



St Petersburg  
University

# СИСТЕМАТИКА И СТРУКТУРА ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ В СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ

Анастасия Кострыгина,  
СПбГУ, кафедра ЯФМИ,  
НИЦ «Курчатовский Институт» -  
ПИЯФ

Иван Митропольский,  
НИЦ «Курчатовский Институт» -  
ПИЯФ

# База данных ISOTIME

**Selection of adopted levels**

The conditions for selection of nuclides

Nuclides

A:  Any,  Odd,  Even  
 A=,  A>,  A<

Z:  Any,  Odd,  Even  
 Z=,  Z>,  Z<

N:  Any,  Odd,  Even  
 N=,  N>,  N<

The conditions for selection of levels

Momm1,  Mome2

T1/2(second):  T1/2 > 1  
 T=,  T<

E\_excitation(keV):  E > 0  
 E=,  E<

Spin:  Spin

DecayModa:  DecayModa

Excitation Type:  Excitation Type

Query

Where Nuclides A\_Even Z\_Even  
 Where Levels Eexc(keV) > 0 T1/2(s) > 1  
 FOUND 15 LEVELS FOR 14 NUCLIDES

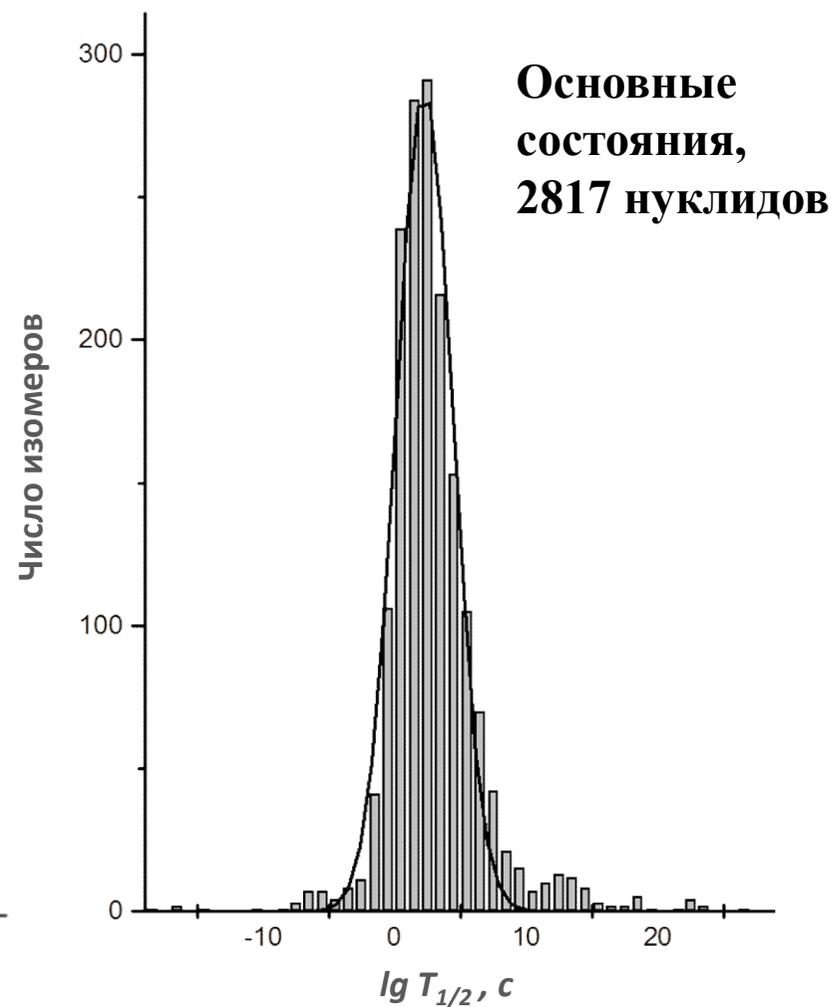
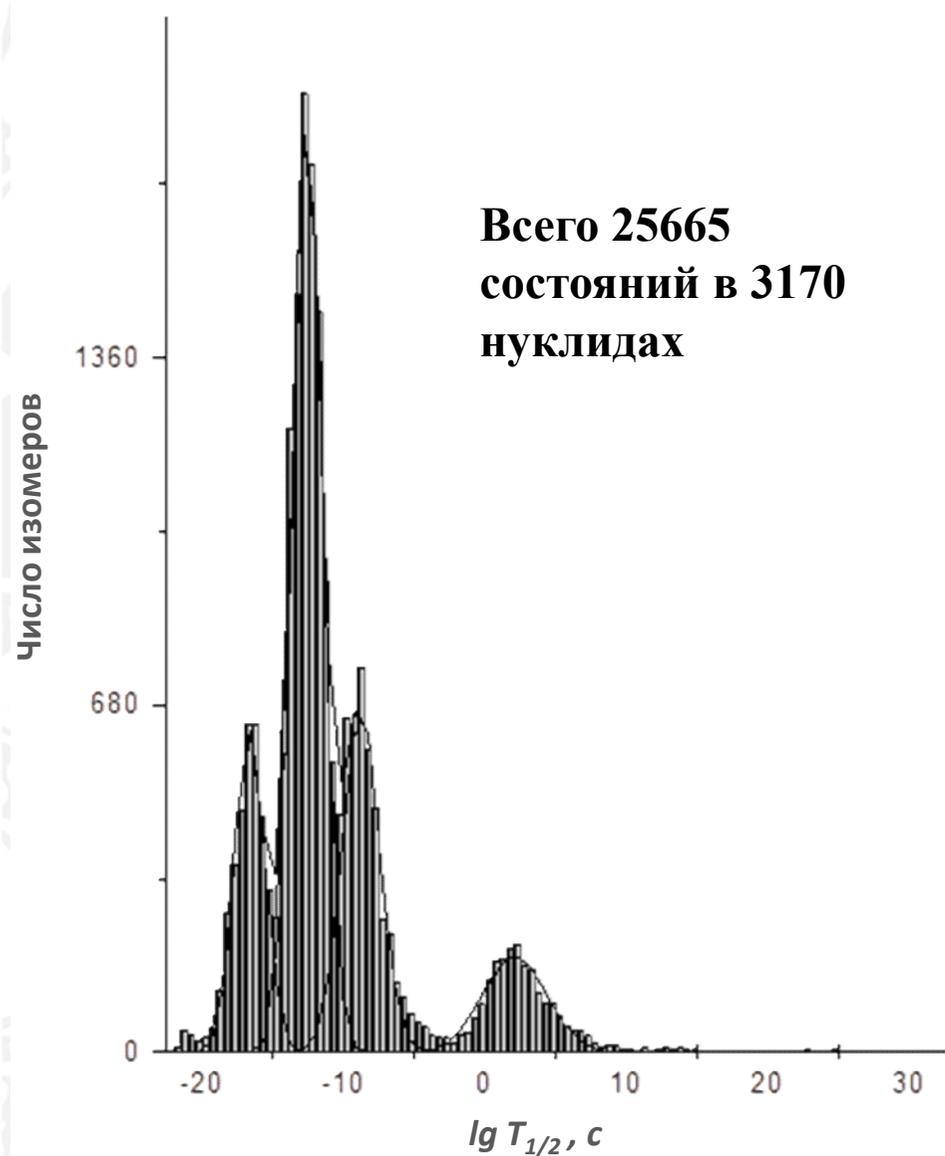
Preview Text Query  
 Found

Additional parameter of checked level  
 GammaDecay from checked level

A	Z	Nucid	E	DE	JPI	T	DT	XREF	Decay Moda	Momm1	D...	Mome2	D...
<input type="checkbox"/>	52	26	52FE	6958.0	4	12+	45.9 S	6	H	%EC+%B+=100%IT...			
<input type="checkbox"/>	128	50	128SN	2091.50	11	(7-)	6.5 S	5	BCDHI	%IT=100%			
<input type="checkbox"/>	130	50	130SN	1946.88	10	(7-)	1.7 M	1	ABC	%B-=100 %			
<input type="checkbox"/>	176	70	176YB	1049.8	6	8-	11.4 S	3	BGJ	%IT=100%			
<input type="checkbox"/>	178	72	178HF	1147.416	6	8-	4.0 S	2	BCDEGILNQ	%IT=100%			
<input type="checkbox"/>	178	72	178HF	2446.09	8	16+	31 Y	1	DGHL	%IT=100%			
<input type="checkbox"/>	180	72	180HF	1141.552	15	8-	5.53 H	2	CFGLM	%IT=99.69 8%#B-...	+8.7	10	+4.6
<input type="checkbox"/>	182	72	182HF	1172.87	18	(8-)	61.5 M	15	ADE	%B-=54 2 %IT=4...			
<input type="checkbox"/>	184	72	184HF	1272.2	4	(8-)	48 S	10	C	%IT=100%			
<input type="checkbox"/>	190	76	190OS	1705.4	2	(10)-	9.9 M	1	EC	%IT=100%	-0.56	+8-	
<input type="checkbox"/>	192	76	192OS	2015.40	11	(10-)	5.9 S	1	B	%IT GT 87%#B- L...			
<input type="checkbox"/>	202	82	202PB	2169.85	8	9-	3.54 H	2	ADEGHI	%IT=90.5 5%#EC+...	-0.2276	7	+0.58

FOUND 15 LEVELS FOR 14 NUCLIDES

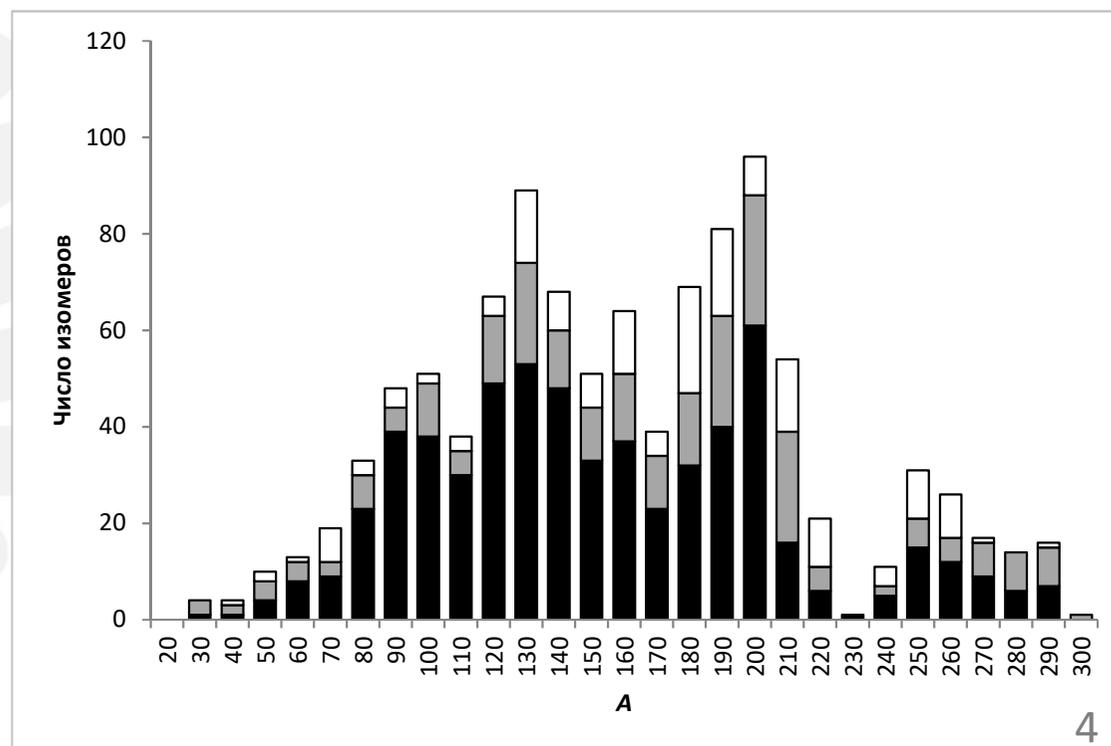
# Распределения времен жизни ядерных состояний



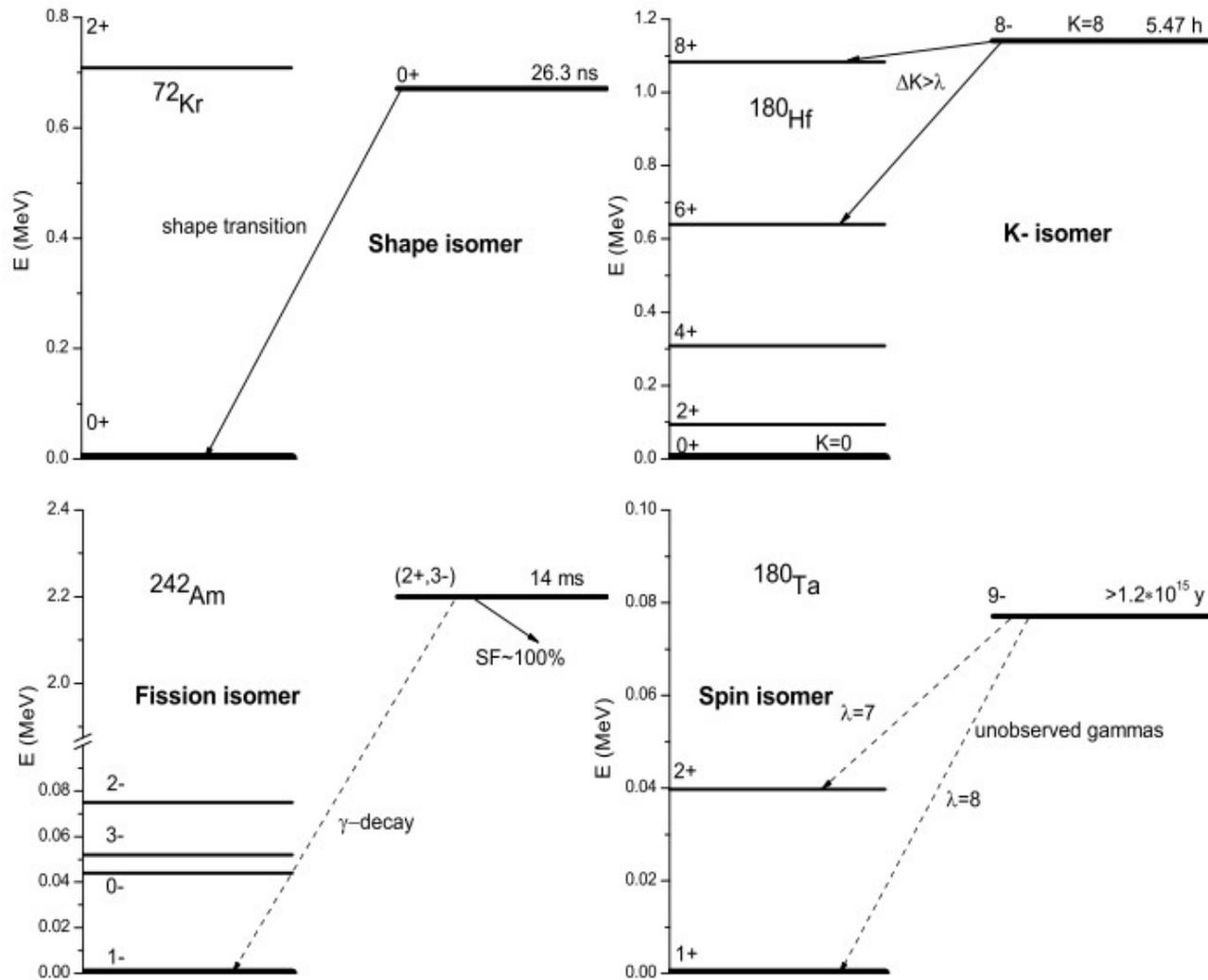
# Ядерные изомеры и определение временного порога

Время жизни	Число состояний	Число нуклидов
$> 1$ с	455	429
$> 10^{-3}$ с	638	579
$> 10^{-6}$ с	1086	867

Распределения изомеров с  $T_{1/2} > 1$  с (черные прямоугольники), с  $T_{1/2} > 10^{-3}$  с (серые прямоугольники) и с  $T_{1/2} > 10^{-6}$  с (белые прямоугольники) по массовому числу  $A$ :



# Основные типы изомеров



## Времена жизни изомерных состояний. Электромагнитные переходы.

Правила отбора для электромагнитных переходов:

$$|I_i - I_f| \leq \lambda \leq I_i + I_f, \quad \mu = M_f - M_i,$$

$$M\lambda: \quad \pi_i \pi_f = (-1)^{\lambda+1}; \quad E\lambda: \quad \pi_i \pi_f = (-1)^\lambda.$$

$$W_{fi}(X\lambda) = \frac{8\pi}{\hbar} \frac{\lambda + 1}{\lambda[(2\lambda + 1)!!]^2} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} B(X\lambda)$$

$E_\gamma = E_i - E_f$  - энергия перехода; приведенные вероятности:

$$X = E: \quad B(E\lambda) = \sum_{\mu, m_f} \left| \langle f | \int \rho r^\lambda Y_{\lambda\mu} d^3r | i \rangle \right|^2$$

$$X = M: \quad B(M\lambda) = \sum_{\mu, m_f} \left| \langle f | \frac{-i}{c(\lambda+1)} \int r^\lambda (\mathbf{r} \times \nabla Y_{\lambda\mu} \cdot \mathbf{j}) d^3r | i \rangle \right|^2$$

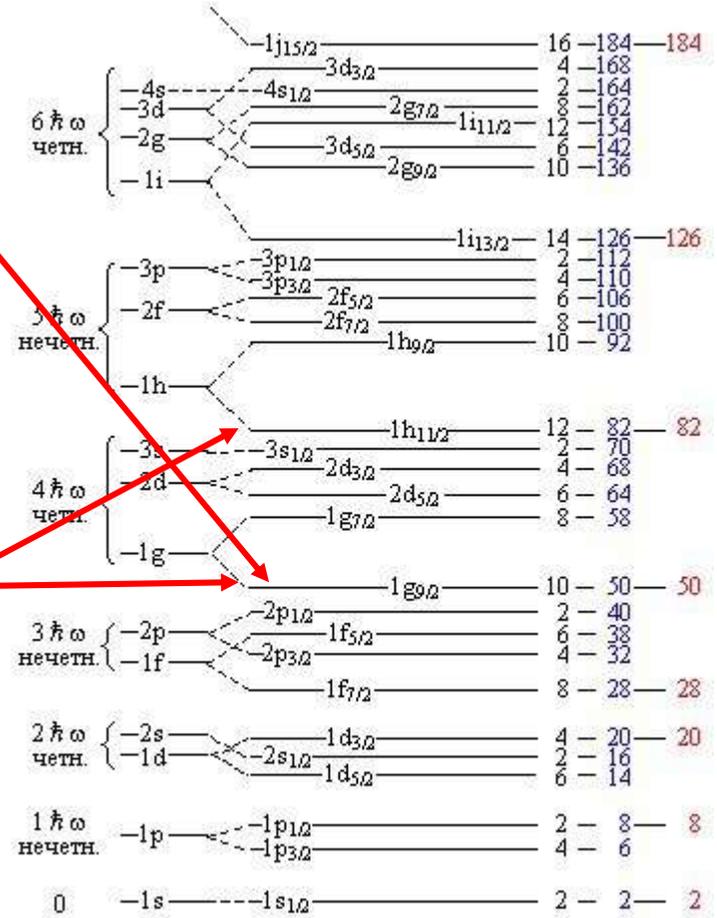
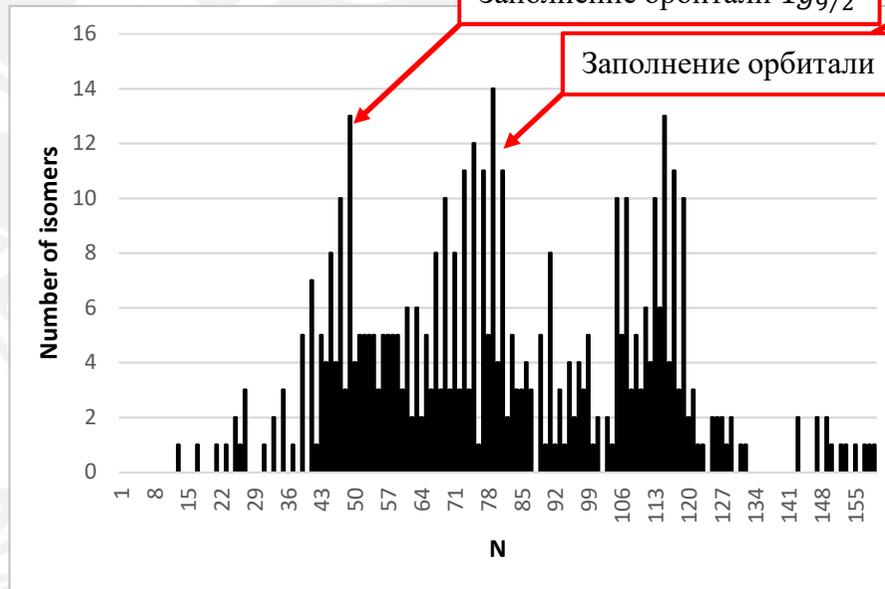
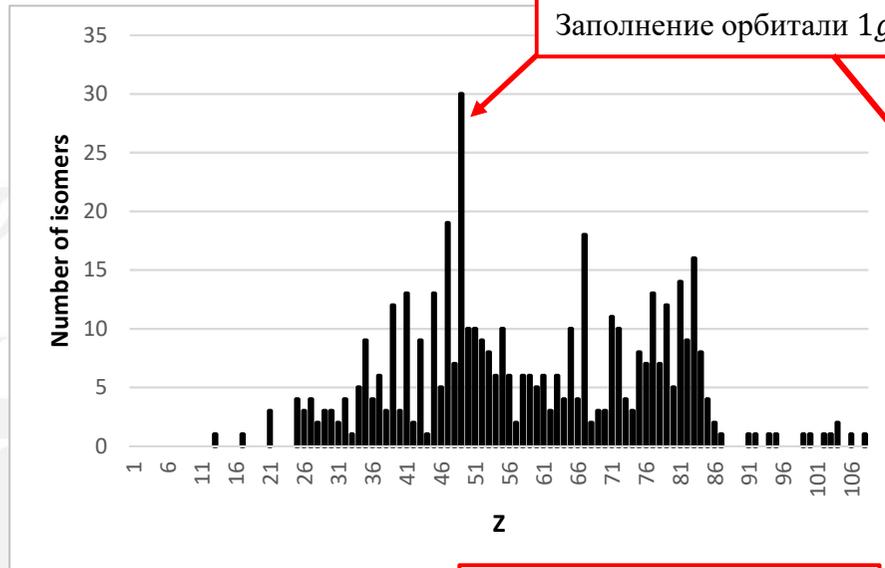
Единицы Вайскопфа  
(Мошковского):

$$\langle r^\lambda \rangle \approx \frac{3}{\lambda + 3} R_0^\lambda$$
$$B_W(E\lambda) \approx \frac{e^2}{4\pi} \left(\frac{3}{3 + \lambda}\right)^2 R_0^{2\lambda}$$
$$B_W(M\lambda) \approx \frac{10}{\pi} \mu_N^2 \left(\frac{3}{3 + \lambda}\right)^2 R_0^{2\lambda-2}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{W}$$

# Изомеры в оболочечной модели сферического ядра

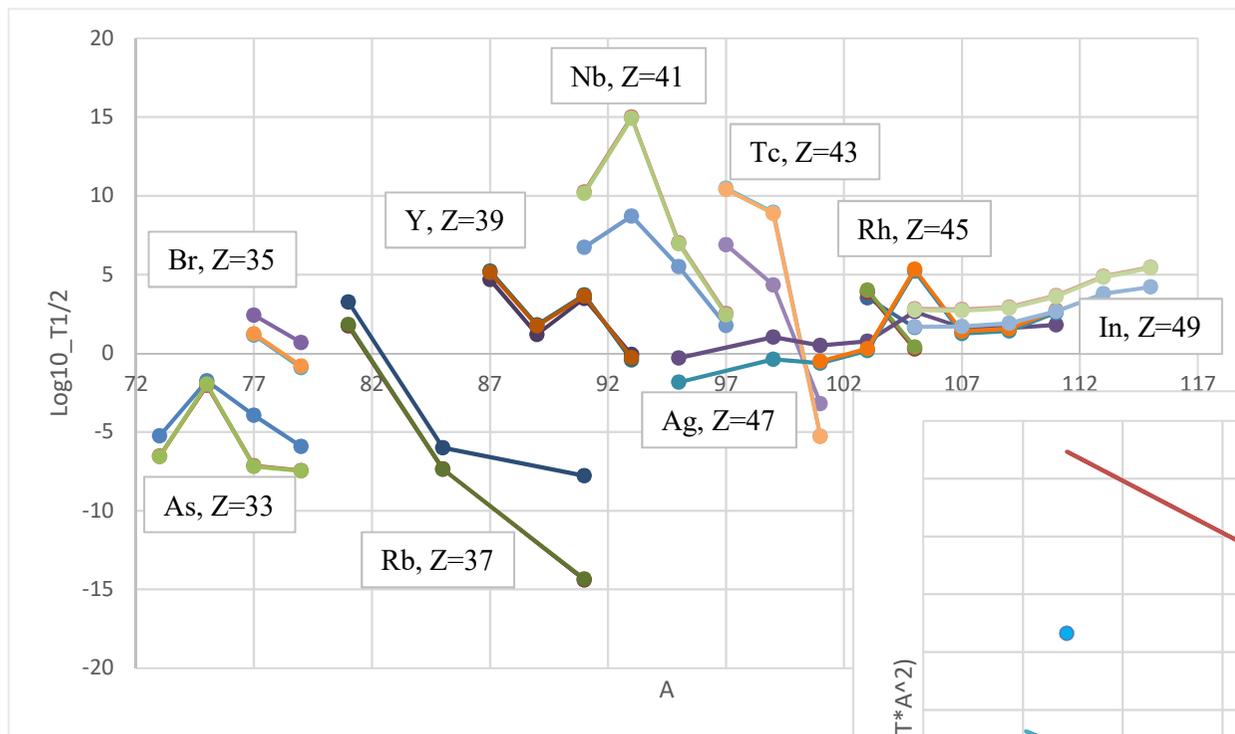
Распределение изомеров по числу протонов



Одночастичные уровни в сферически симметричном оболочечном потенциале Вудса-Саксона

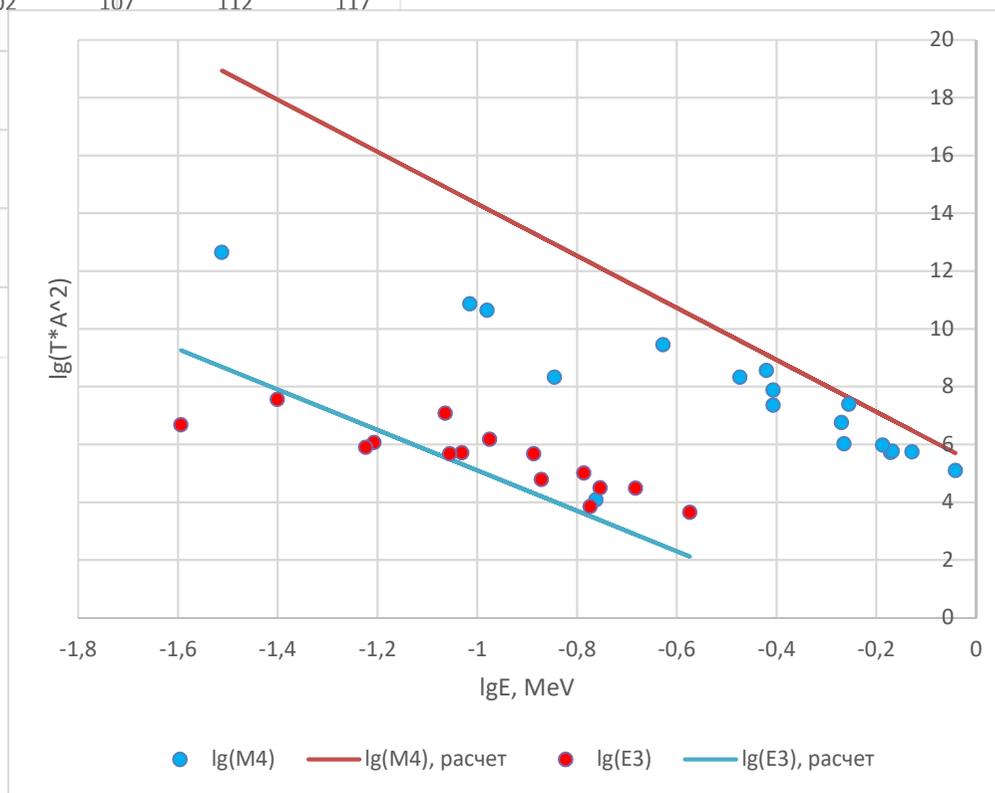
Распределение изомеров по числу нейтронов

# Времена жизни Z-нечетных изомеров в A-нечетных сферических ядрах



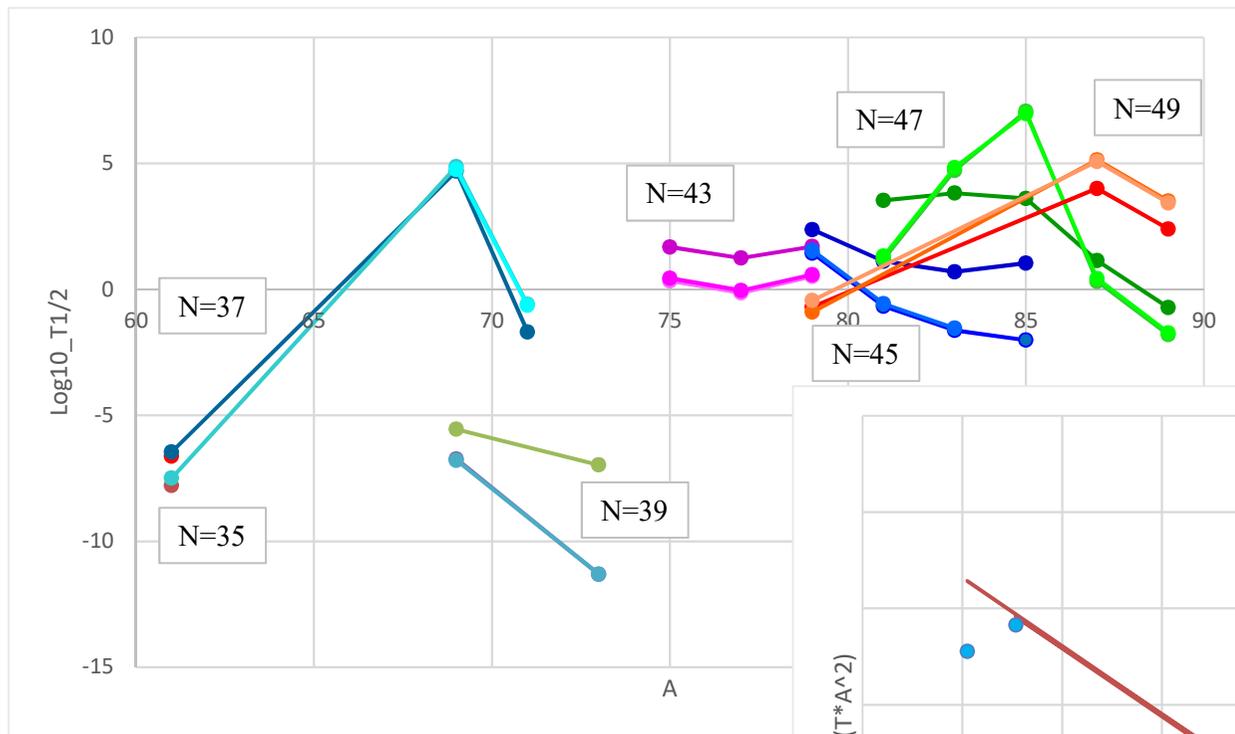
Систематика времен жизни изомеров по A

$\chi\lambda$	$T_{1/2}(\chi\lambda), s$
E3	$2.044 \cdot 10^{-2} E^{-7} A^{-2}$
M4	$2.116 \cdot 10^5 E^{-9} A^{-2}$

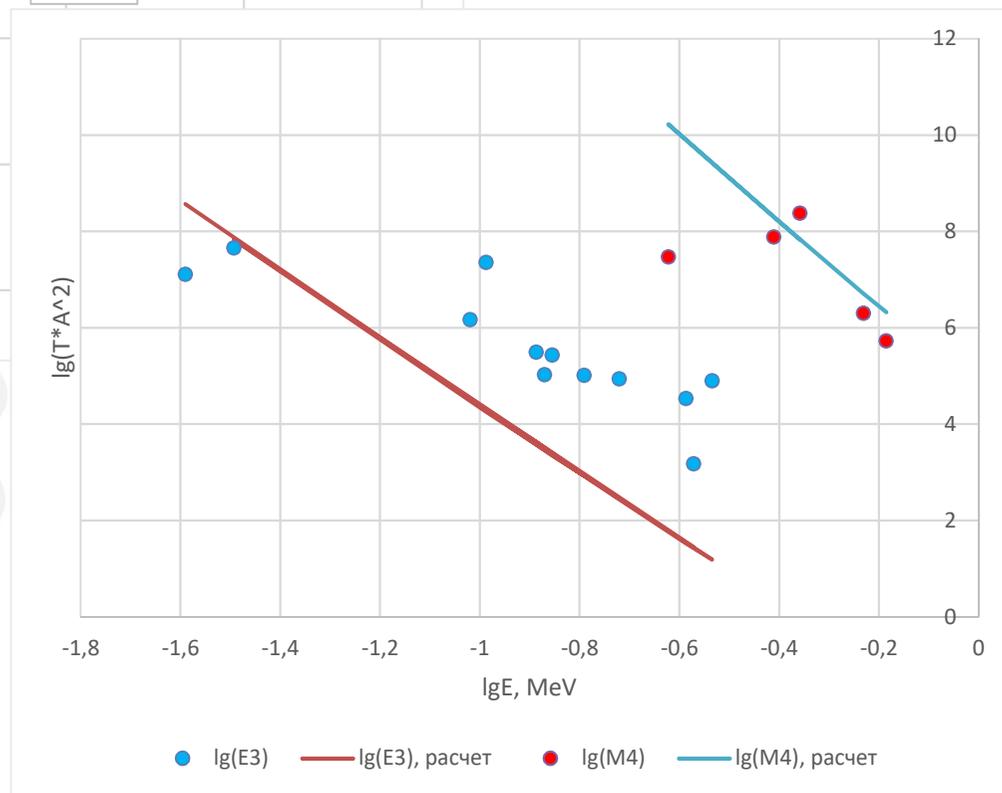


Времена жизни в зависимости от энергии изомерного перехода

# Времена жизни N-нечетных изомеров в A-нечетных сферических ядрах

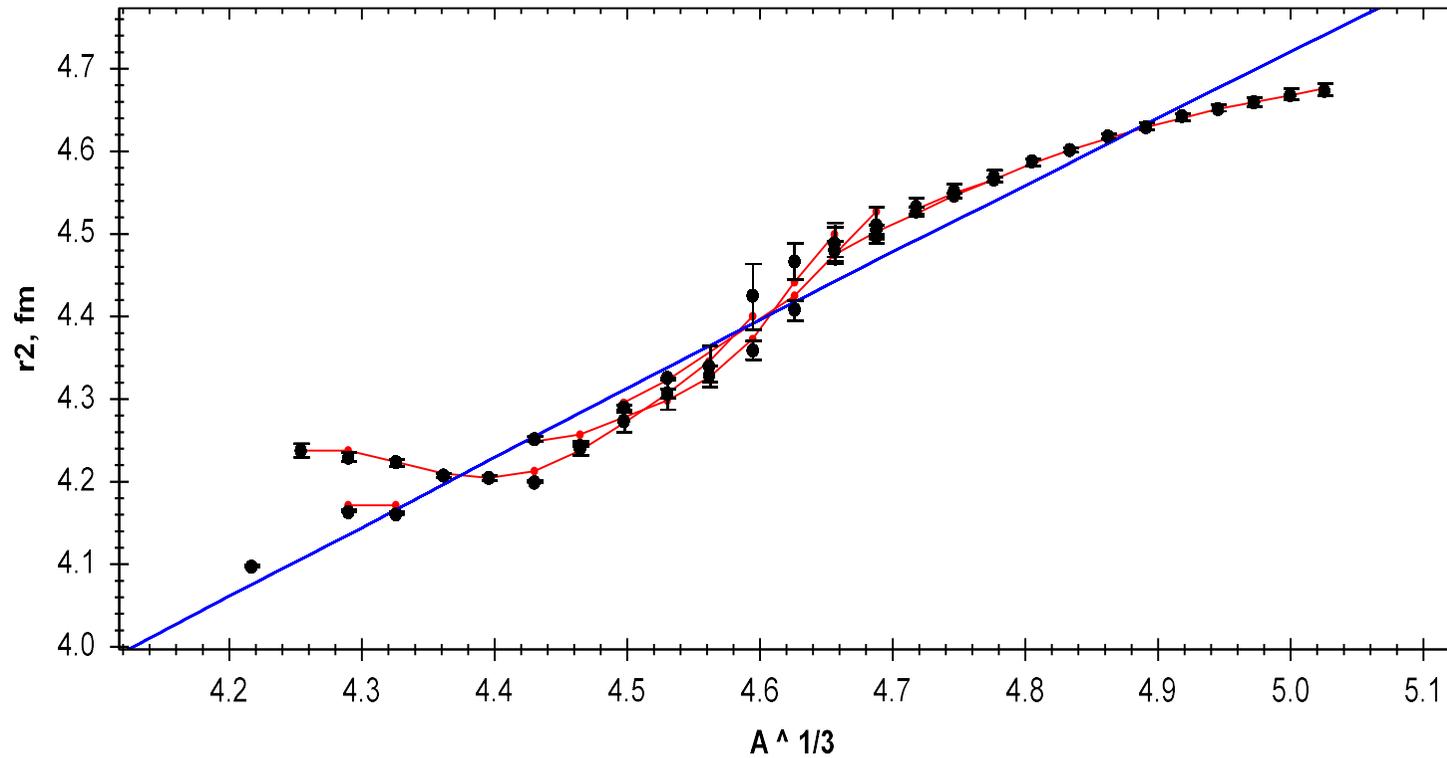


Систематика времен жизни изомеров по A



Времена жизни в зависимости от энергии изомерного перехода

## Учет реальных радиусов



*Среднеквадратичные радиусы ядер из области  $74 < A < 140$ . Точки – экспериментальные значения с погрешностями. Синяя прямая линия – параметризация  $R = r_0 A^{1/3}$ . Красные кривые – полиномиальные аппроксимации радиусов по изотопам.*

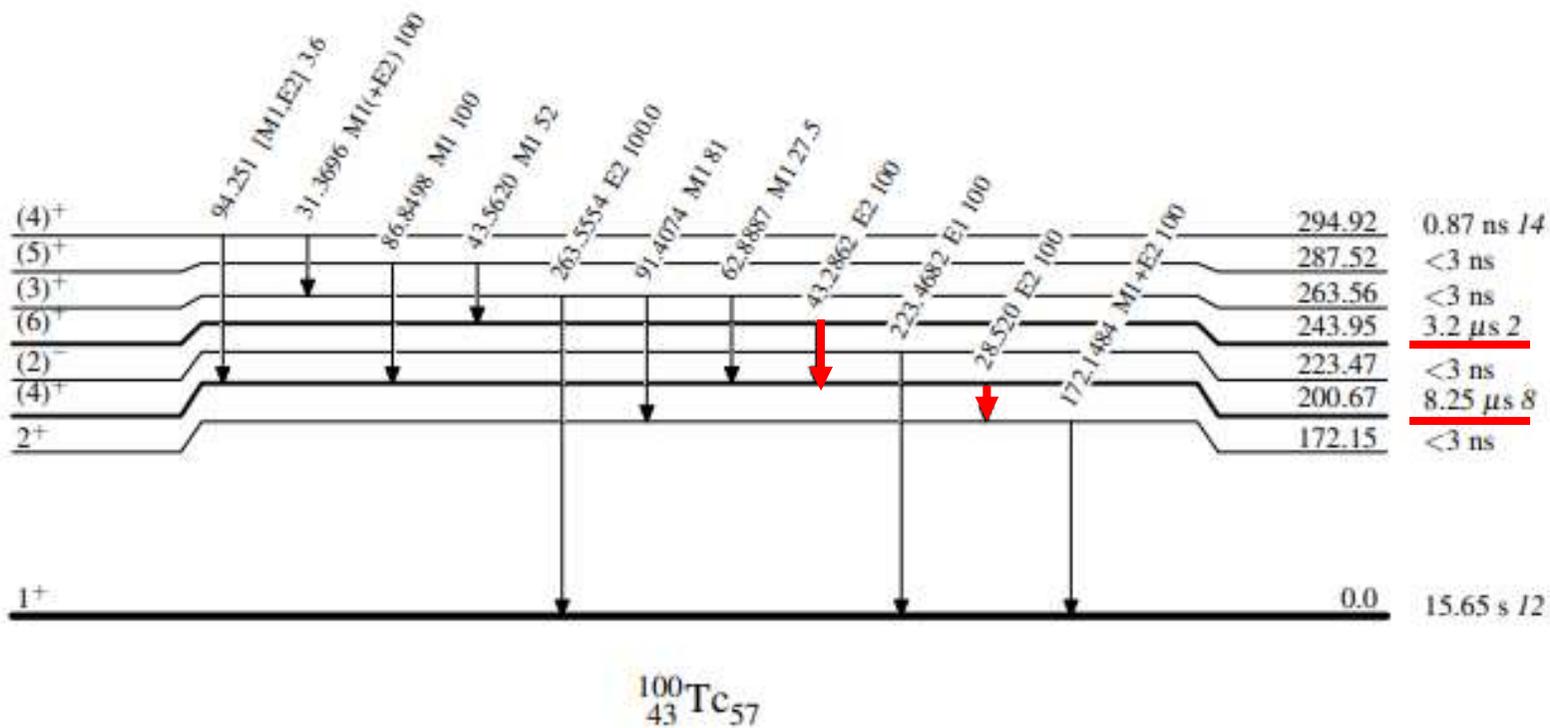
## Одночастичная конфигурация нечетно-нечетных сферических ядер

Ядро	Основное состояние		Изомерное состояние	
	J $\pi$	конфигурация	J $\pi$	конфигурация
$^{62}_{27}\text{Co}_{35}$	(2)+	$\pi[2p1/2]^1\nu[2p3/2]^1$	5(+)	$\pi[1f7/2]^{-1}\nu[2p3/2]^1$
$^{70}_{29}\text{Cu}_{41}$	6-	$\pi[2p3/2]^1\nu[1g9/2]^1$	3-	$\pi[2p3/2]^1\nu[2d3/2]^1$
$^{82}_{35}\text{Br}_{47}$	5-	$\pi[1g9/2]^1\nu[2p1/2]^{-1}$	2-	$\pi[2d3/2]^1\nu[2p1/2]^{-1}$
$^{86}_{37}\text{Rb}_{49}$	2-	$\pi[1f5/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	6-	$\pi[2p3/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$
$^{88}_{39}\text{Y}_{49}$	5-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	8+	$\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	8+	$\pi[1g9/2]^1\nu[1g7/2]^1$ ( $\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$ )	6+	$\pi[1g9/2]^1\nu[2d3/2]^1$ ( $\pi[2d3/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$ )
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	6+	$\pi[2d3/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	1+	$\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	2-	$\pi[g9/2^4, p1/2]_{1/2-}$ $\nu[d5/2, s1/2]_{3/2+}$	5+	$\pi[1g9/2]^5\nu[3s1/2]^1$
	(2)+	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$		
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	(2)-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[2d5/2]$	(2)+	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$
	1-	$\pi[g9/2^4, p1/2]_{1/2-}$ $\nu[d5/2, s1/2]_{1/2+ \text{ or } 3/2+}$		
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	(5+)	$\pi[1g9/2]^5\nu[3s1/2]$	(7+)	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$
$^{114}_{49}\text{In}_{65}$	5+	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[3s1/2]^1$	8-	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[2f7/2]^1$

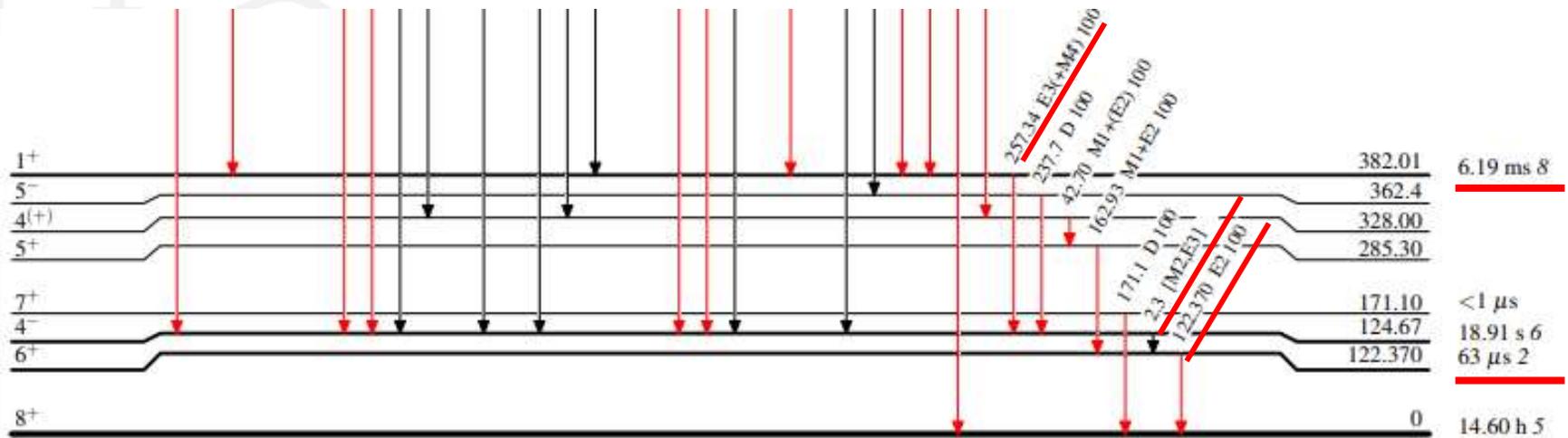
## Каскадные изомерные переходы

Ядро	Конечное состояние		E, keV	Начальное		$T_{1/2}$	%IT
	$J^\pi$	конфигурация		$J^\pi$	конфигурация		
$^{70}_{29}\text{Cu}_{41}$	3-	$\pi[2p3/2]^1\nu[1g9/2]^1$	242.6	1+	$\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^1$ ( $\pi[2p3/2]^1\nu[2p1/2]^{-1}$ )	6.6 s	6.8
$^{70}_{29}\text{Cu}_{41}$	6-	$\pi[2p3/2]^1\nu[1g9/2]^1$	101.1	3-	$\pi[2p3/2]^1\nu[2d3/2]^1$	33 s	48
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	382.01	1+	$\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$	6.19 ms	100
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	6+	$\pi[2d3/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$	124.67	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	18.91 s	100
$^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	8+	$\pi[1g9/2]^1\nu[1g7/2]^1$ ( $\pi[1g7/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$ )	122.37	6+	$\pi[1g9/2]^1\nu[2d3/2]^1$ ( $\pi[2d3/2]^1\nu[1g9/2]^{-1}$ )	63 $\mu\text{s}$	100
$^{100}_{43}\text{Tc}_{55}$	(4)+	$\pi[1g9/2]^3\nu[3s1/2]^1$	243.95	(6)+	$\pi[1g9/2]^3\nu[2d3/2]^1$	3.2 $\mu\text{s}$	100
$^{100}_{43}\text{Tc}_{55}$	2+	$\pi[1g9/2]^3\nu[2d5/2]^1$	200.67	(4)+	$\pi[1g9/2]^3\nu[3s1/2]^1$	8.25 $\mu\text{s}$	100
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	(5+)	$\pi[1g9/2]^5\nu[3s1/2]$	219.58	(7+)	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$	132 ns	100
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	2-	$\pi[g9/2^4, p1/2]_{1/2-}$ $\nu[d5/2, s1/2]_{3/2+}$	107.59	5+	$\pi[1g9/2]^5\nu[3s1/2]^1$	4.6 m	98.3
	(2)+	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$					
$^{100}_{45}\text{Rh}_{57}$	(2)-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[2d5/2]$	74.782	(2)+	$\pi[1g9/2]^5\nu[2d5/2]$	214.3 ns	100
	1-	$\pi[g9/2^4, p1/2]_{1/2-}$ $\nu[d5/2, s1/2]_{1/2+ \text{ or } 3/2+}$					
$^{112}_{49}\text{In}_{63}$	(7)+	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[2d5/2]^{-1}$	613.82	(8)-	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[2f7/2]^1$	2.81 $\mu\text{s}$	100
$^{112}_{49}\text{In}_{63}$	5+	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[1s1/2]^1$	350.8	7+	$\pi[1g9/2]^{-1}\nu[2d5/2]^{-1}$	0.69 $\mu\text{s}$	100

## Примеры каскадных изомерных переходов



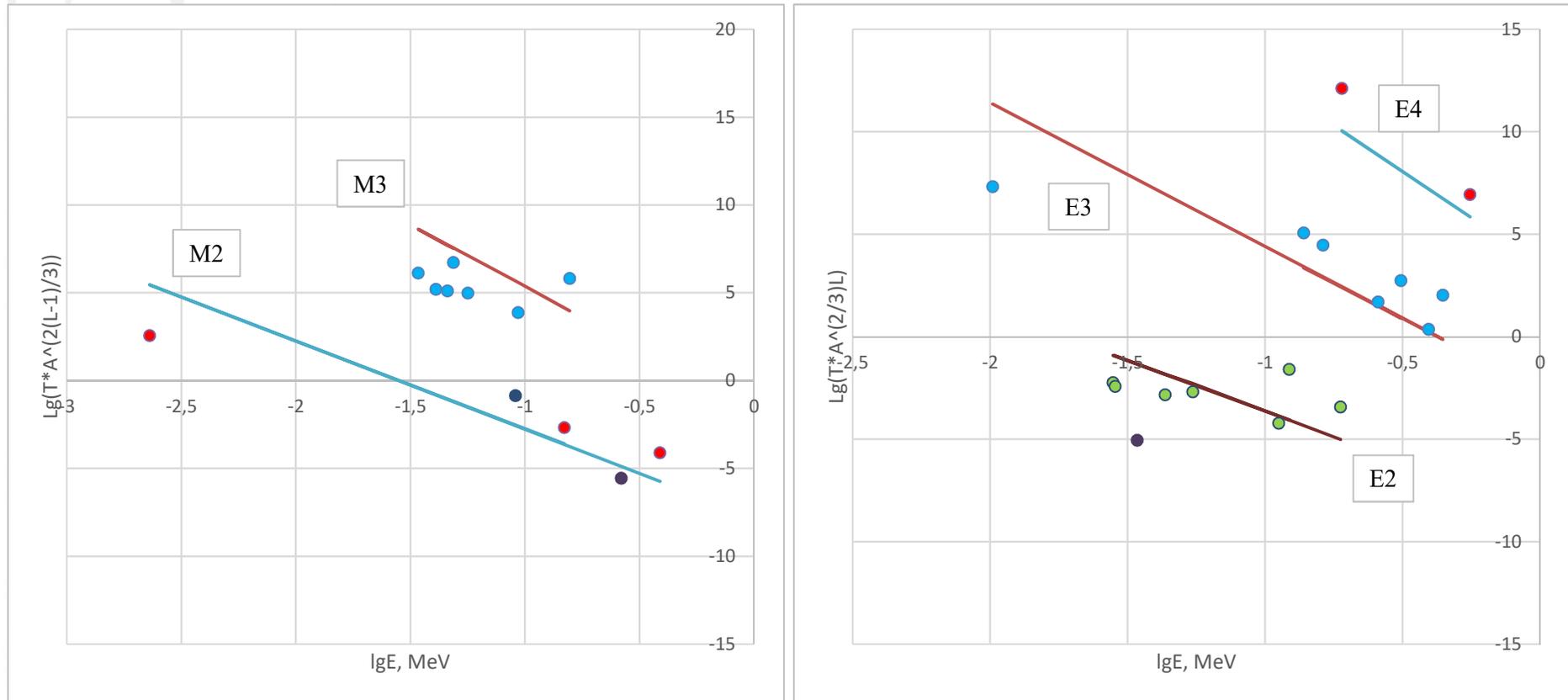
$^{100}_{43}\text{Tc}_{55}$	(4) <sup>+</sup>	$\pi[1g9/2]^3v[3s1/2]^1$	243.95	(6) <sup>+</sup>	$\pi[1g9/2]^3v[2d3/2]^1$	3.2 μs	100
$^{100}_{43}\text{Tc}_{55}$	2 <sup>+</sup>	$\pi[1g9/2]^3v[2d5/2]^1$	200.67	(4) <sup>+</sup>	$\pi[1g9/2]^3v[3s1/2]^1$	8.25 μs	100



${}^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$

${}^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	382.01	1+	$\pi[1g7/2]^{1}\nu[1g9/2]^{-1}$	6.19 ms	100
${}^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	6+	$\pi[2d3/2]^{1}\nu[1g9/2]^{-1}$	124.67	4-	$\pi[2p1/2]^{-1}\nu[1g9/2]^{-1}$	18.91 s	100
${}^{90}_{41}\text{Nb}_{49}$	8+	$\pi[1g9/2]^{1}\nu[1g7/2]^{1}$ $(\pi[1g7/2]^{1}\nu[1g9/2]^{-1})$	122.37	6+	$\pi[1g9/2]^{1}\nu[2d3/2]^{1}$ $(\pi[2d3/2]^{1}\nu[1g9/2]^{-1})$	63 μs	100

# Времена жизни изомеров в нечетно-нечетных сферических ядрах



# Заключение

- Изомерные переходы в сферических ядрах часто конкурируют с бета-распадом, что затрудняет теоретическую оценку;
- Спин-изомеры в сферических ядрах имеют одночастичную природу. По-видимому, этой областью ( $Z < 50$  и/или  $N < 50$ ) исчерпывается существование изомерных состояний в сферических A-нечетных ядрах;
- У более легких ядер нет высокоспиновых одночастичных орбиталей;
- Для более тяжелых ядер включается деформация, и природа изомерии связана уже не со спином, а с «К-запретом».



Спасибо за внимание!

[spbu.ru](http://spbu.ru)