

支持宇宙加速膨胀的物质，被称为“暗能量”。来源/NASA

无中生有的暗能量

文/胡彬

比起看不见、摸不着、测不到的暗物质，暗能量更加神秘莫测。这种能驱动宇宙运动的能量，直到20年前我们才意识到了它的存在。

发现历史

自哈勃于1929年在威尔逊山天文台用望远镜首次发现宇宙膨胀的事实之后，近一个世纪以来，对于距离的测量始终是宇宙学的中心任务。而刻画宇宙膨胀速率的参数被称为“哈勃参数”或“哈勃常数”。其实，宇宙的膨胀率并不是一个静态的常数。之所以这么称呼，是想突出其空间位置的不依赖性，或者说是“在空间尺度上为常数”的特性。对于引力的直观理解告诉我们：由于物质之间是相互吸引的，所以宇宙的膨胀速度一定是慢慢降低的。这一朴素的想法一直主导

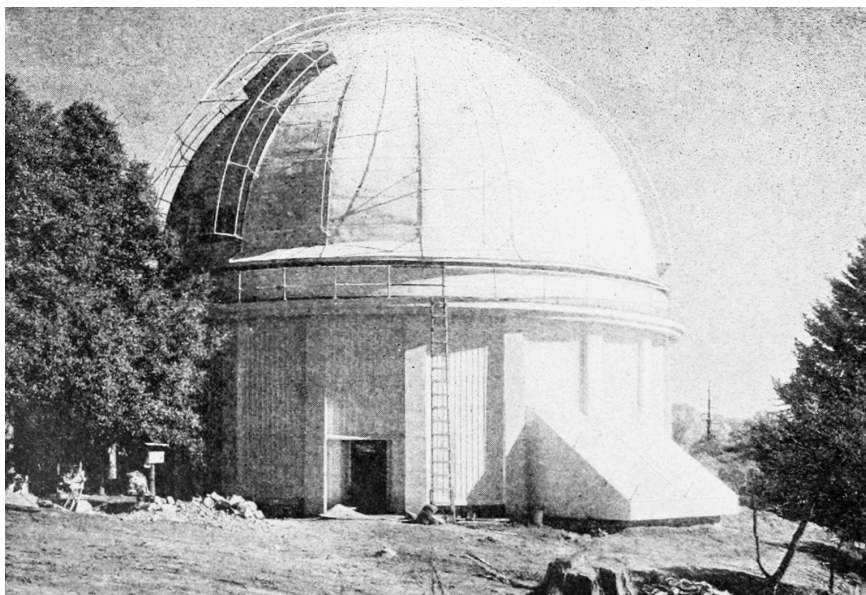
着我们的宇宙观。直到1998年，两个超新星观测团队意外发现当前的宇宙的加速度其实不是负的而是正的。也就是说，我们当前的宇宙中有一只无形的大手正在像盘古开天地一般向外将宇宙迅速地撑开。这个效应被称为宇宙晚期加速膨胀。而支撑这种加速膨胀的物质被称为“暗能量”。

到底什么是暗能量呢？很遗憾，到目前为止我们一无所知。但是，最简单的我们可以用一个时空中真正意义上的常数来描述，被称为“真空能”或“宇宙学常数”。顾名思义，就是哪怕时空中什么物质都没有，时空本身也会天然存在

的常数能量。由于时空本身的动力学是用引力理论来刻画的，因此真空能反映的是时空本身的引力性质。稍微接触过量子力学的读者，应该都不难想到一个类似的例子，那就是量子力学系统中的真空能。但是，通过科学家的仔细计算发现，我们已知的四种基本相互作用力所能给出的真空能竟然比实际观测到的值高出了10的120次方倍。这也就意味着，我们对于引力系统的真空能的理解远远不足。但是，我们可以采取一种“实用主义”的处世哲学，不去深究该常数背后的物理机制，仅是把它当作一个参数去与观测数据去拟合就好。其实，这种态度早在上个世纪早期就被爱因斯坦所采用过。当他在求解出由他一手缔造的广义相对论方程之后，他马上意识到一个问题：“由该理论刻画的宇宙是动态的”。这与当时普遍被人们接受的“静态宇宙观”背道而驰。于是，他“人为”的在空间拓扑为三维球的“闭宇宙中”添加了一个“正的常数”，从而保证了“静态宇宙”的实现。但是，在1929年哈勃

发现宇宙膨胀的事实之后，爱因斯坦公开承认说“这是他一生中最大的错误”。令人大跌眼镜的是，故事发展到1998年情节又来了个180度的翻转。

那么为什么真空能或正的宇宙学常数会推动宇宙加速膨胀。一般的，我们将其形象地描述为“负压强”或是“斥力”。在平时的教学当中，笔者常通过热力学的角度来跟学生解释这件事情。想象有一个左右两端可以滑动的方盒子，当里面盛满了高于外部压力的气体。内部气体要向外部扩张，推动挡板。由于气体的压力是向外的（正压）和受力方向相同，于是内部气体对外做功，内部气体的能量降低。但是对于真空能则完全相反。由于该能量是时空本身的属性，所以当挡板向外扩得越大，内部体积越大，内部的总能量就越高。由热力学基本公式 $dU=-pdV$ ， dU 是内部气体内能的增加， p 是系统的压强， dV 是系统体积的增加。因此，对于该系统而言， p 是负的。这显示了暗能量“无中生有”的本质属性。



1929年，哈勃（左图）在威尔逊山天文台（右图）用望远镜首次发现宇宙膨胀的事实。来源/wikipedia

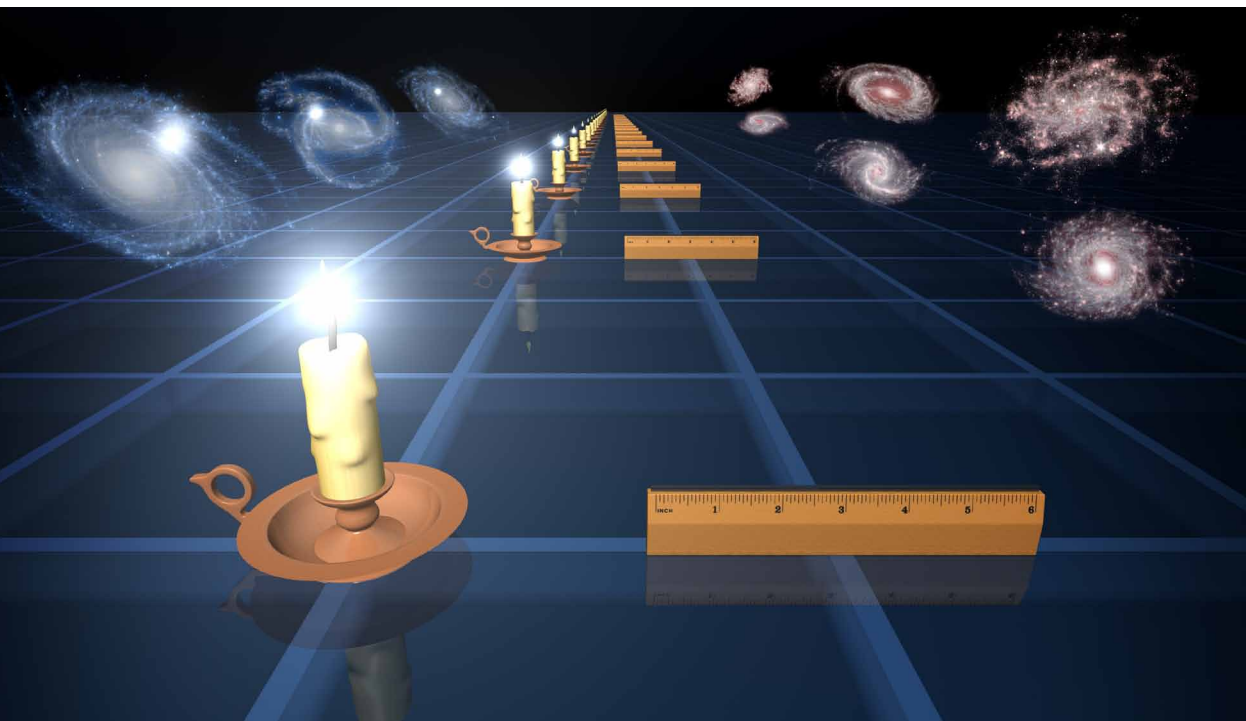
观测证据

那发现暗能量的原理到底是什么样的呢？通过前面的叙述读者应该不难想到，应该是与距离测量相关。那么宇宙学距离是怎么测量的呢？我们这里讲三种平常生活中常见的方法：点灯、听警笛和放风筝。

所谓点灯，就是指点一盏具有确定亮度的标准烛光。根据光子数守恒，不难想象：烛光放置得越远，观测者应该看到的就越暗。而宇宙中，为了能够在距离很远处也能看到这柄烛光，其本身的亮度一定要足够高才可以。而在诸多星体当中，Ia型超新星无疑是一个很好的选择。首先，它具有十分确定的亮度。这是由其爆发机制所导致的必然结果。一个碳氧白矮星吸积一颗它周围的红巨伴星，当其质量达到钱德拉塞卡极限（大约1.44倍太阳质量）时，由于电子简并压无法支撑其自身质量，白矮星会向内塌缩并触发爆

发。由于1.44这个临界值的确定，因此Ia型超新星会具有确定的亮度。其次，Ia型超新星具有足够的亮度。其绝对光度大约是10的42次方格每秒，大约是太阳光度的十亿倍。目前，我们观测到的最远的Ia型超新星可以来自距我们145亿光年之外。

夜晚里听过警车呼啸而过的读者一定不会陌生，除了由于速度产生频率移动的多普勒效应之外，我们可以通过声量的大小判断警车的远近。宇宙学上，科学家也早在上个世纪60年代提出了利用致密双星系统并合产生的引力波当作“标准汽笛”来测量宇宙学距离，进而可以探测暗能量的性质。跟超新星类似，引力波测量也是测量信号的流量强度。但是跟前者不同的是，引力波几乎是单色的，没有特征谱线，因此无法通过“光（引力波）谱”分析的方法确定波源的红移。因此，要确保能够测量暗能量，我们对于引



测量宇宙学距离，可以利用标准烛光法。来源/wikipedia

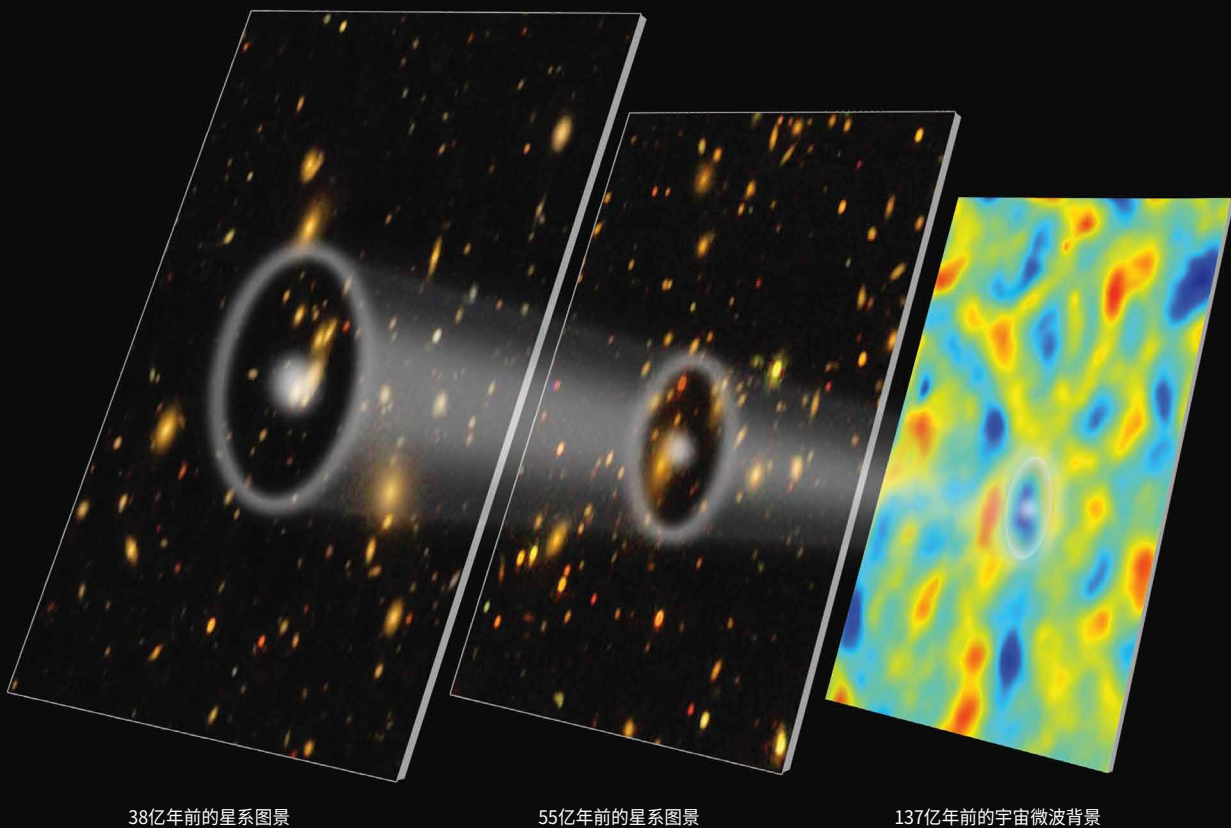


在诸多星体当中，Ia型超新星无疑是一个很好的标准烛光。来源/NASA

引力波源有一定要求，即：该波源除了可以产生引力波信号之外，还得能够产生电磁对应体。通过前者，测量光度距离；通过后者的，测量红移。当距离和红移都确定之后，我们就可以研究其宇宙学演化了。引力波信号在2015年首次被LIGO/Virgo合作组发现，2017年首例具有电磁对应体的双中子星并合事例得到了天文学家的极大关注。但是，由于该并合事例距离我们太近，仅为50Mpc。这个尺度上，我们很难观测到宇宙演化的信息。因此，还不能用来限制暗能量性质。但是，毫无疑问随着测量精度的提升，未来我们将能够观测到越来越多的来自于宇宙深处的“引力波-电磁对应体”信号，届时该方案将能对暗能量研究提供新的动力。

春天放过风筝的读者一定深有体会，风筝

视线张角越小，就代表着风筝飞得越高。在宇宙距离尺度上，要利用单个这种具有确定大小的展源来测量距离几乎是不可能的，理由是即便是大到银河系这样的中大型星系，在宇宙学尺度上也可以近似认为是一个没有任何体积大小的几何点。好在宇宙学家们足够的聪明，他们发现利用星系在空间中的统计分布性质，即重子声学振荡效应，我们可以获得一把具有确定大小的量天尺而且该把尺子的空间大小又足够的大，直径大约300Mpc（Mpc意思是百万秒差距）。重子声学振荡效应产生于自由电子与宇宙这锅等离子体热汤退耦的那一刹那，彼时的宇宙只有38万年的生命历程（现如今宇宙年龄是138亿年）。由于退耦时刻之前，向内的引力与向外的光压相互竞争，这就推动着宇宙中的等离子体热汤在暗物质

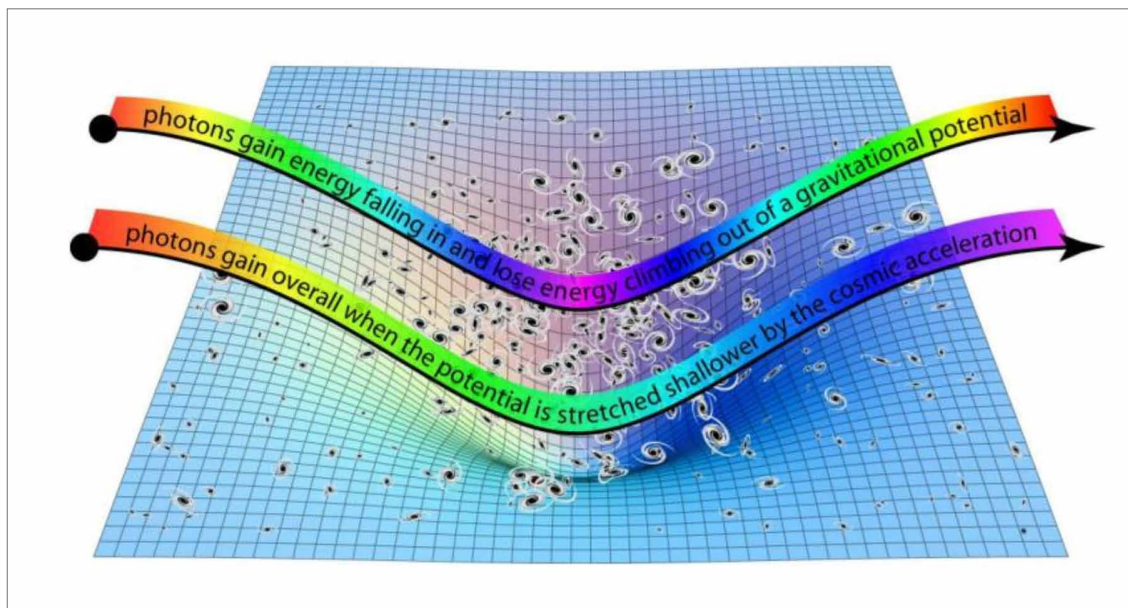


重子声学振荡示意图。来源/bingotelescope

粒子挖出的势阱附近反复振荡。这个振荡的基频模式的波长就是前述所说的300Mpc。

除了上述三种距离测量方案之外，还有另外一种独立于距离测量来探测暗能量的方法，就是类似于冬季奥运会单板滑雪运动员U型池的方法。基本思想如下：星系在宇宙空间中是非均匀分布的。其在暗晕势阱当中的分布会比暗晕之间的低密度区域分布要稠密一些。在没有暗能量的宇宙中，引力势阱中的星系之间相互的引力效应会与宇宙背景膨胀效应相互抵消，从而保证引力势阱的深度不随时间变化。当光子从左侧的边缘划入引力势阱当中又从右侧爬出，总的能量应该保持不变。但在有暗能量的宇宙当中，由于背景

膨胀速度变快，因此引力势阱的深度会随着时间的推移变浅。光子在右侧势阱边缘爬出来的时候所消耗的能量就要比从左侧划入时所获得能量要少，总体来看获得了左右两侧引力势能的一个差值。这个效应会在宇宙微波背景辐射的大尺度空间分布上有影响，被称为积分萨克斯-沃尔夫效应（Integrated Sachs-Wolfe）。由于光子的运动速度非常快，所以这个引力势阱的宽度一定要在当前哈勃视界尺寸上才能显现的出来。否则，光子很快从势阱中穿过，势阱还没来得及变浅。因此，该效应只出现在宇宙大尺度结构上面。该效应首次被欧洲的普朗克卫星项目探测到，可以说是对暗能量存在的又一强有力的支持证据。



如果宇宙中没有暗能量，光子经过引力势阱后总能量保持不变；但如果暗能量存在，宇宙膨胀加快，引力势阱会变浅，光子经过引力势阱后能量变少。这个效应会在宇宙微波背景辐射的大尺度空间分布上有影响，被称为积分萨克斯-沃尔夫效应。来源/NASA

观测上的新困境与理论上的新机遇

2017年起，由1998年发现暗能量的诺贝尔物理学奖获得者亚当·里斯所率领的研究团队结果显示：利用距离阶梯方法校准过的Ia型超新星所测量的哈勃参数结果与欧洲宇宙微波背景辐射团队所测量到的结果有着显著的差异，被称作“哈勃危机”。相比于后者，前者是一种与宇宙学模型几乎无关的对于哈勃参数直接的测量方案；但是后者由于测量的是宇宙婴儿期的信息，因此通过该数据获得当前哈勃参数的估计，要依赖于对宇宙学模型的假设。如果说两个测量本身都没有问题的话，那么只有一种可能那就是我们需要对标准宇宙学模型进行修正。在诸多修正方案中，比较有效的方案之一便是“早期暗能量”方案。其大体思路如下：在宇宙刚刚由辐射为主时期进入到物质为主时期时，此时的相对论辐射组分和暗能量组分虽然不是主导因素，但其对于物质分布的不均匀性的效应还是不可忽略的。由于他们的存在，使得再复合时期的声学视界的大

小由148Mpc缩减到135Mpc。这样就可以解决“哈勃危机”了。

另外，一个暗能量的研究机遇则主要是来自于数学理论逻辑的自治性方面的考虑。由于，从弦论出发的对于时空真空能的构造方案当中，一直以来有所谓“弦景观”的图景，即：当前宇宙加速膨胀所需的正的真空能解，可以有高维的弦论约化到四维时空得到。但由于约化途径的不同，所产生的真空能大小也不尽相同。但是，最近有弦论学家提出猜想：之前我们一直相信的大量的“弦景观”中的解，其实在数学上是不自治的。他们不应该在漂亮的“景观”当中，而是应该被抛弃到泥泞的“沼泽地”当中去。如果这个猜想成立的话，那么我们或许该重新考虑暗能量的理论解释了。CNA

责任编辑/孙媛媛

作者简介：胡彬，北京师范大学天文系教授，北京师范大学第十一届“十佳教师”，研究方向：宇宙学、引力波天文学。