



РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Стимуляция девозбуждения ядерных изомеров в плазме электрического взрыва проводников как составная часть плазменных технологий

Кольцов

Владимир Владимирович

Радиевый институт

им. В.Г. Хлопина,

Санкт-Петербург

E-mail: vkoltsov@khlopin.ru

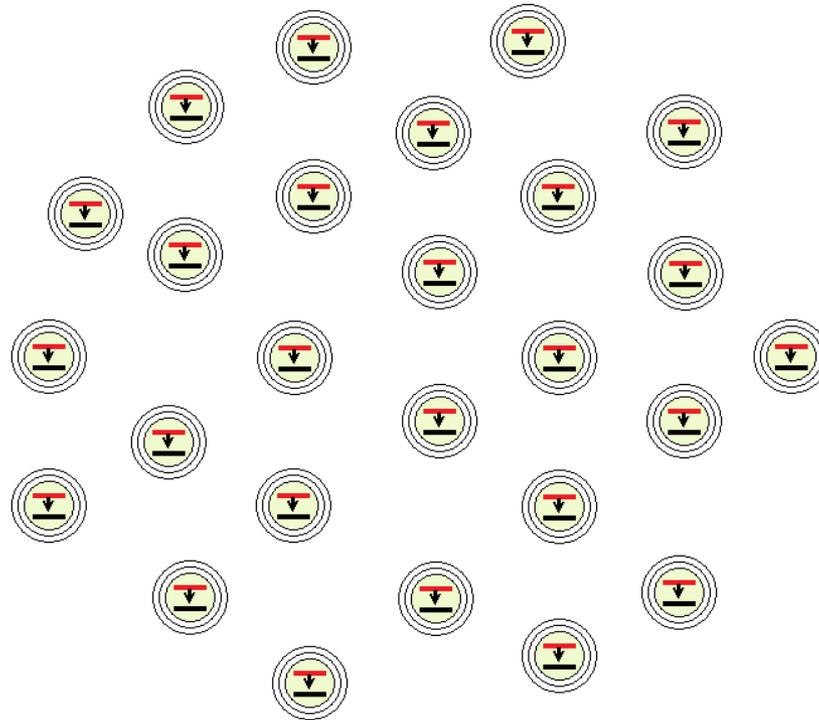
Ядерные изомеры в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина

1. Исследование влияния среды на вероятность спонтанных изомерных переходов.
2. Участие в исследованиях стимулированного девозбуждения ядерных изомеров в лазерной плазме.
3. Разработка радиохимических технологий наработки и очистки ядерного изомерного материала.
4. Изготовление мишеней и источников с ядерными изомерами.

Ядерная изомерия была открыта в 1930-х годах И.В. Курчатовым с сотрудниками (ФизТех) и Л.В. Мысовским с сотрудниками Радиевого института.

Цель исследований

Цель – создание управляемого источника ядерной энергии на основе стимуляции девозбуждения ядерных изомеров.



Необходимо лавинообразно или внешним воздействием с большим КПД стимулировать массовое девозбуждение ядерных изомеров.

Пока эта задача не решена.

План доклада

1. Введение

- Спонтанные ядерные изомерные переходы.
- Возможные способы стимуляции девозбуждения ядерных изомеров.
- Обзор исследований без использования плазмы с изомерными ядрами.
- Обзор исследований с изомерными ядрами в лазерной плазме.

Вывод: изомерный источник энергии не получился, но накоплен большой материал.

2. Перспективность исследований в плазме электрического взрыва проводников.

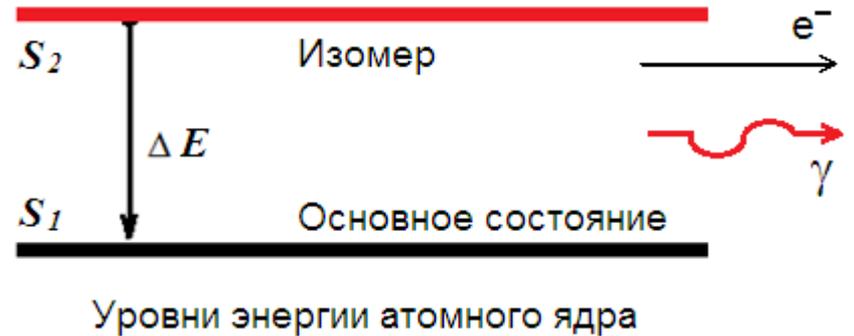
3. Предложение НИОКР управляемого источника энергии на основе изомера ^{186m}Re .

Основная цель доклада :

Показать возможность в настоящее время реализации эффективной стимуляции девозбуждения ядерных изомеров и создания управляемого источника энергии.

Спонтанные изомерные переходы

Долгоживущий изомер образуется при большом различии в структуре ядерных состояний, например в спинах S_2 и S_1 .



1. Вероятность излучения γ -кванта с длиной волны λ

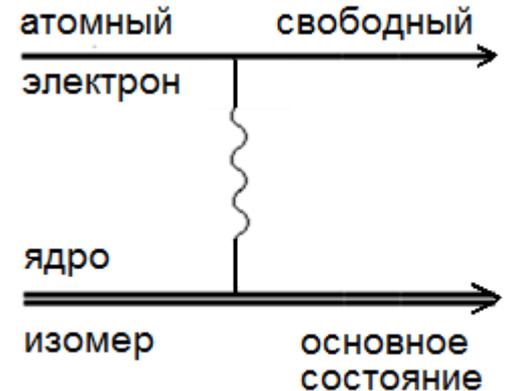
$$P_{\text{изл}} \sim \alpha \frac{c}{\lambda} \left(\frac{R_{\text{ядра}}}{\lambda} \right)^{2L}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}, \quad L = |S_1 - S_2|$$

2. Вероятность конверсионного перехода

$$P_{\text{конвер}} = \beta_{\text{конвер}} P_{\text{изл}}$$

$$\beta_{\text{конвер}} \sim \alpha (\alpha Z)^3 \left(\frac{2 m_e c^2}{\Delta E} \right)^{L+5/2} \gg 1 \quad \text{при } \Delta E < 10 \text{ кэВ}$$



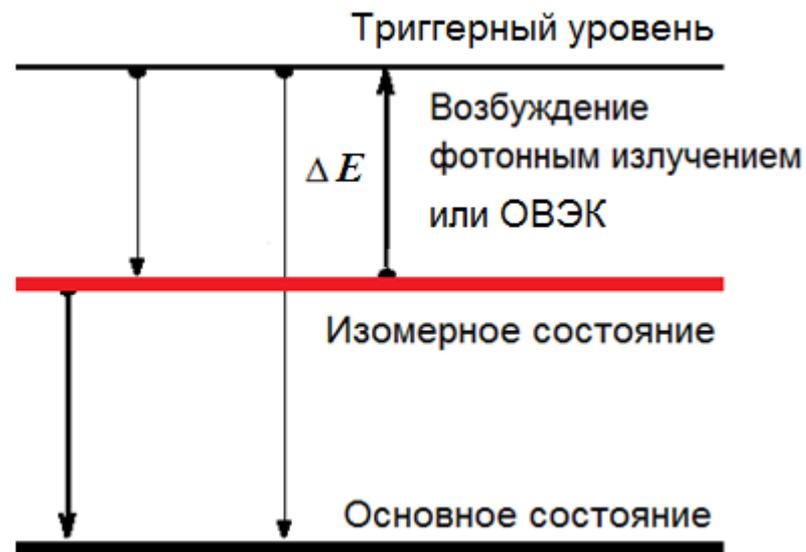
Для изомерных переходов малой энергии более вероятна электронная конверсия и обратно – возбуждение изомера более эффективно через возбуждение электронной оболочки атома.

Способы стимуляции девозбуждения изомерного состояния

Девозбуждение изомера
через триггерный уровень



Прямая стимуляция
изомерного перехода
фотонным излучением



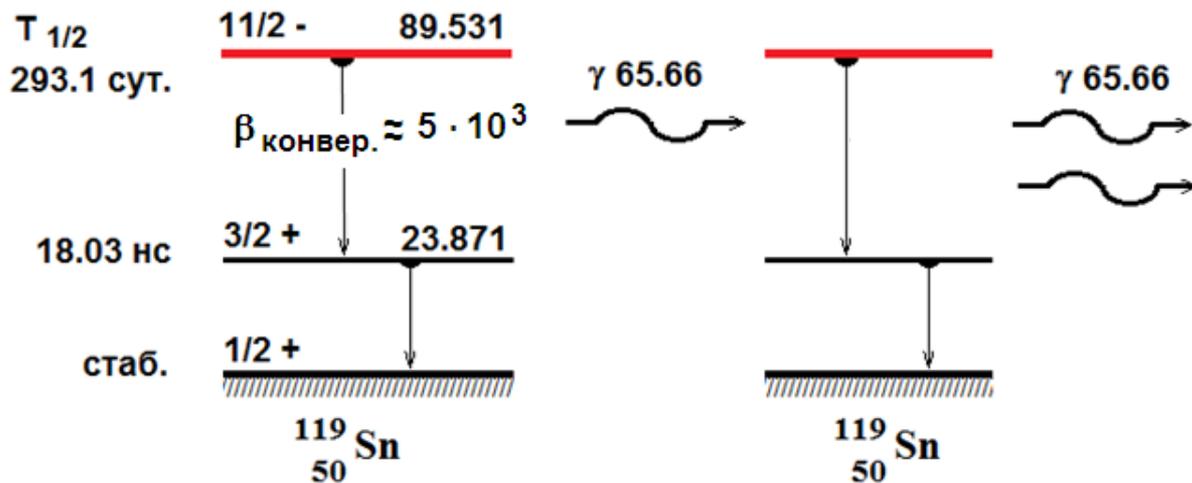
1. Облучение изомера фотонами на частоте перехода $\omega \approx \Delta E / \hbar$:
 - стимуляция прямого изомерного перехода (идея гамма-лазера, пока не получилась);
 - возбуждение триггерного уровня.
2. Возбуждение триггерного уровня при передаче энергии из атомной оболочки на ядро (ОВЭК).

Мультипольность триггерного перехода меньше мультипольности прямого изомерного перехода.

В практически важных случаях $\Delta E > 1$ кэВ.

Первые попытки стимуляции девозбуждения изомеров: гамма-лазер (Л.А. Ривлин, 1961)

Пример эксперимента (Скоробогатов, ..., 1999).



Концентрация изомера ^{119m}Sn
 $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

(ат. концентрация $\approx 2 \cdot 10^{-2} \%$)

При условиях Мессбаура
в кристалле SnO_2

эффект $0.07 \pm 0.03 \%$

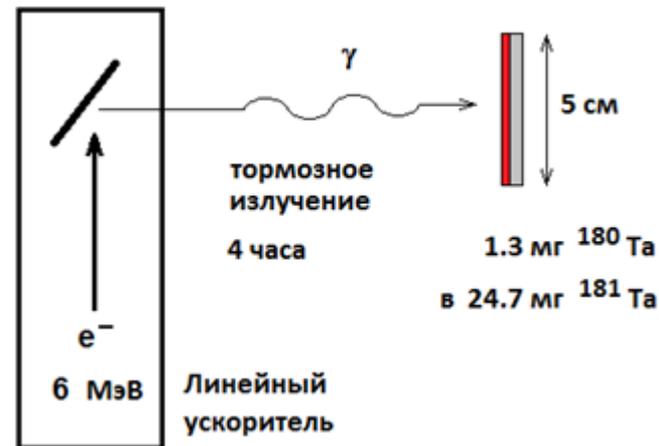
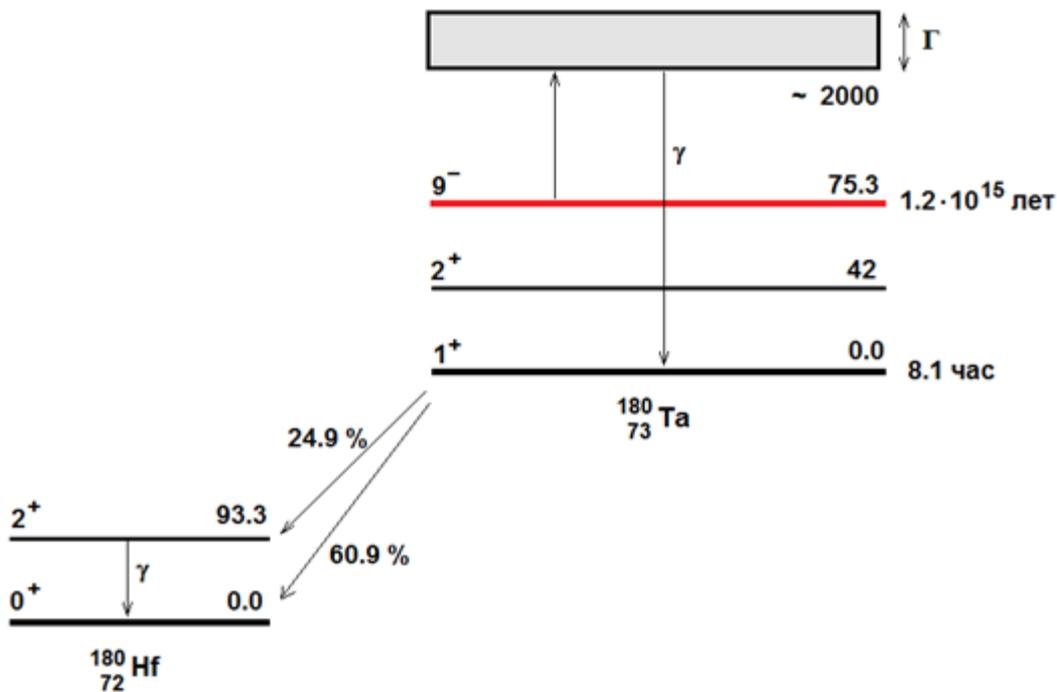
от интенсивности

спонтанного излучения.

1. Вывод по многим экспериментам (Ривлин, 2008): индуцированного излучения не видели.
 - При большом $T_{1/2}$ неоднородное уширение γ -линий много больше естественной ширины.
 - При малом $T_{1/2}$ не создать инверсную заселенность при Мессбауровских условиях.
2. Конверсионный переход также резонансно индуцируется γ -квантами и конкурирует с индуцированным излучением γ -квантов (Кольцов, 1993, 2018).

Стимуляция девозбуждения изомеров в принципе возможна,

пример – девозбуждение изомера ^{180m}Ta тормозным излучением (Collins, ..., 1988)

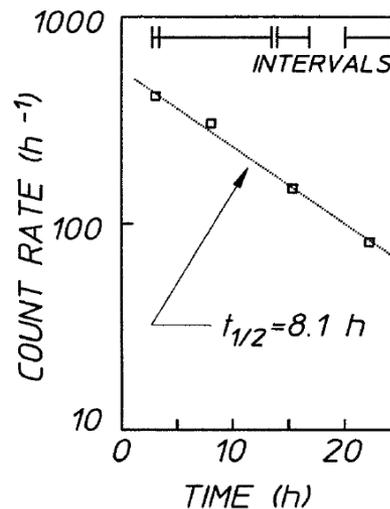


Сечение возбуждения триггерного уровня

$$\sigma \Gamma \sim 5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2 \cdot \text{кэВ.}$$

Вывод: для источника энергии возбуждение

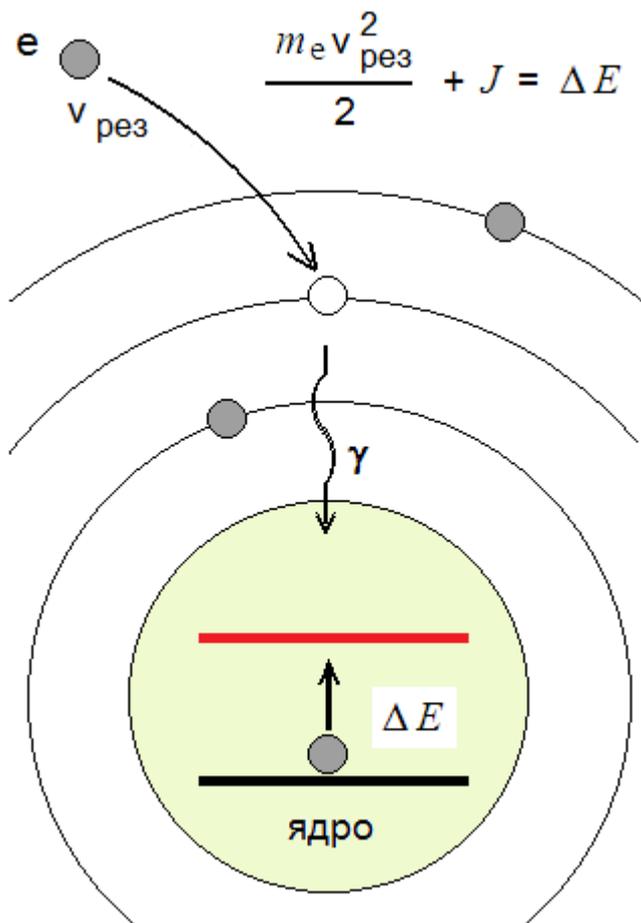
триггерных уровней большой энергии неэффективно.



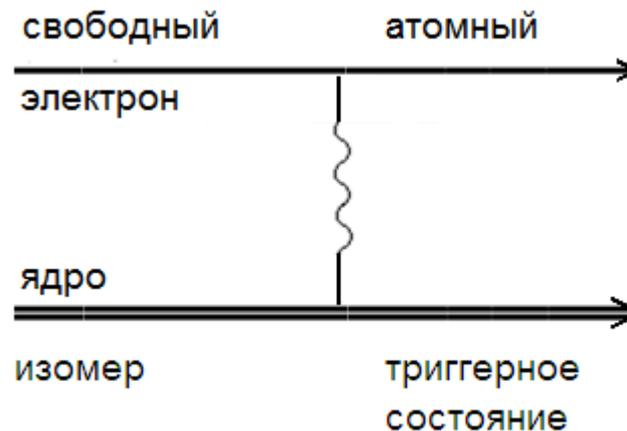
Интенсивность
линии Hf ($K\alpha$).

Эффективный механизм возбуждения триггерного ядерного уровня

– обратная внутренняя электронная конверсия (ОВЭК) (Гольданский, Намиот, 1976)



J – энергия связи электрона в атоме.



Сечение ОВЭК

$$\sigma \sim \hat{\lambda}_e^2 = \left(\hbar / m_e v_{рез} \right)^2$$

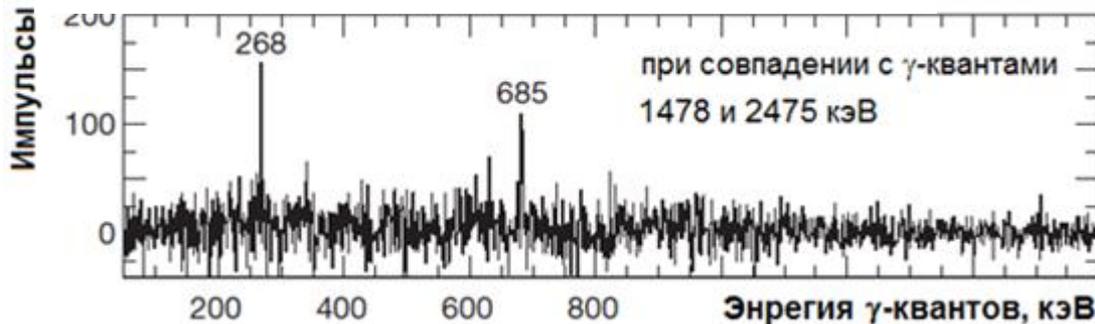
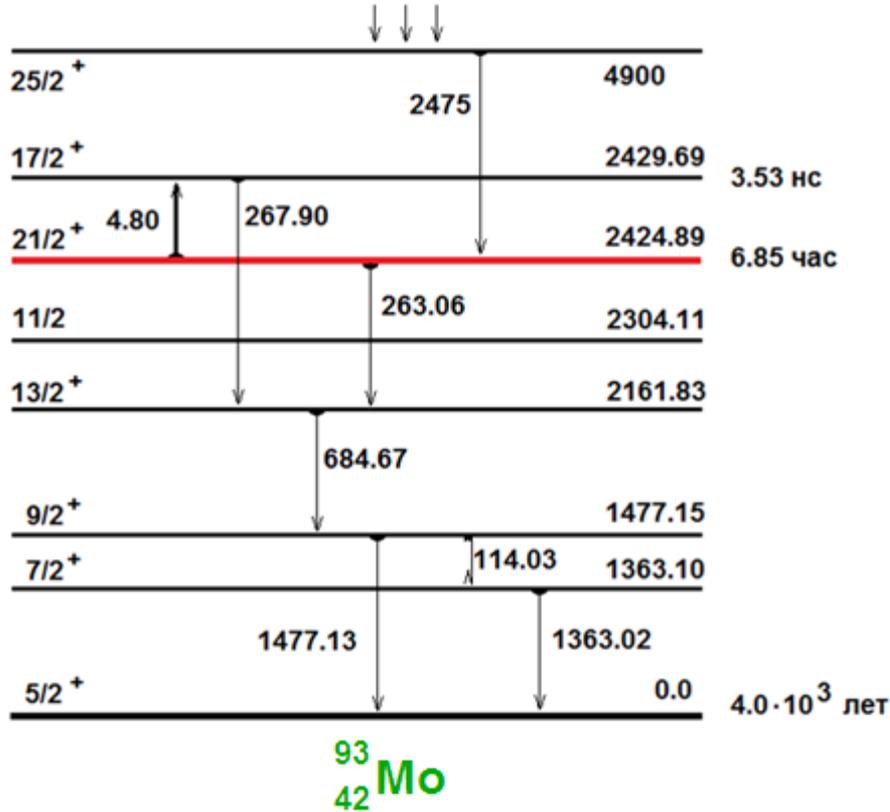
Получено прямое экспериментальное подтверждение ОВЭК

(Chiara, Carroll, Karamian, ..., 2018).

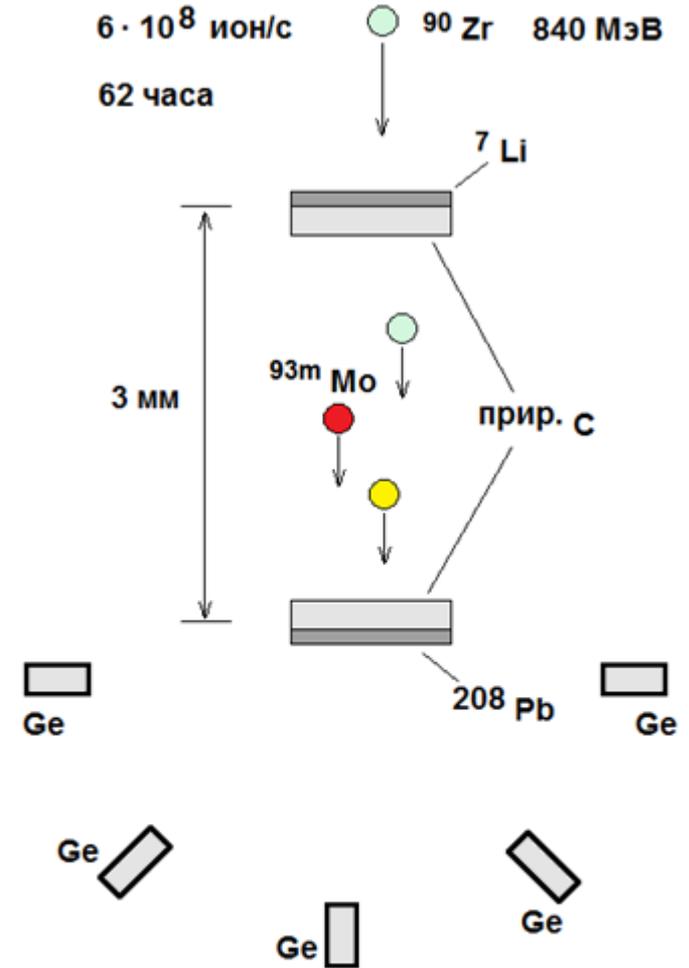
Эксперимент по наблюдению ОВЭК

(Chiara, Carroll, Karamian, ..., 2018)

После испарения нуклонов из $^{90}\text{Zr} + ^7\text{Li}$

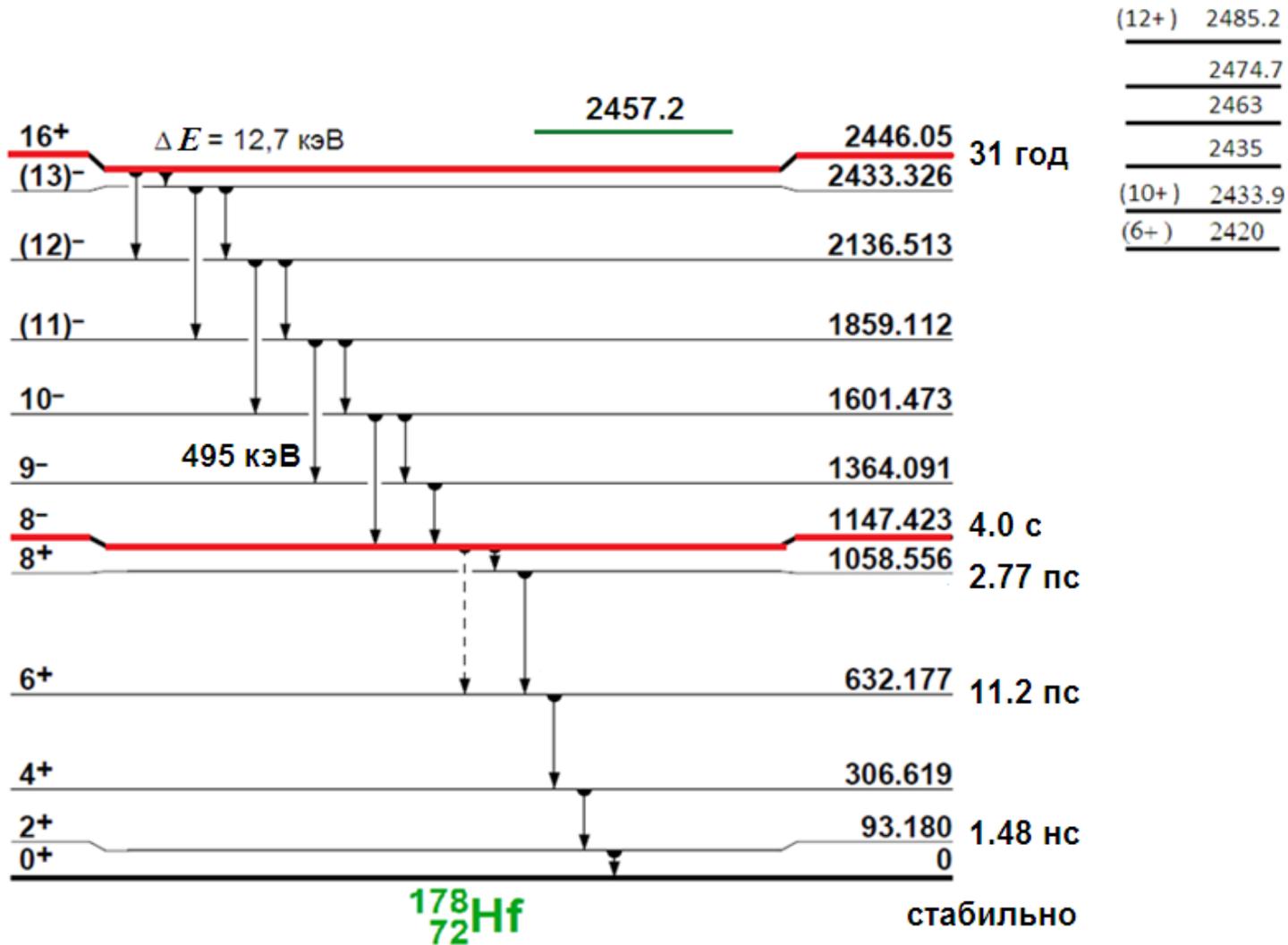


ATLAS facility (Argonne National Laboratory)



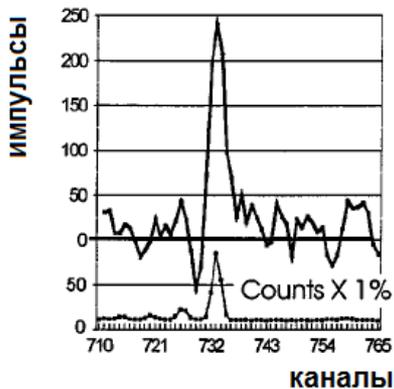
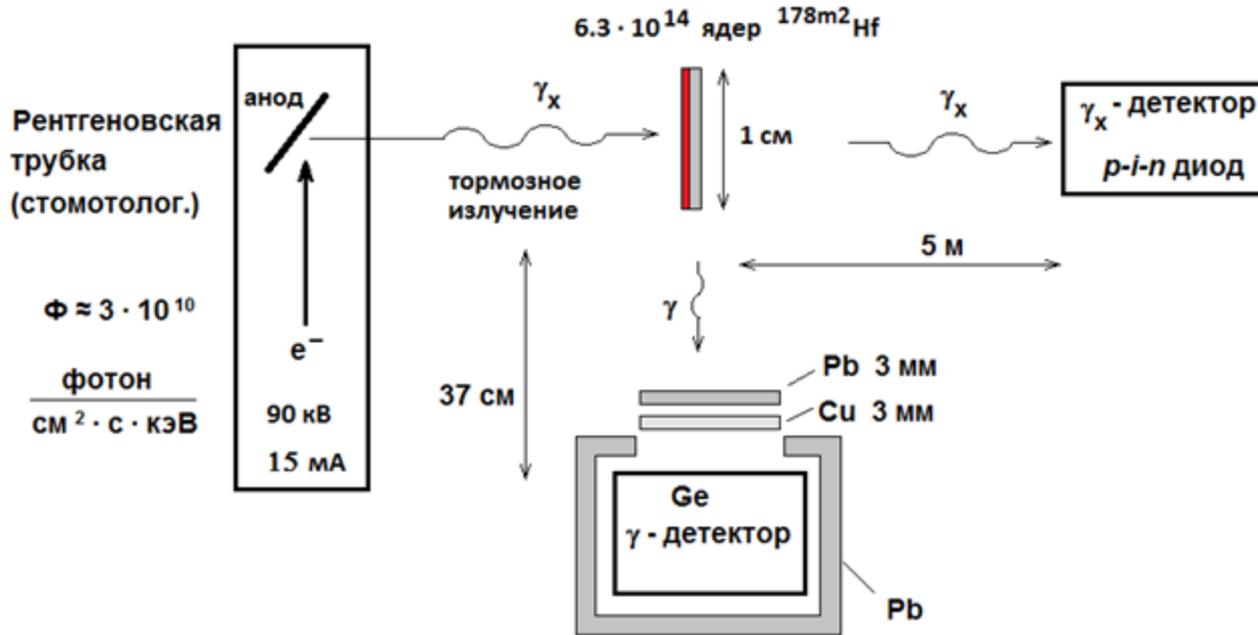
92 гамма-детектора
в режиме совпадений

Измер $^{178m2}\text{Hf}$ – наиболее интересный объект исследований (Collins, ... 1999)



- Особенность – радиохимией трудно разделить основное и изомерное состояния ^{178}Hf .
- В основном рентгеном облучали мишень с изомером $^{178m2}\text{Hf}$.
- Нет однозначного эксперимента по стимуляции девозбуждения изомера.

Девозбуждение $^{178m2}\text{Hf}$ тормозным излучением ? (Collins, Karamian, Kirischuk, ..., 1999)



Спектр
(пик 495 кэВ)
индуцированного
излучения $^{178m2}\text{Hf}$.

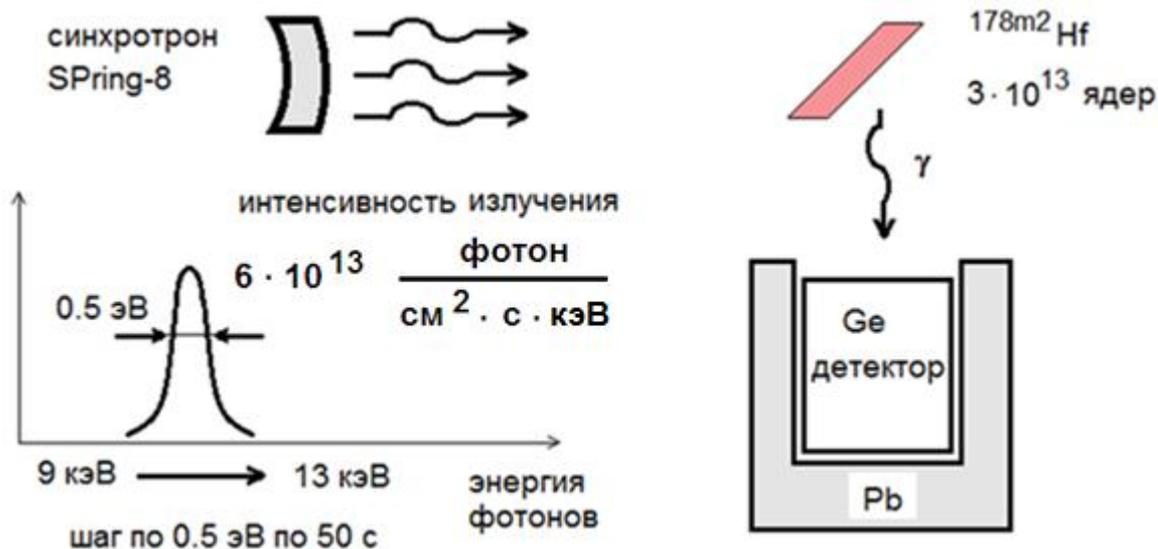
Экспозиция облучения 546 с в течение 24 часов.

Эффект (4 ± 2)% от спонтанного излучения.

Сечение возбуждения триггерного уровня

$$\sigma_{\Gamma} \sim 1 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2 \cdot \text{кэВ}$$

Девозбуждение $^{178m2}\text{Hf}$ синхротронным излучением? (Collins, Kirischuk, ..., 2002)



Эффект:

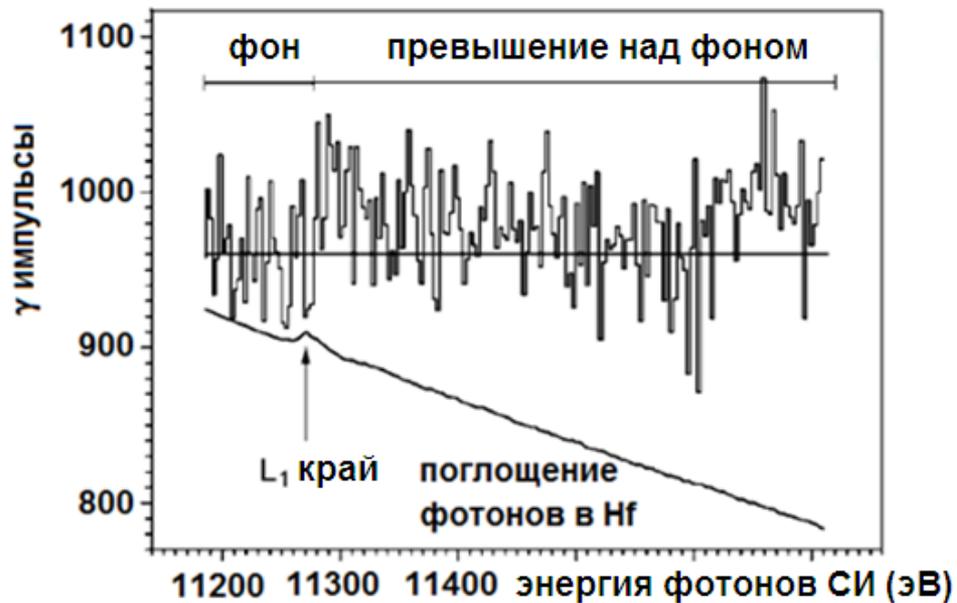
превышение интенсивности

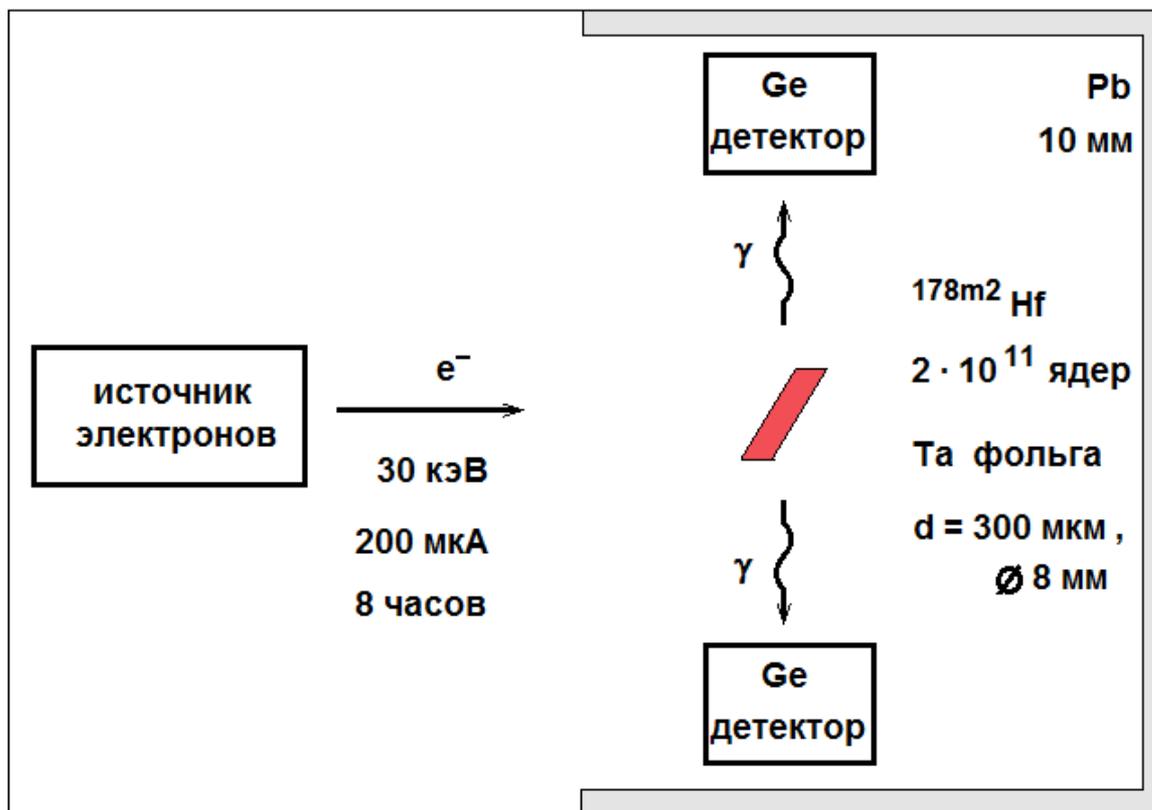
γ -квантов $^{178m2}\text{Hf}$ над фоном

$3.3 \pm 0.76 \%$

Сечение девозбуждения

$^{178m2}\text{Hf}$ фотонами $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$





Эффект: превышение интенсивности γ -квантов $^{178m2}\text{Hf}$ над спонтанным излучением 2.9 ± 0.7 % .

Сечение девозбуждения $^{178m2}\text{Hf}$ электронами $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-27}$ см² .

Вывод: различные варианты облучения мишеней $^{178m2}\text{Hf}$ рентгеном и электронами не дали однозначного подтверждения стимуляции девозбуждения изомера.

Перспективные изомеры $T_{1/2} > 3$ суток (Карамян, 2008 + данные последних лет)

Изомер	$T_{1/2}$	E_{is} , кэВ
^{91m}Nb	61 сут	105
^{92m}Nb	16,1 лет	31
^{97m}Tc	90 сут	97
^{102m}Rh	2,9 лет	141
^{108m}Ag	418 лет	109
$^{110m}\text{Ag}^{**}$	250 сут	118
^{113m}Cd	14,1 лет	264
$^{114m1}\text{In}$	49,5 сут	180
^{117m}Sn	13,6 сут	315
$^{119m}\text{Sn}^*$	293 сут	90
^{121m}Sn	55 лет	6,3
^{121m}Te	154 сут	294
$^{123m}\text{Te}^*$	119,7 сут	248
$^{125m}\text{Te}^*$	57,4 сут	145
^{127m}Te	109 сут	88
^{129m}Te	33,6 сут	106

Изомер	$T_{1/2}$	E_{is} , кэВ
^{129m}Xe	8,9 сут	236
^{131m}Xe	11,8 сут	164
^{148m}Pm	41,3 сут	138
^{166m}Ho	1200 лет	6
^{174m}Lu	142 сут	171
$^{177m}\text{Lu}^*$	161 сут	970
$^{178m2}\text{Hf}^*$	31 лет	2446
$^{179m2}\text{Hf}$	25 сут	1106
^{180m}Ta	$> 10^{15}$ лет	75
^{184m}Re	169 сут	188
$^{186m}\text{Re}^{**}$	$2 \cdot 10^5$ лет	149
^{192m}Ir	241 лет	155
^{193m}Ir	10,5 лет	80
^{193m}Pt	4,33 сут	150
^{195m}Pt	4,02 сут	259
^{242m}Am	141 лет	49

* – заявлялось о наблюдении девозбуждения изомеров, нет подтверждения,

** – изомеры представлены в настоящем докладе, на ^{186m}Re положительный эффект.

Девозбуждение ядерных изомеров наиболее эффективно в плазме

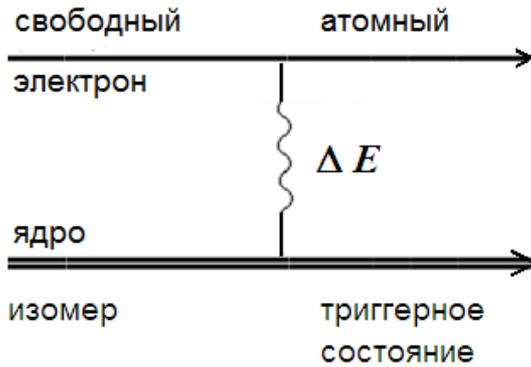
В плазме с изомерными ядрами при электронной температуре $\Theta \sim \Delta E$ одновременно присутствуют:

1. Интенсивное рентгеновское излучение на частоте ядерного перехода.
2. Интенсивные потоки электронов и ионов.
3. Высокая степень ионизации атомов с изомерными ядрами.

Вероятность девозбуждения ядерных изомеров пропорциональна времени жизни плазмы.

Вероятность возбуждения в плазме ядерного триггерного уровня по механизму обратной внутренней электронной конверсии (ОВЭК) (Кольцов, 2018)

$$P_{\text{ОВЭК}} \sim \hat{\lambda}^2 \tau v_{\text{рез.}} n_{E_{\text{рез.}}} \Gamma$$



$m_e, v_{\text{рез.}}$ – масса и скорость e^- плазмы, $m_e v_{\text{рез.}}^2 / 2 + J = \Delta E$

J – потенциал ионизации атомного уровня, захватывающего e^- ;

$n_{E, \text{рез.}}$ – энергетическая плотность e^- состояний, $E_{\text{рез.}} = m_e v_{\text{рез.}}^2 / 2$

Γ – ширина конверсионного перехода с триггерного уровня на изомер;

τ – время жизни плазмы. Сечение ОВЭК $\sigma \sim \hat{\lambda}^2 = \left(\hbar / m_e v_{\text{рез.}} \right)^2$

$$n_{E_{\text{рез.}}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{n \sqrt{E_{\text{рез.}}}}{\Theta^{3/2}} e^{-E_{\text{рез.}} / \Theta}$$

распределение Максвелла-Больцмана для n_E ,
 n – концентрация e^- , Θ – температура плазмы.

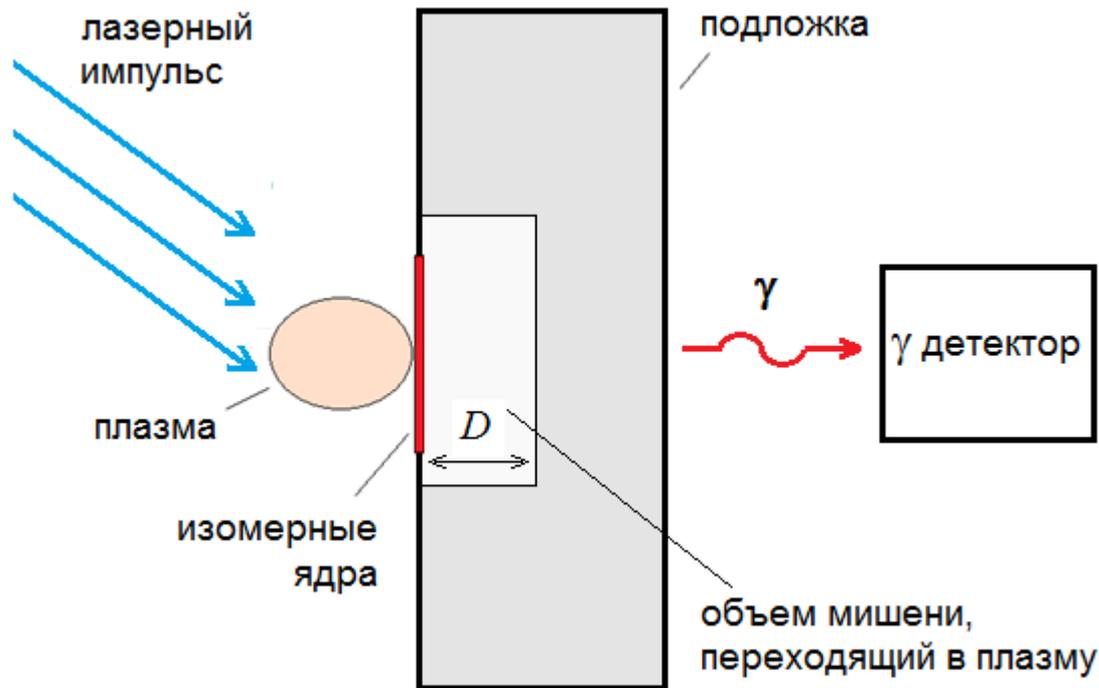
$$P_J \approx \frac{2 g_i}{g_a} \left(\frac{m_e}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \frac{\Theta^{3/2}}{n} e^{-J / \Theta}$$

вероятность ионизации атомного уровня J
 по формуле Саха.

$$P_{\text{Возб.}} = P_{\text{ОВЭК}} P_J \sim \frac{1}{\pi^2} \frac{\Gamma \tau}{\hbar} e^{-\Delta E / \Theta}$$

Оптимально: $\Theta \geq \Delta E$

Эксперименты с лазерной плазмой



Детектировать стимулированное девозбуждение изомеров можно

- по мгновенным γ -квантам
- с меньшей чувствительностью по неравновесному излучению α , γ , e^- после девозбуждения изомера.

Специфика лазерной плазмы:

1. Время жизни плазмы порядка длительности лазерного импульса.
2. Глубина $D < 1$ мкм, количество ядер изомера в плазме зависит от концентрации изомера в материале мишени.

Возбуждение изомера ^{235m}U в плазме (ГНЦ РФ "ТРИНИТИ")

(Арутюнян, Большов, Кольцов, Малюта, Римский-Корсаков, Смирнов, Ткаля... 1989)

Мишень – оксид ^{235}U (основное состояние)

Лазерная плазма:

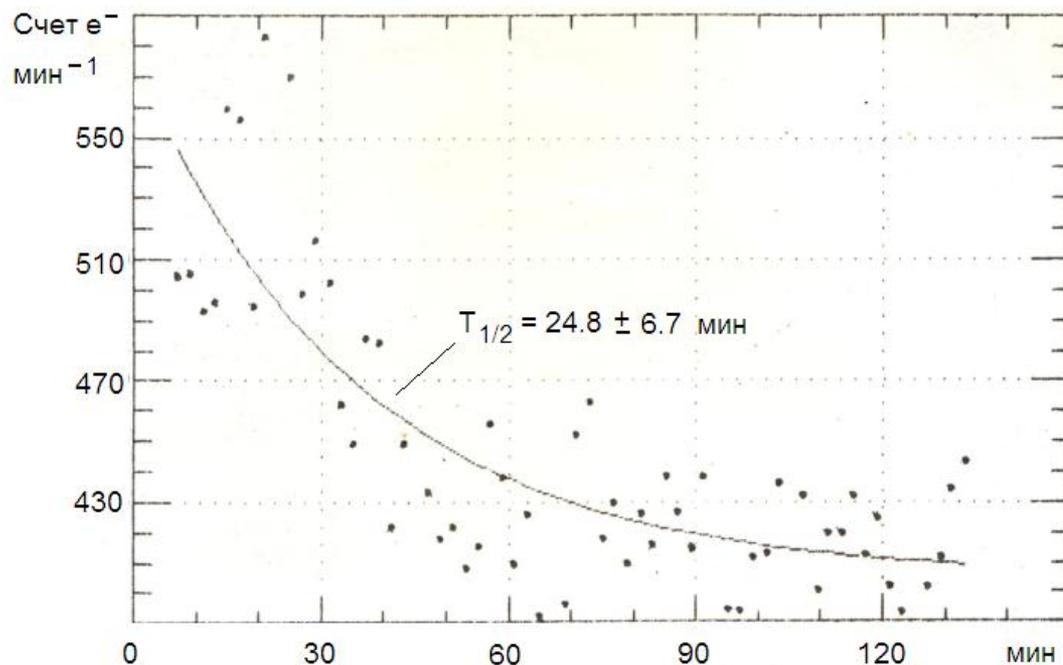
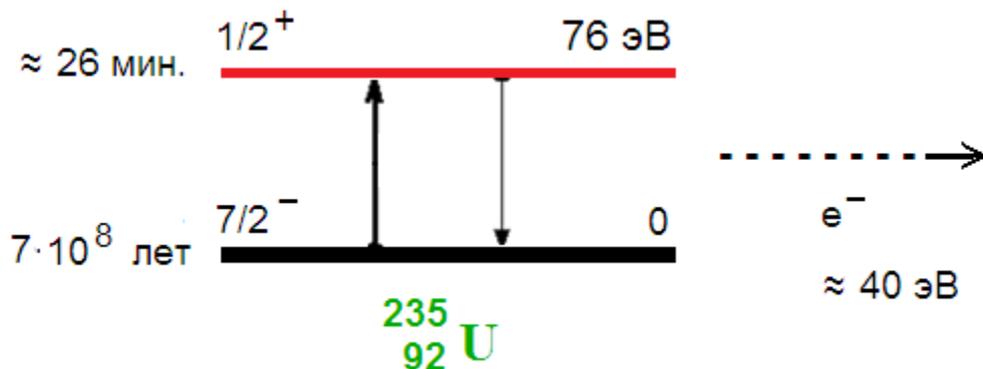
- импульс CO_2 лазера $\lambda = 10.6$ мкм,
- длительность 200 нс,
- энергия 5 Дж,
- интенсивность $\sim 10^{11}$ Вт / см^2 .

Температура плазмы $\Theta \sim 10$ эВ.

Плазма от пучка электронов:

- длительность импульса 30 нс,
- ток 150 кА,
- e^- энергия 500 кэВ,
- диаметр пятна плазмы 2 мм,
- объем плазмы $\sim 10^{-4}$ см^3 .

Температура плазмы $\Theta \sim 20$ эВ.

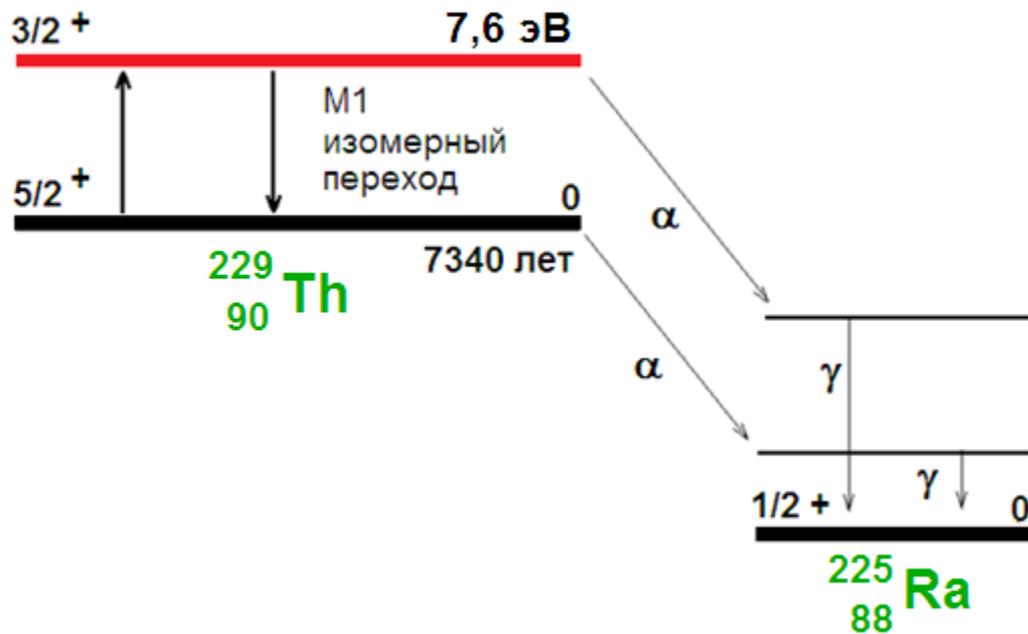


Интенсивность e^- конверсии после электронного выстрела

Возбуждение в плазме изомера ^{229m}Th $\Delta E = 7.6 \text{ эВ}$ (Борисюк, ...,Ткаля, ... , 2018)

Возбуждение изомера ^{229m}Th
по механизму ОВЭК
в лазерной плазме

+ электрический разряд в плазме:
напряжение 10 кВ,
разрядный конденсатор 25 нФ,
энергия разряда ~ 2 Дж.



Nd:YAG лазер



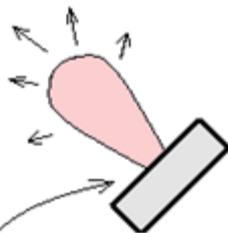
$$\lambda = 1064 \text{ нм}$$

$$100 \text{ мДж}$$

$$\tau = 15 \text{ нс}$$

10^{13} ядер ^{229m}Th

плазма $\Theta_e \sim 10 \text{ эВ}$



^{229}Th

10^{16} ядер

$\varnothing 3 \text{ мм}$

$$W \sim 10^{10} \text{ Вт/см}^2$$

Вероятность возбуждения
 ^{229m}Th изомера $\sim 10^{-5}$.

Стимуляция девозбуждения изомера ^{186m}Re ($\Delta E = 3$ кэВ)

(Ватулин, Жидков, Римский-Корсаков, Кольцов, Костылев, ..., 2017)



Мишенная камера
лазерной установки “Искра-5”
(РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров).

Лазерный импульс:

- $\lambda = 1.3$ мкм,
- энергия ≈ 300 Дж,
- длительность 0.3 нс,
- интенсивность $\sim 10^{15}$ Вт / см².

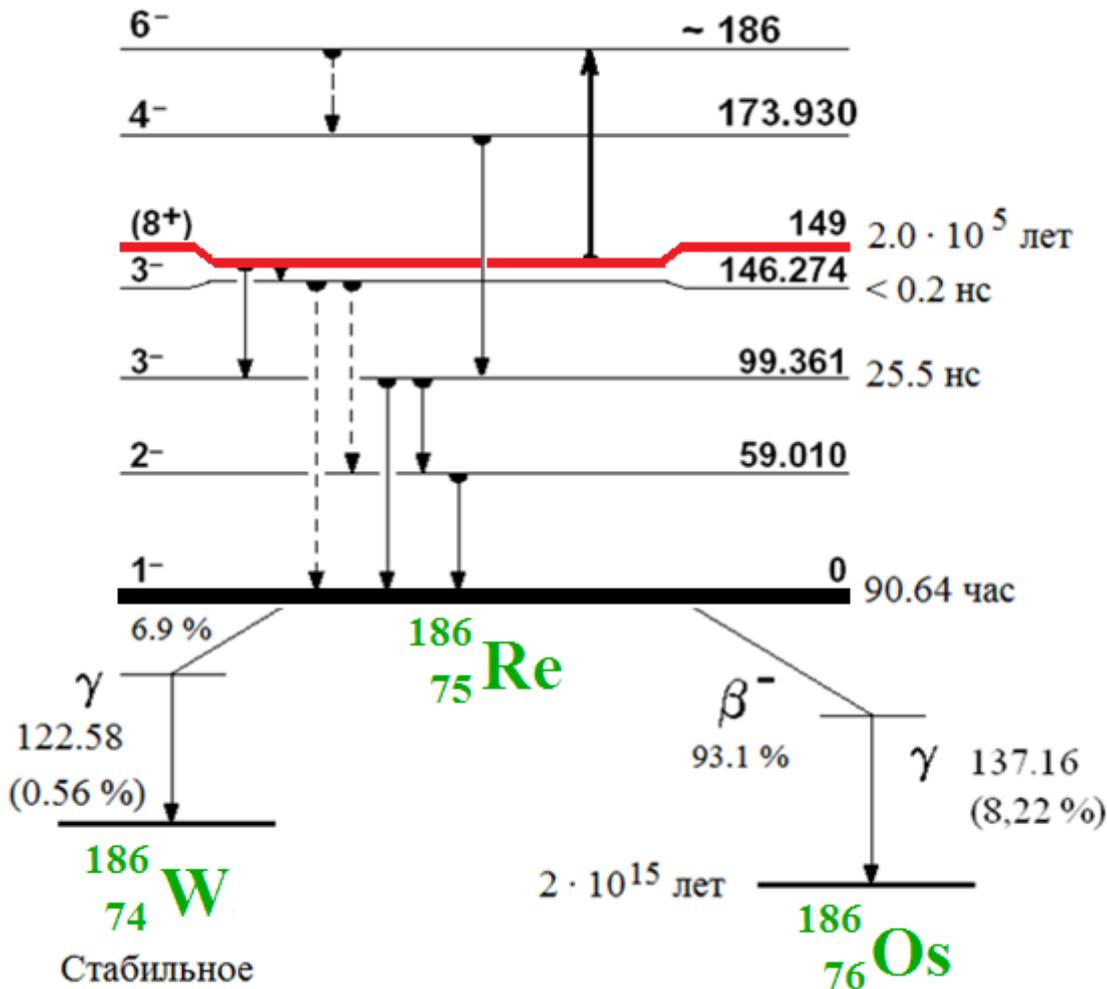
Температура плазмы $\Theta \sim 1$ кэВ.

Мишени:

- изомер ^{186m}Re на W или Fe подложках.
- в изомерном материале
атомная концентрация изомера $^{186m}\text{Re} \sim 10^{-3}$ %.

Облучение в реакторе природного Re,
поток $\approx 6 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см².

Изомер ^{186m}Re перспективен для источника энергии



Стрелка вверх – возможность возбуждения триггерного уровня.

Преимущества изомера ^{186m}Re :

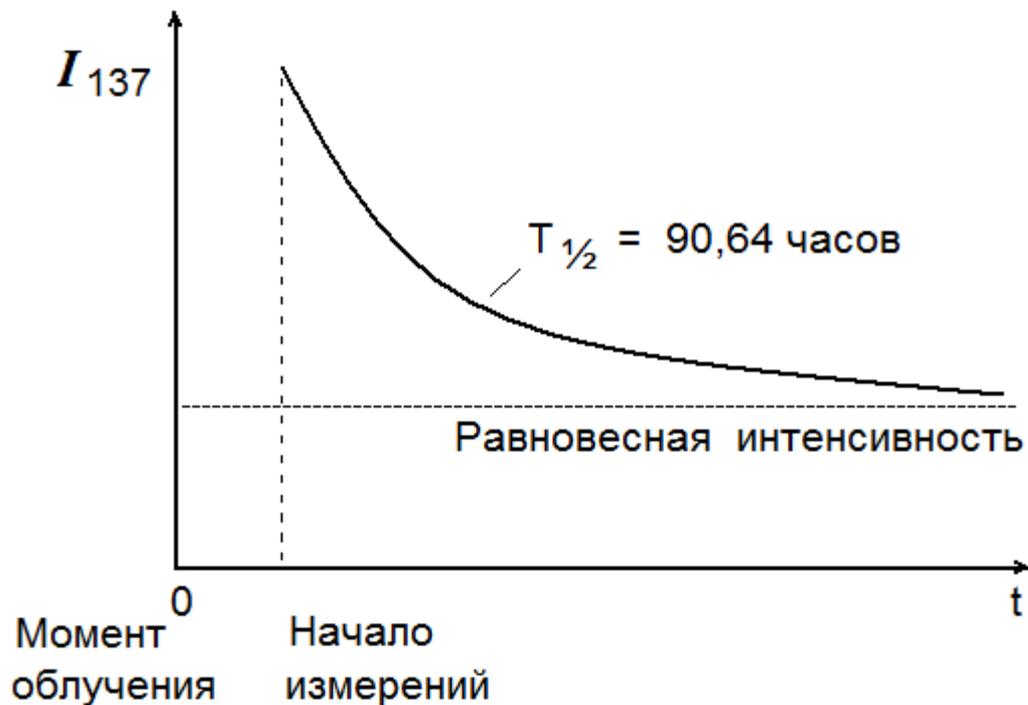
- Очень большое время жизни.
- Малая энергия изомерного перехода.
- Радиохимия может выделить чистый изомер ^{186m}Re .

Недостатки:

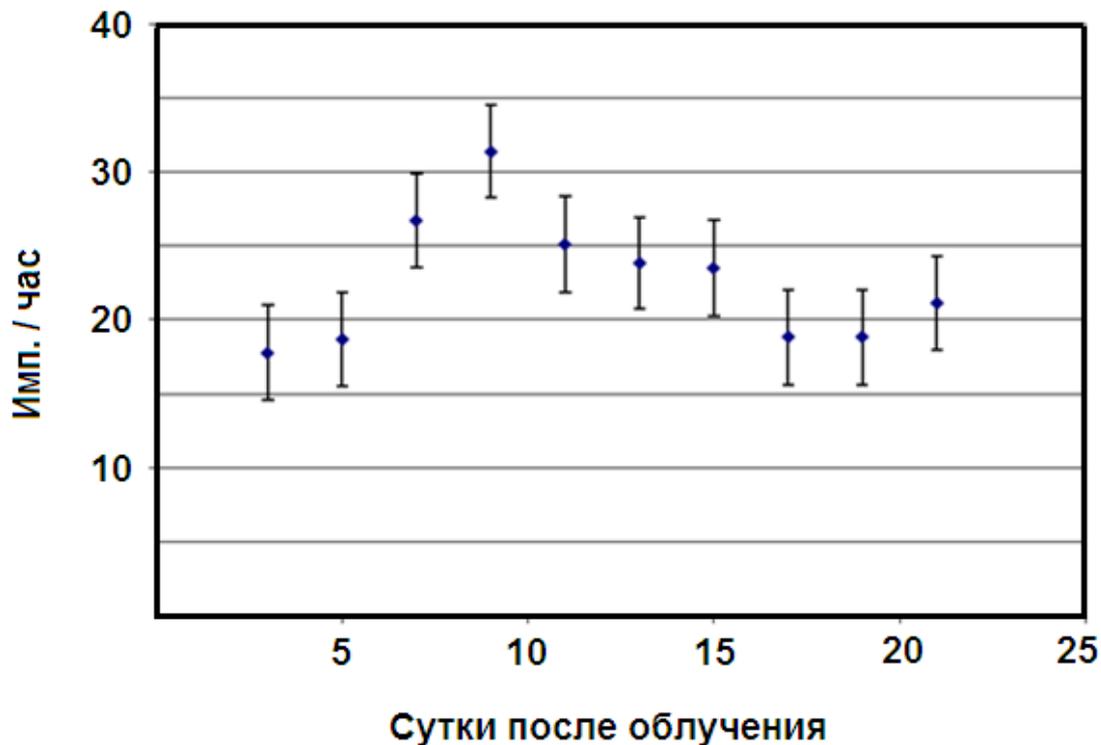
- Большая мультипольность изомерного перехода $E5$.
- Низкая точность значения энергии изомера ~ 1 кэВ. Нельзя резонансно воздействовать на переход.

Эта схема уровней неполная, что показали измерения кривой распада ^{186}Re , полученного в реакции $^{186}\text{W}(\text{p}, \text{n})^{186}\text{Re}$ (Кольцов, Римский-Корсаков, Карасев, 2018).

Ожидаемая зависимость от времени интенсивности линии 137 кэВ в γ -спектре мишени при стимуляции разрядки изомерного состояния ^{186m}Re в лазерной плазме.



Изменение во времени интенсивности линии 137 кэВ в спектре облученного ^{186m}Re



Результат

одного из экспериментов на мишени с W-подложкой.

Спад интенсивности соответствует

$$T_{1/2} = 112 \pm 10 \text{ часов.}$$

Эффект наблюдали только на мишенях с W-подложкой.

Если эффект за счет стимулированной разрядки ядер ^{186m}Re , то:

- стимулирована разрядка $\sim 10^{-5} \%$ ядер ^{186m}Re ;
- наличие максимума показывает, что в ядре ^{186}Re есть неизвестный изомер с $T_{1/2}$ несколько суток, который заселяется при стимулированной разрядке известного изомера ^{186m}Re .

Поиск разрядки изомера ^{186m}Re тормозным ЭМ излучением до 40 кэВ. Эффекта нет.

$$V_e = 46 \text{ кВ,}$$

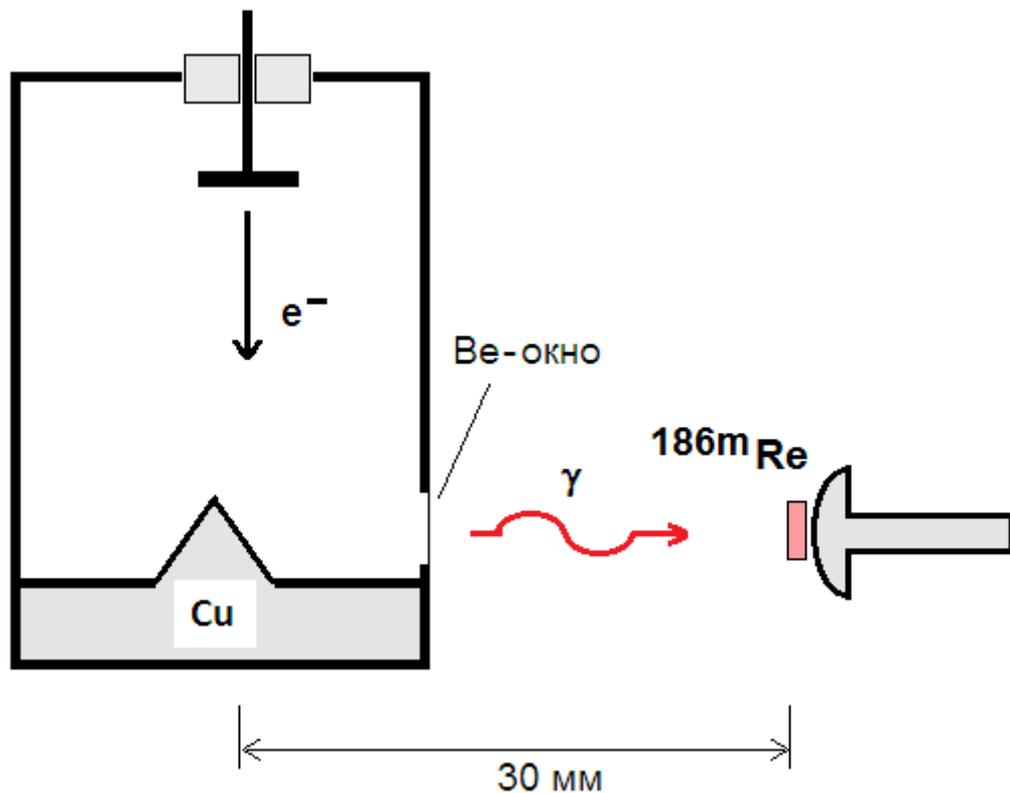
$$I_e = 10 \text{ мА.}$$

Экспозиция облучения 400 минут

Слой Re металла с изомером
толщиной 5 мкм, \varnothing 4 мм.

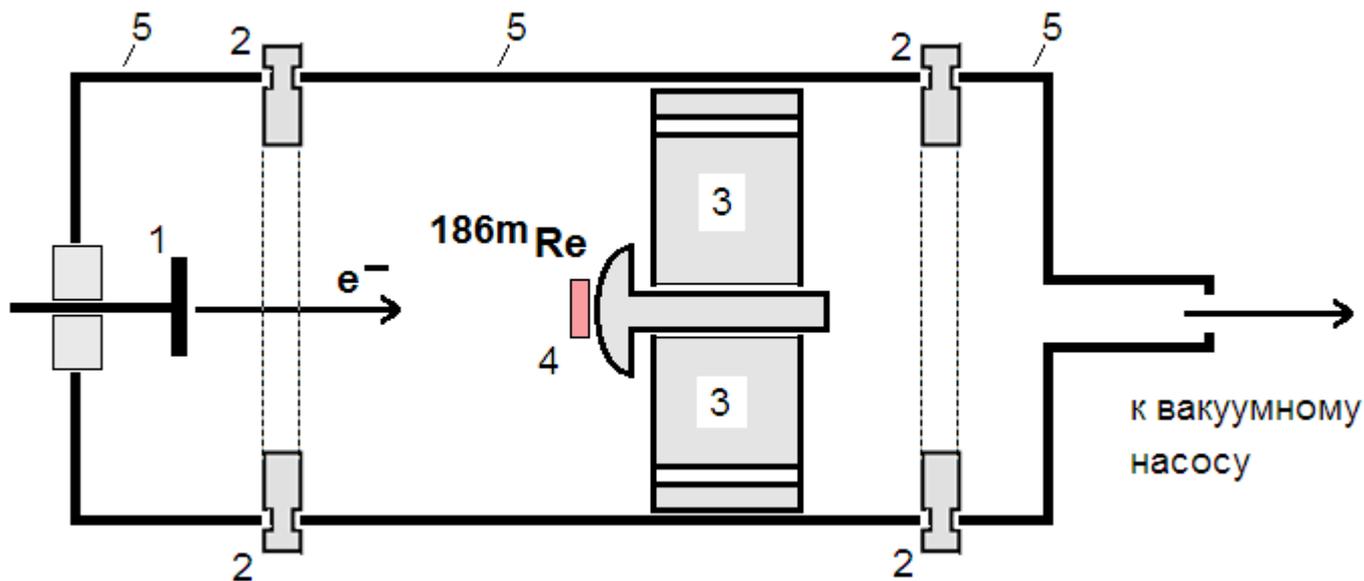
Фотоны $E = 20$ кэВ,

поток = 10^{14} фотонов / (кэВ · см²).



Рентгеновская трубка БС В-9

Поиск разрядки изомера ^{186m}Re электронами 10 кэВ.



$E_e = 10$ кэВ, $I_e = 3$ мА, Сечение пучка 10 мм.

Слой Re металла толщиной 1 мкм, \varnothing 4 мм.

Экспозиция облучения 150 минут.

Тормозные фотоны $E = 3$ кэВ :

поток = $4 \cdot 10^{17}$ фотонов / (кэВ \cdot см²).

1 – эмиттер электронов (катод) ;

2 – электроизолирующие фланцы;

3 – массивный медный держатель мишени;

4 – ^{186m}Re на подложке из нержавеющей

стали в форме болта;

5 – корпус электронной пушки.

Эффекта нет. Вывод: девозбуждение ^{186m}Re происходит только в плазме.

Возможные пути увеличения эффекта девозбуждения ядерных изомеров в лазерной плазме

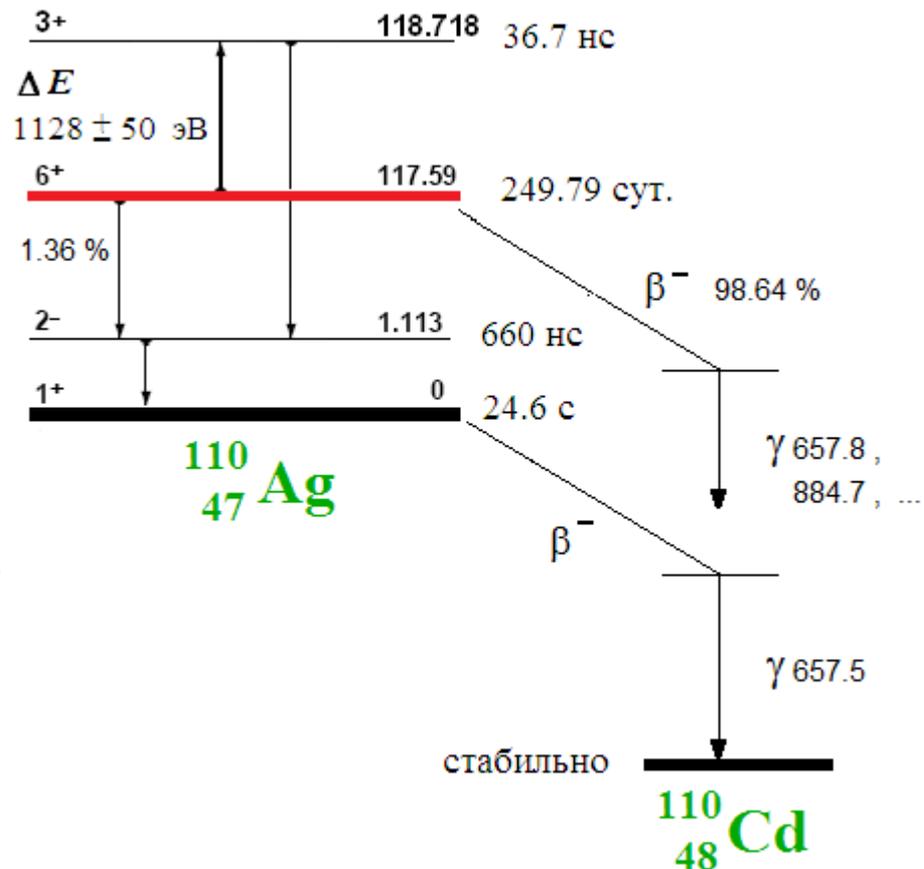
Для увеличения эффективности девозбуждения изомеров в плазме нужны новые подходы к исследованию:

- увеличение концентрации изомерных ядер в плазме;
- уточнение схемы триггерных переходов в исследуемых изомерах;
- исследование новых механизмов стимуляции, в частности влияния резонансной рентгеновской подсветки на вероятность обратной внутренней конверсии;
- поиск новых удобных для исследования изомеров с более точно измеренной энергией триггерного перехода.

Перспективный изомер ^{110m}Ag (Кольцов, 2018)

Преимущества изомера ^{110m}Ag :

1. Большое время жизни – 250 суток.
2. Малая энергия триггерного перехода.
3. Относительная простота получения больших количеств изомера.
4. Высокая точность измерения энергии уровней.
Можно подобрать ЭМ излучение, резонансное триггерному переходу.
5. Высокая чувствительность детектирования девозбуждения изомера по “мгновенным” γ -квантам.

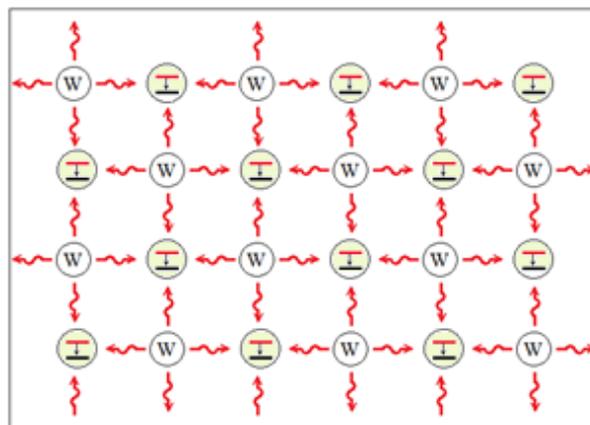


Недостаток:

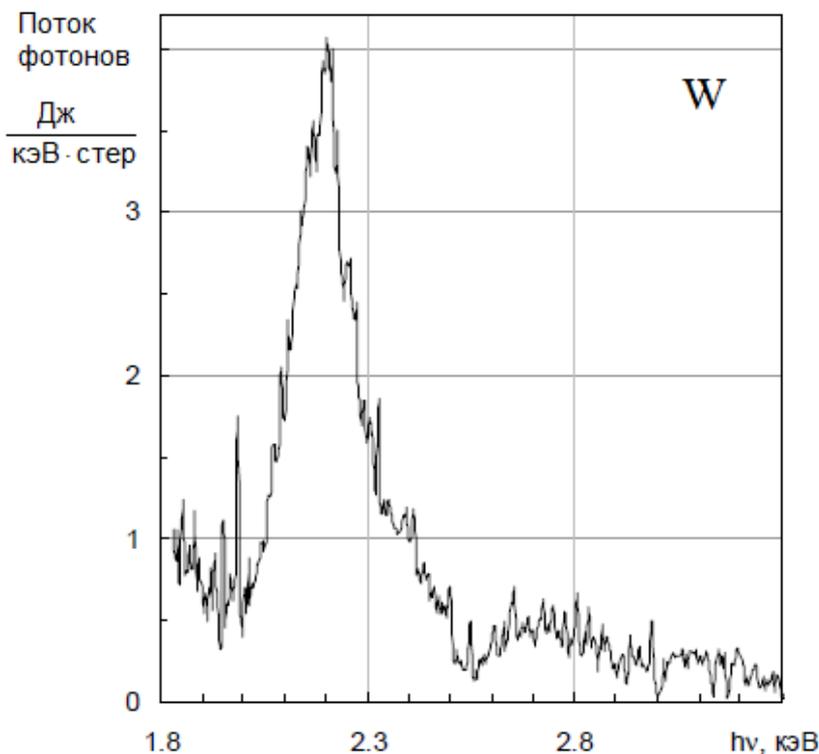
большая мультипольность триггерного перехода $M3$.

Усиление ОВЭК при подсветке плазмы ЭМ излучением частоты $\omega = \Delta E / \hbar$ (1)

Источник резонансных фотонов – собственное излучение плазмы за счет введения в плазму вместе с атомами изомера и атомов с резонансной характеристической линией рентгеновского излучения.



Плазма из смеси атомов изомера и атомов резонансного излучателя (W).

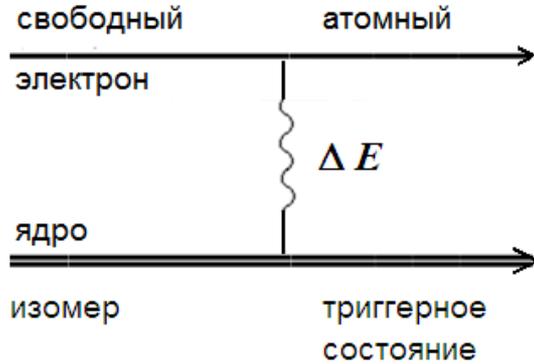


Пример (Ватулин, ..., 2014):

спектр фотонов из плазмы установки “Искра-5” (РФЯЦ ВНИИЭФ), полученной действием на W-фольгу лазерного импульса ~ 1 кДж, $\tau = 0.5$ нс, интенсивность $\sim 10^{16}$ Вт/см². Температура плазмы $\Theta \sim 1$ кэВ.

В излучение на характеристической рентгеновской линии W переходит $\approx 1\%$ энергии лазерного импульса.

Усиление ОВЭК при подсветке плазмы ЭМ излучением частоты $\omega = \Delta E / \hbar$ (2)



$$P_{\text{ОВЭК}} \sim \hat{\lambda}^2 v_{\text{рез.}} \tau n_{\text{рез.}}, \quad n_{\text{рез.}} = n \frac{\Gamma}{\Theta}$$

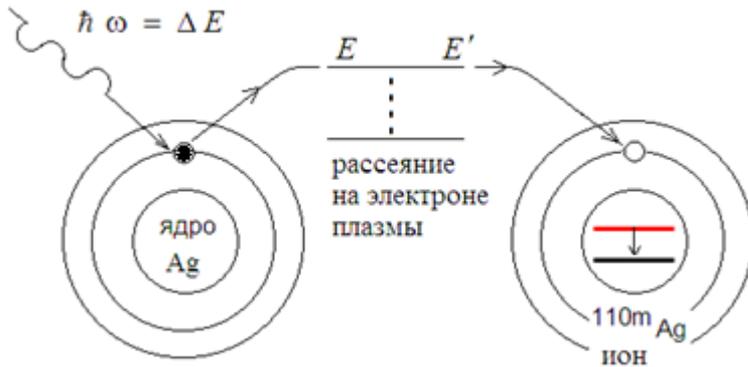
$n_{\text{рез.}}$ – концентрация резонансных электронов;

τ – время жизни плазмы; Γ – ширина триггерного перехода;

$m, v_{\text{рез.}}$ – масса и скорость электронов плазмы; $mv_{\text{рез.}}^2/2 + J = \Delta E$

J – потенциал ионизации атомного уровня, захватывающего e^- .

1. Увеличение концентрации резонансных электронов за счет фотоэффекта (Кольцов, 2019)



$$P_{\text{ОВЭК,рез.}} \sim (1 + \alpha) P_{\text{ОВЭК}}$$

Коэффициент α зависит от температуры плазмы Θ :

для изомера ^{110m}Ag ($\Delta E \approx 1.1$ кэВ)

$\alpha \sim 10^{-4}$ при $\Theta = 1$ кэВ, $\alpha \sim 10^{-2}$ при $\Theta = 10$ кэВ.

2. Стимуляция излучения

виртуального фотона (Кольцов, 2018)

$\alpha \sim 10^2$ при $\Theta \geq 1$ кэВ.

Отработка методики эксперимента на лазерной установке “Прогресс”

НИИ ОЭП (Сосновый Бор ЛО) (Ватулин, ..., Жидков, ..., Римский-Корсаков, Кольцов, ..., Чарухчев, 2019)

Импульс Nd - лазера:

- энергия 20 Дж
- длительность 1.5 пс
- интенсивность $\sim 10^{18}$ Вт / см².

Изомерные мишени:

^{110m}Ag, ^{186m}Re

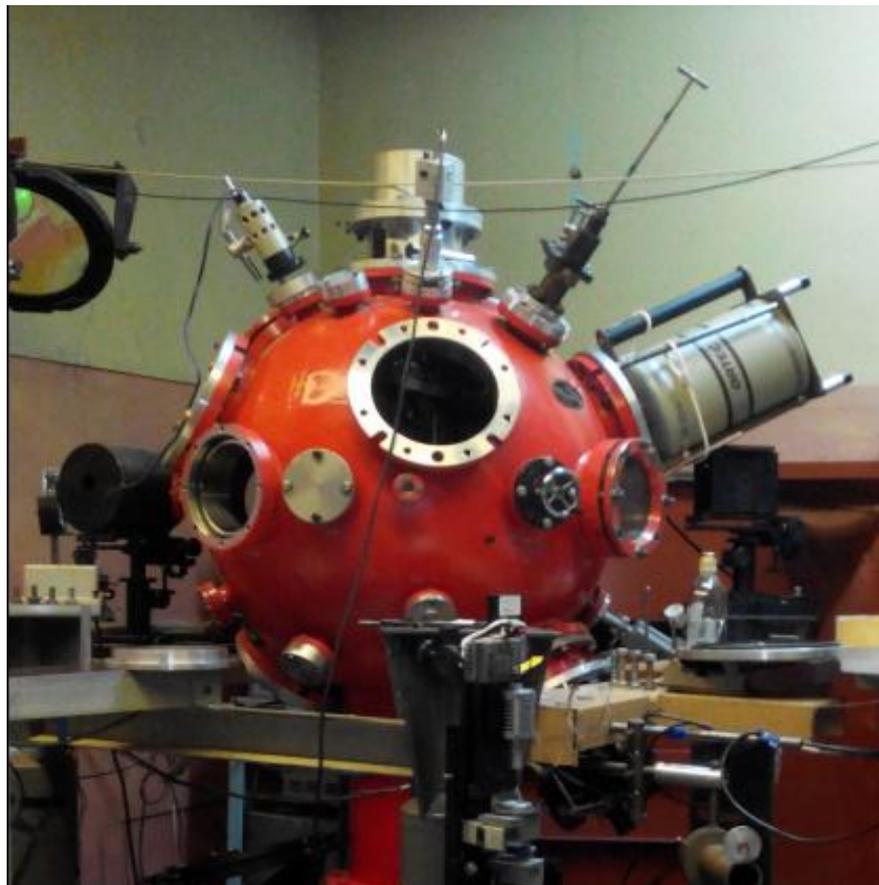
Температура плазмы $\Theta \sim 10$ кэВ.



Основные задачи работы:

- методика измерения γ -квантов девозбуждения изомеров непосредственно из плазмы;
- конструкция изомерных мишеней с минимальным разбросом вещества.

Мишенная камера лазерной установки “Прогресс”

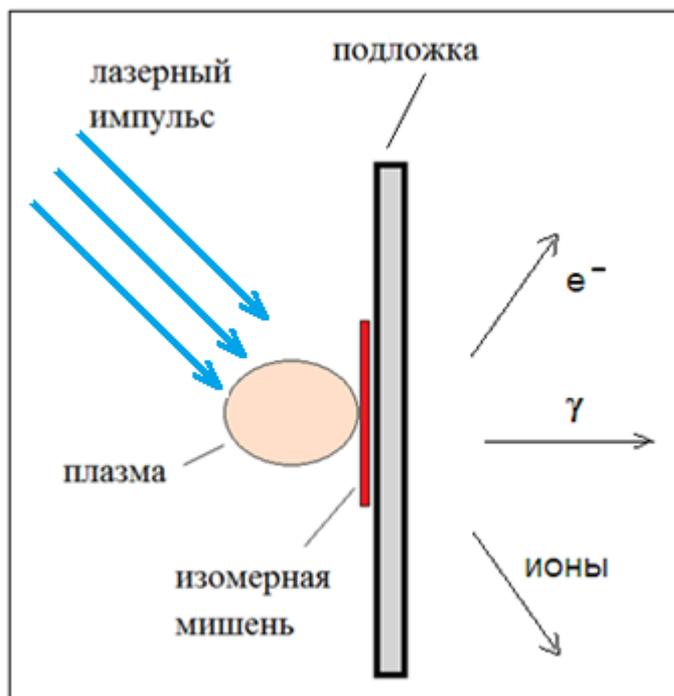


Плазма мощных сверхкоротких лазерных импульсов СКИ

Лазерный импульс:

- длительность < 1 пс
- энергия ~ 100 Дж
- интенсивность $> 10^{18}$ Вт/см²
- объем мишени $< 10^{-7}$ см³.

Температура плазмы
до 10 кэВ.



Особенность плазмы СКИ:

- неравновесные e⁻
энергии до ~ 10 МэВ
- рентген до ~ 100 МэВ
- ионы большой энергии
($E_p > 10$ МэВ).

В плазме СКИ наблюдали:

- фотоядерные реакции (γ, n),
- возбуждение ядерных переходов:
 ^{181}Ta ($E1$ переход $\Delta E = 6.2$ кэВ) (Андреев, Гордиенко, ..., 2000);
 ^{103}Rh ($E3$ переход $\Delta E = 39.8$ кэВ) (Афонин, ..., 2012).
- фотоделение ^{235}U ,
- ядерные реакции (p, n),

Трудно рассчитывать на создание источника энергии на основе фотоядерных и (p, n) реакций ввиду малой величины их сечений.

Выводы из экспериментов по стимуляции ядерных переходов в лазерной плазме

В лазерной плазме наблюдали стимуляцию девозбуждения ядерных изомеров, но эффект пока был очень слабый.

Для сильного увеличения эффективности девозбуждения в плазме необходимо:

- новые методы стимуляции девозбуждения;
- уточнение схемы триггерных переходов изомерных ядер.

Плазма электрического взрыва проводников (ЭВП) – альтернатива лазерной плазме для изомерных переходов энергии ΔE до ~ 1 кэВ (Кольцов, 2018)

Достижимые параметры плазмы

установки Ангара-5м,

ГНЦ РФ “ТРИНИТИ” (Троицк) :

- температура Θ до ~ 1 кэВ;
- энергия в импульсе до ~ 1 МДж;
- времени жизни $\tau = 10 - 100$ нс.

Разлет плазмы замедлен из-за магнитного удержания плазмы.

“Взрывающаяся проволочка”

обычно в виде лайнера –

набора проволочек

для оптимального нагрева плазмы.

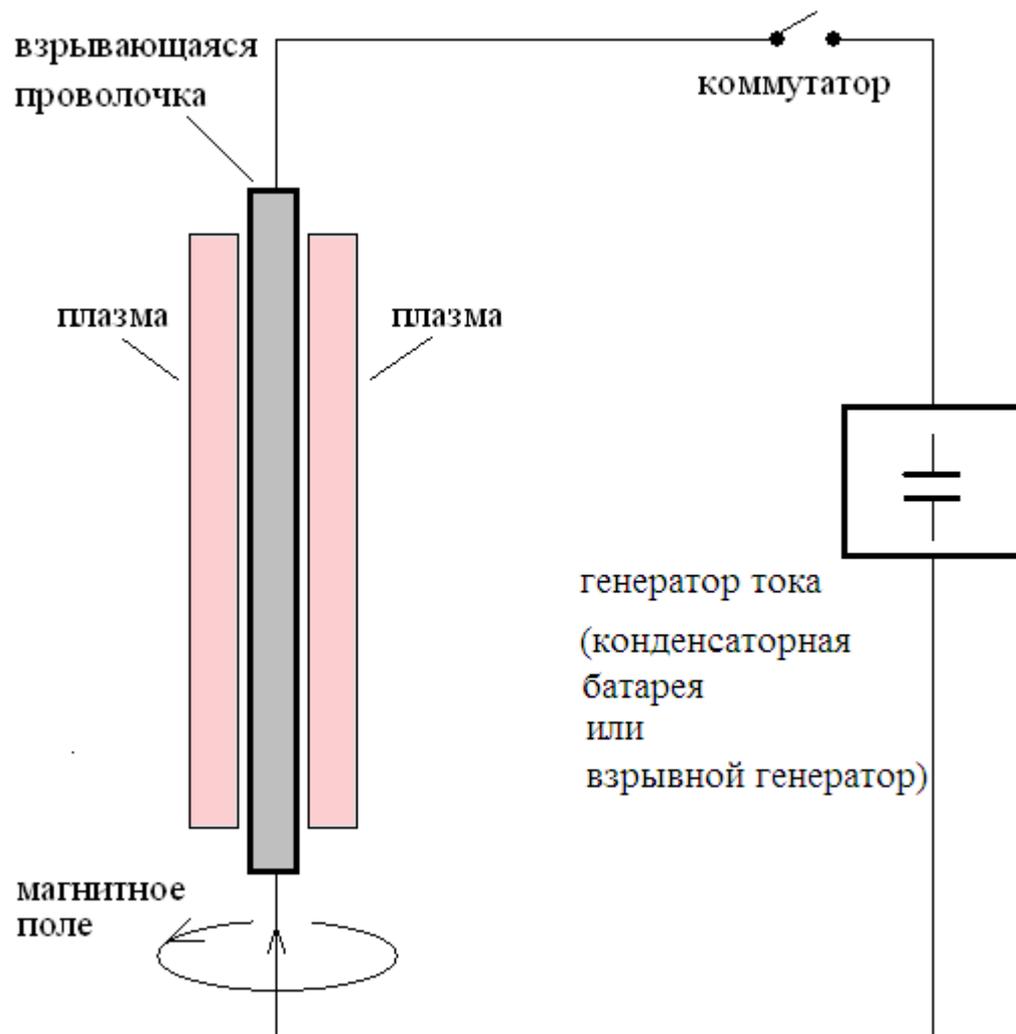


Схема установки ЭВП

Перспективность экспериментов с ЭВП плазмой

Более высокая эффективность стимуляции девозбуждения изомеров по сравнению с лазерными экспериментами.

1. За счет увеличения времени жизни плазмы и соответствующего увеличения вероятности девозбуждения изомеров.
2. В ЭВП плазме оказывается больше вещества, чем в лазерной плазме. При одном и том же изомерном материале число изомерных ядер в плазме взрыва проводников может быть на порядки больше, чем в лазерной плазме.

Установка Ангара-5м



ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ).

Установка “ Z ”



Сандийские национальные лаборатории, США.

Установка рентгенографического изображения

Внешний вид малогабаритного генератора в установке рентгенографического изображения производства Института сильноточной электроники ИСЭ СО РАН (2008 г.)



Импульсный генератор:
масса 70 кг, ток до 300 кА,
напряжение 50 кВ,
конденсаторы 250 нф,
время нарастания тока 200 нс,
энергозапас конденсаторных
батарей 1 кДж .

Плазма X-пинча
(электрический взрыв
перекрещенных проволочек),
температура плазмы $\Theta \sim 1$ кэВ.

Выводы по перспективности использования ЭВП плазмы

1. Проведенные оценки показывают возможность наблюдения в ЭВП плазме девозбуждения ядерных изомеров с триггерными переходами энергии до ~ 1 кэВ.

$$^{229\text{m}}\text{Th}, \quad \Delta E \approx 7,6 \text{ эВ}$$

2. Изомеры, подходящие для экспериментов

$$^{235\text{m}}\text{U}, \quad \Delta E \approx 76 \text{ эВ}$$

$$^{110\text{m}}\text{Ag}, \quad \Delta E = 1,128 \text{ кэВ}$$

$$^{186\text{m}}\text{Re}, \quad \Delta E \text{ неизвестно}$$

3. Эксперименты позволят исследовать механизмы эффективного девозбуждения ядерных изомеров в плазме, которые можно было бы использовать для более широкого набора ядер в более горячей лазерной плазме.

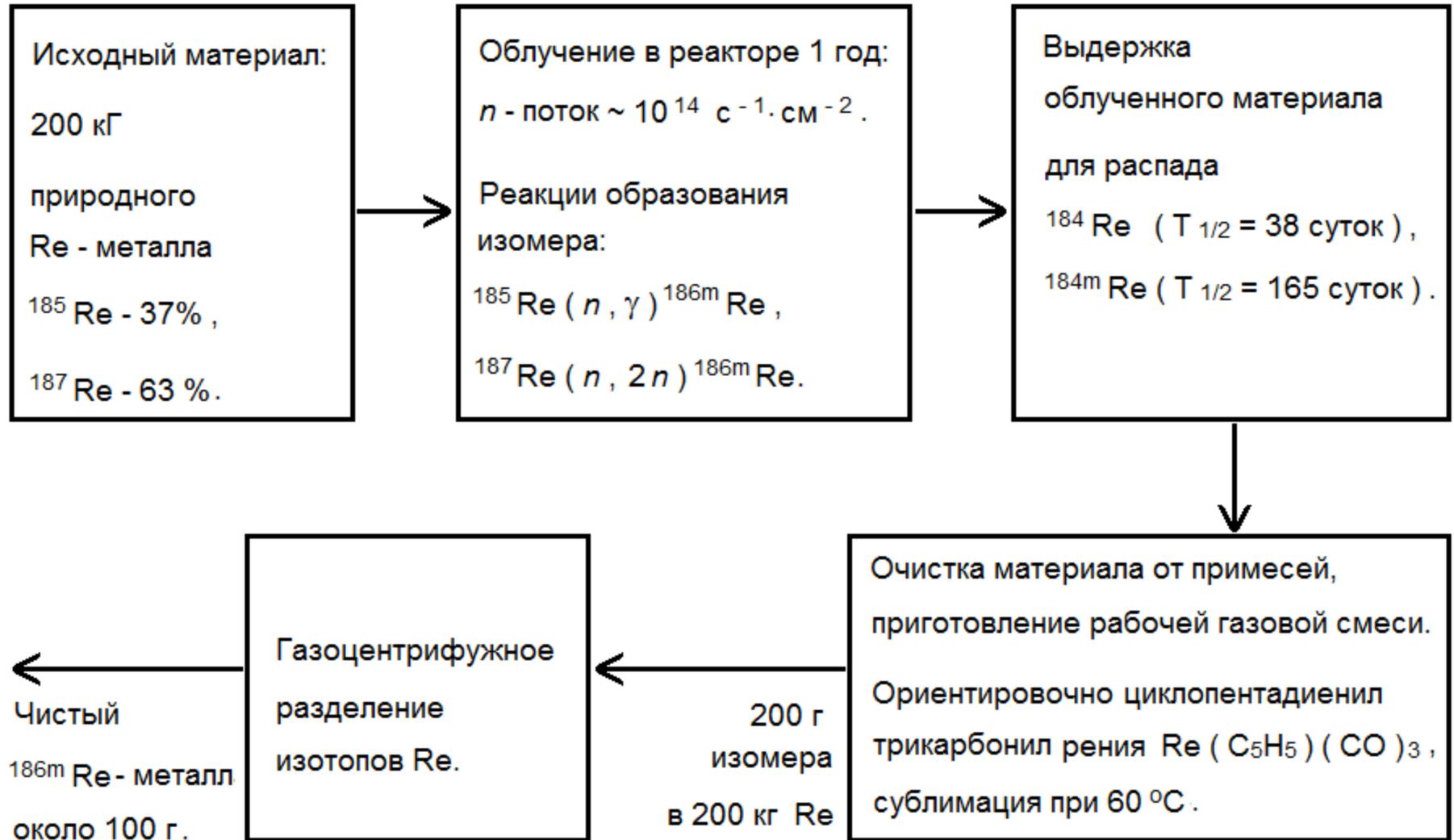
Разработка управляемого источника ядерной энергии на основе девозбуждения изомерных ядер ^{186m}Re .

Параметры рабочего вещества источников энергии

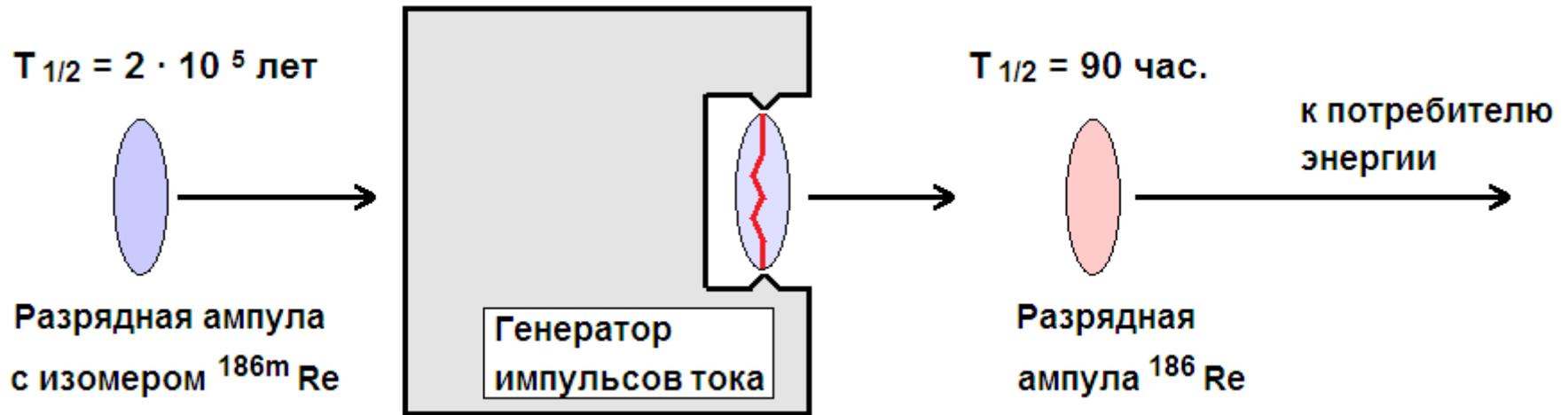
Вещество	$T_{1/2}$	Энергоемкость, <u>Дж/г</u>	Рабочая мощность, <u>Вт/г</u>	Мощность при хранении, <u>Вт/г</u>	Цена 1 г, тыс. руб.
^{186m}Re изомер	$2 \cdot 10^5$ лет <hr/> 90 час.	$5 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^{-5}$	600
^{238}Pu	87,7 лет	$2 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	480
Бензин	-	$5 \cdot 10^4$	-	0	0,0005

Сейчас нет аккумуляторов энергоемкости $> 1 \cdot 10^8$ Дж/г , мощности $> 0,1$ кВт/г .

Схема наработки изомера ^{186m}Re



Предполагаемая схема работы источника энергии



Малогабаритный генератор импульсов тока образует в разрядной ампуле Re-плазму температурой ~ 500 эВ.

Основания для успешной реализации:

- Получено стимулированное девозбуждение изомера ^{186m}Re в лазерной плазме.
- Разработаны методы усиления девозбуждения изомеров в плазме.
- Известны технологии разработки сильноточных импульсных генераторов тока.
- Известны технологии наработки и выделения изомера ^{186m}Re .

(Основные исполнители: АО “Радиевый институт”, ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”)

**Разработка основных элементов
управляемого источника ядерной энергии
на основе девозбуждения изомерных ядер ^{186m}Re
в плазме сильноточного электрического разряда**

Календарный план НИОКР

Этап	Наименование этапа	Срок
1	Подтверждение эффективности девозбуждения изомера ^{186m}Re в плазме установки Ангара-5 на имеющемся материале с 0,001% содержанием изомера.	12 месяцев
	Облучение 10 г природного Re в реакторе с наработкой 10 мг изомера ^{186m}Re .	
	Уточнение схемы уровней ядра ^{186}Re .	
2	Выбор оптимальной конструкции лайнера на установке Ангара-5. Изготовление макета лайнера.	12 месяцев
	Разработка технологии синтеза газа для газо-центрифужного обогащения ^{186m}Re .	
3	Изготовление образцов лайнеров из материала с 0,1% содержанием изомера.	12 месяцев
	Девозбуждение ^{186m}Re из материала с 0,1 % содержанием изомера в плазме установки Ангара-5 на разработанном макете лайнера.	
	Изготовление макета установки для синтеза рабочего газа для газо-центрифужного обогащения изомера ^{186m}Re .	

Ожидаемый результат НИОКР

1. Подтверждение эффективности методики девозбуждения изомера ^{186m}Re в плазме электрического взрыва проводников.
2. Опытный образец лайнера для девозбуждения изомера ^{186m}Re .
3. Опытный образец установки для синтеза рений-содержащего рабочего газа для газо-центрифужного обогащения изомера ^{186m}Re .
4. 10 г металлического Re с 0.1% концентрацией изомера.
5. Уточненная схема уровней ядра ^{186}Re .
6. Технический проект источника энергии на основе изомера ^{186m}Re .

Возможный вид слитка металла из чистого изомера ^{186m}Re



Новое состояние вещества.