

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ
КУЛЬТУРЫ, СПОРТА И ТУРИЗМА»**

Кафедра социально-гуманитарных дисциплин

Р.М. Нугаев

**ВТОРАЯ НАУЧНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ: ГЕНЕЗИС И СТАНОВЛЕНИЕ
НЕКЛАССИЧЕСКОЙ НАУКИ**

*Рекомендовано Ученым советом Поволжского Государственного
Университет Физической Культуры, Спорта и Туризма
для студентов и аспирантов, изучающих историю и философию науки*

Москва 2023

УДК 167/168 (075)
ББК 72.3-я73
DOI 10.29039/167168075-72-3-215-07-2023
Н87

Рецензент:

Е.А. Мамчур, проф., д.ф.н., главный научный сотрудник отдела
философии науки Института Философии РАН

Нугаев Рннат Магдневич

Н87 Вторая научная революция: генезис и становление неклассической науки : учебное
пособие / Р.М. Нугаев. – М.: Изд-во Триумф, 2023. – 215 с. ил.

© Нугаев Рннат Магдиевич, 2023

Аннотация. В чем состояли основные причины второй (начатой Планком и Эйнштейном) научной революции? Почему классическая механика и электродинамика были «опровергнуты» одновременно в начале XXв. ? – Квантовая и релятивистская революции были одновременными потому, что имели одну и ту же причину – глубокий конфликт между базисными исследовательскими традициями классической физики- ньютоновской механикой, максвелловской электродинамикой, больцмановской статистической механикой и классической термодинамикой.

– В общем случае, причины второй научной революции – сложное и уникальное взаимодействие внешних (социальных) и внутренних (когнитивных) факторов. *Внешние* факторы описываются лаконичной фразой Фридриха Ницше: «*Бог умер*». Это – набравшая силу к концу XIXв. безудержная модернизация всех сфер общественной жизни, состоявшая прежде всего в становлении индустриального общества с его коренной ломкой экономического уклада, традиционных политических институтов, культурных традиций, ценностей социума. Это – интенсивная «секуляризация» всех сфер общественной жизни, рост эгоизма, цинизма, материализма, прагматизма и позитивизма. Это – становление Большой Науки (Big Science) и постепенное превращение знания в своеобразный ‘товар’, безличный ‘продукт духовного производства’, который можно обменивать, рекламировать, покупать и продавать. Теперь знание, в еще большей степени, чем ранее, – сложный социальный конструкт, отражающий специфику не только природных процессов, но и сложных отношений внутри научного сообщества и социума в целом.

Внутренние причины – это появление более совершенной экспериментальной техники и, соответственно, новых опытных данных, трудно укладывавшихся в прокрустовы ложа старых исследовательских традиций и рассматриваемых в контекстах внутренних разломов, «разладов» в структуре научного знания, борьба и взаимодействие, конкуренция самих исследовательских программ, «парадигм», традиций, «практик» друг с другом, дальнейшая безудержная математизация научного знания и т.д.

Взаимодействие этих двух групп факторов, определяется прежде всего тем, что «внешние» факторы вовсе не отменяют «внутренних», но изменяют «веса», значимость, роли этих факторов в ситуациях смены базисных парадигм. Нарастающая математизация научного знания, ужесточающиеся требования к непротиворечивости и взаимной согласованности приводят к тому, что *доминирующим* оказывается т.н. ‘интертеоретический контекст’, определяющий ведущую роль такого фактора как согласованность встретившихся друг с другом «старых» парадигм.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, изучающих историю и философию науки.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Аннотация	3
2. Глава первая. Основные причины второй научной революции	5
3. Глава вторая. Становление электромагнитной научной картины мира.....	25
4. Глава третья. Генезис специальной теории относительности.....	41
5. Глава четвертая. Приложение – 1: генезис специальной теории относительности как синтез максвелловской электродинамики и ньютоновской механики	61
6. Глава пятая. Генезис общей теории относительности	79
7. Глава шестая. Приложение - 2: генезис общей теории относительности как синтез теоретических схем Нордстрема, Абрагама и Эйнштейна	87
8. Глава седьмая. Эмпирический базис общей теории относительности: три «критических эффекта», черные дыры, гравитационные волны и многострадальная релятивистская космология.....	102
9. Глава восьмая. Генезис и становление квантовой теории.....	131
10. Глава девятая. Эволюция квантовой парадигмы... ..	161
11. Глава десятая. Особенности квантовой научной картины мира.....	191
12. Заключение	196
13. Список литературы	207

Раяну в надежде на то, что он когда-нибудь дочитает эту книгу до конца .

Глава 1. Основные причины второй научной революции.

Вероятно, в порядке общего предположения можно сказать, что в истории человеческого мышления наиболее плодотворными часто оказывались те направления, где встречались два различных способа мышления. Эти различные способы мышления, по-видимому, имеют свои корни в различных областях человеческой культуры или в различных временах, в различной культурной среде или в различных религиозных традициях. Если они действительно встречаются, если, по крайней мере, они так соотносятся друг с другом, что между ними устанавливается взаимодействие, то можно надеяться, что последуют новые и интересные открытия.

Вернер Гейзенберг. Физика и философия

Известно, что на рубеже XIX и XX вв. произошла *вторая* («планковская» и «эйнштейновская») *научная революция*, состоявшая в переходе от т.н. «классической физики» (ньютоновская механика + максвелловская электродинамика + статистическая механика + классическая термодинамика) к «неклассической» (теория относительности + квантовая теория). В чем состоят ее основные причины?

Казалось бы, о чем здесь рассуждать? – Откройте, например, стандартный вузовский учебник по курсу «Концепции современного естествознания»¹ и вы сразу же обнаружите следующее авторитетное, высказываемое как само собой разумеющееся, утверждение. Во второй половине XIX века стало возможным конструирование такой экспериментальной техники, такой прецизионной измерительной аппаратуры, которая позволила, наконец, подвергнуть опытной проверке определенные важные следствия классических теорий механики, электродинамики и термодинамики. Созданное оборудование (интерферометр Майкельсона, например) позволило поставить такие «**критические эксперименты**», которые практически одновременно опровергли все основные структурные элементы классической физики - и классическую механику, и классическую теорию электромагнитного излучения.

¹ См., например, Каренков С.Х. Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. – М.: Академический проект, 2014. – 12-е изд., иср. и доп.

В итоге исследователи просто *вынуждены* были, под давлением «лавины бесспорных опытных данных», порвать с привычными представлениями о пространстве, времени, движении и причинности и заменить их другими, более «сумасшедшими» (в смысле Н. Бора) идеями, вопиюще противоречившими как обыденному опыту, так и здравому смыслу.

В более продвинутых курсах эта точка зрения обычно подкрепляется отсылкой к хрестоматийной речи одного из ведущих представителей классической физики второй половины XIX в. – лорда Кельвина. Эта знаменитая речь была произнесена в 1900г. на ежегодном заседании Британской Ассоциации Содействия Науке, председателем которой Кельвин являлся². В ней он «пророчески указывал» на «**два облака** на дотоле безоблачном небосводе классической физики», с которыми авторы учебников легко идентифицируют опыты Майкельсона - Морли (опровержение классической теории светового эфира) и Люммера-Принсгейма и Рубенса - Курльбаума (опровержение классической теории излучения черного тела).

Описанная история, переходя из учебника в учебник и обрстая все новыми подробностями, уверенно приобрела незыблемость научного мифа - одного из краеугольных камней современной научной идеологии. Этот миф, и многие подобные ему, несомненно, способствуют формированию когнитивных ценностей у будущих исследователей, инженеров, преподавателей и школьных учителей, укрепляя «дух объективного научного исследования» и задавая яркие образцы успешной профессиональной деятельности. Но он же представляется весьма *сомнительным* в свете данных иного рода, обильно предоставленных современной историей и методологией науки.

(I) Начнем с хрестоматийного случая, с «*революционера-радия*» (крылатая фраза президента Французской Академии Наук Анри Пуанкаре). В четверг 27 февраля 1896 г. в Париже физик (и химик) Анри Беккерель, тщательно исследуя способность солей урана вызывать явление фосфоресценции, сделал эпохальное открытие, изменившее ход развития науки. По ошибке заперев на ночь пакетик с урано-калиевой солью вместе с пачкой фотопластинок в своей лаборатории в Ботаническом саду (в домике знаменитого Жоржа Кювье), наутро он (опять же *совершенно случайно!*) зачем-то проявил эти фотопластинки. И с удивлением обнаружил на одной из них следы неведомого излучения, исходящего из недр атома урана.

Так был запущен спусковой механизм целой серии выдающихся открытий: уяснение сложной структуры атома, расщепление выходящих из атомных недр таинственных лучей на три вида – альфа, бета и гамма излучение, опыты Резерфорда по исследованию атомных ядер, и т.д. и т.п.- вплоть до опытов Гана и Штрассмана по делению атомных ядер (1938) и запуска атомного реактора на чикагском стадионе командой Энрико Ферми в 1943г.

² Kelvin Lord. XIX-th Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light //Philosophical Magazine, 1901, vol.2, pp.1-39.

Но недоверчивые французские историки науки, обратившись к архивам, обнаружили два обстоятельства, позволившие поставить под сомнение изложенную выше прелестную «рождественскую сказку для юных друзей науки»³.

Во-первых, оказалось, что Беккерель отнюдь не был первым, кому пришло в голову исследовать уран на радиоактивность. За тридцать лет до него на заседании *парижской* академии наук было заслушано сообщение некоего лейтенанта Ньежа де Сен - Виктора, доложившего о действии урановой соли на фотографические пластинки. Но и сам лейтенант, и его слушатели приписали наблюдавшееся явление лишь химическому действию урановой соли.

Во-вторых, открытие Беккереля не было нагромождением случайностей, позволившим кому-то едко заметить, что «не Беккерель открыл радиоактивность, а радиоактивность открыла Беккереля». Всего за несколько недель до своего открытия Анри Беккерель встречался с академиком (а впоследствии президентом Французской академии наук), великим математиком (и физиком-теоретиком) Анри Пуанкаре. Он-то и поставил перед Беккерелем задачу исследовать соли урана на предмет возможного выявления в них радиоактивности⁴.

(II) Обратимся ко второму еще более известному примеру. В 1881 году американские физики *Альберт Майкельсон и Генри Морли* в подвале берлинского института кайзера Вильгельма поставили ныне признанный классическим (а для своего времени - самым дорогостоящим) эксперимент по измерению скорости эфирного ветра. (Благо, что отец А. Майкельсона был мультимиллиардером – владельцем известных из истории классовых битв чикагских боен; он-то и подарил сыну на день рождения чек на 1 миллион долларов, принесенных в жертву прогрессу науки).

Вспомним, что «эфиром» в классической теории электромагнитного излучения называли гипотетическую среду, возмущения которой представляли собой электромагнитные волны. (Также как изменения сил сцепления молекул воды представляют собой волны «водяные»).

Земля, как часть Вселенной, была погружена для физика XIXв. в «океан эфира», так что наблюдатель, находившийся на поверхности быстро вращающейся вокруг своей оси и вокруг Солнца Земли, должен был ощущать эфирный ветер. Интерферометр, размещенный Майкельсоном и Морли на поверхности мраморной плиты, плавающей в озере ртути, должен был зафиксировать разность хода когерентных лучей, испущенных вдоль направления движения Земли и перпендикулярно к нему.

³ Подробнее см.: Тяпкин А.А., Шибанов А.С. Пуанкаре. М.: Мол. Гвардия, 1979.

⁴ См. подробнее: Тяпкин А.А., Шибанов А.С. Пуанкаре. М.: Молодая Гвардия, 1979.

Но никакого ветра обнаружено не было. Целый год упорные американцы провели в подвале, дыша вредными для здоровья парами ртути и пытаясь выяснить, в чем же дело. Потом, наконец, они опубликовали в одном из американских научных журналов статью⁵, сообщавшую о полученном отрицательном результате. Статья не могла не вызвать полемику о достоверности полученных опытных данных, тон в которой задал один из самых авторитетных теоретиков того времени – сам Гендрик Антоон Лоренц. – И опыт, после жесткой критики, в 1887 г. пришлось повторить. – Опять ничего⁶. – Это обстоятельство – много позже, во времена расцвета аналитической философии, – было истолковано такими ее столпами как Мориц Шлик, Ганс Рейхенбах и Карл Поппер, как классический пример бэконовского «решающего эксперимента» (*experimentum crucis*), опровергшего классическую физику⁷. Только в 1905г. вызванный этим экспериментом «кризис в физике» разрешил 26-летний Альберт Эйнштейн. Он выдвинул специальную теорию относительности, прямо обобщавшую в одном из своих постулатов результаты опыта Майкельсона – Морли⁸.

На этот раз другие недоверчивые историки науки – американцы Мартин Клейн, Джералд Холтон и др. – опять захотели перепроверить это объяснение⁹. И снова оказалось, что и эта история – тоже миф, правда, на этот раз уже несколько более правдоподобный.

Во-первых, ни сам Альберт Майкельсон, ни его коллега Генри Морли ни в статье 1881г., ни в статье 1887г., ни где-либо еще никогда не интерпретировали свои результаты как *опровержение* всей классической теории излучения и лежащей в ее основе концепции эфира. Они сами скромно указывали лишь на то, что результаты их опыта позволяют в лучшем случае *выбрать* между различными разновидностями классической теории излучения (спор на самом деле шел лишь о выборе между конкурирующими гипотезами Стокса и Френеля о полном и частичном увлечении эфира движущимися телами).

⁵ Michelson A. The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. – American Journal of Science, 1881, ser. 3, vol. 22, pp. 120 – 129.

⁶ Michelson A., Morley M. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. – American Journal of Science, 1887, ser. 3, vol. 34, pp. 333-345.

⁷ Зотов А.Ф., Мельвиль Ю.К. Западная философия середины 19 – начала 20 века.: Учеб. пособие для филос. фак. ун-тов. – М.: Высшая школа, 1988. Зотов А.Ф., Мельвиль Ю.К. Западная философия XX века. Учебное пособие. М.: «ПРОСПЕКТ», 1998.

⁸ Эйнштейн А. Физика и реальность. Сб. статей. М.: Наука, 1965.

⁹ Klein M.J. Einstein's First Paper on Quanta. - The Natural Philosopher, 1963, vol.2. Klein M.J. Paul Ehrenfest. vol.1. The Making of Theoretical Physicist. North - Holland Publishing Company, Amsterdam - London, 1970. Klein M.J. No firm foundations: Einstein and the Early Quantum Theory. - In: Some Strangeness in the Proportion. N.Y., 1980, pp.161-185. Holton G. Einstein, Michelson and the 'Crucial' Experiment. - Isis, 1969, vol.60, pp.133-197. Holton G. Einstein's Scientific Program: the Formative Years. - In: M. Wolff (ed.) Some Strangeness in the Proportion. N.Y., Addison-Wesley, 1980, pp.49-65. Имеется перевод: Холтон Д. К. К генезису специальной теории относительности // Эйнштейновский сборник. М.: Наука, 1966, с. 177 – 194.

В итоге в 1909г. Альберт Майкельсон по праву получил нобелевскую премию отнюдь не за «опровержение теории эфира», а за «разработку и совершенствование прецизионных методов оптических измерений»¹⁰, включавшую, но не сводившуюся, к конструированию интерферометров. (Последние до сих пор активно задействованы в современной науке: именно они в 2017 позволили, наконец, обнаружить гравитационные волны).

Во-вторых, уже через несколько лет после опытов А. Майкельсона и Г. Морли континентальные физики – голландец Г. Лоренц и ирландец Л. Фицджеральд - *независимо друг от друга* выдвинули весьма разумную гипотезу, согласно которой все весомые тела (и, в частности, плечи интерферометра) при движении сквозь эфир сокращались в направлении движения, - но так, чтобы опыт Майкельсона - Морли приводил к нулевым результатам¹¹.

Действительно, много позже, в классических работах Карла Поппера, эта гипотеза была метко названа *гипотезой ad hoc*, «уловкой от опровержения», введенной только для того, чтобы подстроить теорию под противоречивший ей эксперимент¹². Но это – позже. А тогда ни сам лидер пост-маквелловской теоретической физики, профессор лейденского университета Гендрик Антоон Лоренц, ни президент Французской Академии Наук Анри Пуанкаре так не считали¹³.

Действительно, гипотеза сокращения Лоренца-Фицджеральда вполне естественно следовала из введенной ранее *гипотезы Молекулярных Сил*. Согласно этой гипотезе, электромагнитные силы притяжения между молекулами любого твердого тела (в том числе и между молекулами плеч интерферометра Майкельсона) зависят от его скорости в полном соответствии с т.н. «преобразованиями Лоренца»¹⁴. (На них, кстати, основана вся кинематика специальной теории относительности Эйнштейна).

В-третьих, ни в самой статье 1905г. по специальной теории относительности, ни в более поздних обзорах, написанных Эйнштейном в самый продуктивный период своей деятельности, нет ни одной *прямой ссылки* на эксперимент Майкельсона – Морли. Почему? Казалось бы, вот он – самый убедительный аргумент в пользу отказа от теории эфира. Пользуйся!

¹⁰ Rayleigh. Anniversary Address. – Proceedings of the Royal Society, 1908, A538, April, pp. 239 – 251.

¹¹ Lorentz H.A. The Relative Motion of the Earth and the Ether. – Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1892a, vol. 1, pp. 74 – 77. Reprinted in: Lorentz, Collected Papers, 1937, vol. 4, pp. 219 – 223.

¹² Popper Karl. Logik der Forschung. Springer, Wien, 1938. Имеется перевод: Поппер К. Р. Логика и рост научного знания. – М.: Прогресс, 1983.

¹³ Poincare H. Sur la dynamique de l'electron. – Rediconti del Circolo Mathematico di Palermo, 1906, vol. 21, pp. 129-176. Имеется перевод: Пуанкаре А. О динамике электрона. – Собр. Соч., т.3. М.: 1974, С. 433 – 486.

¹⁴ Zahar Elie. Did Einstein's programme supersede Lorentz's? – The British Journal for the Philosophy of Science, 1973, vol.24, pp.95-123, 226-262. Zahar Elie. Einstein's Revolution. A Study in Heuristic. Open Court, La Salle, Illinois, 1989.

Более того, в беседах с американским физиком и историком физики Робертом Шенклендом, имевшим место в последние годы жизни¹⁵, на прямо поставленный вопрос Эйнштейн дал однозначный ответ: во время написания статьи по специальной теории относительности *он ничего не знал* об эксперименте Майкельсона - Морли. «Я узнал о нем позже, из обзоров Г. Лоренца».

В-четвертых, в упоминавшемся выше хрестоматийном докладе лорда Кельвина также почему-то ничего не говорится об опыте Майкельсона - Морли. Соответственно, под «облаком» на безукоризненно светлом небосводе классической физики в нем понимаются не результаты экспериментов, но недостатки, *парадоксальность* теорий, трактующих взаимодействие движущихся тел с эфиром. (Недаром знаменитая статья Эйнштейна 1905г. непритязательно называлась «*К электродинамике движущихся тел*»).

(III) Обратимся к третьему хрестоматийному примеру – опытам Рубенса и Курльбаума по опровержению классической теории излучения абсолютно черного тела. Согласно традиционной точке зрения, эти эксперименты, поставленные в конце XIX века ведущими немецкими экспериментаторами, как грубо **противоречили** классической теории излучения, так и **неносредственно** вели к формуле Планка¹⁶.

Тем не менее, погружение в реальную историю науки ставит и эту историю под сомнение. Классическая теория излучения абсолютно черного тела была создана Р. Рэлеем и Д. Джинсом только в **1904 году**, через несколько лет *после* доклада Планка, на котором он предложил свою формулу для спектра чернотельного излучения. Во время постановки этим экспериментам нечего было опровергать! Они не для этого ставились, а для того, чтобы получить хоть какую-то достоверную информацию о спектре излучения абсолютно черного тела¹⁷.

Когда Планк выводил свою формулу, он отнюдь не намеревался подрывать здание классической физики, активно используя при выводе своего закона результаты и методы *всех* основных классических теорий своего времени – ньютоновской механики, максвелловской электродинамики, Больцмановской статистической механики и классической термодинамики¹⁸. И никакой ужасный «**крнзис**» в теории излучения в **документах того времени** – статьях и докладах – зафиксирован не был.

¹⁵ Shankland R.S. Conversations with Albert Einstein. - American Journal of Physics, 1963, vol.31, pp. 47 - 57. Shankland R.S. Michelson – Morley Experiment. – American Journal of Physics, 1964, vol. 32, pp. 16 – 35.

¹⁶ Norton John. The Determination of Theory by Evidence: The Case for Quantum Discontinuity, 1900-1915. Synthese, 1993, vol. 97, pp.1-31. Франкфурт У. И., Френк А. М. У истоков квантовой теории. – М.: Наука, 1975. Хунд А. История квантовой теории. – М.: Прогресс, 1980.

¹⁷ Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912. Oxford and New York, 1978.

¹⁸ Планк М. Отношение современной физики к механическому мировоззрению. – Физическое обозрение, 1911, т. 12, № 3. Планк М. Единство физической картины мира. – В кн.: Планк М. Избранные труды. М.: Наука, 1975.

Он появился позже – например, в учебниках по квантовой механике, авторы которых хотели поскорее обратить студентов в новую, «копенгагенскую» веру.

Другое дело, что, как предупреждал Макса Планка в личной переписке еще сам основатель статистической механики Людвиг Больцман, **условием** применимости статистических методов к излучению было предположение о том, что энергия чернотельного излучения состоит из маленьких порций (квантов) энергии¹⁹. Но Планк надеялся, что это «сильное» предположение удастся в будущем как-нибудь обосновать классически. В любом случае он старался не привлекать к этому предположению внимание, рассматривая его лишь как промежуточный этап, как инструмент для вычислений, аналогичный комплексным числам в математике.

Тем не менее, первым, кто вообще сослался на эту статью и «поднял хайп» (made hype) был Эйнштейн, в другой своей великой статье 1905г. – по фотоэффекту – выдвинувший революционную идею реальности светового кванта²⁰.

И в своем хрестоматийном докладе 1900г. лорд Кельвин говорил отнюдь не об *экспериментах* Рубенса и Курльбаума, а выражал вполне справедливое сомнение в применимости теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы к максвелл-лоренцевскому эфиру. Электромагнитное поле (эфир) обладает бесконечным числом степеней свободы, и не отсюда ли следует бесконечность полевой энергии в «ультрафиолетовой катастрофе»?

Уже три рассмотренных хрестоматийных примера (а на самом деле их гораздо больше) наводят на мысль, что имеющая давние традиции в учебно-методической литературе концепция «критического эксперимента», раз и навсегда опровергающего классическую фундаментальную теорию и тем самым значительно способствующего продвижению науки вперед, – это **слишком большое упрощение**.

История науки убедительно говорит о том, что даже одни и те же наблюдения и эксперименты (не говоря уже о теоретических интерпретациях и объяснениях) оцениваются в разные исторические эпохи по-разному, в зависимости от контекста, «менталитета» (mentalité), «духа времени»²¹ (немцы называют его «Zeitgeist»).

Отвечая на вполне резонные аргументы физика Алана Сокала, философ Бруно Латур подчеркивал, что последний отказывается признать, что “[жесткие] факты остаются жесткими только тогда, когда они поддержаны культурой повседневности, социальными институтами, которым можно доверять, в большей или меньшей степени общественной жизнью, более или менее достоверным средствам массовой информации».

¹⁹ Dugas Rene. La theorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes. Paris, Editions de Griffon, 1959.

²⁰ Einstein A. Uber eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden hewristischen Lesictpunkt. - Annalen der Physik, 1905a, vol.17, pp.132-148. Имеется перевод: Эйнштейн А. Об одной точке зрения, касающейся возникновения и превращения света. – Собр. соч., т.3. М.: Наука, 1966, С. 92 – 107.

²¹ Feyerabend P. Critique of Scientific Reason. - In: C. Howson (ed.). Method and Appraisal in the Physical Sciences. The Critical Background to Modern Physics, 1800-1905. Cambridge University Press, 1976, pp. 309-339.

Поэтому с появлением альтернативных «жестких фактов» можно или нет доверять какому-либо утверждению зависит гораздо менее от его достоверности, чем от условий его конструирования. А именно, от того, кто его делает, кому оно адресовано, и каким социальным институтам обязано его возникновение²².

Ни один стремящийся рассуждать здраво исследователь не претендует и не может, я думаю, претендовать на описание *всего* спектра этого контекста научной деятельности, на раскрытие *всех* зубцов и шестеренок сложнейшего механизма его влияния на научное познание. Как в конце жизни признавался еще Фридрих Шеллинг, «человеческая жизнь в общем и целом вращается главным образом вокруг *двух* полюсов: государства и религии»²³. Но сколько споров вызывает учет влияния одних только религиозных факторов на развитие научного познания, - начиная от «Протестантской этики и духа капитализма» (и т.н. «тезиса Мертон») и заканчивая «и все-таки она вертится»²⁴.

Тем не менее, работы авторитетных историков и социологов науки убедительно говорят о том, что в своей повседневной деятельности ученые-естествоиспытатели стараются *максимально дистанцироваться* от влияния «внешних» - социально-политических, социально-экономических и даже социокультурных факторов. Как пронципально отмечал еще Томас Кун, чем более развитой является наука, тем меньшее влияние внешние факторы оказывают на ее внутреннюю динамику²⁵.

Даже если влияние внешних факторов действительно имеет место, его упорно стараются не замечать, а если замечают – не признавать, а если признавать – только сквозь зубы, когда «припрут к стенке». И даже если ученые мужи сознательно следуют в своей профессиональной деятельности определенным религиозным, классовым, национальным, расовым и, наконец, этническим «предрассудкам» («дело Галилея», «дело Лысенко», etc.), они стараются представить свои лабораторные отчеты, статьи и монографии таким образом, чтобы от этих предпочтений *максимально дистанцироваться*. Неслучайно такая этическая максима, как «*незаинтересованность*» (disinterestedness), входит, наряду с «коммунизмом», «организованным скептицизмом» и «универсализмом» (communism, organized scepticism and universalism) в «этнос науки», проанализированный еще классиком социологии науки Робертом Мертоном²⁶.

²² Latour B.1990.Drawing things together. In *Representation in Scientific Practice*, edited by M. Lynch and S. Woolgar. Massachusetts: The MIT Press,1990, p. 19.

²³ См.: Шеллинг Ф. Философия откровения. – Том 1. – СПб.: Наука, 2000. – С. 128

²⁴ См., например, Нугаев Р.М. Генезис и становление механической научной картины мира. – Казань: ПГАФКСИТ, 2017.

²⁵ Kuhn T.S. Objectivity, Value Judgement and Theory Choice. - In: *The Essential Tension*. University of Chicago Press, 1977, pp. 320 - 339.

²⁶ Подробнее см.: Мертон Р. Наука и демократическая социальная структура. – В сб.: Мертон Роберт. Социальная теория и социальная структура. - М.: АСТ, 2006. – С. 767-781.

Миф о «башне из слоновой кости», в которой внутренне проживает каждый настоящий ученый – истинный профессионал своего дела, – хотелось бы верить, полезен для успешного функционирования науки как социального института, для формирования этических профессиональных норм будущих исследователей.

Но это – все-таки миф. И в той или иной мере отражающие его эпистемологические модели Карла Поппера, Имре Лакатоса и даже Томаса Куна все-таки игнорируют, хотя и в разных степенях, тот жесткий факт, что современная наука представляет собой «коммунальный эффект» (community effect – Russ Payne). К сожалению, «эпистемологи» все-таки продолжают придерживаться точки зрения, согласно которой прогресс науки состоит прежде всего в деятельности «великих людей».

Согласно этой «романтической» позиции, именно поразительные озарения («инсайты») узкой группы очень и очень своеобразных личностей, эдаких «избранников богов», - это то, что главным образом толкает науку вперед. Но это, конечно, весьма и весьма искаженная и односторонняя картина. Великие личности, - такие как Ньютон, Максвелл и Эйнштейн, - могут только начать революцию в научном мышлении, - в лучшем случае, - но только тогда, когда «молчаливое большинство» исследователей, все научное сообщество – старательно подготовило для этого почву. Взрыхлило почву для того, чтобы на ней взошли семена новой, революционной парадигмы. Соответственно, история науки должна пониматься в новых терминах – в терминах того, как все научное сообщество «прогрессирует» от одной эпохи к другой, от ситуации «застоя» к ситуации, когда востребованным оказывается революционное мышление. Прославленные великие «озарения» и «прорывы» никогда не происходят в социальном вакууме²⁷.

Революция в науке никогда не произойдет, пока все научное сообщество не будет убеждено в том, что старая парадигма «никуда не годится». И только тогда, когда это случится, начнут разрабатываться или оказываться востребованными и альтернативы.

Поэтому значение и соотношение «внутренних» и «внешних» факторов для «внутреннего наблюдателя» -ученого – с одной стороны – и для «внешнего наблюдателя» - философа, социолога и историка науки, – с другой, - неодинаково.

Обратимся к примеру. Если Вы захотите понять поведение спортсмена во время футбольного матча, то, конечно, определенное значение имеют учет его настроения, темперамента, степени изношенности оборудования – футболки и кроссовок, размеров вознаграждения («социально экономические факторы»), отношения публики (рев на трибунах – «социокультурный фон») и т.д. Но в этом анализе **правил игры** – те принципы, которым игрок *сознательно* следует во время матча, - занимают особое место. Мы вынуждены признать, что ничего не пойдем в

²⁷ Лекторский В.А. Эпистемология классическая и неклассическая. М.: Наука, 2001.

поведении футболиста, если мы не будем эти правила учитывать. Далее, любой анализ поведения игрока должен основываться на анализе успешности следования им этим правилам.

Правила игры (и судейства) образуют «внутренний контекст» (т.н. «поле рациональности»), формируют внутренние условия, в рамках которых и происходит разворачивание всего спектра сознательной исследовательской деятельности.

Аналогично, поведение ученого – это социальное действие, ориентированное в своем протекании на других «игроков»²⁸. Профессиональный исследователь тем и отличается от дилетанта, что «выходит» на исследование Природы не сам по себе, не как «гносеологический робинзон», но как вооруженный коллективно выработанными и принятыми командой профессионалов, частью которой он является, представлениями, ценностями, методами и методиками, которые, с легкой руки Томаса Куна, и принято называть «**нарадрнгом**»²⁹.

Поэтому и к поведению ученого применимо веберовское понимание социального действия как поведения, которому сам «*актор*» (тот, кто действует) придает особый **смысл**. Важно то, что, как не устал подчеркивать сам Макс Вебер³⁰, под смыслом поступка понимается тот смысл, который придается ему *самим* актором, а не, скажем, метафизический смысл, существующий в голове Бога или, на худой конец, эпистемолога и философа науки.

Если, по Марксу, понять общественное явление – это значит свести его («в конечном счете») к определенным социально-экономическим условиям, а по Дюркгейму – вывести из законов эволюции и функционирования общественного сознания, то, по Веберу, понять человеческое поведение по отношению к другим людям, понять социальное действие – это значит понять тот **смысл**, который ему придается *самим* актором, *самим* человеком, совершающим (или задумавшим) тот или иной поступок. Поэтому, в соответствии с веберовской методологией социального познания, ученый не является ни беспомощной игрушкой в руках могущественных социально-экономических сил, ни жалким слепцом, ведомым за руку подспудно действующими законами общественного сознания. Все формы научной социальности – элементы социальной структуры научного сообщества, ценности, нормы, образцы поведения – имеют для отдельного исследователя смысл лишь как *регулятивы*³¹ его поведения; они и существуют только в деятельности в качестве ее отдельных сторон.

²⁸ подробнее см.: Нугаев Р.М. Смена базисных парадигм: коммуникационный подход. Казань : изд-во «Дом печати», 2003.

²⁹ Кун Т. Структура научных революций. – М.: АСТ, 2003.

³⁰ Подробнее см.: Макс Вебер. Избранные произведения. М.: Мысль, 1989.

³¹ Методологические принципы физики. М.: Наука, 1975.

Соответственно, следуя Веберу, и в науке все социальные действия можно, по степени рациональности, подразделить на четыре группы: (1) целерациональные, (2) ценностно-рациональные, (3) традиционные и (4) аффективные. Наиболее рациональными являются действия *целерациональные*, а наименее – аффективные, совершающиеся в состоянии «аффекта».

Целерациональное действие – это когда актер прекрасно сознает цель, к которой стремится, и сознательно выбирает наиболее эффективные средства ее достижения. Между ними располагаются действия ценностнорациональные, совершаемые в соответствии с определенными ценностями, и действия традиционные, совершаемые неосознанно, в соответствии с определенными традициями.

То обстоятельство, что действие целерациональное является высшим, наиболее рациональным типом социального действия, еще не означает, что оно является тем пределом, к которому стремятся в своем протекании все остальные типы. Напротив, этот тип образует как бы шкалу, концептуальный *каркас*, обеспечивая (нейтральный) язык, посредством которого описываются остальные социальные действия. Всякое конкретное социальное действие, несмотря на то, что в нем, как моменты, содержатся все типы одновременно, может, тем не менее, в зависимости от того, какой тип преобладает, описан быть в терминах отклонения от действия целерационального.

Соответственно, анализ действия внутренних факторов имеет как в истории, так даже и в социологии науки особое значение. Это – тот *каркас*, тот «скелет», на котором «наращивается мясо» других дисциплин. Более того, внутренняя история образует тот шаблон, с которым сравниваются все факты реальной истории науки. Но это отнюдь не означает автоматической справедливости известного тезиса Имре Лакатоса о том, что «внутренняя история первична, а внешняя - вторична». И что при сравнении двух различных рациональных реконструкций одного и того же периода развития науки следует предпочесть ту из них, которая большее число фактов объясняет «внутренним образом»³².

Реконструируемая таким образом история действительно содержит в себе тенденцию превращения в «философию выдумывающую примеры» (*philosophy conjuring examples*), по меткому замечанию Томаса Куна³³.

³² Lakatos Imre. History of Science and its Rational Reconstructions. – In: R.C. Buck & R.S. Cohen (eds.). Boston Studies in the Philosophy of Science, vol.8, 1971. Reprinted in C. Howson (ed.) Method and Appraisal in the Physical Sciences, 1976, Cambridge University Press. Имеется перевод: Лакатос И. История науки и ее реконструкции. – В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, С. 203 – 270; Лакатос И. Ответ на критику.- В кн.: Структура и развитие науки. М.: Прогресс, 1978, С. 330 – 333.

³³ Kuhn T.S. Notes on Lakatos. - In: Boston Studies in the Philosophy of Science, 1971, vol.8, pp. 137-146. Имеется перевод: Кун Т. Замечания на статью Лакатоса. – В кн.: Структура и развитие науки. М.: Прогресс, 1978, С. 270 – 283.

Как хорошо известно³⁴, все внутренние факторы развития науки подразделяются на четыре группы: (1) *согласие с экспериментом*; (2) *простота*; (3) *непротиворечивость*; (4) *соответствие другим теориям*, разрабатывавшимся или разрабатываемым в данное время. При этом все эти, как отмечалось выше, факторы являются *регулятивными принципами*, которые определенным образом направляют деятельность профессиональных исследователей.

Это означает, что в каждой часто встречающейся проблемной ситуации, характеризующейся наличием нескольких конкурирующих теорий, профессионал должен отдавать предпочтение лучше согласующейся с экспериментом, более простой, самосогласованной и хорошо согласующейся с другими теориями теории. Более того, даже рассмотренные в рамках единой системы, рассматриваемые факторы не образуют т.н. «алгоритм выбора». Ведь слишком часто в науке возникают ситуации, когда одна теория из совокупности сравниваемых более точна, но зато другая – лучше согласуется с принятыми в данное время фундаментальными теориями. (Вспомним первую научную революцию).

Для уяснения соотношения между «внутренними» факторами обратимся к взглядам на структуру научной теории, выработанным в рамках российской философии науки. Наиболее полно они представлены в работах акад. В.С. Степина³⁵. Согласно В.С. Степину, всякая развитая научная теория (например, классическая механика или классическая электродинамика, или квантовая механика, etc.) – это система высказываний, описывающая связи и отношения между определенными абстрактными объектами, такими как «материальная точка», «вектор электрического поля», «волновая функция», «метрический тензор», и т.д. Абстрактные объекты всякой развитой научной теории организованы в сложную *иерархическую систему*, которая содержит *три уровня* : уровень фундаментальной теоретической схемы (ФТС), уровень частных теоретических схем (ЧТС) и уровень эмпирических схем (ЭС). Например, ФТС классической механики – это идеальная модель, в которой механическое движение предстает как перемещение материальной точки под действием силы в инерциальной системе отсчета³⁶.

Все эти уровни тесно связаны между собой, образуя своеобразную пирамиду: частные теоретические схемы являются своеобразными обобщениями эмпирических схем, а фундаментальная теоретическая схема обобщает частные теоретические схемы. Другая сторона взаимосвязи всех этих уровней состоит в том, что, в процессе развертывания, частные теоретические схемы конструируются из базисной (ФТС), а эмпирические схемы – из частных.

³⁴ См., например, T.S. Kuhn. *The Essential Tension*. University of Chicago Press, 1977.

³⁵ Стенин В.С. *Теоретическое знание*. М.: Наука, 2000.

³⁶ см. также: Рузавин Г.И. *Методы научного исследования*. – М.: Мысль. – 1975. – 237с. *Философия науки*. Учебник для высших учебных заведений. (Отв. ред. В.П. Кохановский). Ростов – на - Дону: Феникс, 1997.

Это позволяет сравнивать теоретические предсказания с данными экспериментов.

Тем не менее, для дальнейшего изложения ключевой является следующая особенность рассматриваемой концепции: *жесткая связь между объектами трех уровней отсутствует*³⁷. Во-первых, не существует строгого и однозначного алгоритма конструирования объектов ЧТС из объектов ФТС. Всякий раз конструирование ЧТС из ФТС – это особого рода *творческая задача*, не имеющая однозначного решения. Например, для того, чтобы сконструировать из ФТС ньютоновской механики ЧТС теории малых колебаний, нужно задать вид силы, ввести феноменологически коэффициент упругости и т.д.

Поэтому данное конструирование производится *по аналогии*, в соответствии с образцами решения задач, которые входят в парадигму (подробнее см. книгу Т. Куна³⁸). То же верно и для перехода от ЧТС к ЭС.

Но именно потому, что *нет жесткой связи* между всеми слоями развитой научной теории, расхождение выводов из эмпирической схемы с опытом опровергает только ЭС, но не всю теорию. Мы всегда можем так модифицировать фундаментальные законы развитой теории, чтобы добиться согласования ее с опытом. Как справедливо отмечал еще в начале XX в. выдающийся французский физик и философ науки Пьер Дюгем, «постулаты же, служащие исходной точкой для теории, *промежуточные звенья*, ведущие от постулатов к заключениям, этой проверке со стороны фактов подвержены быть *не могут*»³⁹.

Одно опровержение, второе, третье,... Сколько же нужно опровержений, чтобы раз и навсегда отбросить развитую ЭС, а при необходимости и ЧТС, для того, чтобы сохранить ФТС и всю научную теорию? – Очевидно, бесконечное количество. Если к конечному числу аномалий теория всегда сможет подстроиться – по очереди, сначала к 1-ой, затем ко 2-ой,..., к n-ой, то к бесконечному числу аномалий она подстроиться не сможет.

Но что означает то обстоятельство, что теория противоречит бесконечному числу данных опыта? -Это означает, что *теория противоречит другой теории*⁴⁰. Только теоретическая схема, обобщающая ряд эмпирических схем, содержит информацию не только о произведенных экспериментах, но и о будущих, еще не поставленных опытах. Теория, как известно, нужна не только для того, чтобы упорядочивать уже известные опытные данные, но и для того, чтобы предсказывать новые.

³⁷ См. также: Suppe F. (ed.) *The Structure of Scientific Theories*. - Urbana, University of Illinois Press, 1974.

³⁸ Кун Т. *Структура научных революций*. М.: АСТ, 2003.

³⁹ Дюгем П. *Физическая теория, ее цель и строение*. СПб., 1910. – С.247.

⁴⁰ Нугаев Р.М. Почему одна фундаментальная теория смеяет другую? // *Вопросы философии*, № 6, 1987, С. 90 – 98.

Сказанное выше означает, что расхождения с данными отдельных экспериментов могут вызвать изменения только в эмпирических схемах. Но *изменения в частных теоретических схемах и тем более в фундаментальной теоретической схеме могут быть вызваны прежде всего столкновениями между теориями*⁴¹.

Ясно, что предлагаемая точка зрения решительно отвергает не эмпиризм и фальсификационизм, но лишь примитивные версии последних, связанные с пресловутой бэконовской концепцией «критического эксперимента». Эта концепция, несомненно, сыграла немалую роль в борьбе с примитивной качественной аристотелевской физикой (Бэкон), и в утверждении неклассической релятивистской физики (Поппер). Но она превратилась в архаизм в XXI веке, когда мы имеем дело с такими громоздкими, многоуровневыми, изощренными, сложнейшими междисциплинарными комплексами как молекулярная биология, генетика, синергетика, физика твердого тела, релятивистская астрофизика или квантовая космология.

Физика, конечно, была, есть и останется опытной наукой. Но тернистый путь от опыта к основаниям теории, как отмечали еще в конце XIX в. и Пьер Дюгем, и Макс Планк, по мере эволюции физики становится все длиннее, связь между уровнями физического знания и его разделами – все гибче, а сами теоретические представления – все дальше и дальше отстоящими от наглядности повседневного опыта. Противоречия хорошо разработанной, крепко стоящей на ногах, хорошо апробированной научной теории T_2 , проверяемая теория T_1 противоречит не одному эксперименту, а **сразу многим** опытными данным, аккумулированным, обобщенным во встретившейся теории. Поэтому от такой Встречи с Опытном чрезвычайно трудно уклониться; но именно она приводит к особенно катастрофическим последствиям для проверяемой теории⁴².

Соответственно, будучи рассмотрена с «внутренней», интертеоретической стороны, *вторая (планковская и эйнштейновская) научная революция предстает прежде всего как возникновение и частичное разрешение противоречий встречи между наиболее развитыми теориями классической физики – классической (ньютоновской) механикой, максвелловской электродинамикой, больцмановской (и гиббсовской) статистической механикой и классической термодинамикой*⁴³.

Рассмотрение взаимодействий этих теорий друг с другом и с экспериментальными данными и составляет т.н. «*интертеоретический контекст*» эйнштейновской революции.

⁴¹ Нугаев Р.М. Смена базисных парадигм: коммуникационный подход. Казань: изд-во «Дом печати», 2003.

⁴² Подробнее см.: Нугаев Р.М. Почему одна фундаментальная теория сменяет другую? // Вопросы Философии, 1987, № 6. С.90-98.

⁴³ Нугаев Р.М. Специальная теория относительности как результат взаимодействия термодинамики, статистической механики и максвелловской электродинамики // Физическое знание: его генезис и развитие. М.: Наука, 1993, С.130-144

Именно последовательный учет этого контекста должен позволить более точно и последовательно объяснить ряд важных обстоятельств, которые ранее рассматривались независимо, изолированно друг от друга. Прежде всего, он позволяет объяснить тот известный историко-научный факт, что два таких радикальных переворота (breakthrough) как Квантовая и Релятивистская революции начались практически **одновременно** (в 1900 и 1905), с интервалом в 5 лет, и определенное время протекали параллельно.

Во-вторых, и в том, и в другом случае самое активное участие в этих изменениях принимали одни и те же люди – Альберт Эйнштейн, Макс Планк, Арнольд Зоммерфельд, Вольфганг Паули и др., что и позволяет охарактеризовать эти события как две взаимосвязанные стороны одного и того же процесса – второй научной революции.

В-третьих, во «внутреннем» объяснении нуждается и то важное обстоятельство, что **один и тот же** никому неизвестный молодой человек – скромный клерк бернского патентного бюро Альберт Эйнштейн - в *одном и том же* 1905 году заложил основы трех значительно отличающихся друг от друга, а в ряде аспектов и диаметрально противоположных исследовательских традиций современной физики – квантовой физики, теории относительности и статистической термодинамики. Маловероятно, чтобы юный Эйнштейн одновременно и с большим энтузиазмом, по собственной инициативе занимался тремя сложнейшими и достаточно удаленными друг от друга фундаментальными теориями, руководствуясь просто спортивным азартом или безграничной любознательностью. Любой человек, обладающий опытом творческой работы, подтвердит, что эта работа, скажем, решение какой-либо сложной задачи, захватывает человека *целиком* и не отпускает до тех пор, пока человек эту задачу *окончательно* не решит (см., например, красочные воспоминания Г. Гельмгольца и И. Павлова).

Лучший способ отвлечься - это переключиться на другой вид деятельности, скажем, поиграть в шахматы или на скрипке (как это и делал создатель теории относительности). Но переход от решения одной задачи к решению (неокончательному) другой может быть рационально понят именно тогда, когда решения этих задач являются работой по реализации *одной и той же* «внутренне намеченной» программы, когда есть определенная *согласованность* между исследованиями в столь различных областях. Иными словами, *должна* существовать *внутренняя связь* между тремя различными «исследовательскими проектами» Эйнштейна.

В четвертых, многие предложенные объяснения причин принятия специальной теории относительности (СТО) явно недостаточны⁴⁴ вследствие ограниченности фальсификационистского подхода, связывающего причины как отказа от классической механики, так и принятия СТО с печально известным «критическим экспериментом» Майкельсона-Морли.

⁴⁴ Нугаев Р.М. Эйнштейновская революция. Казань: изд-во «Логос», 2010.

Судя по всему, дальше всех в объяснении подлинных причин принятия СТО пошли создатель методологии научно-исследовательских программ (методологии НИП) Имре Лакатос (Imre Lakatos) и его ученик Эли Захар (Elie Zahar). Они весьма убедительно показали, что на самом деле любая научная революция состоит в смене не теорий, а *научно-исследовательских программ*, т.е. двух совершенно разных «проектов» дальнейшего развития науки, выражающихся в существенно различных последовательностях, цепочках теорий. Каждая из этих цепочек конструируется по своим собственным правилам (т.е. в соответствии с «эвристикой НИП») на основе собственных представлений о рациональном устройстве природы («твердых ядер» НИП).

Эти программы начинают соревноваться друг с другом за то, какая из них раньше, больше и точнее не только объяснит уже известные опытные данные⁴⁵, но и предскажет новые.

Тем не менее, к сожалению, и объяснение Лакатоса - Захара односторонне, хотя и в гораздо меньшей степени, чем предыдущее. И оно допускает, конечно, дальнейшее развитие – уточнение и обобщение. В частности, оно корректно описывает поведение влиятельной *части* научного сообщества – специалистов по математической физике, - которые поверили в СТО только после того, как была создана общая теория относительности (ОТО) и были зафиксированы весомые факты в пользу ее адекватности. (Особенно большое значение на мировую и научную общественность оказали сообщенные в 1919г. британскими астрономами под руководством сэра Артура Эддингтона данные об отклонении лучей света в гравитационном поле Солнца. Они, кстати, во многом способствовали получению Эйнштейном в 1921г. нобелевской премии по физике).

Но долгие годы, вплоть до 70-80гг. XX в., для многих физиков ОТО продолжала оставаться разделом римановой геометрии, т.е. весьма экзотической частью теоретической физики.

Чрезвычайно узкий эмпирический базис ОТО на протяжении более чем полувека составляли три печально-знаменитых (своей малочисленностью) т.н. «критических» эффекта – смещение перигелия Меркурия (известное за 50 лет до создания ОТО), отклонение лучей света в гравитационном поле Солнца (следующее из любой релятивистской теории гравитации, признающей справедливость тождества массы и энергии) и красное смещение в гравитационном поле (измеренное только в 60-х годах XX века при помощи т.н. «эффекта Мессбауэра»).

⁴⁵ Lakatos Imre. The Methodology of Scientific Research Programmes. Philosophical Papers, volume 1. Edited by J. Worrall & G. Currie, CUP, 1978. Zahar Elie. Einstein's Revolution. - A Study in Heuristic. Open Court, La Salle, Illinois, 1989. Lakatos Imre & Zahar Elie. Why did Copernicus's Research Program Supersede Ptolemy's? – In: The Copernican Achievement. University of California, Los Angeles, 1974, ch. X, pp. 168-192.

К этому следует добавить, что в течение десятилетий ОТО оставалась на обочине столбового развития физики также и потому, что изобиловала парадоксами и почти философскими спорами о физической, операциональной интерпретации полученных решений⁴⁶ и основных понятий (например, энергии гравитационной волны).

Тем не менее, можно считать общеизвестным, что уже в течение первых десяти лет после своего создания СТО стала общепринятой, вошла, по выражению современника Планка и Эйнштейна, немецкого физика Арнольда Зоммерфельда, «в арсенал каждого физика». Почему?

В историко-научной литературе были предложены многочисленные объяснения разнообразных причин принятия СТО научным сообществом – начиная от концепции критического эксперимента и заканчивая весьма экзотическими объяснениями (связанными, например, с радикальной (феминистской) переоценкой вклада однокурсницы и первой жены Эйнштейна – Милевы Марич – в создание СТО⁴⁷). И многие из них, предложенные серьезными профессиональными исследователями, действительно отражают реальные обстоятельства, которые играли важные роли в рассматриваемой революции. Затронутые факторы действительно побуждали тех или иных физиков или даже те или иные группы, «невидимые колледжи» принять СТО.

Тем не менее, даже в самом благоприятном случае, при полной независимости встретившихся теорий, мы никогда не сможем с полной уверенностью утверждать, что та или иная философская концепция, логико-методологическая схема, эпистемологическая «модель» раскрывает некие скрытые «законы» движения истории науки, или хотя бы раскрывает некие «сущности» этих процессов.

Тенденции развития науки, задаваемые данной схемой, ни в коей мере не носят *обязательный* характер. Это, в лучшем случае, - лишь определенные ориентиры познавательной деятельности индивидов, которым индивиды могут следовать, а могут и - нет. В данном случае обращение к этимологии слова «закон» особенно уместно, поскольку первоначально слово «закон» означало не повторяющиеся черты явлений природы, а определенные *нормы человеческой деятельности*. Именно в этом смысле это слово употребляют и сейчас, говоря, например, о «конституции как основном законе», и именно к этому смыслу ближе то понимание законов научной деятельности, которое употребляется в данной работе.

⁴⁶ Подробнее см.: Нугаев Р.М., Якупов М.Ш. Проблема выбора между метрическими и неметрическими теориями гравитации. – В кн.: Математизация естественнонаучного знания: пути и тенденции. Казань: изд-во КГУ, 1984. С.105-121.

⁴⁷ Albert Einstein / Mileva Maric (1992): The Love Letters. Edited and with an introduction by Jurgen Renn and Robert Schulmann. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989.

Несмотря на то, что каждый гражданин государства может исполнять закон, а может и игнорировать его, законы тем не менее существуют «объективно», независимо от того, нравятся они кому-нибудь, или нет, собирается ли кто-нибудь их исполнять, или же они продолжают служить ширмой для бесконечных коррупционных сделок.

Подведем, наконец, итоги. В чем состоят *подлинные* причины второй, эйнштейновской научной революции? – Их немало, но можно, в соответствии с традицией, выделить причины «внешние» и причины «внутренние», сложное взаимодействие которых и привело к смене классических научных теорий теориями неклассическими.

Внешние – кратко описываются афоризмом Фридриха Ницше: «Бог умер» (“Gott ist tot”). Это – ускоренная модернизация общественной жизни, состоявшая в становлении индустриального общества, коренная ломка экономического уклада, политических и культурных институтов, ценностей и ценностных ориентаций современного общества. Это – «секуляризация» общественной жизни, отделение церкви от государства, рост эгоизма, цинизма и материализма, меркантилизма, прагматизма и позитивизма. Важно, что внешние причины оказывают неодинаковое влияние на развитие научных исследований, поскольку их длительность и интенсивность проявления в самом социуме неравномерны и неоднородны. Отметим, что основным опосредующим фактором, через который осуществляется воздействие социально-политических и социально-экономических факторов, является т.н. «социокультурный фон», содержащий ценности, ценностные ориентации, образцы поведения, и, главное, когнитивные ценности, представления об истине, etc.

В этом плане значение влияния как самих религиозных представлений, так и их расщепления (католичество и протестантизм), а также процесса их разложения («секуляризация») трудно переоценить.

Но к социальным относится и такой фактор, как превращение науки в массовую профессию, своеобразная «индустриализация» научных исследований, превращение профессии исследователя в массовую профессию, а самого научного знания – в продукт массового духовного производства. Знание превращается в своего рода «товар», допускающий почти конвейерную обработку разными специалистами, товар, который можно «обменять» или «продать». Это размывает жесткие критерии истинности, присущие романтическим стадиям развития науки, приводя к пролиферации не только прагматистских и позитивистских, но и (нео) платонистских концепций.

Внутренние причины – это, конечно же, появление новых опытных данных, особенно трудно укладывавшихся в прокрустовы ложа старых исследовательских традиций потому, что они были тесно связаны с их внутренними разломами, значительными разладами в структуре научного знания, интенсивная борьба «механицизма» и «электродинамизма», механистических и полевых концепций, дальнейшая безудержная математизация научного знания, обострявшая «противоречия встречи» между ведущими научными традициями, и т.д.

Взаимодействие этих двух групп факторов, по крайней мере начиная с Нового времени, определяется тем, что внешние факторы не отменяют внутренних, но изменяют прежде всего «веса», значения этих факторов в ситуациях смены базисных парадигм. Нарастающая с XV-XVII вв. (промышленная революция) математизация научного знания, обусловленная доминированием количественного подхода к описанию природных явлений, приводит к тому, что, как в первой, так и во второй научных революциях ведущим оказывается *интертеоретический контекст*, определяющий важность такого значимого фактора как согласованность встретившихся друг с другом «старых» парадигм.

В самом же общем случае, научная революция – это сложнейшее *взаимопереплетение* разнообразных внутренних и внешних факторов, такое сплетение, мировоззренческий и методологический контексты которого не могут быть заданы однообразным образом, раз и навсегда. Но уже сейчас понятно, что никакие простые, односторонние, «крайние» объяснения – от попперовского «критического эксперимента» до вульгарно-марксистского «экономического детерминизма» - сегодня уже не проходят.

Судя по всему, соотношение внутренних, когнитивных, и внешних – социально-экономических, социально-политических и социокультурных – факторов состоит отнюдь не в том, что все они выстраиваются в ряд в рамках определенной эпохи и начинают соревноваться друг с другом в том, какой из них окажет на научное сообщество и на отдельных его представителей большее значение. Представители современной социологии знания справедливо подчеркивают, что, в своем влиянии, социальные факторы неизбежно опосредуются, трансформируются, превращаются в когнитивные.

Как отмечает выдающийся современный социолог науки Бруно Латур, существующие эпистемологические подходы, несомненно, интересны, но они все еще пытаются ответить на вопрос, которого следует избегать: «как наши когнитивные способности относятся к нашим обществам».

Ключевой пункт – в том, что этот сложнейший и запутаннейший вопрос (и различные ответы на него) основываются на идее, что что состав нашей жизни как-то отличается от состава наших наук, наших взглядов и нашей информации. При этом

«мы имеем дело с одним и тем же этнографическим пазлом: некоторые общества – на самом деле крайне редкие – созданы за счет капитализации на большем пространстве. Заикленность на быстрых перемещениях и стабильной инвариантности, для мощных и безопасных связей, не является простой частью нашей культуры, или чем-то, ‘обусловленным’ социальными интересами: *это и есть наша культура*. Слишком часто социологи ищут не прямые, опосредованные отношения между ‘интересами’ и ‘техническими’ деталями.

Причина их близорукости проста: они ограничивают значение 'социального' обществом, не понимая, что мобилизация союзников и, в общем, преобразование слабых ассоциаций в сильные, - это то, что также обозначает термин 'социальное'. Зачем искать надуманные отношения, когда технические детали науки прямо говорят об инвариантности, ассоциации, расхождениях, непроницаемости, и тому подобном?»⁴⁸

⁴⁸ Latour Bruno. Drawing things together. In :Representation in Scientific Practice, edited by M. Lynch and S. Woolgar. Massachusetts: The MIT Press, 1990, p.64.

Глава 2. Становление электромагнитной научной картины мира.

Тем фактором, которому удалось, после долгих колебаний, заставить физиков отказаться от веры в то, что вся физика может быть основана на ньютоновской механике, была электродинамика Фарадея и Максвелла. Именно эта теория и ее подтверждение герцевскими экспериментами показали, что существуют электромагнитные явления, которые по своей природе отличны от весомой материи, – это волны в пустом пространстве, состоящие из электромагнитных 'полей'.

Альберт Эйнштейн. Автобиография 1949.

Лидером классической науки XIX в. являлась классическая физика (т.е. классическая механика + классическая электродинамика + классическая термодинамика + статистическая физика). О классической механике мы уже подробно говорили в предыдущем учебно-методическом пособии⁴⁹. Рассмотрим теперь генезис классической электродинамики.

Среди природных явлений, известных, если верить Геродоту, еще древним грекам, были два особенно странных. Первое явление: натертый шерстяной тряпкой кусочек янтаря мог притягивать к себе маленькие клочки папируса. (Янтарь по-гречески – *электра*). Второе явление: близ города *Магнезия* были обнаружены удивительные черные камни, которые притягивали железо. Эти две группы явлений настолько сильно отличались друг от друга, что никому и в голову не могло придти, что между ними есть какая-либо существенная связь. Но только когда эта связь была в начале XIX в. обнаружена и осознана, оказалось возможным создать первую настоящую научную теорию электромагнетизма.



проф. копенгагенского университета Ханс Христиан Эрстед (1777-1851)

⁴⁹ Нугаев Р.М. Первая научная революция: генезис и становление механической научной картины мира. Казань: ПГАФКСИТ, 2017.

Опыт Эрстеда

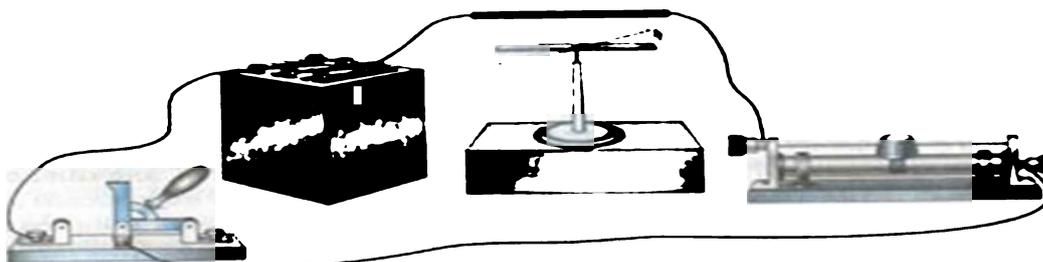


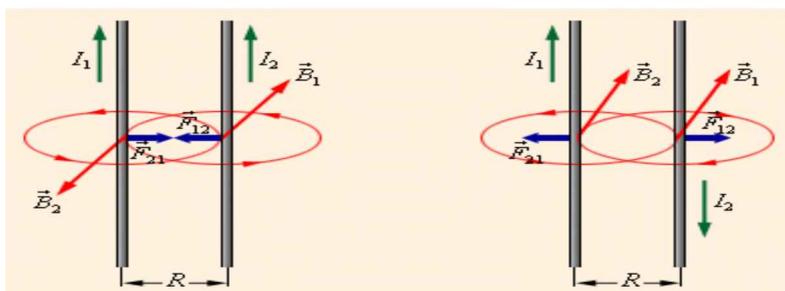
Рис. 90

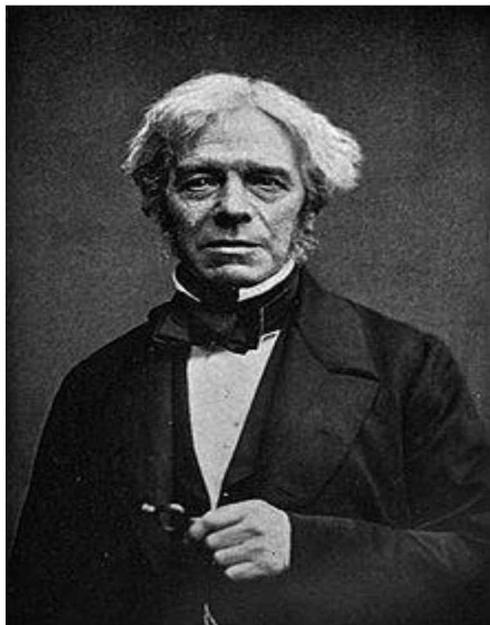
Знаменитый опыт Эрстеда

(I.a) Первый шаг к обнаружению тесной взаимосвязи электричества и магнетизма сделал датский физик, поклонник диалектической онтологии Шеллинга и профессор копенгагенского университета Ганс Христиан Эрстед (1777-1851). Он, судя по всему, впервые (1819) догадался поместить на лекции студентам университета рядом с проводником, по которому проходит электрический ток, магнитную стрелку. Как только по проводнику начал протекать электрический ток, магнитная стрелка тут же отклонялась на определенную величину. Этот опыт убедительно свидетельствовал о том, что изменения электрических сил создают изменения сил магнитных.

[Вы можете легко воспроизвести его у себя на кухне, если у вас имеются три вещи: кусок медной проволоки не менее одного метра длиной, батарейка и компас. Расположите проволоку так, чтобы прямолинейная часть была не менее одного метра длиной, и поместите рядом магнитную стрелку. Как только вы подсоедините проволоку к батарейке, стрелка компаса обязательно отклонится].

(I.b) Следующий аналогичный опыт – опыт Ампера с притягивающимися (или отталкивающимися) проводниками.





Майкл Фарадей (1791-1867)



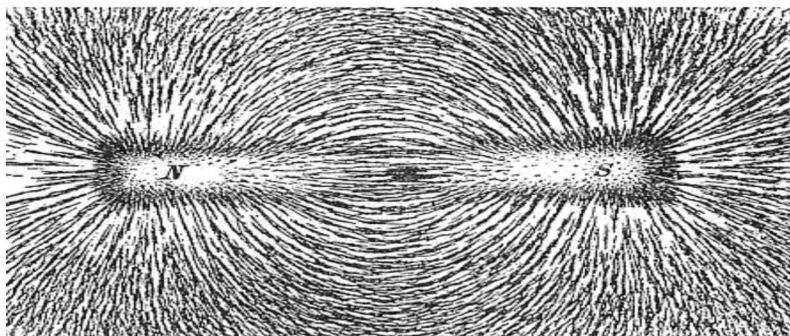
Жан-Мари Ампер (1775-1836)

(II) Второй существенный шаг к раскрытию взаимосвязи электричества и магнетизма сделал великий английский физик-экспериментатор Майкл **Фарадей**. Он продемонстрировал *обратный* по отношению к опыту Эрстеда эффект (1831). Если вблизи большого магнита вы поместите согнутый в рамку кусок медной проволоки, то при очень быстром вращении рамки по ней потечет электрический ток. (Правда, в отличие от опыта Эрстеда, этот опыт воспроизвести в домашних условиях сложнее, поскольку нужен достаточно чувствительный амперметр для измерения силы электрического тока). Таким образом, Майкл Фарадей (Michael Faraday, 1791-1867), открыв явление индукции, продемонстрировал обратный эффект: изменения магнитных сил вызывают изменения сил электрических.

В дальнейшем Фарадей проделал немало важных экспериментов, но наибольший интерес для нас представляет следующий. Так же, как и опыт Эрстеда, мы можем воспроизвести его у себя на кухне. Возьмите в левую руку кухонную разделочную доску с равномерно нанесенным на ее поверхность (как масло на бутерброд) слоем железных опилок (которые, например, получают тогда, когда вы перепиливаете «болгаркой» железную трубу). А правой рукой поднесите снизу к разделочной доске достаточно большой магнит (полюсами к доске). И вы с удивлением убедитесь в том, что опилки начали располагаться в виде странного узора – «силовых линий магнитного поля», как их назвал сам Фарадей.

В результате этого опыта и многих других, ему подобных, Фарадей пришел к понятию *электромагнитного поля*. В пространстве между полюсами магнита, вокруг заряженного шара, между проводами под током и т.д. несомненно «что-то есть»!

Присутствие магнитов и заряженных тел как-то изменяет окружающую их среду, создавая силовые линии. И это «что-то» обладает энергией; и оно даже может перемещаться в пустоте от точки к точке. Каковы же законы его движения?



Силовые линии магнитного поля

Сам Michael Faraday происходил из бедной рабочей семьи, средств которой хватало только на оплату его начального образования. (И даже из средней школы его выгнали за плохое поведение - «нагрубил училке»). Университетов он явно не кончал и, соответственно, недостаточно хорошо разбирался в математике. Свои «*Экспериментальные исследования по электричеству*» он изложил обычным, бытовым языком (common language). При этом, как ехидно отмечают современные историки науки, тогдашние специалисты по теоретической механике «с тайным, а иногда и с явным презрением смотрели на грубые материальные силовые линии и трубки, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея».

(III) Третий шаг пришлось сделать профессору кафедры высшей математики лондонского университета лорду Джеймсу Клерку **Максвеллу** (1831-1879). Блестящему студенту эдинбургского университета и выпускнику, а затем аспиранту Кембриджа, сыну преуспевающего юриста лорду Джеймсу Клерку Максвеллу, в отличие от христианского фундаменталиста, сына деревенского кузнеца Майкла Фарадея, был присущ глубокий скептицизм Юма и Канта, впитанный на лекциях ведущего шотландского философа Уильяма Гамильтона (1788 – 1856). Эти лекции, которые «интересовали его чрезвычайно», и развили его «любовь к спекуляциям, к которым он в итоге

оказался весьма склонен».



».

James Clerk Maxwell и школа, в которой он учился (г. Эдинбург, Шотландия)



Юный Максвелл



Все тот же Trinity college, Cambridge



Зрелый Максвелл с супругой



с Супругой и с Собакой

Именно заведующий кафедрой моральной философии эдинбургского университета сэра Уильяма Гамильтона (sir William Hamilton) привил студенту Максвеллу вкус к основам кантовской философии. Неслучайно уже после Эдинбурга, приступая к занятиям в аспирантуре Кембриджа и разрабатывая «обычное обилие планов на будущее», под пунктом 4 (метафизика) Максвелл намечает «прочтение кантовской “Критики чистого разума” на немецком с целью согласования ее с сэром У. Гамильтоном»⁵⁰.

Предшественниками Максвелла в деле создания теории электромагнетизма были такие светила науки, как Ганс Христиан Эрстед, Андре-Мари Ампер, Майкл Фарадей и Вильям Томсон.

Но мировоззрение Максвелла резко отличалось от их взглядов прежде всего *более высоким уровнем философской культуры*, подчеркнутой ориентацией на взгляды Канта критического периода. Как известно, суть ‘коперниканской революции’, которую начал в эпистемологии Кант, состоит в том, что мир повседневного, обычного опыта утрачивал право быть исходной точкой отсчета в истолковании чувственно-воспринимаемых вещей. У Канта мир привычного опыта заменяется галилеевской экспериментально-математической физикой, в основе которой лежит идеализация, абстрагирование от ‘жизненного мира’.

С другой стороны, коль скоро истина постигается в опыте, и мы познаем не столько ‘ноумены’, сколько ‘феномены’, необходимо отказаться от допущения реализуемой возможности абсолютного знания. ‘Являемость вещей в опыте’ заключает в себе истинно-сущностный характер. *Феномены не есть просто сущностные явления, сквозь которые проглядывает так или иначе замутненная сущность; они есть прежде всего сущее в своем собственном состоянии.* Феномены человеческого опыта заключают в себе *всю* полноту постигаемой достоверности.

Особое место в процессе познания занимают т.н. ‘анalogии опыта’. Они, согласно Канту, в отличие от основоположений о применении математики к естествознанию, касаются не порождения созерцаний, а *связи их существования в опыте, не синтетического единства в связи вещей самих по себе, но лишь восприятий.*

«...Познание по аналогии... не означает, как обычно понимают это слово, несовершенного сходства двух вещей, а *означает совершенно сходство двух отношений между совершенно несходными вещами*»⁵¹.

Более детально, рассматривая аналогии опыта, Кант отмечает, что если понятие предшествует восприятию, то это означает лишь *возможность* его, и только восприятие, дающее материал для понятия, есть единственный признак действительности.

⁵⁰ цит. по : Campbell Lewis, Garnett William . The Life of James Clerk Maxwell. L., Macmillan, 1882, p.77.

⁵¹ Кант Иммануил [1783]. Прологомены ко всякой будущей метафизике, могущей явиться как наука. (Пер. Вл. Соловьева, 1893). – В сб.: Иммануил Кант. Трактаты. Спб.: Наука, 2006. С.236.

«Однако если вещь находится в связи с некоторыми восприятиями согласно принципам их эмпирического связывания (согласно аналогиям [опыта]), то существование ее можно познать также и до восприятия ее, стало быть, до некоторой степени a priori. В этом случае существование вещи все же связано с нашими восприятиями в возможном опыте, и мы можем прийти от своих действительных восприятий до вещи через ряд возможных восприятий, руководствуясь упомянутыми аналогиями [опыта]. Так, воспринимая притягиваемые железные опилки, мы познаем существование проникающей все тела магнитной материи, хотя непосредственное восприятие этого вещества для нас из-за устройства наших органов невозможно»⁵².

Заметим, что даже *пример работы принципов аналогии в научном познании Кант приводит из области магнитных явлений*, как бы прямо указывая дорогу Максвеллу. И основная философская работа Максвелла – эссе «*Существуют ли действительные аналогии в природе?*», написанное в 1856г. – несомненно ‘вышла’ из «*Критики чистого разума*». Это эссе представляет собой своеобразную переключку с теми частями творчества Канта, которые посвящены аналогиям.

Легший в основу эссе доклад «*Существуют ли действительные аналогии в природе?*», прочитанный Максвеллом на заседании кембриджского «клуба апостолов» в феврале 1856г., является кульминационной точкой эволюции максвелловской эпистемологии. Этот год для творчества Максвелла особенно значим: именно в 1856г. была завершена публикация его первой электродинамической статьи «*О фарадеевских линиях сил*», в которой была тщательно намечена программа исследования электромагнитных явлений, которой Максвелл следовал всю свою жизнь.

Кембриджский доклад представляет собой достаточно пространное изложение метафизических компонент ‘твердого ядра’ (hard core) максвелловской научно-исследовательской программы (НИП). Одна из них - признание относительности всякого конкретного знания, в полном соответствии с шотландскими традициями здравого смысла с их нелюбовью к чистому, абстрактному анализу. Все, что нам остается – это прибегать к аналогиям и моделям.

«Тогда, когда видят отношение между двумя вещами, которые хорошо известны, и думают, что должно быть сходное отношение между вещами, которые менее известны, то заключают от одного к другому. Это предполагает, что несмотря на то, что пары вещей могут значительно отличаться друг от друга, *отношение* в одной паре может быть тем же, что и в другой. Теперь, с научной точки зрения *отношение – это самое важное, что нужно знать*, и знание одной вещи позволяет в конечном счете получить знание о другой. Если все, что мы знаем, - это отношение, и если все отношения одной пары вещей соответствуют отношениям другой пары, будет трудно отличить одну пару от другой...Правда, такие ошибки достаточно редки, за исключением математических и физических аналогий...Возможно «книга», как говорится, природы тщательно пронумерована; в этом случае несомненно, что вводные части будут объяснять то, что следует за ними, а методы, которым учат в первых частях, будут сочтены таковыми и использованы для иллюстраций более продвинутых частей курса; но если это - не «книга», а иллюстрированный журнал, нет ничего глупее предположения, что одна ее часть может пролить свет на другие»⁵³.

⁵² Кант Иммануил [1787]. Критика чистого разума. Второе издание. (Пер. Н. Лосского).- М.: Эксмо, 2006, С.222.

⁵³ цит. по : Campbell Lewis, Garnett William. The Life of James Clerk Maxwell. L., Macmillan, 1882, p.112 .

Итак, первый урок, извлеченный Максвеллом из кантовской философии – (I) ‘*принцип относительности научной истины*’ . Но этим влияние Канта не ограничивается. Из рассматриваемого доклада может быть извлечен еще один принцип – (II) ‘*принцип активности теории по отношению к опыту*’. Значение этого принципа для творчества Максвелла трудно переоценить.

Действительно, в природе все явления тесно взаимосвязаны и взаимопроникают друг в друга (*merge into one another*). Вся разница в теоретических подходах обусловлена тем, что их авторы фокусируются на разных сторонах и разных уровнях рассматриваемых явлений. Поэтому главная задача теоретика состоит в том, чтобы ввести особые понятия, выражающие различные аспекты явлений. Но эти понятия - не пассивные копии вещей, а те (априорные) формы, в которых хаотическая лава ощущений и впечатлений отливается, приобретая сначала смутные очертания. Затем эти сырые формы еще «обтачиваются» за счет сталкивания их как с опытными данными, так и со следствиями из других теорий для того, чтобы приобрести завершенность.

Но задачи теоретика состоят не только в том, чтобы ввести и отполировать теоретические понятия, выражающие различные аспекты явлений, но также и в том, чтобы соединить эти аспекты в синтезе, раскрывающим связи и отношения между ними. Структура этого синтеза намечена в другой философской работе Максвелла – статье «*Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц*», посвященной анализу творчества одного из наиболее близких по духу для Максвелла исследователей, наставнику Генриха Герца .

«Обычно научное знание растет за счет аккумуляции вокруг конечного числа отличающихся друг от друга центров. Но рано или поздно должно наступить такое время, когда два или более раздела знания уже больше не могут оставаться независимыми друг от друга, но должны *слиться в согласованное целое* (*must be fused into a consistent whole*). Но, несмотря на то, что ученые мужи могут быть глубоко убеждены в необходимости подобного слияния, сама эта операция является одной из *самых трудных*. Ведь, хотя явления природы все согласованы друг с другом, мы должны иметь дело не только с ними, но и с гипотезами, которые были изобретены для систематизации этих явлений; и ниоткуда не следует, что из-за того, что одно множество наблюдателей выработало со всей искренностью для их упорядочения одну группу явлений , гипотезы, которые они сформировали, будут согласованы с теми, при помощи которых второе множество наблюдателей объясняли другое множество явлений. Каждая наука может показаться достаточно (*tolerably*) согласованной внутри самой себя, но прежде чем они смогут быть объединены в одно целое, каждая должна быть освобождена от известкового раствора, при помощи которого ее части были предварительно скреплены для согласования друг с другом. Поэтому операция слияния двух наук в одну в общем случае содержит много критики установленных методов, и отбрасывание многих кусков любимых знаний, которые ранее долгое время имели устойчивую научную репутацию»⁵⁴ .

Этот отрывок – не случайное для Максвелла обстоятельство; Максвелл неоднократно подчеркивал ценность «*взаимооплодотворения* разными науками друг друга» .

⁵⁴ Maxwell, James. “Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz”. *Nature*, 1877, vol. XV. Reprinted in :The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, 1890, 2, p.592.

Классический пример устранения «остатков цемента», который Максвелл приводил неоднократно (в частности, в статье «О действии на расстоянии»), - это создание ньютоновской теории тяготения, когда

«прогресс науки состоял в освобождении от небесных механизмов, которыми поколения астрономов загромождали небеса, в смывании паутины с неба (sweeping cobwebs off the sky)»⁵⁵.

В итоге в знаменитом «Трактате об электричестве и магнетизме»⁵⁶ он, создав особый математический язык для описания электромагнитного поля, вывел свои знаменитые «уравнения Максвелла», связывающие между собой в вакууме вектор напряженности электромагнитного поля \mathbf{E} , вектор напряженности магнитного поля \mathbf{H} , вектор плотности тока \mathbf{j} и плотность заряда ρ .

Благодаря Фарадею и его причудливым представлениям о силовых линиях, Максвелл понял, что электрическое и магнитное поля должны описываться **векторами** – математическими величинами, которые в каждой точке (x,y,z) характеризуются не только величинами – компонентами $\{E_x, E_y, E_z\}$ и $\{H_x, H_y, H_z\}$, но и **направлениями** в пространстве, которые изменяются по определенным правилам от точки к точке. (Примеры: сила \mathbf{f} ; векторное поле скоростей \mathbf{v}).

Более того, Максвелл понял, что законы электромагнитного поля должны быть *дифференциальными уравнениями*, связывающими значения поля в точке (x,y,z,t) со значениями в бесконечно близкой точке $(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z, t+\Delta t)$. Поэтому они описываются такими дифференциальными операторами как дивергенция («расхождение») вектора $\text{div} \mathbf{A} = \partial A / \partial x + \partial A / \partial y + \partial A / \partial z$ и его ротор («вихрь») $\text{rot} \mathbf{B} = \mathbf{i} (\partial B_z / \partial y - \partial B_y / \partial z) + \mathbf{j} (\partial B_x / \partial z - \partial B_z / \partial x) + \mathbf{k} (\partial B_y / \partial x - \partial B_x / \partial y)$. В итоге уравнения Максвелла в пустоте принимают следующий вид ($c = \text{const}$ – это постоянная, смысл которой Максвелл уяснил далеко не сразу).

$$\text{rot} \mathbf{E} = - (1/c) \partial \mathbf{H} / \partial t$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = (1/c) (\mathbf{j} + \partial \mathbf{E} / \partial t)$$

$$\text{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

$$\text{div} \mathbf{H} = 0$$

Несмотря на то, что подлинное, строгое содержание уравнений Максвелла раскрывается во *всей* электродинамике, можно все же попытаться грубо, «на пальцах» объяснить их физический смысл следующим образом. *Первое* уравнение Максвелла $\text{rot} \mathbf{E} = - (1/c) \partial \mathbf{H} / \partial t$ является не чем

⁵⁵ Maxwell, James .[1873] .”On Action at a Distance”. Reprinted in :The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, 1890, 1,p. 315.

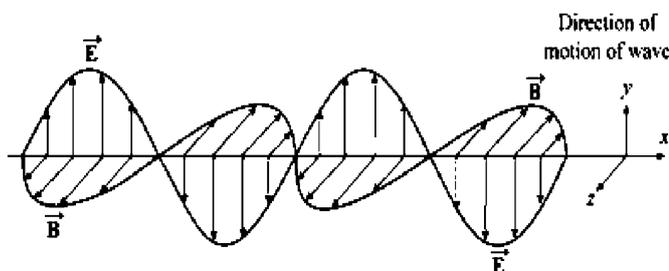
⁵⁶ Maxwell, James ([1873/1891] 1954) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 2 vols third ed. New York: Dover.

иным, как математическим обобщением опыта Фарадея: бесконечно малые изменения в пространстве электрического поля \mathbf{E} вызывают бесконечно малые изменения во времени магнитного поля \mathbf{H} .

Соответственно, *второе* уравнение Максвелла $\text{rot } \mathbf{H} = (1/c) (\mathbf{j} + \partial \mathbf{E} / \partial t)$ – это математическое обобщение опыта Эрстеда, гласящее, что бесконечно малые изменения в пространстве магнитного поля \mathbf{H} вызываються бесконечно малыми изменениями во времени электрического поля \mathbf{E} . *Третье* уравнение Максвелла – это хорошо известный закон Кулона, описывающий электростатическое поле покоящегося заряда. А *четвертое* уравнение $\text{div } \mathbf{H} = 0$ говорит нам о том, что магнитных зарядов (монополей) не существует.

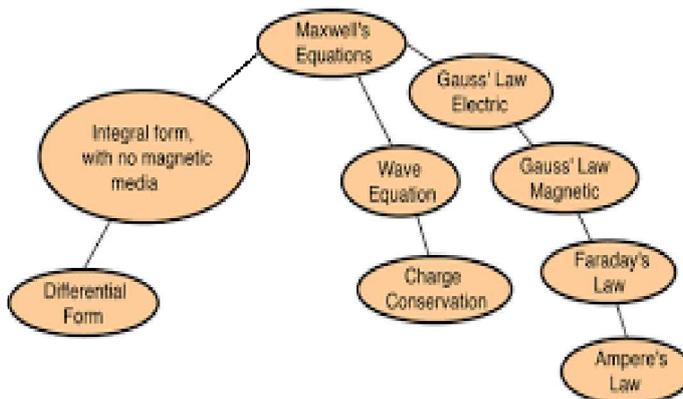
Особенности электромагнитной НКМ.

1. Уже после вывода своих уравнений Максвелл заметил, что небольшие математические манипуляции с ними приводят к т.н. «*волновому уравнению*», согласно которому электромагнитное поле распространяется в пустом пространстве в виде т.н. «*электромагнитных волн*». Например, пульсирующий заряженный шар порождает сферическую электромагнитную волну, которая распространяется в окружающем шар пространстве с колоссальной скоростью $c = 300\,000$ км/сек. И эксперименты (опыты Физо, например, этот вывод подтверждали).



2. Расчеты Максвелла подтверждали выводы других ученых о том, что свет – это не что иное, как электромагнитные волны, движущиеся со скоростью c . Более того, создав свои уравнения, Максвелл добился *синтеза* электромагнетизма и оптики.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$



3. Более поздние исследования (в частности, русского физика П.Н. Лебедева) подтвердили, что электромагнитное излучение обладает не только энергией, но и давлением. Оно «материально».

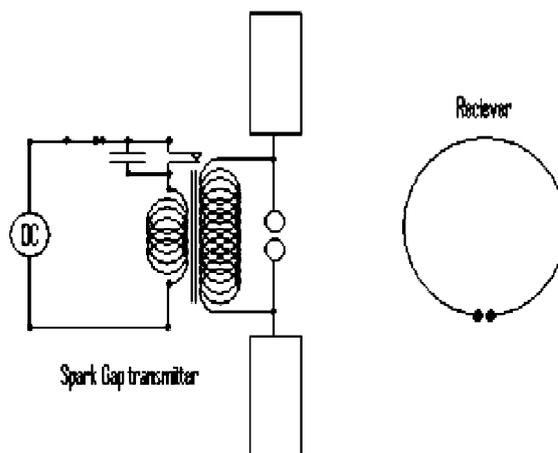


проф. Московского университета Петр Николаевич Лебедев (1866-1912)



4. Теория Максвелла утверждала, что, кроме света, могут существовать **еще и другие электромагнитные волны (радиоволны)**. В частности, опыты последователя Максвелла – немецкого физика Г. Герца – показали, что можно построить как передатчик этих волн (генератор искровых разрядов), так и их приемник (вооруженный антенной).

Впоследствии английский (итальянский) предприниматель и инженер Г. Маркони и русский военно-морской инженер А.С. Попов показали, что эти открытия можно использовать для создания радиосвязи.



Генрих Герц (1857-1894) и его экспериментальная установка



Последний приют Г. Герца



маркиз Гульельмо Маркони (1874-1937), итальянский радиотехник и предприниматель, лауреат Нобелевской премии по физике за 1909г.



Русский военно-морской инженер Александр Степанович Попов (1859-1906) и его установка

Но у теории Максвелла были и свои большие проблемы. Главная из них: *что из себя представляют электромагнитные волны? В чем они движутся?*

В самом деле, «водяные» волны, например, движутся в воде. Эти волны – изменения сил сцепления молекул воды, которые передаются в пространстве от одной группы молекул к другой. «Воздушные» волны – это колебания молекул воздуха, передающиеся от одного места к другому. А электромагнитные волны – это колебания молекул чего? Например, когда Нейл Армстронг, долетев до Луны, выполз, наконец, из лунного модуля и послал на Землю, на радиолокационную станцию НАСА в штате Флорида радиосигнал, в какой среде этот сигнал распространялся? – Ведь на Луне нет воздуха!

Волны (по определению) не могут распространяться в пустоте. Должна существовать какая-то среда, колебания частиц которой и представляют собой электромагнитные волны.

И Максвелл вынужден был, для того, чтобы его теория выглядела правдоподобной, эту среду ввести. Она получила название «эфир» (это слово использовал еще Аристотель: «природа боится пустоты»; эфир или «пятый элемент» заполнял собой все пространство в «надлунном мире»). Предполагалось, что эфир пронизывает собой все пространство, так что истинной, подлинной пустоты не существует. При этом электромагнитные волны – это колебания молекул эфира, распространяющиеся от точки к точке со скоростью c .

Правда, вскоре были выявлены существенные трудности, связанные с этой гипотезой. Во-первых, теоретики выяснили, что для того, чтобы допускать такую колоссальную скорость и поперечные колебания, эфир должен обладать свойствами твердого тела. Но это было неглавным. Главное – это то, что эфирный ветер должен был наблюдаться на опыте, экспериментально. В самом деле, Земля, как утверждали еще Аристарх Самосский и Коперник, вращается как вокруг своей оси, так и вокруг Солнца. Поэтому наблюдателя на быстро ($\cong 1000$ км/сек) вращающейся Земле должен обдувать поток эфирного ветра, который он не может не чувствовать. (Как, наверное, каждого на верхней полке, кто высовывается в окно быстро идущего поезда, не может не обдувать поток обычного ветра).

И тогда два американских физика – Альберт **Майкельсон** и Генри **Морли** – поставили в подвале берлинского физического института в Берлине знаменитый эксперимент, позже получивший в их честь название «эксперимент **Майкельсона-Морли**». Заметим, что этот эксперимент стоил около миллиона долларов (по тогдашним ценам) и считался самым дорогим в истории науки XIX века.

Эксперимент, о котором идет речь, был поставлен в берлинском Институте Гельмгольца в 1881 г. и повторялся со все более возрастающей точностью в 1887 году и позже. Майкельсон использовал двухплечевой интерферометр (рис. 1 и 2), одно плечо которого (ВЕ) располагалось вдоль направления движения Земли сквозь эфир, другое (ВД) – перпендикулярно. Покоящийся относительно абсолютной системы отсчета, но движущийся относительно Земли эфир должен был вызвать разность во временах прихода лучей L_1 и L_2 в интерферометре и, следовательно, сдвиг интерференционных полос. Рассмотрим устройство интерферометра подробнее.

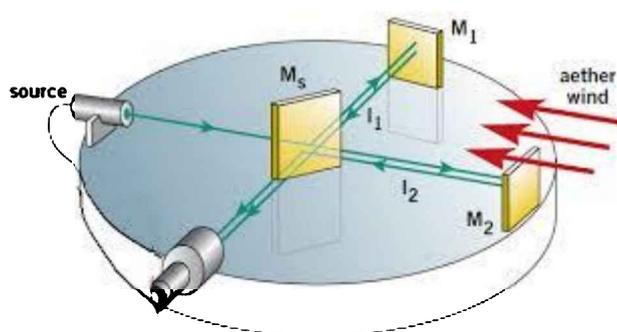
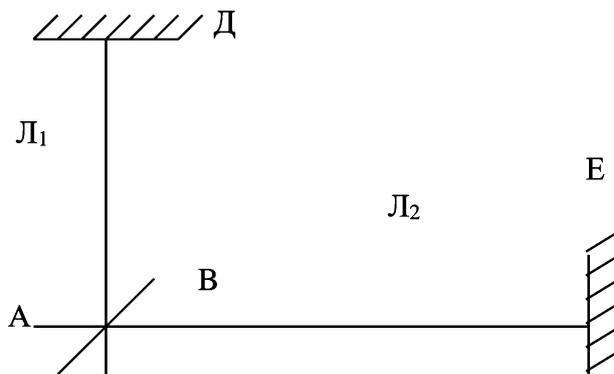


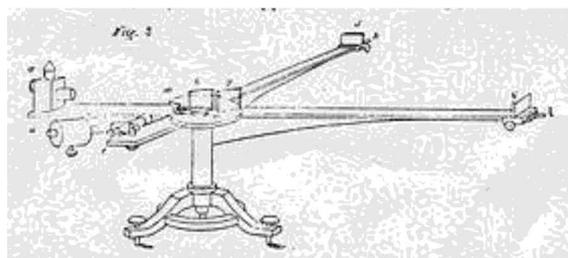
Рис. 1 и 2. *Схема опыта Майкельсона – Морли.*



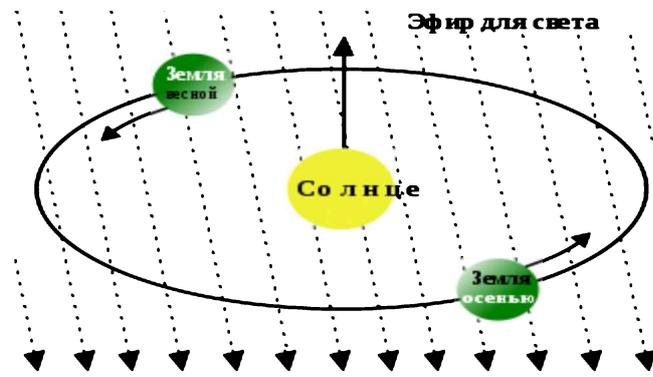
$$BE = L, \text{ а } BD = l.$$

Под углом в 45° по отношению к направлению ВД в пункте В находится полупрозрачное зеркало. Находящийся в А источник света (в те времена – керосиновая лампа, в наше время – лазер) испускает луч, который в точке В расщепляется на два луча. Первый луч L_1 распространяется вдоль ВД, отражается в Д и возвращается в В. Второй луч L_2 путешествует вдоль ВЕ и, отразившись от Е, интерферирует затем с лучом L_1 .

Существование эфира и эфирный ветер должны были привести к разности хода лучей. Эта разница должна вызвать значительный сдвиг интерференционных полос. *Но никакого сдвига обнаружено не было.* Результаты повторного опыта (1887) опять показали отсутствие эфирного ветра. Как пишут в учебниках, «физика оказалась на пороге научной революции». Многие начали понимать, что для «спасения явлений», как говаривал еще Птолемей, необходимо радикально изменить сами основы классической науки.



Экспериментальная установка Майкельсона и Морли

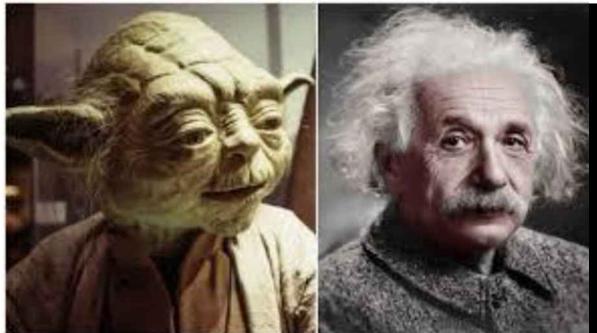


проф. чикагского университета, лауреат нобелевской премии по физике за 1907г. Альберт Майкельсон (1852-1931) в лаборатории.

Глава 3. Генезис специальной теории относительности.

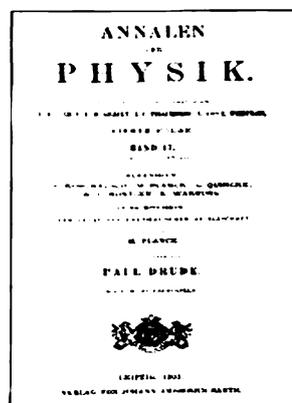
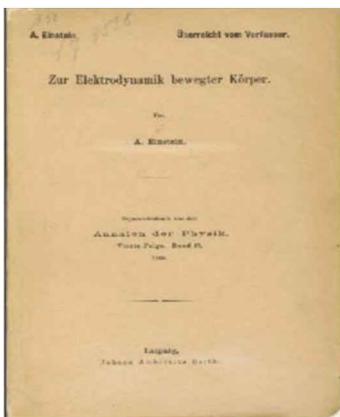
Настоящее открытие – это не поиск новых земель, это взгляд на мир новыми глазами.

Марсель Пруст



Так вот кто был прототипом одного из героев «Звездных войн»!

Проблемная ситуация в физике начала разрешаться только в начале XX вв. В частности, в вестнике (немецком) журнале того времени «*Annalen der Physik*» была опубликована статья никому не известного молодого эксперта из какого-то богом забытого патентного бюро (г. Берн, Швейцария). Ему недавно исполнилось 26 лет, и в мире Большой Науки его почти не знали. Говоря современным суконым языком, у него не было даже базового физического образования. Закончив (не без проблем) цюрихский политехнический институт, он получил, наконец, диплом инженера, но долго мыкался в поисках работы, то давая частные уроки, то преподавая математику в начальных классах сельским детям. Парня звали Альберт Эйнштейн (1879 – 1955), а статья непритязательно называлась «*К электродинамике движущихся тел*» (1905)⁵⁷.



Та самая статья в том самом журнале

⁵⁷ Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. - Annalen der Physik., 1905d, vol.17, pp. 891 - 921. Имеется перевод: Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел. – Собр. соч., т.1. М.: Наука, 1965, С. 7 – 35.



5 лет



17 лет



*26 лет, но уже выдвинута 'фотонная' гипотеза
и создана специальная теория относительности*



Славный старинный город Ульм



*Родители (мелкий предприниматель
+ домохозяйка) и сестра Майя*



Альберт и Милева



Так создавалась специальная теория относительности?



Фото из семейного альбома



Старинный г. Цюрих (справа) и цюрихский политехникум (слева)



прикольная (шутовская) «академия Олимпия»



Альберт и Эльза (вторая жена)



Старший сын



Младший сын



Лизерль?

Эйнштейн осознал (вместе с Г. Лоренцем и А. Пуанкаре), что для того, чтобы выйти из кризиса, созданного столкновением классической механики и классической электродинамики (и, в частности, «объяснить отрицательные результаты опытов подобных эксперименту Майкельсона-Морли»), недостаточно изменить какие-то детали, второстепенные части классической науки. Надо изменить сами *основы* классической механики.

В частности, согласно Эйнштейну, надо решительно отказаться от введенных еще Ньютоном основополагающих понятий Абсолютного Пространства и Абсолютного Времени. Согласно Эйнштейну, пространство и время не абсолютны, а *относительны* ('релятивны'), т.е. зависят от скорости движения наблюдателя. Отсюда, в частности, следует, что два события, одновременные для одного наблюдателя, могут быть неодновременными для другого, движущегося относительно первого с постоянной и большой скоростью.

Значительное влияние на такое радикальное изменение мировоззрения оказали, по признанию самого Эйнштейна, историко-научные и философские работы Эрнста Маха, Ньера Дюгема и Давида Юма.



Эрнст Мах (1838-1916)

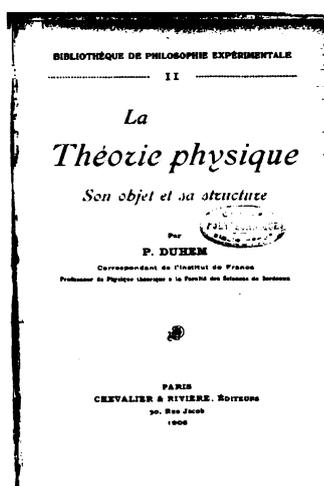


Пьер Дюгем (1861-1916)



MPIWG, Sou IV M149me

Die Mechanik (1893)



La Théorie Physique (1906)

Эрнст Мах, «Механика» (1893).

«Может даже показаться, что Ньютон в цитируемых здесь замечаниях все еще подвергался влиянию *средневековой* философии, как будто бы он сам оставался глух к своему же призыву рассматривать только реальные факты»⁵⁸ (Эрнст Мах. «Механика», 1893).

«Движение может быть равномерным по отношению к другому движению. Но вопрос о том, является ли данное движение равномерным *само по себе*, не имеет смысла. Также с такой же малой степенью обоснованности мы можем говорить об «*абсолютном времени*» - о времени, которое не зависит от изменений. Это абсолютное время не может быть измерено сравнением с каким-то другим движением; поэтому оно не имеет ни практической, ни научной ценности; и никто не может с достоверностью заявить, что хоть что-нибудь знает о нем. Это - *праздное метафизическое понятие*»⁵⁹ (Эрнст Мах. «Механика», 1893).

«Едва ли необходимо здесь отметить, что в представленных здесь рассуждениях Ньютон снова поступал диаметрально противоположным образом по отношению к выраженному им намерению исследовать только *реальные факты* (actual facts). Никто не может указать предикаты абсолютного пространства и абсолютного движения; они представляют собой предметы чистой мысли, чисто ментальные конструкции, *которые не могут быть воспроизведены в опыте*. Все наши принципы механики являются, как мы это детально показали, экспериментальным знанием, относящимся к **относительным** положениям и движениям тел»⁶⁰ (Эрнст Мах. «Механика», 1893).

«К наиболее развитым в *экономическом отношении* наукам относятся те, чьи факты сводятся (are reducible) к небольшому количеству элементов сходной природы. Такова наука механики, в которой мы имеем дело только с пространствами, временами и массами...Сама наука, поэтому может быть рассмотрена как минимальная проблема, состоящая из наиболее полного изложения фактов с наименьшим расходом мыслительного материала»⁶¹ (Эрнст Мах. «Механика», 1893).

⁵⁸ Ernst Mach. The Science of Mechanics. A Critical and Historical Account of Its Development (translated by T.J. McCormach), Chicago-London: The Open Court Publishing Company, 1999, p.223.

⁵⁹ Ibid, p.224.

⁶⁰ Ibid, p.229.

⁶¹ Ibid, pp. 486, 489.

Пьер Дюгем . «Физическая теория» (1906).

«Физическая теория – это не объяснение; это – система математических высказываний, цель которой состоит в как можно более простом, полном и точном представлении всей группы экспериментальных законов»⁶² .

«Таким образом, истинная теория – это не теория, которая дает объяснение физическим явлениям в соответствии с реальностью; это – теория, которая представляет удовлетворительным образом группу экспериментальных фактов»⁶³.

«Согласие с экспериментом – это единственный критерий оценки физической теории»⁶⁴.

«Короче говоря, физик никогда не сможет подвергнуть опытной проверке *изолированную гипотезу*, но только группу гипотез»⁶⁵.

«Физическая наука – это система, которая должна рассматриваться как целое; это – организм, в котором одна часть не может функционировать, кроме случая, когда другие наиболее удаленные части введены в игру»⁶⁶.

«Критический эксперимент в физике невозможен»⁶⁷.

«Единственная экспериментальная проверка физической теории, которая не является нелогичной, состоит в сравнении *всей системы* физической теории со всей группой экспериментальных фактов, и в выявлении того обстоятельства, насколько удовлетворительно эта группа представлена»⁶⁸.

⁶² Pierre Duhem. The Aim and Structure of Physical Theory. (Translated from the French by Philip P. Wiener). Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1954, p. 19.

⁶³ Ibid, p.20.

⁶⁴ Ibid, p. 21.

⁶⁵ Ibid, p. 187.

⁶⁶ Ibid, p.187.

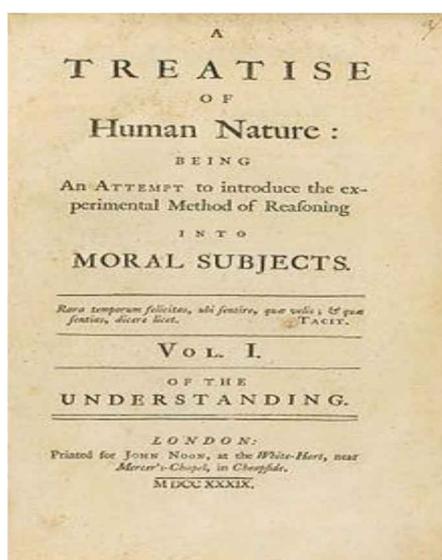
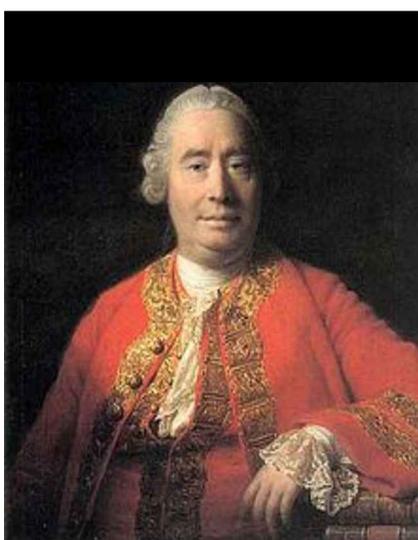
⁶⁷ Ibid, p. 199.

⁶⁸ Ibid, p.200.

Особенно большое влияние на Эйнштейна оказала процитированная выше критика Махом ньютоновских понятий абсолютного пространства и абсолютного времени. Значительно помогли также представления о том, как надо конструировать физическую теорию и работы другого физика и философа – Пьера Дюгема. Но этим влияние философии на Эйнштейна не ограничивалось: он с упоением читал работы профессионального шотландского философа Давида Юма.

В письме своему старому другу Мишелю Бессо (1948) Эйнштейн много позже вспоминал : “Насколько я отдаю себе отчет, непосредственное влияние Д. Юма было велико. Я читал его вместе с Конрадом Габихтом и Соловином в Берне⁶⁹”.

Напомним, что, в соответствии с юмовской эпистемологической доктриной, пространство и время – это прямые абстракции простых переживаний (perceptions).



David Hume (1711-1776) and his conspicuous “Treatise of Human Understanding” (1748)

Суть эпистемологии Юма.

Все наши идеи (ideas), т.е. более слабые восприятия(perceptions), **суть копии наших впечатлений** (impressions), т.е. более живых и сильных восприятий. Анализируя наши мысли, или идеи, мы всегда находим, что они сводятся к простым идеям, скопированным с какого-нибудь прошлого ощущения или чувствования. *Объяснить идею значит поэтому указать впечатление как оригинал, копией которого она является.*

⁶⁹ Speziali P (ed.) Albert Einstein-Michele Besso: Correspondence. Paris: Hermann, 1972.

И еще более глубокое (не «непосредственное») влияние на него оказал Кант. Как известно, Эйнштейн прочитал *«Критику чистого разума»* сначала в тринадцать лет, затем перечитал в шестнадцать⁷⁰. Позже, уже на студенческой скамье, в цюрихском политехникуме, он имел возможность в 1897г. продолжить знакомство с философией Канта на лекциях Августа Штадлера, первого докторанта Германа Когена, выдающегося нео-кантианца марбургской школы⁷¹. Эйнштейн записался даже на целых два курса Штадлера – *«Теория познания»* и *«Философия Канта»*.



Immanuel Kant (1724-1804) and his faithful pupil Dr. Prof. August Stadler (1850-1910)

Этим знакомство с кантовской эпистемологией, конечно же, не ограничилось; Эйнштейн постоянно возвращался к ней всю жизнь. Неслучайно в 1918г. он писал Максу Борну:

«Я читаю здесь, помимо всего прочего, кантовские *“Прелегомены”* и начинаю постигать ту невероятную *конструктивную мощь*, которая исходила и продолжает исходить от этого пария»⁷².

И, наконец, уже в конце своего творческого пути, рассуждая о принципах теоретической физики, Эйнштейн отмечал, что

«теоретическая позиция, которая здесь отстаивается, отличается от кантовской *только в одном отношении*, - в том, что мы не рассматриваем категории как неизменные... Они оказываются априорными только в той мере, в какой мышление без общего выставления общих категорий и понятий было бы так же невозможным, как дыхание в вакууме»⁷³.

⁷⁰ Howard, Don. Einstein, Kant and the Origins of Logical Positivism. – In: Language, Logic and the Structure of Scientific Theories The Carnap -Reichenbach Centennial. Wesley Salmon and Gedeon Wolters (eds.) Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1994, p.49.

⁷¹ Einstein, Albert. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 1 The Early Years, 1879-1902. John Stachel et al. (eds.) Princeton: Princeton University Press, 1987, pp.45-50.

⁷² Цит. по : Born, Max . *The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955*. I. Born translation. N.Y.: Walker and Company, 1971, pp.25-26.

⁷³ Einstein, Albert . *Remarks Concerning the Essays Brought together in this Co-operative Volume*. – In: Schlipp P.A. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, vols 1-2, Evanston, IL, 1949, p. 674.

Что же привлекало Эйнштейна в Канте и было у него творчески заимствовано? - Согласно Канту, именно «свобода человека от мира», *творческая активность субъекта научного познания* делает последнее возможным. И в «*Приложении к трансцендентальной диалектике. О регулятивном применении идей чистого разума*»⁷⁴ он утверждал, что наука должна рассматривать некоторые идеи Разума в качестве *эвристических* («как если бы») устройств, обеспечивающих *систематическое единство научного знания*.

«Понятия разума, как было сказано, суть только идеи, и, конечно, для них нет предмета ни в каком опыте, однако отсюда вовсе не следует, что они обозначают предметы вымышленные и вместе с тем признаваемые возможными. Они мыслятся только *проблематически*, для того чтобы можно было обосновать по отношению к ним (как *эвристическим* фикциям) *регулятивные принципы* систематического применения рассудка в сфере опыта»⁷⁵.

Эйнштейн, судя по всему, впервые приобщился к «эвристической точке зрения» благодаря своему раннему знакомству с «*Критикой чистого разума*». Для Эйнштейна эвристический метод прежде всего состоял в *свободном изобретении тезиса, в смелом конструировании* такой теоретической модели, из которой известные факты следуют с логической необходимостью. «Физические понятия суть свободные творения человеческого разума и неоднозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться»⁷⁶. Неслучайно самая глубокая и радикальная, «квантовая» статья Эйнштейна из опубликованных в 1905г. называлась «*О некоторой эвристической точке зрения, касающейся производства и преобразования света*»⁷⁷.

Но самым *значимым* понятием эйнштейновской эпистемологии явилась кантовская идея *систематического единства природы*⁷⁸. Это единство вовсе не является для Канта онтологическим принципом. Бессмысленно спрашивать о том, обладает ли Природа подобным единством, или нет. Напротив, идея единства обладает важным *эпистемологическим* значением: «такие понятия разума не черпаются из природы; скорее наоборот, мы задаем вопросы природе сообразно этим идеям»⁷⁹. Систематическое единство природы обеспечивает критерий значимости научной гипотезы, дополняющий критерий ее эмпирического подтверждения: «гипотетическое применение разума имеет целью систематическое единство рассудочных знаний, а это единство служит критерием истинности правил»⁸⁰.

⁷⁴ Кант И. Критика чистого разума (пер. Н. Лосского). М.: Эксмо, 2006. – С. 486- 505.

⁷⁵ Кант И. Критика чистого разума. – С. 575.

⁷⁶ А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. М.: Молодая гвардия, 1966. – С.36.

⁷⁷ Einstein, Albert. *Über eine die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* // *Annalen der Physik*, 1905a, **17** :pp.132-48.

⁷⁸ Beller, Mara. *Kant's Impact on Einstein's Thought*. – In: Don Howard and John Stachel (eds.) *Einstein: The Formative Years, 1879-1909*. Boston: Birkhauser, 2000; Morrison, Margaret *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge University Press, 2000.

⁷⁹ Кант И. Критика чистого разума. – С. 489.

⁸⁰ Кант И. Критика чистого разума. – С. 490.

Поэтому из множества различных эмпирических закономерностей только такие могут рассматриваться как обладающие законоподобной необходимостью, которые могут быть включены в объединяющую, систематически общую систему. Соответственно, согласно Эйнштейну,

«любая система обладает истинным содержанием в соответствии с определенностью и полнотой возможности координации ею всей полноты и целостности опыта. Правильное предсказание заимствует свою 'истинность' из истинности той системы, к которой оно относится»⁸¹.

Поистине, что именно подобная «хололистская» (whole) эпистемологическая позиция позволила Эйнштейну еще в 1906г. занять скептическую позицию по отношению к «критическим» экспериментам Кауфмана, противоречившим специальной теории относительности. Как отмечал Эйнштейн, конкурировавшие с теорией относительности теории, подобные теории Абрагама,

«обладают достаточно небольшой вероятностью, поскольку их фундаментальные предположения (относительно массы движущихся электронов) необъяснимы в терминах теоретических систем, которые охватывают большее число явлений»⁸².

Но из того факта, что Эйнштейн испытывал влияние и Маха, и Дюгема, и Юма, и, конечно, Канта, вовсе не следует, что он был их убежденным и последовательным сторонником.

В том-то и суть его отношения к философии вообще, что он занимал по отношению к конкретным философским системам достаточно сдержанную, часто скептическую позицию, здраво отделяя то, что представлялось ему конструктивным и интересным от того, что выглядело сомнительным. Это видно, например, из следующего знаменитого отрывка из его «Ответа на критику», примыкающего к его «Автобиографии» (1949).

«Взаимоотношение эпистемологии и науки весьма любопытно. Они зависят друг от друга. Эпистемология без контакта с наукой становится пустой схемой. Наука без эпистемологии является – насколько это вообще возможно – примитивной и запутанной. Тем не менее, эпистемолог, ратующий за создание своей собственной ясной системы, старается интерпретировать мыслительное содержание науки именно через призму своей системы и игнорирует все то, что находится за ее рамками. Но ученый, однако, не может позволить себе в своем поиске эпистемологической систематизации зайти настолько далеко. Он с благодарностью принимает эпистемологический анализ понятий; но внешние условия, налагаемые на него опытными фактами, не позволяют ему ограничиваться в процессе конструирования своего собственного концептуального мира только какой-то одной эпистемологической системой.

⁸¹ Einstein, Albert .Autobiographical Notes. – In: Schlipp et al. (eds.), 1949, p.13.

⁸² А. Эйнштейн; цит. по: Holton, Gerald. Mach, Einstein and the Search for Reality. Daedalus ,1968, p. 253.

Поэтому он может показаться профессиональному эпистемологу (*systematic epistemologist*) кем-то вроде беспринципного оппортуниста: он кажется реалистом, в той мере, в какой он стремится описать мир, независимый от актов восприятия; идеалистом, поскольку он рассматривает понятия и теории как свободные изобретения человеческого духа (не выводимыми логически из данных опыта); позитивистом, поскольку он рассматривает свои понятия и теории обоснованными только в той степени, в какой они совершенствуют логическое представление отношений между ощущениями. Он может даже показаться платоником или пифагорейцем в той мере, в какой он рассматривает требование логической простоты как незаменимое и эффективное орудие своего исследования»⁸³.

Поэтому, как справедливо отмечал Альберт Эйнштейн в письме своему другу Микеле Бессо 6 января 1948г.,

«Мах был убежден в том, что теоретические научные понятия, даже самые основные, получают свое оправдание только при помощи эмпирического знания, что они ни в коей мере не являются логически необходимыми... Я вижу его слабость в том, что он в общем верил в то, что наука состоит *только* в “упорядочении” эмпирического “материала”; то есть он не признавал свободный конструктивный элемент в образовании понятий. В каком-то смысле он полагал, что теории создаются в результате *открытий*, но не в результате *изобретений*. Он даже заходил настолько далеко, что рассматривал “ощущения” не только как материал, которые еще только предстоит исследовать, но буквально в качестве строительных блоков реального мира; таким образом он верил в то, что сможет преодолеть различия между психологией и физикой. Если бы он удосужился сделать все выводы из этой точки зрения, он бы отверг не только **атомизм**, но и саму идею физической реальности»⁸⁴.

Аналогично, хотя и более сдержанно, Эйнштейн высказывался и в адрес дюгемовского конвенционализма, и кантовского априоризма, что не исключает высокой оценки Эйнштейном *роли философии в формировании творческой личности*. В завершение я не могу не привести такое высказывание самого Маха, где он предельно точно охарактеризовал значение своей философии:

«Цель моих исследований, как и моя профессия отнюдь не состоят в решении философских проблем, но *только* в *очищении* методологии естественных наук от старых, запутывающих дело *псевдопроблем*» (письмо датскому философу, учителю Нильса Бора проф. Гаральду Хеффдингу от 6 сентября 1905г.).

⁸³ Albert Einstein. Reply to Criticisms.- In: P.A. Schlipp (ed.)Albert Einstein: philosopher-scientist. Open Court: La Salle, Illinois, 1949b, pp.681-682.

⁸⁴ A. Einstein to M. Besso on 6 January 1948; quoted from Speziali, 1972, Doc.153

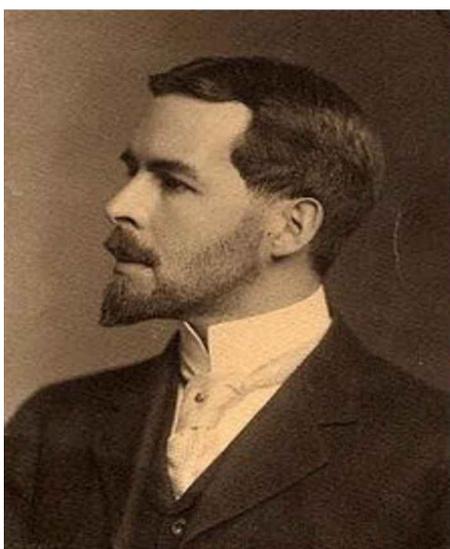
Кроме Эйнштейна, в создание СТО значительный вклад внесли голландский физик, профессор лейденского университета Гендрик Антоон Лоренц (1853-1928) – «преобразования Лоренца», великий французский математик, президент французской Академии Наук Анри Пуанкаре (1854-1912) – «принцип относительности» и американский физико-химик, автор термина «фотон» проф. МТИ (Massachusetts Institute of Technology) Гилберт Н. Льюис (1875-1946).



*Гендрик Антоон Лоренц
(1853-1938)*



*Анри Пуанкаре
(1854-1912)*

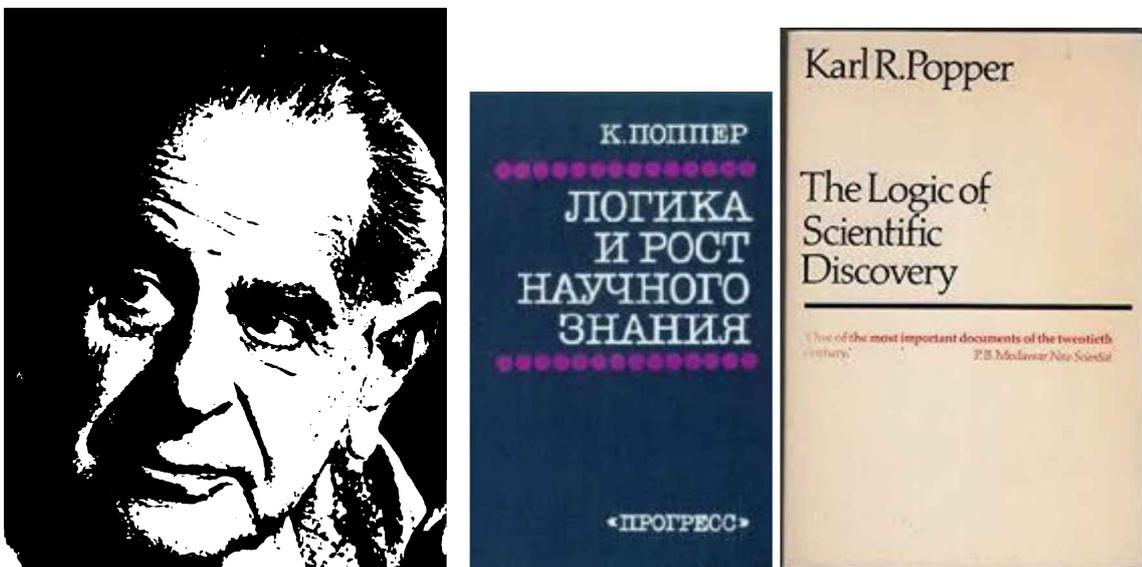


Гилберт Льюис (1875-1946)

Специальная теория относительности (СТО) была основана Эйнштейном (1905) на двух принципах (постулатах или аксиомах).

1. Принцип относительности. Во всех инерциальных системах отсчета не только все механические, но и все электромагнитные процессы происходят одинаково. [Прямое обобщение принципа относительности Галилея].
2. Принцип постоянства скорости света. Скорость света постоянна и во всех инерциальных системах отсчета равна одной и той же величине $c = 300000$ км/сек.

Оба постулата Эйнштейна (особенно второй) прямо из опыта не вытекают. Они не являются непосредственным обобщением экспериментальных данных. Это – смелые гипотезы,вольные допущения, полученные при помощи весьма изощренных мысленных экспериментов и (полу) интуитивных догадок. Но только из них можно вывести многочисленные следствия, которые блестяще подтверждаются на опыте. Действительно, Эйнштейн радикально изменил не только привычные представления о пространстве и времени, но и *сами методы построения развитой научной теории*. Он по праву считается одним из создателей гипотетико-дедуктивного метода. «Наука, - писал вслед за Эйнштейном философ науки Карл Поппер, - движется вперед за счет выдвижения смелых теоретических гипотез и их жесткой опытной проверки»⁸⁵.



Карл Поппер (Karl R. Popper) и его книги

Создав СТО, Эйнштейн явился одним из инициаторов, вместе с Максом Планком, *второй научной революции*, приведшей к становлению неклассической физики, которая покоилась на принципиально отличном от классической науки мировоззренческом и логико-методологическом фундаменте. Но это не означает, что неклассическая наука напрочь отрицает классическую и отбрасывает ее как грубую ошибку.

⁸⁵ Современная философия науки: знание, рациональность, ценности в трудах мыслителей Запада: Учебная хрестоматия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательская корпорация «Логос». – 1996.

‘Новая’ теория и ‘старая’ связаны т.н. «*принципом соответствия*», утверждающим, что *некоторые* следствия новой теории переходят в соответствующие следствия старой при переходе к определенным пределам.

Так, некоторые следствия СТО переходят в следствия классической механики тогда, когда скорость данной системы крайне мала по сравнению со скоростью света: $(v/c)^2 \ll 1$.

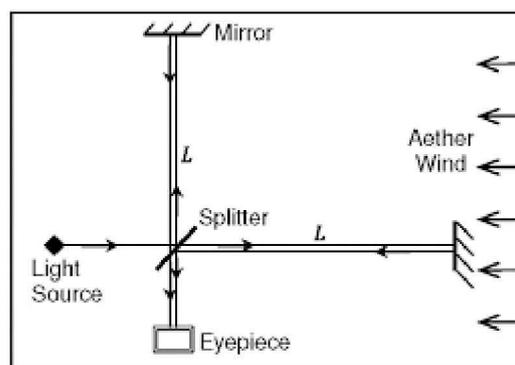
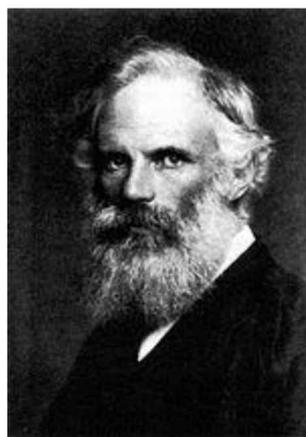
Может показаться, что два постулата Эйнштейна противоречат друг другу. В самом деле, первый – принцип относительности – фактически исходит из предположения о том, что эфира – абсолютной системы отсчета – не существует. Второй же постулат – принцип постоянства скорости света – явно позаимствован из теории Лоренца, которая пыталась сохранить эфир за счет т.н. «гипотезы сокращения Лоренца-Фицджеральда». Скорость распространения электромагнитной волны в эфире определяется свойствами этой среды; аналогично, скорость распространения океанской волны (в первом приближении) не зависит от скорости лодочки, в которой сидит наблюдатель-океанолог.

И для того, чтобы согласовать эти постулаты, дабы они не противоречили друг другу, Эйнштейн понял: надо изменить преобразования, связывающие показания инерциальных наблюдателей друг с другом. Надо заменить преобразования Галилея, лежащие в основе ньютоновской механики, преобразованиями Лоренца, которые и должны лечь в основу новой – релятивистской (relativity – относительность) – механики.

Преобразования Галилея		Преобразования Лоренца
$x' = x + vt$	→	$x' = [x + vt] / \sqrt{1 - (v/c)^2}$
$y' = y$	→	$y' = y$
$z' = z$	→	$z' = z$
$t' = t$	→	$t' = [t + x (\frac{v}{c})^2] / \sqrt{1 - (v/c)^2}$

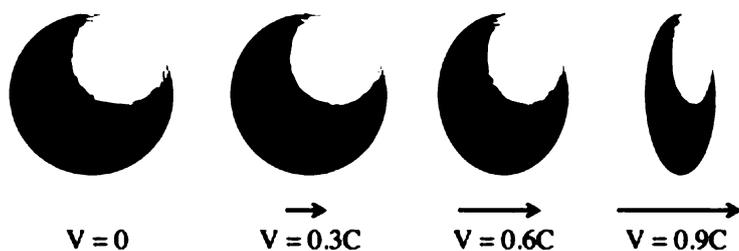
Преобразования Лоренца были найдены задолго до создания СТО как преобразования, оставляющие неизменными (инвариантными) уравнения Максвелла. Заслуга Эйнштейна состояла в том, что он выявил иной их смысл, их другую функцию – обеспечивать непротиворечивость первого и второго постулатов СТО.

Как мы уже отмечали, специальная теория относительности Эйнштейна была не единственной теорией, которая согласовывалась с экспериментом Майкельсона – Морли. Кроме нее, и *задолго до нее* была высказана еще и *гипотеза Лоренца-Фицджеральда*, объяснявшая этот эксперимент за счет реального сокращения плеч интерферометра при его движении сквозь эфир и отрицавшая относительность времени в рамках научно-исследовательской программы классической физики⁸⁶.



Hendrik Lorentz
(1853-1928)

George FitzGerald, FRS
(1851-1901)



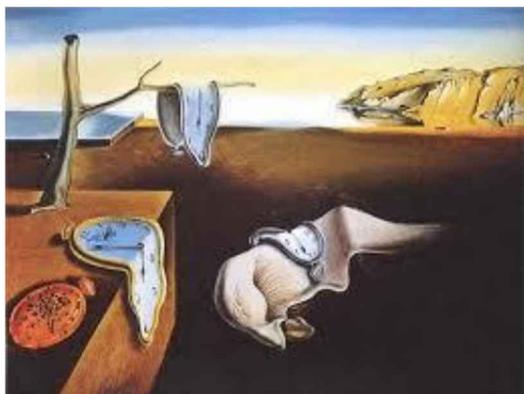
Но многие физики – такие как Пуанкаре, например, сочли это предположение хитроумной *гипотезой ad hoc* – гипотезой, выдуманной специально для объяснения только данного, частного случая. Многие философы науки во главе с К. Поппером полагают, что выдвижение таких гипотез противоречит «духу современной науки».

⁸⁶ Подробнее см.: Lorentz H.A. The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat. New York: G.F. Stechart & Co, 1909. Имеется перевод: Лоренц Г.А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. – М.: ГИТТЛ, 1953.

Как бы то ни было, представляется, что особенно веским аргументом в пользу специальной теории относительности явилось развитие *квантовой теории*, с которой теория относительности на первых порах прекрасно согласовывалась. Развитие квантовой теории привело к появлению такой лавины экспериментальных данных, которые классическая электродинамика и механика «переварить» уже не смогли⁸⁷.

Рассмотрим знаменитые следствия СТО.

(1) **Релятивистское сокращение длины.** Длина движущегося стержня сокращается вдоль направления движения по формуле $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где l_0 - длина покоящегося стержня, v – скорость его движения, а c – скорость света. Из формулы видно, что чем больше скорость стержня, тем стержень короче, и при скорости стержня равной скорости света длина стержня становится равной 0. Эта формула блестяще подтверждается в экспериментах на ускорителях элементарных частиц, подобных недавно запущенному в Швейцарии БАКу (Большому Адронному Коллайдеру), где экспериментаторы имеют дело с элементарными частицами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света. Размеры электрона или протона, мчащегося в кольце ускорителя с огромной скоростью, действительно сокращаются в направлении движения в точном соответствии с приведенной формулой.



Большой адронный коллайдер (БАК)

⁸⁷ Подробнее см. Приложение-1. См также : Нугаев Р.М. Генезис специальной теории относительности: интертеоретический контекст // «Метафизика», 2018, №4 (30), С.113-128.

(2) **Релятивистское запаздывание.** Время в движущейся системе отсчета замедляется в соответствии с формулой $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, где t_0 - время в покоящейся системе отсчета. Чем быстрее мы движемся, тем дольше живем. И эта формула блестяще подтверждена в опытах на ускорителях элементарных частиц: чем больше скорость частицы, тем больше время ее полураспада.

Любимый для научных фантастов пример релятивистского запаздывания – т.н. «парадокс близнецов». Жили-были два брата-близнеца, похожие друг на друга как две капли воды. Они отличались друг от друга только одним свойством: один страстно любил путешествовать, а другой был неисправимым домоседом. В день, когда обоим исполнилось по 18 лет, брат-путешественник отправился на далекие звезды, а брат-домосед остался дома. Брат-путешественник провел в перелетах (с околосветовыми скоростями) с одной звезды на другую двадцать лет и, наконец, решил вернуться домой. Но на Земле он с ужасом обнаруживает, что это по его часам прошло 20 лет. А по часам его брата-домоседа прошло 100 лет, и все его родители, брат, ближайшие родственники, невеста и друзья давным-давно умерли, и он оказался в совсем чужом ему мире.

(3) Масса движущегося со скоростью v тела возрастает с ростом скорости в соответствии с выражением $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, так что при $v=c$ масса становится бесконечно большой. Вот почему квант света – фотон – обладает равной нулю массой покоя, и ни одно тело с неравной нулю массой покоя не может двигаться быстрее скорости света.

(4) Самое известное следствие из специальной теории относительности $E = m c^2$. Энергия и масса эквивалентны.

(5) Скорость света $c = 300000$ км/сек; это - верхний предел всех скоростей. Ни одно взаимодействие не может передаваться со скоростью большей, чем скорость света. В противном случае нарушается принцип причинности.

.....

В первые годы после своего создания специальная теория относительности вызвала большие споры, связанные с тем, что многие ее положения вопиюще противоречат нашему повседневному опыту, пресловутому «здравому смыслу». Никто, скажем, еще не видел, чтобы BMW или «Porsche» сокращались по направлению движения даже по мере достижения скорости в 200 км/час.

Но многие возражения отменил сформулированный и использованный А. Эйнштейном и Н. Бором т.н. «**принцип соответствия**»: новая теория, приходящая на место старой, не отменяет действия старой, а лишь ограничивает область ее применимости. Поэтому в соответствующем пределе выводы новой теории переходят в следствия старой.

Скажем, в мире малых скоростей, гораздо меньших скорости света, членом (v^2/c^2) в приведенных выше следствиях из специальной теории относительности можно пренебречь, и выводы из СТО плавно переходят в выводы классической механики.

Соответственно, в нашей повседневности, в мире медленных движений мы вполне можем пользоваться законами классической механики. Но уже в микромире, где скорость вращения электрона вокруг ядра равна 100 000 км/сек, или в космосе необходимо прибегать к математическому аппарату СТО.

Глава 4. Генезис специальной теории относительности как синтез максвелловской электродинамики и ньютоновской механики.

Разразился фундаментальный кризис, серьезность которого была осознана благодаря планковским исследованиям теплового излучения (1900). История этого события еще более замечательна тем, что по крайней мере на начальной стадии, на нее ни в коей мере не повлияли никакие удивительные экспериментальные открытия.

Альберт Эйнштейн. Автобиография

В теории относительности мы наблюдаем бесспорно не революционный акт, но естественное развитие тех тенденций, которые развивались в течение столетий.

Альберт Эйнштейн.

Теория относительности возникла из попыток улучшить, с точки зрения логической экономии, основания физики в том виде, в каком они существовали на рубеже веков.

Альберт Эйнштейн.

Резюме. В данной главе сделана попытка по-иному взглянуть на зарождение СТО (специальной теории относительности). Она позволяет прийти к такому целостному пониманию всех эйнштейновских работ 1905г., которое уясняет как их взаимосвязи, так и раскрывает логику перехода от одной работы к другой. Для этого утверждается, что проблемная ситуация, способствовавшая генезису специальной теории относительности, была прежде всего создана «встречей» основных исследовательских традиций классической физики: ньютоновской механики, максвелловской электродинамики, больцмановской статистической механики и классической термодинамики. Соответственно, специальная теория относительности явилась лишь этапом реализации программы согласования этих ведущих исследовательских программ классической физики, главное место в которой занимала статья Эйнштейна по световым квантам. Показано, что действительная эйнштейновская стратегия объединения основывалась в 1905г. на оригинальном сплаве принадлежащих Маху принципов экономии мышления и «инстинктивного знания» и элементов дюгемовского конвенционализма с такими значимыми элементами кантовской эпистемологии, как «конструктивизм» и «регулятивность».

4.1. Введение.

Общеизвестно, что творчество Эйнштейна, особенно после создания общей теории относительности (ОТО), было посвящено созданию единой теории, объединяющей все известные тогда взаимодействия. Неудивительно, что страстные «спинозистские» поиски Эйнштейном единства в природе ассоциируются скорее с этими попытками, нежели с ранними его работами.

Тем не менее, я искренне убежден в том, что зрелая эйнштейновская стратегия объединения выросла из его ранних работ и, прежде всего, из его попыток создания в 1905 году специальной теории относительности (СТО) и особенно из его смелой гипотезы световых квантов. В самом деле, эйнштейновская статья 1905г. по световым квантам начинается с раскрытия

«глубокого формального противоречия между теоретическими представлениями, которые физики сформировали о газах и других весомых телах, и максвелловской теорией электромагнитных процессов в так-называемом пустом пространстве»⁸⁸.

Эта статья прямо ставит своей целью объединение основных исследовательских традиций классической физики. Более того, вышедшая всего лишь через несколько месяцев и посвященная СТО следующая знаменитая статья 1905 г. начинается с выявления «глубокой асимметрии» в описании явления электромагнитной индукции⁸⁹.

Цель данного приложения – сделать следующий шаг по выявлению влияния идей объединения на все работы Эйнштейна 1905г. *Второй* раздел посвящен анализу тех проблем объединения, решение которых подвело Эйнштейна к работам 1905г. *Цель третьего* раздела – раскрыть генезис гипотезы световых квантов и СТО. *Цель четвертого* раздела – ответить на вопрос: в чем состояли теоретико-методологические предпосылки, которые с необходимостью *должны* были привести Эйнштейна к гипотезе световых квантов и СТО.

⁸⁸ Einstein, Albert . Uber eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden hewristischen Lesictpunkt // Annalen der Physik , **1905a**, 17, pp. 132-148. English translation by Anna Beck in : The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, p.86.

⁸⁹ Einstein, Albert . Zur Elektrodynamik bewegter Korper// Annalen der Physik , **1905 d**, 17 : 891-921. English translation by Anna Beck in : The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, p. 140.

4.2. Эйнштейн, Гельмгольц, Герц и Вебер.

Благодаря весьма солидному – кантианскому – эпистемологическому фундаменту, максвелловская научно-исследовательская программа (НИП) должна была особенно интенсивно развиваться в Германии⁹⁰. Так и случилось. Максвелловская удачная попытка найти разумный компромисс между тремя исследовательскими традициями – Юнга-Френеля, Фарадея и Ампера-Вебера – была подхвачена Г. Гельмгольцем и его учеником Г. Герцем. В гельмгольцевской парадигме (1870) заряды и токи рассматривались как источники электрических и магнитных полей⁹¹.

После Максвелла, Гельмгольца, Герца и Лоренца решением этой проблемы занялся и юный Эйнштейн. В письме от 10 августа 1899г. Милеве Марич отважный студент цюрихского политехникума признается своей невесте, что

«Я все более и более убеждаюсь в том, что электродинамика движущихся тел, в том виде как она представлена сегодня, неверна, и что должно быть возможным представить ее *более простым* образом. Введение понятия «эфир» в теории электричества привело к понятию о веществе, движение которого невозможно описывать физически осмысленным образом. Я полагаю, что электрические силы могут быть непосредственно определены только для пустого пространства...Электродинамика должна поэтому быть теорией движения электричеств и магнетизмов в свободном пространстве»⁹²

Судя по всему, именно поэтому опубликованная в 1890г. герцевская статья “*Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegter Körper*”⁹³ была источником заголовка статьи по СТО: “*die Elektrodynamik bewegter Körper*” . Но Эйнштейн не был послушным учеником Герца; с самого начала своей научной карьеры он сомневался в той роли, которую играли в электродинамике ‘des Namens Aether’ . Тем не менее, его ученический скептицизм относился только к герцевскому пониманию эфира как среды, находящейся в определенном состоянии движения, но не к самому понятию эфира. Понятию «электрические массы» Эйнштейн придавал определяющее значение и рассматривал электрические токи как перемещения электрических зарядов в пустом пространстве, но отнюдь не как ‘*Verschwinden elektrische Polarisation in der Zeit*’.

⁹⁰ Нугаев Р.М. Генезис и становление максвелловской электродинамики: интертеоретический подход //История науки и техники, 2013.-№ 12.- С. 3-19. См. также : Nugayev, Rinat M. Communicative Rationality of the Maxwellian Revolution // Foundations of Science, 2015. 20/ 4: 447-478.

⁹¹ Helmholtz, Hermann. Wissenschaftliche Abhandlungen, Barth, 1882, vol.1, 611-628.

⁹² цит. по: Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 1. The Early Years, 1879-1902. John Stachel et al. (eds.).Princeton: Princeton University Press, 1987, p. 131.

⁹³ Hertz , Heinrich [1890a] On the Fundamental Equations of Electromagnetics for Bodies at Rest. In : Heinrich Rudolph Hertz. Electric Waves. L.: Macmillan, 1893, 195-240;

Эйнштейновские воззрения, по понятным причинам, восходили к лекциям по теории электричества, которые читались в цюрихском политехникуме проф. Г.Ф. Вебером. «Субстанциональный» подход к электричеству зародился в Германии в работах Вильгельма Вебера и развивался в работах многих представителей немецкой школы, к которым относился и проф. Г.Ф. Вебер. Поэтому Эйнштейн и завершил цитирувавшееся выше письмо указанием на необходимость ‘Strahlungsversuche’ для выбора между двумя точками зрения, а в следующем его письме Милеве от 10 сентября 1899г. соответственно упоминается планируемый эксперимент по изучению влияния эфира на распространение света в движущихся сквозь него телах.

Эйнштейновский профессор физики никакого интереса к этой работе не проявил, что, судя по всему, и объясняет то, что в течение последующих двух лет Эйнштейн в своей переписке ни разу о ней не упомянул. Тем не менее, ‘die prinzipielle Trennung von Lichtaether und Materie, Definition absoluter Ruhe’ находились среди проблем, которые он живо обсуждал со своим другом Мишелем Бессо (письмо Марич от 4 апреля 1901г.).

В марте 1901 Альберт пишет Милеве, что он подумывает о завершении “*unsere Arbeit über die Relativbewegung*”. Но уже в декабре Эйнштейн ‘arbeite eifrigst’ от “*die Elektrodynamik bewegter Körper*”, которая обещает стать “eine kapitale Abhandlung” (письмо Марич от 17 декабря 1901). Ошибка в вычислениях ранее привела к тому, что он стал сомневаться в справедливости его ‘Ideen über die Relativbewegung’, но теперь Эйнштейн начинает верить в них «даже сильнее, чем раньше».

Ему удастся разъяснить свои идеи проф. Клейнеру, и последний даже «полагает, что предлагаемый мной метод является наипростейшим и наиболее подходящим и разумным. Этот успех оказал на меня самое благоприятное впечатление. Я обязательно напишу статью в ближайшие недели» (письмо Марич от 19 декабря 1901⁹⁴). Но, несмотря на воодушевляющую оценку Клейнера и на собственный юношеский энтузиазм, Эйнштейн так ничего об этом не опубликовал в течение трех лет – вплоть до июня 1905г. - Почему?

- Ведь Эйнштейн действительно интенсивно работал над «капитальным мемуаром» по электродинамике движущихся тел уже в конце 1901. Но затем он оставил свои занятия и вернулся к ним только в 1905. Что же случилось за это время, и почему Эйнштейн из сдержанного сторонника эфира стал его принципиальнейшим оппонентом?

⁹⁴ Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 1. The Early Years, 1879-1902. John Stachel et al. (eds.). Princeton: Princeton University Press, 1987, p.189.

- Для ответа на эти закономерные вопросы необходимо сначала вспомнить эйнштейновскую уничижительную оценку своих собственных ранних произведений – «мои ничего не стоящие ранние статьи»⁹⁵. Имеющиеся данные⁹⁶ свидетельствуют о том, что планировавшийся “*kapitale Abhandlung*” был чрезвычайно далек от знаменитой статьи 1905 по СТО. С другой стороны, сегодня мы знаем наверное⁹⁷, что Эйнштейн пришел к своим главным результатам по СТО вследствие некоего «внезапного порыва вдохновения» и только *после того*, как он завершил свои предыдущие весенние статьи 1905г. Отвечая на прямой вопрос биографа Карла Зелига, Эйнштейн позже вспоминал: «Между основной идеей специальной теории относительности и завершением соответствующей опубликованной позже работы прошло всего пять или шесть недель»⁹⁸.

5.3. Как Эйнштейн пришел сначала к гипотезе световых квантов, а затем к СТО.

Опубликованная в 1905 г. статья по СТО начинается с констатации «глубокой асимметрии» в описании явления электромагнитной индукции. Опыт убедительно свидетельствует о том, что ток, индуцированный в проводнике движущимся магнитом, зависит только от относительного движения магнита и проводника. Однако теория Максвелла-Лоренца объясняет это явление двумя качественно *разными* способами, которые загадочным образом приводят к одному и тому же количественному результату.

Но Альберт Эйнштейн не был ни первым, ни единственным исследователем, обнаружившим асимметрию в описании индукционного феномена. В 1885г. она была подмечена Оливером Хевисайдом и независимо от него телеграфным инженером Толвером Престоном, в 1894г. – Германом Фепплем, а в 1898г. – самим Вильгельмом Вином⁹⁹. Для нашего исследования важно не то, почему Эйнштейн заметил асимметрию, а то, что сделало его таким нетерпимым к ней.

Представляется, что ключ к ответу на этот вопрос лежит в других работах Эйнштейна и, прежде всего, в статьях, опубликованных им в 1905г. До 1905г. у Эйнштейна не было *ни одной* публикации, посвященной проблемам оптики и электродинамики движущихся тел.

⁹⁵ Albert Einstein / Mileva Marić . The Love Letters. Ed. and with an introduction by Jurgen Renn and Robert Sculmann. Transl. by Syawn Smith. Princeton University Press, 1992.

⁹⁶ Renn, Jurgen and Schulmann Robert (1992) Introduction. – In: Albert Einstein/ Mileva Marić. The Love Letters. Ed. and with an introduction by Jurgen Renn and Robert Sculmann. Princeton University Press, 1992.

⁹⁷ Rynasiewicz, Robert. The Construction of the Special Theory: Some Queries and Considerations”. – In : Don Howard&John Stachel (eds.) *Einstein.The Formative Years, 1879-1909*. Birkhauser-Boston,2000, pp. 159-201.

⁹⁸ Seelig, Carl 1960. *Albert Einstein. Leben und Werk Eines Genies Unserer Zeit*. Europa Verlag, p.114.

⁹⁹ Darrigol, Olivier. *Electrodynamics from Ampere to Einstein*. Oxford University Press, 2001, p.377

И именно Эйнштейн более глубоко раскрыл основное противоречие между основными исследовательскими традициями классической физики в статье "Об одной эвристической точке зрения, касающейся излучения и преобразования света", опубликованной в том же журнале "Annalen der Physik", но за три месяца до статьи по специальной теории относительности¹⁰⁰. Обратимся к началу этой статьи:

«Существует глубокое формальное противоречие между теоретическими представлениями физиков о газах и других весомых телах и максвелловской теорией электромагнитных процессов в так - называемом пустом пространстве».

В чем же это противоречие состоит ?

«В то время как мы полагаем, что состояние тела полностью определяется положениями и скоростями хотя и очень большого, но ограниченного количества атомов и электронов, мы используем для определения состояния электромагнитного поля непрерывные пространственные функции, так что конечное число переменных не может считаться достаточным для полного определения электромагнитного поля в пространстве».

Но это противоречие может привести к ситуации, когда

«теория света, оперирующая непрерывными функциями в пространстве, придет в противоречие с опытом, будучи применена к явлениям образования и преобразования света».

Поэтому

«я полагаю, что наблюдения чернотельного излучения, фотолюминесценции, образования катодных лучей и других явлений могут быть лучше объяснены, исходя из предположения, согласно которому энергия света прерывно распределена в пространстве».

И в первой части статьи Эйнштейн демонстрирует, каким образом совместное применение механических и электродинамических «теоретических картин» для описания чернотельного излучения не только приводит к противоречиям с экспериментом (а у него нет даже ссылок на работы Люммера и Принсгейма и Рубенса и Курльбаума), но приводит к такому парадоксу, который обычными методами устраним быть не может. Для этого Эйнштейн ставит мысленный эксперимент: рассматривает воображаемую полость, содержащую свободное электромагнитное поле, молекулы газа и подручные идеальные объекты – «герцевские резонаторы».

В результате получается, что совместное применение механики и электродинамики неизбежно ведет к тому, что позже будет названо в учебниках т.н. «законом Рэлея-Джинса». Но «это соотношение, которое мы нашли как условие термодинамического равновесия, не только не согласуется с экспериментом, но также показывает, что в нашей картине невозможно определенное распределение энергии между эфиром и материей», поскольку «чем больше интервал частот резонаторов, тем больше становится энергия излучения в пространстве, и в пределе мы получаем

$$\int_0^{\infty} \rho_{\nu} d\nu = (R/N) (3\pi/L^3) \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty,$$

¹⁰⁰ Einstein, Albert . Uber eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden hewristischen Lesictpunkt // Annalen der Physik , 1905a, 17 :132-48. English translation by Anna Beck in : The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909.Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, 86-103.

т.е. т.н. «ультрафиолетовую катастрофу» (термин Пауля Эренфеста).

Несмотря на то, что часто в литературе утверждается, что рассматриваемая статья была написана Эйнштейном «для объяснения фотоэффекта», более тщательное ее изучение показывает, что это не совсем так. Измерения этого эффекта, произведенные к тому времени, не были достаточно точны для однозначного указания на отклонения от предписанного классикой поведения¹⁰¹. Поэтому Эйнштейн обращался к данным по флюоресценции, фотоэлектричеству и фотоионизации лишь как к *косвенным* свидетельствам в пользу выдвинутого им тезиса. Напротив, то, что его занимало более всего – это глубокое «противоречие встречи» между механикой и электродинамикой¹⁰².

Но почему это противоречие так его занимало? – Согласно эйнштейновским «Автобиографическим Заметкам» (Autobiographical Notes),

«Я усматриваю подлинное величие Маха в его неподкупном скептицизме и независимости; однако, в мои молодые годы *эпистемологическая позиция Маха также* оказала на меня громадной влияние»¹⁰³.

Известно, что тем ключевым элементом махистской эпистемологии, который значительно влиял на творчество Эйнштейна начиная с 1897г. и до последних дней, был знаменитый Принцип Экономии Мышления¹⁰⁴.

Соответственно, и Эйнштейн признавал, что «теория относительности возникла из попыток улучшить, с точки зрения логической экономии, основания физики в том виде, в каком они существовали на рубеже веков»¹⁰⁵.

Вполне здоровое объяснение тех мотивов, которые лежали не только в основе СТО, но и других работ 1905г. мы можем найти в самих эйнштейновских «Автобиографических Заметках».

И действительно, первый этап научной «революции, начатой введением поля»¹⁰⁶ состоял в изобретении и упрочении максвелловской электродинамики. Все домаксвелловские попытки описания физических взаимодействий были теориями взаимодействий между несколькими материальными точками.

¹⁰¹ Ter Haar Dirk . The Old Quantum Theory. Oxford, Pergamon Press, 1967.

¹⁰² Renn, Jurgen and Schulmann Robert (1992) Introduction. – In: Albert Einstein/ Mileva Marić. The Love Letters. Ed. and with an introduction by Jurgen Renn and Robert Sculmann. Princeton University Press, 1992; Einstein, Albert . Autobiographical Notes. In : Albert Einstein:Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949, vols 1-2, pp. 1-14 , Evanston, IL,

¹⁰³ Einstein, Albert. Autobiographical Notes. In : Albert Einstein:Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949a, vols 1-2, Evanston, IL, p.21.

¹⁰⁴ Mach, Ernst. 1893 / 1999. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Developments*. La Salle: Open Court, p.6.

¹⁰⁵ Einstein, Albert 1940 / 1954. The Fundamentals of Theoretical Physics, In: Ideas and Opinions, 323-330, New York : Crown Publishing Inc.,p.329.

¹⁰⁶ Einstein, Albert. Autobiographical Notes. In : Albert Einstein:Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949a, vols 1-2, pp. 1-14 , Evanston, IL,p.37.

Благодаря Фарадею и Максвеллу, в классическую физику уверенно вошло Электромагнитное Поле в качестве элемента физической реальности, обладавшего равными правами с Материальной Точкой. Возникшая в итоге проблемная ситуация характеризовалась «дуализмом, состоящим в том факте, что материальная точка в ньютоновском смысле и поле как континуум используются как элементарные понятия рука об руку. Кинетическая энергия и энергия поля оказываются существенно различными вещами»¹⁰⁷.

Как неизбежное следствие этого дуализма,

«разразился *фундаментальный кризис*, вся серьезность которого была внезапно осознана благодаря исследованиям Максом Планком теплового излучения (1900)»¹⁰⁸

Стиль мышления Макса Планка [$\epsilon = h\nu$] явно противоречил парадигмам механики и электродинамики, из которых исходили его вычисления. Правда,

«Мой *собственный интерес* состоял в следующем: какие общие следствия, имеющие отношения к структуре излучения и даже, более того, к *электромагнитным основаниям физики*, могут быть выведены из радиационной формулы...?»¹⁰⁹.

Эйнштейновское внимание в первой статье 1905а по теории квантов было обусловлено ее предполагаемой способностью объединить максвелловскую электродинамику с больцмановской статистической механикой. Он и начал свою статью с того, что волновало его более всего – с глубокой трещины в основаниях физики, ощущавшейся особенно явственно в лоренцевской теории электронов. Но как Эйнштейн собирался устранять противоречие встречи в своей статье 1905а?

Для здравого ответа на этот вопрос необходимо обратиться к тем работам Эйнштейна, которые были опубликованы им до 1905г. Все они имеют одну явную общую особенность – статистико-термодинамический подход¹¹⁰. Но еще Томас Кун показал, что то, что привело Эйнштейна к идее фотона, было результатом последовательной реализации определенной «исследовательской программы, начатой в 1902г.», программы

«настолько независимой от Планка, что она неминуемо должна была привести к закону излучения черного тела даже в том случае, если бы Планка на свете не было»¹¹¹.

¹⁰⁷ Ibid,p.37.

¹⁰⁸ Ibid, p.37

¹⁰⁹ Ibid,p.47

¹¹⁰ Einstein, Albert . Folgerungen aus den Capillazitatsercheinungen // Annalen der Physik, 1901,vol.4, pp.513-523;Einstein, Albert . Uber die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollstandig dissoziierten Losungen ihrer Salze und uber eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkrafte// Annalen der Physik, 1902, vol.8, pp.798-814.

Einstein, Albert. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. Annalen der Physik, 1903, vol.11, pp.170-187. Einstein, Albert . Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme // Annalen der Physik, 1904, vol.14,354-362.

¹¹¹ Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity,1894-1912. Oxford and New York, 1978, p.171

Работа 1905а, по Куну, явилась закономерным этапом последовательного развития НИП статистической термодинамики. Ее содержание убедительно свидетельствует о том, что Эйнштейн начал искать свой собственный закон чернотельного излучения, что он быстро натолкнулся при этом на парадокс – противоречие встречи между статистической механикой и максвелловской электродинамикой. И что он оставил поиск закона чернотельного излучения для того, чтобы целиком заняться самим парадоксом. Все это ясно из начала самой статьи, которое мы уже процитировали. Первая часть 1905а заканчивалась описанием т.н. «ультрафиолетовой катастрофы». Как же Эйнштейн все-таки намеревался разрешить парадокс?

Во второй части 1905а Эйнштейн применил классическую термодинамику ($dS=1/T$), больцмановскую статистическую механику ($S=k \log W$) и максвелловскую электродинамику ($E=V \int \rho_v dv$) для описания области эмпирической реальности, охватываемой законом излучения Вина.

Совместное применение трех наиболее фундаментальных классических программ позволило Эйнштейну придти к явно дедуктивному умозаключению: если монохроматическое излучение с частотой ν и энергией E содержится в объеме V_0 , то вероятность W того, что в любой момент времени вся энергия излучения будет находиться в части V объема V_0 дается выражением

$$W = (V/V_0)^{E/h\nu} \quad (i)$$

В этой же работе Эйнштейн показал, что в случае n движущихся независимо друг от друга частиц в объеме V_0 вероятность их одновременного обнаружения в V есть

$$W = (V/V_0)^n \quad (ii)$$

Сравнивая (i) and (ii), Эйнштейн приходит к выводу, что «монохроматическое излучение малой плотности ведет себя в термодинамическом отношении так, как если бы оно состояло из отличных друг от друга независимых квантов энергии величиной $h\nu$ »¹¹². Но все имевшиеся в 1905г. экспериментальные данные – по флюоресценции, фотоэлектричеству и по фотоионизации – обеспечивали только *косвенные* свидетельства в пользу квантовой гипотезы. Поэтому для проверки революционной гипотезы квантов Эйнштейн вынужден был произвести «критический эксперимент» весьма необычного типа: сравнить квантовые результаты с выводами другой «старой» теории, независимой от 1905а. Было необходимо, чтобы эта теория была достаточно «старой» для того, чтобы аккумулировать результаты многих надежных экспериментов. В случае совпадения результатов последние должны были обеспечить особенно достоверную верификацию. В противном случае, в случае несовпадения, теория 1905а будет фальсифицирована не одним «критическим» экспериментом, а целым кластером хорошо подтвержденных экспериментальных данных.

¹¹² Dorling, Jon . Einstein's Introduction of Photons: Argument by Analogy or Deduction from the Phenomena// The British Journal for the Philosophy of Science, 1971, 221:8

Поэтому следующая работа¹¹³ 1905b – оказывается необходимой для верификации первой статьи 1905г. – работы 1905а. В этой работе Эйнштейн развил принципы броуновского движения, которые были непосредственно подтверждены в опытах Перрена. Значимость этих результатов для работы по СТО была отмечена Эйнштейном значительно позже: в письме Макс фон Лауэ от 17 января 1952 Эйнштейн признавал:

«Но в 1905г. я уже знал наверное, что теория Максвелла приводит к неправильному выражению для флуктуаций давления излучения, и следовательно к неправильным выражениям для броуновского движения зеркала в полости, содержащей планковское излучение»¹¹⁴.

Этот очевидный еще в 1905г. для Эйнштейна результат был продемонстрирован научному сообществу в 1909г., когда Эйнштейн применил разработанную им теорию броуновского движения к броуновскому движению двустороннего зеркала, помещенному в полость с тепловым излучением. Он показал, что зеркало будет неспособно участвовать в броуновском движении в том случае, если флуктуации давления излучения на его поверхности будут обусловлены действиями случайных волн, которые предсказываются теорией Максвелла. Но только наличие дополнительного члена, соответствующего флуктуациям давления излучения со стороны случайных частиц, может гарантировать броуновское движение зеркала. Эйнштейн показал, что сходные члены в выражении для флуктуации энергии являются следствиями закона Планка. Для нас особенно важно, что он рассматривал явления флуктуации как *самый сильный аргумент* в пользу физической реальности гипотетических световых квантов¹¹⁵. Только *после этого* своеобразного «критического эксперимента», мог Эйнштейн начать рассматривать следствия из гипотезы световых квантов; поэтому он и вернулся к полузабытому “*unsere Arbeit uber die Relativebewegung*”, eine “*kapitale Abhandlung*”. В самом деле,

«если монохроматическое излучение (достаточно малой плотности) в смысле зависимости энтропии от объема ведет себя как дискретное вещество, состоящее из квантов энергии $R\beta v/N$, встает вопрос: не являются ли и законы возникновения и преобразования света такими, как если бы он состоял из сходных квантов энергии?»¹¹⁶.

Таков вопрос, «ребром» поставленный Эйнштейном в конце одного из разделов 1905а. Но положительному ответу на этот вопрос роковым образом препятствует концепция эфира. Именно она затрудняет реализацию статистико-термодинамического подхода.

¹¹³ Einstein, Albert . Eine neue Bestimmung der Molekuldimensionen. University of Zurich Dissertation, **1905b**.

¹¹⁴ цит. по: Rynasiewicz, Robert. The Construction of the Special Theory: Some Queries and Considerations”. – In : Don Howard&John Stachel (eds.) Einstein. The Formative Years, 1879-1909. Birkhauser-Boston ,2000, p. 177

¹¹⁵ Einstein, Albert Autobiographical Notes. In : Albert Einstein:Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, vols 1-2, pp. 1-14 , **1949a**, Evanston, IL,

¹¹⁶ Einstein, Albert . Uber eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // Annalen der Physik , **1905a**, 17 :132-48. English translation by Anna Beck in : The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909.Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, p.236.

Для создания квантовой теории излучения нужны электромагнитные поля в качестве независимых сущностей, которые могут излучаться источником «в точности как в эмиссионной теории Ньютона». (Т.е. энергия, передаваемая в процессе излучения, не должна рассеиваться в пространстве, но должна полностью сохраняться вплоть до элементарного акта поглощения).

Но в рамках лоренцевской исследовательской программы электромагнитное поле рассматривается как особое состояние эфира – состояние среды, *непрерывно* распределенной в пространстве. Элементарный процесс излучения связан в такой среде только со сферической волной¹¹⁷.

Многие эйнштейновские современники также не без основания полагали, что отвержение эфира неизбежно ведет к корпускулярным теориям¹¹⁸. Тем не менее, необходимо подчеркнуть, что отказ от эфира и принятие «эмиссионной теории» еще отнюдь не тождественны принятию двух постулатов СТО.

Отказ от эфира и принятие эмиссионной теории прямо ведут к известной «*баллистической гипотезе*» Ритца (1908). Согласно этой гипотезе, скорость кванта должна зависеть от скорости его источника. В теории Ритца скорость света отнюдь не постоянна, но равна $v+c$, где v – это относительная скорость наблюдателя относительно источника. Но это, конечно, плохо согласовывалось с полевой концепцией, на которой основывалась максвелловская электродинамика. В самом деле, в теории Максвелла конечная скорость электромагнитных возмущений в вакууме *не зависела* от их формы и от скоростей их источников.

В теории Лоренца этой проблемы *в принципе* не существовало. В системе отсчета, покоящейся относительно эфира, свет распространялся с постоянной скоростью, которая не зависела от скорости источника. Здесь особенно уместна гидродинамическая аналогия – с волнами на воде, - когда, по крайней мере в первом приближении, их скорости не зависят от скорости производящего их корабля. Поэтому если кто-то собирается отказаться от идеи эфира, но сохранить при этом теорию Максвелла хотя бы в первом приближении, он должен отбросить баллистическую гипотезу, но постулировать специальный «*принцип постоянства скорости света*».

Позже, в апреле 1922г. Эйнштейн признавался Вискардини:

«я отверг эту [эмиссионную] гипотезу в то время, поскольку она ведет к чудовищным теоретическим трудностям (например, к образованию тени экраном, который движется по отношению к источнику света)»¹¹⁹.

¹¹⁷ См. также: Einstein, Albert. *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*// *Physikalische Zeitschrift*, 1909, 10 :817-25.

¹¹⁸ Poynting, John. *Radiation Pressure* // *Philosophical Magazine*, 1905, vol.9, Aprilp.393; Snyder C. *Das Weltbild der modernen Naturwissenschaft*. Leipzig, Barth, 1907, p.111; Lodge O. *Radioaktivität und Kontinuität*. Leipzig, Barth, 1914.

¹¹⁹ цит. по: Howard, Don . *Einstein, Kant and the Origins of Logical Positivism*. – In: *Language, Logic and the Structure of Scientific Theories : The Carnap -Reichenbach Centennial*. Wesley Salmon and Gedeon Wolters (eds.) Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1994, p. 182.

Второй базовый постулат СТО – «принцип относительности» - немедленно следует из того «факта», что эфира и, следовательно, абсолютной системы отсчета не существует. Эти два постулата – (I) принцип относительности и (II) принцип постоянства скорости света – вполне достаточны, согласно Эйнштейну, для создания электродинамики движущихся тел. Но для того, чтобы «теория, основанная на этих двух постулатах, не приводила к противоречивым следствиям, необходимо отказаться от принятого правила сложения скоростей»¹²⁰.

В самом деле, обратимся еще раз к «Автобиографическим Заметкам».

«Вновь и вновь я отчаянно пытался отыскать истинные законы при помощи *конструктивных* попыток, основанных на известных фактах. Но чем больше я старался, тем больше я приходил к убеждению, что только открытие *универсального формального принципа* может привести нас к достоверным результатам. *Образцом, который я видел перед собой, была термодинамика*»¹²¹.

Последний пункт нуждается в уточнении за счет обращения к основному для юного Эйнштейна источнику информации по истории физики – к маховской «Механике». Но в этой замечательной книге наиболее разработанный, образцовый пример взаимосвязи второго начала термодинамики и принципа экономии мышления – это мастерский анализ конструирования Стевином (1548-1620) теоретической схемы статики. В книге “*Нуропnemata Mathematica*” (Лейден, 1605) Стевин тщательно исследовал механические свойства наклонной плоскости. Его конечная цель состояла в нахождении универсального теоретического принципа, который можно было бы применить к частным случаям, допускающим количественную обработку. Для постановки своего мысленного эксперимента, необходимого для выдвижения общего принципа, Стевин конструирует идеальную модель, содержащую треугольную призму¹²².

На призме размещена бесконечной длины струна , к которой привязаны 14 одинаково весящих шаров, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга. (Струна может быть с успехом заменена бесконечной однородной цепью).

Данная цепь или находится в равновесии, или нет. В последнем случае цепь, в силу того, что условия события в ходе движения не изменяются, если она находится в движущемся состоянии, будет продолжать двигаться всегда. Иными словами, она должна представлять вечное движение, что с очевидностью представляется Стевину абсурдным. Поэтому реальным представляется только первый случай, и *цепь всегда остается в равновесии*.

¹²⁰ Einstein, Albert . Principe de relativite et ses consequences dans la physique modern// Archives des Sciences Physique et Naturelles, 1910, 29 :pp.125-44.

¹²¹ Einstein, Albert 1949a. Autobiographical Notes. In : Albert Einstein:Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, vols 1-2, pp. 1-14 , Evanston, IL, p.51

¹²² Стенин В.С. Теоретическое знание. М: Прогресс-Традиция, 2000.

В основной предпосылке, из которой исходит Стевин, что бесконечная цепь не движется, содержится только *чисто инстинктивное* знание. Он чувствует, и мы вместе с ним, что мы никогда не наблюдали что-либо похожее на движение вышеупомянутой цепи. Это убеждение обладает такой большой логической последовательностью, что мы принимаем выводы из него, относящиеся к закону равновесия на наклонной плоскости, даже не помывлив о возражении, даже *несмотря на то, что закон репрезентируется автором как непосредственное обобщение экспериментальных данных*. Мы не можем этому удивляться, когда замечаем, что результаты действительных экспериментов затемняются случайными обстоятельствами (трение, etc.), и что каждая гипотеза, относящаяся к определяющим условиям, может оказаться в данном случае ошибочной. В итоге Стевин приписывает инстинктивному знанию этого типа *большую достоверность*, чем простым, непосредственным, прямым наблюдениям!

И тогда мы вынуждены задать себе следующий вопрос: *откуда берется эта «высшая достоверность»?* Если мы вспомним, что и научные демонстрации, и научный критицизм могут в общем случае быть обязаны своему существованию осознанию индивидуальной погрешимости исследования, искомое объяснение может быть получено без особого труда. Мы начинаем отчетливо осознавать, что сами по себе ничего не внесли в создание этого «*Инстинктивного Знания*», и что оно существует объективно, как бы само по себе, независимо от нашего участия.

Согласно «*Механике*», стевиновский вывод является одним из редких показателей того, чем мы обладаем в истории генезиса механического мировоззрения, и этот вывод высвечивает сам процесс появления подлинно научного знания из преднаучного, инстинктивного. Маху ясно, что именно сплав сильнейшего инстинкта с величайшей способностью к абстрактному мышлению и делает ученого великим исследователем¹²³.

Но каким образом подобное «инстинктивное знание» возникает и каково его содержание?

- Все, что мы наблюдаем в природе, оставляет в наших идеях и восприятиях непонятый и непроанализированный нами отпечаток. В этом аккумулятивном таким образом опыте мы, с одной стороны, обладаем такой «кладовой», которая всегда под руками, но, с другой, – только самая малая часть ее воплощена в ясном и артикулированном виде. То обстоятельство, что нам гораздо легче апеллировать именно к этому опыту, чем к самой природе, и что опыт этот свободен, в указанном выше смысле, от всякой субъективности, *наделяет его особенно высокой значимостью*. При этом «специфическая особенность инстинктивного знания состоит в том, что оно по природе негативно»¹²⁴.

¹²³ Mach, Ernst. [1893]. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Developments*. La Salle: Open Court, 1999

¹²⁴ Mach, Ernst. [1893] *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Developments*. La Salle: Open Court, 1999, p.28.

Мы не столько можем предвидеть то, что должно случиться, сколько то, что случиться никак не может. Более того, утверждает Мах, другая специфическая черта, особенно значимая для философии науки, состоит в том, что способ рассуждения Стевина оказывает на нас такое большое влияние именно потому, что результат, к которому он приходит, содержит больше, чем предпосылка, из которой он исходит. Далее, часто в процессе развития науки случается так, что новый принцип, воспринимаемый неким исследователем в связи с фактом, не получает немедленного признания и не рассматривается в качестве общеизвестного и справедливого во всех случаях. Если же мы, сквозь все факты, *ясно и отчетливо* различаем принцип, который, даже не будучи доказанным, тем не менее известен в качестве *преобладающего*, то это значит, что мы гораздо далее продвинулись по направлению к созданию согласованной концепции природы, чем если бы мы имели какую-либо специфическую демонстрацию.

В итоге,

«В гораздо большей степени согласуется с *экономией мышления* и с эстетикой науки – прямо признать принцип (скажем, статических моментов) в качестве ключа к пониманию *всех* фактов какого-либо раздела научного знания, и *действительно* видеть, как он *пронизывает* все эти факты, чем чувствовать себя обязанным произвести неуклюжую и сомнительную дедукцию его из незабвенных предпосылок, которые обладают лишь тем преимуществом, что оказались известными нам ранее»¹²⁵.

Я полагаю, что *все рассмотренные выше рецепты Маха-Стевина были искусно использованы Эйнштейном при формулировке основного принципа СТО - принципа относительности.*

При этом мы должны прежде всего иметь в виду, что, в силу ультра-революционного и крайне спекулятивного характера гипотезы световых квантов, Эйнштейн не мог позволить себе исходить из этой гипотезы прямо и непосредственно. Поэтому он искусно использовал описанную выше технику Стевина-Маха для позиционирования своей «электродинамики движущихся тел» в *феноменологическом виде*. Мы должны особо отметить при этом негативный характер принципа относительности и ту изощренную манеру связи с экспериментами и наблюдениями, которая гораздо ближе к маховскому инстинктивному знанию, чем к грубому «бэконовскому» индуктивистскому способу вывода.

Обратимся к началу статьи по СТО:

«Примеры подобного рода, а также провал попыток обнаружения движения Земли по отношению к “светоносной среде”, ведут к *предположению*, что не только в механике, но также и в электродинамике эти явления *не имеют никаких* свойств, относящихся к понятию абсолютного покоя, но что во всех системах координат, для которых справедливы уравнения механики, также справедливы те же электродинамические и оптические законы, как уже было показано для величин первого порядка. Мы поднимем это предположение (содержание которого далее будет называться “принцип относительности”) до статуса постулата и введем дополнительно постулат, который только на первый взгляд может показаться несовместимым с первым, что в пустом пространстве

¹²⁵ Ibid, p.82

свет всегда распространяется с определенной скоростью V , которая не зависит от состояния движения излучающего тела»¹²⁶.

Именно апелляция к *инстинктивному знанию* легко объясняет тот факт, что статья 1905г. по СТО стоит особняком в мировой научной литературе по *полному отсутствию сносок*.

В силу того, что, в соответствии с «*Автобиографическими Заметками*», новая эйнштейновская теория была создана в результате встречи ньютоновской механики и максвелловской электродинамики, ее базис должен состоять из минимального количества двух постулатов – (I) первого выведенного из классической механики (принцип относительности¹²⁷, и (II) второго перенесенного из электродинамики Максвелла-Лоренца (принцип постоянства скорости света¹²⁸).

Именно это и было сделано в статье «*К электродинамике движущихся тел*» 1905d, опубликованной через несколько месяцев *после* фотонной статьи 1905a.

Эйнштейн вскрыл молчаливое допущение, лежавшее в основе закона сложения скоростей Галилея, согласно которому утверждения о времени, а также о размерах движущихся тел имеют смысл, независимый от состояния движения системы отсчета. Он показал, что совместное принятие «принципа относительности» (I) вместе с «принципом постоянства скорости света» (II) эквивалентно модификации понятия одновременности и запаздыванию часов в движущейся системе отсчета.

Важно отметить, что с самого начала Эйнштейн не был праздным мыслителем, размышляющим о сущности пространства и времени. Он *вынужден был* заняться подобными размышлениями в процессе согласования принципа относительности с принципом постоянства скорости света.

Но если все сказанное выше справедливо, неизбежно встает вопрос: *почему же в своей статье по СТО Эйнштейн не сослался на свою предыдущую статью по световым квантам?*

В письме, посланном в 1905г. своему другу Конраду Габихту, сопровождавшем отиски только что опубликованных в «*Annalen der Physik*» статей, Эйнштейн называет свою статью по световым квантам «очень революционной», в то время как статья по СТО удостоивается лишь скромной характеристики «интересной в своей кинематической части». Современники оценивали эти работы сходным образом : «революционный дух ощущается наиболее полно в теории излучения»¹²⁹.

¹²⁶ Einstein, Albert . Zur Elektrodynamik bewegter Körper// Annalen der Physik , **1905 d**, 17 : 891-921.English translation by Anna Beck in : The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909.Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, p.140

¹²⁷ Einstein, Albert. Relativity and the Problem of Space.In Ideas and Opinions, 360-370, 1954, New York : Crown Publishing Inc.,p.369

¹²⁸ Einstein, Albert [1940] The Fundamentals of Theoretical Physics, In: Ideas and Opinions,1954, pp. 323-330, New York : Crown Publishing Inc.,p.370.

¹²⁹ Mac Laren, Samuel. The Theory of Radiation //Philosophical Magazine, 1913, vol.25, January.

Поэтому ссылка в статье, вводящей действительно важные изменения, но преимущественно метафизического характера, на гипотезу, которая содержала поистине революционные изменения, к тому же очевидно противоречившие теории Максвелла, едва ли могла усилить аргументацию. Сам Эйнштейн на первом сольвеевском конгрессе вынужден был признать «временный характер этого понятия (световых квантов), который не кажется совместимым с экспериментально подтвержденными следствиями волновой теории»¹³⁰. На самом деле ситуация была еще хуже, поскольку тогда отсутствовали *прямые* экспериментальные подтверждения гипотезы световых квантов. Они появятся только в 1923г. (эффект Комптона). Поэтому светила немецкой науки, при избрании Эйнштейна в берлинскую академию наук, вынуждены были оговориться: «то, что он иногда попадал в своих спекуляциях мимо цели, как, например, в случае гипотезы световых квантов, не должно слишком сильно ставиться ему в вину»¹³¹.

В то же самое время статья по СТО характеризовалась академиками как «знаменитая работа», представлявшая его *основной* вклад в науку.

Но ситуация неопределенности не могла длиться долго. Эйнштейн *вынужден* был раскрыть связь между 1905a и 1905d четырьмя годами спустя. В 1909г., в Зальцбурге, он сделал исторический доклад на 81 заседании Общества Немецких Естествоиспытателей и Физиологов под многообещающим заголовком «*О развитии наших взглядов на природу и структуру излучения*». Этот доклад представлял собой практически первую попытку Эйнштейна проанализировать все свои работы в целом. Доклад начинается с краткого изложения теории светоносного эфира, заканчивающегося многозначительной фразой: «Тем не менее, сегодня мы должны считать гипотезу эфира *устаревшей*».

Почему? – Подчеркнем, что для ответа на этот вопрос Эйнштейн обращается не к хорошо известным экспериментам Майкельсона и Морли или Физо, а к тому, что

«невозможно отрицать, что существует обширная группа фактов, относящихся к излучению, которые показывают, что свет обладает определенными фундаментальными свойствами, которые гораздо лучше могут быть поняты с точки зрения ньютоновской эмиссионной теории света, чем с точки зрения волновой теории. Поэтому я считаю, что следующая фаза развития теоретической физики принесет нам такую теорию света, которая будет слиянием волновой и эмиссионной теорий света»¹³².

¹³⁰ Цит. по: Pais, Abraham . Einstein and the Quantum Theory //Reviews of Modern Physics, 1979, 51:863-914,p.884

¹³¹ Einstein, Albert . The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, p.377

¹³² Einstein, Albert. Uber die Entwicklung unserer Anschauungen uber das Wesen und die Konstitution der Strahlung// Physikalische Zeitschrift,1909, 10 :817-25,p.379.

5.4. Теоретико-методологические предпосылки работ 1905.

Сказанное выше отнюдь не означает, что к 1905г. Эйнштейн стал закоренелым махистом, неспособным черпать из других эпистемологических источников. Вовсе нет. Расхождения во мнениях с Махом проявлялись не только в успешном развитии атомной теории при рассмотрении броуновского движения [22], но и в не менее упорной разработке сходной идеи «световых атомов» - фотонов (1905а). Для более глубокого понимания причин этих расхождений необходимо оценить *действительную* философскую позицию Эйнштейна. Согласно мнениям многих специалистов, последняя может быть названа «эклектизмом», и мы не можем проигнорировать подтверждающий эту позицию знаменитый эйнштейновский отрывок из «*Ответа на критику*»¹³³, уже процитированный нами.

С нашей точки зрения, более точно эйнштейновская философия науки может быть охарактеризована как своеобразный сплав элементов, позаимствованных из таких разных источников, как эмпиризм (и интуитивизм!) Маха, конвенционализм Дюгема и неокантианство¹³⁴. Последнее и явилось той эпистемологической основой, сделавшей этот сплав возможным.

Неслучайно выдвинутая в 1905г. гипотеза световых квантов была *конструктивистской* моделью излучения; и позже Эйнштейн следующим образом отзывался о противоречивом творческом наследии Маха:

«Он [Мах] не рассматривал в правильном свете *существенно конструктивную* и спекулятивную природу как всего мышления, так и особенно мышления научного; из-за этого он осуждал теорию именно в тех пунктах, в которых *конструктивно-спекулятивный* характер особенно бесспорен, как это имело место в кинетической теории атомов»¹³⁵.

Конструктивистский характер гипотезы световых квантов значительно сближает взгляды Эйнштейна с кантовской эпистемологией, что, впрочем, не раз отмечалось многими «эйнштейноведами»¹³⁶.

¹³³ Einstein, Albert. Remarks Concerning the Essays Brought together in this Co-operative Volume. In : Albert Einstein: Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949b, vols 1-2, 665-688, Evanston, IL, p.684.

¹³⁴ Howard, Don . Einstein, Kant and the Origins of Logical Positivism. – In: Language, Logic and the Structure of Scientific Theories : The Carnap -Reichenbach Centennial. Wesley Salmon and Gedeon Wolters (eds.) Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1994, 45-105.

¹³⁵ Einstein, Albert . Autobiographical Notes. In : Albert Einstein: Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949a, vols 1-2, pp. 1-14 , Evanston, IL,

¹³⁶ Lenzen, Victor F. Einstein's Theory of Knowledge. In: Albert Einstein: Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949, vols 1-2, 357-384, Evanston, IL, p.380

Northrop, F.S.C. Einstein's Conception of Science. In: Albert Einstein: Philosopher-Scientist, ed. P.A. Schilpp, 1949, vols 1-2, 387-408. Evanston, IL, p.390. Van Dongen, Jeroen. Einstein's Unification. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, p.49.

Эйнштейн многократно подчеркивал, что основные понятия науки являются «свободными творениями человеческого ума». В этом отношении взгляды Эйнштейна с очевидностью близки к взглядам Канта.

Согласно кантовской эпистемологии, важнейшая особенность математического познания, лежащего в основе теоретического естествознания, - в том, что математика развивается за счет *конструирования* понятий на основе тесно связанного с каждым понятием *интуитивного* его содержания. Последнее не сводится только к аналитическим компонентам, являясь по существу синтетическим. Как ярко описал эту особенность выросший в неокантианской традиции Людвиг Витгенштейн, «математик не открывает, а изобретает».

Кантианский тезис об интуитивном характере математики означает сведение математики к оперированию такими объектами, которые могут быть сконструированы¹³⁷. В этом смысле абстрактные объекты теории конституируются законами этой теории. А объективность научного знания связана не столько с существованием самих вещей, сколько с *объективностью отношений между ними*.

Соответственно, в работе 1905а, конструируя математический абстрактный объект «световой квант» из фундаментальных теоретических схем максвелловской электродинамики и статистической термодинамики, Эйнштейн был озабочен отнюдь не поисками «сущностей» радиационных феноменов. Его в гораздо большей степени интересовала проблема *согласования* основных исследовательских традиций классической физики, т.е. максвелловской электродинамики, статистической механики и термодинамики. Вспомним, как в своем знаменитом коллективном ходатайстве о выдвижении Эйнштейна в прусскую академию наук Макс Планк, Вальтер Нернст и др. выдающиеся исследователи подчеркивали, что

«Эйнштейн обладает особым талантом проникновения в суть выдвигаемых другими учеными новых идей, и поразительно точной оценки их *отношения друг к другу* и к опыту»¹³⁸ (Дос. № 44).

Хорошо известно, что эволюция философских идей Эйнштейна после создания ОТО (1915) проходила в направлении отхода от юмовского и махистского наивного эмпиризма в сторону изоциренной нео-кантианской философской традиции, представленной Вейлем, Эддингтоном, Кассирером, Гуссерлем и др. и математической спекулятивной методологии, нашедшей свое выражение в ряде теорий объединения. Но мы и не пытаемся здесь утверждать, что в 1905г. Эйнштейн был законченным (нео) кантианцем, упорно пытавшимся внедрить абстрактные и туманные положения «*Критики чистого разума*» в свою повседневную исследовательскую

¹³⁷ Кант И. Критика чистого разума / Пер. с нем. Н.Лосского. М.: Эксмо, 2006.

¹³⁸ Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 1. The Early Years, 1879-1902. John Stachel et al. (eds.). Princeton: Princeton University Press, 1987, p.338

практику. Тем не менее, мы утверждаем, что именно кантианские корни поздней эйнштейновской методологии лежат в его плодотворных попытках примирить в 1905г. основные исследовательские традиции классической физики.

Глава 5. Гепезис общей теории относительности.

Факт эквивалентности инертной и тяготеющей масс таким образом совершенно естественно ведет к признанию, что базисное требование специальной теории относительности (инвариантность законов относительно преобразований Лоренца) слишком узко, т.е. что инвариантность законов должна быть постулирована также по отношению к нелинейным преобразованиям координат в четырехмерном континууме.

Альберт Эйнштейн. Автобиография

После создания в 1905г. специальной теории относительности (СТО) Эйнштейн *вынужден* был пойти дальше и создать в 1913-1915гг. общую теорию относительности (ОТО). Основная причина, заставившая его это сделать, состояла отнюдь не в появлении новых опытных данных. Напротив, она состояла в том, что один из основных выводов СТО – о том, что никакое взаимодействие не может передаваться со скоростью, большей чем скорость света, - грубо **противоречил** принципу дальнего действия, лежавшему в основе ньютоновской теории всемирного тяготения. В самом деле, вспомним, что в теории Ньютона считалось, что скорость гравитационного взаимодействия бесконечна, т.е. тяготение передается мгновенно. О событии, происшедшем в любом месте Вселенной, в тот же момент узнают во всех частях Вселенной, удаленных друг от друга на миллиарды и триллионы километров.

Эйнштейн понял, что для устранения этого противоречия надо привести теорию тяготения в соответствие с СТО, т.е. надо изменить теорию тяготения так, чтобы она основывалась не на *принципе дальнего действия*, а на *принципе близкого действия*. Иначе говоря, надо, по аналогии с электродинамикой, ввести понятие «*гравитационное поле*»¹³⁹. Ведь в мире электричества и магнетизма металлическая скрепка притягивается к магниту не потому, что магнит сразу и непосредственно на нее воздействует, а потому, что магнит сначала изменяет состояние среды вокруг себя, а уже потом это изменение воздействует на металлическую скрепку.

¹³⁹ Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 5. The Swiss Years: Correspondence, 1902 – 1914. Martin J. Klein et al., eds. Princeton: Princeton University Press, 1993.

Аналогично, - рассуждал Эйнштейн, - камень падает на Землю не потому, что Земля непосредственно его к себе «притягивает», а потому, что Земля создает вокруг себя в пустоте «гравитационное поле», и уже оно непосредственно воздействует на камень в точке соприкосновения с ним. Также как и электромагнитное, гравитационное поле должно распространяться с конечной скоростью от одной точки к другой.

Так что если некто в Агрызе вращает вокруг себя массивной дубиной, наводя ужас на местное население, то юпитерский ОМОН, например, об этом узнает, к счастью, не сразу, а только через 5 секунд, необходимых для того, чтобы сферические **гравитацпопные волпы** дошли от поверхности Земли до поверхности планеты Юпитер.

Но электрические и магнитные поля описываются **векторами**. Скажем, вектор напряженности электрического поля **E** характеризуется в каждой точке не только величиной, но и определенным направлением. Какими же математическими величинами должно описываться гравитационное поле, в частности, гравитационная волна, распространяющаяся от одной точки к другой в пустом пространстве?

Для ответа на этот вопрос Эйнштейн обратил внимание на одно исключительно важное обстоятельство, которому до него значения не придавалось. В основе ньютоновской механики лежит т.н. *Слабый Принцип Эквивалентности*, постулирующий (но не объясняющий) равенство инертной и гравитационной масс.

В самом деле, рассмотрим движение камня, падающего на Землю (для простоты рассуждений предположим, что падение камня происходит в пустоте, т.е. пренебрежем сопротивлением воздуха).

С одной стороны, это движение описывается вторым законом Ньютона $F = m_i a$, где m_i - т.н. «инертная масса», являющаяся мерой инертности тела, т.е. мерой оказывать сопротивление внешнему воздействию.

С другой стороны, сила, с которой камень, согласно закону всемирного тяготения, взаимодействует с Землей, описывается выражением $F = \gamma m_r M / r^2$, где γ - т.н. «постоянная тяготения», M - масса Земли, r - расстояние между центром Земли и камнем, а m_r - т.н. «гравитационная масса» камня.

$$\text{Поэтому } F = m_i a = \gamma m_r M / r^2$$

Ньютон просто приравнял m_i и m_g , опираясь на опыты Х. Гюйгенса с маятниками [впоследствии опыты Этвеша (Будапешт) и Брагинского (Москва, МГУ) с очень большой точностью подтвердили справедливость этого положения]. Отсюда вытекало, что ускорение свободного падения камня в гравитационном поле Земли $a = \gamma M / r^2$ не зависело ни от массы камня, ни от его формы и структуры.

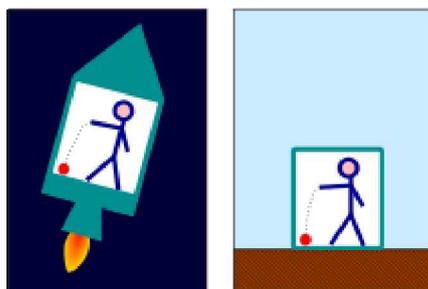
Все тела должны падать в гравитационном поле Земли с одинаковым ускорением, не зависящим от природы тел.

Эйнштейн понял, что факт равенства инертной и гравитационной масс неслучаен. Он свидетельствует о *тождестве гравитации и инерции*. Этот факт указывает на своеобразие гравитационного поля: в отличие от электромагнитного, оно одинаково действует на все «гравитационные заряды». Он является выражением более глубокого принципа -

– *Сильного Принципа Эквивалентности*, - первого принципа который Эйнштейн положил в основание ОТО

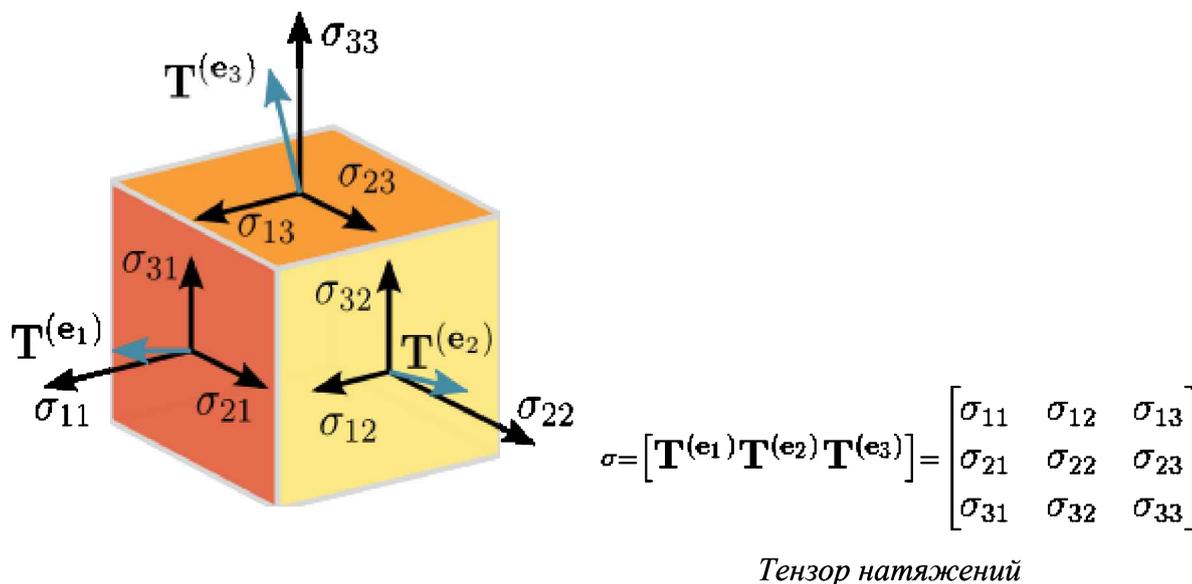
(I) гравитация и ускорение в пределах, обусловленных особенностями системы отсчета, неразличимы.

Наблюдатель, находящийся в наглухо заколоченном лифте, какие бы гравитационные или электромагнитные опыты он не ставил, не сможет отличить состояние равноускоренного в пустоте вверх лифта, от состояния лифта, висящего на веревке в однородном гравитационном поле. Скажем, выпущенный им из рук пробный шарик будет двигаться с соответствующим ускорением по отношению к днищу лифта вне зависимости от того, покоится ли лифт в гравитационном поле Земли, или движется с ускорением вверх в пустоте.



(II) Второй основополагающий принцип ОТО – принцип ковариантности – гласит, что законы физики должны быть сформулированы так, чтобы одинаково выглядеть не только в инерциальных, но и в неинерциальных (ускоренных) системах отсчета. Этот принцип является разумным обобщением принципа относительности и справедливо требует, чтобы фундаментальные уравнения описывали отношения в общем случае между тензорными величинами в четырехмерном пространстве-времени.

Математической величиной, описывающей напряженности гравитационной волны, движущейся в пустом пространстве, должен быть **тензор** – математическая величина, обобщающая понятие вектора и характеризуемая в каждой точке пространства-времени не одним направлением, а несколькими. Если вектор – это набор палок, распределенных в пространстве так, что каждая палка указывает в своей точке определенное направление, то тензор – это набор ежей, размещенных в каждой точке пространства так, что щетина каждого задает определенное множество направлений. В общем случае щетина может вырастать от точки к точке, а направления, которые она указывает, могут, конечно, изменяться по соответствующему закону.



Этот закон и сформулировали в 1914г. Альберт Эйнштейн и его друг и коллега Марсель Гроссман в виде т.н. «уравнений Эйнштейна» :

$$R_{ij} - (R/2) g_{ij} = \chi T_{ij} ,$$

где $\chi = \text{const}$, i и j – не переменные, а **индексы**, которые пробегает значения 1,2,3,4, соответствующие координатам x, y, z, t .

g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}
g_{21}	g_{22}	g_{23}	g_{24}
g_{31}	g_{32}	g_{33}	g_{34}
g_{41}	g_{42}	g_{43}	g_{44}

метрический тензор

energy density		energy flux		
T_{00}	T_{01}	T_{02}	T_{03}	
T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	shear stress
T_{20}	T_{21}	T_{22}	T_{23}	
T_{30}	T_{31}	T_{32}	T_{33}	pressure
momentum density		momentum flux		

тензор энергии-импульса

Фактически речь идет о 16 уравнениях, описывающих связи и отношения между такими величинами как тензор Римана R_{ij} , тензор энергии – импульса T_{ij} и метрический тензор g_{ij} . Тензор Римана R_{ij} - это матрица (таблица) с размерностью 4 x 4, содержащая 16 элементов, каждый из которых описывает соответствующую проекцию напряженности гравитационного поля на оси xx , $xу$, tx и т.д., а g_{ij} – это т.н. «метрический тензор», характеризующий геометрию пространства-времени. В частности, для плоского, неискривленного пространства-времени этот тензор имеет особенно простой вид. Это – таблица, матрица, состоящая из 16 компонентов. Отличны от нуля только компоненты, расположенные по диагонали: 1,1,1, -1.

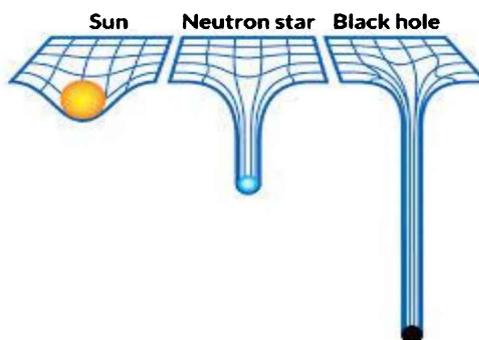
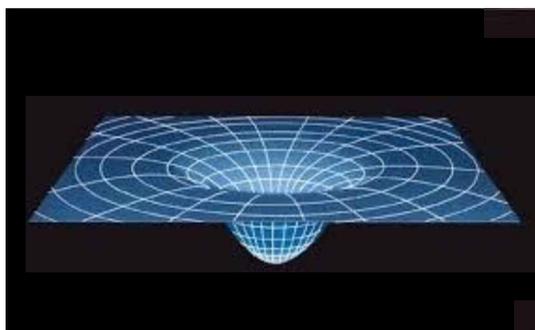
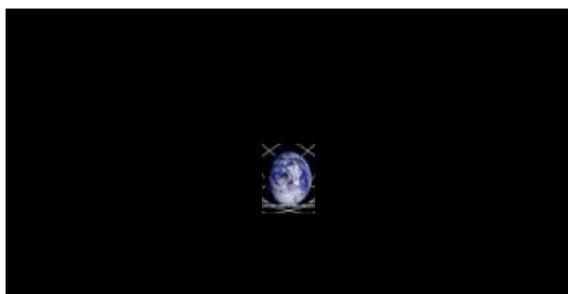
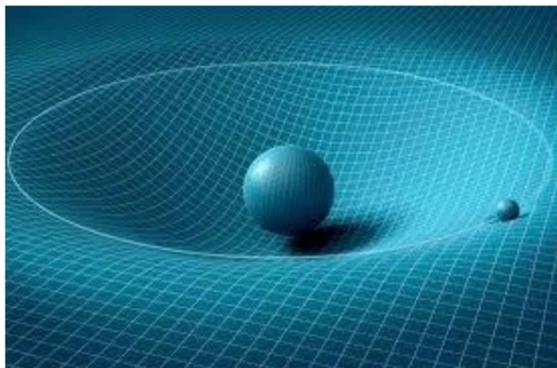
И, наконец, T_{ij} – это т.н. «тензор энергии-импульса» - матрица, описывающая распределение в пространстве и во времени источников гравитационного поля – масс и энергий, их плотностей, скоростей и давлений.

Несмотря на чрезвычайную математическую сложность уравнений Эйнштейна (их общее решение так до сих пор и не получено), смысл их достаточно прост. Он исходит из тривиального факта, что «гравитация есть везде». Она должна быть связана с другими свойствами материи, которые тоже есть везде – с пространством и временем. Поэтому связь гравитации, пространства и времени сводится к одной фразе:

гравитация есть искривление пространства и времени.

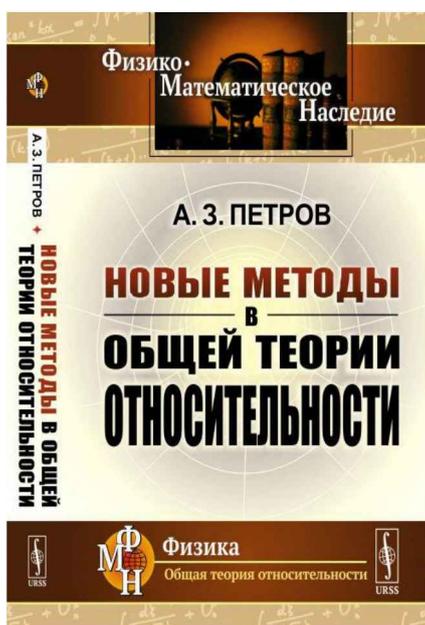
Образно эту идею можно представить так. Вообразите большую четырехугольную раму, на которую натянут большой кусок тонкой резины (которую хулиганистые пацаны примеияли и применяют в своих рогатках, эффективно использующихся не только против кошек, но и против школьных училок). Эта рама расположена горизонтальным образом так, что напоминает стол, при помощи четырех ножек прикрепленный к полу.

Если в центр этой резиновой поверхности мы поместим арбуз, то эта поверхность искривится. Если теперь в одном из ее концов мы поместим теннисный шарик, то он не будет оставаться на месте и под действием «силы» - искривления резиновой поверхности – он скатится к арбузу. Арбуз – это Земля, шарик – это камень, а искривление резиновой поверхности – это «сила», которая заставляет камень падать на Землю.

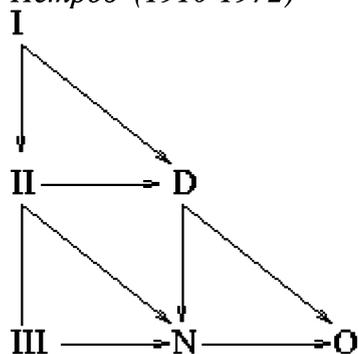




Ученик Лобачевского, проф. казанского госуниверситета Петр Алексеевич Широков (1895-1944)



Ученик П.А. Широкова, лауреат ленинской премии, проф., дфмн, основатель кафедры теории относительности и гравитации казанского госуниверситета им. В.И.Ленина Алексей Зиновьевич Петров (1910-1972)



Глава 6. Генезис общей теории относительности как синтез теоретических схем Абрагама,

Нордстрема и Эйнштейна.

Прочти статьи! Они несут спасение от несчастий. Самая радостная сторона – это согласие между движением перигелия и общей ковариантностью, но тем не менее самая потрясающая – то обстоятельство, что ньютоновская теория поля неверна уже в первом приближении

Альберт Эйнштейн. Из письма (1915) Микеле Бессо

Резюме.

Цель данной главы состоит в уточнении и соответствующей корректировке широко распространенной точки зрения на генезис и развитие общей теории относительности (ОТО) - на основе учета современной практики функционирования ОТО, ряда выявленных недавно историко-научных данных и определенных аргументов, относящихся к современной философии и социологии науки. В данном приложении генезис и становление ОТО рассматриваются в свете эпистемологической модели смены развитых научных теорий, основанной на рассмотрении встречи и взаимодействия нескольких «старых» развитых теорий. Приводятся доводы в поддержку тезиса, согласно которому становление ОТО главным образом детерминировалось противоречиями между такими исследовательскими традициями, как ньютоновская теория тяготения и специальная теория относительности. Встреча этих традиций и их конструктивное взаимодействие привели к созданию целой совокупности гибридных теоретических моделей. Постепенно, за счет устранения противоречий между этими моделями и их поэтапного согласования, хаотическая совокупность была приведена в систему, ядром которой является фундаментальная теоретическая схема ОТО, отношения между абстрактными объектами которой описываются уравнениями Эйнштейна.. Утверждается, что одной из причин убедительной победы программы Эйнштейна над достаточно успешно конкурировавшими с ней на первых этапах исследовательскими программами Абрагама и Нордстрема был синтетический характер релятивистской программы, воплощенный в т.н. «принципе эквивалентности». В результате согласования и успешного объединения «физического» и «математического» подходов к конструированию глобальной теории, воплощенных в гибридных моделях Абрагама, Нордстрема и Эйнштейна, Эйнштейн смог успешно теоретически воспроизвести аномальное смещение перигелия планеты Меркурий.

6.1. Введение. Носталгия проблемы.

Известно, что создание Эйнштейном общей теории относительности (ОТО) сопровождалось выдвижением ее альтернативных версий Гуннаром Нордстремом¹⁴⁰, Максом Абрагамом¹⁴¹, Густавом Ми и др. До сих пор их работы рассматриваются, как правило, лишь как причудливые фантазии, которые в лучшем случае инициировали дискуссии вокруг ОТО, способствуя тем самым раскрытию ее превосходства. Неслучайно сложилась точка зрения, согласно которой в процессе создания ОТО Эйнштейн *категорически отверг* лоренц-инвариантные скалярные и векторные гравитационные теории.

Тем не менее, некоторые вскрывшиеся в последнее время историко-научные данные¹⁴² позволяют поставить эту точку зрения под сомнение. Начнем с того, что переписка Эйнштейна и Нордстрема свидетельствует о том, что Эйнштейн принимал самое живое участие в создании нордстремовских скалярных гравитационных теорий. Эти теории разрабатывались за счет постоянного обмена письмами между Эйнштейном и Нордстремом; причем часто именно Эйнштейн выдвигал те идеи, которые играли для развития теории Нордстрема решающую роль. Поэтому эта теория должна была бы называться «теория Эйнштейна-Нордстрема».

Далее, следствия «Наброска» (“Entwurf” - предварительного метрического варианта ОТО, 1913) и ОТО (1915) оказались полностью совпадающими с выводами из теорий Нордстрема и Абрагама в ряде весьма важных частных случаев. Более того, переход от ОТО к ньютоновской теории гравитации¹⁴³ основывается на допущении, для слабых и стационарных гравитационных полей, что гравитационное поле описывается скаляром в плоском пространстве-времени, т.е. на редукции к теории Нордстрема.

Аналогично, т.н. «линейное приближение в ОТО»¹⁴⁴, которое до сих пор активно используется для описания распространения и детектирования гравитационных волн (см., например, исследования по проекту LIGO, проведенные в 2015-2017 гг.), основывается на переходе к такой теории гравитации, в которой гравитационная волна, в полной аналогии с классической электродинамикой, описывается 4-вектором в плоском пространстве-времени, т.е. фактически на

¹⁴⁰ Nordström, Gunnar. Relativitätsprinzip und Gravitation, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.1126.

¹⁴¹ Abraham, Max. “Das Elementargesetz der Gravitation“, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.4.

¹⁴² Norton, John D. “Einstein, Nordström and the Early Demise of Scalar, Lorentz Covariant Theories of Gravitation”, *Archive for the History of Exact Sciences*, 1992, vol.45: pp.17-94; Renn, Jürgen and Sauer, Tilman. Pathways out of Classical Physics: Einstein’s Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations”, in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*. 2007, Vol. 1. Dordrecht : Springer, pp. 113-312; Renn, Jürgen. “The summit almost scaled: Max Abraham as a pioneer of a relativistic theories of gravitation”, in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*. 2007, Vol.3. Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory and Astronomy. Dordrecht : Springer, pp. 305-330.

¹⁴³ См., например, Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.

¹⁴⁴ Einstein, Albert. “Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation“, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1916, vol.1, pp.688-696.

переходе к векторной теории Абрагама¹⁴⁵. Но особенно важно, что первоначальный подход Эйнштейна к созданию ОТО, - с одной стороны, - и подходы Абрагама и Нордстрема, - с другой, - были во многих отношениях **дополнительны**.

Например, эйнштейновская теория статического гравитационного поля¹⁴⁶ основывалась на существенно физических предпосылках, обусловленных принципом эквивалентности, в то время как теории Абрагама исходили из сугубо математических соображений, относящихся к формализму Г. Минковского. «Цюрихская Тетрадь», использовавшаяся Эйнштейном в качестве черновика при создании «Наброска» (т.е. с середины 1912г. до начала 1913г.), свидетельствует о том, что Альберт Эйнштейн пытался постоянно продвигаться вперед на основе т.н. «двойной стратегии», которая охватывала как физические, так и математические подходы к нахождению конечных полевых уравнений¹⁴⁷. Эта стратегия должна была в конечном счете дать ответ на вопрос: каким должно быть конечное выражение для математической величины $X_{\mu\nu}$, образованной комбинацией метрического тензора $g_{\mu\nu}$ и его первой и второй производных, входящих в уравнения поля вида $X_{\mu\nu} = k T_{\mu\nu}$ ($k=\text{const}$)? Эта стратегия предполагала, чтобы Эйнштейн начинал с множества условий, имеющих сугубо физический характер. (ньютоновский предел + закон сохранения энергии и импульса).

С другой стороны, нисходящий «сверху вниз» (ван Донген) математический подход коренился в принципе общей ковариантности. Дуальный подход предполагал обязательное использование обоих подходов: «это был итеративный процесс, который начинался с одного подхода, и последующей проверки полученных результатов при помощи другого подхода»¹⁴⁸.

Сначала физический подход доминировал, - и это привело к «Наброску», но затем верх одержал математический подход, и это привело в 1915г. к созданию полноценной теории - ОТО. Но важно то, что эти «физическая» и «математическая» стратегии, колебания между которыми привели к созданию и «Наброска», и ОТО, были укоренены в двух принципиально различных исследовательских традициях¹⁴⁹, сложившихся начиная с 1907г.

¹⁴⁵ Abraham, Max. "Neuere Gravitationstheories", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1915, pp. 470-520.

¹⁴⁶ Einstein, Albert. "Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes". *Annalen der Physik*, 1912, vol.38, pp.443-458.

¹⁴⁷ Janssen, Michel and Renn, Jürgen. "Untying the knot: how Einstein found his way back to field equations discarded in the Zurich notebook", in J. Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*, vols.1-2. Dordrecht : Springer, 2007, pp.838-926; Renn, Jürgen and Sauer, Tilman. Pathways out of Classical Physics: Einstein's Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations", in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*, 2007, Vol. 1. Dordrecht : Springer , pp. 113-312; Van Dongen, Jeroen, *Einstein's Unification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

¹⁴⁸ Van Dongen, Jeroen, *Einstein's Unification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, p.11

¹⁴⁹ Renn, Jürgen and Sauer, Tilman. Pathways out of Classical Physics: Einstein's Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations", in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*. 2007, Vol. 1. Dordrecht : Springer , p. 125.

Далее, динамика релятивистской теории гравитации определялась в основном *внутренними противоречиями* системы научного знания в гораздо большей мере, чем новыми эмпирическими данными, которые играли подчиненную роль¹⁵⁰.

Упомянутые особенности генезиса, развития и функционирования ОТО, и, особенно, современная практика ее применения приводят к следующим заключениям.

(а) Отношения между ОТО и ее конкурентами были в 1907-1915гг. слишком сложными для того, чтобы описывать их в полярных категориях «истина-заблуждение», так что на самом деле имели место не только конкуренция, но и взаимопроникновение разных «парадигм» друг в друга.

(б) Эйнштейновская ОТО была лучше своих соперниц хотя бы потому, что она уже содержала их в «снятом», существенно преобразованном виде. Именно таким образом ОТО включает в себя ньютоновскую теорию гравитации и специальную теорию относительности, или максвелловская электродинамика содержит в себе в качестве своих частных теоретических схем теоретические схемы Кулона, Ампера, Био-Саара и др.

(в) Эйнштейн смог завершить согласование знаний о гравитации и инерции, дававшихся классической механикой, со знанием о структуре пространства-времени, задававшимся специальной теорией относительности, только после того, как он совершил переход от «Наброска» к ОТО. Именно благодаря объединению «физического» и «математического» подходов, воплощенных в гибридных моделях теорий Абрагама, Эйнштейна и Нордстрема, Эйнштейн смог, наконец, объяснить аномальное смещение перигелия Меркурия.

Поэтому *цель* данного приложения – усовершенствовать общепринятую точку зрения на генезис и становление ОТО и привести ее в соответствие с указанными выше историко-научными данными, философскими аргументами и современной практикой функционирования этой теории.

Основная идея приложения состоит в том, что одна из основных причин победы ОТО над конкурирующими программами Абрагама и Нордстрема состоит в *синтетическом* характере исследовательской программы Эйнштейна. Эта программа вытеснила конкурентов потому, что она искусно ассимилировала здоровые элементы программы Нордстрема, равно как и разумные предположения программы Абрагама. Помимо прочего, убедительная победа эйнштейновской программы стала возможной также и потому, что Эйнштейн выдвинул, в качестве базисного синтетического принципа, т.н. «принцип эквивалентности», радикально отличавшийся от конкурировавших подходов открытым, гибким и регулятивным характером.

¹⁵⁰ Renn, Jürgen. “Classical Physics in Disarray. The Emergence of the Riddle of Gravitation”, in Jürgen’ Renn, ed.. *The Genesis of General Relativity*.2007, vols. 1-2, Dordrecht : Springer, pp.21-84.

Данное исследование основано на простой эпистемологической модели смены теорий, которая соответствует некоторым современным достижениям философии¹⁵¹ и истории науки и описывает структуру и динамику развитых физических теорий. Эта модель образует сердцевину настоящего исследования, поскольку она исходит из предположения, что история физики развивается не за счет создания *ex nihilo* (из ничего) новых парадигм, но напротив, за счет долговременного и тернистого процесса взаимного согласования, взаимной «притирки», глубокого взаимопроникновения и сложного «перекручивания» старых исследовательских традиций¹⁵².

6.2. Конструирование гибридных моделей при помощи принципа эквивалентности.

Создание специальной теории относительности (СТО) и явные противоречия между ньютоновской теорией тяготения и СТО поставило Эйнштейна и его современников перед проблемой создания релятивистской теории гравитации. Самое значительное противоречие между этими теориями состояло в том, что в ньютоновской теории тяготения скорость распространения гравитационных взаимодействий была бесконечной. С другой стороны, СТО запрещает распространение сигналов со скоростями, большими чем скорость света. Поэтому уже в 1907г., в обзоре «О принципе относительности и его следствиях» Эйнштейн заложил концептуальные основания релятивистской теории гравитации¹⁵³. В пятом разделе обзора он впервые сформулировал свой «принцип эквивалентности». Значимость последнего для создания ОТО состоит в том, что «это предположение распространяет принцип относительности на равномерно ускоренное поступательное движение системы отсчета. *Эвристическое значение* этого предположения основывается на том факте, что оно допускает замену однородного гравитационного поля равномерно ускоренной системой отсчета, что позволяет сделать последний случай доступным теоретическому исследованию»¹⁵⁴.

В первую очередь Эйнштейн был заинтересован не в онтологическом, метафизическом содержании этого принципа, которое позволило бы ему возвести принцип в ранг некоего Основного Закона Природы. (Известно¹⁵⁵, что в 1907г. Эйнштейн не знал об экспериментах Этвеша по установлению эквивалентности инертной и гравитационной масс; более того, А. Папапетру в 1951г. показал, что в ОТО вращающееся тело падает по законам, отличающимся от законов падения

¹⁵¹ Стенин В.С. Теоретическое знание. – М.: Наука, 2000.

¹⁵² Nugayev, Rinat. *Reconstruction of Mature Theory Change: A Theory-Change Model*. Frankfurt am Main: Peter Lang, 1999.

¹⁵³ Einstein, Albert. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907, vol.4, pp.411-462. Translated by Anna Beck in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol.2, *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, pp.252-311.

¹⁵⁴ Einstein, Albert. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907, vol.4, pp.411-462. Translated by Anna Beck in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol.2, *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, p.302

¹⁵⁵ Norton, John D. “Einstein, Nordström and the Early Demise of Scalar, Lorentz Covariant Theories of Gravitation”, *Archive for the History of Exact Sciences*, 1992, vol.45: pp.17-94

невращающихся тел).

В своих воспоминаниях об изобретении принципа эквивалентности Эйнштейн обращается прежде всего к своему собственному опыту создания СТО, как об этом, например, ясно говорится в книге Пайса¹⁵⁶, написанной на основе бесед с создателем СТО и ОТО.

Очевидно, что для Эйнштейна было вполне рационально в 1907г. еще раз использовать опыт, приобретенный в 1905г. И в СТО, и в ОТО он высматривал *эвристические компоненты* неких общих принципов¹⁵⁷. В частности, в теории тяготения он с самого начала пытался рассматривать явления гравитации и инерции с некоей единой точки зрения¹⁵⁸.

Именно последовательное применение принципа эквивалентности позволяло изобрести последовательность гибридных моделей, объединявших СТО и ньютоновскую теорию гравитации. Для Эйнштейна принцип эквивалентности являлся не столько Законом Природы, сколько образцом, паттерном, **шаблоном** конструирования теорий гравитации. Он, в частности, позволял исследовать специальные виды гравитационных полей при помощи изучения ускоренного движения. И до 1911г. Эйнштейн был в основном занят предварительным рассмотрением, при помощи принципа эквивалентности, явлений, предвосхищающих глобальную теорию гравитации, но без серьезных попыток ее конструирования. Но только в начале 1912г. он был поставлен перед вызовом провоцирующих публикаций Макса Абрагама и вынужден пойти дальше и разработать теорию статического гравитационного поля¹⁵⁹.

Для частного случая постоянного ускорения Эйнштейн смог отождествить инерциальные эффекты со скалярным ньютоновским гравитационным полем; это позволяло надеяться на то, что подобные рассуждения помогут и в более общих случаях – при обобщении понятия гравитационного поля. Парадигмой обобщения служила релятивистская электродинамика. Именно СТО «объединяла» электричество и магнетизм за счет рассмотрения электрического поля **E** и магнитного поля **B** в качестве компонент единого тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$. Соответственно, для Эйнштейна самым важным достижением ОТО оказалась не пресловутая «геометризация» гравитационного поля, но «объединение» гравитации и инерции при помощи метрического тензора $g_{\mu\nu}$ » (M.Janssen, *ibid*). Между 1907 и 1911гг. Эйнштейн изобретательно применял принцип эквивалентности для получения некоторых важных следствий своей еще не созданной релятивистской теории гравитации. Заметим, что в этих случаях он следовал по пути СТО.

¹⁵⁶ Pais, Abraham. *Subtle is the Lord. The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982, p.178

¹⁵⁷ Ruyckman, Thomas. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. Oxford: Oxford University Press, 2005..

¹⁵⁸ Janssen, Michel . “The twins and the bucket: How Einstein made gravity rather than motion relative in general relativity”, *Studies in History and Philosophy of Science, Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2012, vol.43 , p. 162.

¹⁵⁹ Norton, John D. “What was Einstein’s Principle of Equivalence Principle?” In: *Einstein’s Studies*, 1986, vol.1

Действительно, создание новой теории началось с конструирования гибридных объектов, т.е. введения соотношения между массой и энергией в теорию гравитации. Одно из важных следствий СТО состояло в принципе эквивалентности энергии и массы. Но, согласно Эйнштейну,

«этот результат ставит вопрос о том, обладает ли энергия также и тяжелой (гравитационной) массой. Дальнейший вопрос, который закономерно из этого следует, состоит в том, ограничено ли применение принципа относительности случаями неускоренных движущихся систем»¹⁶⁰

С самого начала Эйнштейн пытался найти такую теорию гравитации, которая охватывала воедино знание о гравитации и инерции, представленное в классической механике, и знание о структуре пространства и времени, представленное в СТО. Однако введение гибридного объекта – введение гравитационной и вместе с тем инертной массы – привело к проникновению методов СТО в ньютоновскую теорию гравитации и к обратному проникновению методов ньютоновской теории гравитации в СТО. В итоге обе теории были как бы «взорваны изнутри», и в них начались соответствующие изменения. Эти изменения выразились в появлении соответствующих последовательностей гибридных теоретических моделей, своего рода «осколков» произведенного взрыва.

Неизбежным следствием проникновения методов СТО в ньютоновскую теорию гравитации стало появление исследовательских программ Нордстрема и Абрагама. С другой стороны, не менее неизбежным, благодаря принципу эквивалентности, было проникновение методов ньютоновской теории гравитации в СТО, которое привело к серии эйнштейновских работ по обобщению принципа относительности и к распространению этого принципа не только на инерциальные системы отсчета, но также и на ускоренные системы. Важно, что Эйнштейн использовал принцип эквивалентности для трансформации не только классической механики, но и СТО. Его теория статического гравитационного поля, равно как и ранние попытки ее обобщить, были ничем иным, как реинтерпретацией СТО при помощи введения ускоренных систем отсчета.

Его систематический анализ подобных систем отсчета привел к применению обобщенных гауссовых координат для описания соответствующих систем отсчета. Следующим закономерным этапом явилось введение метрического тензора.

¹⁶⁰ Einstein, Albert. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907, vol.4, pp.411-462. Translated by Anna Beck in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol.2, *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, p. 254.

И с введением метрического тензора Эйнштейн сконструировал теоретический объект, способный на единой основе представлять как гравитационные, так и инерционные поля. К началу 1912г. Эйнштейн осознал, что он должен выйти за рамки скалярной теории гравитации. Его стратегия состояла в осторожном и постепенном, пошаговом приближении к окончательной динамической теории. Первый шаг программы состоял в конструировании «гравистатической» идеальной модели, т.е. гравитационного аналога электростатики. И он уже подумывал о втором, «гравистационарном» этапе, гравитационном аналоге магнитостатики. Его конечная цель состояла в разработке теории зависящего от времени гравитационного поля.

Отметим, что даже направления создания теорий Нордстрема и Абрагама были обозначены самим Эйнштейном, особенно в его пионерской и основополагающей статье 1907г. В самом деле, одно из важных следствий СТО гласит о том, что $E = mc^2$. В силу того, что в гравитационном поле энергия частицы зависит от значения гравитационного потенциала в месте ее нахождения, эквивалентность массы и энергии означает, что

(1) или масса частицы m ,

(2) или скорость света c ,

или же обе величины должны быть функциями потенциала.

Все эти возможности, зависимость гравитационного потенциала или от скорости света, или от инертной массы m , были использованы Максом Абрагамом¹⁶¹ и Гуннаром Нордстремом¹⁶², соответственно. И прежде всего стало ясно, что мы можем без особых затруднений создать лоренц-инвариантную теорию гравитации, в которой гравитационная и инертная массы равны (Нордстрем 1912-1914).

Кроме того, эйнштейновская теория статического гравитационного поля не содержала и намека на то, каким образом может быть сконструирована глобальная теория гравитационного поля. Напротив, самый ценный результат гибридных теорий Нордстрема и Абрагама состоял в том, что обе они содержали исключительно многообещающие намеки на то, как должна быть создана глобальная теория¹⁶³.

¹⁶¹ Abraham, Max. "Zur Theorie der Gravitation", *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.1-4.

Abraham, Max. "Das Elementargesetz der Gravitation", *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.4-5. Abraham, Max. "Neuere Gravitationstheories", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1915, pp. 470-520.

¹⁶² Nordström, Gunnar, "Relativitätsprinzip und Gravitation", *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.1126-1129.

Nordström, Gunnar, "Trage und Schwere Masse in der Relativitätsmechanik", *Annalen der Physik*, 1913, vol.40, pp.856-878.

Nordström, Gunnar, "Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzip", *Annalen der Physik*, 1913, vol.42, pp.533-534.

¹⁶³ Norton, John D. "Einstein, Nordström and the Early Demise of Scalar, Lorentz Covariant Theories of Gravitation", *Archive for the History of Exact Sciences*, 1992, vol.45: pp.17-94.

6. 3. Генезис «Наброска».

Обратимся к результатам исследования Г. Нордстрема, полученным при помощи работ М. Лауэ. Проблема, к которой М. Лауэ обратился в 1911г., состояла в нахождении самых общих условий, при которых динамика электрона будет согласовываться с релятивистской динамикой точечных частиц. Хотя уже Герман Минковский ввел четырехмерный тензор энергии-импульса в процессе разработки четырехмерных методов в СТО, его использование этого тензора ограничивалось специальным случаем электромагнитного поля. Работы Лауэ были посвящены проблемам распространения этих результатов на самые общие случаи¹⁶⁴, и свойствам этого тензора и его поведению при преобразованиях Лоренца; они аккумулировали огромное количество фактов, относившихся к движению твердых тел в СТО.

В итоге Лауэ пришел к такому выражению для тензора энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$), которое содержало три основных блока.

(1) Первый блок представлял обычный трехмерный тензор p_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$).

(2) Второй блок представлял плотность импульса \mathbf{g} (g_x, g_y, g_z).

(3) Третий блок представлял поток энергии $\boldsymbol{\theta}$ ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

И, конечно, (T_{44}) компонента тензора энергии-импульса представляла собой энергию. Эйнштейновский принцип эквивалентности требовал, чтобы каждый блок давал свой собственный вклад в систему потенциалов гравитационного поля, т.е. чтобы каждый блок относился к своим собственным гравитационным потенциалам. Поэтому должна существовать целая система гравитационных потенциалов – скалярных, векторных, etc., но не один-единственный потенциал. Общий гравитационный потенциал должен образовывать группу нескольких потенциалов, и в общем случае должен описываться матрицей, тензором¹⁶⁵, отдельные части которого преобразуются при переходе от одной системы отсчета к другой подобно скалярам, векторам, etc. Наиболее подходящая аналогия – это аналогия с классической электродинамикой с ее четырехмерным потенциалом электромагнитного поля $A^\mu = (\mathbf{A}, \phi)$. Последний, в случае статического электромагнитного поля, сводится к статическому скалярному потенциалу ϕ .

Но какой же должна быть связь между $T_{\mu\nu}$ и $g_{\mu\nu}$? – Важный намек имеется уже в первой нордстремовской статье 1912г.: $R = (k/2) T$, где R представляет собой полную свертку тензора Римана-Кристоффеля, а T – след тензора энергии-импульса.

¹⁶⁴ Laue, Max, “Zur Dynamik der Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 1911, vol.35, pp.524-542; Laue, Max, *Das Relativitätsprinzip*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn, 1911. Laue Max, “Ein Beispiel zur Dynamik der Relativitätstheorie. Verhandlungen der deutschen Physikalische Gesellschaft”, 1911, : pp.513-518.

¹⁶⁵ Abraham, Max, “Neuere Gravitationstheories“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1915, p. 499..

Но если это выражение типично для скалярной теории, то выражение, которое обобщает его на самый общий, тензорный случай должно выглядеть так : $k T_{\mu\nu} = X_{\mu\nu}$ (где $X_{\mu\nu}$ является «контравариантным тензором второго ранга, образованном производными фундаментального тензора $g_{\mu\nu}$ ». Но именно так и выглядят уравнения гравитационного поля в первой метрической теории – теории Эйнштейна и Гроссмана, - опубликованной в 1913г.!

Сразу же было установлено, что в общем случае уравнения «Наброска» нековариантны; они только остаются ковариантными по отношению к линейным ортогональным преобразованиям. Но авторов «Наброска» в течение довольно долгого времени это ничуть не беспокоило, что еще раз указывает на то, что полевые уравнения «Наброска» были созданы не на основе т.н. «Принципа Ковариантности»¹⁶⁶, а за счет кропотливого, медленного синтеза гибридных теорий Нордстрема и Абрагама при помощи полученных М. Лауэ замечательных результатов.

Само собой встал вопрос о математическом аппарате, способном оперировать с такими своеобразными математическими объектами. В частности, с математической точки зрения, основная проблема состояла в нахождении дифференциального оператора второго ранга для метрического тензора, ковариантного по отношению к возможно большему допустимому классу преобразований координат. В августе 1912г. Эйнштейн покинул Прагу, где он преподавал полтора года, для того, чтобы занять должность профессора в цюрихском высшем техническом училище. После возвращения в Цюрих он возобновил сотрудничество со своим старым другом Марселем Гроссманом - для решения упомянутой выше проблемы потребовалась его помощь. Последний выяснил, что соответствующий математический аппарат был разработан в конце XIXв. в работах Римана, Леви-Чивиты, Риччи, Кристоффеля и др. Но подлинное начало разработки метрической программы должно быть отнесено к началу 1912г., когда в заметке, опубликованной 15 февраля 1912г., Абрагам переосмыслил те идеи, при помощи которых он ранее оценивал формализм Германа Минковского.

Вместо этого он теперь ввел бесконечно малый линейный элемент с изменяющейся метрикой, распространяя таким образом пространство-время Минковского на более общее, риманово многообразие¹⁶⁷.

Абрагам оказался первым, кто ввел ключевую для ОТО математическую репрезентацию гравитационного потенциала при помощи 4-мерного линейного элемента, содержащего переменный метрический тензор. Понятно, что на первых порах абрагамовское выражение оставалось просто математическим курьезом без какого-либо глубокого физического смысла.

¹⁶⁶ Einstein, Albert.(1993). *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol.5. The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914. Martin J. Klein, A. J. Kox and Robert Schulmann, Eds. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993. .

¹⁶⁷ Abraham, Max, "Der Freie Fall". *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13, pp.310-311.

Тем не менее, именно эту формулу, с нашей точки зрения, имел в виду А. Эйнштейн в написанном 26 марта своему ближайшему другу Микеле Бессо письме: «Сначала (на протяжении 14 дней!) я был полностью “потрясен” красотой и простотой этой [абрагамовской] формулы» (цитируется по сборнику под ред. М. Клейна¹⁶⁸, док. 377, С. 436-437).

Именно под настойчивым абрагамовским влиянием Эйнштейн в мае 1912г. понял, что обобщение линейного элемента $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, как это и предлагалось в тонких комментариях Абрагама, сделанных тремя месяцами ранее, является ключом к подлинно релятивистской теории гравитации¹⁶⁹.

В итоге, основное достижение второго этапа состояло в изобретении метрического тензора, который был введен в качестве гибридного объекта, объединяющего две существенно различные исследовательские традиции – «физическую» традицию (скалярные и векторные теории Эйнштейна, Нордстрема и Абрагама) и «математическую» традицию (геометрические результаты Римана, Кристоффеля, Леви-Чивита и др.). Теперь уже компоненты g_{ij} играют двойственную роль. С одной стороны, они репрезентируют физические потенциалы гравитационного поля, а с другой – коэффициенты выражения $ds^2 = \sum g_{ij} dx^i dx^j$. За счет изобретения гибридного объекта g_{ij} началось взаимопроникновение геометрии и физики: физика стала геометрической, а геометрия – физической¹⁷⁰.

Неслучайно сам Эйнштейн не рассматривал геометризацию гравитационного поля в качестве главного достижения своей исследовательской программы, подчеркивая, что ОТО не более и не менее «геометрична», чем максвелловская электродинамика¹⁷¹.

¹⁶⁸ Einstein, Albert. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol.5. The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914. Martin J. Klein, A. J. Kox and Robert Schulmann, Eds. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993. .

¹⁶⁹ Einstein, Albert, “ Zur Theorie des statischen Gravitationfeldes“. *Annalen der Physik*, 1912, vol.38, pp.443-458.

¹⁷⁰ Zahar, Elie., *Einstein's Revolution: A Study in Heuristic*. La Salle: Open Court, 1989, p.267.

¹⁷¹ Lehmkuhl, Dennis, “Why Einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity“, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, vol.46 ,pp.316-326.

6. 4. Созданне окончательной релятивистской теории гравитации.

Взаимопроникновение геометрии и физики привело к конструированию фундаментальной теоретической схемы ОТО. Итогом первой стадии взаимопроникновения явилось создание уравнений гравитационного поля «Наброска» $R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ с их предельно упрощенным рассмотрением потенциалов гравитационного поля как обычных частных производных от метрики. Тем не менее, дальнейшее взаимодействие геометрии и физики привело к более изощренной модификации этой нехитрой схемы. В серии четырех статей, представленных прусской академии наук 4,11,18 и 25 ноября 1915г., Эйнштейн постепенно заменил «Набросок» полноценной метрической теорией гравитации, попутно разобравшись, наконец, с проблемой теоретического воспроизведения аномального смещения перигелия планеты Меркурий. Для уяснения подлинных причин перехода от «Наброска» к ОТО мы должны прежде всего принять во внимание эйнштейновскую синтетическую дуальную стратегию, охватывавшую и примирявшую как физический, так и математический подходы к нахождению окончательной системы уравнений гравитационного поля. Избранный Эйнштейном «**дуальный метод**» предполагал, что прежде всего необходимо «индуктивно» продвигаться вперед в соответствии с такими предположениями существенно физического характера, как т.н. «ньютоновский предел» и принцип сохранения энергии и импульса.

С другой стороны, дополнительная, «комплементарная», направленная «сверху-вниз» (ван Донген) или «дедуктивная математическая стратегия коренилась в принципе эквивалентности и в обобщении принципа относительности. Эти принципы совместно обеспечивали общую ковариантность уравнений поля. Соответственно, естественным исходным пунктом математического подхода должно быть введение и тщательное исследование ковариантного математического объекта, известного из математической литературы.

Сначала возобладал физический подход, что привело с необходимостью к «Наброску»; но затем верх одержал подход математический, что выразилось в окончательной победе ОТО в ноябре 1915г.

При этом «правильные» уравнения ОТО были получены Эйнштейном уже в «Цюрихской Тетради» – задолго до ноября 1915г. Он пришел к ним в результате применения дуального метода, но они оказались несовместимыми с принципами физического подхода. Прежде всего, они не вели к ньютоновской метрике $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$ в приближении слабого поля. Напротив, одним из очевидных преимуществ уравнений «Наброска» было то, что при переходе к ньютоновскому пределу не было необходимости - для того, чтобы получить уравнения Пуассона - в принятии печально знаменитых «гармонических» координатных условий.

Более того, уверенность Эйнштейна в справедливости уравнений «Наброска» укреплялась благодаря т.н. «дырному аргументу»: «явления, имеющие место в гравитационном поле, не могут однозначно определяться общековариантными дифференциальными уравнениями гравитационного поля».

Тем не менее, в свете дуальной стратегии и синтетического характера, которым релятивистская теория гравитации должна обладать, неудивительно, что общая нековариантность уравнений гравитационного поля подверглась суровой критике как Абрагама¹⁷², так и Ми¹⁷³. Правда, Эйнштейн сначала был к этим аргументам глух.

Но вскоре А. Эйнштейн и М. Бессо применили метрику $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$ для подсчета аномального смещения перигелия Меркурия. Полученный результат в 2,4 раза отличался от наблюдаемого значения. Значительно расстроенный, Эйнштейн был вынужден оставить теорию «Наброска». Тем не менее, в дальнейшем Эйнштейн нашел-таки выход из затруднения, созданного «Наброском»: он вернулся к полузабытой математической стратегии и к требованию общей ковариантности, которое он так поспешно оставил в «Цюрихской Тетради».

Соответственно, в конце недели, последовавшей за 11 ноября 1915г., Эйнштейн вновь проделал расчеты смещения перигелия Меркурия. Он наконец-то осознал, что ковариантное уравнение $R_{\mu\nu} - (R/2) g_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$ не может быть совместимым с ньютоновской метрикой $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$.

Теперь он был вынужден признать существенно тензорный характер теории гравитации и, в частности, вынужден был допустить, что пространственные компоненты метрического тензора также являются функциями координат: $g_{\mu\nu} = \text{diag}\{g_{00}(x), g_{11}(x), g_{22}(x), g_{33}(x)\}$. Погрузившись еще глубже в вычисления, Эйнштейн получил, наконец, правильное выражение смещения перигелия: $43''$, что прекрасно согласовывалось с данными наблюдений: $45'' \pm 5''$ в столетие. В итоге именно возвращение к математическому требованию общей ковариантности «принесло спасение» и освободило Эйнштейна от его предрассудков, относящихся к ньютоновскому пределу $g_{\mu\nu} = \text{diag}(g_{00}, -1, -1, -1)$. Он ярко описал свои переживания этого воистину «выдающегося достижения» в знаменитом письме Микеле Бессо:

«Прочти статьи! Они несут спасение от несчастий. Самая радостная сторона – это *согласие [гармония] между движением перигелия и общей ковариантностью*, но тем не менее самая потрясающая – то обстоятельство, что ньютоновская теория поля неверна уже в первом приближении (появляются члены g_{11} - g_{33}). Простота теории Ньютона обязана своим существованием тому факту, члены g_{11} - g_{33} не появляются в первом приближении уравнений

¹⁷² Abraham, Max. “Die neue Mechanik“, *Scientia*, 1914, vol.15, pp.8-27.

¹⁷³ Mie, Gustav. “Bemerkungen zu der Einsteinischen Gravitationstheorie“, *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol.15, pp.115-122.
Mie, Gustav. “Bemerkungen zu der Einsteinischen Gravitationstheorie .II“, *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol.15, pp.169-176..

движения точечной массы» (21 декабря 1915г., письмо Эйнштейна Бессо, цитируется по книге ван Донгена¹⁷⁴, курсив мой – РМН).

В свете предложенной в данной работе реконструкции генезиса ОТО отмеченное выше «согласие [гармония] между движением перигелия и общей ковариантностью» представляется очевидным. Эйнштейн смог выйти на правильное объяснение аномального движения (основанное на понимании, что в этой ситуации действует несколько гравитационных сил, действующих не только в плоскости вращения Меркурия вокруг Солнца) только тогда, когда он полностью осознал тензорный характер гравитационного поля. То есть тогда, когда он понял, что $g_{\mu\nu}$ - это множество, которое содержит не только скалярные компоненты подобные $g_{00}(r, m)$, но также и компоненты g_{11}, g_{22}, g_{33} , каждая из которых также зависит от r и m .

Важно отметить следующее. Окончательные уравнения ОТО – т.н. «уравнения Эйнштейна» - были получены только в ноябре 1915г., - так что с момента обнаружения «вопиющего несоответствия» между предсказаниями «Наброска» и наблюдательными данными, относящимися к аномальному движению перигелия Меркурия, прошло целых два года.

И несмотря на то, что сам Эйнштейн действительно отмечал эту аномалию как *одну из* действительных причин отказа от «Наброска» и перехода к ОТО (см., например, его известное письмо Арнольду Зоммерфельду¹⁷⁵ от 28 ноября 1915, документ 153, С. 206-209), на самом деле ситуация была не столь проста. «Набросок» смог объяснить только часть аномального движения, но не всю аномалию целиком. Но Эйнштейн по вполне разумным причинам не счел это обстоятельство окончательным опровержением «Наброска», поскольку оставшиеся необъясненными части могли быть вызваны другими, существенно негравитационными факторами. Несмотря на то, что указанная аномалия была обнаружена Эйнштейном и Бессо уже в июне 1913г., целых два года – вплоть до сентября 1915г., - Эйнштейн постоянно и настойчиво выражал уверенность в справедливости теории «Наброска». (См., например, его письмо Микеле Бессо¹⁷⁶ от 10 марта 1914г., документ 514, С. 603-604).

Я полагаю, что основной импульс в переходе от «Наброска» к ОТО исходил все-таки от дуальной стратегии, постоянно побуждавшей Эйнштейна согласовывать физический и математический подходы. И только *после* того, как он эффективно согласовал эти подходы, т.е. только *после* того, как он осознал значение общей ковариантности уравнений гравитационного поля, Эйнштейн смог придти к правильному объяснению перигелия Меркурия. В итоге решающий

¹⁷⁴ Van Dongen, Jeroen, Einstein's Unification. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, p. 29.

¹⁷⁵ Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol.8. Correspondence 1914-1918. Schulmann R., Janssen M., Illy J., Eds, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998.

¹⁷⁶ Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol.5. The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914. Martin J. Klein, A. J. Kox and Robert Schulmann, Eds. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993.

импульс в конструировании ОТО исходил из попыток согласования физического и математического подходов, представленных гибридными теоретическими схемами Абрагама, Нордстрема и самого Эйнштейна. Достоверное объяснение смещения перигелия Меркурия оказалось побочным продуктом самоотверженных попыток согласования существенно различных исследовательских традиций.

Глава 7. Эмпирический базис общей теории относительности : три «критических эффекта», черные дыры, гравитационные волны и многорадиальная релятивистская космология.

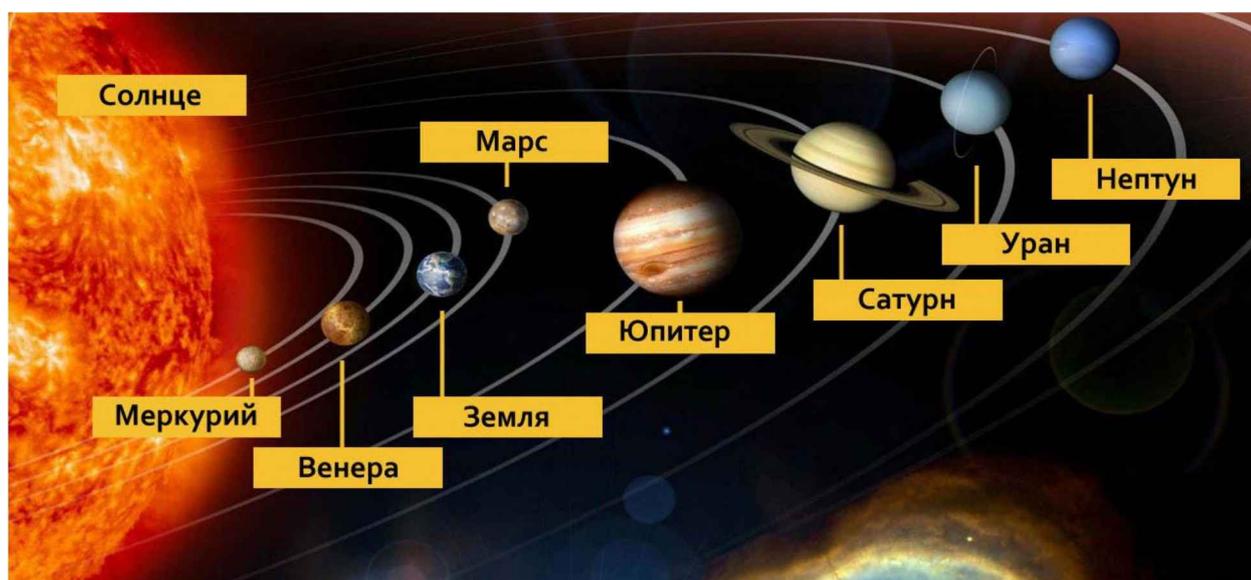
История мидян темна и неизвестна. Ученые, тем не менее, делят ее на три периода.

Михаил Зоценко

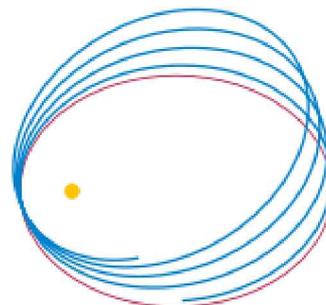
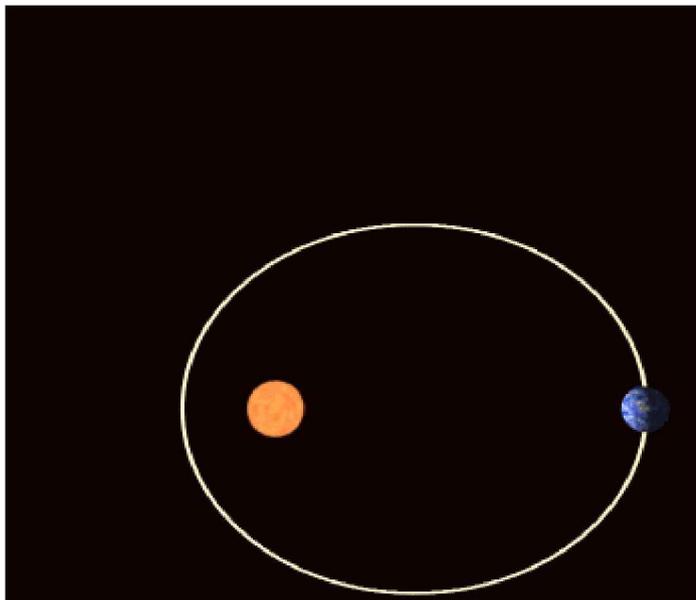
7.1. «Критические» эффекты ОТО.

Вскоре после создания ОТО в 1914г. стало ясно, что эта теория не только способна решить накопившиеся теоретические проблемы (вроде объяснения «причин», по которым различные тела притягиваются друг к другу или введения понятия «гравитационное поле»). Она может также как объяснять уже известные, так и предсказывать **новые** физические явления. Именно к этой первой группе явлений, образующих эмпирический базис эйнштейновской теории гравитации, и относятся три знаменитых «критических» эффекта ОТО.

(1) Аномальное смещение перигелия планеты Меркурий. Несмотря на то, что явление это было известно задолго до создания ОТО, основанная на классической механике астрономия XIX в. не смогла его удовлетворительно объяснить. Это объяснение, данное тотчас после создания ОТО, явилось первой победой эйнштейновской теории гравитации.



Солнечная система



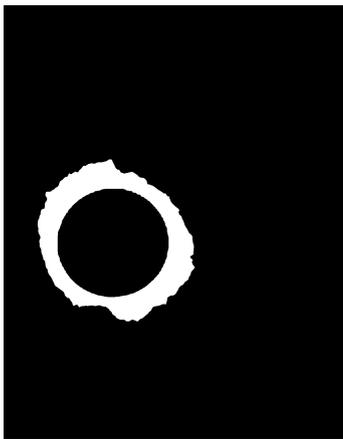
Планета Меркурий и ее аномальное смещение

Как известно, Меркурий является самой близкой к Солнцу планетой, вращающейся при этом с самой большой угловой скоростью. «Перигелий», как употребляют это понятие астрономы, - это расстояние максимально близкого прохождения планеты от Солнца. Еще во второй половине XIX в. астрономы-наблюдатели заметили, что сам перигелий планеты Меркурий, а вместе с ним и вся эллиптическая траектория движения этой планеты, вращается вокруг Солнца с очень небольшой угловой скоростью – несколько градусов в столетие. Несмотря на свою малость, этот эффект был все же зарегистрирован, после чего стал головной болью астрономов - теоретиков вплоть до 1915г. Чего только они не придумывали для его объяснения ! – Даже изменяли закон всемирного тяготения: $F = \gamma mM / r^{2+\acute{\alpha}}$, где константа $\acute{\alpha}$ определялась из экспериментов и наблюдений.

Только ОТО *просто и легко* объяснила это явление, не прибегая ни к каким ad hoc гипотезам – всем этим находимым из опытов альфам, бетам и гаммам. Кинетическая энергия вращения Меркурия вокруг своей оси создает дополнительное гравитационное поле, действительно, - но только в случаях подобного рода, - добавляющее соответствующие члены в закон всемирного тяготения.

(2) Отклонение лучей света в гравитационном поле Солнца.

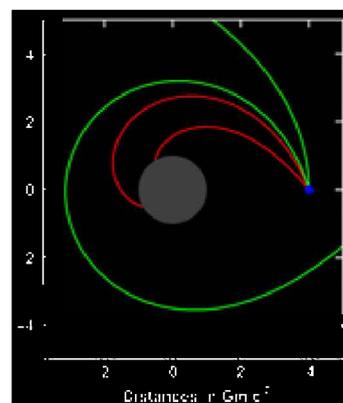
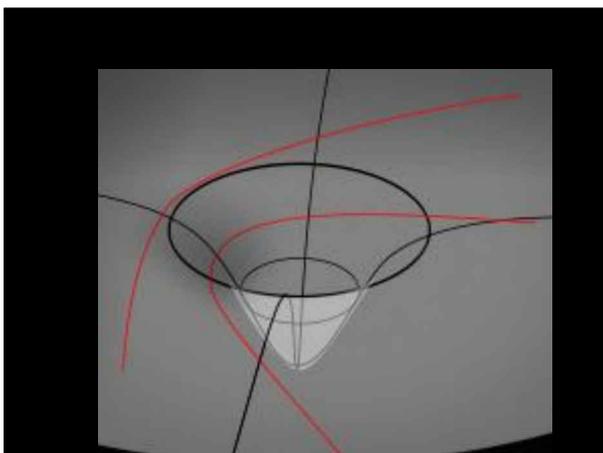
Согласно теории относительности, луч света, состоящий из фотонов – частиц, масса покоя которых равна нулю, - обладает энергией, и, следовательно, массой. Поэтому пролетая мимо Солнца, обладающим мощным гравитационным полем, луч света должен отклоняться (в сторону Солнца) от первоначальной прямолинейной траектории. Это явление и наблюдалось английскими астрономами в 1919г. в Сибири, где они застряли во время первой мировой войны. Когда наблюдатели вернулись в Лондон, они обо всем доложили, и с этого момента и начался подлинный триумф ОТО. Именно тогда ученые поверили в ОТО, несмотря на ее абстрактный характер и математическую сложность. После этого открытия А. Эйнштейн получил в 1921г. нобелевскую премию по физике.



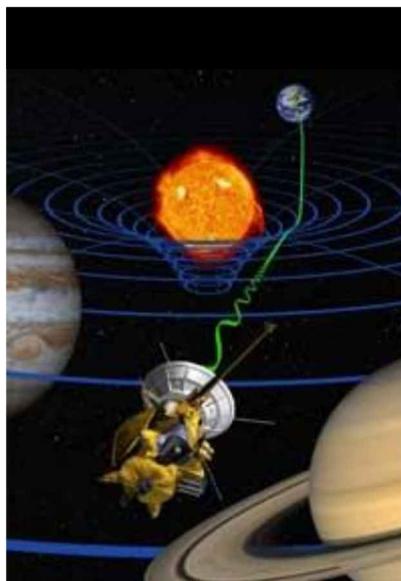
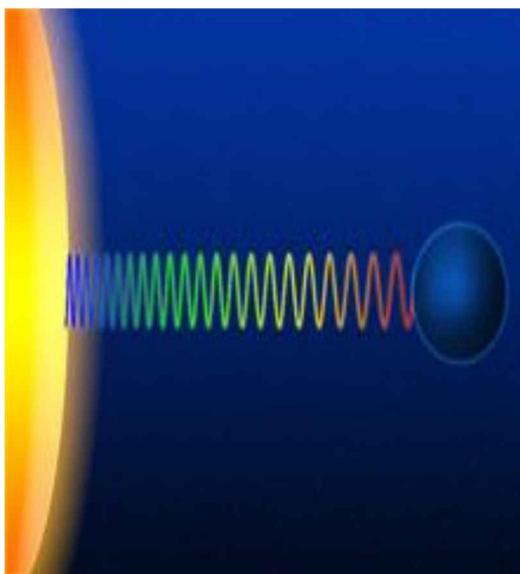
Солнечное затмение



Sir Arthur Eddington(1882-1944)

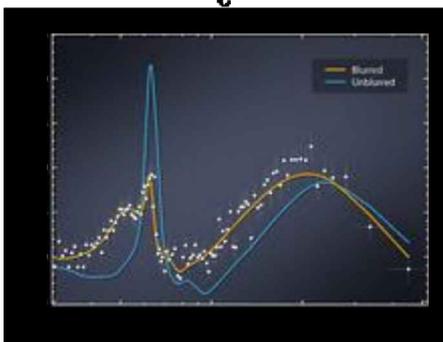
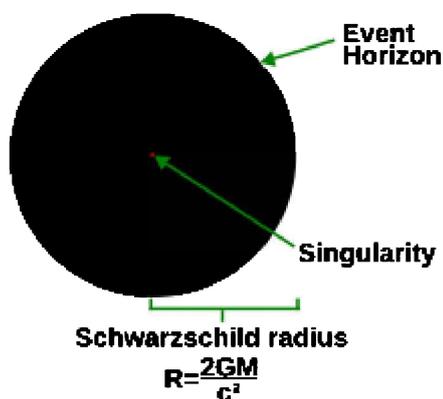


(3) Красное смещение частоты излучения света в гравитационном поле Земли. Согласно ОТО, частота излучения, распространяющегося в гравитационном поле, зависит от интенсивности гравитационного поля. Например, частота излучения лазера изменится, если его поднять на высокую гору. Именно это явление и наблюдалось.



7.2. Черные дыры (black holes)

Черные дыры – и самые загадочные, и одновременно самые *простые и симметричные* объекты во Вселенной. Черными дырами, согласно ОТО, становятся истощившие свои источники энергии звезды, массы которых превышают три массы Солнца.



жесткий рентген от Cygnus-X-1



Cygnus –X-1

I. Первое открытие черных дыр произошло в конце XVIII в., когда любознательный английский священник Джон Митчелл (John Mitchell) и великий французский математик Пьер Лаплас (Pierre Laplace) вычислили размеры тела, для которого вторая космическая скорость (необходимая для того, чтобы ракета могла вырваться за пределы этого тела) превышает скорость света. Т.е. они заявили, что в природе должны существовать тела, для которых скорость, необходимая для преодоления притяжения, превышает скорость света. Поэтому такие тела должны быть **темными**, невидимыми для внешнего наблюдателя.

Как известно, вторая космическая скорость выводится из условия равенства нулю суммы потенциальной и кинетической энергий :

$$mv^2/2 - \gamma mM/r = 0$$

Подставив в формулу для этой скорости величину скорости света c , Митчелл и Лаплас получили радиус темного тела r_g при его заданной массе M :

$r_g = 2\gamma M/ c^2$, где γ = гравитационная постоянная. Таким образом, если радиус тела не превышает r_g , т.н. «гравитационный радиус», то такое тело будет темным, невидимым, потому что свет от него не сможет вырваться к внешнему наблюдателю.

II. Второе открытие черных дыр состоялось в 1915г., когда немецкий математик и астроном Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild), вскоре после опубликования Эйнштейном статьи по ОТО, нашел в окопах первой мировой войны точное решение уравнений Эйнштейна для «точечного» сферически симметричного невращающегося тела. В это решение, как фундаментальный параметр, входит гравитационный радиус $r_g = 2\gamma M/ c^2$, который в наши дни принято называть **радиусом Шварцшильда**.

Поверхность с радиусом r_g , отделяющая доступную часть пространства-времени от недоступной для далекого наблюдателя, называется *сферой Шварцшильда* или *горизонтом событий* (event horizon).



Karl Schwarzschild (1873-1916)



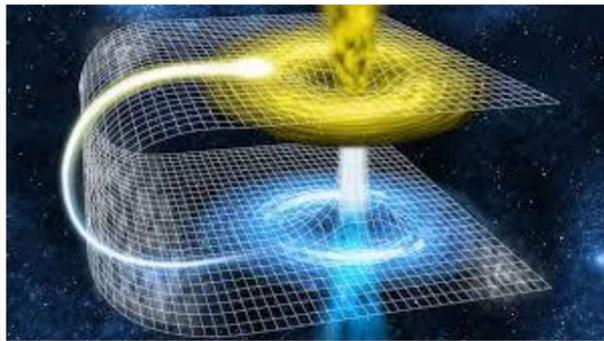
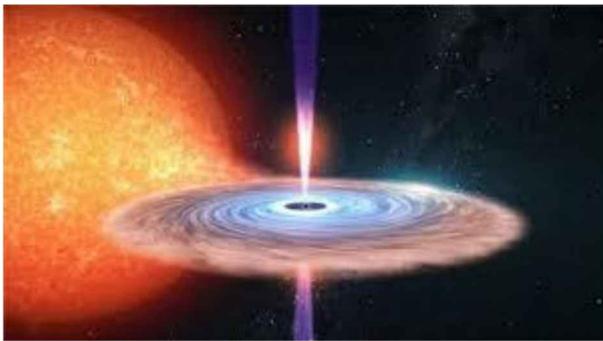
Не дай Бог попасть под горизонт событий!

Горизонт событий – физическая граница черной дыры. На горизонте событий ход времени с точки зрения далекого наблюдателя замедляется. Если послать к черной дыре космический корабль с космонавтом на борту, то с Земли мы увидим, что по мере приближения к дыре он будет замедлять свое движение и никогда не проникнет под горизонт событий. Однако с точки зрения самого космонавта он вместе с кораблем свободно проникнет внутрь горизонта черной дыры, не испытывая никаких препятствий, кроме все возрастающих приливных сил. (Они связаны с разностью сил притяжения, действующих на разные части его тела). После пересечения горизонта событий космонавт увидит внутренность черной дыры и центральную сингулярность – область с бесконечно большой плотностью, куда сжалось вещество, образовавшее черную дыру. Однако передать какую-либо информацию наружу путешественник не сможет. Он не сможет даже развернуть космический корабль, поскольку внутри черной дыры возможно только движение в одном направлении – к центру.

Решение Шварцшильда – стационарное: оно описывает вечно существующую черную дыру. При этом процесс образования черных дыр из обычных тел оставался неясным.

Поэтому

III. Третье открытие черных дыр состоялось в 1939г., когда американские физики Р. Оппенгеймер (будущий «отец» американской атомной бомбы) и Х. Снайдер рассчитали коллапс облака пыли до его превращения в черную дыру. Само название «**черная дыра**» (black hole) предложил американский физик Джон Уилер (John Wheeler) в 1968 г.





*Robert Oppenheimer (Oppy) and his favorite teacher
(1904-1967)*



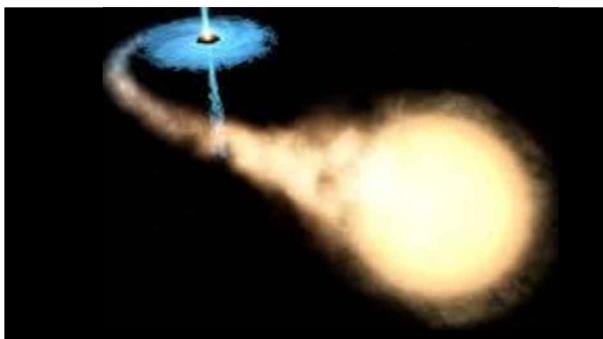
*John Wheeler
(1911-2008)*



Hands up! Главный «вклад» Оппенгеймера в военную науку

Все перечисленные открытия были сугубо теоретическими. С открытиями реальных черных дыр все обстоит сложнее. При этом внимание ученых направлено на изучение двойных систем: в центре – массивное тело с массой больше трех масс Солнца (т.е. больше т.н. «радиуса Чандрасекара»), а вокруг него вращается большое облако газа. При этом если газ перетекает на массивное ядро, производится мощное рентгеновское излучение, спектр которого легко рассчитать, что и сделали Рашид Сюняев и Николай Шакура в самой цитируемой отечественной статье.

Еще в 1971г. была оценена масса невидимого объекта в одном из наиболее компактных рентгеновских источников, Лебедь X-1 (Cygnus X-1). Сегодня таких кандидатов в черные дыры (только в нашей галактике) более 20, и 99% астрономов считают, что черные дыры уже открыты¹⁷⁷. Правда, нобелевская премия непосредственно за открытие черных дыр еще не присуждена.



Аккреция газа со звезды на черную дыру

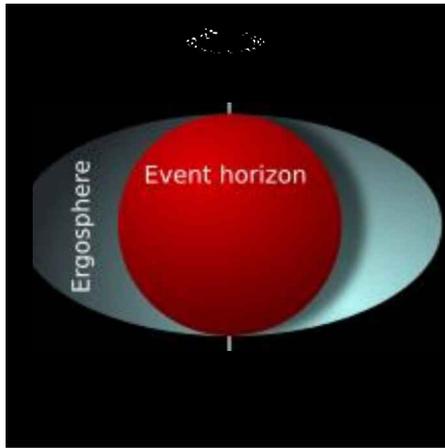


Другим местом, где астрофизики вплотную приблизились к открытию черных дыр, являются ядра галактик. Очень может быть, что черная дыра с массой 3-4 миллиона масс, Солнца, находится в центре и нашей галактики. Поживем – увидим.

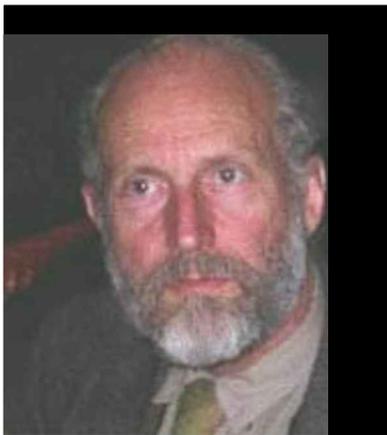


Black holes

¹⁷⁷ Подробнее см.: Астрономия: век XXI. – Фрязино : «Век 2», 2008. – 608с.



керровская (вращающаяся) черная дыра



Brandon Carter



young Stephen Hawking



*Roger Penrose, FRS
Nobel laureate*



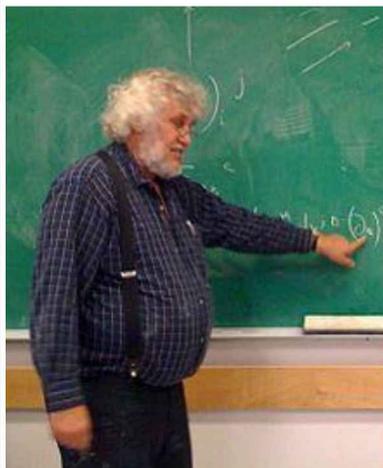
Игорь Д. Новиков



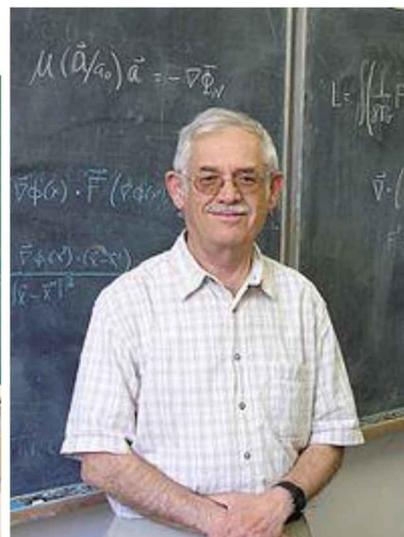
акад. Я.Б. Зельдович



Stephen Fulling



Wilhelm Unruh

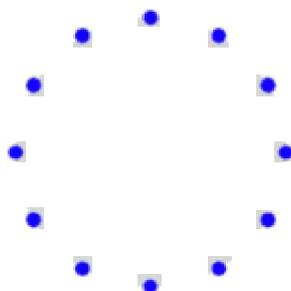
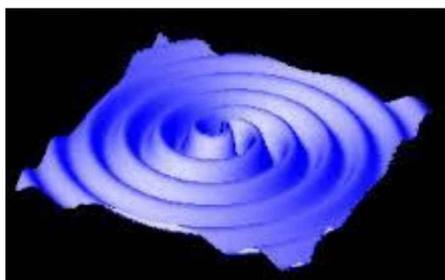


Jakob Bekenstein



Рашид Алиевич Сюняев красочно описывает аккрецию газа на черную дыру

7.3. Гравитационные волны.



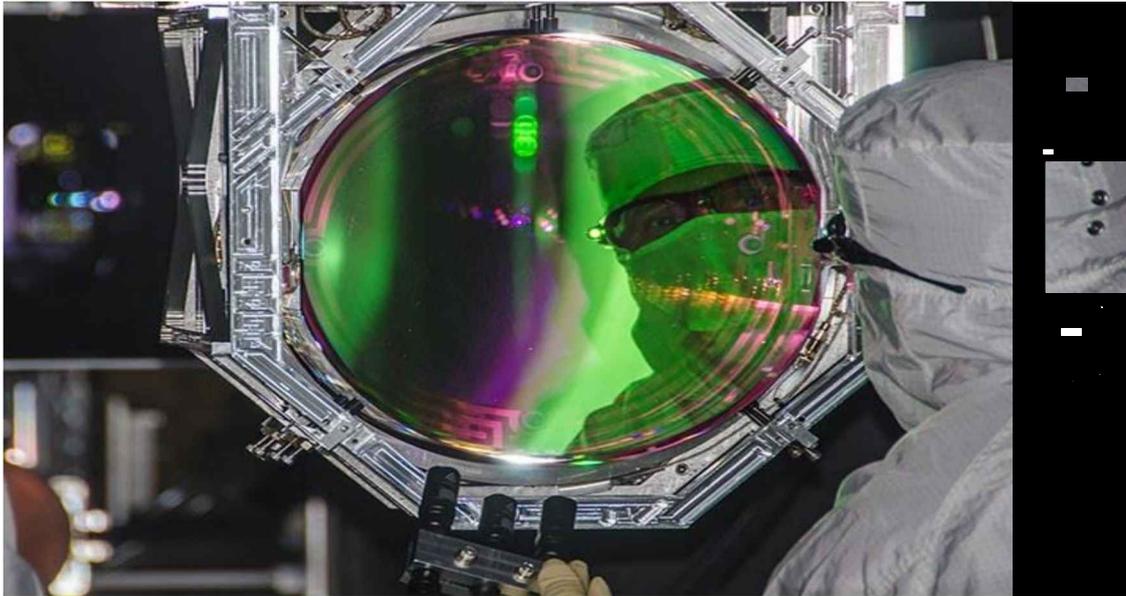
Проф. Джозеф Вебер (Joseph Weber, 1919-2000) со своей цилиндрической болванкой, судорожные сокращения которой еще в 1960-е гг. должны были доказать существование гравитационных волн

Еще одно следствие ОТО – гравитационные волны. Их долго не могли обнаружить, хотя уже затратили на эксперименты миллионы долларов (эксперименты Дж. Вебера). Наконец, в 2015-17 гг. группы исследователей на одинаковых установках в Вашингтоне и в Луизиане обнаружили два одинаковых сигнала, получение которых отличалось на время, необходимое для того, чтобы радиосигнал дошел из Вашингтона до Луизианы.



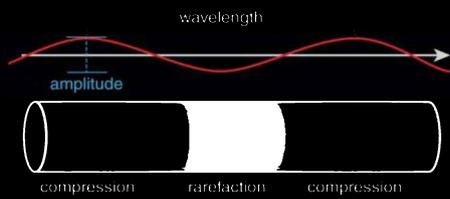
The USA

Карта США, демонстрирующая расстояние от Атлантического океана (Вашингтон) до Тихого (Луизиана), которое должны были пересечь гравитационные волны для того, чтобы на расположенных там детекторах возникли одни и те же картинки

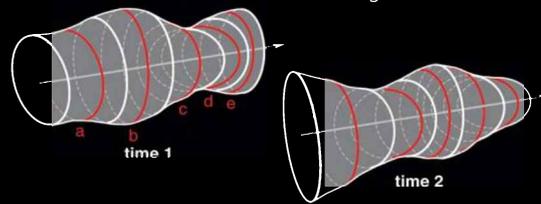


The Family of Wave Forms

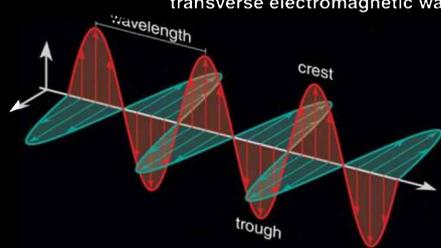
longitudinal pressure wave



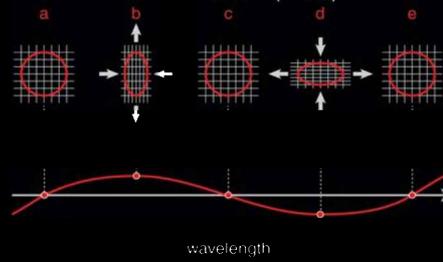
transverse gravitational wave



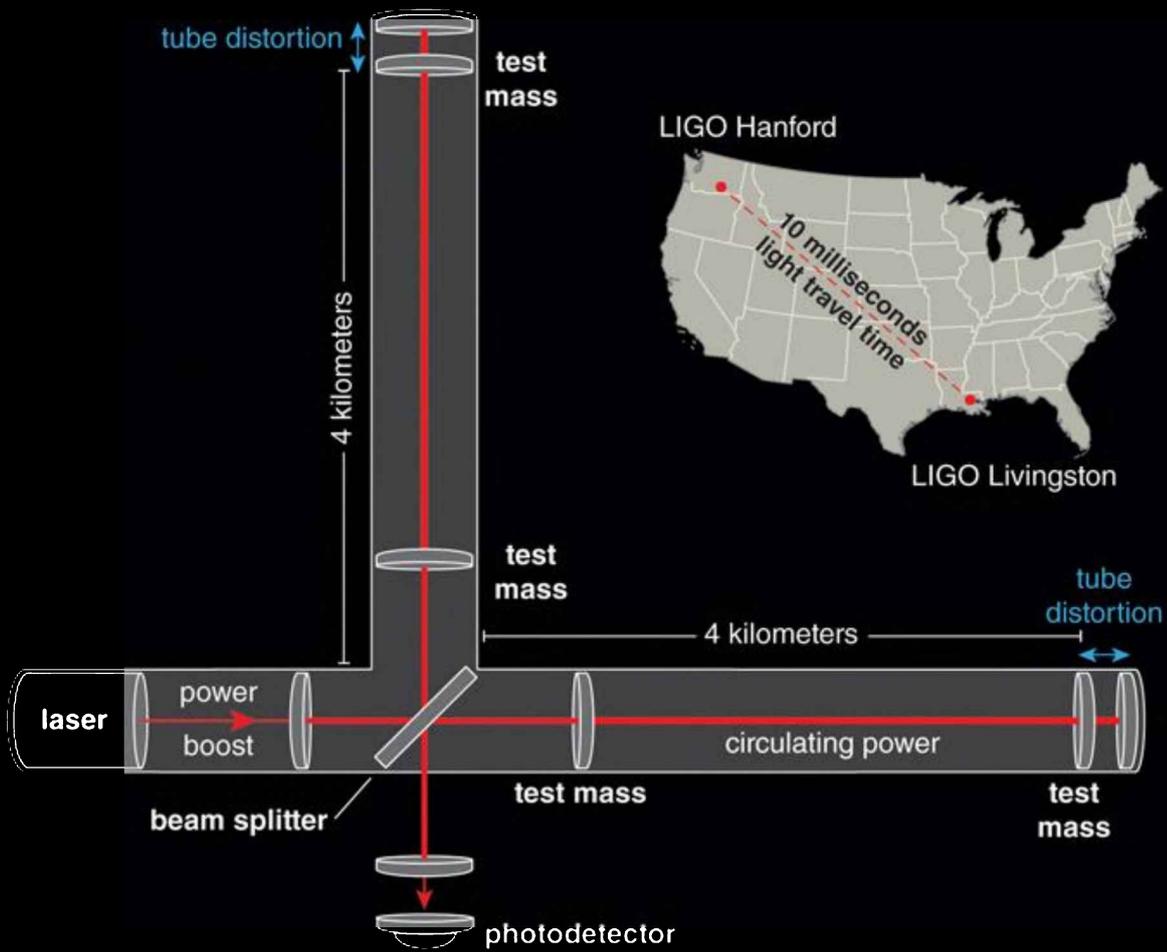
transverse electromagnetic wave



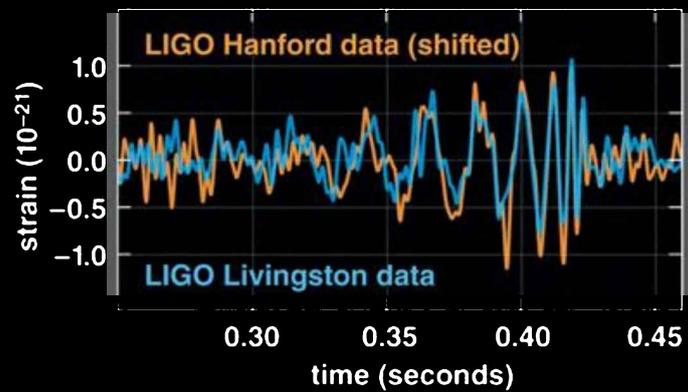
wave cross-sections (rotated)



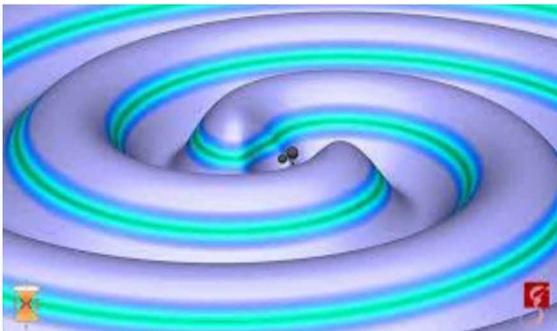
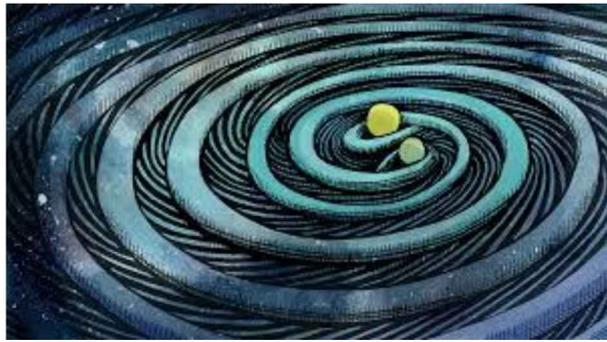
How LIGO Catches Gravitational Waves



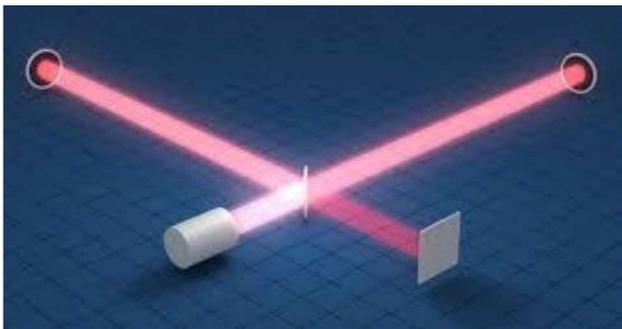
LIGO Livingston



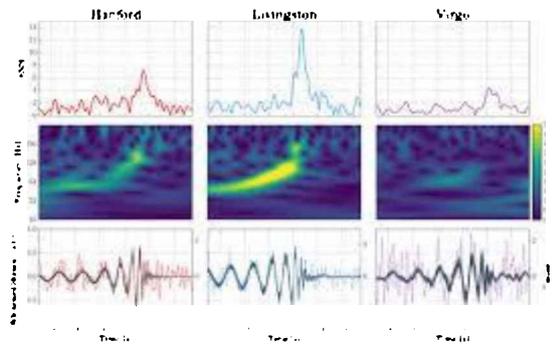
Вот как LIGO ловит гравитационные волны



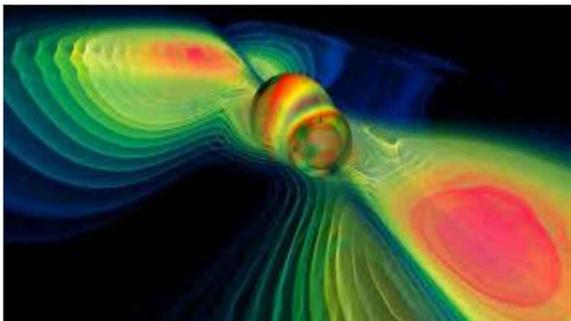
Образование гравитационных волн в процессе столкновения двух черных дыр



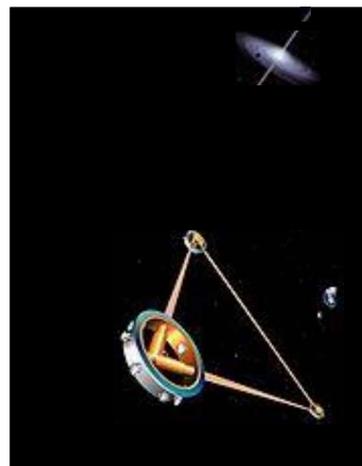
Детали измерительных устройств для обнаружения гравитационных волн



Вот что наблюдали в Хенфорде и Ливингстоне

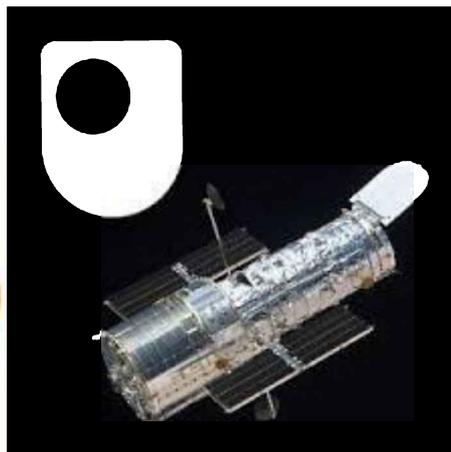
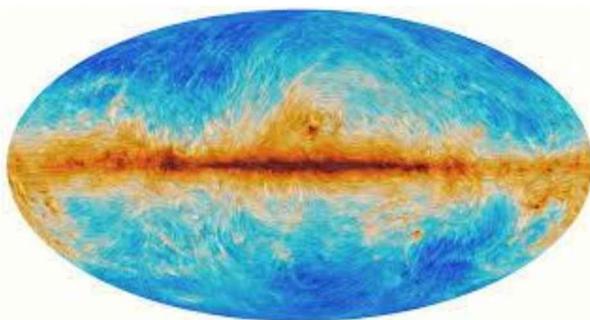
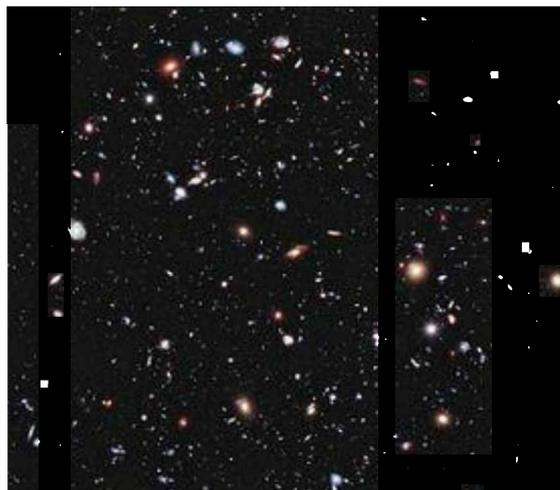
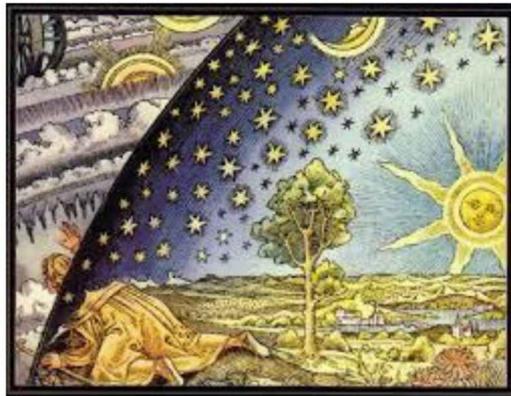
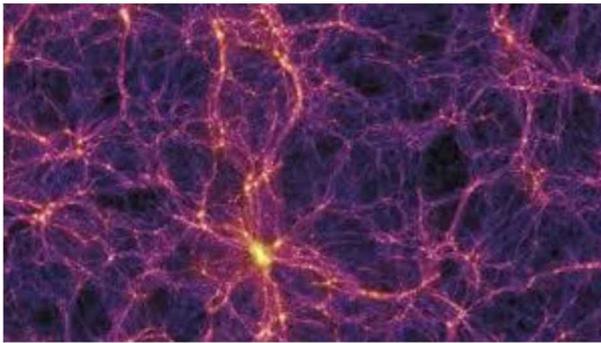


*2017 Nobel prize winners
(седина в бороде – Бес в ребро)*

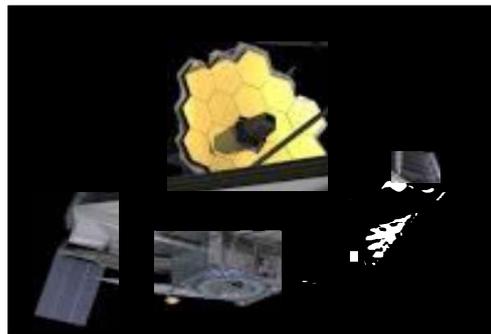
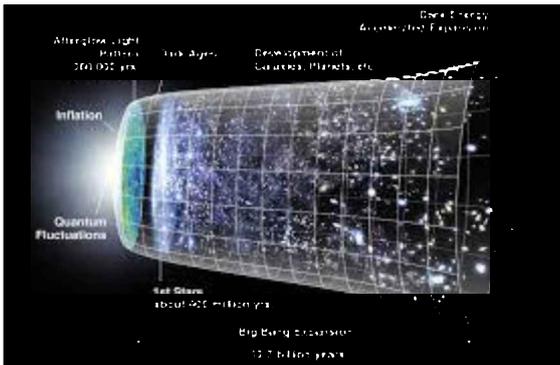


*LISA - будущий эксперимент
в космосе по обнаружению
грав. волн*

7.4. Многомерная релятивистская космология.



Так Вселенная (слева) выглядит со спутника (справа)



Космология – это, судя по всему, наука, изучающая законы развития Вселенной в целом. Конечно, еще Ньютон пытался создать научную космологию, отличавшуюся от полуфантастических построений Аристотеля и Птолемея (в которых звезды были приколоты к хрустальным орбитам ангелами). Но его картина Вселенной содержала ряд парадоксов, главный из которых был связан с поразительной устойчивостью Вселенной. В самом деле, если в мире правит всемирное тяготение, почему же Вселенная стационарна? Поэтому и Эйнштейн, сразу же после создания ОТО построивший в 1917г. модель вечного и неизменного мира, для того, чтобы противостоять тяготению, ввел в свою модель космологическую константу (знаменитый «лямбда-член» Λ), величину и знак которой всегда можно было подобрать так, чтобы ни коллапса, ни расширения Вселенной не происходило.

Но в 1922г. в немецком журнале “*Zeitschrift fur Physik*” была опубликована статья советского математика (и метеоролога) Александра Александровича Фридмана «*О кривизне пространства*». Основной вывод автора заключался в том, что наша Вселенная расширяется. Ее объем растет. Модель Фридмана основывалась на решении уравнений ОТО для случая изотропного и однородного распределения вещества в пространстве.

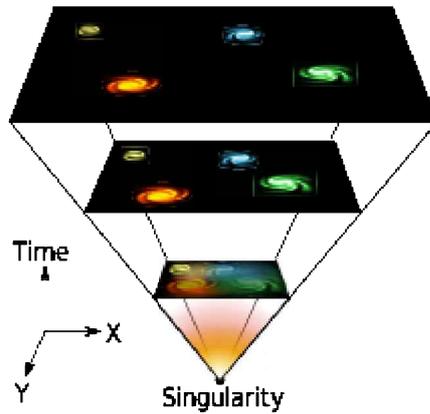
Термин «изотропия» означает, что свойства вещества Вселенной, наблюдаемые из одной точки в разных направлениях, одинаковы. Термин «однородность» означает, что свойства вещества не меняются при переходе от одной точки пространства к другой.



А.Фридман
Александр Фридман
(1888-1925)



Georges Lemaitre
Georges Lemaitre
(1894-1966)



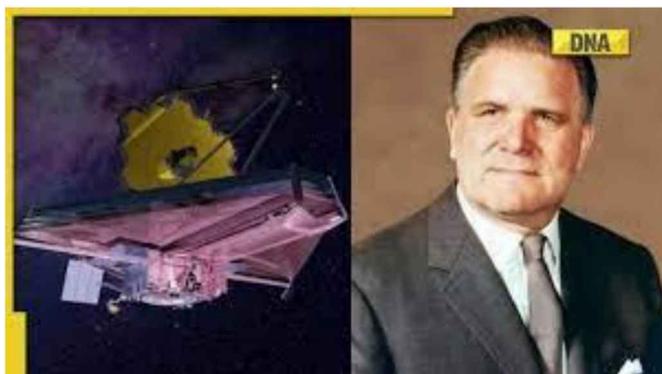
Теоретически предсказанное А.А. Фридманом расширение Вселенной было действительно обнаружено при помощи телескопа в штате Калифорния на горе Маунт Паломар в 1929г. Эдвином Хабблом (Edwin Hubble, 1889-1953). Он представил доказательства того, что лучевые скорости галактик возрастают с увеличением расстояний до них. Закон расширения имеет простой вид $V = H r$, где v – скорость далекого объекта, r – расстояние до него, а H – постоянная Хаббла, равная 72 км/с Мпк.



*Георгий Антонович Гамов
(1904-1968),
член-корреспондент
АН СССР, член Национальной
Академии Наук (США).*



Эдвин Хаббл(1889-1953)



James Webb and JWST

Вторым из основных тестов, заложивших фундамент современной космологии, является открытие реликтового излучения в 1965г. Это излучение предсказал еще американский физик русского происхождения Георгий Гамов (George Gamow). В 1950-е он предложил идею т.н. «горячей Вселенной», применив в космологии методы ядерной физики и термодинамики. В горячем и плотном веществе ранней Вселенной должны были происходить термоядерные реакции, обусловившие нынешнее обилие химических элементов.

Реликтовое излучение – это самые древние фотоны. Они возникли тогда, когда температура расширяющейся Вселенной упала настолько, что материя и излучение разделились. Реликтовое излучение было открыто А. Пензиасом и Р. Вильсоном в 1965г., причем совершенно случайно. Его открыватели были не астрономами, а инженерами, что не помешало им получить за свое открытие нобелевскую премию.

Они обнаружили в тех явлениях, которые они рассматривали, некоторый фон с температурой 2,7 К, от которого невозможно было избавиться.



Arno Penzias & Robert Wilson (1964)

Тем не менее, стандартная модель Фридмана не могла ответить на вопрос о *физических причинах* разлета галактик. Ведь силы притяжения могут только противодействовать разлету, но не могут его вызвать. Убедительный ответ на поставленный выше вопрос удалось дать только в 1980-е благодаря систематическому применению к ранней Вселенной результатов, полученных в физике элементарных частиц. В основе этого подхода лежала т.н. «*теория инфляции*».

Из курса школьной физики известно, что газ при расширении охлаждается, а при сжатии нагревается. Вещество Вселенной – по сути тот же газ. Поэтому в прошлом наша Вселенная была и плотнее, и горячее. Согласно теории «Большого Взрыва», Вселенная начала расширяться и охлаждаться из т.н. «*сингулярности*». Правда, что было до рождения – можно только гадать. Как говаривал акад. Я.Б. Зельдович, «было время, когда времени не , было».



акад. Яков Борисович Зельдович (1914-1987): от атомной бомбы до вращающейся черной дыры

Через 10^{-42} сек. после рождения пространства и времени во Вселенной наступила **инфляционная стадия**. (Кстати, термин «инфляция» [inflation] пришел в космологию из экономики: он означает рост по экспоненциальному закону).

Отметим, что еще до разработки т.н. «инфляционной модели» Вселенной многие ее свойства были предвосхищены в конце 1970-х гг. российскими физиками-теоретиками (впоследствии академиками) В.А. Рубаковым и А.А. Старобинским.

Но первый вариант инфляционной модели был разработан российским исследователем Андреем Линде. Весомый вклад в изучение ранней Вселенной внесли такие известные российские космологи, как А.Г. Дорошкевич, акад. Я.Б. Зельдович, В.Н. Лукаш и др.



Акад. В.А. Рубаков



Акад. А.А. Старобинский



Команда

Согласно инфляционной модели, «инфляционная стадия» наступила вскоре после т.н. «Большого Взрыва», Этот этап характеризуется релятивистским отрицательным давлением, при котором изменяются физические законы обычной теории гравитации, и вещество становится источником не притяжения, но отталкивания. На этой стадии объем Вселенной многократно увеличивается, из-за чего вся современная Вселенная оказывается в одной причинно-связанной области, и кинетическая энергия расширения и потенциальная энергия уравниваются. В результате действия сил отталкивания Вселенная разгоняется и приобретает большую кинетическую энергию. При этом имеющимся наблюдательным данным более всего соответствует модель «хаотической», или «вечной», инфляции, предложенная Андреем Линде. Согласно этой модели, Вселенная заполнена особым видом материи (т.е. скалярным полем), обладающим предельно большой плотностью и релятивистским отрицательным давлением.

В модели «хаотической инфляции» объем Вселенной постоянно растет, и постепенно выкристаллизовываются причинно-связанные домены, в которых инфляция заканчивается, поскольку состояние вещества с отрицательным давлением неустойчиво. Но при этом вся потенциальная энергия, запасенная в скалярном поле, выделяется в виде элементарных частиц и их тепловой энергии; в итоге образуется горячая плазма. Так с окончанием инфляции рождается обычная материя. А в тех же доменах, где инфляция завершилась, начинается эволюция Вселенной по законам, выявленным А.А. Фридманом.

Поэтому, в соответствии с инфляционной моделью, Вселенная разбивается на множество причинно-несвязанных областей; при этом каждую такую область можно рассматривать как своего рода «мини-Вселенную». Совокупность же всех мини-вселенных принято называть «Мультиленной» (Multiverse). На инфляционной стадии из квантовых флуктуаций скалярного поля рождаются возмущения плотности. При этом флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной, быстро увеличивают свою длину и амплитуду, становясь космологически-значимыми. Следовательно, скопления галактик, да и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций. И инфляционная модель Вселенной предсказывает вид спектра этих флуктуаций, подтвержденный наблюдениями крупномасштабной структуры Вселенной и анизотропии реликтового излучения. Важная особенность эпохи инфляции состоит в том, что области Вселенной, разделенные расстоянием «больше размера горизонта частиц», эволюционируют независимо друг от друга. Эти области можно рассматривать как отдельные вселенные. Подобно нашей Вселенной, они однородны и изотропны на больших масштабах.



Андрей Линде (р.1948)



Алан Гут (р.1947)

Согласно теории хаотической или вечной инфляции, предложенной Андреем Линде¹⁷⁸, Мультиленная заполнена особым веществом – скалярным полем ϕ . Это – не материя в обычном понимании этого слова, но «темная энергия». Но после завершения инфляции появляется и обычная материя, и Вселенная начинает развиваться по фридмановским законам «Большого Взрыва».

¹⁷⁸ См., например, А.Д. Линде. Раздувающаяся Вселенная. // *Успехи Физических Наук*, 1984, том 111, вып. 2, С. 191.

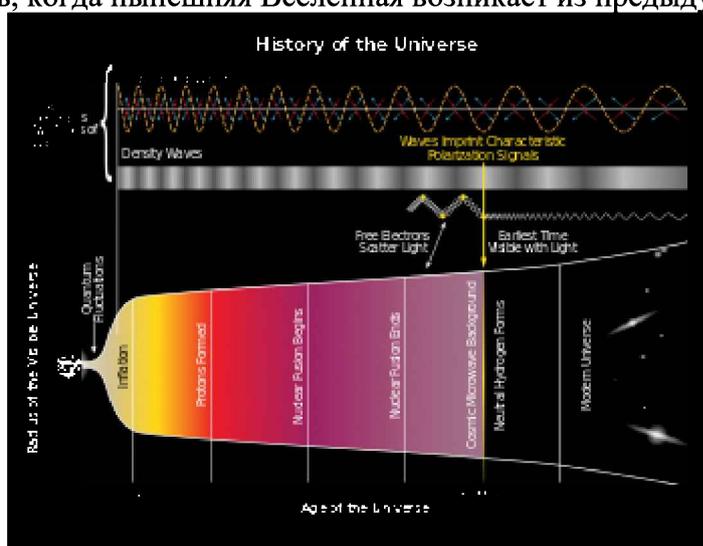
В частности, один из решающих следующих этапов – т.н. «*фазовые переходы*», в результате которых единое поле расщепляется на 4 компоненты - электромагнитное, слабое, сильное и чисто гравитационное поля. Кварки начинают соединяться, образуя протоны, электроны и нейтроны, затем происходит синтез легких ядер, наступает эпоха водорода и т.д. и т.п.

Самый важный факт, подтверждающий теорию инфляции, - это открытие в 1998г. двумя независимыми группами астрономов факта ускоренного расширения Вселенной. Это ускоренное расширение, т.е. разбегание галактик, началось примерно 5 млрд. лет тому назад. По сути дела это означает, что астрономы открыли новый вид материи, обладающий свойством антигравитации.

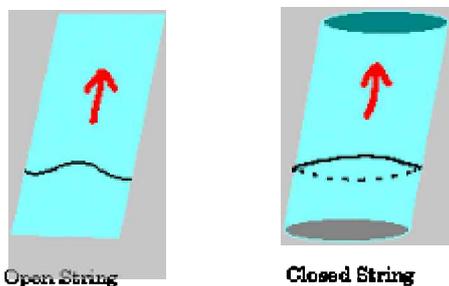
Вкратце достижения современной космологии могут быть подытожены следующим образом:

- нынешний возраст Вселенной составляет 13,7 млрд. лет;
- Вселенная плоская, т.е. евклидова: сумма углов треугольника во всех масштабах равна 2π (средняя плотность Вселенной равна критической и она будет расширяться вечно);
- темная энергия, обладающая свойством антигравитации, вносит в плотность энергии Вселенной вклад, равный 74%;
- вклад ненаблюдаемого гравитирующего вещества (т.н. «темной массы») равен 22%;
- вклад барионов составляет 4%, в том числе обычных звезд – менее 1%.

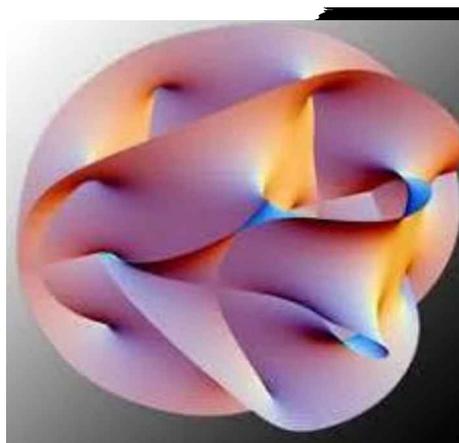
Добавим, что согласно новейшим данным, полученным инфракрасным телескопом JWST (James Webb Space Telescope), модель Большого Взрыва нуждается в определенной модификации. Судя по всему, придется отказаться от космологической сингулярности и принять циклическую модель, когда нынешняя Вселенная возникает из предыдущей.



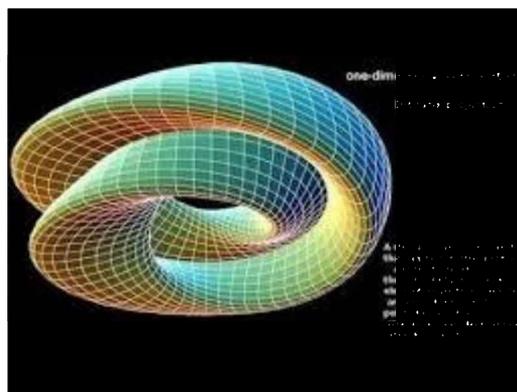
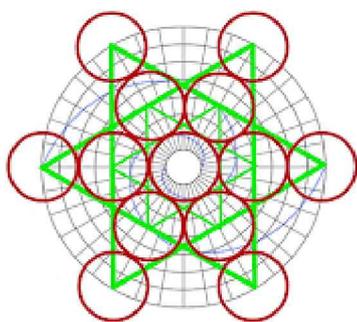
До эпохи инфляции геометрия Вселенной не была плоской. Более того, важная особенность ранней Вселенной – ее *многомерность*, предсказываемая т.н. «*теорией суперструн*». В этой теории все элементарные частицы, в том числе и переносчик гравитационного взаимодействия – гравитон – являются различными типами («*модами*») колебаний одного и того же одномерного пространственного объекта – *струны*. Частота колебаний струны определяет тип частицы и ее энергию. Типичный (планковский) продольный размер струны $l = 10^{-33}$ см. Поэтому при малых энергиях струна неотличима от точечной частицы. Теория струн начинает «работать» только при сверхвысоких энергиях, существовавших в ранней Вселенной. Для непротиворечивого описания «классической» струны нужны 9 пространственных и одно временное измерения. А уже в современной неклассической М-теории – 11 измерений. Куда же девались дополнительные измерения? – Они *компактифицировались*, «свернулись», так что кварки и электроны их чувствуют, а мы – нет¹⁷⁹.



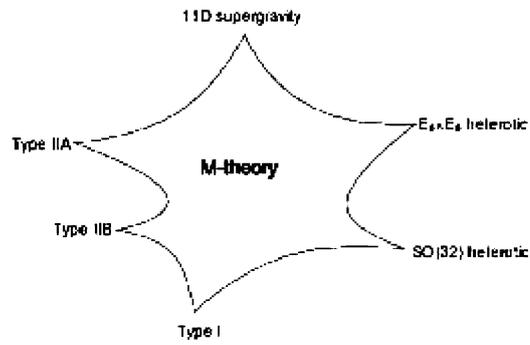
Открытые и замкнутые струны



Пространство Калаби-Яо



¹⁷⁹ Подробнее см.: Виленкин А. Мир многих миров: Физики в поисках параллельных вселенных. – М.: Астрель, 2010.

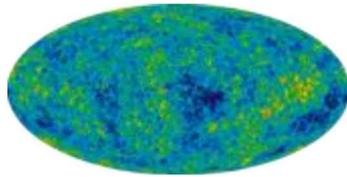


$$\text{Action} = S = \int_t^{t'} L(q(t), \dot{q}(t)) dt \quad \text{--- for point particle}$$

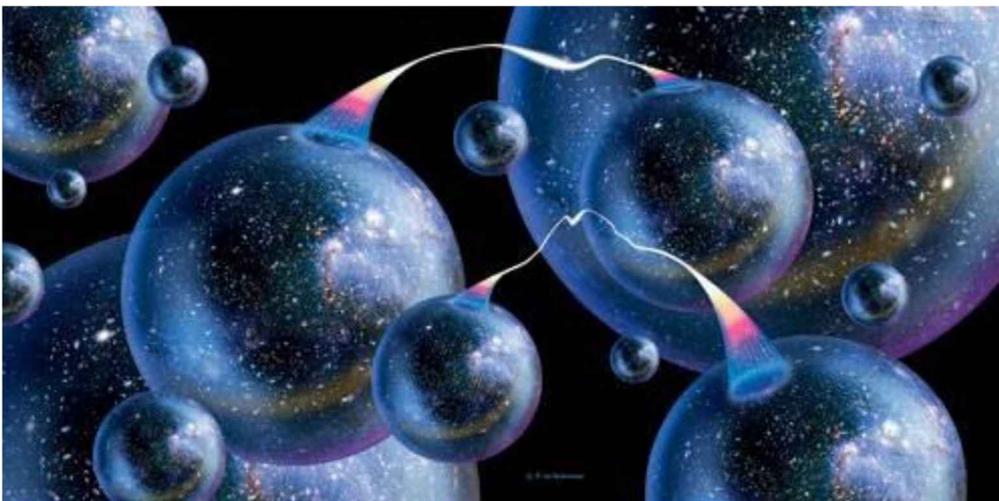
$$\text{Action} = S = \int L(\phi, \phi, \partial\phi/\partial x) dx dt \quad \text{--- for field}$$

$$\text{Action} = S = \int d\sigma d\tau L(\sigma, \tau) \quad \text{--- for string}$$

В итоге жизнь в нашей Вселенной судя по всему носит **случайный** характер. Существует бесконечное число причинно-несвязанных мини-вселенных, а мы находимся в той, где основные физические константы (заряд электрона, постоянная всемирного тяготения и т.д.) оказались такими, что стало возможным появление как жизни, так и разума. Нам всем крупно повезло. Надолго ?



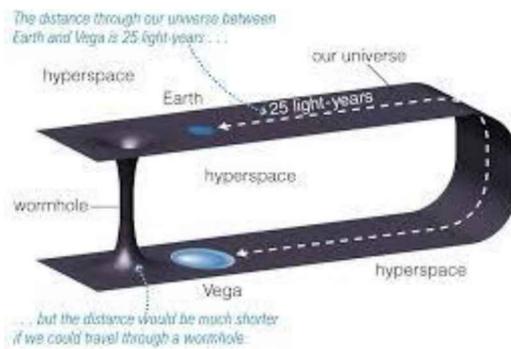
Вот как выглядит Вселенная с искусственного спутника Земли



Мультиленная (Multiverse)

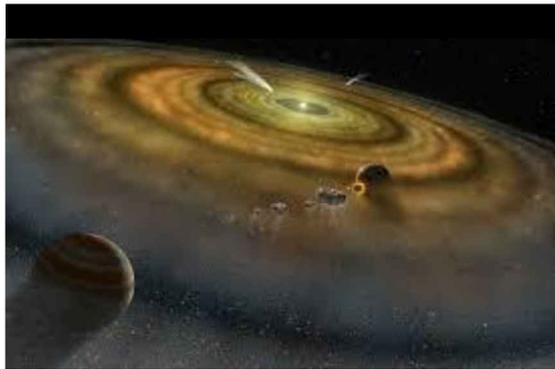
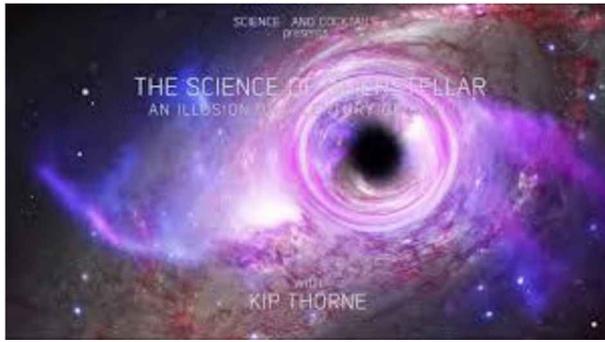


Часть Вселенной, как она видится JWST



INTERSTELLAR





Глава 8. Генезис и становление квантовой теории.

Однако любопытнее всего то, что идея о квантах, в сущности, должна была зародиться еще полвека тому назад, когда создавалась кинетическая теория вещества, ибо эта идея неразрывно связана с молекулярным строением материи, и, если угодно, является даже по существу дела ничем иным, как своеобразным выражением этой молекулярности структуры...Аналогично этому объяснение физических свойств тел с точки зрения молекулярно-атомных движений долго стояло совсем особняком от объяснений явлений излучения световых и звуковых волн. И там, и тут, с известной точки зрения, дело было просто. Но науке понадобилось свести эти явления т.с. на очную ставку, и в результате явились кванты энергии. И там, и тут дело как будто усложнилось; между тем этой идеей квант все эти явления, стоявшие разрозненно и особняком, объединились, так сказать, под одним флагом молекулярности и материи, и энергии.

Дмитрий Гольдгаммер, 1923

В древности, во времена Аристотеля и Птолемея, весь окружающий человека мир подразделялся на три области (точнее, три уровня Реальности): *подземный мир* (лешие, гоблины, демоны, привидения, духи умерших людей и просто злые духи), *подлунный мир* (обычные грешные людишки) и *мир надлунный* (ангелы и боги). Современная наука не слишком далеко ушла вперед. Она выделяет те же три уровня реальности; только называются они теперь иначе: *микромир* (I), *макромир* (II) и *мегамир* (III).



(I) *Микромир* – это темный и запутанный мир молекул, атомов, атомных ядер, элементарных частиц, кварков, струн и бран. Он описывается т.н. «квантовой теорией» (т.е. квантовой механикой, квантовой теорией поля, а теперь и теориями струн и суперструн)

(II) *Макромир* – это привычный мир столов и стульев, домов и деревьев, паровозов и океанских лайнеров. Этот мир описывается классической механикой, классической электродинамикой (а также статистической физикой и термодинамикой).

(III) *Мегамир* – это возвышенный и захватывающий дух мир планетных систем, черных дыр, квазаров, нейтронных звезд, галактик и Вселенной в целом. Он описывается общей теорией относительности (а теперь и инфляционной, и квантовой космологиями).

Поговорим о *микромире*. Как самостоятельная область реальности, обладающая своими собственными законами, он был открыт наукой сравнительно недавно – начиная с конца XIX в. Но откуда же мы знаем о существовании его объектов – молекул, атомов, атомных ядер, кварков и струн?

О существовании молекул мы знаем из опытов с броуновскими частицами: хаотическое движение молекул заставляет большие по размерам частицы взвеси совершать хаотические колебания. (Аналогично, о существовании мелких морских волн мы можем узнать даже пролетая над морем в самолете - глядя в бинокль на колебания палубы корабля).

О существовании составляющих молекулы атомов мы знаем из химии и из оптики.

О существовании ядер и элементарных частиц (включая бозон Хиггса и кварки) – из наблюдений явлений радиоактивности и из экспериментов на ускорителях элементарных частиц, подобных тем, что имеются в г. Дубне (московская область).

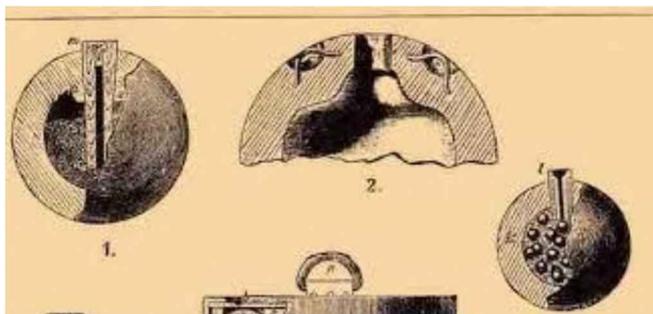
Правда, о существовании струн и бран мы знаем пока только из крайне умозрительных построений теории суперструн. Может, опыты на недавно введенном в эксплуатацию швейцарском международном суперколлайдере внесут, наконец, ясность?

I. Макс Планк. 14 декабря 1900г. на заседании германского физического общества (г. Берлин) немецкий физик-теоретик Макс Планк сообщил, наконец, о решении задачи, которая долгое время волновала научное сообщество физиков всего мира. Речь шла о теоретическом описании спектра излучения абсолютно черного тела¹⁸⁰.

¹⁸⁰ Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge*//*Annalen der Physik*, 1900a, vol,pp.69-122. См. также: Planck Max . *Verdampfen, Schmelzen und Sublimieren.* – *Annalen der Physik*, 1882, vol. 15, pp. 446 – 475.

Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge. Erste Mitteilung.* Berl. Ber.,1897a, pp.57-68.

Если Вы возьмете большое чугунное ядро (внутри оно пустое – туда насыпают порох) и, закатив его в печь, нагреете до большой температуры, то, выкатив кочергой его из печи и просверлив в ядре дыру, Вы сможете изучить спектр выходящего из дыры излучения. Оно образовалось в результате установления т.н. «термодинамического равновесия» между тепловым излучением в ядре и стенками полости.



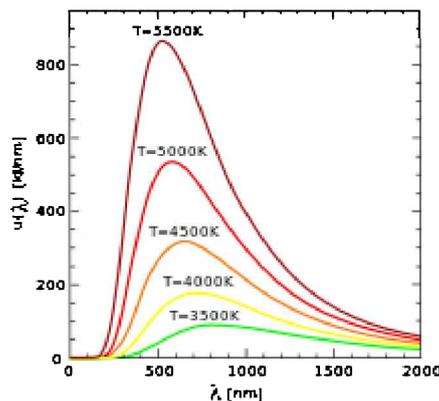
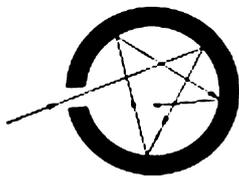
Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge. Zweite Mitteilung.* Berl. Ber., 1897b, pp.715-717.

Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge. Dritte Mitteilung.* Berl. Ber., 1897c, pp.1122-1145.

Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge. Vierte Mitteilung.* Berl. Ber., 1898, pp.57-68.

Planck Max. *Über irreversible Strahlungsvorgänge. Funfte Mitteilung (Schluss).* Berl. Ber., 1899, pp.440-480.

Planck Max (1900b): *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum.* Verh. D. D. Phys. Ges., vol.2, pp. 237-245



Абсолютно черное тело и его спектры для разных температур

Но будущий президент германской академии наук проф. Макс Планк с гордостью сообщил, что он нашел, наконец, теоретический закон, приводивший теорию в согласие с экспериментом:

$$u_v = h \nu^3 / \exp (h\nu/kT) - 1,$$

где T – температура абсолютно черного тела, а ν – частота выходящего из его недр излучения, $h = \text{const}$ – т.н. «постоянная Планка» - константа, открытая незадолго до этого самим Планком.

Как Планк получил этот результат, в чем состояло его значение и почему долгое время другие исследователи не могли к нему прийти?

Согласно Томасу Куну¹⁸¹, в конце XIX в. в творчестве Макса Планка три зрелые научно-исследовательские программы, три исследовательские традиции вступили во *взаимодействие* (и мы могли бы добавить – во *взаимопроникновение*): термодинамика, теория электромагнетизма и статистическая механика. До 1900 года Планк внес существенный вклад во все три традиции, но их вес уменьшался в его творчестве от респектабельной классической термодинамики Карно и Клаузиуса через новомодную и быстро развивающуюся теорию Максвелла до сложного и противоречивого подхода Больцмана. Термодинамика была для него безукоризненным образцом научной теории. Соответствующие достижения Планка в этой области были хорошо известны и высоко оценены научным сообществом до того, как он впервые обратился, не без многочисленных сомнений и колебаний, к максвелловской электродинамике. Неудивительно, что статистическая механика вошла в исследования Планка намного позже и столкнулась с серьезным сопротивлением. Очевидно, что для Планка роль классической электродинамики и статистической механики первоначально была чисто инструментальной.

Изящные уравнения Максвелла и изощренная статистическая техника Больцмана представлялись Планку лишь концептуальными инструментами для решения в первую очередь мучительной «головоломки необратимости» и только потом - трудноразрешимой технической головоломки теоретического описания излучения черного тела. Тем не менее, хотелось бы подчеркнуть, что тот факт, что именно Макс Планк оказался в центре глубокого конфликта между основными парадигмами классической физики, отнюдь не случаен. Как один из первых профессиональных физиков-теоретиков, Планк был особенно внимателен к отношениям между различными фундаментальными физическими теориями, – прежде всего, из-за своей философской позиции «*утонченного реализма*», имеющей прямое отношение к структуре, динамике и прогрессу физического знания.

Согласно Планку, в самом генезисе современной науки такой ее раздел, как физика, основывался на физиологических особенностях человека и носил явно антропологический характер. Тем не менее, хотя изначально основные идеи физики выкристаллизовались из специфических чувственных восприятий обычного человека, в настоящее время они оказались в значительной степени исключенными из физической акустики, оптики и теории тепла. И безусловный итог состоял при этом в достижении «единства и компактности нашей системы теоретической физики».

¹⁸¹ Kuhn TS *Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912*. Oxford and New York: Oxford University Press, 1978

«...Можно сказать, что характерной чертой всего предшествующего развития теоретической физики является явное исключение из всех физических представлений антропоморфных элементов»¹⁸².

Напротив, в соответствии с позитивистской концепцией, основная проблема физики состоит только в прочтении чувственных восприятий в соответствии с установленными законами. Однако, возражает Планк,

«хотя позитивистская точка зрения и совместима с самой собой, она никогда не способствовала сколько-нибудь существенному прогрессу в физике»¹⁸³.

Достаточно обратиться к эпохальным трудам Коперника, Кеплера, Ньютона, Гюйгенса, Фарадея и др. В серии восьми лекций, прочитанных с различными поправками в течение периода, заканчивающегося примерно в 1920 году, Планк утверждал:

«Оглядываясь назад, мы можем вкратце сказать, что характерной чертой всего развития теоретической физики до настоящего времени является объединение ее систем, достигнутое устранением антропоморфных элементов»¹⁸⁴.

Например, непреходящее значение максвелловской электродинамики состоит в том, что она мастерски объединила два раздела физики, которые раньше приходилось рассматривать как независимые друг от друга. Поэтому все теоремы, справедливые для одной ветви объединения, применимы и к другой.

«До появления теории электромагнетизма физика была разделена на три отдельных раздела - механику, оптику и электродинамику, и их объединение является конечной и величайшей целью физических исследований... и, следовательно, количество независимых разделов сократилось до двух - предпоследний шаг к унификации картины мира. Когда и как будет сделан последний шаг, соединение механики и электродинамики, нельзя сказать, и хотя многие умные физики в настоящее время заняты этим вопросом, время для его решения еще не пришло»¹⁸⁵.

Следовательно, знаменитая эпистемологическая концепция Маха, несмотря на ее подкупающую простоту и ясность, в целом представляет собой всего лишь вполне понятную реакцию на крах ожиданий поколений физиков, связанных с особым статусом механических явлений. Главный принцип Маха, принцип экономии мысли, по мнению Планка,

«находится в стороне от природы науки, и он (Мах) уклоняется от самой естественной цели всех научных исследований - нахождения фиксированной картины мира, независимой от изменений времени и людей ...

¹⁸² Planck Max [1910] : Acht Vorlesungen uber theoretische Physik. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia university, 1909, and translated as "Eight Lectures on Theoretical Physics by A.P. Wills, New York, Columbia University Press, 1915, p.4.

¹⁸³ ibid

¹⁸⁴ Planck, Max. [1908] A Survey of Physical Theory. Translated by R. Jones and D.H. Williams. NY: Dover Publications, 1960, p. 4.

¹⁸⁵ Ibid, p. 93.

Фиксированное единство картины мира, однако, как я попытался показать, - это, прежде всего, фиксированная цель, к которой приближается настоящая наука через все свои многочисленные изменения»¹⁸⁶.

Вот почему не следует удивляться, что красной нитью через всю эпохальную творческую деятельность Планка проходила проблема объединения зрелых теорий того времени.

«Итак, как далеко мы продвинулись сегодня к унификации нашей системы физики? Многочисленные независимые области прежней физики теперь кажутся сведенными к двум: механике и электродинамике, или, можно сказать, *физике материальных тел и физике эфира*. Первый охватывает акустику, явления в материальных телах и химические явления; последнее - магнетизм, оптика и лучистое тепло. Но является ли это разделение фундаментальным? Будет ли это окончательным? Это вопрос большого значения для будущего развития физики»¹⁸⁷.

Сам Планк был весьма оптимистичен в отношении будущего развития физики и пытался оказать на него собственное влияние.

«Что касается меня, я считаю, что на него следует ответить отрицательно и на следующих основаниях: *механику и электродинамику нельзя постоянно резко отличать друг от друга*. Относится ли, например, процесс излучения света к механике или электродинамике? К какой области следует отнести законы движения электронов? На первый взгляд, можно сказать: к электродинамике, так как с электронами тяжелая материя не играет никакой роли. Но позвольте обратить его внимание на движение свободных электронов в металлах. Там он обнаружит, изучая классические исследования Х.А. Лоренц, например, что законы, которым подчиняются электроны, относятся к кинетической теории газов, чем к электродинамике. В общем, мне кажется, что *изначальные различия между процессами в эфире и процессами в материальных телах следует рассматривать как исчезающие. Электродинамика и механика не так уж и далеки друг от друга, как это считают многие люди, которые уже говорят о конфликте между механическим и электродинамическим взглядами на мир*»¹⁸⁸.

По мнению Планка, ньютоновская механика и максвелловская электродинамика не являются несоизмеримыми (incommensurable) : механика основана на идеях пространства и времени, но то же самое можно сказать и о классической электродинамике. Следовательно, «на самом деле, есть много указаний, указывающих на **окончательное слияние** этих двух предметов, области которых уже частично перекрываются»¹⁸⁹.

Таким образом, Планк считал себя человеком, который стремится обеспечить ситуацию, когда «пропасть между эфиром и материей когда-то будет преодолена», отвечая на вопрос, который «будет характеризовать всю природу дальнейшего развития нашей науки»¹⁹⁰.

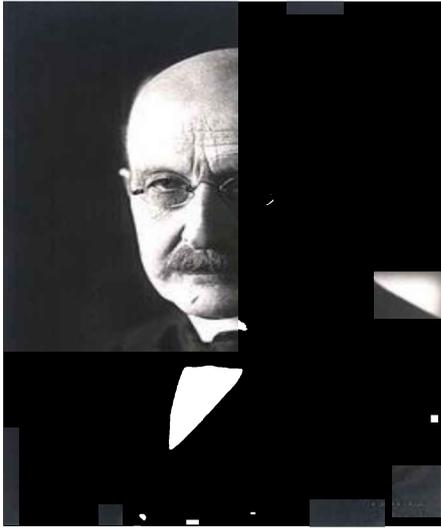
¹⁸⁶ Ibid, p.24

¹⁸⁷ Planck Max [1910] : Acht Vorlesungen uber theoretische Physik. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia university, 1909, and translated as "Eight Lectures on Theoretical Physics by A.P. Wills, New York, Columbia University Press, 1915, p.4.

¹⁸⁸ Planck Max [1910] : Acht Vorlesungen uber theoretische Physik. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia university, 1909, and translated as "Eight Lectures on Theoretical Physics by A.P. Wills, New York, Columbia University Press, 1915, p.4.

¹⁸⁹ ibid

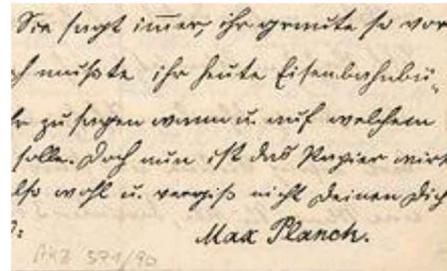
¹⁹⁰ ibid



Макс Планк (1858 – 1947)



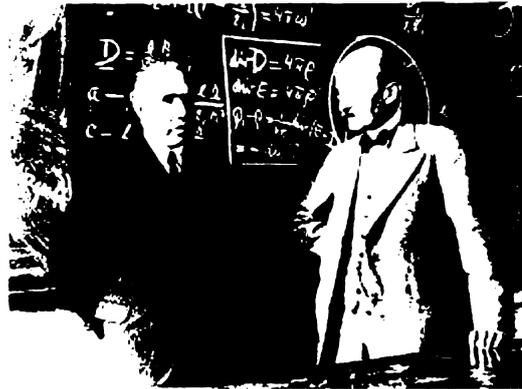
Школа



почерк Планка в 10 лет



Фото из семейного альбома



Max Planck, Albert Einstein and Niels Bohr





Именно исходя из вышеуказанных эпистемологических установок, Планк и приступил к задаче нахождения спектра излучения абсолютно черного тела. При изучении его вклада следует заметить, что так называемая «классическая теория излучения черного тела» до его энергичных усилий вообще не существовала. В 1879 году Йозеф Стефан в результате экстраполяции предварительных экспериментов продемонстрировал, что зависимость плотности излучения черного тела u от температуры T выражается формулой $u = \sigma T^4$. В дальнейшем, Михельсоном, Лэнгли, Вебером, Пашеном и другими исследователями было найдено немало разнообразных выражений для функции распределения черного тела $u(\nu, T)$, полученных за счет непосредственного обобщения экспериментальных данных, пока в борьбу с этой проблемой не включился, наконец, Вильгельм Вин. Он и оказался пионером в нахождении выражения для $u(\nu, T)$, исходя из теоретических представлений

Для Вина (1896 г.) источником излучения абсолютно черного тела являлся нагретый газ. Следуя проницательной мысли русского физика Владимира Михельсона, Вильгельм Вин обнаружил, что в газе количество молекул со скоростями в диапазоне от v до $v + dv$, согласно закону распределения Максвелла, прямо пропорционально $v^2 \exp(-v^2/\alpha^2)$, где константа α пропорциональна температуре газа T . Если предположить, что и частота, и интенсивность излучения определенной молекулы являются функциями только скорости этой молекулы, тогда распределение излучения подчиняется уравнению

$$u(\nu, T) = F(\nu) \exp(-f(\nu)/T).$$

Определив $F(\nu)$ и $f(\nu)$, Вин пришел к следующему выражению (в современных обозначениях с использованием более точных значений констант)

$$u(\nu, T) = 8\pi h \nu^3 / \exp(h\nu/kT)$$

Очевидно, что как чисто теоретический продукт, закон распределения Вина был получен весьма сомнительными средствами и, соответственно, не являлся авторитетным. Правда, ситуация начала постепенно изменяться, - когда Макс Планк заново вывел его другим путем в 1899 году. Именно его напряженные усилия превратили малосодержательный полуэмпирический закон, полученный к тому же произвольным путем, в закон чисто теоретический (с областью

применимости $h\nu / kT \gg 1$).

Таким образом, работы Планка оказались фактически первой реальной и успешной попыткой создать настоящую теорию излучения черного тела, то есть заново вывести плотность излучения $u(\nu, T)$ не из разнообразных эмпирических данных, но из «первых принципов» классической механики, статистической термодинамики и максвелловской электродинамики.

Несомненно, Планк встретил на своем пути множество препятствий, скрупулезно выводя сложные частные теоретические законы, сравнивая их с запутанными экспериментальными результатами, старательно исправляя эмпирические законы и т.д. Это было в то время, когда термодинамика стала устоявшейся, тщательно продуманной физической теорией с множеством практических приложений. Когда он пришел к разочаровывающему выводу, что термодинамика недостаточна, он обратился к противоречивой электродинамике Максвелла - молодой, незавершенной и сомнительной в то время, собственно эмпирическое подтверждение которой только что началось, в первую очередь, из-за напряженных усилий Герца. Тем не менее, Планк, в своем бесконечном поиске необратимости, был вынужден вставить в свою первичную теоретическую схему воображаемые вибрирующие резонаторы. Они были репрезентированы крошечными колеблющимися токами, подчиняющимися уравнениями Максвелла.

Изящные резонаторы Планка не имели ничего общего с настоящими экспериментальными устройствами. Они не имели ничего общего с реальными молекулами, атомами или даже электронами, представляя собой просто причудливые теоретические устройства для установления термодинамического равновесия между веществом и излучением.

В 1897 году Планк опубликовал первую из серии пяти статей, озаглавленную «О необратимых радиационных процессах»¹⁹¹. Во всех пяти статьях¹⁹² (1897- 1899), а также в аналитической статье, в которой резюмировались их результаты для «*Annalen der Physik*»¹⁹³, он подробно исследовал свойства идеальной модели, описывающей систему резонаторов,

¹⁹¹ Planck, Max (1897a)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Erste Mitteilung“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft* 57-68.

¹⁹² Planck, Max (1897a)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Erste Mitteilung“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft* 57-68.

Planck, Max (1897b)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Zweite Mitteilung“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft*,715-717.

Planck, Max (1897c)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Dritte Mitteilung“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft* 1122-1145.

Planck, Max (1898)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Vierte Mitteilung“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft* 57-68.

Planck, Max (1899)“Über irreversible Strahlungsvorgänge. Fünfte Mitteilung (Schluss)“. *Berichte der Deutsche Chemischen Gesellschaft* 440-480.

¹⁹³ Planck, Max (1900a)“Über irreversible Strahlungsvorgänge“. *Annalen der Physik* 1 : 69-122.

взаимодействующих с электромагнитным полем. Однако, как только он прочитал свой первый доклад в Академии, Больцман подверг его резкой и аргументированной критике.

Действительно, еще в 1872 году, за 28 лет до новаторской теории Планка (1900), Больцман в своей потрясающей статье «Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа» уже (в предварительном порядке) применил к процессам обмена понятия дискретной энергии. Обосновывая второе начало из статистической точки зрения, Больцман постепенно пришел к смелому понятию «энергетические атомы» для анализа сложных процессах молекулярных взаимодействий.

Новаторское представление о конечных количествах энергии, которые можно свободно обменивать на сталкивающиеся молекулах, привело Больцмана к важным вычислениям числа столкновений с помощью специальных комбинаторных методов. Однако, из-за преобладающего в то время «электродинамического мировоззрения», Больцман воспринял понятие квантов энергии с большой осторожностью, только как вспомогательную математическую уловку.

Отметим, что «наследие Больцмана» было весьма спорным. Поэтому сначала Планк пытался обойти связанные с этой неоднозначностью проблемы, просто придумав некий электромагнитный аналог Н-теоремы Больцмана. Когда этого оказалось недостаточно, ему пришлось прибегнуть к исчислению вероятностей и пресловутому комбинаторному определению энтропии, которое ему не нравилось больше всего. Таким образом,

«самое позднее, к середине зимы 1897–1898 гг., Планк внимательно изучил версию второго закона Больцмана, эксплуатируя найденные им предложения и почти полностью отказался от своего сопротивления подходу Больцмана. К сожалению для историков, он в течение почти двух лет явно не признавал изменение своего мнения. “Эта задержка усилила почти всеобщее впечатление, что его переход к статистической точке зрения был тесно связан с введением его квантовой гипотезы в конце 1900 года»¹⁹⁴.

Однако верно как раз обратное: *введение Планком странной квантовой гипотезы в 1900 году является прямым следствием необходимого, но неохотного его обращения к статистической точке зрения!*

В письме Роберту Вуду, Планк (1931) откровенно признал, что

«Больцман объяснил существование термодинамического равновесия через статистическое равновесие; если применить его соображения к равновесию между веществом и излучением, можно прийти к выводу, что преобразования всей энергии в излучение [требуемого классической физикой] можно избежать, если предположить, что энергия должна существовать с самого начала в виде некоторых **дискретных частей**».

К началу 1900 года в далеко идущей научно-исследовательской программе Планка все еще отсутствовала только одна грань мастерской трактовки Больцманом необратимости, а именно: использование комбинаторных представлений, и к концу года Планк сделал и этот шаг.

¹⁹⁴ Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912. Oxford and New York, 1978, p.78.

К этому его побудила отнюдь не проблема необратимости. Скорее, это был неустанный поиск такого теоретического закона излучения, который в конечном итоге мог бы пройти проверку новыми, более изощренными экспериментами.

Явным недостатком вывода закона распределения Вина, который Планк вскрыл в «*Annalen der Physik*» в ноябре 1899 года, состоял в отсутствии доказательства уникальности функции, которую он определил как энтропию осциллятора. На основе своих измерений частотного распределения излучения в новой лабораторной черной полости, О. Люммер и Э. Прингсхайм представили новый эмпирический закон излучения черного тела, который явно отклонялся от вышеупомянутого закона Вина. Планк закрыл эту брешь в статье, представленной для публикации уже в феврале 1900 года. Он утверждал, что впервые получил, а не определил, выражение для энтропии осциллятора, еще раз подтвердив закон Вина. Однако эксперимент оказался неподатливым. В статье, представленной в разделе «Встреча натуралистов» 18 сентября 1900 года, Люммер и Прингсхайм ответили, что устаревший закон распределения Вина-Планка не согласуется с их уточненными измерениями чернотельного излучения в низкочастотной области.

В этом диапазоне, достигаемом только с помощью новейших передовых методов, расхождение между экспериментом и теорией составляло около 50% и, очевидно, не могло быть связано с обычными экспериментальными ошибками.

В статье, представленной Физическому обществу 19 октября, Планк сослался на недавнее доказательство закона Вина, которое он представил в «*Annalen der Physik*» в марте, и сразу указал на его недостаток. Он заявил, что энтропия n осцилляторов должна зависеть не просто от их полной энергии, как предполагалось, но от энергии U одного осциллятора. Выражение $S/U = -\alpha / U$, найденное ранее, является слишком грубым, и его следует заменить на более сложное. Планк предложил уравнение, которое «является самым простым из всех выражений, которые дают S как логарифмическую функцию от U (условие, которое предлагает теория вероятностей) и, которое, совпадает с законом Вина для малых значений U ». Если уравнение для S взять в качестве первого члена $(-U / \alpha)$ в разложении в степенной ряд для $(\delta^2 S / \delta^2 U)^{-1}$, его новая форма немедленно следует за добавлением члена, пропорционального U^2 . При $\delta^2 S / \delta^2 U = -\alpha / U (U + \beta)$ два интегрирования, стандартное условие $\delta S / \delta U = 1/T$ и применение закона смещения дают новый захватывающий закон распределения $U = hv / \exp (\alpha v / T)^{-1}$.

Эта формула излучения, как утверждал Планк,

«насколько я могу судить при быстром осмотре, представляет опубликованные до сих пор данные наблюдений так же удовлетворительно, как и лучшая из ранее предложенных функций распределения ... Поэтому я считаю оправданным обратить внимание на эту новую формулу, которую с точки зрения теории электромагнитного излучения, я считаю простейшей, за исключением формулы Вина».

Новые уточненные измерения Люммера и Принсгейма быстро продемонстрировали, что последнее уравнение несомненно превосходит все другие законы распределения. Тем не менее Планку нужно было найти такой путь к формуле, который был бы менее произвольным.

«В тот самый день, - вспоминает Планк, - когда я впервые сформулировал этот закон, я начал посвящать себя проблеме придания ему реального физического смысла, и этот вопрос сам по себе привел меня к рассмотрению взаимосвязи между энтропией и вероятностью, и, таким образом, к линии Больцмана»¹⁹⁵.

Как подчеркнул Томас Кун, эти небольшие замечания регулярно ошибочно интерпретировались как отражение первоначального перехода Планка от феноменологической термодинамики к статистической. Но этот поразительный поворот произошел, по крайней мере, за год, а более вероятно, за три года до этого. Когда Планк говорил об «отношении между энтропией и вероятностью», он имел в виду не грандиозный статистический подход в целом, а только сложное комбинаторное определение энтропии Больцмана. Планк, открывший это определение в «Теории газа» Больцмана, оказался первым ученым, признавшим ее существование.

Увы, первоначальный вывод закона Вина Планком содержал досадное внутреннее противоречие. Введенные им N резонаторов должны были быть независимыми, но его довод зависел от предположения, что их полная энергия U_N распределена между ними поровну. Усложненный довод выявил бы различные способы, которыми эта энергия может быть разделена между резонаторами, точно так же, как сам Больцман в соответствующих комбинаторных выводах решительно разделял полную энергию газа между его многочисленными молекулами. Выражением закона распределения Планка $U = bv / \exp(\alpha v / T)^{-1}$ можно манипулировать, чтобы получить $1/T$ как функцию от U и v , а $1/T$ - это просто $\delta S / \delta U$. После интеграции однозначно получается

$$S = (b/a) \log \left\{ (1 + U / bv)^{1 + U/bv} / U / bv^{U/bv} \right\} + \text{const}$$

Планка, по-видимому, должно было сильно воодушевить очевидное сходство с выдающимся выражением Больцмана для логарифмической связи между энтропией и вероятностью. Однако захватывающее уравнение, кажется, применимо только к одиночному резонатору с энергией U , находящимся в равновесии с полем излучения; оно не подходит для правильной интерпретации в вероятностных величинах.

Итак, представим себе N независимых резонаторов с частотой v в тепловом равновесии со своим собственным полем излучения. Их полная энтропия обязательно равна NS , а их полная энергия равна NU .

¹⁹⁵ Planck, Max [1910] *Acht Vorlesungen über theoretische Physik*. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia University, 1909, and translated as "Eight Lectures on Theoretical Physics" by A.P. Wills. New York: Columbia University Press, 1915.

Если необходимо использовать вышеупомянутые раздражающие комбинаторные элементы, полная энергия должна быть разделена на P элементов равного размера ϵ , так что $P\epsilon = NU$. Умножение уравнения Планка для S на N и замена $P\epsilon / N$ на U определенно дает

$$SN = (b/a) \log \{ (N + P_E / bv)^{1 + P_E / bv} / N^N / (P_E / bv)^{P_E / bv} \} + \text{const}$$

Чтобы прийти к выражению, содержащему только целые числа, размер элемента энергии ϵ должен быть установлен равным bv . Затем количество в $\{ \}$ уменьшается для больших N и P до $(N + P - 1)! / (N - 1)! P!$

Но это выражение является стандартным для известного числа способов, которыми P неотличимых элементов могут быть распределены по N различным блокам. Первые этапы использования Планком известной связи Больцмана между энтропией и вероятностью были успешно завершены. Однако, странное комбинаторное выражение, полученное в результате обратной работы из закона распределения Планка, решительно отличалось от того, которое Больцман развернул при выводе равновесного распределения молекул газа. Следовательно, Планк должен был продемонстрировать, что оно пропорционально вероятности, соответствующей равновесному излучению. Конечная задача Планка состояла в том, чтобы вычислить энтропию S определенного распределения полной энергии E по N резонаторам. Затем он должен был найти ее максимум по изменению распределения полной энергии E по частоте ν . Тем не менее, чтобы вычислить энтропию произвольного распределения, Планку пришлось использовать комбинаторные элементы и, следовательно, он пунктуально следовал за Больцманом в подразделении энергетического континуума на элементы конечного размера.

«Теперь мы должны дать распределение энергии по отдельным резонаторам каждой группы, прежде всего распределение энергии E по N резонаторам с частотой ν . Если рассматривать E как непрерывно делимую величину, такое распределение возможно бесконечным множеством способов. Однако мы считаем, - и это самый важный момент во всем расчете, - что E должно состоять из определенного числа равных частей и использовать в них природную постоянную $h = 6,55 \times 10^{-27}$ (эрг x сек). Эта постоянная, умноженная на частоту резонатора ν , дает элемент энергии в эргах, и, разделив E на нее, можно получить число P элементов энергии, которые должны быть распределены по N резонаторам»¹⁹⁶.

Затем Планк определяет «Аспект» (выражение, используемое самим Больцманом для аналогичной концепции) как конкретную спецификацию набора чисел, которая фиксирует количество элементов, приписываемых различным резонаторам в наборе N . Общее количество возможных комплексов - R . Чтобы получить равновесное распределение, нужно максимизировать R или $\log R$, варьируя энергию на различных частотах. Прямые вычисления показывают, что энтропия ($\log R$) будет иметь максимум, если $U\nu = h\nu / \exp(h\nu/kT)^{-1}$.

¹⁹⁶ Planck, Max [1900b] "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum". *Verh. D. D. Phys. Ges.* 2: 237-245. Translated in Ter Haar, Dirk *The Old Quantum Theory*. Oxford: Pergamon Press, 1967, p.83.

Соответствующее распределение для поля $uv = (8\pi^2v^2/c^3) Uv$. Между прочим, как в его первоначальных статьях, так и в его замечательных «Восьми лекциях по теоретической физике» (1906), теория излучения Планка несовместима с квантованием энергии резонатора. Теория просто требует фиксации размера небольших интервалов, на которые подразделяется энергетический континуум, в целях проведения комбинаторных вычислений. В теории Планка излучение и поглощение резонатора полностью регулируются уравнениями Максвелла. Действительно, Планк часто использовал такие выражения, как $UN = Phv$. Но UN - это полная энергия N резонаторов. Ограничение его целыми кратными hv не налагает каких-либо аналогичных ограничений на энергию отдельного резонатора, которая все еще может изменяться непрерывно.

Как позже признал Макс Планк в своих уже цитировавшихся нами «Лекциях», впервые прочитанных в Колумбийском университете в 1909 году и опубликованных там же в 1915 году,

«Дж. Томпсон склоняется к наиболее радикальной точке зрения, как и Дж. Лармор, А. Эйнштейн и вместе с ним И. Старк даже считают, что распространение электромагнитных волн в чистом вакууме происходит не в точном соответствии с уравнениями Максвелла. но посредством квантов определенной энергии hv . С другой стороны, я придерживаюсь того мнения, что в настоящее время нет необходимости действовать столь революционно»¹⁹⁷.

Итак, хотя Планк часто обращался к экспериментальным результатам, роль эксперимента в создании т.н. «ранней квантовой теории» не следует преувеличивать. Прежде всего, чернотельные эксперименты сыграли роль доминирующего фактора, который побудил Планка применять статистику во все большей степени. Столкнувшись с недостатком экспериментальных данных, Планк никогда не стал бы использовать комбинаторные методы Больцмана в полной мере, так как на самом деле они ему категорически не нравились. Это было основано на выдвигании сомнительных гипотез, которых Планк, поклонник классической термодинамики, постоянно пытался избежать.

И вообще, роль экспериментов в построении квантовой теории была охарактеризована самим Планком следующим образом:

«Даже сегодня физику можно разделить на три существенно разные группы теорий: механику, включающую упругость, гидродинамику и акустику, затем электродинамику с магнетизмом и оптикой и термодинамику. Каждая из этих трех групп теорий сохранила определенную степень независимости, хотя в настоящее время между ними существует большое количество точек соприкосновения, которые либо дополняют, либо противоречат друг другу. *Благодаря быстрому развитию экспериментальной науки* количество этих точек соприкосновения постоянно увеличивается»¹⁹⁸.

¹⁹⁷ Planck, Max [1910] Acht Vorlesungen über theoretische Physik. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia University, 1909, and translated as "Eight Lectures on Theoretical Physics" by A.P. Wills. New York: Columbia University Press, 1915. P.95.

¹⁹⁸ Planck, Max. A Survey of Physical Theory. Translated by R. Jones and D.H. Williams. NY: Dover Publications, 1960, p.83.

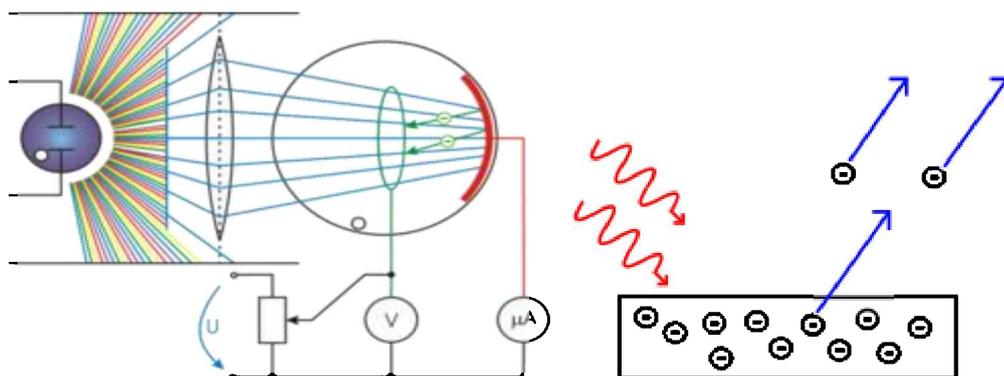
Но ни в коем случае нельзя утверждать, что закон распределения Планка был *прямым обобщением* экспериментальных результатов. Утомительный путь Планка к своему знаменитому закону пролегал сверху вниз. Излишне говорить, что он должен был принять во внимание экспериментальные данные, но это побуждало его не усердно «делать выводы из явлений», а вместо этого применять больше теории. Как одного из первых профессиональных теоретиков физики, выдающегося патриарха немецкой теоретической физики, Планка ни в коем случае нельзя назвать заносчивым мальчиком, которому посчастливилось найти закон природы, ценность которого он сам не смог понять. Как профессиональный теоретик, Планк был чрезвычайно чувствителен к важности проблемы, которую он стремился решить, и к появлению необходимости исследовать ее в межтеоретическом контексте. Он, очевидно, рассматривал генезис проблемы как лежащей в *глубоких противоречиях* между классической механикой, статистикой, электродинамикой и термодинамикой¹⁹⁹.

Планк прозорливо замечал, что внедрение формулы $\epsilon = h\nu$ вызвано наличием пропасти между статистической механикой и электродинамикой. Окончательное устранение перекрестного противоречия заключалось в создании квантовой электродинамики, то есть в построении огромной квантовой теории излучения, которая рассматривала электромагнитные частицы как молекулы Больцмана, которые могут набирать энергию при столкновениях с обычными молекулами и резонаторами. Вторым человеком, который осознал этот серьезный и заволашевающий разрыв, был Альберт Эйнштейн.

II. Альберт Эйнштейн. И в 1905г. в другой своей знаменитой статье, опубликованной за 3 месяца до статьи по специальной теории относительности (СТО), никому тогда не известный 26-летний молодой человек, инженер по базовому образованию, которого звали Альберт Эйнштейн (1879-1955), показал следующее. Такие явления, как фотоэффект (т.е. выбивание отдельных электронов с поверхности металлической пластинки) и ряд других, можно успешно объяснить, если предположить, что электромагнитное излучение *действительно* состоит из крошечных корпускул -квантов²⁰⁰. Сам Планк считал, что атомы и молекулы черного тела испускают и поглощают энергию квантами, импульсами, вспышками; само же излучение имеет чисто классическую природу. Напротив, Эйнштейн в своей эпохальной статье 1905 успешно возродил корпускулярную теорию света, восходящую еще к Ньютону.

¹⁹⁹ Rinat M. Nugayev. The Planck-Einstein Breakthrough: Reconciliation of the Pivotal Research Programs of the Classical Physics. Minkowski Institute Press, Montreal, 2020.

²⁰⁰ Einstein A. Über eine die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. - *Annalen der Physik*, 1905a, vol.17, pp.132-148. Имеется перевод: Эйнштейн А. Об одной точке зрения, касающейся возникновения и превращения света. – Собр. соч., т.3. М., 1966, с. 92 – 107.



Крайне важен путь, приведший Эйнштейна к этому результату²⁰¹. Как бы продолжая исследования Макса Планка, Эйнштейн начинает свою эпохальную статью 1905г. следующими словами:

«Существует *глубокое формальное противоречие* между теоретическими представлениями физиков о газах и других весомах телах и максвелловской теорией электромагнитных процессов в так - называемом пустом пространстве».

В чем же это глубокое противоречие состоит ?

«В то время как мы полагаем, что состояние тела полностью определяется положениями и скоростями хотя и очень большого, но *ограниченного* количества атомов и электронов, мы используем для определения состояния электромагнитного поля *непрерывные* пространственные функции, так что конечное число переменных не может считаться достаточным для полного определения электромагнитного поля в пространстве».

Но это противоречие может привести к ситуации, когда

«теория света, оперирующая непрерывными функциями в пространстве, придет в противоречие с опытом, будучи применена к явлениям образования и преобразования света».

Поэтому

«я полагаю, что наблюдения чернотельного излучения, фотолюминесценции, образования катодных лучей и других явлений могут быть лучше объяснены, исходя из предположения, согласно которому энергия света прерывно распределена в пространстве».

И в первой части статьи Эйнштейн демонстрирует, каким образом совместное применение механических и электродинамических «теоретических картин» для описания чернотельного излучения не только приводит к противоречиям с экспериментом (а у него нет даже ссылок на работы Люммера и Принсгейма и Рубенса и Курльбаума), но приводит к *парадоксу*, который не

²⁰¹ Нугаев Р.М. Генезис специальной теории относительности: интертеоретический контекст // «Метафизика», 2018, №4 (30), С.113-128.

может быть устранен обычными методами. Для этого Эйнштейн строит идеальную модель – конструирует воображаемую полость, содержащую свободное электромагнитное поле, молекулы газа и герцевские резонаторы. В результате получается, что совместное применение механики, термодинамики и электродинамики неизбежно приводит к закону Рэлея-Джинса. Но

«это соотношение, которое мы нашли как условие термодинамического равновесия, *не только не согласуется с экспериментом*, но также показывает, что в нашей картине невозможно определенное распределение энергии между эфиром и материей»,

поскольку «чем больше интервал частот резонаторов, тем больше становится энергия излучения в пространстве, и в пределе мы получаем

$$\int_0^{\infty} \rho_{\nu} d\nu = (R/N) (3\pi/L^3) \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty,$$

т.е. то, что позже назовут «ультрафиолетовой катастрофой».

Несмотря на то, что часто в литературе утверждается, что рассматриваемая статья была написана Эйнштейном для объяснения фотоэффекта, более тщательное ее изучение показывает, что это не совсем так. Измерения этого эффекта, произведенные к тому времени, не были достаточно точны для однозначного указания на отклонения от предписанного классикой поведения²⁰².

Эйнштейн обращался к данным по флюоресценции, фотоэлектричеству и фотоионизации только как к *косвенным* свидетельствам в пользу выдвинутого им тезиса. Напротив, то, что его занимало более всего – это глубокое «противоречие встречи» между механикой и электродинамикой.

Но почему это противоречие так его занимало? – Как всегда, вполне здоровое объяснение мы можем найти в эйнштейновских «Автобиографических Заметках»²⁰³. И действительно, первый этап «революции, начатой введением поля»²⁰⁴ состоял в создании максвелловской электродинамики.

Все домаксвелловские попытки описания физических взаимодействий были теориями взаимодействий между несколькими материальными точками. Благодаря Фарадею и Максвеллу, в классическую физику вошло Электромагнитное Поле в качестве элемента физической реальности, обладавшего равными правами с Материальной Точкой. Возникшая в итоге проблемная ситуация характеризовалась «дуализмом, состоящим в том факте, что материальная точка в ньютоновском смысле и поле как континуум используются как элементарные понятия рука об руку.

²⁰² Ter Haar Dirk . The Old Quantum Theory. Oxford, Pergamon Press, 1967.

²⁰³ Einstein, Albert. Autobiographical Notes. In : Albert Einstein: Philosopher -Scientist, ed. P.A. Schilpp, vols 1-2, 1949, Evanston, IL, pp. 1-14.

²⁰⁴ *ibid*, p.37

Кинетическая энергия и энергия поля оказываются существенно различными вещами»²⁰⁵.

Как неизбежное следствие этого дуализма,

«разразился фундаментальный кризис, вся серьезность которого была внезапно осознана благодаря исследованиям Максом Планком теплового излучения (1900)».

Планковский результат [$\epsilon = h\nu$] явно противоречил основам механики и электродинамики, из которых исходили его вычисления. Правда,

«Мой собственный интерес состоял в следующем: какие общие следствия, имеющие отношения к структуре излучения и даже, более того, к *электромагнитным основаниям физики*, могут быть выведены из радиационной формулы...?»²⁰⁶.

Эйнштейновское внимание в первой статье 1905г. к теории квантов было обусловлено ее намечающейся способностью объединить максвелловскую электродинамику с Больцмановской статистической механикой. Он и начал свою статью с того, что волновало его более всего – с раскола в основаниях физики, особенно чувствительно ощущавшегося в лоренцевской теории электронов. Но как Эйнштейн в своей статье собирался устранять противоречие встречи?

Для ответа на этот вопрос обратимся к тем работам Эйнштейна, которые были опубликованы им до 1905г.²⁰⁷. Все они имеют одну общую особенность – статистико-термодинамический подход. Но еще Томас Кун показал, что то, что привело Эйнштейна к идее фотона, было результатом последовательной реализации определенной исследовательской программы, начатой в 1902г., программы «настолько независимой от Планка, что она неминуемо должна была привести к закону излучения черного тела даже в том случае, если бы Планка на свете не было»²⁰⁸.

Рассматриваемая работа Эйнштейна 1905г., по Куну, явилась закономерным этапом развития исследовательской программы статистической термодинамики. Ее содержание убедительно свидетельствует о том, что Эйнштейн начал искать свой собственный закон чернотельного излучения, что он быстро натолкнулся при этом на глубокий парадокс –

²⁰⁵ Ibid, p.37

²⁰⁶ Ibid, p. 47

²⁰⁷ Einstein A. Folgerungen aus den Capillazitatsercheinungen. – Annalen der Physik, 1901, vol. 4, pp. 513 – 523. Имеется перевод: Эйнштейн А. Следствия из явлений капиллярности. – Собр. соч., т. 3, 7 – 17. М., 1966.

Einstein A. Uber die thermodynamische Theorie der Potential-differenz zwischen Metallen und vollstandig dissoziierten Losungen ihrer Salze und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte. – Annalen der Physik, 1902, vol. 8, pp. 798 – 814. Имеется перевод: Эйнштейн А. О термодинамической теории разности потенциалов между металлами и полностью диссоциированными растворами их солей и об электрическом методе исследования молекулярных сил. – Собр. соч., т. 3. М., 1966, с. 18 – 33.

Einstein A. Kinetische theorie des Warmegleichgewichtes und des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. – Annalen der Physik, 1902, vol. 9, pp. 417 – 433. Имеется перевод: Эйнштейн А. Кинетическая теория теплового равновесия и второго начала термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 34 – 49.

Einstein A. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. - Annalen der Physik, 1903, vol.11, pp. 170 - 187.Имеется перевод: Эйнштейн А. Теория основ термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 50 – 66.

Einstein A. Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme. - Annalen der Physik, 1904, vol.14, pp. 354 - 362. Имеется перевод: Эйнштейн А. К общей молекулярной теории теплоты. – Собр. соч., т.3, М., 1966, с. 67 – 74.

²⁰⁸ Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912. Oxford and New York, 1978, p.171

противоречие встречи между статистической механикой и максвелловской электродинамикой, - и что он оставил поиск закона чернотельного излучения для того, чтобы целиком заняться самим парадоксом. Все это ясно из начала самой статьи, которое мы уже процитировали. Первая ее часть заканчивалась описанием т.н. «ультрафиолетовой катастрофы». Как же Эйнштейн все-таки разрешил парадокс?

Во второй части рассматриваемой Эйнштейн применил термодинамику ($dS=1/T$), статистическую механику ($S=k \log W$) и максвелловскую электродинамику ($E=V \int \rho_v dv$) для описания области эмпирической реальности, охватываемой законом излучения Вина.

Совместное применение трех наиболее фундаментальных классических исследовательских традиций позволило Эйнштейну придти к явно дедуктивному умозаключению: если монохроматическое излучение с частотой ν и энергией E содержится в объеме V_0 , то вероятность W того, что в любой момент времени вся энергия излучения будет находиться в части V объема V_0 дается выражением

$$W = (V/V_0)^{E/h\nu} \quad (i)$$

В этой же работе Эйнштейн показал, что в случае n движущихся независимо друг от друга частиц в объеме V_0 вероятность их одновременного обнаружения в V есть

$$W = (V/V_0)^n \quad (ii)$$

Сравнивая (i) and (ii), Эйнштейн приходит к выводу, что

«монохроматическое излучение малой плотности ведет себя в термодинамическом отношении так, как если бы оно состояло из отличных друг от друга независимых квантов энергии величиной $h\nu$ ».

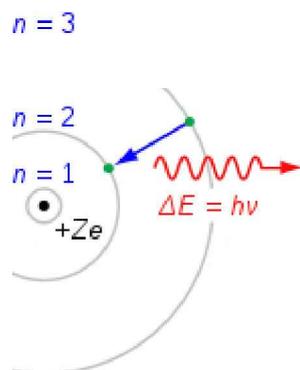


Нильс Бор (1885-1962)



Нильс Бор и Лев Ландау в МГУ

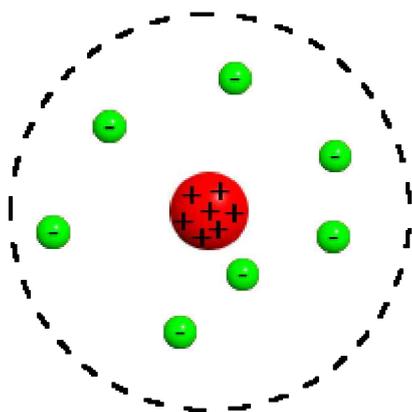
III. Третий шаг в создании квантовой теории сделал датский физик Нильс Бор (1885-1962). В 1911-12 гг. он работал в Кембридже у Эрнста Резерфорда²⁰⁹. Основываясь на его достижениях (открытие атомного ядра), Бор выдвинул такую планетарную модель атома²¹⁰ (1913 г.), в которой отрицательно заряженные электроны, вращающиеся вокруг положительно заряженного ядра, излучали только при переходе с дальней орбиты на ближнюю кванты света величиной $E = nh\nu$, где $n = 1, 2, 3, \dots$



Модель Бора



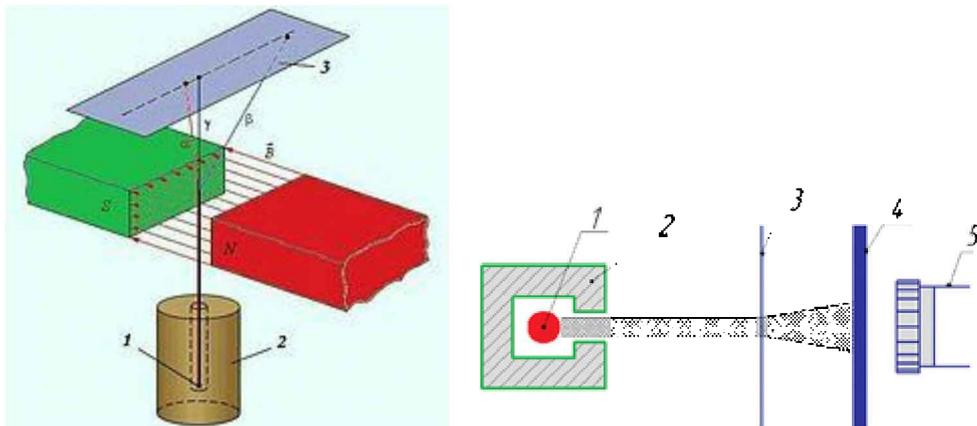
Институт Бора в Копенгагене



Планетарная модель атома и ее создатель сэр Эрнст Резерфорд (1871-1937).

²⁰⁹ Розенбергер Ф. История физики. Часть вторая. История физики в новое время. М. - Л.: Государственное технико-теоретическое издательство. – 1933.

²¹⁰ Bohr N. On the Constitution of Atoms and Molecules. – Philosophical Magazine, 1913, vol. 26, pp. 1-25, 476-502, 857-875. Имеется перевод: Бор Н. О строении атомов и молекул. – Собр. соч., т. I. – М.: Наука, 1970, с. 84 – 148.



Схемы опытов Резерфорда по изучению радиоактивности, выявившие существование атомного ядра и приведшие к созданию планетарной модели атома (1911).

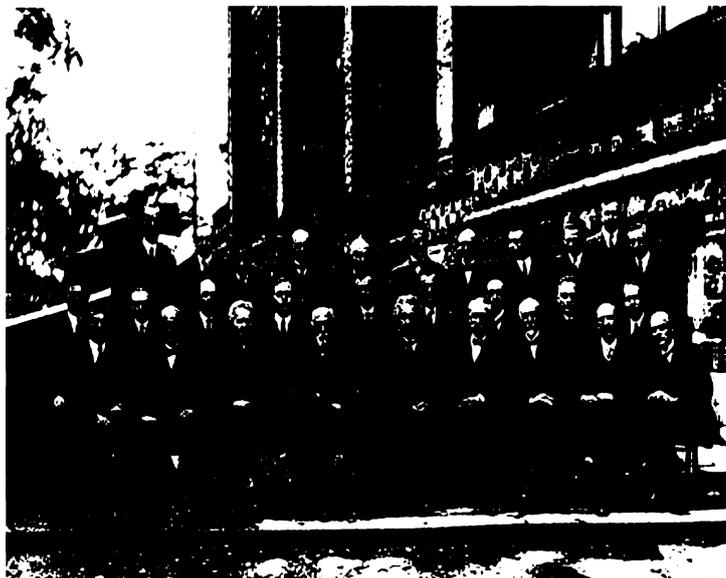


Герцог Луи де Бройль (1892-1987)



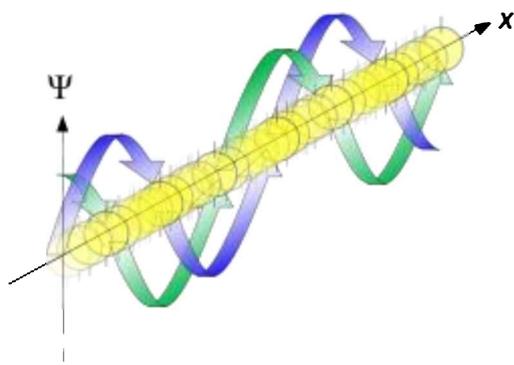
Francois-Marie, 1st Duc de Broglie, (1671–1745) ancestor of Louis de Broglie and Marshal of France under Louis XIV of France

IV. В 1923г. французский физик Луи де Бройль (Louis de Broglie) высказал потрясающую воображение идею о том, что как свет, будучи волной, в ряде экспериментов ведет себя как частица, так и любая микрочастица, скажем электрон, может иногда рассматриваться как волна с длиной волны $\lambda \sim h/mv$, где m – масса микрочастицы, а v – ее скорость. Соответствующая каждой микрочастице волна теперь называется волной де Бройля. Длина волны де Бройля тем больше, чем меньше масса и скорость частицы.

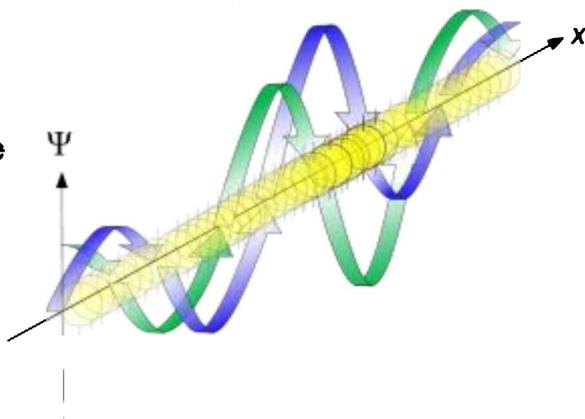
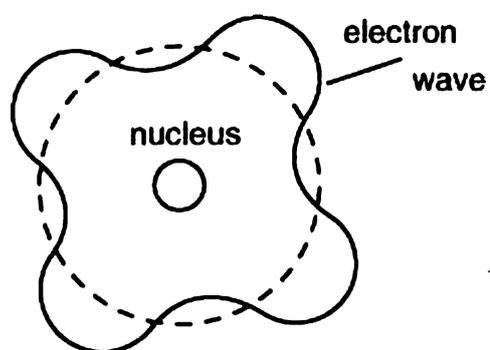


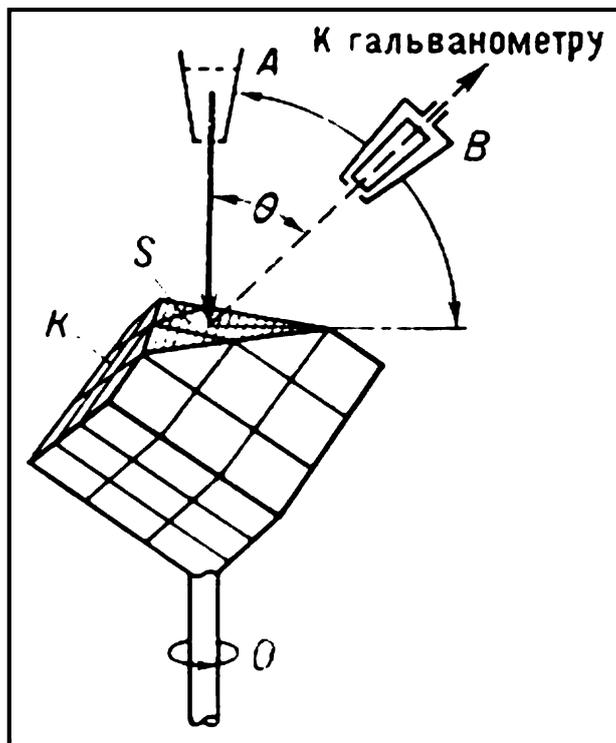
Все великие физики начала XX в. на конгрессе

$$\Psi = Ae^{i(\rho x - \omega t)}$$



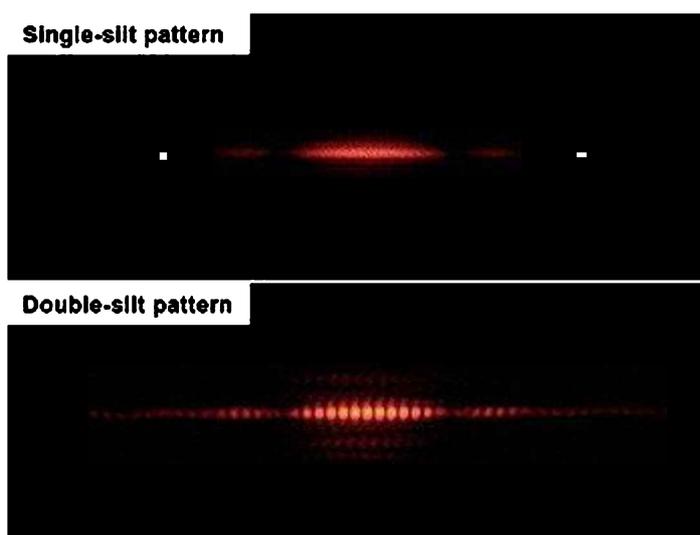
$$\Psi = \sum_n A_n e^{i(\rho_n x - \omega_n t)}$$





Дэвиссон & Джермер и схема их потрясающего эксперимента

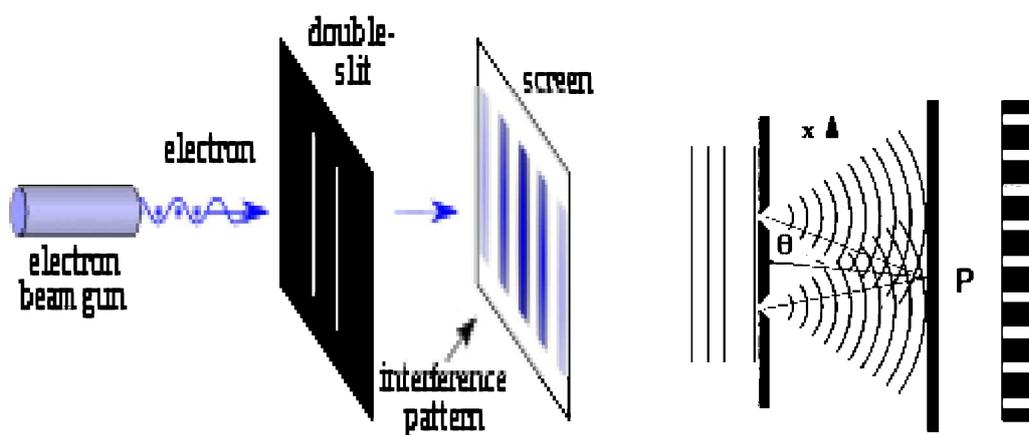
И в 1927 г. американские физики Дэвиссон и Джермер (Clinton Davisson & Lester Germer) поставили знаменитый эксперимент, раскрывший явление дифракции электронов и наглядно выявивший их волновые свойства.



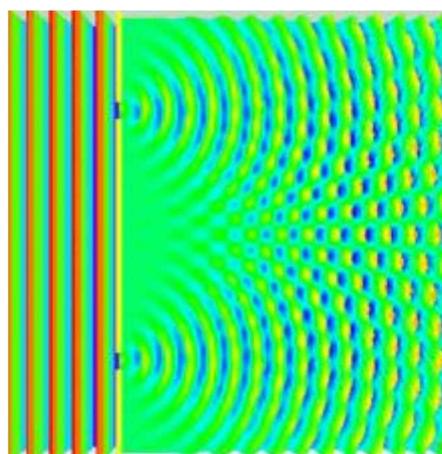
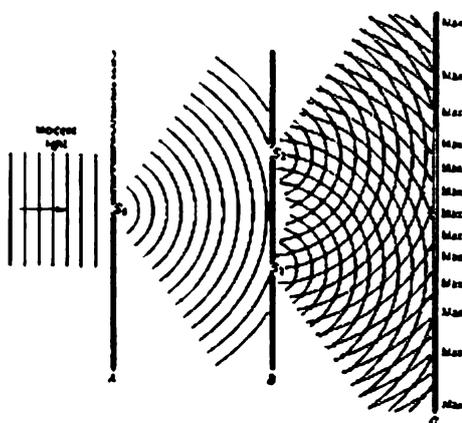
Рассмотрим идеализированную версию этого эксперимента. Из точки S испускаются по очереди электроны, которые проходят через две щели, вырезанные в экране, и попадают на мишень с расположенными на ней счетчиками частиц. Если закрыта левая щель, электроны ведут себя достаточно предсказуемо, попадая в соответствующую область экрана. Если закрыта правая – аналогично.

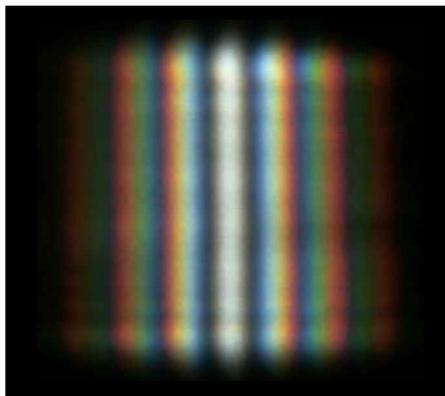
Но если мы откроем *обе* щели, мы должны ожидать, что полученная картина должна явиться соединением предыдущих, но не тут-то было ! Наряду с левой и правой мишенями в центре экрана возникает новая, *третья* область, с очевидностью образованная т.н. «интерференцией» электронов. (Правда, это явление известно из ... оптики и состоит в том, что два когерентных – т.е. с одинаковыми длинами волн - луча света, взаимодействуя друг с другом, образуют на экране своеобразную картину, характеризующуюся чередованием черных и белых концентрических полос).

Но не только поток электронов, но и отдельный электрон обладают волновыми свойствами! Мы можем испускать электроны по-одному, по очереди, но от этого итоговая картина не изменится! Как будто один электрон в полете раздваивается на две половинки, которые проходят через разные щели для того, чтобы после прохождения через них начать интерферировать друг с другом и образовать соответствующую интерференционную картину.



Упрощенная версия эксперимента Дэвиссона и Джермера





Для сравнения: интерференция солнечных лучей



Эрвин Шредингер (1887-1961)



Вернер Гейзенберг (1901-1976)

V. Основываясь на идеях де Бройля, австрийский физик Эрвин Шредингер (Erwin Schrodinger, 1887-1961) сформулировал понятие волновой функции $\Psi(x,y,z,t)$ и нашел уравнение, которое описывало ее распространение в пространстве и во времени

$$i\hbar \partial\Psi/\partial t = H \Psi,$$

где оператор Гамильтона $H = (-\hbar^2/2m)(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2) + V(x,y,z)$. Уравнение Шредингера – это дифференциальное уравнение в частных производных, решив которое при заданном начальном условии, мы найдем решение $\Psi(x,y,z)$ в любой следующий момент времени t .

Кстати, Эрвин Шредингер с уважением относился к философии, и даже собирался ее преподавать, подчеркивая, что последняя «создавалась и создается «не тупицами, а людьми, одаренными высшей способностью к мышлению». После окончания венского университета, осенью

1925г. «я намеревался преподавать физику, приняв в качестве образца превосходные лекции моего любимого учителя Фрица Газенерля. В остальном же предполагал заниматься философией. В то время я углубился в изучение трудов Спинозы, Шопенгауэра, Рихарда Земона и Рихарда Авенариуса»²¹¹.

Роль философии для науки он описывал при помощи следующей аналогии:

«в научной армии, при продвижении ее в неизвестную вражескую страну, метафизика образует острие или выдвинутые вперед дозоры; они **совершенно необходимы**, но, как каждый знает, находятся в большой опасности». Поэтому «метафизика не является частью самого здания науки, но подобна, скорее, деревянным лесам, без которых нельзя обойтись при постройке здания»²¹².

Наверное, поэтому

«наука о природе никогда не достигает своей цели, т.е. ни о какой теории нельзя спросить, верна ли она, но лишь в каком направлении будет она развиваться... Уже по этой причине точное знание в полном смысле этого слова невозможно»²¹³ «Мы в лучшем случае еще можем договориться о **структуре** чувственно воспринимаемого мира, но не о качестве строительных камней, из которых этот мир состоит»²¹⁴.

Тем не менее, в истинный смысл пси-функции Ψ вник чуть позже немецкий физик Макс Борн (Max Born). $|\Psi(x,y,z)|^2$ – это вероятность обнаружить систему в точке с координатами (x,y,z) . Поэтому электрон – это всего лишь «облако вероятности», а уравнение Шредингера – это уравнение, описывающее динамику совокупности объективных потенциальных возможностей электрона обладать определенными свойствами – и вести себя в определенных экспериментах соответствующим образом. Как позже Макс Борн отмечал в книге «*Атомная физика*» (С.118), «корпускулярные и волновые идеи **нельзя совместить** в пределах монолитного и непротиворечивого формализма, не поступившись некоторыми фундаментальными классическими принципами. В качестве объединяющей основы выступает концепция вероятности...»

²¹¹ Шредингер Эрвин. «Мой взгляд на мир». - М.: Книжный дом «Либрокон», 2009, предисловие.

²¹² *ibid*, С.13.

²¹³ С.112.

²¹⁴ С.119.



Макс Борн (1882-1970)

Именно Борн выразил мироощущение физиков своего поколения в афоризме :

«Я изучал философов всех времен и встретил у них множество ярких идей, но не смог усмотреть никакого стабильного прогресса к более **глубокому** познанию или пониманию сути вещей. Наука, напротив, наполняет меня чувством устойчивого прогресса, и я убежден, что *именно теоретическая физика и есть подлинная философия*».

К сожалению, и прогресс в области физики г. Борн оценивал слишком оптимистично.

В 1927г. немецкий физик **Вернер Гейзенберг** (Werner Heisenberg, 1901-1976) разработал «матричный» вариант квантовой механики, эмпирически-эквивалентный шредингеровскому. Он сформулировал соотношение неопределенностей, показывающее невозможность одновременного существования у квантового объекта определенных значений для таких величин как координата и импульс.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

В 1924-1925гг. швейцарский физик **Вольфганг Паули** (Wolfgang Pauli, 1900-1958) сформулировал т.н. «принцип запрета», согласно которому две одинаковые квантовые частицы с полуцелым спином (скажем, электроны) не могут находиться в одинаковом состоянии.

Глава IX. Эволюция квантовой парадигмы.

Shut up and calculate!

Поль Дирак. Наставление аспирантам

VI. Следующий этап развития квантовой теории – т.н. «*релятивистская квантовая механика*» - связан с именем английского физика-теоретика Поля Дирака (Paul Dirac, 1902-1984). Он дал первый набросок согласования квантовой механики с другой неклассической теорией - специальной теорией относительности и записал уравнение движения электрона со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Несмотря на неоднократные заявления Дирака о нерелевантности его исследовательской деятельности и философии, все же можно констатировать определенное косвенное влияние ряда теоретико-методологических принципов гуссерлевской эпистемологии, имевшее место через труды Артура Эддингтона и Германа Вейля, с которыми Дирак был прекрасно знаком²¹⁵.



$$(i\hbar c \gamma^\mu \partial_\mu - mc^2) \psi = 0$$

Поль Дирак и его уравнение

«Теория, обладающая математической красотой, обладает большей вероятностью быть правильной, чем уродливая, которая удовлетворяет определенным экспериментальным данным»

“мы, возможно, можем описать эту ситуацию [в современной науке], заявив, что Бог является математиком чрезвычайно высокого уровня, и что он использовал при конструировании Вселенной очень продвинутую математику»

²¹⁵ Нугаев Р.М. Дираковский синтез квантовой механики и специальной теории относительности: интертеоретический контекст// Философия науки и техники, 2021, т.26, №2, С.96-109



Sir Arthur Eddington, FRS (1882-1944) Prof. Hermann Weyl, ForMemRS (1885-1995)

Всем этим требованиям отвечала статья Поля Дирака «Квантовая теория электрона»²¹⁶ [Dirac, 1928]. В теории Дирака роль основополагающего принципа играл эпистемологический «принцип математической красоты», во многом сводившийся, к требованию внесения минимальных, по сравнению с классическими теориями, изменений в новую, неклассическую теорию. Но это требование не исчерпывало содержание важнейшего для Дирака эвристического принципа. Необходимо еще и учитывать его «синтетический», эддингтоновский и вейлевский аспект - обращение, при формулировке своих уравнений, к такому математическому языку, который способен осуществить *подлинный синтез* «геометрии и физики», вводя математические конструкты, эффективно интегрирующие и чисто математические, трансформационные, и сугубо физические, «материальные» свойства.

Как бы то ни было, «математическая красота», очевидно, состоит не только в получении максимального числа результатов минимальными средствами, но и в возможности одним элегантным жестом объединить казалось бы никак не связанные друг с другом представления. Примерами такого интегрального математического языка являются векторное исчисление, представленное ‘гидравлическими’ максвелловскими моделями, и тензорное исчисление ОТО А. Эйнштейна .

Исходным материалом для построения релятивистской теории электрона могла стать теория Паули: необходимо было просто сформулировать ее лоренц-инвариантным образом, обобщив матрицы 2x2 на случай 4x4. Но Дирак претендовал на большее.

²¹⁶ Dirac P.A.M. The Quantum Theory of the Electron // *Proceedings of the Royal Society (London)*, 1928, A 117 , pp. 610-624.

Первый этап его исследования состоял во введении *принципиально нового математического конструкта*: 4-компонентной волновой функции $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)$. Этот шаг был чрезвычайно смелым и рискованным, поскольку никаких эмпирических указаний в пользу такого обобщения не существовало. В конце концов, спин электрона мог принимать только два значения, но не четыре.

Следующие шаги, естественно, состояли и в релятивистских обобщениях двумерных матриц Паули на 4 измерения, и в симметричном ранжировании всех производных, которые должны были выглядеть, в соответствии с релятивистской инвариантностью, одинаковым образом, и т.д. и т.п. (см. технические подробности в соответствующих учебниках, или, еще лучше – в дотошных историко-научных исследованиях, подобных статьям²¹⁷).

В итоге Дирак пришел к следующему релятивистскому уравнению для свободного электрона

$$[\rho_0 - \rho_1 (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}) - \rho_3 mc] \psi = 0,$$

где $\rho_0 = i\hbar \partial / c \partial t$, $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)$; $\rho_r = -i\hbar \frac{\partial}{c \partial x(r)}$, $r = 1, 2, 3$; $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ - вектор, сформированный при помощи указанных 4x4 матриц Дирака.

В итоге успешный синтез состоял в получении уравнения, пространственно-временные свойства которого преобразовывались в соответствии с СТО, а квантовые свойства – в соответствии с трансформационными свойствами квантовой механики. Но главное достижение теории Дирака состояло, конечно, в теоретическом воспроизведении спина электрона, который естественно оказывался теперь строго релятивистским следствием его теории. Изящный вывод корректных спиновых и магнитных моментов электрона позволил Дираку легко объяснить все имевшиеся спектроскопические головоломки – эффекты Зеемана, Пашена-Бака и формулу Зоммерфельда.

Но, пожалуй, самым неожиданным следствием релятивистской теории Дирака явилось предсказание нового вида материи – т.н. «антиматерии», существование которой никем до этого не ожидалось, но которое было подтверждено через несколько лет. Только после этого открытия все закономерные сомнения в справедливости и плодотворности дираковского синтеза СТО и квантовой механики полностью отпали. Из уравнения Дирака вытекает, что электрон обладает механическим моментом количества движения — т.н. «спином», равным $\hbar/2$. Более того, он также обладает магнитным моментом $e\hbar / 2mc$ (e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, \hbar — ‘редуцированная’ постоянная Планка). Все это было известно и до теории Дирака. Но с помощью уравнения Дирака была получена также более точная формула для уровней энергии атома водорода, включающая тонкую структуру уровней, а также разумно объяснен эффект Зеемана.

При помощи уравнения Дирака были найдены формулы для вероятностей рассеяния фотонов свободными электронами (т.н. «комpton-эффект») и излучения электрона при его торможении (т.н. ‘тормозное излучение’).

²¹⁷ Kragh H. The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons // *Archive for History of Exact Sciences*, 1981, vol. 24, pp. 31-52.

Все эти тривиальные выводы вскоре получили убедительное экспериментальное подтверждение. Правда, последовательное релятивистское описание движения электрона и соответственно, более полное согласование СТО и квантовой теории было дано только в рамках созданной позже *квантовой электродинамики*.

Удивительная особенность уравнения Дирака состояла в том, что среди его решений были такие, которые соответствовали состояниям с отрицательными значениями энергии для свободного движения частицы (что эквивалентно отрицательной массе частицы). Это представляло значительную трудность для теории, поскольку все механические законы для частицы в таких состояниях были бы неверными; переходы же в эти состояния в квантовой теории возможны. Физический смысл переходов на уровни с отрицательной энергией выяснился позже, когда была выявлена возможность взаимопревращения частиц. Из уравнения Дирака следовало, что должна существовать новая частица (античастица по отношению к электрону) с массой электрона и электрическим зарядом противоположного знака. И эта частица была открыта в 1932 Андерсоном, и она была названа позитроном. Это событие явилось огромным успехом теории электрона Дирака.

Добавим, что в современной КЭД переход электрона из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией и обратный переход интерпретируются как процесс образования пары электрон-позитрон и аннигиляция такой пары.

VII Следующий шаг синтеза специальной теории относительности и квантовой теории – создание Хансом Бете (Hans Bethe), Ричардом Фейнманом (Richard Feynman), Юлианом Швингером (Julian Schwinger), Шиничиро Томонагой (Shinichiro Tomonaga) и др. *квантовой электродинамики*.



Hans Bethe (1906-2005)



Richard Feynman & Robert Oppenheimer in Los Alamos



Shinichiro Tomonaga
(1906-1979)



Julian Schwinger
(1918-1994)

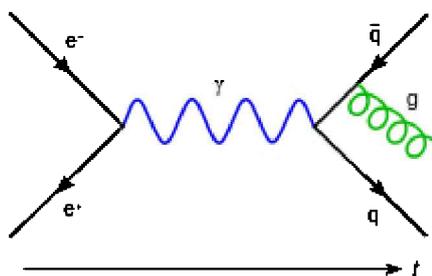


Диаграмма Фейнмана

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

Лагранжиан квантовой электродинамики

Математически, КЭД (квантовая электродинамика) – это «абелева калибровочная теория поля с группой симметрии $U(1)$ ». Калибровочное поле, которое переносит взаимодействие между заряженными полями спина-1/2, является полем электромагнитным. Лагранжиан КЭД для поля спина-1/2 взаимодействующего с электромагнитным полем равен действительной части от следующего выражения

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

где

γ^μ - матрицы Дирака;

ψ - биспинорное поле спина-1/2 (т. е. электрон-позитронное поле);

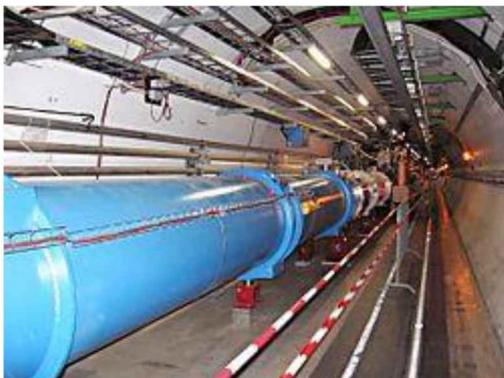
$\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger \gamma_0$, называемое "пси-бар";

$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu + ieB_\mu$ - ковариантная производная;

e постоянная тонкой структуры;

A_μ - ковариантный 4-потенциал; B_μ внешнее поле;

$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ - тензор электромагнитного поля.



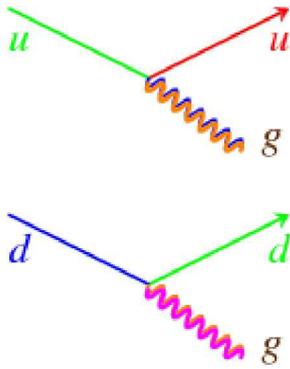
Часть ускорителя, на котором были подтверждены предсказания квантовой электродинамики

VIII Затем, много позже окончания второй мировой войны, была создана *квантовая хромодинамика* (quantum chromodynamics - теория сильных взаимодействий).

Согласно т.н. «стандартной модели» (the Standard Model) — лучшей на сегодняшний день теории строения материи, кварки (quarks), в разных комбинациях друг с другом, образуют всё многообразие элементарных частиц. Взаимодействия между кварками описываются квантовой хромодинамикой (КХД). В соответствии с этой теорией, кварки взаимодействуют друг с другом, обмениваясь особыми частицами — *глюонами*.

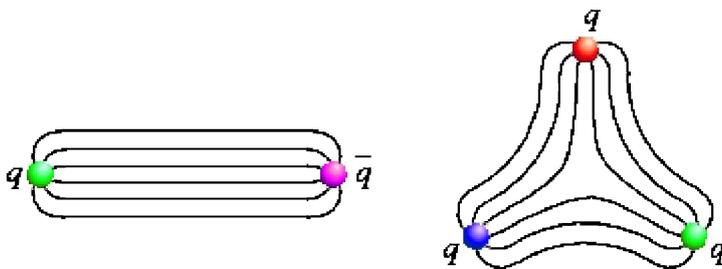
В обычной ньютоновской физике любая сила, изменяющая характер движения тела, — это либо притяжение, либо отталкивание. Но в квантовых теориях сила, действующая между элементарными частицами, понимается иначе. Считается, что эта сила возникает в результате того, что две частицы обмениваются третьей.

Обратимся к прозрачной аналогии. Представим себе себе пару фигуристов на катке, мчащихся друг другу навстречу. Приблизившись к другому, один из них внезапно выплескивает на него ведро воды. Тот, кто выплеснул воду, из-за этого затормозит и изменит направление движения. Но и тот, кто получил порцию воды, также затормозит и изменит направление. Таким образом, интенсивный «обмен» водой привел к тому, что оба фигуриста изменили направление движения. Согласно терминам ньютоновской механики, это означает, что между фигуристами произошло силовое взаимодействие. В приведенном примере эта сила передалась «через» обмен водой. Соответственно, все (калибровочные) теории стремятся описывать силовые взаимодействия в терминах обмена частицами. Эти теории основаны на идеях симметрии и инвариантности в системе частиц и полей. Уравнения, описывающие такую систему, остаются неизменными, когда что-то происходит со всей совокупностью частиц. Если, например, положительный и отрицательный заряды меняются местами, то силы, действующие между частицами, остаются прежними.

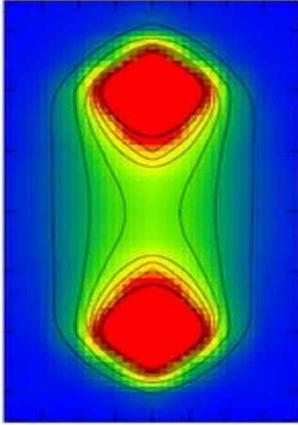


КХД развивает далее идеи первой успешной теории из ряда калибровочных — квантовой электродинамики, или КЭД. Согласно КЭД, электромагнитная сила между электрически заряженными частицами возникает в результате обмена фотонами (квантами света).

Аналогично, в КХД взаимодействия между кварками обусловлены свойством особого рода, который ученые назвали *цветом* (colour). Он может иметь три значения (три «оттенка»). Условно их называют *красный*, *желтый* и *синий*, но буквально эти оттенки понимать, конечно же, не следует. Интригующее высказывание «кварк имеет красный цвет» следует всего лишь навсегда понимать так же, как высказывание «электрон имеет отрицательный заряд».



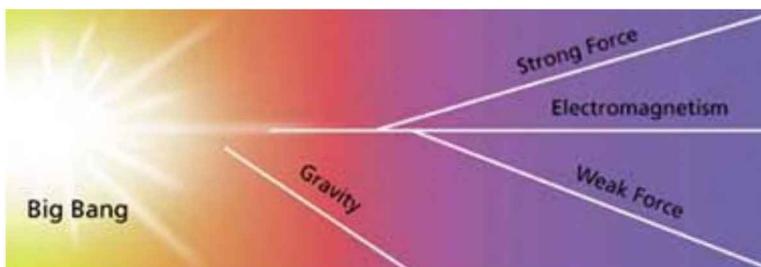
Цвет присущ кваркам, ноотнюдь не барионам и мезонам, в состав которых они входят. *Барионы* (к которым относятся и протон, и нейтрон) состоят из трех кварков — красного, желтого и синего, — цвета которых взаимно гасятся. А *мезоны* — из пары {кварк + антикварк}, поэтому они тоже бесцветны. Вообще, в КХД «работает» правило, согласно которому кварки в природе могут образовывать только такие комбинации, суммарный цвет которых оказывается нейтральным.



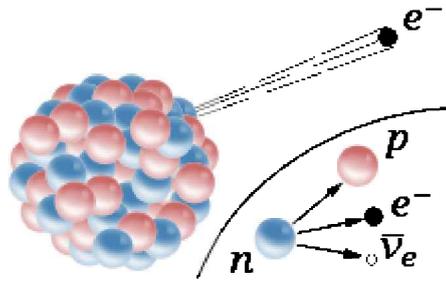
Взаимодействие между кварками осуществляется посредством восьми разновидностей частиц, называемых *глюонами* (от английского *glue* — «клей, клеить»; глюоны как бы «склеивают» кварки между собой). Они и выступают в роли «ведер с водой», если вспомнить аналогию с фигуристами.

Однако, в отличие от фотонов в КЭД, которые электрическим зарядом не обладают (хотя и выступают в роли носителей электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами), глюоны имеют собственный *цветовой заряд* и могут изменять цвет кварков, с которыми взаимодействуют. (Это как если бы упоминавшиеся выше фигуристы меняли пол с мужского на женский и наоборот, обменявшись ведром воды!) Например, если при поглощении глюона синий кварк превращается в красный, значит глюон несет на себе единичный положительный заряд красного цвета и единичный отрицательный заряд синего. Поскольку совокупный цветовой заряд кварка при этом не меняется, такие взаимодействия в рамках КХД не только допустимы, но и необходимы.

КХД успешно функционирует с начала 1980-х годов и с тех пор выдержала целый ряд экспериментальных проверок. В итоге, все ее прогнозы относительно результатов соударений элементарных частиц высоких энергий пока что подтверждаются достоверными данными, полученными на ускорителях.

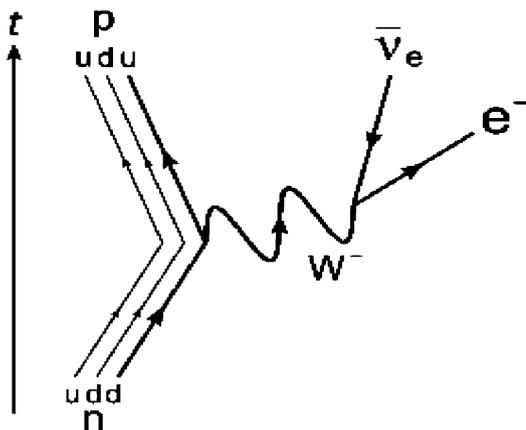


IX. Теория слабых взаимодействий.



К началу XXв. выяснилось, что все известные к тому времени силы сводятся к двум фундаментальным взаимодействиям – гравитационному и электромагнитному. Но в 1930-е гг. физики обнаружили, что ядра атомов состоят из *нуклонов* (протонов и нейтронов). Выяснилось, что ни электромагнитное, ни гравитационное взаимодействия не могут объяснить, что удерживает нуклоны в ядре. Соответственно, возникли первые представления о «*сильном взаимодействии*». Но и этого оказалось недостаточно: органично возник вопрос о том, что заставляет распадаться свободный нейтрон?

– В ответ возникли первые представления о «*слабом взаимодействии*». Добавим, что после открытия «бозона Хиггса» (Higgs's boson) поле Хиггса даже стали называть *пятым фундаментальным взаимодействием*.



Слабое взаимодействие (weak interaction) – такой механизм взаимодействия между субатомными частицами, который обеспечивает *радиоактивный распад* атомов. Радиус действия слабой силы ограничен субатомными расстояниями; он меньше диаметра протона.

Слабое взаимодействие – это такой обмен *бозонами* (переносчиками взаимодействия с целым спином) между *фермионами* (частицами с полуцелым спином), который включает бозоны трех типов: W_+ , W_- и Z . Масса каждого из них гораздо больше массы протона или нейтрона, что хорошо коррелирует с малым радиусом действия слабой силы.

Последний на несколько порядков меньше электромагнитного или гравитационного взаимодействий. Более того, именно благодаря своим массам W и Z бозоны живут приблизительно 10^{-24} секунд. Константа связи (coupling constant) слабого взаимодействия $\approx 10^{-7}$ - 10^{-6} ; при этом константа связи сильных взаимодействий ≈ 1 , а электромагнитных $\approx 10^{-2}$.

Все слабовзаимодействующие частицы обладают *слабым изоспином* T_3 , который характеризуется определенным квантовым числом, влияющим на то, как эти частицы ведут себя в слабых взаимодействиях. Слабый изоспин аналогичен электрическому заряду в электромагнитных взаимодействиях и цветовому заряду в квантовой хромодинамике. Во всех слабых взаимодействиях слабый изоспин сохраняется.

Х.Следующий шаг состоял в *объединении теории электромагнетизма и теории слабых взаимодействий* и создании теории электрослабых взаимодействий Абдусом Саламом (Abdus Salam), Шелдоном Глашоу (Sheldon Glashow) и Стивеном Вайнбергом (Stephen Weinberg) в конце 60-х гг. XX в. при активном участии Герарда т'Хоофта (Gerard t'Hoof).

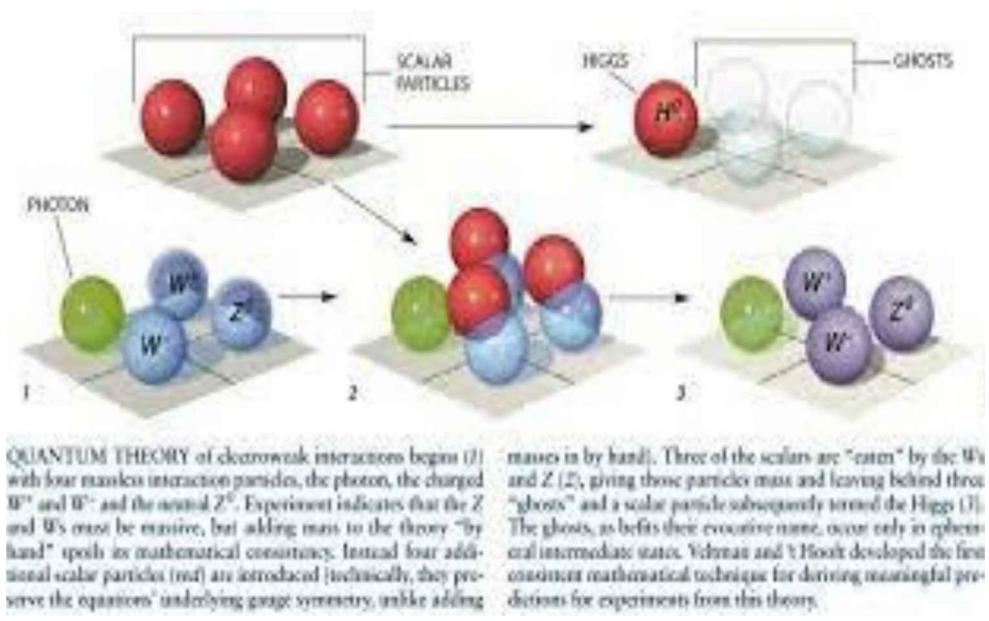
Теория электрослабых взаимодействий – это весьма абстрактное описание двух из четырех фундаментальных взаимодействий – слабого и электромагнитного. Эти 2 взаимодействия значительно различаются на обычных низких энергиях; но в теории они рассматриваются как 2 разных *проявления* одного и того же, *электрослабого* взаимодействия (electroweak interaction). При энергиях выше энергии объединения (порядка 100 Гэв) они соединяются в единое электрослабое взаимодействие. Теория электрослабого взаимодействия – это единая (объединенная) теория слабых и электромагнитных взаимодействий *лептонов* и *кварков*. Это взаимодействие осуществляется посредством обмена 4 частицами – безмассовым фотоном γ (электромагнитное взаимодействие) и тремя тяжелыми бозонами Z_0 , W_+ и W_- .

Математически объединение осуществляется при помощи калибровочной группы $SU(2) \times U(1)$. Ей соответствуют *калибровочные бозоны* – фотон, W и Z бозоны.

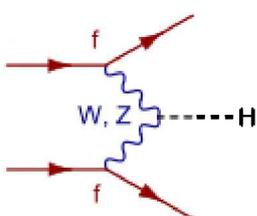
В стандартной модели калибровочные бозоны слабого взаимодействия получают массу из-за *спонтанного нарушения электрослабой симметрии*, вызванного т.н. «механизмом Хиггса».

Механизм Хиггса был предложен молодым шотландским физиком Питером Хиггсом (Pieter Higgs) в 1964г. Он раскрывает то, каким образом частицы – переносчики слабого взаимодействия (W и Z бозоны) приобретают массу. «Механизм Хиггса» делает Z -бозон отличным от фотона. Масса векторного бозона (иногда именованного калибровочным бозоном) появляется эффективно за счет

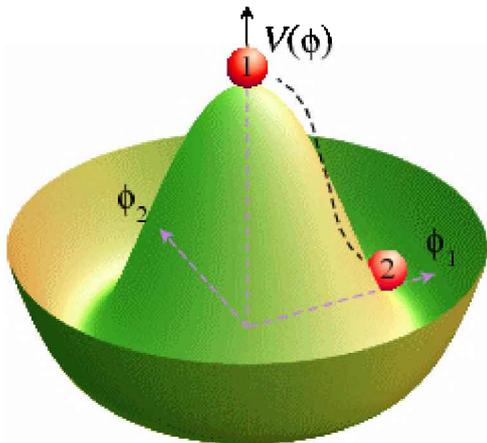
взаимодействия этого бозона со скалярным полем.



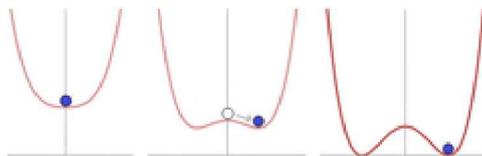
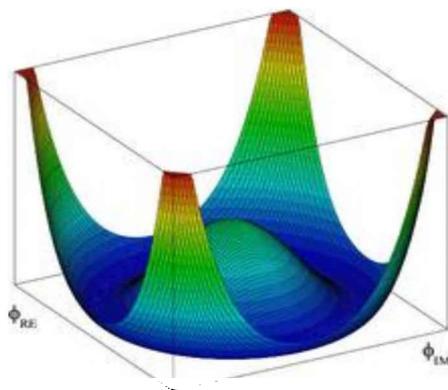
Наглядно хиггсовский механизм можно представить следующим образом. Рассыпанные по поверхности стола маленькие пенопластовые шарики (аналоги безмассовых частиц) легко разлетаются от малейшего дуновения. Но, будучи помещены на поверхность воды, они уже не так легко перемещаются с места на место. Взаимодействие с жидкостью, которая в этой простой аналогии играет роль хиггсовского поля, придает им определенную инертность. Рябь от дуновения на поверхности воды и будет гидродинамическим аналогом хиггсовских бозонов. Приблизительность этой аналогии состоит в том, что вода активно мешает *любому* движению шариков. В то время как хиггсовское вакуумное поле не оказывает влияние на частицы, движущиеся равномерно и прямолинейно, а противодействует лишь их ускорению (т.е. появлению т.н. «инертной массы»).



Действительно, многие эксперименты убедительно продемонстрировали наличие массы у частиц (калибровочных бозонов), за счет обмена которыми описываются фундаментальные взаимодействия. Поэтому в уравнения движения этих частиц необходимо ввести соответствующее выражение для массы. Но уравнения движения для калибровочных полей с массовыми членами неинвариантны относительно локальных преобразований симметрии (т.н. «калибровочных преобразований»), т.е. эти уравнения будут непременно изменяться при калибровочных преобразованиях.



Как раз для объяснения появления массы калибровочных бозонов без нарушения законов природы и используется известный термин «спонтанное нарушение симметрии» (spontaneous symmetry breaking). Таким образом вводится дополнительное поле – «поле Хиггса» - которое взаимодействует со всеми другими полями и посредством этого взаимодействия сообщает массу калибровочным бозонам.



Важно, что электрослабая теория возникла именно благодаря попыткам создания самосогласованной калибровочной теории слабых взаимодействий – такой теории, которая была бы аналогична КЭД – самой успешной (и точной) современной теории электромагнитных взаимодействий. Как калибровочная теория, электрослабая теория должна подчиняться двум принципиальным требованиям.

Во-первых, она должна выказывать математическую симметрию, которую принято называть *калибровочной инвариантностью* (gauge invariance), т.е. такую, что действия этой силы будут одними и теми же в различных точках пространства и времени.

Во-вторых, эта теория должна быть *перенормируемой* (renormalizable) т.е. она не должна содержать физически бессмысленные бесконечные величины.

Как тонко заметил Герард т'Хоофт,

«предположение, на котором эта модель [Вейнберга-Салама-Уорда] в конечном счете построена, связано с постулированием локальной инвариантности изотопического спина – для сохранения этой инвариантности вводятся четыре фотоноподобных поля, а не три, как в исходной янг-миллсовской теории. Четвертый фотон отождествляется с некоторой изначальной формой электромагнетизма. Он соответствует выделенной силе, которая должна быть добавлена в теорию *без объяснений*. По этой причине эта модель не может быть названа *единой теорией поля*. Силы по своей природе остаются различными – именно их *переплетение* делает модель столь специфичной»²¹⁸.

За описанное выше объединение слабого и электромагнитного взаимодействий Шелдону Глэшоу, Стивену Вайнбергу и Абдусу Саламу была присуждена нобелевская премия по физике за 1979г. Существование электрослабых взаимодействий было экспериментально установлено в 2 этапа.

- (1) Сначала были открыты т.н. «нейтральные токи» в совместном эксперименте Гаргамели по рассеиванию нейтронов (1973).
- (2) Затем совместные эксперименты в 1983г. доказали существование W и Z калибровочных бозонов.



Гаргамель из ЦЕРНа

²¹⁸ Г. т' Хоофт. Калибровочные теории сил между элементарными частицами //Успехи физических наук, 1981, том 135, вып.3, С.502.



Abdus Salam (1926-1996)



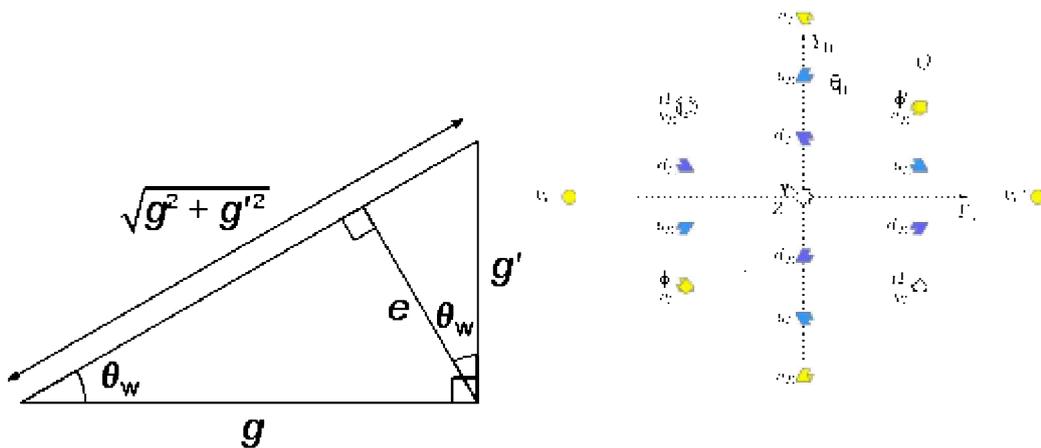
Sheldon Glashow
(born in 1932)



Steven Weinberg
(1933-2021)



Gerardus 't Hooft
(born in 1946)



Важное значение для оценки эффективности синтеза электромагнитных и слабого взаимодействий, а также перспектив развития электрослабой теории имеет история ее создания .

Как известно, первая квантово-полевая теория слабых взаимодействий была создана Энрико Ферми в 1934 для объяснения процесса β – распада. Для предлагаемой реконструкции важно, что именно эта теория явилась местом *встречи* двух существенно различных фундаментальных теорий XX в.– квантовой электродинамики и теории слабых взаимодействий²¹⁹.

В дальнейшем теория Ферми была значительно усовершенствована для того, чтобы, убедительно объяснив процессы несохранения четности, трансформироваться в V-A теорию²²⁰. Правда, встреча теорий столь принципиально разных взаимодействий, как слабое и электромагнитное (чего только стоит крайне короткий радиус действия слабой силы - 10^{-15} - в сравнении с фактической бесконечностью электромагнитного взаимодействия r^{-2}), не могла не привести к таким парадоксам, как *неперенормируемость* и, соответственно, к следующему странному предсказанию : сечения рассеяния нейтрино на электронах должны линейно расти вместе с ростом энергий. (Это должно было привести к переизбытку нейтрино в пузырьковых камерах и космических лучах). Упомянутые парадоксы слишком хорошо напоминали «*ультрафиолетовую катастрофу*», вызванную встречей максвелловской электродинамики, больцмановской статистической механики и термодинамики .

²¹⁹ Fermi E. Versuch einer Theorie der β - Strahlen // Z. Phys. 1934, **88**, p.161. Translated in: Fred L. Wilson. Fermi's Theory of Beta Decay // Am. J. Phys. 1968, vol.36, number 12, pp.1150-1160.

²²⁰ Feynman R.P., Gell -Mann M. Theory of the Fermi Interaction // Phys. Rev. 1958, vol. 109, pp.193-198.

Благодаря попыткам преодоления этих трудностей и были предложены объяснения феномена радиоактивности, основанные не на представлениях о непосредственных точечных взаимодействиях слабых токов, а на идее *обмена* частицами. «Так называемая слабая ядерная сила – сила, ответственная за β -радиоактивность (и описанная неперенормируемой теорией Ферми) должна была передаваться некоторыми неизвестными мезонами с нулевым спином *для того, чтобы теория была перенормируемой*»²²¹. Для сохранения пространственно-временной структуры V-A теории было необходимо предположить, что частицы-носители слабого взаимодействия являются векторными мезонами со спином 1, которые стали называть *промежуточными векторными бозонами* (ПВБ). И феноменология V-A теории требовала введения не просто ПВБ, а W^+ и W^- частиц. Однако случилось так, что изменение способов описания слабых взаимодействий не столько не привело к разрешению рассмотренных парадоксов (противоречий встречи), сколько еще более высветило пропасть, разделявшую фотоны и W-бозоны. Самым разительным отличием было то, что фотоны электрически нейтральны, тогда как β -распад с необходимостью включал обмен электрически-заряженными частицами.

Второе – и на этот раз *коренное* – отличие состояло в том, что W бозоны были *массивными* частицами (в отличие от безмассового фотона). Это было необходимо для объяснения чрезвычайно малого радиуса действия слабых сил в атомах. Данное обстоятельство (вместе с векторным характером ПВБ) и вело к появлению таких расходящихся членов в пропагаторах (функциях Грина) для слабых взаимодействий, которые не удавалось элиминировать посредством рецептов, заимствованных из КЭД (квантовой электродинамики)²²².

Но неоднократные неудачи в устранении расходимостей показали, что необходимо от конкретных попыток устранения частных перейти к решению главной проблемы – *синтезу* теорий электромагнитных и слабых взаимодействий. И первой обнадеживающей попыткой построения такой теории явилась работа Швингера²²³, обозначившая главное направление успешного синтеза – т.н. «калибровочную теорию Янга и Миллса».

²²¹ Salam Abdus. Gauge Unification of Fundamental Forces // Abdus Salam. Ideals and Realities /Ed. By Zafar Hassan & C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, p.325. Имеется перевод: Салам А. Калибровочное объединение фундаментальных сил // УФН, 1980, том 132, вып.2, С. 229-253.

²²² Morrison Margaret. Unifying Scientific Theories. Physical Concepts and Mathematical Structures. Cambridge University Press, 2007.

²²³ Schwinger J. A. Theory of Fundamental Interactions // Annals of Physics, 1957, vo.2, pp.407-434.

В ряде первоклассных исследований, но прежде всего в своей классической статье Янг и Миллс продемонстрировали, что специфические, зависящие от координат, локальные т.н. «калибровочные» преобразования не изменяют лагранжиан в КЭД, и, следовательно, все предсказания этой теории²²⁴. При этом та часть лагранжиана L , которая относится к электронам и позитронам, при калибровочных преобразованиях инвариантна; для инвариантности нужна та часть L , которая относится к *взаимодействиям* фотонов с источниками поля. В итоге, существование взаимодействующих с источниками поля фотонов предстает как необходимое условие калибровочной инвариантности *всего* электромагнитного лагранжиана.

Неудивительно, что Янгу и Миллсу пришла в головы мысль о том, что *любую* полевою теорию (и даже теорию сильных взаимодействий) можно сконструировать в соответствии с КЭД. На языке теории групп калибровочные преобразования, оставляющие инвариантным лагранжиан КЭД, относятся к унитарной группе преобразований $U(1)$. Янг и Миллс попытались создать аналогичную теорию, которая была бы инвариантна относительно локальных преобразований группы сильно-взаимодействующих симметрий изоспина, т.е. специальной унитарной группы $SU(2)$. Роль первых двух членов лагранжиана, которые в КЭД относились к электронам и протонам, теперь стали играть члены, относившиеся к изоспиновым мультиплетам адронов. Теперь волновая функция представляла 2-компонентное поле (p, n) , относившееся к дублету ядерного изоспина. Как и в КЭД, эта часть лагранжиана оказалась неинвариантной относительно калибровочных преобразований. Но если мы введем W -частицы со спином 1, образующие знаменитый триплет (W^-, W^0, W^+) , то сможем без особых затей ввести в L такие члены, описывающие взаимодействия W -бозонов с нуклонами, что его инвариантность относительно калибровочных преобразований будет, наконец, обеспечена.

Теория, сконструированная Янгом и Миллсом, стала рассматриваться в качестве *образца* («парадигмы») создания целого класса калибровочных теорий, вплоть до теории гравитации. Действительно, «замечательным свойством неабелевой калибровочной симметрии является то, что она не только накладывает ограничение на массы частиц и константы связи, но и детерминирует динамику взаимодействия калибровочных полей»²²⁵.

Янг и Миллс создали $SU(2)$ -инвариантную теорию взаимодействующих нуклеонов, и многочисленные группы исследователей быстро распространили их результаты на другие калибровочные группы, на взаимодействия иных частиц²²⁶.

²²⁴ Yang C.N., Mills Robert. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance // The Physical Review, 1954, pp. 96-191.

²²⁵ Okun L.B. Leptons and Quarks. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987, p.185.

²²⁶ Cao T.Y. Conceptual Developments of 20th century field theories. Cambridge University Press, 1997, p.269

Как справедливо отмечает Т. Као, «методологически, использование калибровочной теории направлялось стремлением заполучить *универсальный принцип*, фиксирующий уникальную форму связей, *сцеплений* (couplings) между множеством различных возможностей...»²²⁷.

Но вернемся к исследованиям Юлиана Швингера, поставившего своей конечной целью описание *всего* множества элементарных частиц в рамках теории квантованных полей. В частности, он намеревался рассмотреть массивные заряженные векторные бозоны и безмассовые фотоны в качестве калибровочных мезонов. Его наиболее существенные результаты состояли в демонстрации следующих двух тезисов:

(а) лептоны несут слабую форму изоспина аналогичную сильно взаимодействующим частицам;

(б) фотон и промежуточный векторный бозон (идентифицируемый как Z-частица) являются частями одного и того же изоспинового мультиплета.

Работа Швингера раскрыла ведущую роль, которую играла симметрия как в конструировании теоретико-полевых моделей элементарных частиц, так и в успешном синтезе этих моделей. Он справедливо предположил, что одной из причин разнообразия элементарных частиц является наличие их т.н. «*внутренних*» степеней свободы. Ядро его исследовательской программы составляли базисные принципы симметрии и теории поля, на основе которых он сконструировал концептуальный каркас для описания фундаментальных взаимодействий. В частности, лептоны слабых взаимодействий начали трактоваться им как неприводимые представления трехмерной группы вращений, из которой можно было считывать их основные черты. Отталкиваясь от рассмотрения симметрии между изоспиновыми свойствами тяжелых бозонов и фермионов, Швингер поставил вопрос о существовании семейства бозонов, которые явились бы реализацией трехмерной группы вращений. Из-за того, что электромагнитное поле предположительно оказывалось третьей компонентой трехмерного изоспинового вектора, было совершенно естественно предположить, что существуют еще две заряженные частицы, которые входят в триплет. Отсюда Швингер заключил, что «мы вынуждены принять концепцию существования семьи бозонов со спином равным единице, в которую входят безмассовый нейтральный фотон и пара электрически-заряженных Z-частиц, которые предположительно несут массу по аналогии с лептонами» [Schwinger, 1957,p.434]. И на основе общего предположения о том, что существует семья бозонов, являющихся изотопическим аналогом лептонов, вкупе с идентификацией фотона в качестве нейтрального члена этого семейства, Швингер успешно развил динамическую теорию заряженного поля Z-частиц со спином 1.

²²⁷ Ibid, p.269

Тем не менее, данная *реальная* попытка объединения слабых и электромагнитных взаимодействий столкнулась с множеством проблем, основной из которых была проблема массы векторных бозонов. Радиус действия слабых взаимодействий крайне мал, что, в соответствии с принципом неопределенности, предполагает весьма значительные массы W -частиц. Их мы должны «руками» вводить в лагранжиан, что расходится с одним из необходимых условий применимости калибровочного подхода : калибровочные частицы должны быть безмассовыми.

«Проблема массы» привела к всеобщему мнению, что только частичные симметрии, т.е. инвариантность только части лагранжиана L относительно группы инфинитезимальных преобразований, могут связать массивные бозоны с безмассовым фотоном. Исследователи были вынуждены выйти за пределы триплета и ввести *дополнительный* нейтральный бозон Z^0 , который мог бы быть связан с его собственным нейтральным лептонным током .

Следующий важный шаг в синтезе электромагнитного и слабого взаимодействий сделал аспирант Швингера Шелдон Глэшоу. В 1961г. он выдвинул теорию, предвосхитившую многие особенности будущих достижений. Его модель включала как триплет, так и синглет калибровочных векторных бозонов, а соответствующая калибровочная симметрия теперь относилась к группе $SU(2) \times U(1)$. Триплет содержал положительно заряженный, отрицательно заряженный и нейтральный ПВБ, в то время как синглет относился только к бозону нейтральному. Благодаря соответствующей модификации квантово-полевого лагранжиана, состоявшей в искусном введении «массовых» членов, Глэшоу показал, что синглет и нейтральный член триплета «смешиваются» так, чтобы произвести как очень массивную частицу Z^0 , так и безмассовую частицу, сильно напоминающую фотон²²⁸.

Сходные результаты были получены Абдусом Саламом и Джеймсом Уордом²²⁹ . Действительно важным оказалось то обстоятельство, что эта работа, хотя и страдавшая таким недостатком, как «проблема масс» ПВБ, которые вводились в лагранжиан «руками» и приводили к неперенормируемости теории, тем не менее содержала возможности выхода из непростой проблемной ситуации. Возможности эти были связаны с концепциями «*спонтанного нарушения симметрии*» и «*бозона Хиггса*».

Подчеркнем, что идея спонтанного нарушения симметрии оказалась занесенной в физику элементарных частиц из достаточно далекой области – физики твердого тела (явление сверхпроводимости, теория которого была создана Л.Д. Ландау и В.Л. Гинзбургом). Необходимым звеном этого переноса оказались ученые – специалисты одновременно в двух областях – физике твердого тела и физике элементарных частиц.

²²⁸ Pickering Andrew. Constructing Quarks. A sociological history of particle physics. The University of Chicago Press, 1984.

²²⁹ Salam A., Ward J.C. Electromagnetic and Weak Interactions // Physics Letters ,1964, vol.13, pp. 168-171.

Так же как и в случае разработки калибровочных теорий, решающую роль сыграли исследователи, имевшие первоклассный опыт работы как в теории групп, так и в физике сильных и слабых взаимодействий.

Сама идея спонтанного нарушения симметрии возникла в физике твердого тела при теоретическом воспроизведении явления *ферромагнетизма*. Обычный магнит представляет собой совокупность обладающих спином частиц, расположенных в атомах железа. Само явление магнетизма обязано своим существованию взаимодействию спинов, когда каждый спин ведет себя, как крошечный магнит. Далее, лагранжиан системы в целом не содержит и намека на какое-либо выделенное направление, т.е. является «инвариантным относительно вращений». Но, когда спины всей системы выстраиваются в линию для производства явления ферромагнетизма, то физическое состояние ферромагнита теряет свойства инвариантности, присущего лагранжиану.

Значимость явления *спонтанного нарушения симметрии* для сильных и слабых взаимодействий была осознана Йохиро Намбу²³⁰, но дальнейшее развитие этой идеи было связано с исследованиями, проведенными в 60-х гг. Питером Хиггсом²³¹. Он разработал т.н. «*хиггсовский механизм*» на основе модели, заимствованной из квантовой электродинамики.

Она состояла из обычного электромагнитного лагранжиана, дополненного частями, относящимися к двум скалярным полям с нулевым спином, которые взаимодействовали и с фотонами, и друг с другом так, чтобы калибровочная инвариантность сохранялась. Хиггс продемонстрировал, что если член в L , относящийся к массам скалярных полей, окажется отрицательным, то физический спектр теории должен будет содержать один массивный фотон и одну массивную скалярную частицу – т.н. «*бозон Хиггса*».

Однако решающий шаг в объединении электромагнитных и слабых взаимодействий был сделан в 1967г. (независимо друг от друга) Стивенем Вайнбергом (Massachusetts Institute of Technology) и Абдусом Саламом (Imperial College, London). И тот, и другой исходили из моделей электрослабых взаимодействий, предложенных ранее Глэшоу (1961) и Саламом и Уордом (1964), но они заменили в лагранжиане термины, относившиеся к массам ПВБ и вводимые «руками», теми терминами, которые были образованы посредством хиггсовского механизма. В частности, в работе Вайнберга соотношения между массами ПВБ были определены при помощи т.н. «угла Вайнберга» θ_w ²³².

²³⁰ Nambu Y., Jona-Lasilio G. Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity // Phys. Rev. 1961, vol. 122, pp. 345-358; 124-246.

²³¹ Higgs P.W. Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields // Physics Letters, 1964, vol. 12, pp. 132-133; Higgs P.W. Spontaneous Symmetry Breaking Without Massless Bosons // Phys .Rev., 1966, vol.145, pp. 1156-1163.

²³² Weinberg Steven. A Model of Leptons // Phys. Rev. Letters, 1967, vol. 19, pp. 1264-1266.

Фактически и Вайнберг, и Салам (не мудрствуя лукаво) соединили хиггсовский механизм с ранними электрослабыми моделями, что и объясняет то, что их работы первоначально не вызвали у научного сообщества особого интереса. Но все переменялось после доказательства перенормируемости модели Вайнберга-Салама, которое было представлено Вельтманом и т'Хоофтом.

Итак, искомое объединение электромагнитного и слабого взаимодействий несомненно состоялось. Но как его следует понимать? В чем состоит его *специфика* и отличие от четырех «образцовых» синтезов – Ньютона, Максвелла и Эйнштейна?

Ключом к выявлению этой специфики могут служить следующие слова Абдуса Салама, произнесенные в Стокгольме во время получения, вместе с Шелдоном Глэшоу и Стивеном Вайнбергом, нобелевской премии по физике (1979).

« С незапамятных времен человек пытался понять сложность природы в терминах как можно меньшего числа элементарных понятий. Среди его поисков первый состоял, по словам Фейнмана, в нахождении «колес внутри колес»; задача натуральной философии состояла в отыскании самых последних колесиков мироздания, если таковые, конечно, существуют. Второй поиск относился к фундаментальным силам, которые заставляют колеса вертеться и сцепляться друг с другом...

А вот третий поиск пытается *объединить* заряды (а значит и силы) за счет поиска *единой сущности*, компонентами которой все эти различные заряды являются *в том смысле, что они могут быть преобразованы друг в друга*»²³³

Тем не менее, существует весьма важное отличие способа построения электрослабой теории от максвелловского. Если у Максвелла объединение электромагнетизма и оптики увенчалось потрясающе точным, в результате введения базисного гибридного объекта – тока смещения, – вычислением скорости света из электрической и магнитной констант ($c = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$), то у Глэшоу, Салама и Вайнберга объединение электромагнитного и слабого взаимодействий привело лишь к введению угла Вайнберга, описывающего перемешивание слабого и электромагнитного полей. Увы, этот угол не вычисляется в теории, а определяется эмпирически, из эксперимента.

Это обстоятельство особенно наглядно *раскрывает незавершенность* электрослабой теории. Как неоднократно отмечал академик Л.Б. Окунь, то, что слабые и электромагнитные взаимодействия характеризуются одним и тем же зарядом e , является наиболее ярким выражением того, что стандартная модель электрослабых взаимодействий все же является *единой* теорией слабых и электромагнитных взаимодействий. Но

«то, что в модели имеется свободный параметр θ_μ , который теоретически не фиксируется и не предсказывается, означает, что *единая теория пока не завершена*. Наличие свободного параметра θ_μ является следствием того, что группа симметрии слабых взаимодействий является прямым произведением двух простых групп: $SU(2)$ и $U(1)$. Мы могли бы избавиться от этого

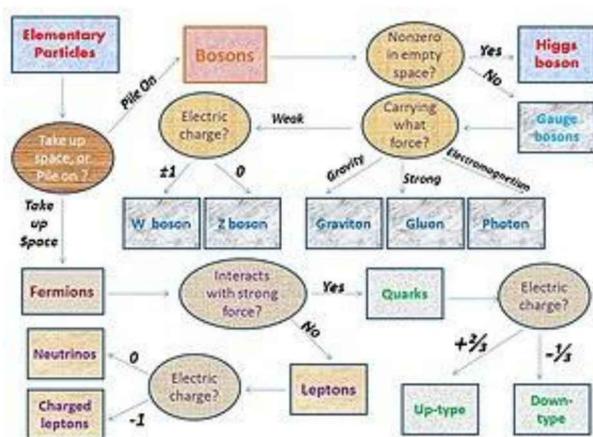
²³³ Salam Abdus. Gauge Unification of Fundamental Forces // Abdus Salam. Ideals and Realities /Ed. By Zafar Hassan & C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, p.325. Имеется перевод: Салам А. Калибровочное объединение фундаментальных сил // УФН, 1980, том 132, вып.2, С. 229-253.

произвола, если бы потребовали, чтобы обе эти группы были подгруппами какой-то *более обширной группы*»²³⁴.

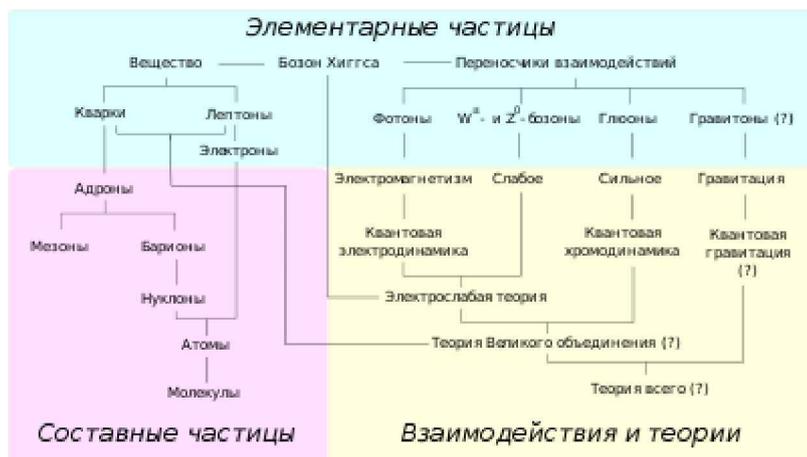
Слова российского академика гармонируют с мнением американского нобелевского лауреата:

«я не верю в то, что стандартная теория долго продержится в качестве правильной и полной картины мира. Взаимодействия могут иметь калибровочную природу, но при этом они, конечно, должны лежать внутри объединяющей их группы»²³⁵.

X этап – создание т.н. «стандартной модели» - теории Великого Объединения, «синтезировавшей» три взаимодействия – электромагнитное, сильное и слабое (так же, как Д.И. Менделеев «синтезировал» все известные ему химические элементы).



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

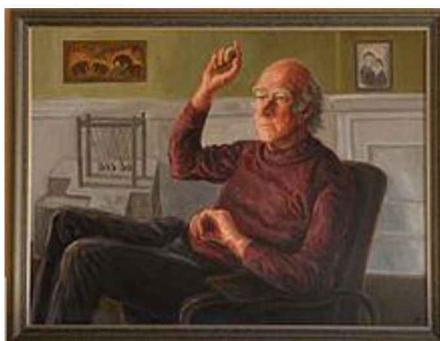


Одно из знаменитых следствий этой теории – существование т.н. «*хиггсовского бозона*», предсказан

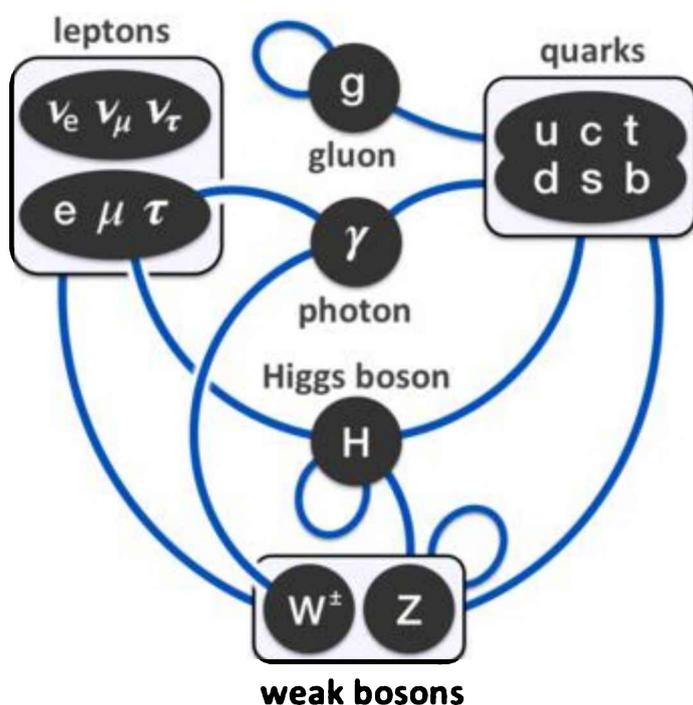
²³⁴ Okun L.B. Leptons and Quarks. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987, p.204.

²³⁵ Glashow, 1980 - *Glashow S.L. Towards a Unified Theory – Threads in a Tapestry // Science 1980, vol.210, issue 4476, p.1220*

ное в 1964г. шотландским физиком-теоретиком Питером Хиггсом (Peter Higgs). Судя по всему, эта частица и была обнаружена на суперколлайдере в 2012г., после чего шотландский пенсионер Хиггс получил положенную ему нобелевскую премию.



Prof. Peter Higgs



Справка .

Калибровочная инвариантность – инвариантность высказываний физической полевой теории относительно (локальных) *калибровочных преобразований* – т.е. таких координатно-зависимых преобразований поля, которые описывают переходы между базисами в *пространстве внутренних симметрий* этого поля.

Сформулированное еще Германом Вейлем требование калибровочной инвариантности – основное понятие физики элементарных частиц. Именно математический язык калибровочной инвариантности является тем «нейтральным языком», при помощи которого удается непротиворечивым образом описать в Стандартной Модели электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия с единой точки зрения.

Пример 1 – классическая электродинамика. Пусть $f = f(x, y, z, t)$ – произвольная скалярная функция. Если изменить потенциалы электромагнитного поля \mathbf{A} и φ таким образом, что $\Phi_1 = \varphi - (1/c) \partial f / \partial t$; $\mathbf{A}_1 = \mathbf{A} + \nabla f$; то реальное поведение системы не изменится.

Основная идея калибровочной инвариантности состоит в следующем: В квантовой механике волновая функция ψ – величина комплексная. Но все измеряемые величины – координаты, импульсы, etc. – вещественны. Поэтому ничего в предсказаниях теории не изменится, если мы ψ умножим на $e^{i\alpha}$

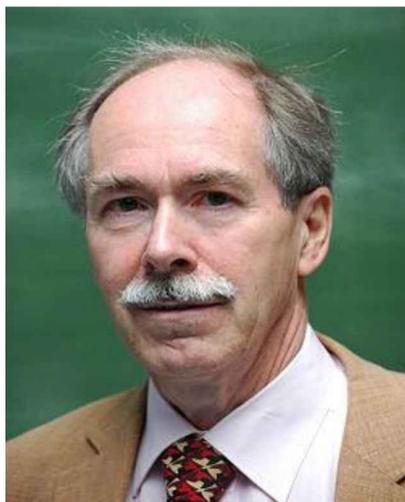
Таким образом, квантовая механика инвариантна относительно глобальных фазовых вращений, которые называются «*глобальными калибровочными преобразованиями*».

Но инвариантна ли квантовая механика относительно локальных фазовых вращений $e^{i\alpha(x)}$, т.е. «*локальных калибровочных преобразований*»? – Несомненно. Но можно ли восстановить инвариантность? – Можно, если ввести новое физическое поле, которое «чувствует» то внутреннее пространство, в котором мы производим фазовые вращения.

В результате при локальных фазовых вращениях у нас преобразуются как волновая функция ψ , так и новое поле, причем так, что изменения в уравнениях компенсируют, «калибруют» друг друга. Соответственно, современная теория калибровочных полей анализирует весьма сложные калибровочные преобразования, отвечающие за инвариантность в сложном пространстве внутренних степеней свободы.

Пример 2 – квантовая хромодинамика. Инвариантность относительно вращений кварков в «цветовом пространстве» приводит к тому, что сильные взаимодействия можно рассматривать как калибровочные поля. Правда, слабые взаимодействия отдельно от других полей описать как «калибровочные» не получается. Тем не менее, существует метод описания электромагнитного и слабого взаимодействий одновременно как двух разных проявлений единого электрослабого поля.

Все фундаментальные взаимодействия выводятся на основе калибровочной инвариантности. Три фундаментальные взаимодействия – электромагнитное, сильное и слабое – выводятся как следствие постулата, согласно которому наш мир симметричен относительно трех типов калибровочных преобразований.



Gerard t'Hooft (born in 1946)

Описание «Стандартной Модели» может быть завершено следующей цитатой из обзорной статьи лауреата нобелевской премии (1999) ведущего современного теоретика Герарда т'Хоофта.

«Математическая структура калибровочных теорий жестко фиксирована, но остается некоторая свобода в *подгоночных параметрах*. Это означает, что предсказываемая величина взаимодействия между частицами зависит не только от структуры теории, но также и от значений, приписываемых определенным *свободным параметрам*, которые должны рассматриваться как *мировые константы*. Теория остается самосогласованной независимо от выбора этих констант, но *экспериментальные предсказания существенно зависят от значений, приписываемых константам*.

Хотя константы могут быть измерены в процессе эксперимента, значения их не могут быть получены из самой теории. Примерами мировых констант являются *заряд электрона* и *массы элементарных частиц*, таких как электрон и кварки. *Сила калибровочных теорий – в том, что они оставляют свободными относительно небольшое число* таких параметров: *около 18 констант*, которые необходимо зафиксировать, ответственны за все известные силы.

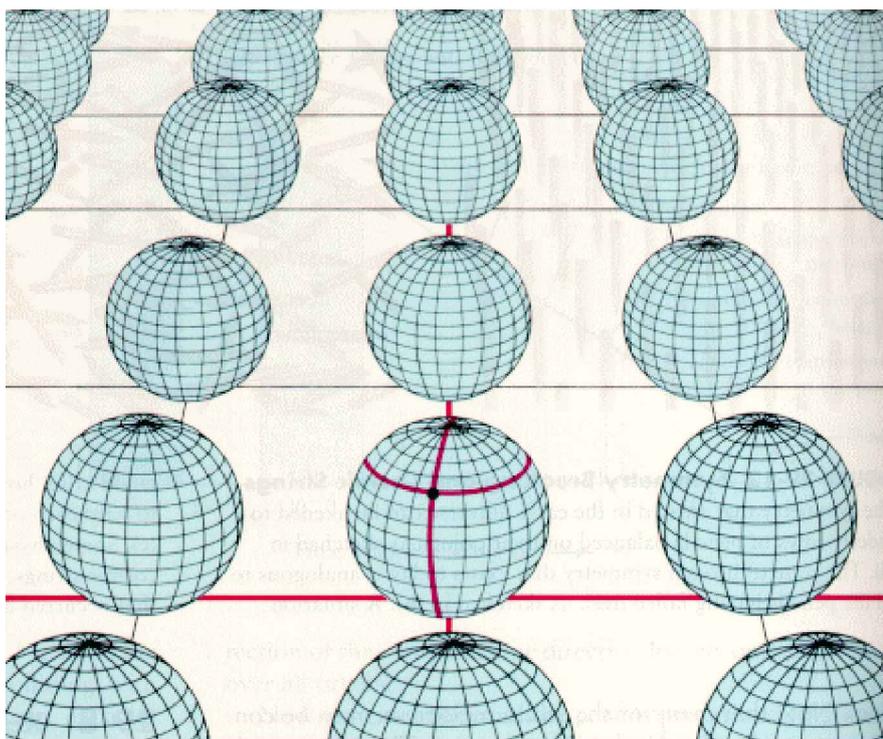
Далее, они, эти параметры, остаются существенной и неотъемлемой частью теории. Нет никаких объяснений того, почему параметры принимают те или иные значения. Фундаментальные вопросы, которые калибровочные теории оставляют нерешенными, концентрируются вокруг этих мировых констант. Почему кварки и другие элементарные частицы имеют ту массу, которую они имеют? Что определяет массу хиггсовской частицы? Что определяет фундаментальную единицу электрического заряда или величину взаимодействия цветных зарядов? Ответы на эти вопросы могут быть получены не в рамках калибровочных теорий, а только с помощью более общей теории...

Так же как максвелловская теория объединила электричество и магнетизм, а модель Вайнберга-Салама-Уорда *связала* электромагнитные и слабые взаимодействия, так, возможно, будет найдена некоторая более широкая теория, способная включить в себя модель Вайнберга-Салама-Уорда и квантовую хромодинамику. Такая теория в принципе могла бы быть основана на модели существующих калибровочных теорий.

Необходимо найти более общую симметрию природы. Локализация такой симметрии приведет к появлению сильных, слабых и электромагнитных сил»²³⁶.

XI этап - создание *теории супергравитации*. Супергравитация (supergravity) - название физических теорий, включающих дополнительные измерения, суперсимметрию и гравитацию.

Этот термин был введен физиками, желавшими получить преимущество от использования суперсимметрии при построении теории «Великого Объединения» (Grand Unification theory), заключавшееся в том, что при этом происходит частичное сокращение наиболее интенсивных квантовых флуктуаций, связанное с парами частиц-суперпартнёров, которое помогает смягчить противоречия, возникающие при попытке включения в квантовую механику гравитации.



Суперсимметрия—это гипотетическая симметрия, связывающая бозоны и фермионы в природе. Абстрактное преобразование суперсимметрии связывает бозонное и фермионное квантовые поля таким образом, что они могут превращаться друг в друга. Образно можно сказать, что преобразование суперсимметрии может переводить вещество **во** взаимодействие (или в излучение), и наоборот.

²³⁶ Г.т'Хоофт. Калибровочные теории сил между элементарными частицами //Успехи физических наук, 1981, том 135, вып.3, С.510-512.

В настоящее время суперсимметрия рассматривается в качестве физической гипотезы, не подтверждённой экспериментально. Твердо установлено, что наш мир не является суперсимметричным в смысле *точной* симметрии, так как в любой суперсимметричной модели фермионы и бозоны, связанные суперсимметричным преобразованием, должны обладать одинаковыми массой, зарядом и другими квантовыми числами (за исключением спина). Данное требование для известных в природе частиц не выполняется. Тем не менее, предполагается, что существует энергетический лимит, за пределами которого поля подчиняются суперсимметричным преобразованиям, а в рамках лимита — нет. В таком случае частицы-суперпартнеры обычных частиц оказываются очень тяжёлыми по сравнению с обычными частицами. Неслучайно поиск суперпартнеров обычных частиц — одна из основных задач современной физики высоких энергий. Ожидается, что Большой Адронный Коллайдер (БАК) сможет открыть и исследовать суперсимметричные частицы (если они существуют), или поставить под большое сомнение суперсимметричные теории (если ничего не будет обнаружено).

XII этап – создание *теории суперструн*, объединяющей все 4 основные взаимодействия и претендующей на роль *Theory of Everything* – Теории Всего на Свете. Эта теория представляет собой набор особенно далеких от эксперимента математических спекуляций. Если она когда-нибудь и будет подтверждена на опыте, то это случится очень и очень нескоро.

Теория струн – это такое направление теоретической физики, которое изучает динамику взаимодействия не обычных точечных частиц, а одномерных протяженных объектов – т.н. «*квантовых струн*» (quantum strings). Теория струн действительно гармонически сочетает идеи как квантовой теории, так и специальной и общей теорий относительности, поэтому многие надеются на то, что именно на ее основе, возможно, будет построена будущая «*квантовая теория гравитации*».

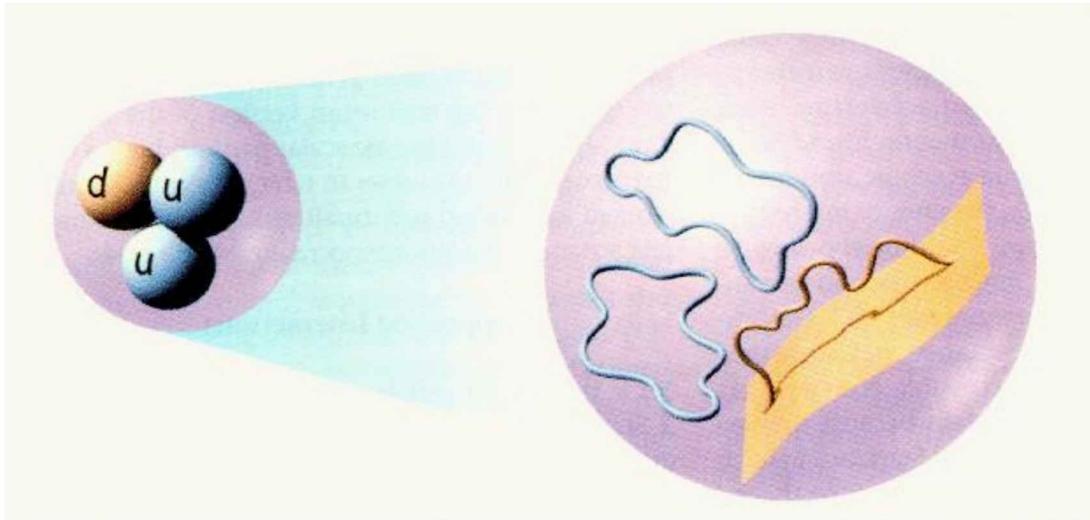
Теория струн основана на предположении, что все элементарные частицы и их взаимодействия возникают в результате *колебаний* и взаимодействий квантовых струн на масштабах порядка планковской длины ($\sim 10^{-35}$).

Важно, что этот весьма своеобразный подход позволяет избежать такой печально известной трудности обычной квантовой теории поля, как «*перенормировка*».

Но, к сожалению, избавившись от одних трудностей, теория струн принесла новые.

- (1) Несмотря на математическую строгость, непротиворечивость и целостность теории, пока ни одно *эмпирическое подтверждение* теории струн не получено.
- (2) «Проблема ландшафта»: разработано *слишком много* вариантов редукции струнных теорий из размерностей 26 или 10 в низкоэнергетическую физику. Какая же из них истинна?

(3) Поэтому и встал неизбежно вопрос: «заслуживает ли теория струн статуса научной»?



Leonard Euler (1707-1783)



Gabriele Veneziano (born in 1942)

Откуда вообще взялось понятие «квантовой струны»? – В 1968г. Габриэле Венециано (Gabriele Veneziano) и Махико Судзуки при анализе столкновений π -мезонов обнаружили, что амплитуда парного рассеивания высокоэнергетических пионов точно описывается одной из т.н. «бета-функций», введенных еще Леонардом Эйлером (Leonard Euler) в 1730г.

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$$

В 1970г. Намбу, Тото, Нильсен и Саскинд (Nambu, Toto, Nielsen & Susskind) выдвинули идею, что взаимодействие между сталкивающимися пионами возникает из-за того, что эти пионы соединяет «бесконечно тонкая колеблющаяся нить».

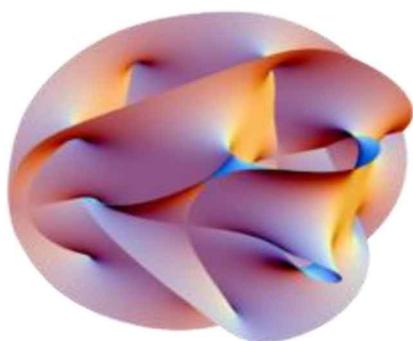
Справедливо полагая, что эта т.н. «нить» подчиняется законам квантовой механики, они вывели формулу, совпадающую с формулой Венециано-Судзуки.

В 1974г. Джон Шварц и Джоэль Шерк (John Schwarz & Joel Scherk), изучая свойства некоторых струнных вибраций, обнаружили, что они в точности соответствуют свойствам т.н. «гравитона» - кванта гравитационного поля со спином 2. Как известно, струна может вибрировать различными способами, и каждый способ ее вибрации генерирует отдельную частицу.

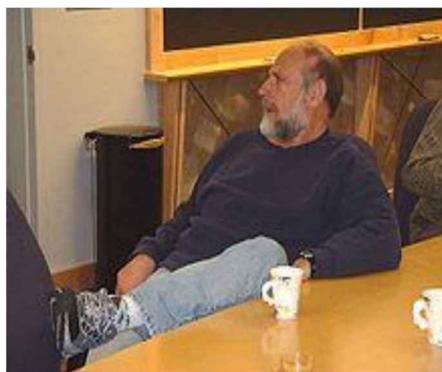
В 1984г. Майкл Грин и Джон Шварц (Michael Green & John Schwarz) открыли факт сокращения аномалий в суперпространствах 10 и 26 измерений.

В середине 1990-х гг. Эдвард Виттен и Джозеф Полчински (Edward Witten & Joseph Polchinsky) обнаружили весьма веские доказательства того, что различные суперструнные теории представляют собой различные предельные случаи еще неразработанной пока некоей М-теории. В связи с этим результатом в теорию струн были введены т.н. «D-браны» (D-branes) – определенные многомерные объекты.

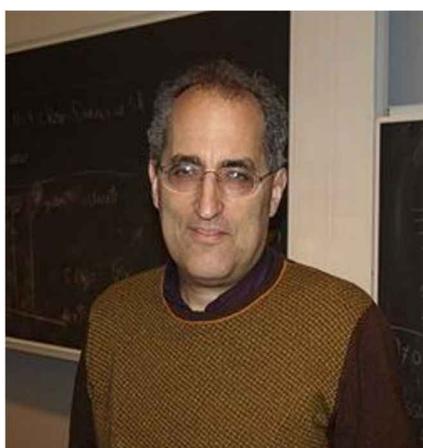
В 1997г. Хуан Малдасена (Juan Maldacena) обнаружил взаимосвязь между теорией струн и калибровочной теорией $N=4$ суперсимметричной теорией Янга-Миллса AdS/CFT.



Пространство Калаби-Яо



Leonard Susskind



Edward Witten



Juan Maldacena

Глава X. Особенности квантовой научной картины мира.

Я могу с уверенностью заявить, что на самом деле никто не понимает квантовую механику.

Ричард Фейнман

(1) У электрона нет траектории, но это не значит, что электрон – это волна. Электронные волны, когда электрон наблюдался бы «размазанным» в пространстве, не существуют. Электрон всегда наблюдается как точечная частица. Волны же, сопоставляемые электрону, существуют только в нашей голове. В рассмотренном выше идеализированном варианте эксперимента Девиссона и Джермера электронов больше в интерференционном максимуме по следующим причинам. Когда их выстреливают из пушки, формально они могут попасть в любую точку экрана. Но большая их часть попадает в те точки, где вероятность больше. Как справедливо отмечал Луи де Бройль, «волна вероятности управляет движением электрона».

(2) Квантовая механика отказывается от принципа детерминизма_: относительно некоторых событий в квантовой физике нельзя *в принципе* сказать, в полном соответствии с юмовским скептицизмом, почему они происходят. Например, пусть у нас имеются 5 одинаковых радиоактивных атомных ядер с одним и тем же временем полураспада. Через некоторое время ядра №3 и №5 распались, а ядра №1, №2 и №4 – нет. «Классический» физик (XIX в.) сказал бы, что существует некая «скрытая причина», по которой именно ядра №3 и №5 распались. Но квантовая физика утверждает, что распад происходит *спонтанно* и никаких причин предпочтения этих ядер другим не существует.

Отсутствие причинности для отдельных событий очень не нравилось Эйнштейну: «Бог не играет в кости». Поэтому он был сторонником концепции «скрытых параметров» (которую развили впоследствии Луи де Бройль и Давид Бом) утверждая, что причины, конечно, есть, просто наша нынешняя примитивная теория их «не видит».

Но против этой концепции была выдвинута «теорема Белла», доказанная в 1965г. и подтвержденная опытами Аспека. Поэтому мы можем утверждать, что квантовый индетерминизм *доказан*. Электрон - таки обладает «свободой воли».

(3) Основные принципы квантовой теории – «**принцип неопределенности**» и «**принцип дополненности**». Они тесно связаны между собой, поскольку именно принцип неопределенности привел Бора к формулировке принципа дополненности. Последний гласит: у квантовых объектов существуют *дополнительные* свойства: если мы наблюдаем одно свойство, мы ничего не можем говорить о другом и наоборот. Такими дополнительными парами являются «координата x и импульс p », «энергия E и время t » и т.д.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

(4) Если над системой производится измерение физической величины A (скажем, координаты, импульса, спина или энергии), то этой величине сопоставляется особый математический объект – оператор A . При этом волновая функция Ψ в момент времени, когда производится измерение, скачком превращается в новую функцию φ – собственную функцию оператора A . Подобное скачкообразное изменение называется «**редукцией волнового пакета**» или «**коллансом волновой функции**». Именно в этом случае особенно очевиден квантовый индетерминизм. Мы можем в данном случае только предсказать, что волновая функция станет собственной функцией оператора A , т.е. что $A \varphi_n = a_n \varphi_n$, и что экспериментатор зафиксирует только одно из ее собственных чисел. Но какое именно число он увидит? - Заранее предсказать нельзя. Можно лишь предсказать **вероятность** этого события.

(5) В своей знаменитой статье²³⁷ Альберт Эйнштейн, Борис Подольский (Boris Podolsky) и Натан Розен (Nathan Rosen) высказали уверенность в том, что в квантовой физике свойства квантовых объектов, как и сами эти объекты, существуют объективно, как стабильные элементы реальности, независимые от того, наблюдают их или нет (как это имеет место в классической физике).

Но в знаменитых спорах с Эйнштейном Нильс Бор оспорил это утверждение. Он показал, что *нельзя говорить о свойствах квантовых объектов независимо от способа их наблюдения* - в силу «неразложимой цельности между прибором и квантовым объектом». [Здесь вполне уместна аналогия со специальной теорией относительности. Определенная длина существует только относительно определенной системы отсчета].

Точку зрения Бора подтвердил в 1982 французский физик Аспек, доказавший т.н. «неравенства Белла». Суть эксперимента Аспека состояла в том, что имелся источник пар фотонов, вылетающих в разные стороны. Затем фотоны пролетали через два поляризатора (один слева, другой справа от источника) – прибора, измеряющего «поляризацию», после чего попадали на счетчики фотонов (приемники). Каждый поляризатор характеризуется особой «осью», так что при повороте этой оси измеряются разные поляризации.

Если фотоны обладают поляризациями «независимо от наблюдения», как полагал Эйнштейн, то в этих опытах должны выполняться неравенства Белла. Каждый поляризатор можно быстро поворачивать на некоторый угол, так что ни один сигнал, распространяющийся со скоростью света, не «успеет» сообщить другому поляризатору об этом повороте. Если верен принцип боровской,

²³⁷ A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? // The Physical Review, 1935, vol.47(10), pp.777-780.

«копенгагенской» интерпретации квантовой механики, согласно которому свойства возникают при редукции волнового пакета при измерении, то неравенства Белла должны нарушаться.

Но именно это опыты и продемонстрировали, раскрыв такое важное свойство квантовой физики как *нелокальность*. Нелокальность означает существование особой связи между случайными событиями на большом расстоянии. Эта связь не обусловлена каким-либо сигналом, переданным из одной точки в другую. Она следует из существования у двух частиц единой общей волновой функции. Пример: пусть в Казани и в Агрызе происходит один и тот же случайный процесс. Например, некто X в автобусах ворует мелочь из карманов в Казани, а его напарник У делает то же самое в Агрызе. Каково же будет удивление воришек, когда при встрече в Нижнекамске выяснится, что всякий раз, когда один находил в карманах доверчивых граждан 10 долларов, другой обнаруживал ту же сумму!

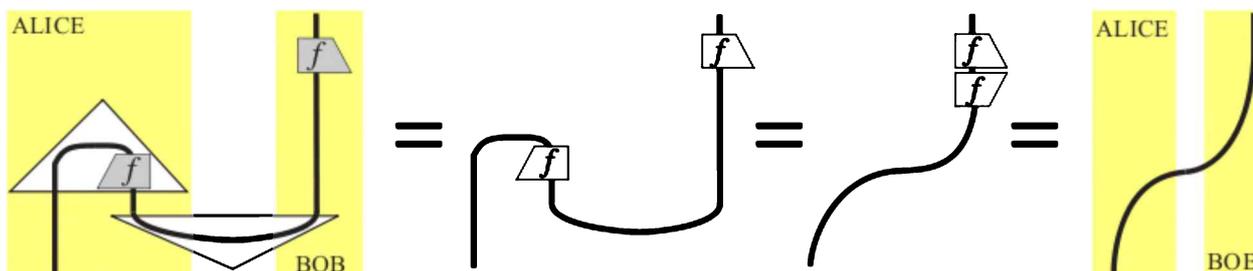
Именно на этих явлениях и основана возможность *телепортации*, т.е. гипотетического переноса тела космонавта с Земли на звезду Альфа-Центавра, например.



John Bell (1928-1990)



Alain Aspect (born in 1947)



Квантовая телепортация

В завершение хотелось бы привести два высказывания нобелевских лауреатов - творцов квантовой теории XX в. – характеризующие глубину их проникновения в тайны микромира:



Paul Dirac : SHUT UP AND CALCULATE! (Заткнись и считай!)



Richard Feynman: I THINK I CAN SAFELY SAY THAT NOBODY REALLY UNDERSTANDS QUANTUM MECHANICS (Я могу с уверенностью заявить, что на самом деле никто не понимает квантовую механику).

Недаром такой ажиотаж в среде современных историков и философов науки вызвал т.н. «тезис Формана».



Пол Форман (Paul Forman, born 1937) в 1971 выдвинул тезис, согласно которому многие выдающиеся достижения в области теории квантов в Веймарской Германии в 1920-х гг. были обусловлены такой ее «интеллектуальной атмосферой», в которой многие ученые отвергали

Веймарскую Германию как незаконное государство и в которой существовала благоприятная почва для бунтов против причинности, детерминизма и материализма. Соответственно, ученые изгоняли лапласовский детерминизм из квантовой теории, открывая дорогу потрясающим новым и чрезвычайно плодотворным исследовательским перспективам. Форман увязывает возникновение квантовой механики и особенно ее копенгагенской интерпретации с послевоенным отвращением по отношению к рационализму и каузальности как основе бездушной военной мясорубки, безжалостно перемоловшей миллионы ни в чем не повинных людей. Форман подчеркивал, что

«Если физик хотел улучшить свой публичный имидж, то он должен был прежде всего отмежеваться от причинности, от жесткого детерминизма как от наиболее отвратительной черты физической картины мира. И именно это оказывалось тем, что требовалось для решения тех проблем атомной физики, которые находились в фокусе интересов физиков-профессионалов».

Само собой разумеется, что этот тезис вызвал шквал возражений и дискуссий о взаимоотношении внутренних и внешних факторов, которые не прекращаются до сих пор (т.н. science wars - «**научные войны**»). Как бы то ни было, даже такие суровые интерналисты, как Макс Джеммер (Max Jammer), указывают на то, что именно философские направления, подобные экзистенциализму, прагматизму и логическому эмпиризму, сформировали тот социокультурный фон, который оказался особенно восприимчивым к идеям, выдвигавшимся Бором, Гейзенбергом, Дираком и их единомышленниками.

Заключение.

Даже здесь не существует, Постум, правил.

Иосиф Бродский. Письма римскому другу.

В самом общем случае, всякая научная революция – это своеобразный «узловой пункт», фокус, в котором особенно интенсивно сходятся и *взаимопереплетаются* самые разные факторы и условия развития науки. Это – такое сложное сочетание разнообразных внутренних и внешних факторов, мировоззренческий и методологический контексты которого, судя по всему, не могут быть заданы одним и тем же способом, раз и навсегда²³⁸.

В чем же тогда состоят *подлинные* причины рассматриваемой нами второй научной революции? – Их, конечно, немало, но это множество все же можно разделить, как всегда, на две традиционные части: причины социальные («*внешние*») и причины когнитивные («*внутренние*»). Именно их сложное взаимодействие, выразившееся, прежде всего, в том, что причины внешние оказывали влияние, а иногда даже трансформировались в причины внутренние, и привело, судя по всему, ко второй научной революции, к замене классических фундаментальных научных теорий теориями неклассическими.

Внешние факторы второй научной революции точно описываются лаконичной фразой немецкого мыслителя и пророка второй половины XIX в. Фридриха Ницше: «*Бог умер*» (“*Gott ist tot*”). Это – набравшая силу к концу XIX в. безудержная модернизация всех сфер общественной жизни, состоявшая прежде всего в становлении индустриального общества с его коренной ломкой экономического уклада, традиционных политических институтов, ценностей и ценностных ориентаций социума. Это – интенсивная «секуляризация», отделение церкви от государства, рост эгоизма, цинизма, материализма, прагматизма и позитивизма²³⁹. Это – постепенное превращение знания в своеобразный «товар», «продукт духовного производства», сложный социальный

²³⁸ Печенкин А.А. (ред.) Современная философия науки: знание, рациональность, ценности в трудах мыслителей Запада. - М.: Логос, 1996. Философия науки. Учебник для высших учебных заведений. (Отв. ред. В.П. Кохановский). – Ростов – на - Дону: Феникс. – 1997.

Философия науки / под ред. С.А. Лебедева: Учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Академический Проект. – 2006. – 736с.

Философия социальных и гуманитарных наук. Учебное пособие для вузов / Под общ. ред. проф. С.А. Лебедева. – М.: Академический Проект. – 2006. – 912с.

Современные философские проблемы естественных, технических и социально-гуманитарных наук: учебник для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук (под общей редакцией д-ра филос. наук проф. В.А. Миропова). – М.: Гардарики. – 2006. – 639с.

²³⁹ Gilbert G.N. and Mulkay M. Opening Pandora's box: A sociological analysis of scientist's discourse. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984.

конструкт, отражающий специфику как природных процессов, так и непростых отношений внутри научного сообщества и социума в целом.

Внутренние причины – это появление более совершенной, прецизионной экспериментальной техники и, соответственно, новых опытных данных, трудно укладывавшихся в прокрустовы ложа старых исследовательских традиций и рассматриваемых в контекстах их внутренних разломов²⁴⁰, «разладов» в структуре научного знания, борьба и взаимодействие самих традиций друг с другом, «механицизма» и «электродинамизма», механистических и полевых концепций²⁴¹, дальнейшая безудержная математизация научного знания и т.д.

Взаимодействие этих двух групп факторов, по крайней мере начиная с Нового времени, определяется тем, что «внешние» факторы вовсе не отменяют «внутренних», но изменяют прежде всего «веса», значимость, роли этих факторов в ситуациях смены базисных парадигм. Нарастающая математизация научного знания, возрастающие требования к непротиворечивости и взаимной согласованности приводят к тому, что, как в первой, так и во второй научных революциях доминирующим оказывается *интертеоретический* контекст, определяющий ведущую роль такого фактора как *согласованность встретившихся друг с другом «старых» парадигм*. В условиях определяющей роли количественного подхода к описанию природных явлений особенно значимыми становятся попытки избавления от всякого рода логических противоречий и, прежде всего, от «противоречий встречи» между «старыми» парадигмами, исследовательскими программами и исследовательскими традициями. Если с противоречиями между теоретическими предсказаниями и экспериментальными данными можно как-то смириться (а какая развитая теория объясняет все аномалии?) и даже справиться за счет незначительных модификаций в теориях и моделях, то с концептуальной пропастью, разногласиями по *принципиальным* вопросам между старыми фундаментальными теориями примириться никак нельзя. Ведь они серьезно подрывают саму способность теоретического аппарата предсказывать новые опытные данные.

Поэтому обращение к материалу, предоставляемому историей второй научной революции, убедительно демонстрирует, что как *индуктивистская* (выводимость основных понятий теории из опыта), так и *фальсификационистская* (опытная проверяемость) модели научных революций явно недостаточны²⁴².

²⁴⁰ Нугаев Р.М. Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий. - Казань: изд-во КГУ. - 1989.

Нугаев Р.М. Смена базисных парадигм: коммуникационный подход. – Казань: изд-во «Дом печати», 2003.

²⁴¹ Einstein A. Autobiographical Notes. - In: Albert Einstein. Philosopher-Scientist. (ed. by P.A. Schlipp). Evanston, Illinois, 1949. - 781pp. Имеется перевод: Эйнштейн А. Творческая автобиография. – В кн.: Физика и реальность. М., 1965, с. 131 – 166.

²⁴² Lakatos Imre. History of Science and its Rational Reconstructions. – In: R.C. Buck & R.S. Cohen (eds.) Boston Studies in the Philosophy of Science, vol.8, 1971. Reprinted in C. Howson (ed.) Method and Appraisal in the Physical Sciences, 1976, Cambridge University Press. Имеется перевод: Лакатос И. История науки и ее реконструкции. – В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, с. 203 – 270; Лакатос И. Ответ на критику. - В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, С. 330 – 333.

Они ограничены по крайней мере в двух отношениях – логико-методологическом и историко-научном. Исследования философов и историков науки убедительно демонстрируют, что теоретические законы не являются непосредственным обобщением опытных данных. (Классический пример – I закон Ньютона, согласно которому тело, на которое не действуют никакие силы, продолжает находиться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения; но где вы видели такое тело?) - Существует определенный «диалектический скачок» от опыта к теории, от эмпирических схем к частным теоретическим, а также от слоя частных теоретических моделей к слою модели базисной. Поэтому вся содержащаяся в фундаментальной (развитой) теории информация должна быть равномерно распределена между тремя относительно независимыми слоями или уровнями организации научного знания²⁴³. В силу отсутствия жесткой связи между этими тремя основными слоями – слоем базисной идеальной модели, слоем производных теоретических моделей и слоем эмпирических законов (слоем опытных данных), всякая фундаментальная (развитая) научная теория в том смысле, который придают этому поиятию сторонники «критического эксперимента», «неопровержима»²⁴⁴. И обращение к истории науки убедительно этот тезис подтверждает. Ни один пример подобного эксперимента, предлагавшийся фальсификационистами, не проходит по историко-научным соображениям²⁴⁵.

Более полное описание научных революций возможно в рамках такого подхода, который, по возможности сохраняя определенные позитивные элементы хорошо зарекомендовавших себя методологий Лакатоса и Куна, смог бы пойти несколько дальше.

Он смог бы пролить дополнительный свет не столько на то, как *возникают* конкурирующие научно-исследовательские программы и парадигмы, как *формируются* их «ядра», «эвристики» и «дисциплинарные матрицы», сколько на то, как они *взаимодействуют* друг с другом.

С нашей точки зрения, научная революция возникает прежде всего в результате выявления *противоречий встречи*²⁴⁶ и реализации попыток их разрешения, согласования встретившихся парадигм или научно-исследовательских программ.

²⁴³ Степин В. С. Стаповление научпой теории. – Минск: Изд-во БГУ, 1976. Степин В.С. Теоретическое знапие. – М.: Наука, 2000.

²⁴⁴ Степин В. С. Структура теоретического знания и историко-паучные реконструкции. – В кп.: Методологические проблемы историко-паучных исследований. – М.: Наука, 1982, С. 137 – 171; Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы: учебник для аспирантов и соискателей учепой степепи кандидата паук. – М.: Гардарики. – 2006..

²⁴⁵ Kuhn T.S. Logic of Discovery or Psychology of Research? - In: I. Lakatos & A. Musgrave (eds.) Criticism and the Growth of Knowledge. Cambridge University Press, 1970, pp.1-23.

²⁴⁶ Tisza L. The Conceptual Structure of Physics // Reviews of Modern Physics, 1963, vol. 35, pp.151-185. Подгорецкнй М. И., Смородипский Я. А. Об аксиоматической структуре физическнх теорий. – В кп.: Физическая теория. М., 1980, С. 53 – 61.

Этот процесс может длиться веками (коперниканская революция²⁴⁷) и десятилетиями (создание максвелловской электродинамики²⁴⁸). Но наиболее эффективный, обеспечивающий наибольший эмпирически-прогрессивный сдвиг решаемых проблем метод согласования встретившихся теорий – это реализация синтетической программы. Последняя ставит своей целью регулирование отношений между встретившимися теориями за счет создания более общей, *глобальной* теории, пытающейся включить в себя встретившиеся теории в качестве «частных случаев»²⁴⁹.

Подобный подход органично вписывается в концепцию *роста научного знания*, согласно которой рост знания состоит в увеличении надежных, достоверных, причинно-следственных объяснений наблюдаемых явлений²⁵⁰. Чем более согласованными друг с другом будут различные теории, научно-исследовательские программы и парадигмы, тем большее количество надежных причинно-следственных объяснений будет получено. Поэтому на уровне теорий рост знания состоит не в стремлении к «Единой Теории Всего на Свете» (Theory of Everything), а в росте *взаимосвязей, взаимоотношений* между различными «парадигмами», исследовательскими традициями и «практиками».

Прибегая к аналогии, можно сказать, что вся совокупность человеческих знаний напоминает стохастическую среду, эдакие концептуальные «джунгли», где выживают в ходе жестокой борьбы за существование только те отдельные моды (колебания), которые усиливают, поддерживают друг друга. А всех остальных ждет печальная участь «кануть в Лету».

Таким образом, эта картина напоминает такую картину биологической эволюции, где различные организмы не только борются друг с другом за выживание (конкуренция научно-исследовательских программ), выясняют отношения и иногда *сотрудничают* (интертеоретический контекст), но также активно взаимодействуют с окружающей средой (социокультурным, социально-политическим и социально-экономическим контекстом). В силу непредсказуемости изменения этого контекста состояние научного знания также не стремится ни к какому определенному пределу.

²⁴⁷ Койре А. От замкнутого мира к беспечной Вселенной. М., 2001. Koyre A. Les etapes de la cosmologie scientifique. - In: Etudes d'histoire de la pensee scientifique. Paris, 1966.

Kuhn T.S. The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought. Cambridge: Harvard University Press, 1957.

²⁴⁸ Максвелл Д.К. Статьи и речи. – М.: Наука. – 1968. Нугаев Р.М. Максвелловская научная революция: согласование исследовательских программ Фарадея, Ампера-Вебера и Френеля-Юнга. – Казань: изд-во Казанского университета, 2013.

²⁴⁹ Нугаев Р. М. Почему одна фундаментальная теория сменяет другую? // Вопросы философии, № 6, 1987, С. 90 – 98.

²⁵⁰ Cartwright N. How the Laws of Physics Lie. Cambridge, Cambridge University Press, 1983; см. также : Нугаев Р.М. Проблема роста научного знания // Философия Науки, №4 (31), 2006. – С.3-19; Нугаев Р.М. Проблема роста социогуманитарного знания // Вопросы Философии, № 8, 2007.

Пользуясь суконным языком отечественной диалектики²⁵¹, можно констатировать, что «единство», т.е. согласованность исследовательских традиций, носит временный характер, а их «борьба» – вечный²⁵². Поэтому существенное, «научное» требование к каждой новой теории, программе, парадигме состоит в том, чтобы она носила «открытый», честный, «человечный» характер, чтобы она была сформулирована так, чтобы была способна взаимодействовать и даже в конечном счете *объединяться* с другими интеллектуальными продуктами человеческой деятельности, с другими интеллектуальными трендами и духовными традициями.

Особенно наглядным примером «работы» этой концепции является вторая – «эйнштейновская»²⁵³ – научная революция, гармонично объединившая две локальные революции – квантовую и релятивистскую. Первая из них началась в 1899г., когда на заседании берлинской академии наук Макс Планк доложил о решении задачи нахождения формулы, описывающей спектр излучения абсолютно черного тела. Для получения своего результата Планк применил одновременно ньютоновскую механику, максвелловскую электродинамику, статистическую механику и термодинамику – классические исследовательские программы или «парадигмы», в каждую из которых он уже успел сделать значительный вклад до 1899г.²⁵⁴

Эти незаурядные «открытость» и компетентность и позволили Планку, одному из первых немецких профессиональных физиков-теоретиков, сделать решающий, выдающийся шаг.

Для того чтобы согласовать все эти научно-исследовательские программы друг с другом, он и ввел предположение о квантовании энергии излучения. Это предположение выступало в качестве необходимого условия применимости статистико-механического подхода; тем не менее, Планк надеялся впоследствии все же как-то его элиминировать и обосновать свои вычисления классически.

Но уже в 1905г. Альберт Эйнштейн, исходя из *собственной* статистико-термодинамической программы²⁵⁵, начатой в 1902г., убедительно продемонстрировал, что совместное применение

²⁵¹ Гегель Г.В.Ф. Наука логики. – Спб.: Наука. – 2005.

²⁵² Фейерабенд П. Прощай, разум. – М.: АСТ, 2010. Фейерабенд П. Наука в свободном обществе. – М.: АСТ, 2010.

²⁵³ Нугаев Р.М. Эйнштейновская революция 1898-1915: иптертеоретический контекст.- Казань : изд-во «Логос», 2010.

²⁵⁴ Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912. Oxford and New York, 1978.

²⁵⁵ Einstein A. Folgerungen aus den Capillazitatserchneinugen. – Annalen der Physik, 1901, vol. 4, pp. 513 – 523. Имеется перевод: Эйнштейн А. Следствия из явлений капиллярности. – Собр. соч., т. 3, 7 – 17. М., 1966.

Einstein A. Über die thermodynamische Theorie der Potential-differenz zwischen Metallen und vollständig dissoziierten Lösungen ihrer Salze und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte. – Annalen der Physik, 1902, vol. 8, pp. 798 – 814. Имеется перевод: Эйнштейн А. О термодинамической теории разности потенциалов между металлами и полностью диссоциированными растворами их солей и об электрическом методе исследования молекулярных сил. – Собр. соч., т. 3. М., 1966, с. 18 – 33.

Einstein A. Kinetische theorie des Warmegleichgewichtes und des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. – Annalen der Physik, 1902, vol. 9, pp. 417 – 433. Имеется перевод: Эйнштейн А. Кипетическая теория теплового равновесия и второго начала термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 34 – 49.

Einstein A. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. - Annalen der Physik, 1903, vol.11, pp. 170 - 187.Имеется перевод: Эйнштейн А. Теория основ термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 50 – 66.

Einstein A. Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme. - Annalen der Physik, 1904, vol.14, pp. 354 - 362. Имеется перевод: Эйнштейн А. К общей молекулярной теории теплоты. – Собр. соч., т.3, М., 1966, с. 67 – 74.

классических подходов к описанию спектра излучения абсолютно черного тела неизбежно ведет к «ультрафиолетовой катастрофе». Выход – в рассмотрении электромагнитной волны как состоящей из *реально* существующих частиц - фотонов, в возвращении к «теории истечения» Ньютона, etc.

Своего рода «побочным следствием» статьи 1905а «по фотоэффекту» явилась знаменитая статья 1905b по СТО, опубликованная в том же журнале «*Annalen der Physik*», но *спустя два месяца*. Несмотря на то, что задумана она была давно, «спусковым крючком», триггером для ее доработки и публикации явились исследования Эйнштейна по созданию квантовой теории. В статье по СТО Эйнштейн показал, что следующее из статьи 1905а заключение об отсутствии эфира (когда энергия передается за счет прямого обмена фотонами и не рассеивается в пространстве в качестве сферической волны) эквивалентно тезису об отсутствии абсолютной системы отсчета и положению об относительности одновременности двух разных событий. Если эфира на самом деле не существует, то формулы преобразований Лоренца, содержащие эфемерное «локальное время», на самом деле следует понимать буквально.

СТО и теории из «конкурирующей», редуционистской исследовательской лоренцевской программы были эмпирически-эквивалентны. В частности, обе они, хоть и по – разному, вполне разумно объясняли результаты опыта Майкельсона - Морли²⁵⁶.

Расходились же эти программы в двух областях – в теории излучения и в теории тяготения, поэтому для понимания *действительных* причин победы программы Эйнштейна над программой Лоренца необходимо принимать во внимание как эволюцию квантовой подпрограммы, так и создание ОТО. На наш взгляд, в силу того, что ОТО стала полноценной, уважаемой теорией сравнительно недавно, а квантовая – победила уже в первое десятилетие после создания СТО, - *развитие квантовой подпрограммы оказало гораздо большее влияние на принятие СТО, чем развитие собственно релятивистской.*

Не менее важно, что создание ОТО также происходило в рамках осознания и разрешения своего собственного «противоречия встречи»²⁵⁷. В самом деле, принятие, в качестве следствия СТО, утверждения о том, что скорость света является верхним пределом скоростей распространения всех взаимодействий, резко расходилось с ньютоновской теорией тяготения; – в этой парадигме изначально гравитационное взаимодействие передавалось мгновенно. Противоречие встречи было

²⁵⁶ Lorentz H.A. The Relative Motion of the Earth and the Ether. – Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1892a, vol. 1, pp. 74 – 77. Reprinted in: Lorentz, Collected Papers, 1937, vol. 4, pp. 219 – 223. Lorentz H.A. Stokes' Theory of Aberration. – Versl. Kon. Akad. Wetensch., Amsterdam, 1892b, vol. 2, pp. 97-103. Reprinted in : Lorentz, Collected Papers, 1937, vol. 4, pp. 224 – 232. Lorentz H.A. Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Korpern. – Versl. Kon. Akad. Wetensch., Amsterdam, 1895, pp. 89 – 92.

Lorentz H.A. Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektrontheorie. - Encyklopedie der Mathematischen Wissenschaften. Leipzig, Teubner. Band 5/2, 1904.

²⁵⁷ Nugayev Rinat M. Einstein's Revolution: A Study in Theory Unification. Bentham Science Publishers, Sharjah, UAE-USA, 2018.

разрешено не сразу, а в ходе длительного процесса, одним из промежуточных этапов которого явилось создание неметрических, т.н. «релятивистских» теорий гравитации²⁵⁸.

Для более глубокого и полного уяснения причин второй научной революции необходимо сравнить ее с первой – коперниканской - революцией, рассмотренной в предыдущем учебно-методическом пособии. В этом случае основное противоречие, осознание и разрешение которого и составляет интертеоретический контекст этой революции, уже давно было выявлено известным французским историком и философом науки Александром Койре. Это - «*вопиющий разрыв*»²⁵⁹, в терминах А. Койре, между птолемеевской математической астрономией и аристотелевской качественной физикой (не признававшей количественных методов) в рамках птолемеевской исследовательской программы,

Соответственно, при создании собственной, нептолемеевской, гелиоцентрической программы Коперник руководствовался не столько мотивами устранения астрономических аномалий, сколько соображениями метафизического и эстетического характера. Он начинает свой труд «*О вращениях небесных тел*» (De Revolutionibus) с язвительной критики язычника Птолемея за то, что в его системе по сути дела нет единого Бога, а разные части его системы отражают замыслы разных «творцов»²⁶⁰.

Желая, в противовес языческим математикам, сторонникам Птолемея, продемонстрировать, что «небо устроено в наилучшем порядке», Коперник предлагает, вслед за Аристархом Самосским, поместить в центр космоса Солнце, а Землю сделать рядовой, заурядной планетой. Но именно это и обострило глубокие парадоксы в аристотелевской физике, связанные с понятиями естественного и вынужденного движений: «почему у Земли как целого естественным движением является круговое, а у частей ее – прямолинейное?»

По сути дела, Коперник сконструировал *гибридную* теорию, положившую начало *взаимопроникновению* «математики Неба» и «физики Земли». (Через несколько столетий тот же методологический «прием» повторили Планк и Эйнштейн, создав гибридную теорию, своеобразно «соединявшую» волны и частицы). Незабвенный автор книги «*О вращении небесных сфер*» ввел в традиционную космологию положения, которые «взорвали ее изнутри»²⁶¹. В особой мере Коперник подготовил почву для Галилея. Действительно, если Земля – рядовая планета, то законы математики

²⁵⁸ Нугаев Р. М. Возникновение и разрешение ситуации выбора адекватной релятивистской теории гравитации //Философские науки, 1988, № 3, с. 32 – 42. См. также: Швырев В. С. Теоретическое и эмпирическое в научном познании. – М.: Наука, 1978.

²⁵⁹ Койре А. Очерки истории философской мысли. О влиянии философских концепций на развитие научных теорий. – М.: Прогресс, 1985.

²⁶⁰ Коперник Н. О вращении небесных сфер. – СПб.: Амфора, 2009.

²⁶¹ Шопю П. Цивилизация классической Европы. – М.: АСТ МОСКВА; Екатеринбург: У - Фактория, 2008.

должны быть применимы не только к ее вращению вокруг собственной оси и вокруг Земли, но и к движениям на ее поверхности²⁶².

В работах Николая Кузанского метафизические интуиции, составлявшие «дух времени» (Zeitgeist) и подпитывавшие творчество Коперника, Кеплера, Галилея и Ньютона, получили основательно продуманный, последовательный и систематический характер²⁶³.

Монотеистический креационизм кардинала Кузанского неуклонно подрывал метафизические основы птолемеевско - аристотелевской космологии: в качестве тварного «Небо» ничем не должно отличаться от «Земли». С другой стороны, **трактовка человека как «второго бога»**, творца идеальных мыслительных сущностей эффективно подрывала основы аристотелевской метафизики и закладывала теоретико-методологические основы математического экспериментального естествознания²⁶⁴.

Руководствуясь идеями Платона, работами Коперника и собственными потрясающими астрономическими наблюдениями, сделанными при помощи самостоятельно сконструированного телескопа, Галилей *низводит математику с небес на Землю*. (Аналогично через три столетия Планк и Эйнштейн низведут статистическую механику с рассмотрения «весомых тел» к описанию электромагнитного поля).

Для математизации естественных наук Галилей, следуя математику Декарту, радикально преобразует методологию науки, возведя «идеализацию» и «мысленный эксперимент» в ранг ведущих методов научного познания²⁶⁵.

Основной целью творчества Исаака Ньютона было нахождение единых законов, управляющих движением как небесных, так и земных тел. Главное, что должен был сделать «стоявший на плечах гигантов» -Коперника и Галилея- Ньютон, – это показать, что **та же самая** сила, что притягивает все тела к Земле, заставляет и Луну вращаться вокруг Земли.

Создав фундаментальную схему своей теоретической механики за счет синтеза гибридных теоретических схем своих предшественников²⁶⁶, Ньютон сформулировал три своих знаменитых динамических закона и закон всемирного тяготения²⁶⁷. За счет этого синтеза он наконец-то обеспечил постоянный эмпирически-прогрессивный сдвиг решаемых проблем.

²⁶² Галилей Г. Избранные труды в 2 тт. – М., 1964. Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой. – Пер. А.И. Долгова. ОГИЗ – СССР. М.-Л., 1948.

²⁶³ Nagel F. Nicolaus Cusanus und die Entstehung der exakten Wissenschaften. Munster, 1984.

²⁶⁴ Николай Кузанский. Соч. в 2 томах. т.1. – М.: Мысль, 1979.

²⁶⁵ Finocchiaro Maurice A. The Galileo Affair. A Documentary History. 1989. University of California Press. The Essential Galileo. Ed. and transl. by Maurice Finocchiaro. Hackett Publishing Company, 2008.

²⁶⁶ Нугаев Р.М. Коперниканская революция : интертеоретический подход // Вопросы философии, 2012, № 3, С.110-120.

²⁶⁷ Ньютоп И. Математические начала натуральной философии. – В кп. Собрание трудов акад. А.Н. Крылова. Т.7. – М.- Л. : Изд-во АН СССР. –1936. См. также: Исаак Ньютон. Математические пачала натуральной философии (под ред. Л.С. Полака). М., Наука, 1989. Перевод с лат. и комментарии А.Н. Крылова.

В завершение следует добавить, что раскрытое Кузанским (и реализованное Коперником, Кеплером, Галилеем и Ньютоном) сыгравшее столь плодотворную роль понимание Творца характерно именно для науки Нового времени. Согласно известному современному французскому историку, вся цивилизация классической Европы была «цивилизацией государства». Конечно, государство родилось не в XVII веке, но именно тогда оно «обрело свое подлинное качество».

«Именно в XVII веке конституируется современное государство. Это – великое предприятие, фактор несравненного порядка. Виет и Ферма были государственными служащими. Декарт служил по военной части»²⁶⁸.

Та же классическая эпоха почти повсеместно демонстрирует укрепление монархического принципа. В тех условиях не было ничего более значительно противостоящего своенравному деспотическому режиму, чем «абсолютная монархия естественного права». Вокруг короля – источника права, но покорного праву, – постепенно складывалась иерархическая система советов, ведомств и т.д., в конечном счете удерживавшая власть от произвола.

Государство тогда не было отделимо от общества, чаяния которого оно объединяло. Общество Нового времени было обществом сословным. Это означает, что его социальная структура определялась не положением одной или нескольких групп по отношению к процессу производства, а по «иерархии достоинства, статуса, должности».

Далее, централизованное государство утверждалось в противовес государству раздробленному со всеми его баронами, лордами, визирями и боярами. Поэтому оно утверждалось, опираясь на группу *служащих*, на группу «специалистов». История Нового времени характерна утверждением чиновничества, т.е. переходом части элиты крестьян и горожан на службу государства.

На наш взгляд, *аналогия между политическими и когнитивными процессами очевидна*. Так же как централизованное государство ломало сословные перегородки и устанавливало единый для всех, однородный и бездушный порядок, единое «правовое пространство», так же и перестройка науки XVI-XVII вв. ломала античный, иерархически-упорядоченный космос для того, чтобы заменить его бесконечной и однородной, холодной и пустой Вселенной. Трудно не процитировать самого Исаака Ньютона:

«Такое изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по намерению и по власти могущественного и премудрого существа... Сей управляет всем не как душа мира, а как властитель вселенной, и по господству своему должен именоваться господь бог вседержитель. Ибо бог есть слово относительное и относится к рабам; божественность есть

²⁶⁸ Шопю П. Цивилизация классической Европы. – М.: АСТ МОСКВА; Екатеринбург: У-Фактория, 2008. – С.15-18. См. также: Гайденко П. П. Эволюция понятия науки: стаповление и развитие первых научных программ. – М.: Наука, 1980.

господство бога не над самим собою, как думают полагающие, что бог есть душа мира, но над рабами».²⁶⁹

Тем не менее, в общем случае, судя по всему, можно говорить не столько о причинно-следственной связи между когнитивными и социально-политическими структурами, сколько об их «когерентности»²⁷⁰, т.е. их взаимном усилении в социуме, обусловленном «духом времени». То же самое справедливо и по отношению ко второй научной революции, в чем, как мы надеемся, смогли убедиться читатели этой книги.

«Дух времени», кризисная атмосфера предвоенного (*fin de siècle*) мира обусловили не только мятежные настроения участников «эйнштейновской революции»²⁷¹, но и, в соответствии с т.н. «тезисом Формана»²⁷² и создание таких «монстров», таких дерзких вызовов не только лапласовскому детерминизму, но и всей классической рациональности как квантовая теория поля и физика элементарных частиц²⁷³.

Таким образом, история второй научной революции убедительно раскрывает изощренную взаимосвязь между т.н. «внутренними» и «внешними» факторами, вписывая энергичные поиски единого описания многообразных природных явлений в сложнейший социокультурный контекст, опосредованно детерминируемый, в свою очередь, социально-политическими и социально-экономическими факторами.

Важно, что внешние причины оказывают неодинаковое влияние на развитие научных исследований, поскольку их длительность и интенсивность проявления в самом социуме неравномерны и неоднородны. Важно также отметить, что основным опосредующим фактором, через который осуществляется воздействие социально-политических и социально-экономических факторов, является т.н. «социокультурный фон», содержащий ценности, ценностные ориентации, образцы поведения, и, главное, когнитивные ценности, представления об истине, etc. В этом плане значение влияния как самих религиозных представлений, так и их расщепления (католичество и протестантизм), а также процесса их разложения («секуляризация») трудно переоценить.

Взаимодействие этих двух групп факторов, по крайней мере начиная с Нового времени, определяется тем, что внешние факторы не отменяют внутренних, но изменяют прежде всего «веса», значения этих факторов в ситуациях смены базисных парадигм.

²⁶⁹ Исаак Ньютон. Математические пачала натуральной философии (под ред. Л.С. Полака). М., Наука, 1989. Перевод с лат. И комментарии А.Н. Крылова.

²⁷⁰ Мамчур Е. А. Проблема социокультурной детерминации научного знания. – М.: Наука, 1987.

²⁷¹ Feuer L.S. Einstein and the Generations of Science. N.Y.: Basic Books. Inc., 1974. Pyenson Lewis. The Young Einstein. The Advent of Relativity. Adam Hilger: Bristol & Boston, 1985.

²⁷² Forman Paul. Weimar culture, causality, and quantum theory: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment // Historical Studies in the Physical Sciences, 1971, vol.3, pp. 1-115.

²⁷³ Mehra J. & Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Mechanics. Springer-Verlag, vol.1, 1982. Pickering Andrew. Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics. The University of Chicago Press, 1985.

Нарастающая с XV-XVII вв. (промышленная революция) математизация научного знания, обусловленная доминированием количественного подхода к описанию природных явлений, приводит к тому, что как в первой, так и во второй научных революциях доминирующим оказывается *интертеоретический контекст*, определяющий такой внутренний фактор как согласованность встретившихся друг с другом «старых» парадигм.

Список литературы

- Астрономия: век XXI. Фрязино: «Век 2», 2008. 608с.
- Вебер Макс. Избранные произведения. М.: Мысль, 1989. 720с.
- Виленкин А. Мир многих миров: Физики в поисках параллельных вселенных. М.: Астрель, 2010. 303с.
- Гайденко П. П. Эволюция понятия науки: становление и развитие первых научных программ. М.: Наука, 1980. 566 с.
- Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира – птолемеевой и коперниковой. – Пер. А.И. Долгова. ОГИЗ – СССР. М.-Л., 1948. 378с.
- Галилей Г. Избранные труды в 2тт. – М., 1964.
- Гегель Г. В.Ф. Наука логики. – СПб.: Наука. – 2005. 799с.
- Дюгем П. Физическая теория, ее цель и строение. СПб., 1910. 326с.
- Зотов А.Ф., Мельвиль Ю.К. Западная философия середины 19 – начала 20 века.: Учеб. пособие для филос. фак. ун-тов. – М.: Высшая школа. 1988. 520с.
- Зотов А.Ф., Мельвиль Ю.К. Западная философия XX века. Учебное пособие. М.: «ПРОСПЕКТ», 1998. 432с.
- Кант И. Критика чистого разума (пер. Н. Лосского). М.: Эксмо, 2006.
- Кант Иммануил. Прологомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука. (Пер. Вл. Соловьева). – В сб.: Иммануил Кант. Трактаты. СПб.: Наука, 2006. – С.147-258.
- Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания: Учебник для вузов. М.: Академический проект. – 2014. – 8-е изд., испр. и доп. 640с.
- Койре А. Очерки истории философской мысли. О влиянии философских концепций на развитие научных теорий. М.: Прогресс, 1985. 286с.
- Койре А. От замкнутого мира к бесконечной Вселенной. М., 2001.
- Коперник Н. О вращении небесных сфер. СПб.: Амфора, 2009. 580с.
- Кузанский Николай. Соч. в 2 томах. т.1. М.: Мысль, 1979.488с.
- Кун Т. Структура научных революций. М.: АСТ, 2003.605 с.
- Лакатос И. Методология исследовательских программ. М.: ООО «Издательство АСТ» : ЗАО нпп «Ермак», 2003.380с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
- Лекторский В.А. Эпистемология классическая и неклассическая. М.: Наука, 2001.
- Линде А.Д. Раздувающаяся Вселенная. // УФН, 1984, том 111, вып. 2.
- Максвелл Д.К. Статьи и речи. – М.: Наука.,1968.422с.
- Мамчур Е. А. Проблема выбора теории. М.: Наука, 1975.231 с.
- Мамчур Е. А. Проблема социокультурной детерминации научного знания. М.: Наука, 1987. 127 с.
- Мертон Роберт. Наука и демократическая социальная структура. – В сб.: Мертон Роберт. Социальная теория и социальная структура. М.: АСТ, 2006. С. 767-781.
- Методологические принципы физики. М.: Наука, 1975.
- Нугаев Р. М., Якупов М. Ш. Проблема выбора между метрическими и неметрическими теориями гравитации. – В кн.: Математизация естественнонаучного знания: пути и тенденции. Казань: Изд-во КГУ, 1984, с. 105 – 121,
- Нугаев Р. М. Почему одна фундаментальная теория сменяет другую? // Вопросы философии, № 6, 1987, с. 90 – 98.
- Нугаев Р. М. Возникновение и разрешение ситуации выбора адекватной релятивистской теории гравитации //Философские науки, 1988, № 3, с. 32 – 42.
- Нугаев Р.М. Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий. Казань: изд-во КГУ. 1989. 208с.
- Нугаев Р.М. Специальная теория относительности как результат взаимодействия термодинамики, статистической механики и максвелловской электродинамики.// Физическое знание: его генезис и развитие. М.: Наука,1993, с.130-144

- Нугаев Р.М. Смена базисных парадигм: коммуникационный подход. Казань: изд-во «Дом печати», 2003. 303с.
- Нугаев Р.М. Проблема роста научного знания // Философия Науки, №4 (31), 2006. С.3-19.
- Нугаев Р.М. Проблема роста социогуманитарного знания // Вопросы Философии, № 8, 2007. С. 58-69.
- Нугаев Р.М. Эйнштейновская революция 1898-1915: интертеоретический контекст. Казань : изд-во «Логос», 2010. 311с.
- Нугаев Р.М. Коперниканская революция : интертеоретический подход // Вопросы философии, 2012, № 3, С.110-120.
- Нугаев Р.М. Коперниканская революция: синтез физики Земли и математики Неба. Казань: центр инновационных технологий, 2012. 302с.
- Нугаев Р.М. Максвелловская научная революция: согласование исследовательских программ Фарадея, Ампера-Вебера и Френеля-Юнга. – Казань: изд-во Казанского университета, 2013. – 176с.
- Нугаев Р.М. Генезис и становление максвелловской электродинамики: интертеоретический подход // История науки и техники, 2013.-№ 12. С. 3-19.
- Нугаев Р.М. Первая научная революция: генезис и становление механической научной картины мира. – Казань: ПГАФКСИТ, 2017.62с
- Нугаев Р.М. Генезис специальной теории относительности: интертеоретический контекст // «Метафизика», 2018, №4 (30), С.113-128.
- Нугаев Р.М. Дираковский синтез квантовой механики и специальной теории относительности: интертеоретический контекст// Философия науки и техники, 2021, т.26, №2, С. 96-109.
- Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – В кн.: Собрание трудов акад. А.Н. Крылова. Т.7. – М.- Л.: Изд-во АН СССР. –1936. См. также: Исаак Ньютон. Математические начала натуральной философии (под ред. Л.С. Полака). М., Наука, 1989. Перевод с лат. и комментарии А.Н. Крылова. 708с.
- Печенкин А.А. (ред.) Современная философия науки: знание, рациональность, ценности в трудах мыслителей Запада. - М.: Логос, 1996.395с.
- Планк М. Отношение современной физики к механическому мировоззрению. – Физическое обозрение, 1911, т. 12, № 3.
- Планк М. Единство физической картины мира. – В кн.: Планк М. Избранные труды. М., 1975.
- Подгорецкий М. И., Смородинский Я. А. Об аксиоматической структуре физических теорий. – В кн.: Физическая теория. М., 1980, с. 53 – 61.
- Розенбергер Ф. История физики. Часть вторая. История физики в новое время. М. - Л.: Государственное технико-теоретическое издательство. 1933. 341с.
- Рузавин Г.И. Методы научного исследования. – М.: Мысль. 1975. 237с.
- Садовский В.Н. (ред.) Структура и развитие науки. Из Бостонских исследований по философии науки. Сборник переводов. – М.: Прогресс. 1978. 487с.
- Современная философия науки: знание, рациональность, ценности в трудах мыслителей Запада: Учебная хрестоматия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательская корпорация «Логос». 1996.
- Современная философия науки: знание, рациональность, ценности в трудах мыслителей Запада: Учебная хрестоматия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательская корпорация «Логос». 1996. 400с.
- Современные философские проблемы естественных, технических и социально-гуманитарных наук: учебник для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук (под общей редакцией д-ра филос. наук проф. В.А. Миронова). М.: Гардарики. 2006. 639с.
- Спаский Б. И. История физики, т. 2. М.: Изд-во МГУ, 1964. 300 с.
- Степин В. С. Становление научной теории. – Минск: Изд-во БГУ, 1976. 319 с.
- Степин В. С. Структура теоретического знания и историко-научные реконструкции. – В кн.: Методологические проблемы историко-научных исследований. М.: Наука, 1982, С. 137 – 171.
- Степин В.С. Теоретическое знание. М.: Наука, 2000. 744с.
- Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы: учебник для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук. М.: Гардарики. 2006.384с.

- Г' Хоофт Г. Калибровочные теории сил между элементарными частицами // Успехи физических наук, 1981, том 135, вып.3, С.502.
- Тяпкин А.А., Шибанов А.С. Пуанкаре. М.: Мол. Гвардия, 1979.415с.
- Фейерабенд П. Прощай, разум. М.: АСТ, 2010.477с.
- Фейерабенд П. Наука в свободном обществе. М.: АСТ, 2010.
- Философия науки. Учебник для высших учебных заведений. (Отв. ред. В.П. Кохановский). Ростов – на – Дону: Феникс. – 1997.
- Философия науки / под ред. С.А. Лебедева: Учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Академический Проект. 2006. 736с.
- Философия социальных и гуманитарных наук. Учебное пособие для вузов / Под общ. ред. Франкфурт У. И., Френк А. М. У истоков квантовой теории. М.: Наука, 1975.
- Холтон Д. К. К генезису специальной теории относительности // Эйнштейновский сборник. М.: Наука, 1966, с. 177 – 194.
- Хунд А. История квантовой теории. М.: Прогресс, 1980.
- Швырев В. С. Теоретическое и эмпирическое в научном познании. М.: Наука, 1978. – 382 с.
- Шеллинг Ф. Философия откровения. Том 1. Спб. Наука, 2000.699с.
- Шоню П. Цивилизация классической Европы. М.: АСТ МОСКВА; Екатеринбург: У - Фактория, 2008.604с.¹
- Шредингер Эрвин. «Мой взгляд на мир». М.: Книжный дом «Либрокон», 2009.
- Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. Изд. 4-е. – М.: Молодая гвардия. – 1966. 267с.
- Эйнштейн А. Физика и реальность. Сб. статей. М.: Наука. – 1965. 359с.
- Abraham, Max. “Das Elementargesetz der Gravitation“, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13 , pp.4.
- Abraham, Max. “Zur Theorie der Gravitation“, *Physikalische Zeitschrift*“, 1912, vol.13, pp.1-4.
- Abraham, Max. “Die neue Mechanic“, *Scientia*, 1914, vol.15, pp.8-27.
- Abraham, Max. “Neuere Gravitationstheories“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1915, pp. 470-520.
- Beller , Mara. Kant’s Impact on Einstein’s Thought. – In: Don Howard and John Stachel (eds.) Einstein: The Formative Years, 1879-1909. Boston: Birkhauser, 2000.
- Bohr N. On the Constitution of Atoms and Molecules. – *Philosophical Magazine*, 1913, vol. 26, pp. 1-25, 476-502, 857-875. Имеется перевод: Бор Н. О строении атомов и молекул. – Собр. соч., т. I. – М.: Наука, 1970, с. 84 – 148.
- Born, Max. The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955. I. Born translation. N.Y.: Walker and Company, 1971 .
- Campbell Lewis, Garnett William. The Life of James Clerk Maxwell. L., Macmillan, 1882 .
- Cao T.Y. Conceptual Developments of 20th century field theories. Cambridge University Press, 1997. - 451p.
- Cartwright N. How the Laws of Physics Lie. Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
- Darrigol, Olivier. Electrodynamics from Ampere to Einstein. Oxford University Press, 2001. Dirac P.A.M. The Quantum Theory of the Electron // *Proceedings of the Royal Society (London)*, 1928, A 117 (1928), pp. 610-624.
- Dorling, Jon . Einstein’s Introduction of Photons: Argument by Analogy or Deduction from the Phenomena// *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1971, 221:8
- Dugas Rene. La theorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes. Paris, Editions de Griffon, 1959.
- Duhem P. La Theorie Physique: Son Objet, Sa Structure. Marcel Riviere, Paris, 1906. English translation by P.P. Wiener: The Aim and Structure of Physical Theory. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954. Имеется перевод:

Einstein A. Folgerungen aus den Capillazitatserhneinugen. – Annalen der Physik, 1901, vol. 4, pp. 513 – 523. Имеется перевод: Эйнштейн А. Следствия из явлений капиллярности. – Собр. соч., т. 3, 7 – 17. М., 1966.

Einstein A. Über die thermodynamische Theorie der Potential-differenz zwischen Metallen und vollständig dissoziierten Lösungen ihrer Salze und eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte. – Annalen der Physik, 1902, vol. 8, pp. 798 – 814. Имеется перевод: Эйнштейн А. О термодинамической теории разности потенциалов между металлами и полностью диссоциированными растворами их солей и об электрическом методе исследования молекулярных сил. – Собр. соч., т. 3. М., 1966, с. 18 – 33.

Einstein A. Kinetische theorie des Warmegleichgewichtes und des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. – Annalen der Physik, 1902, vol. 9, pp. 417 – 433. Имеется перевод: Эйнштейн А. Кинетическая теория теплового равновесия и второго начала термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 34 – 49.

Einstein A. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. - Annalen der Physik, 1903, vol.11, pp. 170 - 187.Имеется перевод: Эйнштейн А. Теория основ термодинамики. – Собр. соч., т. 3, М., 1966, с. 50 – 66.

Einstein A. Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme. - Annalen der Physik, 1904, vol.14, pp. 354 - 362. Имеется перевод: Эйнштейн А. К общей молекулярной теории теплоты. – Собр. соч., т.3, М., 1966, с. 67 – 74.

Einstein A. Über eine die Erzeugung und verwandlung des Lichtes betreffenden hewristischen Lesictpunkt. - Annalen der Physik, **1905a**, vol.17, pp.132-148. Имеется перевод: Эйнштейн А. Об одной точке зрения, касающейся возникновения и превращения света. – Собр. соч., т.3. М., 1966, с. 92 – 107.Использован также перевод Анны Бек (Anna Beck) из сборника: The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909.Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989, pp. 86 – 103.

Einstein, Albert (**1905b**) Eine neie Bestimmung der Molekuldimensionen. University of Zurich Dissertation.

Einstein

A.(**1905d**): Zur Elektrodynamik bewegter Korper. - Annalen der Physik.vol.17, pp. 891 - 921.English translation in: The Principle of Relativity, Dover, New York, 1923. Имеется перевод: Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел. – Собр. соч., т.1. М., 1965, с. 7 – 35.

Einstein, Albert. “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, **1907**, vol.4 , pp.411-462. Translated by Anna Beck in: The Collected Papers of Albert Einstein, vol.2, The Swiss Years: Writings, 1900-1909, pp.252-311.

Einstein, Albert.

Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung// *Physikalische Zeitschrift*,**1909**, 10 :817-25.

Einstein, Albert . Principe de relativite et ses consequences dans la physique modern// *Archives des Sciences Physique et Naturelles*, **1910**, 29 :125-44.

Einstein, Albert.“ Zur Theorie des statischen Gravitationfeldes“. *Annalen der Physik*,**1912**, vol.38, pp.443-458.

Einstein, Albert. “Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation“, *Preussische Akademie der . Wissenschaften, Sitzungsberichte*, **1916**, vol.1, pp.688-696.

Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? // *The Physical Review*, **1935**, vol.47(10), pp.777-780.

Einstein, Albert [**1940**] The Fundaments of Theoretical Physics, In: Ideas and Opinions,1954, pp. 323-330, New York : Crown Publishing Inc

Einstein A. Autobiographical Notes. - In: Albert Einstein. Philosopher-Scientist. (ed. by P.A. Schlipp). Evanston, Illinois, **1949a**. – 781 pp. Имеется перевод: Эйнштейн А. Творческая автобиография. – В кн.: Физика и реальность. М., 1965, с. 131 – 166.

Einstein, Albert. Remarks Concerning the Essays Brought together in this Co-operative Volume. – In: Schlipp P.A. Albert Einstein: Philosopher-Scientist, vols 1-2, Evanston, IL, **1949**

Einstein Albert. Reply to Criticisms.- In: P.A. Schlipp (ed.)Albert Einstein: philosopher-scientist. Open Court: La Salle, Illinois, **1949b**, pp.681-682.

Einstein, Albert. **1954**. Relativity and the Problem of Space.In Ideas and Opinions, 360-370, New York : Crown Publishing Inc.

Albert Einstein / Mileva Maric : The Love Letters. Edited and with an introduction by Jurgen Renn and Robert Schulmann. Princeton University Press, Princeton, New Jersey .

Einstein, Albert. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 1. The Early Years, 1879-1902. John Stachel et al. (eds.). Princeton: Princeton University Press, 1987,

The Collected papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss years: writings, 1900 – 1909.Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989.

Einstein, Albert. The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 5. The Swiss Years: Correspondence, 1902 – 1914. Martin J. Klein et al., eds. Princeton: Princeton University Press, 1993.

Fermi E. Versuch einer Theorie der β - Strahlen // Z. Phys. 1934, **88**, p.161. Translated in: Fred L. Wilson. Fermi's Theory of Beta Decay // Am. J. Phys. 1968, vol.36, number 12, pp.1150-1160 Feuer L.S. Einstein and the Generations of Science. N.Y.: Basic Books. Inc., 1974.

Feyerabend P. Critique of Scientific Reason. - In: C. Howson (ed.). Method and Appraisal in the Physical Sciences. The Critical Background to Modern Physics, 1800-1905.Cambridge University Press, 1976, pp. 309-339.

Feynman R.P., Gell -Mann M. Theory of the Fermi Interaction // Phys. Rev. 1958, vol. 109, pp.193-198.

Finocchiaro Maurice A. The Galileo Affair. A Documentary History. 1989. University of California Press. – 382pp.

The Essential Galileo. Ed. and transl. by Maurice Finocchiaro. Hackett Publishing Company, 2008. – 368 pp.

Forman Paul. Weimar culture, causality, and quantum theory: adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment // Historical Studies in the Physical Sciences, 1971, vol.3, pp. 1-115.

Gilbert G.N. and Mulkay M. Opening Pandora's box: A sociological analysis of scientist's discourse. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984.

Glashow S.L. Towards a Unified Theory – Threads in a Tapestry // Science 1980, vol.210, issue 4476, pp.1319-1323.

Helmholtz, Hermann. Wissenschaftliche Abhandlungen, Barth, 1882, vol.1, 611-628.

Hertz , Heinrich (1890a) On the Fundamental Equations of Electromagnetics for Bodies at Rest. In : Heinrich Rudolph Hertz. Electric Waves. L.: Macmillan, 1893, 195-240;

Higgs P.W. Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields // Physics Letters 1964, vol. 12, pp. 132-133.

Higgs P.W. Spontaneous Symmetry Breaking Without Massless Bosons // Phys .Rev. 1966, vol.145, pp. 1156-1163.

Holton G. Einstein, Michelson and the 'Crucial' Experiment. - Isis, 1969, vol.60, pp.133-197.

Holton G. Einstein's Scientific Programme: the Formative Years. - In: M. Wolff (ed.) Some Strangeness in the Proportion. N.Y., Addison-Wesley, 1980, pp.49-65.

Howard, Don . Einstein, Kant and the Origins of Logical Positivism. – In: Language, Logic and the Structure of Scientific Theories : The Carnap -Reichenbach Centennial. Wesley Salmon and Gideon Wolters (eds.) Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1994, pp. 45-105.

Janssen, Michel and Renn, Jurgen. "Untying the knot: how Einstein found his way back to field equations discarded in the Zurich notebook", in J. Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*, vols.1-2. Dordrecht : Springer, 2007, pp.838-926;

Janssen, Michel . "The twins and the bucket: How Einstein made gravity rather than motion relative in general relativity", *Studies in History and Philosophy of Science*, Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2012, vol.43 , p. 162.

Kelvin Lord . 19-th Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light. Philosophical Magazine, 1901, vol.2, July, pp.1 - 39.

Klein M.J. Einstein's First Paper on Quanta. - The Natural Philosopher,1963, vol.2.

- Klein M.J. Paul Ehrenfest.vol.1. The Making of Theoretical Physicist. North - Holland Publishing Company, Amsterdam - London, 1970. - 330pp.
- Klein M.J. No firm foundations: Einstein and the Early Quantum Theory. - In: Some Strangeness in the Proportion. N.Y., 1980, pp.161-185.
- Koyre A. Les etapes de la cosmologie scientifique. - In: Etudes d histoire de la pensees scientifique. Paris, 1966.
- Kragh H. The Genesis of Dirac's Relativistic Theory of Electrons // *Archive for History of Exact Sciences*, 1981, vol. 24, pp. 31-52.
- Kuhn T.S. The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought. Cambridge: Harvard University Press, 1957. – 297 pp.
- Kuhn T.S. Logic of Discovery or Psychology of Research? - In: I. Lakatos & A. Musgrave (eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge University Press, 1970, pp.1-23.
- Kuhn T.S. Notes on Lakatos. - In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 1971, vol.8, pp. 137-146. Имеется перевод: Кун Т. Замечания на статью Лакатоса. – В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, с. 270 – 283.
- Kuhn T.S. Objectivity, Value Judgement and Theory Choice. - In: *The Essential Tension*. University of Chicago Press, 1977, pp. 320 - 339.
- Kuhn T.S. Black-Body Theory and Quantum Discontinuity, 1894-1912. Oxford and New York, 1978.
- Lakatos Imre & Zahar Elie. Why did Copernicus's Research Program Supersede Ptolemy's ? – In: *The Copernican Achievement*. University of California, Los Angeles, 1974, ch. X, pp. 168-192.
- Lakatos Imre . *History of Science and its Rational Reconstructions*. – In: R.C. Buck & R.S. Cohen (eds.). *Boston Studies in the Philosophy of Science*, vol.8, 1971. Reprinted in C. Howson (ed.) *Method and Appraisal in the Physical Sciences*, 1976, Cambridge University Press. Имеется перевод: Лакатос И. История науки и ее реконструкции. – В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, с. 203 – 270; Лакатос И. Ответ на критику.- В кн.: Структура и развитие науки. – М.: Прогресс, 1978, с. 330 – 333.
- Lakatos Imre . *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Philosophical Papers, volume 1. Edited by J. Worrall & G. Currie, CUP, 1978.
- Latour Bruno. Drawing things together. In *Representation in Scientific Practice*, edited by M. Lynch and S. Woolgar. Massachusetts: The MIT Press, 1990, 19-68.
- Laue, Max. “ Zur Dynamik der Relativitätstheorie”, *Annalen der Physik*, 1911, vol.35, pp.524-542;
- Laue, Max. Das Relativitätsprinzip. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn, 1911.
- Laue Max,“ Ein Beispiel zur Dynamik der Relativitätstheorie. Verhandlungen der deutsches Physikalische Gesellschaft”, 1911, : pp.513-518.
- Lehmkuhl, Dennis, “Why Einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity“, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, vol.46 ,pp.316-326.
- Lenzen, Victor F. Einstein's Theory of Knowledge. In: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, ed. P.A. Schlipp,1949, vols 1-2, pp. 357-384, Evanston, IL.
- Lodge O. Radioaktivitat und Kontinuitat.Leipzig, Barth, 1914.
- Lorentz H.A. The Relative Motion of the Earth and the Ether. – Versl. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1892a, vol. 1, pp. 74 – 77. Reprinted in: Lorentz, *Collected Papers*, 1937, vol. 4, pp. 219 – 223.
- Lorentz H.A. Stokes' Theory of Aberration. – Versl. Kon. Akad. Wetensch., Amsterdam, 1892b, vol. 2, pp. 97-103. Reprinted in: Lorentz, *Collected Papers*, 1937, vol. 4, pp. 224 – 232.
- Lorentz H.A. Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Korpern. – Versl. Kon. Akad. Wetensch., Amsterdam, 1895, pp. 89 – 92.
- Lorentz H.A. Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektrontheorie. - *Encyklopedie der Mathematischen Wissenschaften*. Leipzig, Teubner. Band 5/2, 1904.
- Lorentz H.A. The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat. New York: G.F. Stechart & Co, 1909. Имеется перевод: Лоренц Г.А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 471с.

- Mach Ernst. *The Science of Mechanics. A Critical and Historical Account of Its Development.* (Translated by T.J. McCormach). Chicago-London: The Open Court Publishing Company, 1999.
- Mac Laren, Samuel. *The Theory of Radiation* // *Philosophical Magazine*, 1913, vol.25, January.
- Maxwell, James. ([1877/1890] 1952). "Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz". *Nature*, vol. XV. Reprinted in :*The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 1890, 2, 592-59.
- Maxwell, James ([1873/1891] 1954) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 2 vols third ed. New York: Dover.
- Mehra J. & Rechenberg H. *The Historical Development of Quantum Mechanics*. Springer-Verlag, vol.1, 1982.
- Michelson A. *The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether.* – *American Journal of Science*, 1881, ser. 3, vol. 22, pp. 120 – 129.
- Michelson A., Morley M. *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether.* – *American Journal of Science*, 1887, ser. 3, vol. 34, pp. 333-345.
- Michelson A. *On the Relative Motion of the Earth and the Ether.* – *American Journal of Science*, 1897, ser. 4, pp. 475 – 478.
- Mie, Gustav. "Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol.15, pp.115-122.
- Mie, Gustav. "Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie.II", *Physikalische Zeitschrift*, 1914, vol.15, pp.169-176..
- Morrison, Margaret. *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge University Press, 2000.
- Nagel F. *Nicolaus Cusanus und die Entstehung der exakten Wissenschaften*. Munster, 1984.
- Nambu Y., Jona-Lasilio G. *Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity* // *Phys. Rev.* 1961, vol. 122, pp. 345-358; 124-246.
- Nordström, Gunnar. *Relativitätsprinzip und Gravitation*, *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol.13 , pp.1126.
- Nordström, Gunnar, "Trage und Schwere Masse in der Relativitätsmechanik", *Annalen der Physik*, 1913, vol.40 , pp.856-878.
- Nordström, Gunnar, "Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzip", *Annalen der Physik*, 1913, vol.42 , pp.533-534.
- Northrop, F.S.C. *Einstein's Conception of Science*. In: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, ed. P.A. Schlipp, 1949, vols 1-2, 387-408. Evanston, IL.
- Norton, John D. "What was Einstein's Principle of Equivalence Principle?" In: *Einstein's Studies*, 1986, vol.1
- Norton, John D." Einstein, Nordström and the Early Demise of Scalar, Lorentz Covariant Theories of Gravitation", *Archive for the History of Exact Sciences*, 1992, vol.45: pp.17-94 Norton John. *The Determination of Theory by Evidence: The Case for Quantum Discontinuity, 1900-1915*. Synthese, 1993, vol. 97, pp.1-31.
- Nugayev Rinat M. *Reconstruction of Mature Theory Change: A Theory Change Model*. Peter Lang Verlag, (Frankfurt/M, West Germany, Switzerland), 1999.
- Nugayev, Rinat M. *Communicative Rationality of the Maxwellian Revolution* // *Foundations of Science*, 2015, 20/ 4: 447-478.
- Nugayev Rinat M. *Einstein's Revolution: A Study in Theory Unification*. Bentham Science Publishers, Sharjah, UAE-USA, 2018.
- Nugayev Rinat M. *The Planck-Einstein Breakthrough: Reconciliation of the Pivotal Research Programs of the Classical Physics*. Minkowski Institute Press, Montreal, 2020.
- Okun L.B. *Leptons and Quarks*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. – 362p.
- Pais, Abraham . *Einstein and the Quantum Theory* // *Reviews of Modern Physics*, 1979, 51:863-914.
- Pais, Abraham. *Subtle is the Lord. The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982,
- Pickering Andrew. *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*. The University of Chicago Press, 1985.

- Planck Max. Verdampfen, Schmelzen und Sublimieren. – *Annalen der Physik*, 1882, vol. 15, pp. 446 – 475.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. Erste Mitteilung. Berl. Ber., 1897a, pp.57-68.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. Zweite Mitteilung. Berl. Ber., 1897b, pp.715-717.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. Dritte Mitteilung. Berl. Ber., 1897c, pp.1122-1145.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. Vierte Mitteilung. Berl. Ber., 1898, pp.57-68.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. Fünfte Mitteilung (Schluss). Berl. Ber., 1899, pp.440-480.
- Planck Max. Über irreversible Strahlungsvorgänge. *Annalen der Physik*, 1900a, vol.1, pp.69-122.
- Planck Max [1900b]: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. *Verh. D. D. Phys. Ges.*, vol.2, pp. 237-245. Translated in: Ter Haar Dirk. *The Old Quantum Theory*. Oxford, Pergamon Press, 1967.
- Planck, Max. [1908] *A Survey of Physical Theory*. Translated by R. Jones and D.H. Williams. NY: Dover Publications, 1960.
- Planck Max [1910] *Acht Vorlesungen über theoretische Physik*. Leipzig: Hirzel. Originally delivered at Columbia university, 1909, and translated as “Eight Lectures on Theoretical Physics by A.P. Wills, New York, Columbia University Press, 1915.
- Planck, Max. *A Survey of Physical Theory*. Translated by R. Jones and D.H. Williams. NY: Dover Publications, 1960.
- Poincare H. Sur la dynamique de l'electron. – *Rediconti del Circolo Mathematico di Palermo*, 1906, vol. 21, pp. 129-176. Имеется перевод: Пуанкаре А. О динамике электрона. – *Собр. Соч.*, т.3. М.: 1974, с. 433 – 486.
- Popper Karl. *Logik der Forschung*. Springer, Wien, 1938. Имеется перевод: Поппер К. Р. *Логика и рост научного знания*. – М.: Прогресс, 1983. – 605 с.
- Poynting, John. *Radiation Pressure* // *Philosophical Magazine*, 1905, vol.9, April. 393
- Pyenson Lewis. *The Young Einstein. The Advent of Relativity*. Adam Hilger: Bristol & Boston, 1985. - 238pp.
- Rayleigh. Anniversary Address. – *Proceedings of the Royal Society*, 1908, A538, April, pp. 239 – 251.
- Renn, Jürgen and Schulmann Robert. Introduction. – In: Albert Einstein/ Mileva Marić. *The Love Letters*. Ed. and with an introduction by Jürgen Renn and Robert Sculmann. Princeton University Press, 1992.
- Renn, Jürgen and Sauer, Tilman. Pathways out of Classical Physics: Einstein’s Double Strategy in his Search for the Gravitational Field Equations”, in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*. 2007, Vol. 1. Dordrecht : Springer , pp. 113-312;
- Renn, Jürgen. “The summit almost scaled: Max Abraham as a pioneer of a relativistic theories of gravitation”, in Jürgen Renn, ed., *The Genesis of General Relativity*. 2007, Vol.3. Gravitation in the Twilight of Classical Physics: Between Mechanics, Field Theory and Astronomy. Dordrecht : Springer, pp. 305-330.
- Renn, Jürgen. Classical Physics in Disarray. The Emergence of the Riddle of Gravitation, in Jürgen’ Renn, ed.. *The Genesis of General Relativity*. 2007, vols. 1-2, Dordrecht : Springer, pp.21-84.
- Ryckman, Thomas. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- Rynasiewicz, Robert. The Construction of the Special Theory: Some Queries and Considerations”. – In : Don Howard & John Stachel (eds.) *Einstein. The Formative Years, 1879-1909*. Birkhauser-Boston, 2000, pp. 159-201.
- Salam A., Ward J.C. Electromagnetic and Weak Interactions // *Physics Letters* , 1964, vol.13, pp. 168-171.
- Salam Abdus. Gauge Unification of Fundamental Forces // Abdus Salam. *Ideals and Realities* /Ed. By Zafar Hassan & C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, pp.320-369. Имеется перевод: Салам А. Калибровочное объединение фундаментальных сил // УФН, 1980, том 132, вып.2, С. 229-253.

Schwinger J. A. Theory of Fundamental Interactions // *Annals of Physics* 1957, vo.2, pp.407-434. Seelig, Carl 1960. *Albert Einstein. Leben und Werk Eines Genies Unserer Zeit*. Europa Verlag.

Shankland R.S. Conversations with Albert Einstein. *American Journal of Physics*, 1963, vol.31, pp. 47 - 57.

Shankland R.S. Michelson – Morley Experiment. *American Journal of Physics*, 1964, vol. 32, pp. 16 – 35.

Snyder C. *Das Weltbild der modernen Naturwissenschaft*. Leipzig, Barth, 1907.

Speziali P (ed.) *Albert Einstein-Michele Besso: Correspondence*. Paris: Hermann, 1972.

Suppe F. (ed.) *The Structure of Scientific Theories*. Urbana, University of Illinois Press, 1974.

Ter Haar Dirk . *The Old Quantum Theory*. Oxford, Pergamon Press, 1967.

Tisza L. The Conceptual Structure of Physics // *Reviews of Modern Physics*, 1963, vol. 35, pp.151-185.

Van Dongen, Jeroen, *Einstein's Unification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

Weinberg Steven. A Model of Leptons // *Phys. Rev. Letters* 1967, vol. 19, pp. 1264-1266.

Yang C.N., Mills Robert. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance // *The Physical Review*, 1954, pp. 96-191.

Zahar Elie. Did Einstein's programme supersede Lorentz's? – *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1973, vol.24, pp.95-123, 226-262.

Zahar Elie. *Einstein's Revolution. A Study in Heuristic*. Open Court, La Salle, Illinois, 1989. 373pp.