

高等学校教学参考书

原子物理学

顾建中 编

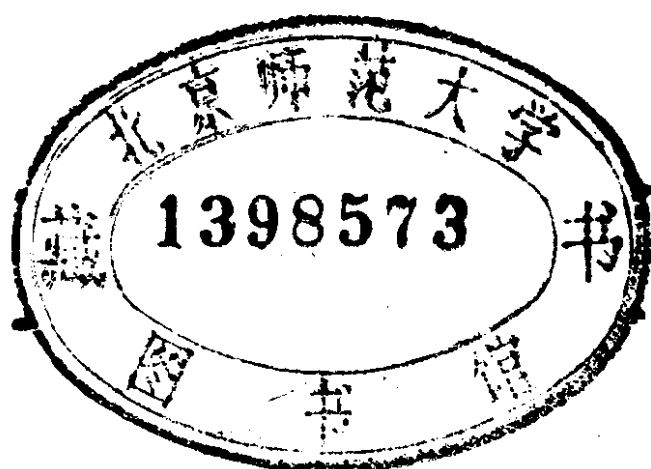
高等

高等学校教学参考书

原子物理学

顾建中 编

8411173/04



高等教育出版社

内 容 提 要

本书是编者根据他在云南大学物理系讲授“原子物理学”课程时编写的讲义修改、补充而成的。前七章讲原子物理，以原子结构为中心，包括第三章量子力学基础在内；第八、九章讲原子核物理，以原子核结构为中心；最后一章讲粒子物理，力求简介最新成就。各章之末附有复习思考题和习题，书末附有答案。全书采用国际单位制。

本书以实验事实为基础，着重阐述物理概念和规律，力求说理清楚、简明扼要、重点突出、脉络分明。

本书可作为综合大学及高等师范院校物理专业原子物理学的教学用书，也可供其他专业参考。

高等学校教学参考书

原子物理学

顾建中 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 13.75 字数 330,000

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数 00,001—7,200

书号 13010·01292 定价 2.80元

编者的话

我接受77级原子物理学的教学任务时，苟清泉、吴知非先生的书还没有重印，褚圣麟先生的书还未出版，只好以过去编写的讲义为基础，参考手边能得到的资料，编写了一本讲义。教78、79级的同一课程时，根据教学中发现的问题和1980年部颁原子物理学大纲，对这本讲义进行了全面的修改和补充。

针对过去学生对这门课程不够重视、学后效果也不够好的情况，除对学习原子物理学的必要性和重要性加强教育外，编写时注意把讲义写成普通物理学的一部分，力求把重要概念、规律和理论写清楚，来龙去脉交待明白，力求符合历史发展和认识规律，藉以引起学生的重视；并选编了一套习题，要求学生完成每周作业，严加督促检查。由考试成绩和学生反映看，似已初见成效。

在教学过程中，77-79级学生提过不少问题和意见；云南大学物理系的张仁昂讲师提供了“原子核的结构模型”一节的初稿，并提供过一些修改意见；顾若刚同志描绘了全部插图，谨此一并志谢。

书稿曾经南京大学物理系的方杰同志全面审阅，提出了许多宝贵意见，编者参照这些意见作了修改和补充，使书稿得以改进。谨对方杰同志表示衷心的感谢。

北京大学高崇寿教授对粒子物理学简介一章作了仔细的校订并补充了新的内容。谨对高崇寿教授表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

顾建中

1984年3月于云南大学

JY1/173/04

目 录

第一章 原子结构的早期理论和实验	1
§ 1.1 原子和电子	1
§ 1.2 关于原子结构的一些早期看法——汤姆孙模型	10
§ 1.3 α 粒子的散射实验——对汤姆孙原子模型的审查	15
§ 1.4 原子的核模型——卢瑟福模型	20
§ 1.5 卢瑟福散射公式和实验结果的比较	26
复习思考题	30
习 题	31
第二章 量子论·光谱线系和氢原子	34
§ 2.1 黑体辐射和量子假说——普朗克常数	34
§ 2.2 原子光谱的实验规律	38
§ 2.3 玻尔的氢原子模型——主量子数	41
§ 2.4 夫兰克-赫兹实验	48
§ 2.5 类氢离子光谱·里德伯常数的修正	50
§ 2.6 索末菲量子化条件·角量子数	56
§ 2.7 空间量子化·磁量子数	61
§ 2.8 原子的磁矩·斯特恩-革拉赫实验	64
§ 2.9* 相对论效应·角量子数的选择定则	69
§ 2.10 对应原理·对玻尔理论的评价	78
复习思考题	82
习 题	84
第三章 量子力学的初步基础	87
§ 3.1 光的粒子性	87
§ 3.2 实物粒子的波动性	98
§ 3.3 波函数和薛定谔方程式	105
§ 3.4 一维方势阱中粒子的运动	112

§ 3.5* 势垒贯穿	116
§ 3.6 线性谐振子	119
§ 3.7 量子力学对氢原子问题的处理	123
§ 3.8* 角动量的初步理论	135
§ 3.9 测不准关系式	139
复习思考题	144
习 题	147
第四章 碱金属原子和电子自旋	153
§ 4.1 碱金属原子光谱的规律性	153
§ 4.2 碱金属原子的结构·原子实的极化和轨道贯穿	158
§ 4.3 碱金属原子光谱的精细结构和电子自旋	167
§ 4.4 电子自旋与轨道运动的相互作用能	176
§ 4.5 光谱线的精细结构	184
§ 4.6* 光谱线的强度——跃迁几率	192
复习思考题	195
习 题	197
第五章 多电子原子·原子的矢模型	200
§ 5.1 原子的矢模型	200
§ 5.2 具有两个价电子的原子（或离子）的光谱	205
§ 5.3* 氦氖激光器原理	209
§ 5.4 简单塞曼效应	211
§ 5.5 复杂塞曼效应和帕邢-巴克效应	216
复习思考题	223
习 题	225
第六章 原子的电子壳层结构和伦琴射线谱	228
§ 6.1 元素周期系和泡利不相容原理	228
§ 6.2 原子的电子壳层结构	233
§ 6.3 满层的总角动量·斯特恩-革拉赫实验的解释	245
§ 6.4 伦琴射线谱	248
§ 6.5 标识伦琴光谱和伦琴吸收光谱	252
复习思考题	260

习 题	262
第七章 分子结构和分子光谱基础	265
§ 7.1 分子结构和分子光谱的特点	265
§ 7.2 分子的远红外转动光谱	268
§ 7.3 分子的振动-转动光谱	271
§ 7.4 分子的电子-振转光谱	276
§ 7.5 分子的离解热和电子组态	280
§ 7.6 喇曼效应及其在固体中的应用	285
复习思考题	288
习 题	290
第八章 原子核的基本性质和原子核衰变	292
§ 8.1 原子核的电荷和质量·同位素	292
§ 8.2 原子核的自旋和磁矩	299
§ 8.3 天然放射性——原子核的衰变	305
§ 8.4 观察放射性现象的方法	314
§ 8.5 α 衰变	317
§ 8.6 β 衰变和中微子	321
§ 8.7 γ 衰变	326
复习思考题	331
习 题	333
第九章 核反应和核结构模型	336
§ 9.1 用 α 粒子轰击稳定的原子核所引起的核反应	336
§ 9.2 中子	342
§ 9.3 宇宙线·正电子·人工放射性·电子偶	346
§ 9.4 人工加速的粒子所引起的核反应·核反应的种类 和过程	351
§ 9.5 原子核的组成	356
§ 9.6 核力·原子核的大小	360
§ 9.7 原子核的结构模型	363
§ 9.8 重核的裂变	373
§ 9.9 轻核的聚变	379

复习思考题	382
习 题	384
第十章 粒子物理学简介	386
§ 10.1 介子·超子·粒子的相互作用分类	386
§ 10.2 “基本”粒子的特征和分类	390
§ 10.3 守恒定律和对称原理	392
§ 10.4 共振态	397
§ 10.5 强子分类和夸克模型	401
§ 10.6* 关于弱电统一理论和大统一理论的初步概念	407
复习思考题	414
习 题	414
习题答案	416
附录 I 索末菲径向运动量子化积分的计算	424
附录 II 关于类氢离子相对论效应的两个计算	425
附录 III 旧量子论对 $\overline{\left(\frac{1}{r^4}\right)}$ 的计算	427
附录 IV 常用物理常数及单位换算表	428
附录 V 参考书目	429

第一章 原子结构的早期

理论和实验

“原子由电子和原子核构成”这一大家熟悉的结论，是在十九世纪末和本世纪初经过较长时间实验和理论的研究才得到的。本章着重介绍“原子”、“电子”和“原子核”这三个基本概念。

§ 1.1 原子和电子

(一) 原子 远在2400年前，古希腊哲学家德模克利特等，提倡物质结构不是连续的而是分立的学说，他们认为物质由许多极小的微粒构成，这种微粒，称为原子（在希腊文中“原子”有不可再分的意思）。这种学说只是一种设想，没有实验的依据。

十九世纪初，人们通过大量的化学实验，认识了一些基本定律如：

(1) 定比定律 元素按一定的质量比相互化合。

(2) 倍比定律 若两种元素能生成几种化合物，则在 这些化合物中，和一定质量的甲元素化合的几个乙元素的质量，互成简单整数比。

在这两条定律的基础上，1803年道耳顿提出了他的原子学说，他认为：(i) 一定质量的某种元素，由极大数目的该元素的原子所构成；(ii) 每种元素的原子，都具有相同的质量，不同元素的原子，质量各不相同；(iii) 两种可以化合的元素，它们的原子可能按几种不同的比率化合成几种化合物的分子。加上其他的化学定律，可以确定各种元素原子的相对质量——原子量 A 。1961年国际会议确定，原子量采用同位素碳-12为标准，定为12.0000。

1971 年国际计量会议决议, 定义摩尔 (国际代号为 mol) 是一系统物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数相等。在使用摩尔时, 基本单元应予指明, 可以是原子、分子、离子、电子或其他粒子, 或是这些粒子的特定组合。如摩尔原子、摩尔分子等。一摩尔物质的质量, 称为该物质的摩尔质量, 用 μ 表示, 单位为 kg/mol。1mol 物质中的基本单元数, 称为阿伏伽德罗常数, 用 N_0 表示, 它是一个重要的普适常数, 有许多方法可以测定, 其中以伦琴射线法为最精确, 今天公认的数字为①

$$N_0 = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

这个常数之所以重要, 因为它是宏观世界和微观世界的桥梁, 这可以由

$$N_0 = \frac{R}{k}$$

看出, R 为气体常数, k 为玻耳兹曼常数。

1mol 的某元素, 质量为 μ , 其中有 N_0 个原子, 所以原子量为 A 的元素的一个原子的质量为

$$m_A = \frac{\mu}{N_0} = \frac{A \times 10^{-3}}{6.022 \times 10^{23}} \text{ kg} = 1.661 \times 10^{-27} A \text{ kg} \quad (1)$$

利用下面的方法, 我们可以估计原子的大小。设一固体元素 (如金属) 的原子是球状的, 半径为 r 米, 它们互相接触、整齐地排列成一个边长为 1m 的立方体, 每边上排有 $\frac{1}{2r}$ 个原子, 整个立方体将有 $\frac{1}{8r^3}$ 个原子。另一方面, 若这种元素的原子量为 A , 密度为 $\rho \text{ kg/m}^3$, 那么 1mol 原子应占有 $A \times 10^{-3} / \rho \text{ m}^3$ 的体积, 这个体积中有 N_0 个原子, 结果 1 m^3 中将有 $\frac{N_0}{A \times 10^{-3} / \rho} = \frac{N_0 \rho}{A \times 10^{-3}}$ 个原子。把两方面联系起来, 得

① 目前的准确值为 $6.022045(31) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ [取自 Particle Data Group, Phys. Lett., No. 1 (1978), 17].

$$\frac{1}{8r^3} = \frac{N_0 \rho}{A \times 10^{-3}},$$

或
$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{A \times 10^{-3}}{N_0 \rho} \right)^{1/3} = \frac{1}{20} \left(\frac{A}{N_0 \rho} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

将一些元素的 A 和 ρ 的数值连同 N_0 代入, 可计得相应原子的半径如表1.1.

表 1.1

元 素	原 子 量	ρ (kg/m ³)	r (m)
锂	7	0.7×10^3	1.1×10^{-10}
铝	27	2.7×10^3	1.1×10^{-10}
铜	63	8.9×10^3	1.14×10^{-10}
硫	32	2.07×10^3	1.48×10^{-10}
铅	207	11.34×10^3	1.55×10^{-10}

可见原子半径的数量级为 10^{-10} m 或 10^{-8} cm.

道尔顿的原子学说被许多实验所证实. 总起来说, 元素由原子构成, 每一原子有确定的质量和半径, 质量为 1.661×10^{-27} kg, 半径的数量级为 10^{-10} m. 但必须指出, 一种元素事实上常有几种原子 (同位素), 它们的质量不同, 但化学性质相同.

(二) 电子

(i) 电荷的原子性 十九世纪法拉第通过大量电解实验, 总结出电解定律. 按此定律, 在电解器一极所析出的物质的质量 M , 和通过的电量 Q 成正比, 和该物质的化学当量 A/v 成正比. A 表原子量, v 表原子价. 用式表示, 得

$$M = \frac{QA}{vF} \times 10^{-3} \text{ kg}, \quad (3)$$

$1/F$ 为比例常数, F 称为法拉第常数, 实验测得

$$F = (9.648456 \pm 0.000027) \times 10^4 \text{ C/mol}$$

电解定律的前一部分暗示我们, 这些电量是由析出物质的原

子运载的，假定一个 ν 价原子载有 $q\nu$ 的电荷，那么析出 1 mol 原子 ($M = A \times 10^{-3} \text{ kg}$) 物质所需要的电量应为 $Q = N_0 q\nu$ ， N_0 为阿伏伽德罗常数，它近似等于 $6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ，代入 (3) 式，得：

$$q = \frac{F}{N_0} \simeq \frac{9.65 \times 10^4}{6 \times 10^{23}} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}. \quad (4)$$

可见将原子假说和电解定律结合起来，我们得到一种看法，即“每个原子伴随有 $q\nu$ 的电量”。如果假定电荷也具有原子性，电解时每个原子带有 ν 个“电的原子”，那么上述现象可以获得最简单的解释。这个“电的原子”如 (4) 式所示，它就是单价离子所带的电荷。

(ii) 辉光放电 在常温常压下气体一般不导电。若在一玻璃管中封入一对电极，将管内气体抽出，使气体压力降到 10 mmHg 以下，并在两极间加几个 kV 的直流电压，则管中将呈现出稳定的辉光放电，如图 1.1。若继续降低气体压力，将见阴极暗区向右扩展，压力减到 10^{-3} mmHg 时，这个暗区充满全管，但这时联在电路中的安培计仍有读数，说明管中仍有电流通过。若事先在阳极上穿有一孔，将见孔后的管壁上出现绿色辉光；说明阴极板面上有“东西”射出，穿过阳极上的小孔，直射到管壁上，让它发

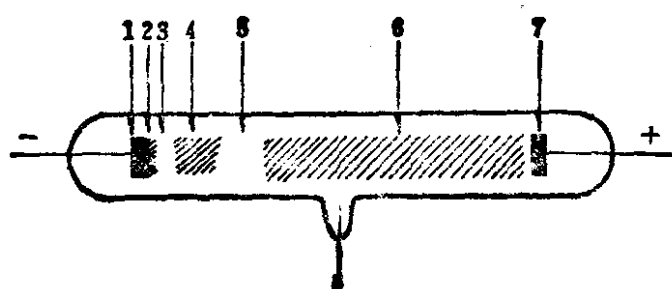


图 1.1 1. 阴极，2. 阴极电辉，3. 阴极暗区，4. 阴电辉，5. 法拉弟暗区，6. 阳极区，7. 阳极，8. 抽气处

生荧光。若将放电管吹制成图 1.2 的形状，与阳极相连有一十字形金属片，将见玻璃管右壁上的荧光中，有一个清晰的十字暗影，说明那种“东西”是沿直线进行的。若将一小风车支在这种“东西”

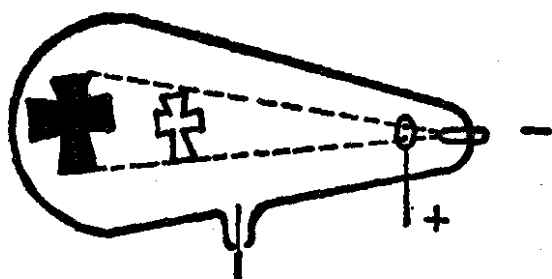


图 1.2

前进的通路上，小风车会被它推得转起来，说明它还有动量。这种由阴极射出来的“东西”，称为阴极射线。

(iii) 阴极射线的性质——荷质比 J. J. 汤姆孙研究阴极射线的装置示意如图 1.3。他把阳极板做成两个连在一起的金属薄板，中央各有一小孔，这样使穿过阳极板的阴极射线成为一细束。若偏转电极 P_1 、 P_2 间无电场，射线将在荧光屏 S 上产生一亮点 O ；若在 P_1 、 P_2 二电极上加一电压， P_2 为正，将见屏上的亮点向下移到 P ，设 $OP = y$ 。由此知阴极射线带负电。实验时还观察到，亮

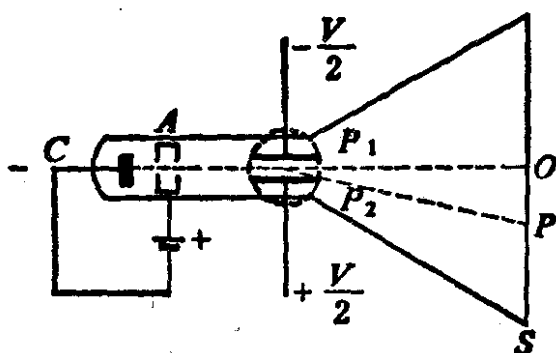


图 1.3

点在下移过程中，形状大小不变，说明阴极射线可看为由某种带有电荷 $-e$ 的粒子组成，这些粒子性质相同，所生偏转也相同。设这种带电粒子的质量为 m ，射入电场时的速率为 v ，如图 1.4。设 P_1 、 P_2 间的电压为 V ，距离为 d ，则电场强度的值为 $E = \frac{V}{d}$ ，所以射入 P_1 、 P_2 间的粒子应受力 $-eE$ 作用，生 $-\frac{eE}{m}$ 的加速

度，方向向下。这和平抛运动类似，粒子在电场中作抛物线运动。离开电场后，粒子的水平分速率仍为 v ，因粒子在电场中经过的距离为 l ，时间为 $\frac{l}{v}$ ，所以向下的分速率为 $v_1 = \frac{eE}{m} \cdot \frac{l}{v}$ ，此后沿直线运动而达 P 点。若将这根直线反向延长，将交原径迹于 O' 点，可证 O' 点恰在 l 的中央。设 $O'O = L$ ，由图知

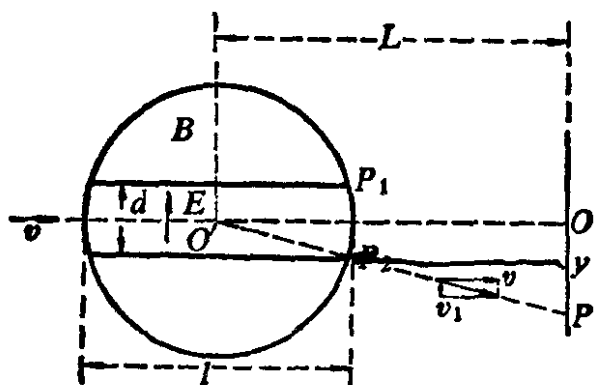


图 1.4

$$\frac{y}{L} = \frac{v_1}{v} = \frac{eE}{m} \frac{l}{v^2}. \quad (5)$$

为了求得粒子的速率 v ，应在图中虚线圆处，加一与纸面垂直的均匀磁场，方向指向读者，设磁感强度为 B ；粒子以 v 速射入后，将受洛伦兹力 F 的作用， $F = Bev$ ，方向向上。调节磁场，使

$$Bev = Ee,$$

则粒子在这正交电磁场中所受合力为零，将不发生偏转，直射到 O ，条件是

$$v = \frac{E}{B}. \quad (6)$$

将这个 v 值代入(5)式，得偏转

$$y = L \frac{e}{m} \frac{B^2}{E} l = L \frac{e}{m} \frac{l B^2 d}{V},$$

或

$$\frac{e}{m} = \frac{yV}{LlB^2d} \text{ (C/kg)}. \quad (7)$$

式中各量均用国际单位(SI), y 表亮点位移的绝对值。利用(7)式可以计得阴极射线中, 粒子所带电荷与其质量之比, 简称荷质比。汤姆孙发现, 不论管中残留气体的性质如何或其他条件如何(但 v 不能接近光速), 测得的荷质比在实验误差范围内都相同。他测得的数值为 $1.3 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。用更精密的方法测得的最新值为

$$e/m = (1.7588 \pm 0.0004) \times 10^{11} \text{ C/kg}.$$

(iv) 阴极射线的本性——电子的发现 我们将上述测定荷质比的实验结果和电解的结果比较一下。拿最轻的元素氢来说, 它的原子价为 1, 原子量为 1.0078 (用 C^{12} 单位), 所以电解时氢离子的荷质比(e/M)应为

$$\frac{9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}}{1.0078 \text{ g/mol}} = 9.57 \times 10^4 \text{ C/g} = 9.57 \times 10^7 \text{ C/kg},$$

阴极射线粒子和氢离子的荷质比的比为

$$\frac{(e/m)_{\text{阴极射线}}}{(e/M)_{\text{氢离子}}} = \frac{1.7598 \times 10^{11}}{9.57 \times 10^7} = 1.84 \times 10^3.$$

如果一个阴极射线粒子和一个氢原子的质量相同, 那么这个结果表明两种粒子所带电量不同, 前者为后者的一千多倍, 这是难以想象的。如果这两种粒子所带电量相同, 则一个氢原子的质量等于一个阴极射线粒子的质量的 1840 倍, 即

$$\frac{M_{\text{H}}}{m} = 1840.$$

汤姆孙把这种质量为氢原子质量的 $\frac{1}{1840}$ 、带有 $-e$ 电荷的粒子, 命名为电子, 这时是 1897 年。

(v) 密里根实验与电子电荷 本节 (一) 段由电解结果估计了一个单

价离子所带的电荷, 但那是若干万亿个离子所带电荷的平均值;

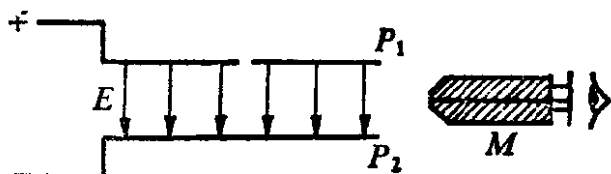


图 1.5

汤姆孙虽然设计了实验来测定一个电子所带的电荷，而且所得结果和电解法基本一致，但仍嫌太粗糙。一般认为密里根的油滴实验是比较典型的测 e 实验。

实验装置示意如图1.5. P_1 、 P_2 是平板电容器的两块极板，相对面要仔细磨光，用等高的绝缘柱把它们分开，使相对二面准确地平行，而且安放在水平位置。上极板 P_1 的中央穿有小孔，若在 P_1 以上用喷雾器将不易挥发的油吹散成雾，则部分小油滴可穿过小孔落到 P_1 、 P_2 之间，用显微镜 M 可观察测量油滴的运动。这些油滴在喷洒过程中，一般都带有一定的电量 e_n 。

若油滴的密度为 ρ ，空气密度为 ρ_0 ，油滴呈球形、半径为 a ，则所受表观重力为 $-\frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \rho_0)g$ 。当二板间没有电场时，油滴在表观重力和内摩擦力作用下运动，后者按斯托克斯定律为 $6\pi\eta av$ ，因此最初油滴加速下落，速率达 v_d 后匀速落下，此时

$$-\frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta av_d. \quad (8)$$

选择大小适当的油滴如 $a \sim 1\mu\text{m}$ ，由于下落较慢，便于观察。

二极板间建立向下的电场 E 后，若油滴带负电，将受向上的力 $-e_n E$ 作用，设小油滴最后用速率 v_f 向上匀速运动，则

$$Ee_n - \frac{4}{3}\pi a^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta av_f.$$

与(8)式相加，得：

$$e_n = \frac{6\pi\eta a}{E}(v_d + v_f). \quad (9)$$

由(8)式解出 a ，代入(9)式，就可算得油滴所带的电荷。

若用伦琴射线从侧孔照射，使空气电离，就可以改变那个小油滴所带的电荷。依次用上法测定小油滴所带的电荷，结果发现小油滴所带的电荷，不论其来源如何，总是某一最小电荷 e 的整数倍，从而证明了电荷的原子性。

实验发现，油滴不太小时，用不同半径的油滴测得的 e 值相同；若油滴很小，随着 a 的减小，测得的 e 值会急剧增加。这是由于对很小的油滴，空气不宜再看作连续介质，原来的斯托克斯定律不再适用了；在这种情况下，应当加上一个补正因子，把内摩擦力改写成

$$\frac{6\pi\eta av}{1 + \frac{B}{pa}}.$$

p 表空气的压力， B 是一个常数。加上这个补正后，密里根发现不论油滴半径是大是小，所得 e 值都同为 $1.591 \times 10^{-19} \text{C}$ 。这时是 1911 年。这一结果直到三十年代还被认为是最准确的。

但是后来用伦琴射线衍射法精确测量阿伏伽德罗常数，然后按本节(4)式计算电子电荷，所得结果较密里根的为大；促使重新审核密里根的工作。结果发现他所用的空气粘滞系数 $\eta = 1822.6 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 过小，反复实验的结果是 $\eta = 1832 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ；代入原式计算，得 $e = (1.603 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{C}$ ，和伦琴射线法测得结果一致。今天公认的电子电荷数值为：

$$e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}.$$

(vi) 电子的质量 把前两段求出的 e/m_e 和 e 的数值结合起来，可以求得电子的静质量为

$$\begin{aligned} m_e &= \frac{e}{e/m_e} = \frac{(1.603 \pm 0.002) \times 10^{-19}}{(1.753 \pm 0.0004) \times 10^{11}} \\ &= (9.108 \pm 0.012) \times 10^{-31} \text{kg}. \end{aligned}$$

最新的电子静质量值为：

$$m_e = (9.109354 \pm 0.000047) \times 10^{-31} \text{kg}.$$

通过这一大段的讨论，我们明确电子是一个带电粒子，它带有一 e 的电荷，具有 m_e 的静质量。在求荷质比实验时，无论阴极用什么材料制成，由它放出的电子的荷质比都相同；进一步用热电子和光电子做实验，测得的荷质比也相同，说明无论在什么情况下，由什么元素放出的电子都是一样的。这个结论具有重要

• • •