

# 宇宙加速膨胀:2011 年诺贝尔物理学奖述评

张新民<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

北京时间 2011 年 10 月 4 日,瑞典皇家科学院宣布 2011 年诺贝尔物理学奖授予美国科学家 Saul Perlmutter、美国—澳大利亚科学家 Brian P. Schmidt 和美国科学家 Adam G. Riess (见图 1),以表彰他们通过对遥远的超新星的观测发现了宇宙的加速膨胀<sup>[1,2]</sup>. Saul Perlmutter 现任美国加州大学伯克利分校教授,1959 年出生于美国伊利诺伊州,1986 年从加州大学伯克利分校获得博士学位,1988 年,他在劳伦斯伯克利实验室(Lawrence Berkeley Laboratory)建立了“Supernova Cosmology Project”(SCP) 研究组,致力于超新星的观测研究; Brian P. Schmidt,澳大利亚国立大学教授,于 1967 年出生在美国蒙大拿州,1993 年从美国哈佛大学获得博士学位,1994 年, Schmidt 和他的同事一起建立了另一个超新星观测的“High-Z Supernova Search Team”(HZT)研究组; Adam G. Riess 现任约翰霍普金斯大学教授,1969 年出生于美国华盛顿,1996 年从哈佛大学获得博士学位,为 HZT 团队成员,在其中起到了至关重要的作用。



Photo: Axel Zambalich, Copyright © Nobel Media AB  
Saul Perlmutter  
Photo: Belinda Prattin, Australian National University  
Brian P. Schmidt  
Photo: HomeWood Photography  
Adam G. Riess

图 1 2011 年诺贝尔物理学奖得主(图片来源:诺贝尔奖官方网站 <http://www.nobelprize.org/>)

1998 年,由 Saul Perlmutter 领导的 SCP 研究组和由 Brian P. Schmidt 以及 Adam G. Riess 领导的 HZT 研究组的科学家通过对 50 多颗遥远的超新星的观测研究,发现了宇宙在加速膨胀,这一结果震惊了世界,当年被美国《科学》(Science)杂志评为世界十大科技进展之首. 2006 年,三位科学家为此获得了邵逸夫奖,今年,又摘得了诺贝尔物理学奖的桂冠. 不可质疑,这三位科学家的发现是革命性的,给世界展示了一幅全新的暗能量主导的宇宙图像。

这一发现对物理学有着极其深远的影响,对粒子物理和宇宙学提出了一些重大而极其严峻的新挑战. 事实上,自 1998 年以来,针对宇宙加速膨胀和暗能量的研究一直是国内外物理和天文学界研究的热点课题. 今年的诺贝尔物理学奖是对这一研究的一个充分的肯定. 那么,宇宙加速膨胀到底意指什么? 为什么意义如此重大? 驱使宇宙加速膨胀的物理机制是什么? 本文将简要地介绍这三位科学家工作的基本情况并围绕以上的几个问题,介绍这一领域自 1998 年以来的研究状况和发展前景。

在介绍加速膨胀之前,我们先简要地回顾一下膨胀宇宙的发现历史. 1929 年,美国天文学家哈勃(Edwin Hubble)在对邻近 24 个星系的观测数据分析后,发现大多数星系的光谱出现红移现象. 类似于多普勒效应,红移表明被观测天体在逐渐远离观测者. 哈勃还发现,天体退行速度  $v$  与它们离观测者的距离  $D$  成正比,即  $v = H_0 D$ . 这就是著名的哈勃定律,其系数  $H_0$  被称作哈勃常数. 哈勃发现的这种普遍的宇宙学红移实际上是一种时空膨胀的效应,反映了整个宇宙处于膨胀状态之中,从而揭开了大爆炸宇宙学的序幕。

哈勃的观测局限于低红移的天体,而  $H_0$  反映的是宇宙在现时刻的膨胀速率. 如果想知道宇宙在过去不同时刻的膨胀率,并确定宇宙的膨胀是加速还是减速,就需要测量更遥远天体的距离和红移的关系. 天体的红移是可以通过其光谱直接测量的,但是要测量天体的距离却很不容易. 天文学上一种常用的测距方法是测量天体的光度距离,即

$$d_L \equiv \left(\frac{\mathcal{L}}{4\pi\mathcal{F}}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

这里  $\mathcal{L}$  表示天体的绝对光度,  $\mathcal{F}$  表示视亮度,即直接观测到的亮度. 它们又分别和天体的视星等  $m$  以及绝对星等  $M$  相联系,

$$m(z) - M = 25 + 5\log_{10}\left[\frac{d_L(z)}{1\text{Mpc}}\right]. \quad (2)$$

2011-12-01 收到

<sup>†</sup> Email: xzmzhang@ihep.ac.cn

其中  $1\text{Mpc}=3.2615\times 10^6$  光年. 如果事先知道了天体的绝对光度, 我们就可以通过测量它的视亮度来定出它的距离. 因此在距离的测量过程中, 要选取那些具有确定的绝对光度的天体作为观测对象, 这类天体被称作“标准烛光”. 通过测量不同红移处标准烛光的视亮度, 并画出视亮度与红移(或者视星等与红移)的关系, 即图 2 所示的哈勃图, 人们就可以用它来确定宇宙膨胀率与时间的依赖关系. 幸运的是, 宇宙中确实存在着标准烛光. 早期有名的标准成光是造父变星, 它的光度与其光度变化周期之间存在着确定的关系. 通过观测它的光度变化周期就可以计算出它的真实光度. 在哈勃的研究中就曾使用了造父变星的标准烛光性质.

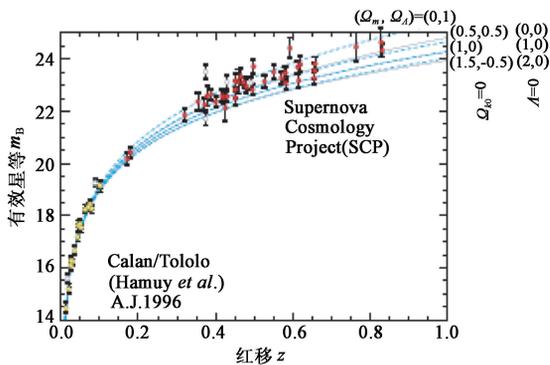


图 2 1998 年 SCP 研究组观测得到的哈勃图. 取自文献[2]

但是为了观测更远的距离, 如几十亿光年的量级, 造父变星已经无能为力, 因为其亮度太小. 为了使宇宙的标杆向更高红移处延伸, 人们需要寻找更亮的标准烛光. Ia 型超新星就是这样一类合适的标准烛光, 它爆发时非常明亮, 在短短几个星期之内, 其亮度可以与整个星系相比拟, 因此在很遥远的距离上都可以观测到. 一般认为中、小质量的恒星在燃尽氢和氦等核区燃料后, 会变成致密的白矮星. 如果白矮星周围有一个伴星, 白矮星就会吸积其伴星物质. 当吸积到一定程度使其质量达到钱德拉塞卡极限后就会产生核爆炸, 形成 Ia 型超新星. 因为白矮星发生超新星爆发时其质量基本上都接近钱德拉塞卡质量上限, 所以产生的 Ia 型超新星具有非常接近的最大光强和相似的亮度变化曲线.

Ia 型超新星作为标准烛光自 20 世纪 80 年代中期就被提出来了. 但是超新星爆发是罕见的天文现象, 而且其爆发过程很短暂, 使得利用 Ia 型超新星研究宇宙演化项目进展一度非常缓慢. 但是, 经过多年不懈的努力, Perlmutter 领导的 SCP 研究组和 Schmidt, Riess 领导的 HZT 研究组的科学家们找到了五十多颗高红移的超新星样本, 而且通过对这

些样本的分析, 两个独立的研究组得到了一致的结论: 观测到的高红移超新星亮度比一个通常物质为主的宇宙学模型所预言的要暗(见图 2), 现今宇宙的膨胀在加速而不是减速. 1998 年, 这两个研究组几乎同时公布了他们的这一新发现. 笔者清晰地记得, 这一结果当时轰动了整个世界. 在国内, 中国科学院高能物理研究所、理论物理研究所、国家天文台、北京大学等单位的物理学和天文学家专门组织了一个会议, 对此进行了研讨.

宇宙加速膨胀意指什么呢? 爱因斯坦的广义相对论告诉我们, 时空的性质是由处于其中的物质的性质决定的. 对于一个膨胀的宇宙来说, 通常我们熟悉的物质如辐射、重子物质和暗物质, 它们都只会让宇宙的膨胀速率降下来而不会加速. 那么, 三位科学家发现的宇宙加速膨胀意味着什么呢? 由爱因斯坦场方程:

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

我们可以看出, 要使宇宙膨胀加速, 即宇宙标度因子  $a$  对时间的二阶导数  $\ddot{a} > 0$ , 宇宙中总的压强必须为负, 并且满足  $P < -\rho/3$ , 即今天的宇宙是由一种具有很强负压的物质所主导. 这是一种全新的物质形态, 在文献中, 这种神秘的负压物质被称之为暗能量. 一般而言, 暗能量的性质可由其状态方程参数  $w$  来描述, 它定义为暗能量的压强与能量密度之比, 即  $w = P/\rho$ .

最简单的暗能量模型是爱因斯坦于 1917 年为了得到静态宇宙而引进的宇宙学常数  $\Lambda$ , 其状态方程  $w = -1$ . 为了进一步定量地说明 1998 年 Perlmutter 和 Schmidt, Riess 三位科学家的发现与暗能量的关系, 我们下面给出在一个包含宇宙学常数的宇宙中, 光度距离与红移的关系:

$$d_L = \frac{1+z}{\sqrt{|k|}} \sin K \left[ \frac{\sqrt{|k|}}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \right], \quad (4)$$

其中

$$E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0} = [\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{k0}(1+z)^2 + \Omega_{\Lambda 0}]^{1/2}. \quad (5)$$

这里  $\Omega_{r0} = 8\pi G\rho_{r0}/3H_0^2$  对应于今天各个物质能量密度在整个宇宙中所占的比例, 并满足条件  $\Omega_{m0} + \Omega_{r0} + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{k0} = 1$ . 其中下标  $m, r, k, \Lambda$  分别表示物质、辐射、曲率和宇宙学常数的贡献. 这里我们引进了函数  $\sin K[\sqrt{|k|}x]$ . 它表示对于正曲率的宇宙来说,  $k > 0$ ,  $\sin K[\sqrt{|k|}x] = \sin[\sqrt{|k|}x]$ ; 对于  $k < 0$  的负曲率宇宙,  $\sin K[\sqrt{|k|}x] = \sinh[\sqrt{|k|}x]$ ; 而对于平坦的宇宙  $k = 0$ ,  $\sin K[\sqrt{|k|}x] = \sqrt{|k|}x$ . 有了公式

(4),通过超新星测出来的距离—红移关系,我们就可以用  $\Omega_{10}$  等参数去拟合观测数据,从而确定各种物质成分的比例.图 3 显示的是 1998 年 Perlmutter 领导的 SCP 研究组给出的这种拟合的结果.从图中可以看出,当时超新星的观测数据明显地支持一个正的宇宙学常数的存在.

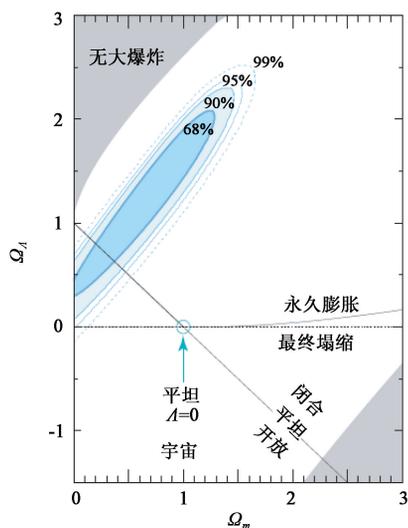


图 3 1998 年 SCP 研究组的数据拟合以 99% 的置信度排除了  $\Omega_{\Lambda} \leq 0$  的情形(取自文献[2])

自 1998 年 Perlmutter, Schmidt 和 Riess 公布了他们的发现以来,宇宙加速膨胀和暗能量的存在得到了各种天文观测和实验的进一步证实.首先是超新星的样本增大了很多,大大增强了这一重大发现的置信度.图 4 所示的是目前 580 颗超新星样本 Union2.1 对宇宙学常数拟合出的结果(见标有 SNe 字样的区间).与图 3 相比,可以看出,的确置信度增大了很多.另外,对于宇宙微波背景辐射(CMB)温度涨落及其极化的精确测量,大尺度结构(LSS)巡天观测都有力地证实了宇宙加速膨胀和暗能量的存在(见图 4 标有 CMB 和 BAO 字样的区间).从定量上看,通过整体拟合去年威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)7 年的积累观测数据并联合其他天文观测,给出暗能量在今天宇宙中所占的组分为  $\Omega_{\Lambda} = 0.725 \pm 0.0016$  (68% 的置信区间)<sup>[4]</sup>.另外,支持宇宙加速膨胀和暗能量存在的天文观测目前还有: CMB 和大尺度结构角关联所隐含的宇宙晚期的积分 Sachs—Wolfe 效应,引力透镜和星系团等.

值得指出的是,虽然宇宙加速膨胀的直接证据来自于超新星,但笔者认为,CMB 和 LSS 更为重要.记得 1998 年 Perlmutter, Schmidt 和 Riess 刚公布了他们的发现以后,理论家曾试图构造一种理论模型,认为超新星变暗并非宇宙加速膨胀的缘故,而

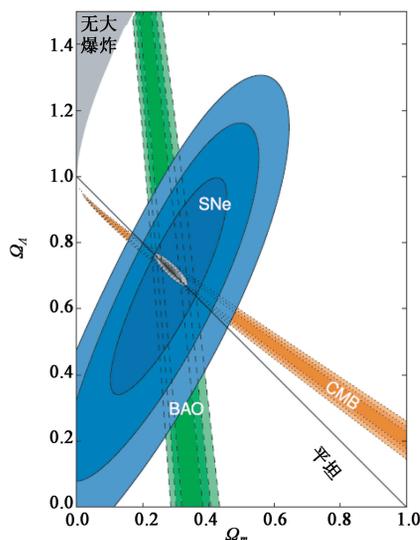


图 4 截至 2011 年,超新星(UNION2.1),宇宙微波背景辐射(WMAP7)和大尺度结构(SDSS DR7)观测对暗能量的限制.取自文献[3]

是存在着一种看不见的类似于轴子的粒子,超新星发出的光子在宇宙空间传播时,在磁场的作用下转换成了这种新粒子,但望远镜看不到.不过,这种理论无法解释 CMB 和 LSS 的观测.所以,宇宙加速膨胀的证实是各种天文观测的联合结果.但是,诺贝尔奖只发给“第一次”,但是笔者认为,正是过去的十余年的精确宇宙学的发展才成就了今年的诺贝尔物理学奖.

的确,自 1998 年三位科学家发现宇宙加速膨胀,揭示暗能量的存在以来,宇宙学的研究进展是迅速的.例如:2000 年 BOOMERANG 和 MAXIMA 气球实验对 CMB 温度功率谱第一峰位置的测量,揭示了宇宙是平坦的;2002 年 DASI 第一次发现了 CMB 的极化;特别是 2003 年以来,WMAP 对 CMB 的精确测量,斯隆数字巡天(SDSS)大尺度结构(LSS)的观测以及更大样本的超新星(SN)观测等,对宇宙学参数进行了精确的测量,使宇宙学的研究步入了辉煌的精确定义时代.这些发展使人们对宇宙有了全新的认识,同时对物理学提出了一些重大的挑战.从粒子物理学研究物质基本结构的观点出发,我们知道普通的物质是由分子、原子构成的.然而分子、原子不是最基本的,目前已知的粒子是粒子物理标准模型所描述的夸克和轻子以及传递相互作用的规范玻色子.但是,Perlmutter, Schmidt 和 Riess 三位科学家的工作以及其他的天文观测告诉我们,这些普通物质只占 4%,而 96% 是暗物质和暗能量.暗物质、暗能量问题对粒子物理学提出了重大的挑战.寻找暗物质粒子,研究暗能量的物理本质,探索宇宙起源及演化的奥秘,并结合粒子物理和宇

宙学的研究,已经成为 21 世纪天文学和物理学发展的一个重要趋势。

上面谈到了宇宙学常数可以作为暗能量。值得指出,在当今宇宙学研究中,宇宙学常数有更深一层的意义,它包含真空能。在量子场论中,“真空”不是“空”的。根据协变性要求,真空的能量-动量张量正比于度规张量,等效于爱因斯坦引进的宇宙学常数。在实验测量中,二者是不可区分的。这种能量在日常生活和科学实验中感觉不到,但却支配着宇宙的演化,驱动宇宙的加速膨胀。但是,目前量子场论的理论预言值远远大于观测值。如果认为爱因斯坦的广义相对论和粒子物理的标准模型在普朗克标度以下都是有效的,理论计算的真空能比观测值大 120 个数量级。这一理论与实验的冲突(即宇宙学常数问题)是对当代物理学的一大挑战。

另外,宇宙学常数作为暗能量还有一个巧合性问题。我们知道,目前的观测给出,今天的真空能量密度与物质的能量密度处于同一量级,但是宇宙学常数和物质有着截然不同的演化行为,那么为什么恰巧在今天二者差不多呢?

动力学暗能量模型可以解决或缓解宇宙学常数作为暗能量的巧合性问题。在过去的十余年间,人们提出了大量的理论模型。从唯象的角度考虑,这些动力学暗能量模型可以通过它预言的状态方程  $w = P/\rho$  的演化行为来分类,例如精质(Quintessence)模型具有  $w > -1$  的特性,而幽灵(Phantom)给出  $w < -1$ ,精灵(Quintom)模型却预言了  $w$  在宇宙演化的过程中能穿越  $w = -1$ 。

一般来说,动力学暗能量模型除了用来解释宇宙的加速膨胀,它还不同于宇宙学常数,会带来一系列有趣的物理现象,以此提供更多的手段来探测暗能量。下面仅举几个例子:(1)暗能量场  $\phi$  与电磁场的相互作用  $\phi F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$  (其中  $F_{\mu\nu}$  是电磁场张量)将会导致精细结构常数的改变;(2)2003 年,在中国科学家和美国科学家分别提出的中微子暗能量模型中,中微子质量不是一个常数,在宇宙演化过程中将发生变化;而且,中微子在暗能量“以太”场中传播时,将导致 Lorentz 对称性的破坏,给出中微子超光速的现象。这样,通过研究中微子可以探测暗能量;(3)动力学暗能量场导致的宇宙学 CPT(电荷-宇称-时间反演)对称性的破坏将给 CMB 极化带来新的特征。这一点是近年来国际上 CMB 理论和实验研究的一个新课题,并且在这一领域中,中国科学家做出了重要的贡献。

暗能量的物理本质还决定着宇宙的命运。如果加速膨胀是由真空能引起的,那么宇宙将永远延续这种加速膨胀的状态。宇宙中的物质和能量将变得越来越稀薄,星系之间互相远离的速度将变得非常快,新的结构不可能再形成。如果导致当今宇宙加速膨胀的暗能量是动力学的,那么宇宙的未来将由暗能量场的动力学决定,有可能会永远加速膨胀下去,也有可能重新进入减速膨胀的状态,甚至可能收缩,特别是在精灵暗能量框架下,宇宙将有可能是振荡的。

在过去的十余年间,有关暗能量理论的探讨十分积极,但是认识暗能量的物理本质,实验检验更为重要。如上面所讲,暗能量模型可以通过其状态方程进行分类,由此可见,利用天文数据来确定暗能量状态方程显得至关重要。理论上,确定状态方程的演化行为要求确定每一红移点的状态方程的值。实际上,这是几乎不可能的。所以,人们通常首先将状态方程参数化,以此来达到通过只测定几个参数来确定暗能量演化行为的目的。唯象上,人们已提出了多种参数化方案,但目前较常用的参数化形式是

$$w(a) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}, \quad (6)$$

其中  $w_0$  和  $w_a$  为自由参数,由观测数据来确定。

实验上,探测暗能量的发展也十分迅速。近年来,随着天文观测技术的不断发展,我们已经进入了一个“精确宇宙学”的时代,目前很多的天文观测数据可以用来限制暗能量的状态方程。在这些天文观测中,有的技术已经成熟了,比如对 Ia 型超新星和宇宙微波背景辐射的观测,有的还处于试探阶段,比如伽马射线暴和弱引力透镜的观测。就目前而言,做暗能量研究使用得比较多的是 Ia 型超新星、CMB 和 LSS 的天文观测数据。

目前,暗能量研究现状可以由图 5 来说明,它显示的是 WMAP 组利用最新的 CMB 观测数据,结合超新星数据,BAO 数据和哈勃常数观测数据给出的暗能量状态方程的允许区间。结果显示:(1)尽管目前误差还很大,但实验的确已经对理论模型有很大的限制;(2)宇宙学常数可以很好地拟合数据;(3) $w$  随时间变化的暗能量模型不能被排除,甚至在一定程度上数据更加倾向于穿越  $w = -1$  限的 Quintom 模型。数值上, $w_0$  和  $w_a$  的一维限制为

$$w_0 = -0.93 \pm 0.12, \quad w_a = -0.38^{+0.66}_{-0.65}. \quad (7)$$

测量误差(特别是对  $w_a$  来说)的确还是很大,所以我们需要更多更精确的天文观测数据对它们进行严格的限制,探索暗能量的物理本质。

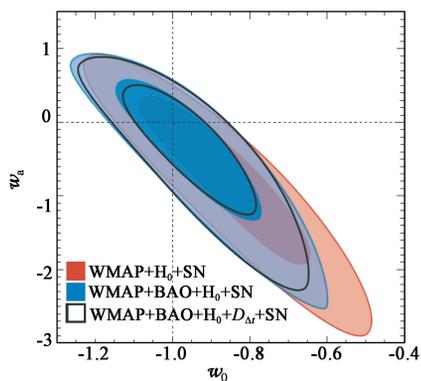


图5 WMAP第7年数据给出的对于 $\omega_0$ 和 $\omega_a$ 的限制.对于同一种颜色,内圈和外圈分别代表68%和95%置信区间.取自WMAP组的文章[4]

值得指出的是,关于宇宙加速膨胀的物理机制,另一种可能性为修改引力模型.在这一类模型中,宇宙晚期的加速膨胀和有效状态方程演化通常是引力大尺度上被修正的效应和宇宙中物质场演化性质的联合产物.一个典型的例子是 Dvali—Gabadadze—Porrati (DGP) 模型.在这个模型中,我们的宇宙是被嵌入到了一个更高维平坦时空的膜世界,四维的引力动力学在小尺度上和我们熟知的爱因斯坦引力相一致,但是在大于一个临界值的尺度上,引力的动力学会通过向高维时空释放引力辐射的方式而被修改.其他的修改引力模型包括 Gauss—Bonnet 引力模型,  $f(R)$  模型,非极小耦合的标量张量模型等.实验上,目前还没有观测证据显示引力规律明显偏离了爱因斯坦理论.对于这些通过修改引力模型来解释宇宙的加速膨胀来说,拟合目前的实验数据显示,这些模型与爱因斯坦的引力加上一个等效的暗能量成分的模型类似.另外,理论上修改引力模型也面临着各种巨大的挑战.

关于暗能量的研究,一般来说,目前的天文观测(CMB+LSS+SN等)显示了在 $2\sigma$ 范围内宇宙学常数可以很好地拟合数据,但动力学模型没有被排除,而且数据略微支持 $\omega$ 越过-1的精灵暗能量模型.虽然目前的数据已经给暗能量的理论模型的参数空间很大的限制,但是不足以精确地检验这些模型.为此,国内外科学家正积极地策划下一代地面和空间的大规模巡天项目,以提高测量精度,充分检验暗能量理论.国际上有代表性的下一代暗能量观测项目包括 LSST, WFIRST, Euclid, BigBOSS 等.在我国已建成的 LAMOST 望远镜可以探测暗能量,但有一定的局限性.在光学和近红外成像巡天方向,我国的南极昆仑站(DOME A)具有得天独厚的观测条件,在南极建一个大型光学/近红外望远镜,有望在

昆仑站实现一个由中国主导的下一代暗能量巡天的项目.近年来我国科学家又提出了空间站大光学平台和天籁项目等新的实验设想,这些对暗能量的研究都是十分重要的.

就南极 DOME A 的 KDUST 实验而言,笔者与合作者初步的模拟研究显示,在暗能量探测方面,的确有其一定的优越性,将与美国的 LSST 项目相当[5].这一点可以从图6中直接看出.的确,相对于今天的状况,这些望远镜将对暗能量参数的限制有量级的提高.

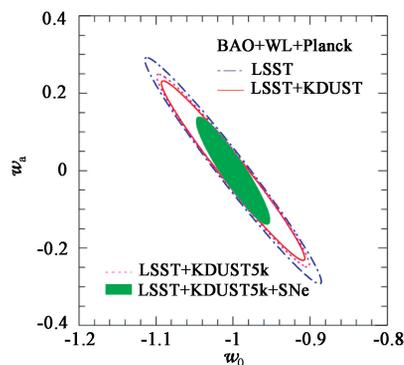


图6 对暗能量状态方程参数 $\omega_0$ 和 $\omega_a$ 限制的预研究.取自文献[5]

最后,笔者认为,自1998年以来,在过去的十余年间,宇宙加速膨胀和暗能量的研究取得了重要的进展.对于宇宙加速膨胀这一发现已得到了充分的证实.今年的诺贝尔奖授之无愧.相应地,暗能量的存在也基本不可质疑,但暗能量的物理本质还需进一步的探索.暗能量问题是目前物理和天文研究的一个重大科学问题,它的最终解决预期需要很长的时间.实际上,在1998年以前,宇宙学常数问题已是一个十分关注的难题,至今也没有很好的答案.但是,就唯象研究而言,在将来的十年内,预期在区分动力学暗能量与宇宙学常数的问题上会有大的进展.相信随着高精度天文观测数据的不断积累,理论研究的日益成熟,我们对于暗能量将会有更加深刻的认识,Perlmutter, Schmidt 和 Riess 三位科学家1998年发现的宇宙加速膨胀的物理本质将会逐渐呈现在我们的面前.

#### 参考文献

- [1] Riess A G *et al.* *Astron. J.*, 1998, 116:1009
- [2] Perlmutter S *et al.* *Astrophys. J.*, 1999, 517:565
- [3] Suzuki N *et al.* arXiv:1105.3470 [astro-ph. CO]
- [4] Komatsu E *et al.* *Astrophys. J. Suppl.*, 2011, 192:18
- [5] Zhao G B, Zhan H, Wang L *et al.* arXiv:1005.3810 [astro-ph. CO]