



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория теоретической физики

С346

Г-427

С.С. Герштейн

1142

МЕЗОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук

Дубна 1962 год

С.С. Герштейн

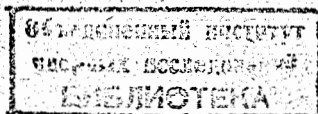
1142

С 346

Г-427

МЕЗОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук



Дубна 1962 год

1862
8981

В настоящее время изучена довольно большая область физических явлений, связанных с процессами, происходящими в мезоатомах и мезомолекулах. В то время как обычные атомно-молекулярные явления, как правило, не влияют на протекание ядерных реакций, характерная особенность мезомолекулярных явлений, делающая изучение их особенно интересным, заключается в том, что они могут существенно определять целый ряд специфических ядерных процессов. Таковыми процессами являются катализ ядерных реакций в водороде, захват отрицательных мезонов, возбуждение ядер при мезоатомных переходах в тяжелых мезоатомах и ряд других. Настоящая диссертация посвящена рассмотрению мезомолекулярных процессов, связанных в основном с двумя первыми из перечисленных выше процессов^{х)}.

Как известно, попадая в вещество, μ мезоны замедляются и за время, значительно меньшее времени их жизни, достигают основного состояния. Особенностью мезоатомов водорода является их электронейтральность. Радиус боровской орбиты μ мезоатома водорода $a_{\mu} = 2,56 \cdot 10^{-11}$ см значительно меньше атомных размеров. Поэтому поведение в веществе мезоатомов водорода во многом аналогично поведению медленных нейтронов. Мезоатомы водорода "свободно" проходят через электронную оболочку атомов и способны приближаться к другим ядрам на расстояния порядка мезоатомных. Это обуславливает целый ряд мезомолекулярных явлений:

1) Переходы между уровнями сверхтонкой структуры в мезоатомах $p\mu$ и $d\mu$, происходящие благодаря мезонному обмену между ядрами при столкновениях $p\mu + p$ и $d\mu + d$. Эти переходы приводят к деполаризации μ^- мезонов и изменяют в несколько раз вероятности захвата мезонов в водороде и дейтерии. Они могут также существенно влиять на катализ ядерных реакций.

2) Переход μ мезона от легкого изотопа водорода к тяжелому, скажем $p\mu + d \rightarrow d\mu + p$. Вследствие различия в приведенных массах (энергиях связи), эти переходы в обычных условиях необратимы по энергетическим соображениям. Вероятность таких процессов, естественно, пропорциональна концентрации тяжелого изотопа. Однако уже при концентрациях порядка 0,1% она оказывается существенно больше вероятности всех конкурирующих процессов, и наблюдается практически полный переход μ мезонов к тяжелому изотопу.

3) Образование мезомолекул водорода (точнее, мезомолекулярных ионов) $pp\mu$, $pd\mu$, $dd\mu$ и т.д.

^{х)} Возбуждение ядер при переходах в тяжелых мезоатомах подробно рассмотрено в работах Д.Ф. Зарецкого и его сотрудников.

Образование мезомолекул $pp\mu$ существенно влияет на захват μ мезона протоном, а при наличии малой примеси дейтерия конкурирует с переходом μ мезона от протона к дейтрону. Образование мезомолекул $pd\mu$, $dd\mu$ и т.д. приводит к возможности осуществления подбарьерных ядерных реакций между изотопами водорода, входящими в состав мезомолекулы. При этом в мезомолекулах наряду с обычными каналами реакции открываются новые возможности. Например, энергия реакции может быть отдана μ мезону конверсии, пойти на образование электронно-позитронных пар и т.д. Эти явления могут быть использованы для экспериментального изучения мезомолекул.

4) Переходы мезонов к ядрам других элементов. При наличии в водороде примесей других элементов с зарядом $Z > 1$ возможен необратимый переход мезонов к ядрам этих элементов. Механизм таких переходов рассмотрен в главе IV. Сечение их, как правило, весьма велико.

Со всеми перечисленными процессами конкурирует распад μ мезона, происходящий с вероятностью $\lambda_0 = 0,45 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$.

В первой главе диссертации приводится обзор теоретических и экспериментальных работ, связанных с мезомолекулярными явлениями. Впервые идея о возможности существования мезомолекул водорода была высказана независимо Франком^{/1/}, А.Д.Сахаровым^{/2/} и Я.Б.Зельдовичем^{/3/} в связи с рассмотрением катализа ядерных реакций, вызываемых μ -мезонами в водороде^{x)}. Первые подробные оценки связанных с этим процессом мезомолекулярных явлений были проведены Я.Б.Зельдовичем^{/3/}. Экспериментальное открытие μ катализа, сделанное группой Альвареса^{/4/}, стимулировало появление дальнейших теоретических и экспериментальных работ. (Подробный обзор результатов, полученных до 1960 года, содержится в работе^{/5/}).

В работе Я.Б.Зельдовича и А.Д.Сахарова^{/6/} была приведена первая оценка сечения перехода μ мезона от протона к дейтрону и на основании ее объяснена зависимость выхода ядерного катализа от концентрации дейтерия (см. также^{/7,8/}). Однако, ни оценка^{/6/}, основанная на соображениях размерности, ни оценки^{/7,8/}, полученные в борновском приближении, не могли считаться достаточно точными (между собой они отличались на два порядка). Для получения аккуратных оценок необходимо было учесть различие в энергиях связи мезоатомов $p\mu$ и $d\mu$, происходящее из-за различия в приведенных массах μ мезона у протона и дейтрона, т.е., по существу, выйти за рамки справедливого для обычных молекул

x) На возможность мезонного катализа ядерных реакций указывал также М.А.Марков (не опубликовано).

адиабатического приближения. В связи с тем, что отношение масс μ мезона и протона не мало, поправки к адиабатическому приближению существенно влияют также на спектр мезомолекул (например, некорректный учет этих поправок привел в^{/9/} к неправильным заключениям относительно основного состояния мезомолекул). В работе^{/10/} был развит метод, с помощью которого можно было получить с точностью m_μ/M_p поправки к адиабатическому приближению. Полученная в^{/10/} система связанных уравнений использовалась во всех дальнейших расчетах сечений переходов и спектров мезомолекул^{/11-14/}.

Механизмы образования мезомолекул обсуждались впервые в работе Я.Б.Зельдовича^{/3/}. Из оценок^{/3/} следовало, что наиболее эффективным является 0-0 переход на резонансный уровень мезомолекулы с конверсией на атомном электроны. Однако, получающаяся при этом вероятность образования мезомолекул оказалась существенно меньше экспериментальной. Более поздние оценки 0-0 перехода, сделанные Джексоном^{/8/}, содержали грубую ошибку (см. § 8) и давали для вероятности образования мезомолекул величину на несколько порядков большую, чем правильная оценка^{/3/}. В качестве другого, более эффективного механизма образования мезомолекул в работе^{/6/} был указан электрический дипольный переход E1. Этот переход был связан с существованием в системе из μ мезона и двух ядер неодинаковой массы дипольного момента, возникающего благодаря тому, что центр заряда в такой системе не совпадает с центром инерции. Указанный механизм не мог объяснить довольно большой вероятности образования мезомолекулы $pp\mu$, состоящей из ядер одинаковой массы. В работе^{/15/} было замечено, что дипольный момент системы из μ мезона и двух ядер содержит наряду с членом, указанным в^{/6/}, также член, связанный с распределением заряда μ мезона и отличный от нуля для случая мезомолекул с одинаковыми ядрами. В^{/15/} было указано, что мезомолекулы из одинаковых ядер должны образовываться из состояния отталкивания Σ_u (с мезонной функцией нечетной относительно перестановки ядер). Вычисленная в^{/15/} вероятность образования мезомолекул $pp\mu$ хорошо согласуется с экспериментальными данными. В дальнейшем указанный в^{/15/} механизм был применен в работе^{/11/} для расчета образования всех мезомолекул водорода и независимо в работе^{/12/} для расчета мезомолекул $pp\mu$, $pd\mu$ и $dd\mu$. В настоящее время наиболее полная сводка данных по мезомолекулам водорода содержится в работах^{/11,12/} и обзоре^{/5/}. Указанным вопросам посвящена глава II.

Экспериментальное исследование мезомолекулярных процессов было проведено в ряде различных лабораторий: в Беркли^{/4/}, Ливерпуле^{/16/}, институте Карнеги^{/17/}, в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{/18/}, в Университете Чикаго^{/19/}, Колумбийском университете^{/20/}, ЦЕРНе^{/21/}. Изложению и анализу результатов экспериментов посвящен § 2.

Помимо вопросов, связанных с мезонным катализом ядерных реакций, мезомолекулярные процессы представляют существенный интерес в связи с изучением элементарного процесса взаимодействия $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ в водороде. В данном случае наиболее важными оказываются различные эффекты сверхтонкой структуры (С.Т.С.) мезоатомов и мезомолекул.

В работах ^{/22, 23/} была вычислена вероятность перехода между уровнями С.Т.С. мезоатома водорода на основе указанного Я.Б.Зельдовичем механизма мезонного обмена. Большая вероятность перехода в нижнее состояние С.Т.С. ($F=0$), как следовало из ^{/22,23/}, должна была приводить к полной деполяризации μ^- -мезонов в водороде. Это было подтверждено опытами, проведенными в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ ^{/24/}.

Из-за полной деполяризации μ^- -мезонов оказалось невозможным наблюдение в водороде угловой асимметрии нейтронов, образующихся в реакции $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$, т.е. проведение опытов, которые согласно ^{/25,26/} могли дать ценные сведения о вариантах слабого взаимодействия $(\mu\nu)(pn)$. С другой стороны, в работе ^{/27/} было показано, что благодаря переходам мезоатомов $p\mu$ в нижнее состояние С.Т.С. оказывается возможно экспериментально определить относительный знак векторного и аксиально-векторного вариантов взаимодействия в μ захвате.

Спиновая структура мезомолекул $pp\mu$ и ее влияние на вероятность захвата μ мезонов в водороде рассматривалась в работах ^{/15,28,29/}. В работе ^{/30/} были рассмотрены переходы между уровнями С.Т.С. в мезоатомах дейтерия и показано, что они существенно влияют на захват μ мезонов в дейтерии и на выход μ катализа в смеси водорода с дейтерием. Влияние спинового состояния мезоатома $p\mu$ на сечение рассеяния $p\mu + p$ рассматривалось в работе ^{/31/}.

Систематическое изложение эффектов С.Т.С. и вопросов, связанных с захватом μ мезонов в водороде и дейтерии, приведено в главе III.

В главе IV рассматриваются переходы отрицательных мезонов от водорода к ядрам других элементов. Механизм этих переходов, объясняющий большие сечения, указан в работах ^{/32,33/}. Одновременно в главе IV рассмотрен ряд общих вопросов: нарушение теоремы Неймана-Вигнера ^{/34/} для задачи двух кулоновских центров, сопоставление термов изолированных и объединенного атомов и т.д.

В главе V рассмотрены некоторые механизмы образования мезоатомов в газах и диэлектриках. Приводится оценка вероятности распределения образующихся мезоатомов по квантовым числам (n, ℓ) ; делаются некоторые качественные заключения относительно сечений образования мезоатомов в зависимости от химической связи элементов.

Приведем в заключение основные результаты, содержащиеся в реферируемой работе.

Глава II.

1) Развита метод, позволяющий учесть с точностью до m_μ/M поправки к адиабатическому приближению в мезомолекулярных системах. Такой учет особенно важен для мезомолекул, состоящих из ядер неодинаковой массы, где различие в энергиях связи мезоатомов того же порядка величины, что и энергии связи мезомолекул. Выход за рамки адиабатического приближения в указанном порядке по m_μ/M приводит к системе двух связанных уравнений для радиальных функций (вместо одного уравнения Шредингера в адиабатическом приближении). Полученные уравнения описывают все типы движений в мезомолекулярных системах (§3).

2) Для мезомолекул с одинаковыми ядрами эффективные потенциалы (с учетом динамических поправок) аппроксимированы простыми функциями, что позволяет в аналитической форме найти волновые функции, уровни энергии, длины рассеяния и т.д. (§4).

3) Вычислены сечения перехода μ^- мезона от одного изотопа водорода к другому (§5).

Измеренная на опыте вероятность перехода $p\mu + d \rightarrow d\mu + p$
 $\lambda_e = 1,2^{+0,4}_{-0,2} \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ (согласно ^{/18/}) и $\lambda_e = (1,9 \pm 0,7) \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ (согласно ^{/20/}) хорошо согласуется с теоретическим значением $\lambda_e = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$.

4) Вычислены сечения упругого рассеяния мезоатома тяжелого изотопа водорода на ядре более легкого (§6). Полученные значения для сечения рассеяния $d\mu + p \rightarrow d\mu + p$ и $d\mu + d \rightarrow d\mu + d$ удовлетворительно описывают величину и частоту появления "щели" на конце трека μ мезона в водородных камерах, связанную с пробегом мезоатома $d\mu$ после перезарядки $p\mu + d \rightarrow d\mu + p$.

5) Вычислены спектры мезомолекул (§§ 4,7).

6) Указан эффективный механизм образования мезомолекул: электрический дипольный переход E1 на вращательный уровень мезомолекулы ($K=1$) с конверсией на атомном электроном. Проанализирована роль других переходов. Вычислены вероятности образования мезомолекул водорода (§8). Измеренная в ряде опытов ^{/18,20,21/} вероятность образования мезомолекул $pp\mu$

$$\lambda_{pp} = \begin{cases} 0,8^{+0,4}_{-0,2} \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1} / 18/ \\ (1,4 \pm 0,5) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1} / 20/ \\ (2,04 \pm 0,14) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1} / 21/ \end{cases}$$

хорошо согласуется с теоретическим значением: $\lambda_{pp} = (1,5 - 2,5) \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$

(см. табл. У1). Для мезомолекул $pd\mu$ и $dd\mu$ экспериментальные данные различных авторов ^{/18,20,21/} расходятся между собой, однако по порядку величины вероятности образования этих мезомолекул также согласуются с теоретическими оценками.

7) Рассмотрены переходы между уровнями мезомолекул (§ 9). В частности, показано, что мезомолекула $pp\mu$ должна с большой вероятностью остаться в ортосостоянии. (Этот факт весьма важен для захвата μ мезона в водороде).

Глава III.

1) Показано, что механизм мезонного обмена между протонами при столкновениях $p\mu + p$ приводит к быстрому переходу мезоатомов $p\mu$ в нижнее состояние сверхтонкой структуры (С.Т.С.) $F=0$ (с вероятностью порядка $10^9 - 10^{10}$ сек⁻¹ для жидкого водорода) (§ 10).

2) Предсказана полная деполяризация μ -мезонов в водороде (§ 12), что подтверждается с точностью 5% опытами, проведенными группой А.Е.Игнатенко в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Указанный факт делает невозможным наблюдение асимметрии нейтронов при захвате μ мезонов в водороде.

3) Показано, что для случая $(V-A)$ варианта взаимодействия переход в нижнее состояние С.Т.С. увеличивает в 4 раза вероятность захвата μ мезона протоном в мезоатоме $p\mu$ по сравнению со статистическим распределением по уровням С.Т.С. В то же время для $(V+A)$ варианта переход в $F=0$ не меняет вероятности захвата μ -мезона протоном (§ 12).

На основании этого было указано, что измерение вероятности μ захвата в водороде позволяет определить относительный знак V и A взаимодействий. Проведенные в 1962 году опыты по захвату μ мезонов в водороде ^{/36-38/} свидетельствуют в рамках гипотезы об ограниченной универсальности Ферми взаимодействия (V и A варианты) в пользу $(V-A)$ варианта.

4) Рассмотрено влияние образования мезомолекул $pp\mu$ на вероятность μ захвата в водороде. При этом очень существенным оказывается установленный в гл. II факт, что мезомолекулы $pp\mu$ образуются в ортосостоянии и за время жизни μ мезона не переходят в нижнее парасостояние, а также то, что переход в состояние $F=0$ предшествует образованию мезомолекул.

В предположении справедливости универсального Ферми взаимодействия экспериментальные данные ^{/36-38/} однозначно свидетельствуют в пользу сделанных выше заключений.

5) Рассчитано сечение перехода между уровнями С.Т.С. в мезоатомах

дейтерия при столкновениях $d\mu + d$. В жидком дейтерии за время жизни μ мезона происходит полный переход в нижнее состояние С.Т.С. (§ 13).

6) Показано, что благодаря переходу мезоатомов $d\mu$ в нижнее состояние С.Т.С. и упругому обменному рассеянию в этом состоянии μ мезоны в дейтерии практически полностью деполяризуются (§ 14).

7) Показано, что переход в нижнее состояние С.Т.С. увеличивает вероятность захвата μ мезонов в дейтерии примерно в 3 раза (§ 15).

8) Рассмотрена спиновая структура мезомолекул $pd\mu$ и $pt\mu$ и ее влияние на μ катализ (§ 16). Указано, что в смеси водорода и дейтерия при большой концентрации дейтерия переходы мезоатомов $d\mu$ в нижнее состояние С.Т.С. должны примерно в 2 раза увеличивать выход реакции катализа $p+d \rightarrow He_3$ с конверсией на μ мезоне.

Как указывают авторы работы ^{/20/}, их данные по вероятности образования мезомолекул $pd\mu$ могут быть согласованы с данными ^{/17/} только при учете указанного выше эффекта.

9) Отмечено, что эффективное сечение упругого рассеяния $p\mu + p$ в нижнем состоянии С.Т.С. может сильно отличаться от значения, вычисленного без учета С.Т.С. (§ 11). Предварительные экспериментальные данные о сечении рассеяния получены в работе В.П.Джелепова, П.Ф.Ермолова и др. ^{/18/}. Однако эти данные еще требуют уточнения и более тщательной интерпретации.

10) Учтено влияние молекулярной структуры водорода на процессы перехода между уровнями С.Т.С. (§ 17).

Глава IV.

1) Отмечается, что теорема Неймана-Вигнера о невозможности пересечения термов одинаковой симметрии не выполняется для случая электрона в поле двух кулоновских центров (как, впрочем, и для любой системы с разделяющимися переменными).

Установлено соответствие между термами электрона в поле двух неодинаковых ($Z_1 \neq Z_2$) кулоновских центров при больших и малых расстояниях между ядрами, т.е. определено, в какие термы объединенного атома переходят при сближении ядер термы изолированных атомов (§ 18).

3) Исследовано поведение термов при больших и малых расстояниях между ядрами.

4) Указано на наличие пересечений термов, отвечающих перезарядке при атомных столкновениях.

5) Указан механизм, объясняющий большие сечения переходов отрицательных мезонов от водорода к ядрам других элементов с $Z > 1$ (§ 19). Вычисленные значения для сечений переходов μ^- -мезонов к углероду и кислороду по порядку величины согласуются с экспериментальными /18,19,39/

6) Указано на отсутствие заметного перехвата μ^- -мезонов к гелию, что связано с отсутствием пересечений нижних термов в системе μHe и согласуется с экспериментами /39/. (§ 20).

7) Приводятся соображения в пользу того, что короткое время жизни μ^- -мезонов в жидком водороде может быть связано с особым механизмом перехода возбужденных μ^- -мезоатомов в нижние состояния за счет неупругих соударений 2-го рода $p\mu + p$ (§ 21).

Глава У.

1) Рассмотрен механизм адиабатического захвата отрицательных мезонов на мезоатомные орбиты в водороде. Приведена оценка для распределения вероятности захвата мезона на различные мезоатомные орбиты.

2) Показано, что часто встречающееся предположение о статистической $(2l+1)$ заселенности мезоатомных уровней неверно. В действительности максимальные l в случае адиабатического механизма захвата ограничены условием $l \leq (m_\mu / m_e)^{1/2}$, а в случае неадиабатического захвата наиболее эффективны $l \approx (m_\mu / m_e)^{1/3}$.

3) Указанное распределение хорошо согласуется с экспериментальными данными о среднем числе оже-электронов, наблюдающихся при образовании мезоатомов.

4) Указано, что в соединениях типа $LiF, NaCl$ и т.д. должны быть отклонения от Z закона в пользу галогена, что также подтверждается опытными данными.

Содержание диссертации изложено в работах /5/, /10/, /11/, /11a/, /15/, /18/, /18a/, /186/, /22/, /23/, /27/, /30-33/, /33a/, /35/.

Л и т е р а т у р а

1. F.C.Frank. Nature 160, 525 (1947).
2. А.Д.Сахаров. Отчет ФИАН (1948. Ссылка взята из 7).
3. Я.Б.Зельдович. ДАН, 95, 493 (1954).
4. L.W.Alvarez, H.Bradner, F.S.Crawford, Jr., J.A.Crawford, P.Falk-Vairant, M.L.Good, J.D.Gow, A.H.Rosenfeld, F.Solmitz, M.L.Stevenson, H.K.Ticho and R.D.Tripp. Phys.Rev. 105, 1127 (1957).

- 4a. M.Cresti, K.Gottstein, A.H.Rosenfeld and H.K.Ticho. U.C.R.L; 3782, с. 8 (1957) неопубликовано; см. D.West, Rep. Progr. Phys. XXI, 271 (1958).
5. Я.Б.Зельдович и С.С.Герштейн. УФН, 71, 581 (1960).
6. Я.Б.Зельдович, А.Д.Сахаров. ЖЭТФ, 32, 947 (1957).
7. T.J.Skytte. Philos. Mag. 2, 910 (1957).
8. J.D.Jackson. Phys. Rev. 106, 330 (1957).
9. H.Marschall and Th.Schmidt, Z.Phys. 150, 193 (1958).
10. С.С.Герштейн. ДАН, 117, 956 (1957).
11. В.Б.Беляев, С.С.Герштейн, Б.Н.Захарьев, С.П.Ломиев. ЖЭТФ, 37, 1652 (1959).
- 11a. В.Б.Беляев, С.С.Герштейн, Б.Н.Захарьев, С.П.Ломиев. Препринт ОИЯИ, Р-397.
12. S.Cohen, D.L.Judd, R.L.Riddell. Phys. Rev. 119, 19397 (1960).
13. M.Shimizu, Y.Mizuno, T.Jzuama. Progr. Theor. Phys. 20, 777 (1958); 21, 479 (1959).
14. T.Y.Wu, R.L.Rosenfeld and H.Sandstrom. Nucl. Phys. 16, 432 (1960).
15. Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 35, 649 (1958).
16. A.Ashmore, R.Nordhagen, K.Strauch and B.M.Townes, Proc. Phys. Soc. (London) 71, 161 (1958).
17. J.G.Fetkovich, T.H.Fields, G.B.Yodth, M.Derrick, Phys. Rev. Lett. 4, 579 (1960).
18. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Е.А.Кушниренко, В.И.Москалев, С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 42, 439 (1962).
- 18a. V.P.Dzheleпов, S.S.Gershtein, E.A.Kushnirenko, V.I.Moskalev, P.F.Yermolov, Nucl. Phys. 34, 424 (1962).
- 18b. V.P.Dzheleпов, M.Friml, S.S.Gershtein, YU. V. Katyshев, V.I.Moskalev, P.F.Yermolov. Proc. Inter. Conf. High Energy Phys. CERN (1962), p. 484.
- 18c. В.П.Джелепов. Атомная энергия (1962). См. специальный выпуск, посвященный памяти И.В.Курчатова.
19. M.Schiff. Nuovo Cim. 22, 66, (1961).
20. E.Bleser, L.Lederman, J.Rosen, J.Rothberg and E.Zavattini, Phys. Rev. Lett. 8, 128 (1962).
21. G.Konforto, S.Focardi, C.Rubia, E.Zavattini. (Preprint).
22. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 34, 463 (1958).
23. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 34, 893 (1958).
24. А.Е.Игнатенко, Л.Б.Егоров, Б.Халупа, Д.Чултэм. ЖЭТФ, 35, 894 (1958).
25. I.S.Shapiro, E.I.Dolinsky, L.D.Blokhintsev, Nucl.Phys. 4, 273 (1957).
26. Huang, Yang and Lee. Phys. Rev. 108, 1348 (1957).
27. Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 35, 821 (1958).
28. S.Weinberg. Phys. Rev. Lett. R, 575 (1960).
29. A.Halpern and N.Kroll (частное сообщение).
30. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 40, 688 (1961).
31. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 36, 1309 (1959).
32. С.С.Герштейн и В.Д.Кривченков. ЖЭТФ, 40, 1491 (1961).

33. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 43, 706 (1962).
- 33а. С.С.Герштейн. Препринт ОИЯИ Р-942 (1962).
34. J.V.Neuman, E.Wigner. Phys. ZS. 30, 467 (1929).
35. С.С.Герштейн. ЖЭТФ, 39, 1170 (1960).
36. R.H.Hildebrand. Phys. Rev. Lett.. 8, 34 (1962).
R.H.Hildebrand and J.H.Doede. Proc. Intern Conf.
High Energy Phys. CERN (1962), с. 418.
37. E.Bleser, L.Lederman, J.Rosen, J.Rothberg and Zavattini, Phys. Rev. Lett. 8, 288 (1962).
38. E.Bertolini, A.Citron, G.Gialanella, S.Focardi, A.Mukhin, C.Rubbia, S.Saporetti,
Proc. Intern. Conf. High Rnergy Phys: CESN, (1962), с. 421.
39. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Б.Понтекорво, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов,
В.И.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков. ЖЭТФ, 41, 1804 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 декабря 1962 года.