暗物质间接探测现状

毕效军*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*E-mail: bixj@mail.ihep.ac.cn

收稿日期: 2011-10-07; 接受日期: 2011-11-08; 网络出版日期: 2011-11-25

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11075169)

摘要 本文简介了暗物质间接探测的最新进展. 主要介绍近年来 PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) 卫星所探测到的宇宙线正电子超出的问题, 及相关的理论解释. 本文还介绍了 PAMELA 对于宇宙线反质子的测量结果, ATIC 和 Fermi 卫星对于正负电子总能谱的测量结果等. 另一个重要的结果来自于 Fermi 和地面实验对于伽马射线的测量结果, 这些结果对暗物质性质给出较强的限制.

关键词 暗物质, 宇宙线, 伽马射线

PACS: 95.35.+d, 96.50.S-, 95.85.Pw

天文观测表明宇宙中存在大量的不发光的物质, 称为暗物质. 暗物质由于其引力作用而被天文观测所证实, 如星系的旋转曲线, 星系团的 SZ (Sunyaev-Zel'dovich) 效应或弱引力透镜效应, 以及微波背景的观测等. 目前我们知道暗物质是中性的、稳定的一种粒子, 而且, 在宇宙结构形成的时候暗物质粒子是非相对论运动的, 即所谓冷暗物质. 这些特征表明, 暗物质粒子只能存在于超出粒子物理标准模型的理论模型中. 为了通过非引力的作用直接探测到暗物质粒子, 世界各国开展了广泛的实验研究, 试图直接找到暗物质粒子的迹象, 探明暗物质粒子的性质. 要探明暗物质粒子的性质无非有 3 种途径, 一种是探测暗物质粒子和探测器粒子发生碰撞所产生的信号, 这称为暗物质的直接探测. 为了屏蔽宇宙线所造成的干扰信号, 直接探测实验通常在很深的地下实验室进行. 另一种途径是研究两个暗物质粒子碰撞后湮灭并转化为可以探测的粒子, 如伽马光子、中微子、正反电子、正反质子等, 这称为暗物质的间接探测.

间接探测实验就是通常的宇宙线探测实验, 利用高灵敏度、高分辨率的探测装置可能探测到微弱的不同于宇宙线本底的由暗物质湮灭所造成的宇宙线信号. 最后一种探测方法是利用通常的粒子在高能下的碰撞过程, 研究碰撞所直接产生出来的暗物质粒子. 这种研究在通常的对撞机实验上实现, 如 LHC 等. 有关暗物质介绍请见文献[1~4].

本文主要介绍暗物质间接探测的实验现状. 根据暗物质湮灭的产物, 带电粒子的探测和中性粒子的探测会有所不同. 带电粒子在银河系的磁场中运行会被偏折, 所以带电粒子会失去其源的方向的信息, 我们只能通过能谱证认暗物质的信号. 与此不同, 伽马射线和中微子不会受到银河系磁场的偏折, 因而可以追溯其来源, 这是用伽马光子和中微子探测暗物质的优势. 暗物质间接探测在 20 世纪 80 年代就由 Sik 和 Freese 等人提出, 当时他们建议探测来自于太阳或地球内部的暗物质湮灭所产生的中微子, 以此来证实暗物质的存在. 随后, Ellis, Gondolo 等人提

引用格式: 毕效军. 暗物质间接探测现状. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1354-1357

Bi X J. Status of indirect detection of dark matter (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 1354-1357, doi: 10.1360/132011-973

出了用高能伽马射线和正电子等探测来自银河系晕或银河系中心的暗物质湮灭信号. 时至今日, 世界各国大量的宇宙线实验在进行暗物质信号的寻找. 在空间有伽马射线探测器 Fermi 卫星, 带电粒子探测卫星 PAMELA 和在国际空间站的 AMS02 等, 地面上更是有大气切伦科夫伽马射线望远镜 HESS, Magic, Veritas 等, 中微子望远镜 IceCube, Antares 等, 以及地面大气簇射阵列中意 ARGO 实验. 这些实验正在积累大量的实验数据, 努力寻找暗物质的湮灭信号的蛛丝马迹.

1 正电子超出

2008 年底, PAMELA 卫星实验公布了一个非常轰动的实验结果, 即在宇宙线探测中发现正电子的比例远远高于预期的结果^[5]. 通常宇宙线中不包含正电子等反粒子, 但宇宙线在银河系空间中传播的过程中会和星系际物质相互作用而产生次级粒子, 如正电子、反质子、伽马光子等. 目前的观测对于宇宙线的传播理论有着较强的限制, 因此可以比较准确的预言宇宙线中次级正电子的能谱和所占的比例. PAMELA 观测给出了宇宙线正电子在正负电子总能谱中所占的比例, 发现在大于 10 GeV 处观测值远高于宇宙线理论所预言的结果. 这个结果于 2009 年 4 月份发表在《自然》杂志^[5]. 与此同时, PAMELA 也观测了宇宙线中反质子与质子的比例, 观测结果与宇宙线模型所预言的结果却符合的非常好.

PAMELA 在 2010 年发表了他们最新的关于反质子的结果, 这个结果和 2008 年公布的结果一致, 但精度更高, 而且能量也达到 100 GeV 以上. 这些结果和宇宙线物理所预期的符合非常好, 因而, 对于暗物质所贡献的反质子给出了极强的限制.

在 PAMELA 的结果发表之前, 气球实验 ATIC 已在 2008 年 11 月份在《自然》杂志发表了它对于电子总能谱的测量结果^[6]. 由于 ATIC 无法区分电荷, 因此, 它给出的是正负电子的总能谱. ATIC 的结果发现正负电子的总能谱在 600 GeV 处远高于原来的预期, 尤其是在约 600 GeV 的地方总能谱有一个“尖锐”的超出. 这一超出用天体起源很难理解, 这个结果同样得到了极大的关注.

在 2009 年初, Fermi 卫星也发表了电子总能谱的测量结果^[7]. Fermi 的结果同样发现电子能谱在高

能超出预期的结果, 但和 ATIC 不同, Fermi 没有发现 600 GeV 处有 ATIC 所发现的“尖锐”超出. 总之, ATIC 和 Fermi 测量的总能谱都超出了预期的能谱, 但它们之间还不完全一致. 这个差别只能通过第三方的实验, 如 AMS02, 给出最终的判断. 这一系列的实验结果引起了广泛的关注, 大量的理论解释文章发表, 试图提出理论模型以解释这些实验结果. 这些研究结果大致分为两大类, 一类文章是基于天体物理的起源, 如认为是太阳系附近的超新星遗迹、脉冲星等贡献了多余的正负电子, 从而引起了正电子比例和总能谱的超出, 或者是宇宙线传播过程中的一些效应所造成的. 另外一大类的工作则是认为这些正负电子的超出可能和暗物质存在联系, 如用暗物质湮灭或衰变解释这些数据.

比如, 人们研究了距离太阳系不远的几颗脉冲星, Geminga, B0656+14 等, 计算了它们辐射正负电子对的能谱和流强以及传播到地球的能谱. 研究发现, 如果脉冲星辐射的能谱参数合适, 这些脉冲星贡献的额外的正负电子可以用来解释 PAMELA 等实验结果^[8]. 如果用暗物质解释 PAMELA 的实验数据, 研究表明, 需要暗物质具有独特的性质^[9]. 第一, 暗物质主要和轻子相互作用, 而和夸克的相互作用比较弱. 这是因为, PAMELA 实验只是观测到了正电子的超出, 而反质子并没有超出, 这就要求暗物质和夸克的作用不能太强. 第二, 暗物质的湮灭速度要非常大, 才能解释实验上观测到的正负电子的超出.

如果暗物质是早期宇宙通过热碰撞过程产生的, 那么暗物质的密度对于暗物质的湮灭截面就给出一定的限制. 随着宇宙暗物质密度的精确测量结果, 这对暗物质的湮灭截面给出很强的限制. 但是, 为了解释 PAMELA 给出的正电子超出就要求暗物质的湮灭截面要远远大于暗物质密度所给出的限制. 因此, 这就需要一些特别的暗物质模型, 才能很好解释 PAMELA 的数据和早期暗物质的产生过程.

如果认为暗物质湮灭产生了实验上所观测到的多出的电子, 那么通过观测数据就可以限制暗物质的性质, 如暗物质粒子的质量、和普通物质的相互作用强度等. 一种整体拟合的办法给出了暗物质的性质^[9], 如果 ATIC 的实验数据是对的, 那么暗物质质量大约应该是 700 GeV, 而且主要的湮灭产物是电子对. 而如果认为 Fermi 的数据是正确的, 那么暗物质质量大约是 2 TeV, 而主要的湮灭产物则是 μ 轻子.

总之, 目前由于实验数据的误差仍然比较大, 用天体起源和暗物质起源都可以给这些结果比较好的解释. 而现在最大的问题是 ATIC 和 Fermi 的实验数据不自洽, 这给理论解释带来了混乱, 采用不同的实验数据会导致不同的理论解释. 因此, 人们寄希望与 2011 年发射的 AMS02 将给出比现在的结果更加精确且能量范围更广的实验数据.

2 伽马射线的结果

暗物质湮灭到伽马射线有两种不同的谱形, 一种是暗物质直接湮灭到一对伽马射线光子, 这样的伽马射线具有确定的能量, 即暗物质质量, 这种谱形称为线性谱. 这种谱是暗物质湮灭独有的一种信号, 因此如果能够探测到这样的线性谱形的伽马射线信号, 那就一定是暗物质的信号. 但由于暗物质是电中性的, 与光子没有直接的耦合, 这样的过程是通过真空中的量子扰动实现, 流强非常低, 探测非常困难. 此外, 暗物质在湮灭到其他的末态时, 这些态在衰变过程中也会发射伽马射线, 这样的伽马射线的流强较大, 容易探测. 但是这样的能谱没有独特的特征, 因而, 难以和宇宙线中的伽马射线本底区分.

Fermi 卫星已经根据它所积累的实验数据对线性伽马射线能谱进行了寻找, 结果在 30~200 GeV 间没有发现任何线性伽马谱存在的迹象^[10]. 这导致线性伽马射线能谱的流强上限大约是 $(0.6 \times 10^{-9} \sim 4.5 \times 10^{-9}) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 这就给暗物质湮灭到线性伽马的湮灭截面一个限制. 此外, Fermi 卫星另外一个非常重要的结果就是探测银河系的弥散伽马射线. 所谓的弥散伽马射线就是来自银河系星际空间的伽马射线的辐射, 这是由于宇宙线在星际空间传播的时候和星际物质相互作用造成的. 在 Fermi 之前, EGRET 卫星曾经对此进行了观测, 它们的观测表明, 弥散伽马射线的能谱和宇宙线模型所预期的不一致, 在 GeV 附近存在明显的超出. 这曾经导致了很大的关注, 人们认为这些超出的弥散伽马射线可能是由于暗物质湮灭造成的. 但也有人认为这些超出可能是 EGRET 卫星的

探测器的问题造成的, 因此, 人们曾寄希望于 Fermi 给出澄清. Fermi 很快利用它们的观察数据否定了弥散伽马存在 GeV 超出, Fermi 的测量结果和宇宙线预言的结果符合的非常好. 这就否定了暗物质湮灭会给弥散伽马射线很大贡献的可能. 此外, Fermi 组根据他们的分析结果还发表了几个不同的区间的弥散伽马射线的观测结果. 这些区间都具有不同的天文特点, 但所有这些观测的弥散伽马射线都和宇宙线物理的预期符合的比较好.

总之, Fermi 对于伽马射线的观测结果和宇宙线物理的预期符合的非常好, 没有任何超出本底的迹象被发现. 这就对暗物质的湮灭速率一个很强的限制. 越来越多的研究表明, Fermi 给出的对于伽马射线的限制可能和暗物质湮灭解释宇宙线正电子超出存在矛盾. 这是因为, 暗物质湮灭到轻子会自然辐射出伽马射线, 由于解释正电子超出要求湮灭截面很大, 这样伽马射线的辐射也很强, 会和 Fermi 的观测相矛盾. 目前的现状表明, 这一矛盾是和暗物质的空间分布有关的, 在某些情形下, 有可能排除暗物质模型. 而衰变暗物质受到的限制要弱很多. 除 Fermi 以外, 地面切伦科夫望远镜对银心、矮星系等进行观测也对暗物质的湮灭截面进行了相应的限制. 地面切伦科夫望远镜对于暗物质的限制相比 Fermi 要弱一些. 羊八井 ARGO 实验同样可以通过对矮星系的观测限制暗物质的湮灭. ARGO 羊八井的灵敏度比切伦科夫望远镜要差, 因而其限制也稍弱一些. 由于 ARGO 具有大的视场, 所以 ARGO 可以同时观测几个矮星系并对其中的暗物质湮灭进行限制.

预言暗物质湮灭的流强最大的不确定性来自于暗物质的密度分布函数, 这是由于暗物质的密度分布一般通过计算机模拟获得, 而由于计算机的分辨有限, 因而, 在很小的尺度上有很大的不确定性. 这些不确定性直接影响了暗物质湮灭的计算和通过实验观测探测暗物质性质. 因而, 间接探测暗物质粒子的信号和天文研究暗物质分布是紧密关联的, 必须结合天文研究, 更准确了解暗物质分布的信息才能更准确了解暗物质探测实验对于暗物质性质的限制.

参考文献

- 1 Bi X J, Qin B. Dark matter and its detection (in Chinese). *Physics*, 2011, 40(1): 13–17 [毕效军, 秦波. 暗物质及暗物质粒子探测. *物理*, 2011, 40(1): 13–17]

- 2 毕效军, 常进. 空间观测暗物质粒子. 中国国家天文, 2009, (8): 20–25
- 3 Chen X L. Review on dark matter research (in Chinese). Sci Tech Rev, 2006, 24(1): 15–18 [陈学雷. 暗物质研究评述. 科技导报, 2006, 24(1): 15–18]
- 4 Kolb E W, Turner M. The Early Universe. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- 5 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. [PAMELA Collaboration]. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. Nature, 2009, 458: 607–609
- 6 Chang J, Adams Jr J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. Nature, 2008, 456: 362–365
- 7 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. [The Fermi LAT Collaboration]. Measurement of the cosmic ray $e^+ + e^-$ spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi large area telescope. Phys Rev Lett, 2009, 102: 181101
- 8 Profumo S. Dissecting cosmic-ray electron-positron data with Occam's Razor: The role of known Pulsars. arXiv: 0812.4457
- 9 Liu J, Yuan Q, Bi X J, et al. A Markov chain monte carlo study on dark matter property related to the cosmic e^+ excesses. Phys Rev D, 2010, 81: 023516
- 10 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. [Fermi-LAT collaboration]. Fermi large area telescope search for photon lines from 30 to 200 GeV and dark matter implications. Phys Rev Lett, 2010, 104: 091302

Status of indirect detection of dark matter

BI XiaoJun*

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

In this article we introduce the present status of indirect detection of dark matter briefly. Especially we introduce the positron excess detected at PAMELA and the related works to explaining the results. We also introduce the antiproton result by PAMELA and electron/positron spectrum measured by ATIC and Fermi. The gamma ray results by Fermi and ground experiments are introduced. These results give quite strong constraints on the nature of dark matter.

dark matter, cosmic ray, gamma ray

PACS: 95.35.+d, 96.50.S-, 95.85.Pw

doi: 10.1360/132011-973