

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.123

**ГЛУБОКОВОДНЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП\*)****Дж. Лёрнд, Д. Эйхлер**

*При выделении большого количества энергии в таких, например, объектах, как сверхновые звезды и двойные рентгеновские источники, образуется много нейтрино. Эти нейтрино можно детектировать с помощью системы приемников, погруженных в воду на глубину пяти километров.*

Все знания о космических объектах вне Солнечной системы фактически принесли астрономам фотоны — кванты электромагнитного излучения. Но существует и другая форма излучения, заполняющая Вселенную и могущая в известном смысле играть большую роль, а именно, нейтрино. Обладающее ничтожной массой и лишенное заряда нейтрино представляет собой элементарную частицу, которая слабо взаимодействует с другими частицами. Это взаимодействие столь ничтожно, что нейтрино может пройти через всю Вселенную, проникая через достаточно большие скопления вещества, не поглощаясь и даже не отклоняясь. Поэтому нейтрино, которые не поглотились и не рассеялись на своем пути, несут информацию об источниках. В частности, нейтрино могут придти из областей пространства, которые заэкранированы веществом, не пропускающим свет и вообще электромагнитное излучение. Детектирование космических нейтрино могло бы поэтому принести новые данные о широком круге астрофизических явлений.

Слабость взаимодействия с веществом, дающая нейтрино возможность проникать на большие расстояния, приводит к очень большим трудностям при детектировании нейтрино. Большинство достигающих Земли нейтрино свободно проходят сквозь нее, не оставляя за собой никакого следа. Нейтрино можно детектировать только с помощью аппаратуры, содержащей очень массивные элементы и надежно заэкранированной от фона, обусловленного другими частицами. Большая масса обеспечивает наличие огромного количества нуклонов (нейтронов и протонов), и чем массивнее детектор, тем больше вероятность взаимодействия одного из нуклонов с нейтрино.

Несколько лет тому назад группа физиков внесла смелое предложение детектировать нейтрино космического и земного происхождения, используя массу океанской воды. В проекте, получившем название ДЮМАНД (DUMAND — глубокий подводный детектор мюонов и нейтрино), предлагается поместить систему приемников света над ложем океана на глубине около 5 км. Детектирующей средой является сама морская вода. Взаимодействие нейтрино с какой-либо частицей в атоме воды вызывает каскад

\*) Learned J. G., Eichler D. A Deep-sea Neutrino Telescope. — Scientific American, February, 1981, v. 244, pp. 104—113. — Перевод Н. И. Гинзбург.

Дж. Лёрнд — сотрудник Гавайского университета, Гонолулу, Д. Эйхлер работает в Мэрилендском университете, США.

© Scientific American, Inc., 1981.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. «Успехи физических наук», 1982.

электрически заряженных частиц и вспышку света, которую должны детектировать приемники. Слой морской воды в 5 км будет экранировать приемники от эффектов взаимодействия с другими частицами высокой энергии, проникающими сквозь атмосферу.

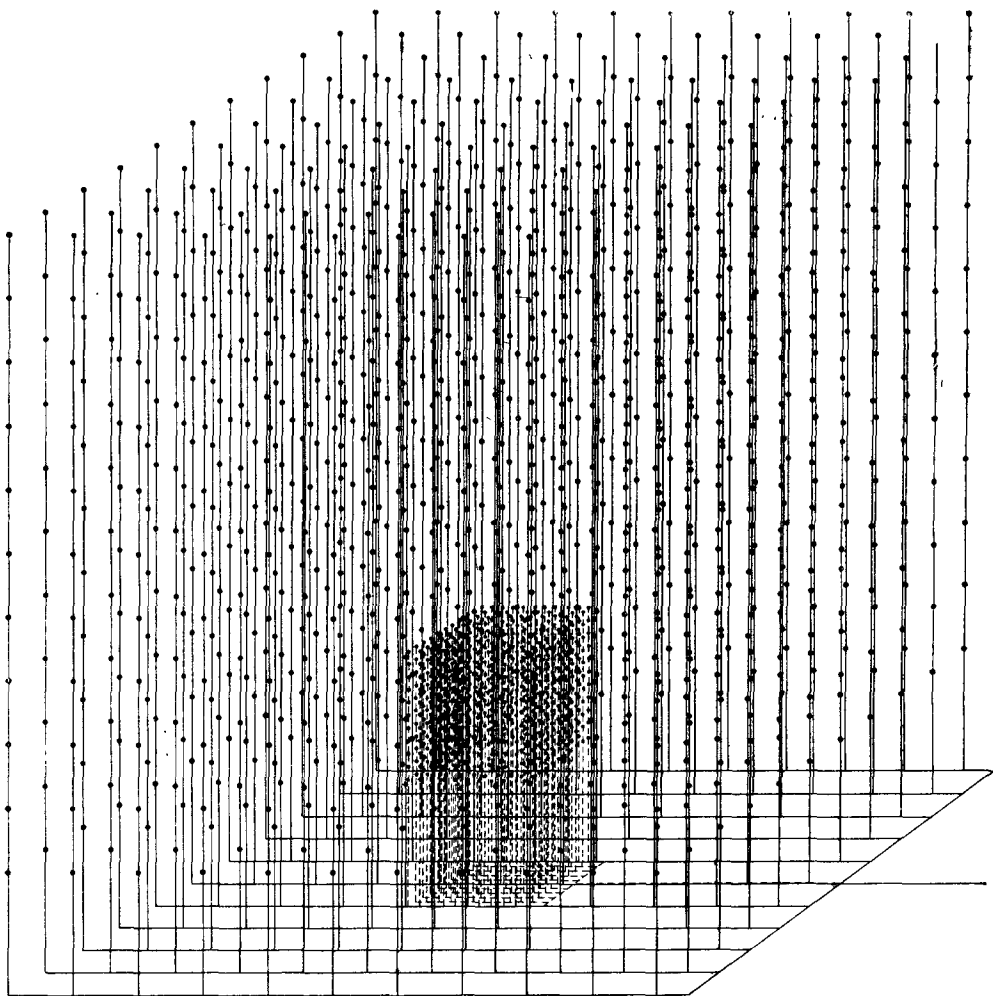


Рис. 1. Устройство из 1331 световых приемников, которые можно установить на дне океана на глубине 5 км вблизи Гавайских Островов.

Предложенное устройство, получившее название ДЮМАНД (DUMAND — deep underwater muon and neutrino detector — глубокий подводный детектор мюонов и нейтрино), будет регистрировать вспышки голубого черенковского излучения, генерируемого каскадом частиц, возникающих при столкновении нейтрино с частицей, входящей в состав атомных ядер в морской воде. Если проект ДЮМАНД будет одобрен и финансирован, приемники будут расположены на расстоянии 50 м в объеме морской воды с весом 125 млн. тонн. Внутренняя группа счетчиков состоит из 1331 приемников, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Наружные приемники должны регистрировать нейтрино с энергией выше  $10^{12}$  эВ, внутренние — регистрировать нейтрино с меньшими энергиями и ливни мюонов. Приемники соединены кабелем с наземным компьютером. Представленная на рисунке схема — одна из нескольких конфигураций приемников, рассматриваемых в проекте ДЮМАНД.

История изучения нейтрино весьма интересна. В 1931 г. эта частица была предложена в качестве гипотетической для объяснения некоторого количества энергии, исчезающей, как казалось, при радиоактивном распаде атомных ядер. В. Паули предположил, что исчезающая энергия уносится

ненаблюдаемой частицей, которую позже Э. Ферми назвал нейтрино («маленькая нейтральная»). Однако только в 1956 г. частица была детектирована Ф. Райнесом и К. Л. Коуэном (мл.). Теперь нейтрино входит в состав небольшого семейства элементарных частиц, называемых лептонами, которые, по-видимому, не состоят из каких-либо других частиц и размер которых так мал, что не поддается измерению. Другие представители семейства лептонов — мюон, электрон и тау ( $\tau$ )-частица. Имеется три типа нейтрино: ассоциируемое с электроном (электронное нейтрино), ассоциируемое с  $\tau$ -частицей ( $\tau$ -нейтрино) и ассоциируемое с мюоном (мюонное нейтрино). Для каждого типа нейтрино имеется соответствующее антинейтрино.

□

Нейтрино, образующиеся с помощью больших ускорителей заряженных частиц, обычно используют для зондирования других массивных частиц таких, как адроны (включая протоны, нейтроны, пионы и каоны), которые, по-видимому, состоят из кварков. Проводимые на ускорителях эксперименты, в которых нейтрино рассеиваются на адронах, принесли много сведений о кварковой структуре вещества. Это говорит о многогранности нейтрино, которые можно использовать для зондирования столь малых объектов, как кварки, и для исследования источников, удаленных на астрономические расстояния. Однако нейтринные микроскопы оставили далеко позади нейтринные телескопы.

ДЮМАНД — не первый нейтринный телескоп. В начале 60-х годов Р. Дэвис из Брукхевенской Национальной лаборатории предпринял первую серьезную попытку исследования космических нейтрино. Он поставил перед собой задачу детектировать нейтрино с низкой энергией, испускаемые Солнцем — самым ярким на небосводе источником как нейтрино, так и фотонов. Нейтрино образуются в глубине Солнца в результате термоядерных реакций, в которых водород переходит в гелий с освобождением энергии. Почти десятая часть энергии уносится нейтрино с энергией в пределах от  $0,5 \cdot 10^6$  до  $14 \cdot 10^6$  эВ. Поток солнечных нейтрино, приходящих на Землю, огромен (в течение каждой секунды человеческое тело пронизывает больше  $10^{14}$  нейтрино), но тем не менее частицы почти неуловимы. И все же ничтожно малая их часть взаимодействует с достаточно большим количеством вещества.

Сконструировав массивный детектор и вооружившись бесконечным терпением, Дэвис, по-видимому, сумел детектировать солнечные нейтрино. Его детектор представляет собой большую цистерну, наполненную 610 тоннами обычно используемой для чистки жидкости — четыреххлористым углеродом, молекулы которого состоят из двух атомов С и 4-х — Cl ( $C_2Cl_4$ ). Каждый четвертый атом хлора является изотопом хлор-37. Когда такой атом захватывает нейтрино, он переходит в атом аргон-37. Аргон-37 радиоактивен, и распад его атома указывает на захват нейтрино. Дэвис и его сотрудники в течение предыдущего десятилетия пытались детектировать солнечные нейтрино. Их эксперименты начали, наконец, приносить положительные результаты, однако количество событий меньше, чем этого можно было бы ожидать.

За последнее десятилетие был создан и другой тип телескопа для регистрации нейтрино низких энергий. Он состоит из заполненной водой цистерны, оборудованной светоприемниками. Если нейтрино взаимодействует с атомом воды, то в результате этого взаимодействия возникает заряженная частица отдачи, обладающая значительной энергией. Такая частица, проходя через прозрачную среду со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, испускает характерный для черенковского

излучения голубой свет, детекторы же регистрируют слабую вспышку этого свечения.

Телескопы для нейтрино низких энергий могут зарегистрировать нейтрино от Сверхновой — звезды, которая, как полагают, взрывается в результате истощения ее ядерного горючего и последующего коллапса. За несколько секунд взрыва освобождается больше энергии, чем за всю предыдущую историю звезды. Большая часть энергии уносится нейтрино, каждое из которых обладает характерной энергией порядка  $15 \cdot 10^6$  эВ.

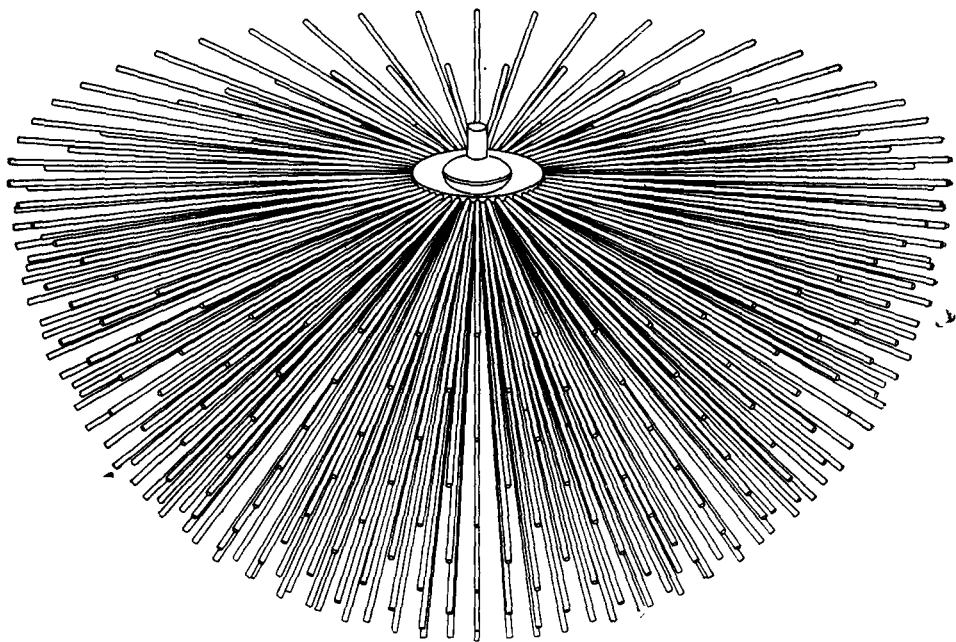


Рис. 2. «Морской еж» — световой приемник одного из типов, рассматриваемых для проекта ДЮМАНД.

Приемник имеет 500 «иглонок» — трубок, каждая длиной в восемь футов. Трубки соединены с фотоумножителем. Внутри трубок находится химическое вещество, флуоресцирующее при попадании черенковского излучения. Флуоресцирующий сигнал проходит по трубке и попадает в фотоумножитель, в результате чего регистрируется пролет частицы, вызвавшей черенковское излучение.

Каждый из 1331 приемников наружного устройства ДЮМАНД может быть «морским ежом».

Детектор с массой, равной нескольким тоннам, может регистрировать нейтрино, приходящие от Сверхновой, расположенной на другой стороне Галактики. Для наблюдения такой ожидаемой Сверхновой создано несколько телескопов для детектирования нейтрино низких энергий.

Некоторые нейтрино обладают значительно большими энергиями, чем нейтрино, образующиеся при взрыве Сверхновых или в глубине таких звезд, как Солнце. В земной атмосфере и во многих других астрофизических системах возникают нейтрино с энергиями, превышающими  $10^9$  эВ. Такие нейтрино образуются в результате столкновений нуклонов, обладающих крайне высокими энергиями. Например, нейтрино с высокими энергиями образуются, когда обладающие высокой энергией протоны космических лучей сталкиваются с ядрами атомов земной атмосферы. ДЮМАНД сможет регистрировать нейтрино с энергиями, превышающими  $10^{11}$  эВ.

□

Высоко в атмосфере Земли при столкновении космических лучей с нуклонами молекул воздуха возникают также мюоны. Если эти мюоны смогут дойти до детектора нейтрино высоких энергий, они будут им заре-

гистрированы. Чтобы отделить атмосферные мюоны от более редких мюонов, генерированных нейтрино, нужно поместить детектор глубоко под землей. Используемый в экспериментах Райнеса детектор с общей площадью  $140 \text{ м}^2$  был расположен на глубине двух миль в самой глубокой в мире шахте (вблизи Йоганнесбурга в Южной Африке). Глубина и стоимость установки накладывают ограничения на размер детектора. Последний не зарегистрировал никаких нейтрино от источников за пределами земной атмосферы. Но даже этот отрицательный результат существен для астрофизики, поскольку дает возможность судить об образовании во Вселенной дейтерия (тяжелого водорода), поскольку в этом процессе при столкновении нуклонов образуются также и нейтрино.

ДЮМАНД будет значительно чувствительнее, чем другие детекторы нейтрино высоких энергий, в основном за счет лучшей экранировки и большего объема вещества детектора. Согласно существующему проекту предполагается разместить по крайней мере 2000 световых приемников в одном кубическом километре морской воды. Гибкие кабели соединят приемники друг с другом и прикрепят их к дну океана. Сигнал от всех приемников будет поступать в расположенный на берегу компьютер.

Приемники ДЮМАНД будут способны детектировать взаимодействие одного нейтрино, если его энергия превышает  $10^{11}$  эВ. Нейтрино с меньшей энергией будут зарегистрированы только в том случае, если большое их количество одновременно пройдет через приемники, что может произойти при нейтринном всплеске астрофизического происхождения. Существенная черта подводного устройства — способность определять направление движения регистрируемых нейтрино. Основная часть потока заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино с нуклонами в морской воде, должна иметь вид стержня с протяженностью порядка 10 м в направлении пришедшего нейтрино с отклонением только примерно на половину градуса. Заряженные частицы будут сталкиваться с частицами воды, которые в свою очередь будут соударяться с другими частицами. В результате возникнет каскад, возможно, из нескольких миллионов частиц. Этот каскад будет сопровождаться миллиардами слабых вспышек черенковского излучения, регистрируемых расположенными вблизи светоприемниками.

Самая проникающая из всех заряженных частиц — мюон — будет испускать свет на всем своем пути в морской воде. При энергии нейтрино

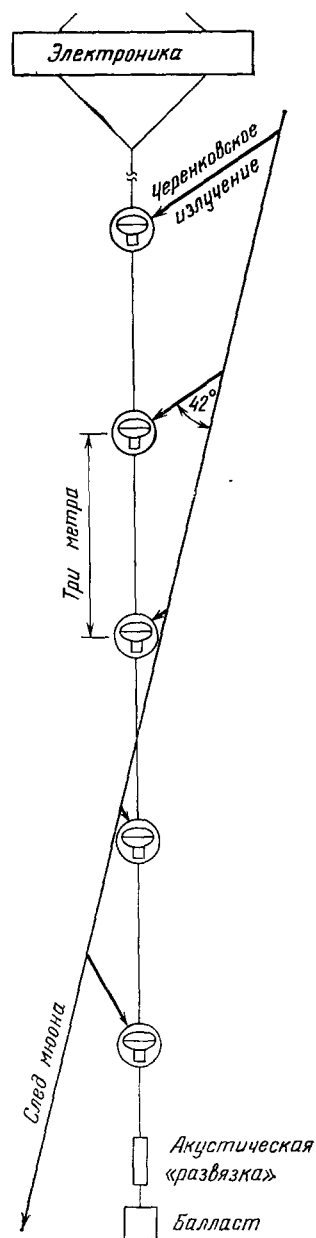


Рис. 3. Пять мюонных приемников будут помещены на глубинах от 1 до 5 км.

В течение двух недель подвешенные на нитях приемники могут зарегистрировать четыре мюона, генерируемых нейтрино, а также многочисленные атмосферные мюоны. Если регистрируемый мюон придет снизу, то он, безусловно, был порожден нейтрино, поскольку только нейтрино может пройти сквозь Землю. Эти приемники представляют собой фотоумножители без «иголок», и их можно использовать в проекте ДЮМАНД вместо «морских ежей».

порядка  $10^{12}$  эВ типичная траектория мюона должна достигать по крайней мере 1 км.

При компьютерной обработке сигналов приемников направление движения нейтрино должно быть определено с точностью, превышающей половину градуса. Согласно вычислениям А. Робертса и В. Дж. Стенгера из Гавайского центра ДЮМАНД можно будет довольно точно определять энергию нейтрино в результате компьютерного анализа всех детектируемых черенковских фотонов.

□

Хотя эффективная площадь ДЮМАНД для детектирования мюонов будет равна  $1 \text{ км}^2$ , для детектирования нейтрино эта площадь будет значительно меньше. Для нейтрино с энергией  $10^{12}$  эВ каждый нуклон морской воды образует мишень площадью  $10^{-35} \text{ см}^2$ . В  $1 \text{ км}^3$  воды находится

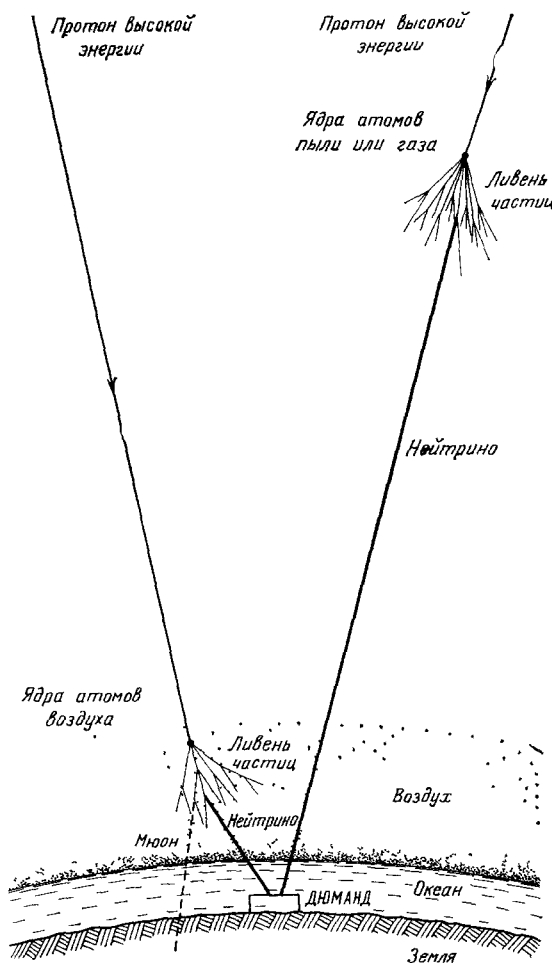


Рис. 4. Два типа источников — атмосферные и космические — генерируют нейтрино, могущие попасть в приемники ДЮМАНД.

Нейтрино возникает, когда протон с высокой энергией сталкивается с нуклоном (протоном или нейтроном). В результате столкновения возникают пионы и каоны, распадающиеся на нейтрино, мюоны и другие частицы. Возникшие в атмосфере в результате этих столкновений пионы и каоны в большинстве своем поглощаются в атмосфере или на поверхности Земли до того, как смогут претерпеть распад с образованием нейтрино. В межзвездном пространстве плотность вещества столь низка, что пионы и каоны (так же, как и мюоны) не поглощаются и могут распадаться с образованием нейтрино. При достаточно высоких энергиях релятивистское замедление времени приводит к увеличению времени жизни пионов и каонов до такой степени, что практически все атмосферные пионы и каоны будут сталкиваться с нуклонами молекул воздуха, прежде чем произойдет их распад с образованием нейтрино и других продуктов. Следовательно, при достаточно высоких энергиях счетчики ДЮМАНД будут регистрировать в основном внеземные нейтрино.

$6 \cdot 10^{38}$  нуклонов, и, таким образом, эффективная площадь для соударений внутри устройства будет равна  $6000 \text{ см}^2$ . В отличие от регистрирующих фотоны телескопов, нейтринный телескоп принимает нейтрино одновременно со всех направлений, регистрируя даже нейтрино, пришедшие с другой стороны Земли. Регистрация за год трех или более нейтрино

с высокой энергией с данного направления может статистически дать существенный результат. Такой результат должен соответствовать минимальному потоку энергии, равному  $15 \text{ эВ/см}^2 \text{ с}$ . Если учесть расстояние, которое проходит генерируемый нейтрино мюон, эффективный размер детектора становится много больше.

Т. Боуэн из Аризонского университета предложил другой способ использования океана для детектирования нейтрино \*). Каскад частиц, образующийся в результате соударения с нейтрино, нагревает объем воды в форме стержня. При нагреве вода расширяется и создает небольшой импульс давления или звуковую волну, которая может пройти расстояние до 10 км, прежде чем она поглотится или будет заглушена фоном в океане. Если создать акустические приемники, могущие «слышать» такой каскад, они должны обладать значительно большим радиусом действия, чем оптические приемники. Однако в случае мюона или каскада частиц с энергией меньше  $10^{16} \text{ эВ}$  звуковой импульс быстро затеряется в фоновом шуме океана. Если существуют нейтрино, могущие создать каскад с энергией  $10^{16} \text{ эВ}$ , то акустические приемники будут способны определить траектории нейтрино по четко направленной звуковой волне от каскада. Следовательно, среди приемников ДЮМАНД могут быть и звуковые приемники.

Не так легко опустить в океан тысячи оптических и акустических приемников на глубину в 5 км, сохранять их в рабочем состоянии, а также принимать и обрабатывать поступающие от них сигналы. Более шести последних лет около сотни физиков, астрономов, инженеров и океанографов под руководством Райнеса провели оценку потенциально пригодных мест на дне океана, изучили способы размещения аппаратуры и произвели испытания различных типов оптических и акустических приемников. В результате проведенных испытаний местом для создания установки были выбраны Гавайские острова. Поскольку острова имеют вулканическое происхождение и обладают крутыми склонами, дно океана около берегов расположено на большой глубине, в связи с чем доступ к приемникам будет облегчен. Над дном океана вблизи островов нет сильных течений и невелика биологическая активность, которая могла бы помешать работе приемников.

□

Воды вблизи Гавайских островов кроме глубины имеют и другое преимущество, а именно, необычайную прозрачность для голубого света. Испытания, проведенные недавно в 20 км к западу от острова Гавайи на глубине 4,5 км, показали, что вспышка голубого света затухает на 64% на неожиданно большом расстоянии, равном 25 м. В результате приемники ДЮМАНД можно располагать не с интервалом в 20 м, как предполагалось, а с интервалом более 50 м, так что для наблюдения заданного объема воды требуется меньшее количество приемников.

Стоимость проекта ДЮМАНД по первоначальной оценке была равна 100 млн долларов, но возможность сократить число приемников существенно снизила эту цифру. Более того, организаторы создания установки ДЮМАНД намереваются опробовать меньшую систему приемников, прежде чем приступить к окончательному осуществлению большого проекта. Это предварительное устройство должно стоить около 5 миллионов долларов. Если такое небольшое устройство оправдает себя и будут предоставлены необходимые средства, то может быть, установка ДЮМАНД начнет накапливать данные уже через три года.

---

\*) О работах советских авторов по этому и другим вопросам см. две последние ссылки в списке литературы. (Прим. пер.)

Весной 1981 г. группа исследователей под руководством У. З. Петерсона из Гавайского центра ДЮМАНД намеревается опустить пять вертикально расположенных мюонных приемников на глубину от 1 до 5 км (см. рис. 3). Приемники будут регистрировать сигналы в течение двух недель. Можно ожидать, что за это время они зарегистрируют тысячи атмосферных мюонов и, может быть, четыре мюона, порожденных нейтрино. Если зарегистрированные мюоны придут снизу, то они, безусловно,

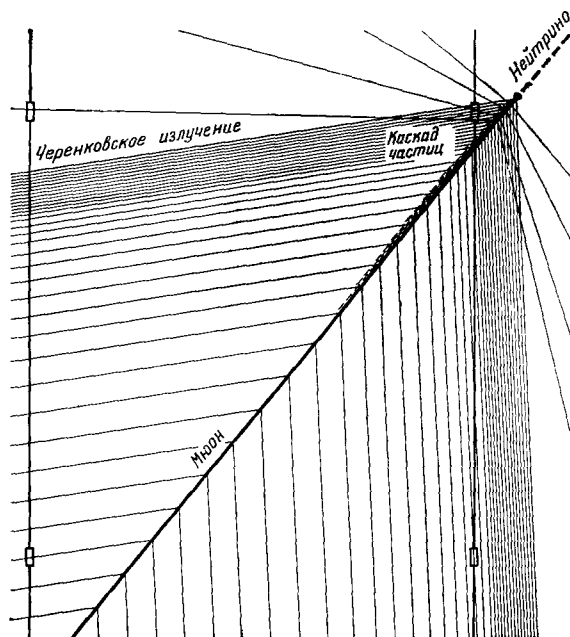


Рис. 5. Каскад, состоящий примерно из миллиона частиц, может возникнуть при столкновении нейтрино с частицей в ядрах атомов в морской воде.

Эти частицы в свою очередь могут генерировать миллиарды черенковских фотонов. Излучаемый свет пройдет, по крайней мере, 25 м, прежде чем существенно ослабеет. В связи с этим приемники ДЮМАНД будут располагаться на расстоянии 50 м друг от друга. Образовавшийся в результате соударения мюон движется почти вдоль траектории падающего нейтрино. Мюон также испускает голубой свет, характерный для черенковского излучения.

будут образованы нейтрино (единственной частицей, могущей пройти через всю Землю, является нейтрино). Эксперимент с такими приемниками должен оказать помощь при оценке возможностей реализации проекта ДЮМАНД.

Как же образуются нейтрино высоких энергий, которые будет регистрировать ДЮМАНД? Нейтрино — основной продукт распада нестабильных адронов — пионов и каонов. Пионы и каоны образуются, когда нуклон сталкивается с релятивистским протоном, т. е. протоном, движущимся со скоростью, близкой к скорости света. Примерно треть пионов не обладают электрическим зарядом: при распаде они переходят в  $\gamma$ -лучи. Заряженные пионы и большая часть каонов при распаде дают нейтрино, мюоны, электроны и их античастицы. Когда релятивистский протон сталкивается с покоящимся нуклоном, то пионы, каоны и продукты распада все движутся примерно в том же направлении, что и протон. Часто при таких столкновениях один из продуктов распада (такой, как нейтрино) наследует большую часть энергии протона.

Короче говоря, для образования нейтрино с высокими энергиями нужны протоны с высокими энергиями, бомбардирующие мишень из покоящихся нуклонов. Если не считать ускорителей заряженных частиц, главный земной источник нейтрино высоких энергий — соударение протонов космических лучей с нуклонами в молекулах воздуха в верхних слоях атмосферы. Когда возникшие в результате таких столкновений пионы



и каоны претерпевают распад до их поглощения в атмосфере или в земле, они образуют нейтрино.

Релятивистский эффект запаздывания времени увеличивает время жизни особенно энергичных пионов и каонов. Для пионов и каонов с энергиями, превышающими  $10^{12}$  эВ, эффект запаздывания времени должен увеличивать время их жизни до такой степени, что многие из них в конце концов вместо распада на нейтрино и другие продукты столкнуться с нуклонами в воздухе. Протоны космических лучей, входящие в атмосферу Земли под малым углом к горизонту, образуют вторичные частицы, которые скользят вдоль верхних слоев атмосферы, где плотность воздуха низка. Такие частицы имеют поэтому лучшие шансы распасться до следующего столкновения, чем частицы, приходящие прямо в более плотные слои атмосферы, где вероятность соударений много больше. При энергиях нейтрино около  $10^{12}$  эВ с горизонтального направления приходит в четыре раза больше атмосферных нейтрино, чем с вертикального. Такая угловая зависимость является доказательством того, что нейтрино образуются в атмосфере.



Протоны космических лучей сталкиваются не только с нуклонами в атмосфере, но также с протонами в разреженной межзвездной среде Галактики. В областях Галактики, где протоны ускоряются до высоких энергий, характерная плотность вещества так низка, что все возникающие при соударениях вторичные частицы претерпевают распад и образуют нейтрино еще до того, как потеряют большую часть своей энергии в последующих столкновениях. В этом смысле нейтрино более эффективно образуются в Галактике в целом, чем в земной атмосфере. Внеземные нейтрино, по-видимому, будут основными среди регистрируемых ДЮМАНД нейтрино с высокими энергиями, поскольку образование нейтрино в атмосфере менее эффективно.

Нейтрино высоких энергий, образующиеся в межзвездном пространстве под действием космических лучей, должны регистрироваться счетчиками ДЮМАНД несколько сот раз в год. Однако они должны приходить с большой части неба, и может оказаться трудным отделить такой диффузный сигнал от фона атмосферных нейтрино. Разрешающая способность счетчиков ДЮМАНД должна зависеть от распределения космических лучей в Галактике. Но даже отсутствие сигнала явится существенным результатом, дающим возможность судить об источниках космических лучей.

Интенсивный, как бы сконцентрированный, нейтринный сигнал может быть обусловлен соударениями вблизи источника релятивистских протонов. В этом случае нейтрино должны поступать не с большого участка неба, а от точечного источника. В результате отвечающее им число отсчетов будет превышать атмосферный фон значительно сильнее, чем в случае диффузного источника. Известно, что релятивистские частицы генерируются разнообразными астрофизическими системами, как внутри Галактики, так и вне ее, а именно, нейтронными звездами, ударными волнами при взрыве Сверхновых, активными ядрами других галактик и даже квазарами. ДЮМАНД, быть может, зарегистрирует нейтрино, образовавшиеся в результате соударений релятивистских протонов в перечисленных объектах.

Один из простых примеров генерации нейтрино связан с образованием релятивистских протонов вблизи поверхности массивного астрофизического тела (примером может служить солнечная вспышка, при которой вблизи поверхности Солнца внезапно освобождается магнитная энер-

гия, в результате чего протоны ускоряются до очень высоких скоростей). Если некоторые из протонов будут падать на поверхность объекта, то последний предоставит для них мишень из нуклонов. В результате соударений образуются нейтрино, большая часть которых, пронизав объект, уйдет в мировое пространство.

В другом случае вещество, аккрецируемое (т. е. падающее на него) компактным объектом, создает мишень для релятивистских частиц, генерируемых самим объектом. Многие галактические рентгеновские источники являются аккрецирующими вещество нейтронными звездами. При этом рентгеновское излучение источника возникает как раз в результате падения вещества. Энерговыведение в квазарах и активных галактических ядрах может возникать таким же образом. Согласно некоторым теориям квазары и активные ядра галактик в своих недрах генерируют релятивистские частицы; такие объекты должны стать предметом изучения нейтринной астрономии.

□

Если аккрецируемое вещество образует достаточно толстый слой, система оказывается невидимой. Тогда излучаемые нейтрино окажутся единственным агентом, позволяющим судить о процессах с высокой энергией, происходящих в объекте. Чем больше масса вещества, аккрецируемая в единицу времени, тем мощнее объект. Два года тому назад была

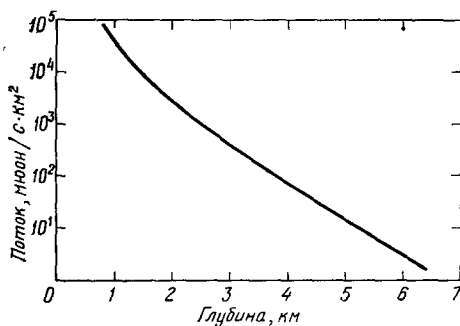


Рис. 6. Поток мюонов вблизи поверхности Земли, возникший в результате соударений космических лучей в земной атмосфере.

Такие мюоны могут попадать в приемники нейтрино. Даже на глубине 5 км под водой приемники ДЮМАНД будут регистрировать 10 мюонов в секунду. Мюоны, генерируемые космическими лучами в земной атмосфере, будут, однако, приходить с вертикального или близкого к нему направления. Мюоны, генерируемые при столкновениях нейтрино с нуклонами, поступают со всех направлений.

аккрецируемое вещество, являющееся источником огромной мощности источника SS 433, экранирует его центральную яркую область. Вместе с тем образующиеся вблизи компактного объекта релятивистские протоны, несомненно, должны соударяться с другими нуклонами, генерируя нейтрино. Источник SS 433 может оказаться очень мощным, что будет регистрировать ДЮМАНД, даже в том случае, если в нейтрино переходит одна миллионная часть энергии этого источника. Правда, природа объекта SS 433 еще в точности не установлена и неизвестно, образуются ли в этом случае при аккреции протоны с высокой энергией. Тем не менее открытие источника SS 433 подкрепляет предположение о том, что существуют экзотические

обнаружена удивительная система, заслоненная как раз аккрецирующим веществом. Эта система, известная как SS 433, состоит, по-видимому, из компактного объекта, выбрасывающего две струи вещества в противоположных направлениях с необычайно высокой скоростью (см. Margon B. The Bizarre Spectrum of SS 433.— Scientific American, October 1980). Согласно оценкам некоторых астрономов источник SS 433 в 1000 раз мощнее (т. е. выделяет в 1000 раз больше энергии в секунду), чем самая яркая звезда в Галактике.

Почему же такой мощный объект был обнаружен лишь недавно? Причина заключается в том, что SS 433— сравнительно слабый источник фотонов. Может показаться, что слабость излучения фотонов находится в противоречии с мощностью объекта, однако это не так. Аккреци-

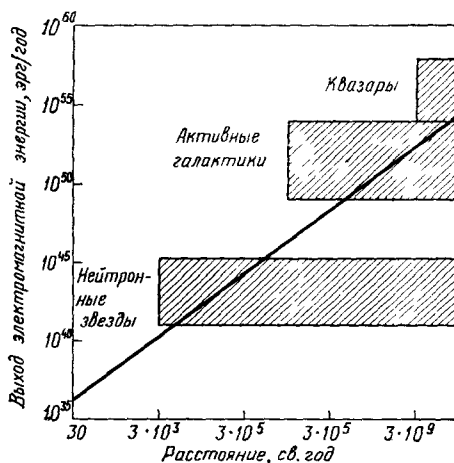
системы, заэкранированные аккрецирующим веществом, служащим источником их энергии. Только развитие нейтринной астрономии откроет возможности непосредственно детектировать подобные объекты.

Многие звездные объекты являются двойными системами. Нуклоны одной из компонент такой же системы могут поэтому служить мишенью для релятивистских частиц, генерируемых другой компонентой. Если двойная система содержит молодую быстро вращающуюся нейтронную звезду, то звезда-компаньон будет играть роль мишени. Когда происходит затмение нейтронной звезды звездой-компаньоном, релятивистские протоны, образующиеся вблизи нейтронной звезды, бомбардируют нуклоны звезды-компаньона и генерируют нейтрино, которые могут проходить через звезду-компаньон в направлении наблюдения, т. е. вдоль луча зрения.

Согласно теоретическим предположениям в Галактике может одновременно находиться несколько двойных систем, содержащих молодые

Рис. 7. Выход электромагнитной энергии для различных космических источников и их расстояние от Солнечной системы в двойной логарифмической шкале.

Линия соответствует минимальному потоку нейтрино высокой энергии, который еще может регистрировать ДЮМАНД. Чтобы ДЮМАНД регистрировал нейтрино от объектов, расположенных значительно выше линии, нужно, чтобы нейтрино от этих объектов обладали потоком энергии, составляющим малую долю потока их электромагнитной энергии. Количество электромагнитной энергии излучаемой новой нейтронной звездой, может достигать  $10^{42}$  эрг в год.



нейтронные звезды. Одна из таких систем, возможно, наблюдается; это — двойной рентгеновский источник Лебедь X-3 (Cyg X-3). Нейтронная звезда в Лебеде X-3 испускает  $\gamma$ -лучи, и это означает, что она генерирует также релятивистские частицы. Из детального исследования рентгеновского излучения этого источника следует, по-видимому, что вся система окутана облаком газа, который испаряется с поверхности звезды-компаньона, нагреваемой излучением от нейтронной звезды. Звезда-компаньон периодически затмевает нейтронную звезду, и в это время рентгеновское излучение детектировать нельзя. Из этих наблюдений следует, что звезда-компаньон при затмении находится между Солнечной системой и релятивистскими частицами, генерируемыми нейтронной звездой. Такая геометрия идеальна для испускания нейтрино высоких энергий в нашем направлении.

Предложим еще один сценарий образования нейтрино. В этом случае оно связано с выбросом (эжекцией) вещества компактным объектом. Например, нейтронные звезды рождаются, по-видимому, при взрывах Сверхновых. При этом происходит также выброс наружной оболочки взрывающейся звезды. Эта расширяющаяся оболочка может тогда служить мишенью из нуклонов для релятивистских протонов, испускаемых нейтронной звездой. Фактически в течение первых шести месяцев оболочка будет непрозрачна для фотонов и всех других релятивистских частиц, и поэтому нейтронную звезду с помощью современных телескопов наблю-

дать в это время невозможно. Полагают, что в этот период мощность молодой нейтронной звезды больше, чем когда бы то ни было. Приемники ДЮМАНД смогут зарегистрировать нейтрино от молодой нейтронной звезды, окутанной оболочкой Сверхновой, даже если эта Сверхновая образовалась не в нашей, а в другой близлежащей галактике. Полагают, что взрывы Сверхновых происходят в среднем в каждой галактике раз в 20 лет. За несколько лет работы установка ДЮМАНД может зарегистрировать нейтрино высоких энергий от сверхновой, вспыхнувшей в одной из нескольких близлежащих галактик.

□

В принципе, оболочка Сверхновой может служить источником нейтрино значительно дольше шести месяцев. Если в оболочке имеется достаточно сильное магнитное поле, то оно может сохранять релятивистские протоны. Тогда оболочка смогла бы излучать нейтрино до тех пор, пока релятивистские протоны претерпевают достаточно частые соударения с нуклонами оболочки, плотность которой все время уменьшается. Согласно нашей оценке оболочка будет достаточно плотной для образования нейтрино в течение примерно 50 лет. В нашей Галактике также может оказаться два или три таких источника нейтрино, которые установка ДЮМАНД сможет регистрировать.

Таковы наиболее вероятные астрофизические сценарии образования нейтрино высоких энергий. Можно предложить много и других путей образования нейтрино, исходя из той же схемы: соударение релятивистских протонов с мишенью с последующей генерацией нейтрино.

Будет ли чувствительность ДЮМАНД достаточна для детектирования нейтрино, образующихся в различных упомянутых объектах? Мы не можем дать определенный ответ на этот вопрос, поскольку нейтрино пока детектировать еще не удалось. Тем не менее мощность многих космических объектов не противоречит предположению о возможности детектировать нейтрино с помощью ДЮМАНД. От таких объектов до Земли доходит значительный поток электромагнитной энергии, и если на Землю поступает поток нейтрино с энергией, составляющей лишь небольшую долю потока электромагнитной энергии, то установка ДЮМАНД сможет регистрировать нейтрино.

Например, поток энергии фотонов от нейтронных звезд в нашей Галактике, квазаров и активных галактических ядер порядка нескольких тысяч эВ/см<sup>2</sup>с. Для ДЮМАНД пороговая чувствительность потока нейтрино составляет от 10 до 100 эВ/см<sup>2</sup> с для нейтрино с энергиями между  $10^{12}$  и  $10^{14}$  эВ. Следовательно, ближайшие нейтронные звезды, квазары и активные галактические ядра должны тратить лишь 1 % своего энергетического баланса на нейтрино с очень высокой энергией, чтобы последние детектировались ДЮМАНД. Но и при этом образование релятивистских частиц в указанных объектах должно быть довольно эффективным. Имеется однако убедительное доказательство, что такая высокая эффективность редка.

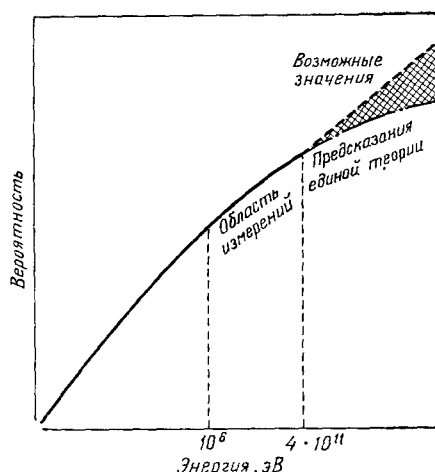
Крабовидная туманность — хорошо известная система, в которой частицы с энергиями, превышающими  $10^{13}$  эВ, образуются в большом количестве. Туманность генерирует рентгеновские лучи с помощью синхротронного механизма, т. е. в результате отклонения электронов с высокой энергией в магнитном поле туманности. Согласно оценке напряженность поля как раз такова, что каждый электрон имеет энергию порядка  $10^{13}$  эВ.

Такие быстрые электроны будут отдавать свою энергию в течение примерно года, и при этом их количество в Крабовидной туманности,

по-видимому, не уменьшается. В связи с этим астрономы пришли к выводу, что быстро вращающаяся нейтронная звезда, находящаяся в центре туманности, каким-то образом обеспечивает непрерывный приток электронов или повышает их энергию. Нейтронная звезда, скорость вращения которой медленно падает, испускает один импульс излучения за оборот, т. е. является пульсаром. Постепенное снижение частоты импульсов дает возможность оценить скорость замедления вращения звезды. Это в свою

Рис. 8. Вероятность взаимодействия нейтрино с протоном зависит от энергии падающего нейтрино.

Согласно теории электрослабого взаимодействия, являющейся единой теорией слабого и электромагнитного взаимодействия, для нейтрино с энергией выше некоторой критической вероятность взаимодействия очень мало зависит от энергии. Определив с помощью установки ДЮМАНД число взаимодействий с энергией выше критической энергии, можно проверить это предсказание теории.



очередь указывает приблизительно на скорость, с которой звезда теряет энергию вращения. Скорость потери энергии, как следует из наблюдений, сравнима с мощностью, необходимой для поддержания синхротронного излучения электронов Крабовидной туманности. Из этого численного согласия можно предположить, что нейтронная звезда каким-то образом конвертирует большую часть своей энергии вращения в релятивистские частицы.

□

Еще одним примером эффективного образования релятивистских частиц является совсем другой тип системы — яркий квазар 3С 273. Недавние измерения, проведенные со спутника, показали, что этот квазар испускает столь же большую энергию в  $\gamma$ -лучах, как и в любой другой области электромагнитного спектра. Энергия каждого регистрируемого фотона больше  $10^8$  эВ; это означает, что  $\gamma$ -лучи могут генерироваться только релятивистскими частицами (хотя пока неизвестно точно, до какой степени релятивистскими). Несомненно квазар тратит на образование релятивистских частиц очень большую часть своего энергетического бюджета. Из энергетических соображений можно предположить, что аппаратура ДЮМАНД может регистрировать от этого источника нейтрино примерно 100 событий в год. Хотя квазар 3С 273 необычно ярк, он может быть представителем большого класса квазаров и активных галактик, в которых также происходит эффективное образование релятивистских частиц. Частицы с высокой энергией могут эффективно образовываться во взрывных волнах от Сверхновых и в меньшей степени в ударных волнах, приходящих от различных источников в нашей Солнечной системе.

Поскольку в астрофизических объектах, служащих источником нейтрино высоких энергий, образуются также  $\gamma$ -лучи сравнимой энергии, измерение потока  $\gamma$ -лучей от объекта может служить индикатором воз-

возможного источника нейтрино. Однако нет точного соответствия между детектируемыми  $\gamma$ -лучами и ожидаемыми нейтрино.  $\gamma$ -лучи высокой энергии всегда образуются там же, где возникают нейтрино высокой энергии. Но нейтрино высокой энергии не всегда образуются там, где генерируются высокоэнергетические  $\gamma$ -лучи. Другими словами,  $\gamma$ -кванты могут частично приходить из источников, не испускающих нейтрино. Наоборот, измеряемый поток  $\gamma$  лучей может привести к заниженной оценке нейтринного потока, если некоторые из фотонов, образованные тем же источником,

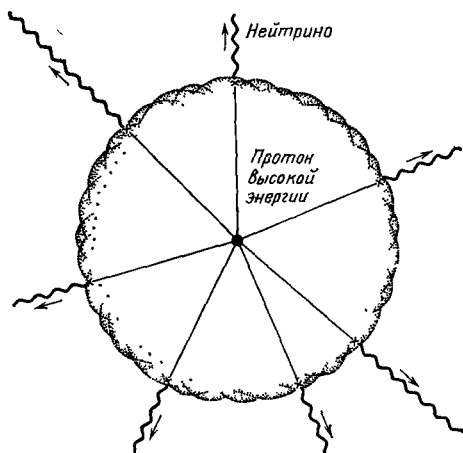


Рис. 9. Молодая Сверхновая может генерировать нейтрино, когда протоны высокой энергии, испускаемые нейтронной звездой, находящейся в центре системы, соударяются с веществом расширяющейся оболочки Сверхновой.

Оболочка, которая в течение первых шести месяцев может экранировать фотоны и другие релятивистские частицы, испускаемые звездой, будет прозрачной для нейтрино. Нейтрино могут оказаться единственным ключом к разгадке высокоэнергетических процессов, происходящих за «экраном».

не достигают Земли. Это происходит в силу того, что экран из вещества мишени, где образуются нейтрино, может поглощать  $\gamma$ -лучи. Более того, проходя астрономические расстояния, многие фотоны с наивысшими энергиями теряют энергию в результате соударений с другими фотонами. Тем не менее если иметь эти обстоятельства в виду,  $\gamma$ -астрономия помогает оценивать поток нейтрино вблизи Земли.

Интересующие нас здесь  $\gamma$ -лучи обладают такой же энергией (более  $10^{12}$  эВ), что и нейтрино, к которым наиболее чувствительна аппаратура ДЮМАНД. Обозначаемые как VHGR (very-high-energy-gamma-rays- $\gamma$ -лучи с очень высокой энергией) эти лучи обладают в 1000 раз большей энергией, чем  $\gamma$ -лучи, обычно наблюдаемые со спутников. VHGR детектируются большими зеркалами, которые собирают слабые вспышки света, вызванные ливнем частиц, возникающих при входе фотона в атмосферу Земли. Астрономия  $\gamma$ -лучей с очень высокой энергией (VHGR), зародившаяся два десятилетия назад, начинает последние несколько лет приносить положительные результаты.

□

Количество вещества, образующее достаточно толстый экран для остановки большинства соударяющихся с ним релятивистских частиц, будет также достаточно толстым для поглощения  $\gamma$ -лучей. Однако для образования нейтрино нет необходимости, чтобы большинство протонов сильно поглощалось экраном. Так, образование нейтрино может быть эффективным, если поглощается лишь половина протонов. Возможно также существование экрана, достаточно толстого для остановки существенной части падающих протонов, но еще столь тонкого, чтобы пропустить большую часть  $\gamma$ -излучения. Таким экраном является молодая нейтронная звезда в двойной системе Cyg X-3. Поскольку, по-видимому,

нейтронная звезда испаряет вещество с поверхности своей звезды-компаньона, ее наблюдают в момент начала и конца затмения сквозь «туман» из вещества. В некотором положении, когда нейтронная звезда движется по своей орбите, «туман» имеет оптимальную толщину для эмиссии  $\gamma$ -лучей.

Такой вывод теперь подтвержден наблюдениями. В течение последнего десятилетия группа исследователей под руководством А. А. Степаняна в Крымской Астрофизической обсерватории (СССР) наблюдают  $\gamma$ -лучи с очень высокой энергией, испускаемые Суг X-3. Наблюдения недавно были подтверждены этой же группой, а также группой в США. Наблюдаемые  $\gamma$ -лучи испускаются лишь периодически с наибольшей интенсивностью, несомненно, в момент появления нейтронной звезды

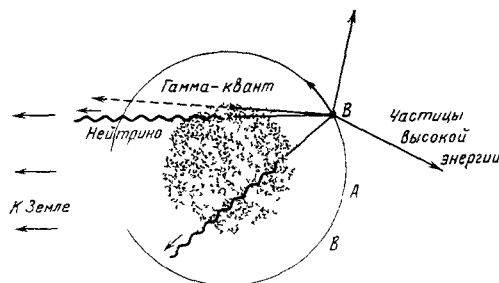


Рис. 10. Двойная звездная система также может генерировать нейтрино.

Излучение от нейтронной звезды может испарять вещество с поверхности звезды-компаньона. Как испаряемое вещество, так и сама звезда-компаньон создают экранирующую мишень из нуклонов для частиц с высокой энергией, испускаемых нейтронной звездой. В положении А нейтронная звезда затмевается ее компаньоном. При этом нейтрино, генерируемые при соударении частиц с высокой энергией, испускаемых нейтронной звездой, с нуклонами звезды-компаньона будут проходить сквозь звезду-компаньон вдоль луча зрения, достигающего Земли.  $\gamma$ -лучи, всегда генерируемые вместе с нейтрино, при прохождении через звезду-компаньон будут терять свою энергию. Когда нейтронная звезда выходит из-за звезды-компаньона (положение В), ее можно наблюдать с Земли через «туман» испаренного вещества. Туман может оказаться достаточно толстым, чтобы задержать многие частицы высокой энергии, но быть при этом достаточно тонким для прохождения большей части  $\gamma$ -излучения. Система в созвездии Суг X-3 является примером двойной звездной системы, могущей отвечать такому сценарию.

из-за ее компаньона.  $\gamma$ -лучи наблюдаются за отрезок времени, составляющий лишь 5% периода орбитального движения. Для возникновения наблюдаемого потока  $\gamma$ -лучей нейтронная звезда в Суг X-3 так же, как и нейтронная звезда в Крабовидной туманности, должна эффективно создавать частицы с энергией  $10^{13}$  эВ. Если  $\gamma$ -кванты являются продуктом пионного распада, то одновременно с ними образуются и нейтрино. Согласно нашей оценке эти нейтрино будут регистрироваться счетчиками ДЮМАНД 50 раз в год.

В 1975 г. были обнаружены  $\gamma$ -лучи с очень высокой энергией, испускаемые радиогалактикой NGC 5128. Если эти  $\gamma$ -лучи возникают при пионном распаде, сопутствующие ему нейтрино должны регистрироваться счетчиками ДЮМАНД по крайней мере несколько раз в год. Важность этого открытия для ДЮМАНД заключается в том, что активные галактики способны эффективно генерировать релятивистские частицы с энергией, достаточной для образования нейтрино, которые можно регистрировать.

Нейтринная астрономия может также дать ответы на некоторые основные вопросы, касающиеся общей структуры и истории Вселенной. Один из этих вопросов: состоят ли все галактики из обычного вещества или примерно половина из них содержит антивещество? Согласно наиболее распространенной точке зрения все Галактики состоят из обыкновенного вещества (см. Wilcreek F. The Cosmic Asymmetry between Matter and Antimatter. — Scientific American, December 1980 \*)). Тем не менее неко-

\*) См. перевод: УФН, 1982, т. 136, с. 149. (Прим. пер.).

торые авторы полагают, что во Вселенной существует всеобщая симметрия, согласно которой половина материи во Вселенной состоит из антивещества. «Фотонная астрономия» не может непосредственно ответить на этот вопрос, поскольку фотоны являются своими собственными античастицами и не способны принести никакой информации о том, состоит ли источник из вещества или антивещества. Нейтрино отличаются от антинейтрино, и аппаратура ДЮМАНД сможет их различать благодаря деталям во взаимодействии. При этом существенно, что галактики, состоящие из вещества, испускают значительно больше нейтрино, чем антинейтрино, в силу чего достаточно сильный нейтринный сигнал от галактики (по сравнению с сигналом антинейтрино) должен показывать, состоит галактика из вещества или антивещества.

С помощью ДЮМАНД может оказаться возможным исследовать не только астрофизические явления, но и фундаментальные вопросы физики частиц такие, как теория электрослабого взаимодействия (единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия). Этим взаимодействиям отвечают две из трех фундаментальных сил в ядерной физике; третья сила соответствует сильному взаимодействию, связывающему нуклоны друг с другом. Нейтрино испытывают лишь слабые взаимодействия; они не «чувствуют» ядерных сил. Согласно теории электрослабого взаимодействия слабое и электромагнитное взаимодействия кварков в частице на некотором очень близком расстоянии (менее  $10^{-16}$  см) обладают одной и той же силой. Таким образом, на малом расстоянии слабая сила не является, собственно, слабой.

Проходящее через протон нейтрино с вероятностью меньше лишь  $10^{-6}$  может подойти достаточно близко к кварку и «почувствовать» слабую силу. Тем не менее с повышением энергии нейтрино слабая сила играет все большую роль и вероятность взаимодействия нейтрино с протоном увеличивается. Согласно теории электрослабого взаимодействия выше некоторой критической энергии вероятность нейтрино-протонного взаимодействия перестает зависеть от энергии. Нейтрино с энергиями, превышающими критическую, с известной скоростью все время образуются в земной атмосфере.

Зная эту скорость и число нейтрино-нуклонных взаимодействий, зарегистрированных ДЮМАНД, можно вычислить вероятность взаимодействия и измеренную вероятность сравнить с предсказанной. Теория предсказывает также распределение энергии между различными заряженными частицами, образующимися при нейтрино-протонном взаимодействии. С помощью аппаратуры ДЮМАНД эти предсказания можно будет проверить.

Недавно организаторы ДЮМАНД исследовали возможность установки другого типа детекторов на поверхности моря или на берегу с целью измерения энергии космических лучей, могущих генерировать мюоны, которые будет регистрировать аппаратура ДЮМАНД. Из данных об энергии и распределении мюонов можно получить много информации о природе взаимодействия частиц и о космических лучах высокой энергии.

Самым же важным мотивом для создания ДЮМАНД является тот факт, что эта установка даст возможность использовать новый источник информации о Вселенной. Появление помимо оптической астрономии сначала радиоастрономии, а затем рентгеновской и гамма-астрономии привело к открытию необычных источников таких, как радиогалактики, квазары и пульсары. Обнаружение всех этих объектов было неожиданным. Весьма вероятно, что и нейтринная астрономия принесет нам сюрпризы.



## ЛИТЕРАТУРА

- Proceedings of the 1976 DUMAND Summer Workshop in Hawaii/Ed. A. Roberts — Fermilab., 1977.  
Proceedings of the 1978 DUMAND Summer Workshop. La Jolla/Ed. A. Roberts — DUMAND Seripps Inst. of Oceanography, 1979.  
Proceedings of the 1979 DUMAND Summer Workshop at Khabarovsk and Lake Baikal/Ed. J.G. Learned — Hawaii DUMAND Center, University of Hawaii, 1980.  
Б е р е з и н с к и й В. С., З а ц е п и н Г. Т.— УФН, 1977, т. 177, с. 3; см. также: УФН, 1981, т. 133, с. 545 \*).  
Б е р е з и н с к и й В. С.— Природа, 1981, № 3, с. 13 \*).
- 

\*) Литература, добавленная переводчиком.