

※ 高等学校教材 ※

原子物理学学习题集

И. Е. 伊罗多夫著

田俊恒译 周寰澄校

人 民 教 育 出 版 社



原子物理学习题集

И. Е. 伊罗多夫著
田俊恒译 周寰澄校

人民教育出版社

本书是根据苏联国家原子科学技术书籍出版社 (Атомиздат) 出版的伊罗多夫 (И. Е. Иродов) 著“原子物理学习题集” (Сборник задач по атомной физике) 1960 年版译出的。原书曾经苏联高等及中等专业教育部审定作为苏联高等学校的教学参考书。

本书编录了将近 850 个习题, 包括原子物理学各个方面的内容, 其中还有近代原子核物理学的一部分。本书不但可作物理专业的教学参考书, 同时也可供原子核物理专业的师生参考。

原子物理学习题集

И. Е. 伊罗多夫著

田俊恒译 周寰澄校

北京市书刊出版业营业许可证出字第 2 号

人民教育出版社出版 (北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K13010 · 1112 开本 850 × 1168 $\frac{1}{32}$ 印张 8 $\frac{14}{16}$ 插页 2

字数 192,000 印数 0,001—3,700 定价 (6) ¥0.90

1963 年 12 月第 1 版 1963 年 12 月北京第 1 次印刷

第二版序言

这本习题集,是在苏联国家原子科学技术书籍出版社 1959 年出版的“原子物理习题集”一书的基础上,按教学参考书编成的。本版是原子物理普通教程的教学参考书。

本书编录了将近 850 个习题,书中对于解最复杂的习题附有相当详细的提示。为了减少学生作业时的困难,在每章的开始,都扼要地叙述解本章内习题所必需的基本概念和关系式,书末还附了基本物理常数及一系列数据表。

本习题集第二版作了相当大的修订和补充。

本版大体上保持第一版材料的一般安排,但作了如下的变动:

1. 新编三章(“薛定谔方程”、“原子核的特性”和“基本粒子”)。
2. 几乎每一章都作有相当大的修订;同时出于教学法的考虑,习题的次序有所更动。
3. 附录中增添了新的数据表。这样就可以在一系列习题的条件中省略某些必需的数据,其目的是使学生习惯于独立运用参考文献。
4. 为了便于使用本习题集,把材料分得更细致,几乎每章都分节,并带有相应的小标题。
5. 习题的总数增加了一半以上,插图增加了两倍。

最后,作者认为有必要向指出该书第一版中某些缺点和刊误的所有同志们致谢。Г. И. 穆赫塔洛夫副教授仔细地校阅了本版的手稿,并提出不少宝贵的意见,作者特此向他致谢。

И. 伊罗多夫

目 录

第二版序言	vi
1. 热辐射	1
辐射热力学	3
普朗克公式 · 光的量子性	6
2. 光的微粒性	10
光子的能量、动量和质量	11
光电效应	15
康普顿效应	18
3. 卢瑟福-玻尔原子	21
卢瑟福公式	22
玻尔原子理论	25
4. 微观粒子的波动性	33
德布罗意假设 · 微观粒子运动的波动性	34
测不准关系	40
5. 薛定谔方程	44
6. 碱金属光谱 · 精细结构	56
碱金属原子光谱	58
谱线的精细结构和固有宽度	60
7. 磁场中的原子	64

原子的矢量模型	65
塞曼效应·施铁倫和盖拉赫实验	69
8. 抗磁性和順磁性	74
9. 倫琴射綫	80
倫琴射綫的吸收和散射	82
倫琴射綫譜	85
10. 多电子原子·元素周期系	90
11. 分子	95
自由度·分子的轉动和振动	96
分子光譜·光的联合散射	100
12. 原子核的轉变	104
放射性	105
核反应	109
核裂变·核能的利用	113
13. 原子核的特性	117
核的半徑和质量·結合能	118
核的自旋和磁矩	120
14. 基本粒子	124
15. 原子物理的实验方法	129
带电粒子的 e 和 e/m 的測定·分析器	130
带电粒子加速器	135
答案	142

附录	269
1. 单位的符号	269
2. 单位名称的十进位词冠	269
3. 金属中电子的逸出功	270
4. 原子和分子的电离电势	270
5. 某些金属的密度	270
6. 某些定积分的数值	271
7. 双原子分子的一些常数	271
8. K -系及 L -系的激发电势	272
9. 某些同位素的特性表	272
10. 铀放射系	275
11. 基本粒子表	276
12. 能量单位之间的关系	277
13. 原子物理的基本常数	277

1. 热辐射

1) 取一元面积 $\Delta\sigma$, 在与其法线方向成 θ 角的立体角 $d\omega$ 内, 从该面元发射的电磁辐射的功率 $d\Phi$ 等于

$$d\Phi = J\Delta\sigma \cos\theta d\omega,$$

式中 J 是辐射的能量亮度(比强度)。

2) 由于平衡热辐射是各向同性的, 故可以推得下列公式:

$$I = \pi J,$$

$$\rho = \frac{4}{c} I,$$

式中 I 是能量发光度(积分发射本领);

J 是辐射的能量亮度(比强度);

ρ 是能量的体密度;

c 是光速。

相应的光谱的量 I_ν 、 J_ν 和 ρ_ν 之间也存在着类似的关系。

3) 基尔霍夫定律: 任何物体的发射本领 E_ν 与它的吸收本领 A_ν 之比, 在给定温度下是频率和绝对温度的普遍函数:

$$\frac{E_\nu}{A_\nu} = I(\nu, T).$$

4) 维恩公式——绝对黑体光谱中能量的体密度按频率的分布函数:

$$\rho_\nu = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right).$$

5) 维恩位移定律:

$$T\lambda_{\text{最大}} = b.$$

式中 $\lambda_{\text{最大}}$ 是相应于绝对黑体光谱中能量分布函数 ρ_λ 最大值的

波长;

b 是維恩常数 ($b = 0.29$ 厘米·度)。

6) 斯忒藩-玻耳茲曼定律:

$$I = \sigma T^4,$$

式中 I 是輻射的积分功率;

σ 是斯忒藩-玻耳茲曼常数

$$(\sigma = 5.7 \times 10^{-5} \text{ 尔格/厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{度}^4);$$

T 是輻射的絕對溫度。

7) 平衡热輻射的压强 p 与能量的体密度 ρ 之間的关系:

$$p = \frac{1}{3} \rho.$$

8) 热力学的基本方程:

$$TdS = dU + \delta A,$$

式中 T 是絕對溫度;

dS 是熵的增量;

dU 是內能的增量;

δA 是在准靜态(平衡)过程中物体(輻射)所做的元功。

9) 普朗克公式——絕對黑体光譜的輻射能量的体密度的分布函数:

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

式中 ν 是輻射的頻率;

h 是普朗克常数 (6.62×10^{-27} 尔格·秒);

c 是真空中光速。

10) 量 $A(\alpha)$ 的平均值决定于公式

$$\bar{A} = \frac{\int A(\alpha) f(\alpha) d\alpha}{\int f(\alpha) d\alpha},$$

式中 $f(a)$ 是量 a 的分布函数。

辐射热力学

1.1. 指出下列物理量的量纲(用厘米克秒制):

a) 能量的体密度 ρ 、比强度(能量亮度) J 和发射本领(能量发光度) I ;

b) 光谱能量的体密度 ρ_ν 和光谱能量亮度 J_ν 。

1.2. 若辐射的比强度 $J = 10^5$ 尔格/厘米²·秒, 电磁辐射是各向同性的, 在辐射场中取一元面积 $\Delta\sigma = 1$ 厘米², 试计算在时间 $\tau = 1$ 分钟内向一个方向通过该面积的总能量。

1.3. 试导出黑体辐射的比强度 J 与能量的体密度 ρ 之间的关系。能量的体密度 $\rho = 10^{-5}$ 尔格/厘米³ 对应的比强度 J 有多大?

1.4. 热辐射与其他形式的辐射(化学发光、光激发光、电激发光和阴极激发光)有什么基本区别?

1.5. 绝对黑体具有什么样的颜色? 例如煤烟、雪和太阳, 在什么意义下可以当做绝对黑体?

1.6. 加热到温度约为 800°C 的一块钢能发出明亮的樱红色光, 而一块透明的石英在这个温度下却完全不发光。试解释这种现象的原因。

1.7. 两个同样的物体具有同一温度, 其中之一被与其等温的物体包围, 而另一物体则被较冷的物体包围。试问在这样的条件下两个物体的辐射功率是不是相等?

1.8. 试证明在封闭空腔的各部分处于热平衡的条件下, 空腔壁上“灰色”区域 $\Delta\sigma$ 所发出的总辐射量和壁上其余的“黑色”区域所发出的总辐射量是没有任何区别的。

1.9. 若某温度下黑体光谱中的能量分布为已知, 试利用维恩

公式推导出其他任何温度下的能量分布表达式。

1.10. 試证明, 維恩位移定律是分布函数 ρ_λ 的維恩公式的推論。

1.11. 輻射的积分密度, 显然不应该依赖于用何种函数描写光谱中的能量分布—— ρ_ν 或 ρ_λ 。这便給分布函数以下列条件: $\rho_\nu d\nu = \rho_\lambda d\lambda$ 。試利用維恩公式确证, 两个函数的最大值的位置对应于不同的波长是給定条件的推論。

1.12. 星体光谱的成分与绝对黑体光谱十分相近。估計星体表面温度的方法之一, 在于确定星体光谱中輻射强度 J_λ 的最大值所对应的波长。太阳的这个波长等于 0.55 微米, 北极星的等于 0.35 微米, 天狼星的等于 0.29 微米。試計算这些星体的温度。

1.13. 当绝对黑体由于輻射而冷却时, 相应于能量分布 ρ_λ 光谱中最大值的波长移动 5000 埃。若黑体的初始温度是 2000°K , 試确定物体冷却了多少度。

1.14. 試证明斯忒藩-玻耳兹曼定律是維恩公式的推論。

1.15. 直径为 10 厘米的球形绝对黑体保持着某个恒定的温度。若已知該物体的輻射功率是 15 千卡/分, 試求这个温度。

1.16. 若黑体輻射的积分强度 $I = 5.7$ 瓦/厘米², 試求与該輻射最大光谱强度相对应的波长。

1.17. 把绝对黑体模型做成某种空腔的形状, 其上开一直径 $d = 1$ 厘米的小孔。用电阻綫圈加热空腔, 此綫圈所消耗的功率 $W = 0.1$ 千瓦, 該功率的一部分 ($\eta = 10\%$) 扩散到空腔之外。試确定由小孔中射出的輻射的平衡温度。

1.18. 太阳的质量为 2×10^{33} 克, 其半径为 7×10^{10} 厘米, 表面有效温度为 5700°K 。試利用斯忒藩-玻耳兹曼定律, 計算在 1 秒內太阳由于輻射而損失的质量。并估計太阳的质量减少 1% 所經歷的时间。

1.19. 直径 $d=10$ 厘米的铜球具有绝对黑色的表面, 使它在恒温箱中冷却, 恒温箱的壁(也是绝对黑体)保持接近绝对零度的温度。若铜球的初始温度 $T_0=300^\circ\text{K}$, 试确定经过 $\tau=5$ 小时的时间间隔, 铜球冷却到多少度。铜的比热 $c=0.091$ 卡/克·度。

1.20. 根据某些设想我们得到, 太阳内部区域的压强 p 达到 0.4×10^9 大气压的数量级。试估计与这个压强相对应的温度。

1.21. 当空腔的初始温度 T_0 升高到 $n=2$ 倍时, 平衡热辐射的压强改变的数值为 $\Delta p=0.038$ 达因/厘米²。试确定 T_0 。

1.22. 根据高温时物质遵从理想气体方程的这个事实, 试求出这样一个温度, 在这个温度下辐射的压强, 等于密度为 $\rho=0.1$ 克/厘米³ 的氢气的压强, 而且氢气的原子完全离解成核与电子(很炽热的等离子体)。

1.23. 试计算温度为 $T=10^4^\circ\text{K}$ 的 1 厘米³ 平衡热辐射的热容量 c_v (体积不变时)。

1.24. 体积不变时平衡热辐射的比热 $c_v=0.1$ 尔格/厘米³·度, 试求该辐射的压强。

1.25. a) 试计算温度为 $T=300^\circ\text{K}$ 时, 在体积 $v=1$ 厘米³ 中平衡热辐射的熵 S 。

b) 试用定容热容量 c_v 表示熵 S 。

1.26. $v_0=10$ 升的体积内维持平衡热辐射, 试求当温度从 $T_1=300^\circ\text{K}$ 升高到 $T_2=600^\circ\text{K}$ 时该辐射的熵的变化。

1.27. 体积 $v_0=1$ 升的空腔中维持着相应于室温的平衡热辐射。当空腔等温膨胀到原有的 n 倍($n=4$)时, 该辐射的熵有什么变化?

1.28. 平衡热辐射在温度 $T_0=400^\circ\text{K}$ 时充满某个空腔, 当这个空腔的体积绝热压缩到原有的 $1/n=1/10$ 时, 试确定平衡热辐射的熵和压强的变化。

1.29. 绝对黑体光谱发射本领的瑞利-金斯公式导致“紫外光的灾难”，这个事实的物理原因是什么？

普朗克公式·光的量子性

1.30. 试利用绝对黑体光谱中的能量分布函数 ρ_ν 导出函数 ρ_λ 的表达式。

1.31. 试根据 ρ_ν 的普朗克分布，求出两种极限情形的相应表达式： $h\nu \ll kT$ (瑞利-金斯公式) 和 $h\nu \gg kT$ (维恩公式)。

1.32. 当黑体的温度从 $T_1 = 2000^\circ\text{K}$ 变化到 $T_2 = 2300^\circ\text{K}$ 时，波长 $\lambda = 6000$ 埃的光谱辐射强度 J_λ 增加多少倍？

1.33. 若绝对黑体的温度为 6000°K ，试求其光谱 J_λ 中波长 $\lambda_1 = 0.35$ 微米和 $\lambda_2 = 0.7$ 微米的光谱辐射强度的比率。

1.34. 已知当黑体的温度约为 $6 \times 10^3^\circ\text{K}$ 时，波长 $\lambda_1 = 4000$ 埃和 $\lambda_2 = 6000$ 埃的光谱辐射强度 J_λ 相等。试比较精确地计算这个温度。

1.35. 已经测出，温度为 5000°K 的绝对黑体的光谱 J_λ 的最大值处，光谱间隔为 5 埃的辐射功率。比 $\lambda_{\text{最大}}$ 大一倍的波长附近光谱间隔也有同样的功率。试确定该间隔的宽度。

1.36. 试证明下列热力学定律是由普朗克公式推导出来的：

- a) 辐射的比功率的斯忒藩-玻耳兹曼积分定律；
- b) 黑体光谱 ρ_λ 中的最大光谱发射本领和绝对温度的五次方成正比；
- c) 光谱 ρ_λ 的长波部分的辐射功率和绝对温度的一次方成正比。

1.37. 有两个彼此孤立的绝对黑体，它们的光谱 ρ_λ 中相应于能量分布最大值的波长相差 $n = 1.2$ 倍。试求这两个物体的最大光谱能量密度的比率。

1.38. 試計算絕對溫度增加一倍時, 平衡熱輻射光譜中能量分布函數 ρ_ν 的最大值所對應的縱坐標增大多少倍。

1.39. 試利用普朗克公式以普遍常數 h 、 c 和 k 表示斯忒藩-玻耳茲曼定律中的常數, 並求出它的數值。

提示: 利用附錄 6 中的積分值。

1.40. 試利用普朗克公式以普遍常數 h 、 c 和 k 表示維恩位移定律中的常數 b 。求出它的數值。

1.41. a) 試證明, 絕對黑體輻射光譜中的能量分布函數 $\rho_\nu(T)$, 有類似於維恩位移定律的關係式, 即 $\nu_{\text{最大}}/T = b'$, 式中 $\nu_{\text{最大}}$ 是在給定溫度 T 時, 與函數 ρ_ν 的最大值對應的輻射頻率, b' 是常數。

b) 試求出常數 b' 的數值。此外, 試說明 b' 是否可以按公式 $b' = c/b$ 計算, 式中 c 是光速, b 是維恩位移定律中的常數。

1.42. 試利用普朗克分布, 求出當溫度為 $T = 6000^\circ\text{K}$ 時絕對黑體光譜 ρ_λ 中分布的最大值對應的波長。

1.43. 試確定頻率 ν_0 , 在 ν_0 附近絕對黑體光譜的輻射強度 J_ν 對 ν 的依賴性最大(在給定溫度 T 時)。

1.44. 從波長 $\lambda_0 = 5$ 微米開始的光譜, 其長波部分的平衡熱輻射積分功率是 $I = 34.7$ 瓦/厘米²。試利用普朗克公式確定該輻射的溫度。應該注意, λ_0 遠大於與分布函數 ρ_λ 的最大值對應的波長。

1.45. 當溫度 $T = 2000^\circ\text{K}$ 時, 黑體表面的比輻射功率等於 $I = 91.2$ 瓦/厘米²。若認為光速及玻耳茲曼常數是已知的, 試確定普朗克常數的值。

提示: 在本題中為確定普朗克常數的值, 可以利用附錄 6 中積分的數值。

1.46. 試根據平衡熱輻射光譜的體密度的普朗克公式, 求出與能量的積分體密度 $\rho = 7.6 \times 10^{-3}$ 爾格/厘米³ 相應的溫度。

提示: 利用附录 6 中积分的数值。

1.47. 試求从零到 $\lambda_0 = 3$ 微米的光譜間隔中的黑体輻射能量的体密度。已知 $\lambda_0 \ll \lambda_{\text{最大}}$, 輻射的溫度 $T = 500^\circ\text{K}$ 。

1.48. 試确定当光譜 J_λ 的可見光部分(从 $\lambda_1 = 0.4$ 微米到 $\lambda_2 = 0.76$ 微米)的黑体輻射强度的相对分率有最大值时的溫度 T 。

1.49. 試根据普朗克公式, 求出下列光譜間隔中决定量子数目的表达式:

a) $\nu, \nu + d\nu$;

b) $\lambda, \lambda + d\lambda$ 。

1.50. 空腔中充滿平衡热輻射, 当空腔的絕對溫度增加到 k 倍 ($k=2$) 时, 空腔中量子总数变化多少倍?

1.51. 絕對黑体的溫度 $T = 500^\circ\text{K}$, 在其光譜中能量分布函数 ρ_λ 最大值附近的波长間隔 $\Delta\lambda = 5$ 埃內, 每 1 厘米³ 体积里有多少个量子?

1.52. 在溫度 $t = 0^\circ\text{C}$ 时空腔中充滿平衡热輻射, 試确定空腔中 1 厘米³ 体积內的量子总数。

提示: 利用附录 6 中积分的数值。

1.53. 絕對黑体的溫度 $T = 2000^\circ\text{K}$ 。試求該物体的光譜中单位頻率間隔內数目最大的量子的能量。

1.54. 試計算絕對黑体光譜中对应于溫度 $T = 1000^\circ\text{K}$ 的量子 的平均能量。

提示: 利用附录 6 中积分的数值。

1.55. 試确证, 絕對黑体輻射光譜的平均波长与該物体輻射的平均頻率不相对应。

提示: 利用附录 6 中积分的数值。

1.56. 試证明, 絕對黑体光譜中的能量分布函数(ρ_ν)和量子数分布函数(n_ν)的最大值对应于不同的頻率。試在同一个图上画出

这两个函数的近似形式。

1.57. 試用維恩公式

$$J_\nu = A\nu^3 e^{-a\nu/T}$$

表示黑体辐射光谱的能量分布, 式中 A 和 a 是常数 ($a = 4.8 \times 10^{-11}$ 秒·度), 計算相应于太阳光谱 J_ν ($T = 5700^\circ\text{K}$) 的平均辐射频率。

1.58. 試根据維恩公式(見上題), 估計人体辐射的光谱 J_λ 的平均波长。

1.59. 試利用普朗克公式, 求出与太阳表面 ($T = 5700^\circ\text{K}$) 的辐射光谱 J_λ 相对应的平均波长。

提示: 利用附录 6 中积分的数值。

1.60. 按普朗克的初始理論, 每个振子的能量 $E = nh\nu$ (n 是能量为 $h\nu$ 的量子数)。試根据振子的能量分布遵从玻耳茲曼定律这一事实, 計算振子在給定溫度 T 时的平均能量。

1.61. 按照近代概念, 辐射频率为 ν 和绝对温度为 T 的量子振子的平均能量由下式决定:

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{2} + \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

a) 試证明这个表达式在高温时轉变为經典公式。指出該溫度的准数。

b) 画出函数 $\bar{E}_\nu(T)$ 和 $\bar{E}_T(\nu)$ 的图形。

2. 光的微粒性

1) 光子的能量 E 和频率 ν 之间的关系:

$$E = h\nu,$$

式中 h 是普朗克常数。

2) 光子的动量 p 和波长 λ 之间的关系:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

3) 外光电效应的爱因斯坦公式:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\text{最大}}^2}{2},$$

式中 A 是逸出功;

m 和 $v_{\text{最大}}$ 依次是光电子的质量和最大速度。

4) 光的康普顿散射:

$$\Delta\lambda = 2\frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

式中 $\Delta\lambda$ 是被散射到与初始方向成 φ 角上去的光子的波长变化;

m 是电子的静止质量。

5) 瓦维洛夫-契连科夫效应: 当带电粒子在介质中, 以大于光在这种介质中的相速度 c' 的恒定速度 v (即 $v > c'$) 运动时, 与粒子运动方向成 θ 角的方向上会发生辐射, 并且有

$$\cos\theta = \frac{c'}{v},$$

式中 $c' = c/n$, c 是真空中光速;

n 是介质的折射率。

6) 相对论粒子的总能量 E 、动量 p 和静止质量 m_0 之间的关系