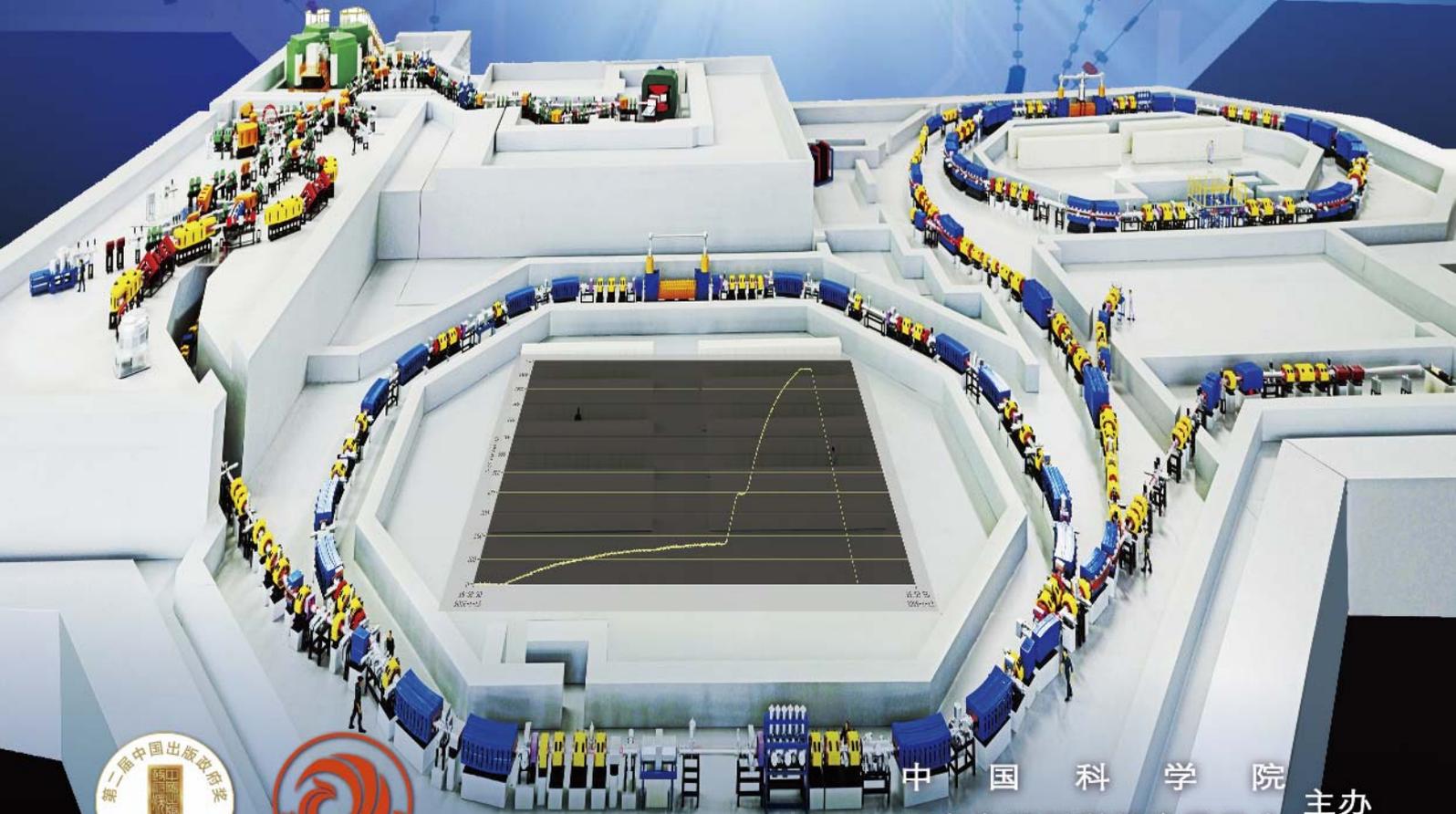


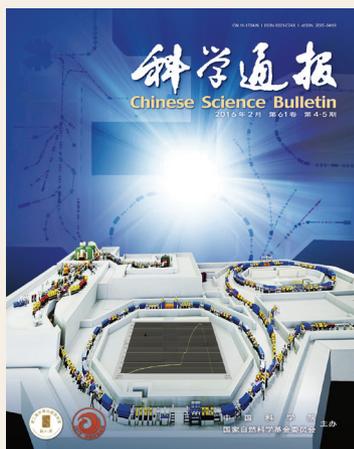
科学通报

Chinese Science Bulletin

2016年2月 第61卷 第4-5期



中国科学院 主办
国家自然科学基金委员会



封面说明

重离子加速器具有重要的科学作用和社会意义,是研究物质微观结构、宇宙演化、解决人类有关生存环境问题的有效手段,如探索原子核存在的极限,探究宇宙中铁到铀元素的来源以及能量的起源,探究太阳系的演化过程等。此外,重离子加速器可为应用研究提供独特的实验条件,可开展先进能源相关材料研究、生命科学研究、高效生物农业研究、空间辐照效应研究等。中国科学院近代物理研究所是一个依托大科学装置,主要从事核物理基础前沿和重离子束应用研究、同时发展先进粒子加速器及核应用技术的重离子科学综合研究中心。通过几代人的不懈努力和三项大科学工程建设,建成了兰州重离子加速器(HIRFL)国家重大科技基础设施,主要技术指标达到国际先进水平,为我国重离子物理及交叉学科研究创造了先进的实验条件,取得了一批重要科研成果,使我国进入重离子物理及交叉学科研究的国际先进行列。同时,在核技术产业化方面也取得了重要进展,为我国科技、经济、社会的发展和国家安全作出了贡献。详见夏佳文等人文(p467)。

目次

2016年2月,第61卷,第4-5期

Science 125个科学前沿问题系列解读 (II)

399 爱因斯坦的未竟之梦:物理规律的大统一

杨金民,王飞

对物理学中的统一理论的发展历史和目前的现状展开综述。从牛顿的天和地的统一,到麦克斯韦的电、磁、光的统一;从爱因斯坦的时间、空间和物质的统一,到电磁作用和弱作用的统一。对一些未成功的统一理论也给予简要介绍。最后评述目前正在尝试的试图把所有相互作用都统一进来的超弦理论。

404 计算的极限

季铮锋,夏盟估

计算深刻地影响着人们的日常生活和生产活动,也推动了诸多其他科学领域的发展和变革。本文从几个不同的方面探讨计算的能力和极限。从计算的模型和丘奇图灵论题,到P和NP问题的深远影响和量子计算对传统计算的冲击,深入讨论了我们对计算极限的理解。

409 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起

马瑾

作者认为地震是以突发形式表现的构造变形,它发生前有一个由慢变快的物理过程,地震是应有先兆的。寻找先兆除受观测仪器、测点布局、以及地震先兆与主震之间关系复杂性等的限制外,抓住不可逆转的亚失稳阶段至关重要。

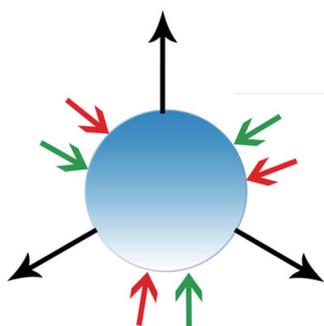
香山科学会议 专栏

评述/土木工程

415 中国桥梁技术的现状与展望

张喜刚, 刘高, 马军海, 吴宏波, 付佰勇, 高原

系统总结中国桥梁在建设技术等5个方面取得的主要进展与不足, 指出为了支撑国家重大发展战略、实现桥梁强国梦, 应尽快实施以“智能桥梁”为主题的“中国桥梁2025”科技计划。



▲ 徐金顺等 p426

自然科学基金项目进展专栏

进展/声学

426 液气相变型超声分子探针研究进展

徐金顺, 王志刚, 郑元义

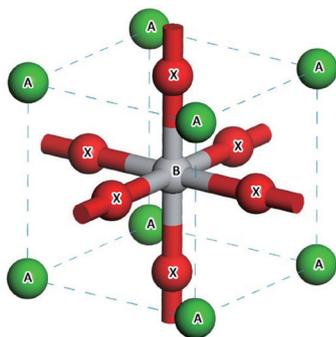
纳米相变型探针因其尺寸小可进入组织间隙并在一定条件下发生相变形成微泡等优势, 在临床应用方面显示出潜力. 本文对其相变机制及在生物医学领域的应用研究进行评述.

进展/分析化学

432 终端等重同位素标记串联质谱定量技术: 高通量、高准确度的肿瘤标志物筛查新方法

王丽蒙, 谢力琦, 陆豪杰

癌症的攻克和预防需要更为灵敏和特异的早期诊断和术后控制标志物. 终端等重同位素标记串联质谱定量方法为肿瘤标志物的筛查提供了新的手段. 本文综述了终端等重同位素标记串联质谱定量方法的最新发展及其在生物标志物研究中的应用.



▲ 白宇冰等 p489

评述/分析化学

442 硅纳米线场效应晶体管生物传感器在肿瘤分子诊断中的应用

鲁娜, 高安然, 戴鹏飞, 宋世平, 樊春海, 王跃林, 李铁

硅纳米线场效应晶体管(FET)在肿瘤分子诊断方面引起了研究者极大关注. 本文介绍了硅纳米线FET传感器的工作原理、制备方法、灵敏度影响因素, 以及在核酸定性定量检测、肿瘤蛋白标志物检测、分子间相互作用的应用.

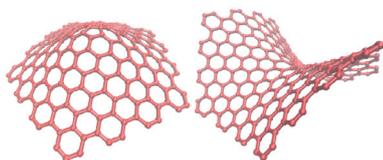
进展

有机化学

453 纯有机室温磷光体系的构筑及应用

马雅枝, 杨晓峰, 陈玉哲, 杨清正, 吴骊珠, 佟振合

磷光发射是分子激发态的特征之一. 本文综述了近5年来纯有机化合物室温磷光材料的最新研究进展及应用, 主要从长寿命磷光材料的构筑手段上进行分类论述, 并对今后的发展方向进行了展望.



▲ 徐志平等 p501

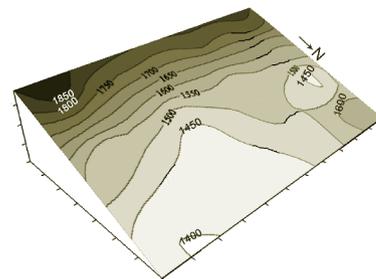
评述

原子核物理

467 兰州重离子加速器研究装置HIRFL

夏佳文,詹文龙,魏宝文,原有进,赵红卫,杨建成,石健,盛丽娜,杨维青,冒立军

重点介绍了兰州重离子加速器装置HIRFL的发展现状以及取得的系列成果,同时对国内外典型的重离子加速器装置的发展现状也做了简要介绍.



▲ 刘章等 p511

材料科学

478 染料敏化太阳能电池合金对电极材料

张太宏,云斯宁,李晶,刘艳芳,周笑,后玉芝,方雯

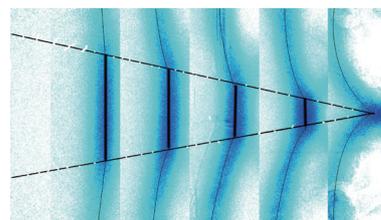
本文围绕染料敏化太阳能电池(DSSCs)重要部件之一的对电极进行论述,对国内外近年发展的新型合金对电极材料进行了较全面地综述,并对目前合金材料在DSSCs领域内所面临的关键科学问题及发展前景等进行了展望.

能源科学

489 钙钛矿太阳能电池研究进展

白宇冰,王秋莹,吕瑞涛,朱宏伟,康飞宇

对钙钛矿电池研究领域取得的进展进行概述,描述了钙钛矿电池的基本结构、工作机理和制备方法,总结了其在电池效率、稳定性和环境友好化3个方向的研究成果,并展望了该电池日后的发展方向.



▲ 王欣隆等 p529

力学

501 二维材料中的缺陷及其拓扑、几何效应

徐志平

晶体缺陷会引发局部形变与应力,对材料行为产生影响,这在石墨烯等二维材料中尤为显著.缺陷对材料性能有调控作用,且与块体行为有别,其物理机制将在本文中进行介绍.

论文

地理学

511 黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀速率空间分布

刘章,杨明义,张加琼

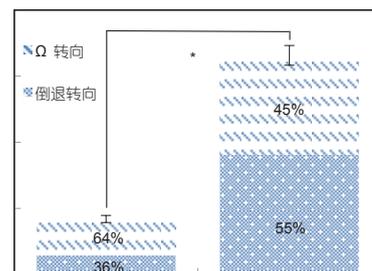
利用⁷Be示踪技术估算黄土高原水蚀风蚀交错带典型坡耕地的土壤风蚀速率,结果指示了风蚀速率的空间分布特征,揭示了造成坡面土壤风蚀分布的主导合成风向,显示了影响坡面土壤风蚀的微地貌形态和分布.

大气科学

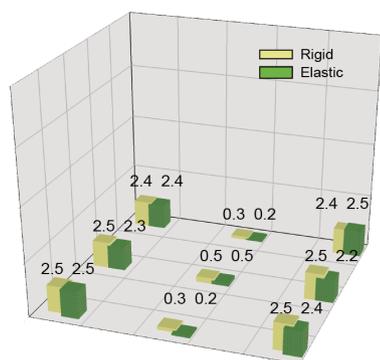
518 一个新的高分辨率洪涝动力数值监测预报系统

汪君,王会军,HONG Yang

基于简单的分布式水文模型CREST和多种卫星遥感资料等,建立了一个水平空间分辨率1 km×1 km的高分辨率洪涝灾害数值预报系统.经分析验证,该系统能较好地监测、预报洪涝发生时间及其影响的空间范围.



▲ 张阳等 p536



▲ 任冰等 p543

力学

529 海洋内孤立波斜相互作用的Mach效应特性实验

王欣隆, 魏岗, 杜辉, 谷梦梦, 王彩霞

区别于两孤立子碰撞后仍保持原有的特性, 海洋中两列内孤立波斜相互作用后会衍生出振幅更大波速更快的第3列内孤立波, 这种称之为Mach效应的新特性正逐步应用于海洋各领域, 本文实验对其认识提供了重要科学依据.

声学

536 声振动对秀丽隐杆线虫转向行为的影响

张阳, 吉鸿飞, 罗林姣, 郭霞生, 屠娟, 章东

报道了声振动对线虫转向行为影响的研究. 线虫可以感知数百赫兹的声振动, 该行为与声波所产生位移振幅正相关, 并与机械力感知神经元有关.

水利工程

543 弹性变形对三维弹性液箱内晃荡波面的影响

任冰, 李晨光, 蒋梅荣, 王国玉, 王永学

通过物理模型实验研究了水弹性效应对弹性方形液舱内液面晃动的影响, 比较分析了刚性和弹性三维液舱内液体在不同频率简谐纵向激励作用下的液面波动形态及其波面高度的变化特性.

Can the laws of physics be unified?

爱因斯坦的未竟之梦：物理规律的大统一

杨金民^{①*}, 王飞^②

① 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190;

② 郑州大学物理工程学院, 郑州 450000

* 联系人, E-mail: jmyang@itp.ac.cn

2015-11-23 收稿, 2015-12-15 修回, 2015-12-16 接受, 2016-01-13 网络版发表

摘要 本文对物理学中的统一理论的发展历史和目前的现状展开综述. 从牛顿的天和地的统一, 到麦克斯韦的电、磁、光的统一; 从爱因斯坦的时间、空间和物质的统一, 到电磁作用和弱作用的统一. 对一些未成功的统一理论(引力和电磁的统一、强作用和电磁作用以及弱作用的统一、夸克和轻子的统一、超对称大统一)也给予简要介绍. 最后评述目前正在尝试的试图把所有相互作用都统一进来的超弦理论.

关键词 大统一, 规范理论, 超对称, 超弦理论

东临碣石观沧海, 洪波滚滚天际来, 苍穹尽处水连天, 宇河一统在此间. 其实, 人类一直在追求对自然界各种物质起源的理解以及各种相互作用的大统一, 这体现了人类对物质世界本源和谐统一的一种信念. 古往今来, 人们一直企图从统一的角度来理解世界的物质基础和基本规律, 无论是古希腊还是古代中国, 都产生过朴素的唯物论, 把万物的本源归结于具体的物质形态或者是“原子”和“气”等, 试图从本源统一的角度来理解形形色色的物质世界. 统一是物理学发展的主旋律, 统一之路曲折漫长, 统一之美引无数英雄竞折腰. 统一不仅是爱因斯坦的梦想, 也是众多物理英豪的毕生追求. 本文对物理学中的统一之路展开简要的评述, 不仅介绍已经成功的统一理论, 也将提及一些优美的不成功的统一尝试, 最后评论正在进展中的终极大统一理论.

1 统一理论的发展历史

1.1 物理学的第一次统一(天和地的统一)

基于伽利略相对性原理和惯性系的假设, 牛顿

提出了三个运动定律来描述质点的运动规律. 结合万有引力, 牛顿定律可以描述宇宙中天体的运动, 把地上的运动和天体的运动用数学的方式联系起来, 这也是物理学真正意义上的第一次统一. 牛顿定律是经典物理学的基础, 可以成功地描述宏观、低速的质点运动问题. 此后, 人们也尝试用牛顿定律把“热、光、化学”等现象描述为流体粒子间的瞬时相互作用.

1.2 物理学的第二次统一(电、磁、光的统一)

在经典物理的发展过程中, 人们逐步认识了电作用、磁作用以及满足平方反比定律的静电力和磁力的相似性. 奥斯特实验以及电磁感应定律发现后, 法拉第以惊人的直觉引进了“电力线”和“磁力线”的概念, 抛弃了瞬时“超距”作用的观点; 而基于“库仑定律”、“毕奥-萨伐尔定律”和“法拉第电磁感应定律”, 麦克斯韦提出了电场和磁场的统一数学描述, 预言了电磁波的存在, 提出光是一种电磁波. 这是首次把看起来表现截然不同的“电、磁、光”现象统一起来, 被称为继牛顿以来物理学的第二次大统一. 为了使电磁场和牛顿定律相容, 麦克斯韦提出电磁波可以

引用格式: 杨金民, 王飞. 爱因斯坦的未竟之梦: 物理规律的大统一. 科学通报, 2016, 61: 399-403

Yang J M, Wang F. Einstein's unrealized dream: Unification of physical laws (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 399-403, doi: 10.1360/N972015-01308

用经典力学来解释,只要假定“以太”的存在,而电磁波通过以太的起伏振荡来传播.20世纪初期的一系列实验,如迈克尔逊-莫雷实验等,发现了“以太”假设的困难,迫使人们放弃以太假设.

1.3 时间、空间和物质的统一

1905年爱因斯坦建立了狭义相对论,彻底抛弃了“以太”假定;到1915年,基于其以前发现的等效原理和广义协变性原理,爱因斯坦成功建立了广义相对论的引力场方程,把描述时空几何结构的爱因斯坦张量和描述物质的能动量张量联系起来.狭义相对论基于相对性原理和光速不变原理,把时间和空间统一成平直的四维时空;而在广义相对论中,时空不再是平直的,本身变成了动力学变量,由于物质而发生弯曲.一个通俗的说法是,在广义相对论中“物质告诉时空怎么弯曲,弯曲的时空告诉物质怎么运动”.

1.4 引力和电磁统一的尝试

在广义相对论建立以后,卡鲁扎(Kaluza)把广义相对论从四维推广到五维,五维度规张量中的10个分量是描述四维时空的度规,4个分量描述电磁场,1个分量描述暴涨场(dilaton);而五维场方程可以约化为四维场方程、麦克斯韦方程和克莱因-高登方程.克莱因(Klein)提出了时空紧致的观点,认为第五个时空维度是卷起来的尺度很小的圆.卡鲁扎-克莱因理论是第一种把引力和电磁相互作用统一起来的框架,可以解释电荷量子化.但最初的卡鲁扎-克莱因理论遇到了一系列困难,如理论预言的电子质量和电荷的比值和实验严重不符以及额外维的稳定性等问题.解决这些困难的尝试也推动了理论的进展.爱因斯坦晚年就是沿着这种思路统一引力和电磁相互作用,但没有获得成功.改进的卡鲁扎-克莱因理论,如尝试在十一维统一标准模型规范对称性的理论,遇到了手征费米子、额外维的稳定性等困难,但卡鲁扎-克莱因的思想仍是现代统一场论的重要基础之一.

1.5 统一场论的基础(规范对称性)

现代物理学的基础是对称性.著名的女数学家诺特(Noether)证明了对称性和守恒律的对应关系,如能动量守恒对应时空平移不变性;角动量守恒对

应转动不变性.数学上人们用不同的群来刻画对称性.外尔(Weyl)和泡利等人首先认识到电磁场和 $U(1)$ 局域对称性的关系.基于外尔的局域标度(“规范”的原始意义)变换思想及电荷守恒与 $U(1)$ 规范的关系,Yang和Mills^[1]提出了同位旋守恒和基于局域 $SU(2)$ 对称性的规范场论.规范场论的思想是统一场论的基础,广义相对论也可以看作是一种规范理论.规范场论提出后遇到了规范玻色子质量、量子化和重整化等方面的困难,直到希格斯机制和特霍夫特关于规范场重整化方面的进展后,规范场论才趋于完善.

1.6 核力的统一描述(强相互作用)

强相互作用描述了核子之间的强核力,是自然界已经发现的4种基本相互作用之一.强相互作用在几个费米(fm)的尺度上可以描述把核子束缚成原子核的力;在更小的尺度上可以描述把夸克束缚成强子的作用.量子色动力学(QCD)是描述强相互作用的理论,基于 $SU(3)_c$ 的规范对称性,通过交换无质量的胶子在带“色”的夸克和胶子之间传递相互作用.QCD有“渐近自由”和“色禁闭”等基本性质,在各种实验中得到了广泛检验.核子间的强核力可以看作是夸克间“色力”类似范德瓦尔斯力那样的残留效应.

1.7 电磁作用和弱作用的统一

弱相互作用也是4种基本相互作用之一,描述了原子核的衰变等现象.弱相互作用通过四费米相互作用描述,分为带电流和中性流过程.在弱相互作用中宇称可以不守恒,所以弱作用理论是一种手征理论,相互作用区分左右手.弱相互作用和电磁相互作用强度差别几千倍,看起来很不相同,但数学描述中有某些相似性.格拉肖、温伯格和萨拉姆在20世纪60年代成功地发展了电弱统一的理论,用基于 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 的规范理论来描述电弱对称性;通过自发对称性破缺机制和希格斯机制,部分带电和中性规范玻色子获得质量,作为弱相互作用的“传递粒子”;而光子仍然是无质量的,来传递电磁相互作用.弱作用和电磁作用都是电弱作用的不同表现.1983年欧洲核子中心发现了理论预言的 W^\pm, Z_0 规范玻色子;2012年欧洲核子中心发现了希格斯粒子^[2].这些发现都验证了电弱统一理论的正确性.电弱统一理论部分统一了物理学中的基本相互作用,是人类认识世界方面的一个重要进步,但距离包括引力在内的统一场论仍

很遥远.

1.8 强作用、电磁作用和弱作用的统一描述(标准模型)

人们把基于 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范对称性且包括三代夸克、轻子来描述强作用和电弱作用的理论称为标准模型. 在标准模型中, 理论中有28个自由参数, 包括3种规范耦合常数、9种带电粒子的质量、3种中微子质量、夸克部分的混合以及轻子部分的混合10个参数、强CP相位、希格斯的真空期待值和四次耦合常数. 这些自由参数标准模型不能解释, 需要通过实验来定出. 对于寻求简单和谐的物理学家们而言, 很难相信标准模型是最基本的规律, 而看起来更像一种对基本规律的有效理论描述. 标准模型还有其他的理论和美学上问题, 如电荷量子化的起源、宇宙中重子不对称的根源、精细调节问题、宇宙中的暗物质.

1.9 夸克和轻子统一的尝试(Pati-Salam 模型)

在标准模型中, 带色的夸克和不带色的轻子看起来相互独立的东西. 在20世纪70年代中期, 帕惕(Pati)和萨拉姆(Salam)提出, 轻子可以看作是第四种“色”^[3], 这样夸克和轻子都只是同一硬币的不同方面而已. 另一方面, 该理论中仍然有3种耦合(如果考虑左右手对称, 则只有2种耦合), 所以仍然没有解释规范耦合的来源.

1.10 强作用、电磁作用和弱作用的大统一

为了真正解释规范耦合的来源问题, 乔治(Georgi)和格拉肖(Glashow)提出了能统一色对称性和电弱对称性的最小形式—— $SU(5)$ 大统一模型^[4]. 大统一理论把几种规范群统一在一个更大的规范对称性当中, 所以几种耦合在大统一标度处都有相同的值. 低能下表现的不同规范对称性来自于大统一规范群在大统一能标处的破缺效应. 由于 $U(1)$ 群被嵌入到一个单李群中, 所以大统一理论可以很自然地解释电荷的量子化; 大统一理论可以对宇宙中重子不对称的起源给出解释, 但由于宇宙暴涨的存在, 理论要求宇宙重加热的温度很高, 所以存在一定困难. 大统一理论预言了质子可以通过重的规范玻色子诱导而衰变. 现在日本的超级神冈实验已经限定了质子的寿命在 10^{34} 年以上(下一代的实验将会把质子寿命的限制提

高10倍以上), 这就限定了 $SU(5)$ 大统一能标在 10^{15} GeV以上. Pati-Salam的部分统一理论预言存在重的leptoquark, 能够诱导 K_L 介子到 $e^\pm \mu^\mp$ 的衰变. K_L 介子的衰变实验限制了“轻子色”破缺的标度在 1.9×10^6 GeV左右. 在 $SU(5)$ 大统一模型中, 每一代的物质场被分别放在一个 $SU(5)$ 群的 $\bar{5}$ 和10维表示中; 而在Pati-Salam模型中, 每一代的左右手物质场部分分别处于一个四色的二重态中. 物质场仍然看起来有不同的来源. $SU(5)$ 大统一模型和Pati-Salam的部分统一模型都可以嵌入到 $SO(10)$ 大统一理论, 包括其规范群部分和物质场部分. $SO(10)$ 大统一理论可以真正把物质部分都统一在一个16维旋量表示中, 这样标准模型中所有的汤川耦合都来自于同一项, 都有共同的根源. $SO(10)$ 大统一理论的一个特点是在16维旋量表示中纳入了右手中微子. 其实, 能够自然给出很轻中微子质量的跷跷板模型, 最初就是来自于大统一理论; 另一方面, 跷跷板机制中所需要的很高的右手Majorana中微子质量标度, 可以和大统一能标一致. 中微子部分还可以采用轻子合成机制, 通过宇宙中的轻子不对称用sphaleron效应转化为重子不对称, 很好地解释了宇宙中的重子物质的起源. 夸克-轻子部分混合角的互补性也可能是物质部分大统一的一种反映.

2 目前正在进展的大统一理论

2.1 统一理论对超对称的召唤

在最初的(非超对称)大统一理论中, 严格计算会发现, 3种规范耦合并不严格相交于一点. 事实上, 如果用2种较弱的规范耦合 g_1, g_2 相交得到的大统一标度反推强耦合 g_3 在电弱标度处的值, 理论预言和实验观测值会有12个 σ 以上的偏差. 随着温伯格角测量的越来越精确和质子衰变实验的进展, 非超对称 $SU(5)$ 模型已经被排除掉. 另一方面, 人们发现, 当引入低能超对称理论后, 规范耦合统一可以很好地实现. 超对称大统一理论可以很好地结合超对称和大统一理论的优点. 超对称理论是联结玻色子和费米子的一种对称性, 是时空对称性的最大扩充. 超对称变换可以把玻色子变成费米子, 也可以把费米子变成玻色子. 超对称预言每种标准模型粒子都有其相应的超对称伴子. 超对称有很多优美的性质, 能够解决标准模型中的精细调节问题, 能够提供暗物质

候选者,也能给出合适的重子合成机制,而且超对称理论预言希格斯场要小于135 GeV,而2012年发现的希格斯质量正好处在超对称预言的小区间内.尽管现在欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)仍未发现超对称粒子,超对称仍然是TeV标度新物理的最好候选者之一.在Kaluza-Klein统一场论中,KK真空的稳定性要求也倾向于超对称的存在.

2.2 强作用、电磁作用和弱作用的超对称大统一

超对称大统一理论在电弱标度可以回到超对称标准模型,可以给出低能参数间的若干联系.超对称大统一理论一般会存在量纲为5的能诱导质子衰变的有效算符,而且超对称大统一的标度比非超对称的情况要高几十倍,所以在超对称大统一理论中,重规范玻色子诱导的质子衰变是非主导的.由于主导衰变方式的不同,质子衰变的产物也和非超对称大统一的情况不同.现在的超级神冈实验已经排除掉最小的超对称SU(5)大统一模型;非最小的SU(5)和SO(10)超对称大统一模型仍然和实验不矛盾,但很快就可以被最新的实验所检验.另一方面,高维的超对称大统一理论中可以压低量纲为5的质子衰变的贡献,理论仍然可以在未来的质子衰变实验下存活.

2.3 把4种相互作用都统一进来的终极大统一理论

大统一理论可以很好地统一物质和强、弱、电磁3种相互作用,但并没有纳入引力相互作用,这是因为引力场的量子化遇到了根本性的困难.把引力场按照通常的场量子化途径处理会遇到不可重整的困难.毕竟广义相对论是从根本上改变了时空观,其量子化应该和平直时空中的量子场论方法有本质不同.现在主流的量子引力主要有3种途径:超引力、超弦理论和圈引力.

圈引力把广义相对论变成类似规范场论的理论,基本的正则变量为阿希提卡-巴贝罗联络.圈引力只涉及了引力量子化,很难给出规范相互作用和物质场以及物质场相互作用的拉氏量,所以只可能是终极理论的一个组成部分.

超对称的局域化可以得到超引力理论,包含了自旋为3/2的引力微子和自旋为2的引力子,能自然包括引力理论.超引力理论有可能不会遇到普通量子引力中的发散困难.对于四维 $N=8$ 的超引力,早期人

们曾预期该理论没有紫外发散;其后人们构造出在壳的三圈抵消项,认为三圈层次上发散存在;再后来的实际计算发现,三圈层次上发散能抵消掉,发散最早要到七圈层次;最近研究表明,理论在微扰论意义下可能是紫外有限的^[5].尽管该理论不是现实的理论,如不能纳入手征费米子场、没有破缺扩展超对称的机制等,但超引力研究的进展表明理论的紫外特性可能比预期的好.低维的扩展超对称可以由高维的超引力理论通过维数约化得到,如11维 $N=1$ 的超引力理论可以约化到4维 $N=8$ 的超引力理论.11维的超引力是早期的“终极理论”候选者,也有前面所述众多理论上的困难.超引力的困难基本都可以在超弦理论中得到解决.

弦理论发源于对强相互作用的研究.在弦理论中,基本对象都不是点状的,而是具有一维(或高维)结构、特征长度很小为 10^{-32} cm的弦(包括具有2个端点的开弦和没有端点的闭弦),而不同的粒子对应弦的不同振动模式.由于把相互作用和物质都统一用弦描述,所以弦有可能统一包括引力在内的相互作用.量子场论中点粒子的世界线在弦理论中变成了二维世界面或者管道,这样点粒子的相互作用顶角就变得光滑,相互作用的时间和地点不再是不变量而是依赖于观测者的,所以我们可以预期理论不出现发散.弦理论的谱预言了无迹对称张量的存在,可以描述自旋为2的引力子,其长程行为和广义相对论一致.玻色弦自洽性要求时空的维数为26维;而为了引入费米子而包含超对称的超弦理论要求时空的维数为10维.和量子场论中拉氏量的任意性不同,理论研究只存在5种自洽的超弦理论: I, IIA, IIB和2种杂化弦理论SO(32), $E_8 \times E_8$.而基于弦的非微扰性质的进展,Witten等人发现5种超弦理论都可以作为11维M理论的各种极限,相互之间可以通过S, T等对偶相互联系起来.M理论的理论框架仍然没有完全建立起来,特别是其强耦合非微扰区域的性质.规范对称性可以包含在杂化弦理论中,手征费米子也可以在超弦理论中实现.超弦理论可以将引力量子化,而且可以给出有限的结果,解释黑洞熵.理论的自洽性能自然将引力和其他作用统一起来,是终极理论的最热门的候选者.超弦理论是一个仍在发展中的理论,仍然存在一系列的理论问题,例如其形式只对应场论中粒子形式的描述,仍然缺乏波动形式的描述等^[6].另一方面,超弦理论实验检验很困难,只能

在宇宙早期留下某些线索. 量子引力方面的新进展也会进一步促进人们对“终极”理论的认识.

3 展望

近几百年来物理学的发展, 使得人类对物质世界的基本规律已经有了比较深刻的认识. 尽管还有许多

不尽人意的地方, 现阶段的理论框架已经在一定程度上实现了爱因斯坦的统一之梦. 对物质世界和运动规律统一的追寻是人类文明的标志之一. 大统一理论虽然艰难曲折, 但具有超高智商的人类最终会找到这个统治万物的终极真理. 这正是: 宇宙洪波淘英雄, 终极统一胸臆中, 路漫雾蒙苦求索, 前赴后继为追梦.

参考文献

- 1 Yang C N, Mills R L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Phys Rev*, 1954, 96: 191–195
 - 2 Yang J M. A brief review of Higgs particle (in Chinese). *Physics*, 2014, 43: 25–32 [杨金民. 希格斯粒子之理论浅析. *物理*, 2014, 43: 25–32]
 - 3 Pati J C, Salam A. Lepton number as the fourth color. *Phys Rev D*, 1974, 10: 275–289
 - 4 Georgi H, Glashow S L. Unity of all elementary particle forces. *Phys Rev Lett*, 1974, 32: 438–441
 - 5 Kallosh R. The ultraviolet finiteness of $N=8$ supergravity. *J High Energy Phys*, 2010, 1012: 9
 - 6 Witten E. What every physicist should know about string theory. *Phys Today*, 2015, 68: 38–43
-

Einstein’s unrealized dream: Unification of physical laws

YANG JinMin¹ & WANG Fei²

¹*Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

²*Department of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China*

In this review, we survey the history and status of the unification of physical laws. Starting from Newton’s unification of celestial and terrestrial laws, we recall Maxwell’s unification of electromagnetism and light, Einstein’s unification of spacetime and matter, and the unification of electromagnetic and weak interactions. We also mention some unsuccessful unification attempts like the unification of gravity and electromagnetism, the unification of quarks and leptons as well as the supersymmetric grand unification. Finally, we comment on the ongoing string theory which tries to unify all interactions.

unification, gauge theory, supersymmetry, string theory

doi: 10.1360/N972015-01308



杨金民

1995 年在中国科学院理论物理研究所取得博士学位, 然后到美国西北大学、爱荷华州立大学和日本东北大学做博士后研究, 2000 年被中国科学院理论物理研究所引进为“百人计划”研究员. 一直从事粒子物理中的新物理研究, 在超对称和大统一方面合作发表了一系列文章.

What are the limits of conventional computing?

计算的极限

季铮锋^{①②*}, 夏盟信^{①*}

① 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190;

② Institute for Quantum Computing, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L3G1, Canada

* 联系人, E-mail: jizhengfeng@gmail.com; mingji@ios.ac.cn

2015-12-07 收稿, 2016-01-04 修回, 2016-01-06 接受, 2016-01-25 网络版发表

摘要 计算深刻地影响着人们的日常生活和生产活动, 也推动了诸多其他科学领域的发展和变革. 本文从几个不同的方面探讨计算的能力和极限. 从计算的模型和丘奇图灵论题, 到P和NP问题的深远影响及量子计算对传统计算的冲击, 我们深入讨论了对计算极限的理解.

关键词 图灵机, 丘奇图灵论题, 量子计算, 大数分解, 量子模拟

小学课堂上, 学生们正在学习加减乘除四则运算. 奔波的旅途中, 车内的GPS导航引导驾驶员以最短路径驶向目的地. 国家超级计算中心的机房里, “天河二号”超级计算机正在进行C919客机的高精确度空气动力学参数的运算. 在这些景象的背后, 计算无处不在, 悄无声息地改变着人们的生产生活方式. 与此同时, 计算机科学在理论和技术2个方面向其他包括天文、地理、气象、生物、物理、材料等学科输出其特有的方法、观点和强大的工具, 推动了整个科学研究的高速发展.

计算如此重要, 那什么是计算呢? 有趣的是, 早在20世纪30年代, 在电子计算机诞生之前, 这个问题就已经有了完满的回答. 很多种后来被证明为等价的关于计算的模型被相继提出, 其中包括递归函数、 λ 演算、图灵机等.

由于图灵机的定义最为直观, 最类似人类进行计算的方式, 图灵机作为计算理论模型被广泛接受. 一条可读写符号的无限长的带子, 一组有限的转移规则就定义了一个图灵机. 图灵机读入符号, 根据当前机器状态, 移动读写头, 写入符号, 进入新的状态, 并循环反复这一过程, 直至机器进入停机状态,

从而得到计算结果. 值得指出的是, 图灵机定义中符号集合、状态集合、规则集合都是有限的, 只有带子是无量长的. 图灵机的有限可描述的性质让我们可以对图灵机进行编码, 对应到特定的自然数.

著名的丘奇图灵论题说如果一个问题在某个合理的计算模型下可计算, 那么它在图灵机上也是可计算的. 这一论题奠定了用图灵机作为计算理论模型的地位. 由于不存在关于“合理”模型的准确定义, 因此这一论题是无法证明、只可证伪的. 迄今为止, 所有提出的合理的计算模型都符合这个论题.

1 计算的极限之外: 停机问题

有了严格的计算的定义, 首先要问的关于计算极限的问题就是是否所有问题都可以计算. 图灵机所定义的计算概念是一种特定方式的有限的描述对无限的驾驭——通过有限的规则计算一个无穷定义域上的问题. 有限的规则, 只有可数无穷多个, 而问题有不可数无穷多个, 所以必然存在不可计算的问题. 著名的图灵停机问题就是一个例子. 设输入实例是自然数 x , 这个问题问编码为 x 的图灵机计算输入 x 时是否停机. 这个结论可以用康托对角线方法证明,

引用格式: 季铮锋, 夏盟信. 计算的极限. 科学通报, 2016, 61: 404-408

Ji Z F, Xia M J. The limits of computation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 404-408, doi: 10.1360/N972015-01363

与罗素悖论也有自然的联系。

图灵机有一个重要性质，存在通用图灵机。一个图灵机是一组有限的规则，可以编码成有限长度的字符串。通用图灵机，可以机械地读懂任何图灵机编码，从而模拟编码所对应的图灵机的计算。

2 计算的效率

计算能力的极限，一方面有停机问题这种不可计算的问题的极限限制，另一方面，是算法解决计算问题时的效率。但是这里的效率不是现代的通用计算机每秒钟可以运算多少次，而是所需的计算资源与问题实例的编码长度之间的关系。最常见的计算资源是时间和空间，分别是图灵机的运算步数，和使用的带子格子数目。如果一个算法时间复杂度是 n^2 ，就是说它计算任何长度为 n 的实例，最多需要 n^2 步。

理论计算机科学家认为，多项式时间是衡量计算是否有效的合理标准。太慢的算法，例如，指数时间算法，在不太大的输入长度 n 的时候，计算时间 2^n 就会指数爆炸而无法在实际中使用。另一方面，同样一个问题，在图灵机上可能需要 n^3 时间，在随机访问模型下可能只需要 n^2 时间。用多项式时间衡量有效性避免了计算模型相关性。所有存在多项式时间算法的判定问题构成的集合记为P。丘奇图灵论题可以扩展到有效计算的情形。扩展版的丘奇图灵论题说，如果一个问题在某个合理的计算模型上有多项式时间的算法，那么它在图灵机上也有多项式时间算法。虽然还没有定论，但是量子计算已经对这个扩展论题发出了挑战。

3 有效计算的未知极限：NP完全问题

P和NP问题是计算机科学中最广为人知的问题，也是一个深刻的数学问题。粗略地讲，NP是可以有效验证的问题类。对一个问题和一个可能的解答，如果有一个图灵机可以在多项式时间内验证解答的真伪，那这样的问题就属于NP。

等价地，NP也是多项式时间不确定型图灵机所能计算的问题类。不确定型图灵机的每一步计算有2种可能选择，它计算一个问题只要存在一个不确定选择的序列完成这一计算。这种不确定选择的能力可以用来猜到一个解。也正因为这种能力，我们无法物理上造出这样的图灵机，也不认为它是合理的计算模型，不认为它打破了扩展版的丘奇图灵论题。

对很多NP中的问题，可以使用归约的方法证明，如果它们中有一个问题有多项式时间算法，那么所有的NP问题都有多项式时间算法。这类问题被叫作NP完全问题，目前已知的NP完全问题有成千上百个，几乎遍布各个计算机科学的研究领域。NP完全问题是否存在多项式时间算法，也就是P和NP问题，被克雷数学研究所在千禧年大奖难题中收录，列为七大问题之一。这个问题在理论计算机科学复杂性研究中具有核心地位，是认识计算极限的核心问题。

4 突破计算极限的新方向：量子计算

量子信息与量子计算研究基于量子力学原理的信息处理和计算方法，是探索物理可实现计算能力极限的新方向。本文后半部分介绍量子计算理论领域的新进展，重点讲述量子计算研究带给我们在计算极限方面的认识和启示。

如果说比特是经典信息的基本单位，那么量子比特则是量子信息的基本单位。一个经典比特要么是0，要么是1，一个量子比特可以是0和1的量子叠加。更加数学地，一个量子比特所处的叠加态可表示为 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 。其中 α, β 称为概率振幅，分别描述0和1的权重，满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。量子叠加与概率凸组合有2点本质的区别。首先，量子叠加中的概率振幅可以是负数或者复数，而概率组合中的概率总是非负的实数，正的和负的概率振幅可以叠加相消。其次，量子叠加的概率振幅按照2范数归一化的向量，而概率组合是按照1范数归一化的向量。

理解量子叠加对深入理解量子计算的能力有着重要的意义。如果 $|0\rangle, |1\rangle$ 是2个可能的量子状态，那么根据量子叠加原理， $\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$ 和 $\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$ 都是合法的量子状态。进一步地， $\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$ 和 $\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$ 也可以叠加，又回到 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。这种正负概率振幅相消的量子现象是量子干涉产生的原理，也是量子计算优势的基础。量子叠加通常也被解读成一种量子并行性，并被认为是量子算法加速计算的核心。

除了量子叠加概念，另一个理解量子计算的重要概念是量子测量。量子测量是沟通量子系统与经典世界的桥梁，通常是量子计算获得计算结果的最后一步。如果测量时系统处在某量子叠加态，测量的结果将由概率振幅的模平方定义的概率分布随机决

定. 比如在 $\frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}$ 上做测量将以 $\frac{1}{2}$ 的概率得到 0, $\frac{1}{2}$ 的概率得到 1.

量子叠加和量子测量的讨论很大程度上揭示了量子计算的实质. 首先, 我们利用量子力学的原理操作量子叠加态, 使得对于计算没有实际意义的输出对应的概率振幅相消, 然后做量子测量并读出对计算有帮助的输出信息. 任何现有的量子算法都遵循这样的思路, 但是设计有效的量子算法却非易事.

5 大数分解量子算法及其影响

最重要最具深远影响的量子算法是肖尔的大数分解多项式时间量子算法. 这个算法输入为一个整数, 输出为这个整数的素数分解. 为什么解决这个简单数论问题的量子算法却是过去 20 年量子计算研究的核心推动力呢?

一方面, 大数分解问题被认为是经典计算不能有效解决的问题之一, 并广泛应用于构造公钥密码体系. 大数分解量子算法给基于大数分解问题的密码体系带来阴影. 更为致命的是, 除大数分解问题外, 其他一大类包括离散对数问题、椭圆曲线等在内的密码设计中常用的数论难题都可以用类似的量子傅里叶分析的方法设计出有效的量子算法. 如果大规模的量子计算机成为现实, 那么目前广泛应用的公钥密码体系将形同虚设, 互联网安全、电子商务将受到致命的威胁.

另一方面, 大数分解量子算法揭示了量子计算超越经典计算的可能性, 让我们对计算极限的认识有了新的高度. 特别地, 大数分解量子算法的提出意味着如下 3 个看似不可能的论断必有 1 个是真的. 一是扩展版丘奇图灵论题是错的, 二是量子力学在大规模尺度是错的, 三是大数分解问题有多项式时间的经典算法. 无论哪一论断确定为真, 都将是科学发展史上一次革命性的飞跃.

6 量子模拟

除了在数论问题上的突破, 量子计算在无结构数据搜索、模拟量子系统, 求解线性系统等重要问题中有望超越经典计算.

著名的物理学家费曼最早观察到用经典计算机模拟量子系统的困难, 并提出了用量子计算模拟量子系统的想法. 量子哈密顿量模拟问题是用量子电

路来模拟稀疏哈密顿量演化的问题. 量子系统的演化由哈密顿量 H 按照薛定谔方程决定. 经过时间 t , 系统的演化为 $\exp(-iHt)$. 对于一个 n 量子比特的系统, 哈密顿量 H 是一个 2^n 乘 2^n 的厄米矩阵. 如果这个矩阵的每行绝大部分元素是 0, 而只有最多多项式个非零元, 那么它就被称为稀疏的. 稀疏的哈密顿量的演化 $\exp(-iHt)$ 可以有效地用量子计算机模拟. 大部分量子化学、材料科学中哈密顿量都是稀疏的, 这使得量子模拟算法可以在这些领域中取得广泛引用, 模拟并预测系统的行为. 量子模拟问题是量子计算的代表性应用, 除非所有的量子算法都可以被经典计算有效模拟, 否则量子模拟问题不可能有经典的算法.

量子线性系统算法是量子模拟算法的一个重要应用. 这个算法给出了求解稀疏线性系统 $Ax=b$ 的对数时间算法. 值得注意的是这个算法并不解决传统意义下的线性方程求解问题. 首先, 为了使用该算法, 需要把向量 b 制备成量子叠加态. 其次, 计算结束后, 系统处在正比于解 x 的量子叠加态上, 因此并不能有效地读出 x 的每个元素, 而只能按照 x 的概率振幅随机读出元素标号. 这些细节问题局限了这个算法的应用范围. 与其说它是一个算法, 不如说它是一个算法的框架, 在利用这个框架设计具体的量子算法时需要考虑输入态制备和结果读出这两个问题.

鉴于揭示和区分量子计算和经典计算极限的重要理论意义, 研究者开始考虑一些并不自然的、人造的、但现有的量子实验技术条件可实现而经典计算不能有效解决的问题. 玻色采样问题就是这方面尝试的代表. 玻色采样问题中, 多个输入光子经过一个分光镜网络到底输出端, 问题的要求是根据由量子力学给出的分布进行输出采样. 这样的特殊分光镜网络并不等价于通用量子计算机, 但实现相对容易, 有望在可以预期的将来较早展示出量子计算设备相对于经典设备的优越性.

7 量子计算与经典计算关系

总体来讲, 量子计算在可计算性的层面并不强于经典计算, 但是在有效计算的层面, 普遍的认识是量子计算比经典计算更加优越. 这些认识和信心来自于已知的量子算法, 包括大数分解算法、量子模拟算法、玻色采样等问题的理解. 同时, 我们也要客观地认识到, 量子计算并不是万能的, 我们只在这些特定的问题上找到了超越经典计算的应用. 特别地, 依

据量子叠加和并行性从而简单地认为量子计算能加速所有问题的观点是不正确的。量子计算的加速似乎对问题的结构有着特殊的要求，并不是所有的问题都能利用量子叠加找到更加高效的算法。特别地，目前研究者普遍认为量子计算机并不能有效解决NP完全问题。

8 量子计算实现：可能性和困难

量子算法和理论的研究让人们欢欣鼓舞，但是为什么自肖尔算法提出已过去20多年，还没有通用量子计算机出现呢？量子计算真的是可以物理实现的计算模型吗？在量子计算研究初期，对于量子计算的质疑主要集中在量子系统的退相干性和噪声对

大规模量子系统的破坏性影响。量子纠错解错码、量子容错计算等方面的研究逐步打消了这方面的担忧。特别地，量子阈值定理给出了确定的噪声阈值——只要计算过程中每个部件的噪声控制在阈值之下，任意大规模的量子计算都能实现。这在理论上铺平了量子计算发展的道路，量子计算的实现看起来只是一个工程技术问题。当然，在物理实现上，我们离通用量子计算所需要的精度，离阈值定理给出的阈值还有很大的距离。真正实现大规模的通用量子计算机将是未来几十年各个大国、各大信息业巨头重要的攻关课题。量子计算能否真实地带来计算极限的新突破，量子力学能否在大规模尺度经受住考验，让我们拭目以待。

参考文献

- 1 Turing A. On computable numbers, with an application to the Entscheidungs problem. *London Math Soc, Ser 2*, 1936, 42: 230–265
- 2 Cook S. The complexity of theorem-proving procedures. In: Harrison M A, Banerji R B, Ullman J D, eds. *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Theory of Computing*, 1971. 151–158
- 3 Levin L. Universal search problems (in Russian). *Probl Inf Transm*, 1973, 9: 115–116
- 4 Arora S, Barak B. *Computational Complexity: A Modern Approach*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009
- 5 Feynman R. Simulating physics with computers. *Int J Theor Phys*, 1982, 21: 467–488
- 6 Nielsen M, Chuang I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 7 Lloyd S. Universal quantum simulator. *Science*, 1996, 273: 1073–1078
- 8 Shor P. Polynomial-time algorithm for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM J Comput*, 1997, 26: 1484–1509
- 9 Harrow A, Hassidim A, Lloyd S. Quantum algorithm for linear systems of equations. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 150502
- 10 Aaronson S, Arkhipov A. The computational complexity of linear optics. In: Fortnow L, Vadhan S P, eds. *Proceedings of the 43rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 2011. 333–342

The limits of computation

JI ZhengFeng^{1,2} & XIA MingJi¹

¹ State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Institute for Quantum Computing, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L3G1, Canada

The powerful idea of computation has accompanied the development of human civilization, has deeply changed the way we live and work, and has accelerated the advancement of many areas of sciences. In this article, we explore the power and limits of computation from several different perspectives. We will discuss topics from the models of computation and Church-Turing thesis, to the impact of the P versus NP problem and quantum computing on our understanding of the limits of computation. More concretely, we will explore the computability and the halting problem, the efficiency problem of computation, the P versus NP problem. We then move on to the discussion of quantum computation, quantum algorithm for factoring and its implications, quantum simulation and the relation between quantum and classical computations.

Turing machine, Church-Turing thesis, quantum computing, integer factorization, quantum simulation

doi: 10.1360/N972015-01363



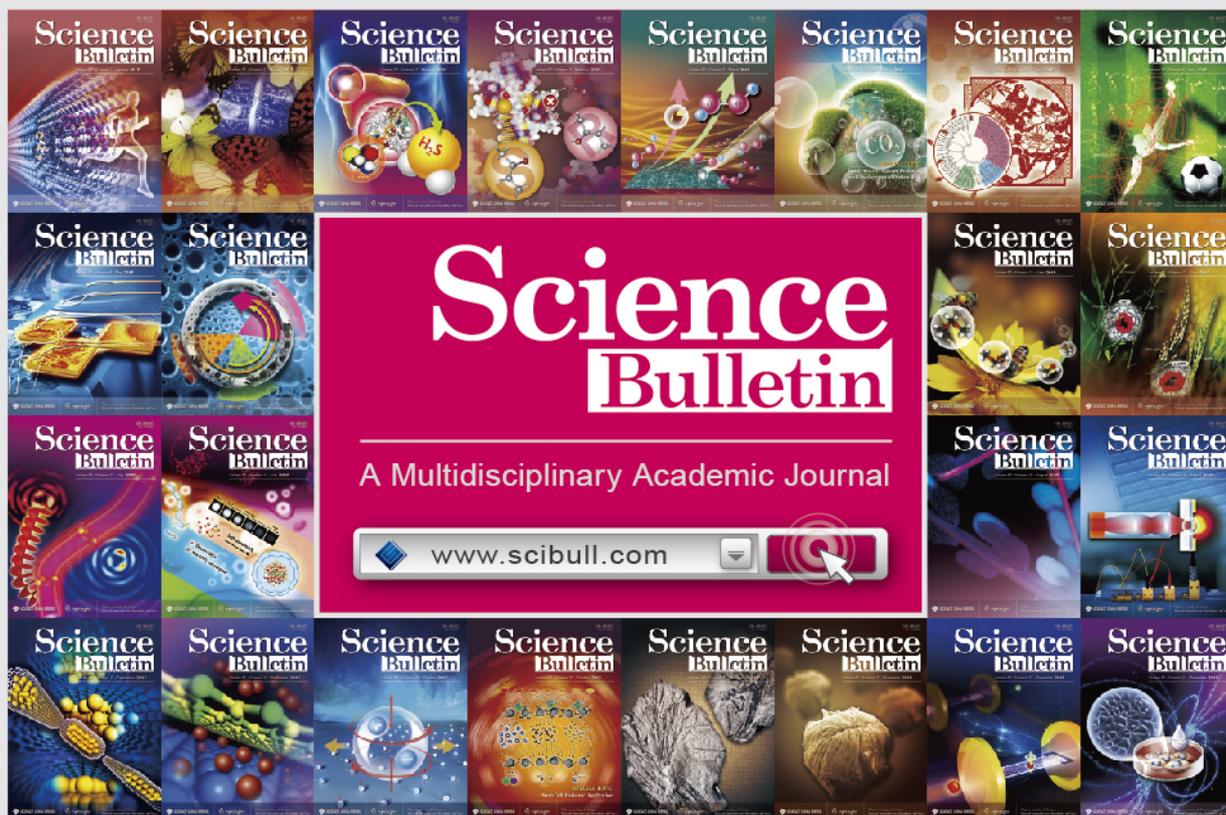
季铮锋

清华大学计算机系博士，加拿大滑铁卢大学博士后。现为中国科学院软件研究所助理研究员，研究方向为量子信息、量子计算和量子复杂性。



夏盟信

中国科学院软件研究所副研究员，研究计数复杂性、全息算法、张量网络。中国科学院软件研究所博士，美国威斯康星大学研究助理，德国马普所博士后，西蒙斯计算理论研究所学期主题计划“计数复杂性与相变”参与者，“中国科学院院长奖”获得者。



- ◆ Indexed by SCI, EI, CA, etc.**
- ◆ Fast review & editorial decision**
- ◆ Open choice & broad dissemination**
- ◆ High quality & rapid publication**

Articles | Reviews | Feature Articles | Letters | News & Views | Research Highlights | Commentaries | Correspondences | etc.

科学通报

CHINESE SCIENCE BULLETIN

第 61 卷 第 4-5 期 2016 年 2 月 20 日出版

(版权所有, 未经许可, 不得转载)

主 管	中 国 科 学 院	出 版	《中国科学》杂志社
编 辑	中 国 科 学 院 《科学通报》编辑委员会	印 刷 装 订	北京(100717)东黄城根北街16号
	北京(100717)东黄城根北街16号	总 发 行 处	北京艺堂印刷有限公司
主 编	高 福	订 购 处	北京报刊发行局
			全国各邮电局
			《中国科学》杂志社发行部

刊号: ISSN 0023-074X eISSN 2095-9419
CN11-1784/N

代号: 国 外 TM41
国内邮发 80-213

广告经营许可证: 京东工商广字第 0429 号
本期定价: 240.00 元 全年定价: 4320.00 元

csb.scichina.com

ISSN 0023-074X

