

# 匪夷所思的电子

谭天荣

青岛大学 物理系 青岛 266071, 中国

[ttr359@126.com](mailto:ttr359@126.com)

**内容提要:** 电子的自旋与磁矩使人自然地联想到电子的电荷在旋转这样的直观模型,但这种模型有两个困难:第一,考虑到电子的线度,考虑到电子的边缘线速度不能超过光速,洛仑兹曾经对电子的刚球模型作过计算,电子的角动量的有一个上限,而这个上限小于其测量值。第二,如果电荷的在旋转,则电子会辐射电磁波,辐射将带走能量,而电子又没有外部能源,因此,电子会因为辐射失去能量,从而很快地崩溃。但事实上,电子却是经久不变的。我们知道,波尔从原子的卢瑟福模型看到了同一矛盾,并得出“原子世界有特殊规律”的论断。由于有这两个困难,量子物理学家们放弃了电子的直观模型。但我们即将看到,上述两个困难都可以在经典物理学的框架内予以排除。

先说电子的角动量的问题,洛仑兹在这里有一点疏忽:电子是一个带电系统,它会激发一个电磁场,它是电子的固有电磁场。由于电荷的旋转,电子的固有电磁场有角动量,它是电子的角动量的组成部分。而电子的电磁场分布在空间,不受电子大小的限制。考虑到这一点,电子角动量的大小就不再具有洛仑兹所说的那种上限了。

再说波尔的论断:根据经典物理学,电子的内部运动满足麦克斯韦方程,至于它会满足哪一个特解,则必须根据实验事实来确定。容易证明,将麦克斯韦方程应用于电子的内部运动时,有一个特解:它表示当电子的电荷持续地旋转时,电子的能量却不会因此而流失。这个特解的存在表明波尔论断的原始依据是错误的,从而电子的直观模型并不是不可想象的。

对于一个静止的电子,麦克斯韦方程的上述特解表示一个“驻波场”。如果用复数表示,它由两个因子组成,一个仅含时间坐标,是时间的周期函数;另一个仅含空间坐标,表示一个静止的球面波场。如果电子作等速直线运动,则该时间因子表示一个单色平面波,而其空间因子则表示一个随着电子运动的固定波形。在一个电子束中,诸电子的固有电磁场相互迭加,形成该电子束的固有电磁场。如果电子束中的每一个电子都以相同的速度作等速直线运动,则这个电子束的固有电磁场由两个因子组成,一个因子表示单色平面波,另一个因子则是某一极为急剧变化的场函数,但其平均值却是一个常量。因此,该电子束的固有电磁场的测量值是一个单色平面波,它就是德布罗意波。由此得出结论:德布罗意波与光波都是由电子激发的电磁波,光波是离开了波源的电磁波,而德布罗意波则是伴随着波源的电磁波。

按照牛顿力学,一个物体的角动量在外界的作用下是可以改变的,从而它不可能有固定不变的角动量。但电子的角动量在外部作用下却保持不变。电子的这种行为表明,电子有一种自我调节的机制:当外部条件改变时,它总能保持不变的内部运动。例如,当电子绕原子核旋转时,电子的自我调节的机制将使得其轨道运动与自转运动相互协调,这就要求其轨道满足一定条件,满足这种条件的轨道称为“稳定轨道”。如果外界有小的扰动,电子会继续在轨道上运行。如果外界的扰动足够大,电子也会离开“稳定轨道”,进入一种不平衡状态,这时电子的自我调节的机制为了恢复电子的平衡,将迫使电子重新进入稳定轨道。如果回到了原来的稳定轨道,则不会显出宏观效果,如

果过渡到另一稳定轨道，则电子经历了一个被人们称为“量子跃迁”的过程。这是电子的量子性的最典型的表现方式。电子有磁矩，在磁场中会进入“进动”状态，为了使其进动状态与自旋相互协调，电子的自我调节机制将使得其自转轴与磁场方向保持特定的角度。电子的这种行为，称为“空间量子化”。对于电子束，诸电子的自我调节机制使得诸电子的位置分布与动量分布相互协调，电子束的这种行为的表现方式之一就是著名的海森堡关系。

所谓“不确定性”有多种含义，如果说电子的不确定性是指我们不能预言单个电子的行为，那么，这种不确定性只表明量子力学还不完备，而不表明电子的运动不是轨道运动。

[New York Science Journal. 2008;1(2):36-48]. (ISSN: 1554-0200).

**关键词：**电子；自旋；磁矩；麦克斯韦方程；波粒二象性；量子性；不确定性；轨道运动；量子跃迁；量子力学

## 1. 引言

今天，人们非常熟悉“电子”这一用语：要看时间，手上带着电子表，墙上挂着电子钟；要看书，电子版各种书籍应有尽有，可以打开电子计算机在网上在线阅读，也可以下载下来慢慢看；要写信，可以写电子邮件，通过电子信箱投递，不仅节省了笔墨纸张，而且快得几乎没有时间延迟；要开车，驾驶台前电子仪表琳琅满目；要给孩子买生日礼物，超市的电子玩具目不暇接……。一言以蔽之，现代生活的任何一个环节似乎都少不了某种以“电子”命名的玩意。

然而，电子到底是一个什么东西，或许只有少数人才关心，也只有少数人才知道，电子的行为使人们绞尽脑汁。早在上世纪的二十年代，物理学家们就为了研究电子的行为建立了一个新的分支——量子力学，但这个量子力学却极为艰深难懂。对此，许多物理学家直言不讳。例如，美国物理学家费曼曾说：“没有人能理解量子力学。”前苏联物理学家兰道也说：“量子力学永远不可能被‘理解’，你们只须去习惯它。”或许，任何一门新的学科对于初学者都是困难的，但是量子力学的困难却不同一般，物理学领域里的一位王者，丹麦物理学家波尔曾说：“如果一个人说他可以思考量子力学而不会感到迷惑，这只不过说明他一点也不懂量子力学。”

关于量子力学的这种特殊性，中山大学的物理学教授，我的朋友关洪，有过极为精彩的描述。他对《老子》中的名言“道，可道，非常道；名，可名，非常名”作了如下重新诠释：“自然的规律和秩序是可以讲清楚的，但它们不是通常意义的规律和秩序；科学的术语和概念是可以给予称呼的，但它们不是通常意义的术语和概念。”他接着又说：“微观世界的规律是可以弄明白的，但它们不是我们习见的宏观世界的规律；量子力学的概念是可以弄明白的，但它们不是我们习用的经典物理学概念。”可见关洪教授上面说的“自然的规律”特指微观世界的规律，而他说的“科学的概念”则是特指量子力学的概念。

那么，电子的行为究竟怎样不同于宏观物体呢？我想，如下三点是特别引人注目的：

第一，波粒二象性：电子射线有时候显得是一束粒子，像由机枪射出的一粒一粒的子弹；有时候又显得是一种波动，像长江后浪推前浪的过程。

第二，量子性：电子往往从一种状态突变为另一种状态，似乎无法追溯其过渡阶段；

第三，不确定性：单个电子的行为是不能预言的，我们只能给出大量电子的统计规律。

电子的这些行为确实是非常奇怪的，而量子力学对电子的这些行为的说明则更匪夷所思。但是，从量子力学建立到今日已经八十多年了，不论量子力学的思维方式多么古怪，不论量子力学的语言多么晦涩，物理学家们也早已习惯了。而平易近人的经典物理学则被看作过时的“传统观念”。时至今日，如果有人想到要恢复经典物理学昔日的风光，肯定会被人们认为是痴人说梦。

然而，我在这里却要冒天下之大不韪：用经典物理学的规律来说明电子的奇异行为。特别是，我将根据经典物理学的原理，导出电子的与波粒二象性、量子性与不确定性。

## 2. 电子的卫星模型

一座城市，例如北京城，东城与西城的经度是不同的，北城与南城的纬度也不一样，但是，在地球仪上，这些区别不能表现出来，因为地球仪上的北京城只能表现北京城的位置，而不能表现其大小与形状。在这种意义下，我们把北京城看作了一个几何点。同样，在一定的条件下，我们也可以仅用一个几何点来表现一个物体的位置，而忽略其大小与形状。事实上，在表述牛顿力学的基本定律时，我们就把“物体”抽象为一个几何点，但同时考虑其质量，这种仅考虑其位置与质量的抽象物体，称为“质点”。1897年汤姆逊发现电子时，他就把电子看成一个质点，但同时还考虑电子的另一“特征量”——电荷。这种同时考虑其位置、质量与电荷的抽象物体，就是“点电荷”。因此，电子是以点电荷的姿态最先出现在物理学的舞台上的。

到了二十世纪二十年代，物理学家们通过颇为复杂的途径发现，为了进一步描述的电子行为，必须考虑电子的另外两个特征量。一个是“角动量”，另一个是“磁矩”。角动量是一个物体的旋转运动的量度，由于它是一个力学量，人们似乎比较容易接受它，但对某些读者来说，磁矩这一物理量就显得有点陌生了。

粗略地说，磁矩是表现一个物体的磁性大小的物理量。说起物体的磁性，我们全都熟悉永久磁铁的如下行为：它能吸住铁钉等小物体，又能吸附在铁门等较大的物体上。从实质上说，这两种吸引是一回事。但在磁铁吸引铁钉时，我们把磁铁看作激发磁场的物体，在磁铁被铁门吸引时，我们却把磁铁看作在磁场中受力的物体。当我们把磁铁看作一个几何点时，它激发磁场的行为与它在磁场中受力的行为，都可用“磁矩”这一物理量来描述。

除了永久磁铁，电流也能产生磁性。例如，一个有电流通过的封闭线圈也会有磁矩，这就是说，像永久磁铁一样，它也会激发磁场，也会在磁场中受力。

那么，电子为什么有磁矩呢？是因为电子是一块小的永久磁铁，还是因为电子是一个小的封闭线圈呢？

1911年，卢瑟福提出了原子的有核模型：原子有一个带正电的原子核，还有一些电子绕它旋转。形象的说，原子像一个小太阳系，原子核像太阳，绕原子核旋转的电子像行星。根据这种类比，我们很自然设想电子像一个由地球和月亮组成的系统。我们不妨设想得更具体一些：电子有两个“部分子”组成，一个像地球，我们称它为“定子”，一个像月亮，我们称它为“旋

子”。对于一个静止的电子，定子不带电，基本上是静止的，旋子带负电，以恒定的角速度绕定子作圆周运动。如果把原子核比作太阳，电子比作行星，则电子中的旋子就好比卫星，在这种意义下，我们把上面的电子模型称为“卫星模型”。这个模型对电子的结构刻画还相当粗糙，但已经远远超过实验数据能证实的程度。为什么我们要这么细致地想象电子的结构呢？因为我假定读者也像我一样，喜欢直观的、感性的、具体的模型，不喜欢那些玄之又玄的抽象概念。如果以后发现这个电子模型不能与实验事实吻合，那时再来修改还不迟。

根据经典电动力学，电子的卫星模型确实有磁矩，而且也有角动量，但这里有一个问题：角动量的计算值能不能与实验的测量值吻合？物理学领域里的另一位王者，荷兰物理学家洛仑兹，曾经对另一种电子模型作过计算，把他的计算结果用于我们的电子模型将得出结论：考虑到电子的大小，考虑到旋子的线速度不能超过光速，电子的角动量的计算值有一个上限，而这个上限小于其实验的测量值。

这个令人沮丧的矛盾引发了一场“物理学危机”，为了言简意赅，我们称它“洛仑兹危机”。我们不在这里详细叙述和评论这场危机，只想指出，洛仑兹在这里有一点小小的疏忽：由于旋子的旋转，电子会激发一个相应的电磁场，这个电磁场不能离开电子独立存在，在这种意义下它是“准静止的”。这个准静止的电磁场有角动量，它也是电子的角动量的组成部分。另一方面，准静止的电磁场分布在整个空间，不受电子大小的限制。考虑到这一点，电子角动量的大小就不再具有洛仑兹所说的那种上限了。

还有一个问题，它与著名的“波尔论断”有关。

### 3. 波尔论断

1913年，波尔提出原子的“波尔理论”，并提出“波尔论断”：“原子世界有特殊规律”，其原始依据是：根据经典电动力学，作加速运动的带电粒子必然辐射电磁波。把这个结论应用于卢瑟福的原子有核模型将得出结论：电子会因为辐射电磁波而落向原子核，从而原子会自动崩溃，而事实上原子却是经久不变的。

这一矛盾曾引发了另一场物理学危机，我们称它“波尔危机”，它迫使经典物理学退出了历史舞台。

同样，按照电子的卫星模型，由于旋子的旋转，电子除了会激发一个不能离开电子的准静止的电磁场以外，还会激发一个可以离开电子的周期性的电磁场，换句话说，电子也会“辐射电磁波”。电磁波的辐射将带走能量，而电子又没有外部能源，根据经典电磁学，我们立刻得出结论：电子会因为辐射失去能量，从而很快地崩溃。但事实上，电子却是经久不变的。这一矛盾是波尔危机的另一种表现方式。

然而，我们并不因为这一矛盾而放弃电子的卫星模型，相反，我们要重审一下物理学史上的这个旧案。问题在于：波尔危机能不能在经典物理学的框架下克服？这个问题可以这样提：按照电子的卫星模型，由于旋子的旋转，电子会激发一个球面电磁波的“波场”，在经典物理学的前提下，伴随着这个“波场”的电子是否可能经久不变？

“作加速运动的带电粒子必然辐射电磁波”这一结论是从经典电磁学的一个基本方程——麦克斯韦方程得出的，确切地说，是从麦克斯韦方程的某一个特解得出的。按照经典物理学，电子的内部运动满足麦克斯韦方程，至于它会满足哪一个特解，经典物理学却没有先验的规定，必须根据实验事实来确定。既然事实证明电子的能量不会流失，上面的疑难就归结为如下问题：将麦克斯韦方程应用于我们的卫星模型时，有没有这样一个特解：一方面，旋子持续地旋转，另一方面电子的能量却不会因此而流失。

回答是肯定的，麦克斯韦方程确实有这样一个特解，它表示电子的辐射与吸收达到平衡，我们称它“平衡解”。这个特解的存在表明波尔危机的原始依据可以在经典物理学的框架下得到克服，同时也表明我们的卫星模型就不再与经典物理学相冲突，在这种意义下，它是一个电子的经典模型。

但是，人们之所以坚信波尔论断，与其说是由于其原始依据，倒不如说是由于实验事实一再地证实它。因此，我们的上述论证远不能驳倒波尔论断。这里，我们提出另一论据。首先提一个问题：

“如果原子世界没有特殊规律，电子应该怎样运动？”

汤姆逊当年发现电子，即发现阴极射线是一束“电子流”时，他默认了一个前提：电子在外电磁场中的行为和点电荷一样。而按照经典力学，点电荷在外电磁场中的行为像点电荷一样。不久以后，人们还根据这一前提发现电子的质量与速度之间的相对论关系。由此可见，自从发现电子以来，人们一致认为：如果原子世界没有特殊规律，则电子在外电磁场中的行为和点电荷一样。”

另一方面，根据牛顿第二定律，一个带负电的点电荷在一个质量大得多带正电的点电荷的有心力场中，将作椭圆轨道运动。我们立刻得出结论：

**A：** 如果原子世界没有特殊规律，则对于原子有核模型来说，电子将绕核作椭圆轨道运动。

量子力学建立以后，人们发现：在普朗克常量趋于零的极限情况下，薛定谔方程蜕化为经典力学的雅可比方程。将这一方程应用于原子的有核模型，将得出与牛顿第二定律相同的结论。可见即使在量子力学建立以后，命题 A 仍然是人们深信不疑的结论。

可是，当波尔提出它的原子理论，并断言原子世界有特殊规律时，他的前提却是：

**B：** 如果原子世界没有特殊规律，则对于原子有核模型来说，电子的运动不是绕核作椭圆轨道运动。

即使电子是一个百依百顺的女孩子，任我们梳妆打扮，她也会无所适从。她会问：

“我不可能既满足命题 A 又满足命题 B，你们到底要我怎样运动？”

但是，胡适的原理在这里似乎不适用。电子非常不听话，一再让人们得出“原子世界有特殊规律”的结论。不过这也难怪电子，无论电子怎样运动，它都会不断地证明这一结论。就说电子在原子中的运动吧，如果电子绕核作椭圆轨道运动，它就违背了经典电动力学，这就表明原子世界有特殊规律；如果电子不绕核作椭圆轨道运动，它就违背了经典力学，这也表明原子世界有特殊规律。

由此可见，波尔论断之所以不断被证实并不是由于它符合实验事实，而是因为经典物理学

本身自相矛盾。因此，我们的任务不是放弃经典物理学，而是首先清理经典物理学，使它成为一个自洽的理论，然后再用它来说明新的实验事实。

#### 4. 电子衍射与德布罗意波

回到电子的卫星模型，电子的状态经久不变表明，对于一个静止的电子，旋子绕定子旋转激发一个驻波场，对应于麦克斯韦方程的平衡解。如果用复数表示，这个解由两个因子组成，一个仅含时间坐标，是时间的周期函数，我们称它为“时间因子”；另一个仅含空间坐标，表示一个静止的球面波场，我们称它为“空间因子”。

如果一个电子作等速直线运动，则其时间因子变成了一个单色平面波的“波函数”，而其空间因子则表示一个随着电子运动的固定波形。下面，对于作等速直线运动的电子，我们仍然把表示单色平面波的因子称为“时间因子”，把表示随着电子运动的固定波形的因子称为“空间因子”。

电子束是由大量电子组成的电子群体，在这个群体中，每一个电子都有一个准静止的电磁场和一个驻波场，这些场相互迭加，合成一个统一的电磁场，它是电子束的固有电磁场，这个场的场函数随位置与时间剧烈变化，其测量值将是它的平均值。

考虑一种特殊的电子束，其中的每一个电子都以相同的速度作等速直线运动，即该电子束诸电子的动量是一致的，人们称这种电子束为“单色电子束”。这个电子束中的诸电子的固有电磁场的场函数是诸电子的固有电磁场的场函数的迭加。如果表成复数，则诸电子的固有电磁场的场函数有一个相同的时间因子，即单色平面波的波函数，因此，单色电子束的固有电磁场的场函数有一个单色平面波的因子。

实验证明，电子束的位置分布与速度分布有一一对应的关系，特别是，对于单色电子束，它的诸电子的位置在整个空间均匀分布。这样，单色电子束的固有电磁场的平均值的空间因子不再随位置与时间改变，成了一个常量，换句话说，单色电子束的固有电磁场中的空间因子消失在平均值中了。这样，从宏观的角度来看，单色电子束的固有电磁场是一个单色平面波，这个单色平面波就是大名鼎鼎的“德布罗意波”。

由此我们得出结论：

第一，德布罗意波是单色电子束的固有电磁场。

第二，德布罗意波是一种电磁波。

然而，德布罗意波不是光波那样的电磁波：德布罗意波与光波的波源都是电子，但两种波有一显著的区别：德布罗意波作为电子束的固有电磁波，总是伴随着电子束，也就是伴随着波源。而光波却已经离开了作为波源的电子。由于有这一区别，这两种电磁波所满足的波动方程是不同的。光波满足“齐次波动方程”：

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0;$$

德布罗意波则满足如下“广义波动方程”：

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \left( \frac{2\pi m_0 c}{h} \right)^2 \Psi。$$

除了单色电子束以外，其他电子束也有固有电磁波，我们仍然称它为德布罗意波。按照这一规定，一般地说，德布罗意波是电子束的固有电磁波。

这样，电子的波粒二象性就不再难以理解：例如，在电子的散射实验中，可以用盖革计数器为射向某一方位的诸电子计数，从而显示出电子束的粒子性；而在电子衍射实验中，电子束的固有电磁场——德布罗意波——作为电磁波，在通过单缝、双缝或小孔时，将像光波一样衍射，并通过电子的数密度表现出来，从中可以看到德布罗意波的衍射图形，从而显示出电子束的“波动性”。

## 5. 电子的量子性

从牛顿力学的角度来看，电子肯定有确定的质量，但是它有确定的角动量却难以理解，我们不妨用一个日常生活的例子来阐明这一点。小孩玩的陀螺有一定的质量，这使得当它的平移运动有所改变时有某种“惯性”。陀螺不仅能平移，而且还特别能旋转，它的旋转运动也有某种“惯性”，用一个称为“转动惯量”的力学量来描述。在小孩玩陀螺的过程中，不断地用鞭子抽它，每抽它一下，陀螺就转的更欢。用力学的术语来表达，用鞭子抽陀螺，就是给它施加力矩，陀螺转的更欢，就是它的角动量增加了，因此，一个陀螺有固定不变的质量和转动惯量，却不可能有固定不变的角动量，它的角动量在外界的作用下是可以改变的。一般地说，牛顿力学意义下的物体都不可能具有固定不变的角动量。但是，电子自旋（电子的角动量）是电子的一个特征量这一事实表明，电子有固定不变的角动量，因此，电子不是一个牛顿力学意义下的物体。

由于电子有磁矩，可以通过磁场对电子施加力矩，但电子的角动量不会因此而改变。电子的这种行为虽然是微观世界的特征，但宏观世界也有类似的现象。例如，我们的体温是一定的，天气突然变冷时，体温会降低一点点；天气突然变热时，体温也会稍稍增高，但我们的身体随之就会进行自我调整，恢复到原来的体温。这种情况表明我们的身体有一种自我调节的机制。电子有固定不变的角动量表明，电子也有一种自我调节的机制：当外部条件改变时，它总能保持自己内部运动不变。

19世纪德国生物学家海克尔曾说，原子是“有意识的”。根据上下文，海克尔在这里是说：原子等微观物体不同于牛顿力学意义下的物体，它不是被动地接受外界作用，而是有着内部的、必然的、自己的运动的一种新型物体。或许，“意识”这一用语未必恰当，微观物体与其说是“有意识的”，还不如说是“自动的”。然而，海克尔关于原子等微观物体不同于牛顿力学意义下的物体的论断却是天才的预言，物理学家们要是早听了他的这一预言，或许就不会有今天的量子力学。

如果考虑到电子的自我调节的机制，电子的量子性就不难理解了。下面，我们举三个例子。

第一，当电子绕原子核旋转时，电子的自我调节的机制将使得其轨道运动与自转运动相互协调，这就要求其轨道满足一定条件，满足这种条件的轨道称为“稳定轨道”。德布罗意发现，

当电子在原子中运行时，只有德布罗意波即所说的“物质波”在轨道上形成驻波时，才是“稳定轨道”。用我们的语言来表述：在原子中运行的电子的“稳定轨道”对应于该电子的固有电磁场的时间因子在轨道上形成驻波。在这里，“稳定”这一用语的含义是：如果外界有小的扰动，电子会继续在轨道上运行。但“稳定”并不意味着绝对不变，如果外界的扰动足够大，电子也会离开“稳定轨道”。电子离开某一稳定轨道以后，将进入一种不平衡状态，这时电子的自我调节的机制将恢复电子的平衡，从而使得电子重新进入稳定轨道。如果回到了原来的稳定轨道，则不会显出宏观效果，如果过渡到另一稳定轨道，则电子经历了一个被人们称为“量子跃迁”的过程。这是电子的量子性的最典型的表现方式。

第二，当陀螺在水平的地面快速旋转时，如果它的转轴不与地面垂直，则这个转轴会与垂直轴保持不变的角度的前提下绕垂直轴旋转，这种运动称为陀螺的“进动”。按照经典物理学，当一个有磁矩与角动量的物体落在外磁场中时，将会进入绕磁场方向“进动”的状态。电子有磁矩与角动量，因此它在外磁场中肯定会“进动”。但是，当电子进入外磁场以后，会立即进入进动状态，而电子的自我调节的机制将力求其“进动”与“自转运动”相互协调，只有这样的“进动状态”才是稳定的。实验证明：电子在外磁场中恰好有两种稳定的“进动状态”，这意味着电子在外磁场中，总与外磁场方向保持两种不变的角度之一，电子的这种行为称为“空间量子化”，它是电子的量子性的另一种表现方式。

第三，当一个孤立的电子遇到外界扰动时，电子的自我调节机制力求使保持电子的内部运动不变，其中包括是旋子的圆周运动与电子的驻波场之间的相互协调。当大量电子形成电子束时，诸电子的固有电磁场相互迭加，形成一个统一的电磁场，这时电子的自我调节机制将要求每电子中的旋子运动与这个统一的电磁场相协调。对于电子束，诸电子的自我调节机制要求诸电子的位置分布与动量分布满足某种一一对应的关系。一般地说，电子束的动量分布是比较稳定的，诸电子的自我调节机制主要是调节诸电子的位置分布。以单色电子束为例，这种电子束诸电子的动量一致，诸电子的自我调节机制将力求它们的位置在空间均匀分布。这也是电子的量子性的一种表现方式。

## 6. 电子在云雾室中的径迹

在量子力学中，“不确定性”这一用语有各式各样的含义，这些含义彼此混淆造成许多概念混淆。在这里，我们先考察这些概念混淆中的一个。

电子衍射实验曾经使物理学家们大为震惊，时至今日，让我们静下心来仔细想一想，当年人们为什么会那样震惊？如果说这个实验事实出人意外，那么，当时人们意料的究竟是什么？如果说这个实验事实违背了经典物理学的预期，那么，经典物理学究竟预期什么样的实验结果？

电子被发现以后，人们曾一度把电子看作点电荷，如果在电子的小孔衍射实验中把每一个电子换成一个点电荷，则诸点电荷将落在屏幕上的同一位置（最多有实验误差允许的小偏差）。因此，在一个点电荷刚通过小孔时，我们就能预言它将落在屏幕上的什么位置，在这种意义下，我们说“单个点电荷落在屏幕上的位置是确定的”。但电子不是这样，它们不是集中在屏幕上同



一位置，而是分散成为衍射图形。因此，在电子刚通过小孔时，我们不能预言它将落在屏幕上的什么位置，正是在这种意义下，人们说“单个电子落在屏幕上的位置是不确定的”。电子的这种不确定性是一种“量子现象”，它可以追溯到海森堡的“测不准关系”。

但是，在同一实验中，电子的“不确定性”还有另一种含义：单个电子落在屏幕上留下一个痕迹，这个痕迹的线度远远大于电子本身的线度，因此，某一电子在屏幕上留下的痕迹不能给出这个电子落在屏幕上的确切位置。在这种意义下，我们也可以说“单个电子落在屏幕上的位置是不确定的”。这种不确定性并不是什么量子现象，它与测不准关系无关。

按照海森堡的用语，在上面的两种“不确定性”中，第一种不确定性来源于预告性测量的误差，我们称它为“预告不确定性”；第二种不确定性来源于回溯性测量的误差，我们称它为“回溯不确定性”。海森堡一再强调：回溯性测量是没有意义的；而英国哲人波普尔却认为回溯性测量极为重要，回溯性测量达不到一定的精确度，就无法检验对预告性测量的预言。在判定波普尔与海森堡的上述争论谁是谁非之前，请允许我先提出一个问题：怎样划分预告性测量的误差与回溯性测量的误差，即怎样划分预告不确定性和回溯不确定性？我想，人们会异口同声地说：“多么幼稚的问题”。尽管如此，我还是要为这一幼稚的问题提供一个或许是更加幼稚回答：以电子小孔衍射过程为例，如果设想整个实验装置的线度（包括装置本身的大小和装置之间的距离）增加一倍而各种部件的材料性能保持不变，则有，第一，屏幕上任意两个电子的距离增加了一倍，从而 $\Delta x$ 这一预告性测量的误差增加了一倍；第二，屏幕只改变大小而不改变性能，因此，单个电子落在屏幕上留下的痕迹的线度不变，从而 $\Delta x$ 的回溯性测量的误差保持不变。一般地说，当实验装置的线度改变时，与距离有关的预告不确定性将随着改变，而回溯不确定性则保持不变。

实验证明，当电子经过威尔逊云雾室时，将留下一条径迹。由于有某种不确定性，这条径迹不能确切地给出电子的轨道。现在我们问，这里的“某种不确定性”是“预告不确定性”还是“回溯不确定性”。

如果一束电子通过一个小孔进入一个云雾室，则每一个电子将在该云雾室中形成一条径迹，这些径迹将是相互分散的。现在让我们设想，把云雾室的线度增加一倍（从而小孔的直径也增加一倍），但不改变云雾的物质颗粒的大小，结果会怎么样？我们可以立刻回答：第一，则根据测不准关系，大量进入云雾室的电子留下的径迹将更加分散，从而 $\Delta x$ 的预告性测量的误差增加了一倍；第二，每一条径迹的粗细保持不变。从而 $\Delta x$ 的回溯不确定性保持不变。那么，海森堡所说的“云雾室中的电子的轨道不确定”是哪一种不确定性呢？他说的是：由于云雾室的雾珠太大，不能精确确定电子的轨道，这分明说的是回溯不确定性，它与测不准关系无关。

为了区分上面两种“不确定性”，找出它们的反义词或许是有益的。命题“单个电子落在屏幕上的位置是不确定的”的对立命题是“单个电子落在屏幕上的位置是确定的”。

按照不确定性的第一种含义，“单个电子落在屏幕上的位置是确定的”是指在电子的小孔衍射过程中，所有通过小孔的电子基本上都落在屏幕上的同一位置；而按照不确定性的第二种含义，同一命题是指在单个电子落在屏幕上留下的痕迹的线度与电子的线度相差无几。我想许多人会对这种指出反义词的作法极为反感，他们会提出抗议：“为什么要说这种与事实不符的话

呢？”诚然，“单个电子落在屏幕上的位置是确定的”的上述两种含义确实都与事实不符，但是，我们在这里不是问这个命题是否符合事实，而是问它有没有歧义。我们看到，这个命题与两种不同的事实不符，从而它是有歧义的。它的第一种含义“所有通过小孔的电子都落在屏幕上的同一位置”虽然与事实不符，但当人们把电子看作点电荷时，他们正是这样预期的。他们这样预期，是因为他们还不知道测不准关系。而它的第二种含义，即“单个电子落在屏幕上留下的痕迹的线度与电子的线度相差无几”，不仅与事实不符，而且根本就没有人这样想过，无论是在知道测不准关系之前还是之后，这一事实明显地表明命题的第二种含义与测不准关系无关。

同样，由于有某种不确定性，电子在威尔逊云雾室留下的径迹不能确切地给出电子的轨道。这一事实可以表成：“电子的轨道是不确定的。”其对立命题是“电子的轨道是确定的”。

和“单个电子落在屏幕上的位置是确定的”一样，“电子的轨道是确定的”也有两种含义，第一种含义是，云雾室中的每一个电子都留下同一径迹；第二种含义是，电子在云雾室中的留下每一条径迹都和电子的真实轨道一样细。诚然，根据观察，我们知道该命题的第一种含义与事实不符，但只有知道了测不准关系以后，我们才知道这种含义的命题在理论上是不成立的。因为根据测不准关系，一个电子束中的诸电子不可能在同一轨道上运行。至于该命题的第二种含义，它也与事实不符，与第一种含义不同的是，无论是在知道测不准关系之前还是之后，谁也没有想过电子在云雾室中的留下径迹和电子的真实轨道一样细。这也可以看出该命题的第二种含义与事实不符这件事与测不准关系完全无关。

或许没有人曾混淆命题“单个电子落在屏幕上的位置是不确定的”的两种含义，但是，似乎没有人不会混淆命题“电子的轨道是不确定的”的两种含义，人们多么健忘！

在电子衍射过程中，由于回溯不确定性，单个电子在屏幕上留下的痕迹不能给出该电子的确切位置，但是这个痕迹足以表明，该电子在屏幕上有一个“位置”；同样是由于回溯不确定性，单个电子在云雾室中留下的径迹不能给出该电子的确切轨道，但是这条径迹的存在足以表明，该电子运行在云雾室中有一条轨道。换句话说，这条径迹的存在足以表明，电子的运动是轨道运动。

爱因斯坦与玻尔的所谓“世纪之争”中的一个重要问题是：“量子力学的描述是否完备？”现在我们可以简单地回答这一问题：量子力学不能给出单个电子的轨道运动，从而不能描述电子在云雾室中留下的径迹，因此是不完备的。

## 7. 结束语

综上所述，我们得出结论：

第一，电子的波粒二象性原来是经典物理学的必然结论。例如，单色电子束伴随着一个单色平面波，这个单色平面波是该电子束的固有电磁场（测量值）。

第二，电子的量子性乃是电子的自我调节机制的表现。诚然，从经典物理学不能导出电子具有自我调节的性质，但是，电子的这种性质并不与经典物理学相矛盾。我们知道，从牛顿力学不能导出电动力学的方程，但电动力学的方程并不与牛顿力学相矛盾，从而这个方程的导出

不意味着推翻了经典物理学，而是把经典物理学发展到了一个新阶段。同样，电子的量子性并不与经典物理学相矛盾，这种性质的存在不意味着推翻了经典物理学，相反，它把经典物理学发展到了一个新阶段。

第三，如果说电子的不确定性是指我们不能预言单个电子的行为，那么，这种不确定性只表明量子力学还不完备，而不表明电子的运动不是轨道运动。

在近代的思想史上，数学和物理学一样，也经历过从“经典”阶段向“现代”阶段的过渡，如果说对于物理学，这一过渡以爱因斯坦的相对论的建立为标志，那么对于数学，同样的过渡的标志或许可以算是罗巴切夫斯基建立非欧几何学。这一早一晚的两个过渡都经历了光辉而又苦涩的历程，但两者的发展进程却有一个明显的区别：现代数学的建立使数学家们发现，过去的数学中的逻辑形容枯槁、惨不忍睹。人们伤心地看到：数学中包括错误的证明，推理的漏洞，还有稍加注意就能避免的疏忽，这样的大大小小的错误比比皆是。此外，还有对概念的不充分理解，不清楚逻辑所需要的原理，在某些已经给出的证明中，直觉、实证和借助于几何图形的证明取代了逻辑的证明。等等，等等。诸如此类，不一而足。

那么，在从“经典”阶段向“现代”阶段的过渡中，物理学的情况又怎样呢？由于物理学是一门实验的科学，人们重视实验事实超过重视逻辑推理，因此从“经典”阶段向“现代”阶段的过渡并没有促使物理学家们去检查物理学有没有和数学一样的随处可见的错误；相反，这种过渡使物理学家们相信，在物理学的不同的领域，特别是高速领域与微观领域，有新的物理学规律。

在我看来，与数学相比，物理学的现状更加惨不忍睹：和数学一样，物理学也有错误的证明，推理的漏洞以及稍加注意就能避免的疏忽，正是这种类型的错误导致上面我们所说的“洛仑兹危机”和“波尔危机”。此外，物理学中还有一些在数学中罕见的概念混淆，上面说的对“不确定性”这一概念的两种含义的混淆就是一例。更令人伤心的是，物理学中还充满了古怪新奇而又令人啼笑皆非的幻想，人们把这些幻想称为“新颖观念”。

在二十世纪，几乎物理学的每一个划时代的发现都伴随着某种空前的“新颖观念”。现在，这些“新颖观念”已经如此深入人心，人们已经把它们当作天经地义，竟然没有发现，这种由一个又一个“新颖观念”所形成的思维方式，已经使得一度辉煌的物理学蜕化成为一门边缘学科。不幸的是，失去了神圣光环的物理学家不是反躬自问：物理学的思想方法是不是出了问题。相反，人们仍然一味把物理学中的每一个困难都归结为经典物理学的传统观念作祟。

## Unimaginable Electrons

Tan Tianrong

Qingdao University, Physics department, 266071

[ttr359@126.com](mailto:ttr359@126.com)

**Abstract:** It is natural to associate the argument that an electron has angular momentum and magnetic moment with an intuitive electron modal in that the charge is revolving, but such an electron modal has two difficulties: Firstly, considering the dimension of the electron, and the requirement that the linear velocity of the electron border cannot large than light velocity, Lorentz has concluded that the electron angular momentum has a superior limit, but which is clearly less than the measurement value. Secondly, if the charge is revolving, an electron is bound to emit electromagnetic wave and thus would collapse because of losing energy, but the state of the electron is prolonged constant actually. It is well known that Bohr found the same contradiction in the Rutherford atom model, and for this reason he asserted that “there are special laws in micro world”. Due to the above two difficulties, any intuitive modal in micro world are abandoned by quantum physicists. However, it is about to see that the very two difficulties are eliminable in the framework of classical physics.

Firstly, it must be pointed out that Lorentz advanced his argument through an oversight. An electron is a charged system, and thereby it certainly excites an electromagnetic field, which is the “intrinsic electromagnetic field” of the electron. This field possesses angular momentum and that is a component part of the electron angular momentum. On the other hand, the intrinsic electromagnetic field of the electron distributes over the whole space. Considering this argument, the electron’s angular momentum has not the superior limit as Lorentz given any longer.

Secondly, if there are no special laws in micro world, the internal motion of electron satisfies Maxwell functions, but the question which special solution herein ought to be choosed must be answered by experimental facts. It is easy to prove that applying Maxwell functions to the internal motion of electron, there exists a special solution indicating that the energy of the electron will not be washed away when its charge sustained revolve. It is thus seen the original foundation of Bohr’s thesis that “there are special laws in micro world” is wrong, and thereby the intuitive electron modal in that the charge is revolving is imaginable.

For a still electron, such a special solution of Maxwell function expresses a standing wave field, of which the wave function signified as a complex number consists of two factors, one merely contains the coordinate of time; the other only contains that of space. It is concluded that the first factor of for an electron moving in a straight line and constant velocity state becomes a singer-frequency plan wave, and the second factor becomes a fixed wave shape following the electron.

In an electron beam, the intrinsic electromagnetic field of its electrons forms the intrinsic electromagnetic field of the beam. If all electrons belong to the beam are in a same straight line and constant velocity state, the intrinsic electromagnetic field of the beam has two factors, one is a singer-frequency plan wave, and the other as a function of time and space rapid changes, but its mean value is a constant. So, the measurement value of the intrinsic electromagnetic field of this beam is a singer-frequency plan wave, which is exactly de Broglie wave. It is thus seen that both de Broglie wave and light wave are electromagnetic waves radiated by electrons, merely a light wave is one departed from wave source while a de Broglie wave is one in company with wave source.

According to Newton mechanics, the angular momentum of a given body is variable, namely, a body in the Newton mechanics sense has not fixed angular momentum. On the other hand, it is well known that

the angular momentum is a characteristic quantity of the electron. This fact means that the angular momentum of an electron is able to keep invariant under the external action. In other words, this fact indicates that the electron has a certain self-regulation mechanism, by means of which it is always able to keep its internal motion constant while the external condition is changing. For instant, when the electron revolves round the atom nuclear, its self-regulation mechanism will harmonize its orbital motion with rotation, so that requires its orbit satisfies a certain condition. An orbit satisfying such condition is called “stable orbit”. If there is small external turbulence, an electron in stable orbit will continue move in the orbit. Conversely, if the external turbulence is large enough, the electron will depart from stable orbit, enter an unbalance state, and at this moment the self-regulation mechanism will make it reenter stable orbit for the purpose of recovering balance state. If returning to the original orbit, this process has not macro effect. Conversely, if enters a new orbit, it will undergo a process that is called “quantum transition”. That is a typical example of so-called “quantum behavior”. Having magnetic moment, an electron will enter precession in a magnetic field and its self-regulation mechanism will make its rotation axis form a certain angle with the magnetic field. Such a behavior of the electron is called “space quantization”. For an electron beam, the self-regulation mechanism of each electron will harmonize the position distribution of electrons with the momentum distribution. So-called Heisenberg relation is one of the expressions of such a behavior of the electron beam.

So-called “uncertainty” has variable meanings. If “the uncertainty of the electron” means that it is impossible to predict the behavior of a single electron, then the “uncertainty” only indicates that quantum mechanics is not complete instead of electron motion is not orbital motion,

**Key words:** electrons; spin; magnetic moment; Maxwell function; wave particle duality; quantum properties; uncertainty; orbit motion; quantum transition; quantum mechanics