

电子学前沿
FRONT ELECTRONICS

朱世豹 编著

上海科学技术文献出版社

电 子 学 前 沿

朱世豹 编著

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

电 子 学 前 沿

朱世豹 编著

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路 2 号 邮政编码 200031)

丹阳教育印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.75 字数 115,000

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—2,200

统一书号: ISBN 7-5439-0480-2/T·333

定 价: 5.00 元 3.00 元

内 容 简 介

本书以 10 个趣味题（电子的大小、特征、作用、运动、时空、碰撞、绿叶中、人体内、数学语言及哲学思辨）为纲，重点介绍近代电子学在理论与应用方面所取得的新进展，主要涉及量子力学、粒子物理学、光电子学、生物电子学等学科。

本书博采近年来有关电子学的众多书籍与论文，渗入作者的一些观点与思考，力求向读者提供更多的电子学前沿信息。

前 言

我有幸生活在这个电子学理论，特别是应用飞速发展的年代。曾记得，50年代初，当小学生的我，对一个用干电池驱动的小电动机模型惊奇不已。50年代末，我迷上了半导体，曾连续一个月在夜深人静之际躲进实验室，无数次地改进袖珍收音机线路以提高灵敏度。我在60年代当了讲授无线电遥控设备的教师，到70年代又戏剧性地成为电子仪器的维修工。80年代初，我担任某电子手表厂的技术副厂长，后期至今是某研究所所长，电子专业的高级工程师。

从50年代后期至今的30多年中，我对有关电子学的书籍与期刊的兴趣与日俱增。先偏重于应用，后转向到理论。在电子学领域内，我越学，在增进学识的同时却越感到“学海无涯”：原来以为十分清楚的问题有时会变得难解；原来以为已经到头的领域又呈现疑案。我回忆孩童时曾埋怨自己出世太晚以致在电子等学科中已经再无用地；而现在已经是55岁的我却深感要学的东西和待攻克的问题是如此之多，时间和能力都难以如愿，需要寻找一个归纳与表达的机会。于是萌生了编著这本《电子学前沿》小册子的念头。

取名“前沿”，是出于两种考虑。一方面在取材上，尽量减少对电磁学、电子器件与电路、无线电电子学及半导体物理学等书籍内容的过多重复；另一方面在叙述的内容上加大量子电子学、光电子学与生物电子学等新学科知识的介绍，并增加有关理论探索与实验结果的最新材料。

笔者在编写方法上作了一些改革尝试：在体裁上，不沿用

目前教科书中惯用的标题与程序，而是以 10 个问题作线索，并插入对话、习题、自述等，以增添趣味性和通俗性；在内容上，力求理论概念的清晰，并对有些内容交待了“深度的底”，而不拘泥于应用与技术细节。

考虑到采用墨守成规的编写方法较为保险，而对创新与活泼的追求会被引起误解。为了力求避免混淆，笔者在编排格式方面作了如下三方面的特殊安排：

——页中左侧用实线所括部分，为深入分析或数学计算内容，读者在初看时可以略去；

——页中左侧用虚线所括部分，为虽有理论探索但尚无实验验证的内容；

——页中左侧用波浪线所括部分，纯属笔者本人见解。

由于本书追求的目标偏高，而笔者水平却有限，因此书中不妥乃至谬误之处在所难免，敬请赐教。

如果本书能给那些有志参与电子学理论与应用方面变革冒险（不少学者预测，在新老世纪交替之际存在这种变革的可能性）的读者以某种思维启迪，笔者将感到由衷喜悦。

朱世豹

1992 年底于苏州市

目 录

前言	(1)
1. 电子多大？ ——半径、位置、性状	(1)
2. 特征何在？ ——质量、电荷、自旋	(13)
3. “超距”作用 ——力源、场论、媒介	(25)
4. 运动方式 ——跃迁、加速、结对	(38)
5. 漫游时空 ——起源、环境、约束	(53)
6. 碰撞效应 ——散射、转变、湮没	(68)
7. 绿叶中 ——光电、光合、生命	(82)
8. 人体内 ——大脑、医疗、寿命	(98)
9. 数学语言 ——方程、图像、规范	(111)
10. 哲学思辨 ——骰子、巧思、终极？	(127)

后记：展望 21 世纪..... (139)

参考文献 (142)

1. 电子多大？

——半径、位置、性状

谁不“认识”电子？利用它，描述它，百册厚书本不嫌少；
谁又“看见”电子？抓住它？量过它？三个小问题就难倒！

电子，自 1895 年被汤姆逊 (J. Thomson) 发现至今已有近 100 年的历史。迄今为止，电子是“基本”粒子中最引人注目、最活跃、也是最小的粒子。所谓“基本”，是指不可再分割。从 1932 年发现中子起到本世纪 50 年代，教科书中对基本粒子的定义是：质子、中子和电子。质子和中子组成原子核，电子围绕其旋转，构成原子，共有 100 多种不同的原子（元素），它们组成分子、化合物、物质，形成万千世界和整个宇宙。

60 年代，随着加速器和天体物理学的飞速发展，人们对基本粒子 (Elementary particles) 有了新的解释：它泛指比原子核小的物质单元，是能够以自由状态存在的各种最小物质粒子的统称。到 80 年代，已发现的基本粒子有 300 种以上，在基本粒子表中分为光子、轻子和强子三大类，而电子是轻子中的主要成员。

80 年代末，基本粒子的概念被再次更新。物理学家公认基本粒子只有两类，即夸克和轻子。它们又各有 6 种（一种尚未被验证），电子是轻子中的一种。有的文献中，把介子与某些特种粒子（如磁单极子）作为附加的两类，这样就构成四类。夸克——著名理论物理学家盖尔曼 (Gell-Mann) 用一种海鸟的名称命名并预言它的存在。尽管迄今并未发现任何自由的夸克，但

是它目前已间接地为实验所证实。夸克和电子有一种直接联系，这就是电荷 e 。夸克和反夸克(夸克的反粒子)是分数电荷 $\pm \frac{1}{3}e$ 及 $\pm \frac{2}{3}e$ 的携带者，6种夸克分别冠以上、下、奇异、粲、底和顶之名称，6种轻子中，有3种是电子型的，即电子、 μ 子与 τ 子，还有三种是与它们对应的中微子。电子型轻子的共同点是它们均携带电荷 e 。

电子到处存在，对电子的熟识可以说已达到耳熟能详、老幼皆知的地步。电灯、电话、电视、电子计算器、电动机、电子钟表及各种家用电器，都有无数的小小的电子在活跃着。让我们设想一下没有电子应用的世界会是什么样的：夜间靠烛光照明，如同电视故事片中所拍摄的那样；通讯联系靠人的双腿奔跑；记事靠书写，或者再远古些，依靠在绳上打结。但是，蜡烛燃烧实际上也是由无数电子参与的一种化学反应；一根绳子所以能够存在而不折断，主要是依靠电子与质子之间电力的吸引；在一个人体内，在器官和大量细胞中，究竟有多少电子？粗略地估算有百万亿亿亿(10^{30})个电子！足见，电子是多么万能，又是多么渺小。

1.1 半 径

人们习惯于把电子看作是一个很小很小的荷电的球体，宛如孩童游戏用的玻璃弹子的缩型。在教科书及有关电子学的技术书籍中，就在书页平面上用一个小黑圆或者小黑点来标示电子。

用什么方法来估算电子半径？基本方法是认为电子大小是与电子电荷产生的电场能量多少相关的，这是一种习惯的经典

方法。翻开物理学辞典，可以查到电子的经典半径（用经典场论计算的半径） r_e 的公式：

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

式中： e ——电子电荷， ϵ_0 ——真空介电常数， m_e ——电子质量， c ——光速。即电子半径与电荷、质量及光速有关，代入相应的数值，得 $r_e = 2.8 \times 10^{-15} \text{m}$ 。

r_e 的具体推导与计算如下：电子静能 $E_e = \frac{1}{8\pi} \int E^2 dv$ ，式中， E 为电场， v 为体积。假设：电子电荷集中在半径为 r_e 的球面，因此，电子内部 $E=0$ 。代入外部 $E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ （其中 r 为距电子的距离）及 $v = \frac{4}{3}\pi r^3$ ， $E_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_e}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_e}$ 。而根据爱因斯坦质能转换公式， $E_e = m_e c^2$ 。因此， $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_e} = m_e c^2$ ， $r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}$ ，采用 SI 制 $r_e = \frac{(1.602 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 9.109 \times 10^{-31} \times (2.998 \times 10^8)^2} = 2.8158 \times 10^{-15} \text{m}$ 。用此方法，同样可计算质子的半径，约比 r_e 小 5 个数量级，这是因为质子质量 $m_p = 1836 m_e$ 。大概是由于上述推导中假设的根据不足，或者在微观距离上欧几里德几何需要修正。因此，实验结果与以上计算相比，误差甚大。现代测量方法表明，电子半径 $r_e \ll 10^{-15} \text{m}$ 。

丁肇中博士于 1991 年底在上海作的关于“本世纪末实验高能物理研究进展”的报告中，提到关于电子大小的实验结果：1964 年实验结果为 $r_e < 10^{-14} \text{m}$ ，25 年后测得小于 10^{-17}m 。差不多每 10 年小一个数量级。

有没有比电子更小的粒子？按现代物理观点，宇宙是由点粒子组成的，而基本的是夸克和轻子。而夸克大小，推测也小

于 10^{-17}m 。

其他的中性粒子，诸如光子、中微子以及所谓的引力子等，还没有对它们进行过体积大小方面的探讨。因此，至今还没有任何实验数据说明世界上还有比电子更小的粒子。电子堪称我们这个世界的娇小者。

对电子、原子核及原子的相对大小可以作一个形象的比喻：如把原子看作是一个足球场，原子核就是足球（碳原子核的直径约 $2.7 \times 10^{-15}\text{m}$ ），而电子只是地上的一颗砂粒（见图 1.1）。而且，这颗“砂粒”距离“足球”至少得保持较远的距离。因为按照玻尔半径，最靠近原子核的轨道半径为 $5.29 \times 10^{-11}\text{m}$ ，比原子核约大 4 个数量级，这意味着“砂粒”离“足球”的距离至少大于“足球”本身大小的 10,000 倍以上。

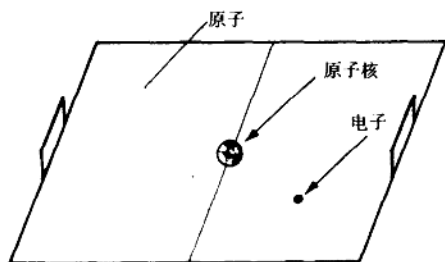


图 1.1 电子、原子核、原子的大小

如果按电子半径为 10^{-17}m 计，那么在 1m 距离上可依次排列 5 亿亿个电子！但是，这还不是电子的真实尺度，那么，电子的最小极限尺寸可能是多少？我们作个推测。按照现代物理中尚未被验证的推论，宇宙中存在着一个基本的最小长度，即普朗克长度 $l_p = \hbar / M_p c = (\hbar G / c^3)^{\frac{1}{2}}$ 。式中， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ， h 为普朗克常数， M_p 为普朗克质量， G 为引力常数， c 为光速。 $l_p \approx 10^{-35}\text{m}$ ，

这比目前测得的电子半径还要小千亿亿倍。有人推测，整个宇宙可能就是从这个尺寸上突然爆炸形成的。如果那时已经存在电子，那么它将远比 10^{-35}m 小；如果那时电子不存在，那么小小的电子又是怎样被转换或“生长”出来的呢？

深究电子的尺寸有什么意义？首先，追根问源是科学家的信仰与动力。连电子大小也没有被量过，很难说我们已经真正认识了电子。弄清电子尺寸，有助于人们去发现空间的最小单位究竟有多大？有没有比电子更小的粒子？这对探讨物质深层次和宇宙的起源与发展是必要的。在应用方面，至少将对电子器件的微型化和电子信息量的扩大奠定理论基础。

1.2 位 置

你与朋友约会，问他（她）在哪里等你？得到的答复，可能是在某条街的一个剧场或商店门口等你，会有一个确切的位置。但是，如果你能够与一个电子通话，问它在哪里？它的回答竟是如此怪诞：我在某位置出现的可能性是 75%。电子没有确定的位置！

在不少书籍和广告中，常常可以看到一幅象征现代科技的图案：在一个小球的四周有几个卫星式轨道，轨道上有一个小黑点便是电子，见图

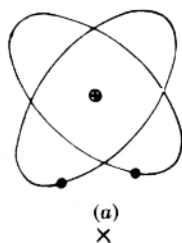


图 1.2 电子的经典轨道与电子云

1.2 (a)。十分遗憾的是，这幅图案本身恰恰违背了现代物理关于电子没有确切位置的理论。电子在原子中或其他空间的出现

只能以出现可能性——几率来表示。有的位置上电子出现可能性大些，用图表示就是雾点的密度高些；相反，雾点密度就低些。这种雾点密度，就代表电子出现几率的大小（其分布可以从趋近原子核到离原子核无穷远），称为电子云，见图 1.2 (b)。

电子位置的不确定性是由量子力学的一个著名原理——测不准原理的定量描述。若将 ΔX 视作位置不确定量， ΔP 为动量不确定量 ($P=mv$ ，即动量为质量与运动速度之乘积)。测不准公式为：

$$\Delta X \Delta P \geq \hbar \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

式中， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ，而 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{JS}$ ，为普朗克常数。

让我们估算电子在原子中的 ΔX 。设电子在轨道上的速度为 10^6m/s （相当于超音速飞机的速度），现取 Δv （速度不确定量）与 v 同数量级，即 $\Delta v = 10^6 \text{m/s}$ （数量误差上限可以用数量本身表示）。则 $\Delta X \geq \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{\hbar}{m \Delta v} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{JS}}{9.109 \times 10^{-31} \text{kg} \times 10^6 \text{ms}^{-1}} = 7.27 \times 10^{-10} \text{m}$ 。

我们知道原子的线度为 10^{-10}m 。因此，在理论上，电子可在原子中的任何位置出现，只是出现的几率不同而已。

按式 (1.2) 可看出，位置不确定性与物体本身的质量（一般与其体积成正比）与速度成反比，因此大的物体位置的不确定性可以忽略不计。例如，一个飞行中的乒乓球，位置不确定性只有 100 亿亿亿亿分之一 (10^{-34})，完全可由经典物理学决定；对一个细菌的影响也只有 10 亿分之一 (10^{-9})；对晶体中一个原子，不确定量达到百分之一 (10^{-2})。而电子位置与本身大小相比的不确定性为 $\frac{10^{-10}}{10^{-17}} = 10^7$ ，即达到 1000 万倍！

位置不确定量意味着位置的范围大小，而在该范围中某位置上电子出现的几率，我们可以通过量子力学薛定谔方程式的

计算求出。薛定谔方程是个难以直观理解、更难以求解的方程，对它的注释将在第9章数学语言中给予，这里只是看一下它的形式：

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$$

式中， $\psi = \psi_0 e^{-i\frac{2\pi}{h} P \cdot r}$ ，称为波函数，其平方值 $|\psi|^2$ ，即电子出现的几率。图 1.3

(a) 表示波函数 (又称物质波、几率波)，而图 1.3 (b) 为其平方值，即表示几率。

但是，电子位置的几率观往往不符合人们的直觉。常识范畴内的许多事例说明电子的存

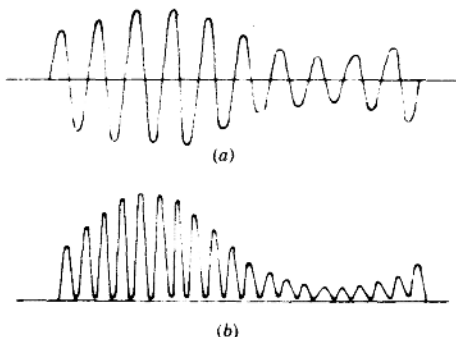


图 1.3 几率波与几率

在及其踪迹是确定的。例如：电子在原子核周围的定态轨道 (或能级) 上旋转，否则在宏观上就不会出现磁性及光谱；电子沿着金属内或真空中的固定路线漂移运动，否则就不会出现电流；电子处在晶体或化合物的共价键中，否则几乎一切物质材料都难以形成；电子在高能粒子实验室的气泡室或火花室中留下轨迹，否则不会被拍摄下曲线。怎样统一这些矛盾呢？应该指出，以上这些电子的轨道、轨迹或路线等是宏观的、平均的，更确切地说电子出现在这些“平均的”轨迹上的概率为最大。以氢原子的基态为例，虽然电子可以在半径为 $0 \sim \infty$ 的空间，但在 $r=r_0$ 处几率最大， r_0 为氢原子的第一玻尔轨道。

几率观是一种非决定论思想，相信上帝（主宰宇宙发展者的代名词）在掷骰子。20 世纪最伟大的物理学家爱因斯坦直至生命终了都不相信上帝会掷骰子，为此与量子学家们开展了长时间的论战。可是，现在的大多数物理学家在一些实验面前，却已接受了上帝掷骰子的非决定论思想。

不管电子多么小，不管它是如何测不准，但是，人们能否“抓住”电子呢？“抓电子”问题虽然 50 年代已展开研究，但直至 70 年代才首次实现。我们知道，为了驱动电子到一个地方，可以依赖于磁场聚焦或电场推动，但是要使其静静地呆在一个地方，即将其捕集起来，则需要巧妙地应用爱因斯坦有关辐射的发射和吸收理论。一个朝电磁辐射源移动的电子通过吸收一定频率的光子可激发到更高能级。如使电子失去激发态，它能发射光子。由于多普勒效应，发射光子的频率将高于吸收光子的频率，附加的能量（光子能量与其频率成正比）在电子运动时排出，从而使电子运动趋缓，游离至捕集范围——陷井或笼子（Cage）。这种陷井，能使电子被分离出来，并且较长时间锁住它。1973 年彭宁（Penning）陷井首次实现了锁住单个电子的实验，并测得电子的 g 因子（即磁矩与其经典数值的偏离值），测量精度达 10 亿分之几。

1.3 性 状

6 个大学物理系一年级学生，相约在周末小聚餐。席间，他们讨论一个问题：电子究竟以什么面貌出现？即它的性状如何？由于谁也没有看见过电子，因此，他们确定一项讨论的规则，那就是各抒己见，依靠已学到的各种资料加上自己的推理说明，但不得重复，也不予辩论。

A: 电子是个真实的粒子, 它是一个很小的球体, 如果将 10 亿个电子无间隙地依次排列, 才像头发丝那么粗。电子犹如一个超小型的“金属球”, 因为有金属特性, 电荷 e 被均匀地分布在球体表面, 球体内部不存在电场。至于这电荷层有多“厚”, 金属的确切含义又是什么? 都还讲不清楚。此外, 电子是一个永远独立存在的粒子, 它可以与其他粒子(光子等)作用, 但不会与它们结合, 只是在一种情况下例外, 这就是与正电子(它的反粒子)相遇会产生湮灭。当然它也能在高能光子与大质量原子相撞中产生出来。

我不愿作其他猜测, 姑且相信现代不少理论物理学家和实验物理学家的知识: 电子宛如一个实点, 大小不超过 10^{-17}m , 它塞满所占空间, 却没有内部结构, 见图 1.4 (a)。

B: 电子不仅是粒子, 而且还是一种波。量子力学的基柱之一就是波粒二象性——粒子在不同条件下表现为波动性和粒子性的双重性质。电子是基本量子之一, 当然具备这个特性。一个动量为 P 、能量为 E 的自由运动的电子, 相当于一个波长为 $\lambda = h/p$, 频率为 $\nu = E/h$, 并沿着粒子运动方向传播的平面波。电子的波动性是电子显微镜基本原理。我参观过中国最大的电子显微镜, 加速电压为 10^4V , 电子波的波长是 $0.04\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)。这台电子显微镜的分辨率约 $1.4\text{\AA}$, 放大倍数为 80 万倍。这种波一般称为物质波。但很重要的一点是应该记住, 电子物质波只是电子的同义词, 而不是“与电子缔合在一起的波”。电子物质波(见图 1.4 (b))应该是与它所携带的电荷没有直接联系, 因为中性粒子(中子、原子)等也呈现波的特性。

C: 我一直很难接受波粒二重性观点, 也许是经典物理思想“中毒”太深的缘故。电子的波动性已为实验所证实, 但它的起