

«Многоликое множество ядер изомеров»

С.А. Карамян

«Что за прелесть эти ядра,
Каждое из них есть поэма»
(Следуя Пушкину)

1. Введение: полиморфизм – общее свойство материи.
2. Как изомеры стали “большими”.
3. Свойства изомеров.
4. Особенности изомеров.
5. Ядерные реакции с изомерами.
6. Изомеры в атомно-ядерных процессах.

Полиморфизм видов:

В кристаллах – разная симметрия решетки;

В молекулах – разное расположение атомов;

В атомах – долгоживущие метастабili;

В ядрах – ядерные метастабильные состояния, изомеры.

История изомеров ядер:

Открыты независимыми группами в 1935 г. при облучении нейтронами бромистого этила:

- Б.Курчатов, И.Курчатов, Л.Мысовский, Л.Русинов, ДАН СССР, 200, 1201 (1935).
L.Szillard and T.A.Chalmers, Nature, 135, 98 (1935).

Первая модель, изомер как спиновая ловушка:

C.F. von Weizsacker, Naturwissenschaften, 24, 813 (1936).

Тогда вспомнили слова F.Soddy, что ядра могут иметь состояния, отличающиеся по стабильности и модам распада:

F.Soddy, Nature, 99, 433 (1917).

Также наблюдение в солях урана дочерних активностей UZ и UX₂, идентифицированных потом, как ядра ^{234g,m}Pa:

O.Hahn, Chem. Berichte 54, 1134 (1921).

После войны в Ленинградском Физтехе продолжали работы по выделению изомеров:

- Л.И. Русинов, А.С. Карамян, ДАН СССР, нов. Сер. 55, 603 (1947).

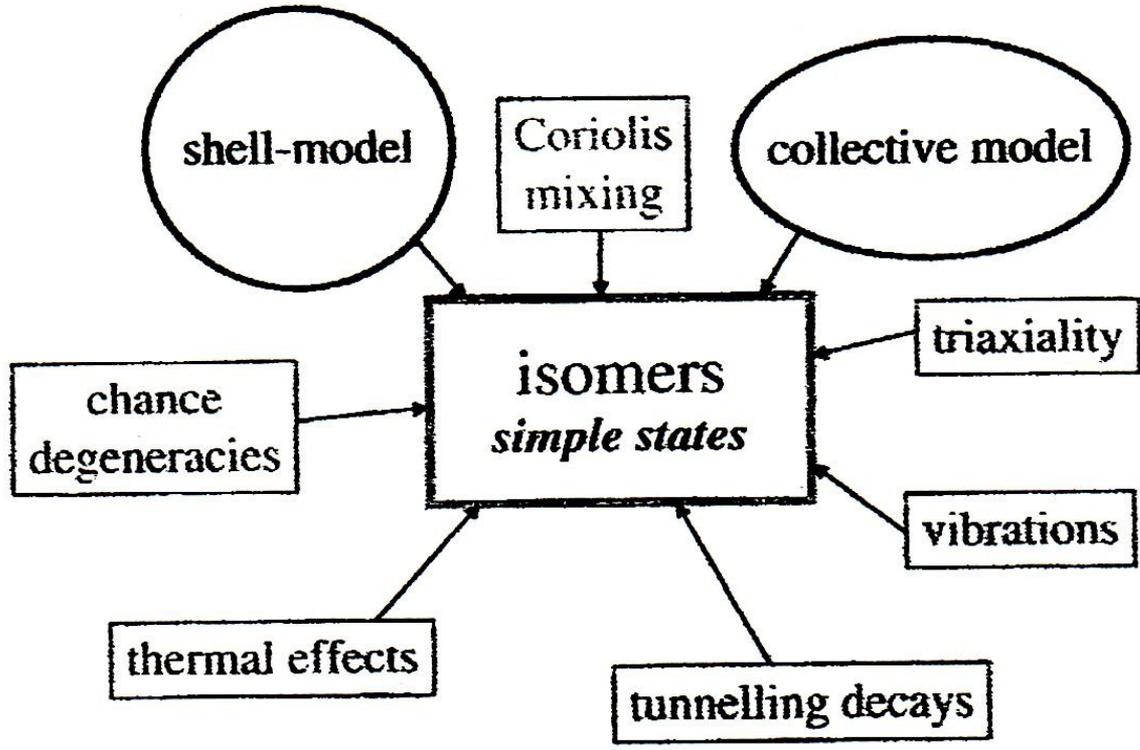
Причины изомерии

- a) Структура;
- b) Спиновый запрет;
- c) Запрет по числу K;
- d) Аномальная деформация.



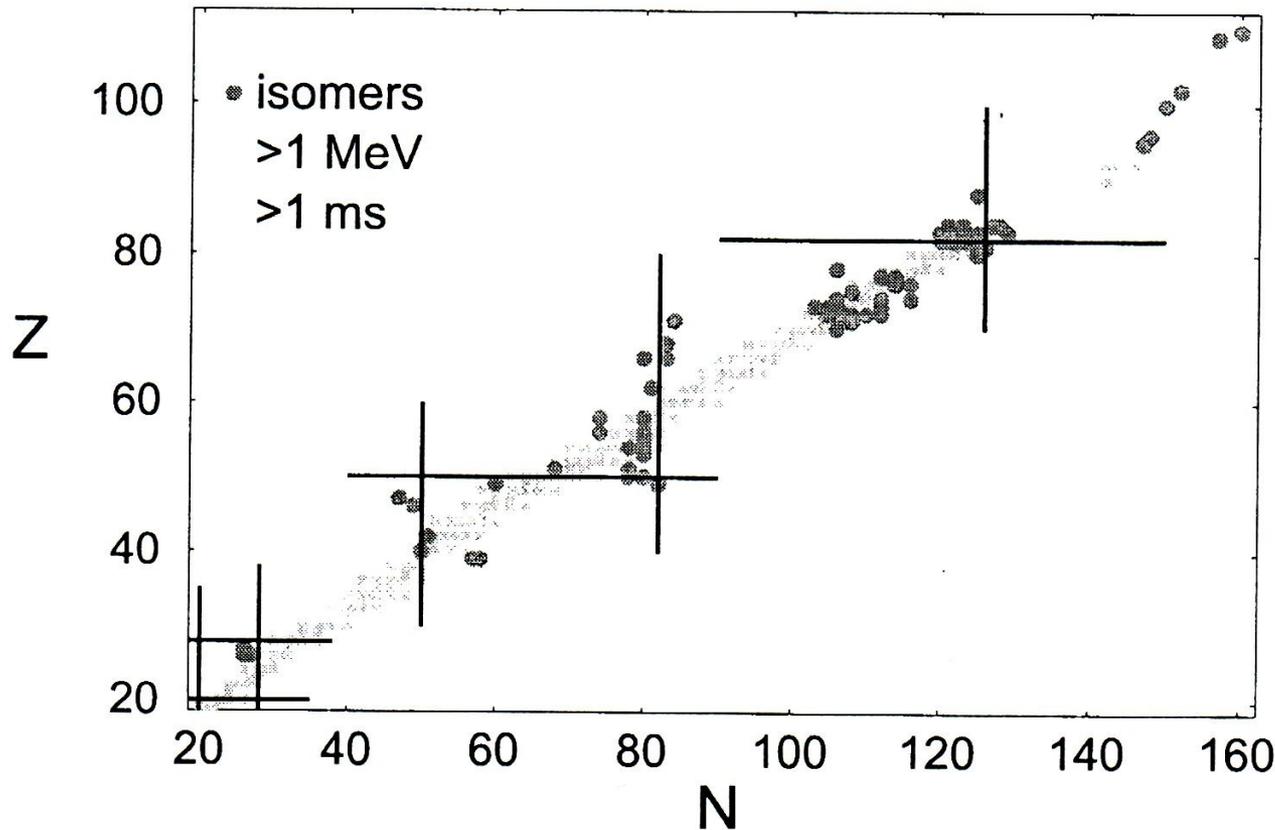
Потенциальный барьер

Процессы, влияющие на распад изомеров



- Изомерия – ключ к пониманию строения ядра;
- Практическое использование изомеров.

Расположение изомеров на плоскости (Z,N), отобранные состояния с $T_{1/2} > 1$ мс и $E^* > 1$ МэВ. Замкнутые оболочки показаны пересекающимися отрезками



острова изомерии

“Isomers: stepping stones to the unknown” (P. Walker 2006)

- a) О. Бор и Б. Моттelson доказали, что ядро – квантовый ротатор, на примере спектра уровней ^{180}Hf при распаде $^{180\text{m}}\text{Hf}$ (1953);
- b) Изомерный запрет стабилизирует возбужденное ядро при $E^* > B_n$;
- c) Возможна стабилизация ядер на границе ядерной устойчивости;
- d) Изомеры в сверхтяжелых увеличивают время жизни;
- e) Изомерный запрет помогает наблюдать протонный распад;
- f) Наблюдение не сохранения четности в электромагнитном распаде.

Таким образом: изомеры служат ступенями к новому знанию, не только в качестве конкретного объекта спектроскопии ядра.

Особенные изомеры

Субъективно были выделены 16 ядер с особенными свойствами. Но остановлюсь только на нескольких:

^{12m}Be – самое легкое ядро, живущее ~ 1 мкс при $E^*=2,24$ МэВ;

^{94m}Ag – запаздывающий протонный распад с уровня 6,7 МэВ, 21^+ ;

^{99m}Tc – медицинский источник, $T_{1/2}=6,01$ часа;

^{152m}Er – рекордная энергия 13,4 МэВ и спин 36, задержка эмиссии нейтрона в 10^6 раз;

● $^{178m2}\text{Hf}$ – высокая энергия 2,45 МэВ, 16^+ , при длинном периоде 31 год;

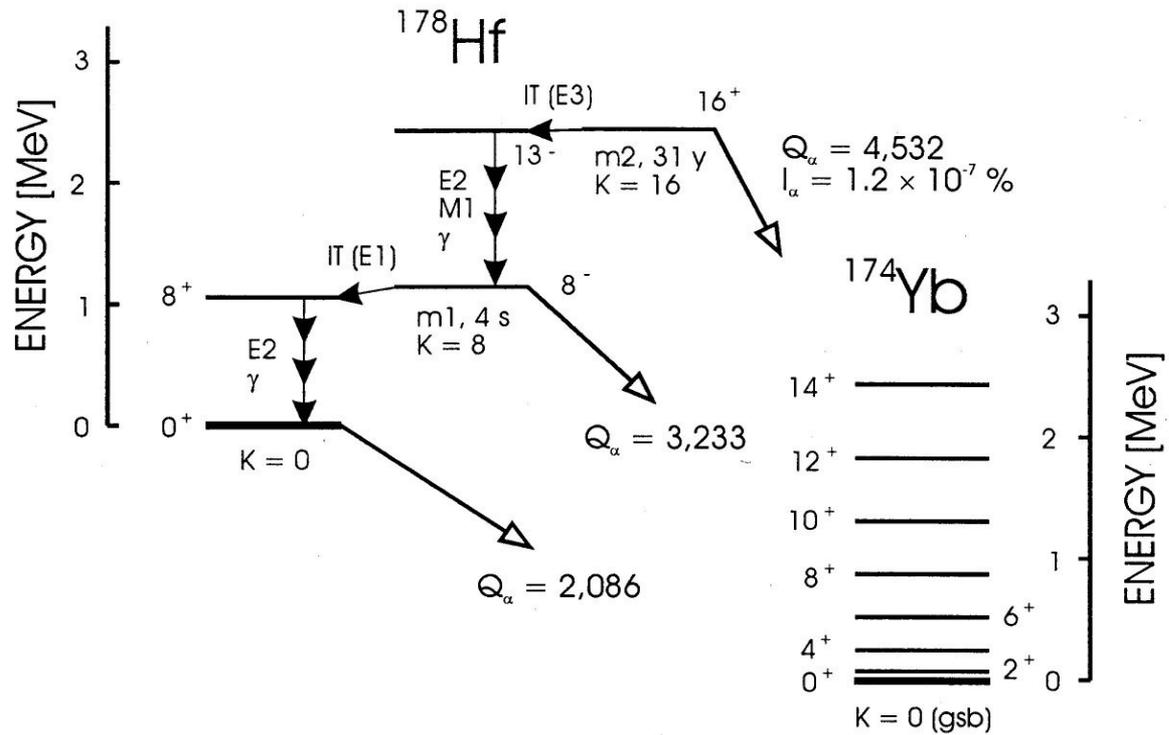
^{180m}Ta – единственный стабильный изомер;

● ^{212m}Po – рекордная энергия α распада;

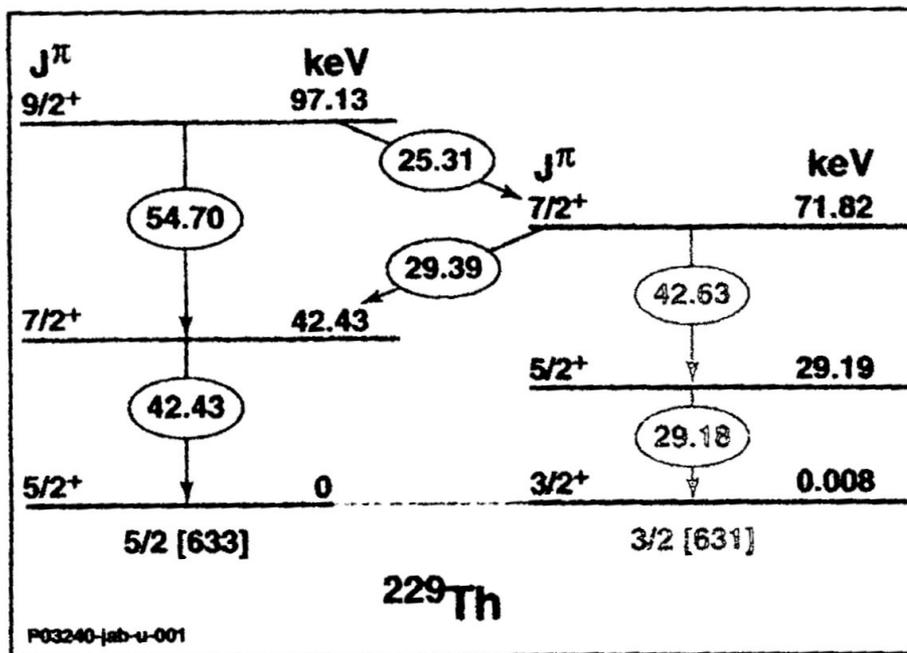
^{229m}Th – рекордно низкая энергия изомера 7,6 эВ $3/2^+$ над $5/2^+$ осн. сост.;

● $^{242mf}\text{Am}$ – спонтанно-делящийся изомер.

Схема альфа распада изомера $^{178m2}\text{Hf}$



Нижние уровни ^{229}Th и каскады, заселяющие основное и изомерное состояния

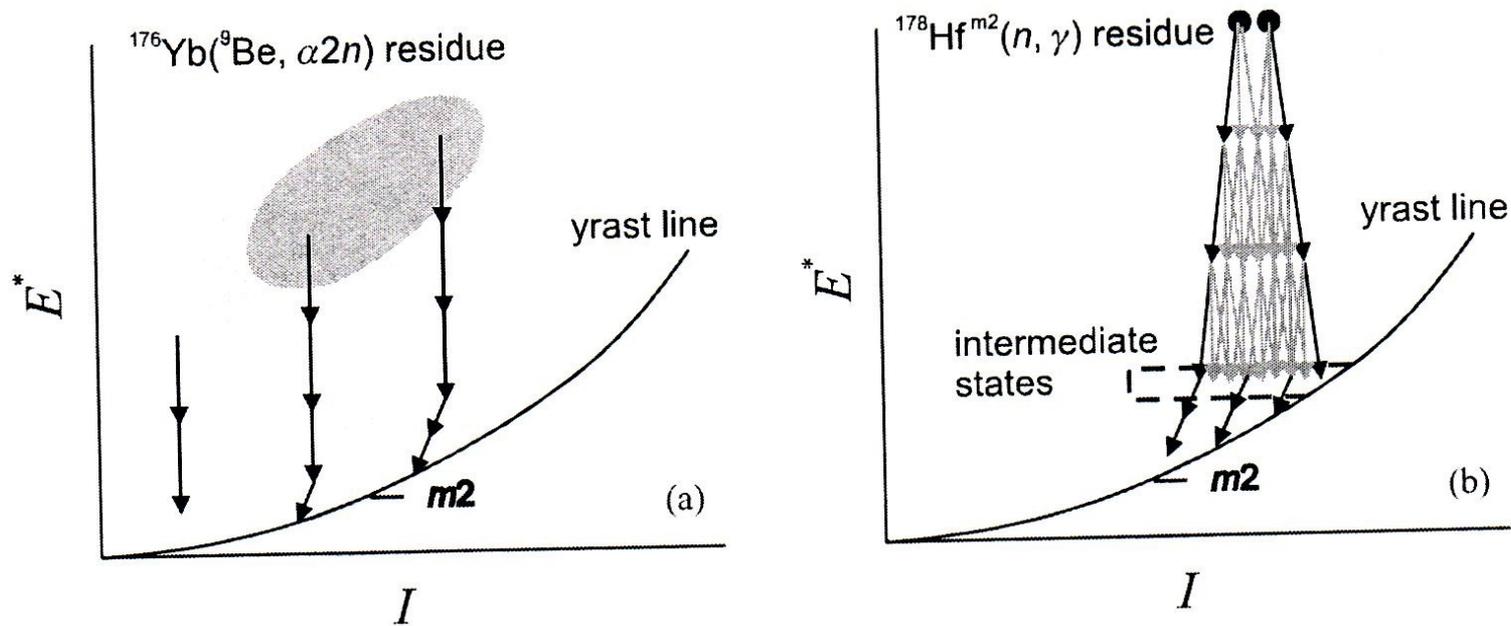


при α распаде ^{233}U

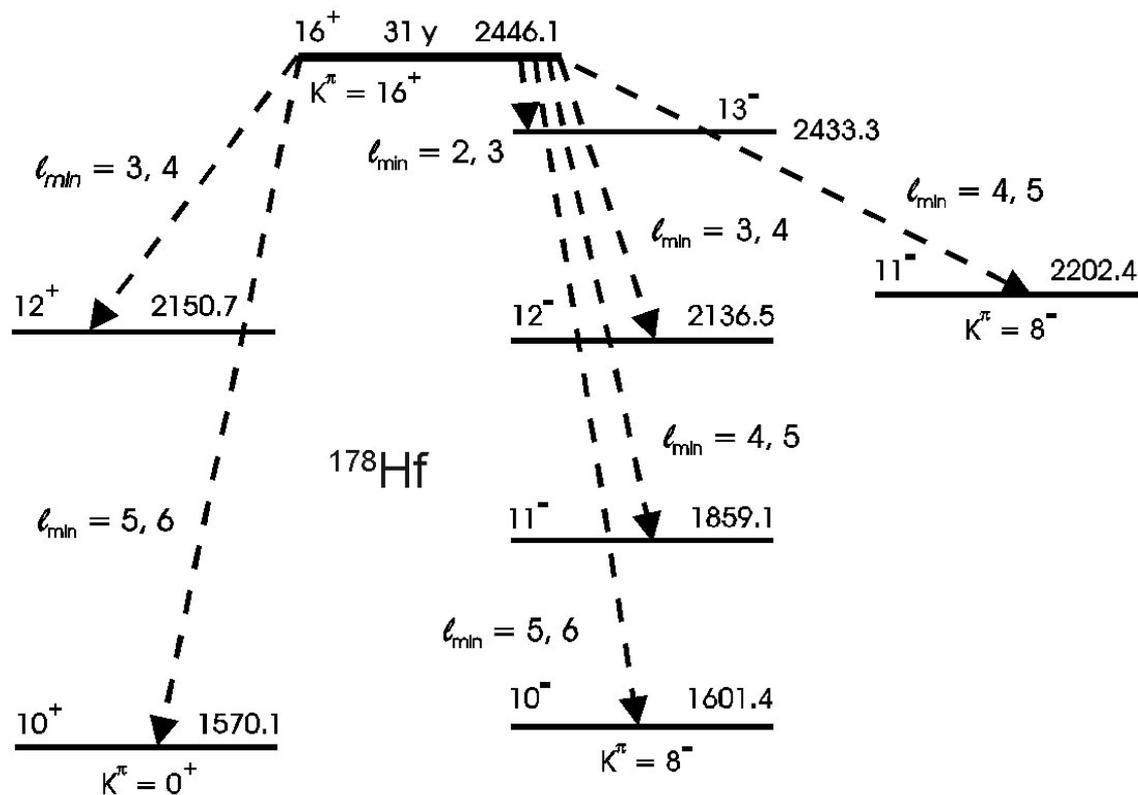
Реакции с изомерами (основные результаты 2000-х)

- Реакции с изомера на изомер с мишенями $^{178m2}\text{Hf}$ и ^{180m}Ta ;
Разрядка изомера ^{180m}Ta ;
- Разрядка изомеров $^{178m2}\text{Hf}$, ^{177m}Lu с ускорением теплового нейтрона до сотен кэВ;
- Заселение и разрядка изомеров при кулоновском возбуждении – ослабление запретов.

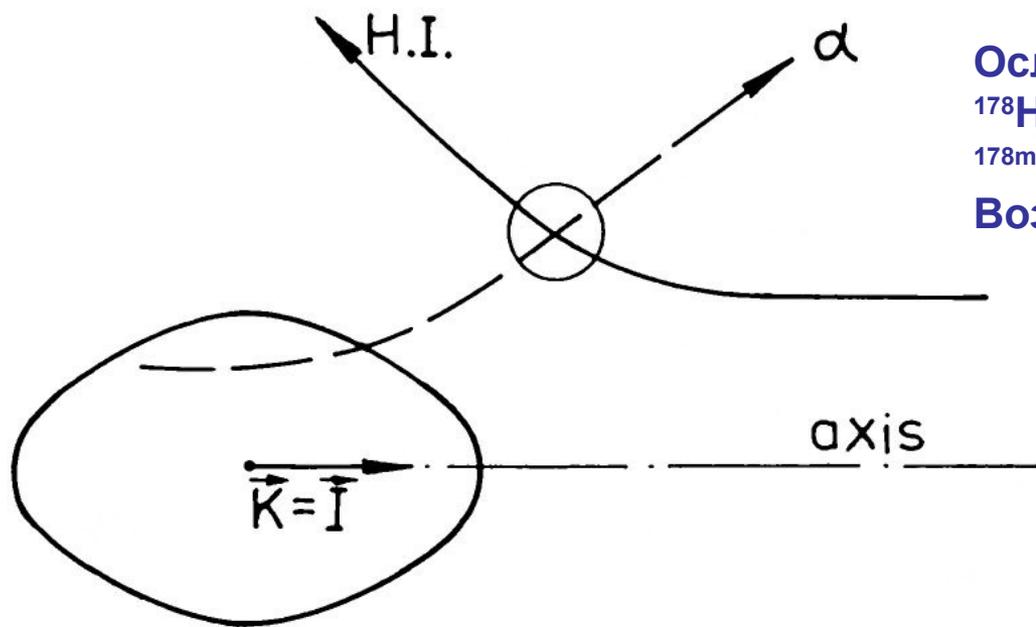
Схема заселения изомера в реакции $^{178m2}\text{Hf}(n,\gamma)$



Ядерные переходы, соответствующие ускорению нейтрона при неупругом рассеянии на изомере $^{178m2}\text{Hf}$. Энергии уровней – в кэВ



Схематическое изображение взаимодействия частицы с аксиально деформированным ядром



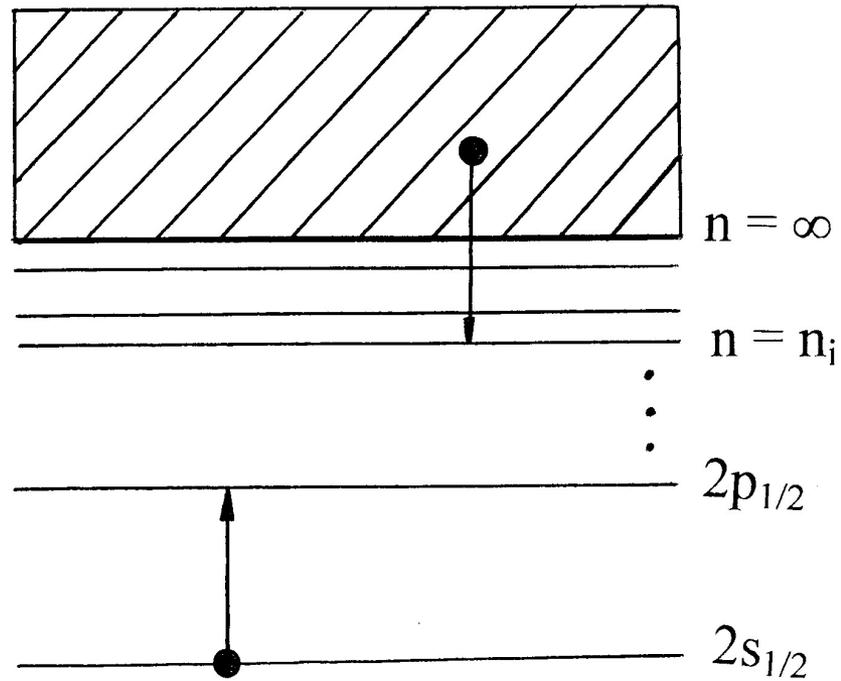
Ослабление К запрета при Кул. возб.
 $^{178}\text{Hf} \rightarrow ^{178\text{m}2}\text{Hf}$ и при α -распаде
 $^{178\text{m}2}\text{Hf} \rightarrow ^{174}\text{Yb}$.
Возможная схема объяснения.

Атомно-ядерные процессы и изомеры

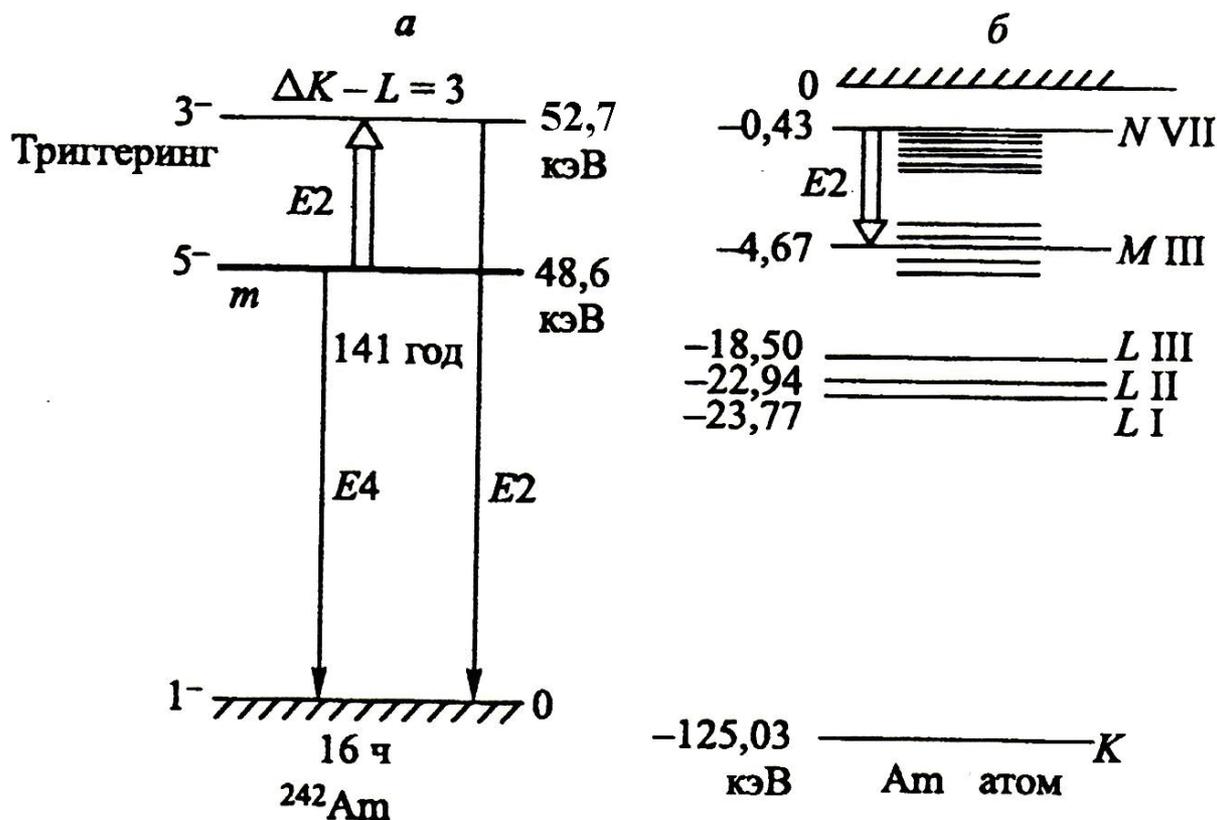
NEET и NEEC – перекрестный разговор между атомом и ядром;

- Возможность разрядки $^{242m1}\text{Am}$ и ^{93m}Mo в ловушках;
- Новая схема разрядки при торможении в газе ядра отдачи изомера, продукта реакции;
- Оценки вероятности NEEC.

Схема ди-электронной рекомбинации



Сравнение квантовых состояний ядра ^{242}Am и атома Am. Энергия ядерного перехода между уровнями 5⁻ и 3⁻ соответствует заселению M-вакансии в атоме с вышележащих состояний



Схемы уровней ядер ^{242}Am и ^{93}Mo выглядят подобно, несмотря на различие шкалы энергий возбуждения и на другие существенные различия этих ядер. Энергии уровней и переходов – в кэВ

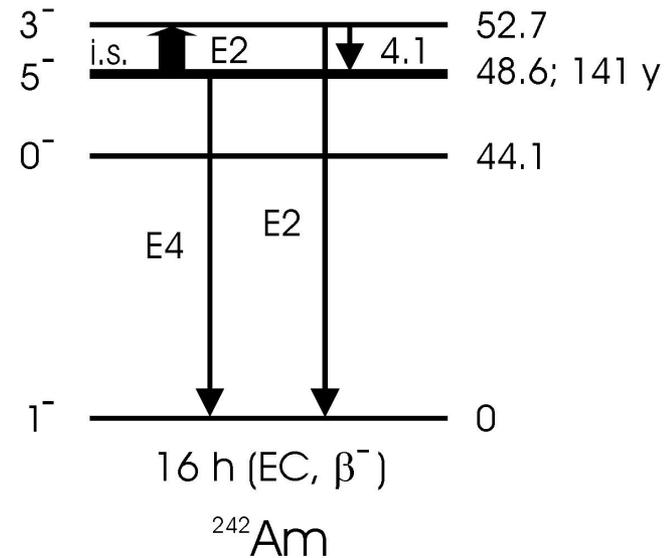
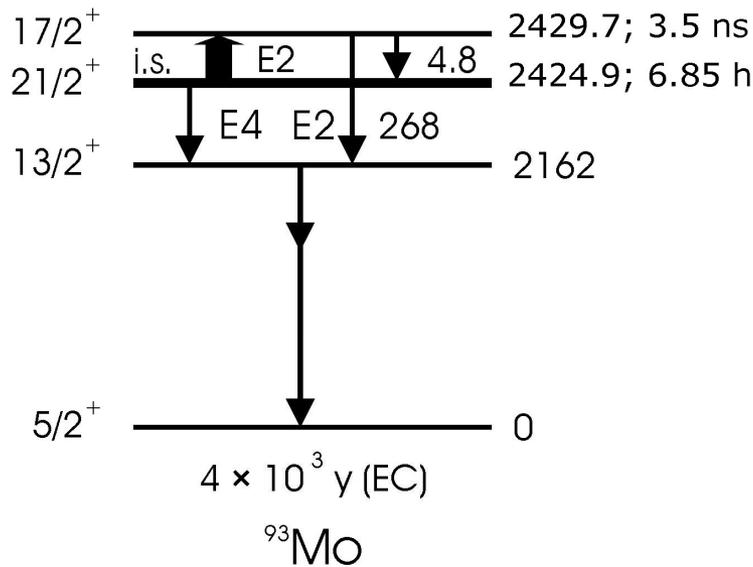
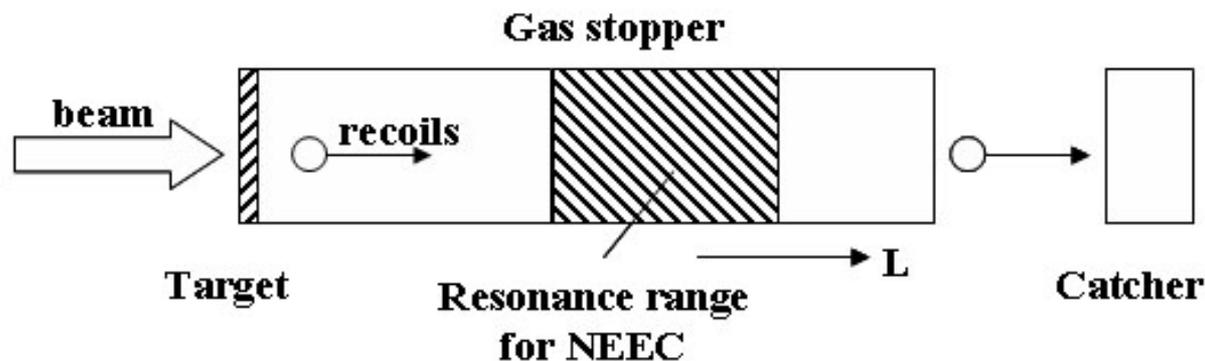


Схема образования и торможения ядра отдачи-изомера в газовой мишени. Штриховкой показана область, где многократно возникают условия для резонанса НЕЕС



ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ ПО ИЗОМЕРАМ С УЧАСТИЕМ С. А. КАРАМЯНА

1. S. A. Karamian and J. J. Carroll, **Phys. Rev. C**, **83**, 024604 (2011).
Cross Section for Inelastic Neutron “Acceleration” by $^{178}\text{Hf}^{m2}$
2. S. A. Karamian, J. J. Carroll, N. V. Aksenov, et al. To be published in **Nucl. Instr. Meth. A** (2011).
Production of Isomers in Compound and Transfer Reactions with ^4He ions
3. S. A. Karamian and J. J. Carroll, **Laser Phys.** **20**, 977 (2010). *Possible Depletion of Isomers in Perturbed Atomic Environments*
4. A. B. Hayes, D. Cline, C. Y. Wu, et al. To be published in **Intern. J. Modern Phys.** (2011). *New Structures in ^{178}Hf and Coulomb Excitation of Isomers*
5. A. B. Hayes, D. Cline, K. J. Moody, et al. **Phys. Rev. C**, **82**, 044319 (2010). *Coulomb Excitation of a ^{242}Am Isomeric Target: E2 and E3 Strengths, Rotational Alignment, and Collective Enhancement*
6. J. J. Carroll, S. A. Karamian, R. Propri, et al. **Phys. Lett. B**, **679**, 203 (2009). *Search for Low-Energy Induced Depletion of $^{178}\text{Hf}^{m2}$ at the SPring-8 Synchrotron*
7. S. A. Karamian, C. A. Ur, J. Adam, et al. **Nucl. Instr. Meth. A**, **600**, 488 (2009)
Spallation and Fission Products in the $(p + ^{179}\text{Hf})$ and $(p + ^{\text{nat}}\text{Hf})$ Reactions
8. S. A. Karamian, J. J. Carroll, S. P. Tretyakova, et al. **Phys. Rev. C**, **75**, 057301 (2007). *Weak K Hindrance in alpha Decay of the $^{178}\text{Hf}^{m2}$ Isomer*

March, 11-th, 2011