

漫谈量子 量子物理的 诞生与发展

徐晓帆 谭惠文

(中国电子科技集团有限公司电子科学研究院 100041)

当今世界,科技发展日新月异,人工智能、大数据、云计算、5G移动通信、虚拟现实和增强现实等新名词已经融入了大众茶余饭后的闲谈之中。尤其是“量子”这个最熟悉的陌生词,凭借着这两年我国“墨子号”量子卫星和地面量子通信网络的成功,已经通过电视、网络、报纸等各式各样的宣传报道深入到大家的心中。“量子”是怎么来的?究竟该怎样理解?许多物理学大师和专家都已经从专业的、概念性的、趣味性的等多个角度进行了阐述。然而,就像“量子”是捉摸不定的一样,每个人的理解都有所不同。这里,将根据笔者在从事量子物理研究过程中所学的、所听的、所读的、所想的方方面面,与大家聊一聊对量子物理的理解,并分享一些有趣的故事。

在正文开始之前,笔者想先和大家分享一张照片(图1)。照片拍摄于1927年第五次索尔维会议

(Solvay Conference),公认的有史以来最牛的一次自然科学大师的聚会,29名出席者中有17名诺贝尔奖得主。照片中^①第一排从左至右分别为:欧文·朗缪尔、马克斯·普朗克、玛丽·居里、亨德里克·洛伦兹、阿尔伯特·爱因斯坦、保罗·郎之万、查尔斯·古伊、查尔斯·威尔逊、欧文·理查森;第二排从左至右分别为:彼得·德拜、马丁·克努德森、威廉·劳伦斯·布拉格、亨德里克·克雷默、保罗·狄拉克、阿瑟·康普顿、路易·德布罗意、马克斯·玻恩、尼尔斯·玻尔;第三排从左至右分别为:奥居斯特·皮卡尔、埃米尔·昂里奥、保罗·埃伦费斯特、爱德华·赫尔岑、泰奥菲·德唐德、埃尔温·薛定谔、埃米尔·弗沙费尔特、沃尔夫冈·泡利、维尔纳·海森堡、拉尔夫·福勒、莱昂·布里渊。量子物理就是在这样一群大师的关心爱护下发芽并茁壮成长的。

在下文中,将从量子的诞生讲起,分享量子物



图1 第五次索尔维会议参会人员照(图片来自维基百科 Solvay Conference 词条)

理中笔者认为最重要的几个概念,最后介绍几个与量子相关的前沿科技。

1. 物理学的分支

物理学的起源很难追溯,古埃及时期就已经有相当发达的天文观测技术,但直到古希腊时期,亚里士多德才撰写了已知最早的物理学著作《物理学》。经过几千年的发展,现代物理学包含经典力学、热力学和统计力学、电磁学等经典理论,以及相对论、量子力学等新型方向,还与生物、化学等学科交织出了生物物理、化学物理、经济物理、医学物理等交叉学科(图2)。经典力学研究的是在日常生活所涉及的速度和尺寸范围下物体的运动规律,当速度趋于光速时便进入到相对论力学范畴,若尺寸小到微观的原子分子级别则进入到量子力学范畴,而在速度和尺寸均超出经典范畴时则需要量子场论了。

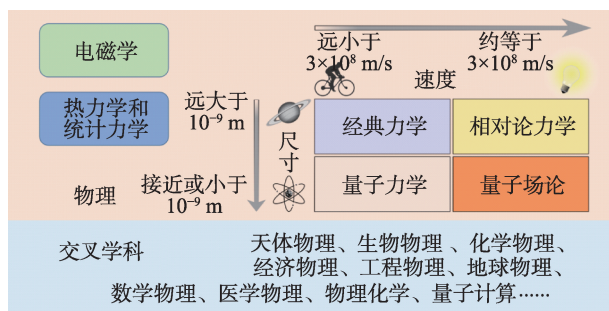


图2 物理学分支示意图

2. 拼凑出来的公式——量子的诞生

在物理历史的长河中,有很多故事被传颂,像阿基米德的澡盆、牛顿与苹果树、薛定谔的猫,等等。然而在笔者心里分量最重的是20世纪伊始开尔文勋爵^②的那次讲话,正是那“两朵乌云”带来了近现代物理的勃勃生机。

1900年4月27日,开尔文勋爵发表了题为“十九世纪热和光的动力学理论上空的乌云”^③的演讲。开尔文勋爵指出,只要再解释仅剩的两个现

象,我们就可以完整地理解热力学和宇宙能量的性质。这“两朵乌云”分别是以太的探测(尤其是迈克尔逊-莫雷实验的失败),以及黑体辐射现象中存在的紫外灾难^④。正是这两个无法被解释的现象,促成了当代物理学的进步,分别引出了相对论和量子力学。

黑体辐射是指物体的热电磁辐射,其频谱和强度与物体的温度相关。为了解释这个现象,物理学家从经典热力学出发做了大量的研究。1893年,威廉·维恩从处于热平衡中含有光波的腔的绝热膨胀出发,推导出了维恩位移定律,指出黑体辐射曲线存在最大值,且其波长与温度成反比。1896年,维恩进一步推导出维恩分布定律,给出了黑体辐射频谱曲线,在短波长时和实验吻合较好,但在长波长时失效。1900年,瑞利勋爵推出了瑞利-金斯定律,在长波长时和实验吻合,然而在短波长时(当频率趋于紫外时)与实验相悖甚远,其辐射能量趋于无穷,称为紫外灾难。1900年10月19日,在德国物理学学会的一次会议上,马克斯·普朗克通过经验拟合提出了普朗克定律,与实验结果完全符合。此后,普朗克竭尽全力寻求一个物理解释,最终发现必须引入“电磁能量是量子化的”这一假设,认为发射和吸收时的能量不连续,同时指出能量和频率的关系为 $E = h\nu$,其中 h 称为普朗克常数。就这样,从普朗克拼凑出来的公式入手,量子力学诞生了。

3. 究竟是波还是粒——波粒二象性

在物理的历史长河中,为追寻真理引发了多次争论,其中最著名的恐怕要数关于光究竟是一种波还是一种粒子的争论了。早在11世纪初,阿拉伯科学家伊本·艾尔-海什木就撰写了光学专著描述折射、反射、小孔成像等现象,并指出光线是由粒子组成的。1630年前后,法国科学家勒内·笛卡尔提出了不一样的观点,认为光应当被看作介质中的波状扰动。自1670年起的数十年间,波和粒的争论迎来了一个高潮。艾萨克·牛顿提出了微粒假说,认为

反射光呈完美的直线传播证明了光的粒子性。而罗伯特·胡克和克里斯蒂安·惠更斯,以及100年后的奥古斯丁·菲涅耳则站在另一立场,完善了波动的数学模型,并强调在不同介质中的折射可以被波动的数学模型完美解释。1803年托马斯·杨的双缝干涉实验很好地证实了光的波动性。麦克斯韦方程组更是指出光的实质是电磁波,并完美地描述了电磁相互作用。至此,光的波动性似乎已经取得了胜利。然而,20世纪发生的物理革命,让人们有了全新的认识。

我们在上一节提到,20世纪初科学家发现能量是量子化的。这种革命性的思想,一经提出就遭到了大多数物理学家的极力反对,但同时也为后续众多物理研究开拓了思路。1905年,爱因斯坦提出了“光子”概念^⑤,并以此解释光电效应,认为电子仅能从电磁场中吸取非连续的能量。人们逐渐意识到光同时具有波和粒子双重性质。1924年,德布罗意进一步提出了物质波的概念,认为所有的物质(原本通常被认为是粒子)也都具有波动特性,并给出了著名的公式 $\lambda=h/p$ 将波长和动量用普朗克常数相连接。1927年,乔治·汤姆孙与克林顿·戴维孙和雷斯特·革末分别进行了电子的衍射试验,证明了粒子也具有波动性。光的波动、粒子之争终于在20世纪前叶由量子物理解决,原来不仅是光,所有的物质都具有波粒二象性。这种独特的性质可以由波函数和几率幅解释,描述物质性质的波函数具有干涉的特性,但是测量会使之塌缩到某一特定的态,表现出粒子的特性。当然,还有很多其他不同的解释方法,有待我们继续研究确定。

4. 约会情人擦出的科学火花——波动方程

一直以来,无数人都在思考灵感是怎么来的这个问题,而薛定谔则告诉了世人一种答案。薛定谔受到爱因斯坦一篇文章的激发,想到将电子绕原子核的运动按照波动的形式模型化。屡次尝试无果令他身心疲惫,于是1925年底,薛定谔决定带着他的情人去瑞士阿尔卑斯山的阿罗萨镇放松心情^⑥。正是这次“浪漫的”假期激发了他的灵感,1926年1月,薛定谔便提出了举世瞩目的量子力学波动方程:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t)。$$

虽然有些讽刺,但是不可否认该方程的提出使得量子力学真正地可以被用来研究各类问题。同年,玻恩将方程中的波函数 Ψ 解释为几率幅,其模的平方为几率密度,进而将量子力学的研究与应用推向了高潮。

有趣的是,在同一时期问世的另一个描述量子系统演化的方程,量子力学矩阵方程的提出者海森堡,一直被视为好好先生。海森堡和他的妻子共有7个子女,是个虔诚的基督徒,与薛定谔的放纵生活形成了鲜明的对比。另外一个小插曲是,海森堡在推导矩阵方程时最初并不了解矩阵数学,直到玻恩在审阅他的文章时才发现其思想很接近矩阵数学,进而将海森堡的思想扩展成了今天我们熟知的量子力学矩阵方程。之后,狄拉克将矩阵方程和波动方程相融合,并进一步推导出了相对论量子力学方程。

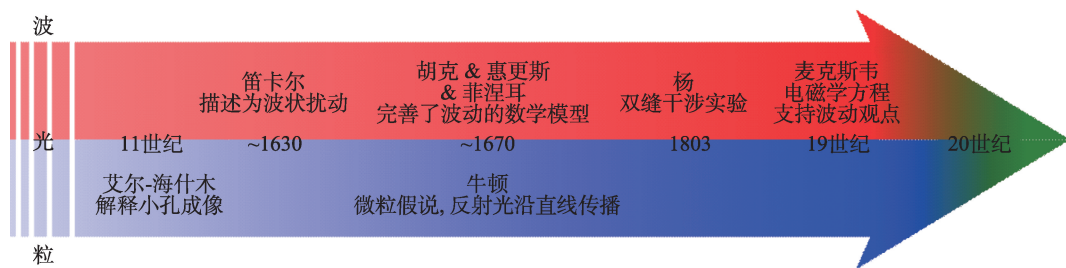


图3 20世纪前光的波粒之争

5. 小猫咪你怎么了——量子纠缠态

量子物理中最被大众所熟知的,恐怕要数薛定谔的猫了。量子力学诞生初期,很多物理学家都不认可这种看似荒诞的解释,他们依旧坚信经典物理所设置的条条框框才是世界的本质,这其中最著名的要数爱因斯坦了。1935年,爱因斯坦、波多尔斯基和罗森提出了著名的思想实验——EPR佯谬,依据两个量子纠缠粒子所呈现出的关联性现象,认为波函数不能完整地描述物理实在,进而提出局域隐变量理论。同年,为了支持EPR佯谬,薛定谔提出了另一个思想实验,把EPR的思想从微观推到了宏观。该实验中,猫被装入放有放射性物质的房间并锁上房门,放射性物质如果发生衰变,则会由盖革计数器探知并驱动一个锤子打破装有氰化氢的瓶子,剧毒物质便会将猫毒死;如果没有发生衰变,一系列的反应不会发生,猫也就活着。如果我们不打开房门,就不会知晓房间内所发生的事,因此薛定谔认为,猫处在一种既死又活的状态中。自从该思想实验被提出以来,各种量子力学解释相继涌出,其中最被广泛接受的是哥本哈根解释,也正是在争论中,薛定谔给出了“纠缠”^⑦这个名词。

虽然薛定谔的实验恐怕因为退相干的原因而永远无法实现,但其思想却激励了几代物理学家去思考背后的问题。终于,1964年,北爱尔兰物理学家约翰·贝尔从局域隐变量理论出发提出了著名的贝尔不等式,预言量子力学将打破该不等式。1982年,阿兰·阿斯佩首次通过实验证明了量子力学的正确性^⑧,自此质疑量子力学的声音越来越少。

6. 大牛泡利的错误——电子自旋

世界上从来都不缺少牛人,但是能被诸多物理大师承认的牛人屈指可数,奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利便是这样一个人。泡利是个完美主义者,他不仅对自己要求严格,更对与他共事的其他人要求苛刻,被称为“物理学的良心”。泡利一生极少犯错,然而他仅有的几个错误,却都与物理学上的重大发现有关。

在了解泡利所犯的错误之前,我们先回顾一下原子模型的发展。19世纪初期,英国科学家约翰·道尔顿提出了现代原子理论,认为元素是由非常小的原子组成的,同一种元素对应的原子尺寸和质量相同,不同元素对应的原子则不同,不同元素的原子还可以组合成化合物。1902年,吉尔伯特·路易斯提出了原子的立方模型,认为电子处在立方体的八个角落处^⑨。1904年,约瑟夫·汤姆孙提出了梅子布丁模型,认为呈负电性的电子分布在一个本身均匀呈正电性的区域,因此原子呈电中性。不久之后,金箔实验证实了原子拥有一个很小但很重的核,于是欧内斯特·卢瑟福在1911年提出了行星模型,认为正电荷聚集在中心很小的区域构成原子核。1913年,玻尔将量子的概念引入到了原子模型中,认为电子绕原子核转动,其角动量是不连续的。现在我们知道,描述电子能级需要四个量子数,通常选为主量子数、角量子数、磁量子数和自旋量子数。而自旋的发现,却牵连着泡利的一个错误。

1924年,泡利提出描述外层电子的能态还需要一个具有双值的量子数。1925年初,拉尔夫·克朗

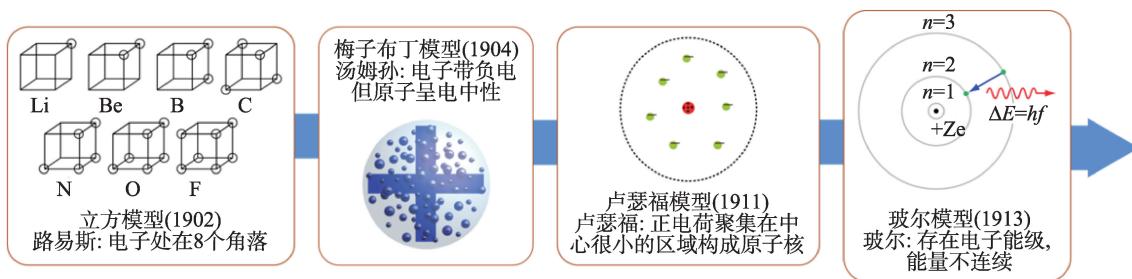


图4 原子模型的演变

尼格指出这个具有双值的量子数来自于电子的自旋。然而,该想法得到了泡利的猛烈抨击,泡利认为为了产生必须的角动量,电子假想表面的运动速度将要快过光速,这违背了相对论。可怜的克朗尼格为此而放弃发表该结果。同年秋天,两名荷兰物理学家乔治·乌伦贝克和塞缪尔·古德斯特发表了克朗尼格当初没有发表的自旋的概念,并用实验结果佐证。虽然曾在一开始极力反对,泡利还是接受了自旋的概念,并于1927年基于量子力学给出了理论解释。也是基于此,1940年,泡利提出了自旋统计定理,指出费米子具有半整数的自旋,而玻色子自旋呈整数。需要提及的是,泡利的另一个错误与弱相互作用中的宇称不守恒相关。

泡利虽然天性傲慢,但是这世界上还是有“三个半”物理学家让他感觉不那么“笨”。首先的“半个”是泡利的同事兼朋友海森堡,也就是那个发明了量子力学矩阵方程的人。接下来让他感到敬重的是玻尔——哥本哈根学派的领头人,和大名鼎鼎的爱因斯坦。说玻尔和爱因斯坦是量子物理发展过程中最重要的两个人一点也不为过,正是经过以两人为代表的两派间的相互争论和合作,才建立了现在我们所熟知的较完备的量子物理体系。可是让泡利最最敬重的人,是泡利的老师阿诺·索末

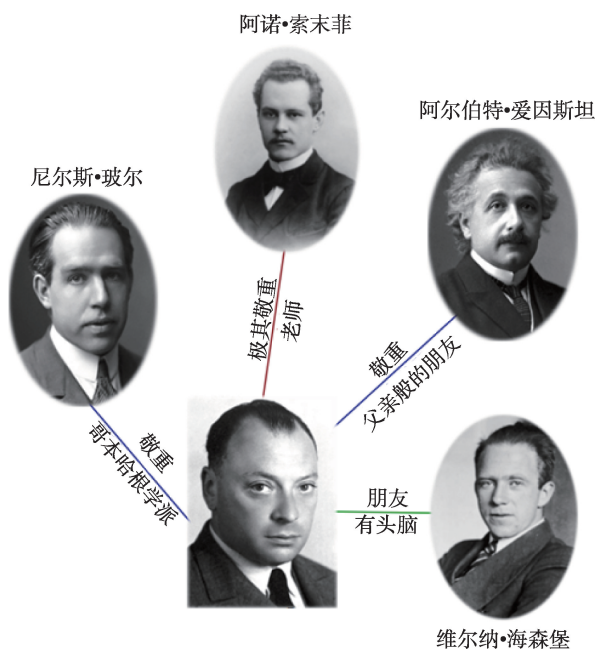


图5 泡利认可的“三个半”物理学家

菲。索末菲可称得上是物理学历史上最牛的老师之一,在后面的章节中我们再详细讨论。

7. 量子力学的圣殿——哥本哈根

哥本哈根是丹麦的首都,是最适宜居住的城市之一。同时,在众多量子物理学家眼中,它更是量子力学的圣殿,现在绝大多数教科书所采用的依旧是量子力学的哥本哈根诠释。哥本哈根诠释核心思想的形成可以追溯到20世纪20年代,那时,玻尔和海森堡在哥本哈根的研究中对量子力学进行了深入的研究。不过,哥本哈根诠释并没有一个确定的定义,经过百年的演变,普遍被接受的哥本哈根诠释的主要思想有:

- 波函数:表示系统的状态,且在与其它系统孤立时随时间平滑演进;
- 不确定原理:一些系统特性无法同时被确定,比如位置和动量;
- 玻恩定则:描述系统态的波函数是概率的;
- 互补原理:对于一个研究对象,它可能存在几个侧面,既互斥又不可割弃,例如波粒二象性,在一个实验中只能反映出它的一面;
- 对应原理:当量子数很大时,量子体系的行为趋于经典体系。

除了哥本哈根诠释,量子力学还存在很多其他诠释,包括多世界诠释、德布罗意-玻姆理论、量子退相干理论等。多世界诠释认为所有可能的历史和未来都是真实的,有无穷多个宇宙,不断分裂。德布罗意-玻姆理论也称作确定性非局域隐变量理论,为了让量子力学回归经典,理论认为除了波函数外还存在构造量,其演化由波函数通过导引方程决定。量子退相干理论将波函数塌缩解释为退相干,系统与环境相耦合导致系统本身的量子特性消失,该理论逐渐被吸收入哥本哈根诠释。

8. 走在21世纪——量子通信与量子计算

沧桑百年,科学技术水平的进步和社会意识形

态的改变,使人们对生活品质的要求日益增加,无形间推动了量子力学和实际应用的结合。步入21世纪,量子力学在通信和计算中的应用日渐丰富,不少技术已经被推广使用,其中最知名的恐怕要数量子密钥分发。

量子密钥分发是利用量子力学,为通信双方提供无条件安全的共享密钥来保障绝对安全通信的方法。量子密钥分发中最基本的两个协议是基于编码于非正交态的BB84协议,以及基于量子纠缠态的E91协议,前者更是成为了目前国内外工程应用的基本协议。量子密钥分发的无条件安全性得益于量子力学的一系列基本性质:量子不可克隆定理保证了无法复制量子态,因此窃听者仅能够对截获的量子态进行测量;然而对一个量子系统的测量将会带来扰动,使得窃听者被通信双方发现。不过,目前还没有理想的单光子源,这就为窃听者提供了一种称之为光子数分束攻击的方法。为了弥补这一漏洞,科学家们开发了诱骗态方法。目前,基于“墨子号”量子科学实验卫星,科学家们已经实现了kbps级别、距离达到1200千米的星地量子密钥分发实验。

量子隐形传态是量子力学中特有的现象,通过借助量子纠缠和经典通信手段实现量子信息的传递。在量子隐形传态的过程中,量子信息的发送方和接收方需要首先通过量子信道分享一对量子纠缠态并分别保存;当发送方希望向接收方发送一个量子态时,仅需要将预传送的量子态与发送方手上存留的量子纠缠对中的那个量子态进行联合量子力学测量,并将测量结果通过经典信道告知接收方;接收方依据测量的信息,对手上存留的量子纠缠对中的那个量子态进行相应的幺正变换即可得到目标量子态。需要强调,量子隐形传态技术不是一种传统意义上的传输技术,并没有传送物质或能量,而是一种通信技术,传递量子态信息。量子隐形传态和量子密钥分发的根本区别在于,后者利用量子特性传输的是经典信息,而前者传递的则是量子态。因此,量子隐形传态技术在量子通信中具有不可替代的重要地位,不仅保障了通信的安全性,

也是实现量子网络、分布式量子计算的关键技术。除了利用光子的量子隐形传态,基于原子的量子隐形传态也已经实现。此外,借助于“墨子号”量子卫星,科学家展示了距离长达1400千米的量子隐形传态实验。

量子计算是量子力学应用的另一个重要领域。由于量子态的叠加特性,量子计算机在许多场景下有远超过经典计算机的计算效率,其中最著名的如大数质因子分解算法(Shor算法)——从指数时间缩短到多项式时间,以及搜索算法(Grover算法)——对计算资源的需求从 N 量级降低到 \sqrt{N} 量级。实现量子计算机的方法有很多,其中比较知名的有基于超导、离子阱、光晶格、量子点、核磁共振等方法。目前,IBM已经利用超导技术实现了50个量子比特的量子计算机原型,Google更是实现了72个量子比特。

除了量子密钥分发、量子隐形传态和量子计算技术,量子存储、量子模拟、量子雷达等也是量子力学的热点应用领域。相信不久的将来,量子物理将为社会带来颠覆性的科技革命,彻底改变我们的生活和思考方式。

9. 量子力学大事记

细数历史上与量子力学相关的重大发现和进展,我们会发现量子力学的发展不仅仅是循序渐进的,更是理论和实验相互推动、共同进步的。

- 1805年(实验),托马斯·杨通过双缝干涉实验证明了光的波动性。
- 1877年(理论),路德维希·玻尔兹曼提出物理系统的能级可以是离散的。
- 1897年(实验),约瑟夫·汤姆孙通过阴极射线实验发现了电子,并证实电子带负电。
- 1900年(理论),马克斯·普朗克引入能量量子化的思想。
- 1850年至1900年前后(实验),进行了与黑体辐射相关的一系列实验,反映了能量量子化的事实。

- 1905年(理论),阿尔伯特·爱因斯坦提出光量子假说,用光子的概念解释光电效应。
 - 1887年至1914年(实验),自海因里希·赫兹发现光电效应至罗伯特·密立根的实验,逐步证明光量子假说。
 - 1909年(实验),罗伯特·密立根的油滴实验证明电荷是最小单位。
 - 1911年(实验),欧内斯特·卢瑟福的金箔实验证明梅子布丁模型是错误的,进而促进了原子行星模型的提出。
 - 1920年(实验),奥托·施特恩和瓦尔特·格拉赫进行了施特恩-格拉赫(Stern-Gerlach)实验,证明了粒子自旋的量子化。
 - 1923年(理论),路易·德布罗意提出物质波理论,引出波粒二相性。
 - 1925年(理论),维尔纳·海森堡发表矩阵力学。
 - 1926年(理论),埃尔温·薛定谔发表波动力学。
 - 1927年(理论),保罗·狄拉克将量子力学和狭义相对论结合,同年维尔纳·海森堡提出不确定原理。
 - 1927年(实验),克林顿·戴维孙和雷斯特·革末通过电子衍射实验证明了电子的波动性。
 - 1932年(理论),约翰·冯·诺依曼完善了量子力学的数学体系。
 - 20世纪40年代(理论),理查德·费曼等人构建出量子电动力学,描述电磁相互作用。
 - 1955年(实验),克莱德·科温和弗雷德里克·莱因斯证实了中微子的存在。
 - 1961年(实验),克劳斯·容松的电子双缝实验展示出了波粒二象性。
 - 1975年(理论),休·波利策等人推动形成了量子色动力学,描述强相互作用。
 - 20世纪70年代(理论),在众多科学家的努力下,形成了标准模型,将电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用统一。
 - 1980年(实验),克劳斯·冯·克利青发现量子霍尔效应,显示出了量子化的电阻值。
 - 1982年(实验),阿兰·阿斯佩首次证实量子纠缠。
 - 1994年(实验),保罗·奎亚特等人通过马赫-曾德尔干涉仪实验展示了零作用测量。
- 在不久的将来,也许广义相对论与量子力学也会结合在一起,将引力相互作用和其他三种相互作用结合,最终形成大统一理论。

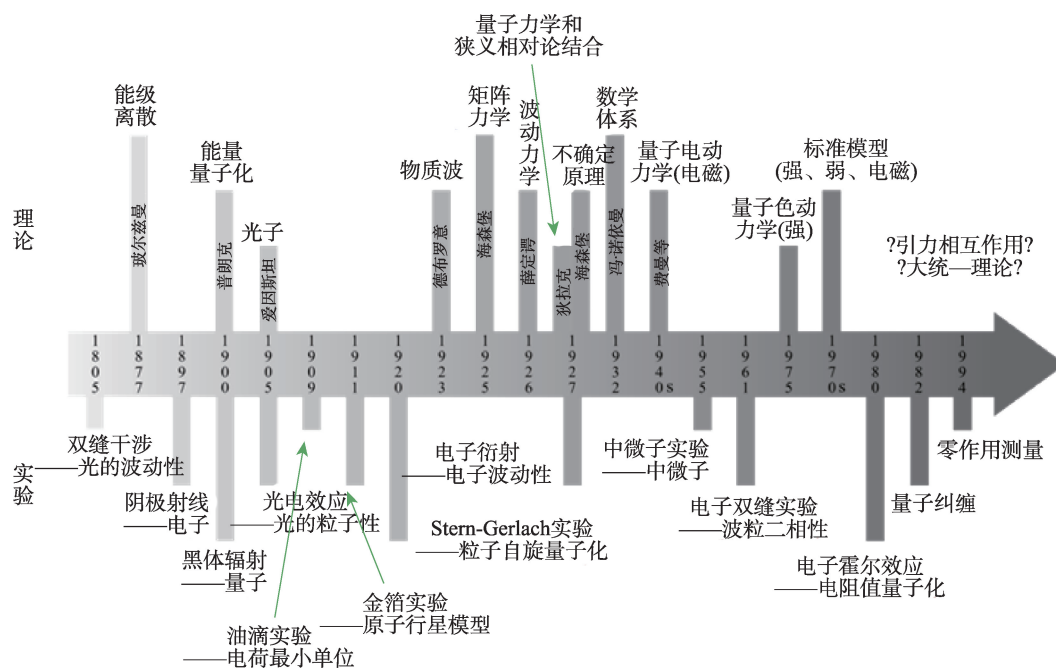


图6 量子力学大事记

10. 最牛的老师——索末菲 vs 汤姆孙

千里马常有,而伯乐不常有,千里伯乐就更难得了。纵观量子物理学界,有两位算是本身既是大师级别的人物,带出来的学生也不乏大师的身影。德国物理学家阿诺·索末菲出生于1868年12月5日,卒于1951年4月26日,一生对量子力学的贡献不胜枚举,其中最重要的是他引入了描述原子能级的4个好量子数中的2个,以及精细结构常数等。索末菲共培养了6名诺贝尔奖得主,共计获得7次诺贝尔奖。英国物理学家、1906年诺贝尔物理学奖得主约瑟夫·汤姆孙生于1856年12月18日,卒于1940年8月30日,发现了电子并提出了梅子布丁模型。汤姆孙共培养了10名诺贝尔奖得主,算上自己共获得了11次诺贝尔奖,此外还培养了被称作“原子弹之父”的罗伯特·奥本海默。更为难得的是,汤姆孙不仅将自己的儿子乔治·汤姆孙培养成诺贝尔奖,还培养出了威廉·亨利·布拉格和威廉·劳伦斯·布拉格这一对父子诺贝尔奖。

表1 索末菲和汤姆孙知名学生列表

阿诺·索末菲知名学生	约瑟夫·汤姆孙知名学生
维尔纳·海森堡 (1932年诺贝尔物理)	欧内斯特·卢瑟福(1908年诺贝尔化学)
彼得·德拜 (1936年诺贝尔化学)	威廉·亨利·布拉格(1915年诺贝尔物理)
沃尔夫冈·泡利 (1945年诺贝尔物理)	威廉·劳伦斯·布拉格(1915年诺贝尔物理)
莱纳斯·鲍林(1954年诺贝尔化学,1962年诺贝尔和平)	查尔斯·巴克拉(1917年诺贝尔物理)
汉斯·贝特 (1967年诺贝尔物理)	尼尔斯·玻尔(1922年诺贝尔物理)
赫伯特·克勒默 (2000年诺贝尔物理)	弗朗西斯·阿斯顿(1922年诺贝尔化学)
	查尔斯·威尔逊(1927年诺贝尔物理)
	欧文·理查森(1928年诺贝尔物理)
	乔治·汤姆孙(1937年诺贝尔物理)
	马克斯·玻恩(1954年诺贝尔物理)
	罗伯特·奥本海默(原子弹之父)

11. 年轻人的时代

量子力学是一门年轻的科学,在对量子物理探索的过程中,更是涌现出了一批年轻的物理大师:

- 威廉·劳伦斯·布拉格,1915年获得诺贝尔奖,时年25岁
- 维尔纳·海森堡,1932年获得诺贝尔奖,时年31岁
- 保罗·狄拉克,1933年获得诺贝尔奖,时年31岁
- 尼尔斯·玻尔,1922年获得诺贝尔奖,时年37岁
- 路易·德布罗意,1929年获得诺贝尔奖,时年37岁
- 恩里科·费米,1938年获得诺贝尔奖,时年37岁
- 欧内斯特·卢瑟福,1908年获得诺贝尔奖,时年37岁
- 阿尔伯特·爱因斯坦,1921年获得诺贝尔奖,时年42岁
- 沃尔夫冈·泡利,1945年获得诺贝尔奖,时年45岁
- 埃尔温·薛定谔,1933年获得诺贝尔奖,时年46岁
- 约瑟夫·汤姆孙,1906年获得诺贝尔奖,时年50岁

这份名单也激励着现代年轻一代科学家,告诉我们年轻和阅历都不是成功的阻碍,只要努力奋斗,就一定会成功的。

世界总是前进的,不会因为谁而停顿。也许有一天量子力学也不再能够完美地描述整个世界,物理体系还需要进一步完善。但是一代代科学家走过来的路告诉我们,无论年龄长幼,只要奋斗求索,就都有成功的机会!

- ① 获得诺贝尔奖的人物用黑体标出。
- ② 开尔文勋爵,本名威廉·汤姆森,是第一代开尔文男爵。
- ③ 原文题目为“Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”。
- ④ 紫外灾难的预言出现自1900年瑞利-金斯定律,但其名字则是在1911年由保罗·埃伦费斯特首次提及。
- ⑤ 1926年,光学物理学家弗里肖夫·沃尔弗斯和化学家吉尔伯特·路易斯提出了“photon”这个名字,即“光子”。
- ⑥ 注意,薛定谔此时已婚。
- ⑦ “纠缠”一词最早出现在薛定谔写给爱因斯坦的信中,原词为德文“Verschränkung”。
- ⑧ 该实验依旧存在局域性和探测器效率等漏洞,目前科学家们正在尝试进行无漏洞的Bell不等式测量。
- ⑨ 该理论虽在1902年形成,但1916年才发表,并于1919年被朗缪尔进一步完善。