

暗物质的天文学探测

苏萌^{1,2}

1. 麻省理工学院物理系/Kavli天体物理与空间科学研究所, 美国马萨诸塞州剑桥市 02138

2. 哈佛大学天文系, 美国马萨诸塞州剑桥市 02138

摘要 暗物质和暗能量是宇宙主要的组成部分, 被认为是“笼罩在21世纪物理学上的两朵乌云”, 是基础物理与宇宙学研究最前沿的方向之一。对暗物质突破性的研究进展将极大促进人们对基本自然规律以及宇宙演化的理解。国际上对暗物质的研究极为重视, 美国和欧洲都为之进行了详细周密的规划, 开展了一系列的相关项目规划。中国也将暗物质的研究纳入了中长期规划, 在过去的几年中国在暗物质探测方面实现了长足进步, 在四川锦屏山地下实验室开展多项暗物质直接探测试验, 暗物质粒子卫星作为中国空间科学先导专项的首发星, 也是中国发射的第1颗天文卫星, 2015年12月成功发射。通过观测暗物质粒子湮灭后的粒子产物, 有可能在间接探测方向实现对暗物质研究的革命性突破。本文简介暗物质概念提出的历史与暗物质探测的天文学观测手段。

关键词 暗物质; 宇宙学; 粒子物理; 星系; 引力透镜; 空间望远镜; 宇宙微波背景辐射

1 怪人兹威基的“狂想”

暗物质这个名字, 是一位脾气极其古怪的加州理工学院天文学家在20世纪30年代创造的, 他的名字叫弗里兹·兹威基(Fritz Zwicky)。他以粗暴的性格和卓越的才华闻名遐迩, 经常在讨论问题的时候咄咄逼人, 甚至变得气势汹汹, 连最亲密的合作者都不愿意单独跟他待在一起。然而兹威基有着敏锐的洞察力, 他极富创造力地提出了宇宙中存在“暗物质”的假设。兹威基尝试计算了由数千个星系组成的“后发座”星系团中所有能够被观察到的物质的总量(基本上就是把看到的星系们加起来)。结果他惊讶地发现这些物质的总质量所能产生的引力强度竟然不足以让整个星系团聚集在一起。也就是说这些星系都“跑得太快了”, 如此之大的逃逸速度应该早就让这些星系跑出这个集团, 这样的话“后发座”星系团就分崩离析而不复存在! 你可以把整个星系团想象为一个旋转木马, 旋转木马转动得太快, 上面坐着的星系们互相之间的吸引力太弱了, 早就应该都会飞出去

才对!

正是基于这些观察, 兹威基提出了一项在当时看来惊世骇俗的主张, 星系团里必定还存在着某种神秘的“黑暗”物质。这些物质不能轻易被直接观察到, 但却同样能够产生引力作用, 从而帮助星系聚集在一起而不至于被撕碎。不幸的是, 兹威基在当时普遍被同行们认为是怪人一个, 被人看不起, 在差不多40年的时间里, 兹威基的有关暗物质的推论没有人愿意认真对待。尽管暗物质的话题今天已经为科学家和公众津津乐道, 但在1933年, 几乎没有人愿意相信宇宙中大部分的物质是人们看不到的, 大家似乎还是信奉“眼见为实”。兹威基的想法已经超越了他的时代, 他的伟大洞察和理论都被搁置一旁, 无人问津。

既然这种物质既不发光, 又不吸收光, 也不反射光, 人们根本不能直接看到它, 找不到更好的名字, 物理学家们于是就将这种神秘物质称作“暗物质”(图1)。如果没有这种神秘物质的存在, 宇宙中的星系将分崩离析。迄今为止尽

管有数以百计的模型, 但没人知道暗物质的本质究竟是什么。

20世纪初, 当物理学家们最初开始了解到原子的结构组成时, 他们曾经以为人类即将洞察整个宇宙中一切物质的本质。然而, 70多年过去了, 人们才确切地知道今天的宇宙中, 暗物质质量所占的比重是可见物质(或者说普通物质——物理学家常常称之为重子物质)的6倍左右, 占到宇宙物质成分的24%左右(普通物质占4%), 另外72%左右是暗能量——一种充盈宇宙空间的未知能量形式, 导致今天的宇宙在加速膨胀。

原本人们很欣喜地认为, 整个世界的物理学基础已经被搞清楚, 人类几乎可以到庆功的时刻了, 然而在进入21世纪前竟然被告知在茫茫宇宙中可以看到物质, 或者说自始至终都在研究的东西, 只占了相当可怜的一部分。确实, 要承认宇宙中95%以上的物质都看不到而且几乎一无所知, 实在令人有些尴尬。大自然似乎出于某种目的, 把宇宙的绝大部分美妙地隐藏了起来。

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-02-16

作者简介: 苏萌, Pappalardo Fellow/Einstein Fellow, 研究方向为宇宙学和高能天体物理, 电子信箱: mengsu@space.mit.edu

引用格式: 苏萌. 暗物质的天文学探测[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 14-21; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.001

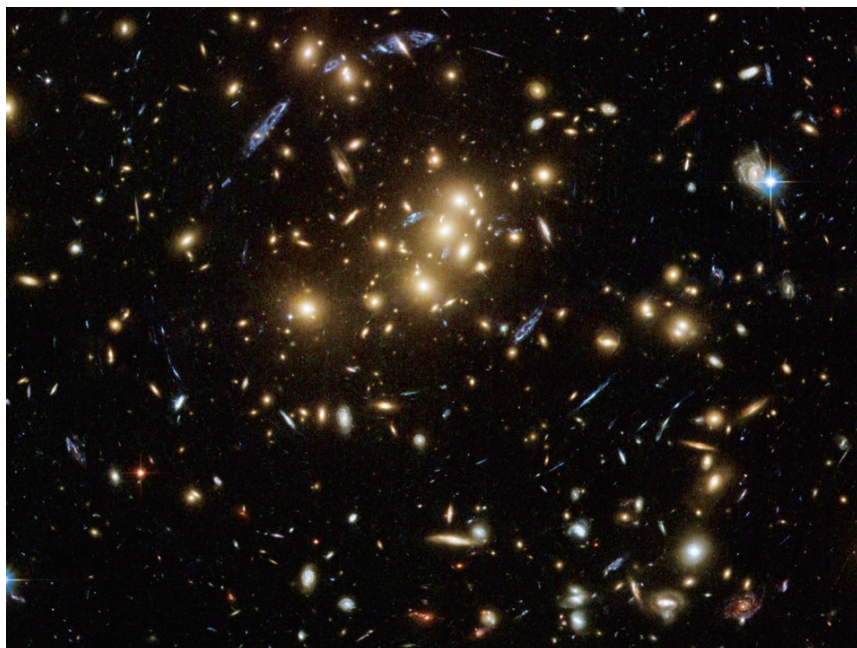


图1 哈勃望远镜观测到的一个星系团,暗物质是星系团的主要组成部分,随着质量分布的不同,星系团中大约有数十个大型星系和上千个小型星系构成

当然人类爆棚的好奇心和自信心在宇宙学的这一世纪谜团前正在大显身手。迄今为止,地球上已经建起十几个寻找暗物质的地下实验室,此前美国、欧洲和日本分别发射了多个空间探测器寻找暗物质来自宇宙空间的微弱信号。尽管科学家们大海捞针似的撒网,暗物质依然悬念重重。

2 什么是暗物质

在现代宇宙学中,一般认为暗物质是一种全新的不同于任何我们熟悉的基本粒子。暗物质之所以被冠以“暗”之名,就是因为天文学家迄今为止没有发现这种物质发射出的光子,也就是说暗物质粒子几乎不直接参与电磁相互作用。电磁力是处于电场、磁场或电磁场中的带电粒子所感受到的作用力。大自然的4种基本相互作用中,电磁力是其中一种,其他3种是强力、弱力、与引力。光子是传递电磁力的中间媒介,带电粒子倚赖光子为媒介传递电磁力,而电荷是基本粒子的内秉性质。只有带电粒子或带电物质才能够感受到电磁力,发射出光子被人眼或者探测装置看到,这也对探测暗物质粒子的方式提出了挑战。

在日常生活所遇到的物质的内部,分子与分子之间彼此相互作用的分子间作用力,就是电磁力的一种形式。暗物质不直接参与电磁相互作用,对我们熟悉的日常生活的物理化学过程,暗物质可以说完全不会产生任何影响。事实上,天文学家估计每秒钟都会有成千上万的暗物质粒子穿过人体,但是在暗物质粒子的“眼中”,人体几乎是透明的。现在主流的暗物质粒子的理论假说认为,暗物质粒子与人体中所含氢、氧、碳、氮等元素的原子核发生碰撞的机率大约只有数十次每天,而且这种暗物质粒子与人体的直接相互作用不会被人体察觉,更不会有有害的后果。事实上,有一种寻找暗物质粒子的方法,就是用专门的探测装置去寻找暗物质粒子与核子可能发生的碰撞事件,从而了解暗物质粒子的相关属性,我们把这种手段称之为暗物质粒子的“直接探测”——暗物质粒子虽然看不见,但是这种碰撞就真真切切地发生在这个实验装置里。然而,当两颗暗物质粒子相互撞击时有可能会发生“湮灭反应”——两个粒子抱在一起粉身碎骨,释放出大得多的能量。如果暗物质粒子的质量像现在的主流理论所认为的,

是质子的数百倍,那暗物质粒子碰撞时发出的能量将是可见光光子能量的一千亿倍。如果这种湮灭反应发生在人体内,它将可能导致对人体有害的突变。当然,发生这种事件的概率是非常低的。

迄今为止,人们只能通过宇宙中广泛分布的暗物质结构的引力产生的效应得知(而且已经发现)宇宙中有大量暗物质的存在。现代宇宙学是新兴的一门重要的基础交叉学科,是通过宇宙自身以及宇宙中天体的观测结果,结合现代物理学的基本认知,研究宇宙大尺度的结构起源与演化等基本问题的学科。宇宙学的研究对象是天体运动和它的第一起因,在人类历史相当长一段时期曾是形而上学的一部分。作为现代科学的重要组成部分,宇宙学起源于哥白尼原则和牛顿力学,它们指出天体和地球上的物体遵守同样的物理原理并解释了天体的运动。一般认为,现代物理宇宙学起源于20世纪的爱因斯坦广义相对论和对极远天体的天文观测,对暗物质的研究更是现代宇宙学和粒子物理学的重要课题之一。

为了解释暗物质,早期的理论认为暗物质可能是宇宙中未被观测到的由普通物质形成的大质量天体,比如大质量的致密的天体,包括黑洞、中子星、老年的白矮星等,但根据观测实验的结果,这些天体的质量不足以解释暗物质在宇宙中的物质里所占的较大的比例。另一些理论主要通过修正引力理论来解释和暗物质有关的观测现象,比如修正的牛顿动力学理论等理论。而目前科学界对暗物质解释的主流观点认为,暗物质是非重子的亚原子粒子,其粒子属性的认证与研究贯穿宇宙学研究数十年,依然是未解之谜。

3 为什么相信暗物质存在

20世纪物理学与探测技术飞速发展,使精确研究宇宙的起源与演化成为可能。现代天文学通过“引力透镜效应”、宇宙中大尺度结构的形成、宇宙微波背景辐射等方法 and 理论来探测暗物质。现代宇宙学中各项独立的观测实

验证据,包括对旋涡星系旋转曲线的测量、“子弹头”星系团的研究,引力透镜效应,宇宙中大尺度结构,宇宙微波背景辐射等的观测等,均表明宇宙中存在着具有引力效应但不发射或吸收电磁波(包括可见光)的物质,即暗物质。占宇宙总量较大比例的暗物质和暗能量(导致宇宙的加速膨胀的宇宙组分)的实质是什么,这是当今物理学的两大谜团。

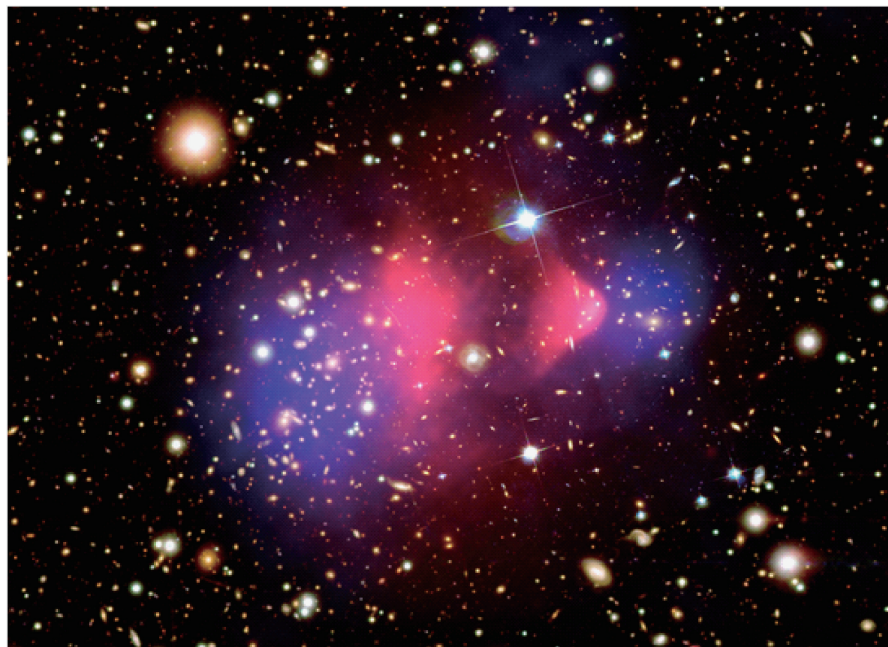
3.1 爱因斯坦引力透镜效应

根据爱因斯坦的广义相对论,由于时空在大质量天体附近会发生畸变,光线经过邻近区域时会向大质量天体发生偏折,产生汇聚效应。如果从观测者到背景光源的视线有一个大质量的前景天体(比如暗物质主导的大质量星系团),有时会看到在光源的两侧呈现两个像甚至多个像,就好像有一面凸透镜放在观测者和所观测天体之间一样,“引力透镜效应”(图2)因而得名。顾名思义,引力透镜是因为光的路线被引力改变了。而引力是所有东西所共有的性质(只要是存在于宇宙里的东西,没有无引力的),所以,引力透镜到处都是。一般来讲,当透镜天体正好位于背景和观测者中间的时候,透镜的效应最强。

通过分析背景光源的扭曲程度、多个像的位置和特性等,可以帮助我们研究中间作为“透镜”的物质分布的性质。根据尺度与效果的不同,引力透镜效应可以分为强引力透镜效应、弱引力透镜效应和微引力透镜效应。在强透镜区域一般可以形成多个背景源的像,甚至圆弧(又称“爱因斯坦环”),而弱透镜区域则只产生比较小的扭曲。强透镜方法通过对爱因斯坦环的曲率和多个像的位置的分析,可以估计测量透镜天体质量,得到暗物质的质量和空间分布信息。暗物质是宇宙的主要组分,是普通物质总量的6倍左右,它的引力作用与常见的物质是一样的,不可避免地产生引力透镜效应。所以通过分析引力透镜来测定星系团里的暗物质分布,测定大尺度上的暗物质分布是现代宇宙学中重要的研究暗物质的手段。



图2 强引力透镜效应



图中蓝色代表通过引力透镜的方式测量到的暗物质分布,红色展示的是通过美国钱德拉X射线空间望远镜测量到的普通发光物质的空间分布。可以明显看到引力透镜观察到的物质分布跟发光物质分布明显不同,证明暗物质是星系团中的主要物质成分

图3 1E 0657-558中两个星系团之间的相互碰撞(被形象地称之为“子弹头星系团”)为科学家提供了有关暗物质存在的强烈证据

2006年美国天文学家利用钱德拉X射线空间望远镜对一个叫做1E 0657-558的星系团(即“子弹头星系团”)进行观测,无意间观测到两个星系团高速碰撞的过程(图3)。星系团之间的碰撞威力之猛,使得两个星系团的暗物质相互穿越的同时,发出可见光的

正常物质被甩在身后,天文学家发现引力透镜观察到的物质分布跟发光物质分布明显不同,从而证明暗物质是星系团中的主要物质成分。

3.2 星系的旋转曲线

另一个令人信服的暗物质存在的证据,来自于对我们银河系及附近邻

星系的观察。在兹威基提出暗物质的概念 40 年后,美国女科学家 Vera Rubin 和其同事 Kent Ford 在 20 世纪 70 年代开展了对仙女座大星云(M31 星系)旋转曲线的研究。运用此前改进的观测技术,他们可以探测到距离星系核区域数十光年的星体的径向运动速度。按照牛顿万有引力定律,如果星系的质量主要集中在星系核区(就像我们看到的 M31 星系发出的可见光所展示的那样),星系外围的星体的旋转速度将随着离星系中心越远而减小。但观测结果确表明,在相当大的范围内,星系外围星体的速度几乎是恒定不变的——再次出现了兹威基发现的类似现象:仅凭望远镜看到的“可见物质”,远不足以把外围的星体拽住——至少需要 10 倍以上的质量才能把这些恒星拴在 M31 星系中,它们实在转得太快了。既然仙女座星系没有分崩离析,要么意味着牛顿万有引力定律在星系这样的大尺度上是不正确的、需要修改,要么意味着在星系非核心区的更广阔范围内分布有大量的不发光物质,也就是暗物质。他们的工作启发了大量的后续研究工作,现在天文学家认为每一个星系,无论大小,都被各自的暗物质晕团团围住,甚至有些质量小的“矮星系”,暗物质的总量要超过普通物质的 1000 倍以上。如何解释不同星系尺度的“旋转曲线问题”是形形色色暗物质理论必须克服的困难。

3.3 宇宙大尺度结构

宇宙大尺度结构在物理宇宙学中是描述可观测宇宙在大范围内(典型的尺度是 10 亿光年)质量和光的分布特征。近年来大天区星系巡天的结果显示,宇宙似乎显示一种“网状泡沫”结构。几乎所有的星系都分布在狭窄的“纤维带”上,而在它们的中间则是巨大的空洞,其间分布的星系密度要少很多,天文学上称为“空洞”结构。这些空洞的体积巨大,有些直径可达 3 亿光年,尽管看上去那里确实是什么也没有,但实际上天文学观测证明这里充斥着暗物质。对宇宙进一步的研究看到,巨大的像是气泡的空洞分隔开了片状

的物质结构和星系纤维,而超星系团就像是其中偶尔相对出现的密集节点。这种网络结构在宇宙学星系红移巡天可以清楚地看见。在星系巡天观测的三度空间图的结构中显示出迄今所知宇宙的最大结构。所有这些结构的形成都离不开暗物质的帮助,可以说,暗物质是形成我们宇宙中丰富多彩的结构的重要基石。

3.4 宇宙微波背景辐射

宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)的研究在现代天文学、宇宙学以及高能物理学的发展中起着举足轻重的作用。CMB 是宇宙大爆炸遗留下来的微弱光子辐射场,携带着丰富的宇宙学信息,几乎是人类认知极早期宇宙演化的唯一有效途径。CMB 的发现不仅在半个世纪前开创了宇宙学,近年来对它的精确测量更是将人类带入“精确宇宙学”时代。CMB 的测量对探索当代宇宙学、高能物理及基础物理学最前沿问题,例如宇宙加速膨胀及“暗能量”的物理本质、“原初”引力波的探测、早期宇宙暴胀过程的物理机制等起到了核心作用,是最为精确有效的宇宙学“探针”。对 CMB 温度场空间各向异性的观测研究,极大地推进了人类对宇宙物质组分及早期演化的认知。

宇宙微波背景是宇宙大爆炸后遗留下来的热辐射,它是一种充满整个宇宙的电磁辐射,其特征和绝对温标 2.725 K 的黑体辐射相同,频率属于微波范围。1964 年美国射电天文学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊偶然发现宇宙微波背景,并于 1978 年获得诺贝尔奖。CMB 显示出微小的温度涨落,对应着局部密度的细微差异。宇宙在年轻时期,恒星和行星尚未形成之前,等离子与辐射充满着整个宇宙,随着宇宙的膨胀而逐渐冷却。当宇宙冷却到某个温度时,质子和电子结合形成中性原子。这些原子不再吸收热辐射,因此宇宙逐渐变得透明起来。对 CMB 的观测显示宇宙中暗物质的组分是可见光普通物质组分的 6 倍左右,跟大尺度结构的观测结果相吻合。

4 暗物质粒子可能是什么

暗物质的候选粒子必须满足电中性、与物质的相互作用很弱等特性,不然就已经跟众多研究暗物质的实验和观测结果冲突了。在现有的标准粒子模型中,似乎只有中微子满足条件。实际上,中微子曾经是“热暗物质”模型的候选粒子。热暗物质粒子的质量较小,若中微子作为宇宙的主要组分,则在宇宙早期结构形成时,中微子在大尺度的范围上运动会“抹平”宇宙中正在形成的结构,从而使宇宙中的物质先在更大的尺度上形成结构(如超星系团结构),然后再“碎裂”成更小的结构(如大大小小的星系),即所谓的“从大到小”的顺序,有点“顶层设计”的意味。然而,与此前介绍的、通过对宇宙微波背景辐射和宇宙大尺度结构演化的观测发现的“从小到大”的顺序完全不符。同时,大量宇宙学的观测数据将中微子总质量限制在宇宙总质量的 1% 以内,而我们知道暗物质占宇宙物质的 1/4 左右,这说明中微子最多只能占暗物质的一小部分。这样一来,在标准粒子模型里便没有符合暗物质特性的候选粒子。因此,人们兴奋地尝试着拓展或建立超越标准粒子模型的理论,提出可以解释暗物质的候选粒子新理论。

如前所述,为了与宇宙大尺度结构形成的观测和数值模拟结果相符合,人们提出了冷暗物质模型。对于冷暗物质粒子,它们的质量较大,运动速度缓慢,远远小于光速。因此根据冷暗物质模型,宇宙结构是自下而上,从小到大一级一级慢慢形成的,小型的天体先在自身的引力下通过气体冷却丢失掉系统的角动量形成结构,然后又相互在引力作用下并合起来,逐渐形成大的天体结构,使得宇宙结构按照“从小到大”顺序演化,这与观测的结果定性上相符合。

在众多可能组成暗物质的成分中,最热门的要属一种被称为大质量弱相互作用粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP)的新粒子了。这种粒子与普通物质的作用非常微弱,以致于它们虽然存在于我们周围,却从

来没有被探测到过。大质量弱相互作用粒子顾名思义,主要参与弱相互作用、引力相互作用或其他某种可能存在的新型相互作用,具有较大的质量,运动缓慢。WIMP粒子的候选者主要为“超对称理论”下的中性微子(neutralino)、超对称中微子(sneutrino)和引力微子(gravitino)等。超对称理论作为标准粒子模型的拓展,几乎使得所有已知的基本粒子都有了可能的对应粒子,从而拓展了潜在未知粒子的数目。而这些标准模型粒子的“伴子”由于某种猜想的基本物理特性,其质量可能极大。通过检验超对称理论对标准粒子模型进行拓展后的粒子,可以发现一些粒子能够作为暗物质粒子的候选者,这些粒子均为电中性,有较弱的相互作用。其中,中性微子是超对称理论下最合适的WIMP候选粒子。在标准模型的超对称拓展中,中性微子为最轻的超对称粒子,这保证了它的稳定性,不会轻易衰变,从而能够作为在宇宙中占据较大比例的暗物质的候选者。轴子的质量很轻,但数量足够多便具有冷暗物质的行为,因此轴子是冷暗物质粒子的一个候选者。还有一种被理论物理学家很早就提出来解决强相互作用中所谓“CP问题”的粒子,被称为轴子,长期以来也是理论物理学家追逐的对象,被认为也有可能是暗物质的成分之一。

除了冷暗物质模型外,人们还提出了“温暗物质”模型,这个模型综合考虑了冷暗物质和热暗物质对宇宙结构的“从小到大”和“从大到小”的贡献。这个模型下的候选粒子主要有惰性中微子(Sterile Neutrinos)等。除了这些暗物质候选粒子中闪耀的“明星”理论,还有成百上千种各具特点的暗物质理论。理论的蓬勃发展为探索暗物质打开了一道又一道大门,呈现出生机勃勃的发展状态。说到底,我们并不知道暗物质是什么,我们必须打开思维的局限,反复的审视甚至自我否定,因为一切皆有可能。

5 如何探测暗物质粒子

暗物质粒子的探测在当代基础物理学,包括粒子物理、天体物理、宇宙学等领域是一个很热门的研究领域——宇宙中最主要的一种物质成分到底是什么?这个听起来就激动人心的问题,几十年来孜孜不倦地吊着科学家和公众的胃口。对于大质量弱相互作用粒子来说,物理学家试图通过放置在地下实验室的探测装置,屏蔽掉各种干扰来寻找暗物质粒子与普通物质可能发生的相互作用。天文学家们尝试通过地面或太空望远镜对暗物质粒子在宇宙中可能发生的相互碰撞并湮灭产生的次级粒子来间接寻找暗物质粒子存在的证据。粒子物理学家们希望欧洲大型强子对撞机(LHC)或者未来更大能量的粒子对撞机能够“人工”自制出暗物质粒子来。

5.1 暗物质粒子的直接探测

暗物质粒子游离在宇宙中的任何一个角落,地球就是在这样的“暗物质粒子汤”中穿行着。地球上任何一个原子核都有一定的概率被一个暗物质粒子撞一下,虽然暗物质粒子我们看不到,但如果一个原子核无缘无故“身子”晃了晃,那一定是暗物质粒子干的,我们就抓住了暗物质粒子的踪迹。物理学家可以探测这种暗物质粒子与原子核之间的相互作用所释放出的热量或闪光,从而判别碰撞的起源是不是暗物质粒子造成的,物理学家把这种探测方式叫做直接探测。暗物质直接探测试验一般设置于地下深处,地表几百米甚至几千米以下,以排除各种可能造成原子核被碰撞的背景噪声,并且探测装置要经过多种屏蔽处理等降低噪声。这类的实验室包括美国的Soudan和DUSE、加拿大的SNOLAB地下实验室、意大利的大萨索国家实验室等。我们国家在四川锦屏山建设了地下2500 m世界最深的地下实验室,正在开展PandaX、CDMX等暗物质粒子直接探测实验,已经取得了世界领先的研究成果。

5.2 暗物质粒子的间接探测

地球上的暗物质探测实验一方面要仰仗暗物质粒子跟普通物质多多少少要发生一些相互作用,如果暗物质粒子真的完全无视普通物质,那这种直接探测实验就无能为力了。另一方面,即便真的看到了无法解释的“碰撞信号”,仍然需要依赖于对暗物质空间分布的模型才能把地球上的测量结果与宇宙整体暗物质特性联系起来——毕竟我们无法在宇宙空间的其他地方重复这样的实验。到底直接探测发现的粒子是不是我们要寻找的主导宇宙物质组分的暗物质粒子?与直接探测实验互补的另一种探测方式的基本思路是:既然暗物质粒子无处不在,我们可以通过望远镜去寻找暗物质粒子在宇宙中发出的信号,这就是暗物质粒子间接探测实验。

间接探测主要是寻找两个暗物质粒子互相碰撞湮灭时所产生的讯号。不同的暗物质模型预言暗物质粒子湮灭所产生的末态粒子不同,或者比例不同,比如产生高能伽马射线光子或正反粒子对(比如正负电子、正反夸克等)。针对不同的末态粒子,物理学家和天文学家设计了不同的空间望远镜和探测装置。尽管暗物质粒子在宇宙中无处不在,对暗物质可能产生的带电粒子来说,很难在宇宙中传播的过程中会受到磁场的影响,传播方向发生偏折,一般很难知道探测到的带电粒子是从哪个方向发射出来的,只能通过高能带电粒子的能谱特征来搜寻暗物质的迹象。而伽马射线光子保留了方向的信息,与能谱信息结合起来可以提供更多暗物质粒子的佐证与判据。在星系暗物质晕中的暗物质粒子可以通过一些间接的复杂物理过程产生伽马射线光子。对间接探测手段而言,最重要的在于完全了解背景噪声的来源,从中找到可靠的暗物质迹象。美国航空航天局于20世纪90年代发射了EGRET伽马射线望远镜,并于2008年6月11日发射运行费米伽马射线太空望远镜搜寻暗

物质湮灭产生伽马射线的事件,是迄今为止在伽马射线能段最有效的望远镜。ATIC 实验 2008 年发现正负电子的能谱在几百 GeV 的能段有一个超出理论预言的鼓包,恰恰符合了大质量弱相互作用粒子的预言,轰动一时。意大利领导的实验计划 PAMELA 更是于 2009 年就探测到正电子的能谱在高能段的变化,成为一个可能的暗物质信号。

美籍华裔科学家丁肇中教授领导的阿尔法磁谱仪(AMS),也被称为反物质磁谱仪,通过巨大的磁铁把带正电和负电的粒子区分开,主要目的是探测宇宙中的反物质和暗物质。第 1 台 AMS-01 在 1998 年进入轨道,而第 2 代价值 20 亿美元的 AMS-02 于 2011 年由航天飞机运送到国际空间站开始观测(这也是航天飞机的最后一次发射),是迄今为止灵敏度最高,也是最复杂、最昂贵的一台暗物质探测设备,代表了当今科学实验的最高技术手段,由 16 个国家和地区 600 余名科学家历时近 18 年完成,发射 4 年多来已经精确地测量了正负电子谱和其他带点宇宙射线的能谱,实验过程可能持续 15~20 年。

5.3 用粒子对撞机人造暗物质

不论是直接探测还是间接探测,目标都是想办法通过空间或者地面的探测器抓住在宇宙中游离的暗物质粒子的信号。那么为何不自己制造一些暗物质出来研究呢?事实上,粒子物理学家们正在利用瑞士日内瓦附近的欧洲大型强子对撞机(LHC)寻找暗物质粒子。大型强子对撞机会将大量质子加速到十分接近光速并使它们相撞。这样的粒子碰撞过程通过强大的能量释放产生大量的新粒子。在大量的粒子产物中,有这样的一种可能:在释放出来的新粒子中探测器发现有一束粒子射出,但在另一侧却发现没有粒子出来。发生这种情况就只有一种可能性,那就是出来的粒子是一种探测器无法检测到的粒子形式,这就很有可能是暗物质粒子——比如前文提到的一种暗物质粒子的候选者——大质量弱相互作用粒子。如果这种粒子的确是组成

暗物质的基本粒子,并且我们利用大型强子对撞机发现了它,那将是物理学具有划时代意义的发现。然而,如果暗物质并非如大质量弱相互作用粒子理论中所预言的那样,那么或许大型强子对撞机或许就不能检测到它,或者需要更高能量更强大的粒子对撞机。中国正在考虑建设的新一代环形正负电子对撞机(CEPC),并在第二阶段升级为质子对撞机(SPPC),届时对撞机能量比目前运行的欧洲大型强子对撞机能量高 7 倍,暗物质粒子的寻找也是其重要的科学目标之一。

6 为什么要发射空间天文望远镜研究暗物质

由于地球引力作用,几乎全部的大气集中在离地面 100 km 的高度范围内,其中 75% 的大气又集中在地面至 10 km 高度的对流层范围内。在地球表面进行天文学的研究会由于地球大气层的电磁辐射的干扰和过滤而受到限制。太空望远镜的概念最初出现在 20 世纪 40 年代,天文学家们设想将望远镜放置到太空,因为地球的大气层对许多波段的天文观测影响甚大(图 4),若能将望远镜移到太空中,便可以不受大气层及地表人类生产生活产生的各种信号的干扰,得到更精确的天文资料。迄今为止,大量的望远镜被发射到了轨道上,数十年来极大地增加了我们对于宇宙的认识。目前已有不少空间

望远镜在太空中运行,许多太空天文台已经完成了它们的任务,而另外一些则仍然在运作中。举例来说,X 射线完全不能穿透地球大气层,使得建立在 X 射线观测基础上的天文学在地表是不可能的。而现在众多来自美国、欧洲和日本的 X 射线望远镜卫星的发射打开了天文学研究的新局面,在高空天体物理的研究中占据了核心的地位,印度也在近期发射了第 1 颗 X 射线卫星,我国也将在 2016 年下半年发射首颗 X 射线天文卫星。同样的,红外线和紫外线也被大气层大量阻断,而暗物质粒子探测卫星所观测的伽马射线能段,也只有空间装置可以实现探测的目标。

著名的空间天文望远镜包括观测可见光波段的哈勃空间望远镜,观测红外波段的史匹哲太空望远镜、赫歇尔望远镜,观测微波波段的 WMAP、Planck 望远镜,观测 X 光波段的钱德拉太空望远镜,观察伽马射线波段的康普顿天文台(已于 2000 年退役)与正在运行的美国费米太空望远镜等。即将升空的大型空间望远镜包括计划于 2018 年发射的美国航空航天局新一代空间望远镜,计划接替哈勃的天文研究使命。该望远镜以 NASA 第二任局长詹姆斯·韦伯的名字命名,目标是寻找宇宙有史以来第一代恒星和星系;WFIRST 则是美国暗能量探索计划之一,旨在寻找并精确测量暗能量、寻找太阳系外行星。

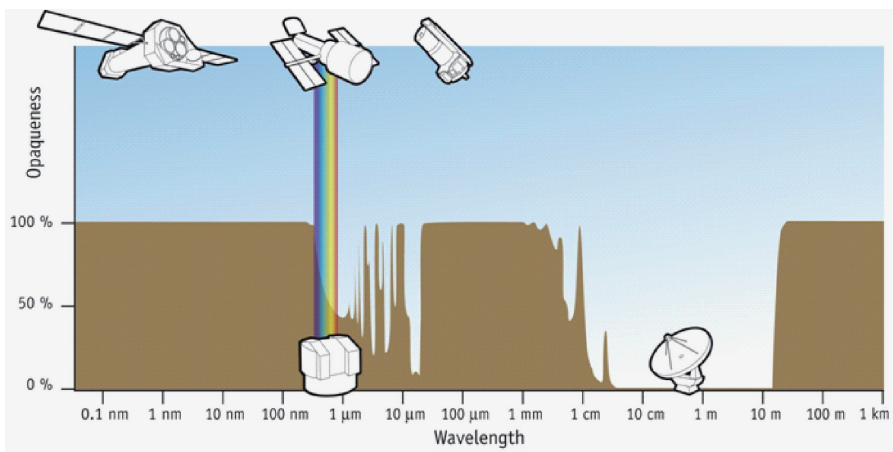


图 4 大气层对不同波段电磁能谱的吸收情况

7 中国暗物质粒子探测卫星 (DAMPE)

暗物质粒子探测卫星是中国科学院空间科学战略性先导科技专项中,4颗科学卫星的首发卫星,也是中国空间科学卫星系列首发星。由中国科学院紫金山天文台等科研单位共同参加有效载荷、科学应用等工程项目研制工作。其科学目标为通过高空间分辨和高能量分辨的精确测量方式,研究高能电子、伽马射线以及宇宙射线的能量和方向,寻找暗物质粒子存在的证据和研究其物理特性,并在宇宙射线起源和伽马射线天文学方面取得重大进展,是迄今为止观测能段范围最宽、能量分辨率最优的空间探测器,超过国际上所有同类探测器。在卫星结构方面,暗物质卫星首次尝试了“科学探测载荷一体化”设计,卫星有效载荷质量 1410 kg,整星质量 1850 kg,载荷平台比达到了 3.2:1。这样的设计减小了卫星体积,降低了重量,大幅节省了发射成本。2015年11月9日,中国科学院重大科技任务局在中国科学院国家空间科学中心组织召开了暗物质粒子探测卫星工程星箭出厂审定会。11月14日卫星和火箭从上海航天科技八院起运,驶往酒泉卫星发射中心。12月17日,暗物质粒子探测卫星“悟空”在酒泉卫星发射中心,搭载由中国航天科技集团第八研究院研制的长征二号丁型火箭成功发射,并顺利进入预定转移轨道,标志着中国空间科学研究迈出重要一步。这是长征-2D型火箭第26次出征任务,也是长征系列运载火箭的第221次飞行。

8 国际与国内暗物质研究的现状 与展望

国际物理学界对暗物质的研究相当重视,美国、欧洲和日本等国家和地区都进行了相应的规划和布局。2007年,美国自然科学基金会(NSF)、航空航天局(NASA)、能源部(DOE)联合成立的暗物质研究评估小组发布报告指出,宇宙里面暗物质之谜的解决具有极特别的科学意义,并建议美国加大投入,以保持其领先地位。美国国家科学

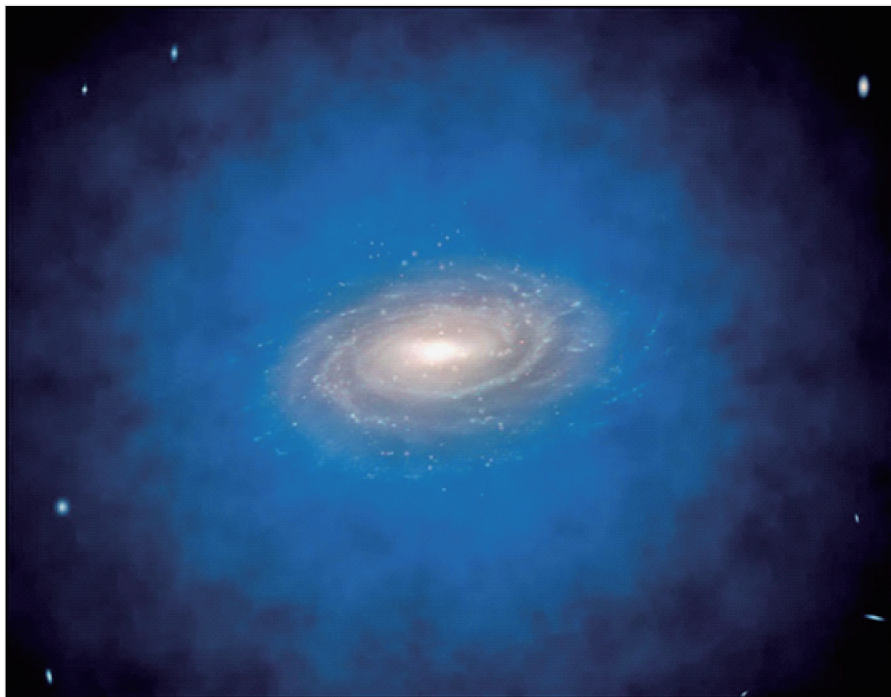


图5 星系分布在更为扩展的暗物质晕的结构当中,这样的图像不仅得到观测的支持,而且被近年来快速发展的宇宙学数值模拟所验证

院发布的天文及天体物理 2012—2021“十年规划”中,暗物质和暗能量是主要的研究方向。美国通过搭载于费米(Fermi)伽马射线空间卫星上的“大面积望远镜”和位于国际空间站上的阿尔法磁谱仪(AMS-02)进行暗物质的间接探测。2008年,欧洲天体粒子物理联盟所规划的路线图中,暗物质直接探测实验位于其所规划的7个项目之首。2009年发射的普朗克(Planck)空间观测卫星已经完成了它的使命,并于2016年年初给出了最新的宇宙学参数的测量结果,包括迄今为止最为精确的暗物质组分的参数测量。欧洲下一步计划在2020年左右发射欧几里得(Euclid)航天器,通过观测大量的星系在空间中的分布特性来精确测量宇宙学基本参数(图5),从而帮助深入理解暗能量和暗物质的物理特性。而日本与美国合作也于2015年8月发射了CALET探测器,成功放置在国际空间站上属于日本的舱位开展研究。

中国对暗物质和暗能量的研究非常重视。揭开暗物质、暗能量之谜,将是人类认识宇宙的又一次重大飞跃,可能导致一场新的物理学革命。我国已

经在考虑建设几项关键性的探测暗物质、暗能量的重大实验装置,包括地下和太空的粒子探测器和在南极建立大口径天文望远镜,以取得第一手实验数据,在国际竞争中处于主导地位。中国暗物质粒子探测器(DAMPE)卫星通过探测来自宇宙空间的高能伽马光子、电子及质子,以实现宇宙空间中的暗物质的间接观测,而下一代伽马射线卫星盘古(PANGU)卫星已经在积极的筹划中,将成为首个针对 MeV 到 GeV 能段的宇宙探测望远镜,寻找暗物质在这个特殊能段的信号。基于中国未来空间站为平台的高能宇宙辐射探测装置(HERD)也处于积极的研发中,并已经在技术预研上取得了相当的进展。

对暗物质和暗能量的研究是当代基础物理学最前沿的方向之一。天体物理和宇宙学的研究表明,暗物质和暗能量在宇宙的演化过程中起着重要作用。对于暗物质和暗能量进行实验和理论上的探索将大大深化人们对微观世界结构和宇宙演化的理解,并极有可能产生物理学基础理论革命性的突破。在过去的几年里面,中国科学家在暗物质的研究中实现了跨越式的发展,

取得了重要的成绩。这些基础让中国跟上了国际前沿研究的步伐,并在某些方面达到国际上先进水平,甚至世界领先。包括暗物质粒子探测卫星在内的实验项目将在未来几年内完成一系列互相关联的探测项目,使中国的暗物质

研究能够有机会作出引领世界的贡献。除了中国四川锦屏地下暗物质实验室外,其他正在计划中的科学实验包括在中国西藏阿里地区建设宇宙微波背景辐射观测望远镜,首次实现对北半球暗物质大尺度空间分布的精确探

测。这些规划中的科学实验将能够全面探索暗物质的基本属性,期待着下一个10年,暗物质的探测实验将给人类展现宇宙最神秘的一面。

Astronomical Approach of Dark Matter Detection

SU Meng^{1,2}

1. MIT Department of Physics/Kavli Institute of Astrophysics and Space Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02138, USA
2. Harvard University, Department of Astronomy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02138, USA

Abstract Dark matter and dark energy are considered as the “two clouds of physics at the 21st century”, among the frontier of fundamental physics and cosmology research. The breakthrough will significantly change our understanding of the Universe and the fundamental law of physics. Both United States and Europe have made increasing support for the research of dark matter and approved several mid-term and long-term plans of large projects. In the last several years, China has made significant progress on the detection of dark matter, in particular the development of Jinping Underground Laboratory, and the Dark Matter Particle Explorer (DAMPE) has been launched last December. DAMPE has the potential to discover dark matter particle through indirect detection approach by observing the secondary particles from dark matter annihilation. In this article, we briefly introduce the history of dark matter concept and a summary of astronomical approaches to study dark matter.

Keywords dark matter; cosmology; particle physics; galaxy; gravitational lensing; space telescope; cosmic microwave background

(责任编辑 李娜)