

寻找一个自治的常数

(云南大学中国西南天文研究所 范祖辉 编译自 Keith Cooper. *Physics World*, 2020, (7): 28)

在宇宙学发展的历程中，最伟大的发现是天文学家哈勃意识到了宇宙在膨胀。这一突破为我们了解宇宙年龄、微波背景辐射和宇宙大爆炸奠定了基础。

哈勃是一位拥有天时地利人和机缘的天文学家。1923年，利用美国加州威尔森天文台2.5 m胡克望远镜，他在“旋涡星云”中观测到了造父变星，这类变星具有很好的周期-光度关系，可以用来测量距离。所得距离表明旋涡星云是在银河系之外的星系，银河系不是宇宙的全部，而只是众多星系中的一个。这为1920年沙普利和柯蒂斯所辩论的宇宙大小和旋涡星云本质等问题提供了确切答案。

很快，通过观测光的红移，哈勃发现几乎所有的河外星系都在远离我们而去。据此，哈勃和比利时宇宙学家勒梅特独立推导出了描述宇宙膨胀的数学表示式，今天称为哈勃-勒梅特定律：星系退行速度 v 等于其距离 D 乘以哈勃常数 H_0 ， H_0 为宇宙现在的膨胀速度。

此后经过近一个世纪的发展，我们已经建立了宇宙演化的详细图像。欧洲航天局普朗克卫星于2009年发射，通过测量微波背景辐射(CMB)场中温度的微小起伏(图1(a))，揭示出宇宙中只有4.9%的重子物质，其他部分由26.8%的暗物质和68.3%的暗能量组成。观测亦给出了宇宙年龄为138亿年，确认了宇宙空间是平坦的，展示了早期等离子体中的重子声波振荡(BAO)是如何在后期的尺度结构中留下自治

的印记。将理论模型与普朗克卫星高精度观测数据相对比，可以限制大量的宇宙学参数，包括 H_0 ，得到的数值为 $H_0=67.4$ km/s/Mpc，误差小于1%。

至此，我们觉得已能精确地知道宇宙在138亿年里是如何膨胀的。然而，我们有可能错了。

变化的部分

传统的确定 H_0 的方法是利用“局域”标准烛光测量星系的距离和退行速度。这些标准烛光包括Ia型超新星(图1(c))，即当白矮星超过一定临界质量时引起的爆发现象，和造父变星(图1(b))，其具有可靠的周期-光度关系，光变周期越长，其内禀峰值光度越亮。但是，标准烛光中有许多“变化的部分”，包括恒星金属丰度、不同红移具有不同的类型、造父变星和Ia型超新星的物理机制等。这些不确定因素会影响观测精度。

相对而言，普朗克卫星对 H_0 的测量更为直接，将所有已知的误差包含在内，其得到 H_0 的误差仅为1%。需要指出的是虽然普朗克卫星是通过观测CMB得到 H_0 ，但CMB反映的是大爆炸后37.9万年时宇

宙的状态，而 H_0 是将其外推而得到的，外推过程中加入了宇宙膨胀和 Λ CDM模型假设，在这个模型中，宇宙学常数(Λ)作为暗能量提供斥力，冷暗物质(CDM)提供引力。但是，无论怎样测量 H_0 ，或通过CMB，或通过造父变星和超新星，我们期待应该得到一致的答案。

问题出现

当普朗克卫星于2013年首次发布结果时， H_0 还不是一个问题。因为那时虽然局域测量得到的 H_0 与普朗克卫星观测得到的结果有所不同，但它们的误差很大，两个结果在误差范围内相自治。

2016年，约翰霍普金斯大学的里斯教授(其为利用Ia型超新星在1998年发现暗能量的共同贡献者)领导了SH0ES项目，这是一个为Ia型超新星提供高精度定标，从而测量

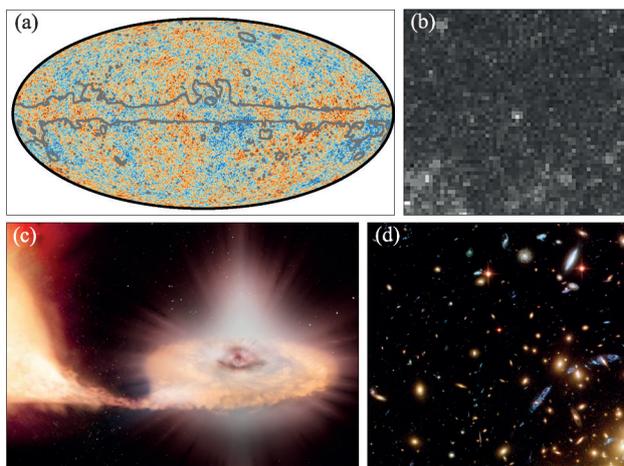


图1 (a)普朗克卫星2018年CMB温度起伏图，从中得到了迄今为止最为精确的哈勃常数：67.4 km/s/Mpc，误差为1%；(b)星系M100中的一颗造父变星；(c) Ia型超新星示意图；(d)星系团Cl0024+17的强引力透镜效应

H_0 和暗能量性质的项目。为了提供定标, SH0ES 项目组在已观测到 Ia 型超新星的近邻星系中, 寻找并测量处于“宇宙距离阶梯”(图2)下方的造父变星以得到距离, 进而利用所得距离为 Ia 型超新星定标, 而定标后的超新星又可以用来测量更远的距离。这一方法将 H_0 的测量误差降到了 2.4%。

令人惊讶的是, SH0ES 得到 H_0 为 73.2 km/s/Mpc, 由于误差的极大降低, 该结果已经无法与普朗克卫星得到的 67.4 km/s/Mpc 相吻合。如果二者都是对的, 这意味着对宇宙的理解存在深层次的错误, 可能需要新的物理。

对此差异, 科学家们第一直觉是应该进一步检查宇宙距离阶梯的测量是否出现了问题。需要指出的是任何测量中都存在两类误差: 第一类为统计误差, 增加样本数量可以有效地降低统计误差; 但是另一类误差, 系统误差, 则不是这样的, 无论样本大小如何, 系统误差都是无法约减的。

来自爱因斯坦的拯救

为了进一步检验 H_0 危机是否真实存在, 天文学家正在利用其他方法测量 H_0 。这些方法独立于标准烛光, 因此不受其系统误差的影响。

1964 年挪威奥斯陆大学的雷夫斯达尔提出了一种测量方法, 其中用到了爱因斯坦利用其广义相对论预言过的但彼时尚未观测到的现象: 引力透镜。在“强引力透镜”中, 时空被星系或星系团所扭曲, 从而光的传播路径发生偏折, 就像一个玻璃透镜一样。透镜效应可以形成多条光路, 长度略有不同(图1(d))。雷夫斯达尔提出如果一颗超新星发出的光经过一个引力透镜, 取决于光路的长度, 它的光变在不同的透镜像中会存在不同的时间延

迟。测量时间延迟可以确定光路长度的不同, 加之考虑这期间空间的膨胀便可以测量 H_0 。

但是出现超新星引力透镜系统的概率是极其低的。而类星体(存在光变的高亮度活动星系核)引力透镜系统则更为普遍。这驱使德国马克斯普朗克天体物理研究所的苏游瑄在 2016 年启动了通过观测类星体透镜系统独立测量 H_0 的项目, 称为 H0LiCOW。经过盲数据分析, 他们的测量结果为 73.3 km/s/Mpc, 不确定度为 2.4%。这与 SH0ES 结果非常一致, 进一步加强了 H_0 危机存在的证据。

目前 H0LiCOW 项目组正在致力于增加类星体样本数量, 同时开始观测超新星透镜系统。2014 年哈勃空间望远镜发现了第一个超新星透镜系统, 2016 年发现了第二个。位于智利的 Vera C Rubin 天文台, 即人们熟知的大口径全景巡天望远镜(LSST), 将于 2022 年 10 月开始采集科学数据, 期待能够发现几百个超新星透镜系统。

伦敦大学学院的费尼等正在推动另一个独立测量 H_0 的方法, 其中使用了爱因斯坦的另一个预言: 引力波。

2017 年 8 月 17 日, 美国激光干涉引力波天文台 LIGO 和意大利的 VIRGO 探测到了两个中子星合并而产生的引力波事件, 其位于距离我们 1.4 亿光年的星系中。这一事件的出现, 使得费尼等重新提起利用引力波测量宇宙膨胀的方法, 该方法由舒茨于 1986 年首次提出。

探测到的引力波强度反映了中子星合并事件到我们的距离。合并过程中产生电磁波的爆发, 即千新

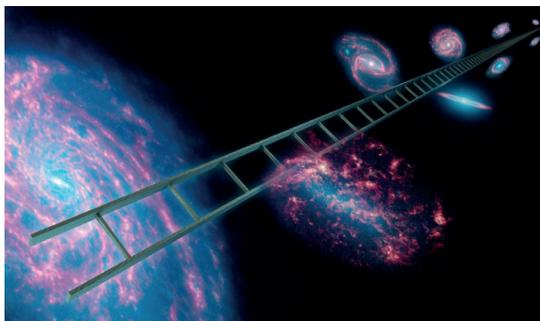


图2 宇宙距离阶梯示意图

星, 可用来确定中子星的宿主星系, 测量星系的红移则可知其退行速度。根据费尼和其同事佩里斯的估计, 要得到精确的 H_0 , 需要观测约 50 个千新星。普林斯顿大学的佻坂健太等指出通过观测中子星合并产生的相对论性喷流的角度, 可以知道观测方向与合并面的夹角, 从而确定引力波真实的强度, 这样观测 15 个千新星便可以精确测量 H_0 。迄今为止, 仅观测到 1 个千新星, 据此, 佻坂得到 $H_0=70.3$ km/s/Mpc, 不确定度为 10%。

游戏的改变

现有的证据表明局域测量的 H_0 和普朗克卫星给出的结果之间的确存在差异。但是, 仍然需要扩大样本, 进一步夯实结果。

H_0 的数值具有重要宇宙学意义, 它反映了宇宙的年龄, 且影响宇宙膨胀历史和大尺度结构的形成。如果确实需要新的物理, 则将会对宇宙学产生目前尚无法估量的影响。

也许我们漏掉了新的相对论性粒子, 其会改变普朗克卫星得到的 H_0 结果。亦或可能是存在早期暗能量, 也可能是漏掉了从来没有想过的东西。需要指出得此结论不能操之过急, 为确定 H_0 危机的真实性, 首先需要在多种测量方法中将不确定度都降至 1%。但是如果 10 年后再来看, 我们的确有可能发现宇宙突然间变得完全不同了。