

物理学和哲学

〔西德〕W·海森伯 著

商 务 印 书 馆

53.36

435

物理学和哲学

现代科学中的革命

〔西德〕W. 海森伯 著

范岱年 译



商务印书馆

1981·北京

1109947

DL70.23

W. Heisenberg
PHYSICS AND PHILOSOPHY
(The Revolution in Modern Science)
George Allen and Unwin
1958

内 容 简 介

本书作者是量子力学的创始人，哥本哈根学派的主要代表人物之一。本书从量子论建立的历史谈起，讨论了现代物理学中的主要哲学问题，并牵涉到哲学史、语言学、逻辑的一些问题和物理学的社会作用的问题。书中较系统地阐述了哥本哈根学派的基本哲学观点，是该学派的有代表性的哲学著作。

附录中收录了诺斯普普为英文版写的“序言”，以及海森伯在晚年发表的四篇文章。

本书可供物理学、物理学史和哲学研究工作者、大中学校物理、哲学教师参考。

物 理 学 和 哲 学

现代科学中的革命

〔西德〕W. 海森伯 著

范岱年译

商 务 印 书 馆 出 版

(北京王府井大街36号)

新华书店北京发行所发行

外文印刷厂印刷

统一书号：2017·263

1981年7月第1版

开本 850×1168 1/32

1981年7月北京第1次印刷

字数 170 千

印数 1—8,100 册

印张 7 1/4

定价：0.93 元

目 录

第一章 老传统和新传统.....	1
第二章 量子论的历史.....	3
第三章 量子论的哥本哈根解释.....	14
第四章 量子论和原子科学的渊源.....	25
第五章 自笛卡儿以来哲学观念的发展 和量子论的新形势的比较.....	38
第六章 量子论和自然科学其他部分的关系.....	52
第七章 相对论.....	65
第八章 对量子论的哥本哈根解释的批评 和反建议.....	80
第九章 量子论和物质结构.....	94
第十章 现代物理学中的语言和实在	109
第十一章 现代物理学在当前人类思想 发展中的作用	124
附录:英文本序言 (F. S. C. 诺斯劳普).....	139
科学真理和宗教真理	160
量子论历史中概念的发展	174
基本粒子是什么?.....	188
宇宙辐射和物理学中的基本问题	203
译后记	215

第一章

老传统和新传统

今天,当人们谈到现代物理学时,首先就想到原子武器。人人都认识到这些武器对现代世界政治结构的巨大影响,并且都心悦诚服地承认物理学对一般政治形势的影响比以往任何时期都要大。但是,现代物理学的政治方面真的是它的最重要的方面吗?当世界上的政治结构已变得适应于新技术的种种可能性时,现代物理学还将留下什么影响呢?

为了回答这些问题,应当记住,每个工具都带有用来创造它的那种精神。因为每个国家和每个政治集团,不管它的地理位置和文化传统如何,都必须以某种方式关心这种新武器,所以,现代物理学的精神必将渗透到许多人的心灵之中,并以各种不同的方式和老传统联系起来。现代科学的这个特殊部门对各种强有力的老传统进行冲击的结果将是什么呢?世界上已经发展了现代科学的那些地区,长时期来,主要兴趣是在实用的活动方面,在工业和与这种活动的内外条件的合理分析相结合的工程学方面。这些地区的人觉得应付这些新观念是颇为容易的,因为他们已经有充分时间慢慢地、逐渐地来适应现代科学的思想方法。在世界的其他地区,这些观念将同本地文化的宗教基础和哲学基础发生冲突。因为现代物理学的成果确实触及实在、空间和时间这样一些基本概念,所以,这种冲突可能引起全新的、难以预料的发展。在现代科学和旧思想方法之间这次决战的特征之一,就在于它完全是国际性的。在这次思想交流中,老传统的一方在世界不同地区是不同

的，而它的对方则在任何地区都是一样的，因此，这次思想交流的结果将传播到发生论战的全部地区。

由于这样的理由，尝试用不太技术性的语言来讨论现代物理学的这些观念，研究它们的哲学影响，将它们和若干较老的传统相比较，可能不是一个无关紧要的任务吧。

对量子论的发展作一历史性描述，可能是着手讨论现代物理学问题的最好的方法。确实，量子论仅仅是原子物理学中的一个小分支，而原子物理学又是现代科学中的一个很小的分支。然而，正是在量子论中，关于实在的概念发生了最基本的变化，并且也是在量子论中，原子物理学的新观念集合并具体化为它的最后的形式。原子核物理学研究所需的巨大的、非常复杂的实验设备，显示了这一现代科学部门的另一非常激动人心的方面。说到实验技术，原子核物理学代表了自从惠更斯(Huyghens)、伏打(Volta)或法拉第(Faraday)以来一直决定着现代科学成长的研究方法的最大扩展。与此相似，量子论某些部分的令人望而生畏的数学复杂性，也可以说是代表着牛顿(Newton)、高斯(Gauss)或麦克斯韦(Maxwell)的方法的最高成就。但是，在量子论中显示的实在概念的变化，并不是过去的简单的继续，而却象是现代科学结构的真正破裂。因此，下一章首先将致力于探讨量子论的历史发展。

第二章

量子论的历史

量子论的起源是和一个大家熟悉的现象相联系的，这一现象并不属于原子物理学的中心部分。任何一块物质在被加热时，都会开始发光，并在较高温度下达到红热和白热。发光的颜色与材料表面关系不大，而对于黑体，则只与温度有关。因此，这样一个黑体在高温下发出的辐射是物理学研究的适当对象；它是一个简单的现象，并且应该可以根据已知的辐射和热学定律找到一个简单的解释。但是，瑞利勋爵(Lord Rayleigh)和琼斯(Jeans)在十九世纪末所作的努力却失败了，并且揭示了种种严重的困难。这里无法以简单的词句描述这些困难。但只要指出他们应用已知定律不能导出合理的结果这一点，应该也就够了。当普朗克(Planck)在1895年进入这条研究路线时，他试图将问题从辐射转到辐射原子方面。这种转换不能消除问题中固有的任何困难，它只简化了经验事实的解释。正当这个时候，即在1900年的夏天，库尔包姆(Curlbaum)和鲁本斯(Rubens)在柏林对热辐射光谱作了很准确的新测量。当普朗克听到这些结果时，他试图根据他对热与辐射的一般联系的研究，用简单的、看来好象是合理的数学公式来表示它们。有一天，普朗克和鲁本斯在普朗克家中喝茶，他们将鲁本斯的最新结果和普朗克提出的新公式作比较。比较的结果表明二者完全相符。这就是普朗克热辐射定律的发现。

就在这个时候，普朗克开始了艰巨的理论工作。什么是新公式的正确物理解释呢？既然普朗克能根据他以往的工作把他的公

式毫不费力地翻译成关于辐射原子(所谓振子)的陈述,那么他一定很快就发现了,他的公式似乎表明振子只能包含分立的能量子——这个结果与经典物理学中任何已知的东西是那么不同,以致他在开始的时候一定会觉得难以相信。但是,在1900年夏天最紧张的工作时期中,他终于确信无法避免这个结论。普朗克的儿子曾说,他的父亲曾在通过柏林近郊的森林——绿林的漫长的散步中谈到了他的新观念。在这次散步中,他解释说,他感到他可能已经完成了一个第一流的发现,或许只有牛顿的发现才能和它相比。所以,这个时候普朗克一定认识到了,他的公式已经触动我们描述自然的基础,并且有朝一日,这些基础将从它们现有的传统位置向一个新的、现在还不知道的稳定位置转移。普朗克由于在整个世界观上是保守的,他根本不喜欢这个后果,但他还是在1900年12月发表了他的量子假说。

能量只能以分立的能量子发射或吸收,这个观念是这样新奇,以致它不能适合物理学的传统框架。普朗克企图把他的新假说和老的辐射定律调和起来的尝试,在几个根本点上都失败了。这一尝试花了五年时间,直到能够朝新方向迈出第二步时为止^①。

这时候出现了年轻的阿耳伯特·爱因斯坦(Albert Einstein),物理学家中的一个有革命性的天才,他不怕进一步背离旧的观念。他在两个问题中应用了新观念。一个就是所谓光电效应,即金属在光的作用下发射出电子。许多实验——特别是勒纳(Lenard)的那些实验——都表明,发射电子的能量与光的强度无关,而只与光的颜色有关,更准确地说,即只与光的频率有关。根据传统的辐射理论,这是难以理解的。爱因斯坦将普朗克的假说解释为光是由

^① 海森伯这句话同历史事实不尽相符。普朗克作这种调和的尝试不止进行五年,而是进行了十多年,直到1915年他才宣告放弃他的这种尝试。那时,别的物理学家朝量子论这个“新方向迈出”已经不止是“第二步”了。——译者注

穿过空间的能量子组成的,这样,他就成功地解释了上述的观测结果。按照普朗克的假说,一个光量子的能量应当等于光的频率乘以普朗克常数。

另一个问题是固体的比热。从传统理论推导出来的比热值与高温时的观测记录相符,但在低温时就不相符了。又是爱因斯坦成功地指出,将量子假说应用到固体中原子的弹性振动上去,就可以理解这种性状。这两个结果标志了一个很重要的进展,因为它们表明,普朗克的作用量子(在物理学家中称为普朗克常数)也出现在若干与热辐射并无直接关系的现象中。同时,它们还揭示了新假说的深刻的革命性,因为第一个问题导出了与光的传统的波动图象迥然不同的描述。光既可以按照麦克斯韦的理论解释为由电磁波所组成,又可以解释为由光量子,即由以高速穿过空间的能包所组成。但是,是否两种解释都成立呢?爱因斯坦当然知道,著名的衍射和干涉现象只有根据波动图象才能解释。他不能消除这个波动图象和光量子观念之间的根本矛盾;他甚至也不企图消除这种解释的不一致性。他只是简单地把这种矛盾看作是某种大概只有在很久以后才能弄清楚的东西。

在这期间,贝克勒耳(Becquerel)、居里(Curie)和卢瑟福(Rutherford)的实验,对原子结构的问题作了某种程度的澄清。1911年,卢瑟福从他对穿过物质的 α 射线与物质的相互作用的观测,推导出他的著名的原子模型。原子被描绘为由一个原子核和一些电子所组成,原子核带正电,差不多包含了原子的全部质量,而电子环绕原子核旋转,就象行星环绕太阳旋转一样。不同元素的原子之间的化学键被解释为相邻原子的外层电子之间的相互作用;它和原子核没有直接关系。原子核通过它的电荷决定着原子的化学行为,而原子核的电荷又使中性原子的电子数目固定不变。起初,这个原子模型不能解释原子的最突出的特性,即原子的巨大稳定

性。按照牛顿的力学定律,从来没有一个行星系统在它和另一个这样的系统碰撞以后能够回复它原来的位形。但是,举例说吧,一个碳元素的原子,在化学结合过程中的任何一次碰撞和相互作用之后,都始终保持为一个碳原子。

玻尔(Bohr)在1913年利用普朗克的量子假说,对这个不平常的稳定性作出了解释。如果原子只能通过分立的能量子来改变它的能量,这必定意味着原子只能处在分立的定态之中,而最低的定态就是原子的正常态。因此,原子在各种相互作用以后,最后总是回复到它的正常态。

通过量子论在原子模型上的这种应用,玻尔不仅能够解释原子的稳定性,而且,在若干简单例子中,对原子通过放电或加热受激发后所发射的光谱线也能作出理论解释。他的理论以电子运动的经典力学和量子条件的结合为基础,这些量子条件是为了定义系统的分立定态而强加于经典运动之上的。关于这些条件一致的数学表述是后来由索末菲(Sommerfeld)给出的。玻尔完全了解量子条件在某些方面破坏了牛顿力学的一致性这样一个事实。在氢原子的简单例子中,人们能根据玻尔的理论算出原子所发射的光的频率,并且和观察结果完全一致。然而这些频率和电子环绕原子核的轨道频率以及它们的谐频都不相同,这个事实立刻显示了玻尔的理论还充满了矛盾。但是,它包含了真理的主要部分。它定性地解释了原子的化学行为和它们的光谱线。分立定态的存在也为弗朗克(Franck)和赫兹(Hertz)、斯特恩(Stern)和革拉赫(Gerlach)的实验所证实。

玻尔的理论开辟了一条新的研究路线。光谱学在好几十年内积累起来的大量实验资料,现在可用来作为关于支配原子中电子运动的奇怪的量子定律的信息了。许多化学实验能用于同样的目的。从这个时候开始,在这方面物理学家才学会提出正确的问题;

而提出正确的问题往往等于解决了问题的大半。

这些问题是什么？实际上全部问题都涉及不同实验结果之间的奇怪的明显的矛盾。同一种辐射，它既产生干涉图样，因而它必定是由波所组成，然而它又引起光电效应，因而它必定由运动的粒子所组成，这是怎么一回事呢？原子中电子的轨道运动的频率怎么能够不在发射出的辐射的频率中显示出来？难道这意味着没有轨道运动？但是假如轨道运动的观念是不正确的，那么原子中的电子到底是怎么样的呢？人们能够看到电子通过一个云室，有时它们是从一个原子中打出来的；为什么它们不再运动到原子之中去呢？确实，在原子的正常态即最低能态中，电子或许可能是静止的。但是还有许多较高的能态，在这些态里电子壳层有一个角动量。那里的电子不可能是静止的。人们还能够举出许多类似的例子。人们一而再、再而三地发现，用物理学的传统术语来描述原子事件的企图，结果总是导致矛盾。

到二十年代的初期，物理学家们逐渐变得习惯于这些困难了，他们得到了关于麻烦会在哪里发生的某种模糊的知识，并且还学会了回避矛盾。他们知道，对于所探讨的特殊实验，关于原子事件的哪一种描述是正确的。这虽然还不足以为一个量子过程中所发生的一切构成一幅前后一致的一般图象，但它是这样地改变了物理学家们的见解，以致他们多少领会了量子论的精神。因此，甚至在人们建立起前后一致的量子论形式系统以前的相当时期，人们就已多少知道一些实验的结果将是个什么样子。

人们常常讨论到那种所谓理想实验。这样的实验是被设计来回答判决性的问题的，不管它们实际上是否能够实现。当然，重要的是原则上应当能够实现这个实验，但在技术上可能是极端复杂的。这些理想实验在澄清某些问题方面是十分有用的。如果物理学家们对某个理想实验的结果没有一致的意见，那就常常可以找

到一个与之相似但更为简单的能够实现的实验，从而使实验答案能从基本上对量子论的阐明有所贡献。

那几年有一个最奇怪的经验：在阐明过程中，量子论的佯谬并没有消失；恰恰相反，它们甚至变得更为显著，更加激动人心了。例如，康普顿(Compton)有一个关于X射线散射的实验就是这样。在以往关于散射光干涉的实验中，散射无疑地主要以下列方式发生：入射光波使得处于光束中的一个电子以光波的频率振动；然后振荡的电子发出一个同样频率的球面波，从而产生了散射光。然而康普顿在1923年发现，散射出来的X射线的频率与入射X射线的频率不同。假设散射是用光量子和一个电子的碰撞来描述的，那么，频率的这种改变在形式上是可以理解的。光量子的能量在碰撞过程中改变了；并且因为频率乘上普朗克常数应当是光量子的能量，所以频率也应当改变。但是在光波的这种解释中发生了什么呢？两个实验——一个是关于散射光的干涉，另一个是关于散射光频率的变化——看来是互相矛盾，没有任何调和的可能性的。

这时候，许多物理学家相信，这些明显的矛盾应当归入原子物理学的内在的结构。因此，1924年，法国的德布罗意(de Broglie)试图将光的波动描述方法和粒子描述方法间的二象性推广到物质的基本粒子，首先是推广到电子上去。他指出，有某种物质波云“对应”于一个运动电子，就象一个光波对应于一个运动光子一样。那时候，在这种联系中“对应”这个词意味着什么，还是不清楚的。但是德布罗意建议，应当把玻尔理论中的量子条件解释为关于物质波的陈述。由于几何学上的理由，环绕一个核转动的波只能是一个驻波；而轨道的周长必定是波长的整数倍。德布罗意的观念就是这样地把量子条件和波粒二象性联系起来，而量子条件过去在电子力学中一直是一个外来的因素。

在玻尔的理论中，计算出来的电子轨道频率和发射出来的辐射频率间的不相符，必须解释成电子轨道的概念有其局限性。这个概念从一开始就有点值得怀疑。然而，对于较高的轨道，电子将在离核很远的地方运动，就象人们看到它们在云室中运动时的情况一样。在那里，人们应当谈到电子轨道。因此，对于这些较高的轨道，发射辐射频率接近轨道频率和它的较高的谐频，这是很令人满意的。此外，玻尔在他的早期论文中就已经提出，发射光谱线的强度接近于对应的谐波的强度。这个对应原理对近似地计算谱线强度已经证明是很有用的。这样，人们就有一个印象：玻尔的理论对原子内部发生的事情作了定性的但不是定量的描述；物质行为的若干新特征是由量子条件定性地表示的，而这些量子条件又与波粒二象性相联系。

量子论的准确的数学表述最后是从两个不同的发展方向出现的。一个从玻尔的对应原理开始。人们不得不放弃电子轨道的概念，但在高量子数的极限情况下，即对于大轨道而言，这个概念仍须保留。在后面这种情形中，发射辐射以它的频率和强度给出电子轨道的图象；这个图象代表数学家所谓的轨道的傅里叶(Fourier)展开式。这种观念自身说明了，人们不应当把力学定律写为电子的位置和速度的方程，而应当写为电子的傅里叶展开式中的频率和振幅的方程。从这样一些方程出发并稍稍改变它们，人们就能够希望得到同发射辐射频率和强度相对应的那些量之间的关系，这些关系甚至对于小轨道和原子的基态也能成立。这个计划是能够实际实现的；1925年的夏天，它引导出一个数学形式系统，称为矩阵力学，或者，更一般地称为量子力学。牛顿力学的运动方程被矩阵之间的类似方程所代替；有一个新奇的经验是：人们发现牛顿力学的许多旧结果，例如能量守恒等等，也能从新的数学方案推导出来。后来，玻恩(Born)、约尔丹(Jordan)和狄拉克(Dirac)

的研究表明，代表电子的位置和动量的矩阵是不对易的。这个事实清楚地显示了经典力学和量子力学之间的本质差别。

另一个发展方向是随着德布罗意的物质波的观念而来的。薛定谔(Schrödinger)试图建立一个关于环绕原子核的德布罗意驻波的波动方程。早在1926年，他成功地推导出氢原子各定态的能量值作为他的波动方程的“本征值”，并能给出将一套已定的经典运动方程转换成多维空间中对应的波动方程的更一般的规定。后来，他又得以证明，他建立的波动力学形式系统和较早的量子力学形式系统在数学上是等价的。

因此，人们终于有了一个前后一致的数学形式系统，它能用两种等价的方法规定下来，或者从矩阵之间的关系出发，或者从波动方程出发。这个形式系统给出了正确的氢原子能量值；不到一年，又证明它对氢原子和较重原子的更复杂问题也是成功的。但是新的形式系统是在什么样的意义上描述原子的呢？波动图象与微粒图象间二象性的佯谬尚未解决；这些佯谬不知因什么缘故而潜伏在数学方案之中。

玻尔、克拉麦斯(Kramers)、斯莱特(Slater)在1924年向真正理解量子论迈出了第一步和很有意义的一步。这几位作者试图用几率波的概念来解决波动图象和粒子图象间的明显矛盾。电磁波不被解释为“真实”的波，而被解释为几率波，几率波在每一点的强度决定该点的原子吸收(或感生发射)一个光量子的几率。这个观念引导出这样一个结论：能量和动量守恒律对单个粒子事件不一定成立，它们只是统计规律，只有取统计平均值时才成立。不过，这个结论是不正确的，而辐射的波动面貌和粒子面貌之间的联系却变得更为复杂了。

但是玻尔、克拉麦斯和斯莱特的论文揭示了量子论的正确解释的一个主要特征。几率波的概念是牛顿以来理论物理学中全新

的东西。在数学或统计力学中，几率意味着我们对实际状况认识程度的陈述。在掷骰子时，我们不知道决定骰子下落的人手运动的细节，因此我们说掷出某一个特定数字的几率正好是六分之一。然而，玻尔、克拉麦斯、斯莱特的几率波意味着更多一些东西；它意味着对某些事情的倾向。它是亚里士多德(Aristotle)哲学中“潜能”(potentia)这个老概念的定量表述。它引入了某种介于实际的事件和事件的观念之间的东西，这是正好介于可能性和实在性之间的一种新奇的物理实在。

后来，当量子论的数学框架确定了以后，玻恩采取了这个几率波的观念，并给被看作几率波的形式系统中的数学量以清楚的定义。它不是象弹性波或无线电波那样的三维波，而是在多维位形空间中的波，因而是颇为抽象的数学量。

即令在这个时候，即在1926年夏天，在各种情况下应当怎样使用数学形式系统来描述给定的实验状况，也还是没有搞清楚。人们知道怎样描写一个原子的定态，但不知道怎样描述一个简单得多的事件——例如通过云室的一个电子。

当薛定谔在那个夏天证明了他的波动力学形式系统在数学上等价于量子力学以后，他一度试图全部放弃量子论和“量子跳变”的观念，并简单地用他的三维物质波来代替原子中的电子。他当时热衷于这种尝试是由于他得到了一个成果，即在他的理论中氢原子的能级似乎正好就是驻立物质波的本征频率。因此，他以为把它们叫做能量是错误的；它们只不过是频率。但在玻尔、薛定谔和哥本哈根学派的物理学家们于1926年秋在哥本哈根举行的讨论会中，很快就弄清楚，这样一种解释甚至还不足以解释普朗克的热辐射公式。

在这些讨论以后的几个月内，在哥本哈根对有关解释量子论的全部问题所作的紧张研究，正如许多物理学家所相信的那样，终

于对情况作出了全面的、令人满意的阐明。但这不是一个容易被
人接受的解答。我记得有一次同玻尔讨论了几个钟头，直到深夜
才几乎在绝望中结束；当讨论结束时，我独自到邻近的花园中去散
步，当时我一再反复问我自己：难道自然界真能象这些原子实验给
我们的印象那么荒诞无稽吗？

最后的解答是从两条不同的道路逐渐接近的。一条是改变问
题的提法。代替这样一个问题：“人们怎样才能够在已知的数学方
案中表示出一个给定的实验状况？”提出了另一个问题：“只有能在
数学形式系统中表示出来的实验状况才能在自然中发生，也许这
是正确的？”如果假设这实际上是正确的，结果就将对自牛顿以来
成为经典力学基础的那些概念的适用范围施加限制。像在牛顿力
学中那样，人们能够谈论一个电子的位置和速度，并能够观察和测
量这些量。但是，人们不能以任意高的准确度同时测定这两个量。
实际上已经发现，这样两个不准度的乘积不应当小于普朗克常
数除以粒子的质量。从其他实验状况也能推出类似的关系。它们
通常称为测不准关系，或测不准原理。^①人们已经知道，老概念
只是不准确地吻合自然。

另一条接近的道路是玻尔的互补概念。薛定谔已经不把原子
描述为一个原子核和电子的系统，而把它描述为一个原子核和一
些物质波的系统。这种物质波图象当然也包含一个真理的因素。
玻尔把两种图象——粒子图象和波动图象——看作是同一个实在
的两个互补的描述。这两个描述中的任何一个都只能是部分正确
的，使用粒子概念以及波动概念都必须有所限制，否则就不能避免
矛盾。如果考虑到能够以测不准关系表示的那些限制，矛盾就消
失了。

这样，自从 1927 年春天以来，人们就有了一个量子论的前后

^① 或译不确定关系或不确定原理。——译者注

一致的解释,它常常被称为“哥本哈根解释”。1927年在布鲁塞尔举行的索尔维(Solvay)会议上,这个解释接受了严峻的考验。对那些总是导致最坏的佯谬的实验全都再三地在所有细节上作了讨论,特别是爱因斯坦。人们还设想了一些新的理想实验去探索理论的任何可能的不一致性,但是这个理论被证明为前后一致的,并且对于人们所知道的一切实验,看来都是符合的。

这个哥本哈根解释的细节将是下一章的主题。应当强调指出这一点:从最初提出存在能量子的观念到真正理解量子理论的定律,已经过去了四分之一世纪以上。这表明了,在人们能够理解新情况之前,有关实在的基本概念必须发生巨大的变革。