

2015年物理学热点回眸

傅雪

《科技导报》编辑部, 北京 100081

摘要 为回顾2015年物理学领域的研究热点、重大进展和重大事件, 遴选了高能物理、量子物理、凝聚态物理、光物理和天体物理等领域的一些研究热点及物理领域的重大事件。

关键词 物理学前沿; 研究热点; 重大事件

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.01.002

2015年, 对于物理学界来说, 无疑是充满欣喜的一年, 在高能物理学、量子物理学、凝聚态物理学和天体物理学等领域取得了许多突破性进展。高能、天体物理研究的是宇宙的本源, 探究世界从哪里来、往何处去的大问题; 量子物理一方面探究物质的本质结构, 另一方面是可发展量子通信、量子计算等实际应用; 凝聚态物理研究集中在超导、半导体等与人类生活息息相关的领域, 是推动人类技术革命的重要途径, 因而这些领域成为近年来研究热点。而物理最引人入胜的地方是充满热点但又不断地变化, 在大方向、大思路指引下, 研究中又会发现很多细节的乐趣, 牵引着科学家一步步走下去。

值得一提的是, 2015年中国科学家首获“基础物理学突破奖”, 在实现多自由度量子隐形传态、外尔费米子的发现等重大突破中都有重要贡献, 中国物理学研究已逐步从跟踪模仿成长为可以同国际前沿并驾齐驱、相互竞争, 在个别点上还有突破和亮点, 相信将来中国科学家的研究被国际认可的事件会越来越多, 2015年必将作为崭露头角的一年被历史铭记。

1 高能物理

1.1 五夸克现身

2015年7月, 欧洲核子研究组织(CERN)LHCb协作组报道, 发现2个五夸克态。他们表明5个夸克可以在被

称为五夸克态的粒子中被束缚在一起。

五夸克态的存在是在20世纪70年代被首次预言的, 在21世纪是争议的对象。质子和中子这样的重子是由3个夸克组成的, 在重子之间传递相互作用的介子是由2个夸克组成的。夸克从来不会单独出现, 因为把2个夸克分开时要消耗的能量太大, 超过夸克质量对应的能量, 于是会产生新的夸克。理论预测了4个和5个夸克组成的粒子, 但一直未被证实。2015年, 当2个质量约为 7.8452×10^{-27} kg (4400 MeV/c²) 的五夸克态从大型强子对撞机的质子碰撞中涌现出来时, 这个预言终于被证实。2个信号的统计显著度都超过 9σ , 远高于粒子物理中确认一个发现的黄

金标准 5σ 。该研究成果发表在2015年8月12日《Physical Review Letters》上(图1、图2)^[1]。

五夸克不仅仅是1个新的粒子, 还代表了1种产生夸克的方式, 而这些夸克是普通质子和中子最基本的组成单元。这种模式在以前的实验中从未被观察到。研究五夸克的性质可以更加深入地了解物质是如何构成的^[2]。此研究成果被欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选为“2015年度国际物理学领域的十项重大突破之一”, 被美国物理学会(APS)评为“2015世界物理八大进展之一”。

1.2 证明质子与反质子为真正镜像

2015年8月, 欧洲核子研究组织一

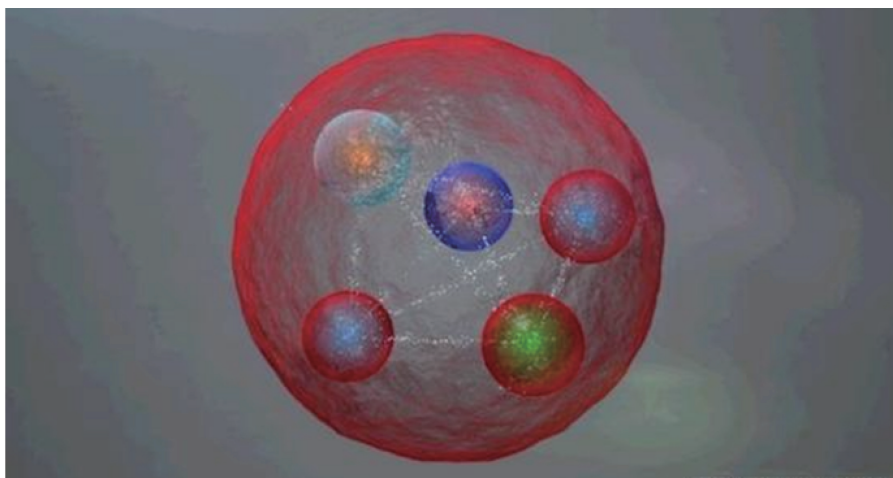


图1 在1个五夸克粒子中5个夸克可能的组合方式



图2 在LHCb实验中采用高精度度量揭示新的五夸克粒子

支由日本理化研究所领导的研究团队,在对粒子物理学中标准模型的一个基本特性——电荷共轭-宇称-时间反演(CPT)不变性进行测试时,对质子及其反物质——反质子的荷质比做了迄今为止最精确的测量,证明质子和反质子表现出严格的镜像。

该研究团队使用了CERN的反质子减速器,得到了反质子和负氢离子(作为质子的代替物),然后在磁性潘宁阱(图3)^[3]中困住反质子-负氢离子对,将其能量降至超低。随后研究人员测量了这对物质的回旋频率,确定它们的

荷质比,并比较了二者的相似性。在超过35天的时间里,研究人员共测量了约6500对反质子-负氢离子。

此研究帮助解释了为何宇宙大爆炸后尽管一定会产生物质和反物质,我们却感到生活在一个没有反物质的宇宙中。如果发现有违反了CPT的现象,则意味着物质和反物质可能具有不同的特性。例如,反质子也许比质子衰变的速度快。但是研究发现,在相当严格的限制中,它们的荷质比是相同的^[3]。该研究成果发表在2015年8月12日《Nature》杂志上^[4]。

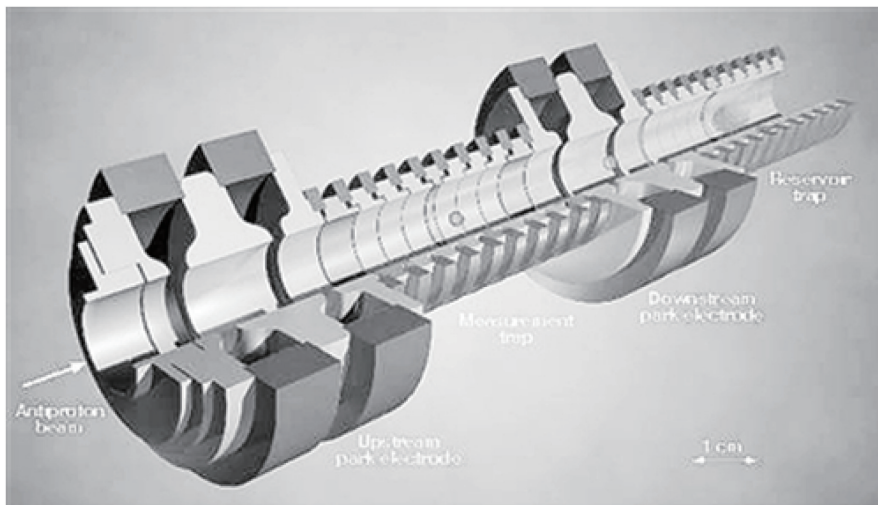


图3 磁性潘宁阱剖面示意

1.3 首次测到反物质间相互作用力

由来自12个国家的52家科研单位组成的STAR合作组在美国布鲁克海文国立实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)上,首次测量到反质子-反质子间的相互作用力,这对理解反物质的构成起到了至关重要的作用。论文于2015年11月5日在线发表在《Nature》杂志上^[5]。此次对反物质间相互作用的首次定量测量,标志着人们对反物质的研究进入了新篇章,即从定性的观测到定量相互作用研究的跨越,这将对人们理解反物质的形成机制起到关键作用。

在通常环境下,反物质的产额极为稀少,在此之前一直未有实验涉及反物质间相互作用力的定量测量。研究人员利用金核-金核碰撞中产生的丰富的反质子,通过反质子-反质子动量关联函数测量,并扣除通过其他粒子衰变而来的次级反质子与其他反粒子关联的污染,精确地构建了反质子-反质子关联函数。然后,结合量子多粒子关联理论,提取出反质子-反质子的有效力程和散射长度这两个基本作用参数。研究表明,在实验精度内,反物质间的相互作用与正物质并没有差别。也就是说,反质子-反质子之间的强相互作用存在着吸引,它们可以克服由于同号(负电荷)的反质子-反质子之间的库伦排斥而结合成反物质原子核。这项研究成为检测正反物质对称性的又一种新方式(图4、图5)^[5]。

该研究对于理解自然界中物质-反物质不对称性提供了新的基础。人类所认识的自然界充满了普通物质,而反物质却非常稀少,是一直以来困扰科学家的难题。在宇宙大爆炸初期,夸克、反夸克是成对产生的,然后演化到现在,在物质空间缺失了数量上的对称性。而这项研究指出,反物质之间的作用与正物质作用是对称的。也就是说,在相互作用的层次上,反物质作用仍然满足CPT对称性。因此,要彻底解决正反物质粒子产额不对称这个难题,需要科学家全面地研究正反物质的产生、相互作用及其演化机制。因此,反物质研究有着广阔的前景^[6]。

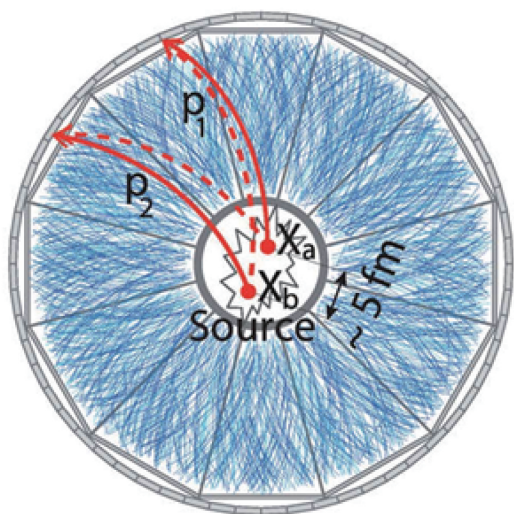


图4 STAR探测器内探测到的2个反质子-反质子关联示意

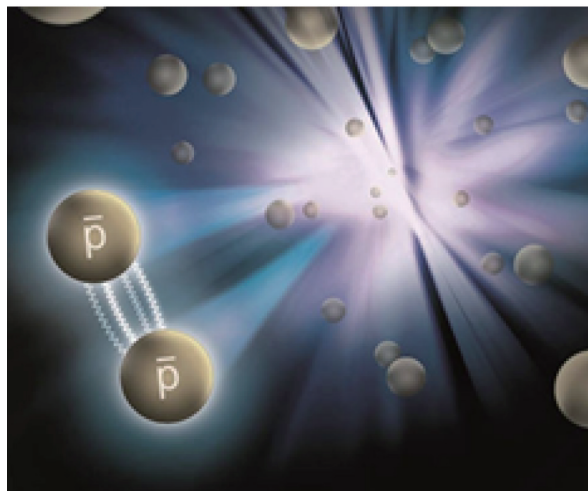


图5 反质子间相互作用示意

2 凝聚态物理

2.1 首次发现外尔费米子相似粒子

外尔费米子,被称之为“幽灵粒子”。1929年,由德国数学家、物理学家赫尔曼·外尔(Hermann Weyl)在狄拉克方程的基础上指出。狄拉克方程无质量的解描述的是一对重叠的具有相反“手性”(左旋和右旋)的新粒子——外尔费米子。这种神奇的粒子带有电荷,却不具有质量。寻找外尔费米子的努力一直持续不断,但是80多年过去了,人们一直没有能够在实验中观测到外尔费米子。2015年,3个相互独立的研究小组报道称发现了外尔费米子的相似粒子。

2014年12月31日,中国科学院物理研究所翁红明、戴希、方忠通过理论计算第一次预言 TaAs、TaP、NbAs 和 NbP 等打破中心对称的家族材料属于外尔半金属。不同于以往的理论方案,这一系列材料能自然合成,没有磁性且无需进行掺杂等细致繁复的调控,非常有利于实验验证(图6)^[7]。这一发现率先在 arXiv 网站对全世界公开,立即受到热切关注,国际上多个研究组开始了竞赛般实验验证工作。

中国科学院物理研究所陈根富研究组首先制备出具有原子级平整表面的大块 TaAs 晶体。北京大学贾爽研究组也几乎同时制备出了 TaAs 晶体。

2015年1月初,中国科学院物理研究所丁洪研究组用刚在上海光源建成的“梦之线”同步辐射X射线对TaAs晶体进行了精确地测量,第一次观测到TaAs表面态存在费米弧。通过与翁红明、戴希、方忠紧密合作,结合第一性原理计算结果,证实了表面费米弧的存在,并且确定了费米弧与外尔点在(001)表面投影的连接方式,提供了TaAs材料外尔电子态的直接实验证据(图7)^[8]。2015年2月底,他们又在瑞士光源观测到体态中的外尔点及其附近的四维外尔锥(图8)^[9]。与此同时,陈根富研究组通过精确的电输运测量,首次在TaAs单晶中观测到由手性反常导致的负磁阻效应,进一步从输运角度证

明了外尔费米子的存在(图9)^[10]。

丁洪等随后撰写论文,2月13日联系《Science》杂志并于2月16日提交论文,几经反复后在6月17日意外遭遇拒稿处理。

而使用北京大学贾爽研究组提供的相同材料,普林斯顿大学Hasan研究组及合作者利用ARPES也在实验中发现了外尔费米子。其论文2月15日提交,于7月16日在线发表在《Science》杂志网站上。

值得注意的,同样在2月15日提交论文,并于7月16日在线发表在《Science》杂志网站上的还有美国麻省理工学院陆凌、傅亮等的研究工作,他们宣布在一个三维光子晶体中观测到

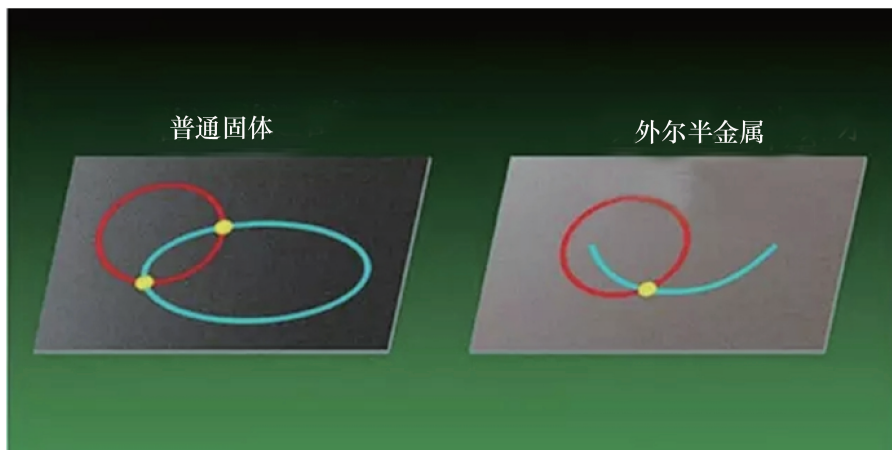


图6 固体表面上的2种费米面(蓝线)

外尔波色子,并认为这对发展新一代的光学有重要意义。

英国皇家化学会(RSC)的《Chemistry World》杂志作为独立的第三方科学媒体,第一时间全面、客观报道了3个国际研究小组的工作。

这是首次在凝聚态物质中实现外尔电子态并观测到其特有的物理特性,具有非常重要的物理意义。外尔半金属的发现不仅提出了很多新的科学问题,同时也带来未来革新性技术突破的希望。在外尔半金属中,由于受到拓扑保护,两个具有相反手性的外尔电子态间的散射很弱,可以用于实现极低能耗电子传输。特别是该电子态可以在室温下稳定存在,对室温低能耗电子学器件的应用具有重要价值(图10)^[11,12]。

普林斯顿大学的Hasan、麻省理工大学的Marin Soljaic、中国科学院物理研究所的方忠与翁红明关于外尔费米子的先驱性工作,入选欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选“2015年度国际物理学领域的十项重大突破之一”。

2.2 发现第二类外尔费米子

科学家预言在钨二碲化物(WTe2)中存在第二类外尔费米子,也就是外尔费米子的“表亲”。引领这项研究的主要有中国科学院物理研究所的戴希、普林斯顿大学物理系的B. Andrei Bernevig、苏黎世联邦理工学院的Alexey Soluyanov、Matthias Troyer等。这一研究结果发表在2015年12月25日的《Nature》杂志上(图11)^[13,14]。

外尔费米子、外尔波色子及II型外尔费米子的发现将极大推进未来技术的发展,有望完成诸多当前科技不可企

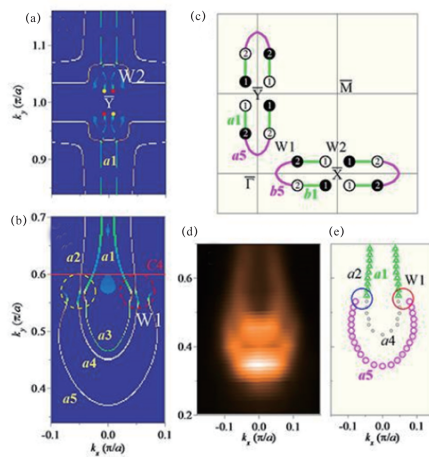


图7 实验和计算获得的TaAs(001)表面态费米弧

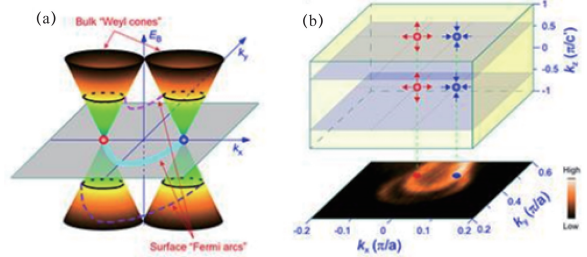


图8 TaAs体态外尔点与表面态费米弧的关系

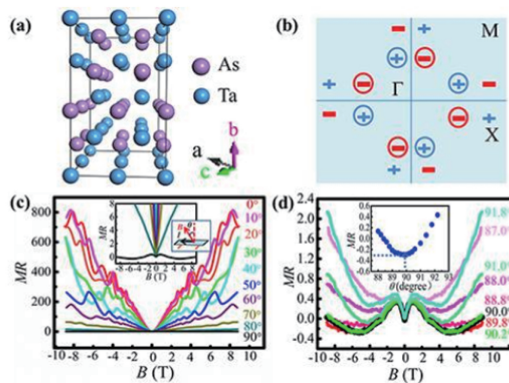


图9 TaAs的负磁阻现象



图10 中国科学院物理研究所研究人员在外尔费米子的发现中做出重要贡献

及的任务。外尔半金属材料能实现低能耗的电子传输,对解决当前电子器件小型化和多功能化所面临的能耗问题

意义重大。同时外尔费米子具有拓扑稳定性,对高容错的拓扑量子计算具有重要作用。当前电子设备充电方式是

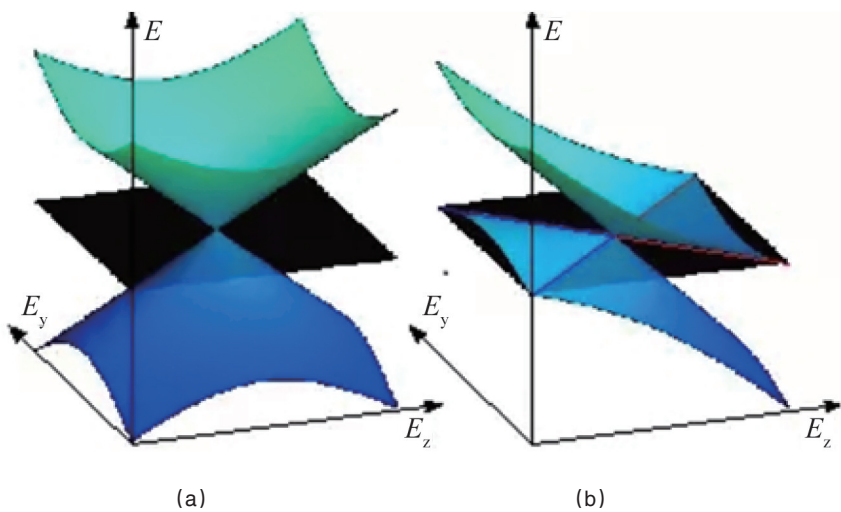


图11 标准I型外尔费米子能态(a)和新发现的II型外尔费米子能态(b)

电子流通过电线和电路进入设备,这些粒子不仅笨重、不易控制,还会导致能量流失。如果用外尔费米子将之置换掉,一个费米子装置就能够保证电流几乎不流失,并且在几乎不损耗能源的情况下完成高功率计算,可以解决智能电子设备待机时间短、电量消耗快等问题。另外,外尔费米子材料可以充当超导体,因而也可应用到量子物理学领域。这种材料能够保持长时间量子态,而不受或很少受到外部环境的影响,这使它成为打造一台实用、高容错量子计算机的热门材料,实现比目前的超级计算机运行速度更快的量子计算机。

在其他凝聚态系统中是不是可以找到更多的“基本粒子”?还有什么样的其他“粒子”被隐藏在无限的“材料宇宙”中?关于这方面的研究也许只是刚刚开始。

2.3 费米子显微镜露出曙光

美国麻省理工大学 Lawrence Chuck, Martin Zwiernik 等,制造了第一台“费米子显微镜”——能够为超冷气体中多达 1000 个独立原子成像的设备。观测是通过把费米子原子冷却到超低温、再用光和磁场精细调节原子间的相互作用来实现的。对于理解材料中的电子如何相互作用,已经有许多重大的进展,通过此次物理学家观测单个费米子在气体冷却时的行为,费米子显微镜把这种方法又向前推进了重要的一步。这项新技术可能很快就会被研究者用于观测原子间的磁相互作用,甚至可能被用于探测体系内的量子纠缠。这项工作把观测对象从很多原子的集合缩小到单个原子,即大大提高了分辨率。由此可观察到很多以前想象不到的现象,以后还有可能把对单原子的观测升级为控制。此项研究结果发表在 2015 年 5 月 13 日《Physical Review Letters》上(图 12)^[15]。

2015 年 12 月 11 日,被欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选为“2015 年度国际物理学领域的十项重大突破之一”。

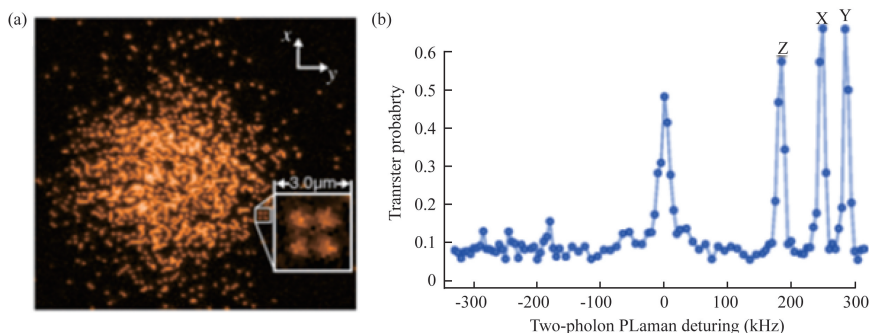


图 12 费米子显微镜成像

2.4 硫化氢创高温超导新纪录

超导每年都在刷新纪录。2015 年,德国美因茨市马普学会化学研究所 Mikhail Erements, Alexander Drozdov 等发现了第一种在地球表面能自然出现的温度下超导的材料。该团队发现,150 万个大气压的极端压强下的硫化氢直到 203 K 都是超导体,这个温度比南极洲记录到的最低温度要高 19 K,这项发现可能为室温超导体铺平了道路。这项工作把超导温度提高了几十度,甚至超过了地球表面的最低温度,这是个重要的里程碑。当然离实用还很远,因为 150 万大气压的压强是个严重障碍。

该成果发表在 2015 年 8 月 17 日《Nature》杂志上(图 13)^[16],并被欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选为“2015 年度国际物理学领域的十项重大突破之一”。

2.5 首次探测到虚磁场中“李-杨零点”

中国科学技术大学教授杜江峰团队和香港中文大学合作,在多体系统量子模拟方面取得重要进展,在国际上首次成功实现探测虚磁场中“李-杨零点”实验。该研究成果发表在 2015 年 1 月 9 日《Physical Review Letters》

上(图 14)^[17]。同时美国物理学会网站“物理”栏目以“视点”形式对该研究成果作了《真实世界中的虚磁场》的专题介绍。

1952 年,李政道和杨振宁证明了 Ising 铁磁模型在复数域内存在可以使系统配方函数为零的点(即“李-杨零点”),通过“李-杨零点”,可以获得系统各种热力学性质,这对于多体系统的相变研究有重要意义。由于这些零点存在于虚磁场条件下,“李-杨零点”一直以来被认为仅仅存在于理论中,实验上直接探测非常困难。

该团队利用亚磷酸三甲酯的分子,其中的磷核自旋作为探测比特,9 个氢核自旋模拟 Ising 铁磁系统,通过核磁共振方法,首先将磷核自旋制备到自旋向上和向下的量子叠加态,然后观测其量子相干随时间的演化,首次在实验上直接观测到该系统的“李-杨零点”,并

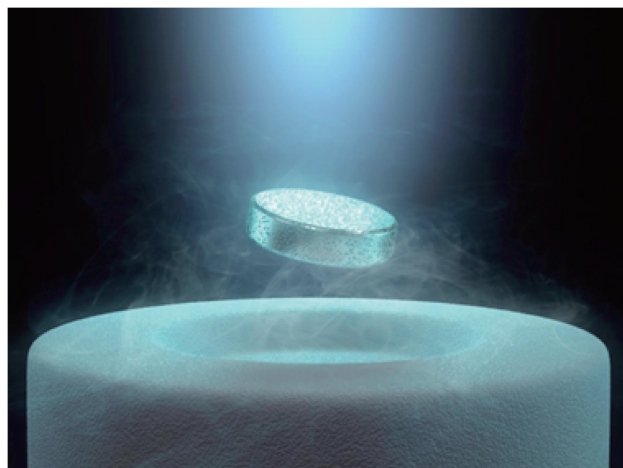


图 13 低温超导可以使物体悬浮在空中

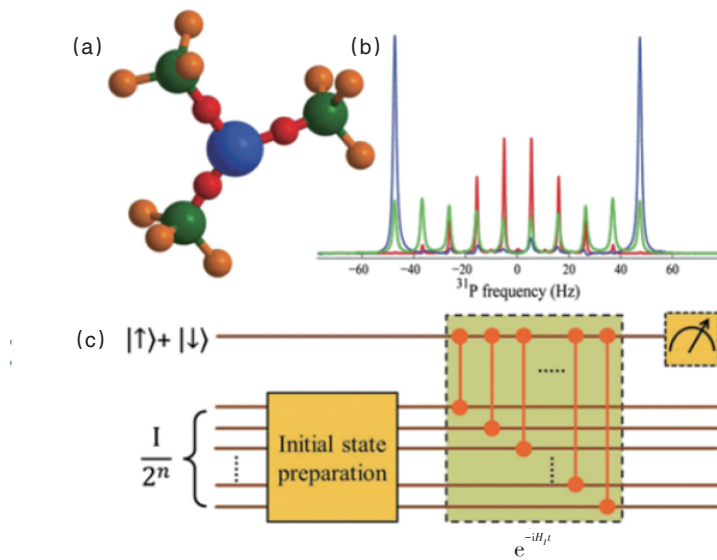


图14 探测“李-杨零点”的系统和方法

通过这些零点研究了系统的自由能和相变现象。

这是虚磁场中“李-杨零点”在实验中的第一次直接观测,不仅在统计物理学中极为重要,同时对研究复杂实际体系中隐藏在物理参数复数域内新的物理现象提供了一种新的方法和实验实现的可能性^[18]。

3 量子物理

3.1 量子纠缠被证实

量子纠缠效应描述了1个亚原子粒子的状态可以立即对另外1个亚原子粒子的状态产生影响的现象,不论这2个粒子相距多么遥远。在量子信息的各方面,如量子隐形传态、量子密钥分配、量子计算等都起着重要作用。

荷兰代尔夫特理工大学的科学家采用贝尔实验方法,证实成对电子之间存在“量子纠缠”。把两颗钻石分别放在代尔夫特理工大学校园内的两侧,距离1.3 km。每块钻石含有一个可以俘获单个电子的微小空间,此空间具有一种称为“自旋”的磁性,然后用微波和激光能的脉冲来纠缠,并测量电子的“自旋”。两侧设有探测器,2个电子之间的距离确保做测量的同时,信息无法以传统的方式交换。这个实验不仅仅证实了量子力学反常识的理论,也是朝着所谓的“量子互联网”的实际应用前进

了一步。

该成果发表在2015年10月21日的《Nature》杂志上(图15、图16)^[19,20],同时被美国《Science》杂志评选为“2015年十大科学突破之一”,被欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选为“2015年度国际物理学领域的十项重大突破之一”。

3.2 实现单个光子的多个自由度的量子隐形传态

1997年,国际上首次报道了单一自由度量子隐形传态的实验验证,该工作随后与伦琴发现X射线、爱因斯坦建

立相对论、沃森和克里克发现DNA双螺旋结构等影响世界的重大科技成果一起入选了《Nature》杂志“百年物理学21篇经典论文”(《Experimental quantum teleportation》)^[21]。

隐形传态要实用,就必须传输多个自由度。制备多粒子的纠缠态已经是一个很困难的任务了,而要传输多个自由度,就需要制备多粒子的多个自由度的“超纠缠态”,更加令人望而生畏。中国科学技术大学教授潘建伟、陆朝阳等(图17)就是攻克了这个难关,成功制备了国际上最高亮度的自旋-轨道角动量超纠缠源、高效率的轨道角动量测量器件,突破了以往国际上只能操纵两光子轨道角动量的局限,搭建了6光子11量子比特的自旋-轨道角动量纠缠实验平台,从而首次让一个光子的“自旋”和“轨道角动量”两项信息能同时传送,为发展可扩展的量子计算和量子网络技术奠定了坚实的基础。2015年2月26日,《Nature》杂志以封面标题的形式发表了《Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon》(《单个光子的多个自由度的量子隐形传态》)^[22]。该成果被欧洲物理学会新闻网站《Physics World》评选为“2015年度国际物理学领域的10项重大突破之首”,其他9项突破排名不分先后。

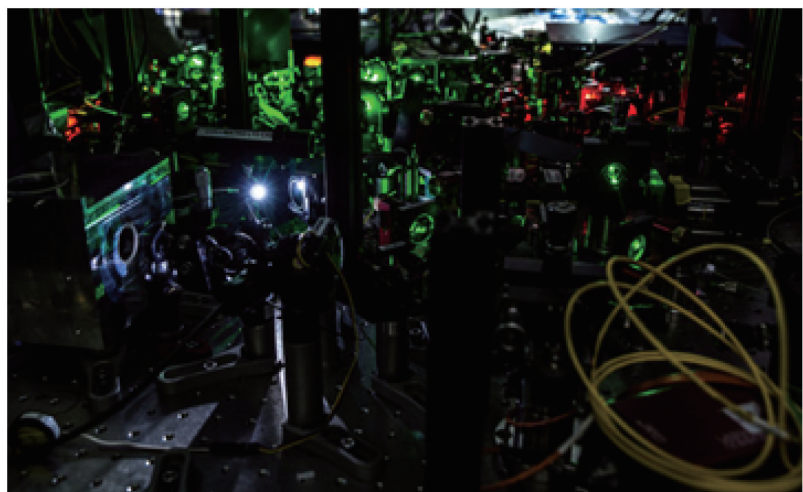


图15 代尔夫特理工大学的最新实验证明,物质的确可以远隔万里却相互作用

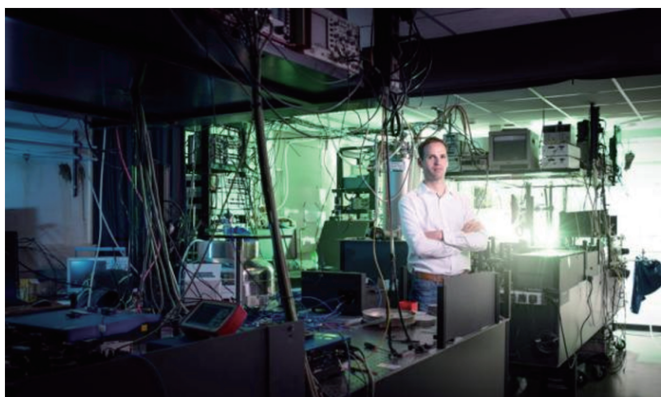


图 16 代尔夫特理工大学科维理纳米科学研究所物理学家 Ronald Hanson

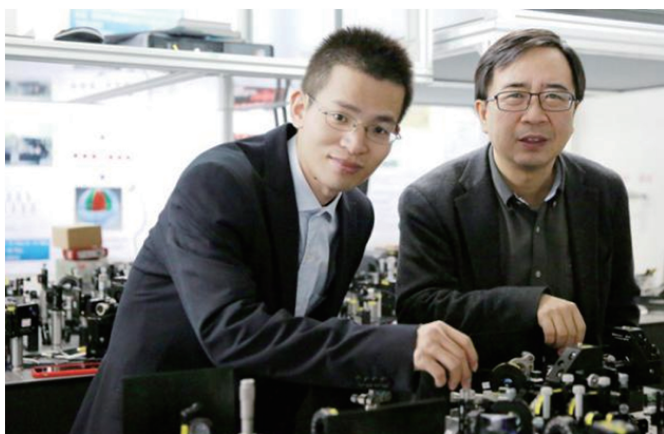


图 17 潘建伟 (右) 和陆朝阳 (左)
(图片来源: <http://china.caixin.com/2015-12-12/100885228.html>)

3.3 实现确定性单光子的多模式固态量子存储

中国科学技术大学李传锋研究组成功实现了量子点发射的确定性单光子的多模式固态量子存储。该成果在国际上首次实现量子点与固态量子存储器 2 种不同固态系统之间的对接,并且实现了 100 个时间模式的多模式量子存储,模式数创造世界最高水平,为量子中继和全固态量子网络的实现打下坚实的基础。

纠缠分发是构建量子网络的核心技术。由于信道中不可避免的传输损耗,目前在信道中直接进行纠缠分发只能达到百公里量级,要想实现长程的纠缠分发则需要基于单光子量子存储和两光子 Bell 基测量的量子中继技术。目前已经实验验证的量子存储或量子

中继方案都是基于概率性光源(光子产生几率一般低于 1% 且存在多光子项)的存储,这类方案的长程纠缠分发时间预计将在分钟量级以上。

利用自组织量子点产生确定性单光子源(原则上光子产生几率 100% 且每次有且仅有单个光子),然后通过光纤传输到 5 m 外的另一张光学平台上的固态量子存储器中。他们一方面利用局部光学加热方法调节单光子的波长与固态量子存储器的操作波长相匹配,另一方面利用光学频率梳技术把单光子存储到研究组自主研发的“三明治”型固态量子存储器^[23]

中,并测得单光子偏振态的存储保真度为 91.3%。研究组进一步实验实现确定性单光子的 100 个时间模式的多模式量子存储,模式数创造了世界最高水平。该研究成果发表在 2015 年 10 月 15 日的《Nature Communications》杂志上^[24]。图 18 为量子网络示意图,其中小球表示量子节点,线表示信道,不同节点间利用信道传输光子进行连接。不同颜色的小球代表构成量子网络的各种不同量子系统。右下角插图展示了量子点与固态量子存储器的能级结构^[25]。

3.4 量子态叠加效应尺度刷新纪录

美国斯坦福大学的研究团队成功地让原子云处在相距半米的两个状态进行了叠加,这将量子态叠加效应的最大尺度纪录从 1 cm 扩展到了 54 cm。相关研究论文在线发表在 2015 年 12 月 23 日《Nature》杂志上^[26]。

研究人员通过创建一个玻色-爱因斯坦凝聚态云(BEC),由所有最初在相同状态的 1 万个铷原子(在一个超级冷冻室)组成。BEC 是爱因斯坦在 80 年前预言的一种新物态,表示原来不同状态的原子突然“凝聚”到同一状态。然后,用激光把云推到 10 m 高的腔室,使原子进入一个给定状态。当云到达腔顶时,波函数是给定状态的对半混合物,代表位置是 54 cm。当云被允许回

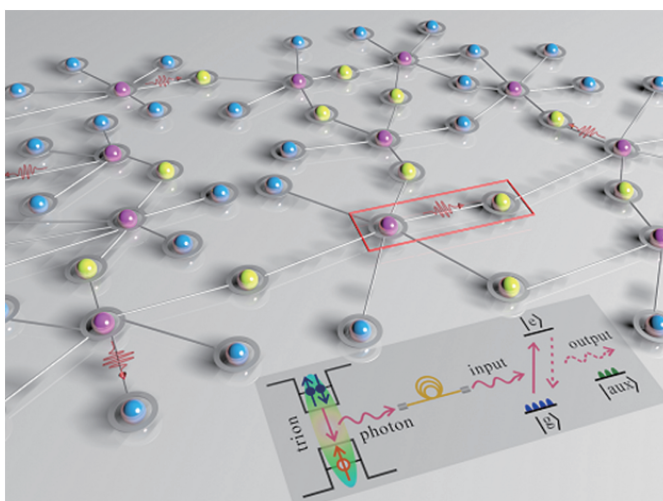


图 18 量子网络示意

(图片来源: http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNTA5NTYxOA==&mid=400041093&idx=4&sn=2245197ee3c4fce21823d3dd21375fa3&scene=23&srcid=01067TiDBIMLMJbRzKQbrCxn#rd)

到底时,研究证实原子从两个不同的高度下降,证明云处在叠加状态中。

虽然实验刷新了宏观尺度叠加态的新纪录,但其仍然是用单个原子进行的。新研究成果可能意味着找到了量子世界与经典世界之间的分界点,因为相对那些量子水平的物体,新研究成果更适用于大尺度的宏观物体。《Nature》杂志也发表了针对该团队研究的社论,描述他们的实验过程,并总结相关结果^[27]。

3.5 “驯服”薛定谔猫

在寻求开发新一代具有革新能力并可解决很多问题的计算机时,英国萨塞克斯大学(University of Sussex)物理学家使用基于囚禁离子和微波辐射的新技术,能够创建和完全控制一个薛定谔猫态的离子,这一成果超越了基础科学,将向实现创建大型微波量子计算机迈出重要一步。该研究成果发表在2015年1月19日的《Physical Review A》杂志上(图19)^[28]。

量子力学奇特和神秘的性质往往是通过一个著名实验来说明,即称为薛定谔猫,这是奥地利物理学家埃尔温·薛定谔于1935年提出的一个思想实验。通过这一实验,薛定谔指出了应用量子力学的哥本哈根诠释于宏观物体会产生的严峻问题,以及这问题与物理常识之间的矛盾。在这个实验里,由于先前发生事件的随机性质,猫会处于生存与死亡的叠加态。而根据退相干理论,猫不可能永远处于这种叠加态,由于环境的影响,很快会产生退相干效

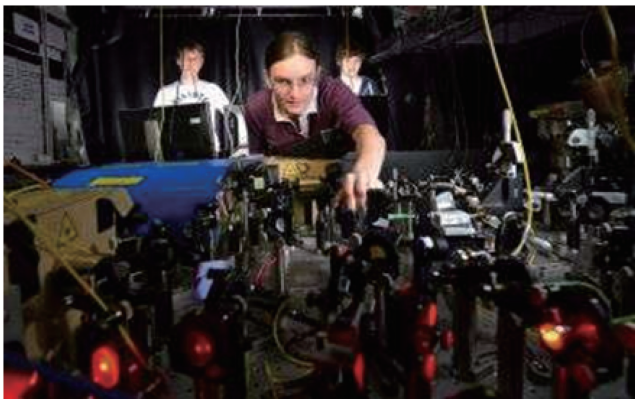


图19 用微波辐射创建“量子纠缠”

应,猫改为处于生存或死亡的状态,因此,一般而言绝对无法观察到生存与死亡的叠加态。迄今为止,物理学家只能精心制备出一些介观物体的叠加态。

这项新研究使用基于囚禁离子(带电原子)和微波辐射的新技术,设法创建了一种特殊类型的“薛定谔猫”,可像原来的薛定谔猫一样,通过创建“量子纠缠”让这些离子同时以两种状态存在。基于量子物理的理论,囚禁离子将引领构建一种新型计算机,能够以前所未有的速度解决某些问题^[29]。

4 光物理

4.1 首次捕捉激光在空气中飞行画面

科学家利用能探测到单光子,每秒200亿帧的超高速摄像机,首次捕捉到了激光在空气中飞行的画面。在10 min内,研究者记录了光子与空气碰撞时产生的200万次激光脉冲。该技术可用于巡查环境角落,显示屏幕上看不到的物体,还可用在需要精准计量时间信息的地方。

该相机由爱丁堡大学开发,其感光部件由单光子光敏像素阵列构成。这些像素有两种特性:一是对单个光子敏感的能力——每个像素的敏感性是人眼的10倍左右;二是它们的速度——每个像素被激活只要67ps(万亿分之1秒),比人眨一下眼的速度要快10亿倍。这些特性能够实现“飞光成像”,当光在空中飞行,从物体上散射开来时,这种成像方法连光本身也能拍下来。

这种迷你型数码摄像机是进行激光研究的同类产品第一种可以轻松携带的。该摄像机具有一个32×32的探测器网格,能记录光子到达的时间和速率——每秒200亿帧。该成果发表在2015年1月27日《New Scientist》杂志上(图20、图21)。

科学家希望能够更加精确地记录光子运动,从而为开发快速角检测的工具提供帮助。目前要获得一张角检测的图像可能需要1 h,而新技术将可以在几分钟内完成。

据英国皇家学会会展介绍,这些技术可以用于巡查环境角落。放在隐蔽角落处的物体也会散射光子,通过记录这些散射光,就能显示屏幕上看不到的物体。此外,该相机还可以用在需要精准计量时间信息的地方^[30]。

4.2 声波可让光纤中的光变“听话”

要让一根光纤只向一个方向传导光,方法已经不止一种。美国伊利诺伊大学厄本那-香槟分校研究人员首次实验证明了用布里渊散射引致透明(BSIT)可以实现这种效果,BSIT效应允许光向前传播,而向后传播的光被强烈吸收,还可以让光纤中的光加快、减慢甚至停止。这种非交互的性质是构建绝缘器和环形器的基本条件,也是光学设计中必不可少的工具之一。相关论文发表在2015年1月的《Nature Physics》杂志上。

在大部分声学、电磁学和热力学中,反演对称性(如交互性)是一项基本原则。在一些特殊设备应用中,工程师经常要用各种技巧来打破交互性。现有的非交互性光学器件如绝缘器和循环器,通过磁场打破交互性。而在芯片尺度上产生磁场的材料很难制造,在一些系统中,磁场也是一种干扰源。

该实验证明了一种不用磁铁也能获得线性光学非交互性的方法,在任何普通的光学材料系统中都能实现,目前的任何商业光学工厂都能使用。目前的布里渊绝缘器是非线性设备,还需要过滤散射光,而BSIT是一种线性的非交互机制。BSIT还能加快和减慢光的波群速度,物理学家称之为“快”光和“慢”光。图22^[31]为BSIT效应产生慢光、快光和单向封锁光。红色为减慢,蓝色为加快,黄色显示封锁效应。“慢”光技术对量子信息存储和光缓存器设备极为有用。将来有一天,这种缓存器有望并入量子计算机^[31]。

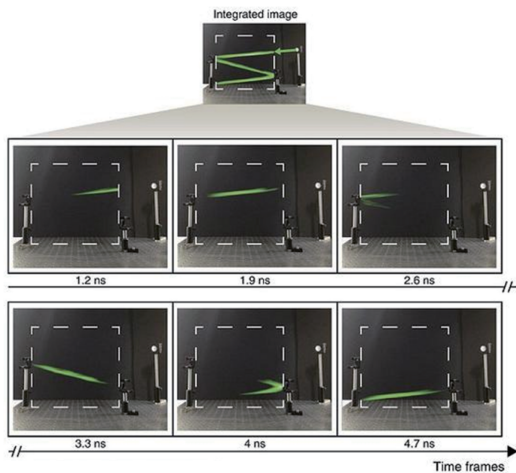


图20 激光在空气中飞行的定格画面
(图片来源: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/1/312627.shtml>)

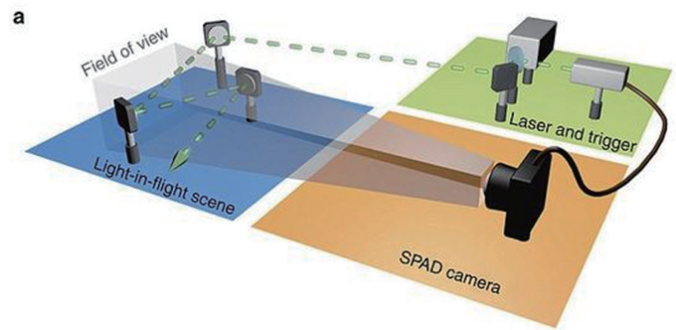


图21 摄像机从侧面对射向一系列镜面的激光束进行拍摄
(图片来源: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/1/312627.shtml>)

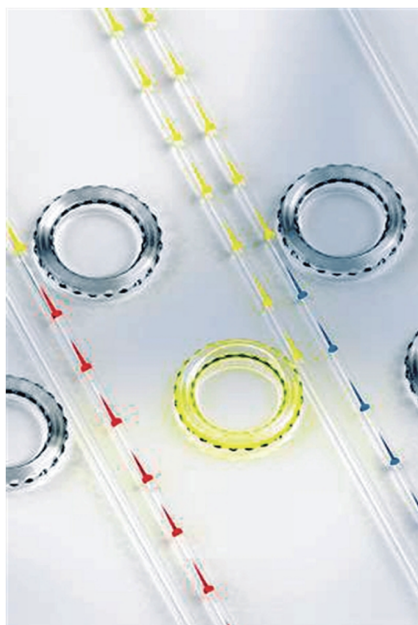


图22 BSIT效应产生慢光、快光和单向封锁光

5 天体物理

2015年,科学家借助哈勃望远镜、开普勒望远镜、斯皮策望远镜等高端观测仪器,在暗物质、黑洞等方面获得各种突破性进展,让人们进一步认识到宇宙之广大及人类认识之狭小。

5.1 首次从银河系获得暗物质存在的直接证据

2015年2月9日,欧洲科学家首次

通过对比星体自转速度的方法,从银河系获得直接证据,证实宇宙存在暗物质。图23中,蓝色的球形对称光晕即为银河系中的暗物质。

从目前的观测数据证实,银河系内存在暗物质,而不必再做出假设。该结果有望破除依赖模型的局限,消除直接和间接探测暗物质中存在的模糊性,有助于揭示银河系的结构和演化^[32]。

5.2 发现极古老超级黑洞或改写物理学

2015年2月25日,天文学家宣布,在128亿光年远的类星体中,发现存在质量为太阳120亿倍的极其古老超级黑洞SDSS J0100+2802(图24)。该黑洞仅比宇宙年轻9亿年,亮度是太阳的420兆倍。该成果发表在《National Geographic》上。

令科学家吃惊的是,它的年龄非常古老,在宇宙极其年轻的时候,它就生成了。若以宇宙为100岁的年龄比喻,这个黑洞是在宇宙6岁的时候形成的。

现有科学理论无法解释如此质量巨大、能力极强的黑洞为什么在宇宙的很早时期形成,因此科学家认为此发现将会

改写物理学^[32]。

5.3 “新视野号”最近距离观测冥王星

2015年7月13日,美国航空航天局(NASA)“新视野号”探测器终于在历时9年半的飞行后,抵达冥王星上空12500 km的位置,对冥王星进行有史以来最近距离的观测。

目前,科学家根据“新视野号”从48亿km外传来的观测数据得知,冥王星不是以前想像的那样死气沉沉,而是一颗美丽、充满神秘色彩的星球,有蓝天、大气、高山、冰原甚至下雪天等各种地质和气候活动。而且,“新视野号”观测了冥王星的五颗卫星,发现它们也有出乎意料的地质特点。其中,最大的卫星Charon平均直径为1207 km,地形十分复杂,有山川、高地、陨坑等构造。图

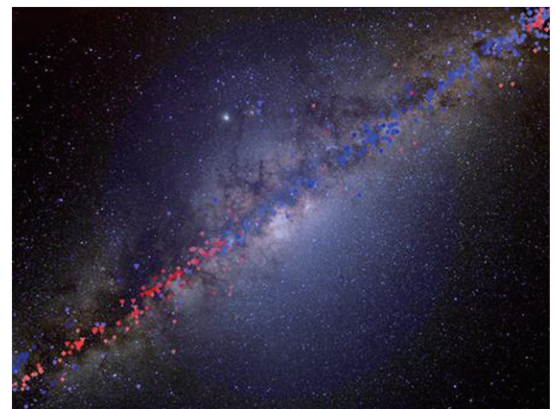


图23 银河系中的暗物质 (图片来源: NASA)

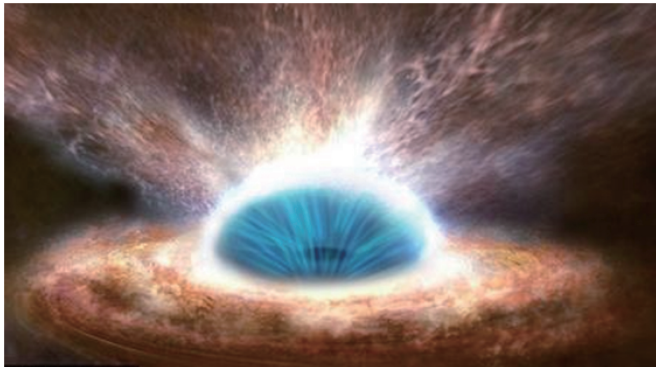


图24 超级黑洞模式示意 (图片来源: NASA)



图25 冥王星和它的卫星 Charon(图片来源:NASA)

25为Charon(左上)和它的主星——冥王星(右下)的对比图^[32]。此成果被美国《Science》杂志评选为“2015年十大科学突破之一”。

5.4 发现“地球2.0”引人关注地外生命是否存在

2015年7月23日,美国航空航天局公布,开普勒太空望远镜找到目前为止与地球最相似的行星——开普勒452b。John Grunsfeld认为开普勒452b(图26)是和地球“最相像的双胞胎”或“地球2.0”。

开普勒452b位于1400光年远的宜居带,比地球大60%左右。它可能也是一个岩石星球,有活跃的火山运动、海洋和阳光,不会太冷也不会太热,有液态水。它与恒星的距离相于地球与太阳的距离,它的1年有385天^[32]。

5.5 实验室首次发现另外空间

2015年8月20日,西班牙巴塞罗那自治大学的科学家首次在实验室制造出传导磁场的“虫洞”时空隧道,并检测到自然界不可能单独存在的磁单极子。

磁场的磁极通过无法检测的途径被传送到另外部位,而这个隐形的传送过程与途径就是超出常规三维空间的另外空间。理论物理学家推测,银河系存在足够大的时空通道“虫洞”,可以让飞船通过(图27)^[32]。

5.6 火星存在液态水

2015年9月28日,美国航空航天局宣布,火星(图

28)不再是以前科学所描述的干枯不毛之地。在这个红色星球上,存在随季节而变化的盐水,因此火星存在生命的基本元素——液态水。

科学家描述,火星南半球局部地表的“季节性斜坡纹线”(recurring slope lineae)是季节性变化的盐水造成的地质特征。这一令人兴奋的结果带来一个新的待解之谜:盐水来源。但是不管怎样,科学家将集中精力寻找火星生命^[32]。

5.7 观测到扭曲的暗物质

宇宙在我们眼中的形象其实是部分受到那些巨型暗物质团阻碍后形成的样子,这扭曲了遥远星系的本来面貌。不过天文学家并未因此而抱怨,相反,他们利用这一引力效果来判断暗物质的位置。智利的暗物质调查(DES)就是这样一个观测项目。通过分析南方天空139平方度的领域,DES团队创建了巨大而连续的暗物质地图。他们通过测量附近星系图形的微小距离来推断暗物质团的存在位置(图29)。项目组目前正致力于完成一幅更大的地图(约全天空的1/8),借此他们将能够测量宇宙的扩张速度——这是神秘的暗能量所带来的影响^[32]。该成果被美国物理学会(APS)评为“2015年物理学标志性进展之一”。

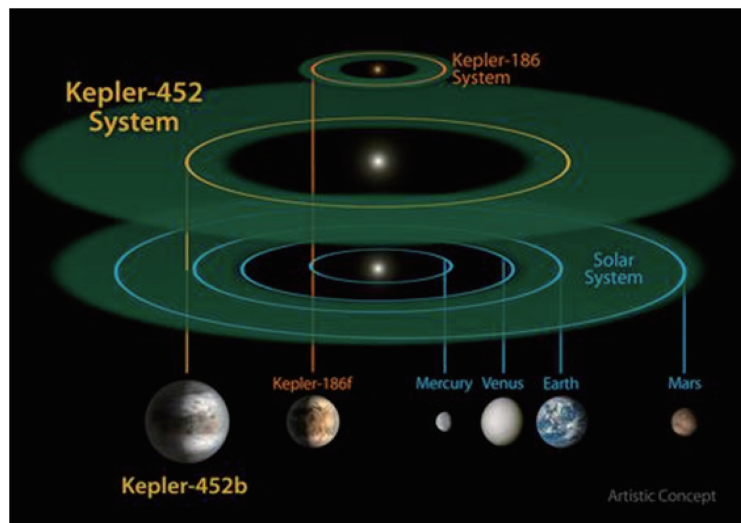


图26 开普勒452b(图片来源:NASA)

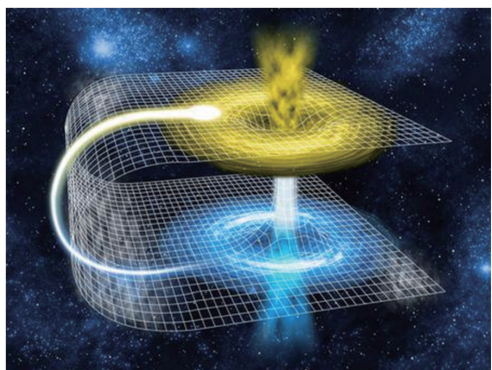


图27 “虫洞”示意

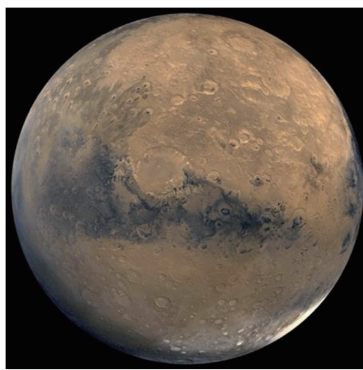


图28 火星(图片来源:NASA)

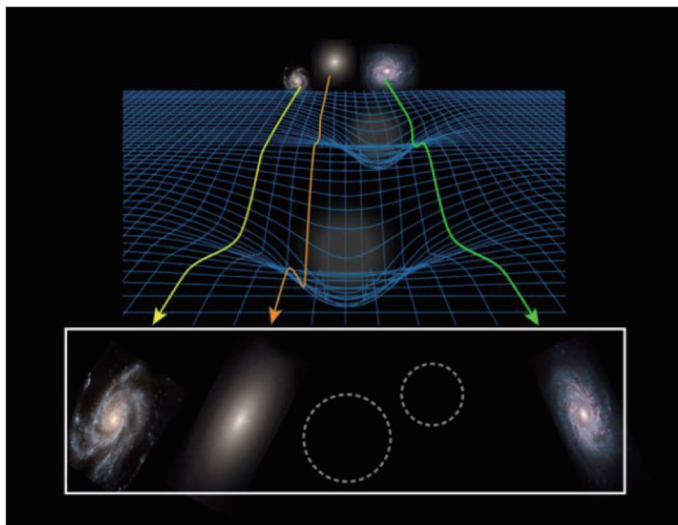


图29 暗物质示意

(图片来源:http://www.360doc.com/content/16/0102/20/1751130_524889013.shtml)

6 重大事件

6.1 2015年诺贝尔物理学奖

2015年10月6日,2015年诺贝尔物理学奖揭晓,授予了日本的Takaaki Kajita和加拿大的Arthur B. McDonald(图30),以表彰他们“发现了中微子振荡,该发现表明中微子具有质量”。该发现无论对于粒子物理学本身,还是我们正尝试理解的宇宙,都具有极其重要的意义。

20世纪60年代,物理学家计算发现,来自太阳的中微子出现了失踪,大约2/3的中微子不见了,这些中微子哪儿去了?而Takaaki Kajita与Arthur B. McDonald的实验证明:这些中微子“身份”确实转变了。这种改变的发生需要中微子有质量,虽然质量极小,却是一

个历史性的发现。

发现了中微子的振荡和质量,不仅表明粒子物理的标准模型仍有待扩展,



图30 日本科学家Takaaki Kajita和加拿大科学家Arthur B.Mcdonald
(图片来源:<http://news.sciencenet.cn/html/shownews.aspx?id=328149>)

为未来粒子物理的发展指出更多的方向,还将有助于理解宇宙中物质和反物质为什么是不对称的。标准模型预言正物质和反物质是对称的,但是宇宙中主要是正物质,反物质非常少,科学家认为中微子质量很可能与此有关,这也是人们关心中微子振荡的重要原因。

6.2 中国科学家首获“基础物理学突破奖”

2015年11月9日,大亚湾中微子团队斩获“2016年基础物理学突破奖”,共同分享这一大奖的还有其它4个国际中微子实验团队(Kam-LAND, K2K/T2K, SNO, SuperKamiokande)。这也是中国科学家首次获得该奖项。图31为大亚湾中微子项目的首席科学家王贻芳参加在美国加州圣何塞举行的颁奖仪式现场照片。

以王贻芳为首的实验团队,利用大亚湾核反应堆群产生的大量中微子,发现了中微子的3种振荡模式,定量测定了中微子的非零混合角(θ_{12} , θ_{23} , θ_{13})及中微子质量的平方差。这些参数都是自然界的基本常数,对于进一步理解中微子质量起源和探索中微子与轻子部分的CP破坏具有重大科学意义(C和P分别代表电荷共轭变换和空间反演变换2种基本分离对称性)。不仅使我们更深入了解了中微子的基本特性,也决定了我们是否能够进行下一代中微子实验,以了解宇宙中物质—反物质不对称现象,即宇宙中反物质消失之谜。



图31 王贻芳参加在美国加州圣何塞举行的颁奖仪式(图片来源:中央电视台)

6.3 中国成功发射首颗暗物质粒子探测卫星“悟空”

2015年12月17日,中国首颗暗物

质粒子探测卫星“悟空”成功发射升空。升空后第7天,经卫星平台测试、有效载荷管理器加电测试后,第一批科学数据下传至中国科学院国家空间科学中心空间科学任务大厅(图32)^[33]。

暗物质粒子探测卫星具有先进的科学探测指标,观测能段范围为0.5 GeV—10 TeV,能量分辨率优于1.5%,是迄今为止观测能段范围最宽,能量分辨率最优的暗物质粒子探测卫星,超过国际上所有同类探测器。

在3年的设计寿命中,暗物质卫星将通过高空间分辨、宽能谱段观测高能

电子和伽马射线寻找和研究暗物质粒子,同时将在宇宙射线起源和伽马射线天文学方面取得重大进展。



图32 中国科学院国家空间科学中心空间科学任务大厅正在做数据接收准备

参考文献(References)

- [1] Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Observation of J/ψ p resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(7): 072001.
- [2] LHCb 实验大型强子对撞机发现五夸克粒子[EB/OL]. 2015-07-15, http://news.k618.cn/discovery/201507/t20150715_6054927.html.
- [3] 欧洲核子研究中心(CERN)证明质子与反质子为真正镜像[EB/OL]. 2015-08-15, http://www.wokeji.com/kbjh/zxbd_10031/201508/t20150815_1563205.shtml.
- [4] Ulmer S, Smorra C, Mooser A, et al. High-precision comparison of the antiproton-to-proton charge-to-mass ratio[J]. Nature, 2015, 524(7564): 196-199.
- [5] STAR Collaboration. Measurement of interaction between antiprotons[J]. Nature, 2015, 527(7578): 345-348.
- [6] 科学家首次测量到反物质间相互作用力[EB/OL]. 2015-11-07, <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/11/331200.shtml>.
- [7] Weng H, Fang C, Fang Z, et al. Weyl semimetal phase in noncentrosymmetric transition-metal monophosphides[J]. Physical Review X, 2015, 5(1): 011029.
- [8] Chen X. Experimental discovery of Weyl semimetal TaAs[J]. Science, 2015, 9: 002.
- [9] Lv B Q, Xu N, Weng H M, et al. Observation of Weyl nodes in TaAs[J]. arXiv preprint arXiv:1503.09188, 2015.
- [10] Huang X, Zhao L, Long Y, et al. Observation of the chiral anomaly induced negative magneto-resistance in 3D Weyl semi-metal TaAs[J]. arXiv preprint arXiv:1503.01304, 2015.
- [11] Lv B Q, Weng H M, Fu B B, et al. Discovery of Weyl semimetal TaAs[J]. arXiv preprint arXiv:1502.04684, 2015.
- [12] 实验发现外尔费米子[EB/OL]. 2015-08-28, http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNTA5NTYxOA==&mid=209990644&idx=3&sn=1f67fa216e7f4553dc9a6aa950e8603c&scene=23&srcid=0106H5tB7zLY69kHEEMRVY1o#rd.
- [13] Soluyanov A A, Gresch D, Wang Z, et al. Type-II Weyl semimetals[J]. Nature, 2015, 527(7579): 495-498.
- [14] 第二类Weyl费米子[EB/OL]. 2015-12-01, http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNTA5NTYxOA==&mid=400757792&idx=3&sn=837fd758cd9b14fa175b2767aac72b67&scene=23&srcid=01065AyYTJxuoDYnSMcllbal#rd.
- [15] Cheuk L W, Nichols M A, Okan M, et al. Quantum-gas microscope for fermionic atoms[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(19): 193001.
- [16] Carlidge E. Superconductivity record sparks wave of follow-up physics[J]. Nature, 2015, 524(7565): 277-277.
- [17] Peng X, Zhou H, Wei B B, et al. Experimental observation of Lee-Yang zeros[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(1): 010601.
- [18] 科学家首次探测到虚磁场中“李-杨零点”[EB/OL]. 2015-01-27, http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAwNTA5NTYxOA==&mid=203386564&idx=3&sn=a7ea79ce2364dbee6f44af08bb613da3&scene=23&srcid=0106kC97LFZUnsXEPICQs3nc#rd.
- [19] Hensen B, Bernien B, Dréau A E, et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres[J]. Nature, 2015, 526(7575): 682-686.
- [20] 荷兰科学家领导的国际科研团队证实量子纠缠或打破爱因斯坦光速不变原理[EB/OL]. 2015-10-25, http://www.guanchna.cn/Science/2015_10_25_338820.shtmlhttp://www.guanchna.cn/Science/2015_10_25_338820.shtml.
- [21] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation[J]. Nature, 1997, 390(6660): 575-579.
- [22] Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon[J]. Nature, 2015, 518(7540): 516-519.
- [23] Zhou Z Q, Huelga S F, Li C F, et al. Experimental detection of quantum coherent evolution through the violation of Leggett-Garg-type inequalities[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(11): 113002.
- [24] Tang J S, Zhou Z Q, Wang Y T, et al. Storage of multiple single-photon pulses emitted from a quantum dot in a solid-state quantum memory[J]. Nature communications, 2015, 6.
- [25] 中国科大首次实现确定性单光子的多模式固态量子存储[EB/OL]. 2015-10-18, http://news.ustc.edu.cn/xwbl/201510/t20151018_229114.html.
- [26] Kovachy T, Asenbaum P, Overstreet C, et al. Quantum superposition at the half-metrescale[J]. Nature, 2015, 528(7583): 530-533.
- [27] 量子态叠加效应尺度刷新纪录扩展到54厘米[EB/OL]. 2015-12-31, <http://tech.qq.com/a/20151231/017419.htm>.
- [28] Lake K, Weidt S, Randall J, et al. Generation of spin-motion entanglement in a trapped ion using long-wavelength radiation[J]. Physical Review A, 2015, 91(1): 012319.
- [29] 英物理学家“驯服”薛定谔猫[EB/OL]. 2015-01-21, <http://paper.sciencenet.cn/htmlpaper/2015121193421835504.shtml>.
- [30] 科学家首次捕捉激光在空气中飞行画面[EB/OL]. 2015-01-30, <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/1/312627.shtml>.
- [31] 声波可让光纤中的光变“听话”[EB/OL]. 2015-01-30, <http://paper.sciencenet.cn/htmlpaper/20151301335549935601.shtml>.
- [32] 2015年十大科学新发现从否定进化论到发现另外空间[EB/OL]. 2016-01-02, http://www.360doc.com/content/16/0102/20/1751130_524889013.shtml.
- [33] “悟空”睁开眼首次获取科学探测数据[EB/OL]. 2015-12-24, <http://news.sciencenet.cn/html/shownews.aspx?id=334782>.

(责任编辑 陈广仁)