

3
П-56

668



Лаборатория ядерных проблем
Лаборатория теоретической физики

Б. Поляков, Я. Смородинский

Д-668

НЕЙТРИНО И ПЛОТНОСТЬ
МАТЕРИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

ЖЭТФ, 1961, т 41, Вып. 1, с 239.

СЭИ, 1962, вып. 112.

Б. Понтекорво, Я. Смородинский

Д-668

НЕЙТРИНО И ПЛОТНОСТЬ
МАТЕРИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Направлено в ЖЭТФ

984/7 1286

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

Рассматривается возможность того, что плотность энергии нейтрино и антинейтрино во вселенной сравнима с плотностью энергии, связанной с массой покоя водорода, или больше её. Предположение о большой плотности энергии нейтрино и антинейтрино не противоречит существующим экспериментальным данным.

Обсуждаются способы проверки этого предположения, которое естественно возникает при обсуждении РС-асимметрии мира совместно с гипотезой о существовании антимиров. Подчеркивается большая роль фермиевского $(e\nu)(e\bar{\nu})$ - взаимодействия в обеспечении перекачивания энергии в $\nu\bar{\nu}$ компоненту.

Введение

До сих пор не существует обоснованных оценок плотности нейтрино и анти-нейтрино в пространстве. Так как эти частицы ничтожно мало поглощаются в плотных веществах и условия их рождения в прошлом неизвестны, то в пространстве может происходить их накопление, а поэтому их число могло бы достичь очень больших величин. Хотя общепринято считать, что материя во вселенной представлена, в основном, водородом, возникает естественный вопрос: не может ли энергия, приходящаяся на нейтрино и антинейтрино во вселенной, оказаться сравнимой или даже больше полной энергии водорода?

Зарядовая асимметрия мира и флюктуационная гипотеза

Предположение о большом количестве ν и $\bar{\nu}$ во вселенной возникает, например, при обсуждении вопроса о зарядовой (точнее РС) асимметрии мира. В литературе неоднократно обсуждалась возможность существования антимиров, которые вместе с нашим миром возникли в результате флюктуации в зарядово-симметричной вселенной. Хотя сейчас не существует никаких экспериментальных оснований, указывающих на реальное существование антигалактик, нам кажется интересным отметить, что флюктуационная гипотеза требует, чтобы во вселенной существовал большой зарядово-симметричный "фон". Такой фон, в принципе, должен был бы состоять в значительной степени из ν и $\bar{\nu}$, плотность которых одинакова. Поэтому флюктуационная гипотеза, в принципе, приводит к следствию, которое может быть проверено в "земных" условиях. Заметим сразу же, что, если бы такой фон существовал, то измерение потоков и энергии ν и $\bar{\nu}$ дало бы значение очень важного параметра - средней плотности энергии вселенной. Интересно то, что тогда оценка плотности не была бы никак связана с "размазыванием" галактик, так как массой галактик можно было бы просто пренебречь. Все астрономические оценки сейчас сходятся на том, что средняя плотность таких "размазанных" галактик не превышает 10^{-29} г/см³ ($\sim 10^{-2}$ Мэв/см³) или меньше 10^{-5} протона в см³ /1/ х). Поэтому флюктуационная гипотеза требует,

х) Вопрос о плотности вещества во вселенной особенно важен для выбора космогонической модели мира. Величина средней плотности, отвечающей плоской вселенной (переход от закрытой модели к открытой), составляет примерно $5 \cdot 10^{-29}$ г/см³/2/. В связи с тем, что в последнее время шкала космических расстояний увеличилась более чем в два раза, эту величину надо уменьшить примерно до $2 \cdot 10^{-29}$ г/см³, что близко ко всем оценкам остальной плотности. Величина нейтринной компоненты, таким образом, может оказаться определяющей.

чтобы средняя плотность энергии ν и $\bar{\nu}$ во вселенной была не меньше 10^{-2} Мэв / см³. При этом, конечно, вопрос о возможном механизме разделения вещества и антивещества остается открытым. По крайней мере, сейчас мы не можем об этом ничего сказать. Отметим очевидное обстоятельство, что вне рамок флюктуационной гипотезы оценки плотности ν и $\bar{\nu}$ во вселенной зависят в очень сильной степени от конкретной космогонической модели и поэтому весьма неопределенны. И в этом случае (хотя и с другой точки зрения^{/3,4/}) измерение плотности энергии нейтрино и антинейтрино является важнейшей задачей космогонии.

Прежде всего отметим, что существующие экспериментальные данные, которые обсуждаются ниже, не исключают даже очень больших плотностей энергии нейтрино и антинейтрино во вселенной.

Универсальное слабое взаимодействие и перекачивание энергии

в $\nu\bar{\nu}$ - компоненту

Флюктуационная гипотеза наводит на мысль, что характерная энергия ν и $\bar{\nu}$ должна быть порядка сотен Мэв. Она определяется нуклон-антинуклонной аннигиляцией (ν и $\bar{\nu}$ от распада пионов аннигиляционной природы) и равна по порядку величины одной десятой энергии покоя нуклона. Возникает вопрос: почему же во вселенной нет интенсивного потока γ -лучей с энергией, сравнимой с энергией предполагаемого лептонного потока? Сразу можно ответить, что энергия от "аннигиляционных" фотонов (от распада π^0 -мезонов) естественно деградирует в условиях заметных плотностей вещества, что и объясняет отсутствие высокоэнергичных фотонов. Однако эта "деградированная" энергия не может исчезать и, на первый взгляд, должна появляться во вселенной в виде тепловой энергии, фотонной энергии и т.д. в количестве, не меньшем, чем энергия, связанная с массой покоя протона. Однако известно, что плотность тепловой и фотонной (т.е. "симметричной") энергии во вселенной мала по сравнению с плотностью ("несимметричной") энергии, связанной с массой покоя, и это кажется трудно объяснимым. Такое возражение может быть ликвидировано, если существует рассеяние нейтрино электронами (как это, например, должно быть в теории универсального взаимодействия Ферми). Тогда в электромагнитных процессах вместо испускания фотонов становится возможным испускание пары $\nu\bar{\nu}$ (через виртуальную или реальную пару

e^+e^- /5/). При очень высоких температурах и плотностях (тем более, при условиях, которые нас теперь интересуют) испускание пар $\nu\bar{\nu}$ становится единственным эффективным механизмом излучения энергии плотными телами /5,6,7,8/.

Так как ν и $\bar{\nu}$ не находятся в равновесии с веществом (из-за малого взаимодействия), большая часть "симметричной" энергии могла бы быть "перекачана" в нейтринную компоненту, так что "видимая" форма энергии, не связанная с массой покоя, может, оказаться несравнимо меньшей, чем "невидимая" (т.е. нейтринная) форма "симметричной" энергии. Это могло бы примирить видимую асимметрию мира с его истинной симметрией. Подчеркнем еще раз, что сама флюктуационная гипотеза отнюдь не является необходимой и мы лишь обсуждаем возможные ее следствия.

Существующие сведения о плотности энергии ν и $\bar{\nu}$

Обсудим теперь экспериментальные данные о плотности энергии ν и $\bar{\nu}$ в веществе. Прямые сведения о максимальных плотностях ν и $\bar{\nu}$ можно получить из предположения, что в опытах Райнса-Коуэна /8/ и Девиса /10/, выполненных при помощи реактора, эффект, который наблюдали при выключенном реакторе, обусловлен целиком нейтральными лептонами из космического пространства. В опыте Райнса и Коуэна могли регистрироваться антинейтрино с энергией 3-10 Мэв; из него следует, что поток антинейтрино с энергией от 3 до 10 Мэв в космическом пространстве не может заметно превышать $10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Это соответствует максимальной энергетической плотности антинейтрино, имеющих энергию от 3 до 10 Мэв, по порядку величины равной 10^3 Мэв/см^3 .

Что же касается антинейтрино высокой энергии, отбор событий типа $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ в опыте Райнса и Коуэна намеренно не дал возможности регистрировать $\bar{\nu}$ с энергией $\gg 10 \text{ Мэв}$, и поэтому опыт не дает никаких сведений о $\bar{\nu}$ высокой энергии.

В опытах Девиса показано, что

$$\int_0^{\infty} c \varrho(E) \sigma(E) dE \leq 1,1 \cdot 10^{-33} \text{ сек}^{-1}$$

где $\varrho(E)$ - плотность космических нейтрино с энергией E (включая нейтрино от Солнца) в $\text{Мэв}^{-1} \text{ см}^{-3}$ и $\sigma(E)$ сечение реакции $\nu + \text{Al}^{27} \rightarrow \text{Al}^{27} + e^-$.

Это сечение, грубо говоря, пропорционально квадрату энергии нейтрино в области от нескольких Мэв до нескольких десятков Мэв. Из анализа опыта Девиса следует, что плотность энергии нейтрино космического пространства с энергией в несколько Мэв не может превышать нескольких десятков Мэв в см^3 . Для нейтрино же с энергией порядка 1 Бэв, которые будут вызывать расщепления аргона, опыт Девиса явно не может дать никаких сведений. Что же касается нейтрино с энергией до 100 Мэв, наименьшая оценка плотности энергии этих нейтрино получается при предположении, что детектор Девиса был облучен моноэнергетичными нейтрино с энергией, равной максимальной энергии, при которой отдача нуклона не мешает образованию A^{37} (скажем, $E \sim 70$ Мэв). И в этом крайнем случае максимальная (т.е. допустимая опытом) плотность энергии этих нейтрино — порядка нескольких Мэв в см^3 и значительно превышает W_H — максимальную величину плотности энергии водорода ($W_H \sim 10^{-2}$ Мэв/ см^3) во вселенной.

Рассмотрим сейчас, какие сведения можно получить из опытов, выполненных под землей. При больших глубинах нейтрино и антинейтрино от космического пространства будут рождают заряженные лептоны, распределяющиеся изотропно, с не зависящей от глубины интенсивностью. Если их энергия значительно превышает энергию покоя мюона, то ν и $\bar{\nu}$ будут эффективно образовывать мюоны. Последние должны замедляться и останавливаться, и в условиях равновесия число образованных мюонов равняется числу остановившихся. Из измерений^{/11/} на глубине 6000 г/см^2 следует, что число остановившихся в эмульсиях мюонов, приходящих в эмульсию из нижней полусферы, равно $\sim 10^{-8} \text{ сек}^{-1} \text{ см}^{-3}$. Это число можно рассматривать как максимально возможное число мюонов, образованных космическими нейтрино (поскольку приходящие в эмульсию из нижней полусферы мюоны, конечно, могут возникать от распада пионов, испускаемых в звездах, образованных проникающей компонентой). Из этого следует, что

$$\int_0^{\infty} c \rho(E) \sigma(E) dE \leq 10^{-12} \text{ сек}^{-1},$$

где $\sigma(E)$ — нейтрино-нуклонное сечение. Для нейтрино и антинейтрино с энергией около 1 Бэв σ находится в интервале^{/12/} $10^{-38} - 10^{-39} \text{ см}^2$, так что подземные измерения интенсивности медленных мюонов требуют, чтобы плотность энергии ν и $\bar{\nu}$ с энергией около 1 Бэв была $\leq 10^{-1}$ Мэв/ см^3 . Эта величина довольно близка к величине W_H . Даже меньший предел возможной плотности энергии ν и $\bar{\nu}$ с энергией порядка 1 Бэв получится, если исходить из резуль-

татов опытов, выполненных^{/13/} при помощи телескопа счетчиков при глубине около 10^5 гр. см^{-2} . Эти данные, однако, трудно интерпретировать с нашей точки зрения, так что можно только сделать вывод о том, что максимальная плотность энергии ν и $\bar{\nu}$ с энергией большей или равной 1 Бэв не может сильно превышать W_H и, вероятно, меньше W_H . Во всяком случае, при современных условиях техники эксперимента вполне реальной становится задача регистрации потока нейтрино и антинейтрино, по порядку величины равного $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ и имеющего энергию 1 Бэв. Эта задача представляется гораздо менее сложной, чем широко обсуждавшаяся в последнее время задача - зарегистрировать нейтрино от ускорителя^{/14/}. В таком потоке будет рождаться внутри земли 10-100 изотопически распределенных заряженных частиц (электроны и мюоны) в день на тонну вещества.

Необходимо подчеркнуть, что при энергиях ν и $\bar{\nu}$ порядка или меньше $m_\mu c^2$, образование мюонов нейтрино невозможно; подземные измерения никак не исключают энергетической плотности ν и $\bar{\nu}$ больше, чем W_H .

Опыты по регистрации ν и $\bar{\nu}$ в составе космических лучей обсуждались ранее^{/15,16/}, причем предполагалось, что эти частицы образуются в столкновениях "протонов космического излучения" с земной атмосферой или с межзвездным веществом. Ясно, что в этом случае число нейтрино очень невелико, и это видно сразу, хотя бы из-за крайне малой интенсивности высокоэнергетичных γ -лучей от распада π^0 -мезонов.

З а к л ю ч е н и е

Из вышесказанного следует, что априори нельзя отвергнуть возможность того, что во вселенной плотность энергии нейтрино и антинейтрино сравнима или больше средней плотности энергии, связанной с массой покоя протонов. Это должно быть проверено опытом.

В заключение заметим, что в условиях очень больших плотностей и энергии преобладание "симметричной" формы энергии в виде пар $\nu \bar{\nu}$ над другими симметричными формами энергии есть довольно общее свойство, связанное с рассеянием нейтрино электронами, и может представлять интерес вне связи с флуктуационной гипотезой. Вообще механизм "перекачивания" энергии в ней-

тринную компоненту мог бы привести к значительной плотности ν и $\bar{\nu}$ во вселенной. Существование этого механизма поставит под сомнение оценки плотности материи во вселенной, сделанные с учетом только "видимой" формы материи.

Следует подчеркнуть, что экспериментальное опровержение гипотезы о существовании данной плотности энергии $\int \rho(\epsilon) \epsilon d\epsilon$ нейтрино и антинейтрино во вселенной становится тем труднее, чем меньше их средняя энергия. Грубо говоря, плотность энергии ν и $\bar{\nu}$, которую можно экспериментально обнаружить, обратно пропорциональна квадрату энергии нейтральных лептонов в области энергий больших, чем несколько Мэв. При меньших энергиях трудность их регистрации колоссальна. Так, например, гипотезу о существовании плотности ν и $\bar{\nu}$, равной или большей W_H , нетрудно проверить на опыте (ее, может быть, уже опровергают существующие данные о подземной интенсивности мюонов), если энергия нейтрино $\gtrsim 1$ Бэв. Если же ν и $\bar{\nu}$ имеют энергию около 100 Мэв, проверка гипотезы реальна, но встречается со значительными трудностями. При энергии нейтрино < 1 Мэв трудно опровергнуть в опытах существование плотностей энергии ν и $\bar{\nu}$, даже на много порядков превышающих W_H .

Для измерения потоков нейтральных лептонов с энергией $\gtrsim 1$ Бэв удобнее всего регистрировать вторичные мюоны, образованные нейтрино^{/14,15/}. В области энергий ν и $\bar{\nu}$ в интервале от нескольких Мэв до нескольких сотен Мэв постановки опытов Райнса-Коузена и Девиса вполне приемлемы. Что же касается регистрации ν и $\bar{\nu}$ с энергией ≤ 1 Мэв, нам представляется, что единственная возможность - использование нейтрино-электронного рассеяния. К сожалению, сегодня это только принципиальная возможность.

Авторы благодарят А.Г. Масевич и С.Б. Пикельнера за ценные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. Д.Я. Мартынов. Труды УИИ Совещания по космогонии. Москва 1957г.
Ср. также У.Аллен. Астрофизические величины, Москва 1960 г.
2. Я.А. Смородинский. Труды УИИ Совещания по космогонии, Москва 1957.
3. В.М. Харитонов. Совещание по физике элементарных частиц. Ереван 1960 г.
4. G.Marx, N.Menyhard. Science, 131, 299, 1960.
5. Б.Понтекорво. ЖЭТФ, 36, 1615, 1959 г.
6. Г.М. Гандельман, В.С. Пинаев. ЖЭТФ, 37, 1072, 1959.
7. H.Y.Chiu, P.Morrison. Phys.Rev. Letters, 5,573, 1960.
8. H.Y.Chiu, R.Stabler. Neutrino Emission Processes and Stellar Evolution, preprint, 1960.
9. F.Reines, C.L.Cowan. Intern. Congr.Atomic Energy, 2 nd Cong. Geneve (1958).
10. R.Davis. Bull. Amer. Phys.Soc., Ser. 11,4, 217, 1959.
11. G.E.P. George. I.Evans. Proc.Soc., A 63, 1248, 1950 and Proc. Phys.Soc., A. 64, 193, 1951.
12. T.D. Lee, L.N.Yang. Phys.Rev. Letters, 4, 307, 1960.
N.Cabbibo, R.Gatto. Nuovo Cimento 15, 304, 1960.
13. M.Miezowicz, L.Turkiewicz, T.M. Massalski. Phys.Rev. 77, 380, 1950.
14. Для обсуждения этого вопроса см. Труды IX Международной (Киев, 1959г.)
и X Международной (Рочестер, 1960 г.) конференций по физике высоких
энергий.
15. М.А. Марков. Труды X Международной конференции по физике высоких энергий,
Рочестер, 1960 г.
16. В.М. Харитонов. "Нейтрино и антинейтрино в свободном пространстве", препринт,
Ереван, 1959 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 февраля 1961 года.