

天文 视点

2012年10、11月新闻头条背后的故事



何锐思 (Richard de Grijs), 北京大学科维理天文与天体物理研究所 (KIAA) 教授, 国际天文学联合会天文发展办公室东亚分站负责人。

哈勃定律：揭示宇宙膨胀

1929年, 著名美国天文学家哈勃 (Edwin Powell Hubble, 大家熟悉的哈勃太空望远镜就是以他的名字命名的) 首次发表了“哈勃定律”。这后来成为人们在宇宙尺度上的一把重要的“量天尺”。他测量了本星系群 (由银河系、仙女座星系M31、三角座星系M33和银河系周围约326万光年范围内众多的矮星系一起组成的松散星系群) 中六个“河外星云” (现在我们知道它们都是星系) 的距离, 并考查了这些星系的距离和视向速度的关系。(视向速度的数据已经改正了太阳绕银河系中心公转的影响, 因此可看作相对银河系的视向速度。)

假设星系中恒星形成密集区中的“明亮蓝色恒星”都有相同的亮度上限, 哈勃在他的样本中又加进了室女星系团中的18个星系。借助这些数据, 哈勃绘制出了世界上第一张描述星系距离与视向速度之间关系 (以距离为横轴、视向速度为纵轴) 的“哈勃图”。其实, 早在1927年, 一位比利时的罗马天主教牧师、物理学家、天文学家勒梅特主教 (Monsignor Georges Henri Joseph Édouard Lemaître) 就基于膨胀宇宙的数学模型预言了这个结果。但是他的文章是用法文发表在一份并不出名的刊物《布鲁塞尔科学会年刊》 (Annals of the Scientific Society of

宇宙膨胀 进行时

□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) 翻译 程思淼

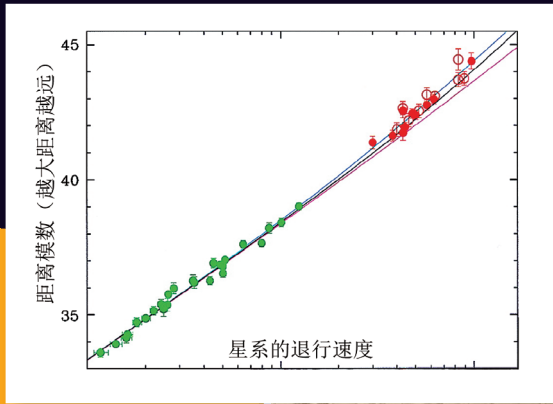
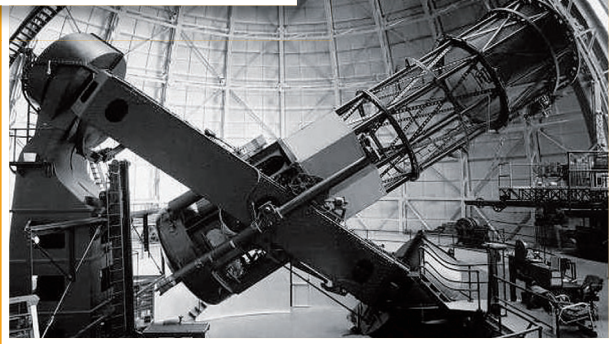


图1 美国天文学家、星系天文学之父哈勃（右）与哈勃定律。下图为哈勃发现哈勃定律所使用的2.5米胡克望远镜。哈勃定律显示我们的宇宙正在膨胀之中，离我们越远的星系，远离我们而去的速度（称为退行速度）越大。



Brussels) 上的，而那时候（当然现在也一样）科学界的通用语言是英语，因此当时并没有引起同行们多大注意。现在我们知道，哈勃的结果实际上并不精确，但他的洞见为我们提供了膨胀宇宙的基本观念：宇宙不是稳恒不变的，而是从一次剧烈的事件（即“大爆炸”）中诞生，并且不断膨胀的。

哈勃图中线性关系的斜率称为“哈勃常数”，用 H_0 表示。哈勃常数的物理意义是现在的宇宙膨胀速率。它的倒数（我们注意到与时间具有相同的单位）则称为“哈勃时间”。哈勃时间大致对应于宇宙现在的年龄。在这里我想强调一点：哈勃常数和哈勃时间对应于宇宙现在的膨胀速率和年龄——在匀速膨胀

的宇宙中，哈勃常数是随时间变化的。由于系统误差很大而且相当难缠，严重影响和妨碍了观测，精确测定哈勃常数成为几代天体物理学家一直以来的工作。最近，使用哈勃太空望远镜的观测数据， H_0 的测量获得了前所未有的精度——事实上，哈勃望远镜的主要任务之一就是将其 H_0 的测量精度推进到10%以内。今天，以更高的精度确定 H_0 的追求仍然继续着。

暗能量：亦已深入人心

让我们的目光回到现在。读者也许知道2011年的诺贝尔物理学奖授予了三位首次证明宇宙不仅在膨胀，而且是在加速膨胀的科学家。一边是珀尔马特（Saul Perlmutter）的团队，另一边是里斯（Adam Riess）和施密特（Brian Schmidt）的团队，在20世纪90年代末发表了重要的科学论文，指出简单的匀速膨胀宇宙模型与他们对遥远超新星的观测结果不符。出于某种原因，更远距离上的星系以比预期更大的速度远离我们而去。这个“某种原因”，我们最终给它取名为“暗能量”。这是受到以前我们创造的名词“暗物质”的启发（在星系和星系团的质量中，暗物质占

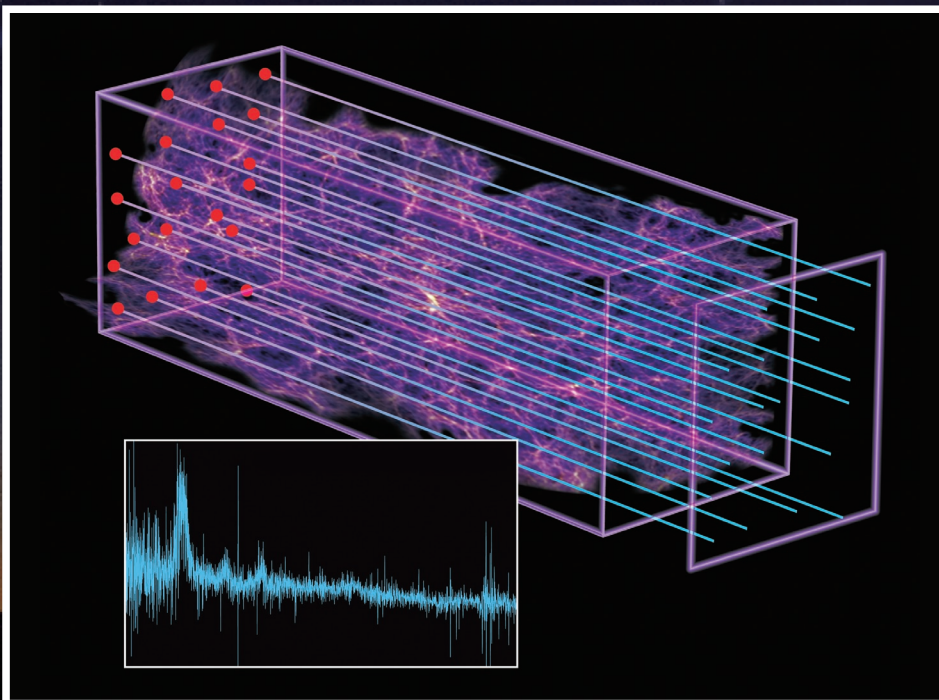


图2 遥远类星体（图左侧的小圆点）发出的光穿过氢原子云时被部分地吸收。在望远镜光谱仪（图右侧的正方形）得到的数据中，如果我们发现某一类星体光谱中出现氢吸收线的“森林”，那么就知道了在它到我们之间的视线存在着密度较大的气体团块。在BOSS之前，斯隆数字巡天已经在可行的红移范围内收集了约十分之一的类星体（黄色的小圆点）的光谱，距现在平均100亿年（即约100亿光年远）。通过测量附近同一区域的更多类星体（红点），BOSS就能够重建那些不可见的气体的三维分布图，揭示出早期宇宙的大尺度结构。[图片来源：Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory; Nic Ross, BOSS Lyman-alpha team, Berkeley Lab; and Springel et al., Virgo Consortium and Max Planck Institute for Astrophysics.]

到了大部分)。除了不可见以外,暗能量的另一特性在于它能够提供一个“向外”的压力(也称作“负压”),因此它能够促使宇宙加速膨胀。

除了对宇宙膨胀速率的影响,我们对暗能量了解甚少。有时人们把它和爱因斯坦的所谓“宇宙学常数”等同起来,但实际上这并不正确。爱因斯坦认为存在着宇宙学常数,是为了在他那个时代的宇宙理论框架中解释人们所观测到的星系运动。那时候大多数科学家认为宇宙是一直处于“稳恒状态”的。在这个现在已经废弃不用的理论中,宇宙中会连续不断地生成新的物质。这样的宇宙满足完美的宇宙学原理,也就是说,无论在空间上还是在时间上都是均匀而且各向同性的。我们对暗能量还知之甚少;但我们并不满足于此——目前已有数个大型国际合作项目正在开展当中,以使我们暗能量的基本性质有更深入的认识。

BOSS, 重子震荡光谱巡天(the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)通过勘查广大空间中重子震荡的分布情况来研究暗能量在宇宙演化中的角色。这是第三代斯隆数字巡天(the third Sloan Digital Sky Survey, SDSS-III)中最大的项目。最近刚刚公布了由一种新技术得到的第一批重要的成果,研究的样本是红移最高可达3.5的超过48,000颗类星体。哈勃定律指出,平均来看,星系离我们的距离越远,它远离我们而去的速度将越快。由于多普勒效应,远离我们的星系发出的光,我们观测到它的波长将会变长,也就是说,星系光谱中由特定化学元素产生的发射线或吸收线就会发生“红移”;星系远离我们的速度越快,红移的程度将越大。一个星系的红移是3.5意味着它距我们有115亿光年远,或者说,我们接收到的是它在115亿年前发出的光。

“在此之前还没有哪种技术能够把对暗能量的研究像这样追溯到宇宙的早期。那时候宇宙中的物质密度还很大,引力作用能够减慢宇宙的膨胀速度,暗

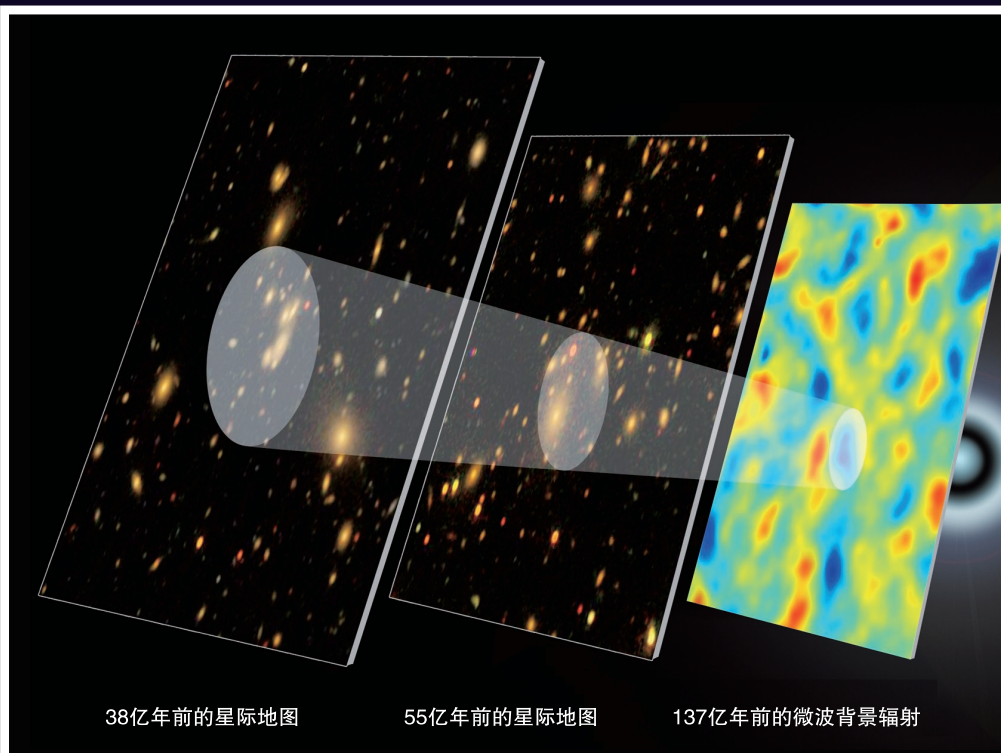


图3 对星系地图中重子声学震荡(图中的白圈)的研究帮助天文学家回溯宇宙膨胀的历史。这幅示意图显示了三个不同时期的宇宙图景。右图的经典颜色展示的是“宇宙微波背景”,即137亿年前宇宙看起来的样子。那时候的这些微小的密度变化造就了现在的星系团、星系长城和星系泡等大尺度结构。这些微小变化中就包含最初的重子声学震荡(右图中的白色圆圈)。随着宇宙的膨胀(中图和左图),重子声学震荡的证据保留了下来,表现为星系之间的“分隔峰”(白色大圈)。2012年3月,SDSS-III公布了对于55亿光年远星系的结果。55亿年前,暗能量对宇宙膨胀的作用开始超过引力。把这些数据与之前得到的38亿光年远(左图)的结果放在一起比较,我们就可以测得宇宙是如何膨胀的。[图片来源: E. M. Huff, the SDSS-III team, and the South Pole Telescope team. Graphic by Zosia Rostomian.]

能量的影响还难以察觉;” BOSS首席研究员、美国能源部物理科劳伦斯伯克利国家实验室(简称伯克利实验室,位于美国加利福尼亚)的天体物理学家施雷格(David Schlegel)说,“而在我们现在这个时期,由于宇宙已经由暗能量主导,膨胀速度则是加快的。暗能量究竟是怎样使宇宙由减速膨胀转变为加速膨胀的,这是宇宙学中最有挑战性的问题之一。”

重子声学震荡: 来自大爆炸的遗迹

BOSS通过勘查重子声学震荡(英文简称BAOs)来研究暗能量。重子声学震荡是指在大尺度上,可见的星系和难以看见的星系间气体云分布所形成的网状结构。通过研究重子声学震荡,我

们也可以揭示出不可见的暗物质的分布。重子声学震荡是在宇宙早期炽热、致密的等离子体中产生的类似声波一样的震荡的遗迹,体现在电子和其他正常原子粒子在空间中分布时密度的微小变化——而在早期宇宙中,这些物质的密度分布与暗物质是相一致的。在“大爆炸”后不久,物质粒子与辐射光子解耦,宇宙变为透明的“最后散射面”(对应红移约1100),引力对抗“辐射压”(由光子与物质粒子的相互作用产生)。另一方面,这种对抗也产生了一种带着可见物质和光子一起向外传播的“声波”。(暗物质不和光子相互作用,因此由于引力作用而落在后面。)正是这种“声波”造成了疏密相间的物质密度分布(对应于“声波”的波峰和波谷),我们可以在微波背景辐射中清楚地看到它的遗迹。因此,只要我们能

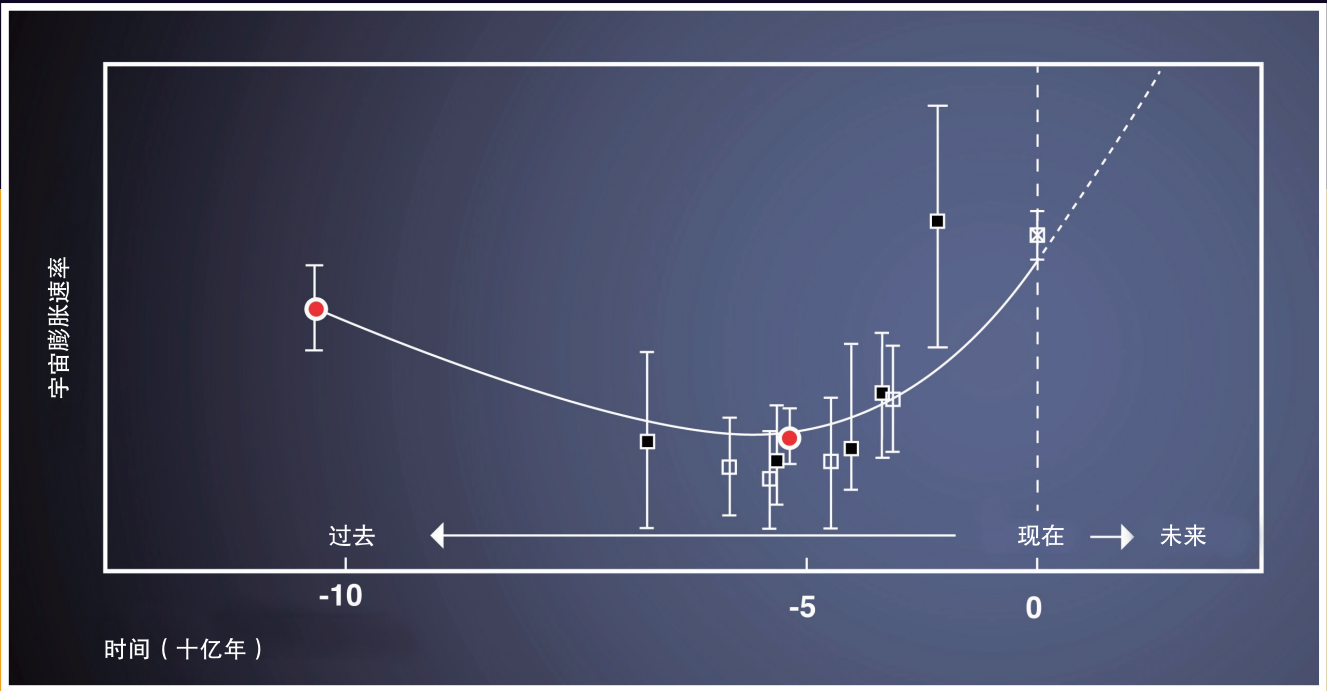


图4 以前，BOSS和其他巡天对星系分布情况绘制的三维地图只能回溯到平均55亿年之前：那时候宇宙已经在加速膨胀了（BOSS的数据为图中中间偏右的红点）。而BOSS通过测量类星体得到的星系间气体分布的结果（左侧的红点）则显示了宇宙极早期，由于引力的影响而减速膨胀时的结构。这些类星体的数据为我们研究宇宙从由于暗能量的作用而减速膨胀到加速膨胀的转变提供了新的途径。[图片来源：Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory, and Nic Ross, BOSS Lyman-alpha team, Berkeley Lab.]

够测量到重子声学震荡，这种疏密相间的密度分布能够提供一把测量宇宙膨胀速率的“标尺”。借助位于美国新墨西哥州阿帕奇峰天文台的斯隆望远镜，BOSS对重子声学震荡进行了两项光谱研究。第一项研究主要是对红移最高达到0.8（距我们约70亿光年远）的普通明亮星系进行巡天，其首批结果包括超过300,000个星系，已于2012年3月公布。但是使用直径仅2.5米的斯隆望远镜，很难观测到足够多的高红移星系，因此没有办法对宇宙极早期的重子声学震荡进行研究。因此BOSS的第二个目标是：类星体。

“类星体是天空中最明亮的天体，因此它也是在红移2.0及更大的距

离上唯一可能获得光谱的天体。”施雷格说，“在这些红移的距离上，星系的数目是类星体的一百倍，但是对

于重子声学震荡的测量来说，它们太暗了。”对直接测量重子声学震荡来说，类星体的分布是太过稀疏了，但

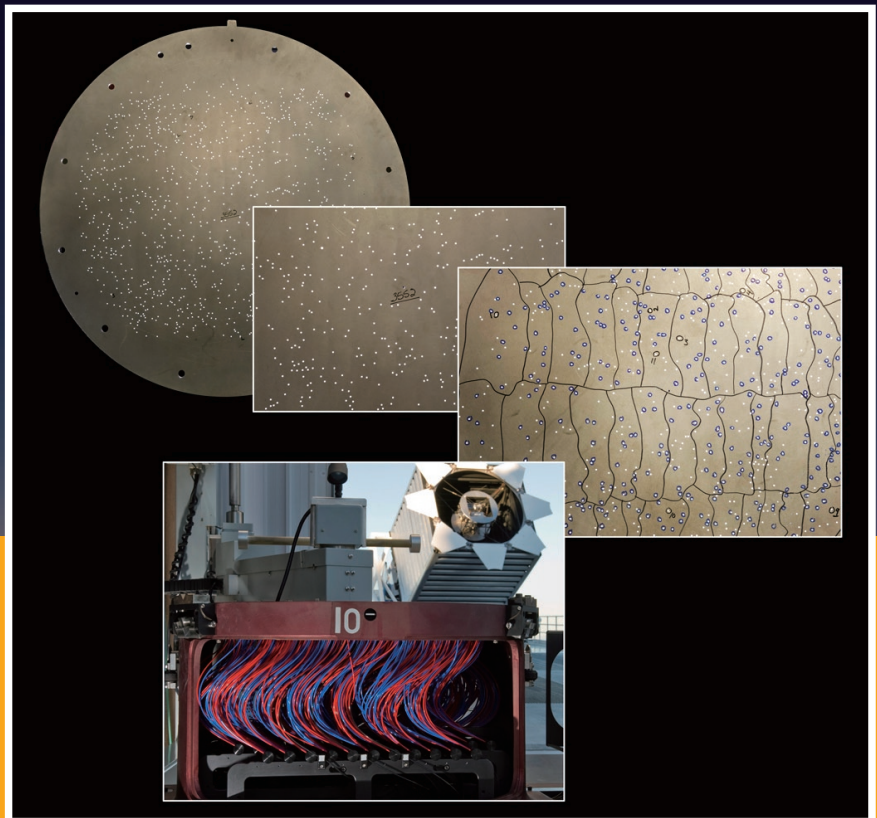


图5 借助斯隆望远镜焦面上的2,000张光纤板，BOSS获得了数百万个天体的精密光谱。每张板面上打着1,000个小圆孔；每个圆孔捕捉来自一个特定星系、类星体或其他目标的光，并通过一根光纤把光传递到光谱仪上。光纤板上都做了标记，指明哪个孔对应的是传递光线的一捆数千根光纤中的哪一条。[图片来源：Lawrence Berkeley National Laboratory and Sloan Digital Sky Survey III.]

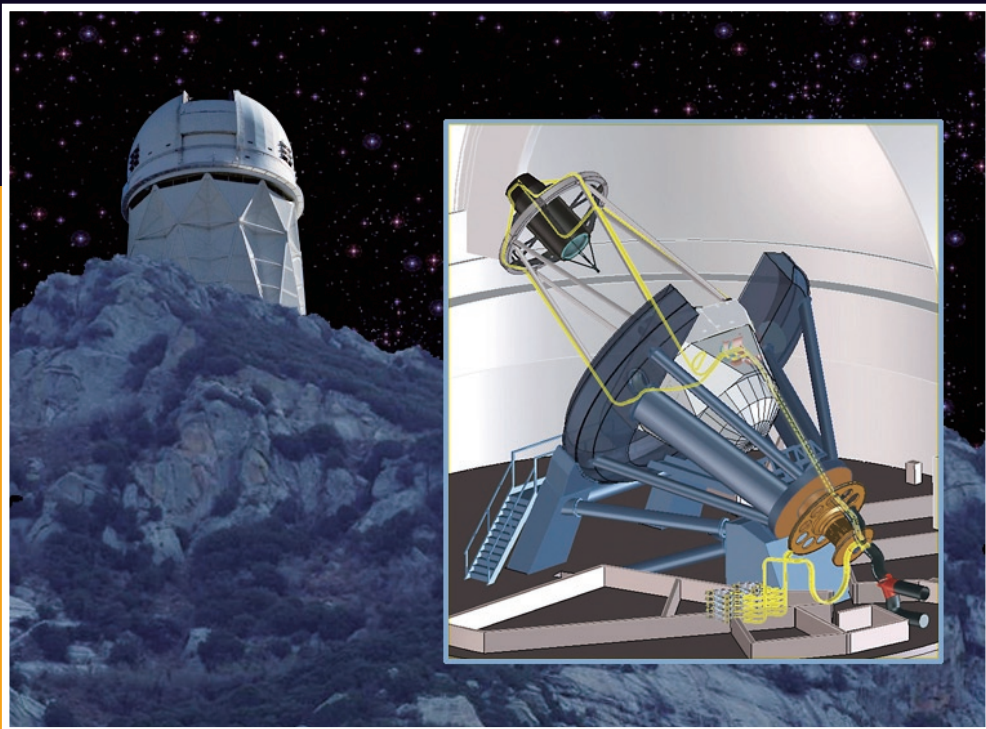


图6 BigBOSS项目将为口径4米的梅耶尔望远镜加装一组宽视场主焦点改正镜。在焦面上安置了由5,000根光纤组成的光纤阵列，每根光纤可由电机独立定位，并将光线传递到10台三臂光谱仪上。[图片来源：Lawrence Berkeley National Laboratory; 背景：Mark Duggan.]

还有另一种方法能够揭示高红移下的重子声学震荡。当类星体发出的光经过星系间的气体云时，它的光谱中会产生大量的氢原子吸收线，称为“赖曼阿尔法森林”。理想情况下，这个“森林”里的每一条吸收线能够告诉我们类星体的光是从哪里穿过并与气体云产生相互作用的。像用手筒的光穿过雾气一样，一颗类星体光谱中的各条吸收线不同的深度和红移揭示出在视线方向上气体云密度的变化。如果有足够多、相聚在一起并且覆盖了足够大天区的类星体，通过对它们光谱的研究，我们就可以绘制出造成吸收线的气体云在三维空间中的密度分布。

SDSS-III远为精细的光谱仪能够提供比以前的巡天高得多的覆盖率和分辨率，但有很多原因使在赖曼阿尔法森林中搜索重子声学震荡的方案颇具风险。首先，赖曼阿尔法吸收线出现在光谱的紫外区，而地球大气会吸收这一波段的光；因此在地面上观测，只有那些红移量刚好使这些吸收线“转移”到可见光波段的类星体才是可用的。其次，这些

吸收线只有中性氢原子才能产生，而宇宙中大部分的氢都是电离的。在另外的诸多不确定因素中，氢云的不均匀加热，或者太多类星体聚在一起，都会扭曲得到的结果。

初步的赖曼阿尔法的结果（这是人们得到的宇宙演化早期的第一张重子声学震荡分布图）只覆盖了BOSS最终样本空间的三分之一，包括经过目视检视光谱确认的60,369颗类星体。对此，施雷格表示：“在红移2.0或更大的地方，现在还没有其他测量重子声学震荡的可行方法。五年前项目开始的时候，我们完全是在碰运气，但这是我们能想到的唯一的方案了。在任何地方出一点问题我们都可能完全失败，但是上天眷顾了我们。”伯克利实验室的怀特（Martin White）说：“我们往回看到了物质主导时期的宇宙，那时候宇宙的膨胀正在减速，而暗能量还难觅踪迹。从减速膨胀到加速膨胀的转变是非常迅速的，现在我们生活在一个由暗能量主导的宇宙中。而宇宙学中最大的谜团就是，为什么现在是这样？”这也是BOSS在SDSS-

III完成之前，获得超过150万个星系以及超过160,000颗类星体的数据时，将大大有助于揭开谜底的原因。同时，赖曼阿尔法森林向我们打开了观察远古宇宙的一个新视角，而随着威力越来越大的巡天项目（如已经提出方案、并且刚刚获得了重要资金支持的BigBOSS）投入使用，这一领域在未来将会结出硕果。

“BigBOSS是宇宙学的下一件大事，”伯克利宇宙物理中心（Berkeley Center for Cosmological Physics, BCCP）主任Uroš Seljak说，“它将勘查数百万个星系，我们因此将能够对暗能量进行更高精度的测量，它还将产出其他重要的科学成果，包括确定中微子的质量和中微子家族的数目。”“在我们获得诺贝尔奖之后，我们被问到最多的问题就是‘现在你们已经发现了暗能量，那么下一步呢？’”珀尔马特说，“答案很清楚：我们必须弄清楚暗能量到底是什么。理论是没有止境的。要知道哪种理论是可能的，我们最需要的就是只有BigBOSS和其他先进的实验能够提供的准确的观测证据。”

“就现在已有的设备来看，即使我们把世界上所有的望远镜都用来进行这个项目，也至少需要10年才能绘制出如此复杂的一幅地图来。”施雷格说，“而我们已经找到了更合适的设备：借助它，我们只用梅耶尔（Mayall Telescope）这一台望远镜就能绘制这幅地图。”为了安装这个合适的设备，需要对亚利桑那基特峰现有的直径4米的梅耶尔望远镜进行改造。现在这台望远镜的视场只有半度（大致相当于一个满月大小），而在改造之后视野将达到3度，并在焦面上布满位置可精确控制的5,000根光纤，这样每一次曝光将可获得最多5,000个星系或其他天体的光谱。在每一次曝光中，每个目标的光线将汇聚在焦面上并由一个独立的光纤接收并传递到10台光谱仪中的一台上。

看来已经万事俱备。在接下来的十年里，我们对暗能量性质的理解将取得重大的进展。就让我们拭目以待吧！

（责任编辑 李鉴）