

暗物质问题简介^{*}

周宇峰[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

摘要 暗物质的属性问题是当代物理学面临的一大挑战. 文章简要回顾了暗物质的发现历史, 已有的暗物质观测证据和粒子物理中的暗物质候选者以及暗物质丰度起源相关理论, 还介绍了近年来暗物质的空间间接探测和地下直接探测及其在理论上研究的新进展.

关键词 暗物质, 粒子物理

A brief introduction to the dark matter problem

ZHOU Yu-Feng[†]

(*Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract Understanding the nature of dark matter is a big challenge to the physics of our time. We briefly review the early history of the discovery of dark matter, the evidence of its existence from observations, its candidates, and the origin of its abundance in particle physics. An overview is given of the latest progress in its direct and indirect detections, and of the recent theoretical studies.

Keywords dark matter, particle physics

1 引言

20 世纪人类对微观世界和宇观世界的认识取得了辉煌的成就. 在被称为物理学上空两朵乌云的迈克尔孙-莫雷实验和黑体辐射问题的推动下, 20 世纪初的物理学取得了多个革命性的突破, 发现了大量新的现象和规律. 导致了相对论和量子论的诞生. 经过一个世纪的努力, 人类对物质结构的认识由原子、分子进入到了夸克和轻子层次. 这些物质世界的基本组员及其相互作用规律被总结在一个称为“粒子物理标准模型”的理论中, 该理论成功地解释了目前已知的大量高能实验现象. 其预言的新基本粒子(如中间规范子和重味夸克等)相继被实验所证实. 粒子物理与现代宇宙学相结合, 导致了大爆炸宇宙论的出现, 成功地解释了宇宙的轻元素起源, 并准确地预言了当今宇宙存在残留温度即各向同性微波背景辐射(CMB)(见图 1).

随着精确宇宙学时代的到来, 大量前所未有的高精度天文观测给人类的科学认识再次带来了新的

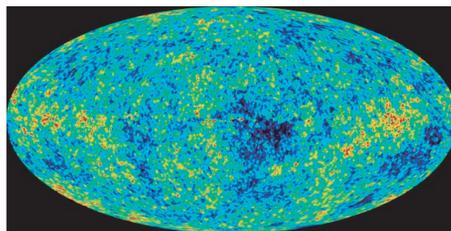


图 1 威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)观测到的宇宙微波背景辐射

挑战: 不同尺度的观测均显示宇宙中的绝大部分物质是由一种在宇宙学时间尺度上稳定、不发光、非相对论性运动的、有质量的粒子构成, 简称暗物质. 例如我们所在的银河系就被笼罩在一个巨大的暗物质晕中. 对宇宙中原初核合成的研究表明, 暗物质不属于我们已知的任何一种由原子、分子构成的常规重子物质, 而是一种尚未被认识的新物质. 超新星观测发现, 宇宙在某种未知的排斥力量的推动下正在加速膨胀, 这和我们从万有引力理论中预期的减速膨

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB833000)资助项目
2011-01-24 收到

[†] Email: yfzhou@itp.ac.cn

胀背道而驰,这种未知的排斥力量通常被称为暗能量.暗物质与暗能量的存在几乎颠覆了我们以前对宇宙的认识,人们意识到,占宇宙能量组分最多的物质,我们反而了解得最少.对暗物质和暗能量的研究必将再次带来新的认识革命.

2 暗物质存在的天文观测证据

暗物质发现的历史可以追溯到 20 世纪 30 年代.1933 年,Zwicky(见图 2)通过对后发座星系团中星系的速度弥散度推断出的星系团质量,比从星系团中发光星体推出的质量足足大了数百倍.因此,他得出结论说,该星系团主要由不发光的物质构成,并首次称之为“暗物质”^[1].不过此观点当时未能引起学术界的重视.1936 年,Smith 通过对室女座星系团中星系运动的研究也发现了类似现象.1939 年,Babcock 通过对仙女座大星云的光谱研究发现,星系外围区域的运动速度比预期的要大,对应于较大的质光比,这暗示着该星系中可能存在大量的暗物质.1959 年,Kahn 和 Woltjer 研究了仙女座大星云和银河系的相对运动,从中推论我们人类所处的本星系团也可能主要由暗物质构成.暗物质存在的重要证据来自于 1970 年 Rubin(见图 2)和 Ford 对仙女座大星云中星体旋转曲线的研究.运用改进的观测技术,他们可以探测到远离星系核区域(大约 24kpc)的可见星体的运动速度.按照牛顿万有引力定律,如果星系的质量主要集中于星系核区的可见星体,那么星系外围的星体的速度将随着距离增大而减小.但观测结果表明,在相当大的范围内,星系外围的星体的速度是恒定的(见图 3)^[2,3].这意味着或者牛顿万有引力定律是不正确的,或者星系中有大量的不发光物质并且它们不分布在星系核心区,且其质量远大于发光星体的质量总和.他们的工作启发了大量的后续研究,目前已知的几乎所有旋臂星系的质量都主要由暗物质构成,甚至可能存在几乎完全由暗物质组成的星系.

暗物质虽不发光,但其存在可以通过引力效应显现出来.根据爱因斯坦的广义相对论,光线经过强引力场时将会发生弯曲.如果从遥远星系发出的光线经过有暗物质的区域到达地球,地球上的观测者将会发现星系图像的改变(见图 4).改变可表现为单个星系影像的变形,出现环状、弧状的影像,甚至出现多个影像;还可表现为大量背景星系影像的整体变化,可通过统计方法分析;还可表现为星体亮度

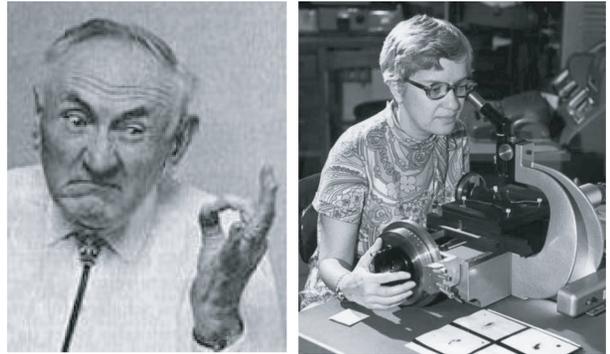


图 2 科学家 Zwicky(左)和 Rubin(右)

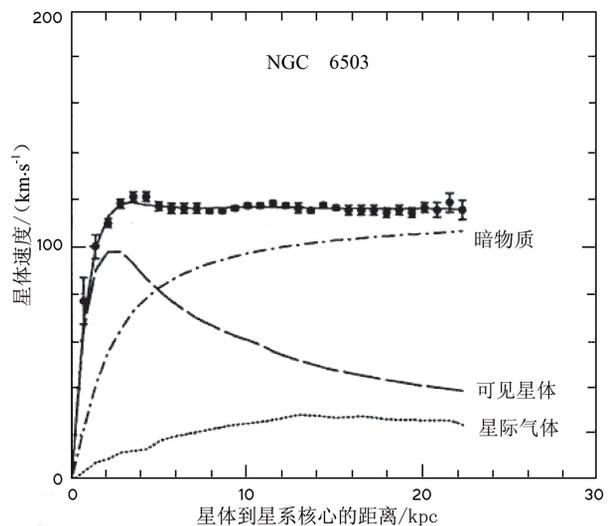


图 3 星系旋转曲线测量结果^[3]

的变化.通过引力透镜效应的研究,人们也发现了大量暗物质存在的证据.



图 4 强引力透镜效应和弱引力效应

对星系团中白炽热气体 X 射线的研究同样显示了暗物质的存在.对宇宙中大尺度结构形成的模拟研究也强烈支持非相对论性运动的暗物质存在.在整个宇宙尺度上,通过对宇宙中微波背景辐射中微小各向异性的精细观测,可以确定出宇宙中暗物质的总量.目前的观测表明,宇宙总能量的 23% 由暗物质贡献,构成星体和星际气体的物质只占 4%,其余为暗能量(见图 5).

暗物质的存在已经得到了广泛的认同.然而暗物质是什么却是一个巨大的谜团.由于暗物质的非重子性,它不可能是由构成我们地球和星系的任何

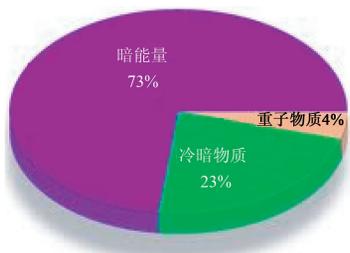


图5 冷暗物质、暗能量和重子物质(主要为原子)占宇宙能量组成比例示意图

一种已知物质组成的。我们目前了解到的暗物质特性仅仅包括在宇宙学尺度上稳定、不带电荷、非重子、有质量和非相对论性运动等几个方面。目前暗物质的存在证据全部来自天文观测，其存在是通过其引力效应间接推断出来的。如果暗物质是某种新的基本粒子，人们猜测它很有可能会和我们已知的常规物质存在某些微弱相互作用，这种相互作用有可能被高灵敏度的实验室探测仪器探测到，这将有可能给出暗物质存在的最直接证据，并可由此进一步揭示暗物质粒子的属性。暗物质参与的相互作用可表现为暗物质湮灭到常规物质或与常规物质发生碰撞和散射。这启发人们到高能宇宙射线和地下极低成本探测仪器中去寻找暗物质留下的踪迹。目前，全世界已经有多个暗物质卫星探测实验和数十个暗物质地下探测实验在积极进行中。

3 基本粒子物理中的暗物质丰度起源和暗物质候选者

宇宙中暗物质的存在对描述微观世界的粒子物理理论提出了巨大挑战，已经成为当前粒子物理研究的重要领域。解释暗物质的丰度并预言其属性已成为一些新粒子物理理论模型的出发动机。目前的粒子物理标准模型在描述微观粒子及其相互作用方面是一个非常成功的理论模型。在这一模型中，物质世界的基本组元包括三代夸克和三代轻子。它们之间的相互作用包括强相互作用和电弱相互作用，满足 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 局域规范对称性（见图6）。其中的 $SU(2) \times U(1)$ 电弱对称性通过一个对称性自发破缺机制，即黑格斯(Higgs)机制发生破缺，残留下一个严格的 $U(1)$ 电磁对称性。对应的传递相互作用的粒子为8个胶子，3个电弱规范中间玻色子和光子。这一机制使得夸克、轻子和电弱规范中间玻色子获得了质量。胶子和光子在对称性的保护下是零质量的。标准模型取得了前所未有的成功，所预言的电弱规范中间玻色

子、重味夸克、强相互作用的渐近自由行为、CP对称性破缺机制等都和实验符合很好，因此而产生了多项诺贝尔物理学奖。

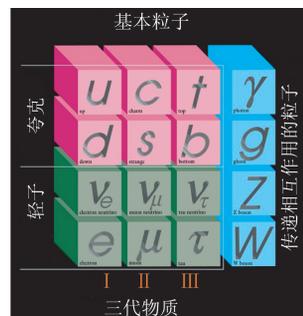


图6 粒子物理标准模型中的基本粒子(其中包括三代夸克,三代轻子和四种传递相互作用的粒子)

当然，标准模型的正确性仍有待进一步检验，该模型中预言的黑格斯粒子尚未在实验室中被发现。目前正在运行的位于欧洲日内瓦的大型强子对撞机将发现黑格斯粒子作为其首要目标。标准模型在理论上也存在明显问题，比如电弱对称性自发破缺在理论上导致了规范等级问题。电弱精确检验实验表明，黑格斯粒子的质量应该和电弱规范中间玻色子的质量在量级上相近。然而研究表明，黑格斯粒子的质量对量子辐射修正是高度敏感的，如果标准模型适用于较高能量标度，则很难理解一个轻的黑格斯粒子的存在。标准模型中的费米子质量差别巨大，从质量几乎为零的中微子到比金原子还重的顶夸克，其起源还不清楚。夸克禁闭的机制还没有很好理解。和物质—反物质不对称相联系的CP对称性破缺位相的起源也还不清楚。人们普遍相信应存在超出标准模型的更基本理论，而目前的标准模型是这个基本理论的一个低能有效近似。

粒子物理标准模型存在的另一个问题是如何解释为什么宇宙中的重子物质远多于反重子物质。早在20世纪60年代，前苏联科学家萨哈诺夫指出，要产生宇宙中的物质—反物质不对称，需要满足3个基本条件：相互作用破坏重子数守恒；宇称和宇称—电荷共轭联合对称性破缺；偏离热平衡。标准模型在定量上无法满足上述条件，一方面无法产生偏离热平衡所需的强一阶电弱相变，因为所要求的黑格斯粒子质量要很轻，这与电弱精确检验给出的黑格斯质量限制不符；另一方面没有足够大的CP破坏源。因此宇宙中净重子物质的存在是对标准模型的有力挑战。

宇宙中暗物质的存在再一次明确告诉我们，必须建立超出标准模型的更基本理论。粒子物理标准

模型中只有中微子可能是暗物质候选者. 但从早期宇宙中热退耦出来的中微子几乎是以光速运动的, 与暗物质低速运动的特征不相符合, 无法成为暗物质的主要组成部分. 标准模型中没有暗物质的候选者, 这明确告诉我们, 标准模型不是一个完备的理论, 必须加以修改和扩充.

根据目前流行的宇宙学模型, 早期宇宙处于高温状态, 各种粒子通过快速交换能量处于热平衡态, 其粒子数密度满足玻尔兹曼分布, 宇宙的温度随着其膨胀而逐渐下降, 直到今天的温度为 3K 左右. 在温度下降的过程中, 与热力学平衡体系相互作用较弱的稳定粒子会在某个时期脱离热平衡, 其粒子数密度不再随温度而快速下降, 成为剩余丰度. 这些剩余粒子最终形成今天宇宙中存在的各类基本元素. 这一热退耦机制很好地解释了宇宙中的轻元素比如氦的丰度. 暗物质作为一种弱相互作用的粒子, 其丰度也有可能是来源于热力学退耦. 研究表明, 如果暗物质的相互作用强度和质量在电弱能标附近, 可以自然解释宇宙中的暗物质丰度. 这一类候选者通常被称为弱相互作用的有质量粒子(WIMP). 在 WIMP 类暗物质丰度的计算中, 由于存在各种数量级上差别巨大的物理量如 CMB 温度、哈勃常数、普朗克常数等的偶然相消, 导致了最后要求的暗物质质量在电弱质量标度附近, 而很多新物理理论模型中预期的暗物质质量也正好在电弱质量标度附近. 这种巧合被称为 WIMP “奇迹”(WIMP miracle). 当然, 不起源于热退耦的非 WIMP 类型的暗物质也是有可能存在的, 比如与强相互作用 CP 破坏相联系的轴子等. 图 7 给出了可能的暗物质粒子候选者.

在众多超出粒子物理标准模型的理论模型中, 超对称模型是一类能够较好地解决规范等级问题的理论模型, 因此受到了广泛关注. 在最小超对称模型中, 为了防止质子衰变, 通常可以引进 R-宇称, 并要求超对称粒子和标准模型粒子具有不同的宇称. 这使得最轻的超对称粒子自动成为稳定的 WIMP 类型暗物质候选者. 最轻的超对称伴子可以是电中性的中性伴随子(neutralino), 是一类 WIMP 类型的具有费米子属性的暗物质. 中性伴随子主要湮灭到重夸克、规范玻色子和黑格斯粒子等. 综合目前已有的高能正负电子对撞机和能区在 B 介子附近的高亮度对撞机(B-工厂)的实验测量, 最小超对称模型的参数空间得到了较强的限制. 研究表明, 在这类模型中, 中性伴随子的质量约数百个 GeV, 其构成以规

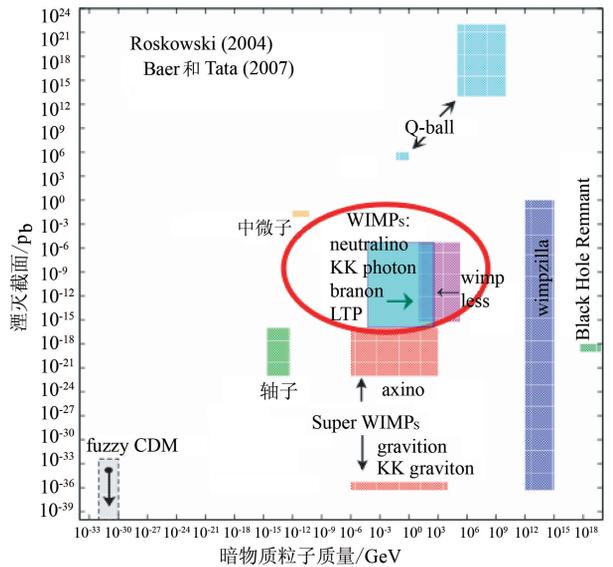


图 7 可能的暗物质粒子候选者(包括 WIMP 类型暗物质粒子)^[4]

范超伴子为主. 与其允许的参数空间范围相对应的暗物质—核子弹弹性散射界面在 10^{-43} cm^2 到 10^{-46} cm^2 之间. 这为在地下实验室探测暗物质给出了明确的指导. 在超对称模型中, 其他可能的暗物质候选者包括中微子的超对称伴子 sneutrino 和引力子的超对称伴子 gravitino. 其中 sneutrino 由于与核子的耦合太强而受到实验的严格限制, gravitino 作为暗物质的候选者则受到宇宙中轻元素合成的限制.

在一类额外维度模型如 UED 模型中, 由于卡鲁查—克莱因(Kaluza—Klein)对称性的存在, 标准模型粒子对应的最小 Kaluza—Klein 激发态(简称 KK 激发态)无法衰变到标准模型粒子, 所以 KK 激发态可以成为暗物质的候选者. 比如最小 KK 激发态 $B^{(1)}$, 热力学剩余丰度要求其质量在 400—1200GeV 之间. 它与标准模型粒子的耦合与超对称模型中的中性伴随子有很大不同, 主要湮灭产物为费米子对, 其中以带电轻子为主. 这导致其与核子的散射截面较小, 直接探测的难度较大. 但其较大的轻子对湮灭截面可能在宇宙线轻子能谱中被观测到. 在小黑格斯模型(little Higgs 模型)及其各种变种版本中, 可以有多种暗物质候选者. 在这类模型中, 为了满足现有电弱精确检验实验的限制, 仿效超对称理论, 可以引入 T-宇称, 并使得标准模型粒子与模型中的新粒子具有不同宇称. 这使得理论中自然出现稳定的粒子, 如自旋为 1 的重光子 A_H , 其质量约在 100—300GeV 左右, 它主要通过黑格斯粒子耦合到规范粒子和费米子对.

4 近期暗物质实验探测进展

最近几年,暗物质空间和地下探测实验均取得了重大进展. 2008 年,欧洲的 PAMELA 卫星实验公布了宇宙线中反物质的探测结果,显示地球附近太空中的正电子能谱在能量约高于 10GeV 的区域明显上升,与传统的宇宙线理论预言的下降能谱不符合,同时该实验组在能量约低于 100GeV 的能区内未探测到超出背景的反质子(见图 8). 随后,我国紫金山天文台参与的 ATIC 高空气球探测结果显示,高能区正负电子的总能谱在能量约为 600GeV 的区域有明显的超出背景现象,并且能谱有明显的类似鼓包(bump)的结构(见图 9). 这一结果与以前的 PPB-BETS 气球实验结果相一致. 其后的美国 Fermi LAT 卫星实验以前所未有的高精度再次测量了正负电子的总能谱,其结果也显示超出背景现象,但能谱变化较平缓,与 ATIC 的测量结果并不完全一致(见图 9). 采用地面大气切连科夫望远镜的 HESS 实验组的近期结果也与 Fermi LAT 的结论相类似. 当然,仅依靠目前的观测数据还无法明确判定超出正负电子的真正来源,天体物理学解释,比如近距离脉冲星的贡献也可以与观测结果很好地符合.

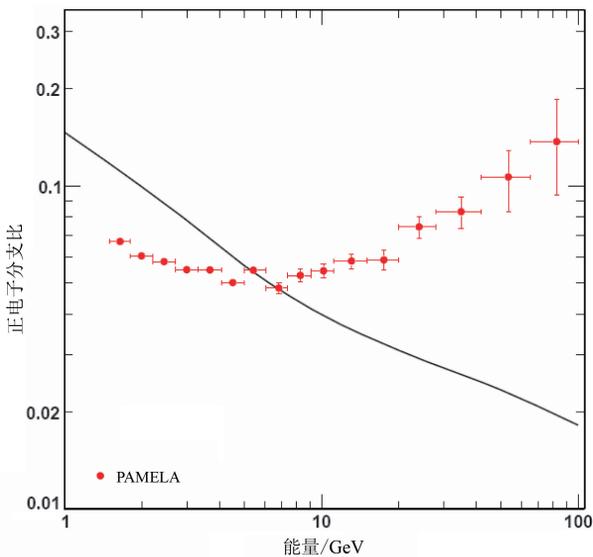


图 8 PAMELA 卫星实验观测结果^[5](该结果显示,宇宙线中正电子超出背景预期.图中实线对应理论背景预期结果,红色点为实验观测数据,见《物理》网刊彩图,下同)

在暗物质地下探测方面,位于意大利格兰萨索的 DAMA 实验组致力于探测暗物质与核子散射中可能存在的由地球运动引起的周年变化,宣称在长

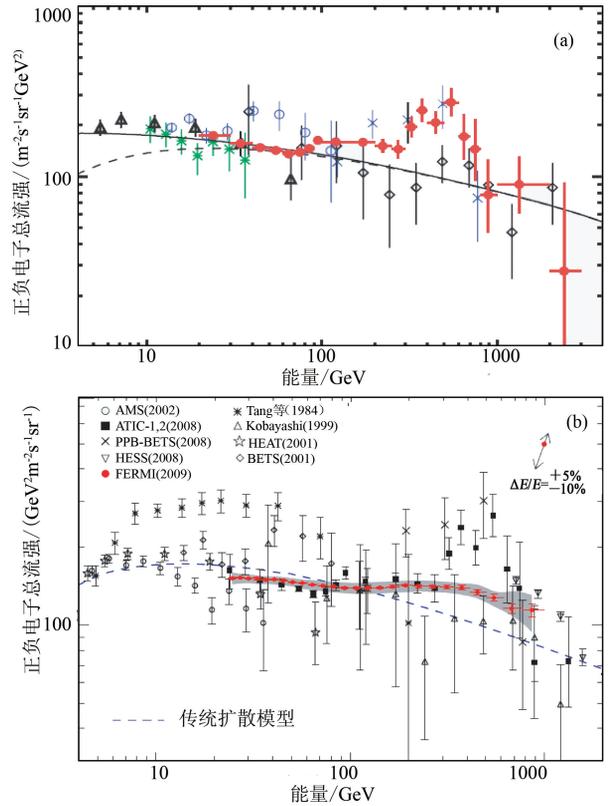


图 9 ATIC 实验 (a) 和 Fermi 实验 (b) 对高能正负电子总流强超出的观测结果^[6,7]((a)图中的实线和虚线对应不同理论模型背景预期;(b)图中红色点代表实验观测数据,虚线对应于传统扩散模型中的理论背景预期)

达 12 年的时间里探测到了包括本底在内的总信号的规则的年度波动,总曝光量达 0.82 吨·年,其统计显著性高达 8.2σ . 对应的暗物质质量在 10 到数十个 GeV 左右. DAMA 实验组认为,其结果完全排除了本底、环境温度、系统不稳定性等诸因素的影响,是到目前为止暗物质探测唯一的正面结果. 然而这一结果尚未得到其他实验的证实. 目前其他的直接探测实验多采用排除本底的实验方法,如位于格兰萨索的 XENON 实验和美国明尼苏达州的 CDMS 实验等. 实验的灵敏度正在大幅提高,已经对某些流行的暗物质理论模型如最小超对称模型给出了一定的限制. 2009 年末,CDMS-II 实验组宣布,发现了两个疑似暗物质与核子碰撞的事例,碰撞反冲能在 10keV 左右,对应的暗物质质量有可能在小于 100GeV 的区间内,这些结果引起了广泛关注^[8]. 但目前还不能排除观测到的事例是由统计误差引起的. 近期同样位于明尼苏达的 CoGent 实验组也宣称观察到了轻的暗物质粒子的可能迹象^[9].

近期实验方面的进展极大地推动了对暗物质的理论研究. 目前针对近期实验结果的暗物质理论模

型和唯象分析研究处于极为活跃的状态. 用目前流行的 WIMP 类型暗物质来解释 PAMELA, ATIC 和 DAMA 实验的结果存在一定的困难. 主要表现为, 较难产生大的宇宙线正电子信号, 并同时不伴随反质子的产生. 目前理论上正在探索各种可能的新机制, 包括量子索末菲效应、共振态效应以及考虑暗物质的微弱衰变等, 同时也在探讨暗物质与核子非弹性散射的可能性来解释直接探测的实验结果. 非传统的暗物质非热退耦产生机制在近期也得到了较多的研究. 受到暗物质探测实验结果的推动, 暗物质与重子物质共同起源的想法在近期又得到了重视, 出现了相当多的有预言能力的新理论模型和机制.

5 我国暗物质研究进展和展望

目前世界各国都在集中力量研究暗物质和暗能量. 国际上许多进行精确宇宙学研究和探测暗物质暗能量的地面和空间的实验正在计划和筹建中. 我国也正在积极推进暗物质方面的研究工作. 在积极参与暗物质暗能量探测国际合作组并做出了重要成果的基础上, 今年科技部的国家重点基础研究发展计划项目“暗物质暗能量的理论研究与实验预研”正式启动, 将充分利用理论研究与实验探测设计相结

合以及多学科交叉融合的优势, 积极发挥理论先行的作用, 突破探测器的关键技术, 优化实验方案设计, 为推进我国大科学目标的建设做出贡献. 目前已经取得了很好的进展, 提出了一些有特色的暗物质理论模型和机制. 2010 年 12 月, 位于我国锦屏山的一个小型暗物质探测实验室初步建成. 该实验室具有得天独厚的有利条件, 处于距离锦屏山地表 2400m 之下, 能很好地屏蔽各种宇宙射线背景的干扰, 是目前为止世界上最深的地下探测实验室. 国内多家研究单位将在这里利用不同的暗物质探测器展开新一轮的暗物质探测实验, 将会为最终解开暗物质之谜作出贡献.

参考文献

- [1] Zwicky F. *Helvetica Physica Acta*, 1933, 6:110
- [2] Rubin V, Ford W K. *Astrophysical Journal*, 1970, 159:379
- [3] Begeman K G, Broeils A H, Sanders R H. *MNRAS*, 1991, 249:523
- [4] Bertone G, Hooper D, Silk J. *Physics Reports*, 2005, 405:279
- [5] Adriani O *et al.* *Nature*, 2009, 458:607
- [6] Chang J *et al.* *Nature*, 2008, 456:362
- [7] Abdo A A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:181101
- [8] Ahmed Z *et al.* *Science*, 2010, 327:1619
- [9] Aalseth C E *et al.* arXiv:1002.4703[astro-ph.CO]