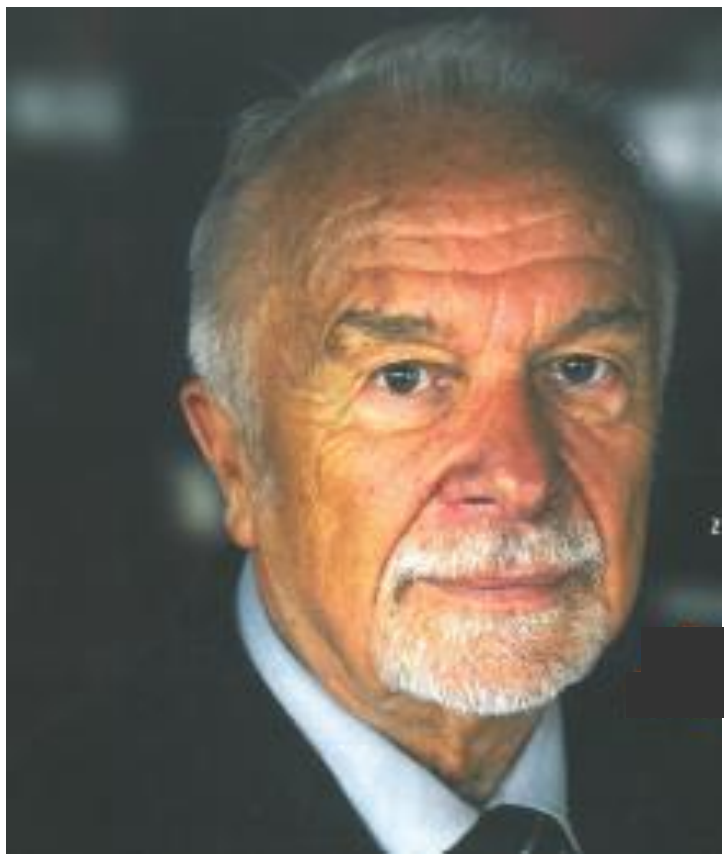


# Od antyprotonów do izotopów medycznych; dorobek naukowy profesora Jerzego Jastrzębskiego



Krzysztof Rusek, Agnieszka Trzcińska,  
Mateusz Sitarz



# CV

- Urodzony w 1934 r. w Poznaniu
- Absolwent wydz. Mat.-fiz.-chem. UAM, 1955
- 1955-1983 w Inst. Badań Jądrowych w Świerku
- 1983-2018 w ŚLCJ UW
- Doktorat 1963, hab. 1971, prof. 1981
  
- 1957-1967, IPN Orsay, CEA Saclay, CERN
- 1976-1977, Indiana Univ. Cyc. Facility
- 1994-1995, CERN

## Brief history of experimental nuclear physics in Poland

**1930's**      **Warsaw University** – cascade generator – ions of hundreds keV  
**Stefan Batory University, Vilno** – natural radioactivity;  
Ra source

---

**1946 - 1955**      **Warsaw University** – **Andrzej Soltan**  
1 MV cascade accelerator (1950)

**Jagiellonian University** – **Henryk Niewodniczański**  
home built cyclotron U-48 (1956)

---

**1955 - 1970**      **IBJ Swierk - Warsaw** – reactor EWA (1958); MARIA (1968)  
**IFJ Krakow** – cyclotron U-120 (1958)  
**Warsaw University** – home built 3 MV Van de Graaff (1961)

---

**1970 -**      **IFJ Krakow** – construction of the U-144 cyclotron  
**Warsaw University** – construction of the Warsaw Cyclotron  
– commissioning 1994

# CV

- Urodzony w 1934 r. w Poznaniu
- Absolwent wydz. Mat.-fiz.-chem. UAM, 1955
- 1955-1983 w Inst. Badań Jądrowych w Świerku
- 1983-2018 w ŚLCJ UW
- Doktorat 1963, hab. 1971, prof. 1981
  
- 1957-1967, IPN Orsay, CEA Saclay, CERN
- 1976-1977, Indiana Univ. Cyc. Facility
- 1994-1995, CERN



# Spektroskopia jądrowa

1.E.4:  
3.A

*Nuclear Physics* **42** (1963) 330—352; © North-Holland Publishing Co., Amsterdam

Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher

## EXPERIMENTAL MATRIX ELEMENT FOR THE ELECTRON CAPTURE TRANSITION $\text{Er}^{165} \rightarrow \text{Ho}^{165}$

J. ŻYLICZ, Z. SUJKOWSKI, J. JASTRZEBSKI, O. WOŁCZEK

*Institute for Nuclear Research, Dept. of Physics, Swierk by Warsaw, Poland*

S. CHOJNACKI

*Institute for Experimental Physics, Warsaw University, Warsaw*

and

I. YUTLANDOV

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna*

Received 24 October 1962

**Abstract:** The radiative capture in the decay of  $\text{Er}^{165}$  was studied by means of scintillation spectrometry. Both singles and KX-ray coincident internal bremsstrahlung spectra were measured. The results were compared to the theory of Glauber and Martin. The shape of the singles spectrum was fitted to the theoretical one by  $\chi^2$  test and good agreement was obtained for the energy interval considered. The shape of the coincidence spectrum, corresponding to the radiative K capture alone, also agreed well with that predicted by the theory. The  $Q$  value deduced from both singles and coincidence experiments was  $Q = (371 \pm 6)$  keV. Upper limits for decay branching to the excited states of  $\text{Ho}^{165}$  were established. The half-life of  $\text{Er}^{165}$  was measured to be  $(10.39 \pm 0.07)$  h. The  $ft$  value for the ground state transition was deduced to be  $(4.33 \pm 0.17) \times 10^4$  sec ( $\log ft = 4.64 \pm 0.02$ ). This value has been used in discussion of the effects of the pairing correlations of the superconductivity type on matrix elements in beta decay.

**PROPERTIES OF LOW-LYING LEVELS  
IN THE EVEN PLATINUM NUCLEI ( $182 \leq A \leq 192$ )**

M. FINGER †, R. FOUCHER, J. P. HUSSON, J. JASTRZEBSKI †† and A. JOHNSON

*Institut de Physique Nucléaire, Orsay, France*

and

G. ASTNER †††, B. R. ERDAL ‡, A. KJELBERG and P. PATZELT ‡‡

*CERN, Geneva, Switzerland*

and

Å. HOGLUND and S. G. MALMSKOG

*University of Stockholm, Sweden*

and

R. HENCK

*Centre de Recherches nucléaires, Strasbourg-Cronenbourg, France*

*(The ISOLDE Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland)*

Received 9 February 1972

**Abstract:** Decay properties of neutron-deficient even-mass Au isotopes obtained from the decay of on-line mass-separated Hg isotopes are presented. New information on energies, spins, parities and transition probabilities concerning low-lying states in even Pt isotopes are given. The experimental data are compared with the available theoretical predictions.

# „Szkoly” mazurskie



Foto A. Wojtasiewicz

# Współpraca Polska-Francja

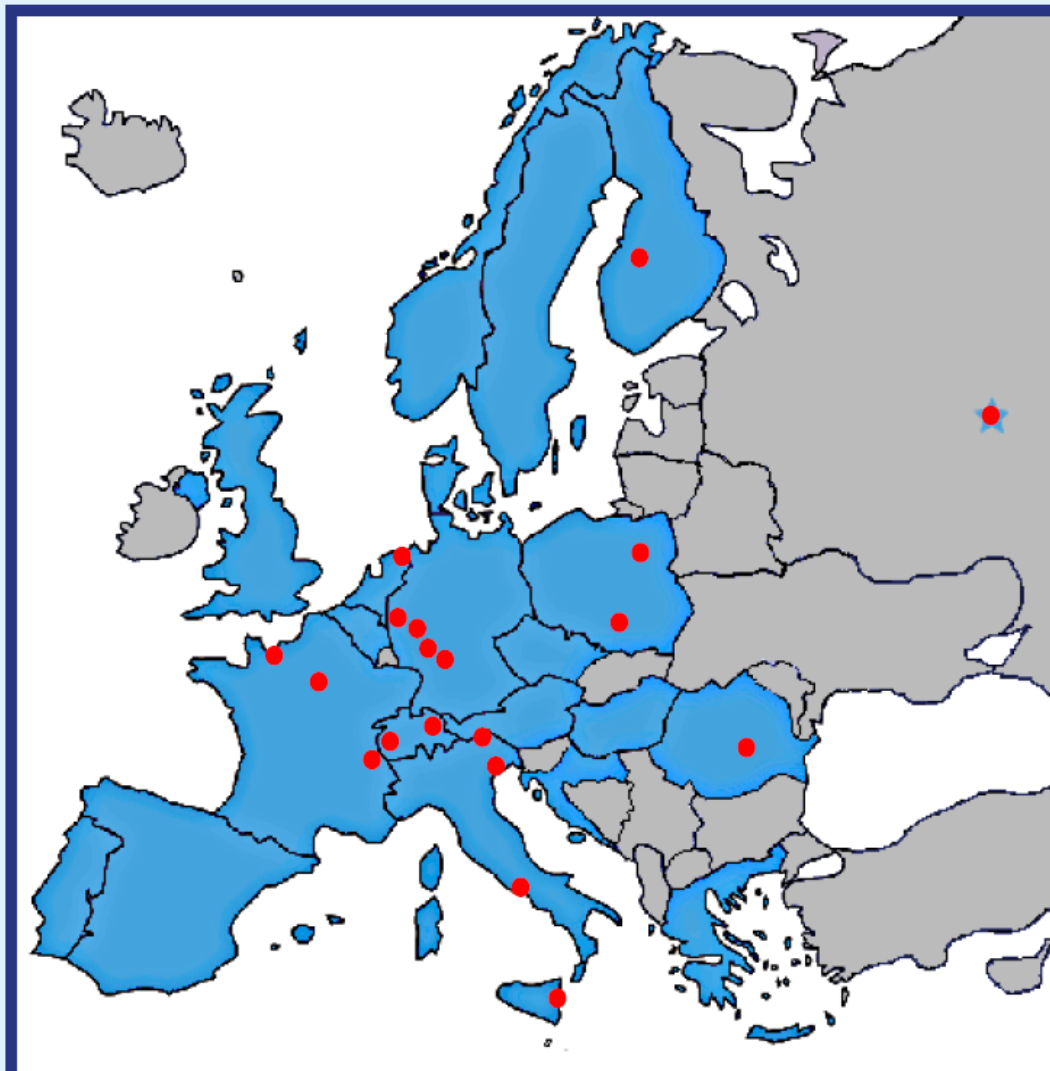
- Umowa o współpracy podpisana w 1974 r (IN2P3-UW), koordynatorzy J.J., J. Żylicz, J. Styczeń, A. Maj
- Co roku ok. 500 dni we Francji i tyleż w Polsce
- Aparatura (ICARE, PARIS...)
- Konsorcjum COPIN

# NuPECC

komisja ekspercka

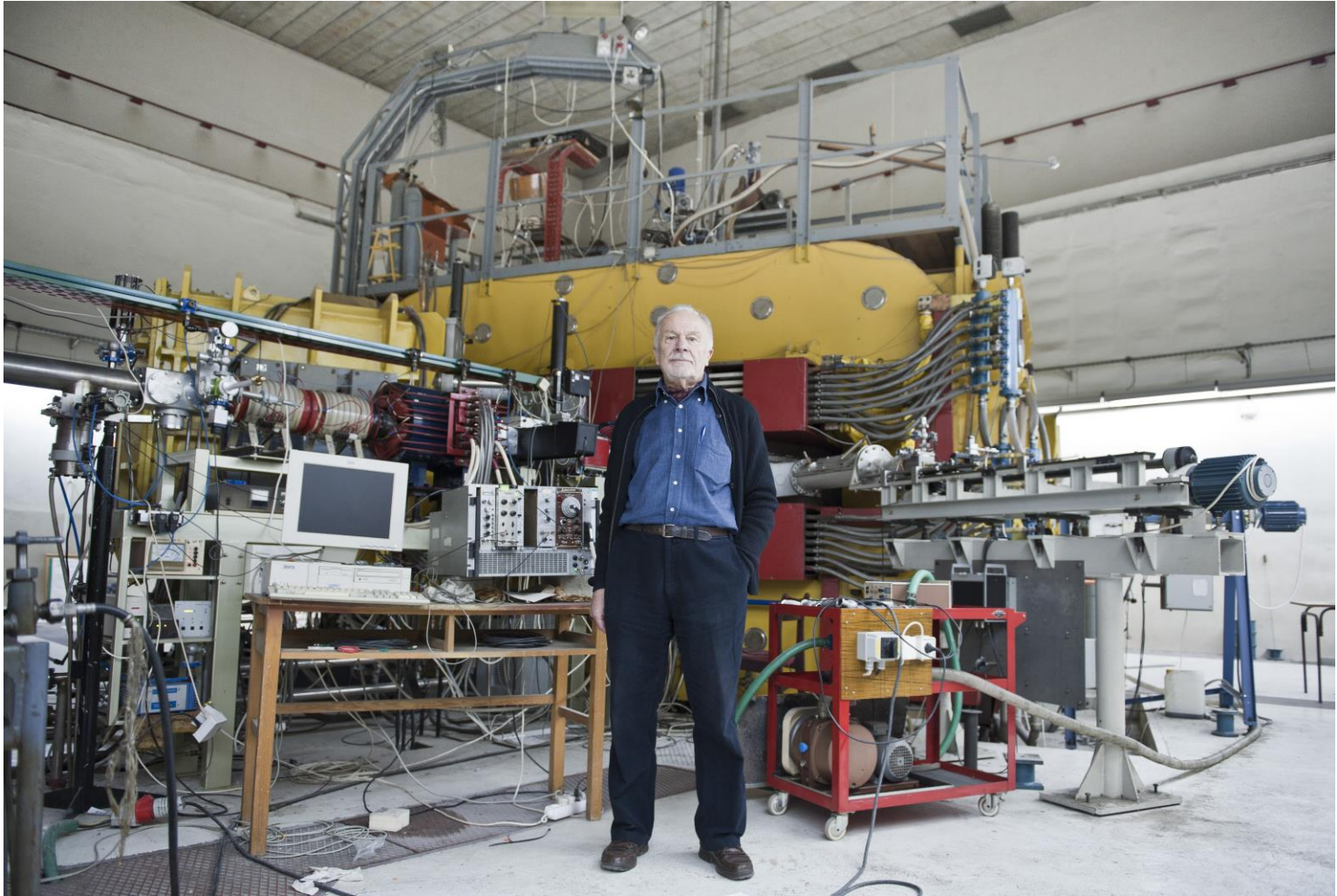
European Science  
Foundation

J.J. pierwszym  
przedstawicielem  
Polski, obecnie A. Maj



● From North to South:  
**JYFL** (Jyväskylä, Finland), **JINR** (Dubna, Russia),  
**KVI-CART** (Groningen, The Netherlands), **HIL** (Warsaw, Poland),  
**GANIL** (Caen, France), **COSY** (Jülich, Germany), **ELSA** (Bonn, Germany),  
**MAMI** (Mainz, Germany), **GSI** (Darmstadt, Germany), **ALTO** (Orsay, France),  
**CCB** (IFJ, PAN Kraków, Poland), **ILL** (Grenoble, France),  
**CERN** (Genève, Switzerland), **PSI** (Villingen, Switzerland),  
**ECT\*** (Trento, Italy), **LNL-INFN** (Legnaro, Italy), **IFIN-HH** (Bucharest, Romania),  
**LNF-INFN** (Frascati, Italy), **LNS-INFN** (Catania, Italy)





# HIL : OPBR







## **Centrum Projektowania i Syntezy Radiofarmaceutyków Ukierunkowanych Molekularnie „CERAD” w NCBJ Świerk**

Celem Projektu jest **stworzenie nowoczesnej infrastruktury badawczej w obszarze poszukiwania nowych radiofarmaceutyków do diagnostyki i terapii, opartych na aktywnych biologicznie ligandach działających na poziomie komórkowym i molekularnym.**

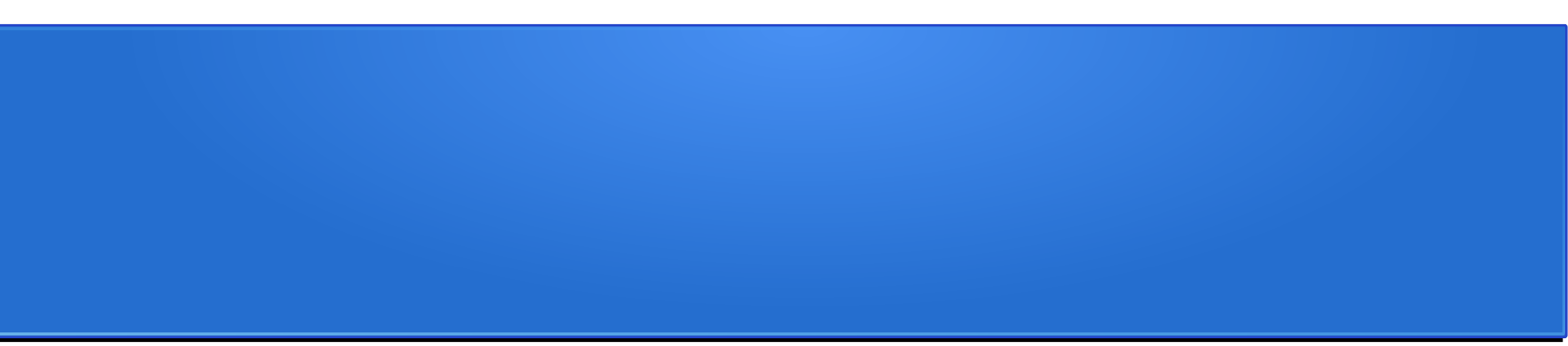
Elementy infrastruktury CERAD przewidziane do zakupu i budowy w ramach Projektu to:

- Budowa trójkondygnacyjnego budynku CERAD.
- Cyklotron o energii cząstek do 30 MeV.
- Laboratoria z wyposażeniem.

Pozostałymi elementami proponowanej infrastruktury CERAD, są: reaktor jądrowy MARIA, Centrum Informatyczne Świerk, Laboratorium Badań Przedklinicznych oraz wyposażenie Działu Badawczego POLATOM.

# HIL@ECOS

*Projektowane jest zastąpienie pracującego od 25 lat w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów UW akceleratora ciężkich jonów przez nowe urządzenie o znacznie polepszonych parametrach energii, zakresu jonów i natężenia wiązek. Realizacja projektu pozwoli na zaistnienie w Polsce i w naszej części Europy unikalnego urządzenia do badań podstawowych z fizyki jądrowej, w tym badań własności pierwiastków superciężkich, a także wielu zastosowań w energetyce jądrowej, medycynie, badaniach własności ciał stałych, astrofizyce i in. Ważnym aspektem projektu będzie możliwość rozwijania kształcenia kadry studentów i naukowców na najwyższym poziomie, z możliwościami dostępu do jednego z najlepszych urządzeń tego typu na świecie. Projekt stanowić będzie częściową realizację programu European Collaboration on high intensity Stable beams (ECOS) rozpatrywanego przez Europejski Program FP7 EURONS i rekomendowanego przez europejski komitet fizyki jądrowej Nuclear Physics European Collaboration Committee (NuPECC).*




badanie  
powierzchni jądrowej  
przy pomocy antyprotonów

współpraca PS209

# pierwsze eksperymenty z $\bar{p}$

- ~ 1988 roku - nawiązanie współpracy z grupą z TUM (Monachium) badającą oddziaływanie antyproton – jądro atomowe w CERN (@ LEAR)
- 1990 – pierwszy wspólny eksperyment – kontynuacja badań grupy z Monachium nad przekazem energii przy oddziaływaniu zatrzymanych antyprotonów z jądrami atomowymi:  
bombardowanie jąder Cu wiązką  $\bar{p}$

# pierwsze eksperymenty z $\bar{p}$

- naświetlanie grubych („kanapkowych”) tarcz wiązką  $\bar{p}$  z LEAR (@CERN)
- pomiary gamma *off-line*: kilka minut po naświetlaniu kontynuowane wiele tygodni
- identyfikacja produktów reakcji i wyznaczenie rozkładu masowego
- 1991 – kolejny eksperyment: badanie przekazu energii przy oddziaływaniu  $\bar{p}$  z jądrami Au i Th  halo neutronowe - ??

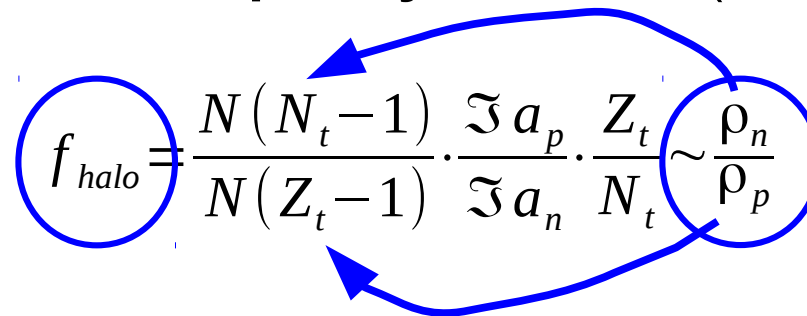
# halo neutronowe

- przypadek  $^{232}\text{Th}$  – zauważono znaczną różnicę w liczbie wyprodukowanych jąder  $^{231}\text{Th}$  ( $N_t-1$ ) w porównaniu z liczbą jąder  $^{231}\text{Ac}$  ( $Z_t-1$ )
- zdefiniowany został tzw **współczynnik halo** (*halo factor*):

$$f_{halo} = \frac{N(N_t-1)}{N(Z_t-1)} \cdot \frac{\mathfrak{S}a_p}{\mathfrak{S}a_n} \cdot \frac{Z_t}{N_t}$$

# halo neutronowe

- przypadek  $^{232}\text{Th}$  – zauważono znaczną różnicę w liczbie wyprodukowanych jąder  $^{231}\text{Th}$  ( $N_t-1$ ) w porównaniu z liczbą jąder  $^{231}\text{Ac}$  ( $Z_t-1$ )
- zdefiniowany został tzw **współczynnik halo** (*halo factor*):

$$f_{halo} = \frac{N(N_t-1)}{N(Z_t-1)} \cdot \frac{\mathfrak{S}a_p}{\mathfrak{S}a_n} \cdot \frac{Z_t}{N_t} \sim \frac{\rho_n}{\rho_p}$$




# halo neutronowe

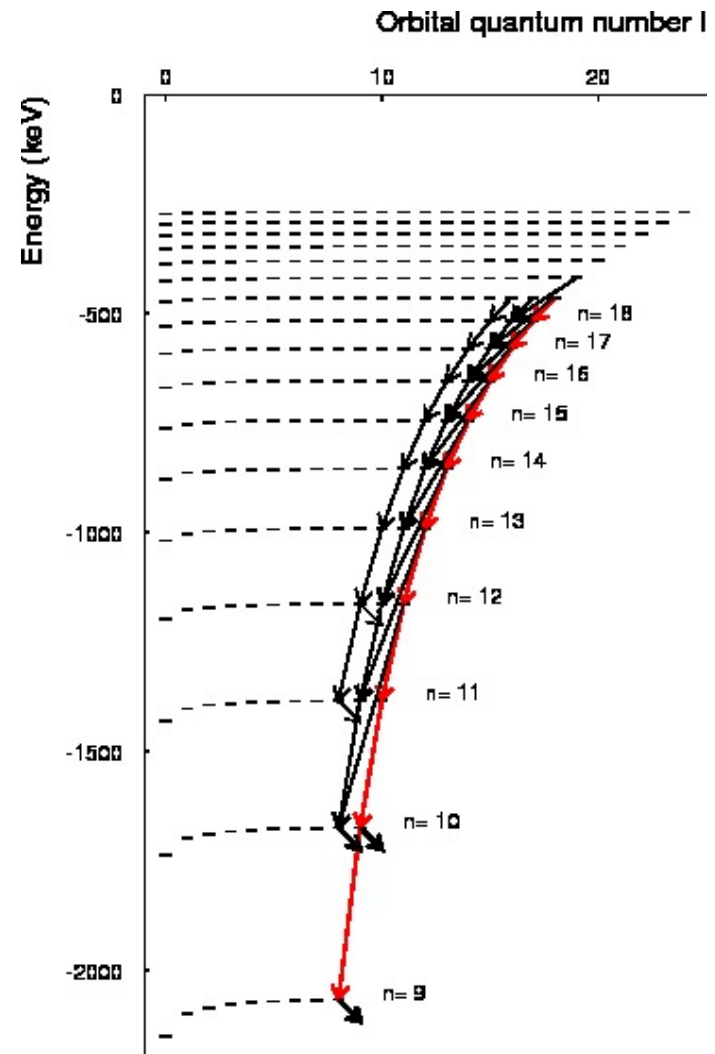
- przypadek  $^{232}\text{Th}$  – zauważono znaczną różnicę w liczbie wyprodukowanych jąder  $^{231}\text{Th}$  ( $N_t-1$ ) w porównaniu z liczbą jąder  $^{231}\text{Ac}$  ( $Z_t-1$ )
- zdefiniowany został tzw **współczynnik halo** (*halo factor*):

$$f_{halo} = \frac{N(N_t-1)}{N(Z_t-1)} \cdot \frac{\mathfrak{I} a_p}{\mathfrak{I} a_n} \cdot \frac{Z_t}{N_t} \sim \frac{\rho_n}{\rho_p}$$

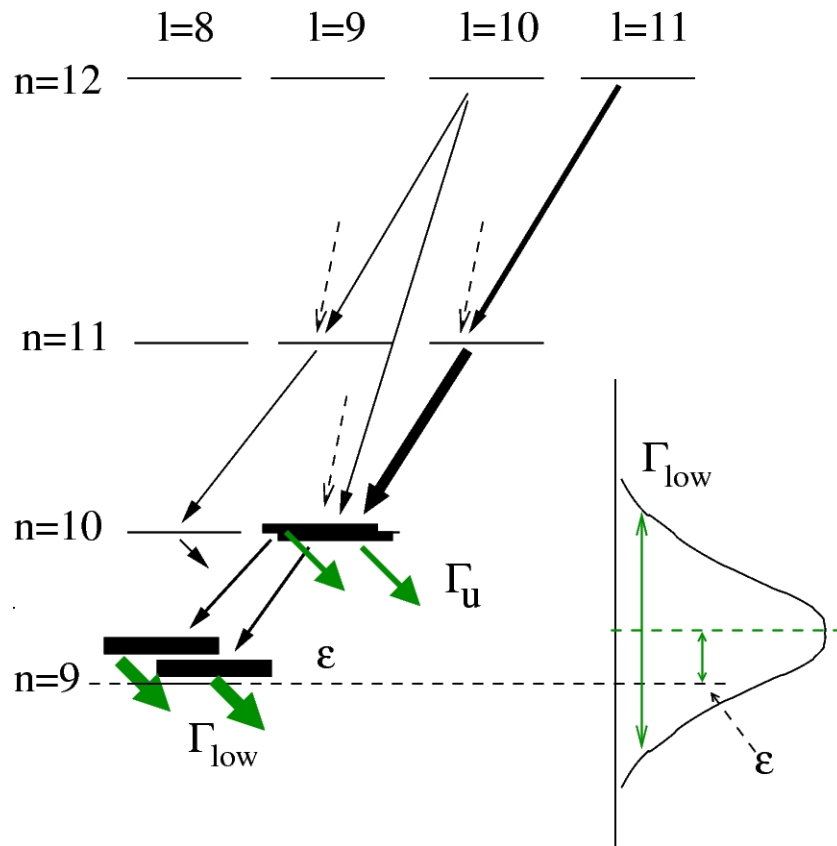
- 1992, 1993, 1996 – badanie halo w kolejnych izotopach:  $^{nat}\text{Sc}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{96}\text{Ru}$ ,  $^{nat}\text{Cd}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{nat}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Nd}$ ,  $^{154}\text{Sm}$ ,  $^{nat}\text{Eu}$ ,  $^{160}\text{Gd}$ ,  $^{nat}\text{Yb}$ ,  $^{176}\text{Yb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$

# atomy antyprotonowe

- tworzenie:
  - wychwyt  $\bar{p}$  na “wysoką” orbitę
  - deekscytacja ( $10^{-15}$  -  $10^{-14}$  s):
    - emisja elektronów Augera,
    - emisja promieniowania X (o energiach odpowiadających  $\gamma$ )
  - anihilacja



# efekty oddziaływania silnego



**oddziaływanie silne**



**poszerzenie i przesunięcie poziomów  $\bar{\rho}$**

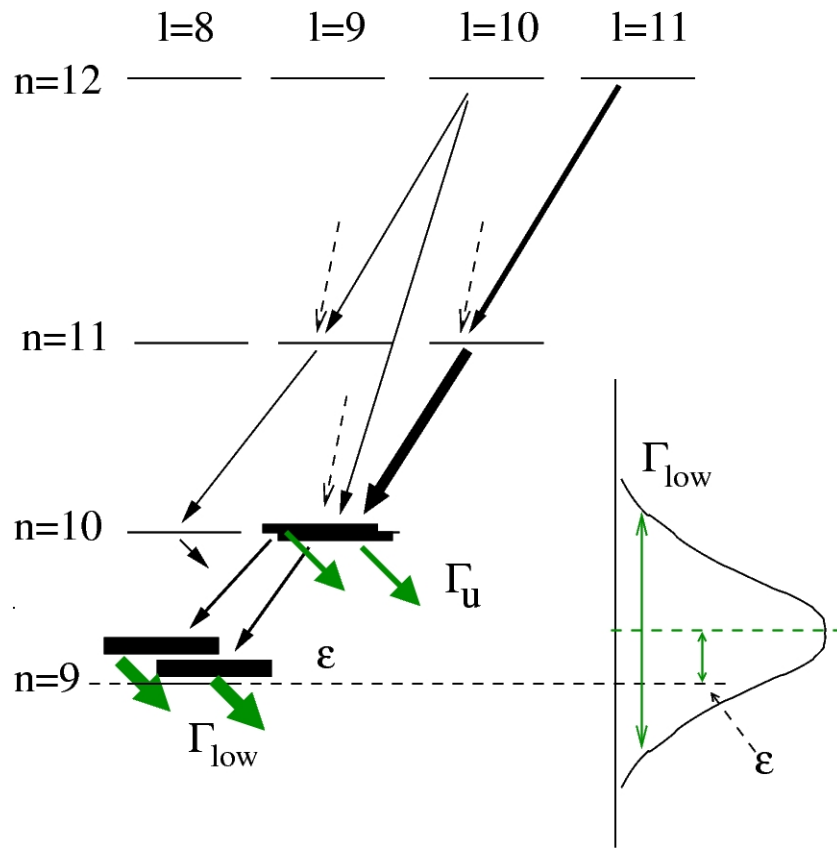
w eksperymencie mierzy się:

$\epsilon$  – wyznaczając energię linii

$\Gamma_{low}$  – wprost, z kształtu linii

$\Gamma_{up}$  – pośrednio, z balansu intensywności

# efekty oddziaływania silnego



**oddziaływanie silne**

poszerzenie i przesunięcie poziomów  $\bar{\rho}$

$$\epsilon \quad \epsilon/2 \sim \int (\Psi(r)^2) \Re[V^{opt}(r, \rho)] d\bar{r}$$

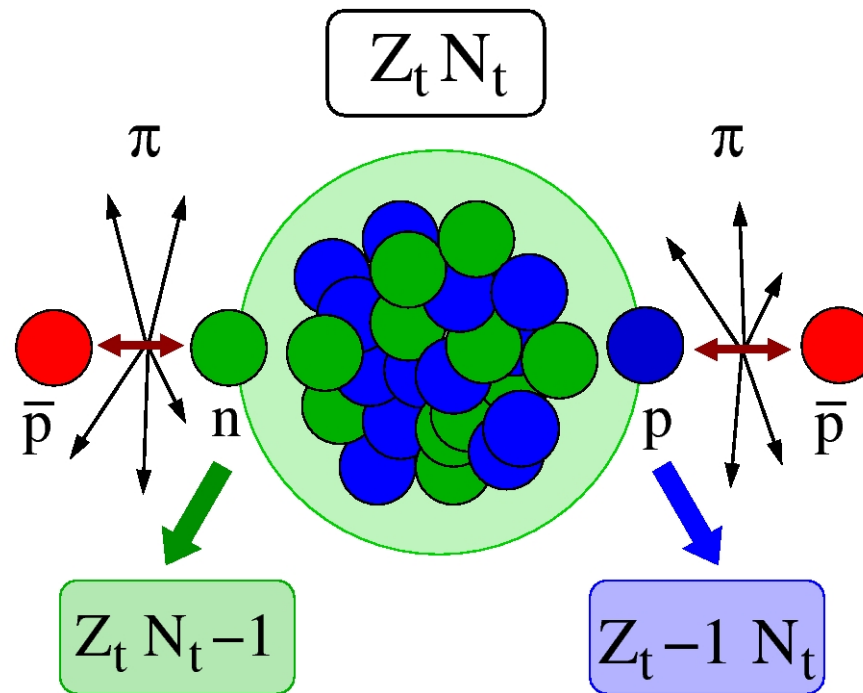
$\Gamma_{low}$

$$\Gamma/2 = - \int (\Psi(r)^2) \Im[V^{opt}(r, \rho)] d\bar{r}$$

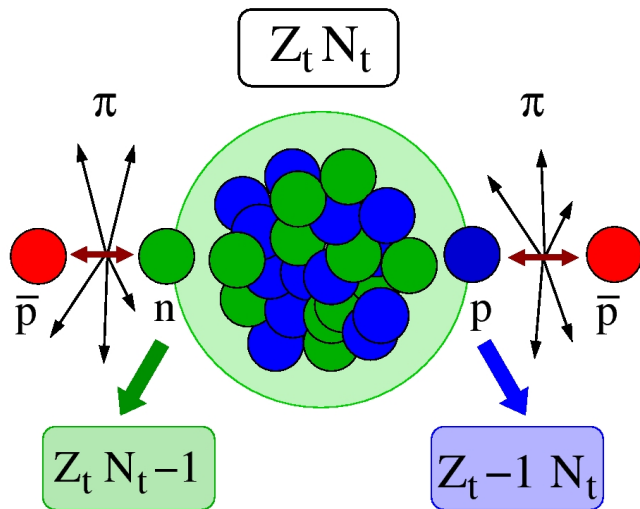
$\Gamma_{up}$

# anihilacja

$\bar{p}$  kończy życie w atomie antyprotonowym anihilując na jednym z peryferyjnych nukleonów :  $p$  lub  $n$



$f_{\text{halo}}$



w eksperymencie mierzymy:

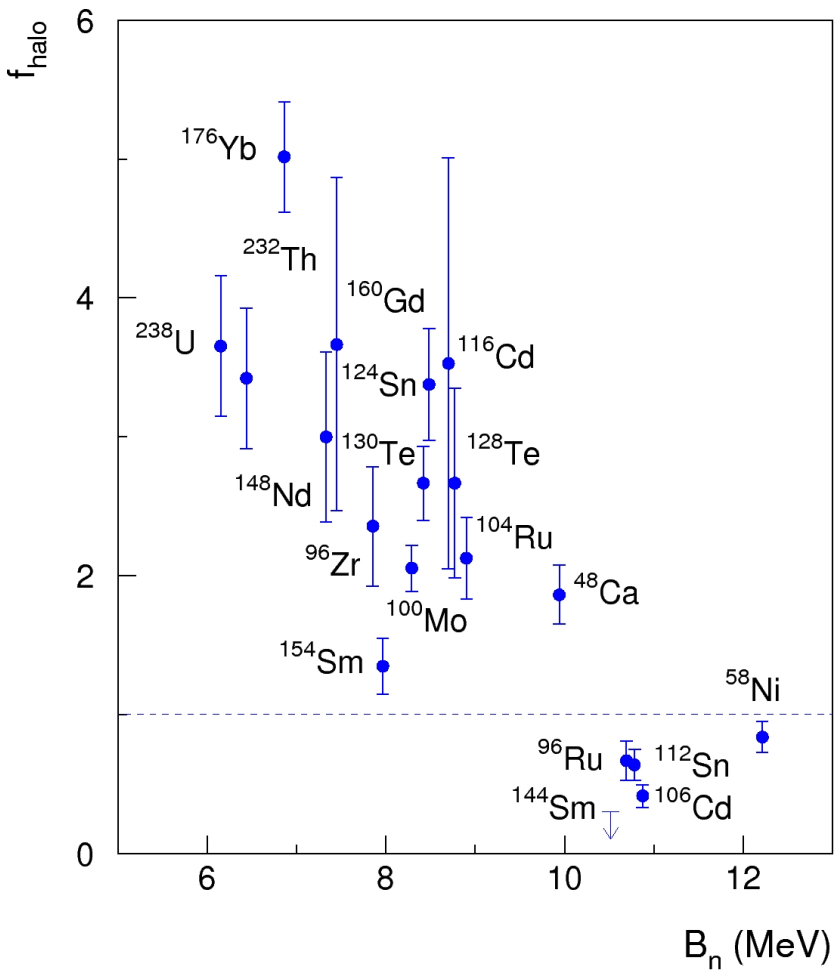
$$N(N_t - 1) \sim \rho_n(r_{\text{annih}})$$

$$N(Z_t - 1) \sim \rho_p(r_{\text{annih}})$$

$$f_{\text{halo}} = \frac{N(N_t - 1)}{N(Z_t - 1)} \cdot \frac{\Im a_p}{\Im a_n} \cdot \frac{Z_t}{N_t}$$

anihilacja zachodzi na odległości  $r_{\text{annih}} \approx r_{1/2} + 2.5 \text{ fm}$

# $f_{\text{halo}}$



Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 3199

Phys. Rev. C **57** (1998) 2962

Phys. Rev. C **60** (1999) 054309

## Obserwacje:

- silna korelacja między  $f_{\text{halo}}$  i energią separacji neutronu  $B_n$
- w jądrach z  $B_n < 9$  MeV peryferia jąder są bogate w neutrony
- $f_{\text{halo}} < 1$  dla jąder o  $B_n > 10$  MeV  
halo protonowe?? stan związany  $N\bar{N}$ ?? (S.Wycech)



# neutrony na peryferiach jądrowych: $\Delta r_{np}$ vs $f_{\text{halo}}$

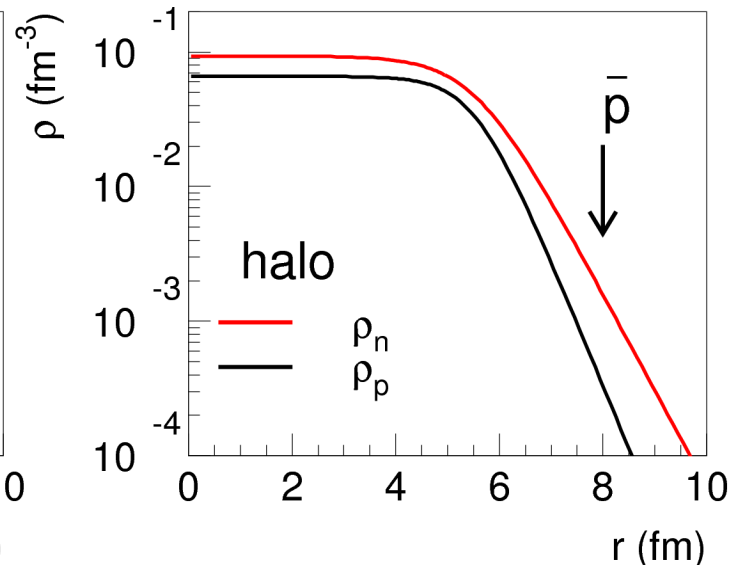
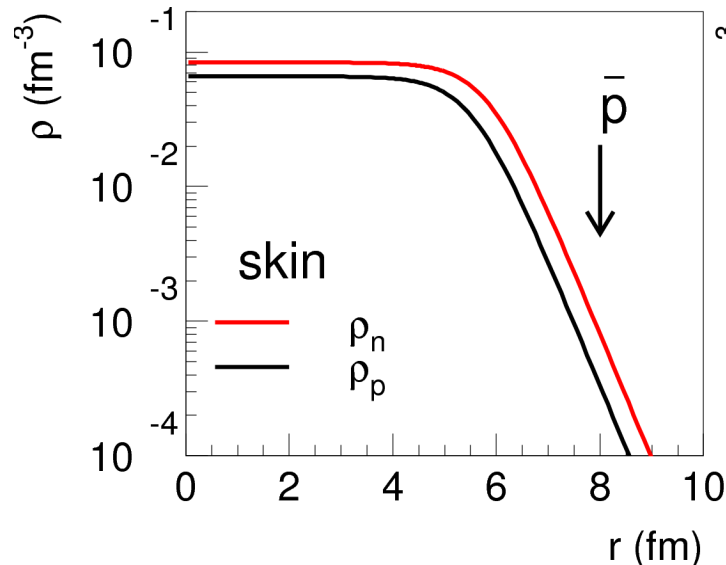
zakładając rozkład gęstości protonów i neutronów w postaci 2pF:

rozważmy 2 ekstremalne przypadki:

$a_n = a_p, c_n \neq c_p \rightarrow \Delta r_{np}$  (“neutron skin”)

$a_n \neq a_p, c_n = c_p \rightarrow \Delta r_{np}$  (“neutron halo”)

$$\rho(r) = \rho_0 \cdot \left(1 + \exp\left(r - \frac{c}{a}\right)\right)$$



# neutrony na peryferiach jądrowych: $\Delta r_{np}$ vs $f_{\text{halo}}$

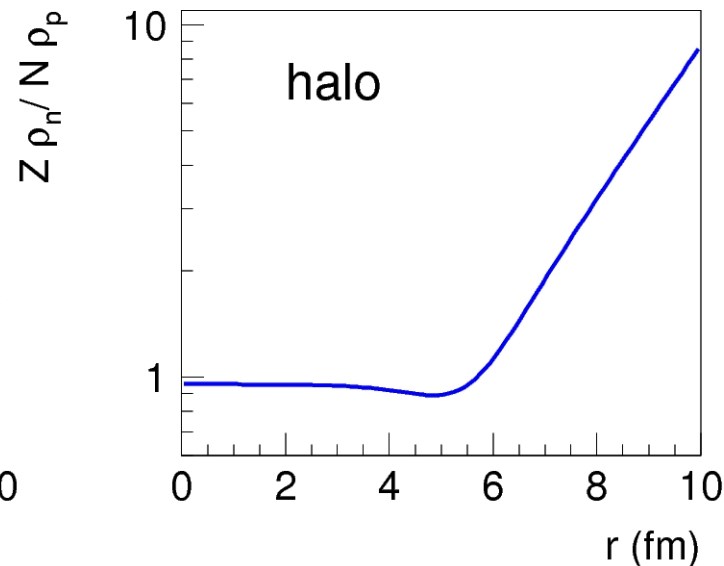
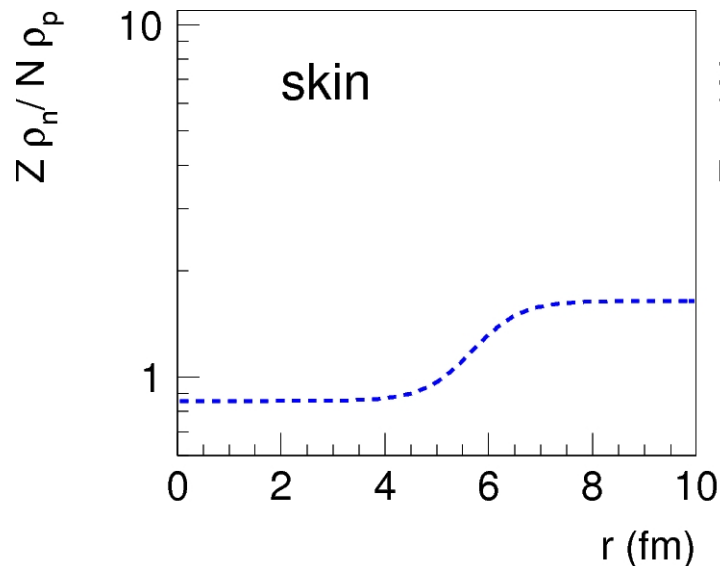
zakładając rozkład gęstości protonów i neutronów w postaci 2pF:

rozważmy 2 ekstremalne przypadki:

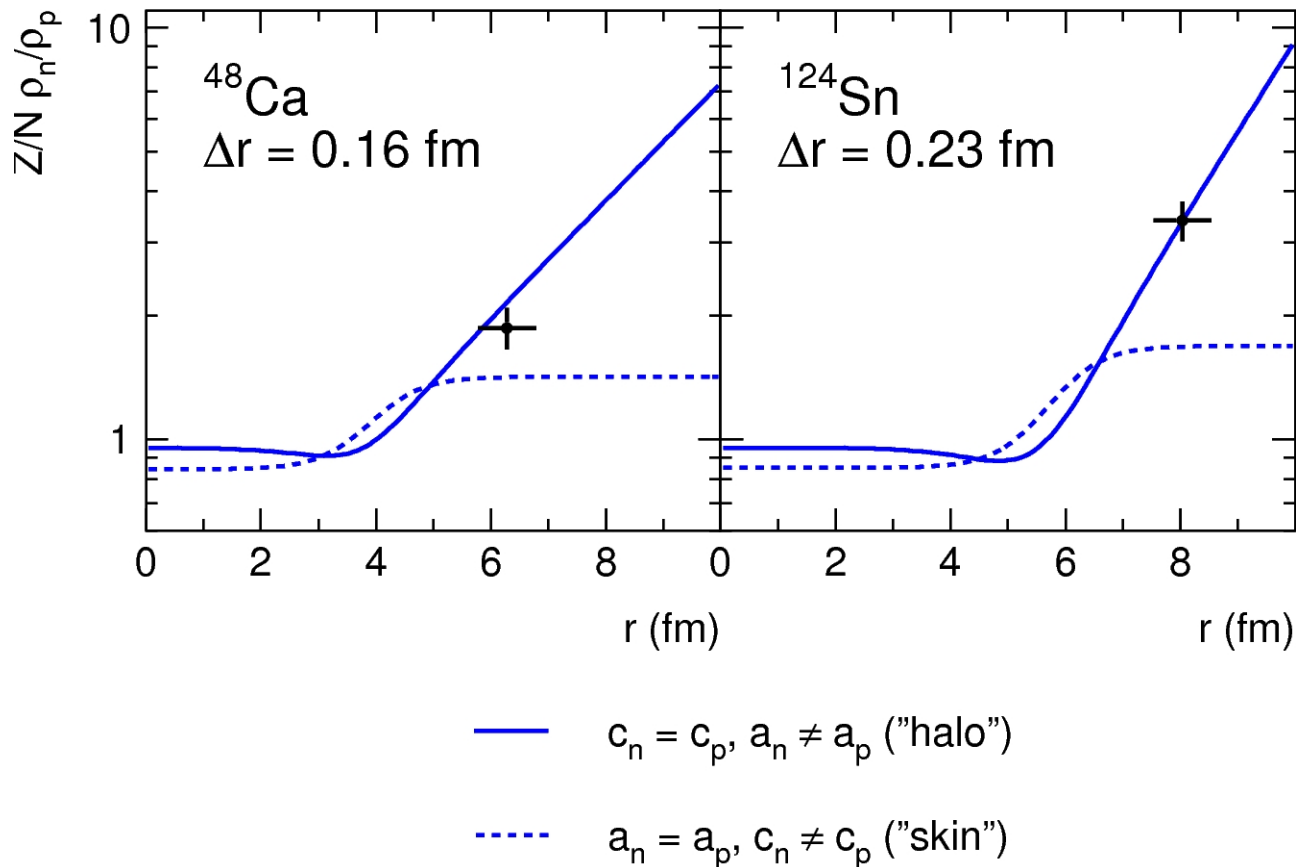
$a_n = a_p, c_n \neq c_p \rightarrow \Delta r_{np}$  (“neutron skin”)

$a_n \neq a_p, c_n = c_p \rightarrow \Delta r_{np}$  (“neutron halo”)

$$\rho(r) = \rho_0 \cdot \left(1 + \exp\left(r - \frac{c}{a}\right)\right)$$

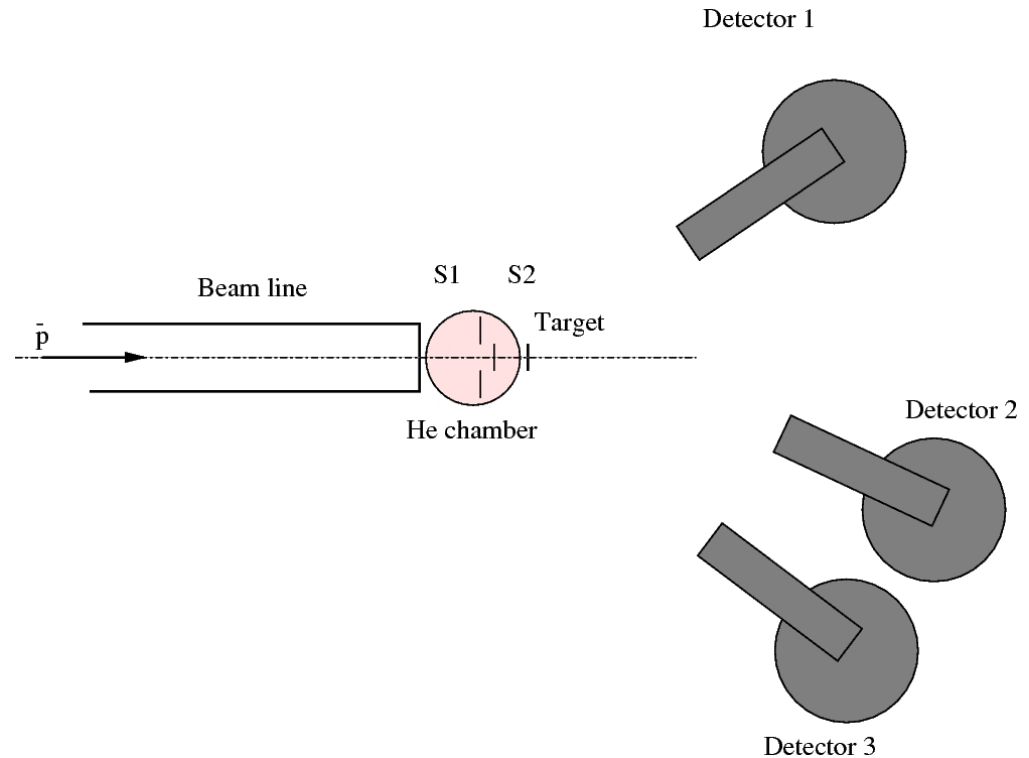


# neutrony na peryferiach jądrowych: $\Delta r_{np}$ vs $f_{\text{halo}}$



$\Delta r_{np}$  jest raczej wynikiem różnicy w rozmyciu powierzchni  $a_n \neq a_p$   
niż różnic w promieniach połówkowych  $c_n \neq c_p$

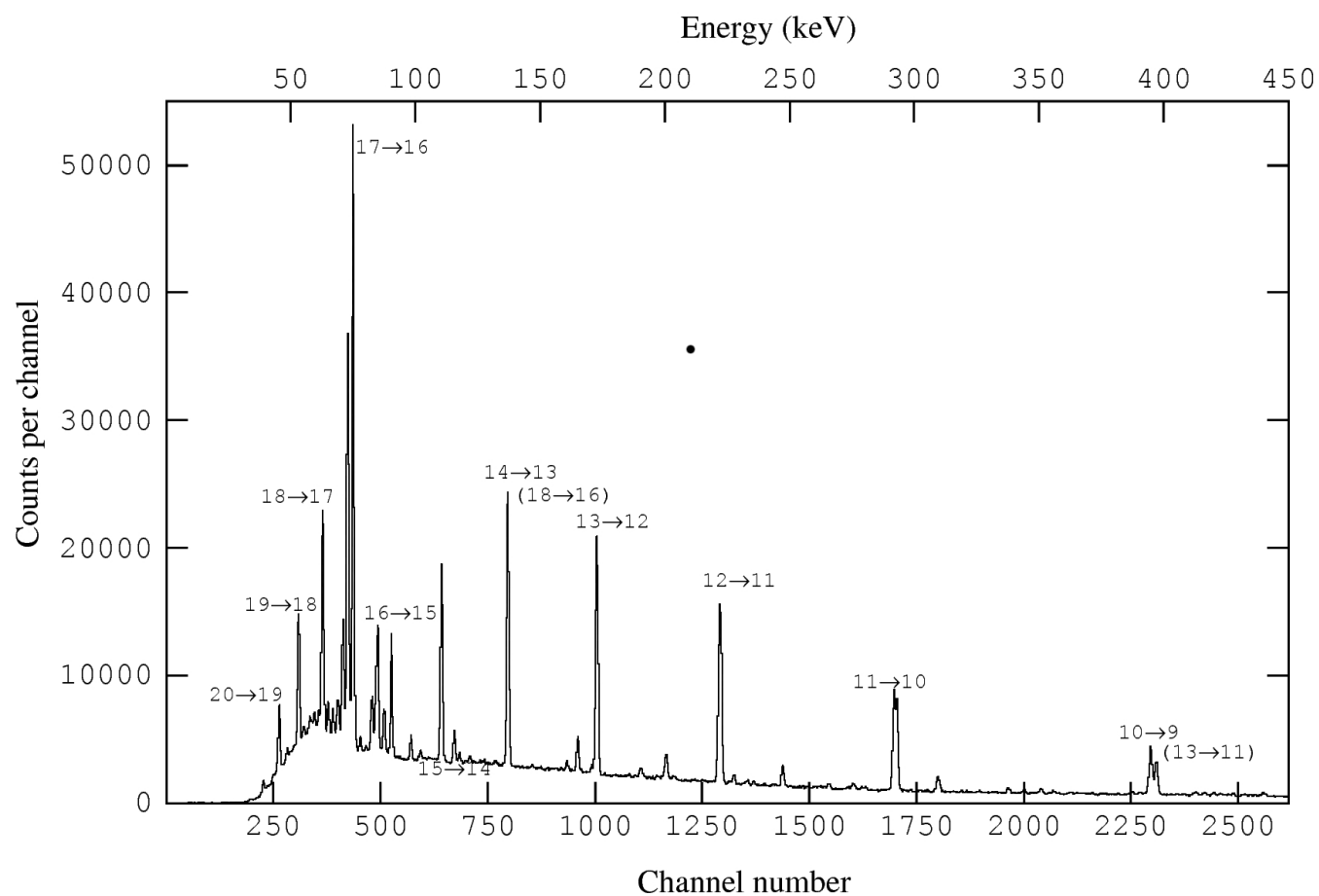
# promieniowanie X atomów antyprotonowych



- wiązka: LEAR @ CERN, 106 MeV/c
- tarcze: z separowanych izotopowo materiałów,  $\sim 50 - 100 \text{ mg/cm}^2$   
o masach atomowych z przedziału :  $^{16}\text{O} - ^{238}\text{U}$

# widmo promieniowania X

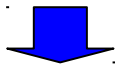
przykład widma promieniowania X atomu antyprotonowego  $^{209}\text{Pb}$





# wyznaczanie $\rho_n$

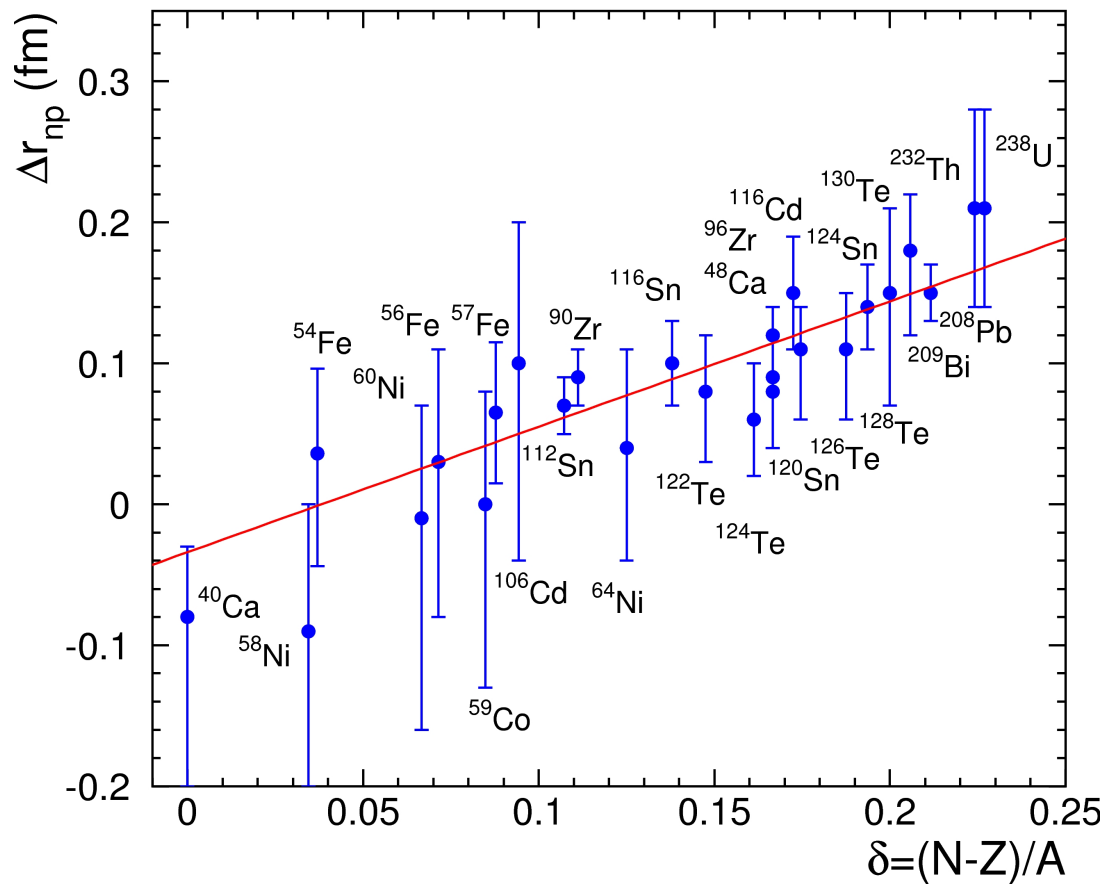
- znamy:
  - $\rho_p$  (z badania jąder atomowych cząstkami oddziałującymi elektromagnetycznie:  $e, \mu$ ) - ?
  - $V_{\text{opt}}(\rho_p, \rho_n)$
- zakładamy:
  - rozkład gęstości postaci 2-parametrycznego rozkładu Fermiego
  - $c_n = c_p$  (na podstawie porównania  $f_{\text{halo}}$  and  $\Delta r_{\text{np}}$ )
- wyznaczamy z dopasowania  $a_n(V_{\text{opt}}, \Gamma_{\text{low}}, \Gamma_{\text{up}})$


$$\rho_n(c_n, a_n)$$

  $\rho_n$  for 26 isotopes deduced (from  $^{40}\text{Ca}$  up to  $^{238}\text{U}$ )

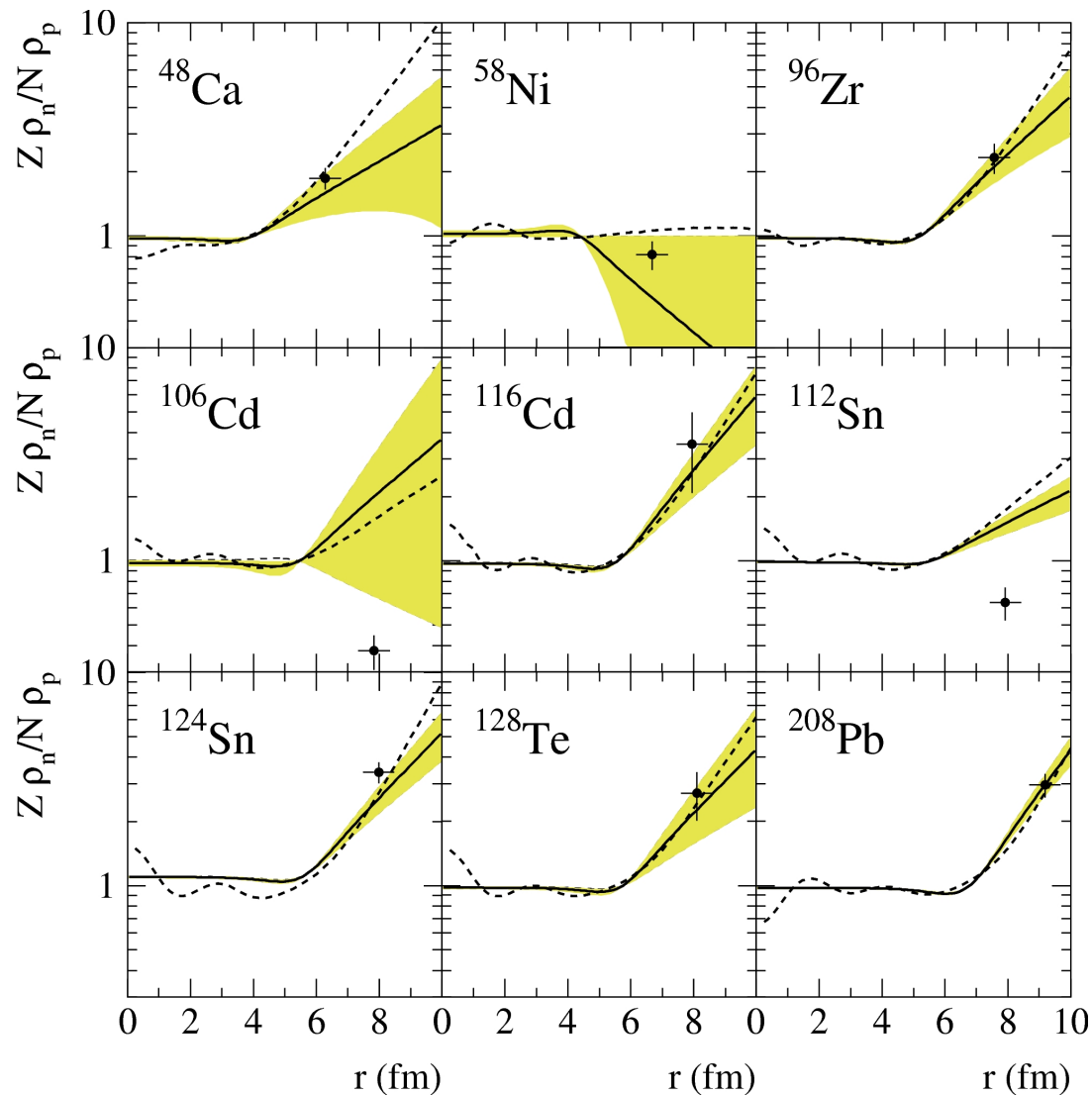


# wyznaczenie $\Delta r_{np}$



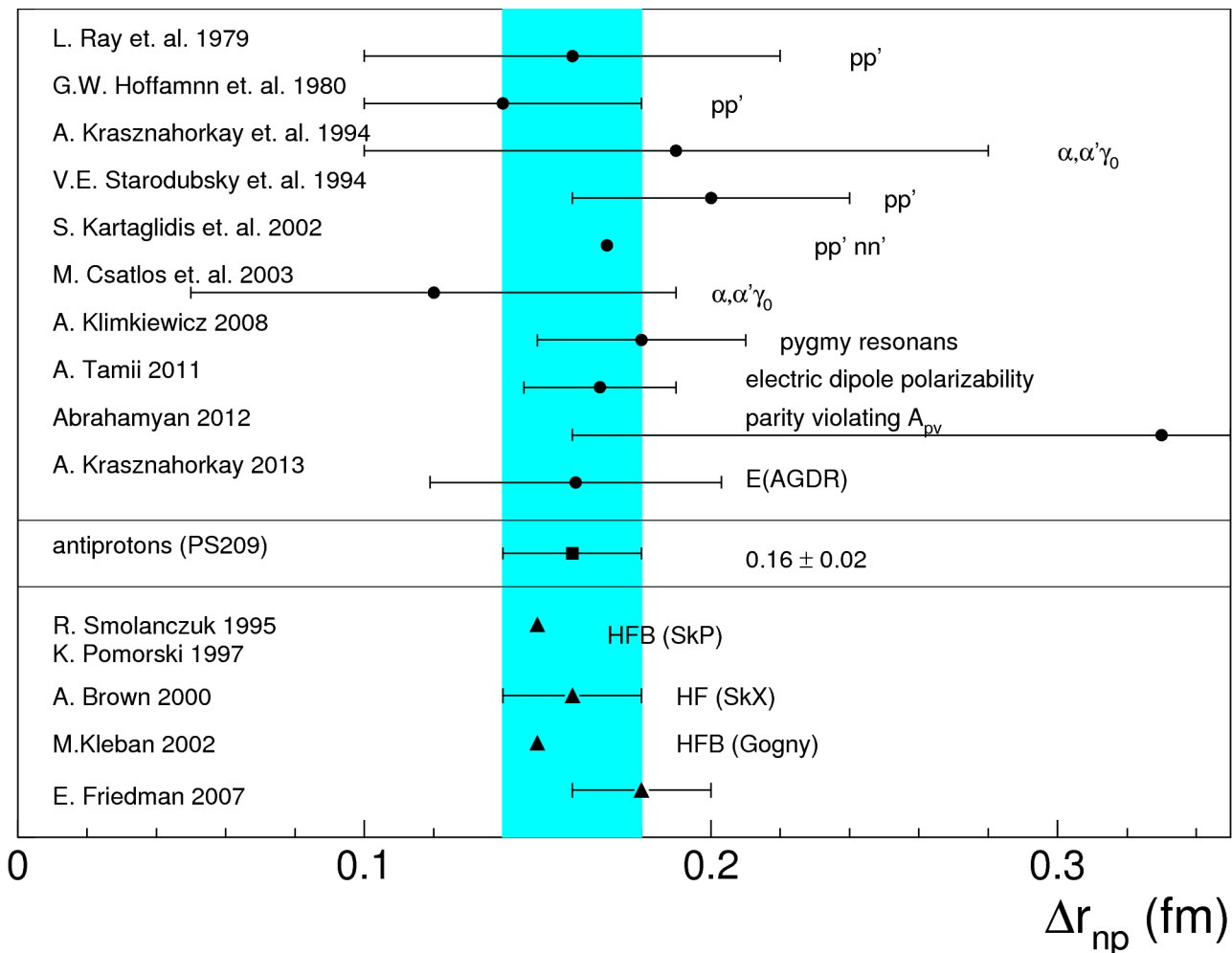
$$\Delta r_{np} = (-0.03 \pm 0.02) + (0.90 \pm 0.15) \cdot \delta$$

# porównanie $f_{\text{halo}}$ vs $\rho_n$



**linie ciągłe:** na podstawie prom. X  
**linie przerywane:** teoria HFB  
+  $f_{\text{halo}}$

# $\Delta r_{np}$ $^{208}\text{Pb}$ – porównanie różnych metod



# podsumowanie badań $\bar{p}$

artykuły PRL	2
PRC	11
Nucl.Phys.	5
inne	8

rozprawy doktorskie: 3 w Polsce i 1 w Niemczech

# podsumowanie badań $\bar{p}$

- Dwie metody doświadczalnego badania powierzchni jądrowej z użyciem wiązki antyprotonów:
  - metoda “radiochemiczna” :  $\rho_n / \rho_p @ r \approx c_{1/2} + 2.5 \text{ fm}$
  - promieniowanie X atomów antyprot. :  $(\rho_n + \rho_p) @ \approx c_{1/2} + 1.5 \text{ fm}$
- Zebrano bogaty zestaw danych
  - pozwalających na wnioskowanie o powierzchni jądrowej
  - ... i będących podstawą do skonstruowania potencjału optycznego
- bogata systematyka  $\Delta r_{np}$ 
  - bardzo dobra zgodność  $\Delta r_{np}$  wyznaczonych w badaniach atomów antyprotonowych i rozpraszania hadronów dla  $^{208}\text{Pb}$
  - dobra zgodność  $\Delta r_{np}(\delta)$  wyznaczona na podstawie atomów antyprotonowych i modeli teoretycznych
  - całkiem dobra zgodność z danymi z innych eksperymentów (rozpraszanie hadronów)

# Współpraca PS209

## Uniwersytet Warszawski

### ŚLCJ

J. Jastrzębski, T. Czosnyka, J. Iwanicki, M. Kisieliński, P. Lubiński,  
P. Napiorkowski, L. Pieńkowski, A. Stolarz, A. Trzcińska

## Zakład Spektroskopii Jądrowej

K. Gulda, W. Kurcewicz

## Technical University, Monachium

T. von Egidy, F. J. Hartmann, B. Ketzer, R. Schmidt

## Uniwersytet Śląski, Katowice

B. Kłos

## IPJ

S. Wycech, R. Smolańczuk

## CERN

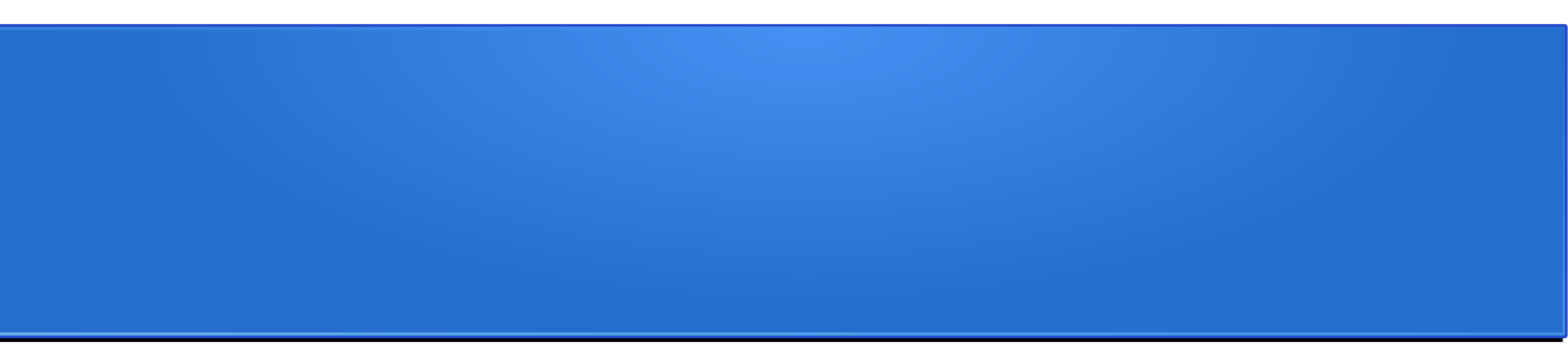
E. Widmann



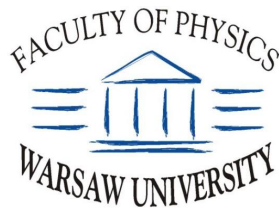








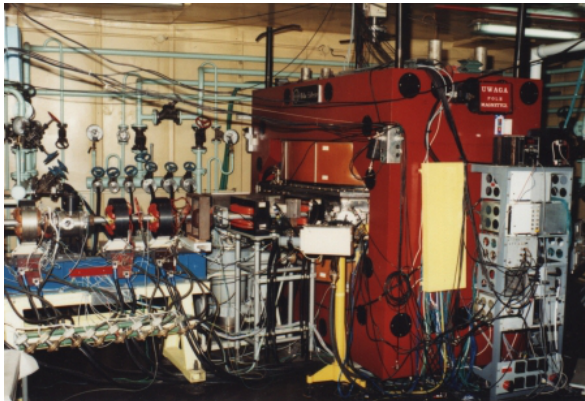
# Produkcja radioizotopów medycznych



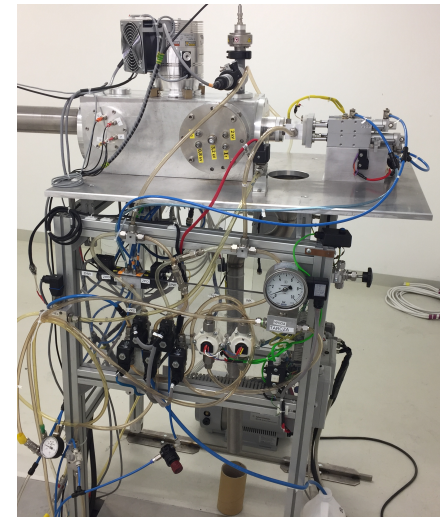
# Cyklotrony użyte do naszych badań



**U-200P** cząstki  $\alpha$  32 MeV  
wiązka wewn.  $\sim 1 \mu\text{A}$   
ŚLCJ



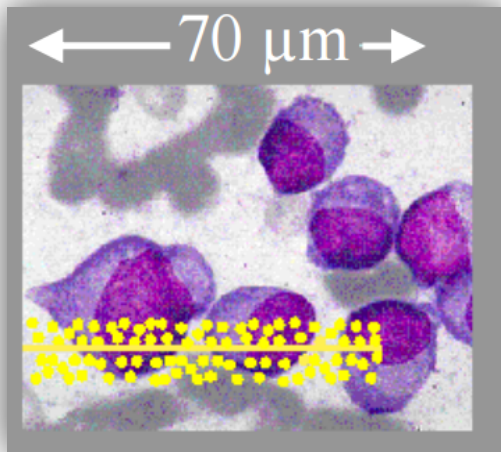
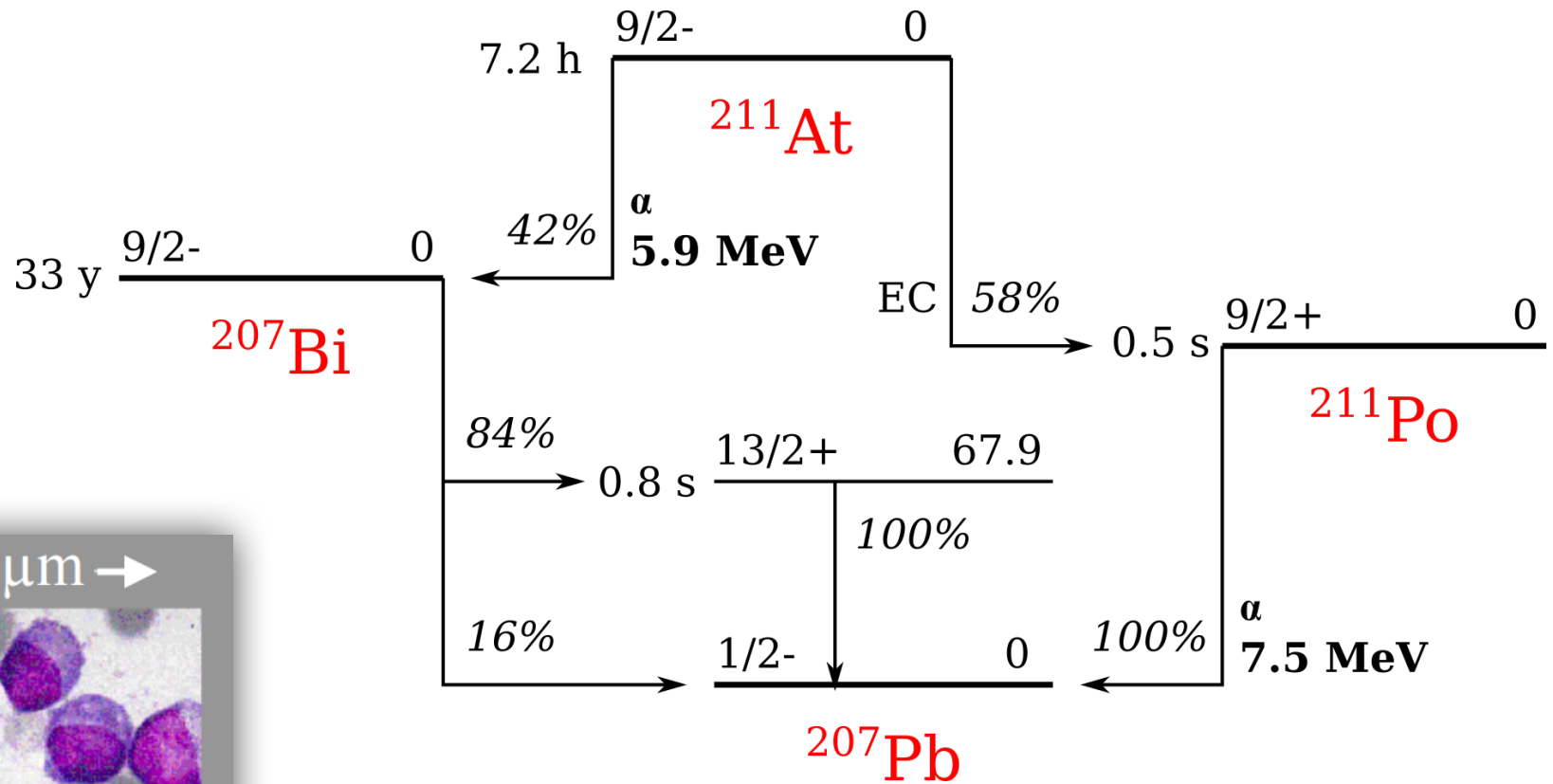
**C30** protony 28 MeV  
wiązka zewn.  $\sim 10 \text{ nA}$   
NCBJ



**PETtrace** protony 16.5 MeV  
deuterony 8.5 MeV  
wiązki zewn.  $25 \mu\text{A}$

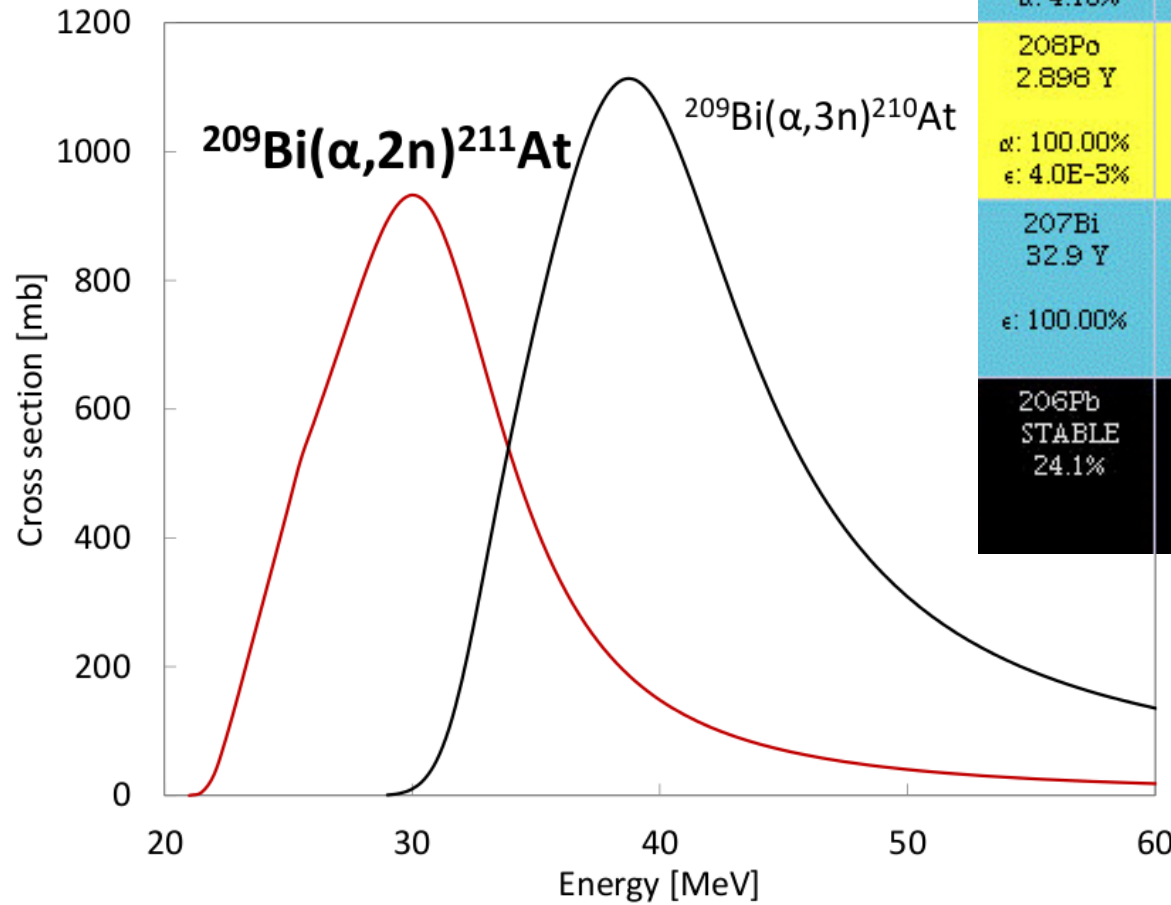
ŚLCJ **Radiopharmaceuticals  
Production and Research Centre**

# Radioisotop $^{211}\text{At}$



- 100 keV/ $\mu\text{m}$
- DSB

# Produkcja $^{211}\text{At}$

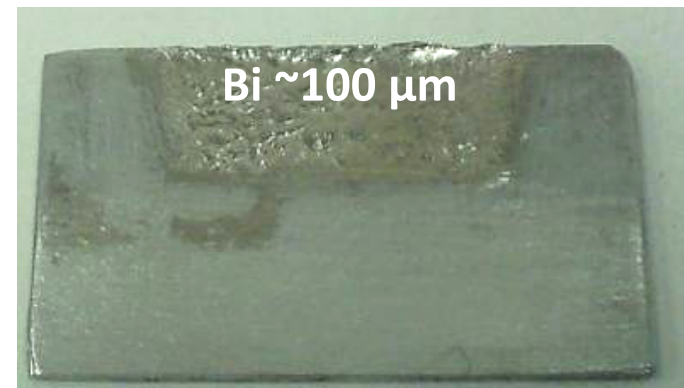
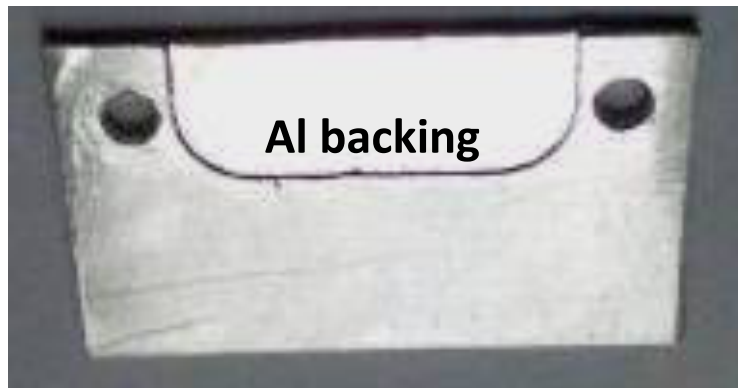
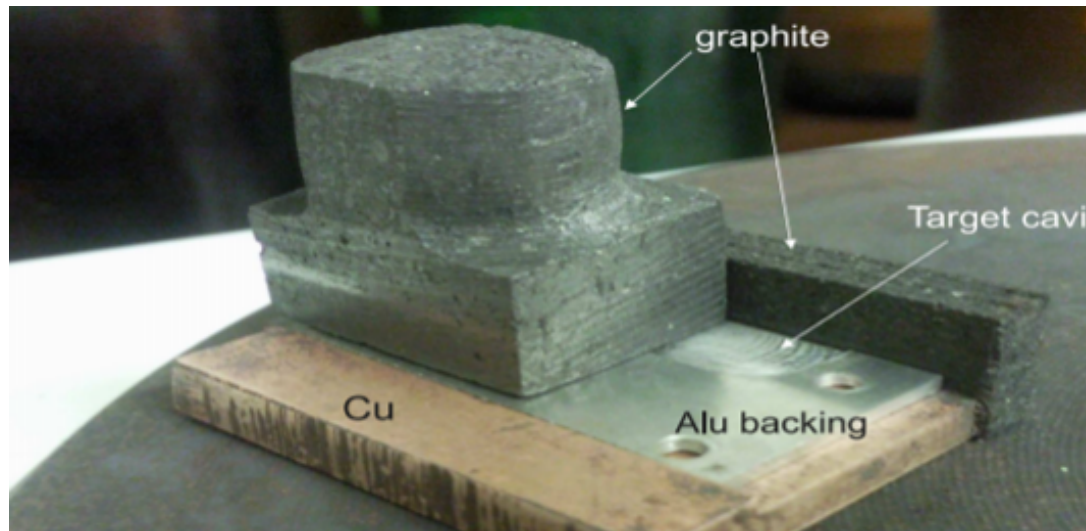


$^{210}\text{Rn}$ 2.4 H $\alpha$ : 96.00% $\epsilon$ : 4.00%	$^{211}\text{Rn}$ 14.6 H $\epsilon$ : 72.60% $\alpha$ : 27.40%	$^{212}\text{Rn}$ 23.9 M $\alpha$ : 100.00%	$^{213}\text{Rn}$ 19.5 MS $\alpha$ : 100.00%	$^{214}\text{Rn}$ 0.27 $\mu\text{S}$ $\alpha$ : 100.00%
$^{209}\text{At}$ 5.41 H $\epsilon$ : 95.90% $\alpha$ : 4.10%	$^{210}\text{At}$ 8.1 H $\epsilon$ : 99.82% $\alpha$ : 0.18%	$^{211}\text{At}$ 7.214 H $\epsilon$ : 58.20% $\alpha$ : 41.80%	$^{212}\text{At}$ 0.314 S $\alpha$ : 100.00% $\epsilon$ : < 0.03%	$^{213}\text{At}$ 125 NS $\alpha$ : 100.00%
$^{208}\text{Po}$ 2.898 Y $\alpha$ : 100.00% $\epsilon$ : 4.0E-3%	$^{209}\text{Po}$ 102 Y $\alpha$ : 99.52% $\epsilon$ : 0.48%	$^{210}\text{Po}$ 138.376 D $\alpha$ : 100.00%	$^{211}\text{Po}$ 0.516 S $\alpha$ : 100.00%	$^{212}\text{Po}$ 0.299 $\mu\text{S}$ $\alpha$ : 100.00%
$^{207}\text{Bi}$ 32.9 Y $\epsilon$ : 100.00%	$^{208}\text{Bi}$ 3.68E+5 Y $\epsilon$ : 100.00%	$^{209}\text{Bi}$ STABLE 100%	$^{210}\text{Bi}$ 5.012 D $\beta^-$ : 100.00% $\alpha$ : 1.3E-4%	$^{211}\text{Bi}$ 2.14 M $\alpha$ : 99.72% $\beta^-$ : 0.28%
$^{206}\text{Pb}$ STABLE 24.1%	$^{207}\text{Pb}$ STABLE 22.1%	$^{208}\text{Pb}$ STABLE 52.4%	$^{209}\text{Pb}$ 3.253 H $\beta^-$ : 100.00%	$^{210}\text{Pb}$ 22.20 Y $\beta^-$ : 100.00% $\alpha$ : 1.9E-6%

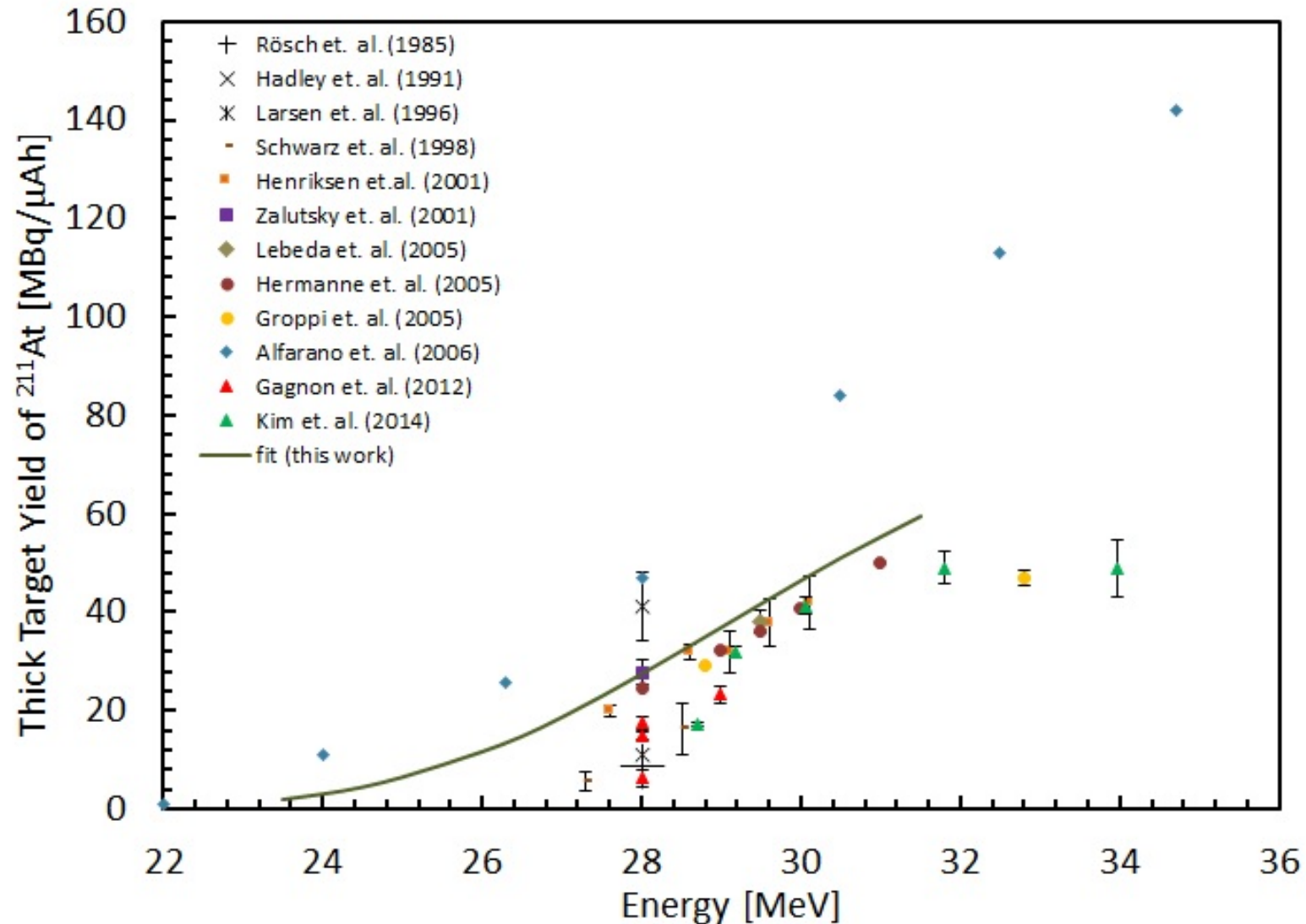
EMPIRE evaporation code



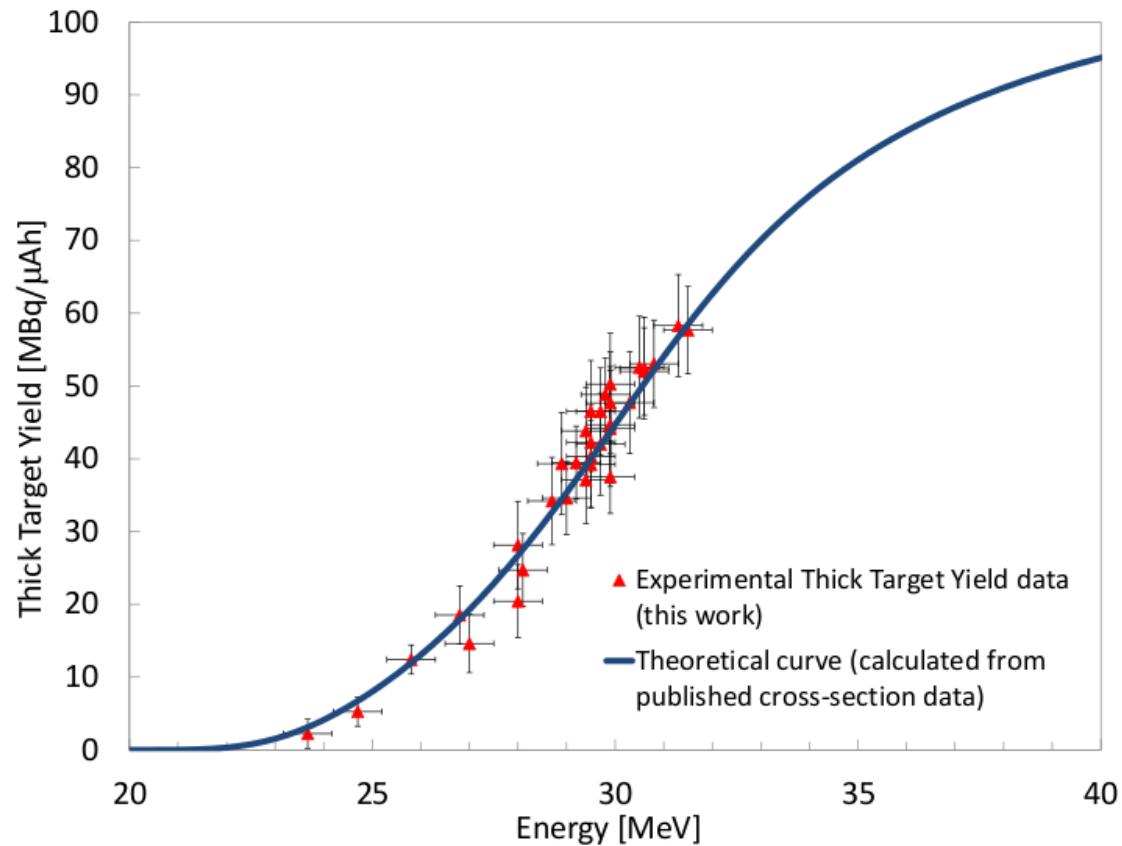
# Produkcja $^{211}\text{At}$ – tarcze $^{\text{nat}}\text{Bi}$



# Produkcja $^{211}\text{At}$ – literatura



# Produkcja $^{211}\text{At}$ – pomiary



reakcja  $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$

naświetlanie 7 h, 25  $\mu\text{A}$

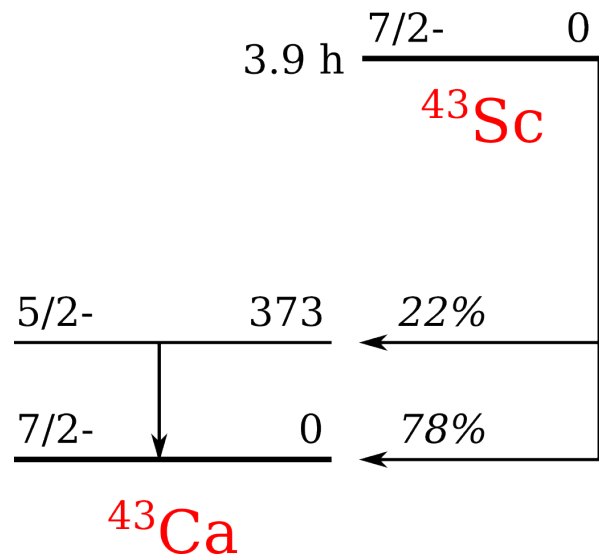
EOB **4,7 GBq (29 MeV)**

$^{210}\text{At}$  0,03%

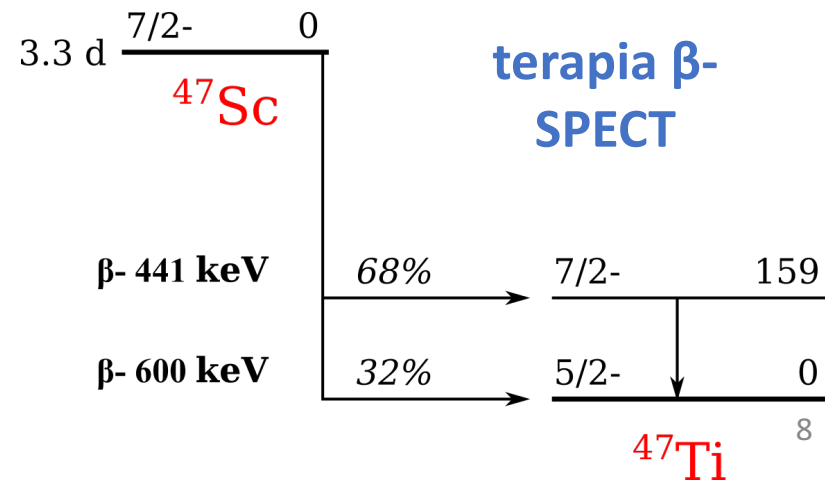
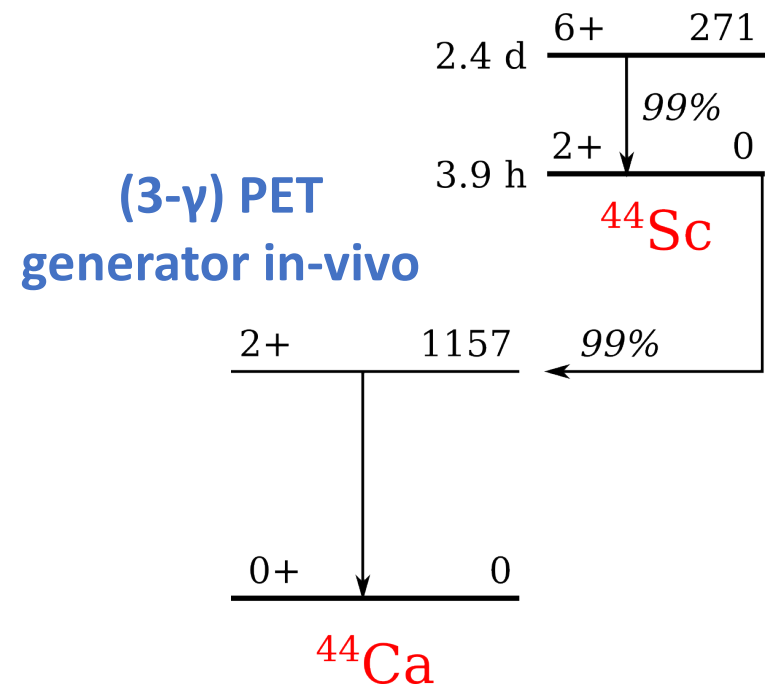
oszacowane dla prądu 25  $\mu\text{A}$



# Radioisotopy skandu (*theranostics*)



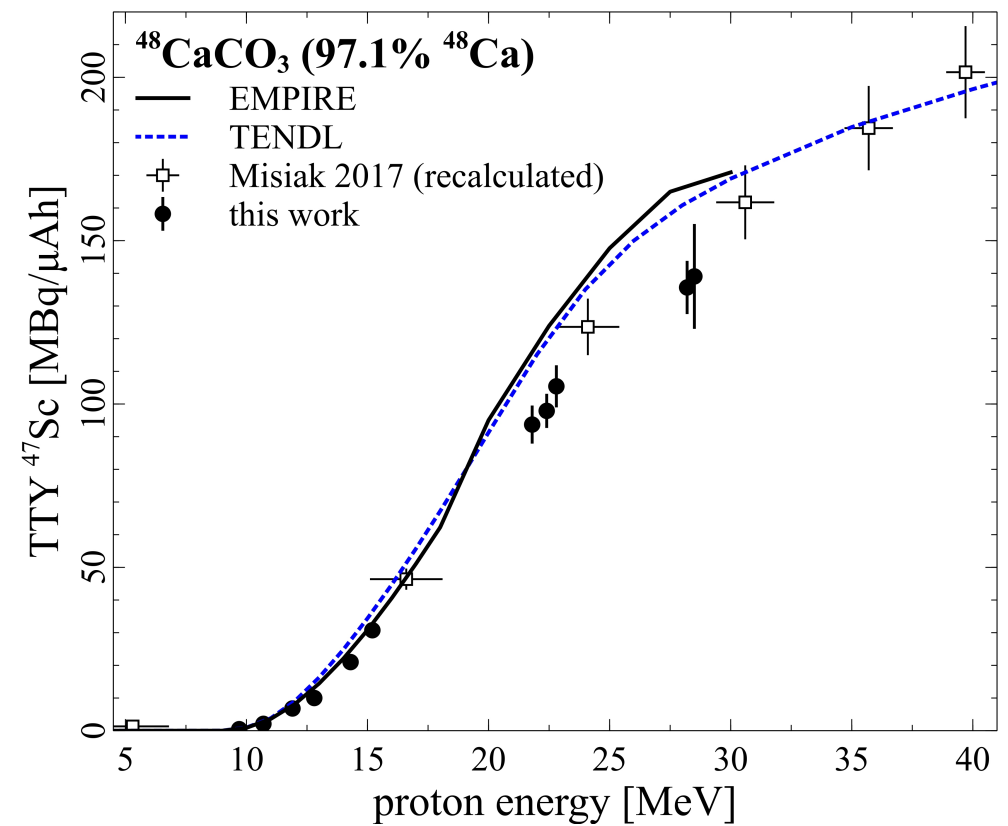
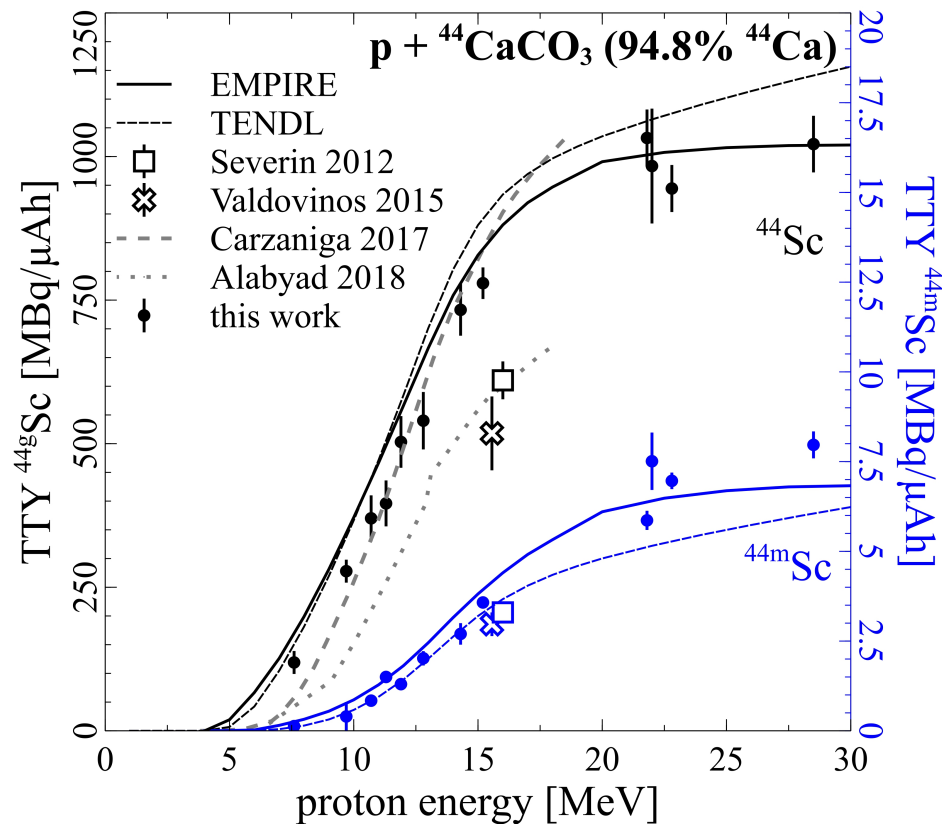
$^{68}\text{Ga}$	$^{43}\text{Sc}$
+3	+3
$\beta^+$ 1899 keV	$\beta^+$ 1199 keV
$T_{1/2} = 68$ min	$T_{1/2} = 3.9$ h



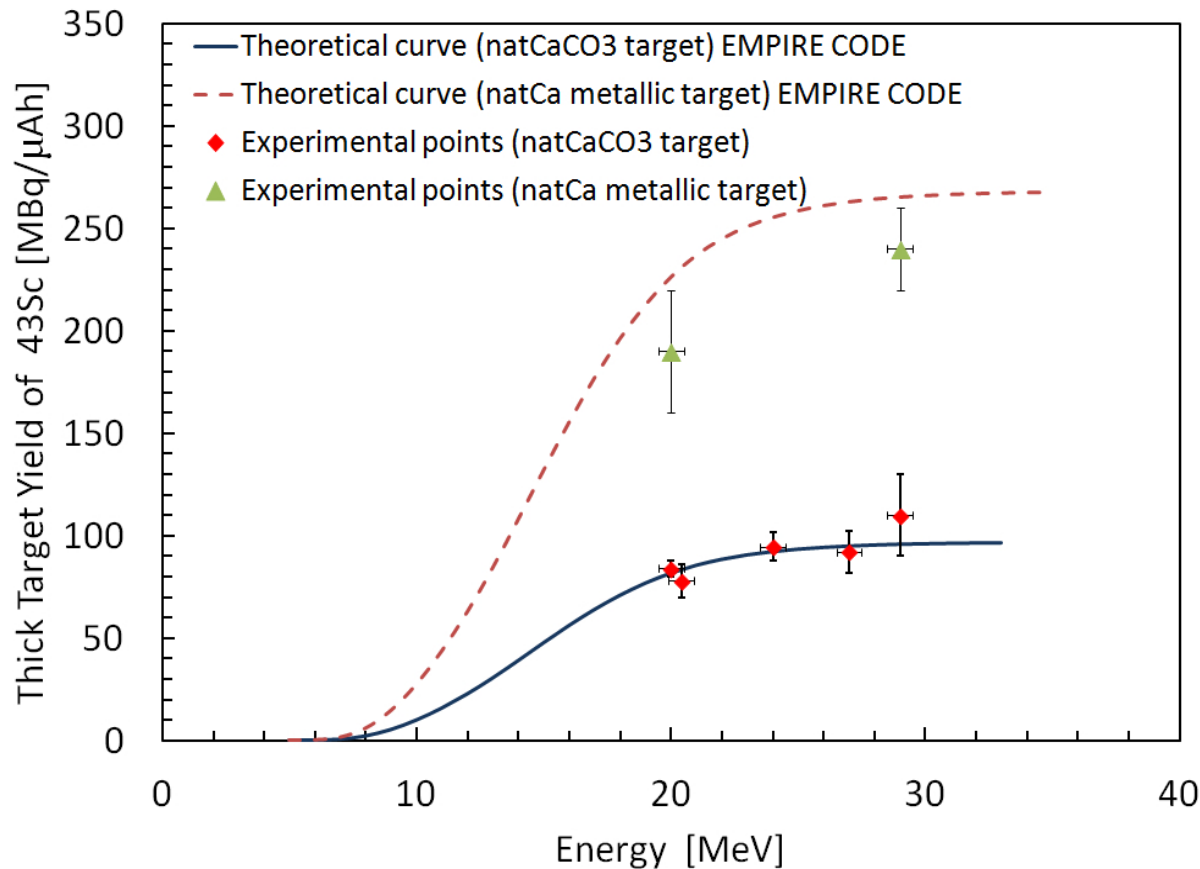
# produkcja Sc: $\text{CaCO}_3 + \text{protony}$

$^{44}\text{Ca}(p,n)^{44,44m}\text{Sc}$

$^{48}\text{Ca}(p,2n)^{47}\text{Sc}$



# produkcja Sc: Ca / CaCO<sub>3</sub> + cz. α

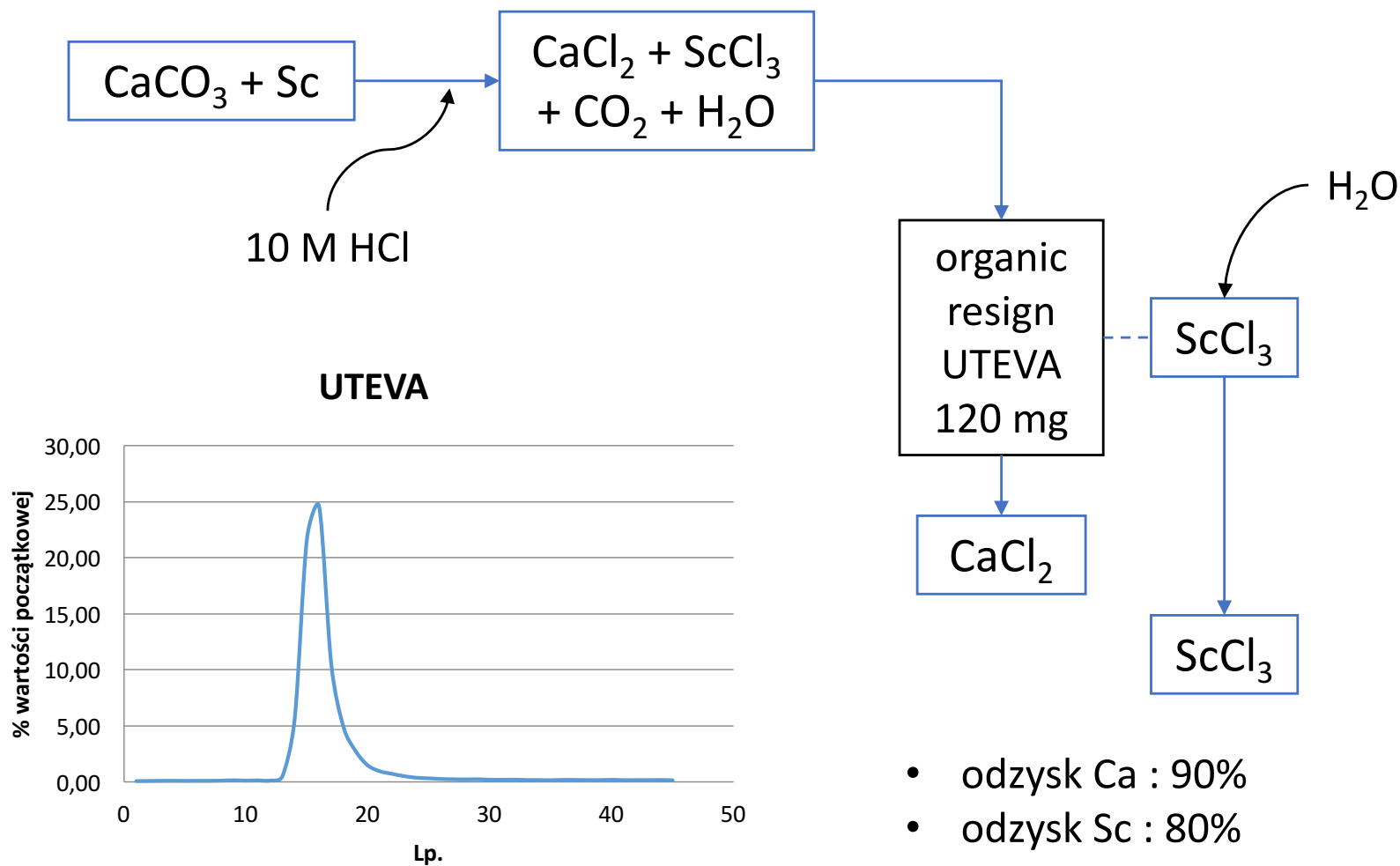


α 20 MeV  
natCaCO<sub>3</sub>, 25 μA, 4 h  
=  
**6 GBq <sup>43</sup>Sc**  
(18 MBq zanieczyszczeń)

estymacja dla prądu 25 μA

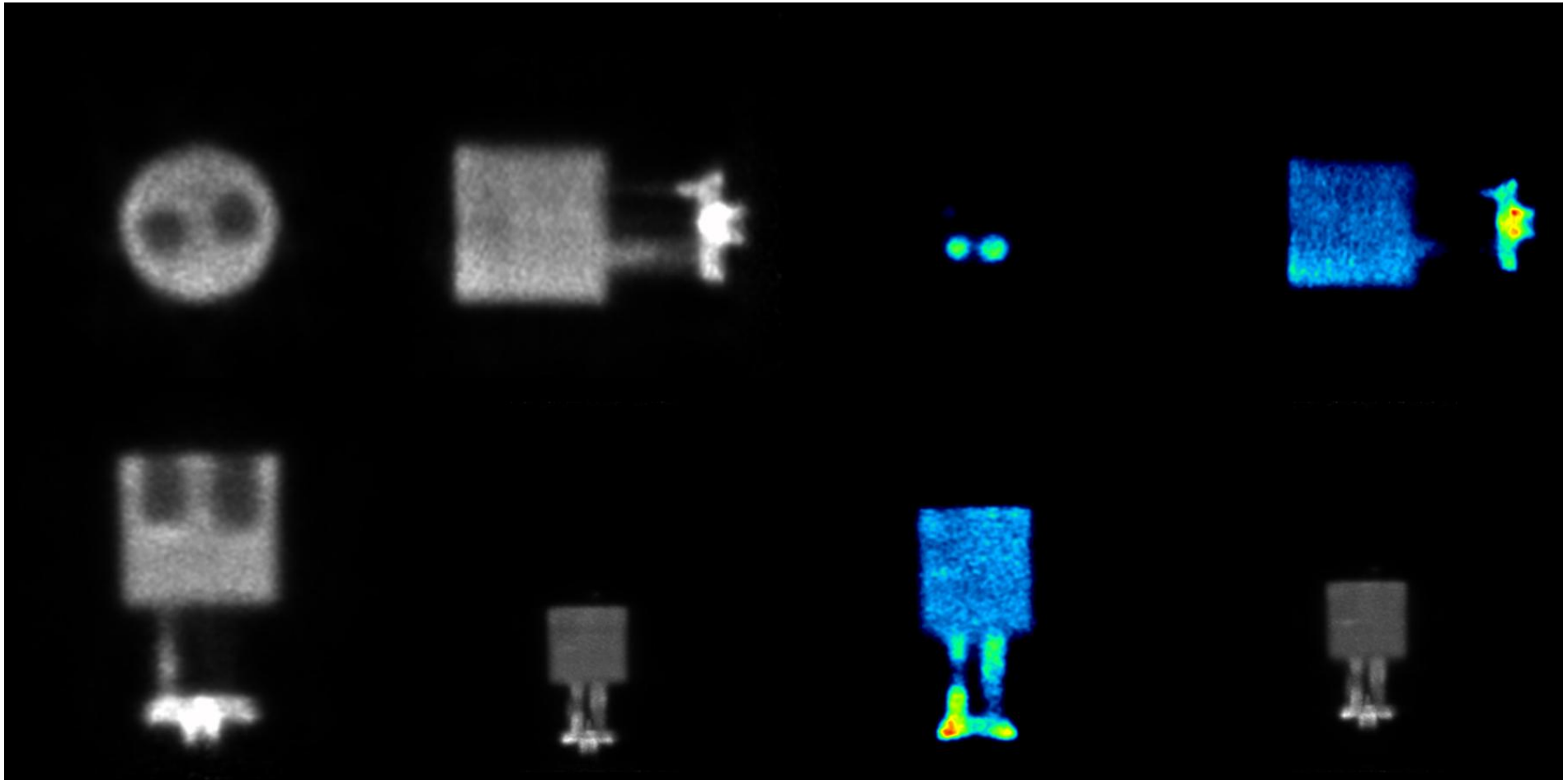
- kompatybilność z produkcją <sup>211</sup>At!

# Separacja Sc z tarcz $\text{CaCO}_3$

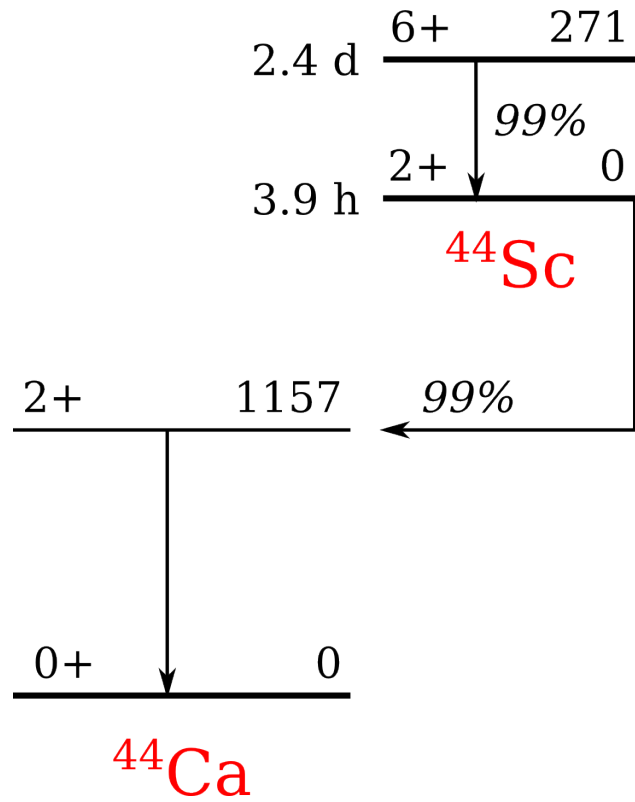


dzięki uprzejmości Rafała Walczaka i Aleksandra Bilewicza z IChTJ

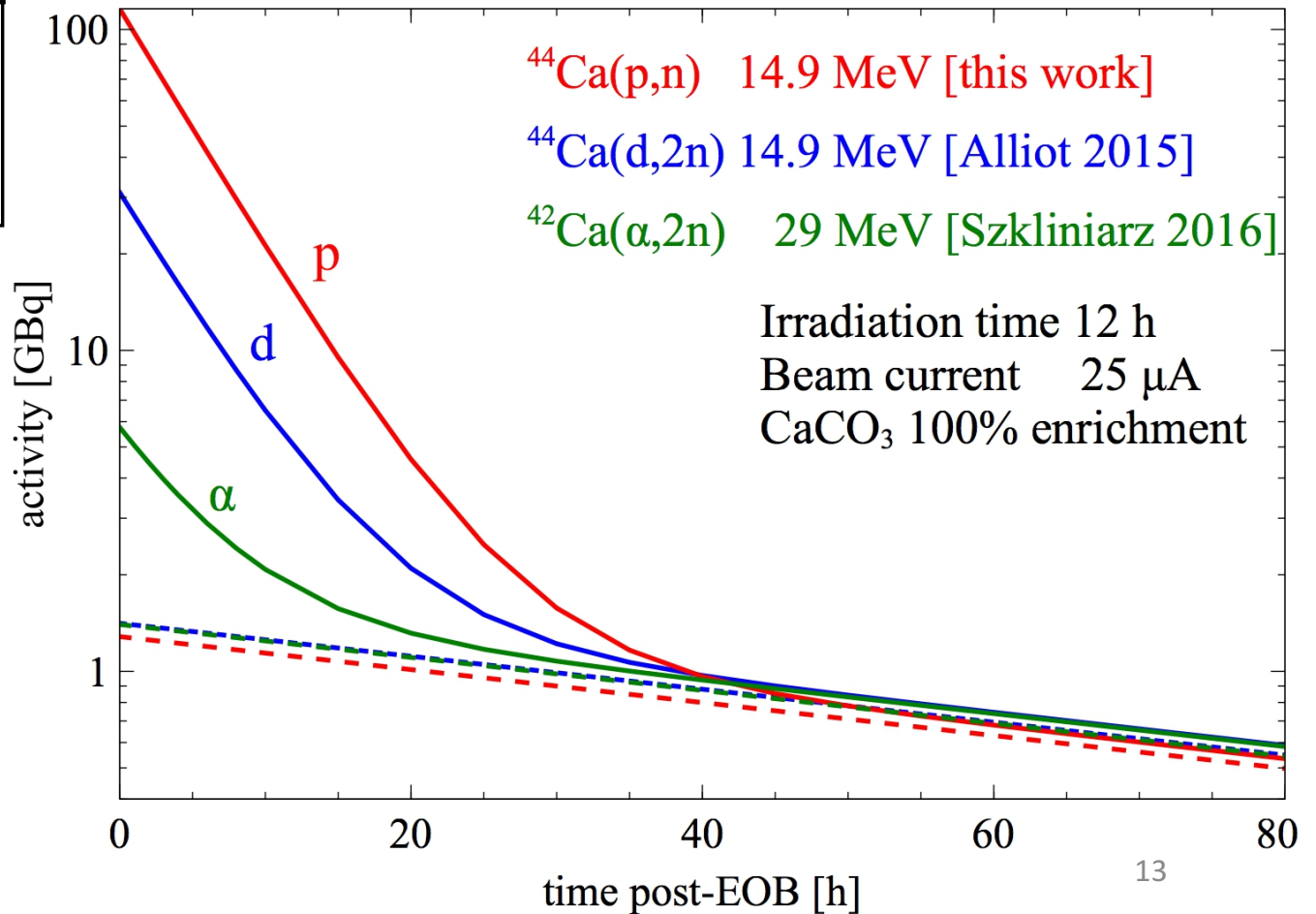
# Próby PET/CT z użyciem $^{43}\text{Sc}$



# $^{44m}\text{Sc}/^{44}\text{Sc}$ generator in-vivo



Różne drogi produkcji  $^{44}\text{Sc}$  (linia ciągła)  
i  $^{44m}\text{Sc}$  (linia przerywana):



## Pozostałe projekty:

- cyklotronowa produkcja  $^{99m}\text{Tc}$
- produkcja generatora  $^{72}\text{Se}/^{72}\text{As}$
- produkcja generatora  $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$
- produkcja  $^{89}\text{Zr}$
- pomiary energii wiązki cyklotronu z użyciem folii monitorujących
- produkcja  $^{135}\text{La}$  (w trakcie)

## od 2015:

- > 16 konferencji z wystąpieniami
- > 5 artykułów (+1 w trakcie)
- PhD cotutelle



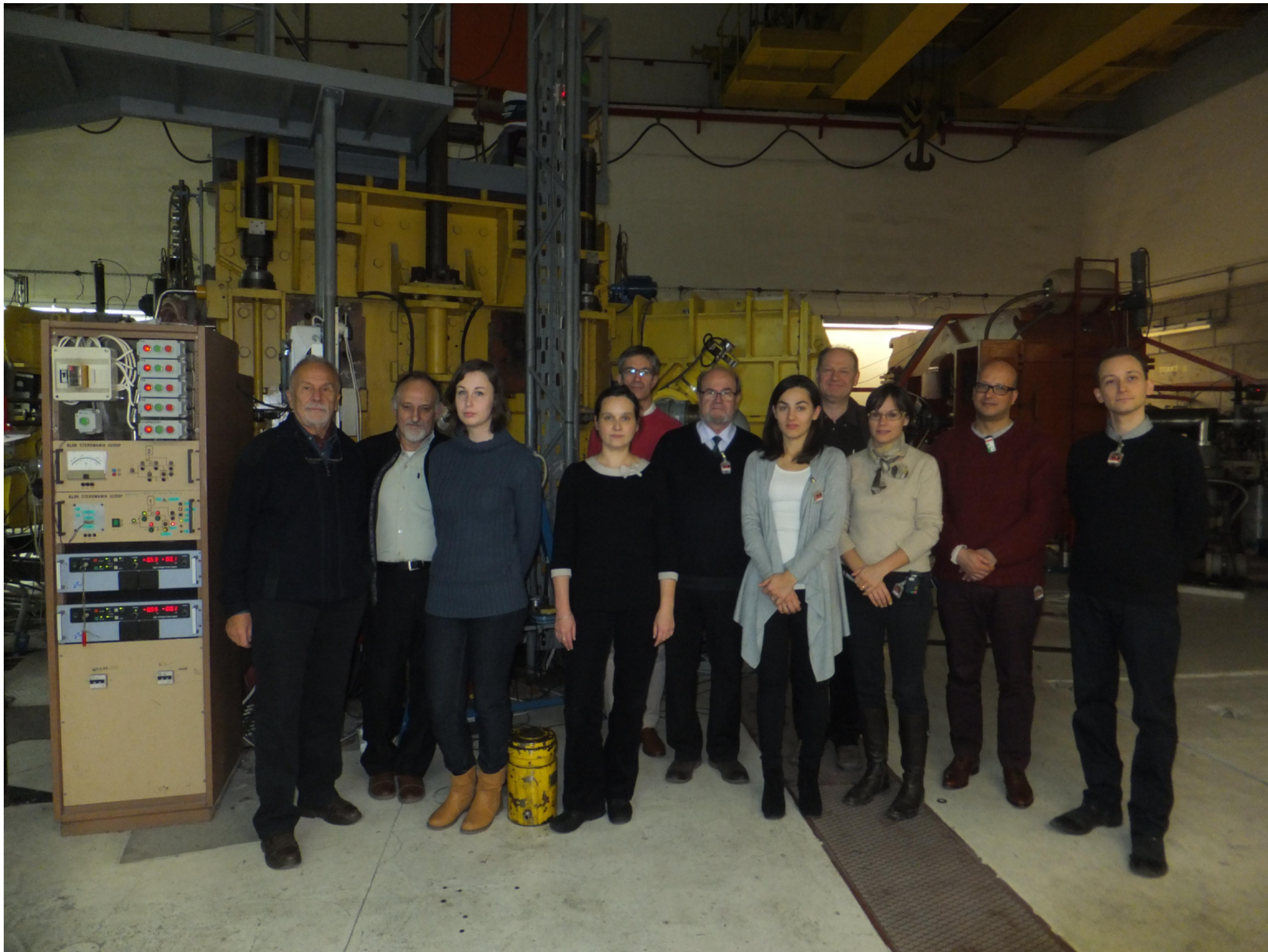
4- Main steps of the research work. For each step, please indicate the actions foreseen, the respective contributions of the French and Polish institutions and the corresponding expected achievements:

[#1] Investigating the optimal production of  $^{44}\text{Ti}$ , the long-lived generator of  $^{44}\text{Sc}$  radioisotope. Theoretical calculations and predictions at ARRONAX and University of Warsaw, including selecting the reaction, cross-section and thick target yield calculations, estimation of the impurities. The experiments at ARRONAX, including sample irradiations, activity measurements, calculation of experimental thick target yields and impurity contributions. The energy of alpha particle available in Warsaw, previously used for the investigation of  $^{44}\text{Ti}$ , covers only half of this isotope's production cross section therefore the higher energy available at ARRONAX can be more appropriate. [#2] Investigations on alternative triple photon PET radioisotope (eg.  $^{94}\text{Tc}$ ). Theoretical calculations and predictions at ARRONAX and University of Warsaw; the experiments at ARRONAX (sub-tasks same as above). This research may provide new, in some cases more convenient, isotopes for triple photon PET technique. [#3] Additional project: development of software to calculate yields and contaminants based on available cross sections in databases. Work at ARRONAX and/or University of Warsaw, depending on available time. Such software would help with the search of new medical radioisotopes and their optimal production route. [#4] Additional project: development of software to calculate optimal irradiation energy range based on provided overlapping cross-sections, minimizing the contribution of produced impurities and maximizing the activity of the main product. Work at ARRONAX and/or University of Warsaw, depending on available time. Such software would improve planning of the irradiation in the light of minimizing the contribution of radioactive impurities.

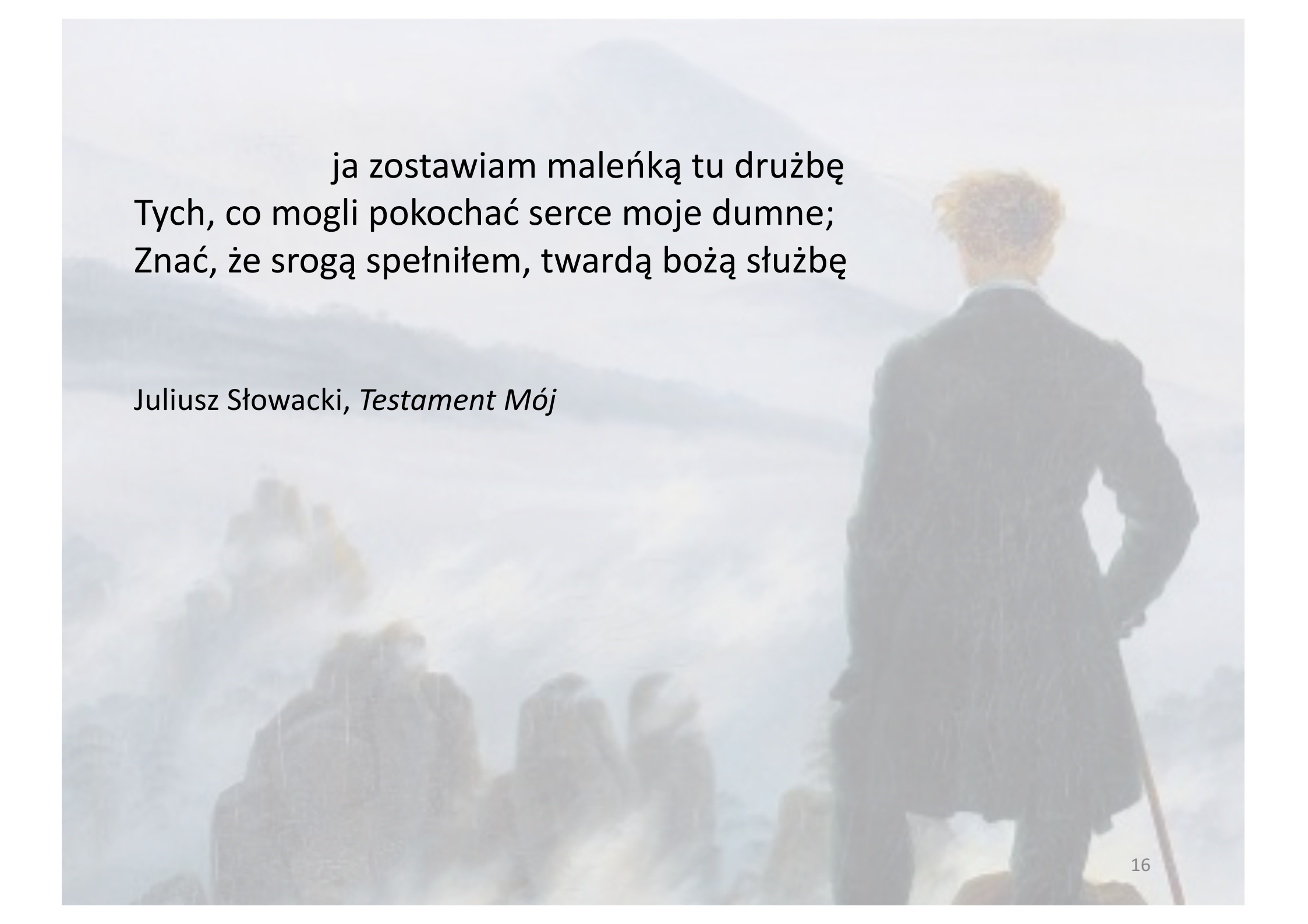
5- Long term prospects of the research works: does valuation actions are foreseen? Does a following-up to the collaboration between the institutions/laboratories is foreseen? The collaboration will have a positive impact on the study of mentioned radioisotopes. The exchange of the experience between two collaborating laboratories is also expected, especially concerning experimental methods in this field. The obtained results will also significantly contribute to my PhD thesis.

6- Additional comments:  
It is worth mentioning that the subject of my thesis matches the already accepted research program included in the WP15 of the presently realised European H2020 project ENSAR2. Both ARRONAX and Heavy Ion Laboratory work in the RITMI task 2 of this Work Package, related to the production of diagnostic and therapeutic radioisotopes, in particular scandium radioisotopes.









ja zostawiam maleńką tu drużbę  
Tych, co mogli pokochać serce moje dumne;  
Znać, że srogą spełniłem, twardą bożą służbę

Juliusz Słowacki, *Testament Mój*