

тонкого расщепления в основном  $1S$ -состоянии  $M$ . можно представить в виде

$$\Delta\nu_{\text{теор.}} = \Delta\nu_F \{1 + a_e + \alpha^2 A + \alpha^3 B(\ln\alpha) + \alpha \frac{m_e}{m_\mu} [C(\frac{m_e}{m_\mu}, \ln \frac{m_e}{m_\mu}) + \alpha D(\ln \frac{m_e}{m_\mu}, \ln\alpha)]\}. \quad (2)$$

В этом выражении  $\Delta\nu_F$  дается равенством (1),  $a_e$  — аномальный магн. момент электрона в единицах  $\mu_B$ , коэф.  $A$  и  $B$  характеризуют вклад релятивистских и чисто радиат. эффектов в пределе бесконечной массы мюона, т. е. при  $(m_e/m_\mu) \rightarrow 0$ , коэф.  $C$  и  $D$  связаны с квантово-возлектординамич. эффектами отдачи (конечностью массы) мюона. Использование известных выражений для коэф.  $A, B, C, D$ , принятых значений фундамент. констант  $R_\infty, c, \alpha, \mu_p/\mu_n$ , а также значений отношений  $\mu_n/\mu_p = 3,18334547(95)$  и  $m_n/m_e = 206,768259(62)$  даёт теоретич. значение

$$\Delta\nu_{\text{теор.}} = 4463,3047(19) \text{ МГц.} \quad (3)$$

Тонкая и сверхтонкая структура уровней энергии  $M$ . полностью аналогична структуре уровней атома водорода. В частности, *лямбовский сдвиг* в  $M$ . (разность уровней  $2S_{1/2} - 2P_{1/2}$ ) составляет

$$I_{\text{теор.}}^{\mu\mu} = 1047,03 \text{ МГц.} \quad (4)$$

Величину сверхтонкого расщепления осн. уровня  $M$ . удаётся очень точно измерить, помещая  $M$ . во внеш. статич. магн. поле. При этом вследствие *Зеемана эффекта* в основном  $1S$ -состоянии возникает система уровней, определяемая ф-лой Брейта — Раби (1931):

$$W_{F=1,0; M_F} = -\frac{\Delta W}{4} + \mu_B^0 g_u(\text{Mu}) H M_F \pm \pm \frac{\Delta W}{2} [1 + 2M_F x + x^2]^{1/2}, \quad (5)$$

$$x = \left[ g_e(\text{Mu})\mu_B - g_u(\text{Mu})\mu_u^0 \right] \frac{H}{\Delta W}, \quad \Delta W = \hbar \Delta\nu,$$

где магн. квантовое число  $M_F = -1, 0, 1$  для  $F = 1$  и  $M_F = 0$  для  $F = 0$ ,  $g_u(\text{Mu})$  — электронное и мюонное гиромагн. отношение в  $M$ . Идея эксперимента состоит в индуцировании магн. дипольных переходов между уровнями с разными  $M_F$  с помощью источника микроволнового излучения. Происходящие переходы детектируются по изменениям в угл. распределениях позитронов от распада мюонов. Резонансные переходы наблюдались в широком интервале внеш. магн. полей от очень слабых,  $H < 2$  МГс, до сильных,  $H \sim 10$  кГс, и при разл. давлениях инертного газа от неск. атм до десятков атм.

Эксперим. значение интервала сверхтонкого расщепления осн. уровня  $M$ . получается из соотношения (5) после экстраполяции к нулевому давлению газа и составляет

$$\Delta\nu_{\text{эксп.}} = 4463,30288(16) \text{ МГц.} \quad (6)$$

Указанное значение  $\Delta\nu$  найдено из одновременных измерений переходов  $\nu_{12}$  и  $\nu_{34}$  в магн. поле 13,6 кГс. Из этих же данных можно найти приведённое выше значение  $\mu_n/\mu_p$ . Прекрасное согласие теоретич. и эксперим. значений  $\Delta\nu$  в  $M$ . свидетельствует о справедливости квантовой электродинамики и релятивистской теории связанных состояний, а также о самосогласованности определения значений фундамент. физ. констант. Наличие неск. частот переходов с  $\Delta M_F = 1$  в  $M$ . приводит к двухчастотной прецессии спина мюона в магн. поле, открытой И. И. Гуревичем и др. и широко используемой при исследовании хим. свойств конденсиров. сред ( $\mu SR$ -спектроскопия). В 1984 впервые была измерена величина лямбовского сдвига уровней с  $n = 2$  в  $M$ :

$$L_{\text{эксп.}}^{\mu\mu} = 1060(15) \text{ МГц.}$$

Проводятся поиски превращения  $M$ . в антимюоний, т. е.  $(\mu^+e^-) \rightarrow (\mu^-e^+)$ , к-рое свидетельствовало бы о нарушении сохранения электронного и мюонного *лептонных чисел*, ожидаемом в нек-рых совр. теориях элементарных частиц.

*Лит.*: Б а б а е в А. И. и др., Наблюдение атомарного мюония в кристаллическом кварце, «Письма в ЖЭТФ», 1966, т. 3, с. 3; Г у р е в и ч И. И., Н и к о л ь с к и й Б. А., Двухчастотная прецессия  $\mu^+$ -мезона в атоме мюония, «УФН», 1976, т. 119, с. 169; H u g h e s V. W., K i n o s h i t a T., Electromagnetic properties and interactions of muons, в кн.: Muon physics, ed. by V. W. Hughes, C. S. Wu, v. 1, N. Y., 1977; B r e w e r J. H., C r o w e K. M., Advances in muon spin rotation, «Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.», 1978, v. 28, p. 239; H u g h e s V. W., P u t t i t z G. Z., Muonium has not yet decayed!, «Comm. Nucl. Part. Phys.», 1984, v. 12, p. 259. P. H. Фейстос.

**МЮОННОЙ СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ МЕТОД** (метод МСР) — исследование физ.-хим. свойств материала и поведения в веществе примесных частиц с помощью положит. мюонов, имплантируемых в изучаемые объекты. Метод МСР сформировался в 1960—70-х гг. в ходе экспериментов по проверке разл. вариантов теории *слабого взаимодействия*. В зарубежной литературе часто используется назв.  $\mu SR$ , возникшее как аббревиатура слов muon spin rotation (relaxation, resonance).

Метод МСР базируется на законе несохранения *пространственной чётности* при распаде пи-мезонов ( $\pi$ ) и мюонов ( $\mu$ ):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Несохранение чётности при распаде пи-мезонов позволяет получать на ускорителях пучки мюонов со степенью поляризации, близкой к 100%, а несохранение чётности при распаде мюонов даёт возможность следить за направлением магн. моментов мюонов, регистрируя позитроны  $\mu \rightarrow e$ -распада, поскольку позитроны вылетают преим. вдоль спина мюона. Суть метода МСР заключается в наблюдении за изменением во времени поляризации ансамбля мюонов, возникающим из-за магн. взаимодействия мюонов, заторможенных в веществе, со средой.

**Применение метода МСР.** Исследования можно разделить на 2 группы: изучение явлений, где анализируется поведение в веществе самого положит. мюона  $\mu^+$ , рассматриваемого как лёгкий протон; изучение проблем, где  $\mu^+$  рассматривается как простейший зонд в исследуемом веществе, сочетающий свойства пробного заряда и элементарного магнитометра. Часто в одном эксперименте оба аспекта тесно переплетаются. Примеры исследований 1-й группы — эксперименты по изучению электронной структуры мюония в полупроводниках и диффузии мюонов в металлах. Эти эксперименты дополняют исследование поведения водорода в материалах, позволяя получать наглядную картину процессов, в к-рых проявляется квантовая природа поведения лёгкой примесной частицы в тяжёлой кристаллич. решётке. Примерами исследований 2-й группы может служить изучение смешанного состояния *сверхпроводников* 2-го рода и фазовых переходов с изменением магн. порядка (см. *Магнитный фазовый переход*).

**Особенности метода МСР:** 1) в методе МСР отсутствует необходимость в сильных магн. полях для создания заметной поляризации мюонов, что позволяет изучать явления, сильно искажаемые внеш. полем (напр., фазовые переходы в *спиновых стеклах*); 2) изменение поляризации детектируется без приложения электрич. ВЧ-поля, что снимает ограничения, связанные со *скин-эффектом*; 3) для получения МСР-спектра необходима регистрация большого кол-ва актов распада мюонов  $\sim 10^6$  (ср. время жизни мюона  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с); т. к. плотность мюонов в образце в любой момент времени исчезающе мала, то при интерпретации эксперим. данных можно пренебречь взаимодействием мюонов между собой.