

# Постоянная тонкой структуры

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

**Постоя́нная то́нкой структу́ры**, обычно обозначаемая как **α**, является фундаментальной физической постоянной, характеризующей силу электромагнитного взаимодействия. Она была введена в 1916 году немецким физиком Арнольдом Зоммерфельдом в качестве меры релятивистских поправок при описании атомных спектральных линий в рамках модели атома Бора, то есть характеризует так называемую *тонкую структуру* спектральных линий. Поэтому иногда она также называется **постоянной Зоммерфельда**.

Она определяет размер очень малого изменения величины (расщепления) энергетических уровней атома и, следовательно, образования *тонкой структуры* — набора узких и близких частот в его спектральных линиях, пропорционального **α<sup>2</sup>**. Расщепление происходит за счёт квантового эффекта — взаимодействия двух электронов атома в результате обмена между ними виртуальными (ненаблюдаемыми) фотонами, которое происходит с изменением энергии.

Постоянная тонкой структуры (ПТС) — это безразмерная величина, образованная комбинацией фундаментальных констант. Её численное значение не зависит от выбранной системы единиц.

С 2018 года CODATA рекомендует использовать следующее значение константы<sup>[1]</sup>:

$$\alpha = 7,297\,352\,569\,3(11)\cdot 10^{-3}$$

или её обратное значение<sup>[2]</sup>:

$$1/\alpha = 137,035\,999\,084(21).$$

Относительная погрешность измерения **α** и **1/α** на 2020 год составляет<sup>[1][2]</sup> 1,5·10<sup>−10</sup>; это одна из наиболее точно измеренных физических констант.

В Международной системе единиц (СИ) постоянная тонкой структуры определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0\hbar c},$$

где

- e* — элементарный электрический заряд,
- ħ** = *h*/2π — постоянная Дирака (или приведённая постоянная Планка),
- c* — скорость света в вакууме,
- ε<sub>0</sub>** — электрическая постоянная.

В системе единиц СГСЭ единица электрического заряда определена таким образом, что электрическая постоянная равна единице. Тогда постоянная тонкой структуры определяется как

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}.$$

Постоянная тонкой структуры может быть также определена как квадрат элементарного электрического заряда, выраженного в единицах планковского заряда:

$$\alpha = \left(\frac{e}{q_p}\right)^2.$$

В рациональной системе единиц квадратный корень из постоянной тонкой структуры является единицей измерения электрического заряда.

Аналогичные постоянной тонкой структуры константы используются и для оценки силы сильных  $\frac{g_S^2}{\hbar c} \approx 15$ , слабых  $\lambda = \frac{g_F^2}{\hbar c} \left(\frac{\hbar}{m_P c}\right)^{-4} \approx 1,0 \times 10^{-10}$  и гравитационных  $\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-39}$  взаимодействий. Здесь  $g_S$  — «заряд» сильного взаимодействия,  $g_F$  — постоянная Ферми слабого взаимодействия,  $m_p$  — масса протона,  $G_N$  — гравитационная постоянная<sup>[3][4]</sup>.

<b>Содержание</b>
<b>Физическая интерпретация</b>
<b>Непостоянство величины</b>
<b>Антропоцентрическое объяснение</b>
<b>Попытки рассчитать постоянную (включая нумерологию)</b>
Ранние попытки
Теория Эддингтона
Другие попытки середины XX века
Теоретико-полевые подходы
Современные попытки
<b>См. также</b>
<b>Примечания</b>
<b>Литература</b>
<b>Ссылки</b>

## Физическая интерпретация

Постоянная тонкой структуры является отношением двух энергий:

- энергии, необходимой, чтобы преодолеть электростатическое отталкивание между двумя электронами, сблизив их с бесконечности до некоторого расстояния  $s$ , и
- энергии фотона с длиной волны  $2\pi s$ .

Исторически первой интерпретацией постоянной тонкой структуры, появившейся в работах<sup>[5][6]</sup> Зоммерфельда, было отношение двух угловых моментов, которые возникают в теории движения электрона по кеплеровским орбитам, — так называемого предельного

момента  $p_0 = e^2/c$ , который отвечает за движение перигентра при релятивистском рассмотрении, и момента  $p_1 = h/2\pi$ , соответствующего первому квантовому состоянию. Позже, в своей известной книге «Строение атома и спектры»<sup>[7]</sup>, Зоммерфельд вводил  $\alpha$  как отношение скорости электрона на первой круговой орбите в боровской модели атома к скорости света. Эта величина использовалась далее для расчёта тонкого расщепления спектральных линий водородоподобных атомов<sup>[8]</sup>.

В квантовой электродинамике постоянная тонкой структуры имеет значение константы взаимодействия, характеризующей силу взаимодействия между электрическими зарядами и фотонами. Её значение не может быть предсказано теоретически и вводится на основе экспериментальных данных. Постоянная тонкой структуры является одним из двадцати «внешних параметров» Стандартной модели в физике элементарных частиц.

Тот факт, что  $\alpha$  много меньше единицы, позволяет использовать в квантовой электродинамике теорию возмущений. Физические результаты в этой теории представляются в виде ряда по степеням  $\alpha$ , причём члены с возрастающими степенями  $\alpha$  становятся менее и менее важными. И наоборот, большая константа взаимодействия в квантовой хромодинамике делает вычисления с учётом сильного взаимодействия чрезвычайно сложными.

В теории электрослабого взаимодействия показано, что значение постоянной тонкой структуры (сила электромагнитного взаимодействия) зависит от характерной энергии рассматриваемого процесса. Утверждается, что постоянная тонкой структуры логарифмически растёт с увеличением энергии. Наблюдаемое значение постоянной тонкой структуры верно при энергиях порядка массы электрона. Характерная энергия не может принимать более низкие значения, так как электрон (как и позитрон) обладает самой маленькой массой среди заряженных частиц. Поэтому говорят, что **1/137,036** — это значение постоянной тонкой структуры при нулевой энергии. Кроме того, тот факт, что по мере повышения характерных энергий электромагнитное взаимодействие приближается по силе к двум другим взаимодействиям, важен для теорий Великого объединения.

Если бы предсказания квантовой электродинамики были верны, то постоянная тонкой структуры принимала бы бесконечно большое значение при значении энергии, известном как полюс Ландау. Это ограничивает область применения квантовой электродинамики только областью применимости теории возмущений.

## Непостоянство величины

Исследование вопроса о том, действительно ли постоянная тонкой структуры является постоянной, то есть всегда ли она имела современное значение или менялась за время существования Вселенной, имеет долгую историю<sup>[9]</sup>. Первые идеи такого рода появились в 1930-е годы, вскоре после открытия расширения Вселенной, и преследовали цель сохранить статическую модель Вселенной за счёт изменения фундаментальных констант со временем. Так, в статье<sup>[10]</sup> Дж. и Б. Чалмерсов предлагалось объяснение наблюдаемого красного смещения спектральных линий галактик за счёт одновременного возрастания элементарного заряда и постоянной Планка (это должно приводить и к временной зависимости  $\alpha$ ). В ряде других публикаций<sup>[11][12][13]</sup> предполагалось, что постоянная тонкой структуры остаётся неизменной при одновременной вариации составляющих её констант.

В 1938 году Поль Дирак в рамках своей гипотезы больших чисел предположил<sup>[14]</sup>, что гравитационная постоянная может уменьшаться обратно пропорционально времени. В своём рассмотрении он считал  $\alpha$  истинной константой, однако отметил, что в будущем это может оказаться не так. Эта работа вызвала значительный интерес к данной проблеме, который сохраняется до сих пор. Следуя Дираку, вопрос о постоянной тонкой структуре рассмотрел<sup>[15]</sup> Паскуаль Йордан и пришёл к выводу, что зависимость  $\alpha$  от времени должна вызывать

сложные сдвиги спектральных линий. Поскольку такие сдвиги не наблюдаются, он отверг эту гипотезу. В 1948 году, пытаясь опровергнуть гипотезу Дирака, Эдвард Теллер упомянул<sup>[16]</sup> возможность логарифмической зависимости  $1/\alpha \sim \ln T$ , где  $T$  — возраст Вселенной; аналогичные соотношения предлагались и позднее<sup>[17][18]</sup>.

Серьёзной проверке вопрос об изменении постоянной тонкой структуры со временем был подвергнут в 1967 году. Инициатором выступил<sup>[19]</sup> Георгий Гамов, который, отказываясь принять дираковскую идею об изменении гравитационной постоянной, заменил её гипотезой о вариации элементарного заряда  $e^2 \sim t$  и, как следствие,  $\alpha \sim t$ . Он также показал, что это предположение можно проверить наблюдениями тонкой структуры спектров удалённых галактик. Против предположения Гамова были выдвинуты возражения ядерно-физического и геологического характера, с которыми выступили Фримен Дайсон<sup>[20]</sup> и Ашер Перес<sup>[21]</sup>. Прямую экспериментальную проверку гипотезы Гамова предприняли<sup>[22]</sup> Джон Бакал и Мартен Шмидт, измерившие дублеты тонкого расщепления пяти радиогалактик с красным смещением  $z \approx 0,2$ . Из опыта следовало отношение измеренного значения постоянной тонкой структуры к её лабораторной величине  $\alpha_z/\alpha_{\text{lab}} = 1,001 \pm 0,002$ , что противоречило предсказанию  $\alpha_z/\alpha_{\text{lab}} = 0,8$  в случае  $\alpha \sim t$  (см. также обзор<sup>[23]</sup>). Гамов быстро признал<sup>[24]</sup> своё поражение. Не выявили каких-либо изменений постоянной тонкой структуры и исследования природного ядерного реактора в Окло, проведённые в 1970-е годы<sup>[25]</sup> и показавшие, что во время работы реактора (около 2 млрд лет назад) значение  $\alpha$  совпадало с современным. Все эти работы позволили установить весьма жёсткие ограничения на возможную скорость и характер изменения  $\alpha$  и других фундаментальных констант.

Тем не менее, к началу 2000-х годов усовершенствования в методиках астрономических наблюдений дали основание считать, что постоянная тонкой структуры, возможно, меняла своё значение с течением времени: анализ линий поглощения в спектрах квазаров позволил предположить<sup>[26]</sup>, что относительная скорость изменения  $\alpha$  составляет около  $5 \times 10^{-16}$  в год. Исследовались также последствия возможного изменения постоянной тонкой структуры для космологии<sup>[27]</sup>. Однако более детальные наблюдения квазаров, сделанные в апреле 2004 года при помощи спектрографа UVES на одном из 8,2-метровых телескопов Паранальской обсерватории в Чили, показали, что возможное изменение  $\alpha$  не может быть больше, чем 0,6 миллионной доли ( $6 \times 10^{-7}$ ) за последние 10 миллиардов лет (см. статьи<sup>[28][29]</sup> и пресс-релиз<sup>[30]</sup>). Поскольку это ограничение противоречило более ранним результатам, то вопрос о том, постоянна ли  $\alpha$ , остался открытым.

В 2010 году при помощи телескопа VLT были получены новые указания<sup>[31]</sup> на то, что постоянная тонкой структуры может не только уменьшаться со временем, но и возрастать, причём характер изменения зависит от направления, в котором ведётся наблюдение. Возможности такого пространственного изменения  $\alpha$  и других фундаментальных констант в настоящее время изучаются в литературе<sup>[32][33][34][35]</sup>. Тем не менее, пока рано делать какие-либо окончательные выводы об обнаружении такого рода эффектов.

В 2014 году две группы исследователей сообщили о получении новых, более точных лабораторных ограничений на скорость изменения постоянной тонкой структуры. Прецизионные измерения частот некоторых квантовых переходов ионов иттербия позволили им прийти к следующим предельным значениям современной вариации  $\alpha$ :  $-0,7 \times 10^{-17}$  в год (Национальная физическая лаборатория, Великобритания) и  $-0,2 \times 10^{-16}$  в год (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, Германия)<sup>[36]</sup>.

В 2018 году опубликованы данные измерений с помощью радиотелескопа Аресибо двух сопряжённых линий группы ОН на длине волны 18 см в спектре объекта PKS 1413+135 (красное смещение примерно 0,247). Благодаря разной зависимости смещения линий от

постоянной тонкой структуры  $\alpha$  и отношения масс протона и электрона  $\mu$  удалось с хорошей точностью определить, что комбинация  $\mu\alpha^2$  не менялась по крайней мере за последние 2,9 млрд лет<sup>[37]</sup>.

Метаанализ данных астрофизических наблюдений, проведённый в 2017 году, дал для взвешенного среднего отклонения постоянной тонкой структуры от современного значения величину  $\Delta\alpha/\alpha = (-0,64 \pm 0,65) \cdot 10^{-6}$ , что согласуется с предположением о нулевых вариациях постоянной<sup>[38]</sup>. Данные последних лет также не подтверждают наличия предпочтительных направлений для изменения  $\alpha$  (пространственного диполя)<sup>[39]</sup>. Совместный анализ результатов наиболее свежих и надёжных (на 2017 год) лабораторных спектроскопических измерений в системах типа атомных часов даёт для современной скорости изменения постоянной тонкой структуры со временем величину  $d\ln\alpha/dt = (-2,2 \pm 2,4) \cdot 10^{-17}$  в год, что свидетельствует об отсутствии вариаций при доступном уровне точности<sup>[40]</sup>. Что касается теоретических объяснений возможного непостоянства  $\alpha$  и других фундаментальных констант, то современные подходы, как правило, основываются на введении дополнительных скалярных полей, использование которых накладывает ограничения на возможные космологические сценарии и в некоторых случаях позволяет одновременно описывать тёмную энергию. Примерами таких моделей, позволяющих учитывать вариации постоянной тонкой структуры и накладывать на них ограничения на основе космологических соображений, являются модели Бекенштейна, дилатонные, симметричные и струнные модели и т. д.<sup>[41]</sup>

Существуют также гипотезы, предполагающие изменение постоянной тонкой структуры в сильных гравитационных полях. В 2020 году сотрудники Парижской обсерватории и ряда организаций США, Австралии и Японии опубликовали результаты анализа спектров излучения пяти звёзд, движущихся в окрестности сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики. Измерения показали, что отклонения значения  $\alpha$ , вызванные воздействием сильной гравитации, не превышают  $10^{-5}$  от её «табличного» значения, что накладывает наиболее строгие ограничения на теоретические предположения такого рода<sup>[42]</sup>.

В апреле 2020 года опубликованы результаты измерения постоянной тонкой структуры в рекордно далёкий момент прошлого. Для этого использовались спектры квазара с красным смещением  $z = 7,085$ , что соответствует возрасту Вселенной всего 800 млн лет. Отличие от современного значения было оценено как  $\Delta\alpha/\alpha = (-2,18 \pm 7,27) \cdot 10^{-5}$ , что согласуется с предположением о нулевых вариациях постоянной со временем. Однако комбинация новых данных с уже существовавшими даёт указание на пространственные вариации постоянной на уровне статистической значимости  $3,9\sigma$ <sup>[43]</sup>, хотя сложности учёта систематической погрешности в разнородных наблюдениях ставят под вопрос правомерность такой комбинации. Следует отметить, что указанная работа является продолжением цикла работ этой группы, продолжающегося с 2001 года; в публикациях 2001<sup>[26]</sup>, 2003<sup>[44]</sup>, 2012<sup>[45]</sup> и 2020<sup>[43]</sup> годов авторы утверждали, что видят в данных вариацию  $\alpha$ , но с увеличением набора наблюдений статистическая значимость эффекта снижалась. В последних трёх работах утверждается, что распределение вариации  $\alpha$  по небесной сфере имеет дипольную структуру.

## Антропоцентрическое объяснение

Одно из объяснений величины постоянной тонкой структуры включает в себя антропный принцип и гласит, что эта константа имеет именно такое значение, потому что иначе было бы невозможным существование стабильной высокоорганизованной материи и, следовательно, жизнь и разумные существа не смогли бы возникнуть. Например, известно, что, будь  $\alpha$  всего на 4 % больше, производство углерода внутри звёзд было бы невозможным. Если бы  $\alpha$  была больше, чем 0,1, то внутри звёзд не смогли бы протекать процессы термоядерного синтеза<sup>[46]</sup>.

# Попытки рассчитать постоянную (включая нумерологию)

## Ранние попытки

Постоянная тонкой структуры, являясь безразмерной величиной, которая никак не соотносится ни с какой из известных математических констант, всегда являлась объектом восхищения для физиков. Ричард Фейнман, один из основателей квантовой электродинамики, называл её *«одной из величайших проклятых тайн физики: магическое число, которое приходит к нам без какого-либо понимания его человеком»*. Предпринималось большое количество попыток выразить эту постоянную через чисто математические величины или вычислить на основе каких-либо физических соображений. Так, ещё в 1914 году химики Гилберт Льюис и Эллиот Адамс (*Elliot Quincy Adams*), отталкиваясь от выражения для константы Стефана, после некоторых предположений выразили<sup>[47]</sup> постоянную Планка через заряд электрона и скорость света. Если составить из их формулы постоянную тонкой структуры, которая тогда ещё не была известна, получится<sup>[48]</sup>

$$1/\alpha = 8\pi\sqrt[3]{\frac{8\pi^5}{15}} \approx 137,348.$$

Работа Льюиса и Адамса не прошла незамеченной и была подхвачена некоторыми другими учёными<sup>[49]</sup>. Герберт Стэнли Аллен (*H. Stanley Allen*) в своей статье<sup>[50]</sup> явным образом сконструировал вышеуказанную безразмерную величину (обозначив её через *q*) и попытался связать её с величиной заряда и массы электрона; он также указал на примерное соотношение между массами электрона и протона  $m/M \approx 10\alpha^2$ . В 1922 году чикагский физик Артур Лунн (*Arthur C. Lunn*) предположил<sup>[51]</sup>, что постоянная тонкой структуры каким-то образом связана с ядерным дефектом массы, а также рассмотрел её возможную связь с гравитацией

посредством соотношения  $\frac{Gm^2}{e^2} = \frac{\alpha^{17}}{2048\pi^6}$  (*G* — ньютоновская гравитационная постоянная).

Кроме того, он предложил несколько чисто алгебраических выражений для  $\alpha$ , а именно:

$$\frac{\pi}{2^4 \cdot 3^3}, \frac{7}{\pi^6}, \frac{32}{45\pi^4}, \frac{3^2}{5^3\pi^2}.$$

Первую попытку связать постоянную тонкой структуры с параметрами Вселенной предпринял в 1925 году ливерпульский физик Джеймс Райс (*James Rice*), находившийся под большим впечатлением от работ астрофизика Артура Эддингтона по объединению общей теории относительности с электромагнетизмом<sup>[52][53]</sup>.

В своей первой статье Райс пришёл к некоему выражению, связывающему  $\alpha$  с радиусом кривизны Вселенной *R*, однако вскоре он обнаружил в своих вычислениях грубую ошибку и в следующей заметке<sup>[54]</sup> представил исправленный вариант соотношения, а именно:

$$\frac{2\pi}{\alpha} = \frac{r^2}{6R\rho}.$$

где *r* — электромагнитный радиус электрона,  $\rho$  — гравитационный радиус электрона. Положив для радиуса Вселенной величину  $R = 1,06 \times 10^{24}$  м, Райс получил  $\alpha^{-1} = 133$ .

Эttore Майорана в 1928 г. из соображений квантования импульса при взаимодействии двух электронов и закона Кулона получил для постоянной тонкой структуры величину  $\frac{1}{2}$ <sup>[55]</sup>.

## Теория Эддингтона

Для Эддингтона вопрос о выводе постоянной тонкой структуры был одной из частных проблем его исследовательской программы по построению фундаментальной теории, способной связать атомные и космические величины. В 1929—1932 годах он опубликовал серию статей<sup>[56][57][58][59]</sup>, посвящённых теоретическому вычислению константы  $1/\alpha$ , которая, как он считал, выражает некоторое число степеней свободы электрона и потому должна быть целым числом<sup>[60]</sup>. Из своей теории Эддингтон получил  $1/\alpha = 16 + 16(16 - 1)/2 = 136$ , а позже добавил к этой величине ещё единицу, связав это с принципом неразличимости частиц. Он также связывал число  $1/\alpha = 136$  с отношением масс протона и электрона  $M/m$ , которое, согласно его предположению, должно равняться отношению корней квадратного уравнения

$$10x^2 - 136xm' + m'^2 = 0,$$

где  $m'$  — некая «стандартная масса». Из решения этого уравнения следовало  $M/m = 1847,6$  (экспериментальное значение, известное в то время, — **1834,1**). Эддингтон также соотносил постоянную тонкой структуры с космическими константами (в частности, с числом Эддингтона, которое оценивает число барионов во Вселенной). Например, в рамках модели статической замкнутой Вселенной он получил

$$2\pi \frac{mc \cdot \alpha}{h} = \frac{\sqrt{N}}{P},$$

где  $P$  — радиус Вселенной,  $N$  — число электронов в ней. Аргументы Эддингтона были малопонятны большинству физиков и были столь же мало убедительны, хотя его теория и привлекла определённый интерес научного сообщества. Эксперименты, проведенные в последующие годы, показали, что  $1/\alpha$  не является целым числом. Впрочем, сам Эддингтон до конца жизни придерживался своих убеждений. Рэймонд Бирдж, один из основных оппонентов Эддингтона, в 1941 году предложил<sup>[61]</sup> следующее соотношение:

$$\alpha = 4\pi R_\infty \frac{F}{N_A} \frac{e}{m} \approx 1/137,030,$$

где  $R_\infty$  — постоянная Ридберга для случая бесконечной массы ядра,  $F$  — постоянная Фарадея,  $N_A$  — постоянная Авогадро.<sup>[62]</sup>

## Другие попытки середины XX века

Хотя некоторые ведущие физики (Зоммерфельд, Шрёдингер, Йордан) с интересом отнеслись к теории Эддингтона, вскоре стала ясна трудность согласования с экспериментом; кроме того, было трудно понять методику Эддингтона. По меткому выражению Вольфганга Паули, это была скорее «романтическая поэзия, а не физика».<sup>[63][64]</sup> Тем не менее, эта теория породила множество последователей, предлагавших свои более или менее спекулятивные подходы к анализу происхождения постоянной тонкой структуры<sup>[65]</sup>. Так в 1929 году Владимир Рожанский (*Vladimir Rojansky*) фактически «переоткрыл» соотношение Аллена между массами протона и электрона<sup>[66]</sup>, а Энос Уитмер (*Enos Witmer*) предложил<sup>[67]</sup> соотношение между массами атомов гелия и водорода в виде

$$\frac{m_{He}}{m_H} = \left( \frac{Z_{He}}{Z_H} \right)^2 \frac{1}{1 + \alpha} = \frac{4}{1 + \alpha}.$$

Аналогичные попытки связать  $\alpha$  с другими константами природы (в особенности с  $m/M$ ) предпринимали примерно в это время Вильгельм Андерсон<sup>[68]</sup>, Рейнгольд Фюрт (*Reinhold Fürth*)<sup>[69]</sup>, Вальтер Глазер (*Walter Glaser*) и Курт Зитте (*Kurt Sitte*) (они определили<sup>[70]</sup> максимальное количество химических элементов как  $Z < \sqrt{2}/c\alpha < 97$ ), Артур Гааз<sup>[71]</sup>, Альфред Ланде<sup>[72]</sup> и другие. Большое количество такого рода работ побудило физиков Гвидо Бека, Ханса Бете и Вольфганга Рицлера (*Wolfgang Riezler*) послать в журнал *Die Naturwissenschaften* шуточную заметку «К квантовой теории абсолютного нуля температуры»<sup>[73]</sup>. Эта статья пародировала поиски нумерологических формул для физических констант и предлагала «объяснение» тому факту, что постоянная тонкой структуры примерно равна  $-2/(T_0 - 1)$ , где  $T_0 = -273,15$  °C — абсолютный нуль температуры. Редакция журнала не осознала пародийного характера заметки и опубликовала её на страницах издания. Когда истина открылась, эта шутка вызвала гнев редактора журнала Арнольда Берлинера (*Arnold Berliner*), так что, по настоянию Зоммерфельда, Бете был вынужден извиниться за свой поступок<sup>[74]</sup>.

После открытия мюона в 1937 году возникли спекулятивные предположения о связи новой частицы с константами природы. Согласно Патрику Блэккетту<sup>[75]</sup>, возможна связь между гравитацией и временем жизни мюона в виде

$$\tau \approx \frac{\alpha e^3}{m_\mu m c^3 \sqrt{G}},$$

где  $m_\mu$  — масса мюона. Генри Флинт (*Henry Flint*), основываясь на соображениях 5-мерного расширения теории относительности, получил<sup>[76]</sup> соотношение  $m_\mu \approx m_e/\alpha$ . Среди более поздних попыток можно отметить чисто нумерологическое соотношение между массами протона и электрона, появившееся в чрезвычайно короткой заметке<sup>[77]</sup> некоего Фридриха Ленца (*Friedrich Lenz*), и гласившее:  $M/m = 6\pi^5 = 1836,118$ . Предлагались самые различные нумерологические («пифагорейские») формулы для постоянной тонкой структуры<sup>[78]</sup>. В 1952 году Йоитиро Намбу указал<sup>[79]</sup>, что массы элементарных частиц тяжелее электрона можно описать следующей эмпирической формулой:

$$m = \frac{(n + 1)m_e}{2\alpha},$$

где  $n$  — целое число. Например, для  $n = 2$  получается масса мюона ( $206m_e$ ), для  $n = 3$  — масса пиона ( $274m_e$ ), для  $n = 26$  — приблизительная масса нуклонов ( $1849m_e$ ).

## Теоретико-полевые подходы

Более научно обоснованными были попытки рассчитать величину постоянной тонкой структуры, предпринятые Максом Борном и Вернером Гейзенбергом на основе их обобщений существующих полевых теорий<sup>[80]</sup>. Борн при помощи своего подхода, основанного на «принципе взаимности» (см., например, работы<sup>[81][82][83]</sup>), к концу 1940-х годов смог получить лишь оценку, которая дала  $1/\alpha = 102,5$ . Гейзенбергу в рамках его нелинейной теории поля также удалось получить<sup>[84][85]</sup> согласие с экспериментальным значением постоянной лишь по порядку величины.

Анализ ренорм-групповых свойств квантовой электродинамики (КЭД) и, в частности, свойств бета-функции КЭД к настоящему времени не позволил объяснить наблюдаемое значение постоянной тонкой структуры<sup>[86]</sup>. Алгебраические выражения для постоянной могут быть выведены из рассмотрения инвариантов групп симметрии тех или иных обобщений теории поля. Так, Уайлер (A. Wyler) исследовал<sup>[87]</sup> пятимерное уравнение Клейна — Гордона и получил

$$\alpha \approx \frac{9}{8\pi^4} \left( \frac{\pi^5}{2^4 5!} \right)^{1/4} \approx 1/137,036\,082\,4.$$

Попытки такого рода до сих пор не только не дали удовлетворительного физического объяснения природы постоянной, но и слишком жёстко привязаны к математической структуре теории и практически не оставляют возможности для более тонкой подгонки теоретического результата к наблюдаемому значению  $\alpha$ .<sup>[88]</sup>

В некоторых попытках расчёта постоянной тонкой структуры используются соображения, связанные с флуктуациями электромагнитного поля. Так, Хендрик Казимир предложил<sup>[89]</sup> так называемую «модель мышеловки», представляющую частицу в виде сферической оболочки, по которой распределён электрический заряд. Рассмотрение вакуумных флуктуаций в такой системе позволяет установить связь между постоянной  $\alpha$  и характеристиками эффекта Казимира<sup>[90]</sup>.

В некоторых подходах делаются попытки связать электромагнитные и гравитационные взаимодействия на основе формализма квантовой теории поля и вывести отсюда значение постоянной тонкой структуры. В частности, указание на такую связь могут дать поиски конверсии фотонов в гравитоны и, как следствие, взаимозависимости в изменении констант электромагнитного и гравитационного взаимодействий на различных энергетических масштабах. Так, подобные гипотезы приводят к оценкам вида

$$\alpha \sim \left( \frac{\Lambda}{m_e} \right)^{-1} \sim \left( \frac{\lambda_e}{\ell_P} \right)^{-1},$$

где  $\Lambda$  — параметр обрезания КЭД,  $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$  — планковская длина,  $m_e$  и  $\lambda_e$  — масса и комптоновская длина волны электрона<sup>[91]</sup>.

Другую оценку постоянной тонкой структуры можно получить из рассмотрения компактификации пятого измерения в теории Калуцы — Клейна:

$$\alpha = \frac{4}{(r\sqrt{\phi})^2} G,$$

где  $r$  — масштаб компактификации,  $\phi$  — вакуумное среднее скалярного поля, в общем случае зависящее от координат и времени. Однако следующее отсюда ограничение на радиус компактификации и величину поля до сих пор не удалось согласовать с получаемыми в теории оценками других параметров<sup>[92]</sup>.

В теории струн взаимосвязь между гравитацией и электромагнетизмом возникает как следствие соотношений между параметрами открытых и замкнутых струн. При некоторых дополнительных предположениях это позволяет получить следующее соотношение:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_G} \exp \sqrt{\frac{m_p}{m_e}} \approx 1/136,976(8),$$

где  $\alpha_G = \frac{Gm_em_p}{\hbar c}$  — так называемая гравитационная постоянная тонкой структуры,  $m_p$  — масса протона<sup>[93]</sup>.

## Современные попытки

Возможна и ассоциация с предполагаемой размерностью пространства-времени<sup>[94]</sup>: в одной из самых многообещающих теорий последнего времени — так называемой «М-теории», развивающейся как обобщение теории суперструн и претендующей на описание всех физических взаимодействий и элементарных частиц — пространство-время полагается 11-мерным. При этом одно измерение на макроуровне воспринимается как время, ещё три — как макроскопические пространственные измерения, остальные семь — это так называемые «свернутые» (квантовые) измерения, ощущаемые только на микроуровне. ПТС при этом объединяет числа 1, 3 и 7 с множителями, кратными десяти, причём 10 можно интерпретировать как суммарную размерность пространства в теории суперструн.

Похожим образом математик Джэймс Гилсон предложил, что постоянная тонкой структуры может быть математически, с большой степенью точности, определена как

$$\alpha = \frac{\cos \frac{\pi}{137}}{137} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{137 \cdot 29}}{\frac{\pi}{137 \cdot 29}} \approx 1/137,035\,999\,786\,7.$$

29 и 137 являются, соответственно, 10-м и 33-м простыми числами. До данных 2002 года это значение лежало в пределах ошибок измерений  $\alpha$ . В настоящий момент оно отличается на 33 стандартных отклонения экспериментальных данных, что делает данное значение крайне маловероятным.

А. Ольчак (2009) приводит более компактную формулу, аппроксимирующую постоянную тонкой структуры с не худшей точностью, чем формула Гилсона<sup>[94]</sup>. Величина ПТС при этом связывается с ключевой для динамики хаоса постоянной Фейгенбаума  $\delta$ . Эта постоянная, в самых общих словах, характеризует скорость приближения решений нелинейных динамических систем к состоянию «неустойчивости в каждой точке» или «динамического хаоса». На сегодняшний день (2020) расчётное значение постоянной Фейгенбаума (в пределах точности, требуемой для расчёта ПТС) составляет  $\delta = 4,669\,211\,660\,910\,299\dots$

Величина ПТС весьма точно вычисляется как корень простого уравнения

$$1/\alpha = 137 + \frac{\delta}{1/\alpha - \delta\pi/2},$$

и составляет  $\alpha = 1/137,035\,999\,559\dots$ , что аппроксимирует экспериментальное значение до десятого десятичного знака. Точность совпадения составляла ~1,3 стандартных интервала экспериментальной погрешности, но на сегодняшний день (2020) с улучшением экспериментальной точности расхождение достигло 22 стандартных отклонений.

Также известна формула<sup>[95]</sup>:

$$1/\alpha = \frac{e^{2\pi} + 2e^{-\pi} + 4\pi}{4} = 137,036\dots,$$

полученная с использованием тождества Эйлера  $e^{\pi i} = -1$ .

Следует также заметить, что с точки зрения современной квантовой электродинамики постоянная тонкой структуры является бегущей константой связи, то есть зависит от энергетического масштаба взаимодействия ( $\alpha$  — естественный параметр, характеризующий «силу» электромагнитного взаимодействия). Этот факт лишает большей части физического смысла попытки сконструировать нумерологическую формулу для какого-то конкретного (в частности — нулевого, если речь идёт о значении **1/137,036...**) передаваемого импульса.

В 2013 С. Ефимов из МГТУ им. Н. Э. Баумана сообщил о скрытой симметрии числа  $\alpha^{-1}$ , которая позволяет построить математическую модель, порождающую значение  $\alpha$ <sup>[96][97]</sup>.

## См. также

- М-теория
- Постоянная Фейгенбаума
- Сверхтонкая структура

## Примечания

- Рекомендованное CODATA значение постоянной тонкой структуры (<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?alph>) .
- Рекомендованное CODATA обратное значение постоянной тонкой структуры (<https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?alphinv>) .
- Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. — М., Оникс, 2007. — ISBN 978-5-488-01248-6. — С. 940.
- Наумов А. И.* Физика атомного ядра и элементарных частиц. — М., Просвещение, 1984. — С. 11—12.
- Sommerfeld A.* Die Feinstruktur der Wasserstoff- und der Wasserstoff-ähnlichen Linien (нем.) // Sitzungsberichte der Königl. Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München. — 1915. — S. 459—500.
- Sommerfeld A.* Zur Quantentheorie der Spektrallinien (<https://dx.doi.org/10.1002/andp.19163561702>) (нем.) // Annalen der Physik. — 1916. — Bd. 356 (51). — S. 1—94.
- Зоммерфельд А.* Строение атома и спектры. — М.: Гостехиздат, 1956. — Т. 1. — С. 81.
- Kragh, 2003, pp. 403—404.
- Kragh, 2003, pp. 427—430.
- Chalmers J. A., Chalmers B.* The expanding universe—an alternative view (<https://dx.doi.org/10.1080/14786443508561389>) (англ.) // Philosophical Magazine Series 7. — 1935. — Vol. 19. — P. 436—446.
- Sambursky S.* Static Universe and Nebular Red Shift (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.52.335>) (англ.) // Physical Review. — 1937. — Vol. 52. — P. 335—338.
- Станюкович К. Р.* Possible changes in the gravitational constant // Soviet Physics — Doklady. — 1963. — Vol. 7. — P. 1150—1152.
- J. O'Hanlon, K.-K. Tam.* Time Variation of the Fundamental Constants of Physics (<https://dx.doi.org/10.1143/PTP.41.1596>) (англ.) // Progress of Theoretical Physics. — 1969. — Vol. 41. — P. 1596—1598.
- Dirac P. A. M.* A New Basis for Cosmology (<https://dx.doi.org/10.1098/rspa.1938.0053>) (англ.) // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1938. — Vol. 165. — P. 199—208.
- Jordan P.* Über die kosmologische Konstanz der Feinstrukturkonstanten (<https://dx.doi.org/10.1007/BF01340095>) (нем.) // Zeitschrift für Physik. — 1939. — Bd. 113. — S. 660—662.
- Teller E.* On the Change of Physical Constants (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.73.801>) (англ.) // Physical Review. — 1948. — Vol. 73. — P. 801—802.

17. *Brandmüller J., Rüchardt E.* Die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante und das Problem der spektroskopischen Einheiten (<https://dx.doi.org/10.1007/BF00623287>) (нем.) // Die Naturwissenschaften. — 1950. — Bd. 37. — S. 337—343.
18. *Baggiolini R.* On a Remarkable Relation between Atomic and Universal Constants (<https://dx.doi.org/10.1119/1.1934449>) (англ.) // American Journal of Physics. — 1957. — Vol. 25. — P. 324—325.
19. *Gamow G.* Electricity, Gravity, and Cosmology (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.759>) (англ.) // Physical Review Letters. — 1967. — Vol. 19. — P. 759—761.
20. *Dyson F. J.* Time Variation of the Charge of the Proton (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1291>) (англ.) // Physical Review Letters. — 1967. — Vol. 19. — P. 1291—1293.
21. *Peres A.* Constancy of the Fundamental Electric Charge (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1293>) (англ.) // Physical Review Letters. — 1967. — Vol. 19. — P. 1293—1294.
22. *Bahcall J. N., Schmidt M.* Does the Fine-Structure Constant Vary with Cosmic Time? (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1294>) (англ.) // Physical Review Letters. — 1967. — Vol. 19. — P. 1294—1295.
23. *Крамаровский Я. М., Чечев В. П.* Изменяется ли заряд электрона с возрастом Вселенной? (<http://ufn.ru/ru/articles/1970/9/f/>) (рус.) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1970. — Т. 102. — С. 141—148.
24. *Gamow G.* Numerology of the Constants of Nature (<https://dx.doi.org/10.1073/pnas.59.2.313>) (англ.) // Proceedings of the National Academy of Sciences. — National Academy of Sciences, 1968. — Vol. 59. — P. 313—318.
25. *Петров Ю. В.* Естественный ядерный реактор Окло (<https://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0123.197711c.0473>) (рус.) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1977. — Т. 123. — С. 473—486.
26. *Murphy M. T., Webb J. K., Flambaum V. V., Dzuba V. A., Churchill C. W., Prochaska J. X., Barrow J. D., Wolfe A. M.* Possible evidence for a variable fine-structure constant from QSO absorption lines: motivations, analysis and results (<https://academic.oup.com/mnras/article/327/4/1208/1008512>) (англ.) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2001. — Vol. 327, no. 4. — P. 1208—1222. — doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04840.x (<https://dx.doi.org/10.1046%2Fj.1365-8711.2001.04840.x>) . — arXiv:astro-ph/0012419.
27. *Barrow J. D., Sandvik H. B., Magueijo J.* Behavior of varying-alpha cosmologies (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.65.063504>) (англ.) // Physical Review D. — 2002. — Vol. 65. — P. 063504.
28. *Srianand R., Chand H., Petitjean P., Aracil B.* Limits on the Time Variation of the Electromagnetic Fine-Structure Constant in the Low Energy Limit from Absorption Lines in the Spectra of Distant Quasars (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121302>) (англ.) // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 92. — P. 121302.
29. *Chand H., Srianand R., Petitjean P., Aracil B.* Probing the cosmological variation of the fine-structure constant: Results based on VLT-UVES sample (<https://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20035701>) (англ.) // Astronomy and Astrophysics. — EDP Sciences, 2004. — Vol. 417. — P. 853—871.
30. New Quasar Studies Keep Fundamental Physical Constant Constant (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2004/pr-05-04.html>) . Архивная копия (<http://web.archive.org/web/20060114193445/http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2004/pr-05-04.html>) от 14 января 2006 на Wayback Machine // ESO Press Release, 31 March 2004.
31. *Webb J. K., King J. A., Murphy M. T., Flambaum V. V., Carswell R. F., Bainbridge M. B.* Indications of a Spatial Variation of the Fine Structure Constant (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.191101>) // Physical Review Letters. — 2011. — Vol. 107. — P. 191101. — arXiv:1008.3907.
32. *Berengut J. C., Flambaum V. V., King J. A., Curran S. J., Webb J. K.* Is there further evidence for spatial variation of fundamental constants? (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.83.123506>) // Physical Review D. — 2011. — Vol. 83. — P. 123506. — arXiv:1009.0591.
33. *King J. A., Murphy M. T., Ubachs W., Webb J. K.* [doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19460.x New constraint on cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio from Q0528-250] (англ.) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Oxford University Press, 2011. — Vol. 417. — P. 3010—3024. — arXiv:1106.5786.

34. *Curran S. J., Tanna A., Koch F. E., Berengut J. C., Webb J. K., Stark A. A., Flambaum V. V.* Measuring space-time variation of the fundamental constants with redshifted submillimetre transitions of neutral carbon (<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117457>) (англ.) // *Astronomy and Astrophysics*. — EDP Sciences, 2011. — Vol. 533. — P. A55. — arXiv:1108.0976.
35. *Berengut J. C., Flambaum V. V.* Manifestations of a spatial variation of fundamental constants in atomic and nuclear clocks, Oklo, meteorites, and cosmological phenomena (<https://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/97/20006>) (англ.) // *Europhysics Letters*. — 2012. — Vol. 97. — P. 20006.
36. *Safronova M. S.* Viewpoint: Time Trials for Fundamental Constants (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.061302>) (англ.) // *Physics*. — 2014. — Vol. 7. — P. 117.
37. *Kanekar N., Ghosh T., Chengalur J. N.* Stringent Constraints on Fundamental Constant Evolution Using Conjugate 18 cm Satellite OH Lines (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.061302>) (англ.) // *Physical Review Letters*. — 2018. — Vol. 120. — P. 061302. — arXiv:1801.07688. См. также популярный обзор (<https://nplus1.ru/news/2018/02/12/constant-or-not>) .
38. *Martins*, 2017, p. 7.
39. *Martins*, 2017, p. 11.
40. *Martins*, 2017, p. 13.
41. *Martins*, 2017, pp. 14—33.
42. *Hees A. et al.* Search for a Variation of the Fine Structure Constant around the Supermassive Black Hole in Our Galactic Center (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.081101>) (англ.) // *Physical Review Letters*. — 2020. — Vol. 124. — P. 081101. — arXiv:2002.11567. См. также популярный обзор (<https://nplus1.ru/news/2020/02/27/fine-structure-black-hole>) .
43. *Wilczynska M. R. et al.* Four direct measurements of the fine-structure constant 13 billion years ago (<https://doi.org/10.1126/sciadv.aay9672>) // *Science Advances*. — 2020. — Vol. 6. — P. eaay9672. — arXiv:2003.07627. См. также популярный обзор (<https://nplus1.ru/news/2020/04/29/fine-structure-constant-variation>) .
44. *Murphy M. T., Webb J. K., Flambaum V. V.* Further evidence for a variable fine-structure constant from Keck/HIRES QSO absorption spectra (<https://academic.oup.com/mnras/article/345/2/609/1747089>) (англ.) // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2003. — Vol. 345, no. 2. — P. 609—638. — doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06970.x (<https://dx.doi.org/10.1046%2Fj.1365-8711.2003.06970.x>) . — arXiv:astro-ph/0306483.
45. *King J. A., Webb J. K., Murphy M. T., Flambaum V. V., Carswell R. F., Bainbridge M. B., Wilczynska M. R., Koch F. E.* Spatial variation in the fine-structure constant - new results from VLT/UVES (<https://academic.oup.com/mnras/article/422/4/3370/1052357>) (англ.) // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — Vol. 422, no. 4. — P. 3370—3414. — doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20852.x (<https://dx.doi.org/10.1111%2Fj.1365-2966.2012.20852.x>) . — arXiv:1202.4758.
46. *Barrow J. D.* Cosmology, Life, and the Anthropic Principle (<https://dx.doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb02133.x>) // *Annals of the New York Academy of Sciences*. — 2001. — Vol. 950. — P. 139—153.
47. *Lewis G. N., Adams E. Q.* A Theory of Ultimate Rational Units; Numerical Relations between Elementary Charge, Wirkungsquantum, Constant of Stefan's Law (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.3.92>) // *Physical Review*. — 1914. — Vol. 3. — P. 92—102.
48. *Kragh*, 2003, pp. 400—401.
49. *Kragh*, 2003, pp. 401—402.
50. *Allen H. S.* Numerical Relationships between Electronic and Atomic Constants (<https://dx.doi.org/10.1088/1478-7814/27/1/331>) // *Proceedings of the Physical Society of London*. — 1914. — Vol. 27. — P. 425—431.
51. *Lunn A. C.* Atomic Constants and Dimensional Invariants (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.20.1>) // *Physical Review*. — 1922. — Vol. 20. — P. 1—14.
52. *Kragh*, 2003, p. 406.
53. *Rice J.* On Eddington's natural unit of the field, and possible relations between it and the universal constants of physics (<https://dx.doi.org/10.1080/14786442508634622>) // *Philosophical Magazine Series 6*. — 1925. — Vol. 49. — P. 457—463.

54. *Rice J.* On Eddington's natural unit of the field (<https://dx.doi.org/10.1080/14786442508634682>) // Philosophical Magazine Series 6. — 1925. — Vol. 49. — P. 1056—1057.
55. *Salvatore Esposito, Ettore Majorana jr., Alwyn van der Merwe, Erasmo Recami* Ettore Majorana: notes on theoretical physics (<http://dinamico2.unibg.it/recami/erasmo%20docs/SomeRecentPubsOnHistoryOfPhysics/EttoreMajorana/volumettInEngl.pdf>) . — Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publishers, 2019. — P. 155.
56. *Eddington A. S.* The Charge of an Electron (<https://dx.doi.org/10.1098/rspa.1929.0025>) // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1929. — Vol. 122. — P. 358—369.
57. *Eddington A. S.* The Interaction of Electric Charges (<https://dx.doi.org/10.1098/rspa.1930.0038>) // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1930. — Vol. 126. — P. 696—728.
58. *Eddington A. S.* On the Value of the Cosmical Constant (<https://dx.doi.org/10.1098/rspa.1931.0170>) // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1931. — Vol. 133. — P. 605—615.
59. *Eddington A. S.* Theory of Electric Charge (<https://dx.doi.org/10.1098/rspa.1932.0168>) // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1932. — Vol. 138. — P. 17—41.
30. Томилин, 2006, с. 262—263.
31. *Birge R. T.* The general physical constants: As of august 1941 with details on the velocity of light only (<https://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/8/1/307>) // Reports on Progress in Physics. — 1941. — Vol. 8. — P. 90—134.
32. Kragh, 2003, pp. 411—415.
33. Kragh, 2003, pp. 416—418.
34. Томилин, 2006, с. 263—267.
35. Kragh, 2003, pp. 419—422.
36. *Rojansky V.* The Ratio of the Mass of the Proton to that of the Electron (<https://dx.doi.org/10.1038/123911c0>) (англ.) // Nature. — 1929. — Vol. 123. — P. 911—912.
37. *Witmer E. E.* The Relative Masses of the Proton, Electron, and Helium Nucleus (<https://dx.doi.org/10.1038/124180a0>) (англ.) // Nature. — 1929. — Vol. 124. — P. 180—181.
38. *Anderson W.* Über die Struktur der Lichtquanten (<https://dx.doi.org/10.1007/BF01339748>) (нем.) // Zeitschrift für Physik. — 1929. — Bd. 58. — S. 841—857.
39. *Fürth R.* Über einen Zusammenhang zwischen quantenmechanischer Unschärfe und Struktur der Elementarteilchen und eine hierauf begründete Berechnung der Massen von Proton und Elektron (<https://dx.doi.org/10.1007/BF01340273>) (нем.) // Zeitschrift für Physik. — 1929. — Bd. 57. — S. 429—446.
70. *Glaser W., Sitte K.* Elementäre Unschärfen, Grenze des periodischen Systems und Massenverhältnis von Elektron und Proton (<https://dx.doi.org/10.1007/BF01333334>) (нем.) // Zeitschrift für Physik. — 1934. — Bd. 87. — S. 674—686.
71. *Haas A. E.* The Dimensionless Constants of Physics (<http://www.pnas.org/content/24/7/274.full.pdf+html?sid=8f289dc6-aa7d-4e64-a31b-317e89359cc0>) (англ.) // Proceedings of the National Academy of Sciences. — National Academy of Sciences, 1938. — Vol. 24. — P. 274—276.
72. *Landé A.* The Ratio of  $e$ ,  $c$ , and  $h$  (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.58.843.2>) (yr) // Physical Review. — 1940. — Vol. 58. — P. 843.
73. *Beck G., Bethe H., Riezler W.* Bemerkung zur Quantentheorie der Nullpunktstemperatur (<https://dx.doi.org/10.1007/BF01523870>) (нем.) // Die Naturwissenschaften. — 1931. — Bd. 19. — S. 39. Русский перевод статьи (<http://n-t.ru/ri/fz/fz105.htm>) появился в книге «Физики продолжают шутить».
74. Kragh, 2003, p. 421.
75. *Blackett P. M. S.* Instability of the mesotron and the gravitational constant (англ.) // Nature. — 1939. — Vol. 144. — P. 30.
76. *Flint H. T.* The theory of the electric charge and the quantum theory (<https://dx.doi.org/10.1080/14786444008521274>) (англ.) // Philosophical Magazine Series 7. — 1940. — Vol. 29. — P. 330—343.
77. *Lenz F.* The Ratio of Proton and Electron Masses (<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.82.554.2>) (англ.) // Physical Review. — 1951. — Vol. 82. — P. 554.

78. Томили́н, 2006, с. 272—274.
79. *Nambu Y.* An empirical mass spectrum of elementary particles (<https://dx.doi.org/10.1143/PTP.7.595>) (англ.) // *Progress in Theoretical Physics*. — 1952. — Vol. 7. — P. 595—596.
30. Kragh, 2003, pp. 424—426.
31. *Born M.* Relativity and Quantum Theory (<https://dx.doi.org/10.1038/141327a0>) (англ.) // *Nature*. — 1938. — Vol. 141. — P. 327—328.
32. *Born M.* Reciprocity and the number 137 // *Proceedings of the Royal Society (Edinburgh)*. — 1939. — Vol. 59. — P. 219—233.
33. *Born M.* Reciprocity Theory of Elementary Particles (<https://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.21.463>) // *Reviews of Modern Physics*. — 1949. — Vol. 21. — P. 463—473.
34. *Heisenberg W.* Quantum Theory of Fields and Elementary Particles (<https://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.29.269>) // *Reviews of Modern Physics*. — 1957. — Vol. 29. — P. 269—278.
35. *Dürr H. P., Heisenberg W., Yamamoto H., Yamazaki K.* Quantum electrodynamics in the nonlinear spinor theory and the value of Sommerfeld's fine-structure constant (<https://dx.doi.org/10.1007/BF02750602>) (англ.) // *Il Nuovo Cimento*. — 1965. — Vol. 38. — P. 1220—1242.
36. Jentschura & Nandori, 2014, pp. 593—596.
37. *Wyler A.* // *Comptes rendus de l'Académie des sciences Ser. A*. — 1971. — Vol. 271. — P. 186.
38. Jentschura & Nandori, 2014, pp. 596—597.
39. *Casimir H. B. G.* Introductory remarks on quantum electrodynamics ([https://dx.doi.org/10.1016/S0031-8914\(53\)80095-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0031-8914(53)80095-9)) (англ.) // *Physica*. — 1953. — Vol. 19. — P. 846—849.
30. Jentschura & Nandori, 2014, pp. 599—600.
31. Jentschura & Nandori, 2014, p. 603.
32. Jentschura & Nandori, 2014, pp. 604—605.
33. Jentschura & Nandori, 2014, pp. 605—606.
34. *Ольчак А. С.* О возможной связи фундаментальных констант физики: постоянной тонкой структуры и постоянной Фейгенбаума. — *Естественные и технические науки*. — 2009. — № 2. — С. 19—22.
35. *Лоренц А. К.* Формула зависимости между математическими и физическими константами (<http://www.mathnet.ru/links/dca5234356a26ab6f43814a00889f12c/tmf3559.pdf>) // *Теоретическая и математическая физика*, 18:3 (1974), 427—428; *Theoret. and Math. Phys.*, 18:3 (1974), 305—306.
36. *Efimov S. P.* Symmetries of Fine-Structure Constant (<https://dx.doi.org/10.12988/astp.2013.3431>) (англ.) // *Adv. Studies Theor. Phys.*. — 2013. — Vol. 7, no. 13. — P. 635—646. — doi:10.12988/astp.2013.3431 (<https://dx.doi.org/10.12988%2Fastp.2013.3431>) .
37. *Efimov S. P.* Formula for the fine-structure constant (<https://doi.org/10.1007/s11182-013-0093-6>) (англ.) // *Russian Physics Journal*. — 2013. — Vol. 56, no. 7. — P. 740-744. — doi:10.1007/s11182-013-0093-6 (<https://dx.doi.org/10.1007%2Fs11182-013-0093-6>) .

## Литература

- *Bouchendira R., Cladé P., Guellati-Khélifa S., Nez F., Biraben F.* State of the art in the determination of the fine structure constant: test of Quantum Electrodynamics and determination of  $h/m\mu$  // *Annalen der Physik*. — 2013. — Vol. 525. — P. 484—492. — doi:10.1002/andp.201300044 (<https://dx.doi.org/10.1002%2Fandp.201300044>) . — arXiv:1309.3393.
- *Jentschura U. D., Nándori I.* Attempts at a determination of the fine-structure constant from first principles: a brief historical overview // *European Physical Journal H*. — 2014. — Vol. 39. — P. 591—613. — doi:10.1140/epjh/e2014-50044-7 (<https://dx.doi.org/10.1140%2Fepjh%2Fe2014-50044-7>) . — arXiv:1411.4673.
- *Kragh H.* Magic Number: A Partial History of the Fine-Structure Constant // *Archive for History of Exact Sciences*. — 2003. — Vol. 57. — P. 395—431. — doi:10.1007/s00407-002-0065-7 (<https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00407-002-0065-7>) .

- *Martins C. J. A. P.* The status of varying constants: a review of the physics, searches and implications (<https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa860e>) // Reports on Progress in Physics. — 2017. — Vol. 80. — P. 126902 (45 pp). — doi:10.1088/1361-6633/aa860e (<https://dx.doi.org/10.1088%2F1361-6633%2Faa860e>) . — arXiv:1709.02923.
- *Борн М.* Таинственное число 137 (рус.) // Успехи физических наук. — Российская академия наук, 1936. — Т. 16. — С. 697—729. — doi:10.3367/UFNr.0016.193606a.0697 (<https://dx.doi.org/10.3367%2FUFNr.0016.193606a.0697>) .
- Постоянная тонкой структуры ([http://www.femto.com.ua/articles/part\\_2/4117.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_2/4117.html)) // Физическая энциклопедия. — М.: БРЭ, 1998. — Т. 5. — С. 131.
- *Томилин К. А.* Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах (<http://www.ihst.ru/personal/tomilin/book/>) . — М.: Физматлит, 2006. — 368 с.

## Ссылки

- Постоянная тонкой структуры (<http://scienceworld.wolfram.com/physics/FineStructureConstant.html>) (англ.)
- История уточнения  $\alpha$  (<http://elementy.ru/news/430291/>)
- Постоянная тонкой структуры и квантовый эффект Холла (<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/alpha.html>) (англ.)
- Ю. К. Земцов, Курс лекций по атомной физике, анализ размерностей ([http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zemcov/Chapter\\_01/chapter\\_01.htm](http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zemcov/Chapter_01/chapter_01.htm))

Источник — [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Постоянная\\_тонкой\\_структуры&oldid=107909192](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Постоянная_тонкой_структуры&oldid=107909192)

Эта страница в последний раз была отредактирована 28 июня 2020 в 16:00.

Текст доступен по [лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike](#); в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации [Wikimedia Foundation, Inc.](#)