

см, что в сотни раз меньше ср. расстояний между ядрами в жидком и газообразном водороде ( $\sim 10^{-8}$  см). Поэтому частота столкновений ядер, приводящих к подбарьерному переходу и реакции синтеза в мюонных молекулах, напр.  $rd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$ ,  $dd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu^-$ , в млн. раз больше, чем в реакциях на лету. Освободившийся  $\mu^-$  вновь может образовать мезоатом и повторить ещё раз всю цепочку реакций  $d\mu + p \rightarrow rd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$  и т. д. В принципе число таких реакций ограничено лишь временем жизни мюона  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с. Однако в действительности почти всегда  $\mu^-$  в процессе реакции «прилипает» к образовавшемуся ядру гелия  $rd\mu \rightarrow \mu^3\text{He} + \gamma$  и в дальнейшем выпадает из цикла последоват. реакций, приводящих к синтезу ядер. Эта реакция «отравления катализатора» не столь существенна при синтезе ядер дейтерия  $dd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu^-$ , в к-рой только 12% мюонов «прилипает» к ядру  ${}^3\text{He}$  по реакции  $dd\mu \rightarrow \mu^3\text{He} + n$ . Ещё меньше мюонов ( $\sim 0,6\%$ ) «прилипает» к ядру  ${}^4\text{He}$  в реакции  $dt\mu \rightarrow \mu^4\text{He} + n$ .

На возможность реакции синтеза в мюонной молекуле  $rd\mu$  указал в 1947 Ф. Франк (F. Frank). В 1954 Я. Б. Зельдович выполнил первые расчёты этого процесса, включая механизм образования мюонных молекул, согласно к-рому  $\mu$ -атом водорода при столкновении с ядром атомарного водорода связывается в мюонную молекулу путём передачи энергии связи мезомолекулы атомному электрону (именно таков механизм образования мезомолекул  $pp\mu$ ,  $rd\mu$ ,  $tt\mu$ ). Одновременно он указал на то, что наличие в мезомолекулах возбуждённых уровней с малой энергией связи может приводить к существ. увеличению вероятности их образования. В 1957 Л. Альварес (L. W. Alvarez) и др. впервые экспериментально обнаружили реакции М. к.  $rd\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$  и  $dd\mu \rightarrow T + p + \mu^-$ . К нач. 80-х гг. М. к. ядерных реакций синтеза в водороде и дейтерии был хорошо изучен как экспериментально, так и теоретически.

Мезоатомные и мезомолекулярные процессы, составляющие последовательность реакций М. к., отличаются большим разнообразием. Одно из таких явлений — резонансное образование мезомолекул  $dd\mu$  — наблюдалось впервые группой В. П. Джелепова в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна) в 1964—66. В 1967 Я. А. Весман предложил объяснение этому явлению, предположив у мезомолекулы  $dd\mu$  наличие слабосвязанного вращательно-колебат. состояния  $J = v = 1$  (где  $J$  и  $v$  — вращат. и колебат. квантовые числа) с энергией  $\mathcal{E}_{11} \approx -2$  эВ (указание на возможность существования такого состояния было получено С. С. Герштейном в 1958). Это состояние действительно было обнаружено в 1973 в расчётах группы Л. И. Пономарёва в Дубне (в настоящее время энергия этого состояния известна с большой точностью:  $\mathcal{E}_{11} = -1,975$  эВ).

В 1977 в результате теоретич. расчётов та же группа обнаружила у мезомолекулы  $dt\mu$  слабосвязанное вращательно-колебат. состояние ( $J = v = 1$ ) с энергией  $\mathcal{E}_{11} = -0,657$  эВ. Благодаря наличию такого состояния мезомолекулы  $dt\mu$  должны образовываться резонансным образом с большой скоростью (в конденсиров. среде за время  $\sim 10^{-8}$  с). В 1979 этот вывод был подтверждён экспериментально группой В. П. Джелепова и В. Г. Зинова и др. Теоретич. представления о резонансном характере образования мезомолекул  $dt\mu$  надёжно обоснованы в экспериментах группы С. Джонса (S. Jones, Лос-Аламос, 1983), в к-рых измерена резонансная скорость  $\lambda_{dt\mu} \approx 5 \cdot 10^8$  с $^{-1}$  образования  $dt\mu$ -молекул, а также её зависимость от темп-ры смеси.

В резонансном процессе  $tt\mu + D_2 \rightarrow [(dt\mu)dee]^* \nu_{\nu}$  мезоатом  $tt\mu$ , приближаясь к одному из ядер молекулы  $D_2$ , объединяется с ним в мезомолекулу  $dt\mu$ , к-рая становится тяжёлым «ядром» мезомолекулярного комплекса  $[(dt\mu)dee]$  в возбуждённом колебательном ( $\nu$ ) и вращательном ( $J$ ) состоянии, а выделяющаяся при

этом энергия связи мезомолекулы передаётся на колебания и вращение мезомолекулярного комплекса.

Группа Джонса наблюдала в жидкой смеси дейтерия и трития  $160 \pm 20$  циклов М. к., к-рые осуществляет один мюон по схеме, представленной на рис. 2 (где  $\lambda_a \sim$

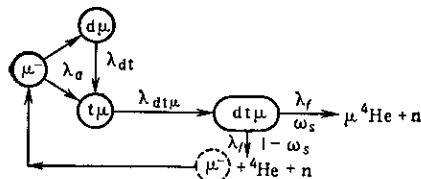


Рис. 2.

$\sim 10^{12}$  с $^{-1}$  — скорость образования  $d\mu$ - и  $tt\mu$ -атомов,  $\lambda_{dt} \approx 3 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ ,  $\lambda_{dt\mu} \geq 4 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ ,  $\lambda_f \approx 10^{12}$  с $^{-1}$  — скорость ядерного синтеза в мезомолекуле,  $\omega_s = 0,58 \cdot 10^{-2}$  — вероятность «прилипания»  $\mu^-$  к гелию). Число циклов катализа  $x_c$  приближённо равно:

$$x_c^{-1} \approx \omega_s + \frac{\lambda_0 c_d}{\lambda_{dt} c_t \varphi} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{dt\mu} c_d \varphi},$$

где  $c_d$  и  $c_t$  — концентрации дейтерия и трития в смеси ( $c_d + c_t = 1$ ),  $\varphi$  — плотность смеси в единицах  $N_0 = 4,25 \cdot 10^{22}$  ядер/см $^3$ ,  $\lambda_0 = 0,46 \cdot 10^6$  с $^{-1}$  — скорость распада свободного мюона. Т. о., в плотной смеси дейтерия и трития один  $\mu^-$  может осуществить до 170 циклов катализа и освободить при этом  $\sim 3$  ГэВ энергии и  $\sim 170$  нейтронов.

Вывод о высокой эффективности М. к. в дейтерий-третиевой смеси позволил рассмотреть разл. возможности использования этого явления для производства ядерной энергии и нейтронов. Первую схему мюоннокаталитич. гибридного реактора рассмотрел Ю. В. Петров в 1979. В этой схеме предлагается увеличивать энерговыделение в реакции  $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^- + 17,6$  МэВ путём дальнейшего размножения нейтронов с энергией 14,1 МэВ в урановом blanketе при делении ядер урана,  $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow n + \text{осколки}$ , и образования ядер плутония,  $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ . Предварит. оценки показывают, что такая гибридная система может оказаться экономически эффективной в ядерной энергетике будущего. Интенсивные исследования М. к. продолжают во многих лабораториях мира.

Лит.: Зельдович Я. Б., Герштейн С. С., Ядерные реакции в холодном водороде, «УФН», 1960, т. 71, с. 581; Gerstein S. S., Polonsky L. I., Mesomolecular processes induced by  $\mu^-$  and  $\mu^+$  mesons, в кн.: Muon physics, v. 3, ed. by V. W. Hughes, C. S. Wu, N. Y., 1975; Пономарев Л. И., Мюонный катализ ядерных реакций синтеза, «Природа», 1979, № 9; Петров Ю. В., Гибридные ядерные реакторы и мюонный катализ, там же, 1982, № 4; Grassi L., Fiorentini G., Mesic molecules and muon catalysed fusion, «Phys. Repts», 1982, v. 86, p. 169.

Л. И. Пономарёв.  
**МЮНЫ** (устар. мю-мезоны;  $\mu$ ) — заряженные элементарные частицы со спином  $1/2$ , временем жизни  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с, массой, приблизительно в 207 раз превышающей массу электрона (в энергетич. единицах ок. 105,7 МэВ); относится к классу лептонов. Отрицательно заряженный ( $\mu^-$ ) и положительно заряженный ( $\mu^+$ ) М. являются частицей и античастицей по отношению друг к другу.

Открытие. М. были впервые обнаружены в космических лучах (1936—37) К. Андерсоном (C. D. Anderson) и С. Неддермейером (S. H. Neddermeyer). Вначале М. пытались отождествить с частицей, к-рая, согласно гипотезе Х. Юкавы (H. Yukawa), является переносчиком ядерных сил. Однако такая частица должна была бы интенсивно взаимодействовать с ядрами, тогда как опытные данные показывали, что М. слабо взаимодействуют с веществом. Об этом свидетельствовал сам факт обнаружения М. на уровне моря: частицы, обладающие сильным взаимодействием, должны были бы практически полностью поглотиться в атмосфере Земли. Этот «парадокс» был разрешён в 1947 после открытия пи-