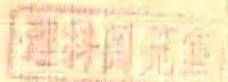


原子与原子核物理学习题集

[苏] И. Е. Иродов 著

田 俊 恒 译



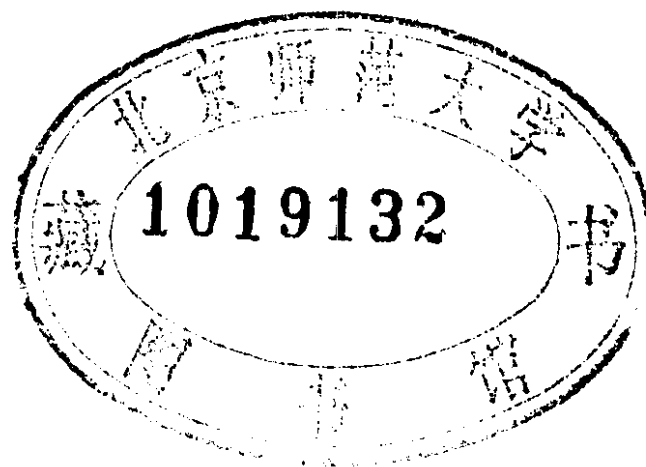
人民教育出版社

原子与原子核物理学习题集

[苏] И. Е. Иродов 著

田 俊 恒 译

2457105



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 И. Е. Иродов 著 “Сборник задач по атомной и ядерной физике” 1976 年版译出的。

全书共收 1036 个习题,差不多包括了原子及原子核物理学各个方面的内容。每章之前都有一段引言,扼要地叙述了本章所需的基本概念和公式。书后附有答案,有一部分还附了题解。附录中列出了基本物理常数和有关的数据、图表等。

本书可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供自学读者参考。

原子与原子核物理学习题集

[苏] И. Е. Иродов 著

田 俊 恒 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 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 10.75 字数 250,000

1981年6月第1版 1982年7月第1次印刷

印数 00,001—10,500

书号 13012·0621

定价 1.45 元

第六版序言

这本习题集预定以学习原子与原子核物理学普通教程的大学生为主要对象。同时，还有许多超出普通物理范围的习题，这就使得学习某些专业教程时也能够使用这本习题集。

在第六版里，对习题集作了一些修改。与前一版不同，现在习题中的原始数据和答案是考虑到相应数值的准确度和有效数字后给出的。此外，许多习题换成了在物理方面比较有意义的新题，因此改变了某些习题的编号。

所有的公式和从前一样是以高斯单位制给出的。

最后，作者向那些对某些习题提出过意见从而使习题集更趋于完善的所有同志表示衷心感谢。

作 者

符 号

矢量用黑正体字表示 (例如 $\mathbf{v}, \mathbf{H}$); 相应矢量的模用白体字 (v, H) 表示。

量的平均值用括号 $\langle \rangle$ 标志, 例如 $\langle \lambda \rangle, \langle x \rangle$ 。

质心参照系里的各种量都在上面标以符号 $\sim$ (波形号), 例如 $\tilde{\mathbf{P}}, \tilde{E}$ 。

能量: T 是动能, U 是势能, E 是总能量。

$H\rho$ 是磁场强度和粒子轨道曲率半径的乘积。

波数: 光谱学的波数 $\bar{\nu} = 1/\lambda$, 理论上惯用的波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 是波长。

所有算符 (除坐标和仅与坐标有关的函数外) 均在上面标以符号 $\wedge$, 例如 $\hat{A}, \hat{p}_x$ 。

反超子符号中所表示的电荷符号是指反超子本身的电荷, 而不是指和它相应的超子的电荷。

目 录

第六版序言	v
符号	vi
1. 电磁辐射的量子性	1
热辐射	1
电磁辐射的微粒性	4
2. 卢瑟福-玻尔原子模型	10
粒子的散射 卢瑟福公式	11
类氢原子	15
3. 粒子的波动性	19
德布罗意波 测不准关系式	20
薛定谔方程 粒子穿透势垒	25
4. 量子力学基础	31
量子力学的算符	33
平均值和几率	38
状态和力学量随时间的变化	40
有心-对称场 氢原子	42
5. 光谱 原子的电子壳层	46
原子中的电子态	48
谱线的强度和宽度	52
标识伦琴谱	56
6. 磁场中的原子	59
原子的磁性 塞曼效应	60
抗磁性和顺磁性	65
7. 双原子分子	68
转动态和振动态	69

分子光谱 组合散射	71
8. 晶体	74
晶体结构 伦琴射线的衍射	75
晶体的结合能和比热	78
9. 金属和半导体	83
费米分布	83
金属和半导体的特性	86
10. 原子核的基本特性	89
核的半径 质量和结合能	90
核的自旋和磁矩	92
11. 放射性	95
放射性衰变定律	95
α 衰变和 β 衰变	99
γ 射线: 内变换 穆斯堡尔效应	102
记录核辐射的统计法 计数器	105
12. 辐射与实物的相互作用	110
带电粒子通过实物	111
γ 射线通过实物	115
辐射的剂量测定法	119
13. 核反应	123
核反应中的守恒定律	124
核能级 核反应的截面和产额	130
14. 中子物理学	135
中子谱学	137
中子同原子核的相互作用	139
中子通过实物	141
中子的减速和扩散	144
15. 核的裂变和聚变	149
核裂变 链式反应	150

热核反应	154
等离子体物理学	157
16. 基本粒子	162
相对论粒子的相互作用	164
粒子的衰变	167
基本粒子的特性	170
17. 带电粒子在外场中的运动	174
运动定律 分析器	174
带电粒子加速器	181
答案和解	187
附录	317
1. 测量单位的符号	317
2. 伦琴射线 K 和 L 吸收带边缘	318
3. 金属的某些特性	318
4. 某些物质的密度	319
5. 双原子分子的一些常数	320
6. 铀放射系	321
7. 同位素特性表	321
8. 中子的截面	325
9. 裂变同位素的一些常数	326
10. α 粒子在空气中的射程-能量曲线	327
11. γ 量子的衰减系数和吸收系数	328
12. γ 量子在铅中的相互作用截面	328
13. 等离子体的 $\langle \sigma v \rangle$ 与温度的依赖关系曲线	329
14. 某些定积分的值	329
15. 放射性和剂量的单位	330
16. 某些单位之间的关系	331
17. 基本物理常数	331

1. 电磁辐射的量子性

热辐射的发射本领 I 和能量体密度 u 之间的关系:

$$I = \frac{c}{4} u. \quad (1.1)$$

维恩公式和维恩位移定律:

$$u_{\omega} = \omega^3 f(\omega/T); \quad \lambda_m T = b, \quad (1.2)$$

式中 ω 是辐射的频率 (弧度/秒);

T 是绝对温度;

λ_m 是发射光谱的最可几波长;

b 是常数.

斯忒藩-玻耳兹曼定律 (对于绝对黑体):

$$I = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

热辐射光谱的能量体密度的普朗克公式:

$$u_{\omega} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\hbar \omega / k T} - 1}. \quad (1.4)$$

静质量为 m 的相对论粒子, 其总能量 E 与动量 p 之间的关系式:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (1.5)$$

被散射光子的波长的康普顿位移:

$$\Delta \lambda = 4 \pi A \sin^2(\theta/2); \quad A = \hbar / mc, \quad (1.6)$$

式中 A 是静质量为 m 的粒子的康普顿波长.

热 辐 射

1.1. 试推导公式 (1.1).

1.2. 若温度为 T_2 时热辐射能量的分布曲线 $u_2(\omega)$ 是已知的, 试证明由维恩公式可以算出温度为 T_1 时的 $u_1(\omega)$.

1.3. 试利用维恩公式证明:

- a) 辐射的最可几频率 $\omega_m \sim T$;
- b) 最可几波长 $\lambda_m \sim T^{-1}$;
- c) 辐射的最大光谱密度 $(u_\lambda)_m \sim T^5$;
- d) 发射本领 $I \sim T^4$.

1.4. 热辐射的初始温度等于 2000 K. 假设热辐射光谱中最可几波长增加 0.25 微米, 试问此温度变化多少度?

1.5. 若热辐射的发射本领为 5.7 瓦特/厘米², 试求热辐射光谱中的最可几波长.

1.6. 太阳光谱非常近似于 $\lambda_m = 0.48$ 微米的绝对黑体的光谱. 试求太阳热辐射的功率. 估计出太阳的质量减少 1% (由于热辐射) 所经历的时间. 太阳的质量为 2.0×10^{30} 千克, 太阳的半径是 7.0×10^8 米.

1.7. 两个空腔 1 和 2 具有相同半径 $r = 0.50$ 厘米的小孔和完全反射的表面. 把空腔的小孔转向彼此相对的位置, 并且两孔之间的距离 $R = 10.0$ 厘米. 空腔 1 保持着 $T_1 = 1700$ K 的温度. 试计算空腔 2 的温度.

1.8. 根据热辐射的压强 $p = u/3$, 式中 u 是辐射的能量体密度, 试求:

a) 太阳内部区域热辐射的压强. 已知那里的温度 $\sim 16 \times 10^6$ K;

b) 完全电离的氢等离子体(密度为 0.1 克/厘米³), 在辐射的压强等于等离子体粒子的动力压强时的温度 (物质在高温下遵从理想气体状态方程).

1.9. 半径 $r = 1.00$ 厘米的铜球具有绝对黑的表面, 将铜球放在抽空的容器内, 使容器的壁保持着近于 0 K 的温度. 铜球的初始温度 $T_0 = 300$ K. 试问经过多长时间它的温度减到 $T = \frac{T_0}{n}$

($n=1.50$)? 铜的比热 $c=0.38$ 焦耳/(克·度)。

1.10. 维恩提出了热辐射光谱中能量分布的如下公式: $u_\omega = A\omega^3 e^{-a\omega/T}$, 式中 $a=7.64 \times 10^{-12}$ 秒·度/弧度. 在 $T=2000$ K 的情形下, 试利用这个公式求出:

- a) 辐射的最可几频率;
- b) 辐射的平均频率;
- c) 最可几波长;
- d) 平均波长.

1.11. 认为振动的传播速度等于 v , 试对下列振动体求出在频率间隔 $(\omega, \omega + d\omega)$ 内本征横振动的数目:

- a) 在一个平面内振动的长为 l 的弦;
- b) 面积为 S 的直角振动膜.

1.12. 形状为直角平行六面体的空腔, 其体积是 V , 并具有完全反射的侧壁. 试证明, 充满空腔的电磁场在间隔 $(\omega, \omega + d\omega)$ 内的本征振动数等于 $dZ_\omega = (V/\pi^2 c^3) \omega^2 d\omega$.

1.13. 充满某个空腔的热辐射可以看作是振子 (具有不同频率的本征振动) 的总合. 如果假设每一个振子的能量 ε 可以有:

- a) 任意的值 (连续谱);
- b) 仅为分立的值 $n\hbar\omega$, 其中 n 是整数, 试求频率为 ω 的振子在温度 T 时的平均能量, 以及在频率间隔 $(\omega, \omega + d\omega)$ 中的能量体密度.

认为振子按能量的分布遵从玻耳兹曼定律 $N(\varepsilon) \sim e^{-\varepsilon/kT}$.

1.14. 试推导普朗克公式在 $\hbar\omega \ll kT$ 和 $\hbar\omega \gg kT$ 两种情形下的近似式.

1.15. 将普朗克公式变换成下列形式:

- a) 按线频率的分布;
- b) 按波长的分布.

1.16. 维恩公式具有如下形式: $u_\omega = (\hbar\omega^2/\pi^2 c^3) e^{-\hbar\omega/kT}$, 为

在 $T = 2000 \text{ K}$ 时给出的能量分布误差不超过 1.0% ，试问应取多大的波长间隔？

1.17. 试利用普朗克公式计算：

a) 当 T 从 2000 K 增加到 2300 K 时，波长 $\lambda = 0.60$ 微米的光谱辐射强度增大多少倍；

b) 在 $T = 2000 \text{ K}$ 时，与最可几波长相差不超过 0.50% 的波长间隔内的发射本领。

1.18. 试利用普朗克公式求出：

a) 斯忒藩-玻耳兹曼常数的数值；

b) 维恩位移定律中的常数 b 的数值。

1.19. 试利用普朗克公式确定：

a) $T = 2000 \text{ K}$ 时热辐射光谱中频率 ω 的平均值；

b) 平均波长等于 2.67 微米的热辐射的温度。

1.20. 试利用普朗克公式求出：

a) 决定在光谱间隔 $(\omega, \omega + d\omega)$ 和 $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ 中 1 厘米^3 内的量子数目的表达式；

b) 在 $T = 300 \text{ K}$ 时 1 厘米^3 内量子的总数。

1.21. 当 $T = 1000 \text{ K}$ 时，试利用普朗克公式计算：

a) 量子的最可几能量；

b) 量子的平均能量。

1.22. 试证明，在单位时间内射到空腔壁单位面积上的热辐射量子的数目等于 $nc/4$ ，其中 c 是光速； n 是单位体积内量子的数目。试证实这个数值与量子平均能量的乘积等于发射本领。

电磁辐射的微粒性

1.23. 若点光源的功率为 1.0 瓦特，试对下列情形求出距此光源 1.0 米处的光子流密度：

a) 光是波长为 0.50 微米的单色光；

b) 光包含波长为 0.70 和 0.40 微米、强度比等于 1:2 的两种谱线。

1.24. 光子的波长等于 0.50 微米、 2.5×10^{-8} 厘米和 0.020 埃。试计算它们的动量(以电子伏/ c 为单位, c 是光速)。

1.25. 从微粒性的概念出发, 试证明平面光流 Φ 所传递的动量与它的光谱组成无关。

1.26. 激光器以延续 $\tau = 0.13$ 毫秒的脉冲射出能量 $E = 10$ 焦耳的窄光束。若这束光聚焦在与光束垂直的表面上, 形成直径 $d = 10$ 微米的光斑, 表面的反射系数 $\rho = 0.50$, 试求在脉冲时间内此光束的平均压强。

1.27. 能量 $E = 7.5$ 焦耳的瞬时光脉冲以窄束的形式射在反射系数 $\rho = 0.60$ 的反射镜面上。入射角 $\theta = 30^\circ$ 。试求传给镜面的动量。

1.28. 强度为 J 瓦特/厘米² 的平面光流完全照亮下列表面, 试利用微粒性概念求出光对表面的压力:

- a) 镜反射平面(入射角为 θ);
- b) 具有镜反射表面的半球;
- c) 完全无光泽的平面(光垂直入射)。

在所有情形下, 被照亮的表面的面积都等于 S ; 反射系数是 1。

1.29. 有一绝对镜反射的圆形板, 其半径 $r = 10$ 厘米, 将功率 $N = 60$ 瓦特的点光源放在板中心的上方。点光源和板之间的距离 $l = 10$ 厘米。试利用微粒性概念求出圆板受到的光压。讨论一下 $r \ll l$ 和 $r \gg l$ 两种情形。

1.30. 从微粒性概念出发, 试证明热辐射的压强 $p = u/3$, 式中 u 是辐射的能量体密度。

1.31. 以速度 v ($v \ll c$) 运动着的原子发射出光子, 光子与原子运动方向之间的夹角为 θ 。试利用守恒定律求出光子频率多普勒位移的相对值。

1.32. 恒星的质量是 M , 半径为 R , 从恒星表面发射出光子. 假设光子具有在本质上是引力性质的质量, 试求光子在远离恒星时能量的相对减少量. 对于从下列恒星的表面发射出来的辐射, 试计算波长的引力位移($\Delta\lambda/\lambda$);

a) 太阳($M=2.0 \times 10^{30}$ 千克, $R=7.0 \times 10^8$ 米);

b) 中子星(它的质量等于太阳的质量, 而平均密度为太阳的 1.0×10^{14} 倍).

1.33. 试说明连续伦琴谱存在着短波限的理由. 若 λ 以埃为单位, V 以千伏为单位, 试计算关系式 $\lambda_{\min}=C/V$ 中常数 C 的值.

1.34. 若已知伦琴射线管上的电压增加了 1.0 倍后, 连续伦琴谱短波限的波长变化了 0.50 埃. 试求该短波限的波长.

1.35. 伦琴射线管射出的一窄束射线, 在单晶体 NaCl 的天然晶面上反射. 若已知当掠射角一直减小到 4.1° 时才观察到镜反射, 试确定伦琴射线管上的电压. 相应的晶面间距等于 2.81 埃.

1.36. 若连续伦琴谱短波限的波长 $\lambda_{\min}=0.157$ 埃, 试计算飞向伦琴管对阴极的电子的速度.

1.37. 当利用薄金属作伦琴射线管的对阴极时, 韧致辐射的光谱分布具有如下形式: $J_\lambda=10^{-5} PZ/\lambda^2$ (瓦特/埃), 式中 P 是伦琴管里电流的功率(瓦特); Z 是对阴极元素的原子序数; λ 是射线的波长(埃).

a) 试画出函数 $J_\lambda(\lambda)$ 和 $J_\omega(\omega)$ 的大致图形.

b) 若伦琴管上的电压 $V=80$ 千伏, 取金箔作为对阴极, 试计算伦琴管的效率.

1.38. 试求具有光谱分布 $J_\omega \sim (\omega_{\max}-\omega)$ 的韧致伦琴辐射的最可几波长, 式中 $\omega_{\max}$ 是光谱的最大频率. 伦琴管上的电压是 31 千伏.

1.39. 试利用附录的表值计算:

a) Cs 和 Pt 的光电效应红限的波长;

b) 波长为 0.270 微米的光从锌、银和镍的表面释放出来的光电子的最大速度.

1.40. 用波长为 0.20 微米的光照射远离其他物体的铜球. 试问铜球被充电到多大的最高电势?

1.41. 用波长为 λ_0 的光线照射锂的表面, 当遏止电势差取某个最大值时, 光电流便被截止. 当光的波长改变为原波长的 $n=1.5$ 倍后, 已查明使电流截止的遏止电势差必需增大到原值的 $\eta=2.0$ 倍. 试计算 λ_0 .

1.42. 电磁辐射的电场强度随时间按如下的规律变化: $E = a(1 + \cos \omega t) \cos \omega_0 t$, 式中 a 是常数; $\omega = 6.0 \times 10^{14}$ 弧度/秒; $\omega_0 = 3.60 \times 10^{15}$ 弧度/秒. 试求这种电磁辐射从锂表面打出去的光电子的最大动能.

1.43. 真空光电池的电极(一个是铯电极, 另一个是铜电极)从外面短路. 用单色光照射铯电极. 试确定:

a) 光电池电路中出现电流时光的波长;

b) 光的波长为 0.220 微米时光电子飞到铜电极的最大速度.

1.44. 用波长为 2620 埃的光照射真空光电池的锌电极, 当外部遏止电势差达到 1.5 伏时, 光电池电路中产生的电流便被截止. 试确定光电池外接触电势差的数值和极性.

1.45. 用不同波长的单色光照射作为球形真空光电池内电极的镍球. 所得的光电流与所加电压 V 的依赖关系曲线如图 1 所示. 试利用这些曲线求出相应的波长.

1.46. $\lambda = 0.170$ 埃的光子从静止的原子中打出一个结合能 $E = 69.3$ 千电子伏的电子. 假设电子在与入射光子成直角的方向飞出去, 试求在此过程中传递给原子的动量.

1.47. 试利用守恒定律证明, 自由电子不可能吸收光子.

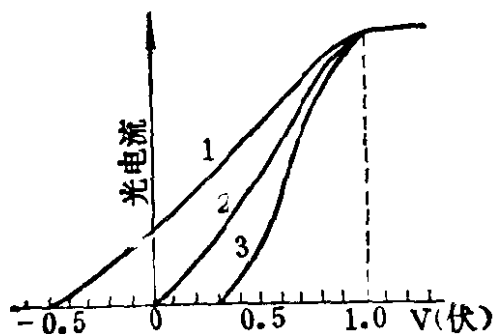


图 1



图 2

1.48. 能量为 $h\omega$ 的光子在静止的自由电子上以 θ 角散射。试求：

- 被散射光子的波长增量；
- 反冲电子飞出的角度 φ 。

1.49. 能量为 0.46 兆电子伏的光子在静止的自由电子上以 $\theta = 120^\circ$ 角散射。试求：

- 被散射的光子的能量；
- 传递给电子的能量。

1.50. 动量为 60 千电子伏/ c 的光子在静止的自由电子上以 120° 角受到康普顿散射，然后从 Mo 原子中打出一个结合能为 20.0 千电子伏的电子。试求光电子的动能。

1.51. 当用单色的硬伦琴射线照射物质时发现，康普顿电子的最大动能 $T_{\max} = 0.44$ 兆电子伏。试确定入射射线的波长。

1.52. 用单色的硬伦琴射线照射某种轻元素的样品，图 2 给出了从样品中放出的电子的能谱 (T 是电子的动能)。试解释能谱的特征。若 $T_2 - T_1 = 180$ 千电子伏，试求入射射线的波长以及 T_1 和 T_2 。

1.53. 能量为 374 千电子伏的光子在静止的自由电子上受到散射，被散射光子的波长的康普顿位移是 0.0120 埃，试确定反冲电子和被散射光子的飞出方向之间的夹角。

1.54. 光子在静止的自由电子上受到散射。若在被散射的光

子与反冲电子的飞出方向之间的夹角为 90° 时, 被散射光子的能量等于反冲电子的动能, 试求入射光子的动量。

1.55. 由于能量为 0.80 兆电子伏的 γ -量子与静止的自由电子碰撞的结果, 若使反冲电子的速度等于 $0.60c$, 试问 γ -量子的散射角多大?

1.56. 动量为 1.02 兆电子伏/ c 的光子在静止的自由电子上受到散射。若反冲电子:

a) 与入射光子的方向成 30° 角飞出去;

b) 获得的动量是 0.51 兆电子伏/ c , 试求被散射光子的波长的康普顿位移。

1.57. 若已知光子在静止的自由电子上以 $\theta = 60^\circ$ 角散射时, 电子获得的动能 $T = 0.450$ 兆电子伏, 试求入射光子的能量。

1.58. 能量 $\hbar\omega = 1.00$ 兆电子伏的光子在静止的自由电子上散射。若由于散射的结果使光子的波长改变 $\eta = 25\%$, 试求反冲电子的动能。

1.59. 当光子和相对论电子碰撞时, 光子以 60° 角散射, 而电子则静止下来。

a) 试求被散射的光子的康普顿位移。

b) 若入射光子的能量等于电子的静能量, 试求碰撞前电子的动能。

1.60. 试解释用单色伦琴射线照射物质时产生的康普顿效应的下列特征。

a) 为验证康普顿位移公式, 必须采用足够硬的伦琴射线;

b) 位移的大小与物质的种类无关;

c) 在被散射的射线中存在着不位移的成分;

d) 被散射光的位移成分的强度随着物质原子序数的减小而增大, 也随散射角的增加而增大;

e) 被散射的光的两个成分变宽。