

14. *Солнечная энергия.* Солнечной постоянной называется плотность потока солнечного излучения на расстоянии Земли от Солнца. Измерения показали, что эта постоянная равна $1,4 \cdot 10^6$ эрг/сек·см².

а) Показать, что полный поток солнечного излучения составляет приблизительно $4 \cdot 10^{33}$ эрг/сек.

б) Показать, что средняя скорость излучения энергии с грамма солнечного вещества приблизительно равна 2 эрг/сек·г, или около $6 \cdot 10^7$ эрг/год·г.

в) С помощью (38) показать, что энергия, выделяемая с одного грамма водорода, затраченного на синтез He⁴, составляет около $6 \cdot 10^{18}$ эрг.

г) Показать, что если бы Солнце состояло на одну треть по массе из водорода и его ядерное сгорание продолжалось без изменений, то излучение Солнца на существующем уровне смогло бы продолжаться еще в течение $3 \cdot 10^{10}$ лет.

15. *Движение под действием давления излучения.* Один из возможных способов продвижения в космическом пространстве заключается в использовании большого отражающего металлического листа, укрепленного на космическом корабле. Требуется оценить порядок ускорений, которые можно получить для подобного корабля обычных размеров на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца.

16. *Импульс (количество движения) вспышки света, испускаемого лазером.* Большой лазер может генерировать световые вспышки с энергией в 2000 дж.

а) Показать, что импульс при этом имеет порядок 1 г·см/сек *).

б) Рассмотреть возможный способ обнаружения этого импульса, если длительность вспышки света составляет миллисекунду.

Из истории физики. Закон взаимосвязи массы и энергии

Первая работа Эйнштейна по специальной теории относительности была напечатана в «Annalen der Physik» 17, 891—921 (1905) под заглавием «Об электродинамике движущихся тел». Указанный том этого журнала содержит три классические статьи Эйнштейна. Одна из них посвящена квантовой интерпретации фотоэлектрического эффекта (стр. 132—148); в другой излагается теория броуновского движения (стр. 549—560); третья — по теории относительности — цитирована выше. (Следует отметить, что многие из результатов этой статьи были предвосхищены Ларморов, Лоренцем и другими.) В том же году в том же журнале (стр. 639—641) появилась еще одна короткая статья Эйнштейна под заглавием «Зависит ли инерция тела от его энергии?». Ниже дается сокращенное изложение рассуждений Эйнштейна по этому вопросу.

Рассмотрим (как это делается в статье Эйнштейна по электродинамике) пакет, или группу, плоских световых волн. Предположим, что пакет обладает энергией ϵ и движется в положительном направлении x в системе отсчета S . По измерениям, произведенным в системе S' , движущейся со скоростью $V\hat{x}$ относительно S , волновой пакет имеет энергию

$$\epsilon' = \epsilon \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right)^{1/2}, \quad \beta = \frac{V}{c}. \quad (72)$$

Этот результат был выведен Эйнштейном в статье по электродинамике без упоминания понятия фотона. Однако результат (72) прямо вытекает из следующих соображений. Как было показано в (11.41), при продольном эффекте Доплера частоты, воспринимаемые наблюдателями, покоящимися в системах S' и S , связаны соотношением

$$\nu' = \nu \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right)^{1/2}. \quad (73)$$

По квантовым представлениям световой импульс рассматривается как целое число световых квантов или фотонов, каждый из которых имеет энергию $h\nu$ (при наблюдении в системе S), где h — постоянная Планка. При наблюдении импульса

* Речь идет о расчете величины mc и использовании формулы $E = mc^2$; отв. 0, (6)... г·см/сек. (Прим. ред.)

из системы S' число фотонов остается без изменения, но энергия каждого фотона становится равной $h\nu'$. (При этом предполагается, что значения h в S' и S одинаковы.) Из сказанного следует, что энергия ϵ' светового импульса пропорциональна ν' . Тогда (72) непосредственно вытекает из (73).

Теперь рассмотрим тело, неподвижное относительно системы S и имеющее начальную энергию E_0 в системе S и E'_0 в системе S' . Предположим, что это тело испускает световой импульс с энергией $\frac{1}{2}\epsilon$ в положительном направлении x и такой же импульс с такой же энергией в противоположном направлении. После этого тело останется в покое относительно S . Обозначим через E_1 и E'_1 энергию этого тела после испускания упомянутых двух импульсов соответственно в системах S и S' . Тогда вследствие закона сохранения энергии имеем

$$E_0 = E_1 + \frac{1}{2}\epsilon + \frac{1}{2}\epsilon, \quad (74)$$

$$E'_0 = E'_1 + \frac{1}{2}\epsilon \left(\frac{1-\beta}{1+\beta} \right)^{1/2} + \frac{1}{2}\epsilon \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right)^{1/2} = E'_1 + \frac{\epsilon}{(1-\beta^2)^{1/2}}. \quad (75)$$

Вычитая (75) из (74), получаем

$$E_0 - E'_0 = E_1 - E'_1 + \epsilon - \frac{\epsilon}{(1-\beta^2)^{1/2}}. \quad (76)$$

С другой стороны, разность энергий $E'_0 - E_0$ должна как раз равняться начальной кинетической энергии тела K_0 с точки зрения наблюдателя S' , так как тело вначале покоилось в S . Аналогичным образом, разность $E'_1 - E_1$ есть конечная кинетическая энергия с точки зрения того же наблюдателя. Таким образом, уравнение (76) может быть переписано в виде

$$K_0 - K_1 = \epsilon \left(\frac{1}{(1-\beta^2)^{1/2}} - 1 \right). \quad (77)$$

Мы видим, что в результате излучения света кинетическая энергия тела уменьшается. Величина этого уменьшения не зависит от свойств тела. Если $\beta \ll 1$, то

$$K_0 - K_1 \cong \frac{1}{2}\epsilon\beta^2 = \frac{1}{2}\frac{\epsilon}{c^2}V^2 \quad (78)$$

и масса покоя тела уменьшается на

$$\Delta M = \frac{\epsilon}{c^2}. \quad (79)$$

Из этого соотношения Эйнштейн сделал следующие заключения:

«Если тело выделяет энергию ϵ в форме излучения, его масса уменьшается на ϵ/c^2 . Тот факт, что энергия, отдаваемая телом, становится энергией излучения, ничего не меняет, так что мы вправе сделать более общее заключение о том, что масса тела является мерой его энергии; если энергия изменяется на ϵ , то масса изменяется в том же направлении на $\epsilon/(9 \cdot 10^{20})$ при измерении энергии в эргах и массы в граммах.

Не исключена возможность, что данная теория сможет быть успешно проверена на телах, энергия которых способна сильно изменяться (как, например, у солей радия).

Если эта теория соответствует фактам, то излучение является средством передачи инерции от излучающих тел поглощающим».