

ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В СРЕДЕ

Основным источником информации о небесных телах остается электромагнитное излучение. С древнейших времен и до середины XX века астрономические наблюдения проводились исключительно в видимом диапазоне электромагнитного спектра (длина волны 4000—8000 Å). Систематические радионаблюдения космических источников начались только после второй мировой войны во многом благодаря развитию радиотехники для целей связи и радиолокации. Земная атмосфера не пропускает коротковолновое излучение, поэтому УФ, рентгеновское и гамма-излучение от небесных объектов изучается лишь с 1960-х гг., когда стали возможны запуски детекторов жесткого излучения в высокие слои атмосферы (20 км и выше — баллонные эксперименты) и за ее пределы на ракетах и специализированных искусственных спутниках («Ухуру», 1972).

Более 99% видимой материи в природе имеет температуру выше 100 тысяч градусов. Это вещество звезд и горячего разреженного межзвездного и межгалактического газа. При такой температуре газ полностью ионизован, то есть представляет собой плазму, состоящую из свободных электронов, ионов и ядер. Свойства такого вещества сравнительно простые, и только при температуре $< 10^4$ К, когда электроны оказываются связанными с ядрами, процесс взаимодействия частиц, как и процесс излучения и поглощения света, становится значительно сложнее.

2.1. Основные понятия

Некоторые часто встречающиеся элементарные физические процессы, ответственные за излучение и поглощение света атомами и свободными частицами, описаны в Приложении. Для количественного понимания процессов, происходящих в астрофизических источниках, нам понадобится знакомство с макроскопической теорией переноса электромагнитного излучения в среде, способной излучать и поглощать электромагнитные волны.

Напомним основные понятия макроскопической теории излучения.

2.1.1. «Температурная» шкала электромагнитных волн

В электродинамическом (классическом) описании излучение представляется электромагнитными волнами, которые распространяются в пустоте со скоростью света $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Частота ν монохроматической электромагнитной волны связана с длиной волны λ соотношением $\lambda\nu = c$. Энергия отдельного кванта света — фотона — может быть выражена через частоту излучения $E = h\nu = \hbar\omega$, где $h = 2\pi\hbar \simeq 6.625 \cdot 10^{-27}$ [эрг·с] — постоянная Планка.

Для теплового излучения среды с температурой T (т. е. в случаях, когда можно термодинамически ввести температуру как меру энергии хаотического движения частиц) характерная энергия излучаемых фотонов не будет сильно отличаться от энергии частиц $\sim kT$, где $k \approx 1.38 \cdot 10^{-16}$ [эрг/К] — постоянная Больцмана. Поэтому удобно характеризовать излучение средней энергией квантов (выраженной, например, в электрон-вольтах) или «температурой излучения» (выраженной в кельвинах). Например, оптические фотоны имеют энергию около 1 эВ, рентгеновские — 1–10 кэВ. В энергетических единицах температура в 1 эВ соответствует физической температуре ≈ 11600 К. С другой стороны, низкочастотное излучение в радиодиапазоне принято характеризовать частотой, выраженной в герцах, или длиной волны в метрах или сантиметрах. Шкала электромагнитных волн представлена на рис. 2.1.

2.1.2. Интенсивность излучения (поверхностная яркость)

Важной характеристикой излучения является *интенсивность*. Рассмотрим элементарную площадку с площадью ΔA в пространстве, заполненном излучением от разных источников. Будем характеризовать ориентацию площадки в пространстве вектором нормали



Рис. 2.1. Спектральная шкала электромагнитного излучения

к ее поверхности (рис. 2.2). Интенсивность излучения (поверхностная яркость) в данном направлении — это мощность световой энергии, проходящей через малую площадку единичного сечения, расположенную перпендикулярно выбранному направлению, в единичном телесном угле $\Delta\Omega$ в единичном интервале частот $\Delta\nu$ или длин волн $\Delta\lambda$. В общем случае, если угол между площадкой и выбранным направлением равен θ , то

$$I_\nu = \frac{\Delta E}{\cos \theta \Delta A \Delta t \Delta \nu \Delta \Omega}, \quad (2.1)$$

или

$$I_\lambda = \frac{\Delta E}{\cos \theta \Delta A \Delta t \Delta \lambda \Delta \Omega}, \quad (2.2)$$

где $\Delta\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ — элемент телесного угла. Переход от I_ν к I_λ осуществляется через очевидное соотношение $I_\nu \Delta\nu = I_\lambda \Delta\lambda$, из которого следует

$$|I_\nu| = \left| I_\lambda \frac{\lambda}{\nu} \right|.$$

Важное свойство интенсивности: эта величина характеризует излучательные свойства источника и не зависит от того, на каком расстоянии от него поместить элементарную площадку, поскольку с ростом расстояния r до источника мощность излучения, проходящего через площадку, падает как r^2 , но по такому же закону падает и

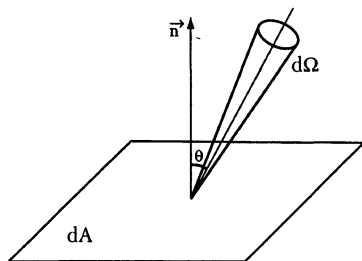


Рис. 2.2. К определению интенсивности и полного потока излучения через площадку.

телесный угол, под которым виден источник (или любая его часть, наблюдаемая под малым телесным углом). Элементарную площадку можно совместить с наблюдателем, а можно представить находящейся на поверхности источника. Интенсивность будет той же самой. Источник называют изотропно излучающим, если его интенсивность не зависит от направления в пространстве.

2.1.3. Поток излучения. Связь с интенсивностью

Интенсивность, проинтегрированная по телесному углу, заключающему источник, дает мощность излучения, проходящего через площадку единичной площади в данном интервале частот или длин волн. Эта величина называется *потоком излучения*:

$$F_{\nu,\lambda} = \int I_{\nu,\lambda} \cos \theta d\Omega, \quad (2.3)$$

где интеграл берется по телесному углу.

Если интенсивность приходящего излучения не зависит от направления (изотропное поле излучения), то из формулы (2.3) вытекает, что полный поток через площадку равен нулю: $F = I \int_{4\pi} \cos \theta d\Omega = 0$. Такая ситуация реализуется в поле равновесного излучения (с большой точностью — внутри звезды). И обратно, чем более анизотропно поле излучения, тем дальше от равновесного состояния оно находится (например, поле излучения вблизи границы фотосферы звезды или излучение облака газа, подсвеченного удаленным источником, уже не является равновесным). Для изотропно излучающей бесконечной плоскости интегрирование по полусфере дает: $F_{\nu,\lambda} = \pi I_{\nu,\lambda}$.

Поток от источника может рассматриваться как освещенность, создаваемая источником (в интервале $d\nu$ или $d\lambda$) в месте наблюдения. Поток при отсутствии поглощения падает с расстоянием как r^{-2} из-за уменьшения телесного угла, под которым виден источник. Однако для реальных астрономических источников обычно необходим учет поглощения света в среде.

Подчеркнем, что от «точечного» источника излучения телескоп может регистрировать только поток излучения (а не интенсивность). Для простоты рассмотрим сферически-симметричный излучатель (звезду) с радиусом r_* , находящуюся на расстоянии D . В силу изотропии излучения звезда будет видна как однородный по яркости диск¹. Непосредственно измеряемый поток излучения от этой звезды, по определению, будет $F_\nu^{(d)} = I_\nu^{(d)} \Delta\Omega$, где $I_\nu^{(d)}$ – интенсивность излучения в точке детектора, $\Delta\Omega = \pi r_*^2 / D^2$ – телесный угол, под которым видна звезда. Так как поток с единицы поверхности звезды для изотропной интенсивности есть просто $F_\nu^{(e)} = \pi I_\nu^{(e)}$, то пренебрегая поглощением (т. е. полагая $I_\nu^{(d)} = I_\nu^{(e)}$), находим для измеряемой величины

$$F_\nu^{(d)} = (r_*/D)^2 F_\nu^{(e)}. \quad (2.4)$$

Для источника, воспринимаемого как точечный, множитель в скобках много меньше 1 и априори неизвестен. Поэтому интенсивность является неопределенной величиной. Это справедливо для любой зависимости интенсивности от угла. Переход от непосредственно измеряемой величины $F_\nu^{(d)}$ к интенсивности $I_\nu^{(e)}$ возможен только если известен угловой размер r_*/D источника, то есть если он не воспринимается как точечный.

2.1.4. Плотность энергии излучения

Спектральная плотность энергии излучения — это энергия излучения в единичном объеме пространства в единичном интервале частот. Она имеет размерность [эрг/(см³·Гц)] и получается интегрированием интенсивности по телесному углу:

$$u_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu d\Omega. \quad (2.5)$$

¹Заметим, что для реальных звездных атмосфер изотропия интенсивности излучения является первым и часто весьма грубым приближением. Хорошо известен эффект потемнения к краю диска Солнца в оптическом диапазоне.

Для доказательства следует взять выражение (2.1) (определение интенсивности), разделить на скорость света c и учесть, что $cdtdA = dV$ есть элементарный объем, проходимый светом за время dt .

2.1.5. Понятие спектра

Спектр — это распределение интенсивности излучения по длинам волн I_λ или частотам I_ν . Очень часто вместо интенсивности используют пропорциональные ей (для данного источника) единицы — световые потоки F_ν или F_λ , или же выражают спектр в относительных (безразмерных) единицах. Последнее обычно имеет место, если интересуются в первую очередь формой спектра, профилем или относительной интенсивностью линий, а не энергетическими характеристиками источника. Иногда спектры характеризуют величиной νI_ν или νF_ν (в зависимости от ν или λ), которая показывает, сколько энергии выделяется в логарифмическом интервале частот; максимум этой величины соответствует характерным частотам, на которых происходит основное энерговыделение.

2.2. Излучение абсолютно черного тела

2.2.1. Тепловое излучение

По физическому смыслу тепловое излучение — это излучение среды, в которой энергия хаотического движения частиц тем или иным способом переходит в энергию фотонов. Примером может служить свободно-свободное (тормозное) излучение электронов в поле положительных ионов, ударное возбуждение атомных уровней с последующим высвечиванием и т. д. Характерная особенность любого типа теплового излучения заключается в том, что при усреднении коэффициента излучения по максвелловскому распределению частиц по скоростям $f(v) \sim v^2 \exp(-mv^2/2kT)$, начиная с энергий $h\nu \sim kT$, в спектре непрерывного излучения возникает экспоненциальный завал.

Иная ситуация для нетеплового излучения: его спектр может простирается в область очень высоких энергий и не иметь никакого отношения к температуре среды. Примеры нетеплового излучения — рекомбинационное излучение (свободно-связанные переходы), которое идет за счет выделения внутренней энергии системы электрон-ион, синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле, обратное комптоновское рассеяние «мягких»