\lambda$$

$$[\lambda] = 0$$

Stop-夸克对的产生和衰变

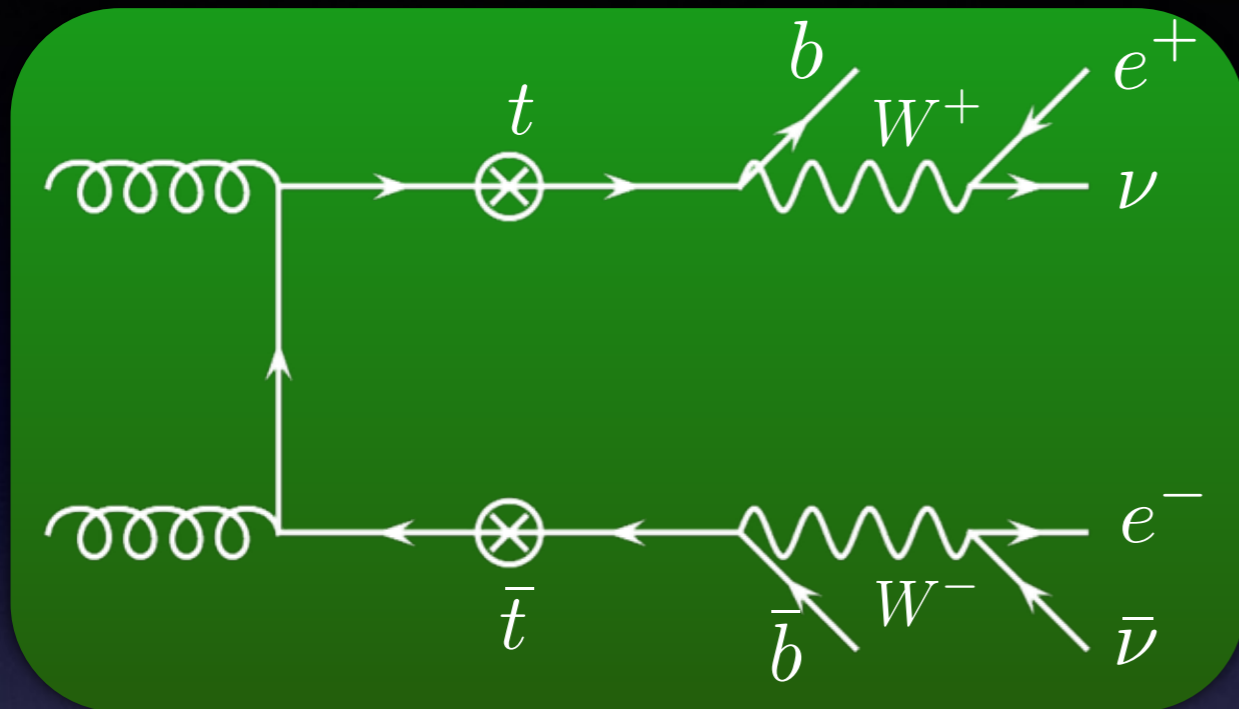


先不考虑
具体的理论要求和
实验数据限制。



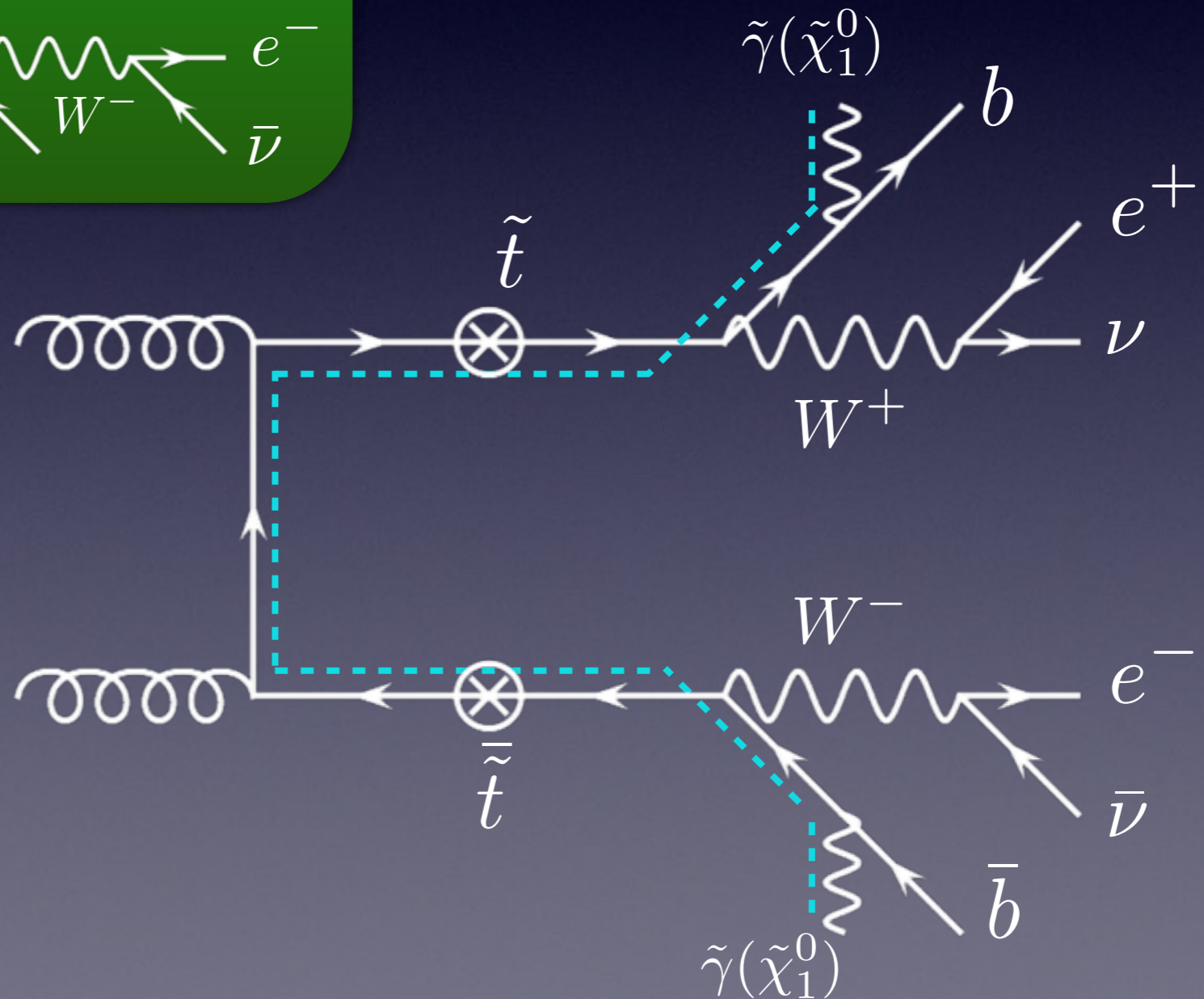
我们通常考虑
非对称性的
超对称粒子
衰变模式来
提高搜寻能力。

Stop-夸克对的产生和衰变

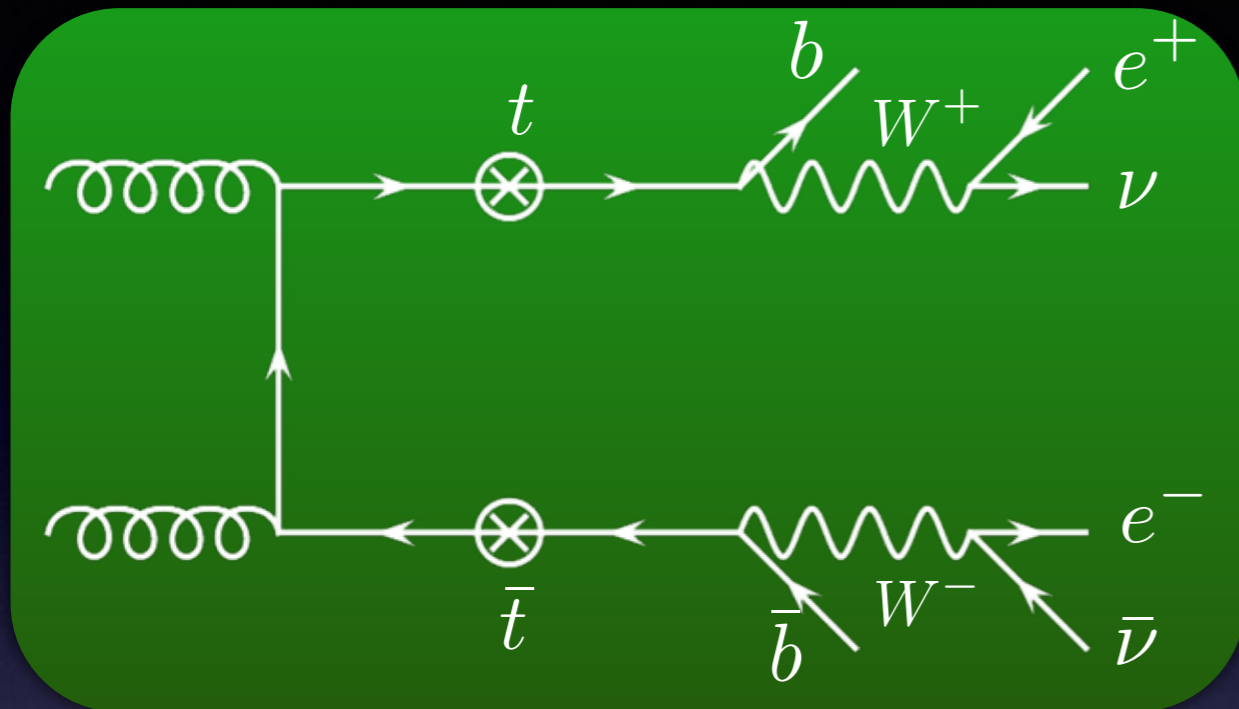


先不考虑
具体的理论要求和
实验数据限制。

我们通常考虑
非对称性的
超对称粒子
衰变模式来
提高搜寻能力。

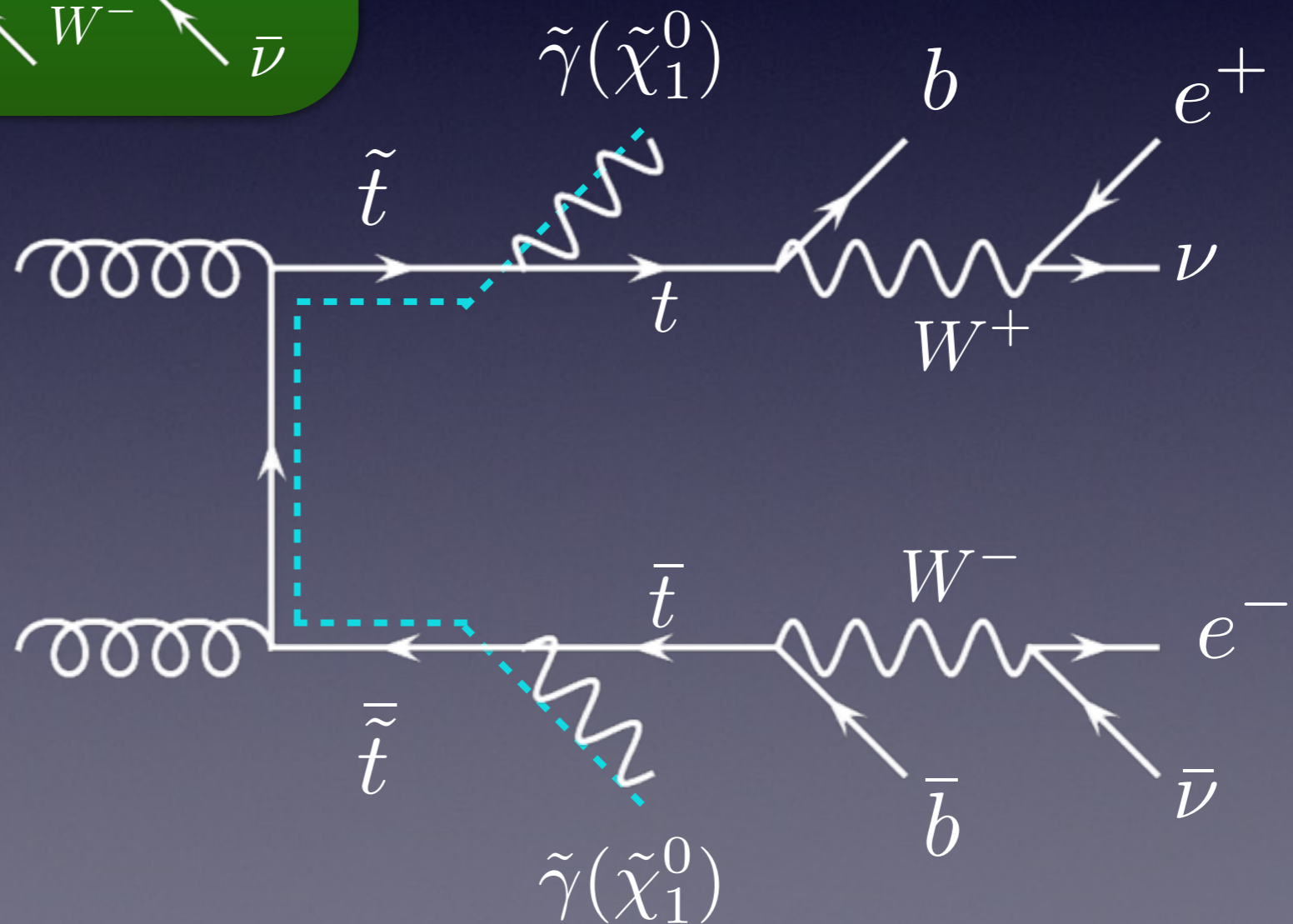


Stop-夸克对的产生和衰变



先不考虑
具体的理论要求和
实验数据限制。

我们通常考虑
非对称性的
超对称粒子
衰变模式来
提高搜寻能力。



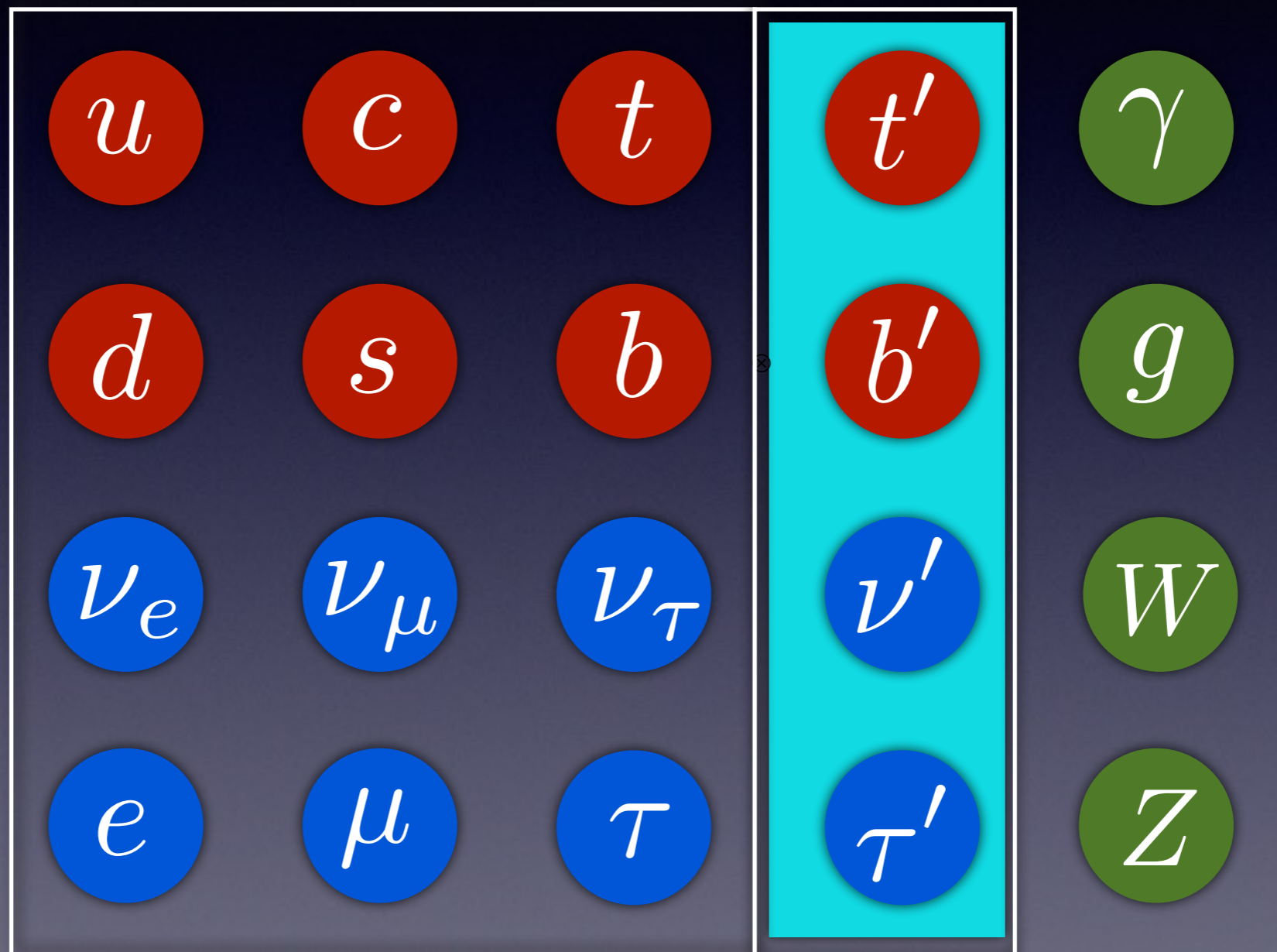
3. 新费米子

第4代费米子

如果自然界只有3代费米子，那我们需要知道为什么。

夸克

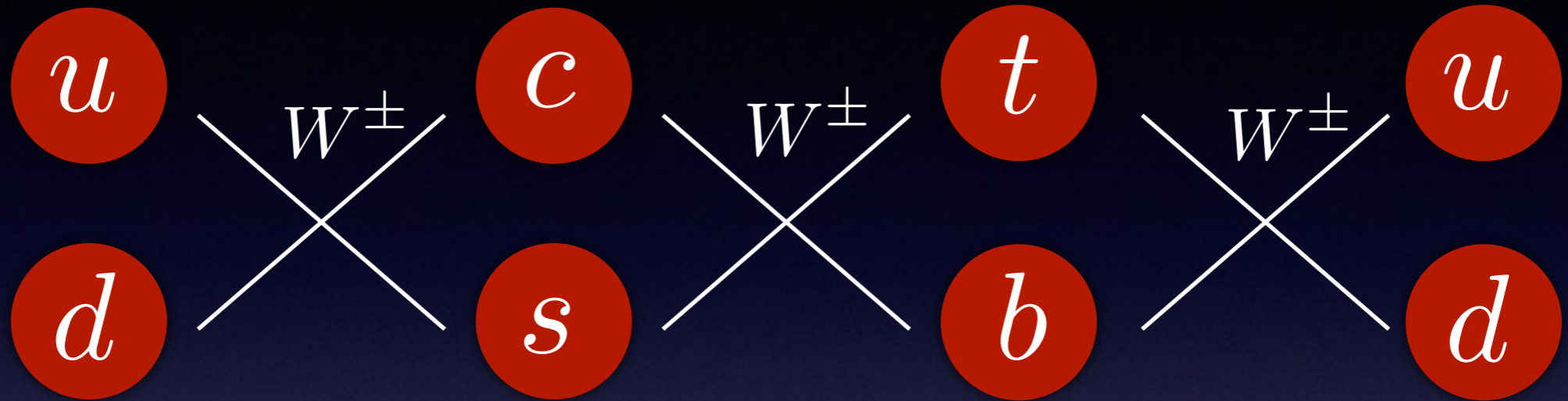
轻子



自旋1/2

自旋1/2 自旋1

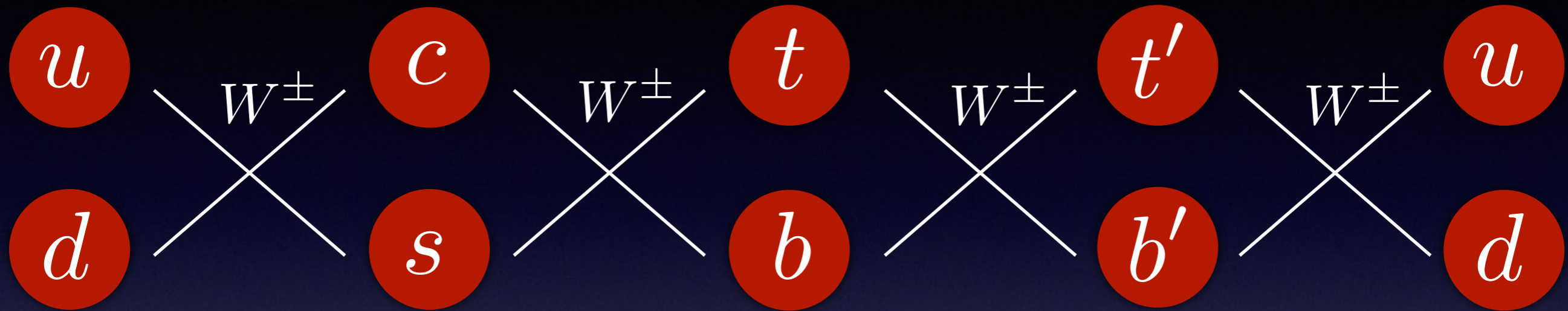
3代夸克的CKM混合矩阵



$$\begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_{\text{weak}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_{\text{mass}}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_{\text{weak}} \equiv \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_{\text{mass}} \quad V_{tb} = 0.99914 \pm 0.00005$$

4代夸克的CKM混合矩阵

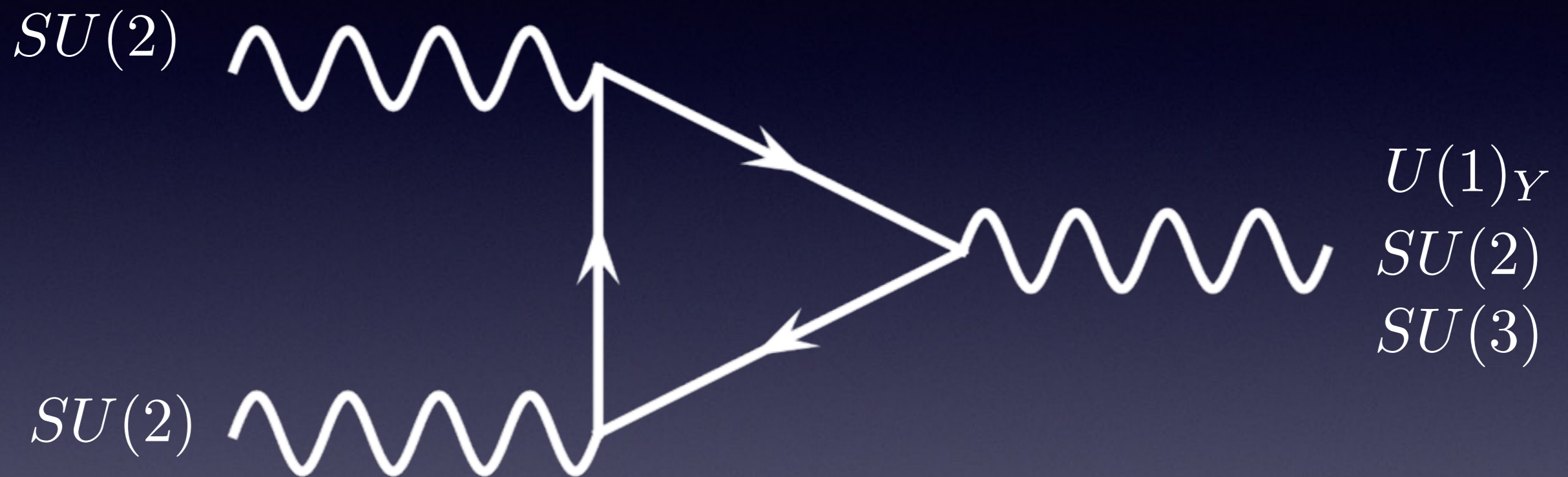


$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} & V_{ub'} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} & V_{cb'} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} & V_{tb'} \\ V_{t'd} & V_{t's} & V_{t'b} & V_{t'b'} \end{pmatrix}$$

么正性被放宽 $\longrightarrow V_{tb} < 1$

为何引入一整代费米子？

手征性费米子 —— 规范反常问题



标准模型中每一代费米子都消除规范反常

矢量型夸克

□ Chiral doublet

$$-\mathcal{L}_Q = Y_U^{ij} \bar{Q}_L \tilde{\Phi} U_R + Y_D^{ij} \bar{Q}_L \Phi D_R + h.c.$$

□ SU(2) doublet

$$-\mathcal{L}_Q = Y_t \bar{q}_{0L} \tilde{\Phi} t_{0R} + Y_T \overline{Q_{0L}} \tilde{\Phi} t_{0R} + Y_B \overline{Q_{0L}} \Phi b_{0R} + M \overline{Q_{0L}} Q_{0R} + H.c.$$

$$-\mathcal{L}_{Q'} = Y_t \bar{q}_{0L} \tilde{\Phi} t_{0R} + Y_T \overline{Q'_{0L}} \Phi t_{0R} + M \overline{Q'_{0L}} Q'_{0R} + H.c.$$

$$Q_{0L} = \begin{pmatrix} T_{0L} \\ B_{0L} \end{pmatrix}, \quad Q_{0R} = \begin{pmatrix} T_{0R} \\ B_{0R} \end{pmatrix}, \quad Q'_{0L} = \begin{pmatrix} X_{0L} \\ T_{0L} \end{pmatrix}, \quad Q'_{0R} = \begin{pmatrix} X_{0R} \\ T_{0R} \end{pmatrix}$$

□ SU(2) triplet

Exotic Q=5/3 fermion

$$-\mathcal{L}_\Sigma = Y_t \bar{q}_{0L} \tilde{\Phi} t_{0R} + Y_T \bar{q}_{0L} \tau^a \tilde{\Phi} \Sigma_{0R} + M \overline{\Sigma_{0L}} \Sigma_{0R} + H.c.$$

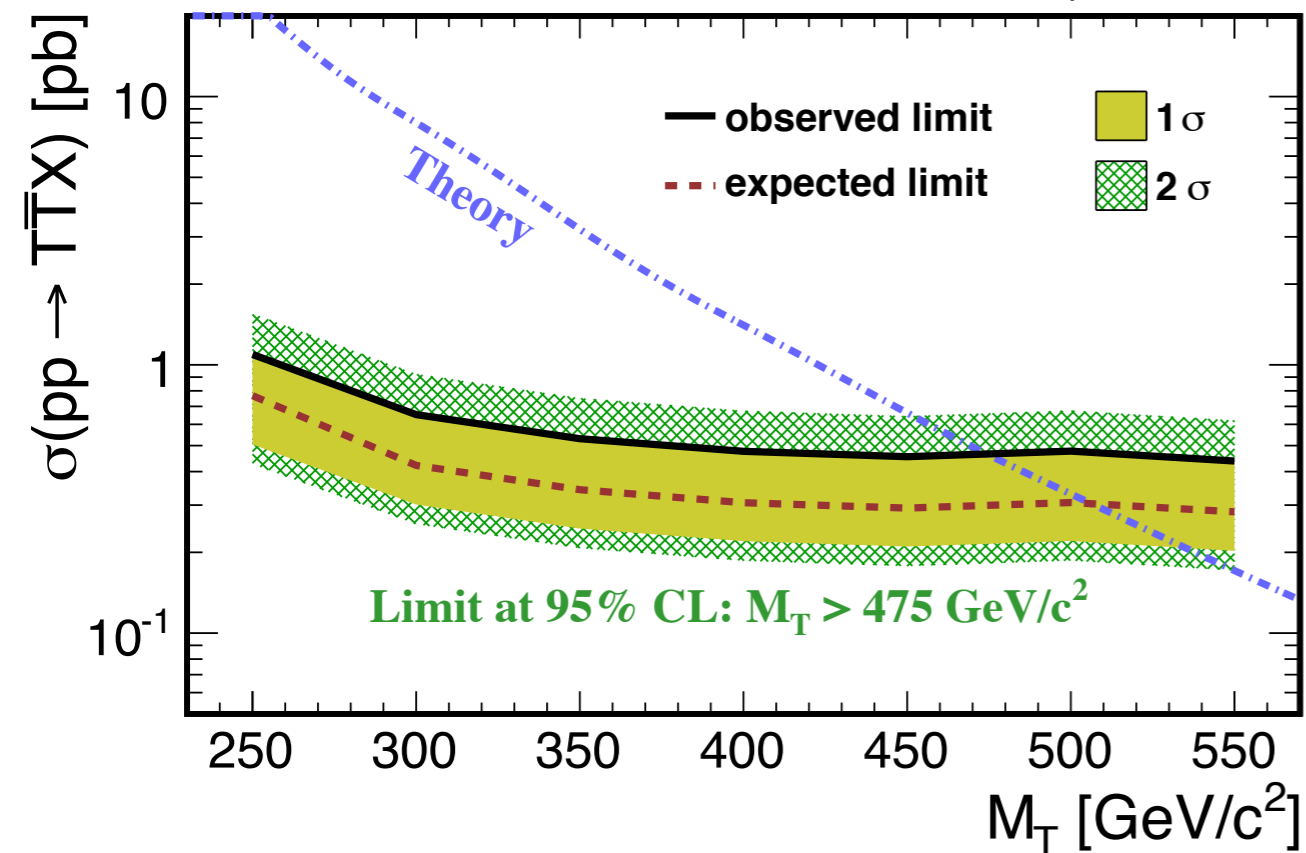
$$-\mathcal{L}_{\Sigma'} = Y_t \bar{q}_{0L} \tilde{\Phi} t_{0R} + Y_T \bar{q}_{0L} \tau^a \Phi \Sigma'_{0R} + M \overline{\Sigma'_{0L}} \Sigma'_{0R} + H.c.$$

$$\Sigma_{0L} = \begin{pmatrix} X_{0L} \\ T_{0L} \\ B_{0L} \end{pmatrix}, \quad \Sigma_{0R} = \begin{pmatrix} X_{0R} \\ T_{0R} \\ B_{0R} \end{pmatrix}, \quad \Sigma'_{0L} = \begin{pmatrix} T_{0L} \\ B_{0L} \\ X_{0L} \end{pmatrix}, \quad \Sigma'_{0R} = \begin{pmatrix} T_{0R} \\ B_{0R} \\ X_{0R} \end{pmatrix}$$

实验结果

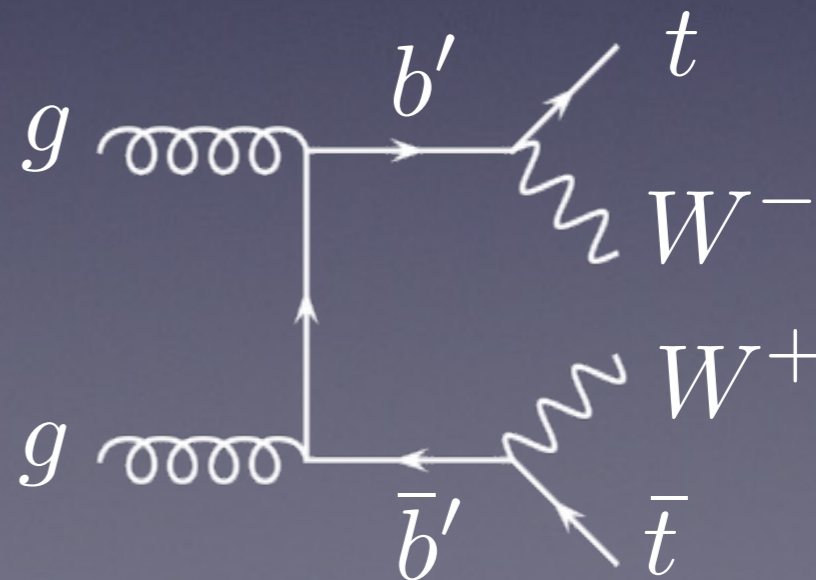
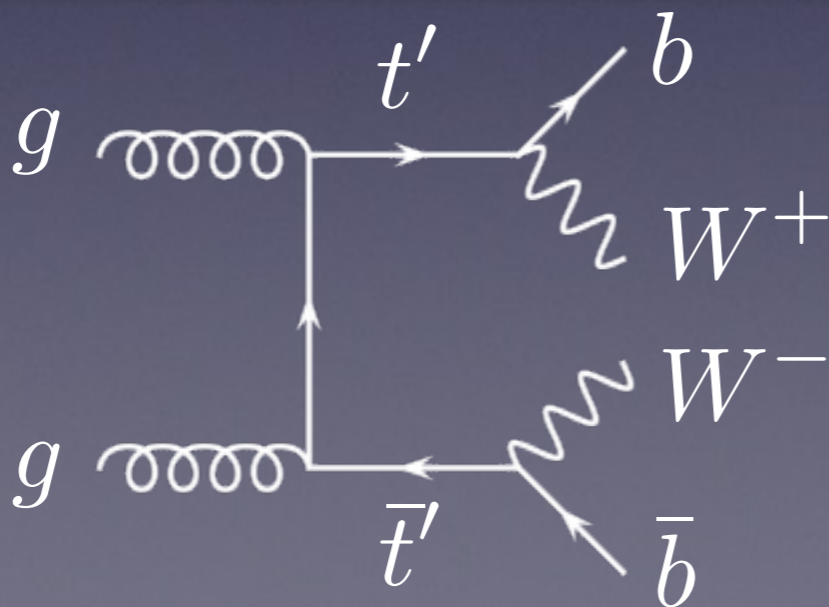
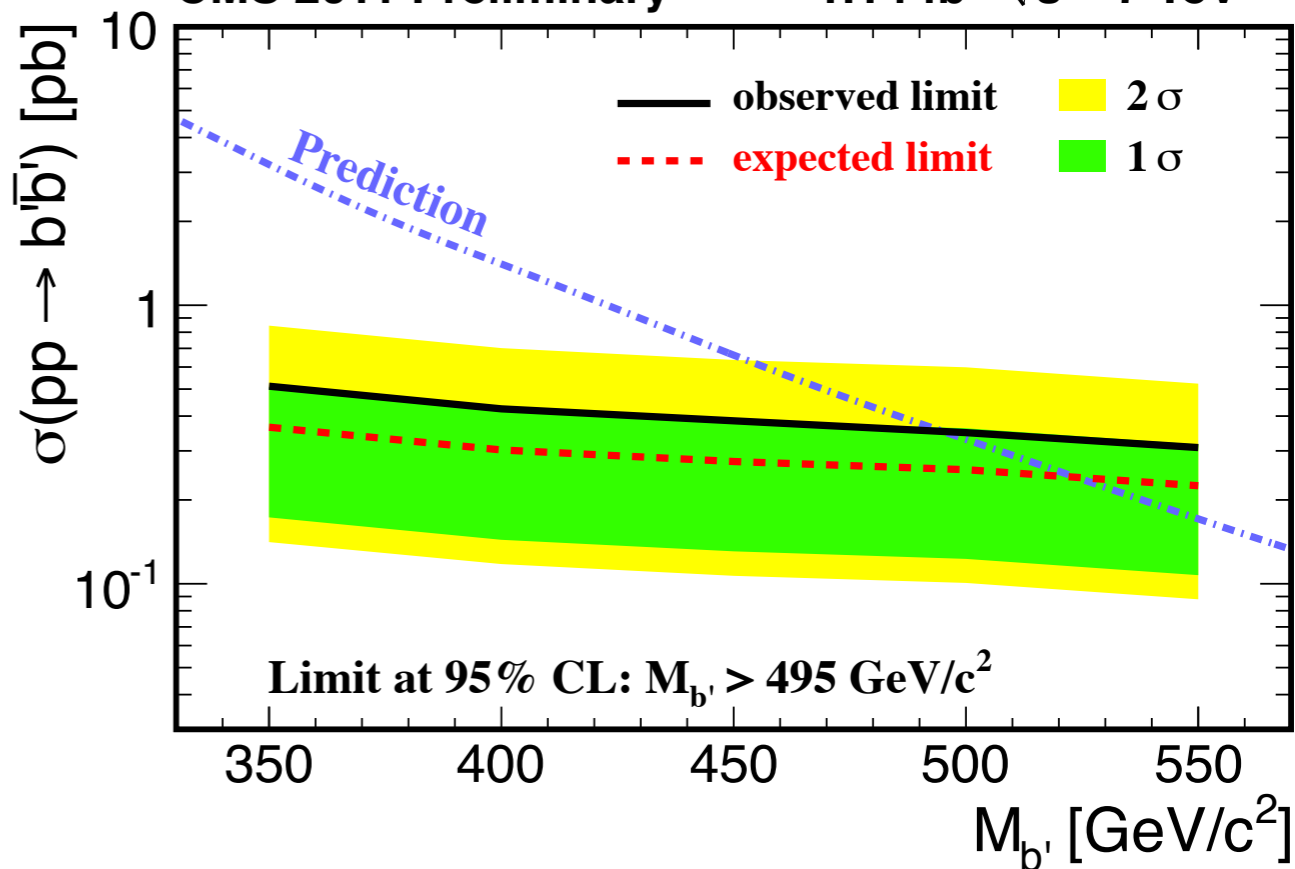
$$t'\bar{t}' \rightarrow WbW\bar{b} \rightarrow \ell\nu b q \bar{q}\bar{b}$$

CMS 1.14 fb⁻¹ $\sqrt{s} = 7$ TeV



$$b'\bar{b}' \rightarrow tW^- \bar{t}W^+$$

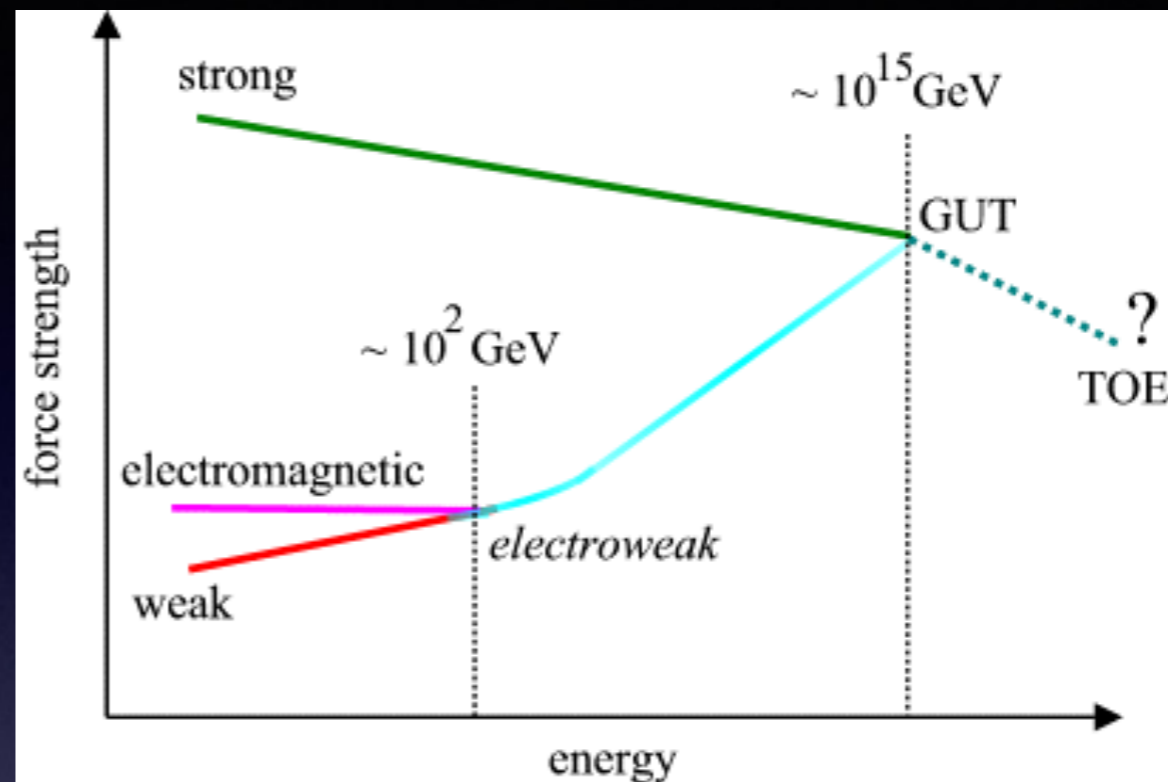
CMS 2011 Preliminary 1.14 fb⁻¹ $\sqrt{s} = 7$ TeV



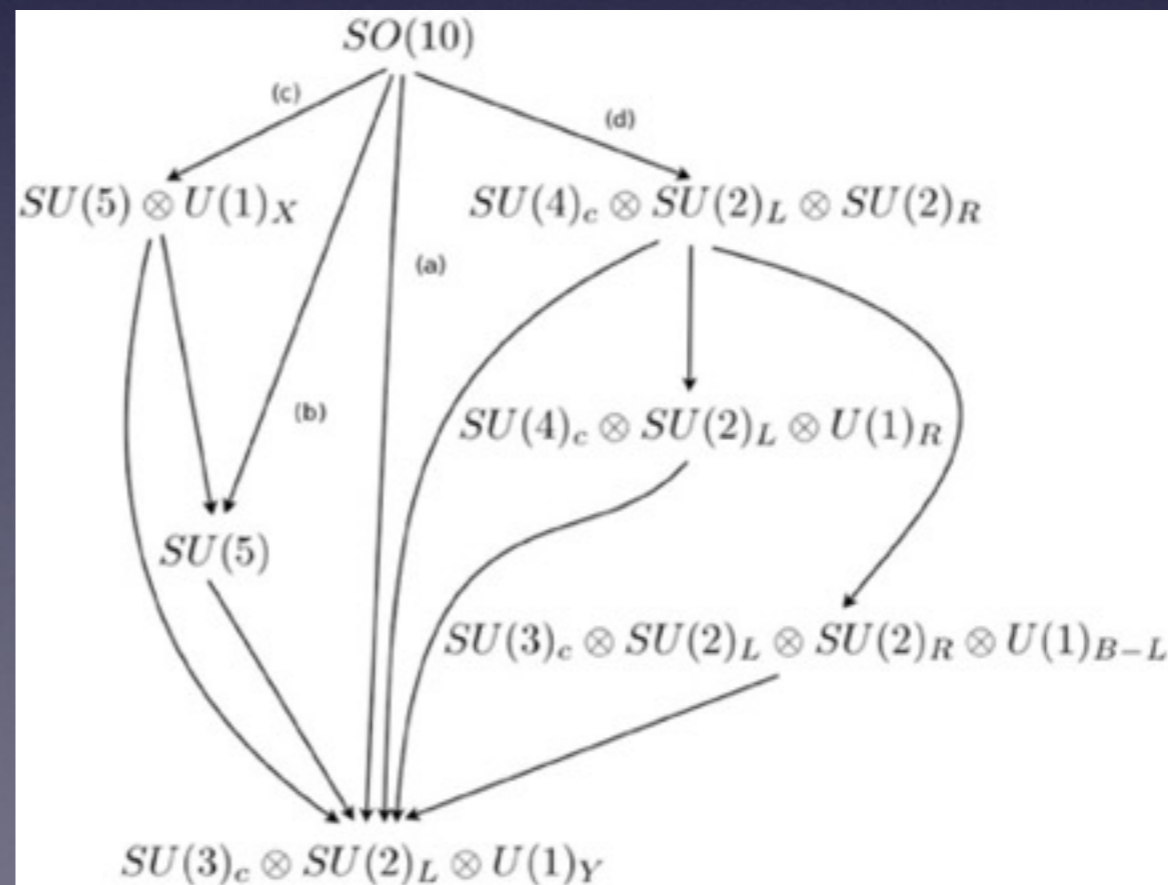
4. 新规范玻色子

大统一理论的破缺

将已知的强、弱、电磁三种相互作用统一起来是粒子物理学家的梦想。



新规范玻色子（额外的力）是大统一模型的必要成分，是对称性破缺的产物。



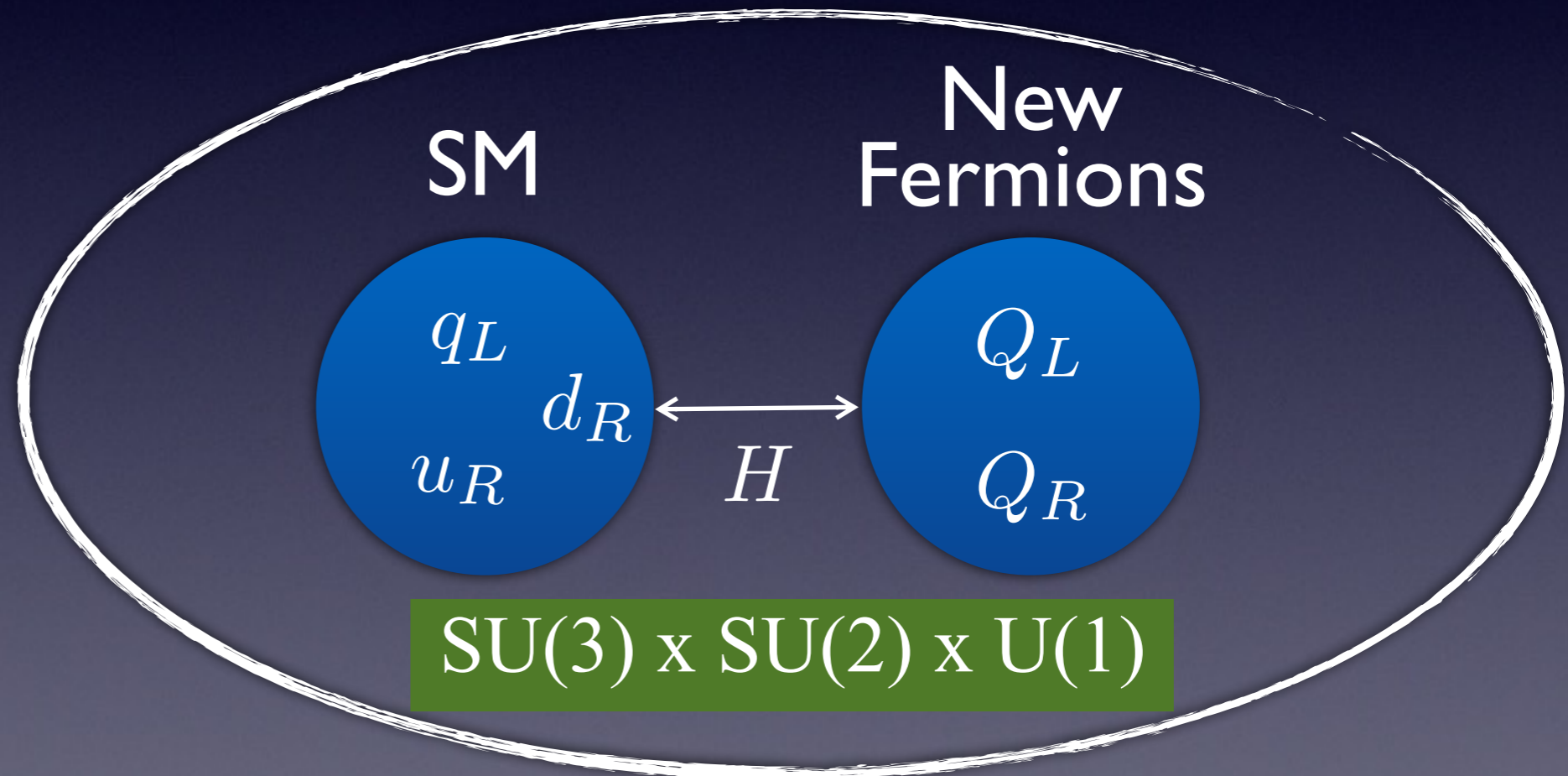
新规范玻色子：额外的“力”

G(221) Model

$$SU(3)_C \times SU(2)_1 \times SU(2)_2 \times U(1)_X$$

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

U(1) Extension
Z-prime



G(331) Model

$$SU(3)_C \times SU(3)_W \times U(1)_X$$

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_1 \otimes SU(2)_2 \otimes U(1)_X$$

Model	$SU(2)_1$	$SU(2)_2$	$U(1)_X$
Left-right (LR)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_R \\ d_R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_R \\ e_R \end{pmatrix}$	$\frac{1}{6}$ for quarks, $-\frac{1}{2}$ for leptons.
Lepto-phobic (LP)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_R \\ d_R \end{pmatrix}$	$\frac{1}{6}$ for quarks, Y_{SM} for leptons.
Hadro-phobic (HP)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_R \\ e_R \end{pmatrix}$	Y_{SM} for quarks, $-\frac{1}{2}$ for leptons.
Fermio-phobic (FP)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$		Y_{SM} for all fermions.
Un-unified (UU)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	Y_{SM} for all fermions.
Non-universal (NU)	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}_{1^{\text{st}}, 2^{\text{nd}}}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}_{1^{\text{st}}, 2^{\text{nd}}}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}_{3^{\text{rd}}}, \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}_{3^{\text{rd}}}$	Y_{SM} for all fermions.

$$SU(3)_C \otimes SU(3)_W \otimes U(1)_X$$

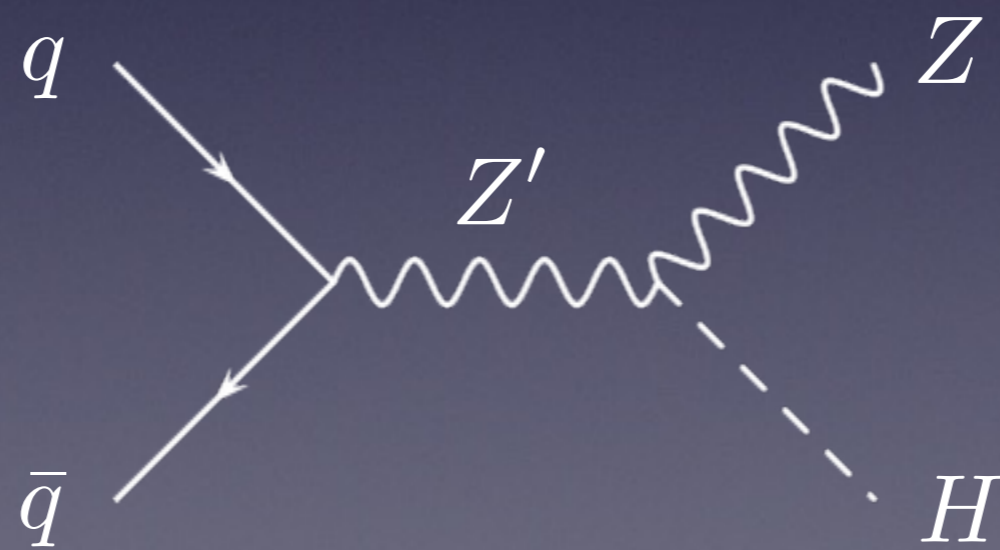
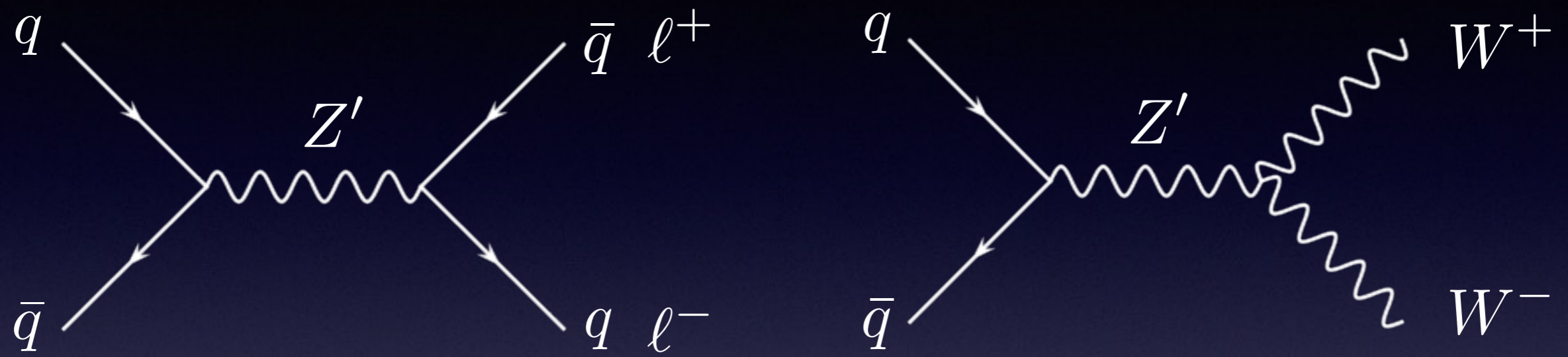
$$SU(3) \times U(1)_X \xrightarrow{H_1} SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{H_2} U(1)_{em}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ D \end{pmatrix}_3 \quad \begin{pmatrix} c \\ s \\ S \end{pmatrix}_3 \quad \begin{pmatrix} b \\ -t \\ T \end{pmatrix}_{\bar{3}}$$

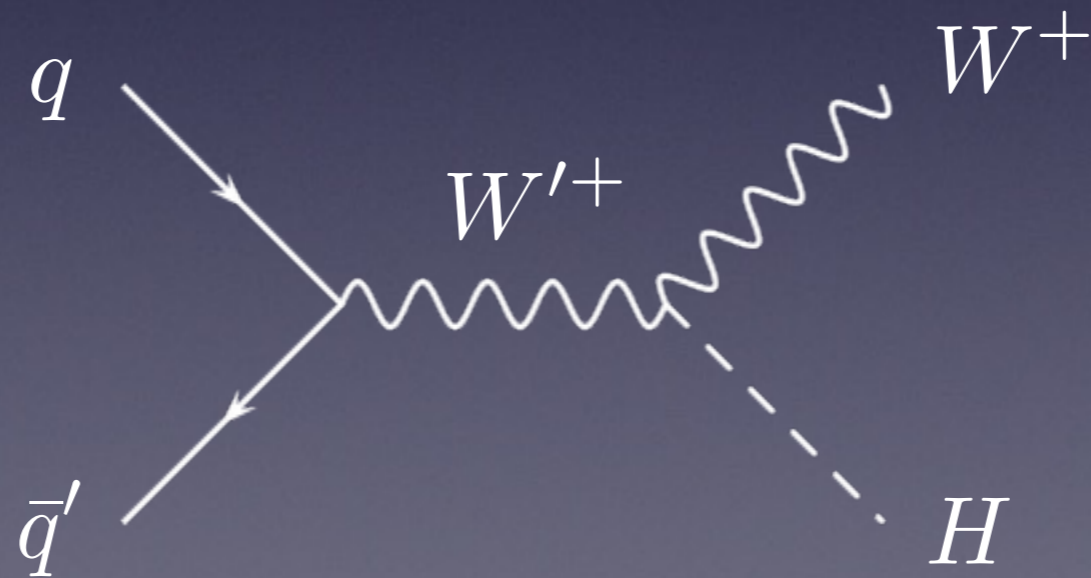
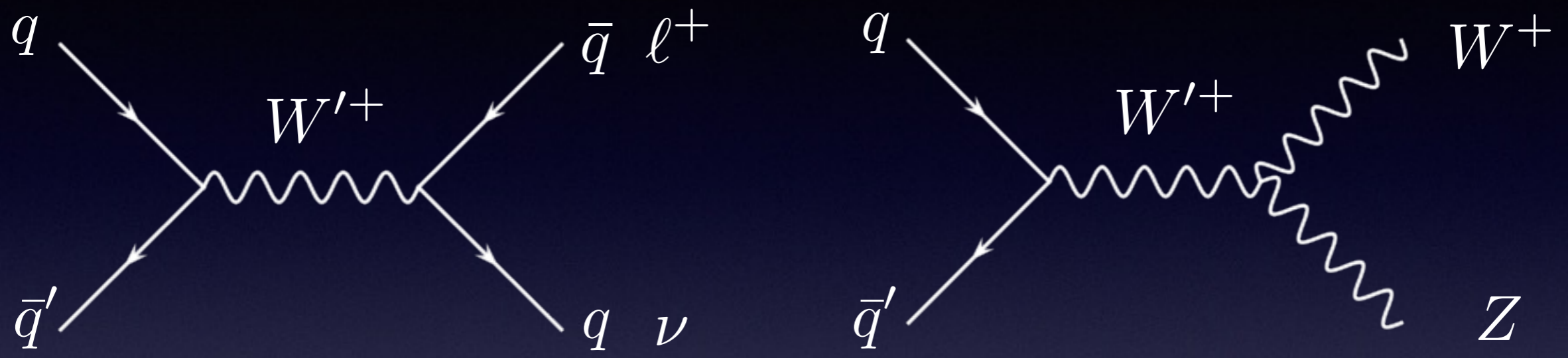
$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_\rho \\ 0 \end{pmatrix} \quad \langle \eta \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v_\eta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \langle \chi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ v_\chi \end{pmatrix}$$

规范反常相消要求有三代费米子，
第1代+第2代的反常之和抵消第3代反常

Z-prime产生和衰变



W-prime产生和衰变



新胶子

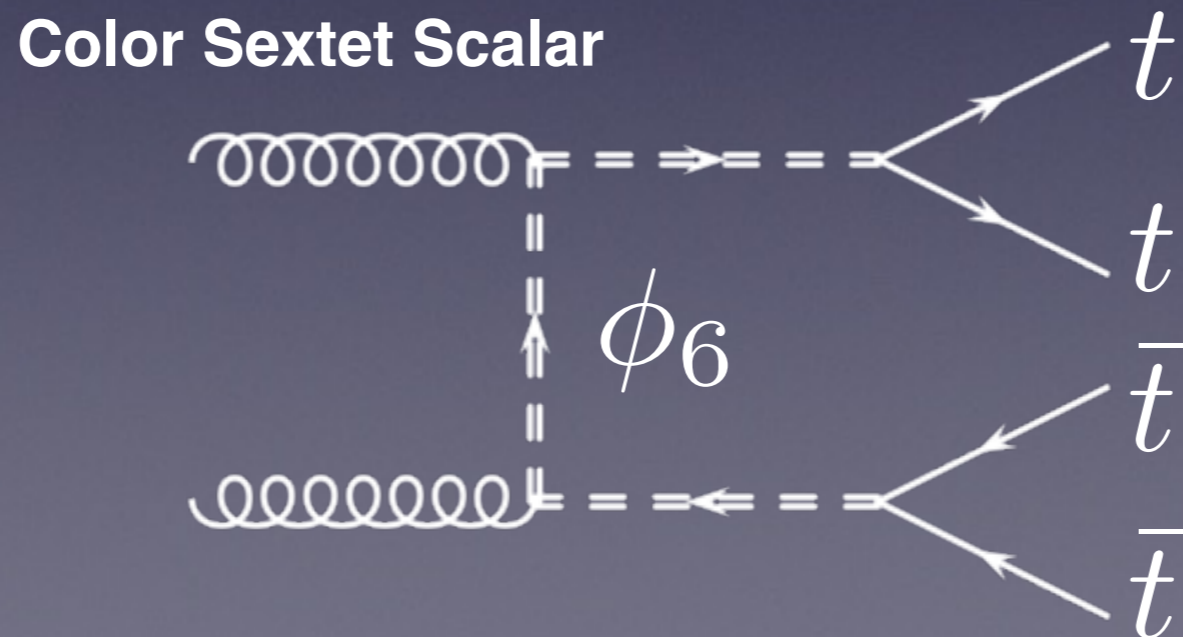
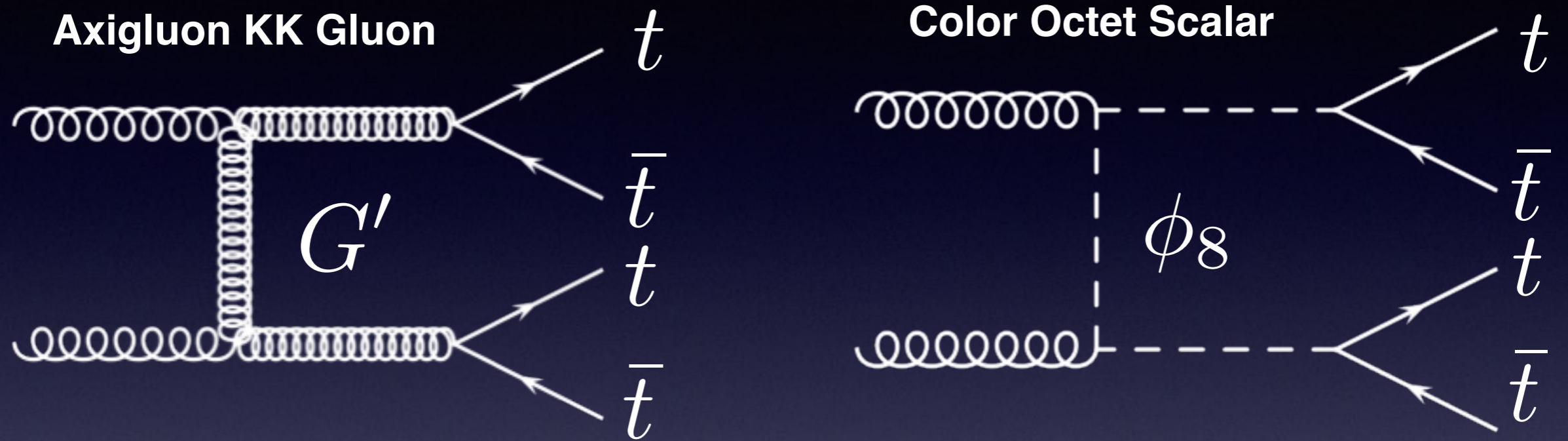
$$SU(3)_1 \times SU(3)_2 \rightarrow SU(3)_C$$

$$q=u,d,c,s$$

Model	$SU(3)_1$	$SU(3)_2$	
Classic Axigluon	$t_R b_R q_R$	$q_L (t, b)_L$	dijet, AFB(t)
New Axigluon	$q_L t_R b_R$	$(t, b)_L q_R$	dijet, AFB(t)
Topgluon	$q_L q_R$	$(t, b)_L t_R b_R$	dijet, FCNC

对称性破缺要求：额外的带色标量粒子

色标量粒子产生和衰变



总结



为什么希格斯粒子质量为 125GeV ？
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？
能否把自然界中所有力统一？
是否存在新相互作用？
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？

.....