

仰望量子群星

20世纪量子力学发展史

Looking up at
the quantum stars

The history of quantum mechanics of 20th century

魏凤文 高新红 编著



浙江出版联合集团
浙江教育出版社

仰望量子群星

20世纪量子力学发展史

Looking up at
the quantum stars

The history of quantum mechanics of 20th century

魏凤文 高新红 编著



浙江出版联合集团
浙江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

仰望量子群星——20世纪量子力学发展史 / 魏凤文
高新红编著. — 杭州: 浙江教育出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5536-4311-3

I. ①仰… II. ①魏… III. ①量子力学—物理学史—
世界—现代②量子力学—物理学家—生平事迹—世界—现
代 IV. ①0413.1-091②K816.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第053773号

仰望量子群星——20世纪量子力学发展史

YANGWANG LANGZI QUNXING 20 SHIJI LIANGZI LIXUE FAZHANSHI

魏凤文 高新红 编著

出版发行 浙江教育出版社

(杭州市天目山路40号 邮编310013)

责任编辑 华明

封面设计 王尔凯

责任校对 戴正泉

责任印务 陆江

图文制作 杭州林智广告有限公司

印刷 浙江新华数码印务有限公司

开本 710mm×1000mm 1/16

印张 30.25

插页 2

字数 508000

版次 2016年3月第1版

印次 2016年3月第1次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5536-4311-3

定价 78.00元

联系电话:0571-85170300-80928

e-mail: zjjy@zjcb.com 网址: www.zjeph.com

前言

20 世纪的物理学发生了翻天覆地的变化,它不仅改变了物理学的整体面貌,也促进了相关学科的大发展。

物理学的变化主要来自两个方面。爱因斯坦分别于 1905 年和 1915 年发表的狭义相对论和广义相对论,给牛顿力学以来的传统时空观带来变革,使人们对物质、运动及其相互作用有了全新的看法,更促进了天体物理学、天文学和宇宙学的革命性进展。物理学的变革也来自另一微观领域。1900 年,普朗克由黑体辐射的研究提出能量量子化;1905 年,爱因斯坦提出光量子说,并因此成功地解释了光电效应;1922 年,康普顿 X 射线光谱实验证实光子假设;1913 年,玻尔在普朗克的量子辐射基础上,建立原子辐射和吸收的量子化理论,成功地解释了氢原子及较重元素原子的谱线;在此后的几十年,以玻尔的量子原子论为基础,物质的光、电、磁及其他诸多化学性质都一一得到了解释;1924 年年底,德布罗意波粒二象性的提出,突破了玻尔的原子量子论,使微观物理得到大发展。从波粒二象性到薛定谔的波动力学和狄拉克的相对论波动方程,从海森堡、玻恩和约旦的矩阵力学到以不确定性原理、不相容原理和互补性原理为核心的哥本哈根学派对量子力学的诠释,最终,波动力学和矩阵力学的统一使量子力学理论构建成功。

量子力学与相对论理论一起,成为近代物理学的两大支柱,它的新概念和新理论也深度影响着其他相关学科,使固体物理、生物物理、物理化学、核物理、天体物理甚至宇宙学等领域都取得了革命性的进展。

在自然科学中,量子力学不同于爱因斯坦相对论、牛顿力学、麦克斯韦电磁理论、摩尔根遗传学甚至达尔文进化论,由于参与人数之多、跨越时间之长、创建之艰辛,给自然科学带来的冲击之大与变革之深,使它成为一门极其独特的学科。

这一学科由众多耀眼的群星共同撑起,其创建与发展跨越了整整一个世纪。在历史的沧桑之中,群星荟萃,以玻尔、玻恩、薛定谔、泡利、海森堡、狄拉克、惠勒、费曼、诺依曼、贝尔、阿斯佩等为代表的众位大师,他们各放异彩,构成了密不可分整体。

如今,这些大师绝大部分已经去世,但是,只要你是一位认真、严肃并珍重历史的人,一定能从这些人物和他们的事迹中捕捉到使人感到津津有味并发人深省的东西。它们使你怀着深深的敬意,不自觉地被这些人和事所触动。

量子力学发端于欧洲,在瞩目众位大师的同时,我们的目光不禁转向他们“脚下的这片沃土”。是什么样的“沃土”既能令一代代量子力学大师前仆后继不停歇地接替,又能令众多杰出人才同时蜂拥而出呢?

这片“沃土”根植于欧洲的自然哲学,尤其与自然哲学的深厚底蕴、纯数学的繁荣发展直接相关。数学家的思维模式、逻辑的运用、数学思维的训练以及关于自然属性等的哲学思考都直接影响到物理能力的开发与展现。此外,教育体制宽松、学术自由、学术交流频繁、严谨学风传承、纯真的对话与激辩、友情及师生情谊也促成这一学科的繁荣发展。

量子力学的创建与发展伴随着频繁的战乱。经济萧条与纳粹迫害,清贫生活与流离失所,疾病困扰与饥饿灾荒,使众位大师的学术生涯不完全是成功与壮举、热闹和辉煌,相反,既有挫折与失败,也有内心纠缠不清的忧郁与孤独。以荣誉、责任、勇气和自律为品性的高贵和对社会、对人类、对科学、对事业的担当精神,成就了这些量子力学大师对科学的纯真追求。

这是一个时代的史诗,读着这些大师跌宕起伏的一生,会使人不胜惊讶,似乎历史总有几分相似。在道德与罪恶、人性与狂暴、信仰与物欲、友情与背叛之中,相隔近百年,情景何其相似。以沉静的思考发掘其根源,甚至从反面感受历史之美也是至关重要的。

像任何一部科学史书那样,本书也有一个重要的宗旨,它所携带的历史性、科学性与文化性的信息首先应是真实的。历史事件和人物的真实性就是其本原性,不能随意改造。失去本原性就失去了历史的生命力所在。为了给出真实性的交待,本书将尽可能地注明资料来源和原始出处,并在各章小注中顺序注明。

魏凤文 高新红

2014年10月

卷首语

20世纪,是一个由物理学引领的世纪。物理学家所提出的一系列新思想犹如一条河流,引导着人们的思想驶向神奇的顶峰,随即又坠向绝望的谷底。这是一个以世界绝对可知与可信为始,又以绝对不可知与不可信为终的世纪;这也是一个因物理学的发展,自然属性可以完全辨识的可能性被彻底否定了的世纪。在这个世纪里,由物理学家所构筑的理论、方法、观点和实验手段彻底地摧毁了所谓的“实在真实性”。^[注]

[注] *The Quantum Story: A History in 40 Moments*. Jim Baggott, Oxford University Press, 2011, Preface

玻尔——原子量子论的开创者,量子力学的哲学与对话大师

曼彻斯特之行	2
揭开原子的量子秘密	6
关于原子谱线研究	8
原子量子论三部曲	11
对玻尔原子量子论的反响	13
玻尔原子模型的修正	16
元素周期性的研究	17
玻尔研究所	20
玻尔的国际影响	23
玻尔的研究方法	25
获诺贝尔奖	28
关于互补性原理的思考	29
互补性原理	34
与薛定谔就两种量子力学的对话	37
第五届索尔维物理大会与巴黎大会	39
玻尔与爱因斯坦的第一次对话	43
玻尔与爱因斯坦的第二次对话——爱因斯坦的光盒子	51
原子核研究	53
玻尔与爱因斯坦的第三次对话——EPR 理论	57
救援行动与逃亡	64
加速器与核裂变研究	69
海森堡造访研究所	73
回到研究所	74
丹麦之子	75

第二章

玻恩——确定性世界的终结者

青少年时期	80
进入布雷斯劳大学	83
初到哥丁根	85
遭遇克莱因	88
再次遭遇克莱因	91
晶体点阵结构研究	94
婚姻与宗教	97
93宣言 与爱因斯坦的友谊	98
从法兰克福到哥丁根	101
玻尔理论与非连续性的突破	105
量子力学的突破性进展	108
薛定谔波动力学的问世	111
波函数的几率诠释	112
“确定论”的终结与“因果律”	114
疯狂的小镇	117
玻恩与奥本海默	118
哥本哈根学派的亮相	120
婚姻危机与玛丽娅·葛培特	121
离开哥丁根	123
从“丛林课堂”到剑桥	129
未知的未来	132
在爱丁堡大学	134
迟到的诺贝尔奖	137

第三章

薛定谔——波动力学理论的创建者

青少年时期	144
进入维也纳大学	145

早期研究	148
初探广义相对论与色彩学研究	150
苏黎世,早期原子量子论研究	152
关于波动性的思考	156
波动力学的创立	158
破解矩阵力学与波动力学的关系	160
洛伦兹的反应	161
与同行的交流	163
与玻尔之争	165
访问美国	167
在柏林	168
纳粹与科学	172
在牛津	177
格拉茨事件	178
逃出奥地利	181
来到都柏林	182
波函数的统计性诠释、“坍缩”与“薛定谔猫”	188
统一场理论研究	193
哲学思考及著作	199
什么是生命	202
永不止息	205

第四章

泡利——不相容原理之父

男孩子的物理学	210
复杂的身世	211
来到慕尼黑	213
恩师索末菲	215
令人倒霉的磁性	217
来到哥丁根	219
上帝的鞭子	221

恼人的“反常塞曼效应”	223
不相容原理的建立	225
泡利与海森堡	227
批评者泡利	232
关于电子自旋	233
苏黎世时期	236
中微子概念的提出	239
赴美	241
寂寞的研究者	244
获诺贝尔奖	246
病逝	248

第五章

海森堡——不确定性原理的发现者

一个喜欢音乐和数学的少年	252
动荡中的抉择	255
研究生之父——索末菲	257
海森堡模型	260
“成功优于手段”	263
量子三角	264
矩阵力学的诞生	267
两种量子力学之争	270
不确定性原理	273
与玻尔之争 互补性原理	275
美国之行	277
莱比锡理论物理研究所	278
量子电子场、铁磁性研究	282
无限大诘难与空间点阵结构的设想	284
核结构与核力的研究	286
纳粹风暴	288
获诺贝尔奖 第二轮大清洗运动	292

“德国物理学”运动	海森堡—盖革—维恩请愿书	293
索末菲继承人之争		296
宇宙射线研究		297
海森堡事件		298
海森堡事件的调查		302
核武器研究	铀俱乐部	304
哥本哈根之行		307
“ε-行动”	战后归来	309
战后研究	宇宙方程	312
晚年		316

第六章

狄拉克——谨言少语的量子力学独行侠

一位拘谨少言的人		320
冷酷的童年		321
大学		323
改变命运的数学课		326
初到剑桥		328
“第一飞人”		331
投身量子力学		334
正则变换与狄拉克方程		336
大萧条中的局外人	对正电子的预言	338
埃伦费斯特之死		342
对美的追求		345
教学与著作均如其人		347
年轻的卢卡斯教授与诺贝尔奖得主		349
独有的“三栖”特征		351
恼人的“无限大困难”		352
婚姻与友情		355
晚年		356

量子力学第三代大师

——关于“叠加态”“纠缠态”的研究与“量子真实”

历史的回顾	362
光和物质的奇异性质——光子光学新说	366
杨氏双缝和“薛定谔猫”	370
量子叠加态的坍缩——对猫实验和双缝实验的解释	373
“惠勒猫”——“延迟选择”实验	376
阿斯佩的延迟实验与玻尔的互补原理	379
玻姆的量子纠缠态研究	383
贝尔及贝尔定理	386
西姆尼、霍恩、克劳瑟与EPR	390
阿斯佩等人的量子纠缠态实验	396
量子纠缠态的其他实验	398
量子遥传学与密码学研究	400
诺依曼与量子力学体系研究	404
多重宇宙诠释	408
量子真实	411
不同的声音	417

引文	421
----	-----

参考书目	471
------	-----



第一章

玻尔——原子量子论的开创者,量子力学的哲学与对话大师

玻尔是把量子论引入原子的第一人,是探索原子世界奥秘的先行者。由于深度的哲学思考与强烈的判断意识,以及对科学的良知与坚持不懈,使他成为量子力学哥本哈根学派的领航人。他与爱因斯坦就量子力学的交锋更对物理学的发展产生重要的影响,由此萌发了量子理论的生长点,也催生了量子领域一代新人的成长。

曼彻斯特之行

曼彻斯特是玻尔(Bohr)的成名地,他来到此地却有些曲折。

1911年9月,玻尔从哥本哈根大学毕业,在卡尔斯堡基金会的资助下,以一年交流学者的身份来到剑桥,在著名物理学家汤姆逊(J. J. Thomson)的指导下,在卡文迪许实验室工作。

与汤姆逊第一次见面时,面对这位一头蓬发、带着金丝眼镜的教授,玻尔有些局促不安。他一只手拿着自己的博士论文,另一只手拿着汤姆逊所写的一本书。玻尔递出了论文,汤姆逊匆匆地浏览了一下,接着,玻尔把汤姆逊的书翻开,打开某一页,指着其中一个公式说:“这是错的。”玻尔这么说,一定使汤姆逊很不适,他没有遇到过这么直截了当指出他错误的人,何况又是一个从没有见过面的学生。汤姆逊把这篇论文放到一摞材料上,突然向玻尔提出共进晚餐的邀请,为此玻尔很是开心。

一周过去了,汤姆逊没再理他,他的论文也没有了下文。玻尔暂时无事可做,时间就这么耗费过去,他感到有些焦虑。在给弟弟哈拉尔德(Harald)的信中,他说:“到现在为止,我感到汤姆逊并不像我当初想的那样容易相处。这是一位非常优秀的人,他具有非凡的才智,充满了活力,虽然非常友好,但是诸事缠身使他太忙了,我很难找到机会与他说上话……我也不知道他是否接受我的批评。”^[1]

在剑桥,除了听拉莫尔(Larmor)和金斯(Jeans)的课,玻尔还在实验室工作,花大量时间在吹制玻璃器皿上。他常笨手笨脚地打碎东西,更使他狼狈不堪的是英语。玻尔在日记中写道,他感觉自己是个“可怜的外国人,连仪器的名称都不知道,不得不随身带着一本字典,真不知道如何对付明天。”^[2]一年的时间很珍贵,他很焦急。“这是一段使人感到失望的日子。汤姆逊不想知道自己在什么地方出了错,他对此不感兴趣,看来也不想更正。可无论如何,这还是我的错,我不熟悉英语,不知如何表达自己的意思,只能简单地跟他说‘这是错的’。”^[3]直到有一天,玻尔遇到了卢瑟福,他的一生从此发生了重大转折。

这年11月初,玻尔去曼彻斯特拜访父亲过去的一位学生,曼彻斯特大学的生理学教授史密斯(Smith)。在他的介绍下,玻尔见到了卢瑟福(Rutherford),两人一见如

故,彼此留下了不错的印象。

当时,曼彻斯特是世界著名的放射性研究中心之一,更是原子核的发现地。这里的研究项目与工作气氛强烈吸引着玻尔。一年学术交流的机会来之不易,他不想浪费时间,决心从剑桥转到曼彻斯特。在年底的卡文迪许研究生年度晚餐聚会上,玻尔再次与卢瑟福相遇,他向卢瑟福表明了这个愿望。卢瑟福很欢迎,但提出必须事先征得剑桥和汤姆逊的同意。剑桥对此事的答复是,如果他想离开,必须等到这一学年结束。

1912年3月,玻尔终于来到曼彻斯特。他立刻忙碌起来,白天忙于听课和卢瑟福交给他的放射性研究的实验课题,晚上攻读电子物理,修改自己那篇关于金属性质的论文。在写给弟弟哈拉尔德的信中,玻尔说:“卢瑟福是个不喜欢出错的人,他定期来到实验室询问课题的进展,然后交代工作的细枝末节。他不像汤姆逊那样不太关心学生做得怎么样,而是真心关注着周围每个人的工作。我发现,在识别自然科学的前景上,他有着超人的能力。”^[4]

除了卢瑟福,玻尔在曼彻斯特认识的人并不多,在少数几个人中,有两个人对他至关重要,甚至影响到他的一生。一个是赫维西(George de Hevesy),一个是查尔斯·达尔文(Charles Galton Darwin),即著名博物学家达尔文之孙。

赫维西是匈牙利籍的物理学家,虽然比玻尔只大几个月,但处事干练,对实验室工作也很有经验。由于共同的爱好与志向,玻尔与赫维西成了好朋友,建立了终生的友谊。多年后,两人都成为诺贝尔奖的获得者。赫维西因原子示踪技术获得1943年的诺贝尔奖,成为放射性在医学诊断与生物、化学应用技术研究的著名人物^[5]。

在原子量子论的发现中,玻尔的一个灵感来自赫维西。赫维西告诉玻尔,在放射性研究中,人们发现了许多元素,但在元素周期表中,却找不到它们合适的位置。1913年,索迪(Soddy)引入了“同位素”概念,他把这些元素作了分类,例如放射性钍、放射性镭、放射性钍^[注](第90号元素钍的放射性同位素)和铀-X,都是钍的同位素,它们有不同的相对原子质量 A ,但有相同的核电荷数 Z ,它们与钍的化学性质相同,物理性质却相差很大。

赫维西的介绍激起了玻尔的兴趣。他立刻把放射性实验的案例收集起来,仔细考察这些元素经 α 和 β 衰变转变为其他元素时,反应前后相对原子质量 A 与核电荷数 Z

[注] 在英华大辞典(商务印书馆修订第二版 1994年)p.723,英文名 Ionium, [化] 钍(天然存在的放射性元素,钍的同位素。)

的变化。经过一番对比,玻尔有了惊人的发现,例如一个正电量为92的铀核,通过放射 α 粒子失去两个正电荷,变为正电量为90的原子核,而这个核不可能保持住原来核外的92个电子,很快失去两个负电荷而变为新的原子,这就是钍的同位素。“我立刻闪现出一个想法,”玻尔后来回忆说,“无论是 α 还是 β 衰变,它们的起因都应该来自原子核。经过放射性衰变,元素(在周期表中)有可能下降两位,或者上升一位,这些变化分别伴随着 α 或 β 射线的发射,并与核电荷的减少或增加相关联。”^[6]

这个发现使一些疑惑得到解释,为此玻尔很兴奋。他立即告诉了卢瑟福,卢瑟福却警告他:“任何没有经过实验充分证明的想法都具有一定的危险性。”^[7]后来玻尔回忆说:“他(指卢瑟福)像往常一样,劝我不要急于求成。我对他说,这是对他的核模型最好的证明,并表示要把这一想法写出来发表。尽管他耐心地听了我的解释,但他太忙了,既没有时间,也不想陷进去……然而我要发表这篇论文,必须先有他的介绍。我一连找他5次,情况总是如此。”^[8]玻尔感到卢瑟福快要失去耐心了,只好先把这个想法放下,然而就在此时,英国物理学家索迪(Soddy)也得出与玻尔同样的结论,但他与玻尔不同,没有找导师过目,而是直接把论文发了出去。索迪成为发现元素放射性衰变移位定律的“第一人”,为此获得1921年诺贝尔化学奖。

失去这个机会,玻尔没有抱怨,在他人可能愤然离去的情况下,他却选择了留下,仍然敬佩卢瑟福。多年以后谈起此事,他认为这种情况还是事出有因,他说:“我们赞美与钦佩他强大的人格,他已经成为全体实验人员的精神支柱。正因如此,每个人都希望拿出自己最好的成果……从他那里得到鼓励是我们每一个人的愿望。”^[9]

对待玻尔的发现,卢瑟福的表现也很自然。卢瑟福核模型称得上是高水平的重大发现,但这只是人们后来的认识。在当时,卢瑟福的核模型不仅没有被物理学界普遍接受,更遭到权威人物汤姆逊的反对。玻尔后来回忆说:“人们没有把卢瑟福的模型当回事,现在看来很不可理解,但在当时事实就是那样,无论在什么场合,很少有人提到它。”^[10]在1911年秋季召开的索尔维第一届大会上,就是卢瑟福本人也没有提到这个核模型。一年以后,卢瑟福完成了一部670页的著作,其中仅有3页涉及 α 粒子散射,说明卢瑟福自己也没有把这个核模型太当回事。因此,对玻尔的想法,卢瑟福有可能没有听进去或没听明白,也有可能根本就不相信。

玻尔认为无论是 α 还是 β 衰变,其根源都出自原子核,但卢瑟福并不这样看,在他的书中明确地写道:“放射性的产生是由两个完全不同的原因引起,这就是中心质量的不稳定性和电荷的不稳定性,由于这两个不稳定性的类型不同,导致 α 粒子被逐出,

或者导致 β 或 γ 射线产生。”^[11]

玻尔的另一灵感来自查尔斯·达尔文。为了取得应用数学的博士学位,达尔文从剑桥来到曼彻斯特,卢瑟福安排他做 α 粒子穿过金属的能量损失的理论研究,为了这一课题,他需要接触一些放射性实验,使玻尔有机会得知他的研究课题。这时,达尔文的一篇关于 α 粒子大角度散射能量损失机制的论文引起了玻尔的注意。他以敏锐的洞察力捕捉到了论文中的一个新视角,也看出了其中的瑕疵。对新东西敏感和洞察力强是玻尔的一个突出特点,在以后的科学生涯中,这一特点起到了重要的作用。这一次,正是达尔文的错误,成了玻尔研究的出发点。在卢瑟福和达尔文分别考虑核和电子关系时,玻尔却超越了一步,不仅给出了成功的解释,更揭开了原子的真实结构^[12]。

在研究 α 粒子大角度散射能量损失机制时,达尔文认为, α 粒子穿过金属的能量损失缘于与金属原子内部电子的碰撞。由于 α 粒子的冲击,使一个或几个电子被打击出来,由此造成 α 粒子的能量损失,而在此过程中,原子核的作用是微不足道的。这篇论文并没有提及核外电子的排布,也没详译打击的过程,但提出了两点假设,一个假设是,电子可能充满核外空间,或者只分布在原子的外壳上;另一个假设是,在与 α 粒子碰撞的过程中,核外的电子是“自由的”。在这两个假设的基础上,他计算出了原子半径。玻尔发现,达尔文的计算结果要比玻尔兹曼依照气体定律所估算的原子半径值大得多。而按照达尔文的结果,不可能把电子维系在原子内,就连一个电子也抓不住。当时,人们还不清楚氢原子只有一个电子。玻尔在写给弟弟哈拉尔德的信中说:“前不久,我注意到年轻的数学家查尔斯·达尔文刚发表的一篇关于 α 粒子理论的论文。从关于 α 粒子吸收的讨论中,我有了一点想法。我认为这篇论文不仅有数学错误(当然这只是一个小的错误),更重要的是,它的基本概念是不完备的。我研究了 this 理论,虽然它还不够完备,但我敢肯定,这里面一定有些事,显露出原子结构的端倪,我打算先对此发篇短文。”^[13]

经过反复思考,玻尔发现问题出在达尔文的第二个假设上。玻尔认为,在与 α 粒子相撞的过程中电子并不是自由的,电子与核之间,像弹簧那样相互维系着。玻尔把原子比喻为“弹簧振子”,由此他计算出振子向外辐射的最小能量值是 $h\nu$ 。这是玻尔首次把量子概念引入原子所得到的一个重要结论^[14]。这次,玻尔终于引起了卢瑟福的注意。玻尔的论文使他倍感惊讶,卢瑟福不仅给了他一些指点,还鼓励他继续做下去,并破例允许玻尔不必再去实验室,专心做理论研究。