

暗物质粒子探测：意义、方法、进展及展望

常 进

(中国科学院紫金山天文台, 南京 210008)

摘 要: 本文回顾了暗物质发现的历史, 介绍了暗物质粒子探测方法和目前国际最新观测结果, 重点讨论了空间探测暗物质粒子的技术方法和可能的突破点, 就我国开展暗物质粒子空间探测提出了一些建议。

关键词: 暗物质; 空间探测

中图分类号: P172.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2010)02-0095-05

1 引言：暗物质及其意义

自从牛顿发现了万有引力定律以来, 人们就一直尝试用引力理论来解释各种天体的运动规律, 在这个过程中, 暗物质的概念很早就开始形成了。比如, 对于天王星运动异常的解释导致法国天文学家勒威耶(Urbain Le Verrier)和英国天文学家 J. C. 亚当斯(J. C. Adams)猜测到海王星的存在, 并最终于 1846 年由 J. G. 伽勒(J. G. Galle)发现了海王星。由行星运动异常而猜测到另外一颗未被发现行星的存在非常类似于今天我们关于暗物质的认识过程。目前从星系到宇宙学尺度的观测都发现可观测物体运动的异常现象, 这表明可能存在我们还没有“看见”的物质, 即暗物质, 它们通过引力效应影响了可见物体的运动。

现代意义上的暗物质概念最早是由瑞士天文学家 F. 扎维奇(F. Zwicky)提出的。1933 年 F. 扎维奇研究后发星系团中星系运动的速度弥散, 他根据所测得的星系速度弥散并应用维理定理得到了后发星系团的质光比, 发现其比太阳的质光比要大 400 倍左右^[1]。今天, 天文学家有许多办法可以测定星系团的质量, 如通过弱引力透镜效应, 通过团内热气体的 X 射线发射轮廓以及通过径向

速度分布等。20 世纪 70 年代, 美国天文学家 V. 鲁宾(V. Rubin)通过对旋涡星系的详细观测, 使得“暗物质”这个概念得到了科学界的认可^[2]。漩涡星系旋转曲线的测量是暗物质存在最直接的证据。

2006 年钱德拉 X-射线望远镜观测到两个星系团的合并, 发现星系团中发光的热气体(由 X-射线像确定其位置)和两个星系的质量中心(由引力透镜观测确定其位置)并不重合。这一现象被认为是暗物质存在的直接证据, 这是因为可见的重子物质之间由于摩擦力而互相黏滞, 但暗物质粒子可以相互通过, 从而造成星系团中暗物质和重子热气体在空间上分离成两团。这个结果引起了学界的广泛关注, 因为这基本排除了通过修改引力理论来解释所观察到的异常现象的途径^[3]。

近年来由于 WMAP 卫星对微波背景(CMB)各向异性的精确测量, 我们可能通过拟合 WMAP 的数据精确确定宇宙中暗物质的总量。目前拟合的结果给出暗物质在整个宇宙中所占的组分大约是 22%^[4]。总之, 自从暗物质的概念提出至今, 人们在各种尺度的天文观测中都发现了暗物质存在的证据。目前, 暗物质的存在已经被人们普遍接受, 并且成为研究宇宙大尺度结构形成过程的必不可

少的要素。

暗物质的存在是通过天文观测发现的, 然而标准模型中不包含能解释暗物质的基本粒子。暗物质粒子探测和研究很可能导致物理学产生新的革命。目前世界各国都在集中人力、物力和财力研究这一问题。例如, 美国国家研究委员会由 19 名权威物理学家和天文学家联合执笔的 2002 年的报告中列出了新世纪要解答的 11 个科学问题, “什么是暗物质”列在第一位。报告同时建议美国政府研究机构加强协调、集中资源为这些难题寻找答案。目前暗物质的探测实验正处在蓬勃发展的阶段, 未来十年将是暗物质探测的黄金时代。

2 暗物质粒子探测方法

由于暗物质粒子不与光作用, 也不会发光, 普通的光学观测无法发现它的踪迹。为了了解暗物质的本质, 目前的探测方法大致可以总结为如下三种:

第一种方法是在加速器上将暗物质粒子“创造”出来, 并研究其物理特性。由于暗物质粒子即使被“创造”出来, 也不会被探测器发现, 只能通过其他可以看见的粒子来推测出是否有这样的粒子产生。虽然暗物质粒子不能被直接观察到, 但它一定会带走“能量”(“创造”暗物质粒子需要能量), 因此从丢失的“能量”及其分布可以推测暗物质的某些性质。欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)被认为很有可能“创造”出暗物质粒子。

第二种方法是直接探测法。该方法是直接探测暗物质粒子和原子核碰撞所产生的信号。由于发生碰撞的概率很小, 产生的信号也很“微弱”。为了降低本底, 通常需要把探测器放置在很深的地下。暗物质直接探测实验是目前寻找暗物质粒子最重要的探测方式。目前的实验精度下, 我们只可能探测到弱作用重粒子(WIMP)的信号, 而更弱的信号, 如轴子、超对称引力子是无法用这种方法探测的。

第三种办法称为暗物质的间接探测法。间接法是观测暗物质粒子衰变或相互作用后产生的稳定粒子如伽马射线、正电子、反质子、中微子等。根据目前的理论模型, 暗物质粒子衰变或相互作用后可能会产生稳定的高能粒子, 如果我们能够精确测量这些粒子的能谱, 可能会发现暗物质粒子留下的蛛丝马迹。由于地球大气的影响, 在地面上无法精确测量粒子的能谱, 实验必须要在空间进行。

3 暗物质粒子探测国际最新进展

暗物质粒子探测是目前科学研究热点, 竞争激烈。弄清这方面的国际形势对我国发展暗物质探测很重要。

欧洲大型强子对撞机是世界上最大的大型强子对撞机, 它的设计目标是对撞两个反向回旋的质子束流, 质子束流的总能量最高可达 14 万亿电子伏特。最新运行能量已经达到该能量的一半——7 万亿电子伏特, 这也是迄今最高能量的质子束流对撞试验。要在加速器上进行暗物质实验, 需要很高的能量。至今所有的加速器(包括欧洲大型强子对撞机)实验还没有发现暗物质粒子的迹象, 取得突破必须要能量更高的加速器。根据我国的经济实力, 短期内建造一个世界最大的加速器显然不现实。目前的发展必须依靠国际合作, 参加国际大加速器实验。

地下直接探测实验国际上已进行了数十年, 我国在这方面还是空白。由于暗物质粒子产生的信号很“微弱”, 为了降低本底, 通常需要把探测器放置在很深的地下。中意合作 DAMA 实验发现了一个时间调制现象, 该现象可以解释地球绕太阳公转的原因: 地球与暗物质粒子的相对速度随季节变化, 在每年的 6 月份可能通过一个较高的暗物质粒子流强, 而在每年的 12 月份可能通过一个较低的暗物质粒子流强^[5]。2009 年 12 月 18 日, CDMS 地下实验项目组宣布, 所发现的 2 个事件可能与暗物质粒子有关^[6]。CDMS 所用的探测器

被埋在美国明尼苏达深达 766 码(700 米)的地下，周围的岩石、塑料、铅、铜和其他物质被用来阻止除了暗物质之外的正常微粒到达探测器，这样可能与暗物质相混淆的宇宙射线和其他粒子就被排除在外了。要确信来自暗物质，两个信号还是太少了，经过计算得知其中的一个信号事件可能来自于背景噪声。CDMS 研究小组打算将他们的探测器升级到更为灵敏的水平，以期发现更为实质性的暗物质信号。目前国际上大约有几十个科学小组在设计实验以期发现暗物质接近普通物质原子的那一刻产生的信号，其中 XENON100 的实验是灵敏度最高的，如果此前的实验结果是正确的，XENON100 试验应该发现多个暗物质粒子事件，除非暗物质的性质与人们以前认为的有很大不同。今年 5 月 XENON100 实验公布了其最新观测结果，没有发现暗物质粒子存在的迹象。这说明暗物质比很多人以前认为的更难被发现^[7]。

地下暗物质实验的主要难点是本底抑制。要将本底降下来，除了选择合适的实验地点外，更主要的是依靠先进探测器技术。这方面我国与国际先进水平还有较大差距。地下实验要取得突破，首先是掌握国际最先进技术，起步阶段的实验可以采用国际先进技术方案。当然，采取国际相似方案不可能取得根本性的发现，国外实验规模比我们大，开展得也比我们早，地下试验的关键还是在掌握了国际先进探测器技术后，设计出比国外更灵敏的实验。

最新空间间接探测试验结果主要来自于 FERMI 伽马射线望远镜^[8]，PAMELA 空间探测器^[9]，ATIC 南极气球实验等^[10]。2009 年 3 月 FERMI 卫星公布其一年半的观测数据，经伽马射线谱线探测，背景分布方面没有探测到任何明显信号与暗物质粒子有关^[11]。另外在电子观测方面 ATIC、PAMELA、FERMI、HESS 几个探测器发现电子观测数据与理论模型相比都存在“超”，但“超”的大小并不一致。由于 ATIC、FERMI、HESS 这三个探测器本来都不是用来观测电子的，在电

子观测方面都存在弱点，这些差异可能来自仪器的系统误差。反质子观测方面，PAMELA 上天 3 年，观测到的反质子能谱基本与宇宙线次级能谱吻合很好，没有探测到异常特征。当然，目前的观测结果由于精度不够，下结论还早，需要新的高精度实验。从目前的发展趋势来看，暗物质粒子的观测由于其重大的科学意义，必将是今后的科研热点。观测暗物质粒子产生的次级产物由于其信号特征明显成为“AMS”“FERMI”等大科学工程的主要科学目标。

4 暗物质粒子的空间探测

暗物质粒子空间实验国际上也是刚刚起步，如果我们能够选择合适的切入点，加上我国先进的航天力量，有可能在短期内取得突破，因而应该作为我国暗物质探测的优先选择。

空间探测的关键是如何选择合适的探测粒子对象。最好的方案是用一个探测器可以探测所有种类的粒子。但要将各种粒子区分开来，需要大型磁谱仪。AMS02 是一个完美的磁谱仪探测器，但研制 AMS02，时间要超过 10 年，经费要超过 20 亿美元，还需采用大量先进探测器技术，这些超过了我们的能力。所以选择合适的探测对象(粒子类型)是寻找突破点的关键。

由于高能伽马射线不受宇宙空间磁场等其他因素的影响，可以直线传播，伽马射线信号可以追溯到暗物质的“源”，所以探测暗物质粒子湮灭产生的伽马射线是非常重要的探测暗物质粒子的手段。尤其是根据目前的理论模型，暗物质粒子湮灭后可能产生伽马射线谱线，这将作为暗物质粒子产生的最确切的信号。

另外暗物质粒子理论模型表明：暗物质粒子衰变或湮灭时，会在宇宙电子或者正电子能谱中产生“显著特征”。由此，高精度观测高能电子或正电子能谱可以间接探测暗物质粒子。

从目前已有的观测结果看，高分辨观测高能伽马射线和电子是探测暗物质粒子可能的突破点。空间观测高能电子和伽马射线的关键是本底抑制。宇宙伽马射线和电子流量与宇宙线本底(主

要是质子和氦核)相比,流量要低百倍以上。如何将伽马射线和高能电子与宇宙线本底区分开来是影响实验成功的关键。

伽马射线由于其不带电,可以通过判断入射粒子是否带电,将其与宇宙线本底区分开来。

探测宇宙高能电子是一件困难的事情,区分电子和宇宙线本底需要特殊探测器技术。首先从物理特性上看,电子是轻子,电荷为-1,静止质量为 511 keV,质子是强子,电荷为+1,静止质量为 938.27 MeV。电子探测器设计主要是探测这些物理特性,区分电子和质子。目前常用的探测器技术是:磁谱仪、穿越辐射探测器、切伦柯夫成像探测器、中子探测器、高分辨图像量能器、高能量分辨量能器。随着粒子能量的增加,磁谱仪、穿越辐射探测器、切伦柯夫成像探测器的粒子区分本领会大大降低,能够探测能量在 TeV 以上电子的探测器技术只有中子探测器、高分辨图像量能器、高能量分辨量能器。

由于电子能谱比宇宙线强子能谱要软,要探测 TeV 以上的高能电子需要将本底至少降低 1 万倍以上。而高分辨图像量能器在 TeV 以上的区分本领也不强,所以观测 TeV 以上的高能电子主要是依靠高能量分辨量能器。从 PAMELA、ATIC、FERMI 等实验的观测经验看,高能量分辨量能器的粒子区分本领主要依靠探测器厚度,厚度越厚,区分本领越强。增加探测器厚度,意味着增加探测器重量。空间实验卫星的重量是有限制的,如何在有限的重量限制范围内,设计出一个低本底高分辨的探测器是一个重要研究内容。

从上边可以看出,暗物质粒子空间探测是一件十分复杂的事情。科学探测必须要达到国际先进水平,否则意义不大。要达到国际先进水平,必须要采用大量先进技术。采用大量的先进技术后,使得探测器研制难度增加,探测器可靠性可能要下降。空间探测需要花费大量的资金,所以可靠性永远是摆在第一位的重要考虑。如何处理可靠

性与先进技术指标之间的矛盾是一个重要课题。

5 国内开展暗物质粒子探测展望

暗物质研究是天文学、粒子物理、理论物理的交叉学科。国际上,美欧日等都将暗物质探测列为 21 世纪重大科学研究的重点,国内在最近中科院 2050 创新规划路线图,将暗物质课题列为科学前沿问题的第一位。无论在实验探测还是理论研究方面国内都已经具备了很好的基础。国内多个单位都正在开展地下和空间暗物质粒子探测研究。

2009 年 11 月 24 日至 26 日在北京召开以“空间探测暗物质粒子”为主题的香山科学会议,国内外四十余位多学科跨领域的专家学者与会,围绕暗物质理论研究、暗物质空间分布与天文观测、暗物质粒子空间观测、高能电子和伽马射线的空间观测技术等中心议题进行深入讨论。与会专家提出暗物质存在已经得到天文大尺度观测的认证,可能导致现代物理学突破,国内已有一定的研究基础,具备天时,地利,人和的良好条件,我国必须开展暗物质粒子探测。理论研究方面,国际上很热,但问题还没有得到解决,我国理论研究很活跃,在我国未来的实验研究中,必须加强理论研究和空间探测工程实践的交流,从理论研究中寻找观测的重点。在暗物质的间接探测方面,国际上还是主要通过探测伽马射线、正电子和电子、反质子及其他反物质来寻找暗物质粒子。考虑到目前我国的技术和暗物质观测重点,电子(包括正电子)和伽马射线是合适的选择。在物理机制还不清楚的情况下,宽观测能段、高能量分辨、高空间分辨显然对寻找暗物质信号有利,其中能量分辨和空间分辨是关键指标。

总之未来十年是暗物质粒子探测的黄金阶段,目前我国科学家正在讨论在雅砻江锦屏山下建设一个大型地下暗物质粒子探测器。建成后将是世界上最大埋深的地下实验室。空间实验方面,我国已经启动暗物质粒子探测卫星的研制,可望

在不远的将来发射上天。目前机会难得，我们应该抓住机会，在暗物质探测方面取得突破。

参考文献

- [1] Zwicky F. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln[J]. Helvetica Physica Acta, 1933(6): 110.
- [2] Rubin V C , Ford W K. Rotation of the andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions[J]. Aerospace Power Journal, 1970(159): 379.
- [3] Clowe D, Bradač, Gonzalez A H , et al. A direct empirical proof of the existence of dark matter[J]. Aerospace Power Journal, 2006(648): 109.
- [4] Larson D, Dunkley J, Hinshaw G, et al. Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-Derived Parameters[J]. arXiv: 1001. 4635.
- [5] Barbabe R, Belli P, Cappella F, et al. First Results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI [J]. The European Physical Journal C, 2008(56): 333.
- [6] The CDMS Collaboration. Dark Matter search results from CDMS Experiment[J]. Science, 2010, 327: 1619.
- [7] Aprile E, Arisaka K, Arneodo F, et al. First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment[J]. arXiv: 1005. 0380.
- [8] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Measurement of the Cosmic Ray e^+ plus e^- Spectrum from 20GeV to 1TeV with the Fermi Large Area Telescope[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(18): 181101.
- [9] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100GeV[J]. Nature, 2009, 458: 607.
- [10] Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300-800GeV[J]. Nature, 2008, 456: 362.
- [11] The FERMI LAT collaboration constraints on cosmological dark matter annihilation from the fermi-LAT isotropic diffuse Gamma-Ray measurement[D]. arXiv: 1002. 4415.

Dark Matter Particles Detection in Space

Chang Jin

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: In this paper, the author reviews the discovery history of dark matter, introduces the observation method, and the latest observation results of dark matter. Special attention is paid to the detection method and possible breakthrough in this field. And at last, the paper puts forward some suggestions for the space observation.

Key words: dark matter; space observation

责任编辑：王大洲