

# 粒子物理与暗物质

余钊煥

中山大学物理学院

<https://yzhxxzxy.github.io>

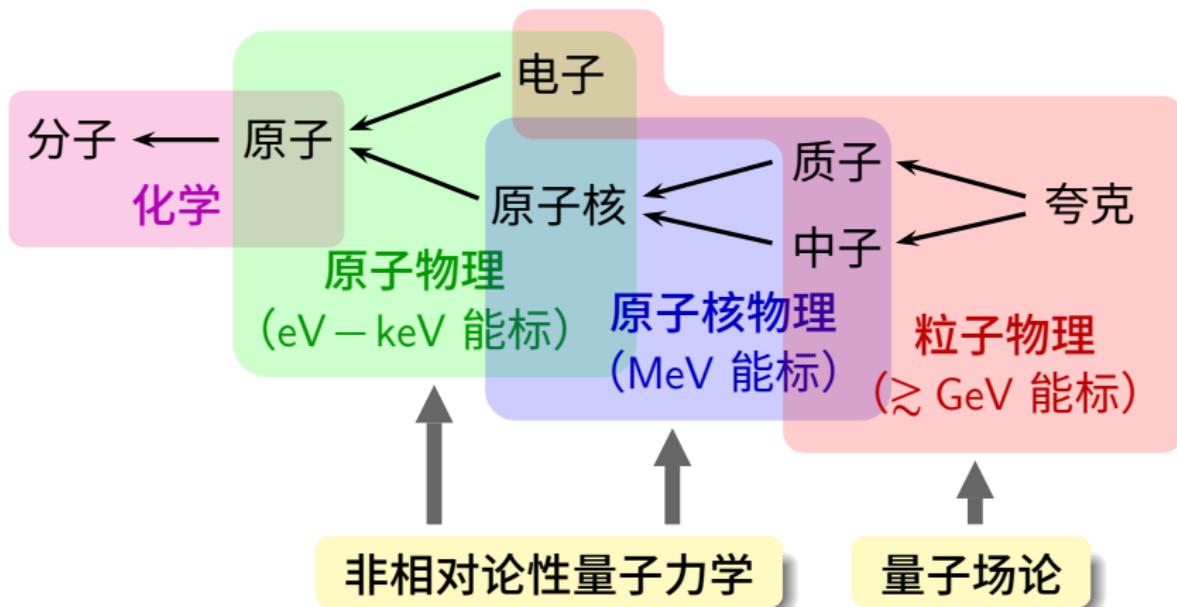


2021 年 12 月 26 日



# 粒子物理学

粒子物理学，也称为高能物理学，是研究物质的基本结构和基本相互作用的科学，理论基础是结合量子力学和狭义相对论的量子场论



# 自然单位制

 为简便起见，粒子物理学常采用**有理化的自然单位制**，取  $c = \hbar = k_B = \epsilon_0 = 1$

常数	国际单位制	自然单位制引起的数值关系
光速	$c = 299\ 792\ 458\ \text{m/s}$	$1\ \text{s} = 2.998 \times 10^8\ \text{m}$
约化普朗克常数	$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV} \cdot \text{s}$	$1\ \text{s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV}$
玻尔兹曼常数	$k_B = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV/K}$	$1\ \text{K} = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV}$

# 自然单位制

为简便起见，粒子物理学常采用**有理化的自然单位制**，取  $c = \hbar = k_B = \epsilon_0 = 1$

常数	国际单位制	自然单位制引起的数值关系
光速	$c = 299\ 792\ 458\ \text{m/s}$	$1\ \text{s} = 2.998 \times 10^8\ \text{m}$
约化普朗克常数	$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV} \cdot \text{s}$	$1\ \text{s}^{-1} = 6.582 \times 10^{-22}\ \text{MeV}$
玻尔兹曼常数	$k_B = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV/K}$	$1\ \text{K} = 8.617 \times 10^{-5}\ \text{eV}$

从而，**长度量纲与时间相同，是能量量纲的倒数，能量、质量、动量和温度具有相同量纲，可将能量单位电子伏特 (eV) 视作唯一基本单位**

**精细结构常数**  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$  没有量纲，在任何单位制下数值为  $\frac{1}{137.036}$ ，取**真空介电常数**  $\epsilon_0 = 1$  意味着**单位电荷量**  $e = \sqrt{4\pi\alpha} = 0.3028$  没有量纲

**粒子物理常见的长度单位是费米** ( $1\ \text{fm} = 10^{-15}\ \text{m}$ )，它与能量单位 MeV 的关系是  $1\ \text{fm}^{-1} = 197.3\ \text{MeV}$

**狭义相对论能动量关系表达成**  $E^2 = m^2c^4 + |\mathbf{p}|^2c^2 = m^2 + |\mathbf{p}|^2$ ，其中  $m$  为**静止质量**

# 基本相互作用

人类对物质间相互作用的认识随着对物质结构的深入研究而不断加深

按照目前的认识，组成物质的基本单元是粒子，自然界中存在四种基本相互作用，支配着粒子的运动和转化

- ① 引力相互作用
  - ② 电磁相互作用
  - ③ 强相互作用
  - ④ 弱相互作用
- } 最先认识的两种长程作用，与日常生活最为相关
- 短程作用，将夸克束缚在核子中、核子束缚在原子核中
- 短程作用，引起原子核的  $\beta$  衰变

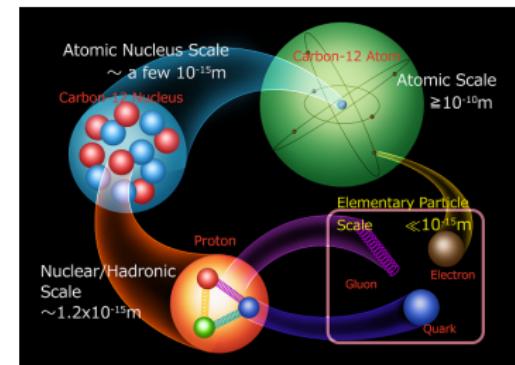
描述相互作用性质的要素

源 手指 决定相互作用的种类

相互作用常数 手指 决定相互作用的强度

媒介粒子 手指 传递相互作用的粒子

力程 手指 相互作用的有效范围



# 引力相互作用

 所有**物质**都参与**引力相互作用**

 引力的源是**质量**, 假想中的媒介粒子叫**引力子**

 相互作用常数是 **牛顿引力常数**:  $\frac{G_N}{4\pi} = 5.34 \times 10^{-40} \text{ GeV}^{-2}$

# 引力相互作用

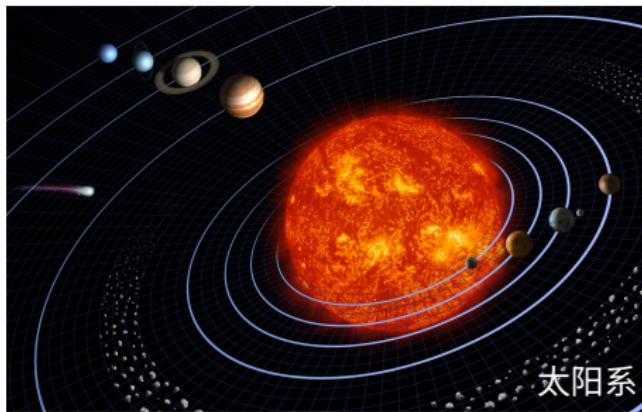
🐬 所有**物质**都参与**引力相互作用**

🐷 引力的源是**质量**, 假想中的媒介粒子叫**引力子**

🐶 相互作用常数是 **牛顿引力常数**:  $\frac{G_N}{4\pi} = 5.34 \times 10^{-40} \text{ GeV}^{-2}$

🦁 引起的束缚态: 行星系(如太阳系)、恒星系(如银河系)、星系团

🐉 目前尚未确立成熟的、得到实验检验的**量子引力理论**



# 电磁相互作用

所有带电粒子都参与电磁相互作用

电磁相互作用的源是电荷，媒介粒子是光子

电磁相互作用常数是精细结构常数

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.036}$$



# 电磁相互作用

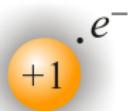
所有带电粒子都参与电磁相互作用

电磁相互作用的源是电荷，媒介粒子是光子

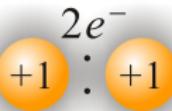
电磁相互作用常数是精细结构常数

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.036}$$

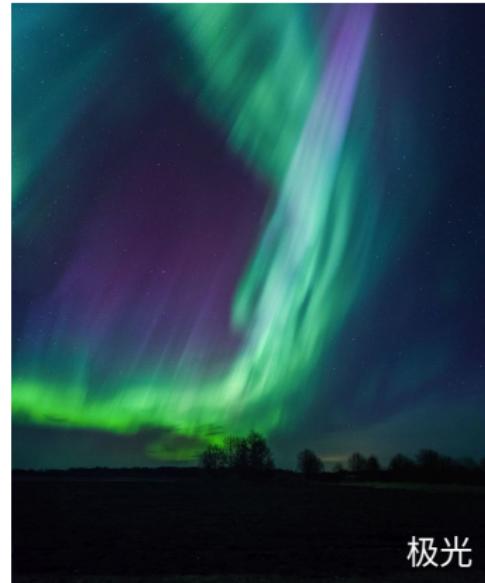
引起的束缚态：原子、分子



氢原子



氢分子



极光

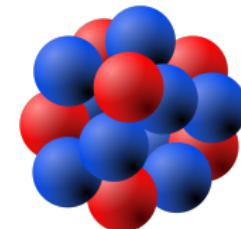
19世纪中叶，麦克斯韦将电和磁统一在电动力学的方程组中

20世纪中叶建立起量子电动力学，它是第一个自洽的量子场理论

# 强相互作用

原子核内部**质子**和**中子**（统称**核子**）之间的作用力可以抵消质子之间的同性电磁排斥力，使原子核稳定存在

核子间存在不同于引力和电磁相互作用的另一种相互作用，它的强度还**强于电磁相互作用**，称为**强相互作用**



原子核

# 强相互作用

原子核内部质子和中子（统称核子）之间的作用力可以抵消质子之间的同性电磁排斥力，使原子核稳定存在

核子间存在不同于引力和电磁相互作用的另一种相互作用，它的强度还强于电磁相互作用，称为强相互作用

描述强相互作用的基本理论是量子色动力学

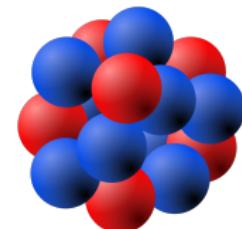
强相互作用的源是色荷，媒介粒子是胶子

相互作用常数是强耦合常数： $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim \mathcal{O}(1)$

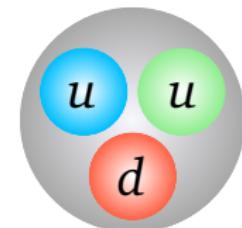
引起的束缚态：介子、重子、原子核

核子间强相互作用是夸克间强相互作用的剩余作用，类似于分子间的范德瓦尔斯力（电磁力的剩余力）

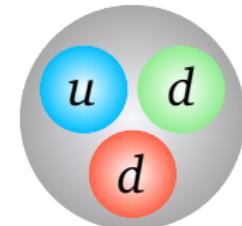
强相互作用的力程很短，约为  $10^{-15}$  m，作用范围仅在相邻核子之间



原子核



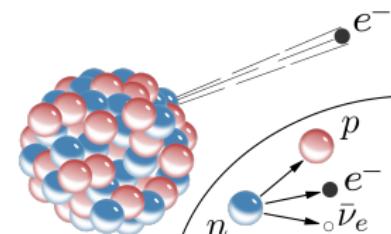
质子



中子

# 弱相互作用

- 原子核  $\beta$  衰变半衰期为几秒到几年,  $\pi^\pm$  和  $K_S^0$  介子寿命为  $2.6 \times 10^{-8}$  s 和  $8.9 \times 10^{-11}$  s, 这些作用时间与电磁或强作用的典型时间相比, 要长  $10^5 - 10^{20}$  倍
- 支配这些衰变的相互作用**非常弱**, 称为**弱相互作用**



原子核  $\beta$  衰变

# 弱相互作用

💡 原子核  $\beta$  衰变半衰期为几秒到几年,  $\pi^\pm$  和  $K_S^0$  介子寿命为  $2.6 \times 10^{-8}$  s 和  $8.9 \times 10^{-11}$  s, 这些作用时间与电磁或强作用的典型时间相比, 要长  $10^5 - 10^{20}$  倍

🐬 支配这些衰变的相互作用**非常弱**, 称为**弱相互作用**

🐉 电磁和弱相互作用由**电弱规范理论**统一描述

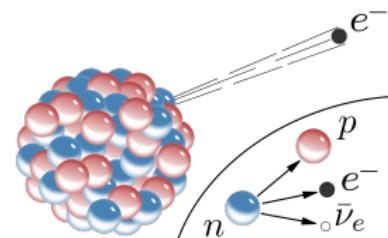
🐖 弱相互作用的源是**弱同位旋**和**弱超荷**, 媒介粒子是  $W^\pm$  和  $Z^0$  玻色子

🐶 相互作用常数是**费米常数**:  $G_F = \frac{g^2}{4\sqrt{2}m_W^2} = 1.166 \times 10^{-5}$  GeV $^{-2}$

🦁 弱相互作用强度太弱, 力程极短, 通常**不会引起束缚态**

✨  $W^\pm$  和  $Z^0$  玻色子的质量分别为 80.4 和 91.2 GeV, 比质子质量大 2 个量级, 严重**压低** GeV 能标以下的衰变过程, 导致弱衰变寿命较长

🌙 当相互作用能标远高于  $Z^0$  质量时, 弱作用强度与电磁作用**相当**



原子核  $\beta$  衰变

# 基本粒子

 **基本粒子**指没有发现内部结构的粒子

 **第一代、第二代、第三代费米子** (自旋为  $1/2$ )

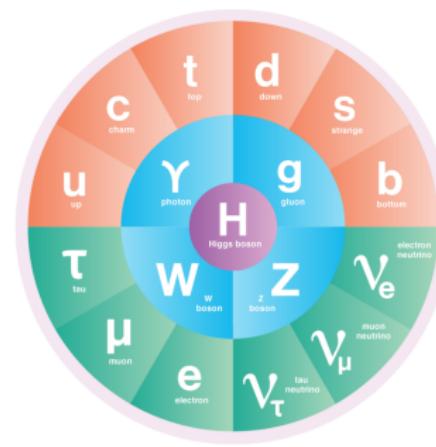
- 带电轻子：电子 ( $e$ )， $\mu$  子 ( $\mu$ )， $\tau$  子 ( $\tau$ )
- 中微子：电子型中微子 ( $\nu_e$ )， $\mu$  子型中微子 ( $\nu_\mu$ )， $\tau$  子型中微子 ( $\nu_\tau$ )
- 上型夸克：上夸克 ( $u$ )，粲夸克 ( $c$ )，顶夸克 ( $t$ )
- 下型夸克：下夸克 ( $d$ )，奇夸克 ( $s$ )，底夸克 ( $b$ )

 **矢量玻色子** (自旋为 1)

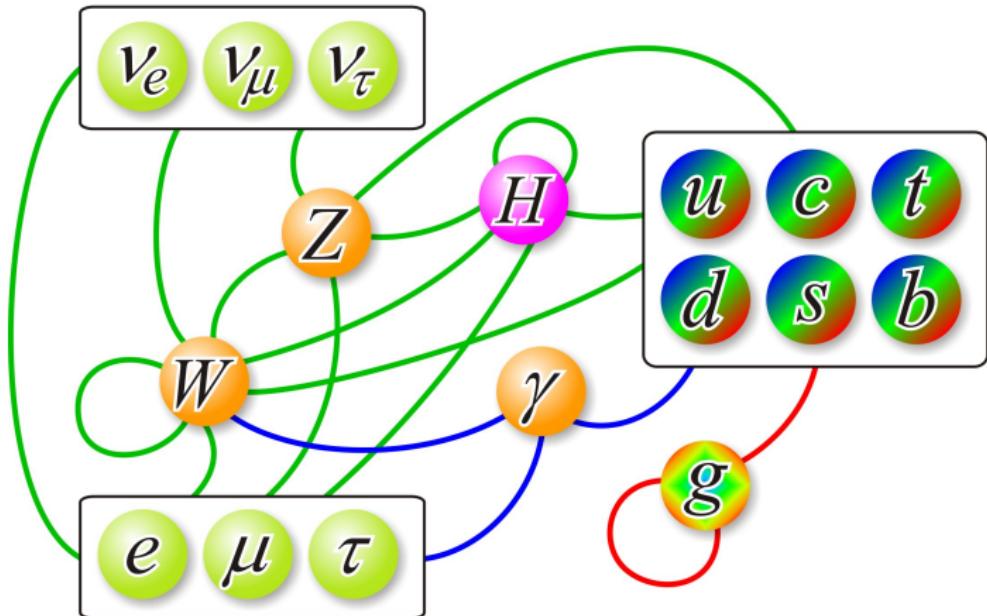
• 电弱规范玻色子：光子 ( $\gamma$ )， $W^\pm$ ， $Z^0$

• 强规范玻色子：8 种胶子 ( $g$ )

 **标量玻色子** (自旋为 0)：希格斯玻色子 ( $H^0$ )



# 基本粒子的相互作用



研究基本粒子间强、电磁、弱相互作用建立起来的量子色动力学和电弱规范理论，合起来称为粒子物理**标准模型**，它是一个  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  规范场论

# 复合粒子



**复合粒子**指具有内部结构的粒子



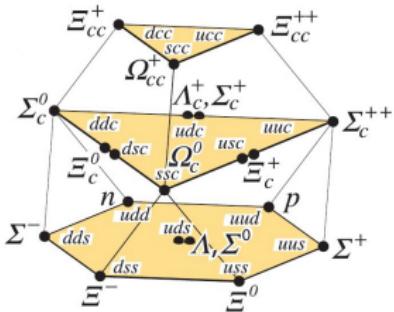
**原子核**: 由质子和中子组成 (如氕, 氘,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ )



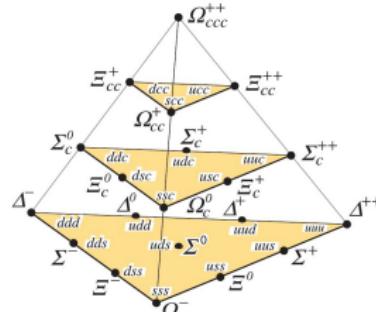
**强子**: 由夸克组成的强相互作用束缚态

- **介子**: 由一个正的价夸克和一个反的价夸克组成  
例如,  $\pi^+(u\bar{d})$ ,  $\pi^-(d\bar{u})$ ,  $\pi^0((u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2})$

- **重子**: 由三个价夸克组成  
例如, 质子  $p(uud)$ , 中子  $n(udd)$ ,  $\Lambda^0(uds)$

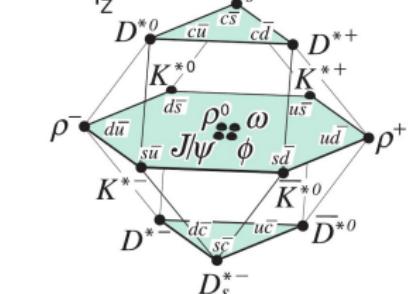
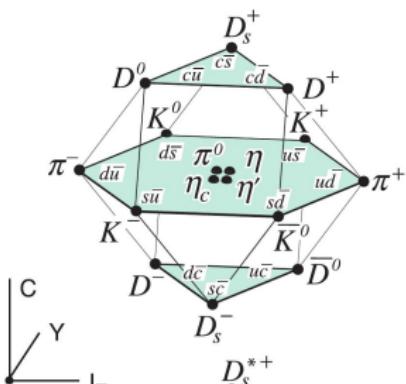


自旋  $1/2$  重子二十重态



自旋  $3/2$  重子二十重态

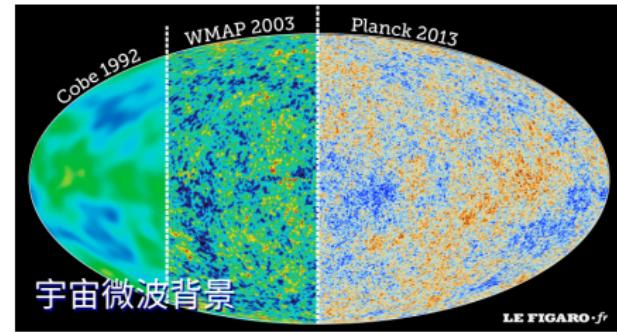
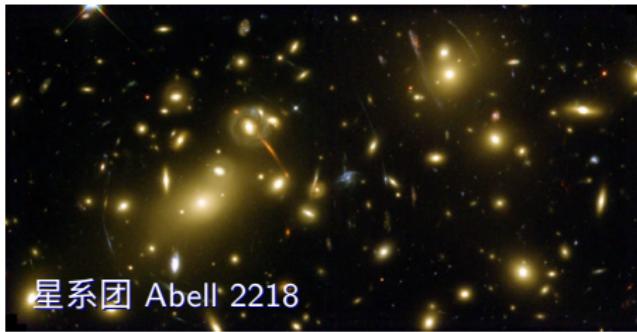
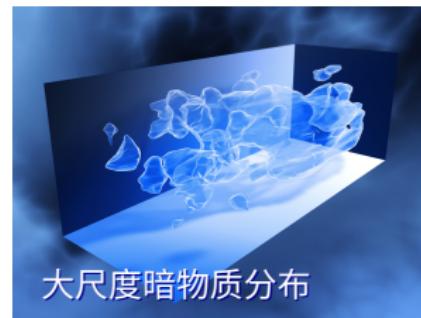
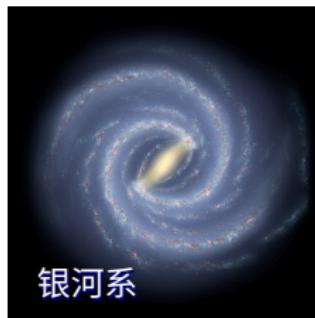
**赝标量介子十六重态**



矢量介子十六重态

# 宇宙中的暗物质

大量的天体物理学和宇宙学观测表明，暗物质 (dark matter, DM) 是宇宙中物质的主要成分，约占总物质含量的 85%



# 后发座星系团



# 后发座星系团



# 后发座星系团



1933 年，瑞士天文学家 Fritz Zwicky 通过计算发现后发座星系团中星系的运动速度太大，远超过星系团中发光物质的引力能够支撑的速度

后发座星系团的质量—光度比  $\Upsilon_{\text{Coma}} \sim 260 \Upsilon_{\odot}$   
 [Kent & Gunn, Astron.J., 1982]

典型旋涡星系  $\Upsilon \sim 10 \Upsilon_{\odot}$

# 旋涡星系的自转曲线



1970 年代，美国天文学家 Vera Rubin 和她的合作者测量了一些旋涡星系中恒星的**绕转速度**，也发现了**不可见物质**的存在证据



三角座星系 M33

# 旋涡星系的自转曲线



1970 年代，美国天文学家 Vera Rubin 和她的合作者测量了一些旋涡星系中恒星的**绕转速度**，也发现了**不可见物质**的存在证据

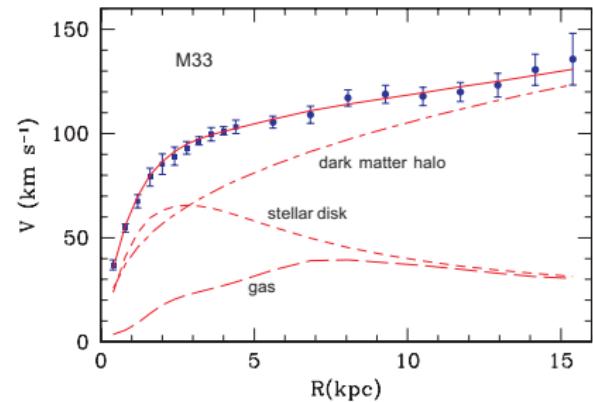


根据牛顿万有引力定律，恒星绕转速度  $v$  由从星系中心向外扩展的半径为  $r$  的球体内包含的质量  $M(r)$  决定，满足

$$\frac{v^2}{r} = \frac{G_N M(r)}{r^2}$$

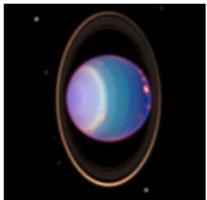
$M(r)$  是常数  $\Rightarrow v \propto r^{-1/2}$

$M(r) \propto r \Rightarrow v$  是常数



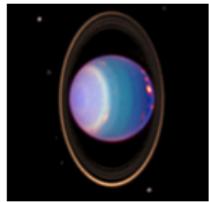
[Corbelli & Salucci, astro-ph/9909252, MNRAS]

# 如何解释反常现象？

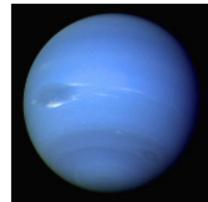


1821 年，法国天文学家亚历斯·布瓦计算出  
版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置  
与表中预测的位置偏差越来越大

# 如何解释反常现象？

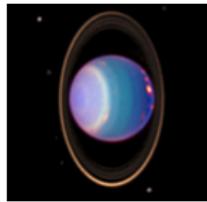


1821 年，法国天文学家亚历斯 · 布瓦计算出版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置与表中预测的位置偏差越来越大

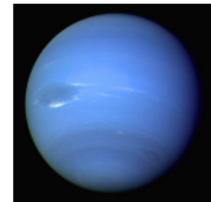


假设天王星运行受到一颗未知行星引力的影响，英国天文学家约翰 · 亚当斯和法国天文学家奥本 · 勒维耶分别推算新行星的轨道，使得**海王星**于 1846 年被发现

# 如何解释反常现象？



💡 1821 年，法国天文学家亚历斯 · 布瓦计算出版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置与表中预测的位置偏差越来越大

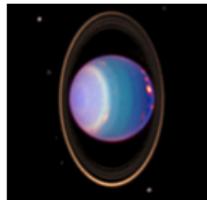


孵 🐥 假设天王星运行受到一颗未知行星引力的影响，英国天文学家约翰 · 亚当斯和法国天文学家奥本 · 勒维耶分别推算新行星的轨道，使得**海王星**于 1846 年被发现

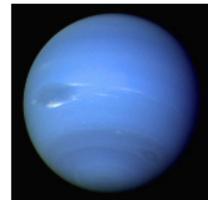


**寻找新的天体或新的物质来解释反常现象！**

# 如何解释反常现象？



1821 年，法国天文学家亚历斯 · 布瓦计算出版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置与表中预测的位置偏差越来越大



假设天王星运行受到一颗未知行星引力的影响，英国天文学家约翰 · 亚当斯和法国天文学家奥本 · 勒维耶分别推算新行星的轨道，使得**海王星**于 1846 年被发现

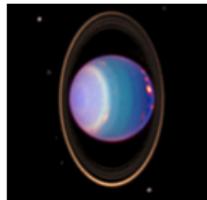


**寻找新的天体或新的物质来解释反常现象！**

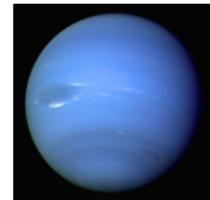


1859 年，勒维耶分析发现**水星**轨道近日点进动与牛顿引力理论预测不符，每 100 年相差 43 弧秒

# 如何解释反常现象？



💡 1821 年，法国天文学家亚历斯 · 布瓦计算出版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置与表中预测的位置偏差越来越大



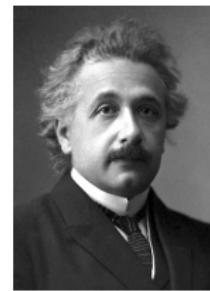
💡 假设天王星运行受到一颗未知行星引力的影响，英国天文学家约翰 · 亚当斯和法国天文学家奥本 · 勒维耶分别推算新行星的轨道，使得**海王星**于 1846 年被发现



## 寻找新的天体或新的物质来解释反常现象！

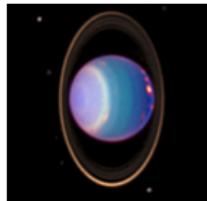


🚀 1859 年，勒维耶分析发现**水星**轨道近日点进动与牛顿引力理论预测不符，每 100 年相差 43 弧秒

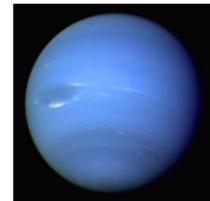


1915 年，爱因斯坦应用**广义相对论**成功解释这个现象

# 如何解释反常现象？



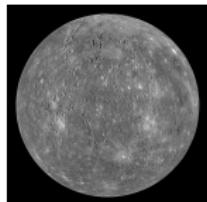
1821 年，法国天文学家亚历斯 · 布瓦计算出版了**天王星**的轨道表，但随后观测到的天王星位置与表中预测的位置偏差越来越大



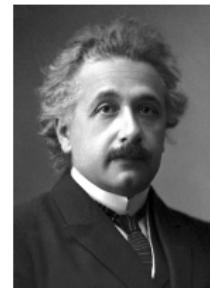
 假设天王星运行受到一颗未知行星引力的影响，英国天文学家约翰 · 亚当斯和法国天文学家奥本 · 勒维耶分别推算新行星的轨道，使得**海王星**于 1846 年被发现



**寻找新的天体或新的物质来解释反常现象！**



 1859 年，勒维耶分析发现**水星**轨道近日点进动与牛顿引力理论预测不符，每 100 年相差 43 弧秒



1915 年，爱因斯坦应用**广义相对论**成功解释这个现象



**修改已知物理定律来解释反常现象！**

# 如何解释这里的反常现象？

## 💡 修改物理定律

- 👉 修正牛顿力学 (MOdified Newtonian Dynamics, MOND) [Milgrom, ApJ, 1983]
- 🤔 难以同时解释所有尺度上的观测结果

# 如何解释这里的反常现象？

## 💡 修改物理定律

👉 修正牛顿力学 (MOdified Newtonian Dynamics, MOND) [Milgrom, ApJ, 1983]

🤔 难以同时解释所有尺度上的观测结果

## 💡 考虑新的天体

👉 晕族大质量致密天体 (MAssive Compact Halo Objects, MACHOs)，包括褐矮星、巨行星、恒星级黑洞、白矮星、中子星等，属于**重子暗物质**

😴 观测结果表明 MACHOs 在银晕质量中所占比例少于 8% (95% 置信度)

[EROS-2 coll., astro-ph/0607207, A&A]

# 如何解释这里的反常现象？

## 💡 修改物理定律

👉 修正牛顿力学 (MOdified Newtonian Dynamics, MOND) [Milgrom, ApJ, 1983]

🤔 难以同时解释所有尺度上的观测结果

## 💡 考虑新的天体

👉 晕族大质量致密天体 (MAssive Compact Halo Objects, MACHOs)，包括褐矮星、巨行星、恒星级黑洞、白矮星、中子星等，属于**重子暗物质**

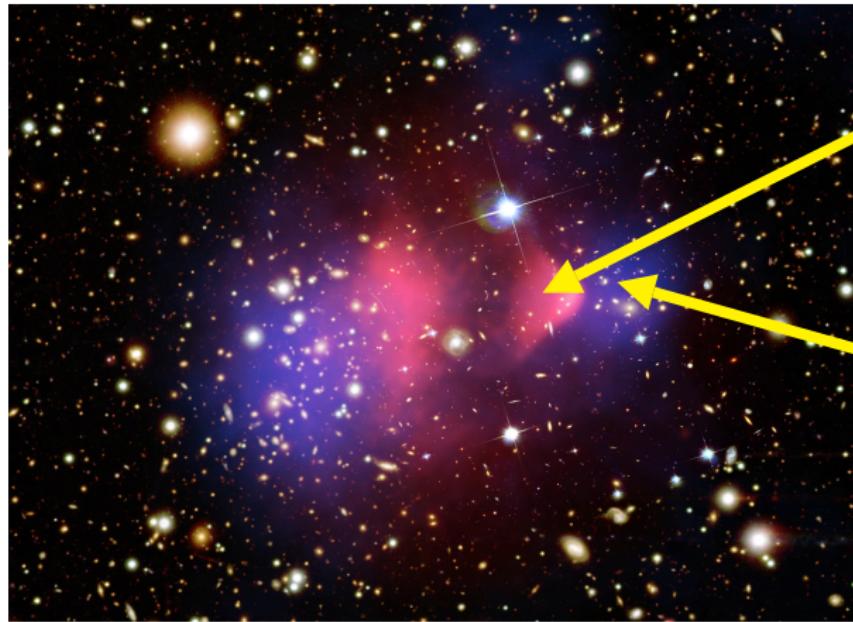
😴 观测结果表明 MACHOs 在银晕质量中所占比例少于 8% (95% 置信度)

[EROS-2 coll., astro-ph/0607207, A&A]

## 💡 考虑新的物质

👉 **非重子暗物质**，即不由重子构成的不发光物质

# 子弹星系团观测：不支持修正牛顿力学



通过 X 射线观测到的  
气体分布  
(可见物质的主要成分)

通过弱引力透镜观  
测到的质量分布  
(暗物质为主)

在  $8\sigma$  显著性水平上观测到重子质量中心与总质量中心的空间位置偏移，无法用修正牛顿力学进行解释 [Clowe et al., astro-ph/0608407, ApJL]

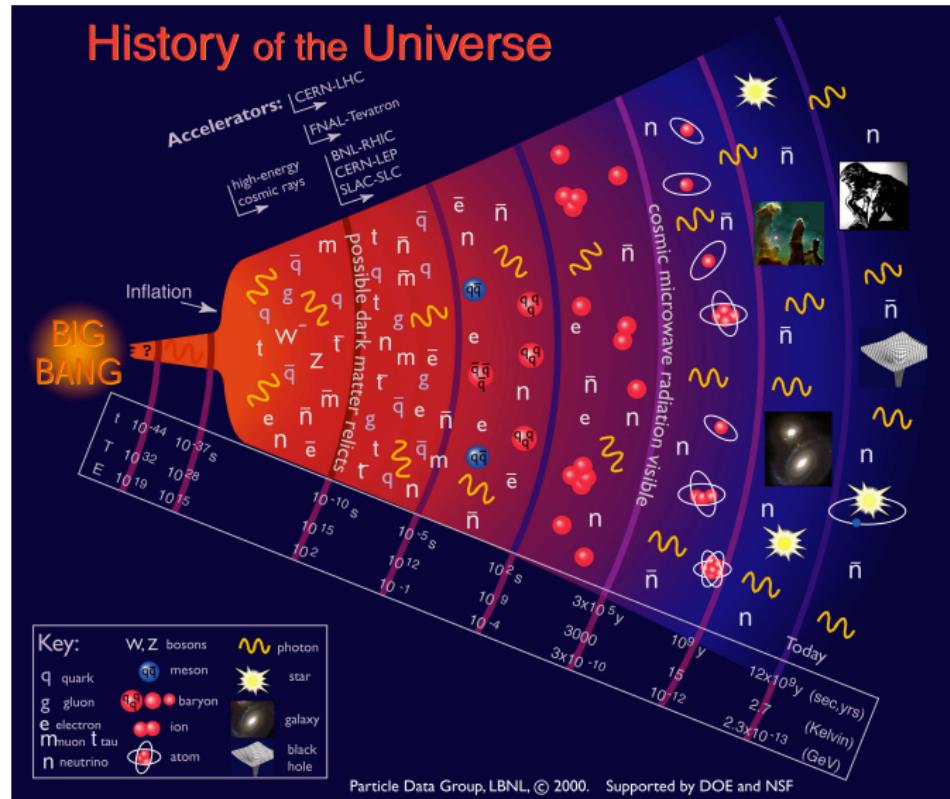
# 大爆炸宇宙学

约 138 亿年前，  
宇宙处于**极度炽热、  
稠密、均匀**的状态

宇宙中所有粒子  
通过相互作用彼此  
处于**热平衡态**

随宇宙膨胀和冷  
却，各种成分逐  
**退耦**，脱离热平衡

逐步形成原子核、  
原子、恒星、星系



# 宇宙结构形成

微小原初扰动 + 引力不稳定性  退耦后的物质形成宇宙结构

 **重子物质退耦太晚**, 单靠重子物质, 星系到今天仍然无法形成!

 需有更早退耦的**非重子暗物质**

# 宇宙结构形成

微小原初扰动 + 引力不稳定性 ➡ 退耦后的物质形成宇宙结构

**重子物质退耦太晚**, 单靠重子物质, 星系到今天仍然无法形成!

需有更早退耦的**非重子暗物质**

**热暗物质** (如中微子): 退耦时速度是**相对论性的** ➡ 结构**由大到小**形成

**冷暗物质**: 退耦时速度是**非相对论性的** ➡ 结构**由小到大**形成

观测到的**星系比星系团更老** ➡ 支持冷暗物质理论

# 宇宙结构形成

微小原初扰动 + 引力不稳定性  退耦后的物质形成宇宙结构

 **重子物质退耦太晚**，单靠重子物质，星系到今天仍然无法形成！

 需有更早退耦的**非重子暗物质**

 **热暗物质**（如中微子）：退耦时速度是**相对论性的**  结构**由大到小**形成

 **冷暗物质**：退耦时速度是**非相对论性的**  结构**由小到大**形成

 观测到的**星系比星系团更老**  支持冷暗物质理论

银河系的卫星矮星系：观测数  $\sim 60$ ，而冷暗物质理论预期数  $\sim 500$

“丢失卫星星系问题”  是否存在一部分**温暗物质**？

# 宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB)

$t \sim 380\,000 \text{ yr}$ ,  $T \sim 3000 \text{ K}$

电子 + 原子核 → 原子

光子退耦

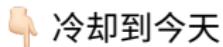
↙ 冷却到今天

2.7 K 宇宙微波背景

# 宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB)

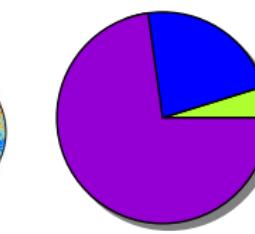
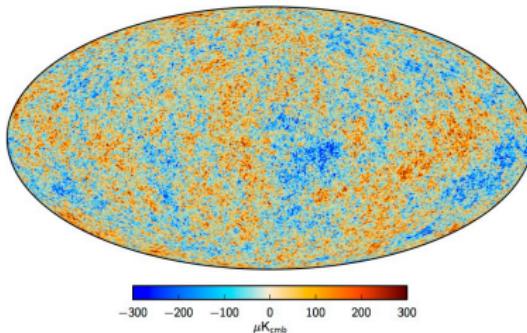
$t \sim 380\,000 \text{ yr}, T \sim 3000 \text{ K}$

电子 + 原子核 → 原子  
光子退耦



2.7 K 宇宙微波背景

拟合宇宙微波背景各向异性功率谱，  
确定当前宇宙中的冷暗物质比例  $\Omega_c$ 、  
重子物质比例  $\Omega_b$  和暗能量比例  $\Omega_\Lambda$



[1502.01582, 1502.01589]

冷暗物质 (25.8%)

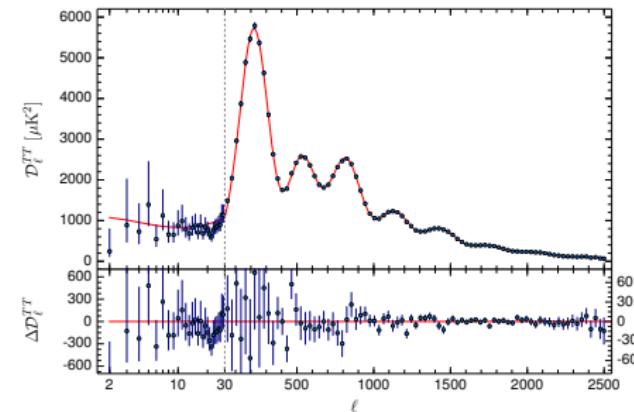
$$\Omega_c h^2 = 0.1186 \pm 0.0020$$

重子物质 (4.8%)

$$\Omega_b h^2 = 0.02226 \pm 0.00023$$

暗能量 (69.3%)

$$\Omega_\Lambda = 0.692 \pm 0.012$$

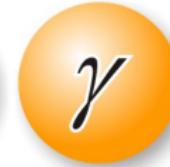
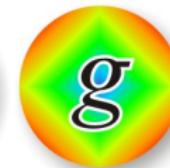
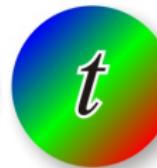
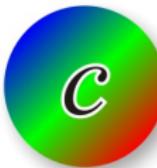


# 推测的暗物质粒子性质

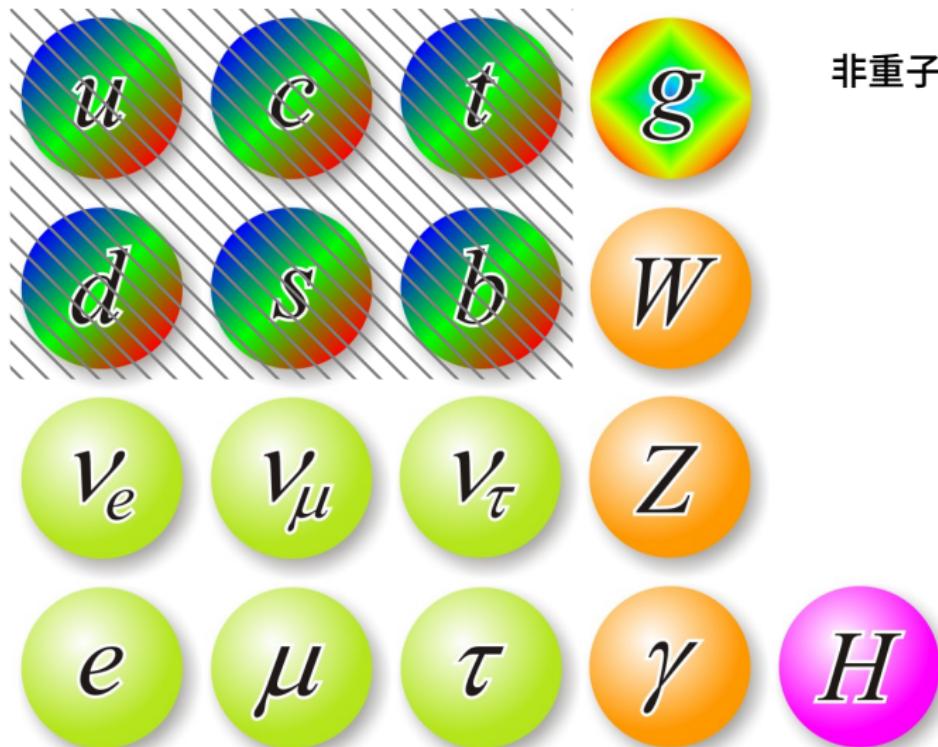
- **暗(电中性)**: 不会发出电磁辐射, 或与光子的相互作用极其微弱
- **非重子**: 由宇宙微波背景和原初核合成观测结果支持
- **稳定或长寿命**: 从早期宇宙一直存活至今
- **不参与强相互作用**: 否则会与原子核形成束缚态
- **冷**: 由结构形成理论支持
- **丰度**: 约占宇宙中所有物质的 85%

地球附近暗物质粒子的质量密度  $\rho_{\text{DM}} \sim 0.3 - 0.4 \text{ GeV/cm}^3$

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?

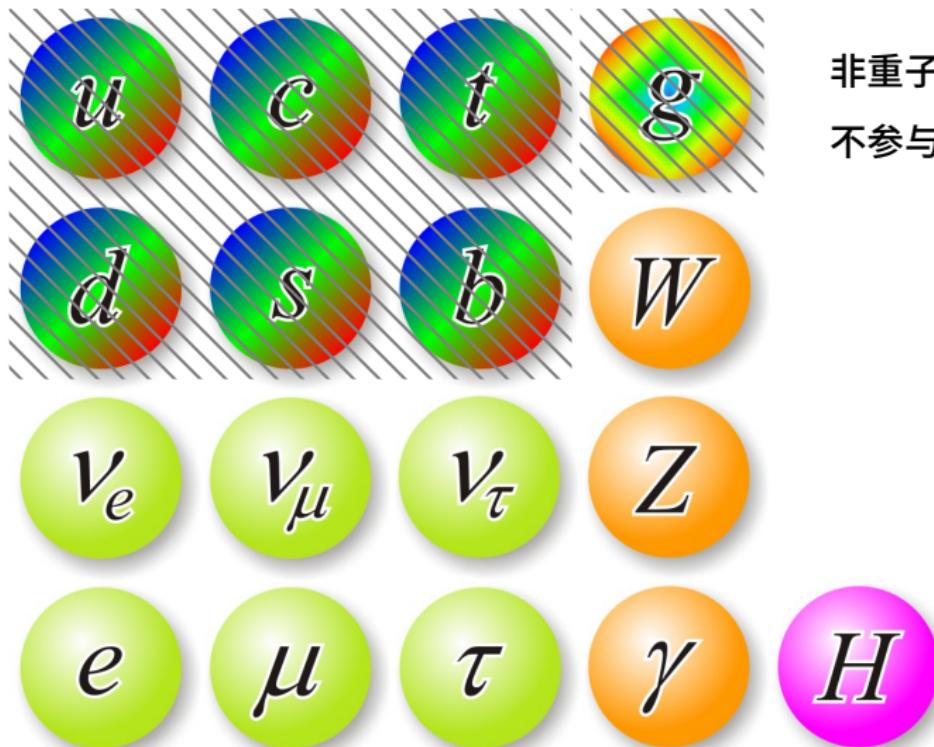


# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



非重子

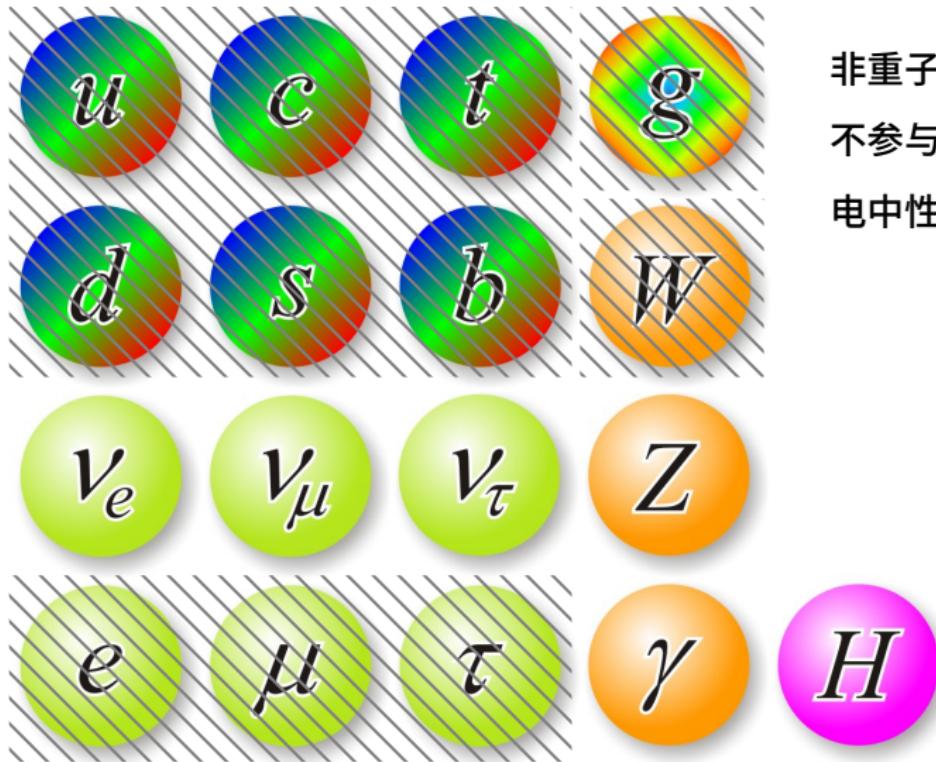
# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



非重子

不参与强相互作用

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?

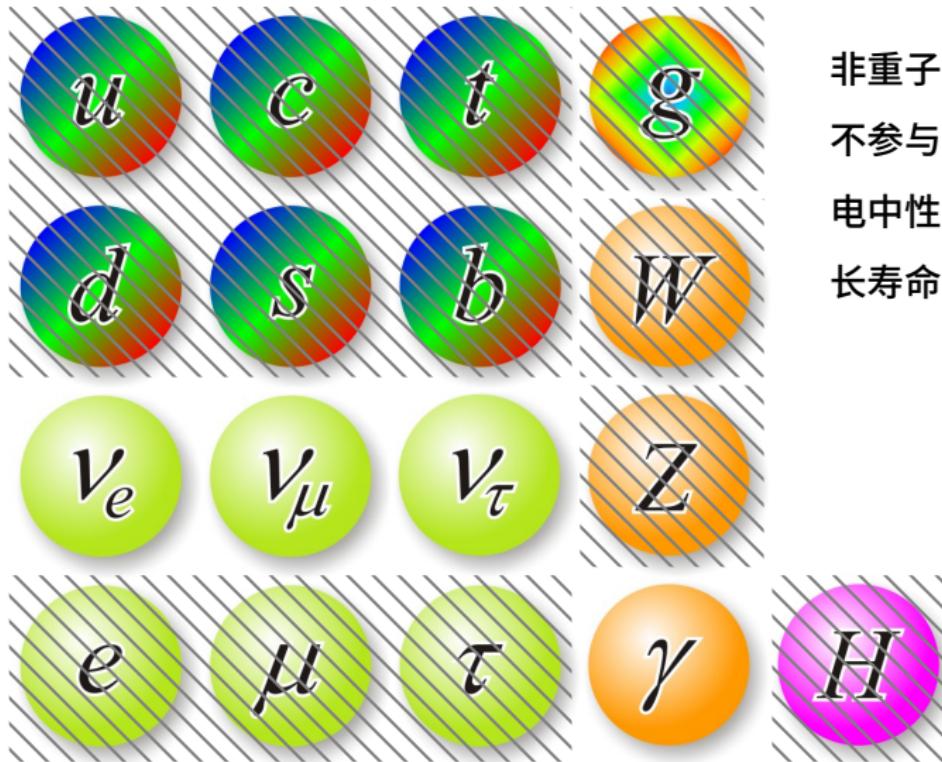


非重子

不参与强相互作用

电中性

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



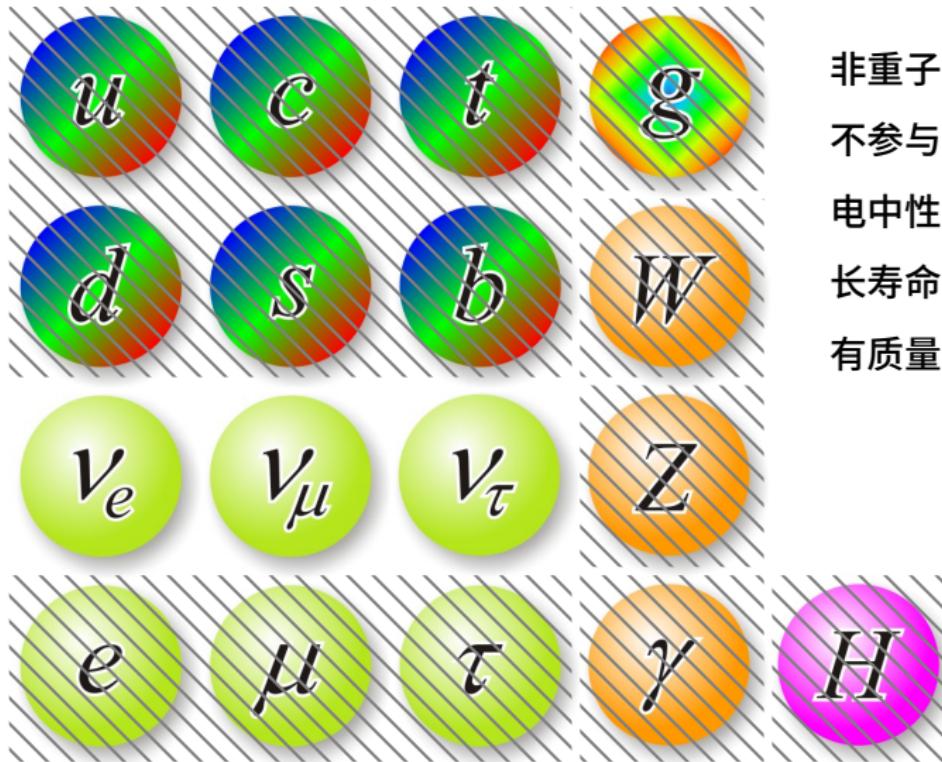
非重子

不参与强相互作用

电中性

长寿命

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



非重子

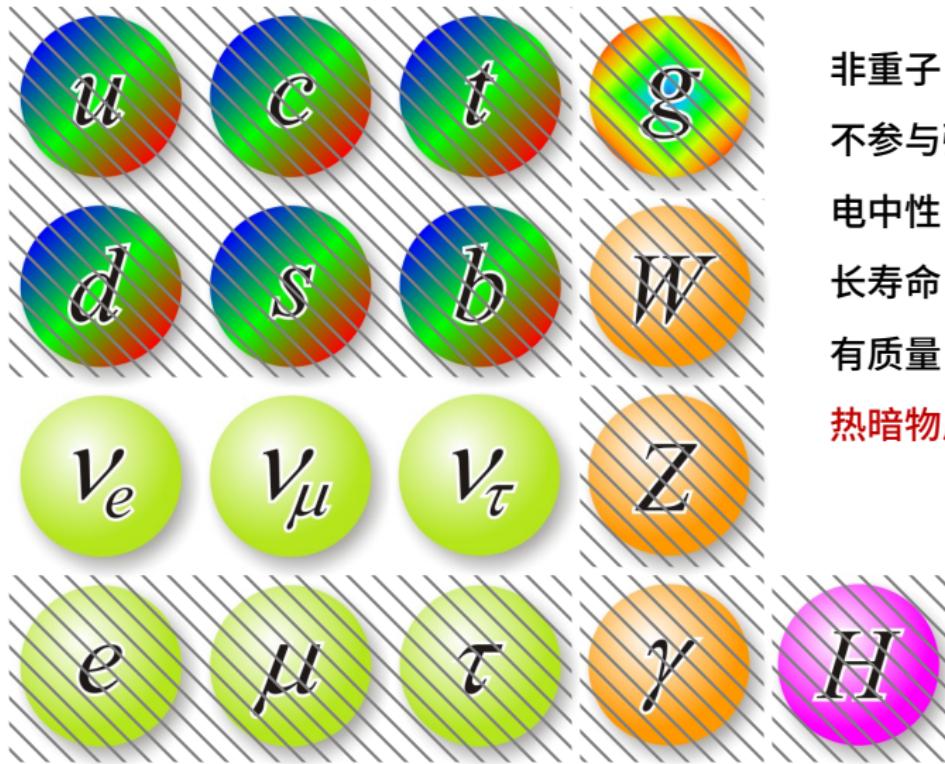
不参与强相互作用

电中性

长寿命

有质量

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



非重子

不参与强相互作用

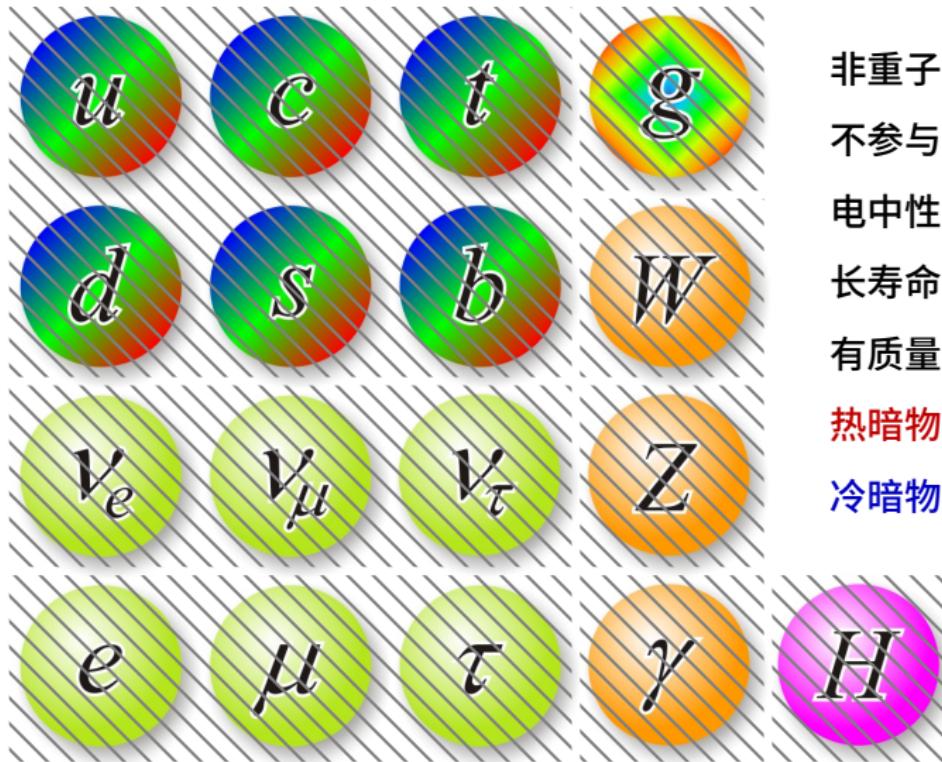
电中性

长寿命

有质量

热暗物质：中微子

# 标准模型中有没有暗物质候选粒子?



非重子

不参与强相互作用

电中性

长寿命

有质量

热暗物质：中微子

冷暗物质：无

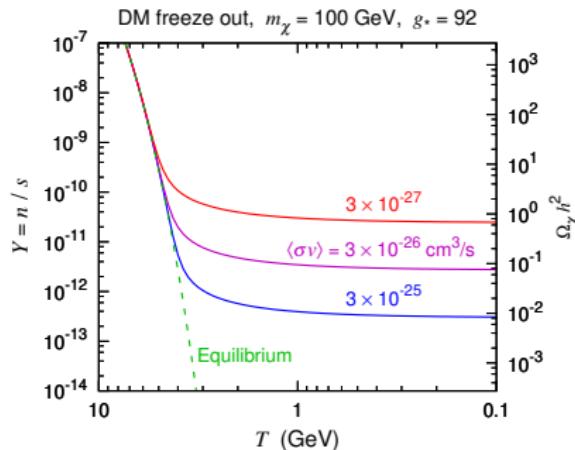
# 暗物质遗留丰度

如果暗物质粒子 ( $\chi$ ) 在宇宙早期通过热平衡过程产生，那么今天它们的遗留丰度  $\Omega_\chi$  基本上由退耦时期的湮灭截面  $\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle$  决定：

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle}$$

遗留丰度观测值  $\Omega_\chi h^2 = 0.1186 \pm 0.0020$

👉  $\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$



# 暗物质遗留丰度

如果暗物质粒子 ( $\chi$ ) 在宇宙早期通过热平衡过程产生，那么今天它们的遗留丰度  $\Omega_\chi$  基本上由退耦时期的湮灭截面  $\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle$  决定：

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}}{\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle}$$

遗留丰度观测值  $\Omega_\chi h^2 = 0.1186 \pm 0.0020$

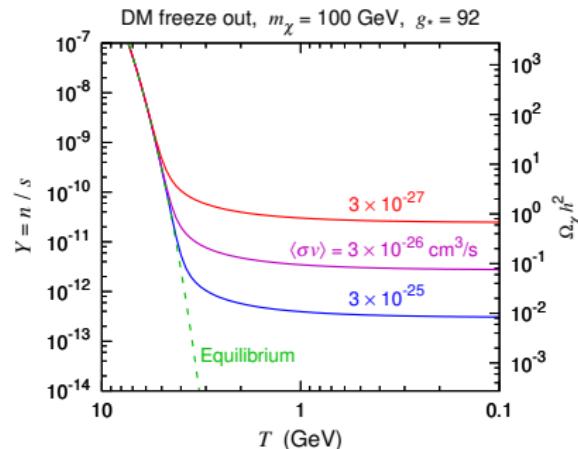
👉  $\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

🤔 假设暗物质粒子的湮灭过程由两个弱相互作用顶点构成，根据  $SU(2)_L$  耦合常数  $g \simeq 0.64$ ，对于  $m_\chi \sim \mathcal{O}(\text{TeV})$ ，有

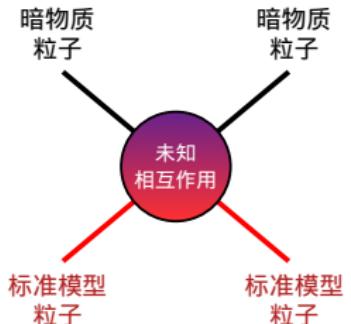
$$\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle \sim \frac{g^4}{16\pi^2 m_\chi^2} \sim \mathcal{O}(10^{-26}) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

一类非常具有吸引力的暗物质候选粒子：

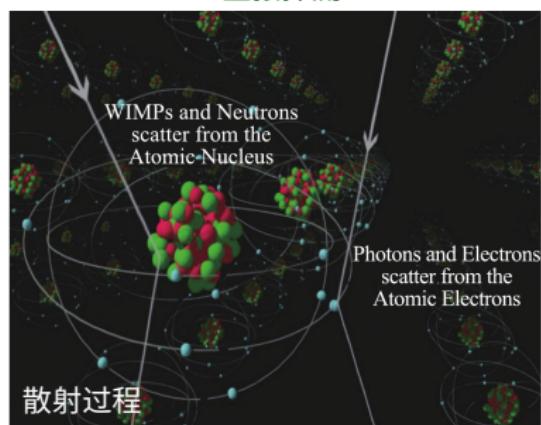
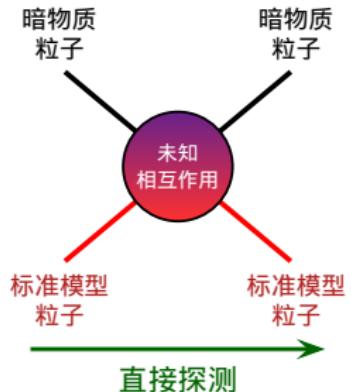
**弱相互作用大质量粒子** (weakly interacting massive particles, **WIMPs**)



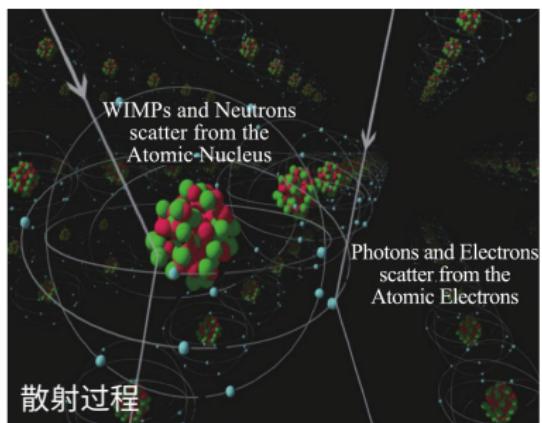
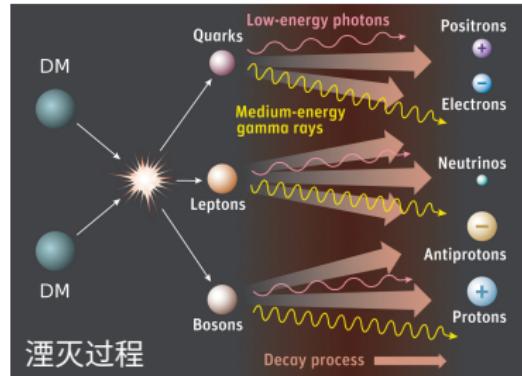
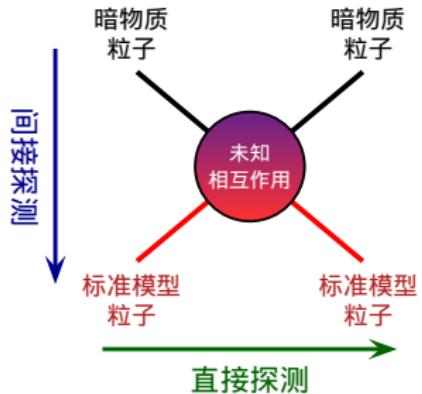
# 暗物质粒子实验探测



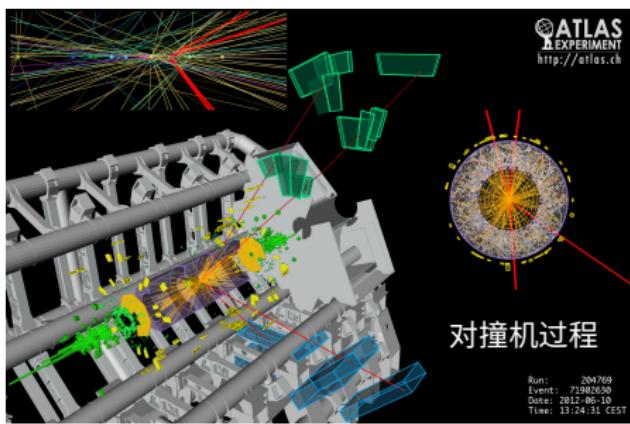
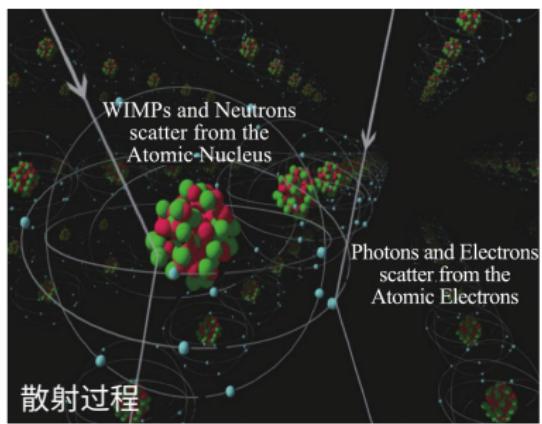
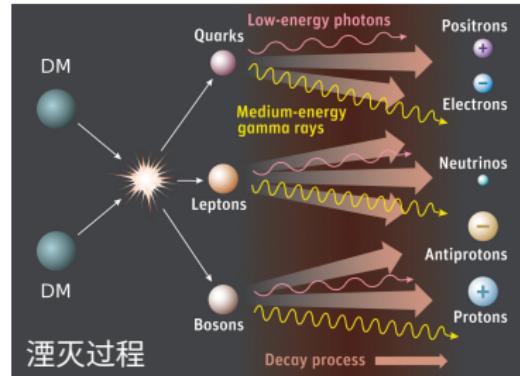
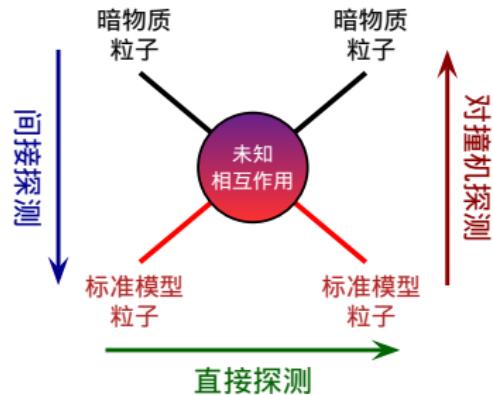
# 暗物质粒子实验探测



# 暗物质粒子实验探测

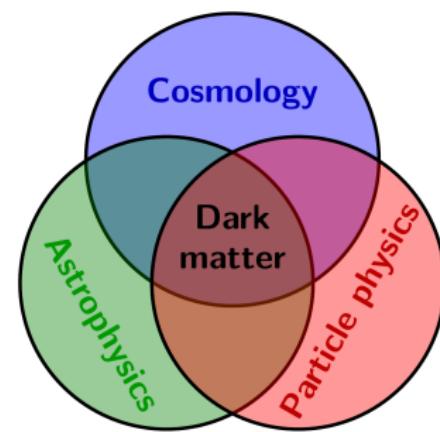


# 暗物质粒子实验探测



# 小结

- ① 粒子物理是一门研究物质基本结构和基本相互作用的学科
- ② 组成物质的基本单元是粒子，它们的运动和转化由四种基本相互作用所支配
- ③ 在研究粒子之间强、电磁、弱相互作用的过程，建立了粒子物理标准模型
- ④ 多个尺度的天体物理和宇宙学观测结果都表明暗物质的存在
- ⑤ 标准模型不包含冷暗物质的候选粒子，因而  
暗物质粒子预示着超出标准模型的新物理
- ⑥ 寻找暗物质粒子并确定它的本质是当前粒子  
物理、天体物理和宇宙学的交叉前沿问题



# 小结

- ① 粒子物理是一门研究物质基本结构和基本相互作用的学科
- ② 组成物质的基本单元是粒子，它们的运动和转化由四种基本相互作用所支配
- ③ 在研究粒子之间强、电磁、弱相互作用的过程，建立了粒子物理标准模型
- ④ 多个尺度的天体物理和宇宙学观测结果都表明暗物质的存在
- ⑤ 标准模型不包含冷暗物质的候选粒子，因而  
暗物质粒子预示着超出标准模型的新物理
- ⑥ 寻找暗物质粒子并确定它的本质是当前粒子  
物理、天体物理和宇宙学的交叉前沿问题

谢谢大家！

