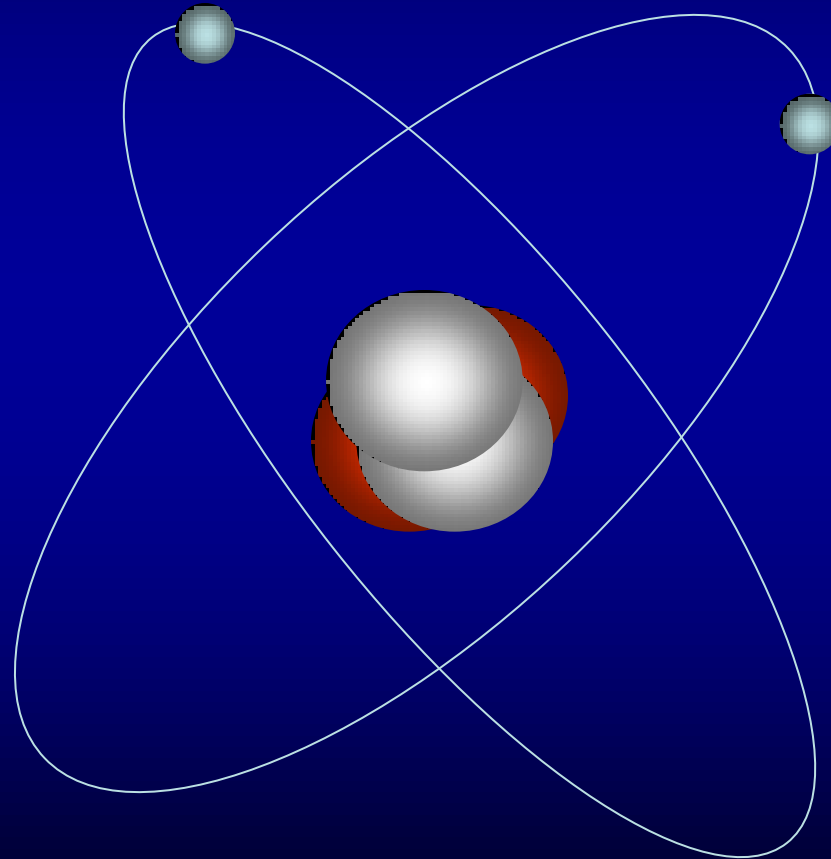
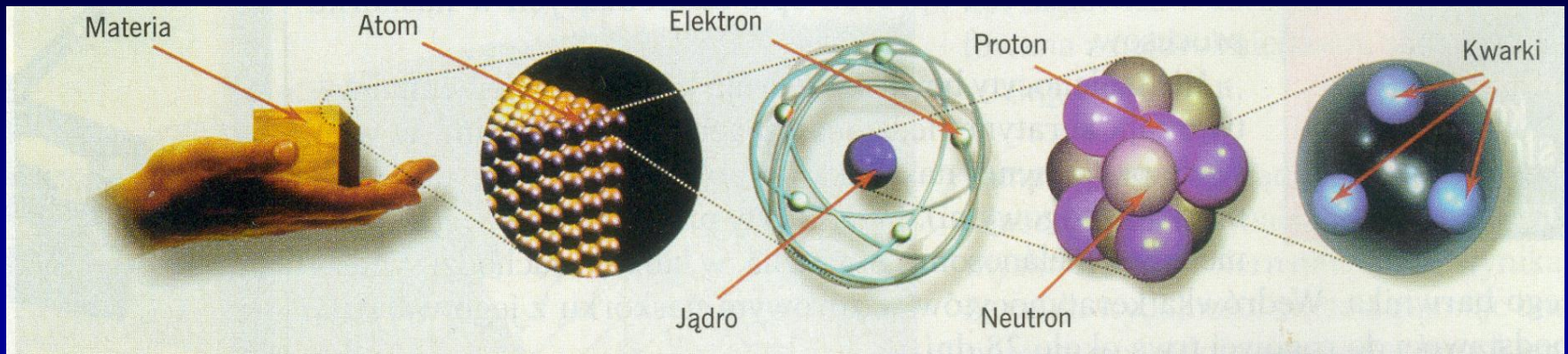


# Seminarium 3

# Budowa Materii



# Budowa i charakterystyka jądra atomowego.



**Makro-świat**  $\sim$  mm

**Cząsteczka**  $\sim$  ( $10^{-9} \div 10^{-6}$ ) m

**Atom**  $\sim 10^{-10}$  m ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )

**Elektrony**

**Jądro atomowe**  $\sim 10^{-15}$  m ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )

**Nukleony**  $\sim 0,8 \cdot 10^{-15}$  m

**Kwarki**  $\leq 10^{-18}$  m

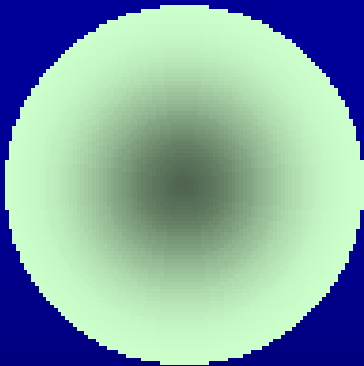


# Atom



masa atomowa

liczba porządkowa



jednostka masy atomowej (j.m.a.)

atomic mass unit (amu, u)

$$^{12}\text{C} = 12.000 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



# Jądro (nuklid)



A – liczba nukleonów

$A \cdot u$  - masa jądra

Z – liczba protonów

$Z \cdot e$  - ładunek jądra

N – liczba neutronów

$$N = A - Z$$



# Jądro atomowe: układ związany nukleonów



**proton**

$$m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 1.0078 \text{ u}$$

$$q_p = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$= +1e$$

(e - ładunek elementarny)

**neutron**

$$m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 1.0087 \text{ u}$$

$$q_n = 0$$



# Rozmiary jądra

$$\rho \sim 10^{17} \text{kg/m}^3$$

$$R = R_0 A^{1/3}$$

$$R_0 \sim 10^{-15} \text{m} = 1 \text{fm}$$



Co powoduje, że  $Z$  protonów i  $N = A - Z$  neutronów tworzy układ związany?

**Sily jądrowe (tzw. oddziaływania silne), które są:**  
przyciągające  
niezależne od ładunku  
krótkozasięgowe ( $\sim 1$  fm)

$$Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n > M_N$$



**Defekt masy  $\Delta m$  :**

$\Delta m = (\text{suma mas p i n}) - \text{masa jądra}$



# Energia wiązania jądra atomowego

$$E_w = - \Delta m \cdot c^2$$

Konwencja: energia wiązania jest ujemna

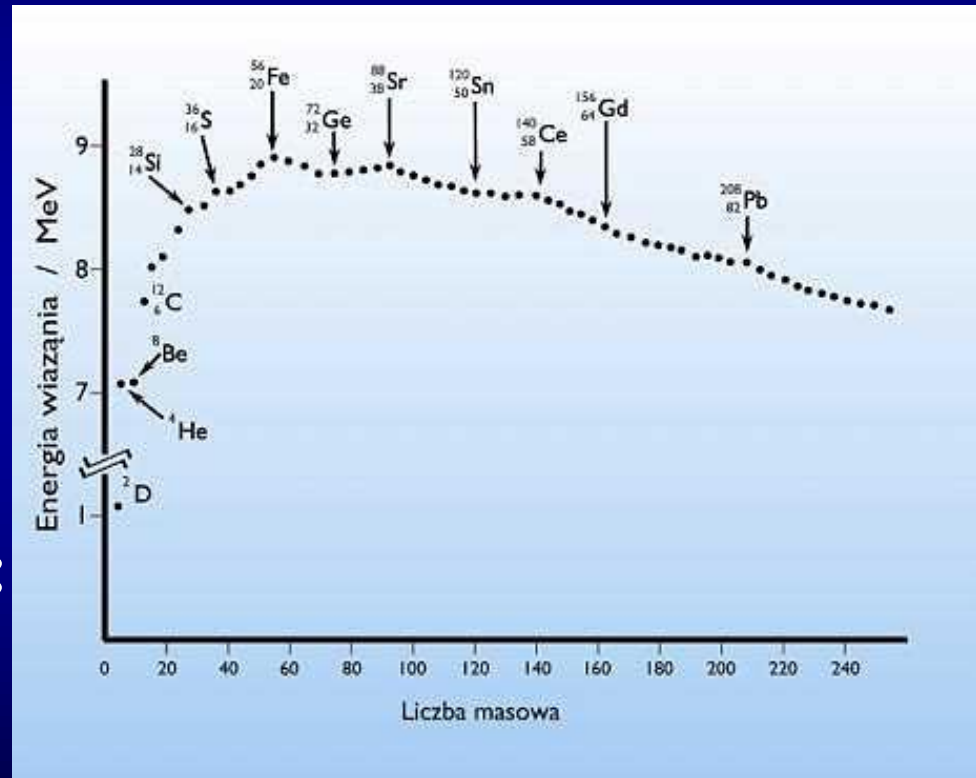
$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.601 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Średnia wartość  $E_w$ :

8 MeV na nukleon

(8,7 - 7,6)





# Energia wiązania jądra helu ${}^4\text{He}$

$$2m_p = 2.0156$$

+

$$2m_n = 2.0174$$

---

$$\Sigma = 4.0330 \text{ u}$$

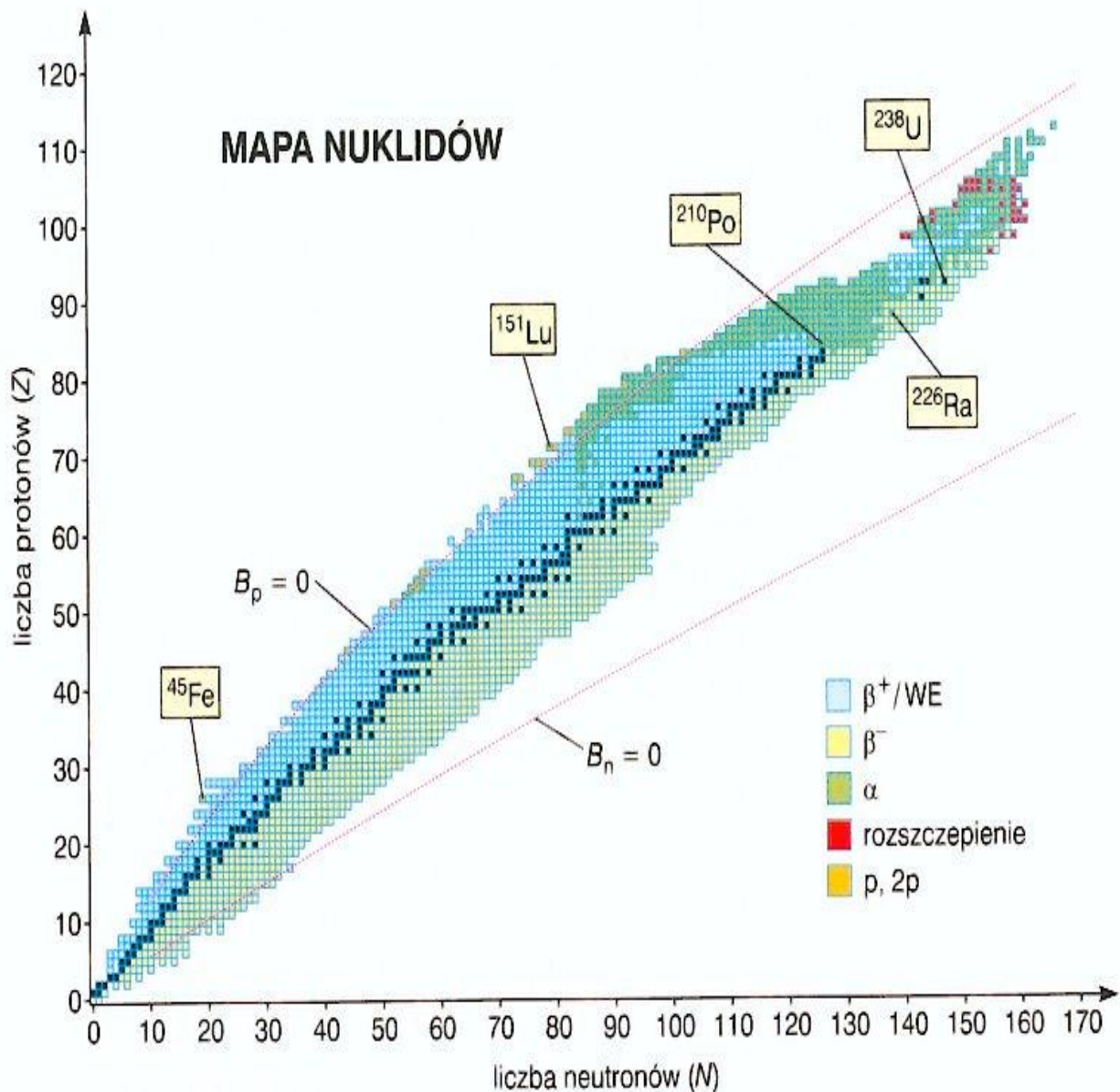
-

$$m_{\text{He}} = 4.0026 \text{ u}$$

$$\Delta m_{\text{He}} = 0.0304 \text{ u}$$

$$E_w = ?$$





**~ 1500  
nuclidów**

**~ 270  
stabilnych**



# Charakterystyka jąder atomowych (podsumowanie)

**Masa jądra > liczba masowa (A), wyrażona w u**

$$A = (\text{suma mas p i n}) - (\text{defekt masy})$$

**Ładunek jądra > liczba atomowa (Z), wyrażona w e**

$$Z = \text{suma ładunków protonów (= liczba protonów)}$$

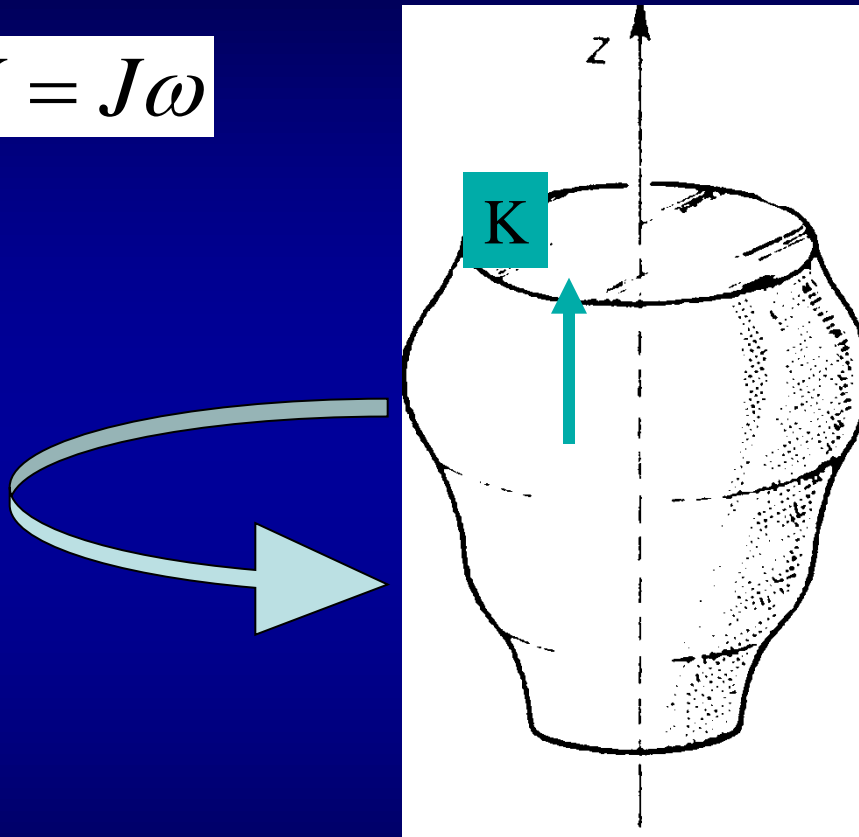
**Spin jądra – skomplikowana suma spinów nukleonów**

**Moment magnetyczny jądra**



# Moment pędu

$$K = J\omega$$



Własny moment  
pędu cząstki:  
**spin**

$$K = \frac{h}{2\pi} \sqrt{S(S+1)}$$

$S$  – spinowa liczba kwantowa

$J$  – moment bezwładności  
 $\omega$  – prędkość kątowa

$$S_{p,n} = 1/2$$



# Spin jąder

- ▶ jądra o parzystej liczbie protonów i neutronów

$$S = 0$$

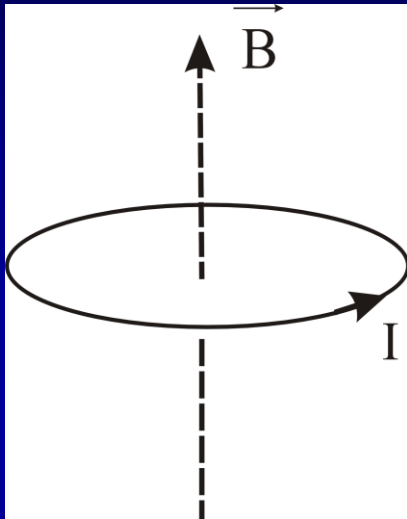


- ▶ jądra o nieparzystej liczbie nukleonów

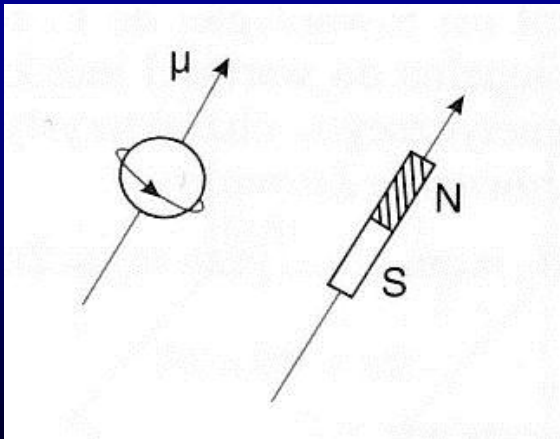
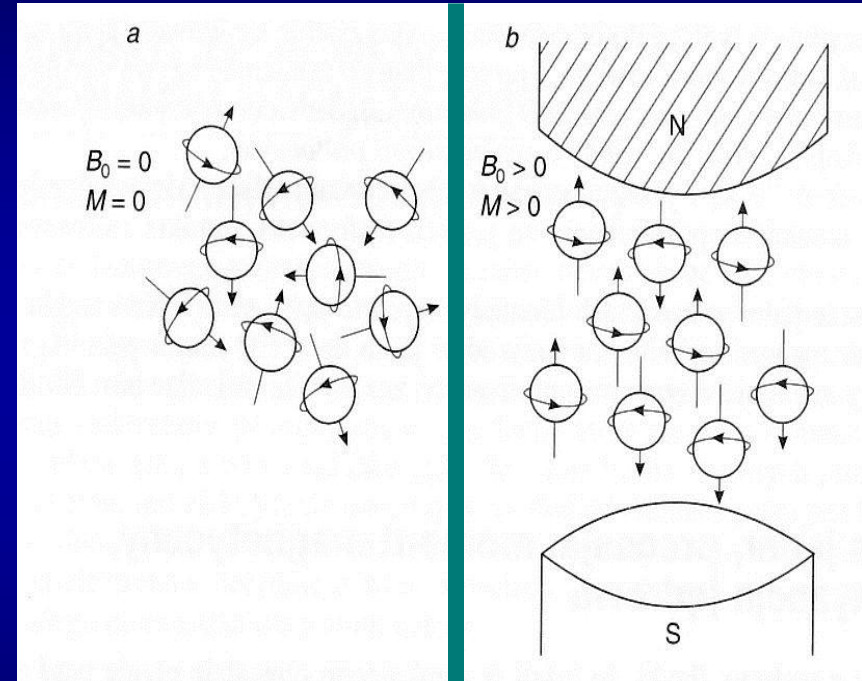
$$S = 1/2, 3/2, \dots 9/2$$



# Moment magnetyczny jądra



$$\mathbf{p}_m = \mathbf{I} \cdot \mathbf{S}$$



$$\mu = \text{constant} \cdot K$$



# Izotopy

identyczne  $Z$ , ale różne  $A$

wodór → 3 izotopy

${}^1\text{H}$  = p - proton

${}^2\text{H}$  = d - deuter

${}^3\text{H}$  = T - tryt

jod → 23 izotopy

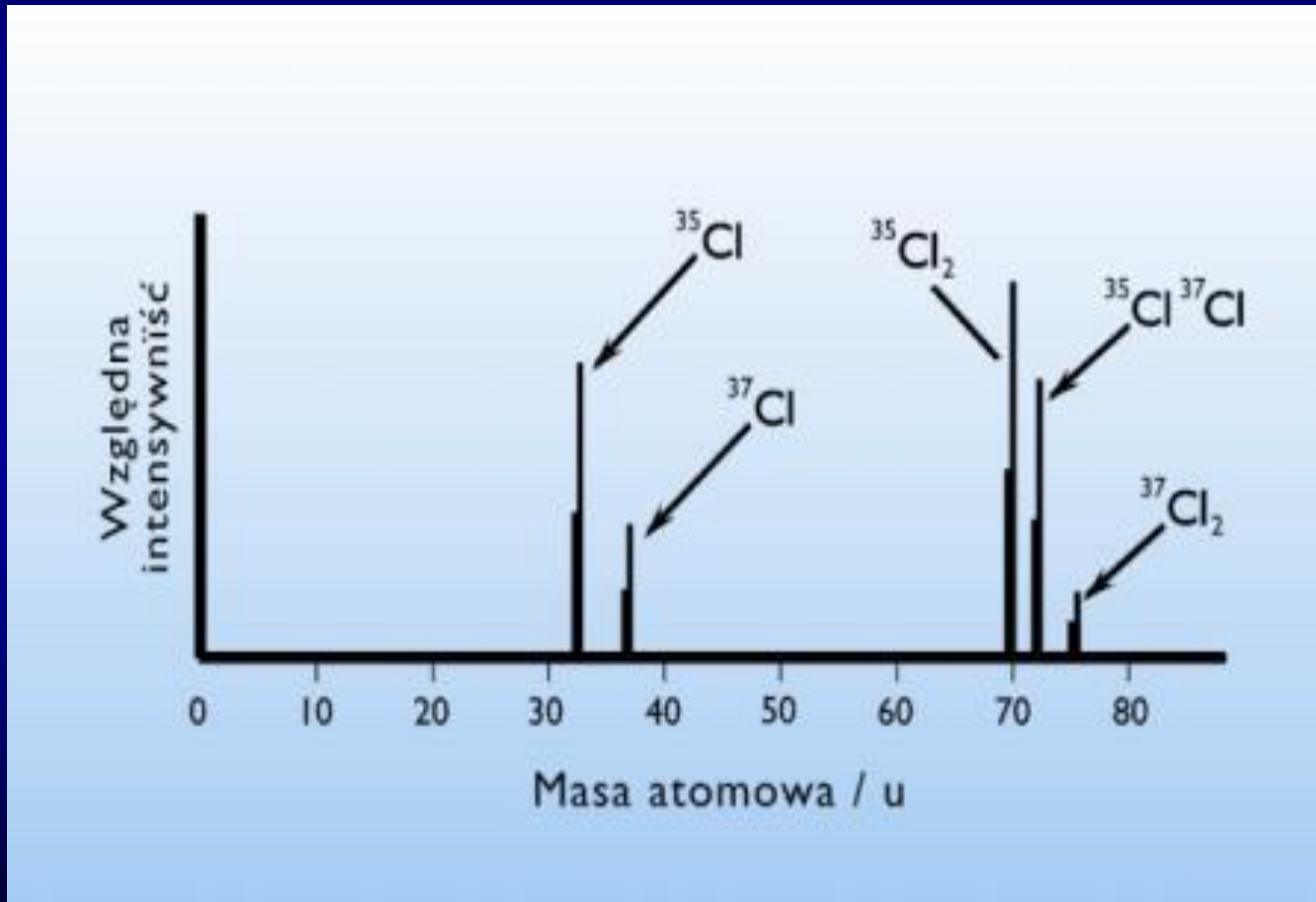
$Z = 53, A = 117 \div 139$

Pierwiastki w przyrodzie to mieszanina izotopów,  
np.  $A$  dla Fe = 55,847



# Liczba masowa $A$ pierwiastka w układzie okresowym

## ( przykład dla Cl )





# Izobary

identyczne  $A$ , różne  $Z$

$^{29}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{P}$ ,  $^{29}\text{S}$

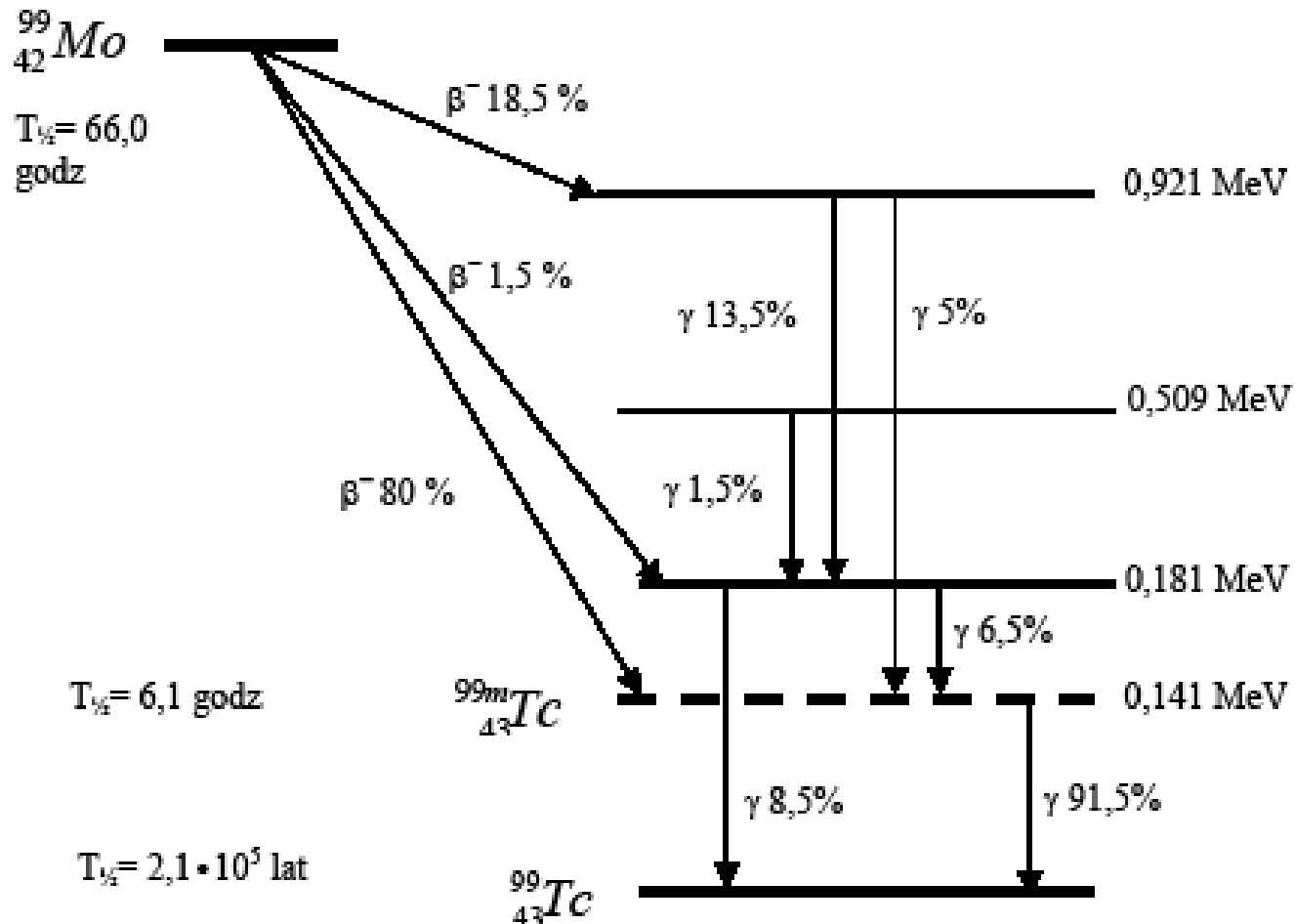
$^{131}\text{I}$ ,  $^{131}\text{Xe}$

# Izotony

identyczna liczba neutronów



# Izomery: $^{99m}\text{Tc}$ i $^{99}\text{Tc}$

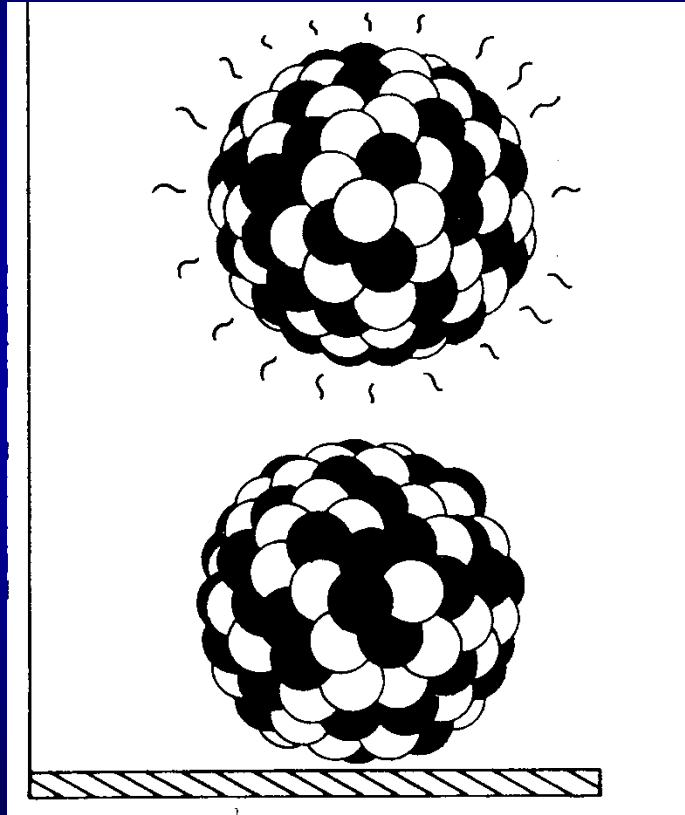


Rys. 5c Schemat poziomów  $^{99}\text{Mo}$  oraz  $^{99}\text{Tc}$ ; zaznaczony poziom izomeryczny  $^{99m}\text{Tc}$



# Stany energetyczne jądra

energia

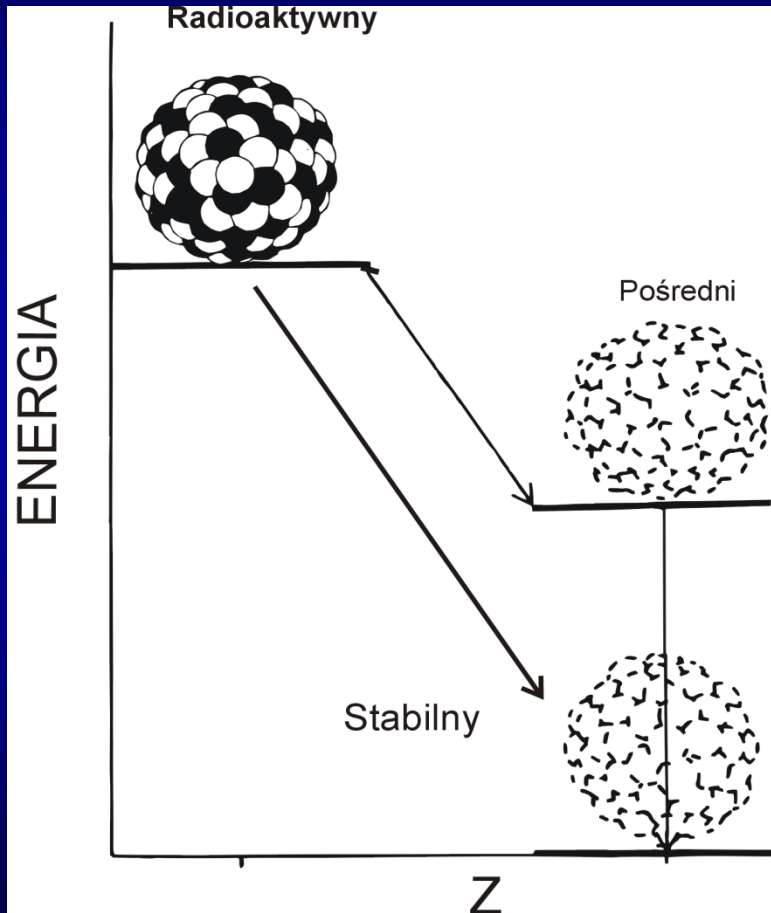


wzbudzony  $E_w > E$

podstawowy  $E = E_{\min}$



# Jądra promieniotwórcze



Promieniotwórczość **naturalna**:  
promieniotwórczość  
izotopów występujących  
w przyrodzie

Promieniotwórczość **sztuczna**:  
promieniotwórczość  
izotopów uzyskiwanych  
w reakcjach jądrowych



# Rozpady promieniotwórcze.

1. Rozpad  $\beta^-$  → jądro emituje elektron (neutron zamienia się w proton)
2. Rozpad  $\beta^+$  → jądro emituje pozyton [antycząstkę elektronu – „elektron o ładunku +1”]

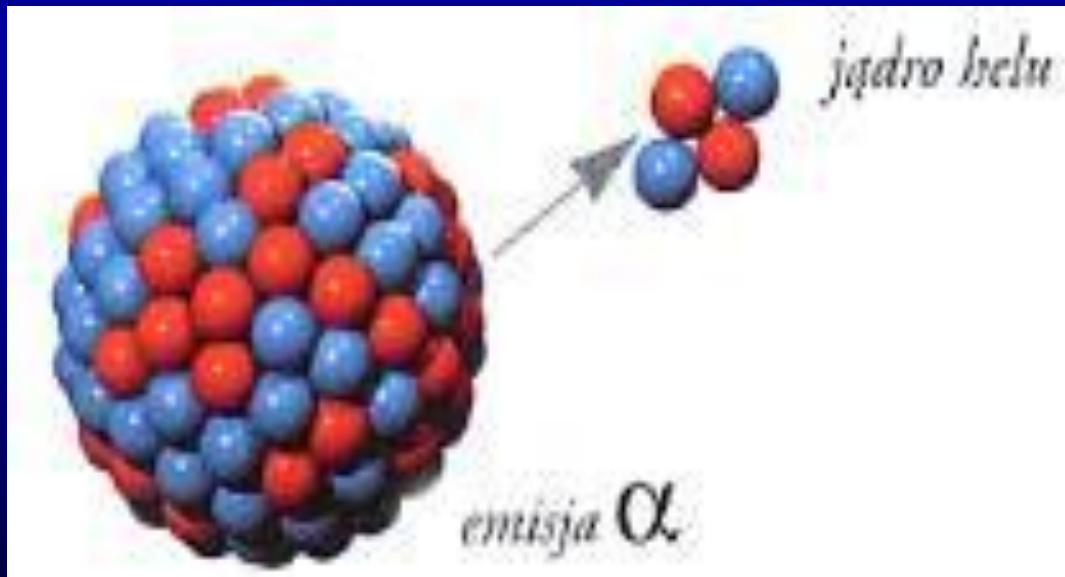
**EC** (electron capture) → wychwyt elektronu orbitalnego

3. Rozpad  $\alpha$  → jądro emituje cząstkę  $\alpha$  (jądro atomu helu)
4. Rozpad  $\gamma$  → jądro emituje promieniowanie elektromagnetyczne



# Rozpad $\alpha$

Okres połowicznego zaniku: od  $10^9$  lat do  $10^{-7}$ s

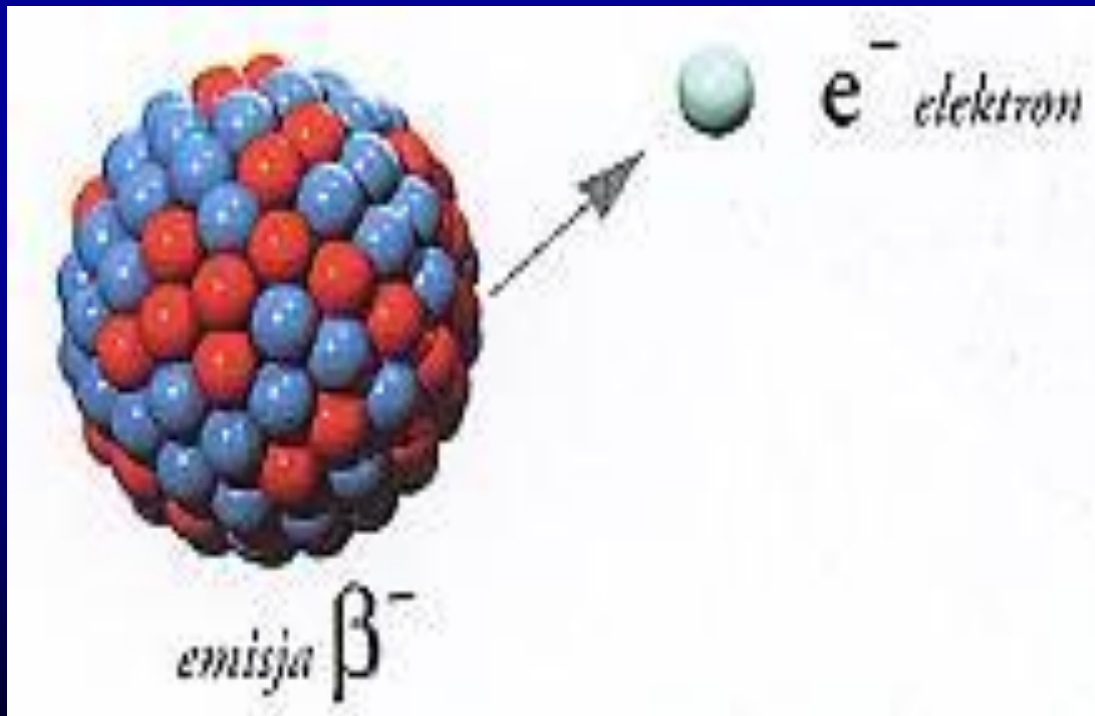
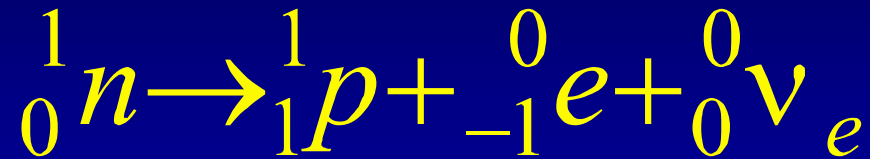


Emitowane cząstki mają różną energię, charakterystyczną dla danego rozpadu.



# Rozpad $\beta^-$

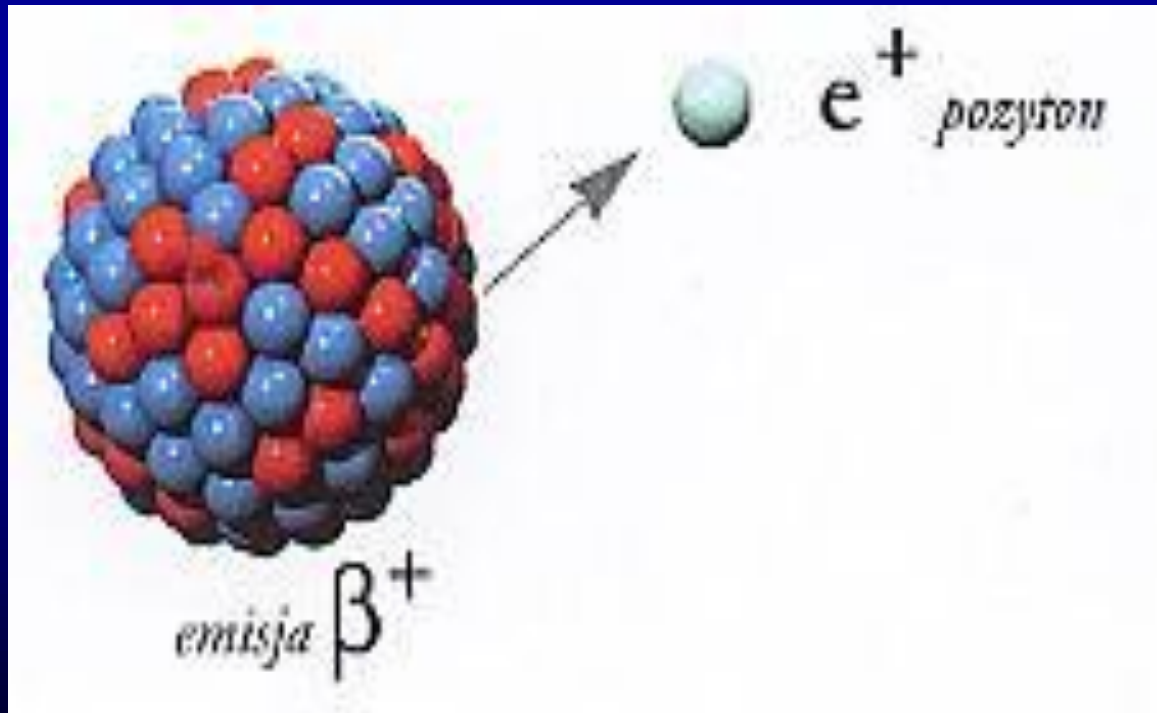
Okres połowicznego zaniku od  $10^{-2}$  s do  $10^{18}$  lat



Emitowane cząstki mogą mieć różne energie dla danego rozpadu (widmo).



# Rozpad $\beta^+$

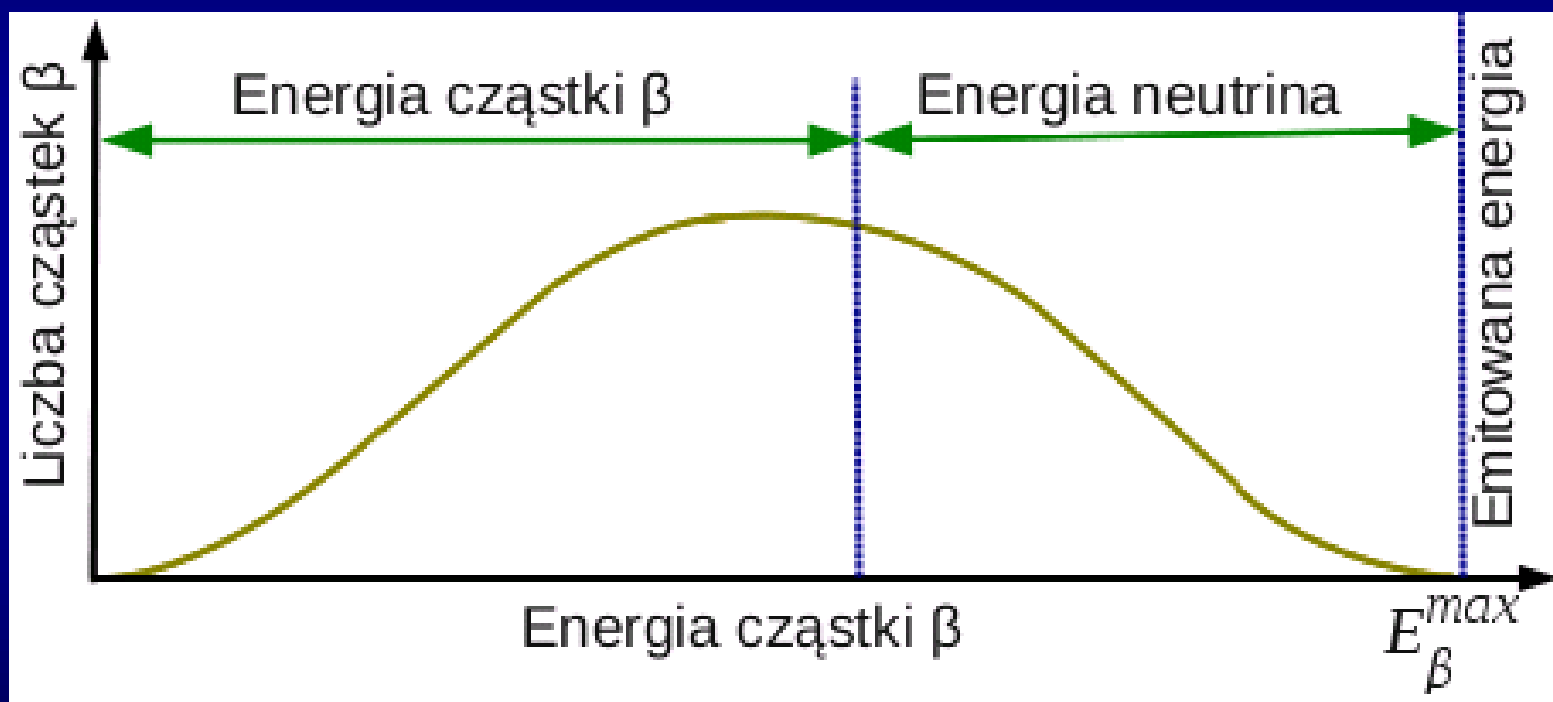


Emitowane cząstki mogą mieć różne energie dla danego rozpadu (widmo).

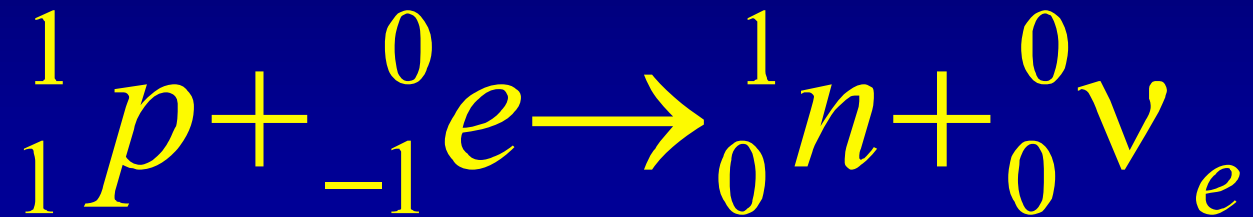




# Widmo elektronów w rozpadzie beta



# Wychwył K



Atom emituje promieniowanie X

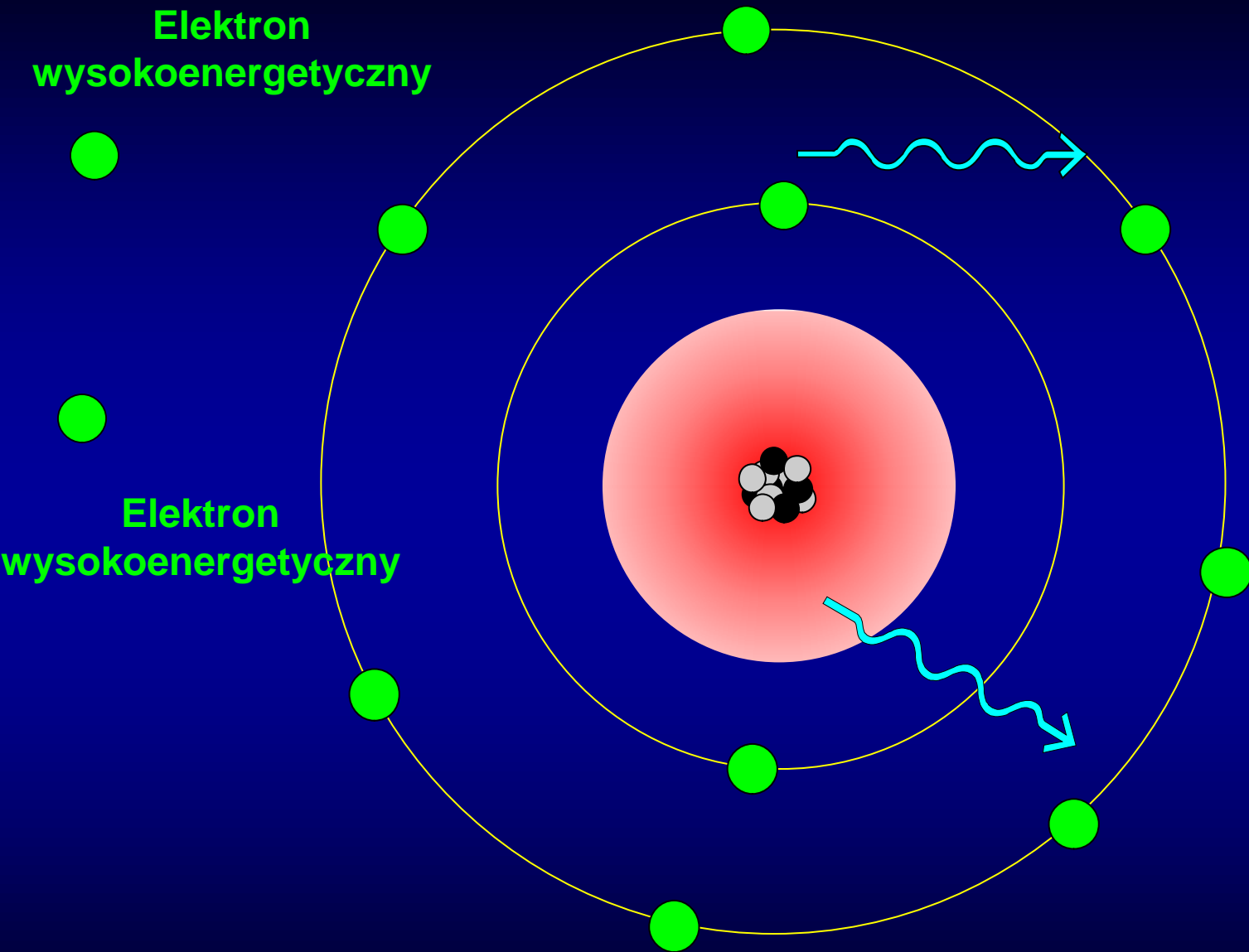


# Mechanizm wytwarzania promieniowania X i jego właściwości.

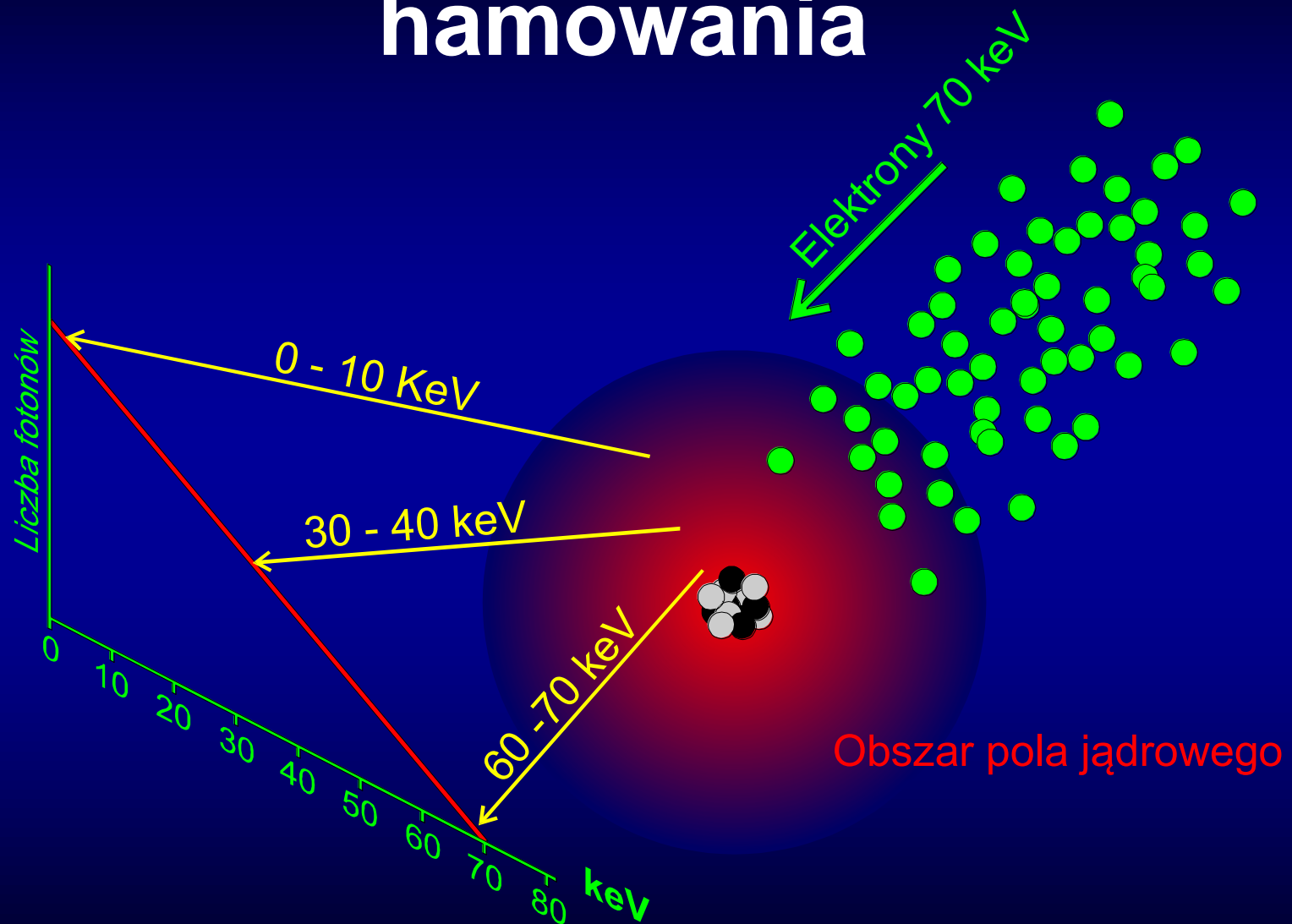
Elektrony docierające do anody oddziałują z atomami anody w dwóch procesach:

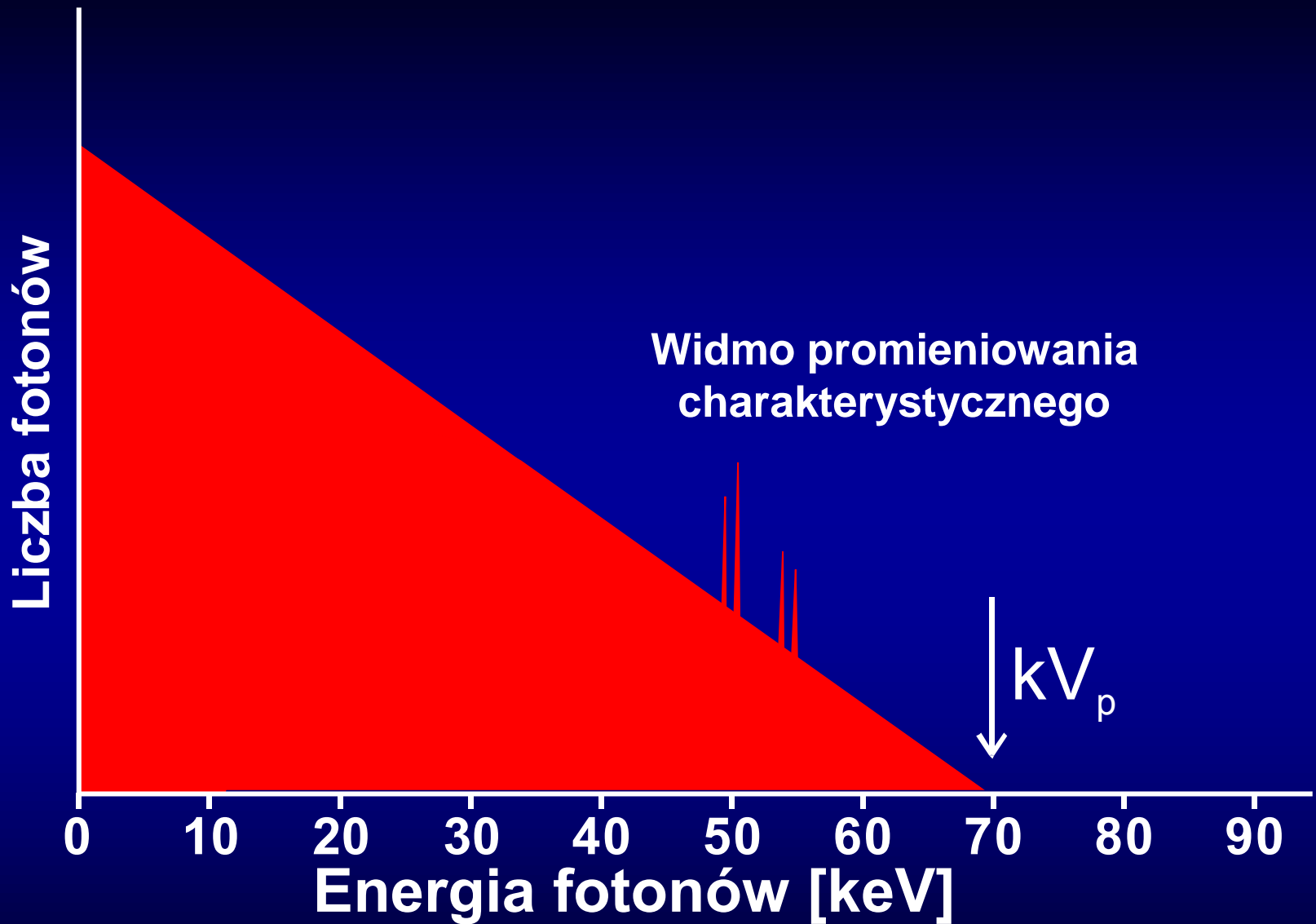
- Wybijanie elektronów z wewnętrznych powłok atomowych (na miejsce wybitych elektronów wskakują elektrony z wyższych powłok oddając energię w formie promieniowania X).
- Hamowanie w polu elektrycznym jądra (elektrony w polu elektrycznym jądra są odchylane i spowalniane, tracona energia jest emitowana w formie promieniowania X).





# Widmo promieniowania hamowania





# Efektywność produkcji promieniowania X

$$E_f = kV_p \cdot Z \cdot 10^{-6}$$

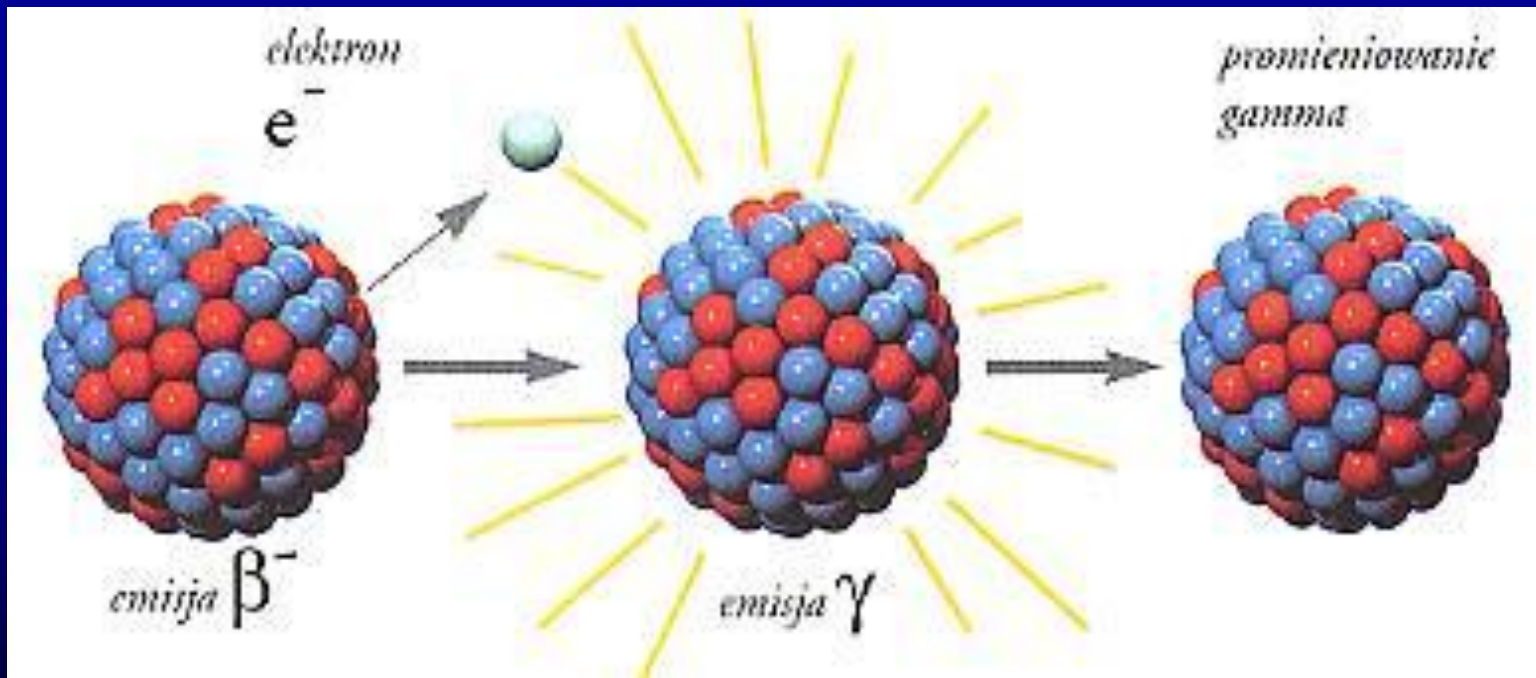
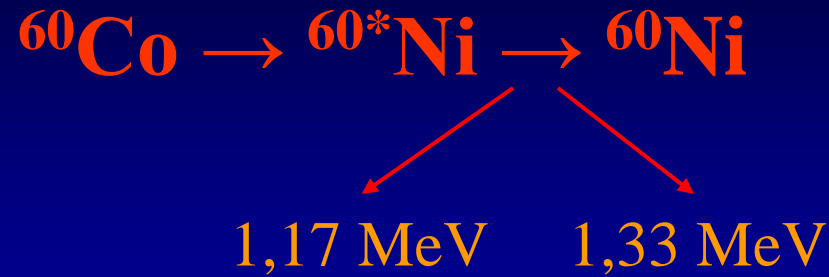
$$kV_p = 100 \text{ keV}$$

$$Z = 74 \text{ (wolfram)}$$

$$E_f = 0.74\%$$



# Rozpad $\gamma$





# Sztuczne izotopy promieniotwórcze



# Prawo rozpadu promieniotwórczego. Stała rozpadu i czas pół-zaniku.

1. Stała rozpadu  $\lambda$  i średni czas życia  $\tau = 1/\lambda$   
(dotyczy jądra promieniotwórczego)
2. Czas połowicznego zaniku  $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$
3. Aktywność  $A$ .



# Czas życia izotopów promieniotwórczych

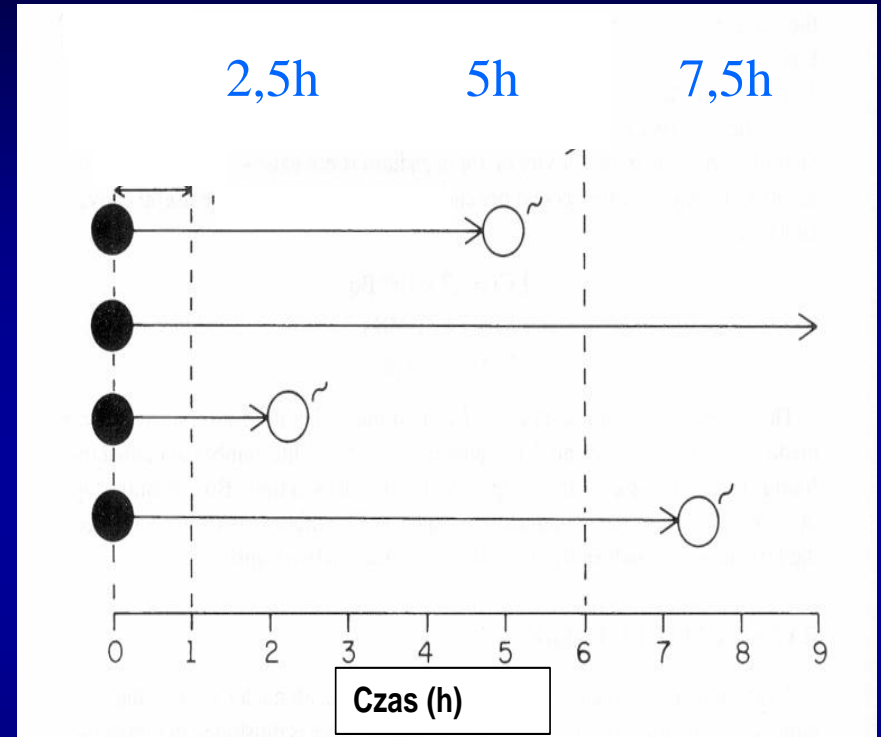
Samoistny rozpad jądra jest zdarzeniem przypadkowym:

$\lambda$  – stała rozpadu

(prawdopodobieństwo rozpadu jądra w jednostce czasu jest charakterystyczną cechą danego izotopu)

$$\lambda = 1/\tau$$

$\tau$  – średni czas życia jądra



# Prawo rozpadu promieniotwórczego

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

$N, N_0$  - liczba jąder promieniotwórczych

$t$  – czas

aktywność źródła w chwili  $t$

$$A = N(t) \cdot \lambda$$

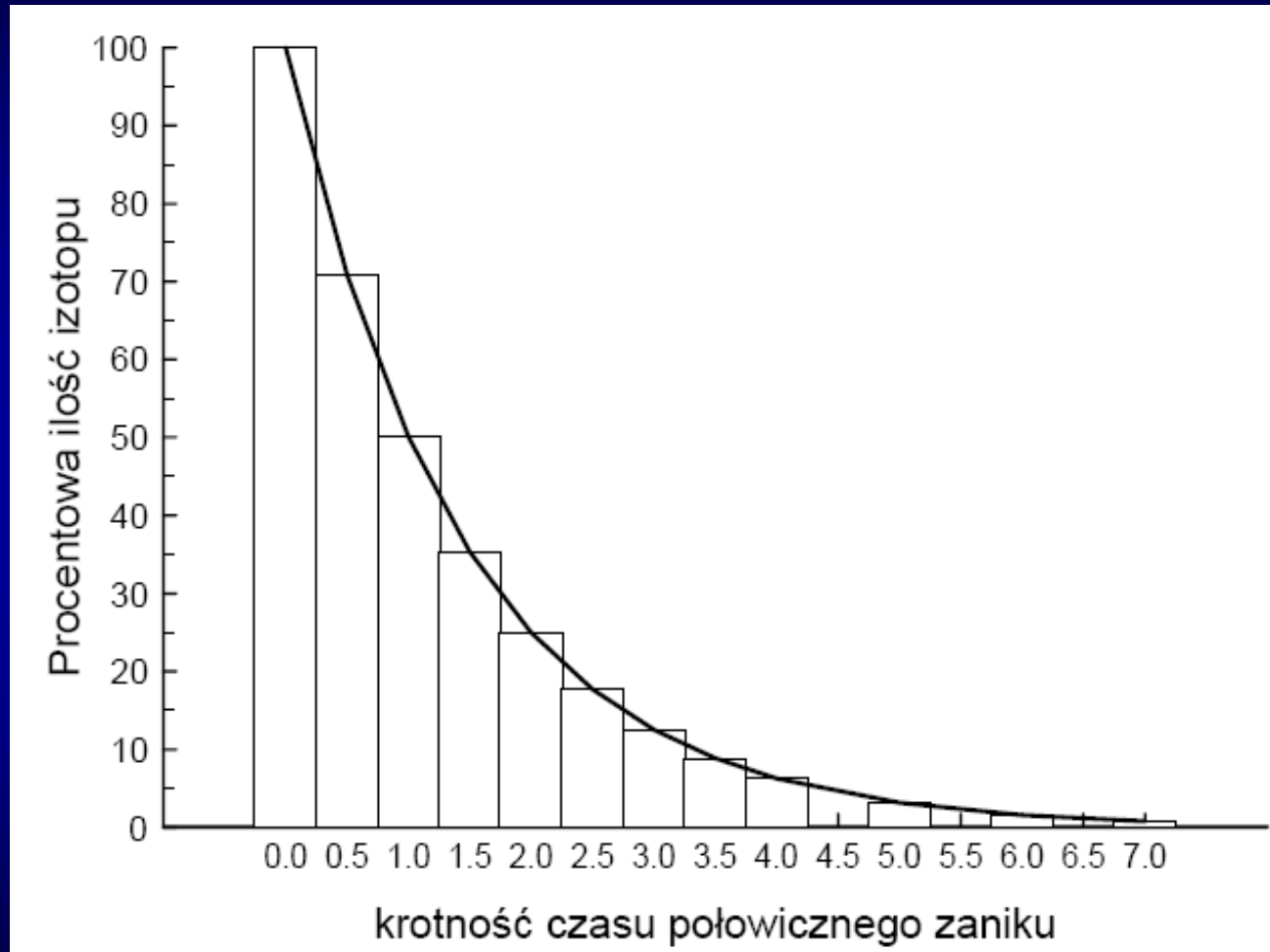


# Krzywa rozpadu

$$N = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$$

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= (\ln 2) / \lambda \\ &= 0.693 / \lambda \\ &= 0.693 \cdot \tau \end{aligned}$$



# Fizyczny, biologiczny i efektywny czas pół- zaniku.

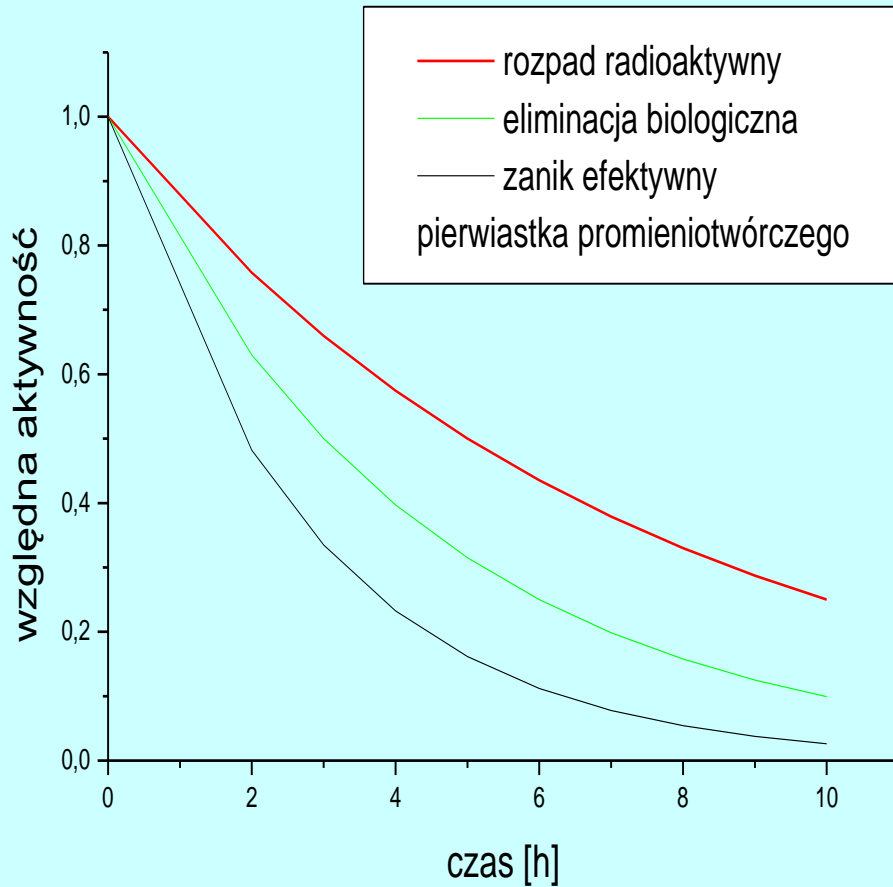
fizyczny  $T_f$  - rozpad promieniotwórczy  
pierwiastka

biologiczny  $T_b$  - eliminacja pierwiastka  
z ustroju

efektywny  $T_e$ : 
$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_b}$$



# Efektywny czas życia izotopu w ustroju



Efektywny  
czas półzaniku

$$T_e = \frac{T_f \cdot T_b}{T_f + T_b}$$

$$T_f \ll T_b \rightarrow T_e \approx T_f$$
$$T_b \ll T_f \rightarrow T_e \approx T_b$$



# $T_{1/2}$

**bardzo duży zakres  $\rightarrow 10^{-10}$  s -  $10^{10}$  lat**

**W zastosowaniach praktycznych:**

$^{14}\text{C} = 5570$  lat  $\rightarrow$  datowanie próbek

$^{125}\text{I} = 60$  d

$^{131}\text{I} = 8$  d

$^{90}\text{Sr} = 19.9$  lat

$^{60}\text{Co} = 5.24$  lat

$^{11}\text{C} = 20$  min

$^{15}\text{O} = 2$  min





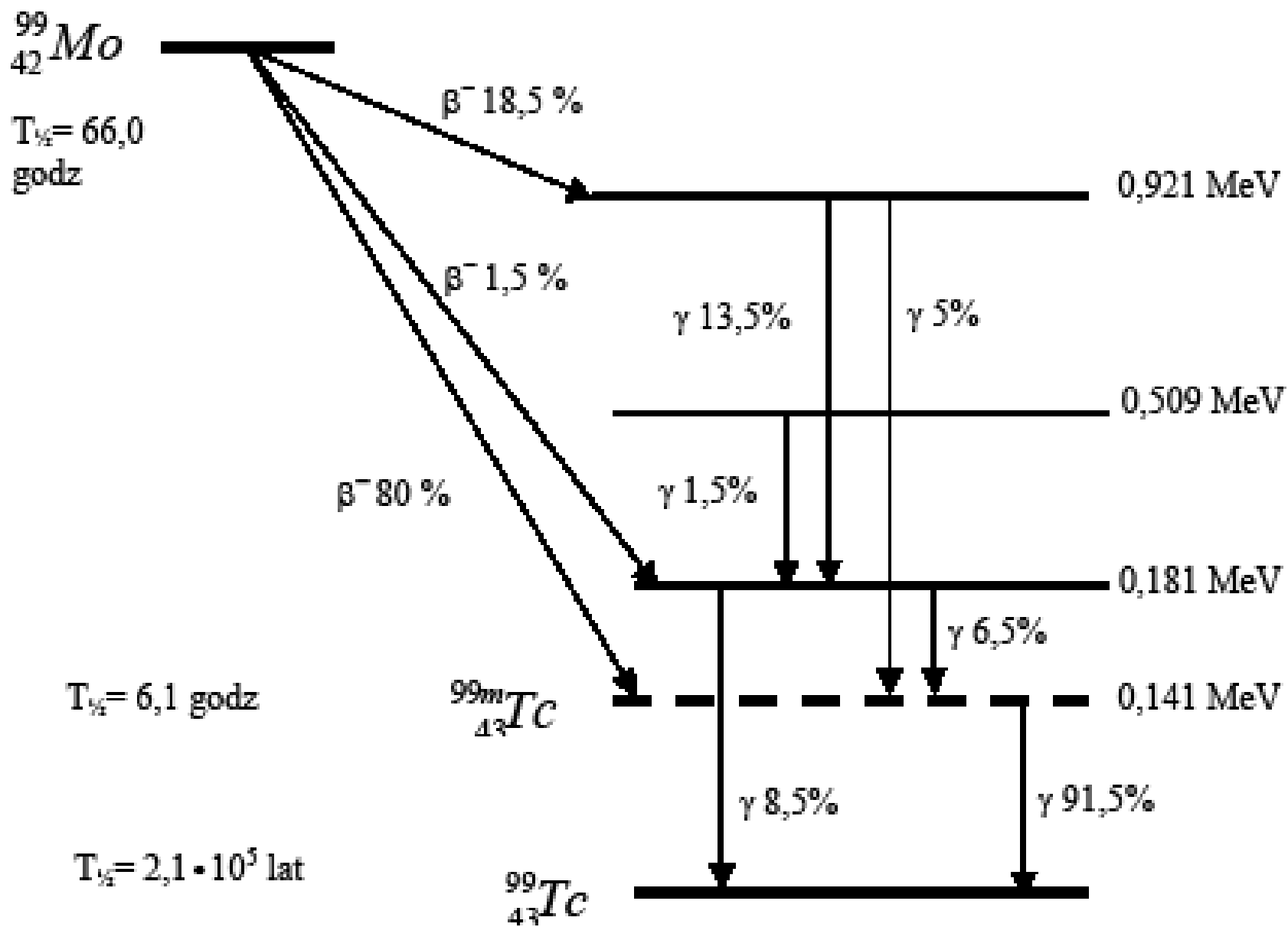
# Źródła promieniotwórcze



Brachyterapia prostaty



Brachyterapia oka  $^{125}\text{I}$  oraz  $^{106}\text{Ru}$



Rys. 5c Schemat poziomów  $^{99}\text{Mo}$  oraz  $^{99}\text{Tc}$ ; zaznaczony poziom izomeryczny  $^{99m}\text{Tc}$

# Najważniejsze radioznaczniki stosowane w medycynie nuklearnej.

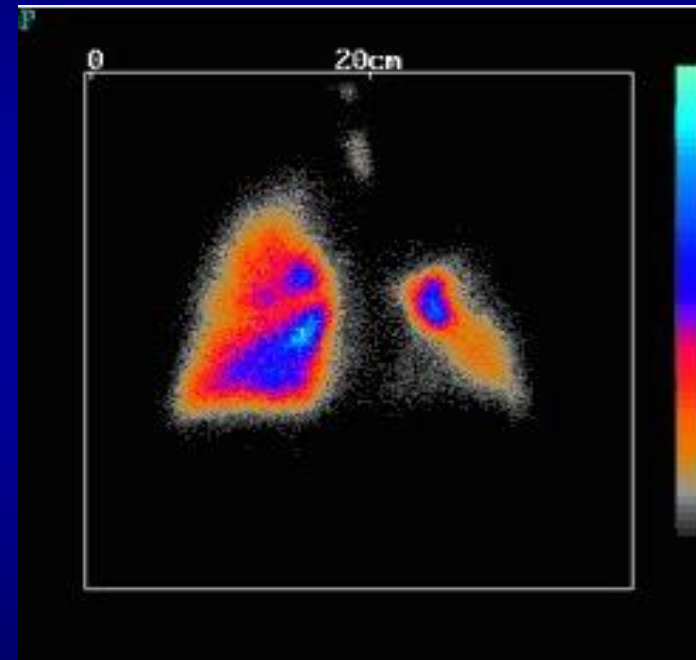
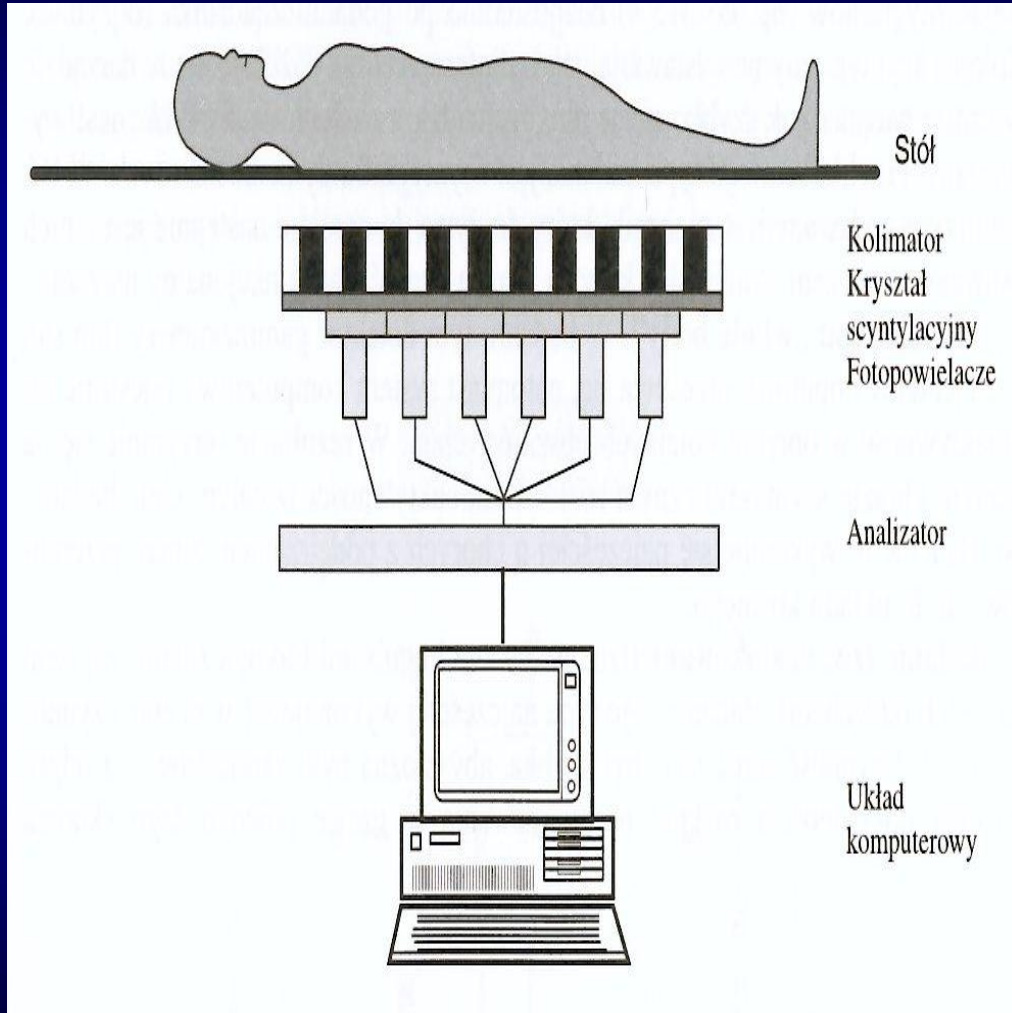
W praktyce klinicznej wykorzystujemy izotopy emitujące promieniowanie  $\gamma$ :

- o odpowiedniej energii
- o odpowiednim czasie  $T_{1/2}$  (minimum  $\sim 100$  s)
- o określonych właściwościach chemicznych.

## Przykłady:



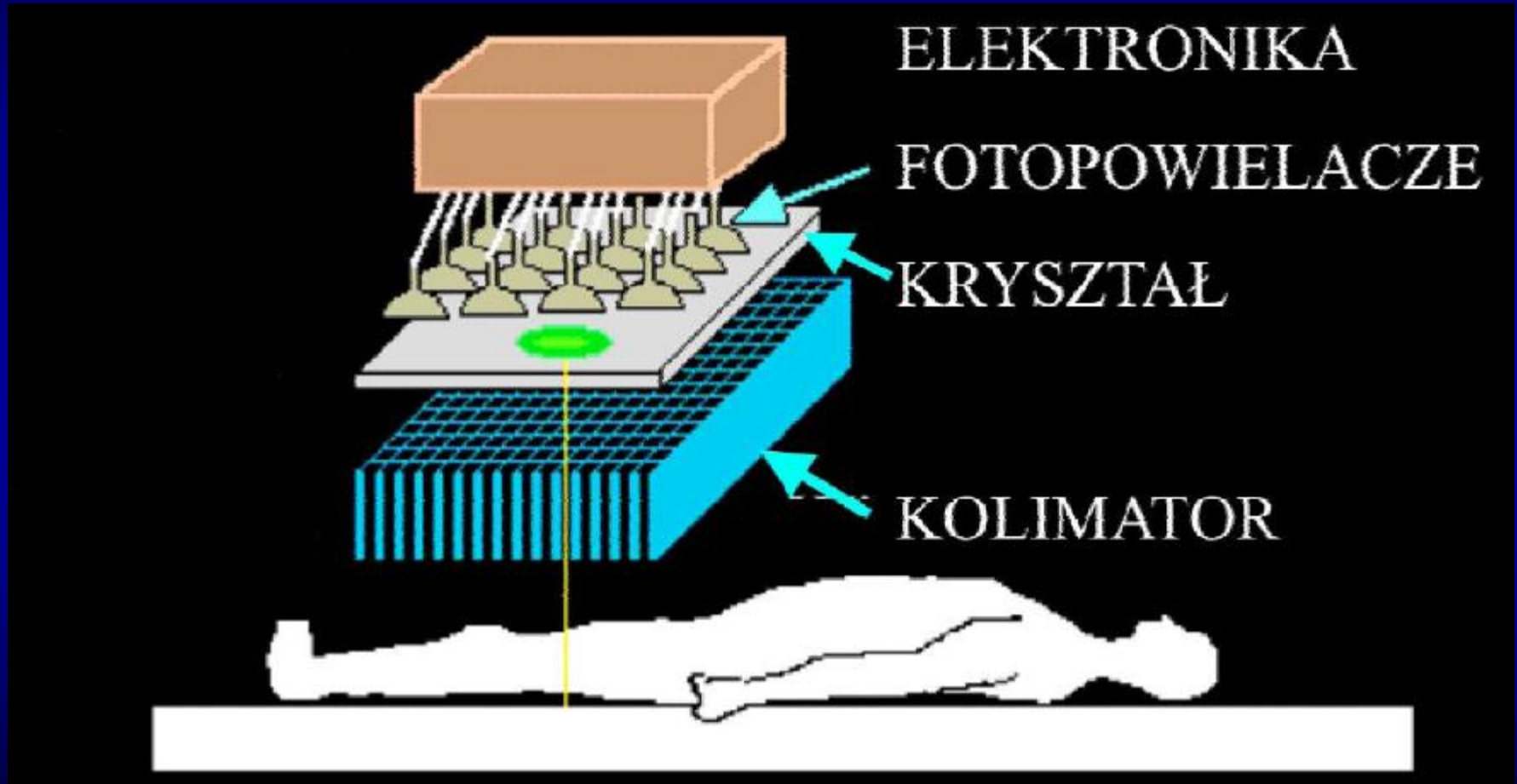
# Scyntygrafia.

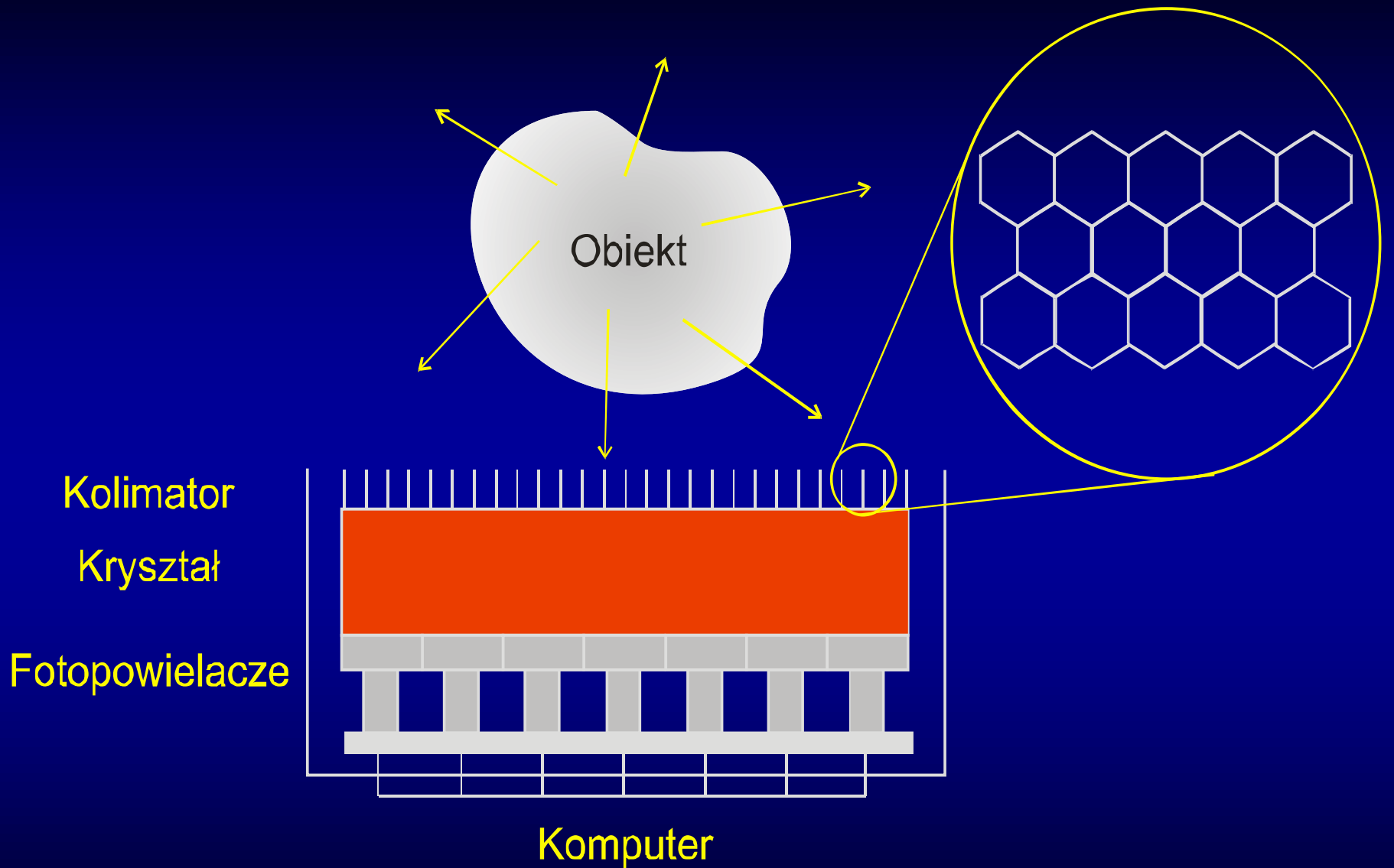


Scyntygram płuc

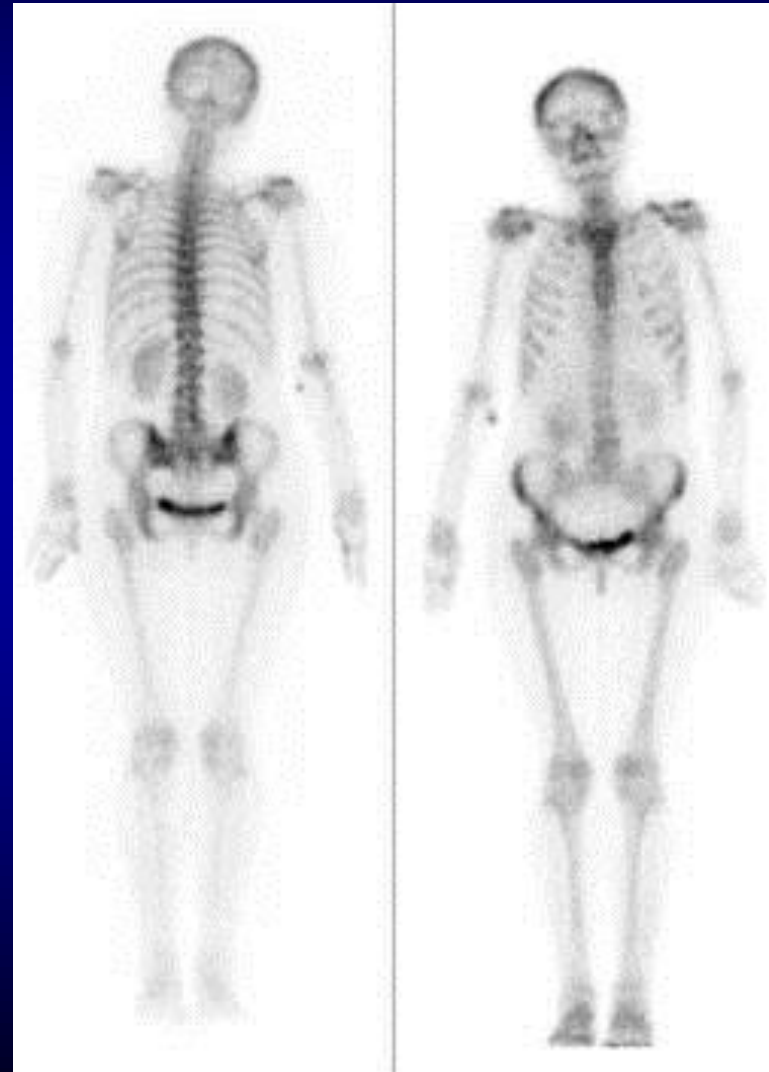


# Budowa gamma - kamery

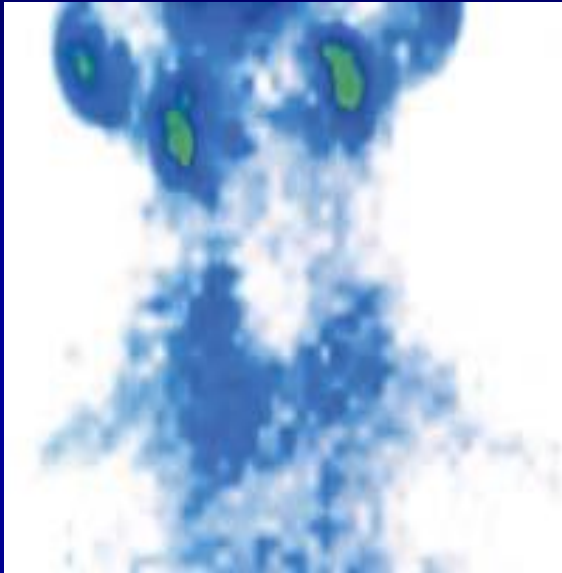




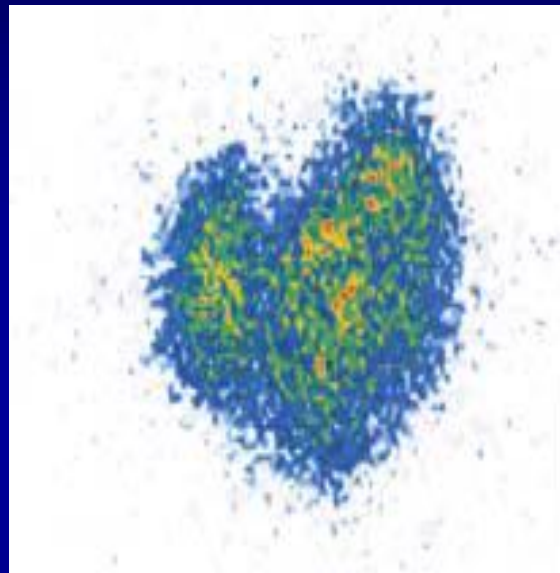
# Obrazowanie kośćca w scyntygrafii



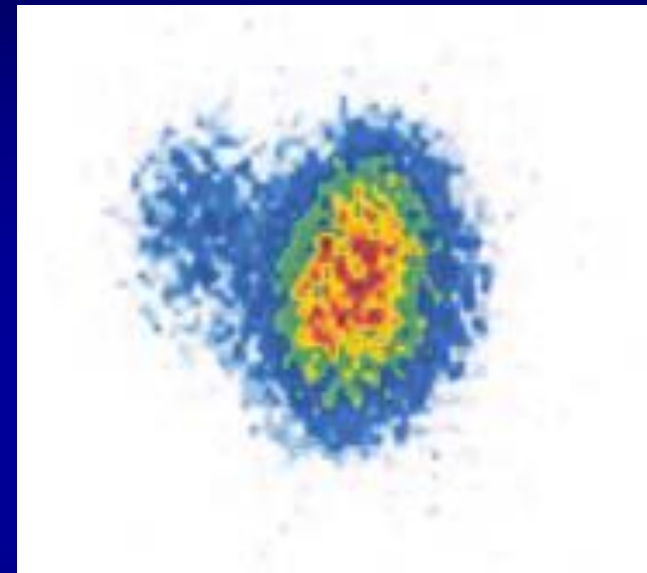
# Scyntygrafia tarczycy



Scyntygrafia tarczycy u pacjenta z zapaleniem tarczycy: wybitnie zmniejszone gromadzenie radiofarmaceutyku w obu płatach tarczycy



Scyntygrafia tarczycy u pacjenta z nadczynnym wolem wieloguzkowym: nierównomiernie zwiększone gromadzenie radioznacznika w obrębie zmian guzkowatych w lewym płacie

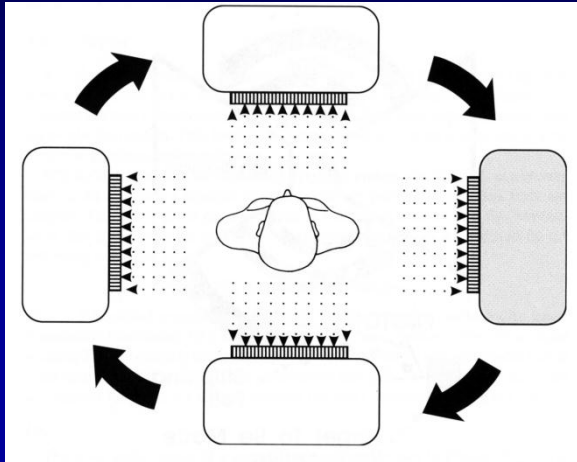


Scyntygrafia tarczycy u pacjenta z guzkiem autonomicznym w płacie lewym: zwiększone gromadzenie radiofarmaceutyku w obrębie guzka zlokalizowanego w płacie lewym; śladowa radioaktywność w płacie prawym

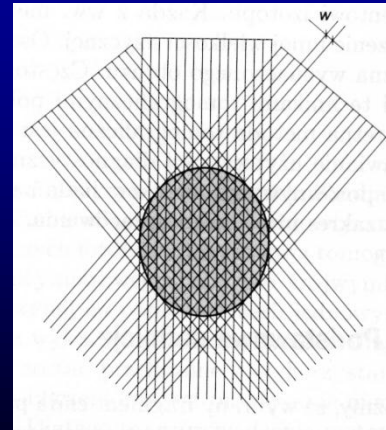




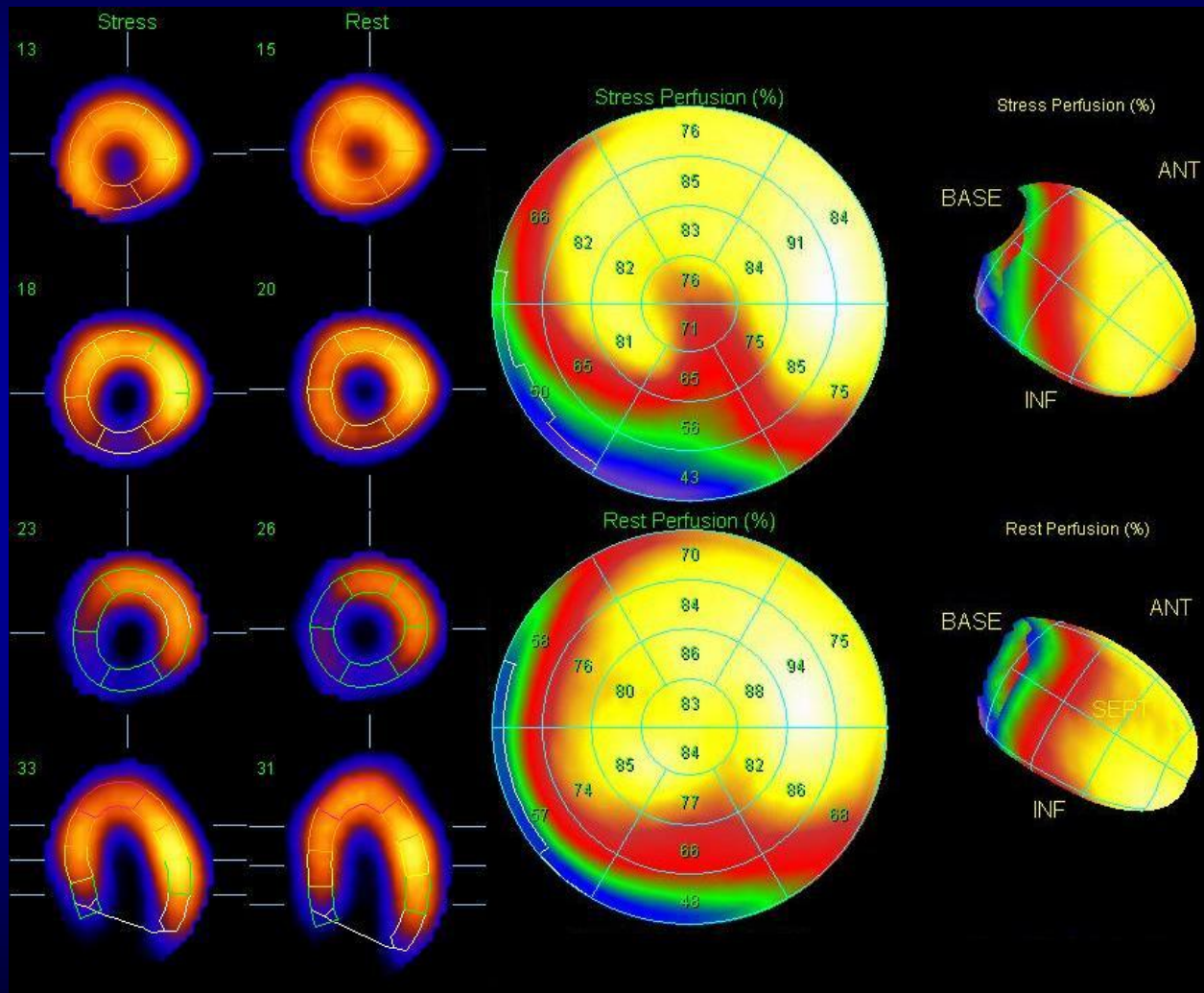
# Tomografia SPECT.



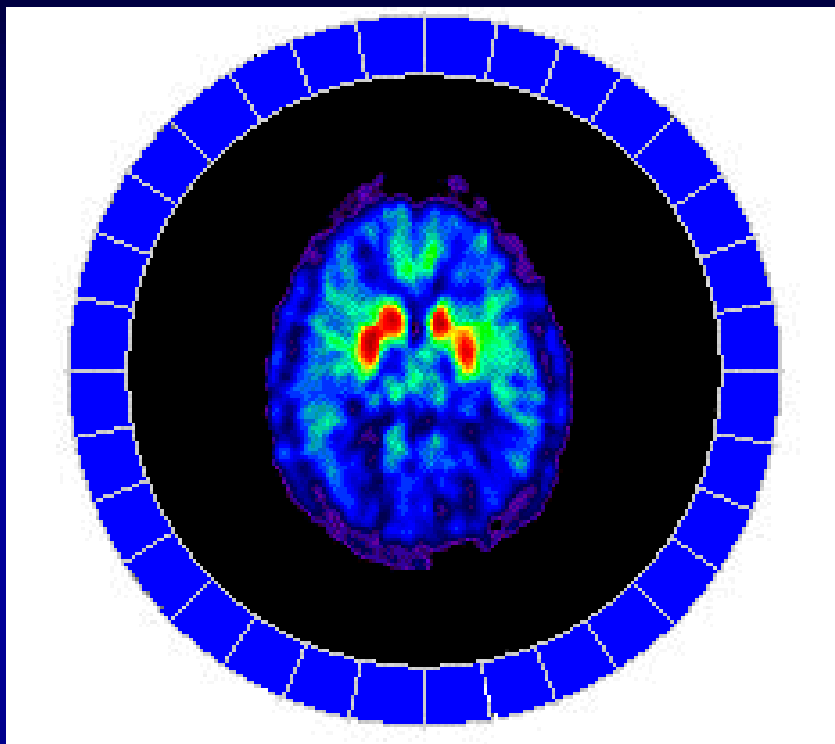
Gammakamera  
obraca się  
wokół pacjenta



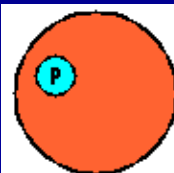
# Zastosowanie SPECT w kardiologii



# Zjawisko anihilacji par.



## Tomografia PET



niestabilna molekula o  
dużej liczbie protonów

Anihilacja pary elektron-pozyton

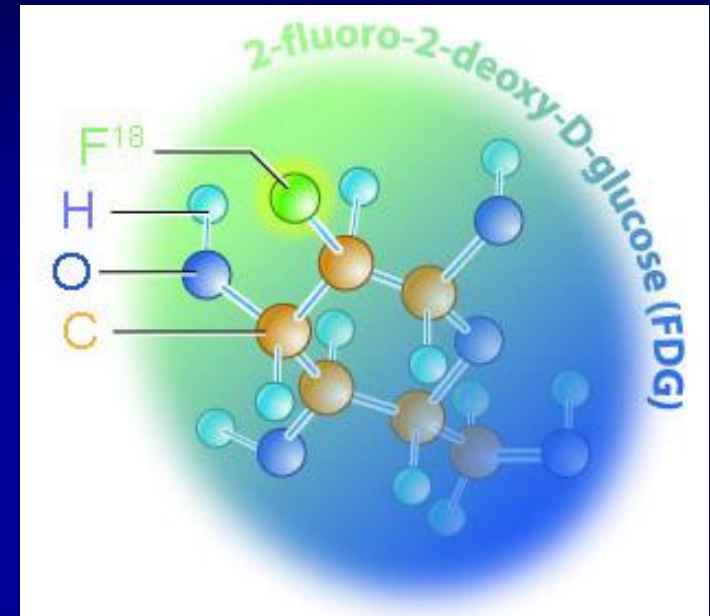


# Tomografia PET - radiofarmaceutyki

Znaczniki pozytonowe wbudowane  
w możliwie proste radiofarmaceutyki  
np.  $\text{H}_2^{15}\text{O}$ ,  $^{13}\text{NH}_3$ ,  $^{11}\text{CO}$ ,  $^{11}\text{CO}_2$

emitują promieniowanie  $\beta^+$

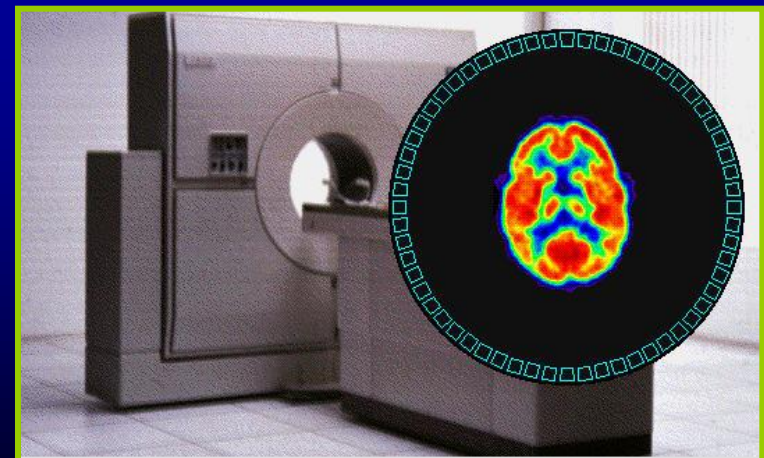
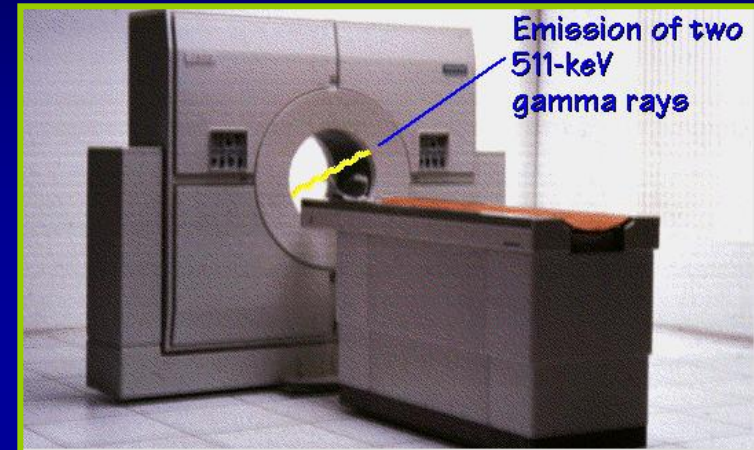
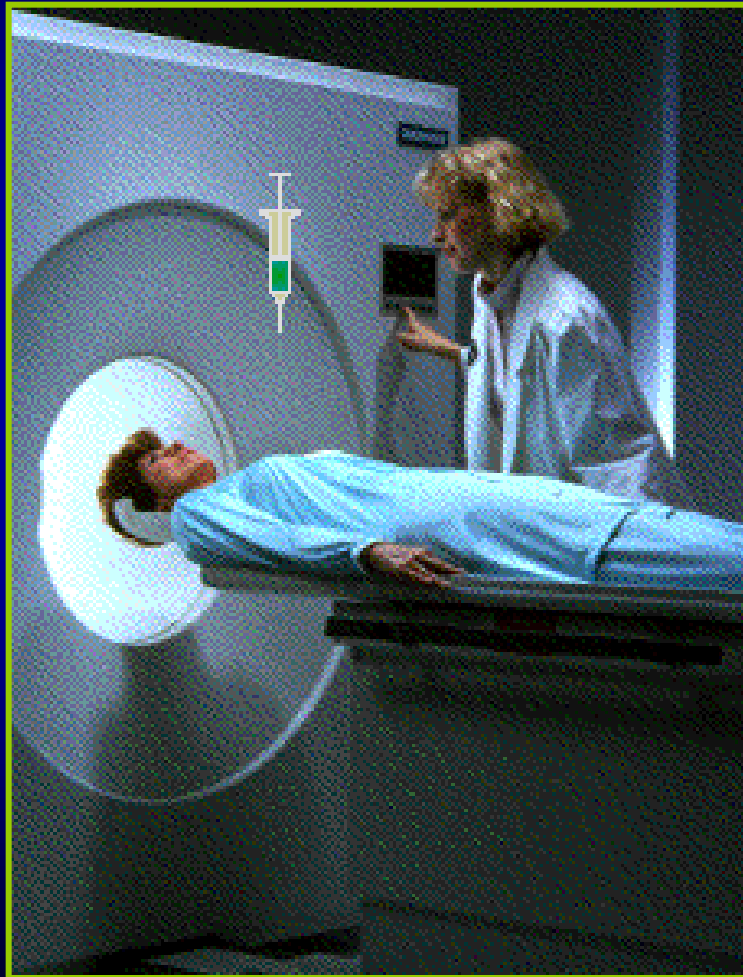
$E_{\text{max}}$	$T_{1/2}$
$^{11}\text{C}$ - 1,0 MeV	20,4 min
$^{13}\text{N}$ - 1,2 MeV	9,97 min
$^{15}\text{O}$ - 1,7 MeV	2,1 min
$^{18}\text{F}$ - 0,6 MeV	109,8 min



Radiofarmaceutyk FDG  
zawierający  $^{18}\text{F}$

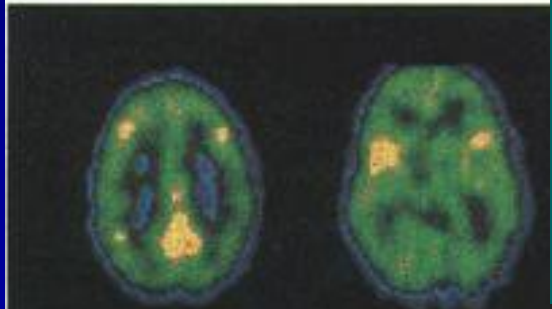


# Tomografia PET. Wykorzystanie w diagnostyce nowotworów.

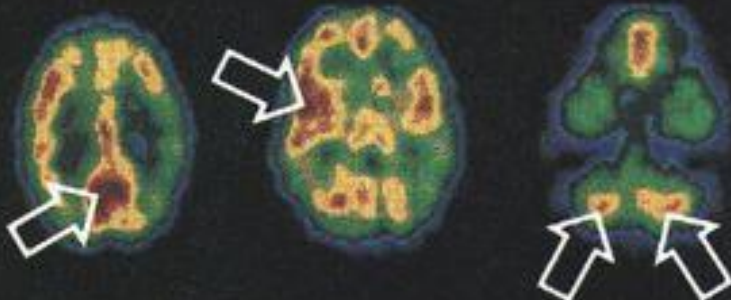


# Obrazowanie mózgu w PET

PET Scans of the



Relaxed condition



Right fist clenched and unclenched

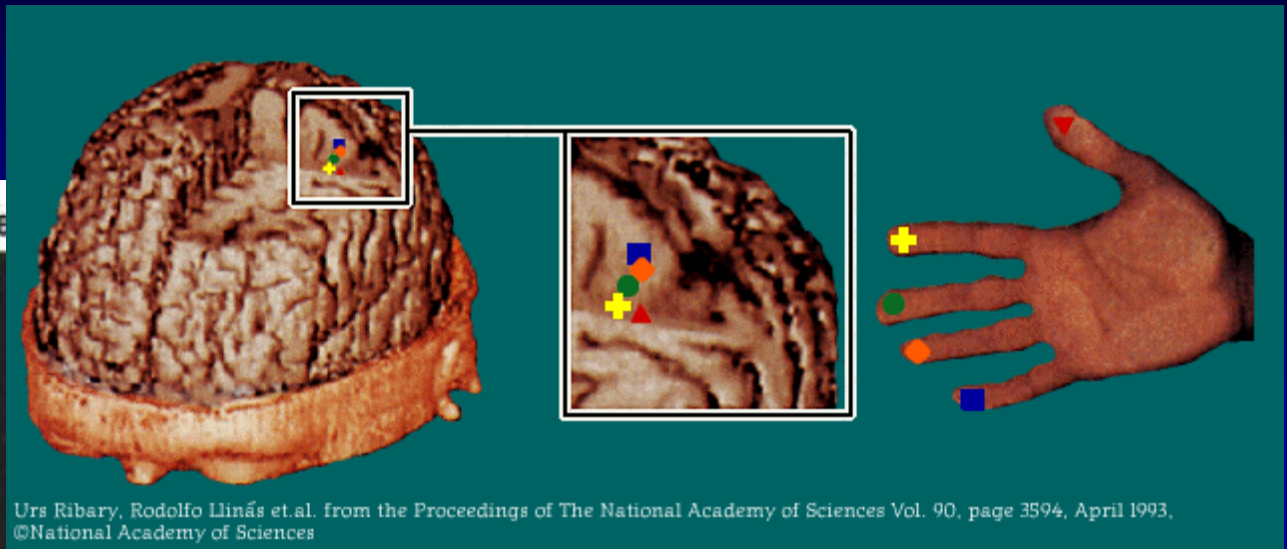
36

24

12

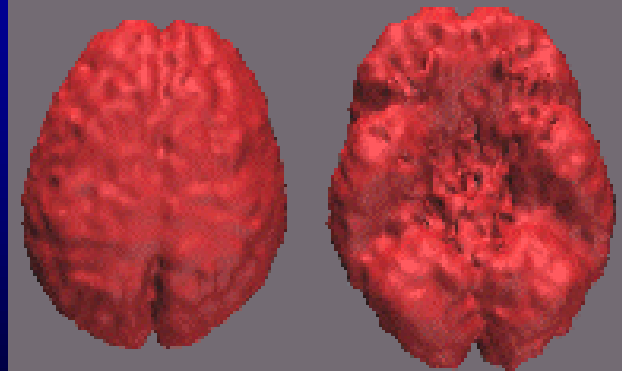
0

Copyright © 1995 by Allyn and Bacon.



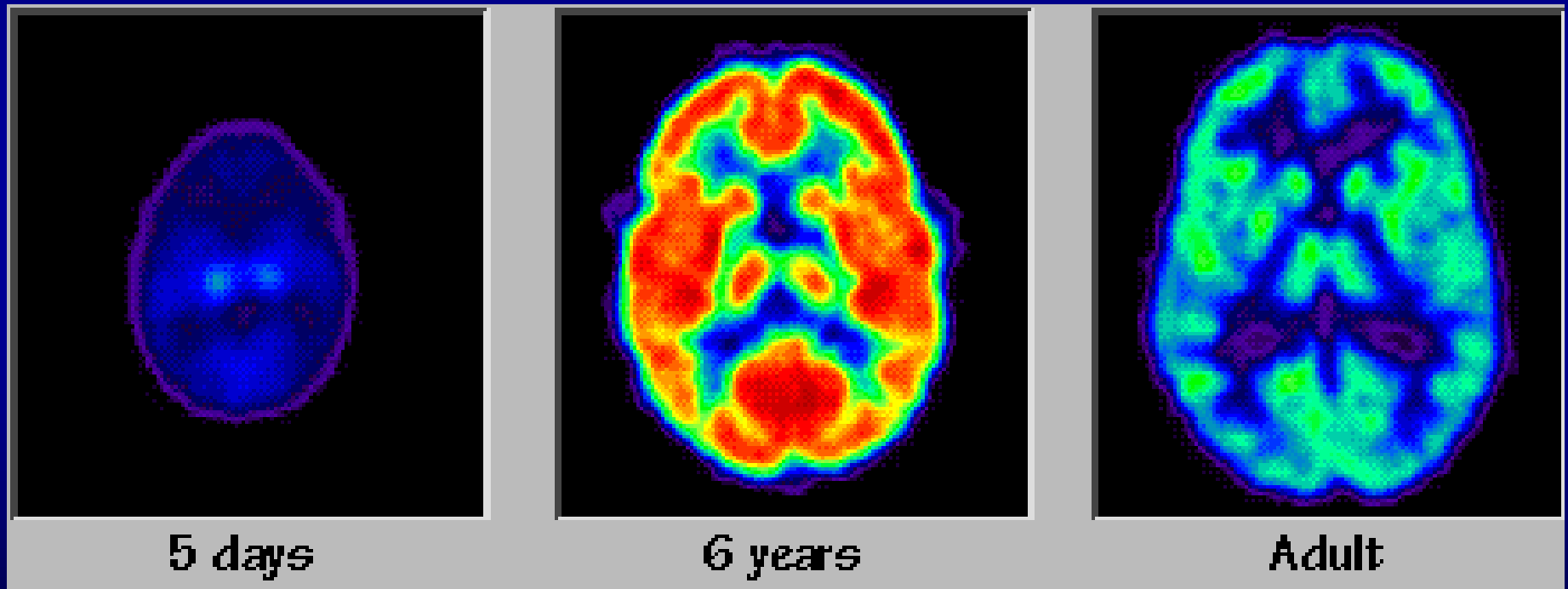
Urs Ribary, Rodolfo Llinás et.al. from the Proceedings of The National Academy of Sciences Vol. 90, page 3594, April 1993, ©National Academy of Sciences

## Rekonstrukcja 3D

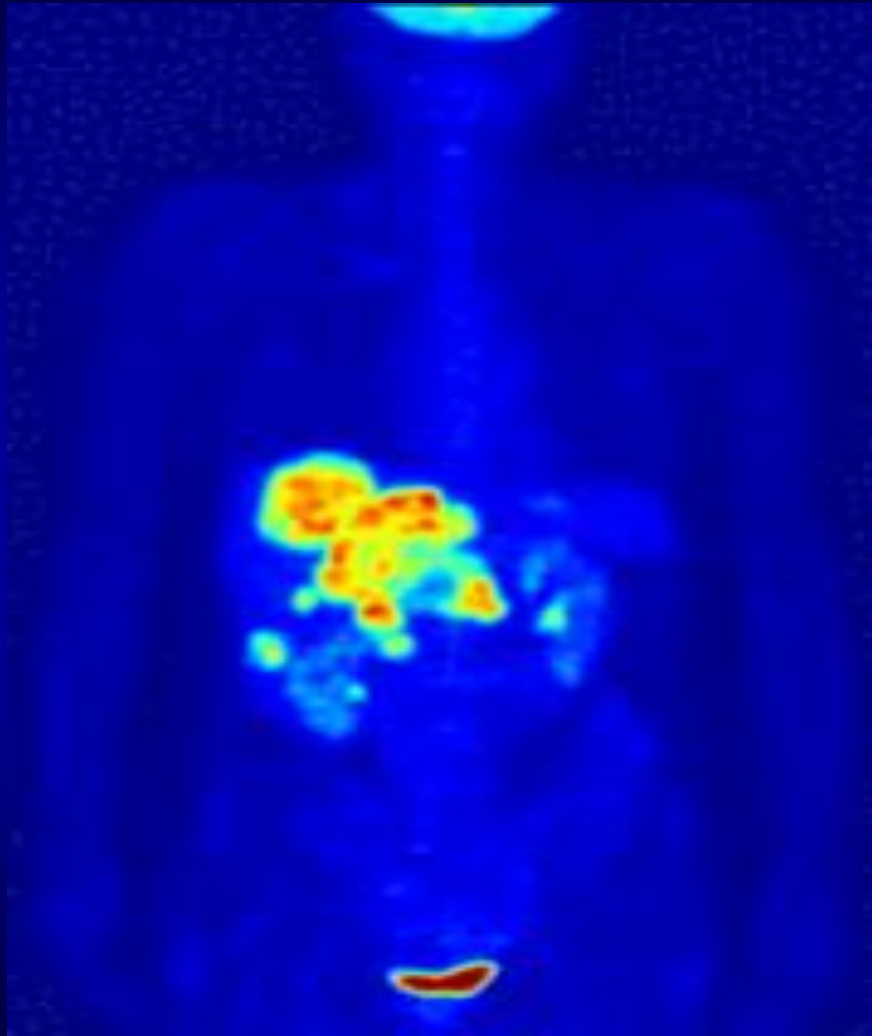


# Tomografia PET

## Metabolizm glukozy w różnym wieku



# Obrazowanie innych narządów w PET



Badanie przewodu pokarmowego  
i układu moczowego





# Tomografia PET - diagnostyka nowotworów

Ze względu na szybki metabolizm, komórki nowotworowe konsumują znacznie więcej glukozy niż zdrowe komórki.

