

# 玻姆及其量子力学诠释

沈惠川

丁晓清

潘雅君

(中国科学技术大学,合肥 230026)

(上海交通大学,上海 200030)

(中国科学技术大学,合肥 230026)

量子力学的权贵们在大街上迈着方步,向看热闹的人群炫耀着自己的打扮。忽然有人高喊道:“皇帝根本没穿衣服!”这就是玻姆的声音。

——R·坦普尔

当1952年第85卷第2期《物理评论》上两篇题为《关于量子理论“隐”变量诠释的建议》的文章连续发表时,世界惊呆了。哥本哈根学派一片诅咒;素以“上帝的鞭子”著称的泡利迫不及待地说:“这完全是新瓶装陈酒!”那些对哥本哈根学派的专制统治不满并正在酝酿暴动的人们(例如以德布罗意为首的法兰西学派)立即亮出了旗帜。而远在普林斯顿的爱因斯坦则满意地竖起了他那著名的烟斗。

写文章的人是当时名不见经传但已小有名气的戴维·玻姆。

## 一、科学生涯和学术成就

戴维·约瑟夫·玻姆(David Joseph Bohm)1917年12月20日出生于美国宾夕法尼亚州北部一座矿山小城韦尔斯伯勒(Wellsboro),其父原籍奥匈帝国,犹太血统,是一位家具业商人,早年因经营成功而移居美国。少年时代的玻姆就一反家庭的商业传统而对科学发生兴趣。他8岁时开始阅读科普作品,一本关于天文学的书使他浮想连翩。他有时还自己动手设计制作小器械,例如曾做出过一把“不滴水的壶”。因而,他从小就有较强的动手能力。

玻姆的学术生涯是从加州大学伯克利分校开始的。1939年他由宾州大学获学士学位后,立即考上了著名物理学家奥本海默(R. Oppenheimer, 1904—1967)的研究生而来到伯克利·玻姆的量子力学知识来自奥本海默(奥本海默是M·玻恩的学生),在奥本海默的指导下,玻

姆从事有关中子-质子散射理论的研究,于1943年获博士学位。与此同时,玻姆还参加了加州理工大学辐射实验室的研究工作。课题是氟化钠在电弧中电离化的理论研究。该课题与曼哈顿原子弹工程最后几个阶段的任务有关(是从铀238中分离出铀235的子课题)。取得博士学位后,他仍留在这个实验室从事了几年有关等离子体方面的理论研究。1947年,奥本海默推荐玻姆到普林斯顿大学任W·史密斯教授的助理教授,主持等离子体物理和高等量子力学讲座,并指导毕业论文。玻姆在普林斯顿一直待到1951年离开美国。

自1947年至1951年,玻姆完成的科学论文有:《等离子体振荡是宇宙射线粒子加速的原因》、《荷电粒子的自振》、《等离子体理论》、《相对论电流的有限分布》、《核体共振》、《等离子体的边界内效应》等。1948年至1953年,他与皮尼斯(D. Pines,曾是玻姆的早期学生,现为伊利诺伊大学教授)合作,创立了电子相互作用的集体描述方法,引入集体坐标的概念,相当于找到了等离子体波的集体变量。皮尼斯的博士论文《等离子体振荡在电子相互作用中的效应》就是在玻姆的指导下完成的。玻姆和皮尼斯的工作兼容了集体变量和单粒子变量的数学表述形式,这种方法至今仍十分有效。他与皮尼斯在所创立的金属等离子体理论中提出了“无规相近似”,其机理可用于研究密度涨落运动方程和等离子体集体描述,在并可解释等离子体振荡与屏蔽等概念,他们还一同采用了“随机相位近似”法。除了在等离子体方面的工作外,玻姆还撰写过有关高能(同步或回旋同步)加速器方面和星云中电子速度分布方面的学术论文。

在读博士学位时,玻姆就曾同另一博士生

温伯格 (J. Weinberg) 一起讨论过量子力学所包含的哲学含义。在普林斯顿讲授了三年量子力学后, 玻姆觉得自己对量子力学仍理解得不深不透。于是他听从一位朋友迪斯雷利 (B. Disraeli) 的“通晓某一领域的最好方法就是写一本关于它的书”的劝告, 决定撰写《量子理论》。《量子理论》于 1951 年在纽约出版。有关由此而引发的一场争论, 将在下文详述。

1950 年 2 月 9 日, 众议员麦卡锡 (J. R. McCarthy) 在西弗吉尼亚州惠城的一次演说中声称他掌握了 205 名苏联间谍的名单。玻姆作为奥本海默的学生和同事被卷进了调查并被吊销了教学席位。经法律咨询后, 玻姆决定为奥本海默的不主张研制氢弹的第五修正案作辩方证人。一年后, 他的证词被否决, 并被判为蔑视议会罪, 但由于美国法律上有一条“如果是证词自陷法网而本人没有犯罪则不应强迫该人作证”而被免于起诉。这时, 玻姆在普林斯顿的合约期满。奥本海默劝他不要在美国寻找工作。经一位巴西朋友的介绍和帮助, 玻姆被迫流亡到巴西圣保罗大学任教授。

1955—1957 年, 玻姆离开巴西去以色列, 在海法大学任教两年。在此期间, 他出版了另一本著名的书: 《现代物理学中的因果关系和机遇》; 并同莎拉·沃耳夫森 (S. Woolfson) 小姐成婚。莎拉说: “我第一次遇见戴维时, 他义无反顾地真诚地看待每一件事的巨大勇气就已深深打动了。他随时准备正视现实而不论其结局如何。”

1957 至 1961 年, 玻姆在英国布里斯托尔大学威尔斯物理实验室当研究员。在那里, 他接纳了象阿哈罗诺夫 (Y. Aharonov, 现为特拉维夫大学教授) 这样一批年轻人当助手。他与阿哈罗诺夫就 AB 效应问题在《物理评论》上发表了四篇文章。他们的工作, 即使是在量子力学问题上与其意见相左的哥本哈根学派也不得不佩服。

1961 年起, 玻姆成为伦敦大学伯克贝克学院的理论物理学教授, 直至 1983 年退休。在伯克贝克期间, 玻姆的主要合作者是希利 (B. J.

Hiley, 1935 年出生于缅甸仰光, 1962 年在国王学院取得博士学位, 接着便任玻姆的讲师)。

早在 50 年代, 玻姆就开始与法国科学院庞加莱 (H. Poincaré) 研究所的维吉尔 (J. -P. Vigiér) 合作。维吉尔是路易·德布罗意的学生。1954 年玻姆与维吉尔提出过一个无规涨落的液体模型, 1960 年又同维吉尔合作发表《相对论旋子和双局域理论》的论文。之后, 他们两人再加上庞加莱研究所的希利昂 (P. Hillion), 共同发表了《超球相对论旋子的内量子态》。1963 年, 玻姆、维吉尔、希利昂再加上庞加莱研究所的霍尔布瓦克斯 (F. Halbwachs) 和日本名古屋大学的高林武彦 (当时他是客座研究员), 又发表了两篇论文, 题目是《闵可夫斯基 (Minkowski) 空间中相对论扩展粒子的时空模型》。在这一工作中, 甚至德布罗意也参加了进来。

1965 年, 作为杰克逊 (J. D. Jackson) 和皮尼斯编辑的《物理教学笔记与补充丛书》之一, 玻姆出版了《狭义相对论》, 这是他又一本注重物理概念及其整体性的书。1980 年, 玻姆写的另一本哲学味很浓的书《整体性和隐序》也出版了。后一本书见仁见智至今尚有争议。

晚年的玻姆, 仍在思索着、撰写着。近年他与希利正在合著一本新书。1992 年戴维·玻姆因心脏病在伦敦逝世。

## 二、量子势理论

玻姆的成名之作是 1951 年出版的《量子理论》, 以及随之于 1952 年发表的两篇论文《关于量子理论“隐”变量诠释的建议》。后者的基本观点与前者正好相反。

玻姆根据玻尔观点撰写《量子理论》一书前后, 经历了思想上由新观念取代旧观念的根本转折。他写书的目的, 是为了理解量子力学, “但完成后我觉得仍未能真正理解它”。当时, 玻姆将书寄给了玻尔、泡利和爱因斯坦等科学家。玻尔没有作答, 而泡利寄来了热情洋溢的回信, 他说他非常喜欢这本书; “爱因斯坦也同我进行了联系, 他说尽管此书竭尽全力地来阐

述量子理论,但还是不能使他信服;他愿同我讨论这一问题。”

玻姆同爱因斯坦讨论了几次,更加坚定了自己对量子力学的怀疑。“可是有人却说我因为同爱因斯坦对话而动摇了,直到如今还未恢复,这种说法完全是错的。”玻姆很快就提出了量子力学的迹径诠释(即“隐”变量诠释,亦即量子势理论),并将打印稿分送给爱因斯坦、德布罗意和泡利等人。“不久我从德布罗意那里得知他很早以前就提出了这一思想,所以在论文后来的排印中,我曾对此表示感谢。”“泡利回信极力反对,也谈及德布罗意多年前提出过相同的模型,并在索尔维会议上由他证明是错误的。”泡利在这里所指的德布罗意模型,就是德布罗意本人后来也持否定态度的波导理论,而不是双重解理论。因此玻姆的量子势理论,实际上是波导理论的继续。玻姆的打印稿,并未获得德布罗意的支持。德布罗意只是由此重新提出了双重解理论。

泡利的回信促使玻姆提出了量子势的多体问题理论。这就是在《关于量子理论“隐”变量诠释的建议》统一标题下的第二篇论文。在这之后的三、四十年间,玻姆的基本观点没有大的变化,但在一些细节问题上有所修正。例如,他根据贝尔(J. S. Bell, 1928—1990)关于“粒子的变量无所谓隐不隐可言”的说法,将“隐”变量诠释更名为“因果诠释”。(正如洪定国教授所说,玻姆的理论实际上是“非决定论因果诠释”,而不同于德布罗意的“非线性因果诠释。”)又例如他参照阿斯派克特(A. Aspect)等人的实验结果和夸克禁闭问题的研究进展,将自己的理论改为非局域的。

量子势  $Q$  实际上是 1927 年德布罗意在《物质及其辐射的波动力学和原子结构》一文中最先提到的,但其一般易于说明的形式可由马德隆(E. Madelung)的流体力学表象得到。设波函数

$$\psi = R \exp \left( \frac{i}{\hbar} S \right)$$

满足薛定谔方程

物理

$$i\hbar\partial_t\psi = \left( -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V \right)\psi,$$

则很容易得到下列两个方程:

$$\partial_t\rho + \partial_k(\rho v_k) = 0,$$

$$m\frac{dv_k}{dt} = -\partial_k(V + Q)$$

$$\left( Q = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R} \right),$$

其中

$$v_k = \frac{1}{m}\partial_k S, \quad \rho = R^2.$$

显然,前一个方程是流体力学中的连续性方程,而后一个方程很像粒子所服从的牛顿方程。如果将后一个方程也写成流体力学中欧拉方程的形式

$$(\partial_t + v_k\partial_k)v_j = -\partial_j(h + V),$$

则量子势可改写成(等熵)量子焓  $h$  的形式

$$h = -\frac{\hbar^2}{2m^2}\frac{\nabla^2 R}{R}.$$

另一方面,根据巴黎矿业学校法尔格(D. Fargne)教授的说法,量子势  $Q$  又相当于连续介质力学中的应力张量,即有关系

$$-\rho^2\partial_i Q = \partial_k \left[ \frac{\hbar^2}{2m^2} R^2\partial_k(\partial_i \ln R) \right].$$

由该量子势玻姆将自己的基本观点总结如下:

(1) 玻姆同意盖尔曼(M. Gell-Mann)的看法,认为正统量子力学是一门神秘的和令人糊涂的学科;人们知道如何使用它,但谁也无法真正理解它;在描述物理实在方面,它工作得很出色,然而它十分不直观。“事实上,不必告诉我们量子力学有什么毛病,只要看一看量子力学有那么多的诠释,这本身就表明有些东西不太对劲。”玻姆及其合作者希利在说了这一番话之后,列举了玻尔的哥本哈根诠释,冯·诺依曼(J. von Neumann)-维格纳(E. P. Wigner)诠释,埃维惹特(H. Everett)的“多世界诠释”,统计系综诠释,玻姆的迹径诠释和用福克-普朗克方程来描述的随机诠释等六种诠释,并说“在文献中还可以找到更多的诠释,但列举这六种就足以表达我们的观点了。”

(2) 正统量子力学的奠基者们认为,在量子力学的方程式中存在着某种不可避免的东西,特别是当冯·诺依曼宣称证明了一条不可能存在任何“隐”变量理论的定理(该定理后来经贝尔证明是在极苛刻的假设条件下才能成立的)之后,大多数物理学家都对“隐”变量理论持不屑一顾的态度。这些人中的绝大部分实际上对冯·诺依曼定理并没有仔细研究过甚至看都没有看懂过。他们只是主观上先验地认为必有一种深层次的原理会勾消任何“隐”变量理论。玻姆不赞成这一看法。他主张用数学来说话。玻姆的量子势理论成功地捍卫了他的观点。

(3) 正统研究否认描述单个过程演化的可能性,其理由出于所谓的海森伯不确定性。玻姆从理论上区分了物理量概念上的不确定性,干扰的不确定性和人们智力上的不确定性,对说法上有些混乱和使用中更加混乱的海森伯不确定性提出了质疑。他认为描述个体行为的演化是可能的。

(4) 玻姆将玻尔的正统诠释归结为四条结论:决定论必须摒弃;当讨论粒子的干涉性质时,或者跟踪一粒子的径迹,或者观测干涉图样(玻尔语);不存在本体论,只有认识论;没有存在变量,只有观测量。玻姆和希利写道:“对于实际物理学家来说,要严格坚守上述观点是很难的。他们觉得玻尔关于放弃独立实在的号召难于接受,于是他们所做的是离弃玻尔,转而去追随冯·诺依曼。”而在冯·诺依曼的理论中,波函数“似乎以两种不同的方式演化:一是按薛定谔方程正常演化,二是不正常的‘编缩’发生在一次测量过程中。”这第二种非因果过程,即“投影假设”,一直受到维格纳的支持。维格纳认为“在人的精神以某种仍未知的方式干预之前,编缩并不发生”。对于冯·诺依曼-维格纳诠释,玻姆和希利反驳道:“在宇宙的整个早期历史中,不存在人来观测它,它就以一种相对确定的状态演变了。如果人的精神是那样地必要,那么宇宙的演化就是不可能的。”

(5) 玻姆曾提出过一个非线性和非局域的

模型,用于说明自旋测量过程中波色的编缩问题,后来又放弃了。原因是,玻姆学派研究了两类波导理论,他们发现在 BB-M 方程的非线性项 $[-b \ln(a^*|\phi|^2)]$ 中,和在温伯格(S. Weinberg)方程的非线性项 $[\Sigma|\phi|^2]$ 中, $b$ 和 $\epsilon$ 的实验测量值极小,因而得出结论:“对于单一系统来说,非线性项似乎确实很小”。当1986年利奇特(Leggett)提出在多体系统中非线性项将变得十分重要时,玻姆学派考察了含弱联结的超导环实验(其Cooper对可用复杂的波函数来描述);实验结果表明:“对薛定谔方程作非线性修正的论据是微乎其微的。即使在涉及多粒子高度关联的系统的情况中,线性量子力学似乎就是所需要的一切。”当然,仍然存在回到玻尔诠释去的可能性。但是,玻姆认为,“物理学家对于跟一个本质上是认识论的理论打交道并不感到愉快。”

(6) 玻姆同爱因斯坦、德布罗意的区别主要在于,前者认为量子行为是非局域的而后二者认为,量子势的非局域特征与他们的“物理学基本定律必须是普遍局域的”之信念格格不入。玻姆后来总算彻底领悟了爱因斯坦和德布罗意的反对意见,但又坚持认为自己的“权宜之计”可以提供对量子理论更“重要的洞察”,并有助于“保持更深刻地理解量子力学的兴趣”。洪定国教授也认为,“玻姆对量子力学所采取的基本立场,是爱因斯坦观点和玻尔观点的奇妙结合。”玻姆接受了爱因斯坦关于“量子理论不完备”的观点,但没有考虑局域性要求。他接受了玻尔关于“量子现象整体性”的观点,却又不同意“量子理论是完备的”之观点。

(7) 玻姆量子势理论的特点是非决定论的。他认为“海森伯后来放弃了他原先的诠释而采用了玻尔的观点”,“我提出的理论支持海森伯早期提出的理论”,“所以这决不是赞成决定论”。玻姆说:“在许多方面我不喜欢决定论,因为它太僵化;它顽固地、武断地限制了可能性。”在这里,玻姆没有注意到,“非线性”也能提供可能性和复杂性。

此外,玻姆在“组态空间”问题上有与正统

量子力学哥本哈根学派相同的观点,在“量子宇宙论”问题上有与霍金(S. Hawking)学派平行的看法。所有这些问题,都与是否坚持相对论有关。从玻姆的工作和他的言论可以看出,他不是事事处处都坚持相对论的人。例如,他曾说过,爱因斯坦“不可能在每一件事情上都是正确的!”他的合作者希利说得更明确“在量子势方法中相对论不是一种绝对效应,而是作为统计效应出现的。”

### 三、“一匹孟加拉虎”

玻姆的独特立场使他处在哥本哈根学派观点和爱因斯坦-德布罗意观点之间。他除了赞同盖尔曼的观点,部分爱因斯坦观点,部分德布罗意观点,部分海森伯观点之外,几乎反对所有的人。然而,在一些更实际的问题上,玻姆的工作受到了正反两派人物的一致赞赏。这些工作就是前面提到的等离子体理论和 AB 效应。

在量子力学基础理论方面,玻姆也有几件相当出色的工作。其一是双高斯缝背后的粒子迹径系统的计算(实际上该工作是由玻姆的博士生菲力皮德斯(C. Philippidis)、杜奈(Dewdney)及玻姆的合作者希利通过计算机模拟得到的)。它与量子理论所预言的屏上粒子密度分布完全一致。其二是量子势诠释在多粒子系统中的推广。这一推广不仅驳斥了泡利的责难,而且确实也是一种易于计算的“权宜之计”。在德布罗意学派没有找到更好更精确的方法之前,只能利用玻姆的算法。此外,玻姆还论证了满足薛定谔方程的几率分布是稳定平衡,说明了自旋测量过程中波色的“编缩”,并将其推广

到量子场论。玻姆将 EPR 实验简化为自旋相关的做法,至今仍有不同的评价。

玻姆还是一代宗师,且不说他的《量子理论》一书影响了何止千万的青年科学家,就是直接得益于玻姆教诲的著名物理学家就有不少。象皮尼斯、阿哈罗诺夫、希利、菲力皮德斯、杜奈这样的学生和合作者还有不少。例如,剑桥大学霍金学派的中坚人物彭罗斯(R. Penrose)就曾于伯克贝克学院数学系工作期间听过玻姆的课。彭罗斯与希利在学术上有着密切的联系,因而玻姆学派在量子宇宙论方面的工作与霍金学派大致相仿。

玻姆是位和善且不喜夸张的老人,要想从他口中掏出他曾写过什么文章,做过什么工作是很困难的。他的许多轶闻趣事,已被深埋在伦敦郊区爱德瓦尔属于他的那一小片庭院中。如果他不得不外出时,邻居们所能看到的仅仅是一位说话亲切,带有美国口音、态度恭敬的上了年纪的人。

作家坦普尔(R. Temple)说,不要看他腼腆、谦逊、内向、说话慢条斯理,玻姆其实“有着孟加拉虎式的勇猛和坚韧不拔。”因为他敢于对哥本哈根学派说:“长远来看,坚持错觉远比面对事实真相要危险……现在看来,说抓住了终极真理的这种思维从一开始就在玩弄虚假,这就是为什么那些自以为他们掌握了终极真理的人不愿意改变思想的原因。”

笔者之一感谢玻姆教授生前的亲切来信,感谢洪定国教授的来访和一夕无拘无束的切磋。

(上接第 235 页)

杜功焕教授阅读了本文初稿并提出过宝贵意见,作者在此表示感谢。

- [1] R. N. Thurston and K. Brugger, *Phys. Rev.*, **133** (1964), A1604.
- [2] W. Cao, et al., *Phys. Rev. B*, **38** (1988), 10244.
- [3] W. Jiang and M. A. Breazeale, *J. Appl. Phys.*, **68** (1990), 5472.
- [4] 钱祖文,非线性声学,科学出版社,(1990).

- [5] 杜功焕,中国科学(A辑), No. 2 (1989), 156.
- [6] M. A. Breazeale and J. Philip, in *Physical Acoustics* (Ed. W. P. Mason), Academic Press, New York, **17** (1984), 1.
- [7] W. Jiang and M. A. Breazeale, *Frontiers of Nonlinear Acoustics*, Proc. of 12th-ISNA, edited by M. F. Hamilton and D. T. Blackstock, Elsevier Science Publish LTD., London, (1990), 541.
- [8] 姜文华、杜功焕,中国科学(A辑), No. 9(1990), 969.