

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

**ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫЕ ЛИВНИ
И ЯДЕРНО-КАСКАДНЫЙ ПРОЦЕСС *)**

Н. Г. Биргер и И. Л. Розенталь

Излагая современную точку зрения на картину прохождения космических лучей через атмосферу, Пууэлл нигде не упоминает о работах советских физиков, впервые систематически исследовавших неэлектромагнитные процессы, происходящие при взаимодействии частиц большой энергии с веществом. На основе этих исследований советскими физиками ещё в 1948—1949 гг.^{128, 129} была предложена схема основных процессов, вызываемых космическим излучением. Эта схема основывалась на результатах изучения электронно-ядерных и широких атмосферных ливней.

В настоящем дополнении изложены вкратце результаты опытов, позволивших с большим основанием, чем по данным, использованным у Пууэлла, наметить общую картину. Помимо этого специальный параграф дополнения посвящён работе советских авторов по изучению механизма распада μ -мезонов.

1. ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫЕ ЛИВНИ

а) Открытие электронно-ядерных ливней

Существенная роль неэлектромагнитных процессов была обнаружена в опытах, выполненных в 1945 г. Г. Б. Ждановым и А. Л. Любимовым¹³⁰. С помощью установки, изображённой на рис. 43, а, измерялся высотный ход ливней под 10 см свинца; одновременно определялся также высотный ход проникающей компоненты космического излучения. Полученный результат представлен на рис. 43, б. Из рисунка 43, б видно, что число ливней под свинцом растёт с высотой значительно быстрее, чем проникающая компонента. Из сопоставления высотных зависимостей вытекает, что ливни под свинцом не могут быть полностью объяснены элек-

*) См. примечание на стр. 15.

ромагнитным взаимодействием μ -мезонов жёсткой компоненты. В то же время контрольные опыты показали, что на уровне моря практически все ливни под свинцом являются δ -ливнями и, следовательно, уже на высоте около 4 км над уровнем моря около половины всех регистрируемых ливней не может быть объяснено электромагнитными процессами. Такие ливни получили в дальнейшем название электронно-ядерных ливней.

В дальнейшем высотный ход ливней изучался в широком интервале высот (вплоть до 23 км) с помощью различных установок 131 , 132 . Было показано, что высотный ход ливней можно представить в виде экспоненты с

показателем $\mu = \frac{1}{120} \text{ с.м}^2/\text{г.}$

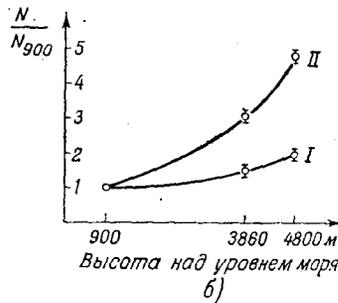
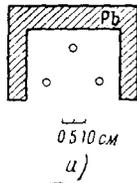


Рис. 43 а) Установка для определения изменения с высотой числа ливней под 14 см свинца. б) Сравнение высотного хода жёсткой компоненты (кривая I) и ливней под 14 см свинца (кривая II).

Последующие затем опыты были посвящены исследованию природы этих ливней и связи их с различными явлениями, происходящими в космических лучах.

Эти исследования проводились главным образом на высокогорной станции (3860 м) сотрудниками лаборатории ФИАН под руководством Н. А. Добротина, а в первый период и В. И. Векслера.

б) Состав электронно-ядерных ливней

Для понимания процессов, приводящих к появлению электронно-ядерных ливней, существенным является вопрос об их составе.

Уже в первых опытах со счётчиками 129 было показано, что электронно-ядерные ливни состоят как из мягких, так и из проникающих частиц.

В дальнейшем исследования с камерой Вильсона, помещённой в магнитное поле 133 , а также с помощью годоскопических установок 134 показали, что мягкая компонента электронно-ядерных ливней состоит из электронов и фотонов, а проникающая компонента — из протонов и мезонов (как теперь известно из всей

совокупности данных, мезоны, входящие в состав электронно-ядерных ливней, являются π -мезонами). В некоторых случаях проникающие частицы, образованные в электронно-ядерных ливнях, в свою очередь, создают в установке вторичные электронно-ядерные ливни. Такие случаи наблюдались как в камере Вильсона, содержащей свинцовые и угольные пластинки¹⁸³, так и в годоскопической установке¹⁸⁴. Таким образом, часть проникающих частиц является ядерно-активной. Смешанный состав ливней прямо указывал на то, что электронно-ядерные ливни не могли явиться результатом электромагнитного взаимодействия частиц большой энергии с веществом, а образовались при взаимодействии космических частиц с ядрами атомов вещества. Полученные снимки ливней, образованных в тонких угольных и свинцовых пластинах внутри камеры Вильсона¹⁸⁵, также подтверждают «взрывной» характер образования электронно-ядерных ливней.

Описываемые в разделе 7 обзора Поуэлла проникающие ливни являются по существу теми же электронно-ядерными ливнями, в которых благодаря особенностям применяемых для регистрации установок выделена только их проникающая часть.

в) Переходной эффект плотности и распад частиц, генерирующих электронно-ядерные ливни

Существование в электронно-ядерных ливнях вторичных ядерно-активных частиц может явиться причиной так называемого переходного эффекта плотности. Этот эффект играет, с одной стороны, важную роль для интерпретации многих результатов и, с другой стороны, доказывает существование ядерно-каскадного процесса (см. ниже).

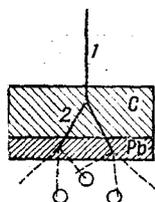


Рис 44. Схема, поясняющая существование эффекта плотности.

Рассмотрим кратко сущность переходного эффекта плотности. Предположим, что в электронно-ядерном ливне генерируются две и более ядерно-активные частицы. В таком случае будет наблюдаться различие в коэффициентах поглощения ливнегенерирующей компоненты в воздухе и в плотном веществе даже с тем же значением атомного номера, что и для воздуха. Действительно, примем, что как в воздухе, так и в плотном веществе первичная частица создаёт несколько вторичных ядерно-активных частиц. Если ядерно-активная частица попадает на установку из воздуха, то будет в основном регистрироваться ливни, образованные одиночными ядерно-активными частицами (в воздухе ядерно-активные частицы успеют разойтись друг от друга).

Если же над установкой расположен слой плотного вещества, то могут наблюдаться случаи одновременного образования в установке двух или нескольких электронно-ядерных ливней (рис. 44)

и, следовательно, в зависимости от соотношения вероятности регистрации двойного и одиночного ливня будет обнаружено определенное различие в коэффициентах поглощения в воздухе и в плотном веществе. Поглощение в плотном веществе может оказаться как больше, так и меньше поглощения в воздухе. Подробный анализ переходного эффекта был проведен в обзорной работе по электронно-ядерным ливням¹²⁹, а также в статьях М. И. Подгорецкого¹³⁶ и др.

Последний окончательно установил, что экспериментальные данные доказывают существование переходного эффекта и, следовательно, в электронно-ядерных ливнях иногда образуются две и более ядерно-активные частицы.

Переходной эффект плотности существенно сказывается на интерпретации компенсационных опытов, проведенных для исследования стабильности ядерно-активных частиц, создающих электронно-ядерные ливни.

Идея поставленных ещё в 1946—1947 гг. В. И. Векслером, Л. В. Курносовой и А. Л. Любимовым¹³⁷ опытов сводится к сравнению числа ливней, регистрируемых на двух высотах, причём на большей высоте над установкой помещался слой плотного вещества, близкого к воздуху по атомному номеру, компенсирующий по массе столб воздуха между обеими высотами. Если среди ливнеобразующих частиц имелись бы нестабильные частицы, то под плотным веществом на большей высоте было бы зарегистрировано большее число ливней, чем на меньшей высоте. Это и наблюдалось на опыте.

Однако наличие переходного эффекта плотности может привести, при определённых условиях опыта, к такому же результату. Анализ условий, осуществлённых в аналогичных опытах, показал, что переходной эффект плотности должен был бы только подчеркнуть распад ливнеобразующих частиц¹³⁸. Следовательно, уже в этих работах было получено указание на распад по крайней мере части ливнеобразующих частиц.

Более строго вывод о распаде следует из опытов¹³⁹, проведенных в условиях, свободных (или почти свободных) от влияния переходного эффекта, а именно, когда слой поглотителя над установкой значительно превышает пробег вторичных ядерно-активных частиц (в качестве плотного вещества использовалась вода в озере, расположенном на высоте 3860 м). Авторы получили, что коэффициент поглощения в воде $\frac{1}{\mu} = 170 \pm 10 \text{ г/см}^2$, тогда как в воздухе $\frac{1}{\mu} = 123 \pm 6 \text{ г/см}^2$. Найденное различие в коэффициентах поглощения в воде и в воздухе свидетельствует о распаде по крайней мере части ливнеобразующих частиц. Естественно предположить, что распадающимися ядерно-активными частицами являются π -мезоны.

г) Связь электронно-ядерных ливней с широкими атмосферными ливнями

Нестабильный характер части ливнеобразующих частиц указывает на вторичное происхождение ядерно-активных частиц в атмосфере. Этот же вывод следует из существования связи между электронно-ядерными и широкими атмосферными ливнями. Так, ещё в первых опытах по изучению электронно-ядерных ливней¹³⁹ было показано, что в некоторых случаях ливни под свинцом сопровождаются широкими атмосферными ливнями. С другой стороны, связь электронно-ядерных и широких атмосферных ливней более подробно изучалась Г. Т. Зацепиным и Л. И. Сарычевой¹⁴⁰ с помощью установки, изображённой на рис. 45. В работе было

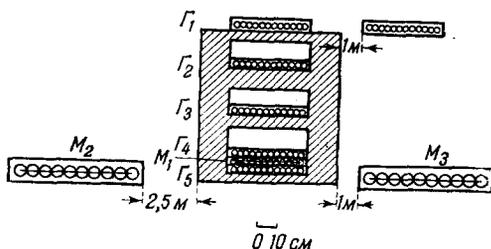


Рис. 45. Схема установки для изучения ливнеобразующей способности проникающих частиц широких атмосферных ливней.

показано, что проникающие частицы широких атмосферных ливней обладают значительно большей ливнеобразующей способностью, чем обычные μ -мезоны жёсткой компоненты. Оценка числа ядерно-активных частиц в широких ливнях приводит к значению от 0,1 до 1% от общего числа электронов в ливне.

Вторичный характер частиц, создающих электронно-ядерные ливни, подтверждается ещё и тем, что около половины этих частиц являются нейтральными¹⁴⁹.

Вторичный характер ядерно-активных частиц, образование электронно-ядерных ливней в плотных веществах с различным атомным номером¹⁸⁵ (графит, свинец) показывают, что и в воздухе происходит создание электронно-ядерных ливней.

д) Изучение электронно-ядерных ливней в стратосфере

Опыты С. Н. Вернова¹⁴¹ с сотрудниками по выяснению природы космических лучей в стратосфере показали, что мягкая компонента на больших высотах состоит из фотонов и электронов. (Такой вывод был сделан как из наличия большого переходного эффекта мягкой компоненты, характерного для электронов, так и из способности к ливнеобразованию, которая оказалась того же порядка, что и ожидаемая для электронов и фотонов.) Опыты по определению ионизации, создаваемой мягкой компонентой в стратосфере, обнаружили¹⁴¹, что энергия мягкой компоненты превы-

шает по крайней мере в два раза энергию, передаваемую электронам за счёт распада обычных мезонов (ещё в 1940 г. Д. В. Скобельцыным и С. Н. Верновым¹⁴² на основании опытов К. Алексеевой¹⁴³ было указано на невозможность объяснить всю энергию, выделяемую мягкой компонентой на ионизацию, только за счёт электронов распада).

Таким образом, при прохождении через атмосферу первичные частицы должны создавать электронно-фотонную компоненту, так как специальные опыты Вернова с сотрудниками¹⁴⁴ показали, что сами электроны не входят в состав первичной компоненты.

В стратосфере (вплоть до высоты ~ 23 км) изучался характер ливней, создаваемых первичными частицами в свинце и алюминии¹⁴⁵. Было показано, что ливни состоят из электронно-фотонной и проникающей компонент. На основании этого был сделан вывод, что при взаимодействии с веществом первичные частицы большой энергии создают электронно-ядерные ливни.

Таким образом, вся совокупность опытов, проводимых в атмосфере, указывала на то, что именно электронно-ядерные ливни являются источником мягкой компоненты космических лучей.

II. ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

Исследования широких атмосферных ливней, проводимые в течение последних лет под руководством акад. Д. В. Скобельцына и Г. Т. Зацепина, показали, что и в развитии широких атмосферных ливней существенную роль играют неэлектромагнитные процессы.

Основные факты, приведшие к такому выводу, состоят в следующем.

1. Наблюдаемое пространственное распределение широких атмосферных ливней значительно шире ожидаемого по каскадной теории¹⁴⁶.

2. В составе широкого атмосферного ливня имеются проникающие частицы, число которых составляет около 2 % от числа электронов в центральной области ливня, причём энергия, несомая проникающими частицами, сравнима с полной энергией ливня¹⁴⁷. Появление проникающих частиц не укладывается в рамки электромагнитной (каскадной) теории широких ливней.

3. Значительная часть проникающих частиц является ядерно-активной, способной образовывать электронно-ядерные ливни¹⁴⁸.

На основе этих фактов, учитывая уже известный процесс образования электронно-ядерных ливней, Г. Т. Зацепиным в 1948 г.¹²⁸ была высказана гипотеза о ядерно-каскадном процессе, приводящем при очень больших энергиях первичных частиц к образованию в атмосфере широкого ливня. Суть этой гипотезы заключается в следующем.

Первичные частицы космического излучения, попадая в атмосферу, взаимодействуют с ядрами воздуха с сечением порядка геометрического сечения ядра, создавая при этом электронно-ядерный ливень, состоящий из мезонов и нуклеонов больших энергий и фотонов или электронов (в 1948 г. вопрос о происхождении мягкой компоненты электронно-ядерных ливней оставался открытым, хотя на основании косвенных соображений и казалось более вероятным, что первичными являются фотоны). Проходя через атмосферу, ядерно-активные частицы вызывают вторичные электронно-ядерные ливни до тех пор, пока энергия ядерно-активных частиц не станет меньше некоторого «порогового» значения. Это значение энергии, повидимому, $\sim 5 \cdot 10^9$ — 10^{10} эв. Образованная в электронно-ядерных ливнях электронно-фотонная компонента, размножаясь в обычных каскадных процессах, создаёт в атмосфере лавины. Рассмотренная гипотеза позволила объяснить целый ряд наблюдаемых при изучении широких ливней, фактов, которые не укладывались в рамки обычной каскадной теории.

При меньших энергиях первичных частиц ядерно-каскадный процесс прекращается уже после малого числа ядерных каскадов. Образованные в электронно-ядерных ливнях π -мезоны, распадаясь налету, превращаются в μ -мезоны, которые в этом случае будут наблюдаться как одиночные частицы из-за быстрого затухания электронно-фотонной лавины.

III. РАСПАД μ -МЕЗОНОВ

До самого последнего времени (1948 г.) считалось, что μ -мезон распадается на электрон и одно нейтрино*). Для проверки этого предположения Г. Б. Ждановым и А. А. Хайдаровым в 1948 г.¹⁴⁸ было проведено на высоте около 4 км исследование поглощения продуктов распада в различных веществах методом запаздывающих совпадений. Схема использованной установки изображена на рис. 46. В этой работе остановившиеся мезоны регистрируются группой счётчиков I, а электроны распада регистрируются группами II и III, включёнными в запаздывающие ветви

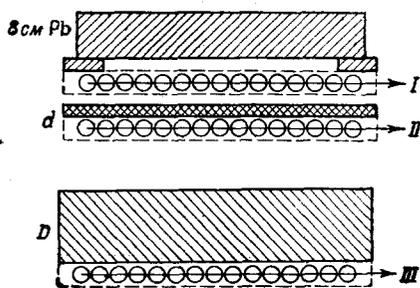


Рис. 46. Установка Г. Жданова и А. Хайдарова для изучения спектра электронов распада.

*) Следует заметить, что первые указания на то, что схема распада μ -мезона на электрон и одно нейтрино не верна, были получены К. Алексеевой¹⁴² ещё в 1940 г.

схемы совпадений. Мезоны останавливались в фильтре d ; кривая поглощения электронов распада исследовалась путём изменения толщины фильтра D . Полученная на опыте зависимость числа запаздывающих совпадений от толщины свинцового фильтра D (кривая 1) или толщины графитного фильтра (кривая 2) представлена на рис. 47. Различие кривых показывает, что образующиеся при распаде частицы испытывают также неионизирующие потери и, следовательно, являются электронами, а не мезонами малых масс (порядка нескольких m_e).

Полученные таким образом кривые поглощения позволяют решить вопрос о правильности схемы распада μ -мезона на две частицы (электрон и одна нейтральная частица). Для этой цели нанесена расчётная кривая поглощения в графите электронов с энергией 50 Мэв (рис. 47, кривая 3). Такая кривая должна была получиться, если бы оказалась правильной схема распада μ -мезона на электрон и нейтрино.

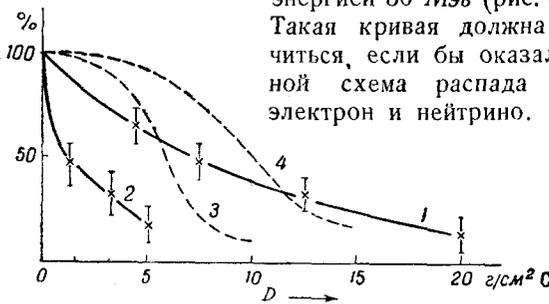


Рис. 47. Кривые поглощения электронов распада в фильтре D : 1 — экспериментальная кривая поглощения в графите; 2 — кривая поглощения в свинце; 3 — расчёт поглощения в графите в предположении, что все электроны распада имеют энергию 25 Мэв; 4 — расчёт поглощения в графите в предположении, что все электроны распада имеют энергию 50 Мэв.

Как видно из рис. 47, невозможно согласовать экспериментальную кривую (2) с предположением о распаде μ -мезона на две частицы. Однако полученный вид спектра просто объяснить предположением о распаде μ -мезона на три частицы (электрон и две нейтральные).

Авторы анализируют две схемы распада:

$$\mu \rightarrow e + 2\nu,$$

$$\mu \rightarrow e + \nu + \mu^0$$

(ν — нейтрино, μ^0 — нейтральный мезон), и приходят к такому заключению, что обе схемы распада могут осуществиться, если предположить, что масса нейтрального мезона $m_{\mu^0} < 70 m_e$. Первая из приведённых выше схем представляется более естественной, так как не требует существования новых гипотетических частиц помимо нейтрино.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

118. Л. Мысовский, П. Чижов, *Zeits. f. Physik* **44**, 408 (1927).
119. Д. Иваненко, *Nature* **133**, 981 (1934); И. Тамм, *Nature* **133**, 981 (1934); *Sov. Physik* **10**, 567 (1936).
120. Д. Скобельцын, *Zeits. f. Physik* **54**, 686 (1929).
121. А. Мигдал, И. Померанчук, *ДАН* **27**, 652 (1940).
122. А. Балдин, В. Михайлов, *ЖЭТФ* **20**, 1057 (1950).
123. Д. Алексеев, Г. Зацепин, И. Морозов, *ДАН* **52**, 375 (1948).
124. С. Беленький. Лавинные процессы в космических лучах, Гостехиздат, 1948.
125. Д. Иваненко, А. Соколов, *ДАН* **58**, 1329 (1947).
126. Н. Добротин, Я. Граевская, Н. Григоров, С. Никольский, Д. Раппопорт, *ДАН* **77**, 3 (1951); С. Азимов, Н. Биргер, Н. Добротин, Г. Жданов, Ю. Кокурин, С. Славатинский, *ДАН* **78**, 3 (1951).
127. «Мезон», Сборник статей, Гостехиздат, 1947.
128. Г. Зацепин, *ДАН* **57**, 993 (1949) (впервые доложено на семинаре ФИАН в 1948 г.).
129. Н. Биргер, В. Векслер, Н. Добротин, Г. Зацепин, Л. Курносова, А. Любимов, И. Розенталь, Л. Эйдус, *ЖЭТФ* **19**, 826 (1949).
130. Г. Жданов, А. Любимов, *ДАН* **55**, 119 (1947).
131. Л. Курносова и В. Тихонова, *ДАН* **69**, 535 (1949).
132. К. Алексеева, С. Вернов, *ДАН* **62**, 199 (1948).
133. Н. Биргер, Л. Эйдус, *ДАН* **65**, 819 (1949); Н. Биргер, Г. Жданов, С. Славатинский, В. Полюнов, *ЖЭТФ* **20**, 478 (1950).
134. Л. Кораблёв, А. Любимов, С. Невраев, *ДАН* **68**, 2 (1949).
135. С. Азимов, А. Горбунов, Н. Биргер, *ДАН* **65**, 625 (1949); С. Азимов, В. Гусева, *ЖЭТФ* **21**, 569 (1951).
136. М. Подгорецкий, А. Барчуков, Д. Ракитин, *ДАН* **73**, 685 (1950); М. Подгорецкий, *ЖЭТФ* **21** (1951).
137. В. Векслер, Л. Курносова, А. Любимов, *ЖЭТФ* **17**, 1026 (1947).
138. М. Подгорецкий, А. Любимов, М. Шербакова, Л. Эйдус, *ДАН* **75**, 15 (1950).
139. С. Азимов, В. Вишневский, Ю. Хилько, *ДАН* **78**, 231 (1951).
140. Г. Зацепин, Л. Сарычева, *ДАН* **69**, 635 (1949).
141. С. Вернов, *ЖЭТФ* **19**, 621 (1949).
142. Д. Скобельцын и С. Вернов, *ДАН* **26**, 1 (1940).
143. К. Алексеева, *ДАН* **26**, 27 (1940).
144. С. Бриккер, С. Вернов, Н. Григоров, И. Евреинова, Т. Чарахчьян, *ДАН* **61**, 629 (1948).
145. С. Вернов, А. Чарахчьян, *ДАН* **62**, 319 (1948).
146. Г. Зацепин, В. Мюллер, *ЖЭТФ* **17**, 939 (1947).
147. Г. Зацепин, С. Кучай, И. Розенталь, *ДАН* **61**, 41 (1948).
148. Г. Жданов, А. Хайдаров, *ДАН* **65**, 287 (1949).
149. Л. Кораблёв, А. Любимов, А. Миллер, *ДАН* **61**, 633 (1948).