

## Палеоастрофизика: достижения и перспективы

© Г.Е. Кочаров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило 14 января 1999 г.)

Представлены результаты высокоточных измерений концентрации радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за последние 400 лет. Впервые восстановлен временной ход интенсивности галактических космических лучей до, во время и после глубокого и протяженного минимума солнечной активности — минимума Маундера (1645–1715 гг.). Установлено, что даже в эпоху глубокого минимума Солнца имела место солнечная модуляция интенсивности галактических космических лучей. Установлен временной профиль генерации гамма-излучения высокой энергии от взрыва сверхновой звезды 1006 г. Показано, что процессы ускорения частиц и генерация гамма-квантов высоких энергий имеют место с задержкой на 3 года по сравнению с началом оптической вспышки. Впервые получен временной ход генерации солнечных космических лучей за интервал времени последние 30 циклов солнечной активности путем прецизионных измерений содержания нитратов в полярном льду. Показано, что солнечные вспышки с генерацией космических лучей имеют место на фазе роста и спада солнечной активности (чисел Вольфа). Обсуждаются перспективы исследований в области экспериментальной палеоастрофизики.

### Введение

Определение палеоастрофизики как области науки может быть следующим: астрофизические явления, сигналы от которых достигли солнечной системы до рождения инструментальной астрономии. Инструментальная астрономия родилась в начале XVII века благодаря систематическим исследованиям неба Галилео Галилея. С маленькой оптической трубой, сделанной собственноручно, он открыл спутники Юпитера, фазы Луны. Официально он сообщил об обнаружении пятен на Солнце в Падуе (Италия) в 1610 г.

Б.П. Константинов и Г.Е. Кочаров [1,2] сформулировали основополагающие идеи новой области науки — палеоастрофизики. Было показано, что путем использования природных архивов имеется возможность количественно исследовать целый ряд астрофизических явлений, имевших место в далеком прошлом. Перечислим некоторые из них: долговременные вариации интенсивности галактических и солнечных космических лучей, вспышечная и модуляционная активность Солнца, катастрофические события в прошлом, амплитудно-временные характеристики взрывов сверхновых звезд и т. д.

### Естественные архивы космических частиц и излучений

Земная кора является перманентным детектором космических частиц и излучений. Как показано К. Вольфсбергом и Г. Кочаровым [3], только она дает принципиальную возможность определения динамики генерации термоядерной энергии в недрах Солнца на шкале времени последние десятки миллионов лет. В [3] разработаны основы нейтринной палеоастрофизики.

Показано, что в земной коре под действием солнечных нейтрино генерируются специфические изотопы свинца и технеция, измерение содержания которых позволит ответить на вопрос фундаментальной важности о динамике энерговыделения в глубоких недрах Солнца. Этот эксперимент чрезвычайно сложный и дорогой. Требуется сотрудничество ученых разных стран.

Годичные кольца деревьев уже стали традиционным источником количественных данных о временных вариациях интенсивности галактических космических лучей на шкале времени от современности до 10 тысяч лет назад. Ширина годичных колец и их изотопный состав содержат информацию о солнечной активности и климатических эффектах на большой шкале времени в прошлом. Недавно было установлено [4], что по ширине годичных колец можно даже восстановить динамику солнечной активности вплоть до 25 миллионов лет назад.

Полярный лед является важным источником количественной информации о вспышечной активности Солнца, взрывов сверхновых звезд и климатических эффектов. Частота и амплитуда солнечно-вспышечных протонов определяются по концентрации нитратов в датированных слоях полярного льда. Амплитудно-временные характеристики взрывов сверхновых звезд устанавливаются путем измерения временного хода концентрации космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в датированных независимым образом образцах полярного льда. Эти изотопы образуются в ядерных реакциях в атмосфере Земли под действием галактических космических лучей, источником которых считаются взрывы сверхновых звезд. Эти же изотопы генерируются и под действием гамма-квантов космической природы. Согласно современному представлению при взрыве сверхновых звезд образуются как высокоэнергетичные протоны, так и жесткие гамма-кванты.

Шкала времени получения астрофизической информации с использованием полярного льда в настоящее время составляет сотни тысяч лет.

Показано [5], что наружный сантиметровый слой лунного грунта содержит количественную информацию о временном ходе и мощности солнечно-вспышечных протонов на шкале времени последние сотни тысяч лет. Существует еще одна возможность изучения палеосолнечных вспышек [6]. Известно, что в атмосфере Солнца имеет место генерация различных изотопов под действием ускоренных в солнечных вспышках частиц. Такие превращения происходят на Солнце в настоящее время, они были и в прошлом. Это означает, что с течением времени химический и изотопный составы солнечного вещества меняются и это изменение должно в первую очередь касаться атмосферы Солнца. Следовательно, экспериментальное определение изотопного состава солнечного ветра может позволить установить интенсивность солнечных вспышек и ядерных реакций в прошлом, механизм формирования солнечного ветра, динамические особенности физических процессов в различных областях солнечной атмосферы, в подфотосферных слоях и т. д. Богатую информацию содержат ядерные гамма-линии от спокойного Солнца, которые могут быть зарегистрированы после увеличения чувствительности регистрации в десятки раз по сравнению с уровнем чувствительности в настоящее время.

Идея экспериментальной палеоастрофизики, сформулированная в 1965 г. [1], за прошедшие десятилетия благодаря усилиям ученых многих стран получила бурное развитие и в настоящее время ее можно разделить на три области как по целям, так и по экспериментальным методам.

Палеоастрофизика космогенных изотопов базируется на следующем. Космические лучи, генерируемые в естественных ускорителях частиц в космосе, непрерывно бомбардируют земную атмосферу, инициируя различные ядерные реакции. В них генерируются радиоактивные ядра, такие как  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$ . Для этих изотопов имеются естественные архивы с хорошей памятью и точным маркером времени. Для радиоуглерода наилучшим являются кольца деревьев, а для  $^{10}\text{Be}$  и  $^{36}\text{Cl}$  — полярный лед. Путем измерения содержания космогенных изотопов в датированных независимым образом образцах удается восстановить за длительный интервал времени интенсивность космических лучей, что содержит информацию как об источнике космических лучей (взрывы сверхновых звезд, солнечные вспышки), так и о характеристиках межзвездной среды, солнечной активности и гелиосферы в целом.

Палеоастрофизика нитратов основывается на высокоточных измерениях содержания нитратов в полярном льду. Разработаны независимые методы датировки льда и уже имеются погодичные измерения нитратов за последние 400 лет. Нитраты в полярном льду являются не только уникальным архивом в исследовании астрофизических явлений в реальном масштабе времени и в далеком

прошлом (взрывы сверхновых звезд, вспышечная активность Солнца и его глубокие минимумы). В отличие от космогенных изотопов, для которых характерны ядерные взаимодействия, нитраты чувствительны к области низких энергий: атомные столкновения, температурные эффекты, изменения в окружающей среде и т. д.

## Проблема глубоких и протяженных минимумов солнечной активности

Согласно историческим данным, в прошлом в истории Солнца существовали такие длительные промежутки времени, когда на поверхности Солнца не отмечалось ни одного пятна. Ближайший к нам по времени глубокий и длительный минимум Солнца был в интервале времени 1640–1715 г. Этот минимум носит имя Е. Маундера, английского ученого, опубликовавшего в 1921 г. работу о существовании указанного минимума.

За прошедшие 30 лет после формулировки идеи о конкретных возможностях по палеоастрофизике выполнен большой цикл высокоточных измерений концентрации радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за интервал времени последние 400 лет с целью установления природы глубокого солнечного минимума, характера солнечной модуляции интенсивности галактических космических лучей до, во время и после маундеровского минимума. Для изучения вспышечной активности Солнца за такой же промежуток времени были проведены погодичные измерения содержания нитратов в полярном льду. Нитраты являются единственным источником погодичной вариации интенсивности солнечных космических лучей, обеспечивающих экспериментальными данными о мощности, частоте и времени вспышечной генерации космических лучей.

Радиоуглеродные исследования проведены коллективами России, Литвы, Украины и Грузии под научным руководством автора настоящей работы. Высокоточные погодичные измерения содержания нитратов в полярном льду были проведены в рамках совместных работ ФТИ РАН и Канзасского университета. Полученные результаты изложены в [7,8]. Здесь приведем лишь основные особенности феномена маундеровского минимума.

1. Содержание радиоуглерода в атмосфере Земли в эпоху глубокого минимума на  $2.3 \pm 0.3\%$  выше, чем до и после минимума. Возрастание ожидалось, величина эффекта установлена впервые.

2. Переход солнечной активности от нормального уровня в глубокий минимум и обратно происходит за время не более года.

3. Основные характеристики 11-летнего цикла солнечной активности до и после глубокого минимума были такими же, что за последние 50 лет, по данным прямых измерений.

По результатам измерений содержания нитратов в полярном льду за последние 400 лет надежно установлено следующее.

1. Во время маундеровского минимума не обнаружена вспыхивающая активность Солнца.

2. В эпохи до и после маундеровского минимума надежно зарегистрированы солнечные космические лучи. Принципиально важно, что генерация космических лучей имеет место во время роста и спада чисел солнечных пятен. Такой эффект был обнаружен в прямых экспериментах за последние несколько десятков лет. Увеличение интервала времени до 400 лет (около 40 циклов солнечной активности) свидетельствует в пользу фундаментальности вывода о генерации солнечных космических лучей во время роста и спада пятнообразовательной активности Солнца.

Наиболее ярким и неожиданным является экспериментальный факт вариации интенсивности галактических космических лучей в эпоху маундеровского минимума, причем характер вариации отличается от хорошо известного 11-летнего цикла солнечной активности. Во время маундеровского минимума обнаружена 22-летняя цикличность. Это соответствует периоду переполусовки общего магнитного поля Солнца. Теория этого явления еще не разработана. Учитывая важность этого эффекта и то, что длительность маундеровского минимума всего 70 лет (3 периода 22-летнего цикла), необходимо исследовать временные вариации для минимума Шперера, длительность которого относительно большая (1416–1534), т.е. более пяти 22-летних циклов. Проблема шпереровского минимума в настоящее время является центральной как для радиоуглеродных измерений, так и для нитратных.

## Проблема происхождения космических лучей

Происхождение космических лучей является одной из ключевых проблем астрофизики высоких энергий в течение нескольких десятилетий. Основополагающие и иницирующие идеи принадлежат В.Л. Гинзбургу (см. [9] и ссылки там). Фундаментальная идея В.Л. Гинзбурга о том, что регистрируемые космические лучи генерируются в нашей галактике уже подтверждена на опыте. Согласно [9], их основным источником являются взрывы сверхновых звезд. Экспериментальная проверка этой идеи в реальном масштабе времени невозможна, так как необходимая длительность эксперимента для регистрации космических лучей от взрыва сверхновых составляет десятки тысяч лет. Единственная возможность заключается в использовании методов палеоастрофизики [10] как по регистрации гамма-квантов высокой энергии от взрыва исторических сверхновых, так и высокоэнергичных протонов от близкой сверхновой (расстояние не более нескольких сот световых лет).

По идее [1] были реализованы прецизионные измерения содержания радиоуглерода в годичных кольцах деревьев за интервалы времени, охватывающие взрывы двух сверхновых звезд: сверхновая 1004 г. и 1572 г. (Тихо

Браге). В обоих случаях обнаруженный эффект обусловлен  $\gamma$ -квантами высоких энергий, рожденных в ядерных реакциях, инициируемых протонами, ускоренными при взрывах. Установлены [10,11] временной профиль и полная энергия взрыва. Время нарастания потоков  $\gamma$ -квантов 3–5 лет, время спада  $\sim 10$  лет. Полная энергия взрыва составляет  $10^{50}$  erg.

Полученные результаты полностью подтверждают идею В.Л. Гинзбурга о том, что основным источником галактических космических лучей являются взрывы сверхновых звезд в нашей Галактике.

## Заключительные замечания

1. Проблема глубоких минимумов Солнца. Очень важно провести высокоточные погочичные измерения концентрации космогенных изотопов для глубокого и протяженного минимума солнечной активности — минимум Шперера (1450–1550). Если в этом случае будет установлено, что модуляция космических лучей характеризуется также 22-летним циклом, то проблема модуляции безусловно станет одной из центральных в астрофизике космических лучей и в физике Солнца.

2. Проблема происхождения космических лучей. Установление временного хода и определение полной энергии протонов при взрыве сверхновых не представляется возможным для исторических сверхновых, так как протоны от них еще не дошли до Земли. Более того, когда они достигнут ее, их идентификация на существующем фоне не представляется возможной. Поэтому речь идет только о сверхновых, вспыхнувших в далеком прошлом на близком расстоянии от Земли.

Анализ экспериментальных данных по концентрации космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$  в датированных природных архивах позволил автору в 1982 г. заключить [12], что 35 тысяч лет назад имел место взрыв сверхновой на расстоянии 160 световых лет от Земли. Полная энергия космических лучей составляет  $10^{50}$  erg и находится в хорошем соответствии с теорией. В то же время нельзя исключить, что установленный эффект повышенной концентрации космогенных изотопов является следствием пониженного значения геомагнитного в ту эпоху с соответствующим временным профилем. Нами предложена [10] конкретная возможность определения природы указанного феномена. Метеорит фармингтон имеет космический возраст 40 тыс. лет, поэтому он должен был быть облученным космическими лучами от взрыва обсуждаемой сверхновой. В результате облучения в метеорите за счет ядерных реакций должны были накопиться атомы изотопа  $^{81}\text{Kr}$ . Поэтому определение содержания указанных ядер в метеорите фармингтон позволит получить ответ на вопрос о природе обсуждаемого феномена. Для реализации этой возможности требуется улучшение чувствительности счета атомов  $^{81}\text{Kr}$  в десятки раз. Име-

ется еще одна возможность регистрации космических лучей от взрыва сверхновой. Речь идет об уникальном объекте "Геминга", возраст которого 300 тысяч лет и расстояние до него 300 световых лет. Геминга является мощным источником гамма-квантов высоких энергий, поэтому этот уникальный объект должен быть сильным источником космических лучей. Необходимо проводить высокоточные измерения космогенного изотопа  $^{10}\text{Be}$  в полярном льду за последние несколько сотен тысяч лет. Эта задача трудная, но принципиально возможная.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что возможности экспериментальной палеоастрофизики огромны и охватывают широкий круг проблем физики и астрофизики.

Автору этой работы хочется особо отметить иницилирующую роль Б.П. Константинова в рождении этой новой и широко распространенной в настоящее время области астрофизики высоких энергий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 990218398.

## Список литературы

- [1] Константинов Б.П., Кочаров Г.Е. // ДАН СССР. 1965. Т. 165. С. 63–64.
- [2] Константинов Б.П., Кочаров Г.Е. // Препринт ФТИ АН СССР. Л., 1967. Т. 64. 54 с.
- [3] Wolfsberg K., Kocharov G.E. // The Sun in Time / Ed. C.P. Sonett, M.S. Giampapa, M.S. Matthews. Tucson (USA), 1991. P. 288–313.
- [4] Cecchini S., Galli M., Nanni T., Ruggiero L. // Nuovo Cimento. 1996. Vol. 19C. N 4. P. 527–532.
- [5] Reedy R.C., Marti K. // The Sun in Time / Ed. C.P. Sonnet, M.S. Giampapa, M. Matthews. Tucson (USA), 1991. P. 260–287.
- [6] Кочаров Г.Е. Изв. АН России. Сер. физ. 1996. Т. 60. № 8. С. 112–120.
- [7] Kosharov G.E., Ostryakov V.M., Peristykh A.S., Vasiliev V.A. // Solar Phys. 1995. Vol. 159. P. 381–391.
- [8] Кочаров Г.Е., Огурцов М.Г. // Современные проблемы Солнечной цикличности. СПб.: изд-во ГАО, 1997.
- [9] Гинзбург В.Л. // УФН. 1996. Т. 166. № 2. С. 169–183.
- [10] Kocharov G.E. // Nuovo Gimento. 1996. Vol. 19C. N 6. P. 883–892.
- [11] Damon P., Kaimei D., Kocharov G. et al. // Radiocarbon. 1995. Vol. 37. N 2. P. 599–604.
- [12] Кочаров Г.Е. // Тр. XII Ленинградского семинара по космофизике. ФТИ РАН, 1982. С. 203–207.