

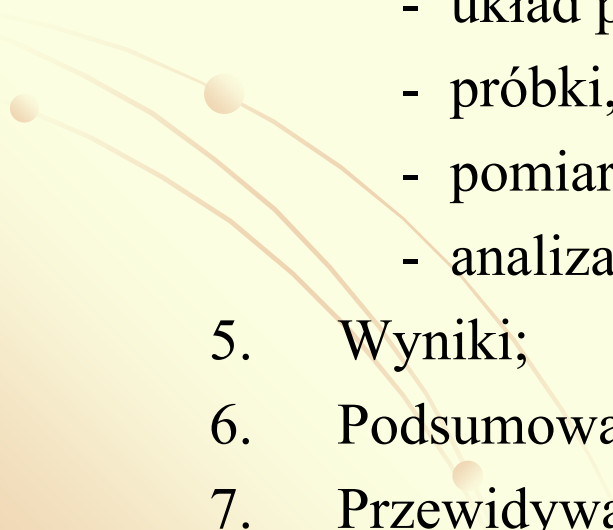
Gwiazdne przekroje czynne typu  $(n, \gamma)$   
na protonowo-nadmiarowych jądrach  
i ich wpływ na proces p nukleosyntezy

**Justyna Marganec**

**Zakład Fizyki Jądrowej, Uniwersytet Łódzki  
justmarg@uni.lodz.pl**

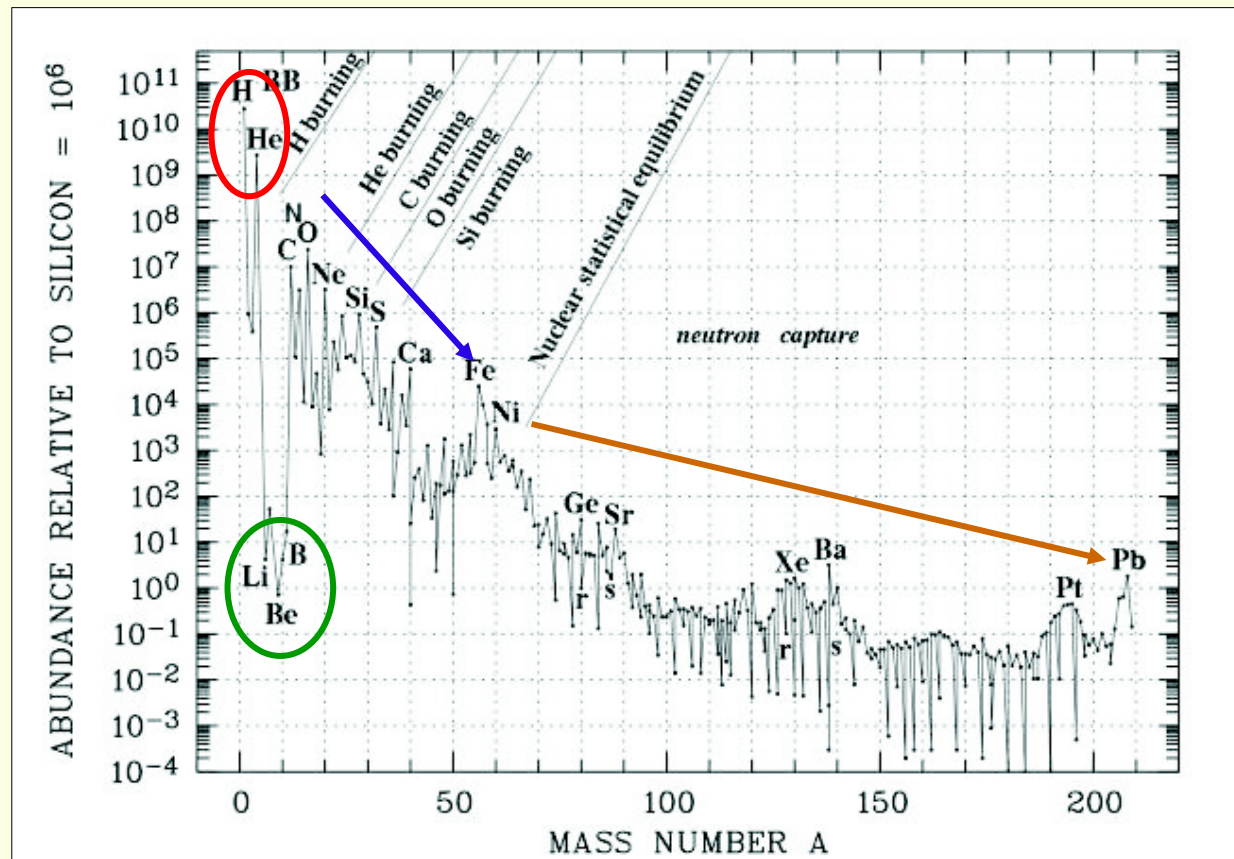
**Warszawa, 27 luty 2008**

# Plan prezentacji

1. Pochodzenie pierwiastków chemicznych;
  2. Nukleosynteza pierwiastków cięższych od Fe:
    - proces  $s$ ,
    - proces  $r$ ,
    - proces  $p$ ;
  3. Motywacja;
  4. Pomiary przekrojów czynnych:
    - metoda aktywacji,
    - układ pomiarowy,
    - próbki,
    - pomiary aktywności,
    - analiza danych;
  5. Wyniki;
  6. Podsumowanie;
  7. Przewidywane pomiary.
- 

# Pochodzenie pierwiastków chemicznych

- synteza pierwiastków lekkich (H, D, He, Li, Be, B);
- synteza w gwiazdach – od H i He do  $^{56}\text{Fe}$ ;
- procesy poza jądrem  $^{56}\text{Fe}$ : proces *s*, *r*, i *p*



# Nukleosynteza pierwiastków cięższych od Fe

## *Proces s* – proces powolnego (slow) wychwytu neutronu

### „słaba” składowa

$M > 10 M_{\odot}$     $A < 88$

palenie He w jądrze   i   palenie C w powłoce

$n_n \sim 10^6 \text{ n/cm}^3$

$n_n \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ n/cm}^3$

$T \sim 3 - 3.5 \cdot 10^8 \text{ K}$

$T \sim 10^9 \text{ K}$

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$

$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)^{23}\text{Mg}$

### „główna” składowa

$1.2 M_{\odot} < M < 4 M_{\odot}$  (gwiazdy TP-AGB)

$88 \leq A \leq 208$

palenie H   i   błyski helowe

$n_n \sim 10^7 \text{ n/cm}^3$

$n_n \sim 10^{11} \text{ n/cm}^3$

$T \sim 10^8 \text{ K}$

$T \sim 3 \cdot 10^8 \text{ K}$

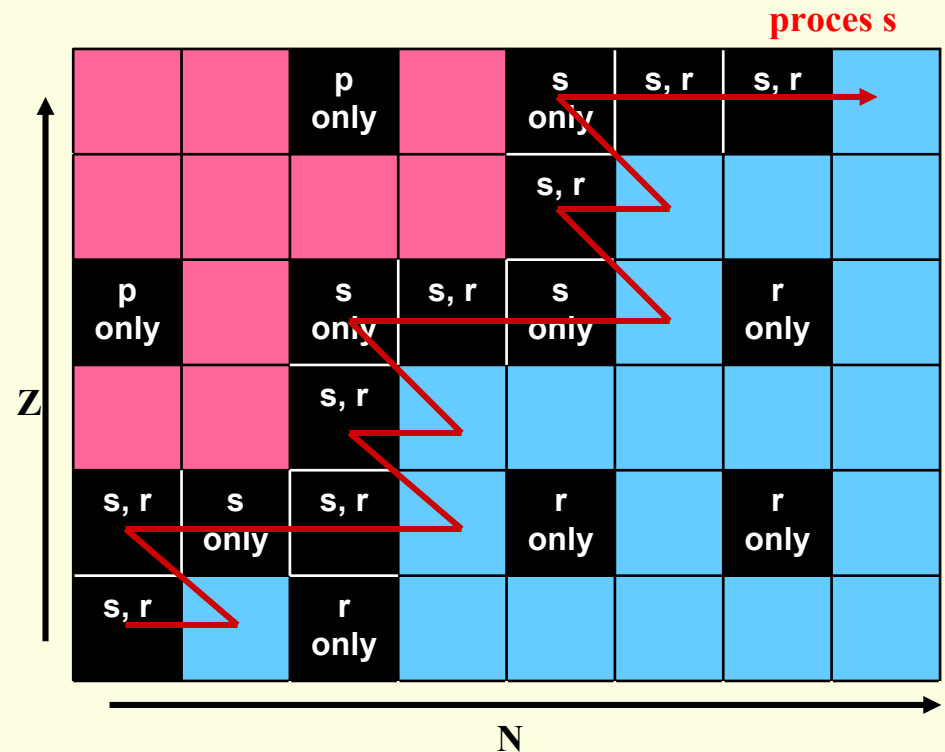
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$

### „silna” składowa

gwiazdy TP-AGB o małym Z

$^{208}\text{Pb}$  i  $^{209}\text{Bi}$



# Nukleosynteza pierwiastków cięższych od Fe

## Proces r – proces szybkiego (rapid) wychwytu neutronu

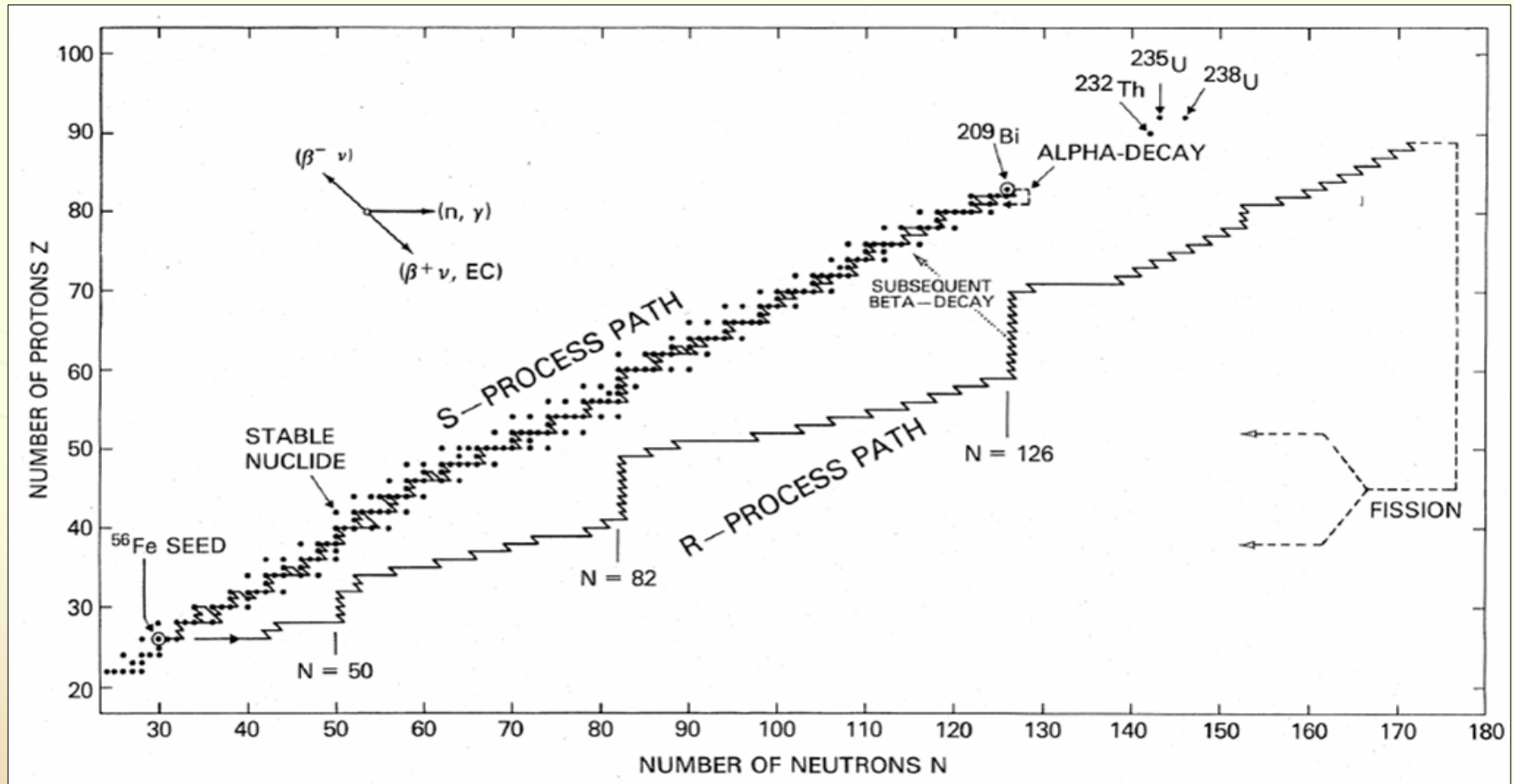
$$t_{\beta} > t_n$$

$$n_n \sim 10^{20} - 10^{30} \text{ n/cm}^3$$

$$t_n \sim 1 - 10 \text{ s}$$

$$T \sim 10^9 - 7 \cdot 10^9 \text{ K}$$

miejsce: wybuch SNII lub podczas zderzenia się gwiazd neutronowych ?





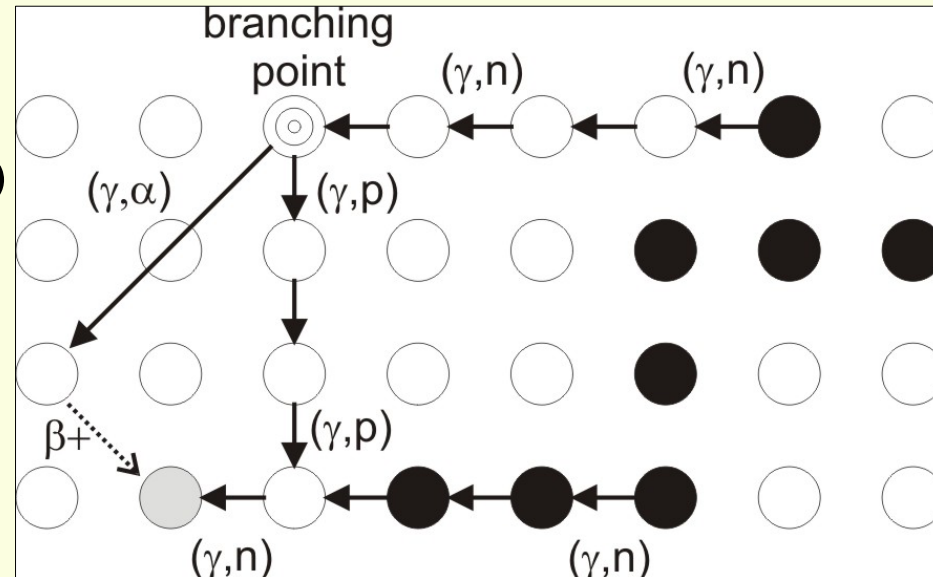
# Nukleosynteza pierwiastków cięższych od Fe

## *Proces p (proces $\gamma$ )*

- proces  $p$  – sekwencje reakcji fotodezintegracji i rozpadów  $\beta^+ \rightarrow (\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha)$  reakcje na istniejących jądrach-zarodkach powstałych w procesach  $s$  i  $r$
- rozpowszechnienie 10 – 100 x mniejsze niż jąder powstałych w procesie  $s$  i  $r$
- miejsce  $\rightarrow$  wybuchowe spalanie w Supernowej typu II ?
- proces  $rp$  – system binarny (gwiazda neutronowa – Czerwony Olbrzym)

### ➤ neutrony w procesie $p$

- reakcje  $(n, \gamma)$  konkurują z reakcjami  $(\gamma, n)$
- wychwyty neutronów odgrywają rolę jako reakcje „freeze-out”



Isotope	El. Abund. %	Year	( <i>n,γ</i> ) MACS at 30 keV	Uncert. %
Se-74	0.89	2004	271 ± 15	5.5
Kr-78	0.35	1991	312 ± 26	8.3
Sr-84	0.56	2004	300 ± 17	5.7
Mo-92	14.84	1978	70 ± 10	14.3
Mo-94	9.25	1972, 1978	102 ± 20	19.6
Ru-96	5.52	2002	207 ± 8	3.9
Ru-98	1.88		173 ± 36	20.8
Pd-102	1.02	2005	370 ± 20	5.4
Cd-106	1.25	1998	302 ± 24	7.9
Cd-108	0.89	1998	202 ± 9	4.5
In-113	4.3	1966	787 ± 70	8.9
Sn-112	0.97	1979, 1989	210 ± 12	5.7
Sn-114	0.65	1996	134.4 ± 1.8	1.3
Sn-115	0.34	1996	342.4 ± 8.7	2.5
Te-120	0.096	2005	499 ± 30	6.0
Xe-124	0.1	1991	644 ± 83	12.9
Xe-126	0.09	1991	359 ± 51	14.2
Ba-130	0.106	2005	767 ± 40	5.2
Ba-132	0.101	2005	399 ± 25	6.3
Ce-136	0.185	1996	328 ± 21	6.4
Ce-138	0.251	1996	179 ± 5	2.8
La-138	0.09		767*	
Sm-144	3.07	1993	92 ± 6	6.5
Dy-156	0.06	1985	1567 ± 145	9.3
Dy-158	0.1		1060 ± 400	37.7
Er-162	0.14	1996	1624 ± 124	7.6
Yb-168	0.13		1160 ± 440	37.9
Hf-174	0.16		983 ± 46	4.7
W-180	0.12	1987	536 ± 60	11.2
Os-184	0.02		657 ± 202	30.7
Pt-190	0.014	1999	677 ± 183	27
Hg-196	0.15		650 ± 82	12.6

## Status gwiazdowego przekroju czynnego typu (*n,γ*)

- (26) eksperymentalnych wartości przekrojów czynnych typu (*n,γ*);

- (7) z błędem ≥ 9%;

- (6) teoretyczne lub pół-empiryczne wartości.



# Motywacja

Bardziej dokładne wartości przekrojów czynnych typu  $(n,\gamma)$  niezbędne są do precyzyjniejszego modelowania przebiegu nukleosyntezy ciężkich pierwiastków w procesie  $p$ :

- przekrój czynny  $(n,\gamma)$  dla  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{184}\text{Os}$  i  $^{196}\text{Hg}$  – dotychczas jedynie teoretyczna wartość, przekrój czynny  $(n,\gamma)$  dla  $^{190}\text{Pt}$  – błąd  $> 27\%$ ;
- reakcje  $(n,\gamma)$  konkurują z reakcjami  $(\gamma,n)$ ;
- wychwyty neutronów odgrywają rolę jako reakcje „freeze-out”.

Lu 168 7m/5.5m	Lu 169 3m/1.4d	Lu 170 2.0d	Lu 171 76s/8.2d
Yb 167 17.7m	<b>Yb 168 0.13</b>	Yb 169 46s/32d	Yb170 3.04
Tm 166 7.7d	Tm167 9.25d	Tm168 93.1d	Tm 169 100

Ir 184 3.0h	Ir 185 14.4h	Ir 186 2h/17h	Ir 187 10.5h
Os 183 10h/13 h	<b>Os 184 0.02</b>	Os 185 94d	Os 186 1.6/10 <sup>15</sup> a
Re 182 13h/64h	Re 183 71d	Re 184 169/38d	Re 185 37.40

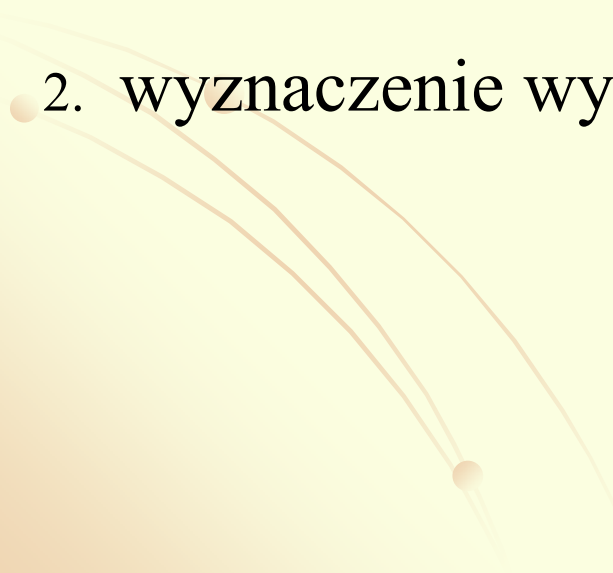
Au 190 42.8m	Au 191 1s/3.18h	Au 192 5.0h	Au 193 4s/18h
Pt 189 11h	<b>Pt 190 0.01/10<sup>11</sup>a</b>	Pt 191 2.8d	Pt 192 0.782
Ir 188 41.4h	Ir 189 13.3d	Ir 190 3h/1h/12d	Ir 191 5s/37.3

Tl 196 1.4h/2h	Tl 197 2.84h	Tl 198 2h/5.3h	Tl 199 7.42h
Hg 195 40h/9h	<b>Hg 196 0.15</b>	Hg 197 24h/64h	Hg 198 9.97
Au 194 38h	Au 195 30s/186d	Au 196 9h/8s/6d	Au197 100

# Pomiary przekrojów czynnych

## - metoda aktywacji

Dwa etapy metody aktywacji:

1. wychwytywanie radiacyjnych neutronów;
  2. wyznaczenie wywołanej aktywności.
- 

# Zalety i wady metody aktywacji

## Zalety:

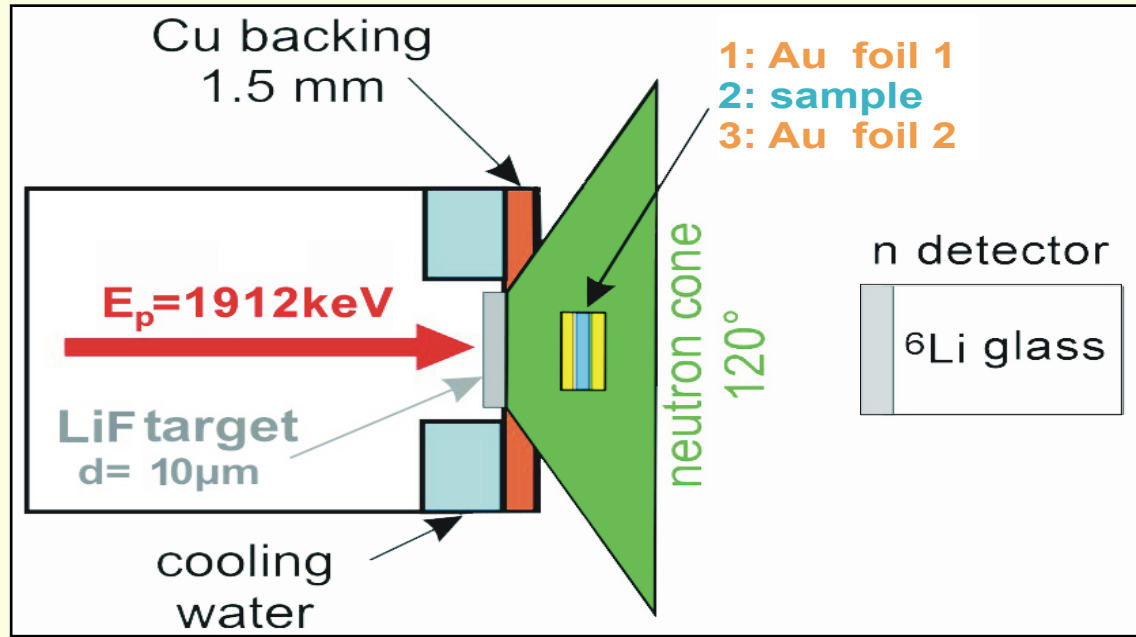
- dokładne wyznaczenie nawet małych przekrojów czynnych;
- wysoka czułość – możliwość użycia niewielkiej ilości badanego izotopu lub próbek naturalnych;
- użycie  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$  jako standardu;
- użycie detektorów HPGe;
- bezpośredni pomiar Maxwellowskiego Uśrednionego Przekroju Czynnego .

## Wady:

- produkt aktywacji musi być nietrwały;
- jego czas połowicznego zaniku musi zawierać się w przedziale sekundy – lata.

# Pomiary przekrojów czynnych

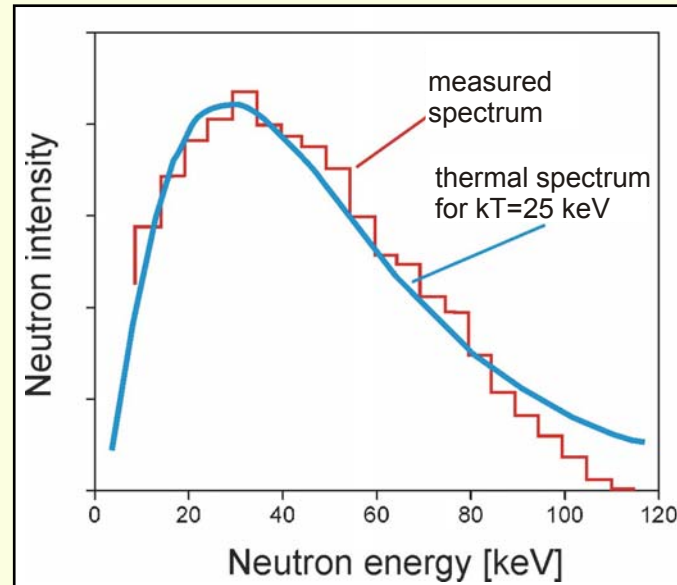
## - układ pomiarowy



Neutrony produkowane za pomocą reakcji:  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$

$E_p = 1912 \text{ keV}$ ,  $\Phi_n \sim 10^9 \text{ n/s}$

quasi-gwiazdne widmo  
( $kT = 25 \text{ keV}$ )



# Pomiary przekrojów czynnych

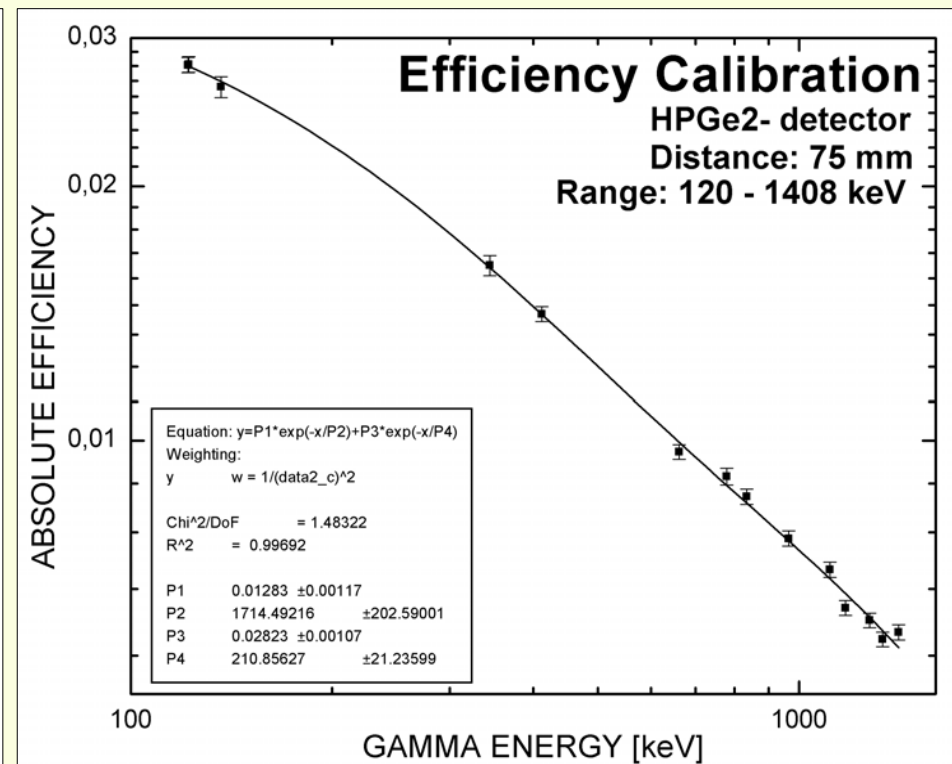
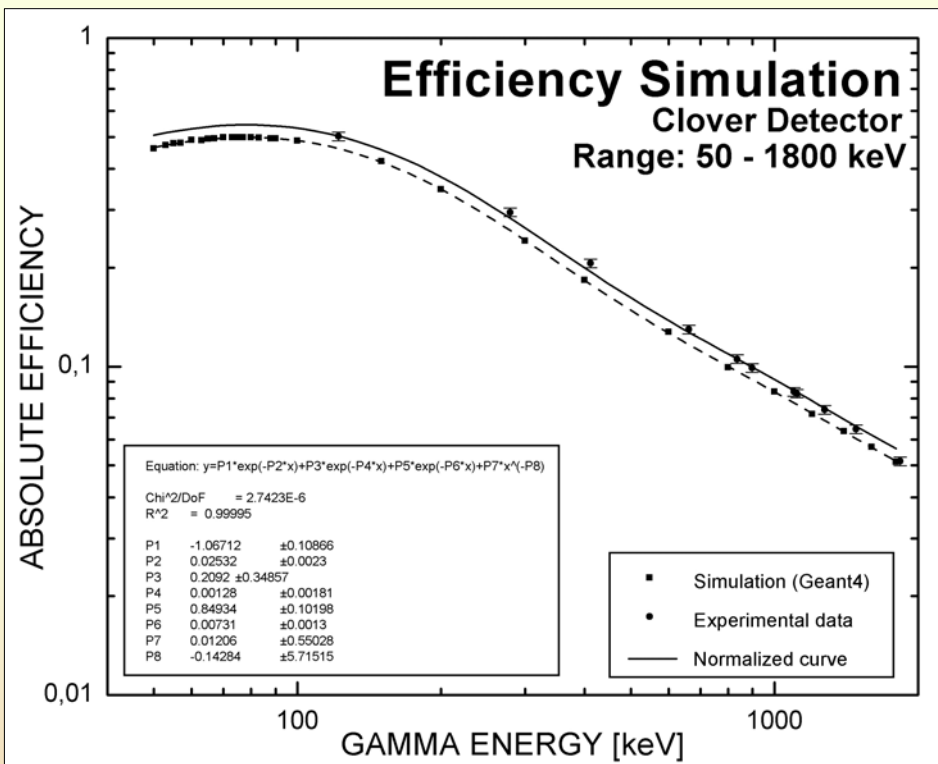
## - próbki

- naturalny Yb:  $^{168}\text{Yb}$  (0.13%);
- naturalny Os:  $^{184}\text{Os}$  (0.02%);
- naturalna Pt:  $^{190}\text{Pt}$  (0.014%);
- naturalna Hg:  $^{196}\text{Hg}$  (0.15%);
- próbki w kształcie dysku → sprasowane z odpowiedniego proszku, poza próbką Pt – metalowa folia;
- próbki umieszczane pomiędzy dwoma złotymi foliami;
- pomiary wykonane dla kilku różnych średnic i grubości próbek.

# Pomiary przekrojów czynnych

## - pomiar aktywności

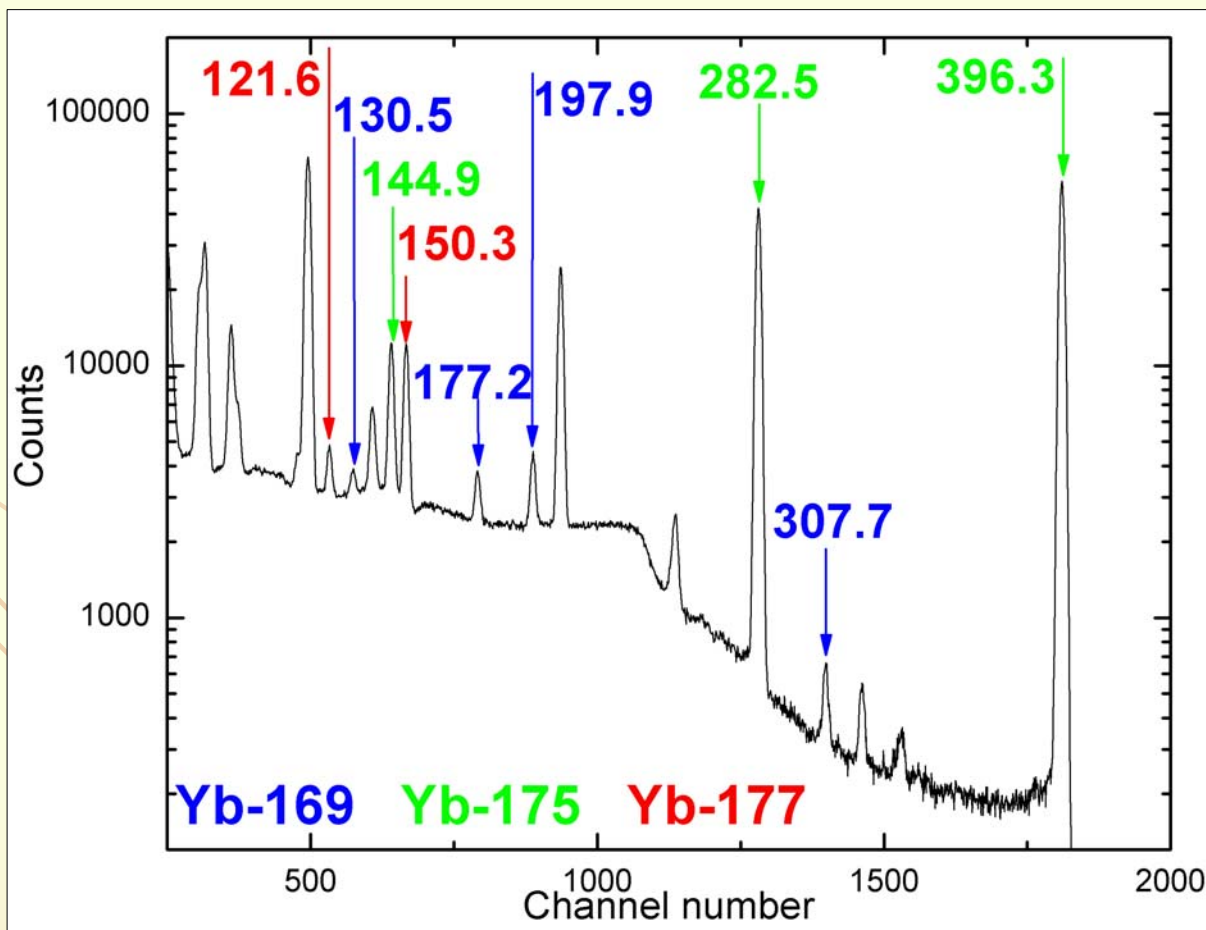
Wywołana aktywność w badanych próbkach i foliach Au wyznaczana była za pomocą pojedynczych HPGe detektorów oraz przy pomocy detektora HPGe typu clover.



# Pomiary przekrojów czynnych

## - pomiar aktywności

Do obliczeń wykorzystane zostały najbardziej intensywne linie gamma pochodzące z rozpadu jąder powstałych w trakcie aktywacji.



# Pomiary przekrojów czynnych

## - analiza danych

Po aktywacji:  $A = \Phi_{\text{tot}} N \sigma f_B$       gdzie:  $f_B = \frac{\int_0^{t_a} \Phi(t) e^{-\lambda(t_a-t)} dt}{\int_0^{t_a} \Phi(t) dt}$

Liczba zliczeń  $C$  w detektorze:  $C = AK_{\gamma} \varepsilon_{\gamma} I_{\gamma} (1 - e^{-\lambda t_m}) e^{-\lambda t_w}$

Współczynnik samopochłaniania kwantów gamma:  $K_{\gamma} = \frac{1 - e^{-\mu x}}{\mu x}$

Ponieważ wszystkie pomiary wykonane zostały w stosunku do  $^{197}\text{Au}$  jako standardu można napisać:

$$\frac{A_i}{A_{Au}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{Au}} \cdot \frac{N_i}{N_{Au}} \cdot \frac{f_{B_i}}{f_{B_{Au}}}$$

z równania tego wyznaczany jest przekrój czynny  $\sigma_i$



# Pomiary przekrojów czynnych

## - analiza danych

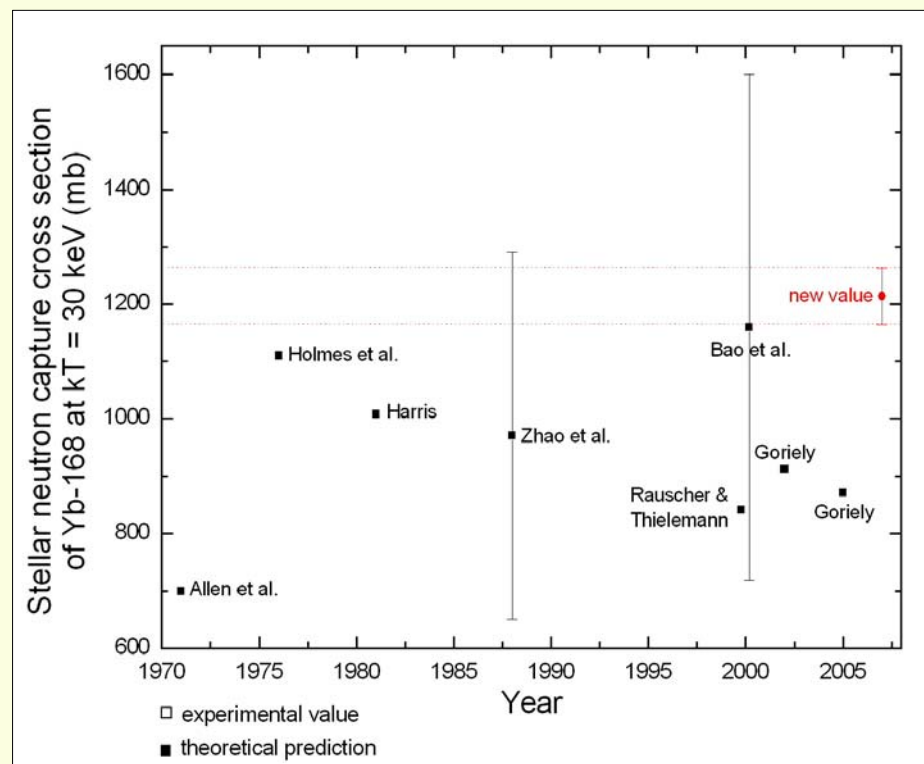
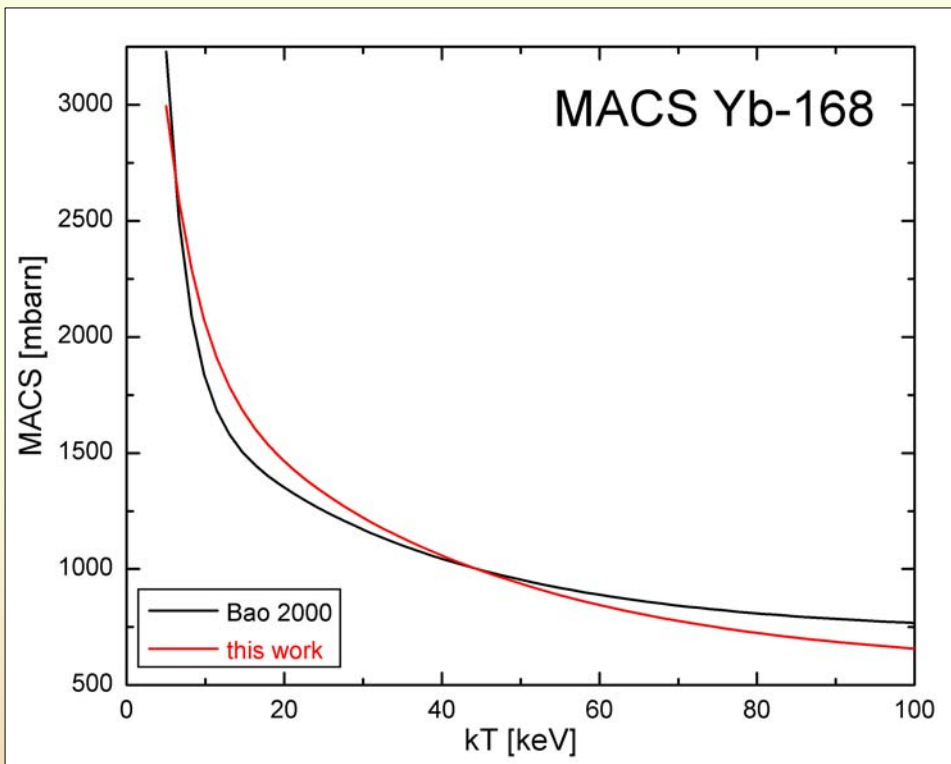
Eksperymentalny przekrój czynny może być przekształcony w **Maxwellowski Uśredniony Przekrój Czynny** dla  $kT=25$  keV używając relacji:

$$MACS = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma_i$$

Krok ten wymaga nieznacznej korekty ze względu na fakt, iż eksperymentalne widmo neutronów nieco odbiega od rzeczywistego termalnego rozkładu.

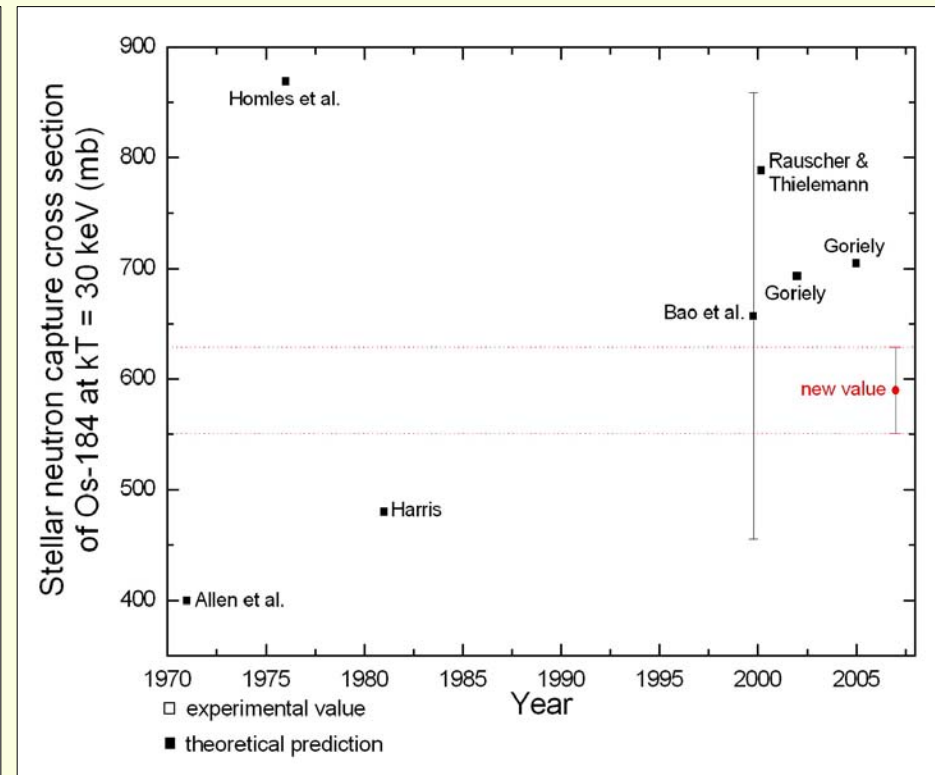
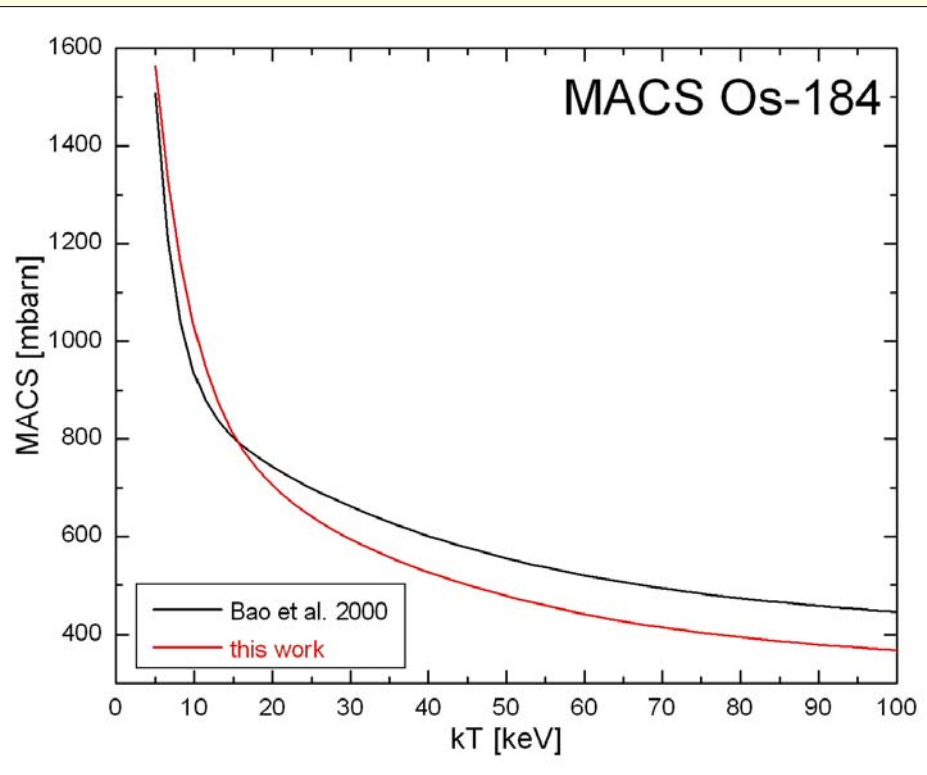
# Wyniki – $^{168}\text{Yb}$

$$\langle\sigma\rangle_{30} = (1214 \pm 49) \text{ mbarn} \quad (4\%)$$



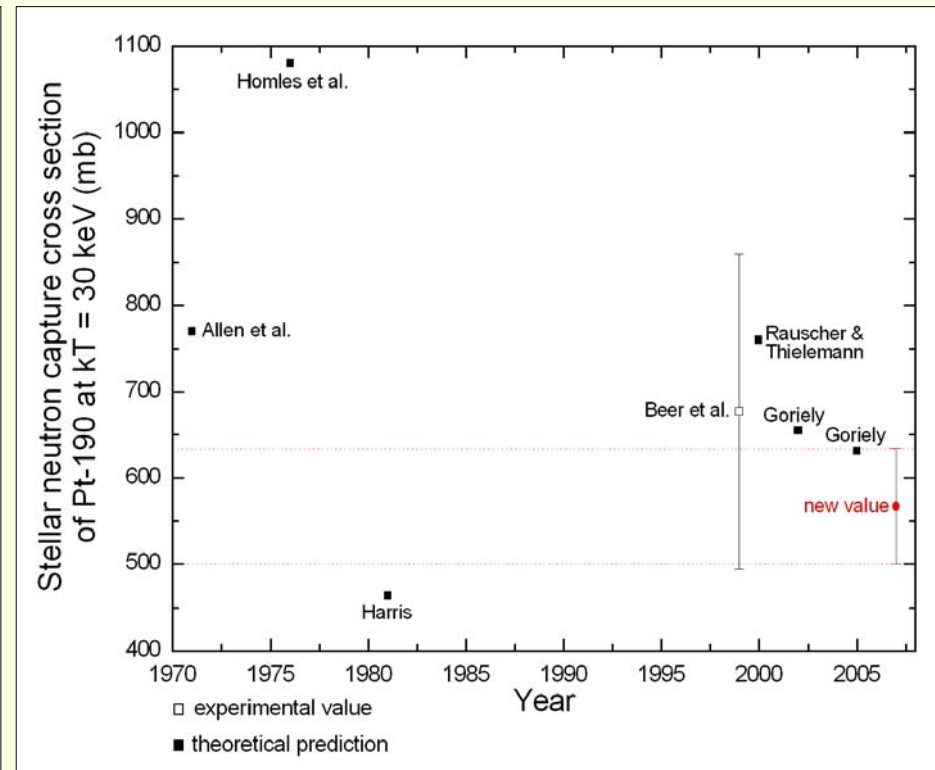
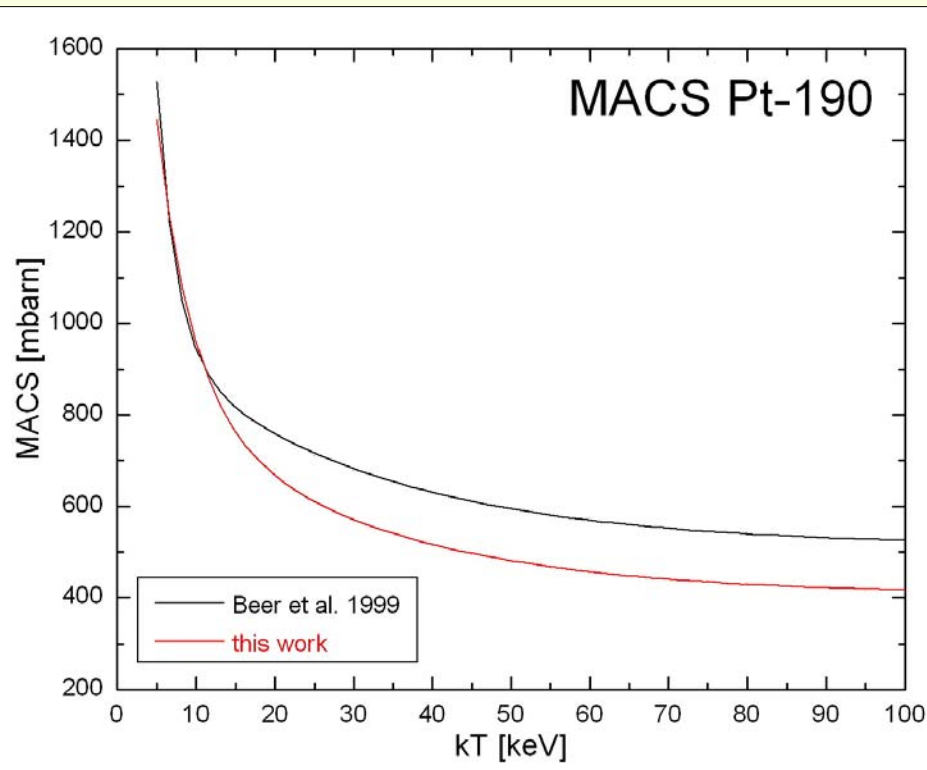
# Wyniki – $^{184}\text{Os}$

$$\langle\sigma\rangle_{30} = (590 \pm 39) \text{ mbarn} \quad (6.5\%)$$



# Wyniki – $^{190}\text{Pt}$

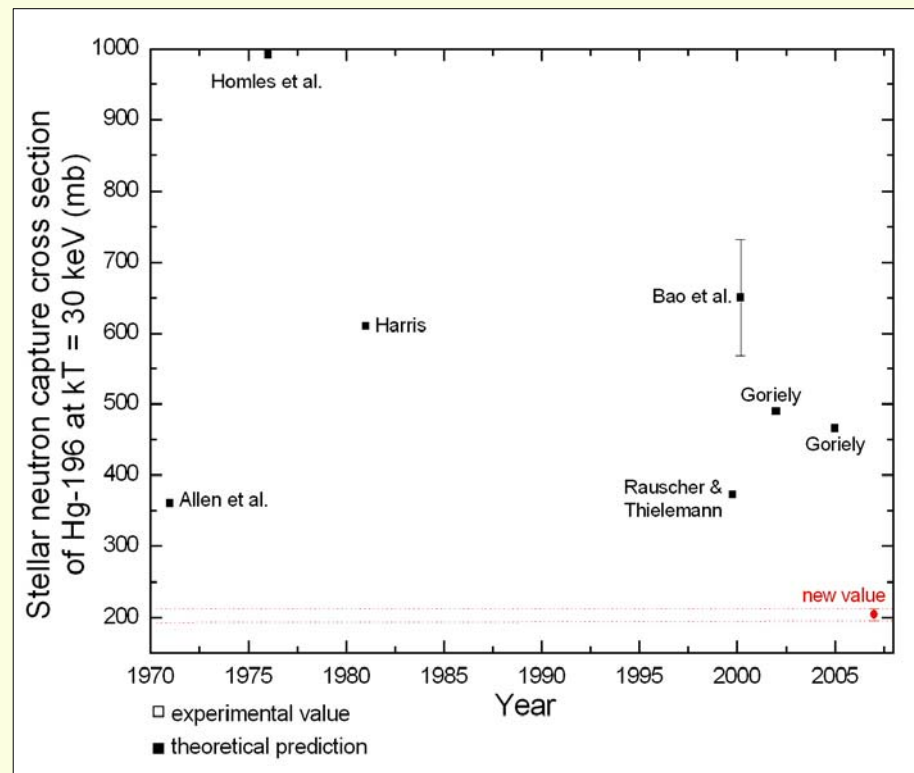
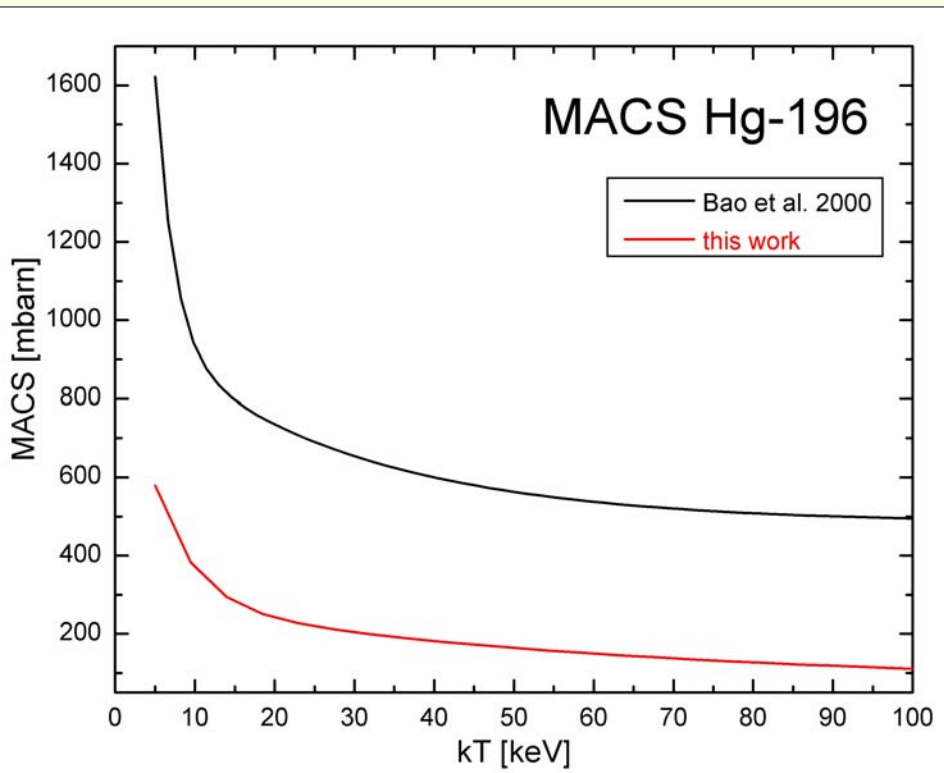
$$\langle\sigma\rangle_{30} = (567 \pm 67) \text{ mbarn} \quad (12\%)$$



# Wyniki – $^{196}\text{Hg}$

$$\langle\sigma\rangle_{30} = (204 \pm 8) \text{ mbarn} \quad (3.8\%)$$

$$\langle\sigma\rangle_{30}(\text{part}) = (26.7 \pm 1.3) \text{ mbarn} \quad (4.4\%)$$



# Błędy

<b><math>^{168}\text{Yb}</math></b>	
	<b>Błąd %</b>
Standard Au	2.00
Wydajność detektora	2.00
Samoabsorpcja kwantów gamma	0.01 – 0.12
Intensywność linii gamma	1.79 – 1.96
Przebieg aktywacji	pomijalny
Czas połowicznego zaniku	0.02
Statystyka	0.29 – 2.20
<b>Całkowity błąd</b>	<b>4.0 – 4.1</b>

<b><math>^{184}\text{Os}</math></b>	
	<b>Błąd %</b>
Standard Au	2.00
Wydajność detektora	2.00
Samoabsorpcja kwantów gamma	0.10
Intensywność linii gamma	3.97
Przebieg aktywacji	0.01 – 0.02
Czas połowicznego zaniku	0.53
Statystyka	0.10 – 0.22
<b>Całkowity błąd</b>	<b>6.5 – 6.6</b>

<b><math>^{190}\text{Pt}</math></b>	
	<b>Błąd %</b>
Standard Au	2.00
Wydajność detektora	2.00
Samoabsorpcja kwantów gamma	0.10
<b>Intensywność linii gamma</b>	<b>10.95 – 11.67</b>
Przebieg aktywacji	0.46 – 0.73
Czas połowicznego zaniku	0.89
Statystyka	0.13 – 0.91
<b>Całkowity błąd</b>	<b>11.4 – 12.2</b>

<b><math>^{196}\text{Hg}</math></b>	
	<b>Błąd %</b>
Standard Au	2.00
Wydajność detektora	2.00
Samoabsorpcja kwantów gamma	0.07 – 0.12
Intensywność linii gamma	2.14
Przebieg aktywacji	0.05 – 0.08
Czas połowicznego zaniku	0.08
Błąd od stanu izomerycznego	0.10
Statystyka	0.40 – 0.79
<b>Całkowity błąd</b>	<b>3.9 – 4.0</b>

# Wyniki

Pierwiastek	Izotop	MACS (mbarn)	Błąd (%)	Poprzednia wartość (mbarn)	Błąd (%)
Iterb	$^{168}\text{Yb}$	$1214 \pm 49$	4.0	$1160 \pm 440$	38
	$^{174}\text{Yb}$	$156 \pm 6$	3.7	$151 \pm 2$	1.3
	$^{176}\text{Yb}$	$113 \pm 10$	9.3	$116 \pm 2$	1.7
Osm	$^{184}\text{Os}$	$590 \pm 39$	6.5	$657 \pm 200$	31
	$^{190}\text{Os}$	$274 \pm 12$	4.5	$295 \pm 45$	15
	$^{192}\text{Os}$	$155 \pm 7$	4.7	$311 \pm 45$	14.5
Platyna	$^{190}\text{Pt}$	$567 \pm 67$	12.0	$677 \pm 180$	27
	$^{196}\text{Pt}$	$171 \pm 22$	13.0	$197 \pm 23$	11.7
	$^{196}\text{Pt}^m$	$11.4 \pm 0.5$	4.3	$13.0 \pm 1.4$	10.8
	$^{198}\text{Pt}$	$94 \pm 5$	5.2	$82 \pm 12$	14.6
Rtęć	$^{196}\text{Hg}$	$204 \pm 8$	3.8	$650 \pm 80$	12.6
	$^{196}\text{Hg}^m$	$26.7 \pm 1.3$	4.4	–	–
	$^{202}\text{Hg}$	$62 \pm 2$	3.2	$74 \pm 6$	8

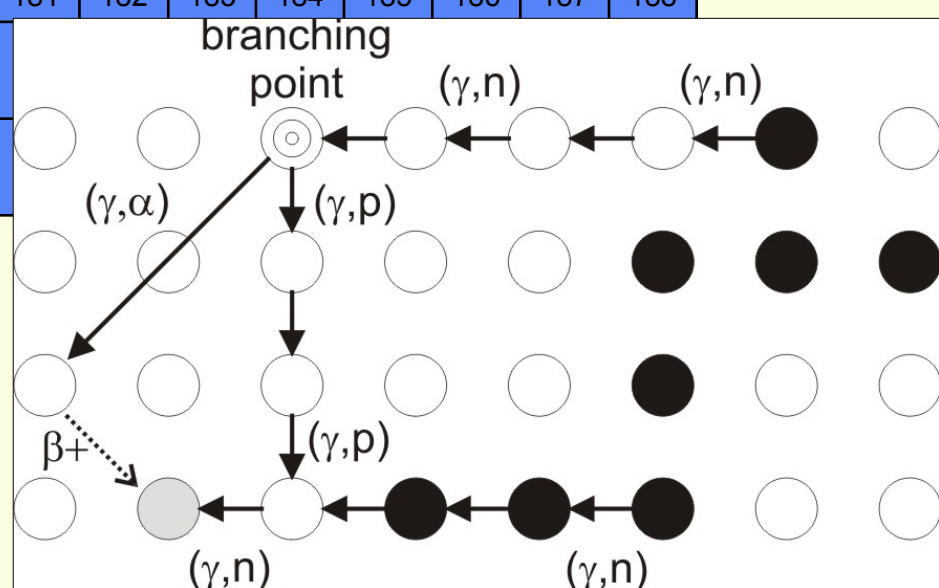
Metoda aktywacji

Metoda TOF

Wartość teoretyczna

Metoda TOF z lat 80-tych

Hg 178	Hg 179	Hg 180	Hg 181	Hg 182	Hg 183	Hg 184	Hg 185	Hg 186	Hg 187	Hg 188	Hg 189	Hg 190	Hg 191	Hg 192	Hg 193	Hg 194	Hg 195	Hg 196	Hg 197	Hg 198
Au 177	Au 178	Au 179	Au 180	Au 181	Au 182	Au 183	Au 184	Au 185	Au 186	Au 187	Au 188	Au 189	Au 190	Au 191	Au 192	Au 193	Au 194	Au 195	Au 196	Au 197
Pt 176	Pt 177	Pt 178	Pt 179	Pt 180	Pt 181	Pt 182	Pt 183	Pt 184	Pt 185	Pt 186	Pt 187	Pt 188	Pt 189	Pt 190	Pt 191	Pt 192	Pt 193	Pt 194	Pt 195	Pt 196
Ir 175	Ir 176	Ir 177	Ir 178	Ir 179	Ir 180	Ir 181	Ir 182	Ir 183	Ir 184	Ir 185	Ir 186	Ir 187	Ir 188	Ir 189	Ir 190	Ir 191	Ir 192	Ir 193	Ir 194	Ir 195
Os 174	Os 175	Os 176	Os 177	Os 178	Os 179	Os 180	Os 181	Os 182	Os 183	Os 184	Os 185	Os 186	Os 187	Os 188	Os 189	Os 190	Os 191	Os 192	Os 193	Os 194
Re 173	Re 174	Re 175	Re 176	Re 177	Re 178	Re 179	Re 180	Re 181	Re 182	Re 183	Re 184	Re 185	Re 186	Re 187	Re 188	Re 189	Re 190	Re 191	Re 192	Re 193
W 172	W 173	W 174	W 175	W 176	W 177	W 178	W 179	W 180	W 181	W 182	W 183	W 184	W 185	W 186	W 187	W 188	W 189	W 190	W 191	W 192
Ta 171	Ta 172	Ta 173	Ta 174	Ta 175	Ta 176	Ta 177	Ta 178	Ta 179	Ta 180	Ta 181	Ta 182	Ta 183	Ta 184	Ta 185	Ta 186	Ta 187	Ta 188	Ta 189		
Hf 170	Hf 171	Hf 172	Hf 173	Hf 174	Hf 175	Hf 176	Hf 177	Hf 178	Hf 179	Hf 180	Hf 181	Hf 182	Hf 183	Hf 184	Hf 185	Hf 186	Hf 187	Hf 188		
Lu 169	Lu 170	Lu 171	Lu 172	Lu 173	Lu 174	Lu 175	Lu 176	Lu 177	Lu 178	Lu 179										
Yb 168	Yb 169	Yb 170	Yb 171	Yb 172	Yb 173	Yb 174	Yb 175	Yb 176	Yb 177	Yb 178										





# Wyniki

Pierwiastek	Izotop	MACS (mbarn)	Błąd (%)	Poprzednia wartość (mbarn)	Błąd (%)
Iterb	$^{168}\text{Yb}$	$1214 \pm 49$	4.0	$1160 \pm 440$	38
	$^{174}\text{Yb}$	$156 \pm 6$	3.7	$151 \pm 2$	1.3
	$^{176}\text{Yb}$	$113 \pm 10$	9.3	$116 \pm 2$	1.7
Osm	$^{184}\text{Os}$	$590 \pm 39$	6.5	$657 \pm 200$	31
	$^{190}\text{Os}$	$274 \pm 12$	4.5	$295 \pm 45$	15
	$^{192}\text{Os}$	$155 \pm 7$	4.7	$311 \pm 45$	14.5
Platyna	$^{190}\text{Pt}$	$567 \pm 67$	12.0	$677 \pm 180$	27
	$^{196}\text{Pt}$	$171 \pm 22$	13.0	$197 \pm 23$	11.7
	$^{196}\text{Pt}^m$	$11.4 \pm 0.5$	4.3	$13.0 \pm 1.4$	10.8
	$^{198}\text{Pt}$	$94 \pm 5$	5.2	$82 \pm 12$	14.6
Rtęć	$^{196}\text{Hg}$	$204 \pm 8$	3.8	$650 \pm 80$	12.6
	$^{196}\text{Hg}^m$	$26.7 \pm 1.3$	4.4	–	–
	$^{202}\text{Hg}$	$62 \pm 2$	3.2	$74 \pm 6$	8

Metoda aktywacji

Metoda TOF

Wartość teoretyczna

Metoda TOF z lat 80-tych

# Podsumowanie

- wszystkie pomiary wykonane zostały za pomocą metody aktywacji;
- dotychczas, przekroje czynne typu  $(n, \gamma)$  dla  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{184}\text{Os}$  i  $^{196}\text{Hg}$  – znane jedynie teoretyczne wartości;
- większość nowo-uzyskanych wyników obarczonych jest zdecydowanie mniejszymi błędami niż dotychczasowe dane;
- nowe, bardziej dokładne wartości przekrojów czynnych typu  $(n, \gamma)$  dla  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{174}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Yb}$ ,  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Os}$ ,  $^{192}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$ ,  $^{196}\text{Pt}$ ,  $^{198}\text{Pt}$ ,  $^{196}\text{Hg}$ , oraz  $^{202}\text{Hg}$ , posłużą do bardziej precyzyjnej symulacji przebiegu procesu nukleosyntezy ciężkich pierwiastków w procesie  $p$ .

# Obecny status gwiazdowego przekroju czynnego typu $(n, \gamma)$

- eksperymentalne wartości  
przekrojów czynnych typu  $(n, \gamma)$ ;

- z błędem  $\geq 9\%$ ;

- teoretyczne lub  
pół-empiryczne wartości;

- nowe eksperymentalne wartości

- planowany pomiar

Isotope	El. Abund. %	Year	$(n, \gamma)$ MACS at 30 keV	Uncert. %
Se-74	0.89	2004	$271 \pm 15$	5.5
Kr-78	0.35	1991	$312 \pm 26$	8.3
Sr-84	0.56	2004	$300 \pm 17$	5.7
Mo-92	14.84	1978	$70 \pm 10$	14.3
Mo-94	9.25	1972, 1978	$102 \pm 20$	19.6
Ru-96	5.52	2002	$207 \pm 8$	3.9
Ru-98	1.88		$173 \pm 36$	20.8
Pd-102	1.02	2005	$370 \pm 20$	5.4
Cd-106	1.25	1998	$302 \pm 24$	7.9
Cd-108	0.89	1998	$202 \pm 9$	4.5
In-113	4.3	1966	$787 \pm 70$	8.9
Sn-112	0.97	1979, 1989	$210 \pm 12$	5.7
Sn-114	0.65	1996	$134.4 \pm 1.8$	1.3
Sn-115	0.34	1996	$342.4 \pm 8.7$	2.5
Te-120	0.096	2005	$499 \pm 30$	6.0
Xe-124	0.1	1991	$644 \pm 83$	12.9
Xe-126	0.09	1991	$359 \pm 51$	14.2
Ba-130	0.106	2005	$767 \pm 40$	5.2
Ba-132	0.101	2005	$399 \pm 25$	6.3
Ce-136	0.185	1996	$328 \pm 21$	6.4
Ce-138	0.251	1996	$179 \pm 5$	2.8
La-138	0.09		767*	
Sm-144	3.07	1993	$92 \pm 6$	6.5
Dy-156	0.06	1985	$1567 \pm 145$	9.3
Dy-158	0.1		$1060 \pm 400$	37.7
Er-162	0.14	1996	$1624 \pm 124$	7.6
Yb-168	0.13	2007	$1214 \pm 49$	4 (37.9)
Hf-174	0.16		$983 \pm 46$	4.7
W-180	0.12	1987	$536 \pm 60$	11.2
Os-184	0.02	2007	$590 \pm 39$	6.5 (30.7)
Pt-190	0.014	2007	$567 \pm 67$	12 (27)
Hg-196	0.15	2007	$204 \pm 8$	3.8 (12.6)

