

РОЛЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ В ЕСТЕСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ ЕДИНИЦ

Жамбайбеков К.Ж.¹, Ярулин Д.С.² Email: Zhambaybekov663@scientifictext.ru

¹Жамбайбеков Кален Жамбайбекович - кандидат физико-математических наук;

²Ярулин Дидар Серикович - магистрант,
кафедра общей и теоретической физики, физико-технический факультет,
Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
г. Астана, Республика Казахстан

Аннотация: в данной статье рассматривается роль фундаментальных постоянных в естественных системах единиц. Проанализированы фундаментальные постоянные, лежащие в основе естественных систем единиц, их физические значения. Сделан обзор истории появления естественных систем единиц, а также классификации и роли естественных систем единиц, преимущественно в эволюции вселенной и квантовой механике. Выявлены характерные особенности планковских единиц в физической картине мира и их колоссальное значение для теоретической физики в качестве пределов применимости для квантовой теории поля, общей теории относительности и релятивистской теории гравитации.

Ключевые слова: фундаментальные постоянные, естественные системы единиц, планковские величины, планковская система единиц, система Хартри, релятивистская система единиц.

THE ROLE OF FUNDAMENTAL CONSTANTS IN NATURAL SYSTEMS OF UNITS

Zhambaybekov K.Zh.¹, Yarulin D.S.²

¹Zhambaybekov Kalen Zhambaybekovich - PhD of Physico-mathematical Sciences;

²Yarulin Didar Serikovich - Graduate,
DEPARTMENT OF GENERAL AND THEORETICAL PHYSICS, PHYSICS AND TECHNOLOGY FACULTY,
EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY NAMED AFTER L.N. GUMILEV,
ASTANA, REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Abstract: this article discusses the role of the fundamental constants in natural systems of units. The fundamental constants underlying the natural systems of units, their physical values are analyzed. A review is made of the history of the emergence of natural systems of units, as well as the classification and role of natural systems of units, mainly in the evolution of the universe and quantum mechanics. The characteristic features of the Planck units in the physical picture of the world and their colossal significance for theoretical physics as limits of applicability for quantum field theory, the general theory of relativity and the relativistic theory of gravity are revealed.

Keywords: fundamental constants, natural systems of units, Planck values, Planck system of units, Hartree system, relativistic system of units.

УДК 530.1

Фундаментальные постоянные – одни из основных компонентов нынешней физической картины мира. Развитие данного определения непосредственно связано с эволюцией физики и отображает единые закономерности формирования физического знания. В традиционной физике физические постоянные возникли в связи с установлением особых характеристик материальных объектов (плотности, скорости звука, света и т.д.) не играли в структуре физической концепции такой фундаментальной значимости, какую они получили в двадцатом веке. Вследствие научной революции конца XIX – начала XX вв. физическая концепция вышла на качественно другой уровень собственного формирования, поменялось представление физической реальности, а такие ФП, как постоянная Планка и скорость света, получили фундаментальный статус. Последующее становление физики кроме того отображает формирование концепции фундаментальных постоянных, особенно в связи с открытием макроскопических квантовых эффектов, что привело к революции в метрологии и её переходу в квантовую метрологию. По этой причине важной считается историческая реконструкция появления и формирования концепции фундаментальных постоянных.

Фундаментальные постоянные - неизменные величины, входящие в уравнения, описывающие фундаментальные законы естества и характеристики материи. Фундаментальные физические постоянные образуются в теоретических моделях наблюдаемых явлений в облике универсальных коэффициентов в соответствующих математических выражениях.

Фундаментальными постоянными, которые рассматриваются в данной работе, являются:

Постоянная Дирака - это постоянная Планка, которую разделили на 2π .

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi} = 1.054571800(13) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Данная константа является связующей между величинами квантовой и классической физики. То есть способна произвести перевод из единиц одной системы измерения в единицы другой системы измерения. К примеру, перевести классическую энергию в частоту, используемую в качестве ее аналога в квантовой механике. Приблизительно равно $1 \cdot 10^{34}$ Дж·с.

Скорость света - это абсолютная величина, которая характеризует скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$$

Самым первым дал оценку скорости света Олаф Рёмер в 1676. Олаф Рёмер увидел, то что, если Земля и Юпитер пребывают по различные стороны от Солнца, затмения спутника Юпитера Ио опаздывают согласно сопоставлению с расчётами на 22 минуты. Отсюда Олаф Рёмер получил значение для скорости света приблизительно 220 000 км/с — неправильное, однако близкое к подлинному. В 1676 г. он делал сообщение в Академии, однако никак не издал собственные результаты в варианте формальной академической работы, в следствии этого научное сообщество утвердило идею о конечной скорости света только лишь в 1727 г.

Спустя пятьдесят лет, в 1728 г., обнаружение аберрации позволило Дж. Брэдли удостоверить конечность скорости света и более точно определить ее оценку: установленное Брэдли значение равняется 308 000 км/с

Гравитационная постоянная - это коэффициент пропорциональности из Ньютоновского закона всемирного тяготения, который определяет силу гравитационного взаимодействия двух массивных объектов на определенном расстоянии.

$$G = 6,67428(67) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$$

Постоянная Планка

В вечернее время 7 октября 1900 г. Макс Планку выдалось разобраться, каким способом нагретые тела способны излучать энергию. Оставшуюся половину XIX столетия точные отношения между распространением световых волн, излучаемых нагретыми телами, и их температурой были одной из ключевых тайн физики.

Каждое нагретое тело излучает свет, при этом с повышением температуры характер данного света меняется. Мы знакомы с различным диапазоном света, соответствующим цветам радуги, однако свет способен содержать и подобную длину волны, что окажется очень короткой либо очень длинной согласно сопоставлению с видимым людским глазом диапазоном.

Свет с огромной длиной волны именуется «инфракрасным», его можно наблюдать при помощи приборов ночного видения. Ещё наиболее длинные — радиоволны. Наиболее короткие, нежели видимый диапазон, световые волны именуются ультрафиолетовыми, а волны наиболее короткой длины принадлежат к гамма-излучению.

Неосвещенный кусочек угля при комнатной температуре излучает инфракрасное излучение. Однако в случае если кинуть его в костерок, он станет сиять красным цветом. Проблема в том, что при увеличении температуры угля средняя длина волны излучения снижается, со временем доходя вплоть до значения, улавливаемого человеческим глазом. Чем интенсивнее нагрето тело, тем короче длина волны, какую оно излучает.

В XIX столетии, когда точность эмпирических измерений значительно увеличилась, стало понятно, что точной математической формулы для обрисовки данного наблюдения никак не имеется. Данную ситуацию зачастую именуют «проблемой излучения черного тела», вследствие того что физики именуют идеализированные объекты, которые целиком поглощают излучение и далее переизлучают его (осуществляют реэмиссию), «черными телами». Данная проблема была весьма значительной, вследствие того что демонстрировала неумение физиков осмыслить характер света, излучаемого абсолютно всеми в мире объектами.

Планк обдумывал данный и сопредельные вопросы термодинамики и электромагнетизма немало лет, прежде нежели был назначен профессором теоретической физики в Берлине. Первоначально должность предполагалась Больцману и Герцу, однако тот и другой отвергли предложение. Это стало внезапным везением, вследствие того что Берлин был средоточием эмпирических изысканий излучения черного тела, а углубление Планка в сердце эмпирической работы стало важнейшим для его дальнейших теоретических свершений. Физики зачастую трудятся гораздо лучше, когда имеют шанс осуществлять незапланированные беседы с коллегами по самому широкому диапазону проблем.

Мы знаем дату и момент откровения, явившегося Планку, вследствие того что он с семьей коротал воскресный день 7 октября 1900 г. совместно с Генрихом Рубенсом. За обедом они обговаривали неприменимость современных им теоретических моделей с целью подробного разъяснения излучения черного тела. К вечеру Планк нацарапал формулу в почтовой открытке и выслал Рубенсу. Формулировка оказалась точной, однако смотрелась и правда весьма удивительно. Планк позже обрисовал собственные действия будто жест отчаяния: он перепробовал все без исключения, то что пришло на ум.

В книге-биографии «Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна» написано:

«Его аргументация была безумной, но безумие это было того божественного сорта, который приносят в науку только величайшие ее представители» [1].

Представление Планка было одновременно новаторским и непонятным. Планк понял, то что способен объяснить излучение черного тела, только лишь в случае если предположить, то что энергия излучения складывается из огромного числа небольших «пакетов» энергии. Другими словами, совокупная энергия квантуется в единицах новейшей фундаментальной константы природы, которую Планк прозвал квантом действия. На сегодняшний день мы именуем её постоянной Планка. Формула Планка подразумевает, то что свет постоянно излучается и поглощается пакетами, либо квантами. В нынешней записи данные пакеты располагают энергией

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

где λ — длина световой волны (произносится «лямбда»), c — скорость света, а h — постоянная Планка. ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с).

Фундаментальные постоянные и естественные системы единиц

В 1899 г. М. Планк создал естественную систему единиц, основывающуюся на гравитационной постоянной, скорость света а также на постоянных теории теплового излучения a и b . Впервые планковская система единиц была введена в докладе, который был сделан в мае 1899 года на заседании Академии наук в Берлине.

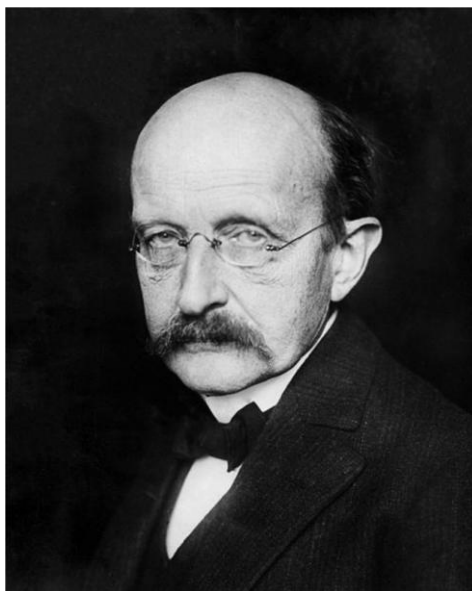


Рис. 1. Макс Планк

Сейчас же под планковскими единицами понимается система величин, где в качестве единиц отобраны данные постоянные:

\hbar — постоянная Дирака

c — скорость света

G — гравитационная постоянная

k — постоянная Больцмана

Так как при построении системы единиц, фундаментальные постоянные принято считать безразмерными, то естественную систему единиц Планка можно охарактеризовать соотношением

$$\hbar = c = G = k = 1.$$

Планковская система единиц представляют собой систему, состоящую из так называемых планковских величин (планковской длины, единицы времени, планковской массы, единицы энергии), которые в свою очередь основываются на скорости света c , постоянной Дирака \hbar , постоянной Больцмана k , а также гравитационной постоянной G . Основные единицы планковской системы представлены в следующем виде:

$$1. \text{Планковская длина} - l_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616229(38) \cdot 10^{-35} \text{ м}$$

$$2. \text{Планковская масса} - m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2.176470(51) \cdot 10^{-8} \text{ кг}$$

$$3. \text{Планковское время} - t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.39116(13) \cdot 10^{-44} \text{ с}$$

$$4. \text{Планковская энергия} - E_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.9561 \cdot 10^9 \text{ Дж}$$

Впервые о планковских единицах стало известно после доклада, сделанного 18 мая 1899 года на заседании Академии наук в Берлине, в последнем параграфе которого Планк предложил так называемую систему "естественных единиц измерения", основанную на выборе четырех фундаментальных физических постоянных - скорости света, гравитационной постоянной и двух новых введенных им постоянных - коэффициентов в законах для энтропии осциллятора и энергии теплового излучения. Планковская система единиц явилась совершенствованием универсальной системы единиц Дж.К. Максвелла, предложенной им в одной из глав «Трактата по электричеству и магнетизму» [1].

«Все до сих пор используемые системы единиц, в том числе так называемая абсолютная СГС-система, обязаны своим происхождением пока что случайному стечению обстоятельств, поскольку выбор единиц, лежащих в основе каждой системы, сделан не исходя из общей точки зрения, обязательно приемлемой для всех мест и времен, но исключительно исходя из потребностей нашей земной культуры... В связи с этим представляло бы интерес заметить, что, используя обе постоянные a и b ... мы получаем возможность установить единицы длины, массы, времени и температуры, которые не зависели бы от выбора каких-либо тел или веществ и обязательно сохраняли бы своё значение для всех времен и для всех культур, в том числе и внеземных и нечеловеческих, и которые поэтому можно было бы ввести в качестве «естественных единиц измерений»» [2].

Помимо планковских времени, длины, энергии и массы, существуют следующие величины:

$$1. \text{Планковская плотность} - \rho_{pl} = \frac{m_{pl}}{l_{pl}^3} = \frac{c^5}{\hbar G^2} \approx 5.1 \cdot 10^{96} \text{ кг/м}^3$$

Является колоссально большой плотностью, приблизительно равной 10^{23} солнечным массам, которые сжаты в объеме одного лишь атомного ядра. Её можно охарактеризовать как предельную плотность материи [3].

Попытки получить такую плотность экспериментальным путем приведут в результате к рождению черной дыры.

$$2. \text{Планковский заряд} - q_{pl} = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \sqrt{2ch\epsilon_0} = \frac{e}{\sqrt{a}} \approx 1.8755459 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$$

Планковский заряд приблизительно равен двенадцати элементарным электрическим зарядам.

$$3. \text{Планковское ускорение} - a_{pl} = \frac{l_{pl}}{t_{pl}^2} = \frac{c}{t_{pl}} \approx 5.1 \cdot 10^{51} \text{ м/с}^2$$

$$4. \text{Планковская температура} - T_{pl} = \frac{E_{pl}}{k} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{k^2 G}} \approx 1.416808(33) \cdot 10^{32} \text{ К}$$

Является пределом температуры в квантовой механике. Из-за отсутствия квантовой теории гравитации, современные физики не могут описать что-нибудь с большей температурой. За пределами планковской температуры энергия частиц приобретает значения, при которых силы гравитации между этими частицами становятся похожи на остальные фундаментальные взаимодействия.

$$5. \text{Планковский ток} - I_{pl} = \frac{q_{pl}}{t_{pl}} = \sqrt{\frac{c^6 4\pi\epsilon_0}{G}} = 2c^3 \sqrt{\frac{\pi\epsilon_0}{G}} \approx 3.489 \cdot 10^{25} \text{ А}$$

Планковский ток — это ток, который переносит за одно планковское время один планковский заряд.

$$6. \text{Планковская сила} - F_{pl} = \frac{m_{pl}c}{t_{pl}} = \frac{c^4}{G} = 1.21027 \cdot 10^{44} \text{ Н}$$

$$7. \text{Планковское давление} - P_{pl} = \frac{F_{pl}}{l_{pl}^2} = \frac{c^7}{\hbar G^2} \approx 4.3309 \cdot 10^{113} \text{ Па}$$

$$8. \text{Планковская угловая частота} - \omega_{pl} = \frac{1}{t_{pl}} = \sqrt{\frac{c^5}{\hbar G}} \approx 1.85487 \cdot 10^{43} \text{ с}^{-1}$$

$$9. \text{Планковская мощность (Планковская светимость)} - L_{pl} = \frac{m_{pl}c^2}{t_{pl}} = \frac{c^5}{G} \approx 3.62831 \cdot 10^{52} \text{ Вт}$$

Планковскую мощность можно охарактеризовать как мощность, необходимую для того чтобы превратить в энергию $2.03 \cdot 10^5$ масс Солнца за одну секунду. Гамма-всплески, которые считались самыми мощными до открытия гравитационных, в своей пиковой светимости 10^{45} Вт не доходят даже до одной миллионной от планковой светимости. Светимость Солнца равна $3.86 \cdot 10^{26}$ Вт, или $1,06 \cdot 10^{-26} L_{pl}$. [4]

$$10. \text{Планковский импульс} - m_{pl}c = \frac{\hbar}{l_{pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}} \approx 6.52485 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Характеризуется импульсом, которым обладает фотон, чья длина волны равна длине Планка. Таким образом, можно сказать, что это верхний предел импульса для безмассовых частиц.

$$11. \text{Планковское напряжение} - V_{pl} = \frac{E_{pl}}{q_{pl}} = \sqrt{\frac{c^4}{G 4\pi\epsilon_0}} \approx 1.04295 \cdot 10^{27} \text{ В}$$

$$12. \text{Планковское сопротивление} - Z_{pl} = \frac{V_{pl}}{I_{pl}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c} = 29.97920 \text{ Ом}$$

Все эти величины основываются на фундаментальных постоянных и, следовательно, сами также остаются постоянными в рамках современной физики.

Измерение планковских величин затруднительно даже теоретическими методами, но, тем не менее, ими постоянно пользуются физики-теоретики в своих математических системах. Это помогает им лучше понять картину мира.

Самыми близкими к привычным масштабам для человека являются планковская масса (масса блохи имеет около 4000 планковских масс), а также планковский импульс, планковская энергия и планковское сопротивление.

Интересен тот факт, что первоначальная эпоха развития вселенной имеет название планковской, а время, на протяжении которого она длилась считается планковским временем - от 0 до 10^{-43} секунд. Кроме этого вещество вселенной в момент зарождения можно охарактеризовать планковскими энергией, плотностью, температурой и радиусом. Так как вселенная была чрезвычайно мала, квантовые эффекты стали преобладать над физическими взаимодействиями, а колоссальные значения плотности и температуры сделали вещество неустойчивым. В результате симметрия была нарушена и это привело к проявлению фундаментальных сил. Таким образом, гравитационное воздействие отделилось от остальных фундаментальных воздействий.

Для физических измерений и расчетов планковские величины не имеют существенного значения, но они, как оказалось, имеют колоссальное значение для теоретической физики в качестве пределов применимости для квантовой теории поля, общей теории относительности и релятивистской теории гравитации. Другими словами, то что находится за границами планковских величин нам неизвестно. К примеру, планковская длина характеризует наименьший предел расстояния за пределами которого привычные определения длины и пространства прекращают свое существование. Попытки изучить более короткие расстояния с помощью столкновения при более высоких энергиях стали бы рождением черной дыры. То же самое можно сказать и о планковском времени, так как по сей день самым маленьким наблюдаемым промежутком времени является время, которое составляет 10^{26} планковских времен.

Помимо наиболее известной системы единиц Планка также можно услышать о **системе Хартри**, именуемой системой атомных единиц, что характеризуется соотношением

$$e = m_e = \hbar = 1;$$

Хартри создал «систему атомных единиц», где за основу приняты заряд электрона, масса электрона, радиус первой боровской орбиты атома водорода, а также постоянная Планка. В данной системе единиц уравнения ядерной физики освобождаются от лишних числовых множителей и становятся более простыми для восприятия.

Также стоит упомянуть и о **релятивистской системе единиц**, которая используется в квантовой электродинамике и характеризуется соотношением

$$c = m_e = \hbar = 1.$$

В ее основе лежат постоянная Планка, скорость света и масса электрона либо протона, а также принимают постоянную Больцмана.

Простота данных естественных систем единиц заключается в том, что характеристики атомных объектов в данных системах по размеру не сильно отличаются от единицы, и в то же время основные уравнения теории приобретают более простой вид.

Производные величины в естественных системах единиц являются комбинациями из основных величин. Оказывается, что с заданной размерностью из основных величин мы можем получить лишь одну комбинацию, что образует производную величину с заданной размерностью.

Предлагались и другие «естественные системы единиц», но ни одна из них не получила широкого распространения. Главная причина состоит в том, что точность измерений предлагаемых постоянных не обеспечивает необходимого уровня точности установления ряда основных и производных единиц.

Список литературы / References

1. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М., 1989.
2. *Томилин К. А.* Планковские величины // 100 лет квантовой теории. История. Физика. Философия: Труды международной конференции. М.: НИИ-Природа, 2002. С. 1.
3. *Планк М.* Избранные труды. М.: Наука, 1975. С. 232.
4. *Томилин К.А.* Планковские величины // 100 лет квантовой теории. История. Физика. Философия: Труды международной конференции. М.: НИИ-Природа, 2002. С. 11.
5. *Черепашук А.М.* Светимость // Физика космоса: Маленькая энциклопедия / Редкол.: Р.А. Сюняев (гл. ред.) и др. 2-е изд. М. Советская энциклопедия, 1986. С. 607—608.