

基础物理学

下 卷

(日) 重原高太郎 著 彭承江译



基础物理学

下 卷

金原寿郎 编

郭永江 译

745113

人民教育出版社

《内 容 提 要》

本书根据日本裳华房出版的金原寿郎编《基础物理学》下卷1977年第27版译出。原书分上下两卷，上卷包括力学、振动与波动、光学和热力学等方面的内容；下卷包括电磁学、相对论、量子力学、电子学、原子核等方面的内容。

本书可作理工科大学物理课程的参考书。

基 础 物 理 学

下 卷

[日]金原寿郎编、郭永江译

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 16.25 插页 1 字数 393,000

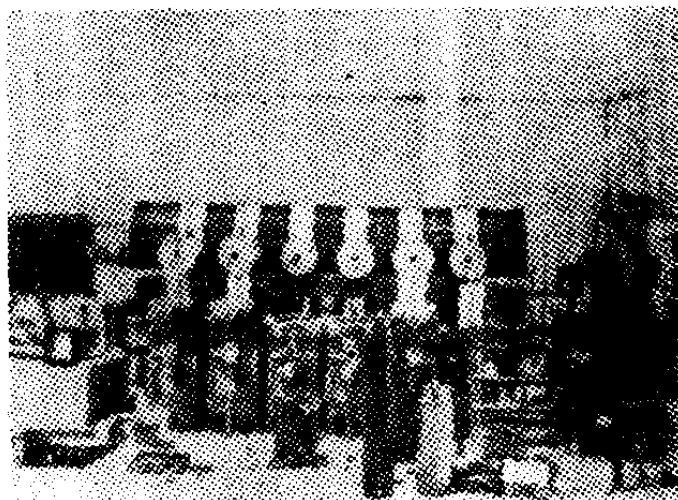
1979年5月第1版 1980年1月第1次印刷

印数 000,001—21,000 册

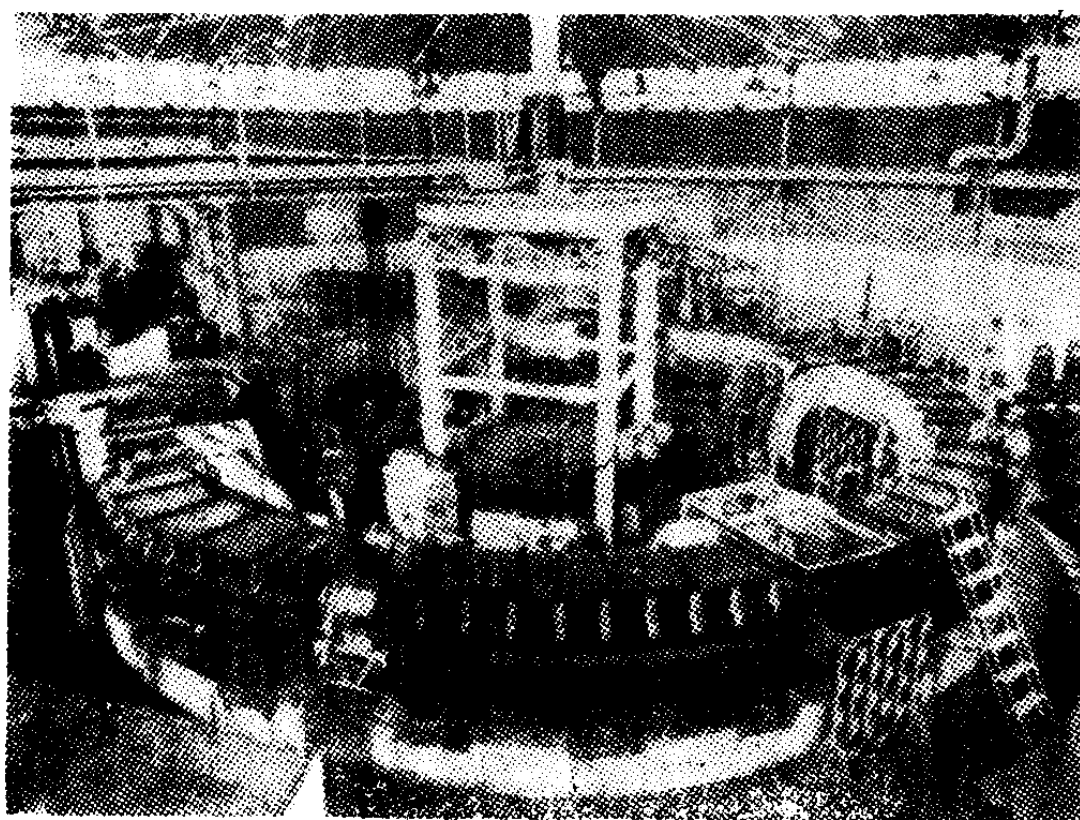
书号 13012·0355 定价 1.20 元



第 1 图 用直线式电子加速器产生的
强 X 射线照射旋转真空泵的
透视图(见本卷 § 26.2)



第 2 图 名古屋大学等离子体研究
所的高温等离子体发生器
(见本卷 § 23.8)



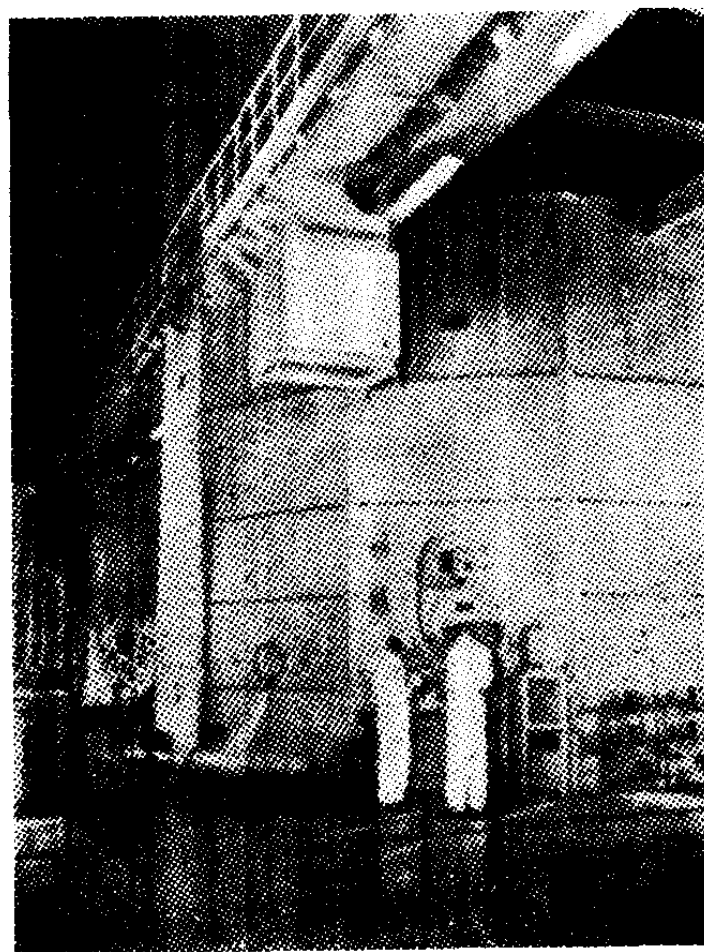
第 3 图 东京大学原子核研究所的同步加速器(见本卷 § 32.9)



第4图 用雷达观测到的台风眼
(见本卷 § 31.12)



第5图 用欧洲国际原子核研究所
2.8 GeV 同步加速器所
产生的高能质子照亮了的
塑料闪烁计(照片中的白
色区域. 见本卷 § 23.6)



第6图 日本原子能研究所的日本制造第1号原子反应堆(见本卷 § 32.12)

下 卷 目 录

第十七章 电荷与真空电场

§ 17.1 带电现象	1	§ 17.7 电力线	19
§ 17.2 带电与电子	2	§ 17.8 库仑定律的第二种变形	20
§ 17.3 电荷与库仑定律	3	§ 17.9 等位面	23
§ 17.4 电荷的单位	5	§ 17.10 电偶极子	24
§ 17.5 电 场	10	§ 17.11 库仑定律的第三种变形	26
§ 17.6 库仑定律的第一种变形	12	习 题	29

第十八章 导 体

§ 18.1 导体中的电荷与电场	31	§ 18.5 电 容	42
§ 18.2 导体的电位	32	§ 18.6 电容器的接法	46
§ 18.3 导体上的电荷分布	35	§ 18.7 静电能	48
§ 18.4 导体表面的电场 与静电压力	38	习 题	50

第十九章 电 介 质

§ 19.1 电介质的分子	52	§ 19.6 电介质中的静电能	65
§ 19.2 极化强度	54	§ 19.7 实用电容器	66
§ 19.3 极化电荷	55	§ 19.8 极化的各种伴随现象	69
§ 19.4 电介质中的电场与极化	57	习 题	70
§ 19.5 电感强度	60		

第二十章 稳 定 电 流

§ 20.1 接触电位差	72	§ 20.8 基尔霍夫定律	89
§ 20.2 电极电位	74	§ 20.9 电位差计	92
§ 20.3 电 池	76	§ 20.10 电流的热效应	94
§ 20.4 欧姆定律	79	§ 20.11 温差电	95
§ 20.5 电 阻	81	§ 20.12 汤姆孙效应、珀耳帖效应	100
§ 20.6 电阻与温度	84	习 题	103
§ 20.7 实用电阻器	86		

第二十一章 磁场与磁介质

§ 21.1 平行电流间的作用力 与电流单位	105	强度与磁位	122
§ 21.2 磁场与磁感强度	109	§ 21.8 安培定律	124
§ 21.3 毕奥-萨伐尔定律	113	§ 21.9 磁化	127
§ 21.4 磁通量	116	§ 21.10 磁介质内部的磁场强度	129
§ 21.5 磁场中的线圈所受的力	118	§ 21.11 磁化率、磁导率	131
§ 21.6 运动的带电粒子在磁场中 所受的力	121	§ 21.12 铁磁质的磁化	135
§ 21.7 电流回路元所产生的磁感		§ 21.13 磁荷	138
		习 题	140

第二十二章 电磁感应与电磁波

§ 22.1 感应电动势与法拉第定律	141	§ 22.10 麦克斯韦基本方程 (积分形式)	164
§ 22.2 自感应	144	§ 22.11 麦克斯韦基本方程 (微分形式)	167
§ 22.3 磁场的能量	147	§ 22.12 电磁波	170
§ 22.4 交变电动势	148	§ 22.13 电磁波的性质	172
§ 22.5 阻 抗	151	§ 22.14 光和电磁波	176
§ 22.6 有效值	155	习 题	179
§ 22.7 互感应	156		
§ 22.8 感应电流所受的力	159		
§ 22.9 变压器	161		

第二十三章 放电与等离子体

§ 23.1 真空与真空泵	181	§ 23.7 真空计与离子泵	200
§ 23.2 气体中的电流与放电	184	§ 23.8 等离子体(无强磁场的 情况)	203
§ 23.3 阴极射线与电子	187	§ 23.9 等离子体(有磁场的情况)	207
§ 23.4 电子的电荷与质量	189	习 题	210
§ 23.5 气体的电离	193		
§ 23.6 放射线的探测	195		

第二十四章 相对性理论

§ 24.1 伽利略相对性理论	212	§ 24.6 物理学定律在四维 世界中的表示	228
§ 24.2 迈克耳孙-莫雷实验	214	§ 24.7 相对论力学	230
§ 24.3 洛伦兹变换	218	习 题	234
§ 24.4 洛伦兹变换的规律	223		
§ 24.5 四维世界	226		

第二十五章 原子的定态

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| § 25.1 光的波长测定 ……235 | § 25.5 电子碰撞引起的激发 ……244 |
| § 25.2 光电效应与光量子 ……237 | § 25.6 玻尔的氢原子模型 ……247 |
| § 25.3 光作用下原子和分子
的电离 ……240 | § 25.7 谐振子 ……250
习 题 ……251 |
| § 25.4 光的吸收和原子的激发 ……241 | |

第二十六章 X 射 线

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| § 26.1 X射线的发现及其本质 ……252 | 射线的绕射 ……261 |
| § 26.2 X射线管与X射线的
硬度、强度 ……254 | § 26.6 X射线的散射 ……264 |
| § 26.3 X射线的晶体绕射 ……256 | § 26.7 X射线与物质的相互作用 ……268 |
| § 26.4 X射线光谱 ……259 | § 26.8 韧致辐射 ……270
习 题 ……271 |
| § 26.5 标识X射线与单色X | |

第二十七章 电子的波动性

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| § 27.1 德布罗意的预言 ……273 | § 27.5 谐振子 ……285 |
| § 27.2 电子射线的绕射 ……277 | § 27.6 箱中不受力作用的电子 ……287 |
| § 27.3 波函数 ……279 | § 27.7 氢原子 ……288
习 题 ……292 |
| § 27.4 定 态 ……281 | |

第二十八章 单电子量子力学

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| § 28.1 波动性和粒子性 ……293 | § 28.6 动量矩的取值 ……315 |
| § 28.2 量子力学的观点 ……296 | § 28.7 斯特恩-革拉赫实验 ……318 |
| § 28.3 电子的动量、测不准关系 ……302 | § 28.8 电子的自旋 ……322
习 题 ……324 |
| § 28.4 物理量与算符 ……308 | |
| § 28.5 对易关系 ……311 | |

第二十九章 多体系统及其统计

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| § 29.1 氦原子、泡利原理 ……325 | § 29.8 气体的分子 ……346 |
| § 29.2 原子的电子组态和
元素周期律 ……328 | § 29.9 物理上可辨别的系统集团 ……348 |
| § 29.3 X射线的发射和吸收 ……330 | § 29.10 固体的比热 ……352 |
| § 29.4 电子集团、各态历经性 ……332 | § 29.11 原子和电磁场之间的
能量交换 ……354 |
| § 29.5 费米统计 ……335 | § 29.12 微波激光器与激光器 ……357
习 题 ……360 |
| § 29.6 费米统计中的分布函数 ……339 | |
| § 29.7 玻色统计 ……341 | |

第三十章 物质与电子

§ 30.1 固体中电子的量子态	361	§ 30.9 抗磁性	376
§ 30.2 自由电子近似	362	§ 30.10 顺磁性	377
§ 30.3 电 阻	366	§ 30.11 铁磁性	380
§ 30.4 束缚电子近似	367	§ 30.12 磁共振	381
§ 30.5 功函数	368	§ 30.13 超导电性	383
§ 30.6 本征半导体	370	§ 30.14 液态氦的超流动性	384
§ 30.7 杂质半导体	371	习 题	387
§ 30.8 霍耳效应	374		

第三十一章 电 子 学

§ 31.1 半导体二极管	388	§ 31.9 调制和检波	414
§ 31.2 晶体管	391	§ 31.10 收音机和电视	417
§ 31.3 真空管(二极管)	395	§ 31.11 无线电波的传播	419
§ 31.4 三极管、五极管	398	§ 31.12 微 波	421
§ 31.5 特殊的电子元件	402	§ 31.13 脉冲电路	426
§ 31.6 整 流	405	§ 31.14 电子计算机原理	429
§ 31.7 放 大	407	习 题	430
§ 31.8 反馈和振荡	411		

第三十二章 原 子 核

§ 32.1 放射能	433	§ 32.8 基本粒子	452
§ 32.2 原子核	438	§ 32.9 加速器	455
§ 32.3 质谱仪和同位素	440	§ 32.10 用加速器产生的核反应	464
§ 32.4 中 子	442	§ 32.11 宇宙线	466
§ 32.5 核力和介子	444	§ 32.12 核裂变	472
§ 32.6 原子核的结构	447	§ 32.13 核聚变	476
§ 32.7 原子核的磁矩	451	习 题	477
习题略解	479		
索 引	488		

第十七章 电荷与真空电场

从现在起，我们开始讨论电现象这种完全有别于前面所讲的现象。但在本章中，我们首先只探讨带电体周围为真空的情形，并把电荷间的作用力作为中心问题来考虑。

§ 17.1 带电现象

琥珀用毛皮来摩擦，就带有一种特殊性质。它能将轻微物体吸引一下，但随后又把它排斥开。这是人们很早以前就已知道的现象，据传说，是在公元前 600 年左右由泰勒发现的。而且电 (electricity) 这一词来源于希腊语琥珀 (ηλεκτρον) 一词。

当物体带有这种性质时，我们就说物体带电了，并认为带电是由于有某种东西存在于物体之中的原故，而这某种东西就叫做电。然而，物体带电却有完全不同的两种状态。这一事实告诉我们电有两种。用绸绢摩擦玻璃棒时，在玻璃上产生的电，规定为正(阳)电；用毛皮摩擦胶木棒时，在胶木棒上产生的电，规定为负(阴)电。同名电相排斥，异名电相吸引，这是人们都很熟习的事实。

其实，通过摩擦来带电，并不是只在一些特殊物质中间才能看到的现象。将任何不同种类的物质相互摩擦时，必定是一个带正电，另一个带负电。即使是同一种类的物质，假如状态不同的话，它们的表现也象两种物质一样。譬如，使温度不同的两块玻璃板相互摩擦，就会带上正负电。再有，一根胶木棒和另一根加上力而变弯了的胶木棒相互摩擦时，也可带上正电和负电。一般讲，物体处在带电状态倒是自然的情况。实际看到的并不那么明显，那是因为产生的电通过该物体传走了的缘故。不导电的物体叫做绝缘体

或非导体。如果用这种东西来支持物体，就可明显看到，不管什么物体通过摩擦都能带电。

当摩擦剧烈引起带电时，要产生小的火花而中和。由于这种原因，有时也会造成预料不到的灾害。穿着胶鞋在绝缘体地板上走动时，鞋和地板都要带电，在它们之间就会产生火花放电。医院里有时要用乙醚当作麻醉剂，所以，也有因为乙醚蒸汽引火而造成意外灾害的情况。

另外，当汽油流过管道时，汽油就会带电；在制粉厂沿管筒输送粉料时，粉料也会带电。在管道的出口处，汽油或粉料与管道之间会产生火花而着火。这样引起的所谓静电火灾在日本也是屡次发生过的。

§ 17.2 带电与电子

为了弄清楚带电是怎样引起的，首先必须知道物质的结构。如前所述 (§ 16.1)，物质是原子的集合，而原子是由称为原子核的带正电的粒子和带负电的电子群所组成。电子的质量很小，用 m_e 来表示它时，

$$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{kg} \quad (1)$$

在通常状态下，原子核的正电的作用和电子群的负电的作用相互抵消，原子作为一个整体对外部不产生影响，而处于一种所谓的中和状态。但是，原子由于某种作用，失掉电子群中的一部分电子或者相反地获得若干个电子时，就变成带电的原子，即离子。

原子核是由质子和中子组成的。在中性的原子中，质子数等于绕核运动的电子数。质子是带正电的粒子，其电量的绝对值与电子的该值相等；中子不带电，但其质量与质子质量大致相等，分别以 m_p 、 m_n 表示时，

$$\left. \begin{aligned} m_p &= 1.672 \times 10^{-27} \text{kg} \\ m_n &= 1.674 \times 10^{-27} \text{kg} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

两者都大约是电子质量的 1800 倍。所以，当说到原子的质量时，认为它就是原子核的质量，关系也不大。

这些事实是从十九世纪末到二十世纪初才弄清楚的。虽然后面还要详细叙述，但本书把这些当作人们已知的事实进行讨论。

因为物体是原子的集合，所以结局就是原子核和电子的集合。而且，当质子和电子的总数相等时，物体呈中性；电子不足就变成带正电的带电体，电子过多就变成带负电的带电体。

使两个物体相互摩擦时，必定一个带正电而另一个带负电。其原因何在？可以认为这是由于电子或离子从一种物质转移到另一种物质上的原故。

通常两种金属接触时，电子要从一方向另一方转移一部分，因而在两物质之间产生电位差。这种电位差叫做接触电位差。至于为什么会产生电位差这一问题，后面我们会学到^①。一般讲，这种电位差的数值不大，为1v左右。但要知道这1v的电位差是正负电相隔极短距离对峙时的数值，当把它们拉开时就会升高到几万v^②。这就是说，单使两种金属接触就可以带电，摩擦的作用只是使两者接触得更紧密、接触面更大一些而已。即所谓的摩擦带电同接触电现象，在本质上并无区别。

上述解释对于金属与金属间的摩擦带电来说，大体上还是说得通的，但对于绝缘体就未必适合。在绝缘体的情况下，电似乎仍以离子的形式从一方转移到另一方，现象非常复杂。虽然摩擦带电是最早被发现的电现象，但对于它的原因至今还没有弄得很清楚。

§ 17.3 电荷与库仑定律

物体的带电状态有强弱的区别，对物体的吸引力就因带电状态而不同。可以认为，这是由于带电体所带的电的量值不相同的原故。下面我们来考虑怎样决定电的量值。

① 参照 § 20.1.

② 参照 § 18.6.

电的量值,当然必须以电与电之间的作用力为基础来考虑.现在设 S 为一个以十分良好的绝缘体所支持、电的量值可视为一定的带正电的带电体.但是假定其体积是很小的,将它固定在一点 O 上.

我们另外考虑一点 P .当取来一个体积很小的任意带电体 A 放到这里时,由于有 S , A 要受到排斥力 F .用另一个小带电体 A' 代换 A ,放在同一点,如果受到完全相等的作用力 F ,那么,认为 A' 所带电的量值跟 A 的相等是合理的.



图 17.3-1

其次,把 A 和 A' 都一起放在 P 点进行实验时,作用在 $(A + A')$ 上的排斥力就变为两倍.这一事实说明, S 和 A 之间的电力,不因 A' 的存在而受到丝毫影响;就 S 和 A' 之间的电力来讲,也是这样.

因此,取走 A 和 A' ,将带电体 B 放在 P 点上时,如果 SB 之间的排斥力为 nF ,便可知道 B 所带的电的量值为 A 的 n 倍.当 B 带负电时,斥力变为引力.但这时将 n 看作负数,将引力看作(一斥力)即可.

仿照这样,可以定出 A 、 B 、 C 、 \dots 等许多带电体所带的电的量值.这种电的量值就叫做电荷或电量.关于电荷的单位问题,下面要研究.但设 A 的电荷为 q 、 B 的电荷为 q' 、它们之间的斥力为 F ,根据上面的讨论可知,

$$F = aqq'$$

这里, a 是比例系数,而且是 A 、 B 间的距离确定后才跟着确定的常数.

下面的问题是 a 和距离的关系.但如人们所熟悉那样,根据 1785 年库仑利用扭秤所作的实验结果, a 与距离 r 的平方成反比.所以,设比例系数为 $1/k_e$,可得下面关系:

$$F = \frac{1}{k_e} \frac{qq'}{r^2} \quad (1)$$

这是作用在体积很小的两个带电体，即点电荷间的电力规律，叫做库仑定律。并且，把遵从库仑定律的电力叫做库仑力。

库仑的实验测量了处在空气中的带电体之间的作用力，但后来的研究查明：如果在绝缘性液体等中作这一实验，即使 q 、 q' 和 r 都相同， F 也会是不同的。

譬如在松节油、石蜡油中作这一实验就是这样，这种结果，是由于这些油类此时带有一种电学性质，对两带电体产生作用的缘故。

关于这一问题，在第十九章中要作详细的讨论。因此，如开头所讲过那样，本章首先只就真空中的库仑力进行研究。

§ 17.4 电荷的单位

将库仑的公式重写一遍，如下：

$$F = \frac{qq'}{k_e r^2} \quad (1)$$

此式中， F 和 r 的单位已分别选定为 N、m，或者 dyn、cm，但 q 的单位还未选定。

q 的单位可以独立选定，跟长度、质量、时间单位的选法完全无关。不过，一旦选定了 q 的单位，其数值也就确定了，所以为使式(1)成立，可以由实验确定出 k_e 的值。

但是，另外也有一种方法是不去选定 q 的单位，而把 k_e 当作一种物理量来处理。设它的单位为 $[k_e]$ ，这时，可以酌量选定 $[k_e]$ 使 $k_e = 1 \times [k_e]$ ，也可以酌量选定 $[k_e]$ 使 $k_e = 1000 [k_e]$ 。而且，一旦选定了 $[k_e]$ ，则 k_e 的数值也确定了，比如是 1 或 1000。因此，为使式(1)成立，我们必须适当规定 q 和 q' 的单位。

根据首先选定哪一个单位的不同，就有两种制定单位的方法。

(1) k_e -基准 所谓的静电单位制,就是将 k_e 的单位当作基本单位来独立地选定的一种方法,并把真空中的 k_e 取作 1. 因此,根据在真空中所作的实验,就有①

$$F = \frac{qq'}{r^2} \quad (2)$$

可见,在这种情况下,相隔单位距离放置等量的两个电荷时,如果它们之间的斥力为 1 绝对单位,那么就必須取这时的电荷作为 1 电荷单位. 这种单位叫做静电单位(esu)的电荷.

虽说是单位距离和绝对单位的斥力,但有 cm、dyn 的 CGS 单位制,也有 m、N 的 MKS 单位制. 两者都是静电单位,可是,实际使用的只是 CGS 单位制. 所以,当说到静电单位时,认为就是指 CGS 制静电单位即 CGS esu 也无妨碍. 1CGS esu 的电荷有时也叫做 1 静电库仑(statC). q 的单位的量纲,根据上节式(1)有

$$[q]^2 = [k_e][F] \cdot [r]^2$$

由此得

$$\begin{aligned} \text{CGS esu} &= k_e^{\frac{1}{2}} \text{dyn}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{cm} \\ &= k_e^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

(2) q -基准 与此相对应,也有把电荷的单位作为基本单位独立地先行选定的方法. 在本书中,将这叫做 q -基准的单位. 也就是说,在电学中除了长度、质量、时间外,把电荷的单位选作第四个独立的基本单位. 这一点就跟讨论热学时把温度的单位看做独立单位的情形相同.

但是,作为实际问题来讲,不是取电荷的单位,而是取电流的单位作为基本单位. 也就是说,所谓单位电荷,就是由单位电流在单位时间内运送的电荷. 我们之所以将电流单位当作基本单位,是

① 在 1 大气压的空气中 $k_e = 1.00059$, 很接近 1.

因为那样做在实验上要容易些,同时在讨论磁场时,较为方便。(参照 § 21.1)

在 q -基准中,长度、质量、时间的单位分别用米(m)、公斤(kg)、秒(s),电流的单位用安培(A),即电荷的单位用库仑(C)的单位制,就是 MKSA 制。至于 A 是怎样定义的这一问题,我们留在后面去讨论^①。

A 在实用上大小是合适的,但 C 作为处理电荷的单位来讲就过大了,要使物体带上 1C 的电荷,实际上几乎是不可能的。C 和 CGSesu 之间有如下关系:

$$\begin{aligned} C &= 2.9979 \times 10^9 \text{CGSesu} \\ &= 10c \text{CGSesu} \\ &\approx 3 \times 10^9 \text{CGSesu} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 c 是 MKS 制的真空中的光速数值^②。

采用这种单位时,电子电荷的绝对值,即质子的电荷 e 为

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C} \quad (5)$$

这样,将电荷的单位独立地选作基本单位时,式(1)中 k_e 的单位便随之确定。即 k_e 的单位的量纲为

$$\begin{aligned} [k_e] &= \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= \text{A}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^2 \\ &= \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2 \end{aligned}$$

而 k_e 的数值可用如下方法计算出来。

假定在真空中放置两个各为 1C 的电荷,相距 1m,由式(1)可知,两电荷间的斥力为

$$F = \frac{1}{k_e} \quad \text{N} = \frac{10^5}{k_e} \text{dyn}$$

① § 21.1

② 此处为什么与光速有关,理由参照 § 22.12.

若用 CGSesu 来计算, 就变为相距 100cm 放置两个 10cCGSesu 的电荷, 所以它们之间的斥力由式(2)可算得

$$F = \frac{(10c)^2}{10^4} \text{ dyn}$$

由上面两式可得

$$k_e = \frac{10^7}{c^2} = \frac{1}{8.9876 \times 10^9} \approx \frac{1}{9 \times 10^9} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

象这样, 当只讨论电荷间的库仑力时, 在 MKSA 制中, 可以将下式看作是基本公式, 即

$$F = \frac{c^2}{10^7} \frac{qq'}{r^2} = 8.9876 \times 10^9 \frac{qq'}{r^2} \approx 9 \times 10^9 \frac{qq'}{r^2} \quad (6)$$

但在电磁学中从一开始就要考虑到, 由此式导出的电磁学基本方程 (§ 22.10) 尽可能用简单的形式来表达是比较方便的. 因此, 我们作一下代换:

$$k_e = 4\pi\epsilon_0$$

这 ϵ_0 叫做真空的介电系数. 但是

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{10^7}{4\pi c^2} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 8.8537 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned} \quad (7)$$

在 MKSA 制中, 总是采用这种有理化单位制^①. 所以在 MKSA 制中的库仑定律可用下式表示:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \quad (8)$$

【例题】 试计算两个 α -粒子相距 10^{-13}m 时的库仑力, 并同作用在两粒子间的万有引力进行比较. 但 α -粒子是 He 原子核, 由两个质子和两个中子所组成.

【解】 α -粒子的电荷 $= 2e = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$

① 这相当于把 k_e 的单位放大 $\frac{1}{4\pi}$ 倍. 这种单位制叫做有理化单位制.