Cod proiect: ID 369 Contract nr. 52 / 2007

MOMENTE ELECTROMAGNETICE STATICE SI DINAMICE PENTRU STARI NUCLEARE EXCITATE

INSTITUTUL NATIONAL DE C&D PENTRU FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA
"HORIA HULUBEI"

Dr. Manuela Ionescu-Bujor	CS1	Director proiect
Dr. Alexandru Iordachescu	CS1	
Dr. Nicolae Marginean	CS1	
Gabriel Suliman	CS	
Gabriela Ilie	As. cercetare	

Obiectiv general → **date experimentale originale**

→ **elucidarea unor aspecte moderne de structură nucleară**

Momentele electromagnetice – mărimi cruciale → testarea modelelor teoretice

Obiective specifice

1. Structura nucleelor uşoare din zona de masă A=30-40
   stări de spin înalt, timpi de viață → excitații intrus, simetrie de izospin
   Etape: 2007, 2008, 2009

2. Momente nucleare pentru stări izomere exotice – nuclee neutrono-deficitare de Pb
   Etapa: 2009

3. Stări izomere de viață scurtă in produşi de fisiune → nuclee bogate în neutroni
   Etapa: 2010

- **Experimente complexe – Lab. Național Legnaro (LNL) Italia, GSI-Darmstadt Germania**
- **Colaborări internaționale**

Activitățile prevăzute pentru realizarea celor 3 obiective se efectueaza în paralel

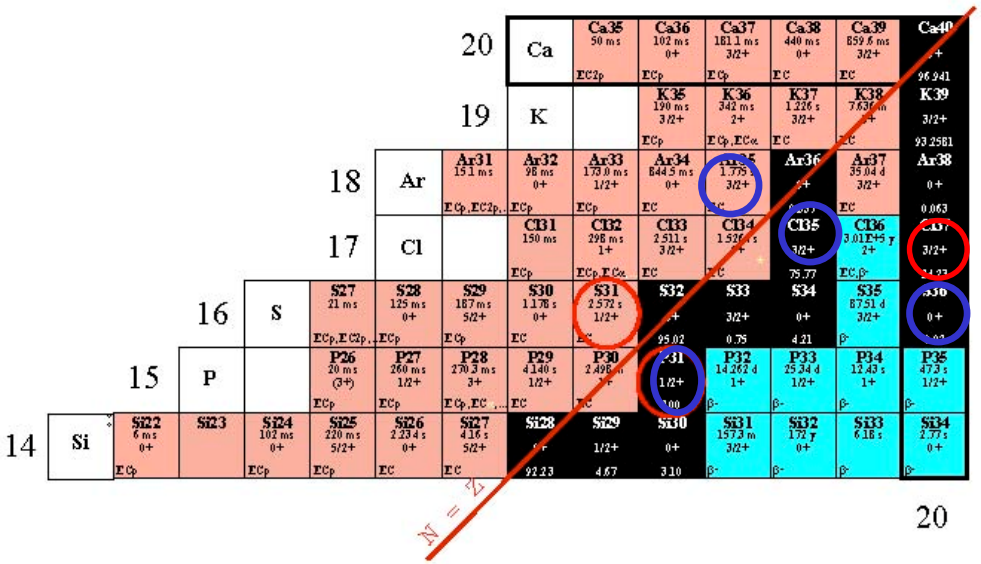
Condiționări: - programarea experimentelor la facilitățile europene

- activități în colaborare

Obiectiv 1: Nuclee din pătura *sd* – interes recent

- Sisteme complexe de accelerare şi detecție – spini înalți – superdeformare ^{36}Ar, ^{38}Ar

- Modelul păturilor nucleare – interacții efective – excitații intrus *fp*



Experimente realizate la LNL → rezultate recente:

M. Ionescu-Bujor, A Iordachescu, N. Marginean,..

^{34}S: Phys. Rev. C 71, 014316 (2005)

^{31}P: Phys. Rev. C 73, 024310 (2006)

^{35}Cl-^{35}Ar: Phys. Rev. C 75, 034317 (2007)

Etapa 2008: ^{37}Cl

Etapa 2009: nuclee oglindă ^{31}P - ^{31}S

Obiectiv 1, etapa 2008: ^{37}Cl

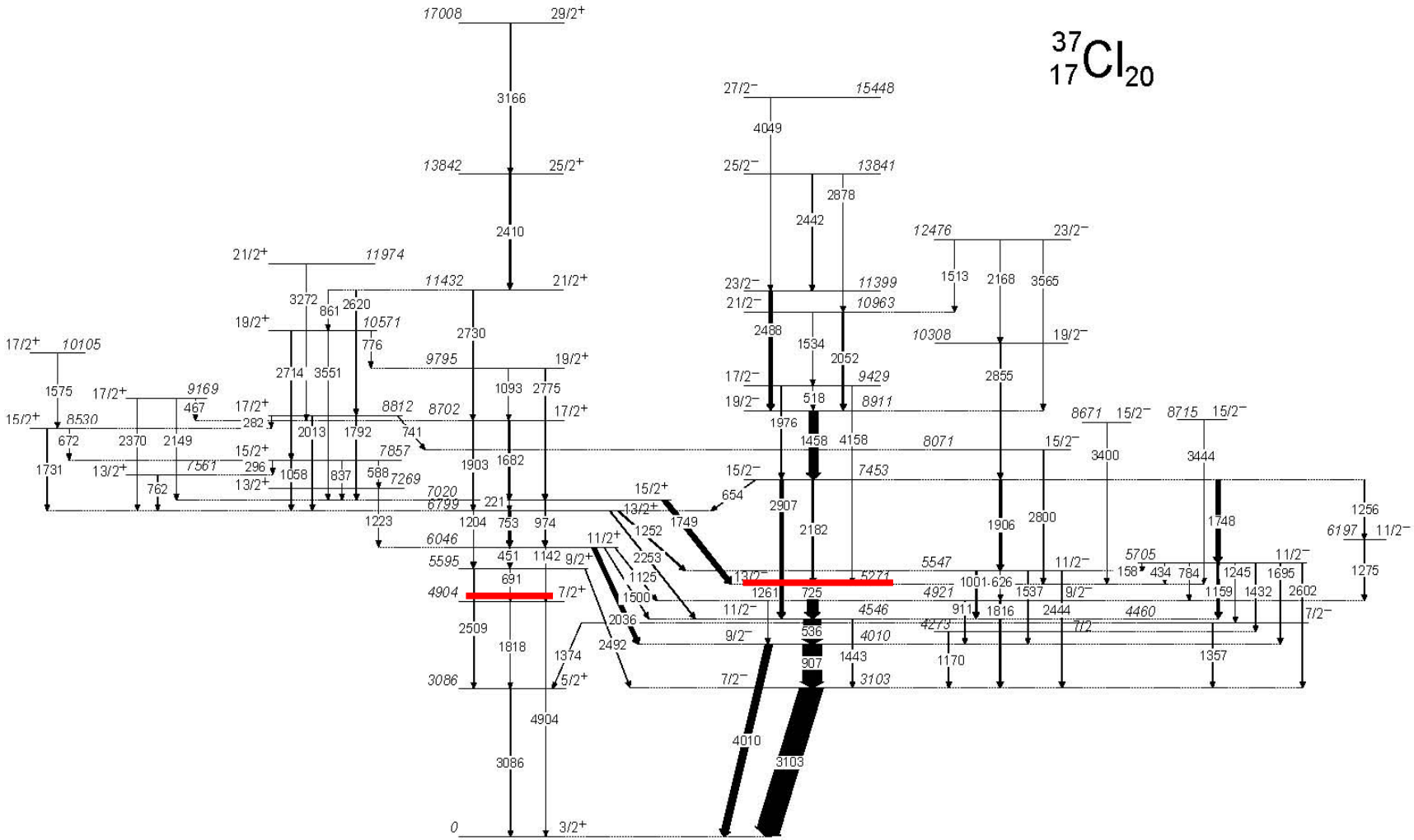
^{24}Mg(^{16}O,3p) @ 70 MeV LNL

28 nivele noi: spini, parități

66 tranziții noi: multipolarități

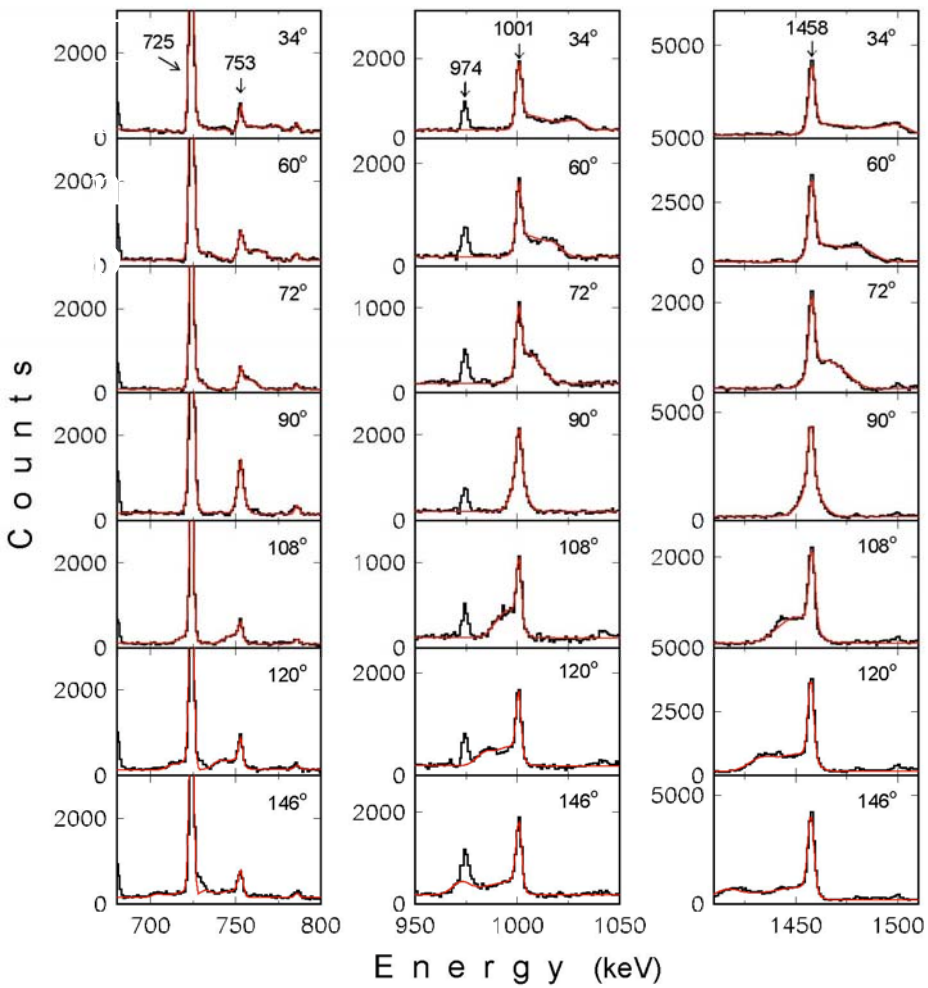
Detecție raze γ : sistemul multidetector GASP

Detecție particule încărcate: sistemul ISIS



Obiectiv 1, etapa 2008: ^{37}Cl

Metoda atenuării deplasării Doppler → Timpi de viață pentru 7 stări noi



E_x (keV)	I^π	$T_{1/2}$ (ps)
5547	$11/2^-_2$	0.14(5)
5705	$11/2^-_3$	0.16(5)
6799	$13/2^+_1$	0.41(7)
7453	$15/2^-_1$	0.13(4)
7857	$15/2^+_2$	0.85(15)
8812	$17/2^+_2$	0.38(11)
8911	$19/2^-_1$	0.68(8)

Obiectiv 1, etapa 2008: ^{37}Cl

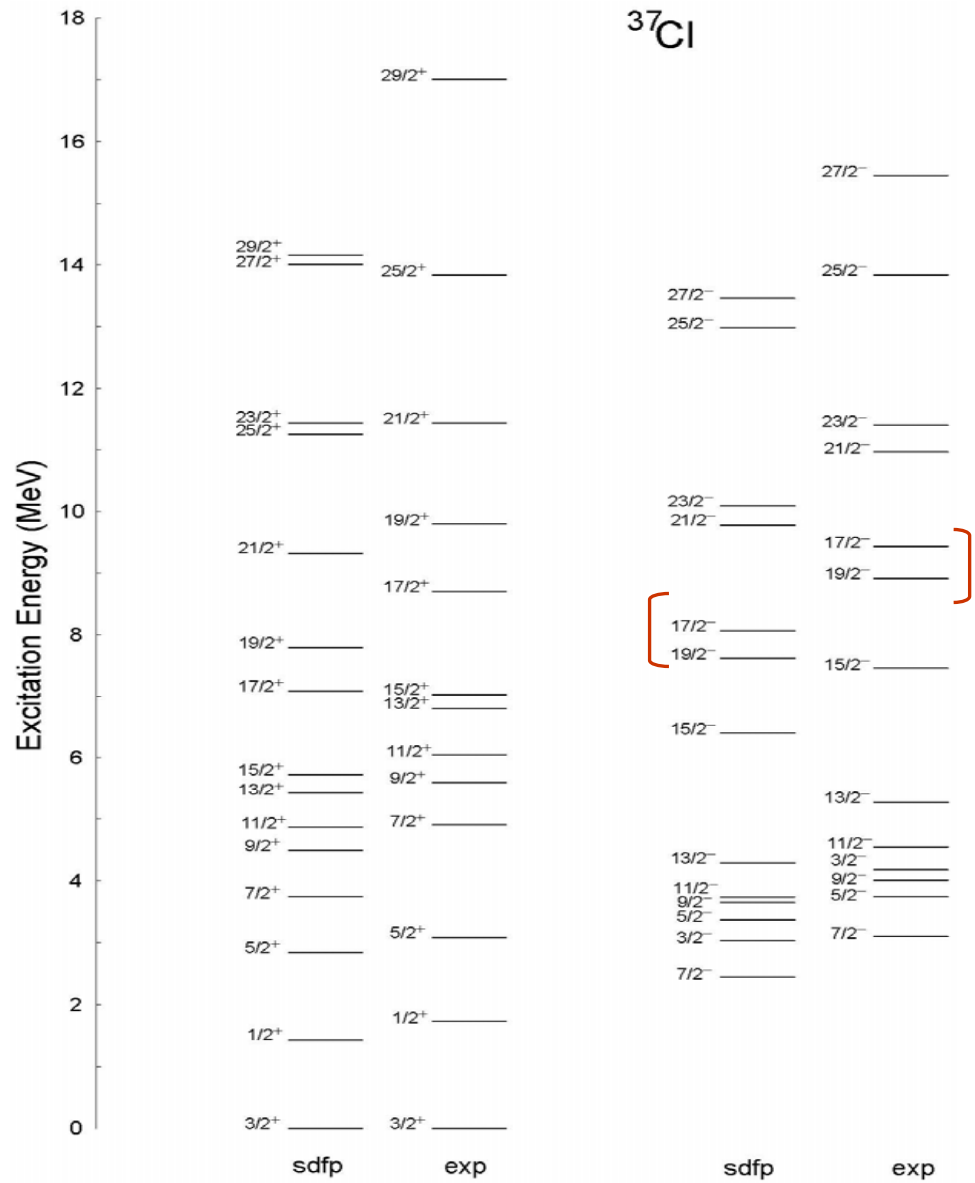
Calcule model pături în spațiu larg de configurații *sd - fp*

1. Codul ANTOINE
Interacția efectivă *sdfp*
Strasbourg-Madrid

2. Monte Carlo
Interacția efectivă SDPF-M
Tokio

1. ANTOINE *sdfp*
Funcții de undă ↔ excitații intrus $f_{7/2}$ $p_{3/2}$

➡ **Gap-ul *sd-fp* subevaluat**



Obiectiv 1, etapa 2008: ^{37}Cl

2. Calcule model pături Monte Carlo

orbitali $d_{5/2}$ $d_{3/2}$ $s_{1/2}$ $f_{7/2}$ $p_{3/2}$

Interacția efectivă SDPF- M

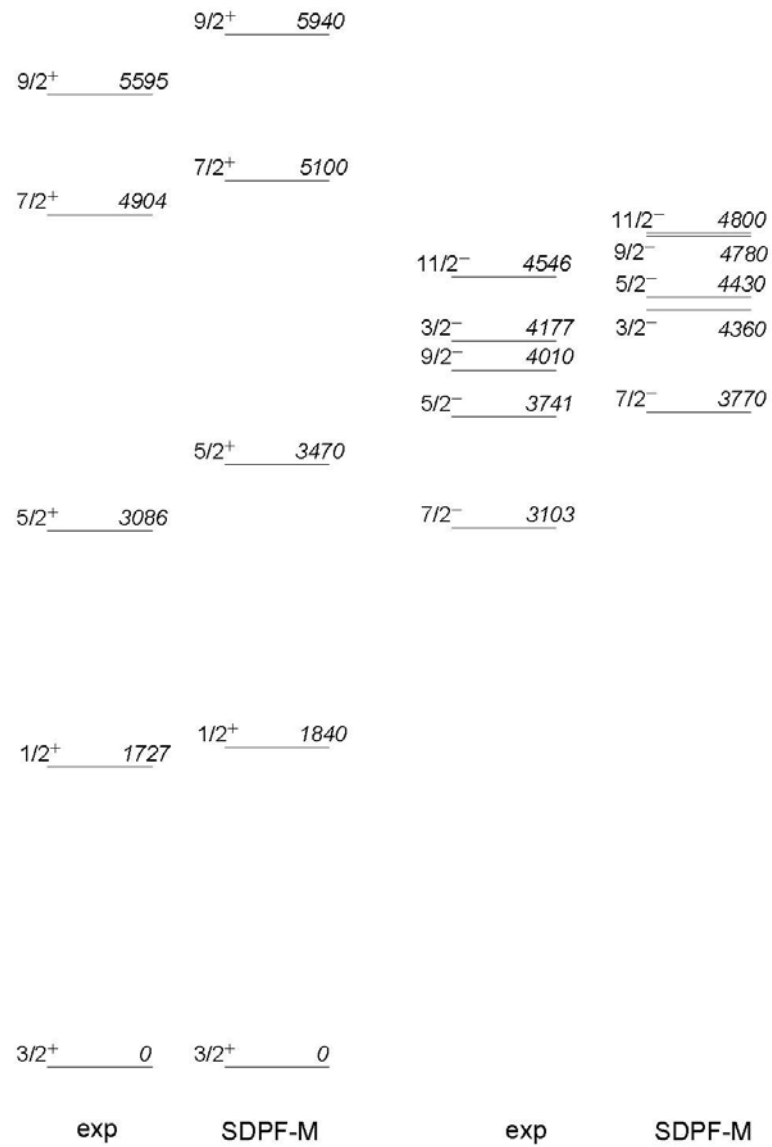
Funcții de undă ↔excitații intrus $f_{7/2}$ $p_{3/2}$

Gap-ul *sd-fp* supraevaluat

Imbunătățirea interacțiilor

sdfp (ANTOINE)

SDPF-M (Monte Carlo)



Obiectiv 1, etapa 2008: ^{37}Cl

B(M1), B(E2) **valori experimentale comparate cu valori teoretice calculate folosind codul ANTOINE şi interacția sdfp**

E^{exp}_{lev} (keV)	$T^{exp}_{1/2}$ (ps)	I^{π}	I^{π}_{f}	E^{exp}_{γ} (keV)	BR_{exp} %	$B(M1)(\mu^2_N)$ exp	$B(M1)(\mu^2_N)$ $sdfp$	$B(M1)(\mu^2_N)$ $sdfp_1$	$B(E2)(e^2fm^4)$ exp	$B(E2)(e^2fm^4)$ $sdfp$	$B(E2)(e^2fm^4)$ $sdfp_1$
3086	0.027(6)[a]	$5/2^+_1$	$3/2^+_1$	3086	100	0.032(7)	0.029	0.037	26(7)	35	38
4904	0.024(11)[a]	$7/2^+_1$	$5/2^+_1$	1818	21(7)	0.056(3)	0.009	0.003			
			$3/2^+_1$	4904	79(8)				7(4)	5	3
6799	0.41(7)[b]	$13/2^+_1$	$11/2^+_1$	753	52(2)	0.117(29)	0.109	0.145			
			$9/2^+_1$	1204	10(2)				54(16)	37	36
7020	2.1(11)[a]	$15/2^+_1$	$13/2^+_1$	221	4(1)	0.070(39)	0.001	0.002			
			$11/2^+_1$	974	10(2)				55(32)	31	31
7857	0.85(15)[b]	$15/2^+_2$	$13/2^+_1$	1058	79(9)	0.031(8)	0.236	0.235			
8812	0.38(11)[b]	$17/2^+_2$	$15/2^+_1$	1792	47(9)	0.008(5)	0.039	0.038	3(2)	6	3
			$13/2^+_1$	2013	40(5)				18(7)	43	32
4273	0.075(30)[a]	$7/2^-_2$	$7/2^-_1$	1170	100	0.336(174)	1.069	1.183	12(6)	17	9
4460	0.055(20)[a]	$7/2^-_3$	$7/2^-_1$	1357	59(8)	0.164(66)	0.001	0.115			
4010	23(2)[a]	$9/2^-_1$	$7/2^-_1$	907	73(4)	0.0013(2)	0.036	0.049	6(1)	4	5
4921	0.055(30)[a]	$9/2^-_2$	$9/2^-_1$	911	26(6)	0.247(143)	0.000	0.008			
			$7/2^-_1$	1817	74(9)	0.089(50)	0.002	0.002			
4546	2.4(7)[a]	$11/2^-_1$	$9/2^-_1$	536	96(5)	0.103(60)	0.158	0.151			
			$7/2^-_1$	1443	4(1)				1.5(6)	0.0	0.4
5547	0.14(5)[b]	$11/2^-_2$	$11/2^-_1$	1001	54(3)	0.152(61)	0.099	0.001			
			$9/2^-_2$	626	3(1)	0.034(17)	0.073	0.071			
			$9/2^-_1$	1537	9(3)	0.007(3)	0.016	0.095			
			$7/2^-_1$	2444	34(8)				16(7)	48	21
5705	0.16(5)[b]	$11/2^-_3$	$11/2^-_2$	158	0.8(3)	0.506(295)	0.836	1.024			
			$11/2^-_1$	1159	48(2)	0.076(25)	0.071	0.074			
			$9/2^-_2$	784	6(2)	0.029(15)	0.064	0.652			
			$9/2^-_1$	1695	18(2)	0.009(4)	0.035	0.056	1.3(7)	1.4	1.2
			$7/2^-_3$	1245	3(1)				39(15)	1.8	2.6
			$7/2^-_2$	1432	7(10)				44(17)	36	6
			$7/2^-_1$	2602	14(2)				4(2)	0.4	9
5271	2.4(6)[a]	$13/2^-_1$	$11/2^-_1$	725	94(2)	0.040(12)	0.166	0.148	13(5)	16	17
			$9/2^-_1$	1261	6(2)				3(1)	10	11
7453	0.13(4)[b]	$15/2^-_1$	$13/2^-_1$	2182	12(2)	0.003(1)	0.000	0.001	0.4(2)	0.003	0.2
			$11/2^-_4$	1256	3(1)				42(15)	7	33
			$11/2^-_3$	1748	35(3)				92(33)	20	11

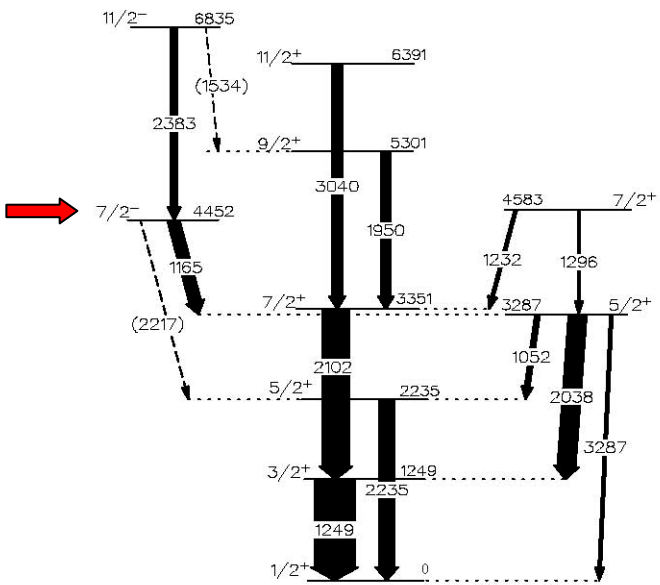
[redacted]

[a] $T_{1/2}$ P.M. Endt, Nucl. Phys. A 633,1 (1998)
[b] $T_{1/2}$ lucrarea prezentă

Obiectiv 1, etapa 2009: nuclee oglindă ^{31}S – ^{31}P

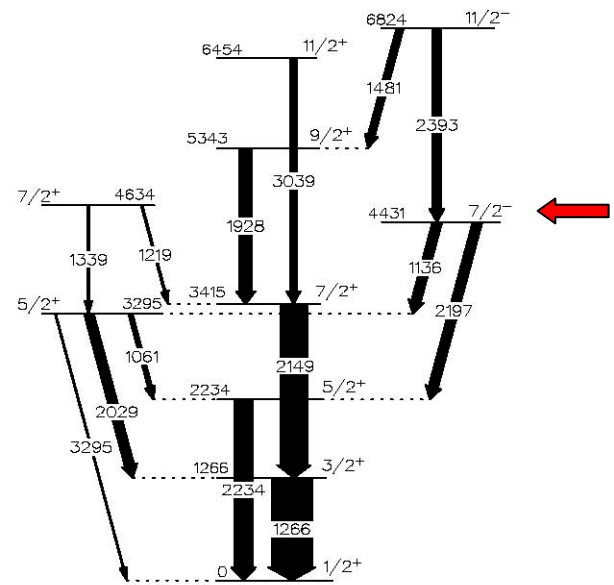
***Z* = 16 *N* = 15**

^{31}S



***Z* = 15 *N* = 16**

^{31}P



Simetria de izospin

- **Energii de excitație stări analoage**
- **Tranziții B(E1)**

Obiectiv 1, etapa 2009: nuclee oglindă ^{31}S – ^{31}P

Măsurători de timpi de viață pentru stări analoage

2 Experimente realizate la LNL ↔ metoda atenuării deplasării Doppler

$^{24}Mg(^{16}O,2\alpha p)^{31}P$ @ 70 MeV → M. Ionescu-Bujor *et al.*, Phys. Rev. C 73, 024310 (2006)

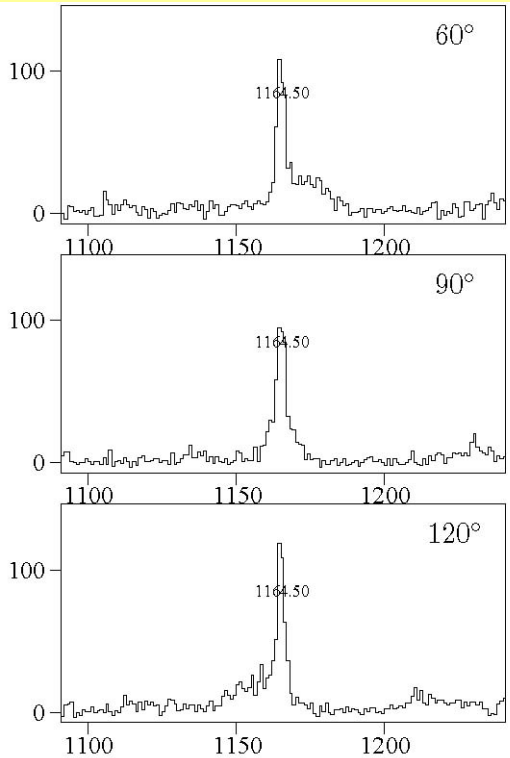
$^{24}Mg(^{16}O,2\alpha n)^{31}S$

$^{12}C(^{20}Ne,p)^{31}P$ @ 33 MeV

$^{12}C(^{20}Ne,n)^{31}S$

Analiza datelor experimentale – în curs

^{31}S 1164.5 keV $7/2^- \rightarrow 5/2^+$ E1



Obiectiv 2, etapa 2009: momente statice în nuclee neutrono-deficitare de Pb

^{208}Pb **$Z = 82$ $N = 126$** ***$N \rightarrow 100$*** **structura complexă**

- **coexistența de forme** - **stări sferice**
  - **stări deformate: oblate , prolate**
  - **stări superdeformate**
- **rotația magnetică**
- **stări izomere → momente magnetice → configurații**
  momente electrice cuadrupolare → forma nucleară

Program experimental propus şi realizat de echipa proiectului

LNL - colaborare internațională → rezultate recente:

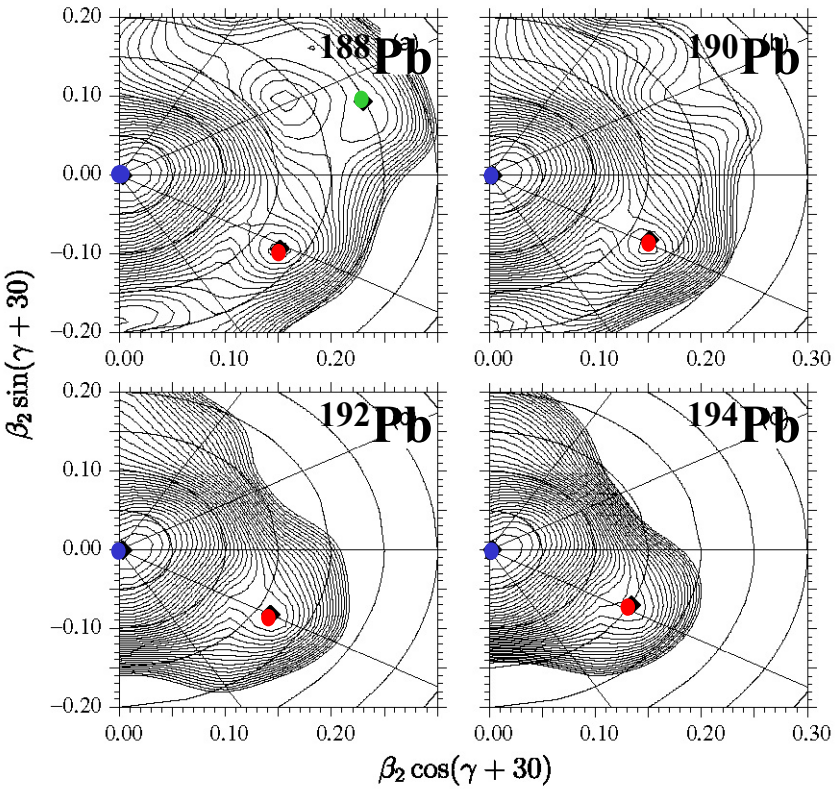
M. Ionescu-Bujor, A Iordachescu, N. Marginean, G. Suliman, G. Ilie *et al.*,

^{193}Pb → Phys. Rev. C 70, 034305 (2004)
^{192,194}Pb → Phys. Lett. B 650, 141 (2007)

Obiectiv 2, etapa 2009:

Coexistența de forme în nuclee de Pb

Modele câmp mediu



D. Karlgren et al., Phys. Rev. C 73, 064304 (2006)
M. Bender et al., Phys. Rev. C 69, 64303 (2004)

Modelul păturilor-excitații protonice intrus

Stări sferice 0*p*-0*h*

$\nu 1i_{13/2}$ $3p_{1/2}$ $3p_{3/2}$ $2f_{5/2}$

izomeri 12^+

Stări oblate 2*p*-2*h*

$\pi 1i_{13/2}$ $1h_{9/2}$

Izomeri 11^-

Stări prolate 4*p*-4*h*

$\pi 1i_{13/2}$ $1h_{9/2}$ $1h_{9/2}$ $1i_{3/2}$

Izomeri 8^-

V. Hellemans et al., Phys. Rev. C 71, 034308 (2005)

Obiectiv 2, etapa 2009: momente statice ^{193}Pb ^{188}Pb

Experimente - fascicol pulsat: spectroscopie γ
izomeri - timpi de viață
distribuții unghiulare perturbate (TDPAD)

^{193}Pb spectroscopie γ, timpi de viață, interacție electrică cuadrupolară în gradient câmp electric Hg solid T=170K

^{170}Er(^{28}Si,5n)^{193}Pb @ 143 MeV

Fascicol pulsat - impuls 2 ns
- repetiție 800 ns

Tinta: ^{170}Er 0.7 mg/cm^2
Detectori - HPGe planari 0° si 90°
Nucleele ^{193}Pb implantate în Hg solid

^{188}Pb interacție magnetică H_{ext}=19 kG

^{164}Er(^{28}Si,4n)^{188}Pb @ 143 MeV

Fascicol pulsat - impuls 2 ns
- repetiție: 3.2, 6.4 μs

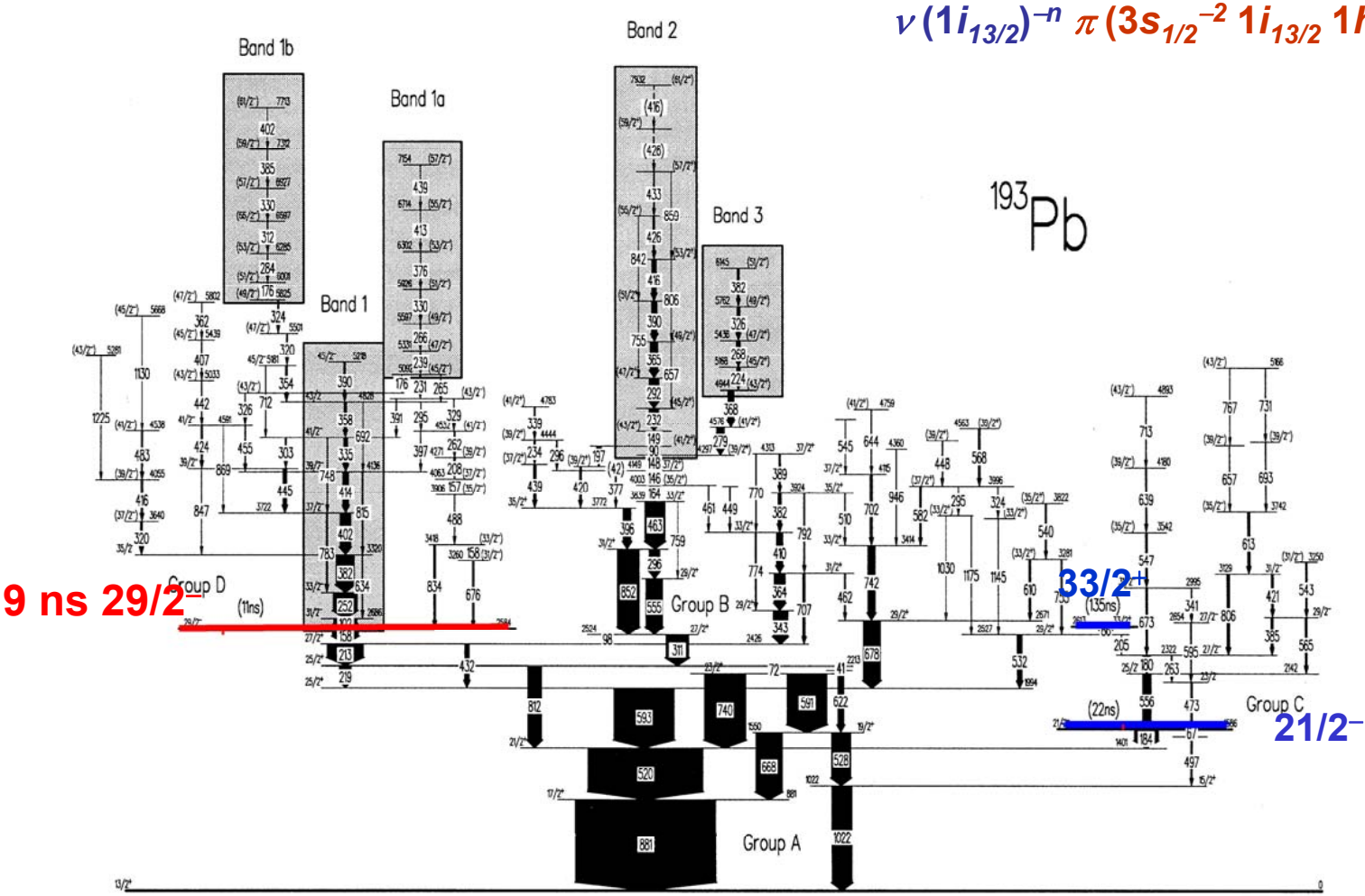
Tinta: ^{164}Er 1 mg/cm^2
Detectori - HPGe planari şi volum mare
Nucleele ^{188}Pb implantate în Pb

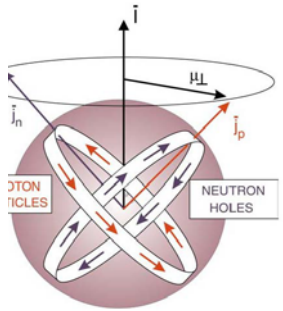
Dificultăți: - secțiuni mici de populare a stărilor izomere
- pondere mare a fisiunii nucleului compus 40-60%

Obiectiv 2, etapa 2009: ^{193}Pb

Investigarea proprietăților stării izomere de 9 ns, cap de bandă de rotație magnetică

$\nu\,(1i_{13/2})^{-n}\ \pi\,(3s_{1/2}^{-2}\ 1i_{13/2}\ 1h_{9/2})$





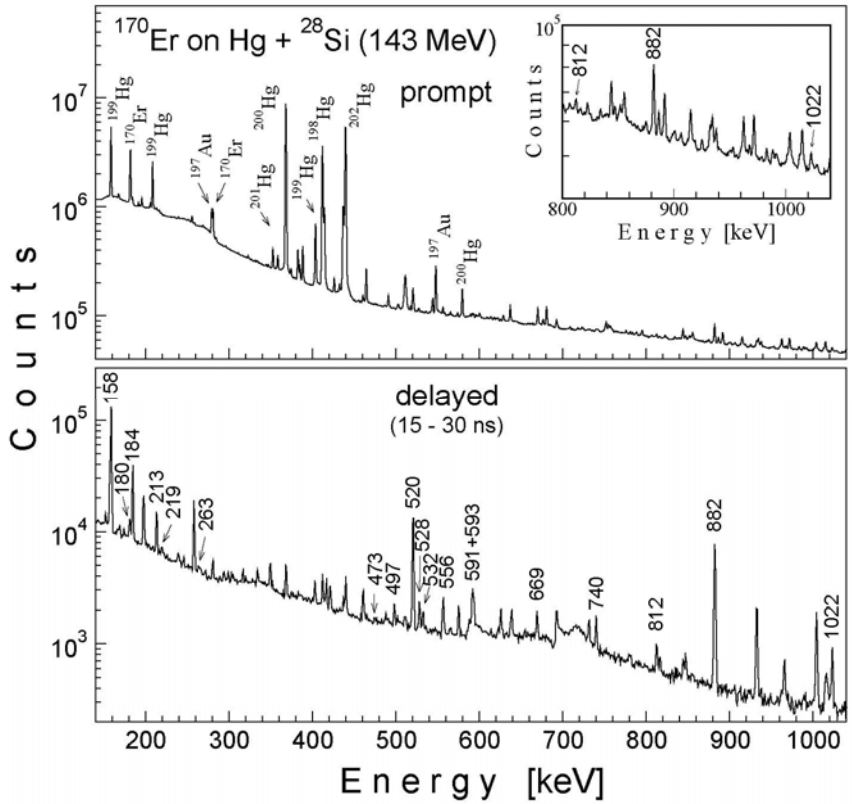
G. Baldsiefen et al., Phys. Rev. C 54, 1106 (1996)

Obiectiv 2, etapa 2009: ^{193}Pb

Distribuții unghiulare →

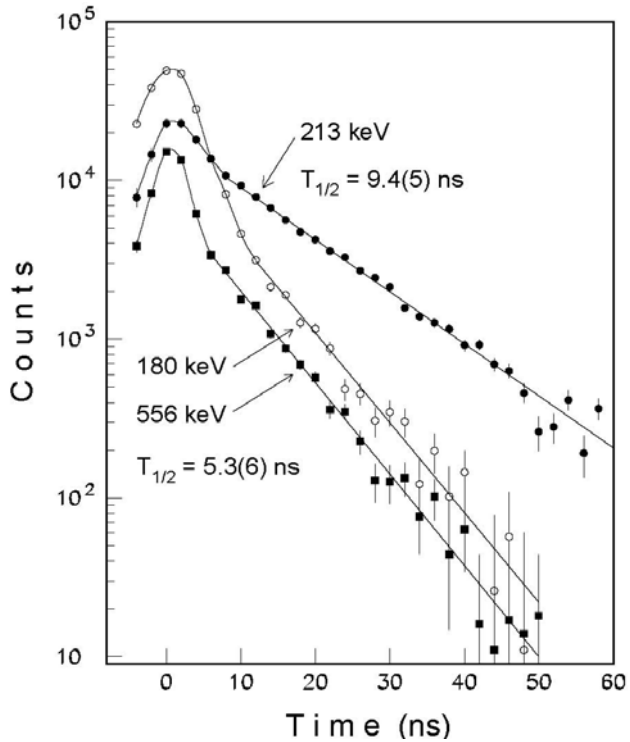
Spinul capului de bandă RM

~~29/2⁻~~ → 27/2⁻



Identificarea unei noi stări izomere

$T_{1/2}$=5.3 ns

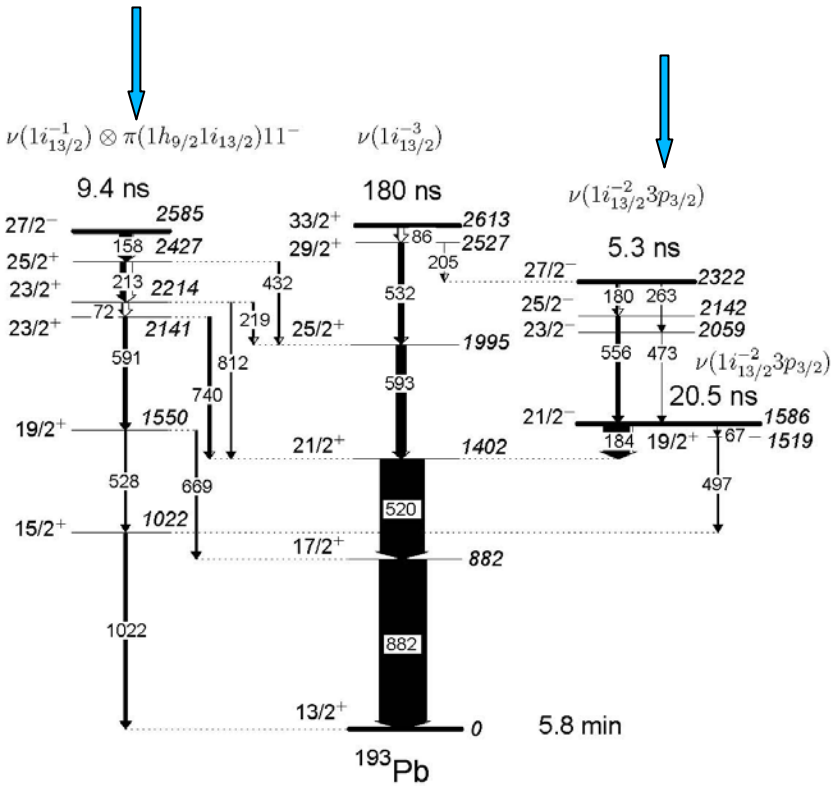


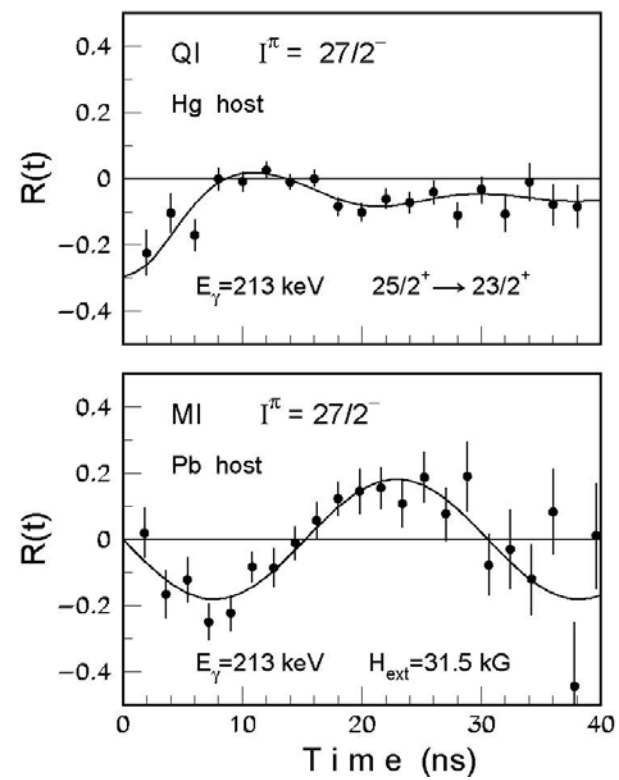
Obiectiv 2, etapa 2009: ^{193}Pb

27/2⁻ 9.4 ns $\nu(1i_{13/2})^{-1}\pi(1i_{13/2}\,1h_{9/2})11^-$ **$|Q_s|$ = 2.6(3) eb**

27/2⁻ 5.3 ns $\nu(1i_{13/2}{}^{-2}\,3p_{3/2})$ **$|Q_s|$ < 0.5 eb**

Primul moment electric cuadrupolar măsurat → bandă de rotație magnetică





Obiectiv 2, etapa 2009: momente cuadrupolare statice în Pb

Comparația Q_s experimental – calcule PQTAC

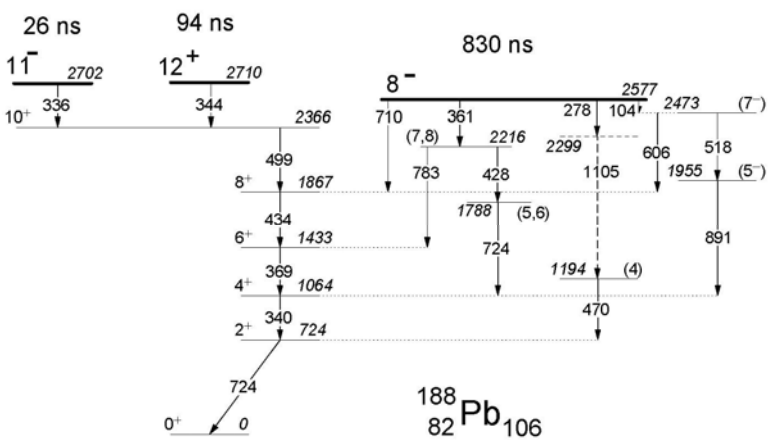
Nucleu	I^π	E_x (keV)	$T_{1/2}$ (ns)	Configurație	$\|Q_s\|_{exp}(eb)$	Q_s(TAC)(eb)
^{192}Pb	12^+	2623	1100	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	**0.32(4)**	+0.36
	11^-	2743	755	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	**2.9(3)**	−2.91
^{193}Pb	$13/2^+$	x	5.8 min	$\nu(1i_{13/2}^{-1})$	0.195(10)	+0.25
	$21/2^-$	1586+x	20.5	$\nu(1i_{13/2}^{-2}3p_{3/2})$	**0.22(2)**	+0.26
	$27/2^-$	2322+x	5.3	$\nu(1i_{13/2}^{-2}3p_{3/2})$	$\leq$ **0.5**	+0.32
	$27/2^-$	2584+x	9.4	$\nu(1i_{13/2}^{-1})\otimes\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})11^-$	**2.6(3)**	−2.40
	$33/2^+$	2613+x	180	$\nu(1i_{13/2}^{-3})$	**0.45(4)**	+0.46
^{194}Pb	12^+	2628	350	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	**0.48(3)**	+0.49
	11^-	2933	133	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	**3.6(4)**	−2.81
^{195}Pb	$13/2^+$	203	15 min	$\nu(1i_{13/2}^{-1})$	0.306(15)	+0.33
^{196}Pb	12^+	2694	270	$\nu(1i_{13/2}^{-2})$	0.65(5)	+0.70
	11^-	3191	72	$\pi(1h_{9/2}1i_{13/2})$	3.6(6)	−3.00

- **Stările neutronice → Q_s valori mici ↔ sfericitate**
- **Excitația protonică intrus → Q_s valori mari ↔ deformare**
- **Deformarea benzii de rotație magnetică β_2=–0.11**

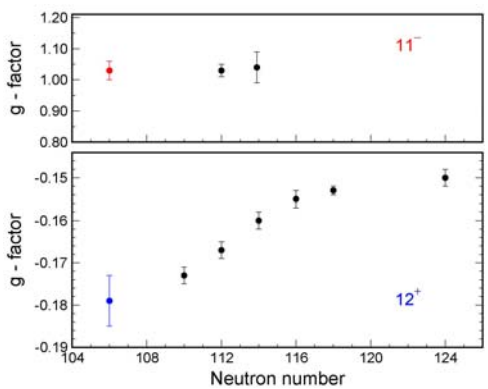
Obiectiv 2, etapa 2009: ^{188}Pb

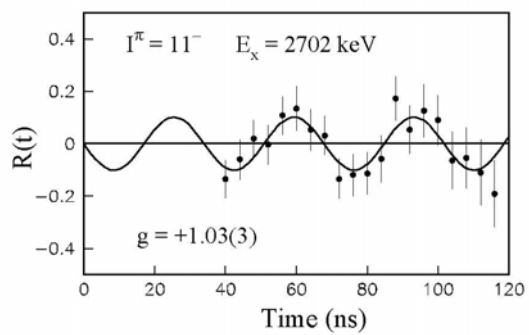
Măsuratori factori g – metoda TDPAD

3 stări izomere ↔ coexistența triplă

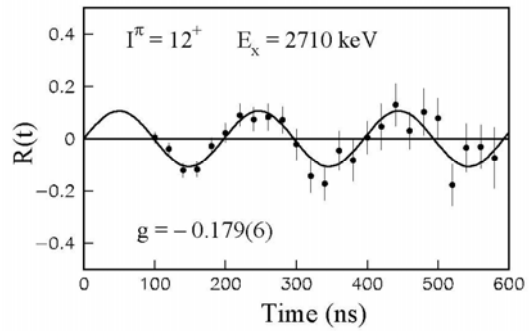


factor g 11⁻, 12⁺ → variația cu N

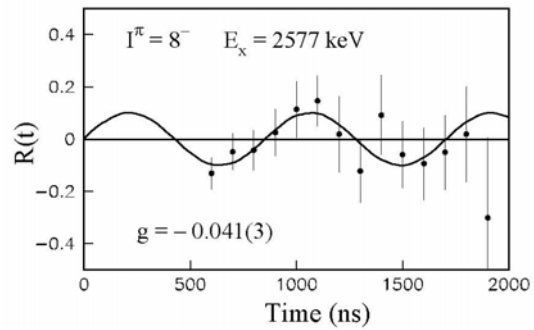




11⁻ oblate $\pi(1i_{13/2}\,1h_{9/2})$



12⁺ sferic $\nu(1i_{13/2})^2$



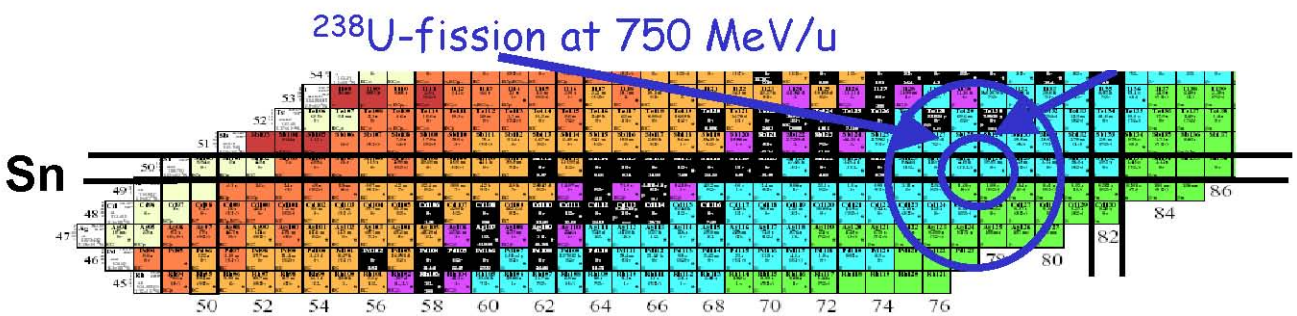
8⁻ prolate $\nu(1i_{13/2}\,1h_{9/2}^{-1})$

8⁻ →primul factor g →stare deformată prolate

Obiectiv 3, etapa 2010: stări izomere în produşi de fisiune

GSI - Fascicole izomerice populate în fisiunea ^{238}U

- Tinta ^{9}Be 1 g/cm^2



New sub-μs isomers in $^{125,127,129}Sn$ and isomer systematics of $^{124-130}Sn$

…G. Ilie, M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, et al.,

Phys. Rev. C 77, 064313 (2008)

Obiectiv 3, etapa 2010: stări izomere în produşi de fisiune

GSI Fisiunea ^{238}U

→ studiul alinierii spinilor

→ determinări de momente magnetice în nuclee de Sn bogate în neutroni

LNL Fisiunea nucleelor neutrono-deficitare de Pb

$^{170}Er + ^{28}Si \rightarrow ^{198}Pb$

$^{168}Er + ^{28}Si \rightarrow ^{196}Pb$

$^{164}Er + ^{28}Si \rightarrow ^{192}Pb$

→ Izomeri de viață scurta ns, μs - produşi de fisiune

Participarea membrilor echipei la realizarea obiectivelor proiectului

Cercetătorii cu experienţă → obiectivele 1, 2, 3

Gabriel Suliman → obiectivul 2

Pregătirea şi realizarea experimentelor la LNL

Sortarea datelor list-mode, crearea matricilor şi a spectrelor de interes

Analiza datelor TDPAD

Gabriela Ilie → obiectivul 3

Pregătirea şi realizarea experimentelor la GSI

Analiza complexă a datelor experimentale

→ Formarea unei echipe de tineri cercetatori - în domeniul momentelor nucleare

- implementarea metodei TDPAD la Tandemul IFIN-HH

Lucrări ISI:

1. New sub-μs isomers in ^{125,127,129}Sn and isomer systematics of $^{124-130}$Sn
   …G. Ilie, M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, ..
   Phys. Rev. C 77, 064313 (2008).

2. High spin structure of ^{37}Cl, intruder excitations and the sd-fp shell gap
   M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, .. N.Marginean, ..
   Phys. Rev. C 80, 034314 (2009).

3. g factors of coexisting isomeric states in ^{188}Pb
   M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, G. Suliman, N. Marginean, ..
   Trimisă la Phys. Rev. C.

4. Isomerism of low-lying states in ^{86}Y
   .. N. Marginean, M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, G. Suliman, ..
   Trimisă la Eur. Phys. J. A.

5. g factor of the 7^- isomer in ^{126}Sn and first observation of spin-alignment in relativistic fission
   G. Ilie, M. Ionescu-Bujor, ...
   Trimisă la Phys. Lett. B.

6. Spin, quadrupole moment and deformation of the magnetic rotational bandhead in ^{193}Pb
   M. Ionescu-Bujor, A. Iordachescu, G. Suliman, N. Marginean, ..
   Redactată, va fi trimisă la Phys. Lett. B.