

诺贝尔物理学奖百年 回顾(续)

张妙静¹ 厉光烈²

(1 广西师范大学 541001; 2 中国科学院高能物理研究所 100049)

2011年



图1 从左至右:波尔马特、斯密特、赖斯

波尔马特(Saul Perlmutter, 1959~)与斯密特(Brian P. Schmidt, 1967~)和赖斯(Adam G. Riess, 1969~)因观测遥远的Ia型超新星并发现宇宙的加速膨胀,共同分享了2011年度诺贝尔物理学奖:波尔马特得一半;斯密特和赖斯均分另一半。

1929年,哈勃(Edwin Hubble, 1889~1953)在对邻近24个星系的观测数据进行分析后,发现大多数星系的光谱出现红移。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 $v=H_0D$,这就是著名的哈勃定律。其中,系数 H_0 被称为哈勃常数。哈勃发现的这种普遍的宇宙红移现象,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,从而揭开了大爆炸宇宙

学的序幕。但是,哈勃的观测局限于低红移的天体, H_0 反映的只是当今宇宙的膨胀速率。如果想知道宇宙在过去不同时刻的膨胀速率,进而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。对此,处在宇宙边缘的Ia型超新星便是最合适的观测对象。早在20世纪80年代中期,Ia型超新星就被作为标准烛光用来研究宇宙红移现象,只是超新星爆发是罕见的天文现象,其爆发过程很短暂,因而使得利用Ia型超新星研究宇宙演化的项目一度进展非常缓慢。

1988年,波尔马特在美国加州大学伯克利分校劳伦斯实验室建立了致力于超新星观测的SCP(Supernova Cosmology Project)研究组;1994年,出生于美国的澳大利亚国立大学教授斯密特和他的同事

一起建立了另一个超新星观测的HZT (High-Z Supernova Search Team)研究组;1996年,美国约翰霍普金斯大学赖斯教授,从哈佛大学获得博士学位后,成为HZT团队成员,并在其中起到了至关重要的作用。经过数年不懈的努力,这两个研究组找到了50多颗遥远的Ia型超新星并对它们进行了观测研究。通过对这些样本的分析,这两个研究组分别独立地得到了一致的结论: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,说明现今宇宙的膨胀是在加速而不是减速。1998年,这两个研究组几乎同时公布了他们的新发现——宇宙在加速膨胀。这一发现震惊了世界,当年就被美国《科学》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。2011年,又摘得了诺贝尔物理学奖的桂冠。

爱因斯坦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?根据爱因斯坦引力场方程:要使宇宙膨胀加速,宇宙中总的压强必须为负,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就被称之为暗能量。目前,最简单的暗能量模型就是爱因斯坦于1917年为了得到静态宇宙而在引力场方程中引进的宇宙学常数。因此,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变得非常快,新的结构不可能再形成;如果导致加速膨胀的暗能量是动力学的,那么宇宙的未来有可能会永远加速膨胀下去,也有可能重新进入减速膨胀甚至收缩的状态,还有可能,宇宙将是振荡的。

自1998年以来,宇宙加速膨胀和暗能量的存在已经得到了各种天文观测和实验的证实。首先,超

新星样本数量增加了很多,从而大大增强了这一发现的置信度;其次,对于宇宙微波背景辐射温度涨落及其极化的精确测量、大尺度结构巡天观测也都有力地证实了宇宙加速膨胀和暗能量的存在。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了暗能量在当今宇宙中所占的组分为 $72.50\% \pm 0.16\%$,具体地讲,96%是暗物质和暗能量;剩余的4%是普通的重子物质。因此,结合粒子物理和宇宙学的研究,寻找暗物质粒子,揭示暗能量本质,探索宇宙起源及演化的奥秘,已经成为21世纪天文学和物理学发展的一个重要趋势。

2012年



图2 阿罗什和维因兰德

阿罗什(Serge Haroche, 1944~)与维因兰德(David J. Wineland, 1944~)因提出测量和操控单个量子系统的有基础性突破的实验方法,使得保持、观察和利用离子、原子和光子的各种量子力学性质成为可能,共同获得了2012年度诺贝尔物理学奖。

维因兰德主要研究离子的量子相干控制,其具体贡献是发展囚禁离子的激光多普勒冷却与边带冷却的理论和实验技术,并利用囚禁离子实现了高精度的时间标准——光钟。

早在20世纪70年代,囚禁带电离子的研究,就开始了。控制离子运动的重要步骤是多普勒冷

却。1975年,维因兰德和德莫尔特,还有阿罗什和肖洛,同时提出了采用激光多普勒冷却单个原子/离子的思想;1978年,维因兰德小组按照自己提出的理论方案首次在实验上成功地用激光冷却了镁离子,随后,诺伊豪泽尔(Neuhauser)等也在离子阱中演示了钡离子的激光多普勒冷却。几乎同时,人们采用相同的原理独立地实现了中性原子的多普勒冷却。顺便指出,德莫尔特是维因兰德的博士后导师,因“发展离子囚禁技术”与保罗一起获得了1989年度诺贝尔物理学奖。

关于激光多普勒冷却,前面在介绍朱棣文、阿罗什的博士生导师科昂——塔努吉和菲利普斯荣获1997年度诺贝尔物理学奖的工作时已介绍过,这里就不再重复。至于边带冷却方法,它也是由维因兰德等首先提出的,主要用于囚禁离子的基态冷却。所谓边带冷却,就是先用窄带宽激光激发离子、增加其内部能量以降低其振动能量,然后离子再退激发回到基态。1988年,维因兰德小组采用边带冷却技术在离子阱中实现了单个汞离子的基态冷却,最终获得了处于“静止状态”的孤立的单个量子系统。后来,这一方法也被用于冷却中性原子的空间运动。

维因兰德小组还采用囚禁离子建立了比铯原子钟的时间精度高出一百倍的时钟。离子钟工作在可见光频率,因此,它也被称为光钟。如果将其用于测量宇宙大爆炸以来长达137亿年的宇宙时间,它的时间测量误差仅有5秒。他们还发展了一种基于两离子纠缠的所谓“量子逻辑光谱学”的新技术。采用这种精确测量时间的新技术,一些优美的自然现象就能被观测到。例如,利用这种光钟,可以测量非常微弱的相对论效应:时速仅为每秒数千米的物体的时间延缓,或者高度相差仅30厘米的两点之间重力势的差别。

维因兰德及其合作者针对囚禁离子发展的激光多普勒冷却和边带冷却技术,不仅促进了中性原子光冷却技术的发展,而且对最终实现冷原子的玻色-爱因斯坦凝聚也做出了实质性的贡献。

阿罗什的主要研究领域是量子物理及其对量子信息的应用,特别是对微腔量子电动力学(CQED)的实验研究做出了重要的贡献。阿罗什所从事的科学研究工作是多方面的,其中最重要的是:观察到微腔中单原子自发辐射被明显增强,利用微腔实现了对单个原子的囚禁,单个光子的量子非破坏测量,直接证实了微腔中的场量子化,直接观察到渐近的量子退相干现象,在原子系统中实现了光子存储,产生原子-原子、原子-光子的纠缠态,实现了将光子-原子系统的量子逻辑门操作等等。需要强调的是,所有这些工作都是在他30年坚持不懈地搭建起来的一类精密的微腔量子电动力学系统上进行的。

所谓微腔量子电动力学,就是研究在单原子和单光子水平上的光和物质相互作用。这种相互作用非常微弱,难以探测。长期以来,人们在实验上都只能研究原子和包含大量光子的强光之间的相互作用。20世纪80年代,借助微加工技术,物理学家得以在实验室中利用两面反射率极高的镜子构造一个体积很小的微腔。微腔中光场的能量密度非常高,于是单光子和单原子的相互作用也就变得很强,能够被有效地观察和控制。从此,微腔成为人们研究少量光子和原子相互作用的有力工具,微腔量子电动力学也就由此诞生。

微腔量子电动力学实验方面取得的第一个显著成果,是观测到了微腔对原子自发辐射的影响。1952年度诺贝尔物理学奖得主珀塞尔早在1946年就从理论上预言了这个效应。1985年和1987年,克莱普纳小组和阿罗什小组先后从实验上观测到了微腔对腔中原子自发辐射的抑制。在其后的20多年中,科学家对微腔中原子和光子的量子行为和量子态操控进行了深入的探讨。在此方向上,阿罗什小组完成了一系列出色的理论和实验研究,并做出了重要的贡献。

阿罗什和维因兰德的工作,一方面,通过单粒子的操控可以应用到某些物理量的精密测量以及精密光谱中;另一方面,在他们的实验中产生了大

量的量子资源,包括量子纠缠态、福克态、“薛定谔猫”态,等等。这些量子资源可以被应用到量子计量方面,它们已经被证明在突破经典极限的超灵敏测量中具有巨大的潜力。两位科学家之所以同时获奖,可能是因为他们的工作具有共同特点:把离子、原子和光子分别约束在不同类型的小空间——非均匀电磁场形成的势阱或由两个镜面形成的微腔驻波场——中,而且描述其运动的理论核心可以简化为二能级体系谐振子模式的相互作用。他们使用的系统看似不同,但其方法很类似:阿罗什利用中性原子来测量和控制腔中的光子,而维因兰德则是利用光来捕捉、控制和测量带电的离子、原子。两位科学家通过对光与原子、离子、腔的作用的长期实验研究,开辟了操控和测量单量子系统的方法,让我们能清晰地看到微观世界发生的状态叠加、纠缠、互补性和退相干等一系列量子物理的基本现象,把量子力学奠基者设想的一些“思维实验”(例如“薛定谔猫”)真正搬进了实验室。他们开拓性的方法为精密测量、量子操控和量子信息的发展迈出了关键性的一步,他们的工作不仅具有重要的意义而且还有很高的潜在价值。

2013年



图3 希格斯和恩格勒

希格斯(Peter Higgs, 1929~)和恩格勒(François Englert, 1932~)因提出有关“上帝粒子”——希格斯

玻色子——理论,共同获得了2013年度诺贝尔物理学奖。

杨振宁,受外尔早年提出的规范变换的启发,认识到“对称性支配相互作用”、电磁力可用 $U(1)$ 规范场来描述,并与密尔斯一起于1953年创建了 $SU(2)$ 规范场理论。本来,他们是想用它来解释作用于核子(质子和中子)之间的核力(包括强力和弱力)。但是,核力是短程力,传递核力的媒介粒子应该具有静止质量,而规范场粒子,例如传递电磁力的光子,不能具有静止质量。这就是泡利在杨振宁讲演时提出的、困扰杨振宁多年的“质量问题”。后来,施温格尝试在杨-米尔斯场的基础上实现弱力和电磁力的统一,他的学生格拉肖引入 $SU(2)\times U(1)$ 规范场来统一描述弱力和电磁力,但是,仍然未能解决上述的“质量问题”。1967~1968年间,施温格的另外两个学生温伯格和萨拉姆分别独立地将希格斯机制引入格拉肖的 $SU(2)\times U(1)$ 规范场,解决了“质量问题”,创建了弱电统一理论,温伯格、格拉肖和萨拉姆共同获得了1979年度诺贝尔物理学奖。

那么,什么是希格斯机制?

希格斯机制是在规范场对称性自发破缺的情况下使其获得静止质量并消除掉哥德斯通玻色子的一种方法。它是由三组科学家:比利时人恩格勒和布鲁特(R.Brout, 1928~2011);英国人希格斯;美国人古拉尔尼克(G.Guralnik)和哈根(D.Hagen),以及英国人基伯(T.Kibble),于1964年分别独立提出的。只是因为希格斯的数学表述更易于理解,1972年之后,韩国物理学家本·李(B.Lee)将其称为希格斯机制。

对称性自发破缺,指的是物理系统的连续对称性虽然不存在明显的破缺,但其基态不具有这种对称性,从而自发破坏了系统的对称性。1960~1961年间,日裔美国物理学家南部阳一郎,将原先存在于铁磁现象中的对称性自发破缺引入到量子场论中,用来说明:如果一个系统具有连续对称性,那么,由于真空在此对称性下并非不变而产生自发破缺时,就必然会出现哥尔斯通定理所预言的质量为

零的玻色子,即哥尔斯通玻色子。但是,实验上一直没有发现哥尔斯通玻色子,这对于严格成立的哥尔斯通定理来说,显然是一个疑难的问题。在希格斯机制提出之后,这个问题才得到了解决。

1964年,希格斯在超导理论的启示下,提出了一种利用对称性自发破缺使中间玻色子获得质量,而不破坏基本相互作用的规范不变性的方法。具体地讲,规范场是无静止质量的矢量场,这个场只有两个横向极化的自由度,而有静止质量的矢量场可以有纵向极化,因而有三个自由度。当发生对称性自发破缺时,规范场获得静止质量,而这就意味着它增加了一个自由度。希格斯发现:这个增加的自由度可以由哥德斯通玻色子提供。于是,通过对称性自发破缺,使规范场获得了静止质量,消除了无静止质量的哥德斯通玻色子,或者说,哥德斯通玻色子被规范场“吃掉”了,代之以产生了一个质量不为零的标量粒子。这样的过程,就被称为希格斯机制;产生的标量粒子,就是希格斯玻色子,简称希格斯粒子。

鉴于希格斯粒子存在与否,不仅关系到粒子物理标准模型的检验,而且涉及到亚原子粒子质量的来源,因此,人们不仅将希格斯粒子戏称为“上帝粒子”,而且寻找希格斯粒子也成为了高能物理实验的主攻方向。但是,因理论物理学家“完全没有在意”希格斯粒子的质量,未能给出恰当的预言,使得实验物理学家花了数十年的时间试图弄清应在什么能区寻找希格斯粒子。2008年,设计能量为14TeV的欧洲核子研究中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)的建成为发现希格斯粒子创造了条件。2012年初夏,在LHC环上的ATLAS和CMS探测器分别观测到质量为126.5 GeV和125 GeV的新粒子事例。同年7月4日,在CERN礼堂举办的报告会上,ATLAS实验合作组的女发言人法比奥拉·吉亚诺蒂和CMS实验合作组的发言人乔·因坎迪拉同时宣布发现了新粒子;同年,美国费米国家实验室质子-反质子强子对撞机(Tevatron)也发表了更新的实验结果:在120~135 GeV能区观测到新粒子,这

些实验以及ATLAS和CMS随后的工作从信号强度、耦合、自旋、宇称等方面确认了他们发现的新粒子就是粒子物理标准模型预言存在的希格斯粒子,提出希格斯机制的恩格勒特和希格斯因此荣获了2013年度诺贝尔物理学奖。恩格勒特的伙伴布鲁特,因两年前去世,遗憾地失去了获此殊荣的机会。

希格斯粒子,作为粒子物理学家一直在找寻的、粒子物理标准模型所预言的唯一的标量粒子,它的发现,不仅实验验证了希格斯机制,确认了“质量”来源于真空对称性自发破缺,而且使粒子物理标准模型的理论框架得以自洽。但是,为了拟合跨度高达11个量级的亚原子粒子的质量谱,标准模型不得不引入过多参数,使得这个模型仍然不能被看作是一个完善的理论,仍然需要在真空中,或者说,在更深层次,去找寻质量的统一来源,以揭示真空对称性自发破缺的本质。

2014年

赤崎勇(Isamu Akasaki, 1929~)、天野浩(Hiroshi Amano, 1960~)和中村修二(Shuji Nakamura, 1954~)因发明高效蓝色发光二极管使高亮度节能白光光源成为现实,共同分享了2014年度诺贝尔物理学奖。

要产生白光,有两个途径:一是蓝、绿、红三色光的直接混合;另一是将蓝光照射到黄色的荧光粉上。因此,只有蓝光LED而不是较早发明的其他颜色光LED,才可能产生白光,才可能引发这一场白光光源的照明革命。那么,这种高亮度节能和环保的白光光源是如何发明的呢?

赤崎勇,早在20世纪70年代初,在松下东京研究所工作时,就决定把氮化镓(GaN)基蓝光LED作为自己的主要研究方向,而当时国际上研制蓝光LED的主流是以易于制备的II-VI族半导体材料为基。尽管III族氮化物材料的物性十分优异,但是,由于缺少大块GaN单晶可用做衬底生长,又由于GaN的晶格常数远小于其他半导体或绝缘体的晶格常数,异质外延生长GaN材料也容易产生大量的



图4 从左至右:赤崎勇、天野浩、中村修二

缺陷而影响发光。在70年代中期至80年代中期,国际上坚持Ga₂N研究的人寥寥无几,每年发表的与Ga₂N有关的论文也只有10篇左右。但是,赤崎勇不随大流,继1974年生长出质量不高的Ga₂N单晶后,1978年又做出外量子效率0.12%的蓝色LED。他在显微镜下观察到缺陷多多的Ga₂N样品中有一些微晶,组内同事还观察到生长设备中残存的一些针状的“蘑菇”能发出较明亮的光。赤崎勇相信,一旦克服了材料生长的难题,Ga₂N用于研制蓝光LED必定具有独特优势。于是,他决定尝试用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术来生长高质量Ga₂N材料,并于1981年在他担任教授的名古屋大学搭建的设备上重新开始生长高质量Ga₂N的探索。

另一获奖人天野浩,1981年,正在跟赤崎勇做博士生。经过一千多次的试验,他偶然发现选用氮化铝(AlN)做缓冲层并适当降低温度可以外延出较高质量的Ga₂N膜,解决了第一个难题。要做成高效LED,较高浓度的空穴是必不可少的,因此宽禁带半导体的P型掺杂是他们面临的第二个难题。同样是在多次失败后,天野浩偶然发现,在低能电子束辐照下P型杂质Mg导致的空穴浓度大大增加。十年磨一剑,天野浩和他的老师赤崎勇,为Ga₂N蓝光LED的两个关键难题的突破奠定了基础,并在此基础上于1989年发明了能够发出较明亮蓝光的Ga₂N基PN结LED。

第三位获奖人中村修二,其主要贡献是使蓝光LED达到高亮度进而实用化。他的经历更带有传奇性。为了照顾家庭,硕士毕业后,他就在一个主要生产荧光粉材料的中小型公司“日亚化学工业”从事开发金属Ga及其单晶、多晶半导体材料。虽然他的材料研发很成功,但始终无法与大公司竞争。无奈之下,他选择了蓝色LED作为研发课题,因为他心里清楚,只要研发成功,产品必定畅销。为此,他去美国佛罗里达大学进修一年,学习MOCVD技术,但是,他的时间主要花在搭建设备上,几乎没有亲自动手操作的机会。回到日本后,由于具有丰富制作设备的经验,他敢于在商售MOCVD设备上动大手术,历经了多次失败,终于把通常加热衬底到1000度以上的高频感应加热装置改成直接加热的加热器;他还尝试多种气体导入方法,发现从底板旁边和上方导入气体的Two-Flow法比较有效。改造MOCVD设备的成功,使他得以用Ga₂N缓冲层取代AlN缓冲层,进一步提高了Ga₂N外延材料的质量;用热退火方法取代电子束辐照,进一步提高了P掺杂。当他研制的Ga₂N二极管已能发出较暗的蓝光(实际上发出光的中心波长在紫外区)时,他听到美国3M公司研制的硒化锌(ZnSe)基LED发出蓝光的消息,感到特别沮丧。后来得知,这种蓝光LED的寿命只有秒的量级,才松了一口气。就这样,靠着明确的奋斗目标和执着的努

力,中村修二于1993年10月使蓝光LED的亮度达到1坎德拉,实现了产品化,轰动了企业界。

蓝光LED的发明,不仅使高亮度节能和环保的白光光源、蓝色激光器和录制高清节目的蓝光光盘成为现实,使远超过一人身高的超大屏幕全彩显示器成为可能,使超薄智能彩色屏幕手机广泛使用,而且解决了一系列半导体物理、材料和器件研究三者结合的关键问题,例如,在缺少晶格适配、高质量衬底的情况下生长高质量外延薄膜,宽禁带半导体材料的P型掺杂等。因此,这确实是一项具有重大经济和社会效益的技术发明。

2015年

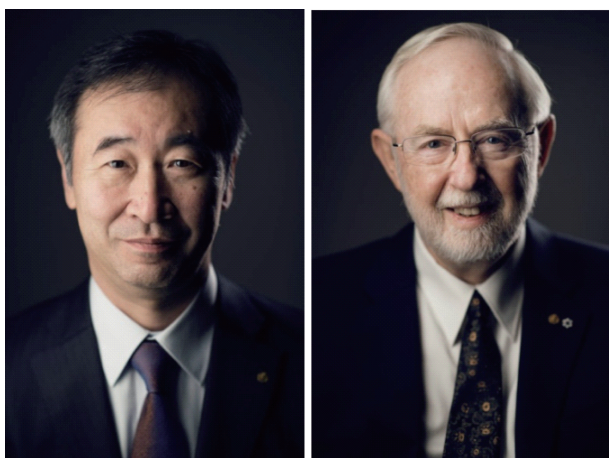


图5 梶田隆章和阿瑟·麦克唐纳

梶田隆章(Takaaki Kajita, 1959~)和阿瑟·麦克唐纳(Arthur B. McDonald, 1943~)因发现中微子振荡现象,证明中微子有质量,共同分享了2015年度诺贝尔物理学奖。

为了解释 β 衰变的连续能谱,泡利1930年假定存在一种“永远找不到”的中性粒子,后来费米创建 β 衰变理论时将其命名为中微子,现在称其为电子反中微子。1956年,莱因斯和柯温(C.L. Cowan, 1919~1974)首次观测到了反应堆产生的电子反中微子,莱因斯被授予1995年诺贝尔物理学奖。1962年,莱德曼、舒瓦茨和斯坦伯格在布鲁克海文国家实验室利用首个加速器中微子束流,发现了第2种

中微子—— μ 子中微子,被授予1988年诺贝尔物理学奖。20世纪70年代,粒子物理标准模型预言存在3种“味道”中微子,1989年,欧洲核子研究中心通过 Z^0 衰变截面的测量证明存在且只存在3种中微子。一直到2000年,第三种中微子—— τ 子中微子才被费米实验室DONUT实验发现。

在粒子物理标准模型中,中微子质量通常被假定为零,实验上也确实没有发现任何质量偏离零的现象。20世纪50~60年代,庞蒂科夫(B. Pontecorvo)、牧(Z. Maki)、中川(M. Nakagawa)、坂田(S. Sakata)等提出:若中微子有小到难以察觉的质量,则其质量本征态与味道本征态之间存在混合,这样便会出现中微子振荡现象,即一种“味道”的中微子在飞行过程中自发地转变成另一种“味道”的中微子。

20世纪60年代末,戴维斯首次探测到了来自太阳的中微子,证实了1967年诺贝尔物理学奖获得者贝特等1936年的预言——太阳和恒星的能源主要来自它们内部的核聚变,进一步,他还发现,探测到的太阳中微子比预期的要少,仅为后者的三分之一,这就是所谓的“太阳中微子丢失”之谜。1987年,日本神冈实验与美国IMB实验探测到超新星中微子,小柴昌俊因此与戴维斯分享了2002年诺贝尔物理学奖。1988年,梶田隆章与他的两位导师小柴昌俊和户冢洋二(Y. Totsuka)在神冈实验中发现大气中微子中 μ 子中微子与电子中微子的比值比预期少,被称为“大气中微子反常”。“太阳中微子丢失”和“大气中微子反常”都可用“中微子振荡”来加以解释。但是,由于实验数据精度不高,加上对中微子振荡理解不深,这两个实验都未被普遍接受为中微子振荡的证据而只能被看作是一种迹象。

更大的超级神冈实验于1991年开始建造,1996年完成。1998年,超级神冈实验精确测量了 μ 子和电子两种中微子个数与能量、方向的关系,发现 μ 子中微子丢失的几率和它的传播距离和能量有关,这正是中微子振荡的关键证据。1998年6月,在日本高山市召开的“国际中微子大会”上,梶田隆章代表超级神冈(Super-K)实验合作组报告了大气中微

子振荡的确凿证据。

为了解决“太阳中微子丢失之谜”，加拿大科学家阿瑟·麦克唐纳领导的萨德伯里中微子观测站(SNO)实验采用加州大学陈华森建议的方法，用重水同时探测三种中微子。该实验于1990年开始动工建设，1999年5月建成并运行。在重水中，中微子可以有三种不同的反应：带电流、中性流和弹性散射。带电流只对电子中微子敏感，中性流对三种中微子同等敏感，而弹性散射对三种中微子都敏感，但电子中微子的反应截面是另外两种中微子的6倍。2001年，SNO实验发现太阳中微子中的电子中微子确实丢失了，与超级神冈实验探测到的太阳中微子结果相结合，基本证实太阳中微子转变成了其他种类的中微子。2002年，SNO进一步测得了全部三种中微子的流强，发现总流强与预期一致，给出了中微子转换的确凿证据，同时证明了太阳标准模型的正确无误。

2002年，铃木厚人(A. Suzuki)领导的KamLAND实验通过探测日本和韩国几十个反应堆发出的中微子，首次发现反应堆中微子的消失现象，其消失的幅度与太阳中微子测量结果一致。与此同时，西川公一郎(K. Nishikawa)领导的K2K实验，使用超级神冈作为远端探测器，测量250千米外日本高能所(KEK)加速器产生的中微子，首次观测到了加速器中微子振荡现象，其振荡行为与大气中微

子振荡一致。这样，太阳和大气中微子振荡现象分别得到了反应堆和加速器等人工中微子源的验证。

中微子振荡由六个参数描述，太阳中微子振荡确定了其中的一组参数 $\sin^2 2\theta_{12} \sim 0.86$ 和 $\Delta m_{21}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ，大气中微子振荡确定了另一组参数 $\sin^2 2\theta_{23} \sim 1$ 和 $|\Delta m_{32}^2| \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 还有混合角 θ_{13} 和CP破坏相角 δ 未知。此外，大气中微子实验不能确定 Δm_{32}^2 的符号，即两个质量本征态 m_2 和 m_3 到底谁更重，称为中微子质量顺序问题，也不能确定 θ_{23} 位于哪个象限。我国大亚湾反应堆中微子实验坐落在广东省深圳市的大亚湾核电站内，于2007年开始建设，2011年底投入运行。2012年3月，大亚湾实验以超过五倍标准偏差的置信水平率先给出了第三种振荡模式存在的证据，并精确测量了中微子参数 θ_{13} 的大小。其后得到了法国 Double Chooz 和韩国 RENO 等两个反应堆中微子实验以及加速器中微子实验的证实，从而完善了中微子振荡的标准框架。

中微子振荡的发现证明了中微子具有微小的质量，但其数值仍然未知，尽管如此，中微子振荡的发现仍然打开了微观世界新物理的大门，将对宇宙起源和天体演化的研究产生极其深远的影响。

2016年

索利斯(David J. Thouless, 1934~2019)、霍尔丹(F. Duncan M. Haldane, 1951~)和科斯特里兹(J. Mi-



图6 从左至右:索利斯、霍尔丹、科斯特里兹

chael Kosterlitz, 1942~), 因关于拓扑相变和物质拓扑相方面的理论发现, 共同获得了2016年度诺贝尔物理学奖, 其中, 索利斯获得一半, 霍尔丹和科斯特里兹均分另一半。

相同的微观粒子组成的物质有不同的宏观表现, 这就是相。物质究竟处于哪个相, 除了有能量因素外, 还有混乱程度的因素。相变能否发生, 不仅与能量和混乱程度有关, 还与系统的维度有关。1966年, 康奈尔大学的默敏(D. Mermin)和瓦格纳(H. Wagner)以及贝尔实验室的霍亨贝格(P. Hohenberg)证明, 如果物理特性, 比如磁性方向, 可以连续变化, 那么, 只要温度不是绝对零度, 二维或二维以下, 不会发生相变, 因为这时混乱程度总能战胜能量的改变。韦格纳(F. Wegner)还曾专门针对二维磁体的XY模型——如果每个原子的磁性方向局限在一个平面上, 相邻原子的磁性耦合能取决于它们磁性方向在这个平面上的夹角, 这样的磁性模型就叫XY模型——严格证明了在绝对零度以上没有相变。但是, 早在1936年, 索利斯的博士后导师派尔斯就已证明, 对于伊辛模型, 关于相变的上述结论会有所改变: 一维没有相变, 二维却有相变。伊辛模型是一种特殊的磁体模型, 其中每个原子的磁性方向不是空间或平面上的任意方向, 而只能是上下两个方向。

20世纪70年代, 索利斯和科斯特里兹合作研究了二维系统相变的可能。他们发现, 涡旋扮演关键角色。涡旋是绕着一个点或者一个轴的流动, 或者某种物理性质(比如XY模型中不同原子的磁性方向)随角度变化。有两种可能的相, 高温相是有自由的涡旋, 低温相是旋转方向相反的涡旋两两束缚成对。随着温度的不同, 这两个相的自由能谁高谁低会发生变化, 导致在绝对零度之上的某个温度发生相变。索利斯和科斯特里兹的这项研究工作, 就是2016年诺贝尔物理学奖所嘉奖的拓扑相变, 又称科斯特里兹-索利斯相变, 或以他们姓氏的首个字母命名为KT相变。这项工作使人们认识到二维薄层材料也可以有超流、超导以及其他有序相。

索利斯获奖的另一部分研究成果与曾两次获得诺贝尔奖的量子霍尔效应有关, 20世纪80年代, 索利斯及其合作者提出, 量子霍尔效应的量子化起源于拓扑, 对应的整数是所谓“陈省身数”。这个数是华裔美国数学家陈省身很多年前发现的一种表征拓扑性质的、代表空间弯曲程度的、特殊的缠绕数, 只是对于量子霍尔效应来说, 这个空间是电子的量子波函数构成的闭合的抽象空间。

在索利斯等人提出量子霍尔效应的拓扑本质后, 1988年, 霍尔丹提出一个模型, 其中没有磁场, 但是也能实现量子霍尔效应, 他用另外的方法实现了所需要的拓扑性质。这种无磁场的量子霍尔效应, 现在称其为反量子霍尔效应。它是霍尔丹的一部分获奖成就。

霍尔丹的另一部分获奖成就是他1982年关于量子一维海森堡反铁磁体的结论。一维海森堡反铁磁体, 说的是每个原子与相邻原子磁性方向相反时, 这对邻居的耦合能量最低。但是, 一维海森堡反铁磁体模型中没有量子力学, 霍尔丹所研究的是将量子力学引入其中的模型, 并用它计算了各种可能的能量取值。量子力学的引入, 特别是海森堡不确定关系, 使得原子磁性方向不确定。不过, 对于一维铁磁体, 最低能量状态仍然是所有原子磁性方向一致。在此基础上, 激发类似于声波, 也就是说, 无论多小的能量都能激发一个磁性波在原子间传播。近似计算给出, 对于一维反铁磁, 最低能量状态是所有原子的磁性方向犬牙交错, 在此基础上, 可以激发能量任意小的磁性波。

鉴于原子磁性可通过玻尔磁矩用自旋来表征, 一维磁体又叫自旋链, 磁性波也叫自旋波。早在1931年, 索利斯的导师贝特就严格地解出了自旋等于 $1/2$ 的情况。1966年, 杨振宁和杨振平在一篇文章中把贝特的方法称作贝特假设, 并指出: 严格的最低能量态并不是犬牙交错态, 但确实能激发能量可以任意小的自旋波。

那么, 对于自旋是其他半整数或整数的情况, 以上结论是否正确呢? 霍尔丹发现, 对于自旋是

半整数的情况,结论与 $1/2$ 类似。但是,对于自旋是整数的情况,结论则截然不同:能量必须大于某个非零值,才能有激发。霍尔丹的结论后来得到实验证实。他还将其论证用于 1 (一维时间)+ 1 (一维空间)维时空里的一个拓扑缠绕数。对于整数自旋情况,各种缠绕数的拓扑效应都不起作用,量子力学不确定关系导致磁体的最低能量态和激发态之间有一非零的能量差,所以不能有能量任意小的自旋波。对于半整数情况,偶数缠绕数和奇数缠绕数带来的效应互相抵消,结果导致可以有能量任意小的自旋波。霍尔丹的这两项获奖工作都与目前热门的研究领域——拓扑绝缘体关系密切。

三位获奖科学家的工作将凝聚态物理带到了一个新的天地,带来了革命性的新观念,打开了组成物质的大量微观粒子的拓扑性质与物质宏观物理性质之间关系的大门,为新材料、新器件的设计带来了新的思路。因为拓扑的性质可能带来稳定的量子状态,有助于克服量子计算对于环境扰动的敏感,因此,对于量子计算机的实现,也很有意义。有趣的是,这三位获奖人分属两个“师生三代获得诺贝尔奖”的系列,一是贝特-索利斯-科斯特里兹,另一是范弗列克-安德森-霍尔丹,真可谓是“名师出高徒”。

2017年

韦斯(Rainer Weiss, 1932~)、巴里什(Barry Barish, 1936~)和索恩(Kip Thorne, 1940~)因对发现引力波的激光干涉仪引力波探测器(LIGO)的建造做出重大贡献,共同获得了2017年度诺贝尔物理学奖。

早在1916年,爱因斯坦就根据他所创建的广义相对论预言了引力波的存在,并指出太空灾变(例如密近双星旋转与并合、超新星爆发、中子星或黑洞形成等)会发射引力波,但因两个理论上的困难:一是因为引力波方程与坐标选择有关,理论上无法弄清引力波究竟是引力场的固有性质,还是某种虚假的坐标效应;另一是不知引力波是否从发射源带走能量,致使引力波的探测在半个多世纪之后才提到日程上来。

第一个探测引力波实验是由美国物理学家韦伯(J. Weber, 1919~2000)设计的,他从1960年起开始用“共振棒”探测引力波,并于1969年宣布已经检测到来自银河系中心的引力波,但是,后人用同样的实验并未探测到这一引力波。进入21世纪,几台大型激光干涉仪引力波探测器(LIGO)相继建成并投入运行,以搜寻引力波存在的直接证据,它们是:位于美国路易斯安那州利文斯顿的LIGO(llo)、位于美国华盛顿州汉福德的LIGO(lho)、意大利和



图7 从左至右:韦斯、巴里什、索恩

法国联合建造位于比萨附近的 VIRGO、德国和英国联合建造位于汉诺威的 GEO 和位于日本东京国家天文台的 TAMA300 等。

以 LIGO(llo) 为例,它由两个直径超过 1 米呈“L”型放置的空心圆柱体组成,其工作原理如下:在两臂交会处,从光源发出的激光束被一分为二,分别进入互相垂直并保持超真空状态的两空心圆柱体内,运行 4 千米后,被终端的用导线悬挂的带有镜面的重物反射回原出发点,并在那里相互干涉。这时,若有引力波通过,便会引起时空变形,即一臂的长度会略为变长而另一臂的长度则略为缩短,于是,干涉条纹发生变化。只要探测到这种变化,便可证实引力波的存在。

LIGO(llo)、LIGO(lho)、VIRGO、GEO 和 TAMA300 等,称为第一代激光干涉仪引力波探测器,灵敏度为 10^{-22} 。在它们运行一段时间而未能探测到引力波后,便开始研发第二代激光干涉仪引力波探测器和爱因斯坦引力波望远镜,将灵敏度设计指标分别提高到 10^{-24} 和 10^{-25} 。就在改进后的 LIGO,即高级激光干涉仪引力波探测器(Advanced LIGO),于 2015 年投入运行后不久,引力波的探测便取得了突破性的进展。

2016 年 2 月 11 日,美国国家科学基金委员会(NSF)召集来自加州理工学院、麻省理工学院以及美国的激光干涉仪引力波探测器(LIGO)科学合作组的科学家代表在华盛顿国家新闻中心向世界宣布:加州理工学院、麻省理工学院和 LIGO 科学合作组 SLC 的科学家利用设在华盛顿州汉福德的高级激光干涉引力波探测器 H1 和位于路易斯安娜州利文斯顿的相同的实验设备 L1 发现了引力波存在的直接证据。具体地讲,就是这两台高级激光干涉引力波探测器(H1 和 L1)于 2015 年 9 月 14 日同时发现了两个黑洞并合产生的引力波事件(GW150914)。这一事件发生在距离地球大约 13 亿光年的地方,两个黑洞的质量分别为太阳质量的 36 倍和 29 倍,合并后的黑洞的质量为太阳质量的 62 倍,也就是说,引力波带走了大约 3 倍太阳质量。在 GW150914 发现之后,又陆续发现了 4 例两个黑洞并合产生的引

力波事件(GW151226、GW170104、GW170814 和 GW170817,其中 GW170814 是 LIGO 和 Virgo 联合观测到的)。这些发现进一步确认了引力波的存在。2017 年 10 月 3 日,瑞典皇家科学院宣布,将 2017 年诺贝尔物理学奖授予美国科学家雷纳·韦斯、巴里·巴里什和基普·索恩,以表彰他们为发现引力波做出的重大贡献。

实际上,对发现引力波的 LIGO 的建造做出重大贡献的,除了获奖的三位,还有得雷夫(R. Drever, 1931~2017),他与韦斯、索恩共同发起 LIGO 项目,人称 LIGO 三巨头。那么,获奖人为何不是 LIGO 三巨头而是上述三位呢?要回答这个问题,还得从头谈起:LIGO 项目启动之后,得雷夫与同为实验专家的韦斯意见不合,互相攻击,无法合作。索恩是理论家,想尽办法在两者之间斡旋,仍然无济于事。在这种情况下,基金会只好下命令彻底改变项目的管理,加州理工学院指派了一个重量级官员取代他们三位独自管理这个项目。新领导人与得雷夫矛盾更大,只好将其开除,不准他再踏入 LIGO 实验一步,得雷夫不服,到处告状,整个团队面临分崩离析,LIGO 实验几乎崩盘!最终,加州理工学院任命了粒子物理学家巴里什担任这个项目的首席科学家。巴里什不负众望,不但重整了 LIGO 项目的管理,而且组建了 LIGO 的科学合作团队,重新向基金会提交了 LIGO 建设方案。虽然经费需求大幅度提高,基金会仍然全盘接受,LIGO 项目终于步入正轨,1994 年正式建造,2002 年开始进行引力波探测。后来,加州理工学院虽然认识到,对得雷夫的处理过于严厉而且不公,但是一直没有恢复得雷夫在 LIGO 项目的成员身份,只是想给得雷夫一笔不菲的研究经费让他爱干啥干啥,得雷夫拒绝了,因为 LIGO 是他一生的心血,除了 LIGO,他什么都不想做。在 LIGO 成功地探测到引力波的时候,得雷夫已经得了重度老年痴呆症,索恩去医院看他,得雷夫非常高兴,与索恩一起回忆他们当年共同开创 LIGO 的愉快时光。虽然 LIGO 项目随后获得的所有科学大奖的名单上都有得雷夫,但是他已不能亲自出席领奖。更加不幸的是,他于 2017 年 3 月去

世,未能荣获科学的终极荣耀——诺贝尔物理学奖。

引力波的发现不仅证实了爱因斯坦的预言而且解决了困扰科学家近百年的前述两个难题,证明了引力波不是虚假的坐标效应、能够从发射源带走能量。这显然是一项划时代的科学成就,具有极其深远的意义。

2018年

阿什金(Arthur Ashkin, 1922~)、莫罗(Gerard Mourou, 1944~)和斯特里克兰(Donna Strickland, 1959~)因在激光物理研究领域的开创性发明,共同分享了2018年度诺贝尔物理学奖:阿什金得一半;莫罗和斯特里克兰均分另一半。具体地讲,美国贝尔实验室阿什金获奖是因其“在“光镊子及其在生物系统中的应用”方面所做的工作,而法国巴黎综合理工学院莫罗和加拿大滑铁卢大学斯特里克兰获奖则是为了表彰他们在“产生高强度、超短光脉冲方法”方面的工作成果。应当指出:斯特里克兰是继居里夫人(1903)和梅耶(1963)之后第三位获得诺贝尔物理学奖的女性;阿什金,现年96岁,则是迄今年龄最大的诺贝尔奖得主。

1953年,美国科学家汤斯等造出第一台微波激射器(maser);1958年,肖洛(Arthur L. Schawlow)和汤斯将 maser 原理推广到红外和可见光,称之为光

学 maser;1960年,梅曼(Theodore Maiman)受肖洛和汤斯的启发,造出第一台光学 maser;1964年,汤斯与两位前苏联科学家巴索夫和普洛霍罗夫因“基于 laser-maser 原理造出振荡器和放大器”荣获诺贝尔物理学奖。从此“光学 maser”改称为激光(laser),即将 maser 全称中的微波(microwave)改为光(light)。

激光是一种受激辐射,是处于高能级的大量电子同时跃迁回低能级所释放出的频率相同、步调一致既具有空间相干性又具有时间相干性的光子束。激光的相干、平直、单色和高强度等基本性质使其得到了广泛应用,激光研究因此多次荣获诺贝尔物理学奖,其中,与这次获奖密切相关的,就是1997年朱棣文、科昂-塔努吉和菲利普斯因“在发展用激光冷却和陷俘原子的方法方面所作的贡献”共同分享了1997年度诺贝尔物理学奖,颁奖词中提到的方法就是阿什金首先想到的光镊子。

当今许多科学家都在使用激光来操控生物细胞和其他透明物体,但在当时只有一个人坚信这件事,他就是阿什金。阿什金自学生时代起就对光压感兴趣,激光发明后,他用激光研究光压。所谓光压,就是光施加在单位面积上的压力,或称辐射压、光力。正是对光压的研究让阿什金想到了用光来操控微观粒子。

让我们考虑将一束光射进一个小球:光被折射,改变了方向,也就是改变了动量,但是光与球的总动量守恒,因此,小球获得动量,开始运动。单位

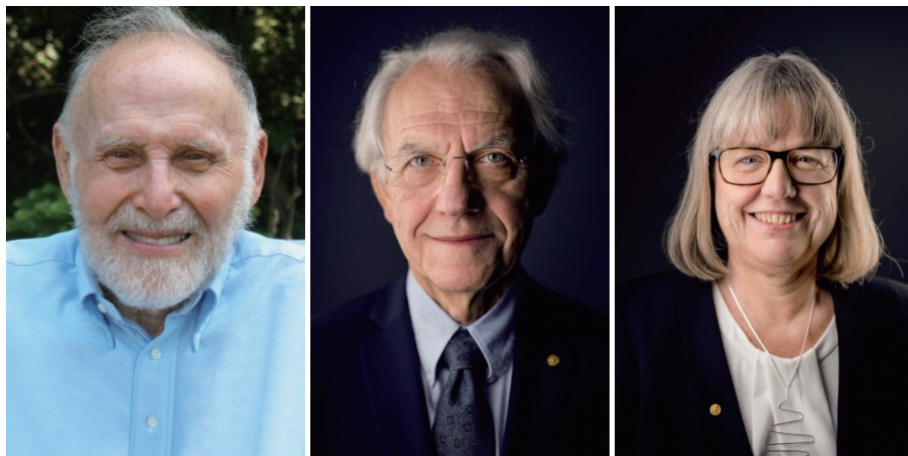


图8 从左至右:阿什金、莫罗、斯特里克兰

时间里小球的动量改变就是光施加在小球上使其发生运动的力,叫散射力。光的密度越大,与小球的碰撞越多,散射力也就越大。如果光束不均匀,那么光密的地方受力大,光疏的地方受力小,这将导致出现一个正比于密度梯度、朝向高密度方向且随位置变化的梯度力。巧妙地利用散射力和梯度力,便可以实现操控乃至囚禁小球。

1969年,阿什金用聚集的激光移动了空气和水中的介电小球,演示了梯度力,并用相向传播的两激光束囚禁了粒子。同时,他还提出:这个方法可以用于囚禁原子、分子。后来,他还曾利用光力与重力的平衡将粒子悬浮起来。1977年,为了囚禁和冷却原子,阿什金提出了全光单束梯度力囚禁的构想。这就是光学镊子,简称光镊子。1985年,阿什金和同事成功地用光镊子囚禁了一个介电小球:他们先借助于透镜将光射进一个介电小球,让小球将光折射,然后,再借助于显微镜物镜获得大数值孔径和大角度会聚,以便梯度力能够抵消散射力。

1986年,朱棣文等与阿什金合作,使用阿什金的方法,想方设法让原子减速冷却下来,成功地实现了原子的激光冷却和囚禁,因此荣获了1997年度诺贝尔物理学奖。在诺贝尔演讲中,朱棣文介绍了阿什金的前期工作。同年,阿什金开始将光镊子用于研究生物系统。他用光镊子实现了操控和囚禁微粒、细菌、细胞、病毒、分子和原子。特别值得一

提的是,他可以深入细胞内部而不破坏细胞膜、不损伤生命物质去测量细胞器微观运输的驱动力,为在微观细节上研究生命过程提供了革命性手段。为了减少损伤,激光需要处于红外波段。利用这种光镊子,人们能够抓住想要的物质并把它们移动到需要放置的地方,进而对其展开操控。

光镊子为生命科学提供了一个广泛使用的革命性工具,用它来对生物物质进行各种操作,使得生物体内很多微观过程,特别是生物体内的各种小机器的物理过程得到仔细研究,从而开创了一个新的物理学与生物学交叉的研究领域。

获奖的另两位科学家:莫罗和斯特里克兰的主要贡献在于“利器”,他们发明的啁啾脉冲放大技术为阿什金的光镊子提供了高强度、超快激光脉冲使其在生物系统的应用中发挥了更为广泛的作用。

莫罗,法国电气工程和激光领域的先驱,美国密歇根大学超快光学科学中心创始人。他开创了超快激光器及其在科学、工程和医学领域的应用。斯特里克兰,主要研究强激光与物质非线性相互作用、非线性光学以及超短超强激光系统。她与莫罗是师生关系,在读博期间,他们一起发明了啁啾脉冲放大技术。这种技术普遍运用于制造高强度、超短激光脉冲,正是这一技术的发明为这次“光镊子”获奖奠定了基础。

2019年

皮布尔斯(James Peebles, 1935~)因在物理宇宙



图9 从左至右:皮布尔斯、麦耶、奎洛兹

学方面的理论贡献和发现、麦耶(Michel Mayor, 1942~)和奎洛兹(Didier Queloz, 1966~)因首次发现一颗围绕类日恒星运转的系外行星,共同分享了2019年度诺贝尔物理学奖:皮布尔斯得一半;麦耶和奎洛兹均分另一半。

尽管,早在1966年,彭齐亚斯和威尔逊就发现了宇宙微波背景辐射,并因此与卡皮查分享了1978年度诺贝尔物理学奖,后来,马瑟和斯穆特又因发现宇宙微波背景辐射的黑体谱和各向异性分享2006年度诺贝尔物理学奖;波尔马特、斯密特和赖斯因观测遥远的Ia型超新星进而发现宇宙加速膨胀共同分享了2011年度诺贝尔物理学奖,但是,使热大爆炸宇宙学由伽莫夫等人的猜想变成现今的精确科学则应归功于皮布尔斯为解读宇宙起源和演化所做出的不懈努力:在过去的半个多世纪里,他在宇宙微波背景辐射(CMB)、宇宙大尺度结构的形成、暗物质和暗能量等诸多方面都做出了重大贡献,是现代宇宙学大厦的主要奠基者之一。

在“诺贝尔物理学奖百年回顾(1971-1980)”一文中,我们曾经谈到:彭齐亚斯和威尔逊正是从皮尔布斯关于“大爆炸宇宙起源会留下射电噪声残余物”的理论预言中得到启示,认识到:他们在实验中所观测到的,正是宇宙微波背景辐射。这里提到的理论预言,正是皮尔布斯对宇宙大爆炸后恒星、星系和星系团组成的宇宙大尺度结构的研究成果。这一研究还将宇宙年龄限制在130~150亿年。在美国麻省理工学院阿兰·古斯(Alan Guth)提出宇宙暴胀理论,并与他的两个同事:斯坦福大学安德烈·林德(Andrei Linde)和俄罗斯科学院朗道理论物理所阿列克谢·斯托尔宾斯基(Alexey Starobinsky)共同荣获2014年天体物理学卡夫里奖(Kavli Prize)之后,宇宙年龄更被精确定为138亿年。另外,1974年,马瑟提出了宇宙微波背景探测卫星(COBE)计划,并和斯穆特合作发现了宇宙微波背景辐射的黑体谱和各向异性,他们的工作支持并完善了热大爆炸宇宙学,使之可以恰当地描写从宇宙极早期的量子涨落直到现今恒星、星系和星系团组成的宇宙大

尺度结构;1998年,波尔马特、斯密特和赖斯通过观测遥远的Ia型超新星进而发现了暗能量驱动的宇宙加速膨胀,随后,威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)、Planck卫星等对微波背景辐射温度涨落和偏振谱的精确测量、大尺度结构巡天观测都有力地证实了宇宙加速膨胀和暗能量的存在,还定量地给出了暗能量在当今宇宙中所占的组分为 $72.50 \pm 0.16\%$,而由夸克和轻子组成的普通(重子)物质只占4%,其余为暗物质。因此,开展粒子物理和宇宙学的交叉研究:寻找暗物质粒子,揭示暗能量本质,探索宇宙起源及演化的奥秘,已经成为21世纪天文学和物理学发展的一个重要趋势。

皮尔布斯的三部著作:《物理宇宙学》、《宇宙大尺度结构》和《物理宇宙学原理》影响了整整一代研究物理宇宙学的年轻学者。正是皮尔布斯和这一代年轻人完善了宇宙大爆炸模型,让人类对宇宙起源和演化有了较为清晰的认知:我们的宇宙创生于大约138亿年前的一个来自时空奇点的大爆炸。它从极高温度的混沌状态开始演变,逐渐产生核子,然后经过原初核合成产生氢和氦的原子核。大约38万年之后,宇宙中形成稳定的中性氢原子与早期CMB。接着在原初密度涨落的影响下,逐渐演化出大尺度结构雏形。到了4亿岁时,宇宙中终于诞生了第一代恒星,而最早的星系和类星体则诞生于大爆炸后约十亿年。之后,由星系和星系团等构成的宇宙大尺度结构开始形成。最终,我们的宇宙演化到当前由暗能量驱动的加速膨胀状态。目前,宇宙热大爆炸模型与粒子物理标准模型、地球表面板块模型和生命科学DNA模型一起被公认为20世纪科学发现的四大模型。虽然如此,宇宙热大爆炸模型仍然只是一个模型,仍然存在许多有待探索的未解之谜:大爆炸奇点哪里来的?暴胀从何而始?暴胀之前会发生什么?以及暗物质和暗能量究竟是什么?等等。因此,宇宙热大爆炸模型仍然不能被视为描述宇宙起源和演化的终极理论。

1995年10月6日,瑞士天文学家米歇尔·麦耶和迪迪埃·奎洛兹在意大利佛罗伦萨举行的一次天

文学会议上宣布：他们在银河系中观测到了第一个太阳系外的行星正在围绕一个类日恒星运动。这颗被证明环绕类日型恒星——飞马座 51 飞速移动的行星被命名为飞马座 51b，它距离地球 50 光年，因极其靠近宿主恒星，其间距离只有 800 万千米，因此，公转周期仅为 4 天。恒星将行星加热，温度超过 1000°C。相比之下，我们的地球，距离太阳 1.5 亿千米，公转周期为 1 年，温度适宜人类生存。这颗新发现的行星，作为一个气态球体，体型巨大，可与太阳系中的最大气态行星：木星——其体积是地球的 1300 倍，质量是地球的 300 倍——相比拟。根据早期有关行星形成的理论，木星体型的行星应该在远离其宿主恒星的位置产生，并且需要很长的公转周期。木星环绕太阳的一个周期大约需要 12 年，所以飞马座 51b 的 4 天环绕周期对寻找系外行星的天文学家是个超级意外。后来，美国天文学家保罗·巴特勒和杰弗里·马西也将他们的望远镜转向了飞马座，也发现了 51b 星，确认了麦耶和奎洛兹的发现。两个月之后，他们又发现了两个新的环绕类日型恒星的系外行星。行星短的环绕周期对于那些天文学家来说是非常便捷的，因为这意味着他们不需要花费几个月甚至几年来等行星环绕宿主恒星一个周期，而是在不到一个月的时间里便可观测到行星环绕宿主恒星好几圈。

早在 1977 年，麦耶就已在位于法国马赛东北 100 千米处的上普罗旺斯天文台望远镜上安装了光谱仪，借助多普勒效应，通过观测光谱线的蓝移或红移来发现被系外行星拖拽的宿主恒星的径向运动：蓝移，向着观测者；红移，远离观测者。但是，当时麦耶所用的光谱仪测量的恒星速度的下限约为 300 米/秒，精度不够，根本看不到系外行星拖拽它的宿主恒星。20 世纪 90 年代早期，奎洛兹在日内瓦大学开始了他的研究生涯，作为博士生的奎洛兹被要求开发新方法以进行更为精确的测量。他与同事们一起，利用了许多可以快速观察大量恒星同时又能分析其结果的新技术，特别是数字图像传感器 (CCD)，改进了光谱仪。顺便指出，威拉德·博伊

尔和乔治·史密斯因发明了半导体成像的电荷耦合器件 (CCD) 的图像传感器与在光在纤维中传输并将其用于光学通信方面取得突破性成就的高锟共同分享了 2009 年度诺贝尔物理学奖。1994 年春，新的光谱仪完工时，其测量恒星运动速度的下限已降低到 10^{-15} 米/秒，距离系外行星的发现已非常接近。又花了数月完善他们的研究成果，1995 年 10 月，麦耶和奎洛兹终于向全世界宣布：他们搜寻到第一颗系外行星。

麦耶和奎洛兹的发现，改变了我们对世界的认识，进一步推动了天文学的发展。目前，发现的以各种形态存在的系外行星已经超过 4000 颗，它们与我们熟知的太阳系内行星几乎完全不同。这些发现，定将促使天文学家去创建描述行星形成的新理论。

2020 年

彭罗斯 (Roger Penrose, 1931~) 因发现黑洞的形成是广义相对论的有力预测、根策尔 (Reinhard Genzel, 1952~) 和盖兹 (Andrea Ghez, 1965~) 因在银河系中心发现一个超大质量的致密天体，共同分享了 2020 年度诺贝尔物理学奖：彭罗斯得一半；根策尔和盖兹均分另一半。应当指出：盖兹是继居里夫人 (1903)、梅耶 (1963) 和斯特里克兰 (2018) 之后第四位获得诺贝尔物理学奖的女性。

北京时间 2019 年 4 月 10 日 21 时，参与事件视界望远镜计划的科学家公布了人类历史上首张黑洞视界照片，于是，与黑洞的理论和观测有关的研究定会获得诺贝尔物理学奖成为大家的共识。但是，让世人认识到黑洞的事件视界看起来就像一个环绕着由吸积或喷流辐射造成的如新月状光环的圆形阴影的大名鼎鼎的霍金 2018 年去世了，因此，与他合作过、对黑洞的理论研究同样做出过重大贡献的英国数学家彭罗斯，以及在银河系中心发现一个超大质量致密天体 (即黑洞) 的德国天文学家根策尔和美国天文学家盖兹，荣获了 2020 年的诺贝尔物理学奖。



图10 从左至右:彭罗斯、根策尔、盖兹

谈到黑洞,就不能不提暗星:早在18世纪,英国自然哲学家米歇尔(John Michell, 1724~1793),还有法国著名天文学家和数学家拉普拉斯(Pierre-Simon de Laplace, 1749~1827)等就曾讨论过:一个具有与太阳同样密度而直径为太阳250倍的明亮天体,因它发射的光将被自身引力拉回而不能被我们看到,因此,它实际上是一颗暗星。拉普拉斯还把光假设成粒子,用万有引力定律推导出与史瓦西后来通过求解爱因斯坦引力场方程得到的黑洞的史瓦西半径公式一样的暗星的半径公式。但是,暗星与作为时空理论的广义相对论所预言的黑洞并不是一回事。暗星,虽观测不到,但它不是不能发射光,而是发射出的光会被自身强大的引力拉回。黑洞则不一样,进入黑洞的物质(包括光)是出不来的。

以史瓦西黑洞为例,有两个特别的地方:一是事件视界,就是史瓦西半径处的黑洞边界,物质(包括光)只要进入事件视界以内,就别想出来了;另一是黑洞中心,那是一个密度无限大的奇点。爱因斯坦引力场方程的史瓦西解还告诉我们:在事件视界内外,时空坐标互换,也就是说,在事件视界外面的空间坐标到了里面就变成了时间坐标,黑洞中心的奇点也就是时间的终点,于是,进入事件视界的物质(包括光)都会奔向奇点,即足够大质量恒星引力塌缩必然导致黑洞及其中心的奇点。

关于黑洞的形成,具体地说,就是足够大质量恒星引力塌缩成黑洞后会不会出现奇点?许多科学家持怀疑的态度,他们认为,奇点的存在,可能是史瓦西在球对称的条件下求解爱因斯坦引力场方程得到的理想结果。真实的恒星很可能是奇形怪状的,其中各处的塌缩速度可以不一样,因此,最终未必会塌缩成一个奇点。

彭罗斯的贡献就在于,他用拓扑方法于1965年最先证明了,对于史瓦西黑洞,无需外加球对称条件,即使候选恒星原来长得奇形怪状,最终都会塌缩成一个奇点。1966年,霍金在博士论文中把彭罗斯证明奇点存在的这个奇点定理推广到了任意黑洞。

前面提到,黑洞中心的奇点是时间的终点,即时间结束的地方,那么,是否存在时间开始的地方呢?理论上,广义相对论允许作为黑洞的时间反演的白洞的存在,如果把黑洞比喻为物质的“陷阱”,那么白洞就是物质的“喷泉”,白洞的中心应该就是时间开始的地方。1970年,霍金和彭罗斯合作又写了一篇论文,他们认为宇宙大爆炸就是始于一个奇点,也就是说,宇宙大爆炸始于一个白洞;他们还认为,在宇宙大爆炸初期会形成一些质量很小的黑洞,但是,这个观点至今尚未得到观测验证。

彭罗斯,虽然证明了黑洞的形成是广义相对论在极端条件下仍然成立的有力证据,但是,黑洞内

部,特别是黑洞中心点的时空本性,仍然是未解之谜。目前,理论物理学家正在努力创建一套新的量子引力理论,以揭示黑洞中心点的时空奇性。

1963年,荷兰天文学家史密特(Maarten Schmidt)发现了类星体。所谓类星体,就是看起来“类似恒星”的一类特殊天体,具体地讲,就是银河系外能量巨大的遥远天体,其中心是猛烈吞噬周围物质的超大质量黑洞。1969年,英国剑桥大学的林登-贝尔(Donald Lynden-Bell, 1935~2018)将类星体解释为超大质量黑洞吸积物质所发射出的辐射,并认为:绝大多数星系的中心都存在超大质量黑洞,为类星体建立了完善的理论;1971年,他和他的同事里斯(Martin Rees)进一步指出,银河系中心就可能有这样的超大质量黑洞,并提出了观测方法。

大约100年前,美国天文学家沙普利(Harlow Shapley, 1885~1972)率先在人马座的方向上确定了银河系的中心。后来,天文学家在那里观测到了一个强大的无线电波源,并将其标记为人马座A*。到了20世纪60年代末,人们发现,人马座A*占据了银河系的中心,银河系几乎所有的恒星都围绕着它。但是,直到20世纪90年代,包括根策尔和盖兹在内的天文学家才用更大的望远镜和更好的设备对人马座A*进行更为系统的研究。根策尔小组使用的是欧洲南方天文台位于智利的两台望远镜:先用的是拉西拉(La Silla)山上的新技术望远镜(NTT),后来,转移到帕瑞纳(Paranal)山脉,用的是甚大望远镜(VLT);盖兹小组使用的是位于夏威夷冒纳凯阿(Mauna Kea)山上的凯克(Keck)望远镜,这是目前世界上口径(10m)最大的光学/近红外线望远镜,由36个六边形镜片以蜂窝状组合而成,可以分别控制这些镜片来更好地聚焦星光。

近30年来,这两个组不断开发和完善相关技术,并配备了更加灵敏的数字光传感器和更好的自适应光学器件,使图像分辨率提高了千倍以上,他们对银河系中心气体、尘埃与恒星混杂的环境中众多明亮的恒星进行了跟踪、观测,结果发现,这些恒

星在距中心一光月半径内移动最快,就像一群蜜蜂一样,而在该区域之外的恒星则以有序的方式遵循其椭圆形轨道运行。他们特别关注一个被根策尔小组和盖兹小组分别标记为S2和S02的引人注目的恒星,这个恒星围绕银河系中心人马座A*的周期只有16年(太阳的周期是2亿年),它的轨道是很扁的椭圆。2002年春,他们观测到S2(S02)距离星系中心17光年,两个小组的观测结果符合得非常好,因此,得出结论:在银河系的中心,确实存在一个黑洞,其质量大约为4百万倍太阳质量,所占据的体积和太阳系大小相当,而S2(S02)距离星系中心的17光年则是黑洞的史瓦西半径的1400倍。他们在同一个位置观测到的近红外和X射线耀斑则被认为是黑洞吸积物质所发射出的辐射。2008年,这两个组分别在会议上公布了这一重要发现。同年,根策尔荣获邵逸夫奖天文学奖。

顺便指出,早在1783年,米歇尔就曾提出,暗星(即黑洞)周围应该有着许多明亮的星体绕其旋转,如果人们跟随这些星体的轨迹,就能够找到黑洞。根策尔与盖兹的发现应用的正是这一古老的思路。人类历史上首张黑洞视界照片公布之后,人们正期待着直接观测银河系中心人马座A*的黑洞。

根策尔与盖兹的开创性工作为广义相对论及其预测提供了新一代精确检验,他们的观测也很有可能为新的量子引力理论提供线索,宇宙仍有很多奥秘与惊喜等待着我们去发现。

