

ЯДЕРНАЯ  
КВАНТОВАЯ  
ОПТИКА

*Семинар НИИЯФ, 11 ноября 2008*

## Д.Е.Ланской

По работам

T.J.Bürvenich, J.Evers, C.H.Keitel. Phys.Rev.Lett. **96**(2006)142501;

Phys.Rev. **C74**(2006)044601;

A.Pálffy, J.Evers, C.H.Keitel. Phys.Rev. **C77**(2008)044602.

**Nuclear Quantum Optics with X-Ray Laser Pulses**

Thomas J. Bürvenich,<sup>\*</sup> Jörg Evers,<sup>†</sup> and Christoph H. Keitel<sup>‡</sup>

*Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg, Germany*

(Received 4 November 2005; published 10 April 2006)

Можно ли создать инверсную заселенность  
ядерных уровней при помощи лазера?

Что для этого нужно?

# 1. Низколежащие уровни со значительной амплитудой электрического дипольного перехода ( $\mu$ )

nucleus	transition	$\Delta E$ [keV]	$\mu$ [ $e$ fm]	$\tau(g)$	$\tau(e)$ [ps]
$^{153}\text{Sm}$	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	35.8	$>0.75^{(1)}$	47 h	$<100$
$^{181}\text{Ta}$	$9/2^- \rightarrow 7/2^+$	6.2	$0.04^{(1)}$	<u>stable</u>	$6 \cdot 10^6$
$^{225}\text{Ac}$	$3/2^+ \rightarrow 3/2^-$	40.1	$0.24^{(1)}$	10.0 d	720
$^{223}\text{Ra}$	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	50.1	0.12	11.435 d	730
$^{227}\text{Th}$	$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	37.9	$\dots^{(2)}$	18.68 d	$\dots^{(2)}$
$^{231}\text{Th}$	$5/2^- \rightarrow 5/2^+$	186	0.017	25.52 h	1030

## 2. Лазер с высокой и легко перестраиваемой частотой излучения

Существующие  
лазеры на  
свободных  
электронах  
(2006)

W.B.Colson  
et al.,  
Proc. FEL06,  
p. 756.

Table 1: Free Electron Lasers (2006)

EXISTING FELs	$\lambda(\mu\text{m})$	$\sigma_z(\text{ps})$	E(MeV)	I(A)	N	$\lambda_q(\text{cm})$	K(rms)	
Italy (FEL-CAT)	760	15-20	1.8	5	16	2.5	0.75	RF,O
UCSB (mm FEL)	340	25000	6	2	42	7.1	0.7	EA,O
Novosibirsk (RTM)	120-230	70	12	10	2x33	12	0.71	RF,O
Korea (KAERI-FEL)	97-1200	25	4.3-6.5	0.5	80	2.5	1.0-1.6	MA,O
Osaka (ISIR,SASE)	70-220	20-30	11	1000	32	6	1.5	RF,S
Himeji (LEENA)	65-75	10	5.4	10	50	1.6	0.5	RF,O
UCSB (FIR FEL)	60	25000	6	2	150	2	0.1	EA,O
Osaka (ILE/ILT)	47	3	8	50	50	2	0.5	RF,O
Osaka (ISIR)	32-150	20-30	13-19	50	32	6	1.5	RF,O
Tokai (JAEA-FEL)	22	2.5-5	17	200	52	3.3	0.7	RF,O
Bruyeres (ELSA)	20	30	18	100	30	3	0.8	RF,O
Osaka (FEL4)	18-40	10	33	40	30	8	1.3-1.7	RF,O
UCLA-Kurchatov	16	3	13.5	80	40	1.5	1	RF,A
LANL (RAFEL)	15.5	15	17	300	200	2	0.9	RF,O
Stanford (FIREFLY)	15-80	1-5	15-32	14	25	6	1	RF,O
<b>Rossendorf (U-100)</b>	<b>15-150</b>	<b>0.3-10</b>	<b>15</b>	<b>240</b>	<b>38</b>	<b>10</b>	<b>2.7</b>	<b>RF,O</b>
UCLA-Kurchatov-LANL	12	5	18	170	100	2	0.7	RF,A
Beijing (BFEL)	5-20	4	30	15-20	50	3	1	RF,O
Dresden (ELBE)	3-22	1-10	34	30	2x34	2.73	0.3-0.7	RF,O
Korea (KAERI HP FEL)	3-20	10-20	20-40	30	30x2	3.5	0.5-0.8	RF,O
Lab (IR upgrade)	0.7-10	0.1	120	400	29	5.5	3	RF,O
Darmstadt (FEL)	6-8	2	25-50	2.7	80	3.2	1	RF,O
BNL (HGHG)	5.3	6	40	120	60	3.3	1.44	RF,A
Osaka (iFEL1)	5.5	10	33.2	42	58	3.4	1	RF,O
Tokyo (KHI-FEL)	4-16	2	32-40	30	43	3.2	0.7-1.8	RF,O
Nieuwegein (FELIX)	3-250	1	50	50	38	6.5	1.8	RF,O
Duke (MARKIII)	2.7-6.5	3	31-41.5	20	47	2.3	1	RF,O
Stanford (SCAFEL)	3-13	0.5-12	22-45	10	72	3.1	0.8	RF,O
Orsay (CLIO)	3-53	0.1-3	21-50	80	38	5	1.4	RF,O
Vanderbilt (FELI)	2.0-9.8	0.7	43	50	52	2.3	1.3	RF,O
Osaka (iFEL2)	1.88	10	68	42	78	3.8	1	RF,O
Nihon (LEBRA)	0.9-6.5	<1	58-100	10-20	50	4.8	0.7-1.4	RF,O
UCLA-BNL (VISA)	0.8	0.5	70.9	250	220	1.8	1.2	RF,S
BNL (ATF)	0.6	6	50	100	70	0.88	0.4	RF,O
Duke (OK-5)	0.45	0.1-10	270-800	35	2x32	12	0-4.75	SR,O
Dortmund (FELICITAI)	0.42	50	450	90	17	25	2	SR,O
<b>BNL (SDL FEL)</b>	<b>0.2-1.0</b>	<b>0.5-1</b>	<b>100-250</b>	<b>300-400</b>	<b>256</b>	<b>3.9</b>	<b>0.8</b>	<b>RF,A,S,H</b>
Orsay (Super-ACO)	0.3-0.6	15	800	0.1	2x10	13	4.5	SR,O
Osaka (iFEL3)	0.3-0.7	5	155	60	67	4	1.4	RF,O
Okazaki (UVSOR)	0.2-0.6	6	607	10	2x9	11	2	SR,O
Tsukuba (NJI-IV)	0.2-0.6	14	310	10	2x42	7.2	2	SR,O
Italy (ELETTRA)	0.2-0.4	28	1000	150	2x19	10	4.2	SR,O
Duke (OK-4)	0.193-2.1	0.1-10	1200	35	2x33	10	0-4.75	SR,O
ANL (APS/FEL)	0.13	0.3	399	400	648	3.3	2.2	RF,S
<b>RIKEN(SCSS Prototype)</b>	<b>0.05</b>	<b>1</b>	<b>250</b>	<b>800</b>	<b>600</b>	<b>1.5</b>	<b>1.3</b>	<b>RF,S</b>
<b>DESY (FLASH)</b>	<b>0.013</b>	<b>0.025</b>	<b>700</b>	<b>2000</b>	<b>984</b>	<b>2.73</b>	<b>0.81</b>	<b>RF,S</b>

# Проектируемые лазеры

Table 2: Proposed Free Electron Lasers (2006)

PROPOSED FELs	$\lambda(\mu\text{m})$	$\sigma_t(\text{ps})$	E(MeV)	I(A)	N	$\lambda_0(\text{cm})$	K(rms)	
Tokyo (FIR-FEL)	300-1000	5	10	30	25	7	1.5-3.4	RF,O
Netherlands (TEUFEL)	180	20	6	350	50	2.5	1	RF,O
Romania (NILPRP)	60	10	7	2	100	2	0.4	RF,O
Dresden (ELBE)	20-150	1-10	20-40	30	38	10	0.3-2.7	RF,O
Novosibirsk (RTM1)	5-100	10	50	20-100	3x33	6	2	RF,O
Daresbury (4GLS-IRFEL)	3-75	0.5-1	18-50	70	27	2.7	2	RF,O
Novosibirsk (RTM)	2-11	20	98	100	4x36	9	1.6	RF,O
Frascati (SPARC)	0.533	0.1	142	500	6x71	3	1.3	RF,S
Hawaii (FEL)	0.3-3	2	100	500	84	2.4	1.2	RF,O
Jlab (UV FEL)	0.25-1	0.2	160	270	60	3.3	1.3	RF,O
Harima (SUBARU)	0.2-10	26	1500	50	33,65	16,32	8	SR,O
Shanghai (SDUV-FEL)	0.5-0.088	1	300	400	400	2.5	1.025	RF,O
Daresbury (4GLS-VUV)	0.4-0.1	0.1-1	600	300	150	5	2	RF,O
Daresbury (4GLS-XUV)	0.1-0.01	0.1-1	750-950	1500	1000	4.5	1-3.5	RF,S
Frascati (COXA)	0.08	10	215	200	400	1.4	1	RF,O
DESY (FLASH)	0.006	0.17	1000	2500	981	2.73	0.9	RF,S
Italy (SPARX)	0.0015	0.1	2500	2500	1000	3	1.2	RF,S
BESSY (Soft X-ray)	0.0012	0.08	2300	3500	1450	2.75	0.9	RF,S
Trieste (FERMI)	0.001-0.1	0.1	1200	500-2500	1140	3.5	1.2	RF,S
Pohang (PAL X-FEL)	0.0003	0.1	3000	4000	6000	1.5	1.1	RF,S
MIT (Bates X-Ray FEL)	0.0003	0.05	4000	1000	1500	1.8	2	RF,S
SLAC (LCLS)	0.00015	0.07	14350	3400	3328	3	3.7	RF,S
DESY (XFEL)	0.0001	0.08	17500	5000	4700	3.6	3.2	RF,S
RIKEN (SPring8 SCSS)	0.0001	0.5	8000	2000	1500	1.5	1.3	RF,S

**XFEL (DESY, 2013):  $E_{\max}=12.4$  кэВ;  $I=10^{16}-10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>;  
длительность импульса 100 фс при частоте повторения 40 кГц**

Spring-8 (2010): 60 Гц

SLAC: 8.2 кэВ; 120 Гц

BESSY: 1 кэВ; 1 кГц

XFEL (DESY, 2013):  $E_{\max}=12.4$  кэВ;  $I=10^{16}-10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>;  
 длительность импульса 100 фс при частоте повторения 40 кГц

Spring-8: 60 Гц  
 SLAC: 8.2 кэВ; 120 Гц  
 BESSY: 1 кэВ; 1 кГц

nucleus	transition	$\Delta E$ [keV]	$\mu$ [ $e$ fm]	$\tau(g)$	$\tau(e)$ [ps]
<sup>153</sup> Sm	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	35.8	$>0.75^{(1)}$	47 h	$<100$
<sup>181</sup> Ta	$9/2^- \rightarrow 7/2^+$	6.2	$0.04^{(1)}$	<u>stable</u>	$6 \cdot 10^6$
<sup>225</sup> Ac	$3/2^+ \rightarrow 3/2^-$	40.1	$0.24^{(1)}$	10.0 d	720
<sup>223</sup> Ra	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	50.1	0.12	11.435 d	730
<sup>227</sup> Th	$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	37.9	$\dots^{(2)}$	18.68 d	$\dots^{(2)}$
<sup>231</sup> Th	$5/2^- \rightarrow 5/2^+$	186	0.017	25.52 h	1030



### 3. Ускорить ядра навстречу лазерному пучку



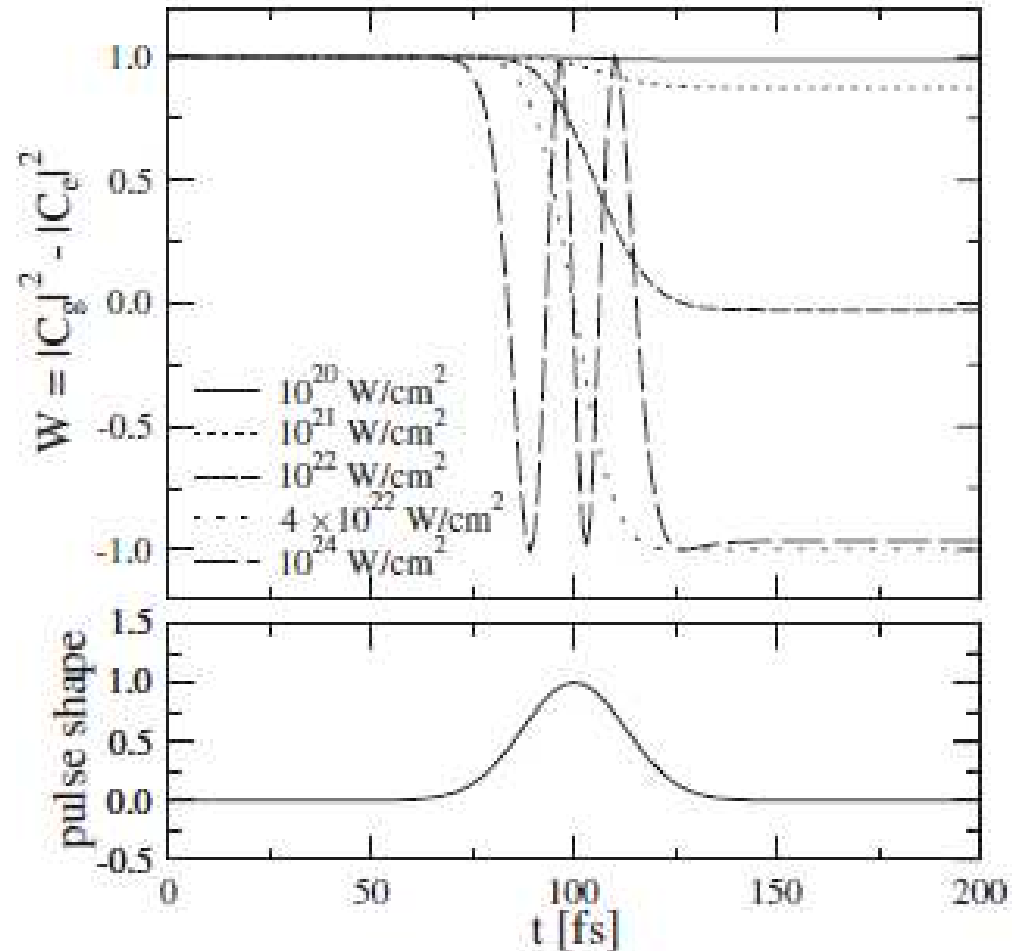
$$\omega = (1 + \beta)\gamma\omega_L$$

$$E = (1 + \beta)\gamma E_L$$

$$I = (1 + \beta)^2 \gamma^2 I_L$$

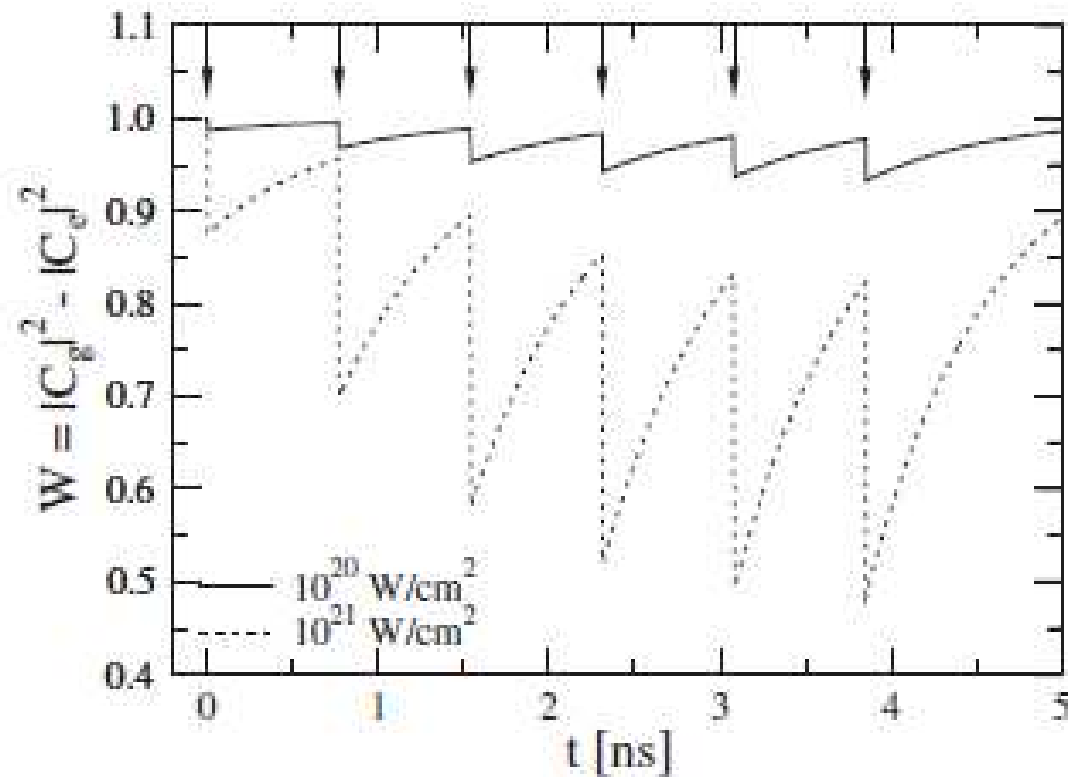
Доплер-эффект

## Инверсия заселенности при подаче одиночного импульса ( $^{223}\text{Ra}$ , $\Delta E=50$ кэВ)



XFEL (DESY):  $E_{\text{max}}=12.4$  кэВ;  $I=10^{16}$ - $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>; длительность импульса 100 фс при частоте повторения 40 кГц

Инверсия заселенности при подаче шести последовательных импульсов ( $^{223}\text{Ra}$ ,  $\Delta E=50$  кэВ)



PHYSICAL REVIEW C 77, 044602 (2008)

## Electric-dipole-forbidden nuclear transitions driven by super-intense laser fields

Adriana Pálffy,<sup>\*</sup> Jörg Evers,<sup>†</sup> and Christoph H. Keitel<sup>‡</sup>

*Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany*

(Received 29 October 2007; published 11 April 2008)

1. M1- и E2-переходы
2. Разброс энергий лазерных фотонов

## Переходы с $\Delta E < 12.4$ кэВ

Isotope	$I_g$	$I_e$	$L$	$E$ (keV)	$B(\lambda L, I_g \rightarrow I_e)$ ( $e^2 \text{ fm}^{2L}$ )	$(I_e \  H_I \  I_g)$ (eV)	$\Gamma_e$ (1/s)
$^{83}_{36}\text{Kr}$	$9/2^+$	$7/2^-$	$M1 + E2$	9.396	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-10}$	$2.51 \times 10^5$
$^{137}_{57}\text{La}$	$7/2^+$	$5/2^+$	$M1$	10.56	$2.51 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-11}$	$6.37 \times 10^4$
$^{151}_{62}\text{Sm}$	$5/2^-$	$3/2^-$	$M1 + E2$	4.821	$7.74 \times 10^{-5}$	$7.07 \times 10^{-11}$	$2.10 \times 10^4$
$^{169}_{69}\text{Tm}$	$1/2^+$	$3/2^+$	$M1 + E2$	8.410	$1.24 \times 10^{-3}$	$3.79 \times 10^{-10}$	$5.96 \times 10^5$
$^{187}_{76}\text{Os}$	$1/2^-$	$3/2^-$	$M1(+E2)$	9.746	$1.26 \times 10^{-3}$	$3.84 \times 10^{-10}$	$9.43 \times 10^5$
$^{181}_{73}\text{Ta}$	$7/2^+$	$9/2^-$	$E1$	6.238	$5.18 \times 10^{-6}$	$6.84 \times 10^{-12}$	$1.59 \times 10^3$

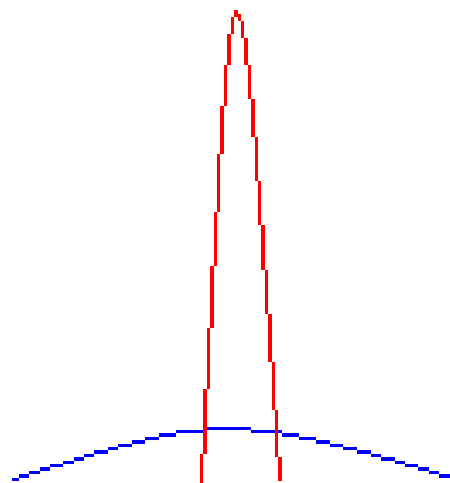
## Переходы с $\Delta E > 12.4$ кэВ

Isotope	$I_g$	$I_e$	$L$	$E$ (keV)	$B(\lambda L, I_g \rightarrow I_e)$ ( $e^2 \text{ fm}^{2L}$ )	$\langle I_e \  H_I \  I_g \rangle$ (eV)	$\Gamma_r$ (1/s)
<sup>153</sup> <sub>62</sub> Sm	3/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>-</sup>	E1	35.843	$> 3.50 \times 10^{-2}$	$2.27 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^9$
<sup>153</sup> <sub>63</sub> Eu	5/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>-</sup>	E1	97.429	$1.80 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-7}$	$2.64 \times 10^9$
<sup>161</sup> <sub>66</sub> Dy	5/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>-</sup>	E1	25.651	$2.65 \times 10^{-4}$	$1.08 \times 10^{-9}$	$7.09 \times 10^6$
<sup>156</sup> <sub>64</sub> Gd	0 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	E2	88.966	$4.64 \times 10^4$	$3.27 \times 10^{-9}$	$6.32 \times 10^7$
<sup>162</sup> <sub>66</sub> Dy	0 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	E2	80.660	$5.35 \times 10^4$	$2.54 \times 10^{-9}$	$4.46 \times 10^7$
<sup>238</sup> <sub>92</sub> U	0 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	E2	44.910	$12.09 \times 10^4$	$6.72 \times 10^{-10}$	$5.50 \times 10^6$
<sup>173</sup> <sub>70</sub> Yb	5/2 <sup>-</sup>	7/2 <sup>-</sup>	M1	78.647	$3.07 \times 10^{-3}$	$5.94 \times 10^{-8}$	$1.81 \times 10^9$
<sup>151</sup> <sub>63</sub> Eu	5/2 <sup>+</sup>	7/2 <sup>+</sup>	M1	21.532	$2.17 \times 10^{-4}$	$3.14 \times 10^{-10}$	$2.62 \times 10^6$
<sup>165</sup> <sub>67</sub> Ho	7/2 <sup>-</sup>	9/2 <sup>-</sup>	M1	94.700	$6.76 \times 10^{-3}$	$2.26 \times 10^{-7}$	$7.42 \times 10^9$

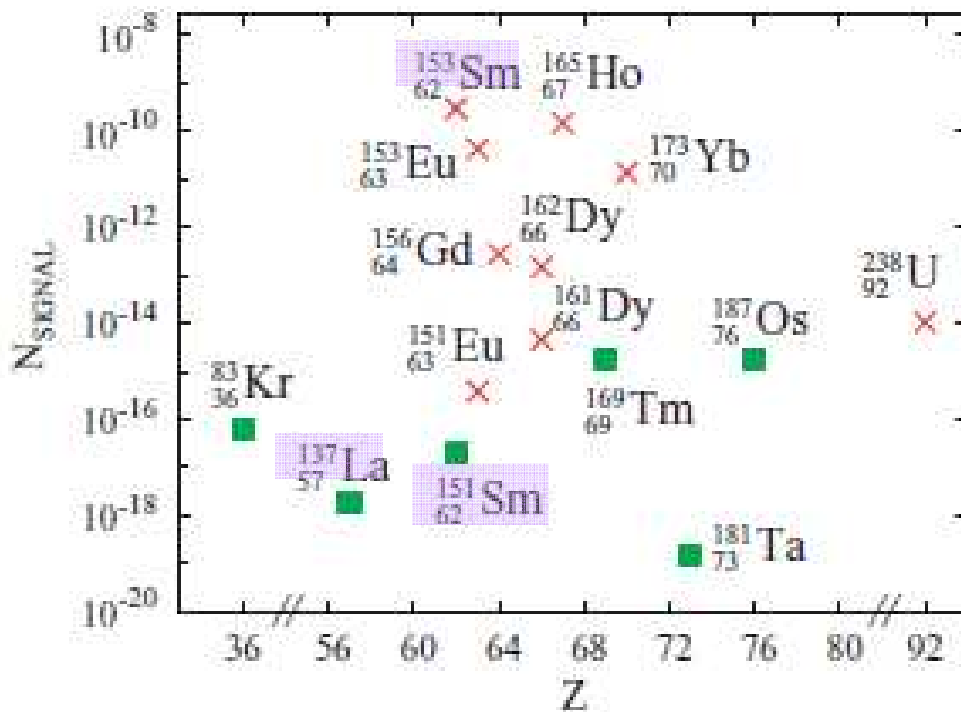
Ширина линии излучения лазера  $\Gamma_L=10$  эВ при энергии 12.4 кэВ!

Ширины ядерных уровней  $\Gamma_N=10^{-12}-10^{-6}$  эВ

$$I_{\text{eff}} = I \frac{\Gamma_N}{\Gamma_L}$$



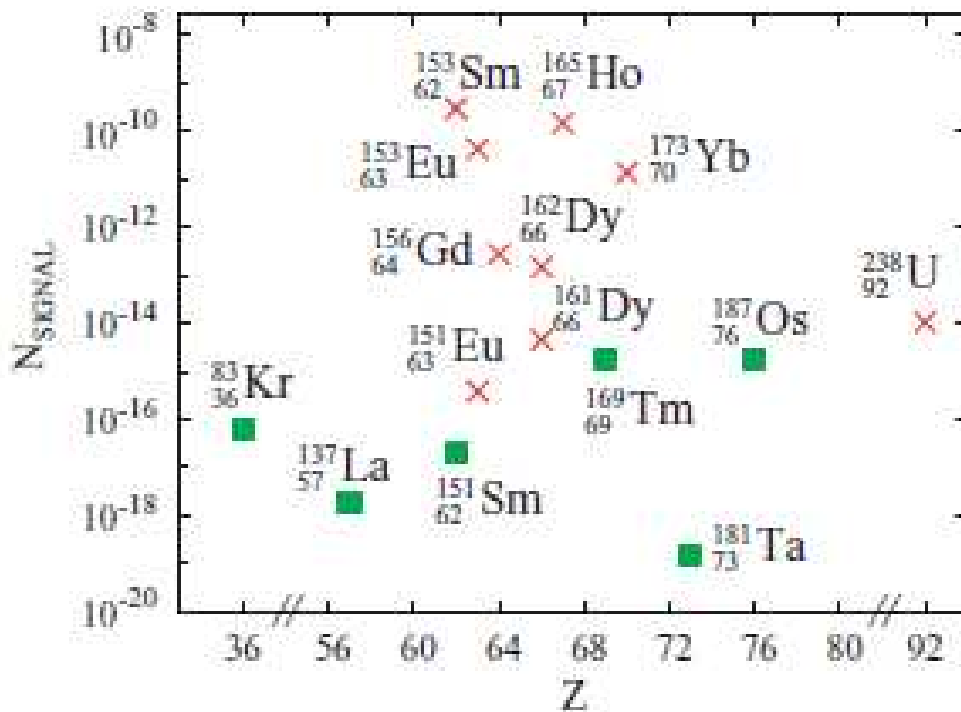
# Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



$\blacksquare$   $E < 12.4$  кэВ  
 $\times$   $E > 12.4$  кэВ



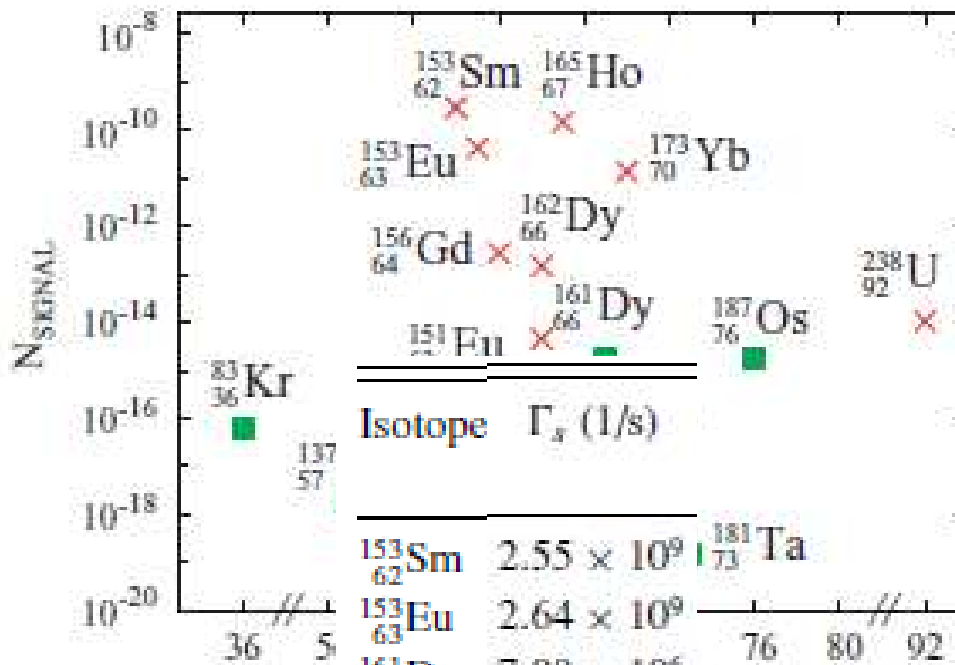
# Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



$E < 12.4$  кэВ

Isotope	$\Gamma_r$ (1/s)
$^{83}_{36}\text{Kr}$	$2.51 \times 10^5$
$^{137}_{57}\text{La}$	$6.37 \times 10^4$
$^{151}_{62}\text{Sm}$	$2.10 \times 10^4$
$^{169}_{69}\text{Tm}$	$5.96 \times 10^5$
$^{187}_{76}\text{Os}$	$9.43 \times 10^5$
$^{181}_{73}\text{Ta}$	$1.59 \times 10^3$

# Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



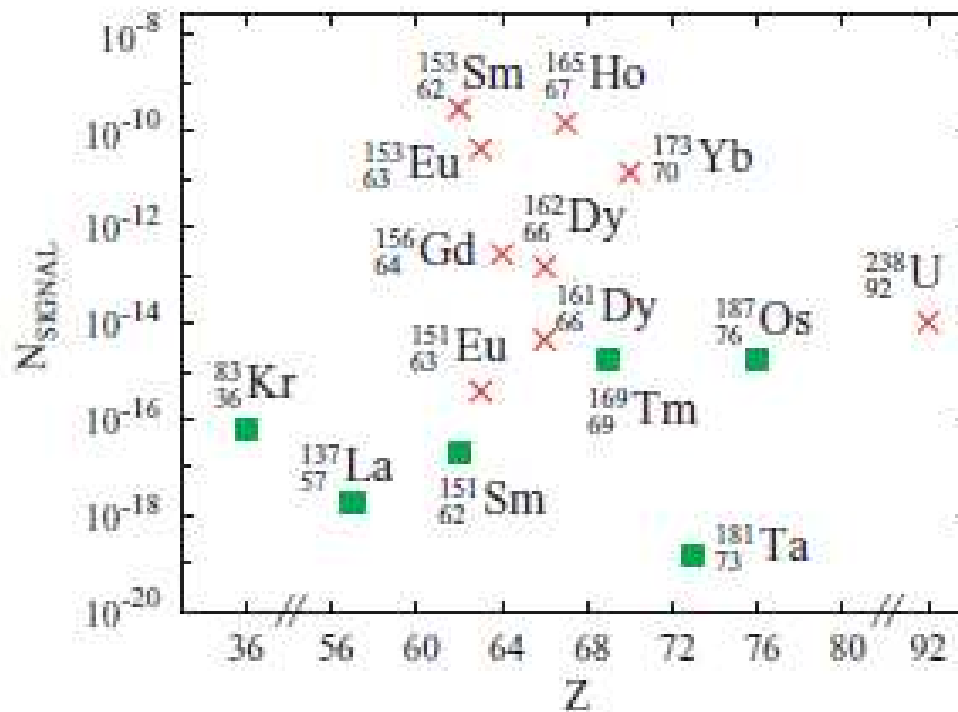
$E < 12.4$  кэВ

Isotope	$\Gamma_x$ (1/s)
$^{83}_{36}\text{Kr}$	$2.51 \times 10^5$
$^{137}_{57}\text{La}$	$6.37 \times 10^4$
$^{151}_{62}\text{Sm}$	$2.10 \times 10^4$
$^{169}_{69}\text{Tm}$	$5.96 \times 10^5$
$^{187}_{76}\text{Os}$	$9.43 \times 10^5$
$^{181}_{73}\text{Ta}$	$1.59 \times 10^3$

$E > 12.4$  кэВ

Isotope	$\Gamma_x$ (1/s)
$^{153}_{62}\text{Sm}$	$2.55 \times 10^9$
$^{153}_{63}\text{Eu}$	$2.64 \times 10^9$
$^{161}_{66}\text{Dy}$	$7.09 \times 10^6$
$^{156}_{64}\text{Gd}$	$6.32 \times 10^7$
$^{162}_{66}\text{Dy}$	$4.46 \times 10^7$
$^{238}_{92}\text{U}$	$5.50 \times 10^6$
$^{173}_{70}\text{Yb}$	$1.81 \times 10^9$
$^{151}_{63}\text{Eu}$	$2.62 \times 10^6$
$^{165}_{67}\text{Ho}$	$7.42 \times 10^9$

# Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом

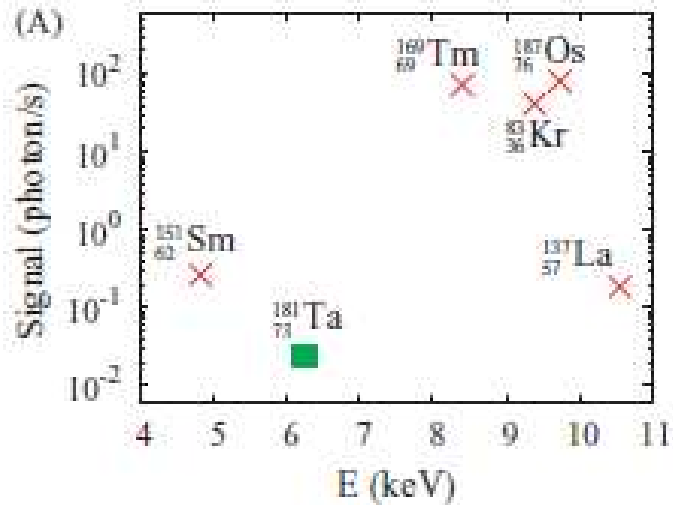


$\blacksquare$   $E < 12.4$  кэВ

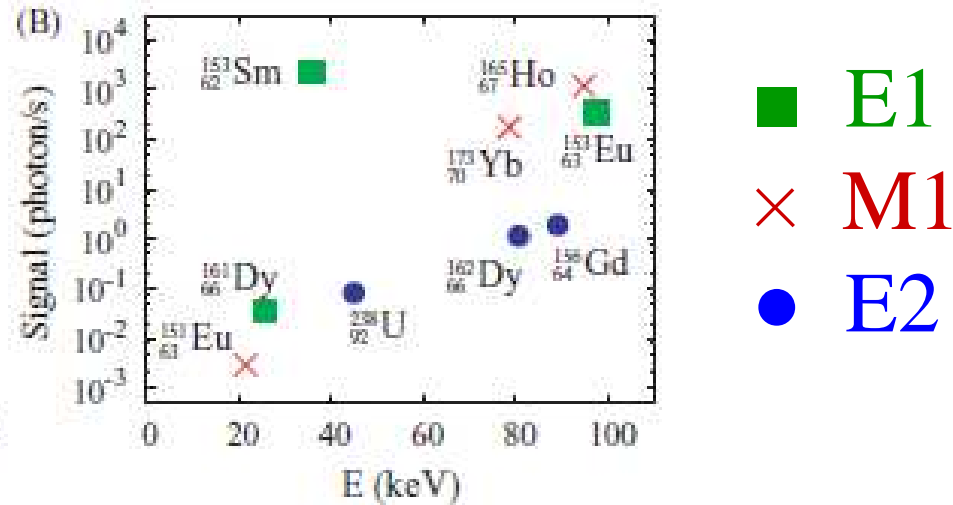
$\times$   $E > 12.4$  кэВ

# Число фотонов от девозбуждения ядер в секунду

$E < 12.4$  кэВ



$E > 12.4$  кэВ



Фокальный диаметр  
лазера 20 мкм  
Плотность мишени  
 $10^{20}$  г/см<sup>2</sup>

Плотность ядер в пучке  
 $10^{11}$  см<sup>-3</sup>  
(SIS100, проект FAIR, GSI)

PHYSICAL REVIEW C 74, 044601 (2006)

**Dynamic nuclear Stark shift in superintense laser fields**

Thomas J. Bürvenich\*

*Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany and Frankfurt Institute for Advanced Studies,  
Johann Wolfgang Goethe University, Max-von-Laue-Str. 1, D-60438 Frankfurt am Main, Germany*

Jörg Evers<sup>†</sup> and Christoph H. Keitel<sup>‡</sup>

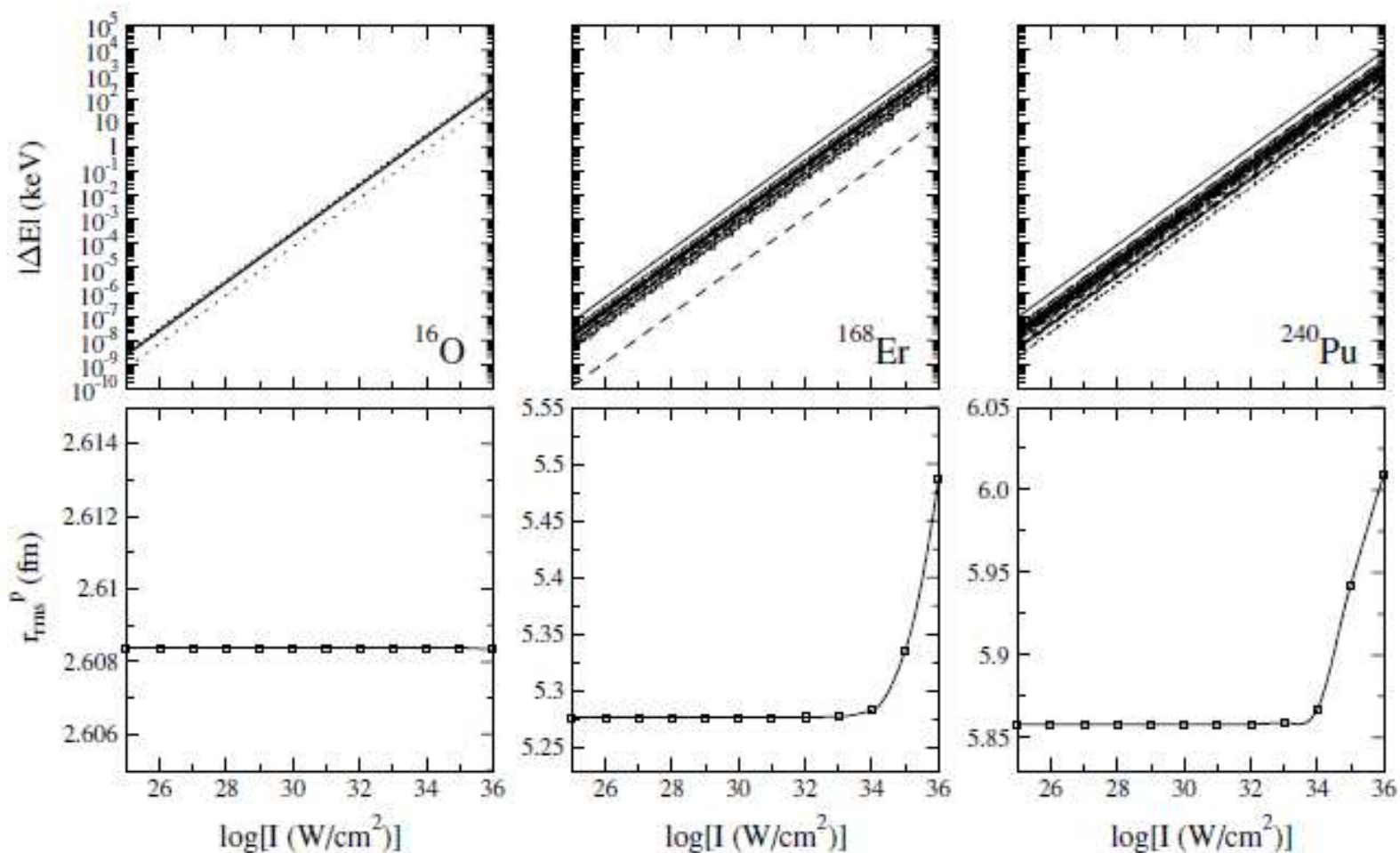
*Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany*

*(Received 20 June 2006; published 3 October 2006)*

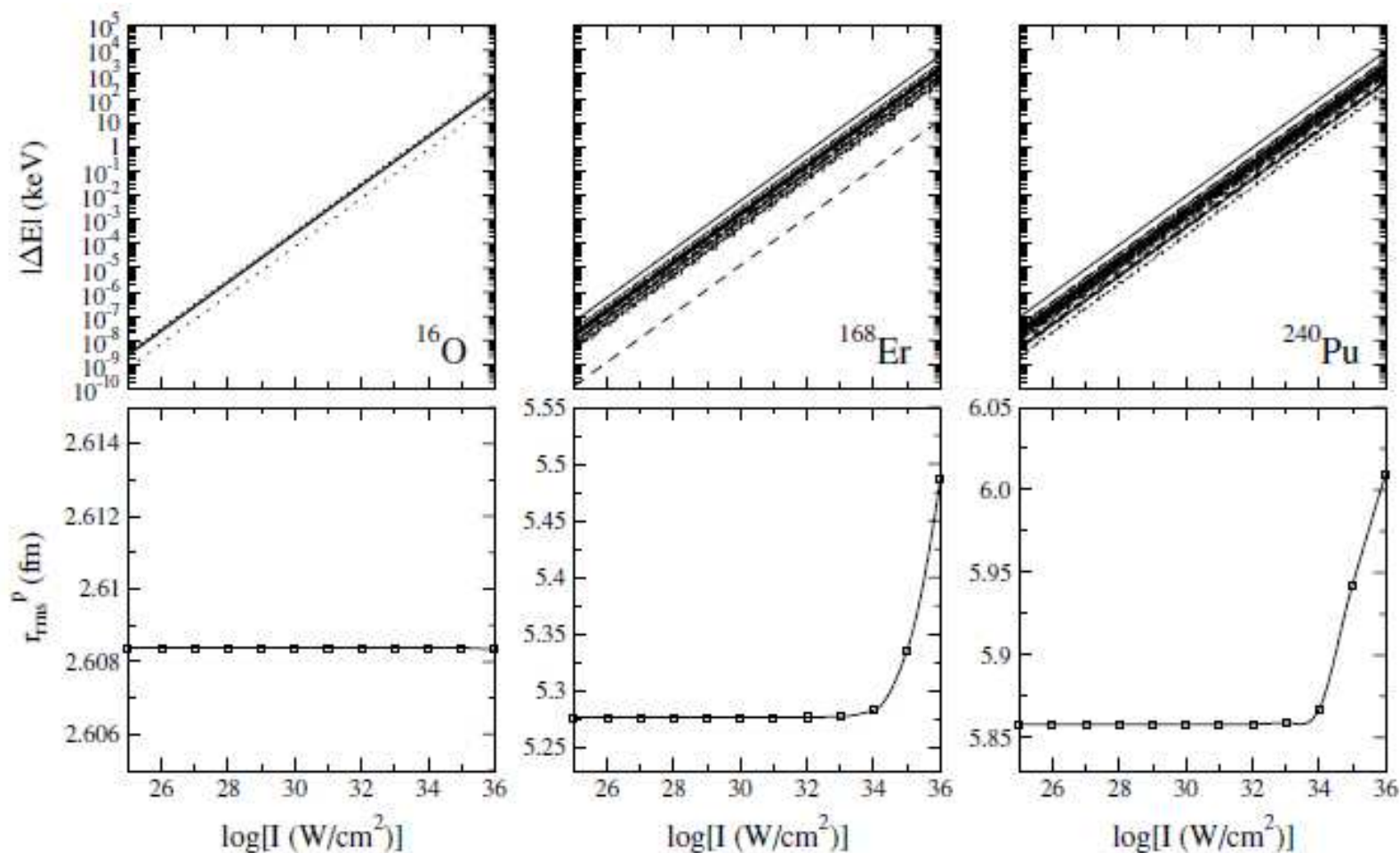
Как меняются свойства ядра в лазерном поле  
*оптического* диапазона?

Штарковское смещение однонуклонных уровней и  
деформация ядра

# Сдвиг однонуклонных уровней и изменение зарядового радиуса ядра в лазерном поле



# Сдвиг однонуклонных уровней и изменение зарядового радиуса ядра в лазерном поле



$$I = (1 + \beta)^2 \gamma^2 I_L$$

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ!



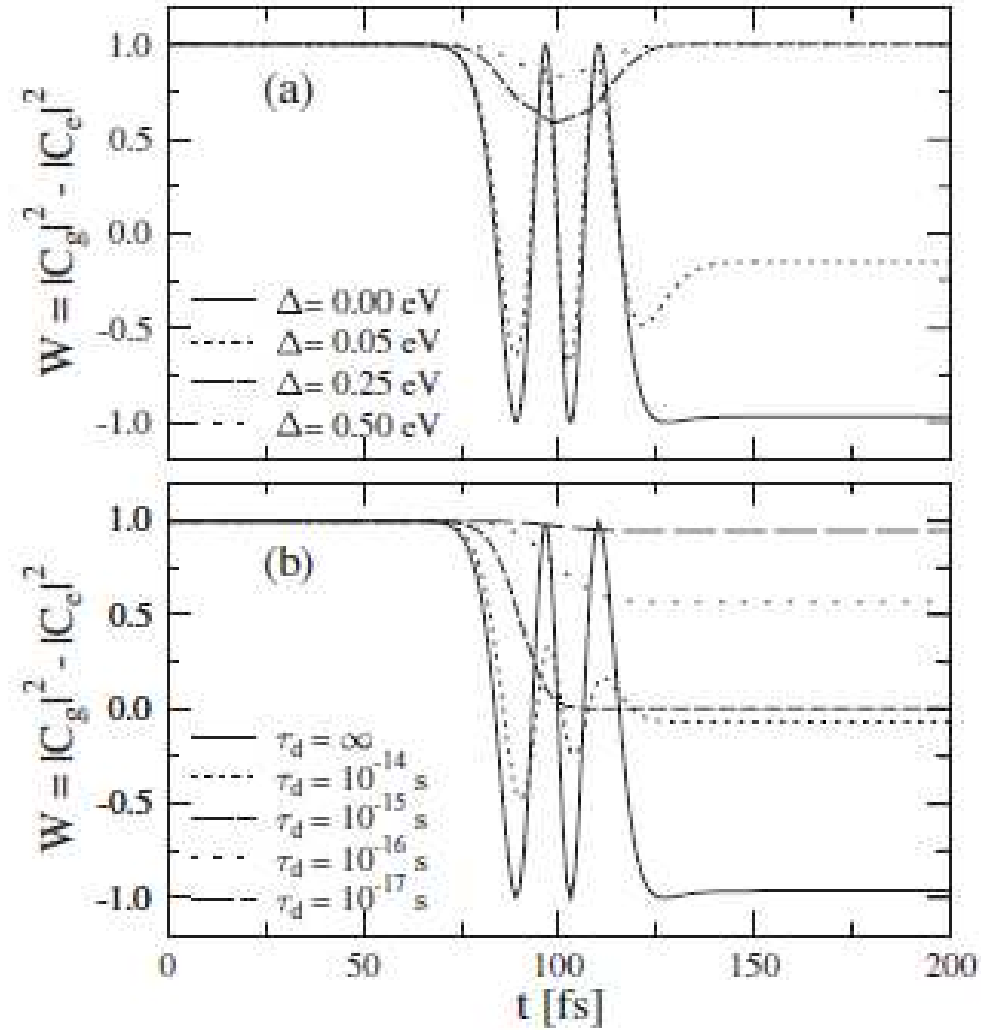


FIG. 3. (a) Inversion  $W$  versus laser field detuning in  $^{223}\text{Ra}$  for a 30 fs (FWHM) Gaussian laser pulse. (b) The inversion for different decoherence times. Both cases correspond to  $I = 10^{24}$  W/cm $^2$ .