

What is dark matter?

什么是暗物质?

毕效军¹, 范一中², 岳骞³, 周宇峰^{4*}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

3. 清华大学物理系, 北京 100084;

4. 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: yfzhou@itp.ac.cn

2018-02-26 收稿, 2018-03-27 修回, 2018-03-30 接受, 2018-08-13 网络版发表

摘要 虽然暗物质的存在已经得到了大量的天文观测的支持, 但暗物质的属性是什么仍然是个未解之谜. 近期暗物质探测的实验和理论研究均取得了长足的进展. 本文从暗物质问题的提出讲起, 介绍了暗物质的基本特点和可能的粒子物理候选者, 之后详细介绍了暗物质研究的最新进展. (1) 暗物质研究的早期历史. 从星系旋转曲线、引力透镜、微波背景辐射等方面介绍了暗物质的观测证据, 特别是暗物质丰度起源的标准热退耦理论机制和典型的暗物质粒子候选者, 如弱相互作用有质量粒子等. (2) 暗物质粒子的实验探测的基本原理和手段, 如地下直接探测和空间间接探测等. 重点综述了近期实验研究的进展. 在地下直接探测方面综述了10 GeV以下轻质量暗物质的探测实验: SuperCDMS(super cryogenic dark matter search), CDEX(China dark matter experiment)等, 以及大质量暗物质探测中的液氙探测器DarkSide等. (3) 暗物质未来的碰撞方向性探测实验, 如DRIFT(directional recoil identification from tracks), MIMAC(Micro-tpc MAtrix of Chambers)等. 在空间间接探测方面介绍暗物质湮灭到宇宙线粒子中涉及到的宇宙线粒子产生和传播的基本理论. (4) 已有的实验, 如Fermi-LAT(Fermi large area telescope)和AMS(Alpha magnetic spectrometer)-02在宇宙线电子和核子方面已经取得的成果, 特别是近期DAMPE(dark matter particle explorer)卫星实验的首个结果中看到的正负电子总流强中的新现象和疑似反常现象以及AMS-02的反质子结果对暗物质搜寻的影响. 展望了未来在反核子, 如反氦和反氦方面可能取得的结果及其对暗物质研究的重要性.

关键词 暗物质, 直接探测, 间接探测

“暗物质”一词最早由 Kapteyn^[1]在1922年提出, 用以指可通过星体的运动间接推断出其周围可能存在的不可见物质. 1933年, Zwicky^[2]利用光谱红移测量了后发座星系团中各个星系相对于星系团的运动速度, 发现它们的速度弥散度太高, 对应的质光比在100以上, 因此星系团中应该存在大量的暗物质. 之后陆续有支持暗物质存在的研究成果不断出现. 1970年, Rubin等人^[3]对仙女座大星云中星体旋转速度开展了高精度的光谱测量, 探测到了远离星系核区域的外围星体绕星系旋转速度和距离的关系. 观测结

果表明在相当大的范围内星系外围的星体速度是恒定的. 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可见物质并不分布在星系核心区, 且其质量远大于发光星体质量的总和. 1973年, Roberts和Rots^[4]运用21 cm特征谱线观测技术探测仙女座大星云外围气体的速度分布, 也从另一角度证实了这一结论. 至此, 星系及星系团中暗物质存在这一假说逐渐被天文学界广泛接受.

星系团中X-射线的观测也强烈暗示暗物质存在. 星系团中普遍存在能发射出X-射线的炽热气体, 当

引用格式: 毕效军, 范一中, 岳骞, 等. 什么是暗物质? 科学通报, 2018, 63: 2413–2421

Bi X J, Fan Y Z, Yue Q, et al. What is dark matter (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2018, 63: 2413–2421, doi: 10.1360/N972018-00181

气体在星系团引力场中达到流体力学平衡后,可通过其温度推测出星系团的质量.大量的星系团X-射线观测数据表明典型温度在10 keV以上,表明星系团质量远大于其中发光部分的贡献.暗物质虽不可见,但其存在可通过其引力透镜效应改变背景星系团的影像显现出来.通过对强弱引力透镜效应的研究,人们发现星系团中大量暗物质存在的证据.利用弱引力透镜效应,还发现了超大星系团中也存在暗物质.无论是星系中恒星的旋转速度比预期大还是星系团中星系运行速度过快都意味着它们所受到的引力比理论预期的要强,这可以解释为宇宙中存在的暗物质贡献了多出的引力,但也有一种可能是引力理论需要修改.后一种可能性一直受到重视并被广泛研究,但随着2006年钱德拉X-射线望远镜对子弹星系团的观测,暗物质假设得到极大支持.钱德拉卫星发现,子弹星系团的两个子星系团在垂直于视线方向上,发生过了一次高速碰撞,高速碰撞产生的激波波前清晰可见.结合弱引力透镜观测,钱德拉卫星发现子弹星系团中的普通发光物质,即重子物质和两个星系的质量中心(即引力场分布)并不重合.这一观测用修改引力理论很难理解,因此被认为是暗物质存在的直接证据.数值N-体模拟等研究表明若宇宙能形成观测到的大尺度结构,宇宙中的绝大部分物质由非相对论性运动的暗物质构成,并且暗物质晕的密度分布存在普适的形式.在整个宇宙尺度上,通过对宇宙中微波背景辐射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27%由暗物质贡献,构成天体和星际气体的常规物质只占5%,其余为推动宇宙加速膨胀的暗能量.

1 暗物质丰度起源及候选者

根据目前主流的宇宙学模型,早期宇宙处于高温热平衡态,其粒子数密度满足波尔兹曼分布,宇宙的温度随着其膨胀而逐渐下降,直到今天的温度为3 K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目前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.由剩余丰度可以推出暗物质粒子的湮灭截面等信息.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(weakly interacting massive particles, WIMP).

在众多超出粒子物理标准模型的理论模型中,具备 R -宇称的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,受到广泛的关注.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 neutrino 自动成为稳定的WIMP类型暗物质候选者.综合目前已有的正负电子对撞机和暗物质直接探测实验的结果,最小超对称模型的参数空间得到了很强的限制,只有联合湮灭和共振态湮灭等情况还是允许的.另一类是WIMP类型的具有费米子属性的暗物质如 sneutrino .其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中,由于KK(Kaluza-Klein)对称性的存在,标准模型粒子对应的最小KK激发态可以成为暗物质的候选者.比如最小KK激发态 $B_{(1)}$,它与标准模型粒子的耦合与超对称模型中的 neutralino 有很大不同,主要湮灭道为费米子对,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little Higgs模型及其各种变种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加入了 T -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 ,主要通过黑格斯耦合到规范粒子和费米子对.

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(axion)或相关的类轴子粒子(axion-like particles)等.

2 暗物质直接探测

理论研究表明暗物质极有可能与常规物质有微弱的非引力相互作用,这意味暗物质是有可能被实验室仪器探测到的.暗物质与常规物质相互作用的探测机制研究,大致可分为空间探测、地面/地下探测、对撞机探测等三大方面.

对于暗物质粒子和探测器散射的直接探测,在

非相对论极限下散射可以分为暗物质和核子质量耦合以及和核子的自旋耦合, 分别称为自旋无关和自旋相关的散射截面

$$\sigma_{SI} = \frac{4\mu_A^2}{\pi} [Zf_p + (A-Z)f_n]^2, \quad (1)$$

$$\sigma_{SD} = \frac{32G_F^2\mu_A^2}{\pi} \frac{J+1}{J} (a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle)^2, \quad (2)$$

对自旋无关部分, $f_{p,n}$ 分别是暗物质与质子和中子的耦合系数, 而自旋相关截面中 J 为核子的总自旋, $\langle S_{p,n} \rangle$ 代表核子中质子和中子的平均自旋, 而 $a_{p,n}$ 则是相应的耦合系数. 如果要探测暗物质和核子的自旋无关的散射过程, 我们要考虑大质量的原子核, 这样由于暗物质与核子的相干散射, σ_{SI} 会大大提高. 通常的模型中有 $f_p=f_n$, 因此 $\sigma_{SI} \sim f^2 A^2$, 随着核子数变大, 散射截面大大增加. 在某个特定的探测器上可能探测的事例数的表达式为

$$\frac{dR}{dE_R} = N_T n_\chi \frac{\sigma_{0\chi N}}{2\mu_A^2} F^2(E_R) \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{f(v)}{v} dv. \quad (3)$$

这里 N_T 是核子数, $f(v)$ 代表的是在地球参照系上暗物质的速度分布, 其积分的下限 v_{min} 表示能够产生反冲能 E_R 的最小速度, 而 v_{max} 代表的是银河系暗物质的最大速度, 一般取逃逸速度 v_{esp} 在 $\frac{450 \text{ km}}{s} <$

$v_{esp} < \frac{650 \text{ km}}{s}$. 如果取银河系中暗物质的速度分布是麦克斯韦分布, 则事例率可以近似为一个随反冲能的 e 指数下降的形式, 因此暗物质的事例率会随着阈能的下降而迅速提高.

暗物质直接探测实验近十几年来发展迅速, 实验灵敏度不断提升, 预计未来数十年能够在 10 GeV 以下轻质量区触及太阳中微子本底、在 10 GeV 以上可以达到大气中微子和超新星中微子本底的实验灵敏度水平, 取得暗物质实验的重要里程碑: 找到暗物质粒子, 或者基本完全排除当前暗物质主流理论预计的 WIMP 暗物质质量和其与探测器靶核相互作用截面的二维参数空间. 当前暗物质直接探测实验主要有以下 3 类: (1) 直接探测暗物质粒子与靶核相互作用产生的事例; (2) 通过探测暗物质的年度调制效应等特征信号给出暗物质存在区域; (3) 通过暗物质方向探测和/或日调制效应研究, 给出暗物质信息. 这些暗物质直接探测实验一般需要在极深地下实验室开展^[5].

当前大部分暗物质直接探测实验是属于第一类. 这类暗物质直接探测实验的最重要目标是通过测量新物理模型描述的暗物质与探测器靶核相互作用后在探测器中沉积的微小能量, 找到可能的暗物质引起的事例. 暗物质粒子在探测器中沉积的能量通过电离、闪烁光、或声子效应被测量到, 进而研究可能的暗物质事例数和能谱. 近年来, 暗物质直接探测实验表现出良好竞争力的几种探测技术包括: 主要探测 10 GeV 以下轻质量暗物质粒子的高纯锗探测器技术、探测中等质量暗物质的气液两相氙探测器技术、以及探测中重质量暗物质的气液两相氙探测器技术等. 这些实验技术目前主要的发展方向是降低探测器能量阈值和本底水平, 以及在此基础上进一步增加探测器靶质量, 进而提高暗物质探测灵敏度. 同时基于这些探测器技术的实验系统可以进行第二类的暗物质直接探测实验, 通过较长时间的实验运行, 给出暗物质年度调制效应实验结果. 第三类实验目前处于发展关键探测技术阶段, 主要技术方向是通过建立低压气体时间投影室探测器来测量入射暗物质粒子轰击靶核引起的反冲核事例的径迹、反冲核数量等来研究暗物质来源和质量等信息.

探测 1~10 GeV 质量范围轻暗物质的高纯锗实验目前有两个技术途径.

一是以美国 SuperCDMS(super cryogenic dark matter search)、欧洲 EDELWEISS(expérience pour détecter les wimps en site souterrain)等实验为代表的极低温高纯锗探测器技术^[6,7]. 这类实验同时测量暗物质粒子在高纯锗探测器中产生的电离信号和声子信号, 并通过两种信号结合来甄别掉电子本底, 提高实验灵敏度. 这类实验由于高纯锗探测器单元质量小(千克量级)、几十 mK 的极低温实验技术难度大、阵列探测器表面体积比率大导致的本底高等特点, 在 10 GeV 以上质量区间暗物质探测灵敏度与二相氙(氙)实验相比不占优势. 而同时测量电离信号和声子信号的二相高纯锗探测器系统的阈值约为 1 keV 水平, 难以进一步降低, 使其在 10 GeV 以下轻暗物质探测实验灵敏度无法有效提升. 目前这类极低温高纯锗实验的一个重要技术方向就是发展高纯锗探测器声子放大技术, 显著降低探测器阈值到 100 eV 以下, 可以有效探测 10 GeV 以下轻暗物质. SuperCDMS 是这类实验的代表, 4 GeV 时, 当前暗物质探测灵敏度约为 $2 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$. SuperCDMS 实验目前正在建设

约50 kg的高纯锗探测器系统, 希望进一步发展稳定的声子放大技术, 提高暗物质探测灵敏度. 预计SuperCDMS实验2020年正式运行.

二是以中国CDEX(China dark matter experiment)实验^[8,9]、美国CoGeNT实验^[10]为代表的点接触电极高纯锗实验技术. 这类实验通过创新设计点接触电极探测器结构和优化前端电子学噪声水平, 单一测量电离信号, 把探测器阈值水平降低到100 eV水平, 从而大幅提升10 GeV以下轻暗物质探测灵敏度. 目前CDEX实验正在运行的点接触电极高纯锗探测器系统阈值可以达到160 eV以下, 4 GeV时, 暗物质探测灵敏度约为 $4 \times 10^{-41} \text{ cm}^{2[8,9]}$. 性能优化后的10 kg量级的CDEX阵列探测器系统预计2019年正式运行取数. 高纯锗实验技术远期计划是建设吨级高纯锗探测器系统, 暗物质探测灵敏度在10 GeV以下能够达到 $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ 的灵敏度, 可以触及太阳中微子本底.

气液二相氙探测器技术在探测10 GeV~数百GeV范围的中等质量暗物质方面处于优势地位. 由于这类探测器可以同时测量液氙中的闪烁光信号和电离信号, 并利用这两个信号之间的比例关系可以很好地去除电子本底, 进而显著提升暗物质探测灵敏度. 同时这类探测器的灵敏区是一体化的液氙介质, 因而在探测器靶质量方面较易实现吨级乃至十数吨级的探测器, 需要重点研究的是大体积探测器系统如何抑制氩本底和保持较低能量阈值等. 目前国际上主要有美国LZ(LUX-Zeplin)^[11]、美欧联合XENON^[12]和中国PandaX(particle and astrophysical xenon detector)^[13]3个实验, PandaX正在运行有效质量约500 kg的实验系统, XENON正在运行有效质量约1 t的实验系统, 在LUX实验基础上组建的LZ实验正在建设有效质量7 t的实验系统, 预计2019年实验运行. 目前气液二相氙暗物质探测实验在40~50 GeV范围最灵敏的暗物质实验结果是由XENON实验给出, 暗物质探测灵敏度约为 $10^{-46} \text{ cm}^{2[12]}$. 液氙探测器技术远期计划是建设约40吨级的液氙探测系统, 在10 GeV~数百GeV范围内暗物质探测灵敏度达到 $\sim 10^{-49} \text{ cm}^2$ 的灵敏度, 可以触及大气和超新星中微子本底.

液氙探测器不仅可以同时测量液氙中的闪烁光信号和电离信号实现气液二相氙探测技术来甄别本底, 而且液氙原初闪烁光本身还可以提供良好的电子信号与反冲核信号的脉冲波形甄别能力, 这两个技术特点使得二相氙探测器技术在探测100 GeV以上范

围的中重质量暗物质粒子方面处于优势. 目前已经完成运行的美欧联合DarkSide实验成功运行50 kg液氙的二相氙探测器系统, 发表了首个液氙暗物质实验成果, 100 GeV时的灵敏度达到约 $2 \times 10^{-44} \text{ cm}^{2[14]}$. 目前DarkSide合作组已经联合欧洲、美国和加拿大等多个液氙暗物质实验团队组成了新的合作组DarkSide-20K, 计划采用低宇生放射性的贫氙材料, 建设质量为20 t的二相氙探测器系统, 预计2020年实验运行. 中国科学院高能物理研究所的几位科学家已经加入了DarkSide合作组开展液氙暗物质实验研究. 液氙探测器远期计划建设300吨级的液氙探测器系统开展暗物质直接探测研究, 希望能够达到触及大气和超新星中微子本底水平的实验灵敏度.

在方向暗物质探测方面, 目前代表性实验是英美科学家联合开展的DRIFT(directional recoil identification from tracks)^[15]实验, 和法国科学家开展的MIMAC(Micro-tpc MAtrix of Chambers)^[16]实验. 这类实验都采用低气压气体时间投影室探测器技术来测量暗物质粒子入射引起的反冲核径迹, 确定暗物质粒子的入射方向. 这类实验目前还没有给出重要实验结果, 主要是发展高灵敏度的反冲核径迹识别技术, 来降低本底水平, 提升暗物质探测灵敏度, 是未来暗物质直接探测的重要发展方向.

上述几类暗物质直接探测实验目前处于暗物质实验事例探测阶段. 未来, 一旦某一个或几个实验探测到暗物质事例, 则需要更大规模实验增加暗物质有效事例, 以及多种探测技术的实验结果相互补充和交叉检验. 预计未来数十年是暗物质直接探测实验取得突破性研究成果的重要时间窗口, 国际竞争激烈.

3 暗物质间接探测

暗物质间接探测实验通过探测暗物质粒子湮灭或衰变的产物来研究暗物质的属性. 研究表明, 宇宙中的暗物质粒子碰撞后有一个很小的概率湮灭产生标准模型的粒子. 或者, 暗物质粒子可能不是完全稳定的、有很小的几率会发生衰变, 其衰变产物也是标准模型的粒子. 可以通过探测这些暗物质粒子湮灭或者衰变产物研究暗物质粒子性质. 宇宙中这些暗物质相互作用的产物通常会叠加在普通的宇宙线本底上, 因而就要求实验的灵敏度要非常高才能够有效区分本底和信号. 为了避免宇宙线本底的干扰, 通

常要寻找本底较小的暗物质湮灭信号, 比如伽马射线、中微子、正电子、反质子等. 此外, 为了更加清晰地探测到暗物质信号, 有些实验还要在大气层以外的空间进行, 这就需要发射卫星或者把实验设备安装在空间站上.

近年来宇宙线实验取得了巨大的进步, 实验精度和灵敏度都得到快速提升, 因而暗物质的间接探测方面取得了重要的进展. 当前国际上最重要的间接探测实验包括在国际空间站上进行的AMS(Alpha magnetic spectrometer)-02实验和美国发射的Fermi卫星实验等. 它们分别对寻找暗物质粒子湮灭或衰变所产生的带电粒子和伽玛射线信号做出了重要贡献. 大型磁谱仪实验AMS-02由丁肇中教授领导, 于2011年5月搭载奋进号航天飞机发射升空, 并安装在国际空间站上. AMS-02能够准确区分高能宇宙线粒子的类别并精确测量其能量, 它最主要的科学目标就是力图发现暗物质湮灭所产生的信号, 及寻找宇宙中的反物质. 经过几年的运行, AMS-02对宇宙线能谱进行了极为精确的测量, 获得了大量非常宝贵的观测数据, 如精确地测量了宇宙线中正电子的比例^[17]、反质子的比例^[18]、质子和氦的能谱^[19]等, 这些数据对寻找暗物质信号是极为重要的. Fermi卫星于2008年发射升空, 至今一直在稳定运行, 获取了大量的观测数据和研究成果. 然而, 到目前为止它仍然没有发现明确暗物质湮灭产生的伽马射线信号, 因而Fermi-LAT(Fermi large area telescope)对暗物质性质给出了严格的限制^[20].

与伽马射线不同, 带电粒子在银河系中的传播过程要复杂得多. 首先带电粒子会受到银河系无规则磁场的散射, 它的运动轨迹也是一种随机的运动, 因此它在银河系内的传播要用扩散方程来描述. 带电的宇宙线粒子在扩散过程中还会和银河系星际气体以及星际辐射场发生相互作用, 产生次级产物、损失能量等等. 因而, 需要对宇宙线的传播过程有比较精确的理解才能解释实验数据并寻找是否存在暗物质湮灭的信号.

宇宙线传播过程通常要通过宇宙线重元素来研究. 这些重元素在传播的过程中会通过和星际气体的作用而产生次级粒子, 要求传播过程首先能够解释次级粒子的数量. 例如, 在宇宙线中发现存在某些元素如锂、铍、硼等的比例远远高于恒星核合成过程所能够产生的比例, 它们通常被认为是宇宙线

中原初元素, 如碳、氮、氧等与星际气体相互作用而产生的次级产物. 测量这些次级元素与原初元素的比就可以确定出宇宙线在传播过程中所经历的相互作用. 硼碳比(B/C)是最常被用来确定宇宙线的扩散参数的量, 而不稳定的次级元素的丰度测量, 比如 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, 则可以用来确定宇宙线被银河系束缚的时间, 及在银河系内宇宙线扩散的范围大小. AMS-02对于B/C等的测量无论能量范围和精度都大幅度的提高, 可以用来研究宇宙线的传播过程及严格限制传播系数.

AMS-02寻找暗物质信号主要是通过宇宙线中带电的正电子和反质子的测量. AMS-02一个非常重要的发现就是测量到宇宙线中正电子所占的比例远远高于宇宙线传播过程中通过相互作用所产生的次级粒子的量, 证实了之前PAMELA的观测结果. 目前有大量的研究试图理解AMS-02的这一观测结果, 但仍然没有一个统一的认识. 宇宙线正电子“超出”的解释主要有如下两类模型: 暗物质湮灭或衰变和天体物理起源. 暗物质虽然是可能的解释之一, 但如果这个超出是暗物质湮灭起源的话, 暗物质粒子质量约为数百个GeV, 速度加权平均截面大约为 $10\sim 23\text{ cm}^{-1}\text{ s}^3$. 这比能够自然给出正确的暗物质残留密度所需要的暗物质湮灭的截面大了3个量级^[21~26]. 而且简单暗物质模型不能解释为何Fermi-LAT没有观测到伴随的伽马光子, 也没有在宇宙微波背景辐射中留下可观测的痕迹. 现有光子数据排除了简单的暗物质模型, 只有假设湮灭截面包含复杂的温度依赖关系才有可能和现有观测不发生矛盾. 暗物质衰变假设由于不和剩余丰度发生联系, 模型的参数空间要大一些, 但也基本被光子数据排除了. 另外一种可能的解释认为这些正电子也可以来自于邻近的一些脉冲星的贡献. 但HAWC实验的最新结果排除了两个最可能的已知脉冲星贡献的可能性. 目前这方面的研究仍然在继续深入当中.

宇宙线正负电子之和是另外一个重要的观测量. 由于宇宙线负电子的主要贡献是初级宇宙线, 我们对其起源的了解还很有限. 在背景还不是很清楚的情况下, 判断其是否存在超出有较大难度, 除非看到了明显反常的能谱结构. 2008年, ATIC^[27]发现在几百GeV能量的正电子和负电子总和的能谱存在突起的鼓包(bump)结构. 但Fermi^[28]卫星的结果显示正负电子能谱整体符合幂律谱, 不过谱指数比预期的偏硬

一些. 目前Fermi, AMS-02和CALET的结果都支持正负电子能谱在能区是单一幂律谱. 我国于2015年12月17日成功发射了暗物质粒子探测卫星 (dark matter particle explorer, DAMPE), 到2017年8月底已经在轨稳定运行600余天, 共记录宇宙线事例32亿. DAMPE的能量范围和高能电子的能量分辨率都要优于AMS-02, 对更大能量范围、更精确的能量分辨的电子能谱测量将有助于寻找暗物质所产生的湮灭或者衰变信号和排除天体源本底的干扰. 最近DAMPE发表了首个物理结果^[29], 把高能宇宙线电子的空间直接测量能段首次拓展到了4.6 TeV, 超越了AMS-02和Fermi-LAT的现有探测范围. 其收集的数据量也比日本同类型卫星探测器CALET要多. DAMPE的一个重要的结果是观测到了比较明显的电子谱TeV“拐折”即电子数目在TeV能量附近快速减少. 这对当前美国的Fermi-LAT和日本CALET的结果构成了挑战, 这两家实验都宣称未看见拐折现象. 但DAMPE的结果与2009年大气切伦科夫望远镜HESS地面间接探测实验的结果吻合. 这对“拐折”是否存在的持续争论提供了新的佐证, 是一个重要的进展. 除此之外, DAMPE也看到大约在1.4 TeV附近有疑似的新超出背景预期的尖锐信号. 受数据统计量的限制, 目前还无法下结论. 如果被证实, 意义将十分重大. 因为通常的天体是不会产生如此尖锐的信号. 无论是“拐折”还是疑似的“超出”信号, 都可能与邻近暗物质有着密切的关系. 暗物质分布在小范围并不均匀, 可能在自身引力作用下或邻近黑洞的引力吸引下聚集, 其湮灭到正负电子对能够产生尖锐的能谱信号. DAMPE看到的疑似信号也可能于此有关. 另外, 邻近的高能天体如脉冲星, 超新星遗迹等的加速机制可能没有以前想象的那么简单. 在特殊机制下出现尖锐能谱的可能性也不能排除^[30].

另外一个重要的测量结果是精确宇宙线中反质子流量. 从AMS-02的结果总体上看, 反质子的测量结果和理论估计的次级反质子背景基本吻合. 在低能处(10 GeV)一些研究指出存在超出背景置信度约 4σ 的可能性为0^[32]. 但在考虑了相互作用截面的不确定性后, 这种可能性的局部(整体)统计置信度下降为 2.2σ (1.1σ)^[34]. 另一种可能性是寻找100 GeV以上可能的超出现象^[35]. 在能区有利的一面是反质子受太阳调制、星际风对流、磁场重加速等效应的影

响, 理论预言的不确定性下降, 有利于对比数据寻找暗物质信号. 不利的一面是目前高能区反质子的统计量也比较低, 测量精度还不够高.

另外一个寻找暗物质信号非常重要的量是反氦核. 因为宇宙线在传播过程中产生的反氦核的流强远低于反质子的流强, 通过反氦来寻找暗物质信号具有一定的优势, 因为次级反氦核通常能量比较高. 因此低能的反氦核更有可能来自暗物质. 反氦核和反质子的信号可以起到优势互补的作用, 在不同的能段它们具有各自的优势.

间接探测对伽马射线信号和带电粒子的处理方式是截然不同的. 伽马射线在宇宙中直线传播, 因而探测的时候可以寻找暗物质密度高的区域并进行观测. 我们已知的暗物质湮灭信号最强的区域包括银河系中心、银河系周围的矮星系、河外的星系团等. 银河系中心应该是暗物质信号最强的区域, 但同时这个区域的物质分布也最为复杂, 天体物理过程丰富, 因而, 本底很强而且目前仍然没有完全理解清楚. 与此相反, 矮星系的暗物质信号较银心稍弱, 但是天体物理过程的活动也非常弱、本底干净, 是非常适合于寻找暗物质信号的地方. Fermi卫星对银河系附近的矮星系进行了细致地观测, 没有发现暗物质湮灭的信号, 因而能够限制暗物质的湮灭截面.

如果暗物质直接湮灭到光子, 产生的伽马射线信号有可能是一个线谱结构, 并且信号的空间分布直接与暗物质的空间分布高度关联. 天文学过程一般不会产生类似的伽马射线发射信号, 所以探测高能光子发射线谱是探测暗物质信号的重要方面. 2012年, 一些研究发现在Fermi-LAT数据中存在1~130 GeV的可能的伽马射线线谱信号^[36,37]. 引起了广泛的讨论. 但随着更多的数据积累, 此信号的置信度在逐步下降. 文献[38]利用Fermi-LAT公开的1~500 GeV的Pass 8数据进行了线谱的搜寻, 在16个近距离的大质量星系团的位置方向上发现了整体置信度为 $\sim 3\sigma$ 的42.7 GeV的疑似线谱信号^[30,31].

地面探测更适合在更高的能段如10 TeV以上开展测量. 目前HESS已经测到20 TeV范围. 在中国四川稻城正在建设中的大型高海拔宇宙线实验LHAASO (large high altitude air shower observatory)的一个重要的科学目标也是探测来自于暗物质的湮灭信号. LHAASO的面积达到一个平方千米, 对高能伽马射线探测具有非常高的灵敏度, 可以用来探测非常重的暗物质粒子所产生的信号.

4 结论与展望

总体而言,暗物质的理论和实验研究在最近几年里呈现出了蓬勃发展的势头.目前空间探测观测到的最具挑战性的现象是正电子超出理论预期以及DAMPE观测到的疑似TeV电子反常能谱结构.这些反常现象是否与暗物质的湮灭或衰变相联系是当前研究的热点.简单的暗物质模型虽然可以解释这些

现象,但受到其他数据如光子观测结果的限制也很强.暗物质的直接探测的灵敏度在近年来有非常大的提高.虽然存在一些疑似的暗物质与靶物质相互作用的事例,但十分可靠的实验证据尚未被发现.可以肯定的是,暗物质的实验搜寻不会停止.近期与未来还有多个与暗物质相关的实验会投入运行.很有可能在不久的将来在暗物质属性方面取得突破性的进展.

参考文献

- 1 Kapteyn J C. First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system. *Astrophys J*, 1922, 55: 302–328
- 2 Zwicky F. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helvet Phys Acta*, 1933, 6: 110–127
- 3 Rubin V C, Thonnard N, Ford W K Jr. Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605/ $R=4$ kpc/ to UGC 2885/ $R=122$ kpc/. *Astrophys J*, 1980, 238: 471
- 4 Roberts M S, Rots A H. Comparison of rotation curves of different galaxy types. *Astron Astrophys*, 1973, 26: 483–485
- 5 Cheng J P, Kang K J, Li J M, et al. The China Jinping underground laboratory and its early science. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2017, 67: 231–251
- 6 Agnese R, Anderson A J, Asai M, et al. Search for low-mass weakly interacting massive particles with superCDMS. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 241302
- 7 Armengaud E, Augier C, Benoit A, et al. A search for low-mass WIMPs with EDELWEISS-II heat-and-ionization detectors. *Phys Rev*, 2012, D86: 051701
- 8 Yang L T, Li H B, Yue Q, et al. Limits on light WIMPs with a 1 kg-scale germanium detector at 160 eVee physics threshold at the China Jinping underground laboratory. *Chin Phys*, 2018, C42: 023002
- 9 Zhao W, Yue Q, Cheng J P, et al. Search of low-mass WIMPs with a p-type point contact germanium detector in the CDEX-1 experiment. *Phys Rev*, 2016, D93: 092003
- 10 Aalseth C E, Barbeau P S, Colaresi J, et al. CoGeNT: A search for low-mass dark matter using p-type point contact germanium detectors. *Phys Rev*, 2013, D88: 012002
- 11 Akerib D S, Akerlof C W, Akimov D Y, et al. LUX-ZEPLIN (LZ) Conceptual Design Report. 2015
- 12 Aprile E, Aalbers J, Agostini F, et al. First dark matter search results from the XENON1T experiment. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 181301
- 13 Cui X Y, Abdurkirim A, Chen W, et al. Dark Matter results from 54-ton-day exposure of PandaX-II experiment. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 181302
- 14 Agnes P, Agostino L, Albuquerque I F M, et al. Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search. *Phys Rev*, 2016, D93: 081101 [Addendum: *Phys Rev* 2017, D95: 069901]
- 15 Daw E, Fox J R, Gauvreau J L, et al. Spin-dependent limits from the DRIFT-IIId directional dark matter detector. *Astropart Phys*, 2012, 35: 397–401
- 16 Grignon C, Billard J, Mayet F, et al. Directional Detection of Non-baryonic Dark Matter with MIMAC. 2010
- 17 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 0.5350 GeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 141102
- 18 Aguilar M, Ali Cavazonza L, Alpat B, et al. Antiproton flux, antiproton-to-proton flux ratio, and properties of elementary particle fluxes in primary cosmic rays measured with the alpha magnetic spectrometer on the international space station. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 091103
- 19 Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. Precision measurement of the proton flux in primary cosmic rays from rigidity 1 GeV to 1.8 TeV with the Alpha magnetic spectrometer on the international space station. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 171103
- 20 Ackermann M, Albert A, Anderson B, et al. Searching for dark matter annihilation from milkyway dwarf spheroidal galaxies with six years of Fermi large area telescope data. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 231301
- 21 Bi X J, He X G, Yuan Q. Parameters in a class of leptophilic models from PAMELA, ATIC and FERMI. *Phys Lett*, 2009, B678: 68–173
- 22 Zhang J, Bi X J, Liu J, et al. Discriminating different scenarios to account for the cosmic $e^{\pm}$ excess by synchrotron and inverse Compton radiation. *Phys Rev*, 2009, D80: 023007
- 23 Jin H B, Wu Y L, Zhou Y F. Cosmic ray propagation and dark matter in light of the latest AMS-02 data. *J Cosmol Astropart Phys*, 2015, 1509: 49

- 24 Yuan Q, Bi X J, Liu J, et al. Clumpiness enhancement of charged cosmic rays from dark matter annihilation with Sommerfeld effect. *J Cosmol Astropart Phys*, 2009, 0912: 011
- 25 Yin P F, Yuan Q, Liu J, et al. PAMELA data and leptonically decaying dark matter. *Phys Rev*, 2009, D79: 023512
- 26 Bi X J, Brandenberger R, Gondolo P, et al. Non-thermal production of WIMPs, cosmic e^+ excesses and gamma-rays from the Galactic center. *Phys Rev*, 2009, D80: 103502
- 27 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: 362–365
- 28 Abdo A, Ackermann M, Ajello M, et al. measurement of the cosmic ray e^+ plus e^- spectrum from 20 GeV to 1 TeV with the Fermi large area telescope. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 181101
- 29 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: 63–66
- 30 Yuan Q, Feng L, Yin P F, et al. Interpretations of the DAMPE Electron Data. 2017
- 31 Huang X J, Wu Y L, Zhang W H, et al. Origins of sharp cosmic-ray electron structures and the DAMPE excess. 2017, arXiv:1712.00005
- 32 Cui M Y, Yuan Q, Tsai Y L, et al. Possible dark matter annihilation signal in the AMS-02 antiproton data. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 191101
- 33 Cuoco A, Krmer M, Korsmeier M. Novel dark matter constraints from antiprotons in light of AMS-02. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 191102
- 34 Reinert A, Winkler M W. A precision search for WIMPs with charged cosmic rays. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, 1801: 055
- 35 Huang X J, Wei C C, Wu Y L, et al. Antiprotons from dark matter annihilation through light mediators and a possible excess in AMS-02 p^-/p data. *Phys Rev*, 2017, D95: 063021
- 36 Bringmann T, Huang X Y, Ibarra A, et al. Fermi LAT search for internal Bremsstrahlung signatures from dark matter annihilation. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 1207: 054
- 37 Weniger C. A tentative gamma-ray line from dark matter annihilation at the Fermi large area telescope. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 1208: 007
- 38 Liang Y F, Shen Z Q, Li X, et al. Search for a gamma-ray line feature from a group of nearby galaxy clusters with Fermi LAT Pass 8 data. *Phys Rev*, 2016, D93: 103525



周宇峰

1996年华中师范大学物理系获学士学位; 1999年华中师范大学粒子物理所获硕士学位; 2002年中国科学院理论物理研究所获博士学位。之后在德国慕尼黑大学、多特蒙德大学、日本高能加速器研究机构、韩国高等研究中心从事博士后研究。2009年入选中国科学院理论物理研究所“百人计划”, 现为第一研究室主任。研究领域主要涉及暗物质理论、超出标准模型的新物理、重子-反重子不对称起源、CP对称性破缺的模型和唯象研究。

What is dark matter?

Xiaojun Bi¹, Yizhong Fan², Qian Yue³ & Yufeng Zhou^{4*}

¹*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

²*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;*

³*Departments of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

⁴*Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

* Corresponding author, E-mail: yfzhou@itp.ac.cn

This study aims to review the early history of dark matter study, such as observational evidence from galactic rotational curves, gravitational lensing, and the cosmic microwave background, among others. The observation of the bullet clusters, which strongly supports the existence of dark matter rather than the theory of modified gravity, is discussed. The N body simulations also suggest the existence of cold non-relativistic dark matter and the existence of a universal form of the dark matter density distribution profile. We introduce a standard mechanism of thermal freeze-out for dark matter relic abundance, i.e., an explanation of how the dark matter particles that were kept in thermal equilibrium in the early stages of the universe are later unable to stay in equilibrium due to the expansion of the universe. The typical dark matter candidates are the so-called WIMPs (weakly interacting massive particles). Popular WIMP candidates include the lightest supersymmetric particles such as neutralinos. Other WIMP candidates such as the lightest T odd particles in the little Higgs models and the lightest KK (Kluza-Klein) modes in the universal extra dimension models are also discussed. Non-WIMP dark matter candidates such as axions are briefly discussed. The basic ideas and methods of dark matter detection, such as underground direct detection, which involves dark matter scattering off target nuclei, and indirect detection in space, which involves dark matter annihilation or decay in galaxies, are reviewed with a focus on recent experimental developments. For underground direct detection, we begin with the basic formulas for elastic dark matter nuclei scattering and the general features of nuclear number dependence. Three types of observables are discussed: (1) direct recoil events, (2) solar modulation of the recoil events, and (3) directional effects or the day-night differences of the events. Then, we focus on the experiments studying low-mass dark matter below 10 GeV, such as SuperCDMS (super cryogenic dark matter search) and CDEX (China dark matter experiment), among others, with a special focus on the CDEX experiment, which uses point contact germanium detectors. Experiments studying high-mass dark matter using liquid argon, such as Xenon, PandaX (particle and astrophysical xenon detector), and DarkSide are also discussed. Directional detection experiments, such as DRIFT (directional recoil identification from tracks) and MIMAC (Micro-tpc Matrix of Chambers), are briefly discussed. For indirect detection experiments in space, we first introduce the basic theory of dark matter signals in cosmic rays and then discuss the importance of the propagation effects of high-energy cosmic rays, such as electrons, positrons, protons, antiprotons, and heavier cosmic ray nuclei. The uncertainties originating from various sources are also discussed. We then review recent experimental results, such as that from Fermi LAT (Fermi large area telescope) and AMS-02 (Alpha magnetic spectrometer 02), with a focus on the most recent dark matter particle explorer (DAMPE) experiments. As nearby sources may contribute to CRE (cosmic ray electron) structures at high energies, the recently released DAMPE results on the CRE flux, which hinted at a narrow excess at energy of 1.4 TeV, is discussed in some detail. In general, a spectral structure with a narrow width appears to reveal the space time distribution of the sources. Future perspectives of heavier cosmic-ray nuclei, such as anti-deuteron and anti-helium, are also reviewed.

dark matter, direct detection, indirect detection

doi: 10.1360/N972018-00181