

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Из истории физики

*Научная сессия Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук, 17 декабря 2012 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305e.0511

17 декабря 2012 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН [www.gpad.ac.ru](http://www.gpad.ac.ru) повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Дианов Е.М.** (Научный центр волоконной оптики РАН, Москва). *На пороге пета-эры*.

2. **Забродский А.Г.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Вклад учёных в Великую Победу на примере ЛФТИ*.

3. **Илькаев Р.И.** (Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров). *История отечественного Атомного проекта*.

4. **Черепашук А.М.** (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *История истории Астрономии*.

Статьи, написанные на основе докладов, публикуются ниже.

ния, как правило, использовались прежде всего для создания средств связи. Приведём примеры наиболее ярких достижений в истории создания средств связи.

В 1794 г. братьями Шапп был построен оптический телеграф между Парижем и Лиллем (225 км), состоящий из цепочки башен, которые отстояли друг от друга на расстояние прямой видимости. Визуальная передача сообщений осуществлялась последовательно от башни к башне посредством семафорной азбуки. Самая длинная в мире линия оптического телеграфа действовала между Петербургом и Варшавой (1200 км), передаваемый сигнал проходил по ней за 15 мин.

В 1837 г. американский художник и предприниматель Самюэль Морзе изобрёл электромагнитный телеграфный аппарат и код (азбука Морзе). В 1844 г. была построена первая коммерческая телеграфная линия Вашингтон — Балтимор. Изобретение гуттаперчи было использовано для изоляции электрических проводов, что позволило в 1851 г. проложить через Ла-Манш подводную телеграфную линию между Англией и Францией.

В 1857 г. началась прокладка телеграфного кабеля между Европой и Америкой по дну Атлантического океана. Эта первая прокладка кабеля по дну океана встретила огромные технические трудности, которые удалось преодолеть лишь с нескольких попыток. Это событие мирового значения ярко описано Стефаном Цвейгом в новелле "Первое слово из-за океана". Самая длинная в мире телеграфная линия Москва — Владивосток, протяжённостью около 12 тыс. километров, была открыта в 1871 г.

В 1876 г. Александр Белл изобрёл телефон, и уже в 1880 г. в США использовалось 48000 телефонных аппаратов. В 1880 г. А. Белл изобрёл оптический телефон (фотофон Белла) и осуществил передачу речевого сигнала через свободную атмосферу на 200 м, используя в качестве несущего излучения солнечный свет.

Открытие Герцем в 1888 г. электромагнитных волн и создание искрового передатчика радиоволн создали основу для развития радиосвязи. В 1895 г. Попов, а в 1896 г. Маркони продемонстрировали возможность передачи сигналов с помощью радиоволн. В 1901 г. Маркони осуществил радиотелеграфную передачу через Атлантический океан. В 1909 г. Г. Маркони и Ф. Брауну была присуждена Нобелевская премия по физике за вклад в развитие беспроволочной телеграфии.

### На пороге пета-эры

Е.М. Дианов

#### 1. Введение

История развития человеческого общества — это и история развития средств связи и передачи информации. И если на ранних этапах развития общества использовались такие простые средства, как дымовые костры, гонцы, почта, то по мере его развития совершенствовались и средства связи. Наиболее эффективные средства связи стали появляться в связи с интенсивным развитием науки и техники в XIX в., но всегда потребности в обмене информацией превышали технические возможности. Поэтому научные и технические достиже-

Е.М. Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, РФ  
E-mail: dianov@fo.gpi.ru

XX в. характеризуется бурным развитием радиосвязи. Возникла спутниковая радиосвязь (1965 г.). Специалистам было ясно, что при передаче информации с помощью несущего излучения скорость передачи информации пропорциональна частоте несущего излучения. Потому развитие радиосвязи шло по пути уменьшения длины волны несущего излучения (увеличения частоты), что позволяло передавать всё большие объёмы информации. Несмотря на высокий уровень развития радиосвязи в передовых странах мира, в том числе в Советском Союзе, растущая потребность развитых стран в информации привела к осознанию необходимости перехода к оптическому излучению, что обещало увеличение скорости передачи информации в  $10^4 - 10^5$  раз по сравнению с таковой при радиосвязи. Сегодняшнее состояние волоконно-оптической связи полностью подтвердило эти ожидания.

В завершение этого раздела, посвящённого истории развития средств связи, хотелось бы подчеркнуть, что Россия и Советский Союз были среди лидеров в развитии упомянутых средств связи.

Далее я вначале коротко остановлюсь на важнейших этапах развития и на сегодняшнем состоянии волоконно-оптической связи, затем коснусь механизмов, ограничивающих скорость передачи информации по волоконному световоду в современных волоконно-оптических системах связи, обсуджу различные пути преодоления этих ограничений и представлю недавние результаты соответствующих исследований и прогноз развития волоконно-оптической связи на ближайшие 10 лет.

## 2. История развития волоконно-оптической связи

Рассмотрение истории развития волоконно-оптической связи целесообразно начать с упомянутых во введении экспериментов А. Белла по передаче речевой информации через свободную атмосферу с помощью солнечного света (фотофон Белла) (рис. 1). Результаты этих экспериментов показали и основные трудности применения оптического излучения для передачи информации, преодоление которых позволило создать эффективные волоконно-оптические системы связи. Используя схему фотофона, представленную на рис. 1, А. Беллу удалось передать речевой сигнал на 200 м. Несмотря на успешный результат этих экспериментов, Беллу не удалось разработать

этот успех — и ясно почему: Солнце не является подходящим источником оптического излучения для передачи информации, а свободная атмосфера — подходящей передающей средой. А других, более подходящих, источников света и передающих сред тогда не было. Именно поэтому никаких серьёзных попыток использовать оптическое излучение для передачи информации не предпринималось в течение последующих 80 лет, до тех пор пока не появились первые лазеры.

Создание лазеров и их широкое развитие привело к появлению ряда новых направлений науки и техники, в том числе современной волоконной оптики и оптической связи. Решающую роль в создании лазеров сыграли американские и советские учёные. В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Н.Г. Басову, А.М. Прохорову и Ч.Х. Таунсу за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на лазерно-мазерном принципе.

Лазеры представляли собой идеальный источник света для передачи информации, обеспечивающий высокую направленность излучения большой мощности. А монохроматичность лазерного излучения позволяла использовать для передачи информации идеи и методы, используемые в радиосвязи. Поэтому одними из первых экспериментов с лазерами стали эксперименты по передаче информации через свободную атмосферу.

Эти эксперименты проводились в ряде стран (в том числе в СССР), но результат был один и тот же: свободная атмосфера, прежде всего вследствие изменчивости метеорологических условий, не является подходящей передающей средой для надёжной передачи информации на значительные расстояния. Другой передающей среды тогда не было — стеклянные волоконные световоды, которые имели высокие оптические потери, порядка  $1000 \text{ dB km}^{-1}$  (свет ослаблялся вдвое на расстоянии 1 м), не могли быть использованы для передачи информации на сколько-нибудь значительные расстояния. И казалось, что блестящая идея создания высокоскоростных систем оптической связи, сильно востребованных современным обществом, не может быть реализована. Но, как часто бывает в истории, если перед обществом стоит очень важная, но трудноразрешимая проблема, то всегда находится человек (или несколько человек), который находит решение проблемы. В данном случае таким человеком оказался Чарльз Као, китаец, работавший в Англии в Стандартной телекоммуникационной лаборатории (рис. 2). В 1966 г. он опубликовал статью [1], в которой проанализировал механизмы оптических потерь в стёклах и показал, что эти потери в основном обусловлены примесями, прежде всего, переходных металлов: Fe, Cu, Ni, и др. При очистке стекла от этих примесей можно получить потери менее  $20 \text{ dB km}^{-1}$ , причём эта величина намного превышает нижний предел оптических потерь, обусловленный фундаментальными механизмами.

На основе теоретических и экспериментальных исследований Као заключил, что волоконная структура с диаметром сердцевины порядка длины волны  $\lambda_0$  и полным диаметром  $\sim 100 \lambda_0$  может представлять собой оптический волновод, пригодный в качестве передающей среды для систем связи. По оценкам Као, если разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляет примерно 1 %, то такой волновод является

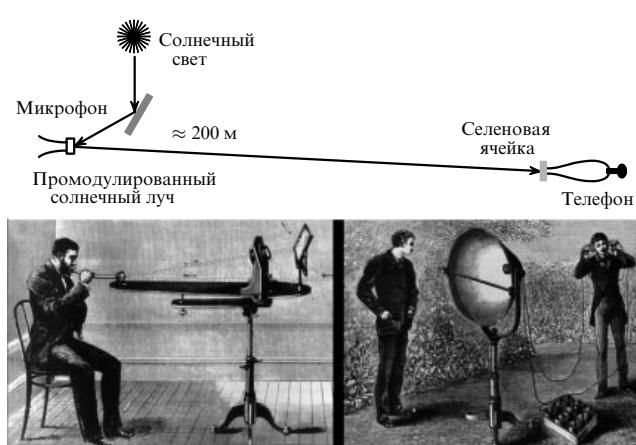


Рис. 1. Фотофон А. Белла.

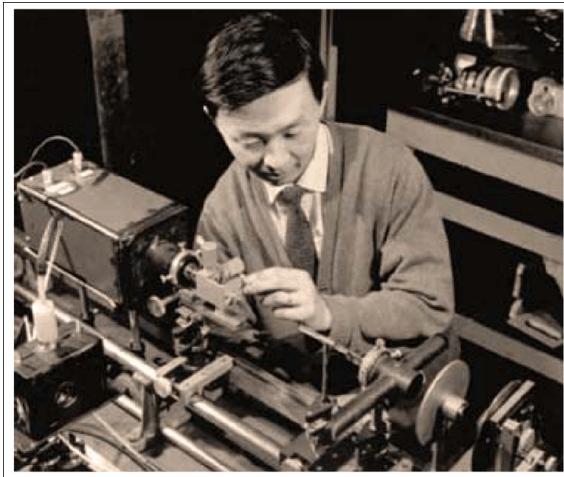


Рис. 2. Ч. Као, делающий оптические измерения.

одномодовым и может передавать информацию со скоростью более  $1 \text{ Гбит с}^{-1}$ . Далее Као подчеркнул, что успешная реализация такого оптического волновода зависит от наличия подходящего диэлектрического материала с низкими оптическими потерями, причём создание такого материала является задачей трудной, но не невозможной.

Идеи Ч. Као, высказанные в 1966 г., были реализованы в 1970 г., когда фирма "Корнинг Гласс" впервые изготовила стеклянные волоконные световоды с оптическими потерями  $17 \text{ дБ км}^{-1}$  на волне  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ .

В 2009 г. Ч. Као присуждена Нобелевская премия по физике за выдающийся вклад в исследование волоконных световодов для оптической связи.

Снижение оптических потерь волоконных световодов от  $\sim 1000 \text{ дБ км}^{-1}$  до  $\sim 20 \text{ дБ км}^{-1}$ казалось чрезвычайно трудной задачей. Однако в фирме "Корнинг Гласс" ещё в 1930-е годы была создана технологическая база для решения этой проблемы [2]. Научный сотрудник фирмы Франк Хайд (Frank Hyde) провёл исследования по получению чистого порошка кварцевого стекла при прохождении паров тетрахлорида кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) через пламя кислородно-водородной горелки (патент США в 1934 г.). Позднее было синтезировано кварцевое стекло, легированное титаном, при использовании в качестве исходного материала тетрахлоридов кремния и титана. Это стекло имело близкий к нулю коэффициент термического расширения. Преимуществом использования тетрахлоридов кремния и титана является возможность глубокой очистки этих летучих соединений. В 1950-е годы возникла потребность в больших пластинах чистого кварцевого стекла для ряда применений, в том числе для изготовления больших зеркал (диаметром  $\geq 1,5 \text{ м}$ ) для нового поколения высокоточных астрономических телескопов. Таким образом, к началу работ по созданию стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями в 1967 г. фирма "Корнинг Гласс" имела как технологию изготовления, так и образцы высокочистого кварцевого стекла. Однако первые попытки изготовить стеклянные волоконные световоды с низкими оптическими потерями методом штабик – трубка не дали результата из-за высоких оптических потерь, обусловленных рассеянием света на границе штабик – трубка. Только осаждение порошка кварцевого стекла, легированного титаном,

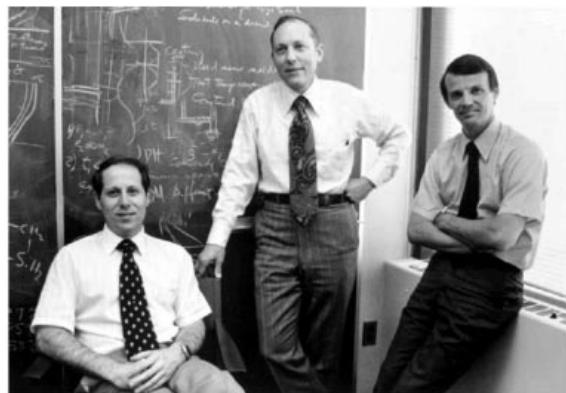


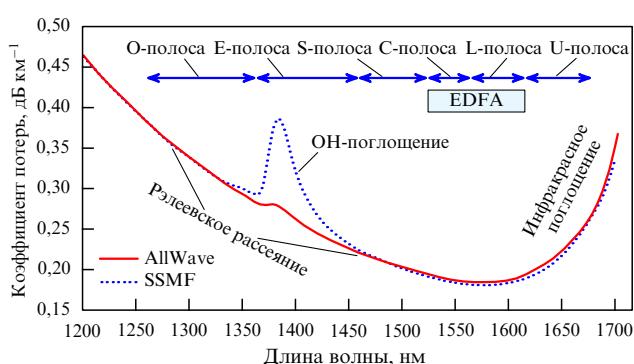
Рис. 3. Слева направо: Дональд Кек, Роберт Маурер, Питер Шульц.

на внутреннюю поверхность трубки из кварцевого стекла с последующими проплавлением пористого слоя, схлопыванием трубки в сплошной стержень (заготовку) и вытяжкой из неё волоконного световода привели к успеху — в 1970 г. были изготовлены волоконные световоды с оптическими потерями  $17 \text{ дБ км}^{-1}$  на волне  $0,63 \text{ мкм}$ . В 1972 г. были изготовлены волоконные световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного германием, с оптическими потерями  $4 \text{ дБ км}^{-1}$ . Героями этого выдающегося достижения в оптике были сотрудники "Корнинг Гласс" Роберт Маурер (Robert Maurer), Дональд Кек (Donald Keck) и Питер Шульц (Peter Schultz) (рис. 3).

В том же 1970 г. в СССР (лаборатория Ж.И. Алфёрова) и США была получена непрерывная генерация полупроводникового лазера на основе двойной гетероструктуры GaAlAs при комнатной температуре. В 2000 г. Ж.И. Алфёрову и Г. Крёмеру (Herbert Krömer) присуждена Нобелевская премия по физике "за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной электронике и оптоэлектронике". Эти два достижения создали надёжную основу для успешного развития волоконно-оптической связи и инициировали интенсивные фундаментальные исследования во многих странах, в том числе в СССР, по технологии волоконных световодов и их свойствам, совершенствованию элементной базы и созданию волоконно-оптических систем связи.

Что касается фундаментальных исследований волоконных световодов на основе кварцевого стекла, то наибольший интерес представляли характеристики волоконных световодов, важные для практического применения в системах связи: оптические потери, дисперсия, механическая прочность. Большой интерес представляло исследование нелинейных оптических явлений в волоконных световодах, которые могли возникать при передаче оптической информации по волоконному световоду и играть негативную роль. Отметим лишь наиболее важные результаты этих исследований, которые хорошо известны и опубликованы во многих обзорных статьях и книгах по волоконной оптике (см., например, подборку обзорных статей по различным применением волоконной оптики [3]).

Было обнаружено, что минимальные оптические потери волоконных световодов на основе кварцевого стекла соответствуют длинноволновой части ближней инфракрасной (ИК) области спектра (длинам волн  $\lambda > 1 \text{ мкм}$ ). При этом



**Рис. 4.** Спектр оптических потерь волоконных световодов [4]. О, Е, С, С, Л, У — обозначения спектральных полос, используемые в литературе. EDFA — полоса усиления эрбийового волоконного усилителя. AllWave и SSMF (Standard Single Mode Fiber) — типы волоконных световодов.

оптические потери менее  $0,35 \text{ дБ км}^{-1}$  соответствуют спектральной области  $\lambda = 1,3 - 1,7 \text{ мкм}$ , а абсолютного минимума, менее  $0,2 \text{ дБ км}^{-1}$ , они достигают при длине волны около  $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$  (рис. 4). Было также обнаружено, что материальная дисперсия кварцевого стекла близка к нулю при  $\lambda \approx 1,31 \text{ мкм}$ . Исследование механизмов деградации механической прочности волоконных световодов и совершенствование технологии позволили получить волоконные световоды большой длины (порядка 10 км) с механической прочностью на растяжение около 5 ГПа (для световодов диаметром 125 мкм). В работе [5] впервые продемонстрировано, что герметичное металлическое покрытие волоконных световодов позволяет увеличить механическую прочность на растяжение вдвое.

Широкие фундаментальные исследования нелинейных оптических явлений в волоконных световодах показали, что в волоконных световодах, несмотря на низкую нелинейность кварцевого стекла, наблюдаются не только практически все известные нелинейные явления в твёрдом теле, но и ряд новых. Это объясняется большой длиной волоконного световода при низких оптических потерях (т.е. большой длиной взаимодействия) и малыми поперечными размерами сердцевины световода (т.е. высокой плотностью мощности излучения), что резко снижает пороги возникновения нелинейных явлений. Нелинейные явления в волоконных световодах могут играть отрицательную роль в волоконно-оптических системах связи. Так, нелинейные явления, приводящие к преобразованию излучения с основной длиной волны в излучение с другими длинами волн, могут вызывать перекрёстные помехи в случае систем со спектральным уплотнением каналов. Однако было показано, что нелинейные явления могут найти полезное применение в системах связи. Например, усиление сигнала за счёт вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) может эффективно использоваться для компенсации потерь излучения в линиях связи, при этом волоконный световод, по которому передаётся информация, одновременно служит усиливающей средой с широкой полосой усиления.

Здесь уместно отметить, что по инициативе А.М. Прокорова в 1973 г. в Советском Союзе были начаты работы по изготовлению волоконных световодов с низкими

оптическими потерями на основе кварцевого стекла. В качестве исходных соединений использовались высокочистые летучие соединения кремния, германия, бора, разработанные ранее под руководством Г.Г. Девятых.

Уже в начале 1975 г. были получены образцы волоконных световодов с низкими оптическими потерями [6] и начаты фундаментальные исследования этих световодов. Советскими учёными внесён существенный вклад в упомянутые выше результаты фундаментальных исследований. Обзор этих результатов, полученных в 1975–1985 гг., опубликован в обзорной статье [7]. Подробный обзор нелинейных явлений в волоконных световодах содержится в статьях [8, 9].

Приведённые выше результаты фундаментальных исследований волоконных световодов показали перспективность использования спектральной области  $1,0 - 1,6 \text{ мкм}$  для передачи информации [10] и инициировали разработку нескольких поколений волоконно-оптических систем связи и их элементной базы.

Отметим лишь наиболее важные результаты этих разработок. В 1980 г. были введены в строй первые коммерческие волоконно-оптические системы связи со скромной скоростью передачи информации,  $45 \text{ Мбит с}^{-1}$  на длине волны  $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$ . Выбор длины волны несущего излучения определялся наличием соответствующих полупроводниковых лазеров и кремниевых фотодетекторов. В качестве передающей среды в этих системах использовался многомодовый волоконный световод, межмодовая дисперсия которого ограничивала скорость передачи информации.

Для следующего поколения волоконно-оптических систем связи планировалось использовать для передачи информации спектральную область вблизи  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$ , где материальная дисперсия кварцевого стекла близка к нулю. Это обеспечивало возможность передачи больших потоков информации по одномодовому волоконному световоду, в котором отсутствует межмодовая дисперсия.

Поэтому большие усилия были направлены на разработку элементной базы (прежде всего, одномодовых волоконных световодов, полупроводниковых лазеров и фотодетекторов) и создание волоконно-оптических систем связи, работающих в этой спектральной области. Здесь следует отметить первые работы японских и советских исследователей по созданию лабораторных волоконно-оптических систем связи, работающих на длине волны  $\lambda \approx 1,3 \text{ мкм}$  [11, 12]. В 1988 г. по дну Атлантического океана была проложена первая волоконно-оптическая система связи, соединившая Европу и Америку. Система позволяла передавать информацию по одномодовому волоконному световоду на длине волны  $\lambda = 1,31 \text{ мкм}$  со скоростью  $280 \text{ Мбит с}^{-1}$  и использовала ОЭО-регенераторы с преобразованием оптического сигнала в электрический и снова в оптический. Использование ОЭО-регенератора ограничивало скорость передачи информации, поэтому стала задача создания волоконного оптического усилителя сигнала. Интенсивные исследования в этой области привели к разработке двух перспективных волоконных оптических усилителей: эрбийового волоконного усилителя (Erbium Doped Fiber Amplifier — EDFA) [13] и ВКР-волоконного усилителя [14, 15]. Преимущество эрбийового волоконного усилителя состояло в высокой эффективности и совпадении спектральной полосы усиления с областью низких опти-

ческих потерь волоконных световодов (см. рис. 4). Это привело к созданию нового поколения волоконно-оптических систем связи, работающих на длине волн около 1,5 мкм, с оптическим ретранслятором сигнала на основе EDFA. Недостатком эрбиевого волоконного усилителя является узкая полоса усиления, максимум 80 нм (1530–1610 нм), что ограничивает скорость передачи информации современных волоконно-оптических систем.

Преимуществом ВКР-волоконного усилителя является возможность получения значительно более широкой полосы усиления на любой длине волны. Недостаток — невысокая эффективность этого усилителя. Несмотря на это, ВКР-волоконный усилитель используется в коммерческих волоконно-оптических системах связи.

Следующим ярким результатом в разработке высокоскоростных волоконно-оптических систем явилось использование спектрального уплотнения каналов, что позволило увеличить скорость передачи информации по волоконному световоду до терабитного уровня [16]. Советскими учёными внесён существенный вклад на начальном этапе развития техники спектрального уплотнения каналов (см., например, обзорную статью [17] и ссылки в ней).

В завершение этого раздела, посвящённого краткой истории развития волоконно-оптических систем связи — от первых коммерческих систем со скоростью передачи информации 45 Мбит  $\text{с}^{-1}$  до терабитных систем, хотелось бы подчеркнуть исключительную роль параметров передающей среды (волоконного световода) в этом развитии. Каждому этапу соответствовал волоконный световод с определёнными параметрами (многомодовый, многомодовый с градиентным профилем показателя преломления, одномодовый с нулевой материальной дисперсией, одномодовый с минимальными оптическими потерями и возможностью оптического усиления сигналов и т.д.).

### 3. Состояние дел и перспективы дальнейшего роста скорости передачи информации по волоконному световоду

В настоящее время в коммерческих волоконно-оптических системах информация может передаваться со скоростью до 10 Тбит  $\text{с}^{-1}$ , в экспериментальных — со скоростью порядка 100 Тбит  $\text{с}^{-1}$ . В мире к 2010 г. в системах связи было проложено 1 млрд км волоконных световодов; по оценкам, это число удвоится к 2015 г.

Число пользователей Интернета в 2015 г. достигнет, согласно оценкам, 5 млрд.

Потребность развитых стран в информации возрастает на 30–40 % в год. Это означает, что через 20 лет, если сохранится такой рост потребности в информации, необходимо будет передавать информацию по волоконному световоду со скоростью порядка 100 Пбит  $\text{с}^{-1}$ . По одномодовым волоконным световодам передавать информацию с такой скоростью невозможно из-за ряда ограничений.

При передаче информации с высокой скоростью, другими словами, с широкой спектральной полосой на большие расстояния критическими являются ряд параметров передающей среды, таких как дисперсия, нелинейность, оптические потери. В экспериментах 1960-х годов по передаче информации через свободную атмосферу с помощью лазерного излучения было обнаружено, что свободная атмосфера не является подходящей передающей средой, прежде всего, из-за пространственной и временной нестабильности таких параметров, как оптические потери и плотность атмосферы. Стеклянные волоконные световоды являются идеальной передающей средой до определённых, достаточно высоких, скоростей передачи информации, порядка ста Тбит  $\text{с}^{-1}$ . Однако дальнейшее увеличение скорости передачи информации ограничивают нелинейность, дисперсия и оптические потери волоконных световодов. В то же время эти параметры воздушной атмосферы как таковой по крайней мере на порядок меньше, чем в стеклянных волоконных световодах. Но воздушная атмосфера не должна быть свободной, чтобы её параметры оставались стабильными. Поэтому возникла идея сделать волоконные световоды с воздушной сердцевиной, изолированной от внешних воздействий. Стеклянная оболочка в виде фотонного кристалла обеспечивает в этом случае механизм распространения света по воздушной сердцевине. Такие световоды были созданы и их характеристики подробно исследованы (см., например, работу [18] и приведённые там ссылки). На рисунке 5 показаны структура такого волоконного световода с воздушной сердцевиной и спектр оптических потерь. В настоящее время минимальные оптические потери составляют величину 1,2 дБ  $\text{км}^{-1}$ , которая значительно превышает минимальные оптические потери стеклянных волоконных световодов (< 0,2 дБ  $\text{км}^{-1}$  на длине волны 1,5 мкм). Достаточно высокие оптические потери волоконных

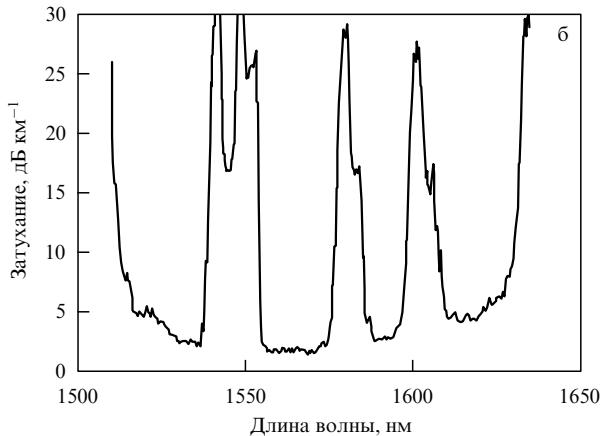
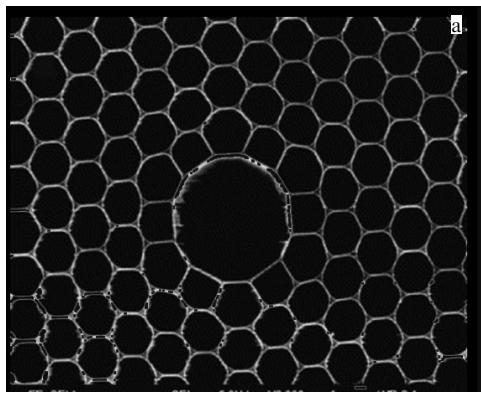
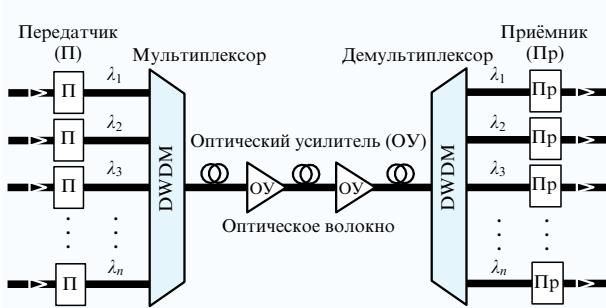


Рис. 5. (а) Поперечное сечение волоконного световода с воздушной сердцевиной. (б) Спектр оптических потерь этого световода [19].



**Рис. 6.** Схема спектрального уплотнения каналов DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — плотное спектральное мультиплексирование.

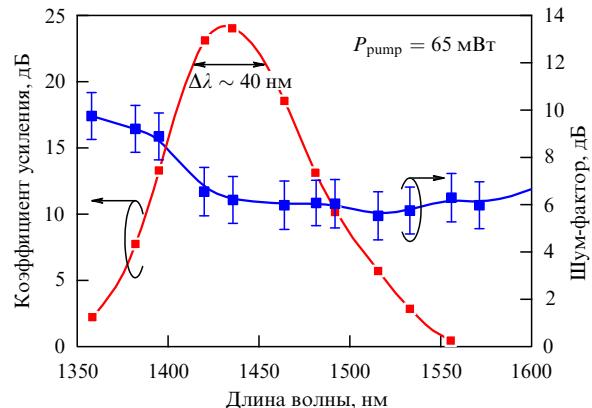
световодов с воздушной сердцевиной объясняются рассеянием света на шероховатостях стекла, обусловленных замороженными поверхностными капиллярными волнами [18].

Решение проблемы снижения оптических потерь таких световодов требует проведения дальнейших фундаментальных исследований, а пока специалисты и учёные ищут другие пути увеличения скорости передачи информации по волоконному световоду.

В настоящее время исследован ряд путей преодоления вышеуказанных ограничений в волоконно-оптических системах со спектральным уплотнением каналов, в которых на сегодняшний день достигнута максимальная скорость передачи информации (рис. 6). В таких системах по одномодовому волоконному световоду распространяются порядка 100 независимых каналов с различными длинами волн несущего излучения, но в пределах полосы усиления оптического усилителя.

Полная скорость передачи информации  $B = nb$ , где  $b$  — скорость передачи одного спектрального канала, а  $n$  — число спектральных каналов. Если скорость передачи информации одного спектрального канала равняется  $10 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$ , а число каналов  $n = 100$ , то полная скорость передачи информации по одному волоконному световоду составит  $1 \text{ Тбит } \text{с}^{-1}$ . Одним из путей повышения скорости передачи информации является увеличение числа спектральных каналов, но для этого необходимо расширить спектральную область для передачи информации. Как видно из рис. 4, спектральная область, в которой оптические потери составляют менее  $0,35 \text{ дБ } \text{км}^{-1}$ , имеет величину  $400 \text{ нм}$  ( $1300$ – $1700 \text{ нм}$ ), но для этой спектральной области отсутствуют оптические усилители. Поэтому создание волоконных оптических усилителей для этой спектральной области является приоритетной задачей.

В 2005 г. Научный центр волоконной оптики РАН совместно с Институтом химии высокочистых веществ РАН впервые в мире разработали технологию изготовления легированных висмутом волоконных световодов, спектр люминесценции которых перекрывает указанную спектральную область [20]. В том же году впервые был продемонстрирован висмутовый волоконный лазер с непрерывной генерацией в спектральной области  $1150$ – $1300 \text{ нм}$  [21], а позднее было создано семейство висмутовых волоконных лазеров, генерирующих в спектральной области  $1150$ – $1550 \text{ нм}$  [22]. Использование волоконного световода, легированного висмутом, — новой



**Рис. 7.** Спектр усиления висмутового волоконного усилителя.

перспективной активной среды [23, 24] — позволило сделать первый шаг в создании эффективных волоконных усилителей для спектральной области  $1300$ – $1500 \text{ нм}$ . Впервые для спектральной области  $1425$ – $1465 \text{ нм}$  были разработан висмутовый волоконный усилитель с максимальным коэффициентом усиления  $25 \text{ дБ}$  при накачке излучением лазерного диода мощностью  $65 \text{ мВт}$  на длине волны  $1310 \text{ нм}$  (рис. 7) [25].

Другой путь увеличения скорости передачи информации по волоконному световоду — это повышение скорости передачи информации спектрального канала  $b$ . В настоящее время в соответствии с принятыми стандартами  $b = 40 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$ , но в экспериментах уже получены значения  $b = 100 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$  за счёт многоуровневой модуляции несущего излучения [26] и продолжаются интенсивные исследования по созданию так называемых суперканалов со значениями  $b = 400 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$  и выше.

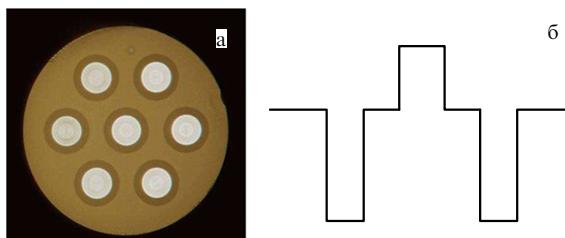
Ещё одним способом увеличения скорости передачи информации, привлекшим в последние годы большое внимание, является пространственное уплотнение каналов путём создания многосердцевинных волоконных световодов и маломодовых волоконных световодов, в котором каждая мода является носителем независимых каналов.

Ниже будут приведены доложенные на Европейской конференции по оптической связи в 2012 г. новые результаты по созданию суперканалов и разработке многосердцевинных и маломодовых волоконных световодов, соответствующих оптических волоконных усилителей, а также наиболее интересные результаты по передаче информации с пространственным уплотнением каналов.

В работах [27, 28] сообщается о генерации суперканалов со скоростью передачи информации  $512 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$  и  $1,5 \text{ Тбит } \text{с}^{-1}$  и передача этих каналов на расстояние  $2400 \text{ км}$  и  $56 \times 100 \text{ км}$  соответственно. В работе [29] осуществлена передача восьми суперканалов (со скоростью  $603 \text{ Гбит } \text{с}^{-1}$ ) по каждой сердцевине семисердцевинного волоконного световода на расстояние более  $845 \text{ км}$ .

В настоящее время разработан и исследован ряд многосердцевинных волоконных световодов, включая семисердцевинные, двенадцатисердцевинные, девятнадцатисердцевинные.

Технические требования к многосердцевинным волоконным световодам включают в себя наличие низких оптических потерь всех сердцевин, низких перекрёстных



**Рис. 8.** (а) Типичная структура семисердцевинного волоконного световода. (б) Профиль показателя преломления сердцевин многосердцевинного световода.

помех между соседними сердцевинами и не слишком большого диаметра таких световодов (диаметр оболочки  $\leq 200$  мкм). На рисунке 8а показана типичная структура семисердцевинного световода. Величина перекрёстных помех зависит от расстояния между соседними сердцевинами. Кроме того, выбором специального профиля показателя преломления (например, как на рис. 8б) можно существенно уменьшить перекрытие оптических полей в соседних сердцевинах, что естественно уменьшает перекрёстные помехи. В работе [30] описывается семисердцевинный волоконный световод с диаметром оболочки 186 мкм и расстоянием между соседними сердцевинами 55 мкм. Профиль показателя преломления сердцевины аналогичен профилю, показанному на рис. 8б. Измеренные перекрёстные помехи между соседними сердцевинами этого световода составляют  $-40$  дБ после прохождения расстояния 100 км.

Разработка передающей среды в виде многосердцевинного волоконного световода для передачи информации на большие расстояния ( $\geq 100$  км) требует в свою очередь разработки многосердцевинных волоконных оптических усилителей. В работе [31] представлены параметры разработанного семисердцевинного эрбиевого волоконного усилителя. Диаметр световода 180 мкм, расстояние между сердцевинами, легированными эрбием, 45 мкм, длина световода 16 м. Получены усиление более 15 дБ при накачке с мощностью 40 мВт, шум-фактор менее 7 дБ, перекрёстные помехи менее  $-40$  дБ.

В работе [32] представлены результаты первой демонстрации передачи сигналов с пространственным уплотнением каналов (семисердцевинный волоконный световод) и с семисердцевинным эрбиевым усилителем на расстояние 6160 км со скоростью передачи информации  $35,8$  Тбит  $s^{-1}$ . При этом в каждую сердцевину семисердцевинного волоконного световода вводились 40 спектральных каналов со скоростью передачи информации каждого канала 128 Гбит  $s^{-1}$ .

Большой интерес представляет создание шестимодового эрбиевого волоконного усилителя, описанного в работе [33]. Проблема создания такого усилителя заключается в обеспечении одинакового усиления сигналов, переносимых различными модами. В работе описывается усилитель шести мод: LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub> (две вырожденные моды), LP<sub>21</sub> (две вырожденные моды) и LP<sub>02</sub>, которые имеют различное распределение мощности по сечению волоконного световода. Для получения одинакового усиления сигналов, переносимых различными модами, необходимо соответствующее распределение мощности накачки по сечению активного световода.

Авторам пока не удалось полностью решить эту проблему — разница между коэффициентами усиления сигналов для разных мод составляет до 3–4 дБ.

В работе [34] осуществлена передача информации по трёхмодовому волоконному световоду с использованием трёхмодового эрбиевого оптического усилителя на расстояние 119 км со скоростью  $73,7$  Тбит  $s^{-1}$ . При этом в каждую моду вводилось 96 спектральных каналов со скоростью передачи информации каждого канала 256 Гбит  $s^{-1}$ .

И наконец, наиболее замечательным результатом, доложенным на этой конференции, является передача информации по двенадцатисердцевинному световоду со скоростью 1,01 Пбит  $s^{-1}$  на расстояние 52 км [35]. В этом эксперименте в каждую из 12 сердцевин вводились 222 спектральных канала, каждый со скоростью передачи информации 456 Гбит  $s^{-1}$ . Несущее излучение 222 спектральных каналов занимало спектральные области С и L (1526,44–1565,09 нм и 1567,95–1620,06 нм), при этом частоты несущего излучения соседних каналов отстояли на 50 ГГц.

Представленные результаты показывают перспективность использования пространственного уплотнения каналов для увеличения информационной ёмкости волоконных световодов до петабитного уровня.

К сожалению, Россия не может похвастаться подобными результатами. Несмотря на высокий уровень фундаментальных исследований в области волоконной оптики в институтах Российской академии наук, развитие современных волоконно-оптических средств связи и передачи информации не является в настоящее время в России приоритетной государственной задачей.

#### 4. Заключение

Два выдающихся прорыва в оптике — создание лазеров и разработка стеклянных волоконных световодов с предельно низкими оптическими потерями — обеспечили колоссальный прорыв в разработках средств связи и передачи информации — создание ранее недостижимых высокоскоростных (терабитных) волоконно-оптических систем.

Уровень развития современного общества определяется возможностью использования неограниченно больших потоков информации, и это отражается в настоящее время в росте потребности развитых стран в информации на 30–40 % в год. Современные терабитные волоконно-оптические сети связи и передачи информации превратились в своеобразную нервную систему развитого общества, которая, по аналогии с нервной системой человека, регулирует работу всех органов государства.

Указанный рост потребности в информации означает, что уже в ближайшие 5–10 лет будут необходимы волоконно-оптические системы со скоростью передачи информации по одному волоконному световоду 1–10 Пбит  $s^{-1}$ .

Результаты соответствующих исследований, выполненных в последние годы, приведённые в данной статье, показывают реальность решения этой проблемы.

Разработка петабитных систем передачи информации и создание петафлопных суперкомпьютеров означает, что в сфере обработки и передачи информации человечество находится на пороге пета-эры.

## Список литературы

1. Kao K C, Hockham G A *Proc. IEE* **133** 1151 (1966); republished, *IEE Proc. J. Optoelectron.* **133** (3) 191 (1986)
2. Schultz P C *Opt. Photon. News* **21** (10) 30 (2010)
3. Alferness R et al. *J. Lightwave Technol.* **26** 990 (2008)
4. Essiambre R-J et al. *J. Lightwave Technol.* **28** 662 (2010)
5. Богатырев В А и др. *Письма в ЖТФ* **14** 769 (1988) [Bogatyrev V A et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **14** 343 (1988)]
6. Белов А В и др. *Письма в ЖТФ* **1** 689 (1975) [Belov A V et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **1** 303 (1975)]
7. Дианов Е М, Прохоров А М *УФН* **148** 289 (1986) [Dianov E M, Prokhorov A M *Sov. Phys. Usp.* **29** 166 (1986)]
8. Дианов Е М, Мамышев П В, Прохоров А М *Квантовая электроника* **15** 5 (1988) [Dianov E M, Mamyshev P V, Prokhorov E M *Sov. J. Quantum Electron.* **18** 1 (1988)]
9. Stolen R H J. *Lightwave Technol.* **26** 1021 (2008)
10. Дианов Е М *Квантовая электроника* **7** 453 (1980) [Dianov E M *Sov. J. Quantum Electron.* **10** 259 (1980)]
11. Ito T et al. *Electron. Lett.* **14** 520 (1978)
12. Алферов Ж И и др. *Квантовая электроника* **5** 2486 (1978) [Alferov Zh I et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **8** 1403 (1978)]
13. Mears R J et al. *Electron. Lett.* **23** 1026 (1987)
14. Dianov E M et al., in *Proc. of the 20th European Conf. Optical Communications, Firenze, Italy, September 25–29, 1994*, Vol. 1, p. 427
15. Grubb S et al., in *Proc. Topics Meeting Optical Amplifiers and Their Applications, Breckenridge, CO, USA, 1994*, PD3-1, p. 187
16. Gnauck A H et al. *J. Lightwave Technol.* **26** 1032 (2008)
17. Дианов Е М, Кузнецов А А *Квантовая электроника* **10** 245 (1983) [Dianov E M, Kuznetsov A A *Sov. J. Quantum Electron.* **13** 125 (1983)]
18. Roberts P et al. *Opt. Express* **13** 236 (2005)
19. Mangan B J et al., in *Opt. Fiber Communications Conf., 2004*, PDP
20. Dvoyrin V V et al., in *Technical Digest European Conf. on Optical Communication, Glasgow, UK, 2005*, paper Th.3.3.5
21. Дианов Е М и др. *Квантовая электроника* **35** 1083 (2005) [Dianov E M et al. *Quantum Electron.* **35** 1083 (2005)]
22. Bufetov I A, Dianov E M *Laser Phys. Lett.* **6** 487 (2009)
23. Dianov E M *Light Sci. Appl.* **1** e12 (2012)
24. Дианов Е М *Квантовая электроника* **42** 754 (2012) [Dianov E M *Quantum Electron.* **42** 754 (2012)]
25. Melkumov M A et al. *Opt. Lett.* **36** 2408 (2011)
26. Gringeri S, Basch E B, Xia T J *IEEE Commun. Mag.* **50** (2) S21 (2012)
27. Chien H-C et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.2.C.4
28. Liu X et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.5
29. Gnauck A H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.2.C.2
30. Imamura K et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Mo.1.F.2
31. Tsuchida Y et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Tu.4.F.2
32. Takahashi H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.3
33. Salsi M et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Tu.3.A.6
34. Sleiffer V et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.4
35. Takara H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.1

PACS numbers: **01.65.+g, 28.70.+y, 89.20.Dd**  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305g.0518

## Вклад учёных в Великую Победу на примере ЛФТИ

А.Г. Забродский

### 1. Введение

Великая Отечественная война — это героические страницы истории СССР и Академии наук СССР, истории Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), судьб его учёных, инженерно-технических работников и рабочих. Статья включает в себя описание событий, определявших деятельность ЛФТИ в этот период, а также важных для понимания происходившего документов. Центральное место отводится анализу разработок учёных Ленинградского физтеха, их значимости для фронта, для обороны Ленинграда, для Победы.

### 2. ЛФТИ накануне войны

Созданный 23 сентября 1918 г. ЛФТИ быстро выдвинулся в число ведущих научно-исследовательских центров мира. Главная заслуга в этом принадлежит одному из его основателей — Абраму Фёдоровичу Иоффе, руководившему институтом до 1951 г. (рис. 1).

В состав Академии наук (АН) СССР ЛФТИ, принадлежавший ранее Народному комиссариату тяжёлой промышленности (впоследствии — Министерство среднего машиностроения), был введён в 1939 г.



Рис. 1. Академик А.Ф. Иоффе.

А.Г. Забродский. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ  
E-mail: Andrei.Zabrodskii@mail.ioffe.ru

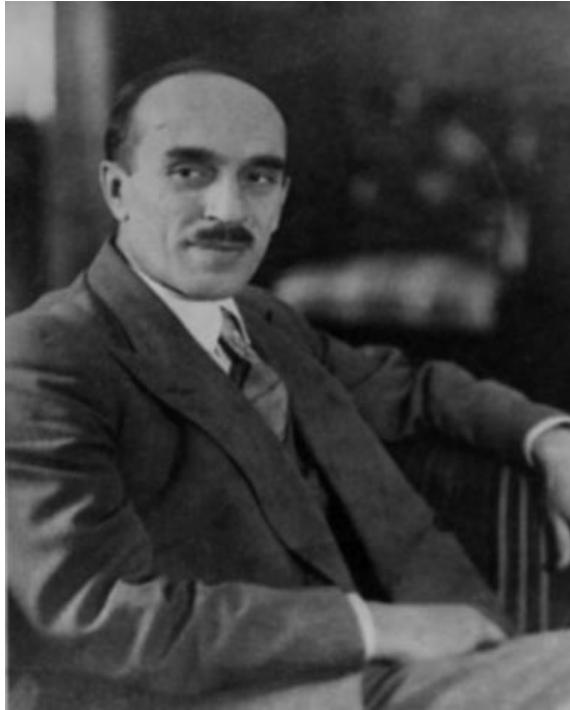


Рис. 2. Академик Н.Н. Семёнов.

К лету 1941 г. ЛФТИ представлял собой большой по тем временам институт: 18 лабораторий и более 300 человек штата, в числе которых было 23 доктора наук, 56 старших и младших научных сотрудников [1].

Из лабораторий и филиалов ЛФТИ группами его учёных в Ленинграде и других городах СССР к этому времени было уже создано 10 институтов физико-технического профиля.

Субботний вечер 21 июня 1941 года... Дом учёных в Лесном, недалеко от ЛФТИ. Коллеги, включая большую группу физиков, чествуют академика Н.Н. Семёнова в связи с присуждением ему Сталинской премии за выдающиеся достижения в области химической физики [2], в том числе за открытие цепных реакций, сделанное им в ЛФТИ. Через 15 лет Н.Н. Семёнов (рис. 2) получит за это открытие Нобелевскую премию по химии.

Был и ещё один повод для празднования. Страна узнала о нём на следующий день. Газета "Правда" в номере от 22 июня 1941 г. сообщила о большом успехе учёных ЛФТИ, завершивших строительство крупнейшего в Европе циклотрона (рис. 3). Часть оборудования уже была изготовлена, а часть — закуплена и завезена в ЛФТИ.

Начавшаяся война круто изменила планы учёных...

### 3. ЛФТИ и перестройка науки в первые недели войны

В штате ЛФТИ к началу войны было 197 военнообязанных, 43 человека имели броню.

До конца июля ушли в регулярную армию и в ополчение добровольцами и по призыву 42 человека. Через месяц их число достигло 130 [3]. Ленинградское народное ополчение в первые недели войны оказалось малобоеспособным по причине катастрофической нехватки оружия и плохой подготовки. Впоследствии его расформировали с переводом ополченцев в регулярную армию.



Рис. 3. Фрагменты статьи из газеты "Правда" от 22 июня 1941 г. о завершении строительства циклотрона ЛФТИ.

23 июня 1941 г. состоялось заседание Президиума АН СССР по перестройке деятельности Академии наук в соответствии с требованиями военного времени. Председательствовал вице-президент АН СССР О.Ю. Шмидт. Суть принятых решений состояла в следующем.

1. Перестроить тематику на "укрепление военной мощи".
2. Обеспечить силами и средствами научно-исследовательские работы (НИР) по оборонной тематике.
3. Особое внимание уделить заканчивающимся НИР.
4. Уполномочить бюро Президиума АН осуществлять оперативное руководство работой учреждений Академии наук.
5. Соблюдать строжайшую дисциплину военного времени.

Представление об интенсификации труда учёных даёт приказ № 85 директора ЛФТИ А.Ф. Иоффе от 7 июля 1941 г. об установлении в институте одиннадцатичасового рабочего дня [1].

Ленинград становился прифронтовым городом. Контренным образом перестраивалась деятельность его науки.

В июле 1941 г. при Ленинградском городском комитете ВКП(б) создаётся комиссия по рассмотрению и реализации оборонных предложений, возглавляемая академиком Н.Н. Семёновым. В комиссию вошли А.Ф. Иоффе, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харiton и другие учёные и специалисты города. Только за два первых месяца войны комиссия рассмотрела 847 предложений [3], многие из которых были реализованы. Так, деревянные чердачные конструкции городских домов были обработаны специально разработанным раствором, препятствующим их взорваннию. Это резко снизило эффективность использования неприятелем зажигательных бомб. А.Ф. Иоффе писал: "Никогда и нигде я не видел таких стремительных темпов перехода научных идей в практику, как в Ленинграде в первые месяцы войны" [4].

### 4. Организация работ казанской группы ФТИ и Ленинградского филиала ФТИ

В конце июля заместителем председателя Совета Народных Комиссаров А.Н. Косягиным (уполномоченным Государственного Комитета Обороны (ГКО) по Ленинграду) был решён вопрос об эвакуации ЛФТИ как одного из головных институтов Академии наук по работам на оборону.

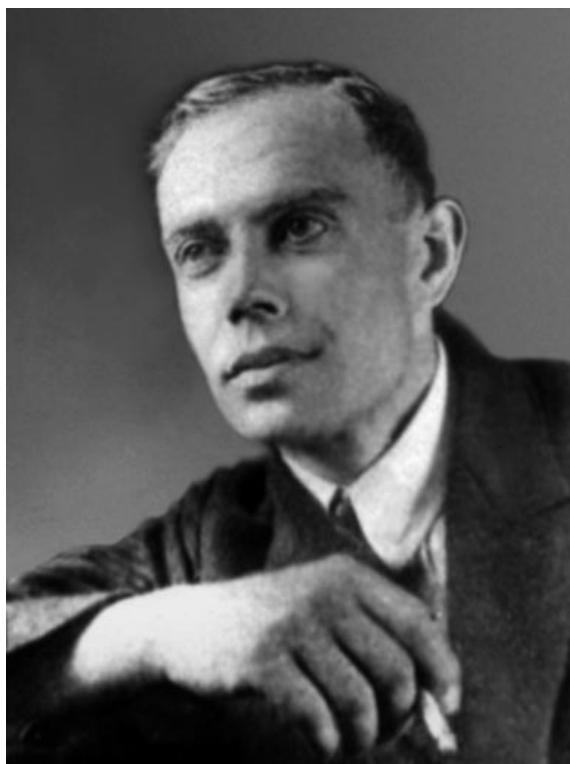


Рис. 4. Блокадный директор П.П. Кобеко.

Двумя эшелонами (2 и 23 августа 1941 г.) 8 из 18 лабораторий (около 70 сотрудников во главе с А.Ф. Иоффе) были эвакуированы в Казань [3]. Вместе с учёными других институтов Академии наук они расположились на территории Казанского университета<sup>1</sup>. В октябре обустройство было завершено и полностью развернулись работы в казанской группе ФТИ.

Лаборатории казанской группы ФТИ были реорганизованы в тематические группы. Из приказа № 12 А.Ф. Иоффе от 20 октября 1941 г. по казанской группе ФТИ [1]: "Для срочного выполнения задач тематического плана Института организовать по каждой теме группу, в которую временно включаются сотрудники разных лабораторий..." Было создано 10 групп<sup>2</sup>, заведующими которыми были назначены: Ю.П. Маслаковец, А.А. Харкевич, В.Л. Куприенко, Л.А. Арцимович, Ю.Б. Кобзарев, С.Е. Бреслер, Б.М. Гохберг, С.Н. Журков, Е.М. Шевандин, А.П. Александров.

Не могу не процитировать ещё один документ — Постановление бюро Отделения физико-математических наук АН СССР от 15 августа 1941 г. [5]: "Считать желательной тесную кооперацию научных сотрудников ЛФТИ, ФИАН, ИФП и РИАН<sup>3</sup> по некоторым темам... Прикрепить некоторых теоретиков ФИАН к ЛФТИ..." В разделе 4 приведён один из примеров такой кооперации.

В Ленинградском филиале ФТИ осталось работать 103 человека во главе с профессором Павлом Павлови-



Рис. 5. Амбразура дота в главном здании ФТИ.

чем Кобеко (рис. 4). События в Ленинграде между тем развивались весьма драматично. 8 сентября 1941 г. с потерей Шлиссельбурга началась 900-дневная блокада города. На первом этаже главного здания ЛФТИ появились амбразуры дотов, на втором разместили воинскую часть, на крыше циклотрона — пункт местной противовоздушной обороны (рис. 5).

В интересах обороны города работа Ленинградского филиала ФТИ была радикальным образом перестроена. Из приказа № 29-а по Ленинградскому филиалу от 27 ноября 1941 г.: "В связи с обстоятельствами и нуждами военного времени работа Ленинградского филиала ФТИ переключается с проведения НИР на выполнение производственных заказов для нужд обороны г. Ленинграда..." [1].

С 1 декабря 1941 г. были, в частности, организованы следующие мастерские<sup>4</sup>:

1) по очистке масел и бензина (производство из олифы и красок пищевых масел как важной добавки к скучному блокадному рациону<sup>5</sup> (рис. 6) и чистого авиабензина из бензиновых отходов);

2) селеновых выпрямителей;

3) диэлектриков (высокочастотный кабель "Эскапон" был разработан П.П. Кобеко. Внедрён в производство на заводе "Севкабель" в Ленинграде. Использовался для

<sup>1</sup> Память об этом бережно хранится в музее Казанского государственного университета.

<sup>2</sup> Впоследствии их стали называть лабораториями.

<sup>3</sup> ФИАН — Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, ИФП — Институт физических проблем АН СССР, РИАН — Радиевый институт АН СССР. (Примеч. ред.)

<sup>4</sup> Работники мастерских ЛФТИ получали паёк по рабочим карточкам.

<sup>5</sup> Технология очистки, разработанная П.П. Кобеко, спасла от голодной смерти не только физтеховцев, но и многих других ленинградцев.



Рис. 6. Экспонаты из Музея обороны и блокады Ленинграда.

замены вышедшего из строя английского полистирола в системах автоматического наведения зенитных орудий Ленинградского и других фронтов);

4) особого назначения (размагничивание кораблей Балтийского и Северного флотов);

5) по производству гидрофобной земли (предотвращение размывания земляных укреплений дождями).

##### 5. Работы по размагничиванию военных кораблей

В 1936 г. А.Ф. Иоффе принимал командующего Балтийским флотом адмирала И.С. Исакова. Адмирал сообщил о решении правительства СССР строить для Военно-морского флота большие корабли, вплоть до линкоров. Опасное оружие против них представляют собой магнитные мины. Взрыватель этих мин действует как магнитная стрелка компаса, реагируя на изменение вблизи него магнитного поля Земли, вызванное намагниченным корпусом корабля. Намагничивание корпуса начинается ещё на стапелях верфи при его изготовлении. В ходе плавания за счёт магнитного поля Земли добавляется так называемая индукционная составляющая, которая имеет ярко выраженную вертикальную компоненту — именно на неё и реагирует взрыватель магнитной мины. Такие, являющиеся донными, мины трудно поддаются тралению и поражают наиболее уязвимое место корпуса — его дно. Ставилась задача — найти средство борьбы с этим грозным оружием.

В ЛФТИ за работу взялся А.П. Александров со своей лабораторией. Из Минно-торпедного института в его коллектив влился первоклассный инженер Б.А. Гаев (рис. 7). Опыта по изучению магнитных явлений ни у



Рис. 7. А.П. Александров с сотрудниками его лаборатории в ЛФТИ.

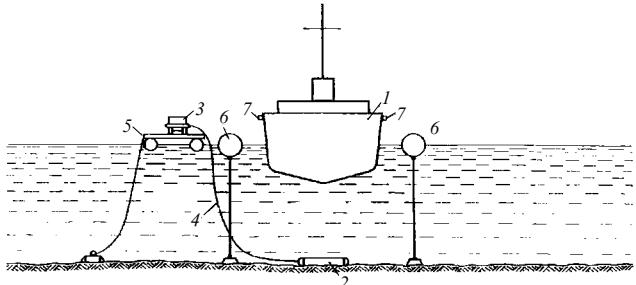


Рис. 8. Схема испытательного стенда для отладки "системы ЛФТИ": 1 — корабль, 2 — разоружённая мина, 3 — система управления миной, 4 — кабель, 5 — плотик, 6 — воротные буи, 7 — кабель размагничивающего устройства.

кого не было. Начинали с "нуля" — с разработки простейших магнитометров на основе лезвия бритвы.

За три года была создана и испытана система размагничивания кораблей — "система ЛФТИ". Она компенсировала магнитное поле корабля (грубо напоминающее поле витка с током) более чем на порядок величины, до значений, не превышающих примерно 10 мЭ. Это было достигнуто с помощью специальным образом уложенных на палубе секций из кабеля с током (рис. 8).

31 декабря 1940 г. Главный военный совет Военно-морского флота (ВМФ) принимает решение об оборудовании всех кораблей ВМФ "системами ЛФТИ" [6]. К началу войны, однако, из линкоров ею был укомплектован лишь "Марат".

В первые дни войны фашисты забросали с самолётов магнитными минами Финский залив и бухты Севастополя с целью запереть наш флот на базах. Боевое крещение "системы ЛФТИ" прошла во время перехода эскадры кораблей из Таллина в Кронштадт 28–29 августа 1941 г. Эскадра потеряла 53 корабля, многие — от мин. Однако те корабли, которые буквально накануне перехода в Таллинне были оборудованы бригадой физтеховцев "системой ЛФТИ"<sup>6</sup>, дошли без потерь от магнитных мин [6].

<sup>6</sup> Это были наспех сделанные "времянки" на линкоре "Октябрьская революция" и других кораблях, которые в Кронштадте заменили постоянными. На борту "Октябрьской революции" покинули Таллин и физтеховцы.



Рис. 9. А.П. Александров, И.В. Курчатов, Б.А. Гаев, В.М. Тучкович, В.Р. Регель и П.Г. Степанов.

Для подводных лодок и малых вспомогательных судов "систему ЛФТИ" не применяли по техническим и экономическим соображениям соответственно. Уже в первые месяцы войны для них стали использовать "безобмоточный" метод на основе многократного перемагничивания корпуса магнитным полем сильного тока на специально оборудованных станциях безобмоточного размагничивания. Через несколько месяцев процедуру повторяли. (В Ленинграде, например, такие станции располагались у Гренадёрского моста, где сейчас стоит крейсер "Аврора", а также у Литейного моста и в Кронштадте.)

С началом войны на флотах были созданы службы размагничивания во главе с А.П. Александровым. Без их разрешения ни один военный корабль не мог выйти в море. Моряки шутили: "Прежде чем в поход идти, побывай у эЛЭФТИ". Костяк служб размагничивания составили 24 сотрудника ЛФТИ, которые в 1941–1942 гг. трудились на всех флотах и флотилиях, во фронтовых условиях обучая флотских офицеров навыкам размагничивания. В их числе — И.В. Курчатов, В.М. Тучкович, Л.М. Неменов, Г.Я. Щепкин, Б.С. Джелепов, П.Г. Степанов и др. В расчётах магнитных полей участвовал И.Е. Тамм, прикомандированный к казанской группе ФТИ, в усовершенствовании магнитометра — Г.Н. Флёров.

Следует заметить, что до 1943 г. военно-инженерная мысль рейха пыталась как-то отвечать на "систему ЛФТИ" и схожие разработки союзников, главным образом совершенствуя взрыватель. Затем эти попытки прекратили.

С созданием флотских служб размагничивания в 1942–1943 гг. занятые в них физтеховцы переключились на выполнение других оборонных задач. Ни один из кораблей с действовавшей "системой ЛФТИ" не подорвался на магнитной мине. "Публичная демонстрация" эффективности этой системы случилась уже после окончания войны в порту Таллина [6]. В воскресенье команду одной из канонерских лодок отпустили на берег в увольнение, а генератор, питавший "систему ЛФТИ", выключили. Тут же прогремел взрыв: у корабля буквально оторвало корму. Лежащая под кормой на дне немецкая магнитная мина дождалась своего часа. К счастью, никто не погиб.

В 1942 г. за разработку "системы ЛФТИ" были удостоены Сталинской премии I степени шесть сотрудников ЛФТИ: А.П. Александров, И.В. Курчатов, Б.А. Гаев, В.М. Тучкович, В.Р. Регель и П.Г. Степанов (рис. 9). В 1979 г. в Севастополе был сооружён замечательный своей выразительностью и простотой памятник физтеховцам за размагничивание кораблей Черноморского флота в годы войны (рис. 10).



Рис. 10. Памятник в Севастополе, посвящённый размагничиванию кораблей Черноморского флота в годы войны.

## 6. Создание импульсной радиолокации

16 января 1934 г. в ЛФТИ под руководством А.Ф. Иоффе состоялось совещание с участием А.А. Чернышёва и С.И. Вавилова по вопросу возможности создания системы радиолокационного обнаружения самолётов<sup>7</sup>. По предложению Управления противовоздушной обороны (УПВО) Рабоче-крестьянской Красной армии (РККА) эти работы были развёрнуты в ЛФТИ под руководством Д.А. Рожанского, а после его смерти в 1936 г. — Ю.Б. Кобзарева [3].

В ЛФТИ была разработана импульсная генераторная лампа ИГ-7 ( $\lambda = 4$  м,  $P = 50$  кВт), импульсный модулятор, приёмное и индикаторное устройства для первых импульсных радиолокационных станций (РЛС) "Редут" с дальностью обнаружения 150 км. Перед началом войны был создан корабельный вариант "Редут-К", ЛФТИ решил задачи модернизации РЛС "Редут" и разработки первой системы опознавания целей.

<sup>7</sup> В то время применялась звуковая локация, которая по мере увеличения скорости самолётов начинала терять свою эффективность.



**Рис. 11.** Н.Я. Чернцов, П.А. Погорелко, Ю.Б. Кобзарев (справа налево) на полигоне.

Импульсные РЛС дальнего обнаружения, о существовании которых неприятель долгое время не догадывался, сыграли огромную роль в годы войны, особенно при защите Москвы и Ленинграда. Они позволяли иметь около получаса для приведения в боевую готовность средств ПВО. В Ленинграде для ускорения передачи данных от операторов РЛС в штаб ПВО впервые использовалось появившееся накануне войны телевидение. Потери большого города от бомбёжек составили не более 10 тыс. человек, от артобстрелов — 40 тыс., от голода — до миллиона.

В 1941 г. физтеховцы Ю.Б. Кобзарев, П.А. Погорелко и Н.Я. Чернцов (рис. 11) были удостоены Сталинской премии I степени "за создание первого в стране радиолокационного прибора для обнаружения самолётов и кораблей". Ознакомившись в конце войны с РЛС "Редут", английские специалисты были поражены её простотой, надёжностью и тем, что работа ведётся на одну антенну.

## 7. Усиление танковой брони и ночное видение

17 мая 1943 г. заместитель командующего бронетанковыми войсками Красной Армии Н.И. Бирюков получил от И.В. Сталина строжайшие указания по подготовке к битве на Курской дуге [7]:

"Проверить результаты расследования по приборам *ночного вождения*. Их нельзя было посыпать без разрешения... Минные тралы и приборы *ночного вождения* являются секретными, и без разрешения никому не посыпать<sup>8</sup>..."

Проверить, где находится полк с *экранированными танками*, и доложить на предмет получения разрешения на его применение".

Обе выделенные нами курсивом разработки были связаны с ЛФТИ [3].

Приборы *ночного вождения* (*видения*) разрабатывались под руководством Л.А. Арцимовича (рис. 12) в тематической группе (лаборатории) № 4 казанской группы ФТИ. К зиме 1942–1943 годов был создан электронно-



**Рис. 12.** Л.А. Арцимович.

оптический преобразователь с сурьмяно-цезиевым катодом, электронно-оптический преобразователь с уменьшением изображения и многоакадные усилители света.

"Броневая лаборатория" ЛФТИ была создана в 1938 г. по приказу наркома машиностроения на основе всемирно известной школы "прочников" ЛФТИ, руководимой академиком УССР Н.Н. Давиденковым. До начала 1942 г. работами Броневой лаборатории<sup>9</sup> руководил В.Л. Куприенко, с февраля 1942 г. до августа 1943 г. — И.В. Курчатов, с августа 1943 г. — Ф.Ф. Витман (рис. 13).

В августе 1941 г. перед лабораторией была поставлена задача: найти *основные положения в конструировании бензобаков для самолётов*, которые оказались наиболее уязвимым местом. Была предложена многосекционная конструкция из стали, выстланная внутри губчатой резиной для "заличивания" пробоин. Резина была разработана в ЛФТИ под руководством А.П. Александрова.

Применение кумулятивных снарядов (фауст-патронов) в германской армии с конца 1942 г. поставило острую задачу укрепления брони советских танков. В Броневой лаборатории был разработан эффективный способ экранирования танковой брони отделённой от неё внешней преградой.

## 8. Термоэлектрические источники питания

Под руководством Ю.П. Маслаковца (рис. 14) в казанской группе ФТИ<sup>10</sup> решались задачи разработки и создания термоэлектрических источников питания для партизанских и диверсионных отрядов.

<sup>8</sup> Следует пояснить суть происшествия. Дело в том, что один из танков, на которых испытывались приборы, был захвачен немцами. (Примеч. А.Г.З.)

<sup>9</sup> В Казанской группе ЛФТИ ей был присвоен № 3.

<sup>10</sup> Тематическая группа (лаборатория) № 1.

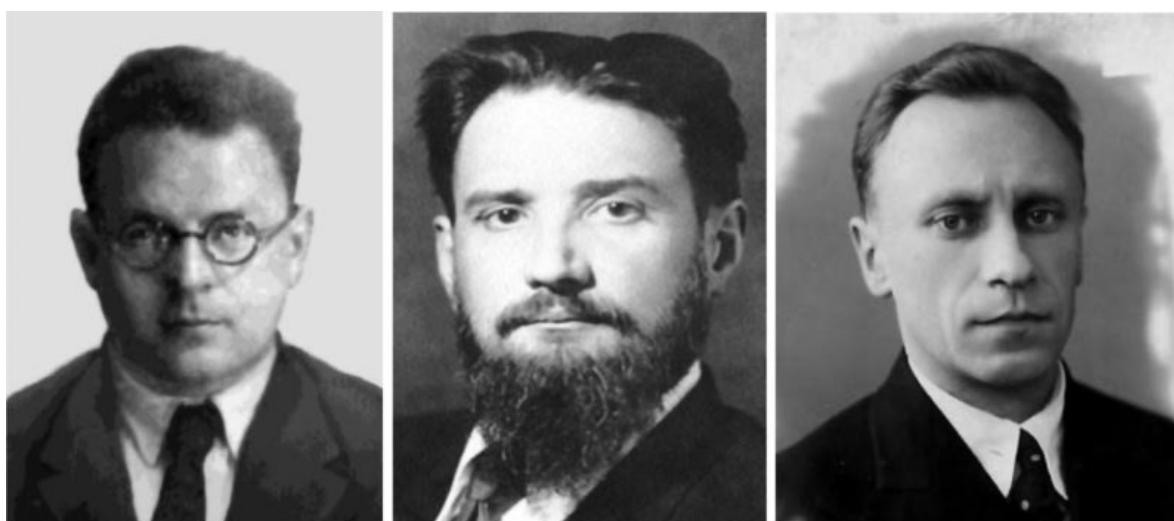


Рис. 13. В.Л. Куприенко, И.В. Курчатов, Ф.Ф. Витман.



Рис. 14. Ю.П. Маслаковец.

Использовалась термопара сурьмянистый цинк–константан [3]. Спай снаружи нагревался пламенем костра, внутренний имел температуру воды ("партизанский котелок"). При разности температур спаев  $\Delta T \approx 300^\circ\text{C}$  и к.п.д.  $\approx 2,0\%$  обеспечивалось питание накальных и анодных цепей переносных радиостанций. Выпуск был наложен в марте 1943 г. в Научно-исследовательском институте 627 с опытным заводом № 1<sup>11</sup> (впоследствии преобразован во Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики).

<sup>11</sup> В дальнейшем было выпущено несколько десятков тысяч штук более совершенных термоэлектрических генераторов для неэлектрифицированных районов СССР.



Рис. 15. Испытания прогибографа на льду Суздальского озера. В полурубке у прибора — П.П. Кобеко.

#### 9. Обеспечение функционирования ледовых трасс

В первые две недели после начала функционирования в ноябре 1941 г. "Дороги жизни" по льду Ладожского озера, связавшей тонкой ниточкой блокадный Ленинград с Большой землёй, было потеряно около 100 машин, причём не самых тяжёлых (!). Обратились к П.П. Кобеко в Ленинградский филиал ФТИ. Под его руководством быстро разработали приборы для автоматической записи колебаний льда — "прогибографы" (рис. 15). Проявив чудеса изобретательности, практически при полном отсутствии материалов<sup>12</sup> изготовили более 50 таких приборов. Оказалось, что причина разрушения льда заключалась в резонансном усилении колебаний при совпадении скоростей машины и волны подо льдом (примерно  $35 \text{ см} \text{ ч}^{-1}$ ). Оказывали влияние также волны, отражённые от берега, и волны, создаваемые другими машинами. Для каждого участка Дороги были разработаны строгие правила дорожного движения: регламентировались скорость и интервалы между машинами и колоннами (рис. 16). Дорога функционировала вплоть до 24 апреля 1942 г., когда толщина льда уменьшилась уже до 10 см (!) [3].

В ходе подготовки к частичному снятию блокады в январе 1943 г. учёные Ленинградского филиала ФТИ со своими прогибографами принимали участие в прокладке свайно-ледовых железных дорог по льду Ладоги (рис. 17). Более того, по льду Ладоги прямо на передовую шли

<sup>12</sup> Для первого прибора учёные использовали вытащенный ими из-под снега кусок упавшей чугунной ограды парка Политехнического института, который они доставили на санках в ФТИ.



Рис. 16. Колонна машин на Дороге жизни.

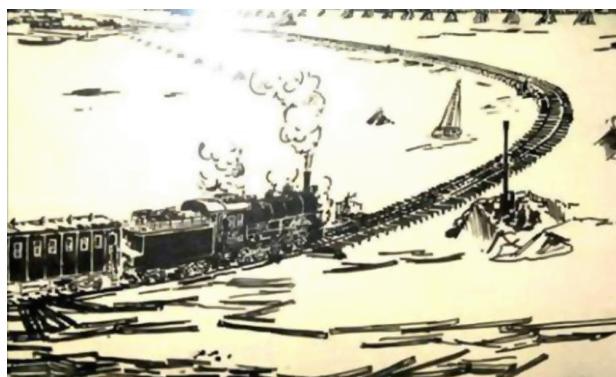


Рис. 17. Низководный свайно-ледовый мост через Неву. С.П. Светлицкий (1943 г.).

своим ходом, преодолевая трещины, тяжёлые танки КВ<sup>13</sup>! В январе 1944 г. в ходе подготовки к полному прорыву блокады Ленинграда железная дорога была проложена на месте нынешней дамбы между Горской и Кронштадтом, в котором сосредоточивались силы для удара [3].

#### 10. Создание антибактериального "препарата П"

В 1944 г. У. Черчилль подарил И. Сталину некоторое количество пенициллина. Часть его отправили в Ленинград. Там, однако, был свой антибиотик, который назывался "препарат П". Разработан он был в ЛФТИ.

С.Е. Бреслер из казанской группы ФТИ написал своей сотруднице М.В. Гликиной в Ленинградский филиал ФТИ (рис. 18), ссылаясь на опыт первой мировой войны, что в условиях стационарного фронта (как под Ленинградом) резко ускоряется развитие газовой гангрены у раненых и надо заняться разработкой эффективного антибактериального препарата. С.Е. Бреслер предложил применить для этой цели метод Хугерхейда (США), который использовал определённый тип почвенных бактерий. М.В. Гликиной удалось разыскать в одном из институтов блокадного Ленинграда необходимые бактерии и вырастить нужную культуру. Эти результаты вошли в отчёт Ленинградского филиала за 1941 г., а уже в начале 1942 г. "препарат П" был рекомендован к применению и доработке в эвакуационном госпитале № 1170, который располагался в Александро-Невской



Рис. 18. С.Е. Бреслер и М.В. Гликина.

лавре [1]. При сравнении с пенициллином "препарат П" оказался более эффективным. Его использование снизило смертность от анаэробной инфекции в два раза.

#### 11. ЛФТИ и Атомный проект

Широкие исследования по физике атомного ядра начались в ЛФТИ в самом начале тридцатых годов прошлого века. Соответствующее структурное подразделение института — "ядерная группа" — было образовано Приказом по ЛФТИ от 16 декабря 1932 г., в котором, в частности, говорилось:

"§ 1. Для осуществления работ по ядру... образовать особую группу по ядру в составе: акад. А.Ф. Иоффе — нач. гр., И.В. Курчатов — зам. нач. гр., М.А. Еремеев, Д.В. Скобельцын, П.А. Богдаевич, С.А. Бобковский, И.П. Пустовойтенко, Л.П. Селинов, М.П. Бронштейн, Д.Д. Иваненко.

"§ 2. Г.А. Гамова и Л.В. Мысовского числит консультантами группы".

Через год ЛФТИ было доверено организовать и провести крупную международную конференцию по атомному ядру в Ленинграде. Уже через несколько лет работы по ядерной физике А.Ф. Иоффе назовёт вторым по значимости направлением исследований института.

Душой "ядерного" сообщества ЛФТИ, а затем и руководителем отдела ядерной физики был Игорь Васильевич Курчатов. Коллеги уважительно называли его

<sup>13</sup> Были сняты башни (несложная процедура), которые танки тащили за собой на полозьях.

Генералом за то, что в любом увлекающем его деле он быстро становился лидером.

Развитие экспериментальной ядерной физики в ЛФТИ требовало поддержки со стороны правительства. Пример обращения за такой поддержкой представляет собой письмо сотрудников ЛФТИ Председателю Совета Народных Комиссаров СССР В.М. Молотову об экспериментальной базе ядерных исследований от 5 марта 1938 г. [7]. Вот его краткое резюме. Для результативных исследований по атомному ядру ЛФТИ нуждается в *радии* (в количестве 2 г) и *циклотроне* (объём затрат 1 млн рублей — немалые по тем временам деньги). Обращение подписали: А. Иоффе, И. Курчатов, А. Алиханов, Д. Скobelцын, Л. Арцимович, А. Алиханьян, Л. Немёнов, Л. Русинов, Б. Джелепов, Г. Щепкин, В. Куприенко, В. Дукельский, Я. Френкель и др. (всего 23 подписи). Это тот самый циклотрон, о завершении строительства которого сообщает газета "Правда" 22 июня 1941 г. От обращения за поддержкой до завершения строительства пройдёт всего три года!

Циклотрон был детищем И.В. Курчатова, который руководил его проектированием и строительством. В 1940 г. его аспиранты Г.Н. Флёрков и К.А. Петржак открывают явление спонтанного деления ядер урана. Курчатов предлагает поставить контрольные эксперименты: эффект подтверждается, но Игорь Васильевич отказывается от соавторства, полагая, что исследование его учеников в значительной степени является самостоятельным.

В начале войны Курчатову отказывают в его просьбе об отправке в действующую армию [3]. Он оставляет ядерные исследования и вливается в команду А.П. Александрова, которая во фронтовых условиях занималась размагничиванием военных кораблей. После отъезда А.П. Александрова из Севастополя руководит бригадой физиков на Черноморском флоте, которая сделала чрезвычайно много для разблокирования запертых в бухтах магнитными минами кораблей. В казанскую группу ФТИ И.В. Курчатов вернулся в декабре 1941 г. с тяжелейшей пневмонией, отпустил бороду, как он говорил: "до Победы", но, как оказалось, навсегда.

К началу войны ЛФТИ находился на переднем крае исследований атомного ядра. Ряд учёных осознавали принципиальную возможность использования энергии, выделяющейся при делении ядер урана, для создания оружия невиданной разрушительной силы. Опасность, нависшая над страной, подвигла их стать инициаторами создания ядерного оружия перед правительством СССР<sup>14</sup>, стимулировала начало советского Атомного проекта. С.В. Кафтанов, уполномоченный ГКО по науке, вспоминал [9], что, наряду с разведкой, Академия наук, А.Ф. Иоффе и лично Г.Н. Флёрков внесли свой вклад в решение о начале Атомного проекта.

Из распоряжения ГКО № 2352сс "Об организации работ по урану" от 28 сентября 1942 г., инициированного обращением в ГКО А.Ф. Иоффе и С.В. Кафтанова [10]: "Обязать АН СССР (академик Иоффе) возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии при расщеплении ядра урана, представить ГКО к 1 апреля 1943 года доклад о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива.

<sup>14</sup> Например, хорошо известны обращения Н.Н. Семёнова, Г.Н. Флёрьева, А.Ф. Иоффе.

Для этой цели:

1. Президиуму Академии наук СССР:

А. Организовать при Академии наук специальную лабораторию атомного ядра...

7. Обеспечить к 5 октября 1942 года доставку самолётом в г. Казань из г. Ленинграда принадлежащих ФТИ АН СССР 20 кг урана и 200 кг аппаратуры для физических исследований".

Для руководства работами А.Ф. Иоффе рекомендовал И.В. Курчатова, который в то время в казанской группе ФТИ возглавлял Броневую лабораторию (Лабораторию № 3). Именно он и готовил аналитическую записку по материалам советской разведки, а затем и указанный выше доклад в ГКО.

В марте и апреле 1943 г. выходят распоряжения Президиума АН СССР о назначении И.В. Курчатова руководителем ядерной лаборатории и об организации самой лаборатории. Соответствующий приказ № 86 по казанской группе ФТИ об организации Лаборатории № 2<sup>15</sup>, об освобождении И.В. Курчатова от руководства Лабораторией № 3 и о том, чтобы его и ещё десять физиков, составивших костяк Лаборатории № 2, считать переведёнными в Москву, был подписан А.Ф. Иоффе [1] 14 августа 1943 г. 30 декабря 1943 г. Президиум АН выдал И.В. Курчатову доверенность "на руководство всей административной, хозяйственной и финансовой деятельностью Лаборатории № 2". 27 января 1944 г. И.В. Курчатов "в связи с переходом на оплату по отдельной штатной ведомости снят с оплаты и штатов ЛФТИ" [11].

Так закончился физтеховский период подготовки и старта Атомного проекта. Основные результаты этого периода и вклад ЛФТИ в проект сводятся к следующему.

1. Создание всемирно известной школы физиков-ядерщиков — кадровой основы Атомного проекта. Все пять выдающихся учёных, трижды удостоенных звания Героя Социалистического Труда участников Атомного проекта, работали в разные годы в ЛФТИ (рис. 19).

2. Инициирование в СССР исследований в области ядерной физики и самого Атомного проекта, доказательство на государственном уровне их стратегической важности и реалистичности.

3. Постройка крупнейшего в Европе циклотрона. Оборудование его было вывезено в Москву в 1943 г. В ЛФТИ он был запущен в 1946 г. и производил оружейный плутоний для Атомного проекта.

4. Разработка методов разделения изотопов урана для Атомного проекта.

5. Создание счётчиков нейтронов для испытаний атомной бомбы.

Созданный в результате выполнения Атомного проекта паритет в оружии сдерживания оказал и сегодня продолжает оказывать важнейшее влияние на развитие человечества.

## 12. Наука в ЛФТИ в годы войны

Несмотря на то что главным делом во время войны для большинства физиков стали разработки в интересах обороны, они продолжали заниматься и научными исследованиями, защищать диссертации.

<sup>15</sup> К этому времени прежняя Лаборатория № 2 казанской группы ЛФТИ прекратила своё существование и под этим номером, по сути, образовалась вакансия.



Рис. 19. Трижды удостоенные звания Героя Социалистического Труда участники Атомного проекта, работавшие в разные годы в ЛФТИ (слева направо): И.В. Курчатов, А.П. Александров, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, К.И. Щёлкин.



Рис. 20. Б.П. Константинов.

В 1941–1945 гг. в ЛФТИ состоялось 38 защит диссертаций — 10 докторских и 28 кандидатских [3]. Как показывает знакомство со штатным расписанием, из всех, кто в принципе мог защититься, это сделал каждый второй. В частности, Б.П. Константинов (рис. 20), руководивший Физико-техническим институтом в 1957–1967 гг., в годы войны защитил кандидатскую (1942 г.) и докторскую (1943 г.) диссертации.

К двум упомянутым Сталинским премиям военных лет за радиолокацию и размагничивание кораблей добавились следующие премии: А.Ф. Иоффе — за исследования полупроводников; Н.Н. Давиденков — за исследования прочности; Е.Ф. Гросс — за исследования рассеяния света; Г.Н. Флёрнов — за открытие спонтанного деления урана; Я.И. Френкель — за исследования по теории жидкости.

Среди работников институтов Академии наук, удостоенных Сталинской премии военных лет, а также

поименованных в Указе Президиума Верховного Совета СССР от 10 июня 1945 г. о награждении орденами и медалями (за войну), доля сотрудников ЛФТИ составляет несколько процентов. Это позволяет судить о том огромном вкладе в Победу, который внесла АН СССР в целом.

### 13. Заключение

На примере деятельности ЛФТИ ясно видно, что Великая Отечественная война была выиграна не только на полях сражений и в тылу, но и в лабораториях и конструкторских бюро. При этом разработки советских учёных не уступали разработкам союзников, во многом превосходя их. То, что сделал для Победы и укрепления моцки страны в послевоенное время ЛФТИ, представляет собой часть огромного вклада в создание принципиально новых средств защиты и видов вооружений, который внесли институты Академии наук и её учёные<sup>16</sup>.

Трудно подыскать нужные слова, чтобы охарактеризовать беспримерную деятельность Ленинградского филиала ФТИ в блокадном Ленинграде и его роль в героической обороне города, когда уже само выживание было подвигом.

В годы войны не прерывалась миссия ЛФТИ — быть кузницей кадров для реализации крупномасштабных проектов, будь то радиолокация, размагничивание военных кораблей или Атомный проект. Работа в условиях военного времени, в ряде случаев даже в условиях фронта, сформировала особое поколение учёных с обострённым чувством долга, могущих в критических ситуациях брать ответственность на себя. Не случайно участие в этих проектах стало важным этапом личностного развития для огромной плеяды учёных — выдающихся организаторов советской науки.

**Благодарности.** Выражаю признательность сотрудникам ФТИ им. А.Ф. Иоффе Р.Ф. Витман, Б.Б. Дьякову и Ю.И. Коптеву, работы которых по истории института существенно дополнили мои представления о работе ЛФТИ в годы войны.

### Список литературы

1. Дьяков Б.Б. (Сост.) *Физико-технический институт в годы Великой Отечественной войны* (СПб.: Наука, 2006)

<sup>16</sup> Эта титаническая деятельность велась в сложных условиях не имеющей аналогов в мировой истории по срокам и масштабам эвакуации научно-производственного комплекса страны.

2. Рейнов Н М *Физики — учителя и друзья* (Л.: Лениздат, 1975)
3. Витман Р Ф, Куницына Е В (Ред.-сост.) *Трудный путь к Победе. Физтеховцы о днях войны* (СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012)
4. Левшин Б В *Советская наука в годы Великой Отечественной войны* (М.: Наука, 1983) с. 57
5. Рябев Л Д (Общ. ред.), Кудинова Л И (Сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 1 1938–1945 Ч. 1* (М.: Физматлит, 1998), Документ № 103
6. Контев Ю И *Виза безопасности* (СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011)
7. Бирюков Н *Танки — фронту! Записки советского генерала* (Смоленск: Русич, 2005)
8. Рябев Л Д (Общ. ред.), Кудинова Л И (Сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 1 1938–1945 Ч. 1* (М.: Физматлит, 1998), Документ № 1
9. Кафтанов С В *"По тревоге" Химия и жизнь* (6) 16 (1985)
10. Рябев Л Д (Общ. ред.), Кудинова Л И (Сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 1 1938–1945 Ч. 1* (М.: Физматлит, 1998), Документ № 128
11. Гринберг А П, Френкель В Я *Игорь Васильевич Курчатов в Физико-техническом институте (1925–1943 гг.)* (Л.: Наука, 1984) с. 151

PACS numbers: 01.65.+g, 28.52.-s, 28.70.+y  
 DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305h.0528

## Основные этапы Атомного проекта

Р.И. Илькаев

### 1. Введение

Реализация Атомного проекта явилась задачей наивысшего государственного приоритета, решение которой опиралось на мобилизацию лучших кадров страны, включая специалистов высшей квалификации, учёных академических и отраслевых институтов, организаторов военной промышленности СССР, выдвинувших и сформировавших научно-технических и организационных лидеров всех уровней Атомного проекта.

Выдающуюся роль в создании базы разработки ядерного оружия СССР сыграла советская разведка, которой удалось получить и передать ценную информацию как в отношении принципиальных идей, так и конкретных научно-технических данных по атомному проекту.

Атомный проект (1943–1955 гг.) заложил основы безопасности нашей страны во второй половине XX в., ликвидировал атомную и термоядерную монополию США.

К основным этапам Атомного проекта относятся:

1943–1949 гг. — создание Лаборатории № 2 под руководством И.В. Курчатова, научно-технической и промышленной инфраструктуры атомной отрасли, создание на основе принципа газодинамической имплиозии первой атомной бомбы РДС-1 и её испытание;

1948–1953 гг. — реализация идеи А.Д. Сахарова и создание прототипа термоядерного модуля РДС-6с — впервые осуществлено зажигание и горение термоядерного вещества;

1954–1955 гг. — разработка и реализация принципа радиационной имплиозии, создание РДС-37 — прототипа современного термоядерного оружия.

**Р.И. Илькаев.** Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, РФ  
 E-mail: ilkaev@vniief.ru

В статье рассмотрены основные научные особенности реализации каждого из этих трёх этапов Атомного проекта.

### 2. Предыстория Атомного проекта

В основе Атомного проекта лежат фундаментальные научные открытия и результаты, включая открытия нейтрона и деления атомного ядра, изотопов, способных поддерживать цепную реакцию, трансурановых элементов, принципов разделения изотопов, создание ядерного реактора, создание радиохимии, исследования физики взрывчатых процессов.

Идеи о создании атомной бомбы из U-235, элементы теории атомного взрыва, включая понятия критической массы и ядерной цепной реакции, были сформулированы рядом европейских, в том числе советских, учёных ещё в конце 1930-х – начале 1940-х годов. Первоначально эти идеи обсуждались в ходе открытой научной дискуссии о научных достижениях ядерной физики. Многими было осознано, что деление урана открывает совершенно новые возможности в создании оружия и развитии энергетики.

Советские учёные активно работали в целом ряде областей науки, оказавшихся необходимыми в дальнейшем для выполнения Атомного проекта. Исследования советских учёных в ядерной области находились на высоком уровне, соответствовавшем общемировым достижениям, а именно:

- развивалась теория атомного ядра;
- были открыты ядерные изомеры и процесс спонтанного деления урана;
- развивалась теория ядерных цепных реакций;
- проводились первоклассные исследования по физике взрывчатых веществ (ВВ).

Среди довоенных работ, которые оказали значительное влияние на реализацию Атомного проекта СССР, отмечу исследования по механизмам процессов взрывчатых превращений, устойчивости динамических состояний — горения и детонации ВВ, способам возбуждения и передачи детонации. Важный вклад в эти работы внес основатель ВНИИЭФ (ныне — Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики) и руководитель разработок ядерных и термоядерных зарядов Атомного проекта академик Юлий Борисович Харiton.

В 1939–1940 гг. Ю.Б. Харитон совместно с другим нашим замечательным учёным, много сделавшим для становления и развития ядерно-оружейных работ, — Яковом Борисовичем Зельдовичем — выполнили ряд пионерских работ по изучению развития цепной реакции в урановых материалах. Уже тогда Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович определили, что экспоненциальное возрастание скорости цепной реакции имеет порядок  $10^7 \text{ с}^{-1}$ , и отметили принципиальную необходимость решения проблемы быстрого перехода из подкритической области состояния делящегося материала в надкритическую.

Одним из важных событий в истории советского Атомного проекта явились предложения, выдвинутые Г.Н. Флёровым в письме И.В. Курчатову в марте–июне 1942 г. В этих предложениях был сделан вывод об осуществимости цепной реакции деления на быстрых нейтронах для U-235. Вероятное количество вторичных

нейтронов при делении ядер этих изотопов быстрыми нейтронами было оценено как  $\sim 2-3$ ; вероятное эффективное сечение деления ядер этих изотопов для быстрых нейтронов оценивалось величиной  $\sigma_f \sim 3$  б.

В предложениях Г.Н. Флёрова отмечалось, что существенным препятствующим фактором для реализации мощного взрывного процесса деления ядер является естественный нейтронный фон, который складывается из трёх компонентов:

- нейтронов космического излучения;
- нейтронов спонтанного деления;
- нейтронов, нарабатываемых в процессе  $\alpha$ -распада ядер в реакции  $\alpha$ , п.

Г.Н. Флёров отметил важность влияния на энерговыделение ядерного взрыва уровня надкритичности системы в момент взрыва и времени разлёта активного материала в процессе взрыва.

### 3. Лаборатория № 2 Академии наук СССР

В 1942–1943 гг. на высшем государственном уровне были приняты принципиальные решения, определившие развертывание работ по советскому Атомному проекту. Первое такое решение было принято 28 сентября 1942 г. в виде распоряжения Государственного Комитета Обороны (ГКО) "Об организации работ по урану".

В распоряжении ГКО от 11 февраля 1943 г. говорилось: "В целях более успешного развития работы по урану возложить на тт. Первухина М.Г. и Кафтанова С.В. обязанность повседневно руководить работами по урану и оказывать систематическую помощь спецлаборатории атомного ядра АН СССР. Научное руководство работами по урану возложить на профессора Курчатова И.В..." [1].

Существенным шагом в укреплении организационной структуры работ по Атомному проекту явилось назначение Игоря Васильевича Курчатова начальником Специальной лаборатории по атомному ядру (Лаборатория № 2 АН СССР). Это назначение было оформлено 10 марта 1943 г. распоряжением № 122 по АН СССР.

В начале 1944 г. А.И. Алиханов, по-видимому, впервые в СССР рассмотрел вопрос о возможности создания средства противодействия атомному оружию. В записке от 4 января 1944 г., представленной И.В. Курчатову, в качестве такого способа А.И. Алиханов предлагал облучение атомного заряда, работающего по принципу сближения, сильным потоком нейтронов, что должно вызвать преждевременное нейтронное инициирование заряда и снижение его энерговыделения на несколько порядков.

В указанной записке отмечается, что в атомной бомбе могут быть предприняты специальные меры защиты от такого воздействия — окружение бомбы слоем богатого водородом вещества или помещение её в грунт на глубину в несколько метров.

В марте 1945 г. И.В. Курчатов после рассмотрения и анализа новой информации разведки об атомной программе США отметил, что атомная бомба может быть приведена в действие двумя способами:

- быстрым сближением двух половин заряда урана-235 или плутония-239, находящихся первоначально на расстоянии 0,5–1,0 м друг от друга;
- уплотнением зарядов урана-235 или плутония-239 мощным взрывом тротила, окружающего эти вещества (газодинамическая импльзия).

Величина критической массы делящегося материала не могла быть определена с необходимой точностью, и по разным оценкам она составляла от 1 до 10 кг. По предварительным расчётам общий вес содержащей от 5 до 10 кг урана-235 или плутония атомной бомбы, эквивалентной по своему действию взрыву от 10000 до 50000 т тротила, мог составить от 3 до 5 т.

7 апреля 1945 г. И.В. Курчатов отмечал, что "мы только что узнали о методе импльзии и начинаем над ним работу, однако его преимущества перед методом пушечного сближения уже ясны". В полученных материалах этому методу посвящён основной объём. В частности, были даны:

- схема распространения детонации во взрывчатом веществе и процесс деформации материала, окружающего ядерный заряд;
- описание процессов сжатия тела взрывом и самого взрыва;
- указания на условия (что являлось особенно существенным), при которых можно получить симметричность эффекта взрыва, необходимую по самому существу метода;
- описание явлений неравномерного действия взрывной волны и способов устранения этой неравномерности;
- описание техники экспериментов с ВВ и оптики взрывных явлений.

### 4. Создание первой атомной бомбы РДС-1

9 апреля 1946 г. Совет Министров СССР принял закрытое постановление № 806-327 о создании конструкторского бюро № 11 (КБ-11). Так была названа организация, призванная создать атомную бомбу.

Этим постановлением определялось руководство КБ-11, начальником был назначен П.М. Зернов, главным конструктором — Ю.Б. Харитон.

Создание атомной бомбы требовало решения исключительно широкого круга физических и технических вопросов, связанных с проведением обширной программы расчётно-теоретических исследований, проектно-конструкторских и экспериментальных работ.

Прежде всего предстояло провести исследования физико-химических свойств делящихся материалов, разработать и апробировать методы их литья и механической обработки.

Необходимо было создать радиохимические методы извлечения различных продуктов деления, организовать производство полония и разработать технологию изготовления источников нейтронов.

Требовались методики определения критической массы, разработка теории эффективности или коэффициента полезного действия, а также теории ядерного взрыва в целом.

Особый раздел обширных работ был связан с теорией сходящейся детонационной волны, вопросами детонации ВВ и процессами, происходящими с фронтом детонационной волны при переходе детонации из одного ВВ в другое, при столкновении детонационных волн, исходящих из различных точек, изучением сжимаемости металлов при больших давлениях.

Экспериментальные исследования свойств веществ, входящих в состав физической схемы заряда, создавали фундамент для верификации физических представлений о процессах, происходящих в заряде на его газодинамической стадии.

Нужны были лабораторные методы исследования газодинамических процессов, протекающих при взрыве сферического заряда ВВ, и методы определения параметров ядерного взрыва при полигонных испытаниях.

Для разработки РДС-1 важное значение имела физическая теория ядерного взрыва, в основе которой лежали уравнения газодинамики, диффузии теплового излучения и переноса нейтронов. Решение этих задач требовало использования методов приближённых вычислений. Большинство математических расчётов в то время проводилось в четырёх специализированных математических подразделениях:

- в отделе приближённых вычислений Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР, руководимом К.А. Семеняевым;
- в расчётном бюро Института физических проблем во главе с Л.Д. Ландау и Н.Н. Мейманом;
- в математическом отделе Института геофизики АН СССР, руководимом А.Н. Тихоновым;
- в отделе приближённых вычислений Ленинградского отделения Математического института им. В.А. Стеклова под руководством Л.В. Канторовича.

Создание инфраструктуры производства оружейного плутония представляло собой главный технологический этап реализации ядерной оружейной программы СССР. Ещё 22 марта 1943 г. в записке заместителю Председателя Правительства М.Г. Первухину по анализу данных разведки И.В. Курчатов, в частности, писал: «...кроме того, указано, что, может быть, продукты сгорания ядерного топлива в "урановом котле" могут быть использованы вместо урана-235 в качестве материала для бомбы... Перспективы этого направления необычайно увлекательны...» [2].

С пуском в конце 1944 г. в Лаборатории № 2 первого циклотрона (в его создание большой вклад внесли Л.М. Немёнов и В.П. Джелепов) появились возможности получения микроскопических количеств плутония.

Пуск первого ядерного реактора Ф-1 25 декабря 1946 г. значительно расширил эти возможности. В то время уже твёрдо было установлено, что плутоний, накопленный в процессе нейтронного облучения в уране, может быть действительно выделен доступным химическим способом.

23 августа 1946 г. вышло постановление Правительства о строительстве первых очередей комбината № 817 по производству плутония (Челябинск-40; производственное объединение "Маяк").

19 июня 1948 г. под руководством И.В. Курчатова был начат запуск реактора "А" с нулевой отметки, и 22 июня мощность этого реактора достигла проектного значения — 100 МВт. Строительство реактора заняло 1,8 года, столько же времени заняли его разработка и проектирование.

Радиохимические процессы по выделению плутония были разработаны под руководством В.Г. Хлопина в Радиевом институте Академии наук в Ленинграде.

Разработка технологии получения чистого металлического плутония была осуществлена под научным руководством А.А. Бочвара.

В 7 часов утра 29 августа 1949 г. был произведён взрыв РДС-1, который ознаменовал успешное завершение разработки и проведение испытания первой атомной бомбы в СССР.

Использовавшаяся в опыте аппаратура позволила провести оптические наблюдения и измерения теплового потока, параметров ударной волны, характеристики нейтронного излучения и гамма-излучения, определить уровень радиоактивного загрязнения местности в районе взрыва и вдоль следа облака взрыва, изучить воздействие поражающих факторов ядерного взрыва на биологические объекты.

Энерговыделение первой советской атомной бомбы составило 22 кт тротилового эквивалента.

СССР стал обладателем технологии создания ядерного оружия и сумел подготовить его промышленное производство.

Следует отметить принципиальную важность того обстоятельства, что, несмотря на аналогичность схемы заряда американской, его конструкция, отработка, обоснование определяющих физических процессов, производство и технология были советскими.

История разработки первой атомной бомбы СССР является образцом высокой организованности всех служб самой разной направленности, самоотверженной работы всех участников её создания, чёткости взаимодействия и высокой ответственности за порученное дело.

Ю.Б. Харiton писал: "Я поражаюсь и преклоняюсь перед тем, что было сделано нашими людьми в 1946–1949 гг. Было нелегко и позже. Но этот период по напряжению, героизму, творческому взлёту и самоотдаче не поддаётся описанию..." [3].

## 5. Влияние Атомного проекта на научные и технологические программы СССР

С Атомным проектом были связаны масштабные научные программы, реализация которых привела к интенсивному развитию ядерной физики в СССР.

4 марта 1946 г. было принято постановление Совета Народных Комиссаров (СНК) СССР "О мерах развития исследований космических лучей". В рамках этих работ, в частности, предполагалось:

- выяснение природы космических лучей, их состава и процессов воздействия на атомные ядра частиц сверхвысоких энергий;
- выяснение механизма ядерных превращений, вызываемых космическими лучами;
- проведение работ по решению проблемы искусственного получения потоков частиц с энергией, сравнимой с энергией космических лучей.

Руководство выполнением этих задач было возложено на С.И. Вавилова, А.И. Алиханова и Д.В. Скobel'цына. В этих целях предписывалось, в частности, создать высокогорные Памирскую и Эльбрусскую и подземную Московскую (метрополитен) постоянно действующие станции по изучению космических лучей.

В августе 1946 г. к И.В. Сталину поступило письмо с представлением на утверждение проекта постановления Совета Министров (СМ) СССР "О проектировании и сооружении мощного резонансного ускорителя электронов" по проекту В.И. Векслера. Целью создания ускорителя с энергией электронов до 1 ГэВ явилось исследование взаимодействия таких электронов с атомными ядрами и получение мезонов. Проект связывался с проблемой ядерного оружия. Соответствующее постановление СМ СССР было утверждено 13 августа 1946 г.

В это же время И.В. Сталину было направлено письмо с представлением на утверждение проекта постановления СМ СССР "О строительстве мощного циклотрона" с энергией частиц до 0,25 ГэВ, близкой к энергии космических лучей. Предполагалось, в частности, что установка позволит "перейти к открытию новых физических явлений (открытию новых элементов, новых способов получать атомную энергию из более дешёвых источников, чем уран)". Инициатива предложения исходила от С.И. Вавилова, И.В. Курчатова, А.И. Алиханова, Д.В. Скobel'цына и Л.А. Арцимовича. Постановление было утверждено 13 августа 1946 г.

22 апреля 1946 г. президент АН СССР С.И. Вавилов направил руководству страны записку об организации исследований в связи с проблемой использования атомной энергии. В этой записке фактически идёт речь о взаимном влиянии атомной проблемы и развития фундаментальных научных исследований. В записке [4], в частности:

- предлагалось мобилизовать и реорганизовать математическую область исследований, прежде всего за счёт использования "машинной" математики. В связи с этим высказывались соображения о необходимости создания в системе АН СССР специального Института "машинной" математики и приближённых вычислений;

- отмечалось, что возможность использования атомной энергии даёт способ концентрации огромной энергии в опытных установках разного рода, что позволит изучать свойства материалов при чрезвычайно высоких давлениях, плотностях и температурах, исследовать распространение излучения при огромных интенсивностях;

- отмечалась необходимость проведения исследований новых методов физических измерений различных физических величин и явлений;

- указывалось, что большое значение приобретают исследования фотохимических процессов под действием интенсивной световой радиации, химических процессов под действием нейtronов и других частиц, химических реакций и кинетики при очень больших давлениях и температурах;

- говорилось о необходимости широкого использования сейсмологии и сейсмических приборов для изучения мощных взрывов, сопровождающих быстрое освобождение ядерной энергии;

- отмечалось, что огромные запасы ядерной энергии могут быть привлечены для искусственного изменения климата (таяние льдов, расширение водоёмов, создание плотин, центров конденсации воды);

- подчёркивалась необходимость широкого проведения исследований действия радиации на человека, животных и растения и развития в этих целях физиологии, генетики, медицины и агрономии.

В ответ на эти предложения постановление СМ СССР от 16 октября 1946 г. предписывало развивать научно-исследовательские работы по изучению атомного ядра и использованию ядерной энергии в технике, химии, медицине и биологии. К числу тем исследований, в частности, относились [5, с. 76, 77]:

- поисковые работы по прямому преобразованию энергии радиации в другие виды энергии;
- развитие методов измерения акустических волн, сопровождающих взрыв на больших расстояниях;
- сжимаемость металлов при высоких и сверхвысоких давлениях;

- радиохимические исследования;
- определение вещественного носителя урана в естественных рудах;
- изучение радиоактивного распада в земной коре;
- фотохимические процессы в белках при поглощении ультрафиолетовых, рентгеновских и корпускулярных лучей;
- влияние облучения ионизирующей радиацией на рост и обмен веществ растений и живых организмов;
- действие радиоактивных излучений на органы человека;
- действие радиоактивных излучений на элементарные биологические процессы;
- терапевтическое применение новых видов радиации и радиоактивных веществ.

К этим же видам работ относились:

- разработка методов, организация и проведение машинно-вычислительных работ;
- изучение ядерного фотоэффекта на бериллии;
- изучение свойств нейтрino и его влияния на ядерные процессы;
- конструирование типовых приборов для радиоактивных исследований;
- изучение оптики световых потоков большой интенсивности;
- изучение обмена веществ в растениях с помощью меченых атомов.

Ещё до создания первой атомной бомбы, в 1948 г. была поставлена задача проведения исследований по вопросу о возможности создания эффективных средств противодействия атомному оружию. С таким предложением выступил руководитель Института химической физики АН СССР Н.Н. Семёнов. Смысл предложения состоял в том, что необходимо сосредоточить усилия на исследовании воздействия на делящиеся материалы потоков высокоэнергетических частиц (нейтронов, протонов, дейtronов), а также их прохождения через внешние слои атомной бомбы и атмосферу. Кроме того, отмечалась необходимость создания специальных ускорителей, которые позволяли бы получать частицы с энергиями выше 100 МэВ. Первый этап экспериментальных работ предполагалось проводить на имевшихся в то время установках, а также с использованием естественного фона космических лучей. В августе 1948 г. было принято постановление СМ СССР, которое обязывало Институт химической физики, Физический институт АН СССР, Лабораторию № 2 и Физико-технический институт АН УССР провести необходимые научно-исследовательские работы по этой проблеме в 1948–1949 гг. Этот проект явился прообразом дальнейших разработок средств противодействия ядерному оружию.

Особое место в использовании атомной энергии в мирных целях занимала проблема создания энергетических реакторов. США уже в апреле 1946 г. предполагали начать строительство атомной электростанции с газовым теплоносителем в Окридже и ввести её в эксплуатацию в 1948 г.

В 1946 г. И.В. Курчатов рассматривал возможность использования в СССР графитового реактора (который разрабатывался тогда для наработки оружейного плутония) в целях производства энергии. В 1947 г. в печати появились сообщения о начале работ по созданию атомной электростанции в США, и это обстоятельство подтолкнуло развитие аналогичных работ в СССР.

В 1949 г. в Лаборатории № 2 исследовались возможные направления создания энергетических реакторов для транспорта и атомной энергетики. 16 мая 1949 г. постановление Правительства определило начало работ по созданию первой атомной электростанции (АЭС). В качестве места строительства АЭС был определён г. Обнинск, а в её создании ключевую роль играли Лаборатория В (ныне — Государственный научный центр (ГНЦ) "Физико-энергетический институт") и Лаборатория № 2 (ныне — Российский национальный центр (РНЦ) "Курчатовский институт"). Научным руководителем работ по созданию первой АЭС был назначен И.В. Курчатов, главным конструктором реактора — Н.А. Доллежаль.

В ноябре 1949 г. на заседании Специального комитета при СМ СССР было принято решение:

"В целях изыскания возможностей использования атомной энергии в мирных целях (возможности разработки проектов силовых установок и двигателей с применением атомной энергии) поручить тт. Курчатову, Александрову, Доллежалю, Бочвару, Завенягину, Первухину и Емельянову рассмотреть вопрос о возможных направлениях научно-исследовательских работ в этой области и свои соображения в месячный срок доложить Специальному комитету" [5, с. 351].

Вскоре стали проводиться исследования возможности создания ядерных энергетических установок для кораблей военно-морского флота и гражданских судов. Эти исследования стимулировались информацией из США о масштабных работах по созданию атомной подводной лодки. Эта задача требовала совершенно новых решений — создания эффективного малогабаритного ядерного реактора с учётом жёстких ограничений, определяемых условиями его размещения и эксплуатации на подводной лодке.

## 6. Термоядерное усиление. "Слойка" Сахарова

12 августа 1953 г. на Семипалатинском испытательном полигоне прогремел первый в нашей стране термоядерный взрыв. Это было испытание знаменитой сахаровской "слойки" — термоядерного заряда с маловыразительным индексом РДС-6с. Испытание оказалось исключительно успешным, изделие сработало "по верхнему пределу" и оправдало все возлагавшиеся на него ожидания как идеологов и руководителей проекта, учёных и конструкторов, так и руководителей страны и атомной отрасли.

Центральной фигурой проекта РДС-6с был Андрей Дмитриевич Сахаров, который за осуществление этого проекта был удостоен высших государственных наград и стал академиком АН СССР прямым избранием, минуя ступень члена-корреспондента.

Можно без преувеличения сказать, что разработка РДС-6с явилась одним из знаковых событий XX в., крупным шагом на пути к созданию ядерного щита нашей страны.

В основе РДС-6с лежал принцип ионизационного сжатия термоядерного горючего ("первая идея" по терминологии А.Д. Сахарова). А.Д. Сахаров отмечал: "Предполагалось, что детонационная волна, первоначально создаваемая инициатором (ядерным взрывом), обжимает тяжёлую воду и уран (до ~ 7 раз) и нагревает их до температуры ~ 10 кэВ (в условиях равновесия излучения с веществом). В изотермических условиях происходит процесс выравнивания давлений в уране и тяжёлой воде,

что приводит к дополнительному существенному сжатию тяжёлой воды (~ 7 раз) и соответствующему ускорению термоядерных реакций" [6, с. 30] (см. также [7]). Впоследствии этот процесс был назван "сахаризацией".

Далее А.Д. Сахаров предложил существенно более эффективную схему "слойки" на принципе имплозии: в центр помещается детонатор, на котором располагаются гетерогенные слои термоядерного горючего и урана. Вся система обжимается ВВ, расположенным снаружи слойки. Инициирование слойки происходит за счёт энергии взрыва атомного детонатора.

Это было исключительно плодотворное и прагматичное соединение фундаментальных физических идей "сахаризации" и имплозии.

Динамика многослойного заряда рассчитывалась в рамках системы гидродинамических уравнений, которые включали в себя уравнение непрерывности среды, уравнение движения в форме Эйлера и уравнение сохранения энергии. Уравнение сохранения энергии содержало источник энергии, определяемый нейтронно-ядерными взаимодействиями. Внутренняя энергия среды включала в себя материальную энергию и энергию излучения, а перенос энергии излучения в среде определялся в рамках приближения лучистой теплопроводности.

В 1950 г. Е.С. Фрадкин уточнил уравнение состояния урана в рамках модели Томаса–Ферми. Для уровня температур, характерного для стадий зажигания и горения термоядерного горючего, было получено, что материальная энергия среды, согласно модели Фрадкина, оказалась примерно в два раза больше, чем в исходной модели. При этом давление в уране при одинаковой температуре и плотности в обеих моделях практически не различалось. Это был важный пример того, как уточнение физической модели может существенно влиять на описание физических параметров основных процессов.

Одним из существенных факторов, от которого зависел успех или провал разработки РДС-6с, являлся эффект перемешивания термоядерных слоёв и слоёв урана в процессе ядерного взрыва. А.Д. Сахаров писал: "В процессе разлёта многослойного заряда развиваются большие ускорения. В результате этого становятся неустойчивыми поверхности раздела слоёв... Неустойчивость поверхности раздела приводит к перемешиванию... Перемешивание является весьма неблагоприятным фактором, поскольку при этом уменьшается скорость термоядерной реакции" [6, с. 69].

Процесс перемешивания разделялся на две стадии:

- начальную стадию экспоненциального возрастания начальных возмущений;

- стадию развитого турбулентного перемешивания.

Обе стадии были исследованы С.З. Беленьким: первая — в 1949 г., вторая — в 1949–1950 гг.

Далее отмечалось, что "при косом падении ударной волны на лёгкий слой возникает дополнительный источник их перемешивания — тангенциальные разрывы. Влияние этого фактора, в отличие от гравитационного перемешивания, не зависит от малых начальных возмущений" [6, с. 70]. Значение данного фактора также оценивалось С.З. Беленьким (1949 г.). Было показано, что роль этого эффекта сравнима с ролью "гравитационного" перемешивания.

Работы по обоснованию конструкции РДС-6с положили начало созданию в нашей стране новой отрасли знаний — вычислительной математики и вычислитель-

ной техники. Один из ведущих разработчиков РДС-бс физик-теоретик Ю.А. Романов писал: "... в процессе разработки РДС-бс рождалась новая научная отрасль — вычислительная математика. Несмотря на примитивность вычислительных средств, благодаря творческому вкладу выдающихся учёных М.В. Келдыша, А.Н. Тихонова, К.А. Семеняева, Л.В. Канторовича стал возможным численный расчёт сложного процесса — взрыва термоядерного заряда" [6, с. 169].

Государственная комиссия под председательством И.В. Курчатова приняла решение провести испытания первой водородной бомбы РДС-бс 12 августа 1953 г. в 7 ч 30 мин по местному времени на Семипалатинском полигоне.

Предварительный отчёт по результатам испытаний, который был подготовлен через три дня после испытаний, подписан И. Курчатовым, Ю. Харитоном, К. Щёлкиным, И. Таммом, А. Сахаровым, М. Лаврентьевым, Я. Зельдовичем, В. Давиденко, В. Комельковым, Н. Духовым, Е. Забабахиным, М. Садовским, Н. Боголюбовым. В отчёте приведена сводка данных по физическим измерениям и общей картине взрыва. По результатам анализа делается вывод, что "полный тротиловый эквивалент изделия РДС-бс находится в пределах между 350 и 400 тыс. тонн" [6, с. 112].

Выдающийся физик Г. Бете в 1953 г. вполне искренне сказал о создании РДС-бс: "Я не знаю, как они его сделали. Поразительно, что они смогли его осуществить" [6, с. 117].

Отметим, что менее чем за два месяца до проведения испытания РДС-бс, 16 июня 1953 г., в докладе президенту США Центральное разведывательное управление США сообщало, что у него "нет доказательств, что термоядерное оружие развивается в СССР" [6, с. 11].

## 7. Принцип радиационной имплозии. РДС-37

В основе создания РДС-37 и следующих поколений термоядерных зарядов лежат фундаментальные научные представления физики высоких плотностей энергии. Этот принцип предполагает:

- выход значительной части энергии при взрыве ядерного заряда (первичного модуля) в виде рентгеновского излучения;
- транспортировку энергии рентгеновского излучения к термоядерному модулю;
- имплозию термоядерного модуля с помощью энергии "доставленного" рентгеновского излучения.

Ещё в начале 1950-х годов обсуждалась возможность более эффективного сжатия ядерного материала по сравнению со сжатием, обеспечиваемым взрывом химических ВВ. Первоначально эта идея была сформулирована в общем виде как идея использования ядерных взрывов одного или нескольких зарядов для обжатия ядерного горючего, находящегося в отдельном модуле, пространственно отделённом от первичного источника (источников) ядерного взрыва.

В январе 1954 г. Я.Б. Зельдович и А.Д. Сахаров детально рассматривали схему, которая содержала принципиальное представление о двухстадийном ядерном заряде. С самого начала в отношении возможности реализации этой идеи возник ряд вопросов, которые можно объединить в две группы.

Первая группа вопросов относилась к самому понятию "ядерной имплозии". Хорошо изученная к тому

времени схема работы ядерного заряда предполагала обжатие ядерного (или ядерного и термоядерного, как в РДС-бс) материала сферическим взрывом химических ВВ, в котором сферическая симметрия имплозии определялась исходной сферически-симметричной детонацией взрывчатки. Было очевидным, что в гетерогенной структуре из первичного источника (источников) и обжимаемого вторичного модуля аналогичные первоначальные возможности для реализации сферически-симметричной "ядерной имплозии" отсутствуют. Этот вопрос был тесно связан с другими вопросами: что является носителем энергии взрыва первичного источника и как осуществляется этот перенос энергии ко вторичному модулю?

Вторая группа вопросов была связана с тем, что должен представлять собой вторичный модуль, на который воздействует ядерная имплозия.

Первоначально предполагалось, что перенос энергии ядерного взрыва первичного источника в двухстадийном заряде должен осуществляться потоком продуктов взрыва и создаваемой ими ударной волной, распространяющейся в гетерогенной структуре заряда. В январе 1954 г. данный подход был проанализирован Я.Б. Зельдовичем и А.Д. Сахаровым. При этом за основу физической схемы вторичного модуля было решено взять аналог внутренней части заряда РДС-бс, т.е. "слоёную" систему сферической конфигурации.

Следует отметить, что это была исключительно сложная система с точки зрения вычислительных возможностей того времени. Основная проблема состояла в том, каким образом в подобном заряде можно было бы обеспечить близкое к сферически-симметричному режиму сжатие вторичного модуля, поскольку скорости распространения ударных волн вокруг модуля и внутри него различались не слишком сильно.

Через несколько месяцев работы над проектом было найдено решение этой проблемы — разработан так называемый принцип окружения, согласно которому перенос энергии первичного модуля осуществлялся рентгеновским излучением, а для формирования направленности переноса энергии первичный и вторичный модули заключались в единую оболочку (как и в случае гидродинамической имплозии в январском проекте), обладавшую хорошим качеством для отражения рентгеновского излучения; были также обеспечены меры, способствующие переносу рентгеновского излучения внутри заряда в нужном направлении.

А.Д. Сахаров так описывает возникновение идеи радиационной имплозии ("третьей идеи", как он её называет) в КБ-11 [8]:

«По-видимому, к "третьей идеи" одновременно пришли несколько сотрудников наших теоретических отделов. Одним из них был я. Мне кажется, что я уже на ранней стадии понимал основные физические и математические аспекты "третьей идеи". В силу этого, а также благодаря моему ранее приобретённому авторитету, моя роль в принятии и осуществлении "третьей идеи", возможно, была одной из решающих. Но также, несомненно, очень велика была роль Зельдовича, Трутнева и некоторых других, и, быть может, они понимали и предугадывали перспективы и трудности "третьей идеи" не меньше, чем я».

8 июля 1955 г. был выпущен отчёт "Опытное устройство для проверки принципа окружения (расчёто-теоретические работы)", который является итоговым материа-

лом по определению характеристик основных физических процессов, протекающих в РДС-37, его физических параметров, включая прогнозируемое энерговыделение.

Во введении этого отчёта указывается: «...принцип окружения разрабатывался в теоретических секторах с 1950 г. В начале 1954 г. были достигнуты первые успехи, а именно была выяснена принципиальная возможность получить симметричное обжатие водородной бомбы ("основного изделия") за счёт лучистого теплообмена дополнительного ("первичного") изделия со слоем лёгкого вещества ("обмазка"), окружающего основное изделие.

В изделиях, использующих принцип окружения, важнейшую роль играет ряд процессов, которые никогда ранее не были проверены экспериментально и не исследовались теоретически.

1. Лучистый теплообмен в полости сложной формы.
2. Проникновение тепла в "обмазку" и в "кожух", сопровождающееся разлётом в вакуум.

Согласно расчётам, предлагаемая система является надёжной. Её мощность оценена как лежащая в пределах 600–1400 тыс. тонн.

Разработка принципа окружения является одним из ярких примеров коллективного творчества. Одни давали идеи (идей потребовалось много, и некоторые из них независимо выдвигались несколькими авторами). Другие более отличались в выработке методов расчёта и выяснении значения различных физических процессов» [9].

Из заключения экспертной комиссии И.Е. Тамма от 1 июля 1955 г.: "Комиссия отмечает, что КБ-11 и ОПМ<sup>1</sup> проделана весьма большая работа по исследованию новых физических принципов, положенных в основу конструкции водородных бомб с атомным обжатием" [9].

Испытанием РДС-37 руководил И.В. Курчатов. В подготовке изделия к испытанию и в его проведении принимало участие руководство Министерства обороны СССР: заместитель министра обороны А.М. Васильевский, М.И. Неделин, В.А. Болятко, заместитель Председателя СМ СССР — министр Министерства среднего машиностроения А.П. Завенягин с большой группой руководителей МСМ, руководители институтов, в которых разрабатывались методики измерений.

На испытаниях присутствовала большая группа выдающихся математиков: М.В. Келдыш, И.М. Гельфанд, С.К. Годунов, В.Ф. Дьяченко, О.В. Локуциевский, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов.

Сводные материалы по результатам испытания изделия РДС-37 были подписаны И.В. Курчатовым, Ю.Б. Харитоном, Н.Н. Семёновым, А.Д. Сахаровым, Я.Б. Зельдовичем, М.А. Садовским.

Рассмотрев результаты испытания РДС-37 на заседании 24 ноября 1955 г., комиссия отметила следующее:

- успешно испытана конструкция водородной бомбы, основанная на новом принципе;
- необходимо дальнейшее детальное исследование процессов, протекающих при взрыве бомбы этого типа;
- дальнейшую разработку водородных бомб следует проводить на основе широкого использования принципов, положенных в основу бомбы РДС-37.

<sup>1</sup> ОПМ — Отделение прикладной математики Математического института АН СССР. (Примеч. ред.)

Успешное испытание первого термоядерного устройства на принципе атомного обжатия позволило перейти к широкомасштабной разработке термоядерных зарядов.

Созданием заряда РДС-37 был совершён прорыв в решении проблемы термоядерного оружия, а сам заряд стал прототипом всех последующих двухстадийных термоядерных зарядов СССР.

## Список литературы<sup>2</sup>

1. Рябев Л Д (Общ. ред.), Кудинова Л И (Сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 1 1938–1945 Ч. 1* (М.: Физматлит, 1998) с. 306, 307
2. "У истоков советского атомного проекта: роль разведки. 1941–1946" *Вопросы истории естествознания и техники (3)* 116, 117 (1992)
3. Харитон Ю Б "Вступление СССР в атомную эру", в кн. Андрюшин И А, Чернышев А К 60 лет мира, 1949–2009. К шестидесятилетию испытания первой советской атомной бомбы (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2009) с. 3
4. Рябев Л И (Общ. ред.), Гончаров Г А (Отв. сост.) *Атомный проект СССР. Документы и материалы Т. 2 Атомная бомба. 1945–1954* Кн. 2 (Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000) с. 491–494
5. Андрюшин И А, Чернышев А К, Юдин Ю А *Укращение ядра. Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР* (Саров, Саранск: Тип. "Красный Октябрь", 2003)
6. Андрюшин И А, Илькаев Р И, Чернышев А К "Слойка" Сахарова. Путь гения (Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011)
7. Илькаев Р И УФН **182** 195 (2012) [Ilkaev R I *Phys. Usp.* **55** 183 (2012)]
8. Сахаров А Д *Научные труды* (Редколлегия: Л В Келдыш (предс.) и др.) (М.: ОТФ ФИАН — ЦентрКом, 1995)
9. Андрюшин И А, Илькаев Р И, Чернышев А К *Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37* (Саров: ФГУП РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2010) с. 66, 77
10. Харитон Ю Б, Адамский В Б, Смирнов Ю Н УФН **166** 201 (1996) [Khariton Yu B, Adamskii V B, Smirnov Yu N *Phys. Usp.* **39** 185 (1996)]
11. Романов Ю А УФН **166** 195 (1996) [Romanov Yu A *Phys. Usp.* **39** 179 (1996)]
12. Гончаров Г А УФН **166** 1095 (1996) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **39** 1033 (1996)]
13. Кадомцев Б Б УФН **166** 449 (1996) [Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **39** 419 (1996)]
14. Гончаров Г А УФН **167** 903 (1997) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **40** 859 (1997)]
15. Кривоносов Ю И УФН **170** 1021 (2000) [Krivonosov Yu I *Phys. Usp.* **43** 949 (2000)]
16. Гончаров Г А, Рябев Л Д УФН **171** 79 (2001) [Goncharov G A, Ryabev L D *Phys. Usp.* **44** 71 (2001)]
17. Гончаров Г А УФН **171** 902 (2001) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **44** 859 (2001)]
18. Шафранов В Д, Бондаренко Б Д, Гончаров Г А, Лаврентьев О А, Сахаров А Д УФН **171** 877 (2001) [Shafranov V D, Bondarenko B D, Goncharov G A, Lavrent'ev O A, Sakharov A D *Phys. Usp.* **44** 835 (2001)]
19. Киселев Г В УФН **175** 1343 (2005) [Kiselev G V *Phys. Usp.* **48** 1251 (2005)]
20. Гончаров Г А УФН **175** 1243 (2005) [Goncharov G A *Phys. Usp.* **48** 1187–1196 (2005)]
21. Киселев Г В, Конев В Н УФН **177** 1361 (2007) [Kiselev G V, Konev V N *Phys. Usp.* **50** 1259 (2007)]
22. Киселев Г В УФН **178** 947 (2008) [Kiselev G V *Phys. Usp.* **51** 911 (2008)]
23. Мирнов С В УФН **179** 767 (2009) [Mirnov S V *Phys. Usp.* **52** 725 (2009)]
24. Илькаев Р И УФН **181** 405 (2011) [Ilkaev R I *Phys. Usp.* **54** 387 (2011)]
25. Азизов Э А УФН **182** 202 (2012) [Azizov E A *Phys. Usp.* **55** 190 (2012)]

<sup>2</sup> Об истории создания отечественного ядерного щита и мирного использования атома см. также [10–25] (Примеч. ред.)

PACS numbers: 01.65.+g, 04.20.-q, 95.35.+d, 95.55.-n, 98.80.-k  
 DOI: 10.3367/UFN.0183.201305i.0535

## История истории Вселенной

А.М. Черепашук

### 1. Введение

В этом обзоре мы опишем историю развития наших представлений о строении и эволюции Вселенной. Рассмотрим две революции в астрономии: переход от геоцентрической системы мира к гелиоцентрической, а также переход от модели стационарной Вселенной к модели нестационарной, расширяющейся Вселенной, прошедшей инфляционную стадию развития. Сейчас мы находимся на пороге третьей революции в астрономии, связанной с открытием ускоренного расширения Вселенной и осознания того факта, что барионное вещество составляет всего лишь около 4 % от полной плотности материи во Вселенной. Выдающиеся достижения современной космологии поражают воображение (см., например, монографии [1–3]).

Представляет интерес вернуться к истокам развития астрономии и проследить, как формировалась современная космологическая модель Вселенной. Это особенно важно в связи с тем, что в последние годы в нашей стране всё более утверждается порочный принцип: "вперёд к прошлому". Под лозунгом возврата к древним традициям, к историческим корням нашего народа в стране возрождаются язычество и мракобесие. Подвергается нападкам материалистическое видение мира. Идёт выхолащивание естественнонаучных предметов из школьных образовательных программ. В частности, вот уже свыше 10 лет астрономия как отдельный предмет не преподается в российских школах. Телевидение, радио и другие средства массовой информации захлестнула волна воинствующего мракобесия. И сейчас мы имеем вполне закономерный результат: согласно опросам Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), доля граждан России, считающих, что Солнце вращается вокруг Земли, а не наоборот, возросла с 2007 по 2011 г. от 29 % до 33 % ([wciom.ru/index.php?d=459&uid=111345](http://wciom.ru/index.php?d=459&uid=111345)). Так что треть населения нашей страны придерживается средневековой точки зрения на мир, и, что очень печально, число таких людей растёт. Поэтому можно считать, что написание нашего обзора вполне своевременно.

### 2. Астрономия — древнейшая наука

Первые обнаруженные следы ранней астрономической деятельности человека относятся к VII–VIII тысячелетиям до нашей эры (н.э.) [4–6]. Как правило, это подобия наблюдательных астрономических площадок, астрономические рисунки и изображения лунных календарей на стенах пещер. Например, древние майя наносили астрономические рисунки на стены пещер более шести тысячелетий назад [7, 8]. По-видимому, имеются свидетельства астрономической деятельности человека даже в XX тысячелетии до н.э., например, найденный под Ачинском жезл из кости мамонта с числом лунок в его орнаменте, соответствующим различным астрономиче-

**А.М. Черепашук.** Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ  
 E-mail: cherepashchuk@gmail.com

ски значимым периодам [9]. Все эти следы относятся к так называемой доисторической астрономии.

Астрономическая деятельность человека, отражённая в письменных источниках, относится к исторической астрономии. Первые свидетельства исторической астрономии соответствуют II–III тысячелетиям до н.э. [10, с. 26].

В I тысячелетии до н.э. появляются первые попытки осознания Вселенной в целом как упорядоченного устройства, попытки понять её состав, собственные законы развития и даже происхождение.

Наиболее ранние дошедшие до нас такие идеи пробивались в религиозных космофизических "тимнах" — ведах — жителей древней Индии [11, 12]. Например, в древнеиндийской *Rигведе* — книге гимнов (X в. до н.э.) сказано, что Земля — это "общирное плоское пространство", покрытое сверху небом — "голубым сводом", усеянным звёздами [10, с. 47–51].

Попытки описать в целом Вселенную, в центре которой расположена плоская Земля, встречаются в хрониках древних придворных астрономов-чиновников Китая, в котором занятия астрономией были ответственной государственной службой [10, с. 37–43; 13, с. 93–104]. Но особенно ярко и многообразно такие попытки проявились в научных сочинениях-поэмах *O природе* (о сущности вещей) у первых натурфилософов и астрономов древней Греции, с её не вполне тоталитарным государственным устройством и наличием сравнительно большой свободы мышления [13, с. 107; 14].

Ранняя астрономия, помимо прикладного назначения (ориентация в пространстве и во времени, предсказания времени начала сельскохозяйственных работ и т.п.), носила культовый характер, что выражалось прежде всего в поклонении небесным светилам (первоначальные астральные формы религии), а также в толковании движений небесных тел и небесных явлений как сигналов с неба (зарождение астрологии).

Умение на основе наблюдений предсказывать некоторые периодические явления (например, солнечные и лунные затмения) делало астрономию в руках причастных к ней жрецов в тоталитарных государствах (наподобие Древнего Египта и Вавилонии в Месопотамии) большой политической силой. Поэтому культовая жреческая астрономическая деятельность была строго засекреченной.

### 3. Древнейшие идеи о "привычных" и новых формах материи во Вселенной

Древние мыслители старались свести всё многообразие наблюдаемого мира к немногим первичным элементам<sup>1</sup>. Обычно в качестве первооснов мыслились четыре сущности.

Прежде всего, это "земля", которой придавалась центральная роль.

Вторая первооснова — это "вода" как вечно движущаяся среда. Родоначальник греческой науки Фалес Милетский в VII в. до н.э. считал, что на воде и держится — плавает — тяжёлая плоская цилиндрическая Земля [10, с. 60; 13, с. 109].

<sup>1</sup> Впоследствии этот принцип чётко сформулировал английский логик и философ XIV в. У. Оккам: "Сущности не следует умножать без необходимости". Так называемая бритва Оккама стала одним из руководящих принципов при построении теории и даже служила признаком её правильности.

Третья первооснова — это "воздух" как вездесущая субстанция, проявляющаяся в ветре и вихрях. Анаксимен в VI в. до н.э. полагал, что именно на вихре воздуха, как на подушке, держится Земля [10, с. 61].

Четвёртая первооснова — это "огонь" как наиболее лёгкая субстанция, проявляющаяся в небесных светилах. Так считали Анаксимандр (VII в. до н.э.), ученик Фалеса и учитель Анаксимена, а также пифагореец Гераклит Эфесский (V в. до н.э.) — огнепоклонник-зороастрец и родоначальник диалектики в философии [10, с. 61, 62; 15, с. 358–365].

Платон (IV в. до н.э.), древнегреческий философ, математик и астроном, добавил к четырём "земным" первоосновам-сущностям (земля, вода, воздух и огонь) пятую — особую "небесную" первооснову, пятую сущность ("квинтэссенцию"), дав ей имя "эфир" [10, с. 73, 74].

Древнеиндийские натурфилософы (IV в. до н.э.) выдвинули ещё одну любопытную идею. Они предположили, что некоторая невидимая мировая среда, которую они называли "прана", обладает свойствами самодвижения и находится в состоянии "натяжения" (не напоминает ли это образ "пустой" Вселенной де Ситтера?) [10, с. 51].

Впервые материю представили как состоящую из микрочастиц-атомов Левкипп и Демокрит (V–IV в. до н.э.), различая их только по размерам и сложности формы, без её конкретизации [10, с. 67–72].

Количественные характеристики в понятие первоматерии (геометризацию) ввёл Платон, младший современник Левкиппа и Демокрита, основатель афинской академии (интересно отметить, что над входом в неё была предупреждающая надпись: "Не знающий геометрии да не войдёт сюда"). Платон придал частицам каждого первоэлемента форму одного из пяти правильных выпуклых многогранников ("платоновы тела"): куба (частицы земли), тетраэдра (частицы воздуха), октаэдра (частицы огня), икосаэдра — 20-гранника (частицы воды), додекаэдра — 12-гранника (частицы эфира) [10, с. 74].

#### 4. Плоская Земля в центре Мира

Древним мыслителям казалось очевидным, что Земля плоская, а сам человек ощущал себя находящимся в центре сферического небосвода. Поэтому первые модели Вселенной строились как геоцентрические — с плоской Землёй в её центре. Само возникновение Вселенной нередко связывалось с идеей первоначального жара (у древних индийцев, у греков). Особенно примечательна модель Вселенной Анаксимандра (VII в. до н.э.) [10, с. 60, 61] (рис. 1). Возникновение Вселенной Анаксимандр представлял как результат перегрева центрального тела — "зародыша" — и разрыва его на несколько колец ("космосов") из некой непрозрачной материи, заполненных небесным огнём. Небесные светила — это щели в "космосах"-кольцах, через которые огонь просвечивает. Вселенная снаружи также окружена внешней огненной средой. При этом Солнце и Луна расположены выше звёзд. В центре Вселенной находится плоская, в форме цилиндра (по Фалесу), ойкумена (т.е. обитаемая земля), а в её центре — Греция. (Аналогично в Месопотамии центром мира изображался Вавилон, а в Китае — сама "Поднебесная" — отражение ещё более древней топоцентристической системы мира.)

#### 5. Сферическая Земля в центре Мира

Ещё в VI в. до н.э. Пифагор учил, что Земля имеет форму шара. Доказательством тому могла служить, например,



Рис. 1. Модель Вселенной Анаксимандра (VII в. до н.э.) с плоской Землёй в центре.

круглая тень Земли, наблюдаемая на диске Луны во время лунных затмений [10, с. 64]. Парменид [10, с. 66], а затем Аристотель [13, с. 126–128] считали шарообразной, сферической, всю Вселенную. На эту мысль их наводил не только окружный вид небосвода, но и круговые суточные движения небесных тел. (Недаром греки наиболее совершенной среди форм считали сферу, а среди движений наиболее совершенными — равномерные круговые движения.)

Аристотель (384–322 гг. до н.э.) (рис. 2) впервые обобщил все накопленные в Греции и за её пределами знания о явлениях как на Земле, так и в космосе [10, с. 77–84] и оформил эти знания в первую в истории естествознания стройную, наблюдательно и физически обоснованную для своего времени геоцентрическую картину Мира. В центре Мира Аристотель поместил Землю как состоящую из наиболее тяжёлого элемента. Вокруг неё врачаются Солнце, Луна и пять известных тогда (видимых невооружённым глазом) планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Каждому из этих тел соответствует своя сфера, обращаясь вокруг центральной Земли. Тело прикреплено к своей сфере, поэтому оно тоже движется вокруг Земли. Самой удалённой сферой, охватывающей все остальные, являлась восьмая, на которой располагались звёзды. Эта сфера также обращалась вокруг Земли в соответствии с наблюдаемым суточным движением неба. Согласно физической теории Аристотеля, небесные сферы, как и сами небесные тела, представлялись состоящими из небесного материала — эфира, который не имеет свойств тяжести или лёгкости и существует в вечном кругообразном движении.

Вершиной развития геоцентрической картины Мира стала математическая теория Птолемея (II в.) [16, 17] (рис. 3), которая благодаря своей точности просуществовала почти два тысячелетия и, позволяя составлять достаточно точные астрономические таблицы положений небесных тел — эфемериды, обеспечила первые великие географические открытия Колумба и Америго Веспуччи и первые кругосветные плавания Магеллана (XV в.).

Предшественником и вдохновителем Птолемея был великий родоначальник точной наблюдательно-теоретической древнегреческой астрономии Гиппарх [10, с. 88–



Рис. 2. Аристотель (384–322 гг. до н.э.).

92; 13, с. 137–142] (II в. до н.э.), который первым перешёл от моделирования небесных движений с помощью врачающихся сфер (с прикреплёнными на них телами) к описанию их как сочетания равномерных движений по круговым орбитам. Применив метод Аполлония Пергского [10, с. 89] (III в. до н.э.) описания неравномерных движений путём сложения двух круговых равномерных движений (когда по одной, несущей, окружности (деференту) движется центр вторичной (эпипицели), на которой и укреплено исследуемое тело, отчего из центра деферента движение тела представляется неравномерным), Гиппарх показал, что при некоторых условиях движение по двум таким окружностям тождественно движению по одной окружности-эксцентрику. Центр последней оказался несколько смещённым от Земли. Таким образом Гиппарх впервые смог объяснить открытое тремя веками ранее неравномерное движение Солнца, поскольку в его модели появились апогей и перигей, а затем и движение Луны. Но для исследования планет у него не было ещё достаточно материала.

Птолемей, астроном и географ, живший в Александрии (Египет), получил возможность более полно использовать наблюдательное наследие астрономов Вавилона и создал первую полную строгую математическую (геоцентрическую) теорию движения всех подвижных светил — Солнца, Луны и планет — и на её основе мог весьма точно (с точностью, достаточной для наблюдений неба невооружённым глазом) вычислять видимые положения светил на небе. А эта задача оказалась весьма непростой, поскольку, например, планеты, в отличие от звёзд, движутся по небу неравномерно и иногда даже петлеобразно. Планета может остановиться среди звёзд и начать затем двигаться в противоположном направлении, а потом вновь остановиться и вернуться к прежнему направлению движения. Наблюдателю, считающему, что он смотрит на планеты, находясь на центральной неподвижной Земле, было очень трудно понять такое сложное движение планет. Вполне возможно, что именно поэтому планетам в те времена приписывалась



Рис. 3. Птолемей (около 90–около 168).

мистическая роль "вершителей судеб" людей, что и послужило основой для возникновения астрологии.

В теории Птолемея [13, с. 147–157] каждая планета участвует в нескольких круговых движениях: по первой окружности, основной (деференту), движется центр вторичной (эпипицели), по ней — центр нового эпипицели, для которого она служит деферентом и т.д., а планета прикреплена к последнему, верхнему, эпипицели. Причём плоскости эпипицелий и деферентов могут не совпадать, а некоторые — даже колебаться. Их сложение и даёт видимые траектории небесных тел. Говоря современным языком, теория Птолемея основывалась на разложении видимых траекторий небесных тел в ряды по сферическим функциям, типа рядов Фурье. Как отмечалось выше, математическая теория Птолемея неизменно и с хорошей точностью позволяла объяснять и предвычислять положения планет на небе и с немалой пользой служила людям на протяжении 14 веков (если считать от эпохи Птолемея). Теория Птолемея была освящена католической церковью и казалась незыблемой. Недаром арабские астрономы называли собрание трудов Птолемея *Альмагест* (Величайшее). Сам автор называл его намного скромнее: *Математике Мегале Синтаксис* (*Большое математическое построение*) [10, с. 93]. Уже в V в. труды Птолемея комментировали астрономы Индии. А получившие сочинение Птолемея как военный трофей в VII в., после падения античной цивилизации, астрономы Ближнего Востока сохранили этот труд, и благодаря им он стал доступен всему миру.

С укреплением новой, монотеистической, религии — христианства — геоцентрическая картина мира Аристотеля, вполне научная для своего времени, как и система мира Птолемея, сначала яростно отрицались католической церковью, как и всё языческое наследие эллинизма. Но в XIII в. (с подачи дальновидного теолога Фомы Аквинского, увидевшего в них опору и для христианства [10, с. 122; 18, с. 107–109]), эти системы были объединены в общее учение и превращены в религиозную догму, став на века тормозом для развития естествознания.

Сама теория Птолемея, которая с открытием новых неравномерностей в движении небесных тел обрастила новыми и новыми эпициклами (число которых к началу XVI в. достигло 80), становилась непомерно громоздкой, свидетельствуя о приближении кризиса в общей астрономической картине мира. Теорию Птолемея пытались совершенствовать на Востоке (ещё при полном отсутствии контактов с Западом): Насирэддин (XIII в.) [10, с. 115, 116] с этой целью отказался от самого остроумного изобретения Птолемея — введения эквантата, по существу прообраза второго закона Кеплера, тем самым сделав шаг назад, а двумя веками раньше энциклопедист Биоруни даже глухо высказывался о возможности движения Земли [19].

В Западной Европе в XIII–XIV вв., несмотря на церковный запрет, также стали пробиваться идеи о возможности нецентального положения и даже движения Земли. В середине XV в. немецкий математик, философ-космолог и крупнейший теолог Николай Кузанский (1401–1464) (добившийся высокого сана римского кардинала исключительно благодаря личным заслугам) в труде *Об учёном незнании* (1440 г.) изложил свою космологическую концепцию бесконечной изотропной Вселенной [20], провозгласив: "Центр Вселенной — везде, а граница — нигде". И далее: "Ни один звёздный участок не лишен жизни". Спустя полтора века его духовным наследником, развившим эту философскую картину до уровня поразительных конкретных астрономических предвидений, станет Джордано布鲁но.

## 6. Гелиоцентрическая система

### Мира Николая Коперника

Разрушителем, казалось бы, незыблемой геоцентрической системы Мира (отчасти даже вопреки своим первоначальным намерениям) стал великий польский астроном Николай Коперник (1473–1543) [21–23] (рис. 4). Пленённый ещё в студенческие годы в Краковском университете математическим гением Птолемея, Коперник уже вскоре понял главный изъян птолемеевской геоцентрической теории — в ней был нарушен главный методологический принцип бритвы Оккама. Для каждого светила строились свои, не связанные между собой, системы эпициклов, что делало теорию не только громоздкой, но и внутренне раздробленной: отсутствовала единая причина видимых закономерностей движения тел. В исторических поисках Коперник обнаружил высказывания древних философов об иной причине наблюдавшихся явлений — движении самого наблюдателя вместе с Землёй вокруг другого центра мира (мифического центрального священного очага — Гестии — у пифагорейцев (VI–V вв. до н.э. [10, с. 64]), или вокруг гораздо более реалистического тела — Солнца — в гипотезеalexандрийца Аристарха Самосского (III в. до н.э. [24])).

Энтузиазм Коперника в работе над новой теорией, которой он занялся уже в годы продолжения учёбы в Италии в начале XVI в., подогрело и обращение к нему как к уже известному математику и астроному отцов римской церкви после Латеранского собора 1512 г. с просьбой заняться подготовкой остро необходимой реформы юлианского календаря, непомерно разошедшегося с солнечным, что вносило сумятицу в расчёты главного церковного праздника — Пасхи. (Такая реформа требовала прежде всего нового уточнения теории движения Солнца и Луны.)

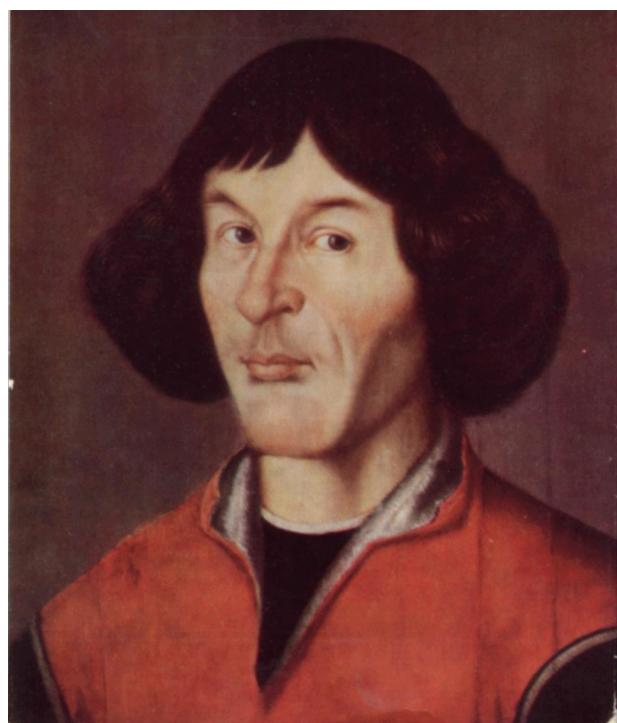


Рис. 4. Николай Коперник (1473–1543).

Таким образом, стимулами к созданию новой теории движения светил для Коперника стали прежде всего внутренняя логика развития науки, а также практические потребности тогдашней жизни, что вообще характерно для истории развития фундаментальных наук. Современные же высокопоставленные российские чиновники нередко требуют от нас, учёных, лишь исследований, напрямую задаваемых практическими нуждами. Вот, например, высказывание одного из них (заместителя председателя Комитета Государственной Думы РФ по науке и наукоёмким технологиям): "Промышленность исходя из рыночных потребностей должна ставить задачи перед прикладной наукой, а прикладная наука, опять же исходя из рыночных условий, должна ставить задачи перед фундаментальной наукой; это и должно определять финансирование фундаментальной науки". Таким образом, игнорируется общеизвестный факт, состоящий в том, что наука имеет свои законы развития, а научные знания обладают самостоятельной ценностью.

Основным положением своей теории Коперник избрал движение Земли вокруг Солнца. Чтобы достичь нужной точности описания движений планет, он был вынужден сохранить и в гелиоцентрической теории некоторое количество эпициклов (но только 34 против 80). Дело в том, что реальные орбиты планет — эллиптические, и движение по ним является неравномерным, однако Коперник по традиции оперировал лишь с равномерными движениями и круговыми орбитами. Поскольку в системе Мира Коперника наблюдатель следует за движением планет с движущейся Земли, сложные петлеобразные движения планет оказываются всего лишь отражением её годичного орбитального движения, результатом сложения векторов скоростей Земли и планет.

Это, кроме того, полностью развенчивало мистическую роль планет и лишало астрологию главного идеиного базиса. Приходится лишь удивляться тому, насколько живучи средневековые предрассудки даже в

современной России, где астрология, этот грязный бизнес, основанный на словоблудии и наглом мошенничестве, царит едва ли не на всех наших каналах телевидения и радио. Астрологические "предсказания" наносят не только моральный, но и экономический вред: до трети выгодных контрактов упускаются российскими бизнесменами по той причине, что астрологи не рекомендуют в данный день заниматься бизнесом...

Таким образом, благодаря Копернику мы узнали, что не Земля, а Солнце занимает центральное положение в планетной системе.

Основные положения гелиоцентризма Коперник предварительно изложил в рукописном *Малом комментарии* (1515 г.) [25]. Полнотью новую теорию он развел в главном фундаментальном труде, который закончил уже к 1530 г., но решился опубликовать лишь спустя многие годы под нажимом своих друзей — видных и достаточно образованных духовных деятелей. Перед этим её подробное популярное изложение опубликовал ученик Коперника Ретик под названием "Первый рассказ о книгах обращений" (1539 г.) [26], по которому впоследствии большинство читателей и узнавали о гелиоцентрической теории Коперника (полное сочинение, насыщенное математикой, было далеко не всем доступно). Готовый труд Коперника *О вращении небесных сфер* из шести больших разделов-«книг», напечатанный в Нюрнберге [27], был вручён умирающему учёному в день его кончины 24 мая 1543 г. После Коперника уже нельзя было рассматривать Землю как занимающую какое-то особое место в пространстве, как "подножие Бога". Наше положение в Мире ничем особым не выделено. Это общее утверждение называют принципом Коперника. По сути, Коперник заново "открыл" Землю — как рядовую шестую планету Солнечной системы (впрочем, выделенную до сих пор тем, что только на ней из всех тел системы имеется жизнь). Разделение Коперником движений небесных тел на кажущиеся (ввиду движения наблюдателя) и собственные стимулировало поиски законов этих истинных движений, которые и открыли в начале следующего века Кеплер, а затем эти законы обосновали создатели современной механики, начиная с Галилея и кончая Ньютоном, который вывел все три закона Кеплера из общего закона тяготения.

В теории Коперника оставался один принципиально важный вопрос, на который тогда не было ответа. Если далёкие звёзды находятся на разных расстояниях от Земли, то вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца должны наблюдаваться регулярные параллактические смещения близких звёзд относительно более далёких. Во времена Коперника такие параллактические смещения звёзд не могли быть обнаружены. Но, как и его древнегреческий предшественник Аристарх Самосский, Коперник объяснял это практически бесконечной удалённостью звёздной сферы. Первые звёздные параллаксы удалось измерить лишь спустя три столетия [28] российскому астроному В. Я. Струве (у звезды Vega,  $\alpha$  Lyg, 1837 г.), немецкому астроному Ф. В. Бесселю (у звезды 61 Cyg, 1838 г.) и англичанину Т. Гендерсону (для  $\alpha$  Cen, в южном полушарии, несколько ранее 1839 г., но опубликовать свои измерения он смог лишь в 1839 г. после возвращения в Англию). Все три параллакса составляли лишь несколько малых долей секунды дуги. Это стало прямым свидетельством того, что звёзды удалены от нас на огромные расстояния: даже от ближайшей из них ( $\alpha$  Cen) свет идёт к нам 4,3 года.

Уже в первые десятилетия после опубликования сочинения Коперника его новая теория "заработала" как более эффективный математический метод описания движений небесных тел. Уже в 1551 г. немецким астрономом Э. Рейнгольдом были составлены первые гелиоцентрические планетные "Прусские таблицы" [10, с. 140, 150]. В 1582 г. была проведена, наконец, реформа календаря с переходом на новый стиль (устаревший юлианский календарь был заменён григорианским). Тогда же, в 1580-е годы, в ряде университетов некоторые астрономы начали читать лекции, опираясь на математическую теорию Коперника (первым стал швейцарский профессор математики и теологии, астроном и историк науки Х. Вурстейзен, высоко оценённый в дальнейшем Галилеем). Такому свободному на первых порах распространению теории Коперника способствовало и смягчавшее её революционную суть предисловие к книге лютеранского богослова Осиандера, представившего теорию Коперника лишь как новую математическую модель мира.

Но уже в 1616 г. учение Коперника было запрещено католической церковью. И в дальнейшем учение Коперника, и в том числе открытые Кеплером в начале XVII в. истинные законы планетных движений, с трудом пробивало себе дорогу. Его церковный запрет официально просуществовал более 200 лет (был снят лишь в 1828 г.). Дело в том, что в те же 1580-е годы стало осознаваться подлинное мировоззренческое революционное содержание новой теории как системы мира, явно противоречившей Библии и догмам христианской религии. И первой яростной нетерпимостью к новой теории проявила католическая церковь, представители которой, профессора европейских университетов, оказывались посрамлёнными в публичных диспутах с первым горячим пропагандистом новой системы мира, поражавшим слушателей своими познаниями, смелостью мысли и силой убеждённости, недавним монахом, бежавшим из Неаполитанского монастыря, Джордано Бруно.

## 7. Борьба за гелиоцентризм

Первым борцом за гелиоцентризм, кроме того, расширившим и углубившим его смысл, стал гениальный итальянский мыслитель Джордано Бруно (1542–1600) (рис. 5). Последователь Николая Кузанского в космологии Бруно, признавая значение математического содержания новой теории Коперника, первым понял и её мировоззренческую ограниченность, поскольку гелиоцентризм у Коперника был утверждением центрального положения Солнца во всей Вселенной. Бруно заявил, что Солнце и Солнечная система — это одна из многих подобных систем во Вселенной, и также вслед за своим духовным учителем стал пропагандировать смелую идею о множественности обитаемых миров. В своём главном космологическом сочинении *О бесконечности, Вселенной и мирах* (1584 г.) [29] Джордано Бруно развил новые идеи о Вселенной, о самодвижении тел в ней, прорицавшие название своей учения "философией рассвета". Он описывал Вселенную, состоящую из множества солнц, вокруг которых обращаются планетные системы, на которых также может быть жизнь. Такого "богохульства" католическая церковь простить не могла. Выданный предателем в руки инквизиции, Джордано Бруно был брошен в тюрьму и после безнадёжных попыток церкви добиться от него отречения от "заблуждений" сожжён на костре инквизиции в 1600 г. на площади

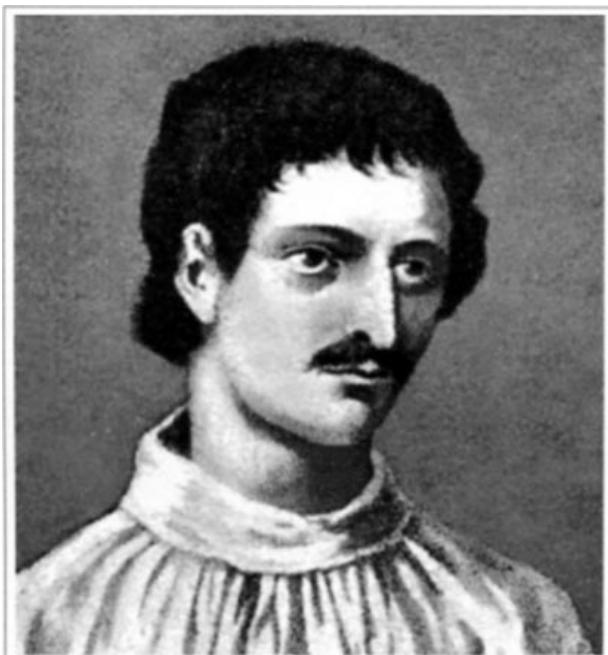


Рис. 5. Джордано Бруно (1548–1600).

Цветов в Риме... (В конце XIX в. на этом месте благодарное человечество установило ему памятник с надписью: "От столетия, которое он предвидел".)

И хотя в обвинительных протоколах десятков допросов Бруно в римской тюрьме, где он провёл последние семь лет жизни, защита множественности обитаемых миров выставлялась главным обвинением против учёного, не менее болезненным и нетерпимым для церкви были выступления Бруно с критикой основных её догматов, а ещё более — его прямые призывы к Венецианскому правительству отобрать у церкви непомерные богатства её монастырей (о которых он знал не понаслышке, а из личного опыта). Как видим, времена идут, а нравы не меняются...

Будем надеяться, что наше нынешнее увлечение "древними традициями" не приведёт к повторению подобных акций по отношению к современным российским учёным: когда в 2007 г. 10 российских академиков подписали письмо на имя Президента России с протестом против введения предмета "Основы православной культуры" (читай — "Закон Божий") в светских школах России, в прессе появлялись гневные статьи, в которых предлагалось собрать всех этих нахальных 10 академиков на Лобном месте на Красной площади в Москве и отрубить им головы...

А недавно "православные активисты" потребовали запретить астрономию, так как она подрывает веру ([http://kremlnews.ru/posts.html?p2\\_articleid=1502](http://kremlnews.ru/posts.html?p2_articleid=1502)). Таким образом, современным российским религиозным радикалам не дают покоя лавры древних египетских жрецов, которые, как отмечалось выше, держали астрономические знания в строгом секрете и использовали их для укрепления своего политического и экономического могущества. Это удивительно, как тесно переплетаются эпохи, разнесённые во времени на многие тысячелетия!

Несколько лет назад В.И. Арнольд на приёме у Папы Римского, Иоанна Павла II в Ватикане спросил: "Галилей недавно оправдан церковью. Не пора ли оправдать и Джордано Бруно?" Понтифик ответил: "Почему бы и

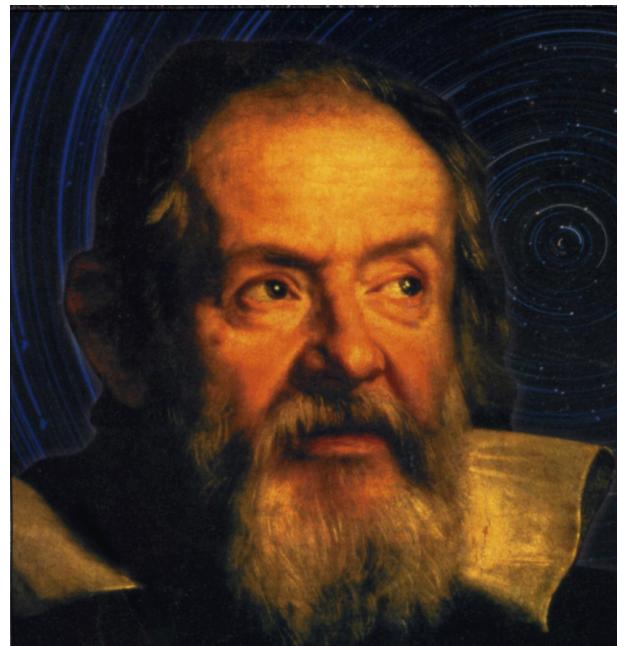


Рис. 6. Галилео Галилей (1564–1642).

нет, но докажите сначала существование жизни на других планетах". Сейчас открыто свыше 2000 планетных систем около других звёзд Галактики. Ставится на реальную основу поиск следов жизни на этих планетах, в частности поиск в спектрах атмосфер этих планет линий кислорода, метана, паров воды и углекислого газа, которые являются признаками наличия органических форм жизни.

Сильнейший удар по обветшалой геоцентрической системе Мира — но уже методами наблюдательной астрономии — нанёс гениальный итальянский учёный Галилео Галилей (1564–1642) (рис. 6), положивший начало телескопической астрономии.

Очки с выпуклыми стеклами были изобретены в Италии ещё в конце XIII в. В 1450 г. также в Италии были изобретены очки с вогнутыми стеклами. К началу XVII в. в разных странах появились мастера, достигшие значительных успехов в развитии техники шлифовки и полирования стеклянных линз. Первая подзорная труба с окуляром — отрицательной линзой, — дающая неперевёрнутое изображение, была изобретена в начале XVII в. в Голландии. Это изобретение связано с именами оптиков Яакова Метиуса, Захария Янссена и Липперсгейса, которые даже попытались запатентовать его у правительства как важный военный прибор. Подзорные трубы появились также в продаже [30].

Узнав об этом, Галилей, будучи талантливым инженером, в 1609 г. по описанию сконструировал аналогичную трубу собственными силами (доведя увеличение от 8-кратного до 32-кратного) и одним из первых, навел её на небесные объекты. Однако именно Галилей, в отличие от других наблюдателей, первым увидел и понял, что эти наблюдения не только раскрывают подлинную природу небесных тел, но и подтверждают теорию Коперника. Приступив к наблюдениям в начале 1610 г., Галилей опубликовал первые результаты уже в марте того же года в своём знаменитом *Звёздном вестнике* [31]. Он увидел горы на Луне, обнаружил звёздный состав некоторых "облаков" Млечного Пути, а впоследствии открыл фазы

у Венеры (невозможные с точки зрения геоцентрической системы) и в числе первых — пятна на Солнце. Но главной сенсацией стало сообщение в *Звёздном вестнике* об открытии новых тел, обращающихся вокруг другой планеты, — четырёх "лун" у Юпитера. Это было первым наглядным опровержением геоцентризма (ведь единственным центром обращений тогда считалась Земля) и несомненным свидетельством в пользу гелиоцентрической системы Мира. Сделав это открытие, Галилей стал горячим защитником гелиоцентрической системы Мира Коперника.

Именно после того как стало широко известным письмо Галилея своему ученику Каステли о солнечных пятнах (1613 г.), в котором Галилей явно склонялся к правоте Коперника, последовал в 1616 г. запрет католической церковью распространения гелиоцентрического учения Коперника (если оно не представлялось лишь удобным математическим методом). Сочинение Коперника было внесено в знаменитый *Индекс запрещённых книг* (Index Librorum Prohibitorum). Добившись после многих хлопот разрешения Рима на публикацию более осторожных рассуждений о теории Коперника, Галилей в фундаментальном труде *Диалог о двух главнейших системах Мира* (1632 г.), написанном в традиционной форме спокойной беседы трёх учёных, кроме того, на доступном его соотечественникам итальянском языке [32], убедительно показал преимущества гелиоцентризма. Это предрешило дальнейшую судьбу учёного. Сочинение почти сразу было запрещено, а его автор подвергся супровому осуждению со стороны инквизиции. В 1633 г. Галилей был вызван в Рим, арестован и предан публичному суду, на котором в унизительной форме (под угрозой пыток) 69-летнего учёного вынудили произнести отречение от своих "заблуждений". Все последние годы Галилей провёл под домашним арестом и присмотром представителей инквизиции в небольшом имении Арчетри под Флоренцией. Одно из преступлений, в котором инквизиция обвиняла Галилея, касалось формы и стиля его сочинений. Возмущало, что учёный пишет так, что это понятно обычным людям. И всё же не сломленный духом Галилей успел переиздать свой труд в более терпимой тогда Голландии [33] (что, возможно, и породило легенду о якобы произнесённых им после своего осуждения словах: "А всё-таки она вертится"). 2009 год, год 400-летия появления телескопа и первых телескопических наблюдений Галилея, человечество отметило как Всемирный год астрономии [34].

В 1609—1619 гг. другой убеждённый последователь Коперника, выдающийся немецкий астроном, современник и друг Галилея Иоганн Кеплер (1571—1630) (рис. 7) открыл три закона истинных движений планет. Основой для его открытий послужил богатый наблюдательный материал, главным образом по изучению движения Марса, накопленный и завещанный ему великим датским астрономом-наблюдателем Тихо Браге (1546—1601), в обсерватории которого Кеплер в последние годы жизни Тихо Браге служил вычислителем. Эти три закона планетных движений ныне хорошо известны. Первый гласит, что каждая планета обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого расположено Солнце; второй описывает характер изменения скорости тела на такой орбите; в третьем утверждается красавая математическая связь периодов обращений планет вокруг Солнца и их средних расстояний от Солнца. Эти открытия Кеплера навсегда покончили и с древней традицией "округлённо-

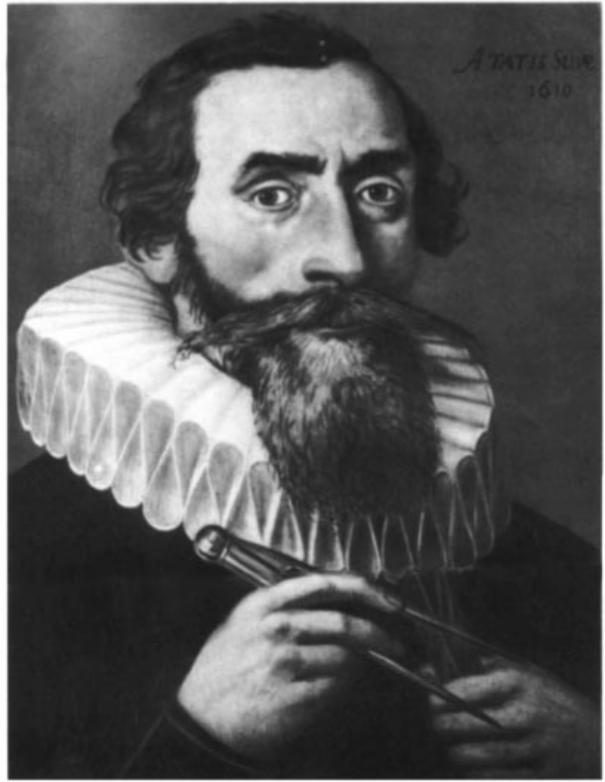


Рис. 7. Иоганн Кеплер (1571—1630).

сти" орбит, и с многотысячелетним господством геоцентрической системы мира.

После открытий Галилея и Кеплера первая революция в естествознании (начатая в астрономии переходом от геоцентрической к гелиоцентрической системе Мира) продолжила своё победное развитие.

Знание законов планетных движений позволило Исааку Ньютону (1643—1727) (рис. 8) открыть закон всемирного тяготения. Ньютон был величайшим английским физиком, математиком, астрономом, конструктором-изобретателем, а также химиком и металлургом. Он решил очень трудную обратную задачу: по следствиям некоторого процесса (движению планет) восстановил причину, определяющую этот процесс. Причиной оказался знаменитый закон всемирного тяготения. Ньютон впервые доказал действие этого закона (по крайней мере на расстояниях, меньших расстояния до Луны) в 1666 г. На основе закона всемирного тяготения Ньютон построил новую космофизическую картину бесконечной Вселенной, которую он изложил в третьей части знаменитого труда *Математические начала натуральной философии* [35], изданного в 1687 г. Вопрос об уточнении закона тяготения Ньютона возник неоднократно. Так, в середине XVIII в. при попытке описать очень сложное движение Луны (которая подвержена действию соизмеримых сил притяжения со стороны двух тел, Солнца и Земли, — и долгое время астрономов особенно настороживало вековое ускорение Луны) французский учёный Алексис Клод Клеро ввёл в закон Ньютона дополнительное слагаемое  $\varepsilon/r^3$ . В дальнейшем Клеро от этой идеи вынужден был отказаться. А вековое ускорение Луны объяснил П.С. Лаплас (1787 г.), доказав, что оно, как и все загадочные прежде неравенства в Солнечной системе, вызывавшие опасения относительно её устойчивости, носит периодический характер. Хотя следует отметить, что даже в наше время в солидных научных



Рис. 8. Исаак Ньютона (1643–1727).

журналах нередко появляются статьи, авторы которых предлагают различные варианты модифицированной ньютоновской динамики (Modified Newtonian Dynamics — MOND). Это делается, например, с целью объяснить очень быстрые движения галактик в скоплениях без привлечения гипотезы о наличии тёмной материи. Однако следует подчеркнуть, что все варианты MOND страдают общим недостатком: для каждой галактики и для каждого скопления галактик приходится вводить свою модификацию закона тяготения Ньютона, что делает MOND непривлекательной.

С открытием закона всемирного тяготения в физике надолго воцарилась идея дальнодействия центральных сил, в том числе главной вселенской силы — тяготения, действующей якобы мгновенно и через пустоту. При этом было быстро забыто, что сам Ньютон полагал, что осуществление тяготения требует некоторого посредника. Правда, он допускал не только материальную, но и нематериальную природу этого посредника.

Новую физику Ньютона высоко ценил и пропагандировал в своих трудах великий русский учёный-энциклопедист, поэт, государственный деятель и основатель науки в России Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765), хотя он одновременно был и одним из последних картезианцев, приняв, например, объяснение Декартом теплоты как результата движения частиц-атомов. Как прогрессивный мыслитель, Ломоносов был последователем и даже выступал защитником (что было ещё актуальным в России его времени) самой теории Коперника и идеи множественности обитаемых миров. В ярких стихотворных строках Ломоносов нарисовал впечатляющую картину Вселенной, единой по своим законам и наполненной очагами жизни и разума: "Открылась бездна звезд полна, звездам числа нет, бездне дна". Важным для установления единства законов природы было открытие М.В. Ломоносовым атмосферы у планеты Венеры на основе наблюдений прохождения её по диску Солнца (1761 г.) [36].

Ярким пропагандистом аналогичных идей, эволюции планет, борцом против "кометных" суеверий был извест-

ный физик и автор первой теории лунного вулканизма, петербургский академик Ф.У.Т. Эпинус, который, впервые проанализировав распределение теплоты по земному шару, предсказал (1761 г.) ещё и открытие южного полярного материка — Антарктиды. В 2009 г. по инициативе Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) именем Эпинуса был назван кратер в северной полярной области Луны.

### **8. Вселенная — мир звёзд. Наша Галактика**

Согласно гипотезе Джордано Бруно, Солнце — это одна из звёзд Вселенной. В XVIII–XIX вв. учёные считали, что наша Галактика — это и есть вся Вселенная. Поэтому все усилия астрономов в то время были направлены на изучение состава и кинематики Галактики.

Одним из активнейших исследователей структуры Галактики был замечательный английский астроном Вильям Гершель (1738–1822) [37], превосходный наблюдатель, который сам строил телескопы-рефлекторы с зеркалами из бронзы (наибольший из построенных им телескопов имел зеркало диаметром 1,26 м и фокусное расстояние 12 м). В. Гершель с помощью телескопа открыл новую планету в Солнечной системе — Уран, а также наличие визуально-двойных звёзд в Галактике. В такой двойной системе звёзды-компоненты движутся вокруг общего центра масс по эллиптическим орбитам под действием взаимного притяжения, в соответствии с законом Ньютона.

Одним из главных научных достижений В. Гершеля является построение модели нашей Галактики на основе звёздных подсчётов ("черпков" звёзд). Гершель нарисовал модель Галактики в форме чечевицы с Солнцем в центре. Позднее Х. Шепли отнёс Солнце на расстояние в 8 кпк от центра Галактики и тем самым ещё раз подтвердил принцип Коперника: наше Солнце — рядовая звезда из сотен миллиардов звёзд Галактики, занимающая отнюдь не привилегированное (не центральное) место в Галактике. Начав одновременно с 1784 г. глобальные обзоры всего неба с целью выяснить общую структуру Вселенной, Гершель сразу открыл более 400 новых туманностей и предложил модель островной Вселенной.

К концу XIX – началу XX вв. наша Галактика была подробно исследована: определены её размеры (100 тыс. световых лет), изучены типы звёздного населения (звёзды плоской, промежуточной и сферической составляющей Галактики), исследованы звёздные скопления (шаровые и рассеянные), а также туманности. Была осуществлена спектральная классификация звёзд, что привело к построению знаменитой диаграммы Герцшпрunga–Рассела для звёзд, имеющей глубокий эволюционный смысл.

Были исследованы различные типы переменных звёзд, в том числе пульсирующих звёзд — цефеид. Построение зависимости период–светимость для цефеид дало мощный метод определения расстояний до звёзд. Изучение визуально-двойных, спектрально-двойных и затменно-двойных звёзд позволило дать надёжные определения масс, радиусов и светимостей звёзд разных типов. На этой основе была построена зависимость масса–светимость для звёзд, которая легла в основу проверки наших представлений о внутреннем строении и эволюции звёзд.

## 9. Эдвин Хаббл. Начало второй революции в астрономии: Вселенная — мир галактик

Вопрос об истинных размерах нашей Вселенной особенно остро встал в начале XX в., когда учёные задумались о природе многочисленных туманностей, которые они наблюдали в свои телескопы. В 1920 г. произошла знаменитая дискуссия между двумя авторитетнейшими американскими астрономами: Х. Шепли и Г. Кертиром [38]. Дискуссия касалась природы туманностей. Шепли утверждал, что все туманности — это газовые образования, расположенные в нашей Галактике. Кертис, напротив, считал, что многие туманности — это отдельные галактики, состоящие из миллиардов звёзд, и расположены они далеко за пределами нашей Галактики. По Кертису выходило, что наша Вселенная — это мир галактик, и её размеры во много раз превышают размеры Галактики. Каждый из этих выдающихся учёных приводил наблюдательные и теоретические аргументы в пользу своей концепции, однако они так и не смогли вместе прийти к однозначному выводу.

В 1917 г. в обсерватории Маунт-Вилсон в Калифорнии (США) был установлен крупнейший для того времени телескоп с главным зеркалом диаметром 2,5 м. На этом телескопе начал наблюдать выдающийся астроном XX столетия Эдвин Хаббл (США) (рис. 9). Используя фотографическую методику и выбирая ночи с наилучшим качеством изображения, Хаббл в 1923–1924 гг. впервые разрешил на отдельные звёзды три спиральных туманности, в том числе Туманность Андромеды (M31), и обнаружил среди них особые переменные цефеиды (для таких физических переменных пульсирующих звёзд к тому времени уже был разработан метод весьма точного определения расстояния до них по периоду изменения их блеска). Расстояние даже до M31, ближайшей из трёх, оказалось, по оценке Хаббла, равным 900 000 световых лет (по современным данным, это расстояние составляет около 2,4 млн световых лет). Таким образом, Хаббл доказал, что знаменитая туманность Андромеды, видимая невооружённым глазом на безлунном осеннем небе, находится вне Галактики и представляет собой гигантскую систему звёзд, сравнимую по размерам с нашей Галактикой [39]. Так широко были раздвинуты, благодаря введению в строй нового крупного телескопа, горизонты Вселенной, которая оказалась миром галактик. Галактики во Вселенной чаще всего входят в состав скоплений (содержащих от нескольких сотен до нескольких тысяч отдельных галактик), а скопления галактик образуют сверхскопления — самые крупные структурные единицы Вселенной. Наша Галактика вместе с галактикой Андромеды, а также примерно с четырьмя десятками других, менее крупных, галактик образуют Местную группу. Местная группа входит в скопление галактик в созвездии Дева, а это скопление составляет вместе с несколькими другими скоплениями систему, называемую Местным сверхскоплением, характерные размеры которого достигают многих десятков миллионов световых лет. Приблизительно так же устроены и другие скопления и сверхскопления галактик. Сверхскопления — это самые крупные образования, наблюдаемые во Вселенной. Важно то, что скопления и сверхскопления распределены в пространстве в среднем равномерно. Пространственная область диаметром 300 млн световых лет, начиная с которого распределение галактик в пространстве представляется в среднем однородным, называется ячейкой однородности. Если



Рис. 9. Эдвин Хаббл (1889–1953).

мысленно "размазать" светящееся (барионное) вещество равномерно по объёму ячейки однородности, то мы получим очень малую плотность, приблизительно  $10^{-31}$  г см $^{-3}$ , что соответствует примерно двум атомам водорода на область объёмом 10 м $^3$ .

Таким образом, открытие Хаббла в очередной раз подтвердило принцип Коперника: не только наше Солнце ничем не выделено в Галактике, но и сама Галактика ничем не выделена и является всего лишь одной из многих миллиардов галактик Вселенной. Осознание Вселенной как однородного (в среднем) мира миллиардов галактик — это настоящий прорыв в науке, по значению сопоставимый с коперниковской революцией.

## 10. Зарождение релятивистской космологии: Эйнштейн и Фридман

В 1916 г. Альберт Эйнштейн (1879–1955) (рис. 10) опубликовал общую теорию относительности (ОТО) [40], а в 1917 г. вышла в свет его первая космологическая работа [41], в которой развивалась модель стационарной Вселенной с  $L$ -членом. В то время Эйнштейн, как и другие исследователи, считал, что наша Вселенная — это содержащая сотни миллиардов звёзд Галактика, которая находится в стационарном состоянии. Но, к удивлению Эйнштейна, развитая им ОТО не позволяла получить стационарное решение. Поэтому Эйнштейн был вынужден ввести в уравнения ОТО новый член, который он обозначил как космологическую константу  $L$ . Вселенная Эйнштейна, описанная в его первой космологической работе 1917 года, — это вечная Вселенная в покое и без развития. Её трёхмерное пространство неевклидово и подобно сфере (точнее, гиперсфере). Эйнштейн считал, что это пространство должно иметь конечный объём и быть замкнутым в себе. Судя по всему, Эйнштейн был не вполне удовлетворён развитой им теорией. В конце статьи [41] он ещё раз подчёркивал, что космологическая постоянная "нам необходима для того, чтобы обеспечить возможность квазистатистического распределения материи, соответствующего фактически малым скоростям звёзд".



Рис. 10. Альберт Эйнштейн (1879 – 1955).

О возможности космологического расширения Вселенной первым сказал Александр Александрович Фридман (1888 – 1925) (рис. 11). В 1922 г., за семь лет до наблюдательного открытия Хабблом закона расширения Вселенной, Фридман рассмотрел модифицированные уравнения ОТО (с  $\Lambda$ -членом) и показал, что они допускают не только статический мир, но и мир, способный расширяться как целое или сжиматься. Свои космологические работы Фридман изложил в двух статьях: "О кривизне пространства" [42] в 1922 г. и "О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной" [43] в 1924 г. (см. также его научно-популярную книгу *Мир как пространство и время* [44] (1923 г.)). Описывая поведение мира во времени, Фридман отмечает: "Переменный тип Вселенной представляет большое разнообразие случаев. Для этого типа возможны случаи, когда радиус кривизны мира... постоянно возрастает с течением времени. Возможны далее случаи, когда радиус кривизны меняется периодически: Вселенная сжимается в точку (в ничто), затем снова из точки доводит радиус своей до некоторого значения, далее опять, уменьшая радиус своей кривизны, обращается в точку и т.д." [44].

В 1922 г. работа Фридмана [42] по теории нестационарной Вселенной была подвергнута критике со стороны Эйнштейна [45]. Однако годом позднее Эйнштейн пересмотрел свою точку зрения и в заметке [46], опубликованной в том же научном журнале, заявил: "Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет". И действительно, благодаря работам Фридмана в космологии впервые появились динамика и развитие. Как Коперник "заставил" Землю двигаться, вращаясь вокруг Солнца, так и Фридман "заставил" Вселенную двигаться, расширяясь.

Независимо от А.А. Фридмана бельгийский астроном-теоретик Ж. Леметр (1894 – 1966), тогда недавний студент А. Эддингтона, а в дальнейшем член и президент Папской академии наук в Ватикане (он имел сан аббата), ознакомившись в США с наблюдаемыми Слайфером и



Рис. 11. А.А. Фридман (1888 – 1925).

Хабблом значительными красными смещениями в спектрах далёких галактик, в 1927 г. дал своё объяснение этому факту как общему расширению Вселенной [47]. Полнее свою теорию расширения Вселенной Леметр развил в 1933 г. [48]. Он построил свою модель изменения радиуса кривизны пространства со временем и рассмотрел развитие возмущений в космологических моделях, предшествовавших образованию скоплений галактик.

## 11. Закон Хаббла

В 1927 – 1929 гг. Эдвин Хаббл обнаружил, что галактики не стоят на месте, а удаляются от нас и друг от друга (за исключением самых близких галактик, таких как Туманность Андромеды). О разбегании "космических туманностей" ещё в 1917 г. писал американский астроном Весто Слайфер [49, 50] (как раз в год выхода статьи Эйнштейна [41] по теории стационарной Вселенной!). Слайфер обнаружил следующий замечательный факт: у 11 из 15 исследованных им спектроскопически туманностей линии в спектре смещены в красную часть спектра, при этом чем слабее туманность, тем сильнее линии в её спектре сдвинуты в сторону его красной области. Такое красное смещение, если его интерпретировать в рамках эффекта Доплера, указывает на разбегание галактик. Однако в то время ни расстояния до туманностей, ни их истинная природа ещё не были известны, поэтому в работе Слайфера ни слова не говорилось о космологии. Тем не менее семью годами позднее, в 1924 г., за два года до открытия Хаббла, Фридман обсуждал открытие Слайфера на одном из своих семинаров в Петроградском университете и рассматривал это открытие в космологическом контексте, указывая на него как на первое прямое наблюдательное свидетельство в пользу теории расширяющейся Вселенной (по словам участника семинара Д.Д. Иваненко [51]). Об открытии Слайфера было сообщено в издававшемся в те годы в СССР научно-популярном журнале *Мироведение* (апрельский номер 1923 г.).

К 1927 г. Хаббл благодаря своим исследованиям уже знал, что многие туманности, наблюдаемые в телескоп, — это далёкие галактики. Кроме того, наблюдая переменные звёзды-цефеиды и ярчайшие звёзды в близких галактиках, он смог определить расстояния до многих из них. Воспользовавшись опубликованными данными Слайдфера, а также Хьюмасона [52] о лучевых скоростях этих галактик, Хаббл построил зависимость скоростей удаления  $V$  галактик от расстояний  $R$  до них. Таким образом он вывел знаменитый закон [53]

$$V = HR,$$

который по праву носит имя закона Хаббла. Современное значение постоянной Хаббла  $H$  составляет  $\sim 70 \text{ км с}^{-1}$  на 1 Мпк. Таким образом, Хаббл эмпирически доказал, что наша Вселенная расширяется, и дал количественную характеристику этого расширения: скорость расширения прямо пропорциональна расстоянию до галактики. Именно такой закон расширения Вселенной предсказывается фридмановской космологической теорией. Замечательное открытие Хаббла привело к тому, что Эйнштейн вынужден был отказаться от введения  $\Lambda$ -члена в свои уравнения ОТО. В 1934 г. Эйнштейн осторожно писал [54]: "...при рассмотрении космологической проблемы представляется естественным отказаться пока от введения космологической постоянной — до тех пор, пока для её введения не возникнут опытные основания". Приходится лишь восхищаться гениальной прозорливостью Эйнштейна: в 1998 г. было открыто ускоренное расширение Вселенной, что вновь потребовало введения в уравнения ОТО аналога  $\Lambda$ -члена. Интересно отметить, что и Хаббл не избежал сомнений в правильности интерпретации своих наблюдений эффекта красного смещения в спектрах галактик. Однажды, спустя много лет после своего космологического открытия, он неожиданно для всех на собрании Американского астрономического общества заявил, что никакого космологического расширения на самом деле нет, а наблюданное красное смещение в спектрах галактик — это результат "старения" квантов света на их пути к нам. Идея старения фотонов не выдерживает критики с точки зрения современной теоретической физики. Кроме того, в последние годы получены независимые доказательства того, что объём Вселенной увеличивается со временем, т.е. Вселенная действительно расширяется (см. раздел 17).

## 12. Горячая Вселенная Георгия Гамова

Исходя из наблюдавшегося темпа расширения Вселенной, задаваемого постоянной Хаббла  $H \simeq 70 \text{ км с}^{-1}$  на 1 Мпк, возраст Вселенной составляет около 14 млрд лет. Какой же была Вселенная в самом начале своей эволюции? Если отступить от начального, по-видимому, сингулярного, состояния Вселенной на несколько минут, то дальнейший ход её эволюции можно детально исследовать на основе твёрдо установленных физических законов. Это сделал один из самых выдающихся астрофизиков XX в. Георгий Антонович Гамов (1904–1968) — русский учёный, эмигрировавший в США в 1933 г. (рис. 12).

Фридман открыл динамику и геометрию мира. Гамов привнес в космологию термодинамику и ядерную физику. В 1948 г. Гамов выдвинул теорию горячей Вселенной и в её рамках смог предсказать (вместе со своими учениками Ральфом Альфером и Робертом Херманом)



Рис. 12. Г.А. Гамов (1904–1968).

[55] реликтовое излучение (термин, введённый в 1970-х годах И.С. Шкловским). Согласно Гамову, реликтовое излучение с температурой в нашу эпоху от 1 до 10 К представляет собой остаточное излучение, сохранившееся в мире с самых ранних стадий его расширения. Исходным мотивом этих исследований было стремление Гамова объяснить происхождение химических элементов и их относительную распространённость. По Гамову, вначале был вселенский взрыв (Большой взрыв — термин, введённый Фредом Хойлом), который произошёл одновременно и повсюду в мире, заполнив пространство горячим излучением и веществом [56]. При возрасте мира в 200 с температурой вещества и излучения составляла около 1 млрд градусов. При таких температурах интенсивно шли ядерные реакции синтеза атомов гелия из атомов водорода. Гамов надеялся объяснить таким способом распространённость не только атомов водорода и гелия, но и более тяжёлых элементов (кислорода, углерода, кремния и т.п.). Однако, как выяснилось позднее, синтез тяжёлых элементов происходит не в первые минуты формирования Вселенной, а на более поздних стадиях, когда формируются звёзды. Термоядерный синтез химических элементов тяжелее гелия осуществляется в недрах звёзд.

Гамов утверждал, что остаточное фоновое излучение, по его расчётом, остывшее до температур 1–10 К, можно обнаружить как доказательство реальности сингулярного начала расширения нашей Вселенной. Предсказание Гамова, казавшееся фантастическим и недоступным проверке, подтвердилось в совершенно случайных, проводимых с иной целью наблюдениях двух американских радиофизиков, А. Пензиаса и Р. Вильсона [57], в 1965 г. Температура реликтового излучения оказалась равной  $\sim 2,7 \text{ K}$ , что находилось в полном количественном согласии с предсказанием Гамова. За семь лет до

открытия Пензиаса и Вильсона трёхградусное космическое радиоизлучение реально регистрировалось в Пулковской обсерватории с помощью рупорной антенны, построенной Хайкиным, Кайдановским и Шмаоновым [58]. Но тогда никто, увы, не придал этому значения...

С открытием трёхградусного реликтового излучения модель нестационарной, эволюционирующей, расширяющейся Вселенной, прошёлшей горячую стадию Большого взрыва, утвердилась как стандартная. Так завершилась вторая научная революция в астрономии.

Но, как оказалось, согласно словам известной песни советских времён: "Есть у революции начало, нет у революции конца", — человечество уже в 1970-х годах стояло на пороге новой, третьей, революции в астрономии. И связано это было с тем, что наступила эра космических исследований, что придало астрономии, по меткому выражению И.С. Шкловского [59] и В.Л. Гинзбурга [60], всеволновой характер.

### 13. Эра всеволновой астрономии

4 октября 1957 г. в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник Земли. У астрономов появилась возможность выносить телескопы за пределы земной атмосферы (которая непрозрачна для большинства электромагнитных излучений, идущих из космоса). Если ранее астрономы наблюдали небо в основном в оптическом диапазоне спектра (где длина волн регистрируемого излучения изменяется примерно в два раза), то космические исследования позволили наблюдать небо в очень широком диапазоне длин волн: в гамма-диапазоне, рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом, инфракрасном и длинноволновом радиодиапазонах. При этом диапазон длин волн принимаемого электромагнитного излучения изменяется не в два раза, а от примерно  $10^{-8}$  см (гамма-диапазон) до  $10^8$  см (длинноволновое радиоизлучение), т.е. в  $10^{16}$  раз. Это привело к тому, что надёжность результатов астрономических наблюдений сравнялась с надёжностью результатов лабораторных физических экспериментов — несмотря на то что астрономические объекты удалены от нас на огромные расстояния в несколько тысяч, миллионов или миллиардов световых лет.

В 1609–1610 гг. Галилей наблюдал небо в телескоп с диаметром объектива около 3 см и 32-кратным увеличением, что привело к прорыву в понимании окружающего нас мира и наблюдательному обоснованию гелиоцентрической системы Коперника. Сейчас в распоряжении астрономов имеются неизмеримо более мощные средства наблюдений. Вот уже два десятилетия на орбите вокруг Земли летает космический телескоп имени Хаббла с зеркалом диаметром 2,4 м. В космосе работают специализированные гамма-обсерватории и рентгеновские обсерватории, такие как "Чандра", XMM-Newton (XMM — от англ. X-ray Multi-Mirror Mission — рентгеновская многозеркальная миссия), "Интеграл" и т.п. В июле 2011 г. был произведён успешный запуск российского космического радиоинтерферометра "Радиоастрон". В космосе летает радиообсерватория "Планк" (Planck), изучающая свойства реликтового излучения. В мире уже работает более 12 наземных оптических телескопов с диаметром зеркал 8–10 м. Планируется создание наземных оптических телескопов с составными зеркалами эффективным диаметром 25–39 м. Осуществляются глубокие фотометрические и спектральные обзоры неба с помощью автоматизированных широко-

полных телескопов (космический телескоп Хаббла, обзор SDSS (Sloan Digital Sky Survey) и т.п.). Создаются новые крупные автоматизированные телескопы с широким полем зрения (например, LSST (Large Synoptic Survey Telescope)). Завершается создание уникального наземного радиоинтерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), работающего на коротких радиоволнах. Все эти мощные наблюдательные средства нацелены на решение фундаментальных проблем современной космологии.

### 14. Открытие анизотропии реликтового излучения

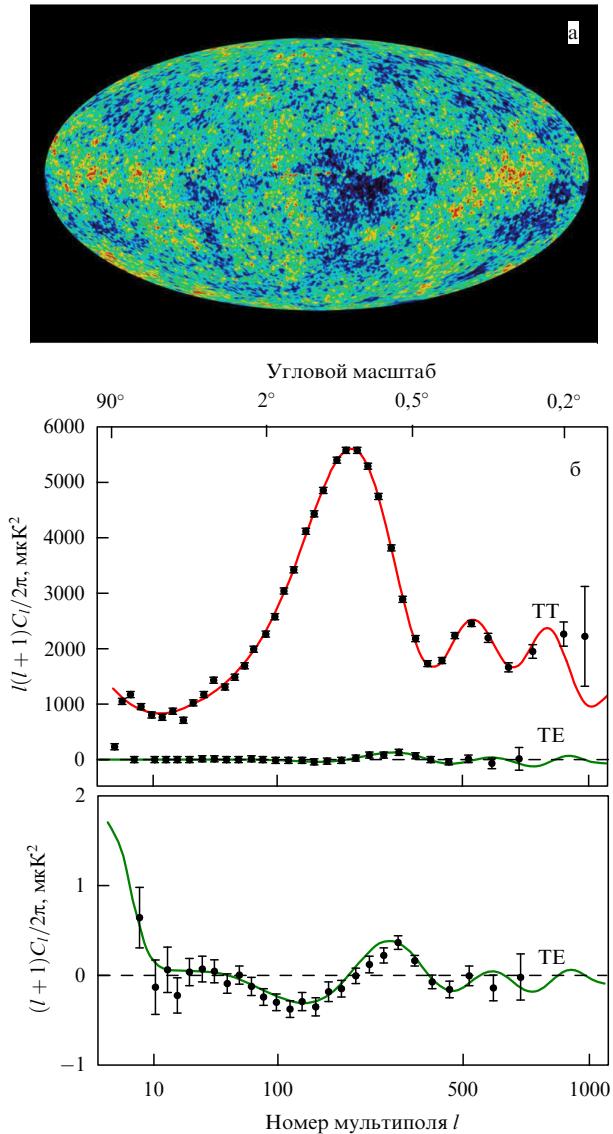
Максимум трёхградусного реликтового радиоизлучения приходится на длину волны около 1,3 мм. Поскольку земная атмосфера имеет плохую прозрачность в этом диапазоне, для детального изучения спектра и анизотропии реликтового излучения наиболее перспективными являются космические исследования.

Первые указания на возможную анизотропию реликтового излучения были получены в 1980-х годах с борта российского специализированного спутника "Реликт." [61–63]. Доказательство чернотельного спектра реликтового излучения и надёжное выявление его анизотропии на уровне  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$  были получены с помощью спутников COBE (Cosmic Background Explorer) [64] и WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [65]. К настоящему времени завершается обработка данных, полученных со спутника "Планк". Очень важными также оказались наземные радионаблюдения в субмиллиметровом диапазоне на Южном полюсе, а также наблюдения с баллонов.

Карта распределения угловых неоднородностей реликтового излучения (рис. 13) соответствует возрасту Вселенной около 350 тыс. лет, при котором излучение отделилось от вещества после его рекомбинации при температуре  $\sim 3000$  К. Количественное исследование распределения неоднородностей интенсивности реликтового излучения позволило с хорошей точностью (порядка нескольких процентов) определить фундаментальные параметры расширяющейся Вселенной. В частности, было получено решающее доказательство того, что наше трёхмерное пространство евклиово, а средняя плотность всех видов материи во Вселенной равна критической плотности  $\rho_c = 3H^2/(8\pi G) \sim 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$ .

### 15. Открытие тёмной материи

В 1932 г. американский астроном швейцарского происхождения Фриц Цвикки (1898–1974), работавший с 1925 г. в США, заметил, что, кроме светящегося барионного вещества галактик, во Вселенной должны иметься невидимые "скрытые" массы, которые проявляют себя только своим тяготением [66]. Цвикки изучал скопление галактик в созвездии Волосы Вероники и обнаружил, что галактики в этом скоплении движутся с очень большими скоростями, достигающими несколько тысяч километров в секунду. Для того чтобы удержать так быстро движущиеся галактики в объёме скопления, требуется тяготение, которое не способны создать только одни видимые, светящиеся, массы галактик. Для этого необходимы дополнительные массы, которые должны быть, по оценкам Цвикки, примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы скопления. Позднее, в 1970-е годы, усилиями астрономов из СССР и США было обнаружено, что скрытые массы (тёмная материя) должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в

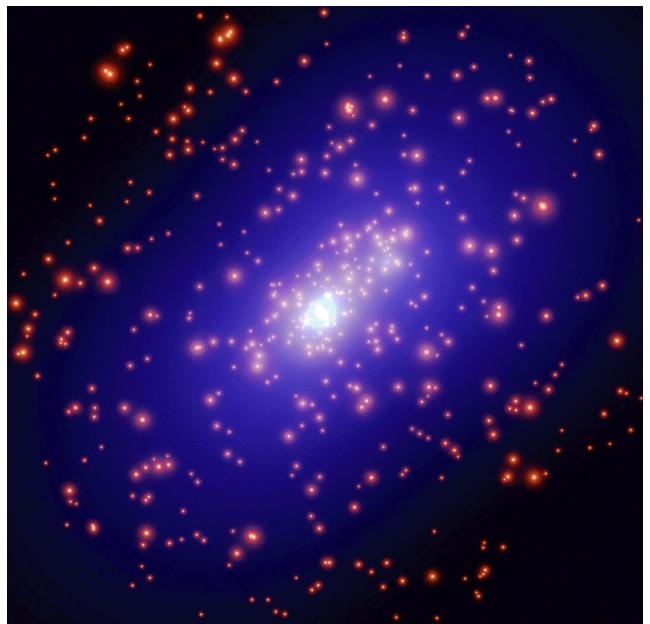


**Рис. 13.** (а) Карта распределения неоднородностей реликтового излучения, полученная спутником WMAP. (б) Положение первого максимума в распределении флуктуаций реликтового излучения свидетельствует о том, что наше трёхмерное пространство евклидово.

изолированных крупных галактиках. Я. Эйнасто [67], В. Рубин [68], Дж. Острайкер и Дж. Пиблс [69] и их коллеги выяснили, что тёмная материя образует невидимые тёмные гало крупных галактик. Эти гало являются почти сферическими образованиями с радиусами, в 5–10 раз превышающими размеры самих звёздных систем.

К настоящему времени имеются по крайней мере 10 независимых свидетельств существования тёмной материи во Вселенной. Отметим некоторые из них.

1. Движение галактик в скоплениях ( $v \geq 1000 \text{ км с}^{-1}$ ).
  2. Вращение галактик (плоские кривые вращения).
  3. Горячий ( $T \approx 10^8 \text{ K}$ ) газ в скоплениях галактик (скорости протонов  $v_p \geq 1000 \text{ км с}^{-1}$ ) (рис. 14).
  4. Гравитационное линзирование света далёких галактик в гравитационном поле более близких скоплений галактик.
  5. Движение тройных и кратных галактик и т.д.
- Замечательно то, что для каждого из 10 независимых свидетельств существования тёмной материи следует вывод о том, что масса тёмной материи в 5–10 раз



**Рис. 14.** Горячий газ ( $T \approx 10^8 \text{ K}$ ) концентрируется в центре скопления галактик, что свидетельствует о наличии тёмной материи, которая по массе в 5–10 раз превышает вклад светящейся барионной материи.

больше массы видимого барионного вещества. Это подобно тому, как если бы 10 независимых линий пересекались в одной точке. Такова прочность наших выводов о существовании тёмной материи во Вселенной. Хотя, как упоминалось в разделе 7, до сих пор появляются попытки обойтись без тёмной материи с помощью развития теории MOND. Как отмечалось, такие попытки являются безуспешными, поскольку для каждого скопления галактик и для каждой галактики в этом случае приходится вводить свою модификацию закона тяготения Ньютона.

## 16. Открытие тёмной энергии

В 1998–1999 гг. две группы астрономов открыли всемирное антитяготение. В работе участвовало большое число исследователей (в общей сложности около 100). Одной группой руководили Брайан Шмидт (Австралия) и Адам Риесс (США), другую возглавил Сол Перлмуттер (США). Открытие сделано на основании наблюдений вспышек далёких сверхновых типа Ia (термоядерный взрыв углеродно-кислородного белого карлика с массой, близкой к чандraseкаровскому пределу) [70–72]. На возможность использования сверхновых типа Ia в качестве "стандартных свечей" с известной абсолютной светимостью в максимуме вспышки указал ещё в 1977 г. сотрудник ГАИШ МГУ Юрий Павлович Псковский [73]. Сверхновые типа Ia благодаря своей огромной светимости в максимуме видны на очень больших расстояниях (в несколько миллиардов световых лет), соответствующих красным смещениям  $z$  порядка или даже более единицы. На таких огромных расстояниях движение (удаление) галактик определяется не только их скоростями, но и ускорениями. Сравнивая наблюдаемый блеск сверхновых типа Ia с их известной абсолютной светимостью в максимуме, можно определить расстояния до соответствующих галактик. При малых  $z$  (случай относительно близких галактик) связь между расстоянием  $R$  и красным смещением  $z$  линейна, а блеск объекта убывает с увели-

чением красного смещения как  $z^{-2}$ . Однако при не малом  $z$  (далёкие галактики) связь между расстоянием и красным смещением становится сложнее: в эту связь оказывается вовлечённой не только скорость разбегания галактик  $V$ , но и их ускорение. Поэтому, сравнивая наблюдаемый блеск сверхновых типа Ia в максимуме с соответствующей величиной красного смещения галактики, можно определить ускорение, с которым разбегаются галактики. Оказалось, что это ускорение положительно, т.е. Вселенная не просто расширяется, но расширяется с ускорением. Обычное вещество, ввиду действия взаимного притяжения между галактиками, должно замедлять разбегание галактик. То, что галактики разбегаются с ускорением, свидетельствует о существовании во Вселенной некоторой материи нового типа (называемой теперь тёмной энергией). Эта материя обладает не тяготением, а антитяготением, гравитационным отталкиванием, что и приводит к ускоренному расширению Вселенной. К настоящему времени ускоренное расширение Вселенной установлено по наблюдениям многих сотен сверхновых типа Ia. В 2011 г. первооткрывателям ускоренного расширения Вселенной С. Перлмуттеру, А. Риссу и Б. Шмидту (рис. 15) была присуждена Нобелевская премия.

Оценки показывают, что вклад тёмной энергии, обуславливающей ускоренное расширение Вселенной, в полную плотность материи во Вселенной составляет около 70 %, т.е. загадочная тёмная энергия доминирует во Вселенной.

Помимо ускоренного расширения Вселенной, наблюдаемого по вспышкам сверхновых типа Ia, имеется ещё по крайне мере три независимых свидетельства существования тёмной энергии.

1. Эволюция скоплений галактик, изучаемая с помощью наблюдений скоплений на разных  $z$  в рентгеновском диапазоне (наблюдения со спутников ROSAT (от нем. Röntgensatellit), "Чандра", XMM-Newton и др.) и в радиодиапазоне (по наблюдениям эффекта Сюняева – Зельдовича). Рост скоплений галактик со временем обусловлен действием двух конкурирующих факторов: притяжением обычной материи (барионы и тёмная материя) и отталкиванием тёмной энергии. Для того чтобы получить наблюдаемую зависимость массы скопления от красного смещения  $z$ , необходимо предположить, что тёмная энергия вносит  $\approx 70\%$  от полной плотности материи Вселенной. При других значениях вклада тёмной энергии модельные параметры скоплений галактик получаются не согласующимися с наблюдаемыми характеристиками скоплений.

2. Возраст самых старых шаровых звёздных скоплений  $\sim 12–13$  млрд лет. В старых вариантах космологии,

в которых не учитывался эйнштейновский  $\Lambda$ -член, возраст Вселенной ( $\sim 11$  млрд лет) получался меньше возраста самых старых шаровых скоплений.

Это беспокоило учёных, поэтому ещё в 1970-х годах Я.Б. Зельдович [74], И.С. Шкловский [75] и Н.С. Кардашёв [76] высказывали идею о том, что если взять решение уравнений ОТО с  $\Lambda$ -членом, полученное Ж. Леметром (признанным классиком космологии), то возраст Вселенной увеличивается и становится больше возраста самых старых шаровых скоплений. Так что наблюдаемый возраст самых старых шаровых скоплений сам по себе является свидетельством наличия тёмной энергии во Вселенной.

3. Точные измерения анизотропии реликтового фона, как упоминалось в разделе 14, позволили установить, что наше трёхмерное пространство является евклидовым, а средняя плотность всех видов материи во Вселенной (включая тёмную энергию) равняется критической и составляет  $\sim 10^{-29} \text{ г см}^{-3}$ . Так как плотность тёмной материи, барионов и излучения известна из независимых данных, отсюда следует возможность независимо оценить плотность тёмной энергии, которая составляет 70 % от плотности всех видов материи во Вселенной. Эта оценка совпадает с оценкой вклада тёмной энергии, выведенной из наблюдений сверхновых типа Ia.

Дополнительным аргументом в пользу наличия тёмной энергии могут служить результаты исследований А.Д. Черниным с соавторами [77] кинематики групп и скоплений галактик с целью объяснения так называемого парадокса Сэндиджа [78], сформулированного в 1972–1999 гг. Согласно Аллану Сэндиджу, регулярное космологическое расширение Вселенной со "стандартным" значением постоянной Хабbla (современное значение  $H = 70 \text{ км с}^{-1}$  на 1 Мпк) прослеживается до относительно весьма малых размеров, вплоть до 1,5–2,0 Мпк (5–7 млн световых лет) — несмотря на то что размер ячейки однородности во Вселенной, как отмечалось в разделе 9, составляет около 300 млн световых лет, а на меньших масштабах имеются большие неоднородности в распределении плотности вещества. Несмотря на такие неоднородности вещества, космологическое расширение регулярно на малых масштабах и неотличимо от космологического расширения на масштабах в несколько тысяч мегапарсек. Как это понять? Оценки плотности тёмной энергии в шести группах и скоплениях галактик, выполненные группой А.Д. Чернина и И.Д. Каракенцева, показали [77, 79], что локальная плотность тёмной энергии практически совпадает с плотностью тёмной энергии, оценённой по глобальному расширению Вселенной. Отсюда можно заключить, что космологическое расширение на малых масштабах управляет антигравитацией тёмной энергии.

На рисунке 16 отражена процедура определения плотности тёмной энергии тремя способами, основанными на использовании разных электромагнитных диапазонов: рентгеновского диапазона, радиодиапазона и оптического диапазона. Изучение сверхновых типа Ia (оптический диапазон) даёт первую линию, исследование флуктуаций реликтового фона (радиодиапазон) — вторую, а анализ эволюции скоплений галактик (рентгеновский диапазон) позволяет построить третью линию. Как видно, все три линии (полосы) пересекаются в одной области, которая соответствует вкладу тёмной энергии  $\Lambda \sim 70\%$  и доли остальной материи  $\Omega$  (тёмной материи и барионов)  $\sim 30\%$ .

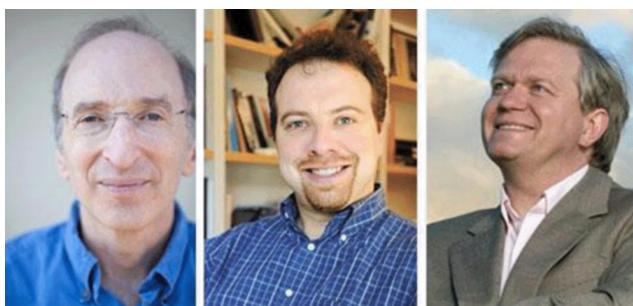
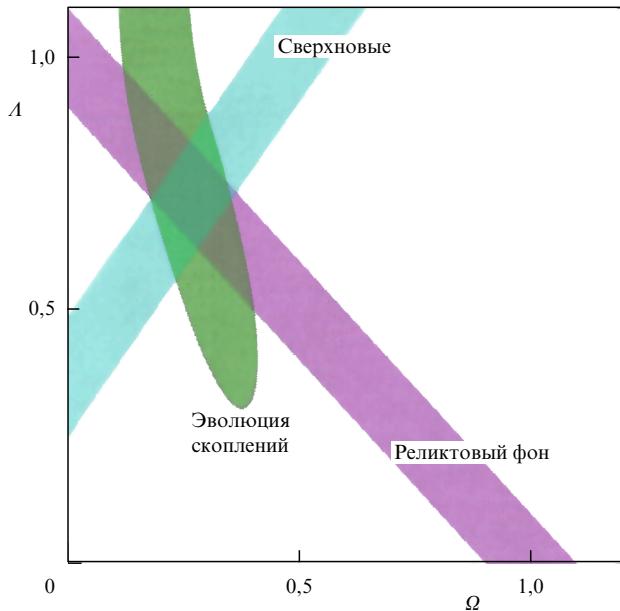


Рис. 15. Первооткрыватели ускоренного расширения Вселенной (слева направо): С. Перлмуттер, А. Рисс и Б. Шмидт.



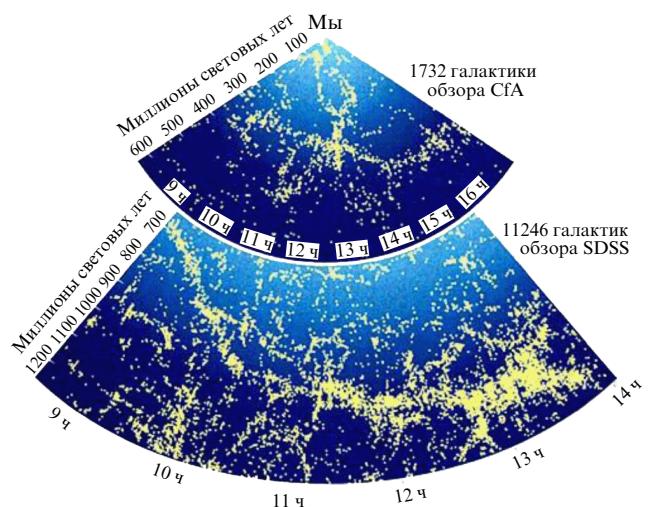
**Рис. 16.** Процедура определения плотности тёмной энергии по наблюдениям в трёх электромагнитных диапазонах: радиодиапазоне (реликтовое излучение), оптическом (сверхновые типа Ia) и рентгеновском (эволюция скоплений галактик).

## 17. Новые доказательства реального расширения Вселенной

В ходе космологического расширения уменьшается плотность реликтовых фотонов. Это означает, что в прошлом число реликтовых фотонов (и их температура) в единице объёма было больше, чем сейчас. С введением в строй крупных 8–10-метровых телескопов учёным удалось установить, что населённости возбуждённых уровней некоторых молекул внегалактического газа на больших расстояниях заметно выше, чем у тех же молекул на близких расстояниях. Поскольку такие низкоэнергетические уровни возбуждаются фотонами реликтового излучения, это прямо свидетельствует о том, что в прошлом плотность реликтовых фотонов во Вселенной была выше. Данный факт, независимо от красного смещения в спектрах галактик, свидетельствует о том, что объём Вселенной увеличивается со временем, т.е. Вселенная действительно расширяется.

## 18. Наблюдаемая крупномасштабная структура Вселенной и результаты компьютерного моделирования

С помощью глубоких фотометрических и спектральных обзоров неба измерены красные смещения нескольких десятков тысяч галактик и построена трёхмерная карта распределения барионного вещества во Вселенной (рис. 17). Оказалось, что это распределение имеет сложную структуру: скопления галактик стремятся сосредоточиться в вытянутые структуры (филаменты), которые подобны крупномасштабным структурам Вселенной, предсказанным Я.Б. Зельдовичем [80] (так называемые блины Зельдовича) (рис. 18). Между филаментами наблюдаются области с резко пониженным числом галактик (так называемые впадины). С помощью современных суперкомпьютеров удалось провести моделирование процесса срабатывания гравитационной неустойчивости в расширяющейся Вселенной и формирования крупномасштабных структур. Оказалось, что



**Рис. 17.** Трёхмерная карта распределения барионного вещества (галактик и скоплений галактик) во Вселенной, построенная на основе глубоких фотометрических и спектральных обзоров неба.

определяющим фактором в формировании крупномасштабной структуры является не барионное вещество, а рост неоднородностей в бесстолкновительной среде — тёмной материи. В потенциальные ямы, сформированные тёмной материей, затем "сваливается" барионное вещество (как малая добавка) и образуется наблюдаемый узор крупномасштабной структуры Вселенной.

## 19. Энергетический состав Вселенной

На рисунке 19 изображён вклад различных форм материи во Вселенной. Барионное вещество (атомы и молекулы) составляет лишь  $\sim 4\%$  от полной плотности материи во Вселенной.

Во Вселенной доминирует так называемый тёмный сектор.

1. *Тёмная материя* ( $\sim 23\%$ ) ничего не излучает и не поглощает, проявляет себя лишь гравитационным притяжением. Она гравитационно скучивается и обнаруживает тенденцию к концентрации вблизи больших масс барионного вещества. Скорее всего, это особые элементарные частицы, которые пока ещё не открыты в земных лабораториях (есть надежда открыть эти частицы на Большом адронном коллайдере в Швейцарии).

2. *Тёмная энергия* ( $73\%$ ) также ничего не излучает и не поглощает, проявляет себя лишь своим гравитационным взаимодействием (отталкиванием). Тёмная энергия гравитационно не скучивается (скорее всего, представляет собой поле или совокупность полей). Плотность тёмной энергии почти не зависит от времени, от красного смещения. Поэтому со временем, по мере возрастания объёма Вселенной, вклад тёмной энергии в общий баланс сил во Вселенной увеличивается. Когда возраст Вселенной был менее 7 млрд лет, во Вселенной преобладало гравитационное притяжение тёмной материи, барионов и фотонов. В момент, когда возраст Вселенной достиг 7 млрд лет, вклад тёмной энергии сравнялся с вкладом обычного вещества; для более поздних эпох во Вселенной (и большего её объёма) стало преобладать гравитационное отталкивание тёмной энергии. Поэтому в нашу эпоху Вселенная расширяется с ускорением.

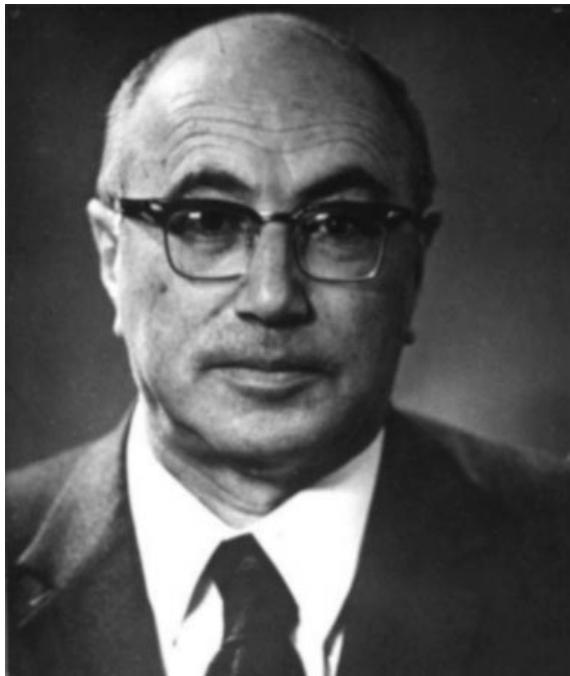


Рис. 18. Я.Б. Зельдович (1914–1987).

Давление тёмной энергии отрицательно:  $p = -w\varepsilon$ , где  $\varepsilon = \rho c^2$  — плотность энергии,  $w$  — коэффициент, по современным астрофизическим определениям близкий к единице,  $w = 1,02 \pm 0,05$ . Поскольку в ОТО источником гравитации является величина  $\rho + 3p/c^2$ , при отрицательном давлении источник гравитации оказывается отрицательным ( $-2\rho$ ). Это приводит к тому, что тёмная энергия обуславливает не гравитационное притяжение, а гравитационное отталкивание. Точное определение коэффициента  $w$  в уравнении состояния тёмной энергии — важнейшая задача современной наблюдательной космологии, для решения которой планируются специальные космические эксперименты. Значение коэффициента  $w = 1,02$  может свидетельствовать о том, что тёмная энергия — это вакуум (для которого  $w$  точно равно единице). Вакуум — это лоренц-инвариантная среда, с которой невозможно связать никакую систему отсчёта: плотность вакуума строго постоянна и одинакова во всех системах отсчёта. Следует отметить, что в пределах ошибок определения  $w$  может быть как меньше единицы (тогда это квинтэссенция), так и больше единицы (соответствует случаю фантомной энергии). Свойства квинтэссенции и особенно фантомной энергии удивительны. Здесь предоставляется большой простор для фантазий теоретиков.

Следует отметить, что имеются работы, авторы которых объясняют ускоренное расширение Вселенной не с помощью нового вида материи — тёмной энергии, а посредством введения так называемой  $F(R)$ -гравитации. В последнем случае гравитация отождествляется не с кривизной пространства-времени (как в ОТО), а с некоторой функцией этой кривизны.

## 20. Основные этапы эволюции нашей Вселенной

Согласно очень точному высказыванию И.С. Шкловского [81], современная астрономия является всеволновой и насквозь эволюционной. Поэтому современная космологическая модель Вселенной радикально отличается от систем Мира, предложенных нашими гениальными древ-

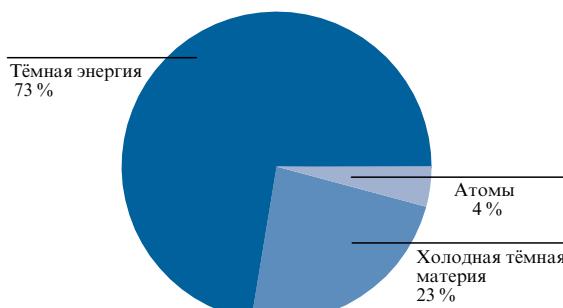


Рис. 19. Энергетический состав Вселенной.

ними предшественниками. Прежде всего, современная космология учитывает весь комплекс наблюдательных данных, накопленных благодаря применению мощных средств наблюдений. Важнейшие из этих данных описаны выше. В частности, принимается во внимание тот удивительный факт, что барионное вещество, из которого состоят звёзды, галактики, а также человек, составляет всего лишь 4 % от полного количества материи во Вселенной; главная же доля материи во Вселенной — это тёмный сектор (тёмная материя и тёмная энергия), природа которого пока непонятна. При построении космологических моделей используются новейшие достижения теоретической и экспериментальной физики. Но особенно важно то, что современная модель Вселенной является эволюционной: мы не только имеем представление о структуре Вселенной, но и делаем заключения о путях её развития и даже обсуждаем проблемы происхождения нашей Вселенной, а также возможность возникновения других вселенных, причинно не связанных с нашей. Настало время, когда человечество пытается распространить принцип Коперника не только на Землю, Солнце, нашу Галактику, но и на всю Вселенную: по-видимому, наша Вселенная, как и Галактика, ничем не выделена и является всего лишь одной из многих, причинно не связанных вселенных Мультимира. Как отмечалось выше, наша эволюционирующая Вселенная может быть описана с помощью надёжно установленных физических законов начиная по крайней мере с эпохи термоядерного синтеза химических элементов (в основном водорода и гелия), т.е. с первых секунд и минут после момента её образования.

Естествен вопрос: что происходило во Вселенной до эпохи термоядерных реакций, когда её возраст был менее одной секунды? С определённой степенью уверенности можно полагать, что космологическое расширение прошло и в более ранние эпохи, когда возраст Вселенной был много меньше одной секунды. Но суждения о самых ранних стадиях космологического расширения становятся тем менее надёжными, чем глубже мы уходим в прошлое. Когда мы приближаемся к самому началу образования Вселенной, мы вынуждены оперировать немыслимо высокими температурами и плотностями, при которых известные нам физические законы уже неприменимы. Поэтому описание самых ранних стадий формирования Вселенной вынуждает исследователей прибегать к далёкой экстраполяции известных физических законов в область, где для их применения, вообще говоря, не существует объективных оснований. Тем не менее в последние 25–30 лет получили развитие теории очень ранней Вселенной, которые оперируют колоссальными плотностями (например, планковской плотностью

$\sim 10^{93}$  г см $^{-3}$ ), экстремально малыми промежутками времени ( $\sim 10^{-43}$  с) и ничтожными пространственными расстояниями ( $\sim 10^{-33}$  см).

Такова, например, теория инфляции, которую развилиятые многие исследователи. В основе этой теории лежит смелая гипотеза о причине космологического расширения, выдвинутая свыше 40 лет назад петербургским учёным Э.Б. Глиннером (рис. 20). Согласно идеи Э.Б. Глиннера [82, 83], исходный разгон материи Вселенной создало антитяготение первичного космического вакуума. Развитие этой идеи привело к созданию инфляционных теорий, в основе которых рассматриваются различные скалярные поля и фазовые переходы в них. В этой области удалось показать, что неоднородности в космическом веществе, которые оставили отпечатки в реликтовом фоне и положили начало формированию галактик и их скоплений, могли возникнуть благодаря квантовым флуктуациям первичного скалярного поля и неовообразимо быстрому, экспоненциальному, увеличению масштабного фактора в молодой формирующейся Вселенной. Предсказанный спектр неоднородностей (зависимость относительной амплитуды от масштаба возмущений) согласуется с наблюдениями реликтового фона. Пionерские работы в этой области сделали В.А. Муханов и Г.В. Чибисов [84] из Физического института имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), а также А.А. Старобинский [85] (Институт теоретической физики имени Л.Д. Ландау РАН).

Современная космология решает также проблему барионной асимметрии Вселенной. Долгое время казался загадочным тот факт, что, хотя в ядерных реакциях в физических лабораториях частицы и античастицы рождаются равновероятно, наша Вселенная состоит из вещества, а антивещество в ней практически отсутствует. Основополагающая идея в этой области была высказана в 1960–1970-х годах А.Д. Сахаровым [86] и В.А. Кузьминым [87]. Идея состоит в том, что симметрия между частицами и античастицами является, как выяснилось, не строгой, а слегка нарушенной (нарушение CP-симметрии). Если имеет место несохранение барионного заряда (протон нестабилен), то вследствие быстрого расширения Вселенной (в конце инфляционной стадии) этой очень слабой асимметрии между частицами и античастицами достаточно, чтобы в тех экстремальных физических условиях, которые существовали в очень ранней Вселенной, возникла наблюдаемая барионная асимметрия. Эксперименты показывают, что время жизни протона более  $10^{32}$  лет, что на много порядков превосходит возраст Вселенной ( $1,4 \times 10^{10}$  лет). Таким образом, хотя пути решения проблемы барионной асимметрии Вселенной уже намечены, эта проблема ждёт своего окончательного решения. Тем не менее следует признать, что огромное время жизни протона — большая удача для нас...

В план нашего обзора не входит детальное описание проблем современной космологии. Отсылая читателей к специальным монографиям [1–3, 88], ограничимся лишь кратким перечислением основных этапов эволюции нашей Вселенной.

1. *Квантовое рождение классического пространства-времени и эра инфляции.* Время от момента образования Вселенной  $t = 10^{-43} - 10^{-36}$  с. За это время геометрический масштабный фактор  $a(t)$  экспоненциально расширяющейся Вселенной возрос в  $10^{10}$  раз. Большой вклад в решение этих проблем внесли Сахаров [89], Лифшиц [90,

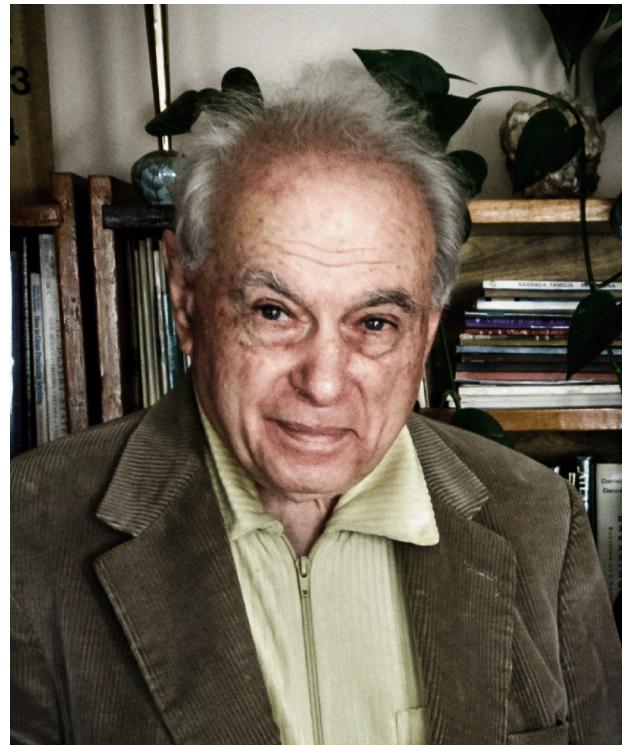


Рис. 20. Эраст Борисович Глиннер. (Сан-Франциско, 18 февраля 2013 г.)

91], Халатников [90–92], Белинский [92], Старобинский [85, 93], Гут [94], Линде [95], Зельдович [96–99], Рубаков [100, 101], Глиннер [82, 83, 102, 103], Дымникова [102, 103], Фомин [104], Грищук [105], Стейнхард [106], Муханов [84, 107], Чибисов [84], Сажин [99, 100], Зельманов [108], Лукаш [109] и др.

2. *Распад скалярного поля, рождение частиц, возрастание энтропии Вселенной, переход к стадии горячей Вселенной, расширяющейся по закону Фридмана,  $t = 10^{-36}$  с — Рубаков [110], Старобинский [111], Линде [111], Горбунов [110] и др.*

3. *Генерация барионной асимметрии,  $t = 10^{-35}$  с — Сахаров [112], Афлек [113], Дайн [113], Кузьмин [87, 114], Рубаков и Шапошников [114] и др.*

4. *ЭлектроСлабый переход и фазовый переход квантовой хромодинамики, конфайнмент кварков,  $t = 10^{-10} - 10^{-4}$  с (Рубаков и Шапошников [115]).*

5. *Отщепление нейтрино,  $t = 10^{-1}$  с.*

6. *Закалка нейтронов ( $n_n/n_p = 1/5$ ),  $t \simeq 1$  с.*

7. *Первичный нуклеосинтез: H,  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ , D, T, Li,  $t = 1 - 200$  с — Гамов [116], Шрамм и Оливье [117], Зельдович [118], Варшалович [119] и др.*

8. *Доминирование тёмной материи,  $t = 60000$  лет — Эйнасто [120], Зельдович, Сюняев [121] и др.*

9. *Рекомбинация и отделение излучения от вещества,  $t = 350000$  лет — Гамов [116], Пиблс [122], Курт [123], Сюняев [123], Зельдович [123], Дорошкевич [124], Новиков [124] и др.*

10. *Тёмная эра: H,  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$ , D, T, Li,  $t = 100 - 200$  млн лет.*

11. *Первые звёзды III типа населения ( $M = (100 - 1000) M_\odot$ ),  $t = 200$  млн лет — М. Рис [125] и др.*

12. *Формирование крупномасштабной структуры Вселенной,  $t \approx 1$  млрд лет — Лифшиц и Халатников [90, 91], Сахаров [89], Зельдович [126–129], Сюняев [127],*

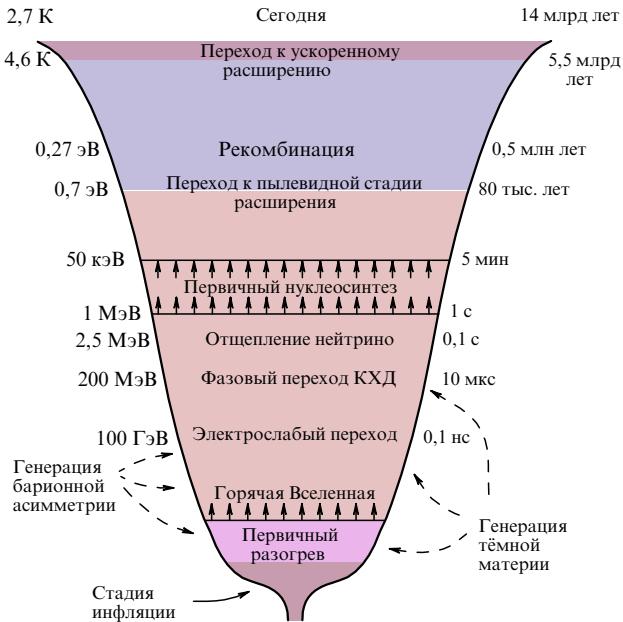


Рис. 21. Основные этапы эволюции нашей Вселенной.

Шандарин [128, 129], Дорошевич [130, 131], Эйнасто [120], Гуревич и Зыбин [132, 133], Лукаш [134, 135] и др.

13. *Переход к ускоренному расширению Вселенной*,  $t = 7$  млрд лет — Перлмуттер [72], Шмидт [71, 136] и Рисс [70], Старобинский [137, 138] и др.

14. *Современная эпоха*,  $t = 13,7$  млрд лет.

На рисунке 21, заимствованном из книги [1], отмечены основные этапы эволюции нашей Вселенной, включая момент её перехода от замедленного расширения к ускоренному (при возрасте  $t = 7$  млрд лет).

## 21. Мультимир (Multiverse).

### Теория вечной инфляции Андрея Линде

Итак, на самых ранних стадиях формирования нашей Вселенной, по-видимому, существовал инфляционный период, который начался через  $10^{-43}$  с после рождения классического пространства-времени. В интервале времён от  $10^{-43}$  до  $10^{-36}$  с происходило экспоненциальное раздувание Вселенной, после чего начался распад скалярного поля, что привело к возрастанию энтропии Вселенной и рождению частиц. Наблюдательными свидетельствами в пользу инфляционного сценария являются два важных факта: евклидовость (или почти евклидовость) нашего трёхмерного пространства, выводимая из анализа флуктуаций реликтового излучения, а также плоский спектр небольших неоднородностей, существовавших во Вселенной сразу после её рождения (так называемый спектр Гаррисона–Зельдовича), который выводится из современных наблюдательных данных. Важным наблюдательным подтверждением существования инфляционной стадии было бы обнаружение флуктуаций поляризации реликтового излучения, обусловленной фоном реликтового гравитационно-волнового излучения во Вселенной. Такая задача стоит в программе космической обсерватории "Планк" по исследованию флуктуаций реликтового излучения.

Возникает естественный вопрос: а что было раньше, до формирования классического пространства-времени и инфляционной стадии? По современным представлениям, инфляционной стадии развития нашей Вселенной предшествовал период её квантового существования.

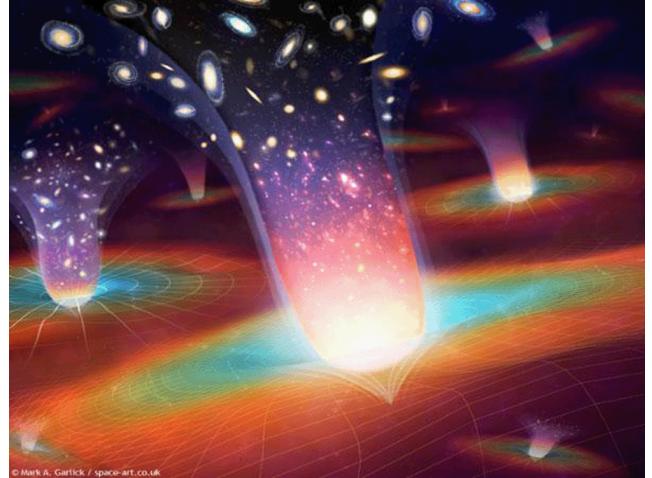


Рис. 22. "Кипящий вакуум" и квантовое рождение вселенных в мультимире.

Промежутки времени более короткие, чем  $10^{-43}$  с, и расстояния, меньшие, чем  $10^{-33}$  см, уже нельзя рассматривать как непрерывные время и пространство. При чудовищно большой плотности ( $10^{93}$  г  $\text{см}^{-3}$ ) энергии скалярного поля (вакуумоподобной материи) пространство-время распадалось на отдельные кванты и всё это находилось, как образно говорят теоретики, в состоянии "кипения вакуума". Характеристики пространства-времени изменялись причудливейшим образом, в том числе, менялись размерность пространства, а также его топология. Изучать такие процессы очень трудно, ввиду того что пока не создана строгая теория квантовой гравитации. Объединение ОТО с квантовой физикой осуществляется в рамках теории струн и М-теории. Компьютерное моделирование показало, что вследствие квантовых флуктуаций случайным образом происходит превращение "кипения вакуума" в отдельные "пузыри" (раздувающиеся вселенные). Каждая из таких рожденных вселенных подобна нашей, но разные вселенные могут иметь разные физические свойства и в них могут действовать разные физические законы при других физических константах (по сравнению с таковыми в нашей Вселенной). Некоторые "пузыри", рожденные из кипящего вакуума, будут развиваться неограниченно долго, а некоторые будут испытывать коллапс и новый переход в квантовое состояние (рис. 22).

До последних десятилетий XX в. господствовало представление о том, что релятивистская расширяющаяся Вселенная исчерпывающе представляет собой весь материальный мир. Мы называли всю мыслимую Вселенную единственным термином — Universe. С конца XX в. картина Единственного существующего мира уступает место картине Множественности многоголосых миров-вселенных. В этом состоит начавшаяся третья революция в астрономии и космологии.

Таким образом, описанный сценарий вечной инфляции предсказывает бесконечное рождение разных причинно не связанных вселенных. Этот процесс не имеет ни границ, ни пределов. В соответствии с принципом Ко-пернико, как упоминалось в разделе 6, наша Вселенная — лишь одна из многих вселенных Мультимира.

Один из создателей современной теории расширяющейся Вселенной Андрей Дмитриевич Линде (сотрудник ФИАН, профессор Стэнфордского университета) писал, что конца эволюции Вселенной (Multiverse) нет [139].

Пути наблюдательного подтверждения описанной модели Мультимира пока не ясны, хотя следует отметить, что поиски таких наблюдательных подтверждений кажутся не совсем безнадёжными. Дело в том, что разные вселенные могут быть связаны между собой топологическими туннелями ("кровервами норами"), которые могли остаться после стадии "кипения вакуума". Благодаря инфляционному раздуванию такие туннели из микроскопических структур пространства-времени могли превратиться в макроскопические объекты. Сквозь такие туннели может протекать материя и передаваться информация, в том числе из других вселенных. Поиск кровервов нор в нашей Вселенной (входов в другие вселенные) — важная задача современной наблюдательной астрофизики. В России теорией кровервов нор активно занимаются И.Д. Новиков, А.А. Шацкий и Н.С. Кардашев [140, 141]. Задача поиска кровервов нор включена в программу наблюдений российского космического интерферометра "Радиоастрон" [142].

## 22. Антропный принцип

Одну из первых формулировок антропного принципа ещё в середине 1950-х годов дали выдающийся московский космолог из ГАИШ МГУ Абрам Леонидович Зельманов (1913–1987) [143], а также известный астроном-теоретик Григорий Моисеевич Идлис (1928–2010) [144]. Зельманов утверждал, что наблюдаемая Вселенная такая, какая она есть, поскольку другие вселенные развиваются без свидетелей. Это было сказано задолго до разработки модели Мультимира. Не все учёные принимают всерьёз антропный принцип. Сторонники антропного принципа обращают внимание на то, что наша Вселенная неплохо приспособлена для жизни, в том числе для существования человека. Серьёзные физические и астрономические аргументы в пользу антропного принципа были предложены Б. Картером, И.Л. Розенталем, Р. Дикке, Дж. Барроу и др. Главный из этих аргументов состоит в том, что набор физических констант в нашем мире, а также управляющие им законы природы весьма благоприятны для возникновения жизни. Особое внимание обращается на то, что относительно небольшие изменения физических констант могли бы приводить к таким условиям в нашей Вселенной, при которых формирование жизни было бы невозможным. То есть наша Вселенная очень тонко настроена на процесс формирования в ней жизни.

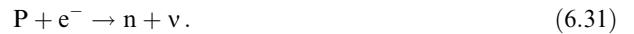
Специалисты различают сильный и слабый антропные принципы. Сильный антропный принцип звучит сурово: наша Вселенная специально создана такой, чтобы в ней имелась возможность нашего естественного существования. Сильный антропный принцип выводит нашу Вселенную из-под действия принципа Коперника и придаёт ей уникальный характер. Слабый антропный принцип более "демократичен" по своему звучанию; он утверждает: если в мире есть много разнообразных вселенных, то мы находимся в той из них, где наша жизнь возможна. Другие вселенные, по А.Л. Зельманову, "могут развиваться без свидетелей", поскольку в них физические константы и законы неблагоприятны для формирования жизни.

Слабый антропный принцип хорошо согласуется с новейшей моделью Мультимира, описанной в разделе 21.

Подробный анализ тонкой настройки нашей Вселенной на возможность формирования жизни выполнен,

например, в работах И.Л. Розенталя. Вот один из рассмотренных им аргументов [88]:

"На наш взгляд, наиболее впечатляющим примером является неустойчивость структуры Метагалактики относительно значения массы электрона  $m_e$ . Действительно, атом водорода в Метагалактике — абсолютно стабильный элемент. Его стабильность при достаточно низких температурах ( $T < m_e$ ) гарантируется законом сохранения энергии, запрещающим реакцию



Чтобы не осуществлялся коллапс атома водорода, необходимо выполнение условия:

$$m_e < \Delta m_N = m_n - m_p \simeq 1,3 \text{ МэВ}, \quad (6.32)$$

где  $m_{n,p}$  — масса нейтрона, протона. Однако, используя значения превосходно измеренных масс частиц, участвующих в реакции (6.31), легко убедиться, что при увеличении массы  $m_e$  более чем в 2,5 раза реакция (6.31) осуществлялась бы при сколь угодно малых температурах. А это означало бы, что при увеличении массы  $m_e$  атом водорода коллапсировал бы в нейтрон и нейтрино".

Далее И.Л. Розенталь подчёркивает, что на стадии первичного нуклеосинтеза в Метагалактике с утяжелённым электроном почти всё вещество, в соответствии с реакцией (6.31), превратилось бы в нейтроны и в нейтрино. В такой Вселенной существовали бы исключительно нейтронные звёзды, в недрах которых не протекают термоядерные реакции синтеза углерода, кислорода, кремния и других тяжёлых элементов, которые необходимы для формирования жизни.

Согласно И.Л. Розенталю, пределы возможного изменения фундаментальных констант, в интервале которых структура нашей Вселенной не меняется, весьма узки. Так, например, соответствующий интервал относительных изменений разности масс нейтрона и протона  $m_n - m_p$  составляет (0,4, 1,6). Для постоянной тонкой структуры  $\alpha_{em} = e^2/\hbar c = 1/137$  этот интервал равен (0,8, 1,6). Такая сильная чувствительность параметров нашей Вселенной к сравнительно небольшим изменениям физических констант даёт основания предполагать, что в разных вселенных Мультимира могут реализовываться различные физические константы и даже разные физические законы. Слабый антропный принцип, как отмечалось выше, позволяет распространить принцип Коперника на всю нашу Вселенную: она ничем не выделяется среди других вселенных Мультимира, за исключением того, что в ней в момент квантового рождения случайным образом сформировался такой набор физических констант и законов, который благоприятствует развитию условий для формирования жизни. В Мультимире, возможно, есть другие вселенные, причинно не связанные с нашей, в которых набор физических констант неблагоприятен для формирования жизни, а в некоторых вселенных, напротив, набор физических констант и законов, как и в нашей Вселенной, благоприятствует формированию жизни.

## 23. Заключение

В данном обзоре мы проследили историю развития наших представлений о Вселенной, её структуре и эволюции. Начиная от первых наивных представлений об устройстве Вселенной (X в. до н.э.) человечество в



Рис. 23. Глубокий снимок неба, сделанный космическим телескопом Хаббла с суммарной экспозицией  $\approx 2$  млн секунд.

стремлении понять природу окружающего нас мира прошло через две научные революции: коперниковскую (переход от геоцентризма к гелиоцентризму) и Эйнштейна–Фридмана–Хаббла (переход от модели статической Вселенной к модели расширяющейся, эволюционирующей, Вселенной). Сейчас мы стоим на пороге третьей революции в астрономии (открытие ускоренного расширения Вселенной и осознание того факта, что барионная материя — это лишь малая добавка к общей плотности всех видов материи во Вселенной).

Современная космология берёт своё начало с первых десятилетий XX в. За почти 100 лет своего существования, считая от первых наблюдений Слайфера и космологической работы Эйнштейна, космология превратилась из области абстрактных и иногда близких к фантастическим рассуждений в одно из центральных направлений естествознания XXI в. Сегодня космология обладает прочным наблюдательным фундаментом, на основе которого развивается теория, основанная на достижениях современной физики, включая общую теорию относительности, ядерную физику и физику элементарных частиц. Особо следует отметить недавнее открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, что может дать новый импульс развитию теоретических исследований в области космологии.

Космология ставит новые проблемы, выдвигает новые идеи и гипотезы, делает смелые предсказания, которые находятся на переднем крае науки, и даёт широкую и богатую картину окружающего нас мира, ставшую уже неотъемлемой частью общей культуры человечества. Как и в любой живой и сложной науке, в космологии есть нерешённые проблемы. Но так и должно быть, потому что это является источником дальнейшего развития такой замечательной науки, как космология.

В заключение продемонстрируем глубокий снимок неба (рис. 23), сделанный космическим телескопом Хаббла в направлении на галактический полюс (область созвездия Печь). Изображение области неба размером 2,5 угловых минуты получено с рекордно большой суммарной экспозицией, около 2 млн секунд ( $\approx 0,8$  месяца). На снимке почти нет звёзд нашей Галак-

тики, все объекты на нём — это галактики нашей Вселенной. Наиболее слабые из них соответствуют 30-й звёздной величине. Соответствующее красное смещение для них  $\sim 10$ , а их собственный возраст менее 500 млн лет (при современном возрасте Вселенной 13,7 млрд лет). Полное число галактик на снимке — около 6000. Снимок наглядно демонстрирует, что наша Вселенная — это мир галактик. Каждая галактика включает в себя от одного до нескольких сотен миллиардов звёзд. В центре практически любой из галактик располагается сверхмассивная чёрная дыра массой от  $10^6$  до  $10^{10}$  солнечных масс. Кроме того, в каждой галактике имеются чёрные дыры со звёздными массами ( $M = (5-20) M_\odot$ ), общая доля которых составляет около 0,1 % от массы барионного вещества галактики (звёзд, газа и пыли).

Задача для будущих гигантских оптических и инфракрасных телескопов с зеркалами диаметром 25–39 м и будущего космического телескопа им. Джеймса Вебба с зеркалом диаметром 6,5 м — дойти по проникающей силе до так называемой тёмной эры Вселенной (собственный возраст  $\sim 100-200$  млн лет), в которую Вселенная была заполнена только нейтральным водородом и гелием, а звёзды и галактики ещё не успели сформироваться. Наблюдательное обнаружение такой границы существования светящегося барионного вещества будет ещё одним подтверждением правильности наших представлений о структуре и эволюции Вселенной.

**Примечание при корректуре.** После того как наша статья была сдана в печать, были опубликованы результаты обработки наблюдений флуктуаций реликтового излучения с борта космической обсерватории "Планк" (arXiv:1303.507.6; 1303.508.2; 1303.508.3). Новые результаты в основном подтвердили выводы, сделанные на основе анализа наблюдений со спутника WMAP. Новое значение постоянной Хаббла в нашу эпоху  $H_0 = 67,0 \pm 1,2$  км  $s^{-1}$  на 1 Мпк, соответствующий возраст Вселенной составляет  $T = 13,8 \times 10^9$  лет (соответствующие величины для WMAP  $H_0 = 70,2 \pm 2,2$  км  $s^{-1}$  на 1 Мпк,  $T = 13,7 \times 10^9$  лет). Обнаружены небольшие, но значимые отклонения от плоского спектра Гаррисона – Зельдовича для начальных флуктуаций, которые позволяют наложить дополнительные ограничения на класс инфляционных моделей.

**Благодарности.** Автор благодарит А.И. Еремееву, М.В. Сажина, А.Д. Чернина, Ю.Л. Менцина и Т.П. Романову за ценные обсуждения.

## Список литературы

- Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва* (М.: ЛКИ, 2008) [Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)]
- Лукаш В Н, Михеева Е В *Физическая космология* (М.: Физматлит, 2010)
- Бисноватый-Коган Г С *Релятивистская астрофизика и физическая космология* (М.: Красанд, 2011)
- Van der Waerden B L *Science Awakening Vol. 2 The Birth of Astronomy* (Groningen: P. Noordhoff, 1974) [Ван-дер-Варден Б *Пробуждающаяся наука 2. Рождение астрономии* (М.: Наука, 1991)]
- Потемкина Т М, Обридко В Н (Отв. ред.) *Астрономия древних обществ* (М.: Наука, 2002)
- Brown P L *Megaliths, Myths, and Men. An Introduction to Astro-Archaeology* (Mineola, N.Y.: Dover Publ., 2000) [Браун П Стоунхендж. *Загадки мегалитов* (М.: Центрполиграф, 2010)]

7. Hawkins G S *Beyond Stonehenge* (Albuquerque, N.M.: Hubert Allen and Associates, 2001) [Хокинс Дж *От Стоунхенджса до шиков* (М.: Вече, 2004)]
8. Юревич В А *Астрономия доколумбовой Америки* (М.: УРСС, 2004)
9. Владимирский Б М, Кисловский Л Д *Археоастрономия и история культуры* (Новое в жизни, науке, технике. Космонавтика, астрономия, Вып. 3/1989) (М.: Знание, 1989)
10. Еремеева А И, Цицин Ф А *История астрономии* (М.: Изд-во МГУ, 1989)
11. Бонгард-Левин Г М (Отв. ред.) *Ригведа. Избранные гимны* (М.: Наука, 1972); Macdonell A A (Selected and translated) *Hymns from the Rigveda* (New Delhi: Y.M.C.A. Publ. House, 1966)
12. Бонгард-Левин Г М, Ильин Г Ф *Индия в древности* (М.: Наука, 1985)
13. Pannekoek A A *History of Astronomy* (New York: Interscience Publ., 1961) [Паннекук А *История астрономии* (М.: Наука, 1966)]
14. Рожанский И Д *Античная наука* (М.: Наука, 1980)
15. Ахутин А В *Античные начала философии* (СПб.: Наука, 2007) с. 358–365
16. Куртик Г Е, Матвиевская Г П "Птолемей и его астрономический труд", в кн. Птолемей К *Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати книгах* (Пер. с древнегреч. И.Н. Веселовского) (М.: Физматлит, 1998) с. 429–451
17. Птолемей К *Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати книгах* (Пер. с древнегреч. И.Н. Веселовского) (М.: Физматлит, 1998)
18. Кимелев Ю А, Полякова Н Л *Наука и религия: историко-культурный очерк* (М.: Наука, 1988) с. 107–109
19. Булгаков П Г *Жизнь и труды Беруни* (Ташкент: Фан, 1972)
20. Николай Кузанский "Об ученом незнании", в кн. *Сочинения в 2-х томах*. Т. 1 (М.: Мысль, 1979) с. 130–133
21. Адамчевский Я *Николай Коперник и его эпоха* (Варшава: Интерпресс, 1972)
22. Веселовский И Н, Белый Ю А *Коперник, 1473–1543* (М.: Наука, 1974)
23. Гребенников Е А *Николай Коперник* (М.: Наука, 1982)
24. Коперник Н *О вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 22–23, 39
25. Коперник Н "Малый комментарий", в кн. Коперник Н *О вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 419–430
26. Ретик Г И "О книгах вращений Николая Коперника", в кн. Коперник Н *О вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 488–547
27. Михайлов А А "Николай Коперник. Биографический очерк", в кн. Коперник Н *О вращениях небесных сфер* (М.: Наука, 1964) с. 485
28. Струве В Я *Этюды звездной астрономии* (Л.: Изд-во АН СССР, 1953)
29. Бруно Дж "О бесконечности, вселенной и мирах", в кн. Бруно Дж *Диалоги* (М.: Госполитиздат, 1949) с. 295–448
30. Данилов Ю.А. "Комментарии", в кн. Галилей Г *Пробирных дел мастер* (М.: Наука, 1987) с. 262
31. Галилей Г "Звездный вестник", в кн. Галилей Г *Избранные труды в 2-х томах*. Т. 1 (М.: Наука, 1964) с. 11–54
32. Галилей Г *Диалог о двух главнейших системах мира птолемеевой и коперниковой* (М.–Л.: Гостехиздат, 1948)
33. Кузнецов Б Г *Галилей* (М.: Наука, 1964) с. 223, 224
34. Боярчук А А, Вибе Д З (Ред.) *Наследие Галилея. Сборник лекций, прочитанных на Конф. "Астрономия и общество", Москва 25–27 марта 2009 года* (М.: Скиф, 2009)
35. Ньютона И *Математические начала натуральной философии* (Пер. с латин. и коммент. А Н Крылова, Под ред. и с предисл. Л С Полака) (М.: Наука, 1989)
36. Ломоносов М В "Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санкт-Петербургской Императорской Академии наук мая 26 дня 1761 года", в кн. *Полное собрание сочинений* Т. 4 (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1955) с. 361–376
37. Еремеева А И *Вселенная Гершеля. Космологические и космогенные идеи и открытия* (М.: Наука, 1966)
38. Shapley H, Curtis H D "The scale of the Universe" *Bull. Natl. Res. Council* **2** (Pt. 3, 11) 171–217 (1921)
39. Hubble E P "Extragalactic nebulae" *Astrophys. J.* **64** 321 (1926)
40. Einstein A "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" *Annalen der Physik* **354** 769 (1916) [Эйнштейн А, в сб. Альберт Эйнштейн и теория гравитации (Под ред. Е. Куранского) (М.: Мир, 1979) с. 146]
41. Einstein A "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie" *Sitzungsber. Königl. Preuß. Akad. Wissenschaft. Berlin* **1** 142 (1917) ["Cosmological considerations in the general theory of relativity" *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 6 (Translator A Engel) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1996) doc. 43; Эйнштейн А "Вопросы космологии и общая теория относительности", в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 1 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1965) с. 601]
42. Friedmann A "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **10** (1) 377 (1922) [Фридман А "О кривизне пространства" *Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва* **56** 59 (1924)]
43. Friedmann A "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **21** (1) 326 (1924) [Фридман А "О возможности мира с постоянной отрицательной кривизной пространства" *УФН* **80** 447 (1963)]
44. Фридман А А *Мир, как пространство и время* (Петроград: Академия, 1923); *Мир как пространство и время* 2-е изд. (М.: Наука, 1965)
45. Einstein A "Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **11** 326 (1922) [Эйнштейн А "Замечание к работе А. Фридмана "О кривизне пространства""], в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 2 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1966) с. 118; *УФН* **80** 453 (1963)]
46. Einstein A "Notiz zu der Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedmann: Über die Krummung des Raumes" *Z. Phys.* **16** 228 (1922) [Эйнштейн А "К работе А. Фридмана "О кривизне пространства""], в кн. *Собрание научных трудов А. Эйнштейна* Т. 2 (Под ред. И Е Тамма, Я А Смородинского, Б Г Кузнецова) (М.: Наука, 1966) с. 119; *УФН* **80** 453 (1963)]
47. Lemaître G "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques" *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* **47** 49 (1927)
48. Lemaître G "L'Univers en expansion" *Ann. Soc. Sci. Bruxelles A* **53** 51 (1933)
49. Slipher V M "Nebulae" *Proc. Am. Phil. Soc.* **56** 403 (1917)
50. Slipher V M "Radial velocity observations of spiral nebulae" *Observatory* **40** 304 (1917)
51. Сарданашвили Г А *Дмитрий Иваненко — суперзвезда советской физики. Ненаписанные мемуары* (М.: URSS, 2010) с. 155
52. Humason M L "The large radial velocity of N. G. C. 7619" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** (3) 167 (1929)
53. Hubble E "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168 (1929)
54. Einstein A "Relativity, thermodynamics and cosmology" *Science* **80** 358 (1934), Review of R. Tolman book [Эйнштейн А, в кн. Эйнштейн А *Физика и реальность* (М.: Наука, 1965) с. 36]
55. Alpher R A, Bethe H, Gamow G "The origin of chemical elements" *Phys. Rev.* **73** 803 (1948)
56. Gamow G *The Creation of the Universe* (New York: Viking Press, 1952)
57. Penzias A A, Wilson R W "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s" *Astrophys. J.* **142** 419 (1965)
58. Шмаонов Т А "Методика абсолютных измерений эффективной температуры радиоизлучения с низкой эквивалентной температурой" *Приборы и техника эксперимента* (1) 83 (1957)
59. Шкловский И С *Звезды: их рождение, жизнь и смерть* 3-е изд. (М.: Наука, 1984) с. 10 [Shklovskii I S Stars, Their Birth, Life, and Death (San Francisco : W.H. Freeman, 1978)]
60. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* 3-е изд. (М.: Бюро Квантум, 1995) с. 142 [Ginzburg V L *The Physics of a Lifetime: Reflections on the Problems and Personalities of 20th Century Physics* (Berlin: Springer, 2001)]
61. Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 387 (1992) [Strukov I A et al. *Sov. Astron. Lett.* **18** 153 (1992)]
62. Strukov I A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **258** 37P (1992)
63. Скулачёв Д П *УФН* **180** 389 (2010) [Skulachev D P *Phys. Usp.* **53** 373 (2010)]
64. Mather J C et al. *Astrophys. J.* **420** 439 (1994)
65. Hinshaw G et al. "Three-years Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Temperature analysis" *Astrophys. J. Suppl.* **170** 288 (2007); astro-ph/0603451
66. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
67. Einasto J "Galactic models and stellar orbits", in *Stars and the Milky Way System. Proc. of the First European Astronomical Meeting, Athens, September 4–9, 1972* (Ed. L N Mavridis) (Berlin: Springer-Verlag, 1974) p. 291

68. Rubin V C et al. "Motion of the Galaxy and the local group determined from the velocity anisotropy of distant SC I galaxies. I — The data" *Astron. J.* **81** 687 (1976)
69. Ostriker J P, Peebles P J E "A numerical study of the stability of flattened Galaxies: or, can cold Galaxies survive?" *Astrophys. J.* **186** 467 (1973)
70. Riess A G et al. "Observational evidence from Supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant" *Astron. J.* **116** 1009 (1998)
71. Schmidt B P et al. "The High-Z Supernova Search: Measuring cosmic deceleration and global curvature of the Universe using Type IA Supernovae" *Astrophys. J.* **507** 46 (1998)
72. Perlmutter S et al. "Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift Supernovae" *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
73. Псковский Ю П *Астрон. журн.* **54** 1188 (1977) [Pskovskii Yu P Sov. Astron. **21** 675 (1977)]
74. Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **6** 883 (1967) [Zel'dovich Ya B JETP Lett. **6** 316 (1967)]
75. Шкловский И С *Астрон. циркуляр* (429) (1967)
76. Kardashev N *Astrophys. J.* **150** L135 (1967)
77. Чернин А Д и др. *Астрон. журн.* **89** 723 (2012) [Chernin A D et al. *Astron. Rep.* **56** 653 (2012)]
78. Sandage A *Astrophys. J.* **527** 479 (1999)
79. Chernin A D et al. *Astron. Astrophys.* **520** A104 (2010)
80. Зельдович Я Б *Астрофизика* **6** 319 (1970) [Zel'dovich Ya B *Astrophys.* **6** 164 (1970)]
81. Шкловский И С *Вселенная, жизнь, разум* (Под ред. Н С Кардашева, В И Мороза) 6-е изд., доп. (М.: Наука, 1987)
82. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1966) [Gliner E B Sov. Phys. JETP **22** 378 (1966)]
83. Глинер Э Б *ДАН СССР* **192** 771 (1970) [Gliner É B Sov. Phys. Dokl. **15** 559 (1970)]
84. Муханов В Ф, Чибисов Г В *Письма в ЖЭТФ* **33** 549 (1981) [Mukhanov V F, Chibisov G V JETP Lett. **33** 532 (1981)]
85. Старобинский А А *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979) [Starobinskii A A JETP Lett. **30** 682 (1979)]
86. Сахаров А Д *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967) [Sakharov A D JETP Lett. **5** 24 (1967)]
87. Кузьмин В А *Письма в ЖЭТФ* **12** 335 (1970) [Kuz'min V A JETP Lett. **12** 228 (1970)]
88. Розенталь И Л, Архангельская И В *Геометрия, динамика, Вселенная* (М.: УРСС, 2003)
89. Сахаров А Д *ДАН СССР* **177** 70 (1967) [Sakharov A D Sov. Phys. Dokl. **12** 1040 (1968)]
90. Lifshitz E M, Khalatnikov I M *Adv. Phys.* **12** 185 (1963)
91. Лицшиц Е М, Халатников И М *УФН* **80** 391 (1963) [Lifshitz E M, Khalatnikov I M Sov. Phys. Usp. **6** 495 (1964)]
92. Belinskii V A, Khalatnikov I M, Lifshitz E M *Phys. Lett. A* **77** 214 (1980)
93. Starobinsky A A *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980)
94. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
95. Linde A D *Phys. Lett. B* **108** 389 (1982)
96. Зельдович Я Б, Старобинский А А *Письма в Астрон. журн.* **10** 323 (1984) [Zeldovich Ya B, Starobinskii A A Sov. Astron. Lett. **10** 135 (1984)]
97. Zeldovich Ya B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160** IP (1972)
98. Starobinsky A A, Zeldovich Ya B "Spontaneous creation of the Universe", in Zeldovich Ya B *My Universe. Selected Reviews* (Eds B Ya Zeldovich, M V Sazhin) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1992)
99. Sazhin M V, Zeldovich Ya B "Gravitational Waves in Cosmology: Sources and Detection", in Zeldovich Ya B *My Universe. Selected Reviews* (Eds B Ya Zeldovich, M V Sazhin) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1992)
100. Rubakov V A, Sazhin M V, Veryaskin A V *Phys. Lett. B* **115** 189 (1982)
101. Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Lett. B* **125** 139 (1983)
102. Глинер Э Б, Дымникова И Г *Письма в Астрон. журн.* **1** 7 (1975) [Gliner É B, Dymnikova I G Sov. Astron. Lett. **1** 93 (1975)]
103. Глинер Э Б *УФН* **172** 221 (2002) [Gliner É B Phys. Usp. **45** 213 (2002)]
104. Фомин П И *Докл. Украинской АН. Сер. А. Физ.-мат. тех. науки* (9) 831 (1975)
105. Zeldovich Ya B, Grishchuk L P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **207** 23P (1984)
106. Albrecht A, Steinhardt P J *Phys. Rev. Lett.* **48** 1220 (1982)
107. Муханов В Ф *Письма в ЖЭТФ* **41** 402 (1985) [Mukhanov V F JETP Lett. **41** 493 (1985)]
108. Зельманов А Л *Астрон. журн.* **54** 1168 (1977) [Zelmanov A L Sov. Astron. **21** 664 (1977)]
109. Лукаш В Н *ЖЭТФ* **79** 1601 (1980) [Lukash V N Sov. Phys. JETP **52** 80 (1980)]
110. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория* (М.: КРАСАНД, 2010); Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)
111. Kofman L, Linde A, Starobinsky A A *Phys. Rev. Lett.* **73** 3195 (1994)
112. Сахаров А Д *ЖЭТФ* **76** 1172 (1979) [Sakharov A D Sov. Phys. JETP **49** 594 (1979)]
113. Affleck I, Dine M *Nucl. Phys. B* **249** 361 (1985)
114. Kuzmin V A, Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Lett. B* **155** 36 (1985)
115. Рубаков В А, Шапошников М Е *УФН* **166** 493 (1996) [Rubakov V A, Shaposhnikov M E Phys. Usp. **39** 461 (1996)]
116. Gamow G *Phys. Rev.* **70** 572 (1946)
117. Yang J, Turner M S, Schramm D N, Steigman G, Olive K A *Astrophys. J.* **281** 493 (1984)
118. Зельдович Я Б *УФН* **89** 647 (1966) [Zel'dovich Ya B Sov. Phys. Usp. **9** 602 (1967)]
119. Варшалович Д А и др. *УФН* **180** 415 (2010) [Varshalovich D A et al. *Phys. Usp.* **53** 397 (2010)]
120. Zeldovich Ya B, Einasto J, Shandarin S F *Nature* **300** 407 (1982)
121. Doroshkevich A G, Khlopov M Iu, Sunyaev R A, Szalay A S, Zeldovich Ia B *Ann. New York Acad. Sci.* **375** 32 (1981)
122. Peebles P J E, Yu J T *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
123. Зельдович Я Б, Курт В Г, Сюняев Р А *ЖЭТФ* **55** 278 (1968) [Zel'dovich Ya B, Kurt V G, Syunyaev R A Sov. Phys. JETP **28** 146 (1969)]
124. Дорошкевич А Г, Новиков И Д *ДАН СССР* **154** 809 (1964) [Doroshkevich A G, Novikov I D Sov. Phys. Dokl. **9** 111 (1964)]
125. Kashlinsky A, Rees M J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **205** 955 (1983)
126. Zel'dovich Ya B *Astron. Astrophys.* **5** 84 (1970)
127. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astron. Astrophys.* **20** 189 (1972)
128. Shandarin S F, Zeldovich Ya B *Rev. Mod. Phys.* **61** 185 (1989)
129. Arnold V I, Shandarin S F, Zeldovich Ia B *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics* **20** 111 (1982)
130. Дорошкевич А Г *Астрофизика* **6** 581 (1970) [Doroshkevich A G *Astrophysics* **6** 320 (1970)]
131. Doroshkevich A G, Kotok E V, Poliudov A N, Shandarin S F, Sigov Iu S, Novikov I D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **192** 321 (1980)
132. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **165** 723 (1995) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **38** 687 (1995)]
133. Gurevich A V, Sirota V A, Zybin K P *Phys. Lett. A* **207** 333 (1995)
134. Komberg B V, Lukash V N *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **269** 277 (1994)
135. Лукаш В Н, Михеева Е В, Малиновский А М *УФН* **181** 1017 (2011) [Lukash V N, Mikheeva E V, Malinovsky A M *Phys. Usp.* **54** 983 (2011)]
136. Tonry J L et al. *Astrophys. J.* **594** 1 (2003)
137. Sahni V, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 373 (2000)
138. Boisseau B, Esposito-Farèse G, Polarski D, Starobinsky A A *Phys. Rev. Lett.* **85** 2236 (2000)
139. Линде А Д *Физика элементарных частиц и инфляционная космология* (М.: Наука, 1990) [Linde A D *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Chur: Harwood Acad. Publ., 1990)]
140. Новиков И Д, Кардашев Н С, Шацкий А А *УФН* **177** 1017 (2007) [Novikov I D, Kardashev N S, Shatskii A A *Phys. Usp.* **50** 965 (2007)]
141. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008) [Shatskii A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)]
142. Кардашев Н С *УФН* **179** 1191 (2009) [Kardashev N S *Phys. Usp.* **52** 1127 (2009)]
143. Зельманов А Л "К постановке космологической проблемы", в сб. *Труды 2 съезда Всесоюз. астрономо-геодезического общества 25–31 января 1955 г.* (Отв. ред. А А Михайлов) (М.: Изд-во АН СССР, 1960) с. 77, докл. на 2 съезде ВАГО 27 янв. 1955 г.
144. Идлис Г М "Основные черты наблюдаемой астрономической Вселенной, как характерные свойства обитаемой космической системы" *Изв. Астрофиз. ин-та АН КазССР* **7** 39 (1958)