

普通物理学

第三卷

近代物理学

[苏]И. В. 萨韦利耶夫著 雷祖猷 译 高等教育出版社

385109

普通物理学

第三卷

近代物理学

[苏] И. В. 萨韦利耶夫著

雷祖猷 译



高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书系据苏联科学出版社出版的 И. В. 萨韦利耶夫著《普通物理学》第三卷 1982 年修订第二版译出。

这套《普通物理学》共三卷。内容包括：力学与分子物理学(第一卷)；电磁学、波与光学(第二卷)；量子光学、原子物理学、固体物理学、原子核与粒子物理学(第三卷)。

这套书的主要目的在于向大学生介绍物理学的基本概念和方法，特别注意物理定律涵义的解释及其应用。该书保持了苏联教材在叙述上严谨、简洁的特色，并在可能的情况下将物理学的近代成就(包括相对论和量子论)引入普通物理学。这种引入不只是作一般知识性介绍，而是尽可能与普通物理学的传统内容融为一体，使经典理论成为它的相对论或量子论表述的经典极限。在内容、风格和处理方法上给人以“新”的感觉。

该书是莫斯科工程物理学院使用的教材，可供高等工科院校使用多学时(扩充的)普通物理学教学大纲的专业作为教学参考书。但就其内容的深度与广度而言，它也可供我国理科物理等专业师生参考。

И. В. Савельев
КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
Том 3

Москва «Наука» 1982



新华书店总店北京科技发行所发行
北京顺义县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10.875 字数 260 000

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数 0001—2 160

ISBN 7-04-003873-0/O·1134

定价 6.90 元

前 言

本书是作者所著《普通物理学》的最后一卷。在准备本卷第二版时,已将讲述夸克的 § 83 重新写过,并对 § 24、§ 49 和 § 81 作了补充和修改。其余章节实际上没有变动。

作者谨对莫斯科工程物理学院普通物理教研室的同事们表示谢意,没有与他们的交往,没有他们的善意的评论和建议,这部书是不可能写成的。作者还对物理数学科学博士 И. П. 克雷洛夫的有益建议和意见表示感谢。

本书首先是为采用扩充的物理大纲的高等工科院校编著的,但是内容的编排,使它在略去个别地方时,也可以供采用普通大纲的院校用做教材。在列于卷首的《教学法建议》中指出,当课时不够用来讲授全书内容时,哪些材料是可以省略的。

И. В. 萨韦利耶夫

1981 年10月于莫斯科

教学法建议

本建议大致列出在课时不足以讲授全卷内容时可以略去的节或其中的某些部分。节略意见反映的是作者个人的观点，因而只带有建议的性质。

1. 在 § 3 “平衡辐射能量密度”中，可以只限于讲解前面三段和最后一段，而略去公式(3.3)的推导。应当注意到，公式(3.4)可以极其简单地由光子概念得出[见与公式(10.7) — (10.9) 有关的课文]。

2. § 5 “三维空间中的驻波”一节中几乎全部内容都可以略去，而限于不加推导地讨论公式(5.26)和(5.27)。

3. § 7 “普朗克公式”一节末尾，从公式(7.10) 后面第二段起(其内容为绝对黑体能量面发光度的积分表达式)，可以不加讨论。

4. § 13 “汤姆孙原子模型”可以删去。

5. 在 § 14 “ α 粒子散射实验原子的有核模型”一节中可以讨论与公式(14.2) — (14.8) 有关的课文，而限于不作推导地介绍公式(14.9)和讲述该公式后面的课文。

6. 在 § 16 “圆形轨道的量子化法则”一节中可以限于不加推导地讨论公式(16.7)。

7. 在 § 26 “粒子通过势垒”中可以限于讲述从公式(26.13)起的最后几段。

8. § 30 “光谱线的宽度”可以删去。

9. § 31 “光谱多重性和电子自旋”末尾，从公式(31.8) 起可以不讲。

10. 在 §33“原子的磁矩”中,可以不介绍如何借助原子的矢量模型而获得公式(33.5).

11. 在 § 34“塞曼效应”中,可以限于介绍简单塞曼效应.

12. § 35“电子顺磁共振”可以删去.

13. § 37“门捷列夫元素周期系”中涉及洪德定则的那最后几段,可以不细述.

14. § 39“分子的能量”可以删去.

15. § 40“分子光谱”可以删去.

16. § 41“光的组合散射”可以删去.

17. § 45“晶格 米勒指数”可以删去.

18. § 50“穆斯堡尔效应”可以删去.

19. 在研习 §51《金属中自由电子的量子理论》时应当注意到费米能级与温度有关,尽管关系不强.在各种教材中常常会见到把费米能级简单地定义为绝对零度下电子的最高能量.由此可见,这种说法是把费米能级与绝对零度下的费米能级等同起来[见公式(51.9)后面的课文].结果,费米能级就从温度的函数变成了所研究金属的一个特有常数.在这样的定义下,接触温差电动势的产生就变成不可理解的了[见公式(63.1)].这样的定义也不适用于半导体,对于半导体,费米能级位于禁带之中.

20. § 52“费米-狄拉克分布”开头部分可以跳过,而从公式(52.5)开始本节的讲授.

21. § 63“温差电效应”开始部分可以略去,而从公式(63.8)讲起.本节涉及汤姆孙现象的后面部分可以删去.

22. § 71“核反应”可以删去.

23. § 78“同位旋”可以删去.

24. §80“弱相互作用中宇称不守恒”可以删去.

再次强调指出,上述删节意见只是作者所提出的大致建议.使用本书的教师可根据具体情况酌情增删.

目 录

前言

教学法建议	1
-------	---

第一编 量子光学

第一章 热辐射	1
§ 1. 热辐射和发光	1
§ 2. 基尔霍夫定律	2
§ 3. 平衡辐射能量密度	7
§ 4. 斯特藩-玻耳兹曼定律和维恩定律	10
§ 5. 三维空间中的驻波	11
§ 6. 瑞利-金斯公式	21
§ 7. 普朗克公式	23
第二章 光子	28
§ 8. 韧致伦琴辐射	28
§ 9. 光电效应	30
§ 10. 博特实验 光子	35
§ 11. 康普顿效应	39

第二编 原子物理学

第三章 原子的玻尔理论	44
§ 12. 原子光谱的规律性	44
§ 13. 汤姆孙原子模型	47
§ 14. α 粒子散射实验 原子的有核模型	48
§ 15. 玻尔假设 弗兰克和赫兹的实验	54
§ 16. 圆形轨道的量子化法则	58

§ 17. 氢原子的初等玻尔理论.....	60
第四章 量子力学初步.....	63
§ 18. 德布罗意假说 物质的波动性.....	63
§ 19. 微观粒子的异常性质.....	66
§ 20. 不确定性原理.....	69
§ 21. 薛定谔方程.....	74
§ 22. 波函数的意义.....	78
§ 23. 能量量子化.....	79
§ 24. 角动量量子化.....	84
§ 25. 叠加原理.....	87
§ 26. 粒子通过势垒.....	89
§ 27. 简谐振子.....	94
第五章 原子和分子物理学.....	97
§ 28. 氢原子.....	97
§ 29. 碱金属光谱.....	104
§ 30. 光谱线的宽度.....	108
§ 31. 光谱多重性和电子自旋.....	112
§ 32. 多电子原子的总角动量.....	120
§ 33. 原子的磁矩.....	122
§ 34. 塞曼效应.....	128
§ 35. 电子顺磁共振.....	134
§ 36. 泡利原理 电子按原子能级的分布.....	136
§ 37. 门捷列夫元素周期系.....	139
§ 38. 伦琴光谱.....	144
§ 39. 分子的能量.....	148
§ 40. 分子光谱.....	152
§ 41. 光的组合散射.....	156
§ 42. 受激辐射.....	158
§ 43. 激光器.....	161
§ 44. 非线性光学.....	166

第三编 固体物理学

第六章 晶格振动	169
§ 45. 晶格 米勒指数.....	169
§ 46. 晶体的热容 爱因斯坦理论.....	171
§ 47. 多自由度系统的振动.....	173
§ 48. 德拜理论.....	176
§ 49. 声子.....	181
§ 50. 穆斯堡尔效应.....	183
第七章 固体能带理论	191
§ 51. 金属中自由电子的量子理论.....	191
§ 52. 费米-狄拉克分布.....	196
§ 53. 晶体中的能带.....	201
§ 54. 晶格电子动力学.....	206
第八章 金属和半导体的导电性	210
§ 55. 金属的导电性.....	210
§ 56. 超导性.....	213
§ 57. 半导体.....	217
§ 58. 半导体的本征导电性.....	219
§ 59. 半导体的杂质导电性.....	222
第九章 接触现象和温差电现象	226
§ 60. 逸出功.....	226
§ 61. 热电子发射 电子管.....	229
§ 62. 接触电势差.....	234
§ 63. 温差电效应.....	238
§ 64. 半导体二极管和三极管.....	244
§ 65. 阻挡层光电效应.....	250

第四编 原子核和基本粒子物理学

第十章 原子核	252
----------------------	-----

§ 66. 原子核的组成和特征.....	252
§ 67. 核的质量和结合能.....	256
§ 68. 原子核模型.....	259
§ 69. 核力.....	260
§ 70. 放射性.....	266
§ 71. 核反应.....	275
§ 72. 核裂变.....	281
§ 73. 热核反应.....	287
第十一章 基本粒子.....	291
§ 74. 相互作用的类型和基本粒子的分类.....	291
§ 75. 基本粒子的记录方法.....	294
§ 76. 宇宙线.....	298
§ 77. 粒子和反粒子.....	300
§ 78. 同位旋.....	309
§ 79. 奇异粒子.....	312
§ 80. 弱相互作用中宇称不守恒.....	316
§ 81. 中微子.....	319
§ 82. 基本粒子分类法.....	324
§ 83. 夸克.....	329
§ 84. 结束语.....	334

第一编 量子光学

第一章 热 辐 射

§ 1. 热辐射和发光

物体可以通过消耗不同形式的能量而实现其电磁波的辐射(物体的光发射)。最常见的一种是热辐射,即靠消耗物体内能而实现的电磁波的辐射。靠消耗内能(热能)以外任何一种形式的能量的所有其余形式的光发射,我们统称之为“发光”。

在空气中氧化的磷靠消耗化学变化中释出的能量发光。这种形式的发光称为化学发光。在各种不同形式自持气体放电中出现的发光,称为电致发光。固体在其受到电子轰击时所引起的发光,称为阴极射线致发光。物体因吸收电磁辐射而产生的发光,称为光致发光。

热辐射在任何温度下都可以产生,但在温度不高时,辐射的实际上只是长波(红外)电磁波。

用一个具有理想反射表面的空腔把辐射物体围起来(图 1.1),并把空腔中的空气抽掉。被空腔内壁所反射的辐射在射到物体上

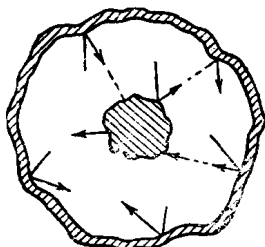


图 1.1

时将被物体吸收(部分或全部)。因而在物体和充于空腔中的辐射这两者之间将产生连续的能量交换。如果对于每一波长而言,物

体和辐射之间的能量分布都保持不变，则物体和辐射所组成的系统将处于平衡状态。实验表明，能与辐射物体处于平衡状态的唯一的辐射形式是热辐射。所有其余的辐射形式都是非平衡辐射。

热辐射之所以具有能与辐射物体处于平衡状态的本领，是由于它的强度随温度升高而增大。假定物体和辐射之间的平衡受到破坏，而且物体辐射的能量多于吸收的能量。在这种情况下，物体的内能就会减少，从而使温度降低。而温度的降低又会使物体辐射的能量减少。物体的温度将一直降低到物体辐射的能量等于吸收的能量为止。如果平衡是朝另一个方向受到破坏，即物体辐射的能量小于它吸收的能量，则物体的温度就会升高，直到重新建立起平衡状态为止。由此可见，在物体和辐射这两者所组成的系统中，平衡的破坏将导致一些旨在恢复平衡的过程的产生。

在发光的情况下，情况就不是这样的了。我们可以举化学发光为例来说明这一点。当引起辐射的化学反应发生时，辐射物体将愈来愈离开原来的状态。物体吸收辐射非但不会改变反应方向，反而会使反应朝原来的方向更快地进行下去（由于吸热升温）。一直到参与反应的物质全部消耗掉而化学过程所引起的发光已被热辐射所替代的时候，平衡才能建立起来。

可见，在所有的辐射形式中，只有热辐射才是平衡辐射。对于平衡状态和过程，可以应用热力学的定律。所以热辐射应当遵从由热力学原理所引伸出来的某些普遍规律。下面我们就要转而讨论这些规律。

§ 2. 基尔霍夫定律

我们将用以瓦特为单位的能量通量之值来表征热辐射的强度。辐射物体单位表面向一切方向（在 2π 立体弧度范围内），发

射出去的能量通量,称为物体的能量面发光度.我们将以字母 R 记之.能量面发光度是温度的函数.

辐射是由具有不同频率 ω (或波长 λ) 的波组成的.我们用 dR_{ω} 表示物体单位表面所辐射的,频率处于间隔 $d\omega$ 内的能量通量.在间隔 $d\omega$ 很小的情况下,通量 dR_{ω} 将正比于 $d\omega$:

$$dR_{\omega} = r_{\omega} d\omega. \quad (2.1)$$

量 r_{ω} 称为物体的辐射本领.就像能量面发光度一样,辐射本领急剧地随物体温度而变.由此可见, r_{ω} 是频率和温度的函数.

能量面发光度与辐射本领由下述公式相关联:

$$R_T = \int dR_{\omega} = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega \quad (2.2)$$

(为了强调指出能量面发光度和辐射本领随温度而变,我们给相应的字母加下标 T).

也可以不用频率 ω 而用波长 λ 来表征辐射.频率间隔 $d\omega$ 对应着波长间隔 $d\lambda$.对于同一光谱段而言,量 $d\omega$ 和 $d\lambda$ 之间有一个简单关系,它可以由公式 $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ 推出(通过求微分):

$$d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega. \quad (2.3)$$

这表达式中的负号并无实质意义,它只表示 ω 与 λ 二者之一增大时,另一就会减小.所以我们今后将不再写出这个负号.

间隔 $d\lambda$ 所对应的能量面发光度,可以比照(2.1)式表示为

$$dR_{\lambda} = r_{\lambda} d\lambda. \quad (2.4)$$

既然表达式(2.1)和(2.4)中所含的间隔 $d\omega$ 和 $d\lambda$ 由关系式(2.3)来联系,即它们相应于同一光谱段,则量 dR_{ω} 和 dR_{λ} 应当相等:

$$r_{\omega} d\omega = r_{\lambda} d\lambda.$$

将(2.3)式代入上式,得到

$$r_{\omega} d\omega = r_{\lambda} \frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = r_{\lambda} \frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega,$$

由此得

$$r_{\omega} = r_{\lambda} \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_{\lambda} \frac{\lambda^2}{2\pi c}. \quad (2.5)$$

利用公式(2.5), 可以将 r_{λ} 变换为 r_{ω} 或反之.

设频率在间隔 $d\omega$ 内而辐射能量通量为 $d\Phi_{\omega}$ 的电磁波入射于物体的元表面积. 这通量的一部分 $d\Phi'_{\omega}$ 将被物体所吸收. 无量纲的量

$$a_{\omega, T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}} \quad (2.6)$$

称为物体的吸收本领. 物体的吸收本领是频率和温度的函数.

根据定义, $a_{\omega, T}$ 不能够大于 1. 对于能将射于其上的一切频率的辐射全部加以吸收的物体, $a_{\omega, T} \equiv 1$. 这样的物体叫做绝对黑体. 其 $a_{\omega, T} \equiv a_T = \text{常数} < 1$ 的物体, 叫做灰体.

在任何物体的辐射本领和吸收本领之间都有一个关系. 通过下述实验的研究, 我们就能证实这一点. 设在一个保持恒温 T 的封闭空腔内放有若干物体(图2.1). 腔内抽成真空, 因而物体之间以及物体与空腔之间只能通过发射和吸收电磁波来实现能量的交换. 实验表明, 这样的系统在经过一段时间后将达到热平衡状态——所有物体均取得同一温度, 且此温度即为空腔壁的温度 T . 在这样的状态下, 具有较大辐射本领 $r_{\omega, T}$ 的物体, 比之 $r_{\omega, T}$ 值较

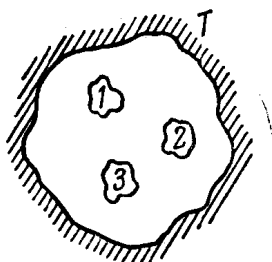


图 2.1

小的物体而言, 在单位时间内从单位面积上将失掉较多的能量. 既然物体的温度(从而其能量)不变, 于是发射较多能量的物体就

必定吸收较多的能量,即必定具有较大的 $a_{\omega T}$. 由此可见,物体的辐射本领 $r_{\omega T}$ 愈大,其吸收本领 $a_{\omega T}$ 也愈大. 于是就可推出下列关系式:

$$\left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_3 = \dots, \quad (2.7)$$

此处下标 1, 2, 3 等等相应于不同的物体.

关系式(2.7)表示基尔霍夫所建立的一个定律. 这定律可以表述为:辐射本领与吸收本领之比与物体的种类无关,对于所有的物体而言,它都是频率(或波长)和温度的同一个(普适的)函数,即

$$\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} = f(\omega, T). \quad (2.8)$$

对于不同的物体, $r_{\omega T}$ 之值和 $a_{\omega T}$ 之值都可以相差悬殊,然而对所有物体而言,此二值之比则均相同. 这意味着,如果一个物体较强烈地吸收某一波长的光线,则它也必定较强烈地发射该波长的光线(不要将物体对光线的发射和对光线的反射混淆在一起).

对于绝对黑体,按定义,有 $a_{\omega T} \equiv 1$. 因而由公式(2.8)可以推出,这种物体的 $r_{\omega T}$ 等于 $f(\omega, T)$. 由此可见,基尔霍夫普适函数 $f(\omega, T)$ 不是别的,就是绝对黑体的辐射本领.

在进行理论研究时,用频率函数 $f(\omega, T)$ 表征平衡热辐射的光谱成分较为称便. 但在实验工作中则以使用波长函数 $\varphi(\lambda, T)$ 较为方便. 这两个函数彼此由下述公式联系在一起:

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \varphi(\lambda, T), \quad (2.9)$$

这公式与公式(2.5)相类似. 根据(2.9),为了由已知函数 $f(\omega, T)$ 求出 $\varphi(\lambda, T)$,须要在 $f(\omega, T)$ 中将 ω 代以 $\frac{2\pi c}{\lambda}$ 并将所得表式乘以

$$\frac{2\pi c}{\lambda^2}.$$

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda}, T\right). \quad (2.10)$$

为了由已知的 $\varphi(\lambda, T)$ 求出 $f(\omega, T)$, 须要利用关系式

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \varphi\left(\frac{2\pi c}{\omega}, T\right). \quad (2.11)$$

在自然界中, 绝对黑体是不存在的。煤烟或铂黑仅在狭窄的频率间隔里才具有接近于 1 的吸收本领 $a_{\omega, T}$; 在远红外区域里, 它们的吸收本领显著地小于 1。但是我们可以制造出一种装置, 使它在性质上可任意趋近绝对黑体。这样的装置就是一个开有小孔的几乎完全闭合的空腔(图 2.2)。通过小孔穿入的辐射, 在从该小孔再穿出来以前要遭受到许许多多的反射。在每一次的反射中都要有一部分能量被腔壁吸收, 结果任何频率的辐射都将全部地被

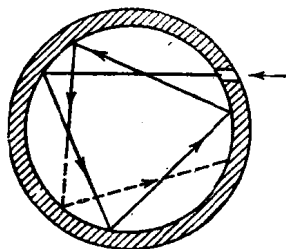


图 2.2

这样的空腔所吸收^①。根据基尔霍夫定律, 这种装置的辐射本领很接近于 $f(\omega, T)$, 同时 T 就是腔壁的温度。由此可见, 如果空腔壁维持在某一温度 T 之下, 则由其开孔所放出的辐射, 按光谱组成而言是与同一温度下绝对黑体的辐射极其接近的。利用衍射光栅把这种辐射展为光谱, 并测出不同谱段的强度, 可以从实验上求出函数 $f(\omega, T)$ 或 $\varphi(\lambda, T)$ 的曲线。这样的实验结果见图 2.3。不同的曲线相应于绝对黑体的不同温度值 T 。曲线与横轴所包围的面积表示相应温度下绝对黑体的能量面发光度。

由图 2.3 可见, 绝对黑体的能量面发光度随温度急剧增大。温度增高时, 辐射本领极大值朝短波方向移动。

① 出于同样的原因, 在阳光明亮的日子里, 从远处向开着的窗张望时, 室内显得很暗。

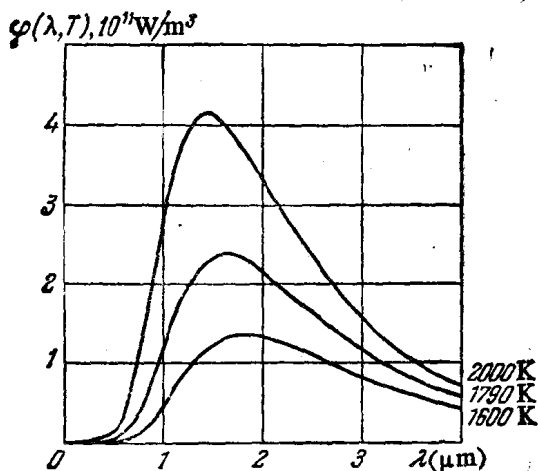


图 2.3

§ 3. 平衡辐射能量密度

我们来研究一下与物质处于平衡的辐射。为此试设想一个抽成真空的空腔，其壁保持恒温 T 。在平衡状态下，辐射能量将以一定的密度 $u = u(T)$ 分布于空腔容积中。这一能量的谱分布可以用条件 $du_\omega = u(\omega, T)d\omega$ 所确定的函数 $u(\omega, T)$ 来表征。此处的 du_ω 是能量密度中相应于频率间隔 $d\omega$ 的那一部分。总的能量密度 $u(T)$ 与函数 $u(\omega, T)$ 由如下公式相联系：

$$u(T) = \int_0^\infty u(\omega, T) d\omega. \quad (3.1)$$

由热力学的推理可知，平衡辐射能量密度 $u(T)$ 仅随温度而变，与腔壁性质无关。我们来研究这样两个空腔，它们的壁由不同的材料制成并且在开始时具有相同的温度。假定两空腔中平衡能量密度不相同，比如说 $u_1(T) > u_2(T)$ 。借助于一个小孔将两腔连通(图3.1)，从而使得两腔壁可以通过辐射而进行热交换。因为按