

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук и заседание Ученого совета
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
посвященные 90-летию академика В.Л. Гинзбурга**

(4 октября 2006 г.)

4 октября 2006 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялись Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и заседание Ученого совета ФИАН, посвященные 90-летию академика В.Л. Гинзбурга. Были заслушаны доклады:

1. **Гуревич А.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Нелинейные эффекты в ионосфере.*

2. **Кардашев Н.С.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Радиовселенная.*

3. **Птушкин В.С.** (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк, Московская обл.). *О происхождении галактических космических лучей.*

4. **Максимов Е.Г.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Что известно и что неизвестно о ВТСП.*

5. **Белявский В.И., Копаев Ю.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Уравнения Гинзбурга–Ландау для высокотемпературных сверхпроводников.*

6. **Цытович В.Н.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Поляризационные эффекты в среде: от излучения Вавилова–Черенкова и переходного рассеяния до спаривания пылевых частиц, или развитие одной идеи В.Л. Гинзбурга с 1940 по 2006 гг.*

Расширенное содержание докладов 1 и 4, представленное в виде обзоров, будет опубликовано в последующих выпусках *УФН*. Краткое содержание остальных докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 95.30. – k, 95.55.Jz, 95.85.Bh

Радиовселенная

Н.С. Кардашев

1. Введение

Благодаря революционному развитию физики и техники в XX в. начались исследования Вселенной во всех диапазонах электромагнитного спектра. Открытие космического радиоизлучения Галактики (К. Янский, 1932 г.), Солнца (Г. Ребер, Дж. Хэй, Дж. Саусворт,

1942–1944 гг.), галактических и внегалактических радиоисточников (Г. Ребер, Дж. Хэй, С. Парсонс, Дж. Филлипс, Дж. Болтон, Г. Стенли, М. Райл, Ф. Смит, 1942–1948 гг.), развитие радиоастрономии и радиоинтерферометрии, открытие квазаров, пульсаров и космологического реликтового фона совместно с глубоким анализом и моделированием наблюдаемых астрономических объектов на основе бурно развивающейся теоретической физики (прежде всего квантовой механики и общей теории относительности) привели к созданию современной картины строения и эволюции отдельных объектов и многокомпонентной космологической модели всей Вселенной. В этом бурном продолжающемся процессе научных исследований радиоастрономические методы имели и будут иметь огромное значение. Основная библиографическая информация о раннем периоде развития собрана в указателе [1], а история становления радиоастрономии в СССР описана в [2–6].

Инициатором первых радиоастрономических исследований в СССР был крупнейший радиофизик академик Н.Д. Папалекси — заведующий лабораторией колебаний ФИАН в 1940-е годы. Обдумывая возможность радиолокации планет и Солнца, Н.Д. Папалекси в начале 1946 г. попросил В.Л. Гинзбурга исследовать условия отражения радиоволн [7, с. 127]. Для Солнца это оказалось трудной задачей, однако результаты оценок и особенностей собственного излучения оказались очень интересными и вызвали появление целой серии ранних работ по физике излучения Солнца и Галактики [7–20].

Для наблюдений полного солнечного затмения 20 мая 1947 г. Н.Д. Папалекси организовал большую экспедицию в Бразилию, участниками которой кроме экспериментаторов стали В.Л. Гинзбург и И.С. Шкловский. Радиотелескоп (переоборудованная радиолокационная станция с приемником на длину волны 1,5 м) был установлен на палубе теплохода "Грибоедов", а сам теплоход использовался в качестве поворотного устройства. Результаты наблюдений впервые надежно показали, что излучение Солнца на метровых волнах генерируется в короне в соответствии с теоретическими предсказаниями. Диплом на открытие был выдан на имя Н.Д. Папалекси, С.Э. Хайкина и Б.М. Чихачева. Это был первый существенный эксперимент по радиоастрономии в СССР.



В.Л. Гинзбург (слева) и И.С. Шкловский обсуждают вопросы теории радиоизлучения солнечной короны (Рио-де-Жанейро, 1947 г.).

2. Наиболее интересные результаты последних лет

Продолжается сверхточное картографирование флуктуаций реликтового космологического излучения в короткой сантиметровой и миллиметровой областях спектра с помощью спутника WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [21]. Согласно этим данным космологическая модель описывается шестью безразмерными параметрами:

$$\begin{aligned}\Omega_m h^2 &= 0,1277 + 0,0080/-0,0079, \\ \Omega_b h^2 &= 0,02229 \pm 0,00073, \\ h &= 0,732 + 0,031/-0,032, \quad n_s = 0,958 \pm 0,016, \\ \tau &= 0,089 \pm 0,030, \quad \sigma_8 = 0,761 + 0,049/-0,048.\end{aligned}$$

Здесь Ω_m — современная плотность материи по отношению к критической, Ω_b — то же для барионов, h — современное значение постоянной Хаббла в единицах $100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, n_s — наклон спектра скалярных возмущений плотности, τ — оптическая толщина, σ_8 — амплитуда флуктуаций плотности на масштабе 8 Мпк. Комбинация данных WMAP и наблюдений с космическим телескопом аппарата "Хаббл" приводит к значению плотности вакуумной составляющей $\Omega_\Lambda = 0,716 \pm 0,055$, строгому ограничению на параметр уравнения состояния темной энергии $w = -1,08 \pm 0,12$ и очень малому отличию полной плотности материи от критической $\Omega_c = -0,014 \pm 0,017$.

Еще более точные данные, включая поляризационные измерения, ожидается получить со спутника "Planck", запуск которого планируется на 2008 г. [22].

Новые перспективы в космологии связаны с моделью многокомпонентной Вселенной (Multiverse), в которой инфляция возникает в разных областях пространства и в разные моменты времени (рис. 1). В целом Multiverse может быть бесконечна в пространстве и времени и бесконечно разнообразна. Экспериментально такая модель может быть исследована только при наличии топологических тоннелей — кротовых нор [23, 24]. В работе [24] обращено внимание на то, что кротовые норы могут поддерживаться пронизывающим их сильным магнитным полем (с малой добавкой фантомной энергии), и поэтому наблюдение входов в тоннели может обнаружить целый ряд отличительных признаков, например, монополярную структуру поля, односторонние выбросы релятивистских частиц, отсутствие горизонта событий. Однако по многим признакам такие объекты будут очень похожими на уже наблюдае-



Участники бразильской экспедиции по наблюдению солнечного затмения 20 мая 1947 г. на палубе теплохода "Грибоедов". В первом ряду первый справа С.Э. Хайкин, во втором ряду четвертый слева В.Л. Гинзбург, девятый Б.М. Чихачев, в третьем ряду второй справа И.С. Шкловский.

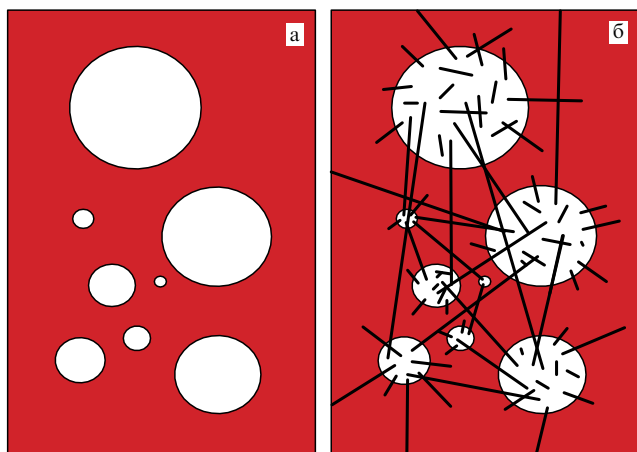


Рис. 1. Модели многоэлементной Вселенной (Multiverse) без тоннелей (а) и с тоннелями (б).

мые галактические или внегалактические компактные объекты.

Систематические исследования внегалактических источников [25] указывают на то, что во многих областях, где предполагается наличие сверхмассивных черных дыр (или входов в тоннели), наблюдаются сверхкомпактные объекты, не разрешаемые с помощью наземных радиоинтерферометров. Примером является известная радиогалактика М87. Вероятно, только с применением космических радиоинтерферометров удастся исследовать структуру и понять природу таких объектов.

Очень интересными представляются исследования нового для радиоастрономии класса внегалактических объектов, возникающих на месте гамма-всплесков. Согласно обсуждаемым моделям эти объекты являются результатом взрыва, возникающего при слиянии двух черных дыр звездной массы, или черной дыры и нейтронной звезды, или двух нейтронных звезд. Совершенно неожиданным оказалось то, что спектр этих радиоисточников в первые дни после взрыва является инвертированным [26, 27], т.е. растет в коротковолновую область. Это объясняет, почему наблюдаемый поток для таких источников почти не изменяется с красным смещением и в радиодиапазоне можно наблюдать даже самые далекие взрывы [28]. Вероятно, только с помощью радиоинтерферометров удастся исследовать структуру этих объектов и, в частности, определить направленность, динамику и полную энергию взрыва.

Очень интересны новые открытия в галактической радиоастрономии. При наблюдениях, выполненных на радиотелескопах в Пушино и Калязине [29], гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности (после специальной обработки для исключения размытия импульса вследствие дисперсии при распространении радиоволн в межзвездной среде) было обнаружено, что некоторые импульсы имеют огромную амплитуду, превышая по потоку радиоизлучение Солнца, а по яркостной температуре значение 10^{40} К. Это означает, что плотность энергии электромагнитного поля в области генерации импульса превосходит плотность энергии магнитного поля самой нейтронной звезды, что представляется большой проблемой для построения физической модели такой области.

В работе [30] впервые получено изображение быстро переменного радиоисточника Суг Х-3, представляющего собой тесную двойную систему: черная дыра с массой около пяти масс Солнца и питающая ее аккреционный диск звезда типа Вольф Райе. Исследования с большим угловым разрешением позволят получить структуру и параметры плазмы, релятивистских частиц и магнитного поля системы.

В 2006 г. было сообщено об открытии нового класса пульсаров [31]: обнаружены радиоимпульсы от переменного рентгеновского источника ХТЕ J1810-197, поступающие с периодом 5,54 с. Однако спектр радиоизлучения оказался плоским (у обычных пульсаров спектр круто падает с частотой). Это ставит вопрос о новой модели когерентного излучения таких объектов и позволяет исследовать их с самым высоким угловым разрешением на коротких волнах.

Большой интерес представляют продолжающиеся исследования сверхкомпактных источников мазерного излучения в областях образования звезд и планетных систем. Наблюдения одного из самых мощных мазеров в нашей галактике W3 (ОН) для линии водяного пара 1,35 см [32] показали наличие сильного, не разрешаемого с наземными базами радиоисточника. Исследования галактик, в которых наблюдается так называемый процесс звездообразования, показывают наличие множества узких сверхмощных линий (мегамазеры) в диапазонах 1,35 см (H_2O) и 18 см (ОН), генерируемых из ультракомпактных областей (верхняя граница размеров которых определяется только по наличию мерцаний на неоднородностях межзвездной плазмы) [33, 34].

3. Перспективы исследований

Перспективы радиоастрономии тесно связаны с важнейшими проблемами современной астрофизики и возможностью создания более мощных радиотелескопов, в первую очередь, с большей чувствительностью и большим угловым разрешением. При этом очень важно учитывать множество специфических свойств радиодиапазона. Перечислим основные особенности и цели исследований.

1. Самая длинноволновая область электромагнитного спектра ($\lambda = 0,1$ мм–10 км, 8 порядков), самые низкие частоты, самые малоэнергичные кванты.

2. Полный спектр интенсивности космического электромагнитного фонового излучения имеет в радиодиапазоне абсолютный максимум, совпадающий с максимумом реликтового космологического фона, который весь находится в радиодиапазоне.

3. Пространственный спектр флуктуаций интенсивности и поляризации реликтового фона тесно связан с параметрами ранней Вселенной, темной материей и темной энергией.

4. В радиодиапазоне исследуются самые низкотемпературные объекты (от 300 К до 2,73 К и даже $-2,73$ К, а градиенты до 10^{-6} К).

5. В радиодиапазоне исследуются объекты с самой высокой яркостной температурой (до 10^{40} К), что обеспечивается возможностью когерентного излучения.

6. В радиодиапазоне очень интересны исследования рассеяния реликтового фона на электронах (эффект Зельдовича – Сюняева в скоплениях галактик).

7. Возможность исследования межзвездной среды нашей и других галактик (структура, динамика, эволю-

ция) по линии сверхтонкого расщепления основного уровня водорода (21 см), линиям других элементов и молекул.

8. Радиоизлучение межзвездной пыли (наблюдаются температуры до 7 К и ниже). Пылевые облака прозрачны для радиоволн (длина волны больше пылинки), следовательно, имеется возможность исследования процессов формирования планет.

9. Радиоизлучение областей ионизованной плазмы в континууме и рекомбинационных линиях (переходы между самыми высокими уровнями атомов) в галактиках, возможность наблюдения рекомбинации Вселенной, темной эпохи, начального звездообразования.

10. Эффект дисперсии при распространении радиоволн в плазме (измерение меры дисперсии DM).

11. Мерцания радиисточников (турбулентность межпланетной и межзвездной плазмы).

12. Измерение фарадеевского вращения и зеемановского расщепления.

13. Синхротронное радиоизлучение релятивистских электронов и возможность обнаружения синхротронного радиоизлучения релятивистских протонов (источники космических лучей).

14. Исследование космических лучей и нейтрино самых высоких энергий: когерентное радиоизлучение при попадании высокоэнергичных частиц в твердое тело (например Луну) — эффект Аскаряна.

15. Исследование радиоизлучения оболочек сверхновых звезд как вероятных генераторов космических лучей.

16. Изучение со сверхвысоким угловым разрешением структуры окрестностей черных дыр как вероятных областей ускорения релятивистских частиц (источник в центре Галактики SgrA*, ядра других галактик, радиогалактики, квазары, микроквазары, "сверхсветовое" движение и расширение).

17. Поиск со сверхвысоким разрешением топологических тоннелей (кротовых нор), проверка теории струн и дополнительных измерений, исследование проявлений многокомпонентной Вселенной (Multiverse).

18. Радиоизлучение на плазменной частоте и гирочастотах: Солнце и радиозвезды.

19. Исследование самых компактных радиисточников — пульсаров (нейтронные и кварковые звезды, магнетары, гигантские импульсы), двойных пульсаров, излучение гравитационных волн пульсарами.

20. Мазеры (яркостные температуры до 10^{16} К), мегамазеры, антимазеры.

21. В радиодиапазоне достигнуто самое высокое угловое разрешение — до нескольких десятков микросекунд дуги (интерферометры, многоэлементные решетки, синтез изображений, многочастотный синтез). В перспективе — космическая радиоинтерферометрия с угловым разрешением до нескольких микросекунд и даже наносекунд дуги, трехмерная астрономия, межзвездный интерферометр, Вселенная в ближней зоне.

22. Самая высокая координатная точность, собственные движения и параллаксы.

23. Самая высокая чувствительность по яркостной температуре (близки к реализации предельные приемники и болометры с учетом границы между квантовой и классической статистиками — максимум реликтового фона).

24. Самая высокая временная точность исследования событий (наносекунды, пульсарное время).

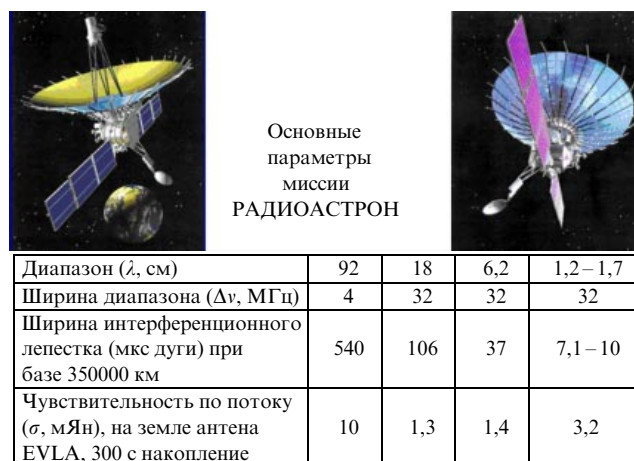


Рис. 2. Основные параметры интерферометра Земля – космос (проект "Радиоастрон").

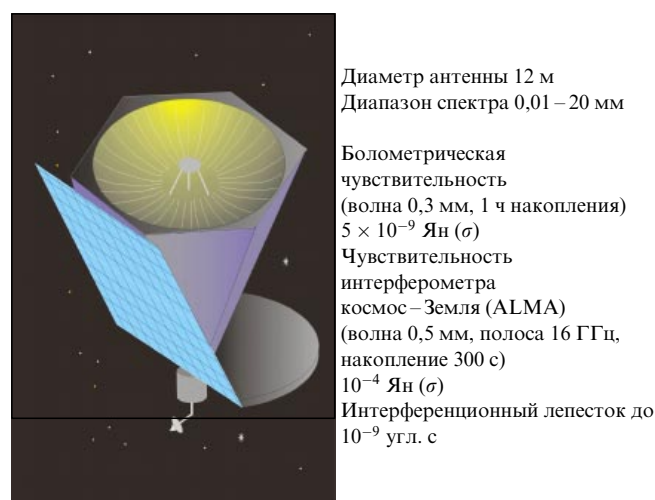


Рис. 3. Основные параметры проекта "Миллиметр".

25. Малое затухание радиоволн позволяет исследовать поверхность планет сквозь облачные слои (Венера) и даже подповерхностные слои (Луна, в перспективе — Марс и др.).

26. Наблюдается когерентное радиоизлучение частиц из магнитосфер Земли, Юпитера и, вероятно, других планет с сильным магнитным полем.

27. Радиидиапазон является оптимальным для связи с предполагаемыми внеземными цивилизациями.

28. В радиодиапазоне оказывается возможным создание телескопов, наблюдающих одновременно почти все небо, что очень важно для исследования кратковременных явлений.

29. В радиоастрономии возможна реализация самых больших собирающих поверхностей телескопов (стоимость обратно пропорциональна длине волны).

30. В космосе, в отсутствие радиопомех и атмосферы (для субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов, а также для диапазона ниже критической частоты ионосферы) открываются новые перспективы создания радиообсерваторий. Благоприятным фактором будет также отсутствие силы тяжести (остается только приливная сила).

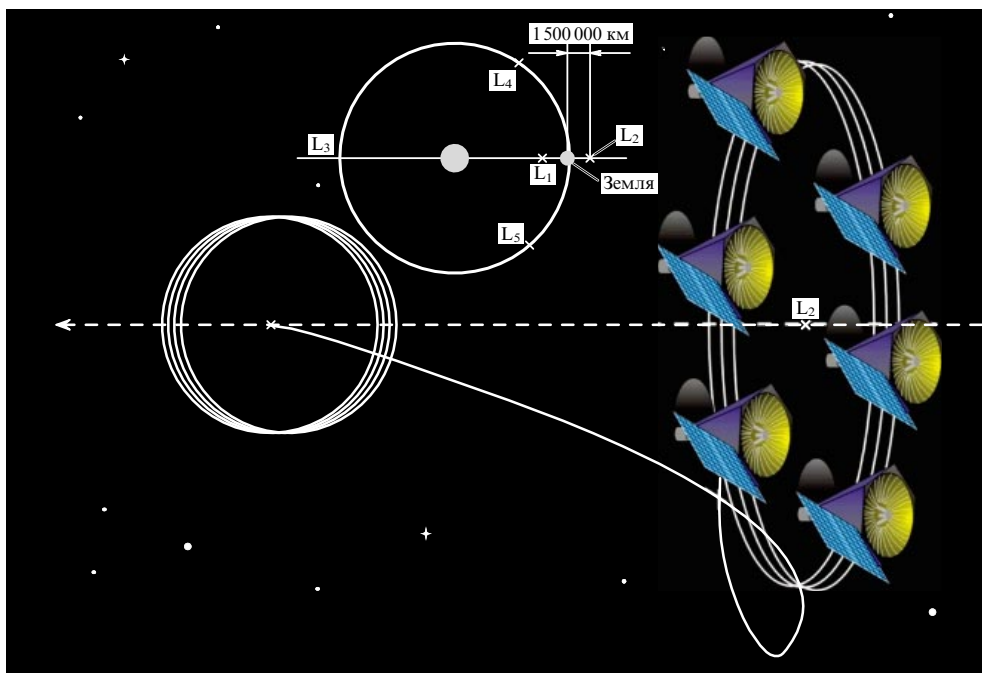


Рис. 4. Космический многоэлементный интерферометр.

Наиболее крупными радиоастрономическими космическими проектами, обеспечивающими сверхвысокое угловое разрешение, являются интерферометры Земля – космос сантиметрового и дециметрового диапазонов "Радиоастрон" (основные параметры показаны на рис. 2, более подробно описаны в [35]) и миллиметрового-субмиллиметрового диапазонов "Миллиметрон" (основные параметры представлены на рис. 3 и 4, подробности см. в [36]). В качестве наземного плеча будут использоваться все крупнейшие радиотелескопы мира. Оба проекта включены в Федеральную космическую программу России и поддерживаются широкой международной кооперацией обсерваторий и институтов. Ведется строительство новых крупных наземных радиотелескопов. В частности, Российская Федерация совместно с Узбекистаном строят на плато Суффа крупнейший радиотелескоп миллиметрового диапазона с диаметром зеркала 70 м [37], начато строительство решетки (международная система ALMA (Atakama Large Millimeter Array)) из 64 антенн диаметром 12 м на высоте 5 км в пустыне Атакама [38]. Начато сооружение в Европе крупнейшего многолучевого радиотелескопа метровых и декаметровых волн LOFAR (Low Frequency Array) с эффективной площадью до миллиона квадратных метров [39], идет проектирование такого же по площади радиотелескопа сантиметровых и дециметровых волн SKA (Square Kilometre Array) [40]. Ведется предварительное обсуждение создания многоэлементных антенных решеток (похожих на схему перспективного развития проекта "Миллиметрон" (см. рис. 4)): в районе антисолнечной точки Лагранжа L_2 ($1,5 \times 10^6$ км от Земли) или даже в "треугольных" точках (150×10^6 км), в этом случае наша Вселенная окажется в ближней зоне для субмиллиметрового диапазона.

4. Заключение

Перечислим основные проблемы астрофизики с точки зрения науки начала XXI в. Этот перечень в основном

совпадает со списком проблем астрофизики, обсуждающимся в [7, с. 11–74], однако я хотел бы подчеркнуть значимость редукционизма для понимания роли процессов возникновения и эволюции жизни и информации во Вселенной.

1. Высшие формы разума во Вселенной. Проблема редукционизма.
2. Антропный принцип и множественность вселенных (Multiverse).
3. Топология Вселенной, дополнительные измерения, кротовые норы.
4. Космологическая модель и эволюция нашей Вселенной.
5. Скрытые масса и энергия.
6. Начало нашей Вселенной.
7. Галактические ядра и черные дыры.
8. Нейтронные, кварковые и преонные звезды, происхождение гамма-всплесков.
9. Планетные системы и конденсированное состояние вещества во Вселенной, происхождение и эволюция жизни.
10. Гравитационно-волновая астрофизика и реликтовые гравитационные волны.
11. Нейтринная астрофизика и реликтовые нейтрино.
12. Происхождение космических лучей.

При исследовании всех этих проблем радиоастрономия имеет самые блестящие перспективы, фундаментом которых являются теория распространения и генерации радиоволн в космических средах, физика космических лучей и другие области физики и астрофизики, многие из которых были разработаны В.Л. Гинзбургом, которому в заключение хочу выразить глубокую благодарность за обсуждение упомянутых здесь вопросов.

Список литературы

1. *Радиоастрономия*. Аннотир. библиогр. указатель отечеств. и иностр. литературы. 1932–1958 гг. (Сост. В.Г. Нейшильд,

- Б Н Пановкин; Отв. ред. Ю Л Кокурин) (М.: Изд-во АН СССР, 1960)
2. *Очерки истории радиоастрономии в СССР*. Сб. науч. тр. (Редкол. А Е Саломонович и др.) (Киев: Наукова думка, 1985); Гиндилис Л М и др. *Развитие радиоастрономии в СССР* (Отв. ред. А Е Саломонович) (М.: Наука, 1988)
 3. Алексеев В А и др. *Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца* (Отв. ред. А Е Саломонович, Г Я Смольков) (М.: Наука, 1990)
 4. Шкловский И С *Из истории развития радиоастрономии в СССР* (Новое в жизни, науке, технике. Космонавтика, астрономия, Вып. 11) (М.: Знание, 1982)
 5. *Радиоастрономия. Труды Пятого совещания по вопросам космогонии, 9–12 марта 1955 г.* (Отв. ред. В Л Гинзбург) (М.: Изд-во АН СССР, 1956)
 6. Van de Hulst H C (Ed.) *Radio Astronomy, IAU Symp., No. 4, August 1955* (Cambridge: Univ. Press, 1957)
 7. Гинзбург В Л *О науке, о себе и о других* 3-е изд. (М.: Физматлит, 2003)
 8. Гинзбург В Л "Об излучении Солнца в области радиочастот" *ДАН СССР* **52** 491 (1946)
 9. Гинзбург В Л "Радиоизлучение Солнца и Галактики" *УФН* **32** 26 (1947)
 10. Гинзбург В Л "Новые данные о радиоизлучении Солнца и Галактики" *УФН* **34** 13 (1948)
 11. Гинзбург В Л "Н.Д. Папалекси и радиоастрономия" *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **12** 34 (1948)
 12. Гинзбург В Л "О поглощении радиоволн в солнечной короне" *Астрон. журн.* **26** 84 (1949)
 13. Гетманцев Г Г, Гинзбург В Л "О дифракции солнечного и космического радиоизлучения на Луне" *ЖЭТФ* **20** 347 (1950)
 14. Гинзбург В Л "Космические лучи как источник галактического радиоизлучения" *ДАН СССР* **76** 377 (1951)
 15. Гинзбург В Л "Межзвездная материя и ионосферные возмущения, приводящие к мерцанию радиозвезд" *ДАН СССР* **84** 245 (1952)
 16. Гинзбург В Л "Сверхновые и новые звезды как источники космического и радиоизлучения" *ДАН СССР* **92** 1133 (1953)
 17. Альперт Я Л, Гинзбург В Л, Фейнберг Е Л *Распространение радиоволн* (М.: Гос. изд. техн.-теор. лит., 1953)
 18. Гинзбург В Л "О природе радиогалактик" *Астрон. журн.* **38** 380 (1961)
 19. Гинзбург В Л, Писарева В В "Поляризация радиоизлучения дискретных источников и изучение метagalактического, галактического и околосолнечного пространства" *Изв. вузов. Радиофизика* **6** 877 (1963)
 20. Гинзбург В Л, Сыроватский С И *Происхождение космических лучей* (М.: Изд-во АН СССР, 1963)
 21. Spergel D N et al. "Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) three year results: implications for cosmology", astro-ph/0603449; *Astrophys. J.* (2007) (in press)
 22. The Planck Collab. "The scientific programme of Planck", astro-ph/0604069
 23. Visser M *Lorentzian Wormholes: from Einstein to Hawking* (Woodbury, NY: American Institute of Physics, 1995)
 24. Кардашев Н С, Новиков И Д, Шацкий А А "Магнитные тоннели (кратовые норы) в астрофизике" *Астрон. журн.* **83** 675 (2006)
 25. Kovalev Y Y et al. "Sub-millarcsecond imaging of quasars and active galactic nuclei. IV. Fine-scale structure" *Astron. J.* **130** 2473 (2005)
 26. Kuno N et al. "Radio observations of the afterglow of GRB 030329" *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **56** (2) L1 (2004); astro-ph/0401258
 27. Kohno K et al. "Nobeyama Millimeter Array observations of GRB 030329: a decay of afterglow with bumps and molecular gas in the host galaxy" *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **57** (1) 147 (2005); astro-ph/0412261
 28. Frail D A et al. "An energetic afterglow from a distant stellar explosion" *Astrophys. J.* **646** L99 (2006)
 29. Soglasnov V A et al. "Giant pulses from PSR B1937+21 with widths ≤ 15 nanoseconds and $T_b \geq 5 \times 10^{39}$ K, the highest brightness temperature observed in the Universe" *Astrophys. J.* **616** 439 (2004)
 30. Tudose V et al. "First e-VLBI observations of Cygnus X-3" *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **375** L11 (2007)
 31. Camilo F et al. "Transient pulsed radio emission from a magnetar" *Nature* **442** 892 (2006)
 32. Slysh V I "Self-stark limit on brightness temperature in cosmic masers", in *Radio Astronomy at the Fringe* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 300, Eds J A Zensus, M H Cohen, E Ros) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 2003) p. 239

33. Vlemmings W H T, Bignall H E, Diamond P J "Green Bank Telescope observations of the water masers of NGC 3079: accretion disk magnetic field and maser scintillation" *Astrophys. J.* **656** 198 (2007)
34. Argon A L et al. "Toward a new geometric distance to the active galaxy NGC4258: I. VLBI monitoring of water maser emission", astro-ph/0701396
35. Проект РадиоАстрон, http://www.asc.rssi.ru/radioastron/description/intro_rus.htm
36. Проект Миллиметрон, <http://www.asc.rssi.ru/millimetron/rus/millim.htm>
37. Радиоастрономическая обсерватория на плато Суффа, <http://tashkbn.narod.ru/suffa.htm>
38. The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), <http://www.alma.info/>
39. LOFAR, <http://www.lofar.org/>
40. Square Kilometre Array (SKA), <http://www.skatelescope.org/>

PACS numbers: 96.50.S–, 98.70.Sa

О происхождении галактических космических лучей

В.С. Птускин

1. Введение

Наша Галактика заполнена космическими лучами — газом релятивистских протонов, электронов и атомных ядер. Основная доля этих частиц была ускорена в остатках сверхновых и несколько десятков миллионов лет блуждает в межзвездных магнитных полях до выхода в межгалактическое пространство. Спектр космических лучей имеет степенной вид по энергии с изломом ("коленом") при 3×10^{15} эВ (рис. 1). Максимальная зарегистрированная энергия превышает 10^{20} эВ. При очень малой концентрации, $N \sim 10^{-10}$ см $^{-3}$, на 10 порядков меньшей средней концентрации межзвездного газа в галактическом диске $n \sim 1$ см $^{-3}$, космические лучи обладают плотностью энергии $w_{cr} = 1,5$ эВ см $^{-3}$, что сравнимо с плотностью энергии галактического магнитного поля и плотностью энергии турбулентных движений межзвездного газа. Космические лучи в высокой сте-

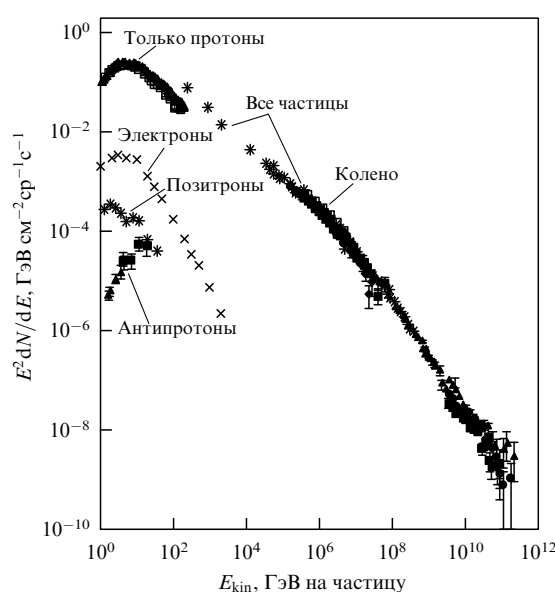


Рис. 1. Спектр космических лучей с энергиями, превышающими 1 ГэВ. (Упрощенная версия рисунка из статьи [1], в которой даны ссылки на соответствующие эксперименты.)