

弱引力透镜成为精确的巡天科学

(北京大学 徐仁新 编译自 Anže Slosar. *Physics*, August 27, 2018)

对暗能量巡天(DES)第一年数据的分析显示：利用弱引力透镜效应限制宇宙学参数的精度可与微波背景辐射观测相媲美。

基于广义相对论，科学家经过几十年的努力成功地建立了宇宙学模型，即宇宙学常数 Λ 非零的冷暗物质(Λ CDM)模型。该模型解释了宇宙演化的方方面面，从原初均匀的等离子体到我们如今看到的行星、恒星和星系这一不均匀宇宙。不幸的是， Λ CDM模型与粒子物理标准模型有冲突，后者无法解释 Λ CDM宇宙中的两个重要成分：约占宇宙物质成分85%的冷暗物质(CDM)和驱动加速膨胀的宇宙学常数(或暗能量)。

探究暗物质和暗能量本质的一种方案是利用所谓的弱引力透镜效

应——因物质的存在而导致光线的微弱弯曲。然而测量这一效应却具有挑战性，至今所得到结果乃少于物理学家的预期。不过暗能量巡天(DES)项目最近发表一系列论文，报道了该领域较大进展。分析了第一年的运行数据后，DES结合弱引力透镜和星系成团性观测重新约束了宇宙学参数。结果表明，我们已经进入一个精确测量时代：弱引力透镜效应已应用于高精度探测宇宙，其精度可跟其他成熟的手段相媲美，包括宇宙微波背景辐射(CMB)和重子声波振荡(BAO)等。

引力透镜是物质导致时空弯曲的后果。当光线从遥远的星系射向地球时，它会穿过各种物质团块，从而扭曲光线的路径。如果透镜效应强，这种扭曲能将星系显著地拉伸成弧形。但在大多数情况下，透镜效应很弱，仅会导致微弱的形变——就像T恤上印有的图像被略微扭曲。宇宙中相邻星系发出的光线所经路径相近，它们受到类似的扭曲效应，这使得星系具有取向相关性(aligned)。这一效应亦称为宇宙剪切。通过量化“背景”

星系的相关程度，弱引力透镜测量将给出导致失真的“前景”物质分布信息。因暗物质主导，故弱引力透镜效应主要反映了暗物质的性质。

几十年前人们就知道这一方法的潜在应用。然而，最初研究人员并没有意识到测量弱引力透镜信号如此困难，并且难以甄别导致类似扭曲的其他效应。最重要的是，光线要穿过地球的大气层才能到达地面望远镜。大气层状态、望远镜光学缺陷甚至不够理想的数据处理技术都会使星系的图像模糊或扭曲。如果这些效应在望远镜视场内是相关的，则可能被误认为是弱引力透镜的后果。此外，对于众多的椭圆星系而言，其取向由于天体物理原因也具有内禀相关性，而这是与弱引力透镜效应无关的。

尽管有这些困难，一些先驱性的工作仍表明弱引力透镜测量的可行性。2000年几个研究小组公布了宇宙剪切的首次测量。随后的15年内也相继获得若干进展，包括斯隆数字巡天SDSS、千平方度巡天KiDS以及斯巴鲁巡天HSC等。

DES最新结果是该领域的里程碑，其成功归于两个主要因素。首先是使用暗能量相机DECam。它是专为弱引力透镜测量而设计的灵敏探测器，安装在智利的4 m口径Blanco望远镜上。DES有充足时间用它观测。其次是大规模的合作，

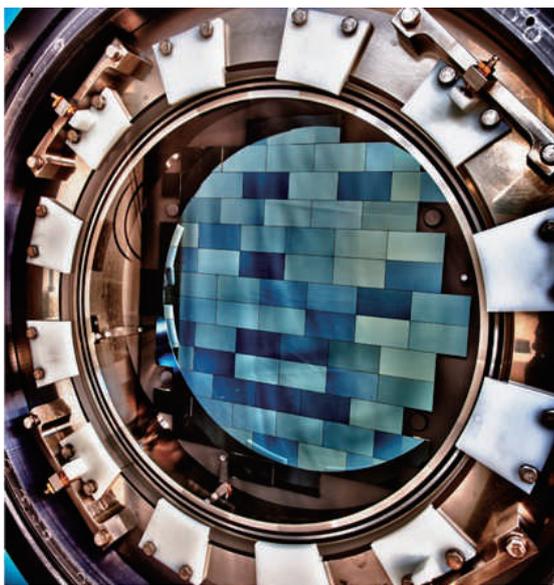


图1 暗能量巡天所使用的CCD成像仪(暗能量相机DECam)，安装在位于智利安第斯山脉的4 m口径Blanco望远镜上

其规模与粒子物理合作相近，远远大于通常的天体物理合作。该合作资源使得 DES 能够对数据深入挖掘，包括建立两个独立分析渠道，从而可以对结果进行交叉验证。

正如 DES 最新报告所示，合作组给出了 1321 平方度天区的暗物质分布，占全天 3%。他们用两种独立的方法观测。第一种方法，测量两千六百万背景星系受前景暗物质影响而导致的宇宙剪切，从而给出暗物质分布的信息。第二种方法，测量星系位置和宇宙剪切之间的相关性，以及星系位置的互相关；比较它们的相关性可推断暗物质的分布。这两种方法得到相同的结果，表明弱引力透镜测量暗物质的可信性。

合作组利用弱引力透镜结果约束一些宇宙学参数。特别地，他们将自己和其他测量(如 CMB, BAO 和 Ia 超新星)的数据结合起来得出暗能量状态方程参数(w , 定义为暗能量压强和密度之比)的最强约束。参数 w 可能跟暗能量的演化有关。数据显示，在几个百分点的实验精度内 $w = -1$ 。这表明暗能量恐

怕不变，支持真空能(或爱因斯坦的宇宙常数)的解释，而非许多理论家所推测的动力学演化的暗能量。

DES 系列工作中最重要的一项，是与普朗克卫星最新 CMB 测量结果进行了比较。CMB 是在宇宙大爆炸约 38 万年后光与物质脱耦时残留的辐射，故普朗克探测高红移($z \sim 1100$)宇宙。但是，DES 测量的是最近的宇宙，红移 z 为 0.2~1.3。要审视普朗克和 DES 结果是否一致，需要在标准宇宙学模型框架内外推宇宙演化史(从 $z \sim 1100$ 到 $z \sim 1$)。在实验误差内，两者显现较好的一致性(图 2)，也佐证了标准宇宙学模型的预测能力。虽然这一成功值得赞颂，但人们还是期望实验上发现对 Λ CDM 模型的偏离，从而提供些暗物质和暗能量新的蛛丝马迹。

该领域今后几年肯定会令人兴奋。DES 已积累 5 年数据，并很快将发布 3 年的分析结果。最终，

DES 将巡天 5000 平方度，占全天 1/8。大型综合巡天望远镜 LSST 也将受到 DES 结果的鼓舞。“暗物质望远镜”LSST 的概念于 1996 年提出，拟于 2022 年开始运行，几乎覆盖整个南天。在这个背景下，我们期待弱引力透镜测量将为宇宙待揭之谜提供重要线索。

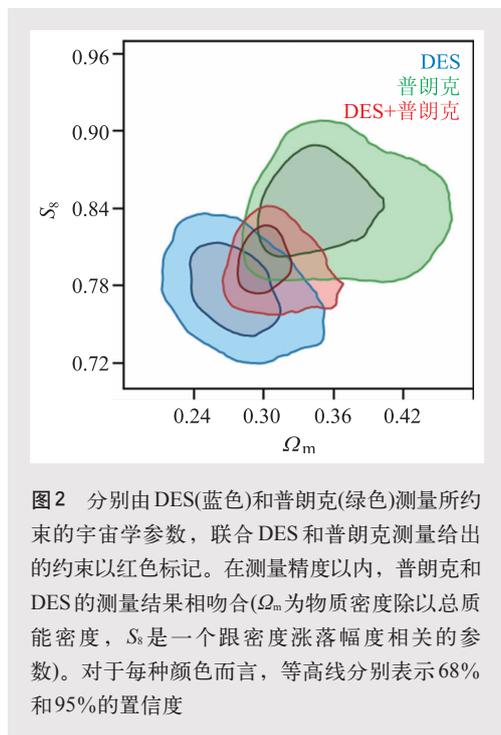


图2 分别由 DES(蓝色)和普朗克(绿色)测量所约束的宇宙学参数，联合 DES 和普朗克测量给出的约束以红色标记。在测量精度以内，普朗克和 DES 的测量结果相吻合(Ω_m 为物质密度除以总质能密度， S_8 是一个跟密度涨落幅度相关的参数)。对于每种颜色而言，等高线分别表示 68% 和 95% 的置信度

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029

《物理》编辑部