

Попытка простого и краткого
изложения теории
относительности:
от формулы Эйнштейна
к теореме Пифагора

Л.Б. Окунь

okun@itep.ru

ИТЭФ, Москва, Россия

Аннотация

Это слайды доклада на сессии секции ОЯФ ОФН РАН в ИТЭФ 27 ноября 2007 года

Формирование фундаментальных понятий физики ещё не завершено и вряд ли завершится в обозримом будущем.

Тем важнее не забывать высказывание, приписываемое Фоку: “Физика – наука, по существу простая. Главная проблема в ней – понимать, что какая буква означает.”

Введение

Физика XX века в корне изменила представление о том, что такое материя, и по-новому связала между собой такие её свойства как энергия, импульс и масса.

Постараюсь рассказать об этом максимально просто.

Узловые слайды отмечены **зелёным**.

3

Часть первая

Относительность

За

Принцип относительности

Со времён Галилея и Ньютона термин принцип относительности выражает невозможность, оставаясь внутри замкнутого пространства (например, внутри корабля), обнаружить равномерное и прямолинейное движение этого пространства. Эйнштейн обобщил этот принцип на случай существования предельной скорости распространения сигналов. Планк назвал построенную таким образом теорию теорией относительности Эйнштейна.

Часть вторая

Размерности

4а

Единицы, в которых $c = 1$

Максимальную скорость в природе обычно называют скоростью света и обозначают c . При рассмотрении формул теории относительности удобно пользоваться такой системой единиц, в которой c выбрана в качестве единицы скорости. В такой системе единиц во всех формулах следует положить $c = 1$, что очень упрощает их. Если измерять время в секундах, то в этой системе единиц расстояние следует измерять в световых секундах: одна световая секунда равна $3 \cdot 10^{10}$ см.

Размерные множители

Обозначим $[a]$ размерность физической величины a . Умножение a на любую степень мировой постоянной c меняет её размерность, но не меняет её физической сути. Обычно размерности импульса, массы и скорости частицы связаны соотношением $[\mathbf{p}] = [m][\mathbf{v}]$, а для энергии $[E] = [m][\mathbf{v}^2]$.

6

Введём безразмерную скорость \mathbf{v}/c и начиная с этого момента будем именно её обозначать \mathbf{v} . Аналогично будем называть импульсом \mathbf{p} то, что обычно обозначают \mathbf{p}/c . А энергией будем называть величину $e = E/c^2$. Очевидно, что после этого размерности \mathbf{p} , e и m станут одинаковыми, и потому эти величины можно будет измерять в одних и тех же единицах, например – в граммах, или в электронвольтах, как это принято в физике элементарных частиц.

ба

О букве e для энергии

Выбор буквы e для обозначения энергии частицы может вызвать недовольство читателя, поскольку обычно этим символом обозначают электрон и электрический заряд. Но к путанице такой выбор привести не может, а зато позволяет компактно записать формулы для одной частицы, напоминая, что эти формулы записаны в системе единиц, в которой $c=1$. С другой стороны, как будет видно из дальнейшего, букву E удобно использовать для обозначения энергии двух или большего числа частиц.

Я видел формулу Эйнштейна с малым e на постере на Рублёвке. Не понимаю, почему именно физикам это режет глаза?

Часть третья

Одна частица

6с

Относительные величины

Кинетическая энергия любого тела – величина относительная: она зависит от того, в какой системе отсчёта её измеряют. То же относится и к импульсу тела. В отличие от них масса тела – величина абсолютная: она характеризует тело само по себе, безотносительно к наблюдателю.

7

Инвариантная масса

Этому соответствует следующее определение массы тела (частицы):

$$m^2 = e^2 - p^2 \quad . \quad (1)$$

Здесь и ниже $p = |\mathbf{p}|$. Аналогично ниже $v = |\mathbf{v}|$.
Заметьте, что энергия и импульс данного тела не ограничены сверху, а его масса фиксирована.
Соотношение между e , \mathbf{p} и m не может быть линейным, поскольку \mathbf{p} – вектор, а e и m – скаляры в трёхмерном пространстве.

4-ИМПУЛЬС

В теории относительности энергия и импульс тела образуют 4-мерный вектор энергии-импульса p_i ($i = 0, a$), где $p_0 = e$, $p_a = \mathbf{p}$, $a = 1, 2, 3$.

Масса является лоренцовым скаляром, равным квадрату p_i .

4-мерное пространство псевдоевклидово; отсюда знак минус в формуле (1).

9

СВЯЗЬ ИМПУЛЬСА И СКОРОСТИ

Импульс тела связан с его скоростью \mathbf{v} формулой

$$\mathbf{p} = e\mathbf{v} . \quad (2)$$

Эта формула самым простым образом удовлетворяет тому, что 3-вектор импульса должен быть пропорционален 3-вектору скорости, а размерный коэффициент пропорциональности не должен обращаться в ноль для безмассового фотона.

В теории относительности сохранение так определённого импульса является следствием однородности 3-пространства, а сохранение энергии – следствием однородности времени (теорема Нётер).

Теорема Пифагора

Формула (1) представлена на рис. 1
прямоугольным треугольником, в котором m и p
– катеты, а e – гипотенуза.

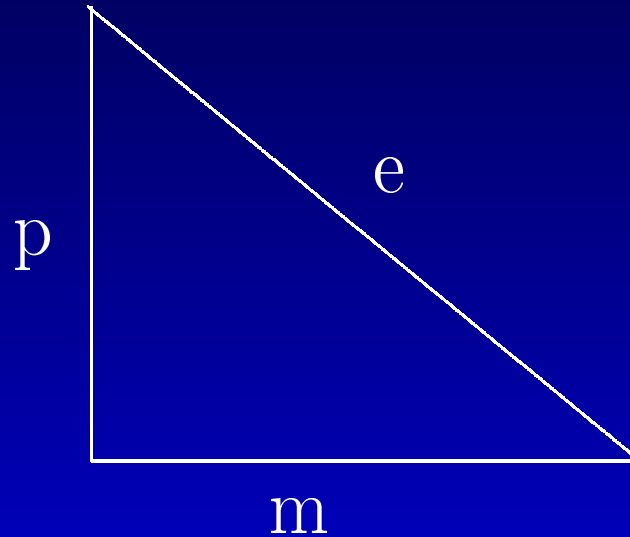


Рис. 1

Переход от $m \neq 0$ к $m = 0$

Формула (1) очевидным образом справедлива и при $m = 0$. А формула (2) справедлива и при $v = 1$. Отсюда следует, что существует плавный переход к безмассовым частицам от массивных, когда энергия последних намного превосходит их массу.

11

Физика от $p = 0$ до $p = e$

Рассмотрим формулы (1) и (2) сначала при импульсе, равном нулю, затем в пределе очень малых импульсов, когда $p \ll m$, затем – в пределе очень больших импульсов, когда $p \sim e \gg m$ и, наконец, в случае безмассовых фотонов.

Будем называть случай малых импульсов и скоростей Ньютоновым, а случай очень больших импульсов и скоростей, близких к скорости света, – ультрарелятивистским. Но начнём с покоящегося тела.

Часть четвёртая

Энергия покоя

12а

Тело в покое

Если тело покоится, то его скорость и импульс равны нулю, а его энергия e по определению равна энергии покоя e_0 . В этом случае из уравнения (1) следует, что

$$e_0 = mc^2, \quad (3)$$

Горизонтальный “двуугольник”

Таким образом, для покоящегося тела треугольник рис. 1 “схлопывается” в горизонтальный “двуугольник”.

$$\frac{e_0}{m}$$

Рис. 2

Великое открытие Эйнштейна

В единицах, в которых $c \neq 1$, уравнение (3) имеет вид:

$$E_0 = mc^2 . \quad (4)$$

Осознание, что покоящееся тело обладает колоссальной энергией, было великим открытием Эйнштейна.

15

“Знаменитая формула”

Очень часто (особенно в научно-популярной литературе) уравнение (4) записывают в виде “знаменитого уравнения Эйнштейна”, опуская индекс 0:

$$E = mc^2. \quad (5)$$

Такое, на первый взгляд невинное, упрощение приводит к недопустимой путанице в понимании основ физики. В частности, оно приводит к абсолютно ложному представлению о том, что согласно теории относительности масса тела эквивалентна его полной энергии и потому зависит от его скорости.

Вопрос не вкуса, а понимания

Часто можно услышать, что введение понятия массы, зависящей от скорости, это “вопрос вкуса”. Разумеется, E/c^2 можно обозначить отдельной буквой, можно даже выбрать в качестве такой буквы m , хотя это не более разумно, чем обозначить E/c буквой p . Но это “переодевание” приводит к введению излишнего понятия массы покоя m_0 и затрудняет понимание теории относительности.

16a

Часть пятая

Механика Ньютона

16b

Импульс в механике Ньютона

Ньютонова механика с высокой точностью описывает движение макроскопических тел в земных условиях, поскольку их скорости гораздо меньше скорости света. Так, скорость пули – порядка 1 км/сек, что соответствует $v = 1/300000$, а $v^2 = 10^{-11}$. В этих условиях уравнения (2) сводится к

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} . \quad (6)$$

Уравнение (1) в Ньютоновом пределе в схематическом виде изображено на рис. 3.

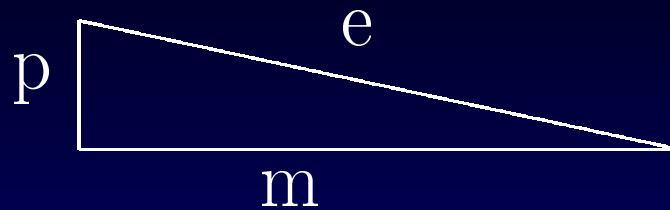


Рис. 3

Отрезок, изображающий p , на этом рисунке непропорционально велик. При соблюдении масштаба он должен был бы измеряться микронами.

Кинетическая энергия e_k

При малых скоростях разумно переписать формулу (1) в виде:

$$e^2 - m^2 = p^2 \quad (7)$$

и представить левую часть этой формулы в виде

$$(e - m)(e + m) = p^2 \quad (8)$$

Это позволит получить нерелятивистское выражение для кинетической энергии не прибегая к обычному разложению в ряд квадратного корня. Учтём, что полная энергия e равна сумме энергии покоя e_0 и кинетической энергии e_k , и, следовательно, $e = m + e_k$.

Энергия в механике Ньютона

В Ньютоновом пределе ($e_k \ll m$). (Для пули, например, $e_k/m = 10^{-11}$.) Поэтому e с высокой точностью можно заменить на m в выражении (2) для импульса и в сомножителе $(e + m)$ в уравнении (8). Из последнего сразу же следует выражение для кинетической энергии e_k в механике Ньютона:

$$e_k = p^2/2m = mv^2/2 \quad . \quad (9)$$

Часть шестая

Ультрарелятивизм

20а

Коллайдеры

Рассмотрим теперь другой предельный случай, когда $e/m \gg 1$. Именно такое соотношение между энергией и массой осуществляется в физике высоких энергий. Например, для электронов в коллайдере LEP в ЦЕРНе $e/m = 10^5$, поскольку $m=0.5$ МэВ, а $e=50$ ГэВ . И для протонов в коллайдере LHC, который расположен в том же тоннеле, где раньше работал LEP, $e/m \sim 10^4$. (Здесь $m \sim 938$ МэВ, а $e \sim 7$ ТэВ.)

Вертикальный треугольник

Треугольник для протона в ЛНС весьма схематически изображен на рис. 4. Его основание на четыре порядка меньше его гипотенузы.

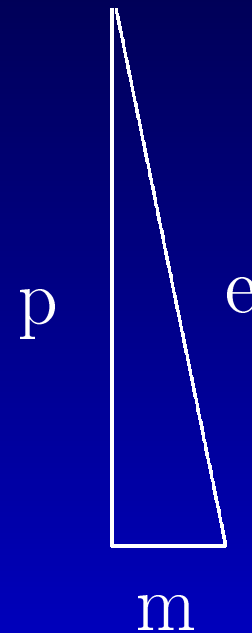


Рис. 4

Зачем нужны коллайдеры?

Если импульсы сталкивающихся частиц равны и противоположны, как например в LHC или LEP, то практически вся энергия сталкивающихся частиц идёт на рождение новых частиц.

21b

Нейтрино

Ещё более ультрарелятивистскими являются нейтрино: их массы составляют доли эВ, а энергии – МэВы у нейтрино, летящих из Солнца и ядерных реакторов, и ГэВы у нейтрино от распадов частиц, рождающихся в космических лучах и на ускорителях.

При таких высоких энергиях нейтрино основание треугольника, схематически изображенного на рис. 4, на много порядков меньше и его вертикального катета, и его гипотенузы.

Осцилляции нейтрино и $m^2/2e$

Из уравнения $(e - p)(e + p) = m^2$ сразу же следует, что

$$e - p \simeq m^2/2e.$$

Различие масс трёх нейтрино ν_1, ν_2, ν_3 , обладающих определёнными массами в вакууме, приводит к осцилляциям между нейтрино, не обладающими определёнными массами, но обладающими определёнными флейворами: ν_e, ν_μ, ν_τ . Данные по осцилляциям нейтрино дают:

$$\Delta m^2_{21} = (0.8 \pm 0.04) \cdot 10^{-4} \text{эВ}^2,$$

$$\Delta m^2_{32} = (25 \pm 6) \cdot 10^{-4} \text{эВ}^2.$$

ФОТОН

Как известно, масса фотона равна нулю.

Поэтому для фотона $e = p$ и треугольник рис. 4 схлопывается в вертикальный двуугольник рис. 5

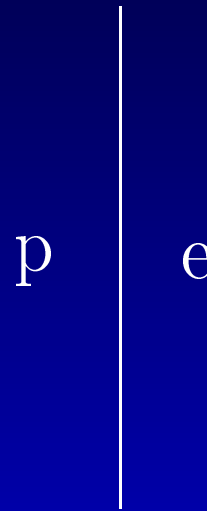


Рис. 5

Фотон и энергия покоя?

Уместно заключить рассмотрение одночастичной физики вопросом : “ Совместимо ли с понятием энергии покоя существование безмассового фотона?” Легко видеть, что совместимо. Ведь чем меньше масса частицы, тем ближе к c скорость, с которой должен двигаться наблюдатель, чтобы перейти в систему её покоя. Для очень лёгких одиноких частиц эта система становится иррелевантной вместе с самим понятием e_0 . Поэтому вполне согласуются с предельным переходом значение $e_0 = 0$ при $m = 0$.

24a

Часть седьмая
Две свободные частицы

24b

Столкновение двух частиц

В случае столкновения двух частиц сравнение системы покоя одной из них с системой покоя их общего центра инерции демонстрирует преимущества последней. Это обстоятельство используется в коллайдерах.

24с

Масса системы частиц

Как известно, для изолированной системы частиц полная энергия E и полный импульс \mathbf{P} сохраняются. Так как энергия и импульс аддитивны, то для двух свободных частиц

$$E = e_1 + e_2 \quad , \quad (10)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \quad . \quad (11)$$

Определим величину M формулой:

$$M^2 = E^2 - \mathbf{P}^2 \quad . \quad (12)$$

Массы аддитивны при $v = 0$

Уравнение(12) инвариантно относительно лоренцевых преобразований, как и уравнение (1). Поэтому величину M естественно назвать массой системы двух частиц. В статическом пределе, когда p_1 и p_2 равны нулю, из уравнения (12) следует, что

$$M = e_{01} + e_{02} = m_1 + m_2 \quad . \quad (13)$$

Таким образом, в ньютоновом пределе M действительно равно сумме масс двух частиц, т.е. массы аддитивны.

Массы не аддитивны при $v \neq 0$

Однако при больших скоростях связь между M и массами m_1, m_2 отсутствует. Например, в коллайдерах ЦЕРН M на четыре порядка превышает массу электронов или протонов (см. раздел 3).

Величина M кардинальным образом зависит от относительного направления импульсов двух частиц, поскольку сумма двух векторов зависит от угла между ними. Так, для двух фотонов, летящих в одном направлении,

$$P = |\mathbf{P}| = |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2| = p_1 + p_2 \quad . \quad (14)$$

Коллинеарные фотоны

Для фотонов $p_1 = e_1$, а $p_2 = e_2$. И потому для пары фотонов, летящих в одном направлении,

$$P = p_1 + p_2 = e_1 + e_2 = E \quad . \quad (15)$$

А тогда из уравнения (12) следует, что в этом случае масса пары фотонов $M = 0$. А это значит, что масса “игольного” пучка света равна нулю.

А если фотоны разлетаются

Однако, если фотоны летят в противоположные стороны с одинаковыми энергиями, то $\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2$, а $\mathbf{P} = 0$. В этом случае энергия покоя системы двух фотонов просто равна сумме энергий этих фотонов, а масса этой системы равна

$$M = E_0 = 2e \quad . \quad (16)$$

Шок

Разумеется, утверждение о том, что пара двух безмассовых частиц имеет огромную массу, может вызвать шок у неподготовленного читателя.

Какой смысл имеет понятие энергия покоя для двух фотонов, каждому из которых “покой лишь только снится”? Что покоится в этом случае?

30

Ответ очевиден

Ответ очевиден: покоится центр инерции двух фотонов. Но если для одной покоящейся частицы энергия покоя это энергия, скрытая в её массе, то для двух фотонов это просто сумма их энергий (кинетических!) в системе отсчёта, в которой их импульсы равны по величине и противоположны по направлению. Скрытой энергии в этом случае нет!

30a

Аннигиляция позитрония

Как известно, nihil по-латыни значит ничто. При аннигиляции позитрония $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ величина M сохраняется, поскольку сохраняются E и P . В начальном состоянии M равно сумме масс электрона и позитрона, а в конечном – сумме энергий двух фотонов в системе покоя позитрония. Таким образом, энергия покоя электрона и позитрона полностью переходит в кинетическую энергию фотонов, но массы начального и конечного состояний в этом процессе одинаковы, как того требует сохранение полной энергии и полного импульса.

Распады мезонов

Аналогичным образом при распаде K -мезона на два π -мезона или три π -мезона энергия покоя каона переходит в сумму полных энергий пионов, каждая из которых имеет вид $e = e_k + m$. Но масса системы двух или трёх пионов, возникших при распаде каона, равна массе каона.

32

Что называть материей?

Во всех распадах энергия покоя переходит в энергию движения, а полная энергия изолированной системы сохраняется.

Сохраняется и масса системы, но не массы отдельных её частиц. Массивные частицы переходят в менее массивные, а то и вовсе безмассовые. Разумно называть частицами материи не только такие массивные частицы как протоны и электроны, но и очень лёгкие нейтрино, и безмассовые фотоны.

32a

Чеширский кот ?

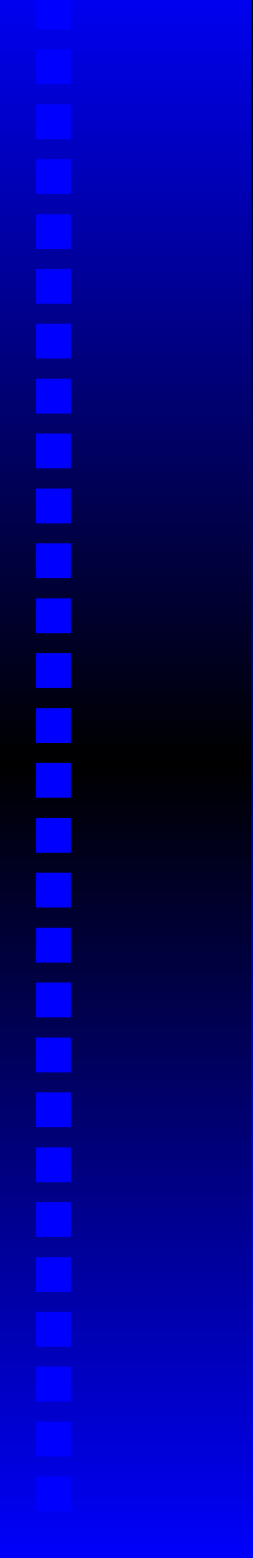
Материя в распадах и аннигиляции не исчезает подобно чеширскому коту, от которого остаётся только его улыбка – энергия. Носителями энергии всегда являются частицы материи во всех изученных до сих пор процессах. Энергии без материи (“чистой энергии”) не бывает. Это, правда, не относится к так называемой “тёмной энергии”, которая была открыта недавно и которая проявляется в ускоряющемся разлёте сверхновых звёзд. Похоже, что её носителем является вакуум. Но в лабораторных опытах с частицами тёмная энергия не проявляется.

32b

Окружающая среда

Если распад (или реакция) происходит в среде, то в результате распада система перестаёт быть изолированной из-за взаимодействия продуктов распада с частицами среды. При этом среда будет нагреваться, а её энтропия будет расти.

32с



Часть восьмая

Несвободные частицы

32d

Масса газа

Во всех рассмотренных выше случаях, когда масса системы частиц была больше суммы их масс, эти частицы свободно разлетались.

Обратимся теперь к ситуации, когда они разлететься не могут.

Такая ситуация осуществляется, например, в часто обсуждаемом мысленном опыте с газом молекул или фотонов в замкнутом сосуде.

Полный импульс такого газа равен нулю, поскольку газ изотропен: $\mathbf{P} = \sum \mathbf{p}_i = \mathbf{0}$. Поэтому полная масса M такого газа равна его полной энергии E и равна сумме энергий отдельных частиц: $M = E = \sum e_i$.

Масса нагретого газа

При нагревании газа полный импульс не меняется, а полная энергия увеличивается, т.к. растёт кинетическая энергия отдельных частиц. В результате масса газа в целом растёт, в то время как масса каждой отдельной частицы остаётся неизменной. (В литературе можно встретить неверное утверждение, что при увеличении кинетической энергии частиц (фотонов) растёт их масса.)

Масса утюга

Аналогично должна расти при нагревании и масса утюга, хотя массы колеблющихся атомов остаются неизменными. Однако, формула для массы системы свободных частиц (12) здесь неприменима, поскольку частицы в этом случае не свободны, а связаны в кристаллической решётке металла. Разумеется, увеличение массы утюга слишком мало, чтобы его можно было измерить.

34

Масса атомного ядра

Так же неприменима формула (12) и к нуклонам в атомных ядрах. Но здесь эффект настолько велик, что от него зависит судьба жизни на Земле. Начнём с ядра тяжёлого водорода. Масса дейтрона меньше суммы масс протона и нейтрона, составляющих его. Энергия связи нуклонов в дейтроне равна 2,2 МэВ. Чтобы развалить дейтрон на нуклоны, надо затратить энергию, равную или превышающую энергию связи. Атомные ядра остальных элементов Таблицы Менделеева тоже существуют благодаря энергии связи нуклонов в этих ядрах.

Слияние и деление ядер

Энергия связи – в начале Таблицы – максимальна у ядра гелия, а в середине Таблицы – у ядра железа. Именно поэтому при образовании гелия из водорода в реакциях слияния на Солнце и в водородных бомбах выделяется большое количество кинетической энергии. А в ядерных реакторах и атомных бомбах эта энергия образуется в реакциях деления при развале тяжелых ядер урана и плутония на более легкие ядра в середине Таблицы Менделеева.

Химические реакции

Существенно меньшая энергия, измеряемая электрон-вольтами, выделяется в химических реакциях за счет различия энергий связи электронов в разнообразных химических соединениях. Однако источником кинетической энергии и в химических, и в ядерных реакциях является разность масс начальных и конечных частиц, участвующих в этих реакциях.

37

Энергия связи

Энергия связи электронов в атомах много меньше массы электрона. Энергия связи нуклонов в атомных ядрах много меньше массы нуклона. Поэтому понятие энергии связи и в атомах, и в ядрах можно пояснить с помощью нерелятивистского понятия потенциальной энергии. Энергия связи ϵ равна сумме положительной кинетической энергии связанной частицы и её отрицательной потенциальной энергии. Потенциальная энергия электрона, скажем, в атоме водорода определяется законом Кулона:

$$U = -\alpha/r \quad , \quad (17)$$

где $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$, а e – заряд электрона.

Соотношение неопределённости

И для атомов, и для ядер очень важны закономерности квантовой механики и, в частности, соотношение неопределённости. Как известно, произведение неопределённостей импульса Δp и координаты Δx должно быть больше, чем квант действия \hbar . Поэтому частицы в атомах не имеют определённых значений импульса; но они имеют определённые значения энергии.

40

Часть девятая

Гравитация

40a

Гравитационное взаимодействие

На различных эмблемах изображаются орбиты электронов в атомах, подобные орбитам планет. Из только что сказанного должно быть ясно, что таких орбит в атомах нет из-за квантовой механики. Для макроскопических тел и уж конечно для таких тяжелых, как планеты, квантовые эффекты ничтожны. Их орбиты прекрасно описываются классической механикой.

Константа Ньютона

Потенциальная энергия Земли в гравитационном поле Солнца определяется законом Ньютона:

$$U = -\frac{GMm}{r}, \quad (18)$$

где M – масса Солнца, m – масса Земли, r – расстояние между их центрами, а G – константа Ньютона:

$$G = 6.71 \cdot 10^{-39} \hbar c (\text{GeV}/c^2)^{-2}. \quad (19)$$

(Здесь использованы единицы, в которых $c \neq 1$.)

Тензор энергии-импульса

В Ньютоновой физике источником гравитации является масса. В теории относительности источником гравитации является тензор энергии-импульса $p_i p_k$, который, будучи делённым на c , служит как бы “гравитационным зарядом”. (Напомню, что p_i – вектор энергии-импульса, $i = 0, 1, 2, 3$.)-

Пропагатор гравитационного поля пропорционален $g^{il} g^{km} + g^{im} g^{kl} - g^{ik} g^{lm}$, где g^{ik} – метрический тензор.

Рассмотрим частицу находящуюся в статическом гравитационном поле, для которого в силу статичности $l, m = 0$.

Яблоко и фотон

В этом случае пропагатор пропорционален $2g^{i0}g^{k0} - g^{ik}g^{00}$,

а тензор энергии-импульса, умноженный на пропагатор сводится к простому выражению:

$$p_i p_k \Rightarrow (2e^2 - m^2).$$

Следовательно. для нерелятивистского яблока с массой m “гравитационный заряд” равен m , а для фотона с энергией e – он равен $2e$. Обратите внимание на множитель 2. Кинетическая энергия притягивается сильнее, чем скрытая энергия, заключённая в массе.

43а

Фотон в поле Солнца

Взаимодействие фотона с гравитационным полем должно вызывать отклонение луча света далекой звезды вблизи солнечного диска. . В 1915 году Эйнштейн вычислил угол отклонения и показал, что он должен составлять $4GM/c^2R \simeq 1,75''$. (Здесь M и R – масса и радиус Солнца.) Это предсказание было подтверждено во время солнечного затмения в 1919 году, что вызвало огромный интерес к теории относительности.

Атом в поле Земли

При подъёме тела над Землёй его потенциальная энергия растёт пропорционально его массе.

Поэтому разность энергий двух уровней атомного ядра должна быть тем больше, чем выше этаж дома, на котором ядро находится.

44а

Энергия фотона сохраняется

С другой стороны, частота фотона, летящего в статическом гравитационном поле, а следовательно, и его энергия не должны меняться.

В результате фотон, испущенный на нижнем этаже дома при переходе между двумя уровнями ядра, не сможет вызвать обратного перехода в том же ядре на верхнем этаже. Это теоретическое предсказание было подтверждено в 1960х годах после открытия эффекта Мёссбауера, позволяющего измерять ничтожно малые смещения ядерных уровней.

44b

Но фотон краснеет

Этот эффект часто (и неправильно!) объясняют тем, что фотон, подобно камню, теряет энергию, преодолевая гравитационное поле Земли. Как уже отмечено выше, энергия и частота фотона в статическом гравитационном поле не меняются. Но его длина волны растёт по мере подъема и возрастает его скорость, стремясь к предельной скорости c . То, что фотон в гравитационном поле имеет скорость не равную c , не противоречит фундаментальному свойству, согласно которому скорость свободного фотона равна c : ведь фотон в гравитационном поле несвободный.

44с

Показатель преломления

При удалении фотона от источника гравитационного поля его скорость возрастает, а при приближении – падает. Гравитационное поле, как прозрачная среда, имеет коэффициент преломления. Это наглядно объясняет отклонение света в поле Солнца. и в гравитационных линзах галактик.

44d

Часть десятая

Семантика

45

“Склеенные понятия ”

С времён Ньютона “склеены” понятия массы и материи (вещества): “масса пропорциональна плотности и объему”. В статьях Эйнштейна масса “склеена” с инерцией и с гравитацией.

46

Поэты о терминах

Д.Самойлов о словах: “ Их протирают как стекло. И в этом наше ремесло” В. Маяковский: “Улица корчится безъязыкая. Ей нечем кричать и разговаривать”

47

Надо протирать и расклеивать

48

Доклады

1. Что такое масса? (Из истории теории относительности) в сборнике "Исследования по истории физики и механики. 2007" М. Наука 2007 (masshistory.pdf)

2. Энергия и масса в теории относительности и вокруг неё. Доклад на заседании бюро ОФН РАН 6.06.2007 (energymasscolor.pdf)

3. The evolution of the concepts of energy, momentum and mass from Newton and Lomonosov to Einstein and Feynman. Talk at the 13th Lomonosov conference. August 23, 2007 (302.pdf)

Благодарности

Без помощи С.И.Блинникова, М.Б. Волошина, В.И. Кисина и Б.Л. Окуня составление этого доклада было бы невозможно. Я глубоко благодарен Э.Г. Гуляевой за требование логично и последовательно изложить вопрос о массе одной частицы и двух частиц, а А.А. Абрикосову, В.Р. Золлеру, О.В. Канчели – за полезные замечания.

50