



# *Współpraca n\_TOF – osiągnięcia i plany*

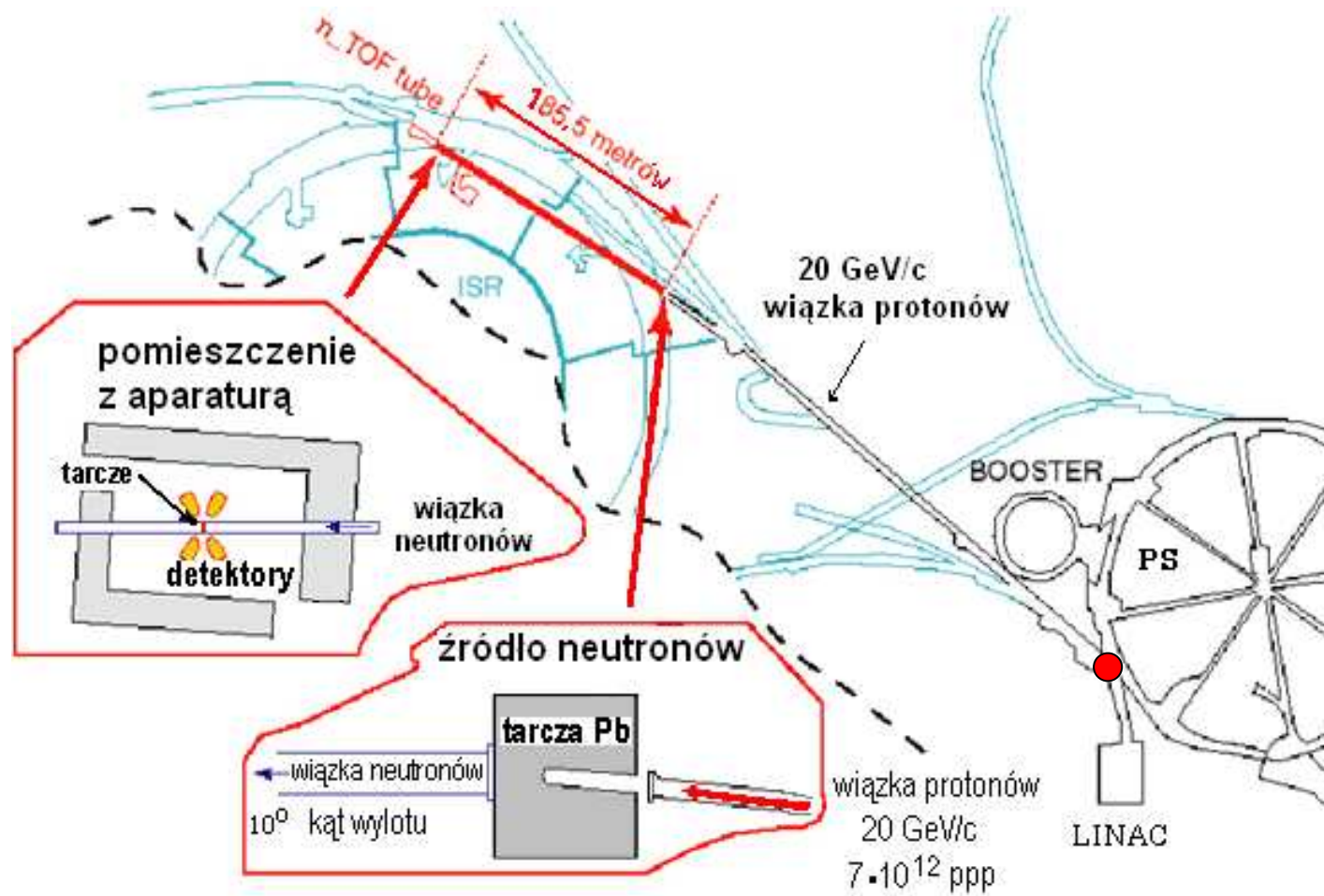
Józef Andrzejewski

Zakład Fizyki Jądrowej  
Uniwersytet Łódzki









Widok magnesu „wymiatającego“ naładowane cząstki lecące razem z neutronami



# n\_TOF basic parameters

proton beam momentum	20 GeV/c
intensity (dedicated mode)	$7 \times 10^{12}$ protons/pulse
repetition frequency	1 pulse/2.4s
pulse width	6 ns (rms)
n/p	300
lead target dimensions	80x80x60 cm <sup>3</sup>
cooling & moderation material	H <sub>2</sub> O
moderator thickness in the exit face	5 cm
neutron beam dimension in EAR-1 (capture mode)	2 cm (FWHM)

# Eksperymenty n\_TOF w latach 2002- 2004

- **P**omiary neutronowych przekrojów czynnych istotnych dla transmutacji odpadów jądrowych i technologii jądrowych
  - Th/U cykl paliwowy (wychwyty & rozszczepienie)
  - transmutacja MA (wychwyty & rozszczepienie)
  - transmutacja PR (wychwyty)
- **P**rzekroje czynne istotne dla astrofizyki jądrowej
  - proces s: rozgałęzienia ( $\lambda_\beta \approx \lambda_{(n,\gamma)}$ )
  - proces s: ziarna z początków Układu Słonecznego
  - Proces p: metoda reszkowa
- **N**eutrony jako sondy w badaniach podstawowych fizyki jądrowej
  - gęstość poziomów jądrowych & oddziaływania n-jądro
  - fotonowa funkcja nasilenia

# Eksperymenty n\_TOF, 2002-4

## Wychwyty

$^{151}\text{Sm}$

$^{204,206,207,208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$

$^{232}\text{Th}$

$^{24,25,26}\text{Mg}$

$^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Zr}$

$^{139}\text{La}$

$^{186,187,188}\text{Os}$

$^{233,234}\text{U}$

$^{237}\text{Np}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$

## Rozszczepienie

$^{233,234,235,236,238}\text{U}$

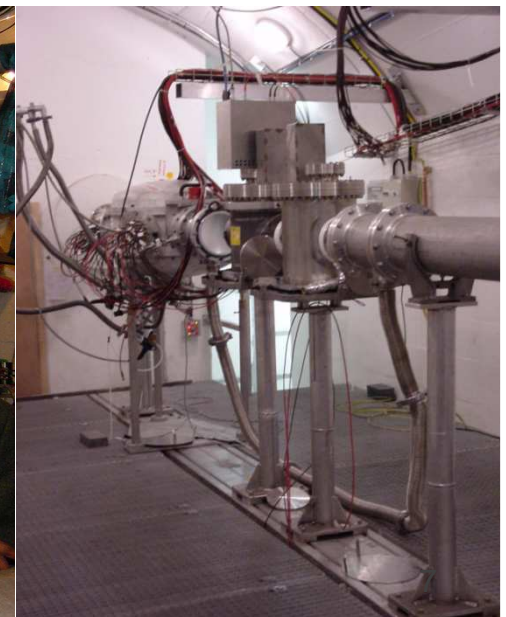
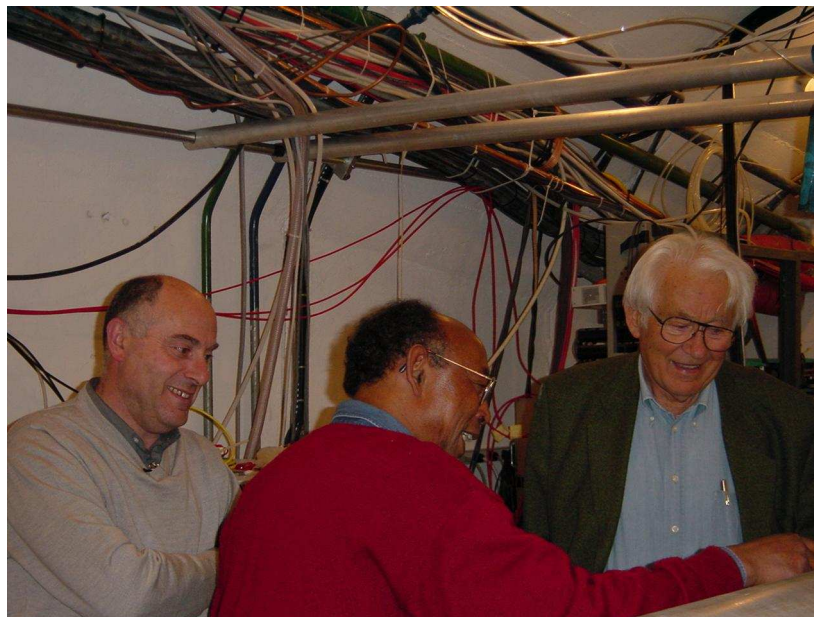
$^{232}\text{Th}$

$^{209}\text{Bi}$

$^{237}\text{Np}$

$^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{245}\text{Cm}$

- zakończona analiza danych, wyniki opublikowane
- zakończona analiza danych, publikacje przygotowywane
- kontynuacja analizy danych





# 204,206,207Pb

Pomiary rezonansów w bardzo szerokim przedziale energii neutronów.

Bardzo dokładne określenie szerokości rezonansów neutronowych.

Dla niskich energii neutronów występuje zgodność wyników z poprzednimi pomiarami.

C. Domingo-Pardo, *et al.*  
4 artykuły opublikowane w  
*Phys. Rev. C* **74, 75, 76, 77** (2006-2007)

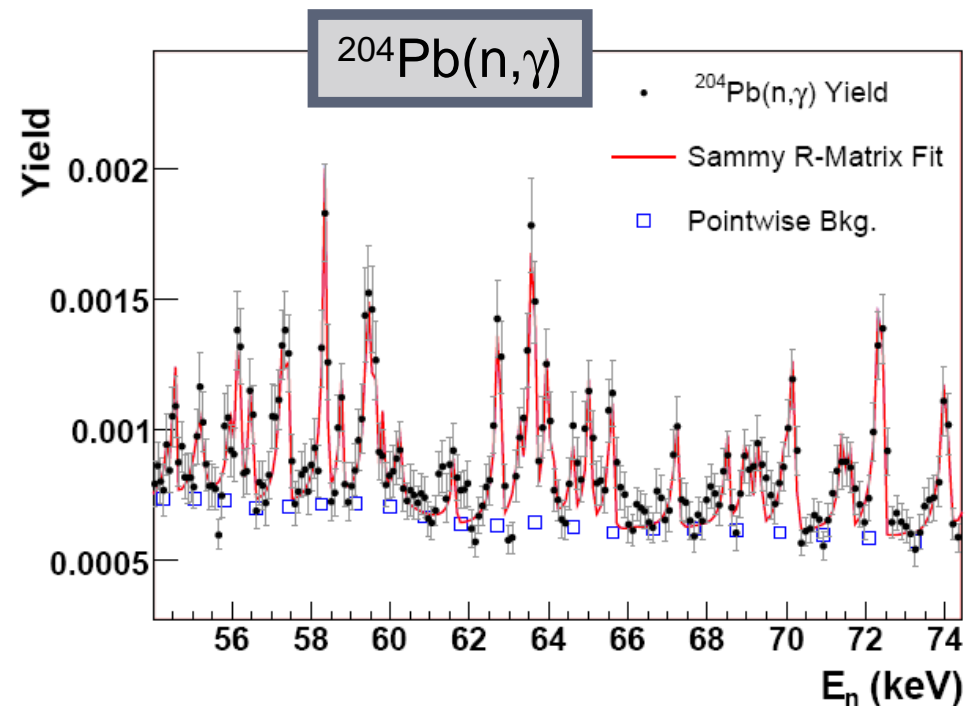
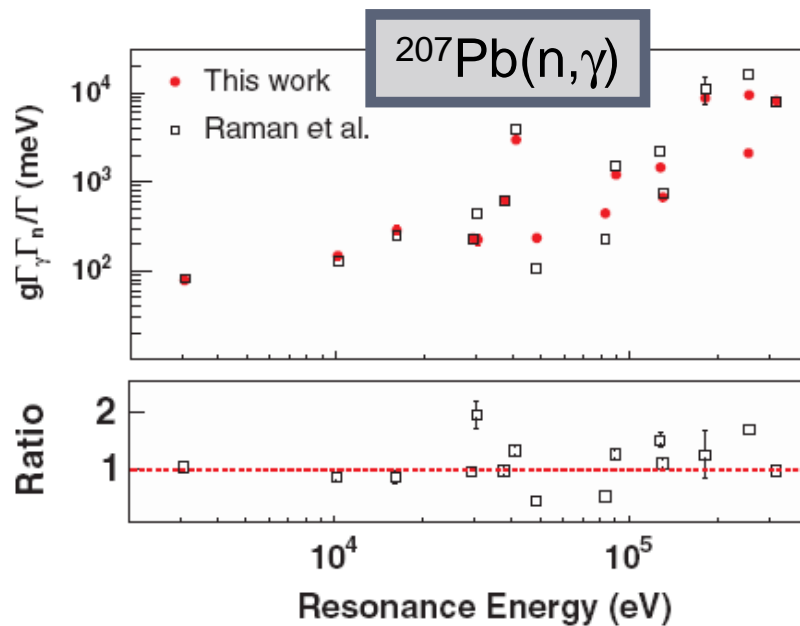
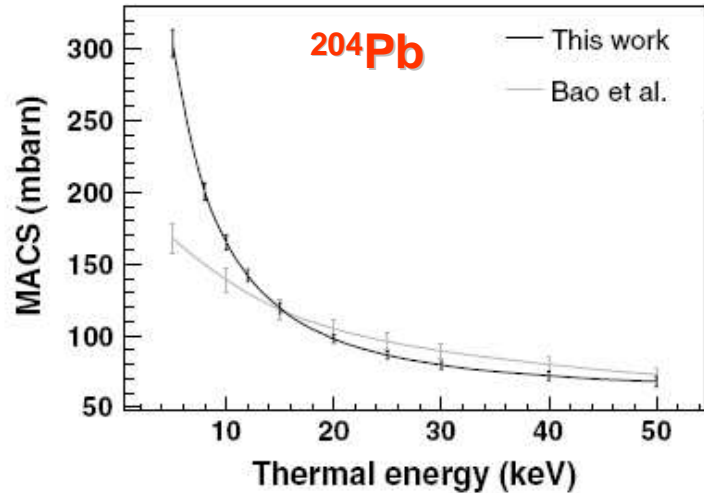




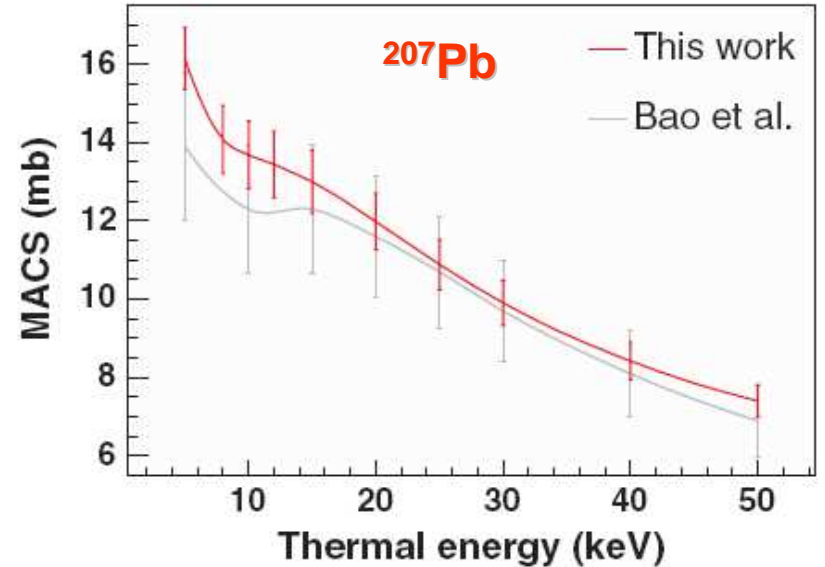
TABLE IV: Average neutron capture cross section for  $^{204}\text{Pb}$ .

$E_{\text{low}}$ (keV)	$E_{\text{high}}$ (keV)	Cross section (barn)	Statistical uncertainty <sup>a</sup> (%)
88.210	92.404	0.059	9
92.404	96.748	0.059	5
96.748	101.406	0.058	11
101.406	106.408	0.057	8
106.408	111.790	0.057	7
111.790	117.591	0.056	8
117.591	123.855	0.056	7
123.855	130.634	0.055	7
130.634	137.985	0.054	6
137.985	145.974	0.054	6
145.974	154.678	0.053	6
154.678	164.185	0.053	7
164.185	174.596	0.052	7
174.596	186.030	0.051	6
186.030	198.625	0.051	5
198.625	212.544	0.050	5
212.544	227.981	0.049	5
227.981	245.162	0.049	5
245.162	264.363	0.048	4
264.363	285.911	0.047	4
285.911	310.207	0.046	4
310.207	337.739	0.046	4
337.739	369.107	0.045	4
369.107	405.060	0.044	4
405.060	443.512	0.043	3


 TABLE II: Resonance parameters and radiative kernels from the analysis of the  $^{207}\text{Pb}(n,\gamma)$  data measured at n\_TOF<sup>a</sup>.

$E_o$ (eV)	$l$	$J$	$\Gamma_n$ (meV)	$\Gamma_\gamma$ (meV)	$g\Gamma_\gamma\Gamma_n/\Gamma$ (meV)
3064.700(3)	1	2	111.0(8)	145.0(9)	78.6(9)
10190.80(4)	1	2	656(50)	145.2(12)	149(14)
16172.80(10)	1	2	1395(126)	275(3)	287(30)
29396.1	1	2	16000	189(7)	234(9)
30485.9(5)	1	1	608(45)	592(50)	225(30)
37751(3)	1	1	$50 \times 10^3$	843(40)	620(30)
41149(46)	0	1	$1.220 \times 10^6$	3970(160)	2970(120)
48410(2)	1	2	1000	230(20)	235(20)
82990(12)	1	2	$29 \times 10^3$	360(30)	444(30)
90228(24)	1	1	$272 \times 10^3$	1615(100)	1200(80)
127900	1	1	$613 \times 10^3$	1939(150)	1449(120)
130230	1	1	$87 \times 10^3$	900(80)	675(60)
181510(6)	0	1	$57.3 \times 10^3$	14709(500)	8780(300)
254440	2	3	$111 \times 10^3$	1219(90)	2110(150)
256430	0	1	$1.66 \times 10^6$	12740(380)	9482(280)
317000	0	1	$850 \times 10^3$	10967(480)	8120(350)

<sup>a</sup>Orbital angular momenta  $l$  and resonance spins  $J$  are from Bao et al. [17]

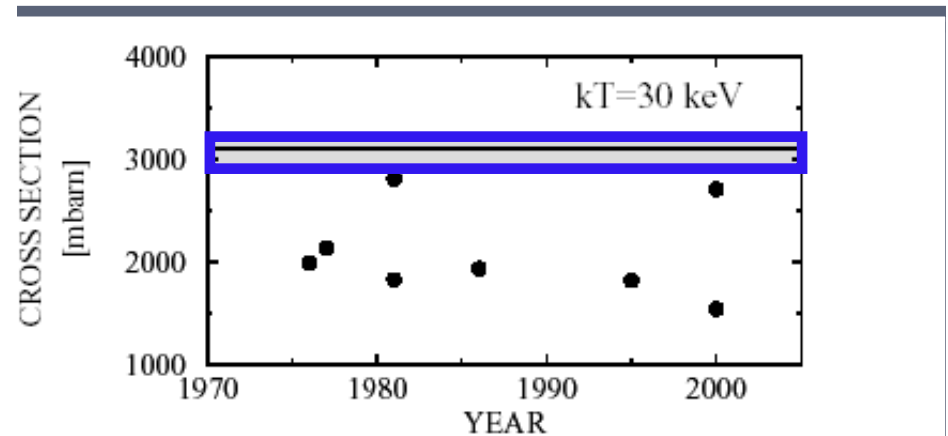
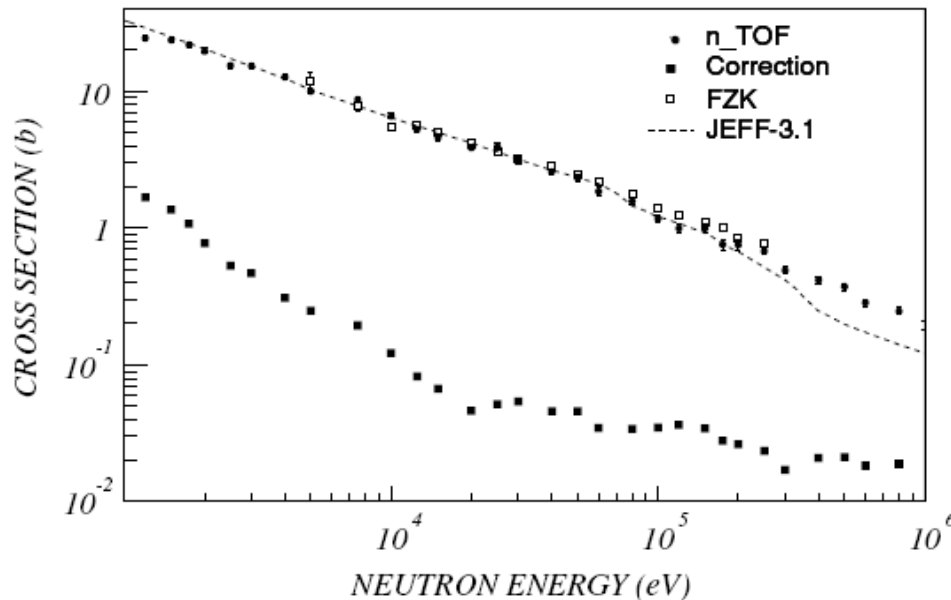
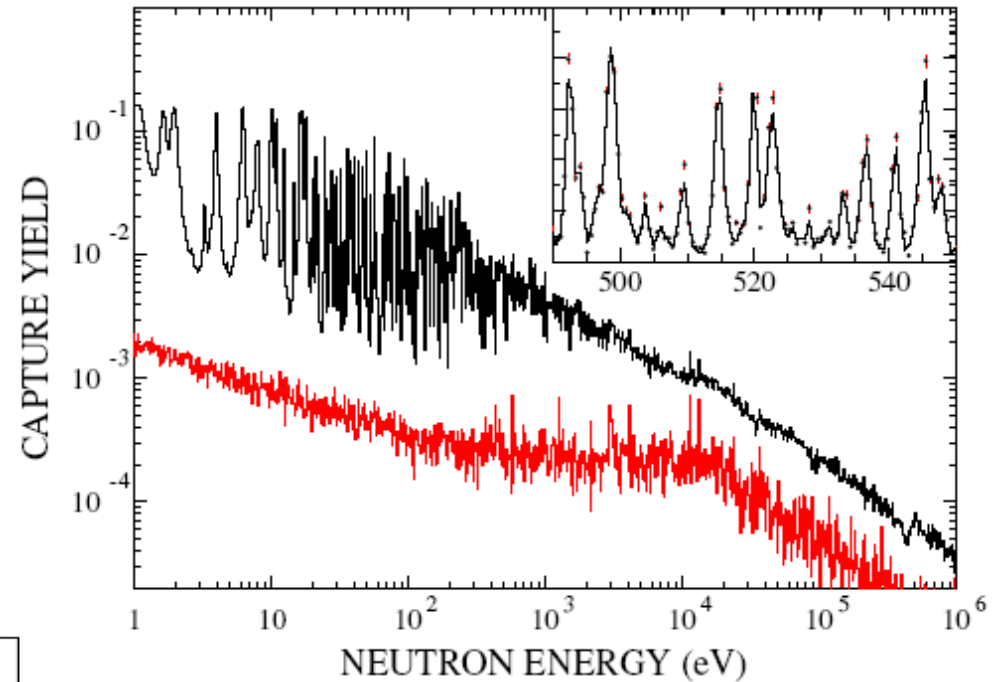




# $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$

U Abbondanno *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **93** (2004), 161103  
S Marrone *et al.*  
Phys. Rev. C **73** 03604 (2006)

$\langle D_0 \rangle = 1.49 \pm 0.07$  eV  
 $S_0 = (3.87 \pm 0.33) \times 10^{-4}$   
 $R_1 = 3575 \pm 210$  mb  
uśredniony przekrój czynny  
zmierzony do energii 1 MeV



MACS (30 keV) =  $3100 \pm 160$  mb

TABLE IX. The  $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$  cross section in the unresolved resonance region from 1 keV to 1 MeV.

Energy bin (keV)	$\sigma_{(n,\gamma)}$ (b)	Uncertainty (%)		
		Stat.	Syst.	Tot.
1–1.2	24.52	0.8	4.4	4.5
1.2–1.5	23.68	0.8	4.3	4.4
1.5–1.75	21.94	1.0	4.2	4.3
1.75–2	19.76	1.2	4.2	4.3
2–2.5	15.43	1.1	4.1	4.3
2.5–3	15.36	1.3	4.1	4.3
3–4	12.78	1.2	4.1	4.3
4–5	10.04	1.4	4.1	4.3
5–7.5	8.91	2.1	2.9	3.6
7.5–10	5.85	3.0	3.1	4.3
10–12.5	5.38	3.9	2.9	4.8
12.5–15	4.26	4.9	3.2	5.8
15–20	3.82	3.8	3.2	4.9
20–25	3.52	4.6	3.5	5.8
25–30	3.13	4.5	3.1	5.5
30–40	2.69	4.4	3.2	5.5
40–50	2.17	4.8	3.4	5.9
50–60	1.90	5.2	3.3	6.2
60–80	1.66	4.1	3.6	5.5
80–100	1.30	5.1	4.6	6.9

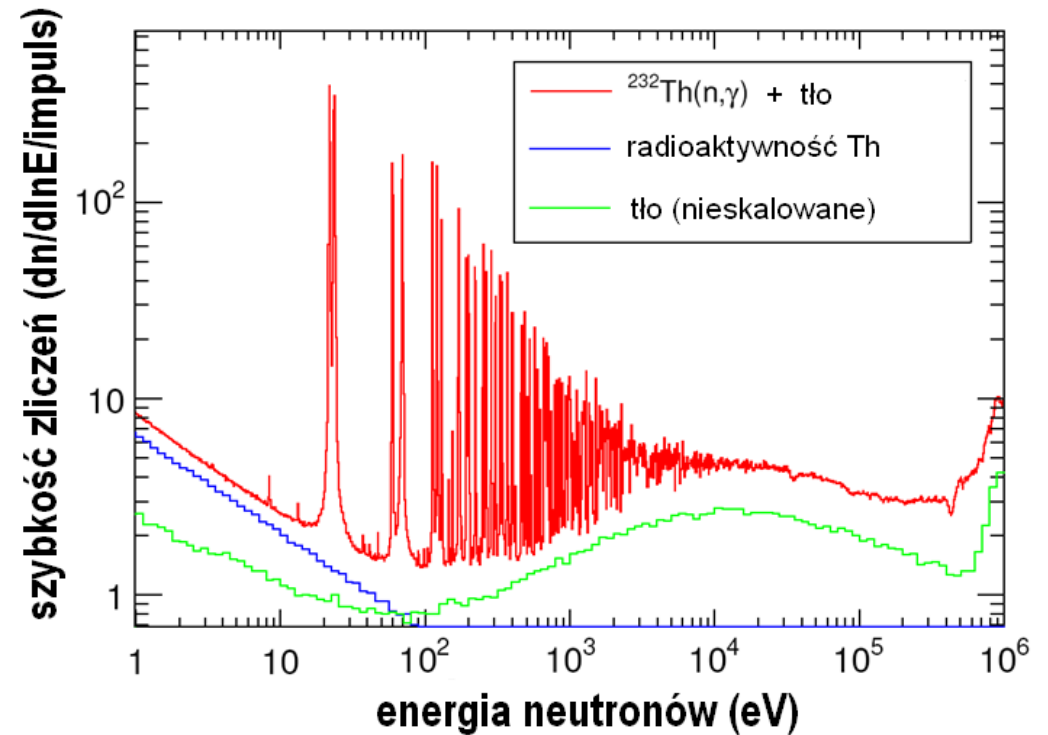
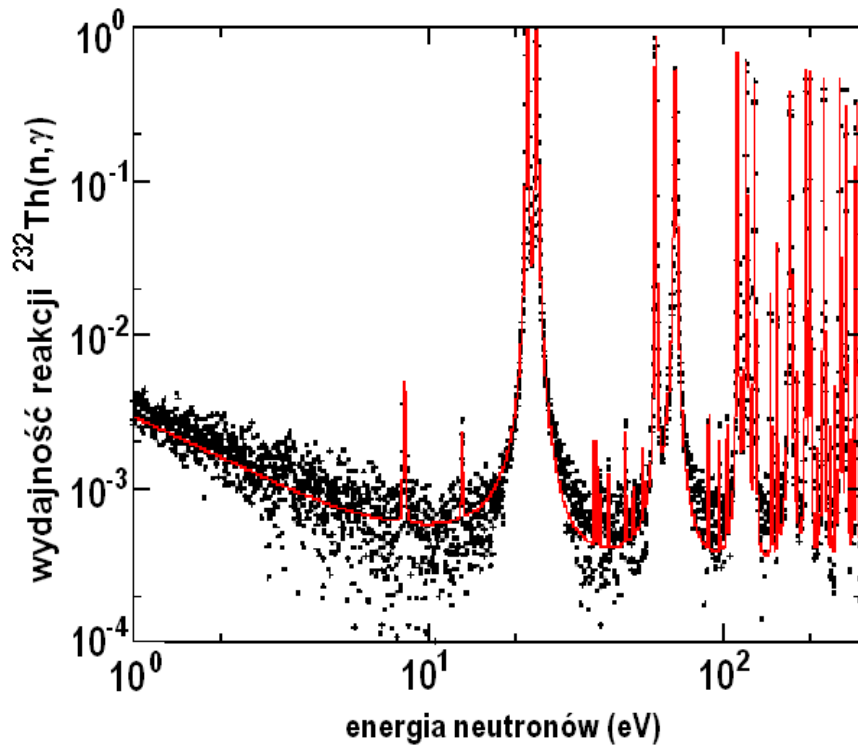




# $^{232}\text{Th}$

F. Gunsing et al. - The n\_TOF Collaboration  
ND2004 Conference, Santa Fe, NM – Sept. 2004  
&

G. Aerts et al. (The n\_TOF Collaboration)  
Phys. Rev. C 73, 054610 (2006)



analiza rozdzielonych rezonansów w toku

## Najważniejsze daty w poznawaniu nukleosyntezy

- 1937** pierwsze systematyczne przedstawienie rozpowszechnienia pierwiastków w układzie słonecznym podane przez Goldschmidta
- 1937 - 39** łańcuch pp i cykl CNO zidentyfikowane przez Bethe & Critchfielda oraz przez Weizsäckera, jako źródła gwiazdnej energii
- 1952** odkrycie **Tc** przez Merrilla w Czerwonych Olbrzymach: potwierdzenie występowania syntezy w gwiazdach
- 1957** podstawowa publikacja dotycząca nukleosyntezy autorstwa: Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (**B<sup>2</sup>FH**) Rev. Mod. Phys. **29**, 547 (1957)

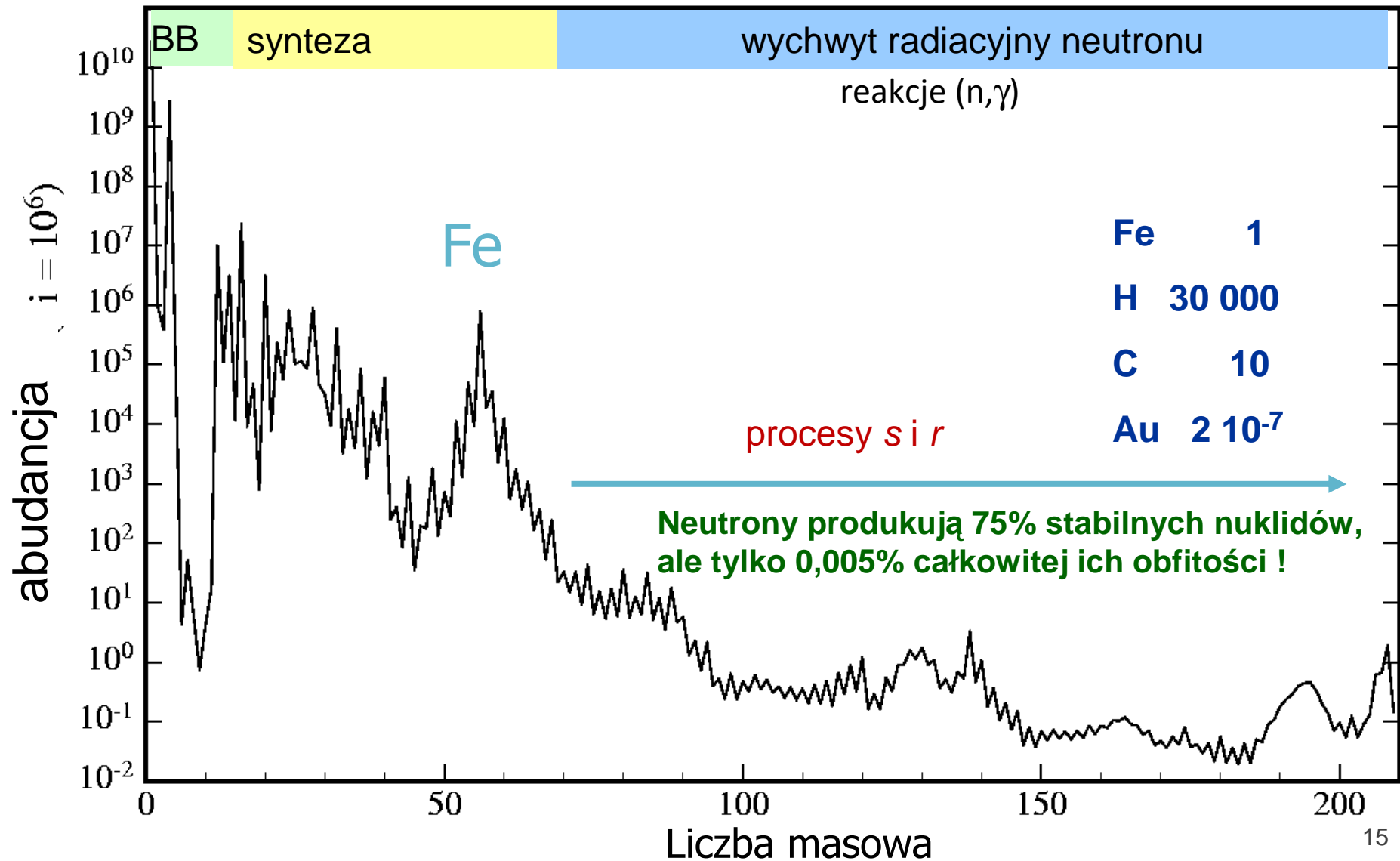
## Istnieje kilka sposobów określenia wieku wszechświata:

- kosmologiczny (oparty na definicji czasu Hubble'a,  $13,9 \pm 1,5 \text{ Gy}$ )
- astronomiczny (oparty na obserwacji gromad kulistych,  $14 \pm 2 \text{ Gy}$ )
- jądrowy (w oparciu o względne rozpowszechnienie izotopów promieniotwórczych o bardzo długim czasie półrozpadu - U/Th,  $14,5 \pm 2,5 \text{ Gy}$ )

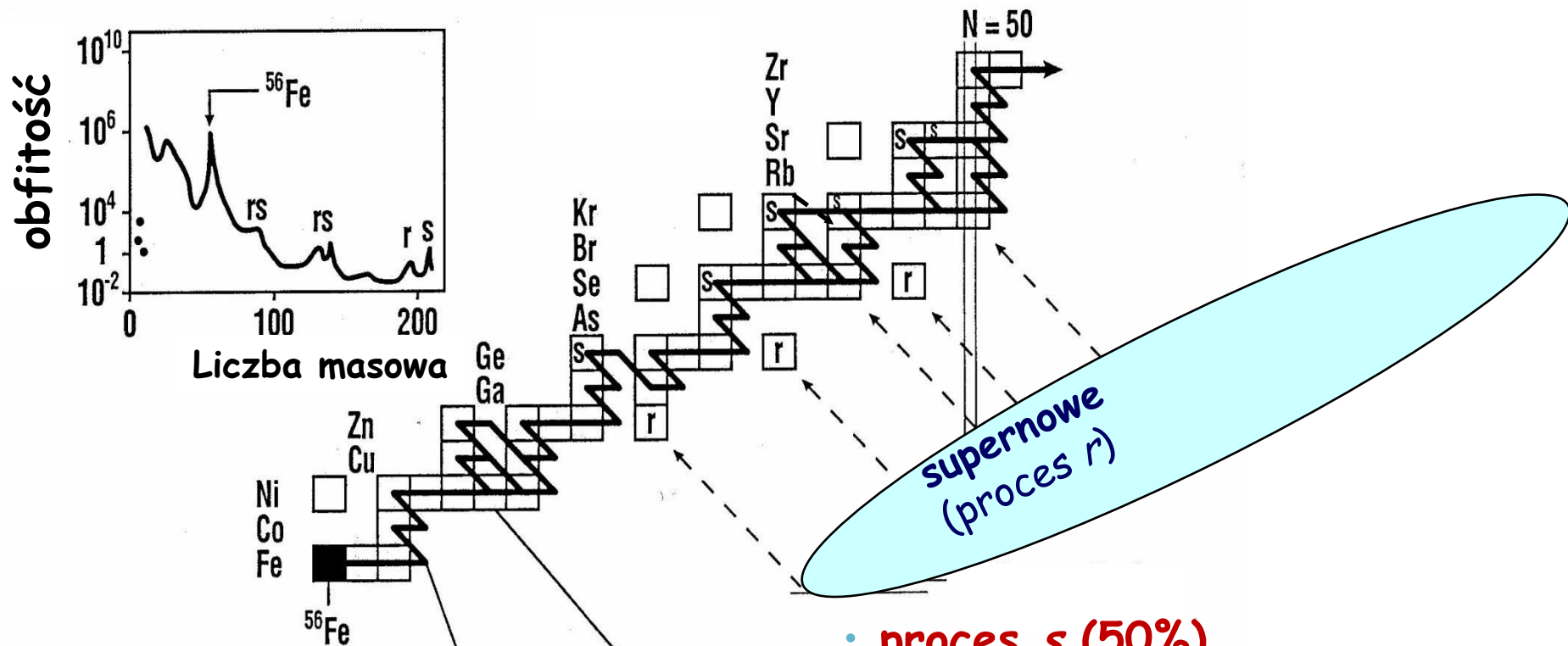
Wiek wszechświata można także określić za pomocą zegara  $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ .



# Rozpowszechnienie pierwiastków



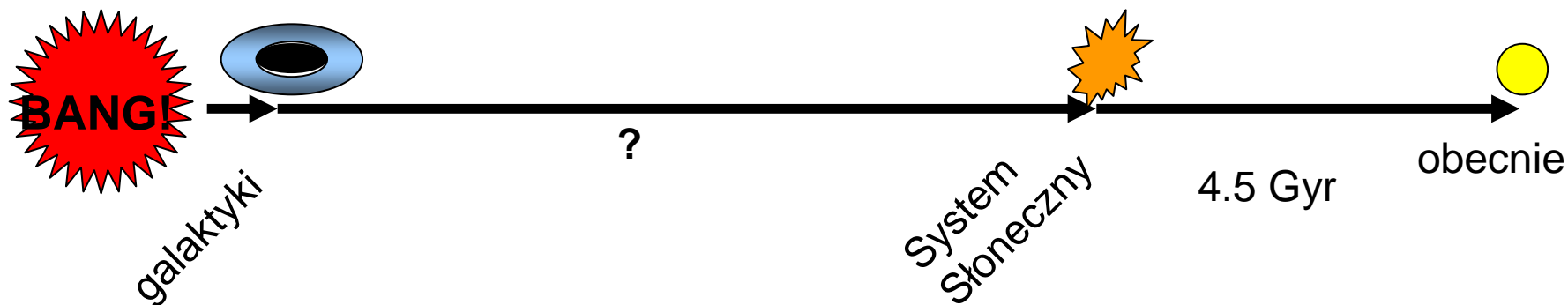
# Od Fe do U: procesy s i r



**Czerwone olbrzymy**  
(proces *s*)

- proces *s* (50%)
- proces *r* (50%)
- proces *p* (<1 %)

# Zegar Re/Os

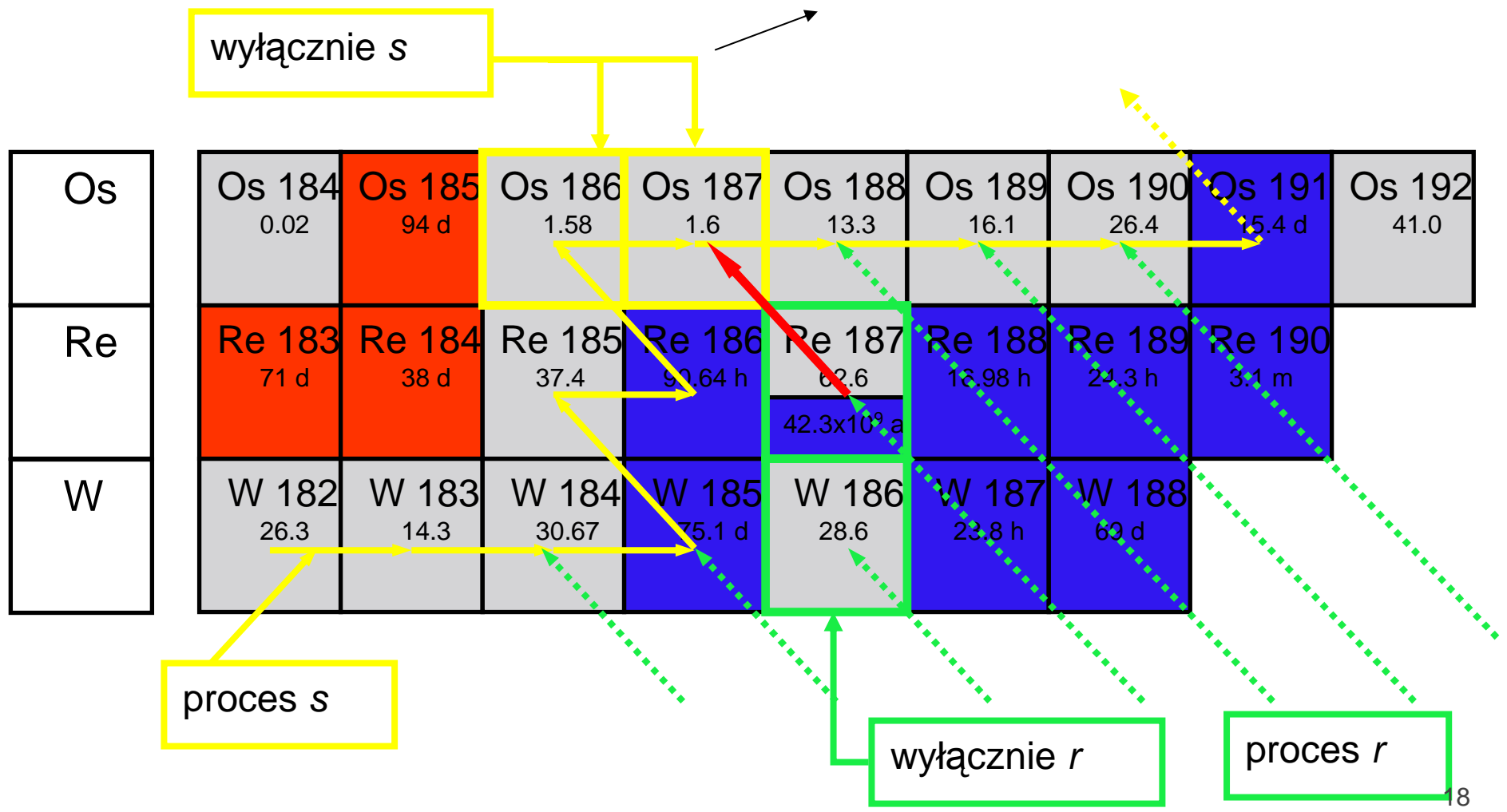


Os	Os 184 0.02	Os 185 94 d	Os 186 1.58	Os 187 1.6	Os 188 13.3	Os 189 16.1	Os 190 26.4	Os 191 15.4 d	Os 192 41
Re	Re 183 71 d	Re 184 38 d	Re 185 37.4	Re 186 90.64 h	Re 187 62.6 42.3x10 <sup>9</sup> a	Re 188 16.98 h	Re 189 24.3 h	Re 190 3.1 m	
W	W 182 26.3	W 183 14.3	W 184 30.67	W 185 75.1 d	W 186 28.6	W 187 23.8 h	W 188 69 d		

Rozpad  $\beta^-$   $^{187}\text{Re}$  o  $T_{1/2} = 42,3$  Gyr  
wpływa na obfitość jądra pochodnego  $^{187}\text{Os}$ .



$$\sigma N_s(^{186}\text{Os}) = \sigma N_s(^{187}\text{Os})$$



**Dla analizy zegara Re/Os istotnymi danymi jądrowymi są:**

**1. gwiazdne przekroje czynne typu  $(n,\gamma)$**

na gwiazdny przekrój czynny reakcji  $^{187}\text{Os}(n,\gamma)$  duży wpływ mają wzbudzone, nisko leżące stany jądrowe  $\rightarrow$  silnie obsadzany 1-szy stan o energii 9,8 keV (w wyniku nieelastycznego rozpraszania neutronów)

**2. temperaturowa zależność czasu półrozpadu  $^{187}\text{Re}$**

( $T_{1/2}$  rozpadu  $\beta^-$  tego jądra bardzo silnie zależy od temperatury gwiazdy)



$$\sigma N_s(^{186}\text{Os}) = \sigma N_s(^{187}\text{Os})$$

- $t_0$  poprzez rozpad  $^{187}\text{Re}$ :  
radiogeniczna składowa  
 $^{187}\text{Os}$  powstającego  
w procesie s

$$^{187}\text{Os}_c = ^{187}\text{Os} - \frac{\sigma(186)}{\sigma(187)} ^{186}\text{Os}$$

- $e^{-\Lambda t}$ : wzrost obfitości  
 $^{187}\text{Re}$  w procesie r

$$\frac{^{187}\text{Os}_c}{^{187}\text{Re}} = \left[ \frac{\Lambda - \lambda}{\Lambda} e^{\Lambda t_0} \frac{1 - e^{-\Lambda t_0}}{1 - e^{-(\Lambda - \lambda)t_0}} \right] - 1$$

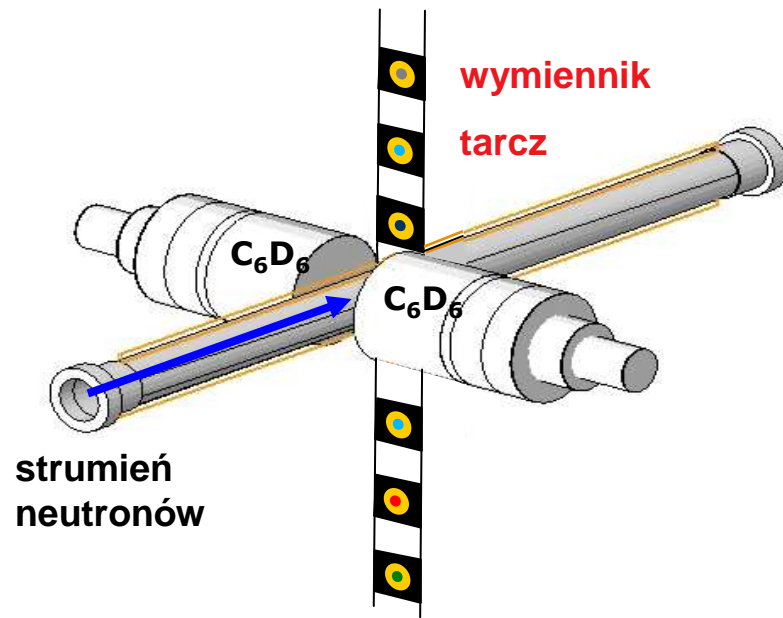
$\Lambda$  - oznacza stałą zmniejszania się liczby supernowych we wszechświecie (w Galaktyce)

ciągła synteza:  $\Lambda \rightarrow 0$

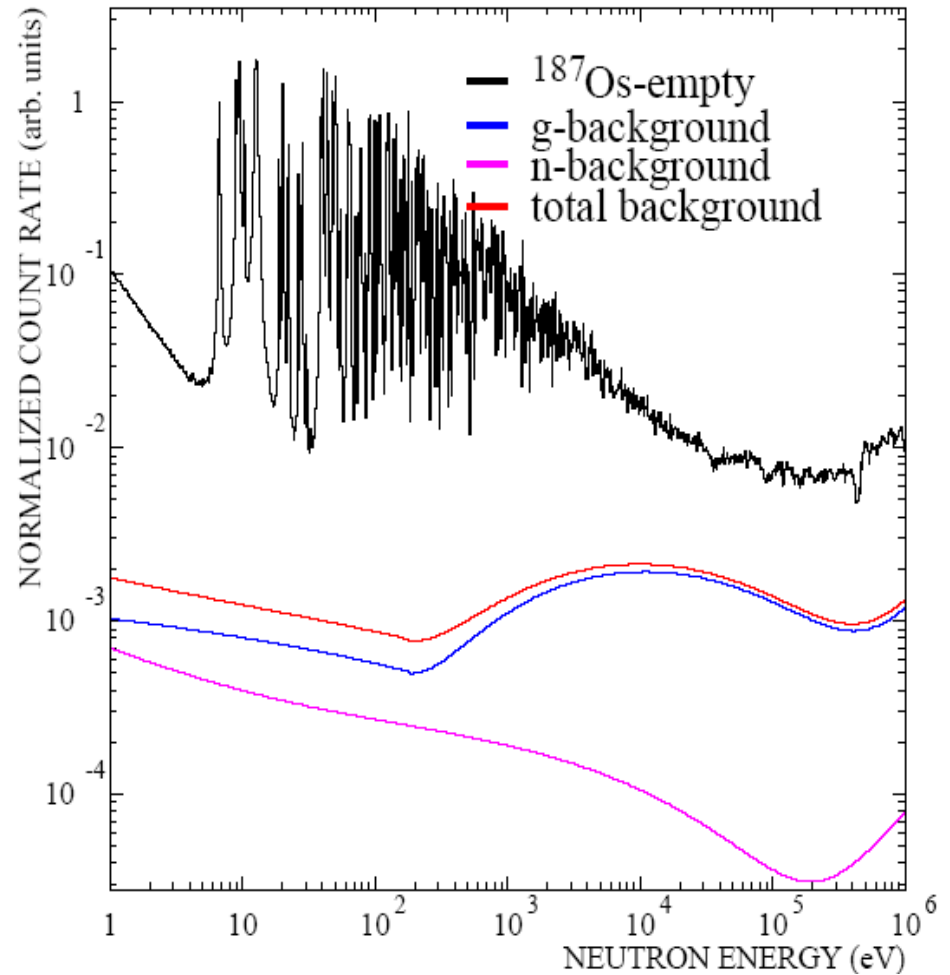
jednorazowa synteza :  $\Lambda \rightarrow \infty$

# Pomiary przekroju czynnego reakcji $\text{Os}(n,\gamma)$ przeprowadzone przez n\_TOF/CERN

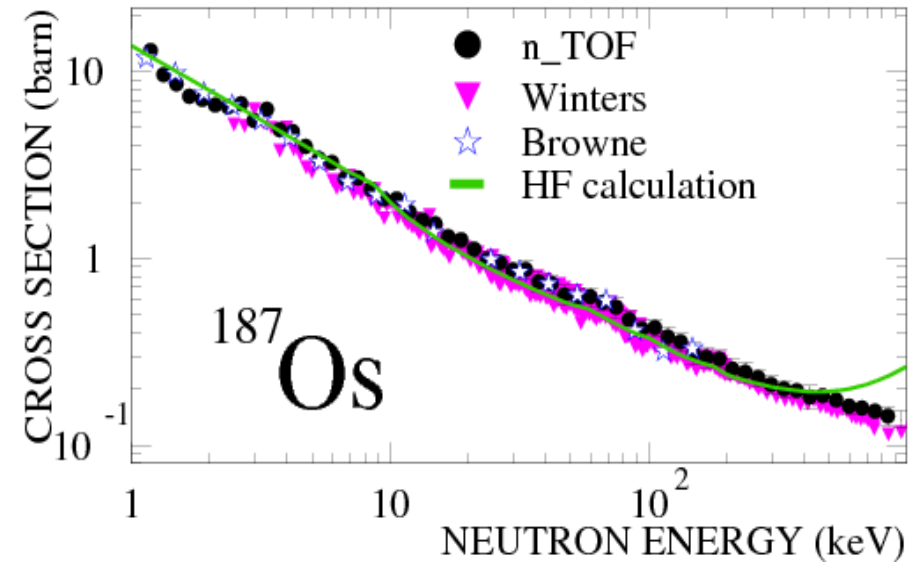
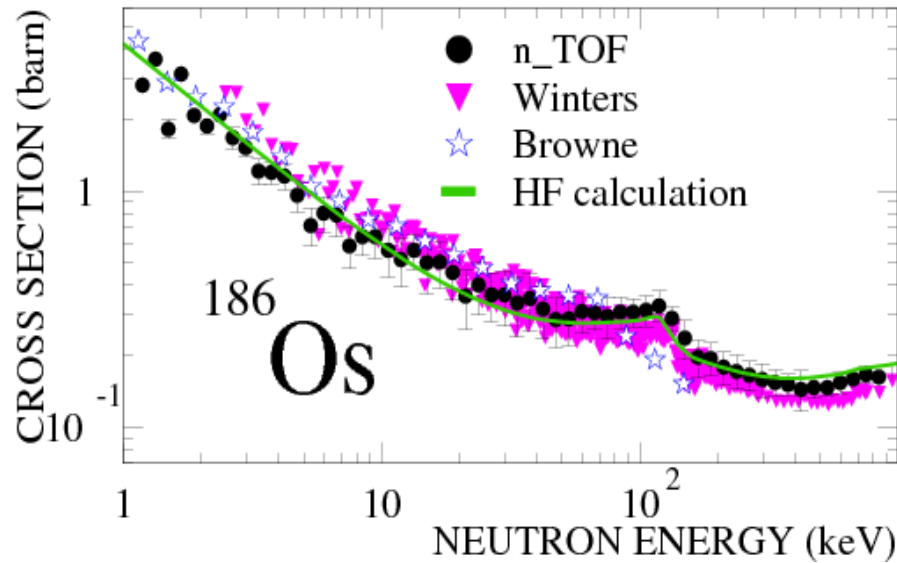
detekcja  $\gamma$ :  $\text{C}_6\text{D}_6$  scyntylatory



Detektory  $\text{C}_6\text{D}_6$  charakteryzują się bardzo małą czułością na wychwytywanie neutronów.

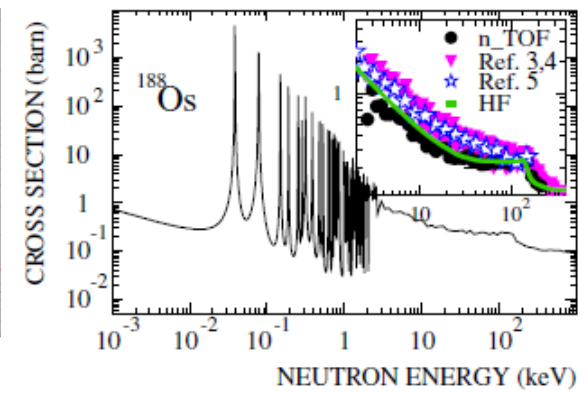
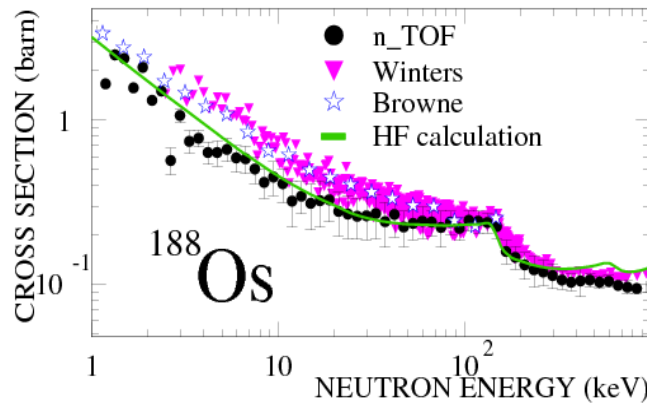


# Uśrednione przekroje czynne reakcji (n,γ) - n\_TOF



$${}^{187}\text{Os}_c = {}^{187}\text{Os} - \frac{\sigma(186)}{\sigma(187)} {}^{186}\text{Os}$$

$$\frac{\sigma(186)}{\sigma(187)} = 0.42 \pm 0.02$$



HF – na podstawie statystycznego modelu Hausera-Feshbacha

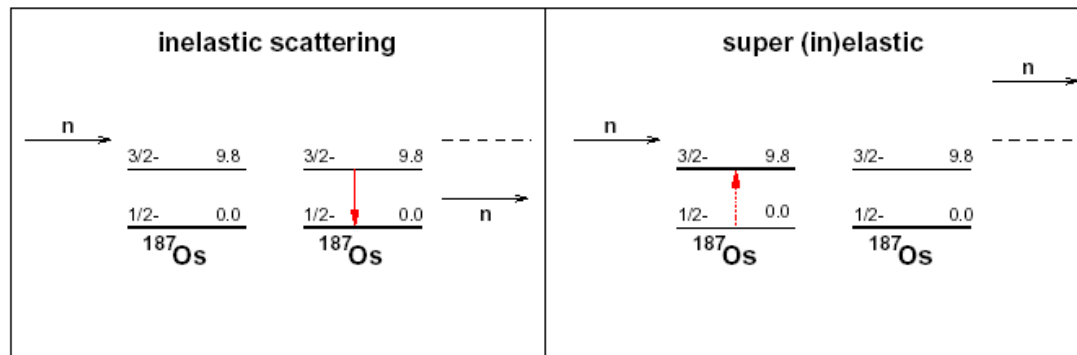


## Zegar wymaga regulacji



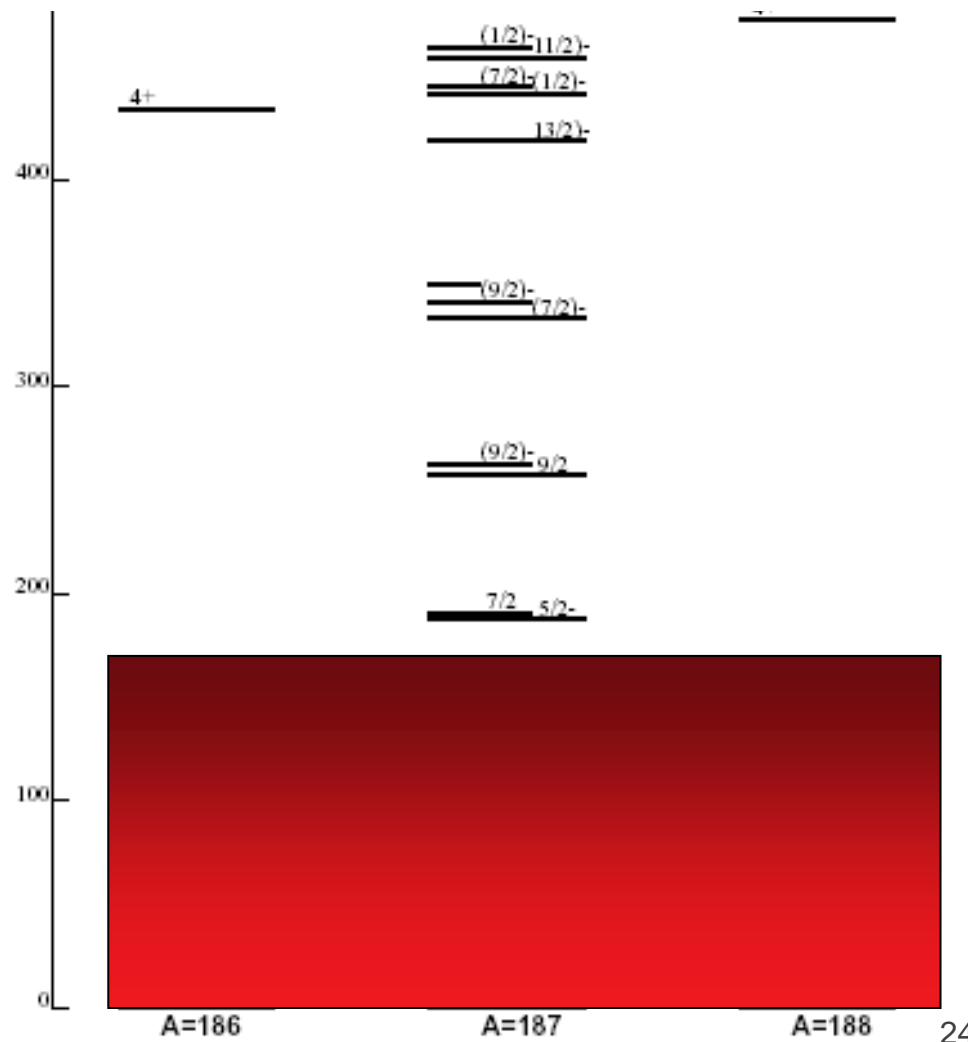
Zegar Re/Os  $\Rightarrow$  poprawki na efekty: jądrowy i gwiazdny.

Wzbudzenia termiczne  
stanów jądrowych

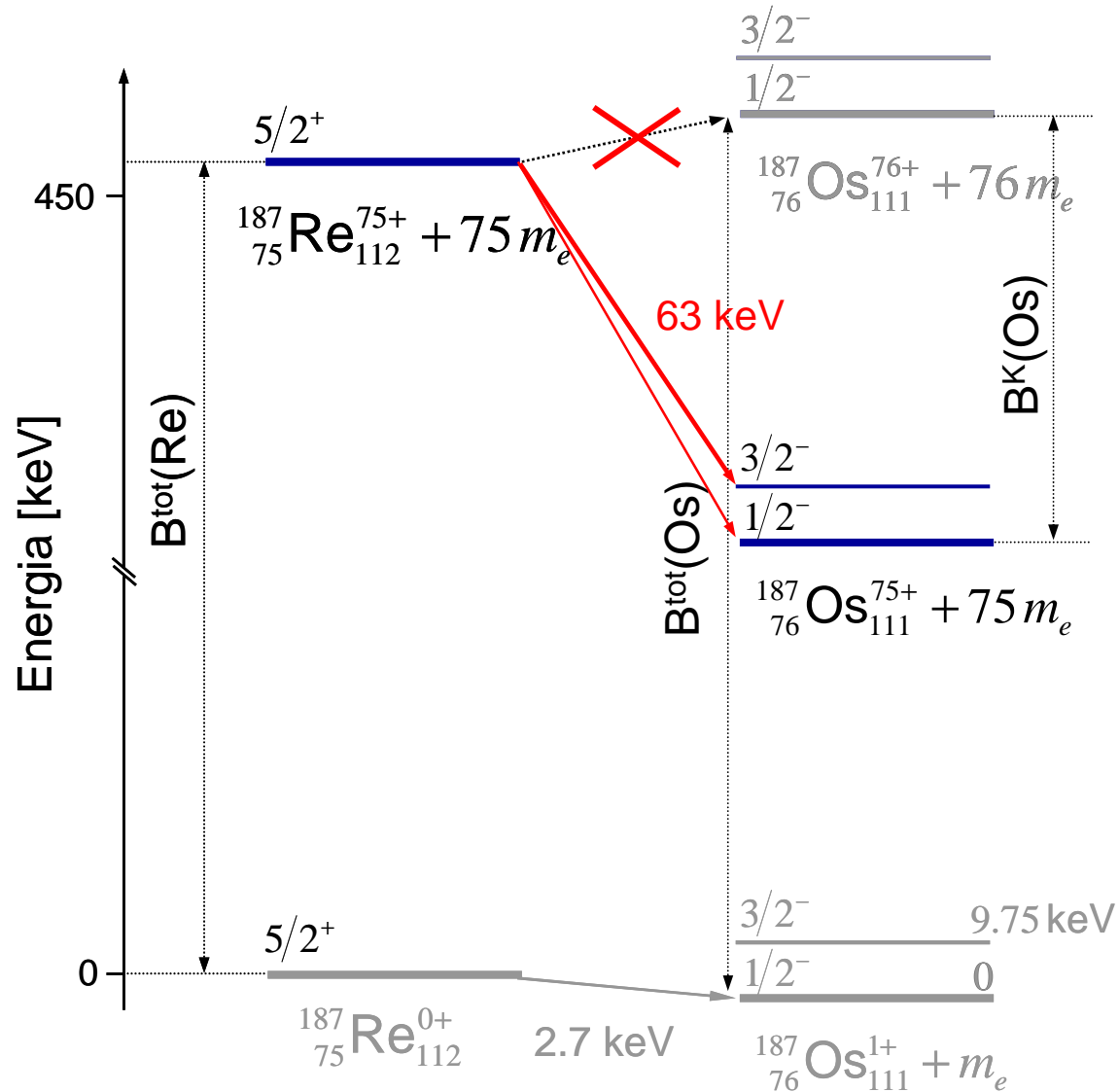


w  $^{187}\text{Os}$  przy  $kT = 30$  keV:

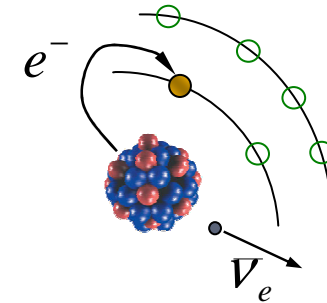
- P(sp) = 33%
- P(1-szy) = 47%
- P(pozostałe) = 20%



# Przemiana zjonizowanego $^{187}\text{Re}$



- ▶ Zabieramy wszystkie elektrony orbitalne.
- ▶ Zwykła przemiana  $\beta$  nie jest teraz możliwa !
- ▶ Ale emitowany elektron może zatrzymać się na pustym orbitalu atomowym !



Przemiana beta do stanu związanego

Półokres rozpadu  
obojętnego  $^{187}\text{Re}$  :  
 $T_{1/2} = 42,3 \cdot 10^9 \text{ lat}$



Półokres rozpadu  
„gołego”  $^{187}\text{Re}$  :  
 $T_{1/2} = 32,9 \pm 2,0 \text{ lat}$

Uwzględnienie tego faktu wpływa na wiek :  
 $\approx 1 \text{ Gyr}$

Ostatecznie:

$$t_0 \cong 10,4 \pm 2,0 \text{ Gyr}$$



**wiek wszechświata =  $15 \pm 2 \text{ Gyr}$**

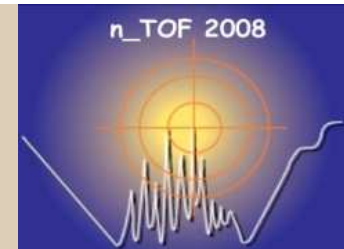
# Podsumowanie osiągnięć pierwszej fazy n\_TOF

- **n\_TOF jest dobrze funkcjonującą współpracą; przeprowadzono dotąd 18 eksperymentów obejmujących pomiar przekrojów czynnych na wychwyty radiacyjny neutronów i rozszczepienie wywołane przez neutrony.**
- **n\_TOF zbudował kilka detektorów (SiMon, C<sub>6</sub>D<sub>6</sub>, TAC, PPAC, FIC) oraz nowoczesny system DAQ w oparciu o Flash-ADC.**
- **Publikacje: 1 Phys. Rev. Lett., 12 Phys. Rev. C, 1 Prog. Nucl. Part. Phys., 10 NIM A, oraz 5-10 Conference Proceedings/rok.**

patrz: [www.cern.ch/n\\_TOF](http://www.cern.ch/n_TOF) oraz **Postępy Fizyki**, z. 6 (2008)



Nowy target  
i  
pierwszy element osłony



## Eksperymenty n\_TOF : Ph-2

Wychwył  
radiacyjny  
neutronów

Rozszczepienie

(n,p) (n, $\alpha$ )  
Detektory gazowe  
...

1. Przekroje czynne waŹne dla astrofizyki jądrowej
2. Przekroje czynne waŹne dla transmutacji popiołůw jądrowych i technologii jądrowych
3. Neutrony jako sondy w badaniach podstawowych fizyki jądrowej

# Eksperymenty n\_TOF-Ph2 (od 2009 roku)

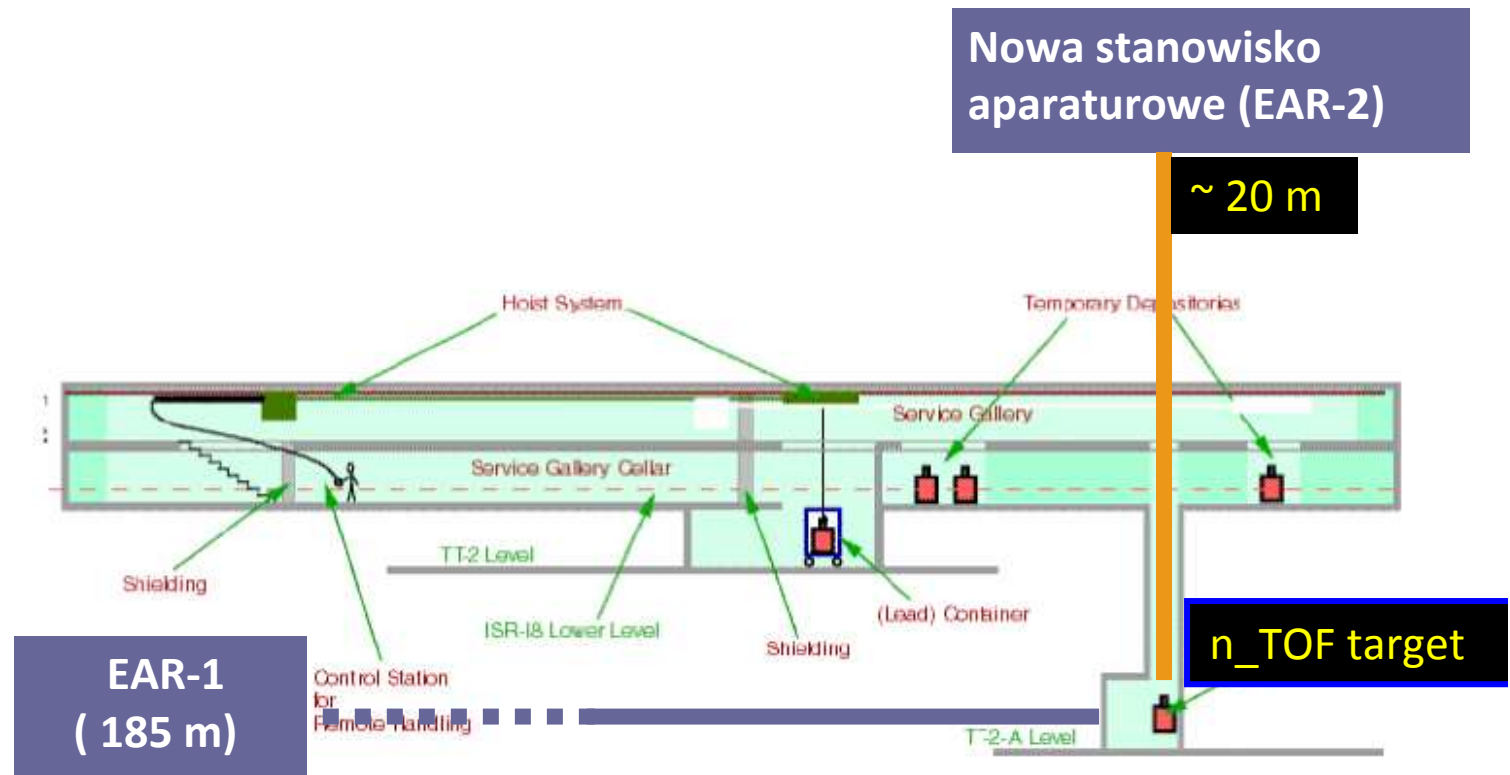
Pomiary wychwytu radiacyjnego neutronów	
Mo, Ru, Pd (izotopy stabilne)	wkład procesu $r$ , izotopowe szablony w ziarnach SiC
Fe, Ni, Zn, and Se (izotopy stabilne) $^{79}\text{Se}$	proces $s$ nukleosyntezy w masywnych gwiazdach dane jądrowe dla materiałów konstrukcyjnych
$A \approx 150$ (różne izotopy) $^{234,236}\text{U}$ , $^{231,233}\text{Pa}$ $^{235,238}\text{U}$ $^{239,240,242}\text{Pu}$ , $^{241,243}\text{Am}$ , $^{245}\text{Cm}$	proces $s$ w punktach rozgałęzienia produkty rozszczepienia o długim czasie półrozpadu  Th/U jądrowy cykl paliwowy  standardy, klasyczny U/Pu cykl paliwowy  wypalanie mniejszościowych aktynowców

(\*) zatwierdzone przez CERN Isolde-n\_TOF Committee, wykonanie w 2009

# Eksperymenty n\_TOF-Ph2

Przekroje na rozszczepienie	
MA	ADS, intensywne wypalanie, reaktory GEN-IV
$^{235}\text{U}(n,f)$	$^{235}\text{U}(n,f)$ przekrój czynny – nowy standard
$^{234}\text{U}(n,f)$	badanie rezonansów przy energii bariery rozszczepienia
Inne przekroje czynne	
$^{147}\text{Sm}(n,\alpha)$ , $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)$ , $^{99}\text{Ru}(n,\alpha)$ $^{58}\text{Ni}(n,p)$	badania procesu $p$ produkcja gazu w materiałach konstrukcyjnych
Al, V, Cr, Zr, Th,	materiały paliwa i konstrukcyjne dla ADS i innych zaawansowanych reaktorów jądrowych
He, Ne, Ar, Xe	nisko energetyczne jądra odrzutu (rozwój detektorów gazowych)
$n+\text{D}_2$	badanie rozproszeń n-n

# Drugi neutronowód n\_TOF oraz EAR-2



Długość drogi przelotu : ~ 20 m  
pod kątem 90° względem kierunku wiązki protonów.  
Spodziewany wzrost strumienia neutronów: ~ 100.  
Drastyczna redukcja intensywności „błysku” w chwili  $t_0$ .





## The n\_TOF Collaboration

