

量子力学新进展

第二辑

曾谨言 裴寿镛 龙桂鲁 主编

北京大学出版社

量子力学新进展

(第二辑)

曾谨言 裴寿鏞 龙桂鲁 主编

北京大学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

量子力学新进展. 第2辑/曾谨言, 裴寿镛, 龙桂鲁主编. —北京:
北京大学出版社, 2001

ISBN 7-301-05250-2

I. 量… II. ①曾… ②裴… ③龙… III. 量子力学-研究-
进展-中国 IV. 0413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070477 号

书 名: 量子力学新进展(第二辑)

著作责任者: 曾谨言 裴寿镛 龙桂鲁 主编

责任编辑: 周月梅

标准书号: ISBN 7-301-05250-2/O·0315

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑部 62753160

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 印 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

850×1168 32 开本 12 印张 310 千字

2001 年 10 月第 1 版 2001 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

序 言

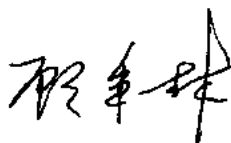
2000年12月,在北京中国科技馆举办了纪念量子论创立100周年学术报告会。一百年前的12月,普朗克教授在柏林德国物理学会宣读了他的划时代论文《论正常光谱能量分布定律》,提出了能量量子化的概念,并由此从理论上导出了他在此前不久所发现的与实验非常符合的黑体辐射定律,从而创立了量子论。后经过玻尔、爱因斯坦、海森伯、薛定谔、玻恩、约当和狄拉克等杰出物理学家的努力,建立了量子力学的理论体系。20世纪,量子力学相继在原子和分子、固体和液体、原子核、基本粒子等各种体系中应用,都取得了巨大的成功。可以毫不夸张地说,20世纪的科学是量子力学的科学。

量子力学的发展过程中一直充满了激烈的论争。历史上,以爱因斯坦和玻尔为代表的双方,在量子力学的基本问题上就曾展开过激烈的论争,这种论争对量子力学的发展起到了巨大的推动作用。但由于争论的关键问题在当时尚无实验检验,长期以来还停留在思辨性争论。近年来,一方面是由于实验技术的进展,关于量子力学基本概念的一些论争已经可以用实验来直接检验,另一方面是由于量子信息科学的发展,重新激发了人们对这些问题研究的热情。现今,这些基本问题不再是局限于少数几个科学天才的论争,而是具有巨大的应用潜力。量子计算机的潜在的巨大能力,促使西方发达国家投入了大量的人力和物力开展研究,得到了迅速的发展。1935年爱因斯坦等反驳量子力学正统诠释而提出了EPR佯谬中所指出的量子力学的奇特性质,即纠缠态所展现的非局域关联,现在已经被实验证实,并且在量子信息、量子计算、密集编码、量子离物传态等中得到了广泛的应用。

量子绝热近似方法是量子力学的一个重要发展,在量子信息和量子测量理论中有重要的应用。对称性理论在量子力学和近代物理学的发展中起到了巨大的作用,最近在这一领域有了重要的发展,如

Yangian 代数、非线性代数方法。这些新的发展丰富了量子力学的内容。现在非常需要一本介绍这些重要的研究进展的专著。我非常高兴地看到《量子力学新进展》这一系列专著起到了这样的作用,现在它的第二辑即将出版。本辑汇集了我国在上述研究领域的几位专家所撰写的文章,介绍国际上这些领域的最新发展以及他们自己的最新研究成果。这里有何祚庥院士撰写的纪念量子论发现 100 周年的专门文章《纪念普朗克发现量子论 100 周年》,孙昌璞教授等的《量子绝热近似理论与 Berry 相因子》,彭堃堉教授的《利用明亮 EPR 光束实现量子密集编码和量子离物传态》,曾谨言、裴寿镛教授等的《量子离物传态与纠缠态的结构》,龙桂鲁教授等的《量子纠缠及其在量子信息中的应用》,张永德教授等的《量子纠缠与空间非定域性》,葛墨林教授等的《从 $^{87}\text{Rb}_2$ 的奇怪简并读出 Yangian》,阮东教授的《量子力学中的非线性代数方法》等 8 篇文章,从多个角度对量子力学近几年的发展进行了专门的评述。相信这个专辑必然会对从事量子力学和量子信息研究的广大科技人员、研究生和高年级本科生起到有益的作用。

量子力学是一门发展中的科学,量子信息的研究正方兴未艾。回顾过去一个世纪,在量子力学的创始阶段,我国正处于帝国主义列强侵略和军阀混战的贫穷落后时期,民不聊生,根本谈不上科学研究。解放后,在十年动乱期间,我们又失去了许多发展良机。改革开放后,我国的经济取得了持续高速发展,特别是最近党和国家实施科教兴国的战略方针,我们具有了前所未有的发展条件。相信我国的科学家一定会在量子力学的这一新的发展阶段中作出重要的贡献。



中国科学院院士
清华大学物理学教授
清华大学副校长

目 录

序言	顾秉林(1)
纪念普朗克发现量子论 100 周年	何祚麻(1)
量子绝热近似理论与 Berry 相因子:	
推广和应用	孙昌璞 张 芃(21)
利用明亮 EPR 光束实现量子密集编码	
和量子离物传态	彭堃堦(87)
量子离物传态与纠缠态的结构	
.....	曾谨言 朱红波 裴孝鏞(126)
量子纠缠及其在量子信息中的应用.....	龙桂鲁 李岩松
曾 蓓 刘晓曙 肖 丽(189)	
量子纠缠与空间非定域性.....	陈增兵 逯怀新
吴盛俊 张永德(260)	
从 $^{87}\text{Rb}_2$ 的奇怪简并读出 Yangian	葛墨林 白承铭(323)
量子力学中的非线性代数方法.....	阮 东(344)

纪念普朗克发现量子论 100 周年

何祚麻

中国科学院理论物理研究所 北京 100080

摘 要

本文简要地回顾了普朗克发现量子论以及由量子论发展为量子力学的简明历程,以及量子力学对科学和人类历史的贡献.本文还讨论了科学创新的评价标准问题,指出量子力学应得到最高的评价,亦即是美学评价标准、学术评价标准和实践评价标准的统一.

本文还讨论了江泽民主席所提出的“三个代表”的理论,指出这一理论应成为评价一切科学工作的根本标准,也是评价我国各方面工作的根本标准.

本文还指出,我国科学工作除了要集中力量于解决足以影响国民经济或国防建设的全局的 8~10 个重大科学技术问题外,还要集中一定的力量于“以探索物质运动基本规律为目的并且看起来是‘无用’的基础研究”.当前正在发展中的物理学的第四次大突破,就是值得关注的问题之一.

最后本文还指出,自 1985 年以来,我国基础研究已由占 R&D 支出的 5%下降到 1.5%!然而不论是发达国家或发展中国家,其基础研究一般都约占 R&D 的 10%~15%.

在 100 年前的今天,也就是 1900 年的 12 月 14 日,普朗克宣布发现了量子论.今天我们大家聚集在北京的中国科技会堂,共同纪念这一划时代的伟大的发现.

下面将扼要地介绍一下量子论的缘起以及由量子论到量子力学的发生发展过程.

一、历史的回顾

1. 光量子说出现以前的有关光的本质的理论——从微粒到波动

19 世纪的物理学,以场的概念的确立获得巨大胜利而告终。由于电磁论代替了机械论,人们就开始转而塑造一幅由带电粒子如质子、电子等及其电磁相互作用来解释自然的新图象。然而在这一电磁图象中,粒子是粒子,场是场,连续形态的物质和不连续形态物质间还存在一道鸿沟。

自 20 世纪开始,在人们对物质形态的认识上,又掀起了一场革命,这就是光量子说的出现。

在物理学发展的历史上,曾经有一场历时数百年之久的、关于光的本质的争论:光是微粒,还是波动?为了解决这一著名的争论,法国科学院甚至悬赏公开征求解答。

统治着 17—18 世纪的观点是原子论,很自然地,这一观念也用来解释光的现象。光是沿直线进行的,光在遇到障碍物后,就出现了阴影。这极易引导人们设想到光是一连串的微粒。光的微粒说的创始人,可以上推到古希腊的德谟克利特,他认为光是一束从发光体运动到眼睛的微粒。为微粒说奠定基础的,却是牛顿。正是牛顿用他的力学定律解释了一系列有关光的现象,如反射、折射等,如反射就被归结为微粒的弹性碰撞。

对于微粒说持不同意见的人,是和牛顿同时代并且还略早一些的惠更斯。1690 年,惠更斯把光解释为类似于声波进行的一种纵波。惠更斯还证明了,这种光波会在一定条件下作直线运动,而且也会遵守反射定律和折射定律。当然,这种光波也会“绕过”障碍物,如果这种障碍物的尺度和波长相当的话。

但是,大多数人都支持微粒说,因为只有粒子才能给出清晰的阴影,更重要的是由于牛顿的崇高威望。在托马斯·杨的有关光的干涉实验出现以前,波动学说被忽视了整整达一个世纪之久!

惠更斯的光波是纵波，杨却建议改为横波。横波学说的最大胜利是能解释光通过冰州石时出现的双折射现象，这无论是微粒说还是纵波说都不能解释。然而为波动说奠定基础的却是实验：光通过障碍物的绕射的实验、光波的干涉实验等。

但是，波动学说对微粒学说取得的胜利，却并非是一帆风顺的。

相传在 19 世纪初叶，在巴黎科学院的某一次年会上，物理学家兼数学家泊松和物理学家菲涅耳之间，就微粒说和波动说的争议展开了一场争鸣。菲涅耳是横波学说的拥护者和奠基者，而泊松却是微粒学说的热烈的支持者。在年会上，两人各自就所赞成的学说提出他们的论据。泊松用来反驳波动学说的一个重要论据是：如果从菲涅耳所主张的波动学说出发，应该可以作出以下推论，就是利用波动学说的数学公式，可以计算出一个点状光源所放出的光可以绕过一个圆盘而聚焦在圆盘阴影后面的中央。但是，在泊松看来，这一推论和光线沿直线进行的现象是相冲突的。因而，泊松就据此指出波动学说的错误。然而不久，菲涅耳却按照泊松所指出的这一推论，做了一个实验，实验结果表明，在圆盘阴影后面的中央，果然存在着一个亮点！乍一看来，这是波动学说的胜利。然而泊松并不因此而折服，他指出这一现象也可以用微粒学说来解释。按照微粒学说，光的微粒在走过圆盘的边缘时，将受到圆盘对微粒的吸引力的牵引（如万有引力）而改变了前进的方向，最后就聚焦在圆盘中央。圆盘衍射的实验固然说明波动学说是正确的，但并不能排斥微粒学说的正确性，而一个学说的最终胜利，必须找出足以完全判别是非的判决性实验。

所以，虽然在法国科学院的年会上从泊松和菲涅耳的辩论看，波动学说仿佛是取得了胜利，但却没有取得最终的胜利。后来，菲涅耳又进行了一个由两面镜子同时反射一个光源而发生干涉现象的实验，这已无法再用微粒学说来解释。由于实验上出现了这种确证，波动学说取得了最后的胜利。

然而波动学说的胜利也带来了一个理论的难题,那就是横波的光是怎样振动的.在早期的波动学说中,无疑只是假设光是“以太”的振荡.如果“以太”是某种气体,或是液体,那么解释可能产生的纵波将没有困难.可是光波却是横波,横波的产生必须有剪切力,这就要求“以太”是透明的固体.而由于光速的巨大,那么“以太”还必须是非常坚硬的固体.但如果“以太”是坚硬固体的话,行星又如何能绕太阳而运动?!

所以,波动学说虽然在解释有关光的种种实验现象上取得了巨大成功,但并没有能解决理论上的矛盾.

2. 从波动学说光量子说

爱因斯坦的狭义相对论完全解除了“以太”观念的束缚.由麦克斯韦方程中的介电常数和介磁常数所导出的电磁波的传播速度,进一步又由高精度的实验,证明和高精确度测定的光速 c 完全一致,这就确凿无疑地证明了光是电磁波.但是随着光的电磁理论的胜利,却又出现了新的观念,这就是 1900 年,德国物理学家普朗克所提出的光量子的假说.

19 世纪末期,实验已经能对热辐射所产生的光谱及其强度的分布进行精密的测定,19 世纪末叶,瑞利和金斯曾经试图用经典统计力学从理论上说明这一热辐射光谱(又名黑体光谱),却只能在光谱的长波方面和实验结果符合一致,在短波方面却完全不符合.维恩虽导出一个只符合于短波波长分布的公式,而在长波方面又完全不符合.普朗克注意到,如果认为原子不是连续地而是断续地放出和吸收能量,或者说,把“粒子”的性质赋予光的吸收和放射的话,那么他将能推导出首先利用“内插法”所猜测到的那个普朗克辐射公式,并和瑞利或维恩公式中的正确部分相一致.但是这种思想和当时已知的经典电磁理论相差太大,以至于普朗克自己也不相信这一观念.但是在 1900 年的夏天,普朗克对这一问题作了精心的研究后,确信“能量子”的观念成立,亦即

$$\text{能量子} = h\nu,$$

其中 h 是普朗克常数, ν 是光的振动频率, 这一观念的出现已是不可回避的了。

1905 年, 爱因斯坦继承了普朗克所提出的这一革命性的观念, 用以解释当时的电磁理论所不能完全解释的光电效应, 亦即在光的照射下, 由金属逸出的电子的能量和光的强度无关, 但和波长有关。爱因斯坦指出, 如果接受了普朗克的光量子的假说, 那么将能很自然地解释光电效应。爱因斯坦因此而获得了诺贝尔奖。

首先把光看作是某种以光速 c 在真空中运动的粒子亦即光量子的, 是爱因斯坦。正式赋予光子这一名称的是康普顿。1923 年, 康普顿在测量 X 射线和某些物质的散射时, 发现某些散射后的 X 射线的波长变长了。康普顿为了解释这一现象, 就除了假定光子的能量

$$E = h\nu$$

以外, 还吸收了 1917 年由爱因斯坦对光子还具有动量 p 的假定, 亦即

$$p = h\nu/c,$$

这样, 光子就被看成为既具有确定能量, 又有确定动量的完整的粒子。如果令这一粒子和静止中的电子发生完全的弹性碰撞, 就可以发现碰撞后的光子的能量和动量都有了改变, 亦即相应的波长有了改变, 其数值恰好就是康普顿在实验上测量到的数值! 后来, 康普顿在吴有训的帮助下改进了他的实验, 进一步确证了这一命名为康普顿效应的实验现象。

康普顿实验的重要意义, 就在于他为光的辐射确立了粒子观。过去, 至多认为在能量的吸收和发射上, 其能量的改变具有“粒子性”。但是康普顿散射的实验, 却将光辐射看成是既有能量、又有动量的粒子, 而且通过牛顿力学中早已研究过的能量守恒定律和动量守恒定律, 就能预言出, 这一弹性碰撞将能导致光量子波长或频率的改变。但是, 光子虽然能被认为是粒子, 但又是波, 因为它们具

有确定的振荡频率,又有实验上所完全确定的波动现象,如绕射、干涉等效应。

总之,由微粒而波动,由波动而波粒二象性的认识的历史发展表明:人的认识的确有一个“正、反、合”的过程,或者说符合唯物辩证法所揭示的“否定之否定”的规律。

3. 光子的波粒二象性和粒子的波粒二象性

由光子所具有波粒二象性的矛盾或对立,使人们推想到这一“波粒二象性”的性质也许具有普遍性。1924年,德布罗意提出了一个大胆的假说:如果被人们看作是典型的波动现象的光具有波动性,那么被人们看作是粒子的电子和质子,是不是也可以具有波动性?德布罗意在康普顿观念的启示下,认为电子或质子等粒子有如下的波粒二象性,亦即和粒子动量相应地有如下的波长:

$$\lambda = h/p,$$

其中 p 是粒子的动量。实际上,德布罗意这一物质波的假定,只不过是爱因斯对光子具有动量的假定倒过来应用。

1925年,戴维孙和盖默在一次偶然的故事中,观察到电子在镍的晶体上的衍射现象,但这一现象没有引起人们包括他们本人的注意。后来,在了解到德布罗意的物质波的概念后,人们较精确地观察到电子在镍单晶上的衍射,由衍射花样所推断出的电子的波长,恰好与德布罗意所预言的物质波的波长相同!

后来,人们在实验中发现,不仅电子,还有质子、中子等“基本”粒子,都具有波动性,甚至这些粒子的集合,如原子、分子等复杂粒子,也具有波动性,这样,波粒二象性就是一切物质所具有的普遍的性质。

还可以举出一些说明粒子具有波动性的很有特色的实验。例如,光子在介质中具有全反射的特性,利用玻璃纤维可以把可见光传递几千米的距离而损耗极小。所谓激光通讯就利用了这一原理。实验表明,中子也有类似的性质。中子本来是高穿透性的不带电的

物质,能在介质中自由地飞来飞去.可是,当中子能量降低到超冷中子的范围时,中子在铜或铍做成的导管里也能产生这种全反射现象.用铜或铍做成的导管可将超冷中子传递达几百米的距离而不致漏失!

物质的“波粒二象性”的发现表明:物质既不是不连续的,也不是连续的,而是连续和不连续性质的对立和统一.“波粒二象性”就第一次揭示了这种对立面的统一.

4. 从波粒二象性到波动力学

描述粒子运动规律的是牛顿力学,或者是具有相对论修正的牛顿力学.但是,现在的粒子却同时又是波,而有了波,就应该有一个波动方程,或称为波动力学,这就是由薛定谔曾经利用“光线沿直线进行并且也有一个波动方程”的事实,作为类比而导出他的著名的薛定谔方程.下面介绍一种较为直观的、由德布罗意物质波概念的推广而求出薛定谔方程的方法.

德布罗意的物质波,实质上是平面波,亦即为正弦或余弦函数形式的振动.很容易将这一平面波写成如下的标准形式:

$$\Psi(x, t) = \Psi_0 e^{i(kx - \omega t)},$$

其中 Ψ_0 是振幅, k 是波矢, ω 是振荡角速度.由德布罗意关系,可知

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k,$$

这里 ν 和 λ 是相应的频率和波长.由牛顿力学可知,由于自由粒子,能量

$$E = \frac{p^2}{2m},$$

或可写为

$$\hbar\omega = \frac{(\hbar k)^2}{2m},$$

在有了这些式子以后,很容易求出上述平面波所满足的方程式:

$$\left(i\hbar \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \Psi = 0,$$

因为只要将以上平面波的算式代入偏微分方程中,就可以得到

$$\left(E - \frac{p^2}{2m} \right) \Psi = 0,$$

薛定谔注意到,对于自由粒子,其能量 E 当然就只有动能 $\frac{p^2}{2m}$,而如
果所讨论的对象是粒子在某一位势 $V(x)$ 中的运动,那么立刻可以
猜想到,这一可能的波动力学将满足如下的方程式

$$\left[E - \frac{p^2}{2m} - V(x) \right] \Psi = 0,$$

也就是

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x)\Psi.$$

有了薛定谔方程以后,就给出了有关物质的“波粒二象性”的完整的图象,电子、质子等“基本”粒子,一方面是粒子,亦即具有确定的动量、能量,满足能量和动量的守恒定律;另一方面又是“波”,可以发生绕射、干涉等典型的波动现象,并且可以由薛定谔方程所描述,尤其是当 $\hbar \rightarrow 0$ 时,薛定谔方程就能还原为牛顿方程。

以上所介绍的是人们由波粒二象性而导出量子力学的波动力学形式的一条认识的路线,在历史上还有由量子论到玻尔的原子模型,玻尔和索莫菲尔德的旧量子力学,后来由海森伯给出了量子力学的矩阵力学的形式的另一条认识路线,最终却有薛定谔证明了波动力学和矩阵力学是完全等价的量子力学。

量子力学对人类的影响是极其巨大的,首先是开辟了人类认识自然界、亦即认识微观世界的新时代;面理所当然的一项后果,是开拓了新技术或现在称为高技术的开发和应用的新时代,下面将就这两方面做一点介绍。

二、量子力学开拓了人类认识自然和改造自然的新时代

1. 量子力学开拓了物理学研究的一系列的新领域

从量子力学建立以后的十几年中,是量子力学取得一系列辉煌成就的时代.在原子物理中,人们用量子力学解释了原子结构,解释了磁场和电场引起的谱线劈裂;解释了强电场中的金属何以能拉出电子,而这在古典牛顿力学中是不可理解的现象(因为这涉及势垒穿透效应);解释了门捷列夫的化学元素周期律为什么会出现这种周期性.

量子力学的一个重要成就,是解释了化学亲和力.原子是怎样粘接成多种多样形态的化合物的,这一直是化学家梦寐以求的难题.在有了量子力学以后,就弄清楚了什么是离子键、共价键、氢键、金属键等不同的形式.由于量子力学的出现,就把化学还原为物理学的一个部门.

量子力学也推动了原子核物理学的研究,整个原子核物理理论就是由质子和中子(另一个“基本”粒子)组成的量子力学体系.

量子力学所蕴涵的波粒二象性的原则还被进一步推广到各式各种场的体系,这就开拓了量子场论的领域,人们在微观世界的认识的进程中,也就由原子核物理延伸到粒子物理,或又称为基本粒子物理.

总之,量子力学反映了人们对自然界的认识达到了一个新的阶段,即由宏观世界进入到微观世界.

2. 量子力学开拓了人类应用新技术又称为高新技术的新时代

量子力学不仅解释了微观世界里的许多现象,经验事实,而且还开拓了一系列新的技术领域.首先,量子力学和狭义相对论再加上原子核物理的深刻的研究,共同开拓了一个新时代,人类进入原

子能时代,从而为人类找到了一种可以说“取之不尽,用之不竭”的能源,并有可能将人类活动的踪迹由地球移到别的星球,如月球、火星等。

然而更为重要的,量子力学还开辟了一种全新的信息技术,致使人类进入信息化的新时代,或又称为电脑时代。量子力学除了应用到原子、分子、原子核、粒子等微观体系外,它还被应用到固体领域等复杂体系,用它解释了铁磁体、铁电体等物质的电磁性质,也解释了为什么有些材料是绝缘体,有些是导体。尤为重要的是,解释了为什么某些材料是半导体。而且根据量子力学,在这些半导体中,可以有电子导电、空穴导电等区别,从而又提出半导体的二极管、三极管等的观念,后来又发展为集成线路。大规模集成线路的组合,成为现代电子计算机的技术基础。可以说,没有量子力学,就没有以电脑控制占主导地位的现代化工业。

由量子力学的研究所提出的光的受激辐射的原理,还被用来研制种种形态的激光器,广泛地应用于科学实验,制成激光雷达、激光制导以及激光武器(又称为“死光”)等。尤为重要的是激光通讯,它可以通过光纤网络高速而大容量地实现通讯,所谓“信息高速公路”就是利用光纤来实现信息量大于10 Gb以上的通讯网络。这已成为当代新经济的重要内涵。顺便说说,描述光纤通讯的光的传播的方程式,却是二维的量子力学方程。

3. 量子力学和认识论问题

i) 然而量子力学所给予人们的还不仅仅是科学和技术上的成就,量子力学还丰富和发展了唯物主义哲学,发展了马克思主义的认识论。首先是量子力学深化了人们对物质的运动的基本规律的认识。古典物理学所追求的一个崇高理想,就是自然界将能由一系列的微分方程或偏微分方程所描述,在给定的始值条件和边值条件下,人们将能描述和预测世界发展的一切细节。天体物理学家拉普拉斯曾认为:如果有一个智能生物能确定从最大天体到最轻

原子运动的现时状态,就能按照力学规律推算出整个宇宙的过去状态和未来状态,这又称为拉普拉斯式的决定论。

19世纪的机械论自然观的破灭,并没有改变这一决定论的自然观,只不过由电磁图象代替了力学图象。19世纪下半叶发展出来的统计力学首先把统计规律引入物理学,但是统计力学所探讨的对象,往往是数达 10^{23} 的粒子,以至于统计涨落所引起的偏差,完全可以忽略。统计力学所给出的预测,仍然是确定的或“决定论”式的预言。

量子力学打破了这一思维模式。量子力学虽然是微观世界的基本特征——“波粒二象性”的深刻反映和概括,但这一“波粒二象性”的物理实质,并没有立刻弄清楚。一个显然的事实是,量子力学中的粒子,并不是通常牛顿力学里所定义的粒子,因为它们不能同时具有确定的位置和动量。量子力学中的波,又不等同于通常的牛顿力学里的机械振荡的波,如声波,因为这种“波包”又能扁缩为粒子。量子力学的另一位奠基人玻恩,提出几率波的概念。量子力学中的波,所描述的是粒子在空间分布或动量分布的概率。所以,量子力学的方程式,一方面在形式上是决定论的,亦即一旦给定了始值条件和边值条件,“波包”就会严格地按照薛定谔方程式所决定的演化方向而前进;但是,量子力学中的“波包”在物理解释上,却又是概率论的,亦即量子规律是决定论和随机式的规律的统一。

量子规律的出现,丰富了人们对自然界发展规律的认识。例如,在生物体发展中虽然既有遗传又有变异,但物种的演化,却又按照达尔文所指出的物种要不断进化的方向发展,其本质上的原因,就是自然规律不仅是决定论的,而且也是概率论的或随机论的。

自然规律是决定论和随机论的深刻的统一,同样,对于社会发展的规律来说,历史社会发展的规律是一元的,亦即总是按照广大人民群众所期待的人类进步的趋向而发展;但另一方面这一规律的表现又是随机的,亦即通过各种偶发事件,甚至是戏剧性的事件