

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Нерешённые проблемы фундаментальной физики

И.Ф. Гинзбург

За последние годы удалось узнать очень много нового о строении Вселенной и об элементарных взаимодействиях. Эти новые знания и критическое осмысление ряда давно известных результатов и построений делают актуальными вопросы, перечисляемые в статье. В этом списке автор статьи совсем не имел в виду какое-либо целеполагание. Вопросы "зачем", "почему" — здесь просто сокращённые версии вопросов типа: существует ли какой-либо (быть может, пока неизвестный) закон Природы, позволяющий понять происхождение данного свойства или явления? Предлагаемый список не претендует на полноту и отражает научные интересы автора.

PACS numbers: 01.70.+w, 11.15.-q, 12.60.-i

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200905d.0525

Содержание

1. Введение (525).
 2. Правильно ли мы понимаем то, что как будто знаем? (525).
 3. Почему мир именно таков? Непонятные числа и их соотношения (526).
 4. Удивительные факты, проявления неизвестных взаимодействий...? (528).
 5. Что дальше (528).
 6. Некоторые понятия (529).
- Список литературы (529).

1. Введение

Довольно подробная картина современного состояния наших знаний о мире элементарных частиц и об астрофизике содержится во многих обзорах последних лет. Там подробно описаны многие понятия и заданы некоторые вопросы, получения ответов на которые можно ожидать в экспериментах более или менее ближайшего будущего (см., например, [1–8]).

Чрезвычайно интересный набор проблем, решение которых требует более детального, чем сегодня, понимания свойств вещества или конструирования вещества с желательными свойствами, представлен в книге [9].

В настоящей статье перечисляются вопросы иного типа, существование ответов на которые не очевидно, а время ожидания ответов на них не поддаётся оценке.

И.Ф. Гинзбург. Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, просп. академика Коптнова 4, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
 Факс (383) 333-25-98
 E-mail: ginzburg@math.nsc.ru
 Новосибирский государственный университет,
 ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация

Статья поступила 24 декабря 2007 г.,
 после доработки 12 марта 2009 г.

В статье используются стандартные обозначения заряда электрона e , скорости света c , постоянной Планка \hbar и гравитационной константы в законе тяготения Ньютона G_N . Из них составляют комбинации, имеющие размерности массы и длины, — планковская масса $M_{Pl} = \hbar c / G_N = 1,2 \times 10^{19}$ ГэВ $= 2,2 \times 10^{-5}$ г и планковская длина $l_{Pl} = \hbar / M_{Pl} c = 1,6 \times 10^{-33}$ см. Массы частиц можно найти в справочниках.

Некоторые используемые ниже понятия разъясняются в разделе 6, адресованном студенту младших курсов или учителю.

2. Правильно ли мы понимаем то, что как будто знаем?

• Многие теоретические построения включают в себя асимптотические условия при $x \rightarrow 0$ или $x \rightarrow \infty$. Однако наш мир конечен в пространстве и времени. Соотношение неопределённостей показывает, что не существует энергий, меньших \hbar / T_U , где $T_U \approx 14$ млрд лет — время жизни Вселенной, и импульсов, меньших $\hbar / c T_U$. Нет сомнений, что на расстояниях меньших планковской длины $l_{Pl} = 1,6 \times 10^{-33}$ см (т.е. при энергиях, больших $M_{Pl} = 1,2 \times 10^{19}$ ГэВ) современные описания не работают, поскольку эффекты квантовой гравитации становятся стопроцентно важными. Значительно раньше подобная нижняя граница достигается при описании материальной среды, в которой предел делимости превышает среднее межмолекулярное расстояние. В то же время типичное рассуждение содержит в себе элементы типа "величина A не может служить решением, поскольку при $x \rightarrow \infty$ или $x \rightarrow 0$ она неограниченно возрастает".

Какие из результатов, полученных с помощью таких рассуждений, сохраняют свою силу с учётом указанной конечности области изменения переменных?

Приведём "арифметический" пример, показывающий, что подобный вывод, по меньшей мере, не всегда содержателен. Пусть утверждается, что некоторое свой-

ство реализуется при столь больших временах t , что $z = \ln(\ln t) \gg 1$. Когда же настаёт это "много больше"? Пусть, например, "много больше" означает, что $z > 5$. Легко проверить, что в этом случае должно быть $t > 10^{53}$. Идёт ли речь о времени, измеренном в секундах или в характерных атомных временах, это условие не выполнится за всё время существования Вселенной.

• Невозможность бесконечного деления пространства и времени на отрезки и временные интервалы может приводить к явлениям, которые выглядят совершенно неожиданными при обычной, непрерывной, трактовке. **В некоторых случаях может оказаться необходимой даже ревизия концепции причинности.** Говоря о причинности, подразумевают обычно два разных утверждения.

Будущее не может влиять на прошлое. В частности, именно это утверждение используется при выводе соотношений Крамерса–Кронига между действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости. Это утверждение не вызывает сомнений, поскольку мы полагаем, что нет какого-то высшего существа, способного менять законы вчерашней игры под влиянием получающихся сегодня результатов.

Будущее однозначно и непрерывно определяется прошлым (здесь речь может идти и о волновой функции с её вероятностным смыслом). Эта концепция используется, например, при получении уравнения Шрёдингера в курсе [10]. В физических системах, принципиально дискретных, это не всегда так. **Иногда даже сколь угодно детальное знание состояния системы не даёт основания для однозначного предсказания будущего** (даже с учётом квантовой неопределённости). В частности, дискретный шаг может пройти точку бифуркации решения. При этом влияние обычно пренебрегаемых малых эффектов может стать определяющим и невозможно предсказать, какая из ветвей решения реализуется в будущем. Подобные эффекты приводят к хорошо известным искажениям результатов больших численных расчётов физики плазмы и геофизики, к невозможности долговременного предсказания погоды и т.п. Б.В. Чириков полагал, что только на этом пути можно понять возникновение жизни и человека с его свободой воли [11].

• Наше понимание явлений микромира основано в значительной части на построениях, полученных с помощью теории возмущений (метода последовательных приближений). В этом методе физические величины вычисляются с помощью разложения в ряд по безразмерной константе связи, определяющей интенсивность взаимодействия, в предположении, что эта константа достаточно мала. В квантовой электродинамике такая константа связи — это постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$. Таким образом, фактически принимается, что физические величины в окрестности точки $\alpha = 0$ — аналитические функции α , допускающие разложение в ряд в пределах некоторого радиуса сходимости; небольшое изменение α в пределах этого радиуса не должно менять качественную картину мира. Это предположение об аналитичности заведомо неправильно. Действительно, при замене $e^2 \rightarrow -e^2$ ($\alpha \rightarrow -\alpha$) одноимённые заряды начинают притягиваться, а разноимённые — отталкиваться, атомы более не существуют, а все электроны собираются в один громадный комок, т.е. физическая картина мира кардинально меняется.

Тем не менее результаты квантовой электродинамики, полученные с помощью теории возмущений по α ,

оправдываются с фантастически высокой точностью (современный рекорд составляет 12 знаков после запятой — для аномального магнитного момента мюона).

Почему так успешно работает теория возмущений? Одна из фантастических гипотез состоит в том, что нам просто повезло: *Именно при наблюдаемых значениях констант связи (и только при этих значениях) наши разложения в ряд чудесным образом описывают действительность.* Тогда эти значения констант связи должны каким-то образом получаться из теории (например, как собственные значения в каких-то задачах).

• В последние десятилетия было обнаружено, что считавшиеся ранее совершенно различными электромагнитное и слабое взаимодействия частиц — это разные проявления единого электрослабого взаимодействия. Только на расстояниях, превышающих 10^{-16} см (отвечающих наблюдениям слабого взаимодействия в ядерных распадах), эти взаимодействия разделяются и выглядят совершенно по-разному. Считается, что теория электрослабых взаимодействий позволяет, по крайней мере в принципе, вычислять амплитуды рассеяния лептонов и калибровочных бозонов с какой угодно высокой точностью.

Общие принципы квантовой теории полей требуют принимать во внимание все возможные промежуточные состояния системы в пределе бесконечного удаления частиц друг от друга (*асимптотические состояния*). Это — состояния стабильных частиц, образующие полную систему промежуточных состояний, в которую каждое из физических состояний входит только однократно. Нестабильные частицы не имеют асимптотических состояний (они исчезают при $t \rightarrow \infty$) и не входят в полную систему промежуточных состояний.

При построении теории возмущений (успешно работающей) для электрослабых взаимодействий имеющиеся методы расчёта требуют учитывать в полной системе промежуточных состояний также и набор состояний всех калибровочных бозонов и лептонов. Однако большинство из этих частиц нестабильно. Учёт состояний нестабильных частиц, которые не имеют асимптотических состояний, неоправданно "удваивает" полный набор.

Почему хорошо работает стандартная форма теории электрослабых взаимодействий, считающей все калибровочные бозоны и лептоны фундаментальными, хотя большинство из них должно быть исключено из полной системы асимптотических состояний ввиду нестабильности?

Может быть, теория электрослабых взаимодействий нуждается в видоизменении?

3. Почему мир именно таков?

Непонятные числа и их соотношения

• Существующие значения масс u - и d -кварков и констант связи ядерного и электромагнитного взаимодействий приводят к тому, что нейтрон на 1,3 МэВ тяжелее протона. Если бы это превышение оказалось менее 0,5 МэВ, то нейтрон был бы стабилен и значительная часть материи существовала бы в виде нейтронных звёзд, а не в виде обычных, видимых, звёзд.

С другой стороны, небольшое изменение энергии взаимодействия протона с нейтроном могло бы привести к отсутствию связанного состояния в системе протон–нейтрон (ядро дейтерия). В этом случае синтез

более тяжёлых ядер (по современным представлениям проходящий через дейтериевую стадию) был бы почти невозможен.

В обоих этих случаях мир был бы совершенно иным и жизнь вряд ли бы существовала.

Случайны ли эти значения?

В связи с этим в литературе обсуждаются две возможности.

1. Реализуется множество различных вселенных с разнообразными наборами констант. Мы наблюдаем только тот набор, при котором существует наблюдатель (*антропный принцип*).

2. Реализующийся набор констант почему-то является единственно возможным. *Почему?*

• **Откуда взялись такие разные массы истинно элементарных частиц — от 171 ГэВ (t-кварк) до 0,5 МэВ (электрон) (отношение $3,5 \times 10^5$) и до нескольких десятых-сотых долей электронвольта (нейтрино) — ещё 6 порядков? Почему всё это настолько меньше планковской массы?**

• В Стандартной модели электрослабых взаимодействий принято считать, что ключевую роль в разделении слабых и электромагнитных взаимодействий на расстояниях больших 10^{-16} см и в происхождении масс частиц играет скалярная частица — бозон Хиггса. (Его обнаружение является важнейшей задачей вводимого в строй Большого адронного коллайдера (ЛНЦ)). И разделение взаимодействий, и возникновение масс частиц связывают с тем, что *отлично от нуля среднее значение поля Хиггса v* (подобное средней намагниченности магнетика). Величина этого среднего значения однозначно определяется по массам W- и Z-бозонов и составляет $v \approx 246$ ГэВ (в такой аналогии сам бозон Хиггса сходен с квантом поля спиновой волны в магнетике).

Почему масса t-кварка настолько близка к значению $v/\sqrt{2}$?

• Вся известная нам материя построена из электронов, протонов и нейтронов. Последние, в свою очередь, строятся из u- и d-кварков; в распадах нейтронов рождаются нейтрино ν_e . Однако элементарный набор (u, d, e, ν_e) дважды дублируется. Существуют наборы элементарных "кирпичей", во всём сходные с этим набором, только более тяжёлые (если не считать нейтрино). Это — (c, s, μ , ν_μ) и (t, b, τ , ν_τ). Эти наборы называют поколениями.

Зачем существует несколько копий первого поколения кварков и лептонов, ведь одного поколения вполне достаточно для построения мира частиц, из которых построена видимая Вселенная?

Верно ли, что этих копий ровно три?

Если это так, то почему именно три?

• При обсуждении электромагнитных явлений в квантовой механике легко обнаруживается, что *электромагнитное взаимодействие имеет калибровочную форму*. Это означает существование такой записи этого взаимодействия, при которой результаты не изменятся, если волновую функцию заряженной частицы домножить на $\exp[ie\phi(\mathbf{x})]$ и одновременно сделать калибровочное преобразование вектора-потенциала электромагнитного поля $A_i(\mathbf{x}) \rightarrow A_i(\mathbf{x}) - \nabla_i\phi(\mathbf{x})$.

Оказалось, что независимость результатов теории от сходных (несколько более сложных) преобразований является общей чертой всех фундаментальных взаимодействий.

Почему все известные взаимодействия имеют подобную калибровочную природу?

• Электрослабые взаимодействия на расстояниях, меньших 10^{-16} см, обладают высокой симметрией — взаимодействия частиц одного сорта, имеющих разные заряды, одинаковы. Говорят, что эти взаимодействия обладают $SU(2) \times U(1)$ -симметрией, которая разрушается на расстояниях около 10^{-16} см, разбиваясь на широко известные электромагнитное и слабое взаимодействия.

Около сорока лет назад выяснилось, что сильные (ядерные) взаимодействия на малых расстояниях сводятся к взаимодействию кварков, которое переносится глюонами, подобно тому как электромагнитное взаимодействие переносится фотонами. Один и тот же тип кварков (например, u-кварки) может существовать в трёх разных формах, которые назвали *цветом* — "красный", "синий" и "зелёный" (здесь довольно далеко проходит аналогия с цветным зрением человека — например, состояние из кварков трёх разных цветов бесцветно). Поэтому такую теорию — фундаментальную теорию сильных взаимодействий — называют квантовой хромодинамикой. В соответствии с существованием именно трёх основных (цветовых) состояний группой симметрии квантовой хромодинамики является $SU(3)$.

В детекторах частиц непосредственно наблюдаются только бесцветные состояния систем кварков и глюонов. В то же время последовательное описание процессов, происходящих на расстояниях, меньших 10^{-13} см, невозможно без учёта цветовой структуры материи. Об этом говорят кратко: цвет не вылетает на большие расстояния. Это явление называют удержанием цвета (конфайнмент).

Зачем три цвета в квантовой хромодинамике и почему именно три?

• **Почему группы симметрий слабого и сильного взаимодействий именно таковы?**

Нельзя ли связать ответы на нижеследующие вопросы с различием групп симметрии этих двух разных *калибровочных* взаимодействий?

Почему слабое взаимодействие (в отличие от сильного) выделяет определённое направление винта? Почему участвующие в этом взаимодействии нейтрино — только левые?

Почему для квантовой хромодинамики (в отличие от электрослабого взаимодействия) имеет место удержание цвета?

• **Почему в Природе реализуются только значения заряда частиц, кратные заряду электрона e (электрический заряд квантован)¹?**

Квантование электрического заряда необходимо имело бы место, если бы существовал точечный монополю Дирака (магнитный полюс — аналог электрического заряда с кулоновским взаимодействием монополю по закону g^2/r^2). Тогда однозначное описание нашего мира возможно только при $ge = 2\pi\hbar c n$ (где e — заряд электрона, g — магнитный заряд монополя, n — целое число). Это означает, что квантование электрического заряда получает объяснение, если где-то во

¹ Кварки и антикварки с дробными зарядами $\pm e/3$, $\pm 2e/3$ могут улетать друг от друга на расстояния, не превышающие размеров атомного ядра 10^{-13} см, и экспериментально не наблюдаются.

Вселенной существует хотя бы один точечный монополю Дирака².

Однако такой точечный монополю не обнаружен, и скорее всего, такого монополя в природе нет. Если это так, было бы неплохо понять, какие причины запрещают существование точечных монополей. С другой стороны, обнаружение точечного монополя заставило бы коренным образом пересмотреть многие представления об устройстве нашего мира на очень малых расстояниях.

Может быть, есть другие причины квантования заряда?

• **Почему полная плотность материи во Вселенной столь близка к критической, так что в целом Вселенная оказывается плоской?**

4. Удивительные факты, проявления неизвестных взаимодействий..?

• Многие годы физики были согласны с тем, что описание элементарных взаимодействий не меняется при каждом из следующих преобразований по отдельности — при зеркальном отражении координат (P-инвариантность), при переходе от частицы к античастице (C-инвариантность) и при обращении знака времени (T-инвариантность). В. Паули доказал, что при весьма общих представлениях о свойствах нашего пространства-времени наблюдаемая физическая картина не меняется при одновременном выполнении этих трёх преобразований (СРТ-теорема), а перечисленные раздельные инвариантности не являются необходимыми свойствами отдельных взаимодействий.

В середине 1950-х годов обнаружилось, что в слабых взаимодействиях зеркальная симметрия не имеет места. Вскоре выяснилось, что взамен этого имеет место CP-инвариантность, т.е. инвариантность относительно одновременного выполнения зеркального отражения и перехода от частицы к античастице (сохранение комбинированной CP-чётности, Л.Д. Ландау).

Примерно через десять лет обнаружилось, что в слабых распадах нейтральных K- и B-мезонов нарушаются не только C- и P-инвариантности по отдельности, но ещё и CP-инвариантность (нарушение CP-симметрии). В других же процессах нарушение CP-симметрии не обнаруживается.

Почему не сохраняется CP-симметрия?

Почему она предпочитает сохраняться в большинстве наблюдаемых процессов?

Придумана такая параметризация слабого взаимодействия, в которой перечисленные свойства выглядят естественными. Но как эта параметризация связана с природой элементарных взаимодействий? **Связано ли наблюдаемое CP-нарушение с действием нового, неизвестного, взаимодействия или существуют какие-то свойства слабого взаимодействия, обуславливающие это нарушение?**

• Недавно обнаружилось, что энергия Вселенной только на 5% состоит из энергии обычного вещества (атомные ядра — в основном протоны, электроны,

фотоны, нейтрино). Ещё 20% энергии Вселенной содержится в тёмной материи, которая похожа на обычную, но участвует только в гравитационных взаимодействиях (и обнаруживается пока только по астрономическим наблюдениям). И остальное содержится в загадочной тёмной энергии — среде с удивительной связью плотности энергии и давления $\varepsilon = -p$.

Что такое тёмная материя? В существующих моделях мира частиц на малых расстояниях есть немало кандидатов, которые смогли бы играть эту роль. Готовятся разные эксперименты, чтобы уловить сигнал от того или иного кандидата.

Что такое тёмная энергия? Есть ли способ обнаружить сигнал от нее помимо наблюдений, связанных с интерпретацией астрофизических данных?

5. Что дальше

• Как говорилось ранее, на расстояниях, больших 10^{-16} см, электрослабое взаимодействие разбивается на электромагнитное и слабое взаимодействия, симметрия каждого из которых ниже, чем симметрия электрослабых взаимодействий.

Существуют ли подобные разбиения на меньших расстояниях? Откуда берутся масштабы этих разбиений?

А может быть, на малых расстояниях все взаимодействия объединяются в единое взаимодействие, обладающее очень высокой симметрией (Великое объединение), которое с возрастанием расстояния (или, что то же, с уменьшением энергии) распадается на отдельные взаимодействия со своими более низкими симметриями (в конце концов — сильное, слабое, электромагнитное)?

Это очень привлекательная возможность, и широко обсуждаются разные варианты теории такого объединения — группы высокой симметрии, суперсимметрия, теория струн и др. Детально анализируются разнообразные возможные эксперименты, которые могли бы подтвердить эти теории. Однако нет способа надёжно указать, каков энергетический масштаб появления соответствующих сигналов; мы знаем только, что он лежит вне области, достижимой современным экспериментом; и всегда можно сказать: *если сегодня мы не наблюдаем этих сигналов, значит, будем ожидать их на ускорителях с ещё большими энергиями*. Известные сегодня аргументы в пользу существования подобного объединения по существу представляют собой пожелания иметь красивую картину на малых расстояниях, причём разные авторы понимают желательную красоту по-разному.

А может быть, наоборот, на малых расстояниях симметрия низкая, а более высокая *приближённая* симметрия, обнаруживаемая на больших (по ядерным масштабам) расстояниях, возникает по причинам, похожим на обсуждаемые в [12, 13]?

• **Почему размерность пространства-времени именно четыре?**

Разрабатываются две группы моделей, в которых размерность полного пространства-времени больше, $d > 4$, а наше четырёхмерное пространство-время — подпространство этого полного пространства.

Наглядную аналогию для явлений в первой группе моделей дают квазиодномерные кристаллы. В них коэффициенты упругости для сдвигов вдоль одной оси значительно меньше таких же коэффициентов для движений в перпендикулярных направлениях. В итоге движе-

² Подчеркнём, что это должна быть точечная частица, а не некоторый "мешок", который естественным образом возникает в отдельных построениях электрослабой теории и только создает вдали от себя поле, подобное кулоновскому, а на малых расстояниях никакой частице не соответствует.

ние совершается практически только вдоль оси с небольшой жёсткостью. В моделях этой группы наше пространство-время — это ветвь полного многомерного пространства, подобная направлению возможного движения в квазиодномерном кристалле. Движение в направлении "лишних" переменных практически невозможно, так как выход из нашего мира требует слишком большого расхода энергии.

В другой группе моделей предполагается, что все "лишние" переменные компактифицируются с очень малым пространственным размером. Смысл этого термина проясняется на примере мира внутри тонкого длинного цилиндра. Рассматривая движения с масштабом, большим его радиуса, мы видим одномерный мир, поперечное движение совершается только на расстояниях, меньших радиуса цилиндра, это и означает, что поперечная координата компактифицирована.

В некоторых моделях из весьма неубедительных (на мой взгляд) соображений вычисляется и полная размерность пространства d (это делается, например, в теории суперструн, где $d = 11$).

Но во всех случаях остаются неясными причины четырёхмерности *наблюдаемого* мира.

Существование таких построений показывает, что вычисление размерности пространства может быть предметом научного исследования.

6. Некоторые понятия

Говоря о массе частицы, мы обычно имеем в виду её энергию покоя mc^2 , которую измеряют в электронвольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-12} \text{ эрг}$). Используются и производные единицы — мегаэлектронвольт ($1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$), гигаэлектронвольт ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$), тераэлектронвольт ($1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$).

Лептоны — частицы со спином $1/2$, не участвующие в сильных (ядерных) взаимодействиях, — это электроны, μ -мезоны (мюоны), τ -лептоны и различные нейтрино.

Калибровочные мезоны (электрослабых взаимодействий) — переносчики элементарных взаимодействий в электрослабой теории — фотоны, W -бозоны, Z -бозоны; W -бозон примерно в 85 раз тяжелее протона (ядра атома водорода), Z -бозон примерно в 95 раз тяжелее протона.

Работа поддержана грантами РФФИ 08-02-00334-а и НШ-1027.2008.2.

Список литературы

1. Чернин А Д *УФН* **178** 267 (2008) [Chernin A D *Phys. Usp.* **51** 253 (2008)]
2. Лукаш В Н, Рубаков В А *УФН* **178** 301 (2008) [Lukash V N, Rubakov V A *Phys. Usp.* **51** 283 (2008)]
3. Рябов В А, Царев В А, Цховребов А М *УФН* **178** 1129 (2008) [Ryabov V A, Tsarev V A, Tskhovrebov A M *Phys. Usp.* **51** 1091 (2008)]
4. Окунь Л Б *УФН* **177** 397 (2007) [Okun L B *Phys. Usp.* **50** 380 (2007)]
5. Рубаков В А *УФН* **177** 407 (2007) [Rubakov V A *Phys. Usp.* **50** 390 (2007)]
6. Иоффе Б Л *УФН* **176** 1103 (2006) [Ioffe B L *Phys. Usp.* **49** 1077 (2006)]
7. Цукерман И С *УФН* **175** 863 (2005) [Tsukerman I S *Phys. Usp.* **48** 825 (2005)]
8. Красников Н В, Матвеев В А *УФН* **174** 697 (2004) [Krasnikov N V, Matveev V A *Phys. Usp.* **47** 643 (2004)]
9. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* 3-е изд. (М.: Бюро Квантум, 1995) [Ginzburg V L *The Physics of a Lifetime* (Berlin: Springer, 2001)]
10. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Квантовая механика: Нерелятивистская теория* (М.: Наука, 1984) [Landau L D, Lifshitz E M *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory* (Oxford: Pergamon Press, 1977)]
11. Chirikov B, physics/0503072
12. Гинзбург И Ф *ЯФ* **25** 421 (1977) [Ginzburg I F *Sov. J. Nucl. Phys.* **25** 227 (1977)]
13. Forster D, Nielsen H B, Ninomiya M *Phys. Lett. B* **94** 135 (1980)

Unsolved problems in fundamental physics

I.F. Ginzburg

S.L. Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

prosp. akademika Koptyuga 4, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

Fax (7-383) 333-25 98

E-mail: ginzburg@math.nsc.ru

Novosibirsk State University,

ul. Pirogova 2, 630093 Novosibirsk, Russian Federation

Fundamental problems of current relevance are listed based on the critical revision of long-known facts and ideas and reflecting the numerous recent discoveries about elementary interactions and the structure of the Universe. The paper avoids the notion of teleology and considers the typical "WHAT FOR" and "WHY" questions as mere abbreviations for "Does a (possibly yet unknown) Law of Nature exist with which the property or phenomenon under study can be explained?" The list of problems reflects the personal interests of the author and so does not claim to be comprehensive.

PACS numbers: **01.70.+w**, **11.15.-q**, **12.60.-i**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200905d.0525

Bibliography — 5 references

Received 24 December 2007, revised 12 March 2009

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (5) 525–529 (2009)

Physics – Uspekhi **52** (5) (2009)