

科学与人文

玻恩与量子革命实践

孙昌璞

摘要 作为20世纪量子革命的拓荒人和践行者, 马克斯·玻恩不仅创建了孕育这场科学革命的哥廷根物理学派, 而且以自己多项具体的卓越成就贡献于量子力学的创立和发展。然而, 他诸多重要科学贡献却被同行们忽视了几近30年。本文在量子力学当代发展的角度, 基于科学进步的内在逻辑, 重新考察玻恩在量子力学创建和发展中的历史作用, 探讨其科学贡献被忽视的科学社会学问题。这里, 我们通过逻辑重构历史的方式探究科学发展历史的真实, 以剖析典型个案的方式, 有助于我们理解学术领袖及其个人品格在学说发展、学派形成等方面的作用。

关键词 量子革命 马克斯·玻恩 哥廷根物理学派 科学社会学

在科学发展的历程中, 观念的革命和思想的演进总是和一些关键人物和重要事件联系在一起。提及20世纪初的量子革命和量子力学的创立, 无论如何也回避不了马克斯·玻恩(Max Born)的伟大贡献。玻恩过分的谦逊和低调, 使得他没有像尼尔斯·玻尔那样, 以量子革命先锋和伟大旗手的姿态出现于那场波澜壮阔的科学革命舞台上。但作为这场科学革命的拓荒人和践行者, 他不仅创建了孕育这场科学革命的哥廷根物理学派, 而且以自己多项具体的卓越成就贡献于量子力学的创立和发展。然而, 就是这样一位不世出的伟大学者, 其诸多科学贡献的重要性却被同行们有意无意地忽视了几近30年。

从二战结束后到他1954年获诺贝尔奖前的若干年间, 玻恩自己也开始觉察到这种无端的忽视对他是一种多么深的伤害。他十分谨慎地向个别的朋友、同行乃至学生(如爱因斯坦、玻尔和奥本海默等)道出了难以忍受的苦闷和不满,

作者简介 孙昌璞, 中国科学院院士, 中国工程物理研究院北京计算科学研究中心教授。

道出了创立矩阵力学的个中原由。在后来出版的玻恩-爱因斯坦通信集中 [Born & Einstein 1971; Born 1979], 玻恩在评注中不无伤感地写到, 通常的提法“海森堡对易关系”明明是在玻恩和约当的“两个人文章”中第一次出现; 人称“海森堡矩阵力学”, 但海森堡完成“一个人文章”时, 连矩阵的概念都不知道。在30年代中期剑桥举行的一次量子物理会议上, 当玻尔、卢瑟福等量子物理名宿以及海森堡、狄拉克等量子物理开拓者鱼贯而入、走向前台时, 坐在后排角落里的玻恩指着这些已被认可为大人物的背影, 对与他坐在一起的青年博士钱德拉塞卡说: 我原本应该在那里呀! 话音未尽, 双眼禁不住热泪盈眶, 玻恩再也难以忍受这种至深的伤害 [厚宇德 2012; 杨建邺 2009]。好在历史可以让真实或快或慢地展现出来, 玻恩终于在1954年获得了诺贝尔物理学奖。随着时间的推移, 玻恩作为量子物理的奠基人和开拓者的作用已经被世人所公认。

现在, 经过相当长的历史沉淀, 人们能够站在量子力学当代发展的角度, 基于更加准确的科学进步的内在逻辑, 以超脱和客观的心态重新考察玻恩在量子力学创建和发展中的历史作用, 探讨其科学贡献被忽视的科学社会学问题。以逻辑重构历史的方式探究科学发展历史的真实, 不仅有助于进一步厘清量子力学发展中的“是是非非”和“物是人非”, 而且能够以剖析典型案例的方式, 在深层次上理解学术领袖及其个人品格在学说发展、学派形成等方方面面的作用。

一 玻恩对易关系和海森堡矩阵力学

根据杨振宁先生引述的观点 [杨振宁 2002], 量子力学的矩阵形式或称矩阵力学起源于三篇划时代的论文, 这就是海森堡的“一个人文章” [Heisenberg 1925]、玻恩和约当的“两个人文章” [Born & Jordan 1925] 以及海森堡、玻恩和约当的“三个人文章” [Born, Heisenberg & Jordan 1926]。比“一个人文章”稍晚, 奥地利物理学家薛定谔独立创建了另一种形式的量子力学——波动力学 [Schrödinger 1926a], 赢得了爱因斯坦等老一代物理学家几乎众口一词的喝彩, 因为那一代人中不少人几乎不堪忍受矩阵力学观念的新奇和几乎前无古人的表达问题的方式, 如物理理论应建立在可观察量的基础之上 [派斯 2000, 2001]。基于同样的原因, 薛定谔和海森堡之间有过诸多言辞激烈的争论, 但最终还是证明, 两种形式是等价的 [Schrödinger 1926b; Eckart 1926a & b] (几乎同时, 美国物理学家埃卡特 (C. Eckart) 也独立地证明了这种等价性, 只是后来少有文献提及)。

英国物理学家狄拉克在“两个人文章”之后，特立独行地用 c 数 q 数重新表达了矩阵力学 [Dirac 1925]，再一次展示了它与波动力学的等价性。进而，与经典力学的泊松括号类比，狄拉克直觉地给出坐标 - 动量不可对易关系。虽然不少人极力推崇这种漂亮的表象理论，但它没有超越“一、二、三”个人文章的物理贡献。当然，他自己后来超天才的物理发现绝对是神来之笔：创建描述电子的狄拉克方程，预言了反粒子构成的物质新世界。

通常大家认为，“一个人文章”是海森堡的独创，“两个人文章”是“一个人文章”的数学表示，而“三个人文章”则是高屋建瓴的综合。然而，这样评价失之于过分笼统。厘清三者的具体贡献，我们才能看到玻恩科学贡献是见诸于平实的伟大。为此，我们先考察一下创立矩阵力学的基本思路。1924年，海森堡首先意识到可观测量才是描述微观世界的唯一合理的物理量，诸如坐标和动量之类的经典物理概念同时描述微观粒子的运动并非十分合适。他指出，人们对原子之类微观系统的描述，主要依据光谱学的观察，原子的光辐射体现了电子运动的全部特征。根据经典物理和对应原理，电子变速运动可以导致电磁辐射，其频率分布是由电子坐标 $q(t)$ 的傅里叶变换决定的。在玻尔的原子模型中，根据里兹组合定律，辐射的频率 $\nu_{mn} = (E_m - E_n) / h$ 与两个原子轨道的能级 E_m 和 E_n 相联系。因此，相应的量子体系坐标的傅里叶变换必须是依赖于两个指标的二维傅里叶变换 $Q = \sum_{mn} Q_{mn} \exp(i \nu_{mn} t)$ ；对动量也要做类似的处理 $P = \sum_{mn} P_{mn} \exp(i \nu_{mn} t)$ 。在此基础上，海森堡引用了1924年7月波恩发表的一篇题为“量子力学” [Born 1924] (德文名为 *Über Quantenmechanik*) 的论文所给出的量子化条件，直接给出了振子能量的量子化。

需要指出的是，虽然这个条件可以视为索末菲量子化条件的微分 - 差分形式推广，但玻恩的简洁表达使得海森堡可观察量描述与实际物理系统联系起来 [彭桓武、徐锡申 1998, 彭桓武 2001]。因此，玻恩的这个工作是海森堡理论建立的技术关键；也是在这篇文献中，玻恩首先使用了“量子力学”一词。玻恩推广了克拉默斯处理原子内电子系统和电磁场之间相互作用的方法，从而能够处理带电体系之间的相互作用。玻恩的做法是将微方程用差分方程代替，依据玻尔的对应原理，就可以完成经典力学向当时原生态的量子力学过渡。这是走向量子力学的一个关键性步骤。这个处理不仅是“将经典公式翻译成它们相应的量子对应物的处方” [Jammer 1966]，而且“对一年以后实际量子力学的表述来说是不可缺少的” [卡西第 2002]。

以上描述的玻恩的贡献对量子力学虽属关键，但也只是停留在技术层面的中间步骤。后来，玻恩与约当的“两个人论文”才把海森堡猜测性的工作推向一个系统化的科学理论的高度。一方面，虽然海森堡原来就强调可观察量的作用，但其理论在具体表述上仍然沿用了坐标、动量的经典观念和电动力学中速度变化导致电磁辐射的经典定律。因此，此时海森堡的量子力学无法摆脱经典观念描述的束缚。另一方面，由于海森堡当时不知道矩阵的概念，理论背后的准确数学观念并不清楚，因此无法对稍加复杂的系统（如氢原子）进行有效的计算。而玻恩首先意识到，微观可观测力学量必须用两指标傅里叶变换描述的本质是其矩阵表述（后来狄拉克称之为 q 数，冯诺依曼称之为算符），并且明确给出了基本可观察量的对易关系 $[Q,P]=i\hbar$ 。这是海森堡量子力学思想走出“原生态”的关键一步，也是玻恩本人对后人称它为“海森堡对易关系”愤愤不满的原因。

对于微观系统，玻恩把量子力学的可观测测量当成算符而不是可对易的数，避免了在微观世界描述中继续使用不可观测经典量的逻辑尴尬，从而彻底贯彻了海森堡“理论必须建立在可观察量之上”的核心精神，使得海森堡新的量子理论成为一个逻辑自洽的矩阵力学思想体系；另一方面，“玻恩对易关系”的建立，使得量子条件变得十分简洁、直观。自此，对于复杂一点的微观系统能谱的计算，不必再使用繁杂的、起源于旧量子论的索末菲-玻恩量子化条件。那位不愿意与玻恩合作进一步证明“玻恩对易关系”的天才物理学家泡利，不久就把“玻恩对易关系”的作用发挥得淋漓尽致，对氢原子能谱给出了一个十分漂亮的计算 [Pauli 1926]，这个成功大大增强了人们对矩阵力学的信心。相比于玻恩在科学上的远见卓识，这无疑也是对泡利在更高层次上的科学洞察力的讽刺。

“玻恩对易关系”在物理上非常直观地展示了普朗克常量是刻画经典和量子边界的重要物理参数；在一些物理过程中， \hbar 的作用可以不予考虑，则动量和坐标可以看成对易的，因而基本上可以用经典物理来近似地描述实际的物理过程。有了这个对易关系，通过经典对应，微观系统动力学就可以用海森堡方程描述，而相应“玻尔轨道”代表的分立定态则由哈密顿量的本征方程给出。与原来哈密顿量不对易的力学量所代表的扰动会引起不同定态（能级）之间的跃迁。在“三个人的论文”里，玻恩等也建立了计算跃迁的微扰论方法。于是，玻恩给出的量子力学矩阵描述和基本对易关系，使得海森堡“原生态”思想变为表述更加严谨、思想脉络更加清晰、计算更加有效的科学理论体系。与狄拉克 q 数- c 数描述相比，玻恩-约当把量子力学完全置于已有的数学框架之下，而非重新发现已有的数学，

表述上更加明确、直接；与冯·诺依曼的算子泛函形式相比，玻恩的矩阵力学更易于物理学家的理解和实际应用。

可以说，量子力学建立后，能在很短时间内在学术界得到广泛接受，并迅速应用到各个领域，得益于玻恩、约当和狄拉克等完整、严谨、简明的理论构造，得益于薛定谔的微分方程形式的独立发现，也得益于玻尔在哲学思想层面上的石破天惊的深入阐释。由此看来，即使没有玻恩后来对波函数意义的概率解释，仅凭量子力学矩阵表达和基本对易关系的发现，以及微扰论的建立，玻恩也完全有资格与海森堡一道获得 1931 年的诺贝尔奖。

二 玻恩几率解释和“哥本哈根诠释”

众所周知，服从薛定谔方程的波函数或海森堡的可观测量正确地描述了微观世界的运动规律。作为量子力学处理问题的关键所在，抽象的数学实体——波函数与微观世界的物理过程如何对应、观测在物理上如何实现，构成了所谓的量子力学诠释（interpretation）。今天，人们对待量子力学的诠释可能有各种迥异的态度以及哲学意义上的不同解读，比如费因曼的“shut up and calculate!”（原话究竟出自经常出语惊人的大科学家费因曼、还是名声稍逊的默明 [D. Mermin]，是各有说辞的）[Mermin 2004]，就暗含着为数众多物理学家对量子力学诠释的漠然和不屑；然而，同为著名物理学家的温伯格（S. Weinberg）则明确强调量子力学诠释的重要性，并对传统的哥本哈根诠释提出了尖锐的批评 [Weinberg 2005]。其实，自所谓的量子力学标准诠释——哥本哈根诠释提出之后，量子力学的各种诠释似雨后春笋、异彩纷呈，包括隐变量诠释、多世界诠释以及后来的退相干历史诠释等 [孙昌璞 2000a; 2000b]。现在需要指出的是，这些诠释虽然各有千秋，但最终要得到检验就必须统一回归到玻恩的几率解释。

为了理解玻恩解释的核心作用，首先要弄清楚什么是哥本哈根诠释。这个问题没有一个标准答案，但大致可归纳为以下 5 条 [Peres 2002]：

1. 量子系统的状态可以用波函数来完全地表述。波函数代表一个观察者对于量子系统所能知道的全部（薛定谔）；
2. 量子系统的描述本质上是概率性的。一个事件发生的概率是其对应的波函数分量的绝对值平方（马克斯·玻恩）；
3. 不确定性原理：一个量子粒子的位置和动量无法同时被准确测量（海森堡）；

4. 互补原理 (Complementarity principle) :物质具有波粒二象性, 一个实验可以展现物质的粒子行为或波动行为, 但不能同时展现二者 (尼尔斯·玻尔);

5. 对应原理 :大尺度宏观系统的量子物理行为应该近似于经典行为, 而测量仪器必须是经典仪器 (尼尔斯·玻尔与海森堡)。

仔细分析“哥本哈根诠释”的5条内容不难发现, 与实验直接联系的只有第1条和第2条, 而第3条海森堡不确定性关系可以从玻恩解释推导出来。其实, 与互补原理和对应原理的艰深与晦涩相比, 第2条玻恩的几率解释可以用数学方式明显地、无歧义地表达出来:量子系统可以处在某个力学量的几个本征态的相干叠加态上 $|\Psi\rangle = \sum C_n |n\rangle$, 这里 $|n\rangle$ 是力学量A的本征态, 对应于A的本征值是 a_n 。此时测量A, 每次测量结果只能是 $\{a_n\}$ 中的一个, 其出现的频率(几率)为 $|C_n|^2$ 。根据玻恩几率解释, 通过对稳定系统的多次测量或对于一个样本进行系综测量, 得到力学量A的平均值为 $\bar{A} = \sum a_n |C_n|^2$ 。因而, 对不可对易的力学量A和B同时进行测量, 它们均方根涨落 $\Delta D = \sqrt{\overline{(D^2)} - (\bar{D})^2}$, for (D = A, B) 具有普朗克常量约束的不确定性, 即 $\Delta A \Delta B \geq \hbar |[A, B]|/2$, 它限制了同时测量A和B的精度。

因为抛开过度的哲学解释不确定关系可以从玻恩解释直接推导出来, 所以很多人怀疑为什么要把海森堡不确定性关系提高到量子力学的核心地位。按照现在对量子力学基础的正确认识, 曾被特别强调的海森堡不确定关系不过是建立在玻恩解释之上的一个推论。苏汝铿在他的量子力学教科书中指出 [苏汝铿 1997], 海森堡不确定性关系“不是一个独立的原理, 而是被波粒二象性和波函数统计解释导致的必然结果”, “只要有波函数统计解释和力学量平均值公式, 就可以严格导出不确定性原理”。当然, 在研究具体问题时, 虽然不能指望不确定性关系可以给出精准的定量预言, 但它的确可以从物理上直接解释一些奇异的量子效应。

哥本哈根诠释的第4条(玻尔互补原理)在一定意义上是哲学性的描述, 与不确定性关系本质上也不是完全独立的。例如, 在粒子双缝干涉实验中, 如果有装置能够探测粒子从哪一条缝通过, 则干涉条纹消失。海森堡不确定性关系对之的解释是, 探测粒子经过那一条缝, 相当于对粒子的位置进行精确测量, 从而对粒子的动量产生很大的扰动, 而动量联系于粒子物质波的波矢或波长, 从而导致干涉条纹消失。玻尔对此不以为然, 他认为互补原理是问题的核心:虽然物质具有波粒二象性, 但在同一个实验中粒子性和波动性不会同时出现, 是测量装置的预先设置决定了“看到”的结果。在双缝实验中, 要探知粒子路径意味着实验强调粒子性, 波动性自然消失。玻尔进而认为海森堡的对干涉消失的阐释是对量子

力学根本的庸俗化。后来冷原子干涉实验似乎佐证了玻尔的论断：是内态与空间路径的纠缠，而不是动量扰动导致干涉条纹消失。然而，进一步的理论研究表明，如果实验解释不局限于简单的动量 - 坐标不确定性关系，而是考虑更普遍的正则变量的不确定关系，这个实验结果仍然可以纳入不确定性关系的框架，从而也可以作为玻恩解释的间接推论 [孙昌璞 2000a; 2000b]。

第 5 条中“仪器必须是经典”的要求，正是现代量子测量理论所要摈弃的，也是温伯格批评哥本哈根诠释的要害之所在 [Weinberg 2005]。现代测量理论把测量仪器、被测系统乃至它们的环境一起，看成一个封闭系统利用量子力学进行研究。当把测量仪器（或环境）看作是宏观极限下的多粒子量子系统、或是大量子数系统（由不确定关系决定其经典极限）时，系统 + 仪器的量子态可以直接给出系统量子态和仪器宏观态的经典对应，从而给出测量结果的经典几率描述。基于同样的考虑，从微观多粒子量子系统的理论和统计物理出发，可以直接证明“大尺度宏观系统的量子行为应该近似于经典行为” [孙昌璞 2000a; 2000b]。

可以说，对应原理的核心内容是旧量子论的一朵奇葩，它是玻尔后来仍然能够继续在量子力学时代发挥一定作用的抓手，但它仍然可以纳入玻恩几率解释的框架。因此，从量子力学当代发展、特别是从后来建立起来的量子测量理论的观点看，哥本哈根诠释中被后人反复强调的两个观念——不确定性原理和互补原理，在可操作的层面上完全可以作为玻恩几率解释的推论。从这个意义上讲，二者不是物理上独立的观念，但可以视为对玻恩解释的哲学提升，因此“哥本哈根学派实质上不是一个物理学派，而是一个哲学学派” [王正行 2004]。

三 玻恩对波动力学发展的贡献

玻恩不仅是量子力学的奠基者，也是集多方面具体贡献于一身的量子力学的践行者。他虽然坚持量子力学描述微观世界的完备性和统计性，并站在“可观测量”的观点为“矩阵力学”据理力争，但他不仅不排斥波动力学，而且在诸多方面对波动力学的发展做出了重要贡献：除了波函数的几率解释 [Born 1926b]，玻恩对量子力学的另一个重要贡献是量子绝热定理的发现和玻恩 - 奥本海默近似方法的建立 [Born & Oppenheimer 1927; Born 1926a; Born & Fock 1928]，后者被认为是当代原子分子物理和固态物理的基础。

1926 年的 6 月，玻恩发表了《论碰撞过程中的量子力学》(Zur Quanten-

mechanik der Stoßvorgänge)一文[Born 1926],提出了应用波动力学解决微观系统散射问题的基本方法——玻恩近似。值得指出的是,在这个文章中,玻恩几率解释虽然是作为副产品出现的,但它是玻恩对波动力学最重要的贡献。因此,我们有必要对此文进行个案分析,此文的思想方法最能体现玻恩的学术风格和科学精神。

玻恩在该文中首先强调了只有薛定谔的波动方程才适合于描述碰撞过程,并认为量子力学的波动形式表述是对量子规律的一种最深刻的描述。在文中特别提到,他尝试用矩阵力学解决碰撞问题,但是没有成功。从而他意识到,要解决碰撞问题,必须在特定边界条件下求解定态薛定谔方程,边界条件的正确选取是解决碰撞和散射问题的关键。以一个电子入射到原子上为例,如果电子沿着一个给定方向入射,那么散射波在传播方向的无穷远处是一个渐近的平面波。在这个过程中,质心静止的原子内态将被激发到分立本征态的叠加态上。如何理解和解释这些描述电子和原子联合状态叠加系数的物理含义是问题的关键。这是关于碰撞和散射的波动图像表述,那些叠加系数代表了从原子散射出去的物质波分布。

然而,如果回到粒子图像、考虑电子是一个不可分割的点粒子,单纯的波动图像就会导致直观上的矛盾:怎么粒子散射以后就会变成弥散在整个空间中的波呢?为了解决这种波粒二象性描述的矛盾,玻恩明确指出,回到粒子图像唯一正确的解释是,这些叠加系数代表了粒子沿特定方向入射然后被散射到特定方向的几率,因此物质波只是一种几率波。在文章注脚中,玻恩进一步写道,“一种更加精密的考虑表明,概率与‘叠加系数函数’的平方成正比”。当然,今天知道,更准确的说法应该是绝对值或者模的平方。玻恩说是叠加系数函数的平方,是因为他讨论问题时采用的是入射态和出射态的实部。虽然这样计算具体问题会有一些麻烦,但玻恩的考虑抓住了一个伟大科学发现的关键——跃迁概率概念。在紧接着的同名文章中,玻恩进一步明确了并一般地阐述了几率解释:归一化的波函数,可以写成几个有离散本征值的非简并本征态的线性叠加,展开式的系数,其模的平方是系统在相应本征态的概率。至此,人们终于发现了波动力学是描述粒子运动的几率性定律,而且几率的改变遵守因果定律。

玻恩还特别指出,薛定谔方程对碰撞问题可以给出确定性的解决:人们不必简单地回答“什么是粒子碰撞以后的状态”,而是直接回答“粒子有多大的可能性被散射到特定的方向”。因此,就不会出现因果描述的困难。可以猜想,这里的因果描述是指从初态到末态的时间演化。如果那时人们就把散射和碰撞问题归

结为因果分析的时间演化，而不是特定边界条件的定态问题，今天用量子力学计算实际的散射问题就会陷于无穷无尽的困难。当年玻恩有如此深刻的洞察力，为碰撞问题的研究指出了如此明确的方向实在令人惊叹。在此文中，玻恩还提出了一些至今仍然重要的科学问题，如原子内态的性质对散射态的影响，是否有可能预设条件使得碰撞问题有一个因果演化的描述？今天我们对于波包演化问题的确可以给出一个因果演化的描述，但对于大部分的实验，玻恩的定态方法还是可以解决很多实际问题。物理学家派斯曾经高度评价玻恩的几率解释：在量子意义上引入几率，把几率作为物理学定律的内禀特征，很可能是 20 世纪最富戏剧性的科学变迁，它的出现标志着一场科学革命的结束，而不只是一个开端 [派斯 2001]。

1927 年，玻恩和他的学生奥本海默 [Born & Oppenheimer 1927] 合作提出了今天称之为“玻恩 - 奥本海默近似”的绝热近似方法。它直到今天还被广泛使用，用来求解快变系统（如电子）与慢变系统（如原子核）耦合的系统的定态薛定谔方程。例如，通常在用量子力学处理分子运动时，需要通过解这类复合系统的薛定谔方程得到整个体系的波函数。由于体系自由度过多，求解非常困难、乃至几乎无法进行。根据玻恩 - 奥本海默近似思想，考虑到分子中原子核的质量要比电子大很多（一般要大 3 个以上数量级），在同样的相互作用下，原子核的动能比电子小得多，这一差异使得电子在每一时刻都仿佛运动在几乎静止的原子核构成的势场中。电子运动很快，原子核只能感受到电子的平均运动，只能受到时间空间平均的反作用。由此，可以先固定慢变自由度求解电子波函数，然后再把电子的平均反作用考虑进来，求解原子核的波函数，从而实现原子核坐标与电子坐标的近似变量分离。在大多数情况下，玻恩 - 奥本海默近似的计算非常精确，大大降低了量子力学计算处理复杂体系的难度，今天已经被广泛应用到分子结构、凝聚态物理、量子化学、化学反应、纳米机械乃至生命蛋白质构型与功能等方面的研究上。

1928 年，在自己 1926 年文章基础上 [Born 1926a]，玻恩与福克 (V. Fock) 合作 [Born & Fock 1928]，成功地发展了量子绝热近似的另外一种形式：与玻恩 - 奥本海默近似相比，其慢变量的变化不是由动力学支配的，而是一个人为给定的缓变的参数。大家知道，如果哈密顿量与时间无关，量子系统若开始处在一个定态（与时间无关的哈密顿量的本征态）上，则在以后的演化中，它会始终处在这个定态上。末态与初态的唯一差别，是增加了一个只与能量相关的动力学相因子。

如果哈密顿量缓慢依赖于时间，体系通常不会再保持在初始时刻的本征态上，因为哈密顿量随时间的改变会激发不同瞬时能级间的跃迁。然而，与系统的内禀演化相比，如果哈密顿量的改变足够缓慢，或称体系是绝热（Adiabatic）变化的，类似于定态演化的特征会得到一定程度的保持。量子绝热定理对此给出了定量的描述。

在这个方向上，当代一个重要发展是 Berry 几何相因子的发现 [Berry 1984; Wilczek & Shapere 1989]。哈密顿量缓变时，除了在瞬时定态产生一个可积的动力学相因子，还会导致一个附加的几何相因子，即所谓 Berry 几何相因子。Berry 几何相因子是在研究特殊问题——量子混沌时发现的，但后来风涌而至的工作表明，它是量子理论中一个普遍存在的重要概念，深刻地反映了量子系统乃至经典动力学过程的整体性质。它的研究已涉及到原子 - 分子物理、凝聚态理论、核物理和粒子物理、量子场论等物理领域。虽然此前人们对量子过程整体特征已经有所认识（如表征电磁势物理意义的 Aharonov-Bohm 位相的发现），但 Berry 几何相因子的普适性是令人惊讶的。

Berry 位相发现以后，人们正确地推广了玻恩 - 奥本海默近似，建立了一个包含 Berry 位相诱导规范场的全量子的绝热近似理论。它把相互作用系统的快、慢自由度绝热分离，使得快变部分对慢变部分还提供一个有效矢量势——诱导规范场势 [Wilczek & Shapere 1989; 孙昌璞、张芑 2001]。例如，针对自旋在非均匀外场中的进动，人们把非均匀场中空间运动的自由度视为慢变，自旋运动视为快变，然后通过玻恩 - 奥本海默近似分离变量。他们发现空间慢变自由度会经一个绝热诱导的矢量势——诱导规范场，它会导致实验上可观测的 Aharonov-Bohm 效应。近几年在磁（光）约束冷原子实验方面所取得的重要进展，使得人们对这方面工作又重新关注起来。

四 量子力学发展早期对玻恩科学贡献的误读

以上基于量子力学当代发展的一些考量，阐述了玻恩对量子力学创建和发展的巨大贡献。但正如本文开篇提到的，历史是如此地捉弄人，玻恩的贡献被埋没了将近一代人之久，直到 1954 年他才在其许多晚辈之后获得诺贝尔物理学奖。且不说原本他就应当与海森堡一道荣获 1932 年的诺贝尔物理学奖，1926 年他独自完成的波函数几率解释的工作也几乎被彻底忽视。令人费解的是，波函数几率

解释或玻恩解释正是当时如日中天的哥本哈根诠释的灵魂所在。这里到底发生了什么，到底有人有意或者无意地做了什么，实在耐人寻味。

国内外不少学者已经从不同角度关注这个科学史上的悬案，有人把它和海森堡和玻恩的个人品行联系起来。例如，厚宇德等在这方面发表了系列文章 [厚宇德 2012]。他们特别注意到，海森堡获诺奖后给玻恩的信中盛赞玻恩对矩阵力学的原创性贡献 [Born 1979]，而在诺贝尔奖的演讲中几乎只字不提玻恩的实质性贡献。其中，他提到的对量子力学发展作出重要贡献的人甚至包含了约当，唯独不提玻恩。派斯对海森堡的行为也提出过类似的疑问：海森堡 1926 年 11 月写于哥本哈根的几率解释的文章 [Heisenberg 1932] 就没有提到玻恩。联想到海森堡在二战期间的作为，以及二战之后海森堡及其追随者的表现，人们很容易把玻恩科学贡献被误读的事实与海森堡的人品联系起来。玻尔对几率解释的优先权的说法更加耐人寻味：“我们从来没有梦想过它是别的什么” [派斯 2002]。他认为，薛定谔证明了波动力学和矩阵力学等价性，波函数的几率诠释就不言自明了。我们觉得，这是一个不难求证的从逻辑角度重构历史的学术命题：以现代方式重复薛定谔的证明，看看是否必须用到波函数的几率解释。

我们不否认个人的性情、操守和品格会影响对别人的功过是非的评价，但仅仅海森堡一个人的观点不可能蒙蔽整个科学社群这么多年。至于玻恩自己的性格中有谦逊低调、与世无争和过于苛求自己的因素，原则上也只能是问题的另一个方面。从他与伦因斯坦的通信中也可以看出，他对科学真理的坚持从来都不低调；与薛定谔就波函数几率解释进行辩论，他更是坚持不懈。因此，个人品格不会是最终决定整个科学社群对个人科学发展贡献认识的全部。在这个认识基础上，我们认为厚宇德等的系列研究工作对我们揭秘“玻恩现象”的确提供了一定的线索和答案，但我们更愿意基于科学发展的逻辑，从科学社会学角度对此提供一些不成熟的浅见和补充。

我们猜测，玻恩被误读的一个可能原因是在量子力学发展的早期，玻恩自己也没有认识到自己工作的重要性。玻恩工作的领域十分广泛，也常常忽视自己的其他工作。值得注意的是，那时，玻恩与伦因斯坦的通信并没有过多地提及自己的矩阵力学的奠基性工作，甚至也没有特别强调自己的波函数几率解释。从事具体科学研究的人都有这样的体会，通常并不是自己才最了解自己哪个工作是最重要的，不正常地拔高或贬低自己的工作是一种常态。一旦自己不强调、不重视自己的工作，加上玻恩在各种场合不断强调海森堡的主要贡献，辅以海森堡本人对

此许多令人生疑的作为，在科学社群里就不会有很多人真正了解玻恩的实质性贡献。从诺贝尔奖解密的材料看，当时“圈内”的科学家推荐玻恩的人的确不多。即使他的好友爱因斯坦也没有推荐过他。当然，这也可能是因为爱因斯坦反对把建立在几率描述之上的量子力学作为终极理论。玻恩本人也只是在海森堡、薛定谔和狄拉克获得诺贝尔物理学奖后才开始或明或暗地抱怨对他的不公。

玻恩贡献被误读的另一个原因可能涉及到一个学派“站队”的问题。大家知道在量子力学发展早期，波动力学和矩阵力学之间有巨大的争论，双方各执一词，几近意气用事。与波动力学的诞生大多“老派”物理学家雀跃欢呼相比，对矩阵力学很多物理学家不仅不欣赏，而且有人甚至嗤之以鼻，这件事对海森堡的压力很大[派斯 2001; 卡西第 2002]。薛定谔等证明了波动力学和矩阵力学的等价性[Schrödinger 1926b; Eckart 1926a&b]，也并没有减轻海森堡的压力，反而使得海森堡更加担心矩阵力学会被人们所遗忘。事实上，直到今天，人们仍然能够感受到波动力学解决具体问题（如，实际的无限系统时间演化和定态问题）的确比矩阵力学来得方便，虽然矩阵力学对问题的理解和意义提升提供了独特的视角。怎样才能使得矩阵力学在与波动力学的竞争中胜出一筹，极有可能是困扰后来的哥本哈根学派成员们的一个关键。玻尔这位旧量子论革命的“元老”再一次高举起量子革命的旗帜，振臂一呼，通过“互补原理”这样一个物理上语义晦涩、哲学上却振聋发聩的思想阐述，把海森堡、泡利等年青的“量子革命者”聚集于麾下，使得量子力学的矩阵形式在当时的年轻一代中成为风尚。

玻恩的学术风格及其核心的学术思想都决定了 he 不能、也不可能完全站在量子力学旷世之争的任何一边。在与薛定谔和爱因斯坦的争论中，他虽然一直坚持波函数的统计诠释，但从来都不持玻尔那种“哥本哈根诠释”的原教旨主义：波函数借助经典仪器描述单粒子过程。玻恩认为，波函数描述并不能回答某个粒子在特定时刻的位置，“回答的只是统计问题”，因此与爱因斯坦的系综解释“分歧不是实质性，只是语言上的”[Born & Einstein 1971]。从现代量子测量理论的观点看，玻恩的确抓住了问题的要害，抛却了物理上不可证伪的、过于哲学化的论题，不失深刻但更贴近实际，但这种实事求是的折衷在思想路线上必定双方不讨好。

在所谓的哥本哈根学派内部，玻恩这种过于低调的姿态很难被当作一面革命性的旗帜，自然不会给年轻的“量子革命者”们留下很深的印象。且不说海森堡的有意和无意，其他人对待玻恩的贡献的态度也令人诧异。例如，曾经师从玻恩的莫特(N. Mott) 1928年与合作者梅西写过一本量子碰撞的专著[Mott &

Massey 1987]，甚至到了 1949 年的第二版涉及入射 - 散射波的解释仍然不提玻恩统计解释的贡献。其理由是因他 1928 年在哥本哈根开始工作时，内部早已称之为“哥本哈根”解释了。20 世纪 50 年代他了解情况后，莫特懊悔不已：一位碰撞理论的大家，居然没有仔细研读玻恩量子碰撞的原作。有趣的是，玻恩本人对此一直毫不在意。

以上只是基于不可能完整的史实片段、匆忙中勾画出一时难以求证或证伪的个人猜测，对玻恩现象还是不能彻底洞察真相。也许关于人的故事就是这样，不可能清清楚楚、明明白白。但了解到这段科学史，面对玻恩一次又一次、或经意或不经意的被误读，面对今天那些还不断强调“不引死人和小人物文章”的“研究者”们，我们会有一种说不出的感伤和落寞。玻恩故事也许会给人们另外一种启示：科学发展浩浩荡荡，自可以淘尽千古沉沙，个人孰轻孰重自有尘埃落定之时。作为科学人，我们唯有正确对待各种委屈和轻视，认真学习、潜心工作，唯有朴实无华的科学工作才是科学生命的全部。

参考文献

- Berry, M. V. 1984. Quantum Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes. *Proc. R. Soc. Lond. A.* **392**: 45.
- Born, M. 1979. 《我的一生和我的观点》. 李宝恒译. 北京: 商务印书馆.
- Born, M. and Einstein, A. 1971. *Born-Einstein Letters: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*. Macmillan Press.
- 玻恩、爱因斯坦 2010. 《玻恩—爱因斯坦书信集（1916 - 1955）动荡时代的友谊、政治和物理学》. 范岱年译. 上海: 上海科技教育出版社.
- Born, M. and Fock, V. 1928. Proof of Adiabatic law. *Z. Physik.* **51**: 165.
- Born, M. and Oppenheimer, R. 1927. Quantum theory of molecules. *Annalen der Physik.* **389**: 457.
- Born, M. 1926a. The Adiabaten principle in the quantum mechanics. *Z. Physik.* **40**: 167.
- Born, M. 1926b. The quantum mechanics of the impact process. *Z. Physik.* **37**: 863; Quantum mechanics in impact processes. *Z. Physik.* **38**: 803.
- Born, M., Heisenberg, W. and Jordan, P. 1926. On quantum mechanics II. *Z. Physik.* **35**: 557.
- Born, W. and Jordan, P. 1925. Zur Quantenmechanik. *Z. Physik.* **34**: 858.
- Born, M. 1924. On quantum mechanics. *Z. Physik.* **26**: 379.
- Dirac, P. A. M. 1925. *Proc. Roy. Soc. (London), A.* **109**: 642.
- Eckart, C. 1926a. Operator calculus and the solution of the equations of quantum dynamics, *Phys. Rev.* **28**: 711.
- Eckart, C. 1926b. Note on the correspondence principle in the new quantum theory, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **12**: 684.

- 厚宇德 2012.《玻恩研究》.北京:人民出版社.
- Heisenberg, W. 1932. Nobel Lectures in Physics 1932. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html.
- Heisenberg, W. 1925. Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanical relations. *Z. Physik*. **33**: 879.
- Jammer, M. 1966. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw Hill Book Company.
- 卡西第 2002.《海森伯传》.戈革译.北京:商务印书馆.
- Mermin, N. D. 2004. Could Feynman Have Said This? *Physics Today*. **57** (5):10-12.
- Mott, N. F. and Massey, O. S. 1987. *Theory of Atomic Collisions*. Oxford University Press, USA.
- Mott, N. F. 1978. *Introduction to Max Born's My Life*. London: Taylor & Francis.
- 派斯 2002.《基本粒子物理学史》.关洪、杨建邺、王自华等译.武汉:武汉出版社.
- 派斯 2001.《玻尔传》.戈革译.北京:商务印书馆.
- Pauli, W. 1926. On the hydrogen spectrum from the standpoint of the new quantum mechanics. *Z. Physik*. **36**: 336.
- 彭桓武 2001.量子理论的诞生和发展——从量子论到量子力学.《物理》**5**: 267.
- 彭桓武、徐锡申 1998.《理论物理基础》.北京:北京大学出版社. 296-298.
- Peres, A. 2002. Popper's experiment and the Copenhagen interpretation. *Stud. History Philos. Modern Physics* **33** (23): 407-418.
- Schrödinger, E. 1926a. *Ann. Physik*. **79**: 361, 489, 734; **80**: 437; **81**: 109.
- Schrödinger, E. 1926b. Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordaschen Quantenmechanik zu der meinen. *Ann. d. Physik*. 387: 734.
- 苏汝铿 1997.《量子力学》.上海:复旦大学出版社.
- 孙昌璞、张芑 2001.量子绝热近似理论与 Berry 相因子:推广和应用.见曾谨言、裴寿镛、龙桂鲁主编《量子力学新进展(第二辑)》.北京:北京大学出版社.
- 孙昌璞 2000a.量子测量问题的研究及应用.《物理》. **29**(8): 10.
- 孙昌璞 2000b.量子退相干问题.见曾谨言等编.《量子力学的新进展》.北京:北京大学出版社.
- 王正行 2004.《量子力学原理》.北京:北京大学出版社. 288.
- Weinberg, S. 2005. Einstein's Mistakes. *Physics Today*. **58**: 31-35.
- Wilczek, F. and Shapere, A. 1989. *Geometric Phases in Physics*. World Scientific.
- 杨建邺 2009.《探上帝的秘密:量子史话》.北京:商务印书馆.
- 杨振宁 2002.沃纳·海森堡(1901-1976).《二十一世纪》(港). **70**: 103-108.
- 杨振宁 2000.《杨振宁文集》.上海:华东师范大学出版社.

Max Born and the Quantum Revolution

SUN Changpu

Abstract: As a pioneer and practitioner of the quantum revolution in the 20th century, Max Born not only creates the Göttingen physics school to bred this scientific revolution, but contributed a lot to quantum mechanics with his own numerous

specific achievements. However, his many important scientific contributions have been ignored for nearly 30 years. In this paper, in the view of contemporary development of quantum mechanics and based on the internal logic of scientific progress, we re-examine Born 's historical role in the founding and development of quantum mechanics, and explore the science sociological reasons that Born 's scientific contributions were ignored. Here, by reconstructing history from logic, we may discover the historical truth of science development, and understand the roles of academic leader and his personality in founding the School of Thought and its doctrine.

Keywords: quantum revolution, Marx Born, Göttingen physics school, sociology of science