

## Chapter 1 辐射转移

1. 写出电磁波谱中射电、红外、可见光、紫外、X 射线和伽玛射线各波段大致对应的频率和波长(以埃表示)范围。与  $1\text{keV}$  光子所对应的电磁波波长和频率分别是多少?
2. 如何定义辐射强度? 它的量纲是什么? 什么情况下辐射场是均匀的和各向同性的?
3. 简单证明来自一个点源的辐射流量与距离是平方反比的关系, 以及辐射能量密度也一样与距离是平方反比。
4. 简单证明真空中(忽略发射和吸收过程)辐射强度与离开源的距离无关。
5. 辐射与介质作用主要有哪两种过程? 如何定义发射系数和吸收系数? 它们的单位分别是什么?
6. 写出光学厚度(即光深)的定义式? 它与介质的哪些性质有关? 哪些情况下介质是光学厚的? 哪些情况下是光学薄的?
7. 光子在介质中传播的平均自由程对应的光深是多少? 由此导出平均自由程和吸收系数的关系。
8. 一个恒星平均质量密度是  $1\text{g/cm}^3$ , 半径是  $10^{11}\text{cm}$ , 质量吸收系数(吸收系数除以质量密度)是  $1\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ , 问光深是多少? 光子穿透恒星而不被吸收的概率是多大?
9. 写出包含发射和吸收的辐射转移方程。何为源函数? 写出辐射转移方程的形式解, 并解释它的物理意义。
10. 对于光学薄的物体, 观测者观测到  $I_\nu = S_\nu \tau_\nu$ , 光深减小则为零。然而, 此式等价于  $I_\nu = j_\nu L$ , 似乎看起来吸收减小时并不为零。请解释“矛盾”。
11. 何为热辐射? 热辐射等同于黑体辐射吗? 请解释。
12. 写出 Einstein 系数的定义式。写出热平衡时确定各能级原子相对数目的 Boltzmann 公式。
13. 尽管当时实验上还没有证实受激辐射的存在, Einstein 就推断受激辐射原则上是必须加入的。他的理由是什么?
14. 写出表征黑体辐射强度的 Planck 公式, 并写出其在低频和高频极限下的近似式。离子体温度为  $10000\text{K}$ , 与其黑体辐射强度极大值所对应的频率和波长大约是多少?
15. 维恩定律表明温度趋于无穷大时辐射场强度并不会趋于无穷大, 为什么?
16. 何为亮温度, 色温度和有效温度?
17. 何为 Kirchhoff 定律? 它在什么条件下成立?
18. 若无外部照射, 试导出一个厚度为  $L$ 、温度为  $T$  的热平衡均匀介质层出射的辐射强度的表示式, 分别在光学厚和光学薄两种情况下考虑。
19. 考虑中心天体产生温度为  $T_c$  的黑体辐射, 外围包层(温度为  $T_e$ )的热吸收系数是只在某频率上非零( $\delta$  函数)。请解释出射的谱中在该频率上产生发射线和吸收线的条件分别是什么?
20. 写出既有散射, 又有吸收和发射时的辐射转移方程。
21. 在随机游走图像下, 写出弹性散射情况下介质有效光深的定义式。相比没有散射的情况下的光深, 加入散射过程会导致光深变大还是变小, 物理原因是什么?
22. 写出罗斯兰平均吸收系数(Rosseland mean absorption coefficient)  $k_R$  的定义式和温度为  $T(z)$  的平行板介质的辐射能流的罗斯兰近似表达式。

## Chapters 2+3+4+8 经典辐射理论

## 1、 辐射场

1. 写出描述偏振的 Stokes 参量  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  的定义式, 并写出任意偏振波偏振面方位角, 以及其中椭圆偏振波成分的椭率与 Stokes 参量的关系。
2. 真空中群速度跟相速度相等, 都是  $c$ , 请证明。
3. 如果一个电磁波脉冲经过一个探测器的时间是 10 微妙, 请问探测器能否区分或者测量其中频率差为 10MHz 的两个成分的振幅? 为什么可以(或不可以)?
4. 为什么大多数天体的辐射是非偏振的?
5. 请解释为什么单色波只有 3 个独立的 Stokes 参量, 而一般有 4 个。
6. 部分非偏振光的 Stokes 参量是( $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$ ), 请把它分解为非偏振光、线偏振光和圆偏振光三个成分, 并写出总偏振度  $\Pi$ , 线偏振度  $\Pi_L$ , 和圆偏振度  $\Pi_C$ 。
7. 考虑一束光, 其强度为常数但是偏振是完全随机的, 请问这束光的 Stokes 参数值。
8. 探测到辐射场的电场随时间的变化为  $E(t)$ , 请问辐射谱跟它是什么关系? 如果  $E(t)$  是持续时间约为  $T$  的脉冲, 辐射谱的频率宽度大概是多少?
9. 请画出辐射场中电场矢量、磁场矢量和传播方向的关系。
10. 已知某时刻空间某处的电场  $\mathbf{E}$  和磁场  $\mathbf{B}$ , 请问电磁波辐射的流量表达式(单位时间单位面积的辐射能量)。

## 2、 运动电荷(非相对论+相对论)的辐射

11. 带电粒子辐射的几种主要物理过程是什么? 引起带电粒子加速的物理过程主要有哪两种? 各分别产生何种辐射? 在考虑辐射问题时, 为何我们通常只考虑电子的辐射?
12. 利用 Maxwell 方程组导出推迟势并写出 $\kappa$ (电量改正因子)的表示式, 并解释推迟势的物理含义。利用推迟势导出运动的单个带电粒子所产生的电场和磁场强度的表示式, 并解释产生辐射场的必要条件是什么?
13. 写出带电粒子辐射角分布的一般公式, 并得出其在非相对论极限下的表示式。相对论粒子和非相对论粒子的辐射角分布各有何特点?
14. 分别写出非相对论粒子和相对论粒子辐射总功率的表示式。它们有何明显不同之处?
15. 写出非相对论电子的辐射谱分布的表达式, 并利用其讨论偶极辐射在单位频率间隔中辐射的总能量。
16. 为什么运动电荷的“速度场”并不会导致能量损失而“辐射场”会?
17. 请证明速度场的电场矢量位于  $\mathbf{n}$  和  $\beta$  定义的平面上, 而辐射场的电场矢量位于  $\mathbf{n}$  和  $d\beta/dt$  定义的平面上(非相对论情形)。
18. 简单解释为什么相对论电荷辐射功率是 Lorentz 变换不变量。
19. 一个由众多运动带电粒子组成的集体的辐射谱原则上非常复杂, 原因是其中各个粒子具有不同的推迟时刻。事实上这通常不是问题, 请解释为什么?
20. 完全非偏振的辐射经过自由电子散射后会变成 100%线偏振, 请问在什么情况下这会发生, 其物理原因是什么?
21. 辐射反作用力怎么定义的? 请量级上比较它的大小和正在散射光学波段辐射的电子受到的加速力  $ma$ 。
22. 由于辐射反作用力的阻尼作用, 带电谐振子的运动会衰减掉。如果谐振子辐射在光学波段, 请问衰减时标是多少(量级上)? 辐射在射电频率 100MHz 上呢?
23. 在经典理论中, 原子可以看作束缚的受阻尼的谐振子, 衰减时标对应一个原子能态的“寿

命”。请问辐射在频率上的宽度与“寿命”的关系？为什么尖锐的发射线对应较稳定的能态？

24. 谐振子具有自己固有的频率 ( $\omega_0$ )，决定于束缚力，而入射波的频率 ( $\omega$ ) 可以是不一样的。请问散射截面对这两个频率的依赖关系，以及在  $\omega$  远大于或远小于  $\omega_0$  时散射截面的值。
25. 请示意画出一个相对论匀速运动的发光体 ( $\gamma \gg 1$ ) 的辐射功率角分布 (在其静止系中为各向同性辐射)。
26. 发光体向着观测者以相对论速度运动 ( $\gamma \gg 1$ )，在其静止系中对着观测者发出时间间隔为  $dt'$  的两个辐射脉冲，求观测者接收到这两个脉冲的时间间隔。
27. 相对论运动的发光体发出的一束光与速度  $\mathbf{v}$  夹角为  $\theta$ ，频率为  $\nu$ ，辐射强度为  $I_\nu$ 。请求出在发光体静止系中这束光的辐射强度 (注意  $I_\nu/\nu^3$  为 Lorentz 变换不变量)。
28. 简单解释为什么光深是 Lorentz 变换不变量。

### 3、 等离子体效应

29. 何为 Faraday 磁光效应？引起这种效应的物理原因是什么？在高频情况下磁等离子体中电磁波线偏振面的偏转角与哪些因素有关？Faraday 磁光效应在天体物理中有何重要意义？
30. 写出等离子体频率和 Lamor 频率的表示式。如磁场强度  $B$  为 1000 高斯，电子密度为  $10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，试计算这两种频率的值。
31. 何为 Cherenkov 辐射？Cherenkov 辐射产生的条件是什么？
32. 在 Cherenkov 辐射中，辐射方向和粒子质量对辐射的影响与其它辐射机制有何不同？
33. 为什么等离子体的折射指数小于 1？
34. 两束电磁波的频率分别大于和小于等离子体频率，它们的传播情况有什么不同？解释为什么天体中能导致能量转移的电磁波频率都是大于等离子体频率。
35. 示意性画出一束调幅的电磁波，表示出群速度如何可以与相速度不同。
36. 如何运用脉冲星的观测获得星际介质中自由电子密度的信息。
37. 对于圆偏振波，如果波长变小，其电场矢量在传播相同距离后所转过的角度是变大还是变小？
38. 线偏振波在星际介质中传播 1kpc 以后电场矢量偏转角度有多大？
39. 如何由 dispersion measure 结合 rotation measure 来给出银盘中平均电子密度和磁场大小的信息？
40. 真空中匀速运动的电荷不产生辐射，但是在 (中性) 气体或流体中则不一定，为什么？电荷在这种介质中产生辐射的条件是什么？
41. Razin 效应预言同步辐射在低频失效，为什么？

## Chapter 5 韧致辐射

1. 何为韧致辐射？为何只考虑电子与离子的韧致辐射而忽略电子与电子或离子与离子的韧致辐射？
2. 画出一非相对论电子和离子碰撞产生的韧致辐射能谱。是哪两个因素决定了辐射谱的宽度，即产生一个高频的截止？写出该截止频率表示式。
3. 为何冈特(Gaunt)因子是一个缓变的函数？

- 4、单个非相对论电子的轫致辐射总功率与电子速度和离子密度有何关系？
- 5、电子系集体轫致辐射的谱发射系数与电子密度和温度、离子密度有何关系？
- 6、电子系集体的热轫致辐射谱在低频和高频分别有何特点？何为自由-自由吸收？对热平衡等离子体，在高频和低频时自由-自由吸收系数与频率各有何关系？
- 7、画出一个（较致密）天体进行的热轫致辐射的能谱。高频掉下来的物理原因是什么？该频率的典型值是什么？图中给出在低频和高频对频率的依赖关系。
- 8、星际介质中的 HII 区具有跟恒星相当的温度  $T$ ，并进行热轫致辐射，为何在频率  $kT/h$  附近的亮度没有相同温度的恒星亮？
- 9、一个热轫致辐射天体的能谱显示低频段有严重吸收，考频段是光学薄。由全波段辐射流量和能谱的观测，有办法估计该天体的电子密度吗？

## Chapter 6 同步辐射

- 1、写出相对论电子同步辐射总功率的表示式。它与回旋辐射总功率表示式有何不同？
- 2、写出同步辐射峰值频率表示式。若磁场强度  $B=10^{-5}G$ ，相对论电子  $\gamma=10^3$ ，投射角  $\alpha=30^\circ$ ，试求其同步辐射峰值频率。
- 3、同步辐射的角分布和谱分布各有何明显特征？与回旋辐射有何不同？
- 4、单电子同步辐射在低频和高频极限下的线偏振度大约是多少？
- 5、对电子系集体的同步辐射，若电子能谱分布为幂律形式，则同步辐射谱亦为幂律形式，试问辐射谱指数  $s$  与电子能谱指数  $p$  之间有何关系？请用电子能谱指数  $p$  表示电子系集体同步辐射的平均线偏振度。
- 6、何为同步辐射自吸收？主要在高频还是低频？为什么？
- 7、简单地想，相对论电子的辐射应该主要在回旋频率  $\omega_B$  上，通常比较低，但是辐射谱的峰值频率  $\omega_c$  要大得多。请问为什么？
- 8、请定性解释为什么单个相对论电子同步辐射的谱形只依赖于  $x=\omega/\omega_c$ ？
- 9、请示意性画出单个相对论电子同步辐射的谱形，标出在高低频极限下对频率的依赖关系。谱的宽度与峰值频率相比怎样？
- 10、同步辐射功率的公式似乎表示电子在“散射”磁场能量产生辐射，因而同步辐射能源来自磁场能量。请问这个理解有什么问题？
- 11、电子同步辐射功率与电子能量是什么关系？由于同步辐射导致电子损失一半能量的时间（冷却时标）与初始能量的关系如何？
- 12、对同步辐射源进行偏振观测，请问观测到的线偏振方向与源内的磁场在天球上投影的方向是什么关系？
- 13、如果同步辐射谱的谱指数是  $s=0.75$ ，请问可能的最大线偏振度是多少？为什么不是 100%？
- 14、非相对论电子的回旋辐射是单频辐射，而随着电子能量增加会出现分立的倍频成分，为什么？实际上，同步辐射谱是“连续”谱，为什么？
- 15、原则上，已知同步辐射的发射系数，怎么求同步辐射的吸收系数？
- 16、考虑幂律电子集体的辐射谱。在高频， $F_\nu$  在固定频率  $\nu$  上随着  $B$  增大而增大，请给出依赖关系。但是，在低频  $F_\nu$  随着  $B$  增大而减少，为什么？
- 17、非热的同步辐射谱在高频和低频的斜率与热辐射谱比有什么不同？

## Chapter 7 康普顿散射

- 1、请运用能量动量守恒推导康普顿散射过程中出射光子能量随着散射角变化的关系。
- 2、何为逆康普顿散射？它与康普顿散射有何区别？电子静止系中，为何总是康普顿散射而不是“逆”的？
- 3、在观测者系中，一次散射是康普顿散射或是逆康普顿散射的条件是什么？
- 4、何为 Thomson 散射？写出其沿观测方向单位立体角的辐射功率表示式。Thomson 散射的截面和微分散射截面分别如何表示？为何只有低频光子才有 Thomson 散射？
- 5、试写出量子理论给出的 Compton 散射的微分截面公式(即 Klein-Nishina 公式)。
- 6、康普顿散射截面在光子能量远大于电子静止质能极限下如何依赖光子能量变化？
- 7、若相对论电子能量为  $E$ ，则“低能”光子在逆 Compton 散射后能量大致增大多少倍？如果是高能光子 ( $\epsilon \gg mc^2$ ) 呢？
- 8、在康普顿散射光子能量的推导中，作了两次参照系变换，先变换到电子静止系，再变换回到观测者坐标系。请问这样做有什么好处？
- 9、写出逆 Compton 散射辐射总功率的表示式。并将其与同步辐射总功率表示式相比较，何种情况下逆 Compton 散射比同步辐射更重要？
- 10、逆康普顿散射辐射功率的计算中我们忽略  $\gamma\epsilon > mc^2$  的情况，为什么？为什么是  $\gamma\epsilon$  而不是  $\epsilon$ ？
- 11、一个超新星遗迹激波后的磁场为  $10^{-6}\text{G}$ ，请问产生  $10\text{keV}$  同步辐射光子的电子与微波背景光子散射是在 Thomson 散射极限中吗？
- 12、对电子系集体的逆 Compton 散射，若电子能谱具有幂指数为  $p$  的幂律形式，则逆 Compton 散射的辐射谱亦为幂律形，请简单推导谱指数。(单电子辐射谱正比于  $f(x)$ ,  $x = \epsilon/4\gamma^2\epsilon_0$ )
- 13、Lorentz 因子为  $\gamma$  的相对论电子在各向同性的光子场中运动，请定性描述电子静止系中电子遇到的光子场的角分布。
- 14、康普顿  $y$  参量的定义是什么？
- 15、若入射光子能量为  $\epsilon$ ，在与温度为  $T$  的非相对论热电子散射时光子相对能量的平均变化率的表达式是什么？它有什么物理含义？
- 16、是否散射次数越多，光子通过康普顿硬化过程从电子获取的能量会越多？为什么？
- 17、试述多次逆康普顿散射过程怎么产生幂律的出射光子谱？是在对散射光学厚的介质中吗？为什么？
- 18、请说明 Kompaneets 方程适用于描述什么过程，以及所适用的物理条件。
- 19、一个天体产生非相对论热韧致辐射且散射影响较大，请解释什么情况下产生变形的黑体谱或维恩谱。