

# 量子物理学各发展阶段大事纪要

金尚年

(复旦大学物理系)

## 一、经典物理学的困难和量子论的诞生

在1900年4月27日的一次科学家集会上，以思想保守闻名于世的物理学元老英国的开尔文勋爵 (Lord Kelvin)，作了题为《热和光的动力学理论上空的十九世纪之云》的长篇讲话，对当时物理学的形势作了估计。他认为物理学大厦已全部造成，今后物理学家的任务就是修饰和完善这所大厦。当时，在晴朗天空的边际，还有二朵小小的令人不安的乌云。其中之一是比热和辐射问题，它最终导致了量子物理学的诞生。因此量子物理学的第一个发展阶段应从物理学最早意识到经典物理学内部有无法克服的内在矛盾时起，到大家公认的量子论诞生之日——1900年12月14日德国的普朗克 (M. Planck) 在导出黑体辐射公式时引入量子假设时止。

1859年，麦克斯韦 (J. Maxwell) 提出了著名的气体分子速度分布律的论文。他在这篇文章中写道：“最后……我们证明了这样一个粒子的系统不可能满足两种比热之间众所周知的关系”。“我们知道，我们无法得出正确的答案。”十年以后在一次讲演中他又说：“现在我要在诸位面前提出在我看来是分子理论上所碰到的一个最大困难。”这些话是一个物理学家第一次公开声明经典物理学定律是有错误的，明确指出由于严格证明了的定理与实验不符，存在着一些根本不可能解释的东西。麦克斯韦这里所指的困难是指气体比热和  $\frac{1}{2}kT$  定律之间的矛盾。

1860年，基尔霍夫 (G. R. Kirchhoff) 引进“辐射本领”、“吸收本领”和“黑体”概念，证明一切物体的辐射本领和吸收本领之比与同一温度的黑体的辐射本领相等，黑体的辐射本领只是温度和波长的函数。

1879年，斯忒藩 (J. Stefan) 发现黑体辐射的总能量与绝对温度的四次方成正比的经验定律。1884年，玻耳兹曼 (L. Boltzmann) 从理论上导出了它，从而被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律： $W = \sigma T^4$ 。

1871年，兰利 (S. P. Langley) 在测定热辐射实验技术上有重大突破，为以后精确测定辐射能量分布曲线奠定了基础。

1893年，维恩 (W. Wien) 发表黑体辐射的维恩位移定律： $\lambda_m T = \text{常数}$ 。

1896年，维恩发表了适用于短波范围的黑体辐射的能量分布公式： $\rho = B\nu^3 e^{-\frac{a\nu}{T}}$ 。

1899年，卢梅尔 (O. Lummer) 和普林斯海姆 (E. Pringsheim) 作空腔辐射实验，精确测得黑体辐射能量分布曲线。

1899年5月18日，普朗克在普鲁士科学院的一次会议上宣布黑体辐射能量分布的一个理论公式： $\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_0$ ，式中  $U_0$  是振子的平均能量。但普朗克没有用能量均分定律给出  $U_0 = kT$ 。如果加上了这一点，那就是下面的瑞利-金斯公式。

1900年6月，瑞利 (Lord Rayleigh) 发表了适用于长波范围的黑体辐射公式  $\rho \sim \nu^2 T$ 。当时并没有给出比例常数。

1900年10月19日，普朗克在德国物理学会的会议上提出一个根据实验数据“猜测”出来

的黑体辐射公式： $\rho = \frac{C'\lambda^{-5}}{e^{\frac{C''}{\lambda T}} - 1}$ ，当天晚上经鲁

本斯 (H. Rubens) 证实，该公式和实验结果完全一致。

1900年12月14日，普朗克通过引入振子能量量子化  $\varepsilon = h\nu$ ，由经典电动力学和经典统计热力学，从理论上导出黑体辐射的普朗克公式： $\rho = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$ 。能量量子化突破了经典物理学的连续性原理，量子物理学由此诞生。

1905年，瑞利为他自己在1900年提出的辐射公式规定一个比例常数，但里面错了一个数值因子，随即为金斯 (J. Jeans) 所纠正，从而得此今天被称为瑞利-金斯公式的适合于长波区域的黑体辐射公式： $\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$ 。

## 二、量子论的传播和发展——从孤立的辐射问题变为普遍的量子问题

现在人们一致公认1900年12月14日普朗克提出黑体辐射公式的推导之日是量子物理学诞生之时，普朗克也因此被称为量子论的第一个父亲。但在本世纪初的第一个十年里，情况并不如此，当时多数人仅把普朗克公式作为一个局限于辐射问题的“经验”公式。1908年，达姆斯特德 (Damstaedter) 编写的《自然科学和技术史手册》(第二版) 详尽地列举了1900年全世界120项发现和发明，就没有普朗克的名字。量子论得以传播和发展，并最终得到人们的理解和承认，爱因斯坦 (A. Einstein) 起了主要作用。是爱因斯坦1905年光量子理论和1906年的固体比热理论，才使人们意识到，普朗克公式所涉及的不仅是一个孤立的“辐射问题”，而是带有普遍意义的“量子问题”。1909年在萨尔茨堡举行的德国自然科学家协会第81届大会上，当时因相对论已名蜚世界的爱因斯坦作了题为《我们关于辐射的本质和结构的观点的发展》的报告；1911年在爱因斯坦的参与下，由能斯特 (W. Nernst) 组织发起的、由世界第一流

物理学家参加的、以《辐射理论与量子》为主题的第一届索尔未 (Solvay) 会议，使量子论突破了德语界限，从“德国物理学”走向了全世界。正因如此，爱因斯坦被人们称为量子论的第二个父亲。

1887年，赫兹 (H. R. Hertz) 发现光电效应现象。

1888年，哈尔瓦克斯 (W. L. Hallwachs) 研究光电效应，发现清洁而绝缘的锌板在紫外光照射下获得正电荷，而带负电的板在光照射下失掉其负电荷。

1902年，勒纳德 (P. Lenard) 发表光电效应的经验定律。

1905年，爱因斯坦发表《关于光的产生和转化的一个启发性观点》的论文。该文从分析黑体辐射理论的困难入手，提出单色辐射好像是由一些互不相关的、大小为  $\frac{R\beta\nu}{N}$  的量子所组成的思想，即光量子思想，并用它解释了光电效应等现象。1926年，路易斯 (G. N. Lewis) 把光量子取名为光子。

1906年3月，爱因斯坦发表《论光的产生和吸收》的论文。文中明确指出，他的光量子 and 普朗克的量子是相同的， $\frac{R\beta\nu}{N} = h\nu$ ，普朗克辐射理论所依据的理论基础不同于经典物理学理论，正是暗中引进了光量子假说。

1906年11月，爱因斯坦发表《普朗克的辐射理论和比热理论》的论文。文中指出黑体辐射的能量分布定律“值得引起严重注意，因为它有助于对一系列规律的理解”。并给出了固体比热的第一个量子理论。

1909年9月，德国自然科学家协会第81届会议在萨尔茨堡举行，爱因斯坦在会上作了《论我们关于辐射的本质和组成的观点的发展》的讲演。参加这次会议的还有来自全世界的理论物理学家和实验物理学家。玻恩 (M. Born) 对这次会议的评论是：“到会的学者们给爱因斯坦的成就打上了批准的印记。”

1910年2月，能斯特第一次报道了他花了三年时间所作的低温比热的测量数据，证实了

爱因斯坦的比热公式。

1911年10月29日—11月3日,由能斯特实际组织发起的,由实业家索尔未(E. Solvay)资助的第一届索尔未会议在布鲁塞尔召开。当时最有名的18名物理学家应邀参加了会议。会议的主题是《辐射理论和量子》,它标志着由普朗克创立、由爱因斯坦发展了的量子论已为人们普遍接受。

### 三、量子论从全盛到衰落,最终为量子力学所取代

第一届索尔未会议后,量子论成为全世界物理学家注意的中心,并很快发展到它的全盛时期。其标志是1913玻尔(N. Bohr)原子模型的建立,玻尔也因此被称为量子论的第三个父亲,在这以后,原子物理学家企图用经典力学加量子化条件和对应原理,来建立完整的原子物理学大厦;但除氢原子外,困难重重。矛盾最尖锐的是对反常塞曼效应的解释。今天我们回顾这段历史,可以清楚地看到其中有两大障碍:一是运动学问题,对电子的内禀自由度——自旋还没有认识;二是作为原子领域动力学规律的量子力学还没有建立。经过约六年(1919—1925)时间的摸索,这两个问题分别得到解决。这一进程是这一时期(1911—1925)量子物理学发展的主流。另一方面,这一时期人们也对量子论的起源——普朗克公式的理论基础发生兴趣。理论物理学家从一开始就认识到普朗克导出他的辐射公式时含有内在矛盾:1899年给出公式  $\rho = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} U_0$  时,采用了电磁场能量连续分布的传统观点,而在1900年给出  $U_0$  的表示式时却用了能量不连续的假定。因此人们纷纷对它作进一步的探讨,试图在新的更合理的理论基础上重新导出普朗克公式。这个问题最后是以量子统计理论的建立而得到解决。

1859年,基尔霍夫和本生(R. Bunsen)提出每一元素具有特征光谱线,为光谱分析奠定了基础。

1885年,巴耳末(J. Balmer)发表氢原子巴耳末线系的波长公式。

1890年,里德伯(J. R. Rydberg)发表碱金属和氢原子光谱线通用的波长公式。

1895年,伦琴(W. K. Röntgen)发现X射线。

1896年,塞曼(P. Zeemann)发现磁场使光谱线分裂(正常塞曼效应)。

1896年,贝克勒耳(A. H. Becquerel)发现放射性。

1897年,J. J. 汤姆孙(J. J. Thomson)证实阴极射线是电子,并测定了电子的荷质比;1899年,汤姆孙在报告中正式提出“电子的发现”。电子这个名词是斯托尼(G. J. Stoney)于1891年最早提出来的,用来表示电荷的基元单位。

1897年,洛伦兹(H. A. Lorentz)提出正常塞曼效应的经典理论解释。

1897年12月,普雷斯顿(T. Preston)发现反常塞曼效应。

1903年,卢瑟福(E. Rutherford)和索迪(F. Soddy)发表放射性元素的嬗变理论。

1903年,J. J. 汤姆孙提出原子结构的葡萄干布丁模型。

1904年,长冈半太郎(Nagaoka)发表原子结构的土星模型。

1906年,赖曼(T. Lyman)发表氢原子光谱的赖曼系。

1906年11月,爱因斯坦在《普朗克的辐射理论和比热理论》一文中,首次提出普朗克公式的另一种推导,并指出要克服普朗克理论的内在矛盾,要从对热的分子运动论(指统计方法)的修正着手。

1908年,帕邢(L. Paschen)发表氢原子光谱的帕邢系。

1909年,盖革(H. Geige)和马斯登(E. Marsden)发表关于金属箔使有些 $\alpha$ 粒子产生大角散射的实验,否定了J. J. 汤姆孙原子模型。

1910年,德拜(P. Debye)绕过普朗克理

论中连续和分立的前后矛盾，给出普朗克公式早期最简单、最清晰的一个推导。

1911年，卢瑟福对 $\alpha$ 粒子大角散射实验作出解释，提出原子行星模型。

1913年，斯塔克 (J. Stark) 发现电场使原子光谱分裂的效应。

1913年，玻尔在卢瑟福原子模型、普朗克量子论和里德伯光谱定律等的基础上，分三次发表长篇论文《论原子构造和分子构造》，提出了原子的定态和跃迁的概念，从理论上解释了线光谱起源、原子结构稳定性等理论问题。

1914年，夫兰克 (J. Franck) 和 G. L. 赫兹 (G. L. Hertz) 发表用电子轰击汞气体原子的实验结果，发现电子能量达到某一确定的值时，气体的电离达到某些明显的极大值，直接验证了玻尔原子理论。

1915年，索末菲 (A. Sommerfeld) 推广玻尔理论，得出电子椭圆轨道的量子化条件，解释了巴耳末系的精细结构。

1916年，爱因斯坦发表《关于辐射的量子理论》的论文，利用量子跃迁概念又一次导出普朗克公式；同时提出受激辐射理论，它成为六十年代初蓬勃发展起来的激光技术的理论基础。

1916年，索末菲和德拜证明角动量沿恒定磁场方向的分量是量子化的，从而用量子论解释了正常塞曼效应。

1918年，玻尔发表对应原理，并用来计算谱线强度和选择定则。

1920年，索末菲提出内量子数假设，使量子论对碱金属原子的光谱基本上都可解释，但对反常塞曼效应仍不能解释。

1921年，玻尔提出多电子原子结构理论，解释元素周期律。

1921年，海森伯 (W. Heisenberg) 发表《关于谱线结构与反常塞曼效应的量子论》，提出半整数量子数。

1921年，朗德 (A. Landé) 提出磁场中谱线分裂的朗德因子，在解释反常塞曼效应方面有突破。

1922年，德布罗意 (L. de Broglie) 用“光

分子”气体模型导出普朗克公式。

1922年，斯特恩 (O. Stern) 和盖拉赫 (W. Gerlach) 发表用银原子束在不均匀磁场中的偏转测定原子磁矩的实验结果，证实角动量空间量子化。

1922年，康普顿 (A. H. Compton) 用光量子和电子碰撞的图象解释X射线散射中波长变长的实验结果(康普顿效应)。这个实验使光量子假说得到最后确认。

1924年，玻色 (S. Bose) 发表光量子所服从的统计规则，并用来导出普朗克公式，至此普朗克公式推导中的内在矛盾得到彻底解决；爱因斯坦把玻色的统计规则作了推广，成为玻色-爱因斯坦统计，它是自旋为整数的粒子所服从的统计规则。

1925年1月，泡利 (W. Pauli) 提出不相容原理：在一个原子中不可能有两个或两个以上的电子具有完全相同的四个独立量子数。

1925年1月，克罗尼格 (R. Kronig) 在得知泡利的不相容原理后，把电子的第4个自由度解释为自转角动量，它和后来乌伦贝克 (G. E. Uhlenbeck)、古德斯密特 (S. A. Goudsmit) 发现的自旋基本一样，但由于泡利等人持否定态度，没有公开发表。

1925年7月，海森伯完成第一篇关于矩阵力学的文章，量子力学宣告诞生。

1925年10月，乌伦贝克、古德斯密特发表电子自旋的文章，并迅速得到玻尔、海森伯的赞同。

1925年12月，托马斯 (L. H. Thomas) 计算自旋轴作进动的角速度，解释了克罗尼格、乌伦贝克和古德斯密特的工作中共同缺少的一个因子2，至此自旋为除泡利外的所有物理学家所接受，反常塞曼效应也不再成为一个无法解释的问题。

#### 四、量子力学理论的迅速完善和向纵深发展

1925年，自旋的发现和量子力学的建立，

扫清了原子物理学发展道路上的两大障碍。1925—1927年,仅二年多时间,量子力学迅速发展成为一个完整的理论,其主要内容可概括为:矩阵力学、波动力学、波函数的几章解释、变换理论、测不准关系、互补原理。在这以后,量子物理学的主流迅速向纵深发展。一方面是理论上的拓广:从非相对论到相对论,从单粒子到多粒子,从有限自由度的粒子系到无限自由度的场。另一方面是量子力学广泛应用于解决原子领域的实际问题,成为原子核物理、固体物理等现代物理学各学科最强有力的理论武器。

1923年9—10月,德布罗意接连发表《波和量子》、《光量子、衍射和干涉》、《量子、气体运动理论以及费马原理》三篇短文,提出他自己称之为相波理论的实物粒子特别是电子具有波动性的思想。这三篇论文后来成为他1924年博士论文《量子理论的研究》的基础,开创以学位论文获诺贝尔(A. Nobel)物理学奖的先例。

1925年7月,海森伯发表一篇题为《运动学与动力学关系的量子理论再解释》的论文,紧接着玻恩和约尔丹(P. Jordan)发表了《关于量子力学》的论文,玻恩、海森伯和约尔丹发表了《关于量子力学II》的论文。这三篇论文构成后来被称为矩阵力学的量子力学的第一种形式。

1925年10月,泡利用海森伯的量子力学成功地解决了氢原子的各种问题,其中包括旧量子论无法解决的交叉电场和磁场中的氢光谱问题。这篇论文于1926年初以《新的量子力学观点处理氢的光谱》为题发表,它令人信服地表明新的量子力学较旧量子论优越,对矩阵力学的发展起了重要的支持和促进作用。

1925年11月,狄喇克(P. A. M. Dirac)发表题为《量子力学的基本方程》一文,把海森伯的矩阵力学纳入泊松括号的形式。

1926年1—2月,薛定谔(E. Schrödinger)接连完成题为《作为本征值问题的量子化》(I)和(II)两篇论文,并随即发表。这两篇论文构成量子力学的第二种形式——波动力学的基

础。

1926年3月,薛定谔完成并立即发表《论海森伯、玻恩、约尔丹的量子力学和薛定谔量子力学的关系》一文,证明波动力学和矩阵力学是一致的,可互相变换。泡利等人也同时独立地证明了这两种力学的等价性。

1926年薛定谔继续发表《作为本征值问题的量子化》(III)和(IV)两篇论文,分别提出定态微扰理论和含时微扰理论,并用来计算斯塔克效应等具体问题。

1926年6月,玻恩在一篇题为《散射过程的量子力学》的论文中,提出波函数的几率解释,得到多数物理学家的赞同。

1926年狄喇克接连发表《量子力学对氢原子的初步研究》、《量子代数》、《量子力学理论》、《量子力学的物理解释》等论文,给矩阵力学以物理解释,发展了一套将矩阵力学和波动力学融为一体的、与玻恩关于波函数的几率解释相容的系统的量子力学理论体系,其中包括普遍变换理论和狄喇克符号。这些内容于1930年整理成书,以《量子力学原理》为名出版。这是第一本量子力学的教科书,是目前多数量子力学教材的原始蓝本。

1926年,费米(E. Fermi)、狄喇克分别独立发表自旋为半整数的微观粒子所服从的统计规则——费米-狄喇克统计。

1927年,海森伯发表测不准关系。

1927年,玻尔提出互补原理。

1927年,泡利按照量子力学的范式引入能描述电子自旋性质的泡利矩阵。

1927年狄喇克引入玻色体系的二次量子化,约尔丹、维格纳(E. P. Wigner)引入费米体系的二次量子化。

1927年,戴维逊(C. J. Davisson)、革末(L. H. Germer)和G. P. 汤姆孙(G. P. Thomson)分别用实验获得电子的衍射花样,证实电子具有波动性。在这以后,德布罗意波就被普遍地称为物质波

1928年,狄喇克发表相对论电子波动方程——狄喇克方程,把电子的相对论运动和自

旋、磁矩自动联系起来。

1928年伽莫夫(G. Gamow)、格尼(R. Gurney)和康登(E. U. Condon)分别发表根据量子力学导出的盖革-努塔耳定律,证明量子力学可用到原子核问题上。

1928年,海森伯用量子力学交换能解释铁磁理论。

1929年,海森伯和泡利提出相对论量子场论。

1929年,爱因斯坦提出统一场论。

1931年,狄喇克发表磁单极子理论。

1948年和1950年,费曼(R. P. Feynman)根据1932年狄喇克最初提出的思想,先后发表《非相对论量子力学的时空研究》和《电磁相互作用量子理论的数学表示》两篇论文,建立了第三种非相对论量子力学的理论形式:量子力学的路径积分形式。它特别适用于推广到场的量子理论。量子力学的路径积分形式和经典力学的哈密顿原理相当,而矩阵力学和波动力学与经典力学的泊松括号和哈密顿-雅可比形式相当。量子力学方程的三种形式正好和经典力学方程的三种形式一一对应,这是饶有趣味的。

1948—1949年,许温格(J. S. Schwinger)、朝永振一郎(Tomonaga)和费曼分别完成量子电动力学(QED)的完整理论,成功地解释了1947年发现的氢原子谱线的兰姆位移,使量子物理学的理论达到高度完美的程度。

## 五、量子力学诠释之争的演变和发展

由于量子力学理论能很好解释原子领域的物理现象,对一个物理学家来说,不论他是否喜欢这一理论,必须得承认它,应用它。但对它的理论基础的 understanding,从一开始物理学家就存在激烈争论。在早期,这一争论对量子力学理论的迅速完善有重要的积极作用。以后,这一争论几经起伏,尽管形式不断有所变化,但到目前还在继续发展。

1926年,薛定谔的物质波诠释。薛定谔建立了波动力学并证明和海森伯的量子力学等价

后,物理学家对量子力学理论的理解,集中在对波函数 $\psi$ 的诠释上。薛定谔本人对 $\psi$ 的诠释是:物理客体就是波本身,粒子是波包;波动力学本征值所表示的能量、动量等物理量都是统计的量,这种统计是系综统计。

1926年,马德隆(E. Madelung)的流体力学诠释。他将复波函数改写为 $\psi = \alpha e^{i\beta}$ ,式中 $\alpha, \beta$ 为实函数,代入薛定谔方程得到 $\alpha, \beta$ 所满足的两个方程:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\alpha^2 \nabla \varphi) + \frac{\partial \alpha^2}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 + \frac{V}{m} - \frac{\nabla^2 \alpha}{\alpha} \cdot \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m^2} = 0, \end{cases}$$

式中 $\varphi = -\frac{\hbar}{2\pi m} \beta$ 。这两个方程和理想流体的动力学方程一样, $\alpha^2$ 相当于流体的密度, $\varphi$ 相当于流体的速度势。因此马德隆认为量子力学就是质量和电荷的连续分布的流体力学。这是一种纯经典诠释。

1926年,德布罗意的双重解诠释。德布罗意于1923年提出的相波,按其本意是非物质的,所以他并不同意薛定谔的物质波诠释。他一直认为波和粒子都是物理客体。量子力学建立后,他提出了波函数的双重解理论。他认为薛定谔方程有两种解。对于正常解,他同意玻恩的几率诠释。另外还有一个奇异解,它含有一个移动的奇点,这个奇点具有粒子的性质;正常解引导奇点的运动。

1927—1930年,爱因斯坦与玻尔的争论和哥本哈根诠释的确立。1927年10月在第五届索尔未会议上,爱因斯坦和玻尔对量子力学的诠释,爆发第一次公开争论;接着在1930年10月的第六届索尔未会议上,双方又爆发了一场激烈争论。两次会上爱因斯坦都集中攻击测不准关系,但结果都以失败告终。这以后量子力学的哥本哈根诠释(波函数的几率解释、测不准关系、互补原理等),就成了量子力学的正统诠释,被迄今为止的大多数量子力学教材所采用。爱因斯坦从此也承认现行量子力学理论在逻辑上是自洽的,测不准关系是成立的。

1931年,冯·诺依曼(J. von Neumann)

的《量子力学的数学基础》一书出版，提出了严格的公理化的量子力学理论的表述形式。他认为物理学家对量子力学诠释之争的核心，在于量子力学是否象经典统计理论一样，允许存在一种隐变量。他在四条可认为是公理的假定下，证明量子力学的隐变量理论是不可能存在的。

1935年，爱因斯坦、波道尔斯基 (B. Podolsky) 和罗森 (N. Rosen) 著文对量子力学的理论基础提出新的争议，认为波函数所提供的关于物理实在的量子力学描述是不完备的。它被称为 EPR 争议，对以后量子力学非正统解释的发展有很大影响。

1952年，玻姆 (D. Bohm) 的隐变量理论。量子力学诠释之争在第二次世界大战期间是一个低潮。战后百废俱兴，对量子力学基础的理论研究再度复兴。1952年，玻姆追随 EPR 争议的思想，提出一个具体的隐变量理论，把薛定谔方程看成是在经典力学方程中再加上一项量子势  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$ ，式中  $R$  由变换  $\psi = R e^{i\frac{S}{\hbar}}$  决定，其中  $S$  即为经典作用量，相应的量子化的牛顿力学方程为

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\nabla \left( V(\mathbf{r}) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \right).$$

由此可定义单粒子的轨道，粒子的动量则由  $\mathbf{p} = \nabla S$  决定。

1964年，贝尔 (J. S. Bell) 不等式。贝尔追随冯·诺依曼隐变量不存在思想，仔细分析了 EPR 争议和玻姆的隐变量理论，提出了一个可用实验检验的不等式。这个不等式可简化为

$$|-\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}| \leq 1 - \mathbf{b} \cdot \mathbf{c},$$

式中  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  是实验可测定的单位矢量。他的结论是：若上述不等式恒成立，则定域的隐变量理论可能存在。显然上式不是对任何单位矢量都成立。例如，若取  $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{b} - \mathbf{c}}{|\mathbf{b} - \mathbf{c}|}$ ,  $\mathbf{b} \perp \mathbf{c}$ ,

则由贝尔不等式可导致  $\sqrt{2} \leq 1$  的错误结论。

1970—1982年，贝尔不等式的实验验证。

贝尔不等式提出后，迄今已有三种类型的 12 个实验结果(见表 1)：

表 1

作者	方法	时间(年)	结论
Kasday, Ullman, 吴健雄	$e^+e^-$ 湮灭辐射 ( $^{22}\text{Na}$ )	1970	与贝尔不等式不符; 与量子力学一致
Freedman-Clauser	原子级联辐射 (Ca)	1972	
Holt, Pipkin	原子级联辐射 ( $^{198}\text{Hg}$ )	1973	与量子力学不符
Faraci, Gutkowski, Notarrigo, Pennisi	$e^+e^-$ 湮灭辐射 ( $^{22}\text{Na}$ )	1974	
Fry, Thompson	原子级联辐射 ( $^{200}\text{Hg}$ )	1976	与贝尔不等式不符; 与量子力学一致
Clauser	原子级联辐射 ( $^{200}\text{Hg}$ )	1976	
Wilson, Lowe, Butt	$e^+e^-$ 湮灭辐射 ( $^{64}\text{Cu}$ )	1976	
Lamehi-Rachti, Mittig	s 波 p-p 散射	1976	
Bruno, d'Agostino, Maroni	$e^+e^-$ 湮灭辐射 ( $^{22}\text{Na}$ )	1977	
Aspect, Grangier, Roger	原子级联辐射 ( $^{40}\text{Ca}$ )	1981	
Aspect, Grangier, Roger	原子级联辐射 ( $^{40}\text{Ca}$ )	1982	
Aspect, Dalibard, Roger	原子级联辐射 ( $^{40}\text{Ca}$ )	1982	

实验倾向于贝尔不等式不成立，即定域隐量理论不可能存在，但不排除非定域的隐变量理论可能存在。

### 参 考 文 献

- [1] R. P. 费曼, 费曼物理学讲义(第一卷), 上海科学技术出版社(1983), 398.
- [2] 陆琰, 科学, 37-2(1985), 67.
- [3] 顾国庆、金尚年, 物理学记事年表, 中国大百科全书·物理卷(待发表).
- [4] A. 赫尔曼, 量子论初期史, 商务印书馆(1980).
- [5] 金尚年、田卫东, 物理, 14(1985), 121.
- [6] M. Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics, McGraw-Hill, New York (1966).
- [7] M. Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, John Wiley & Sons, New York (1974).
- [8] 许良英等编译, 爱因斯坦文集(第一卷、第二卷、第三卷), 商务印书馆, (1977, 1979, 1979).
- [9] 戈革, 尼耳斯·玻尔——他的生平、学术和思想, 上海人民出版社, (1985).
- [10] J. Mehra, H. Rechenberg, The Historical Development of Quantum Theory Vol. 1-4, Springer-Verlag, New York, (1982).