暗物质粒子探测进入新时期

常进

中国科学院紫金山天文台, 暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210033
E-mail: chang@pmo.ac.cn

80多年以前, 科学家从天文观测中发现宇宙中广泛存在暗物质, 然而时至今日, 关于暗物质本质我们仍然不得而知. 理论学家提出了林林总总的暗物质候选体, 从天体级的黑洞到比中微子仍然轻许多数量级的所谓 fuzzy dark matter, 而最自然的是一类被称作“弱相互作用大质量粒子”(weakly interacting massive particle, WIMP)的候选粒子, 它们不仅对今天宇宙中暗物质的丰度给出了自然的解释, 也为暗物质粒子探测提供了切实可行的方案. 探测到暗物质粒子必将打开一扇通往新物理世界的大门.

1 暗物质粒子直接探测

直接探测实验的原理是如果暗物质粒子和普通物质粒子(比如原子核)发生碰撞, 虽然暗物质粒子并不直接“可见”, 但它们施加在普通物质粒子上的影响(例如动量交换)可以被精密的实验手段记录下来, 从而推断暗物质粒子的质量、碰撞截面等基本物理属性. 由于预期的暗物质和物质的相互作用很弱, 直接探测实验的最大挑战来自于本底的排除. 通常直接探测实验都选择放置在深地实验室中进行, 利用厚厚的岩石来屏蔽宇宙射线本底. 中国在四川锦屏山隧道中建设了“中国锦屏地下实验室”, 其垂直岩石覆盖达到 2.4 km, 是世界上最深、宇宙射线本底最低的地下实验室. 除了宇宙射线本底, 探测材料、仪器设施以及岩石和空气中放射性本底也需要很仔细地排除或屏蔽.

国际上已经或者正在开展的暗物质直接探测实验有数十个, 这也从一个侧面反映了暗物质探测的重要性. 主要的技术手段包括低温半导体探测器、液态惰性气体探测器、过热液体探测器、闪烁晶体探测器以及气体时间投影室等^[1]. 目前, 中国在锦屏地下实验室中运行有两个暗物质直接探测实验, 即采用低温半导体探测技术的中国暗物质实验(China dark matter experiment, CDEX)和采用液氙探测技术的 PandaX(particle and astrophysical xenon experiments)实验. 其中, CDEX 瞄准数倍质子质量的低质量参数区间, PandaX 则对大于 10 倍质子质量的参数区间敏感, 两个实验均一度达到了国际上最好的灵敏度^[2,3].

暗物质直接探测实验灵敏度在过去 30 年里取得了巨大的提升(图 1). 对于 WIMP 暗物质和核子的自旋无关弹性

常进 紫金山天文台台长、国家天文台副台长(兼)、中国科学院暗物质与空间天文重点实验室主任、中国科学技术大学天文与空间科学学院院长. 2019 年当选为中国科学院院士. 长期从事空间高能粒子尤其是电子的探测技术方法及科学实验研究, 是中国空间天文学领域的主要学术带头人之一. 提出了一种高能宇宙线电子探测的新方法, 基于该技术方法提出并作为首席科学家领导实施了“悟空”号暗物质粒子探测卫星, 实现了中国天文卫星零的突破, 在电子和质子宇宙线测量方面取得突破性进展.

一种高能宇宙线电子探测的新方法, 基于该技术方法提出并作为首席科学家领导实施了“悟空”号暗物质粒子探测卫星, 实现了中国天文卫星零的突破, 在电子和质子宇宙线测量方面取得突破性进展.

散射截面, 最新的限制已达到 $4 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ ^[4], 离中微子“地板”只有大约 2~3 个数量级的距离. 目前, 有几个实验正在进行新一轮升级, 包括欧洲的 XENON、美国的 LZ 和中国的 PandaX, 其目标均是将有效探测质量提高到数吨的水平, 从而进一步提高暗物质寻找的灵敏度. 如果暗物质粒子确实位于 $10 \text{ GeV}/c^2 \sim \text{TeV}/c^2$ 质量区间, 那么在未来几年, 这几个实验将有可能探测到暗物质粒子信号; 而如果将灵敏度推到中微子“地板”仍然没有探测到信号, 那么就需要

图 1 暗物质-核子自旋无关弹性散射截面灵敏度随时间的变化, 其中暗物质粒子质量假设为 $50 \text{ GeV}/c^2$. 来源: 文献[1]

Figure 1 Sensitivities of WIMP-nucleon spin-independent elastic scattering cross section for WIMP mass of $50 \text{ GeV}/c^2$. Credit: Ref. [1]

新的暗物质直接探测思路,例如使用方向灵敏的气体探测器技术。

2 暗物质粒子间接探测

另一种独立且互补的探测方法称作间接探测,主要是通过宇宙射线和伽马射线探测器探测暗物质粒子湮灭或衰变后产生的粒子。天体物理过程也会产生大量的宇宙射线和伽马射线,通过这种方法探测暗物质粒子需要谨慎排除天体物理背景的干扰,通常的做法是在高能宇宙射线或伽马射线能谱里去寻找具有奇特特征的能谱结构,或者试图从伽马射线方向分布中寻找与暗物质分布吻合的辐射。另外一个压低天体物理背景的做法是研究宇宙射线中的反物质粒子,如正电子和反质子,它们主要由宇宙射线核素和星际介质碰撞产生,其流量比相应的正粒子流量低许多,而且可以通过宇宙射线模型比较准确地计算它们的流量。

近些年,暗物质间接探测也取得了长足的进展。早在20世纪90年代,科学家就通过高空气球实验开展宇宙射线正电子和反质子的观测,主要实验有HEAT、BESS等。1998年,丁肇中教授领导的阿尔法磁谱仪实验(AMS-01)搭载航天飞机进行了两个星期的技术验证飞行。这些实验发现宇宙射线正电子可能在高能段存在超出背景模型的迹象,不过由于统计量很小,观测误差很大,难以得到确切结论。2009年,PAMELA卫星首次清楚地观测到正电子占正负电子总和的比例在约10 GeV以上呈现明显超出背景模型的趋势^[5]。2013年,放置于国际空间站上的AMS-02实验发表了非常精确的正电子比例观测结果^[6],进一步确认该“超出”的存在。随后,AMS-02的新测量结果还发现,正电子能谱可能存在截断,特征截断能量约为810 GeV^[7]。暗物质湮灭或衰变模型至今仍然是宇宙射线正电子“超出”的一个富有吸引力的解释,虽然天体物理学家也提议用类似脉冲星这样的天体来解释该现象。区分暗物质模型和天体物理模型需要将正电子能谱以更高精度测到更高能段,而这在实验观测上存在很大的难度,因为如果想建造一个比AMS-02更大的磁谱仪并发射上天,无论是技术上还是资金上,挑战都是巨大的。

因为正电子在正负电子总和中所占的比例约为10% (在高能段,该比例甚至更高),如果能够准确测量正负电子总谱而不用区分正和负电子,仍然有可能探测到暗物质遗留下的信号,而用一个全吸收型的电磁量能器就可以相对容易地实现对正负电子总谱的精确测量,这样便可以以很低的成本将观测推到很高的能段。这个想法首先在南极气球实验ATIC(advanced thin ionization calorimeter)中得到了验证。通过几个星期的短暂飞行,ATIC气球实验记录到了能量高达~3 TeV的电子,并且发现正负电子总谱在0.3~0.8 TeV存在相对于常规模型预期的“超出”^[8]。ATIC观测到的正负电子总谱“超出”得到了后来的Fermi-LAT^[9]和

AMS-02^[10]等实验的确认。物理上该正负电子总谱“超出”可能与正电子“超出”具有相同的起源,但同样要区分不同模型,我们需要更精细的观测结果。为此,中国科学院空间科学先导专项资助研发了暗物质粒子探测卫星(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)。DAMPE卫星采用厚的、全吸收型量能器方案,可以实现对能量高达10 TeV的正负电子以约1%的能量分辨率进行高统计量、低本底的观测。2017年,DAMPE^[11]发表了25 GeV~4.6 TeV能段的正负电子能谱精确测量结果,证实了在~100 GeV以上能段正负电子总谱的“超出”,而且首次以高置信度直接观测到正负电子总谱在0.9 TeV处的能谱拐折(图2)。此外,DAMPE的结果还在1.4 TeV能量处观察到存在能谱精细结构的迹象。DAMPE的观测结果为理解TeV正负电子起源提供了重要数据,也对一些暗物质模型给出很强的限制。目前,DAMPE卫星在轨工作状态非常稳定,各探测器一切正常,我们期待DAMPE通过积累更多观测数据为暗物质间接探测作出重要贡献。

伽马射线也是暗物质间接探测的重要手段,一方面是因为伽马射线沿直线传播,可以直接示踪其源头,另一方面,不同于带电粒子的是,伽马射线在传播过程中较少发生相互作用,可以很大程度上保留产生时的能谱形状。这两方面特征使得伽马射线在暗物质间接探测方面具有独到的优势。对暗物质探测最理想的信号是GeV能段以上的单能伽马射线线谱辐射,因为没有已知的天体物理过程可以产生这样的单能线谱。人们利用空间卫星Fermi-LAT以及地面切伦科夫望远镜开展了大量的线谱搜寻工作,不过迄今为止还没有确切的线谱信号被发现。伽马射线线谱的探测灵敏度非常依赖于仪器的能量分辨率,Fermi-LAT和现有切伦科夫望远镜的能量分辨率只能达到10%的水平,其线谱探测灵敏度受限。我国的DAMPE卫星对10 GeV以

图2 (网络版彩色)DAMPE测量的正负电子能谱和其他实验结果的比较。来源:文献[11]

Figure 2 (Color online) Total electron plus positron spectrum measured by DAMPE, compared with those by other experiments. Credit: Ref. [11]

上的伽马射线能量分辨率好于1.5%，因此非常适合从事线谱搜寻的工作，目前相关工作正在开展。

伽马射线连续辐射也被广泛用于暗物质探测。理论上预期暗物质粒子湮灭或衰变可能产生夸克、轻子等标准模型粒子，这些粒子最终会辐射出次级伽马光子，其能谱呈现为连续谱。为了和天体物理过程产生的伽马射线辐射区分开，人们通常会有意识地选择“信噪比”较高的天区观测研究，比如银河系中心、矮椭圆星系、大质量星系团等方向。通过Fermi-LAT数据，科学家在银河系中心方向发现了一个圆对称的延展伽马射线“超出”^[12,13]。如果用暗物质模型拟合数据，得到的暗物质粒子质量大约为50 GeV/c²，湮灭截面与热产生模型中解释暗物质丰度所要求的截面相一致。这个结果曾经一度让人觉得欢欣鼓舞，不过也有理论认为银河系核球中可能存在大量的毫秒脉冲星，它们作为一个集体贡献了观测到的“超出”^[14,15]。除此之外，在个别矮椭圆星系中，科研人员也发现可能存在疑似伽马射线辐射^[16,17]，不过目前数据的置信度还太低，不能下确切结论。对这些问题的进一步认识需要更加强有力的伽马射线观测设备，同时辅以射电-X射线的多波段观测。

目前空间伽马射线观测还是以Fermi-LAT最为强大，Fermi-LAT之后的伽马射线望远镜可能需要走兼顾大面积和高能量分辨率的道路。基于我国空间站的“高能宇宙辐射探测设施”(high energy cosmic radiation detection facility, HERD)正在进行这方面的尝试。HERD采用三维颗粒式的量能器方案，可以实现五面有效探测，显著增大了观测天区，从而以较小的探测面积实现较大的接受度。暗物质粒子探测卫星团队正在酝酿下一代空间暗物质探测实验——甚大面积伽马射线空间望远镜(Very Large Area gamma-ray Space Telescope, VLAST)。VLAST伽马射线观测的接受度和能量分辨率将显著超越Fermi-LAT，同时还可以观测非常高能量的正负电子和宇宙射线，预期将在高灵敏度暗物质探测和高能时域天文研究方面发挥引领作用。

与空间实验相比，地基伽马射线观测优势在更高能量段，因此对于更重的暗物质粒子更加灵敏。地基伽马射线探测技术主要有空气切伦科夫望远镜、水切伦科夫探测器、空气簇射探测阵列等。现在新一代空气切伦科夫望远镜(Cherenkov Telescope Array, CTA)已经进入实验建设阶段。位于四川稻城的“高海拔宇宙线观测站”(Large High

Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是一个采用多种探测技术的复合宇宙射线和伽马射线观测阵列，其工程建设已经过半，部分前期阵列已经开始取数，预计很快将获得科学成果。CTA和LHAASO投入运行之后对暗物质(特别是重暗物质)间接观测的灵敏度也将大幅提升。

3 非WIMP暗物质探测

值得注意的是，虽然绝大多数实验仍然瞄准WIMP暗物质开展，我们也不应该忽略了暗物质粒子不是WIMP粒子的可能性。不同的暗物质探测需要不同的实验手段，比如轴子暗物质通常利用微波谐振腔实验探测，惰性中微子则需要高能量分辨率的X射线望远镜。由于暗物质候选模型种类实在繁多，针对每种模型设计建造相应的实验去探测它们可能不是一个经济的办法。如果能够借助已有的天文或物理实验，延伸其科学目标开展相应的暗物质探测则不失为目前的首选方案^[18]。

4 结语

人们从天文学观测中推断暗物质的存在已有80多年的历史，通过物理学实验探测暗物质也有30多年的历史，虽然我们仍然不能回答“暗物质是什么”这样的问题，但长期以来的努力也让我们对暗物质的一些性质(比如与普通物质的相互作用强度)获得了更加深刻的认识，这些认识也促使我们对新物理的理论进行新的思考(例如超对称理论)。可以预期，在未来很长一段时间里，暗物质粒子本质的探索仍将是世界科技前沿热点问题。世界各国不遗余力地开展了多项实验试图探测暗物质粒子，同时还有一系列新的实验正在建造或者酝酿，包括上述几个吨级直接探测实验、切伦科夫望远镜阵列以及下一代空间探测实验。值得欣喜的是，这次我国科学家没有仅作为旁观者，我们通过地下和空间的数项实验一举站在了暗物质探测的国际最前沿^[19]。这些实验，协同国际上的其他实验一起，可望在不远的将来取得暗物质探测的真正突破。此外，我国也有一大批理论学家在暗物质粒子模型、宇宙学分布和演化等领域开展了很多具有较大影响力的工作。通过理论和实验相结合，我国科学家将有望在认清暗物质粒子本质的过程中起到中流砥柱的作用。

推荐阅读文献

- 1 Cushman P, Galbiati C, McKinsey D N, et al. Snowmass CF1 summary: WIMP dark matter direct detection. 2013, arXiv: 1310.8327
- 2 Cui X, Abdurkerim A, Chen W, et al. Dark matter results from 54-ton-day exposure of PandaX-II experiment. Phys Rev Lett, 2017, 119: 181302
- 3 Jiang H, Jia L P, Yue Q, et al. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg × day data of the CDEX-10 experiment. Phys Rev Lett, 2018, 120: 241301
- 4 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. Dark matter search results from a one ton-year exposure of XENON1T. Phys Rev Lett, 2018, 121: 111302

- 5 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. *Nature*, 2009, 458: 607
- 6 Aguilar M, Alberti G, Alpat B, et al. First result from the alpha magnetic spectrometer on the International Space Station: Precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5–350 GeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 141102
- 7 Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. Towards understanding the origin of cosmic-ray positrons. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 041102
- 8 Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. *Nature*, 2008, 456: 362
- 9 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. 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
- 10 Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. Precision measurement of the (e^+e^-) flux in primary cosmic rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the alpha magnetic spectrometer on the International Space Station. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 221102
- 11 Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *Nature*, 2017, 552: 63
- 12 Hooper D, Goodenough L. Dark matter annihilation in the galactic center as seen by the Fermi Gamma Ray Space Telescope. *Phys Lett B*, 2011, 697: 412
- 13 Zhou B, Liang Y F, Huang X, et al. GeV excess in the Milky Way: The role of diffuse galactic gamma-ray emission templates. *Phys Rev D*, 2015, 91: 123010
- 14 Abazajian K N. The consistency of Fermi-LAT observations of the Galactic center with a millisecond pulsar population in the central stellar cluster. *J Cosmol Astropart Phys*, 2011, 1103: 010
- 15 Yuan Q, Zhang B. Millisecond pulsar interpretation of the Galactic center gamma-ray excess. *J High Energy Astrophys*, 2014, 3-4: 1
- 16 Geringer-Sameth A, Walker M G, Koushiappas S M, et al. Indication of gamma-ray emission from the newly discovered dwarf galaxy reticulum II. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 081101
- 17 Li S, Liang Y F, Duan K K, et al. Search for gamma-ray emission from eight dwarf spheroidal galaxy candidates discovered in year two of Dark Energy Survey with Fermi-LAT data. *Phys Rev D*, 2016, 93: 043518
- 18 Bertone G, Croon D, Amin M A, et al. Gravitational wave probes of dark matter: Challenges and opportunities. 2019, arXiv: 1907.10610
- 19 Li Z, Liu J. Experimental search for dark matter in China. *Front Phys*, 2020, 15: 44301

Summary for “暗物质粒子探测进入新时期”

New era of dark matter particle detection

Jin Chang

Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China
E-mail: chang@pmo.ac.cn

The astronomical evidence of the existence of dark matter is overwhelming. However, the physical nature of dark matter is still unknown. It is widely believed that dark matter is some kind of new particles beyond the standard model of particle physics. Alternative candidates include the massive compact halo objects such as primordial black holes. Among all these candidates, the class of so-called weakly interacting massive particles (WIMPs) is the most natural and well theoretically motivated one. The WIMP scenario can naturally explain the abundance of dark matter in the universe via a canonical thermal production mechanism. It also gives a practical way of detecting those particles via various kinds of particle physics experiments. The direct detection method measures the momentum exchange when a dark matter particle scatters off a nucleus. The sensitivities of direct detection increase remarkably during the past 30 years since it was first proposed in the 1980s. China has operated two direct detection experiments, the CDEX and PandaX experiments, in the Jinping underground laboratory. Through the efforts of all the direct detection experiments, including CDEX and PandaX, the current upper limit about the spin-independent scattering cross section between the dark matter particle and the nucleon reaches the level of 10^{-47} cm^2 which is only about two orders of magnitude higher than the neutrino-induced background. Although no convincing signal has been detected yet, such null results can constrain severely many kinds of theoretical models of dark matter. Several experiments are upgrading now, with the goal of a fiducial detector mass of several tons, which are expected to further improve the direct detection sensitivities. The indirect detection method is to search for the annihilation or decay products of dark matter in cosmic rays and gamma-rays, which is complimentary to the direct detection. The main indirect detection experiments in operation include the alpha magnetic spectrometer and the calorimeter electron telescope on the International Space Station, the Fermi gamma-ray space telescope, and China's dark matter particle explorer. Several anomalies have been reported by the indirect detection experiments, such as the positron excess, the excess of the total electron plus positron spectrum, the gamma-ray excess in the Galactic center region. Interpretations of these excesses are still in debate. Nevertheless, these anomalies offer us targets for further investigation with increased statistics and improved understanding of the astrophysical backgrounds. Both the direct detection and indirect detection experiments will have significantly upgrading in the coming years. Particularly, China's PandaX experiment is currently building a 4-ton scale detector which is expected to start to operate in 2021. The long-term plan of the CDEX experiment is also a ton-scale detector for multi-purpose studies including the dark matter searches. For the indirect detection, the HERD payload onboard the Chinese Space Station is in the prototype phase, and the next generation very large area gamma-ray space telescope is under design. On the ground we are building the large high-altitude air shower observatory for high-sensitivity sky survey in the very high energy gamma-ray band. All these efforts will make China play a significant or even leading role in the campaign of dark matter detection. We are looking forward to the breakthroughs in the exploration of the nature of dark matter.

dark matter, direct detection, indirect detection, cosmic rays

doi: 10.1360/TB-2020-0501