

УСТНЫЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА "УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК"

Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков

Л.Б. Окунь

Статья посвящена истории открытия нарушения в природе пространственной четности P , зарядовой четности C , комбинированной четности CP . Гипотеза о существовании так называемых зеркальных частиц была призвана, по мысли ее авторов, восстановить симметрию между левым и правым. Статья описывает возникновение и эволюцию понятий зеркальных частиц и зеркальной материи и представляет собой краткий путеводитель по "зазеркалью". Важная часть статьи — список более двухсот статей с их названиями.

PACS numbers: 01.65.+g, 11.30.Er, 12.60.-i

Содержание

1. Введение (397).
 2. Нарушение P и C (397).
 3. 1960-е годы. Нарушение CP (399).
 4. 1970-е годы. "Минимум". Экзотические вакуумы (400).
 5. 1980-е годы. Возрождение (400).
 6. 1991–2006 гг. "Максимум". От зеркальных звезд до Большого адронного коллайдера (401).
 7. Заключительные замечания (401).
- Список литературы (402).

1. Введение

Терминами "зеркальные частицы", "зеркальная материя" и "зеркальный мир" в настоящее время обозначают гипотетический скрытый сектор частиц и взаимодействий, которые компенсируют зеркальную асимметрию слабых взаимодействий обычных частиц. Зеркальная материя рассматривается как возможная составляющая невидимой темной материи. Ее история — это история переплетения вырождения по четности и нарушения зеркальной симметрии, темного вещества во Вселенной, атомной и ядерной физики, физики высоких энергий, астрофизики и космологии.

2. Нарушение P и C

К середине 1950-х годов так называемая θ -проблема стала самой острой проблемой физики элементарных частиц. В то время распады $K^+ \rightarrow 2\pi$ приписывали θ^+ -мезону, а $K^+ \rightarrow 3\pi \rightarrow \tau^+$ -мезону, так как четности 2π и 3π различны. Но массы и времена жизни θ^+ и τ^+ были подозрительно близки. Поэтому Ли и Янг [1] выдвинули идею о вырождении частиц по четности.

В апреле 1956 г. проблема θ обсуждалась на специальном заседании 6-й Рочестерской конференции. На нем Фейнман, со ссылкой на Блока, задал решающий вопрос: "А может ли быть, что четность не сохраняется?" Вот несколько отрывков из стенограммы конференции [2]:

"Председатель Дж.Р. Оппенгеймер: Имеются пять объектов K_{π_3} , K_{π_2} , K_{μ_2} , K_{μ_3} , K_{e_3} . У них равные или примерно равные массы и тождественные или кажущиеся тождественными времена жизни. Мы пытаемся узнать, имеем ли мы дело с пятью, четырьмя, тремя, двумя или одной частицей...

Затем последовал вводный доклад Янга: ...ситуация такова, что аргументы Далитца убедительно указывают на то, что маловероятно, что $K_{\pi_3}^+$ ($\equiv \tau^+$) и $K_{\pi_2}^+$ ($\equiv \theta^+$) — это одна и та же частица...

Далитц обсуждал θ -проблему: ...600 событий на "диаграмме Далитца" дают замечательно однородное распределение ... Это указывает на то, что у τ -мезона спин-четность 0^- ...

Фейнман поднял вопрос Блока: может ли быть так, что θ и τ — это состояния с различной четностью одной и той же частицы, которая не имеет определенной четности, т.е. что четность не сохраняется?...

Янг сообщил, что он и Ли рассматривали этот вопрос, не придя к какому-либо определенному заключению".

По-видимому, Фейнман имел в виду специальный механизм нарушения четности за счет перемешивания

Л.Б. Окунь. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова",
117218 Москва, ул. Б. Черемушкинская 25,
Российская Федерация
Тел. (495) 123-31-92, (495) 125-96-60
E-mail: okun@itep.ru

Статья поступила 2 декабря 2006 г.

вырожденных скалярного и псевдоскалярного мезонов.

Интересно отметить, что ни Далитц, ни Мишель, который также принимал участие в дискуссии, не упомянули о возможном несохранении четности.

Несколько месяцев спустя Ли и Янг предположили, что в слабых распадах четность не сохраняется, и предложили эксперименты по поискам псевдоскалярных корреляций спина и импульса \mathbf{sp} [3]. (Их знаменитая статья была получена журналом *Physical Review* 22 июня и опубликована 1 октября 1956 г.). В конце статьи, чтобы сохранить симметрию между левым и правым в более общем смысле, была выдвинута гипотеза о существовании "правых протонов" p_R . Термин "зеркальные частицы" в [3] не использовался, и предполагалось, что p_R и p_L взаимодействуют "с одним и тем же электромагнитным полем и, возможно, с одним и тем же пионным полем".

Много позднее я узнал, что еще в 1952 г. Мишель [4] рассматривал взаимодействия, не сохраняющие четность, и псевдоскалярные корреляции между импульсами нескольких частиц в многочастичных процессах. До него Вик, Вайтман и Вигнер [5] рассматривали псевдоскалярные амплитуды, а Перселл и Рамзей [6] предложили проверять сохранение четности, измеряя электрический дипольный момент нейтрона. Однако они не осознали (как это впоследствии осознал Ландау), что электрический дипольный момент частицы нарушает также инвариантность относительно обращения времени. Еще раньше Берестецкий и Померанчук [7] в заметке о бета-распаде нейтрона упомянули, что, по замечанию Ландау, существует 10 (а не 5) четырехфермионных взаимодействий, "если наряду со спинорами использовать псевдоспиноры".

Как хорошо известно, эксперименты, предложенные Ли и Янгом, были проведены полгода спустя и действительно обнаружили большую лево-правую асимметрию в β -распаде ^{60}Co [8] и в $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ -распадах [9, 10].

До того, как результаты этих экспериментов стали известны, Иоффе и Рудик написали в *ЖЭТФ* небольшую статью, в которой доказывали, что \mathbf{sp} -корреляции невозможны, поскольку они Т-четны, а при нарушении Р должна обязательно нарушаться обратимость ко времени Т. Это утверждение основывалось на СРТ-теореме и убеждении, что зарядовая четность С должна сохраняться, поскольку существует короткоживущий K_1^0 -мезон с положительной зарядовой четностью $C = +1$ и долгоживущий K_2^0 -мезон с $C = -1$.

Я живо помню, как теоретики Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) обсуждали эту работу с Ландау в ноябре 1956 г. после очередного семинара ИТЭФ (в то время Теплотехническая лаборатория АН СССР (ТТЛ); семинары проводились и сейчас проводятся по средам). Обсуждение проходило в комнате № 9, где тогда работали молодые теоретики и стоял мой стол.

Ландау в то время считал, что нарушение Р-четности невозможно, поскольку пространство зеркально симметрично. Аналогично тому, как сохраняются импульс и угловой момент вследствие однородности и изотропии пространства. Разумеется, эта аналогия не полная: сдвиги и вращения непрерывны, а отражения дискретны.

Примерно за полгода до этого в Москве в ФИАНе состоялась первая конференция по физике элементарных

частиц [11, 12], на которую приехали американские физики. Я помню, как Ландау саркастически смеялся, когда Гелл-Ман (самый молодой из приехавших американцев, но уже очень знаменитый) упомянул на семинаре в Институте физических проблем (ИФП), что одним из решений θ -проблемы может быть несохранение четности¹.

Примерно в то же время почти такой же была реакция Ландау на так и не опубликованную заметку Шапиро, в которой тот предлагал опыт типа опыта Ву. Я узнал об этом три года спустя, когда Шапиро перешел из Московского государственного университета в ИТЭФ и дал мне прочесть свою заметку. (Позднее он дал ее директору ИТЭФ Алиханову, и заметка потерялась. Ксерокса в ИТЭФ тогда не было.) Помню, что в заметке было неправильное утверждение, что при несохранении четности переход к зеркально отраженным координатам меняет величину энергии физической системы².

Но вернемся в комнату № 9. Во время обсуждения я заметил, что при нарушении Р-четности может нарушаться и С-четность, а коротко- и долгоживущие K_1 и K_2 могут существовать не благодаря С-инвариантности, как было предложено за год до того Гелл-Маном и Пайсом [16], а благодаря хотя бы приближенной Т-инвариантности (и, следовательно, СР-инвариантности). В этом случае должны быть разрешены Т-четные сп-асимметрии и распад $K_2^0 \rightarrow 3\pi^0$.

После этого обсуждения Иоффе и Рудик решили включить мои замечания в свою статью и начали настойчиво убеждать меня стать соавтором их радикально исправленной статьи³. Поначалу я отказывался, но согласился после того, как Иоффе стал передо мной на одно колено. (Это было в той же комнате № 9.) Наша статья [18] была замечена Янгом и Ли, которые независимо, но несколько позднее пришли совместно с Оме [19] к тем же утверждениям (см. ссылки на [18] в их Нобелевских лекциях [20, 21]).

Другим следствием дискуссии стало то, что Ландау внезапно изменил свое отношение к несохранению четности и выдвинул идею строгого сохранения СР-четности (он назвал ее комбинированной четностью) [22] (см. также [23]). В конце этой статьи он написал: "В заключение я хотел бы выразить глубокую благодарность Л. Окуню, Б. Иоффе и А. Рудику, из дискуссии с которыми возникла идея данной работы". Согласно идее Ландау процесс, отраженный в зеркале, не может

¹ Гелл-Ман сделал два одинаковых доклада: в ИФП и в ФИАНе, в кабинете Тамма. Оба доклада я тщательно конспектировал. Остановившись на минуту, он шуточно спросил меня: "А что будет, если дома Вы обнаружите, что две записи противоречат друг другу?" В 1980-х годах Телегди опубликовал два очень содержательных доклада по истории несохранения четности [13, 14]. В [14] написано: "Меррей Гелл-Ман подчеркнул в разговоре со мной ... что И.С. Шапиро самым энергичным образом возражал против идеи о нарушении четности, когда М.Г.М. говорил о ней в 1956 г. на семинаре Ландау как об одном из возможных решений загадки $\tau-\theta$ ". Как уже упомянуто выше, я хорошо помню возражения Ландау. Однако я совершенно не помню, чтобы совместно с ним возражал Шапиро.

² Развитие этого утверждения содержится в [15].

³ Схема, в которой нарушаются Р и Т, но сохраняется С, подробно обсуждалась в [17] даже после того, как эта схема была опровергнута опытом.

существовать в природе — он становится физическим только после замены частиц их античастицами⁴.

Прекрасный пример CP-сопряженных частиц был представлен Ландау в его теории безмассовых продольно поляризованных нейтрино [25]. Спин ν направлен против импульса, а спин $\bar{\nu}$ — вдоль импульса. Другими словами, нейтрино — левовинтовые, а антинейтрино — правовинтовые. Статья [25] следовала в *ЖЭТФ* непосредственно за статьей [22]; позднее [22, 25] вышли как одна статья [26] на английском языке. Продольные нейтрино были независимо, но несколько позднее предложены Саламом [27] и Ли и Янгом [28]. Продольные нейтрино, по существу, указали путь к теории универсального слабого $V-A$ -взаимодействия [29, 30]. Согласно этой теории в релятивистском пределе ($v/c \rightarrow 1$) все элементарные фермионы становятся левовинтовыми во взаимодействиях слабых заряженных токов, а их античастицы — правовинтовыми. Только несколько лет назад, когда были открыты осцилляции нейтрино, стало ясно, что нейтрино не безмассовы и, следовательно, теория продольных нейтрино описывает природу лишь приближенно, хотя во многих случаях с очень высокой степенью точности.

Здесь уместно отметить статью [31] о возможном существовании барионных фотонов, источником которых являлся бы барионный заряд. Эта статья положила начало последующим обсуждениям лептонных фотонов, парафотонов и зеркальных фотонов (см. разделы 3, 5, 6).

3. 1960-е годы. Нарушение CP

Мне очень нравилась идея строгого сохранения CP-инвариантности. Но, с другой стороны, я не мог понять, почему коэффициенты в лагранжиане не могут быть комплексными. Так, в лекциях в ИТЭФ [32] на основе составной модели адронов были описаны слабые взаимодействия в предположении, что CP сохраняется. А в лекциях в Дубне [33] и в книге [34] я настаивал на том, что экспериментальная проверка CP-инвариантности является одним из высших приоритетов. Группа Окнонова в Дубне искала CP-запрещенные распады $K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ и установила верхний предел для их относительной вероятности, примерно 2×10^{-3} [35]. (Они не обнаружили ни одного двухчастичного распада, зарегистрировав 600 трехчастичных.) К сожалению, на этом их эксперимент был прекращен решением директора лаборатории. Группе не повезло. Два года спустя несколько десятков двухчастичных событий с относительной вероятностью, почти достигнутой в [35], было открыто принстонской группой [36].

Открытие распада $K_2^0 \rightarrow 2\pi$ Кристенсоном и др. [36] "закрыло" идею Ландау о строгом сохранении CP-четности, согласно которой античастицы выглядят в точности, как зеркальные отражения частиц. Для того чтобы избежать этого заключения, Нишиджима и Саффури выдвинули гипотезу "теневого Вселенной" [37]. Согласно этой гипотезе, распады на два пиона, наблюдаемые в [36], принадлежали не CP-нечетному K_2^0 -мезону, а CP-четному "теновому" K_1^0 -мезону, в который переходил в вакууме обычный K_1^0 . Так что CP сохранялось. Однако вскоре было показано [38], что этот

механизм противоречит результатам нейтринного эксперимента. Дело в том, что теновые K_1^0 -мезоны должны были бы проникать сквозь защиту и распадаться на два пиона в нейтринном детекторе. А таких событий в опытах не наблюдалось.

В следующей статье [39] Кобзарев, Померанчук и я постулировали существование гипотетических зеркальных частиц, зеркального мира и CРА-симметрию (А — от Алисы). (Современная терминология, согласно которой существование зеркальной материи означало бы удвоение всех обычных частиц, а не только некоторых из них, находилась в стадии рождения. Поэтому термины "зеркальный мир" и "зеркальные частицы" использовались в [39] как синонимы. Следует отметить, что Стандартной модели еще не существовало.) Согласно [39], зеркальные частицы не могут участвовать в обычных сильных и электромагнитных взаимодействиях. В этом отношении они радикально отличаются от правых протонов, рассмотренных Ли и Янгом [3]. Скрытый зеркальный сектор должен иметь свои собственные сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия. А это означало, что невидимые зеркальные частицы, подобно обычным, должны образовывать зеркальные атомы, молекулы, невидимые звезды, планеты и даже зеркальную жизнь. Более того, этот невидимый зеркальный мир может сосуществовать с нашим миром в одном и том же пространстве⁵.

Помню, как Игорь Кобзарев и я в выходной день шли по подмосковному лесу (от станции Фирсановка на ленинградском направлении к станции Нахабино на рижском направлении). И вдруг я очень ярко "увидел", как через поляну по невидимым рельсам идет невидимый и неслышимый поезд. В работе [39] мы показали, что подобное невозможно, так как "зеркальный земной шар" гравитационно сильно возмущил бы движение нашего земного шара. Однако, по крайней мере, гравитационное взаимодействие обычных и зеркальных частиц необходимо, так как в отсутствие какого-либо взаимодействия с нашей материей зеркальная материя превращается в фикцию. Кроме обмена гравитонами в [39] допускались обмены нейтрино. Хотя конкретного обсуждения, как это согласовать с $V-A$ -теорией слабого взаимодействия, представлено не было. Переходы между обычными и зеркальными каонами были детально рассмотрены в [43].

В сентябре 1967 г. зеркальные частицы обсуждались на Четвертой европейской конференции по элементарным частицам [44] и в январе 1968 г. на Московской конференции по проблемам нарушения CP-инвариантности [45].

Пожалуй, здесь стоит упомянуть также статью [46] о мюонном фотоне, хотя прямого отношения к зеркальным частицам она не имела. В ней рассматривался дополнительный гипотетический фотон и его переход в наш фотон через мюонную петлю. Это дает эффективное взаимодействие $\epsilon F_{\alpha\beta} F'_{\alpha\beta}$, где F — поле нашего фотона, F' — поле мюонного фотона, а ϵ — безразмерная константа. Из-за этого взаимодействия, которое сейчас называют кинетическим перемешиванием, мюонное нейтрино приобретает маленький электрический заряд ϵe (см. также [66, 86–89, 147–153, 231–236]).

⁴ См. также [24].

⁵ Мы не знали о пионерских работах по темному веществу Оорта [40] и Цвике [41, 42].

В статье [47] был рассмотрен гравитационный дипольный момент протона и было показано, что он запрещен в рамках общей теории относительности. Гравитационное взаимодействие так называемых стерильных нейтрино было рассмотрено в [48].

Хорошо известно, что в основном потоке физики частиц 1960-е годы ознаменовались введением понятия о кварках и электрослабой теорией со спонтанным нарушением симметрии. Была опубликована важная статья Сахарова [49], которая связывала нарушение CP с барионной асимметрией Вселенной и, следовательно, с нашим существованием.

4. 1970-е годы.

"Минимум".

Экзотические вакуумы

В 1970-е годы открывают τ -лептон, s - и b -кварки и формулируют квантовую хромодинамику, но в то же время наблюдается минимум статей по зеркальным частицам. Мне известна лишь одна такая статья, Павшича [50], в которой вопрос о зеркальных частицах связывался с вопросом о структуре элементарных частиц. Автор статьи [50] считал, что зеркальные барионы безусловно необходимы, поскольку барионы составные, а зеркальные лептоны являются составными лишь в том случае, если лептоны тоже имеют внутреннюю структуру. Это отличается от стандартного представления о зеркальных частицах. В 2001 г. Павшич поместил статью [50] в электронный архив с пометкой: "Раннее предложение зеркальной материи, опубликованное в 1974 г." [51].

В 1970-е годы спонтанное нарушение калибровочных симметрий было рассмотрено в космологической модели горячей Вселенной [52–54], тогда же были опубликованы первые работы по спонтанному нарушению CP-симметрии [55], доменной структуре вакуума [56, 57] и метастабильному вакууму [58]. Согласно [56, 57], вакуумные домены являются следствием спонтанного нарушения CP-инвариантности. Они должны возникать в этом случае при охлаждении горячей Вселенной после Большого взрыва. Метастабильный вакуум был назван ложным лишь три года спустя (см. статьи [59–61]).

5. 1980-е годы.

Возрождение

В 1980-е годы произошло возрождение интереса к зеркальным частицам и к скрытому сектору частиц и взаимодействий. В работах [62–70] были рассмотрены различные аспекты скрытого сектора частиц и взаимодействий. В [62] было предположено существование новых дальнедействующих сил и новых частиц: x и y . Согласно [62], y -частицы не имеют прямых взаимодействий с обычными частицами, а x -частицы служат посредниками: они взаимодействуют с обычными и с y -частицами. В статьях [63, 64] были введены глюоноподобные θ -бозоны с большим радиусом конфайнмента, которые могли бы создавать нервищиеся струны длиной, измеряемой километрами. Роль θ -бозонов в ранней Вселенной была рассмотрена в [65]. В работах [66] обсуждались зеркальные адроны и нейтральные мезонные посредники между обычным и зеркальным миром.

Существование парафотонов было предположено в [67]. Их перемешивание может приводить к осцилляциям обычных фотонов, обсуждавшимся в [67]. Очень маленькие заряды частиц, которые обычно считаются нейтральными (атомов и нейтрино), анализировались в [68]. Обзор гипотетических явлений был дан в раппортерском докладе "За пределами стандартной модели" [69]. Среди других тем в нем обсуждались фотонные осцилляции и лево-правосимметричные модели, но не затрагивалась тема зеркальных частиц.

В 1986 г. Эллис посетил ИТЭФ, и мы совместно с Волошиным написали обзор [70] о поисках новых проникающих частиц, существенная часть которого была посвящена зеркальным частицам. В последний момент я не решился представить его как слишком спекулятивный в обзорный журнал *УФН*, и он вышел только в виде препринта ИТЭФ [70].

Поиски зеркальных частиц продолжил Волошин. Он убедил физиков коллаборации АРГУС (от англ. — A Russian – German – United States – Swedish) в ДЕЗИ искать распады $\Upsilon(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- \Upsilon(1S)$, в которых $\Upsilon(1S)$ из-за переходов в своего зеркального партнера распадается в "ничто". Был установлен верхний предел для доли этих невидимых каналов: $BR \leq 2,3\%$ на 90%-ном уровне достоверности [71, 72]. Поиски невидимых продуктов распада ϕ -мезона были проведены в [73].

Измеряя верхний конец спектра электронов в β -распаде трития, группа экспериментаторов ИТЭФ пришла к выводу (который впоследствии не подтвердился), что масса электронного нейтрино равна 30 эВ. В связи с этим Зельдович и Хлопов опубликовали обзор [74], в котором, наряду с другими сценариями, рассматривалась возможность того, что масса нейтрино возникает из-за переходов между нашим левым и зеркальным правым нейтрино и является мостиком между нашим и зеркальным мирами.

В статье [75] была рассмотрена модель, в которой посредниками между двумя мирами являются так называемые гибриды (частицы с электрослабыми квантовыми числами обычных кварков и хромодинамическими квантовыми числами зеркальных кварков и их зеркальные партнеры). В такой модели возникают связанные состояния с дробными зарядами — фрактоны.

Шварц и Тюпкин предложили модель объединения зеркальных и обычных частиц с помощью группы $SO(20)$. В рамках этой модели появились зеркальные космические струны. Совершив оборот вокруг такой струны, обычная частица превращается в зеркальную и наоборот [76] (см. также [77, 78]).

Дальнейшие космологические и астрофизические проявления зеркальных частиц обсуждались в [79–85]. В частности, струны Алисы были рассмотрены в [79, 82].

Глешоу вместе с соавторами заинтересовался зеркальной Вселенной и фотонными осцилляциями [86, 87, 90]. В статье [87] он предложил объяснить наблюдающуюся в то время экспериментальную аномалию в распаде ортопозитрония переходами в зеркальный ортопозитроний. (Дальнейшее развитие см. в [105, 148, 150].)

Из-за смешивания обычных и зеркальных фотонов зеркальные частицы, не обладающие обычным электрическим зарядом, но имеющие зеркальный электрический, приобретают обычный, хотя и очень малый, электрический заряд [88, 89] (см. также [240]).

6. 1991 – 2006 гг. "Максимум".

От зеркальных звезд до Большого адронного коллайдера

В 1990-х годах число "зеркальных" статей стало стремительно возрастать. Самым большим энтузиастом явился австралийский теоретик Фут, опубликовавший несколько десятков статей. Просматривая заголовки статей [91 – 132] и книги [133], можно оценить широту интересов Фута. В статье [91] была рассмотрена зеркально-симметричная версия стандартной калибровочной модели. В частности, было проанализировано взаимодействие, перемешивающее обычные и зеркальные хиггсы. Отметим, что в этой перенормируемой модели запрещены сильные переходы трех кварков в три зеркальных кварка или двух глюонов в два зеркальных глюона, поскольку такие взаимодействия перенормируемы. Поэтому открытие на опыте переходов нейтрона в зеркальный нейтрон $n \leftrightarrow n'$ или $\Upsilon \leftrightarrow \Upsilon'$ означало бы неправильность этой теоретической модели.

Специального упоминания заслуживает новая фантастическая идея о том, что в окружающем нас веществе могут находиться зерна зеркального вещества [114, 118, 121], "прилипшие" к нему благодаря взаимодействию, обусловленному перемешиванием обычных и зеркальных фотонов. Соавторы Фута — Волкас, Лью, Митра, Игнатъев, Гниненко, Силагадзе, Юн — написали ряд статей и без него (см., например, [134 – 159]). Некоторые из этих статей также посвящены зеркальным зернам [145, 147, 156 – 159].

Большой вклад в литературу о зеркальных частицах внес Бережиани. Он и его соавторы опубликовали более 15 статей [160 – 176] (см. также [177 – 182]).

Большинство статей, рассматриваемых в этом разделе, основаны на строгой зеркальной симметрии. Наблюдаемое неравноправие левого и правого на макроскопическом уровне возникло, согласно этим работам, во время инфляционной стадии Вселенной (см. [143, 166]).

Мохапатра опубликовал около 15 статей (многие из которых — с соавторами) по различным вопросам астрофизики в рамках нарушенной зеркальной симметрии [183 – 196].

Поиски гравитационных микролинз, создаваемых отдельными звездами — МАЧО (Massive Compact Halo Object) — в гало галактик [197 – 201], привели к открытию избытка таких микролинз в направлении Большого Магелланова Облака [200, 201]. Еще до этого открытия теоретики указали [154, 162, 202], что такими МАЧО могут быть зеркальные звезды. Эта интерпретация развивалась в [203, 204]. Хотя открытие МАЧО было поставлено под сомнение [205, 206] (см. дискуссию [207, 208]), многие астрофизики считают (см., например, [209, 210]), что наблюдаемая звездная темная материя не может состоять только из обычных барионов.

Со времени опубликования работ Оорта [40] и Цвики [41, 42] существовали два альтернативных объяснения аномально больших скоростей периферийных звезд и галактик (так называемого "вириального парадокса"): 1) невидимое темное вещество, 2) аномально сильная гравитация на больших расстояниях. Новейшие наблюдения [211, 212] столкновения скоплений галактик, по видимому, разрешают эту неопределенность в пользу темной материи. В этом столкновении темная материя, которая проявляется благодаря своему гравитацион-

ному линзированию, отделена от светящихся частей скоплений. Если она представляет собой зеркальную материю, то отношение звезды/газ в ней должно быть больше, чем для обычных звезд и газа (Блинников, Силагадзе, частное сообщение).

Корреляция вспышек гамма-лучей (gamma ray bursts) с распределением темной материи в галактиках может служить указанием на то, что эти вспышки обусловлены взрывами зеркальных звезд, сопровождающимися испусканием зеркальных нейтрино [213 – 215] или зеркальных аксионов [165, 167, 181] (см. также [182]).

Ограничения на рождение стерильных нейтрино во взрыве сверхновой приводятся в [216]. Космические зеркальные струны как источники космических нейтрино сверхвысоких энергий были рассмотрены в [217] (см. также [218 – 220]). Различные аспекты зеркальной астрофизики были обсуждены в статьях [221, 222] и книгах [223, 224]. Новая калибровочная симметрия типа зеркальной слабой SU(2) была предложена в [225] (см. ее критическое обсуждение в [226 – 230]). Обсуждение в 1990-х годах лептонных (мюонных) фотонов было проведено в [231 – 236]. Верхние пределы невидимых распадов V^0 -мезонов, η - и η' -мезонов были установлены в [237, 238]. Верхний предел для относительной вероятности невидимых распадов $\Upsilon(1S)$ -мезона $B < 2,5 \times 10^{-3}$ был установлен коллаборацией Belle [239].

Различные "зеркальные вопросы" рассмотрены в [240 – 246]; предложения поисков темного вещества — [247 – 249].

В 2004 г. в Дубне состоялся физический пуск специального кольцевого накопителя позитронов LEPTA (от англ. — Low Energy Particle Toroidal Accumulator). Одна из задач этого кольца — поиски зеркального ортопозитрония [250 – 255].

Очень интересное обсуждение невидимых зеркальных каналов распадов хиггсовых бозонов, которые могут быть рождены на Большом адронном коллайдере LHC (Large Hadron Collider) в ЦЕРНе, содержится в статьях [141, 256 – 258] (см. также [259]). Невидимые распады возникают из-за смешивания обычных и зеркальных хиггсов. Хиггсы могут быть найдены в ближайшем будущем.

7. Заключительные замечания

Сравним зеркальную симметрию с суперсимметрией. Первая, конечно, не может конкурировать со второй по глубине концепций и по математическому аппарату. Но она может конкурировать по широте и разнообразию своих феноменологических предсказаний. Несомненно, зеркальная материя гораздо богаче, чем темная материя суперсимметрии.

Предварительный вариант этой статьи был подготовлен для доклада на Рабочей конференции по будущему физики тяжелых ароматов, ИТЭФ, 24–29 июля 2006 г. (<http://www.itep.ru/eng/bellemeeting>) и опубликован 19 июня в электронном архиве в hep-ph/0606202 v.1. Окончательная версия (v.2) была подготовлена для УФН в течение лета 2006 г.

В результате число статей в списке литературы удвоилось. Оно могло возрасти еще больше. Если Вы напечатаете в Google слова "mirror particles" (не забудьте кавычки!), то получите примерно тысячу ссылок. (Если Вы напечатаете "mirror world" или "mirror universe", то

получите примерно двести тысяч ссылок, в основном на эпизоды телевизионных сюжетов Star Trek.) В некоторых ссылках предлагается поиск в Wikipedia, но статьи в Wikipedia по зеркальному веществу могут ввести в заблуждение. Вместо Google лучше использовать поисковую систему Google Scholar, в которой число ссылок на "зеркальную вселенную" — порядка ста, а на "зеркальную частицу" — несколько сотен. В этом случае дополнительные статьи относятся не к зеркальным частицам, которые обсуждаются в настоящей статье, а к частицам, "зеркальным" в ином смысле. Например, термины "зеркальные семейства" или "зеркальные фермионы" относятся к семействам очень тяжелых гипотетических фермионов с обращенными значениями изотопических квантовых чисел. Предполагают, что такие фермионы взаимодействуют с обычными фотонами и глюонами.

Благодарности. Я благодарен М.В. Данилову за приглашение сделать доклад о зеркальном веществе на конференции в ИТЭФ. Я хотел бы поблагодарить З.Г. Бережани, С.И. Блиникова, Р.Р. Волкаса, М.Б. Волошина, С.Н. Гниненко, О.Д. Далькарова, А.Д. Долгова, А.Ю. Игнатьева, З.К. Силагадзе и М.Ю. Хлопова за очень ценные предложения, а также Т.Басалью, Е.А. Ильину и О.В. Миляеву за помощь в приготовлении этой статьи. Работа была поддержана грантом НШ-5603.2006.2.

Список литературы

- Lee T D, Yang C N "Mass degeneracy of the heavy mesons" *Phys. Rev.* **102** 290 (1956)
- Proc. of the Rochester Conf., April, 1956* (New York: Interscience Publ., 1956) Session VIII. Theoretical interpretation of new particles
- Lee T D, Yang C N "Question of parity conservation in weak interactions" *Phys. Rev.* **104** 254 (1956)
- Michel L "Interactions of elementary particles", in *Progress in Cosmic Ray Physics* Vol. 1 (Ed. J G Wilson) (Amsterdam: Elsevier, 1952) [Мишель Л "Взаимодействия элементарных частиц", в кн. *Физика космических лучей. Современные достижения* Т. 1 (Под ред. Дж. Вильсона) (М.: ИЛ, 1954)]
- Wick G C, Wightman A S, Wigner E P "The intrinsic parity of elementary particles" *Phys. Rev.* **88** 101 (1952)
- Purcell E M, Ramsey N F "On the possibility of electric dipole moments for elementary particles and nuclei" *Phys. Rev.* **78** 807 (1950)
- Берестецкий В Б, Померанчук И Я "О β -распаде нейтрона" *ЖЭТФ* **19** 75 (1949)
- Wu C S, Ambler E, Hayward R W, Hoppes D D, Hudson R P "Experimental test of parity conservation in beta decay" *Phys. Rev.* **105** 1413 (1957)
- Garwin R L, Lederman L M, Weinrich M "Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon" *Phys. Rev.* **105** 1415 (1957)
- Friedman J I, Telegdi V L "Nuclear emulsion evidence for parity nonconservation in the decay chain $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ " *Phys. Rev.* **105** 1681 (1957)
- Тезисы докладов на Всесоюз. конф. по физике частиц высоких энергий, 14–22 мая 1956 г.* (М.: Изд-во АН СССР, 1956)
- Лейкин Е М, Бурцев А К, Данилкин И С, Лебедев А Н, Окунь Л Б "Советские по физике частиц высоких энергий" *УФН* **61** 103 (1957)
- Telegdi V L "Parity violation", in *Symmetries in Physics (1600–1980). Proc. of the 1st Intern. Meeting on the History of Scientific Ideas, Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain, September 20–26, 1983* (Eds M G Doncel et al.) (Bellaterra, Barcelona, Spain: Seminari d'Historia les Ciències, Univ. Autònoma de Barcelona, 1987) p. 433
- Telegdi V L "The early experiments leading to the $V-A$ interactions", in *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s: Based on a Fermilab Symp. (2nd Intern. Symp. on the History of Particle Physics, Batavia, Ill., 1985)* (Eds L M Brown, M Dresden, L Hoddeson) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) p. 464
- Шапиро И С "О несохранении четности при β -распаде" *УФН* **61** 313 (1957)
- Gell-Mann M, Pais A "Behavior of neutral particles under charge conjugation" *Phys. Rev.* **97** 1387 (1955)
- Иоффе Б Л "О двух возможных схемах несохранения четности в слабых взаимодействиях" *ЖЭТФ* **32** 1246 (1957)
- Иоффе Б Л, Окунь Л Б, Рудик А П "К вопросу о несохранении четности в слабых взаимодействиях" *ЖЭТФ* **32** 396 (1957)
- Lee T D, Oehme R, Yang C N "Remarks on possible noninvariance under time reversal and charge conjugation" *Phys. Rev.* **106** 340 (1957)
- Lee T D "Weak interaction and nonconservation of parity" (Nobel lecture. December 11, 1957), in *Nobel Lectures: Physics: 1901–1995* (Singapore: World Scientific) (CD-ROM) p. 406; Ли Ц "Слабые взаимодействия и несохранение четности" *УФН* **66** 89 (1958)
- Yang C N "The law of parity conservation and other symmetry laws of physics" (Nobel lecture. December 11, 1957), in *Nobel Lectures: Physics: 1901–1995* (Singapore: World Scientific) (CD-ROM) p. 393; Янг Ч "Закон сохранения четности и другие законы симметрии" *УФН* **66** 79 (1959)
- Ландау Л Д "О законах сохранения при слабых взаимодействиях" *ЖЭТФ* **32** 405 (1957)
- Анонимный корреспондент газеты "Правда". "Новое в ядерной физике", "Правда", 15 февраля 1957 г., № 46, с. 4 (в тексте статьи — интервью с Л.Д. Ландау)
- Wigner E P "Relativistic invariance and quantum phenomena" *Rev. Mod. Phys.* **29** 255 (1957)
- Ландау Л Д "Об одной возможности для поляризационных свойств нейтрино" *ЖЭТФ* **32** 407 (1957)
- Landau L D "On the conservation laws for weak interactions" *Nucl. Phys.* **3** 127 (1957)
- Salam A "On parity conservation and neutrino mass" *Nuovo Cimento* **5** 299 (1957)
- Lee T D, Yang C N "Parity nonconservation and a two-component theory of the neutrino" *Phys. Rev.* **105** 1671 (1957)
- Feynman R P, Gell-Mann M "Theory of the Fermi interaction" *Phys. Rev.* **109** 193 (1958)
- Sudarshan E C G, Marshak R E "Chirality invariance and the universal Fermi interaction" *Phys. Rev.* **109** 1860 (1958)
- Lee T D, Yang C N "Conservation of heavy particles and generalized gauge transformations" *Phys. Rev.* **98** 1501 (1955)
- Окунь Л Б "Лекции по теории слабых взаимодействий" 17 препринтов ИТЭФ (М.: ИТЭФ, 1960–1961) ["Theory of weak interactions: Thirteen lectures", АЕС-т-5226 (Oak Ridge, Tenn.: US Atomic Energy Commission); Translation of lectures 14–16 and the contents: NP-10254, 10842, 10845, 10840]
- Окунь Л Б "Лекции по теории слабых взаимодействий элементарных частиц", Препринт Р-833 (Дубна: ОИЯИ, 1961)
- Окунь Л Б *Слабое взаимодействие элементарных частиц* (М.: Физматгиз, 1963) [Okun L B *Weak Interactions of Elementary Particles* (Oxford: Pergamon Press, 1965)]
- Аникина М и др. "Экспериментальное изучение некоторых следствий СР-инвариантности в распадах K_2^0 -мезонов" *ЖЭТФ* **42** 130 (1962)
- Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, Turlay R "Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson" *Phys. Rev. Lett.* **13** 138 (1964)
- Nishijima K, Saffouri M H "CP invariance and the shadow universe" *Phys. Rev. Lett.* **14** 205 (1965)
- Окунь Л Б, Померанчук И Я "Теневая Вселенная" и нейтринный опыт" *Письма в ЖЭТФ* **1** (6) 28 (1965); Okun L B, Pomeranchuk I Ya *Phys. Lett.* **16** 338 (1965)
- Кобзарев И Ю, Окунь Л Б, Померанчук И Я "О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц" *ЯФ* **3** 1154 (1966)
- Oort J H "The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems" *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **6** 249 (1932)

41. Zwicky F "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln" *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
42. Zwicky F "On the masses of nebulae and of clusters of nebulae" *Astrophys. J.* **86** 217 (1937)
43. Nikolaev N N, Okun L B "Possible experiments on search for mirror K^0 mesons" *Phys. Lett. B* **27** 226 (1968)
44. Okun L B, Rubbia C "CP violation" (Section 6. Mirror particles), in *Proc. of the Heidelberg Intern. Conf. on Elementary Particles, Heidelberg, Germany, September 20–27, 1967* (Ed. H Filthuth) (Amsterdam: North-Holland, 1968) p. 301
45. Окунь Л Б "Нарушение CP-инвариантности" (Разд. V. "Зеркальная симметрия и зеркальные частицы") *УФН* **95** 402 (1968)
46. Окунь Л Б "О мюонном заряде и мюонных фотонах" *ЯФ* **10** 358 (1969)
47. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б "О гравитационном взаимодействии фермионов" *ЖЭТФ* **43** 1904 (1962)
48. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б "Об электромагнитном и гравитационном взаимодействиях майорановских частиц", в сб. *Проблемы теоретической физики. Памяти Игоря Евгеньевича Тамма* (Отв. ред. В И Ритус) (М.: Наука, 1972) с. 219
49. Сахаров А Д "Нарушение CP-инвариантности, C-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной" *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967)
50. Pavšič M "External inversion, internal inversion, and reflection invariance" *Int. J. Theor. Phys.* **9** 229 (1974)
51. Pavšič M "External inversion, internal inversion, and reflection invariance", hep-ph/0105344
52. Киржниц Д А "Модель Вайнберга и "горячая" Вселенная" *Письма в ЖЭТФ* **15** 745 (1972)
53. Kirzhnits D A, Linde A D "Macroscopic consequences of the Weinberg model" *Phys. Lett. B* **42** 471 (1972)
54. Linde A D "Phase transitions in gauge theories and cosmology" *Rep. Prog. Phys.* **42** 389 (1979)
55. Lee T D "CP nonconservation and spontaneous symmetry breaking" *Phys. Rep.* **9** 143 (1974)
56. Kobsarev I Yu, Okun L B, Zeldovich Ya B "Spontaneous CP-violation and cosmology" *Phys. Lett. B* **50** 340 (1974)
57. Зельдович Я Б, Кобзарев И Ю, Окунь Л Б "Космологические следствия спонтанного нарушения дискретной симметрии" *ЖЭТФ* **67** 3 (1974)
58. Волошин М Б, Кобзарев И Ю, Окунь Л Б "О пузырьках в метастабильном вакууме" *ЯФ* **20** 1229 (1974)
59. Frampton P H "Consequences of vacuum instability in quantum field theory" *Phys. Rev. D* **15** 2922 (1977)
60. Coleman S "Fate of the false vacuum: Semiclassical theory" *Phys. Rev. D* **15** 2929 (1977); "Erratum" **16** 1248 (1977)
61. Callan C G (Jr.), Coleman S "Fate of the false vacuum. II. First quantum corrections" *Phys. Rev. D* **16** 1762 (1977)
62. Окунь Л Б "О поисках новых дальнедействующих сил" *ЖЭТФ* **79** 694 (1980)
63. Okun L B "Theta particles" *Nucl. Phys. B* **173** 1 (1980)
64. Окунь Л Б "Тетоны" *Письма в ЖЭТФ* **31** 156 (1979)
65. Долгов А Д "О концентрации реликтовых θ -частиц" *ЯФ* **31** 1522 (1980)
66. Окунь Л Б "Границы электродинамики: парафотоны?" *ЖЭТФ* **83** 892 (1982); Препринт ИТЭФ-48 (М.: ИТЭФ, 1982)
67. Okun L B "On a search for mirror particles", Preprint ИТЭФ-149 (Moscow: ИТЭФ, 1983) and Addendum to the preprint
68. Okun L B, Voloshin M B, Zakharov V I "Electrical neutrality of atoms and grand unification models" *Phys. Lett. B* **138** 115 (1984)
69. Okun L "Beyond the standard model", in *Proc. of the 25th Intern. Conf. on High Energy Phys., Singapore, 2–8 August 1990* Vol. 1 (Eds K K Phua, Y Yamaguchi) (Singapore: World Scientific, 1991) p. 319
70. Волошин М Б, Окунь Л Б, Эллис Дж "О поисках новых проникающих частиц", Препринт ИТЭФ-86-189 (М.: ИТЭФ, 1986)
71. Albrecht H et al. (The ARGUS Collab.) "Search for exotic decay modes of the $\Upsilon(1s)$ " *Phys. Lett. B* **179** 403 (1986)
72. Волошин М Б, Зайцев Ю М "Физика Υ -резонансов: десять лет спустя" *УФН* **152** 361 (1987)
73. Druzhinin V P et al. "Search for rare radiative decays of ϕ meson at VEPP-2M" *Z. Phys. C* **37** 1 (1988)
74. Зельдович Я Б, Хлопов М Ю "Масса нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной" *УФН* **135** 45 (1981)
75. Хлопов М Ю "Дробнозаряженные частицы и невыелетание кварков" *Письма в ЖЭТФ* **33** 170 (1981)
76. Schwarz A S, Tyupkin Yu S "Grand unification and mirror particles" *Nucl. Phys. B* **209** 427 (1982)
77. Schwarz A S "Field theories with no local conservation of the electric charge" *Nucl. Phys. B* **208** 141 (1982)
78. Schwarz A S, Tyupkin Yu S "Grand unification, strings and mirror particles", in *Group Theoretical Methods in Physics: Proc. of the Intern. Seminar, Zvenigorod, 24–26 November 1982* Vol. 2 (Executive Ed. M A Markov) (Moscow: Nauka, 1983) p. 279
79. Блинные С И, Хлопов М Ю "О возможных проявлениях "зеркальных" частиц" *ЯФ* **36** 809 (1982)
80. Blinnikov S I, Khlropov M Yu "Excitation of the solar oscillations by objects consisting of γ -matter" *Solar Phys.* **82** 383 (1983)
81. Блинные С И, Хлопов М Ю "О возможных астрономических проявлениях "зеркальных" частиц" *Астрон. журн.* **60** 632 (1983)
82. Сажин М В, Хлопов М Ю "Космологические нити и эффекты гравитационной линзы" *Астрон. журн.* **66** 191 (1989)
83. Дубрович В К, Хлопов М Ю "О доменной структуре теневой материи" *Астрон. журн.* **66** 232 (1989)
84. Kolb E W, Seckel D, Turner M S "The shadow world of superstring theories" *Nature* **314** 415 (1985)
85. Goldberg H, Hall L J "A new candidate for dark matter" *Phys. Lett. B* **174** 151 (1986)
86. Georgi H, Ginsparg P, Glashow S L "Photon oscillations and cosmic background radiation" *Nature* **306** 765 (1983)
87. Glashow S L "Positronium versus the mirror universe" *Phys. Lett. B* **167** 35 (1986)
88. Holdom B "Two $U(1)$'s and ϵ charge shifts" *Phys. Lett. B* **166** 196 (1986)
89. Holdom B "Searching for ϵ charges and a new $U(1)$ " *Phys. Lett. B* **178** 65 (1986)
90. Carlson E D, Glashow S L "Nucleosynthesis versus the mirror universe" *Phys. Lett. B* **193** 168 (1987)
91. Foot R, Lew H, Volkas R R "A model with fundamental improper spacetime symmetries" *Phys. Lett. B* **272** 67 (1991)
92. Foot R, He X-G "Comment on $Z-Z'$ mixing in extended gauge theories" *Phys. Lett. B* **267** 509 (1991)
93. Foot R, Lew H, Volkas R R "Possible consequences of parity conservation" *Mod. Phys. Lett. A* **7** 2567 (1992)
94. Foot R "Neutrino oscillations and the exact parity model" *Mod. Phys. Lett. A* **9** 169 (1994); hep-ph/9402241
95. Foot R "A Parity invariant $SU(3)_C \times SU(3)_L \times U(1)$ model" *Mod. Phys. Lett. A* **10** 159 (1995); hep-ph/9402244
96. Foot R, Lew H "A novel left-right symmetric model", hep-ph/9411390
97. Foot R "Experimental signatures of a massive mirror photon", hep-ph/9407331
98. Foot R, Volkas R R "Neutrino physics and the mirror world: How exact parity symmetry explains the solar neutrino deficit, the atmospheric neutrino anomaly, and the LSND experiment!" *Phys. Rev. D* **52** 6595 (1995); hep-ph/9505359
99. Brumby S P, Foot R, Volkas R R "Quaternionic formulation of the exact parity model", hep-th/9602139
100. Foot R, Volkas R R "The exact parity symmetric model and big bang nucleosynthesis" *Astropart. Phys.* **7** 283 (1997); hep-ph/9612245
101. Collie M, Foot R "Neutrino masses in the $SU(5) \times SU(5)'$ mirror symmetric model" *Phys. Lett. B* **432** 134 (1998); hep-ph/9803261
102. Foot R "Have mirror planets been observed?" *Phys. Lett. B* **471** 191 (1999); astro-ph/9908276
103. Foot R "Have mirror stars been observed?" *Phys. Lett. B* **452** 83 (1999); astro-ph/9902065
104. Foot R, Volkas R R "Implications of mirror neutrinos for early universe cosmology" *Phys. Rev. D* **61** 043507 (2000); hep-ph/9904336
105. Foot R, Gninenko S N "Can the mirror world explain the orthopositronium lifetime puzzle?" *Phys. Lett. B* **480** 171 (2000); hep-ph/0003278

106. Foot R, Lew H, Volkas R R "Unbroken versus broken mirror world: a tale of two vacua" *J. High Energy Phys.* (JHEP07) 032 (2000); hep-ph/0006027
107. Foot R, Ignatiev A Yu, Volkas R R "Do 'isolated' planetary mass objects orbit mirror stars?" *Astropart. Phys.* **17** 195 (2002); astro-ph/0010502
108. Foot R, Ignatiev A Yu, Volkas R R "Physics of mirror photons" *Phys. Lett. B* **503** 355 (2001); astro-ph/0011156
109. Foot R "Are mirror worlds opaque?" *Phys. Lett. B* **505** 1 (2001); astro-ph/0101055
110. Foot R "Seven (and a half) reasons to believe in mirror matter: from neutrino puzzles to the inferred dark matter in the universe" *Acta Phys. Polon. B* **32** 2253 (2001); astro-ph/0102294
111. Foot R, Silagadze Z K "Do mirror planets exist in our solar system?" *Acta Phys. Polon. B* **32** 2271 (2001); astro-ph/0104251
112. Foot R "The mirror world interpretation of the 1908 Tunguska event and other more recent events" *Acta Phys. Polon. B* **32** 3133 (2001); hep-ph/0107132
113. Foot R, Volkas R R "A mirror world explanation for the Pioneer spacecraft anomalies?" *Phys. Lett. B* **517** 13 (2001); hep-ph/0108051
114. Foot R, Yoon T L "Exotic meteoritic phenomena: The Tunguska event and anomalous low altitude fireballs — manifestations of the mirror world?" *Acta Phys. Polon. B* **33** 1979 (2002); astro-ph/0203152
115. Foot R, Mitra S "Ordinary atom – mirror-atom bound states: A new window on the mirror world" *Phys. Rev. D* **66** 061301 (2002); hep-ph/0204256
116. Foot R "Does mirror matter exist?", hep-ph/0207175
117. Foot R, Mitra S "Mirror matter in the solar system: new evidence for mirror matter from Eros" *Astropart. Phys.* **19** 739 (2003); astro-ph/0211067
118. Mitra S, Foot R "Detecting dark matter using centrifuging techniques" *Phys. Lett. B* **558** 9 (2003); astro-ph/0301229
119. Foot R, Volkas R R "Was ordinary matter synthesized from mirror matter? An attempt to explain why $\Omega_{\text{Baryon}} \approx 0.2\Omega_{\text{Dark}}$ " *Phys. Rev. D* **68** 021304 (2003); hep-ph/0304261
120. Foot R, Mitra S "Have mirror micrometeorites been detected?" *Phys. Rev. D* **68** 071901 (2003); hep-ph/0306228
121. Foot R, Mitra S "Detecting mirror matter on Earth via its thermal imprint on ordinary matter" *Phys. Lett. A* **315** 178 (2003); cond-mat/0306561
122. Foot R "Implications of the DAMA and CRESST experiments for mirror matter-type dark matter" *Phys. Rev. D* **69** 036001 (2004); hep-ph/0308254
123. Foot R "Experimental implications of mirror matter-type dark matter" *Int. J. Mod. Phys. A* **19** 3807 (2004); astro-ph/0309330
124. Foot R, Volkas R R "Explaining $\Omega_{\text{Baryon}} \approx 0.2\Omega_{\text{Dark}}$ through the synthesis of ordinary matter from mirror matter: A more general analysis" *Phys. Rev. D* **69** 123510 (2004); hep-ph/0402267
125. Foot R "Exploring the mirror matter interpretation of the DAMA experiment: Has the dark matter problem been solved?", astro-ph/0403043
126. Foot R, Silagadze Z K "Supernova explosions, 511 keV photons, gamma ray bursts and mirror matter" *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 143 (2005); astro-ph/0404515
127. Foot R "Reconciling the positive DAMA annual modulation signal with the negative results of the CDMS II experiment" *Mod. Phys. Lett. A* **19** 1841 (2004); astro-ph/0405362
128. Foot R, Volkas R R "Spheroidal galactic halos and mirror dark matter" *Phys. Rev. D* **70** 123508 (2004); astro-ph/0407522
129. Foot R "Testing the mirror world hypothesis for the close-in extrasolar planets" *Acta Phys. Polon. B* **35** 2473 (2004); astro-ph/0406257
130. Foot R "Mirror matter-type dark matter" *Int. J. Mod. Phys. D* **13** 2161 (2004); astro-ph/0407623
131. Foot R "Generalized mirror matter models" *Phys. Lett. B* **632** 467 (2006); hep-ph/0507294
132. Foot R "Implications of the DAMA/NAL and CDMS experiments for mirror matter-type dark matter" *Phys. Rev. D* **74** 023514 (2006); astro-ph/0510705
133. Foot R *Shadowlands: Quest for Mirror Matter in the Universe* (Parkland, Fla.: Universal Publ., 2002)
134. Volkas R R, Wong Y Y Y "Energy-dependent solar neutrino flux depletion in the exact parity model and implications for SNO, SuperKamiokande, and BOREXINO" *Phys. Rev. D* **58** 113001 (1998); hep-ph/9803456
135. Bell N F, Volkas R R, Wong Y Y Y "Relic neutrino asymmetry evolution from first principles" *Phys. Rev. D* **59** 113001 (1999); hep-ph/9809363
136. Bell N F, Volkas R R "Mirror matter and primordial black holes" *Phys. Rev. D* **59** 107301 (1999); astro-ph/9812301
137. Volkas R R "Neutrino physics and the mirror world", in *8th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, February 23–26, 1999* Vol. 2 (Ed. M B Ceolin) (Padova: Papergraf, 1999) p. 13; hep-ph/9904437
138. Volkas R R, Wong Y Y Y "Matter-affected neutrino oscillations in ordinary and mirror stars and their implications for gamma-ray bursts" *Astropart. Phys.* **13** 21 (2000); astro-ph/9907161
139. Volkas R R "Mirror neutrinos and the early universe", in *Cosmo-99: 3rd Intern. Workshop on Particle Physics and the Early Universe, Trieste, Italy, 27 September–2 October 1999* (Eds U Cotti et al.) (Singapore: World Scientific, 2000) p. 347; hep-ph/0002002
140. Bell N F "Mirror matter and heavy singlet neutrino oscillations in the early universe" *Phys. Lett. B* **479** 257 (2000); hep-ph/0003072
141. Ignatiev A Yu, Volkas R R "Discovering mirror particles at the Large Hadron Collider and the implied cold universe" *Phys. Lett. B* **487** 294 (2000); hep-ph/0005238
142. Ignatiev A Yu, Volkas R R "Geophysical constraints on mirror matter within the Earth" *Phys. Rev. D* **62** 023508 (2000); hep-ph/0005125
143. Ignatiev A Yu, Volkas R R "Mirror dark matter and large scale structure" *Phys. Rev. D* **68** 023518 (2003); hep-ph/0304260
144. Ignatiev A Yu, Volkas R R "Mirror matter", Talk given at *15th Biennial Congress of the Australian Institute of Physics, Sydney, Australia, 8–11 July 2002*; hep-ph/0306120
145. Mitra S "Applications of mirror matter", <http://people.zeelandnet.nl/smitra/applications.htm>
146. Mitra S "Has DAMA detected self-interacting dark matter?" *Phys. Rev. D* **71** 121302(R) (2005); astro-ph/0409121
147. Mitra S "Detecting dark matter in electromagnetic field penetration experiments" *Phys. Rev. D* **74** 043532 (2006); astro-ph/0605369
148. Gninenko S N "Limit on 'disappearance' of orthopositronium in vacuum" *Phys. Lett. B* **326** 317 (1994)
149. Gninenko S N, Krasnikov N V, Rubbia A "Invisible decay of orthopositronium vs extra dimensions", hep-ph/0205056
150. Badertscher A et al. "An apparatus to search for mirror dark matter via the invisible decay of orthopositronium in vacuum", hep-ex/0311031; Gninenko S N "An apparatus to search for mirror dark matter" *Int. J. Mod. Phys. A* **19** 3833 (2004)
151. Rubbia A "Positronium as a probe for new physics beyond the standard model" *Int. J. Mod. Phys. A* **19** 3961 (2004); hep-ph/0402151
152. Badertscher A et al. "A new experiment to search for the invisible decay of the orthopositronium", hep-ex/0404037
153. Gninenko S N, Krasnikov N V, Matveev V A, Rubbia A "Some aspects of positronium physics" *ЭЧАЯ* **37** 604 (2006)
154. Silagadze Z K "Neutrino mass and the mirror universe" *ЯФ* **60** 336 (1997); hep-ph/9503481
155. Silagadze Z K "Mirror World versus large extra dimensions" *Mod. Phys. Lett. A* **14** 2321 (1999); hep-ph/9908208
156. Silagadze Z K "TeV scale gravity, mirror universe, and ... dinosaurs", Extended version of the talk given at *Gran Sasso Summer Institute: Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics, Gran Sasso, Italy, 13–24 September 1999*; *Acta Phys. Polon. B* **32** 99 (2001); hep-ph/0002255
157. Silagadze Z K "Mirror objects in the solar system?", Prepared for *Tunguska 2001: Intern. Conf., Moscow, Russia, 30 June–1 July 2001*; *Acta Phys. Polon. B* **33** 1325 (2002); astro-ph/0110161
158. Silagadze Z K "Tunguska genetic anomaly and electrophonic meteors" *Acta Phys. Polon. B* **36** 935 (2005); astro-ph/0311337
159. Silagadze Z K "Maxwell's demon through the looking glass" *Acta Phys. Polon. B* **38** 101 (2007); physics/0608114
160. Akhmedov E Kh, Berezhiani Z G, Senjanović G "Planck-scale physics and neutrino masses" *Phys. Rev. Lett.* **69** 3013 (1992); hep-ph/9205230

161. Berezhiani Z G, Mohapatra R N "Reconciling present neutrino puzzles: Sterile neutrinos as mirror neutrinos" *Phys. Rev. D* **52** 6607 (1995); hep-ph/9505385
162. Berezhiani Z G, Dolgov A D, Mohapatra R N "Asymmetric inflationary reheating and the nature of mirror universe" *Phys. Lett. B* **375** 26 (1996); hep-ph/9511221
163. Berezhiani Z G "Astrophysical implications of the mirror world with broken mirror parity" *Acta Phys. Polon. B* **27** 1503 (1996); hep-ph/9602326
164. Berezhiani Z "Unified picture of the particle and sparticle masses in SUSY GUT" *Phys. Lett. B* **417** 287 (1998)
165. Berezhiani Z, Drago A "Gamma ray bursts via emission of axion-like particles" *Phys. Lett. B* **473** 281 (2000); hep-ph/9911333
166. Berezhiani Z, Comelli D, Villante F L "The early mirror universe: inflation, baryogenesis, nucleosynthesis and dark matter" *Phys. Lett. B* **503** 362 (2001); hep-ph/0008105
167. Berezhiani Z, Gianfagna L, Giannotti M "Strong CP problem and mirror world: the Weinberg–Wilczek axion revisited" *Phys. Lett. B* **500** 286 (2001); hep-ph/0009290
168. Bento L, Berezhiani Z "Leptogenesis via collisions: leaking lepton number to the hidden sector" *Phys. Rev. Lett.* **87** 231304 (2001); hep-ph/0107281
169. Bento L, Berezhiani Z "Baryon asymmetry, dark matter and the hidden sector" *Fortschr. Phys.* **50** 489 (2002)
170. Bento L, Berezhiani Z "Baryogenesis: the lepton leaking mechanism", hep-ph/0111116
171. Berezhiani Z "Mirror world and its cosmological consequences" *Int. J. Mod. Phys. A* **19** 3775 (2004); hep-ph/0312335
172. Berezhiani Z, Ciarcelluti P, Comelli D, Villante F L "Structure formation with mirror dark matter: CMB and LSS" *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 107 (2005); astro-ph/0312605
173. Berezhiani Z, Bento L "Neutron–mirror-neutron oscillations: How fast might they be?" *Phys. Rev. Lett.* **96** 081801 (2006); hep-ph/0507031
174. Berezhiani Z, Ciarcelluti P, Cassisi S, Pietrinferni A "Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs" *Astropart. Phys.* **24** 495 (2006); astro-ph/0507153
175. Berezhiani Z "Through the looking-glass: Alice's adventures in mirror world", in *From Fields to Strings: Circumnavigating Theoretical Physics: Ian Kogan Memorial Collection* Vol. 3 (Eds M Shifman et al.) (Singapore: World Scientific, 2005) p. 2147; hep-ph/0508233
176. Berezhiani Z, Bento L "Fast neutron–mirror neutron oscillation and ultra high energy cosmic rays" *Phys. Lett. B* **635** 253 (2006); hep-ph/0602227
177. Ciarcelluti P "Cosmology of the mirror universe", Ph.D. Thesis (Advisor: Berezhiani Z); astro-ph/0312607
178. Ciarcelluti P "Structure formation, CMB and LSS in a mirror dark matter scenario" *Frascati Phys. Ser.* **555** 1 (2004); astro-ph/0409629
179. Ciarcelluti P "Cosmology with mirror dark matter I: Linear evolution of perturbations" *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 187 (2005); astro-ph/0409630
180. Ciarcelluti P "Cosmology with mirror dark matter II: Cosmic microwave background and large scale structure" *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 223 (2005); astro-ph/0409633
181. Gianfagna L, Giannotti M, Nesti F "Mirror world, supersymmetric axion and gamma ray bursts" *J. High Energy Phys.* (JHEP10) 044 (2004); hep-ph/0409185
182. Giannotti M "Mirror world and axion: relaxing cosmological bounds" *Int. J. Mod. Phys. A* **20** 2454 (2005); astro-ph/0504636
183. Mohapatra R N, Teplitz V L "Structures in the mirror universe" *Astrophys. J.* **478** 29 (1997); astro-ph/9603049
184. Brahmachari B, Mohapatra R N "Grand unification of the sterile neutrino" *Phys. Lett. B* **437** 100 (1998); hep-ph/9805429
185. Mohapatra R N "Sterile neutrinos: phenomenology and theory", hep-ph/9808236
186. Mohapatra R N, Sciama D W "Diffuse ionization in the Milky Way and sterile neutrinos", hep-ph/9811446
187. Mohapatra R N, Teplitz V L "Mirror matter MACHOs" *Phys. Lett. B* **462** 302 (1999)
188. Mohapatra R N "Sterile neutrinos", hep-ph/9903261
189. Mohapatra R N, Nussinov S, Teplitz V L "TeV scale quantum gravity and mirror supernovae as sources of gamma-ray bursts" *Astropart. Phys.* **13** 295 (2000); astro-ph/9909376
190. Mohapatra R N "Theories of neutrino masses and mixings", in *Current Aspects of Neutrino Physics* (Ed. D O Caldwell) (Berlin: Springer-Verlag, 2001) p. 217; hep-ph/9910365
191. Mohapatra R N, Teplitz V L "Mirror dark matter and galaxy core densities" *Phys. Rev. D* **62** 063506 (2000); astro-ph/0001362
192. Mohapatra R N, Teplitz V L "Mirror dark matter", astro-ph/0004046
193. Mohapatra R N "Origin of neutrino masses and mixings" *Nucl. Phys. B: Proc. Suppl.* **91** 313 (2001); hep-ph/0008232
194. Mohapatra R N, Nussinov S, Teplitz V L "Mirror matter as self-interacting dark matter" *Phys. Rev. D* **66** 063002 (2002); hep-ph/0111381
195. Mohapatra R N, Nasri S "Avoiding BBN constraints on mirror models for sterile neutrinos" *Phys. Rev. D* **71** 053001 (2005); hep-ph/0407194
196. Mohapatra R N, Nasri S, Nussinov S "Some implications of neutron mirror neutron oscillation" *Phys. Lett. B* **627** 124 (2005); hep-ph/0508109
197. Aubourg É et al. "Microlensing optical depth of the Large Magellanic Cloud" *Astron. Astrophys.* **347** 850 (1999)
198. Lasserre T et al. "Not enough stellar mass Machos in the Galactic halo" *Astron. Astrophys.* **355** L39 (2000)
199. Alcock C et al. "Possible gravitational microlensing of a star in the Large Magellanic Cloud" *Nature* **365** 621 (1993)
200. Alcock C et al. "The MACHO project Large Magellanic Cloud microlensing results from the first two years and the nature of the Galactic Dark Halo" *Astrophys. J.* **486** 697 (1997)
201. Alcock C et al. "The MACHO project: microlensing results from 5.7 years of Large Magellanic Cloud observations" *Astrophys. J.* **542** 281 (2000)
202. Hodges H M "Mirror baryons as the dark matter" *Phys. Rev. D* **47** 456 (1993)
203. Blinnikov S I "A quest for weak objects and for invisible stars", astro-ph/9801015
204. Mohapatra R N, Teplitz V L "Mirror matter MACHOS", astro-ph/9902085
205. Belokurov V, Evans N W, Du Y L "Light-curve classification in massive variability surveys. I. Microlensing" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **341** 1373 (2003)
206. Belokurov V, Evans N W, Du Y L "Light-curve classification in massive variability surveys. II. Transients towards the Large Magellanic Cloud" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **352** 233 (2004)
207. Griest K, Thomas C L "Contamination in the MACHO data set and the puzzle of Large Magellanic Cloud microlensing" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **359** 464 (2005); astro-ph/0412443
208. Evans N W, Belokurov V "Is there a microlensing puzzle?", astro-ph/0505167
209. Freese K "Death of baryonic dark matter" *Phys. Rep.* **333–334** 183 (2000)
210. Freese K, Fields B, Graff D "Death of stellar baryonic dark matter", in *The First Proc. of the MPA/ESO Symp., Garching, Germany, 4–6 Aug. 1999* (ESO Astrophys. Symp., Eds A Weiss, T Abel, V Hill) (Berlin: Springer, 2000) p. 18; astro-ph/0002058
211. Bradač M et al. "Strong and weak lensing united. III. Measuring the mass distribution of the merging galaxy cluster 1E0657–56" *Astrophys. J.* **652** 937 (2006); astro-ph/0608408
212. Clowe D et al. "A direct empirical proof of the existence of dark matter" *Astrophys. J.* **648** L109 (2006); astro-ph/0608407
213. Blinnikov S "Gamma-ray bursts produced by mirror stars", astro-ph/9902305
214. Blinnikov S "Cosmic gamma-ray bursts" *Surv. High Energy Phys.* **15** 37 (2000); astro-ph/9911138
215. Tsvetkov D Yu, Blinnikov S I, Pavlyuk N N "Gamma-ray bursts, type Ib/c supernovae and star-forming sites in host galaxies", astro-ph/0101362
216. Kolb E W, Mohapatra R N, Teplitz V L "New supernova constraints on sterile-neutrino production" *Phys. Rev. Lett.* **77** 3066 (1996); hep-ph/9605350
217. Berezhinskiy V, Vilenkin A "Ultrahigh energy neutrinos from hidden-sector topological defects" *Phys. Rev. D* **62** 083512 (2000); hep-ph/9908257
218. Berezhinskiy V, Narayan M, Vissani F "Mirror model for sterile neutrinos" *Nucl. Phys. B* **658** 254 (2003); hep-ph/0210204

219. Berezhinsky V "SuperGZK neutrinos: testing physics beyond the Standard Model", hep-ph/0303091
220. Berezhinsky V "SuperGZK neutrinos", astro-ph/0509675
221. Хлопов М Ю, Бескин Г М, Бочкарев Н Г, Пустильник Л А, Пустильник С А "Наблюдательная физика зеркального мира" *Астрон. журн.* **68** 42 (1991)
222. Oknyanskij V L "QSO 0957 + 561 and other large-separated double quasars: some new results and a future observational project", astro-ph/0502087
223. Khlopov M Yu *Cosmoparticle Physics* (Singapore: World Scientific, 1999)
224. Хлопов М Ю *Основы космомикробиологии* (М.: УРСС, 2004)
225. Glashow S L "A sinister extension of the standard model to $SU(3) \times SU(2) \times SU(2) \times U(1)$, in *11th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, Italy, 22–25 February 2005* (Ed. M B Ceolin) (Padova: Papergraf, 2005) p. 539; hep-ph/0504287
226. Khlopov M Yu "New symmetries in microphysics, new stable forms of matter around us", Invited contribution to the special issue of honorary series of "Annals of Louis de Broglie Foundations", dedicated to E. Majorana; astro-ph/0607048
227. Belotsky K M, Khlopov M Yu, Shibaev K I "Composite dark matter and its charged constituents", astro-ph/0604518
228. Khlopov M Yu, Stephan S A "Composite dark matter with invisible light from almost-commutative geometry", astro-ph/0603187
229. Fargion D, Khlopov M, Stephan C A "Cold dark matter by heavy double charged leptons?", astro-ph/0511789 (v1)
230. Fargion D, Khlopov M "Tera-leptons shadows over Sinister Universe", hep-ph/0507077
231. Çiftçi A K, Sultansoi S, Türköz S "Lepton charge as possible source of new force", Preprint AU/94-03(HEP) (Ankara: Ankara Univ., 1994)
232. Blinnikov S I, Dolgov A D, Okun L B, Voloshin M B "How strong can the coupling of leptonic photons be?" *Nucl. Phys. B* **458** 52 (1996); hep-ph/9505444
233. Okun L "Leptons and photons" *Phys. Lett. B* **382** 389 (1996); hep-ph/9512436
234. Okun L B "Leptonic photon and light element abundancies" *Mod. Phys. Lett. A* **11** 3041 (1996); hep-ph/9611360
235. Ilyin V A, Okun L B, Rozanov A N "On the search for muonic photons in neutrino experiments" *Nucl. Phys. B* **525** 51 (1998); hep-ph/9707479
236. Akkus B et al. (CHARM II Collab.) "Experimental search for muonic photons" *Phys. Lett. B* **434** 200 (1998)
237. Aubert B et al. (BABAR Collab.) "Search for B^0 decays to invisible final states and to $\nu\bar{\nu}\gamma$ " *Phys. Rev. Lett.* **93** 091802 (2004); hep-ex/0405071
238. Ablikim M (BES Collab.) "Search for invisible decays of η and η' in $J/\psi \rightarrow \phi\eta$ and $\phi\eta'$ " *Phys. Rev. Lett.* **97** 202002 (2006); hep-ex/0607006
239. Tajima O et al. (Belle Collab.) "Search for the invisible decay of the $\Upsilon(1S)$ " *Phys. Rev. Lett.* **98** 132001 (2007); hep-ex/0611041
240. Davidson S, Campbell B, Bailey D "Limits on particles of small electric charge" *Phys. Rev. D* **43** 2314 (1991)
241. Okun L B "Spacetime and vacuum as seen from Moscow", in *2001: A Spacetime Odyssey: Proc. of the Inaugural Conf. of the Michigan Center for Theoretical Physics, Michigan, USA, 21–25 May 2001* (Eds M J Duff, J T Liu) (River Edge, NJ: World Scientific, 2002) p. 105; *Int. J. Mod. Phys. A* **17** (S1) 105 (2002); hep-ph/0112031
242. Dubovsky S L, Sibiryakov S M "Domain walls in noncommutative gauge theories, folded D-branes, and communication with mirror world" *Nucl. Phys. B* **691** 91 (2004); hep-th/0401046
243. Evslin J, Fairbairn M "Photon mixing in domain walls and the cosmic coincidence problem" *J. Cosmol. Astropart. Phys.* (JCAP02) 011 (2006); hep-ph/0507020
244. Pokotilovski Yu N "On the experimental search for neutron \rightarrow mirror neutron oscillations" *Phys. Lett. B* **639** 214 (2006); nucl-ex/0601017
245. Dolgov A D "Cosmology and new physics", hep-ph/0606230
246. Максименко О "В поисках зеркального мира" *Вокруг света* (6) 29 (2006)
247. Rosner J L "Dark matter in many forms", astro-ph/0509196
248. Seto N, Cooray A "Search for small-mass black-hole dark matter with space-based gravitational wave detectors" *Phys. Rev. D* **70** 063512 (2004); astro-ph/0405216
249. Adams A W, Bloom J S "Direct detection of dark matter with space-based laser interferometers", astro-ph/0405266
250. Meshkov I N, Skrinisky A N "The antihydrogen and positronium generation and studies using storage rings" *Nucl. Instrum. Meth. A* **391** 205 (1997)
251. Meshkov I N, Sidorin A O "Conceptual design of the low energy positron storage ring" *Nucl. Instrum. Meth. A* **391** 216 (1997)
252. Kartavtsev O I, Meshkov I N "Method of in-flight production of exotic systems in charge-exchange reactions" *Nucl. Instrum. Meth. A* **391** 221 (1997)
253. Мешков И Н "Экспериментальные исследования физики антиводорода и позитрония. Проблемы и возможности" *ЭЧАЯ* **28** 495 (1997)
254. Meshkov I N "High-precision experiments with antihydrogen and positronium in flight" *Yad. Fiz.* **61** 1796 (1998)
255. Болтушкин Е В и др. "Физический пуск накопителя ЛЕПТА" *Атомная энергия* **98** (3) 225 (2005)
256. Chacko Z, Goh H-S, Harnik R "Natural electroweak breaking from a mirror symmetry" *Phys. Rev. Lett.* **96** 231802 (2006); "The twin higgs: natural electroweak breaking from mirror symmetry", hep-ph/0506256
257. Barbieri R, Gregoire T, Hall L J "Mirror world at the Large Hadron Collider", CERN-PH-TH-2005/162, UCB-PTH-05/25, LBNL-58803; hep-ph/0509242
258. Patt B, Wilczek F "Higgs-field portal into hidden sectors", hep-ph/0605188
259. Strassler M J "Possible effects of a hidden valley on supersymmetric phenomenology", hep-ph/0607160

Mirror particles and mirror matter: 50 years of speculation and search

L.B. Okun'

Russian Federation State Scientific Center "A.L. Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics",
ul. B. Chermushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 123-31 92, (7-495) 125-96 60
E-mail: okun@itep.ru

This review describes history of discovery of violation of spatial parity P, charge conjugation parity C, combined parity CP. The hypothesis of existence of mirror particles was called upon by its authors to restore the symmetry between left and right. The review presents the emergence and evolution of the concepts "mirror particles" and "mirror matter". It could serve as a concise guide to the "mirror-land". An important part of the review is the list of about 250 references with their titles.

PACS numbers: **01.65. +g**, **11.30.Er**, **12.60. -i**

Bibliography — 259 references

Received 2 December 2006

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **177** (4) 397–406 (2007)

Physics – Uspekhi **50** (4) (2007)