

УДК 523.9

Постоянная Ньютона

В.А. Котов

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409
vkotov@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 3 января 2013 г.

Аннотация. На основе когерентного космического колебания (период 9600.6 с) и соотношений “тонкой настройки” между константами микро- и макромиров уточнена постоянная Ньютона: $G = 6.67543(2) \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$.

THE NEWTON CONSTANT, *by V.A. Kotov.* On the basis of coherent cosmic oscillation (period 9600.6 s) and “fine-tuned” relations between invariants of micro- and macroworlds, the Newton constant is specified: $G = 6.67543(2) \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Ключевые слова: Солнце, пульсации, константы, гравитационная постоянная, космология

1 Пролог: постоянны ли постоянные?

Наш Мир, включающий пространство, время, вещество и излучение, сплетен из размерных и безразмерных констант, входящих в выражения для физических взаимодействий. Поэтому часть физики, астрофизики и космологии всегда посвящена определению “констант связи”, поиску аналитических выражений для законов, управляющих системами или объектами, поведение которых определяется симметриями, законами сохранения и инвариантами. Для этого, – в частности, в рамках гипотезы т. н. “Мультимиров”, – производятся наблюдательные тесты. Например, с целью обнаружения изменений фундаментальных констант (ФК), чтобы узнать, неизменны ли законы физики. Такие “доказательства”, однако, будут сомнительными, ибо они – лишь элементы концепций или гипотез, а не четких теорий. К тому же зачастую с участием ненаблюдаемых сущностей, за которыми скрываются загадочные, т. н. “параллельные”, миры Эверетта, число которых – для объяснения только одной нашей Вселенной! – может быть бесконечным.

У нас шесть причин для изучения и уточнения ФК, особенно константы Ньютона G : (1) они определяют свойства нашего Мира и (2) связанные с ними другие физические и космологические параметры, (3) надо ответить на вопрос: меняются ли некоторые константы со временем (неудачная гипотеза Дирака, – в частности, относительно G)? – (4) гравитационная сила пропорциональна GM , поэтому знание G так же важно, как знание массы M тела, (5) G входит в уравнения небесной механики и необходимо для космической навигации и (6) это интересно. К (1) добавим, что ФК участвуют в голографических соотношениях, задающих “архитектуру” Мироздания, – в частности, т. н. “радиус” наблюдаемой Вселенной (Саншез и др., 2011).

ФК входят в выражения для т. н. “планковских” единиц: $\approx 10^{-5} \text{ г}$, $\approx 10^{-33} \text{ см}$, $\approx 10^{-43} \text{ с}$, – и появляются во всех основах физики и космологических моделях. По Вильчеку (2003), например, c – во-

площадь лоренцевской симметрии, h – дуализма “частица-волна”, а G – искривления пространства-времени (обозначения общепринятые). Тем более что тайна – происхождение, конкретное численное значение – как космологических параметров, так и констант связи фундаментальной физики до сих пор не раскрыта. Тем не менее отметим, что по ФК и алгоритмам квантовой механики (КМ) точно предсказывают и вычисляют количественные связи и соотношения между уровнями энергии в атоме, скорости переходов и поперечные сечения. В теоретической физике надежды на решение проблемы констант, также как и проблемы “больших чисел” космологии, связываются с созданием мифической “Теории (почти) всего”. Может, эксперименты со сверхвысокими энергиями на суперускорителях (например, с помощью “техно-чуда” XXI в. – Большого адронного коллайдера, БАКа) и помогут в будущем понять “начало” Вселенной и устройство микромира, природу констант и свойства элементарных частиц, но не только они. Многообещающим и не менее результативным может оказаться исследование Солнца, Солнечной системы и дальнего Космоса – с его громадными масштабами, экстремальными массами и энергиями, экзотическими объектами, температурами и плотностями, а также “сказочными новоделами” – темной материей и темной энергией.

Тэрнер (2003) указал, что экспериментальная и фундаментальная физика сейчас – в положении динозавров 65 млн лет назад: ведь их погубила сама физика, а точнее – Земля и, предположительно, астероид, управляемые законом Ньютона о гравитации. И он считает, что лучше не строить громадные ускорители (вспомним постоянно ломающийся БАК), а изучать небесную лабораторию для понимания частиц, их устройства и глубоких законов природы, т. е. лучше исследовать Космос.

2 G Ньютона

Редко значения ФК получены из прямых измерений; большинство – результат сложной цепи опытов и теоретических расчетов. Потому что для определения констант часто применяются непрямые пути; в частности, через соотношения с другими константами. И в ряде случаев уточнение одной может повлиять на значения других. Поэтому практически все *рекомендованные* наилучшие значения, включая факторы перевода физических единиц, основаны на информации, полученной к *данному* времени, но потом могут быть изменены, т. е. уточнены. Цит. Дю-Монд (1961): “... весь комплекс наших сведений об основных константах подобен огромной паутине, каждая часть которой в какой-то степени зависит от всей остальной сети так, что если коснуться одной части или изменить что-либо, то вся сеть в целом подвергнется изменению”.

В самосогласованном списке ФК за 1998 г. (Мор и Тейлор, 2001), как и прежде, наименее точно определена гравитационная постоянная Ньютона, которая после определения Кавендишем в 1798 г. упорно избегает существенного уточнения. Как отметили Мор и Тейлор, это уникальная константа: относительная неопределенность рекомендованного значения 1998 г. в 12 раз *больше*, чем ошибка предыдущего уточнения 1986 г. Ибо по некоторым причинам группа CODATA вернулась снова к значению 1986 г., увеличив относительную погрешность до 1.5×10^{-3} : $G = 6.673(10) \times 10^{-8}$, – всюду в единицах СГСЭ: $\text{см}^3 \text{г}^{-1} \text{с}^{-2}$; в скобках – стандартная ошибка. Это можно сравнить с более ранними величинами, приведенными в табл. 1: с ошибками от 7.5×10^{-4} до 2.5×10^{-4} и немонотонным ходом с годами.

Но недавно Берингер и др. (2012) сообщили новое, “уточненное” значение:

$$G = 6.67384(80) \times 10^{-8} \quad (1)$$

с неопределенностью 1.2×10^{-4} .

Константа G находится в основании т. н. проблемы “больших чисел” астрономии. А именно в утверждении, что отношение наблюдаемого радиуса Вселенной, R_H , к “длине волны атома” (среднее геометрическое комптоновских длин протона и электрона) имеет такой же порядок величины, как отношение электрической и гравитационной сил в атоме водорода (подробнее см. Карр и Рис, 1979). Отсюда следует:

$$R_H \sim \frac{\hbar^2}{Gm^3}, \quad (2)$$

что “не может быть объяснено на основе известной физики” (здесь m – субатомная масса, т. е. среднее геометрическое масс протона и электрона). В свое время выражение (2) привело Дирака к гипотезе, что G падает со временем. А недавно Саншез и др. (2011) подчеркнули, что Дирак, как и многие другие теоретики, верившие, что R_H растет со временем, часто и необдуманно полагали в своих формулах $c = 1$, обходя молчаливо тот факт, что скорость света вообще не входит в (2).

Таблица 1. Значения G (в единицах $10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$)

G	Ссылка
6.664	Тоннела (1962)
6.670(5)	Карякин и др. (1964)
6.670	Сена (1969)
6.6730(17)	Куликовский (1971)
6.673(3)	Рябов (1972)
6.6732(31)	Вейнберг (1975)
6.670(4)	Аллен (1977)
6.6742(18)	“Астроном. календарь” (1981 г.)
6.670	Нарликар (1985)
6.673(10)	Мор и Тейлор (2001)
6.67384(80)	Берингер и др. (2012)
6.6755(1)	данная работа (2012 г.)

Цит. Дю-Монд (1961): “Наблюдается широко распространенная плачевная тенденция со стороны части... высокоспециализированных работников – рекомендовать обойти трудную задачу точных измерений простым способом – приписывания по соглашению определенного значения величине, которая должна быть измерена”. Поэтому, несмотря на все трудности, в мире постоянно ведется теоретическая и экспериментальная работа по уточнению ΦK .

На Земле всюду присутствует гравитация, влияющая на приборы и измеряемые тела: от самой гравитации невозможно освободиться. Но сейчас появилась возможность уточнить G путем исследования крупномасштабной структуры Вселенной, поскольку структура определяется именно гравитацией. И разумно предположить, что наиболее точное значение следует найти не земными гравитационными опытами, а путем изучения *всей Вселенной или некоторых ее параметров*. Например, из рассмотрения *когерентного космического колебания* (ККК), обнаруженного в 1974 г. у Солнца, затем у некоторых активных ядер галактик (АЯГ, см. Котов и Лютый, 2010, и ссылки) и до сих пор остающегося загадкой астрономии.

3 Космическое колебание P_0

Среди космологических констант пока что наиболее точно, с относительной погрешностью 1.3×10^{-6} , измерен период ККК: $P_0 = 9600.606(12)$ с. Неопределенности всех других параметров гораздо хуже: (а) постоянная Хаббла $H_0 = 72(2)$ км с^{-1} Мпс $^{-1}$, (б) возраст Вселенной $1.375(13) \times 10^{10}$ лет, (в) доля барионного вещества 4.5(3) %, (г) доля темной материи 22(3) %, (д) доля темной энергии 73(3) %, (е) температура микроволнового фона 2.7255(6) К (Берингер и др., 2012).

Период P_0 впервые был обнаружен в колебаниях фотосферы Солнца, затем – в вариациях светимости некоторых АЯГ, см. рис. 1 и 2 (Котов и Лютый, 2010; Котов и Ханейчук, 2011, и ссылки). Его “универсальный” характер следует также из анализа орбитальных периодов тесных двойных систем, – см. рис. 3, где показан резонанс-спектр взрывных переменных и родственных систем, предпочитающих вращаться с периодами, кратными $2P_0/\pi$ (с фактором “идеальной несоизмеримости” $2/\pi$ относительно P_0 ; Котов, 2008).

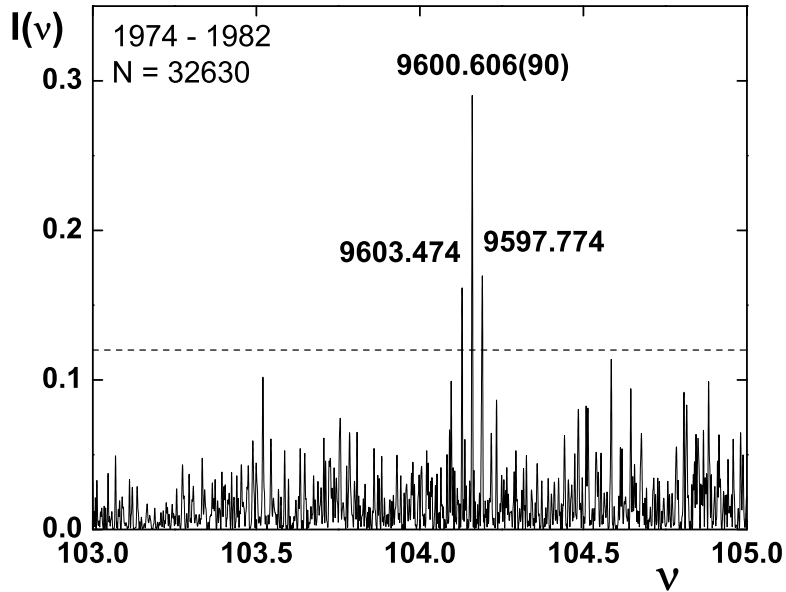


Рис. 1. Спектр мощности колебаний Солнца в 1974–1982 гг. (число измерений лучевой скорости $N = 32630$, пунктирной линией обозначен уровень значимости 3σ ; согласно Котову и Ханейчуку, 2011). По горизонтали – частота ν в мкГц, по вертикали – мощность $I(\nu)$ в произвольных единицах. Основной пик соответствует периоду 9600.606(90) с

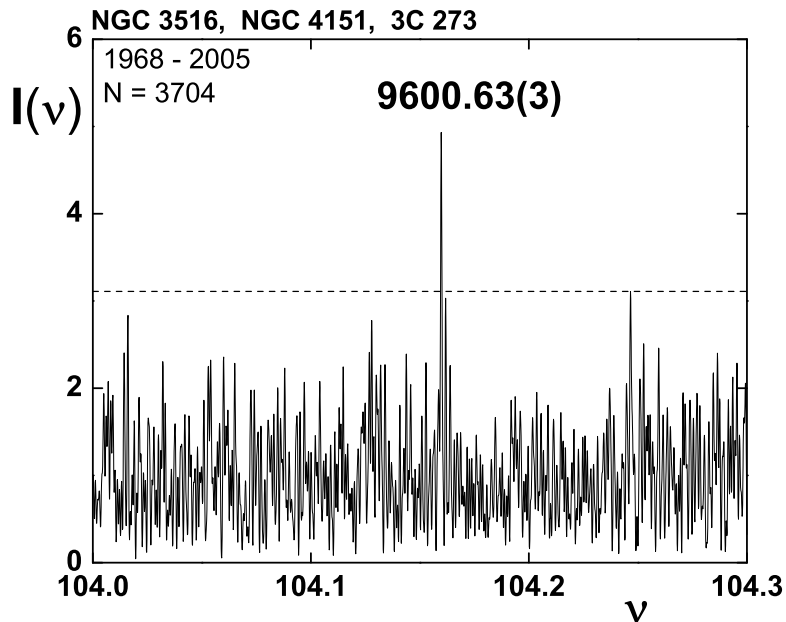


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для среднего спектра мощности вариаций блеска квазара 3C 273 и ядер сейфертовских галактик NGC 3516 и NGC 4151 (1968–2005 гг., суммарное число измерений блеска $N = 3704$; согласно Котову и др., 2012). Главный пик отвечает периоду 9600.63(3) с

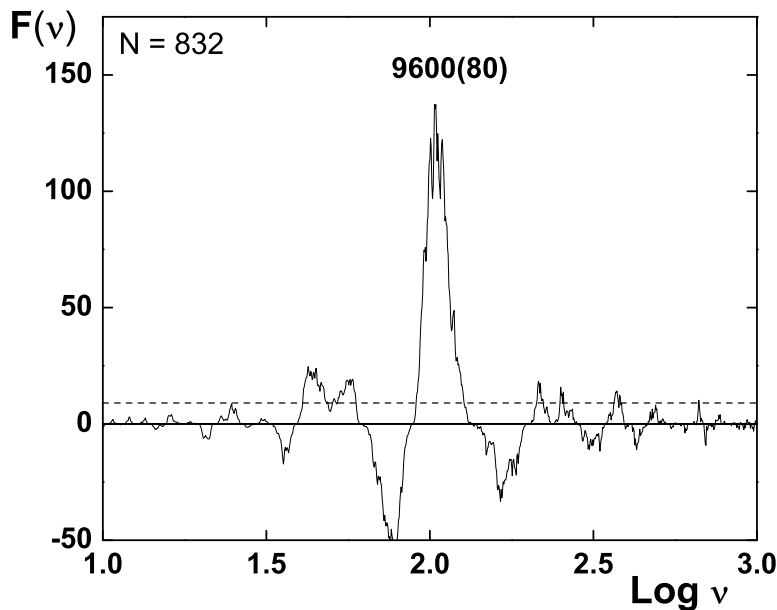


Рис. 3. Резонанс-спектр $F(\nu)$ частот вращения $N = 832$ тесных двойных звезд. Пунктирная линия показывает уровень значимости 3σ , по горизонтали – логарифм частоты ν , в мкГц; главный пик отвечает периоду 9600(80) с (с учетом фактора $2/\pi$)

(Что касается числа π в распределении периодов двойных, то, согласно теории Саншеза и др., 2013, во Вселенной действует симметрия “микро-макро-физики”, придающая главенствующую роль “кванту вращения” $\hbar \equiv h/2\pi$. А именно: каждое вращение объекта характеризуется целым числом “квантов”, или элементарных моментов импульса, \hbar , тогда как “квант спина” равен $\hbar/2$.)

4 G – из физики микромира или всей Вселенной?

Принятые значения G определены на основе *земных* гравитационных экспериментов, а также из соотношений констант микромира. Но *вся Вселенная* управляется гравитацией, поэтому соблазнительно вывести G из наблюдаемой крупномасштабной структуры Мироздания, определяемой этой константой. Для такого подхода в последние годы появились основания, и даже конкретные данные; в частности, как говорилось выше, – феномен ККК, не зависящий от красного смещения.

В статье Саншеза и др. (2013) “*Когерентная космология*” сформулирован принцип *ограниченно-дискретной физики*: “Физика – это поиск закономерностей между измеряемыми величинами, и она не может иметь дело с бесконечными величинами, которые невозможно измерить”. К этому заметим, что стандартная космология, основанная на гипотезе Большого взрыва и общей теории относительности, а также гипотеза о т. н. “черных дырах” любят описывать вещи, которые в принципе не должны существовать в природе: объекты с бесконечной плотностью вещества и бесконечной кривизной пространства, а также с мифическим моментом времени $t = 0$ “творения” Мира.

Саншез и др. подчеркивают, что настоящая физика должна иметь дело лишь с целыми числами, потому что т. н. вещественные и иррациональные числа – всего лишь изобретение математиков (цит. Кронекер, – см. Саншез и др., 2013): “Бог Сам создал целые числа, все остальное – продукт человека”. Утверждение иллюстрируется очевидными примерами: значительная (определяющая) роль резонансов – т. е. целых чисел или их отношений – в динамике частиц микромира, планетных

и спутниковых систем, в Космосе вообще, таблица Менделеева, серия Бальмера излучения водорода, спектр излучения черного тела, атомное квантование по Бору, целочисленные отношения в химии, биологии и генетике, феномен “единичного” электрического заряда и т. д.

Авторы отстаивают точку зрения, что в природе имеется приоритет целочисленных соотношений, – между *измеряемыми*, – над дифференциальным методом. И приводят известное, 100-летней давности, высказывание Пуанкаре: “*физические явления не подчиняются законам, задаваемым дифференциальными уравнениями*”. И далее: “... *поскольку Вселенная у нас одна, локальные уравнения не могут давать ее полного описания*”. И потому адекватную картину Мироздания авторы видят в *голографической* модели Вселенной, свободной от c и “свободных параметров”, см. ниже.

5 Формулы Саншеза

Тот факт, что некоторые (все?) константы физики определяются структурой “светоносной” Вселенной, *самим ее существованием*, следует из выражения Саншеза (подробнее см. Котов и др., 2012) для постоянной тонкой структуры, или электрической константы, $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137.036$. А точнее, из модели “черного атома”: во Вселенной *наблюдатель*, рассматривая изолированный атом водорода, определяет его средневзвешенный радиус $\langle r \rangle$ (в комптоновских длинах волн электрона $\lambda_e = \hbar/m_e c$) как отношение

$$\frac{\langle r \rangle}{\lambda_e} \equiv \frac{\sum n^{-1}}{\sum n^{-2}} \approx 136.9 \approx \frac{a_0}{\lambda_e} \equiv \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

с погрешностью 0.1 %. Здесь n – целое число, а суммирование производится от $n = 2$ до $n = R/\lambda_e$, где

$$R \equiv \frac{2\hbar^2}{Gm_H^2 m_e} = 1.30632(16) \times 10^{28} \quad - \quad (4)$$

теоретический радиус Вселенной в см, совпадающий в пределах ошибки с *измеренной* длиной Хаббла $R_H = c/H_0 = 1.28(5) \times 10^{28}$ см, т. е. 13.5(5) млрд свет. лет. (Здесь $H_0 = 72(2)$ км c^{-1} Мпс $^{-1}$ – постоянная Хаббла, $\sum n^{-1} = \ln(R/\lambda_e) + \gamma - 1$, – с константой Эйлера $\gamma = 0.577215\dots$, – и $\sum n^{-2} = \pi^2/6 - 1$.)

Знаменатель $\sum n^{-2}$, входящий в (3), представляет собой сумму “сферических” вероятностей. Объясняется это тем, что для нас электроны, – мысленно, по логике КМ, – распределены на сферах радиусов r_n вокруг центра, ядра атома. Но частицы *коллапсируют мгновенно* на круговые плоские орбиты модели атома Резерфорда-Бора в момент редукции их волновых функций при наблюдении, “распознавании”, при любом “контакте” с внешним миром или просто при регистрации наблюдателем, другим атомом или другим объектом. (Подчеркнем, что в теории *коллапс*, или *редукция волновой функции*, – уже давно, “по умолчанию”, – происходит *мгновенно* на любом расстоянии, причем с полным игнорированием c и вообще без всякой скорости.)

Отсюда заключаем, что (3) – поразительный пример “квантового голизма”, где микрофизика и космология объединены КМ. Это также – простейший и доходчивый аргумент в пользу критического состояния нашей Вселенной.

Другая формула Саншеза и др. (2011), полученная для “космологического периода” $P_C \approx P_0$, объединяет гравитационное, электрическое и слабое взаимодействия в одной простой структуре (магнетизм рассматривается как релятивистская часть электричества):

$$P_C = \frac{\tau_e}{(\alpha_G \alpha_w)^{1/2}}, \quad (5)$$

где $\tau_e \equiv \lambda_e/c \equiv \hbar/m_e c^2$ – приведенный комптоновский период электрона, $\alpha_G \equiv Gm_p m_H/\hbar c = 5.9090(7) \times 10^{-39}$ – безразмерная константа гравитационного взаимодействия (между протоном и атомом водорода массы m_H) и $\alpha_w = G_F m_e^2/\hbar^3 = 3.045647(2) \times 10^{-12}$ – безразмерный коэффициент, характеризующий слабое взаимодействие, с “константой слабого взаимодействия” $G_F =$

$1.4358508(8) \times 10^{-49}$ эрг см³ (постоянная Ферми: см. Карр и Рис, 1979). После подстановки в (5) численных значений получаем $P_C = 9601.7(6)$ с, что с точностью $\approx 10^{-4}$ совпадает с $P_0 \approx 9600.6$ с.

Саншез и др. получили (5) из рассмотрения энергетических квантов трех взаимодействий, сочетающих безразмерные константы фундаментальной физики с такими космологическими параметрами, как постоянная Хаббла и возраст Вселенной. И видно, что за математическим формализмом (3)–(5) скрывается реальный мир, наблюдаемые физические силы. Отсюда также следует, что вся Вселенная в принципе управляется законами КМ: это квантово-механическое Мироздание, – хотя на практике мы, конечно, живем на его макроскопическом уровне.

6 Снова о G всемирного тяготения

Период P_0 фотосферы Солнца наблюдался в КрАО в 1974–1982 гг. (подтвержден другими обсерваториями и анализом хромосферных вспышек за 1947–1980 гг., см. Котов и Левицкий, 1987). Затем в спектре мощности стал доминировать период 9597.936(16) с, природа которого неясна (Котов и Ханейчук, 2011). Интригует то, что он смещен относительно P_0 на величину, отвечающую синодическому периоду Юпитера 399 сут, и имеет, наверное, солнечную природу. Период же P_0 – космологического характера, поскольку обнаружен в вариациях светимости активных ядер галактик (Котов и Лютый, 2010). Поэтому для дальнейшего рассмотрения взят именно этот период.

Преобразовав (5) и приняв за P_C эмпирическую величину P_0 , для константы гравитации получаем:

$$G = \frac{\hbar c}{\alpha_w m_p m_H} \left(\frac{\tau_e}{P_0} \right)^2 = 6.67543(2) \times 10^{-8}, \quad (6)$$

с точностью 3×10^{-6} . Это в 40 раз лучше, чем неопределенность рекомендованного выше значения 2012 г. (и примерно на два порядка лучше, чем погрешности других значений G в табл. 1). Особо отметим, что величина

$$T \equiv \frac{\tau_e}{\alpha \alpha_w (\alpha_G \alpha_w)^{1/2}} \equiv \frac{P_C}{\alpha \alpha_w} = 13.690(1), \quad (7)$$

в млрд лет, с точностью 1 % согласуется с т. н. “возрастом Вселенной” 13.75(13) млрд лет, принятым в современной стандартной космологической модели.

В связи с этим, снова отбросив бесконечность, Саншез и др. (2013) утверждают: поскольку число событий не может быть бесконечным, Мирозданию требуется понятие *циклической* Вселенной, с циклом $T \approx 13.7$ млрд лет. Именно он воспринимается стандартной космологией как кажущийся “возраст” Вселенной.

7 Заключение: притягательное G

Физики и многие астрономы привыкли к мысли, что физика – “основа всего” и всегда “фундаментальная”. И что практически все на свете может быть объяснено законами физики, предопределено и предсказано заранее на все случаи этими законами (в небесной механике – законами Кеплера). И они увлечены поисками простоты законов природы – в отличие, скажем, от биологии, химии и экологии, где закономерности ищутся в междисциплинарном взаимодействии. Ищут всегда и во всем простоту и универсальность; ищут константы, их “постоянность”.

И это множество констант – как физических, так и математических (например, π и неперово число e) – эффективно “управляет” Миром. Хотя мы и далеки от понимания смысла конкретных численных значений констант. Поэтому Эверетт и ввел понятие вектора состояний для всей Вселенной, который якобы и есть реальность, составленная из многих миров (теория “расщепленного мира”, избавленная от постулата коллапса волновой функции; или идея о 10^{100} слабо-несовершенных копий реальности, – см. Архангельская и др., 2006). Но астрономия плюс космология – наука не о

“чудеса творения”, а о физике и Космосе, о природе Вселенной. И наше определение G – см. (6) – может быть не хуже предыдущих. Будучи основанным на ККК, *охватывающем всю наблюдаемую Вселенную и свободном от c* , оно может оказаться более надежным в настоящее время. Но этот вывод, конечно, требует подтверждения новыми измерениями или определениями гравитационной постоянной.

Многие ученые начала XXI в. признают, что на деле физика в кризисе (цит. Нагель, 2002): “Мы утратили наши идеалы и общую цель”. Потому и вопрос, который задает “нобелеат” Вильчек (2003): почему нам удобно описывать мир в единицах “г”, “см”, “с”, столь далеких от “планковских”? Может быть, именно потому, что реальный мир свободен от c , а наша теория от c несвободна. Может, это обстоятельство связано с нашим *восприятием* физической реальности, с типом нашего взаимодействия с ним? В любом случае мы уверены, что Вселенная не менее разумна, чем человек.

Я глубоко признателен Ф.М. Саншезу за стимулирующие дискуссии о физике Солнца, роли звезд и галактик, о загадочных свойствах Мироздания и константах природы, а также рецензентам за ряд полезных замечаний.

Литература

- Аллен К.У. // Астрофизические величины. М.: Мир. 1977.
- Архангельская И.В., Розенталь И.Л., Чернин А.Д. // Космология и физический вакуум. М.: Ком-Книга. 2006.
- Берингер и др. (Beringer J., Arguin J.-F., Barnett R.M., et al.; Particle Data Group) // Phys. Rev. 2012. V. D86. P. 010001; <http://pdg.lbl.gov>.
- Вейнберг С. // Гравитация и космология. М.: Мир. 1975.
- Вильчек (Wilczek F.) // Phys. Today. 2003. V. 56(2). P. 10.
- Дю-Монд Дж. // Успехи физ. наук. 1961. Т. 73(2). С. 333.
- Карр и Рис (Carr B.J., Rees M.J.) // Nature. 1979. V. 278. P. 605.
- Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С. // Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа. 1964.
- Котов В.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. № 1. С. 169.
- Котов В.А., Левицкий Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 77. С. 51.
- Котов В.А., Лютый В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. № 1. С. 187.
- Котов В.А., Саншез Ф.М., Бизуар К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 57.
- Котов В.А., Ханейчук В.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С. 99.
- Куликовский П.Г. // Справочник любителя астрономии. М.: Наука. 1971.
- Мор и Тейлор (Mohr P.J., Taylor B.N.) // Phys. Today. 2001. V. 54(3). P. 29.
- Нагель (Nagel S.) // Phys. Today. 2002. V. 55(9). P. 55.
- Нарликар Дж. // Неистовая Вселенная. М.: Мир. 1985.
- Рябов Ю.А. // Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1972. С. 587.
- Саншез и др. (Sanchez F.M., Kotov V.A., Bizouard C.) // J. Cosmology. 2011. V. 17. P. 7225.
- Саншез и др. (Sanchez F.M., Kotov V.A., Bizouard C.) // Galilean Electrodynamics. 2013 (в печати).
- Сена Л.А. // Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука. 1969.
- Тоннела М.-А. // Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: ИЛ. 1962.
- Тэрнер (Turner M.S.) // Phys. Today. 2003. V. 56(9). P. 10.