

сят резонансный характер и подобны методу ядерного магнитного резонанса.

Эксперименты с μ^- затруднены из-за конкуренции процесса μ -захвата.

Лит.: Мезоны в веществе. Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе. Дубна. 7—10 июня 1977 г., Дубна, 1977; Muon spin rotation. Proceedings of the International Conferences, Switzerland, 1978, «Hyperfine Interactions», 1979, v. 6, № 1—4; Белоусов Ю. М. и др., Исследование металлов с помощью положительных мюонов, «УФН», 1979, т. 129, с. 3; Кириллов В. Г., Угрюмов В. Г., Никитин Ю. П., Сергеев Ф. М., Атомы и мезоны, М., 1980; MSR-2, Vancouver, Canada, 1980, «Hyperfine Interactions», 1981, v. 8, № 4—6; Gurevich I. I., Nikolsky B. A., Investigation of matter with positive muons, «Sov. Sci. Revs. section A. Physics Reviews», 1983, v. 3, p. 89; MSR-3, Shimoda, Japan, 1983, «Hyperfine Interactions», 1984, v. 17—19, № 1—4; Karlsson E., The use of positive muons in metal, в кн.: Muons and pions in materials research, Amst., 1984; Schenk A., Muon spin rotation spectroscopy, Bristol, 1985; MSR-4, Uppsala, Sweden, 1986, «Hyperfine Interactions», 1988, v. 31, № 1—4; Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом, Дубна, 1987.

МЮОННЫЙ АТОМ (мю-нуклонный атом) — атомоподобная система $Z\mu$, состоящая из атомного ядра и отрицательно заряженного мюона (μ^-), к-рая, как правило, содержит ещё нек. электронов. Свойства М. а. подобны свойствам обычного водородоподобного атома с зарядом ядра Z , а некоторые различия обусловлены отличием массы μ^- от массы электрона m_e : $m_\mu = 206,769 m_e$. Поэтому характерные размеры М. а. $a_\mu = \hbar^2/m_\mu e^2 \approx 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ см}$. Это примерно в 200 раз меньше размеров обычных атомов, и при $Z \approx 50$ они становятся даже меньше размеров ядра. Напр., радиус ближайшей к ядру орбиты μ^- в М. а. свинца почти в 2 раза меньше, чем радиус ядра Pb, т. е. μ^- осн. часть времени проводит внутри ядра. Это позволяет использовать свойства М. а. для изучения распределения электрич. заряда по объёму ядра.

В отличие от адронных атомов пребывание μ^- в ядре не приводит к исчезновению М. а. (захвату мюона ядром), поскольку мюоны взаимодействуют с нуклонами ядер значительно слабее, чем адроны. Поэтому время жизни М. а. определяется временем жизни свободного мюона $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Однако с увеличением заряда ядра слабое взаимодействие мюона с ядром возрастает. Для лёгких элементов вероятность захвата мюона ядром $[Z + \mu \rightarrow (Z - 1) + \nu_\mu]$ растёт пропорционально Z^4 и уже при $Z \approx 10$ сравнивается с вероятностью распада свободного мюона. При больших Z рост вероятности μ -захвата замедляется, а при $Z = 70-90$ время жизни М. а. $\tau \sim 10^{-7} \text{ с}$, т. е. примерно в 20 раз меньше τ_μ .

М. а. образуются при захвате мюонов кулоновским полем ядра Z . При этом из электронной оболочки атома выбивается один или нек. электронов (обычно внешних). М. а. образуются вначале в возбуждённых состояниях и за время порядка $10^{-11}-10^{-13} \text{ с}$ переходят в осн. состояние, освобождая энергию в виде рентгеновских и γ -квантов или передавая её оже-электронам. Измеряя энергии радиац. переходов в тяжёлых М. а., можно получить информацию о распределении зарядов в ядре, а также о его размерах и форме. Иногда возможны безызлучательные переходы с передачей энергии на возбуждение ядра.

Компактная система $Z\mu$ для внеш. электронной оболочки эквивалентна ядру с зарядом $Z - 1$, т. е. при захвате мюона кулоновским полем к.-л. ядра, напр. Ne, образуется М. а. $Z\mu$ с электронной оболочкой соседнего атома F. Взаимодействие спинов μ^- и электрона из оболочки атома фтора в магн. поле позволяет проследить судьбу этого атома и даёт способ измерить абс. скорость хим. реакции изолиров. атома F (см. Мезонная химия).

Наиб. изучены простейшие М. а., именно М. а. гелия He и водорода p μ . Радиус орбиты μ^- в них сравним с комптоновской длиной волны электрона $\hbar/m_e c$ (т. е. в 200 раз меньше радиуса боровской орбиты электрона), поэтому для них эффекты поляризации вакуума

и обусловленный ими ламбовский сдвиг $\Delta\mathcal{E}_\lambda$ весьма значительны ($\Delta\mathcal{E}_\lambda = 1,38 \text{ эВ}$ для He и $\Delta\mathcal{E}_\lambda = 0,202 \text{ эВ}$ для p μ , для атома H $\Delta\mathcal{E}_\lambda = 0,44 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}$).

М. а. изотопов водорода p μ , d μ и t μ отличаются от др. М. а. своей нейтральностью, благодаря к-рой, а также благодаря своей малости они подобно нейтронам свободно проникают сквозь электронные оболочки атомов и при столкновениях с их ядрами участвуют в многочисл. мезоатомных процессах. Особый интерес вызывает совокупность процессов в смеси дейтерия и трития, в к-рой благодаря явлению мюонного катализа один мюон за время жизни τ_μ может осуществить ~ 150 реакций синтеза ядер дейтерия и трития по схеме $\mu^- \rightarrow t\mu \rightarrow dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + p + \mu^- + 17,6 \text{ МэВ}$, освободив при этом ок. 150 нейтронов и энергию $\sim 2,5 \text{ ГэВ}$.

Лит.: Бархон Э., Экзотические атомы, пер. с англ., «УФН», 1972, т. 106, с. 527; Ким Е., Мезонные атомы и ядерная структура, пер. с англ., М., 1975; Кириллов В. Г., Угрюмов В. Г., Никитин Ю. П., Сергеев Ф. М., Атомы и мезоны, М., 1980; Exotic atoms, N. Y.—L., 1980; Бетти С. Дж., Экзотические атомы, «ЭЧАЯ», 1982, т. 13, с. 164.

МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ — явление синтеза (слияния) ядер изотопов водорода, происходящее при существ. участии отрицательно заряж. мюонов. Мюоны, образуя с ядрами мезомолекулы, способствуют сближению ядер на расстояния, достаточные для протекания ядерной реакции. Освобождаясь после акта реакции, μ^- могут повторить этот процесс (т. е. они выступают в качестве катализатора).

В отсутствие мюонов реакции синтеза, напр. ядер дейтерия $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + p$ или ядер дейтерия и трития $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$, происходят с заметной вероятностью лишь при высоких энергиях $\mathcal{E}$ сталкивающихся частиц, $\mathcal{E} \gtrsim 1-10 \text{ кэВ}$, т. е. при темп-рах в десятки и сотни млн. градусов, поскольку ядрам нужно путём туннельного перехода преодолеть высокий барьер кулоновского отталкивания, чтобы сближаться до расстояний действия ядерных взаимодействий ($r_N \sim 5 \times 10^{-13} \text{ см}$) (рис. 1). При торможении отрицательно заряж. мюонов в плотной смеси изотопов водорода за вре-

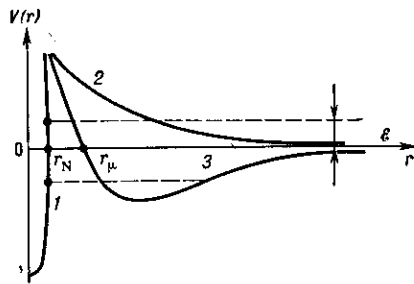


Рис. 1. Схематическое изображение потенциальной энергии V взаимодействия ядер в зависимости от расстояния r между ними: 1 — сильное притяжение на малых расстояниях $\sim r_N$; 2 — кулоновское отталкивание на больших расстояниях; 3 — взаимодействие ядер в мюонной молекуле, имеющая область притяжения $V(r) < 0$ при $r > r_\mu \gg r_N$.

мя 10^{-12} с образуются мюонные атомы p μ , d μ и t μ . Из-за малых размеров и электронейтральности мезоатомов водорода ведут себя подобно нейтронам: они свободно проникают сквозь электронные оболочки атомов и подходят на близкие расстояния к их ядрам. При этом происходят многообразные μ -атомные и μ -молекулярные процессы: перехват мюонов ядрами более тяжёлых изотопов $p\mu + d \rightarrow d\mu + p$, $d\mu + t \rightarrow t\mu + d$; образование мюонных молекул $d\mu + p \rightarrow p d\mu$ и т. д. Образование мюонных молекул является решающим условием протекания М. к. В принципе (благодаря экранировке кулоновского поля ядра мюонов в мезоатоме водорода и значит. уменьшению ширины кулоновского барьера) реакции синтеза могли бы протекать на лету, т. е. при столкновениях свободных мезоатомов с ядрами изотопов водорода (напр., $d\mu + p \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$, $d\mu + d \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu^-$). Однако в мюонных молекулах ядра удалены друг от друга на расстояние порядка удвоенного боровского радиуса мезоатома $2r_\mu \sim 5 \cdot 10^{-11}$