

引力波之后的下一个重大科学目标： 暗物质

广义相对论的4大推论及其验证

1915—1920年期间,理论物理学家爱因斯坦(Albert Einstein)根据广义相对论提出了4大推论:

- 1) 水星每百年43 s的剩余进动。
- 2) 引力透镜效应,即光线在强引力场中发生弯曲,产生透镜效应。
- 3) 引力红移,引力场中的时钟变慢,从恒星表面射到地球的光线谱线会产生红移。
- 4) 引力波,大质量天体加速运动引起时空曲率变化,以波和光速在宇宙空间传播。

上述第1个问题,爱因斯坦根据广义相对论把行星的绕日运动看成是它在太阳引力场中的运动,由于太阳质量造成周围空间发生弯曲,从而最靠近太阳的水星产生了每百年43 s的剩余进动,这与观测给出的剩余进动量完全符合,从而给出了完满的解释。

对于第2个推论,1919年日全食期间,爱丁顿(A. S. Eddington)等率领的2支观测队分别赴西非和巴西两地观测。观测结果分别为 $1''.61 \pm 0''.30$ 和 $1''.98 \pm 0''.12$,与理论预期基本吻合。1974—1975年人们通过对类星体进行观测,观测值与理论计算值的偏差不到1%。

对于第3个推论,1925年,亚当斯(W. S. Adams)利用美国威尔逊天文台的望远镜观测天狼星的伴星,这颗伴星是白矮星,观测它发出的谱线,得到的频移与推论基本相符。1959年,庞德(R. V. Pound)和雷布卡(G. Rebka)成功地运用穆斯堡尔效应检测引力频移,得到的结果与理论值相差小于5%。

对于引力波的探测,长期以来被人们认为几乎是不可能的,因为在地球上这种效应太弱了宇宙中大质量天体的加速、碰撞和合并等事件可以形成强大的引力波,但能产生这种较强引力波的

波源距离地球都十分遥远,传播到地球时变得非常微弱。哪怕是很强的天体物理引力波源所释放的引力波强度,到达地球时在整个地球这么大的尺度上产生的空间畸变不超过 10^{-14} m,大约只比质子大10倍,可见探测之难。

美国LIGO协作组2016年2月11日宣布,他们利用激光干涉引力波天文台(LIGO)于2015年9月14日首次探测到13亿年前2个质量分别为太阳质量的36倍和29倍的黑洞碰撞而并合发射出的强引力扰动,在这个过程中大约有相当于3倍太阳质量的物质转化为引力波释放出来,在约0.5 s时间里接收到的引力波频率从35 Hz迅速增加到250 Hz,证实了引力波的存在。

引力波的重大发现意义,从理论上讲,广义相对论实验验证中最后一块“拼图”被填补了;从科学意义上看,由于引力波是唯一能逃出黑洞的辐射,我们将可以直接观测到黑洞的内部。另外,由于电磁波观测只能探测到宇宙再电离之后的宇宙过程,无法探测到宇宙暗黑时期之前(即大爆炸之后约40万年之前)的过程,而引力波可以产生于宇宙大爆炸初始时刻,这种大爆炸之初的引力波在137亿年后的今天仍然可以探测到,被称为原初引力波。一旦发现了原初引力波,就可以揭开宇宙的各种谜团,甚至了解宇宙的开端和运行机制。

下一个重大科学问题:暗物质

那么,引力波都发现了,人们所面临的下一个重大科学发现会是什么呢?许多科学家和媒体都认为,下一个目标应该是暗物质。2012年《Science》把暗物质问题列为人类面临的重大科学难题之首,比起引力波,发现暗物质似乎更加重要。因为,引力波

的发现只是进一步验证了爱因斯坦广义相对论,而暗物质的阐明将极大地影响现有理论大厦,并有可能推动人们去建立全新的物理理论。

然而,暗物质却很像中国传说中的“鬼”。天文学家通过大量观测事实肯定它的存在,是宇宙中所有可见星球、星系、热气体质量总和的5倍以上并有可能决定着宇宙的命运;但是,物理学家们上天入地苦寻多年,却始终没有找到暗物质的踪影,暗物质是什么?在哪里?它有什么特征?

根据爱因斯坦广义相对论,宇宙形状取决于宇宙间质量的多少,如果宇宙是有限封闭的,那么宇宙中物质的平均密度必须达到 5×10^{-30} g·cm³。但是,根据天文观测,宇宙中似乎并没有这么多物质,还有大量物质我们没有看到。

1932年,美国加州理工天文学家Fritz Zwicky观测螺旋星系旋转速度时,发现星系外侧的旋转速度较牛顿重力理论预期的快,据此推测在这些星系中必定还有更多的物质存在,否则将无法约束住那些星系外侧快速旋转的天体。他将这些看不见的物质称为暗物质(Dark Matter)。几十年来,人们通过大量天文观测,尤其是20世纪70年代以来,美国女天体物理学家Vera Rubin大量仔细的工作,基本上肯定了宇宙中确实存在大量的暗物质。目前,多数人都接受这样一个事实,在宇宙的整体构成中,可见物质占4.9%(包括组成行星、恒星、星系以及各种热气体的物质)、暗物质占26.8%、暗能量占68.3%,即暗物质是可见物质的5倍以上。

人们也曾经试图通过修改引力理论去解释有关暗物质的观测结果,即所谓MOND理论。但是,随着大量引力透镜观测结果的发表,修改引力理论的途径越来越不被人们看好,人们更倾向于

相信暗物质确实是存在的。

提到暗物质,人们马上便会想到另一个同样也是谜一样的东西——暗能量(Dark Energy)。二者很可能有某种联系,但是它们的区别也是很显著的。暗能量的基本特征是具有负压、在宇宙中均匀分布、完全不结团,驱动宇宙加速膨胀;而暗物质的压强是非负的,具有显著的成团性。

暗物质自身不发射、不吸收、也不反射任何电磁波,不参与电磁相互作用,它们是什么呢?关于暗物质的本质人们至今几乎仍然是一无所知的,著名天体物理学家陆埏教授曾将迄今人们对暗物质的认识归纳为:1) 不参与强相互作用和电磁作用,最多只参与弱相互作用和引力作用,因此也不带电荷。2) 寿命很长。3) 冷,即静止质量大。

暗物质粒子也称为宇宙粒子(Cosmion)。人们认为可能的暗物质粒子候选者主要有:弱作用大质量粒子(WIMP)、中微子(Neutrino)、微中子(Neutralino)、轴子、磁单极子等。

针对不同的暗物质候选粒子,人们先后设计建造了不同类型的探测器。例如,如果暗物质是WIMP,则宇宙中将存在大量的WIMP粒子,当一个WIMP粒子偶尔撞上一个原子核时,会散射原子核,使之和周围其他原子核发生碰撞。探测这些碰撞所释放出的热量和闪光可以反推WIMP的性质。这类探测必须排除宇宙射线的背景噪声,因此一般都把探测器安置在地下深处,如美国Soudan和DUSE、加拿大SNOLAB地下实验室、意大利Gran Sasso国家实验室、英国的Boulby以及中国四川锦屏地下实验室等。美国南达科他州“大型地下氙实验(LUX)”拥有世界上最灵敏的DM探测器,盛有300 kg液态氙的探测器被冷却到 -101°C ,当暗物质粒子同氙原子发生碰撞时,将产生微弱的光,能被探测器捕捉到。最近,LUX开始全面升级为LUX-Zeplin,探测器中液态氙的量将增加到10 t,预计2018年开始观测。

另外,人们也试图在外太空捕捉暗物质粒子的踪迹,由著名物理学家丁肇

中教授领导的国际探测团队使用国际空间站上的阿尔法磁谱仪(AMS)是2013年以来灵敏度最高、最复杂的一台暗物质探测设备,由600余名科学家历时近18年完成,耗资20多亿美元,中国许多科研机构 and 大学的科学家也对这个项目发挥了重要作用。实验可能持续15~20年。2013年2月,该研究团队甚至透露他们可能找到了WIMP的某种迹象。

暗物质粒子也可能通过对撞而湮灭,产生伽马射线或正负粒子对。如此可能会在星系晕生成大量伽马射线、反质子和正电子。EGRET伽马射线望远镜曾经观测到了超出预期量的伽马射线,但科学家认为这多半是来自系统中的效应。2008年6月11日启动的Fermi伽马射线太空望远镜则正在搜寻暗物质湮灭产生伽马射线的事件。

当然,利用高能加速器直接打出暗物质粒子并研究其特性是最有说服力的办法了,人们期望欧洲的LHC在这方面能有所作为。

中国在暗物质粒子的探测方面也一直紧追国际前沿。在地下探测方面,位于四川大山深处的中国锦屏地下实验室是全世界最深的暗物质探测实验室,位于地底深处2.4 km的岩石之下。实验室上方厚厚的大理石岩层既可拦截大部分宇宙射线,使其数量降至地面水平的 10^{-8} ,同时,其天然辐射本底也非常低,条件得天独厚。实验室2010年启用后,有两个实验组进驻,分别是清华大学主导的CDEX实验和上海交通大学主导的PandaX实验。2014年,CDEX实验组得到了目前同类探测器上国际最灵敏的实验结果,进一步缩小了暗物质可能存在的区域。PandaX采用液氙技术,2014年也公布了首批实验数据,对以往国际上所有发现的疑似轻质量暗物质信号提出了质疑。目前,PandaX实验二期扩建升级接近完成,核心区液氙规模进一步扩大。2个实验组最近发表的成果,真正使得中国暗物质搜寻努力走到了国际最前沿。在空间探测方面,2015年12月18日,由中国科学院紫金山天文台主导研发

的中国暗物质粒子探测卫星“悟空”发射升空。“悟空”探测器的观测能段是AMS的10倍,能量分辨比国际同类探测器高3倍以上,是目前世界上观测能段最宽、能量分辨率最优的暗物质粒子探测卫星。它将在太空中通过对高能电子及高能伽马射线探测,反演暗物质粒子湮灭的证据,并研究暗物质的物理特性和空间分布规律。

虽然设计建造的探测器越来越精密和灵敏,但是,不能不说的是,迄今所有的暗物质探测实验,无论是地下、南极、还是在太空,都没有得到暗物质明确存在的证据。尤其是2013年10月国际最灵敏的LUX为期3个月的搜索实验表明,没有暗物质存在的任何迹象,这让人们非常失望。人们在思考,暗物质到底是什么呢?

暗物质——打开物理学更深层次理论大门的钥匙

20世纪,人们建立了粒子物理学标准模型,可以解释迄今为止的所有加速器实验的观测结果。尤其是2012年在欧洲核子中心(CERN)的巨型强子对撞机LHC上发现Higgs粒子,使粒子物理学标准模型完美收官。

但是,粒子物理标准模型无法包含暗物质粒子,因为标准模型根本就无法容忍既稳定、不带电、相互作用弱而同时质量又很大的粒子。因此,暗物质粒子必然是某种超出标准模型以外的新粒子,需要新的更基本的物理理论。而确定暗物质粒子的基本性质便成为建立这个新理论的突破口。诺贝尔物理学奖获得者李政道曾多次指出:“暗物质是笼罩20世纪末和21世纪初现代物理学的最大乌云,它将预示着物理学的又一次革命。”2012年《Science》将暗物质问题列为人类目前面临的重大科学难题之首。很多前沿科学家都有这样的预感:今天物理学所面临的状况与19世纪末、20世纪初诞生相对论和量子力学时是类似的。人们相信,暗物质更像一把钥匙,有可能打开物理学更深层次理论的大门。

文/谭宝林(中国科学院国家天文台)

(编辑 祝叶华)