

物理学技术革命之第二次 量子技术革命

金芳洲

(武昌首义学院 430064)

1665年,一场可怕的瘟疫在英国伦敦流行,剑桥大学被迫停课,学生们都回家躲避。当时只有23岁的艾萨克·牛顿(Issac Newton)也在其中,回到了位于伍尔索普村的一个庄园里,在这里待了18个月。这段时期被晚年的牛顿称为“是我发明创造时期的顶峰”,正是在这段时期里,牛顿潜心自由的钻研开普勒、笛卡尔、阿基米德、伽利略等前辈科学家的主要论著,并发明了微积分,发现了牛顿运动的定律、万有引力定律以及光色散定律等一生中最伟大的几个成就。牛顿将力学体系化后,当时处于萌芽阶段的机械制造有了理论基础,快速发展起来。后来蒸汽机被发明,且不断的被改进提升效率,由蒸汽机带来的“动力革命”引起了从手工劳动向动力机器生产转变的重大飞跃,促使了纺织、船舶、铁路等产业飞速发展,这场“动力革命”也被称之为第一次工业革命。

1873年,英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)出版了《论电和磁》,建立了完整的电磁场理论,将电学、磁学、光学统一起来,并预言了电磁波。对于麦克斯韦来说,他是站在法拉和W.汤姆逊这两位巨人的肩上。他面对众说纷纭的电磁理论,以深邃的洞察力完成了电、磁、光的统一。有了电磁理论的支撑,发电机和电动机相继问世,电器开始用于代替机器,进入人们的生活和生产中。强电能够提供绝大部分生产和生活的能源,而弱电能够提供主要的通信手段(电报、电话等),从此电力开始成为补充和取代以蒸汽机为动力的新能源。另一方面,在1862年,法国人德罗夏

提出了四冲程理论,成为内燃机发明的科学基础。19世纪70~80年代,以煤气、汽油为燃料的内燃机相继问世,此后不久,以柴油为燃料的内燃机也研制成功。内燃机的工作效率远远高于蒸汽机,大大提高了工业部门的生产力,特别是迅速推动了交通运输领域的革新。如果使用蒸汽机来发动汽车的话,恐怕需要数十平方米的空间才能容纳动力部分。而如果利用油气为原料的内燃机,动力部分可以缩小放置于仅四平米的汽车当中。这场“电气革命”也被称之为第二次工业革命。

19世纪末期,经典力学与电动力学的理论框架已建立完善,并完成了机械革命和电气革命。当时的物理学家普遍很自满的认为,所有的物理系统都可以被经典力学与电动力学的基本方程描述,尽管还存在“两朵乌云”,其中一朵便是黑体辐射中的紫外发散问题。然而正是这一朵乌云,逐渐发酵导致了物理学的重大变革,并发展形成了20世纪最伟大的理论之一:量子力学。“两朵乌云”的说法是由开尔文勋爵在1900年4月27日英国皇家学会上发表演讲时提出的,后来的事情大家也知道,两朵乌云掀起了狂风暴雨,发展成了相对论和量子力学。能深邃地洞察到经典物理中的两大僵局,恰恰说明开尔文极富远见,而不是骄傲自满。

量子力学是一群人的狂欢。1900年,马克斯·普朗克(Max Planck)提出量子化思想,成功的解决了黑体辐射中的紫外灾难问题。1905年,阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)进一步提出光的量子化,成功的解释了光电效应。1911年,欧内斯特·卢

瑟福(Ernest Rutherford)通过阿尔法粒子散射实验提出“卢瑟福原子结构模型”。紧接着在1913年,在卢瑟福的实验室进修的尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)研究卢瑟福原子模型的稳定性问题时,首次把普朗克的量子思想引入到原子内部的能量,提出了著名的玻尔模型。尽管早期的量子思想取得了不错的效果,但物理学家并不理解是什么机制导致了如此奇怪的规则。1923年,路易·德布罗意(Louis de Broglie)在他的博士论文中提供了一个解答:电子及其他粒子可以表现出波动行为,即被后来称为德布罗意物质波。如同吉他弦振动一样,物质波有确定的分立的频率。原子中做轨道运动的电子,只有满足谐振条件,才是稳定的运动。据说由于德布罗意的观点如此奇怪,学位委员会将他的论文外送至爱因斯坦评审,在得到爱因斯坦的肯定后论文才通过。

1925年,埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger)在苏黎世做有关德布罗意工作的报告时,皮特·德拜(Pete Debye)说,既然提到了波,就应该有波动方程。受此启发,薛定谔提出了波动方程,即著名的薛定谔方程。与此同时,马克斯·玻恩(Max Born)、帕斯库尔·约当(Pascual Jordan)和维尔纳·海森堡(Werner Heisenberg)共同发展出了与波动力学等价的矩阵力学。有了强大的数学理论基础后,量子理论开始了爆炸性的发展。在短短的几年时间里,物理学家解释了一系列的实验观测结果,包括复杂的原子光谱和化学反应性质。

量子理论的建立使人们对微观世界有了更加丰富的认识,催生并发展出了一系列重大的理论和技术,如超流现象、核反应、晶体管、超导理论、磁共振成像、量子霍尔效应、玻色-爱因斯坦凝聚态等。据估计,全球经济有三分之一与基于量子力学的产品有关。量子力学的发展及其应用的时间轴示意图如图1所示。

我们要重点介绍一下晶体管。晶体管无疑是20世纪最重要的发明之一,没有它就不可能有现代科技。1947年12月,美国贝尔实验室的肖克利、巴丁和布拉顿组成的研究小组,研制出一种点接触型

的锗晶体管。有些人可能不知道晶体管与量子力学有什么关系,在这里稍做一下说明。量子力学在固体中的应用发展出了能带理论,用能带理论可以解释导体、绝缘体和半导体的行为特征,基于掺杂半导体的性质才发明出了晶体管。在晶体管技术开发之前,这种作用是由电子管承担。世界上第一台通用计算机“ENIAC”于1946年在美国宾夕法尼亚大学诞生,用了18000个电子管,占地170平方米,重达30吨,耗电功率约150千瓦,每秒钟仅可进行5000次运算。每个真空电子管有拳头般大小,发出的热量几乎和一个灯泡一样多,成本也要几十元。如今在一台个人电脑中就集成了数十亿个晶体管,每个的成本不到一分钱的百万分之一。如果使用真空电子管来制造一个与现代个人电脑功能相当的计算机,不仅价格会贵的离谱,占地也十分庞大,而且其所需电力与一个城市相当。

晶体管的大规模集成化应用,导致了计算机与信息技术的飞跃性发展。如今晶体管几乎无处不在,手机、互联网、电脑、汽车、银行卡等,几乎所有数字电器中都有它的身影。人们通过通信技术迅速缩短了物理距离,使用计算机数字化也极大的提高工业生产效率,这场“数字信息革命”也被称之为第三次工业革命。

1965年,英特尔的联合创始人戈登·摩尔(Gordon Moore)作了一个非凡的论断,被后来认为称作“摩尔定律”:单个芯片上的晶体管数量大概每隔十八个月就会翻一番。这个定律一直持续到2010年,之后的时间里晶体管数量密度预计只会每三年翻一番,但也马上就到尽头了。因为从芯片的制造来看,7纳米就是物理极限。一旦晶体管大小低于这一数字,它们在物理形态上就会非常集中,以至于产生量子隧穿效应,为芯片制造带来巨大挑战。其实量子效应是一把双刃剑:当你试图按照经典物理的规律去设计集成电路和计算机时,自然认为遇到的量子效应是一场噩梦;但当你能够运用量子力学的原理有效利用量子效应时,会发现至少在某些重要问题上,它能够带来计算能力的巨大飞跃。

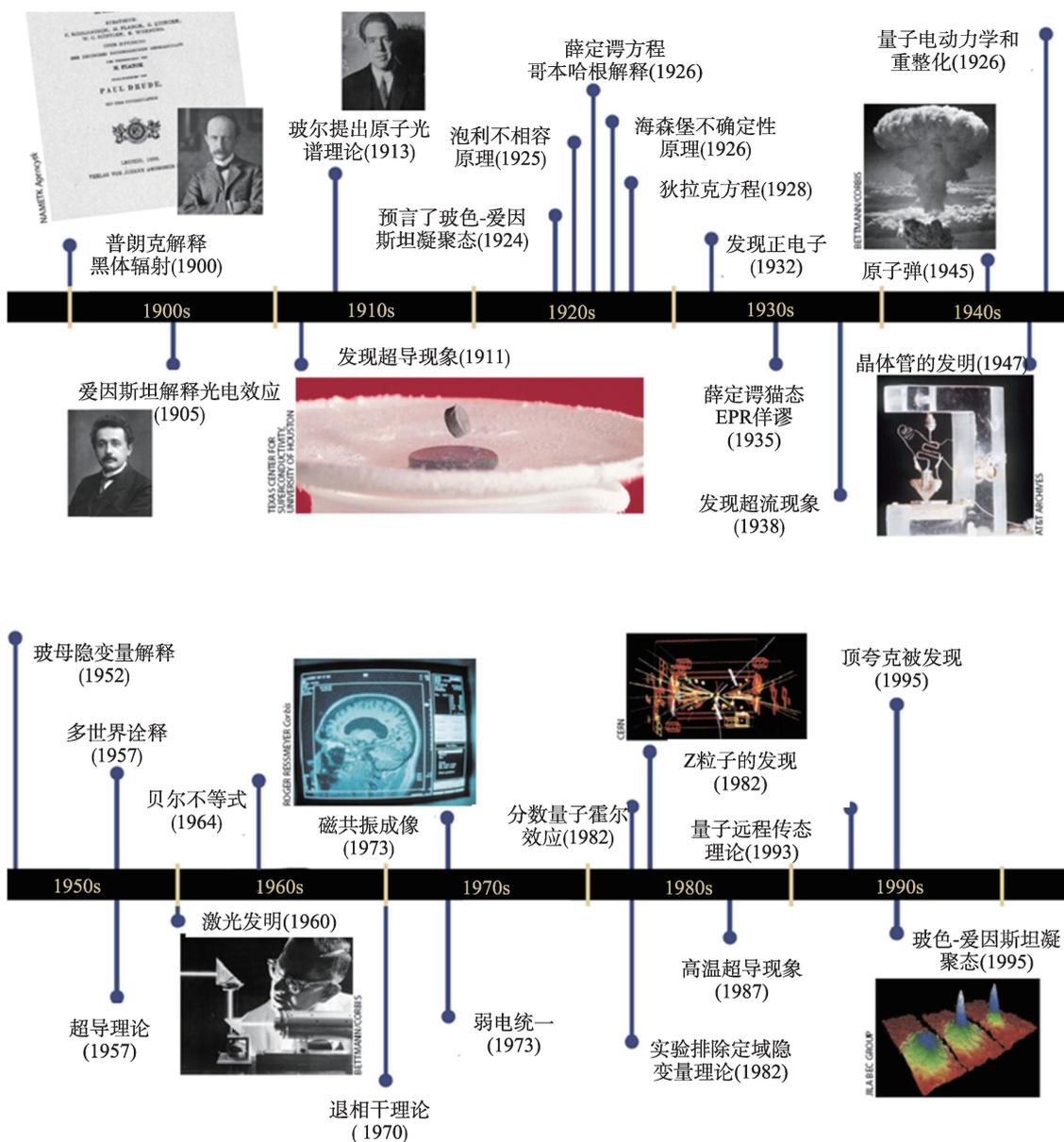


图1 量子力学的发展及其应用(图片来自文献: Scientific American,2, 01(2001) ①)

经典计算机还有另一个原则上不可克服的问题是热耗散。经典计算机中所有的计算过程都是不可逆的,每擦除一个比特的信息,都会耗损一定的能量。为了减少计算机中热耗问题,美国阿贡国家实验室的科学家 Paul Benioff 在 1980 年首先提出了量子计算机的概念。同年,苏联科学家 Yuri Manin 从计算复杂性的角度也独立地提出了量子计算机的概念。1982 年,理查德·费曼(Richard Feynman)认识到如何模拟量子系统是非常有挑战性的问题。这个问题根本上来说就是计算复杂度的问

题:随着量子体系维度的增长,为了存储量子态所需的经典寄存器是指数增加的。上述问题的可能的解决方案也是费曼在同一篇文章中提出,即利用基于量子力学规则建造的新型计算机。随着一系列量子算法尤其是大数分解的 Shor 算法和量子搜索的 Grover 算法的提出,量子计算对某些重要问题相对于已知的经典计算方式的计算能力的巨大优势已不容置疑。

量子计算利用量子的叠加性,可以同时处理多个量子态。这种庞大的并行运算能力将使量子计



图2 IBM Q计算中心内部图,IBM最先进的量子计算机就放置在这里。图中,科学家正在通过IBM云访问其量子计算机(图片来源:IBM官网)

计算机能在几分钟内解决经典计算机需要花费10亿年时间才能解决的某些问题,而且量子叠加性使得只需要300个量子比特所能够存储的状态就跟宇宙中所有的原子数量相当。近年来,对商业化应用的追求使得量子计算不断取得可喜的成果。但你目前还无法买到一台量子笔记本电脑,因为量子计算机的研发仍面临着诸多困难。不过目前IBM、阿里巴巴-中科院相继上线了量子计算云平台,大众都可以去申请,在云端使用他们的量子计算机做测试运算。事实上,量子计算机运行的环境极其苛刻,无法像个人电脑那样普及,而且只针对特定问题才能比经典计算机优越。未来量子计算机应该会是采取这种云平台形式,大众普及使用的仍是经典计算机,有量子加速需求时就从云平台调用量子计算机,返回结果给经典计算机处理。

随着新型量子技术的发展,JP Dowling 和 G. Milburn 在2002年最早提出了第二次量子革命的概念^②,并按照用到的量子特性以及发展的时间,将量子技术分为两代。激光、晶体管、电荷耦合器、磁共振成像等早期的应用,主要是基于量子体系的不连续特性(如光谱、隧穿等效应),被称为第一代量子技

术。而基于量子体系中的叠加性和非定域性(如量子叠加、量子纠缠等),发展起来的量子计算、量子通信及量子传感等技术,被称为第二代量子技术。在我国,2015年中国科学院量子信息重点实验室召开了首届“第二次量子力学革命”,研讨量子力学基本理论的发展以及应用。

第二代量子技术本质上是通过对单个原子、单个电子、单个光子的独特量子属性进行调控与检测,从而来实现远超当前技术水平的获取信息、处理信息、传输信息的能力。这些技术除了上文介绍的量子计算外,还包括量子通信和量子精密测量。

量子通信是指以量子系统,如单光子、纠缠光子对,作为信息载体进行经典信息或量子态传输的通信方式,它包括量子密钥分发(1984年 Bennett & Brassard 提出)、量子安全直接通信(2000年 Long & Liu 提出)、量子秘密共享(1999年 Hillery, Bužek, Berthiaume 提出)、量子隐形传态(1993年 Bennett et al 提出)和量子密集编码(1992年 Bennett & Wiesner 提出)等主要模式,其中量子密钥分发、量子安全直接通信和量子秘密共享以保密通信为目的,又叫做量子保密通信、量子密码。量子保密通信具有感知

窃听的能力,因此其安全性是信息论可证的,简单地说就是不可破译的。而现在通用的经典保密通信是基于计算复杂性的,现在找不到有效的破译方法,但不能证明有效的破译算法不存在,在理论上存在将来被破译或者是有人已经破译,但却不公开的隐患。但是保密是分等级的、有时效的,绝对安全是无法做到的,而且往往也是不必要的,经典保密通信在现在和将来相当长时间里都是保密通信的主要方式。但在一些安全等级高、保密时效长等特殊情形,量子保密通信正可发挥重要作用。从另一个方面看,在以后有了量子计算机后,它们之间的通信一定是量子信道,这种量子通信设备和技术肯定要被用到。

量子精密测量能以更高的灵敏度、准确度,更快的速度来测量时间、加速度、重力、转动、时间、压强、温度、电场、磁场等。量子精密测量技术在很多领域有着重要的应用,例如在对地下结构的检测(地下管道、排水管道)、环境监测(地下含水层及沉降的监测)、矿藏储存的探测、自然灾害预警、地下爆炸的监控(国防战略需求);在医疗健康方面,基于量子传感的精准诊断技术将为阿尔茨海默病、癌症等重要疾病的早期检测提供低成本、无副作用的新技术。

近年来,电子信息产业增长速度与增长成本已不相匹配,如集成电路、大数据存储等方面,量子信息科学为其提供了一个很好的成长方向。量子信息科学技术的产、学、研受到各国政府、研究机构、高科技公司、投资机构的极大重视,并获得了大量的资金支持。美国发起“国家量子计划”^③(每年资助2亿美元),将量子传感、量子计算、量子通信列为三大战略支持领域。欧盟发布“量子宣言”^④启动“量子技术旗舰计划”(资助10亿欧元),制定量子通信、量子传感、量子计算与量子模拟的短(0~5年)、中(5~10年)、长(>10年)期发展规划。英国启动了一

项价值2.7亿英镑(3.37亿美元)的“国家量子技术计划”,制定十年规划目标,力争逐步实现量子系统组件、量子时钟、量子成像、量子传感、量子通信、量子计算等一批量子信息科学技术的产业化、商业化应用。量子信息科学技术既是国防战略的需求,对国民经济特别是高附加值产业的发展也具有重大意义。世界上各大高科技公司,包括Google、IBM、微软、英特尔、腾讯、阿里巴巴、百度、华为等,纷纷加入到量子信息科学技术产业化的竞争浪潮。

我国在量子信息领域的研究起步较早,经过二十余年的发展,已经具备强劲的国际竞争力:在量子传感与量子精密测量方面,尤其是在量子时钟、量子成像、量子传感方面取得了一系列突破性进展,接近国际领先水平;在量子计算与量子模拟方面,紧跟国际前沿,目前在实现量子计算的主流体系和架构方面,都有明确布局;在量子通信方面,特别是在实用化的量子密钥分配方面,处于国际领跑地位^⑤。国家对量子信息科学技术的发展也高度重视,将其视为国家战略优先发展的领域、产业。

物理学中的技术革命从未停止过,这次到来的革命或许正是已经萌芽并快速发展的第二代量子技术。

参考文献

- ① J. Wheeler, and M. Tegmark, 100 years of quantum mysteries. *Scientific American*, 2, 01 (2001).
- ② J. P. Dowling, and G. J. Milburn, Quantum Technology: The Second Quantum Revolution[J]. *Philosophical Transaction*, 361, 1655 (2003)
- ③ The Committee on Science and Committee on Homeland and National Security, The National Science and Technology Council. *Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities*. 2016-07.
- ④ The European Commission. *Quantum Manifesto*. 2016-03.
- ⑤ 郭光灿, 韩永建, 史保森. 量子信息科学发展展望.《2017科学发展报告》第一章(2017).