

暗物质粒子探测和LHAASO实验

袁强

(中国科学院紫金山天文台 210034)

一、我们的宇宙很“黑暗”

理解我们所生存的宇宙长期以来一直是人们孜孜以求的目标。根据日月星辰的运动,人们从中学会了昼夜交替和季节变化的规律,并将其用于农业生产和历法授时;通过行星的精确运动规律,开普勒总结出了行星运动三大定律并导致了牛顿提出万有引力定律;望远镜的发明极大地拓展了我们的视野,引导我们对宇宙的认识逐步走出太阳系、走出银河系、走向极其深远的宇宙空间。图1形象地展示了我们宇宙宏大、丰富的层次结构以及地球在宇宙中是处于何种微不足道的位置。

那么在认识宇宙的过程中,一个很自然的问题就是,宇宙中有些什么物质(物体)以及有多少物质?回答这个问题需要一项非常基本的技能——给天

体“称重”(测量质量)。天体都是遥不可及的,如何能够测量它们的质量呢?天文学家很巧妙地想到了利用天体的运动来推断质量,本质上是根据万有引力定律和牛顿第二运动定律。比如在太阳系内,行星绕着太阳做近似圆周运动,运动的速度随着离太阳的距离增加而下降,反比于距离开平方根,即开普勒第三定律描述的内容。太阳系行星运动观测结果的确非常完美地符合这个规律,见图2(a)。根据图中的数值我们可以简单地做个计算,比如地球离太阳的距离为1个天文单位,约1.5亿千米,地球绕太阳运动的速度约为30千米每秒,我们可以得到太阳的质量约为 2×10^{30} 千克。太阳系里如此,我们自然预期在星系里也应该有类似的现象,唯一的区别是太阳在太阳系里可以被当做点质量,而星系里星星的分布范围会更广一些。然而观测结果却

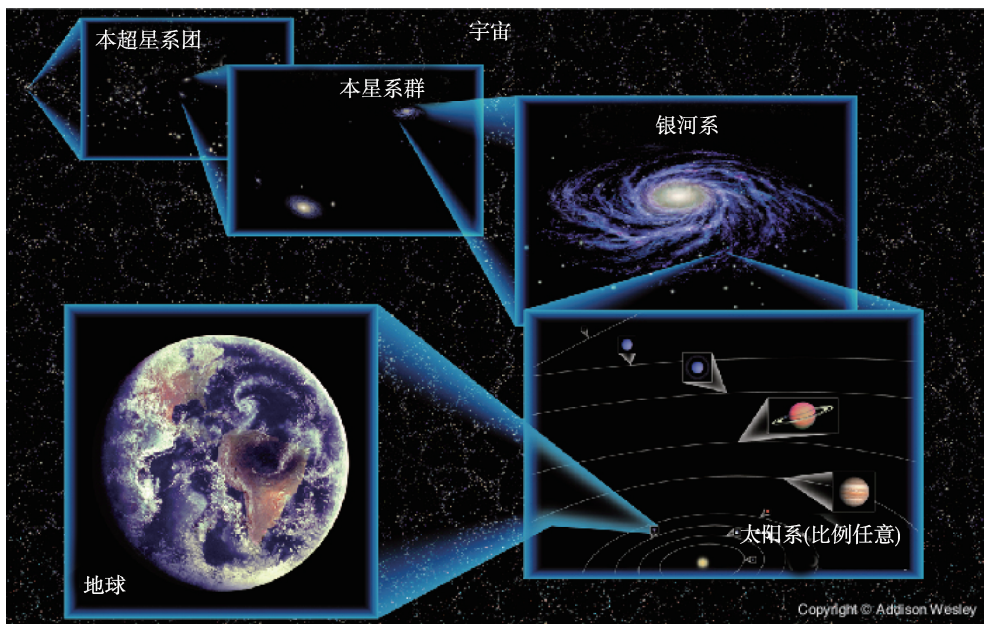


图1 宇宙的层次结构(图片来自网络)

出乎意料^①:星系中天体绕星系中心旋转的速度并不像太阳系中那样越远的地方转动越慢(图2(b)虚线所示),而是越到外围转得越快(绿点所示)!这给我们一个启示,可能在星系空间中存在一些不发光的物质,虽然我们看不见它,但它却通过引力影响着天体的运动。人们将这种假想的物质称为暗物质。

话说“孤证不立”,如果只是单一的证据,那便不足取信。事实上天文学家在很多天文观测中都发现了需要存在额外物质的现象,大到宏观宇宙,小到矮星系尺度;方法上也不仅限于测量天体的运动,人们还用上了诸如引力透镜效应、星系计数等等。总而言之,现代天文学观测告诉我们宇宙的组分只有约5%是由原子构成的恒星、气体等我们称之为普通物质的天体,有约25%是上面提到的暗物质,还有约70%是一种更为神秘的、驱动宇宙加速膨胀的暗能量^②。我们的宇宙实际上是笼罩在“黑暗”之中。暗物质和暗能量的物理本质被誉为新世纪物理学的“乌云”,认识它们很可能会导致基础物理学的革命性突破。

二、暗物质是黑洞吗?

我们知道黑洞是一种具有极强引力场的物体,即便是光都无法逃离黑洞的引力,因此才得名为黑洞。观测上我们也确实发现宇宙中存在大大小小的黑洞,比如在银河系的中心存在一个四百万倍太

阳质量的超大质量黑洞,而激光干涉仪引力波天文台发现的引力波信号,更是恒星级质量黑洞存在的直接证据。那么如果宇宙中遍布着黑洞,它们也不发光,是否就可以解释暗物质现象呢?的确在很早的时候人们想象中的暗物质就是类似黑洞这样的天体,不仅仅是黑洞,还包括一些别的发光非常暗弱的天体,人们给这类天体起了个名字叫“大质量致密晕状天体”(massive astrophysical compact halo object),简称为MACHO。MACHO发光很弱或者不发光,直接观测它们非常困难。天文学家发明了一种办法来观测它们。如果一个MACHO天体位于地球和某颗恒星之间,它的引力将会偏折恒星发出的星光,产生一种称为微引力透镜的现象。MACHO天体越多,这种微引力透镜事件就会越频繁发生。通过一系列搜寻微引力透镜的努力,人们发现观测到的微引力透镜事件率远远达不到解释暗物质现象所需的MACHO数量^③。因此MACHO或者说黑洞这条路基本上是行不通的(但这个问题目前还不能下绝对定论,因为任何观测都有一定的局限性,如果MACHO质量位于某些特定范围,它们仍然可能构成暗物质。不过需要注意到这种可能性比较低)。此外,天文观测结果还表明暗物质的物理属性应该和普通物质不同,即它们根本就不能由构成普通世界的原子构成,否则宇宙面貌跟今天观测到的结果将截然不同。

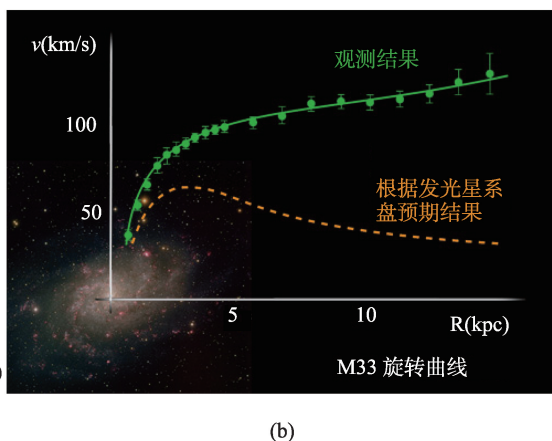
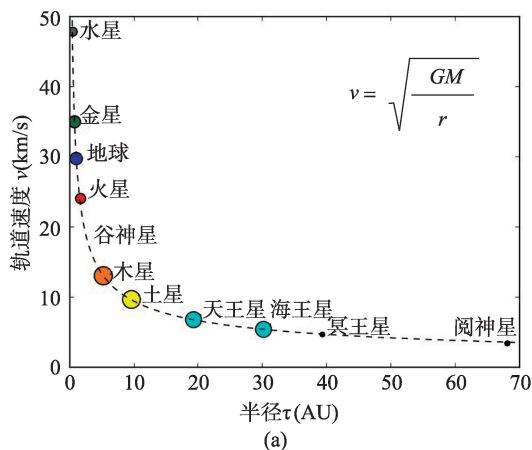


图2 太阳系行星绕日运动速度随距离的变化关系(a)和M33星系中天体绕星系中心旋转速度随距离的变化关系(b)(图片来自网络)

三、暗物质是一种新粒子吗？

如果说暗物质不是黑洞,也不是由普通物质构成的任何不发光天体,那么最大的可能性便是某种尚未发现的新粒子了。普通物质主要由质子、中子和电子构成,或者更基本一点,由夸克和电子构成。除此之外,宇宙中稳定存在的粒子还有光子和中微子。通过粒子对撞机和宇宙线,人们还发现了少量的反物质粒子,以及多种不稳定粒子。但是所有这些粒子表现出来的性质都不符合天文观测所揭示的暗物质属性,因此很有可能暗物质是某种或者某些尚未发现的新粒子。在理论物理学家眼里,这样的新粒子五花八门、形形色色。其中最受青睐的一类粒子,人们也给它起了个名字,叫做弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particle),简称WIMP。

弱相互作用是大自然的四种相互作用之一,其他三种相互作用是强相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。典型的弱相互作用过程是中微子和物质的相互作用。弱相互作用名副其实,例如中微子几乎都可以穿越整个可观测宇宙而不发生任何碰撞。天文观测得到的关于暗物质的证据均是来自于引力相互作用,而暗物质显然应该不具有电磁相互作用和强相互作用,否则我们应该能够很容易地看到它们发出电磁辐射或者和物质强烈碰撞等。暗物质可能具有弱相互作用,这符合目前所有的观测事实。这样的话我们就有可能在实验室里探测到暗物质,就类似于通过大型实验装置探测到中微子一样。暗物质即使具有弱相互作用,这种相互作用的强度也必定非常弱,因此探测暗物质非常具有挑战,需要很大规模、很高精度的探测设施。当然暗物质也可能没有弱相互作用,那样的话我们只能说很遗憾,认识暗物质本质的唯一窗户也被关上了。

科学家们提出了几种方案来探测WIMP暗物质粒子。最直接的方案就是去探测暗物质粒子和普通物质粒子(例如原子核)的碰撞反应,这种碰撞就像打台球一样,不过我们不能直接看到“白球”的

轨迹,而需要通过被“白球”击中的“彩球”的运动来推断“白球”的性质。这种方法也被称为直接探测。如果存在这类的碰撞反应,那么我们便有可能观察到被撞之后的原子核的运动,可能以电离、发光或者发热等方式呈现出来。目前国际上正在和计划开展的暗物质直接探测实验有数十个,其中中国在四川锦屏深地实验室中也正在进行两个直接探测实验,PandaX^④和CDEX^⑤。第二种方案是通过高能粒子对撞机撞出暗物质粒子。历史上有很多的新粒子都是通过粒子对撞机发现的,例如丁肇中教授发现的 J/ψ 粒子和2012年大型强子对撞机发现的“上帝粒子”——希格斯粒子。如果对撞粒子的能量和数量足够,将有机会能够产生暗物质粒子。但这个方法需要建造大型粒子加速器,成本非常高昂。第三种方案称作间接探测。理论上预期WIMP暗物质粒子可以发生自湮灭或者衰变,变成普通物质粒子,这些粒子会混迹在宇宙射线中,因此通过宇宙射线实验有可能会观测到它们从而反推出暗物质粒子的属性。相比较前面两种方法,这种方法显得更加间接一些,因为观测暗物质湮灭或衰变后留下的遗迹毕竟还是不如直接探测那样“抓现行”。但三种方案各有优势,互为补充。间接探测实验国际上也有好几个项目正在进行。中国于2015年底发射了暗物质粒子探测卫星“悟空”号,其主要科学目标就是通过高精度观测宇宙射线来揭示暗物质的属性^⑥。三种探测WIMP暗物质粒子的方法原理图见图3。

四、LHAASO如何探测暗物质？

正在四川稻城建设的大型基础科学设施“高海拔宇宙线观测站”(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是一个高海拔、大视场、平方千米级、复合式探测技术的宇宙射线和伽马射线观测站^⑦。LHAASO通过观测高能宇宙射线粒子在空气中形成的级联簇射产生的次级粒子来测量宇宙射线。空气簇射的发展从大气层顶部开始呈现出先增长后衰减的方式,LHAASO选择在海拔4400

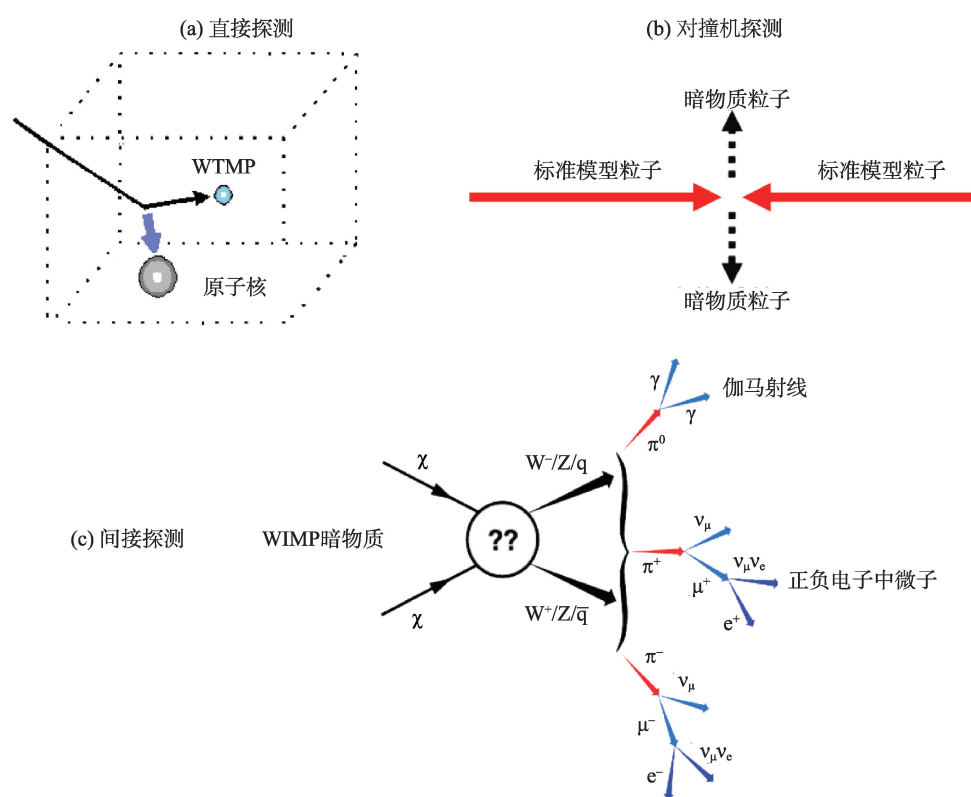


图3 三种探测WIMP暗物质的原理示意图(来自赛先生微信公众号文章“捕获暗物质:宇宙中的神秘幽灵”)

米的高山上做实验,正好可以测量到簇射发展比较充分的阶段,有利于做出精确的测量。LHAASO采用了三类不同的探测器来探测次级粒子,包括覆盖1.3平方千米面积的表面粒子探测阵列KM2A,覆盖7.8万平方米的水切伦科夫光探测阵列WCDA,和20台广角大气切伦科夫光望远镜WFCTA。三类探测器既可以相互验证又可以优势互补,共同实现宽能段、高精度的宇宙射线和伽马射线观测。LHAASO视场很大,每一时刻可以覆盖约15%天区,借助地球自转可以实现对几乎整个北半天的覆盖。LHAASO计划于2021年建设完成。前期1/4阵列将于2019年内建成并开始试运行。预期LHAASO将在宇宙射线起源和高能天体物理研究方面取得突破性进展。

LHAASO也将会是暗物质粒子探测的利器,基于上述间接探测的原理。LHAASO主要通过观测伽马射线来探测暗物质。LHAASO探测暗物质的

优势体现在两个方面。一是能段高,LHAASO将可以观测数百GeV(GeV是能量单位,读作“京电子伏”,相当于一个氢原子按照爱因斯坦质能关系所对应的能量)到一百万GeV的伽马射线,而且在一万GeV以上的能段LHAASO的观测灵敏度将达到世界最高水平。如果暗物质粒子恰好位于这样的高能量段,那么LHAASO将会是国际上最好的探测仪器。第二个优势是视场大。我们对暗物质信号最强(或者说信噪比最高)应该出现在哪里并没有十足的把握,虽然像银河系中心这样的地方最有可能是暗物质高度聚集之处,然而银心的天体辐射也很强,导致银心并不是暗物质探测的首选。而暗物质在银河系内可以形成为数众多的子结构,它们可能随机地分布在各个地方。如果探测器的视场足够大,就会明显降低漏掉信号的可能性。LHAASO几乎可以覆盖整个北半球,这对暗物质探测非常重要。

暗物质探测是目前物理学领域最前沿的热点

问题之一,全世界有几十个相关实验正在进行。近年来中国在这个领域也部署了一系列实验开展相关研究,在天上“悟空”卫星,在地面有 LHAASO 实验,在地下有锦屏实验,这些实验取得的部分成果已经达到国际上最高的水平。希望在不远的将来中国在暗物质探测方面能够取得突破,引领物理学的新方向。

参考文献

- ① E. Corbelli, P. Salucci. MNRAS, 311, 441 (2000).
- ② P. Ade et al. (PLANCK collaboration). A&A, 594, A13 (2016).
- ③ P. Tisserand et al. A&A, 469, 387 (2007).
- ④ <https://pandax.sjtu.edu.cn/>
- ⑤ K.-J. Kang et al. (CDEX collaboration). Front. Phys., 8, 412 (2013).
- ⑥ J. Chang et al. (DAMPE collaboration), Astropart. Phys., 95, 6 (2017).
- ⑦ Z. Cao (LHAASO collaboration). Chin. Phys. C, 34, 249 (2010).



科苑快讯

人工智能教机器人创建自定义障碍教程

在你训练跨栏跑之前必须学会爬行,在你阅读莎士比亚作品之前需要先学会字母表。任何教育工作者都知道,循序渐进的教学计划对完成一项任务的重要性。现在,优步人工智能实验室(Uber AI Labs)的研究人员设计了一种算法规则,推出了自己的教程,教授模拟机器人穿越崎岖地形而不再摔倒。该教程有朝一日甚至能够帮助自动驾驶汽车在紧急情况下做出反应。

名为配对开放式先驱者(Paired Open-Ended Trailblazer, POET)的新计划,首先推出一系列独特地形,每个地形都有计算机控制的角色居住。角色必须学会利用两条腿和类似激光的测距仪学会走路。经过一段时间的练习,人工智能改变了挑战形式,有时更容易,有时更困难。可能是壕沟更宽,树桩更高,或地面更不平。偶尔会更换一个步行者,看看在一个地形

上学到的技能是否可以用于另一个地形。这种障碍训练课程中的变换,出乎意料地使步行者的动作一步步变得更为敏捷。

研究人员在2019年1月发表在arXiv网站上的论文中称,利用POET,机器人步行者最终能够应对那些从未学习过的困难地形。更重要的是,POET比那些随时间简单增加地形难度的程序更好,无需尝试其他间接路径。POET迂回的学习路线一次又一次得到了回报。举个例子,一个蹲着走路的机器人,进入一个有树桩的区域,不得不学会直立行走;当它后来回到平坦区域后,继续直立行走,就比以前走得更快了。

(高凌云编译自2019年1月22日 www.sciencemag.org)

