Оптический переход в ядре ²²⁹Th: основные свойства, проблемы исследований и перспективы использования

Евгений Ткаля Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

МИФИ 23 октября 2019 г.

Ядро Th-229: протонов 90, нейтронов 139



a Th-229 $_{I^{\pi}}$ E (keV) Jπ E (keV) 11/2⁺ 195.71 11/2⁺ 163.26 $9/2^{+}$ 125.41 9/2+ 97.13 M^{1} 71.82 7/2+ 42.44 $5/2^{+}$ 29.19 $M1 \quad 3/2^+$ 0.0078 5/2+ 0.0 5/2[633] 3/2[631]

 $K^{\pi}[Nn_{Z}\Lambda]\Sigma$ - Асимптотические квантовые числа модели Нильссона для деформированного ядра

$$\widehat{H} = \frac{\widehat{R}^2}{2\Im}, \qquad E \sim \quad \frac{I(I+1)}{2\Im}$$

Ротационные полосы

Энергия и период полураспада изомерного уровня



Правила отбора для М1 перехода

При *ΔК*=1: *ΔN*=0,2 *Δn_Z*=0,1 *Δ*Λ=0,1

Время жизни зависит от канала распада возбужденного уровня.

В настоящее время:

- Экспериментально обнаружен распад изомера по каналу внутренней электронной конверсии с периодом полураспада около 7 μs.
- 2. Измерены

- магнитный дипольный момент изомерного состояния $\mu_{is} = -0.37 \mu_N$ ($\mu_{gr} = 0.36 \mu_N$) - электрический квадрупольный момент $Q_s^{is} = 1.74 \text{ eb}$ ($Q_s^{gr} = 3.11 - 3.15 \text{ eb}$, $Q_0^{is} / Q_0^{gr} = 0.99$) - зарядовый радиус ^{229m}Th $\langle r^2 \rangle_{is} - \langle r^2 \rangle_{gr} = 0.012 \text{ fm}^2$, $\langle r^2 \rangle_{gr} = (5.76 \text{ fm})^2$

3. Неизвестен один из ключевых параметров - ядерный матричный элемент перехода

Основной канал распада низколежащего ядерного уровня Th-229 в атоме – внутренняя электронная конверсия на состояниях 7s и 6d



Процесс второго порядка по е доминирует при распаде ^{229m}Th вследствие полюсного поведения функции $h_L^{(1)}(\omega r)$ в фотонном пропагаторе при $\omega r < < 1$.

Зонд для исследования свойств поверхности и химического окружения.

Увидеть гамма излучение можно только в ионах ^{229m}Th^{+,++,3+...}



Вероятность гамма перехода

$$W_{\gamma} = \frac{16\pi}{9} \omega^3 B(M1) \simeq 3 \times 10^{-19} \text{ eV}$$

В(М1) – приведенная вероятность ядерного М1 перехода

"Ядерный свет"

^{229m}Th

²²⁹Th

Вероятность спонтанного излучения для М1 перехода в диэлектрике с большой шириной запрещенной зоны зависит от показателя преломления среды *n* как *n*³

$$W_{\gamma}^{Medium}(M1) = n^3 W_{\gamma}^{Vacuum}(M1)$$



Время жизни уровня при *E*_{is} = 8 eV около 30-60 мин. в зависимости от величины *n*

Электронный мостик для ^{229m}Th в ионе тория



Неупругий электронный мостик с мультипольным обменом



Безрадиационный распад низколежащего ядерного изомера ^{229m}Th в металле.

Конверсия на электронах проводимости (неупругое рассеяние электронов проводимости на ядрах). Энергетический порог у реакции ^{229m}Th(*e*,*e*')²²⁹Th отсутствует.

Время жизни изомера в "стандартном" металле < 1 с

$$\frac{1}{T} \approx n_e \sigma_e \upsilon_F \qquad \begin{array}{l} n_e \approx 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \\ \upsilon_F = \sqrt{2E_F / m_e} \approx 4.6 \times 10^{-3} \\ \sigma_{M1} \approx 10^{-30} \div 10^{-31} \text{ cm}^2 \end{array}$$

Альфа-распад первого возбужденного уровня ядра Th-229.



α-Спектр при распаде состояния 3/2*(7.8 эВ)
отличается от спектра основного состояния ядра Th-229. Будут заселяться
преимущественно уровни ротационной полосы 3/2*[631] ядра Ra-225.



Мюонный атом $(\mu_{1s_{1/2}}^{-229} \text{Th})^{*}$





Контактное взаимодействие Ферми

$$\mathbf{H}_{\mu} = -\frac{16\pi}{3} \frac{m_e}{m_{\mu}} \mu_B \frac{\boldsymbol{\sigma}}{2} |\psi_{\mu}(0)|^2$$

Энергия подуровней $E = E_{\text{int}} \frac{F(F+1) - I(I+1) - s(s+1)}{2Is}$

 $E_{\rm int} = -\mu_{\rm gr(is)}\mu_N H_\mu$

Распад ^{229m}Th через Ридберговские состояния в системе 229m Th⁴⁺ + e_{Rv}^{-} .



Внутренняя конверсия на Ридберговских состояниях с *l* >0



Начиная с *l* = 4 Ридберговский электрон «не видит» электронную оболочку иона Th⁴⁺

Управление распадом

Влияние граничных условий на гамма-распад изомера ²²⁹ Th



Управление распадом

Распад ^{229m}Th в тонкой пленке SiO₂ на кремниевой подложке



Возбуждение изомера

Прямое фотовозбуждение ядра Th-229



$$\sigma_{eff} \simeq \frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{\Gamma^{rad}}{\Delta \omega_L}$$

Обратная электронная конверсия





$$\lambda_e^{res} \simeq 10^{-7}$$
 cm

Эффективное сечение ОВЭК

$$\sigma_{\rm IIC}^{\rm eff} = \left(\frac{\lambda_e^{\rm res}}{2}\right)^2 \frac{\Gamma_{\rm IC}^{\rm tot}}{kT} \simeq 2 \times 10^{-25} \ {\rm cm}^2$$

Возбуждение Th-229m фотонами через связанные состояния электронов (дискретный спектр) оболочки атома (иона)



Возбуждение через состояния электрона в непрерывном спектре

$$G(x_2, x_1) = \sum_{n} \psi_n(x_2) \,\bar{\psi}_n(x_1) + \int \psi_c(x_2) \,\bar{\psi}_c(x_1) \frac{d^3 p_c}{(2\pi)^3}$$



Главная особенность процесса в том, что резонансное возбуждение ядра возможно ВСЕГДА, вне зависимости от структуры и особенностей ВФ связанных состояний иона Th.

Возбуждение изомера ^{229m}Th синхротронным излучением через состояние 5/2⁺[633](29 keV)



Важнейшие приложения ²²⁹Th

1. Новый стандарт времени

Ядерные часы $\Delta v/v = 10^{-19} - 10^{-20}$. Зависимость от времени фундаментальных констант и новая физика за пределами Стандартной модели (лекция М.С. 24 окт.)

- а) ионная квадрупольная ловушка Пауля (США и ЕС действующие макеты часов, МИФИ создается в настоящее время);
- б) твердотельный вариант на имплантированных ионах ²²⁹Th.

2. Лазер на ядерном переходе оптического диапазона.

В диэлектрике с шириной запрещенной зоны $\Delta \approx 11$ эВ резонансные фотоны с энергией $\omega = 8$ эВ будут взаимодействовать *непосредственно* с ядрами ²²⁹Th в основном $|5/2^+, 0.0 >$ и изомерном $|3/2^+, 7.8$ eV> состояниях минуя взаимодействие с электронной оболочкой. Открывается возможность накачки ядерной среды лазерным излучением.



LiCaAlF₆ : Ширина зоны 11.1 eV CaF₂: Ширина зоны 11.6-12.1 eV MgF₂, Na₂ThF₆, LiSrAlF₆, YLIF₄, frozen noble gases

Расщепление уровней в кристалле

за счет взаимодействия квадрупольных моментов ядерных уровней с градиентом внутрикристаллического электрического поля **EFG = (1-** γ_{∞}) $\varphi_{77} \approx -3 \times 10^{20}$ V/cm²

$$E_{m} = eQ_{gr(is)}(1 - \gamma_{\infty})\varphi_{zz} \frac{3m^{2} - J_{gr(is)}(J_{gr(is)} + 1)}{4J_{gr(is)}(2J_{gr(is)} - 1)} \qquad Q_{is} = 1.7 \text{ eb}$$



Фотовозбуждение ядер ²²⁹Th узким лазерным лучом



Усиление γ-излучения 7.8 eV за счет стимулированного излучения ансамбля изомерных ядер ^{229m}Th.



Коэффициент усиления <u>ү</u> ≈ 3 сm⁻¹

$$\chi = \frac{\lambda_{is}^2}{2\pi} \frac{\Gamma_{rad}}{\Delta \omega_{tot}} \frac{1}{1+\alpha} \left(n_{is} - \frac{n_{gr}}{g} \right) - \kappa$$

$$n_{gr} (t=0) = 10^{18} \qquad n_{is} \approx 2 \times 10^{17} \quad \text{cm}^{-3}$$

$$\lambda_{is} = 2\pi / E_{is} = 163 \pm 11 \quad \text{nm}$$

$$\Gamma_{rad} = \ln 2 / T_{1/2}^{is} \approx 3 \times 10^{-19} \text{ eV}$$

$$T_{1/2}^{is} \approx 25 \quad \text{min} \qquad \alpha = 0$$
W. Bellergert et al. BBL 104 (2010) 200802

W. Rellergert et al., PRL **104** (2010) 200802 $\Delta \omega_{tot} \leq 7 \times 10^{-13} \text{ eV}$ $\kappa \approx 1 \quad (\kappa \rightarrow 0.01) \text{ cm}^{-1}$ (the linear attenuation coefficient)

Вариант простейшего импульсного у-лазера.



 $\chi = 3 \text{ cm}^{-1}$, D = 0.1 mm, L = 5 cm, усиление $e^{\chi L} \approx 10^6$ D и L должны удовлетворять условию Френеля $F = D^2/L\lambda > 1$

²²⁹Th :
$$m = 1 \ \mu g$$
, $n_{gr}(0) = 10^{18} \div 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $n_{is} = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{is} = 4 \times 10^{14}$

Излучение будет иметь вид последовательности импульсов с частотой повторения

$$f_{rep} = Q_{is} (D/L)^2 \approx 10^4 \div 10^5 \text{ s}^{-1}, \text{ где} \qquad Q_{is} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^{is}} N_{is} \approx 2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

Продолжительность излучения ү-лазера

$$\tau \approx T_{1/2}^{is} (L/D)^2 \exp(-\chi L) \approx 100 \text{ s}$$

Средняя мощность γ -лазера $P \approx 10^{-6} \div 10^{-7} \, \text{W/µg}$.

Спасибо за внимание.