

宇宙的阴暗面：暗物质与暗能量

我的师祖,约翰·惠勒(John Archibald Wheeler),曾经简洁地概括“几何动力学”——一个他个人更喜爱的对广义相对论的称谓:“时空告诉物质如何运动,而物质告诉时空如何弯曲”。

宇宙学家通过观测原子(以气体或恒星形式存在)的运动或者追踪光在宇宙中穿越的路径去推测时空的曲率,然后他们利用这些对于时空曲率的测量去推断宇宙中物质和能量的分布。在本评论中我将探讨各种观测技术,虽然人们都利用广义相对论来理解藉由这些技术获得的观测数据,并最终给出了同一结论,即宇宙中我们熟知的原子类物质仅占5%。

付出代价的标准宇宙学模型

对星系和类星体大尺度的分布观测表明,宇宙在其最大的结构层次上是近似均匀的,并且遥远星系的退行速度是与其距离相关的。由此广义相对论认为我们生活的这个产生于大爆炸的宇宙,当前正处在膨胀中。正因为宇宙在膨胀,所以由遥远星系到达我们的光看起来向频率红端偏移了。哈勃(Hubble)的观测发现,星系红移和其距离间存在一个线性关系,这最终使人们在19世纪20年代建立起一个基本的宇宙学模型。

我们当前的宇宙学模型认为,广义相对论和粒子物理的标准模型可以很好地描述宇宙演化的基本物理过程。该宇宙学模型假定宇宙的大尺度几何是平坦的,即宇宙的总能量为零。这意味着我们在中学数学学过的欧几里德几何在宇宙学尺度上是适用的。尽管宇宙的几何是简单的,然而其物质构成却十分奇特:宇宙的构成不仅包含原子(主要是氢、氦),还包括暗物质和暗能量。

当前最流行的宇宙学模型认为,在大爆炸不久,宇宙经历过一个膨胀极快的时期。在这个暴涨阶段,可见宇宙的体积至少膨胀了 e^{60} (3.06×10^{69})倍,而宇宙微波背景辐射(CMB)则是这个暴涨时期的热遗迹。暴涨也将极微小的量子涨落放大成为密度扰动(译者注:密度扰动是宇宙中诸如星系等结构形成的种子)。暴涨模型预言这些涨落具有“近似的标度不变性”:即在任何尺度上涨落都有相同的振幅。

这些密度扰动产生的“声波”(译者注:该声波不同于人们通常耳朵听到的声波,相同之处则在于这些最早的“声音”也是源于温度、压力的扰动)在宇宙中传播,并在星系的大尺度分布和遍布星空的宇宙微波谱中留下了遗迹。我们对微波背景的观测是开启大爆炸后38万年的宇宙的一扇窗。在这样一个时期,质子和电子开始中和形成氢原子,而一旦中和过程将宇宙变为电中性,微波背景光子就可以自由传播,所以“声波”标记着一个特别的尺度——38万光年。这样一个特殊的尺度——重子声波尺度,可以作为一把测量时空几何的宇宙学标尺,因此也决定着宇宙的密度。

利用来自天空和地面望远镜对宇宙微波背景谱中温度及极

化涨落的观测,我们可以检验标准宇宙学模型,并获得其相关参数。令人惊奇的是,仅有6个独立参数——宇宙的年龄、原子的密度、物质的密度、第一颗恒星形成的时期、原初密度涨落的振幅及该振幅的标度依赖性——的宇宙学模型,足以细致地拟合目前已知的微波背景测量给出的所有统计学特性。该模型同样可以拟合星系大尺度分布的观测、Hubble常数的测量、宇宙膨胀率和超新星测距的结果。只是如此惊人的成功必须付出的代价是:原子在我们可观测宇宙中物质—能量密度中所占的份额不到5%;宇宙学的标准模型认为星系质量中占主导的是暗物质,而绝大部分的宇宙能量密度则是由暗能量——某种真空具有的能量——所占据(图1)。

天文观测和宇宙学理论认为宇宙的结构要比我们可以想象的复杂丰富得多。正如图1所示,目前对于宇宙物质构成的最佳推测是,暗能量、暗物质、重子物质、3类不同的中微子还有光子共同构成了我们可观测宇宙的能量密度。尽管黑洞是最低概率的暗物质的候选者,它们对于宇宙质量密度的贡献大约仅仅是恒星物质的0.5%。

当前的组分(配比随时间演化)

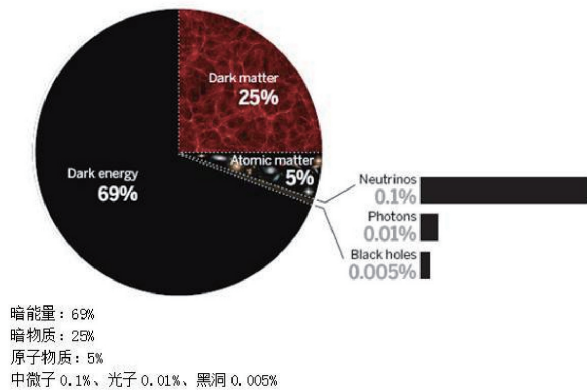


图1 构成宇宙的多组分

暗能量占宇宙质能密度的69%,暗物质占25%，“普通”的原子物质占5%。其他可观测的次要成分包括:3种中微子至少占0.1%,宇宙微波背景辐射占0.01%,黑洞不少于0.005%。

暗物质的天文学证据

暗物质的天文学证据要远早于我们对微波背景辐射、超新星的观测,也要远早于我们对大尺度结构的测量。在一篇发表于1933年的文章中,弗里茨·兹威基(Fritz Zwicky)极具预见性地指出,后发座星系团中星系的速度要远高于人们之前从星系质量推测的结果,这就预示着该星系团中尚有许多未被估算到的额外质量。在20世纪50年代,Kahn和Woltjer则提出,只有

将相当可观质量的不可见物质包含在内,本星系群(Local Group of Galaxies)才可能是动力学稳定的。到20世纪70年代,天文学家论证指出无论是星系还是星系团中的质量都是随银盘半径增加的,而不是循迹光度。理论从星系银盘稳定性出发,要求星系周围存在暗物质晕圈的论述则进一步强化了前述论点。研究系外气体运动的天文学家则在越来越多的星系系统中找到了大质量晕圈存在的证据。到20世纪80年代,暗物质逐渐成为宇宙学范式中已然为学界接受的部分。

那么由当前的宇宙学观测出发,我们对于暗物质又知之如何呢?

微波背景辐射和大尺度结构的观测显示暗物质比普通的重子物质多5倍。观测也表明,暗物质和光子、电子及质子等普通物质的相互作用非常微弱,甚至可能完全没有。如果演化到今天的暗物质是由重子物质构成的话,那么在宇宙早期则应是由离子、电子等构成,如此则必然会在微波背景谱中留下清晰的印迹。因此,暗物质必然是非重子物质,且必须是暗的。

大尺度结构的观测和对星系形成的模拟则表明暗物质还必须是“冷”的,即暗物质粒子必须可以在小尺度成团。对存在冷暗物质(也包括暗能量)的结构形成的数值模拟可以成功地重建出星系大尺度分布的观测结果。若与对宇宙冷却及恒星形成的水动力学模拟相结合,则可成功重建出观测给出的星系的基本特性。

特大质量的星系团可作为人们研究暗物质性质的重要实验平台。观测给出这些星系团中暗物质与普通物质的比值非常接近于宇宙中的观测值,所以这些星系团被认为是宇宙的恰当样本。由于星系团气体中的绝大多数原子都是已电离的物质,所以X-射线段的观测可以直接追踪普通重子物质的分布。正如Zwicky指出的,对背景星系的引力透镜的观测可以直接追踪到星系团中总的物质分布的痕迹。Zwicky建议75年之后的今天,天文学家利用哈勃太空望远镜上的大像幅相机,已能对成团的暗物质分布进行细致地测绘。这些观测揭示出星系团中存在非常可观的暗物质的子结构,而这与对暗物质与星系团的数值模拟是普遍一致的。

在更小的尺度上,矮星系则是检验暗物质理论的又一重要天文学观测平台。因为这些暗物质占主导的引力系统的引力势阱的深度非常浅,所以理论预言的矮星系暗晕的性质对暗物质(的特性)十分敏感。有几个研究组表示矮星系的观测特性与数值模拟的预言不符。尽管部分天体物理学家声称改进了的模型(其中考虑了恒星形成的反馈效应)可以弥合观测与数值模拟间的不符,其他人则建议要弥合该差异,需要考虑的应是暗物质间的自相互作用。

所有关于暗物质存在的天文学论断都假定了在星系尺度上广义相对论是适用的。不过修正的引力理论(MOND),例如修正的牛顿动力学,则是通过修改引力来避免引入暗物质。尽管这些引力模型在星系尺度上已经获得了某些唯像上的成功,但在拟合对微波背景涨落及星系团的观测方面,尤其是在拟合子弹星系团的观测上还存在极大的困难。大多数理论物理学家则认为这些修正引力模型缺乏源自更为根本的基本原理的动机。

什么是暗物质?

非重子型暗物质的存在预示着必然存在超出粒子物理标准模型的新物理。粒子物理学家已经给出了非常多的建议,其中

一些出发点源自基本理论,另一些则源自解释天文观测现象的需要。

极早期的宇宙无疑是一个不可思议的极高能量的粒子加速器。在大爆炸的极早期,宇宙处于高温高密状态,宇宙背景辐射产生了巨量的粒子。宇宙微波背景实验已经探测到了产生于极早期宇宙的大量中微子的可观测信号。该时刻也可能产生了大量的暗物质粒子。

超对称,一种目前研究最多的超出粒子物理标准模型的新理论,提供了暗物质的潜在候选者。通常粒子可以被分为两类:玻色子和费米子。费米子服从泡利不相容原理,每一个粒子仅占据一个量子态;而同一个量子态可以存在许多玻色子。例如,电子是费米子而光子是玻色子。超对称很可能是自然界的又一种对称性,它意味着每一类玻色子都有费米型的超对称伴子,反之亦然。超对称意味着过多的新粒子:光子的费米型超伴子是光微子(photino),而电子的玻色型超伴子则是超电子(selectron)。建造大型强子对撞机(LHC)的目标之一便是寻找这些尚未发现的超对称粒子。

最轻的超对称粒子(LSP)有可能是稳定的。而宇宙最初的几分钟可能会大量产生这些粒子。对于某些参数的超对称模型,大量的LSP正好可以解释观测到的大量的暗物质。这个“巧合”是宇宙学所谓的“WIMP奇迹”的例子。所谓的WIMP指的是一种相互作用极为微弱的大质量粒子,这类粒子通过交换某种质量可与Higgs粒子质量相比拟的粒子发生相互作用,从而恰好具有暗物质所要求的特性。

粒子物理还预言了其他存在很好的理论动机的粒子,包括轴子、不对称暗物质粒子(译者注:其丰度由粒子-反粒子间的不对称性,而非由其反应截面决定)。

如果WIMP粒子是暗物质粒子的话,我们就可以由几类不同的方法探测到:一是利用高能粒子加速器产生并探测;二是由深埋地底的实验观测(译者注:以屏蔽宇宙线等环境干扰);再则是利用天文学观测。这些可能探测到暗物质的方法已经催生出积极寻找暗物质的计划。该探测计划也已经有许多令人激动的事件,产生了不少疑似的实验信号,未来如被证实,很可能成为人们首次探测到暗物质的标志。

1) 位于意大利格兰萨索的格兰萨索暗物质实验(DAMA)声称其探测器已经观测到一个随年度调制的事件,其波动形式恰好与理论预测一致。然而对该结果的理解仍然是富有争议的,因为其他实验组并没有探测到这样的暗物质事件,其他实验的结果甚至似乎与格兰萨索所声称的相冲突。

2) 不少实验组声称探测到来自于银河系中心的 γ 光子超出的信号,银系中心非常可能是暗物质聚集的区域。因为星系中心的暗物质密度一般比较高,很可能正是该处暗物质的湮灭使得此处极为明亮的高能 γ 光子产生。当然,星系中心也含有丰富的可产生高能光子的其他天体物理活动。对于河外星系的搜索也预示着存在暗物质,只是其质量有所不同。当然,这样的说法(即高能 γ 光子的超出可能来自于暗物质湮灭)也有争论,尚未确定。宇宙学家希望对近邻矮星的观测可以得到更为明确的信号。

3) 银河系的暗物质湮灭原则上也会产生正电子。而宇宙线的探测正在搜寻这些信号。对这类搜索的挑战是如何将其与产生宇宙线的其他天体物理过程导致的信号区别开来。

富有希望的是,至少这些结果中的某一个会被未来的实验

所证实。

暗物质粒子的发现可能会解决天文方面长期存在的困惑,为我们深入了解暗物质在星系和结构形成中所起的作用提供参考,并将成为超出Higgs的新物理的最新预示。

什么是暗能量?

当爱因斯坦建立广义相对论的时候,他引入了一个宇宙学常数项。这一项可以产生与重力的吸引作用相反的斥力,从而维持宇宙处于稳恒的静态。到了19世纪20年代,哈勃的发现证明宇宙是膨胀的,所以物理学家扔掉了这个宇宙学常数项。

出于观测证据倾向于低密度宇宙的观测事实,以及理论偏好于一个平坦宇宙的原因,20世纪70—80年代,天文学界对宇宙学常数的热情再一次被点燃。物理学家意识到宇宙学常数的值对基础物理而言是一个意义深远的问题。

一个暗能量占主导的宇宙对于生活其中的人类而言是十分奇特的。我们普遍认为重力是一种吸引力,如果你向上扔出一个球,重力将延缓其向上逃离重力势阱的速度。同样的,在宇宙学常数为零的情况下,重力也会延缓宇宙膨胀的速度。想象一下,如果你站在地面向上扔出一个球,球反而被加速的情形是多么不可思议!这正是宇宙学常数对宇宙的膨胀率所产生的效应。

超新星的观测提供了宇宙加速膨胀的关键证据。超新星是一种极为耀眼的恒星爆炸事件,且拥有几乎独一无二的峰值亮度。因此,它们可以作为测量其所在星系距离的灯标。一旦确定了距离作为星系红移的函数,就可以由超新星观测来衡量作为时间函数的宇宙膨胀率。在20世纪90年代,超新星观测方面的天文学家报道了宇宙正在加速膨胀的惊人结果。

在过去15年间,已经积累了越来越多的宇宙加速膨胀的观测证据。无论是通过宇宙微波背景谱的测量,还是对作为红移函数的星系分布的观测,给出的重子声学振荡(BAO, Baryon Acoustic Oscillation)的特征尺度都可以回溯到红移为1100时的宇宙(译者注:在时间上就是宇宙早期的质子-电子等离子体的复合阶段——recombination era,大约是大爆炸38万年后的宇宙)。BAO的测量已然证实了宇宙的加速膨胀,而对作为红移函数大尺度结构形成的测量则进一步证实,宇宙确实是在加速膨胀。

为何宇宙会加速膨胀呢?研究最多的可能就是宇宙学常数(或与之等价的真空能)在推动宇宙加速膨胀。另一种可能则是在全空间弥漫着一种类似于Higgs(希格斯子)或类似于引起早期宇宙暴涨的暴涨子随时间演化的标量场。这两种可能被统称

为暗能量。因为所有的暗能量的观测证据都建立在我们通过广义相对论去解释宇宙的膨胀和演化,所以另一种思路或许是宇宙学的观测可以用某种新的重力理论来解释。这类可能性包括了存在额外维的引力修正理论。

宇宙加速膨胀的本源以及暗能量的本质究竟是什么,这有赖于未来的观测去确定。我们的观测则可以测量两类不同的效应:一个是星系的红移和距离之间的关系,另一个则是结构形成的速率。如果广义相对论在宇宙学尺度上是适用的,那么这两类测量理应给出相互一致的结果。自然,测量也将揭示出暗能量的基本性质。

天体物理学家目前正在同时运行好几个雄心勃勃的探测计划,其目的一则是利用星系团的测量及超新星的观测得到天体离地球的距离;另一则是利用引力透镜的观测给出大尺度结构的形成速度。宇宙微波背景谱的观测则可以提供独立于引力透镜的结果,并与上述计划互为补充。对宇宙微波背景的观测同时也将提供更精确的宇宙学结构的描述。在下一个10年里,更强大的观测也许有望绘制出宇宙过去100亿年的大尺度结构蓝图,并能探测出地球上绝大多数星空的物质分布。这些观测将为我们更深刻地洞察宇宙加速膨胀的起源提供必要的信息。

结论

尽管广义相对论诞生于100年前,已经是一个相当成熟的理论,然而在宇宙学中它仍然是一个十分强大,同时也是一个颇具争议性的理论。它是我们目前宇宙学模型的基本假设之一,这样一个模型既可以极为成功地描述实验观测,同时也预言了存在暗物质和暗能量这“两朵乌云”。这意味着我们目前对物理学的理解仍然是不完善的。我们也许需要一个如同广义相对论一样意义深远的新想法来解释这些奥秘,自然也需要更强大的观测和实验去照亮我们对宇宙产生更新、更深刻认知的征程。

(原文刊载于2015年3月6日《Science》杂志,标题“The dark side of cosmology: Dark matter and dark energy”)

文/ David N. Spergel

作者简介: 普林斯顿大学教授

译/ 肖智

译者简介: 华北电力大学数理系讲师

(责任编辑 王丽娜)