

哥本哈根学派量子论考释

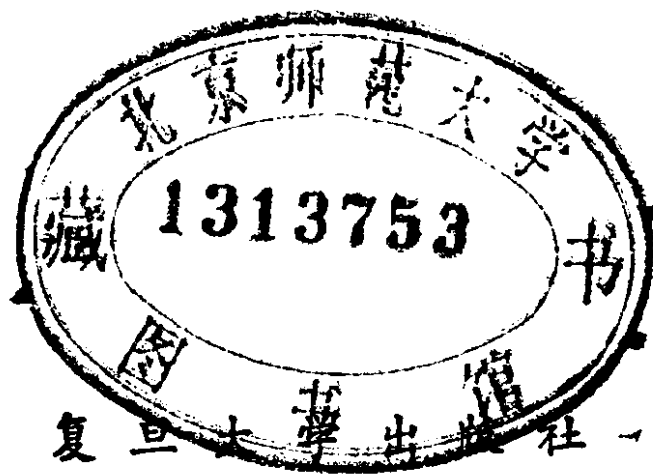
卢鹤绂 著

复旦大学出版社

哥本哈根学派量子论考释

卢鹤绂著

741116/22



哥本哈根学派量子论考释

卢鹤绂著

复旦大学出版社出版

新华书店上海发行所发行

复旦大学印刷厂印刷

字数：113千 开本：850×1168 1/32 印张：6.125

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷

印数：1—5,000

书号：13253·009

定价：1.68元

内 容 提 要

量子理论在当代物理学的各个分支(分子、原子、原子核、基本粒子以及凝聚态)领域里都已成为最深入的理论认识的基本原理,量子论基本原理—量子力学—扮演着使这些物理领域在原则上统一起来的中心角色。量子论中的一些基本概念,初看起来同日常概念或经典物理的概念是矛盾的。西方物理学界的绝大多数长时期以来公认玻尔及其哥本哈根学派在二十年代末所发现的一套原理解决了这类矛盾,促进了量子论的发展。

号称“量子论的哥本哈根精神”发展了近代原子物理学。这个精神究竟是些什么正是本书的内容。作者遍查有关文献,根据哥本哈根学派代表性人物长时期以来发表的原话及其引起的部分原则性争论,分十二章如实作出总结。鉴于理论物理学工作者的活动大都忙于数学技术性的试探,本书或许有助于物理学原则性的探讨;另一方面,哥本哈根学派量子论思想不时遭到一些物理学家和哲学家的批驳和非议。这类争论引起人们对用抽象的数学语言来描写自然界的涵义深感兴趣。这被认为有可能导致哲学思想的深刻改变。鉴于量子物理学的哲学意义仍处于开始形成的阶段,本书内容作为忠实的素材也应有助于哲学家的研究。

序

在今日，人们已普遍认识到物理学按其基本假定可分成经典和量子两大部分。

量子论创始于1900年。当时普朗克对长时期实验测得的电磁波辐射频率分布谱现象所作的全面的理论描述和初步解释，被公认为一反常理的革命性创作。量子特色的标度是作用量量子，这个力学量的量子普遍存在于后来人们认识到的所有量子现象的描述之中，世称普朗克常数 h ，

$$h \equiv 2\pi\hbar \approx 2\pi \times 1.05 \times 10^{-27} \text{ 格尔} \cdot \text{秒}。$$

可见，量子物理学是个十足的本世纪产物，同已有三个多世纪历史、但还在发展的经典理论在原则上形成鲜明对照。

经典物理学中理论认识的根本假定在于：无生命的自然界的运动和转变有其连续不断的发展过程，因而可以有其严格而不间断的因果规律。这一假定可以说来自日常经验的总结，是人们通过感官知觉及其人为直接延伸（例如，使用根据和人的视觉相同的光学原理而发明的、直接辅助目力的光学望远镜或光学显微镜，以及把所要观察的现象直接放大的其他简单仪器）而直接观测到的天然现象的经验总结。作为经典理论基石的经典力学起始于十七世纪，其严格连续性因果律

观点已统治物理学近三百年之久。

上世纪末期，人们根据经典物理学中的理论认识，开始发明创造精密复杂的科学仪器，人工迫使自然界呈现日常经验觉察不到的新奇现象，从而首先间接地认识到物质中有携带天然最小单位电荷的最轻粒子（习惯上称为电子）的普遍存在（1895年贝林，1897年汤姆逊）。电子的电荷可以称为电量的量子，实在电荷只是它的整倍数。1905年爱因斯坦从光致发电等人工促进的现象，间接地认识到光辐射也必须看成是携带微小能量

$$h\nu \equiv \hbar\omega \quad \left(\nu \equiv \frac{\omega}{2\pi} \text{ 是振荡频率} \right)$$

的光量子（后简称光子）所组成。1911年卢瑟福提出了原子中还存在有带电子电荷整数倍的正电荷的核（重粒子），以解释通过人工安排而揭示的 α 粒子大角度散射的实验数据，因而间接地认识到了坐镇在原子中心的原子核。1913年尼尔斯·玻尔提出了原子中电子绕核公转的量子化轨道运动的理论，用以解释通过人工安排而观测到的原子发光具有特征频率谱的现象，从而间接地认识到被束缚于原子中的电子的能量和角动量不能连续变迁，只能在分立数值之间跃变，而这些分立数值决定于作用量量子 h 和只能是整数或半整数的量子数。此后，本世纪物理学发展的主流正是依靠这类发明创造出来的供观测用的科学仪器，根据人工安排的科学实验的实践结果，间接而层层深入地认识到物质内部结构的微观运动和

转变的量子化特征及其突然转变（抗拒任何连续性描述的一次突变）的量子跃迁特点。在这里，强调“间接”二字在于感官所观测到的现象并不是所认识到的微观运动本身，而是被认为由其引起的在仪器中发生的某种不可逆放大过程所导致的宏观可观察效应；而对微观运动或转变的认识，则是根据这些在仪器上的感觉观测的结果所总结出来的科学推论。从原子而电子，电子而核子，核子而轻子、强子两大类基本粒子，从基本粒子而高能粒子，直至今天，这类已基本上赢得公认的认识方式在原则上并没有什么改变，故通称量子物理学。

在感官不能直接观察到的微观世界中，运动状态的量子化以及随之而来的量子跃迁特征已被公认是量子物理学中理论认识的根本假定。它与经典物理学中理论认识的根本假定（连续不断演变的因果过程的概念）全然不同。这就完全有可能导致两个主要不同于经典物理学的新概念，作为象征有基本不连续性的量子存在的后果。其一是：在人工制备的条件下，原认定的某种粒子在人工安排的同一观测装置上所呈现的现象，由于量子本身不再能分割描述，可以是多种多样的，它们对应于发生各种不同的单个量子过程，但每一种结果出现的相对次数或百分率（即几率）则是一定的，即各种观测结果有一定的统计性规律可循。这个统计性行动就可以是单个粒子本身的固有天性。这与经典物理学中每个客体都有严

格的连续性演变规律，只是由于所考察的体系是由巨大数目的个体所组成，起始条件错综复杂，而不得不要求作出统计性的笼统描述的情况，在原则上大有区别。也就是说，量子论中的统计要素不能进一步归结为对体系状态的知识不完备所引起。一句话，由于量子跃迁的基本过程，需要用量子概念来解释的现象，其所认定的粒子的行动不再服从连续性演变的因果规律。如果确是如此，则经典理论中因果律等同于决定论的基本概念不复成立，必须废弃；其二是：来自日常经验的经典物理学概念和语言，不能完备地描述人们脱离日常经验而间接地认识到的微观世界。如果硬要把经典物理概念加给认定的微观客体，那就势必带来本质上的含糊性。这个含糊性的程度当由普朗克常数来表征，因为直接可察现象可以用经典物理学的概念和语言来足够近似地描述的话，那就相当于这个普适常数相对于可观察数量已小到实际上可看成是零的极限情况。既然经典概念和语言不足以恰当地描述微观世界，人们就只能去发明创造崭新的量子语言，特别是必须引进没有日常经验与之对应的、新的、抽象的数学语言来弥补经典语言的不足，从而作出不含糊的描述，表述为严格的统计性规律。

二十年代后半期，发展量子论的先行者，主要是哥本哈根学派(今后简称哥派)的带头成员，在上述两大精神下，依靠同经典理论有细致类比的对应原理，奠定了量子物理学理论认识的概念

基础，并试用各种抽象的数学语言，建立起了表达脱离经典力学形式的基本推算规则（对易关系或规则，线性迭加原理，薛定谔或海森堡运动方程，微扰论，费曼图，色散关系，等等），形成今日被广泛采用的量子力学。

量子力学的历史发展异乎寻常，其特点在于数学形式的理论的建立在前，物理原理及图景解释的“澄清”在后。前者只是通过试探，寻求能以容纳量子存在的方式推广经典力学的数学形式的表述，而以能作出准确预言、指导实践、进一步符合实践结果就为满足。后者则是通过辩论，对量子力学的数学概念及形式表述的物理意义、实际功效的局限性、进一步发展走向完备的可能性、及其同客观实在的关系，作出旨在消除逻辑矛盾的解释。关于前者，因只限于形式逻辑的技术性试探，主要以成败定其可接受与否，无需争论。关于后者，则从量子力学创立之时起，就引起激烈争论，其结果是哥派提出的量子跃迁语言 and 不确定性原理及其扩展（互补性原理）在物理学界赢得普遍的采用，见诸一般的教科书中，直至今日。但问题还远未结束，不同见解时有兴起，因而不能算是定局。目前还在引人注意的这类争论使颇有一些年青一代的西方学者感到忧虑不安。

尽管当前流行的量子力学留下来的这些困难问题尚待解决，但量子力学的功效显著，已成为现代物理研究不可缺少的语言工具。即使对其物

理意义没有较深刻的理解，已获得公认的量子力学语言也足能广泛为用。可是，正如去世前不久，在欧洲核研究中心（CERN）多年负责量子论基础研究的姚赫（J.M. Jauch）教授1966年所写：“近代研究的实用主义倾向常使知道怎样使用一种语言和理解其中概念的意义这两者的差别混淆不清。处处发现很多学生考过量子力学，并取得优等分数，但对其意义却无真正的理解。且常常是比这还坏。他们不仅仅以鹦鹉学舌般的方式来学习量子力学，而且竟把学习重点只是放在那些特殊的近似性技术。这就导致他们把这些有用的技术当作等同于理论的概念基础。”笔者对此，早有同感。

历史表明，在理论认识方面，不对概念基础进行深刻理解和必要的改革，就不会出现革命性的发展。数学语言的使用不同物理概念的发展密切结合，就将使理论走向越来越抽象的纯符号形式主义。数学的严格性不一定必然导致复杂性。相反，用抽象但恰当的数学语言代替传统的老式语言常会带来惊人的简单性，使人感到豁然开朗。规律表达的概括性，概念结构的简单性，科学语言的灵活性仍然是物理学家追求的目标。

无可否认，当前研究量子理论的工作者，不管有意还是无意，在原则上大都仍是走在哥派已铺出的道路上前进，另辟溪径的新概念极为贫乏。如果嫌量子论的原则性发展太慢，其缘故有可能是哥派观点已根深蒂固，难于摆脱成见，跳

出量子跃迁、对应原理等等哥派箍范。不无可能，温习哥派观点的来龙去脉才有希望找到办法，对量子论作出含有实质性变革的推广（正象量子力学是经典力学的推广那样），对微观世界作出更为深入的理解，冀能温故而知新。（例如，近来人们提出创用量子几何中的“弦”概念来代替点状粒子概念，有可能铺出走向畅通的新道路。）

1975年笔者有机缘对哥派关于量子论的观点、言论和态度，作过较全面的调查，据所得分十二章撰成小结，力求实事求是，避开成见，并将据以考核的哥派成员原话择其要者附后，供读者自行判断。有人说，哥派主要成员的观点在后期已有所改变。笔者对此说非常注意，但遍查文献，未能寻得实据，只不过是象德布罗意、玻姆、兰迪等人，原在胜势之下已完全依附于哥派，于五十年代初期开始反戈出击，另立新说，不再附和哥派罢了。

哥派认为量子力学在原则上已臻完备，其前提是对微观世界废弃在连续性时空概念上作实体的经典描述的企图，量子力学的数学形式仍指在宏观仪器上的感觉经验，量子论的理论结构并没有、也不可能对所谓微观客体作出确切的形象描述。对这个同传统经典概念截然不同的态度，可不同意，也可赞同，读者可根据本书自行裁决。老牌反对者爱因斯坦一生坚持说：“我拒绝当今统计性量子论的基本观念，其范围是我不相信这一基本概念会成为整个物理学的基础。……事实

上，我坚决相信，当前流行的量子论在本质上是统计性的这个特征只是应归咎于这个事实，即这个理论是对物理体系执行的一个不完备的描述。”哥派代表人物例如泡利则说：“构成量子力学基础的这个新认识论局面是令人满意的，不论从物理学的观点，还是从整个人类知识条件的广义观点来看都如此。”

兹已决定将原稿本进行必要的修补后出版，公开发表，以飨读者，难免有体会失当，或竟理解错误之处，尚乞识者指正。

卢鹤绂

1983年5月20日于上海

目 录

序	I
绪 论	1
一、科学、物理学、量子论的任务是什么?	25
二、原子现象是什么,是怎样观察到的? 如何来描述 它?	32
三、描述原子过程和原子结构在概念和语言上的困 难	39
四、原子现象的根本过程的特征在于它的整个性、不 可分性及分立性、不连续性	45
五、原子过程的基本不连续性、普遍存在的作用量量 子的不可分性的直接后果	55
六、在观察原子现象的实验中,主体、客体区分的任 意性及其后果	64
七、波粒二重性佯谬	73
八、量子力学数学形式表述的由来和特点	83
(一) 矩阵力学	

(二) 波力学	
(三) 整套量子力学(变换理论或表象理论)	
九、海森堡的不确定性原理 (或关系).....	104
十、玻尔的互补哲学	114
(一) 客体状态的确定和观察的可能性互斥互补	
(二) 严格准确的因果律和用空间时间标示客体的描述互斥互 补 (即自然现象服从严密因果律和要用空间时间描写一 切现象这两大经典要求互斥互补)	
(三) 两大类经典物理学概念、两种图景(粒子和波等)互 斥互补	
(四) 两大类不同观察场合互斥互补	
十一、主观完备性与客观实在性问题	135
十二、留下来的一些问题	155
(一) 关于哲学问题	
(二) 关于恢复决定论问题	
(三) 关于测量的理论问题	
附录一 EPR 型佯谬及量子论的非局域性	166
附录二 历史及参考文献选目	172
附录三 哥本哈根学派代表性人物简介	178

绪 论

(一)

1911年秋，正在英国剑桥大学当 J.J. 汤姆逊助手的丹麦青年尼尔斯·玻尔遇见了正在发现原子有核的卢瑟福教授。当时很多青年从世界各地集合在卢瑟福的周围，形成曼彻斯特学派，致力于研究发现原子核的后果。1912年春，玻尔也到卢瑟福处工作，同卢瑟福学派的其他人一道认识到，按卢瑟福的原子有核模型，原子的稳定性就不能同经典电动力学协调。1900年普朗克在理论上发现经典力学中的作用量有其天然的最小量值，即作用量量子，其值今知为

$$h = 6.625 \times 10^{-27} \text{尔格} \cdot \text{秒};$$

1905年爱因斯坦在理论上又发现光辐射应认为由能量量子 $h\nu$ （即光量子，后称光子）组成（ ν 为辐射频率），并据此他在1909—1913年时期解释了很多经典理论不能说明的实验结果。卢瑟福学派认识到，这类事实已充分揭示出经典物理学理论在本质上的局限性。这就使玻尔相信，要说明原子现象就必须从根本上离开经典概念，因而开始探索如何引进量子概念来解决象原子稳定性这类原子结构问题，相信普朗克作用量量子 h 支配着卢瑟福原子的电子构造。

1912年夏，玻尔回到丹麦哥本哈根后，不断同卢瑟福通信联系。1913年春，玻尔就从氢原子线光谱所服从的简单经验规律（线性组合定律）发现了解决原子稳定性这个疑难问题的线索。这个组合定律迫使他不得不假定原子发射或吸收光辐射是

个不可分割的整体过程，即所谓量子跃迁过程，使原子能量一次突然转移其相应于一个光量子的全部能量，并且这个转移的数量是由电子绕核公转的经典轨道角动量量子化（角动量量子 $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$ 的整倍数）决定的。显然，玻尔的这两大新概念，量子跃迁过程和角动量量子化，已在根本上脱离了任何经典物理图景，即任何连续性演化图象。尽管在这个玻尔原子模型的旧量子理论中，两大量子概念同经典力学原理生硬地合在一起，但它对氢原子线光谱的定量解释和对氦离子线光谱的理论预言都是很成功的。

玻尔的上述这些工作都由卢瑟福介绍分三次发表于英国1913年的《哲学杂志》上，其标题是“关于原子和分子的构造”：I. 电子和正电核的结合；II. 仅含一个核的体系；III. 含多个核的体系。这三部曲问世后，哥本哈根的名气大振，青年学者陆续来到玻尔身旁工作。1916年玻尔被任命为哥本哈根大学理论物理学教授。此后，他致力于筹备创立理论物理研究所，目的在于促成理论物理学家和实验物理学家的密切合作。1920年这个所正式成立。匈牙利人赫维赛(George Hevesy)，德国人弗朗克(James Franck)，荷兰人克雷默斯(Hans A. Kramers)，瑞典人克莱因(Oskar Klein)，挪威人罗斯兰德(Svein Rosseland)等学者先后到所工作。其后，德国慕尼黑大学索末菲(Arnold Sommerfeld)教授的两个学生，奥地利人泡利(Wolfgang Pauli)及德国人海森堡(Werner Heisenberg)，分别于1922年及1924年也到所中长住。从一开始，还有英国剑桥的达尔文(Charles Darwin)，狄拉克(Paul Dirac)，福勒(Ralph Fowler)，哈特里(D.R.Hartree)，莫特(N.F.Mott)等人不时来到哥本哈根短期工作。荷兰人爱伦菲斯特(P. Ehrenfest)，法国人

布里渊 (L.M.Brillouin) , 俄国人兰道 (L.D.Landau) 和加莫夫 (George Gamov) 也都在所中工作过。在玻尔的影响下, 这就自然而然地形成了一个哥本哈根学派。一直和玻尔密切联系的海森堡, 由于最早初步提出了废弃经典电子轨道模型的新量子论 (即量子力学) 的数学表述, 在后来的哥派活动中起了仅次于玻尔的主导作用。

玻尔认为: 有限大小的微观客体的存在, 只是作用量量子 h 普遍存在的后果。他说过: “只是由于作用量量子的存在, 才阻止住电子和原子核聚合成实际上无限小的中性重粒子。”可见, 微观物理学实质上就是量子物理学。量子物理学对当代社会实践所起的作用是巨大的。举一例已足说明。1939年玻尔和惠勒 (J.A.Wheeler) 较全面地提出重核裂变理论, 其所作重要预言当即经尼尔 (Alfred O.C.Nier) 等人的实验证实, 从而导致原子核链式反应堆及铀 235 原子弹的发明。单从这件事就可说明哥派成就对人类物质文明的进步所造成的影响。

(二)

一般公认, 量子物理学的流行描述是以玻尔和海森堡在 1926—1927 年间阐述的量子跃迁这一不连续过程的概念为基础的。这个量子跃迁的假定, 本质上导致了新量子论的数学形式的哥本哈根解释。这个解释的定量方面首先表述为众所周知的海森堡不确定性关系, 后来等效地表述为不相容的两类测量先后次序不对易的关系。这类由作用量量子 h 表达的数学关系, 终于在 1928 年迫使玻尔最后提出其互补概念。这被人们普遍认为, 大致上解决了长久争论不休的许多佯谬 (初看来自相矛盾之论), 从而有了可能维护流行的量子论在原则上的协调一致性和完备无缺性。这个被西方大多数物理学家所长期接受的哥