

宇宙加速膨胀与天文观测

廖 恺 朱宗宏

(北京师范大学天文系 100875)

一、背景介绍

宇宙加速膨胀深刻地影响了现代宇宙学研究，同时对于基础物理也提出了重大的挑战。它的发现荣获了 2011 年的诺贝尔物理学奖。在理论上，它与基础物理的统一紧密相连，为理论物理学家带来了机遇和挑战；在观测上，越来越多的项目投入到它的研究中来，观测技术、测量方法各方面都蓬勃发展。宇宙加速膨胀问题或者是暗能量问题不仅仅让人们重新认识宇宙演化历史，它也关系到宇宙的最终宿命。

宇宙加速膨胀的相关历史可以追溯到爱因斯坦提出广义相对论的时代。1917 年爱因斯坦在创立著名的场方程时考虑到了引力在宇宙尺度上的影响。结合当时的天文观测资料，他认为所有的天体都在进行各自的自动，它们的平均状态是维持静止的，即宇宙是静态的。因此，有必要在场方程中引入一个常数，即宇宙学常数 Λ 来给出一个静态的有限的宇宙学模型解。然而在 1929 年，天文学家哈勃观测到了星系“发红”效应，即观测到的辐射谱线波长变长。我们令观测波长与发射时的波长比为 $1+z$ 。根据多普勒效应，红移 z 是星系速度和光速的比： $z \propto v/c$ 。这种红移现象表明所有远距离天体正在离我们远去。另一方面，天体物理的研究表明，星系中的造父变星的绝对亮度可以通过测量光变周期得到，进一步通过测量变星的暗弱能够得到这些星系离我们的距离。这就好比已知蜡烛的亮度，观测到它的暗弱明亮表明了它离我们的远近。在这个原理下，哈勃也测量了这些星系到我们的距离并且注意到了星系相对我们的退行速度随着离我们距离的增大而增大，并把这一结论以哈勃图的形式给出。这一现象正是膨胀宇宙的表现。随后爱因

斯坦放弃了宇宙学常数，并且称引入这个常数是犯下的最大错误。值得一提的是，宇宙学常数在历史上被排除和重新引入了几次。在哈勃发现宇宙膨胀后，宇宙学家们都努力尝试测量膨胀速度是怎样减慢的。因为当时认为一般物质产生引力的吸引作用会使得这种膨胀速度减慢。人们甚至定义出了一个减速因子 q_0 来刻画膨胀速度变慢程度。

在 20 世纪末，人们对一种特殊的恒星演化阶段，即超新星爆发，有了很深入的研究。超新星爆发是指某些恒星在演化晚期所经历的一种剧烈的爆炸，它的亮度甚至可以和整个星系发出的光相比。特别地，一种分类为 Ia 型的超新星，由白矮星吸收其伴星质量达到钱德拉塞卡极限后发生坍缩爆炸，其光度几乎恒定，可以当作所谓的“标准烛光”。1998 年，两个独立的团队观测到了比预期要暗弱的 Ia 型超新星，由此揭示了我们的宇宙正处在加速膨胀的状态，彻底地改变了人们对宇宙的认识。

宇宙加速膨胀的起源仍然是一个谜。根据广义相

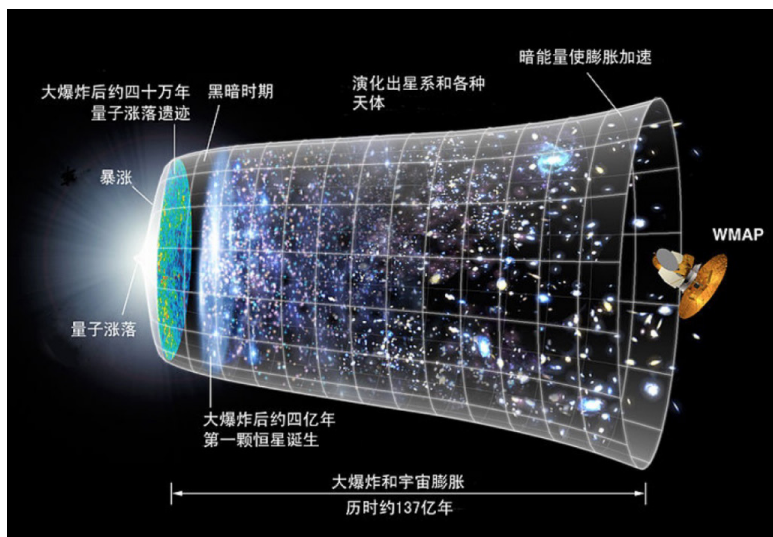


图 1 当前最为广泛接受的宇宙学模型 Λ CDM，即带有宇宙学常数的冷暗物质宇宙所给出的宇宙的演化历史

对论，如果宇宙由普通物质和辐射组成，引力将会导致膨胀的减慢。加速膨胀的事实表明我们面临了两种可能性：首先宇宙中大约 68% 能量由一种压强为负的新能量形式组成，即“暗能量”；其次，广义相对论可能在宇宙学尺度上的预言存在偏离，需要新的引力理论来完善。这两种可能性全都和深刻的物理和对宇宙的认识相联系。在理论解释上，人们首先想到的是爱因斯坦当年排除的宇宙学常数。早在 1968，泽尔多维奇 (A. R. Zel'dovich) 就意识到 Λ 在数学上等价于真空的能动张量项，因此并不能被简单的抛弃。在量子场论中，真空态中是存在粒子的，它们的效应可以通过原子谱线的移动和粒子质量测出来的。然而，如果用真空能来解释加速膨胀，它在量子场论中计算的量级和观测相比大了至少 60 个量级，即著名的“宇宙学常数问题”。

暂且不管 Λ 纠结的历史和它在量子场论中的矛盾，宇宙学家们很快接受了越来越多关于宇宙加速膨胀的证据，它成为建立当前宇宙学模型的重要一环。在当前最为广泛认可的宇宙学模型 Λ CDM 中：1. 宇宙是平坦的并且是正在加速膨胀的；2. 它是由重子物质、暗物质和暗能量组成；3. 在早期为极热、极密、均匀的状态，一直在减速膨胀状态，并且在大爆炸核合成时期产生轻元素和宇宙微波背景辐射；4. 在更早期经历了一个加速膨胀状态，即暴涨，量子涨落产生了密度扰动，在宇宙微波背景的各项异性中留下痕迹，并且成为宇宙大尺度结构的种子。

我们将在本文第二部分简要介绍理论背景知识；在第三部分介绍如何通过天文观测来检验宇宙加速膨胀及暗能量的性质；在第四部分介绍当前暗能量的一些理论模型；最后对本文进行总结及对未来暗能量研究展望。

二、宇宙学基础

根据对大尺度星系、星系团巡天得到的物质分布以及对宇宙微波背景辐射近乎一致的温度分布，我们有理由相信宇宙在零级近似下是均匀的并且是各向同性的。这样的假定也符合哥白尼原理的精神，即宇宙各处的地位是等同的。在这个假设下，时空的度规可以写成 FRW 形式：

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)[dr^2/(1-kr^2) + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2],$$

其中 r, θ, ϕ 是共动空间球坐标， t 是时间，宇宙的膨胀由随时间变化的尺度因子 $a(t)$ 描述，用来刻画宇宙的相对大小，假定现在（用下标 0 表示） $a_0 = 1$ ， k 是三维空间曲率。

考虑到一部分读者对广义相对论的知识不熟悉，可以如下理解宇宙的膨胀：在宇宙的早期， a 要比现在小，我们和远距离的星系之间的距离要更近。我们可以把空间想象成随时间变化的网格，每个节点都有一个不随时间变化的数学坐标，称为共动坐标，两个节点之间坐标差称为共动距离，而物理距离为共动距离和尺度因子的乘积，共动距离不变，而物理距离随时间变化。一个更加形象的例子是想象宇宙是一个气球，我们在上面画满了网格，当你吹气球时，网格坐标不变，而物理距离变大了。值得提到的一点，因为物理距离在光子从远处向我们传播时逐渐变大，它的波长也变长了。因此，尺度因子和红移的关系为 $1+z = 1/a$ 。

除了尺度因子及它的演化，另一个用来刻画宇宙的参数为曲率因子 k 。宇宙有三种可能的几何形式：平坦的 ($k=0$)、开放的 ($k<0$)、闭合的 ($k>0$)。我们考虑两个开始时平行的自由粒子，在平坦宇宙中，时空是欧几里德时空，它们始终保持平行，广义相对论将时空几何与物质能量联系起来，对应地，当前平坦宇宙中的能量密度等于一个临界值 $\rho_{\text{crit}} \sim 10^{-29} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。当能量密度超过这个值时，宇宙为闭合的：最初平行的粒子将逐渐会合，这就好比地球上的经线最终会聚于极点。最后，低密度的宇宙对应于开放的时空，最初平行的自由粒子将分开，好比在马鞍上滚落的两颗弹珠。根据现代宇宙学理论和观测两方面的研究，我们有较为充分的理由认为宇宙是接近平坦的。

宇宙的膨胀由 a 随时间的一阶导数和二阶导数决定，它们和物质的联系由弗里德曼方程给出：

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2},$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p),$$

其中， H 为哈勃参量，反映了宇宙的膨胀速度，当前

的值为哈勃常数 $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$, ρ 是物质能量的总和, 包括了重子物质、暗物质、辐射和暗能量, 即 $\rho = \rho_b + \rho_{dm} + \rho_r + \rho_{de}$, 在保持尽可能简单和观测宇宙学的角度, 我们将宇宙学常数的影响等效于暗能量, 否则在弗里德曼方程右边还需要加上 $\Lambda/3$ 项。 p 为总压强。另外我们定义相对密度 $\Omega = \rho/\rho_{\text{crit}}$, 其中临界密度 $\rho_{\text{crit}} = 3H^2/8\pi G$, 在平坦宇宙中总有 $\Sigma \Omega_i = 1$ 。

从弗里德曼方程中可以看出, 宇宙膨胀的加速度要 $\ddot{a}$ 大于零, 必须有物质的状态方程 $\omega = p/\rho < -1/3$ 。而我们已知的物质 (包括暗物质) 的状态方程为 0, 辐射为 1/3, 所以宇宙中暗能量的状态方程必须小于 -1/3 才能满足观测到了加速膨胀现象。自然地, 在宇宙学常数的基础上, 人们容易考虑真空能对应的暗能量状态方程 $\omega_\Lambda = -1$ 。这样的暗能量模型或宇宙学常数模型与天文观测符合得非常好, 并且有着很强的物理动机, 是当前最为广泛接受的形式。

结合能量守恒, 对于任意形式的随红移演化的状态方程形式 $\omega_i(z)$, 它的密度演化为:

$$\rho_i \propto \exp[3 \int_0^z [1 + w_i(z')] d \ln(1+z')].$$

对于恒定的 ω_i ,

$$\rho_i \propto (1+z)^{3(1+\omega_i)}.$$

因此, 物质有 $\rho_m \propto (1+z)^3$, 辐射有 $\rho_r \propto (1+z)^4$, 真空能暗能量有 $\rho_\Lambda = \text{定值}$ 。其他形式的暗能量将在后面的章节介绍给读者。由于物质和辐射随着宇宙的膨胀密度会很快地降低, 而暗能量的密度不变, 宇宙在历史上分别由辐射、物质直到现在的暗能量占据主导地位, 宇宙的未来将趋于完全由暗能量占据。

在宇宙学检验中, 主要的观测手段是测量给定红移对应的距离。这些宇宙学距离通常包含有哈勃膨胀率 $H(z)$ 的信息, 用来了解宇宙的膨胀历史, 并且进一步通过弗里德曼方程来研究暗能量性质的。在弯曲时空下, 这些宇宙学距离的概念与生活中距离的概念有区别也有联系。首先介绍共动距离, 简单起见, 我们只给出平坦宇宙 $k=0$ 时的表达式。光子走零测地线 $ds=0$, 在宇宙还是 $a(t)$ 大小时的光子被现在的我们接收, 这两个事件之间的共动距离为

$$r = \int_{t(a)}^{t_0} \frac{dt'}{a(t')} = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}.$$

它是一个定义的距离, 实际中我们测量的是光度距离和角直径距离。对于光度距离, 首先我们可以想象生活中有一根点亮的蜡烛, 我们知道它的光度 L , 当它离我们平直空间距离 d 增大时, 我们会觉得它的流量 F 下降, 它们之间的关系为 $F = L/4\pi d^2$, 在膨胀的宇宙中, 我们首先考虑在共动坐标下同样有:

$$F = \frac{L(r)}{4\pi r^2(a)}.$$

注意, $L(r)$ 表示的是在共动球壳上流量的总和, 对于真正光源的光度 L , 一方面在膨胀宇宙中, 同样的共动坐标间隔内, 早期宇宙物理距离小, 因此在单位时间内, 光子通过的共动距离大, 即早期共动球壳上单位时间通过光子数多, 数流量差一个尺度因子 a ; 另一方面, 膨胀的宇宙使得单个光子的波长变长, 能量下降为原来的 a 倍。两方面的作用使得:

$$F = \frac{La^2}{4\pi r^2(a)},$$

结合平直空间的认知, 我们定义光度距离:

$$d_L = \frac{r}{a} = (1+z)r.$$

对于角直径距离, 同样地, 我们首先考虑日常生活中一把知道长度 (l) 的尺子, 当它离我们距离 (d) 增大时, 我们观测到尺子两端的角 (θ) 减小, 它们的关系为: $d = l/\theta$ 。在膨胀的宇宙中, 由于早期宇宙比现在小, 实际共动长度为 l/a , 因此 $\theta = (l/a)/r(a)$, 并且定义角直径距离:

$$d_A = ar = \frac{r}{1+z}.$$

三、天文观测

20 世纪末, 人们对超新星有了越来越多的了解, 一方面恒星演化理论日趋完善, 另一方面, 观测上获得了有效的数据。其中, 有两个重大突破促进了发现宇宙加速膨胀。首先, 菲利普 (M. Philips) 在 1993 年对 Ia 型超新星进行了详细研究, 发现它可以成为宇宙学研究中稳定的标准烛光; 其次, 电荷耦合元件 (CCD) 有效地在 4 米左右的望远镜上投入使用, 它的作用是将光学影像转为数字信号, 使得人们能够在大的天空范围内系统地寻找超新星事件。

20 世纪 90 年代中后期，两个独立的超新星团队：超新星宇宙学计划（Supernova Cosmology Project）和高红移超新星搜索（High-z Supernova Search）在这样的两个基础上测量了超新星的哈勃图，他们的红移范围大大的提高了，因此可以更好地研究宇宙的演化史。他们都发现这些遥远的超新星比在减速膨胀宇宙中预期的要暗，相差大约 0.25 星等，表明宇宙在 50 亿年前已经开始加速膨胀了。

在这个重大发现之后，其他的天文观测手段也被提出，进一步确认了宇宙加速膨胀，并且随着精确宇宙学时代的到来，在海量数据的基础上，人们也开始把目光放在了定量研究宇宙演化及暗能量性质上。值得提到的是，从统计测量的角度来说，每种单一的测量手段都会受到自身系统误差的影响，多种手段的联合测量才能给出一个更加可信的结论。接下来，我们将介绍几种宇宙学研究中广泛使用的天文观测方法。

1. Ia 型超新星

在第一部分我们提到过 Ia 型超新星是由白矮星爆炸产生的。白矮星是演化到末期的恒星，主要由碳构成，外层由氢气和氦气覆盖，它的体积小，亮度低，密度高。典型的 Ia 型超新星爆炸需要有一颗白矮星和其伴星组成。白矮星不断地从其伴星吸收质量，在接近钱德拉塞卡质量极限（1.44 个太阳质量），电子简并压无法承受引力，白矮星坍缩引发核聚变，一定程度时，发生剧烈爆炸，产生的辐射可以与整个星系相比。Ia 型超新星的光变曲线最大值对应的绝对光度几乎不变，使得它成为了宇宙学中的标准烛光。实际研究中，人们通过距离模数 μ 来研究宇宙学：

$$\mu = 5\lg d_L - 5 = m - M,$$

其中 m 是视星等，反映了观测到的亮度， M 是绝对星等，即假定把天体放在距离我们 10 秒差距处测得的亮度，反映了它的绝对亮度。它们的差就是距离模数的定义，与光度距离相联系，由之前介绍的知识可以知道，距离模数可以用来研究宇宙学。

2. 宇宙微波背景辐射

1965 年，美国的两位射电专家为了改进卫星通讯，建立了高灵敏度的号角式接收天线系统。在它测量银晕气体射电强度时，他们意外发现了去不掉的背景

噪声，这些噪声随后被证实为宇宙微波背景辐射。宇宙微波背景是充满整个宇宙的电磁辐射，是热大爆炸宇宙学预言的产物，该理论认为宇宙早期约 137 亿年前大爆炸时处于十分均匀的状态，温度极高，物质处于热平衡。随着宇宙膨胀，宇宙慢慢降温，各种粒子相互作用形成新的元素。当粒子之间的散射截面或相互作用概率低于宇宙膨胀速度时，粒子之间可以看成不会互相影响，即退耦合。在大爆炸 30 万年后，光子和电子退耦合开始自由运动，直到现在残留的绝对温度 $\sim 2.7\text{K}$ 的辐射场。

一方面，和热大爆炸模型所期望的一致，微波背景的谱可以被黑体谱很好地描述。另一方面，随着微波背景中存在微小的涨落被 COBE 卫星首次发现，宇宙学研究也进入了精确宇宙学时代，这些温度涨落反映的各向异性的观测能够很好地反映宇宙早期的情况，之后的更高精度的观测如 WMAP 和普朗克卫星获得的数据为我们限制宇宙学参数并且建立一个现代宇宙学模型起到了至关重要的作用。值得提到的是，微波背景自身对直接探测暗能量能力很弱，它反映的是早期宇宙，那时暗能量占宇宙的成分很少。尽管如此，它可以精确测量其他宇宙学参数如曲率，物质密度，并且可以为重子声学振荡提供标准尺，它结合其他手段来测量暗能量。

3. 重子声学振荡

重子声学振荡（BAO）指在宇宙早期光子退耦合前原子合成时期的重子光子气体振荡。一方面，引力产生吸引作用；另一方面，辐射压力产生排斥作用。在两者的影响下，重子光子气体通过汤姆孙散射耦合在一起发生了类似声波的周期性振荡。在光子退耦后，振荡停止，它的最终状态信息留在了微波背景声学峰

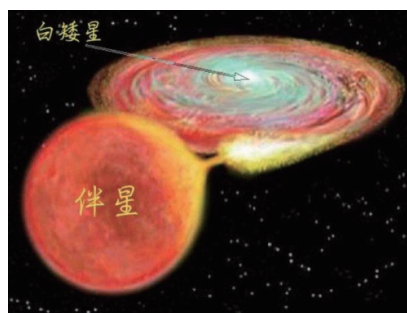


图 2 Ia 型超新星爆发机制图

对应的角尺度上，并且在大尺度结构观测中，在宇宙一定尺度上形成高低密度的起伏结团。BAO 的观测信号由光子振荡的极限距离决定，称为声学视界：

$$s = \int_0^{t_{\text{re}}} c_s(1+z)dt = \int_{z_{\text{re}}}^{\infty} \frac{c_s}{H(z)} dz,$$

其中下标“re”表示原子合成时期（recombination）。 c_s 是声速，由重子和光子能量比决定。相对于超新星的标准烛光，BAO 可以看成是宇宙学中的“标准尺”。WMAP 对宇宙学微波背景辐射的测量和大尺度巡天 SDSS 对大量星系进行采样分析后，都在 ~ 150 Mpc 尺度上探测到了 BAO 的峰值。

标准尺可在视线方向（径向）和垂直于视线方向（横向）体现，分别对应于测量量 $sH(z)$ 和 $r(z)/s$ 。基于标准尺，实际宇宙学研究中用的比较多的包括 AP 测试 $A(z) = (1+z) D_A(z) H(z)/z$ 和距离

$$D_V(z) = \left[\frac{cz(1+z)^2 D_A^2(z)}{H(z)} \right]^{1/3}.$$

同时 BAO 也提供了研究哈勃膨胀率 $H(z)$ 和角直径距离 $D_A(z)$ 的途径。

4. 微分年龄

一般通过测量距离来研究宇宙学的方法中，宇宙学距离是哈勃膨胀率 $H(z)$ 的积分形式，某种程度上也损失了宇宙演化的精细结构信息，而微分年龄方法则是直接测量不同红移处的哈勃膨胀率 $H(z)$ ，提供了另一个研究宇宙学的途径。其基本原理可用如下关系表示：

$$H(z) = -\frac{1}{1+z} \frac{dz}{dt}.$$

即通过测量在一个短的时间间隔内红移的变化来得到哈勃膨胀率。

作为最基本的天体物理研究对象，恒星一直被人们在各个方面研究，它的形成及演化规律已经被人们很好地了解了。通过恒星光谱的观测，人们可以分析出它对应的年龄。恒星年龄的变化可以作为宇宙年龄的变化，而红移则可以直接由光谱得到。然而，在宇宙学距离上，人们很难做到对某颗恒星单独观测，取而代之的是对整个星系进行光谱观测。星系由许多恒星组成，一般情况下，这些恒星来自不同的星族，它们形成的时间不同，因此对于微分年龄方法，

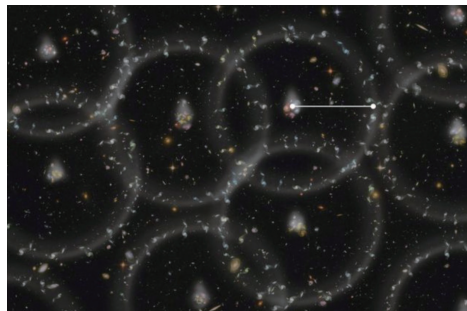


图3 大尺度结构中的 BAO 信号

可以适用的情况是寻找那些具有一致星族的星系，如亮红星系（LRG），它包含的恒星在年龄、化学成分等方面是基本一样的。人们已经在一些巡天中运用这种方法，如 Gemini Deep Deep Survey (GDDS)，VIMOSVLT Deep Survey (VVDS) 和 SDSS 等，同时 Keck 望远镜也正在收集高精度的测光数据。截止到现在，已经有 $\sim 20H(z)$ 数据点在红移 $z \sim 1$ 被得到并运用于宇宙学研究。值得一提的是，用 BAO 方法同样可以得到类似的 $H(z)$ 数据，但是这些数据是在假定了宇宙学模型的基础上得到的，因此在使用它们研究宇宙学时应避免一些循环问题。

5. 强引力透镜

根据广义相对论，光子传播过程中受到引力场影响发生偏转，类似于几何光学的光偏转，成为引力透镜现象。在某些条件下，费马原理允许不止一条光路，我们称之为强引力透镜。我们重点讨论典型的强引力透镜现象之一：遥远的类星体被前景的椭圆星系的引力场影响，到达地球为多像。强引力透镜具有如下几个性质：1. 多像的观测包括像的相对位置，亮度比，到达地球的时间延迟等都与透镜星系的引力势和其导数有关；2. 强引力透镜观测量与源、透镜星系、观测者之间的角直径距离有关，即和宇宙时空几何联系；3. 强引力透镜过程中表面亮度守恒，使得背景源天体亮度放大。这样的性质使得强引力透镜被主要用于天体物理三个方面研究：首先，在离星系中心千秒差距（kpc）或更小尺度内，重子和暗物质相互作用，可以研究其质量分布；其次，通过角直径距离研究宇宙几何即暗能量性质；最后，作为“宇宙学望远镜”研究微弱的源，如黑洞和活动核。

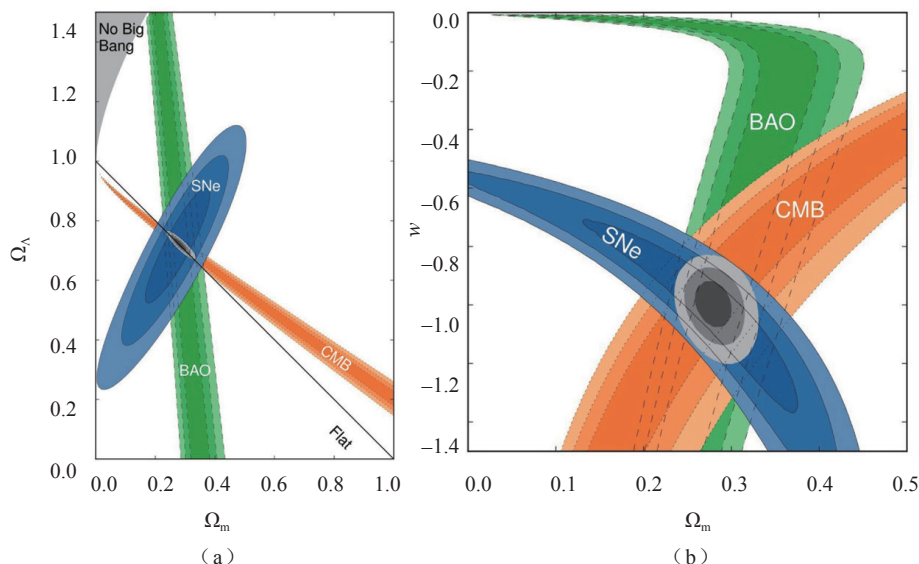


图4 超新星 SNe, 宇宙微波背景 CMB 和重子声学振荡 BAO 对宇宙学参数的限制图, 暗能量占当前宇宙成分的大约 68%。(a) 图是曲率自由的 Λ CDM 模型, 限制结果说明了宇宙是趋于平坦的, (b) 图是平坦宇宙 w CDM 模型, 说明暗能量状态方程接近 -1

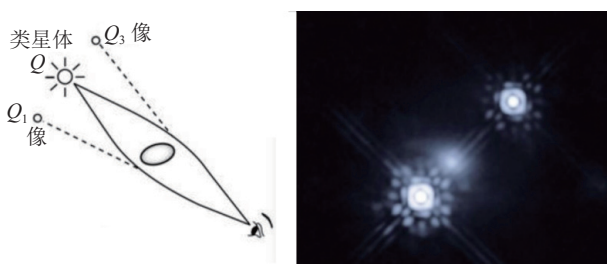


图5 强引力透镜示意图。遥远的类星体被前景星系透镜化变成了观测到的两个像

我们将介绍三种用强引力透镜研究宇宙加速膨胀的方法。第一种方法通过观测像的分离角 θ 和椭圆星系中心弥散速度 σ (从光谱数据得到) 来得到角直径距离比 d_{ls}/d_s , d_{ls} , d_s 分别为透镜到源和地球到源的角直径距离。对于椭圆星系, 多方面证据表明它的质量分布可以用奇异等温球模型 (SIS) 来很好的描述。这个模型假设理想气体构成椭圆星系, 受到引力势限制成团, 满足热力学和流体力学平衡, SIS 质量密度分布为:

$$\rho = \frac{\sigma^2}{2\pi G r^2}.$$

θ , σ , d_{ls}/d_s 有如下很好的近似关系:

$$\theta \approx 4\pi \left(\frac{\sigma}{c} \right)^2 \frac{d_{ls}}{d_s}.$$

随着越来越多强引力透镜系统的发现, 这种方法会有

越来越多的数据来研究宇宙学, 角分离和弥散速度都是相对容易测量的量。

第二种方法是通过不同像到达地球的时间差, 又称时间延迟来研究宇宙。由于不同像经历的空间路径和引力场不同, 到达地球的时间延迟 $\Delta t_{AB} = t_A - t_B$:

$$\Delta t_{AB} = \frac{D_{\Delta t}}{c} \left[\frac{(\theta_A - \beta)^2}{2} - \phi_A - \frac{(\theta_B - \beta)^2}{2} + \phi_B \right]$$

其中, θ_A , θ_B 为观测到的两个像位置, β 为源的位置, ϕ_A , ϕ_B 为两像对应的引力透镜势, 与透镜体质量分布联系。 $D_{\Delta t} = (1+z_l)d_l d_s/d_{ls}$, 为“时间延迟距离”, 是三个角直径距离的组合, 我们就是通过它来研究宇宙学的。

时间延迟方法在技术上的困难在于很难得到精确而准确的时间延迟值。对于类星体-椭圆星系系统, 人们通过测量不同像的光变曲线的相对移动来得到时间延迟。而在实际观测中, 光变曲线并不是数学上完美的曲线, 望远镜每隔一段时间对天空拍一张照片, 对应于曲线上分立的点。获得一对高质量的时间延迟光变曲线需要对像进行长达数年的监测, 光变曲线一方面受到观测条件的制约 (点的疏密程度, 观测误差的影响), 另一方面还受到来自椭圆星系中恒星运动带来的微引力透镜效应影响, 即恒星形成了一个随时间变化的透镜子系统, 对光变的强度有影响。由于不

同像处在的局部环境不同，这种微引力透镜的影响还是独立的，带来了提取时间延迟的阻碍。鉴于这样的现状，一方面，人们在努力提高观测质量；另一方面也在积极研究有效的提取光变曲线时间延迟的算法。未来大型综合巡天望远镜（LSST）将对数千个强引力透镜系统进行长达十年的监测，相信这样为时间延迟宇宙学带来新的契机。

第三种方法是利用椭圆星系的统计性质，通过大量强引力透镜系统来研究宇宙学。在对椭圆星系的研究中发现，它的一些整体性质如光度，有效半径，中心弥散速度等是符合一些规律的，即人们了解其分布函数。在缺少某些观测数据如中心弥散速度时，我们在分布函数的基础上收集大量的、完备的透镜样本分离角也可以到达对宇宙学限制的效果。

6. 其他方法

随着近二十年观测宇宙学的发展，越来越多用于研究宇宙演化的方法被不断提出来，下面再介绍几种：

- 弱引力透镜：不同于强引力透镜产生的多像，大多数情况下，遥远的星系会被宇宙的非均匀结构引力场影响，使得观测到的这些星系形状发生形变。这些基于统计上的形变可以用来测量暗物质的分布及演化，继而可以研究暗能量对于结构形成的影响。

- 伽玛暴：来自宇宙中剧烈的爆炸，伽玛射线强度在短时间突增随后又迅速减弱。分为短暴：持续毫秒到一两秒，产生极高的能量；长暴：持续两秒到数十秒，发出较少的伽玛射线。随着对伽玛暴物理机制的研究，它也作为标准烛光被用于宇宙学研究中，但是需要用超新星进行定标，伽玛暴宇宙学还需要人们进一步完善。

- 星系团：宇宙中最大的维里化天体，是很好的研究天体物理和宇宙学对象。在冷暗物质 CDM 模型下，星系团尺度暗物质晕的数密度作为红移的函数可以有 N 体模拟给出，和大尺度巡天的数据对比可以给出宇宙膨胀历史。同时，单独的星系团基于 SZE 效应和 X 射线表面亮度的测量也能给出角直径距离的信息。

四、宇宙加速膨胀理论模型

自从宇宙加速膨胀发现以来，人们在理论上尝试了各种可能性来解释天文观测，提出了各种宇宙学模

型。重新加入宇宙学常数的爱因斯坦的场方程为：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu},$$

Λ 为宇宙学常数。要想满足加速膨胀，要么在方程左边修改引力，要么在右边修改物质能量组成。因此这些模型主要分为两种：1. 在一定物理基础上提出了暗能量模型；2. 对广义相对论进行修改的引力模型。除此之外在唯象学基础上也提出了许多实用的纯粹参数化模型。宇宙学研究的困难在于目前的观测精度还不足以很好地将理论限制在一个很小的范围内，因此暗能量理论上存在着一个很大的可能性区间，甚至一些玩具模型都可以很好地符合观测，当然这对宇宙学家来说也是新的机遇与挑战。对于当前暗能量的研究，一方面人们在理论上试图寻找一个合理自洽的解释；另一方面，在观测上不断提升的精确度可缩小理论上的可能性，类似于历史上黑体辐射曲线的研究。

1. 真空能

真空能和宇宙学常数联系（本文讨论中都用 Λ 表示，请读者分辨其联系和区别），是最为自然、简单并符合观测的理论解释，同时它也是最令人困惑的暗能量候选体。真空的定义为量子场的基态，是能量最低状态而并非零能量。由于基态的洛伦兹不变性，要求真空能的能动张量正比于度规张量， $T_{\Lambda}^{\mu\nu} = \rho_{\Lambda} g^{\mu\nu}$ ，根据能动张量 T_{ν}^{μ} 的物理意义，即对角元分别对应能量密度和负压强，有 $p_{\Lambda} = -\rho_{\Lambda}$ 。这个状态方程表明真空能压强为负，大小等于能量密度，并且不随时间变化，同时在数学上它等价于宇宙学常数。

宇宙学常数模型在观测上取得了巨大的成功，而在理论上却存在着一些问题。首先，根据量子场论，真空由量子场组成，每种量子场的基态对应的零点能为 $\hbar\omega/2$ ，进一步可以计算出真空能密度为：

$$\rho_{\Lambda} = \frac{1}{2} \sum g_i \int_0^{\infty} \sqrt{k^2 + m^2} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \propto \sum \frac{g_i k_c^4}{16\pi^2}.$$

其中， g_i 为场的自由度，对玻色子为正，费米子为负。求和符号对应于所有的量子场。由于在计算过程中积分发散，人为引入了截断 k_c ，认为当积分上限超过 k_c 时，场论失效。通常认为普朗克能量 $E_p \sim 10^{19} \text{GeV}$ 对应于 k_c ，即 $k_c = E_p \hbar^{-1}$ 。相应的真空能密度量级为

$$\rho_{\Lambda} \sim 10^{91} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3},$$

比天文观测到的值大了 120 个量级！一种解释认为，爱因斯坦场方程中本身存在一个经典的、裸的“宇宙学常数”来和真空能（请分辨两者区别）中和。然而，宇宙中存在如此繁多的粒子，它们的量子场和之间的相互作用都对真空能提供了贡献，很难相信这些总的贡献和一个经典的贡献相似到这样的精度。尽管人们也提出了如超对称（SUSY），人择原理等等来解释，但普遍认为这一问题并没有很好地解决，这也就是著名的宇宙学常数问题。

暂且不管真空能大小的问题，另一方面，宇宙学常数模型中存在“巧合性问题”。前面章节提到了物质和辐射的密度随尺度因子增大而快速减小： $\rho_m \propto a^{-3}$ ， $\rho_r \propto a^{-4}$ ，而宇宙学常数 ρ_{Λ} = 定值，相对密度为

$$\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_m} \propto a^3, \quad \frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_r} \propto a^4,$$

表明宇宙早期宇宙学常数可以被忽略，晚期完全占据宇宙。进一步计算表明早期很长一段时间有 $\Omega_{\Lambda} \ll 0$ ，晚期很长一段时间有 $\Omega_{\Lambda} \ll 1$ ，这两个阶段之间只有一个非常短的时段，使得 Ω_{Λ} 很快地转变。目前的天文观测表明当前宇宙 $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$ ，即我们处于这个很短的时段中，为什么这么巧合？

针对这些问题以及其他宇宙学疑难，人们也提出了其他的宇宙学模型，接下来我们将列举其中的一些。

2. 标量场

真空能不随时间空间变化，人们引入标量场用以说明暗能量演化，可以缓解真空能模型中的问题。对于只随时间演化的标量场 $\phi(t)$ 来说，拉格朗日密度 $\mathcal{L} = \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_{\mu} \phi \partial_{\nu} \phi - V(\phi)$ ，对应于理想流体有：

$$\rho = \dot{\phi}^2/2 + V(\phi), \quad p = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi)$$

式中的 $\dot{\phi}^2/2$ ， $V(\phi)$ 分别为动能和势能， ϕ 的演化方程由运动方程决定：

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0,$$

标量场暗能量的状态方程为

$$\omega = \frac{-1 + \dot{\phi}^2/2V}{1 + \dot{\phi}^2/2V}.$$

因此不同演化形式的标量场可以使得状态方程在 -1 和 +1 之间，一方面满足宇宙晚期暗能量为主，另一

方面暗能量的动力学性也可以缓解巧合性问题。标量场演化主要形式包括“冻结”： ϕ 的演化十分缓慢；“解冻”：早期 ϕ 被“冻住了”，表现得像真空能，当膨胀率低于 $H^2 = V''(\phi)$ ，开始演化使得 ω 远离 -1。

标量场模型自身也存在着问题，比如它和暴涨的关系、是否允许结团，对应场的有效质量过小，等等。

3. 修改引力

一些理论认为，宇宙加速膨胀的起因并不是暗能量，而是广义相对论在宇宙学尺度需要被修改。代表性的修改引力为 $f(R)$ 引力。该引力对应的希尔伯特-爱因斯坦作用量为

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa} f(R) + \mathcal{L}_m \right],$$

$\kappa = 8\pi G$ ， g 为度规， $\mathcal{L}_m$ 为物质对应的拉格朗日项。 $f(R)$ 引力把广义相对论中原有的里奇标量 R 项换成了关于 R 的函数 $f(R)$ 的形式来实现宇宙加速膨胀，如 Palatini 形式 $f(R) = R - \alpha(-R)^{\beta}$ 。在假设宇宙均匀平坦各向异性下， $f(R)$ 引力对应的弗里德曼方程：

$$H^2(R) = \frac{1}{6f'} \frac{Rf' - 3f}{\left(1 - \frac{3}{2} \frac{f''(Rf' - 2f)}{f'(Rf' - f')}\right)^2},$$

撇号代表对 R 的导数。在 Palatini 形式中，适当选取非零的参数 α ， β 将可以导致宇宙加速膨胀，而当 $\alpha=0$ ， $\beta=0$ 时， $f(R)$ 理论回归到广义相对论 ($f(R) = R$) 的结论： $H^2 = \kappa\rho_m/3$ 。

除了 $f(R)$ 引力，还有一些修改引力，如和时空扰率联系 $f(T)$ 引力，与五维宇宙中的四维膜联系的 DGP 引力等也可以给出宇宙加速解。当然随着观测数据的增多，一些理论如 DGP 引力也慢慢地被人们排除。

4. 参数化及重构

从观测的角度，一些暗能量的参数化形式被提出来，旨在探讨暗能量的性质并且检验宇宙学常数模型的成立。其中著名的两种形式如下：首先，对于宇宙学常数模型，暗能量的状态方程为 -1，我们可以考虑暗能量作为独立的一种能量形式有任意的状态方程 $p_{de} = \omega\rho_{de}$ 。通过天文观测对 ω 的数值进行参数限制，如果结果与 -1 偏离较大，一方面说明宇宙学常数模型存在问题，另一方面也可以通过它的数值来研究暗能

量的性质。其次，为了探讨暗能量是否存在演化，将状态方程参数化为 CPL 形式：

$$\omega(a) = \omega_0 + (1-a)\omega_a = \omega_0 + \frac{z}{1+z} \omega_a,$$

其中 ω_a 代表了演化项。除了这两种形式外，还存在各式各样的参数化带着不同目的来研究暗能量问题。

随着越来越多的高质量观测数据的获得，人们已经不满足用少量参数来解析的参数化暗能量状态方程了。通过多个在不同红移处得到的距离红移关系或 $H(z)$ 数据，人们可以直接了解暗能量状态方程作为红移的函数 $\omega(z)$ 。例如共动距离和状态方程的关系为

$$1+\omega(z) = \frac{1+z}{3} \frac{3H_0^2 \Omega_m (1+z)^2 + 2(d^2 r / dz^2) / (dr/dz)^3}{H_0^2 \Omega_m (1+z)^3 - (dr/dz)^2}$$

平坦宇宙中哈勃参量 $H(z)$ 和状态方程的关系为：

$$\omega(z) = \frac{3H^2 - 2(1+z)HH'}{3H_0^2 \Omega_m (1+z)^3 - 3H^2},$$

撇号表示对红移导数。

通过直接对暗能量在不同红移处的性质直接研究，可以更好地检验理论模型并了解宇宙演化历史。在未来更多的数据到来时，这种方法将会被更加广泛地运用。这种方法能够有效地从观测角度给予理论方向。

5. 其他模型

除了以上介绍的几种模型外，还有许多模型在不断被提出来，下面再介绍几种具有竞争力的机制：

- 全息原理：一个区域内的能量不能超过同样大小黑洞的质量，由此导出暗能量密度反比于宇宙学尺度的平方，而宇宙学尺度可以选取将来视界、宇宙年龄、里奇半径来实现。全息暗能量可以解决一些宇宙学常数模型中的疑难问题等，但每种宇宙学尺度的选取中都或多或少存在如因果性或者是与观测不太相符的问题。

- 相互作用暗能量：现代宇宙学中另一项重大的问题是暗物质问题，人们对暗能量和暗物质的观测都来自引力，不排除存在暗物质和暗能量相互作用的情形，并且如果在宇宙演化过程中，能量从暗能量转向暗物质，巧合性问题可以被解决。

- Chaplygin 气体：为研究空气动力学时提出的一种流体，状态方程为 $p = -A/\rho$ ，被修改为 $p = -A/\rho^a$ 用于宇宙学模型，为暗物质暗能量统一模型，早期表现

为物质，晚期表现为暗能量。

- 不均匀宇宙模型：例如 LTB 模型认为我们处在宇宙中的一个特殊位置，宇宙像洋葱一样片层分布，我们在洋葱的中心，这样可以等效地观测到加速膨胀，既不需要引入暗能量也不需要为广义相对论进行修改。

五、总结与展望

20 世纪末通过 Ia 型超新星的研究发现了宇宙加速膨胀，它是现代宇宙学最重要的成果之一，深刻地改变了人们对于宇宙的认识。近十几年的更高精度，更多手段的宇宙学观测进一步证实了它。纵观科学史，重大的发现总伴随着科学的革命。宇宙加速膨胀的背后蕴含着更值得人们研究的东西，比如作为宇宙中主要的能量存在形式暗能量的性质及起源，进一步地，它是否在研究量子引力及物理定律的大统一中起到关键性的作用？

本文从基础出发，对宇宙加速膨胀进行了一个简单的综述。在理论上给出了当前最主流的解释，即和宇宙学常数联系的真空能压强为负，是驱动宇宙加速膨胀的机制，但这个模型中也存在一些问题，同时，也介绍了一些有竞争力的用来解释宇宙加速膨胀的机制；在观测上给出了当前的一些可以用来研究宇宙演化历史的测量手段，主要的思路是测量宇宙学距离和红移的关系，通过多种高精度的天文观测的联合限制，可以有效地给出一个可信的宇宙学图景和暗能量的演化模型。

暗能量的理论问题涉及到物理学的大统一，在理论研究中不能仅仅着眼于宇宙加速膨胀这一个方面，要站在更加基础的角度看待它。重大的理论进展往往是时代的产物，是人们积累了一定的观测资料后的结果。在一个短期的未来里，对暗能量的研究主要还是集中在观测方面。首先，最先进的望远镜如普朗克卫星、詹姆斯韦伯空间望远镜、LSST 等会被投入使用，相关的暗能量研究项目会获取更多更精确的数据；其次，新的观测宇宙的手段也被提出，如果不久的将来，LIGO 望远镜或爱因斯坦望远镜能够探测到引力波，它可以为我们的观测宇宙学打开另一扇窗户；最后，计算科学的发展如我国的天河二号超级计算机可以用来处理大数据时代的观测。