

# 暗物质模型简介

高 昕 康召峰 李田军

粒子物理学的基本任务之一是

探究宏观物质世界的微观起源。以粒子物理标准模型(二十世纪六七十年代)为代表性成就的二十世纪,是粒子物理学的黄金时期。在规范对称性的框架下,标准模型成功地统一了微观世界中(由夸克、轻子和传递相互作用的规范粒子组成)除引力之外的三种基本相互作用:电磁相互作用(确切地说超荷相互作用)、弱相互作用和强相互作用。换句话说,从标准模型出发,几乎可以解释一切目前实验室微观物理现象。

但远在标准模型建立之前的1933年,天文学家兹维基(Zwicky)就基于天文学观测(Coma Galaxy Cluster 后发座星系团)结果提出:在我们的宇宙中,除了发光的重子物质之外,还存在着大量的不发光物质,即暗物质。这个充盈在宇宙空间中的看不见的幽灵,颠覆了标准模型作为终极理论的可能性。而进一步确认暗物质的存在性,进而研究暗物质的各种基本属性,也成了需要粒子物理学家和天文学家共同承担的时代性科学研究重任。实际上,随着实验技术的不断改进升级,暗物质的研究已经成了当前两个领域交叉的热门课题。本文的主要目的在于从粒子物理学角度出发,联系粒子物理理论中本身可能蕴含的超出标准模型的信息,简要介绍粒子物理学中的暗物质模型构造。当然,最后只有实验可以告诉我们暗物质究竟如何。

## 一、暗物质的基本理论

虽然暗物质的存在性是一个公认的事实,但由于它与标准模型的粒子相互作用很弱,使得其直接探测非常困难。除了暗物质不能参与强相互作用和电磁相互作用外,目前为止我们并没有关于暗物质的其他确定性粒子信息。而关于其十分有限的定量信息来自天文学/宇宙观测,如CMB(宇宙微波背景辐射)和WMAP(威尔金森微波各向异性探测器)等。首先,现在宇宙中的能量组分主要为暗能量、暗物质以及重子物质。具体而言,

$$\rho_{\text{tot}} \simeq \rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G_N}, \Omega_{\text{tot}} \equiv \frac{\rho_{\text{tot}}}{\rho_c} \simeq 100\% \quad (1)$$

$$\Omega_\Lambda \simeq 72\%, \Omega_{\text{dm}} \simeq 23\%, \Omega_b \simeq 4.6\%, \Omega_\gamma \simeq 0.005\%, 0.1\% \leq \Omega_\nu \leq 1.5\%.$$

其中 $\rho_c$ 为临界密度, $\Omega_\Lambda$ ,  $\Omega_{\text{dm}}$ ,  $\Omega_b$ ,  $\Omega_\gamma$ ,  $\Omega_\nu$ 分别代表为暗能量、暗物质、重子物质、光子和中微子占总物质密度的百分比。由于我们并不能确认暗物质是否唯一,所以在模型构造中,对于某一个暗物质组分,原则上只要求其丰度不超过现在暗物质的剩余丰度 $\Omega_{\text{dm}} h^2 \simeq 0.11$ ,式中 $h$ 是标度变换过的哈勃常数。其次,为了构成现在物质世界的组分,暗物质需要足够长的寿命 $\tau_{\text{dm}}$ ,即长于宇宙年龄 $t_0$ (约137亿光年):

$$\tau_{\text{dm}} > t_0 \simeq 4.3 \times 10^{17} \text{s}. \quad (2)$$

所以,一个自然的暗物质理论应该可以提供足够好的对称性以保护暗物质的稳定性,即暗物质不衰变或衰变非常缓慢。

显然,标准模型没有这样的暗物质候选者。我们简单看一下标准模型中的稳定粒子以及其保护对称性或原因:(A)光子是传递电磁相互作用的无质量规范玻色子,由于它无质量故稳定;(B)电子是带 $U(1)_{\text{EM}}$ 荷的最轻粒子,即最轻的带电粒子;(C)中微子则是最轻的费米子,洛伦兹对称性保护其稳定性;(D)由于标准模型中具有重子数守恒这个偶然对称性,故质子是稳定的。但是大统一理论中夸克和轻子处于同一多重态中,重子数会被极重的规范玻色子传递的高维算子破坏。这些高维算子导致质子缓慢衰变。另外,非微扰效应如瞬子效应也会诱导非常微弱的重子数破坏。

显然,如何产生正确的暗物质剩余丰度是另一个重要的问题。根据暗物质的早期宇宙学热力学演化历史,主要有标准的热产生和非热产生两种机制。其中具有弱相互作用的电弱能标的粒子(WIMP)是前者的典型代表,由于可以非常自然地给出剩余丰度的正确量级且与人们普遍期待的新物理能标吻合,而成为最热门的暗物质候选者。非热产生剩余丰度又包括多种方式,如具有WIMP性质的不稳定

粒子通过以后的衰变将其数密度转化为暗物质粒子，或者热力学等离子体中的粒子通过极弱的相互作用，把暗物质粒子（初始丰度可以忽略，称之为 FIMP）通过散射或衰变到合适的丰度。这里不一一列举。

## 二、暗物质模型简介

### 1. 最简单的模型

最简单的暗物质模型只需要引入一个单态实标量场  $S$  并引入  $Z_2$  对称性保证其稳定。为了与粒子物理唯象相自洽，我们发现暗物质质量范围是  $m_s \simeq 5.5 \text{ GeV} \sim 1.8 \text{ TeV}$ 。

### 2. 自然的暗物质模型

标准模型唯象上的巨大成功并不意味着它是一个令粒子物理学家们完全满意的终极理论。实际上，它存在诸多基于自然性和美学方面的问题。在解决这些问题的尝试中，即对标准模型进行合理的扩充，如果能够自然给出暗物质的候选者，则显然是一件非常令人感兴趣的事情。

下面我们讨论标准模型的扩充。在介绍具体扩充之前，我们先介绍标准模型的两个主要问题：（1）精细调节问题。首先是宇宙学常数问题，当今宇宙的宇宙学常数为  $\Lambda_{\text{CC}} \sim 10^{-122} M_{\text{Pl}}^4$ ，其中  $M_{\text{Pl}}$  是普朗克能标。为什么宇宙学常数是如此小的非零数还没有很好的解释。另一个是规范等级问题，如何解释电弱能标  $M_{\text{EW}}$  相对普朗克能标这么小， $M_{\text{EW}} \sim 10^{-16} M_{\text{Pl}}$ 。还有强 CP 问题，CP 对称性为“空间反演和正反粒子变换”的复合对称性，所谓强 CP 问题即为什么描述强 CP 项的  $\theta$  角如此之小， $\theta < 10^{-9}$ 。最后还有标准模型费米子质量等级问题，如电子质量比 top 夸克质量小五个数量级。（2）美学问题。这类问题涉及相互作用的统一，费米子的统一，规范耦合常数的统一以及电荷量子化等。这些问题可通过将标准模型嵌入大统一理论和超弦模型中得以解决。

#### A. 轴子

对轴子的描述来源于强 CP 项：

$$\mathcal{L} = \theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu},$$

其中  $G_{\mu\nu}^a$  和  $\tilde{G}^{a\mu\nu}$  分别为胶子场强和它的自对偶。只要  $\theta \neq n\pi$ ，这一项破坏了 CP, P, T 等分离对称性。参数  $\bar{\theta} = \theta + \theta_q$  是一个无量纲的耦合常数，并且是无

限可重整的。但是中子的电偶极矩实验限制要求  $\bar{\theta}$  的值小到  $10^{-9}$ 。这可由下式看出：

$$d_N \sim \frac{e\bar{\theta}}{m_N(m_u^{-1} + m_d^{-1} + m_s^{-1})} \sim 3 \times 10^{-16} \bar{\theta} \text{ e}\cdot\text{cm} \\ \sim 6 \times 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm},$$

其中  $m_u$ 、 $m_d$ 、 $m_s$  和  $m_N$  分别为 up 夸克、down 夸克、strange 夸克和中子的质量。解决强 CP 问题的一种方案是所谓的 Peccei-Quinn (PQ) 机制。PQ 对称性自发破缺产生轴子  $a$ ，有效的  $\theta$  角变成  $\bar{\theta} = \theta + \theta_q + a/f_a$ ，其中  $f_a$  是轴子衰变长度。由瞬子效应得到的轴子势能为  $V_{\text{Instanton}} \simeq \Lambda_{\text{QCD}}^4 (1 - \cos \bar{\theta})$ 。轴子势能的极小值给出  $\bar{\theta} = 0$  的真空。有趣的是轴子可当作冷暗物质的候选者，宇宙学对轴子暗物质的有效衰变长度的约束为  $10^{10} \text{ GeV} < f_a < 10^{12} \text{ GeV}$ 。我们可证明相应轴子的寿命比宇宙年龄长很多，并且它可以得到合适的剩余丰度。

#### B. 超对称标准模型

超对称是玻色子和费米子之间的对称性。在超对称变换下，玻色子变成费米子，和费米子变成玻色子。故在超对称标准模型中，标准模型粒子都有相应的超对称伴侣。超对称标准模型有以下几个特点：（1）解决了标准模型的规范等级问题。（2）可以实现规范耦合常数的统一，故与大统一模型自洽。（3）由于 top 夸克质量较大，正确的电弱对称性破缺可通过辐射修正得到。（4）有自然的暗物质候选者，如 Neutralino（中性微子），Sneutrino（中微子超伴子），Gravitino（引力微子），Axino（轴子）等。（5）可通过电弱重子数产生（Baryogenesis）解释重子不对称。（6）可以通过电弱精细检验的约束。

在超对称标准模型中，我们可以引入  $R$  宇称。 $R$  宇称的定义为： $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$ ，其中  $B$  为重子数， $L$  为轻子数， $S$  为粒子自旋。标准模型粒子在  $R$  宇称下带偶数荷而它们的超对称伴侣带奇数荷，因而在  $R$  宇称守恒的模型中最轻的超对称粒子（LSP）是不会衰变的。在超对称标准模型中 Neutralino 是中性的希格斯粒子、 $Z$  玻色子和光子的超对称伴侣的混合。其中质量最轻的 Neutralino  $\chi_1^0$  可作为暗物质的候选者。

由于在超对称标准模型大多数参数空间中这样的 Neutralino 的物质密度  $\Omega_{\chi_1^0}$  大于实验观测值  $\Omega_{\text{dm}}$ ，

因此  $\Omega_{\chi_1^0} \simeq \Omega_{\text{dm}}$  的参数空间有着特别的意义。一般来讲有四个区域。在 Bulk 区域:  $\chi_1^0 \chi_1^0 \rightarrow l^+ l^-$  通过交换超轻子等。这一区域基本已被目前实验排除。另一个是集中点区域或双曲区域:  $\chi_1^0$  有一个较大的 Higgsino 分量使得  $\chi_1^0 \chi_1^0 \rightarrow W^+ W^-$  和  $Z^0 Z^0$  两个湮灭道占主导。另一个有意思的参数区域是共湮灭区域: 在这个区域次最轻超对称粒子(如  $\tau$  轻子的轻的超对称伴侣  $\tilde{\tau}_1$ ) 的质量与  $\chi_1^0$  非常接近, 并且它的数密度在  $\chi_1^0$  退耦时仍然有可观的数量, 这就使得  $\chi_1^0 - \tilde{\tau}_1$  发生共湮灭过程。还有希格斯 Funnel 区域: 两倍的暗物质质量  $2m_{\chi_1^0}$  与 CP 奇的希格斯  $A_0$  的质量接近, 因此可以有如下的湮灭道:  $\chi_1^0 \chi_1^0 \rightarrow A_0 \rightarrow b\bar{b}$ 。

### 3. 其余的一些模型

#### A. Kaluza-Klein 暗物质模型

Kaluza-Klein (KK) 暗物质模型的特点是:

(1) 有额外的空间维度。(2) 在额外的空间维度可具有 KK-宇称对称性, 不同的粒子处在不同的 KK Level 上。(3) 存在暗物质候选者如  $U(1)_Y$  规范玻色子的第一个 KK 激发态。

#### B. $SO(10)$ 模型和 $U(1)_{B-L}$ 模型

$SO(10)$ 模型或  $U(1)_{B-L}$  模型的特点是其中的  $U(1)_{B-L}$  破缺到  $Z_2$  对称性以保持暗物质的稳定性。暗物质粒子的候选者包括带  $Z_2$  奇数荷的标量场属于  $SO(10)$ 表示 16, 144, 560, 以及带  $Z_2$  偶数荷的费米子属于  $SO(10)$ 表示 10, 45, 120, 126, 210。

#### C. 最小暗物质模型

最小暗物质模型中的暗物质候选者属于  $SU(2)_L$  的高维表示, 中性分量在树图上没有与  $Z$  玻色子的耦合。暗物质粒子的候选者是  $SU(2)_L$  的五重态或七重态的费米子, 或  $SU(2)_L$  的七重态或九重态的标量场。它们通过高维算子衰变, 故寿命可以非常长。

#### D. 镜像暗物质模型

镜像暗物质模型的镜像部分与可观测部分有相同的规范相互作用和粒子谱, 而这两部分之间只有引力相互作用。暗物质粒子属于镜像部分。对于太初核合成, 镜像部分的温度小于可观测部分的温度。这两个部分具有不同的初始条件, 它们之间不会达到热平衡, 各自独立地演化, 各自的熵守恒并且近似保持常数比例。

### E. 隐藏矢量暗物质模型

下面介绍利用非阿贝尔规范对称性中的矢量场作暗物质的模型构造。这样的暗物质模型有一个好处, 就是可以利用规范对称性破缺之后的残余整体对称性作为暗物质的保护对称性。最简单的实现是引入  $SU(2)_{\text{HS}}$  规范群, 以及其基础表示下的标量场  $\phi$ 。如果  $\phi$  获得真空期望值  $v_\phi$  并且破缺  $SU(2)_{\text{HS}}$ , 我们发现质量的规范场  $A_\mu^i$  相关的拉氏量有残余的  $SO(3)$  整体对称性, 而其余的粒子都是这个对称性下的单态。因而矢量场可以作为暗物质候选者。通过  $\phi$  和标准模型 Higgs 粒子的混合, 原则上它可以与标准模型的粒子有相互作用从而被观测到。

### 4. 实验诱导的模型

#### A. 非弹暗物质模型

一方面, INTEGRAL 实验组观测到了银河系中心约 511 keV 的谱线, 故通过非简并暗物质中较重分量的退激发可以自然解释这条谱线。另一方面, DAMA (DARK MATTER) 实验组一直宣称观测到了暗物质信号, 这与其他直接探测实验的无信号结果却是不一致的。但是通过非简并暗物质模型中较轻成分与核子的非弹性碰撞则可以使得它们自洽解释。有趣的是, 两类实验所要求的质量劈裂大概在同一个数量级上, 所以这类模型在唯象上也是很重要的。非弹性暗物质模型构造如下: 狄拉克费米子可以理解为两个质量简并的 Majorana 费米子, 利用对称性破缺我们可得到小的质量劈裂。

#### B. 最近的进展

随着实验探测手段的发展, 目前已经有了不少暗物质探测实验。这些实验探测分为间接探测和直接探测。其中间接探测实验有 PAMELA (反物质-物质探测与轻核天体物理学载荷), ATIC (高级薄电离量热仪) 或者 Fermi-LAT (费米实验室) 等。这类实验都观察到了宇宙射线的反常, 这类实验的特征是: 为得到足够的湮灭截面需要一个增强因子, 约为 1000。各种间接探测指向质量在 1 个 TeV 左右的暗物质, 并且主要湮灭或衰变到轻子上。解释这些共性的方法有: (1) 通过非热产生机制产生暗物质的剩余丰度。(2) 湮灭截面由 Sommerfeld 机制或者 Breit-Wigner 机制提供增强因子。其中 Breit-Wigner 机制的共振质量刚好在两倍暗物质质量下面。(3) 衰变的暗物质模型, 暗物质衰变主要末态是轻子。

直接探测实验主要有: CoGeNT (相干锆中微

子技术), DAMA, CDMS (低温暗物质搜寻), CRESST (低温与超导温度计罕见的事件搜索) 等。而这些实验报告的可能事例如果用暗物质解释, 则要求其质量在 10GeV 左右。其中 DAMA 要求暗物质与核子的自旋无关, 弹性散射截面为  $\sigma_N \sim 2 \times 10^{-4}$  pb, CoGeNT 要求暗物质与核子的自旋无关弹性散射截面为  $\sigma_N \sim 5 \times 10^{-5}$  pb。XENON 和 CDMS 没有探测到暗物质信号, 因而更多是以排除线的方式给出实验约束。较轻的暗物质质量可以通过不对称暗物质 (Asymmetric Dark Matter) 给出  $M_{DM} \sim m_p \times \Omega_{dm}/\Omega_b = 5$  GeV。另外也可由超对称标准模型扩充单态场  $S$  得到。直接探测暗物质与核子的自旋无关弹性散射截面为:

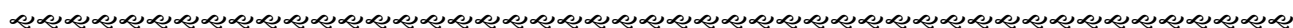
$$\sigma_A = \frac{\mu_A^2}{M_*^4} [f_p Z + f_n (A-Z)]^2。$$

其中,  $f_n$  和  $f_p$  为暗物质与中子和质子的有效顶角,  $A$  和  $Z$  为核子数和质子数。为了使直接探测的各种实

验相互自洽, 需要考虑同位旋破坏的效应, 即  $-0.74 \leq f_n/f_p \leq -0.63$ 。CRESST 和 XENON 倾向于  $f_n/f_p \sim -0.7$ , 而为了使 CDMSII 与 CoGeNT 实验相互自洽则一般需考虑 CoGeNT 实验的调制效应。我们可以系统构造同位旋破坏的暗物质模型, 如  $U(1)$  模型, 扩充希格斯模型以及带色传播子模型等, 这里不一一赘述。

尽管暗物质的研究取得了一定的结果, 但仍有许多问题有待解决, 比如如何将直接探测实验与间接探测实验统一地进行解释, 目前还不是很清楚。但随着实验探测的进一步发展, 对模型的约束将会更加细致, 尤其是现在大型强子对撞机已开始运转, 我们可以将间接探测, 直接探测和对撞机实验的结果联合起来对暗物质模型进行参数约束或进一步得到一些关于暗物质与模型无关的普适性质。可以看到当今暗物质探测实验的快速发展将对暗物质的理论研究提供更加明确的方向和更加强劲的动力。

(中国科学院理论物理研究所 100190)



## 科苑快讯

### 美首次用微波让两个离子发生量子纠缠

美国科学家首次用微波替代常用的激光束, 让两个独立的离子 (带电原子) 发生量子纠缠, 这表明, 智能手机中采用的微型化商用微波技术可取代量子计算机要求的房间大小的“激光器阵列”, 这将大大减小量子计算机的“块头”。最新研究发表在 8 月 11 日出版的《自然》杂志上。

量子计算机主要利用量子物理学的“奇异”规则来解决某些问题, 量子纠缠对量子计算机的信息传输和纠错至关重要。离子可作为量子位 (量子计算机中的最小信息单位) 来存储信息。尽管包括超导电路 (人造原子) 等在内的量子位的其他“候选者”也能被微波在芯片上操作, 但实验表明, 离子量子位的表现更好, 因为当粒子数量增加时, 对离子进行控制的精确度更高且信息损失更少。

量子纠缠是多个粒子联动的状态, 到目前为止制出量子纠缠需要高功率激光等大型装置。而微波作为无线通信的载体, 同复杂且昂贵的激光源相比, 微波元件更容易扩展和升级, 以便科学家制造出利用成千上万个离子进行量子计算和模拟的实用设备。

此前, 科学家们已成功使用微波实现了对单个离子的操控。现在, 美国的科研人员首次借用微波

让单个镁离子的“自旋”发生旋转并让一对离子自旋发生了纠缠。参与研究的迪特里希·莱布弗里得称, 这是一套常见的量子逻辑操作, 旋转和纠缠可按顺序组合以执行量子力学许可的任何计算。

在实验中, 两个离子被电磁场“扣住”并在一个由镀在氧化铝衬底上的金电极组成的离子陷阱芯片上盘旋。有些电极会被激活, 在离子周围制造出频率介于 1GHz 到 2GHz 之间、振动的微波辐射脉冲, 微波产生了让离子自旋发生旋转的磁场。离子自旋能被看作是指向不同方向的细小条形磁铁, 这些磁铁的方向是一种量子属性, 可用来表达信息。

使用微波减少了因激光束指向、能量以及被离子诱导的激光器自发发射的不稳定所导致的错误。然而, 科学家们仍然需要改进微波操作才能使实际的量子计算或量子模拟成为可能。在实验中, 76% 的时间发生了量子纠缠, 超过了定义量子属性发生所要求的 50% 这个最低值, 但仍然无法与由激光器操作离子达到的最高值 99.3% 相抗衡。

莱布弗里得表示: “最终, 一台中等大小的量子计算机或许看起来由一部智能手机与激光笔一样的设备结合在一起形成, 复杂的量子计算机可能和普通台式机一样大。”

摘自中科院高能所《科研动态快报》2011-8