

РЕЗОНАНСНАЯ ВНУТРЕННЯЯ КОНВЕРСИЯ В ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНАХ

Ф. Ф. Карпешин

*Институт физики Санкт-Петербургского университета
198904, Санкт-Петербург, Россия*

М. Б. Тржасковская*

*Петербургский институт ядерной физики Российской академии наук
188300, Гатчина, Россия*

Ю. П. Гангский

*Объединенный институт ядерных исследований
141980, Дубна, Россия*

Поступила в редакцию 2 июня 2003 г.

Рассмотрен эффект резонансной конверсии в водородоподобных ионах. Для $M1$ -перехода с энергией 70.6 кэВ в ^{171}Yb показано, что при совпадении энергий ядерного перехода и перехода единственного $1s$ -электрона в более высокое ns -состояние время жизни ядра в возбужденном состоянии уменьшается на пять порядков величины благодаря включению нового канала девозбуждения — резонансной конверсии. Наблюдение резонансной конверсии в водородоподобных ионах дает мощный метод изучения ядерной структуры.

PACS: 23.20.NX

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонанс с электронной оболочкой оказывает сильное влияние на девозбуждение ядерных состояний [1–5]. В том случае, если энергии электронного и ядерного переходов близки, энергия ядра может быть передана электронной оболочке. Данный эффект, называемый резонансной, подпороговой или дискретной конверсией, является очень редким процессом в нейтральных атомах, с которыми обычно проводятся эксперименты, из-за крайне низкой вероятности совпадения энергий атомного и ядерного уровней. Действительно, свободные атомные уровни сосредоточены в очень узком интервале энергии (несколько эВ) вблизи порога ионизации атома и имеют очень малую ширину ($\sim 10^{-8}$ эВ). Однако ситуация коренным образом меняется в случае ионов, имеющих лишь один электрон (водородоподобные ионы). В таких ионах диапазон свободных уровней

расширяется до десятков кэВ, а ширина уровней может достигать нескольких эВ. Это на много порядков увеличивает вероятность появления резонансной конверсии.

Резонансная конверсия была открыта экспериментально и исследована теоретически в высокозарядных ионах ^{125}Te с зарядом $q \geq 45$ [6–8]. В этих работах наблюдалась подпороговая конверсия на электронах $1s$ -оболочки $M1$ -перехода с энергией 35.492 кэВ. Электроны $2p$ -оболочки производят затухание резонанса, которое играет двойную роль. С одной стороны, затухание уменьшает величину эффекта. С другой стороны, именно благодаря достаточно сильному затуханию удалось наблюдать эффект, так как иначе вероятность перекрытия ядерных уровней с электронными была бы близка к нулю. Ширина уровня, характеризующего затухание, была приблизительно равна 10 эВ.

С этой точки зрения резонансная конверсия в водородоподобных ионах интересна тем, что дает уникальную возможность наблюдать резонансную кон-

*E-mail: trzhask@thd.pnpi.spb.ru

версию в отсутствие затухания. Это обеспечивает огромную величину эффекта ускорения, достигающую многих порядков, так как величина эффекта пропорциональна $(\Delta/\Gamma_a)^2$, где Δ — дефект резонанса, Γ_a — ширина уровня [1]. Положив для оценки $\Delta \approx 1$ эВ, $\Gamma_a \approx 10^{-3}$ эВ, сразу получим, что фактор усиления при резонансе составит 5–6 порядков.

Резонанс можно наблюдать во внешнем магнитном или электрическом поле. Сравнительно большая величина сдвига $1s$ -уровня порядка нескольких эВ, легко достигаемая в современных полях, и наличие сверхтонкой структуры позволяют манипулировать частотой атомного перехода в достаточно широких для достижения точного резонанса пределах. Ранее в работах [1–3] предлагалось использовать излучение лазера, настроенного на разностную частоту, для компенсации дефекта резонанса.

Наблюдение резонансной конверсии в водородоподобных ионах дает мощный метод изучения ядерной структуры. Этот метод позволяет определить энергию ядерного перехода с точностью до атомной ширины, т. е. $\sim 10^{-3}$ эВ. Становится возможным определить магнитный и электрический моменты ядер в основном и возбужденном состояниях.

2. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Теория резонансной конверсии подробно изложена в работах [1–8]. Фактор конверсии определяется аналогично традиционному коэффициенту внутренней конверсии (КВК) как отношение ширин конверсионного и радиационного переходов:

$$R = \frac{\Gamma_c}{\Gamma_\gamma}. \tag{1}$$

Фактор конверсии R может быть вычислен по следующей формуле:

$$R = \frac{\alpha_d \Gamma / 2\pi}{\Delta^2 + (\Gamma/2)^2}. \tag{2}$$

Здесь α_d — резонансный аналог КВК, вычисленный по тем же формулам, что и обычные КВК. В отличие от последних, однако, α_d имеет размерность энергии. Дефект резонанса $\Delta = \omega_n - \omega_a$ является разностью частот ядерного и электронного переходов¹⁾, Γ — полная ширина промежуточного состояния, обычно равная атомной.

Стандартная ситуация такова, что

$$\frac{\Delta}{\Gamma} \gg 1. \tag{3}$$

¹⁾ Мы используем систему единиц $\hbar = c = m_e = 1$.

Из (2) и (3) следует, что величина $R \ll 1$. Однако, как отмечено во Введении, частоту электронного перехода можно регулировать в определенных пределах, добиваясь точного резонанса. В этом случае, как показано ниже, R достигает значений $R \gg 1$. В работах [1–3] предложено использовать для этой цели лазер. В данном случае можно использовать оптический сдвиг электронного $1s$ -уровня, который возникает в постоянном внешнем электрическом или магнитном поле. Таким образом, можно регулировать энергию перехода в пределах нескольких эВ. Более того, надо учесть также и сверхтонкое расщепление [9].

3. ЭНЕРГИИ И ШИРИНЫ УРОВНЕЙ В ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНАХ

Энергии уровней в водородоподобных ионах можно получить, решая уравнение Дирака для движения электрона в кулоновском поле ядра. Результаты таких расчетов с учетом лэмбовского сдвига и конечных размеров ядра представлены в ряде работ [10, 11]. В табл. 1 приведены энергии уровней ns , $np_{3/2}$, $nd_{5/2}$ и $nf_{7/2}$ в водородоподобном ионе ^{171}Yb ($Z = 70$).

Наличие в водородоподобных ионах уровней с широким набором угловых моментов допускает появление резонансов при любой мультипольности ядерных переходов. Из табл. 1 можно видеть, что диапазон энергий переходов, для которых возможен резонанс, достаточно широк (примерно 18 кэВ для иона ^{171}Yb).

Ширины рассмотренных уровней определяются вероятностями $E1$ радиационных переходов на разрешенные правилами отбора лежащие ниже состояния. Времена жизни (или приведенные ширины) уровней в атоме водорода представлены в работах [12, 13]. В водородоподобных ионах эти ширины

Таблица 1. Энергии уровней (в кэВ) для водородоподобного иона ^{171}Yb [10, 11]

n	ns	$np_{3/2}$	$nd_{5/2}$	$nf_{7/2}$
1	0			
2	53.441	54.751		
3	63.738	64.125	64.237	
4	67.281	67.444	67.492	67.515
5			69.006	69.018
10		71.025	71.028	71.029

Таблица 2. Ширины уровней (в эВ) для водородоподобного иона ^{171}Yb [12, 13]

n	ns	$np_{3/2}$	$nd_{5/2}$	$nf_{7/2}$
2		9.88		
3	$9.91 \cdot 10^{-2}$	2.94	1.02	
4	$6.88 \cdot 10^{-2}$	1.28	0.434	0.217
5	$4.39 \cdot 10^{-2}$	0.661	0.227	0.113
10	$1.12 \cdot 10^{-2}$	0.0825	0.0282	0.0141
50	$4.35 \cdot 10^{-5}$	0.00661	0.00227	0.00113

зависят от атомного номера как Z^4 , а от главного квантового числа как n^{-3} . Примеры ширин уровней для водородоподобного иона ^{171}Yb представлены в табл. 2.

4. СВЕРХТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ УРОВНЕЙ

Сверхтонкое расщепление ns -уровней в водородоподобных ионах определяется, в основном, величиной магнитного момента ядра [14]:

$$\Delta W_F = \frac{4}{3}\alpha \left(\frac{\alpha Z}{n}\right)^3 \times \frac{\mu}{\mu_N} \frac{m_e}{m_p} \frac{2I+1}{2I} \left[1 + \frac{3}{2}(\alpha Z)^2\right], \quad (4)$$

где μ — ядерный магнитный момент, I — спин ядра, α — постоянная тонкой структуры, m_e и m_p — массы электрона и протона. В табл. 3 представлен пример сверхтонкого расщепления для ядра ^{171}Yb . Приведенные результаты показывают, что сверхтонкое расщепление заметно влияет на положение резонанса.

Зеемановское расщепление уровней значительно меньше сверхтонкого, так как даже наиболее сильные внешние магнитные поля ($\sim 10^4$ Э) много слабее внутриатомных. Для ^{171}Yb зеемановское расщепление при $H = 10^4$ Э составляет всего 10^{-8} эВ.

Таблица 3. Сверхтонкое расщепление для ядра ^{171}Yb

Ядро	I^π	μ/μ_N	ΔW_F , эВ	
			1s	10s
^{171}Yb	1/2	0.4397	0.569	$5.69 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4. Результаты расчета энергий ε , радиационных ширин Γ и дискретных КВК α_d для электронных ns -уровней водородоподобного иона ^{171}Yb в окрестности энергии ядерного $M1$ -перехода $\omega_n \approx 70.6$ кэВ

ns	ε , кэВ	Γ , эВ	α_d , кэВ
6s	69.646	0.0445	5.39
7s	70.166	0.0299	3.30
8s	70.501	0.0209	2.17
9s	70.729	0.0150	1.50
10s	70.892	0.0112	1.08

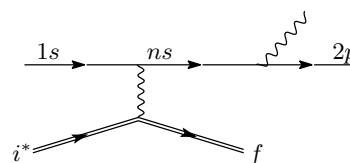


Рис. 1. Типичный фейнмановский график процесса резонансной конверсии в водородоподобных ионах. Двойная линия соответствует ядерному переходу из возбужденного состояния i^* в основное состояние f

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДЛЯ $M1$ -ПЕРЕХОДА В ^{171}Yb

Энергия ядерного перехода в этом случае равна 70.6 кэВ. Значения энергий, радиационных ширин и дискретных КВК вычислены методом Дирака–Фока с учетом конечных размеров ядра, а также высших квантово-электродинамических поправок на поляризацию вакуума, собственную энергию и др. [11]. Расчеты выполнены с использованием пакета программ RAINE [15].

В случае $M1$ -перехода основной вклад в амплитуду (рис. 1) возникает от конверсионного перехода в ns -состояние, для которого энергия перехода близка к энергии ядерного перехода. В резонансном приближении вкладом остальных атомных состояний можно пренебречь вследствие соотношения (3) (см. табл. 4). В свою очередь, радиационные ширины определяются суммарной вероятностью электрических дипольных переходов $ns \rightarrow 2p, 3p, \dots, (n-1)p$.

Вычисленные значения энергий электронного перехода, радиационных ширин и коэффициентов дискретной конверсии представлены в табл. 4. На рис. 2 мы приводим график вычисленной величин

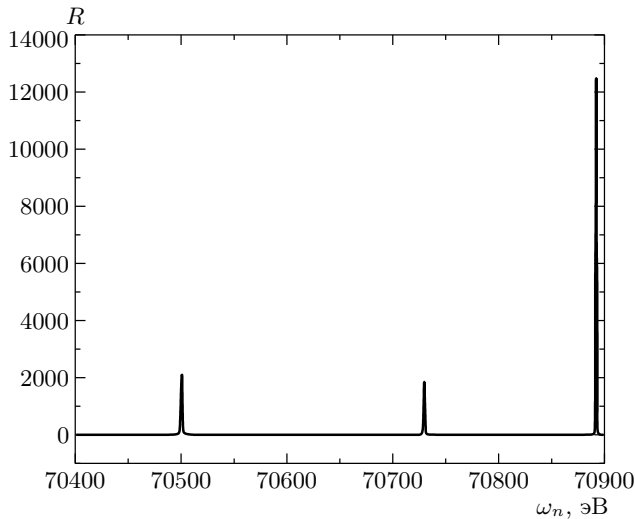


Рис. 2. Вычисленное значение фактора резонансной конверсии R в водородоподобном ионе ^{171}Yb в зависимости от энергии ядерного перехода

ны R -фактора в зависимости от энергии ядерного перехода в интервале 70.4–70.9 кэВ.

Как видно на рис. 2, в случае совпадения частот $\omega_n = \omega_a$ величина фактора дискретной конверсии достигает пяти порядков величины.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере $M1$ -перехода с энергией 70.6 кэВ в ^{171}Yb показано, что в водородоподобных ионах фактор резонансной конверсии может достигать многих, в данном случае пяти, порядков величины при совпадении энергий электронного и ядерного переходов. При этом резонансная конверсия становится определяющим каналом девозбуждения ядра. Данный резонанс может наблюдаться путем наложения постоянного внешнего магнитного или электрического поля. Дефект резонанса можно также компенсировать в резонансном поле излучения лазера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 99-02-17550, 02-02-17117) и контракта DTRA № DTRA01-01-P-0134 (США).

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Зон, Ф. Ф. Карпешин, ЖЭТФ **97**, 401 (1990).
2. F. F. Karpeshin, I. M. Band, M. B. Trzaskovskaya, and B. A. Zon, Phys. Lett. B **282**, 267 (1992).
3. F. F. Karpeshin, M. A. Listengarten, B. A. Zon, I. M. Band, and M. B. Trzaskovskaya, Canad. J. Phys. **70**, 623 (1992).
4. F. F. Karpeshin, I. M. Band, and M. B. Trzaskovskaya, Nucl. Phys. A **654**, 579 (1999).
5. F. F. Karpeshin, I. M. Band, M. B. Trzaskovskaya, and M. A. Listengarten, Phys. Lett. B **372**, 1 (1996).
6. F. F. Karpeshin, M. R. Harston, F. Attallah, J. F. Chemin, J. N. Scheurer, I. M. Band, and M. B. Trzaskovskaya, Phys. Rev. C **53**, 1640 (1996).
7. Ф. Ф. Карпешин, И. М. Банд, М. Б. Тржасковская, ЖЭТФ **116**, 1565 (1999).
8. M. R. Harston, T. Carreyre, J. F. Chemin, F. F. Karpeshin, and M. B. Trzaskovskaya, Nucl. Phys. A **676**, 143 (2000).
9. F. F. Karpeshin, I. M. Band, M. B. Trzaskovskaya, S. Wycech, M. Pftzner, and J. Zylicz, Phys. Rev. C **57**, 3085 (1998).
10. P. J. Mohr, Atom. Data and Nucl. Data Tables **29**, 433 (1983).
11. W. R. Johnson and G. Soff, Atom. Data and Nucl. Data Tables **33**, 406 (1985).
12. Г. Бете, Э. Солпитер, *Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами*, Физматгиз, Москва (1960).
13. H. W. Kugel and D. E. Murnick, Rep. Progr. Phys. **40**, 297 (1977).
14. V. M. Shabaev, M. Tomaselli, T. Kuhl et al., Phys. Rev. A **56**, 252 (1997).
15. И. М. Банд, М. А. Листенгартен, М. Б. Тржасковская, В. И. Фомичев, Препринты ЛИЯФ № 289 (1976), № 298–300 (1977), № 498 (1979), № 1479 (1989).