

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**НЕЙТРОНЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ**

Около полутора десятков лет назад было обнаружено, что в составе космического излучения имеются, наряду с заряженными частицами, также и нейтроны. Однако лишь в последние два-три года получены более подробные сведения о характере процессов генерации нейтронов в космическом излучении и о свойствах частиц, генерирующих нейтроны различных энергий.

Наиболее наглядным доказательством связи присутствующих в атмосфере нейтронов с космическим излучением служит резкое увеличение числа регистрируемых нейтронов при изменении высоты места наблюдения над уровнем моря. Одновременно изучение высотной зависимости позволяет установить характер процессов, приводящих к генерации нейтронов данной энергии.

Изменение числа тепловых нейтронов ($E_n < 0,4$ эв) в атмосфере от уровня моря до высоты с остаточным давлением в 55 г/см^2 было исследовано в работе Юана¹. Регистрация тепловых нейтронов, как обычно, производилась с помощью борных счётчиков*). Два таких счётчика поднимались с помощью шаров-зондов в верхние слои атмосферы. Один из счётчиков защищался от влияния тепловых нейтронов кадмевым экраном. С помощью радиоаппаратуры с шаров-зондов передавались сигналы, регистрируемые на земле. Разность в показаниях обоих счётчиков давала число тепловых нейтронов на соответствующей высоте. Как видно из рис. 1, число тепловых нейтронов растёт с высотой приблизительно экспоненциально с показателем экспоненты μ , соответствующим $\frac{1}{\mu} = 150 \text{ г/см}^2$, и достигает максимума на высоте 122 г/см^2 остаточного давления (около 15 км высоты над уровнем моря).

Наличие максимума само по себе является вполне естественным в связи с тем, что нейтроны вследствие своей нестабильности не могут быть первичными частицами космического излучения и, следовательно, интенсивность их от границы атмосферы может лишь нарастать.

Этим же автором было показано², что на высоте 8 км над уровнем моря число тепловых нейтронов резко зависит от географической широты места наблюдения, увеличиваясь почти в три раза при пере-

*) Во всех описываемых ниже экспериментах применялись борные счётчики повышенной эффективности, достигаемой за счёт обогащения BF_3 изотопом бора B^{10} .

мешении с 20 до 55° сев. широты. Подобный широтный эффект характерен для процессов, связанных с основной массой первичных частиц космического излучения, отклоняемых магнитным полем Земли. Более сильное отклонение частиц, падающих на экваторе, по сравнению с большими широтами, приводит к относительному уменьшению в районе экватора интенсивности первичного космического излучения. Наличие широтного эффекта для интенсивности тепловых нейтронов подтверждает, что они являются вторичным продуктом взаимодействия с веществом атмосферы частиц космического излучения.

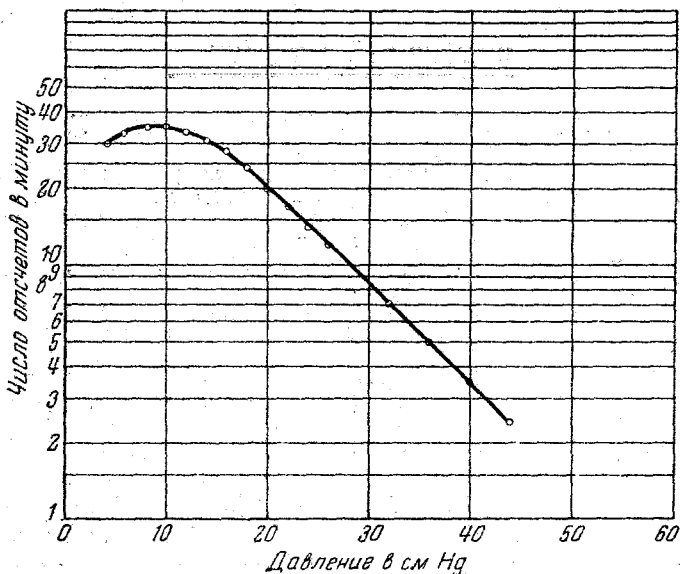


Рис. 1. Зависимость числа тепловых нейтронов в атмосфере от высоты места наблюдения.

Наряду с исследованием тепловых нейтронов значительное число экспериментов было посвящено обнаружению в космическом излучении нейтронов с большей энергией и изучению механизма их генерации (при дальнейшем изложении, говоря о нейтронах, мы будем иметь в виду нейтроны с энергией порядка нескольких *Мэв* или десятков *Мэв*. Случаи тепловых, а также быстрых нейтронов ($> 40\text{--}50\text{ Мэв}$) будут специально оговорены).

В частности, в работе Коккони, Тонжиржи и Грейзена³, произведённой на высоте 3260 м над уровнем моря, была обнаружена генерация нейтронов в локальных ливнях, возникающих в толще свинцового блока, помещённого над детектором нейтронов. Как известно, под толстыми слоями свинца наблюдаются, кроме радиационных и δ -ливней, вызванных мезонами жёсткой компоненты, также и другие ливни, интенсивность которых резко увеличивается с высотой над уровнем моря⁴. Эти так называемые электронно-ядерные ливни широко исследовались советскими физиками⁵. Отличительной чертой электронно-ядерных ливней, рождаемых в свинце и других материалах частицами,

«обладающими сильным ядерным взаимодействием, является одновременное появление как мягких (электронов, фотонов), так и проникающих частиц.

Исследования электронно-ядерных ливней, произведенные с помощью камеры Вильсона⁶, показали, что в их составе имеется также большое число частиц, вызывающих ядерные расщепления. Во всех тех случаях, когда в камере должен был быть виден след частицы, вызвавшей расщепление, можно было утверждать, что расщепление вызвано неионизирующей частицей.

В рассматриваемой работе Коккони, Тонжиоржи и Грейзена ливни, генерированные под большой толщей свинца проникающими частицами, фиксировались с помощью гейгеровских счётчиков. Детектором нейтронов служили две группы борных счётчиков, погружённых в парафиновый блок, служащий для замедления падающих на него нейтронов до тепловых скоростей. Регистрировались совпадения импульсов от нейтронных счётчиков (N) с импульсами от трёх групп гейгеровских счётчиков (S), фиксирующих ливень. Три другие группы гейгеровских счётчиков (A), расположенные вокруг установки на расстоянии нескольких метров от неё и включенные на антисовпадения со счётчиками S , служили для исключения широких атмосферных ливней.

Для реализации совпадения разрядов в нейтронных счётчиках с импульсами от совпадений ($S-A$), последние затягивались до длительности в 150 мксек, в течение которых нейтроны замедлялись в парафине и могли быть зарегистрированы счётчиками.

Таким способом была обнаружена интенсивная генерация нейтронов как в свинце, так и в других материалах (Fe и C). В известном числе случаев при образовании ливней срабатывали обе группы нейтронных счётчиков. Это позволило авторам оценить среднее число нейтронов, приходящееся на один ливень. Оказалось, что одновременно рождается большое число нейтронов, причём это число зависит от вещества блока. Так, среднее число нейтронов, рождаемых в свинце, близко к 30, а в железе и графите равно соответственно 18 и 10. Лежащее в основе этого подсчёта предположение об изотропии в распределении нейтронов при возникновении локального ливня нашло своё подтверждение в другой работе тех же авторов⁷. Нейтронные детекторы в этой работе были расположены под свинцовым блоком и над ним (рис. 2). Оказалось, что эффект не зависит от положения детектора.

Изотропия в распределении излучаемых частиц характерна для процессов «испарения» возбуждённых ядер (ядерные расщепления типа обычных «звёзд»). Энергия, с которой мы имеем дело в этих процессах, обычно относительно невелика. Генерация же электронно-ядерных ливней с образованием новых проникающих частиц происходит в процессах ядерного взаимодействия с гораздо большей потерей энергии генерирующими частицами. Это обстоятельство побудило авторов работы³ предположить существование двух процессов различной энергии, связанных с образованием электронно-ядерных ливней: рождение новых частиц при столкновении генерирующих частиц с ядрами вещества и «испарение» ядер, возбуждённых при этом акте. Большое число одновременно испускаемых нейтронов привело авторов к заключению о возбуждении не только того ядра, на котором произошло рождение проникающих частиц, но и окружающих его ядер. Однако дальнейшие эксперименты⁷ поставили под сомнение это предположение. Действительно, при возбуждении других ядер число испущенных нейтронов должно существенно зависеть от количества материала, окружающего центр зарождения ливня, иными словами, от толщины

слоя свинца Σ (рис. 2). Однако при уменьшении толщины слоя Σ от 8 см до 0,6 см число нейтронов уменьшилось лишь вдвое, оставаясь значительным по величине ($\sim 10 \pm 2$).

Таким образом, если нейтроны и испускаются несколькими ядрами, то во всяком случае промежуточный агент, вызывающий возбуждение этих ядер, весьма короткопробежный.

Образование нейтронов происходит, как было указано выше, не только в тяжелых веществах, но также и в веществах с малым атомным номером (графит), а следовательно, и в атмосфере. Действительно.

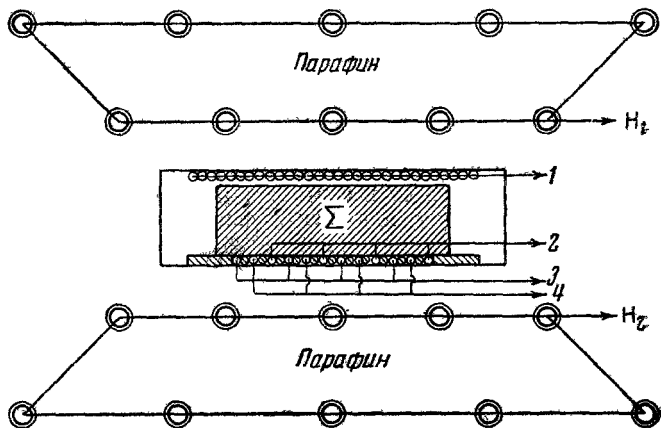


Рис. 2. Установка для исследования углового распределения нейтронов, возникающих в свинцовом блоке. 1, 2, 3, 4 — группы счётчиков, выделяющих ливни, вызванные одной заряженной частицей (срабатывание лишь одного счётчика из группы 1) и содержащие не менее трёх проникающих частиц (совпадение 1—2—3). H_1 и H_2 — две группы нейтронных счётчиков.

было найдено подтверждение⁸ присутствия в воздухе нейтронов с энергией 2—15 Мэв.

Однако образование электронно-ядерного ливня вблизи нейтронного детектора достаточно редкое явление. Гораздо более частым является другой ядерный процесс, отличающийся меньшей выделяемой энергией, а именно, процесс «испарения» ядер, возбужденных при соударении, не влекущем за собой рождения новых частиц.

Как показано Тонжиоржи⁸, основной вклад в число нейтронов, регистрируемых детектором, вносит процесс образования «звёзд». Применявшиеся в этой работе аппаратура и методика измерений в основном не отличаются от приводимых ниже при описании другой работы того же автора (см. рис. 3). Тщательный анализ результатов измерений, проведенных на различных высотах над уровнем моря, привели автора к заключению о том, что компонента, генерирующая эти ядерные расщепления, в основном состоит из быстрых нейтронов. В пользу этого утверждения говорит в первую очередь резкое увеличение наблюдаемого эффекта с высотой над уровнем моря (соответствующее средней длине свободного пробега, равной $132 \pm 15 \text{ г/см}^2$), что исключает возможность объяснения генерации нейтронов μ -мезонами. Слабое поглощение гене-

рирующей компоненты в свинце исключает также фотоны и электроны из числа возможных генерирующих агентов.

Оценка потока этой компоненты позволяет сделать выбор из остальных составных частей космического излучения (нейтронов, протонов и других ядерно-активных частиц). По приближённой оценке поток генерирующей компоненты на высоте 3260 м составляет около 20% по отношению ко всей ионизирующей компоненте, а на высоте 4300 м над уровнем моря — около — 40%.

Применявшаяся установка была чувствительна к нейтронам ограниченного интервала энергии. Поэтому эти цифры характеризовали лишь нижний предел числа генерирующих частиц. Поскольку доля ядерно-активных заряженных частиц (т. е. протонов, а также мезонов, сильно взаимодействующих с ядрами) в общем потоке ионизирующих частиц на этих высотах невелика, вывод о нейтральности основной части генерирующей компоненты является убедительным и находится в согласии с результатами других исследователей (см. обзор В. Л. Гинзбурга⁹, стр. 215, 221).

Над детектором нейтронов помещались поочерёдно слои свинца и других веществ. Оказалось, что в различных материалах генерация нейтронов происходит с сечением, зависящим от атомного номера вещества поглотителя, причём эта зависимость хорошо выражается законом $A^{1/2}$. При этом обычно нейтроны рождаются не в одиночку, а группами. В среднем в установке Тонжиоржи из свинца одновременно появлялось 8 нейтронов. Это число уменьшалось для более лёгких элементов, достигая ~1,6 для графита. Таким образом, меньшая величина энергии, характерной для процессов ядерного «испарения», по сравнению с энергией электронно-ядерных ливней, проявляется и в меньшем числе испускаемых нейтронов.

Данные Тонжиоржи хорошо подтверждаются результатами другой работы¹⁰.

Регистрация нейтронов в этой работе производилась с помощью ионизационной камеры, наполненной BF_3 и окружённой слоем парафина. Сравнивалась интенсивность генерации нейтронов в различных веществах. Производилась также оценка среднего числа одновременно рождающихся нейтронов в предположении, что источником их служат ядерные расщепления, а генерация последних происходит пропорционально геометрическому сечению ядер данного вещества. Полученное отношение

$$\frac{\nu_{Pb}}{\nu_C} = 6,4 \quad (\nu - \text{среднее число нейтронов, появляющихся одновременно}$$

в результате ядерного расщепления) находится в согласии с результатом Тонжиоржи.

Из наблюдений ядерных расщеплений в фотопластинках можно определить абсолютное число «звёзд», появляющихся в эмульсии пластинки в единицу времени.

Зная зависимость числа генерируемых нейтронов от вещества, авторам удалось объяснить весь наблюдаемый эффект, считая эти ядерные расщепления основным источником регистрируемых ими нейтронов. Для этого оказалось достаточным допустить, что в каждой из «звёзд» в среднем рождается от 2,6 до 4,6 нейтронов. Если вспомнить, что среднее число сильно ионизирующих частиц, приходящееся на одну «звезду» в эмульсии, составляет $^9 \sim 3-4$, то полученное число нейтронов является разумным. В свою очередь, одинаковый порядок величины чисел нейтронов и ионизирующих частиц, приходящихся на одно ядерное расщепление, служит оправданием высказанного допущения о рождении основной массы нейтронов в ядерных расщеплениях. Как и в работе Тонжиоржи, авторы наблюдали резкий рост числа отсчётов

детектора с высотой (Коэффициент поглощения μ в атмосфере соответствовал $\frac{1}{\mu} \sim 130 - 160 \text{ г/см}^2$.)

Авторы более детально, чем в работе⁸, исследовали высотный ход нейтронов, генерируемых в поглотителях с различными атомными номерами. Оказалось, что меньшему атомному номеру соответствует более резкое увеличение с высотой, (так для парафина $\frac{1}{\mu} \sim 130 - 140 \text{ г/см}^2$,

а для свинца — около 160 г/см^2). Авторы не объясняют наблюдаемую разницу в поглощении. Возможно, что она объясняется более эффективным захватом тяжелыми ядрами свинца отрицательных μ -мезонов, доля которых в проникающей компоненте растет при приближении к уровню моря. Как известно, останавливающиеся в веществе отрицательные μ -мезоны успевают распасться лишь в случае малого атомного номера этого вещества. Чем больше заряд ядра-поглотителя, тем большую роль играет параллельный процесс захвата этих мезонов. Возбужденные таким образом ядра растрачивают энергию возбуждения, испуская одну или несколько частиц, среди которых могут быть и нейтроны. Полных сведений о продуктах распада ядер, захвативших отрицательные μ -мезоны, в настоящее время нет. Известно, что при захватах, происходящих в эмульсии фотопластинок, а также в камерах Вильсона, не наблюдается появления медленных протонов, характерных для обычных «звезд». Если при таком процессе испускаются нейтроны, то при приближении к уровню моря этот источник нейтронов может стать существенным по сравнению с процессами, вызываемыми нуклонами и другими ядерно-активными частицами, сильно поглощающимися в более высоких слоях атмосферы.

Действительно, произведенный Сардом, Конфорто и др.^{11, 12} анализ нейтронов, связанных с проникающими частицами, остановившимися в слое свинца, согласуется с предположением о рождении этих нейтронов при захвате ядрами поглотителя отрицательных μ -мезонов (абсолютное число последних известно из других экспериментов). Достаточно для этого предположить, что при захвате каждого отрицательного μ -мезона в среднем генерируется 2—3 нейтрона, что согласуется с данными работ, уже разобранных нами выше. Тем самым эти эксперименты, в свою очередь, проливают свет на природу частиц, испускаемых при захвате отрицательных μ -мезонов.

Таким образом, обнаруживается несколько источников нейтронов умеренной энергии. Повидимому, основная масса их генерируется ядерно-активными частицами в «звездах» (малое выделение энергии), а также в процессе с гораздо большим выделением энергии — при образовании электронно-ядерных ливней. Возможно, что вклад в общее число нейтронов, особенно на малых высотах, вносит и процесс захвата ядрами вещества отрицательных μ -мезонов.

За последние годы рядом советских и иностранных физиков было обнаружено присутствие большого числа проникающих ядерно-активных частиц также и в составе широких атмосферных ливней космических лучей¹³. В связи с этим естественно было ожидать появления нейтронов также и в широких ливнях.

На страницах нашего журнала описывались уже¹⁴ первые эксперименты, произведенные Тонджиоржи и приведшие к обнаружению на уровне моря нейтронов, генетически связанных с широкими атмосферными ливнями. В этих опытах регистрировались совпадения импульсов от нейтронных счетчиков с импульсами от трех гейгеровских счетчиков, расположенных вблизи нейтронного детектора и фиксирующих прохождение широкого ливня (краткое описание радиотехнического метода регистрации совпадений см. ¹⁴).

В настоящее время опубликованы подробные результаты дальнейших исследований процессов образования нейтронов в широких ливнях. Эти исследования проводились на различных высотах вплоть до 4300 м над уровнем моря¹⁵. Детектор нейтронов (рис. 3, положение I), аналогичный примененному в работе⁸, последовательно окружался различными поглотителями (положения II—VI). В положении I регистрировались в основном нейтроны, приходящие из воздуха. (Тщательный анализ показал¹⁶, что генерацией нейтронов в парафине самого детектора можно было пренебречь.) Применение различных групп гейгеровских счетчиков, отличающихся величиной площади, позволило

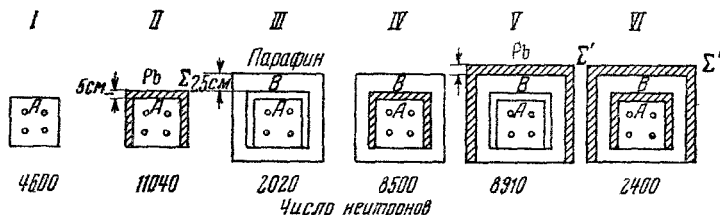


Рис. 3.

оценить долю нейтронов в ливнях различных плотностей. Оказалось, что в первом приближении плотность нейтронов пропорциональна общей плотности заряженных частиц и составляет примерно 1—2% от нее. Добавление к I дополнительного слоя парафина резко уменьшило число отсчетов, подтверждая тем самым достаточно малую энергию приходящих нейтронов (в среднем около 3 Мэв). Сравнение величины эффекта в I и III, а также во II и IV положениях указывало на активную генерацию нейтронов в слое свинца Σ .

Путем замены в слое Σ свинца на железо и графит авторы убедились в генерации нейтронов и в этих веществах.

Плотность потока генерирующих частиц возростала с увеличением плотности регистрируемых широких ливней. При этом генерирующая компонента оказалась весьма проникающей. Добавление 7,5 см свинца (слой Σ') почти не сказывалось на числе отсчетов детектора (сравни IV и VI). Тем самым основная доля частиц широких ливней — электроны и фотоны, — исключалась из числа возможных агентов, генерирующих нейтроны. Возможность объяснить рождение основной части нейтронов действием фотонов противоречит также малая вероятность процессов типа (γ, n) для сколь угодно больших значений γ — числа рождаемых нейтронов. Между тем, как показали авторы, в широких ливнях генерирующая компонента рождает в свинце одновременно в среднем около 60 нейтронов. Это число удалось получить, разбивая нейтронные счетчики на две группы (рис. 4) и оценивая долю случаев одновременного срабатывания обеих групп. (Отметим, что среднее число нейтронов, регистрируемых в парафине, было близко к 1.) Большое число нейтронов, рожденных в свинце, можно было бы пытаться объяснить одновременным падением на установку нескольких генери-

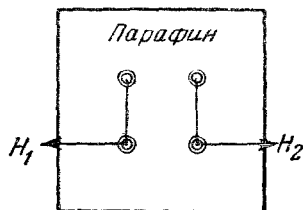


Рис. 4.

рующих частиц. Однако анализ соотношения площадей гейгеровских счётчиков и парафинового блока самого детектора позволяет сделать заключение о генерации всех нейтронов одной частицей. В таком случае напрашивается вывод о большей средней энергии ядерно-активных частиц, связанных с широкими ливнями по сравнению с частицами, не сопровождаемыми достаточно плотным потоком ионизирующих частиц. (Сравнить $v = 60 \text{ с} \cdot v = 8$ — для нейтронов, не сопровождаемых широкими ливнями.) Этот вывод находится в согласии с рядом работ советских авторов, посвященных исследованию свойств ядерно-активных частиц¹⁷.

Была произведена также оценка потока генерирующей компоненты. Разница в эффекте III и IV, вызванная генерацией нейтронов в слое Σ , могла быть приписана как действию ядерно-активных частиц, так и действию μ -мезонов. Оказалось, что в последнем случае необходимо было потребовать, чтобы число μ -мезонов составляло в ливне около 23% от числа электронов, что находится в резком противоречии с экспериментальными данными. Такой большой процент связан с известным фактом слабого поглощения μ -мезонов в веществе. Тем самым данные Тонжиоржи исключили μ -мезоны из числа возможных генерирующих частиц. В то же время, приписывая рождение нейтронов действию ядерно-активных частиц, можно объяснить наблюдаемый эффект. При этом доля таких частиц в ливне могла не превышать 2—3% от числа электронов. Из различных экспериментов известно, что заряженные проникающие частицы в широких ливнях составляют около 2% от числа электронов. Большая часть их является ядерно-активными¹⁸. Генерация оставшейся части нейтронов могла быть отнесена к быстрым нейтронам, присутствие которых в широких ливнях обнаружено, в частности, в других работах группы Коккони. Так, Браун и Маккей¹⁸ наблюдали генерацию в свинцовых пластинках, помещённых внутри камеры Вильсона, электронно-ядерных ливней, вызванных нейтральными частицами. Камера управлялась «стволами» широких ливней, проходящими на расстоянии нескольких метров от нее. Достаточно большая статистика наблюденных случаев позволила авторам оценить долю быстрых нейтронов в широких ливнях в 40% от числа всех проникающих частиц.

Таким образом, опытные данные по порядку величины согласуются с предположением о генерации нейтронов в широких ливнях ядерно-активными частицами, в частности, быстрыми нейтронами.

Присутствие значительного количества нейтронов в широких атмосферных ливнях, генерация их ядерно-активными частицами большой энергии, способность быстрых нейтральных частиц к образованию электронно-ядерных ливней, содержащих, в свою очередь, нейтральные и сильно ионизирующие частицы — все эти экспериментальные факты находят своё объяснение в рамках гипотезы о ядерно-каскадном процессе¹⁹, развитой в последние годы советскими физиками⁵.

В свою очередь, эти факты являются дополнительным подтверждением объективности существования ядерно-каскадного процесса и его роли в различных явлениях, наблюдаемых в космических лучах.

Л. Э.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Luke C. L. Yuan, Phys. Rev. **74**, 504 (1948).
2. Luke C. L. Yuan, Phys. Rev. **76**, 1267 (1949).
3. G. Cocconi, V. Cocconi-Tongiorgi a. Greisen, Phys. Rev. **74**, 1867 (1948).
4. Г. Жданов и А. Любимов, ДАН СССР **55**, 119 (1947).
5. Н. Биргер, В. Векслер, Н. Добротин, Г. Зацепин.

- Л. Курносова, А. Любимов, И. Розенталь, Л. Эйдус, ЖЭТФ **19**, 826 (1949).
6. Н. Биргер и Л. Эйдус, ДАН СССР **65**, 819 (1949).
 7. G. Sossioni, V. Sossioni-Tongiorgi, Phys. Rev. **76**, 318 (1949).
 8. V. Sossioni-Tongiorgi, Phys. Rev. **76**, 517 (1949).
 9. В. Л. Гинзбург, Сборник «Мезон», Гостехиздат, 1947 г.
 10. C. G. Montgomery and Tobey, Phys. Rev. **76**, 1478 (1949).
 11. R. D. Sard, W. B. Ittner, A. M. Conforto, M. Crouch, Phys. Rev. **74**, 97 (1948).
 12. R. D. Sard, A. M. Conforto, M. Crouch, Phys. Rev. **76**, 1134 (1949).
 13. Г. Т. Зацепин и Л. И. Сарычева, ДАН СССР **69**, 635 (1949).
 14. Успехи Физических Наук, **37**, 114 (1949).
 15. V. Sossioni-Tongiorgi, Phys. Rev. **75**, 1532 (1949).
 16. J. S. Levinger, Phys. Rev. **75**, 1540 (1949).
 17. Л. Н. Кораблёв, А. Л. Любимов, А. Т. Невраев, ДАН СССР **68**, 273 (1949).
 18. Brown and McKay, Phys. Rev. **76**, 1034 (1949).
 19. Г. Т. Зацепин, ДАН СССР **67**, 993 (1949).
-