РАЗДЕЛ VIII. ФИЗИКА

Кошман В.С.

Реликтовое излучение и формула для отношения численности фотонов к количеству барионов во вселенной

ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет»
(Россия, Пермь)

doi: 10.18411/lj-03-2021-47

idsp: ljjournal-03-2021-47

Аннотация

Рассмотрен фрагмент физической модели расширяющейся с охлаждением Вселенной. Получены формулы для фотон – барионного отношения, объемной плотности энергии барионов, а также для отношения объемных плотностей энергий барионов и фотонов Вселенной.

Ключевые слова: реликтовое излучение, абсолютно черное тело, фотон – барионное отношение.

Abstract

A fragment of the physical model of the Universe expanding with cooling is considered. Formulas for the photon – baryon ratio, the volume energy density of baryons, and the ratio of the volume energy densities of baryons and photons of the universe are obtained.

Keywords: the relic radiation of an absolutely black body, the photon – baryon ratio.

Как известно, в 1987 г. японско – американская группа сообщила, что по результатам измерения с борта ракеты наблюдаются существенные отклонения спектра космического фона от чернотельного. По свидетельству автора [1], если бы они оказались правы, то это бы явилось концом теории горячего Большого взрыва. Однако сомнения продолжались не долго. В ноябре 1989 г. на орбиту искусственного спутника Земли был выведен космический аппарат COBE (от Cosmic Background Explorer – Исследователь Космического Фона) со спектрофотометром FIRAS на борту. Изучалось распределение реликтового излучения по частоте. Когда в январе 1990 г. на заседании Американского астрономического общества ДЖ. К. Майер показал слайд, демонстрирующий согласие наблюдаемого спектра с планковским спектром черного тела, ему аплодировали стоя [2].

Спектр излучения абсолютно черного тела вне зависимости от его состава и структуры описывается формулой (законом) Планка [3]

$$dU_{\varepsilon} = \frac{8\pi h \nu^3 V}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1)$$

Здесь U_{ε} – энергии фотонного излучения, ν – частота, V – объем, $h\nu$ – энергия фотона, kT – средняя энергия фотонов. Формула (1), полученная М. Планком в 1900 году, была первой из формул в истории науки, где фигурировали постоянная Планка h и постоянная Больцмана k . Энергия dU_{ε} , соответствующая интервалу частот $(\nu, \nu + d\nu)$, может быть получена умножением числа соответствующих фотонов dN_{ε} на $h\nu$: $dU_{\varepsilon} = h\nu dN_{\varepsilon}$. Имеем бесконечно малое число фотонов dN_{ε} , равное $dN_{\varepsilon} = \frac{8\pi \nu^2 V}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$, а также для интервала частот ν от нуля до бесконечности их конечную величину

$$N_{\varepsilon} = 0,244 \left(\frac{k}{c \cdot h} \right)^3 T^3 V \quad (2)$$

(c – скорость света в вакууме). Уравнение (2) известно и из статистической физики равновесных систем. Оно отвечает предположению, что состоянием фотона является электромагнитная волна, а число фотонов, связанных с волной, выражается распределением Бозе – Эйнштейна [4].

Одновременно с формулой Планк также ввел в научный оборот свои «естественные единицы измерения» [5]

$$\begin{aligned} - \text{длины} \quad L_{pl} &= \left(\frac{h \cdot G}{c^3}\right)^{1/2} = 10^{-35} \text{ м}, \\ - \text{массы} \quad m_{pl} &= \left(\frac{h \cdot c}{G}\right)^{1/2} = 10^{-8} \text{ кг}, \\ - \text{времени} \quad t_{pl} &= \left(\frac{h \cdot G}{c^5}\right)^{1/2} = 10^{-43} \text{ с}, \\ - \text{температуры} \quad T_{pl} &= \left(\frac{h \cdot c^5}{k^3 \cdot G}\right)^{1/2} = 10^{32} \text{ К}, \end{aligned}$$

а также отметил, что они сохраняют «свое значение для всех времен и для всех культур, в том числе и вне земных...пока справедливы законы тяготения, оба начала термодинамики и пока остается неизменной скорость света в вакууме». Именно благодаря Планку фотонное излучение можно представить состоящим из большого числа частиц (фотонов), каждая из которых обладая квантом энергии, движется в пространстве со скоростью света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Следуя (2), а также планковским величинам объема $V_{pl} = L_{pl}^3$ и температуры T_{pl} выражению для объемной плотности фотонов (то есть для числа фотонов в единице объема) можно придать вид

$$n_\varepsilon = \frac{N_\varepsilon}{V} = \frac{1}{V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^3. \quad (3)$$

К числу важнейших параметров физики Вселенной относится фотон – барионное отношение Z как мера отношения числа фотонов N_ε к числу барионов N_b в объеме Вселенной:

$$Z = \frac{N_\varepsilon}{N_b} \quad (4)$$

(барионы - это протоны и нейтроны как строительный материал видимых звезд и их скоплений). Для объемной концентрации барионов n_b можно записать

$$n_b = \frac{N_b}{V} = \frac{1}{Z \cdot V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^3. \quad (5)$$

Умножая объемную концентрацию частиц n_i на величину средней энергии единичной частицы $U_i^{(1)}$ можно выйти на их объемную плотность энергии $u_i = \frac{U_i}{V} = U_i^{(1)} \cdot n_i$. Имеем выражения для

— объемной плотности энергии газа фотонов во Вселенной

$$u_\varepsilon = \frac{U_\varepsilon}{V} = U_\varepsilon^{(1)} \cdot n_\varepsilon = \frac{k \cdot T}{V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^3, \quad (6)$$

— объемной плотности энергии барионного газа

$$u_b = \frac{U_b}{V} = U_b^{(1)} \cdot n_b = \frac{m_b \cdot c^2}{Z \cdot V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^3. \quad (7)$$

Умножаем и делим правую часть уравнения (6) на планковскую температуру T_{pl} , что с учетом взаимосвязи $U_{\varepsilon pl} = k \cdot T_{pl}$ позволяет записать

$$u_\varepsilon = \frac{U_\varepsilon}{V} = U_\varepsilon^{(1)} \cdot n_\varepsilon = \frac{U_{\varepsilon pl}}{V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}}\right)^4. \quad (8)$$

Здесь мы можем вспомнить о выводах С. Вайнберга [6, с. 66] «о количестве энергии в излучении черного тела»: «Количество энергии в одном литре, или «плотность энергии», есть просто число фотонов в одном литре, умноженное на среднюю энергию одного фотона. Но мы видели, что число фотонов в одном литре

пропорционально кубу температуры, в то время как средняя энергия фотона просто пропорциональна температуре. Отсюда количество энергии в одном литре излучения абсолютно черного тела пропорционально кубу температуры, умноженному на температуру, или, другими словами, *четвертой степени температуры*».

Согласно уравнениям (6) и (8) $u_\epsilon \propto T^4$. Это отвечает физической сути уравнения (закона) Стефана – Больцмана в его формах записи вида (6) и (8). Из объективной закономерности в ее записях вида (6) и (8) следует, что фотонное излучение, известное в наши дни как реликтовое излучение, стало неотъемлемой составляющей Вселенной вслед за планковским мгновением времени t_{pl} .

По результатам астрономических наблюдений энергия реликтового излучения U_{en} своей величине существенно меньше энергии барионной составляющей U_{bn} материи Вселенной. Однако согласно теории горячего Большого взрыва у истока космологического расширения Вселенной картина была диаметрально противоположной. Вместе с тем, в истории Вселенной было и так называемое мгновение рекомбинации, когда сопоставляемые величины энергии были равны: $U_{eq} = U_{beq}$ [2]. Тогда интерес представляет функция f как отношение объемной плотности энергии барионов к объемной плотности энергии фотонов. Делим (7) на (8) и получаем для f выражение $f = \frac{u_b}{u_\epsilon} = \frac{U_b}{U_\epsilon} = \frac{m_b \cdot c^2}{Z \cdot k \cdot T}$ с тремя переменными величинами: масса бариона m_b , фотон – барионное отношение Z и температура T . Из выражения для f следует, что на момент окончания эпохи Планка (на планковское время t_{pl}) при $f_{pl} = 1$ выполняются равенства $Z_{pl} = 1$ и $m_{bpl} \cdot c^2 = k \cdot T_{pl} = U_{bpl}$, где m_{bpl} и U_{bpl} – соответственно масса и энергия планковских барионов (название условное).

Вместе с тем, на момент рекомбинации при $f_{eq} = 1$ можно записать равенство $\frac{m_{beq} \cdot c^2}{k \cdot T_{eq} \cdot Z_{eq}} = 1$. Все входящие в него величины относятся к числу фиксированных величин. $Z_{eq} = 10^9$ [2], $T_{eq} = 4 \cdot 10^3$ К [2], $T_{pl} = 10^{32}$ К и $T_{eq} = \frac{T_{pl}}{Z_{eq}^3}$, что позволяет записать $\frac{m_{beq} \cdot c^2}{k \cdot T_{eq} \cdot Z_{eq}} = \frac{m_{beq} \cdot c^2 \cdot Z_{eq}^3}{k \cdot T_{pl} \cdot Z_{eq}} = \frac{m_{beq} \cdot c^2 \cdot Z_{eq}^2}{m_{bpl} \cdot c^2} = 1$. Переходя здесь к текущим значениям физических величин, выходим на математическое выражение для фотон – барионного отношения [7]:

$$Z = \frac{N_\epsilon}{N_b} = \left(\frac{m_{bpl}}{m_b} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Тогда выражение для объемной плотности энергии барионов u_b примет вид

$$u_b = \frac{U_b}{V} = \frac{U_{bpl}}{Z^3 \cdot V_{pl}} \left(\frac{T}{T_{pl}} \right)^3, \quad (10)$$

а для космологической функции f можно записать

$$f = \frac{u_b}{u_\epsilon} = \frac{U_b}{U_\epsilon} = \frac{T_{pl}}{Z^3 \cdot T}. \quad (11)$$

Говоря о возрасте Вселенной, П.Ф.М. Дирак [8, с179] обращается к «модели большого взрыва, согласно которой в начальной стадии все вещество Вселенной было сконцентрировано в очень маленьком объеме, может быть даже в математической точке. Потом произошел гигантский взрыв, в результате которого было выброшено множество сгустков вещества... Можно принять другую модель, предложенную Леметром. Согласно этой модели Вселенная начиналась с одного – единственного атома... Этот единственный... атом был чрезвычайно радиоактивным. Он мгновенно распался на части, которые претерпели дальнейший распад, распады продолжались, и радиоактивность, которую мы наблюдаем сейчас, представляет собой просто остатки начальной радиоактивности. Предложенная схема довольно красива...».

В приведенном выше фрагменте теоретического построения началу расширения Вселенной отвечает весьма малый, но конечный по величине планковский объем $V_{pl} =$

$L_{pl}^3 = 10^{-105} \text{ м}^3$. Если следовать выражению (9), то рост величины фотон – барионного отношения $Z = \frac{N_\varepsilon}{N_b} = \left(\frac{m_{bpl}}{m_b}\right)^{1/2}$ объясняется распадом нестабильных радиоактивных частиц (появлению которых активно способствует космический вакуум с присущим ему запасом энергии). Фотон – барионное отношение $Z = \frac{N_\varepsilon}{N_b}$ возрастает в период ядерных реакций в своих естественных пределах от $Z_{pl} = 1$ до его современной величины $Z_n = 2 \cdot 10^9$. Данный результат согласуется с мнением П. Дэвиса [9, с. 122]: «Появление 10^9 фотонов на каждый протон на ранних стадиях расширения Вселенной – это часть большой тайны образования самих фотонов».

Если вновь обратиться к уравнению (11), то можно отметить следующее. При выполнении неравенства $Z^3 \cdot T > T_{pl}$ энергия фотонов превышает энергию газа барионов Вселенной: $U_\varepsilon > U_b$. Это характерно для радиационно - доминированной стадии расширения Вселенной [2, 6, 9]. В настоящее время при числовых значениях величин планковской температуры $T_{pl} = 10^{32}$ К, температуры реликтового излучения $T_n = 2,73$ К и фотон – барионного отношения $Z_n = 2 \cdot 10^9$ имеем величину отношения энергий $\frac{u_b}{u_\varepsilon} = \frac{U_b}{U_\varepsilon} = 4,6 \cdot 10^3$, что совпадает с известными оценками [9] по порядку величины.

1. Муханов В.Ф. Квантовая Вселенная // УФН. 2016. Т. 186. № 10 С. 1117 – 1125.
2. Вайнберг С. Космология / пер. с англ. М.: ЛИБРОКОМ. 2013. – 608 с.
3. Планк М. Законы теплового излучения и гипотеза элементарного кванта действия // М. Планк. Избранные труды. М.: Наука. 1975. С. 282 - 310.
4. Краснопевцев Е.А. Спецглавы физики. Статистическая физика равновесных систем: учебное пособие. Новосибирск: Изд – во НГТУ. 2014. – 387 с.
5. Планк М. О необратимых процессах излучения // М. Планк. Избранные труды. М.: Наука. 1975. С. 191 - 233.
6. Вайнберг С. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной / пер. с англ. М.: Энергоиздат. 1981. – 208 с.
7. Кошман В.С. Закон Стефана – Больцмана и оценка изменчивости плотности энергии барионов Вселенной // American Scientific Journal. 2019. № 30. Vol. pp. 37 – 41.
8. Дирак П.А.М. Космология и гравитационная постоянная // П.А.М. Дирак. Воспоминание о необычайной эпохе / пер. с англ. М.: Наука. 1990. С. 178 – 188.
9. Дэвис П. Случайная Вселенная / пер. с англ. М.: Мир. 1985. – 160 с.

Кошман В.С.

К доказательству факта большого взрыва у истока космологического расширения вселенной

*ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет»
(Россия, Пермь)*

doi: 10.18411/lj-03-2021-48

idsp: ljjournal-03-2021-48

Аннотация

Представлены данные, которые говорят о том, что эпоха Планка и период ядерных реакций играют более существенную роль в эволюции Вселенной, чем считалось ранее.

Ключевые слова: реликтовое излучение, формула Планка, принцип наименьшего действия, составляющие материи Вселенной.