

高等师范院校《普通物理》试用教材

原子物理学

喻身启 龙春华 刘华祥 主编

UANJIWULIXUE

北京师范大学出版社

高等师范院校《普通物理》试用教材

原子物理学

喻身启 龙春华 刘华祥 主编

东北师范大学出版社

东北高师物理系协作组
《普通物理》教材编审委员会

主任委员 金万修

副主任委员 喻身启 张炎勋 张林芝

委员 (以下以姓氏笔划为序)

王振山 周东来 石文善 刘华祥

时维春 李占良 战永杰 岳津生

杨秉爱 白惠元 常广石 毅 赫

高等师范院校《普通物理》试用教材

原子物理学

YUANZI WULIXUE

喻身启 龙春华 刘华祥 主编

责任编辑：于荣海 封面设计：王 帆 责任校对：陈 江

东北师范大学出版社出版
(长春市斯大林大街 110 号)
(邮政编码：130024)

吉林省新华书店发行
长春大学印刷厂制版
长春大学印刷厂印刷

开本：850×1168毫米 1/32

1990 年 2 月第 1 版

印张：12

插页：1

1990 年 4 月第 1 次印刷

字数：311 千

印数：0 001—5 000 册

ISBN 7-5602-0394-9/O·44

定价：3.80 元

前 言

这本《原子物理学》是东北地区高师物理系协作组组织编写的《普通物理学》中的一个分册。

多年来，对于原子物理学的教学内容和教材建设问题，一直存在着各种不同的意见。这些意见曾在历年的全国专业会议上进行了广泛的讨论，我们在各种思想、观点的启发下，试图编写出一本对师范院校针对性较强的《原子物理学》。许多院校编写出版的原子物理教材，为我们的编写工作提供了难得的借鉴。

我们认为，本书首先是一本教材，而不是一本专著，因而它不能脱离现行教学大纲的基本要求。在内容处理上，我们在使学生掌握中学物理教师所必需的基本知识和基本技能的前提下，删繁就简，突出重点，保证科学性，注重新成就（但不可能也不必要反映本学科领域的全部成果）。其次，本课程是一门普通物理课，因而要力求避免普通物理理论化的倾向，应该从实验事实出发，通过实验或提供必要的实验数据，着重对光谱、能谱的介绍和分析，进而揭示出原子、分子、原子核乃至粒子各个不同结构层次的物理现象及规律，使学生学完本课程后能对物质的微观结构有一个清晰的物理图象和感性知识。第三，原子物理学与普通物理的其他课程在研究对象上有着明显的区别，这除了表现在实验上本课程所研究的客体时间和空间的尺度极小，难以直接观测他们的物理现象及其规律外，还表现在这些现象和规律原则上不能用经典理论进行解释。因此这门课程的理论框架应借助于量子力学。从原则上说，既要立足于量子论的观点，又不能将原子物理写成量子力学，这在分寸的掌握及内容的编排上，都是颇费心思的。

本书在上述几个方面都做了一些尝试，我们期望着全国同行共同探索，使原子物理课程中存在的问题能够得到较好的解决。

在东北协作组教材编委会的指导下，《原子物理学》教材编写组于1987年冬在大连召开了编写人员会议，通过广泛深入的讨论和不同意见的交流，统一了编写的指导思想，落实了编写提纲及分工。本书由喻身启、龙春华、刘华祥主编。参加本书编写的有：何训（吉林师范学院）、马维超（东北师范大学）、王治金（齐齐哈尔师范学院）、龙春华（四平师范学院）、张克敏（佳木斯师范专科学校）、刘华祥（长春师范学院）、喻身启（辽宁师范大学）。

本书的编写工作虽然历时两年并几易其稿，但由于我们的水平与经验有限，又加之编写人员分散，各自承担繁重的教学、科研乃至其他工作，相互间的联系和交流存在着客观困难，所以，奉献在读者面前的这本书是不尽如人意的，诚望学者、专家及同行们不吝赐教。

本书在编写过程中，得到了东北师范大学王锡绂教授的关心和鼓励。顾达天和谢利民同志热心地为本书绘制了插图。在此我们一并表示真诚的谢意。

编 者

1989年10月

目 录

前 言

第一章 原子结构的早期实验基础..... (1)

§1 黑体辐射与量子论..... (2)

§2 α 粒子散射实验与原子的核式模型..... (9)

§3 氢原子光谱的实验规律..... (19)

§4 夫兰克-赫兹实验..... (24)

习 题..... (31)

第二章 原子的玻尔理论..... (33)

§5 玻尔的氢原子理论..... (33)

§6 类氢离子光谱..... (43)

§7 玻尔理论的推广..... (51)

§8 施特恩-盖拉赫实验..... (60)

§9 对应原理和玻尔理论的地位..... (68)

习 题..... (74)

第三章 量子力学..... (76)

§10 德布罗意假设..... (77)

§11 不确定关系..... (85)

§12 波函数及其统计解释..... (89)

§13 薛定谔方程..... (94)

§14 力学量的平均值和算符..... (102)

§15 量子力学对氢原子的描述..... (105)

习 题..... (117)

第四章 多电子原子..... (119)

§16 碱金属原子光谱和能级..... (119)

§17 精细结构和电子自旋..... (126)

§18 氦及碱土金属原子的光谱和能级..... (140)

§19 同科电子、洪特定则..... (156)

§ 20	外磁场对原子的作用	(158)
§ 21	塞曼效应	(163)
习 题		(174)
第五章	原子的壳层结构	(176)
§ 22	泡利原理与原子的壳层结构	(176)
§ 23	元素周期表和原子基态符号	(182)
§ 24	X射线的获得	(195)
§ 25	标识谱和内层电子的跃迁	(199)
习 题		(206)
第六章	分子光谱	(208)
§ 26	分子的键联	(208)
§ 27	分子光谱的特点	(214)
§ 28	分子的薛定谔方程	(220)
§ 29	双原子分子	(223)
§ 30	分子态及其表记	(228)
§ 31	腊曼效应	(233)
习 题		(235)
第七章	原子核的基本性质和结构模型	(237)
§ 32	原子核的基本性质	(237)
§ 33	原子核的自旋、磁矩、电矩和宇称	(246)
§ 34	核子间的相互作用	(252)
§ 35	原子核的液滴模型 结合能半经验公式	(257)
§ 36	壳层模型和集体运动模型	(261)
习 题		(272)
第八章	核衰变和核反应	(274)
§ 37	放射性衰变规律	(274)
§ 38	α 衰变和 β 衰变	(282)
§ 39	γ 跃迁和穆斯堡尔效应	(293)
§ 40	核反应	(304)
§ 41	核裂变和核聚变	(314)

§ 42 核能利用及其前景.....	(322)
习 题.....	(329)
第九章 粒子物理学	(331)
§ 43 粒子的相互作用和分类.....	(332)
§ 44 粒子的物理性质.....	(336)
§ 45 对称性和守恒定律.....	(341)
§ 46 夸克模型.....	(354)
习 题.....	(362)
附 录	(363)
习题参考答案.....	(363)
常用物理常数.....	(366)
参考书籍.....	(367)
人名对照表.....	(368)
粒子简表.....	(371)

第一章 原子结构的早期实验基础

正当经典物理学日臻完美的時候，它却在相继出现的新实验事实面前遇到了无法克服的困难，这就是所谓的物理学晴朗天空中出现的乌云。本章选择本世纪初的几个著名实验来揭示这些困难。这些实验不仅是正确认识原子结构的依据，也是量子理论形成初期的实验基础。我们通过对这些实验事实的分析，阐明量子化现象的存在，并为初步形成量子论的新观念奠定基础。

§1 黑体辐射与量子论

量子论发端于黑体辐射的研究。1900年普朗克为解释黑体（或空腔辐射体）辐射能量按频率分布的实验规律，突破了经典物理理论，在历史上第一次提出了量子化假设。人们把普朗克的论文《正常光谱的能量分布理论》在德国物理学会会议宣读的日期——1900年12月14日作为量子物理学的诞辰。与相对论有一个具有根本性意义的常数（光速 c ）来代表它一样，量子物理也有一个表征它的、具有根本性意义的常数——普朗克常数 h 。下面先回顾黑体辐射的实验规律和经典理论的困难，接下来考察普朗克常数的引入以及与它的引入紧密相连的极其重要的能量不连续的量子概念，这就是普朗克假设和爱因斯坦对它的发展。

一、黑体辐射的实验规律与经典理论的困难

光学中大家已经接触了由实验得到的黑体辐射本领与频率的关系、维恩位移定律和斯特藩-玻尔兹曼定律，我们简要回顾这

几个关于黑体辐射的重要规律。

用 $r(\nu, T)d\nu$ 表示绝对温度为 T 的辐射体单位面积单位时间内辐射的频率在 $\nu \sim \nu + d\nu$ 间隔内的能量, $r(\nu, T)$ 称为辐射体的 谱辐射本领 或 单色辐射本领。在热平衡时, 黑体谱辐射本领与频率关系的实验曲线如图1.1所示。可以看出, 频率 ν 比 10^{14} Hz 小

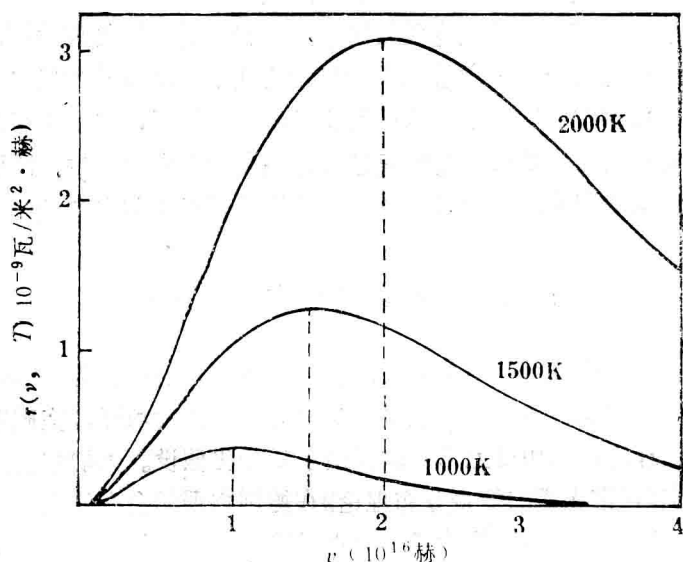


图 1.1 黑体谱辐射本领与辐射频率的函数关系

得多时, 谱辐射本领很小, $\nu = 0$ 时, 谱辐射本领为零。频率从非常小的数值逐渐增大时, 谱辐射本领也逐渐增大。频率增大到一定值时 (如对 1000K 的曲线, 其值为 1.1×10^{14} Hz), 谱辐射本领达最大值。此时的频率记为 ν_m 。其后, 随频率的增加谱辐射本领逐渐减小, 频率趋于无限大时, 谱辐射本领趋于零。

曲线显示, 谱辐射本领随温度升高而增加。辐射体单位面积

单位时间内辐射的总能量为**辐射本领**，它只与热平衡时的温度有关，用 $R(T)$ 表示， $R(T)$ 等于曲线下的面积，即

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu$$

$R(T)$ 随温度升高而增加的具体形式如下：

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (1-1)$$

其中 σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ 瓦/米²·开⁴。这就是四次方律，即著名的斯特藩-玻尔兹曼定律。大家知道，把入射的所有辐射全部吸收的物体叫**理想黑体**，简称**黑体**。最实际的黑体是一个在壁上开有一个小孔的空腔，从该小孔发出的辐射被认为是黑体辐射。小孔辐射的能量与腔内每单位体积的辐射能 $\rho(T)$ 成正比， $\rho(T)$ 称为能量密度或辐射密度。经证明得到的 $\rho(T)$ 与 $R(T)$ 间的关系是 $R(T) = \frac{1}{4}c\rho(T)$ 。当用 $\rho(T)$ 表示时，四次方律可表为

$$\rho(T) = AT^4 \quad (1-2)$$

A 为比例系数。

曲线还显示，谱辐射本领最大的频率 ν_m 随温度上升而成正比地增大，这个规律称为维恩位移定律，它有两种表示式：

$$\nu_m = b_\nu T \quad (1-3)$$

$$\lambda_m T = b_\lambda \quad (1-4)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

式中 b_ν 称为频率位移常数， $b_\nu = 5.87 \times 10^{10}$ 开⁻¹·秒⁻¹， b_λ 称为波长位移常数， $b_\lambda = 2.90 \times 10^{-3}$ 米·开。

维恩由热力学的论据证明了能量按频率的分布必具有 $\rho(\nu, T)d\nu = \nu^3 f(\nu/T)$ 的形式，但函数 f 的形式仅由热力学不能确定。在做了某些特殊假设后，1896年他获得了一个相当好的公式：

$$\rho(\nu, T)d\nu = C_1 \nu^3 e^{-c_2 \nu/T} d\nu \quad (1-5)$$

称为维恩公式。其中 C_1 、 C_2 是两个常数， $\rho(\nu, T)d\nu$ 为单位时间

内单位体积中频率在 $\nu \sim \nu + d\nu$ 间隔内的辐射能。容易知道 $r(\nu, T)$ 与 $\rho(\nu, T)$ 成正比, 由证明得到的关系为 $r(\nu, T) = \frac{c}{4}\rho(\nu, T)$ 。式(1-5)在高频部分与实验结果比较符合, 但在低频部分却与实验有很大偏离。

另一方面, 经典电动力学则可导致完全确定的结果。1900年瑞利把经典统计物理中的能均分定理应用到黑体电磁辐射中, 得到一个黑体辐射公式, 称为瑞利-金斯公式:

$$\rho(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi}{c^3}\nu^2 kT d\nu \quad (1-6)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数, c 为光速。该公式在低频时与实验符合得较好, 但在高频时 $\rho(\nu, T)d\nu$ 趋于无限大, 这显然背离了实验结果。该公式是由经典理论合理地推导出来的, 这说明经典理论在实验面前遇到了困难。上面这种极不合理的理论预言, 曾被称作物理学中的“紫外灾难”。

普朗克仔细分析实验曲线, 参考式(1-5)、(1-6), 得到一个经验公式, 这就是著名的普朗克公式:

$$\rho(\nu, T)d\nu = C_1 \nu^3 \frac{d\nu}{e^{c_2 \nu/T} - 1} \quad (1-7)$$

当 $\nu \rightarrow \infty$ 时, 此公式趋于维恩公式, $\nu \rightarrow 0$ 时, 公式化为瑞利-金斯公式。式(1-7)与当时最精密的实验数据符合得很好, 由此人们认为, 公式中一定蕴藏着一个非常重要但当时尚未被揭示出来的科学真理。

二、普朗克常数

为从理论上解释黑体辐射的实验规律, 必须引入一个新的普适常数, 它被普朗克引入物理学并用普朗克的名字命名, 记为 h 。这一点可从对式(1-1)进行量纲分析中看出。

式 (1-1) 中的系数 σ 与辐射体的材料物质及其具体结构 均无关系。这样，它就只能由普适常数构成。根据经典物理（这里指统计物理和电动力学）理论，凡热平衡条件下的统计物理问题必与玻尔兹曼常数 k 有关，凡电磁辐射问题必和光速 c 有关，因此辐射本领 $R(T)$ 应和 k, c, T 有关。这些量的量纲可以方括号分别表示为

$$[R] = [\text{能量}] / [\text{长度}]^2 \cdot [\text{时间}]$$

$$[c] = [\text{长度}] / [\text{时间}]$$

$$[k] = [\text{能量}] / [\text{温度}]$$

$$[T] = [\text{温度}]$$

显然，为使式 (1-1) 右端不出现 $[\text{温度}]$ ，系数 σ 中应含有因子 k^4 。为使左端分母出现 $[\text{长度}]^2$ ， σ 分母中必含有因子 c^2 。若 σ 仅由 k, c 构成，式 (1-1) 两端的量纲无论如何也不会一致。由此可知 σ 中还应包含一个新的普适常数。为使公式两端单位一致，右端分母中必须再出现 $[\text{能量}]^3 \cdot [\text{时间}]^3$ 因子。由此可以看出，新的普适常数的量纲为 $[\text{能量}] \cdot [\text{时间}]$ 。

新的普适常数的值可由式 (1-7) 按 σ 的实验值确定。 σ 中含有新的普适常数，式 (1-7) 中的常数 C_1, C_2 也应包含这一常数。为了方便，我们直接将式 (1-7) 改为现在大家经常使用的形式：

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (1-8)$$

其中 h 是新的普适常数，称为**普朗克常数**。由该式及 σ 的实验值算得

$$R(T) = \int_0^\infty r(\nu, T) d\nu = \int_0^\infty \frac{c}{4} \rho(\nu, T) d\nu$$

$$= \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^\infty \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \textcircled{1}$$

$$= \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

$$h = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ 焦耳} \cdot \text{秒}$$

三、普朗克假设及其含意 能量子

伴随引进普朗克常数而来的是能量不连续的量子概念，这已隐含在式(1-7)、(1-8)之中了。换言之，只有摒弃辐射基元的能量是连续的这一经典概念，代之以普朗克假设提出的能量不连续的概念和量子概念，才能从理论上导出普朗克公式。为了说明能量连续这一经典概念在微观领域中可能失效，为了强调普朗克假设的深刻物理意义，下面对瑞利-金斯公式的推证方法做必要的说明，然后叙述普朗克公式的推证方法。

考虑一个具有金属壁的空腔，金属壁被均匀加热到温度 T ，金属壁会发出热辐射。考察平衡状态下空腔中电磁波的行为，瑞利、金斯认为，空腔内的平衡辐射必以驻波形式存在（可由对辐射场的傅立叶分析得到这一结果），且驻波的节点就在金属壁内表面上。算得在频率 $\nu \sim \nu + d\nu$ 单位间隔内这种驻波的数目为 $8\pi\nu^2 d\nu/c^3$ ，是个与温度无关的量。再算出平衡状态时这些驻波的平均能量 $\bar{E} = kT$ 。将二者相乘就可以得到瑞利-金斯公式(1-6)。

平均能量 $\bar{E} = kT$ 是能均分定理的结果。按能均分定理，处在热平衡的气体分子系统中的分子每个自由度的平均动能均为

$$\textcircled{1} \quad \text{利用} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}。$$

$\frac{1}{2}kT$ 。对于实体是具有一个自由度（即电场振幅）的驻波，平均动能和平均势能均为 $\frac{1}{2}kT$ ，总能量为 kT 。这是具有一个自由度随时间作简谐振动的系统所共有的性质。由此可以理解，将空腔辐射场和与之达热平衡的腔壁的辐射用带电谐振子模型处理是多么方便。

能均分定理基本上出自玻尔兹曼分布。这里取玻尔兹曼分布的一个特殊形式

$$P(E) = e^{-E/kT} \quad (1-9)$$

$P(E)dE$ 表示在 E 到 $E+dE$ 的能量间隔内系统中某一指定实体能态数目与能态的能量无关时它的能量在这个间隔内的几率，则对于上述驻波，算得其平均能量刚好为 kT 。计算如下：

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{\int_0^\infty E P(E) dE}{\int_0^\infty P(E) dE} \quad \text{令 } \alpha = \frac{1}{kT} \\ &= \frac{d}{d\alpha} \left(\ln \int_0^\infty e^{-\alpha E} dE \right) \\ &= \frac{d}{d\alpha} (\ln \alpha) = kT \end{aligned}$$

应该注意，之所以采用积分计算，是由于按经典理论驻波振子的能量是连续分布的缘故。按经典理论，每个振子的能量与振幅的平方成正比，振幅的值不受限制，可在 $0 \sim \infty$ 的区间内连续分布，因而振子的能量也在上述区间连续分布。由此可以看出，上面的结果，又是经典电磁辐射能量连续的直接结果。

比较式(1-6)和(1-8)会发现能均分定理的失效和经典的能量连续概念的失效。为了从理论上推证公式(1-8)，1900年普朗克大胆否定了经典的能量连续的概念，假设振子模型的能量不能取任意的连续值，只能取如下一系列分立值：

$$E = n\varepsilon = nh\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ε 为能量单元，等于普朗克常数 h 乘以频率 ν ，称为**能量量子**。 n 只能取零和正整数，称为**量子数**。这就是著名的普朗克量子化假设。在这种假设下，求振子模型的平均能量时将以求和代替积分，即

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n \varepsilon e^{-\alpha n \varepsilon}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\alpha n \varepsilon}} = -\frac{d}{d\alpha} \left(\ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\alpha n \varepsilon} \right) \\ &= -\frac{d}{d\alpha} \left(\ln \frac{\varepsilon}{1 - e^{-\alpha \varepsilon}} \right) = \frac{\varepsilon}{e^{\alpha \varepsilon} - 1} \\ &= \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}\end{aligned}$$

将 $\bar{E}$ 乘以间隔 $\nu \sim \nu + d\nu$ 内驻波的个数 $8\pi\nu^2 d\nu/c^3$ ，就得到普朗克公式 (1-8)。

普朗克没有改变玻尔兹曼分布，他所做的只是相当于如下假设：任一具有一个自由度的坐标是时间的正弦函数的物理实体（表现为一个线性谐振子），只能具有满足式

$$E = n\varepsilon = nh\nu \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

的总能量。这一假设的意义极其深远。它否定了经典的能量连续性理论，提出了全新的能量不连续的概念。普朗克假设还意味着，辐射振子从能态 $nh\nu$ 变到能态 $(n-1)h\nu$ 的过程中应该发射出一个不连续的能量为 $\varepsilon = h\nu$ 的电磁能猝发。或者认为，在能量的发射或者吸收中应以量子 $\varepsilon = h\nu$ 的形式整份地进行，这就是**能量量子**的概念。爱因斯坦发展了这一概念，1905年他提出，光不仅在发射和吸收过程中而且在传播过程中都以能量子 $\varepsilon = h\nu$ 的形式进行，这就是**光子说**。爱因斯坦的理论得到了光电效应、康普顿效应、光压实验等实验的验证。这些实验都成了量子概念的坚实实验基础。

§2 α 粒子散射实验与原子的核式模型

α 粒子散射实验是原子物理学史上最重大的事件之一。该实验确认了原子核的存在，从而建立了原子的核式结构模型。卢瑟福散射公式的导出，提供了一个解决实际问题的范例。由于经典物理学无法说明卢瑟福的原子模型，从而促使人们探索原子领域中全新的规律和理论。

一、原子“碎片”和原子

1. 电 子

到1900年，已有许多实验（如X射线在原子上的散射，光电效应等）表明原子中都含有带负电的部分——电子。“电子”一词早在1881年由斯通尼提出；但从实验上确认电子存在的是1897年汤姆逊测定阴极射线荷质比的实验。其后不到两年，汤姆逊又测定了电子的电荷 e 和质量 m_e 。电子电荷的精确测定是1910年密立根用油滴法首次完成的。密立根发现电荷是量子化的，即任何电荷只能是电子电荷 e 的整数倍。 e 的值为 $e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19}$ 库仑，由实验测得的 e 值和荷质比 e/m_e 的值可确定电子的质量， $m_e = (9.109534 \pm 0.000047) \times 10^{-31}$ 千克。大量实验表明电子线度很小，根据电子质量起源于电磁场的假设求得的电子半径称为电子的经典半径，电子经典半径的上限 $r_0 = (2.8179380 \pm 0.0000070) \times 10^{-15}$ 米。电子的质量按相对论与速度有关，但电子的电荷却不随速度的改变而变化。

2. 原子中带正电的部分

实验估算原子中的电子数约为原子质量数的一半。正常状态下原子呈电中性，故原子中必含有正电荷，其量值与电子所带负电荷总量相等。