

本文已发表在 Physics Essays 上，文章引用请引用英文版：

Zeng JQ. Classical physical mechanism of quantum production and its explanation for hydrogen atom structure and photoelectric effect. Physics Essays, 2021, 34(4):529-537.

<http://dx.doi.org/10.4006/0836-1398-34.4.529>

量子产生的经典物理学机制及其对氢原子结构与光电效应的解释

曾纪晴

中国科学院华南植物园，广东 广州 510650

zengjq@scib.ac.cn

摘要：本文分析了普朗克能量子以及爱因斯坦光量子的概念存在的问题，修正了量子的概念并提出了电子跃迁功率的新概念。本文澄清了经典电磁学中关于电子绕核做匀速圆周运动将辐射电磁波的常见误解，指出电子绕核做频率改变的加速或减速运动才会辐射会吸收电磁波，并在此基础上阐述了量子产生的经典物理学机制。基于此，本文在不需要玻尔“量子化假设”的前提下，解释了氢原子电子轨道能级量子化与光谱现象。此外，还利用修改的量子概念解释了光电效应。修正后的量子概念及其经典物理学发生机制打破了宏观与微观之间的鸿沟，消除了“经典物理学”与“量子力学”之间的矛盾，为重建统一的宏观与微观物理学奠定了重要基础。

关键词：量子；普朗克常数；电子跃迁功率；氢原子结构；原子光谱；光电效应；波粒二象性

Classical physical mechanism of quantum production and its explanation for hydrogen atom structure and photoelectric effect

Jiqing Zeng

South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: In this paper, the problems existing in the concepts of Planck's energy element and Einstein's light quantum are analyzed, the revised concept of quantum and a new concept of electron transition power was proposed. This paper clarifies the common misunderstanding in classical electromagnetics that the electron will radiate electromagnetic wave when it moves around the nucleus in a uniform circular motion, points out that the electron will radiate and absorb electromagnetic wave only when it moves around the nucleus in an accelerated or decelerated motion with a change of frequency, and expounds the classical physical mechanism of quantum generation. Based on this, the quantization of electron orbital energy level of hydrogen atom and the phenomenon of spectrum are explained without Bohr's "quantization hypothesis". In addition, the photoelectric effect is explained by using the modified quantum concept. The modified quantum concept and its mechanism of classical physics break the gap between macro and micro physics, eliminate the contradiction between "classical physics" and "quantum

mechanics", and lay an important foundation for the reconstruction of unified macro and micro physics.

Key words: quantum; Planck constant; electronic transition power; atomic structure; atomic spectrum; photoelectric effect; wave particle duality

1 引言

“量子”是量子力学最基本的概念，最早是由德国物理学家 M·普朗克在 1900 年研究黑体辐射时提出的^[1]。他提出能量子假设，认为辐射是振动的带电粒子（谐振子）的振动产生的电磁波，在电磁辐射的吸收与发射过程中，能量是不连续的，而是一份一份地的，这个不可再分的一份能量，就是所谓的最小能量单元，称为能量子 $E=h\nu$ 。他认为辐射或吸收的能量是能量子的整数倍，即 $nh\nu$ 。其中， ν 是电磁波频率， h 是普朗克常数，其值为 $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。在此基础上，爱因斯坦于 1905 年进一步提出了光量子的概念^[2]，认为光的能量在空间中的分布就是不连续的，光就是由一份一份的能量子组成的，其发射与吸收都是一份一份地进行的。爱因斯坦的光量子大小就是普朗克的能量子 $E=h\nu$ 。1913 年，尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)^[3]在提出原子轨道模型时采用了普朗克能量量子化概念与爱因斯坦光量子概念，认为电子在低能级与高能级之间进行跃迁时会吸收或辐射一个能量子或光量子 $\Delta E=h\nu$ 。普朗克和爱因斯坦的量子概念以及玻尔的原子结构模型为量子力学的发展奠定了基础。

然而，量子力学的发展在取得一定成就的同时，也在量子力学诠释方面造成了巨大的争议与分歧。玻尔说：“如果谁不为量子论而感到困惑，那他就是根本不懂量子力学”^[4]。爱因斯坦则一直坚持认为“量子力学是不完备的”^[5]。量子力学取得的成就说明量子概念具有正确的内容，而量子力学面临的问题和困境，则说明该概念本身可能存在着某种缺陷或不足。本文分析了普朗克能量子以及爱因斯坦光量子的概念存在的问题，对量子概念进行了修正，解释了量子产生的经典物理学机制，同时提出了电子跃迁功率的新概念。在此基础上，解释了氢原子电子轨道能级量子化与光谱现象以及光电效应。

2 能量子或光量子概念存在的问题

不论普朗克的能量子概念还是爱因斯坦的光量子概念，都强调了辐射能或光能的不连续性，能量是由一份一份的最小单元的能量子或光量子所组成的。可见，所谓**量子**本质上就是一份**最小的能量**。然而，不论普朗克的能量子概念还是爱因斯坦的光量子概念，均把“1 个量子”的能量规定为 $h\nu$ 。很明显，随着频率 ν 的变化，量子的能量大小也随之变化，也就是说，所谓的最小单元实际上根本就不是固定的最小值，而是一个大小随频率而变化的值。既然是大小可变、不固定的数值，怎么能称之为“**最小的能量单元**”呢？如果是最小的能量单元，它就应该是一个固定的最小值，而不应该是大小可变的、不固定的数值。显然，普朗克能量子或爱因斯坦光量子的概念本身存在着内在的矛盾。

玻尔提出电子在不同能级之间跃迁时电子吸收或辐射“1 个”光量子 $h\nu$ 的假设，认为电子在不同能级之间的跃迁是“瞬间”（或一次性）吸收或辐射 1 个光量子 $h\nu$ 。爱因斯坦在解释光电效应时也假设电子一次性吸收 1 个光量子，不需要花费时间。但实际上，如果 1 个能量子或光量子的能量为 $E=h\nu$ ，由于普朗克常数的单位是“焦耳·秒”，而频率的单位为“1/秒”，那么 $h\nu$ 表示的就是单位时间（1 秒）所吸收或辐射的能量。这就与所谓的电子跃迁“瞬间”（几乎不用时间）吸收或辐射能量的假设相矛盾。既然吸收或辐射“一份”能量子或光量子需要 1 秒钟的时间，所谓的能量“不连续”的说法也是自相矛盾的。

3 量子概念的修正及量子产生的物理机制

实际上,许多人早已经注意到了普朗克或爱因斯坦的量子概念存在问题并尝试进行了修正。比如,2009年 Brooks 注意到普朗克在他早期的工作中包括了缺失的时间变量,但在他著名的量子论文中却忽略了它。把时间(t)恢复到普朗克的量子公式中得到 $E=hvt$, 式中 h 是普朗克能量常数,是光的单个振荡的平均能量,即 $6.626 \times 10^{-34} J/osc$ 。光的平均振荡能量是恒定的,并且随频率或波长的变化而变化。“光子”是一个与时间有关的(一秒钟)能量包,因此不可能是一个真正不可分割的基本自然粒子^[6]。2010年 Worsley 引入一个基本的先验能量等价方程,从普朗克常数 h 出发,定义了基本量子谐振子及其主能量分量,从而修正了普朗克或爱因斯坦的量子概念^[7]。2018年 Gardi 则通过引入循环域的新概念,采用修正的单位分析法,指出电磁波的一次振荡(一个波长,一个周期)的能量在数值上等于普朗克常数^[8]。显然,他们都正确地指出了“量子”的能量应该是一个确定不变的最小能量,并且该能量在数值上等于普朗克常数。然而,他们都没有讨论量子产生的物理机制,因此,他们的结论多少带有先验的或猜测的成分。

由经典电磁学可知,电荷在磁场中加速运动会辐射能量,电荷受到电磁力的作用也会加速运动。光是一种电磁波,随变化的电场与磁场交替震荡而传播,电子与光的相互作用是电子吸收或辐射能量的物理学基础。众所周知,电子在静电场中保持平衡稳定状态的前提是作用力的平衡。而在作用力平衡条件下,电子并不做功,因而并不辐射或吸收能量。因此,电子辐射或吸收能量必须是电子受力不平衡,而电子受力不平衡则电子必然作加速或减速运动。也就是说,电子作加速或减速运动时才辐射或吸收能量。做简谐运动的物体,其动能和势能随着周期性运动而相互转换,其频率不变则总能量保持不变。因此,电子做简谐振动时,只要其振动频率不变,它就是一个稳定的谐振子,就不会辐射或吸收能量。可见,电子做稳定的简谐振动(振动频率不变)或做匀速圆周运动或椭圆运动(运转频率不变)时,电子受力平衡,能量守恒,并不辐射能量。

当电子穿越电磁波时,由于电磁波的电场与磁场交替变换,电子必然受到变化的电场或磁场的作用从而产生电磁力的作用,打破力的平衡,电子的能量得到增加。这就是电磁吸收电磁波的物理机制。电子在电场中受力不平衡时,在合力的作用下,产生加速运动,根据经典电磁学,电子加速运动就相当于产生了变化的电流,因而就产生了变化的磁场,而变化的磁场同时又激发变化的电场由此产生电磁波辐射。这就是电子加速运动辐射能量的物理机制。因此,电子与电磁波相互作用时时,电子将吸收电磁波或光的能量,当电子做加速简谐振动或加速圆周运动或椭圆运动时,电子将辐射电磁波能量。

当仅考虑电子的加速简谐振动或加速圆周运动时,由于电子受到的合力正比于电子运动的加速度 $F \propto a$, 电子运动的加速度正比于电子振动频率或圆周运动频率的增加 $a \propto \Delta f$, 电子振动频率或圆周运动频率的增加又正比于辐射的能量 $\Delta f \propto \Delta E$, 因此电子受力产生加速度进而导致能量的辐射可以采用电子振动频率或圆周运动频率的增加来度量。 $\Delta E / \Delta f$ 可以用来表示电子每增加一个振动或圆周运动频率所辐射的平均能量。电子加速振动或加速圆周运动辐射电磁波时,每增加一个频率恰好对应一个振动周期的电磁波,也就是说,一个振动周期的电磁波(一个频率或一个波长)的能量等于电子每增加一个振动或圆周运动频率所辐射的平均能量。假如电子做匀加速简谐振动或圆周运动,那么电子将辐射频率固定的电磁波。电子受力的增加导致电子简谐振动或圆周运动频率的增加,表现为辐射电磁波的频率的增加。电磁波能量的增加表现为电磁波频率的增加,其本质在于电子简谐振动或圆周运动频率的增加。由此可推知,电磁波一个完整的电磁震荡(一个频率或一个波长)所专递的能量是相同的。

由此可见,一个电子穿过一个完整的电磁场交替变化周期所吸收的能量,与一个电子在静电场中做加速简谐振动(或加速圆周运动)每增加一个频率所辐射的能量是相等的。由于

一个电子的电荷是最小的电荷（即单位电荷），因此一个电子吸收一个振动周期的电磁波的能量，以及一个电子（单位电荷）加速简谐振动（或**加速圆周运动**）每增加一个频率所辐射的能量就是一个“**最小能量单元**”。显然，这个最小的能量单元就是一个能量子或光量子，我们把它标记为 ε 。这就是修正后的量子概念，它真正代表了一份最小的能量单元，符合了普朗克最早对量子概念的定义。

假设一个电子在 Δt 时间内吸收或辐射的总能量是 ΔE ，总共吸收或辐射的“最小能量单元” ε 的数量是 k 个，则：

$$\Delta E = k\varepsilon \quad (1)$$

那么，电子吸收或辐射的功率为：

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{k\varepsilon}{\Delta t} \quad (2)$$

设 $\nu = k/\Delta t$ ，则 ν 代表单位时间内电子吸收或辐射的量子数，这体现了量子的“粒子性”。根据修正后的量子概念，一个能量子或光量子就是一个完整电磁交替振荡周期的电磁波。单位时间内吸收或辐射 ν 个光量子，相当于单位时间内吸收或辐射了频率为 ν 的电磁波，这又体现了量子的“波动性”。因此

$$P = \frac{k\varepsilon}{\Delta t} = \varepsilon\nu \quad (3)$$

该式也就体现了量子的“波粒二象性”。根据修正后的量子概念，1个光量子就是1个波长或1个频率的电磁波。一束光是由若干个相同波长的电磁波一个接一个地组成的，也可以看作是由一个一个光量子依次排列而成的（图1）。看起来光量子是一个不连续的量子，但事实上，因为量子本身是一个完全电磁振动的电磁波，能量变化本身是连续的。因此，所谓的量子不连续性与能量的连续性并不冲突，但实际上是统一的。可见，所谓光的波粒二象性，实际上表征的是光以电磁场交替震荡传播能量的两种理解方式，本质上并不存在不连续的能量。因此，光的粒子性不过是把光量子类比为具有独立能量的粒子，但光量子本身不具有质量，没有物质结构，不是真正的物质粒子，不能把光量子的粒子性的类比当做实际的物理真实。

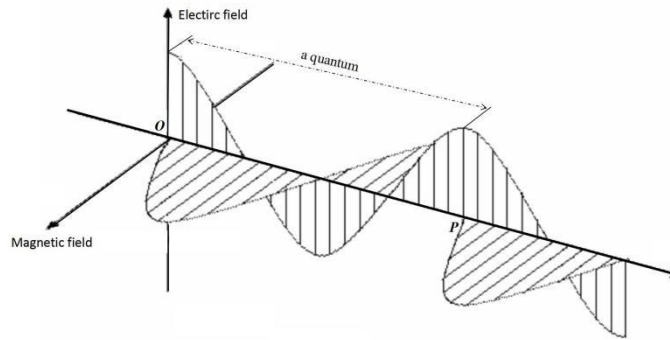


图 1. 一个光量子就是一个波长的电磁波或一个频率的电磁震荡

Fig.1 A quantum of light is an electromagnetic wave of one wavelength or an electromagnetic oscillation of a frequency

由（2）（3）式，得

$$\Delta E = (\varepsilon\Delta t)\nu \quad (4)$$

$\varepsilon\Delta t$ 是作用量的单位（能量×时间），表示最小能量单元 ε 的时间积累。普朗克常数 h 的单位是焦耳·秒（J·S），它表示单位时间（1s）内最小能量的作用量，被称为作用量子。可见，

当 Δt 取单位时间（1s）时， $\varepsilon\Delta t$ 就表示单位时间（1s）内最小能量 ε 的作用量，即 $\varepsilon\Delta t=h$ 。此时（4）与旧量子 $E=h\nu$ 完全一致。因此， ε 与普朗克常数 h 在数值上相等，即 $\varepsilon=6.62607015\times 10^{-34}$ （J）。可见，普朗克常数 h 是作用量子，而 ε 才是真正的能量子（光子）。不难看出，旧量子概念的能量 $E=h\nu$ 实际上表示的是电子在单位时间内吸收或辐射的能量，包含了 ν 个光子 ε 的能量。旧量子概念无法解释为何光的能量与频率有关。而修正后的量子概念则很容易解释清楚：光的频率越大意味着单位时间内传递的光量子 ε 数量越多，因此光的频率越大，它的能量就越高。

4 使用新量子概念解释物理现象

正确的科学概念反映了人们对客观世界的正确认知。新的科学概念是否正确，必须看它是否与以前人已经验证的科学事实与科学理论相一致。建立在旧量子概念基础之上的现代量子力学与前人业已验证的经典物理学常常在科学逻辑上相矛盾，却宣称可以不接受“经典物理学”的检验，让物理学分裂为宏观“经典物理学”与微观“量子力学”两个科学逻辑相互矛盾的理论体系，人们因此陷入了严重的认知混乱。修正后的量子概念消除了旧量子概念的内在逻辑矛盾，有望解决“量子力学”与“经典物理学”不一致的问题。为了验证修正后的量子概念的正确性，我们试图在“经典物理学”规律的基础上去解释以前只能用“量子力学”才能解释的物理现象。

4.1 对氢原子结构与光谱的解释

4.1.1 原子结构的稳定性解释

1913年，玻尔提出了原子轨道模型，对原子中电子绕核运行的轨道作出了“假设”：（1）假设电子绕核运动的轨道存在不吸收和不辐射能量的定态；（2）假设这些电子在定态轨道上运行的角动量是量子化的；（3）假设电子在定态轨道之间跃迁时吸收或辐射的能量是一个光子 $E=h\nu$ 。玻尔的这些假设最后得出的理论推导结果很好地解释了氢原子光谱的形成。然而，玻尔的这些假设本身却没有得到“经典物理学”的解释，这些“无法”用“经典物理学”解释的假设就被认为是不同于“经典物理学”规律的“量子力学”规律。

通常的观点认为，根据经典电磁学，加速运动的电子会辐射能量，而电子做绕核做圆周运动，具有向心加速度，因而就会不断辐射能量，最后坠落到原子核而造成原子“崩塌”。这种观点与实际不符，说明这种说法是错误的。我们认为，这种观点的错误在于**误解了经典电磁学的电子加速运动而辐射能量的理论**。麦克斯韦方程组所揭示的电荷加速运动导致能量辐射，指的是电子运动的**线性加速度**，而不是向心加速度。匀速圆周运动的向心力不做功，因为向心力指向圆心，力矩为0。电子绕核做匀速圆周运动时，电子与原子核之间的库仑力刚好等于向心力，力矩为0，电子不做功，自然就不会吸收、也不会辐射能量了。只有做非匀速圆周运动时，电子与原子核之间的库仑力不等于向心力，力矩不为0，电子才会吸收或辐射能量。此外，原子处于环境中，其吸收和辐射的能量时刻处于动态平衡状态，而电子是原子系统的一部分，不会出现电子能量降为零而突然坠入原子核中的情况。即便在绝对零度下，电子无法从环境中吸收辐射，但它可以绕核做匀速圆周运动，不辐射能量，因此也不会坠入原子核。

4.1.2 原子光谱的不连续性解释

正确理解了经典物理学原理后就明白，电子绕核做匀速圆周运动就不辐射能量，做加速圆周运动时才辐射能量，或吸收能量时做减速圆周运动。人们普遍有一个错误的认知，认为电子绕核做圆周运动就会辐射能量，且辐射的频率 ν 等于电子绕核运转的频率 f 。事实上，电子绕核加速运转才会辐射能量，匀速圆周运动不会辐射能量。因此，根据我们的新量子概念，电子绕核加速运转一周就产生电磁场交替变化震荡一个周期的电磁波，也就是产生一个光子 ε 。

假设电子在定态能级轨道 n 以频率 f_n 绕核做匀速圆周运动，跃迁到定态能级轨道 m 以频率 f_m 绕核做匀速圆周运动，用时 Δt 秒，则频率改变的平均加速度为：

$$a = \frac{f_m - f_n}{\Delta t} = \frac{\Delta f}{\Delta t}$$

Δt 时间内增加的绕核运转圈数 k 为

$$k = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{\Delta t} (\Delta t)^2 = \frac{1}{2} \Delta f \Delta t \quad (5)$$

根据修正后的量子概念， Δt 时间内电子辐射的光量子数为 k ，电子吸收或辐射光量子的功率为：

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{k \varepsilon}{\Delta t} = \frac{1}{2} \varepsilon \Delta f = \varepsilon \nu \quad (6)$$

电子吸收或辐射光量子的功率，反映了电子在不同能级之间跃迁能力的大小，因此我们也可称之为**电子跃迁功率**。从（6）式可得电子跃迁的能级差：

$$\Delta E = \frac{1}{2} \varepsilon \Delta f \Delta t = \frac{1}{2} \varepsilon (f_m - f_n) \Delta t = \frac{1}{2} \varepsilon f_m \Delta t - \frac{1}{2} \varepsilon f_n \Delta t \quad (7)$$

电子产生的辐射频率为：

$$\nu = \frac{1}{2} \Delta f \quad (8)$$

可见，电子跃迁产生的辐射频率是电子在两个定态能级轨道运转的频率之差的一半，不是从 f_n 到 f_m 的连续频率谱。因而，用修正后的量子概念就解释了电子跃迁产生光量子的频率是线状光谱而不是连续光谱。

4.1.3 对电子能级轨道量子化的解释

4.1.3.1 电子定态轨道的能级

我们以氢原子为例，探讨电子绕核运动与电子跃迁的规律。根据我们修正的量子概念，电子在定态能级轨道上运行时绕核做**匀速圆周运动**，则其向心力来自电子的库伦引力：

$$F = ma = m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (9)$$

电子运动速度为：

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r}} \quad (10)$$

电子绕核运动的频率由 $v=2\pi r f$ 得出：

$$f = \frac{v}{2\pi r}$$

把（10）式代入可得：

$$f = \frac{e}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r^3}} \quad (11)$$

其动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

其势能为：

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

由于电子的库伦引力作用，电子离核越远则势能越大，则上述**势能表达式只能取负数**，若取电子与核相距无穷远处势能为零，则

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

电子具有的总能量为其动能与势能之和：

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (12)$$

4.1.3.2 玻尔半径

我们假设电子在某**定态轨道**绕核作匀速圆周运动，其能量为 E_0 ，其运转轨道半径为 r_0 ，其绕核运转频率为 f_0 。**电子吸收能量 ΔE** 后，其运行轨道半径不断增大，运行速度不断降低。能量达到最大值 $E_n=0$ 时，其运动速度为零，其运转频率 $f_n=0$ ，即电子达到最大运行轨道时，电子实际上恰好脱离了原子核的束缚而成为自由电子。据（7）（12）式，得：

$$\Delta E = E_n - E_0 = 0 - E_0 = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0} = \frac{1}{2} \epsilon f_0 \Delta t$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0} = (\epsilon \Delta t) f_0$$

由（11）式，得

$$f_0 = \frac{e}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r_0^3}}$$

代入上式，得

$$r_0 = \frac{\epsilon_0 (\epsilon \Delta t)^2}{\pi m e^2} \quad (13)$$

代入（12）式，得

$$E_0 = -\frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 (\epsilon \Delta t)^2} \quad (14)$$

由于 $\Delta t=1s$ 时， $\epsilon \Delta t=h$ ，则

$$r_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.529 \times 10^{-10} (m), E_0 = -\frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = -2.1787 \times 10^{-18} (J) = -13.6 (eV) \quad (15)$$

这就是**玻尔半径**和玻尔轨道能级。可见，所谓玻尔半径是一个电子在吸收 2.1787×10^{-18} 焦耳

(J) 或 13.6 电子伏特 (eV) 能量后, 在单位时间内 (1s) 跃升到最高能级并成为自由电子的轨道半径。

4.1.3.3 电子能级轨道量子化

根据 (12) 式, 可得

$$\Delta E = E_m - E_n = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_m} \right) = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0} \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right) \quad (16)$$

由 (4) 式可得

$$\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0} \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right) = (\epsilon\Delta t)v$$

则

$$v = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0 (\epsilon\Delta t)} \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right)$$

根据 (13) 式, 可得

$$v = \frac{me^4}{\epsilon_0^2 (\epsilon\Delta t)^3} \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right) \quad (17)$$

由于 $\Delta t=1s$ 时, $\epsilon\Delta t=h$, 则

$$v = \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right) = Rc \left(\frac{1}{r_n/r_0} - \frac{1}{r_m/r_0} \right) \quad (18)$$

其中

$$R = \frac{me^4}{\epsilon_0^2 h^3 c} \quad (19)$$

根据氢原子光谱实验数, (18) 与里德伯公式一致:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad n=1, 2, 3, \dots; \quad m=n+1, n+2, n+3, \dots$$

(R 为 Rydberg 常量)

$$v = Rc \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (20)$$

(19) 式即为里德伯常量, 同时

$$\frac{1}{r_n/r_0} = \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{1}{r_m/r_0} = \frac{1}{m^2}$$

因此

$$r_n = n^2 r_0 \quad (21)$$

由 (12) 式, 可得

$$E_0 = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0}$$

$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = \frac{1}{n^2} E_0 \quad (22)$$

由 (11) 和 (21) 式, 可得

$$f_n = \frac{1}{n^3} f_0 \quad (23)$$

电子在定态轨道运行的角动量为 $L=mvr$ ，由 (10)、(15) 和 (21) 可得

$$L_0 = \frac{h}{2\pi}$$

$$L_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (24)$$

至此，我们得到了 (21) - (24) 式所表示的电子轨道量子化、能级量子化、运行频率量子化以及轨道角动量量子化形式，与玻尔氢原子结构理论完全相同。

此外，根据修正后的光量子概念，我们还可以计算电子跃迁时吸收或辐射的光量子数，这是旧量子概念无法得到的。设电子吸收或辐射 k 个光量子 ε 后从能级轨道 m 跃迁到能级轨道 n ，电子轨道的能级差 $\Delta E = k\varepsilon = E_n - E_m$ 。由 (12) (21) 式，得

$$\Delta E = E_n - E_m = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = k\varepsilon$$

$$k = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 \varepsilon r_0} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

将 (13) 式代入，得

$$k = \frac{me^4 \Delta t}{8\varepsilon_0^2 (\varepsilon \Delta t)^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (25)$$

采用我们修正的量子概念，在不需要玻尔的“量子化条件”假设的情况下，基于经典物理学和原子光谱实验结果，我们合乎逻辑地推导出了“玻尔半径”、“里德伯常数”以及“电子轨道能级、轨道半径、电子绕核运动频率、能级轨道角动量”等量子化表达形式。当电子跃迁时间 Δt 取单位时间 1 秒时，与玻尔的原子结构模型完全一致，充分证明我们的新量子概念是正确的。

4.1.3.4 电子跃迁功率

根据 (3) 和 (25) 式，可得电子在轨道能级 E_m 与 E_n 之间的跃迁功率：

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{k\varepsilon}{\Delta t} = \frac{me^4 \varepsilon}{8\varepsilon_0^2 (\varepsilon \Delta t)^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (26)$$

当 $m=1, n=\infty$ 时，即电子从基态能级 E_0 跃迁到最高能级 E_n 成为自由电子，得到氢原子的电子最大跃迁功率：

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{me^4 \varepsilon}{8\varepsilon_0^2 (\varepsilon \Delta t)^3} \quad (27)$$

$$\Delta E = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 (\varepsilon \Delta t)^2} \quad (28)$$

当 $\Delta t=1s$ 时， $P=\varepsilon Rc=13.6 \text{ eV/s}$ ， $\Delta E = hRc = 13.6(eV)$ 。因此，电子的最大跃迁功率就是电子在玻尔半径轨道与最高能级轨道之间的跃迁功率。由 (3) 式可得电子吸收或辐射的最大光量子频率 $\nu_0 = Rc = 3.28984196 \times 10^{15} / s$ ，以及电子吸收或辐射的光量子最小波长

$$\lambda_0 = c/\nu_0 = 1/R = 9.1126705 \times 10^{-8} m。$$

4.1.3.5 电子跃迁时间

由 (3) 式可得

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{P} = \frac{k}{\nu} \quad (29)$$

可见, 电子跃迁时间取决于电子吸收或辐射的能量和电子跃迁功率的大小, 由电子吸收或辐射的光量子数 k 和电磁波频率 ν 所决定。

依据修正的量子概念, 电子在能级轨道之间跃迁的过程中, 电子绕核运转的频率或周期是不断变化的, 电子绕核加速或减速运动一圈就辐射或吸收 1 个光量子 ε 。电子从能级轨道 m 跃迁到能级轨道 n , 在单位时间内 (1s) 吸收或辐射 ν 个光量子 ε , 则电子吸收或辐射 1 个光量子 ε 所需时间为 $1/\nu$ 秒。电子轨道能级的量子化特征表现为不同能级轨道之间具有不同的电子跃迁功率。在特定的能级轨道之间, 电子在 Δt 时间内吸收或辐射 k 个光量子 ε , 与电子在单位时间内 (1s) 吸收或辐射 ν 个光量子 ε 是完全等价的。可见, 在特定的能级轨道之间电子跃迁功率是一定的, 电子并非只能在单位时间内 (1s) 吸收 ν 个光量子 ε , 它可以在任意 Δt 时间内吸收任意 k 个光量子 ε 。因此, 电子并非只能从一个能级轨道“跳跃”到另一个能级轨道, 实际上电子在能级轨道之间可以做连续运动。电子并不是精确地从一个能级轨道 m 跳跃到另一个能级轨道 n , 而是随着原子体系能量的变化, 电子的运动随时发生连续性的动态变化, 在能级轨道 m 和 n 之间做加速或减速圆周运动。

基于旧量子概念, 玻尔原子结构理论认为, 电子跃迁时只能完整吸收或辐射 1 个光量子的能量 $E=h\nu$ 。也就是说, 电子只能在定态轨道之间“跳跃”。因此人们普遍认为电子跃迁是瞬间发生的、不需要时间的、不连续的、无法用经典物理学解释的, 因而被称之为“量子跃迁”。由 (3) 式可知, 当电子跃迁时间 $\Delta t=1s$ 时, $\Delta E=P(\Delta t)=\varepsilon(\Delta t)\nu=h\nu$ 。可见, $\Delta E=h\nu$ 表示的是单位时间内电子吸收或辐射 ν 个光量子 ε 的能量。也就是说, 玻尔原子结构理论中电子吸收或辐射“1 个光量子”的能量, 隐含的电子跃迁时间是单位时间 1s。因此电子跃迁是非连续的、不需要时间的、瞬间发生的说法在理论上是自相矛盾的。如果电子跃迁的时间 $\Delta t=0$, 那么电子跃迁功率 P 就是无穷大。这显然是荒谬的。此外, 光的传播速度 c 是有限的, 显然吸收或辐射光量子的速度不可能无限大。可见, 所谓电子跃迁是不连续的、不需要时间的、瞬间发生的说法显然是错误的。

由于电子跃迁功率是折算为单位时间 (1s) 内电子跃迁所吸收或辐射的能量, 因此把电子跃迁时间设定为 1s 确实有利于计算电子轨道能级。氢原子的电子离能 (I_1) 为 13.6eV, 恰好与氢原子核外电子的玻尔轨道能级吻合, 说明以电子跃迁为单位时间 1s 计算的电子轨道能级是合乎实际的。但这并不意味着电子只能以 1s 为时间单位一次性吸收或辐射 $\Delta E=h\nu$ 的能量, 实际上电子可以在任意时间 Δt 内吸收任意 k 个光量子 ε 。

4.2 对光电效应的解释

在光学上, 光强指的是单位面积上的辐射功率。用 I 表示光强, A 表示面积, N 为照射到面积 A 之上的总光子数, Δt 为照射时间, 根据修正的量子概念, 可得:

$$I = \frac{N\varepsilon}{A\Delta t} \quad (30)$$

如果光的频率是相同的, 辐射面积 A 上单位时间接收了 n 个光子发射的总共 N 个光子, 即每个光子发射了 ($k=N/n$) 个光子, 则:

$$I = \frac{nk\varepsilon}{A\Delta t} = \frac{n\varepsilon\nu}{A} = \frac{nP}{A} \quad (31)$$

$$n = \frac{IA}{P} = \frac{IA}{\varepsilon\nu} \quad (32)$$

可见，如果光的频率 ν 和受光面积 A 一定，那么随着光强的增加，接收光量子的电子数也会增加。

当不同频率的光与电子作用，电子在单位时间内接收的光量子数就不同。光的频率越高，电子在单位时间内接收的光量子数就越多，电子吸收的能量就越大。如果核外电子接收的光量子足以使该电子跃迁到最大能级轨道，那么该电子就挣脱原子核束缚而成为自由电子。假设某种金属原子最外电子层的电子需要吸收 n_0 个光量子 ε 才能够跃迁到最大能级轨道，设电子吸收 n_0 个光量子所需时间为 Δt ，则该电子吸收光量子的功率为 $P=n_0\varepsilon/\Delta t$ 。单位时间内吸收光量子的频率为 $\nu_0=n_0/\Delta t$ 。也就是说，如果频率恰好为 ν_0 的入射光照在电子上，那么电子就将在 Δt 时间内吸收 n_0 个光量子，摆脱原子核的束缚成为“自由电子”。那么，入射光频率 ν_0 就是该金属材料发生光电效应的最小频率阈值（极限频率）。由于每种金属材料由不同的原子组成，每种原子的核外电子数及排布方式和运行轨道不同，其最外层电子与原子核的束缚力就不同，因此其跃迁到超过最大能级轨道所需吸收的能量也就不同，因而就具有不同的极限频率 ν_0 。

显然，如果某种金属材料在某个频率 $\nu>\nu_0$ 的光照射下发生了光电效应，由（32）式可知，增加光强就增加了接收光量子的电子数量 n ，更多的电子接收光量子从而变成光电子，那么光电效应就会增强。这就解释了为什么光电流强度与入射光的强度成正比。但如果在某个频率 $\nu<\nu_0$ 的光照射下不发生光电效应，由于增加光强仅增加接收光量子的电子数 n ，只要接收光量子的电子不发生光电效应，增加再多这样的电子也同样不会发生光电效应。这就解释了入射光频率 $\nu<\nu_0$ 时，即便增加光强也不能发生光电效应。

假设受光面积 A 上共有 n^* 个电子，当光强为 I^* 时正好每个电子都能连续不断接收光量子，我们称光强 I^* 为饱和光强。虽然低于极限频率（ $\nu<\nu_0$ ）的光在小于光强 I^* 的情况下不发生光电效应，如果增加光强使得 $I\geq I^*$ ，那么一个电子可能同时接收 2 个光量子甚至 m 个光量子（ $I\geq mI^*$ ），若 $2\nu\geq\nu_0$ 或 $m\nu\geq\nu_0$ ，则可发生光电效应。通过不同频率 ν 的光得到不同的饱和光强 I^* ，即可根据（32）式得到受光面积 A 上的总电子数 $n^*=I^*A/\varepsilon\nu$ 。这可以解释采用入射光频率 $\nu<\nu_0$ 的激光照射金属材料时，只要光强足够大也能发生光电效应的现象。

假设入射光的频率 $\nu(>\nu_0)$ ，电子在 Δt 时间内吸收 $n(>n_0)$ 个光量子 ε ，电子吸收的能量 $E>E_0$ ，那么电子多余的能量就成为其增加的动能 $\Delta E_k=E-E_0$ ，飞离金属表面而发生光电效应，则电子的跃迁功率为：

$$P = \frac{n\varepsilon}{\Delta t} = \varepsilon\nu$$

$$\Delta t = \frac{n}{\nu}$$

由于单位时间内电子吸收大于 n_0 个光量子就可以发生光电效应，因此入射光频率 ν 照射之下发生光电效应的响应时间为：

$$\Delta t = \frac{n_0}{\nu} \quad (33)$$

可见，入射光频率 ν 越大，发生光电效应所需的时间就越短。发生光电效应的光往往是紫外光，频率 ν 极高，因而发生光电效应所需的时间 Δt 极短，表现出瞬时性的特点。

设光电效应的电子发射功率为 $P_e=\Delta E_k/\Delta t$ ，由（3）式可得：

$$P_e = \frac{\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{E-E_0}{\Delta t} = \frac{n\varepsilon-n_0\varepsilon}{\Delta t} = \varepsilon\nu - \varepsilon\nu_0$$

$$P_e = \varepsilon\nu - \varepsilon\nu_0 \quad (34)$$

$$\Delta E_k = (\varepsilon\Delta t)\nu - (\varepsilon\Delta t)\nu_0 \quad (35)$$

所以，单位时间（ $\Delta t=1s$ ）射出的光电子的能量 ΔE_k 为：

$$\Delta E_k = h\nu - h\nu_0 \quad (36)$$

(36)式与爱因斯坦的光电效应方程（ $E_k=h\nu-W$ ，其中 W 为电子逃离金属板的“逸出功”）一致，可以解释光电效应射出的光电子的能量与入射光的频率成正比而与光的强度无关。但是爱因斯坦采用了把 $h\nu$ 当做了“1个”光量子的能量，认为电子吸收了这样“1个”光量子（ $E=h\nu$ ）的就变成了光电子，且电子吸收这样“1个”光量子（ $E=h\nu$ ）是“瞬间”“一次性”吸收的。电子“一次性”吸收一个光量子相当于“一个”光量子与一个电子发生了“瞬间”碰撞，光量子的能量传递给了电子，因此爱因斯坦认为光量子具有粒子性。而爱因斯坦并没有完全否定光的波动性，因此他认为光具有波粒二象性。但实际上，电子吸收或辐射“一个”爱因斯坦的光量子（ $E=h\nu$ ）是在单位时间内（1s）完成的。那么他的光子与电子的相互作用被认为是瞬间碰撞是不合适的。而他的“一个”光量子是巨大的（大小为1光秒），将其称为“粒子”显然也是不妥的。此外，在低于极限频率的强激光照射下，一个电子同时吸收多个光量子而产生光电效应，也说明光量子并非实物粒子，因为不可能多个粒子与电子同时发生碰撞。

根据我们修正的量子概念，一个光量子就是一个波长或一次完整电磁震荡的电磁波（图1）。因此，电子吸收或辐射一个光量子的时间为 $1/\nu$ 秒。可见，修正后的光量子才更加符合粒子的特征：微小且与电子作用时间极短。由此可见，采用修正的量子概念，可以更加全面地解释和深刻地理解光电效应，再一次证明了修正后的量子概念的正确性。

5 总结与展望

修正的量子概念消除了普朗克能量量子以及爱因斯坦光量子的概念存在的内在矛盾。在不需要玻尔的“量子化条件”假设的情况下，用经典物理学就能完全解释氢原子结构与光谱现象以及光电效应，证明了我们的新量子概念的正确性。新量子概念打破了宏观与微观之间的鸿沟，消除了“经典物理学”与“量子力学”之间的矛盾，对重建统一的宏观与微观物理学具有重要的意义。

修正的量子概念明确了光量子的“粒子性”仅仅体现了最小能量单元与电子相互作用的瞬时性与独立性的特点，光量子并非真实的物质粒子，因此光的“波粒二象性”不能类推到电子等物质粒子上。德布罗意的物质波假说正是对光的“波粒二象性”的简单类比，而作为量子力学基础的薛定谔方程又是以德布罗意物质波假说为基础的假设性方程。这种以类比的思维建立起来的量子力学，虽然在数学计算上能够提供一些神奇的助力，但却始终无法摆脱物理实在的解释困境。因为类比始终不是真实的物理实际，过度沉溺于类似以至于把类比当成了物理真实，就必然产生诸多荒诞玄幻的奇谈怪论。本文修正的量子概念，将使人们正确认识量子，为量子力学的重建或重新诠释提供了概念基础。

参考文献

- [1] Plank M. On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum[J]. Verh Dtsch Phys Ges, 1900(2):237-245.
- [2] Einstein A. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light [J]. Annalen Phys. 1905(17):132-148
- [3] Niels Bohr Collected Works, vol. 2, Work on Atomic Physics (1912-1917), North-Holland

Publishing Co. (1981). General editor L.Rosenfeld. Edited by U. Hoyer

[4]B.N 瑞德尼克, 黄宏荃. 量子力学史话[M]. 科学出版社, 1979.

[5]许良英. 爱因斯坦文集. 商务印书馆, 1976.p366

[6]Brooks, Juliana. Advance in the Foundations of Quantum Mechanics. In APS April Meeting Abstracts, vol. 2010, pp. X14-009. 2010.

[7]Worsley, Andrew. The formulation of harmonic quintessence and a fundamental energy equivalence equation. Physics Essays 2010, 23(2): 311.

[8]Gardi, Lori-Anne. Calibrating the universe, and why we need to do it. Physics Essays 2016, 29(3) : 327-336.