

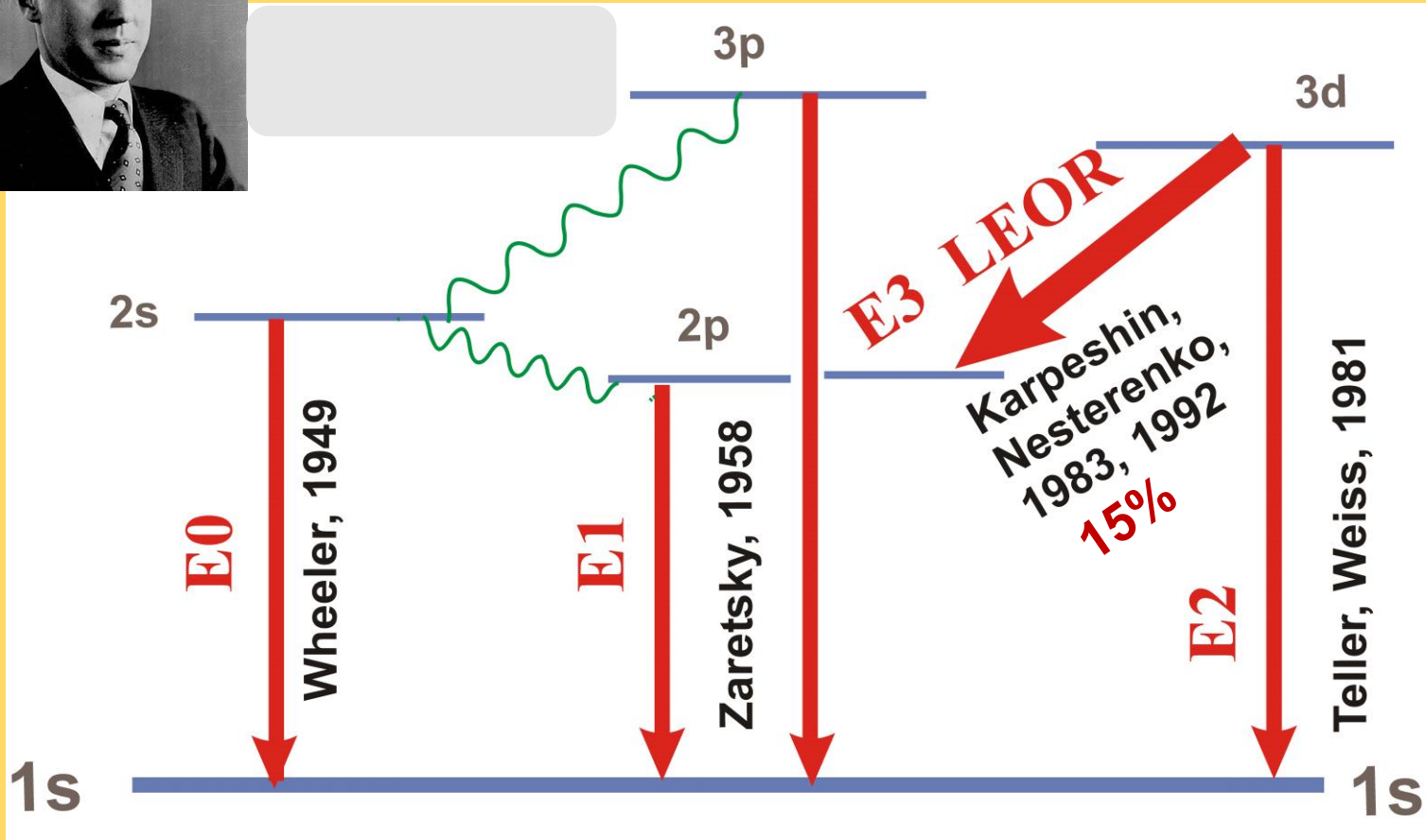
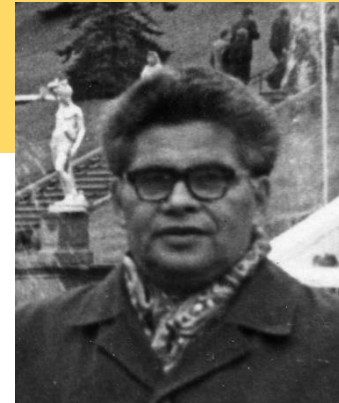
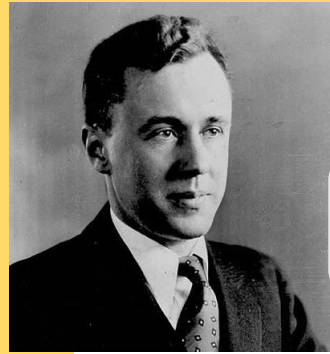
РЕЗОНАНСНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА 8.3-ЭВ ИЗОМЕРА ^{229}Th

Ф. Ф. Карпешин

ВНИИМ имени Д.И.Менделеева

Обосновывается способ оптической накачки изомера
для определения его энергии путем сканирования
частоты лазера накачки

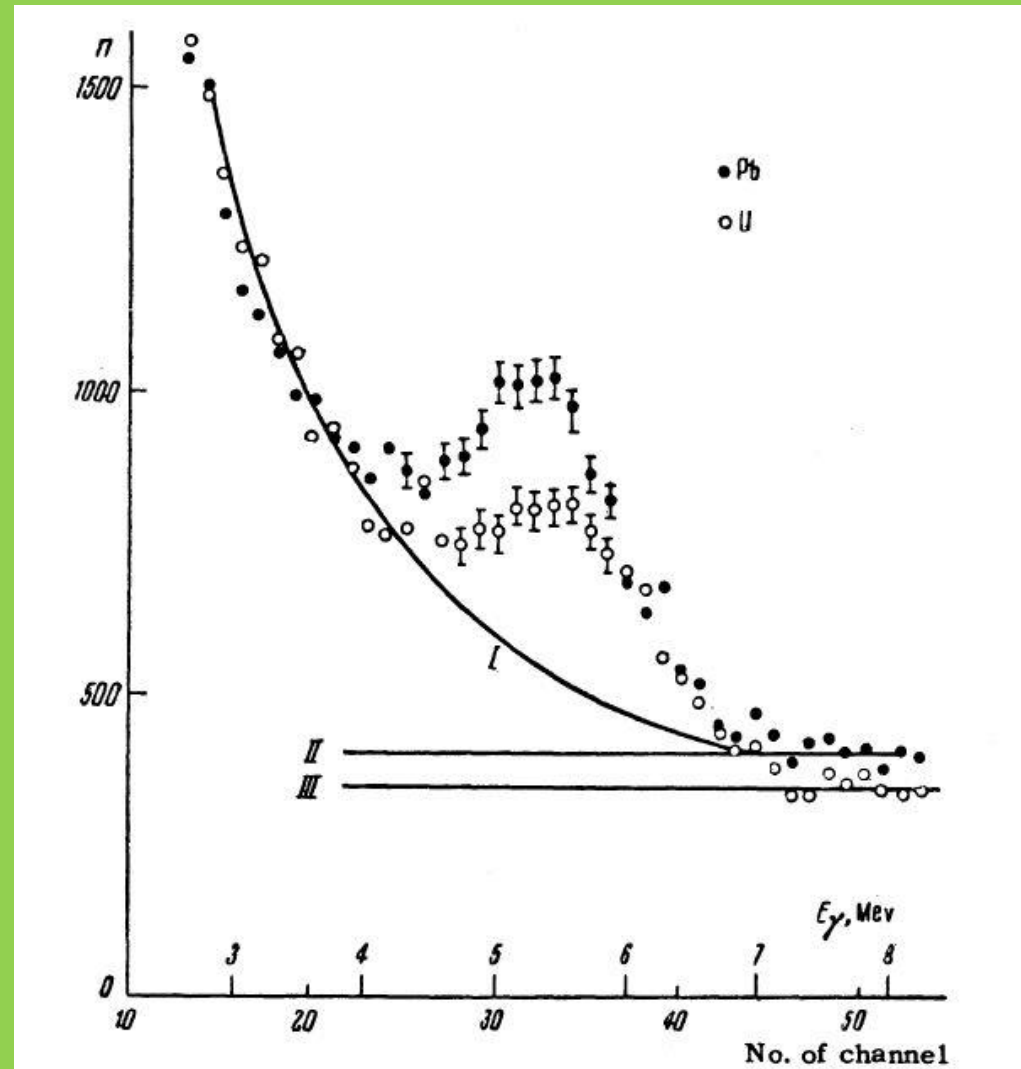
μ -Atom Transitions

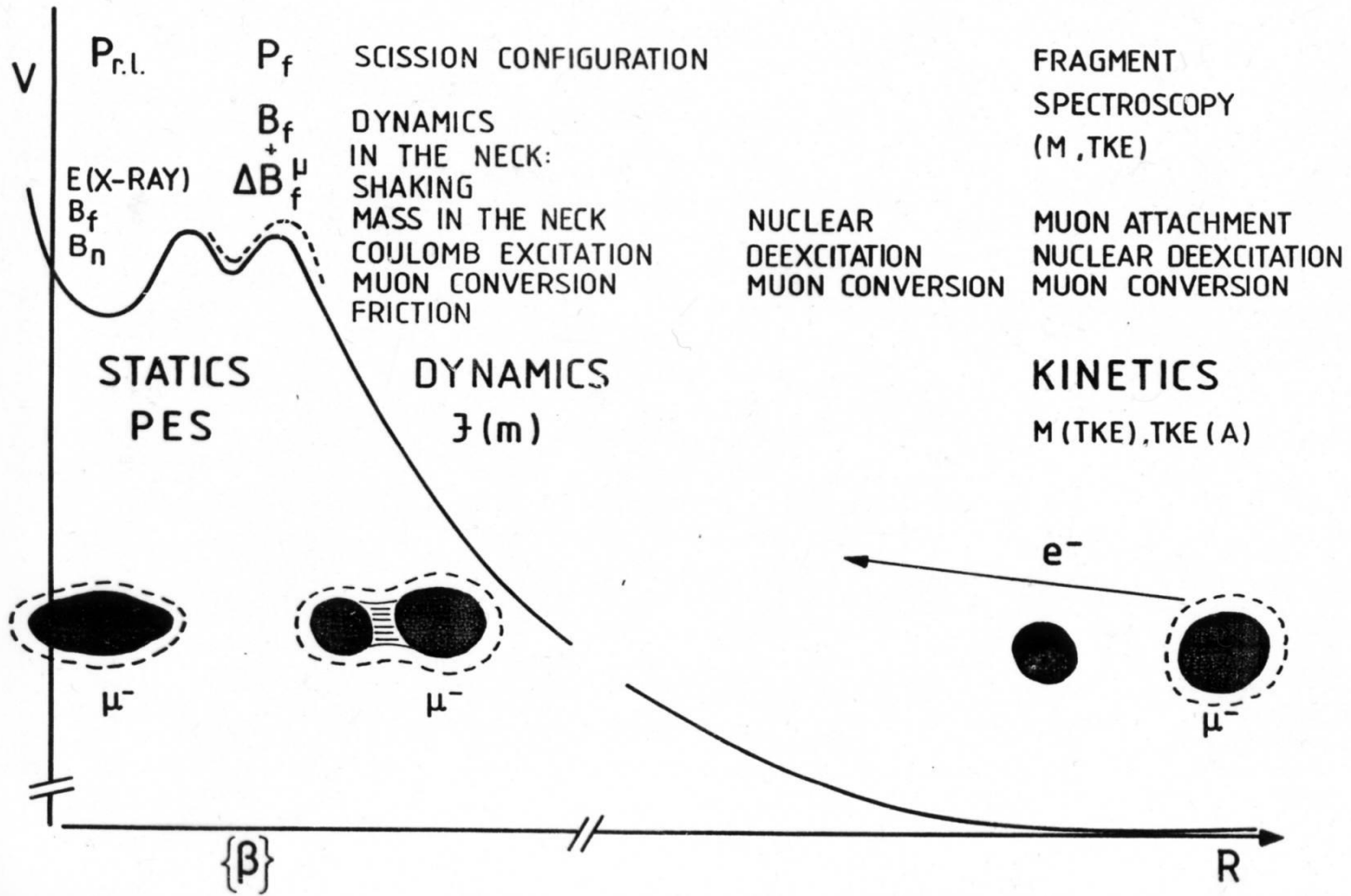


NON-RADIATIVE TRANSITIONS IN MUONIC ^{238}U ATOMS



*M.Ya.Balatz, L.N.Kondrat'ev,
L.G.Landsberg, P.I.Lebedev,
Yu.V.Obukhov, and B.
Pontecorvo. Soviet Phys. ZETP,
11, 1239 (1960)*





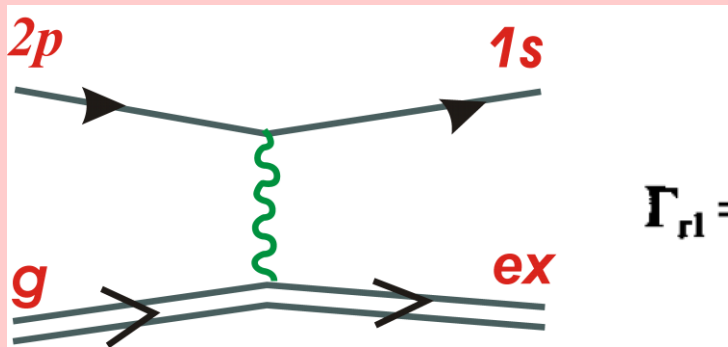


EXPERIMENTAL NON-RADIATIVE TRANSITION PROBABILITIES

Ch. Roesel, P. David, H. Folger, H. Haenscheid et al.
Radiationless transition probabilities in muonic 208Pb, 232Th,
and 238U. Z. Phys. A - Hadrons and Nuclei **340**, 199-208
 (1991)

	$2p \rightarrow 1s$	$2p^l \rightarrow 1s$	$2p^h \rightarrow 1s$	$3p \rightarrow 1s$	$3d \rightarrow 1s$
This work	26.2 ± 2.6	$21.6 \pm 3.2(1.6)$	$31.1 \pm 2.8(1.3)$	88.9 ± 4.3	12.8 ± 1.4
Zaretski & Novikov [2, 3]					
with σ_i from [27]	22.4	21.1	24.2	64.7	
with σ_i from [28]	29.8	28.4	32.0	68.5	
Teller & Weiss [7]	20.7	20.0	21.7	59	9.6
Karpeshin & Nesterenko [8]	$11 \div 15^a$ $19 \div 26^b$			$55 \div 65^c$ $57 \div 69^d$	$19 \div 24^e$ $25 \div 32^f$

CALCULATIONAL NON-RADIATIVE TRANSITION PROBABILITIES

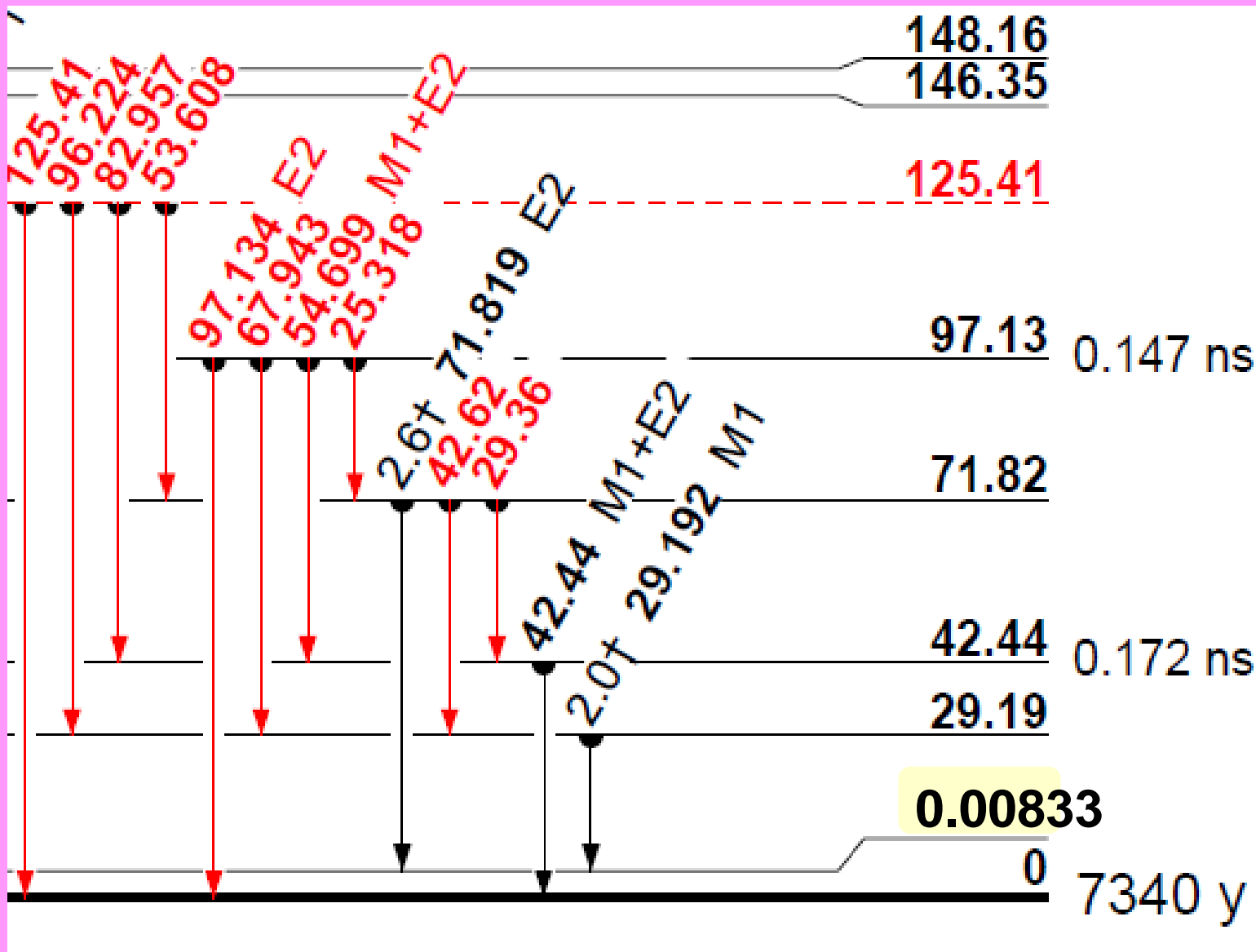


*F F Karpeshin and V O Nesterenko,
J. Phys. B 17, 705 (1991)*

$$\Gamma_{r1} = \alpha_{\mu}^{(d)}(i \rightarrow f) \frac{8\pi(L+1)}{[(2L+1)!!]^2} \omega^{2L+1} b(EL; 0 \rightarrow \omega)$$

QPNM:

$$b(EL; 0 \rightarrow \omega) = \sum_g B(EL; 0 \rightarrow \omega) \frac{\Delta/2\pi}{(\omega - \omega_g)^2 + (\Delta/2)^2}$$



$^{229}_{90}\text{Th}$

Востребованная
погрешность не хуже

10^{-19}

*Достигнутая
погрешность:*

$\sim 5 \times 10^{-18}$ – РТВ

Ядерно-оптические часы:

10^{-19} - в ионах Th^{+++}

(И проще конструктивно)

Свойства изомерной линии

- Длина волны распада изомера: 148.71(42) нм (8,338(24) эВ).
- Метод: вакуумно-ультрафиолетовая спектроскопия $^{229\text{m}}\text{Th}$, имплантированного в широкозонные кристаллы CaF_2 и MgF_2 на установке ISOLDE в ЦЕРН: arXiv: 2209.10276.
- Ширина: 10^{-5} Гц (10^{-19} эВ).
- Собственное время жизни: 2 ч 10 мин.
- Время жизни в нейтральных атомах: 10 мкс.
- Ширина в нейтральных атомах : 10^{-10} эВ.

Lifetimes in ions of ^{229}Th

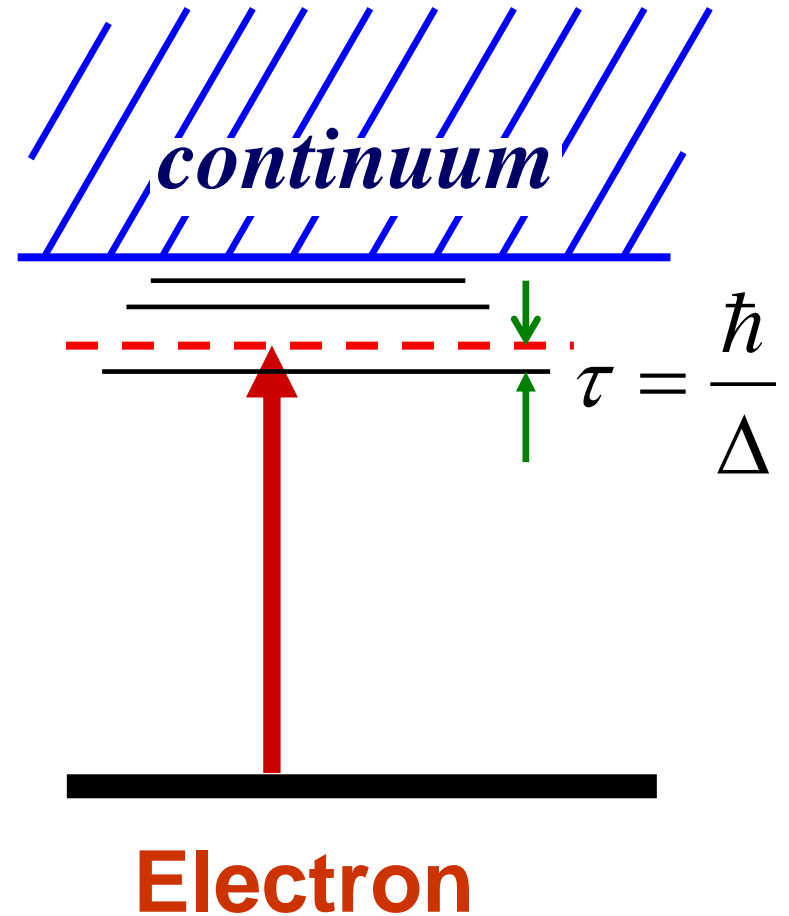
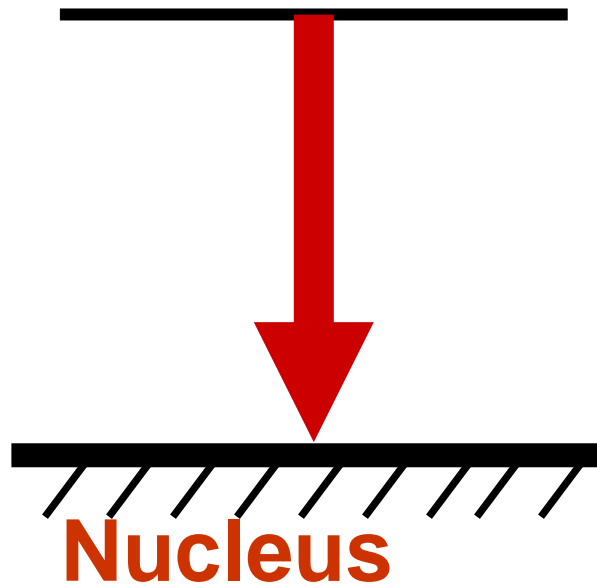
	ThI	ThII	ThIII	ThIV
experiment	10^{-5} s	<10 ms	> 2 min	
theory	3.5 mcs with R=300	10 ms – with the probability of 40%	40 min	2 h

Experiment: Benedict Seiferle, Lars von der Wense, and Peter G. Thirolf, Phys. Rev. Lett. **118**, 042501 (2017).

Theory: F. F. Karpeshin and M. B. Trzhaskovskaya, Nucl. Phys. A **969**, 173 (2018); A **1010**, 122173 (2021).

ELECTRON SHELL AS A RESONATOR.

Resonance IC



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

$$\Gamma_n = (1 + \alpha + R)\Gamma_\gamma^{(n)}$$

INTERNAL CONVERSION

TRADITIONAL

RESONANCE

ICC:

$$\alpha(\tau L; \omega) = \frac{\Gamma_c}{\Gamma_\gamma}$$

α -- dimensionless

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

$\alpha_d \sim [\text{MeV}]$; R - dimensionless

α – smoothly depends on ω

R – sharply resonant

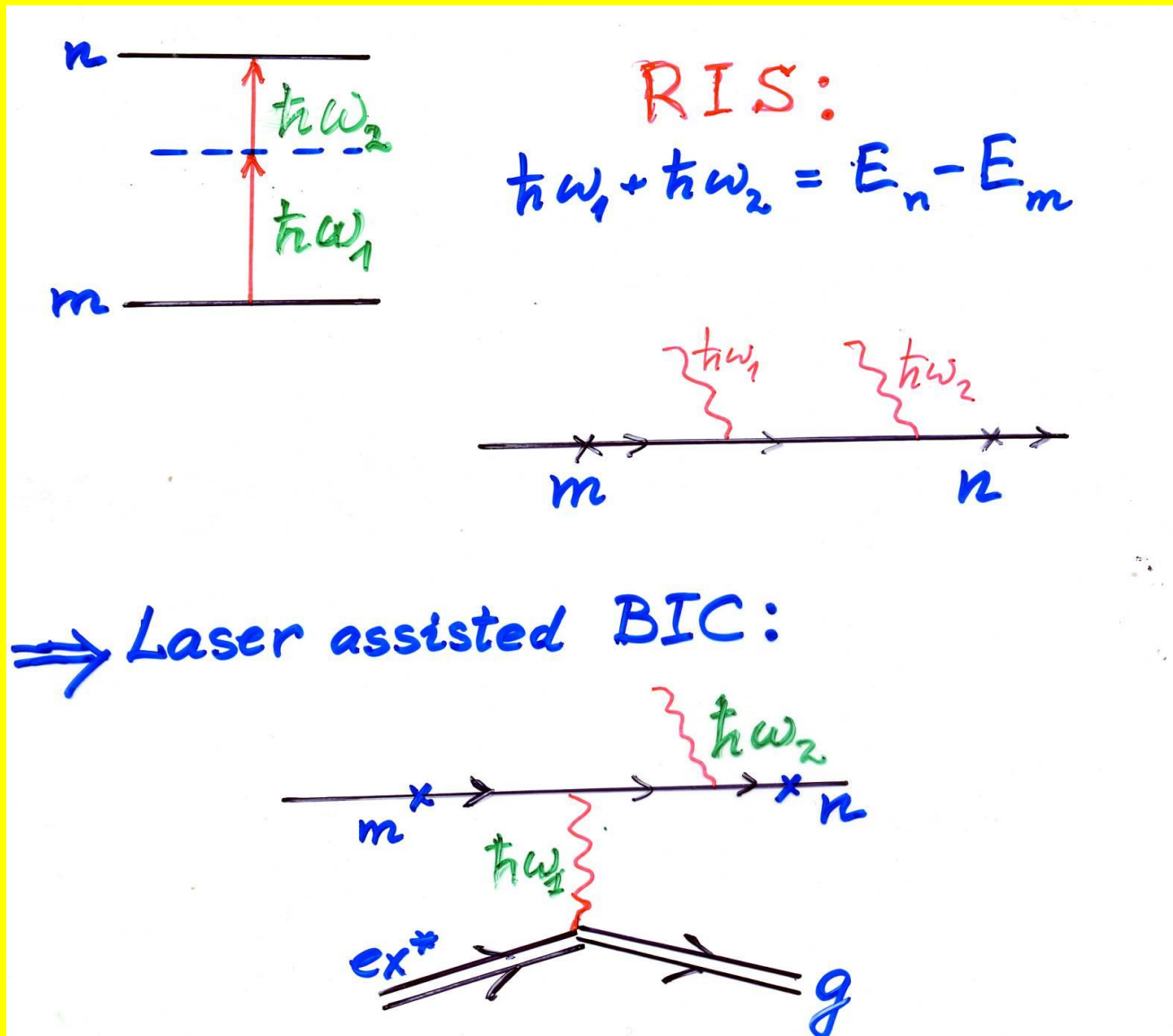
α – independent of spectator electrons

R – depends

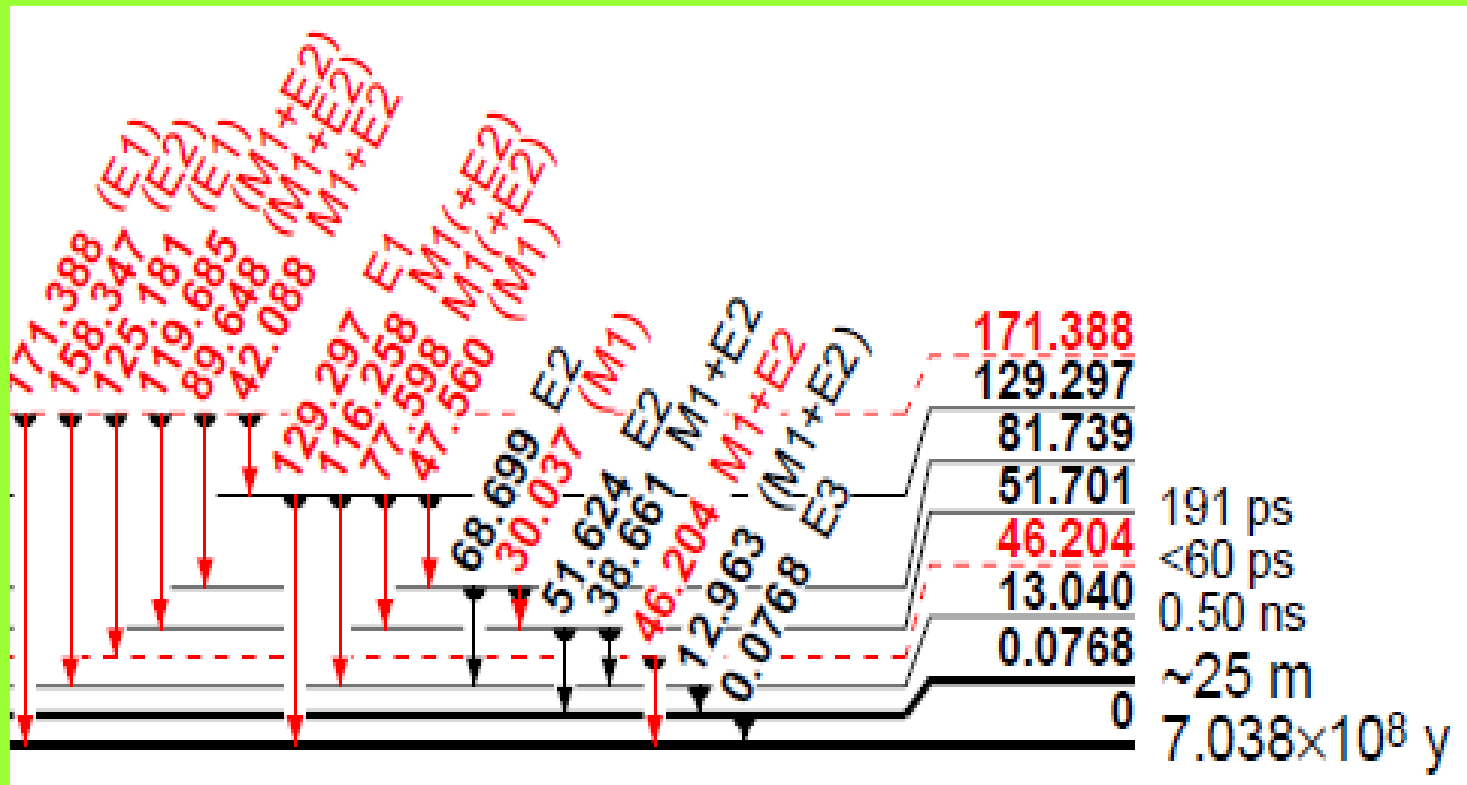
$\alpha = R$ at the boundary

ELECTRON SHELL AS A RESONATOR.

Laser Assistance of BIC (NEET) and TEEN

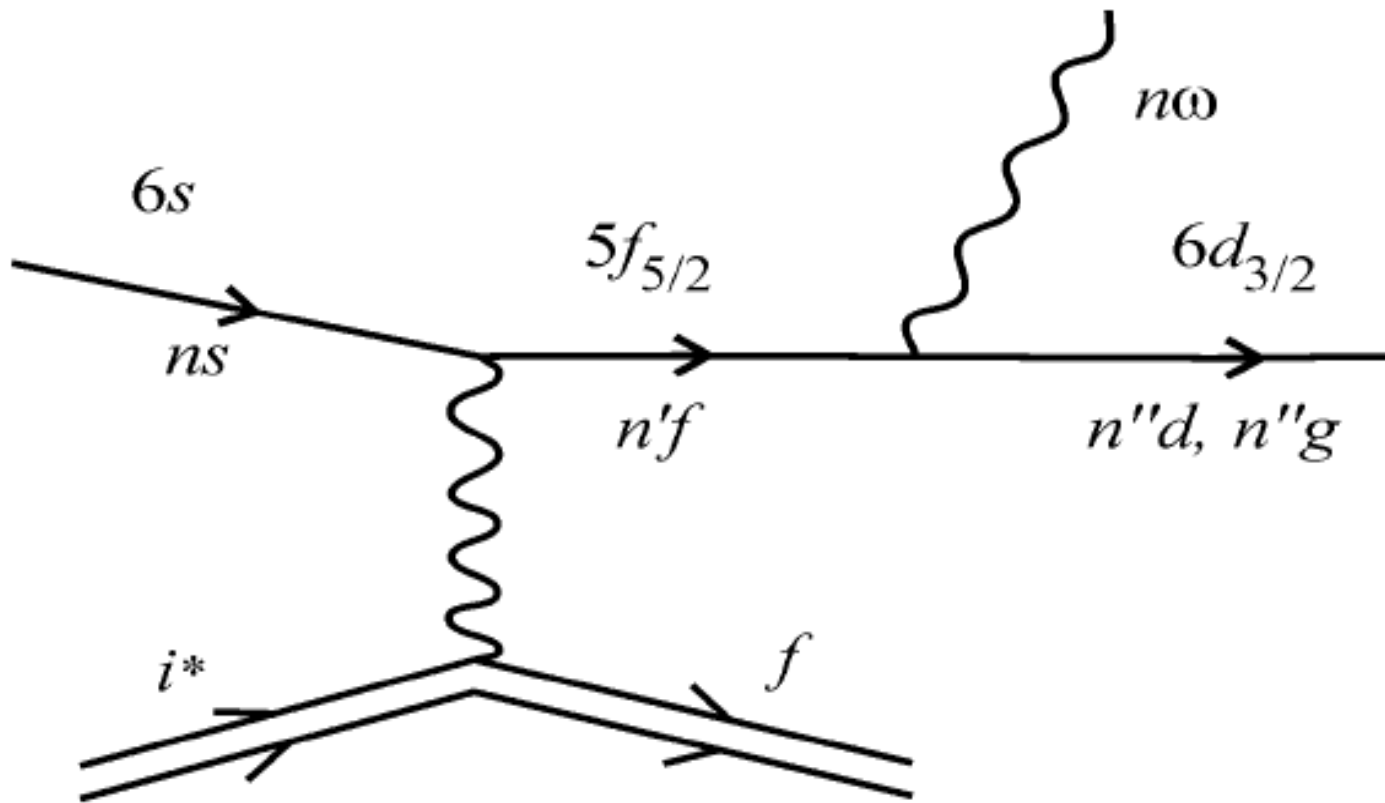


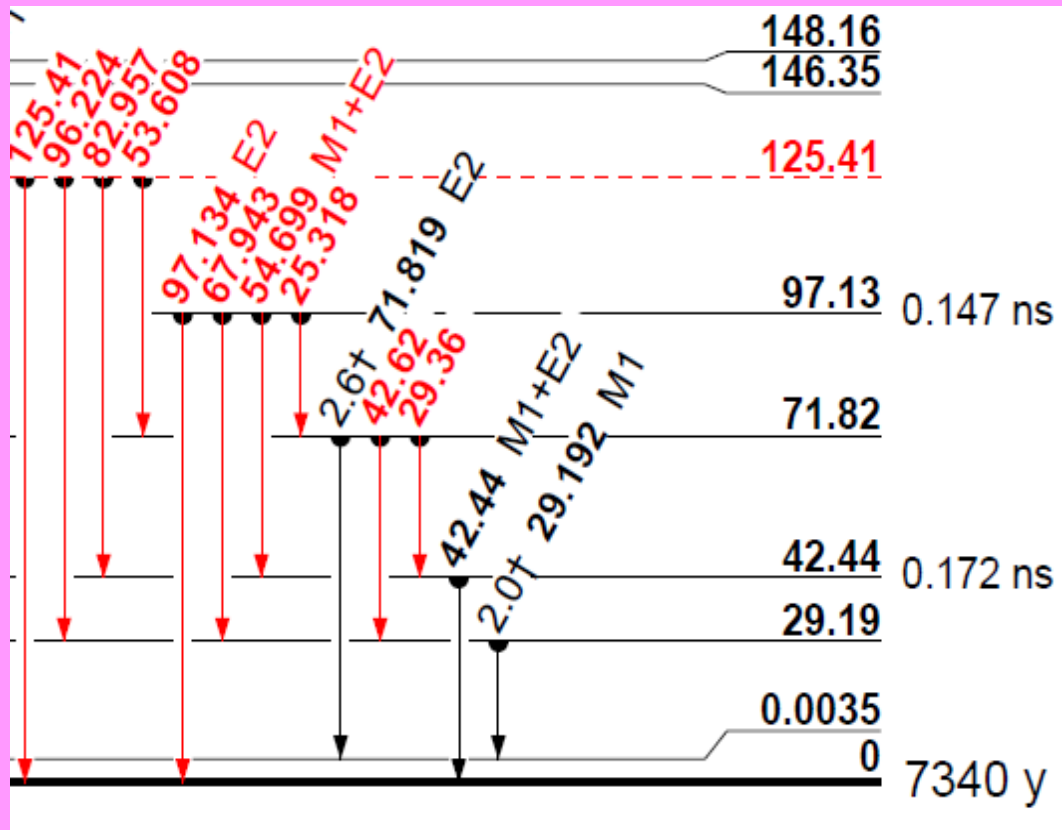
NUCLEI WITH LOW-LYING ISOMERIC STATES



Laser assistance of the 76 eV transition in ^{235}U

B.A.Zon, F.F.Karpeshin, JETP, 70, 224 (1990):

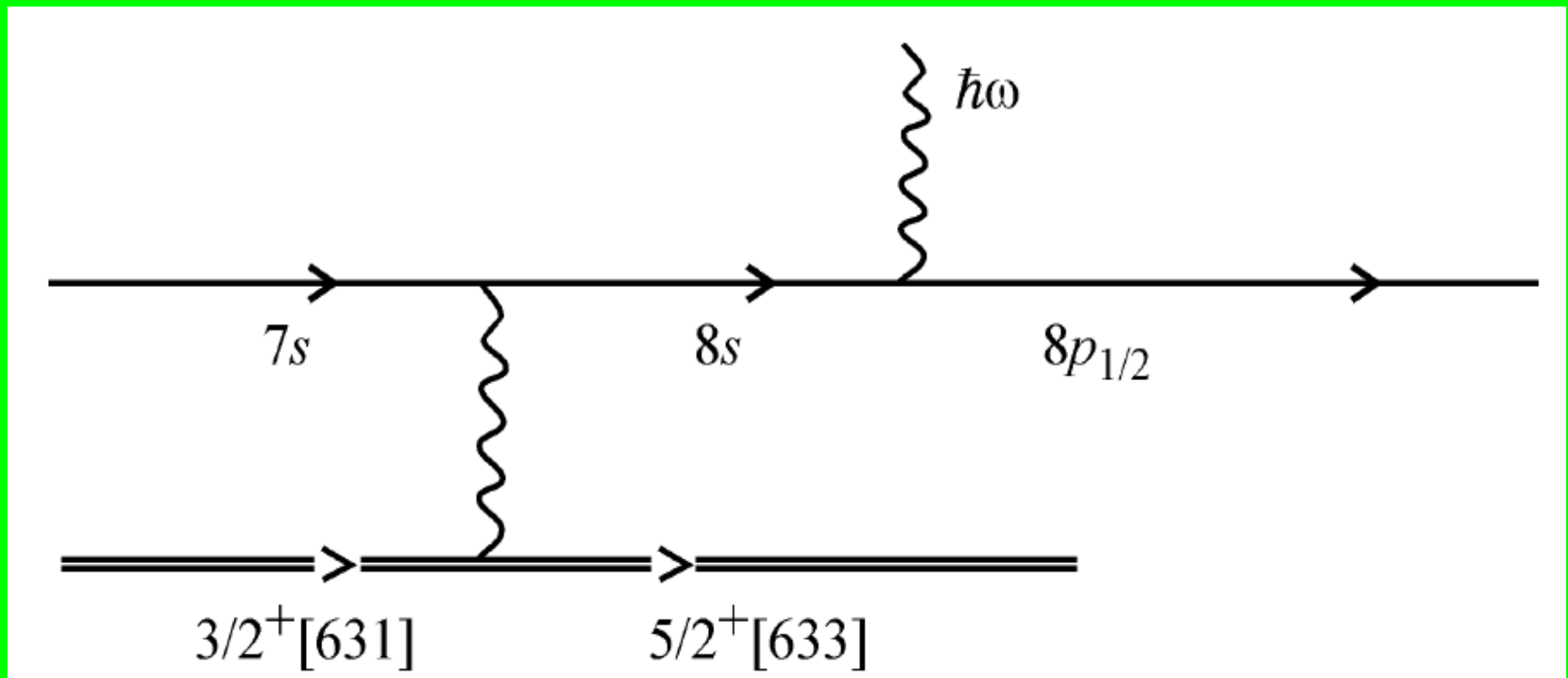




$^{229}_{90}\text{Th}$

Laser assistance of the 7.6 eV transition in ^{229}Th

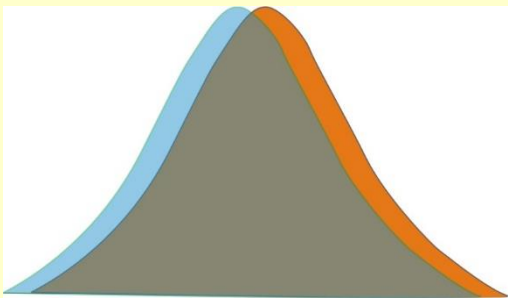
*F.F.Karpeshin, I.M.Band, M.B.Trzhaskovskaya
and B.A.Zon, Phys. Lett. 282B, 267 (1992)*



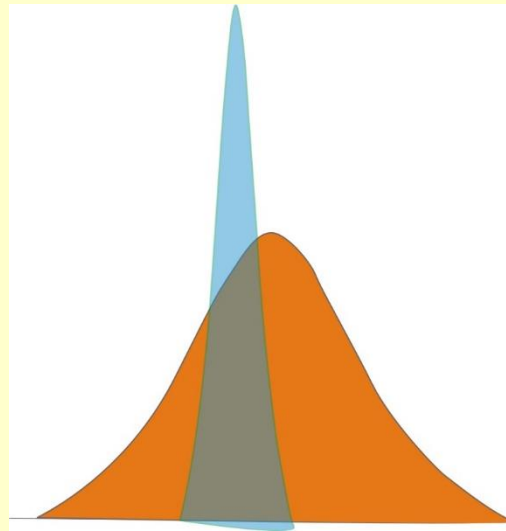
Acceleration is predicted by 500 times with $P \sim 1 \text{ mW/cm}^2$

Facilities: SHIPTRAP in Heidelberg, HYTRAP in GSI

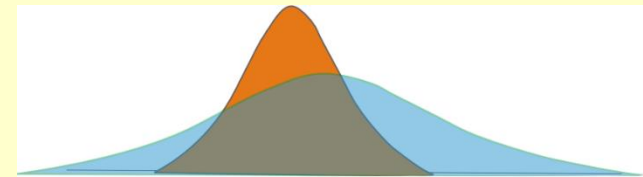
Резонансное фотовозбуждение



$S \approx \Gamma$



$S < \Gamma$



$S > \Gamma$

$$\sigma_{\gamma}(0 \rightarrow \omega) = \Gamma_{\gamma}(\omega \rightarrow 0) \frac{2I_{\omega} + 1}{2I_0 + 1} \left(\frac{\pi}{\omega}\right)^2 S_0$$

Lars von der Wense and Chuankun Zhang,
Eur. Phys. J. Ser. D. 2020. V. 74.

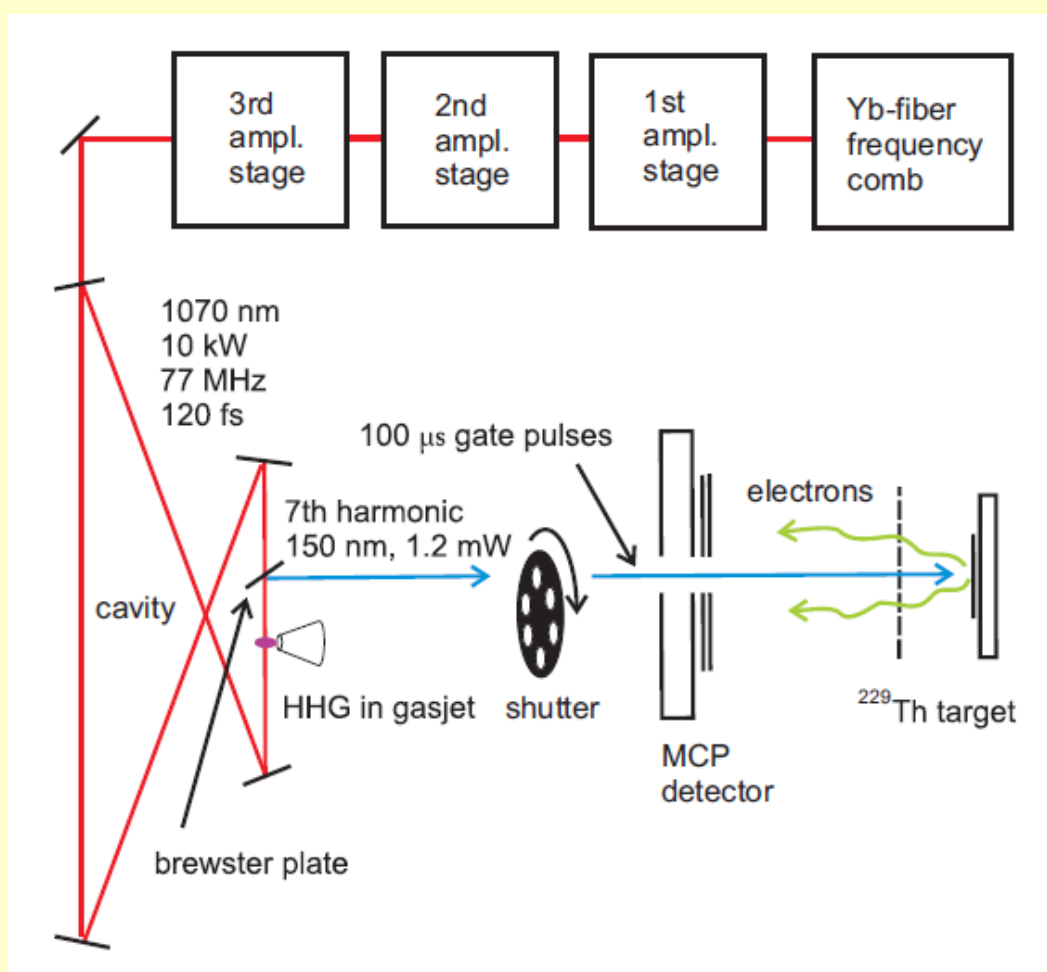
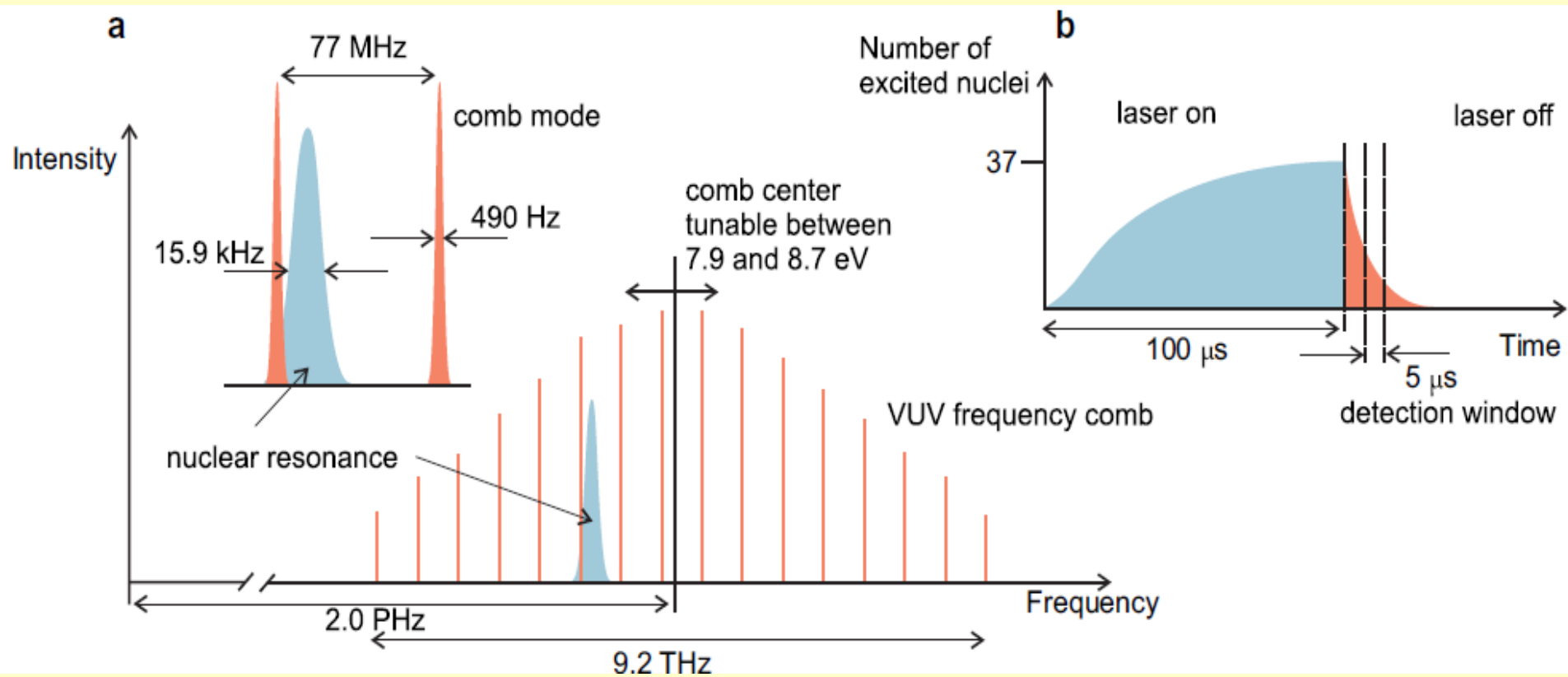


Схема экспериментальной установки, предложенной для прямого ядерного лазерного возбуждения на основе частотной гребенки ^{229m}Th .

Эскиз экспериментальной концепции



ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ СКАНИРОВАНИЯ

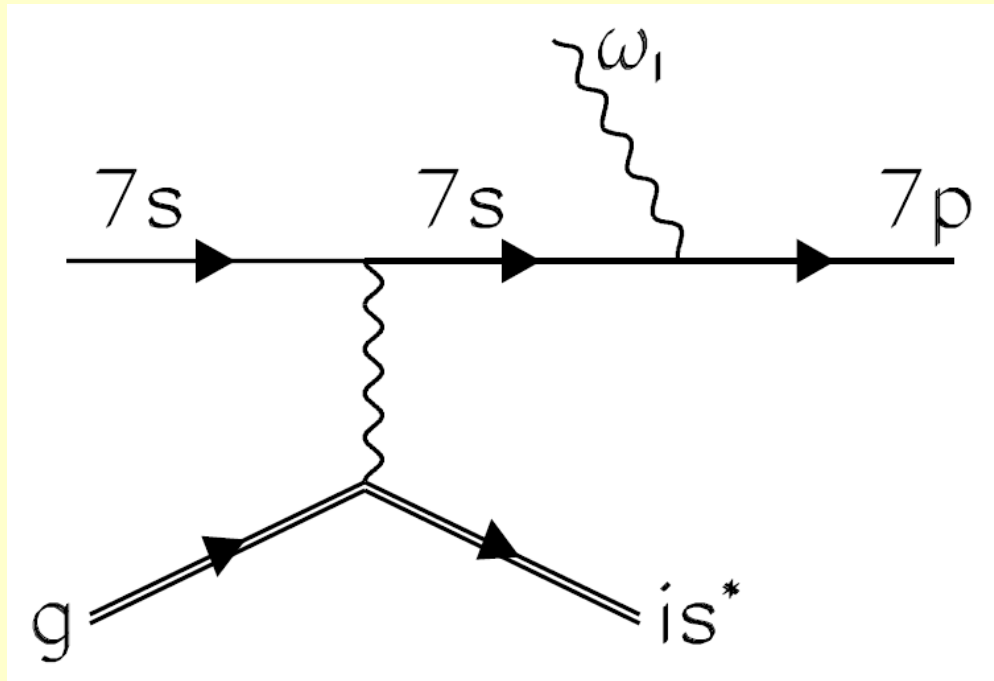
- Продолжительность импульса: 100 мкс.
- Мощность импульса: 10 нВт.
- Мишень: 1.6×10^{13} атомов ^{229}Th .
- \varnothing 0.3 мм.

Итог: 65 изомерных атомов за импульс.

- Шаг сканирования: $\sim \Gamma_n \approx 10^{-10}$ эВ.
- На 1 эВ надо $\sim 10^{10}$ шагов $\approx 10^{10}$
- На 77 МГц надо ~ 5000 шагов = 5000 с
- Для уточнения энергии надо несколько циклов

Электронная оболочка как резонатор

F.F. Karpeshin et al. / Nuclear Physics A 654 (1999) 579–596



Важно!!! **7p – возбужденное** состояние!!!

Иначе малость

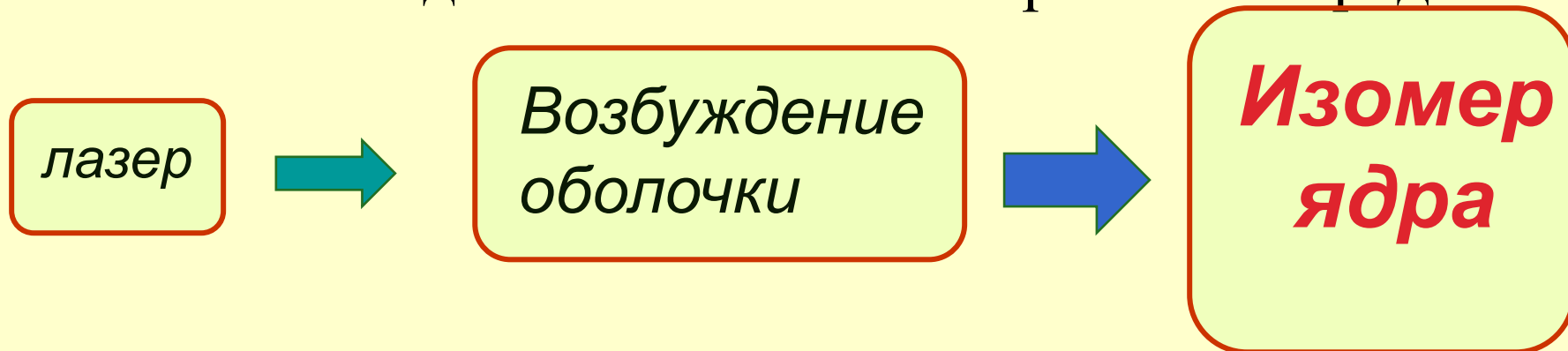
$$\Gamma_n / \Gamma_a \approx 10^{-12}$$

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- Атомная ширина $\Gamma_a \approx 10^{-8}$ эВ $\approx 100 \Gamma_n$ →
 - Спектральная ширина каждого зубца может быть в 100 раз больше, при том же сечении. →
 - Шаг сканирования в 100 раз больше, то есть 50 шагов вместо 5000.
 - Фейнмановская диаграмма в 965 раз сильнее, то есть время экспонирования на каждом шаге можно уменьшить ~в 1000 х.
- Итог: *выигрыш* в $100 \times 965 = 10^5$ раз

РЕЗЮМЕ

- В нейтральных атомах ^{229}Th ВК (внутренняя конверсия) приводит к уширению линии и соответственно к сокращению времени сканирования на 9 порядков.
- Механизм возбуждения изомерного состояния ядра в ионах – обратная резонансная конверсия – обеспечивает дополнительный выигрыш в 5 порядков:



Excitation of the Isomeric ^{229m}Th Nuclear State via an Electronic Bridge Process in $^{229}\text{Th}^+$. S. G. Porsev, V.V. Flambaum, E. Peik, and Chr. Tamm, PRL 105, 182501 (2010)

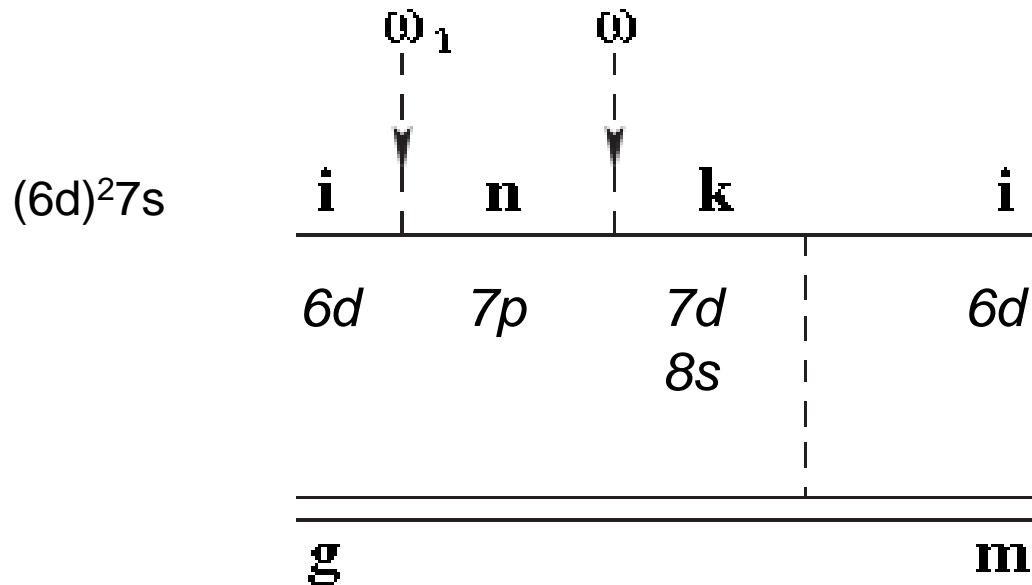


FIG. 1. Two-photon electronic bridge process. The single and double solid lines relate to the electronic and the nuclear states, respectively. The dashed lines are the photon lines.

S. G. Porsev et al. PRL 105, 182501 (2010)

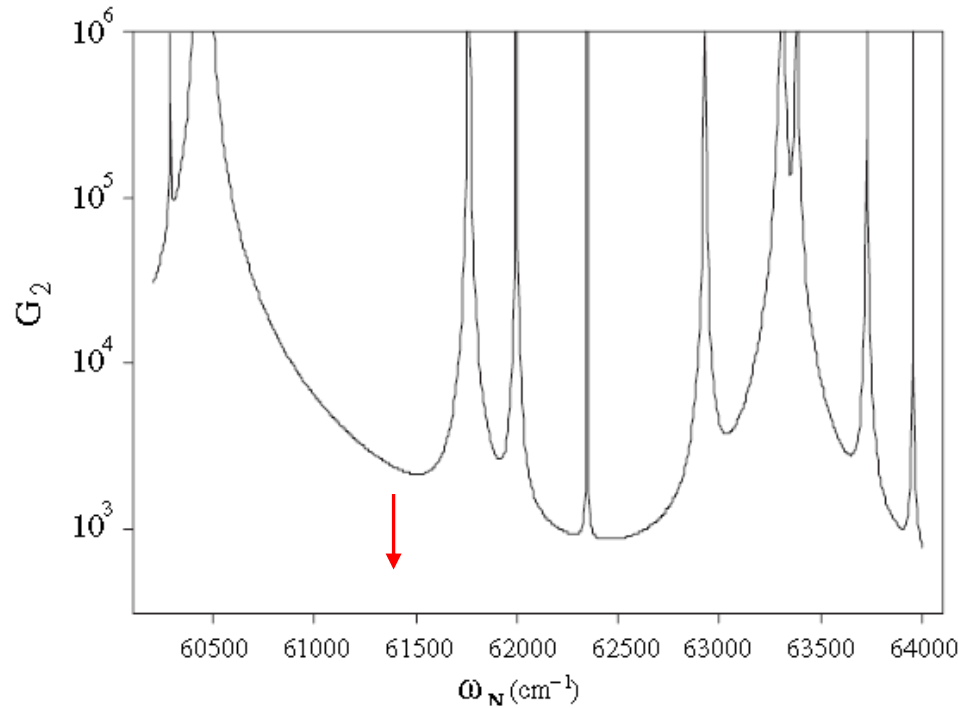


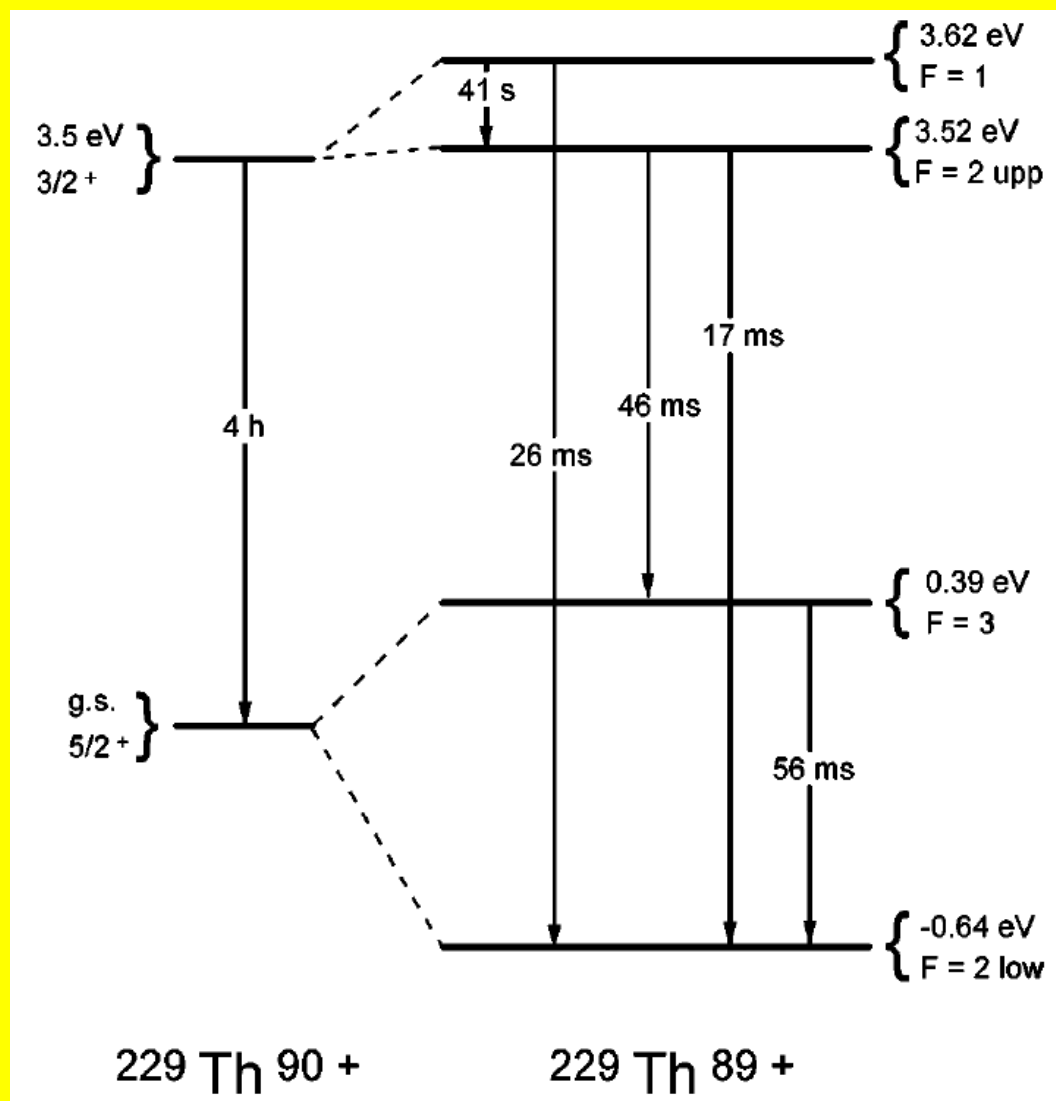
FIG. 3. Dependence of the coefficient G_2 [see Eq. (5)] on the nuclear transition frequency ω_N as calculated on the basis of the data listed in Table I.

$$R \propto \beta$$

$$\beta \approx \frac{1}{20} G_2$$

WARSAW EFFECT OF NUCLEAR LEVEL MIXING

*F. F. Karpeshin, S. Wycech, I. M. Band and M. B. Trzhaskovskaya,
J. Zylicz, Phys. Rev. C 57, 3085 (1998).*



$$\Psi_{low} = \alpha|\phi_g\rangle + \beta|\phi_{is}\rangle$$

$$\Psi_{up} = \alpha|\phi_{is}\rangle - \beta|\phi_g\rangle ,$$

СЛЕДСТВИЯ:

1) Усилены переходы $up \rightarrow low$

2) Возбуждение изомера в результате «встряски».

F.F.Karpeshin, Nucl. Phys. A 654, 579 (1999)

Таблица 1: Значения дискретных КВК $\alpha_d(M1; ns \rightarrow ns)$, вероятностей образования изомера β^2 и полных ширин дырочных состояний Γ .

	1s	2s	3s	7s
$\alpha_d(M1; ns \rightarrow ns)$, эВ	2.57×10^{18}	0.88×10^{17}	3.92×10^{15}	0.98×10^{10}
β^2	2.62×10^{-4}	0.90×10^{-5}	4.00×10^{-7}	1.99×10^{-12}
Γ , эВ	88.2	14.3	15.5	—
$\beta^{2a)}$	1×10^{-5}	0.7×10^{-5}		

^{a)} M. G. Kozlov, A. V. Oleynichenko, D. Budker, D. A. Glazov, Y. V. Lomachuk, V. M. Shabaev, A. V. Titov, I. I. Tupitsyn, and A. V. Volotka, Arxiv: 2308.05173.

3) Две линии в спектре фотоэлектронов, расстояние между которыми в точности равно энергии изомера.

4) Influence on ground-state g factor of highly charged ^{229}Th ions: *V. M. Shabaev, D. A. Glazov, A. M. Ryzhkov, C. Brandau, G. Plunien, W. Quint, A. M. Volchkova, and D. V. Zinenko*, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 043001 (2022).

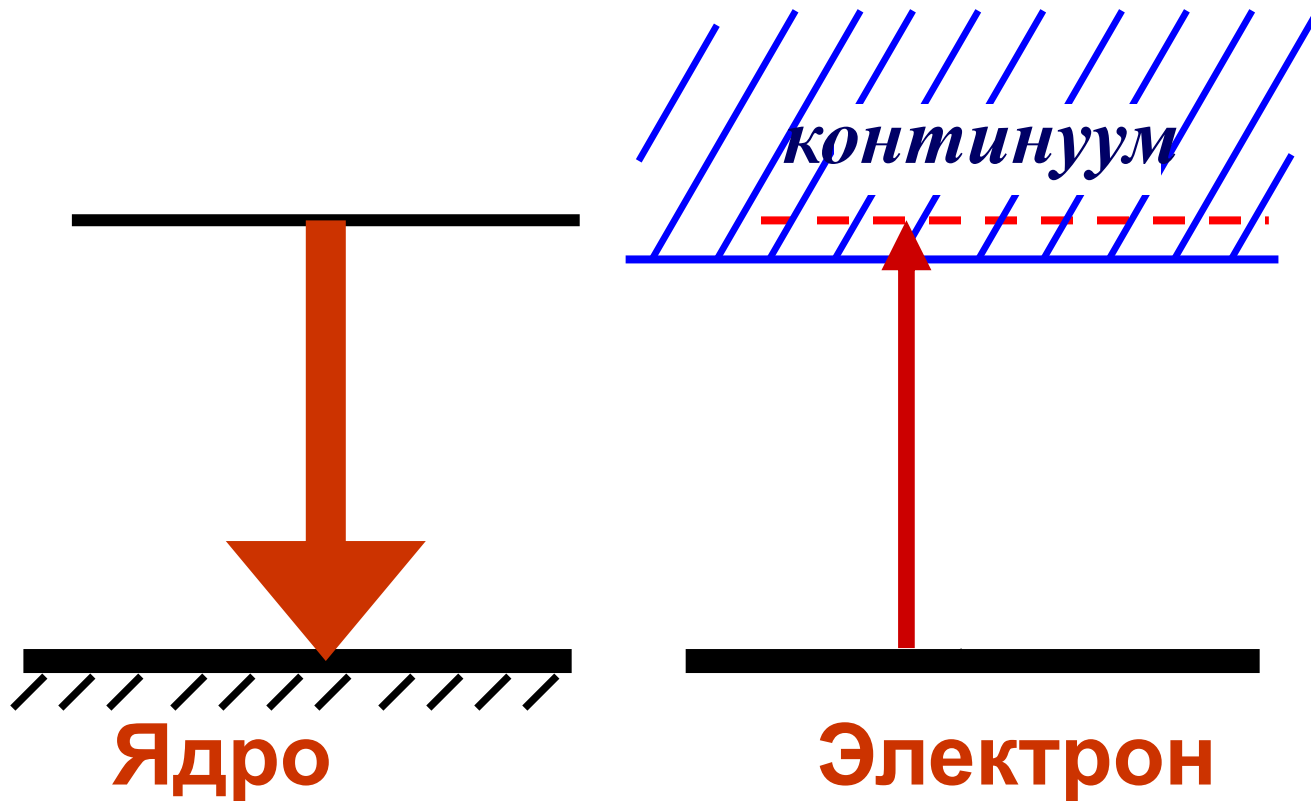
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Давно пришла пора оптических экспериментов для уточнения энергии изомера.
- Уширение линии изомера до 9 порядков в случае Th I. Уширением изомер обязан внутренней конверсии.
- Использование резонанса с электронной оболочкой в ионах Th II позволяет получить дополнительный выигрыш во времени сканирования до 15 порядков и более. Эффект достигается благодаря резонансному R-фактору ускорения, но главным образом вследствие уширения резонанса. *Условие: атом должен оставаться в возбужденном состоянии!*

- В фотоэффekte на внутренних оболочках возникают две электронные линии. Расстояние между ними в точности равно энергии изомера.
- Возбуждение изомера происходит вследствие встряски при образовании вакансий во внутренних оболочках: при обдирке внешних электронов, фотоэффekte, ионизации электронным ударом и т.п.
- Изучение g -фактора ядра в основном состоянии также дает сведения о свойствах изомерного уровня.

***Спасибо
за внимание!***

Внутренняя конверсия (ВК)



Коэффициенты внутренней конверсии – КВК: $\alpha = \Gamma_c / \Gamma_\gamma^{(n)}$

КВК достигают **9 порядков** величины! И даже больше...

$$\Gamma_{\text{total}}^{(n)} = (1 + \alpha) \Gamma_\gamma^{(n)}$$

$$T_{\text{total}}^{(n)} = \hbar / \Gamma_{\text{total}}^{(n)} = T_\gamma^{(n)} / (1 + \alpha)$$

Resonance IC

