

Кошман Валентин Семенович
кандидат технических наук, доцент,
независимый исследователь, Пермь

О КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЭДДИНГТОНА И О СТАНОВЛЕНИИ ЗВЕЗД И ЗВЕЗДНО - ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация: В статье в развитие идеи горячего начала мира обозначены контуры описания физических процессов в расширяющейся Вселенной. Приведены аргументы в пользу дискретного накопления строительного материала звезд в каскаде термоядерных реакций ранней Вселенной.

Ключевые слова: модель Вселенной, тяготение, реликтовое излучение, законы физики, звезды, планковские единицы.

Для становления физики как науки характерно накопление знаний о закономерностях природы, а также и пополнение круга количественных соотношений между различными величинами, характеризующими физические явления. Известными вехами в развитии физики стал выход на формулы

$$F_{\text{пр}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \text{и} \quad \frac{d(U_\varepsilon)}{dv} = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot v}{k_B \cdot T}\right) - 1}, \quad (1)$$

первая из которых установлена И. Ньютоном (1687) при изучении земной и небесной гравитации, а вторая – М. Планком (1899) для колоколообразной кривой спектра излучения абсолютно черного тела. На координатной плоскости $\frac{d(U_\varepsilon)}{dv} - v$ площади под планковской кривой отвечает закону Стефана – Больцмана для объемной плотности энергии теплового излучения u_ε :

$$u_\varepsilon = \frac{U_\varepsilon}{V} = \frac{U_\varepsilon^{(1)} \cdot \mathcal{N}_\varepsilon}{V} = \frac{\pi^2 k_B^4}{15 c^3 h^3} T^4. \quad (2)$$

Этот результат Х. Лоренц назвал «настоящей жемчужиной теоретической физики». В мире нет ни одного физического явления, которое было бы изолировано от других явлений [4]. При реконструкции космологической изменчивости физической картины мира интерес представляют взаимосвязи величин, заложенных в описание – см. (1) и (2) - природных явлений. Покажем это на конкретном примере.

Исследуя дифференциальные уравнения А. Эйнштейна, профессор А.А. Фридман (1922) вышел на формулы, допускающие возможность расширения Вселенной из математической точки. В дальнейшем дополнение геометрии и динамики Фридмана идеями ядерной физики и термодинамики позволило Г.А. Гамову предсказать наличие, как оказалось, реально присутствующего в природе реликтового излучения, его криогенную температуру и чернотельный спектр.

Выступая на кафедре Президиума РАН, И.Д. Новиков [10] отмечает, что где – то 15 млрд. лет назад мир был горячим, масса его материи составляла $10^{-5} - 10^{-6} \Gamma$, «размер Вселенной... был ничтожно маленьким, всего 10^{-33} см, то есть на 20 порядков меньше размера атомного ядра». а для иллюстрации факта расширения Вселенной использует образ: «Представим себе, что галактики - это отдельные метки на поверхности шара, и если этот шар раздувается, расстояния между галактиками увеличиваются». И Р. Декарт рассматривал материю, движущуюся в пространстве и времени, как наиболее фундаментальное явление природы [6]. Сегодня скорость ветра в районе Большое Савино 4 м/с. Человек, находящийся на экваторе, совершает один оборот вокруг оси Земли со скоростью около 1600 км/ч, а Земля обращается вокруг Солнца со скоростью 104000 км/ч [там же]. Фотоны движутся со скоростью распространения света в вакууме c . И если на поверхности шара Новикова радиусом R помимо галактик находятся и реликтовые фотоны, то формуле, связывающей пройденный путь R со временем t следует придать вид

$$R = c \cdot t. \quad (3)$$



Планковские единицы длины $L_{pl} = \left(\frac{\hbar \cdot G}{c^3}\right)^{1/2} = 1,61 \cdot 10^{-35}$ м, времени $t_{pl} = \frac{L_{pl}}{c} = 5,39 \cdot 10^{-44}$ с, массы $m_{pl} = \left(\frac{\hbar \cdot c}{G}\right)^{1/2} = 2,17 \cdot 10^{-8}$ кг, энергии $U_{pl} = m_{pl} \cdot c^2 = 1,95 \cdot 10^9$ Дж, температуры $T_{pl} = \frac{U_{pl}}{k_B} = 1,41 \cdot 10^{32}$ К и др. определяются через присутствующие в формулах (1) и (2) мировые константы: \hbar - постоянная Планка, G - гравитационная постоянная, c - скорость распространения света в вакууме и k_B - постоянная Больцмана. Взаимосвязи [15, с. 88]:

$$G = \frac{L_{pl}^3}{m_{pl} t_{pl}^2}, \quad c = \frac{L_{pl}}{t_{pl}} \quad \text{и} \quad \hbar = \frac{m_{pl} \cdot L_{pl}^2}{t_{pl}} \quad (4)$$

известны из теории струн. Решим задачу.

Задача 1. Земля – третья по удалению от Солнца планета Солнечной системы. Найти силу притяжения $F_{пр}$ Земли к Солнцу и среднюю скорость движения $V_{ср}$ Земли по орбите вокруг Солнца. Принять числовые значения величин: масса Солнца $m_1 = 2 \cdot 10^{30}$ кг, масса Земли $m_2 = 5,97 \cdot 10^{24}$ кг, среднее расстояние между небесными телами $r = 1,5 \cdot 10^{11}$ м [16, 17].

Решение. Ньютонов закон гравитации дает силу притяжения $F_{пр} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{(1,5 \cdot 10^{11})^2} = 3,53 \cdot 10^{22}$ Н. Приравняв силу $F_{пр}$ центробежной силе инерции $F_{цб} = \frac{m_2 \cdot V_{ср}^2}{r}$, получаем формулу для средней скорости движения планеты на орбите

$$V_{ср} = \left(\frac{F_{пр} \cdot r}{m_2}\right)^{1/2} = \left(\frac{G \cdot m_1}{r}\right)^{1/2}, \quad (5)$$

а далее и ее величину $V_{ср} = \left(\frac{3,54 \cdot 10^{22} \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{5,97 \cdot 10^{24}}\right)^{1/2} = 2,98 \cdot 10^4$ м/с. Решим вторую задачу.

Задача 2. Найти безразмерную планковскую силу притяжения $\frac{F_{пр}}{F_{pl}}$ Земли к Солнцу и силу $F_{пр}$ в ньютонах.

Решение. С учетом первой из формул (4) запись закона всемирного тяготения обретает форму

$$\frac{F_{пр}}{F_{pl}} = \frac{m_1 m_2}{m_{pl} m_{pl}} \left(\frac{L_{pl}}{r}\right)^2, \quad (6)$$

где F_{pl} - планковская сила: $F_{pl} = m_{pl} \frac{L_{pl}}{t_{pl}^2} = 10^{-8} \frac{10^{-35}}{(10^{-43})^2} = 1,21 \cdot 10^{43}$ Н. Имеем величины безразмерной силы $\frac{F_{пр}}{F_{pl}} = \frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{(2,17 \cdot 10^{-8})^2} \left(\frac{1,61 \cdot 10^{-35}}{1,5 \cdot 10^{11}}\right)^2 = 2,92 \cdot 10^{-22}$, а также силы притяжения $F_{пр} = \frac{F_{пр}}{F_{pl}} F_{pl} = 2,92 \cdot 10^{-22} \cdot 1,21 \cdot 10^{43} = 3,53 \cdot 10^{22}$ Н.

В записи вида (6) закон всемирного тяготения как бы предлагает учесть возможность рождения материальных частиц сразу же вслед за планковским временем t_{pl} . Полагаем, что по завершению эпохи Планка любая частица создает силу притяжения, которая пропорциональна ее массе, и эта сила спадает обратно пропорционально квадрату расстояния от частицы.

Сегодня предполагается, что галактики образуются из однородного начала в результате крошечных квантовых флуктуаций. Привлекает развитие идеи Ж. Леметра [2, с. 179]: планковский 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». Прежде рассмотрим вопросы роста количества фотонов и барионов во Вселенной.

Реликтовое излучение есть абсолютно черное тело, которое создано самой природой. Из формулы Планка следует, что регистрируемое сегодня реликтовое излучение возникает на планковском масштабе времени, от которого «работает» и известный из курса физики закон Стефана – Больцмана (2). В силу своей высокой информативности комплекс мировых констант $\frac{k_B^4}{c^3 \hbar^3}$ обеспечивает выход на следующую запись известной формулы:



$$\frac{k_B^4}{c^3 h^3} = \frac{U_{pl}}{V_{pl} \cdot T_{pl}^4} = \frac{U_\varepsilon}{V \cdot T^4} = \frac{U_\varepsilon^{(1)} \cdot \mathcal{N}_\varepsilon}{V \cdot T^4}. \quad (7)$$

Физическая постоянная величина $\frac{U_{pl}}{V_{pl} \cdot T_{pl}^4} = \frac{k_B^4}{c^3 h^3}$, сформировавшаяся на планковское время t_{pl} , в дальнейшем сохраняется как закон природы: $\frac{U_\varepsilon}{V \cdot T^4} = \frac{k_B^4}{c^3 h^3}$ вне зависимости от числовых значений физических величин U_ε, V, T . Решим задачу.

Задача 3. Следуя уравнениям (3) и (7), оценить изменчивость количества реликтовых фотонов \mathcal{N}_ε по времени. Принять, что в шарообразной Вселенной температура излучения T и время t отвечают уравнению связи $T = \frac{10^{10}}{t^{1/2}}$ [11], которое равносильно $\frac{T}{T_{pl}} = \left(\frac{t_{pl}}{t}\right)^{1/2}$. В развитие идеи дискретности, для энергии одного фотона $U_\varepsilon^{(1)}$ принять формулу Вайнберга $U_\varepsilon^{(1)} = k_B \cdot T$ [1, с. 81].

Решение. В уравнении (7) выделяем сомножитель $\frac{U_{PL}}{V_{PL}}$, который дает $\frac{U_{\varepsilon PL}}{V_{PL}} = \frac{U_{\varepsilon PL}}{\frac{4\pi}{3} L_{pl}^3} = \frac{U_{\varepsilon PL}}{\frac{4\pi}{3} c^3 \cdot t_{pl}^3}$, а с учетом формулы (3) и $\frac{U_{\varepsilon PL}}{V_{PL}} = \frac{U_{pl}}{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{R}{t}\right)^3 t_{pl}^3}$. Объем Вселенной $V = \frac{4\pi}{3} R^3$. При исключении R^3 из уравнения получаем формулу для количества фотонов $\mathcal{N}_\varepsilon = \left(\frac{t}{t_{pl}}\right)^{3/2}$. Результаты вычисления \mathcal{N}_ε приведены в таблице 1.

Таблица 1

Числовые значения количества фотонов \mathcal{N}_ε

t, c	10^{-44}	10^{-30}	10^{-10}	1	10^2	10^{10}	10^{17}
\mathcal{N}_ε	1	10^{45}	10^{51}	10^{66}	10^{69}	10^{81}	10^{91}

\mathcal{N}_ε не является непрерывной величиной. В таблице 1 приведены результаты приближенной количественной оценки \mathcal{N}_ε с достаточной для наших целей точностью. Виден рост количества фотонов \mathcal{N}_b в постпланковские времена, которому должно быть физическое обоснование. Согласно Гамову, реликтовое излучение есть естественный продукт термоядерных реакций. В цифрах таблицы 1 не учтена изменчивость функции f в уравнении $\frac{T}{T_{pl}} = \frac{1}{f^4} \left(\frac{t_{pl}}{t}\right)^{1/2}$, где f изменяется от $f_{pl} = 1$ до $f_n \approx 10^4$ [8].

Обсуждается [12] вопрос о том, что в наблюдаемой Вселенной такое количество галактик (10^{11}), которое примерно равно количеству звезд в галактике, подобной нашей. При средней массе звезды $M_{зв} = 10^{30}$ кг имеем массу видимых звезд Вселенной порядка $M_{bn} \approx 10^{11} 10^{11} 10^{30} \approx 10^{52}$ кг. Эту величину дают и авторы [3]. Ей отвечает количество современных барионов (протонов, нейтронов) порядка $\mathcal{N}_{bn} \approx \frac{M_{bn}}{m_{bn}^{(1)}} \approx \frac{10^{52}}{10^{-27}} \approx 10^{79}$. Очевидно, что протоны и нейтроны (строительный материал звезд) отсутствовали в мире глубинного космологического прошлого.

Выделяя «космологическое число» Эддингтона $\mathcal{N}_b = \left(\frac{\hbar \cdot c}{G \cdot m_b^2}\right)^2 \approx 10^{80}$ (m_b – масса бариона), Г. – Ю. Тредер [14, с. 307] задается вопросом: можно ли полагать $\approx 10^{80}$ чисто случайной постоянной интегрирования? Здесь поиск ответа дает результат: с учетом объективного содержания связей (4) речь следует вести о космологической функции Эддингтона

$$\mathcal{N}_b = \left(\frac{\hbar \cdot c}{G \cdot m_b^2}\right)^2 = \left(\frac{m_{pl}}{m_b}\right)^4, \quad (8)$$

где физическая переменная m_b прерывисто понижается от фиксированной планковской массы Планка m_{pl} до современного числового значения величины m_{bk} . Результаты оценки – в согласии с (8) – числа барионов \mathcal{N}_{bi} и массы $M_{bi} = \mathcal{N}_{bi} \cdot m_{bi}$ барионной составляющей материи Вселенной приведены в таблице 2. Числовые значения m_{b1}, m_{b2} и m_{b3} приняты произвольно.



Таблица 2

Числовые значения величин $t, m_{bi}, \mathcal{N}_{bi}$ и M_{bi}

i	pl	1	2	3	к
t_i, c	10^{-44}	$10^{-30} \dots - 10^{-10}$	$10^{-15} \dots 1$	$10^{-5} \dots 10$	$5 \dots 100$
$m_{bi}, кг$	10^{-8}	10^{-14}	10^{-18}	10^{-23}	10^{-27}
\mathcal{N}_{bi}	1	10^{24}	10^{40}	10^{60}	10^{76}
$M_{bi}, кг$	10^{-8}	10^{10}	10^{22}	10^{37}	10^{49}

Данные таблицы 2 отвечают горячей модели Вселенной [5] для весьма ранних моментов и высоких температур. Принято, что был период (когда $T_{pl} > T \geq 10^9$ град), по окончании которого возникли современные барионы ($m_{bk} \approx 10^{-27}$ кг). Наполняя нарастающий объем пространства, частицы при рождении из разных мест разлетаются в разные стороны. Рождение частиц есть движение, которое сопряжено с высвобождением энергии той космической среды, в которую и сегодня расширяется Вселенная. И с этой точки зрения протоны и нейтроны есть природный продукт. Таблица 2 иллюстрирует прерывность роста массива и массы строительного материала звезд по мере скачкообразного и дискретного понижения массы m_b нестабильных барионов в естественном каскаде ранних термоядерных реакций.

В ранние времена объем расширяющейся Вселенной заселяется и барионами. Времена жизни нестабильных барионов достаточны для их свободного пробега от мест появления до мест распада с рождением новых частиц, во Вселенной царит хаос. Гравитация по Ньютону стремится придать нарастающему по массе массиву элементарных частиц сферическую форму, а гравитационная неустойчивость массива барионов обеспечивает формирование вращающихся родительских тел (по числу сегодняшних звезд во Вселенной). Родительские тела разнообразны по массе и размерам; они, как рой пчел, совместно с реликтовыми фотонами удаляются от мест своего рождения. Возможно, с момента образования протонов, нейтронов и электронов родительские тела имеют торообразную форму. Как показано в таблице 1, фотоны заселяют Вселенную постоянно, термоядерные реакции не затухают. Как реликт, эти реакции и сегодня продолжаются [9] в недрах звезд.

Для каждой из частиц родительских тел и на каждое из мгновений времени момент количества движения $\vec{L}_0 = \vec{r} \times m\vec{V}$ есть величина неизменная; оси вращения родительских тел сохраняет свою ориентацию в пространстве [7 и др.]. Порой, в силу термоядерной активности, отдельные сгустки вещества выходят за пределы родительских тел. Новые тела покидают родительское тело лишь время от времени (и, возможно, не только с выходом на эллиптические орбиты). Излучение фотонов происходит и после того, как смыкаются материальные частицы на внутреннем диаметре торообразных родительских тел, после чего они принимают шарообразную форму звезд.

Взаимодействие родительского тела с окружающей его космической средой отвечает закону сохранения энергии: $dE = dU + pdW$ (E – энергия, уходящая от родительского тела, U – внутренняя энергия, p – давление, W – объем). При становлении звездно – планетных систем при $dW = 0$ ядерные силы за пределы родительского тела в просторы космоса время от времени отводят новые тела. Планеты формируются на орбитах, в движении, на удалениях r от осей вращения родительских тел.

Масса родительского тела M_Σ при становлении Солнечной системы остается практически неизменной. Выделим на периферии родительского тела, на удалении r от оси вращения материальную частицу массы m . Поскольку действующая на частицу центробежная сила $F_{цб}$ не уравновешивает ньютонову силу притяжения $F_{пр}$, частица движется к оси вращения по спирали с постоянно возрастающим центростремительным ускорением [7]:

$$\frac{dV_r}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2} = \frac{G \cdot M_\Sigma}{r^2} - \frac{V_t^2}{r} \quad (9)$$

M_Σ – масса родительского тела (учтена равнодействующая ньютоновых сил $F = F_{пр} - F_{цб}$); $V = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} \ll c$.



Плоскость орбитального движения новых тел перпендикулярна оси вращения родительского тела. Это упрощает решение задачи по количественной оценке изменчивости скорости V_r . Пусть точка движется по радиусу r со скоростью V_r и за время dt проходит путь $dr = V_r dt$. Помножив левую и правую части (9) на dr , получаем уравнение $V_r dV_r = \frac{G \cdot M_\Sigma \cdot dr}{r^2} - \frac{V_r^2 \cdot dr}{r}$. Интегрируя от состояния 1 до состояния 2, выходим на формулу для радиальной скорости V_{r2} [7]:

$$V_{r2} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_\Sigma}{r_2} \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (10)$$

Для оценки времени Δt_{12} прохождения этапа пути протяженностью $r_1 - r_2$ используем формулу $\Delta t_{12} = \frac{r_1 - r_2}{V_{r2}}$. Принимаем r_1 и r_2 соответственно равными средним удалением планет от оси вращения Солнца R_1 и R_2 (здесь $R_2 < R_1$), которые берем из протокола астрономических измерений [16, 17]. Поскольку подавляющая часть массы формирующейся Солнечной системы содержится в родительском теле, величину $G \cdot M_\Sigma$ принимаем неизменной и равной $G \cdot M_\Sigma = 1,327 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2$. Результаты расчета показаны в таблице 3. Здесь же приведены средние орбитальные скорости движения планет V_{cp} [17].

Таблица 3

Числовые значения величин R , V_{r2} , Δt_{12} и V_{cp}

Под планету	$R, 10^{12}, \text{ м}$	$V_{r2}, \text{ км/с}$	$\Delta t_{12}, 10^7, \text{ с}$	$V_{cp}, \text{ км/с}$
Нептун	4,503	2,64	52,9	5,40
Уран	2,876	4,83	33,8	6,80
Сатурн	1,429	6,83	21,2	9,60
Юпитер	0,816	6,97	8,80	13,0
Марс	0,228	14,0	2,87	24,0
Земля	0,1496	17,46	0,45	30,0
Венера	0,1082	18,33	0,22	35,0
Меркурий	0,058	32,58	0,15	48,0

По мере движения родительского тела, с понижением его наружного диаметра величины скоростей V_{r2} и V_{cp} синхронно возрастают. На каждом из удалений r от оси вращения родительского тела (сегодня это ось вращения Солнца) новым телам сообщается скорость $V_{\tau\tau}$. Ее особенности: $V_{\tau\tau} > V_\tau$, средняя величина $V_{\tau\tau}$ вычисляется по формуле (5), величины $V_{\tau\tau}$ обеспечивают движение новых тел по эллиптическим траекториям. Интервал времени Σt_{12} порядка 37 земных лет – не более как мгновение на пути изучаемой системы к ее современному состоянию. Примечательно, планеты движутся по близким к круговым траекториям, которые лежат почти в одной и той же плоскости [11, 17].

Родительские тела обладают достаточным количеством энергии для того, чтобы, как отмечают авторы [13, с. 258], преодолевая кулоновские силы отталкивания, сблизить легкие ядра на расстояния, когда силы ядерного притяжения смогут привести к синтезу. Термоядерному синтезу ядер способствует уменьшение диаметров D и d вращающегося торообразного родительского тела, что сопряжено с повышением объемной концентрацией ядер $n = \frac{M_{bj}}{V \cdot m_{bk}}$. По мере приближения к оси вращения родительского тела ядра всё в больше мере сближаются друг с другом.

Новой в приведенном выше аналитическом описании является формула (8).

Выводы: Не исключено, что основной источник пополнения численности группировки реликтовых фотонов во Вселенной - термоядерные реакции в недрах звезд. От планковских масштабов величина количества фотонов на один барион - сложная функция космологического времени $\frac{N_\varepsilon}{N_b} = f(t)$. Появлению вращающихся звезд, скорее всего, предшествует движение их торообразных родительских тел.



Список литературы:

1. Вайнберг С. Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной / пер. с англ. М.: Энергоиздат. 1981. - 208 с.
2. Дирак П. Космология и гравитационная постоянная // П. Дирак. Воспоминания о необычной эпохе: сб. статей / пер. с англ. М.: Наука. 1990. С. 178 – 188.
3. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Издательство Моск. ун – та. 1988. - 199 с.
4. Дряунов Л.А. Законы природы и их познание. М. Просвещение. 1982. – 112 с.
5. Зельдович Я.Б. «Горячая» модель Вселенной // Я.Б. Зельдович. Избранные труды. Частицы. Ядра. Вселенная. М.: Наука. 1985. С.237 – 244.
6. Клайн М. Математика. Поиск истины / пер. с англ. М.: Мир. 1988. - 295 с.
7. Кошман В.С. О шарообразности Вселенной и о становлении звезд и звездно – планетных систем // Вектор научной мысли. 2024. № 12. С. 301 – 305.
8. Кошман В.С. Алгоритм и результат поиска уравнений эволюции нашей Вселенной // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 86. Ч. 8. С. 113 - 119.
9. Кошман В.С. Расширение возможностей прогноза радиуса и температуры в центрах звезд главной последовательности // Sciences of Europe. 2022. № 88 – 1. С. 29 – 32.
10. Новиков И.Д. Инфляционная модель ранней Вселенной // Вестник Российской академии наук. 2001. Т. 71. № 10. С. 886 – 895.
11. Розен В.В. Концепции современного естествознания: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань». 2022. - 480 с.
12. Саншез Ф., Артун О. Тайна больших космических чисел // CONCORDE. 2015. № 3. С. 32 – 99.
13. Типлер П.А., Ллуэллин Р.А. Современная физика. В 2 – х т. Т. 2. М.: Мир. 2007. – 216 с.
14. Тредер Г. – Ю. Взгляды Гельмгольца, Планка и Эйнштейна на единую физическую теорию // Проблемы физики: классика и современность / пер. с нем. и англ. М.: Мир. 1982. С. 295 – 314.
15. Цвибах Б. Начальный курс теории струн / пер. с англ. М.: Едиториал УРСС. 2011. - 784 с.
16. На каком расстоянии находятся планеты Солнечной системы от Солнца? [Электронный ресурс]. URL: <https://sunplanets.info/solnechnaya-sistema /rasstoyanie> (дата доступа 23.03.2023).
17. Планеты. Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/3143354> (дата доступа 20.01.2025).

