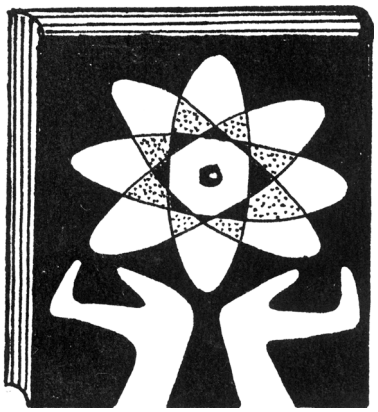
量子力学那30年

史晓雷



20世纪的前30年，是17世纪科学革命之后物理学的又一个黄金时代，是一个需要巨人并且产生了巨人的时代。一位位物理巨擘像雅典卫城帕台农神庙的石柱支撑起了现代物理学的大厦。在大厦的根基处，是两块巨石，一块是相对论，一块是量子力学。相对论的历史是以爱因斯坦为核心的，尤其在与广义相对论厮杀的战场上，他是笑傲群雄的孤胆英雄。量子力学则色彩斑斓、风云际会、大师云集，普朗克、爱因斯坦、玻尔、玻恩、海森堡、狄拉克、薛定谔、德布罗意、泡利是量子宇宙中灼灼生辉的头等亮星。下面的这段历史，是量子力学早期30年的发家史，这里有缓缓溪流、有急瀑险滩、有悬崖峭壁、有一马平川；有长驱直入、有曲折回旋、有争雄逐鹿、有舞姿翩跹。没有哪一段科学史像量子力学这般引人入胜，这般大气磅礴。

1900年，英国的大科学家开尔文在回望自牛顿以来的物理学成就时，认为经典物理学的大厦已经完工，剩下的无非是修修补补的零活。不过，他也指出晴朗的物理学天空上还飘着令人不安的两朵乌云。事情的进展被他言中而又远远超出了他的想象，这两朵乌云竟然引发了新的物理学革命。其中导致量子论（量子力学的前身）的那朵乌云，叫“紫外灾难”。

“紫外灾难”是经典热力学中遇到的一个困境，与黑体辐射密切相关。黑体，是物理学家构造出的一种理想模型，是指能够完全吸收投射到其上一切辐射的理想物体。当时已经知道物体辐射的能量随温度的升高而增加，但是物理学家在用曲线表示黑体在不同的温度下放射不同频率辐射能时，遇到了麻烦。1896年德国物理学家维恩得到一个黑体辐射的能量分布公式，曲线在短波段与实验数据符合得很好，但在长波段偏差很大。后来英国的瑞利和金斯也推出一个辐射能量公式，但与前者相反，长波段符合得很好，短波段严重不符。波长越短，越靠近紫外线一端，因此被荷兰物理学家埃伦菲斯特称为“紫外灾难”。经典物理学面临着危机，时代在召唤英雄。

普朗克是经典物理学的第一个“背叛”者，尽管当初他是何等的不情愿。能量的量子化的确是一个石破天惊的想法，难以想象在经典物理学沉浸多年的普朗克是如何迈出那一步的。1900年的10月19日，是现代物理学的幸运日，普朗克在柏林的物理学会上提出了著名的黑体辐射公式，很快得到了实验的确证。同年12月14日，普朗克在德国物理学会上宣读了一篇影响深远的论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，宣告了量子论的诞生。这一天后来定为量子论的诞生日。如果说19世纪末物理学的三大发现（X射线、放射性、电子）使人们看到了新物理学的曙光，那么普朗克提出的公式$E=h\nu$，则拉开了20世纪现代物理学的帷幕。

幽谷弹琴伴孤影，高山流水觅知音。普朗克一等就是五年，首先回应普朗克的是瑞士伯尔尼专利局的一位三级技术员。他的名字后来成了20世纪科学的化身，他就是阿尔伯特·爱因斯坦。爱因斯坦出身于德国的乌尔姆，后来到了瑞士的苏黎世工业大学学习物理。他在大学里有些叛逆，因此不受老师的欢迎，以至于毕业时他的同学全部留校，而他找工作时费尽了周折，最后才在一位好友的帮助下进了伯尔尼的专利局工作。尽管爱因斯坦的处境比较艰难，但他始终敏锐地注视着物理学的前沿。1905年，是现代物理学上的奇迹年，这一年爱因斯坦发表了4篇划时代的论文，其中与量子力学发展密切相关的便是提出光量子假说的那篇。那篇论文是他唯一自己称之为具有“革命性”的一篇论文，就连同年发表的关于狭义相对论的那篇，他都没有给予如此的称谓。这篇论文提出了光电效应方程，把普朗克的量子理论向前推进了一大步，成了后来波动力学的基点。16年之后他也因此而获得了诺贝尔物理学奖。

对于1905年，我们是如此难以割舍。这一年在科学史上也只有1665~1666年牛顿因剑桥的瘟疫回到家乡乌尔索普的那一段可与之并论。当时牛顿在

万有引力、光的颜色理论、流数术（微积分）三个方面作了最初的研究。1905 年，正如德布罗意所言“爱因斯坦以非凡的精力，在同一年里建立了今天主宰着全部现代物理学的两大理论（相对论和量子论）中的一个，并且对另一个理论的发展也做出了主要的贡献。”之后，爱因斯坦几乎一人在狭义相对论的基础上继续拓荒，直到 1915 年广义相对论的完成。而后，他又甘之如饴地对统一场理论进行研究，或许是他起步太早了，以至于在这条道路上他几无收获。但他从不回头，因为他不能容忍那种老在木板的最薄处钻孔的研究作风。早年他是量子论的三巨头之一，后来他逐渐脱离了量子力学的洪流，海森堡曾为此叹息道，“我们失去了领袖和旗手”。

革命自有后继人。1913 年，比爱因斯坦小 6 岁的玻尔发表了后来被称为“物理学伟大的三部曲”的三篇漂亮论文。玻尔成了一位神奇的魔术师，他把电子的跃迁限制为一个个定态之中，驱散了连续性的幽灵。他创建了一套新的原子结构模型——原子轨道化模型。可能由于玻尔早年在曼彻斯特受卢瑟福熏陶，后来他也成了像卢瑟福那样的一代宗师。卢瑟福在担任卡文迪许实验室主任时提出了原子结构的太阳系模型，他本人也像“太阳”一样，吸引了众多的“行星”绕其运转。玻尔也是如此，正是他使丹麦的哥本哈根成了量子力学发展史上的“圣城麦加”。量子力学的一代才俊在那里壮大成长，担负起了令人嫉妒的历史使命。

玻尔的原子结构模型硕果累累，它不仅正确地导出了巴尔末公式，而且还预测到一些新的谱线系，这些线系后来分别在紫外和远红外区中发现。但是就谱线的强度和偏振等现象以及对多个电子所产生的光谱方面，这套理论显得力不从心。描述微观粒子运动性质的力学体系需要转向。

在玻尔面临的挑战面前，量子力学就要另起炉灶了。1925 年，是新旧量子力学的分界线。德国的年轻后生，24 岁的海森堡用了一种神奇的数学手段“矩阵”很快解释了塞曼效应并且克服了玻尔所无法解释的难题。矩阵，其实 19 世纪就被数学家发明出来了，一直在默默等待着它的用武之地，到了 1925 年才在海森堡的手中大放异彩。不过，海森堡对这种变态的 $AB \neq BA$ 的数学手段认识并不深刻。幸好，他的老师玻恩独具慧眼，很快玻恩和当年仅有 22 岁的约尔丹合作，奠定了矩阵力学的基础。但是，在当时的物理学界看来，矩阵这个东西实在是个怪物，几乎没有一点人性（泡利曾经不屑一顾地斥之为“一文不值”，但后来他反悔了），不过回过头来看，量子力学中出现的怪物实在太多了，更大的怪物还在后头呢。

当德国的玻恩、海森堡、约尔丹、泡利共同摆弄矩阵那个烫手的山芋时，英国的狄拉克也在琢磨海森堡那令人生厌的矩阵表格。英国不愧是科学大师的沃土，在这块培育了牛顿和达尔文等科学泰斗的国度，又慷慨地奉献出了狄拉克，那年他才 23 岁。狄拉克不像批评他人毫不留情，素有“上帝之鞭”之称的泡利，他是谦谦君子，羞闭腼腆。杨振宁非常推崇狄拉克，称赞他的论文是“秋水文章不染尘”。自然，杨振宁是把狄拉克和海森堡对比而言的，看海森堡的论文，你必须像筛子。因为海森堡的论文良莠掺杂，你必须下工夫去筛选，否则就找不到金子，尽管一定会有金子。狄拉克是另一种风格，他的文章没有渣滓、浑然天成。当然，他更重要的成就是在 1928 年建立的狄拉克方程，在此方程的基础上他预言了正电子的存在，1932 年被安德森的实验所证实。杨振宁盛赞狄拉克方程达到了“性灵出万象，风骨超常伦”的境界。

在向量子力学辉煌顶峰的进军途中，另一条道路同样精彩。这条道路的历史渊源可以上溯到牛顿和惠更斯关于波的本性的争论，之后经过了 N 次交锋，引无数物理巨匠竞折腰，使得微粒说和波动说各自赢得了一批拥趸。上面提到的 1905 年爱因斯坦提出的光量子假说，它成功地解释光电效应现象，从而使得普朗克的量子理论第一次被赋予了实在的物理意义。光量子假说第一次揭示了光的波粒二象性，也就是说光兼备粒子和光波的特性。法国的德布罗意在探求波的本质时，异曲同工地迈向了量子力学的巅峰。

德布罗意出身名门，祖上几代声名显赫，他原来对历史学兴趣甚浓，后来在哥哥的影响下转向物理学。1923 年，德布罗意把光的波动性推广到电子，提出了电子衍射的实验设想。1924 年，在其博士论文中阐述了“物质波”的概念，从而把波粒二象性推广到了电子、中子、质子等一切微观粒子。尽管他顺利地通过了答辩，但是他的导师郎之万还是心存疑虑，于是让弟子把论文寄给爱因斯坦过目。爱因斯坦看后眼睛一亮、欣慰不已，他称德布罗意的

工作已经“揭开了大幕的一角”。果不其然，随着1927 年戴维逊和革末的实验发现被镍散射的电子发生了衍射，接着 1928 年汤姆逊父子的电子衍射图案再次证实了德布罗意的物质波理论。一下子使得沉寂多年的争论再次升级，本来光的波粒二象性已够费解，这下可好，一切物质都具有波动性！真是烟笼寒水月笼沙，不周山下乱如麻。

下面出场的这位与一只该死的“猫”永远地纠缠在了一起，他叫薛定谔，每一本提及量子力学的书中都会提到那只令人无限反感的“薛定谔猫”。当然，关于那只“猫”是死是活是薛定谔在 1935 年对量子力学不完备性批评的一个思想实验。有趣的是，薛定谔的情感世界也像那只猫一样令人充满了无限遐想，他成了那个时代绯闻最盛的科学家。受爱因斯坦和德布罗意的启发，1926 年薛定谔创建了波动力学，波动力学的结晶便是在量子力学中赫赫有名的薛定谔方程。因为波动力学用到的数学工具是微分方程，比起海森堡所用的矩阵要友善得多，很快得到了物理学界的青睐。

与此同时，两派力学的粉丝们相互敌视对方理论的情绪也在蔓延，都认为对方是一个怪胎。不过，没过多久，薛定谔推导出了两者在数学上是等价的。谢天谢地，两位孪生子终于找到了共同的血脉，和好言欢了。自此，这两种力学统称为量子力学。要说明的是，狄拉克在 1930 年完成了一本经典的《量子力学原理》，简洁而深刻地阐述了量子力学的理论结构，书中引入了著名的狄拉克符号。

量子力学的大厦已经矗立，凯歌奏响，锣鼓喧天。但月盈则亏，世事万变，1926 年，玻恩抛给了量子力学一个惊人的概念“几率波”。几率，说白了就是概率，是可能性。比如我们连续两次投硬币，得到两次正面的概率是 25%，或者说几率是 25%。玻恩认为，电子运动可以用一个波函数来表征，它说明电子占据空间某一点所存在的几率，而不表示一个电子确定的运动方向与确定的轨道。也就是说，玻恩对物质波给出了统计解释，粒子在某处出现的概率与该处波的强度成正比。天呀，这是什么玩意！当时众多物理学家不能容忍，因为物理学不是赌场，怎么能容忍下赌注呢！背叛，绝对是背叛。自牛顿建立起恢宏的决定论世界之后，大自然的一切尽在掌握之中，怎么能够出现这种不确定性的怪论呢！拉普拉斯就曾假设过一个精灵——后来被称为“拉普拉斯妖”的智能生物，它可以根据力学规律推算出宇宙的过去和未来。几率波？莫名其妙！上帝怎么会是个赌徒！刚刚统一了的量子力学被玻恩的一番解释搅了个天昏地暗。

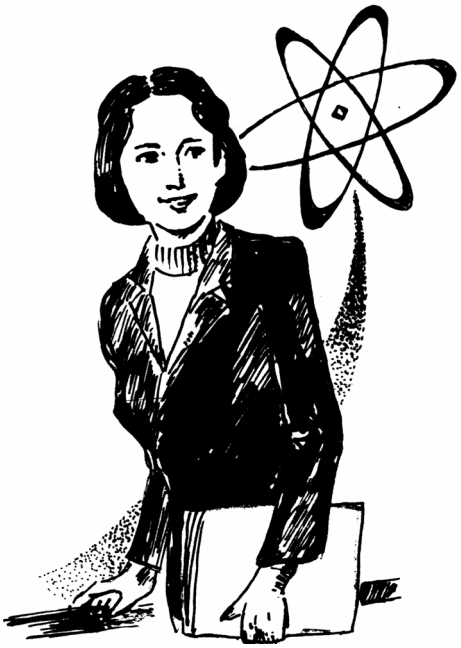
不确定性的幽灵在物理学的天空游荡。海森堡不愧“青出于蓝而胜于蓝”，在几率波引发的地震还未停歇之际，又在这块骚乱的土地上投下了一枚重磅炸弹。1927 年，海森堡提出了量子力学的一个基本原理“测不准原理”。该原理是说，不可能同时精确测量出粒子的动量和位置，对粒子的位置测量得越准确，那么与此同时的动量就越不准确，反之亦然。类似对应的两个共轭量还有能量和时间等。海森堡的这条原理，后来竟然成了某些相对主义者辩护的渊薮，殊不知他们不是歪曲就是误解了这条原理，要是海森堡活着的话，绝对会把肺气炸。同年，玻尔在哲学意义上提出了“互补原理”，认为微观粒子的波动性和粒子性相互补充、同时存在。这样，玻恩对波函数的统计解释、海森堡的测不准原理和玻尔的互补原理构成了量子力学哥本哈根解释的“铁三角”。

1927 年 10 月，第五届索尔维会议在比利时的布鲁塞尔召开。那张与会科学家的合影被誉为科学史上最强阵容的集体照，应该不是虚言。除了一些实验物理学家外，与会者明显分为两派：一派以玻尔为主帅，玻恩、海森堡为哼哈二将，力挺哥本哈根解释；另一派以爱因斯坦为核心，德布罗意和薛定谔为左右都尉，坚守因果律的阵地。会议期间，双方剑拔弩张、硝烟四起。玻尔一派嘲笑爱因斯坦一方冥顽不化，爱因斯坦一方鄙视玻尔一派的“骰子”玩法。结果各持己见，不欢而散。

三年后“两军”再次狭路相逢。1930 年，第六届索尔维会议召开。这次会议上爱因斯坦绞尽脑汁想出了一个绝妙的思想实验。他不愧是思想实验的高手，从 16 岁便开始思索追光思想实验，那是他研究狭义相对论的发轫；后来他又思考了升降机的思想实验，帮助他建立了广义相对论的等效原理。如今，他又拿出他的杀手锏准备对付玻尔。毕竟是泰山北斗间的对决，据说玻尔接招之后，彻夜未眠，用尽了浑身解数，大概是在黎明之前，灵光一闪，豁然开朗。他终于发现了爱因斯坦此次思想实验的一个破绽，原来爱因斯坦竟然疏忽了广义相对论的红移效应，如果考虑进去，一切 OK！分毫不差地

物理之于人生

刘　强　何　捷



中国有句哲言："水平不流，人平不语"，意思是说，水若是平的就不会流动，正如水一样，人若能心态平静，则就不会再多言语。这便是物理与人生哲理绝妙融合的一个很好喻证。水是无形而又有形的物质，古人常用水来比喻人生意境，并孜孜追求之，正所谓"上善若水"，在纷繁的物质世界里能做到这一点确是不易。其实人的性情如能似水，润泽万物而又毫无所求，汇聚江河而又不亢不卑，则必懂得何为人生；若能知道年华似水不该虚度，则必能珍惜人生；若能理解水滴石穿的内涵，则必能践行人生。老子认为，世界总有法度，万物总有规律，所谓的道就蕴含在"物理"之内部，若把这一思想推广并应用于人生，即是追求和谐统一的人生。物理论及人生，可以从人生中汲取古代灿烂的物理思想和现代物理的内涵；人生论及物理，又可以从物理中搜寻人生的道义、价值和生活的真正目的。辩证唯物主义告诉我们，事物具有普遍联系性，那么物理的规律性与人生的不可逆性便有着惊人的相似，物理的发展与人生实践的前进就有着非同寻常的共同点，物理知识的概括与人生思想的提炼又有着怎样的共同源泉！然而，对于很多人，物理之于人生，虽如此的神似，却又那样形远，就如理之于文总是难于在一个人身上得到融会贯通，制约了和谐也造就了偏谬。所以我们应该在人生里探究物理，在物理中探讨人生。

一、人生有物理，物理在人生

所谓物理即物质的原理，物理学是研究物质世界最基本的结构、最普遍的相互作用、最一般的运动规律及所使用的实验手段和思维方法的自然科学。众所周知，物理在探寻自然界规律和人类生活中发挥着无可替代的作用。西方学者康德认为"关于自然规律的学问称为物理学"，中国古代科学家沈括则把物理看成是物理规律的外在表现的事实总结。无论怎么定义它，我们都不得不承认，没有物理则肯定没有人类社会的今天。同样，没有人类社会，也就没有物理的产生、进步与发展。

人类自诞生的那天起，便不得不面对浩瀚的宇宙与未知的自然界，他们不断地实践、探寻、总结各种自然规律、知识及原理。虽然经历无数坎坷与困惑却从未停息。在对太阳的升起、季节的转换、天气的变化、地球的运转、山河的形成等一系列自然规律的探索中，物理便一点一滴的积累与发展了。在这期间，人们也同时完成了一代又一代的人生。物理知识促进人类的进步，并在这进步的长河里完成

落入了哥本哈根的解释之中。很难想象第二天玻尔向爱因斯坦答复时的情形了，不过，依爱因斯坦的个性，他会沉默良久，然后用手抚摸一下他鸟巢般的头发，然后自言自语地说一句，"上帝绝不会掷骰子的"。

1930 年之后，量子力学巍峨的大厦依然会不时地受到暴风雨的洗礼。但是，每一次它都站稳了脚跟。它也不时地会遭遇噩梦，比如那只不祥的"薛定谔的猫"。但是科学有它的铁律，正如那位对"邦戈"鼓和物理学一样痴迷的费曼所言，"只要理论与实验不符，它就是错误的"。在这个意义上，量子力学谱就了一曲高亢的凯歌。

回眸 20 世纪量子力学的那 30 年，每一个对人类智慧充满好奇的人，在心灵上都会感受到持久的震撼。

（中科院自然科学史研究所　100010）

本文获"我心目中的现代物理"征文优秀奖