

· 访谈 ·



陈学雷,中国科学院国家天文台宇宙暗物质暗能量组首席研究员,主要研究方向为宇宙学与粒子天体物理。

陈学雷：“上天入地”搜寻暗物质

20世纪初,看似完美的牛顿万有引力定律几乎可以解释除迈克尔逊—莫雷实验和黑体辐射实验以外的物理与天文学的一切运动过程,当时这2个无法被牛顿定律解释的实验被称为物理天空中的两朵乌云。也正是由于这两朵“乌云”的存在才促成相对论和量子力学的诞生,进而带来了一场物理学革命。现如今,相对论和量子力学仅能解释的宇宙成分的4%,而其余的96%由暗物质和暗能量构成,它们的本质还未知,可以说是21世纪物理学的另外两朵“乌云”。

20世纪30年代,暗物质第一次被发现提出以来,物理学家和天文学家就未曾停下探索的脚步与想象的步伐,粒子模型的不确定性也不能解释暗物质粒子,这使当代物理面临严峻的挑战。暗物质究竟是什么?到底存在于哪里?这些问题多年来一直萦绕在科学家的心头,久久未曾解开。

2015年中国发射“悟空”暗物质探测卫星,中国在暗物质探测领域又向前迈进了一步。值此时机,《科技导报》采访了中国科学院国家天文台宇宙暗物质暗能量组首席研究员陈学雷,请他阐释暗物质研究及探测的进展。

暗物质发现历史

“提到暗物质的发现历史,总是避不开海王星的发现过程。”陈学雷说,牛

顿发现万有引力之后,天文学家一直用引力定律来解释一切天体的运动规律。但由于引力定律难以解释天王星的异常运动,法国天文学家 Urbain Le Verrier 和英国天文学家 J. C. Adams 据此猜测可能存在其他行星的作用,导致天王星的运动无法用万有引力来解释,这一猜测促成了1846年 J. G. Galle 发现海王星。陈学雷说海王星的发现过程与暗物质的发现过程极其相似。1933年,瑞士天文学家 F. Zwicky 在研究 Coma 星系团成员星系运动时发现,Coma 星系团里星系的运动速度远远高出预想,并且超过了该星系团的逃逸速度。另外,他利用后发星系团边缘星系的运动估计出星系团的总质量,与根据后发星系团星系数量和总亮度估计出的星系团总质量进行对比,发现前者是后者的大约400倍。星系团中可见星系所提供的引力远远不足以提供足够的向心力,以拉住边缘星系极快的运动速度。因此 F. Zwicky 大胆提出宇宙中存

在人类还未曾观测到的物质,并将其命名为“暗物质”。随后在1970年,美国天文学家 V. Rubin 在对仙女座大星云中星体旋转曲线的研究证实了星系外围星际气体的旋转速度并未随距离的增加而有明显的下降。这从另一个方面证实了在星系及其外围存在大量不可见的暗物质。并且暗物质的总质量远远大于星系中可见部分的质量之和,这是最早比较明确证实暗物质存在的证据之一。

2006年,钱德拉 X-射线望远镜对子弹星系团的观测,发现星系团中发光的热气体和2个星系的质量中心并不是重合的。陈学雷说,这一现象被天文



子弹星系团(Bullet星系团)的X射线观测和引力透镜成像结果(图片来源:凤凰科技)



“悟空”暗物质探测卫星(图片来源:果壳网)

学家认为是证实暗物质存在最直接的证据。由于暗物质粒子不像普通的重子物之间会发生很强的相互作用,暗物质粒子之间几乎没有任何相互作用,因此普通物质通过相互碰撞而产生减速效应,造成子弹星系团在大碰撞之后,暗物质和普通重子物质的空间分布出现了较为明显的分离。这一结果用修改引力定律非常难解释,但是如果引入暗物质,那就相对自然的多。因此,子弹星系团的观测最为直观的证实了暗物质的存在。

虽然,暗物质的存在得到了大部分天文学家的承认,但是,它到底是什么?以什么形式存在?新的问题摆在了天文学家乃至物理学家的面前。

探测暗物质的意义何在?

暗物质探测为何让粒子物理学家和天文学家如此关注?陈学雷认为,正确认识暗物质,一是对于认识物质的基本结构和基本相互作用可能起到关键的作用;二是对于更进一步解开宇宙爆炸之谜有一定帮助。

有部分科学家猜测暗物质的产生可能是源于宇宙早期的高温过程。陈学雷解释说,在宇宙形成的早期,要经历一个高温的阶段。这时候宇宙中的粒子能量要高于现在已有的一切对撞机的能量,在这种情况下,新物理很有

可能会发生作用。因此他说可以认为暗物质是早期宇宙大爆炸产生的粒子。除此之外,由于暗物质的产生需要超高温高密度的条件,因此目前人类未能在对撞机上创造出暗物质粒子。如果大胆假设一下,人类可以在对撞机上创造出某种新物理所预言的寿命长,且为中性的粒子,那么它很可能就是暗物质的粒子。进一步说,假设暗物质粒子被探测到,其性质也将对新物理模型的创建起到推动和限制作用。因此,陈学雷推测,从某种意义上来说,搜寻暗物质对于宇宙学、天文学和粒子物理是相通的。

也正因为暗物质模型在搜索前期搜索暗物质阶段起到了非常重要的作

用,所以陈学雷预言说,暗物质因此也可以看作是连接新物理与标准模型的桥梁,同时也是连接微观世界和宇宙宏观世界的桥梁。在他看来,对暗物质问题的研究是人类探索更深层次的基本粒子相互作用、寻找新物理信号的指路牌。并且暗物质研究在天体物理领域与粒子物理领域都有重要意义,它决定了星系和星系团的动力学特征,促进了宇宙大尺度结构的生成,有助于解释电弱破缺理论。

如何上天入地搜寻暗物质?

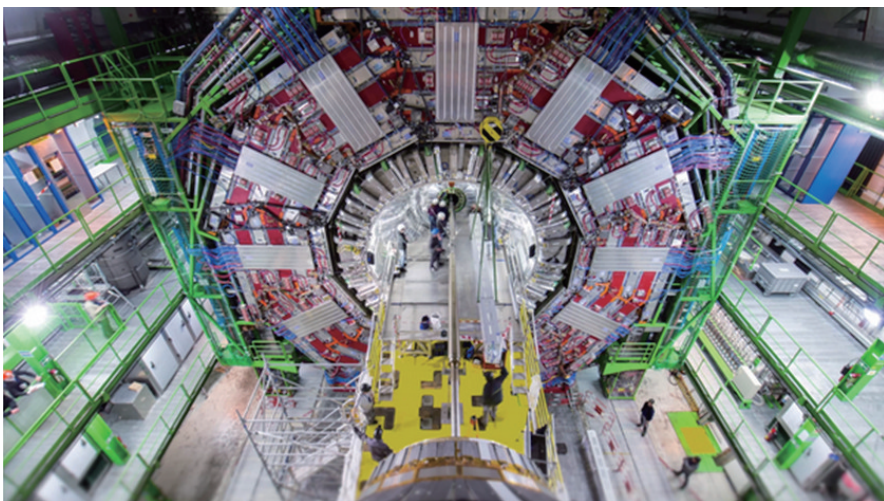
目前,探测暗物质存在的方法主要有3种,即空间探测、地下探测以及对撞机创造“暗物质”。在陈学雷看来,3种方法相辅相成,通过直接或者间接手段在不同空间领域探测暗物质。

空间探测是根据暗物质粒子相撞相互湮灭后产生的高能伽马射线或者高能的正反粒子对的理论,通过探测宇宙中过量的伽马射线,或来路不明的高能反物质粒子,来间接证明暗物质的存在。中国发射的“悟空”暗物质探测卫星应用的就是这种方法。

地下探测是将暗物质探测器深埋地下,厚厚的岩石层可以排除其他粒子的干扰。陈学雷说,暗物质无处不在,且会参与弱相互作用,这种相互作用只能在原子核内部发挥作用。被暗物质粒子碰撞后原子核会发光发热或者会偏离原来位置。这些光、热和位移都是



中国锦屏地下实验室(图片来源:新华网)



LHC对撞机(图片来源:观察者)

可以被探测到的。因此深埋在地下的探测器就通过守株待兔的方法,在探测器里装上大量反应物质,等着暗物质与原子核的“巧遇”。中国的锦屏地下实验室就是利用这种方法直接探测暗物质。

对撞机上创造暗物质粒子。根据爱因斯坦的质能方程,能量和质量是等价的,且在一定条件下可以相互转换。在大型强子对撞机上进行的粒子碰撞实验,能量束相互碰撞后,会转化为多种多样的粒子四处逃散,如果能量足够高,理论上是有可能碰撞出暗物质粒子的。由于暗物质不可见,设置在周围的探测器无法探测记录到,因此如果在能量束碰撞过程中,有粒子凭空消失,那么就可以直接证实暗物质的存在。欧洲大型强子对撞机LHC是目前世界上最大大型强子对撞机,2015年重启升级会,让人对“创造”暗物质粒子充满期待。

暗物质候选者

自暗物质被发现并证实存在以来,物理学家们普遍认为暗物质由未知的新粒子组成,并且这种未知粒子与普通物质间的相互作用微弱且罕见。利用

现有的粒子物理学标准模型中的所有粒子都无法解释暗物质的未知粒子,因此,陈学雷强调说,为了解释暗物质粒子的性质,目前科学家研究较多的是弱相互作用重粒子和轴子。

“暗物质粒子的候选者众多,这其中弱相互作用重粒子(WIMPs)最受瞩目。”陈学雷分析称,WIMPs的首要入选原因主要是因为它非常吻合物理学目前广为流行的理论如超对称理论。所谓的超对称理论,就是认为存在于宇宙中的所有粒子都有一个尚未被发现的“伴侣”粒子,比如,电子的同伴“超电子”等。WIMPs是这些超对称性的粒子中,最轻的一个,因此部分科学家猜测宇宙中的暗物质或许由WIMPs组成。20世纪80年代以来,科学家就开始了WIMPs的探测,尤其期待能在暗物质粒子与普通粒子相互作用的情况下探测到这种粒子的踪迹,但到目前为止还未发现WIMPs的踪迹,在这过程中,科学家不断升级调整探测手段和仪器,以期能尽早探测到WIMPs的踪影。

“与WIMPs同时被提出的暗物质候选者还有轴子(axion)”。陈学雷补充说,轴子是在解决强相互作用中的电

荷-空间(CP)破坏问题时被引入的概念,目前它的质量范围被实验和天文观测限制在 $10^{-6}\sim 10^{-3}\text{eV}$ 之间,可以通过非热过程产生并作为冷暗物质存在。核理论预测,轴子能使暗物质聚集在一起。但由于轴子比WIMPs轻,其与普通粒子相互作用的频率更低,进而更加难探测。

“除了WIMPs和轴子,目前理论物理学家还提出了其他暗物质粒子的模型,例如KK粒子、超对称引力子(gravitino)等。”陈学雷补充道,额外维度空间理论预言了KK粒子的存在,其中最轻的粒子是稳定的并可以成为暗物质。由于超对称引力子其和普通物质的相互作用非常弱,也被称为超弱作用重粒子(super-WIMP),它被认为是指引力子的超对称伴子,主要通过非热产生。

目前人们对于暗物质的本质仍然很不了解,因此在理论上提出了各种各样的模型。尽管超对称粒子、KK粒子、轴子等粒子都已经有了非常明确的物理意义,都是暗物质粒子的候选者,但最终暗物质的性质还要取决于实验结果。

陈学雷目前将研究重心放在暗能量上,他说暗物质和暗能量问题被称为现代物理科学中两朵新的乌云,对它们的研究将极有可能孕育出新的物理学和天文学重大发现乃至科学上的革命,暗物质和暗能量一旦被搜寻到,对未来的科学发展将带来难以估量的重要作用。陈学雷认为:“目前暗物质和暗能量的学科前沿是,寻找暗物质粒子,研究暗能量的物理本质和探索反物质丢失之谜等。物理学和天文学一个重要的研究趋势是开展结合粒子物理和宇宙学、面向极小与极大的研究。”

文/祝叶华(《科技导报》编辑部)
(责任编辑 陈广仁)