

河外测距新进展

□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) / 翻译 程思淼



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。

浏览过去这个月天文领域的最新进展时, 有两件事尤其引起我的注意。熟悉我的人会知道, 我对那些能够确定宇宙大小和几何结构的测量工作, 以及这些测量方法背后的物理过程十分感兴趣。几年前我曾写过一本关于天文测距的教科书。因此, 当我看到这一领域有了新的成果, 就立即决定要在这期的文章中与大家分享。

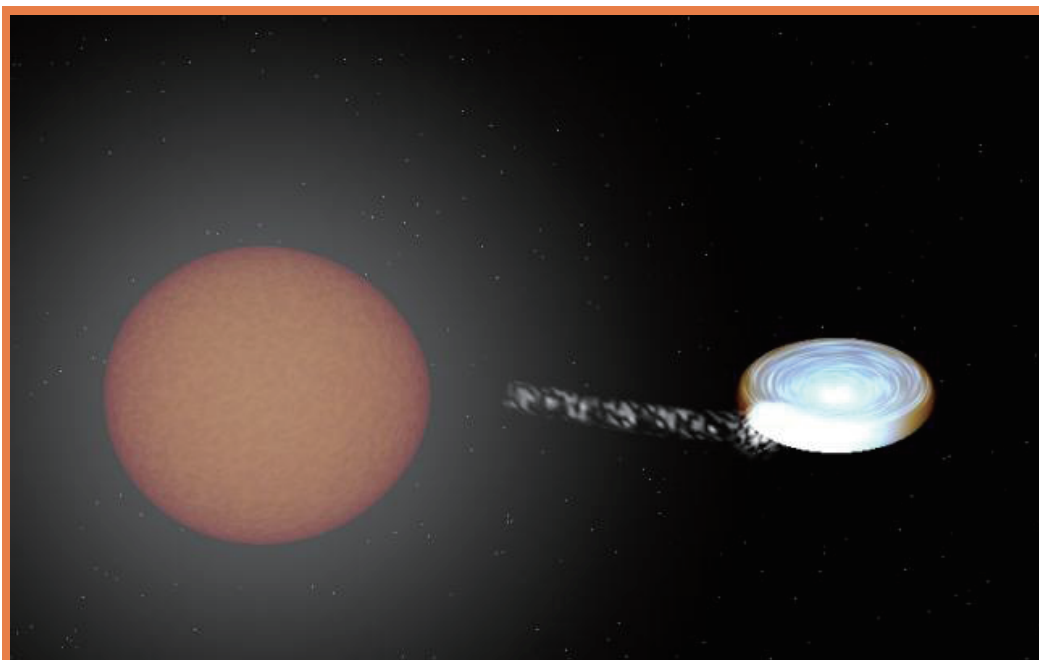
在不到20年之前, 我们才知道了宇宙的膨胀速率在不断增加。推动它加速膨胀的神秘压力被称为“暗能量”。这一发现是通过仔细观测Ia型超新星做出的。由于Ia型超新星极为明亮, 光度又十分接近, 它们可以用作“标准烛光”——也就是那些内禀光度可以通过它其他的观测性质推算出来的天体——来帮助我们揭示宇宙的历史。

事实上, Ia型超新星还远远称不上“标准”。它们与我们之间的星际尘埃主要吸收或散射蓝色的光, 使它们看上去比实际上更暗也更红。而且它们自身发生热核爆炸的物理机制也是不一样的: 可能是由于一颗白矮星的表面积累了太多从伴星吸积而来的物质, 也有可能是因为两颗白

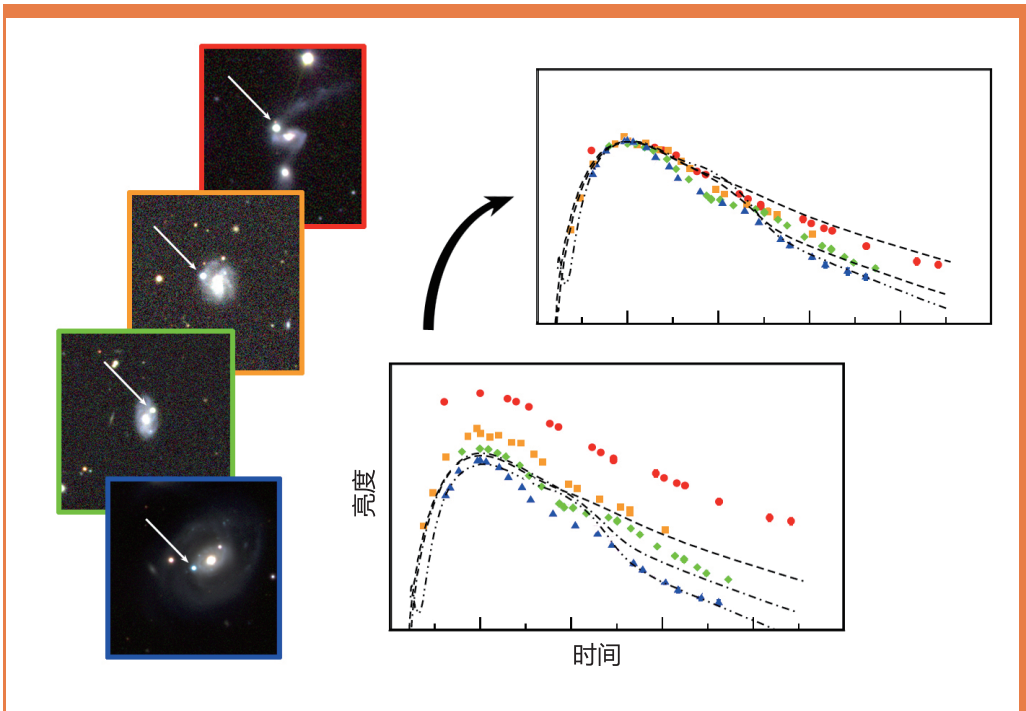
矮星相撞发生的爆炸。因此, 在这些“标准”的Ia型超新星之间, 亮度 (内禀光度) 其实会相差高达40%。虽然通过一些有效的 (改正) 方法, 这种不确定性的范围可以缩小到15%, 但是对作为整个宇宙

学工作基石的“标准烛光”来说, 这毕竟还是太高了。

而现在, 美国能源部下属劳伦斯伯克利国家实验室参与“近邻超新星工厂计划 (Nearby Supernova Factory)”的研究人员已经找到一种方法, 能够极大地减小估计超新星亮度时的这种不确定性。他们研究了约50颗邻近的超新星, 把其中光谱几乎相同的超新星两两结成一队——通过这种方法, 他们成功地把亮度 (意指“绝对亮度”, 文中下同) 的不确定性控制在8%以下。因此, 他们测得的这些超新星的距离就可以比以前精确一倍。



▲ 图中为一种Ia型超新星的前身: 由红巨星 (左) 和白矮星 (右, 但是太小了, 看不见) 组成的双星系统。气体从红巨星中流出, 白矮星通过吸积盘 (白矮星周围发出蓝白色光的物质盘) 把这些气体中的一部分吸积到自己的表面。一旦白矮星的质量达到了某一质量下限 (约1.4倍太阳质量), 它就会爆发为一颗Ia型超新星。



▲ Ia型超新星是白矮星爆发的结果。如图所示，它们在峰值亮度、保持明亮的时间以及亮度衰减的模式方面都有很大的差别。理论模型（黑色虚线）试图解释这种差异，比如为何较暗的超新星亮度下降得也更快，而较亮的超新星的变暗则更平缓。“近邻超新星工厂计划”发布的一篇新的论文指出，如上图所示，当我们把峰值亮度拉平，亮超新星和暗超新星之后的行为充分表明它们的前身白矮星有着不同的质量，虽然爆炸还是可以作为“标准烛光”。

“超新星配对的方法，不去考虑究竟是什么造成了超新星之间亮度的差别，而只是把光谱吻合得最好的一对挑出来，也就是说，用光谱的相似去比拟亮度的相似。”伯克利实验室的宇宙学家、项目带头人格瑞克·奥德灵（Greg Aldering）说。“我们最终验证了这个假设：如果两颗超新星（的光谱）看上去差不多，那么它们本身也就差不多。”

汉娜·法库里（Hannah Fakhouri）从她的博士课题开始就在做超新星配对的研究。她说，在伯克利实验室里其实早就在讨论超新星配对法的好处了；但对于研究者来说，他们主要是需要一批质量足够高的数据来验证他们的假设。好在法库里赶上了好时候：目前有了大量的邻近Ia型超新星高精度光谱测光数据（同时测量光谱和亮度）可供她使用。这些数据由研究团队在莫纳克亚的夏威夷大学2.2米望远镜上安装的“超新星集成视场光谱仪”（SuperNova Integral Field Spectrograph, SNIFS）采集。

当然，这里的“邻近”只是一种相

对的说法。她所用到的超新星中，有的距离我们超过十亿光年。不过，所有这些超新星都得到了全面和仔细的测量。虽然如今大获成功，但是法库里说，最初的研究其实是枯燥的“冷板凳”，需要的是刻苦和细致。超新星的光度迅速

达到极大，而后逐渐变暗——在不同的颜色（波长）上，它们增亮和变暗的速率是不一样的。要把若干条密集地采集的光谱的时间序列恰当地配对，绝对是一项艰巨的任务。研究人员依据光谱对这些超新星进行分类和配对的时候完全是“盲”的，除了光谱之外，他们不知道超新星的其他任何信息。

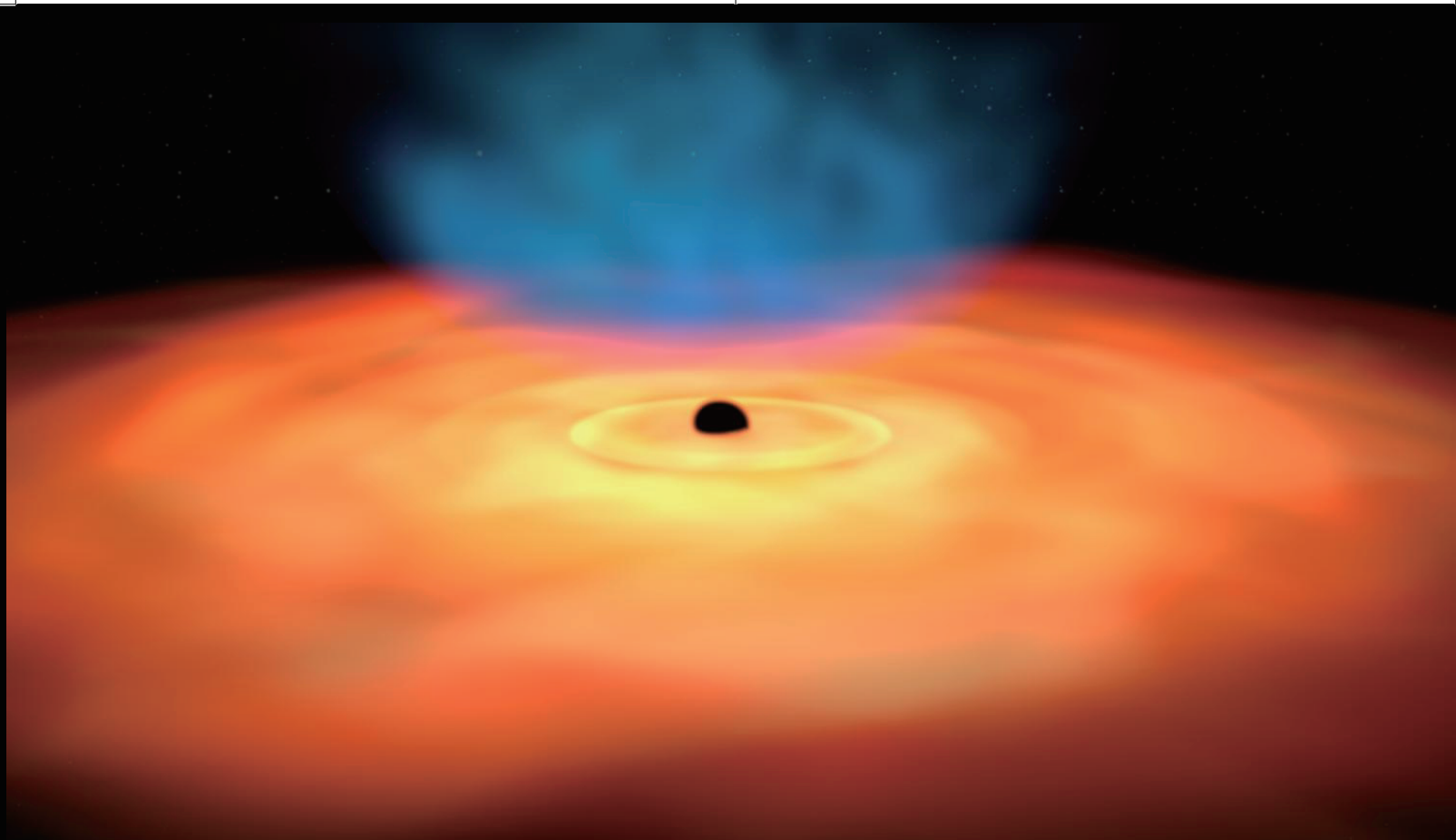
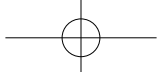
“出结果的时候我们都很紧张，”法库里说，“我们可能会发现配对其实一点用也没有。”不过结果让人长舒一口气：两个超新星的光谱越相近，它们的绝对亮度也越接近。

这一结果表明，一直以来为人们所接受的、Ia型超新星在亮度上的15%的不确定性并非只是统计随机的弥散。它只是表明了我们对超新星自身性质差异的无知。现在，配对法显著地减少了亮度弥散，也就是说，对于同一对的两颗超新星来说，我们的了解又多了一些。作为目标天体的超新星，也向着真正的“标准烛光”又迈出了一大步。

目前，将超新星“改造”成“标准烛光”的通用方法，是考虑超新星的光变曲线：越暗的Ia型超新星，其光变曲线就越陡峭，颜色也越红。人们用这一规律改正超新星的亮度，以使它们“标准化”。不过，配对法（在精度上）不费吹灰之力就胜过了光变曲线法。而且

在超新星SN2011fe爆发之后仅数小时，就被帕洛玛瞬变天文台（Palomar Transient Observatory）发现了。这颗超新星位于北斗七星勺柄外的M101星系。“近邻超新星工厂计划”对它的颜色和光谱随时间的演化所进行的研究，为今后测量Ia型超新星的信息提供了基准点。[图片来源：B. J. Fulton, Las Cumbres Observatory Global Telescope Network] ▶





▲ 这幅艺术图展示了一个位于星系核心区的、正在吸积物质的超大质量黑洞。吸积活动较为活跃的超大质量黑洞，吞噬物质的速率也极大，使得周围的物质在从射电到X射线和伽马射线波段的整个电磁光谱上都发出强烈的辐射。有时，黑洞附近的物质发出的辐射实在太强，甚至掩盖了整个星系的恒星所发出的光。结果，这些天体在天空中看上去就像一个点状的光源，好像一颗恒星一样，因此叫作“类星体”。当吸积物质流通过一个“吸积盘”流向黑洞，它们就会由于摩擦而加热，并且在可见光和紫外波段发出强烈的辐射，在图中用红色和黄色表示。吸积盘发出的光当中，有一部分会与盘面附近冕状区域（图中蓝色）里的高能电子发生作用，从电子那里得到额外的能量而成为X射线。[图片来源：ESA, C. Carreau]

研究人员还发现，实际上只要用一条光谱就可以了，整个时段的光谱序列是不需要的。

法库里说：“超新星为宇宙学研究提供了独特的途径，不过我们还需要多方面的技术，”包括使用统计方法揭示暗能量如何塑造宇宙的结构。“大自然为我们的研究提供了很多条彼此独立的路径，这是非常重要的。”

对天文学家来说，超新星像是稀世珍宝。奥德灵说，“超新星（让我们）发现了暗能量，而且现在仍在为我们提供有关暗能量性质的最清晰有力的信息。”

如果我们能有这样一份样本做参考——其中的每颗超新星都被精确地测量，而且样本数量足够大，使得每颗新发现的超新星都能在其中找到合适的配对——那么通过配对法，我们就能够精确地测出暗能量过去100亿年里对宇宙产生的影响。对我们来说，那些超新星所标记的时空中的点，就会成为宇宙演化史上一座记录详细的里程碑。

读到这个说超新星其实是潜在的“可标准化”烛光的新见解时，我正在

准备北京大学的一门关于距离尺度的研究生课。这可以让向学生们展示，天文学当下的进展在对他们正在学的内容产生即刻的影响——这也正是研究导向型教学的价值！大约在同时，我发现了另一项有趣的新进展，是关于直接测定河外距离尺度（extragalactic distance scale）的。它也将成为我今后某节课的主题。

这一进展是关于如何使用类星体来研究宇宙的历史和组成的。类星体是由星系中心的超大质量黑洞所驱动的强大辐射源。这项新技术主要基于类星体在X射线和紫外波段上光度之间的关系。为此，一队意大利科学家大量使用了欧洲空间局XMM-牛顿望远镜的数据。XMM-牛顿望远镜原名“多镜面X射线空间望远镜”（X-ray Multi-Mirror Mission，简称XMM），于1999年12月发射升空，是欧洲建造的最大的科学卫星，也是迄今发射的最灵敏的X射线卫星之一。它包括三架高通量X射线望远镜，由超过170个薄筒形镜片组成。

在大多数大质量星系的中心，都有一个超大质量黑洞——它的质量非常大，能

够将附近的物质都吸引过来。这些黑洞的质量从几百万到几十亿倍太阳质量不等，但与恒星级别的黑洞不同，它们的密度并不很大，里面一般很“空”，只是捕捉偶尔来到星系中心附近的恒星和气体云。不过在这些星系级黑洞中，也有很少一些非常活跃，它们吞噬物质的速率很大，使得周围的物质在从射电到X射线和伽马射线波段的整条电磁波谱上都发出明亮的辐射。有时候，黑洞附近的物质产生的辐射实在太强，星系中心很小区域的亮度远远超过了星系中所有恒星发出的光。这种天体在天空中就会呈现出点状光源的特征，像颗恒星一样，因此被叫作“类星体”。

通过研究类星体，科学家可以知道超大质量黑洞所产生的极强引力场的性质。另外，比较类星体和其他核心拥有黑洞的星系，还能揭示出星系在宇宙历史上演化的有趣侧面。不过，类星体的另外一面吸引了来自意大利佛罗伦萨阿尔切特利天文台（Arcetri Astrophysical Observatory）两位科学家的注意：他们意识到，类星体可以用来研究宇宙膨胀的历史。

“宇宙膨胀的历史中包含了宇宙的丰富信息，比如它的年龄和各种成分（如暗物质与暗能量）的相对丰度。为了解释宇宙的历史，我们需要观测到我们距离各不相同的天体。”这一研究的领头人之一圭多·里萨里提（Guido Risaliti）解释道，“但要在宇宙中确定距离可不容易，只有用某几类特定天体才能够做得比较好。我们的研究展示了类星体是如何做到这点的。”

要测量天体的距离，主要的障碍在于我们对它们真实的亮度并不了解。因此几乎不可能正确判断出一个天体究竟是它本身就很亮，还是只不过因为它离我们近所以才显得很亮。对于银河系中、离我们相对比较近的恒星来说，天文学家可以通过三角视差法精确地得出它们的距离，其原理是：随着地球公转时位置的移动，恒星在天空中的方位也会发生微小的周年运动。但是目标离我们越远，它的周年视差就越小，因此这种方法仅限于我们附近的天体。对于更远的距离，天文学家就要依赖“标准烛光”，或者至少是“可标准化烛光”，比如之前介绍的伯克利实验室所用的Ia

型超新星。

“Ia型超新星是宇宙学研究中强有力的工具。但在极为遥远的距离上，我们就没法观测到它们了。因此，它们主要用来探测相对比较近的宇宙。”伊丽莎白·鲁索（Elisabeta Lusso）说。

我们的宇宙现在已有140亿岁，而在它50亿岁之前的早期阶段，很少有Ia型超新星被观测到。

“这就是为什么我们要用类星体来完备Ia型超新星的数据。在远得多的距离上，也还能观测到大量的类星体。借助类星体，我们掌握的宇宙历史可以上溯到宇宙只有10亿岁的时候。”鲁索补充道。

要确定类星体离我们有多远，里萨里提和鲁索利用了类星体的一种有趣的性质：它在紫外波段和X射线波段辐射量之间的关系。这一关系发现于20世纪70年代晚期。两种辐射都源于黑洞的活动，但是引起它们的物理过程并不一样：当吸积物质流通过“吸积盘”流向黑洞时，这些物质会因摩擦而加热，并且在可见光和紫外波段发出明亮的光；而其中的一部分辐射会与附近的电子

发生作用，获得额外的能量而成为X射线。

两个波段辐射流量的关系能够应用在宇宙学上的关键在于：它并不是线性的。也就是说，一个类星体的X射线流量和紫外线流量之比并不是常数，而是由它在紫外波段的光度（绝对亮度）所决定。因此，只要测出一个类星体在两个波段的辐射流量之比，科学家就能推算出它在紫外波段的光度，因而也就能确定它的距离了。

虽然这个关系背后的物理机制尚不清楚，但里萨里提和鲁索仍然可以利用它来把类星体当作“标准烛光”，并在宇宙学研究中把它们用作距离精确的里程碑。为此，他们编订了一份包含1138个类星体在紫外和X射线波段亮度数据的样本。

“首先我们要确认，这个关系在宇宙的各个时期都是成立的。如果我们要用类星体来做宇宙学研究，这一点非常重要。”里萨里提解释道。

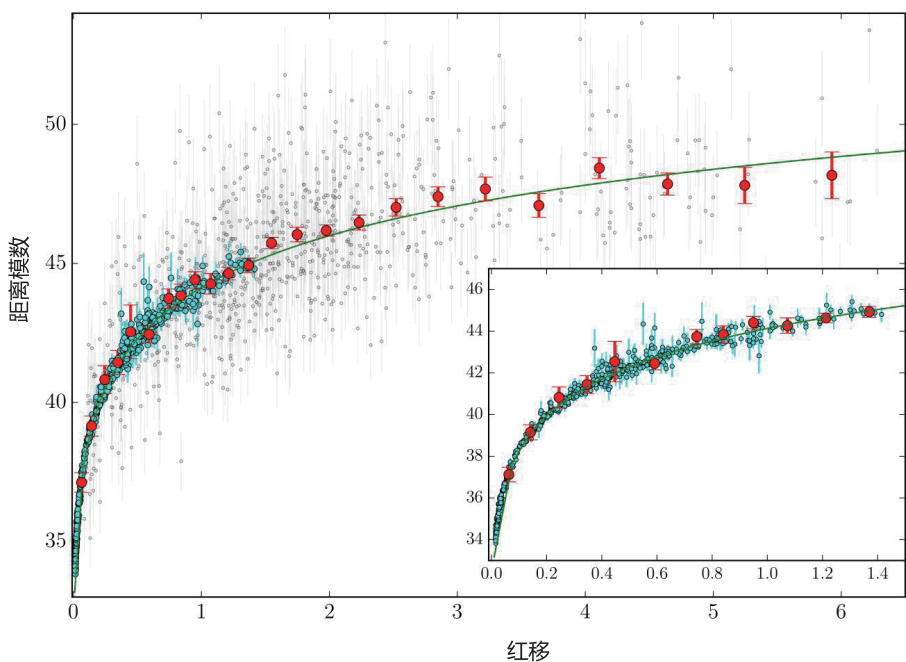
然后，两位科学家确定了这些样本中类星体的距离，并且研究了在它们所覆盖的宇宙历史范围内，宇宙的膨胀情况是如何变化的。

“用类星体测量距离不如用Ia型超新星来得精确，但它们提供了超新星方法所不能达到的遥远宇宙的信息。”鲁索说。

将类星体与超新星的结果结合起来，就能够覆盖宇宙演化史上长达130亿年的时间。要研究宇宙在它历史的大部分时间里是如何演化的，类星体功不可没。而且事实上，通过这两类天体最新巡天数据的结合得出的暗物质与暗能量相对丰度的信息，要比单纯通过超新星得到的结果更精确。里萨里提和鲁索开发的这个方法在未来处理巡天数据中将大有用武之地。有了大量的类星体样本之后，得到的宇宙学参数误差还可以更小。

看样子，我们终于要找到一种方法，能够精确地测量在宇宙很年轻的时候出现的天体的距离了，这真的是非常令人兴奋的进展！

（责任编辑 冯翀）



▲ 本图展示的是对遥远天体的测量如何帮助科学家研究宇宙膨胀的历史。横坐标为红移，纵坐标为距离模数。如果宇宙匀速膨胀，那么遥远天体的数据点应该在图中沿一条对数曲线分布。[图片来源：Risaliti & Lusso, Astrophysical Journal, Volume 815, 2015]