

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

539(048)

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР

(31 октября 1985 г.)

31 октября 1985 г. в конференц-зале Института физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

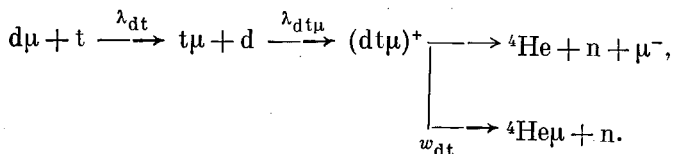
1. А. А. Воробьев. Мюонный катализ ядерных реакций синтеза.
2. М. В. Стабников. Новое в развитии голографических трековых детекторов.

3. В. С. Панасюк. Синхротроны нового типа как специализированные генераторы синхротронного и рентгеновского излучений.

Краткое содержание двух докладов приводится ниже.

539.175.3(048)

А. А. Воробьев. Мюонный катализ ядерных реакций синтеза. Чтобы осуществить реакцию синтеза ядер, например ядер трития и дейтерия, необходимо заставить эти ядра преодолеть кулоновский барьер. Возможным путем решения этой проблемы является нагрев среды до десятков миллионов градусов — метод, используемый в различных вариантах термоядерных установок. Наряду с этим в последнее время все интенсивнее обсуждается метод, в котором слияние ядер осуществляется практически при комнатной температуре под катализирующим воздействием отрицательных мюонов («холодный синтез»). В этом случае, упрощенно, имеет место следующая последовательность процессов:

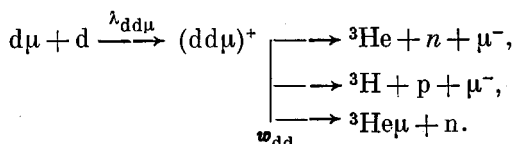


Остановившийся в дейтерий-тритиевой смеси отрицательный мюон захватывается на орбиту ядра трития или дейтерия, образуя соответственно $t\mu$ -атом или $d\mu$ -атом. В последующих столкновениях $d\mu$ -атома мюон переходит от ядра дейтерия к ядру трития. Скорость этого процесса обозначена величиной λ_{dt} . Затем со скоростью $\lambda_{dt\mu}$ образуется мезомолекула $(dt\mu)^+$. Эта молекула аналогична иону H_2^+ , но имеет в 200 раз меньшие размеры. Благодаря этому, ядра дейтерия и трития оказываются «запертыми» в объеме

радиусом $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ см, что позволяет им проникнуть через потенциальный барьер за время меньше 10^{-9} с. Немедленно вслед за слиянием наступает развал компаунд-ядра с выделением энергии $Q = 17,6$ МэВ. При этом мюон, как правило, освобождается и может вновь и вновь катализировать реакции синтеза. Так будет продолжаться до тех пор, пока мюон либо распадется (время жизни $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с), либо будет удержан ядром ${}^4\text{He}$ (w_{dt} — вероятность «прилипания» мюона к ${}^4\text{He}$).

Сколько циклов dt-синтеза должен катализировать один мюон, чтобы μ -катализ можно было бы использовать для получения энергии? Этот вопрос недавно исследовался в ЛИЯФ АН СССР Ю. В. Петровым¹. Ответ получен следующий. Говорить о рентабельности μ -катализа пока имеет смысл только в варианте использования уранового бланкета и только при условии, если число катализированных одним мюоном циклов dt-синтеза $X_c \geq 100$. При $X_c = 100$ возможности μ -катализа сравниваются с возможностями метода электроядерного бридинга. К тому же возможно объединение этих методов в одной установке.

Итак, каким же может быть реальное число циклов синтеза, катализируемых одним мюоном? И существует ли принципиальный предел, выше которого это число не может быть получено ни при каких условиях? Раньше казалось, что на второй вопрос существует определенный ответ. Еще в 1957 г. Дж. Джэксон и Я. Б. Зельдович² вычислили коэффициент прилипания мюона: $w_{\text{dt}} \approx 0,01$. Отсюда следовало, что $X_c \leq 100$. Позднее эти расчеты были повторены³. В них было учтено также, что во время торможения иона (${}^4\text{He}\mu$)⁺ может происходить «стряхивание» мюона. В результате было получено $X_c \leq 110$. Однако в самое последнее время неизбежность этого предела была поколеблена. В ЛИЯФ АН СССР был разработан метод измерения коэффициента прилипания мюона в реакции $d - \mu - d$ -синтеза:



Измерения⁴ дали следующий результат: $w_{\text{dd}}|_{\text{эксп}} = 0,122 \pm 0,003$. Экспериментальный результат оказался несколько ниже теоретического значения $w_{\text{dd}}|_{\text{теор}} = 0,147$, полученного в работе³. Это расхождение заставило теоретиков вновь вернуться к рассмотрению проблемы прилипания мюона. Группа Л. И. Пономарева выполнила новые расчеты (см.^{5, 6}), используя полученные ими к этому времени точные волновые функции $dd\mu$ - и $dt\mu$ -молекул. В результате было получено $w_{\text{dd}}|_{\text{теор}} = 0,122$ в точном согласии с экспериментом. Те же расчеты дали $w_{\text{dt}}|_{\text{теор}} = 0,58 \cdot 10^{-2}$, что соответствует предельному числу циклов синтеза $X_{c|\text{пред}} = 172$. К сожалению, до сих пор не сделано прямых измерений величины w_{dt} , и эта задача остается сегодня одной из самых важных в исследовании проблемы μ -катализа.

Ясно, что достичь предельное значение $X_{c|\text{пред}}$ можно лишь в том случае, если на один цикл синтеза будет затрачено время в сотни раз меньшее, чем время жизни мюона. Еще не так давно эта идея казалась абсолютно утопической. Это было связано с тем, что первой реакцией μ -катализа была открытая в 1956 г. Л. Альваресом⁷ реакция $d\mu + p \rightarrow (d\mu p)^+ \rightarrow {}^3\text{He} + \mu$. Скорость этой реакции оказалась небольшой: $\lambda_{d\mu p} < 10^7 \text{ с}^{-1}$ (*). Еще меньшая скорость была получена в реакции $d - \mu - d$ -синтеза при температуре жидкого водорода: $\lambda_{dd\mu} \simeq 10^5 \text{ с}^{-1}$. При таких скоростях реакции не могло быть и речи о практическом использовании μ -катализа. Поэтому интерес к μ -катализу постепенно угас.

*) Первое теоретическое описание μ -катализа было дано в работе⁸ Я. Б. Зельдовича еще в 1954 г. Эта теория достаточно точно описывает реакцию $d - \mu - p$ -синтеза.

Ситуация изменилась после обнаружения в Дубне⁹ резкой температурной зависимости величины $\lambda_{dd\mu}$ (рис. 1). Анализ этой зависимости привел дубненских теоретиков к выводу о существовании резонансного механизма образования $dd\mu$ -молекулы¹⁰. В этом механизме определяющим для скорости реакции имеет положение наиболее слабо связанного уровня мезомолекулы. Группа Л. И. Пономарева, развив методы прецизионного решения трехтельной кулоновской задачи, доказала наличие таких уровней как в $dd\mu$ -молекуле, так и в $dt\mu$ -молекуле. Результатом этих вычислений было

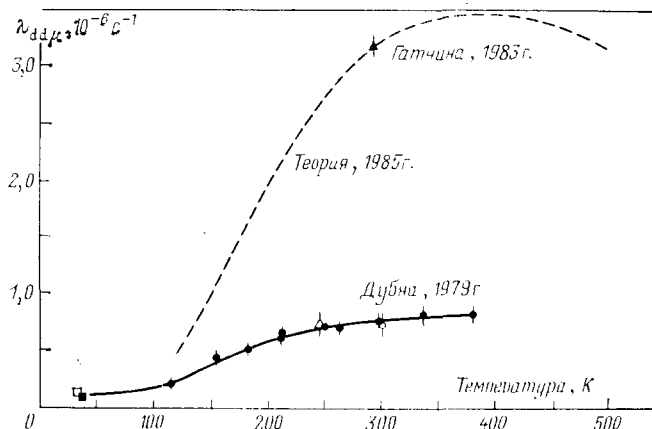


Рис. 1. Температурная зависимость скорости образования $dd\mu$ -молекул

предсказание высокой скорости образования $dt\mu$ -молекулы¹¹. И действительно, первый же эксперимент¹², в котором наблюдалась реакция $d - \mu - t$ -синтеза (Дубна, 1981), подтвердил это предсказание: $\lambda_{dt\mu\text{макс}} > 10^8 \text{ c}^{-1}$. Скорость изотопного обмена оказалась также высокой: $\lambda_{dt} = 2,9 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$.

Полученные в Дубне результаты послужили мощным толчком к дальнейшему изучению μ -катализа. Исследования велись в нескольких направлениях. Разработанный в ЛИЯФ экспериментальный метод оказался очень эффективным для изучения $d - \mu - d$ -синтеза. Эта реакция не является перспективной с точки зрения получения энергии. Однако физика процессов $d - \mu - d$ - и $d - \mu - t$ -синтеза очень похожа. В то же время $d - \mu - d$ -синтез много проще как для экспериментального исследования, так и для теоретической интерпретации данных, поскольку в этом случае основные процессы не затенены сопутствующими. Поэтому можно сказать, что $d - \mu - d$ -синтез является хорошим полигоном для проверки теории μ -катализа. В экспериментах ЛИЯФ были измерены с высокой точностью все основные параметры $d - \mu - d$ -синтеза. В частности, была определена скорость образования $dd\mu$ -молекулы (см. рис. 1, Гатчина, 1983). Этот результат вызвал оживленную дискуссию, поскольку он в 4 раза превышал дубненское значение $\lambda_{dd\mu}$. Однако группа ЛИЯФ повторила эксперимент в различных экспериментальных условиях и продемонстрировала устойчивость результата⁴. Недавно результат ЛИЯФ был подтвержден в эксперименте, выполненном на мезонной фабрике в Лос-Аламосе (США).

Тем временем группа Л. И. Пономарева усиленно работала над совершенствованием теории μ -катализа. Важным этапом было получение рекордной точности в вычислении энергии слабо связанных уровней $dd\mu$ - и $dt\mu$ -молекул ($-1,946 \pm 0,001 \text{ эВ}$ и $-0,634 \pm 0,001 \text{ эВ}$)¹³. Уже отмечалось, что эти уровни существенным образом определяют скорость μ -катализа. Следующей задачей было вычисление скорости $\lambda_{dd\mu}$ в рамках резонансного механизма образования $dd\mu$ -молекулы. Скрупулезные вычисления с учетом всех

деталей механизма реакции привели, наконец, к результату, показанному на рис. 1 штрихами. Превосходное согласие теории с экспериментом демонстрирует достигнутую сегодня высокую степень понимания процесса μ -катализа dd-синтеза.

Понятно, что эти достижения составляют солидную основу для завершающего этапа исследований — количественного описания μ -катализа dt-синтеза, и такая работа в настоящее время ведется. Однако здесь еще предстоит решить ряд проблем, которых в d — μ — d-синтезе не было; детально

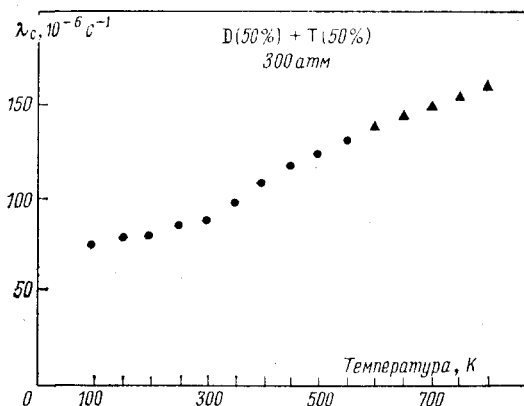


Рис. 2. Температурная зависимость скорости d — μ — t-синтеза

исследовать процесс перехвата мюона, выяснить роль тройных столкновений в образовании dt μ -молекул, исследовать процесс термализации t μ -атомов. Поэтому пока что основные сведения о d — μ — t-катализе поступают от экспериментаторов. Экспериментальные исследования ведутся в лабораториях LAMPF (США), TRIUMF (Канада), SIN (Швейцария) и в Ленинградском институте ядерной физики АН СССР.

Впечатляющие результаты были получены недавно ¹⁴ в группе С. Джонса, работающей на мезонной фабрике LAMPF. Эта группа исследовала выход нейтронов из облучаемой мюонами дейтерий-тритиевой смеси при давлении до 700 атм и температуре до 800 К. Оказалось, что с ростом давления и температуры скорость d — μ — t-синтеза растет (рис. 2) и уже достигла величины $\lambda_c = 1,6 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$. Экстраполируя это значение в область реально достижимых давлений и температур (в следующем эксперименте группа Джонса планирует достичь 2000 атм и 1000 К), можно ожидать $\lambda_c \geq 2 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$. А это означает, что если бы не было эффекта «прилипания» мюона к ядру ⁴He, то за время своей жизни мюон был бы способен катализировать более 400 актов dt-синтеза!

В этой ситуации очень важно выполнить прямые измерения коэффициента прилипания w_{dt} . Такие эксперименты готовятся в ЛИЯФ и в Лос-Аламосе. На сегодня существуют косвенные оценки величины по данным группы Джонса: $w_{dt} \approx 0,003$, что вдвое ниже теоретического предела. Если этот результат подтвердится, то получение числа актов синтеза $X_c \approx 200$ окажется реальным. Наконец, следует отметить недавнее сообщение группы Джонса о наблюдении 160 ± 10 актов синтеза, катализируемых одним мюоном в дейтерий-тритиевой смеси при температуре жидкого водорода.

Итак, исследования последних лет существенно изменили наши представления о мюонном катализе ядерных реакций синтеза. Главным событием явилось установление резонансного механизма образования dd μ - и dt μ -молекул, обеспечивающего высокую скорость катализа, особенно в случае d — μ — t-синтеза. Пока еще окончательно не установлено предельное

число актов dt -синтеза, катализируемых одним мюоном, но уже, видимо, можно утверждать, что это число не меньше 150. Это утверждение обязывает отнестись достаточно серьезно к мюонному катализу как к одному из потенциально возможных источников энергии.

Материалы доклада опубликованы в «Материалах XX зимней школы ЛИЯФ» (Ленинград, 1985).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrov Yu.— Nature, 1980, v. 285, p. 466.
2. Jackson J.— Phys. Rev., 1957, v. 106, p. 330.
Зельдович Я. Б.— ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 310.
3. Герштейн С. С. и др.— ЖЭТФ, 1981, т. 80, с. 1690.
4. Балин Д. В. и др.— Письма ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 318.
5. Богданова Л. Н. и др. Препринт ИТЭФ-37.— Москва, 1985.
6. Богданова Л. Н. и др. Препринт ОИЯИ Е4-85-425.— Дубна, 1985.
7. Alvarez L. W. et al.— Phys. Rev., 1957, v. 105, p. 1127.
8. Зельдович Я. Б.— ДАН СССР, 1954, т. 95, с. 493.
9. Быстрицкий В. М. и др.— ЖЭТФ, 1979, 49, 232.
Джелепов В. П. и др.— ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 1235.
10. Вессман Е. А.— Письма ЖЭТФ, 1967, т. 5, с. 113.
11. Виницкий С. И. и др.— ЖЭТФ, 1978, т. 74, с. 849.
12. Быстрицкий В. М. и др.— ЖЭТФ, 1981, т. 80, с. 1700.
13. Виницкий С. И. и др. Препринт ОИЯИ Р4-84-642.— Дубна, 1984.
14. Jones S. E. et al.— Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, p. 1757.