

Исторические аспекты современной реформы метрологии

К. А. Томилин
(ИИЕТ РАН)

Всероссийское совещание по прецизионной физике
и фундаментальным физическим константам

Дубна, 2011

Появление фундаментальных постоянных

c (Г.Галилей, О.Рёмер, Дж.Брадлей,
Дж.К.Максвелл, А.Эйнштейн, Г.Минковский)

G ($\leq$ С.Д.Пуассон, 1811)

e ($\leq$ Дж.К.Максвелл, 1873; Дж.Стони, 1874/1881)

h (М.Планк, 1899/1900)

k_B (М.Планк, 1900)

k_e ($\leq$ Дж.К.Максвелл, 1873)

m_e (Дж.Дж.Томсон, 1897)

G_F (Э.Ферми, g (совр. G_F), 1934;
Р.Фейнман и М.Гелл-Манн,
Э.Сударшан и Р.Маршак,
Дж.Сакураи G (совр. G_F), 1957)

.

Poisson S.D., 1811, t.2, p.16:

de l'autre, égale à l'unité linéaire; soit f la force attractive de l'un de ces deux corps sur l'autre, c'est-à-dire le rapport numérique de son intensité à celle de la force prise pour unité; soient aussi M et m , les masses du soleil et de la planète, et r , leur distance mutuelle: la force motrice de la planète sera exprimée par Mmf , à l'unité de distance, et elle deviendra $\frac{Mmf}{r^2}$, à la distance quelconque r . La grandeur de la quantité que nous désignons par f , dépend du pouvoir attractif dont la matière a été douée; ce pouvoir est le même, à égalité de masse et de distance, pour tous les corps de la nature; rien, jusqu'à

Maxwell J.C., 1873, vol.1, p.42:

Variation of the Force with the Distance.

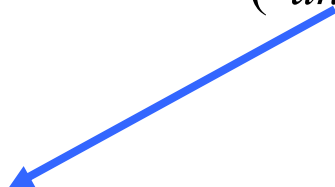
40.] Having established the law of force at a fixed distance, we may measure the force between bodies charged in a constant manner and placed at different distances. It is found by direct measurement that the force, whether of attraction or repulsion, varies inversely as the square of the distance, so that if f is the repulsion between two units at unit distance, the repulsion at distance r will be $f r^{-2}$, and the general expression for the repulsion between e units and e' units at distance r will be

$$f e e' r^{-2}.$$

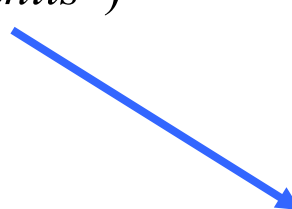
.....

Gauss C. (1830th)

Maxwell J.C. (1870, 1873)
(*"universal units"*)



гравитационные



атомные

Stoney J. (c, G, e)
(1874/1881)
 $M_{st} = \sqrt{\alpha} M_{pl}$

(c, m_e, e) **Fleming J. ?**
< **Born M.** (1935)

Hartree D. ($\hbar, m_e, e$)
(1927)

Planck M. (a, b, c, f) 1899
(c, f, h, k) 1906
переоткрытие: 1950th
($c, G, \hbar, k$) – соврем.
 $M_{pl} = 1,2209(1) \times 10^{19} \text{ GeV}$

Ruark A. ($c, \hbar, m_e$)
(1931)

Stille U. (c, h, m_p, e, k, μ_K)
(1949)

J. Stoney (1874/1881)



THE

LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN

PHILOSOPHICAL MAGAZINE

AND

JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1881.

Stoney G.J. On the physical units of Nature // *Phil Mag*, 11, 381-390 (Apr. 1881).

В сноске указано, что доклад был прочитан на заседании Британской Ассоциации в Белфасте в 1874 г.

we obtain the following actual values for these units of Nature:—

$$L_1 = \frac{1}{XXXVII} \text{ of a metre; } \dots (13)$$

$$T_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{XLV} \text{ of a second; } \dots (14)$$

$$M_1 = \frac{1}{VII} \text{ of a gramme. } \dots (15)$$

Or, in other words—

The natural unit of length approaches in value to the thirty-seventh metre (*i. e.* the metre divided by 10^{37}).

The natural unit of time approaches in value to one third of the forty-fifth second (*i. e.* one third of the second of time divided by 10^{45}); and

The natural unit of mass approaches to the seventh gramme (*i. e.* the gramme divided by 10^7).

13. This appears the best attempt we can yet make to determine these remarkable units. In the series to which they belong all the electrostatic units will be identical with the corresponding electromagnetic units, all the forces of Nature that are known to obey the law of the inverse square, whether they arise from gravitation, electricity, or magnetism, will be expressed without coefficients, and the chemical bond, which seems to be the unit of concrete Nature, is brought into its proper relation to physics.

$$\ell_{st} = \sqrt{\alpha} \times \ell_{pl}; \quad t_{st} = \frac{\ell_{st}}{c} = \sqrt{\alpha} \times t_{pl};$$

$$m_{st} = \sqrt{\alpha} \times m_{pl}$$

SITZUNGSBERICHTE

DER

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

ZU BERLIN.

18. Mai. Gesamtsitzung.

Vorsitzender Secretar: Hr. DIELS.

1. Hr. PLANCK überreicht die fünfte und letzte Mittheilung »über irreversible Strahlungsvorgänge«.

Nach Einführung des Begriffs der natürlichen Strahlung wird das Princip der Vermehrung der Entropie für elektromagnetische Strahlungsvorgänge abgeleitet. Die Identificirung der elektromagnetischen mit der CLAUSIUS'schen thermodynamischen Entropie ergibt sodann eine elektromagnetische Definition der Temperatur, sowie das Gesetz der Energievertheilung im stationären Strahlungszustand, welches sich als identisch mit dem schon früher von W. WIEN aufgestellten Gesetz erweist.

Соотношения между планковскими постоянными:

$$a = (5/\beta)h/k = 1,007 h/k,$$

$$b = \varepsilon(5/\beta)^4 h = 1,113 h$$

$$b/a = \varepsilon(5/\beta)^3 k = 1,105 k$$

где $\varepsilon = \frac{\pi^4}{90} = 1,0823$, $\beta = 4,9651 \dots$ – корень

трансцендентного уравнения $e^{-x} + x/5 - 1 = 0$,

437

1899.

XXV.

480

Gesamtsitzung vom 18. Mai.

aussermenschliche Culturen nothwendig behalten und welche daher als »natürliche Maasseinheiten« bezeichnet werden können.

Die Mittel zur Festsetzung der vier Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur werden gegeben durch die beiden erwähnten Constanten a und b , ferner durch die Grösse der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit c im Vacuum und durch die der Gravitationsconstante f . Bezogen auf Centimeter, Gramm, Secunde und Celsiusgrad sind die Zahlenwerthe dieser vier Constanten die folgenden:

$$a = 0.4818 \cdot 10^{-10} [\text{sec} \times \text{Celsiusgrad}]$$

$$b = 6.885 \cdot 10^{-27} \left[\frac{\text{cm}^2 \text{gr}}{\text{sec}} \right]$$

$$c = 3.00 \cdot 10^{10} \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right]$$

$$f = 6.685 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{gr. sec}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Wählt man nun die »natürlichen Einheiten« so, dass in dem neuen Maasssystem jede der vorstehenden vier Constanten den Werth 1 annimmt, so erhält man als Einheit der Länge die Grösse:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 4.13 \cdot 10^{-33} \text{ cm},$$

als Einheit der Masse:

$$\sqrt{\frac{bc}{f}} = 5.56 \cdot 10^{-5} \text{ gr.}$$

als Einheit der Zeit:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 1.38 \cdot 10^{-13} \text{ sec},$$

als Einheit der Temperatur:

$$a \sqrt{\frac{c^5}{bf}} = 3.50 \cdot 10^{32} \text{ } ^\circ \text{Cels.}$$

Diese Grössen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.

Параграф в книге «Теория теплового излучения»

Die Mittel zur Festsetzung der vier Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur werden gegeben durch die beiden erwähnten Konstanten h und k , ferner durch die Größe der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit c im Vakuum und durch die der Gravitationskonstante f . Bezogen auf Zentimeter, Gramm, Sekunde und Celsiusgrad sind die Zahlenwerte dieser vier Konstanten die folgenden:

$$h = 6,415 \cdot 10^{-27} \frac{\text{g cm}^2}{\text{sec}},$$

$$k = 1,34 \cdot 10^{-16} \frac{\text{g cm}^2}{\text{sec}^2 \text{ grad}},$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}},$$

$$f = 6,685 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{g sec}^2}.$$

Wählt man nun die „natürlichen Einheiten“ so, daß im neuen Maßsystem jede der vorstehenden vier Konstanten den Wert 1 annimmt, so erhält man als Einheit der Länge die Größe:

$$\sqrt{\frac{f h}{c^3}} = 3,99 \cdot 10^{-33} \text{ cm},$$

als Einheit der Masse:

$$\sqrt{\frac{c h}{f}} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ g},$$

als Einheit der Zeit:

$$\sqrt{\frac{f h}{c^5}} = 1,33 \cdot 10^{-43} \text{ sec},$$

als Einheit der Temperatur:

$$\frac{1}{k} \sqrt{\frac{c^5 h}{f}} = 3,60 \cdot 10^{32} \text{ grad}.$$

Diese Größen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vakuum und die beiden Hauptsätze der Thermodynamik in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.

Современная планковская система:

$$\ell_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{G h}{c^3}} = 1,61624(12) \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

$$t_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{G h}{c^5}} = 5,39121(40) \cdot 10^{-44} \text{ с}$$

$$m_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,17645(16) \cdot 10^{-5} \text{ г}$$

$$T_{\text{пл}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,41679(11) \cdot 10^{32} \text{ °K}$$

Предлагались все 4 варианта:

Системы Хартри (h, e),

Руарка (c, h),

электронная (c, e)

Штилле (c, h, e)

единица массы – масса частиц

Система Штилле была с избыточным числом основных единиц (6), вероятно поэтому она была забыта, но это была первая система, в которой все эти три постоянные выбирались в качестве эталонов одновременно.

Перспективная система единиц для квантовой метрологии (переход к 2013 г.):
($v, c, \hbar, e, k, N_A$)

einheit hinzuzufügen. Ein solches System von 6 natürlichen Grundeinheiten läßt sich beispielsweise aus den 6 Konstanten c_0 , Protonenmasse m_p , $\hbar$, Elektronenladung e , Kernmagneton μ_K und k in einfacher Weise herleiten. Wir wollen zu diesem Zweck hier einmal als Elementarlänge die Compton-Wellenlänge des Protons ($\approx$ Reichweite der Kernkräfte⁵⁾), als Elementarmasse die Protonenmasse, als Elementarzeit die reziproke Compton-Frequenz des Protons, als Elementarladung die Ladung des Protons, als elementare magnetische Polstärke diejenige Polstärke, welche, mit entgegengesetzten Vorzeichen im Abstand der Elementarlänge angeordnet, ein Dipolmoment vom 2π -fachen Betrag des Kernmagnetons μ_K ergibt, und als Elementartemperatur diejenige Temperatur ϑ , deren energetisches Äquivalent $k\vartheta$ gleich der Ruhenergie des Protons ist, annehmen:]

$$l = \frac{\hbar}{m_p c_0} \quad (1)$$

$$m = m_p \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\hbar}{m_p c_0^2} = \frac{l}{c_0} \quad (3)$$

$$e = e \quad (4)$$

$$p = 2\pi \frac{\mu_K}{l} = \mu_K \frac{m_p c_0}{\hbar} \quad (5)$$

$$\vartheta = \frac{m_p c_0^2}{k} = \frac{\hbar/\tau}{k} \quad (6)$$

($\hbar = h/2\pi$: Einheit des quantenmechanischen Drehimpulses).

Общий «тренд» развития квантовой метрологии – переход от выбора констант взаимодействий $k_j=1$ к выбору в качестве эталонов констант c_i , которые являются естественными единицами соответствующих физических величин:

$$\begin{array}{c} (c_i; k_j=1) \\ \downarrow \\ (c_i=1; k_j) \end{array}$$

Подробнее об истории ФФП:

Tomilin K.A. Natural systems of units // Proc. of the XXII Internat. Workshop on high energy physics and field theory (Protvino, 23-25 June 1999). Protvino, 2000, c.287-296.
<http://dbserv.ihep.su/~pubs/tconf99/ps/tomil.pdf>

Томили́н К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. М.: Физматлит, 2006, 368 с.

<http://www.ihst.ru/personal/tomilin/book/>
(djvu)

Система одиниц $c=1$, $\hbar=1$, $e=1$ –
принципiально неможна -
утверждали:

Bridgman P.W. ≤ 1931

Bridgman P. Dimensional analysis,
1931.

Hartree D. 1957

Hartree D.R. The calculation of
Atomic Structures. New York:
Wiley & Sons. 1957.

Wesson P.S., 1984

Wesson P.S. Dimensional
fundamental constants and their
application in astronomy // Space
Sci R, vol. 39, № 1-2, p.161 (1984).

Wilczek F., 2006

Wilczek F. On Absolute Units //
Physics Today, Jan. 2006.

The moral is that it is not safe to try for a set of absolute units in terms of any particular group of constants until one is assured that the choice is possible. For instance, one set that might seem quite fundamental turns out to be impossible. It is not possible so to choose the magnitudes of the units that the velocity of light, the quantum, the charge on the electron, and the gas constant all have the value unity.

Bridgman P.

The
choice c , $\hbar$, e fails to generate three independent units, because there is a purely numerical relationship among those parameters. Specifically, we have $e^2/\hbar c = .092$

Wilczek F.

От попыток редукции h и e к фундаментальному статусу

Дискуссия на тему редукции одной из этих постоянных на I Сольвеевском конгрессе (1911)

$$(e, c) \rightarrow \hbar$$

А.Эйнштейн, Дж.Джинс, Г.Лоренц, П.А.М.Дирак и др. выдвигали предположение о возможной редукции постоянной Планка к элементарному заряду и скорости света.

Эйнштейн приводит соотношение $h = \frac{e^2}{c}$ "Здесь не хватает целых трех порядков. Это, конечно, можно отнести на счет неизвестных безразмерных множителей. Самое важное в этом выводе заключается в том, что он сводит квантовую постоянную h к элементарному кванту электричества e " (1909)

П.А.М.Дирак – эстетический критерий против h и принципа неопределенностей
"В физике будущего, конечно, не все три величины $\hbar$, e и c будут фундаментальными. Из этих величин лишь две могут быть фундаментальными, а третья должна выводиться из этих двух". "Соотношение неопределенностей утратит свою фундаментальную роль, поскольку в теории сама величина $\hbar$ перестанет быть фундаментальной постоянной. Поэтому, можно без риска предсказать, что соотношение неопределенностей в его современном виде "не выживет" в физике будущего". (1963)

$$(\hbar, c) \rightarrow e$$

М.Планк, А.Зоммерфельд, М.Борн, М.П.Бронштейн, В.Паули и др. допускали, наоборот, возможность редукции элементарного заряда к постоянной Планка и скорости света.

Физика ЭЧ: все три постоянные $\hbar$, c , e – фундаментальны!

Г.Вейль, В.Гейзенберг

"Все известные элементарные частицы, если они не являются нейтральными, как фотоны и нейтроны, характеризуются, исключая знак, одинаковым зарядом e . Таким образом, мы не можем не принять, что величина e есть еще одна свойственная природе константа, ничуть не менее фундаментальная, чем c или h " (Вейль, 1949)

Гипотетическая переменность постоянной тонкой структуры:

Появились спекуляции, какая постоянная из этих трех постоянных должна быть переменной (космологии с переменной скоростью света и т.п.)

Dicke, 1963

Barrow, Magueijo, 1998;

Albrecht, Magueijo, 1999;

Moffat, 2001;

Magueijo, Barrow, Sandvik, 2002;

Davies, Davies, Lineveaver, 2002, p.602;

Черенащук, Чернин, 2003, с.298;

Das, Kunstatter, 2003, p.2016;

Barrow, 2003, p.651;

Magueijo, 2003, p.7;

Ignatiev, Carson, 2005 и др.

(см. arXiv.org)

На самом деле, изменение постоянной тонкой структуры не влияет на постоянные c , h , e , а приводит лишь к изменению размерной постоянной электромагнетизма (постоянной Кулона), поскольку:

$$k_e \equiv \alpha \cdot \frac{\hbar c}{e^2}$$

Соответственно, это не требует изменения современных физических теорий.

«Формулы постоянной тонкой структуры»

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \quad \text{— где } e \text{ в электростатических единицах}$$

Эйнштейн: оценка безразмерного множителя (1909)

А.Гааз ввел обозначение C (1910)

$$\alpha' = (\pi e^2 / \hbar c)^2 \quad (Sommerfeld, 1915),$$

а затем $\alpha = 2\pi e^2 / \hbar c$, определяя ее как отношение двух угловых моментов в теории кеплеровского движения электрона вокруг ядра атома (*Sommerfeld*, 1916)

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \quad (Sommerfeld, 1935)$$

Эти формулы следует рассматривать не как формулы постоянной тонкой структуры, а как *определения* элементарного заряда в принятых системах единиц:

$$e^2 \equiv \alpha \hbar c \quad (\text{гауссова система})$$

$$e^2 \equiv 4\pi\alpha \hbar c \quad (\text{система Лоренца-Хевисайда})$$

$$e^2 \equiv 4\pi\epsilon_0 \alpha \hbar c \quad (\text{система СИ в современной форме})$$

$$\epsilon_0^{-1} \equiv 4\pi\alpha \cdot \frac{\hbar c}{e^2} \quad (\text{система СИ при выборе точных значений } c, \hbar \text{ и } e)$$

Модернизация систем единиц

1. **Система СИ:** одна безразмерная (α) и одна размерная постоянная, характеризующие силу ЭМ взаимодействия

1) дополнение определением $\epsilon_0^{-1} \equiv 4\pi\alpha \cdot \frac{\hbar c}{e^2}$

2) отказ от второй размерной постоянной $\mu_0 \equiv \frac{\epsilon_0^{-1}}{c^2}$

3) (в перспективе) отказ ϵ_0 от в пользу обратной постоянной ϵ_0^{-1} , например, k_e

т.е. записывать закон Кулона в виде $F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$ в этом случае $k_e \equiv \alpha \cdot \frac{\hbar c}{e^2}$

либо $F = \frac{k_e}{4\pi} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$, в этом случае $k_e \equiv 4\pi\alpha \cdot \frac{\hbar c}{e^2}$

2. Гауссова система

Отказ от $F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$ в пользу $F = \alpha \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$

Это позволит переходить к системе $c=1$, $\hbar=1$, $e=1$, т.е. система будет приведена в соответствие с ФЭЧ и квантовой метрологией; установится соответствие между гауссовой системой и СИ.

Спасибо за внимание