

探索加速膨胀的宇宙

(北京大学 范祖辉 编译自 Joshua Frieman, *Physics Today*, 2014, (4):28)

暗能量巡天项目对近2亿星系的观测将帮助我们确定宇宙的加速膨胀是否起源于宇宙学常数的驱动，还是起源于一种新的具有动力学性质的能量的驱动，又或是由超出广义相对论之外的物理所造成。

1998年，两个研究遥远超新星的研究组分别宣布了宇宙膨胀在加快的观测证据，这震惊了物理学界。这一非凡的发现随后得到了其他观测的确认，因此在2011年被授予诺贝尔物理学奖。在这一发现后的15年间，天文学家已经采用不同的方法更加准确地测量了今天称为标准协和宇宙学模型中的与宇宙加速度相关的参数及其他的参数。

然而，宇宙为什么会加速膨胀这一问题仍然是一个谜。依据广义相对论，引力的吸引性应该使宇宙膨胀逐渐变慢，就如同从地面上扔一个小球，其向上的速度会变慢一样。为了解释宇宙的加速膨胀，摆在物理学家面前有两种可能性：要么宇宙中70%的物质是以奇特的状态存在，现在称为暗能量，其产生斥力；要么是在宇宙学尺度，广义相对论必须被一个新的理论所取代。

如果暗能量是始作俑者，它可能是能量密度为常数的真空能，这等价于爱因斯坦宇宙学常数。但是暗能量也可能是宇宙中一种新的具有动力学行为的成分，其性质随宇宙演化而变化。暗能量的性质决定了它对于宇宙膨胀的影响。反过来讲，测量宇宙的膨胀历史就可以限制暗能量的性质，从而了解造成宇宙加速膨胀的物理起因。但在大部分情况下，我们不是直接测量宇宙的膨胀历史，而是通过测量相对的

宇宙学距离或体密度推出的，宇宙学距离是利用具有标准内禀光度(标准烛光)或尺度(标准尺)的天体而测得的。发现宇宙加速膨胀的两个研究组是根据利用Ia型超新星测量得到的距离而给出他们的结论的。

暗能量的性质也会影响宇宙大尺度结构的生长。当暗物质是主导成分时，宇宙膨胀足够慢，引力不稳定性导致结构的形成和演化。一旦暗能量在约70亿年前占据主导地位后，宇宙膨胀变得足够快，以致于暗物质产生的引力无法将物质聚集在一起，从而有效地抑制了新的结构形成。因此，测量大尺度结构的生长也能够帮助揭示暗能量的本质。

在广义相对论中，包含暗能量，宇宙膨胀历史决定了大尺度结构增长的行为；在改变引力的理论模型中，膨胀和结构增长的关系会不同。因此，同时测量膨胀历史和结构增长就可以检验广义相对论的自洽性，也可能为一个改变引力的理论提供可能的确切的证据。

目前为止，观测数据均与宇宙学常数相符合。为了进一步检验

当前的宇宙学模型，我们希望在更高的统计精度和更好地控制系统误差的条件下确定暗能量的性质。

暗能量巡天(The Dark Energy Survey, DES)项目是为研究宇宙加速膨胀和揭示暗能量本质而设计的。来自美国、巴西、德国、西班牙、瑞士和英国的25个研究所的近300名物理学家和天文学家组成了DES协作体。在过去的几年间，这支队伍建造了极其敏感的数字相机，称为暗能量相机(DECAM)，用来进行巡天观测。2012年9月，DECAM安装在了属于美国国家光学天文台的、位于智利安德斯赛拉托洛洛美洲际天文台(CTIO)的4m口径的布兰科望远镜上，图1显示了完全安装好的DECAM。巧合的是，在当初发现宇宙加速膨胀的研究工作中，许多超新星数据就是利用布

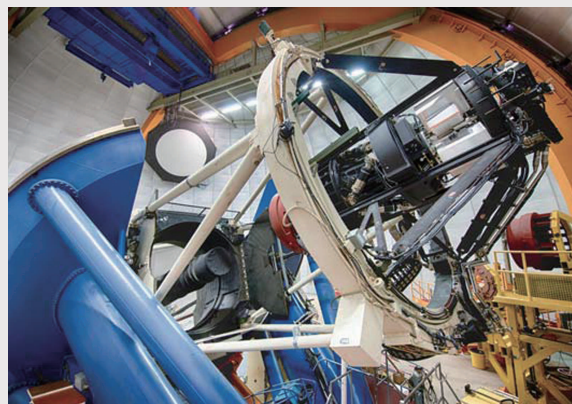


图1 安装完成的DECAM



图2 在 Fornax 星系团中的星系 NGC1365, 这是利用新的 DECam 得到的第一个天体的图像

兰科望远镜观测所获得的。

DES 将结合 4 种互补的观测方法来探索宇宙膨胀历史和结构增长的不同方面。这些方法涉及测量超新星、弱引力透镜、星系团丰度和星系大尺度分布。

Ia 型超新星起源于当白矮星的质量接近其质量上限（即钱德拉赛卡极限）时产生的爆发现象，是可标准化烛光。偏暗的 Ia 型超新星消失得更快，颜色更红。在改正了这一趋势后，原则上，利用一个分布在不同距离的大的超新星样本应该能够确定宇宙学距离至百分之一或更高的精度。事实上，利用超新星测距的精度受限于若干系统不确定性。为了缓解这些系统误差的影响，DES 将对几千颗超新星展开高质量（高信噪比，频繁的时间抽样）多波段光变曲线的测量。这一大样本可以被分作不同的子样本，从而研究和控制系统误差的影响。

从遥远星系传来的光线会在前景分布不均匀的暗物质影响下产生引力偏折。这一偏折会对星系的图像造成微小的但具有相关性的形态扭曲，或称为剪切，这即是弱引力透镜效应。位于不同红移处的源星系的宇宙剪切信号的大小依赖于源星系与产生透镜效应的物质间的相对距离，同时也依赖于透镜物质分布的成团性，因此弱引力透镜效应

可以同时探究宇宙膨胀历史和结构的生长。当 DES 完成后，将会对位于不同红移处的 2 亿个星系测得相关扭曲信号。

星系团是宇宙中最大的引力束缚体系。其质量可以超过 10^{15} 倍的太阳质量，典型星系团包含几十至几百个亮星系，镶嵌在一个大质量暗物质晕中。一旦暗物质和暗能量成分给定后，数值模拟就可以精确地预言这些大质量暗晕的形成。因此暗晕在宇宙不同时期数目的多少应该能够帮助揭示暗能量的本质。由于我们不能直接看到暗物质，DES 将使用发光的星系团作为它们所处暗物质晕的代表。这个巡天将会发现几万个星系团，延伸至红移超过 1。

在宇宙早期，光子和重子物质通过康普顿散射紧密地耦合在一起。重子物质的引力作用使得高密度的区域变得更加致密，但是光子的辐射压会阻碍物质成团。二者之间的竞争在光子重子流体中产生了所谓的重子声波振荡(BAOs)。随着时间的推移，等离子体中的质子与电子结合形成中性氢，重子物质和光子不再耦合在一起，BAOs 被冻结，其特征尺度约为 150 Mpc，这是由声速视界(即至退耦时声波所传播的距离)所决定。在星系分布中，这体现为相对距离在这一特征尺度上的星系对的数目，较邻近的距离尺度的对数而言，有微小的增多。BAO 特征尺度提供了一把标准尺，可以用来测量宇宙学距离和膨胀历史。DES 将在不同红移处通过星系

的角分布成团性测量这一信号及更一般的大尺度结构特征。

DES 协作体将使用一套统一的分析框架将这些手段结合起来。从许多方面来讲，DES 将是成果极其丰富的斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey) 的后继者，同时，也将是未来大型综合巡天项目(Large Synoptic Survey Telescope) 的先驱者。然而，与这两个具有专门用途的设备不同，DECam 还可以供全世界的天文学家使用，开展他们自己的观测。

DECam 在 2012 年 9 月 12 日首次拍摄得到了夜空的图像，图 2 显示了其中的一小部分。其后展开了几个月的科学验证观测，用来判断这个系统是否已达到巡天的科学要求。在这个阶段的观测中，DES 对几百平方度的天区进行了成像观测，深度接近计划中五年巡天的深度；对于超新星巡天也进行了验证观测。

DES 五年的巡天已于 2013 年 8 月 31 日正式开始，每年从 9 月观测到次年 2 月，共观测 525 个夜晚，将会形成近 2 亿个星系的分布图，覆盖全天空的八分之一。除此之外，每隔 6 个夜晚，相机被调整到指向固定的 10 个天区进行观测，从而发现并测量约 3500 颗超新星的光变曲线，这一样本将是当初发现宇宙加速膨胀的超新星样本的大约 100 倍。

第一个包含 105 个夜晚的观测季已于 2014 年 2 月 9 日结束，覆盖了大约 2000 平方度的天区，分别在 5 个波段都观测了 4 次，获得了几千万星系的多波段图像。超新星巡天每隔大约一周就对 10 个天区观测一次，已经发现了几百颗 Ia 型超新星。探索暗能量和宇宙加速膨胀起因的下一重要之步正在顺利进行中。