

**К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АНДРЕЯ ДМИТРИЕВИЧА САХАРОВА**

**Научная деятельность А.Д. Сахарова и современная физика**

Б.Л. Альтшулер

*В работе прослежены различные направления научной и инженерно-конструкторской деятельности А.Д. Сахарова — от первых отечественных термоядерных зарядов до фундаментальной физики. Сделан акцент на современный статус тех научных направлений, родоначальником которых признаётся А.Д. Сахаров: управляемый термоядерный синтез, магнитная кумуляция и взрывомагнитные генераторы, индуцированная гравитация, космологические "сахаровские" (барионные акустические) осцилляции, барионная асимметрия Вселенной. Также неожиданное развитие, особенно в XXI веке, получила близкая Сахарову модель пульсирующей Вселенной. Другие волновавшие его темы: квантовая космология, антропный принцип — это тоже передний край современной науки.*

**Ключевые слова:** А.Д. Сахаров, атомная бомба, водородная бомба, управляемый термоядерный синтез (УТС), магнитная кумуляция, взрывомагнитные генераторы, индуцированная гравитация, сахаровские осцилляции, барионная асимметрия Вселенной

PACS numbers: 01.65.+g, 04.50.-h, 52.55.-s, 98.80.-k

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.02.038946>

**Содержание**

1. Введение. Предсказание интернета (449).
  2. Фундаментальная наука "до бомбы" — 1945–1947 гг. (450).
  3. Водородные бомбы — 1948–1967 гг. (452).
    - 3.1. "Слойка". 3.2. Третья идея. 3.3. Царь-бомба.
  4. Управляемый термоядерный синтез (458).
    - 4.1. Магнитный термоядерный реактор (токамак). 4.2. Лазерный термоядерный синтез. 4.3. Мюонный катализ.
  5. Магнитная кумуляция и взрывомагнитные генераторы (461).
  6. Сила тяготения и пространство-время как квантовые эффекты (462).
    - 6.1. Индуцированная (induced) гравитация. 6.2. Возникающая (emergent) гравитация.
  7. Сахаровские осцилляции (465).
  8. Барионная асимметрия Вселенной (466).
  9. Пульсирующая ("многолистная") Вселенная (468).
  10. Квантовая космология. Антропный принцип (469).
  11. Вместо заключения (470).
- Список литературы (470).

**1. Введение. Предсказание интернета**

Фундаментальная физика всегда была объектом преклонения А.Д. Сахарова на протяжении всей его жизни. "Я чувствовал себя посланцем богов" [1, ч. I, гл. 5], — Сахаров о своём первом докладе по квантовой теории поля в Теоротделе ФИАН в 1945 г. И хотя эти его работы выполнены, по выражению самого Сахарова,



*А. Сахаров*

Андрей Дмитриевич Сахаров  
(21.05.1921 – 14.12.1989)

Б.Л. Альтшулер. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: baltshuler@yandex.ru, altshul@lpi.ru

Статья поступила 5 января 2021 г., после доработки 22 февраля 2021 г.

"на обочине" [2] занимавших всё его время оборонных и общественных задач, некоторые из них стали началом целых научных направлений.

Прежние публикации о научных трудах Сахарова: статьи Б.Л. Альтшулера и Ю.А. Гольфанда в *Сахаровском сборнике* 1981 г. [3], комментированные собрания [4] 1982 г. и [5] 1995 г., публикации в *УФН* [6–8] в 1991, 1996 и 2012 гг., в специальном выпуске журнала *Природа* 1990 г. [9]. Основная задача данной статьи — проследить влияние научных и конструкторских идей Сахарова на современную физику и технику.

Прежде чем перейти к последовательному изложению, отметим одно удивительное по точности предсказание Сахарова. В 1974 году он написал статью "Мир через полвека", т.е. обращённую непосредственно в наше время. Наиболее значимое новшество нашего времени, затрагивающее каждого из жителей Земли, — это интернет, связь всех со всеми, возможность мгновенно получить практически любую информацию. Вот что написал об этом Сахаров почти 50 лет назад и за 15 лет до появления самой идеи Всемирной паутины (WWW):

*Сильные и противоречивые чувства охватывают каждого, кто задумывается о будущем мира через 50 лет, — о том будущем, в котором будут жить наши внуки и правнуки. Эти чувства — удручённость и ужас перед клубком трагических опасностей и трудностей безмерно сложного будущего человечества, но одновременно надежда на силу разума и человечности в душах миллиардов людей, которая только одна может противостоять надвигающемуся хаосу. Это также восхищение и живейшая заинтересованность, вызываемые многосторонним и неудержимым научно-техническим прогрессом современности. (. . .)*

*Я глубоко убежден, однако, что огромные материальные перспективы, которые заключены в научно-техническом прогрессе, при всей их исключительной важности и необходимости, не решают всё же судьбы человечества сами по себе. Научно-технический прогресс не принесёт счастья, если не будет дополняться чрезвычайно глубокими изменениями в социальной, нравственной и культурной жизни человечества. Внутреннюю духовную жизнь людей, внутренние импульсы их активности трудней всего прогнозировать, но именно от этого зависит в конечном итоге и гибель, и спасение цивилизации. (. . .)*

Одним из первых этапов этого прогресса представляется создание единой всемирной телефонной и видеотелефонной системы связи. В перспективе, быть может, позднее, чем через 50 лет, я предполагаю создание всемирной информационной системы (ВИС), которая и сделает доступным для каждого в любую минуту содержание любой книги, когда-либо и где-либо опубликованной, содержание любой статьи, получение любой справки. ВИС должна включать индивидуальные миниатюрные запросные приёмники-передатчики, диспетчерские пункты, управляющие потоками информации, каналы связи, включающие тысячи искусственных спутников связи, кабельные и лазерные линии. Даже частичное осуществление ВИС окажет глубокое воздействие на жизнь каждого человека, на его досуг, на его интеллектуальное и художественное развитие. В отличие от телевизора, который является главным источником информации многих из наших современников, ВИС будет предоставлять каждому максимальную свободу в выборе информации и требовать индивидуальной активности. (. . .)

*Но поистине историческая роль ВИС будет в том, что окончательно исчезнут все барьеры обмена информацией между странами и людьми. Полная доступность информации, в особенности распространённая на произведения искусства, несёт в себе опасность их обесценивания. Но я верю, что это противоречие будет как-то преодолено. Искусство и его восприятие всегда настолько индивидуальны, что ценность личного общения с произведением и артистом сохранится. Также сохранит своё значение книга, личная библиотека — именно потому, что они несут в себе результат личного индивидуального выбора, и в силу их красоты и традиционности в хорошем смысле этого слова. Общение с искусством и с книгой навсегда останется праздником. (. . .)*

*Я не склонен абсолютизировать одну только технико-материальную сторону прогресса. Я убеждён, что "сверхзадачей" человеческих институтов, и в том числе прогресса, является не только уберечь всех родившихся людей от излишних страданий и преждевременной смерти, но и сохранить в человечестве всё человеческое... И уж во всяком случае прогресс, спасающий людей от голода и болезней, не может противоречить сохранению начала активного добра, которое есть самое человеческое в человеке [10].*

## 2. Фундаментальная наука "до бомбы" — 1945–1947 гг.

После окончания университета в эвакуации в Ашхабаде в 1942 г. Сахаров отклонил предложение поступить в аспирантуру и был направлен на патронный завод в Ульяновск. Там он сделал несколько важных для производства изобретений (об этом кратко в следующем разделе), а также женился на К.А. Вихиревой. В конце 1944 г. И.Е. Тамм пригласил его в аспирантуру ФИАНа.

М.С. Рабинович, друг Сахарова по аспирантуре в ФИАНе, пишет в своих воспоминаниях "Как мы начинали" ([11, с. 519]):

*«Я стал аспирантом теоретдела. Нас было пятеро: Андрей Сахаров, Жабига Такибаев, Шура Таксар, Петя Кунин и я. Моим научным руководителем был Е.Л. Фейнберг, у Андрея — И.Е. Тамм...*

*Работа в аспирантуре шла успешно, особенно у Андрея. Он шёл, как говорится, с опережением графика. Прошло полтора года, как он был в аспирантуре, и как раз перед летом он хотел защититься. Но не были сданы все экзамены. Ну, он сдал их по языку, по специальности, оставался экзамен по философии. Готовились они вместе с Куниным. И пошли сдавать. Насколько я помню, Петя получил тройку, а Андрей — двойку! Засыпались они вот на чём. Их спросили: читали ли они Чернышевского, что-то об эстетическом в природе. Петя, как принято, конечно, сказал, что да, читал, а Андрей — со своей фантастической честностью — что не читал, а только посмотрел в "Философском словаре". Вот ему и ввели двойку, и это на год задержало его защиту. Закончить аспирантуру раньше срока не удалось.*

*Вспоминаю Андрея тех лет. Он производил исключительное впечатление умением решать физические задачи, быстротой, с которой выдвигал предложения. Он очень любил ставить различные парадоксы и решать их, придумывал замысловатые задачи и давал на них нетривиальные ответы».*

Диссертация Сахарова называлась "Теория ядерных переходов типа  $0 \rightarrow 0$ ", она полностью опубликована в [5, с. 427–471]. Р.Г. Далитц (1925–2006), который в 1950 г. написал диссертацию "Нуль — нуль переходы в ядрах", ссылается в ней на статью Сахарова 1948 года "Взаимодействие электрона и позитрона при рождении пар" [12], ставшую (ещё до публикации) основой диссертации А.Д. Сахарова. Саму же его диссертацию Далитц прочитал только в 1990 г., получив её копию из ФИАН, и написал к ней обширный комментарий (см. [6, с. 121–136] и [5, с. 485–499]). С Р.Г. Далитцом у меня связано незабываемое впечатление: святая святых Оксфордского университета — закрытый для посещений отдел древних научных фолиантов основанной в XIV веке Бодлианской библиотеки, куда Далитц провёл нас с женой, когда мы впервые посетили Англию в 1996 г.

Из выступления оппонента А.Б. Мигдала на защите диссертации Сахарова 3 ноября 1947 г.: "Особенно интересной частью диссертации является рассмотрение вопроса о взаимодействии компонент пары между собой. Эта задача, считавшаяся ранее чрезвычайно трудной, решается автором необыкновенно изящно, переходом в движущуюся систему координат, в которой вопрос сводится к элементарной задаче о кулоновском взаимодействии двух нерелятивистских частиц" [5, с. 478].

Из отзыва другого оппонента, И.Я. Померанчука: "При определении вероятности образования пары электрон-позитрон А.Д. Сахаров указал на возможность учесть кулоновское взаимодействие между электроном и позитроном в том случае, когда это взаимодействие велико, то есть когда относительные скорости электрона и позитрона малы. Полученный в диссертации результат, учитывающий взаимодействие электрона и позитрона, относится к любым процессам, приводящим к образованию электронно-позитронных пар, а не только к рассмотренному в диссертации случаю образования пар при переходах  $0 \rightarrow 0$ " (там же, с. 480).

Последнее замечание И.Я. Померанчука удивительным образом подтвердилось в 2020 г. В работе [13] рецепт Сахарова учёта взаимодействия компонент рождающейся пары с малыми относительными скоростями был применён к процессу рождения пар в сильных электромагнитных полях при ультрапериферических соударениях релятивистских ядер.

Содержание диссертации составила также и первая, написанная в 1946 г., работа Сахарова "Генерация жесткой компоненты космических лучей" [14]. Научный руководитель И.Е. Тамм на той же защите 3 ноября 1947 г. отметил: "В работе сказывается исключительное владение Сахаровым математическим анализом. Там очень сложный вопрос генерации мезона при соударении двух протонов друг с другом. Это процесс так называемого третьего порядка. Его чрезвычайно сложно вычислить математически. Сахаров сумел найти остроумный метод и так распределить составные элементы этого сложного процесса, что позволило ему эти сложные вещи довести до конца и получить вполне замкнутое решение по этому вопросу" ([5], с. 482). Первоначальное название статьи "Генерация мезонов" было изменено редакцией ЖЭТФ. Сахаров вспоминает: «Игорь Евгеньевич объяснил мне замену так: "Даже Лаврентий Павлович (Берия) знает, что такое мезоны". Я не думаю, что реально имелось в виду вмешательство самого Берии, он тут в этой фразе в качестве крайнего примера, но вполне можно было

опасаться реакции "бдительных" людей меньшего ранга, достаточно опасных и автору, и редактору» [1, ч. I, гл. 5].

В 1948 г. Сахаров написал ещё три работы. Первая — "Температура возбуждения в плазме газового разряда" [15].

И.И. Собельман отзывался о ней так: "Важным шагом было выяснение специфики энергообмена электронов с атомами и молекулами в тех случаях, когда потеря энергии электроном в столкновении много меньше его энергии и может быть обоих знаков (потеря и приобретение энергии). А.Д. Сахаров показал, что этот обмен имеет характер фоккер-планковского процесса... В то время краткая статья А.Д. Сахарова сыграла очень важную принципиальную роль" [5, с. 23].

Л.А. Вайнштейн отмечает: "В этой работе А.Д. Сахаров, по-видимому, "открыл" для себя и обсуждает следствия отступления от термодинамического равновесия в изучаемой плазме умеренной и низкой плотности. Очевидно, ему (и вообще в ФИАНе) тогда ещё не была известна работа Эдлена (1942, Швеция), в которой был сформулирован предельный случай низкой плотности (т.н. корональный предел). В будущей деятельности ему предстоит использовать этот предельный случай как обычный рабочий аппарат. Эти представления (разумеется, в их дальнейшем развитии) актуальны и в наши дни" (там же, с. 24).

Вторая работа — засекреченный отчёт "Пассивные мезоны" [16], о ней ниже в разделе "Управляемый термоядерный синтез. — Мюонный катализ".

Третья работа Сахарова 1948 г. "Влияние рассеяния на интенсивность пучка в синхротроне" [17] — тоже не опубликованный отчёт ФИАН. А.Н. Лебедев вспоминает: "В те годы в ФИАНе запускались первые в стране электронные синхротроны. Целью работы была не общая теория рассеяния пучка в ускорителях, а конкретные оценки для сооружавшейся тогда установки... Ключевым вопросом здесь было чёткое физическое разделение явления для потерь, пригодного для непосредственного технического расчёта. Хотя в дальнейшем А.Д. занимался совсем другими вопросами, интереса к ускорительной тематике он, по-видимому, не терял и существенно позднее даже выступил с красивой и радикальной идеей "взрывного" ускорителя однократного действия, которой, надо надеяться, ещё предстоит детальная технико-экономическая проработка" [5, с. 111]. О "взрывных" ускорителях однократного действия см. ниже в разделе "Магнитная кумуляция и взрывомагнитные генераторы".

А.Д. Сахаров пишет:

«...Диссертация была готова, я думал о дальнейшей научной работе... В литературе обсуждалось наличие в оптическом спектре атома водорода некоей аномалии, противоречащей следующей из теории формуле. А именно были указания (не очень определённые в силу крайней малости эффекта, лежавшего на пределе точности оптических методов измерения уровней), что из двух уровней атома водорода, которые согласно теории должны точно совпадать, один лежит несколько выше другого. У меня возникла идея, что это проявление того, что сейчас называется радиационными поправками, эффект взаимодействия электрона с квантово-механическими колебаниями электромагнитного поля, а точнее — разность

этих эффектов для электрона, связанного в атоме, и свободного электрона... Энергия этого взаимодействия оказывалась при вычислениях бесконечной!... Это была великая трудность теории, под знаком которой происходило всё развитие физики квантовых полей на протяжении многих десятилетий. Я предположил, что надо рассмотреть разность эффектов для связанного и свободного электрона. Так как эффект связи сказывается, как я правильно предполагал, лишь при не очень больших частотах нулевых колебаний, была надежда, что разностный эффект окажется конечным.

Я, конечно, понимал, что значение этой идеи далеко выходит за рамки частной задачи об аномалии в атоме водорода и, в частности, должно распространяться на процессы рассеяния. Я был очень взволнован. Со всем этим я пришел к Игорю Евгеньевичу (летом или осенью 1947 года). К сожалению, он не поддержал и не одобрил меня, скорей — наоборот. Во-первых, он сказал, что эти идеи не совсем новые, в той или иной форме высказывались неоднократно. Это было действительно так, но само по себе не могло бы меня остановить — я уже был настолько увлечён и заинтересован, что меня не слишком заботили такие вещи, как приоритет, меня интересовало существо дела. Во-вторых, он сказал, что идея, по-видимому, "не проходит", конечного результата не получается. И.Е. сослался при этом на недавно опубликованную работу американского теоретика Данкова... Данков попросту ошибся, но, конечно, ни Игорь Евгеньевич, ни я не могли этого обнаружить с ходу конкретно. Если бы нам не отказала интуиция, мы должны были усомниться в работе Данкова столько раз, сколько было нужно, чтобы обнаружить ошибку, или, что ещё разумней, временно игнорировать возникшее противоречие и искать более простые вычислительные задачи, результат которых можно было бы сравнить с опытом. Как известно, именно так действовали более проникательные и смелые люди, добившиеся успеха. Но не мы. Так я упустил возможность сделать самую главную работу того времени (и самую главную, с огромным разрывом, в своей жизни)...

Вспоминая то лето 1947 года, я чувствую, что я никогда — ни раньше, ни позже — не приближался так близко к большой науке, к её переднему плану. Мне, конечно, немного досадно, что я лично оказался не на высоте (никакие объективные обстоятельства тут не существенны). Но с более широкой точки зрения я не могу не испытывать восторга перед поступательным движением науки — и если бы я сам не прикоснулся к ней, я не мог бы ощущать это с такой остротой!» [1, ч. I, гл. 5].

Речь тут идёт о Лэмбовском сдвиге энергетических уровней атома водорода. Через год после описываемых событий, т.е. в 1948 году, западные теоретики сумели рассчитать этот тонкий эффект квантовой электродинамики, причём согласие теории с опытом было фантастически точным. Эти классические результаты были заслуженно удостоены Нобелевских премий. Расчёты удалось выполнить, когда был найден последовательный способ устранения (вычитания) бесконечностей, обусловленных бесконечным числом степеней свободы квантованных полей (в данном случае электромагнитного поля Максвелла). Сахаров додумался до критически важного способа вычитания этих бесконечностей и тем самым был близок к объяснению Лэмбовского сдвига. Но не довёл дело до конца.

Это случилось с начинающим научным сотрудником. Через четыре года, в 1951 году, уже на объекте, Андрей Дмитриевич вместе с И.Е. Таммом, доверяя своей интуиции, не поддались ("усомнились столько раз, сколько было нужно") на убеждения авторитетных московских коллег о принципиальной неосуществимости идеи Сахарова магнитного удержания плазмы (в целях мирного использования ядерной энергии в установках управляемого термоядерного синтеза). Цитирую А.Д. Сахарова:

"Мы уже видели перед собой большие перспективы и не хотели отступить без борьбы. Повторилась почти точно (внешне) ситуация, отражённая в известной притче Эйнштейна — как совершаются изобретения. Сначала все специалисты говорят, что это невозможно, и приводят веские аргументы. Потом появляется невежда, который всего этого не знает, и он-то и делает изобретение. Не следует всё же понимать эту притчу слишком буквально; "невежда" должен быть на уровне современных научных знаний и ещё обладать рядом качеств — иначе ничего не получится; лучше же всего, если он знает о трудностях, но обладает интуицией, чтобы их не бояться даже и тогда, когда ещё не может обосновать свою правоту строго логически" [1, ч. I, гл. 9].

### 3. Водородные бомбы — 1948–1967 гг.

Инженерно-конструкторский талант А.Д. Сахарова проявился ещё во время войны, когда он, работая в 1942–1944 гг. на патронном заводе в г. Ульяновске, сделал ряд изобретений. Первое из них — прибор контроля броневой сердечников на полноту закалки. Сахаров приводит схему прибора в "Воспоминаниях": испытуемый сердечник скользит по наклонной медной трубке между намагничивающей и размагничивающей катушками; а в конце трубки находится прибор, измеряющий величину магнитного момента сердечника. Калибровкой прибора установлено, что при полной закалке стрелка прибора остаётся на нуле. Отклонение стрелки пропорционально степени брака закалки.

А.Д. Сахаров пишет:

«Прибор был разрешён комиссией к использованию в производстве и фактически использовался много лет... В 1945 году я получил авторское свидетельство об изобретении. Через несколько лет я случайно увидел в учебнике "Патронное производство", написанном бывшим главным инженером Н.Н. Маловым, описание моего прибора» [1, ч. I, гл. 4].

Затем А.Д. придумал не требующий травления (при котором пули портились) метод контроля толщины латунного покрытия на оболочках пуль ТТ (для автоматов), экспресс-метод определения марок стали и т.п.

А.Д. Сахаров вспоминает:

«Основная моя работа в 1944 году была связана с разработкой прибора для контроля броневых сердечников калибра 14,5 мм на наличие продольных трещин. Пули, в которых были сердечники с трещинами, рвались в канале ствола противотанковых ружей. Это был необычайно опасный дефект, требовавший сплошного контроля» (там же).

Прибор, разработанный Сахаровым совместно с инженером А.Н. Протопоповым при поддержке начальника цеха Ф.П. Балашова, заменил "адский и не всегда приводящий к цели труд" визуального контроля сердечников. "Прибор был принят к эксплуатации... Прибор

работал до конца 1945 года или до середины 1946-го, потом сломался и его не смогли починить. Обычная история с новой техникой, в основе которой лежат организационные причины. В данном случае меня утешает, что, вероятно, выпуск бронебойных патронов в 1946 году практически был прекращён" (А.Д. Сахаров, там же).

Но вот в 1948 г. Сахарова привлекли к выпуску совсем других "патронов". За прошедшие десятилетия многое было рассекречено — и в части конструкций ядерных зарядов, и об истории их создания.

### 3.1. "Слойка"

После американских атомных бомбардировок японских городов Хиросима и Нагасаки 6 и 9 августа 1945 года в СССР были приняты чрезвычайные меры для форсирования работ по атомному проекту.

20 августа 1945 года "для руководства всеми работами по использованию атомной энергии урана" Распоряжением Государственного комитета обороны (ГКО) СССР № ГКО-9887сс/ов был сформирован "Специальный комитет при ГКО", председатель Л.П. Берия. Также при Спецкомитете было создано Первое главное управление (ПГУ), ответственное за организацию работ по атомному проекту, руководитель Б.Л. Ванников.

30 ноября Спецкомитет ГКО утверждает предложение о выборе места (южный берег оз. Кызыл-Таш Челябинской обл.) строительства комбината "Маяк" (завод № 817) для производства компонентов ядерного оружия.

9 апреля 1946 года — постановление о создании в поселении Саров на юге Горьковской области Конструкторского бюро № 11 (КБ-11, Арзамас-16, "объект", РФЯЦ–ВНИИЭФ) при Лаборатории № 2 АН СССР — ЛИПАН, позже ИАЭ им. И.В. Курчатова. Начальником КБ-11 был назначен П.М. Зернов, Главным конструктором — Ю.Б. Харитон.

Физическая схема первой советской атомной бомбы (РДС-1) мощностью 22 кт тротилового эквивалента (ТЭ), испытанной 29 августа 1949 г., была копией схемы "Толстяка" (Fat Man), сброшенного США на Нагасаки (хотя в конструкции РДС-1 было много элементов, отличающихся от Fat Man). Здесь ключевую роль сыграли данные, переданные в 1945 г. и позднее советской разведке Клаусом Фуксом и другими американскими атомщиками, рискующими жизнью во имя восстановления ядерного равновесия бывших союзников по антигитлеровской коалиции.

Также в 1945 г. в СССР были получены разведанные о введущихся в США исследованиях по созданию оружия, более мощного чем А-бомба, — термоядерного, или водородного, оружия. Эти американские исследования были сконцентрированы на схеме так называемого "классического супера". В 1946 г. Я.Б. Зельдовичу с сотрудниками (С.П. Дьяков и А.С. Компанец) из Института химической физики АН СССР было поручено разработать конструкцию водородной бомбы, соответствующую данным разведки. Эта конструкция получила название Труба (РДС-6т, в США — "Super"). В США через несколько лет убедились, что эта схема тупиковая и в 1950 г. от неё отказались. В СССР группа Зельдовича также столкнулась с серьёзными трудностями в попытках реализации схемы Труба.

Постановлением Совета министров СССР от 10 июня 1948 г. в ряде институтов, включая и ФИАН, были

сформированы группы поддержки, которые должны были выполнять задания Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича по совершенствованию проекта Труба. В ФИАНе это была спецгруппа И.Е. Тамма, в которую вошли С.З. Беленький, В.Л. Гинзбург, Ю.А. Романов, А.Д. Сахаров и Е.С. Фрадкин; постановлением в эту спецгруппу был также включён В.А. Фок, работавший в Ленинграде.

Из воспоминаний А.Д. Сахарова:

*«Два месяца я прилежно занимался изучением отчётов группы Зельдовича, а также повышением своих очень скудных тогда знаний по газодинамике и астрофизике (последнее — поскольку физика звёзд и физика термоядерного взрыва имеют много общего). Газодинамику мы все изучали тогда по соответствующему тому замечательной многотомной монографии Ландау и Лифшица. Думал я об этих предметах непрерывно. Однажды, прочитав у Ландау и Лифшица о так называемых автомодельных решениях уравнений газодинамики (т.е. таких, в которых решение уравнений в частных производных сводится к уравнениям в полных производных), я пошёл в баню (в нашей квартире никакой ванны не было). Стоя в очереди в кассу, я сообразил (исходя из соображений подобия), что гидродинамическая картина взрыва в холодном идеальном газе при мгновенном точечном выделении энергии описывается функциями одной переменной. Правда, потом оказалось, что раньше это решение было найдено Седовым (впоследствии академиком), а ещё раньше — Тэйлором. Но я вскоре по этому образцу придумал ещё несколько автомодельных решений, полезных для качественного и полуколичественного описания интересующих нас процессов.*

*По истечении двух месяцев я сделал крутой поворот в работе: а именно, я предложил альтернативный проект термоядерного заряда, совершенно отличный от рассматривавшегося группой Зельдовича по происхождению при взрыве физическим процессам и даже по основному источнику энерговыделения. Я ниже называю это предложение "1-й идеей".*

*Вскоре моё предложение существенно дополнил Виталий Лазаревич Гинзбург, выдвинув "2-ю идею"» [1, ч. 1, гл. 6].*

Кратко: "1-я идея" — разместить чередующимися слоями (отсюда название "Слойка") термоядерное горючее (тяжёлая вода) и уран-238. "2-я идея" — использовать в качестве термоядерного горючего не тяжёлую воду, а твёрдый дейтерид лития-6<sup>1</sup>. Схема Слойки показана на рис. 1.

Этот рисунок сделан по многочисленным открытым описаниям. Секретными, не подлежащими разглашению здесь остаются и, согласно Договору о нераспространении ядерного оружия, навсегда останутся таковыми числовые параметры (размеры и т.п.) указанных на рисунке элементов.

Как видно, Слойка — это "обычная" атомная бомба, дополненная слоями дейтерида лития-6 и урана-238.

<sup>1</sup> При этом в своём первом отчёте 1948 г. Сахаров рассматривал плоскую систему из слоёв урана-238 и тяжёлой воды, тогда как идея сферической конструкции с атомным инициатором в центре возникла в беседах с Ю.Б. Харитоном и Я.Б. Зельдовичем при первом посещении Сахаровым объекта летом 1949 г., когда его ознакомили с конструкцией атомной бомбы РДС-1 и с её массогабаритными характеристиками, определяемыми размером бомболюка самолёта-носителя. — Частное сообщение А.К. Чернышева, основанное на рассказе Ю.Б. Харитона.

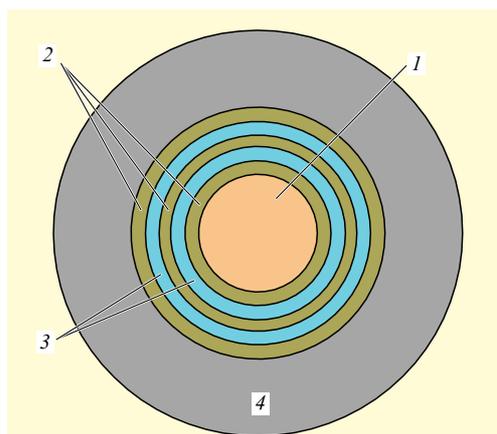


Рис. 1. Схема термоядерного заряда на принципе "слойки": 1 — ядро атомной бомбы (уран-235 или плутоний), 2 — уран-238, 3 — термоядерное горючее (дейтерид лития), 4 — слой взрывчатки.

Подрыв ВВ вызывает сходящуюся ударную волну, которая, достигнув центрального ядра, инициирует взрыв атомной бомбы. В результате должны происходить сжатие и нагрев слоёв дейтерида лития-6 до порога зажигания реакции термоядерного синтеза, т.е. до условий подрыва водородной бомбы. Однако если между ВВ и центральным "атомным" ядром разместить только термоядерное горючее, то порога зажигания термоядерного синтеза достичь не удаётся.

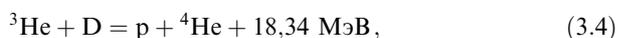
Идея Сахарова чередовать слои лёгких элементов и тяжёлого урана-238 имела ключевое значение для зажигания термоядерной реакции по причине примерно десятикратного ионизационного сжатия лёгких слоёв тяжёлыми. Сжатие это обусловлено разницей атомных номеров (а значит, и числа электронов) тяжёлых и лёгких элементов и происходит в условиях полной ионизации атомов этих элементов при прохождении в слоях ударной волны; при термодинамическом равновесии электронного газа тяжёлых и лёгких слоёв плотность вещества в них обратно пропорциональна атомному номеру. Это явление увеличения плотности термоядерного горючего при взрыве коллеги Сахарова назвали "сахаризацией".

Сахаризация имеет место при использовании в Слойке любого тяжёлого элемента, например, свинца. Сахаров выбрал уран-238, потому что при облучении высокоэнергичными вторичными нейтронами его ядра начинают делиться с выделением "атомной" энергии, подобно тому как это происходит при делении ядер урана-235 или плутония в атомной бомбе.

Первичные реакции синтеза ядер дейтерия в лёгких слоях:



Образующиеся в этих реакциях ядра трития (T) и гелия ( ${}^3\text{He}$ ) в свою очередь вступают во вторичные термоядерные реакции:



идущие с заметно большим энерговыделением. Как было сказано, вторичные нейтроны реакций (3.2), (3.3) инициируют энергетически полезное деление ядер урана-238.

Принципиально важно, что сечение вторичной DT-реакции синтеза (3.3) превосходит сечение DD-реакций (3.1), (3.2) более, чем в 100 раз. Промышленное получение трития чрезвычайно дорого, кроме того, термоядерные заряды с тритием не допускают длительного хранения. Поэтому так важно производство трития непосредственно при взрыве — в реакции (3.1).

И тут шагом вперёд стала "2-я идея" В.Л. Гинзбурга — использовать в качестве термоядерного горючего не тяжёлую воду или жидкий тяжёлый этан (как первоначально предполагал Сахаров), а твёрдый дейтерид лития-6. При этом, благодаря большому потоку вторичных нейтронов и большому сечению реакции



эта реакция становится существенным экзотермическим дополнительным источником трития. В дальнейшем дейтерид лития-6, будучи источником столь энергетически выгодного трития, стал применяться как основное термоядерное топливо во всех водородных бомбах. Его промышленное производство было быстро налажено на комбинате № 817 ("Маяк").

Подробнее о физических основах Слойки см. в статьях В.И. Ритуса [18–20].

Слойка не является "полноценной" водородной бомбой, в её энерговыделении только 15–20% — за счёт термоядерного синтеза, остальная энергия взрыва — за счёт реакций деления тяжёлых элементов в центральном ядре и в слоях урана-238.

А.Д. Сахаров любил повторять "нереализованная идея — ещё не идея". От изложенных выше и представленных на рисунке замечательных идей до работоспособной конструкции РДС-бс "дистанция огромного размера", для преодоления которой потребовались пять лет напряжённой творческой работы, в том числе разработки принципиально новых вычислительных методик. Разносторонние вычисления проводились в ИФП (Л.Д. Ландау, Н.Н. Мейман, И.М. Халатников), ОПМ МИАН (А.Н. Тихонов, А.А. Самарский), в других институтах, включая членов спецгруппы ФИАН (В.Л. Гинзбург, С.З. Беленький, Е.С. Фрадкин), оставшихся там после отъезда на объект весной 1950 г. И.Е. Тамма, А.Д. Сахарова и Ю.А. Романова.

Вот один из эпизодов этой работы, касающийся А.Д. Сахарова, рассказанный Я.Б. Зельдовичем незадолго до его кончины И.М. Дрёмину (устное сообщение), а также описанный в воспоминаниях А.И. Павловского в [11, с. 457].

Дело было примерно за год до испытания Слойки, когда А.Д. Сахаров уже работал на объекте. Возникли сомнения в правильности одной из констант, существенной для расчётов. А поскольку правительственные сроки были жёсткие, то была поставлена задача в течение месяца определить её истинное значение. Задание было выдано двум теоретическим группам (Зельдовича и Сахарова) и двум экспериментальным группам — А.И. Павловского на объекте и московской. Каждая группа работала, не зная о том, что параллельно ту же работу выполняют три других коллектива. О существовании четырёх групп знал только Я.Б. Зельдович. Теоретическая группа Зельдовича в течение месяца провела многочисленные расчёты, но так и не смогла прийти к какому-либо определённым результатам. По прошествии месяца он пришёл к Сахарову и спросил о его резуль-

тате. Андрей Дмитриевич сказал, что он сам кое-что прикинул и оценил ожидаемую цифру. Через несколько дней в кабинете Ю.Б. Харитона собрались И.В. Курчатов, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, А.И. Павловский, В.А. Давиденко, Ю.А. Зысин. Яков Борисович заранее написал на доске числа, полученные Сахаровым и московской экспериментальной группой и закрыл их ладонями. Потом попросил вошедшего в кабинет А.И. Павловского написать результат его группы — и убрал руки. Различие в написанных на доске цифрах составляло не более 20 %. Каким образом Сахаров угадал правильный результат — остаётся загадкой. И это не единственный случай такого рода. "Мой мозг — это компьютер, который работает в 10 раз лучше мозга обычного человека. Мозг Сахарова невозможно классифицировать, он иначе устроен", — говорил Я.Б. Зельдович.

Слойка (РДС-6с) была взорвана 12 августа 1953 г., её мощность составила 400 килотонн ТЭ, в 18 раз больше мощности первой советской А-бомбы.

Но вернёмся в Москву, в ФИАН 1948 года.

А.Д. Сахаров:

*«Осенью я позвонил (по совету Зельдовича) Курчатову с просьбой помочь мне в получении квартиры вместо нашей 14-метровой комнаты в "коридорном доме". Курчатов обещал. Вскоре мы уже въезжали в огромную, по нашим меркам, трёхкомнатную отдельную квартиру на окраине Москвы (с окнами на парк, правда сильно замусоренный; но однажды оттуда к нам забежал заяц: не только дети, но и я были этим сильно обрадованы). Я.Б. Зельдович сострил по поводу получения мною квартиры, что это первое использование термоядерной энергии в мирных целях».*

М.С. Рабинович (продолжение) [11, с. 521–522]:

*«Теоретический отдел в ФИАНе начал заниматься атомной проблемой. Я к этим работам не был привлечён, видел всё со стороны. Андрей же был втянут в эту орбиту. О своей работе он уже не рассказывал мне ни слова, но много говорил о жизни. Однажды он рассказывал мне: "Получается такая ситуация. Меня часто приглашают в Кремль, на заседание. Оно длится обычно часов до четырёх утра, потом все участники идут к своим легковым машинам, а у меня машины нет, и никто не знает, что машины нет, я этого никому не говорю. И нужно от Кремля добираться до Октябрьского поля — а это километров двенадцать, а то и пятнадцать". И он, если не схватит такси, пешком шагает домой<sup>2</sup>.*

Ещё запомнился наш разговор. Андрей говорит: "Знаешь, мне предлагают перейти на новый, большой пост. Стоит соглашаться или нет?" Я начал разводить общетеоретические разглагольствования: "Тебе надо заниматься наукой, нужны ли тебе большие посты?" А он в ответ: "Есть разные люди, которые делают предложения. И есть такие, которым нельзя отказать, если они что-то предлагают". Он не назвал фамилий, но примерно я догадывался. "Я сейчас вхожу в очень большие сферы, — добавил он, — и не знаю, как дальше будет складываться моя судьба"».

Л.В. Парийская (математик-программист, сотрудник Отдела теоретической физики ФИАНа в 1943–1974 гг. Работала с А.Д. Сахаровым в спецгруппе):

*«Сахарова всё чаще куда-то требовали. Прибегала запыхавшаяся секретарша:*

*— Сахарова к директору!*

*— Сахарова на провод, скорее, скорее!!*

*Приходил какой-то невзрачный человек, докладывал: "Машина для Сахарова!" Он стоял у дверей и переминался с ноги на ногу, но торопиться боялся. А Сахаров, как всегда, не спеша, методично засовывал свои бумаги в старую сумку, вежливо прощался с нами и уходил.*

*Я чувствовала, что какой-то мощный водоворот тягивает Сахарова, а с ним вместе и наш отдел... Он был как будто всё такой же, как и раньше. Всё в том же, теперь уже выцветшем защитного цвета костюме, который он привёз с военного завода. Всё та же у него была детская, доверчивая улыбка, только улыбался он гораздо реже. И вообще был очень задумчивый. Нет, пожалуй, не задумчивый, а какой-то отрешённый. Встанет у окна и стоит молча, долго и совершенно неподвижно. Его тогда не трогали. А потом сожмёт глаза и с силой проведёт ладонью от виска вниз, как будто стирает с себя что-то. Жест совершенно не свойственный его невозмутимой, спокойной натуре... Мне иногда казалось, что он смертельно устал, что его надо прогнать в какое-нибудь тихое место, и он будет спать непробудно 10–15 часов.*

*Но обычно он очнётся, прислушается, о чём говорят, возьмёт мел левой или правой рукой и начнёт писать формулы своим детским почерком. И его внимательно, не прерывая, слушает наше начальство, как слушали совсем недавно его товарищи-аспиранты.*

*Сахаров работал всё также иступленно. Мне казалось часто, что он смертельно устал: то ли он ещё работает ночью, то ли плохо спит. Однажды он пришёл поздно. Я сразу зашла к нему с работой. Но он посмотрел на меня такими опустошёнными глазами, что я только спросила: "Что с Вами?" Он помолчал. И вдруг стиснул с силой голову обеими руками и прошептал: "Вы же не понимаете!! Это ужас, ужас! Что я делаю!?" — и потом сказал совсем тихо: "Вы знаете, у меня внутренняя истерика. Я ничего не могу..."*

*Вот тут я сказала ему: "Идите сейчас же домой и ложитесь спать. Уходите!" Он подумал, согласился и ушёл. Пришёл на другой день, сказал мне с торжеством: "Вы знаете, а я проспал 13 часов подряд..." [21, 11].*

А.Д. Сахаров:

*«Я не мог не сознавать, какими страшными, нечеловеческими делами мы занимались. Но только что окончилась война — тоже нечеловеческое дело. Я не был солдатом в той войне — но чувствовал себя солдатом этой, научно-технической. (Курчатов иногда говорил: мы солдаты — и это была не только фраза.) Со временем мы узнали или сами додумались до таких понятий, как стратегическое равновесие, взаимное термоядерное устрашение и т.п. Я и сейчас думаю, что в этих глобальных идеях действительно содержится некоторое (быть может, и не вполне удовлетворительное) интеллектуальное оправдание создания термоядерного оружия и нашего персонального участия в этом. Тогда мы ощущали всё это скорей на эмоциональном уровне» [1, ч. I, гл. 6].*

### 3.2. Третья идея

В октябре 1953 г., после успешного испытания Слойки, А.Д. Сахаров в его 32 года был избран в АН СССР, и тогда же министр Министерства среднего машиностроения В.А. Малышев попросил его написать докладную —

<sup>2</sup> Согласно Постановлению Совета Министров СССР от 5 июня 1948 г. автотранспорт "по запросу" выделялся атомщикам в любое время. Но ведь Сахаров никому не говорил об этой проблеме.

как он видит дальнейшие шаги по развитию термоядерных вооружений. В этой, тут же в министерстве набросанной, докладной Сахаров "неосторожно", как он пишет, анонсировал дальнейшее усовершенствование Слойки и задал параметры (вес, габариты) будущих термоядерных зарядов.

А.Д. Сахаров:

«Через две недели я был приглашён на заседание Президиума ЦК КПСС (в 1952 году так было переименовано Политбюро ЦК, а в 1966 году — восстановлено старое название). Результатом заседания Президиума — той его части, на которой я присутствовал, и другой, проходившей с другими приглашёнными, ракетчиками, — были два Постановления, вскоре принятые Советом Министров и ЦК КПСС. Одно из них обязывало наше Министерство в 1954–1955 гг. разработать и испытать то изделие, которое я так неосторожно анонсировал.

Другое постановление обязывало ракетчиков разработать под этот заряд межконтинентальную баллистическую ракету. Существенно, что вес заряда, а следовательно, и весь масштаб ракеты был принят на основе моей докладной записки. Это предопределило работу всей огромной конструкторско-производственной организации на многие годы. Именно эта ракета вывела на орбиту первый искусственный спутник Земли в 1957 году и космический корабль с Юрием Гагариным на борту в 1961 году. Тот заряд, под который всё это делалось, много раньше, однако, успел "испариться", и на его место пришло нечто совсем иное...» [1, ч. I, гл. 13].

Усовершенствовать Слойку (т.е. увеличить мощность при допустимых габаритах) оказалось невозможно, и весной 1954 года теоретики объекта, вопреки названному Постановлению Правительства ("Формально то, что мы делали (хотя и не афишировали), было вопиющим самоуправством", — А.Д. Сахаров, [1, ч. I, гл. 12]), приступили к разработке термоядерного заряда потенциально неограниченной мощности на основе "третьей идеи".

"Третьей идеей" А.Д. Сахаров назвал радиационную имплозию — предложение отказаться от гидродинамического обжатия термоядерного горючего подрывом атомной бомбы, а обжимать его давлением рентгеновского излучения, возникающего при взрыве атомной бомбы — запала. Сахаров пишет, что эта идея стала результатом коллективного "мозгового штурма" теоретиков объекта. В США её тремя годами раньше предложил Эдвард Теллер (и довёл "до ума" вместе со Станиславом Уламом), но разведанных по этому вопросу не было, учёные СССР пришли к "третьей идее" независимо.

Ганс Бете на слушаниях в Конгрессе по делу Роберта Оппенгеймера в апреле–мае 1954 г. сказал: "Блестящее открытие сделано доктором Теллером. Это одно из тех открытий, что вы не можете предсказать, что-то вроде теории относительности, хотя я и не хочу сравнивать эти вещи. Это что-то столь гениальное, чего не происходит при нормальном развитии идеи. У кого-то внезапно возникает вдохновение... Прозрение доктора Теллера дало программе надёжное основание" (см. [22], где дана ссылка на первоисточник).

О том, как это было в СССР на объекте, ярко рассказано в статье Ю.Б. Харитона, В.Б. Адамского и Ю.Н. Смирнова "О создании советской водородной термоядерной бомбы", в книге [23]:

«И вот однажды Зельдович, ворвавшись в комнату молодых теоретиков Г.М. Гандельмана и В.Б. Адамского, находившуюся против его кабинета, радостно воскликнул: "Надо делать не так, будем выпускать из шарового заряда излучение!" Уже через день или два в вычислительное бюро А.Н. Тихонова, которое обслуживало группу Сахарова, было послано задание для проведения расчёта на предмет выяснения, выходит ли излучение из атомного заряда и как это зависит от используемых материалов.

Решающим был вопрос (от него зависела реальность идеи!), не поглотит ли внутренняя поверхность кожуха большую часть энергии, выпускаемой в виде излучения, — ведь тогда оставшейся её части оказалось бы недостаточно для эффективного обжатия заряда. Простыми изящными оценками А.Д. Сахаров показал, что хотя потери на поглощение стенками кожуха и велики, но они всё-таки не таковы, чтобы сделать невозможным сжатие основного заряда. Не менее серьёзным был вопрос о конкретном механизме использования энергии излучения для эффективного обжатия термоядерного заряда. Важные предложения для решения этого вопроса были высказаны Ю.А. Трутневым. Все эти идеи проходили обязательную обкатку через многочисленные коллективные обсуждения».

Приведу также свидетельство В.И. Ритуса, бывшего участником тех событий: «"Третья идея" приобрела реальные очертания в конструкции водородной бомбы РДС-37, состоящей из Слойки и обжимающей её своим излучением атомной бомбы, размещённых в общем кожухе (см. документ № 120 в [24]).

Испытание РДС-37 было проведено 22 ноября 1955 г.; энерговыделение бомбы составило 1,7 мегатонн ТЭ (см. там же, документы № 184 и № 188). Третий в РДС-37 не применялся, он генерировался в реакциях  $D + D \rightarrow p + T + 4 \text{ МэВ}$  и  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + T + 4,6 \text{ МэВ}$  в основном благодаря использованию дейтерида лития-6, предложенного В.Л. Гинзбургом. Это термоядерное топливо стало применяться как основное во всех водородных бомбах вместе с плутонием — инициатором его обжатия излучением и разогрева» [20].

Водородная бомба на основе "третьей идеи" называется двухступенчатой конструкцией, где рентгеновское излучение взрыва первой ступени — атомной бомбы сжимает вторую ступень — термоядерное горючее, уменьшая его объём в 10–20 раз, что и позволяет реализовать "звёздные" условия зажигания реакции термоядерного синтеза. Вряд ли такое мог представить себе П.Н. Лебедев, измеривший в 1899 г. первым в истории ничтожное давление света. В то время как участник названного "мозгового штурма" теоретиков объекта Д.А. Франк-Каменецкий, как специалист по астрофизике звёзд, уже легко себе это представлял.

Как и в случае Слойки, путь от гениальной идеи до успешного испытания был непрост.

А.Д. Сахаров вспоминает:

«Решения о сроке испытания только увеличили темп работы по "третьей идее", и без того очень напряжённый. Я уже писал о тесном взаимодействии с конструкторами. Получилось так, что особенно многое тут выпало на мою долю. Я, не дожидаясь окончательных расчётов и вообще окончательной ясности, писал технические задания, разъяснял конструкторам то, что казалось мне особенно важным, писал "разрешения" на разумные по-

слабления первоначально слишком жёстких технических условий; в общем, очень много брал на себя, на свою ответственность, опираясь не только на расчёты, но и на интуицию. Я часто бывал в конструкторском секторе, завязал тесные, непосредственные деловые отношения с конструкторами, вполне оценил их нелёгкий, кропотливый и требующий специфических знаний и способностей труд.

Но, конечно, особенно много все теории, и я в том числе, занимались расчётами. Ещё на раннем этапе работы мне удалось найти некоторые приближённые описания существенных процессов, специфических для "третьей идеи" (по математической форме это были автомоделльные решения уравнений в частных производных; замкнутую математическую форму им придал Коля Дмитриев; я до сих пор помню, что первоначально Зельдович не оценил моей правоты и только после работы Коли поверил; с ним такое редко случается, он очень острый человек).

Для расчёта изделий, основанных на "третьей идее", недостаточно было анализа отдельных процессов в упрощающих предположениях — нужны были новые методики сложных численных вычислений, пригодные для ЭВМ. Такие методики были разработаны математиками объекта и московских специальных математических групп. Особенно велика была роль группы, возглавлявшейся членом-корреспондентом АН Израилем Моисеевичем Гельфандом<sup>3</sup> [1, ч. I, гл. 13].

### 3.3. Царь-бомба

Специфика "третьей идеи" в том, что она позволяет конструировать термоядерные заряды сколь угодно большой мощности. Надо лишь под общий с атомной бомбой — запалом кожух заложить достаточное число Слоек либо просто пластин дейтерида лития-6.

В 1961 г. А.Д. Сахаров и его коллеги (В.Б. Адамский, Ю.Н. Бабаев, Ю.Н. Смирнов, Ю.А. Трутнев) сконструировали водородную бомбу мощностью 100 мегатонн ТЭ. Потом эта мощность была уменьшена в два раза, так как при 100 мегатоннах "можем окна у себя вышибить", — как заявил Н.С. Хрущев, когда на XXII Съезде КПСС объявил о предстоящем через несколько дней испытании. Самая большая в истории водородная бомба АН-602 мощностью 50 мегатонн ТЭ была взорвана 30 октября 1961 г. на Новой Земле. Названия этой бомбы: "Царь-бомба", "Кузькина мать" или "Иван". Взрывная волна тогда три раза обошла земной шар.

Цифра 50 мегатонн ТЭ мало что говорит непосвящённым. Полезно сравнить её с некоторыми наглядными параметрами термоядерного взрыва в 360 раз меньшей мощности, 140 килотонн (проект "Чаган" — первый советский промышленный термоядерный взрыв 15 января 1965 г., Казахстан): взрывное устройство внешне представляло собой контейнер диаметром 86 см и длиной 3 метра; оно было заложено в пойме реки Чаган в скважине на глубине 178 метров; взрыв выбросил 10,3 млн тонн грунта на высоту 950 метров, образовав воронку диаметром 430 метров и глубиной 100 метров.

Закончу "оружейную" тему научной деятельности А.Д. Сахарова несколькими его высказываниями, объясняющими, почему он стал знаменитым общественным деятелем.



Рис. 2. Музей

«Во второй половине 60-х годов диапазон проблем, к обсуждению которых я в той или иной мере имел отношение, расширился ещё больше. Я в эти годы ознакомился с некоторыми экономическими и техническими исследованиями, имевшими отношение к производству активных веществ, ядерных боеприпасов и средств их доставки, принял участие в нескольких экскурсиях в секретные учреждения ("ящики") и в одном или двух информационных совещаниях по военно-стратегическим проблемам. Поневоле пришлось узнать и увидеть многое. К счастью, несмотря на высокий гриф моей секретности, ещё больше всё же не попадало в мой круг.

Но и того, что пришлось узнать, было более чем достаточно, чтобы с особенной остротой почувствовать весь ужас и реальность большой термоядерной войны, общечеловеческое безумие и опасность, угрожающую всем нам на нашей планете. На страницах отчётов, на совещаниях по проблемам исследования операций, в том числе операций стратегического термоядерного удара по предполагаемому противнику, на схемах и картах немыслимое и чудовищное становилось предметом детального рассмотрения и расчётов, становилось бытом — пока ещё воображаемым, но уже рассматриваемым как нечто возможное» [1, ч. II, гл. 1].

Через несколько дней после возвращения А.Д. Сахарова из ссылки в конце декабря 1986 года журналисты Юрий Рост и Олег Мороз среди прочего задали ему стандартный вопрос, мучают ли его угрызения совести как создателя самого страшного в истории человечества орудия убийства людей. Сахаров определённо ответил, что нет, не мучают, поскольку созданное им оружие благодаря "равновесию страха" в течение десятилетий предотвращало третью мировую войну. Но при этом сделал очень точное дополнение этического и, потенциально, самокритического характера: "Но если всё-таки случится это величайшее несчастье — термоядерная война, и если я ещё успею о чём-нибудь подумать, то моя оценка моей личной роли может трагически измениться" (см. в публикации Олега Мороза "Возвращение из ссылки (история одного интервью)" [25, с. 320]).

Ещё одно высказывание А.Д. Сахарова:

«Сегодня термоядерное оружие ни разу не применялось против людей на войне. Моя самая страстная мечта (глубже чего-либо ещё) — чтобы это никогда не про-

<sup>3</sup> И.М. Гельфанд (1913–2009) — один из крупнейших математиков XX века.

изошло, чтобы термоядерное оружие сдерживало войну, но никогда не применялось» [1, ч. I, гл. 6].

## 4. Управляемый термоядерный синтез

### 4.1. Магнитный термоядерный реактор (токамак)

И вновь вспоминает А.Д. Сахаров:

*«К первым объектовым годам (1950–1951) относится наша совместная с Игорем Евгеньевичем Таммом работа по проблеме управляемой термоядерной реакции. Я начал думать, как я уже писал, об этом круге вопросов еще в 1949 году, но без каких-либо разумных конкретных идей. Летом 1950 года на объект пришло присланное из секретариата Берии письмо с предложением молодого моряка Тихоокеанского флота Олега Лаврентьева. В вводной части автор писал о важности проблемы управляемой термоядерной реакции для энергетики будущего»* [1, ч. I, гл. 9].

На предложение О. Лаврентьева Сахаров написал положительный отзыв ("Автор поднял проблему колоссального значения"), указав при этом, что рассмотренный Лаврентьевым способ электростатической термоизоляции горячей плазмы не реалистичен. А.Д. Сахаров вспоминает, что идея магнитного удержания плазмы пришла ему в голову в процессе написания этого отзыва:

*«В начале августа 1950 года из Москвы вернулся Игорь Евгеньевич — кажется, ему был предоставлен кратковременный отпуск. Он с огромным интересом отнёсся к моим размышлениям — всё дальнейшее развитие идеи магнитной термоизоляции осуществлялось нами совместно... Мы написали отчёт-предложение и, что тогда было важнее, рассказали о наших идеях И.В. Курчатову.*

*В начале 1951 г. на объект прибыла комиссия для рассмотрения наших предложений. В комиссию входили Лев Андреевич Арцимович и Михаил Александрович Леонтович, впоследствии возглавившие работы по магнитному термоядерному реактору (МТР). Председателем был Арцимович. Игорь Евгеньевич и я сделали серию докладов, в которых, кроме вышеизложенного, осветили и другие вопросы — первые оценки эффективности системы, если "всё получится"; при этом рассматривались системы как с чистым дейтерием, так и со смесью дейтерия с тритием (которые представляются более реальными), пристеночные эффекты и многое другое... Главное внимание при обсуждении было посвящено вопросу о так называемых плазменных неустойчивостях... Существовавшие в то время теории турбулентной плазменной диффузии в магнитном поле давали очень большие значения коэффициента теплоотвода (хотя и меньше, чем в отсутствие магнитного поля). Если бы эти теории были справедливы и применимы к МТР, то МТР был бы практически невозможен или очень сложен и громоздок в осуществлении и не экономичен. Но мы не знали об этом летом 1950 года. А когда Арцимович рассказал нам про эти теории, то и мы, и он уже видели перед собой большие перспективы и не хотели отступить без борьбы...*

*Главная особенность истории разработки МТР была в том, что неустойчивости действительно чрезвычайно опасны и их очень много различных типов, о которых никто тогда не подозревал...*

*На основании доклада комиссии было принято постановление Совета Министров, согласно которому разра-*

*ботка проблемы МТР поручалась ЛИПАНу. Ответственный руководитель — Л.А. Арцимович. Руководитель теоретических работ — М.А. Леонтович...»* (там же).

Предложенная Сахаровым и Таммом конструкция МТР с тороидальным и полоидальным магнитными полями позже получила название "токамак" (тороидальная камера с магнитными катушками). Работа А.Д. Сахарова "Теория магнитного термоядерного реактора" [26] и соответствующая статья И.Е. Тамма, суммирующие их секретные отчёты 1951 г., также как и теоретические и экспериментальные отчёты ЛИПАНа, выполненные в 1951–1956 гг., были рассекречены в знаменитом докладе И.В. Курчатова в английском атомном центре в Харуэлле 25 апреля 1956 г. [27]. Они были опубликованы в трудах Первой Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, 1958 г. А.Д. Сахаров: "Доклад Курчатова (в особенности та часть его, которая относилась к МТР) произвёл огромное впечатление на присутствующих, а затем на всю мировую общественность" [1, ч. I, гл. 9].

Кратко о дальнейших событиях. В 1957 г. вступили в строй токамаки Т-10 в Институте атомной энергии и РЛТ в Принстонской лаборатории физики плазмы. Однако достигнутая на них температура дейтерий-тритиевой плазмы, от одного до нескольких КэВ, была ещё недостаточна для эффективного зажигания термоядерной реакции. В 1980-е годы были введены в действие токамаки: TFTR в США, JET в Европе, JT-60 в Японии и два крупных токамака со сверхпроводящими обмотками — Torus-Supra во Франции и T-15 в СССР.

Наилучшие результаты показали реакторы JET (где была достигнута температура плазмы до 30 кэВ) и преемник РЛТ, экспериментальный реактор Принстонской лаборатории физики плазмы TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), установивший в 1995 г. мировой рекорд температуры плазмы 510 миллионов К, в 25 раз больше температуры в центре Солнца. Эти температуры значительно выше необходимых для зажигания термоядерной реакции. Однако работоспособность термоядерного реактора определяется значением ключевого параметра  $Q$  — отношение полученной энергии термоядерного синтеза к энергии, затраченной на нагрев плазмы (Fusion energy gain factor). Формально для самоподдерживающегося горения плазмы (ignition) нужно  $Q \geq 1$ . В реальности с учётом потерь плазма будет гореть без внешнего подогрева при  $Q \geq 5$ . А в коммерчески оправданном реакторе необходимо иметь  $Q \geq 20$ . В 1997 г. на JET был поставлен мировой рекорд мощности УТС в 16 МВт, при этом значение  $Q \approx 0,7$ . Получить необходимые значения  $Q$  пока не удалось, несмотря на множество инновационных идей. Среди них отчетливой токамаком с изменённой, в сравнении с предложенной Сахаровым, конфигурацией удерживающего магнитного поля, такие как стеллараторы и сферические токамаки.

В 1985 г. М.С. Горбачёв и Р. Рейган договорились о реализации совместного проекта большого термоядерного реактора ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER). На практике международная программа ИТЭР была утверждена только в 2005 г., в ней участвуют 35 стран: РФ, США, Китай, Япония, Индия, Южная Корея и все страны Европейского Союза. Стройку, стоимость которой первоначально оценивалась в 5 млрд евро, планировалось закончить в 2016 году. Затем сроки неоднократно сдвигались, увели-

чивалась и стоимость реактора. На сегодня она оценивается в 19 млрд евро, и первую плазму планируется получить в 2025 году. Это должен быть крупнейший в мире токамак — больше каждого из примерно 100 реакторов управляемого термоядерного синтеза, созданных в разных странах после 1950 г.

ИТЭР во многом следует модели токамака, предложенной А.Д. Сахаровым в 1950–1951 гг., но есть и серьёзные отличия. Планируемая мощность реактора 500 МВт при энергетических затратах около 50 МВт, т.е. должно быть  $Q \approx 10$ . ИТЭР не рассматривается как экономический реактор, он создаётся для исследования возможности создания экономически приемлемого токамака. В настоящее время обсуждается возможность создания в Европе коммерческого преемника ИТЭР — реактора ДЕМО (DEMO).

При этом ряд специалистов критически оценивают проект ИТЭР в связи с его гигантской стоимостью и весьма сомнительными перспективами успешности, обращая внимание, что перенаправление на ИТЭР бюджетных ассигнований стран-участниц сделало невозможным реализацию многих других, менее затратных, но не менее научно значимых, проектов исследования термоядерного зажигания плазмы (см., например, [28, 29]). В докладах Национальной академии наук США (2019, [30]) и Американского физического общества (2020, [31]) подчёркивается, что, хотя выход США из проекта ИТЭР невозможен, необходимо развивать альтернативные направления исследований, такие как компактные экспериментальные установки термоядерного синтеза (Fusion Pilot Plants) со сверхсильными магнитными полями. Например, объём вакуумной камеры установки Игнитор (Ignitor), разработанной в Массачусетском технологическом институте, составляет 10 куб. м (в реакторе ИТЭР — 850 куб. м), при том что величины удерживаемого магнитного поля (порядка 13 Тл) в этих реакторах равны, а ожидаемая мощность реактора Игнитор (100 МВт) только в пять раз меньше планируемой мощности ИТЭР. О программе Игнитор см. [32].

#### 4.2. Лазерный термоядерный синтез

Инерциальный термоядерный синтез (ICF — Inertial Confinement Fusion) — таково название более широкого направления, частью которого является лазерный термоядерный синтез (ЛТС). Имеется в виду, что обжатие дейтерий-тритиевых микромишеней до температуры зажигания термоядерной реакции может осуществляться не только с помощью лазера, но, например, пучками электронов или ионов. Но чаще всего в этой сфере применяются лазеры. Необходимое обжатие происходит за счёт отдачи разлетающихся паров сферической оболочки мишени, нагретой лучом лазера и др. По сути, каждая такая мишень — это микроскопическая водородная бомба.

А.Д. Сахаров вспоминает:

*«В 1960–1961 гг. я ещё раз выступил с предложением, относящимся к управляемой термоядерной реакции. В это время поступили сообщения о создании Майманом в США первого лазера на рубине. Я выступил на объекте с докладом, в котором обосновывал возможность использования лазера для возбуждения термоядерной реакции в маленьких шариках, содержащих термоядерное горючее и обжимаемых за счёт гидродинамических эффектов при импульсном нагреве лазерным лучом внешней поверхности*

*шариков. В докладе были даны оценки необходимых параметров этих устройств. В дальнейшем оценки были уточнены в серии численных расчётов на ЭВМ, проведённых моими сотрудниками (в особенности Никитой Анатольевичем Поповым). В качестве возможных областей использования этого принципа я называл энергетику и термоядерные импульсно-реактивные двигатели космических кораблей будущего. Мой доклад стал известен не только сотрудникам объекта, но и специалистам по лазерам в других учреждениях» [1, ч. I, гл. 9].*

Н.А. Попов заметил:

*«Сам он не придавал большого значения этой "красивой идее". Для него она была слишком тривиальна и слишком далека от практического осуществления, чтобы тратить на неё время и что-то писать об этом. То обстоятельство, что впоследствии идея инерционного удержания термоядерной плазмы в ЛТС была высказана и реализована в экспериментальных установках независимо от А.Д. Сахарова, который в своё время не считал нужным её ни зафиксировать, ни, тем более, обнародовать (последнее в силу действовавшего тогда режима секретности было практически невозможно), ещё раз демонстрирует нам ту непреложную истину, что наука имеет единую внутреннюю логику развития, независимо от того, кто именно это развитие осуществляет» [33].*

ЛТС как способ инерциального удержания термоядерной плазмы является, по-видимому, наиболее перспективным направлением общего подхода газодинамического термоядерного синтеза (ГДТС, см. обзор [34]), альтернативным магнитному удержанию плазмы. Как уже говорилось, в начале 1960-х А.Д. Сахаров предложил зажечь термоядерную реакцию в изотопах водорода с помощью симметричного облучения мощным лазером полый сферы, заполненной дейтерий-тритиевым газом.

В то же самое время идея ЛТС была предложена в ФИАНе, где разрабатывались лазеры с максимальной достижимой энергией. На заседании Президиума академии наук СССР в 1961 г. с концепцией ЛТС выступил Н.Г. Басов. Важным этапом развития физики мощных лазеров стали совместные исследования учёных ВНИИЭФ и ФИАНа лазеров с накачкой излучением сильной фотодиссоциационной волны, создаваемой в инертном газе взрывом химических реагентов. Результатом этих работ стало достижение рекордного на то время значения энергии в лазерном моноимпульсе (более 1 МДж). Однако длительность этого импульса была такова, что его мощности заведомо не хватало для зажигания термоядерного горючего. Тогда же во ВНИИЭФ было создано отделение под номером 13. Сейчас это Институт лазерно-физических исследований ВНИИЭФ. Самое первое совещание, на котором обсуждалась возможность применения лазеров в экспериментах ВНИИЭФ, провёл Ю.Б. Харитон 13 марта 1963 года. Но к ЛТС эта деятельность прямого отношения не имела, всерьёз ВНИИЭФ приступил к изучению возможности ЛТС только в 1972 г.

Первой опубликованной работой по использованию лазера для зажигания термоядерного топлива явилась работа Н.Г. Басова и О.Н. Крохина (*ЖЭТФ* 46 171 (1964)). Несколько позднее была опубликована работа американских учёных (Nuckolls J. et al. *Nature* 239 139 (1972)). Первые успешные эксперименты на сферических мишенях были выполнены на установке "Кальмар"

(ФИАН) (Басов Н.Г. и др. *Письма в ЖЭТФ* 26 581 (1977)). Эти исследования положили начало разработке лазерных установок для изучения физики инерциального термоядерного синтеза... В РФЯЦ–ВНИИЭФ работы по созданию моноимпульсных лазеров и исследования на них различных аспектов ЛТС были начаты в 1972 г. по инициативе Ю.Б. Харитона, С.Б. Кормера и Г.А. Кириллова. Для исследования основных проблем, связанных с решением задач ЛТС, во ВНИИЭФ был создан комплекс мощных лазерных установок: "Искра-4", "Искра-5", "Луч", "Фемто" [35].

Расчётно-теоретическое обоснование концепции ЛТС было дано в работах, выполненных в ФИАНе, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ), РФЯЦ–ВНИИЭФ и РФЯЦ–ВНИИТФ. ФИАН является одним из лидеров в области физики и технологии изготовления мишеней для исследований по ЛТС. Более 30 лет эти мишени различного типа используются в экспериментах по сжатию и нагреву плазмы на российских установках "Дельфин" и "Кальмар" (ФИАН), "Феникс" (ИОФАН), "Мишень" и "Ангара-5" (ТРИНИТИ), "Искра-4" и "ИСКРА-5" (ВНИИЭФ) и др., а также в зарубежных научных центрах Великобритании, Германии, Италии, США, Индии и Китая.

В США пионером в развитии ЛТС является Ливерморская национальная лаборатория — установки на Nd-стекле "Shiva" (1977), "Nova" (1984), преемником которых в начале 2000-х гг. стал гигантский национальный проект NIF — National Ignition Facility ("Национальный комплекс зажигания") с энергией лазерного импульса около 1,8 МДж при длительности моноимпульса порядка нескольких наносекунд. В этом случае пиковая мощность импульса составляет около 500 Тераватт — значение, близкое, как надеются учёные, к порогу "включения" термоядерного синтеза. Ожидается, что в ближайшее время на уровень столь высокой мощности лазерного излучения выйдет французская установка LMJ ("Laser Mégajoule"). Стоимость каждой из этих установок — несколько млрд долларов. Следует указать, что исследования в области ЛТС активно проводятся на Nd-лазерах меньшего масштаба с энергией несколько десятков кДж, таких как "Omega" (Рочестерский университет, США), "Gekko-12" (Университет г. Осака, Япония) и др.

Увеличение мощности лазерного обжатия — одна из главных задач совершенствования установок по ЛТС. Поэтому в РФЯЦ–ВНИИЭФ в дополнение к йодному лазеру "Искра-5" была построена установка на Nd-стекле "Луч". В настоящее время идёт сооружение установки на Nd-стекле с мощностью, превышающей мощность установки NIF [35].

Помимо ЛТС, также активно развиваются такие направления ГДТС, как тяжелоионный инерциальный термоядерный синтез и магнитное обжатие МАГО (MAGO/MTF — Magnetic Compression/Magnetized Target Fusion). Система МАГО по физической схеме занимает промежуточное положение между стационарными системами с магнитным удержанием (токамаки, стеллараторы и др.) и импульсными системами с инерционным удержанием.

### 4.3. Мюонный катализ

В засекреченном отчёте Сахарова 1948 года "Пассивные мезоны" [16] (в то время ещё не существовало название мю-мезон, термин "пассивные" означает не вступающие

в ядерные реакции — в отличие от "активных" пи-мезонов) уже высказана главная идея мюонного катализа ядерных реакций синтеза: поскольку масса мю-мезона в 200 раз больше массы электрона, то размер орбиты основного состояния D $\mu$ -мезоатома в 200 раз меньше размера этой орбиты у атома дейтерия, тем самым возможность такого приближения ядер дейтерия на много порядков увеличивает вероятность туннелирования через кулоновский барьер и их синтеза с выделением термоядерной энергии.

В следующей открытой работе 1957 г. "О реакциях, вызываемых мю-мезонами в водороде" [36] (совместно с Я.Б. Зельдовичем) мю-мезон уже назван, в этой работе впервые появляется ссылка на отчёт "Пассивные мезоны", полученный из ФИАНа на объекте по запросу Я.Б. Зельдовича. Отчёт был рассекречен только после смерти А.Д. Сахарова и опубликован в [5].

С.С. Герштейн, Л.И. Пономарёв (в статье "40 лет спустя: комментарии к отчёту АДС" [5, с. 49–57]) отметили:

*«Публикация легендарного отчёта Андрея Дмитриевича Сахарова, в которой он высказывал идею практического использования мюонного катализа (и ввёл впервые сам термин "мезонно-каталитические ядерные реакции"), представляет (уже по одной этой причине) несомненный исторический интерес. Этот отчёт был выполнен весной 1948 г. — ещё до того, как А.Д.С. начал заниматься проблемами термоядерного синтеза. Более того, в своих воспоминаниях А.Д.С. высказывает предположение, что публикуемый отчёт послужил в своё время одной из причин включения его в группу сотрудников ФИАНа под руководством И.Е. Тамма, привлечённую к работе над термоядерным оружием. По условиям того времени отчёт А.Д.С. был засекречен...».*

Отрицательно заряженный мю-мезон, влетевший в жидкую либо газообразную среду дейтерия, образует мезомолекулярные ионы DD $\mu$ , в которых происходит одна из основных в мю-катализе реакций ядерного синтеза, идущая с выделением энергии:



Выветивший мю-мезон катализирует следующую реакцию синтеза и т.п. Чтобы суммарная "полезная" энергия ядерного синтеза превысила энергетические затраты на производство одного мю-мезона, он должен успеть сгенерировать порядка 300 реакций синтеза (4.1). Как выяснилось в дальнейшем, основная трудность при реализации такого сценария состоит в так называемом "эффекте прилипания", когда мю-мезон захватывается образовавшимся в реакции (3.1) гелием-3 и тем самым выходит из игры:



А.Д. Сахаров:

*«При вычислении выхода каталитической реакции на один  $\mu$ -мезон надо учитывать следующие факторы:  $\mu$ -мезон — нестабильная частица, он распадается за относительно очень короткое время в две миллионных секунды. Образование молекулярного иона и последующая ядерная реакция протекают не мгновенно, а за конечное время. Имеет место отравление катализатора — термин из обычной химии, в данном случае это образование мезоиона с ядром гелия. Очевидно, если мы ожидаем заметного*

выхода ядерной реакции, время образования молекулярного иона и время ядерной реакции должны быть много меньше времени жизни  $\mu$ -мезона, а отравление должно происходить достаточно редко.

Все эти факторы тщательно анализировались. Среди тех, кто вёл эти исследования в СССР — С. Герштейн, Л. Пономарёв и их сотрудники. Основной вывод:

1. В чистом дейтерии нет оснований надеяться на такой выход реакции, при котором можно было бы вернуть энергию, затраченную на производство  $\mu$ -мезонов.

2. В смеси дейтерия с тритием ситуация более обнадеживающая» ([1], ч. I, гл. 5, 1982 г.).

В последующие годы преимущественными являлись исследования реакций мю-катализа в D/T и тройных H/D/T смесях (см., например, [37, 38] и ссылки в этих работах). Также рассматривалась возможность комбинированного двухступенчатого производства энергии с применением мю-катализа, когда нейтроны, выделяющиеся в реакциях ядерного синтеза, используются для целей бриддинга [39].

И хотя в ряде опытов удавалось получить более 100 реакций синтеза на один мюон (что в сумме даёт 2 ГэВ энергии), это не компенсирует энергетические затраты даже на производство одного мюона (от 5 до 8 ГэВ). А экономически выгодным мю-катализ может стать, если на один мюон будет приходиться на порядок больше реакций синтеза. Главная трудность всего этого направления — относительно высокая вероятность процесса типа (4.2) прилипания мюона к гелию (по терминологии Сахарова — "отравления катализатора").

Итак, налицо гигантские общемировые усилия в сферах и классического магнитного удержания плазмы, и газодинамического обжатия, включая ЛТС, и мюонного катализа. Остаётся надеяться, что в скором времени управляемый термоядерный синтез станет, наконец, реальностью, и человечество получит неисчерпаемый источник энергии. "Сахаров поднял нас на решение величественной атомной проблемы двадцатого века — получения неисчерпаемой энергии путём сжигания океанской воды" (один из заместителей Курчатова в новогодний вечер 31 декабря 1950 г., — в книге [40]).

## 5. Магнитная кумуляция и взрывомагнитные генераторы

В 1951–1952 гг. А.Д. Сахаров предложил две конструкции МК-1 и МК-2 для получения сверхсильных импульсных магнитных полей и токов с использованием энергии взрыва. Изначально конструкции МК создавались для решения основных задач объекта. В 1950 г. Тамм и Сахаров написали "наверх" о возможности применения магнитной кумуляции для военных программ. После этого, согласно Постановлению Совета Министров СССР, исследования по МК были включены в финансирование Гособоронзаказа.

А.И. Павловский вспоминает:

«Рождение идеи магнитной кумуляции и изобретение генераторов МК-1 и МК-2 были связаны с поисками решений проблемы импульсного управляемого термоядерного синтеза и актуальной в то время задачи — перевода малых масс (100 г) активного вещества в надкритическое состояние (ядерный взрыв малой мощности)» [5, с. 83].

По причине сохранения магнитного потока в результате быстрой деформации контура — уменьшения его

площади под действием взрывной ударной волны — величина магнитного поля и его полная энергия увеличиваются (при пренебрежении потерями) обратно пропорционально площади контура.

МК-1 — цилиндрическая конструкция, где коаксиально расположены толстый наружный слой взрывчатки, внутри которого цилиндр с обмоткой, создающей в полости цилиндра магнитное поле. Подрыв взрывчатки сжимает цилиндр, увеличивая магнитное поле. А.Д. Сахаров: "Уже в первом майском 1952 года испытании МК-1 было получено рекордное для того времени магнитное поле в полтора миллиона гаусс" [1, ч. I, гл. 9].

МК-2 (другое название "взрывомагнитный генератор" — ВМГ) — более сложная система, где взрывчатка расположена внутри цилиндра по его оси, а обмотка и создаваемое ею магнитное поле — снаружи. Подрыв ВВ производится с торца цилиндра, т.е. взрыв не одновременный, его инициация распространяется вперёд по цилиндру. Так же распространяется и возникающий конус, замыкающий обмотки с током, что приводит к импульсному возрастанию тока, а также создаваемого им магнитного поля.

А.Д. Сахаров:

«В 1964 году, используя МК-2 для питания первичной обмотки, удалось получить поле в 25 млн гаусс; давление, создаваемое таким полем, равно 25 млн килограмм на квадратный сантиметр... Система МК-2 является импульсным источником тока большой силы и мощности (в сравнительно небольших устройствах удаётся перевести в энергию магнитного поля энергию взрыва 1 кг ВВ, при этом сила тока достигает 100–200 млн ампер). Она может быть использована для многих технических задач. В моей публикации (см. [42]) описана электропушка, метающая алюминиевое кольцо со скоростью 100 км/с» (там же).

Всё это было засекречено. Две первые публикации на данную тему: "Магнитная кумуляция" 1965 г. [41] (совместно с коллегами) и "Взрывомагнитные генераторы" [42]. Первую экспериментальную группу, выполнявшую эти опыты, возглавляла Е.А. Феоктистова, затем работа велась под руководством А.И. Павловского. В настоящее время в РФЯЦ – ВНИИЭФ исследования по магнитной кумуляции возглавляет В.Д. Селемир, по ВМГ — С.Г. Гаранин.

Из воспоминаний А.Д. Сахарова:

«Мне запомнился мой первый приезд на экспериментальную площадку в мае 1952 года. Взрывы производились на поляне, окружённой молодыми берёзками и осинками, только ещё покрывшимися свежей нежной листвой. Кора многих деревьев была содрана осколками — вероятно, подобную картину можно было наблюдать в прифронтовых лесах. Я спустился в каземат, служивший для защиты от взрыва людей и регистрационной аппаратуры, и увидел Роберта Людаева, Юру Плющева и Женю Жаринова, сидевших на корточках около плитки, на которой грелся чайник. Но они не угостили меня чаем — в чайнике плавилась взрывчатка, которую они разливали по приготовленным формам. Меня растрогало такое обращение с веществом, небольшого количества которого достаточно, чтобы оторвать кисть руки или сделать что-нибудь похуже. Но они знали, что делали, и, по существу, всё было безопасно. Роберт тут же ознакомил меня с усовершенствованием, которое они (кажется, именно Людаев, но я не уверен) внесли в

конструкцию МК-1. Вдоль образующей металлического цилиндра была сделана косая прорезь. Назначение прорези — пропускать вдоль цилиндра магнитное поле. Без этой прорези импульсное первичное магнитное поле, которое мы создавали расположенными по внешней поверхности цилиндра обмотками, слишком медленно проникало внутрь цилиндра через его хорошо проводящие стенки. При взрыве прорезь бесследно захлопывалась. Это простое изобретение немало способствовало успеху всех экспериментов» (там же).

В комментарии к статьям [41, 42] А.И. Павловский пишет о нарушении процесса кумуляции по причине роста нарушений симметрии при сжатии, из-за чего, как указывал Сахаров, практически возможно иметь изменение радиуса не более чем в 10 раз. Трудность эта преодолевается созданием каскадных генераторов: "Каждый раз, когда возникает угроза потери устойчивости внутренней поверхности оболочки, сжимающей магнитный поток, она передаёт функцию сжатия следующей оболочке. Реализация этого принципа в конструкции каскадного генератора позволила воспроизводимо получать поля  $1,6 \cdot 10^7$  Гс" (А.И. Павловский [5, с. 85]).

В дальнейшем в конструкциях МК-1 было достигнуто рекордное значение магнитного поля — около 28 МГс. Величины магнитных полей, полученные во ВНИИЭФ на генераторах МК, являются непревзойдёнными. Подробнее об этом направлении см. в сравнительно недавнем обзоре [43], где основное внимание уделено каскадным генераторам сверхсильных магнитных полей 10- и 20-мегагауссного диапазонов и описаны варианты их применения в исследованиях физики твёрдого тела (оптические, магнитные, транспортные свойства веществ) в сверхсильных магнитных полях, физики экстремальных состояний вещества (изэнтропическое сжатие давлением магнитного поля мегабарного диапазона) и т.п.

В этом же номере УФН за 2011 год опубликован обзор развития взрывомагнитных генераторов МК-2 [44]. Описаны два типа ВМГ — спиральный (СВМГ) и дисковый (ДВМГ); последний является монополюсией ВНИИЭФ, "усилия по созданию ДВМГ, многократно предпринимавшиеся за рубежом, к успеху не привели" [44]. Во ВНИИЭФ на ДВМГ с зарядом ВВ диаметром до 1 метра получены максимальный ток в нагрузке 265 МА, магнитная энергия в нагрузке 205 МДж при характерном времени нарастания тока в нагрузке 12 мкс.

Конструкция СВМГ ближе к предложенному Сахаровым МК-2. Используется также комбинация двух типов ВМГ, когда СВМГ даёт начальную запитку ДВМГ. При конструировании ВМГ одной из главных является задача уменьшения времени накопления энергии. При характерных временах порядка нескольких десятков микросекунд невозможно использование ВМГ в экспериментах по нагреванию плазмы до температуры зажигания термоядерного синтеза. Важная область применения СВМГ — использование их в установках управляемого термоядерного синтеза МАГО (МАГнитное Обжатие), в этом случае уменьшение времени формирования в СВМГ токового импульса критически важно. В целях уменьшения этого времени во ВНИИЭФ были разработаны оригинальные размыкатели тока разных видов. В ряде экспериментов удалось получить время накопления энергии менее 1 мкс. Для достижения порога термоядерного зажигания необходим импульс тока до 100 МА с характерным временем порядка 0,1 мкс. Попытки со-

здания ВМГ с такими параметрами предпринимаются и в России, и за рубежом.

Одна из любимых идей Сахарова: использовать ВМГ в качестве ускорителей элементарных частиц одноразового действия, возможно даже с применением подземного ядерного взрыва. При этом АДС сознаёт, что одноразовость является серьёзным минусом идеи, поскольку "традиционный способ работы экспериментаторов требует многократного "примеривания", варьирования условий опыта, прежде чем получится что-нибудь стоящее. При этом по ходу эксперимента вся его программа часто перестраивается. Я считал, что одноразовые системы с рекордными характеристиками тоже могут дать очень существенную научную информацию. Я не исключаю и сейчас, что когда-нибудь придётся вернуться к импульсным МК-ускорителям" [1, ч. I, гл. 9].

Но если спуститься (или подняться :) на грешную землю, то применение МК достаточно широко.

А.И. Павловский отмечает:

«Магнитная кумуляция энергии, вне зависимости от осуществления грандиозных проектов ускорителей элементарных частиц, оказалась полезной в различных областях исследований. В настоящее время нет альтернативы взрывному способу генерации сверхсильных магнитных полей. Относительно большие объёмы, в которых они реализуются, позволяют сочетать сверхсильные магнитные поля, высокие давления и сверхнизкие температуры. В десятимегагауссном диапазоне магнитных полей изучаются магнитооптические эффекты, уравнения состояния изэнтропически сжатых веществ при мегабарных давлениях, свойства твёрдого водорода при высокой плотности сжатия, проводятся прямые измерения критического поля высокотемпературных керамических сверхпроводников и ряд других исследований» [5, с. 86].

Лазерные пушки и электромагнитные СВЧ-пушки — другие потенциальные способы военного применения генераторов с взрывным сжатием магнитного поля. В этой сфере, как и в экспериментах по импульсному зажиганию термоядерного синтеза, конкурентом ВМГ являются конденсаторные батареи (КБ) многообразного использования, именно их используют на американских авианосцах. Однако вес, габариты и стоимость мощных КБ существенно выше, чем таковые у ВМГ, и не исключено, что при серийном выпуске одноразовые ВМГ могут оказаться предпочтительней, чем КБ.

## 6. Сила тяготения и пространство-время как квантовые эффекты

В ставшей классической 2-страничной работе 1967 года "Вакуумные квантовые флуктуации в искривлённом пространстве и теория гравитации" [45] А.Д. Сахаров показал, что действие Эйнштейна–Гильберта общей теории относительности

$$S(g_{\mu\nu}) = -\frac{c^4}{16\pi G_N} \int d^4x \sqrt{-g} R \quad (6.1)$$

можно не постулировать, а вывести его как отклик квантового вакуума материальных полей на искривление пространства-времени. В (6.1)  $g_{\mu\nu}(x)$  — метрика 4-мерного искривлённого пространства-времени с координатами  $x^\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ );  $g = \det g_{\mu\nu}$ ;  $R$  — скалярная кривизна;  $c$  — скорость света;  $G_N$  — гравитационная постоянная Ньютона. Конкретно в [45] были выписаны

первые члены ковариантного разложения по производным метрического тензора вакуумной однопетлевой диаграммы квантового скалярного поля, распространяющегося на фоне пространства с метрикой  $g_{\mu\nu}$ . Второй член этого разложения имеет вид правой части (6.1), что позволяет выразить постоянную Ньютона через параметр ультрафиолетового (UV) обрезания  $\Lambda$ :

$$\frac{1}{G_N} \sim \int_0^\Lambda k dk \sim \Lambda^2. \quad (6.2)$$

В 1975 г. А.Д. Сахаров публикует значительно более "солидную" работу "Спектральная плотность собственных значений волнового уравнения и поляризация вакуума" [46], в которой строго математически обосновывает интуитивные соображения статьи 1967 года. "Оказалось, что я пришёл к методу, много лет назад предложенному Владимиром Александровичем Фоком, а затем — Юлианом Швингером. Однако мой вывод и сам путь построения, методы были совершенно иными. К сожалению, я не смог послать свои работы Фоку — он как раз тогда умер" [1, ч. II, гл. 19].

И что интересно: согласно portalу NASA/ADS (Astrophysics Data System) <https://ui.adsabs.harvard.edu> на февраль 2021 г. на работу 1967 г. [45] и её англоязычные "зеркала" 787 ссылок, включая и совсем недавние, тогда как на работу 1975 г. [46] — 6 ссылок. Квантово-индуцированной гравитации Сахарова уделено внимание и в знаменитой *Гравитации* Мизнера, Торна, Уилера [47]. Названные работы Сахарова подробно прокомментированы в собрании его трудов 1995 г. [5] С.Л. Адлером, Д.А. Киржницем и Х. Теразавой. Но это было четверть века назад.

Обсуждаемая идея Сахарова получила развитие в ряде направлений, которые, несколько условно, можно разбить на две большие категории, называемые "induced gravity" ("индуцированная гравитация") и "emergent gravity" ("возникающая гравитация") — см. обзор [48] (2012).

В первом случае принимается подход Сахарова, в котором метрика искривлённого фоновое пространства-времени  $g_{\mu\nu}(x)$  рассматривается как классическое внешнее поле и задаётся априори, а уравнения общей теории относительности для этой метрики не постулируются, как это сделал Эйнштейн, а "индуцируются" диаграммами квантовых полей, распространяющихся в пространстве с этой метрикой.

В свою очередь термин "возникающая гравитация" предполагает возникновение не только динамики, но и самого понятия пространства-времени как низкоэнергетического коллективного эффекта в рамках неизвестной фундаментальной микроскопической теории, подобно тому как гидродинамика или же упругие свойства тел являются следствием физических свойств атомов и молекул, описываемых соответствующими теориями.

Остановимся кратко на содержании этих двух категорий, имея в виду и новейшие публикации.

### 6.1. Индуцированная (induced) гравитация

Развитие этого направления см., во-первых, в статьях [49, 50], см. также обзор 2002 г. [51]. В этих работах в основном принимается подход Сахарова обрезания UV расходимостей "руками" на некоем масштабе  $\Lambda$ , когда индуцированные космологический член  $\sim \Lambda^4$ , обратная

постоянная Ньютона  $\sim \Lambda^2$ , члены, квадратичные по кривизне,  $\sim \ln \Lambda^2$ .

Однако введение UV обрезания "руками" нравится не всем. Один из способов устранения ультрафиолетовых расходимостей — рассчитать сумму однопетлевых диаграмм для такого набора квантовых полей материи (скалярных, спинорных, векторных), для которого бесконечности индуцированных космологической постоянной и постоянной Ньютона взаимно сокращаются — см., например, [52] (2019), [53] (1998) и ссылки в этих работах. (Заметим, что в [53, 54] показано, что выражения для энтропии чёрной дыры имеют универсальный характер и не зависят от конкретной модели, если предположить, что действие гравитационного поля индуцируется "по Сахарову", см. также [55].)

Поскольку в названных моделях квантовые бесконечности отсутствуют, то в квантовом эффективном действии роль размерного параметра вместо обрезания  $\Lambda$  играет максимальная масса  $M$  квантовых полей рассматриваемой модели, определяющая величину индуцированных космологической постоянной ( $\sim M^4$ ) и постоянной Ньютона ( $1/G_N \equiv M_{\text{Pl}}^2 \sim M^2$ ). Но спрашивается, откуда возьмется квантовые поля с массой планковской величины  $M \sim 10^{19}$  ГэВ? Введение их в теорию "руками" столь же искусственно, как и введение энергии UV-обрезания  $\Lambda$ .

И всегда остаётся вопрос о нефизическом гигантском космологическом члене (энергии вакуума), который неизбежно индуцируется вместе с действием Эйнштейна — Гильберта. Конечно, в моделях с точной суперсимметрией квантовая энергия вакуума равна нулю, но в них равна нулю и индуцированная масса Планка; а нарушение суперсимметрии на массовом масштабе  $M$  возвращает нас к указанным выше вопросам.

Те же вопросы возникают в моделях изначально масштабно-инвариантных теорий поля, где отсутствуют четвертичные и квадратичные однопетлевые расходимости, а действие Эйнштейна — Гильберта индуцируется при спонтанном нарушении масштабной симметрии — ссылки на пионерские работы 1977–1984 гг. П. Минковского, Смолина, Адлера, Зи, Спокойного см., например, в начале статьи [56]. Также необходимо указать модели Вейль-инвариантной теории гравитации, где размерная постоянная Ньютона индуцируется в результате спонтанного нарушения масштабной инвариантности (см. [49, 50, 56, 57], включая литературу в недавней работе [58]). Отметим также индуцирование действия Эйнштейна в квантовой хромодинамике [59].

Во всех этих моделях массовый масштаб теории  $M$  возникает так же, как и в теории электрослабого взаимодействия и Стандартной модели, т.е. за счёт динамического возникновения вакуумного среднего скалярного поля  $\phi$  (поля Хиггса):  $M = \langle \phi \rangle$ . Но в Стандартной модели  $\langle \phi \rangle = M_{\text{SM}} \approx 10^2$  ГэВ, тогда как для получения правильной постоянной Ньютона нужно  $\langle \phi \rangle = M_{\text{Pl}} = 10^{19}$  ГэВ. Откуда берётся это гигантское (17 порядков), называемое "иерархия масс", отношение массы Планка  $M_{\text{Pl}} = 1/\sqrt{G_N}$  к характерной массе наблюдаемого нами мира элементарных частиц, опять же неизвестно.

Наиболее перспективный на сегодня подход к возможному объяснению этой наблюдаемой в природе гигантской иерархии масс даёт предложенная в 1999 г. модель Ранделл — Сандрама (RS-модель) [60] 5-мерного

пространства-времени анти-де Ситтера (AdS), в которой масштаб 4-мерного сечения с "нашей" метрикой  $g_{\mu\nu}(x^\alpha)$  ( $\alpha, \mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ ) экспоненциально зависит от дополнительной, 4-й пространственной координаты  $y$ :

$$g_{AB}^{(5)} = dy^2 + \exp\left(\frac{2y}{R_{\text{AdS}}}\right) g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (6.3)$$

Здесь  $A, B = 0, 1, 2, 3, 4$ ;  $R_{\text{AdS}}$  — радиус кривизны пространства AdS.

В RS-модели это 5-мерное пространство-время ограничено двумя 4-мерными поверхностями — "инфракрасной" (IR) и "ультрафиолетовой" (UV) бранами, расположенными при двух значениях координаты  $y$ :  $y = y_{\text{IR}}$  и  $y = y_{\text{UV}}$ . При этом поля массивных элементарных частиц "заперты" на IR-бране (такая возможность обсуждалась много раньше [61, 62]), тогда как поля нулевой массы — гравитон, фотон — равномерно распределены по всему слою 5-пространства  $y_{\text{UV}} < y < y_{\text{IR}}$ . В результате названное выше гигантское,  $10^{17}$ , отношение энергетических масштабов гравитации и мира элементарных частиц естественно возникает при сравнительно небольшой толщине слоя в 5-мерии:

$$y_{\text{IR}} - y_{\text{UV}} = R_{\text{AdS}} \ln(10^{17}) = 39 R_{\text{AdS}}.$$

Цифра 39, в отличие от  $10^{17}$ , — это нечто обозримое для теоретика, и за прошедшие 20 лет было немало попыток, к сожалению, не очень убедительных, получить эту цифру из неких первопринципов.

Учитывая значимость RS-модели, а также тот факт, что при квантовании полей на фоне AdS пространства существует естественный способ сокращения UV-бесконечностей (путём вычитания однопетлевых диаграмм, соответствующих двум различным асимптотикам полей на горизонте пространства AdS) в работе [63] была предпринята попытка применить в RS-модели подход индуцированной гравитации Сахарова. Индуцированные энергия вакуума и постоянная Ньютона определяются при этом массовым параметром теории — кривизной пространства AdS:  $R_{\text{AdS}}^{-1}$ .

В [64] в модели 5-мерного (с дополнительной координатой бесконечного размера) пространства, границей которого является "наше" 4-мерное пространство-время, показано, что квантовое индуцирование на этой границе действия Эйнштейна – Гильберта приводит к нетривиальной модификации закона Ньютона на малых и больших (порядка видимого размера Вселенной) расстояниях.

Говоря о мембранах в контексте индуцированной гравитации Сахарова, нельзя не отметить нетривиальный результат сравнительно недавней работы [65], где однопетлевое квантово-индуцированное гравитационное действие для метрики

$$g_{\mu\nu}(x) = \frac{\partial X^A}{\partial x^\mu} \frac{\partial X^B}{\partial x^\nu} G_{AB}(X) \quad (6.4)$$

мембраны  $X^A(x^\mu)$  рассчитано для общего случая произвольного риманова объемлющего пространства с метрикой  $G_{AB}(X^C)$  ( $A, B, C = 0, 1, 2, \dots, D$ ,  $\mu, \nu = 0, 1, 2, \dots, d$ ,  $d < D$ ).

В [65] действие Намбу – Гото мембраны

$$S_{\text{NG}} = \frac{1}{\alpha} \int \sqrt{-\det\left[\frac{\partial X^A}{\partial x^\mu} \frac{\partial X^B}{\partial x^\nu} G_{AB}(X)\right]} d^{d+1}x \quad (6.5)$$

переписано с помощью (6.4) в форме действия Полякова

$$S_{\text{P}} = \frac{1}{2\alpha} \int \left[ g^{\mu\nu} \frac{\partial X^A}{\partial x^\mu} \frac{\partial X^B}{\partial x^\nu} G_{AB}(X) - (d-1) \right] \times \sqrt{-g^{(d+1)}} d^{d+1}x, \quad (6.6)$$

являющегося действием сигма-модели с нетривиальным нелинейным взаимодействием квантовых полей  $X^A(x)$ . Ковариантное разложение действия (6.6) до второго порядка по малым отклонениям  $\xi^A(x)$  координат мембраны от их фонового значения  $Y^A(x)$ , подчиняющегося уравнениям движения ( $X^A(x) = Y^A(x) + \xi^A(x)$ ), и последующее гауссово функциональное интегрирование по  $\xi^A(x)$  дают эффективное действие, слагаемые которого, пропорциональные квадрату энергии UV-обрезания  $L^2$ , содержат, помимо знакомого действия Эйнштейна – Гильберта  $R^{(d+1)}[g_{\mu\nu}(x)]$ , также член, квадратичный по внешней кривизне фоновой мембраны  $Y^A(x)$ , и член, линейный по компонентам тензора Римана  $R_{ABCD}(Y(x))$  объемлющего пространства, спроектированным на мембрану  $Y^A(x)$  и на перпендикулярные мембране направления. (В [65] рассмотрена 4-мерная мембрана,  $d = 3$ , что легко обобщается на произвольное  $d$ .)

В связи с примечанием Сахарова в статье [45] о физической аналогии индуцированной гравитации и сил Казимира (об этом же комментарий Д.А. Киржница в [5, с. 190]) отметим работу [66].

Следует также указать на сравнительно недавнюю работу [67], где индуцированная гравитация "по Сахарову" рассчитана для скалярных и спинорных квантовых однопетлевых диаграмм на фоновом пространстве Римана – Картана с кривизной и кручением. При этом устранение UV-бесконечностей осуществляется так же, как и в работе Сахарова [45], введением энергии обрезания  $L$ . Статья эта написана для сборника памяти Якова Бекенштейна, работы которого положили начало исследованиям о глубинной связи гравитации и термодинамики.

## 6.2. Возникающая (emergent) гравитация

Во введении к названной работе [67], в обзорах [48, 68–70], в статьях [71–79] и приводимой в них литературе даётся, со ссылками на обсуждаемую работу Сахарова 1967 г., достаточно полная картина различных подходов (в рамках стохастической гравитации [75], голографической дуальности [70], аналоговой гравитации [48, 78, 79] и др.) к гравитации и пространству-времени как низкоэнергетическим проявлениям неких более фундаментальных теорий (см. также недавние статьи [80, 81] и литературу в этих работах). Здесь невозможно осветить все эти интересные подходы.

Отметим также более ранние работы в рамках так называемой "прегеометрии", где метрика "нашего" пространства-времени выражается формулой типа (6.4) через скалярные ([61, 82], см. подробнее в комментариях в [5, с. 191–193]) либо скалярные и спинорные ([83], см. также новейшую работу [84]) поля  $X^A$  для плоской метрики  $G_{AB}$  в (6.4)–(6.6).

Но, наверно, наиболее последовательно идея индуцированной гравитации реализуется в теории струн ( $d = 1$  в (6.4)–(6.6)), которая перенормируема, и значит, однопетлевое приближение имеет смысл. А.Д. Сахаров отмечает: «Теория струн является, на новом этапе, реализа-

цией моей старой идеи об индуцированной гравитации! Не могу этим не гордиться» ([85], с. 14, 15). В данном случае роль метрики "нашего" пространства-времени (4 или более измерений, в теории суперструн десяти-мерного,  $D = 9$ , шесть "лишних" измерений компактифицированы) играет не метрика мембраны  $g_{\mu\nu}(x)$ , а метрика таргет-пространства  $G_{AB}(X)$ , являющаяся совокупностью констант взаимодействия двумерной квантовой теории (6.6)  $D + 1$  квантовых полей  $X^A(x)$ .

В квантовом эффективном действии теории струн [86] (см. также [87] и литературу в этой статье) есть член Эйнштейна – Гильберта

$$\int R^{(D+1)}[G_{AB}] \sqrt{-G^{(D+1)}} d^{D+1}X,$$

что и позволило Сахарову говорить о преимуществах теории струн и его индуцированной гравитации: постоянная Ньютона  $G_N$  определяется в данном случае размерным параметром действия (6.6) — натяжением струны  $1/\alpha$ , причем  $\sqrt{\alpha}$  принимается равным планковской длине  $\alpha = \sqrt{G_N} = 10^{-33}$  см. Разложение эффективного действия по степеням кривизны таргет-пространства — это разложение по степеням  $\alpha$ .

Теория струн оперирует масштабами порядка планковской длины, и основная проблема этой теории — увязка её предсказаний с наблюдаемым миром элементарных частиц, масштаб которого, как уже говорилось, отличается на 17 порядков.

## 7. Сахаровские осцилляции

А.Д. Сахаров пишет:

*«Моя первая космологическая работа была выполнена в 1963–1964 гг., её название — "Начальная стадия расширения Вселенной и возникновение неоднородности распределения вещества" ([88] — Б.А.). Строгое и полное исследование гравитационной неустойчивости применительно к космическим моделям Фридмана осуществил Евгений Михайлович Лифшиц в 1946 году. В качестве конкретного выхода своей теории Лифшиц имел в виду объяснить возникновение галактик и их скоплений... Теория гравитационной неустойчивости показывает, как возрастают начальные малые неоднородности плотности. Однако для того, чтобы найти эти начальные неоднородности, нужны дополнительные физические соображения или гипотезы. Это одна из главных проблем большой космологии. В своей работе, опубликованной в 1965 году, я как раз пытался исследовать этот вопрос» [1, ч. I, гл. 18].*

В этой работе Сахаров впервые выдвинул гипотезу (теперь это общепринято), что начальные неоднородности возникают из-за неустрашимых по причине соотношения неопределённости квантовых флуктуаций в первые мгновения существования Вселенной. Сахаров исходил из модели "холодной Вселенной" и рассмотрел квантовые флуктуации холодного барионного вещества при плотностях порядка  $10^{98}$  барионов в кубическом сантиметре (т.е. линейный размер одного бариона равен планковской длине  $10^{-33}$  см). Комптоновская длина волны бариона порядка  $10^{-13}$  см, представить себе барион, линейный размер которого уменьшен на 20 порядков невозможно и, наверно, не нужно. Это тот случай, когда хорошая математика оказывается умнее и дальновиднее нашего воображения.

А в данном случае математика оказалась настолько хороша, что основной вывод статьи Сахарова об осциллирующей зависимости амплитуды возникающих неоднородностей от их длины волны остался в силе, несмотря на выбор им ошибочной "холодной модели" возникновения Вселенной. Дело в том, что реликтовое излучение, являющееся бесспорным доказательством "горячей модели", было открыто в том же 1965 году, но уже после публикации работы [88]. Из-за этой ошибки в выборе модели начального состояния Вселенной Сахаров в своих воспоминаниях весьма скептически оценивает работу [88]. Но сегодня для этого скепсиса нет оснований. Что же произошло за прошедшие 55 лет?

Сахаров рассмотрел эволюцию малых акустических флуктуаций плотности барионной материи на фоне расширяющейся Вселенной и при меняющемся по мере этого расширения уравнении состояния барионного вещества: от радиационно-доминированной стадии ( $P = \rho/3$ ,  $P$  — давление,  $\rho$  — плотность энергии) к стадии доминирования тяжёлой материи ( $P = 0$ ). В рассмотренной в [88] холодной модели эта смена уравнения состояния происходит в первые мгновения после Большого взрыва, в интересующей нас теперь и подтверждённой множеством наблюдений горячей модели такая смена уравнения состояния датируется возрастом Вселенной 70 тысяч лет — момент, когда плотности энергии реликтового излучения и тяжёлого вещества сравнялись, т.е. когда энергия реликтового фотона (сегодня 2,7 К), была равна энергии покоя бариона ( $1 \text{ ГэВ} = 10^{13} \text{ К}$ ), умноженной на коэффициент барионной асимметрии Вселенной (примерно  $10^{-9}$ , см. (8.1) в разделе 8).

Удивительно, что, несмотря на ошибку Сахарова в выборе модели Вселенной, главный результат статьи [88] оказался достаточно универсальным. Периодическая, с меняющимся максимальным значением, зависимость амплитуды неоднородностей от их длины волны оказалась характерна и для горячей модели, и в теории инфляции. То есть речь здесь идёт не об осцилляциях в пространстве-времени, как у обычных волн, а о барионных акустических осцилляциях (БАО) в фурье-преобразованном пространстве, в пространстве импульсов. И это нетривиально. *"Квантовый случай неустойчивости я рассмотрел с помощью точного автомодельного решения для волновой функции гармонического осциллятора с переменными параметрами: тут большие трудности представил учёт эффектов давления, но я их преодолел (как — отсылаю интересующихся к моей работе; я запомнил день, когда мне удалось найти решение — 22 апреля 1964 года)" (А.Д. Сахаров, там же).*

В модели горячей Вселенной периодическая зависимость неоднородностей плотности от длины волны и её влияние на анизотропию температуры реликтового излучения были предсказаны Зельдовичем и Сюняевым [89] и Пиблсом [90], обе статьи опубликованы в 1970 г. Автор (Л.П. Гришук) обзорной статьи [91], написанной к 90-летию А.Д. Сахарова, справедливо отмечает: "Я.Б. Зельдович понимал важность этого открытия, и именно он предложил назвать этот эффект сахаровскими осцилляциями". В [91] поясняется универсальность результата Сахарова, показано, что возникновение осцилляций амплитуды флуктуации при изменении её длины волны имеет место не только для рассмотренного Сахаровым холодного барионного вещества, но и в других случаях, включая и квантовые флуктуации гравитационного поля.

В [91] также показано, что для возникновения БАО необходимо, чтобы начальные флуктуации описывались не бегущими, а стоячими акустическими волнами, которые с неизбежностью возникают, если начальные флуктуации имеют, как это предположил Сахаров, квантовую природу (наглядное пояснение в [91]: квантовая флуктуация аналогична квантовому рождению пары частица–античастица из вакуума с полным нулевым импульсом, что в квантовой механике описывается стоячей волной).

Для инфляционной модели Большого взрыва расчёт эволюции первичных квантовых флуктуаций впервые в 1981 г. провели Муханов и Чибисов [92] (см. также обзор [93]). Авторы этой работы, как и статей [89, 90], имели в виду возможность обнаружения БАО при наблюдении тонкой структуры температуры реликтового излучения, исходящего от разных точек небосвода. Реликтовое излучение доходит к нам в неизменном виде (только охлаждённое в 1000 раз за счёт расширения Вселенной) с момента рекомбинации, когда температура и возраст Вселенной были соответственно 3000 К и 370000 лет. Согласно расчётам, главный пик акустических осцилляций должен находиться при длине волны, равной величине "акустического горизонта" в момент рекомбинации; сегодня этот размер виден на небосводе в радиусе примерно 0,7 угловых градуса (рис. 3). Но, когда делались теоретические предсказания работ [89, 90, 92], о возможности измерения температуры реликтового излучения на малых угловых масштабах с точностью до миллионных долей градуса можно было только мечтать.

Первый пик акустических осцилляций температуры реликтового излучения был зафиксирован в 1996 г. Дальнейшие (1997–2010 гг.) наблюдения анизотропии реликтового излучения с использованием размещённых на аэростатах и спутниках радиотелескопов обнаружили другие пики акустических осцилляций. Эти эксперименты, среди прочего, подтвердили плоскую модель наблюдаемой Вселенной, что стало свидетельством в пользу инфляционной (экспоненциально раздувающейся) стадии первых мгновений после Большого взрыва. Инфляция в свою очередь с неизбежностью требует динамического механизма происхождения барионной асимметрии Вселенной, описанного Сахаровым в другой работе 1967 г. Но об этом — в разделе 8.

Первичные квантовые флуктуации с их необычной эволюцией по мере расширения Вселенной отпечатались не только на тонком спектре реликтового излучения, они определили и крупномасштабную структуру Вселенной — детали наблюдаемого распределения галактик, скоплений и сверхскоплений галактик, что было, как говорилось, изначальной задачей статьи Сахарова [88]. В этой сфере тоже огромные возможности для сопоставления теории с экспериментом (см., например, [94–96]).

"Если бы А.Д. Сахаров увидел спектр мощности угловых гармоник реликтового излучения! (см. рис. 3 — Б.А.) Я.Б. Зельдовичу тоже не довелось его увидеть, зато многие, принимавшие непосредственное участие в развитии теории, дожили. Наблюдение самого факта акустических осцилляций — только начало. Оказывается, они лучше, чем что-нибудь другое, помогают измерить целый ряд параметров нашей Вселенной, включая её возраст и геометрию. Это примерно то же самое, как если бы на карте ранней Вселенной увидели бы масштабную линейку с делениями в мегапарсеках" [97].

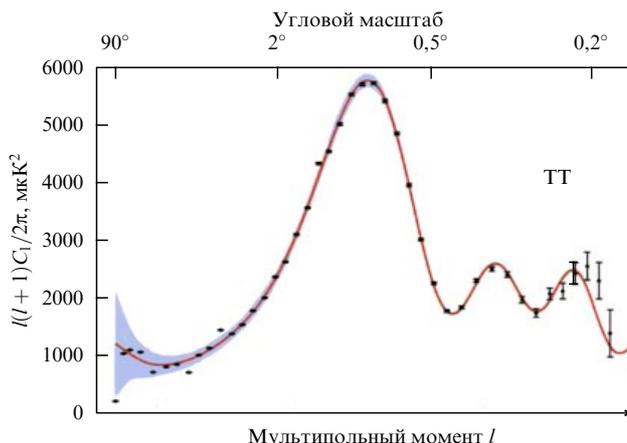


Рис. 3. Осцилляции [97].

О "космологической линейке" и акустических осцилляциях см., например, [98, 99]. Существенно опирается на работу Сахарова 1965 года [88] обзорная статья [100], посвящённая реликтовым гравитонам, если когда-то их удастся наблюдать. О моделировании сахаровских осцилляций в лабораторных экспериментах см. [101].

Достаточно набрать в поисковой системе "Sakharov oscillations", чтобы убедиться, насколько актуальна сегодня та "ошибочная" статья Сахарова. При этом, однако, следует проявлять осторожность в выводах, в том числе и о значении обсуждаемой работы Сахарова, поскольку в интерпретации астрофизических данных о флуктуациях температуры реликтового излучения есть немало неопределённости.

## 8. Барионная асимметрия Вселенной

Ещё одна, ставшая классической, работа Сахарова "Нарушение  $CP$ -инвариантности,  $C$ -асимметрия и барионная асимметрия Вселенной" (1967 г. [102]) уже была основана на модели горячей Вселенной, бесспорным свидетельством которой, как говорилось, стало открытие в 1965 году равномерно заполняющего Вселенную реликтового излучения миллиметрового диапазона. Плотность фотонов реликтового излучения  $n_\gamma = 410 \text{ см}^{-3}$ , тогда как средняя плотность барионов, составляющих основную массу видимых звёзд и галактик,  $n_B = 2,4 \times 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ . Численное значение отношения этих плотностей, называемое барионной асимметрией Вселенной (baryon asymmetry of the universe — BAU):

$$(\text{BAU}) = \frac{n_B}{n_\gamma} = 6,1 \times 10^{-10}, \quad (8.1)$$

является одной из главных загадок космологии, так же как загадкой является самый факт отсутствия во Вселенной антиматерии (антигалактик, антивзвёзд).

На стадиях, когда энергия фотонов (температура Вселенной  $T$ ) превышала энергию рождения барион-антибарионной пары ( $T > 1 \text{ ГэВ}$ , возраст Вселенной  $t < 10^{-6} \text{ с}$ ), в условиях термодинамического равновесия плотности фотонов, барионов и антибарионов должны были практически совпадать. Почему же при охлаждении Вселенной до температур, меньших 1 ГэВ, после аннигиляции барионов и антибарионов остался барионный

"мусор" в доле  $10^{-9}$  — одна десятимиллионная процента?

Предположение, что это небольшое превышение барионов над антибарионами было задано природой как начальное условие в ультрарелятивистской горячей плазме, представляется противоестественным. А в инфляционных моделях ранней Вселенной асимметричное начальное состояние невозможно в принципе, так как экспоненциальное раздувание сглаживает все первичные неоднородности, оставляя универсальное начальное состояние с ненулевой положительной плотностью энергии. Квантовое рождение горячей материи при распаде этого состояния (reheating) заведомо даёт равное количество материи и антиматерии. Значит, нужен динамический механизм возникновения барионной асимметрии из первоначально симметричного состояния вещества.

Такой механизм генерации барионной асимметрии был предложен Сахаровым в [102]. В его основе три условия: 1) несохранение барионного числа; 2) нарушение  $C$ - и  $CP$ -симметрий; 3) отсутствие термодинамического (теплого) равновесия на стадии генерации асимметрии.

Слабое нарушение зарядовой ( $C$ ) и комбинированной ( $CP$ ) чётностей в реакциях рассеяния и распада элементарных частиц было в то время (1967 г.) уже установлено экспериментально. Нарушение термодинамического равновесия в условиях быстро расширяющейся Вселенной, казалось бы, неизбежно; однако, как мы увидим, это условие оказалось наиболее трудно реализуемым. Революционным было первое условие Сахарова — предположение о возможности распада (с временем жизни  $10^{50}$  лет) основного кирпичика мироздания — протона. Оно было встречено, мягко говоря, с недоверием: "Гипотеза автора относительно нарушения сохранения барионного заряда представлялась в то время слишком надуманной, что вызвало скептическое отношение к работе в целом (см., например, книгу Зельдовича и Новикова по релятивистской космологии"<sup>4</sup> (А.Д. Сахаров в комментариях в сборнике [4], см. [5, с. 246])). Механизм генерации БАУ был рассмотрен также в 1970 г. В.А. Кузьминым [103], но эта работа тоже, в основном, осталась тогда незамеченной.

Ситуация изменилась во второй половине 1970-х годов с появлением теории великого объединения (GUT — Grand Unification Theory) сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий [104]. В GUT барионное число не сохраняется в реакциях с участием тяжёлых (масса порядка  $10^{15}$  ГэВ) кварк-лептонных бозонов. Благодаря огромной массе этих бозонов время полураспада протона достаточно велико ( $> 10^{30}$  лет), чтобы не вступать в противоречие с фактом нашего существования. Что будет через  $10^{30}$  лет, лучше не задумываться; как заметил один умный человек: "За это время наши представления изменятся, и мы будем спасены". Но барионная асимметрия — это не фантазия, а зримый парадокс, требующий объяснения здесь и сейчас.

В работе [102], в последовавшей за ней статье 1969 г. "Антикварки во Вселенной" [105] и в написанной после появления GUT работе 1979 г. "Барионная асимметрия Вселенной" [106] А.Д. Сахаров рассматривал механизм генерации барионной асимметрии при планковских

( $\sim 10^{19}$  ГэВ) и близких к планковским GUT ( $10^{15}$ – $10^{16}$  ГэВ) масштабах энергий/температур. Рассмотрение столь высоких температур диктуется третьим из названных условий Сахарова: необходимостью нарушения термодинамического равновесия. То есть характерное время, определяющее темп расширения Вселенной (обратная постоянная Хаббла  $H^{-1}$ ), не должно быть существенно больше характерного времени  $\tau$  ядерных или иных реакций, идущих с нарушением барионной симметрии. А поскольку речь идёт об ультрарелятивистской радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной, когда масштабный фактор  $a(t) \sim t^{1/2}$ ,  $H^{-1} = 2t$ , то характерное время реакций сильно взаимодействующих частиц [105]

$$\tau \sim \frac{1}{T} \sim t^{1/2} \quad (8.2)$$

( $T \sim 1/a$  — температура Вселенной,  $t$  — возраст Вселенной).

При обычных — низких температурах характерное время ядерных реакций равно временному промежутку, за который свет пересекает барион:  $\tau_0 = 10^{-23}$  с. Согласно астрофизическим наблюдениям, экстраполированным назад по времени, Вселенная имела температуру  $T_0 = 1$  ГэВ (энергия покоя бариона) в момент  $t = t_0 = H_0^{-1}/2 = 10^{-6}$  с. Как видно,  $\tau_0 \ll H_0^{-1}$ , т.е. тепловое равновесие ядерных реакций в этот момент заведомо обеспечено, генерация барионной асимметрии невозможна. С учётом названных значений  $\tau_0$ ,  $H_0^{-1}$  и зависимостей  $\tau(t) \sim t^{1/2}$  (8.2) и  $H(t)^{-1} \sim t$  получаем, что обеспечивающее нарушение термодинамического равновесия равенство  $\tau(t) = H^{-1}(t)$  достигается при  $t = 10^{-40}$  с, когда температура Вселенной  $T = 10^{17}$  ГэВ. Поэтому Сахаров и рассматривал столь раннюю Вселенную с такими высокими температурами, полагая, что возникшая на этой стадии небольшая барионная асимметрия "закаливается" [105] и после аннигиляции при  $T = 1$  ГэВ основной массы барионов и антибарионов проявляется в остаточном барионном веществе наблюдаемой нами Вселенной.

Проблема, однако, в том, что названные сверхвысокие температуры в современных моделях ранней Вселенной (включая инфляционную модель, подтверждаемую множеством независимых астрофизических данных) не достигаются. Если же мы хотим генерировать барионную асимметрию при более низких температурах в более поздние моменты существования Вселенной, т.е. при существенно больших временах  $H^{-1}$ , то нужна теория, в которой реакции с нарушением барионного заряда идут соответственно гораздо медленнее ядерных реакций.

В обзорном докладе 1988 г. [107] Сахаров рассматривает и иные, отличные от высокоэнергетического GUT механизмы генерации барионной асимметрии: "квантовое туннелирование между различными вырожденными вакуумами теории калибровочных полей" [108], суперсимметричные варианты GUT [109], электрослабое взаимодействие [110]. Наибольшее развитие в последующие годы получило третье из названных направлений — генерация барионной асимметрии в электрослабых взаимодействиях (см. также [111] и обзоры [112–114]).

Вообще говоря, уже в привычной Стандартной модели есть процессы с нарушением барионного числа, идущие через образование так называемых сфалеронов

<sup>4</sup> Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков *Релятивистская астрофизика* (М.: Наука, 1967).

(пространственно локализованных состояний поля Хиггса и  $W$ -бозона). В высокотемпературной кварк-глюонной плазме эти процессы идут постоянно, однако идут они в условиях теплового равновесия, поскольку их скорость существенно выше темпа расширения Вселенной  $H$ . То есть третье условие Сахарова не выполняется: сколько родилось избыточных барионов, столько же и исчезло в обратных процессах.

Ситуация меняется, когда Вселенная охлаждается до температуры спонтанного нарушения электрослабой симметрии  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  порядка  $T = 100$  ГэВ [115, 116]. Эта температура Вселенной достигается при временах  $H^{-1} = 10^{-10}$  с (см. (8.2)), что соответствует энергетическому масштабу порядка  $10^{-4}$  эВ. Спрашивается, какие реакции с нарушением барионной симметрии имеют столь ничтожный энергетический масштаб в плазме с температурой 100 ГэВ? Оказывается, что с характерными временами порядка  $10^{-10}$  с происходит фазовый переход первого рода — образование пузырьков новой нарушенной электрослабой фазы, на движущихся стенках этих пузырьков генерируется барионная асимметрия, а расширение Вселенной фиксирует этот результат, подавляя обратные процессы. Но тут возникает много проблем, в том числе требующих того или иного выхода за рамки Стандартной модели.

Убеждение, что Стандартная модель является лишь неким низкоэнергетическим приближением точной теории, является сегодня практически всеобщим. Её модификации требуют и обнаруженные на опыте ненулевые массы нейтрино (нейтринные осцилляции), необходимость искусственной тонкой подгонки масс хиггсовских скаляров, загадка "тёмной материи" и т.п. Точно так же выхода за рамки Стандартной модели требует и необходимость объяснения барионной асимметрии Вселенной.

Важным, а возможно и решающим, шагом вперёд стала идея увязать нарушение барионной симметрии Вселенной (бариогенезис) с нарушением её лептонной симметрии (лептогенезис) (см. [117] и обзоры [118, 119]). В процессах, описываемых электрослабой теорией, сохраняется разница барионного и лептонного зарядов  $B - L$ . Поэтому, если удастся (выходя за рамки Стандартной модели) генерировать лептонную асимметрию Вселенной (LAU), то в горячей кварк-глюонной плазме в условиях теплового равновесия барионная асимметрия с неизбежностью возникнет в электрослабых процессах с участием сфалеронов. В этих теориях, основанных на введении массивного синглетного нейтрино и механизме "качелей", объясняющем наблюдаемые массы лёгких нейтрино, возможно обеспечить выполнение всех трёх условий Сахарова, проблема лишь в том, чтобы получить нужное число (8.1).

Красивое развитие идеи лептогенезиса как причины бариогенезиса — теория  $\nu$ MCM (Neutrino Minimal Standard Model), где единственным обобщением Стандартной модели является введение трёх дополнительных тяжёлых стерильных (синглетных) нейтрино — по одному на каждое активное нейтрино  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ . Лептонная асимметрия в этой теории возникает благодаря взаимопревращениям (осцилляциям) новых тяжёлых нейтрино [120, 121] (см. обзоры [122, 123]). В свою очередь, как уже говорилось, ВАУ возникнет из LAU в электрослабых процессах с участием сфалеронов.

Что касается генерации лептонной асимметрии, то ключевой вопрос о выполнении третьего условия Саха-

рова — нарушения теплового равновесия по причине расширения Вселенной решается выбором крайне малых констант юкавского взаимодействия новых нейтрино со старыми — активными. В результате характерное время реакций с нарушением лептонной симметрии увеличивается до значений, сопоставимых с  $H^{-1}$  ( $H$  — постоянная Хаббла).

Необходимые для получения LAU (и вслед за ним ВАУ) малые значения констант взаимодействия новых тяжёлых нейтрино могут решить ещё одну великую проблему космологии — загадку тёмной материи. Известно, что активные нейтрино слабо взаимодействуют с веществом. Если же константы взаимодействия Юкавы новых нейтрино выбраны достаточно малыми, то эти новые нейтрино станут хорошими кандидатами на роль тёмной материи Вселенной. Кроме того, эти тяжёлые нейтрино при правильном выборе значений их масс могут объяснить нейтринные осцилляции. Замечательно в этом подходе, что он в принципе допускает проверку в экспериментах, доступных на Большом адронном коллайдере. Разумеется, многообразные астрофизические данные: о барионной асимметрии, тёмной материи, свойствах реликтового излучения, нейтрино во Вселенной и т.п. — накладывают жёсткие ограничения на выбор параметров теорий лептогенезиса,  $\nu$ MCM и др.

Число работ по теме происхождения барионной асимметрии Вселенной огромно. Среди новейших назовём статьи о лептогенезисе — [124], о "гравитационном лептогенезисе", не требующем выполнения третьего условия Сахарова, — [125], бариогенезисе в процессе инфляции — [126], восходящая к Хокингу и Зельдовичу идея аккреции антибарионов первичными чёрными дырами как причина ВАУ — [127] и ссылки в этих работах.

Назовём также обзоры [128, 129]: *"В течение пятидесяти лет после публикации статьи Сахарова тема бариогенезиса оказалась замечательным образом связана со всеми попытками расширения Стандартной модели, включая Великое объединение, динамическое нарушение электрослабой симметрии, низкоэнергетическую суперсимметрию и массы нейтрино"* (из заключения обзора [129]).

## 9. Пульсирующая ("многолистная") Вселенная

Изучению "многолистных" (осциллирующих, пульсирующих) моделей Вселенной посвящены работы Сахарова 1970, 1980 и 1982 гг. [130–132], возвращается он к этой теме и в статьях [106, 107]. Рассматривается два варианта моделей, в каждом из которых снимается вопрос "что же было раньше"? (до Большого взрыва, до эпохи инфляции и т.п.). Один вариант — "с бесконечным повторением в прошлом циклов космологического расширения и сжатия" и второй — с начальной сингулярной точкой "поворота стрелы времени" [131]. Гипотеза  $CPT$ -симметрии Вселенной — одна из главных в представлениях Сахарова о структуре Вселенной в целом. Сингулярная точка поворота стрелы времени —  $T$ -симметрична, это точка минимальной энтропии, от которой время течёт (энтропия возрастает) "вперёд в обе стороны" и нет смысла спрашивать, "что было раньше". Соответственно, и Вселенная осциллирует в обоих направлениях по времени.

В рамках моделей осциллирующей Вселенной наблюдаемое нами огромное значение энтропии Вселенной произошло по мере её накопления от цикла к циклу,

т.е. предполагается, что "нашему" циклу предшествовало множество других с меньшими максимальными размерами Вселенной. В этих работах рассматривается также далёкое будущее Вселенной, когда распались все протоны, и смена расширения сжатием при максимальном размере Вселенной происходит по причине введённой "руками" небольшой отрицательной космологической постоянной.

Надо признать, что, в отличие от "сахаровских осцилляций" и барионной асимметрии Вселенной, этот комплекс космологических работ Сахарова не получил широкого признания. Возможная причина, по-видимому, в том, что в этих работах не разрешены две принципиальные трудности осциллирующих моделей, хорошо известные и самому Сахарову. Первая трудность: "Недостатком модели является высокая степень неоднородности, возникающая в сжимающемся пространстве" (А.Д. Сахаров, комментарий к статье [130] в сборнике [4], см. [5, с. 276]). Вторая трудность: отсутствие убедительного теоретического описания "отскока" (bounce) — плавной смены сжатия Вселенной расширением при её минимальном размере.

Тем не менее картина осциллирующей ("многолистной" в терминологии Сахарова) Вселенной, с повторением циклов космологического расширения и сжатия, получила интересное развитие в последние десятилетия, в основном в XXI веке. Побудительным мотивом являются такие проблемы теории инфляции, как наличие начальной космологической сингулярности, невозможность ответить на вопрос: "что было раньше, до инфляции?" При этом предлагаются нетривиальные способы преодоления двух названных выше трудностей осциллирующих моделей.

Универсальной проблемой всех моделей осциллирующей Вселенной является нарастание на этапе сжатия неоднородностей Белинского–Халатникова–Лифшица (БХЛ). Например, согласно БХЛ, плотность энергии анизотропии нарастает при уменьшении масштаба Вселенной  $a(t)$  по закону  $\sim a^{-6}$ . Подавить эту анизотропию, сохранить изотропию и однородность Вселенной при сжатии — непростая задача моделей осциллирующей Вселенной. Одна из возможностей состоит во введении скалярного поля ("ekpyrotic field") с неконвенциональной динамикой, "выравнивающего" Вселенную при её сжатии [133–136].

Что касается плавного (не сингулярного) "отскока" при минимальном размере Вселенной  $a = a_{\min}$ , то его реализация требует введения неконвенциональной формы материи, нарушающей условие энергодоминантности  $P + \rho > 0$  (для реализации отскока в модели замкнутой Вселенной необходимо выполнение более слабого условия  $P < -\rho/3$ ). Предложено множество моделей, динамика которых обеспечивает условия отскока и основанных как на введении особого скалярного поля ("галилеона"), так и на модификациях уравнений общей теории относительности при большой кривизне пространства-времени (см. [137–142]).

Среди предлагаемых моделей есть и дающие при высоких плотностях вакуумно-подобное уравнение состояния,  $P = -\rho$ , когда сжатие (так называемая антиинфляция) — отскок — расширение (инфляция) в модели замкнутой Вселенной в области её минимальных размеров происходит по закону гиперболического косинуса. Представление о вакуумно-подобном состоянии веще-

ства на конечной стадии коллапса впервые введено Глинером [143]. Пионерской являлась работа Киржница [115], согласно которой в сверхплотном веществе при достаточно высокой температуре должно происходить восстановление "спонтанно" нарушенной симметрии, в частности, калибровочной симметрии электрослабых взаимодействий. Однако переход замкнутой системы при сжатии в низкоэнтропийное состояние "ложного вакуума" вступает в противоречие со II началом термодинамики. В попытке преодолеть эту трудность автор данной статьи рассмотрел некоторые "игрушечные" теории материи (с нелинейной зависимостью Лагранжиана от кинетической энергии, т.е. от градиентов полей, — в духе электродинамики Борна–Инфельда), в которых возникающее при больших полях вакуумно-подобное состояние обладает не только энергией, но и энтропией [144].

Общей, до сих пор не разрешённой окончательно, проблемой всех моделей осциллирующей Вселенной являются неустойчивости (духовые, градиентные и т.п.) [145]. В ряде недавних работ [146–149] удалось получить стабильные решения с отскоком в рамках весьма изощрённой "расширенной теории Хорндески" скалярного поля, в которой также модифицируются и уравнения общей теории относительности. При этом, конечно, остаётся стандартный вопрос: что будет с этими решениями, если в уравнения включить тензор энергии-импульса обычной материи, плотность энергии которой при сжатии нарастает и угрожает сингулярностью? То есть гарантировать плавный отскок может только такая теория, в которой динамика "обычной" материи при высоких плотностях становится необычной — нарушающей условие энергодоминантности. На необходимость такой модификации обычных теорий было указано в [133], попытка такой модификации уравнений электродинамики, как уже говорилось, была предпринята в [144], где рассмотрены два типа теории — с асимптотической свободой и асимптотическим конфайнментом в области больших полей. Однако в этих моделях сохраняется проблема духовых и градиентных неустойчивостей.

Несмотря на трудности, энтузиазм сторонников осциллирующих моделей не угасает — в том числе и потому, что в рамках этих моделей, как утверждается, удаётся получить те нетривиальные свойства наблюдаемой Вселенной, которые так успешно объясняет теория инфляции [150].

## 10. Квантовая космология.

### Антропный принцип

В работе Сахарова 1984 года "Космологические переходы с изменением сигнатуры метрики" [151] Вселенная рассматривается как квантовый объект, допускающий квантовое туннелирование между состояниями с различной топологией, различным числом пространственных координат и осей времени (сигнатурой). Отсюда один шаг до идеи Мегавселенной (Мультиверз — в современной терминологии) и как следствие — антропного принципа.

А.Д. Сахаров:

*«В 1950–1970-х гг. независимо несколькими авторами была высказана гипотеза, что наряду с наблюдаемой Вселенной существует бесконечное число "других" Вселенных, многие из них обладают существенно иными, чем "наша" Вселенная, характеристиками и свойствами;*

наша Вселенная и похожие на неё Вселенные характеризуются такими параметрами, что в них могли возникнуть структуры (атомы, молекулы, звёзды и планетарные системы и т.д.), обеспечивающие развитие жизни и разума. Эта гипотеза снимает многие вопросы типа — почему мир устроен именно так, а не иначе — с помощью предположения, что есть иначе устроенные миры, но их наблюдение недоступно, во всяком случае сейчас. Некоторые авторы считают антропологический принцип неплодотворным и даже не соответствующим научному методу. Я с этим не согласен» [151].

Термин "антропный принцип" впервые предложил в 1973 г. английский физик Брэндон Картер [152]. Однако сама идея неоднократно высказывалась и ранее. Об антропном принципе см. [153, 154] или в популярной статье [155], авторы которой среди прочего замечают: "Упование на антропный принцип с отказом от поисков конкретного объяснения в некотором смысле противоречит духу науки". Однако, на чём настаивает и Сахаров в работе [151], представление о Мегавселенной придаёт антропному принципу научный характер. Это представление прочно вошло в современную физику в связи с теорией хаотической инфляции [156], а также в связи с так называемым "ландшафтом" теории струн [157, 158]. "Ландшафт" — это гигантское число потенциально равноправных основных состояний этих теорий — каждому может соответствовать свой набор значений фундаментальных констант (число некомпактифицированных измерений, величины  $A$ -члена, постоянной тонкой структуры, масс электрона, протона, нейтрона и т.п.).

В рамках концепции Мегавселенной мы появились там, где есть условия для нашего появления. А.Д. Сахаров придерживался такого подхода: "В духе антропологического принципа считаем, что наблюдаемая Вселенная выделена совокупностью значений параметров, благоприятных для развития жизни и разума" [151].

Особое замечание на тему "антропный принцип и 3-мерность пространства". Известно со времён Эренфеста (1917 г. [159]), что кеплеровы орбиты, равно как орбиты электронов в атомах, устойчивы только в 3-мерном пространстве. Есть и другие сугубо динамические факторы (масштабная инвариантность действия Максвелла, справедливость принципа Гюйгенса), выделяющие число измерений пространства  $n = 3$ . Кто знает, может быть, теоретики со временем покажут, что  $(3 + 1)$  пространство-время также динамически выделено в сценарии начального инфляционного раздувания Вселенной, что инфляция невозможна (нестабильна?) при  $n > 3$ ? Хотелось бы хотя бы 3-мерие нашего мира объяснить динамически, не прибегая к антропному принципу.

В работе [151] А.Д. Сахаров рассмотрел возможность перехода к евклидову пространству на конечной стадии коллапса, а также возможность рождения Вселенной "из ничего" — при квантовом туннелировании из евклидова 4-мерия (сигнатура равна нулю) в нашу Вселенную с сигнатурой единица. Эти идеи, высказанные Сахаровым в 1984 г., позже стали весьма популярны (см., например, обзорную статью [160]).

Неопределённость, слабая предсказательная сила высокомерных теорий суперструн,  $M$ -теории состоит не только в мириадах возможностей выбора основного состояния, но и в существенном произволе в выборе действия теории. В [151] Сахаров выдвинул интересную идею — выбора гравитационного действия высокомер-

ной теории в масштабно-инвариантном виде. Стандартный лагранжиан Эйнштейна – Гильберта в 4-мерии, так же как и весь ряд по кривизне "нашего" пространства-времени, восстанавливается на следующем этапе: в результате компактификации "лишних" измерений. В теории струн, в суперсимметричных теориях с "плоскими потенциалами", в "безмасштабных" моделях типа Калуцы – Клейна спектр полей 4-мерной эффективной теории включает безмассовые скалярные моды (дилатон, масштаб компактификации), от которых мультипликативно зависят ньютоновская постоянная, постоянная тонкой структуры и т.п. Это приводит к известной трудности "пятой силы" (нарушение принципа эквивалентности) и "плывущих", космологически меняющихся констант, что с огромной точностью исключается наблюдениями. Надежды здесь возлагаются на низкоэнергетические квантовые радиационные поправки, в результате которых в первоначально плоском потенциале должен возникнуть минимум, фиксирующий вакуумное среднее скалярных нуль-мод [161, гл. 13, 14]. Идея Сахарова о первичной конформно-инвариантной теории гравитации в высших измерениях предлагает совсем иное решение проблемы "плывущих" констант. В такой теории зависимость радиуса компактификации от макроскопических координат 4-мерия всегда можно откалибровать масштабным преобразованием. В результате гравитация в 4-мерном пространстве описывается стандартной теорией Эйнштейна, тогда как безразмерные константы взаимодействия калибровочных полей есть числа, не зависящие от масштаба компактификации. Для иллюстрации этого круга идей Сахарова в [162] приведены результаты расчёта калибровочной и ньютоновской постоянных для модели компактификации в теории с исходным конформно-инвариантным, суперсимметризуемым, так называемым "геометрическим" действием, являющимся "цепочным" произведением тензоров Вейля (см. обзор [163]).

## 11. Вместо заключения

А.Д. Сахаров пишет в эпилоге к книге воспоминаний:

"Это чудо науки. Хотя я не верю в возможность скорого создания (или создания вообще?) всеобъемлющей теории, я вижу гигантские, фантастические достижения на протяжении даже только моей жизни и жду, что этот поток не иссякнет, а наоборот, будет шириться и ветвиться" [85, с. 445].

**Благодарности.** Выражаю благодарность за ценные советы и консультации Л.И. Гурвицу, С.Ю. Гуськову, И.М. Дрёмину, А.В. Ивановскому, Б. Коппи, С.А. Миронову, В.И. Ритусу, В.А. Рубакову, А.А. Цейтлину, А.К. Чернышёву, Б.Е. Штерну и А.А. Юхемчуку.

## Список литературы

1. Сахаров А "Воспоминания", в сб. Сахаров А *Воспоминания* Т. 1 (Ред.-сост. Е Холмогорова, Ю Шиханович) (М.: Права человека, 1996)
2. Сахаров А, Боннэр Е *Дневники* Роман-документ в 3-х томах (М.: Время, 2006)
3. Бабенышев А, Лерт Р, Печуро Е (Сост.) *Сахаровский сборник, посвященный 60-летию А.Д. Сахарова* (New York: Khronika Press, 1981); Альтшулер Б, Печуро Е (Сост.) *Сахаровский сборник, посвященный 60-летию А.Д. Сахарова* (М.: Книга,

- 1991) Репринтное издание с приложением "Последние десять лет" и "Послесловием к изданию 1981 года" Александра Бабенюшева
4. Sakharov A D *Collected Scientific Works* (Eds D ter Haar, D V Chudnovsky, G V Chudnovsky) (New York: Marcel Dekker, 1982)
  5. *Академик А.Д. Сахаров. Научные труды* (Редколлегия: Б Л Альтшулер, Л В Келдыш (председатель), Д А Киржниц, В И Ритус) (М.: ОТФ ФИАН, ЦентрКом, 1995)
  6. "К 70-летию Андрея Дмитриевича Сахарова" *УФН* **161** (5) (1991) Специальный выпуск
  7. "К 75-летию со дня рождения Андрея Дмитриевича Сахарова" *УФН* **166** (5) (1996) Специальный выпуск
  8. Альтшулер Б Л "Научное и общественное наследие Сахарова сегодня" *УФН* **182** 188 (2012); Altshuler B L *Phys. Usp.* **55** 176 (2012)
  9. "Этюды к научному портрету А.Д. Сахарова" *Природа* (8) (1990) Специальный выпуск
  10. Сахаров А Д "Мир через полвека" (1974), в кн. Сахаров А Д *Тревога и надежда* 2-е изд. (Сост. Е Г Боннэр) (М.: Интер-Версо, 1991) с. 73
  11. Альтшулер Б Л, Болотовский Б М, Дремин И М, Келдыш Л В (председатель), Файнберг В Я (Редколлегия) *Он между нами жил... Вспоминания о Сахарове* (М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Практика, 1996); Пер. на англ. яз.: *Andrei Sakharov: Facets of a Life* (Gif-sur-Yvette: Editions Frontières, 1991)
  12. Сахаров А Д "Взаимодействие электрона и позитрона при рождении пар" *ЖЭТФ* **18** 631 (1948)
  13. Dremine I M, Gevorkyan S R, Madigozhin D T "Enhancement of low-mass dileptons in ultraperipheral collisions" *Eur. Phys. J. C* **81** 276 (2021); arXiv:2008.13184
  14. Сахаров А Д "Генерация жесткой компоненты космических лучей" *ЖЭТФ* **17** 686 (1947)
  15. Сахаров А Д "Температура возбуждения в плазме газового разряда" *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **12** 372 (1948)
  16. Сахаров А Д "Пассивные мезоны", в *Отчет* (М.: ФИАН СССР, 1948) Рукопись. Отчет рассекречен в 1990 г., опубликован с пояснениями С.С. Герштейна и Л.И. Пономарева в: *Академик А.Д. Сахаров. Научные труды* (Редколлегия: Б Л Альтшулер, Л В Келдыш (председатель), Д А Киржниц, В И Ритус) (М.: ОТФ ФИАН, Центрком, 1995) с. 41–44
  17. Сахаров А Д "Влияние рассеяния на интенсивность пучка в синхротроне", в *Отчет* (М.: ФИАН СССР, 1948) Рукопись
  18. Ритус В И "Если не я, то кто?", в сб. *Он между нами жил... Вспоминания о Сахарове* (Редколлегия: Б Л Альтшулер, Б М Болотовский, И М Дремин, Л В Келдыш (председатель), В Я Файнберг) (М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Практика, 1996) с. 526
  19. Ритус В И "Группа Тамма — Сахарова в работе над первой водородной бомбой" *УФН* **184** 975 (2014); Ritus V I "Tamm — Sakharov group in work on the first hydrogen bomb" *Phys. Usp.* **57** 903 (2014)
  20. Ритус В И "В.Л. Гинзбург и атомный проект" *УФН* **187** 444 (2017); Ritus V I "V.L. Ginzburg and the Atomic Project" *Phys. Usp.* **60** 413 (2017)
  21. Парийская Л В *Корни и крылья: воспоминания, рассказы, шутки* (М.: Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН, Отд-ние теорет. физики им. И.Е. Тамма, 2004); см. также, в сб. *Он между нами жил... Вспоминания о Сахарове* (Редколлегия: Б Л Альтшулер, Б М Болотовский, И М Дремин, Л В Келдыш (председатель), В Я Файнберг) (М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Практика, 1996) с. 474
  22. Горелик Г Е "Загадка "третьей идеи". Детектив из жизни академика Сахарова", *Троицкий вариант*, 27.02.2018
  23. Адамский В Б и др. *Юлий Борисович Харитон. Путь длиною в век* 2-е изд., доп. (М.: Наука, 2005)
  24. Рябев Л Д (Общ. ред.), Гончаров Г А (Отв. сост.), Максименко П П (Сост.) *Атомный проект СССР: Документы и материалы* в 3-х т. Т. 3. 1998–2010 Кн. 2 *Водородная бомба, 1945–1956* (М.: Гос. корпорация по атом. энергии "Росатом", 2009)
  25. *Андрей Дмитриевич. Воспоминания о Сахарове* (М.: Книжное обозрение, Терра, 1991)
  26. Сахаров А Д "Теория магнитного термоядерного реактора", в сб. *Физика плазмы и проблема управляемого термоядерного синтеза* Т. 1 (М.: Изд-во АН СССР, 1958) с. 20; см. также *УФН* **93** 564 (1967)
  27. Курчатов И В "О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде" *Атомная энергия* **1** (3) 65 (1956); Kurchatov I V "The possibility of producing thermonuclear reactions in a gaseous discharge" *Sov. J. Atom. Energ.* **1** 359 (1956)
  28. Mazzucato E *Science* **271** 892 (1996)
  29. Claessens M "Those who are against ITER", in *ITER: The Giant Fusion Reactor* (Berlin: Springer, 2020) p. 95
  30. "Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research" National Academy of Sciences, Engineering and Medicine (Washington, DC: The National Academies Press, 2019) <https://doi.org/10.17226/25331>
  31. American Physical Society Division of Plasma Physics Community Planning Process, "A community plan for fusion energy and discovery plasma sciences", Tech. Rep. Am. Phys. Soc. (2020)
  32. Coppi B et al. "Perspectives for the high field approach in fusion research and advances within the Ignitor Program" *Nucl. Fusion* **55** 053011 (2015)
  33. Попов Н А "АДС и ЛТС" *Природа* (5) 89 (1991); см. также в сб.: *Академик А.Д. Сахаров. Научные труды* (Редколлегия: Б Л Альтшулер, Л В Келдыш (председатель), Д А Киржниц, В И Ритус) (М.: ОТФ ФИАН, ЦентрКом, 1995) с. 39
  34. Попов Н А и др. "О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда (проблема газодинамического термоядерного синтеза)" *УФН* **178** 1087 (2008); Popov N A et al. "Thermonuclear fusion in the explosion of a spherical charge (the problem of a gas-dynamic thermonuclear fusion)" *Phys. Usp.* **51** 1047 (2008)
  35. Гаранин С Г "Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии" *УФН* **181** 434 (2011); Garanin S G "High-power lasers and their applications in high-energy-density physics studies" *Phys. Usp.* **54** 415 (2011)
  36. Зельдович Я Б, Сахаров А Д "О реакциях, вызываемых мю-мезонами в водороде" *ЖЭТФ* **32** 947 (1957); Zel'dovich Ya B, Sakharov A D "Reactions produced by  $\mu$ -mesons in hydrogen" *Sov. Phys. JETP* **5** 775 (1957)
  37. Demin D I et al. "Experimental search of nuclear fusion reactions in a  $pT\mu$  system", in *Intern. Conf. New Trends in High-Energy Physics, 24–30 September 2018, Budva, Montenegro*
  38. Юхимчук А А и др. "Жидкотритиевая мишень для исследования реакций  $pT\mu$ -синтеза" *Приборы и техника эксперимента* (4) 12 (2019); Yukhimchuk A A et al. "A liquid-tritium target for studying  $pT\mu$ -fusion reactions" *Instrum. Exp. Tech.* **62** 464 (2019)
  39. Герштейн С С, Петров Ю В, Пономарев Л И "Мюонный катализ и ядерный бриддинг" *УФН* **160** (8) 3 (1990); Gershtein S S, Petrov Yu V, Ponomarev L I "Muon catalysis and nuclear breeding" *Phys. Usp.* **33** 591 (1990)
  40. Головин И Н *И.В. Курчатов (1903–1960 гг.)* (М.: Атомиздат, 1967) с. 81; Головин И Н *И.В. Курчатов* 2-е изд. (М.: Атомиздат, 1972) с. 81
  41. Сахаров А Д и др. "Магнитная кумуляция" *ДАН СССР* **165** (1) 65 (1965); Sakharov A D et al. *Sov. Phys. Dokl.* **10** 1045 (1966)
  42. Сахаров А Д "Взрывомагнитные генераторы" *УФН* **88** 725 (1966); Sakharov A D "Magnetoimplosive generators" *Phys. Usp.* **88** 725 (1966)
  43. Борисков Г В и др. "Физические исследования в сверхсильных магнитных полях" *УФН* **181** 441 (2011); Boriskov G V et al. "Research in ultrahigh magnetic field physics" *Phys. Usp.* **54** 421 (2011)
  44. Гривевич Б Е и др. "Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах" *УФН* **181** 422 (2011); Grinevich B E et al. "Explosive magnetic generators and their application in scientific experiments" *Phys. Usp.* **54** 403 (2011)
  45. Сахаров А Д "Вакуумные квантовые флуктуации в искривленном пространстве и теория гравитации" *ДАН СССР* **177** 70 (1967); Sakharov A D "Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation" *Sov. Phys. Dokl.* **12** 1040 (1968); Reprinted: *Gen. Rel. Grav.* **32** 365 (2000)
  46. Сахаров А Д "Спектральная плотность собственных значений волнового уравнения и поляризация вакуума" *ТМФ* **23** 178

- (1975); Sakharov A D "Spectral density of eigenvalues of the wave equation and vacuum polarization" *Theor. Math. Phys.* **23** 435 (1975)
47. Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A *Gravitation* (San Francisco, CA: W.H. Freeman and Co., 1973); Пер. на русск. яз.: Мизнер Ч, Торн К, Уилер Дж *Гравитация* (М.: Мир, 1977)
  48. Sindoni L "Emergent models for gravity: an overview of microscopic models" *SIGMA* **8** 027 (2012); gr-qc/1110.0686
  49. Adler S L "Einstein gravity as a symmetry breaking effect in quantum field theory" *Rev. Mod. Phys.* **54** 729 (1982); "Einstein gravitation as a long wavelength effective field theory" *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* **310** 273 (1983)
  50. Zee A "Spontaneously generated gravity" *Phys. Rev. D* **23** 858 (1981); "Einstein gravity emerging from quantum Weyl gravity" *Ann. Physics* **151** 431 (1983)
  51. Visser M "Sakharov's induced gravity: a modern perspective" *Mod. Phys. Lett. A* **17** 977 (2002); gr-qc/0204062
  52. Kehagias A, Partouche H, de Vaulchier B "Induced Einstein gravity from infinite towers of states", arXiv:1912.09939
  53. Frolov V, Fursaev D "Black hole entropy in induced gravity: Reduction to 2D quantum field theory on the horizon" *Phys. Rev. D* **58** 124009 (1998); hep-th/9806078
  54. Frolov V P, Fursaev D V "Mechanism of generation of black hole entropy in Sakharov's induced gravity" *Phys. Rev. D* **56** 2212 (1997); hep-th/9703178; "Plenty of nothing: black hole entropy in induced gravity" *J. Astrophys. Astron.* **20** 121 (1999); hep-th/9705207; Frolov V P, Fursaev D V, Zelnikov A I "Statistical origin of black hole entropy in induced gravity" *Nucl. Phys. B* **486** 339 (1997); hep-th/9607104
  55. Jacobson T "Black hole entropy and induced gravity", gr-qc/9404039
  56. Jizba P, Kleinert H, Scardigli F "Inflationary cosmology from quantum conformal gravity" *Eur. Phys. J. C* **75** 245 (2015); arXiv:1410.8062
  57. Чудновский Е М "Спонтанное нарушение конформной инвариантности и механизм Хиггса" *ТМФ* **35** 398 (1978); Chudnovsky E M "The spontaneous conformal symmetry breaking and Higgs model" *Theor. Math. Phys.* **35** 538 (1978); Nepomechie R I "Einstein gravity as the low-energy effective theory of Weyl gravity" *Phys. Lett. B* **136** 33 (1984); Smilga A V "Spontaneous generation of the Newton constant in the renormalizable gravity theory", arXiv:1406.5613
  58. Lin H, Narain G "AdS backgrounds and induced gravity" *Mod. Phys. Lett. A* **34** 2050057 (2019); arXiv:1712.09995
  59. Donoghue J F "Inducing the Einstein action in QCD-like theories" *Phys. Rev. D* **97** 056022 (2018); arXiv:1712.04468
  60. Randall L, Sundrum R "A large mass hierarchy from a small extra dimension" *Phys. Rev. Lett.* **83** 3370 (1999); hep-ph/9905221; "An alternative to compactification" *Phys. Rev. Lett.* **83** 4690 (1999); hep-th/9906064
  61. Akama K "Pregeometry", in *Gauge Theory and Gravitation, Proc., Nara, 1982* (Lecture Notes in Physics, Vol. 176, Eds K Kikkawa, N Nakanishi, H Nariai) (Berlin: Springer-Verlag, 1982) pp. 267–271; эл. версия: "An early proposal of "Brane World"", hep-th/0001113
  62. Rubakov V A, Shaposhnikov M E "Do we live inside a domain wall?" *Phys. Lett. B* **125** 136 (1983)
  63. Altshuler B "Sakharov's induced gravity on the AdS background: SM scale as inverse mass parameter of the Schwinger–DeWitt expansion" *Phys. Rev. D* **92** 065007 (2015); arXiv:1505.07421
  64. Рубаков В А "Многомерные модели физики частиц" *УФН* **173** 219 (2003); Rubakov V A "Multidimensional models of particle physics" *Phys. Usp.* **46** 211 (2003)
  65. Akama K, Hattori T "Brane induced gravity in the curved bulk", arXiv:1403.5633
  66. Belgiorno F, Liberati S "Black hole thermodynamics, Casimir effect and induced gravity" *Gen. Rel. Grav.* **29** 1181 (1997); gr-qc/9612024
  67. Chaichian M, Oksanen M, Tureanu A "Sakharov's induced gravity and the Poincaré gauge theory", in *Jacob Bekenstein. The Conservative Revolutionary* (Eds L Brink et al.) (Singapore: World Scientific, 2019) p. 271; arXiv:1805.03148
  68. Carlip S "Challenges for emergent gravity" *Stud. Hist. Philos. Mod. Phys. B* **46** 200–208 (2014); arXiv:1207.2504
  69. Linnemann N S, Visser M R "Hints towards the emergent nature of gravity", arXiv:1711.10503
  70. Visser M R "Emergent gravity in a holographic universe", Ph.D. Thesis (Amsterdam: Univ. of Amsterdam, 2019); arXiv:1908.05469
  71. Betzios P, Kiritsis E, Niarchos V "Emergent gravity from hidden sectors and TT deformations" *J. High Energy Phys.* **2021** 202 (2021); arXiv:2010.04729
  72. Kim K-S "Emergent geometry in recursive renormalization group transformations" *Nucl. Phys. B* **959** 115144 (2020); arXiv:2004.09997
  73. Simula T "Gravitational vortex mass in a superfluid" *Phys. Rev. A* **101** 063616 (2020); arXiv:2001.03302
  74. Ge X-H et al. "Acoustic black holes in curved spacetime and emergence of analogue Minkowski metric" *Phys. Rev. D* **99** 104047 (2019); arXiv:1902.11126
  75. Erlich J "Stochastic emergent quantum gravity" *Class. Quantum Grav.* **35** 245005 (2018); arXiv:1807.07083
  76. Lee S-S "Emergent gravity from relatively local Hamiltonians and a possible resolution of the black hole information puzzle" *J. High Energy Phys.* **2018** 43 (2018); arXiv:1803.00556
  77. Vargas A F, Contreras E, Bargueno P "SAdS black holes and spacetime atoms: a heuristic approach" *Gen. Relativ. Gravit.* **50** 117 (2018); arXiv:1712.01159
  78. Volovik G E "Induced gravity in superfluid <sup>3</sup>He" *J. Low. Temp. Phys.* **113** 667 (1998); cond-mat/9806010
  79. Barcelo C, Liberati S, Visser M "Analogue gravity" *Living Rev. Rel.* **14** 3 (2011); gr-qc/0505065
  80. de Anda F J "Emergent gravity from off-shell energy fixing" *Class. Quantum Grav.* **37** 195012 (2020); arXiv:1910.03599
  81. Azri H "Inducing gravity from connections and scalar fields" *Class. Quantum Grav.* **36** 165006 (2019); arXiv:c/1808.09348
  82. Akama K et al. *Prog. Theor. Phys.* **60** 868 (1978); Akama K "An attempt at pregeometry: gravity with composite metric" *Prog. Theor. Phys.* **60** 1900 (1978); Akama K, Terazawa H "Pregauge-pregeometry and a Gauge-invariant string model" *Prog. Theor. Phys.* **79** 740 (1988)
  83. Amati D, Veneziano G, "Metric from matter" *Phys. Lett. B* **105** 358 (1981); "A unified Gauge and gravity theory with only matter fields" *Nucl. Phys. B* **204** 451 (1982)
  84. Carone C D, Erlich J, Vaman D "Composite gravity from a metric-independent theory of fermions" *Class. Quantum Grav.* **36** 13 (2019); arXiv:1812.08201
  85. Сахаров А Д "Горький, Москва, далее везде", в сб. Сахаров А *Воспоминания* Т. 2 (Ред.-сост. Е Холмогорова, Ю Шиханович) (М.: Права человека, 1996)
  86. Fradkin E S, Tseytlin A A "Quantum string theory effective action" *Nucl. Phys. B* **261** 1 (1985); "Effective action approach to superstring theory" *Phys. Lett. B* **160** 69 (1985); "Effective field theory from quantized strings" *Phys. Lett. B* **158** 316 (1985)
  87. Tseytlin A A "Sigma model approach to string theory effective actions with tachyons" *J. Math. Phys.* **42** 2854 (2001); hep-th/0011033
  88. Сахаров А Д "Начальная стадия расширения Вселенной и возникновение неоднородности распределения вещества" *ЖЭТФ* **49** 345 (1965); Sakharov A D "The initial stage of an expanding universe and the appearance of a nonuniform distribution of matter" *Sov. Phys. JETP* **22** 241 (1966)
  89. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B "Small-scale fluctuations of relic radiation" *Astrophys. Space Sci.* **7** 3 (1970)
  90. Peebles P J E, Yu J T "Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe" *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
  91. Грищук Л П "Космологические сахаровские осцилляции и квантовая механика ранней Вселенной" *УФН* **182** 222 (2012); Grishchuk L P "Cosmological Sakharov oscillations and quantum mechanics of the early Universe" *Phys. Usp.* **55** 210 (2012)
  92. Муханов В Ф, Чибисов Г В "Квантовые флуктуации и "нелинейная" Вселенная" *Письма в ЖЭТФ* **33** 549 (1981); Mukhanov V F, Chibisov G V "Quantum fluctuations and a nonsingular universe" *JETP Lett.* **33** 532 (1981); Муханов В Ф, Чибисов Г В *ЖЭТФ* **83** 475 (1982); Mukhanov V F, Chibisov G V *Sov. Phys. JETP* **56** 258 (1982)
  93. Mukhanov V F, Feldman H A, Brandenberger R H "Theory of cosmological perturbations" *Phys. Rep.* **215** 203 (1992)

94. Aubourg É et al. (BOSS Collab.) "Cosmological implications of baryon acoustic oscillation measurements" *Phys. Rev. D* **92** 123516 (2015); arXiv:1411.1074
95. Keselman J A, Nusser A "Performance study of Lagrangian methods: reconstruction of large scale peculiar velocities and baryonic acoustic oscillations" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **467** 1915 (2017); arXiv:1609.03576
96. Hipolito-Ricaldi W S et al. "On general features of warm dark matter with reduced relativistic gas" *Eur. Phys. J. C* **78** 365 (2018); arXiv:1706.08595
97. Рубаков В, Штерн Б "Масштабная линейка Вселенной", Троицкий вариант (83) 2 (2011)
98. Anselmi S et al. "Linear point standard ruler for galaxy survey data: Validation with mock catalogs" *Phys. Rev. D* **98** 023527 (2018); arXiv:1711.09063
99. Anselmi S et al. "Cosmic distance inference from purely geometric BAO methods: Linear point standard ruler and correlation function model fitting" *Phys. Rev. D* **99** 123515 (2019); arXiv:1811.12312
100. Giovannini M "Primordial backgrounds of relic gravitons" *Prog. Part. Nucl. Phys.* **112** 103774 (2020); arXiv:1912.07065
101. Hung C-L, Gurarie V, Chin C "From cosmology to cold atoms: observation of Sakharov oscillations in quenched atomic superfluids" *Science* **341** 1213 (2013); arXiv:1209.0011
102. Сахаров А Д "Нарушение  $CP$ -инвариантности,  $C$ -асимметрия и барионная асимметрия Вселенной" *Письма в ЖЭТФ* **5** (1) 32 (1967); Sakharov A D "Violation of  $CP$  invariance,  $C$  asymmetry, and baryon asymmetry of the Universe" *JETP Lett.* **5** 24 (1967)
103. Кузьмин В А "CP-неинвариантность и барионная асимметрия Вселенной" *Письма в ЖЭТФ* **13** 335 (1970); Kuz'min V A "CP-noninvariance and baryon asymmetry of the Universe" *JETP Lett.* **13** 228 (1970)
104. Pati J C, Salam A "Lepton number as the fourth 'color'" *Phys. Rev. D* **10** 275 (1974); Georgi H, Glashow S L "Unity of all elementary-particle forces" *Phys. Rev. Lett.* **32** 438 (1974); Ignatiev A Yu, Krasnikov N V, Kuzmin V A, Tavkhelidze A N "Universal  $CP$ -noninvariant superweak interaction and baryon asymmetry of the universe" *Phys. Lett. B* **76** 436 (1978); Yoshimura M "Unified Gauge theories and the baryon number of the universe" *Phys. Rev. Lett.* **41** 281 (1978); Kolb E W, Turner M S "Grand unified theories and the origin of the baryon asymmetry" *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **33** 645 (1983)
105. Сахаров А Д "Антикварки во Вселенной", в сб. *Проблемы теоретической физики. Сб. статей, посвященных Н.Н. Боголюбову в связи с его 60-летием* (Ред. коллегия.: Д И Блохинцев (гл. ред.) и др.) (М.: Наука, 1969) с. 35
106. Сахаров А Д "Барионная асимметрия Вселенной" *ЖЭТФ* **76** 1172 (1979); Sakharov A D "The baryonic asymmetry of the Universe" *Sov. Phys. JETP* **49** 594 (1979)
107. Сахаров А Д "Барионная асимметрия Вселенной", in *Proc. of the Friedmann Centenary Conf.: 1st Alexander Friedmann Intern. Seminar on Gravitation and Cosmology, 22–26 June 1988, Leningrad* (Eds M A Markov, V A Berezin, V F Mukhanov) (Singapore: World Scientific, 1990) Доклад на конф., посвященной 100-летию А.А. Фридмана, Ленинград, 22–26 июня 1988 г.
108. 't Hooft G "Symmetry breaking through Bell-Jackiw anomalies" *Phys. Rev. Lett.* **37** 8 (1976); "Computation of the quantum effects due to a four-dimensional pseudoparticle" *Phys. Rev. D* **14** 3432 (1976); Dimopoulos S, Susskind L "Baryon number of the universe" *Phys. Rev. D* **18** 4500 (1978); Linde A D "Fate of the false vacuum at finite temperature: theory and applications" *Phys. Lett. B* **100** 37 (1981); Linkhamer F, Monton N S "A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory" *Phys. Rev. D* **30** 2212 (1984)
109. Affleck I, Dine M "A new mechanism for baryogenesis" *Nucl. Phys. B* **249** 361 (1983); Linde A D "A new mechanism of baryogenesis and the inflationary universe" *Phys. Lett. B* **160** 243 (1985)
110. Kuzmin V A, Rubakov V A, Shaposhnikov M E "On the anomalous electroweak baryon-number nonconservation in the early universe" *Phys. Lett. B* **155** 36 (1985); "Anomalous electroweak baryon number non-conservation and GUT mechanism for baryogenesis" *Phys. Lett. B* **191** 171 (1987)
111. Шапошников М Е "О возможности возникновения барионной асимметрии Вселенной в электрослабой теории" *Письма в ЖЭТФ* **44** 364 (1986); Shaposhnikov M E "Possible appearance of the baryon asymmetry of the universe in an electroweak theory" *JETP Lett.* **44** 465 (1986); "Baryon asymmetry of the universe in standard electroweak theory" *Nucl. Phys. B* **287** 757 (1987)
112. Рубаков В А, Шапошников М Е "Электрослабое несохранение барионного числа в ранней Вселенной и в столкновениях частиц при высоких энергиях" *УФН* **166** 493 (1996); Rubakov V A, Shaposhnikov M E "Electroweak baryon number non-conservation in the early Universe and in high-energy collisions" *Phys. Usp.* **39** 461 (1996)
113. Morrissey D E, Ramsey-Musolf M J "Electroweak baryogenesis" *New J. Phys.* **14** 125003 (2012); arXiv:1206.2942
114. Констандин Т "Квантовая теория явлений переноса и электрослабый бариогенезис" *УФН* **183** 785 (2013); Konstantin T "Quantum transport and electroweak baryogenesis" *Phys. Usp.* **56** 747 (2013)
115. Киржниц Д А "Модель Вайнберга и "горячая" Вселенная" *Письма в ЖЭТФ* **15** 745 (1972); Kirzhnits D A "Weinberg model and the 'hot' universe" *JETP Lett.* **15** 529 (1972)
116. Kirzhnits D A, Linde A D "Macroscopic consequences of the Weinberg model" *Phys. Lett. B* **42** 471 (1972); Dolan L, Jackiw R "Symmetry behavior at finite temperature" *Phys. Rev. D* **9** 3320 (1974); Weinberg S "Gauge and global symmetries at high temperature" *Phys. Rev. D* **9** 3357 (1974)
117. Fukugita M, Yanagida T "Baryogenesis without grand unification" *Phys. Lett. B* **174** 45 (1986)
118. Buchmüller W, Peccei R D, Yanagida T "Leptogenesis as the origin of matter" *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **55** 311 (2005); hep-ph/0502169
119. Davidson S, Nardi E, Nir Y "Leptogenesis" *Phys. Rep.* **466** 105 (2008); arXiv:0802.2962
120. Akhmedov E Kh, Rubakov V A, Smirnov A Yu "Baryogenesis via neutrino oscillations" *Phys. Rev. Lett.* **81** 1359 (1998); arXiv:9803.255
121. Asaka T, Shaposhnikov M "The  $\nu$ MSM, dark matter and baryon asymmetry of the universe" *Phys. Lett. B* **620** 17 (2005); hep-ph/0505013; Asaka T, Blanchet S, Shaposhnikov M "The  $\nu$ MSM, dark matter and neutrino masses" *Phys. Lett. B* **631** 151 (2005); hep-ph/0503065; Canetti L, Drewes M, Frossard T, Shaposhnikov M "Dark matter, baryogenesis and neutrino oscillations from right handed neutrinos" *Phys. Rev. D* **87** 093006 (2013); arXiv:1208.4607
122. Canetta L, Drewes M, Shaposhnikov M "Matter and antimatter in the universe" *New J. Phys.* **14** 095012 (2012); arXiv:1204.4186
123. Abada A et al. "Low-scale leptogenesis with three heavy neutrinos" *J. High Energy Phys.* **2019** (01) 164 (2019); arXiv:1810.12463
124. Klarić J, Shaposhnikov M, Timiryasov I "Uniting low-scale leptogenesis", arXiv:2008.13771
125. McDonald J I, Shore G M "Dynamical evolution of gravitational leptogenesis" *J. High Energy Phys.* **2020** 25 (2020); arXiv:2006.09425
126. Maleknejad A "SU(2)<sub>R</sub> and its axion in cosmology: A common origin for inflation, cold sterile neutrinos, and baryogenesis", arXiv:2012.11516
127. Dolgov A D, Pozdnyakov N A "Baryogenesis through baryon capture by black holes", arXiv:2009.04361
128. Cline J M "TASI lectures on early universe cosmology: inflation, baryogenesis and dark matter", arXiv:1807.08749
129. Bödeker D, Buchmüller W "Baryogenesis from the weak scale to the grand unification scale", arXiv:2009.07294
130. Сахаров А Д "Многолистная модель Вселенной", Препринт № 7 (М.: ИПМ АН СССР, 1970)
131. Сахаров А Д "Космологические модели Вселенной с поворотом стрелы времени" *ЖЭТФ* **79** 689 (1980); Sakharov A D "Cosmological models of the Universe with reversal of time's arrow" *Sov. Phys. JETP* **52** 349 (1980)
132. Сахаров А Д "Многолистные модели Вселенной" *ЖЭТФ* **83** 1233 (1982); Sakharov A D "Many-sheeted models of the Universe" *Sov. Phys. JETP* **56** 705 (1982)
133. Buchbinder E I, Khoury J, Ovrut V A "New ekpyrotic cosmology" *Phys. Rev. D* **76** 123503 (2007); arXiv:0702.154
134. Lehnert J-L "Ekpyrotic and cyclic cosmology" *Phys. Rep.* **465** 223 (2008); arXiv:0806.1245
135. Novello M, Perez Bergliaffa S E "Bouncing cosmologies" *Phys. Rep.* **463** 127 (2008); arXiv:0802.1634

136. Barrie N D "Big bounce baryogenesis" *JCAP* **2020** (08) 008 (2020); arXiv:2001.04773
137. Qiu T et al. "Bouncing Galileon cosmologies" *JCAP* **2011** (10) 036 (2011); arXiv:1108.0593
138. Cai Y-F et al. "Two field matter bounce cosmology" *JCAP* **2013** (10) 024 (2013); arXiv:1305.5259
139. Рубаков В А "Изотропное условие энергодоминантности и его нарушение" *УФН* **184** 137 (2014); Rubakov V A "The Null Energy Condition and its violation" *Phys. Usp.* **57** 128 (2014); arXiv:1401.4024
140. Battefeld D, Peter P "A critical review of classical bouncing cosmologies" *Phys. Rep.* **571** 1 (2015); arXiv:1406.2790
141. Brandenberger R, Peter P "Bouncing cosmologies: progress and problems" *Found. Phys.* **47** 797 (2017); arXiv:1603.05834
142. Kobayashi T "Horndeski theory and beyond: a review" *Rep. Prog. Phys.* **82** 086901 (2019); arXiv:1901.07183
143. Глинер Э Б "Алгебраические свойства тензора энергии-импульса и вакуумо-подобное состояние вещества" *ЖЭТФ* **49** 542 (1965); Gliner É B "Algebraic properties of the energy-momentum tensor and vacuum-like states of matter" *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1965); Глинер Э Б *ДАН СССР* **192** 771 (1970); Gliner E B *Sov. Phys. Dokl.* **15** 559 (1970)
144. Altshuler B L "An alternative way to inflation and the possibility of anti-inflation" *Class. Quantum Grav.* **7** 189 (1990)
145. Libanov M, Mironov S, Rubakov V "Generalized Galileons: instabilities of bouncing and Genesis cosmologies and modified Genesis" *JCAP* **2016** (08) 037 (2016); arXiv:1605.05992
146. Kolevatov R, Mironov S, Sukhov N, Volkova V "Cosmological bounce and Genesis beyond Horndeski" *JCAP* **2017** (08) 038 (2017); arXiv:1705.06626
147. Cai Y, Piao Y-S "A covariant Lagrangian for stable nonsingular bounce" *J. High Energ. Phys.* **2017** (09) 027 (2017); arXiv:1705.03401
148. Volkova V E, Mironov S A, Rubakov V A "Cosmological scenarios with bounce and Genesis in Horndeski theory and beyond" *J. Exp. Theor. Phys.* **129** 553 (2019); arXiv:1906.12139
149. Mironov S, Rubakov V, Volkova V "Superluminality in beyond Horndeski theory with extra scalar field" *Phys. Scr.* **95** (T8) 084002 (2020); arXiv:2005.12626
150. Ijasa A, Steinhardt P J "A new kind of cyclic universe" *Phys. Lett. B* **795** 666 (2019); arXiv:1904.08022; "Bouncing cosmology made simple" *Class. Quantum Grav.* **35** 135004 (2018); arXiv:1803.01961; "Fully stable cosmological solutions with a non-singular classical bounce" *Phys. Lett. B* **764** 289 (2017); arXiv:1609.01253
151. Сахаров А Д "Космологические переходы с изменением сигнатуры метрики" *ЖЭТФ* **87** 375 (1984); Sakharov A D "Cosmological transitions with changes in the signature of the metric" *Sov. Phys. JETP* **60** 214 (1984)
152. Carter B "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology", in *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data: IAU Symp. No. 63 (Copernicus Symp. II), Cracow, Poland, 10–12 September, 1973* (Ed. M S Longair) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1974) pp. 291–298; Reprinted: *Gen. Relativ. Gravit.* **43** 3225 (2011); Пер. на русск. яз.: Картер Б "Совпадение больших чисел и антропологический принцип в космологии", в сб. *Космология: теории и наблюдения. Материалы симпозиума* (Пер. с англ. под ред. Я Б Зельдовича, И Д Новикова) (М.: Мир, 1978) с. 369
153. Barrow J D, Tipler F J *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Clarendon Press, 1986)
154. Linde A "Inflation, quantum cosmology and the anthropic principle", in *Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos, Honoring John Wheeler's 90th Birthday* (Eds J D Barrow, P C W Davies, C L Harper) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003); hep-th/0211048
155. Рубаков В А, Штерн Б Е "Антропный принцип", Троицкий вариант (262) с. 1–2 (2018)
156. Linde A "A brief history of the multiverse" *Rep. Prog. Phys.* **80** 022001 (2017); Linde A D, Zelnikov M I "Inflationary universe with fluctuating dimensions" *Phys. Lett. B* **215** 59 (1988)
157. Susskind L "The anthropic landscape of string theory", hep-th/0302219
158. Weinberg S "Living in the multiverse", in *Symp. Expectations of a Final Theory, Trinity College, Cambridge, September 2, 2005*, opening talk; in *Universe or Multiverse?* (Ed. B Carr) (Cambridge, MA: Cambridge Univ. Press, 2007); hep-th/0511037; "Anthropic bound on the cosmological constant" *Phys. Rev. Lett.* **59** 2607 (1987)
159. Ehrenfest P *Proc. R. Amsterdam Acad.* **20** 200 (1917)
160. Альтшулер Б Л, Барвинский А О "Квантовая космология и физика переходов с изменением сигнатуры пространства-времени" *УФН* **166** 459 (1996); Al'tshuler B L, Barvinskii A O "Quantum cosmology and physics of transitions with a change of the spacetime signature" *Phys. Usp.* **39** 429 (1996)
161. Green M B, Schwarz J H, Witten E *Superstring Theory* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987); Пер. на русск. яз.: Грин М, Шварц Дж, Витген Э *Теория суперструн* (М.: Мир, 1990)
162. Альтшулер Б Л "О научных трудах А.Д. Сахарова" *УФН* **161** (5) 3 (1991); Al'tshuler B L *Phys. Usp.* **34** 362 (1991)
163. Fradkin E S, Tseytlin A A "Conformal supergravity" *Phys. Rep.* **119** 233 (1985)

## Andrei Sakharov's research work and modern physics

### B.L. Altshuler

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,  
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation  
E-mail: baltshuler@yandex.ru, altshul@lpi.ru*

We follow the work carried out by Andrei Sakharov in both research and engineering, from the first domestic thermonuclear charges to fundamental physics. We emphasize the current status of the research fields recognized to have originated in Sakharov's work: controlled fusion, magnetic cumulation and magnetic explosion generators, induced gravity, cosmological "Sakharov" (baryonic acoustic) oscillations, and baryon asymmetry of the Universe. Another subject that unexpectedly gained momentum in the 21st century is the model of a pulsating universe, which was among Sakharov's ideas. Other subjects that were dear to him, such as quantum cosmology and the anthropic principle, are also currently at the forefront of science.

**Keywords:** Andrei Sakharov, atomic bomb, hydrogen bomb, controlled fusion, magnetic cumulation, magnetic explosion generators, induced gravity, Sakharov oscillations, baryon asymmetry of the Universe.

PACS numbers: **01.65. + g, 04.50. – h, 52.55. – s, 98.80. – k**

Bibliography — 163 references

*Received 5 January 2021, revised 22 February 2021*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **191** (5) 449–474 (2021)

*Physics – Uspekhi* **64** (5) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.02.038946>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.02.038946>