

暗物质的理论研究进展

刘佳 殷鹏飞 朱守华[†]

(北京大学物理学院理论物理研究所 北京 100871)

摘要 文章简要综述了以下内容:(1)暗物质存在的证据,以及它为什么很可能与目前粒子物理研究紧密相关;(2)暗物质的性质,并以超对称模型和额外维模型为例,讨论了包含暗物质粒子的模型;(3)最近 Pamela/Atic/Fermi 实验观测对于暗物质性质的新认识;(4)讨论和展望.

关键词 暗物质,宇宙射线,Higgs 粒子,超对称模型,额外维模型,中微子望远镜,大型强子对撞机(LHC),北京谱仪(BES)

Dark matter theories

LIU Jia YIN Peng-Fei ZHU Shou-Hua[†]

(Institute of Theoretical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Recent progress in the theories of dark matter is briefly reviewed, including the following topics. (1) Observational phenomena based on which dark matter (DM) is conjectured, and the reasons why DM is probably related to particle physics. (2) Dark matter properties and the models which contain DM, among which the popular supersymmetric and extra-dimensional models are taken as examples. (3) New features inferred from recent observations by Pamela, Atic and Fermi. (4) Discussions and perspectives.

Keywords dark matter, cosmic ray, Higgs boson, supersymmetric models, extra-dimension models, neutrino telescope, Large Hadron Collider, Beijing Electron Spectrometer

1 暗物质的存在

暗物质的研究是与粒子物理和天文学紧密相关的交叉研究领域.暗物质的提出以及存在证据都是来自天文学的观测,然而人们并不能够在粒子物理中的标准模型里找到相对应的粒子去解释暗物质.这表明了目前理论在基本粒子的小尺度和宇宙观测的大尺度之间并不能完全自洽,预示着超出标准模型新物理的可能存在.

1.1 暗物质存在的证据

目前,天文学已经积累了多种证据证明暗物质的存在.其中最直接的证据来自于银河旋转曲线测量(见图 1)^[1].这种观测测量银心周围物质的旋转速度与它们和银心距离的关系.观测得到的旋转速度在离银心很远距离通常趋于常数,与银心距离没有关系,这种行为是偏离牛顿引力行为的.其他的星系尺度证据还包括遥远星系的弱引力透镜效果^[2],和星系碰撞

有关的观测——“子弹星团(bullet cluster)”^[3]等等.

另外,在宇宙尺度上的观测,从微波背景辐射的各向异性能够准确推断出,宇宙中总的物质密度应该是 $\Omega_M h^2 = 0.1326 \pm 0.0063$ ^[5].其中, h 是哈勃常数,单位是 $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$.通过观测轻化学元素的含量能够推测出重子物质的准确密度为 $\Omega_B h^2 = 0.02273 \pm 0.00062$ ^[5, 6].由此可以得到,宇宙中 80% — 85% 的物质是不可见的非重子物质,即暗物质.

1.2 冷暗物质在早期宇宙的产生

尽管我们目前并不知道暗物质与物质的确切相互作用,流行的观点是假设暗物质是具有弱的相互作用的大质量粒子,称为 weakly interacting massive particles (WIMPs).在假设了与物质的相互作用后,可以通过和物质类似的热平衡计算过程得到今天暗物质的密度^[7-9].

2009-06-03 收到

[†] 通讯联系人. Email: aiwen_fan@pku.edu.cn

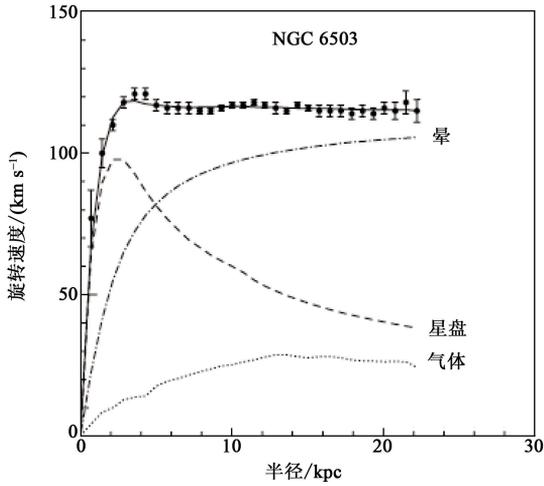


图1 NGC6503的旋转曲线。下面两条标记为“气体”和“星盘”的曲线表示分别来自气体,星盘里物质的贡献。标记为“晕”的曲线表示来自暗物质的贡献,显然只有加上这部分贡献,理论预计才能和上方的观测数据相符。图来自于文献[4]

假设稳定的暗物质粒子为 X , 它和标准模型粒子 Y 通过 $X \bar{X} \rightleftharpoons Y \bar{Y}$ 进行反应. 这个过程可以由玻尔兹曼方程来描述

$$\frac{dn_X}{dt} + 3Hn_X = -\langle \sigma_{X\bar{X}} | v | \rangle (n_X^2 - n_{X,eq}^2), \quad (1)$$

其中, n_X 是暗物质粒子的数密度. $n_{X,eq}$ 是粒子处于热平衡的数密度. $H \equiv \dot{R}/R = (8\pi G\rho/3)^{1/2}$ 是宇宙的膨胀速度. $\langle \sigma_{X\bar{X}} | v | \rangle$ 是暗物质湮灭截面的热平均值. 当宇宙早期的温度远大于 m_X 时, $X \bar{X}$ 的产生和湮灭过程达到动态平衡, 所以暗物质和标准模型粒子一样大量存在. 随着宇宙的膨胀, 宇宙温度逐渐降低, 当降至 m_X 以下时, 标准模型粒子 Y 不能有效的碰撞产生暗物质粒子 X . 这是因为假设 Y 的能量分布是玻尔兹曼分布, 当温度低于 m_X 时, 能量大于 m_X 的 Y 粒子数是指数下降的. 而暗物质粒子的湮灭过程仍然在继续进行, 所以可以预料 X 粒子数密度是在迅速降低的. 一般认为, X 粒子此时为非相对论性粒子, 所以这时 X 粒子的平衡密度是

$$n_{X,eq} = g_X \left(\frac{m_X T}{2\pi}\right)^{3/2} e^{-m_X/T}, \quad (2)$$

其中 g_X 是 X 拥有的内部自由度的数目. 当宇宙降温至某个温度 T_f 以下时, 暗物质湮灭过程发生的速度小于宇宙膨胀速度, 即 $n \langle \sigma_{X\bar{X}} | v | \rangle \leq H$. 我们可以认为暗物质再碰撞的几率很小, 其数密度基本只受宇宙膨胀的影响, 即达到热退耦 (thermal freeze-out), 相应的 T_f 称为退耦温度.

通过求解玻尔兹曼方程, 相应的今天宇宙中暗物

质残留密度可以近似的得到,

$$\Omega_X h^2 \sim g_*^{-1/2} x_f \frac{1.17 \times 10^{-10}}{a + 3b/x_f}, \quad (3)$$

其中 a, b 来自暗物质湮灭截面的非相对论展开 $\langle \sigma_{X\bar{X}} | v | \rangle = a + b \langle v^2 \rangle + O(v^4)$, 与宇宙温度相关的变量 x 的定义是 $x \equiv m_X/T$, g_* 是一个外部自由度 (在标准模型中, 在 $T \sim 1\text{TeV}$ 时, $g_* \sim 120$; 在 $T \sim 1\text{GeV}$ 时, $g_* \sim 65$) [9].

从另一个角度来看, 如果要求上面假设的过程能够解释今天观测到的暗物质残留密度, 即 $\Omega_X h^2 \sim 0.11$, 可以对暗物质的湮灭截面有个大概的估计 [8] (在这里只考虑湮灭截面里与速度无关的部分, 最后一步假设 $g_* \sim 100, x_f \sim 20$)

$$g_*^{-1/2} x_f \frac{1.17 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-2}}{\Omega_X h^2} \sim 10^{-9} \text{GeV}^{-2}, \quad (4)$$

而通常一种质量为 m_X , 相互作用耦合常数为 α 粒子的湮灭截面可以近似写为 (最后一步假设 $\alpha \sim 0.01, m_X \sim 300\text{GeV}$)

$$\sigma_{X\bar{X}} v \sim \frac{\alpha^2}{m_X^2} \sim 10^{-9} \text{GeV}^{-2}, \quad (5)$$

这就等于说, 如果暗物质粒子质量范围在 $\text{GeV} - \text{TeV}$, 并且相互作用在电弱相互作用的量级 $\alpha \sim 0.01$, 那么它的数密度就是符合目前实验观测的. 这就是所谓的“WIMP miracle”, 也是为什么很多理论学家喜欢用 WIMP 粒子来解释暗物质的原因. 这也似乎暗示着暗物质问题与粒子物理中的电弱相互作用部分是有很强关联的.

1.3 暗物质在今天宇宙中的分布

目前对于大尺度暗物质结构的研究, 一种被广为接受的方法是通过计算机的多体模拟 (N-body simulations). 宇宙大尺度的演化近似的认为初始分布的暗物质在引力作用下成团, 并通过暗物质团与暗物质团之间的相互引力作用来完成演化计算. 最新的多体模拟认为对于不同质量、处于不同时段、以及初始分布输入, 存在着普适的暗物质分布形式 [10, 15]. 对于暗物质分布的常用参数化为,

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/R)^\gamma [1 + (r/R)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}, \quad (6)$$

不同的研究组最后在银河系中心的部分给出了不同的结果. 虽然可以简单地想象越到银河系中心, 物质密度分布应该是增加的, 但是具体形式是怎样的仍然是有争议的. 这里我们列出最常见的暗物质分布形式. 按照参数 (α, β, γ) 来看, Navarro, Frenk 和 White (NFW [10]) 分布是 $(1, 3, 1)$; Moore 等 (Moore [11])

分布是(1.5, 3, 1.5); modified isothermal(Iso, 例如文献[12])分布是(2, 2, 0). 可以看到 NFW, Moore 和 Iso 这三种密度分布在 r 很小的时候, $\rho(r)$ 正比于 r^{-1} , $r^{-1.5}$ 和常数. 由此可见银心暗物质分布的研究仍有很大不确定性.

2 暗物质的特点

2.1 暗物质是否是稳定的?

暗物质是否是稳定的主要是指暗物质是否衰变. 如果暗物质的衰变寿命太短就无法解释今天通过天文观测得到的残留密度. 但是如果暗物质衰变寿命远大于宇宙年龄, 就可以不与天文观测相矛盾. 例如最近在解释 PAMELA 实验数据时, 可以用衰变的暗物质来解释, 这一般需要暗物质的寿命在 $\sim 10^{26}$ s, 远大于宇宙寿命的 $\sim 10^{18}$ s. 更一般的情况是假设暗物质是稳定的. 在构造包含暗物质的新模型的时候, 通常会引入一个 Z_2 分立对称性, 使得标准模型粒子带 +1 的荷, 而新粒子带 -1 的荷. 这样由于 Z_2 对称性, 新粒子中最轻的一种粒子不可能衰变到一对标准模型粒子, 因而是稳定的. 例如, 在超对称模型里面具有的分立对称性是 R 宇称, 在额外维模型里面是 KK 宇称.

2.2 暗物质是否是冷的?

暗物质的冷热主要是指运动是否是相对论性的. 以前有人提出热暗物质的可能(hot dark matter), 其运动速度是相对论的. 可能的候选粒子就是标准模型里面的中微子. 在今天, 热暗物质占暗物质多数的提法在解释实验现象上有很大的困难. 因为它预言了宇宙从上到下的结构形成^[13]. 这是因为热暗物质的自由程比冷暗物质要长得多, 因此它抹掉了早期由于宇宙物质分布涨落产生的小尺度结构, 所以小尺度结构是在后来由大尺度结构分裂得到的. 但是在我们的观测里面星系比超星系团的年龄要大, 即小尺度结构形成得更早. 当然少量的热暗物质存在仍然是可能的, 只要它不与大尺度结构形成以及 CMB 的数据相矛盾. 这样人们可以由宇宙学模型给出中微子质量的上限.

流行的结构形成理论需要冷暗物质(cold dark matter, CDM), 即暗物质粒子的速度在宇宙进入物质为主的时期以前就已经是非相对论的, 于是这些粒子可以形成小尺度结构. 基于冷暗物质的多体模拟与很多天文学的实验观测相符合. 不过多体模拟也有一些不确定的地方. 比如说多体模拟认为银河系中心的物质密度会越来越高(例如 NFW 分布), 然而对暗物

质为主的星系的旋转曲线观测指出物质的密度分布在中心是常值.

为了解决这个问题, 有人提出暗物质是温的(warm dark matter), 即速度介于相对论和非相对论之间. 这样暗物质具有适量的速度, 它们比冷暗物质有更长的自由程, 这样就不是那么容易被引力中心捕获, 不容易形成中心的高物质密度. 另一方面, 它们的速度也不是太大, 这样宇宙的小尺度结构仍然可以形成. 不过温暗物质也有一些自己的问题, 现在 CDM 和 WDM 还在进一步的研究之中.

2.3 暗物质是否是中性的?

在标准模型意义下, 暗物质的中性主要是指电中性(不带电荷)和色中性(不带色荷). 有人曾经提出暗物质可以带电荷. 根据自身电荷, 它可以俘获电子、质子或氦离子, 组成类似重氢原子的结构, 形成束缚态. 这种带电物质束缚态可能广泛存在于自然界中, 可以比较容易的被探测到. 比如它可能存在于湖水和海水中, 因此原则上能够被重水提取实验发现, 而实验的结果是并未观测到这种异常物质. 还有很多其他实验对这种暗物质做出了限制, 基本上能够将这种带电暗物质排除掉^[14].

如果暗物质带有色荷, 那么它将会和普通物质有很强的相互作用, 即暗物质和核子的散射截面会非常大. 而位于地下的暗物质直接探测实验, 除了在解释上有争议的 DAMA 年调制信号外, 目前没有探测到暗物质的迹象. 这类实验对碰撞截面有很大的限制, 因此排除了很大部分带色荷暗物质的参数空间. 其他还有一些天文学观测的限制, 例如它们和重子物质的相互作用会撕裂旋转银河系的银盘. 综合各种实验结果, 带色荷的暗物质也不大可能存在^[14].

3 冷暗物质的理论

在近几年, 理论学家们构建了很多超出标准模型的物理模型, 其中往往包含一种稳定的、中性的新粒子可以作为暗物质候选者^[15]. 一般情况下, 只要物理模型中具有一个 Z_2 分立对称性, 那么在该对称性下荷为奇数的最轻的粒子肯定是稳定粒子. 如果该粒子还不含电荷和色荷, 那么它就满足暗物质候选者要求. 因此, 构造具有暗物质候选者的物理模型并不困难. 由于之前提到的“WIMP miracle”, 具有弱的相互作用, 质量较重的暗物质受到更多关注. 值得强调的是, 包含暗物质的理论模型一般都与要解决的其他物理问题相关, 比如超对称模型和额外维模型原来的动

机是解决粒子物理中的等级问题,轴子模型原来的动机是试图解决强 CP 问题,镜像粒子作为暗物质的模型是试图解决宇称破坏问题。

3.1 超对称模型

目前,基本粒子之间的相互作用是由标准模型来描述的.这样的理论基于量子力学基本原理、狭义相对论、杨-米尔斯局域规范作用和最小作用量原理.量子力学基本原理提供了量子化概念,狭义相对论和杨-米尔斯局域规范作用分别对应全局时空对称性和局域内禀对称性,最小作用量原理指导如何从满足以上对称性的拉式量得到运动方程.上面提到的对称性分为全局的和局域的.全局变换对称性是指对场做常数变化(变化量不是时间空间的函数)情况下,作用量不变.局域变换对称性是指对场做局域变化(变化量可以是时间空间的函数)情况下,作用量不变.标准模型具有的对称性为 $P \otimes G$. 其中, P 表示庞加莱群,即四维时空中的洛伦兹变化加上时空平移.在标准模型中,认为庞加莱对称性是全局的.如果要将其局域化,则涉及到广义相对论和引力.由于粒子需要满足庞加莱不变性,于是庞加莱群决定了可以存在的粒子的种类,即每种粒子可以按群的基本表示归类.后面的 G 表示内禀对称性.在标准模型中, $G = SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$, 并且是局域对称性.局域对称性 G 描述了标准模型里的强、弱、电磁相互作用(\otimes 表示群的直积).在标准模型中,根据以上对称性写出拉式量,并根据最小作用量原理就可以得到各种粒子的运动方程。

超对称模型是近年来最为流行的一种超出标准模型的新物理模型.超对称模型与标准模型的唯一不同在于将前面的庞加莱群 P 换为更大的时空对称性 S ,超对称代数.超对称代数包含了庞加莱群,并且加入了玻色子和费米子的反对易变换操作.同样的,在这里 S 是作为全局对称性处理的,如果考虑局域化的超对称代数 S ,则是超引力(Supergravity)的研究范围.由于 S 是一个更大的时空对称性,超对称包含的粒子数比标准模型要多,每一个粒子都有其超对称伴子(玻色子的超对称伴子是一个费米子,反之亦然)。

超对称的引入能够解决在 Higgs 粒子质量的圈图修正计算中遇到的等级问题,并且可以使各种规范作用常数在高能标处达到统一^[16].在早些时候,为了解决超对称模型里质子衰变的问题引入了 R 宇称. R 宇称的定义为 $R = (-1)^{3B+L+2S}$ (其中 B, L, S 分别为重子数、轻子数和自旋).其中,所有的标准模型粒子和超对称粒子分别具有偶宇称($R = +1$)和奇宇称

($R = -1$).因此所有的超对称粒子必须成对产生或消灭,这样最轻的超对称粒子(lightest supersymmetric particle, LSP)就是稳定的,可以作为暗物质的候选者.超对称粒子的质量谱是由超对称破缺的细节来决定的.但是,在超对称粒子列表里能够成为暗物质候选者的粒子并不多.在最小超对称模型里,具有电中性、色中性的粒子是四种 neutralino(中性规范玻色子以及 Higgs 粒子的超对称伴子),三种 sneutrino(中微子的超对称伴子)以及 gravitino(引力子 graviton 的超对称伴子)^[17].

在不加入右手中微子的情况下, sneutrino 不能做为暗物质候选者,因为它大大超过了目前直接探测的限制,已经被目前直接探测实验排除. Gravitino 是合适的暗物质候选者.它与其他粒子的相互作用极其微弱,不被目前已有的实验限制,但是因此对它的探测也相当困难. Neutralino 是超对称中研究最广泛的粒子.在超对称模型中,四种标准模型的超对称伴子(bino, wino 和两个中性 higgsino)混合后组成的四个质量本征态被称为 neutralino,其中最轻的 neutralino 即是暗物质候选者。

3.2 额外维模型

除了超对称模型,我们简要介绍一下目前广受关注的额外维模型,这类模型也可以提供暗物质的候选者^[18].额外维模型假设真实的时空并非通常的 $3 + 1$ 维,而是具有更高的维度.这些额外的维度很小,因此不为我们所知.比如最早的 ADD 模型^[19, 20]里就包括由 n 个小于毫米量级的平坦的额外维度.在 ADD 模型里引力在全空间里传播,而标准模型粒子则限制在四维膜(四维空间在高维空间中的切片)上.这样的设置下,在长距离的情况下,引力行为和以前相同.但是,在距离和额外维的大小差不多时,引力的行为就会出现偏离,因此得出的普朗克能标比以前低.通过适当的参数选取,可以使普朗克能标降到 TeV 量级.这样就解决了前面提到的 Higgs 粒子质量的圈图修正计算中遇到的等级问题.在稍后提出的 Randall-Sundrum 模型里,依旧引入的是极小尺度的额外维,不过它们具有很大的空间曲率^[21].和 ADD 模型相同,RS 模型中的引力在全空间里传播,而标准模型粒子则限制在四维膜上.在 RS 模型中,所有基本的物理参数都可以是四维普朗克能标量级大小,但是由于空间曲率引起的卷曲因子,这些物理参数在标准模型四维膜上都被压低到 TeV 量级.这同样地解决了 Higgs 粒子质量的等级问题.普朗克能标降到 TeV 量级的另一个重要意义是解释了为什么我们观测到的

引力作用强度比其他三种力强、弱、电磁力要小很多。因为牛顿引力系数与普朗克质量平方成反比,当普朗克质量为 TeV 量级,表明引力与弱电相互作用强度相当。这样使得在额外维模型里面,自然界四种力强、弱、电磁、引力的相互作用强度是差不多的。那么为什么我们观测到的引力比其他三种力要小呢? 因为时空存在更多维度,而引力存在于所有维度。我们作为四维时空的观测者只看到一部分的引力,所以强度变小了。用形象的话来说,引力“漏”到其他维度里面去了。由于以上两个模型只有引力在全空间里传播,因此引入的新粒子主要是一些激发态的引力子 graviton。

普遍的额外维模型(universal extra dimensions, UED)则假设平坦的额外维,但是所有的标准模型粒子都在空间的所有维度中传播^[22]。在 UED 模型中,额外维的大小由于实验限制以及理论原因通常取为 $R^{-1} \sim \text{TeV}^{-1}$ 。标准模型粒子在额外维中传播可能带有动量,于是在四维膜上表现为新的重粒子,即 Kaluza-Klein(KK)激发态。由于额外维上的周期边界条件,在额外维的动量是量子化的。所以, KK 激发态在树图层次上的质量为^[18],

$$m_{X^{(n)}}^2 = \frac{n^2}{R^2} + m_{X^{(0)}}^2 \quad (7)$$

其中, $X^{(n)}$ 是标准模型粒子的第 n 个 KK 激发态。 $R^{-1} \sim \text{TeV}^{-1}$ 是额外维的大小, $X^{(0)}$ 是标准模型粒子,也是 KK 态的基态。可以看到在这个模型中,粒子的 KK 激发态一般在 TeV,这个能标与目前 PAMELA 和 ATIC 实验感兴趣的暗物质质量范围很接近,也是 LHC 感兴趣的能量区间。

最轻的 KK 粒子的稳定性通常由 KK 宇称守恒保证。通常一个额外维假设被紧致为一个圆环 S (即 $r=0$ 的点和 $r=R$ 的点是同一个点),两个额外维会紧致为两个一维圆环的直积,即圆环面。在这种紧致下,额外维的动量守恒使得 KK 数(n)是守恒的。但是,在实际模型中为了构建手征费米子,额外维取为 S/Z_2 ($x \leftrightarrow -x$ 的对径捏合)或者 T^2/Z_2 迹形(orbifold)。这个设置破坏了 KK 数(n)的守恒,但是仍然存在 KK 宇称守恒,即 n 的奇偶性守恒仍保留下来。在 KK 宇称下为奇的质量最轻的粒子(lightest KK particle),比如光子的第一 KK 激发态,是稳定的,可以作为暗物质的候选者。

4 暗物质探测实验

暗物质的探测手段包括加速器产生,即直接通过

加速器来研究暗物质的粒子模型;直接探测实验,即通过探测暗物质粒子与实验靶核子的散射来确定暗物质的存在;间接探测实验,即探测暗物质湮灭或衰变产生的各种粒子。

4.1 暗物质直接探测实验

暗物质可能和普通的核子发生碰撞,通过观测靶核的反冲效应使得人们可能直接探测到暗物质粒子。为了屏蔽来自于宇宙射线的干扰,这一类实验往往都在很深的地下实验室来进行。由于核子反冲效应很微弱,而且干扰因素很多,这类实验对实验环境和材料纯度的要求也都很高。目前世界上的直接实验有很多,主要包括 CDMS, XENON, ZEPLIN, EDELWEISS, CRESST, CoGeNT, DAMA/LIBRA, COUPP, WARP 和 KIMS。到目前为止,直接探测除了 DAMA 的年度调制信号以外,其他实验组均未看到暗物质碰撞的正面信号。XENON10 和 CDMS 给出了目前最新的实验限制,对质量范围在几十到几百 GeV 的暗物质和核子与自旋无关的弹性碰撞截面 σ_{SI} ,限制到了 $10^{-8} \text{ pb}^{[23, 24]}$ 。实验对暗物质和核子与自旋相关的弹性碰撞截面 σ_{SD} 限制较弱,其原因是当前实验主要采用的重核子,对自旋相关的弹性碰撞不敏感。因此,实验精度远远低于与自旋无关的弹性碰撞截面测量。

4.2 暗物质间接探测实验

由于我们的星系里可能存在大量的暗物质,特别是在像银心这样物质分布的密集区域,暗物质的数密度很大,发生湮灭的可能性也增大。这就使得人们可能观测到在这些区域里暗物质湮灭产生的各种标准模型粒子,比如 gamma 光,中微子,正电子以及反质子等等。这就是所谓的暗物质间接探测。如果实验探测到超过天体物理理论预测的各种射线的流量,这就有可能是因为暗物质的湮灭产生出的额外射线,以此来间接地推测暗物质的存在。

4.2.1 Gamma 光探测

探测暗物质湮灭出的光子是最重要的间接探测方式之一。主要的原因是光子不像带电粒子会在传播过程中受到磁场作用而偏转,可以对暗物质湮灭的地点进行推断。由于光子探测是很灵敏的,因此实验的靶面积不需要很大,测量光子能谱是目前 Gamma 光探测实验的主要目标。但是,暗物质湮灭产生的光子能谱是跟暗物质的粒子物理结构有关。一般的湮灭产物会有 $b\bar{b}$, $t\bar{t}$, $\tau\bar{\tau}$ 以及规范玻色子 W, Z 以及 Higgs 玻色子。这些湮灭产物进一步直接发射或是通过级联衰变产生光子,因此这些过程的光谱是连续分布的。但是暗物质湮灭产物也可能是单能的光子,比如通过

高阶过程产生 $\gamma\gamma$, γZ 以及 γh . 由于是 $2 \rightarrow 2$ 过程, 所得到的光子具有单能谱. 这类单能谱光子是极好的探测信号, 因为天体物理过程很难产生高能单能光子谱. 不过缺点是可能信号非常弱, 因为贡献通常来自于圈图. 能否看到单能光子信号一方面取决于湮灭的截面大小, 另一方面取决于实验仪器的光子能量分辨率. 如果能量分辨率越高, 就越容易将单能光子谱从连续背景中识别出来. 目前一个备受关注的探测高能 Gamma 光实验是 Fermi 卫星实验^[25]. 它于 2008 年上天, 探测的 gamma 光能段是 20MeV—300GeV, 另外它还能探测能段为 20GeV—1TeV 的高能正负电子.^[26]

4.2.2 带电粒子的探测

除了 Gamma 光的探测, 带电粒子的探测也是非常重要的实验手段. 而由于带电粒子和星际物质反应以及受星系磁场的偏转, 使得人们如何确认观测到的带电粒子是否来自于暗物质所产生比较困难. 实验的基本原理是通过电磁量能器来测量带电粒子的能量沉积, 以此推断带电粒子的能量. 如果实验能够具有磁场, 那么就可以通过磁场偏转方向判断粒子电荷的正负. 实验的探测目标是宇宙射线中的正负电子、正反质子以及各种反物质重核. 2008 年末, PAMELA 实验组^[27]以及 ATIC 实验组^[28]公布了他们的测量结果, 引起了人们的广泛关注. PAMELA 实验是一个卫星实验, 具有磁场. PAMELA 实验观测到正电子流量和正负电子流量和的比值 $e^+ / (e^+ + e^-)$ 在 10GeV 到

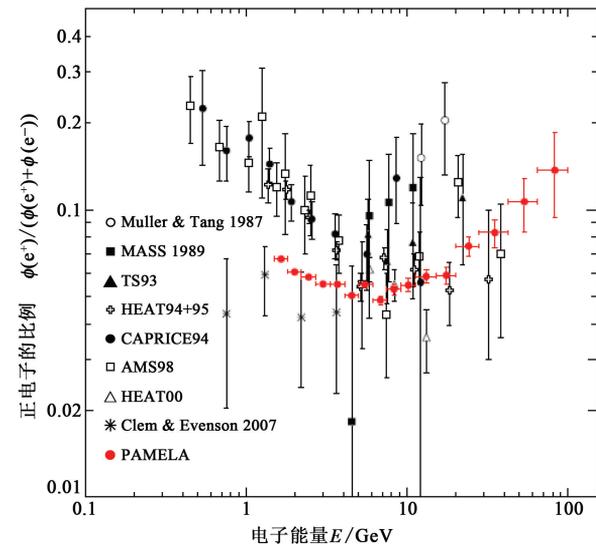


图 2 PAMELA 实验组 2008 年公布的正电子流量和正负电子流量和的比值数据^[27]. 横坐标为电子能量, 单位为 GeV. 纵坐标为正电子的百分比, 定义为 $\phi(e^+) / (\phi(e^+) + \phi(e^-))$. 其中 $\phi(e^+)$ 和 $\phi(e^-)$ 分别是正负电子的流量大小

100GeV 是高于背景估计的, 呈现上升趋势, 见图 2. 另外, 观测到的反质子流量和质子流量比例 \bar{p}/p 和背景又是符合的. 很多研究者试图用暗物质来解释正电子的超出, 但是为了避免反质子的超出, 必须接受一个结果即暗物质的湮灭主要产生轻子对, 而不是夸克对. 这对以前传统的暗物质模型提出了挑战, 引起了人们的广泛兴趣. ATIC 实验组是一个南极气球实验, 不具有磁场. ATIC 实验组观测到正负电子流量之和在 300GeV 到 800GeV 有一个超出, 并且大约在 1TeV 左右回落到与背景一致, 见图 3. 人们猜测 ATIC 的结果与 PAMELA 的异常可能同时来自于暗物质. 在这里 ATIC 实验结果暗示暗物质的质量约为 800GeV. 这两个实验结果来自于暗物质的猜测可以和 Fermi 的实验结果进行对比, 使得人们对暗物质问题的理解更加深入.

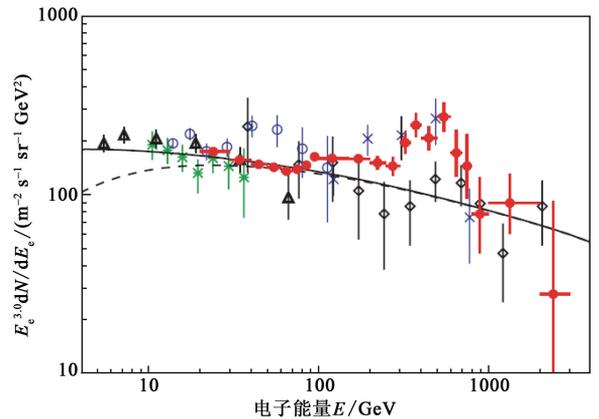


图 3 ATIC 实验组 2008 年公布正负电子流量的数据^[28]. 横坐标为电子能量, 单位为 GeV. 纵坐标为正负电子流量之和, 定义为 $E^2 dN/dE_e$. 红色数据点为 ATIC 在 2008 年公布的数据(见网刊彩图), 其余数据点为之前实验测量数据. 实线和虚线为正负电子流量的背景预测值, 其低能端的区别来自于太阳调制效应

4.2.3 中微子的探测

探测来自宇宙的高能中微子需要大型的中微子探测器. 目前正在运行或建设的实验有 SuperK^[29], IceCube^[30], Antares^[31]. 实验的基本原理是高能中微子与探测器附近物质里的核子碰撞产生高能 μ 轻子, 然后通过高能 μ 轻子在介质, 如水、冰中传播发出的 Cherenkov 光来反推中微子的能量和方向. 由于中微子和核子的散射截面太小, 这类实验需要极大的探测面积. 一般来说, 暗物质间接探测对中微子信号的研究更多的集中探测来自我们临近天体中暗物质湮灭产生的中微子. 这也是因为大质量的天体, 比如太阳和地球, 能够通过引力相互作用将一定数量的暗物质束缚在其内部, 从而增大了暗物质湮灭的可能性. 产生的中微子由于和物质的相互作用很弱, 从而可以顺

利到达探测器. 来自这些近处暗物质湮灭产生的中微子流量可能较大, 一旦观测到, 就可以确定它们的来源. 相比之下, 来自于银河系中暗物质湮灭产生的中微子到达探测器的流量可能就较小, 但这种探测仍然是可能的. IceCube 是世界上首个体积将达到 1km^3 的中微子探测器, 使得它有可能探测到低流量的高能中微子. Antares 相较 IceCube 体积小, 不过 Antares 处于北半球地中海地区, 可以观测银心. 而 IceCube 处于南极, 对北天区的观测有利, 但对银心的观测受到很大限制. 所以两者能够形成互补. 如果最近 Pamela 观测到的带电轻子是由于暗物质湮灭产生的, 我们的研究表明: 带电轻子伴随的中微子信号可能被 IceCube 和 Antares 观测到^[32].

5 暗物质性质的新认识

2008 年 11 月, PAMELA 给出的实验结果暗示宇宙中存在未知的正电子源, 而不存在未知的反质子源. 这引起了人们的广泛关注. 同一时期, ATIC 的实验结果也表明正电子和负电子流强之和比理论估计的背景流强要高. 人们纷纷猜测这是来自于暗物质的信号. 暗物质可以通过湮灭或者衰变产生出正负电子, 给出 PAMELA 的实验结果. 另外, ATIC 的正电子流强异常很快下降, 结束于 $600\text{--}800\text{GeV}$, 这个暗示着暗物质的质量大概在 $O(\text{TeV})$ 这个范围. 因为按照目前冷暗物质的提法, 暗物质产生的正负电子能量不可能高于暗物质质量, 于是正电子能谱在快到暗物质质量附近会很自然的下降, 与 ATIC 实验相符合. 而对于天文物理解释, 比如说脉冲星, 超新星解释, 它们能够提供的能谱一般是幂律行为, 难以解释 ATIC 观测到的陡降行为. 暗物质的解释分为两类. 一种是通过暗物质湮灭来进行解释, 这类解释通常需要一个轻的中介粒子, 例如质量在 $O(\text{GeV})$ 的标量粒子或者矢量粒子^[33]. 实验要求暗物质在今天的湮灭截面比热退耦的湮灭截面要大 $O(1000)$, 主要是通过轻中介粒子产生的 Sommerfeld 增强来达到. Sommerfeld 效应是一种非相对论的量子力学作用, 当两个低速粒子在互相靠近碰撞之前, 如果两个粒子之间存在相互作用势, 那么由于相互作用势的存在, 对粒子的波函数造成了影响, 不能按照平面波入射来计算. 这里冷暗物质的运动速度是非相对论的, 轻中介粒子提供了长程相互作用, 相当于 Yukawa 势, 对入射粒子波函数造成影响, 最终增大了湮灭反应的截面. 在量子场论的语言里, 这对应着所有包含轻中介粒子的梯

形费曼图的贡献. 另一方面, 实验要求暗物质的主要湮灭产物是轻子而不是夸克. 这也可以通过轻中介粒子来完成. 暗物质可以主要湮灭到轻中介粒子对, 然后由轻中介粒子衰变得轻子产物. 没有重子产物的原因是轻中介粒子的质量较低, 不能衰变出重子产物. 另一种暗物质解释是依靠暗物质衰变. 实验要求暗物质的衰变寿命大约为 10^{26}s , 并且衰变主要产物是轻子, 即可解释 PAMELA 和 ATIC 实验. 我们提出超对称模型里 R 宇称破坏项 $LL\bar{E}$ 可以导致上述结果, 暗物质即是超对称模型里面的 neutralino 粒子^[34]. 也有人提出通过 R 宇称破坏项使得 gravitino 粒子^[35] 或者右手 sneutrino^[36] 衰变, 来解释实验结果.

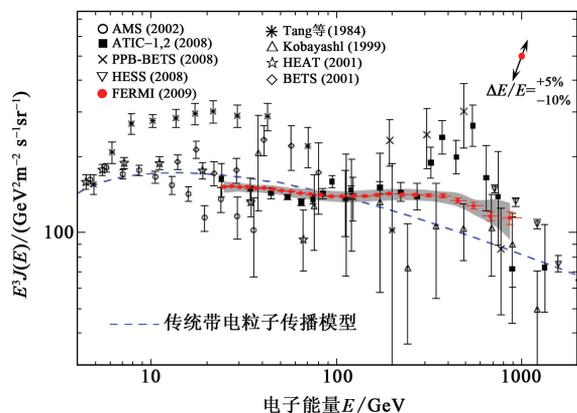


图 4 Fermi 实验组 2009 年 5 月公布的正负电子流量的数据^[26]. 横纵坐标与图 3 相同. 红色数据点为 Fermi 的实验测量值, 灰色阴影部分为系统误差. 蓝色虚线为传统带电粒子传播模型的预言值 (见网刊彩图)

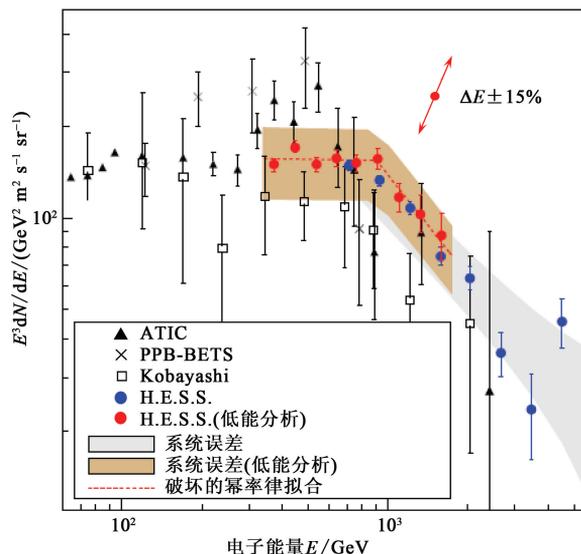


图 5 H. E. S. S. 实验组 2009 年 5 月公布的正负电子流量的数据^[37]. 横纵坐标与图 3 相同. 红色和蓝色点为 H. E. S. S. 的实验测量数据. 红色虚线是 H. E. S. S. 实验组根据其实验数据进行分段幂律拟合得到的 (见网刊彩图)

需要提到的是,最近的 Fermi (见图 4)^[26] 以及 HESS 实验(见图 5)^[37] 没有观测到 ATIC 实验的尖峰,而是在能量为 300GeV—800GeV 能量范围内,测到幂律正好为 -3 的正负电子流量能谱.这对于暗物质解释的影响是暗物质产物倾向于 μ 以及 τ 轻子,而不倾向于电子^[38].而在 Fermi GLAST 以及 HESS 实验之前,往往需要暗物质产生电子来提供 ATIC 观测到的尖峰.但是,在采取 μ 以及 τ 轻子这种选择以后,湮灭暗物质往往需要较大的 Boost Factor(BF),因为它们产生的正电子能量偏软.而这在 Gamma 光和中微子实验观测会受到限制,即 BF 不能够任意的大,而衰变的暗物质受这两类实验限制较少.除了暗物质解释,脉冲星产生的正负电子流量能谱能够很好地符合以上两个实验,并且不与各种 Gamma 光和中微子实验相冲突^[39].

6 讨论与展望

虽然暗物质存在的证据有很多,但是暗物质的存在主要是通过引力效果表现出来的.所以寻找暗物质非引力证据是目前暗物质研究的迫切需要.暗物质在加速器上的寻找,主要是考虑标准模型粒子碰撞可能会产生暗物质粒子.这些暗物质粒子是稳定的,而且不和探测器相互作用,表现为丢失能量. LHC 上如果观测到大量的能量失踪信号,而且它不能由标准模型中微子来解释的话(中微子在加速器上也表现为能量丢失信号),那有可能就是暗物质粒子被加速器产生出来了.另外,在最近为了解释 PAMELA、ATIC 以及 Fermi 的实验上,通常需要一个轻的中介粒子来提供 Sommerfeld 增强.这种粒子可能在低能的正负电子对撞机上产生,比如我国的 BESIII 加速器.我们最近通过研究发现, BESIII 加速器最好可以探测这种轻中介粒子的耦合系数到 $O(10^{-4}) - O(10^{-5})$ ^[40].如果暗物质可以与电弱对称性破缺直接相关,那么暗物质的探测可能与 Higgs 粒子的寻找相关^[41].

另外,除了目前大家研究最多的有弱的相互作用的有质量粒子暗物质(WIMP),还有其他的可能性,例如 SuperWIMP^[42],其意义为有极微弱相互作用的有质量粒子. SuperWIMP 的原型就是超对称里面的 gravitino 粒子.由于它和其他粒子的作用远比电弱相互作用要小,于是它自身不能在早期宇宙中达到热平衡.但是其他的粒子,比如 neutralino 能够达到热平衡,最后在宇宙膨胀中热退耦得到合适的残留密度,然后衰变到更轻的 gravitino 粒子.这样 gravitino 可以

得到正确的残留密度.在这种情况下因为相互作用太小,关于这类粒子的探测都将面临很大困难.

还有人认为,与其添加暗物质来解释天文学的观测,不如对牛顿引力进行修改来达到同样的目的,通常被称为 Modified Newtonian Dynamics (MOND). MOND 通过修改引力,能够解释银河旋转曲线,但是在其他实验的解释上并不是很成功,例如宇宙微波背景辐射的各向异性以及宇宙大尺度结构^[9].另外,也有针对广义相对论进行修改的 MOND,但是最近观测到的“子弹星团”不能由这类 MOND 来解释.该结果支持暗物质的假设,而不支持对广义相对论的修改^[3].

参考文献

- [1] Borriello A, Salucci P. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2001, 323: 285 [arXiv:astro-ph/0001082]
- [2] Hoekstra H, Yee H, Gladders M. *New Astron. Rev.*, 2002, 46: 767 [arXiv:astro-ph/0205205].
- [3] Clowe D, Bradač M, Gonzalez A H *et al.* *Astrophys. J.*, 2006, 648: L109 [arXiv:astro-ph/0608407]
- [4] Begeman K G, Broeils A H, Sanders R H. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1991, 249: 523
- [5] Komatsu E *et al.* [WMAP Collaboration]. *Astrophys. J. Suppl.*, 2009, 180: 330 [arXiv:0803.0547 [astro-ph]]
- [6] Olive K A, Steigman G, Walker T P. *Phys. Rept.*, 2000, 333: 389 [arXiv:astro-ph/9905320]
- [7] Kolb E W, Turner M S. "The Early Universe"
- [8] Murayama H. arXiv, 2007, 0704: 2276 [hep-ph]
- [9] Hooper D. arXiv, 2009, 0901: 4090 [hep-ph]
- [10] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. *Astrophys. J.*, 1996, 462: 563 [arXiv:astro-ph/9508025]
- [11] Moore B, Quinn T R, Governato F *et al.* *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1999, 310: 1147 [arXiv:astro-ph/9903164]
- [12] Bergstrom L, Ullio P, Buckley J H. *Astropart. Phys.*, 1998, 9: 137 [arXiv:astro-ph/9712318]
- [13] Primack J R. *SLAC Beam Line*, 2001, 31 (3): 50 [arXiv:astro-ph/0112336]
- [14] Taoso M, Bertone G, Masiero A. *JCAP*, 2008, 0803: 022 [arXiv:0711.4996 [astro-ph]]
- [15] Bertone G, Hooper D, Silk J. *Phys. Rept.*, 2005, 405: 279 [arXiv:hep-ph/0404175]
- [16] Ellis J R, Kelley S, Nanopoulos D V. *Phys. Lett. B*, 1991, 260: 131
- [17] Jungman G, Kamionkowski M, Griest K. *Phys. Rept.*, 1996, 267: 195 [arXiv:hep-ph/9506380]
- [18] Hooper D, Profumo S. *Phys. Rept.*, 2007, 453: 29 [arXiv:hep-ph/0701197]
- [19] Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G R. *Phys. Lett. B*, 1998, 429: 263 [arXiv:hep-ph/9803315]
- [20] Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G R. *Phys. Rev. D*, 1999, 59: 086004 [arXiv:hep-ph/9807344]
- [21] Randall L, Sundrum R. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83: 3370 [arXiv:hep-ph/9905221]

- [22] Appelquist T, Cheng H C, Dobrescu B A. Phys. Rev. D, 2001, 64: 035002 [arXiv:hep-ph/0012100]
- [23] Ahmed Z *et al.* [CDMS Collaboration]. Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 011301 [arXiv:0802.3530 [astro-ph]]
- [24] Angle J *et al.* [XENON Collaboration]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 021303 [arXiv:0706.0039 [astro-ph]]
- [25] Ylinen T, Edmonds Y, Bloom E D *et al.* [FERMI-LAT Collaboration], arXiv, 2008, 0812:2853 [astro-ph]
- [26] Abdo A A *et al.* [The Fermi LAT Collaboration]. arXiv, 2009, 0905:0025 [astro-ph, HE]
- [27] Adriani O *et al.* [PAMELA Collaboration]. Nature, 2009, 458: 607 [arXiv:0810.4995 [astro-ph]]
- [28] Chang J *et al.* [ATIC Collaboration]. Nature, 2008, 456: 362
- [29] Desai S *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]. Phys. Rev. D, 2004, 70: 083523 [Erratum-ibid. D, 2004, 70: 109901] [arXiv:hep-ex/0404025]
- [30] Ahrens J *et al.* [IceCube Collaboration]. Astropart. Phys., 2004, 20: 507 [arXiv:astro-ph/0305196]
- [31] Aslanides E *et al.* [ANTARES Collaboration]. arXiv, 1999, [astro-ph/9907432]
- [32] Liu J, Yin P F, Zhu S H. Phys. Rev. D, 2009, 79: 063522 [arXiv, 2008, 0812:0964 [astro-ph]]
- [33] Arkani N-Hamed, Finkbeiner D P, Slatyer T R *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 79: 015014 [arXiv:0810.0713 [hep-ph]]
- [34] Yin P F, Yuan Q, Liu J *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 79: 023512 [arXiv:0811.0176 [hep-ph]]
- [35] Ishiwata K, Matsumoto S, Moroi T. Phys. Lett. B, 2009, 675: 446 [arXiv:0811.0250 [hep-ph]]
- [36] Chen C R, Takahashi F. JCAP, 2009, 0902: 004 [arXiv:0810.4110 [hep-ph]]
- [37] Aharonian H E S. arXiv, 2009, 0905:0105 [astro-ph, HE]
- [38] Meade P, Papucci M, Strumia A *et al.* arXiv, 2009, 0905:0480 [hep-ph]
- [39] Hooper D, Blasi P, Serpico P D. JCAP, 2009, 0901: 025 [arXiv:0810.1527 [astro-ph]]
- [40] Yin P F, Liu J, Zhu S H. Phys. Lett. B, 2009, 679:362 [arXiv, 2009, 0904:4644 [hep-ph]]; Zhu S H. Phys. Rev. D, 2007, 75: 115004 [arXiv:hep-ph/0701001]
- [41] Zhu S H. Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 381; Zhu S H. Eur. Phys. J. C, 2006, 47: 833 [arXiv:hep-ph/0512055]
- [42] Feng J L, Rajaraman A, Takayama F. Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 011302 [arXiv:hep-ph/0302215]