

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(24—25 сентября 1980 г.)**

24—25 сентября 1980 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

24 сентября

1. С. М. С т и ш о в. Современное состояние физики высоких давлений.
2. Е. Н. Я к о в л е в. Проблема металлического водорода. Достижения и перспективы.
3. С. И. А н и с и м о в. Термодинамические свойства молекулярного водорода.
4. Ю. М. К а г а н. О проблеме металлического водорода.

25 сентября

5. В. С. Б е р е з и н с к и й. Нейтринная астрономия высоких энергий: источники и потоки.
6. Г. Т. З а ц е п и н. Экспериментальная нейтринная астрономия высоких энергий.
7. Б. А. Д о л г о ш е н н. Возможности акустической регистрации нейтрино в океане.

Ниже публикуется краткое содержание трех докладов.

546[.11:3](048)

Е. Н. Яковлев. Проблема металлического водорода. Достижения и перспективы. Почти десять лет назад Л. Ф. Верещагин и И. М. Халатников выступили в широкой печати со статьей, которая называлась «Металл из водорода. Фантазия или реальность?»¹. В этой статье и публикациях американских ученых² отмечались огромные технические сложности достижения статических давлений, необходимых для получения металлического водорода. Каков итог прошедшего десятилетия?

Прежде всего следует сказать, что за эти годы проблема из фантастической стала вполне реальной. Полученные результаты свидетельствуют о больших достижениях в этой области как в СССР, так и за рубежом³.

В данном сообщении будут затронуты вопросы, относящиеся лишь к экспериментам при статических давлениях.

Уравнение состояния молекулярного водорода было определено в интервале давлений до 30 кбар⁴, структура твердого водорода методом нейтронографии изучена при давлениях до 5 кбар⁵. В исследованиях спектров комбинационного рассеяния водорода при давлении до 150 кбар⁶ было подтверждено, что молекулярный водород кристаллизуется лишь в г. п. у. структуре. В работе⁷ сообщалось о достижении в водороде давлений 630 кбар и исследовании спектров комбинационного рассеяния молекулярного водорода. Эти работы имеют большое значение при построении теоретической модели молекулярного водорода, и в конечном счете для определения давления превращения водорода в металл.

Проблема металлического водорода явилась стимулом для значительного расширения диапазона статических давлений. За истекшее десятилетие предел давлений был увеличен с ~ 200 кбар до ~ 2000 кбар, т. е. на порядок ⁸⁻¹⁰. Для сравнения можно напомнить, что синтез алмаза происходит при давлении 50—60 кбар. Особую роль в достижении давлений ~ 1 Мбар сыграли поликристаллические алмазы типа «карбонадо», впервые полученные в ИФВД АН СССР ¹¹. Алмазы типа «карбонадо» и монокристаллические алмазы являются основными материалами для создания таких давлений. Аппараты из алмазов позволяют достигать давлений ~ 1 Мбар лишь в объемах, меньших 10^{-6} см³. Микрообъемы — одна из особенностей современной физики мегабарных статических давлений. Эксперименты с микроскопическим количеством вещества потребовали разработки специальных приемов.

В мегабарном диапазоне давлений были проведены исследования превращений диэлектрик — металлы ряда веществ с различным типом связи. Этот цикл экспериментов был предпринят как подготовка к опытам с водородом. Полученные результаты имеют и самостоятельный интерес. В частности, удалось определить последовательность превращений диэлектрик — металлы по мере увеличения давлений:

$$P_{\text{GaP}} \approx 200 \text{ кбар} < P_{\text{NaCl}} < P_{\text{Al}_2\text{O}_3} \dots < P_{\text{SiO}_2} < P_{\text{MgO}}.$$

Обнаружены также переходы в воде. Вода (лед) явилась модельным веществом перед постановкой экспериментов с водородом.

В результате исследования водорода установлено: 1) наличие проводящей модификации водорода, получаемой путем сжатия твердого молекулярного водорода между наковальнями из карбонадо; 2) наличие метастабильной проводящей фазы, исчезающей при нагревании; 3) отсутствие метастабильной проводящей фазы при нормальных давлениях ¹² (см. ¹³).

Развитие экспериментальной техники позволило проводить исследования сверхпроводимости металлов в мегабарном диапазоне давлений. При этом открыты новые сверхпроводники GaP, S, Xe, NaCl ¹⁴⁻¹⁷.

В настоящее время экспериментальная техника высоких давлений подготовлена для исследования сверхпроводимости водорода.

В заключение следует сказать, что уже полученные под «знаменем» металлического водорода результаты являются важными для физики твердого тела, для геофизики, техники и вполне оправдывают ту широкую рекламу этого направления, которая началась десять лет назад.

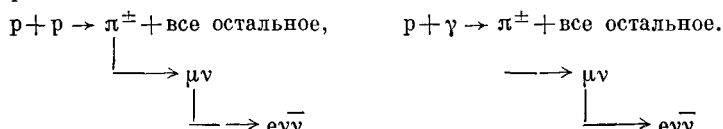
ЛИТЕРАТУРА

1. Верещагин Л. Ф., Халатников И. М. — Неделя, 1971, № 21.
2. Gross E. — Sci. News, June 27, 1970, v. 97.
3. Ross M., Shishkevich Ch. Molecular and Metallic Hydrogen. — Rand, Santa Monica, R-2056-ARPA.
4. Кечин В. В., Павлюченко Ю. М., Лихтер А. И., Утюж А. Н. — ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 2194.
5. Vindryaevskiy B. A., Ishmaev S. N., Sadikov I. P., Chernyshov A. A., Sukhoparov V. A., Telepnev A. S. — Phys. Lett. Ser. A, 1980, v. 76, p. 353.
6. Wiyngaarden R. I., Silvera I. F. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, p. 456.
7. Sharma S. K., Mao H. K., Bell P. M. — In: Proc. of VII AIRAPT Conference. Le Creusot, France (to be published).
8. Kawai N. — Techn. Japan, 1971, v. 3, p. 68.
9. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Степанов Г. Н., Бибавев К. Х., Виноградов Б. В. — Письма ЖЭТФ, 1972, т. 16, с. 240.
10. Mao H. K., Bell P. M. — Science, 1976, v. 191, No. 4229.
11. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Варфоломеева Т. Д., Слесарев В. Н., Штеренберг Л. Е. — ДАН СССР, 1969, т. 185, с. 555.
12. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А. — Письма ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 190.
13. Kawai N., Togaya M., Mishima O. — In: Proc. Japan Academy, 1969, v. 185, p. 555.
14. Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А., Виноградов Б. В. — Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 61.
15. Яковлев Е. Н., Степанов Г. Н., Тимофеев Ю. А., Виноградов Б. В. — Ibid., 1978, т. 28, с. 369.
16. Яковлев Е. Н., Тимофеев Ю. А., Виноградов Б. В. — Ibid., 1979, т. 29, с. 400.
17. Степанов Г. Н., Яковлев Е. Н., Валянская Т. В. — Ibid., с. 460.

539.123:52(048)

В. С. Березинский. Нейтринная астрономия высоких энергий: источники и потоки. Идея о регистрации космических нейтрино высоких энергий была впервые выдвинута М. А. Марковым в 1959 г.¹ Наряду с атмосферными нейтрино им обсуждались также и потоки нейтрино внеземного происхождения. В последнее пятилетие эти идеи развивались²⁻⁹ в направлении нейтринной астрономии высокой энергии, ставящей своей целью поиск космических объектов по их нейтринному излучению. Важную стимулирующую роль в этом развитии сыграли обсуждения проекта ДЮМАНД¹⁰⁻¹², первоначально задуманного как детектор атмосферных мюонов и нейтрино и постепенно трансформировавшегося в проект гигантского (10^9 м³) подводного нейтринного телескопа.

Нейтринное излучение высокой энергии генерируется в космических объектах в результате столкновений ускоренных частиц (космические лучи) с атомными ядрами (pp-нейтрино) или с низкоэнергетическими фотонами (pγ-нейтрино) в цепочке распадов заряженных пионов:



В каждом из этих процессов нейтрино уносит в среднем 4–5% энергии налетающего протона.

При степенном спектре ускоренных протонов ($\sim E^{-(\gamma+1)}$ для дифференциального спектра) число нейтрино, генерированных в pp-взаимодействии, возрастает с уменьшением энергии, но основной вклад в детектирование источников дают нейтрино с энергией выше 50 ГэВ. Это связано с тем, что экспериментально направление на источник определяется по траектории мюона, рожденного в реакции $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + \text{все}$. При уменьшении энергии угол вылета мюона относительно направления движения нейтрино возрастает, вследствие чего возрастает и фон, создаваемый атмосферными нейтрино внутри этого угла. Кроме того, для обычных спектров источников ($\gamma < 2$) большинство мюонов, пересекающих установку, рождается с энергией выше 50 ГэВ, так как при меньших энергиях пробег мюонов в грунте (или воде) и νN -сечение линейно растут с энергией нейтрино. Таким образом, pp-нейтрино с энергией ~ 50 –1000 ГэВ определяют нейтринную астрономию *высоких энергий*.

В отличие от pp-нейтрино, рождение pγ-нейтрино происходит пороговым образом: в «фотонном газе» со средней энергией фотонов ω (в эВ) большая часть нейтрино рождается с энергией, превышающей $E_0 \approx 4 \cdot 10^{-2} \mu_{\pi p} / \omega \approx 6 \cdot 10^6 / \omega$ ГэВ, где μ и m_p — массы пиона и протона. Почти для всех известных в настоящее время источников толща газа невелика (меньше 1 г/см²), в то время как фотонный газ для ряда источников (например, галактические ядра) имеет столь большую плотность, что источник оказывается непрозрачным для протонов высокой энергии. Это приводит к высокой эффективности pγ-механизма генерации нейтрино. Интересно отметить, что для многих источников pγ-механизм дает пороговую энергию нейтрино $\sim 5 \cdot 10^6$ ГэВ и, таким образом, $E \gtrsim 5 \cdot 10^6$ ГэВ определяет область нейтринной астрономии *сверхвысоких энергий*. Потеря в интенсивности потока нейтрино сверхвысоких энергий вследствие падающего ($\sim E^{-\gamma}$) спектра протонов компенсируется повышенной эффективностью pγ-производства нейтрино, значительным возрастанием сечения взаимодействия нейтрино в детекторе (благодаря реакции $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{адроны}$, имеющей максимум в сечении при энергии $5,5 \cdot 10^6$ ГэВ) и возможности использования больших объемов воды при детектировании нейтрино акустическим методом. При сверхвысоких энергиях появляется не только возможность регистрации дискретных источников нейтрино, но и измерения диффузного потока, так как фон атмосферных нейтрино при этих энергиях значительно уменьшается.

Нейтринная астрономия высоких и сверхвысоких энергий имеет ряд уникальных возможностей по сравнению с гамма-астрономией, в частности, она позволяет исследовать плотные объекты и отдаленные космологические эпохи, недоступные средствам гамма-астрономии.

Нейтринная астрономия высокой энергии может использовать лишь оптические методы регистрации (этому посвящен доклад Г. Т. Зацепина), при которых максимальный объем детектора, по-видимому, ограничен величиной 10^9 м³. При таком объеме возможно детектирование галактических источников и лишь единичных событий от внегалактических источников. Другими словами, нейтринная астрономия высоких энергий (50–1000 ГэВ) — это существенно галактическая астрономия. Наиболее интересные галактические источники — это молодые (до 1 года) оболочки сверхновых и «скрытые источники» — пульсары или черные дыры, окруженные большой толщей вещества.

Молодые оболочки сверхновых могут содержать космические лучи вследствие различных процессов ускорения: пульсарное ускорение в разреженной полости между пульсаром и оболочкой, магнитодипольное ускорение в оболочке, плазменные механизмы ускорения в оболочке (перезамыкание магнитных силовых линий, плазменная турбулентность и т. д.). Для оболочки с массой $M \sim 1 M_{\odot}$ и скоростью расширения $\sim 1 \cdot 10^9$ см/с в течение ~ 5 месяцев доминируют ядерные энергетические потери космических лучей и, следовательно, в течение этого времени оболочка является активным нейтринным излучателем. Баксанский нейтринный телескоп может зарегистрировать нейтринный поток с энергией $E \gtrsim 100$ ГэВ от вспышки сверхновой на расстоянии 10 кпс, если светимость источника в космических лучах составляет $\sim 10^{41}$ эрг/с; для установки площадью 1 км² необходимая светимость равна $2 \cdot 10^{37}$ эрг/с.

В качестве примера «скрытого источника» рассмотрим сверхгигант с массой $10 M_{\odot}$, радиусом оболочки $R \approx 7 \cdot 10^{13}$ см и средней плотностью оболочки $\bar{\rho} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ г/см³, в центре которой находится двойная система: пульсар и ядро массивной звезды, похожее на белый карлик. Если светимость пульсара составляет $3 \cdot 10^{38}$ эрг/с, т. е. превышает эддингтоновский предел для нейтронной звезды (пульсара), то давление излучения создает вокруг пульсара вакуумную полость, и в то же время светимость будет оставаться ниже эддингтоновского предела для всей системы ($1,3 \cdot 10^{39}$ эрг/с). Космические лучи, ускоряемые в полости, будут рождать в оболочке рр-нейтрино — единственный вид излучения, выходящий наружу — так как рентгеновское и γ -излучение полностью термализуются в оболочке (ее толща $\sim 2 \cdot 10^8$ г/см²). Наблюдаемая во всех типах электромагнитного излучения система будет выглядеть как обычный гигант со светимостью $\sim 2 \cdot 10^{38}$ эрг/с и температурой ~ 2500 К, и только регистрация нейтринного излучения может обнаружить ее сложную структуру.

Из внегалактических источников нейтрино следует отметить два наиболее интересных: активные ядра галактик и молодые галактики на яркой фазе их развития.

Нейтринные потоки высоких энергий от галактических ядер ожидаются как в модели магнитоида, так и в модели черной дыры. Это связано с возможностью ускорения частиц до высокой и сверхвысокой энергии в этих моделях и с наличием газа и электромагнитного излучения в ядре галактики. Соотношение между потоками нейтринного и гамма-излучения позволяет различить эти модели⁸.

Одной из наиболее интригующих возможностей, которую представляет нейтринная астрономия, является надежда заглянуть в далекое прошлое Вселенной вплоть до красных смещений $z \approx 10$ —30 в поисках «яркой фазы» развития галактик, т. е. периода образования звезд первого поколения и других бурных процессов, сопровождающих формирование галактик^{3, 9}. Из всех частиц высокой энергии, рожденных в ту эпоху, только нейтрино могут дожить до настоящего времени. Спектр нейтрино, генерированных в столкновениях ускоренных протонов с реликтовыми фотонами, имеет максимум при энергии, прямо связанной с красным смещением z эпохи яркой фазы:

$$E_m = 6,1 \cdot 10^6 \left(\frac{20}{1+z} \right)^2 \text{ ГВ}$$

Таким образом, если поток окажется достаточно большим для измерения спектра нейтрино, то определение положения максимума спектра позволит датировать эпоху яркой фазы.

Задачи внегалактической астрономии, согласно нашим оценкам, требуют объема детектора $\sim 3 \cdot 10^{11}$ м³, что доступно только акустическому методу регистрации. Измерению диффузных потоков нейтрино при $E \sim 5 \cdot 10^6$ ГэВ (т. е. вблизи максимума резонанса $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$ адроны) способствуют малость потока атмосферных нейтрино при этих энергиях. Ожидаемое число событий с энергией выше $5 \cdot 10^6$ ГэВ составляет: от яркой фазы — 100—1000 лет⁻¹, от сейфертовских галактик и квазаров — 100 лет⁻¹ и от «прямых» атмосферных нейтрино — 20 лет⁻¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Markov M. A. — In: Proc. of 1960 Annual Intern. Conference on High Energy Physics. — Rochester, 1960. — P. 578.
2. Beresinsky V. S., Smirnov A. Yu. — Astrophys. and Space Sci., 1975, v. 32, p. 461.
3. Березинский В. С., Зацепин Г. Т. — УФН, 1977, т. 122, с. 3.
4. Beresinsky V. S. In: Proc. of Intern. Conference of «Neutrino 77». — М.: Nauka, 1977. — V. 1, p. 177.
5. Margolis S. H., Schramm D. N., Silberberg R. E. — Astrophys. J., 1978, v. 221, p. 990.
6. Eichler D., Schramm D. N. — Nature, 1978, v. 275, p. 704.
7. Shapiro M. M., Silberberg R. E. — In: Proc. 16th Intern. Cosmic Ray Conference. — 1979, V. 10, p. 352.

8. Beresinsky V. S., Ginzburg V. L.— Mon. Not. RAS, 1981, v. 194, p. 3.
9. Berezhinsky V. S., Ozerney L. M.— Astron. and Astrophys. (to be published).
10. Proc. 1975 DUMAND Workshop/Ed. P. Kotzer.
11. Proc. 1976 DUMAND Workshop. Honolulu/Ed. A. Roberts.
12. Proc. 1978 DUMAND Workshop. La Jolla/Ed. A. Roberts.

539.123(048)

Б. А. Долгошеин. Возможности акустической регистрации нейтрино в океане. Как впервые показано в работе Аскарьяна¹, возможна регистрация ионизирующих излучений в воде с использованием акустического сигнала. Наиболее интересным является применение этого метода к регистрации адронных каскадов, вызванных космическим нейтрино высоких энергий глубоко в океане². Глубина (~несколько километров) необходима как с точки зрения защиты от космических мюонов, так и для создания лучших условий приема слабых акустических сигналов.

В настоящее время в экспериментах на пучках ускорителей³ установлено, что доля энергии, идущей на образование звукового сигнала (полоса 10—20 кГц) составляет лишь 10^{-12} — 10^{-10} от поглощенной энергии ионизации и механизм излучения звука связан, по-видимому, главным образом с тепловым расширением⁴ воды. Сигнал должен иметь⁴ очень характерную пространственную структуру (звуковой «диск» с диаметром ~1 км толщиной ~10 м, ось которого совпадает с направлением нейтрино), что позволяет говорить о возможности создания нейтринного телескопа с угловой точностью ~1°.

Возможность использования этой техники регистрации для нейтринной астрофизики сверхвысоких энергий ($\geq 10^{15}$ — 10^{16} эВ) связана с созданием экспериментальных установок с массой ~ 10^{11} т (10 км × 10 км × 1 км океанской воды). Акустический метод в данном случае является, по-видимому, единственно возможным благодаря хорошей прозрачности воды для звука и возможности «прослушать» такие большие объемы вещества.

Практическая реализация подобного детектора требует как детального изучения характеристик шумов океана на глубинах несколько километров (угловое и частотное распределение, статистику и т. п.), так и развития техники когерентного приема слабых звуковых сигналов большим (~ 10^6) числом гидрофонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскарьян Г. А.— АЭ, 1957, т. 3, с. 152.
2. Аскарьян Г. А., Долгошеин Б. А. Препринт ФИАН СССР 160.— Москва, 1976.
3. Sulak L. et al.— Nucl. Instr. and Meth., 1979, v. 161, p. 203.
4. Askariyan G. A., Dolgoshein B. A., Kalinovskiy A. N., Mokhov N. A.— Ibid., 1979, v. 164, p. 267.