

С 346.36

ЯФ, 1969, т. 10, в. 4, с. 812-814

Б-611

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

P2 - 4438



С.М.Биленький, Нгуен Ван Хьеу , Л.Л.Неменов,
Ф.Г.Ткебучава

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПАД ($\mu^+ \mu^-$) АТОМОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

1969

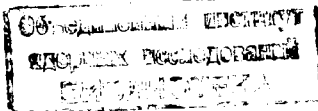
P2 - 4438

С.М.Биленький, Нгуен Ван Хьеу , Л.Л.Неменов,
Ф.Г.Ткебучава ^{x/}

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПАД (μ^+ μ^-) АТОМОВ

Направлено в ЯФ

^{x/} Тбилисский государственный университет



7836/1 нр.

Изучение связанного состояния μ^+ и μ^- -мезонов представляет несомненный интерес.

В этой работе рассматривается образование $(\mu^+ \mu^-)$ атомов при столкновении частиц. Сечения таких процессов малы, однако их исследование на сильноточных ускорителях представляется возможным. Мы кратко рассмотрим также атомы, образованные π - и K -мезонами.

1. Начнем с рассмотрения реакции



Используя обычное приближение, основанное на малости среднего импульса μ -мезона в атоме по сравнению с его массой покоя, получаем следующее выражение для матричного элемента процесса (1) с образованием $(\mu^+ \mu^-)$ - атома в основном состоянии

$$\langle f | S | i \rangle = (2\pi)^{3/2} e \left(\frac{2m_\mu}{k_0} \right)^{1/2} \bar{u} \left(\frac{k}{2} \right) \gamma_\alpha \left(u \left(-\frac{k}{2} \right) \right) \frac{1}{4m_\mu^2} \langle p | J_\alpha(0) | pq \rangle \psi_\mu(0) \delta(k+p'-p-q). \quad (2)$$

Здесь p и p' - импульсы начального и конечного нуклонов, q - 4-импульс π - мезона, k - 4-импульс атома, m_μ - масса μ - мезона, $J_\alpha(0)$ - оператор электромагнитного тока, а $\psi_\mu(0)$ - значение волновой функции $(\mu^+ \mu^-)$ - атома при $r = 0$:

$$\psi_\mu(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_\mu^3}} \quad (3)$$

($a_\mu = \frac{2}{m_\mu \alpha}$ - боровский радиус $(\mu^+ \mu^-)$ атома).

Из (2) очевидно, что сечение процесса (1) может быть связано с сечением реакции

$$\pi^- + p \rightarrow n + e^+ + e^- \quad (4)$$

Соотношение между сечениями процессов (1) и (4) имеет вид:

$$\sigma_1 = 3\pi a_\mu^3 m_\mu^2 \left. \frac{d\sigma}{dk^2} \right|_{k^2 = -4m_\mu^2} \quad (5)$$

где σ_1 - полное сечение процесса (1), а $\left. \frac{d\sigma}{dk^2} \right|_{k^2 = -4m_\mu^2}$ - сечение процесса (4) (k - 4-импульс $e^+ e^-$ - пары; σ_1 и $\left. \frac{d\sigma}{dk^2} \right|_{k^2 = -4m_\mu^2}$ в (5) берутся при одном и том же значении полной энергии). Для того, чтобы оценить сечение реакции (1), заменим в матричном элементе процесса (4) виртуальный фотон реальным.

Для π^- - мезонов с энергией 190 Мэв в л.с. при этом получаем $\sigma_1 \approx 3 \cdot 10^{-37} \text{ см}^2$.

Из CP -инвариантности следует, что $(\mu^+ \mu^-)$ атомы образуются в процессе (1) в триплетном состоянии. Основной схемой их распада является^{x/}



Для вероятности этого распада из 3S_1 - состояния находим

$$\omega_1 = \frac{1}{6} m_\mu \alpha^5 \quad (7)$$

Отсюда получаем, что время жизни $(\mu^+ \mu^-)$ атомов в 3S_1 -состоянии равно

$$\tau_1 = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ сек.}$$

В качестве следующего примера рассмотрим рождение $(\mu^+ \mu^-)$ атомов γ - квантами на ядрах



Полное сечение процесса (8) можно оценить с помощью формулы Примакова^{/2/}. При $k_0 \gg m_\mu (2Z)^{1/3}$ (k_0 - энергия γ -квантов)имеем

$$\sigma_0 = 4\pi^2 \frac{1}{m_\mu r_0} Z^2 \alpha \frac{1}{m_\mu^2} \quad (9)$$

x/

Впервые на это обратил внимание Я.Б. Зельдович^{/1/}.

Здесь $\frac{1}{\tau_0}$ - вероятность распада ($\mu^+ \mu^-$) - атома в 1S_0 - состоянии на два γ - кванта. Время жизни τ_0 равно

$$\tau_0 = \frac{2}{m \mu \alpha^5} = 6 \cdot 10^{-13} \text{ сек.} \quad (10)$$

Из (9) и (10) находим, что

$$\sigma_0 = Z^2 \cdot 10^{-37} \text{ см}^2.$$

Таким образом, при достаточно больших Z сечения фотообразования ($\mu^+ \mu^-$) - атомов становятся значительными.

2. В заключение рассмотрим атомы, образованные π^- и K^- - мезонами.

Атомы ($\pi^+ \pi^-$) будут распадаться в основном на $\pi^0 \pi^0$. Очевидно, что вероятность распада определяется длинами $\pi - \pi$ - рассеяния. Приведем результат вычисления вероятности распада из основного состояния^{x/}

$$\omega_{\pi} = \frac{16 \pi}{9} \left(\frac{2 \Delta m_{\pi}}{m_{\pi}} \right)^{1/2} \frac{|a_2 - a_0|^2}{1 + \frac{2}{9} \frac{m_{\pi} \Delta m_{\pi}}{m_{\pi}} |2a_2 + a_0|^2} |\psi_{\pi}(0)|^2. \quad (11)$$

Здесь Δm_{π} - разность масс π^+ и π^0 - мезонов, a_2 и a_0 - длины $\pi - \pi$ - рассеяния в состояниях с изотопическими спинами 2 и 0,

а $\psi_{\pi}(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} a_{\pi}^3}$ (a_{π} - боровский радиус ($\pi^+ \pi^-$) атома). Если величина $\frac{1}{\sqrt{\pi} a_{\pi}^3} (2a_2 + a_0)$ не является аномально большой, то второй член в знаменателе выражения (11) может быть опущен, и для вероятности распада ($\pi^+ \pi^-$) атома находим

^{x/} Фоторождение ($\pi^+ \pi^-$) атомов рассматривалось в работе^{/3/}. Заметим, что приведенное в этой работе выражение для вероятности распада ($\pi^+ \pi^-$) атома на два π^0 - мезона содержит опечатки.

$$\omega_{\pi} = 2,2 \cdot 10^{-8} |a_2 - a_0|^2 m_{\pi}^3 . \quad (12)$$

Используя данные о длинах $\pi - \pi$ - рассеяния ^{/4/}, получаем отсюда следующую оценку для времени жизни ($\pi^+ \pi^-$) атомов:

$$\tau_{\pi} = 3,8 \cdot 10^{-16} \text{ сек.}$$

Атомы ($K^- \pi^+$) распадаются с в основном на $\bar{K}^0 \pi^0$. Вероятность распада равна

$$\omega_{\pi K} = \frac{8\pi}{9} |b_1 - b_3|^2 \left(\frac{2\Delta m}{\mu}\right)^{1/2} \frac{1}{1 + \frac{2}{9} \mu \Delta m |b_1 + 2b_3|^2} |\psi_{\pi K}(0)|^2 \quad (13)$$

Здесь

$$\mu = \frac{m_{\pi} m_K}{m_K + m_{\pi}}, \quad \Delta m = m_{K^+} + m_{\pi^-} - m_{K^0} - m_{\pi^0},$$

а b_1 и b_3 - длины $\pi - K$ - рассеяния в состояниях с изотопическими спинами 1/2 и 3/2.

Из (13) получаем

$$\omega_{\pi K} = 3,8 \cdot 10^{-8} |b_1 - b_3|^2 \mu^3 . \quad (13)$$

Таким образом, измерение времени жизни ($\pi^+ \pi^-$) - и (πK) атомов позволило бы определить длины $\pi - \pi$ - и $\pi - K$ - рассеяния. Однако малое время жизни весьма сильно затрудняет изучение таких систем.

В заключение выражаем глубокую благодарность Л.И.Лapidусу, Б.М.Понтекорво, Л.И.Пономареву, Р.М.Рындину и Я.А.Сморозинскому за полезные обсуждения рассмотренных здесь вопросов.

Л и т е р а т у р а

1. Я.Б.Зельдович, ЖЭТФ, 38, 649 (1959).
2. H.Primakoff. Phys. Rev., 81, 899 (1951).
3. А.И. Алексеев. Диссертация (1957).
4. J.L.Uretsky, T.R.Palfrey. Phys. Rev., 121, 1798 (1961).
5. Г.А.Лексин, ЯФ, 4, 165 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1969 года.