

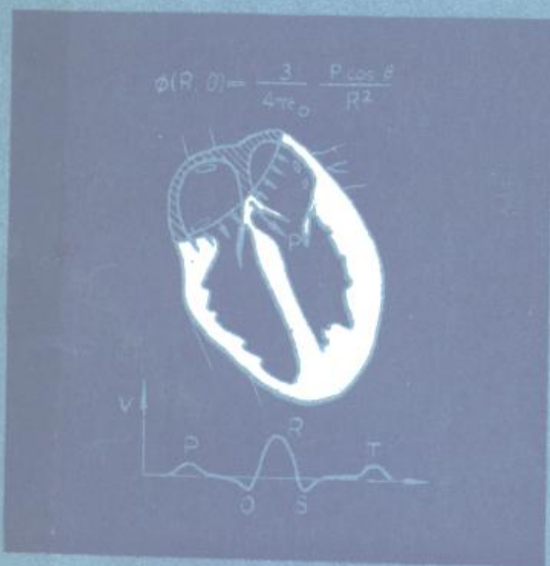
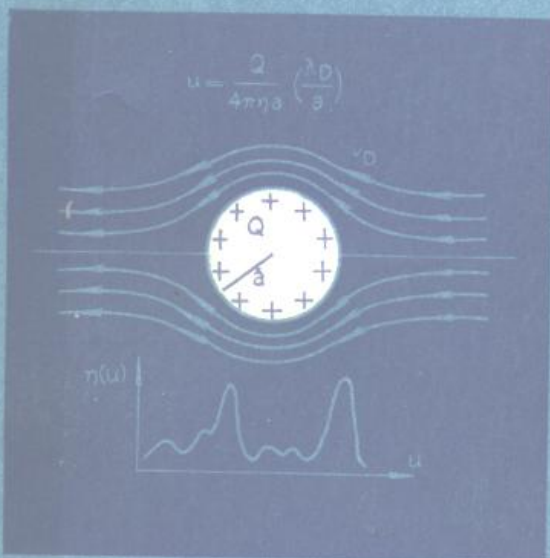
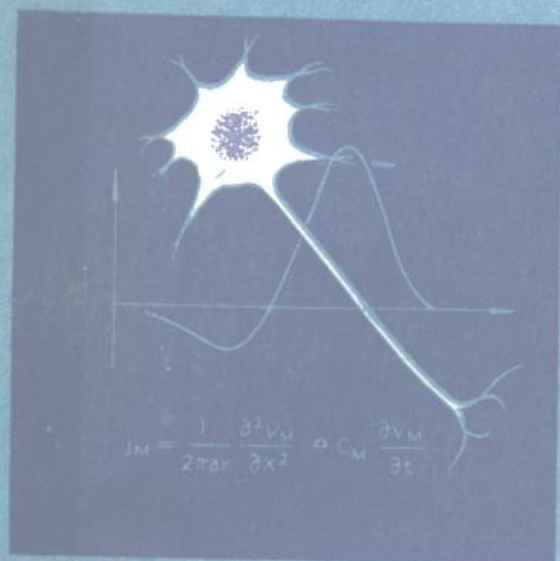
本尼迪克
维拉斯 合著

物理学

结合医学和生物学解说性实例

卷三 电磁学

邝华俊 等译
邝华俊 校



高等教育出版社

物 理 学

结合医学和生物学解说性实例

卷三 电 磁 学

本尼迪克 维拉斯 合著
邝华俊等 译 邝华俊 校

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是美国麻省理工学院本尼迪克和维拉斯两位教授根据哈佛-麻省理工学院保健科学和技术的教学计划写成的教材,共分三卷出版: 1. 力学, 2. 统计物理学, 3. 电磁学。本书收集了大量结合医学和生物学重要和典型的说明性实例,并收入了若干宝贵的原始科学记载及科学家治学的轶事,既结合医学和生物学专业需要,又富启发性,取材先进,文笔生动。

本书适用于我国医科院校和综合大学生物专业的基础物理教学,可供有关师生作为参考教材,亦可供广大科学工作者自学基础物理学之用。

PHYSICS
WITH ILLUSTRATIVE EXAMPLES
FROM MEDICINE AND BIOLOGY
George B. Benedek. Felix M. H. Villars
Volume 3 Electricity and Magnetism
Addison-Wesley Publishing Co. (1979)

物 理 学

结合医学和生物学解说性实例

卷三 电 磁 学

本尼迪克 维拉斯 合著

邝华俊等译 邝华俊校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七工厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 27.25 字数 620,000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数 00,001—2,200

书号 13010·01085 定价 5.20元

中译本序

近年来生命科学的研究已经从宏观的、定性的形态描述进入到微观的、定量的本质探讨。大量采用物理学、化学和数学的原理和方法已经有力地推动了生命科学的进展,这也是今后继续发展的方向。生命科学工作者必须具有更全面更深厚的物理学基础,这已经是很明显的了。遗憾的是在一般物理学教材中,内容的重点往往放在理工方面,很少照顾到生命科学的需要。这就在无意中给学生造成一种错误的印象:以研究低级物质运动形态为对象的物理学不能用来解释属于高级物质运动形态的生命现象。生命科学学生学习物理学往往越学越无兴趣。因此,专为这些学生编写一些物理教材或物理参考书,在介绍物理理论的同时,尽量举些生物学或医学方面的应用例子来说明物理学原理在阐释生命现象本质中所能发挥的作用,是很有必要的。

在这方面国外走得比我们早些。目前已经出版的供生命科学学生用的物理教材是不不少的。不过它们中很大一部分都属于所谓“非微积分水平”,使用的数学工具只限于代数和三角。这就在很大的程度上限制了讨论的深度,不能体现出用定量方法研究生命现象的优越性。美国麻省理工学院 G. B. Benedek 和 F. M. H. Villars 两教授所写的 *Physics, with Illustrative Examples from Medicine & Biology* (全书分力学、统计物理学及电磁学三卷)一书的特点是:把严谨的物理学理论与生物学及医学的例子紧密结合起来;使用较高等的数学工具——微积分。它不仅在讨论问题时提高了深度,而且更重要的是能使学生对如何用定量方法研究生命现象有所体会。原稿曾在该校作为教材使用,深受学生的欢迎。高等教育出版社*决定把它译成中文供我国生物科学、医学、生物医学工程等专业学生阅读和参考。

本书是集体翻译,第一卷由刘普和总校,第二卷和第三卷由邝华俊总校。原本中有错漏的地方经我们发现的都作了更正。由于我们水平有限,译文中如有不当之处,请读者批评指正。

邝华俊

1980年4月20日

1984年4月20日

* 本书第一卷原由人民教育出版社于1980年出版,1983年改由高等教育出版社出版。
本书第二卷已由高等教育出版社于1985年8月出版。

前 言

在过去几十年中，生物科学和医学随着生命物质化学知识的增长而昌盛起来了。我们的时代是一个生物化学的时代。不过，生物学和医学正越来越多地依靠物理科学来更深入和更定量地了解重要的生物医学问题，并求得对这些问题的有效解决。因此，生命科学的，特别是人类生物学的和医学的学生们都有一个掌握物理科学的有效工作知识的不断增长的要求。

为了帮助满足这种需要，本尼迪克和维拉斯两教授开了一门严谨的、真正具有挑战性的、用生物学和医学的实例来说明问题的普通物理学课程。这一课程不仅提供了学习物理学的一种极好方法；而且它也说明，对于许多重要的生物学问题，物理学者的定量方法在提供启发性的见解方面的用处和价值。这本书的编写和相应课程的开设是根据哈佛大学与麻省理工学院合订的“保健科学和技术”的教学计划而提出的。这一计划的一个目的就是促进保健科学与物理科学、工程学的有效联系以推动前者的进展。这门课程的开设就是试图满足这一目的。它在麻省理工学院所受到的热忱欢迎，促使我们建议本尼迪克和维拉斯两教授把它写出来，以便更多的人可以读到。幸运的是，他们答应了这一要求，写了这本书。

伦敦 (I. M. London)

1973年7月30日于法国加森 (Gassin)

原 序

这卷电磁学是这本教材《物理学,结合医学和生物学解说性实例》的第三卷,也是最后一卷。我们相信这一卷保持着前面第一卷经典力学和第二卷统计物理学独有的特点。在本卷中我们继续把丰富多彩的种种物理化学的、生物学的、生理学的和医学的重要现象的分析和阐明交织在严谨的经典物理学推理之中。

第一章介绍静电学的基本原理,包括电介质极化现象的微观理论以及有关气体、非极性和极性液体及固体的电极化率微观理论的详尽讨论。

第二章讨论电流。首先说明电传导现象可以用来理解电解质溶液和金属固体的详细微观性质。接着是大量有关稳恒电流和非稳恒电流的网络分析。在这里我们为学生提供实用的重要换能器件和电路的基本工作知识。这些器件和电路在实验物理学和生物学中有着广泛的应用。在讨论电路时我们首先详细分析 RC 电路对时变电流的响应以及这种电路作为积分器、微分器和触发脉冲源的应用。利用它对交变电源的响应来引入阻抗的概念和旋转矢量图。这一章的一个重要的特点就是广泛论述了运算放大器的原理和应用。在这里我们系统地说明运算放大器的各种重要的实用电路。本章最后三节都是生物学和医学的应用。它们是: Fricke 氏的细胞膜厚度的电测量法;雷击地点周围地面的电流和电压分布的分析;以及测量心电活动的标量和矢量(向量)心电图的详细物理基础。

第三章的主题是电解溶液的物理和它在解释生物电现象中的应用。

在本章的 3.1 节中,先介绍基本的能斯脱-普朗克(Nernst-Planck)电扩散方程式。利用这些方程式求得扩散电势和液体结面(液结)电势,并建立德拜屏蔽(Debye shielding)的概念。最后对巨离子的电泳迁移率进行计算,并举出一些利用这种技术的例子。

在 3.2 节中我们介绍和分析伽伐尼电池(电化学电池)中的物理和化学过程。在定义了可逆电极的概念以后,我们分析有关促成伽伐尼电池电动势的各种因素,并指出如何利用电动势的测量来测定化学反应平衡常数和溶液的 pH 值。

3.3 节研究活细胞的电学性质。首先讨论两种液体间隔(液室)之间的所谓道南平衡(Donnan Equilibrium)的性质,并引入能斯脱电势的概念。我们列出一些数据来说明大部分观察到的生物膜电势都需要用离子抽运的假设来解释,并且确定有泵唧抽运时的稳态性质。最后我们把这些结果用于所谓可兴奋的细胞膜上,并介绍霍奇金-赫胥黎(Hodgkin-Huxley)对动作电位(神经冲动)的分析要点。

最后第四章讨论磁和电磁的现象。这一部分内容与同样水平的其他教材相比有点压缩。不过我们打算仔细介绍重要的现象。首先介绍通过安培定律和毕奥-沙伐尔定律所表示的稳恒电流的磁场,随后是积分形式的法拉第感应定律。我们强调电磁感应在电能-机械能转换过程中所

起的作用。再引入自感和互感、振荡和耦合电路,这样就使第二章中电路的讨论完备了。

第四章最后是麦克斯韦方程组的简单精炼的陈述。这是在简单回顾这些方程所概括的事实的基础上提出来的。我们扼要介绍与著名的“位移电流”有关的一些逻辑上和历史上的论点,并指出电磁波的存在。我们讨论了这些波的主要性质,但认为它们的具体应用不属于这本教材的范围之内。

任何一个讲授基础电磁学的教师都知道这本教材所包括的内容是不可能在一个学期内讲完的。事实上教师完全可以做到有选择地删去一些章节而不致打乱基本内容的逻辑发展。

每章后面都附有一套习题,其中绝大部分都经过课堂试用。里面有许多比较实际。我们尽力使它们有意义和有兴趣、其中一些可能长些,但它们并不是很难完成的。

维拉斯(Felix M.H. Villars)

本尼迪克(George B. Benedek)

1979年1月12日于麻省理工学院

卷三 电磁学目录

1. 库仑力、静电场、静电势、静电能.....1	E. 求自由空间中静电势的拉普拉斯方程.....56
1.1 电荷和库仑定律.....1	i) 拉普拉斯方程基于解贮备.....50
A. 物质的电结构.....1	ii) 初始均匀电场中的金属球.....52
i) 基本带电粒子之间的静电力.....1	1.4 电容器——静电能的储存.....56
ii) 静电力的相加性.....2	A. 平行板电容器.....57
iii) 原子是电中性的吗?.....5	i) 平行板电容器的电场、板电荷和电容.....57
iv) 量子物理学和氢原子的大小.....6	ii) 平行板电容器两板间的相互作用力。 静电场能.....59
v) 电荷的迁移率;导体和绝缘体.....10	B. 柱形和球形对称的电容器.....61
B. 电荷单位的定义.....11	1.5 非导体的静电学:电介质和 电极化性.....62
i) 电荷的静电单位.....11	A. 介电常数和极化率的定义.....62
ii) 库仑和电荷的流动.....12	B. 原子和分子的感生偶极矩和永久偶极矩。 玻耳兹曼因子的作用.....65
iii) MKS制中的库仑定律.....12	i) 原子和分子的电子极化率.....65
iv) 电荷守恒.....14	ii) 离子极化率.....65
C. 总结和静电学的学习方案.....15	iii) 永久电偶极子和它们在电场作用下 的取向.....67
1.2 电场.....17	C. 体极化 P 。 P 和极化表面电荷密度 $\sigma_{\text{感}}$ 的关系.....70
A. 试验电荷和 E 的定义。一些简单电荷分布 所产生的电场.....17	D. 关于介电常数 κ 和微观极化率 α 的相互 关系.....71
i) 孤立电荷 Q 的电场.....19	E. 气体的极化率.....72
ii) 离原点距离 a 的两个点电荷的电场.....20	i) 感生和永久电偶极矩的实验测定.....72
B. 场线和它们的特征几何表示法.....22	ii) 原子的电子极化率经典模型.....73
i) 场线的作法.....22	iii) 永久电偶极矩和它们与分子结构的关系.....75
ii) 几种点电荷排列的电场分布.....24	F. 非极性的液体、固体和液体混合物的 介电常数.....76
iii) 偶极子场.....27	i) 局部电场和克劳修斯-莫索蒂关系式.....76
C. 高斯定律.....28	ii) 致密气体、液体和固体的克劳修斯-莫索蒂 关系式的检验.....76
i) 电通量的概念.....28	iii) 液体混合物的介电常数.....78
ii) 高斯定律的积分形式.....30	G. 极性液体的介电常数。翁萨格理论.....79
iii) 高斯定律的微分形式.....35	i) 克劳修斯-莫索蒂公式的失效。反应场和自 发极化.....79
1.3 静电势.....39	ii) 翁萨格关于极性媒质介电常数的理论。与实验 数据的比较.....81
A. 库仑定律以及电场与静电势之间的关系.....39	
B. 试验电荷所作的功。线积分和静电势.....41	
C. 点电荷、偶极子、连续电荷分布、偶极子层 (或偶层)的电势.....43	
i) 偶极子的电势.....43	
ii) 无限长电荷线的电势.....44	
iii) 偶层的电势.....46	
D. 等势面和场线。静电场的边界条件和导 电体的电势.....48	

H. 介电体内部和周围的电场。边界条件和位移矢量 D	83
i) 拉普拉斯方程和介电体表面的边界条件.....	83
ii) 初始均匀电场中的电介质球体.....	86
1.6 电介媒质中的静电力和能量.....	89
A. 电介质流体中电荷系统的静电能量和力.....	90
i) 平行板电容器.....	90
ii) 单个带电球体的静电能.....	92
iii) 电介质中两电荷间的作用力.....	93
B. 水作为离子化合物的溶剂.....	95
i) 电介质中离子的自具能.....	95
ii) 离子化合物在电介质溶剂中的溶解度.....	97
静电学习题.....	100
2. 电流.....	111
2.1 导言.....	121
2.2 电流、电阻、欧姆定律及电功率耗散.....	122
A. 电流。电迁移率、电导率及电阻率.....	122
B. 欧姆定律.....	125
C. 欧姆导体中的功率消耗.....	127
2.3 电解质溶液的电导率.....	129
A. 电解质溶液的电导率理论.....	129
B. 迁移率和电导率理论与实验测量的比较.....	131
C. 弱酸的离解度。对电导率的应用.....	135
2.4 金属的电导率.....	141
A. 电导率理论.....	141
B. 与实验数据的比较.....	146
2.5 稳恒电流及非稳恒电流的电网络。基尔霍夫定律。电阻、电容及运算放大器.....	147
A. 电路元件。理想的独立电压源和独立电流源。基尔霍夫定律。.....	147
i) 无源电路元件.....	147
ii) 电网络和理想电压源及理想电流源.....	149
iii) 电压与电流的波形.....	150
iv) 基尔霍夫定律.....	151
v) 等效电压源和等效电流源.....	155
vi) 电压、电流和功率传输.....	158
B. 测量和控制用的换能器与简单的电阻性网络.....	161
i) 测量温度、压强和应变的换能器.....	161
ii) 测量电阻用的惠斯登电桥.....	164
iii) 用电势计测量电压.....	167
C. 含有电阻和电容的电路内的非稳恒电流.....	168
i) 电阻电容串联电路.....	168
a) 阶跃函数电压输入.....	168
b) 方形脉冲电压输入.....	171
c) 输入电压为时间的任意函数.....	173
d) RC 电路用作积分器、时间平均器或滤波器.....	175
e) 用作微分器的 RC 电路.....	176
f) 串联 RC 电路对正弦信号的响应.....	177
ii) 交流电路理论基础.....	181
a) 旋转矢量图。容抗、导纳和阻抗.....	181
b) 并联 RC 电路.....	184
c) 补偿衰减器.....	186
D. 运算放大器.....	188
i) 理想运算放大器的基本特性.....	188
ii) 实际运算放大器对理想状态的偏离.....	191
iii) 利用反馈作用的线性运算放大器.....	191
a) 倒相放大器电路.....	191
b) 非倒相放大器、跟随器.....	193
c) 波形加法电路和波形减法电路.....	196
d) 积分电路和微分电路.....	198
2.6 细胞膜电容和厚度的电学测定方法.....	201
A. 细胞膜的静电电容及存储在其中的能量.....	201
B. 细胞膜电容的测定方法。与交流电路理论的关系.....	205
2.7 三维空间内的电荷与电流、连续性方程和电荷中和性、准稳态流动。对闪电与流入大地电流的应用.....	207
A. 导电媒质中的连续方程与电荷中和性.....	207
B. 准稳恒电流.....	210
C. 闪电与流入大地的电流.....	211
2.8 心电图描记术.....	214
A. 心脏神经与肌肉细胞的解剖学与电生理学基础。偶层和跨细胞的电势差.....	215
B. 心脏的除极化。心动矢量 $P(t)$	217
C. 心脏的电活动性。正常心脏的 $P(t)$	218
D. 人体表面的等电势线。球体模型.....	221

E. 标量心电图记法和矢量心电图记法	224
参考文献	228
电流习题	230
3. 电化学和生物电	251
3.1 离子扩散和能斯特-普朗克方程	251
A. 扩散和电场造成的离子流。能斯特-普朗克方程	251
B. 扩散电势。液结和盐桥	254
i) 非均匀浓度单一电解液的扩散电势	254
ii) 两种不同电解液界面上的结电势	256
iii) 盐桥。细胞膜电势的测量	258
C. 德拜屏蔽: 围绕荷电表面的离子云	260
i) 平衡离子浓度和平衡静电势。玻耳兹曼因子	261
ii) 泊松-玻耳兹曼方程、德拜长度定义	262
iii) 线性泊松-玻耳兹曼方程的解	263
iv) 德拜屏蔽距离的大小。溶液的离子强度	264
v) 德拜长度能测量吗?	265
vi) 带电球体的德拜屏蔽	267
D. 电泳	268
i) 关于蛋白结构和电荷的一些情况	269
ii) 带电粒子的电泳迁移率	270
iii) 电泳测量法	275
3.2 伽伐尼电池、电极、电化学测量、pH 测定	278
A. 引言。伽伐尼电池	278
i) 电极反应。定义阴极和阳极	280
ii) 伽伐尼静止电势是电极电势、接触电势及结电势之和	282
iii) 可逆电极反应	285
iv) 第二类电极	286
v) 氢电极	287
B. 伽伐尼电池的电动势	288
i) 半电池电势的能斯特方程	288
ii) 能斯特关系式的实验检验	291
iii) 浓度、活度和活度系数	292
iv) 德拜-许克尔的活度系数理论	296
C. 电化学测量: 水的离子积、pH 测定、酸平衡常数	298
i) 水的离子积	299
ii) pH-测定	301
iii) 弱酸的平衡常数	302
iv) 玻璃电极	305

3.3 膜电位。生物膜。离子的主动运输。可兴奋膜及动作电位	307
A. 生物电现象引言	307
i) 简短的历史介绍	307
ii) 生物膜。膜电位的生理作用	308
B. 膜电位	310
i) 道南平衡	312
ii) 细胞内液和外液的电解质成分及观察到的膜电位	317
iii) 尤辛通量比标准及钠泵	319
iv) 生物膜的电流-电压关系	322
C. 可兴奋膜。轴突及动作电位	325
i) 轴突作为一电缆	327
ii) 动作电位及有关的跨膜电流	333
iii) 霍奇金和赫胥黎的研究工作简介	336
iv) 兴奋阈的存在	341
参考文献	345
电化学和生物电习题	347
4. 电磁	358
4.1 磁场与磁力	358
A. 引言: 基本磁现象	358
B. 洛仑兹力	360
i) 作用在单个运动电荷上的力和磁场 B 的定义	360
ii) 作用在微分电流元上的磁力	361
iii) 作用在电流环路上的转矩。磁偶极子	362
iv) 磁偶极子与磁场间的相互作用能	364
C. 微分电流元产生的磁场。毕奥-沙伐尔定律。安培定律	365
i) 长直载流导线的磁场	366
ii) 微小电流环路的磁场。磁偶极场	367
iii) 安培定律	369
a) 长直载流导线的磁场	369
iv) 安培定律的应用: 粗导线中的磁场和长直螺线管中的磁场	372
a) 粗导线内部和外部的磁场	372
b) 长直螺线管内部的磁场	372
4.2 法拉第电磁感应定律	374
A. 磁通量和感生电动势	374
i) 构成法拉第定律基础的基本观察事实	374
ii) 感生电动势和磁通量的定义。法拉第定律和楞次定则的陈述	375
B. 自感、互感、电感电路、电共振	380

i) 自感的定义.....	380	iii) 电场的性质.....	400
ii) 电感器作为一电路元件。简单 RL 电路.....	380	iv) 磁场的性质.....	403
iii) 由交流电压源激励的串联 RL 电路.....	384	B. 电磁波	407
iv) 包含电阻、电容和电感的电路。电共振.....	386	i) 波和波动方程.....	408
a) LC 共振电路: 振荡.....	387	ii) 平面电磁波.....	410
b) 电源激励的 RLC 串联电路.....	390	iii) 正弦波。线偏振和圆偏振.....	412
v) 两载流线圈的互感.....	393	iv) 电磁波谱.....	414
vi) 变压器作为电路元件.....	394	磁场和磁力习题	416
4.3 麦克斯韦方程(组)和电磁波	397	基本常数表	421
A. 总结。麦克斯韦方程(组)概述	397	MKSA制单位表	425
i) 场概念.....	398		
ii) 电荷, 电流, 和电荷守恒.....	399		

第一章 库仑力、电场、静电势、静电能

1.1 电荷和库仑定律

A. 物质的电结构

在二十世纪的前三分之一(1900—1930),物理学的一个主要的成就,就是认识到物质的性质和结构可以在很大程度上定量地用组成物质的粒子(电子和原子核)之间的电力来解释。

然而,我们目前所用到的电磁理论的主要部分却早在十九世纪就已经建立起来了。这两大成就之间的时间间隔表明,物质的电结构在日常观察中是极难发现的,而且在描写宏观(=大尺度)电现象时似乎也用不上它们。我们要对该表观似非而是的论点加以解释。

研究原子和分子结构的结果表明,从观察宏观现象得出的电磁学规律对原子尺度的水平还是适用的。不过在这个范围内它们必须和量子动力学(而不是和牛顿力学)的规律结合起来才能一般地说明原子、分子和凝聚物质的性质。我们现在用这些规律来了解物质结构的能力已经使得甚至在初等物理课程中能够介绍的电磁现象内容大大丰富起来。特别是在介绍生物电现象时,我们将经常骑在宏观侧与微观(原子)侧间的分界墙上,并瞧瞧兼看两边景象能多么有趣。

许多“熟悉”的电现象实际上是很复杂而又没有弄清楚的,这就使得我们在介绍电学这门学科的第一步就为困难所阻碍。摩擦生电,例如在干燥的日子里尼龙衬衣上所带的电荷,或者塑料膜上的奇怪现象,或者雷云中的电,都属极为复杂而又最不了解的电现象。因此我们必须从另外的地方开始。看来最好的做法是从现在已经知道的有关物质的基本组成粒子(电子、质子、中子)的事实出发。原子核由质子和中子组成,它们统称为核子。这些核子的质量约为 1.6×10^{-24} 克,彼此以强大的短程核力互相吸引。短程一词表示两核子之间的作用力在它们的距离 $r > 10^{-13}$ 厘米时大致按 $F \sim \frac{1}{r} e^{-r/r_0}$ 的规律很快减小为零,其中 $r_0 \sim 10^{-13}$ 厘米。一个由 Z 个质子和 N 个中子组成的束缚系统形成一个原子核。整数 Z 叫做核的原子序数,整数 $A = N + Z$ 叫做质量数。 Z 决定原子的化学种类。

在中性原子中,一个核(Z, N)被 Z 个电子组成的电子“云”所包围,到中心核的半径范围约在 10^{-8} 厘米之内。这个电子云的动力学必需用量子力学的规律来描述。化学键的形成过程以及分子结构也只能用同样的规律来理解。

在这里起作用的力几乎全部是静电力或库仑力。这种力作用于任何两个电子、任何两个质子或质子与电子之间。下面我们指出它的一些主要属性:

i) 基本带电粒子之间的静电力

a) 力的大小与两粒子间的距离平方成反比。

b) 两电子或两质子之间互相排斥;电子和质子之间互相吸引。

c) 在距离相等时,两个电子,或两个质子,或一个电子与一个质子之间的作用力大小完全相等。

上列事实可以归结为下面的代数式,它表示当粒子1与粒子2相距为 r 时,粒子1所受到粒子2的作用力 F_{12} :

$$F_{12} = \pm K \frac{\hat{r}_{12}}{r^2} \quad 1.1-1$$

式中 $\hat{r}_{12} (\equiv \frac{r_{12}}{r_{12}})$ 是一个沿粒子1和粒子2的连线的单位矢量($|\hat{r}_{12}|=1$)。无论粒子1和2是电子-电子对,或质子-质子对,或质子-电子对,常数 K 都是一样的。事实上它是一个普适常数,它的数值是

$$K = 2.31 \times 10^{-10} \text{ 尔格} \cdot \text{厘米}$$

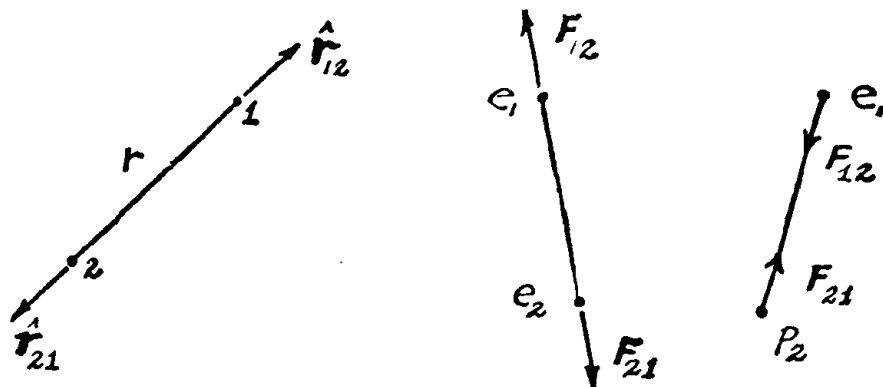


图 1.1-1 一对带电粒子之间的 \hat{r}_{12} , \hat{r}_{21} ,和力 F_{12} , F_{21} 的定义

受库仑力吸引或排斥的粒子称为**带电粒子**。在电子与中子间、质子与中子间或两中子之间是没有库仑力的。象中子这样的粒子就称为**中性粒子**或**不带电粒子**。要使两个粒子之间有库仑力作用,两个粒子就必须都是带电的。

引入粒子的**电荷数** z 的概念还可以把上面讨论过的事实进一步概括起来。 z 是一个整数,有如下指定值:

质子: $z = z_p = 1$

电子: $z = z_e = -1$

中子: $z = z_n = 0$

由这三种粒子形成的任何粒子对之间的力的库仑定律可以表示为:

$$F = K z_1 z_2 \frac{\hat{r}_{12}}{r^2} \quad 1.1-2$$

对两个质子或两个电子, $z_1 z_2 = +1$,式 1.1-2 表示其排斥(力);对电子-质子对, $z_1 z_2 = -1$,式 1.1-2 表示其吸引(力)。如果粒子中的一个(或两个)粒子是中子,则 $z_1 z_2 = 0$,式 1.1-2 表示两粒子间没有库仑力。以后我们还要讨论 K 的数值实际上怎样测定以及这数值对物质的性质有些什么关系等问题。

ii) 静电力的相加性

现在的问题是：怎样把上面的公式推广到多于两个带电粒子的情况？

所有的证据表明，在这种情况下，作用在一个带电粒子的净静电力正好是所有其它粒子对它的作用力的矢量和。为了说明这一点，让我们考虑图 1.1-2 所示的例子：一个电子 ($z_e = -1$) 同时受到另一电子 ($z_e = -1$) 和一个质子 ($z_p = +1$) 的库仑力作用。它所受的净力就是 $F = F_1 + F_2$ 。

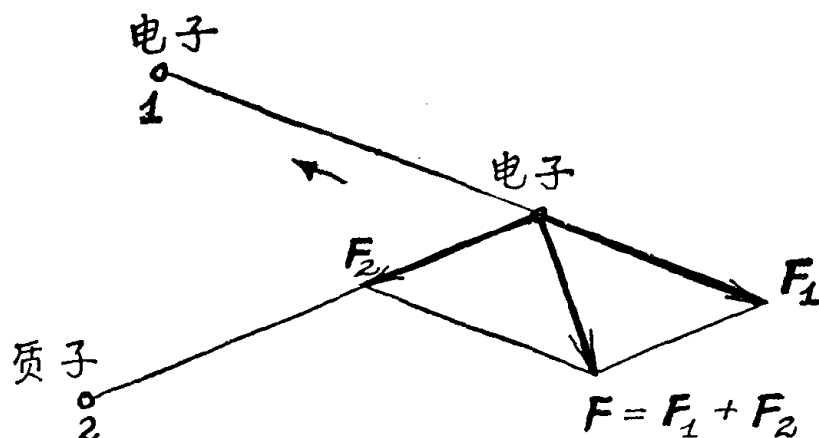


图 1.1-2 静电力的相加性位于(1)和(2)的两个电荷以力 $F = F_1 + F_2$ 作用于第三个电荷上

这就是静电力的相加性原理或叠加性原理 (Principle of additivity, or superposition, of electrostatic forces)。如果在一个荷电粒子周围有 n 个电荷 $z_i (= \pm 1)$ ，则它受到 n 个电荷施于它的净作用力为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

上面的一个重要的特例就是：许多带电粒子紧密地挤在一起，象原子核中的 Z 个质子那样。原子核直径约为 10^{-12} 厘米。从“远处”(离核距离 $r \gg 10^{-12}$ 厘米)看来，所有这些质子都位于同一地点；因此根据相加性原理，有 Z 个质子的原子核对一个带电粒子的作用力就是一个质子对它的作用力的 Z 倍。核子的表现就象是一个电荷数为 Z 的单个点电荷一样。(氧核的 Z 等于 8，铀核的 Z 则等于 92。)

这种考虑方法对于我们理解原子核的质子对原子核周围电子的作用力当然是十分重要的。尽管原子本身很小(数量级为 10^{-8} 厘米，见下面第 iv 节)，原子中的电子离核可以说是“很远”的，核就象是一个电荷数为 Z 的点电荷一样。图 1.1-3 就表示这种情况：每个质子对电子有一拉力



图 1.1-3 含有 Z 个质子的核对电子的作用力

$F = -K \frac{\hat{r}}{r^2}$ 。由于 $r \gg$ 核子的大小，每个质子以同一方向的力拉电子。因此电子所受的净力为

$$F_{*} = -ZK \frac{\hat{r}}{r^2} = Zz_e K \frac{\hat{r}}{r^2} \quad 1.1-3$$

即力与电子的电荷数 $z_e = -1$ 和核的总电荷数

$$Z = \sum z_p \quad 1.1-4$$

的乘积成正比。

这种做法还可以推广到一个原子序数为 Z 、电子壳层内含有 $(Z-z)$ 个电子的核。这种结构就是一个离子，我们给它指派的总电荷数 z 为

$$z = Z \times (+1) + (Z-z) \times (-1) \quad 1.1-5^*$$

这一离子作用在远处电子的净力是

$$F = zz_e K \frac{\hat{r}}{r^2} \quad 1.1-6$$

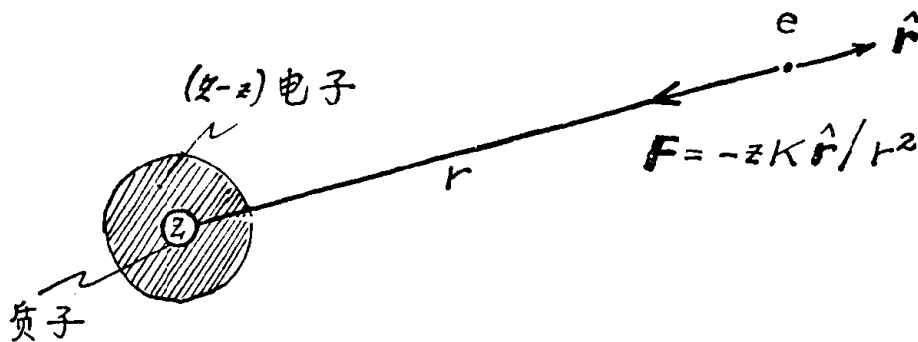


图 1.1-4 电荷数 z 的离子对电子的作用力

最后，不难看出如果双方都是包含多个基本带电粒子的复合结构，则它们的相互作用力与双方的总电荷数乘积 $z_1 z_2$ 成正比(如图 1.1-5 所示)：

$$F_{12} = z_1 z_2 K \frac{\hat{r}}{r^2} \quad 1.1-7$$

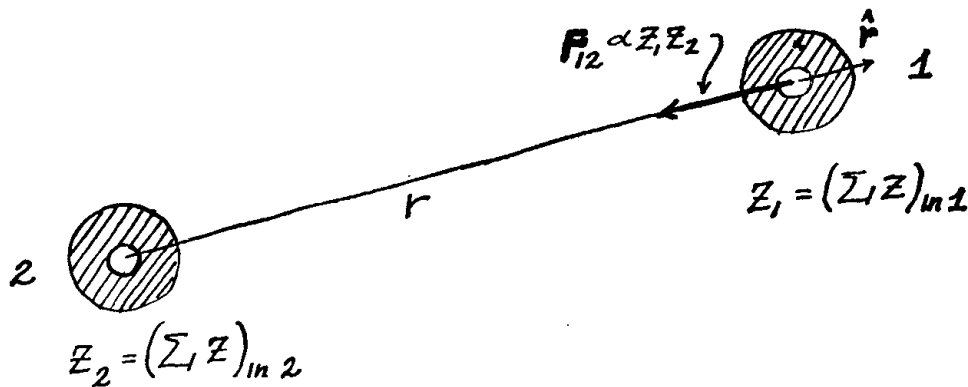


图 1.1-5 两个总电荷数分别为 z_1 及 z_2 的物体之间的电力

* 在离子的情况下， z 也叫做离子的价 (valency)。大部分天然存在的离子，例如电解质中的离子，只带几个单位的电荷。如果用 M 来表示中性原子，则带单电荷的离子就用 M^+ 或 M^- 表示，带双电荷的就用 M^{++} 或 M^{--} 表示。电荷数或价的概念在电化学中用得最多，这就是为什么我们这样早就加以介绍的缘故。

从这个最后的例子可以得到一个普遍的结论：所有可以观察到的电现象都必然是由**多余电荷**（以正离子或负离子的形式出现）产生的。由于同号电荷之间存在着排斥力，因此要把同号（正的或负的）电荷聚积在一起达到可以宏观地观察的电量的话，就必须消耗**能量**。反过来，在空间上分离的异号多余电荷在合并的过程中必然放出能量。大规模的电荷分离只有在巨大能源存在的情况下才能自然出现。例如在大雷雨中，这种能量是以热能和重力能的形式提供的。但一般来说，在宏观尺度下，物质是不带电的，我们以后要研究的电现象绝大多数都是在实验室中用人工方法产生的。只有在生物系统中我们才找到“天然的”、但是经过细心安排和控制的电现象。

iii) 原子是电中性的吗？

上节的论证还留下了一些小问题。例如式 1.1-6 就包含着这个论断：一个中性原子($z=0$) 对一个电子没有任何力的作用。这不能算是完全正确的。作为一个**渐近**的说法是对的，但只限于电子与原子之间的距离远大于原子本身大小的情况。然而如果电子的距离很近，这个力又是怎样的呢？

如果不借助于若干以量子力学为基础的原子结构的近代观点，这个问题是不好回答的。根据这种观点（我们将在下节更为详细地加以介绍），我们原来熟悉的、认为原子的电子绕着核在轨道上运动的图象要被另一种图象所取代，后者认为电子在核外形成一种稳定的（与时间无关的）**电荷云**。在电子绕核运动的图象中，靠近原子的带电粒子将会受到一个小的、快速振荡着的力，不过这力的时间平均值等于零。在量子图象中，原子核（电荷数 Z ）和 Z 个电子组成的**不受扰**电子云对外间电荷的净作用力在任何时候（即使电荷非常靠近）也会是零。（这不是显而易见的。它是后面要介绍的高斯定律推得的结论。）在这个意义上，一个不受扰的原子就是完全电中性的。

这里提出了“不受扰”这个限定条件。它的含义是很容易看出来的，只要我们反过来提出这样的问题：一个靠近的电子对中性原子施有什么作用力。这种情况如图 1.1-6 所示。电子**吸引**原子核的力的数值为

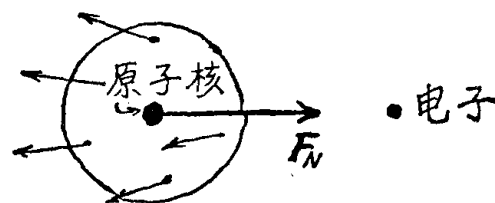


图 1.1-6 电子对附近中性原子的作用力

$$F_N = ZK/r^2$$

它将以大小相等方向相反的力**排斥**电子云。如果电子云的结构相对于核是固定不动的，这两个力就会正好互相抵消，净作用力为零。实际上在这两个方向相反的力的作用下，电子云有一点位移：原子被**极化**了（如图 1.1-7 所示）。现在我们就可以看到**极化的原子**将被吸向电子，因为原子核和它稍为接近了一点，而电子云则稍为远了一点。根据牛顿第三定律，旁边的电子将会被极化了的原子所吸引。但是必须弄清楚，产生这种吸引力的根本原因是原子的极化，而不是由于电子云本身有非无限小的一定大小的缘故。

在下一节中，我们将引入一些**量子物理学**的概念以满意结束这一讨论，目的是使我们能够弄懂一些与一般电磁学有关的原子结构的内容。量子物理学能够准确地预测原子、离子和分子的理化性质；其中一些内容是不必完全掌握量子力学的数学方法也可以弄懂的。

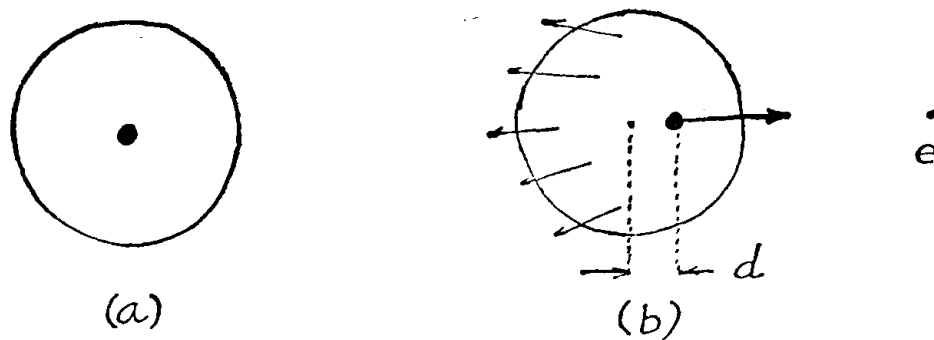


图 1.1-7 (a) 原子的不受扰电子云, 与核同圆心。(b) 在附近电荷(电子)的作用力影响下, 原子被极化; 电子云中心离核移动了距离 d

iv) 量子物理学和氢原子的大小

一个质子与一个电子之间的力(式 1.1-2)是吸引力, 它的大小与距离的平方成反比。因此这一系统的经典动力学和行星运动是一样的, 只是用库仑力来代替万有引力罢了。事实上原子确曾经被看作是微型的行星系统。不过我们必须认识到, 这种观点尽管很有吸引力, 但它不是很正确的: 因为我们无法在这样的基础上去理解为什么所有 H 原子都完全相同、大小都一样、具有相同的电离能, 等等化学事实。

在电子绕着较重的原子核运行的经典图象中, 我们必须容许轨道的大小和有关的系统能量都可以连续变化。更糟的是, 根据电磁辐射理论的预期, 绕行的电子应该不断损失能量, 最后与质子合在一起, 形成一个电离能(=分离能)为无穷大的系统。

这些就是经典物理学不能避免的结论。从它们得到的教训就是: 经典物理学是不适用于描述原子系统(原子和分子)的。

很清楚这里不是介绍量子动力学的地方。我们只要指出, 和经典动力学相反, 量子动力学的一些主要的特点是以物质的波动性为基础的: 经典物理学指出物体在空间运动的轨迹(轨道), 而量子动力学则描写“波包”在时空中的演变。关于波包, 我们需要知道的是:

a) 波包是用一个与位置 r 及时间 t 有关的波幅 $\psi(r, t)$ 来描述的。它在时间中的演化由一波动方程[薛定谔方程(Schrödinger equation)]来决定。波幅 ψ 就是用 ψ 来对粒子性质作几率描述的基础。这一点在下面(d)中再详细说明。

b) 一个波包代表这样一种情况: 一般说来无论粒子的位置、速度或能量都不是明确的; 这些量的值都是不确定的。

这是量子力学概念中最具有革命性的内容, 即在一个确定的物理情况中, 有些量如位置、速度、能量可以没有准确的值。但是, 对一个给定的波包, 它的位置值和速度值的几率分布是可以得出来的。下面我们介绍具体的做法。

c) 存在着一种特殊的波包, 即所谓定波包, 它们的能量是确定的(但一般说来位置和速度却不确定)。这些定波包和一条拉紧的有限长度的绳子上的驻波图样相似(见图 1.1-8)。每种图样相应于系统能量的一个确定值; 量子物理学就是用这种方式来解释能量量子化的基本事实的。

d) 一个波包包含了系统的所有信息。它的解释是统计性的: 特别是从波幅 $\psi(r)$ (r 是电子