

# 走向统一的自然力

## 强力、弱力和电磁力的大统一(II)

厉光烈<sup>1</sup> 阮建红<sup>2</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 华东师范大学 200062)

### (2) 量子力学

1923年, 德布罗意提出物质波假说, 随后, 人们通过实验发现: 一束粒子流穿过晶体后能像光一样产生干涉和衍射现象, 从而认识到一切微观客体(包括光子在内)都同时具有粒子性和波动性, 即所谓“波粒二象性”, 在此基础上, 薛定谔于1926年建立了波动力学; 稍前, 海森伯从玻尔的对应原理出发提出了矩阵力学的概念, 之后, 薛定谔证明波动力学和矩阵力学在数学上是等价的; 1926年, 玻恩对德布罗意物质波提出了统计解释, 这样, 描述微观客体运动规律的量子力学便在量子论的基础上完善地建立起来了。

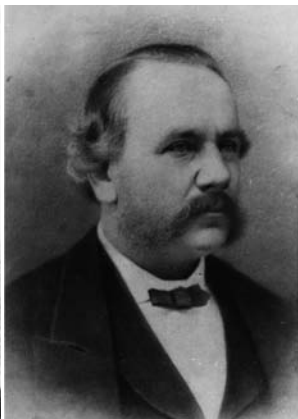
#### 德布罗意物质波假说

阴极射线和X射线的先后发现再次挑起了“波动说”和“粒子说”之争, 只是这次不是针对光, 而是针对“微观客体”。1858年, 德国物理学家普鲁克尔(J. Plücker, 1801~1868)在研究气体放电时, 注意到在放电管正对阴极的管壁上发出绿色的荧光, 进而证明它是因为有一种射线从阴极发出打到管

壁所致。1876年, 另一位德国物理学家哥尔茨坦(E. Goldstein, 1850~1930)研究了这种射线并将其命名为阴极射线, 他还根据这种射线能够引起化学反应判断它是类似于紫外线的“以太波”。在英国, 物理学家瓦尔利(C. F. Varley, 1828~1883)于1871年发现阴极射线在磁场中会发生偏转, 行为与带电粒子很相似; 另一位物理学家克鲁克斯(W. Crookes, 1832~1919)也在实验中证实了阴极射线不仅沿直线行进、能聚焦、在磁场中会偏转, 还可以传递能量和动量, 因此, 他认为阴极射线是一种带电的微粒流——“电原子”。于是, 德、英两国物理学家就阴极射线是“以太波”还是“电原子”引发了新一轮的“波粒之争”。1897年, 英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson, 1856~1940)在阴极射线里发现了电子, 使这场争论暂时告一段落。同样, 在德国物理学家伦琴(W. K. Röntgen, 1845~1923)发现X射线之后, 两位英国物理学布拉格(W. H. Bragg, 1862~1942)和巴克拉(C. G. Barkla, 1877~1944)也就X射线的本性展开了“波粒之争”: 布拉格认为X射线是由



普鲁克尔



瓦尔利



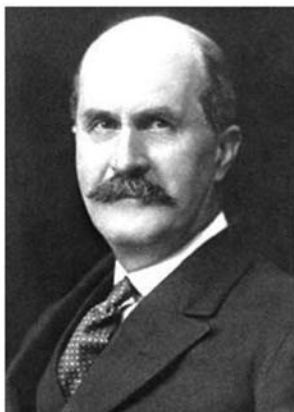
克鲁克斯



J. J. 汤姆孙



伦琴



W. H. 布拉格



巴克拉



劳厄

$\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子组成的带电粒子流；巴克拉则认为 X 射线是光波的一种。1912 年，德国物理学家劳厄 (M. V. Laue, 1879 ~ 1959) 通过在晶体上的衍射实验证实 X 射线具有波动性，确认了巴克拉的看法，因此荣获了 1914 年度诺贝尔物理学奖。布拉格和巴克拉也因从事 X 射线研究分别获得了 1915 和 1917 年度诺贝尔物理学奖。应当指出，早在 1912 年，布拉格就曾预言：问题将不是在 X 射线究竟是“带电粒子流”还是“光波”中决定哪一种，而是要找到一种使它同时具有这两种特性的理论。后来，法国物理学家德布罗意找到了这一理论。

路易斯·德布罗意 (L. de Broglie, 1892 ~ 1987)，1892 年 8 月 15 日出生于法国塞纳河畔迪耶普的一个贵族家庭，父母早逝，从小酷爱读书，进入巴黎大学后，接受的是文科教育，1910 年获得文学学士学位，后受哥哥莫里斯·德布罗意的影响，特别



德布罗意

是阅读了庞加莱的《科学的价值》等书和了解了普朗克、爱因斯坦和玻尔的工作之后，转而研究物理学，1913 年获得理学硕士学位。第一次世界大战后，他拜朗之万 (P. Langevin,

1872 ~ 1946) 为师，攻读博士学位，就在这期间，提出了物质波假说。

1919 ~ 1922 年间，法国物理学家布里渊 (M. Brillouin, 1854 ~ 1948) 提出了一种可以解释玻尔原子模型的定态轨道的驻波理论，他设想原子核周围的“以太”中激发一种波，这种波互相干涉，只有在电子轨道半径适当时才能形成环绕原子核的驻波，因而电子轨道的半径是量化的。受其启发，年轻的德布罗意大胆地将爱因斯坦光量子假说所揭示的光的波动和粒子两重性推广到“微观客体”上去，用以解释上述有关“物质客体”的“波粒之争”。1923 年 9、10 月间，德布罗意在《法国科学院通报》上连续发表了三篇短文：《辐射——波和量子》、《光学——光量子、衍射和干涉》、《物理学——量子气体运动理论以及费马原理》，提出了他的相波理论，并在 1924 年通过的博士论文《量子论研究》中系统地阐述了这一理论。他认为，实物粒子，例如



朗之万



布里渊

电子，也具有与其运动保持相同位相的正弦波，并称这种假想的非物质波为相波，现在人们称其为德布罗意波。应当指出：布里渊的“驻波”指的是电子运动激发的“以太波”而德布罗意波是说电子本身就是波。另外，还要说明：“物质波”这一名称是薛定谔在建立波动力学之后为了解释波函数的物理意义才取的。

德布罗意在回忆他提出物质波假说的思想过程时写道：“如果说在整个 19 世纪讨论关于光的理论时人们过分地倾向于使用波的概念而忽略了‘微粒’概念，那么在讨论关于物质的理论时人们是不是又犯了相反的错误呢？”正是这种类比和逆向思维使他在爱因斯坦和布里渊的工作的启示下提出了微观粒子也具有波粒二象性，即物质波假说，并将爱因斯坦关系：

$$E=h\nu; p=h/\lambda$$

应用于微观粒子。于是，描述具有确定能量  $E$  和动量  $p$  的微观粒子的物质波也应具有确定的频率  $\nu$  和波长  $\lambda$ ，即它的波函数可用平面波表示成  $\psi=e^{i(kr+\omega t)}$  或

$$\psi = e^{\frac{i}{\hbar}(p\cdot r + Et)}$$

圆频率； $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  是约化普朗克常数<sup>①</sup>。显见，描写微观粒子的平面波  $\psi$  既具有典型的“波”的形式，又包含了代表“粒子”特性的能量和动量，也就是说，物质波的波函数很好地反映了微观粒子的波粒二象性。

德布罗意的论文发表后，当时并没有多大的响应，甚至他的导师朗之万也不太相信这种观念，只是觉得他的博士论文写得很出色，才让他获得了博士学位，并将其论文寄了一份给爱因斯坦。没有想到，爱因斯坦看后非常高兴。他意识到，自己创立的有关光的波粒二象性的观念，在德布罗意手里竟扩展到了运动粒子，使其内涵更为丰富。当时，爱因斯坦正在撰写有关量子统计的论文，于是便在其中加了一段介绍德布罗意工作的内容：“一个物质粒子或物质粒子系可以怎样用一个（标量）波场来相对应，德布罗意



玻恩

先生已在一篇很值得注意的论文中指出了。”这样一来，德布罗意的工作才得到了物理学界的普遍关注。

德国物理学家玻恩 (M. Born, 1882 ~ 1970) 也注意到德布罗意的工作，他在哥廷根与夫兰克 (J. Franck, 1882 ~ 1964) 和 埃尔萨塞 (W. Elsasser) 讨论了德布罗意的论文。鉴于德布罗意波的波长只有埃的量级，埃尔萨塞提议用电子在晶体上的衍射来实验证明电子的波动性，玻恩回答说：这就没有必要了，因为戴维逊实验早已证明存在这种预期的效应。玻恩所指的实验，是美国西部电气公司（即后来的贝尔电话实验室）研究员戴维逊 (C. J. Davisson, 1881 ~ 1958) 和他的助手孔斯曼 (Kunsman) 在 1919 ~ 1923 年间所进行的用电子束轰击单晶镍靶的电子散射实验。1927 年，戴维逊接受玻恩建议阅读了薛定谔关于波动力学的论文后，和他的助手革末 (L. H. Germer, 1896 ~ 1971) 在单晶镍靶上又作了电子衍射实验，为德布罗意物质波假说提供了重要证据；同时，在英国，J. J. 汤姆孙的独生子 G. P. 汤姆孙 (G. P. Thomson, 1892 ~ 1975) 在金箔上作了电子衍射实验，也证实了电子具有波动性。至此，德布罗意的理论作为大胆假设而成功的例子获得了普遍的赞赏，荣获了 1929 年度诺贝尔物理学奖，他也是第一个因博士论文而荣获诺贝尔奖的物理学家。戴维逊和 G. P. 汤姆孙也因电子衍射实验共同获得了 1937 年度诺贝尔物理学奖。

1929 年 12 月 11 日，诺贝尔物理学奖委员会主席奥西恩 (Oseen) 在授予德布罗意诺贝尔奖的仪式上发言时想起了一位瑞典诗人的诗句：“我生是一波”，接着，他说：要是诗人说“我是一波”，那就道出了“人



戴维逊



G. P. 汤姆孙



薛定谔

类迄今为止对物质本质的最深刻的认识。”

### 薛定谔波动力学

奥地利物理学家薛定谔(E. Schroedinger, 1887 ~ 1961), 1887年8月12日出生于维也纳一个亚麻油毡厂主的家庭。1906年, 他慕玻耳兹曼之名进入维也纳

大学物理系, 尽管就在那年玻耳兹曼悲惨去世, 但是, 正是玻耳兹曼的统计力学引导薛定谔走上从事物理学研究的道路, 并对其一生影响至深。1910年, 他获得博士学位后留校从事实验物理学研究。第一次世界大战后, 他于1921年受聘任瑞士苏黎世大学数学物理教授, 正是在这所大学里, 他创立了波动力学。

谈到薛定谔创立波动力学, 物理史学家通常会提到德布罗意的博士论文给予他的启示。实际上, 1924年, 当物理化学家亨利(V. Henri)教授将其访问巴黎大学从朗之万那里得到的一份德布罗意的论文带给薛定谔看时, 他曾评论说: “那是胡说!” 只是在看了爱因斯坦第二篇《单原子理想气体量子论》的论文后, 他才认识到德布罗意物质波的真实含义, 在1926年4月23日给爱因斯坦的信中, 他写道: “你和普朗克赞同(德布罗意有关物质波的观点), 对于我比半个世界还有价值, 如果不是你的第二篇关于气体简并的论文使德布罗意思想的重要性恰到好处地引起我的注意



德拜

的话, 全部事情一定还不能、或许永远不能得到发展(我不是说我发展)”当然, 德拜的影响也不能不提, 正是他在得知薛定谔的前述评价后, 找薛定谔讨论德布罗意物质波, 建议他在苏黎世定期召开的讨论会上报告德布罗意的工作, 并在报告后向他

指出: 研究波动就应该先建立波动方程。几个星期后, 薛定谔再次作报告时, 宣布得到了这个方程。

德拜向薛定谔指出的正是德布罗意工作的不足之处: 没有提供物质波在时空中的运动方程。薛定谔先试探将德布罗意关于电子的物质波推广到所有束缚粒子, 获得了成功, 进而他类比光用相对论方法处理原子中的电子, 却因未能引进后来才发现的电子自旋, 所得结果与光谱观测值不符, 使他大失所望。1926年上半年, 他采用非相对论方法, 创立了波动力学, 得到了与原子光谱符合甚好的结果。薛定谔的波动力学主要由四篇题目同为《作为本征值问题的量子化》的论文构成。在第一篇论文中, 他从哈密顿-雅可比方程<sup>②</sup>出发推导出了与时间无关的波动方程, 即现在我们所说的“定态薛定谔方程”:

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E-V)\psi = 0$$

式中 $\psi$ 是波函数,  $m$ 为束缚粒子的质量,  $E$ 和 $V$ 分别表示粒子的能量和位势, 对于氢原子,  $V=-e^2/r$ 。薛定谔认为, 波函数 $\psi$ 表示束缚在原子中的电子的真实波动情况, 这是一个“比那些至今还相当值得怀疑的电子轨道还要真实的过程”, 只要它的单值性和有限性得到保证, 那些神秘的“整数性需要”就“不必再列入方程的规则”之中。他还认为, 既然原子是一个含有多个本征频率的波动系统, 那么量子“跃迁”概念就没有必要了, 玻尔关系:  $\nu=E_1/h-E_2/h$ 完全可以设想为两个本征频率产生的差频, 就像声波中的“拍频”一样。而且, 用波函数描述的电子的“波动”遍布整个四维时空, 是连续进行的。在第二篇论文中, 薛定谔将物质波的相速度和群速度区分开来, 分别描述电子的“波动性”和“粒子性”, 并指出: 宏观运动也是具有波粒两重性的, 只不过因波长相对于轨迹曲率半径可以忽略不计而显现不出而已。因此, 几何光学可以看作是波动光学的近似; 经典力学可以看作是波动力学的近似。1931年, 普朗克对此给予了极高评价: “薛定谔波动方程在现代物理学中起到了由牛顿、拉格朗日和哈密顿在经典力学中建立的方程的同等作用”。在第三篇论文中, 薛定谔引进了与时间无关的微扰理论, 并用来解决氢原子的斯塔克效应, 这是波

动力学最早的应用。接着，在第四篇论文中，他提出了与时间有关的波动方程，即现在我们所说的“薛定谔方程”：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = H\psi$$

式中  $H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$  是描述系统总能量的哈密顿算符。

如何理解薛定谔方程，特别是，如何解释波函数  $\psi$ ？薛定谔自己也不甚清楚。1926年6~7月间，玻恩提出了几率波的概念，对波函数  $\psi$  给出了统计解释。他指出：几率波不同于经典力学中的波，它不携带能量和动量，不能看作是一种物理实体；它只是一种“实在的中间类型”，可以引导定态的出现，而薛定谔称其为电荷密度的  $|\psi|^2$  则表示定态出现的几率。玻恩在这里虽然接受了波动力学的数学形式，但却换上了新的物理内容。正如他所说：“必须彻底放弃薛定谔旨在恢复经典连续理论的物理图像，只保留数学形式，并充实以新的物理内容。”玻恩对  $\psi$  的解释后来成为以玻尔为代表的哥本哈根学派的量子力学统计解释的权威观点，爱因斯坦无法容忍量子力学的这种不确定性，他在给玻恩的信中写道：“我相信，上帝不掷骰子”，薛定谔也不赞同玻恩的观点，他始终站在爱因斯坦一边，与玻恩、海森伯和玻尔等人展开了长期的论争。

### 海森伯矩阵力学

沃纳·卡尔·海森伯 (W. K. Heisenberg, 1901 ~



海森伯

1976)，1901年12月5日出生于德国温兹堡一个知识分子家庭。1920年，刚从大学预科毕业的海森伯前往慕尼黑大学拜访索末菲教授，表示自己想探索、发展爱因斯坦的广义相对论，研究理论物理。索末菲同意他列席高

等讨论班，并从标准物理课中为他选了课。海森伯进入索末菲讲座的第一天便结识了泡利，后来他们成为终身挚友。1922年，玻尔应邀到哥廷根讲学，索末菲带领海森伯和泡利一起去听讲。在演讲后的讨论中，海森伯发表的意见引起了玻尔的关注，并在会后两人一起散步继续讨论。玻尔对海森伯印象深刻，邀请他和泡利在适当的时候去哥本哈根访问，进行合作研究。海森伯随后就去了哥本哈根，开始了他与玻尔及其同事的长期合作。当时，玻尔-索末菲理论虽然取得了令人惊奇的成果，但也遇到严重困难。一方面，它无法解释诸如光谱精细结构、反常塞曼效应和斯特恩-盖拉赫实验等实验现象；另一方面，对应原理的应用没有统一的规则，往往因人因事而异。有人曾这样形容当时物理学家的处境：星期一、三、五用辐射的经典理论；星期二、四、六则用辐射的量子理论。前面谈到，泡利于1924年提出不相容原理，最终导致乌伦贝克 (G. E. Uhlenbeck) 和高德斯密特 (S. A. Goudsmit) 提出电子自旋的假设，使长期得不到解释的上述光谱现象迎刃而解。差不多同时，海森伯创立了“矩阵力学”，克服了后一困难，使量子理论登上一个新的台阶。

1924年，海森伯重访哥本哈根，与玻尔和克拉默斯 (H. A. Kramers, 1894 ~ 1952) 合作研究光的色散理论。在研究中，海森伯发现：不仅描写电子运动的傅里叶展开式中的偶极振幅的绝对值平方决定辐射强度，而且位相也是有观察意义的。由此出发，海森伯进一步假设：电子运动的偶极和多极辐射的经典公式在量子理论中仍然有效，并借助玻尔的对应原理，利



玻尔与海森伯、泡利共同讨论问题

用定态能量差决定的跃迁频率来改写经典理论中电矩的傅里叶展开式。鉴于谱线频率和决定谱线强度的振幅都是可观察量，这样，海森伯就不再需要电子轨道等经典概念，只要引入由频率和振幅组成的二维数集，便可很好地描述辐射。但是，令海森伯奇怪的是，这样做的结果，计算中的乘法却是不可对易的。于是，他把论文拿给他的另一位导师、哥廷根大学教授玻恩，请教有没有发表价值。玻恩开始也感到茫然，经过几天的思索，终于记起这正是大学里学过的矩阵运算，海森伯用来表示观察量的二维数集正是线性代数中的矩阵，“矩阵力学”这一名称便由此而来。玻恩认识到海森伯工作的重要意义，立即推荐发表。另外，玻恩还发现描述位置和动量的无限矩阵也不能互相对易，它们满足正则对易关系：

$$[x, p] = xp - px = i\hbar,$$

于是便着手运用矩阵方法为新力学建立了一套严密的数学理论。一次偶然的机，玻恩遇见了矩阵代数的行家、年轻数学家约丹（P. Jordan, 1902 ~ 1980），便邀请他参与合作研究。1925年9月，两人联名发表了《量子力学》一文，首次给予矩阵力学以严格的数学表述。接着，玻恩、约丹和海森伯三人合作，又写了一篇论文，把以前的结果推广到多自由度和有简并的情况，系统地论述了本征值问题、定态微扰和含时间的定态微扰，导出了动量和角动量守恒定律，以及辐射强度公式和选择定则，还讨论了塞曼效应等问题，从而奠定了矩阵力学的基础。海森伯等人的工作很快得到了英国剑桥大学狄拉克的响应。1925年，狄拉克得知海森伯提出了矩阵力学，立即产生了新的想法：玻恩发现的正则对易关系在数学形式上与哈密顿力学<sup>③</sup>中的泊松括号相当。1925年11月，他以《量子力学的基本方程》为题，运用对应原理，很简单地把经典力学方程改造为量子力学方程。1926年1月又发表《量子力学和氢原子的初步研究》，建立了一种代数方法，用于氢原子光谱，推导出了巴耳末公式。泡利也对矩阵力学的发展做出了自己的贡献。他在《从新量子力学的观点讨论氢光谱》一文中用矩阵力学的方法解决了氢原子能级，得到了巴耳末公式，解释了斯塔克效应。

海森伯在创建矩阵力学时，对形象化的物理图像始终持否定态度，自然也就无法接受由经典力学量“坐标”和“动量”所确定的轨道。通过对云室实验中电子径迹的观察，海森伯发现：那径迹并不是电子的真正轨道，而是水滴串形成的雾迹。鉴于水滴远比电子要大，因此人们观察到的只是一系列电子的不确定的位置，而不是它的精确轨道。海森伯由此想到：在微观世界里，一个电子只能以一定的不确定性处于某一位置，同时也只能以一定的不确定性具有某一动量，可以把这些不确定性限制在最小的范围内，但不能等于零。这就是海森伯不确定性原理的雏形。1927年，他在德国《物理杂志》上发表的一篇题为《关于量子理论的运动学和力学的直观内容》的论文里一开头就说：“如果谁想要阐明‘一个物体的位置’（例如一个电子的位置）这个短语的意义，那么他就要描述一个能够测量‘电子的位置’的实验，否则这个短语就根本没有意义。”后来，在谈到诸如坐标与动量、能量与时间这样一些正则共轭量的不确定关系时，海森伯曾说：“这种不确定性正是量子力学中出现统计关系的根本原因。”那么，不确定性的范围究竟有多大呢？海森伯认为，这只能通过实验来确定。于是，他设想：用一个 $\gamma$ 射线显微镜来观察一个电子的坐标。因为 $\gamma$ 射线显微镜的分辨本领受到入射光波波长 $\lambda$ 的限制，波长 $\lambda$ 越短，显微镜的分辨率越高，测定的电子坐标的不确定程度 $\Delta x$ 就越小，所以 $\Delta x \propto \lambda$ 。但是，从另一方面讲，光照射电子也可看成是光量子和电子的碰撞，波长 $\lambda$ 越短，光量子的动量就越大，电子动量的不确定程度 $\Delta p$ 也就越大，所以 $\Delta p \propto 1/\lambda$ 。这样，海森伯得出： $\Delta x \Delta p \approx h$ 。对此，他写道：“在电子的位置被测定的一瞬间，即当光量子刚好被电子偏转时，电子的动量发生一个不连续的变化，因此，在确知电子位置的瞬间，关于它的动量，我们就只能知道相应于其不连续变化的大小的程度。于是，位置测定得越准确，动量的测定就越不准确，反之亦然。”现在通用的不确定关系式： $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ 是肯纳德（E. Kennard）在发表海森伯论文的德国《物理杂志》的随后一期上给出的，两年后，罗伯森（H. Robertson）借助均方根误差定义不确定量 $\Delta x$ 和 $\Delta p$ ，由正则共轭

力学量  $x$  和  $p$  的厄密性和它们所满足的正则对易关系导出了这一关系式。

海森伯还通过确定原子磁矩的斯特恩-盖拉赫实验分析证明，原子穿过偏转磁铁所费的时间  $\Delta t$  越长，能量测量中的不确定性  $\Delta E$  就越小，再加上德布罗意关系  $\lambda=h/p$ ，便得到  $\Delta E\Delta t>h$ ，于是他得出结论：“能量测定的准确性如何，只有靠相应的对时间的不确定量才能得到。”注意：能量的不确定量  $\Delta E$  可像位置和动量的不确定量  $\Delta x$  和  $\Delta p$  一样借助测量的均方根误差来定义，而时间的不确定量  $\Delta t$  通常则是用粒子衰变的半衰期或传递相互作用的虚粒子的寿命来表示。

玻尔支持海森伯的不确定原理，但不同意他的推理方式，认为应该依据波粒二象性从哲学上加以考虑。1927年，玻尔在“量子公设和原子理论的新进展”的演讲中，提出了著名的互补原理，也称并协原理，较为详细地阐明了他的看法：在物理理论中，平常大家总是认为可以不必干涉所研究的对象，就可以观测该对象，但从量子理论看来却不可能，因为对原子体系的任何观测，都将涉及所观测的对象在观测过程中已经有所改变，因此不可能有单一的定义，平常所谓的因果性不复存在。对经典理论来说，互相排斥的不同性质，在量子理论中却成了互相补充的一些侧面。波粒二象性正是互补性质的一个重要表现。不确定原理和其他量子力学结论也可从这里得到解释。

早在海森伯向约当抱怨“我甚至不知道矩阵是什么”的时候，与海森伯和玻恩同在哥廷根的大数学家希尔伯特就已指出：海森堡的矩阵或许就是某个微分方程的更为有效的一种表现形式。但是，海森堡等不以为然，认为那是“愚蠢的观点，希尔伯特不知道自己在说什么。”但是，就在6个月后，薛定谔就找到了希尔伯特预见的微分方程，创建了波动力学，不仅同样完成矩阵力学所做的事情，而且在数学形式上采用的是人们所熟悉的分析方法。

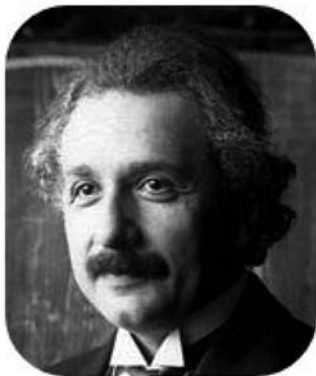
后来，薛定谔还在《论海森伯-玻恩-约当量子力学同我的力学的关系》一文中证明了矩阵力学与波动力学在数学上是等价的。当然，他并不认为两者在物理上也是等同的。实际上，海森伯等反对把因果性和决定论的时空描绘搬进微观领域，而薛定谔则承袭了普朗克-爱因斯坦-德布罗意的思想体系，对微观世界同样采用因果性和决定论的时空描绘。

### 玻恩统计解释引发论争

现在，我们较为详细地介绍玻恩对波函数  $\psi$  的统计解释和海森伯不确定原理所引发的爱因斯坦、薛定谔与玻恩、海森伯和玻尔等之间的论争。

爱因斯坦对量子力学的批评主要是认为量子力学是不完备的，不符合自己根据相对论提出的因果决定论，或称“局域实在论”（Local Realism）：1）物质实体独立于任何测量而存在；2）物质之间的任何影响都是时空局域的，即不能超过光速。它包含两个判据：一是完备性判据——如果一个物理理论对物理实在的描述是完备的，那么物理实在的每个要素都应在其中有它的对应量；另一是实在性判据——当我们不对体系进行任何干扰却能准确地预言某个物理量的数值时，必定存在着一个物理实在的要素对应于这个物理量。爱因斯坦认为，量子力学不满足这些判据，所以它是不完备的。

1935年，爱因斯坦与波多尔斯基（B. Podolsky，1896～1966）和罗森（N. Rosen，1909～1995）在美国《物理评论》第47期上发表了题为“物理实在的量子力学描述能否认为是完备的？”的论文，提出了著名的EPR（Einstein-Podolsky-Rosen）佯谬，论



爱因斯坦



波多尔斯基



罗森

证了量子力学的不完备性。根据海森堡不确定关系，人们无法同时精确地测量微观粒子的位置和动量。于是，他们设想：两个总动量确定的相互作用粒子 A 和 B 形成一个 EPR 对，当它们分开相距很远时，测量 A 的位置可以得到精确值，同时，测量 B 的动量也可以得到精确值，鉴于总动量守恒，因此可以计算出 A 的动量的精确值，也就是说，可以同时精确测量 A 的位置和动量，这样便违反了不确定关系。同年，玻尔在同一杂志随后一期上发表了相同题目的论文，以测量仪器与客体实在的不可分性为理由，否定了 EPR 论证的前提——物理实在的认识论判据，从而否定了 EPR 实验的悖论性质。具体地说，由于粒子 A 和 B 共同组成一个纯的量子态（薛定谔称之为“量子纠缠态”），当你精确测量 A 的位置时，根据不确定关系，必然会影响到 B，即无法精确测量 B 的动量，反之亦然。也就是说，EPR 对的关联性可以在量子力学框架里得到合理的解释。至于定域性疑难，曾有人试图建立量子力学的隐参量理论来取代波函数的统计解释，认为在量子力学中隐藏着某些可以确切描述波函数特性的参量。1964 年，在欧洲核子研究中心（CERN）工作的爱尔兰物理学家贝尔（J. Bell, 1928 ~ 1990）从隐参量存在和定域性成立出发得到一个可供实验检验的不等式，把一个长期争论不休的理论问题，变成一个可供实验判决的问题。随后，克劳泽（J. Clauser, 1942 ~）、弗里德曼（S. Freedman, 1944 ~ 2012）和阿斯佩（A. Aspect, 1947 ~）等人通过一系列实验证明量子纠缠态是非局域的、贝尔不等式不成立，支持量子力学的统计解释，否定了隐参量理论。

为了支持爱因斯坦对量子力学统计解释的批评，薛定谔在 1935 年发表的一篇题为《量子力学现状》的论文中提出了著名的“薛定谔的猫”佯谬。所谓“薛定谔的猫”，指的是：将一只猫放进一个不透明的盒子里，在这个盒子里，还有一个放射性原子核和一个装有毒气的实验装置。如果设想：这个放射性原子核在一个小时内有 50% 的可能性发生衰变，发射出一个粒子去触发这个实验装置，使其释放出毒气，杀死猫，那么，根据



贝尔

量子力学，未进行观察时，放射性原子核处于已衰变和未衰变的叠加态；猫既可能还活着也可能已死去，但是，在一个小时后，打开盒子观察时，只能看到“已衰变的原子核和死猫”或者“未衰变的原子核和活猫”两种情况。这便是薛定谔为了证明量子力学在宏观条件下不具有完备性而设计的一个思想实验，它巧妙地将微观的放射源和宏观的猫联系起来，用以否定宏观世界存在量子叠加态。至今尚有不少实验物理学家试图通过核物理实验来研究这一佯谬。

量子力学作为描述微观客体运动规律的物理理论已经在凝聚态物理、核物理和粒子物理的理论和实验研究中取得了广泛应用，特别是 EPR 佯谬提出的量子纠缠态和被费恩曼认为是“量子力学核心”的“绝对不可能用经典方式解释”的“薛定谔的猫”佯谬所揭示的量子叠加态，也已在现今蓬勃发展的量子通信中获得了成功的应用。

附注：

① 德布罗意在他的论文中曾利用爱因斯坦质能关系  $E=mc^2$ ，并考虑到光子动量  $p=mc$  和频率  $\nu=c/\lambda$ ，由  $E=h\nu$  导出了  $p=h/\lambda$ ，并将爱因斯坦关系改写为  $E=\hbar\omega$  和  $\mathbf{P}=\hbar\mathbf{k}$ ，后人称其为德布罗意关系。

② 哈密顿-雅可比方程是雅可比（K. G. J. Jacobi, 1804 ~ 1851）在哈密顿研究工作基础上在 1842 ~ 1843 年间给出的与描述

系统总能量的哈密顿函数： $H = \sum_{i=1}^n p_i \dot{q}_i - L(q, \dot{q}) = T + V$  有关的一阶非线性偏微分方程，可以用来求解哈密顿正则方程：

$$\frac{\partial H}{\partial q_i} = -\dot{p}_i; \quad \frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i,$$

这里  $q_i$  和  $p_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 分别为广义坐标和广义动量。

③ 哈密顿力学，通常称为分析力学，是牛顿力学的后续发展。

17 ~ 18 世纪，有关“运动的量度”问题，在笛卡尔学派和莱布尼茨学派之间发生了一场旷日持久的争论：前者认为，应从运动量守恒这一基本定律出发，把物体的质量和速度的乘积，即“动量”，作为物体的“运动量”的量度，并通过牛顿第二定律把作为运动原因的“力”表示为“动量”的时间变化率，牛顿力学便代表了这一派观点；后者不同意上述观点，认为应以“能量”或“功”作为物体“运动量”的量度，经过达朗贝尔、拉格朗日和哈密顿等的努力，相继出现了虚功原理、达朗贝尔原理、最小作用原理和哈密顿原理，逐渐形成了代表这派观点的分析力学。

分析力学对量子力学的建立，特别是哈密顿函数、哈密顿正则方程和哈密顿-雅可比方程对于薛定谔方程和矩阵力学的建立，起到了重要的桥梁作用。