

**Лазерная спектроскопия  
нейтронно-дефицитных  
изотопов таллия  
(ПИЯФ и CERN)**

**А. Е. Барзах, Ю. М. Волков, В. С. Иванов,  
К. А. Мезилев, П. Л. Молканов, Ф. В. Мороз,  
С. Ю. Орлов, В. Н. Пантелеев,  
М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров**

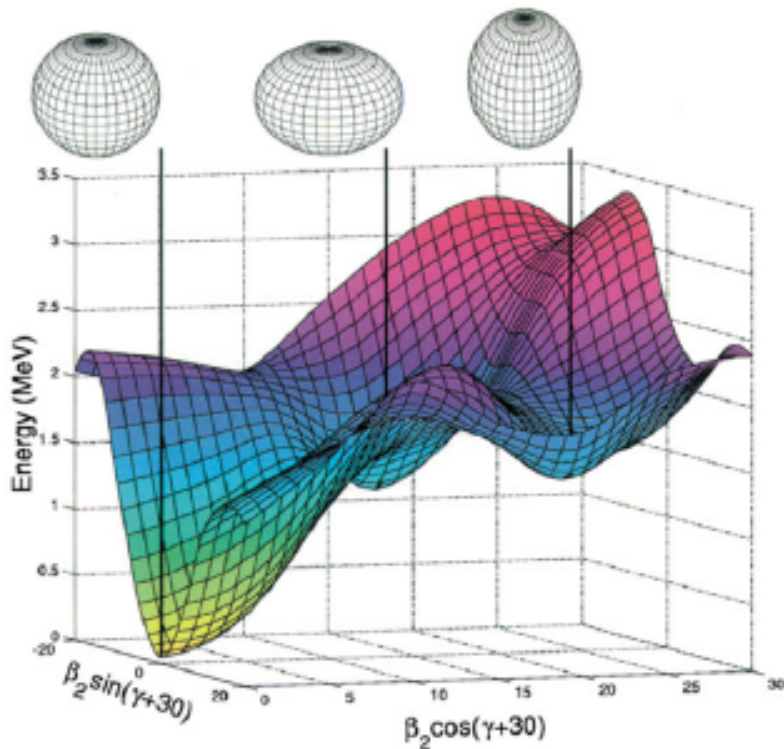
**IOOLDE**



1. Изотопические изменения зарядовых радиусов и сосуществование форм в нейтронно-дефицитных изотопах Tl (ИРИС & ISOLDE).
2. Аномалия сверхтонкой структуры у изотопов Tl и возможность изучения распределения ядерной намагниченности (ИРИС).
3. Ядерная спектроскопия  $^{180}\text{Tl}$  и  $^{180}\text{Hg}$ . Изомерно селективное исследование  $^{184}\text{Tl}$  и  $^{184\text{m}}\text{Tl}$  (ISOLDE).
4. Перспективы: исследование сосуществования форм, запаздывающего деления, октупольной деформации, радиусов и моментов цепочки изотопов At и Bi (ИРИС & ISOLDE).

# 1. Изотопические изменения зарядовых радиусов и сосуществование форм в нейтронно-дефицитных изотопах таллия

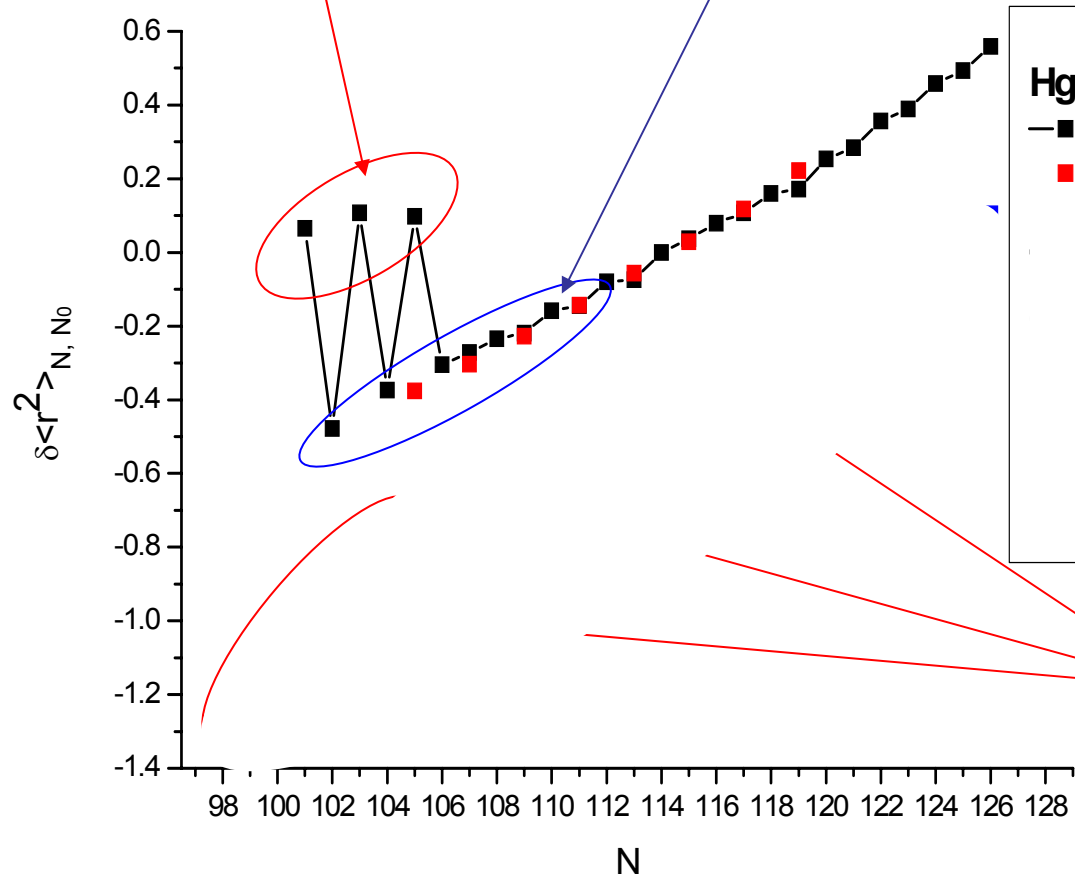
- Shape coexistence = proximity of spherical and/or deformed shapes(s) at low energy ( $E < \text{few MeV}$ )



Shape coexistence in neutron deficient  $_{82}\text{Pb}$  and  $_{84}\text{Po}$  isotopes (even-proton) was investigated at ISOLDE previously. The aim is to extend these studies on odd-proton isotopic chains. We begun with  $_{81}\text{Tl}$

strongly prolate deformed

weekly oblate deformed



regions of interest

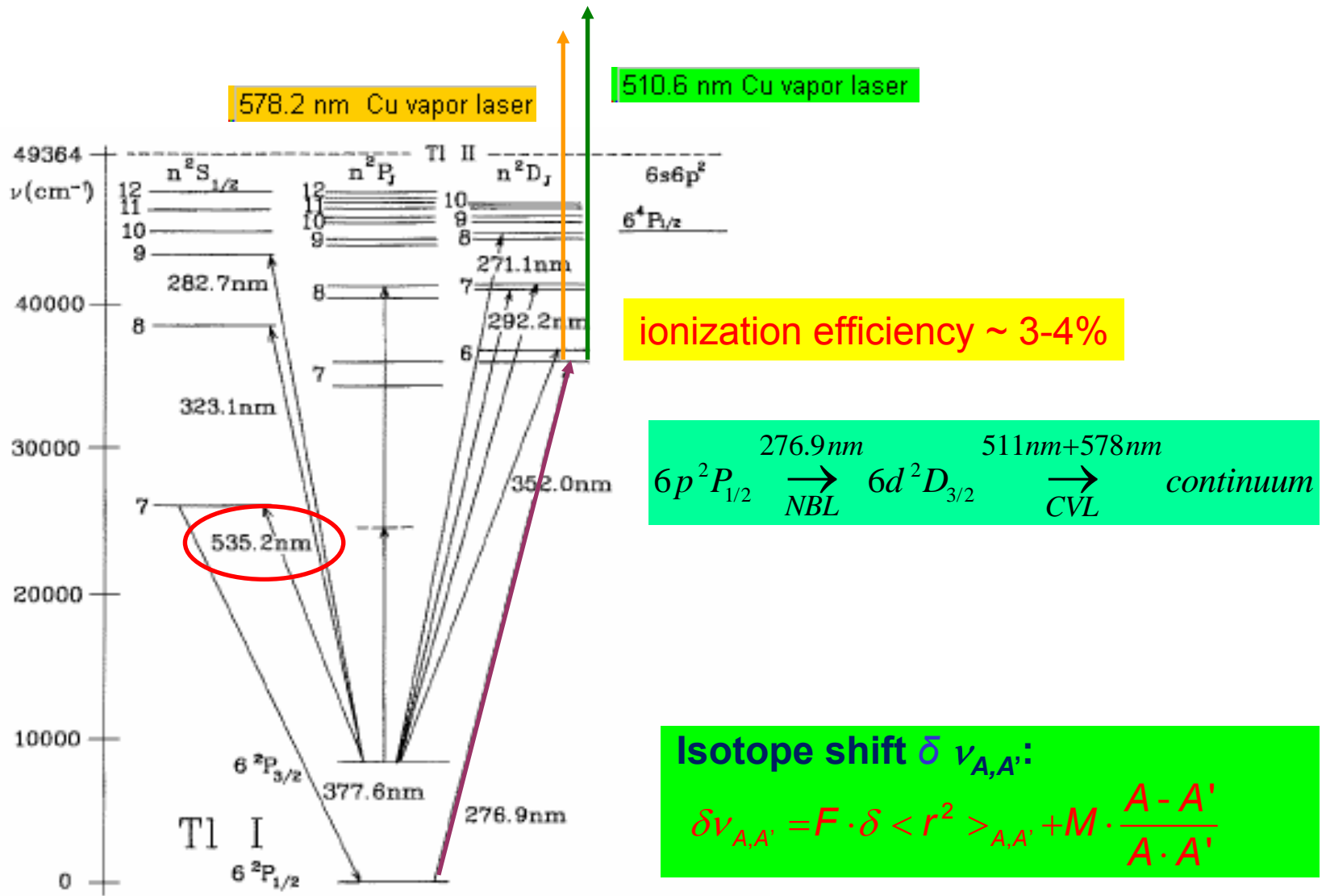


Fig.1. Energy-level diagram of Tl I with the investigated transitions

$^{183}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=6.9\text{ s}$	$^{184}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=11\text{ s}$	$^{185}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=19.5\text{ s}$	$^{186}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=27.5\text{ s}$	$^{188}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=71\text{ s}$	
		$^{185}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=1.8\text{ s}$	$^{186}\text{Tl}$ , $l=10$ , $T_{1/2}=2.9\text{ s}$	$^{187}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=15.6\text{ s}$	$^{188}\text{Tl}$ , $l=9$ , $T_{1/2}=0.04\text{ s}$

	$^{190}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=3.7\text{ m}$		$^{192}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=10.8\text{ m}$		$^{194}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=32.8\text{ m}$
$^{189}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=84\text{ s}$	$^{190}\text{Tl}$ , $l=2$ , $T_{1/2}=2.6\text{ m}$	$^{191}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=5.2\text{ m}$	$^{192}\text{Tl}$ , $l=2$ , $T_{1/2}=9.6\text{ m}$	$^{193}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=2.1\text{ m}$	$^{194}\text{Tl}$ , $l=2$ , $T_{1/2}=33\text{ m}$

repeated for another atomic transition  
 $6p^2P_{1/2} \rightarrow 6d^2D_{3/2}$  (276.9 nm)  
 for King-plot calibration

measured previously for  
 $6p^2P_{3/2} \rightarrow 7s^2S_{1/2}$   
 transition (535.2 nm)

$^{195}\text{Tl}$ ,  $l=9/2$ ,  
 $T_{1/2}=3.6\text{ s}$

$T_{1/2}=0.54\text{ s}$

$^{203}\text{Tl}$ ,  $l=1/2$ ,  
 stable

...

$^{207}\text{Tl}$ ,  $l=1/2$ ,  
 $T_{1/2}=4.77\text{ m}$



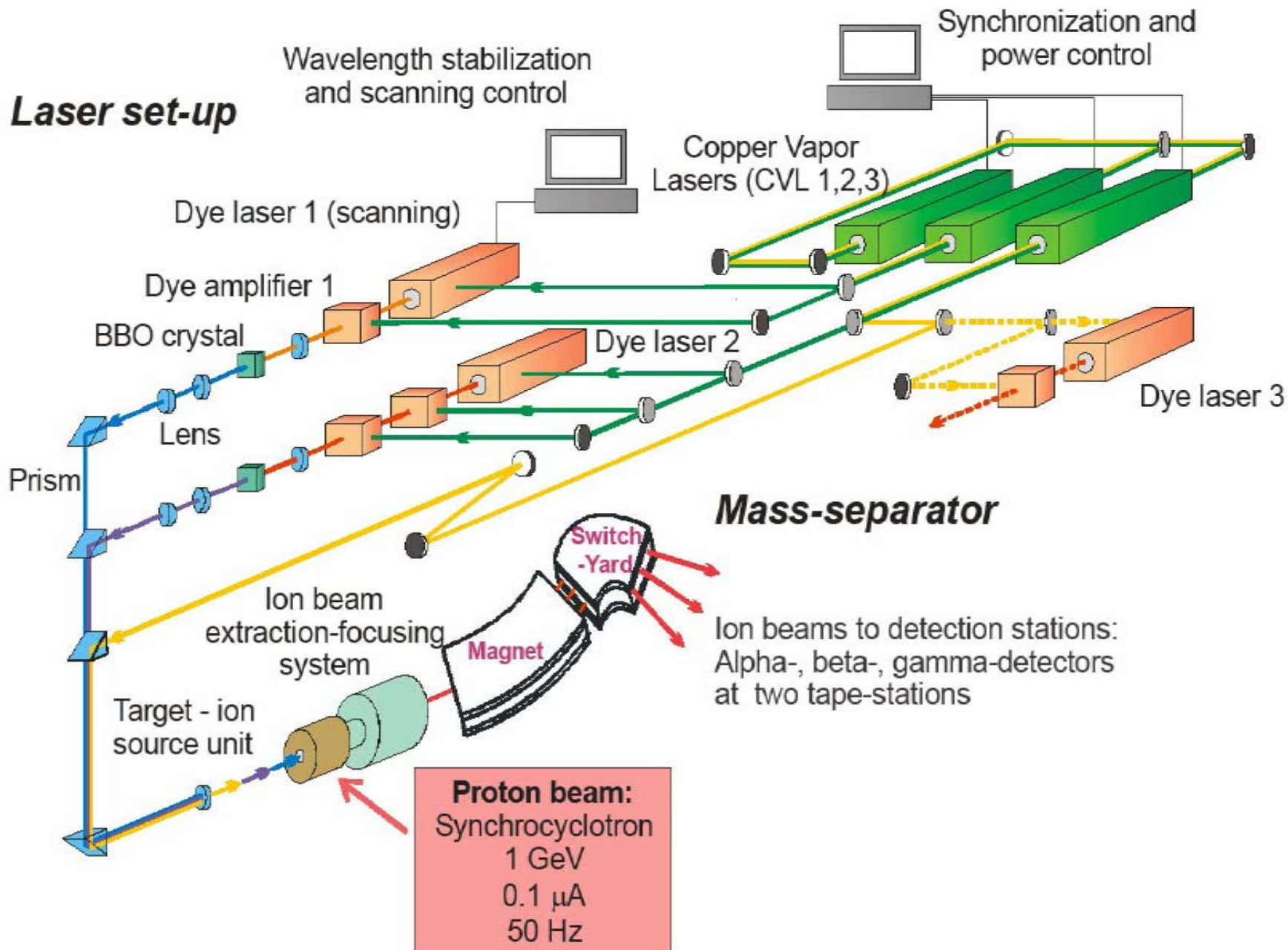
$^{179}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=0.23\text{ s}$	$^{180}\text{Tl}$ , $l=(4,5)$ , $T_{1/2}=1.1\text{ s}$	$^{181}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=3.4\text{ s}$	$^{182}\text{Tl}$ , $l=(4,5)$ , $T_{1/2}=3.1\text{ s}$	$^{183}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=6.9\text{ s}$	$^{184}\text{Tl}$ , $l=7$ , $T_{1/2}=11\text{ s}$
				$^{183}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=0.053\text{ s}$	$^{184}\text{Tl}$ , $l>8$ , $T_{1/2}<1\text{ s}$

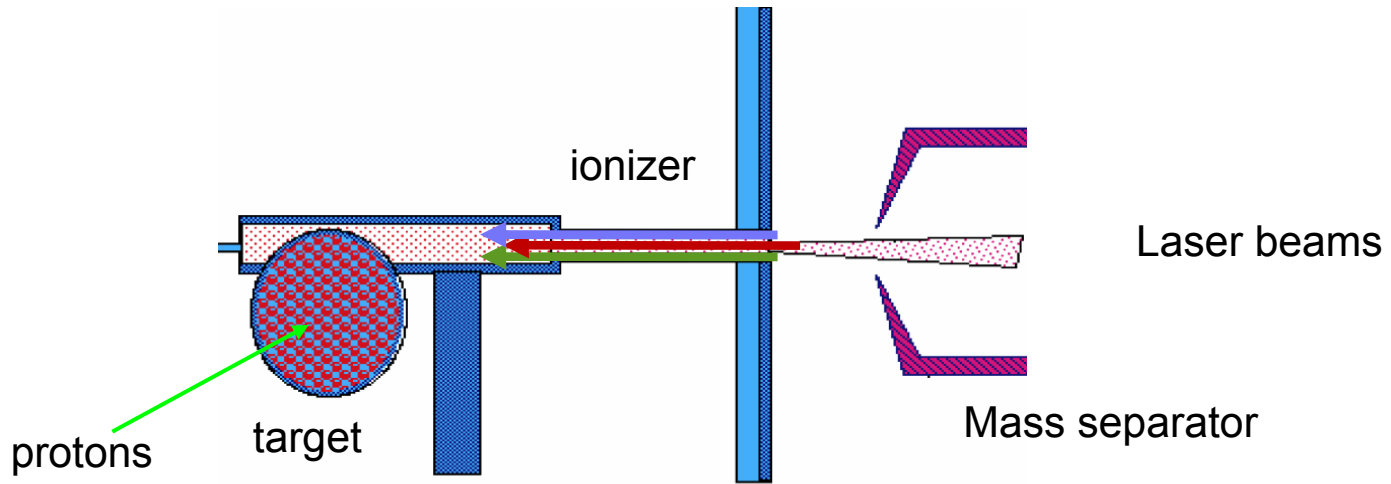
$^{185}\text{Tl}$ , $l=1/2$ , $T_{1/2}=19.5\text{ s}$	
$^{185}\text{Tl}$ , $l=9/2$ , $T_{1/2}=1.8\text{ s}$	$^{186}\text{Tl}$ , $l=10$ , $T_{1/2}=2.9\text{ s}$



- IRIS
- IRIS & ISOLDE
- ISOLDE

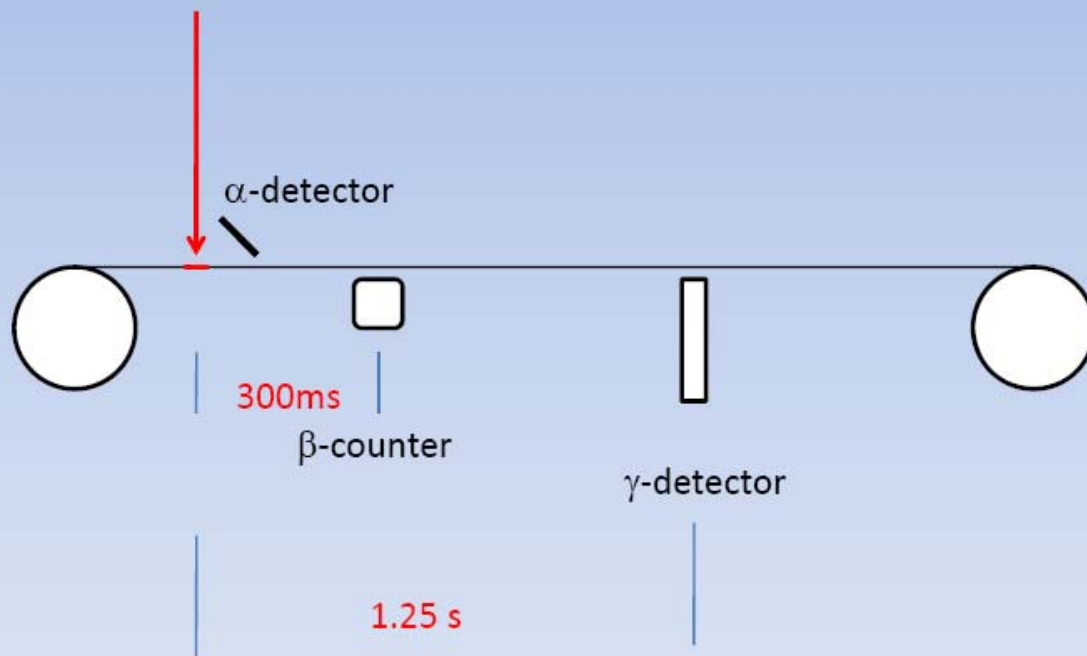
## Laser set-up

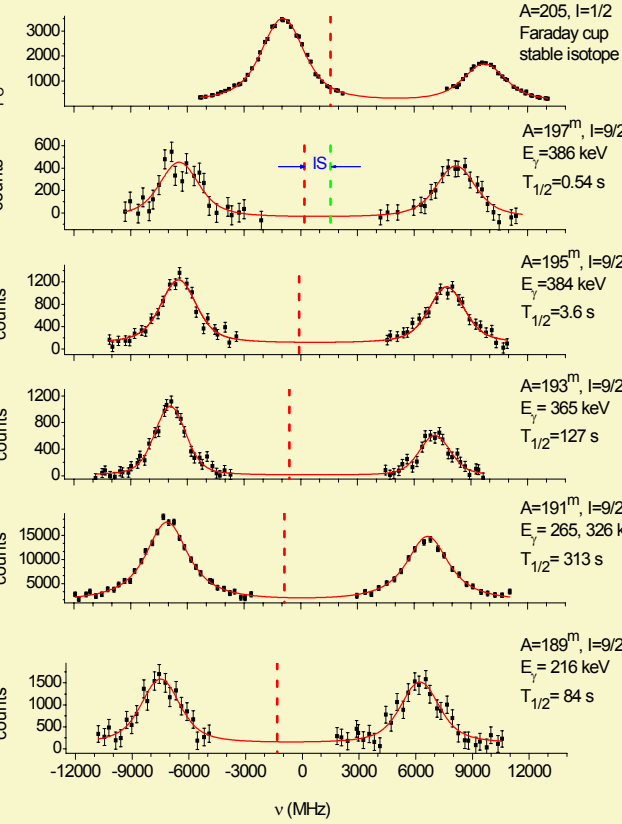




## Laser Ion Source (LIS)

Radioactive ions



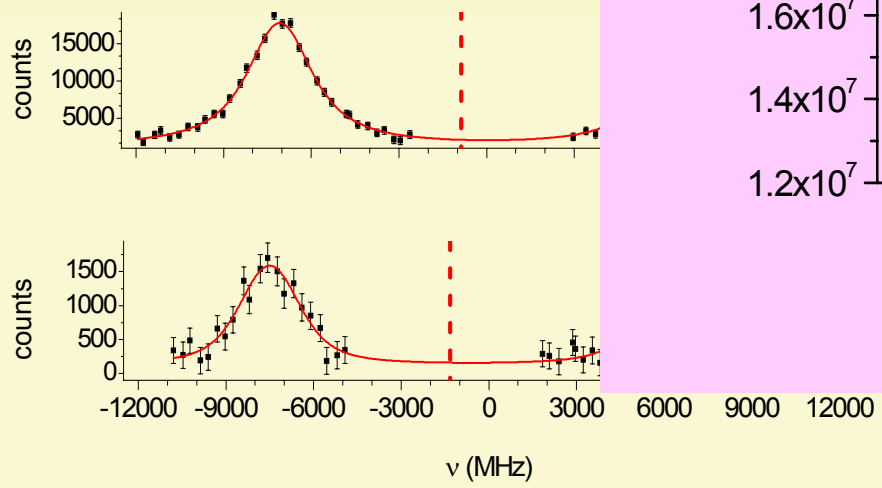
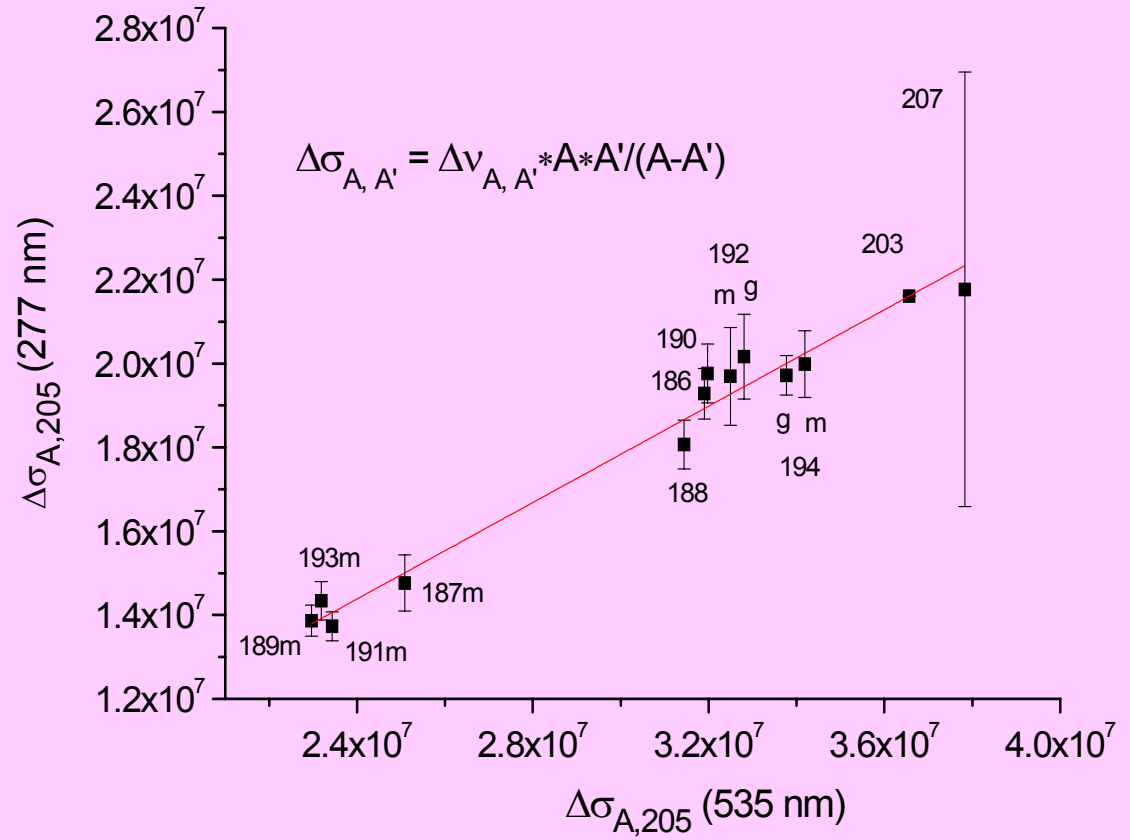


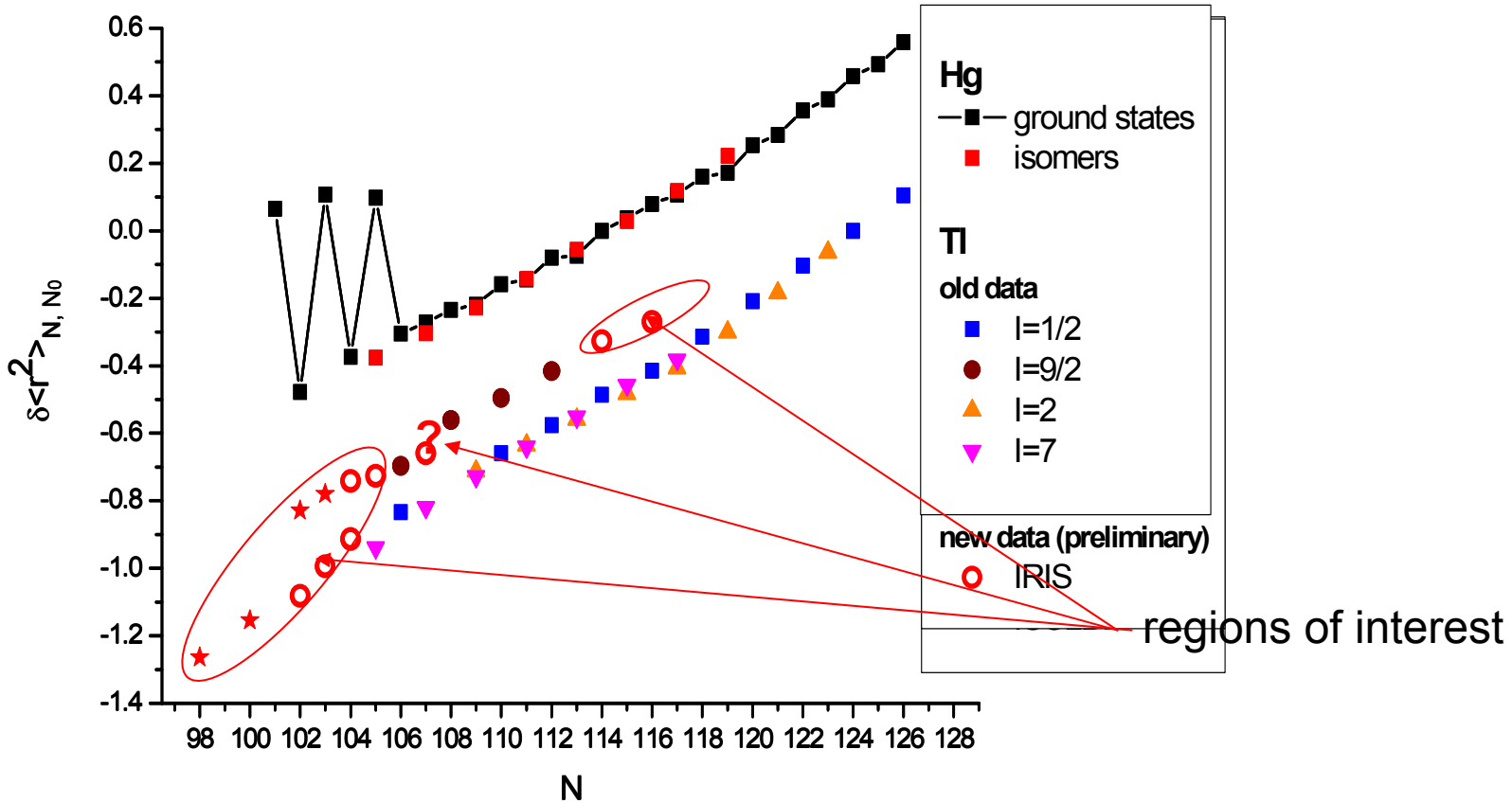
$A=205, I=1/2$   
 Faraday cup  
 stable isotope

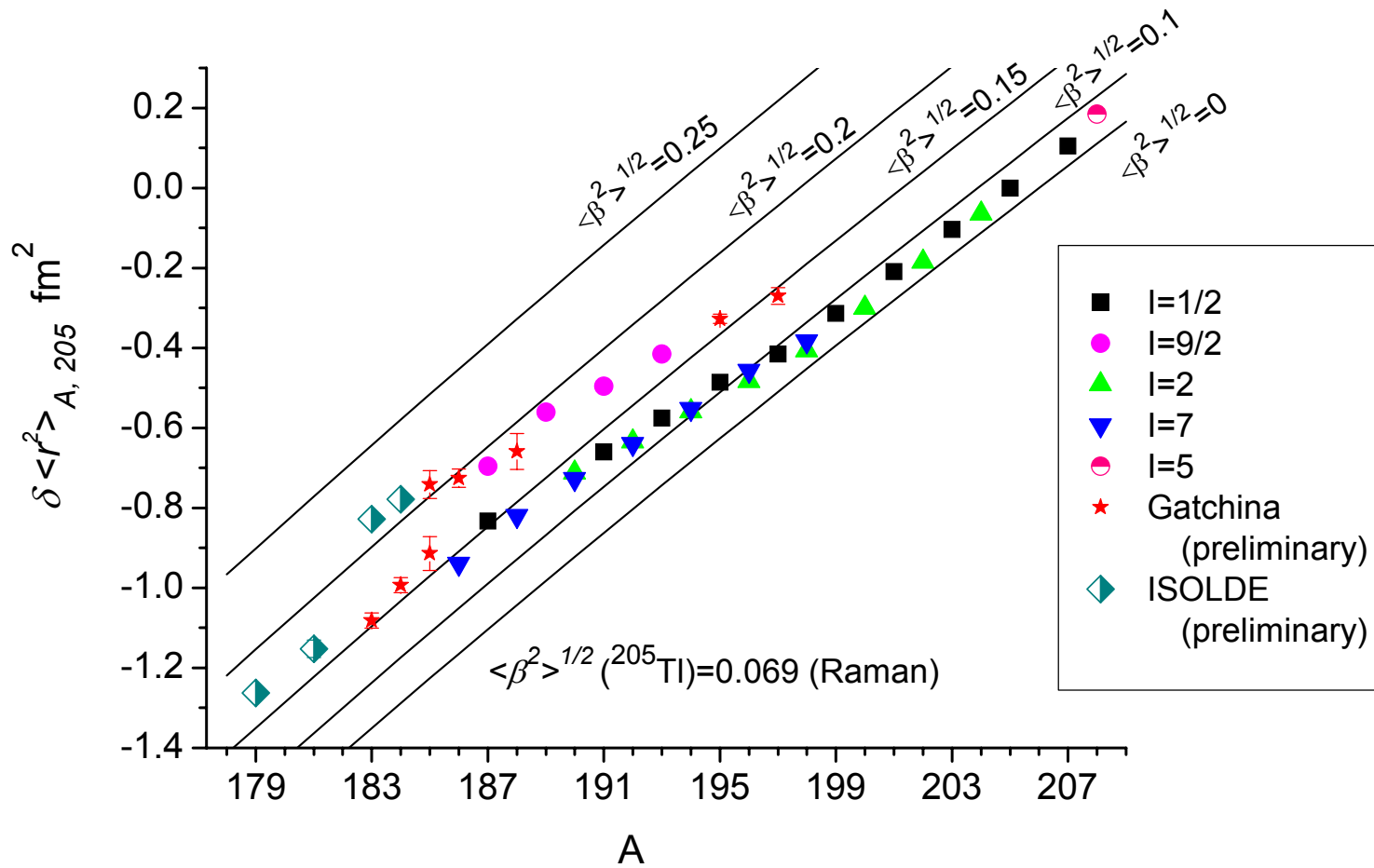
**Isotope shift  $\delta \nu_{A,A'}$ :**

$$\delta \nu_{A,A'} = F \cdot \delta \langle r^2 \rangle_{A,A'} + M \cdot \frac{A - A'}{A \cdot A'}$$

**King plot for 535 nm and 277 nm lines in Tl**

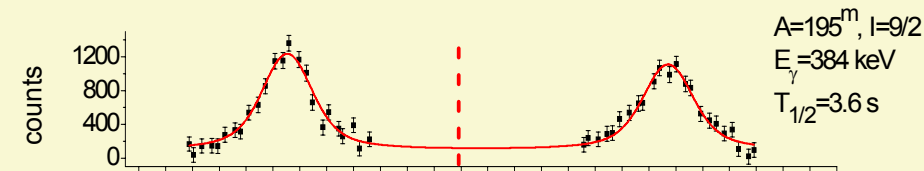
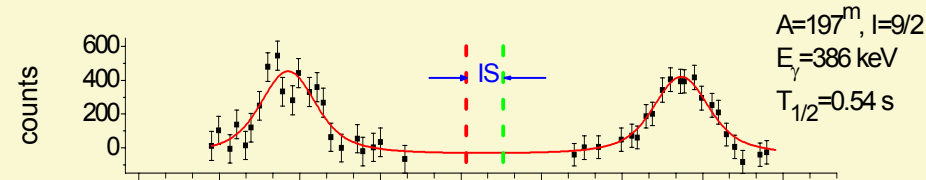
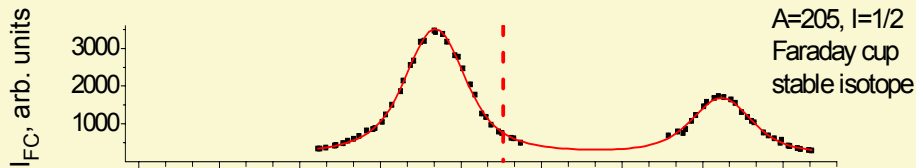




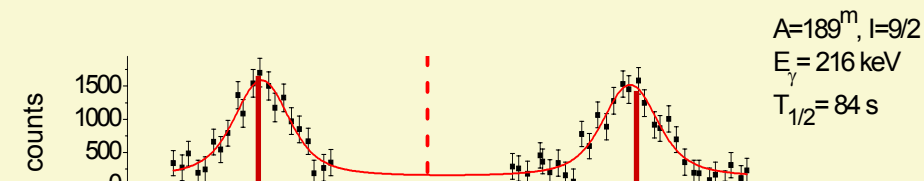
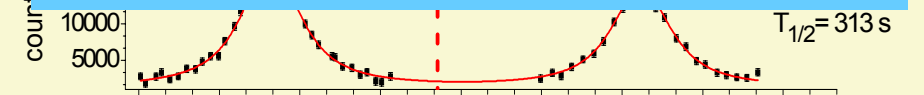


## 2. Аномалия сверхтонкой структуры и возможность изучения распределения ядерной намагниченности





$$\mu_A = \mu_{205} \cdot \frac{I_A}{I_{205}} \cdot \frac{a_A(nl)}{a_{205}(nl)} \cdot (1 + \frac{205}{A} \Delta_{nl}^A)$$



$$a = a_{point} (1 + \varepsilon) \implies A_1 \Delta A_2 = (\varepsilon_{A_1} - \varepsilon_{A_2})$$

$$\Delta \nu = a \cdot \frac{2I+1}{2}$$

$$a \propto \frac{\mu}{I}$$

$$\frac{\mu_A}{I} \neq const$$

$$I_A \cdot a_A \neq const$$

$$\mu_A = \mu_{205} \cdot \frac{I_A}{I_{205}} \cdot \frac{a_A}{a_{205}}$$

HFA:

$$A_1 \Delta A_2 = \frac{a_1 \cdot I_1}{\mu_1} \cdot \frac{\mu_2}{a_2 \cdot I_2} - 1$$

DHFA:

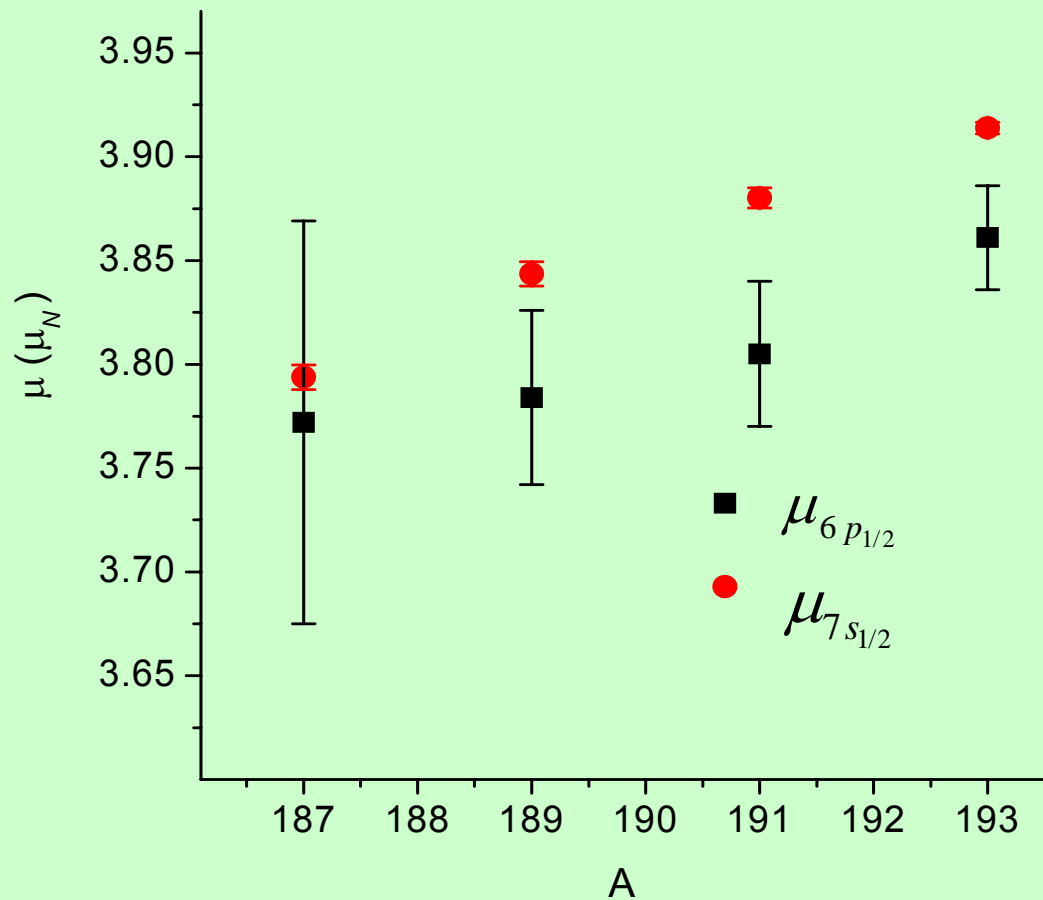
$$\rho_{n_1 l_1, n_2 l_2}^A = \frac{a_{n_1 l_1}^A}{a_{n_2 l_2}^A},$$

Ratio  $\rho_{l_1, l_2}^A$  can have a different value for different isotopes because the atomic states with different  $n, l$  have different sensitivity to the nuclear magnetization distribution.

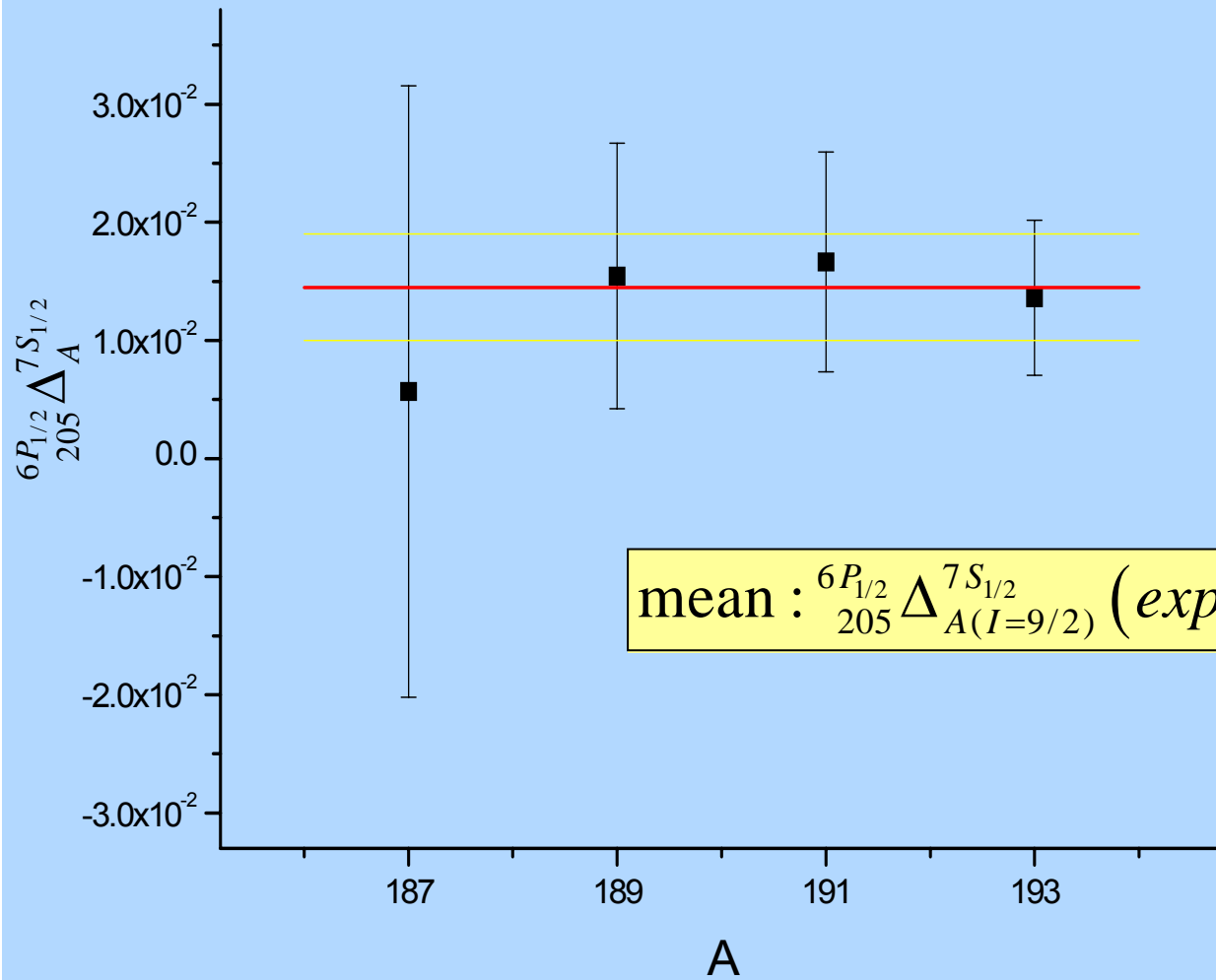
Our case: we have studied state with  $p_{1/2}$  valence electron; previously state with  $s_{1/2}$  valence electron has been studied

$$\frac{n_1 l_1 \Delta_{A_1}^{n_2 l_2}}{A_1 \Delta_{A_2}^{n_2 l_2}} = \frac{\rho_{n_1 l_1, n_2 l_2}^{A_1}}{\rho_{n_1 l_1, n_2 l_2}^{A_2}} - 1 = {}^{A_1} \Delta^{A_2} (n_1 l_1) - {}^{A_1} \Delta^{A_2} (n_2 l_2)$$

$$\mu_{nl} \equiv \mu_{205} \cdot \frac{I_A}{I_{205}} \cdot \frac{a_A(nl)}{a_{205}(nl)} \quad \Rightarrow \quad \mu_A = \mu_{nl} \cdot (1 + {}^{205}\Delta_{nl}^A)$$



$${}_{205}^{6P_{1/2}}\Delta_A^{7S_{1/2}} = \frac{\mu_{7S_{1/2}}(A)}{\mu_{6P_{1/2}}(A)} - 1$$



mean :  ${}_{205}^{6P_{1/2}} \Delta_{A(I=9/2)}^{7S_{1/2}} (exp) = 1.45(48) \cdot 10^{-2}$

## DHFA calculation

Atomic part: atomic many-body technique

(relativistic “coupled-cluster” approach) by A.-M. Mårtensson-Pendrill

$$\varepsilon = b_{2s} \cdot \lambda_m \cdot d_2, \quad \lambda_m = \langle r^2 \rangle_m \cdot \left( 1 + \frac{b_{4s} \cdot d_4}{b_{2s} \cdot d_2} \cdot \frac{\langle r^4 \rangle}{\langle r^2 \rangle} + \dots \right) = k_m \cdot \langle r^2 \rangle_m$$

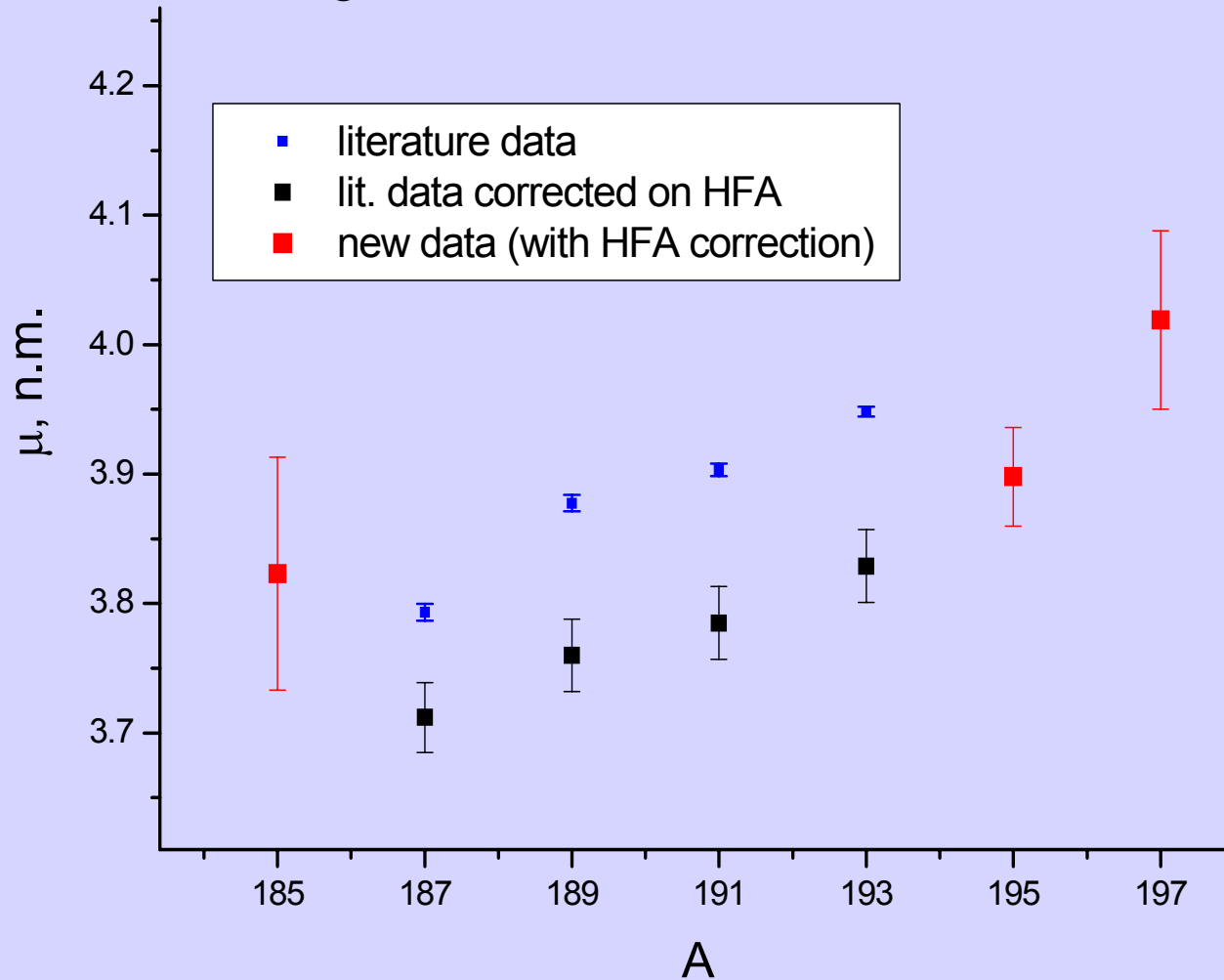
atomic coefficient

sensitive to the nuclear magnetization distribution

$${}_{205}^{6P_{1/2}} \Delta_{A(I=9/2)}^{7S_{1/2}} (theor) = 1.2 \cdot 10^{-2}$$

$${}_{205}^{6P_{1/2}} \Delta_{A(I=9/2)}^{7S_{1/2}} (exp) = 1.45(48) \cdot 10^{-2}$$

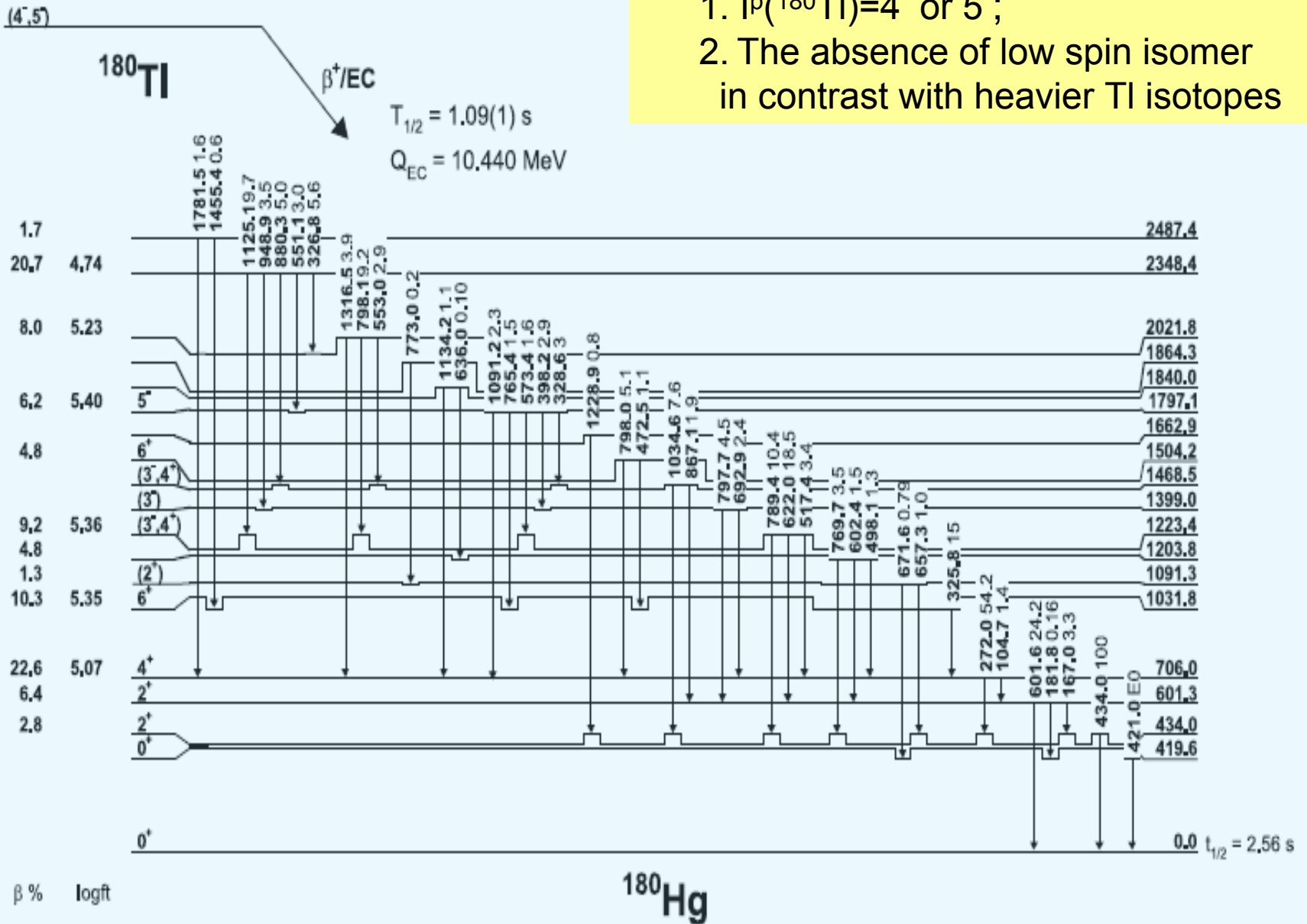
## Magnetic moments for TI isomers with I=9/2



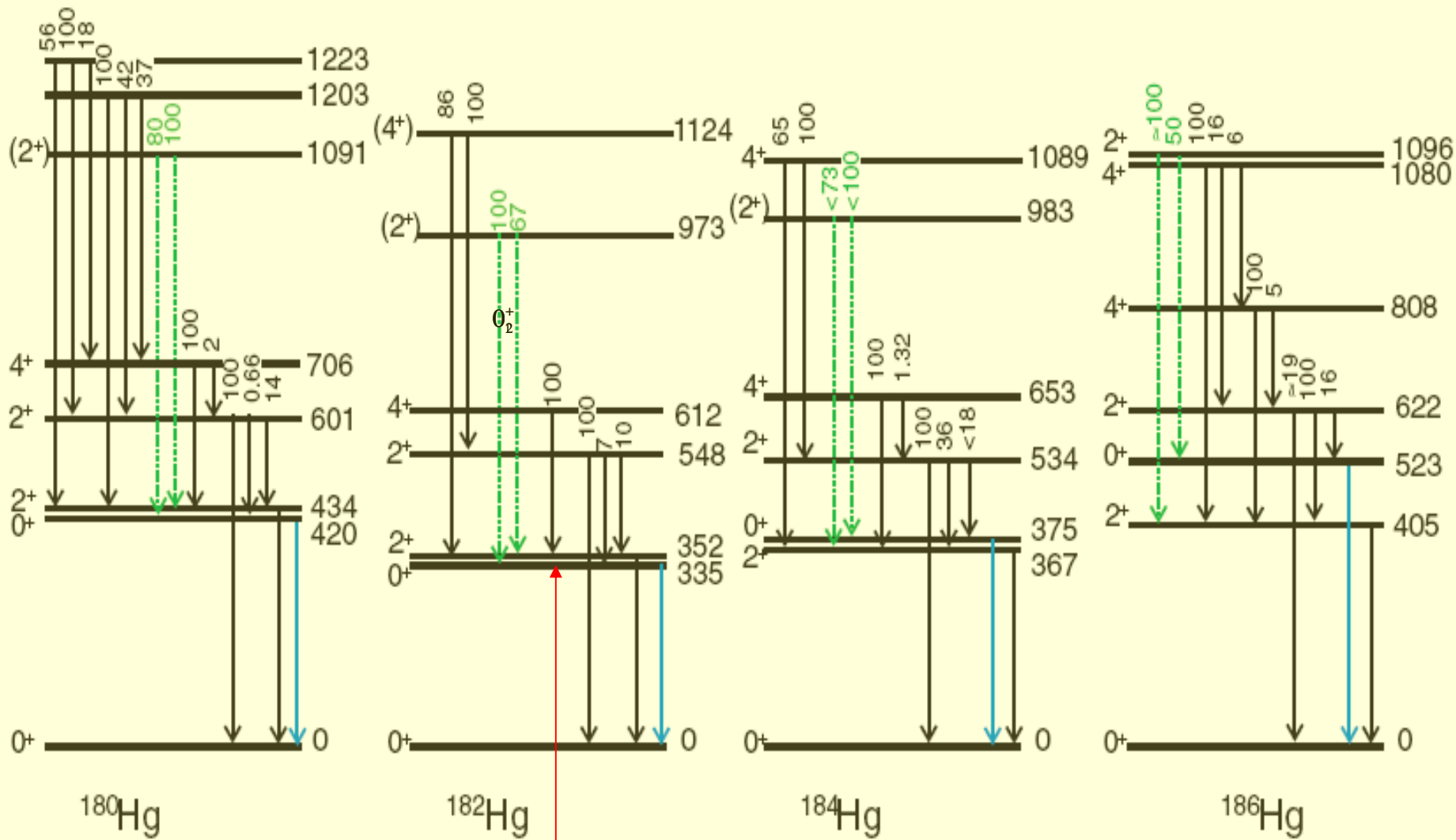
$$\mu_A = \mu_{205} \cdot \frac{I_A}{I_{205}} \cdot \frac{a_A(nl)}{a_{205}(nl)} \cdot (1 + {}^{205}\Delta_{nl}^A)$$

3. Ядерная спектроскопия  $^{180}\text{Tl}$  и  $^{180}\text{Hg}$ .  
Изомерно селективное исследование  
 $^{184}\text{Tl}$  и  $^{184m}\text{Tl}$ .

1.  $I_p(^{180}\text{Tl})=4^-$  or  $5^-$ ;
2. The absence of low spin isomer in contrast with heavier Tl isotopes

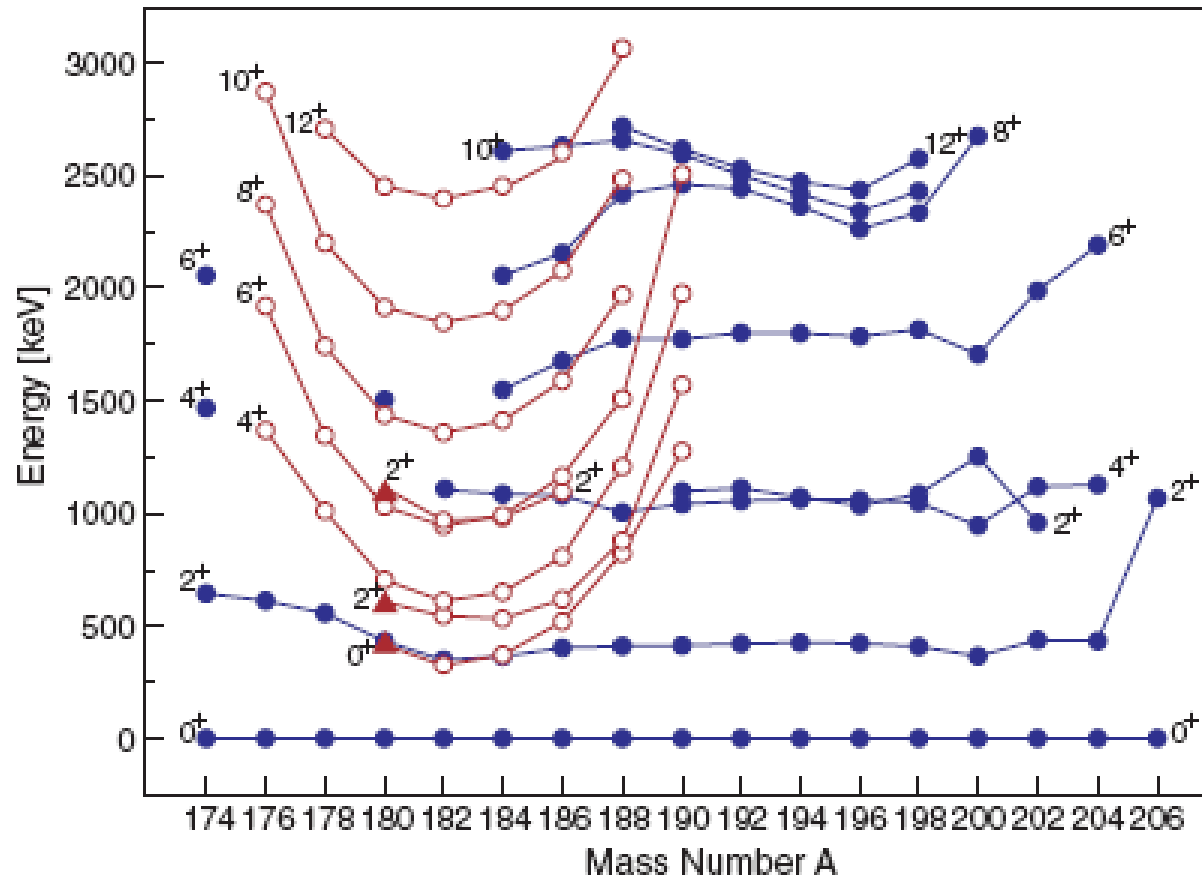






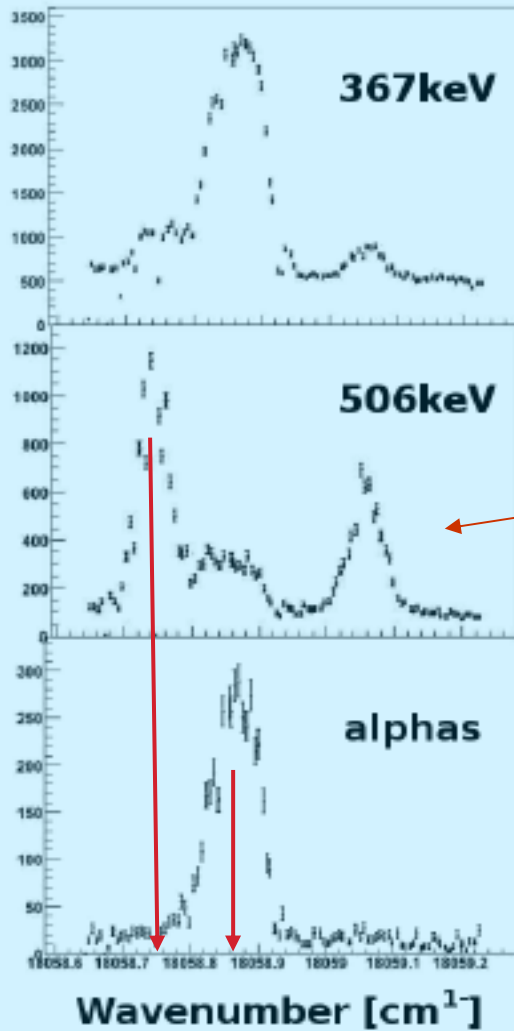
Minimum of the  $0_2^+$  energy (strongly prolate deformed state) is established at  $N=102$   
 Ground  $0_1^+$  states is weakly oblate deformed

# Energy systematics of excited states of even-even neutron-deficient Hg isotopes.



The filled triangles show the newly identified states. The full dots are the level energies associated with the weakly oblate ground-state band, the open dots are those related to the excited strongly prolate band. However, at low spin states, strong mixing can occur.

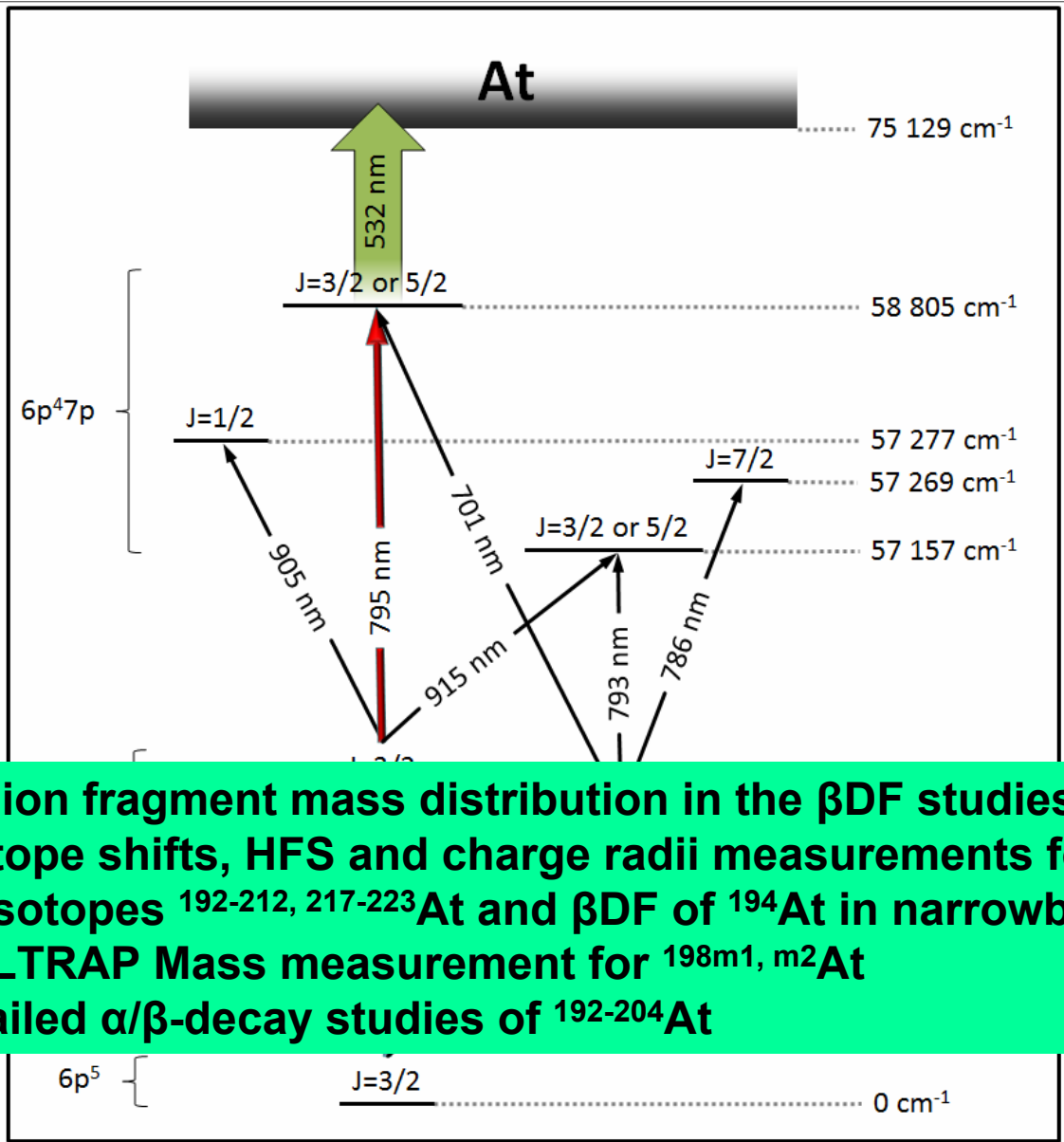
# Hyperfine structures observed for $^{184}\text{Tl}$ with different detection modes



previously unknown isomer with  $I=10$

with frequency of the narrow-band laser fixed at the marked positions isomer selectivity is obtained and one can investigate properties of the pure isomer state

Proposal for future shape coexistence and  $\beta$ DF studies for a long series of At isotopes (ISOLDE)



- Task 1. Fission fragment mass distribution in the  $\beta$ DF studies of  $^{192,194,196}\text{At}$
- Task 2. Isotope shifts, HFS and charge radii measurements for a long series of isotopes  $^{192-212, 217-223}\text{At}$  and  $\beta$ DF of  $^{194}\text{At}$  in narrowband mode
- Task 3. ISOLTRAP Mass measurement for  $^{198m1, m2}\text{At}$
- Task 4. Detailed  $\alpha/\beta$ -decay studies of  $^{192-204}\text{At}$

# Заключение

1. Продемонстрирована работоспособность и эффективность новой лазерной установки на масс-сепараторе ИРИС.
2. Впервые измерена аномалия сверхтонкой структуры для изомеров таллия с  $I=9/2$ , что позволило уточнить значения ранее измеренных магнитных моментов. Показано, что современные атомные расчеты удовлетворительно описывают «атомные» факторы, необходимые для вычисления НФА (ИРИС).
3. Измерены изотопические сдвиги для 28 изотопов (изомеров) Тl на переходе 276.9 нм. Определены электронный фактор и массовый сдвиг для этого перехода, необходимые для получения данных о  $\delta\langle r^2 \rangle$ . Получены новые данные о  $\mu$ ,  $\delta\langle r^2 \rangle$  и деформации для 14 изотопов (изомеров) Тl, что позволит продвинуться в понимании и теоретическом описании феномена сосуществования форм (ИРИС, ISOLDE).
4. Обнаружен новый изомер  $^{184m}\text{Tl}$  на границе области сосуществования форм; в режиме изомерной селективности исследованы ядерно-спектроскопические свойства  $^{184m}\text{Tl}$ , а также  $^{180}\text{Tl}$ , что важно для описания асимметричного запаздывающего деления и эволюции форм в этой области ядер (ISOLDE).
5. Предложены эксперименты по дальнейшему исследованию рассматриваемой области ядер (ИРИС, ISOLDE).

# Magnetic moments for TI isomers with $I=9/2$

