Дж. Уилер

Гравитация, нейтрино и Вселенная

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 52
ББК 22.6
Д40

Дж. Уилер
Д40 Гравитация, нейтрино и Вселенная / Дж. Уилер – М.: Книга по Требованию, 2013. – 401 с.

ISBN 978-5-458-27317-6

Книга представляет собой перевод лекций известного американского физика-теоретика Дж. Уилера в Международной летней школе физики имени Энрико Ферми в Варенне (Италия); в дополнении помещены оригинальные статьи автора и других крупных зарубежных учёных таких как Мак-Витти и Мизнер.В целом книга содержит изложение ряда проблем гравитации, космологии и теории элементарных частиц. Основное внимание уделяется попытке объединенного описания гравитационного и электромагнитного полей, включающего топологические обобщения; обсуждаются также такие актуальные вопросы, как взаимные превращения гравитации и элементарных частиц, роль нейтрино и гравитационных волн в общем балансе энергии во Вселенной.Книга рассчитана на физиков и астрономов, математиков.

ISBN 978-5-458-27317-6

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Серия Книжный Ренессанс
www.samizday.ru/reprint

$^1/_2$ в теорию. В самом деле, в основе римановой геометрии лежит симметричный тензор 2-го ранга $g_{\mu\nu}$ (играющий роль компонент гравитационного потенциала, или, в конце концов, волновой функции гравитационного поля). После выделения продольного гравитационного поля оставшаяся поперечная часть, по крайней мере для случая слабого поля, будет соответствовать гравитационным волнам (гравитонам), способным излучаться и уносить энергию. В дальнейшем подобные гравитоны могут даже, согласно нашей гипотезе, поддерживаемой Уилером, превращаться в электроны — позитроны, нейтрино — антинейтрино и другие пары элементарных частиц. Обратно, эти пары электронов, нейтрино могут превращаться в гравитоны. Наши расчеты подобных процессов были продолжены И. Пийром [9] для случая фотонов и Брилем и Уилером [10] для случая аннигиляции нейтрино — антинейтрино (см. также § 6 гл. IV настоящей книги). Однако последние ограничились лишь получением формулы общего вида, не вычисляя коэффициентов. Точная формула была получена недавно Ю. С. Владимировым [4] для случая аннигиляции e_{-}—e_{+}, т. е. аналогичных спинорных частиц,

$$d\sigma = \frac{\varkappa^2}{4(4\pi)^2}\frac{p^3}{16k_0}\sin^4\theta\left\{1+\frac{2p^2}{k_0^2-p^2\cos^2\theta}-\frac{2p^4\sin^4\theta}{\left(k_0^2-p^2\cos^2\theta\right)^2}\right\}.$$

В нерелятивистском пределе получается прежний результат

$$\sigma\sim r_g^2\left(\frac{c}{v}\right)\left(\frac{\varepsilon}{mc^2}\right)^2,$$

где $r_g = \varkappa m/c^2$ (в обычных обозначениях).

Таким образом, поперечное гравитационное поле в значительной мере эквивалентно обычному веществу. Вместе с тем из тензорных функций бозонного поля непосредственно нельзя перейти к спинорам. Это обстоятельство подчеркивается Уилером в данной книге (Введение, гл. II). Следовательно, последняя серьезная попытка геометризации всей физики в лице геометродинамики впредь до дальнейших радикальных изменений, которые предварительно обсуждаются Уилером, не может претендовать на окончательный успех.

В целом Уилер дает широкую картину космологических и элементарных процессов, рассматриваемых с новой точки зрения. Автор считает себя продолжателем традиции Римана, Клиффорда, Эйнштейна в смысле геометризации физики. Оправдывая замечание Лауэ о преимущественном интересе человечества к проблемам пространства — времени, Уилер приводит даже ряд высказываний древних (Конфуций, Упанишады). Для лучшего понимания работ Уилера дадим самое краткое резюме современной ситуации в теории гравитации, отсылая за подробностями к сборнику «Новейшие проблемы гравитации» [3] и нашей вступительной статье к нему, вместе с тем дополняя эту статью, в частности, материалами 1-й Советской гравитационной конференции [4] и Ужгородской конференции 1961 г. по теоретической физике [5].

§ 2. Теория Эйнштейна

Фундаментом понимания гравитации ныне является эйнштейновская теория, полученная в рамках общей теории относительности и значительно обобщающая ньютоновскую теорию [1]. Во-первых, по аналогии с электродинамикой или мезодинамикой можно было построить «гравидинамику», обобщая статическое уравнение, описывающее порождение поля распределением масс с плотностью ρ, беря справа в качестве источника весь тензор $T_{\alpha\beta}$ плотности энергии-импульса-натяжений, включающих ρ как одну из 16 компонент; поэтому и в левой части следует ввести обобщенный потенциал в виде симметричного тензора $h_{\alpha\beta}$.

Действительно, гравитационное поле порождается не только материей с массой покоя, но и, например, фотонами и нейтрино, а также за счет кинетической энергии. Так как гравитационное поле может порождаться самим гравитационным полем, например гравитационными волнами, то новые уравнения будут нелинейными.

---

[1] Килмистер [11] обсуждает вариант нелинейной теории, сохраняющей абсолютное время и вместе с тем удовлетворяющей принципу эквивалентности.

(Нелинейность тесно связана с принципом эквивалентности.) Подобные обобщения поднимают тензорное гравитационное поле по богатству свойств до уровня векторного электромагнитного, псевдоскалярного мезонного и других полей. Квантование этого поля приведет к гравитонам со спином 2, аналогичным фотонам и т. д.

Однако главная специфика эйнштейновской теории заключается в том, что «нормальная» гравидинамика непригодна, так как по ряду оснований гравитационное поле оказывается резко отличающимся от других полей, будучи теснейшим образом связанным с геометрией пространства-времени [1]. Гравитационные потенциалы, или волновые функции, совпадают с компонентами метрического тензора $g_{\alpha\beta}^{(\text{метр.})} \equiv g_{\alpha\beta}^{(\text{грав.})}$, характеризующего риманову геометрию искривленного от точки к точке 4-пространства.

В случае слабого поля и незначительного искривления

$$g_{\alpha\beta} = \varepsilon_\alpha \delta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \qquad (\varepsilon_\alpha = -1,\ -1,\ -1,\ +1).$$

Ограничиваясь низшими (вторым) производными, но отбрасывая ограничение линейностью, в конце концов получаем знаменитые уравнения Эйнштейна

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R + \Lambda g_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^2} T_{\alpha\beta},$$

где $\Lambda g_{\alpha\beta}$ — космологический член, эмпирически крайне малый, но для отбрасывания которого необходимы дополнительные теоретические или наблюдательные данные. (Факт его введения Эйнштейном для космологии и затем отбрасывания после установления фридмановской теории нестационарной Вселенной, сам по себе любопытен с точки зрения истории, но не является решающим аргументом; кроме того, фридмановские решения и т. д. применимы как в отсутствие, так и при наличии $\Lambda g_{\alpha\beta}$.) Здесь R — скаляр, а $R_{\alpha\beta}$ — тензор Риччи, построенные из кристоффелей $\Gamma^{\alpha}_{\beta\gamma}$ и их производных. Кристоффели являются аналогами напряженности поля, и в свою очередь построены из первых производных от $g_{\alpha\beta}$ по координатам.

Из уравнений Эйнштейна (чаще всего рассматриваемых с $\Lambda=0$) вытекает множество следствий, из которых наибольшее значение приобрело решение Шварцшильда, дающее потенциалы поля сферически-симметричной массы и обобщающее закон Ньютона. Отсюда вытекают три предсказания, подтвержденных астрономическими и земными наблюдениями: 1) сдвиг перигелия Меркурия (43″ в столетие), 2) отклонение луча света от звезды в поле Солнца (1″,75) и 3) красное смещение спектральных линий в поле тяготения, наиболее убедительно подтвержденное в 1960 г. в опытах с γ-лучами (Паунд и Ребка; Крэншоу). 4) Кроме того, в применении ко всей известной части Вселенной теория приводит к нестационарной расширяющей Вселенной Фридмана как наиболее правдоподобной картине¹). Неоднократно подчеркивалось неприятное ощущение из-за небольшого числа (3+1) подтверждений теории, означающей столь радикальный переворот в представлениях о пространстве-времени и тяготении.

Утонченные средства ядерной физики в виде безотдачных γ-лучей Мёссбауэра, использование элементарных частиц, применение молекулярных и атомных стандартов частоты («атомных часов») [16], расширение астрономических и радиоастрономических наблюдений, предстоящее развитие нейтринной астрономии вместе с замечательной возможностью использования спутников и ракет лишь в последние годы создали новую ситуацию. На очереди стоит открытие поправок, обязанных вращению тел (Тирринг — Лензе, Шифф) (см. [17]), открытие нестационарных гравитационных полей, гравитационных волн и измерение их скорости [14, 18], открытие возможной экранировки [19], следствий квантованной и различных обобщенных теорий.

За истекшие годы было проделано большое число теоретических исследований, среди которых наибольшее значение приобрели 1) получение уравнений движения

---

¹) Основы общей теории относительности и ее приложения см. в монографиях, процитированных в нашей вступительной статье к сборнику [3]. См. также монографии Синга [12], Петрова [13] и Вебера [14]. Критический обзор новейшей литературы дан также в нашей статье [15].

тел из уравнений поля[1]) (Эйнштейн — Гофман — Инфельд с сотрудниками, В. А. Фок с Н. М. Петровой и другими сотрудниками), 2) анализ алгебраической структуры уравнений Эйнштейна и открытие трех типов решений (А. З. Петров, далее Пирани, Кундт, Хлаватый и др. [3, 4, 13]).

Много работ было посвящено проблеме энергии, волнам, затем космологии, единой теории поля, квантованию поля и связи гравитации с элементарными частицами. В целом физика ныне вступает в третий (после Ньютона и Эйнштейна) период исследования гравитации, который коротко можно назвать «атомно-космическим».

В самое последнее время в этих направлениях получены интересные результаты. В частности, проблема энергии гравитационного поля продвинулась вперед благодаря недавнему исследованию Мёллера [20], которое должно содействовать и анализу гравитационных волн. Ищется «комплекс» T_i^k, удовлетворяющий следующим условиям: 1) Комплекс должен быть аффинной тензорной плотностью, зависящей алгебраически от g^{ik} и их 1-х и 2-х производных. 2) Должен выполняться закон сохранения $T_{i,k}^k \equiv (\partial T_i^k / \partial x^k) = 0$. 3) Для замкнутой системы, когда 4-пространство плоско на бесконечности, где асимптотически допустимы прямоугольные координаты, величины

$$P_i = \frac{1}{c} \int T_i^4 (d^3x) \qquad (x^4 = \text{const})$$

постоянны во времени и преобразуются как ковариантные компоненты вектора при линейных преобразованиях координат (это существенно для интерпретации интегрального выражения как импульса и энергии). 4) T_4^k преобразуется как плотность 4-вектора при чисто пространственных преобразованиях; тогда полная энергия в конечном объеме не будет зависеть от пространственных координат. Это есть условие локализуемости энергии.

Только старое выражение Эйнштейна удовлетворяло условиям «1», «2», «3»; однако оно нарушало условие

---

[1]) Проблема уравнений движения в связи с объединенным описанием гравитационного и электромагнитного полей (геометродинамикой) рассмотрена в недавней работе Уилера [23].

«4». Комплекс Мёллера — Мицкевича не удовлетворял условию «3», но являлся единственным в смысле удовлетворения условий «1», «2» и «4». Предлагается искать выход в совсем другом направлении, конструируя комплекс энергии не из компонент метрического тензора, а из тетрад или компонент ортогонального репера, сопоставленных каждой точке 4-пространства [21, 22]. Как известно, для описания взаимодействия спинора с гравитационным полем требуется ввести подобные величины (Фок — Иваненко, Вейль): $g_{ik} = h_i(a)\,h_k(a)$. Тогда 16 реперных компонент определяют метрику, но при заданных g_{ik} компоненты $h_i\ (a)$ определены лишь с точностью до лоренцова вращения. Образуя из реперных компонент лагранжиан $\overline{L}$, можно прийти к искомому комплексу энергии, удовлетворяющему всем условиям «1» — «4»:

$$T_i^k = \sqrt{-g}\,(T_i^{k\,(\text{метр.})} + t_i^k) = U_{i,\,l}^{kl},$$

где суперпотенциал U_i^{kl} представляет собой уже истинную тензорную плотность 3-го ранга, антисимметричную по двум значкам:

$$U_i^{kl} = \frac{1}{4k}\left(\frac{\partial L}{\partial h^i(a)_{;\,l}}\,h^k(a) - \frac{\partial L}{\partial h^i(a)_{;\,k}}\,h^k(a)\right),$$

$$L = h\left(h^r(a)_{;\,s}\cdot h^s(a)_{;\,s} - h^r(a)_{;\,r}\cdot h^s(a)_{;\,s}\right);$$

однако для получения однозначного выражения энергии необходимо еще установить условия, фиксирующие относительную ориентацию тетрад в различных точках пространства.

Сложность уравнений гравидинамики и желательность выделения различных аспектов, обязанных, например, наличию 10 компонент, или нелинейности, или отсутствию антигравитации в обычных условиях и т. д., требует развития приближенных трактовок. Ввиду наглядности представляет интерес проведение аналогии между гравидинамикой и электродинамикой, которая неоднократно подчеркивается Уилером и была в специальной форме развита Мёллером [24], М. Дубининым, а также Форвардом [25]. В линейном приближении можно ввести вместе с Ю. Б. Румером [26] аналоги скалярного и векторного потенциалов, тензор напряженности поля и рассмотреть гравитационные волны, а также ряд других эффектов. До сих пор неизвестен ввиду своей малости квазимагнитный гравитационный эффект.

§ 3. Компенсирующие поля

Наряду с «нормальной» гравидинамикой, трактующей гравитацию как погруженное в 4-пространство поле, и эйнштейновской геометризованной трактовкой, недавно стала вырисовываться третья точка зрения, подсказанная теорией элементарных частиц и сближающая гравитационное и прочие поля на базе законов сохранения. С точки зрения иерархии взаимодействий гравитация относится к ультраслабым и стоит после слабых (ферmиевских), средних (электромагнитных) и сильных (барион-пионных) взаимодействий. Ослаблению взаимодействий соответствует понижение симметрии, уменьшение числа инвариантов и соответственно этому, в духе теоремы Нетер, уменьшение числа законов сохранения. Лишь для сильных взаимодействий сохраняется изоспин, странность и барионное число; для слабых — не сохраняется четность и т. д. Поэтому риманова геометрия общей теории относительности, соответствующая отсутствию какой-либо однородности 4-пространства, отвечает предельно слабому, гравитационному взаимодействию. В этом смысле риманова геометрия и общая теория относительности не включается в рамки эрлангенской программы Ф. Клейна, как отметил Картан [27].

Можно пытаться искать наличие некоторой однородности для гравитации и существование группы, обобщающей группу Лоренца. (Если бы это имело место для реального гравитационного поля, то естественно было бы допустить наличие еще более слабых взаимодействий, связанных с отсутствием однородности.) Для ее отыскания предположим, что параметры преобразований Лоренца являются не константами, а функциями координат; иначе говоря, перейдем к локальной группе. Можно исходить либо из бесконечно малых поворотов в касательном пространстве [28], либо сразу из конечных преобразований [29, 30]. Тогда в уравнениях поля появятся дополнительные члены, содержащие производные от параметров поворота, и для устранения этих членов с целью сохранения инвариантности приходится ввести компенсирующие члены, которые можно считать обязанными некоторому полю. Тогда оказывается, что компенсирующее поле, введенное путем перехода от постоянных к локальным параметрам группы Лоренца, играет роль гравитационного поля, по крайней мере в отношении членов взаимодействия (но в общем случае может содержать вклад от кручения наряду с искривлением). Это проверяется для случаев скалярных или псевдоскалярных частиц в уравнении Клейна — Гордона, и спинорных частиц в уравнении Дирака, что означает получение новым способом коэффициентов связности.

Указанная процедура вполне аналогична ситуации с инвариантностью уравнений относительно фазового преобразования $\psi' = \psi \exp \alpha(x)$, так как в случае, когда α не является постоянной, компенсация членов $\partial\alpha/\partial x_r$ происходит за счет одновременного калибровочного (градиентного) преобразования вектор-потенциала электромагнитного поля $A'_\mu = A_\mu + (\partial\alpha/\partial x_\mu)$. Вместе с Сакураи [31] можно сказать, что электромагнитное поле вводится как «компенсирующее» при переходе от постоянной к локальной фазе. С этой общей точки зрения были рассмотрены преобразования в изопространстве, приводящие к новым компенсирующим полям [32]. В случае неточного сохранения соответствующее поле обладает массой покоя (подобно пионам).

Будущее развитие интересных идей компенсирующего поля, обращающих на себя в последние месяцы все большее внимание [33—44], покажет, имеем ли мы здесь только лишь новую ценную интерпретацию эйнштейновской теории, сближающую ее с другими бозонными полями, или же речь может идти даже о более общей теории гравитации [45—47].

§ 4. Единая теория поля

В связи с попыткой Уилера построить единую картину материи — пространства-времени (в которую, впрочем, еще не удается включить фермионы) дадим классификацию геометризованных единых теорий.

Лишнеровиц [50] приводит классификацию всего по двум признакам: а) обобщенная связанность, б) варианты пятимерия. Эта схема является слишком узкой и не учитывает, например, топологии. Будем исходить из римановой геометрии, характеризуемой: 1) интервалом

$$ds^2 = g_{\alpha\beta}\, dx^\alpha\, dx^\beta$$

с симметричными $g_{\alpha\beta}$, 2) параллельным переносом вектора $\delta A^\alpha = -\Gamma^\alpha_{\beta\gamma} A^\beta \delta x^\gamma$, где кристоффели $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ задаются через производные $g_{\alpha\beta}$, 3) эвклидовой топологией 4-пространства, 4) непрерывным характером изменения координат; кроме того, 5) имеется в виду 4-мерное пространство-время и 6) допускаются любые преобразования координат, т. е. максимальная неоднородность 4-пространства. Различные обобщения, применявшиеся в единых теориях в том или другом из указанных пунктов, выходили за рамки римановой геометрии [3]. В самом деле, геометрии Вейля, Эддингтона, Скаутена и др. вводили обобщенные $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$. Вейль сверх того рассматривал конформно-инвариантные интервалы. Эйнштейн допускал несимметрию $g_{\alpha\beta}$. Пятимерные геометрии вслед за Калузой рассматривали О. Клейн, В. А. Фок, П. Иордан, О. Веблен, В. Паули, И. Тири, Э. Шмутцер, В. И. Родичев, Ю. В. Румер и др., в частности вводя или не вводя условия периодичности по пятой координате. Компоненты электромагнитного вектор-потенциала пытались вводить за счет пятого измерения, так же как за счет несимметричной метрики. В связи с изотопическими свойствами элементарных частиц, характеризующими внутренние степени свободы (изоспин, барионное число, странность; вероятно, также лептонное число) и вместе с тем взаимные связи частиц внутри изомультиплетов ($p - n$, $\Sigma^+ - \Sigma^0 - \Sigma^-$ и др.), была развита теория изопространства: 3-мерного, 4-мерного (эвклидова и псевдоэвклидова). Возникла идея объединения 4-пространства Минковского с изопространством (Иваненко — Бродский—Соколик, Хоанг—Фонг, Пайс, Юкава, Райский, Зайков и др.), и были развиты теории 6-, 7- и 8-мерных пространств разных типов [52, 53].

Уилер относится резко отрицательно к модификациям римановой геометрии типа единых теорий 20-х годов и ищет обобщения лишь в направлении топологии, вводя топологические ручки, дырки, многосвязные области при сохранении римановой геометрии и обычной топологии в малом (см. настоящую книгу). Поводом к подобным обобщениям, как подчеркивает Уилер, послужил анализ сингулярностей центрально-симметричного решения Шварцшильда (см. § 10, 12 и др. гл. I настоящей книги). Замечание Уилера о неизбежности квантовых флуктуаций метрики на самых малых расстояниях порядка универсальной длины $L^* \approx (hG/c^3)^{1/2} \approx$ $\approx 10^{-33}$ *см* (гл. 1, § 7 и 11 настоящей книги) и возможности благодаря этим флуктуациям изменения топологии, следует считать очень сильным. Недавно Ч. Мизнер и Д. Финкельштейн указали, что число переверток типа листа Мёбиуса дает даже в неквантованной теории целое число, которое они пытаются сопоставить с барионным числом или странностью [54]. Не следует ли допустить возможности перехода к дискретному 4-пространству благодаря подобным флуктуациям?

Что касается непрерывности координат, то, как известно, с целью устранения расходимостей были рассмотрены многие варианты дискретного пространства [22, 55]: примитивная решетка точек (Амбарцумян — Иваненко, Гейзенберг), операторы координат (Снайдер, см. [55]); Кадышевский [56], считая, что новая геометрия индуцирована слабым взаимодействием частиц, аналогично тому, как искривление 4-пространства обязано наличию гравитирующих масс, и проявляется при длинах волн порядка универсальной фермиевской длины $\sim 10^{-17}$ *см,* вводит искривленное импульсное пространство (М. Борн [57]). Тогда вновь получаются операторы Снайдера, причем прерывный характер пространственных и непрерывный характер временнóй координат сопоставляется несохранению пространственной и сохранению временнóй четности. Коиш [58] и И. С. Шапиро [59] использовали поле Галуа, например поле вычетов, т. е., наглядно говоря, конечное число точек в некоторой области; при этом интегралы заменяются суммами и расходимости исчезают. Теория оказывается очень жесткой