

# 什么是量子理论？

Frank Wilczek<sup>1)</sup>著

黄 饶 曹则贤 译

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

在 1885—1889 的几年中,赫兹<sup>[1]</sup>(Heinrich Hertz)先后发现了电磁波可以在空间传播,并且通过实验证实电磁波以光速传播而且是横向偏振的波.这一工作验证了麦克斯韦(James Clerk Maxwell)20年前(1864年)做出的预言.赫兹的主要论文收录在《电波》一书中,他还为此书写了长篇的导言.该导言中出现了他著名的、非凡的论述:“对于什么是麦克斯韦理论,我知道如下最简短和精确的回答:麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组.”<sup>[2]</sup>

表面看来,这一论述似乎没错,甚至很真诚,但它意味深远,而且在当时曾有所触动.当时,尤其在德国(与麦克斯韦理论)抗衡的是传统电磁理论,它倡导基于超距作用的理论构造,而不是场的观点.这些理论具有诸多优点,例如它继承了非常成功的牛顿力学传统,并且应用为大家所熟知的、业已高度发展的数学工具;此外,它还拥有巨大的灵活性.根据力对速度的依赖关系,那时已知的大部分电磁学现象都可以很容易地通过超距作用来描述.索末菲(Arnold Sommerfeld)叙述了他在 Koenigsberg 的学习时光(1887—1889)<sup>[2]</sup>:“呈现于我们面前的整个关于电动力学的图像是糟糕的,不连贯的,并且没有形成体系.”

或许对理论做些修改也能描述赫兹的新结果(确实,我们现在知道利用延迟势可以从超距作用理论导出麦克斯韦方程组,而且事实上这一推导过程甚至十分优美).于是赫兹试图阻止关于相同物理内容的两种敌对理论之间毫无建设性的争论.他的做法是将关注的焦点放在最根本的内容上.索末菲继续写到:“当我读到赫兹的伟大论文时,我顿时有醍醐灌顶的感觉.”

进一步地,赫兹想要纯化麦克斯韦的工作.问题是麦克斯韦是通过以太的机械模型进行构建和修改这一复杂过程才得到他的方程组的,根据赫兹的说法:“……当麦克斯韦创作他伟大的论文时,那些他的早期概念模式所依据的一大堆假设已经不再适

用,不然就是他发现了其中的矛盾并放弃了它们,但他没有完全使之消除……”.

而一个现代物理学家,尽管不再直面这样的问题(即什么是麦克斯韦理论的问题),他也不会满足于赫兹的回答.麦克斯韦理论远不止是麦克斯韦方程组.或者,换句话说,仅仅写下麦克斯韦方程组,同正确地理解对待它,是完全不同的两回事.

确实,当一个现代物理学家被问到什么是麦克斯韦理论时,他或许会倾向于回答是狭义相对论加上规范不变性.在保持麦克斯韦方程组不变的同时,这些概念真切地告诉我们为什么表面上复杂的偏微分方程组必须严格地采取这样的形式,它最根本的性质是什么,怎样才能将其推广.这最后一点在现代标准模型中收获了大量的成果.标准模型的核心是广义规范不变性,它为远远超出麦克斯韦和赫兹能想象的物理现象提供了成功的描述.

以这段历史作为背景,让我们回到我在此专栏里提出的、可类比的问题:什么是量子理论?在当前这一层次上,我们可以赫兹的方式做出回答.量子理论就是我们能找到的写在量子理论教科书中的理论.也许这方面最权威的表述是狄拉克(Dirac)的书<sup>[3]</sup>.与此相对,你可以在狄拉克书中较靠前的部分找到属于赫兹精神的论述:“当有关支配数学量之操作的所有的公理和规则都明确了,并且确立了联系物理事实和数学公式的定律从而给定了物理条件就能得到数学量之间的方程,而且反过来也行,我们就可以说这一套程式已经成为精确的物理理论了.”

1) 原作者为 2004 年度诺贝尔物理学奖得主.原文选自 *Fantastic Realities*(World Scientific, Singapore, 2007)一书——译者注.

2) 关于此句的理解,有兴趣的读者请参阅 Morris Kline 的 *Mathematics and the search for knowledge*(Oxford University Press, 1986)一书的第七章.麦克斯韦理论与电磁波的发现是对数学在物理中的非凡价值的最有力体现.原文引用了哲学家 Whitehead 的话:“数学的独创性在于这样的事实,在数学中显示了事物之间的联系,而离开了人类推理的作用,这些联系是非常不明显的.”——译者注.

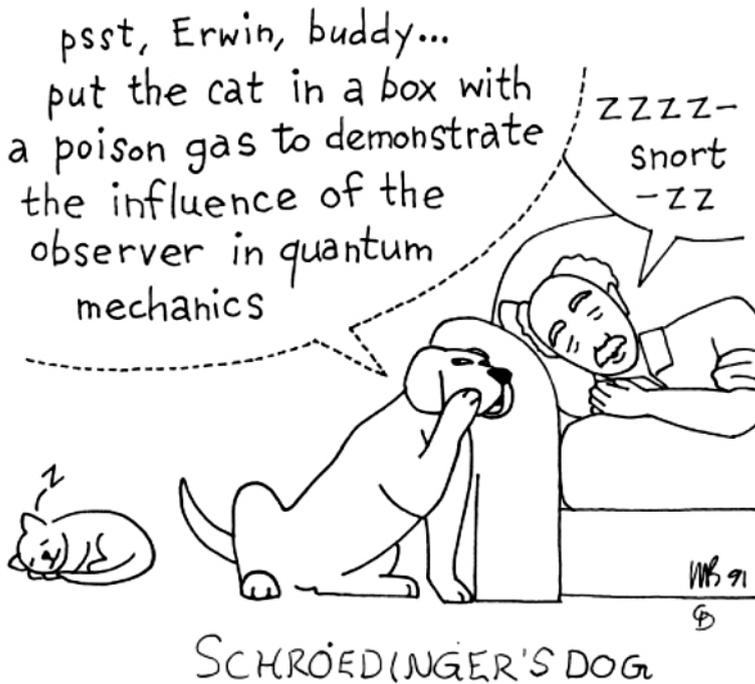


图1 薛定谔的狗在说：“嘘，埃尔文，伙计……你把猫放到有毒气的箱子里就能演示量子力学体系中观测者的影响了。”<sup>3)</sup>

当然，量子理论中的方程比起麦克斯韦方程组更难加以诠释已是尽人皆知。量子理论主流的解释引入了一些对于方程而言是外在的一些概念（像“观察者”），甚或与方程相抵触的概念（如“波函数坍缩”）。相关的文献也因其存在争议并且晦涩难懂而闻名。我相信这种局面将持续到有人用量子力学的公式构造出一个“观察者”——那是一个其状态能够对应于一个可辨识的、有主观意识的人物的模型实体，并且能够表明这个模型实体所察知的其与物质世界按照量子力学理论的相互作用与我们的经验相一致。这是一项艰巨的工程，远超过传统意义上的物理内涵。如同大多数工作着的物理学家一样，我假设（也许太天真），这项工作可以被完成，而且直到那时方程还能完好无损地保留下来。无论如何，也只有在成功地完成了这项工作之后，人们才能理直气壮地宣称量子理论是由量子理论中的方程定义了的。

为了迈向更坚实的基础，让我们考虑这些方程本身。如同麦克斯韦方程组在电动力学中具有中心地位一样，量子理论的核心是力学变量之间的对易关系。特别地，是在这些对易关系中，而且最终只是在这里，才出现了普朗克（Planck）常数。最为人们熟悉的对易关系 $[p, q] = -i\hbar$ 是关于线性动量和位置之间的，但也有一些是自旋之间或者是费米场之间

的。在建立这些对易关系的过程中，指导量子理论创立者们的是（同经典力学的）类比以及美学思想，加上最终的与自然的复杂对话和实验。以下是狄拉克对关键步骤的描述<sup>4)</sup>：“寻找量子化条件不是一件具有通性的事情……而是根植于要研究的特殊动力学系统的特殊问题……一个略具通性的得到量子化条件的方法……是经典类推（原文为斜体字）的方法。”我认为客观地说，此处人们没能找到像不同观察者的等价性（两个相对论的灵感来源）或者不同势场的等价性（规范不变性的来源）那样坚实的指导原则。

物理学中所谓坚实的指导原则就是对称性的表述。是否有可能将量子理论的方程也写成关于对称性的描述呢？对于这个问题，外尔（Herman Weyl）在一篇文章中做了一个非常有趣但是简短而非决定性的讨论，他建议（原文整个都是斜体字！）<sup>5)</sup>：“一个物理系统的运动学结构由希尔伯特空间中阿贝尔旋转的不可约酉正投影表示来描述。”

自然，我将不能在此展开此一理论表述，但给出三条我的评论还是恰当的。第一，外尔表示他的表述包含了量子力学的海森堡（Heisenberg）代数以及作为特例的玻色场和费米场的量子化，但也允许更多的可能性。第二，他提出的对称类型（阿贝尔的）是一种最简单的可能类型。第三，他的量子运动对称性完全是单独存在的，独立于物理学中的其他对称性。

（对量子理论）理解的下一个层次要等到一个涵盖性更强的对称性被发现后才会出现。这种对称性融合了常规的对称性和外尔的量子运动学对称性（更具体化的，或者修正了的）而成为一个有机整体。也许外尔自己是期待有这样的可能性的，他用下面的话结束了他的开创性的讨论：“量子运动学的程式似乎更可能与量子力学的普通程式具有相同的命运——它将被淹没在关于这个唯一存在的物理结构，也即真实世界的具体物理定律中。”

总而言之，我认为在（量子力学）建立了75年之久以及取得无数成功应用之后，我们距离正确理

3) 此处插图者关于薛定谔的猫假想实验的理解有误，请读者参阅相关文献或耐心等待曹则贤即将发表的《薛定谔的猫、薛定谔的狗与薛定谔的兔子》一文。——译者注。

解量子理论仍然还差两大步。

## 参 考 文 献

后记 此文的翻译曾征得 Frank Wilczek 教授本人的同意. 关于此文翻译可能引起的一切责任由曹则贤研究员承担. 批评与指正请发至 zxcao@aphy.iphy.ac.cn. 中国科学院理论物理研究所的刘寄星教授纠正了一处翻译错误, 特此致谢.

- [ 1 ] Mulligan J. Heinrich Rudolf Hertz. New York :Gerland ,1994
- [ 2 ] Sommerfeld A. Electrodynamics. London :Academic ,1964. 2
- [ 3 ] Dirac P A M. Quantum mechanics , 4th revised edition. London :Oxford ,1967. 15
- [ 4 ] Dirac P A M. Quantum mechanics , 4th revised edition. London :Oxford ,1967. 84
- [ 5 ] Weyl H. The Theory of Groups and Quantum Mechanics. New York :Dover ,1950. 27

## · 物理新闻和动态 ·

### 女性基因的自发破缺

在所有哺乳动物的胎盘中,女性种属都具有两个 X 染色体,而男性种属是具有一个 X,一个 Y 染色体. 为了避免 X 染色体在基因中的作用过强,女性细胞必须限制住一个 X 染色体的活动,即将它们完全沉浸在 RNA 的粘性物质内,这种 X 染色体在基因中被称为 XIST. 科学家们对女性细胞内的两个 X 染色体,哪一个被选择成为被抑制的染色体的机理是不清楚的. 利用老鼠作实验后表明,在胚胎发育的早期,两个 X 染色体被选择为 XIST 的机率是相等的,也就是说是对称的. 因此科学家们提出了一个设想,认为蛋白质在聚集过程时,当染色体处于某一个特定的状态时,就会抑制住一个 X 染色体,使其失去活性成为 XIST. 为什么蛋白质浮动在核内会在某一个染色体附近聚集,而不在其他染色体附近聚集呢?这类现象在物理学上被称为状态发生了自发对称破缺.

最近意大利那不勒斯大学的两位科学家 Nicodemi 和 Prisco 设计了一个统计模型来描述蛋白质的聚集. 在他们的模型中,女性细胞中蛋白质的自发聚集是随机地分布在 X 染色体附近. 统计模型中的关键点是利用了去年发表的一个科学观点,即在女性细胞中两个 X 染色体所处的状态是一个挨一个地排成行或列的时候正是其中有一个 X 染色体被抑制的时刻. 当蛋白质分子的束缚能达到一个确定的临界值时,就会有很高的概率使两个 X 染色体处于紧密相邻的位置. 对应这种状态,蛋白质聚集体就会迅速地约束住一个 X 染色体使其转变成为 XIST 基因,而使另一个 X 染色体保持活性. 所以某个临界值正对应着基因的自发对称破缺状态.

( 云中客 摘自 Physical Review Letters , 2 March 2007 )

### 实验室内模拟地磁的翻转

每 20 几万年左右地球的北极和南极相互转换位置. 谁也不知道是什么原因使地球磁场发生这种翻转. 最近法国的一个研究组在实验室内重现了这一现象. 他们将放在容器中的 160 升的熔化的钠加热到 110°C 以上,并用两个向相反方向旋转的螺旋叶片使熔化的钠不停地做涡旋运动,这样模拟地球核心熔化的铁的转动. 由此产生的电流产生出磁场. 这时他们监视磁场的强度和方向. 当他们偶然使一个叶片的速度为 16Hz 而另一个为 22Hz 时,发生了一种奇特的效应:整个样品的磁场方向开始翻转,翻转的间隔为 10 秒到 180 秒之间不等.

在地球的历史上发生过类似的“磁翻转”. 最近的一次翻转可能发生在大约 780,000 年以前,更早的翻转可能相隔几万年到几百万年. 有关论文见 Europhys. Lett. , 2007, 7759001.

( 树华 编译自 Physicsweb News 9 March 2007 )