

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,^{*} Jörg Evers,[†] and Christoph H. Keitel[‡]

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 (μ)

nucleus	transition	ΔE [keV]	μ [e fm]	$\tau(g)$	$\tau(e)$ [ps]
^{153}Sm	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	35.8	$>0.75^{(1)}$	47 h	<100
^{181}Ta	$9/2^- \rightarrow 7/2^+$	6.2	$0.04^{(1)}$	<u>stable</u>	$6 \cdot 10^6$
^{225}Ac	$3/2^+ \rightarrow 3/2^-$	40.1	$0.24^{(1)}$	10.0 d	720
^{223}Ra	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	50.1	0.12	11.435 d	730
^{227}Th	$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	37.9	$\dots^{(2)}$	18.68 d	$\dots^{(2)}$
^{231}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
Rossendorf (U-100)	15-150	0.3-10	15	240	38	10	2.7	RF,O
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
BNL (SDL FEL)	0.2-1.0	0.5-1	100-250	300-400	256	3.9	0.8	RF,A,S,H
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
RIKEN(SCSS Prototype)	0.05	1	250	800	600	1.5	1.3	RF,S
DESY (FLASH)	0.013	0.025	700	2000	984	2.73	0.81	RF,S

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/см²;
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/см²;
 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	ΔE [keV]	μ [e fm]	$\tau(g)$	$\tau(e)$ [ps]
¹⁵³ Sm	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	35.8	$>0.75^{(1)}$	47 h	<100
¹⁸¹ Ta	$9/2^- \rightarrow 7/2^+$	6.2	$0.04^{(1)}$	<u>stable</u>	$6 \cdot 10^6$
²²⁵ Ac	$3/2^+ \rightarrow 3/2^-$	40.1	$0.24^{(1)}$	10.0 d	720
²²³ Ra	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	50.1	0.12	11.435 d	730
²²⁷ Th	$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	37.9	$\dots^{(2)}$	18.68 d	$\dots^{(2)}$
²³¹ Th	$5/2^- \rightarrow 5/2^+$	186	0.017	25.52 h	1030

3. Ускорить ядра навстречу лазерному пучку



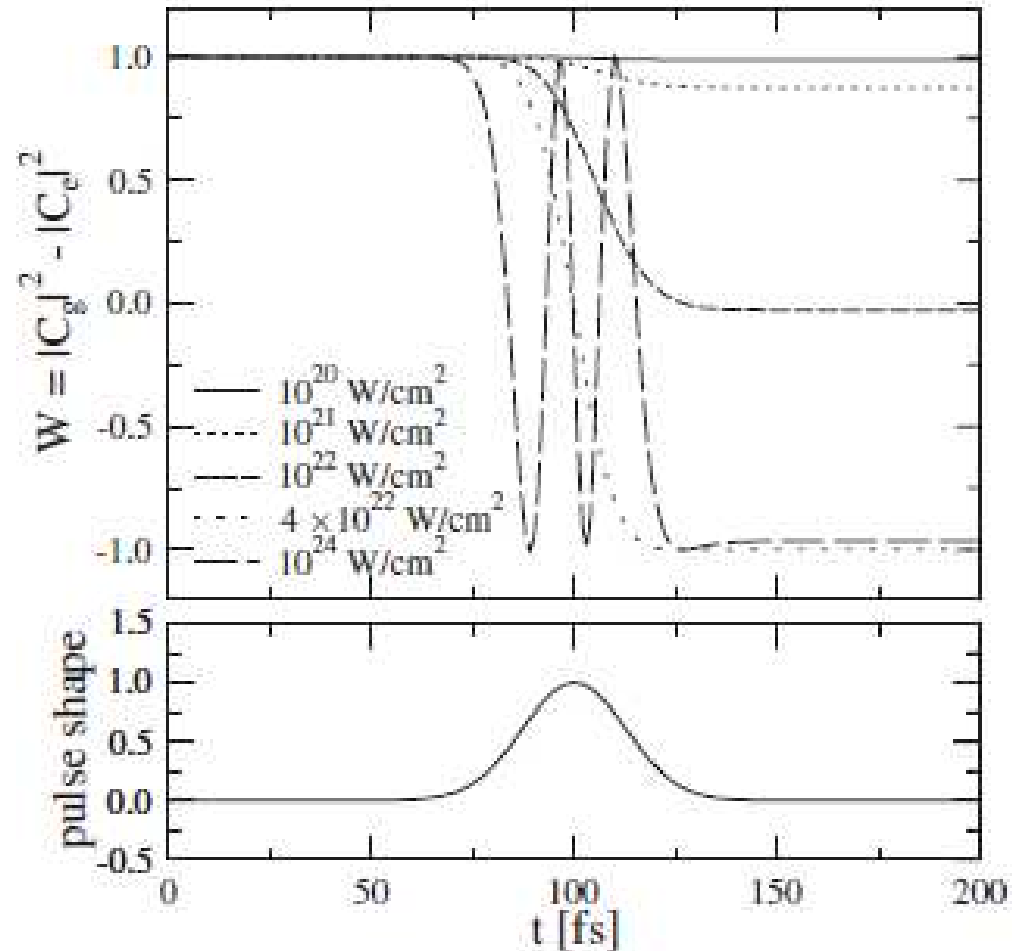
$$\omega = (1 + \beta)\gamma\omega_L$$

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

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

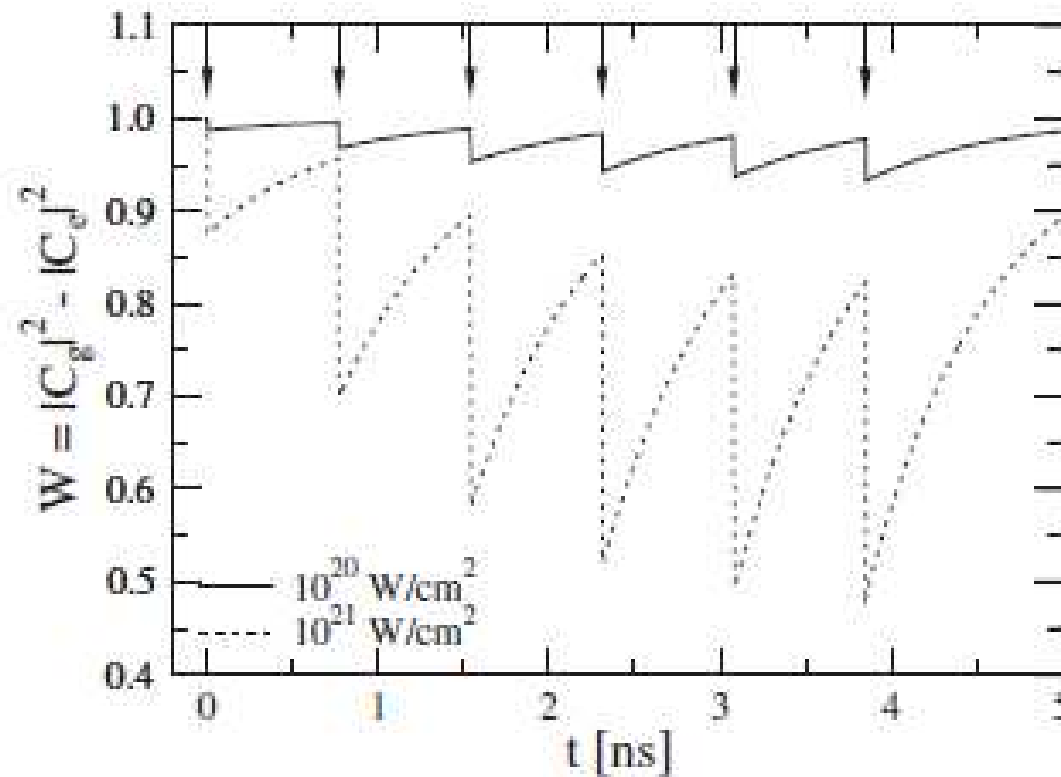
Доплер-эффект

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



XFEL (DESY): $E_{\text{max}}=12.4$ кэВ; $I=10^{16}$ - 10^{20} Вт/см²; длительность импульса 100 фс при частоте повторения 40 кГц

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



PHYSICAL REVIEW C 77, 044602 (2008)

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

Adriana Pálffy,^{*} Jörg Evers,[†] and Christoph H. Keitel[‡]

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)	Γ_e (1/s)
$^{83}_{36}\text{Kr}$	$9/2^+$	$7/2^-$	$M1 + E2$	9.396	1.49×10^{-4}	1.61×10^{-10}	2.51×10^5
$^{137}_{57}\text{La}$	$7/2^+$	$5/2^+$	$M1$	10.56	2.51×10^{-5}	2.50×10^{-11}	6.37×10^4
$^{151}_{62}\text{Sm}$	$5/2^-$	$3/2^-$	$M1 + E2$	4.821	7.74×10^{-5}	7.07×10^{-11}	2.10×10^4
$^{169}_{69}\text{Tm}$	$1/2^+$	$3/2^+$	$M1 + E2$	8.410	1.24×10^{-3}	3.79×10^{-10}	5.96×10^5
$^{187}_{76}\text{Os}$	$1/2^-$	$3/2^-$	$M1(+E2)$	9.746	1.26×10^{-3}	3.84×10^{-10}	9.43×10^5
$^{181}_{73}\text{Ta}$	$7/2^+$	$9/2^-$	$E1$	6.238	5.18×10^{-6}	6.84×10^{-12}	1.59×10^3

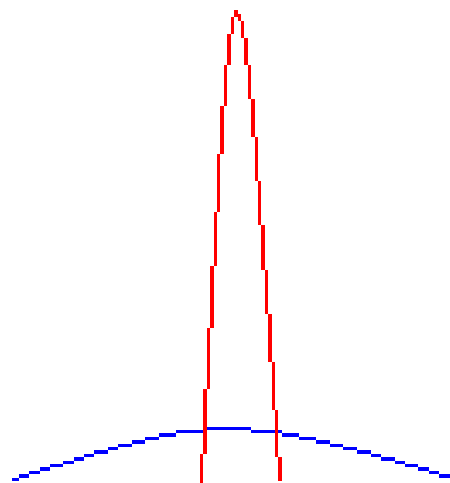
Переходы с $\Delta E > 12.4$ кэВ

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)	Γ_r (1/s)
¹⁵³ ₆₂ Sm	3/2 ⁺	3/2 ⁻	E1	35.843	$> 3.50 \times 10^{-2}$	2.27×10^{-7}	2.55×10^9
¹⁵³ ₆₃ Eu	5/2 ⁺	5/2 ⁻	E1	97.429	1.80×10^{-3}	1.06×10^{-7}	2.64×10^9
¹⁶¹ ₆₆ Dy	5/2 ⁺	5/2 ⁻	E1	25.651	2.65×10^{-4}	1.08×10^{-9}	7.09×10^6
¹⁵⁶ ₆₄ Gd	0 ⁺	2 ⁺	E2	88.966	4.64×10^4	3.27×10^{-9}	6.32×10^7
¹⁶² ₆₆ Dy	0 ⁺	2 ⁺	E2	80.660	5.35×10^4	2.54×10^{-9}	4.46×10^7
²³⁸ ₉₂ U	0 ⁺	2 ⁺	E2	44.910	12.09×10^4	6.72×10^{-10}	5.50×10^6
¹⁷³ ₇₀ Yb	5/2 ⁻	7/2 ⁻	M1	78.647	3.07×10^{-3}	5.94×10^{-8}	1.81×10^9
¹⁵¹ ₆₃ Eu	5/2 ⁺	7/2 ⁺	M1	21.532	2.17×10^{-4}	3.14×10^{-10}	2.62×10^6
¹⁶⁵ ₆₇ Ho	7/2 ⁻	9/2 ⁻	M1	94.700	6.76×10^{-3}	2.26×10^{-7}	7.42×10^9

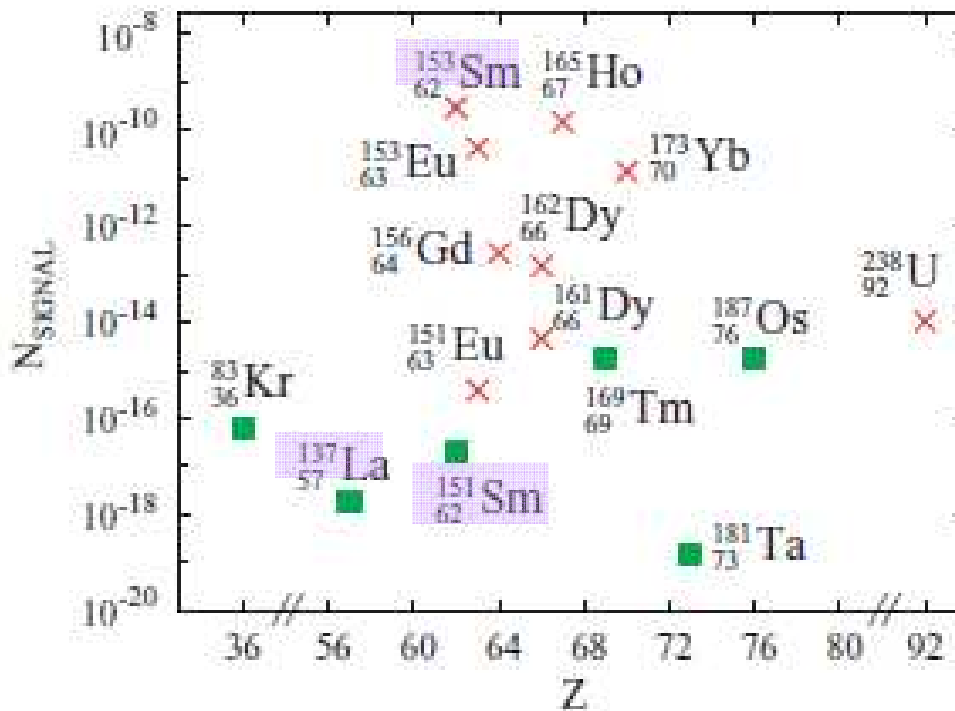
Ширина линии излучения лазера $\Gamma_L=10$ эВ при энергии 12.4 кэВ!

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

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



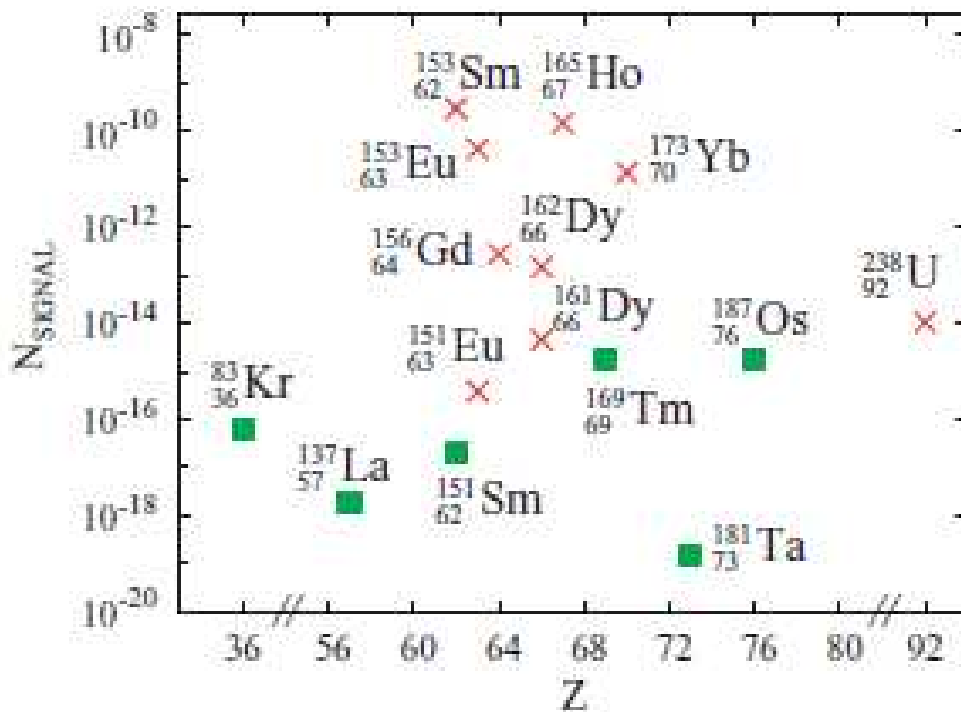
Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



■ $E < 12.4$ кэВ

× $E > 12.4$ кэВ

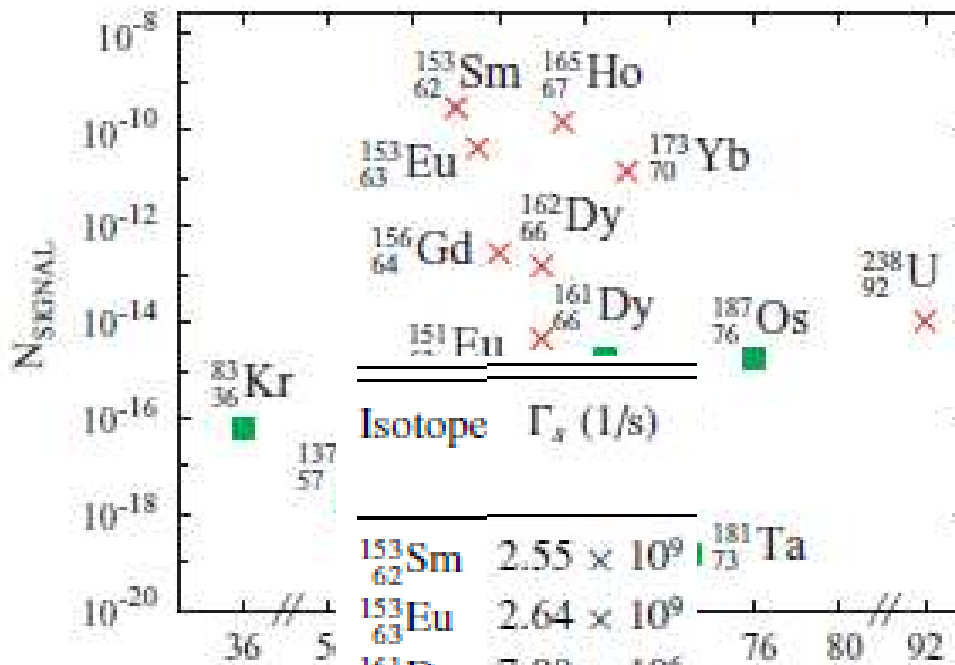
Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



$E < 12.4$ кэВ

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

Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом



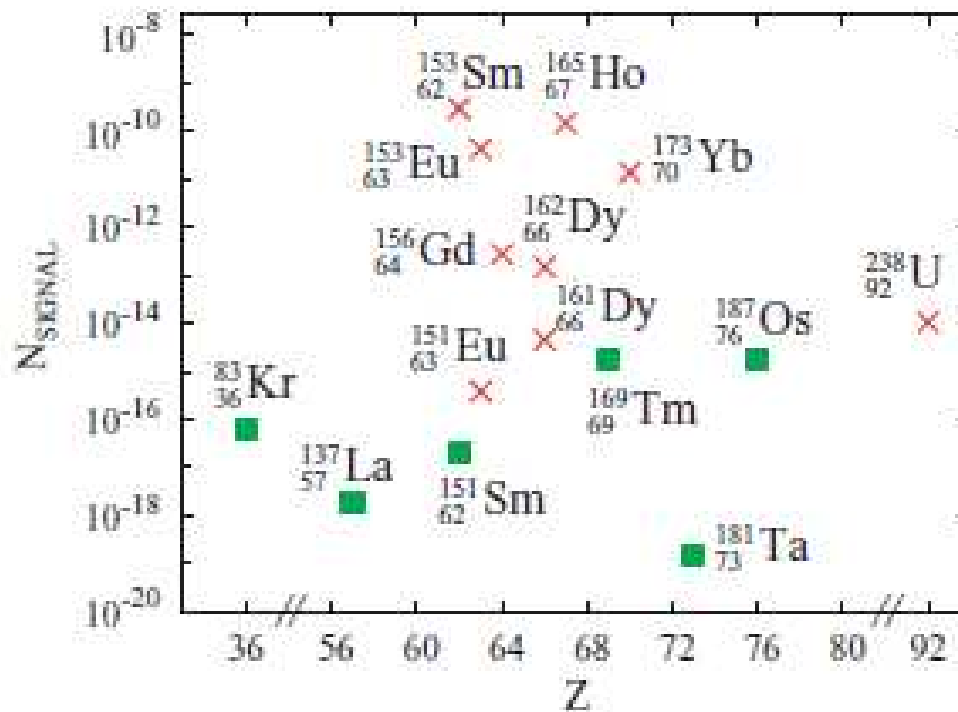
$E < 12.4$ кэВ

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

$E > 12.4$ кэВ

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

Вероятность возбуждения ядра одним лазерным импульсом

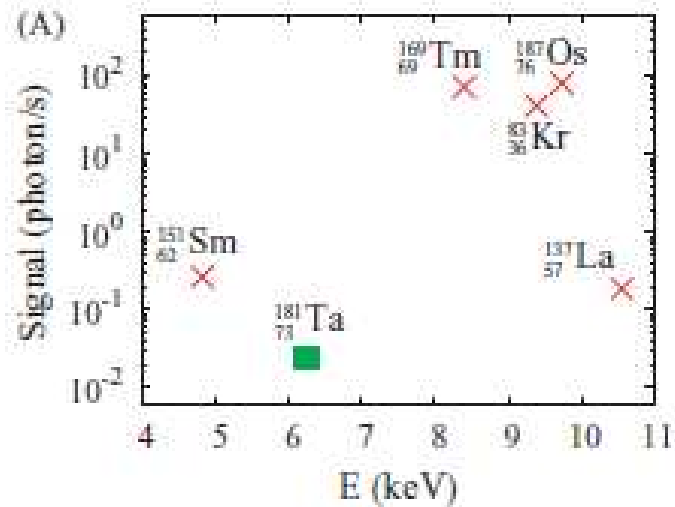


\blacksquare $E < 12.4$ кэВ

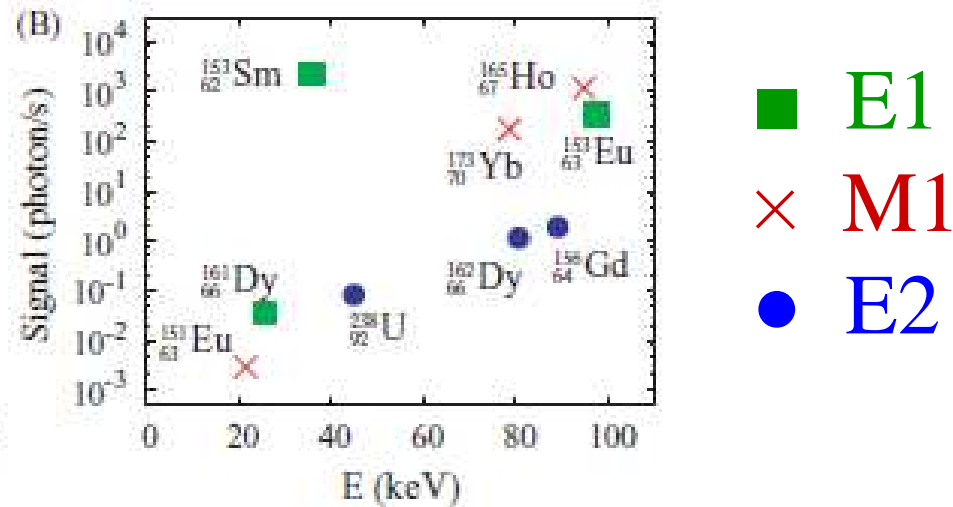
\times $E > 12.4$ кэВ

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/см²

Плотность ядер в пучке
 10^{11} см⁻³
(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[†] and Christoph H. Keitel[‡]

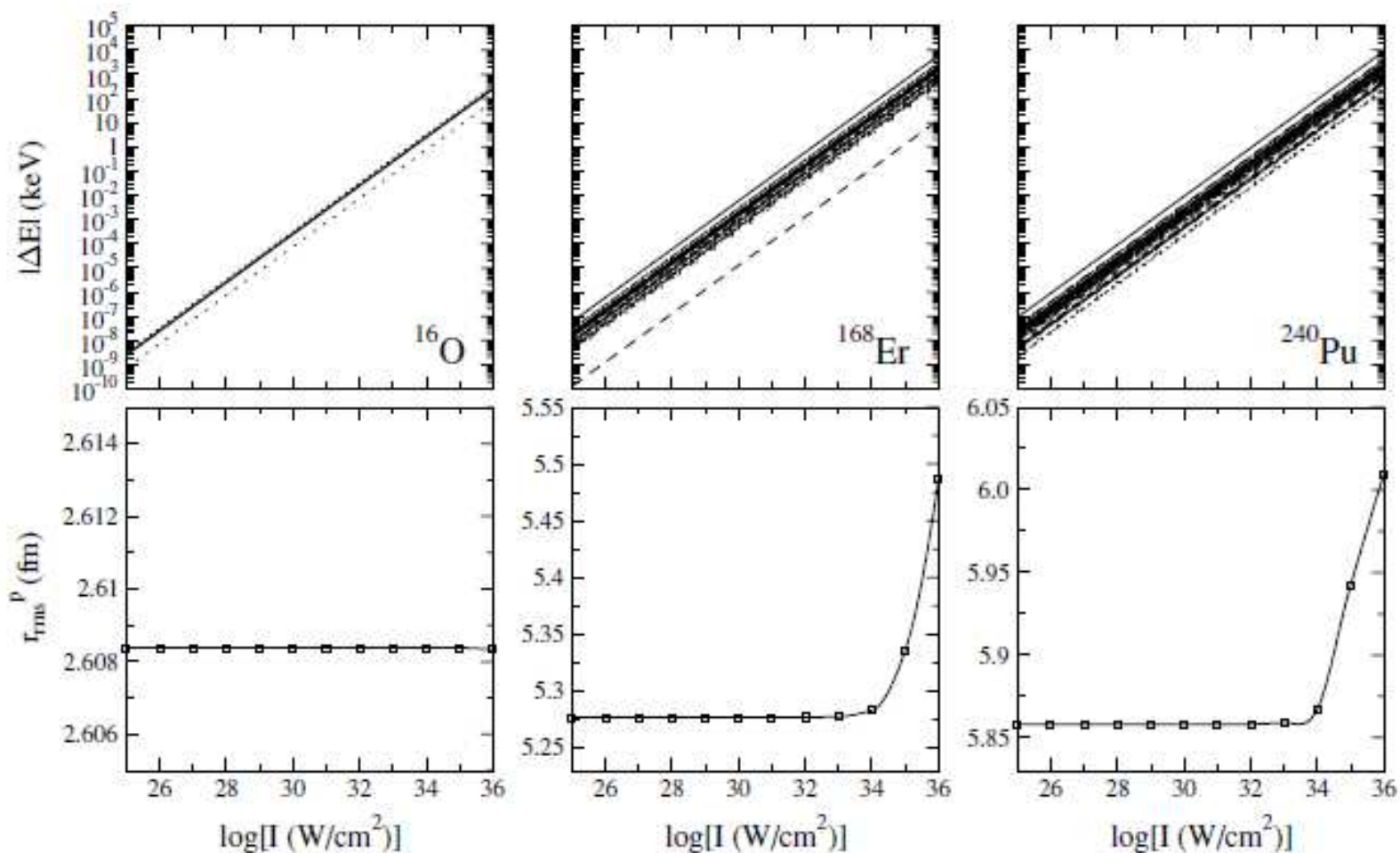
Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg, Germany

(Received 20 June 2006; published 3 October 2006)

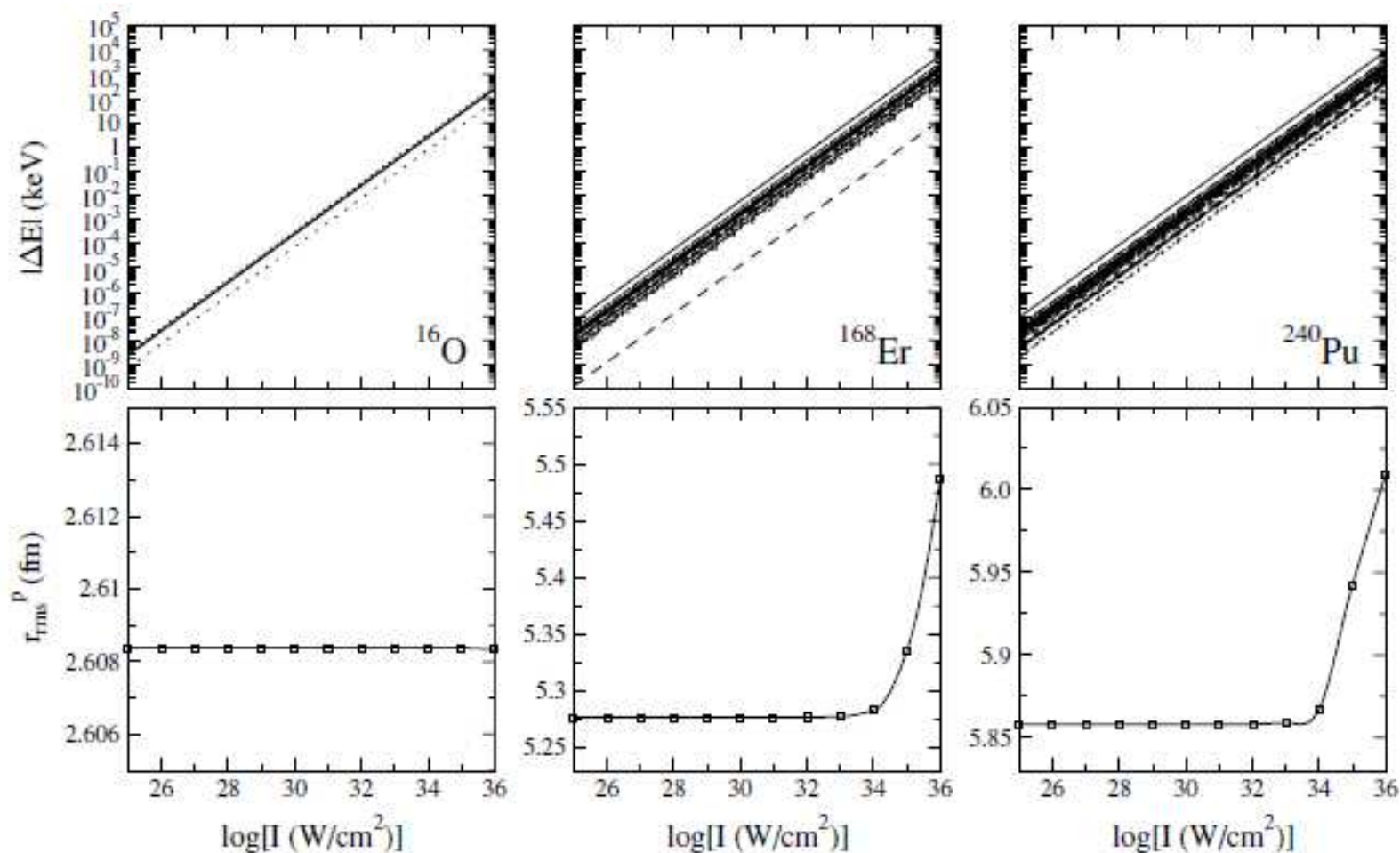
Как меняются свойства ядра в лазерном поле
оптического диапазона?

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!

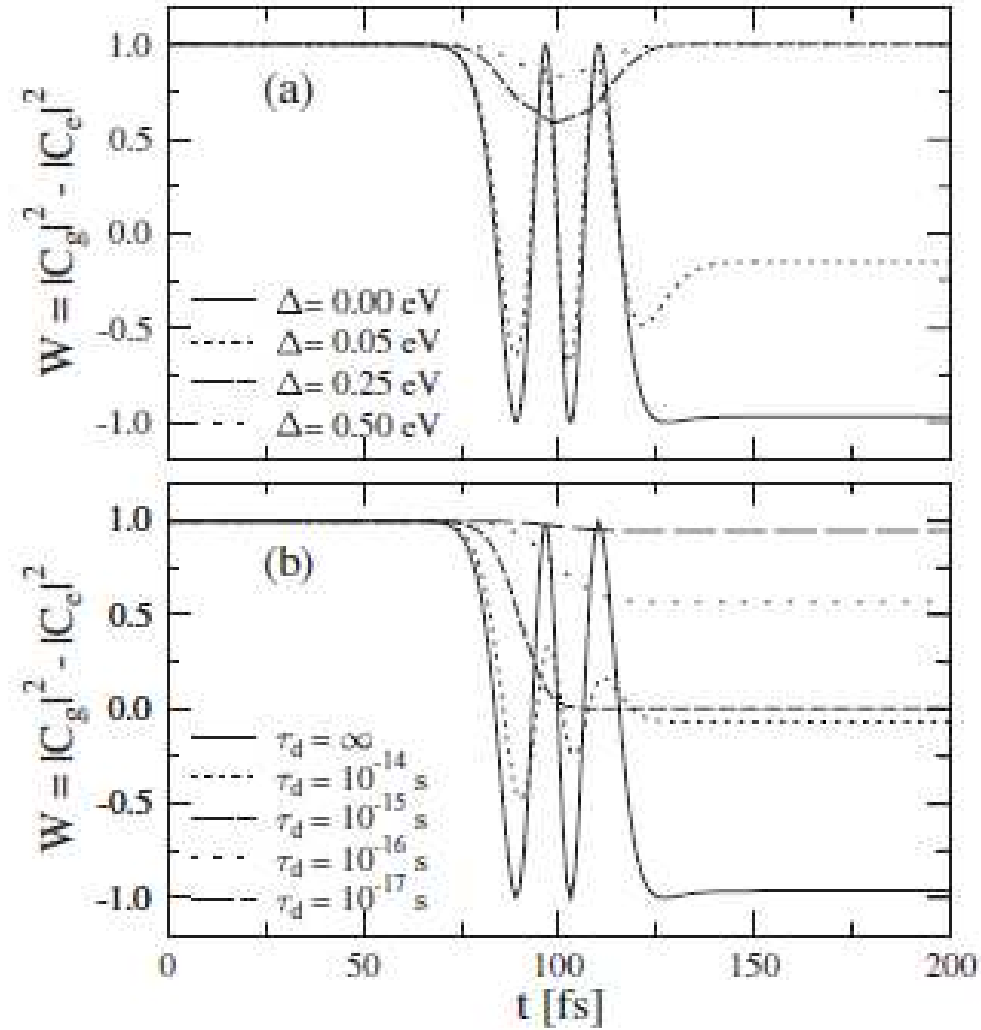


FIG. 3. (a) Inversion W versus laser field detuning in ^{223}Ra for a 30 fs (FWHM) Gaussian laser pulse. (b) The inversion for different decoherence times. Both cases correspond to $I = 10^{24}$ W/cm 2 .