

# Fizyka jądrowa w medycynie

## **Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka:**

1. Oddziaływanie promieniowania jonizującego na organizmy żywe
2. Naturalne źródła promieniowania jądrowego
3. Cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego

## **Radiomedycyna:**

4. Diagnostyka radioizotopowa
5. Radioterapia nowotworów
6. Pozytonowa tomografia emisyjna
7. Tomografia magnetycznego rezonansu jądrowego (patrz wykład 1.)

# Oddziaływanie promieniowania jonizującego na organizmy żywe

## Promieniowanie

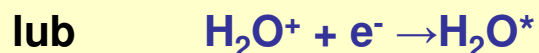
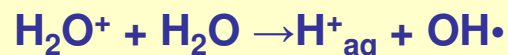
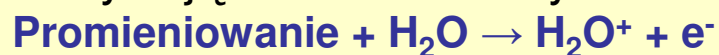
### Bezpośrednie uszkodzenie DNA

(n, p, α – 90%)

Zderzenie cząstki promieniowania z nicią DNA

### Pośrednie uszkodzenie DNA (X – 70-90%)

Oddziaływanie produktów radiolizy wody w jądrze komórkowym z DNA



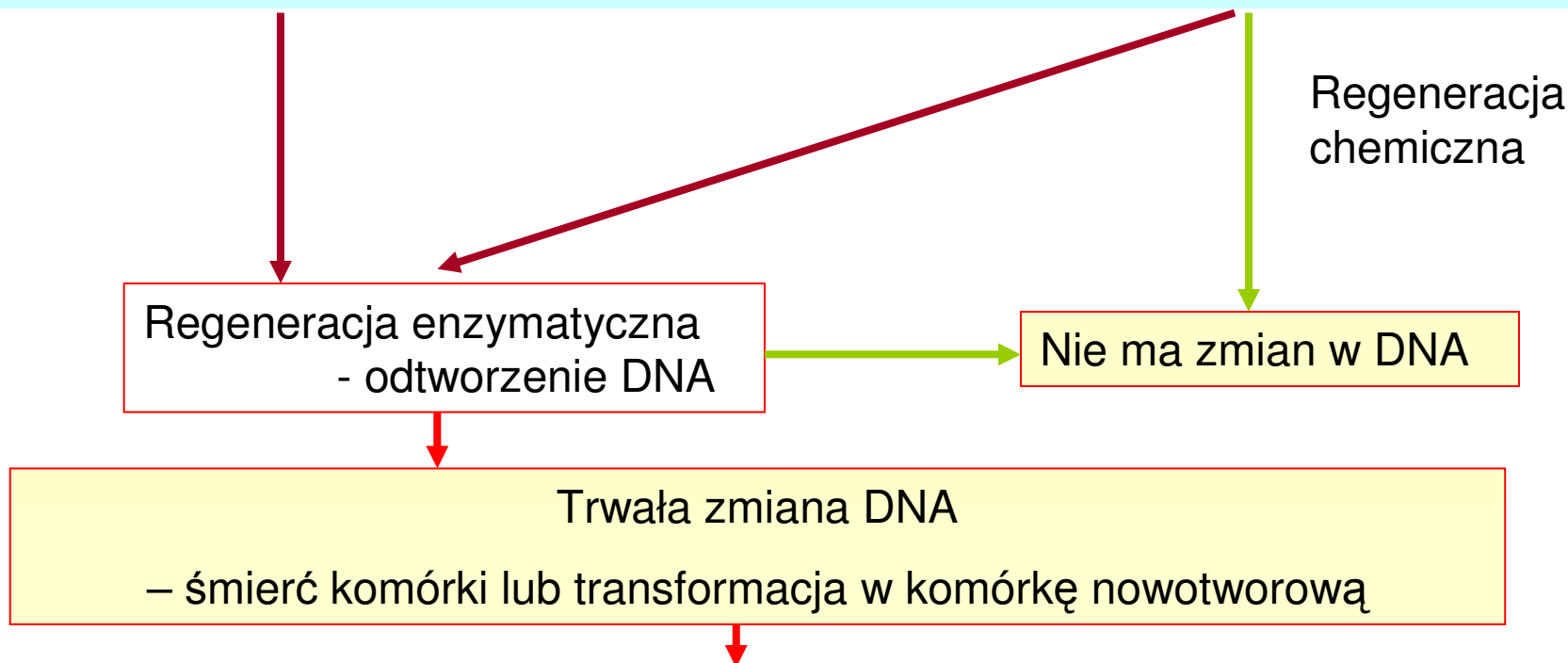
Utlenianie DNA przez rodniki OH• oraz przez nadtlenek wodoru



**Skutek:** pojedynczo- lub podwójnie-niciowe pęknięcia DNA, uszkodzenia lub utrata zasad azotowych, uszkodzenia reszt cukrowych i fosforanowych lub wiązania krzyżowe w podwójnej nici DNA.

# Oddziaływanie promieniowania jonizującego na organizmy żywe c.d.

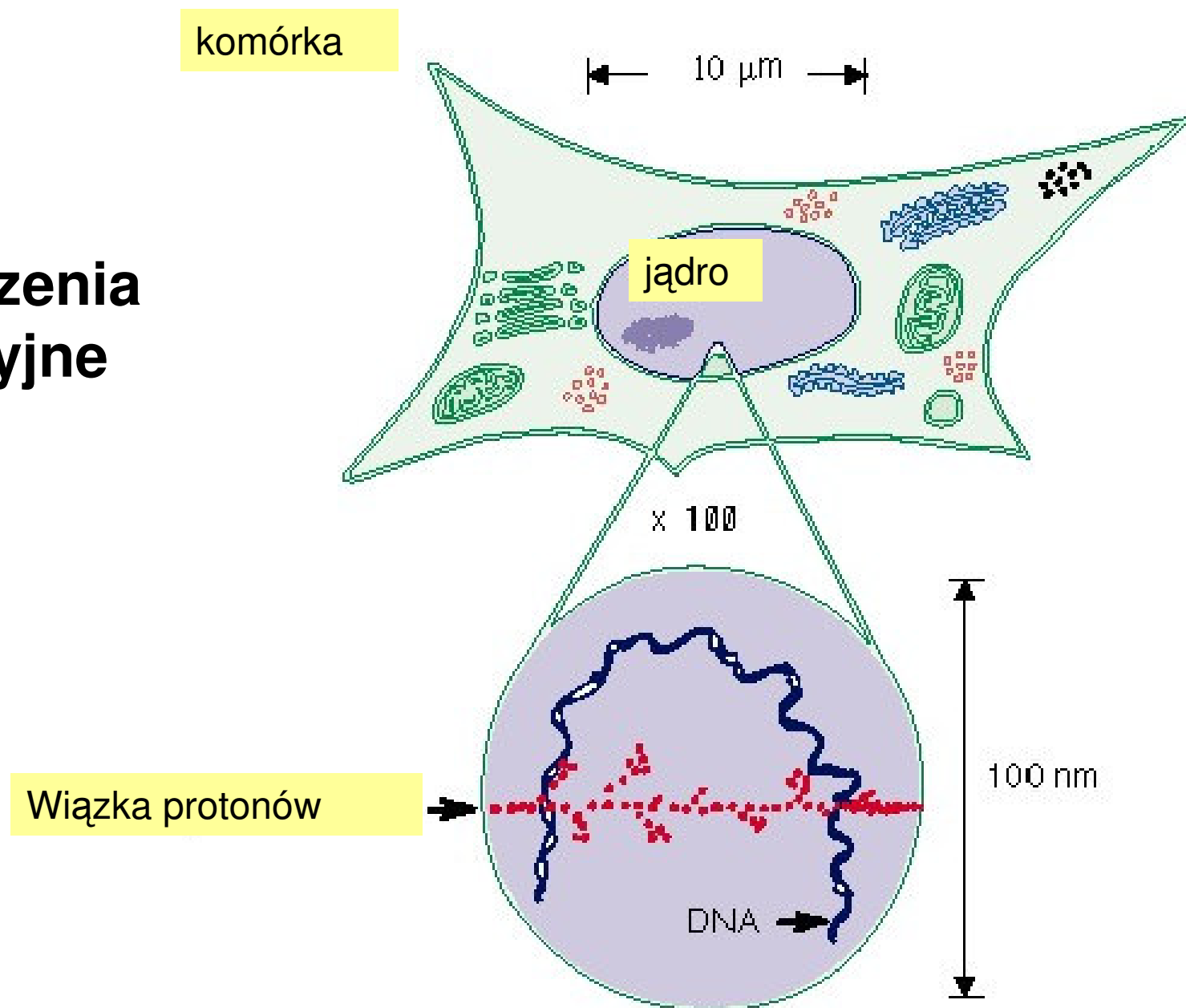
**Skutek:** pojedynczo- lub podwójnie-niciowe pęknięcia DNA, uszkodzenia lub utrata zasad azotowych, uszkodzenia reszt cukrowych i fosforanowych lub wiązania krzyżowe w podwójnej nici DNA.



## Efekty biologiczne:

1. somatyczne- wpływające na procesy odpowiedzialne za utrzymanie organizmu przy życiu
2. genetyczne – naruszające zdolność organizmu do przekazywania cech potomstwu

# Uszkodzenia radiacyjne



# Dawki promieniowania jonizującego

**Dawka pochłonięta promieniowania jonizującego** – jest miarą pochłaniania promieniowania przez różne materiały; jest to energia  $E$  jaką traci promieniowanie a pochłania ośrodek, przez który promieniowanie przechodzi, przypadająca na jednostkę masy tego ośrodka

$$D = E/m$$

**Jednostka w SI:** 1Gy (grej) = 1 J/kg

**Moc dawki  $dD/dt$**  [Gy/h]

W przypadku napromienienia żywych organizmów skutki biologiczne zależą także od rodzaju promieniowania i od wrażliwości narządu.

**Dawka równoważna dla danej tkanki T**  $H_T = \sum D_T w_R$

$w_R$  – czynnik wagowy zależny od rodzaju promieniowania

**Dawka efektywna**  $E = \sum w_T H_T$

$w_T$  – czynnik wagowy zależny od rodzaju tkanki

# Dawki promieniowania jonizującego

$w_R$  – czynnik wagowy zależny od rodzaju promieniowania

Fotony wszystkich energii	1
Elektrony i miony wszystkich energii	1
Neutrony < 10 keV	5
> 10 keV do 100 keV	10
> 100 keV do 2 MeV	20
>2 MeV do 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony > 2 MeV	5
Cząstki $\alpha$ , ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia	20

# Dawki promieniowania jonizującego

**$w_T$  – czynnik wagowy zależny od rodzaju tkanki**

Gruczoły płciowe	0,20
Czerwony szpik kostny, jelito grube, płuca, żołądek	0,12
Pęcherz moczowy, wątroba, przełyk, tarczyca	0,05
Skóra, powierzchnia kości	0,01
Pozostałe	0,05
<b>Całe ciało</b>	<b>1,00</b>

Jednostką dawki równoważnej odpowiadającej dawce pochłoniętej wyrażonej w Gy jest 1 Sv (siwert).

Jednostką dawki efektywnej jest 1 Sv.

# Względna skuteczność biologiczna różnych rodzajów promieniowania

$$\text{RBE} = \frac{\text{Dawka promieniowania X (przy napięciu 250 kV) wywołująca efekt F}}{\text{Dawka innego promieniowania wywołująca efekt F}}$$

RBE – ang. Relative Biological Effectiveness

Wartość RBE zależy od rodzaju i energii promieniowania – wynika to z różnych wartości współczynnika liniowego przekazywania energii LET

$$\text{LET} = \Delta E / \Delta L$$

$\Delta E$  – średnia ilość energii przekazywana przez cząstkę naładowaną w oddziaływaniach z elektronami ośrodka

$\Delta L$  – odcinek drogi przebyty przez cząstkę w ośrodku

LET – ang. Linear Energy Transfer



# Naturalne źródła promieniowania jądrowego

## 1. Naturalne pierwiastki promieniotwórcze

### a) Naturalne szeregi promieniotwórcze:

szereg torowy od  $^{232}\text{Th}$  ( $T = 1,41 \cdot 10^{10}$  lat,  $N/N_0 = 0,80$ ) do  $^{208}\text{Pb}$ ,

szereg uranowo-radowy od  $^{238}\text{U}$  ( $T = 4,47 \cdot 10^9$  lat,  $N/N_0 = 0,49$ ) do  $^{206}\text{Pb}$ ,

szereg uranowo-aktynowy od  $^{235}\text{U}$  ( $T = 7,04 \cdot 10^8$  lat,  $N/N_0 = 0,011$ ) do  $^{207}\text{Pb}$

– zawierają 11 pierwiastków (Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Ra, Ac, Th, Pa i U)  
reprezentowanych przez 43 izotopy promieniotwórcze

Wiek Ziemi =  $4,6 \cdot 10^9$  lat  $>$  T pochodnych nuklidów

Równowaga promieniotwórcza dla każdego z szeregów:  **$A = N \lambda = \text{const}$**

### b) Pojedynczo występujące nuklidy promieniotwórcze:

16 pierwiastków reprezentowanych przez 18 izotopów – m.in.  $^{40}\text{K}$  ( $T = 1,28 \cdot 10^9$  lat),  $^{50}\text{V}$  ( $T = 1,3 \cdot 10^{19}$  lat),  $^{82}\text{Se}$  ( $T = 1,4 \cdot 10^{20}$  lat),  $^{87}\text{Rb}$  ( $T = 4,8 \cdot 10^{10}$  lat),  $^{115}\text{In}$  ( $T = 4,4 \cdot 10^{14}$  lat).

# Naturalne źródła promieniowania jądrowego

## 2. Nuklidy promieniotwórcze wytwarzane przez promieniowanie kosmiczne

**Pierwotne promieniowanie kosmiczne** – cząstki o średnich energiach rzędu  $10^{10}$  eV, energii maksymalnej do  $10^{20}$  eV

W stratosferze, na wysokości ponad 25 km to: protony (87%), cząstki  $\alpha$  (11%), ciężkie jony (Be do Fe) (ok.1%) i elektrony (ok. 1%).

**Wtórne promieniowanie kosmiczne:** elektrony, miony, fotony, mezony, neutrony

Na poziomie morza to: miony (ok. 80%), elektrony (ok. 20%).

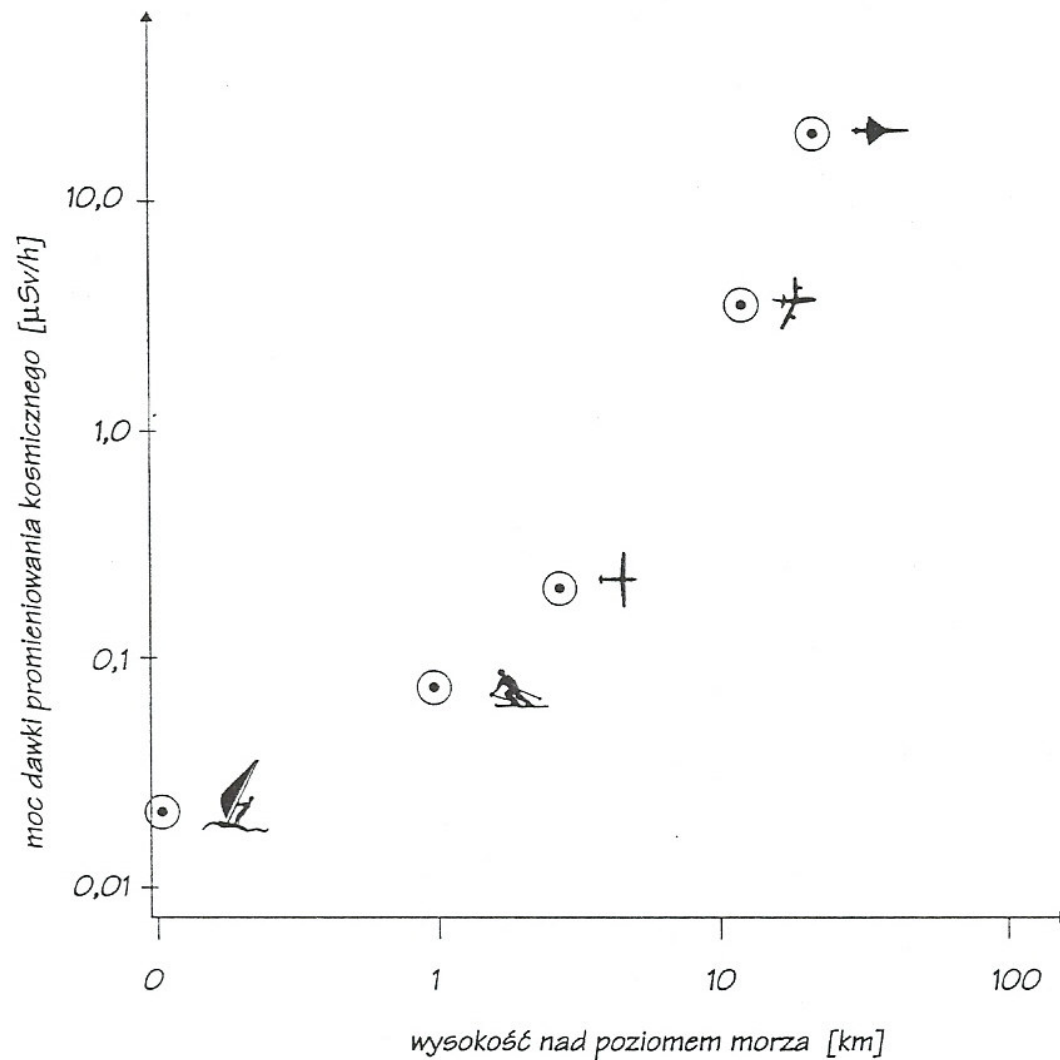
W reakcjach jądrowych tych wysokoenergetycznych cząstek ze składnikami atmosfery (azot, tlen, argon) powstaje ok. 30 izotopów (nuklidy kosmogeniczne), w tym mające istotne znaczenie w napromienieniu żywych organizmów:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ .

# Naturalne źródła promieniowania jądrowego

## 3. Napromienienie wywołane przez promieniotwórczość naturalną

- Średnie moce dawek pochłanianych na dworze na wysokości 1 m nad powierzchnią Ziemi: 24 – 160 nGy/h
- Obszary o anomalnej radioaktywności: do 4000 nGy/h; występują we Włoszech, Brazylii, Francji, Indiach, Chinach, Iranie, Nigerii i Madagaskarze; zamieszkiwane przez 5% ludności świata.
- Dawka efektywna od promieniowania kosmicznego rośnie z wysokością i na wysokości ok. 25 km n. p.m. osiąga 10  $\mu$ Gy/h.  
dla wysokości 1000 m n.p.m. o 45% więcej niż na terenach nadmorskich,  
2000 m n.p.m. - 2,6 razy więcej

# Naturalne źródła promieniowania jądrowego



Rys. 17. Wzrost promieniowania kosmicznego wraz z wysokością nad poziomem morza

# Naturalne źródła promieniowania jądrowego

## 4. Roczne dawki wywołane przez promieniotwórczość naturalną [ $\mu\text{Sv}$ ] w obszarach o normalnej radioaktywności

### Promieniowanie kosmiczne

składowa jonizująca 300

składowa neutronowa 80

Radionuklidy kosmogeniczne 12

Szereg uranowo-radowy (bez radonu) 175

Szereg torowy (bez radonu) 191

Radon i produkty rozpadu 1270

$^{40}\text{K}$  325

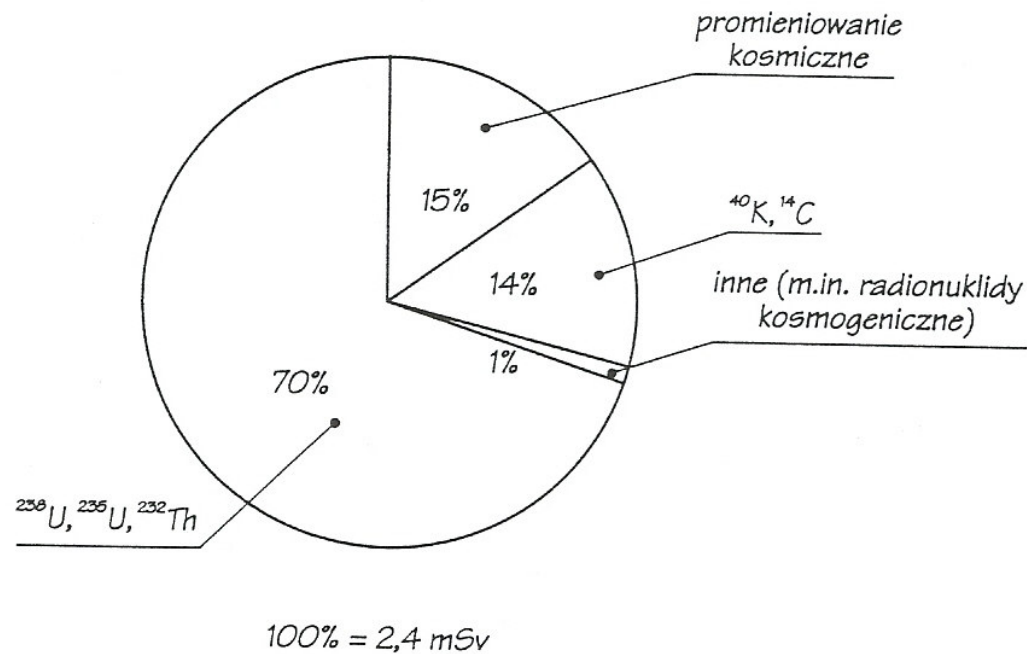
$^{87}\text{Rb}$  6

---

**Suma 2360**

# Naturalne źródła promieniowania jądrowego

## 4. Roczne dawki wywołane przez promieniotwórczość naturalną [ $\mu\text{Sv}$ ] w obszarach o normalnej radioaktywności



Rys. 18. Rozkład dawek promieniowania naturalnego środowiska w zależności od źródła (średni efektywny równoważnik dawki) (UNSCEAR, 1988)

**Średnia roczna dawka efektywna wywołana naturalnymi źródłami promieniotwórczymi: 2,4 mSv**  
**Roczna kolektywna dawka efektywna od źródeł naturalnych:**  
**14 400 000 osoboSv**

# Cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego

## 1. Wydobycie i spalanie paliw organicznych

a) węgiel, torf, ropa naftowa, gaz ziemny zawierają domieszki pierwiastków promieniotwórczych

Średnie stężenia aktywności nuklidów promieniotwórczych w pyłach emitowanych przy spalaniu węgla [Bq/kg]

$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po}$	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Th}$	$^{228}\text{Ra}$
256	200	240	930	1700	70	110	130

Razem 3595 Bq/kg – daje to roczną dawkę efektywną ok. 0,5 osoboSv wskutek wdychania pyłów z elektrowni węglowej dla ludności w pobliżu elektrowni

Popiół ze spalania węgla – 280 mln ton rocznie na świecie – jest wykorzystywany w ok. 5%

**Kolektywna roczna dawka efektywna dla ludności świata – 70 000 osoboSv**

# Cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego

## 2. Wydobywanie i przerób fosforanów

a) Złóża osadowych skał fosforanowych zawierają duże domieszki  $^{238}\text{U}$

W nawozach sztucznych stężenia aktywności  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  – 4000 Bq i 1000 Bq na kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

**Kolektywna roczna dawka efektywna – 10 000 osoboSv**

## 3. Radiomedycyna

a) Diagnostyka przy użyciu promieni X (90% udział w dawce efektywnej)

Rocznie 1910 mln badań medycznych i 520 mln badań dentystycznych

**Kolektywna roczna dawka efektywna – 2 300 000 osoboSv**

b) Diagnostyka przy użyciu radiofarmaceutyków: ok. 60 radionuklidów m.in.  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{131}\text{I}$ ; 32 mln badań rocznie

**Kolektywna roczna dawka efektywna – 150 000 osoboSv**

c) Terapeutyczne zastosowanie promieniowania jonizującego: 5 mln badań rocznie



# Cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego

**4. Zastosowanie promieniowania jonizującego w nauce, w przemyśle**

**5. Zastosowanie energii jądrowej w cywilnej energetyce**

**Średnie roczne dawki napromienienia pracowników uczestniczących w etapach cyklu paliwowego [mSv]**

Wydobycie rudy uranu	4,5
Kruszenie rudy	3,3
Wzbogacanie uranu	0,12
Produkcja paliwa	1,03
Praca reaktora	1,4
Przerób zużytego paliwa	1,5

# Kolektywne dawki efektywne od promieniowania

Źródło napromienienia	Typ dawki	Kolektywne dawki efektywne/rok [osoboSv]	
		lokalne	globalne
<b>Źródła naturalne</b>	DB	-	14 400 000
<b>Źródła cywilizacyjne</b>			
Wydobycie i przerób surowców	PDO	-	140 000
Diagnostyka medyczna	DB	-	2 400 000
Energia jądrowa:			
Próby broni jądrowej	DO	6 000	22 000 000
Produkcja broni jądrowej	DO	54 000	10 000
Awarie reaktorów	DO	2 000	600 000
Awarie innych urządzeń jądrowych	DO	2 900	2 000

# Dawki graniczne

Dawki efektywne na osobę na rok nie powinny przekraczać:

dla ekspozycji zawodowej – 20 mSv

dla ludności – 1 mSv

Liczba mieszkańców Ziemi – 6 mld

Roczna graniczna dawka efektywna:

dla ekspozycji zawodowej 120 000 000 osoboSv

dla ludności 6 000 000 osoboSv

Średnia roczna dawka efektywna wywołana naturalnymi źródłami promieniotwórczymi: 2,4 mSv

Roczna kolektywna dawka efektywna od źródeł naturalnych:

14 400 000 osoboSv

## **Ekspozycja zawodowa na promieniowanie jonizujące**

1. Narażenie górników na radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) i jego krótkożyciowe produkty rozpadu (RaA, RaB, RaC', tzn.  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) – zapadalność na raka płuc
2. Stosowanie radioaktywnych farb świecących (mieszanka soli radu i siarczku cynku)

## **Ekspozycja ludności na promieniowanie w środowisku (poza pracą)**

1. Obszary o anomalnej radioaktywności – ze względu na podwyższoną zawartość naturalnych pierwiastków promieniotwórczych

We Włoszech, Brazylii, Francji, Indiach, Chinach, Iranie, Nigerii i Madagaskarze  
Wybrzeże Morza Arabskiego w Indiach – złoża monacytu (10% toru) –  
kilkadziesiąt razy większe dawki promieniowania dla 70 tys ludności  
Wybrzeże w Brazylii , prowincja Guandong w Chinach– piasek monacytowy  
Iran, miasto Ramsar – źródła wody bogatej w  $^{226}\text{Ra}$  – dawki 1000 razy większe  
od normalnych

## 2. Narażenie na radon w mieszkaniach

Średnie stężenie radonu w powietrzu 0,1 – 15 Bq/m<sup>3</sup>

Istotny odsetek domów, w których stężenie radonu o więcej niż rząd wielkości przekracza średnie stężenie w pomieszczeniach mieszkalnych (30-50 Bq/ m<sup>3</sup>) – wykazano zwiększoną zapadalność na raka płuc

Szwecja, Finlandia, Czechy, Kanada, USA, W. Brytania

- podłóże (stężenie radonu rzędu 10 000 Bq/m<sup>3</sup>)
- materiały budowlane (rad)
- wentylacja pomieszczeń

## 3. Interakcja dawek promieniowania alfa produktów rozpadu radonu z dymem tytoniowym

<b>Względne ryzyko</b> raka płuc	<b>Liczba papierosów</b> palonych dziennie	<b>dawka równoważna</b> dla płuc od bomby atomowej [Sv]	<b>Radon</b> kopanie (WLM)	<b>mieszkania</b> [Bq/m <sup>3</sup> ]
1.0	0	0	0	<40
4.6	1-9	3.4	735	4 500
7.5	10-19	6.1	1325	8 100
13.1	20-39	11.4	2470	15 000
16,6	>40	14.1	3180	19 600

# **RADIOMEDYCYNĄ**

4. Diagnostyka radioizotopowa
5. Radioterapia nowotworów
6. Pozytonowa tomografia emisyjna

# Diagnostyka radioizotopowa

**Zastosowanie znaczników** - atomy radioaktywnego pierwiastka wprowadzone do organizmu zachowują się jak atomy pierwiastka trwałego i uczestniczą we wszystkich procesach metabolicznych

**Pomiar promieniowania emitowanego przez znaczniki** – informacja o funkcji danego narządu, obraz struktury narządu

**Cechy znacznika** – odpowiednie właściwości biologiczne, rodzaj rozpadu, czas połowicznego zaniku  $T_{1/2}$ , możliwości detekcji, łatwość produkcji

$T_{b1/2}$  - biologiczny czas połowicznego zaniku – czas, po którym organizm wydalą połowę podanej ilości danej substancji

$T_{e1/2}$  - efektywny czas połowicznego zaniku

$$1/T_{e1/2} = 1/T_{1/2} + 1/T_{b1/2}$$

**Znaczniki izotopowe są wychwytywane ze wzmożoną szybkością w przerzutach nowotworowych.**



# Badanie czynności narządów – Radioizotopy $\gamma$

Stosuje się znaczniki emitujące tylko promieniowanie  $\gamma$ , o krótkim czasie  $T_{1/2}$ , gromadzące się w wybranych narządach lub tkankach.

Narząd	Izotop	$T_{1/2}$	Sposób podawania
<b>Tarczycza</b> (wychwytywanie jodu)	$^{131}\text{I}$	8 dni	doustnie wodny roztwór $\text{Na}^{131}\text{I}$
<b>Nerki</b> (usuwanie z krwiobiegu hippuranów)	$^{131}\text{I}$	8 dni	dożylnie hippuran sodu znakowany $^{131}\text{I}$
<b>Wątroba</b> (wychwytywanie koloidalnego $^{198}\text{Au}$ )	$^{198}\text{Au}$	2,7 dnia	dożylnie
<b>Serce</b> (kinetyka przepływu krwi przez serce)	$^{131}\text{I}$	8 dni	dożylnie albumina znakowana $^{131}\text{I}$
<b>Płuca</b>	$^{133}\text{Xe}$	5,2 dnia	wdychanie
<b>Mózg</b> (zużycie tlenu, przepływu krwi przez mózg)	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 godz	

# Badanie czynności narządów - Technika

## 1. Podaje się dany izotop radioaktywny

a) czysty lub w związku chemicznym doustnie lub dożylnie

lub

b) pobiera się próbkę płynu ustrojowego od pacjenta, znakuje się tę próbkę izotopem i podaje pacjentowi próbkę znakowaną

## 2. Bada się

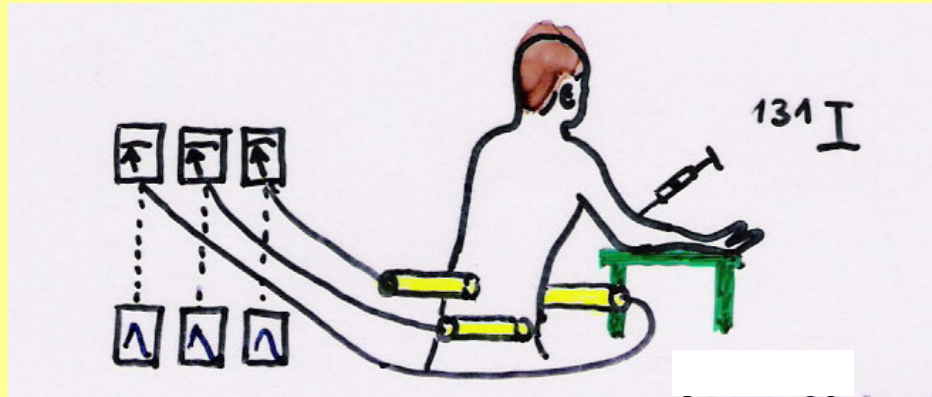
a) aktywność pobieranych próbek (krwi, moczu, itp.) i jej zmiany w czasie

b) aktywność powierzchniową nad określonymi narządami i jej zmiany w czasie

c) umiejscowienie, rozmieszczenie i koncentrację izotopu radioaktywnego wewnątrz ciała poprzez pomiary zewnętrzne

# Badanie czynności narządów - Technika

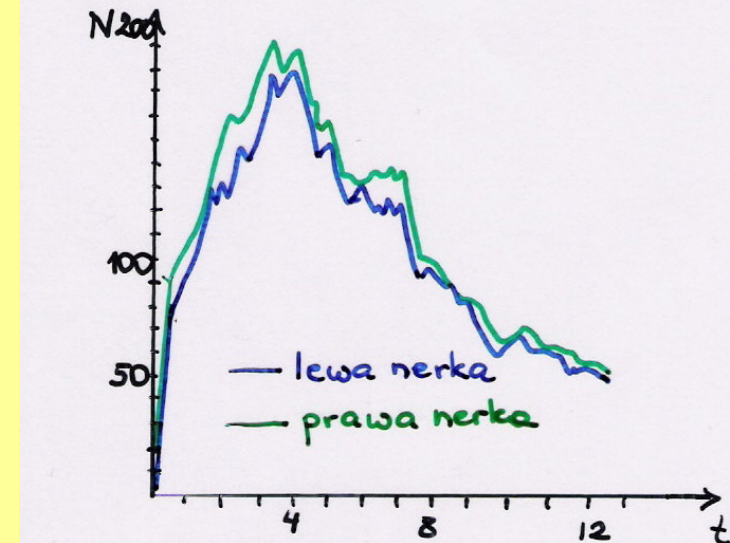
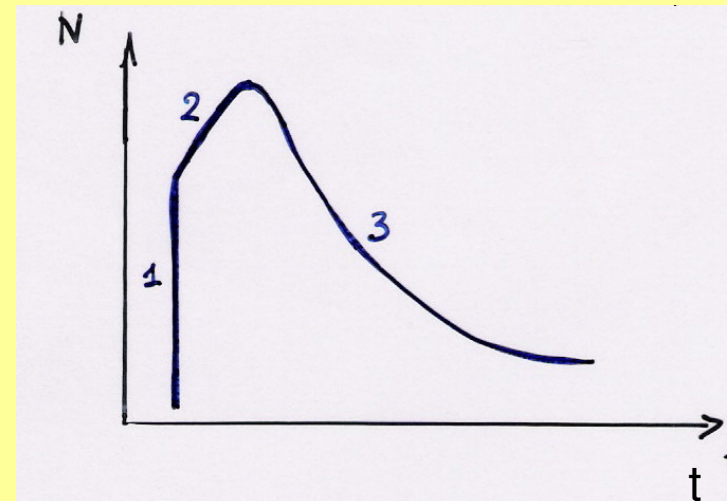
## 1. Badanie zmian aktywności przy użyciu liczników scyntylicyjnych



1 – szybki wzrost aktywności odpowiadający przepływowi znakowanego izotopu przez układ naczyniowy nerki – określa pojemność nerek

2 – wolny wzrost – wydzielanie kanalikowe znacznika – miara ukrwienia nerek

3 – spadek – wydalanie znacznika z moczem – miara zdolności wydalniczej



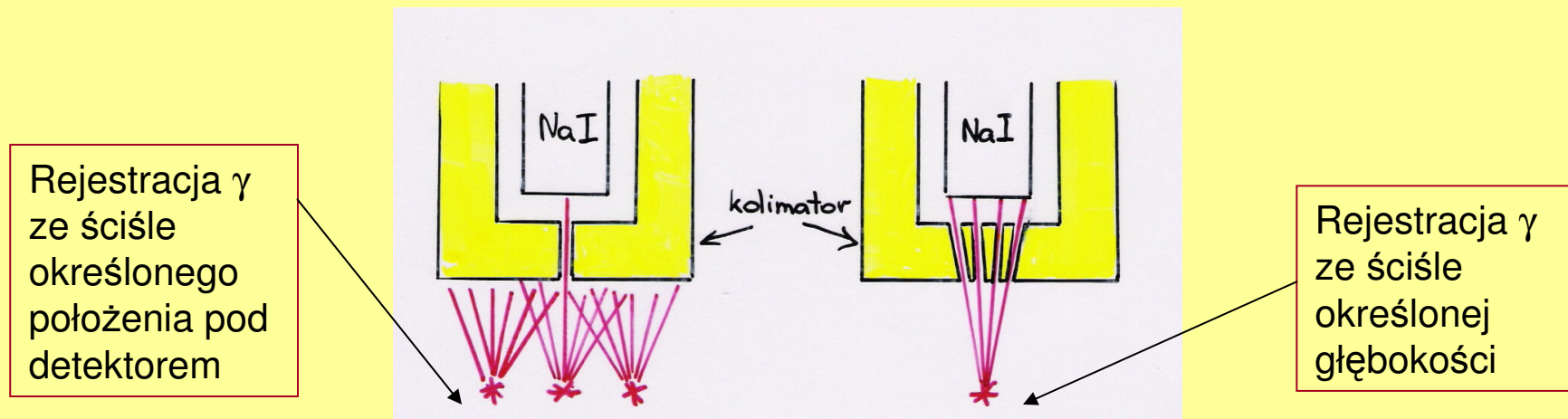
# Badanie czynności narządów - Technika

**2. Scyntygrafia radioizotopowa** – wykrycie i zobrazowanie umiejscowienia, rozmieszczenia i koncentracji izotopu radioaktywnego wewnątrz ciała poprzez pomiary zewnętrzne

**Aparaty scyntygraficzne:** scyntygraf, scyntykamera – przedstawiają trójwymiarowy rozkład izotopu w badanym obiekcie w postaci obrazu dwuwymiarowego

- detekcja promieniowania  $\gamma$  - detektor NaI z osłonami
- czułość
- zdolność rozdzielcza

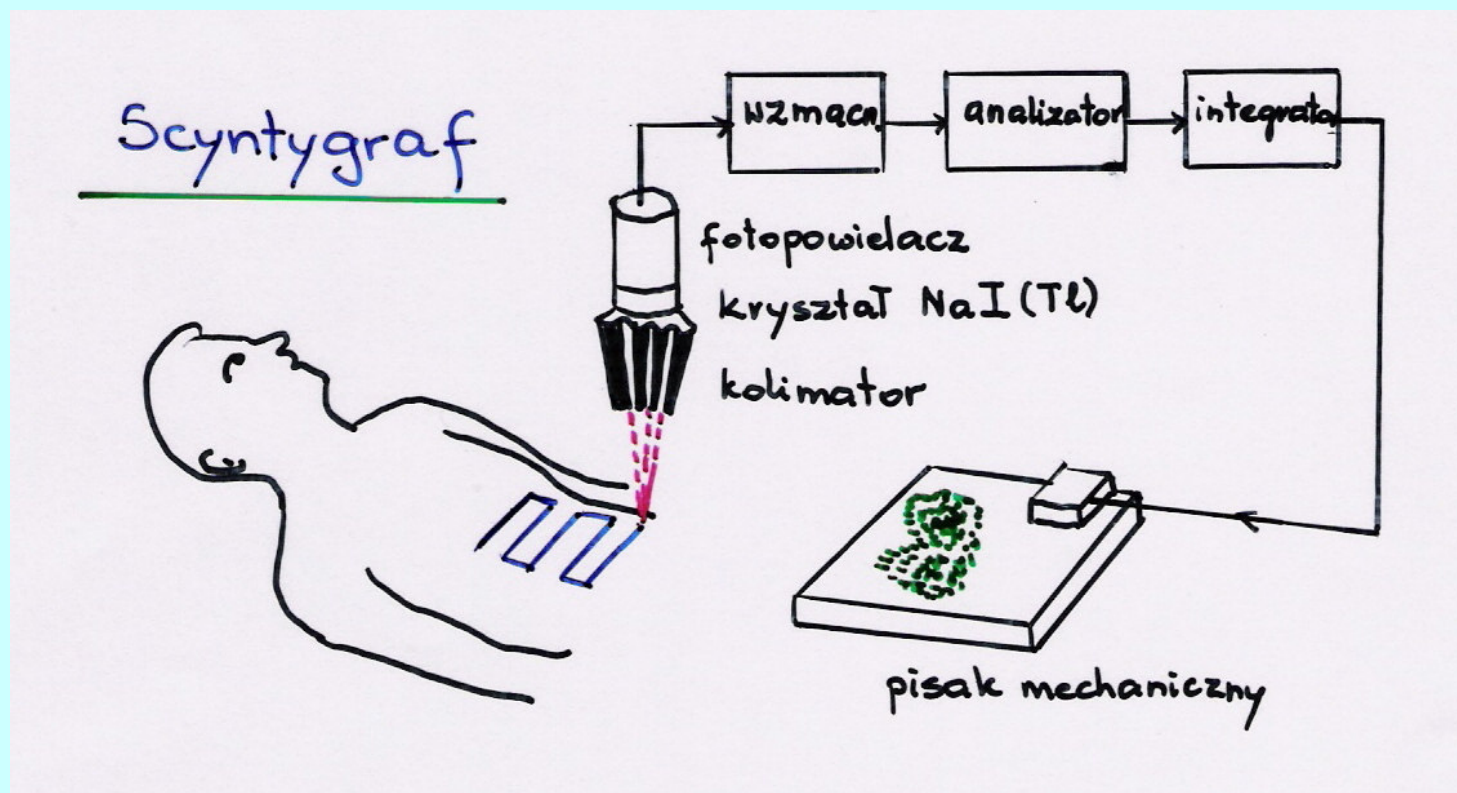
## a) Metody kolimacji promieniowania



# Badanie czynności narządów - Technika

## b) Scyntygraf

Mały kryształ NaI, ruchoma głowica detektora, zbieranie aktywności jednocześnie tylko z małej powierzchni

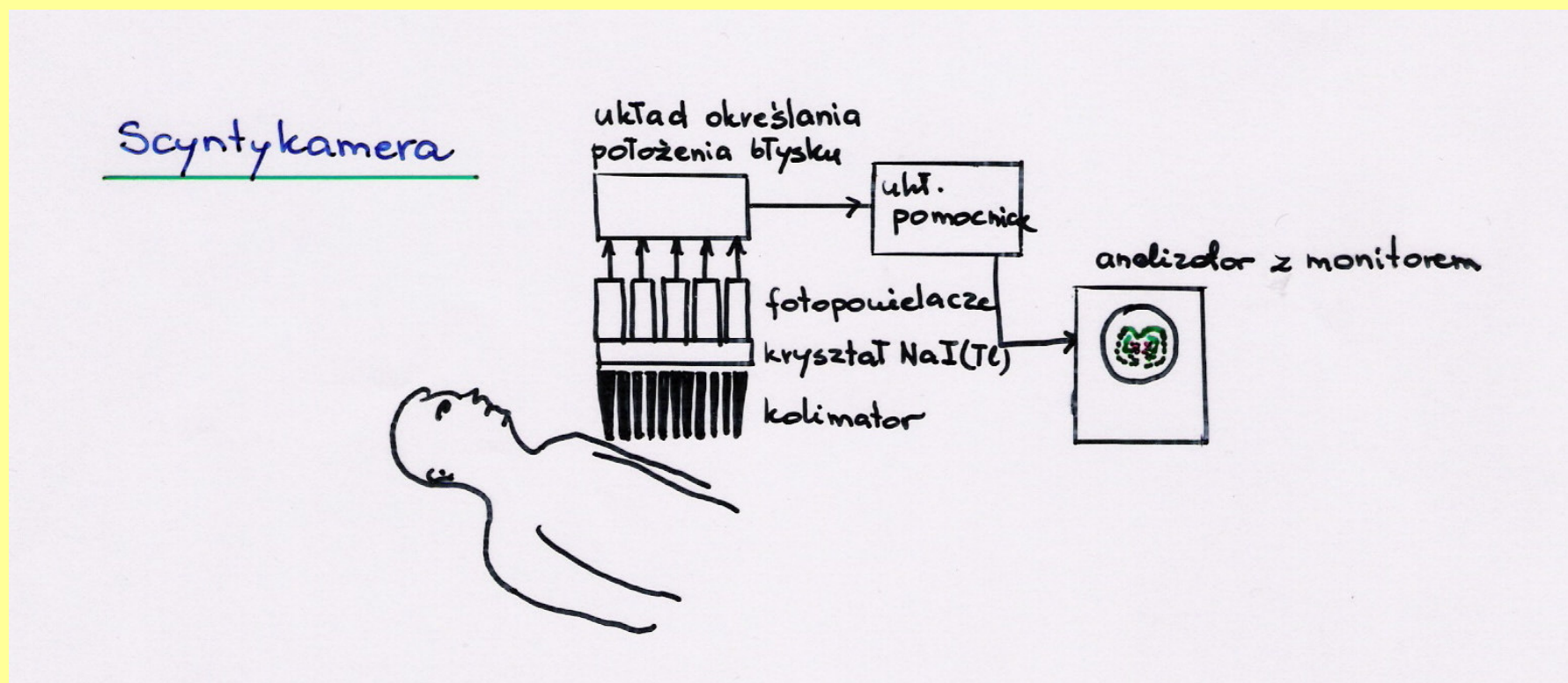




# Badanie czynności narządów - Technika

## c) Scyntykamera

Duży kryształ NaI, nieruchoma głowica detektora, zbieranie aktywności jednocześnie z dużej powierzchni, rejestracja pozycji źródła promieniowania, komputerowa analiza obrazu



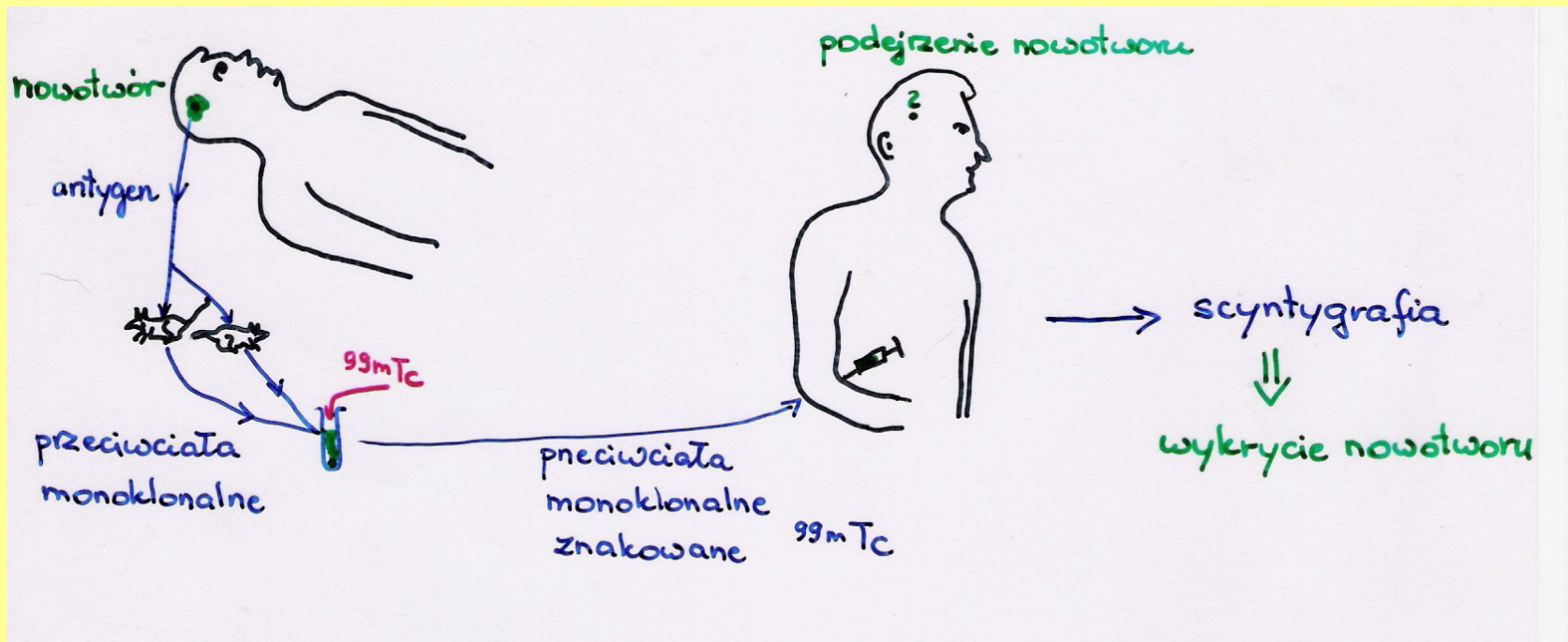
# Badanie czynności narządów - Technika

## d) Nowa technika – immunoscyntygrafia

Immunologia – nauka badająca reakcję organizmu na antygeny

Antygen – substancja białkowa, której podanie powoduje powstanie przeciwciał

Przeciwciała mnonoklonalne – powstałe przez podanie jednego białka



# Radioterapia nowotworów

**Komórki prawidłowe są mniej wrażliwe na działanie promieniowania niż wywodzące się z nich komórki nowotworowe**

**Cel terapii:** całkowite zniszczenie komórek nowotworowych przy przejściowym, częściowym uszkodzeniu komórek prawidłowych

*(historia radioterapii)*

Modele opisujące skutki działania promieniowania na poziomie komórkowym określają:

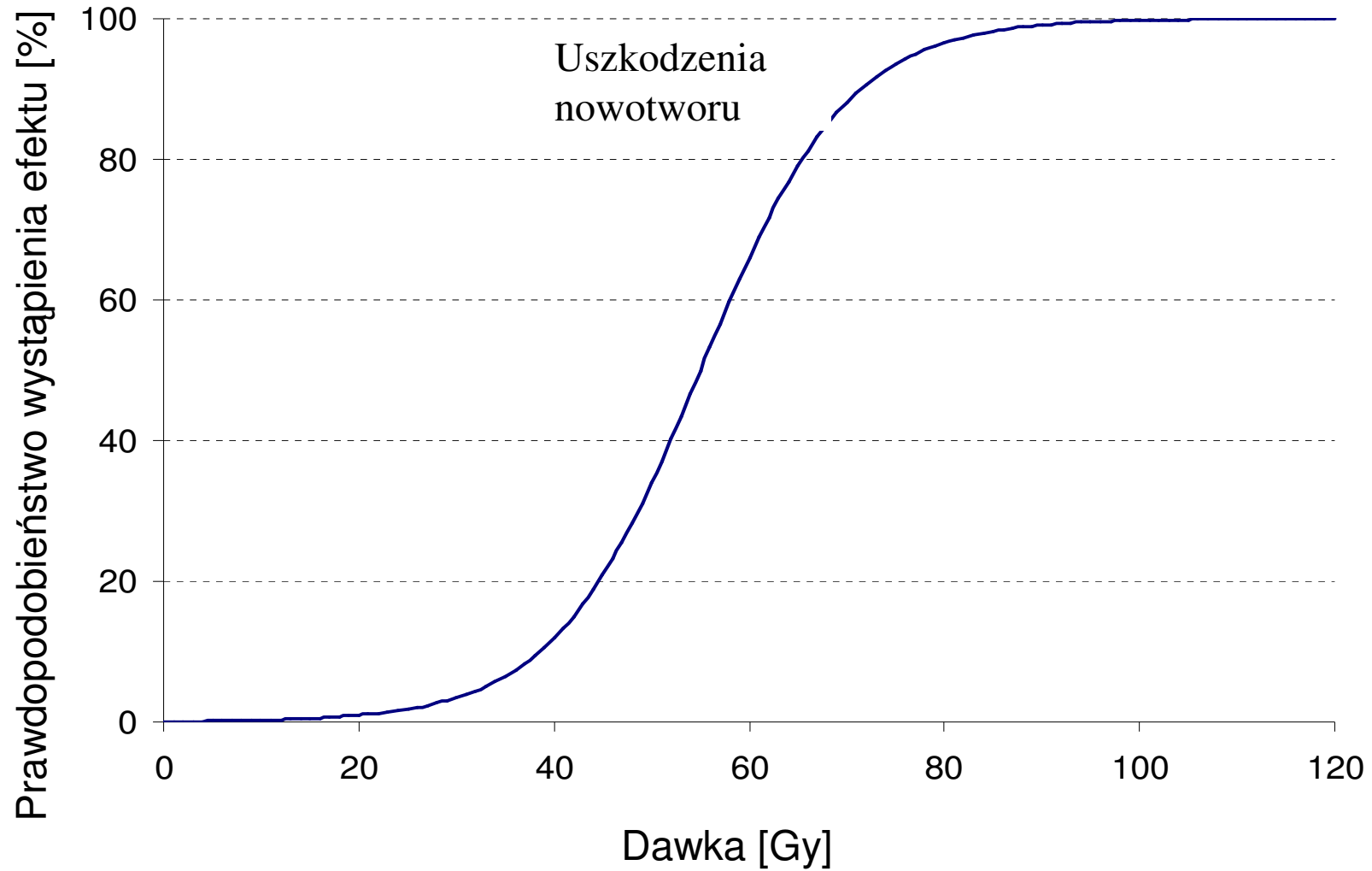
prawdopodobieństwo miejscowego wyleczenia z nowotworu

prawdopodobieństwo wystąpienia komplikacji w tkance zdrowej

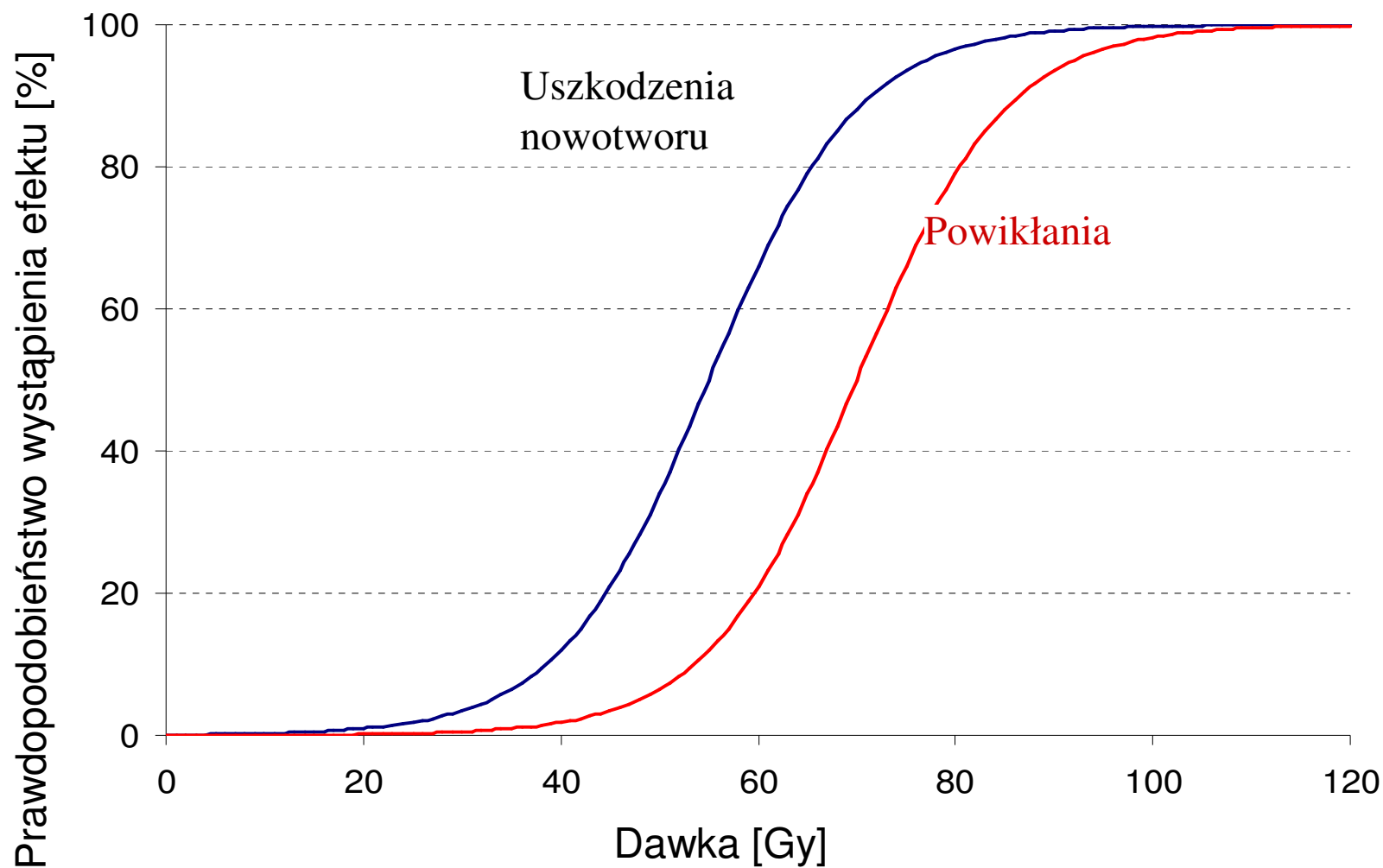
**Zmiana względnej wartości dawki o 5% może spowodować zmianę prawdopodobieństwa wyleczenia o 25% !**



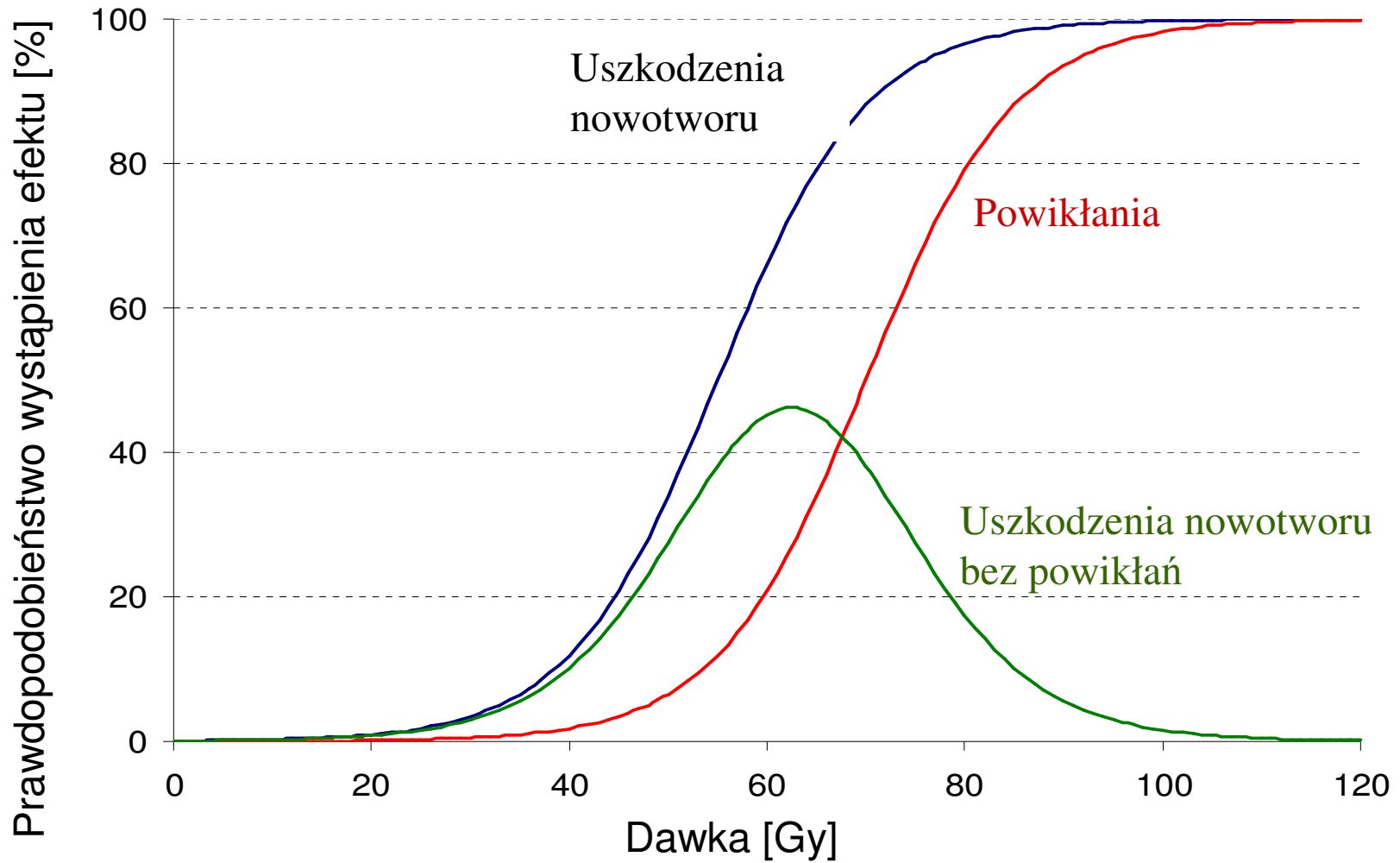
# Reguły prawidłowej radioterapii



# Reguły prawidłowej radioterapii



# Reguły prawidłowej radioterapii



# Procedury współczesnej radioterapii

1. Rozpoznanie – metody diagnostyczne
2. Decyzja terapeutyczna
3. Określenie całkowitej objętości guza
4. **Planowanie leczenia – wybór techniki radioterapii**
  - a) wiązki zewnętrzne - **teleradioterapia**
  - b) źródła śródtkankowe - **brachyterapia**
  - c) źródła otwarte (podanie radioizotopu) – **terapia radioizotopowa**
5. Symulacja (obliczenia rozkładu dawek i sprawdzenie planu teleradioterapii poprzez zastosowanie aparatu rentgenowskiego)
6. **Napromienianie**
7. Ocena pacjenta podczas leczenia
8. Badania kontrolne

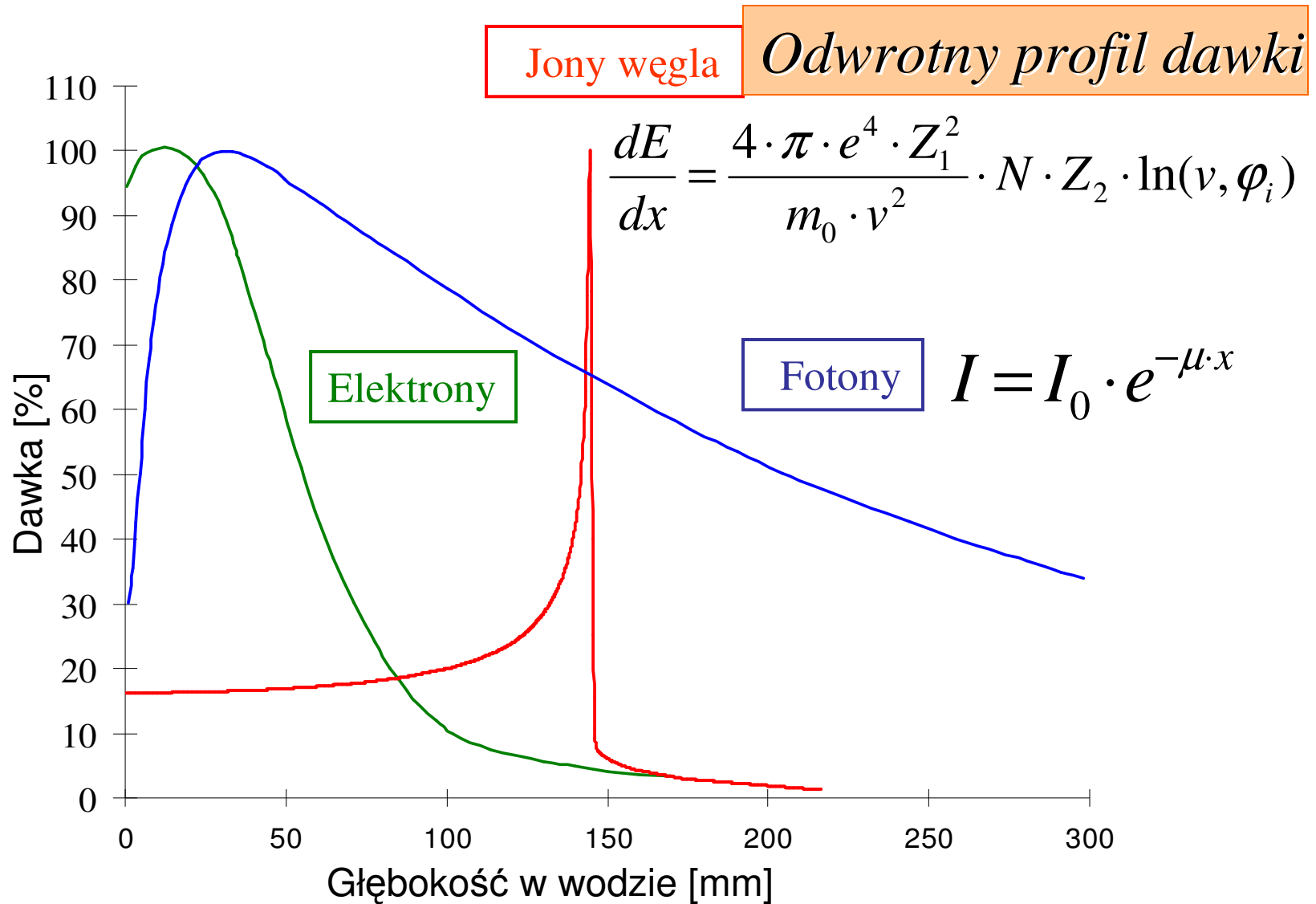
# Teleradioterapia

1. Do roku 1950 – wyłącznie promienie X
2. Od 1950 r – aparaty kobaltowe ze źródłem  $^{60}\text{Co}$  tzw. bomba kobaltowa – promieniowanie  $\gamma$
3. Wiązki elektronów o energiach 6 – 35 MeV z akceleratorów liniowych
4. Wiązki hadronowe
  - Neutrony prędkie 5 - 40 MeV
  - Protony 60 – 250 MeV
  - Ciężkie jony C, N, O, Xe o energiach rzędu GeV

## **Skuteczność napromieniania zależy od sposobu oddziaływania promieniowania z ośrodkiem:**

1. promieniowanie  $\gamma$  - głęboka penetracja, ale duże narażenie tkanki zdrowej
2. wiązki hadronowe – możliwość dobrania energii tak, by zasięg pokrywał się z głębokością; możliwość dobrania natężenia tak, by czas naświetlania był krótki

# Skuteczność promieniowania



## Bomba kobaltowa $^{60}\text{Co}$

Promieniowanie  $\gamma$  o energii 1.17 i 1.33 MeV

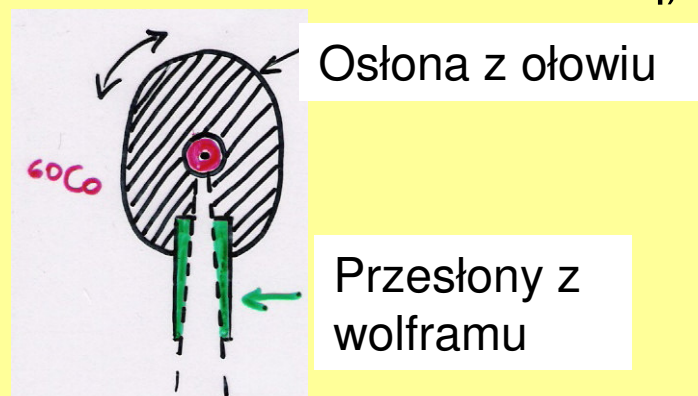
$T_{1/2} = 5.26$  lat

Aktywność  $1.5 - 2.5 \cdot 10^{14}$  Bq (na pracowni na FUW ok.  $4 \cdot 10^4$  Bq)

Rozmiary  $\Phi = 2$  cm,  $h = 2$  cm

Osłony z Pb lub W (0.5 tony)

Możliwość obrotu



## Medyczne akceleratory liniowe

Energia elektronów ok. 6 – 35 MeV, ze zmianą skokową energii

Moc dawki 3 Gy/min w odległości 100 cm od źródła

Naświetlanie przez ok. 6 tygodni, dawką po 2 Gy przez 5 dni w tygodniu

Powszechnie stosowane; produkowane także w IPJ w Świerku

# Akceleratorzy elektronowe





# Wiązki hadronowe z akceleratorów

GSI, Niemcy

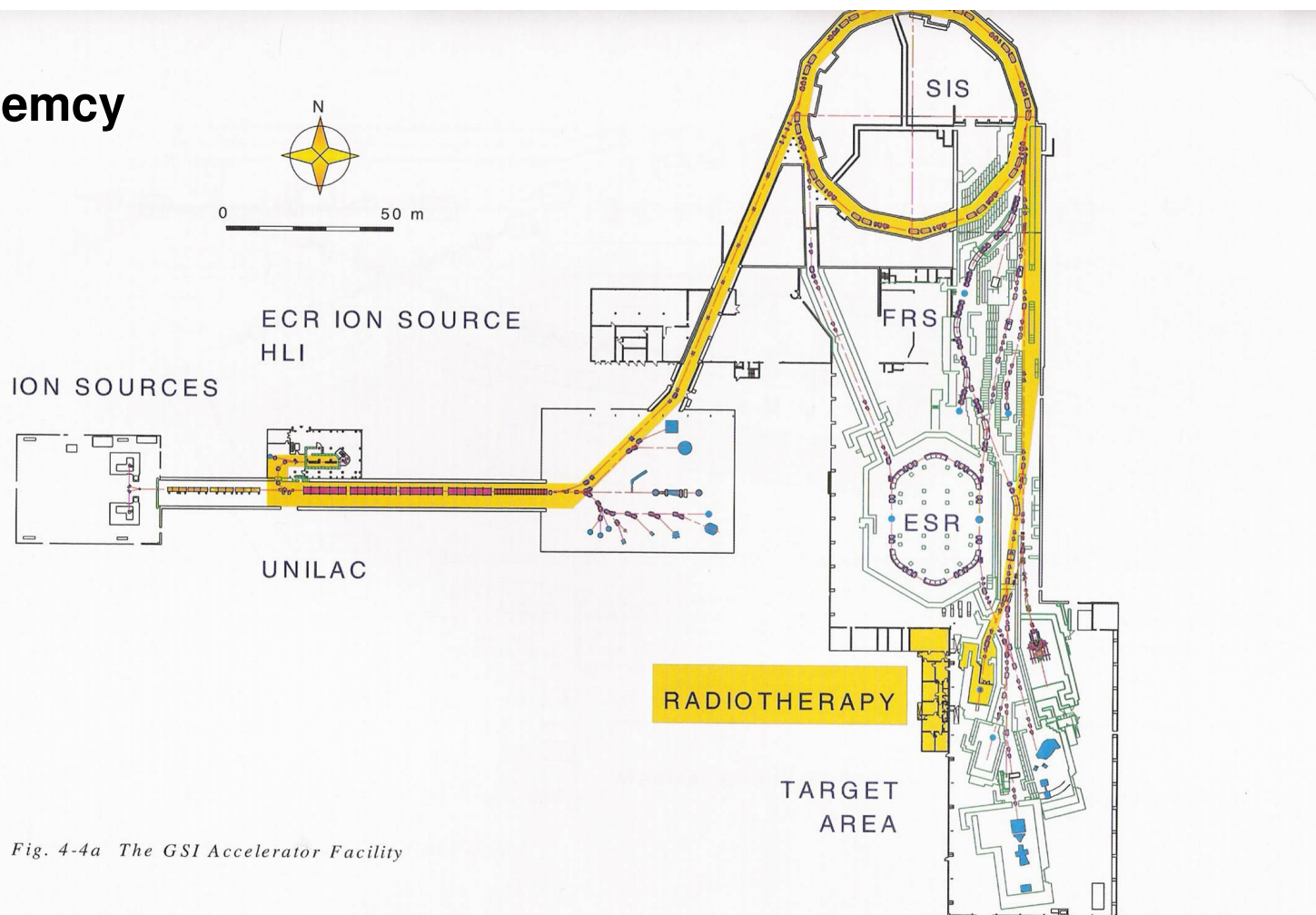


Fig. 4-4a The GSI Accelerator Facility

**Plany stworzenia ośrodków terapii hadronowej  
w Warszawie i w Krakowie**

# Brachyterapia

Stosuje się zamknięte źródła promieniowania  $\gamma$  i  $\beta$  o długim czasie rozpadu, w postaci tubek i igieł, umieszczanych za pomocą aplikatorów zewnętrznych

Źródła promieniowania mogą być stosowane śródtkankowo, wewnątrzjamowo, wewnątrz prześwietowo lub powierzchniowo

Rozkład mocy dawki – duża moc dawki w objętości nowotworu, szybko malejąca z odległością

Izotop	$T_{1/2}$	Promieniowanie używane w terapii	Energia [keV]
$^{137}\text{Cs}$	30 lat	fotony	662
$^{60}\text{Co}$	5.26 lat	fotony	1173 i 1332
$^{198}\text{Au}$	2.7 dnia	fotony	412
$^{125}\text{I}$	59.6 dnia	fotony	27 - 32 (X)
$^{192}\text{Ir}$	74 dni	fotony	296 – 468
$^{226}\text{Ra}$	1600 lat	fotony	śr. 800
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	28.1 lat	elektrony $\beta$	546 max, 196 śr.
$^{106}\text{Ru}$	369 dni	elektrony $\beta$	30.4 max
$^{252}\text{Cf}$	2.65 lat	neutrony	2350 śr.

# Terapia radioizotopowa

Wprowadzenie do tkanek lub narządów pacjenta radiofarmaceutyku emitującego promieniowanie jonizujące (najczęściej  $\beta$ ), który wybiórczo gromadzi się w objętości nowotworu.

Radioizotop podawany jest jako źródło otwarte - doustnie w postaci rozpuszczalnej tabletki, płynu lub koloidu, dokrewnie lub domięśniowo, lub jako wlew do jamy ciała.

Narząd	Izotop	$T_{1/2}$
Tarczycyca	$^{131}\text{I}$	8 dni
Kości	$^{89}\text{Sr}$	50.5 dni
	$^{32}\text{P}$	14.3 dni

# Pozytonowa tomografia emisyjna - PET

Wykorzystuje się proces anihilacji pozytonu w ośrodku:



$$E_\gamma = 511 \text{ keV} \quad \theta_{\gamma-\gamma} = 180^\circ$$

Podaje się znaczniki znakowane izotopami emitującymi  $\beta^+$

Izotop	$T_{1/2}$
$^{18}\text{F}$	110 min
$^{15}\text{O}$	2 min
$^{13}\text{N}$	10 min
$^{11}\text{C}$	20 min

Muszą być produkowane w pobliskim cyklotronie

# Pozytonowa tomografia emisyjna - PET

Metoda PET pozwala określić położenie, w którym gromadzi się substancja znakowana, jej stężenie oraz przemieszczanie się w czasie.

## **Ograniczenie przestrzennej zdolności rozdzielczej:**

Ze względu na ciągłe widmo energetyczne pozytonów można określić jedynie promień sfery, w której zatrzyma się określony procent liczby pozytonów emitowanych w środku tej sfery w czasie między emisją a anihilacją.

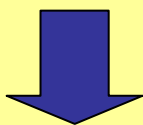
## Izotopy dla PET

Nuklid	$T_{1/2}$ (min)	$E_{\max}$ (MeV)	Zasięg Efektywny (mm)	Target	Reakcja jądrowa
$^{18}\text{F}$	109,7	0,635	1,4	$^{18}\text{O}$ woda Ne gaz	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}\text{F}$
$^{11}\text{C}$	20,4	0,96	2,06	$\text{N}_2$ - gaz	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
$^{13}\text{N}$	9,96	1,72	4,5	$^{16}\text{O}$ woda	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$ $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$
$^{15}\text{O}$	2,07	1,19	3,0	$\text{N}_2$ - gaz	$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$

# Procedura badania PET

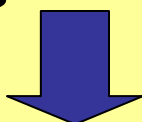
Produkcja izotopu

fizyka



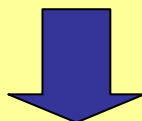
Produkcja radiofarmaceutyku  
- znakowanie

chemia



Podanie radiofarmaceutyku

medycyna

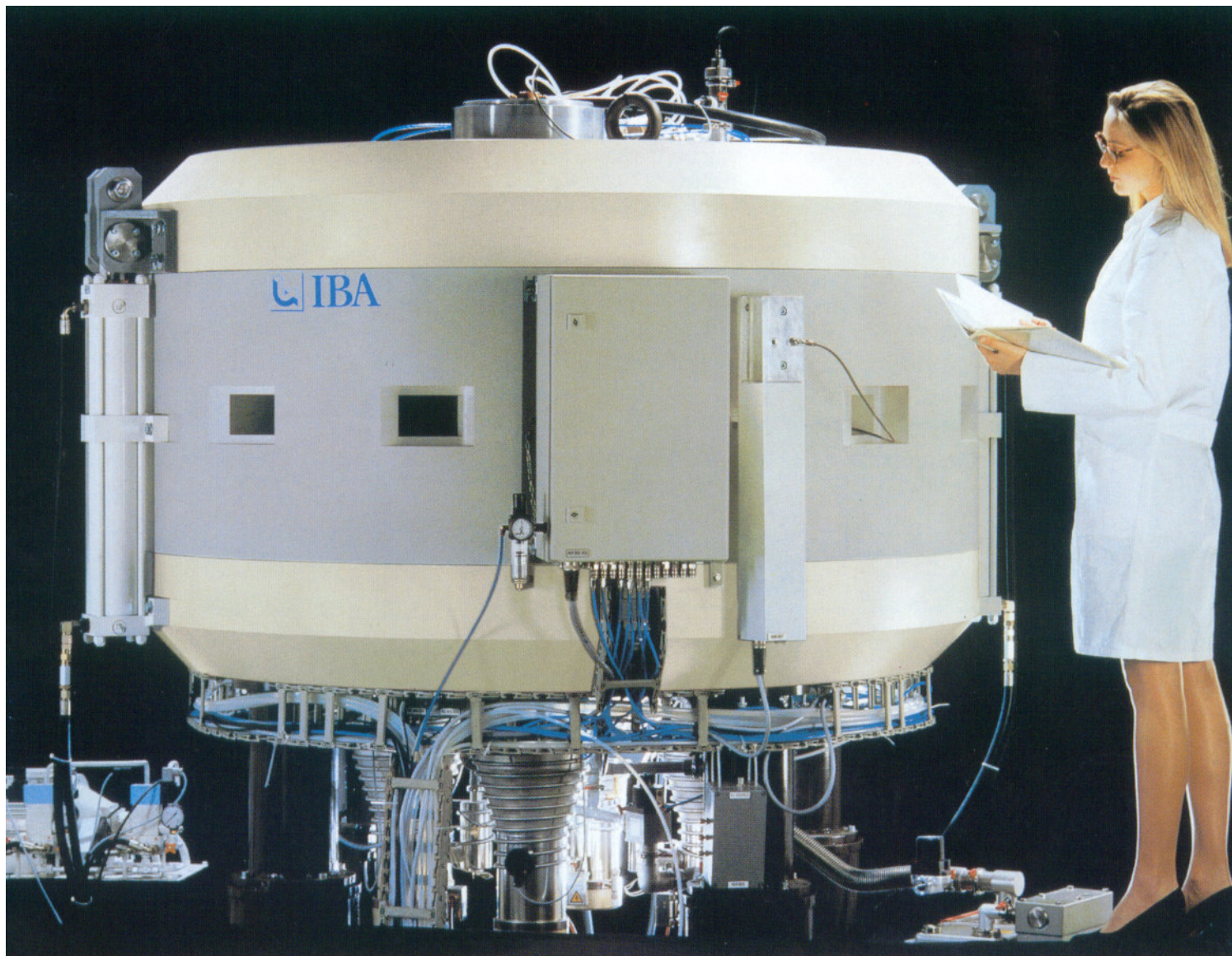


Skaner → analiza → diagnoza

matematycy – fizycy - lekarz



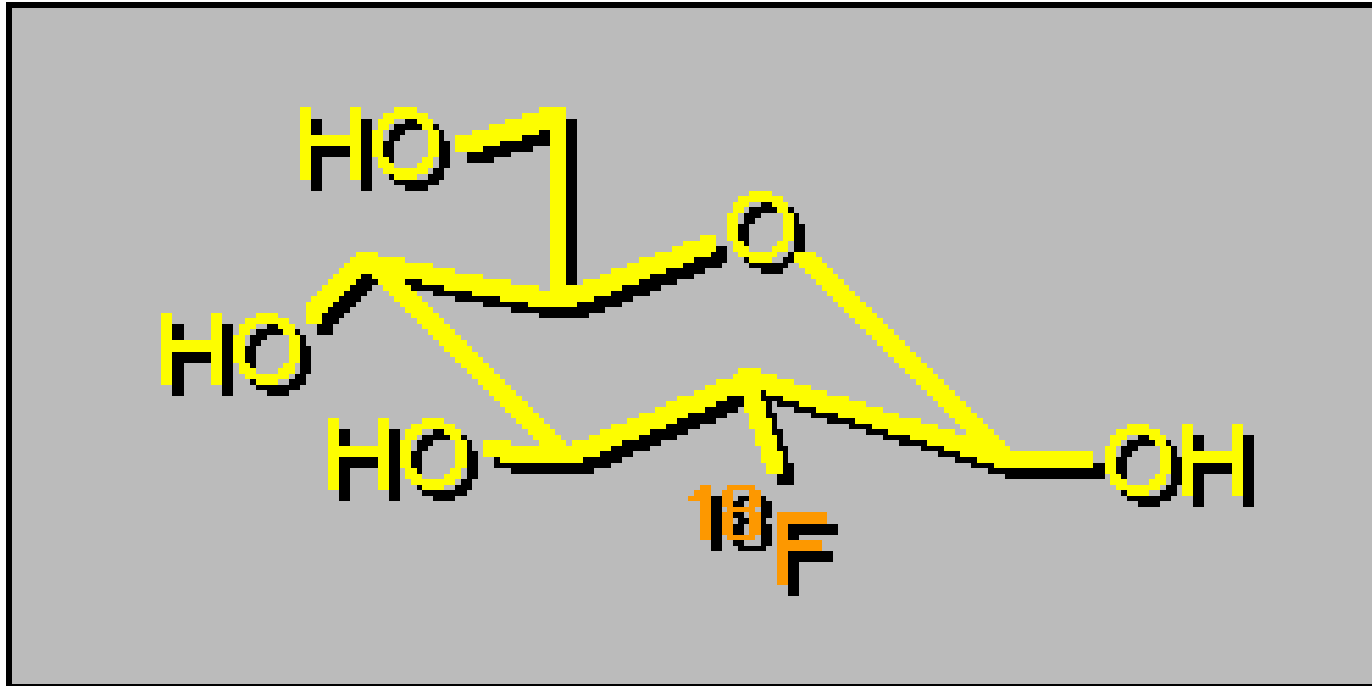
## Akcelerator do produkcji radioizotopów



Ośrodek PET będzie uruchomiony w SLCJ na Uniwersytecie Warszawskim

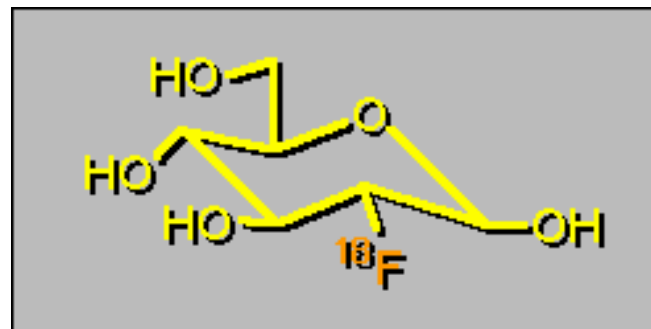


FDG

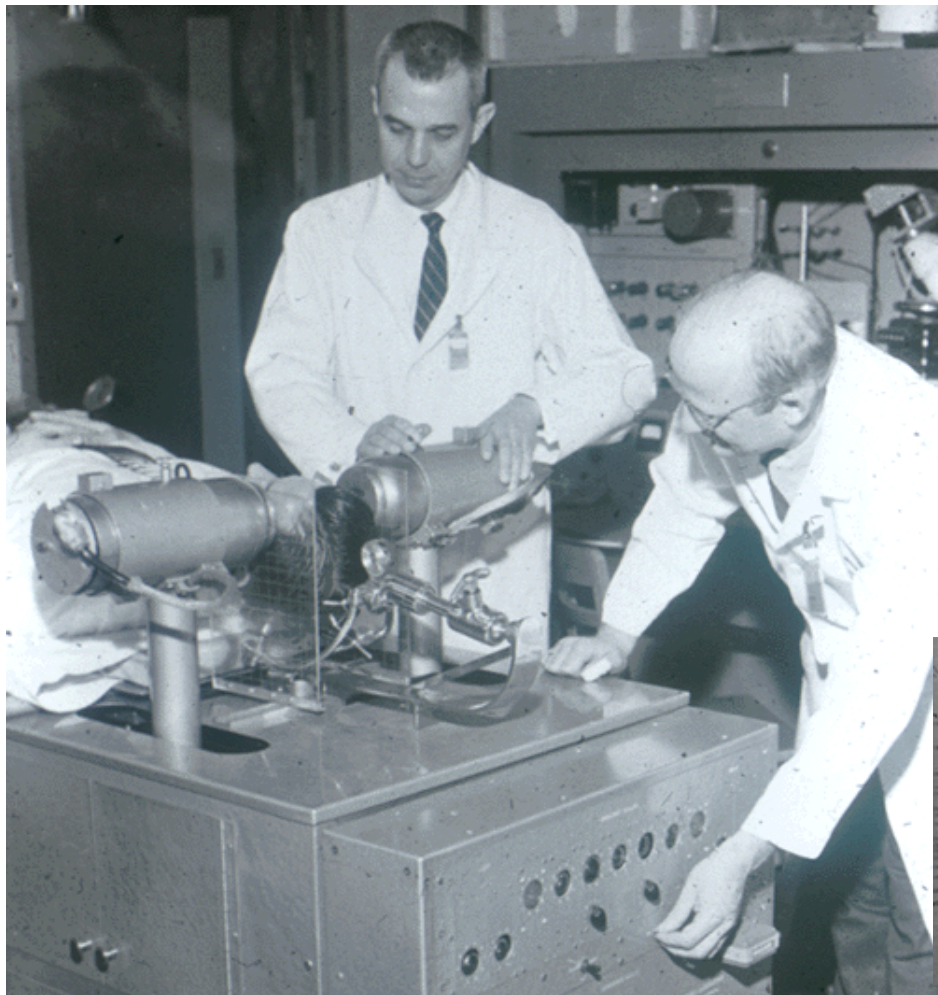


(C6O5FH11)

# Moduł produkcji FDG

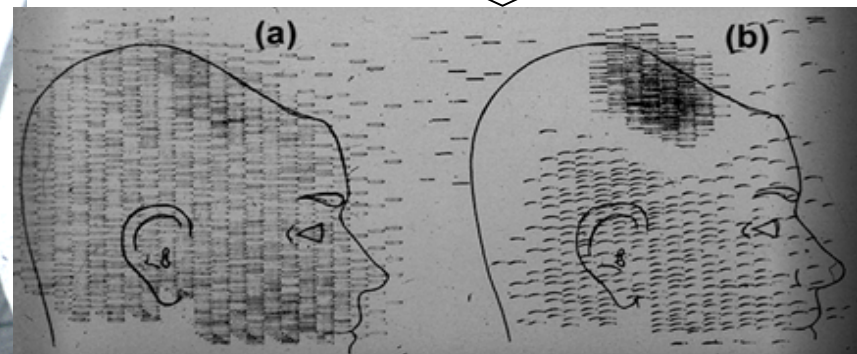


# Pierwsze urządzenie kliniczne PET



Dr Brownell (z lewej) i Aronow z pierwszym urządzeniem tomografii pozytonowej (1953).

Koincydencje (a)  
Asymetria zliczeń (b)  
(nowotwór mózgu)

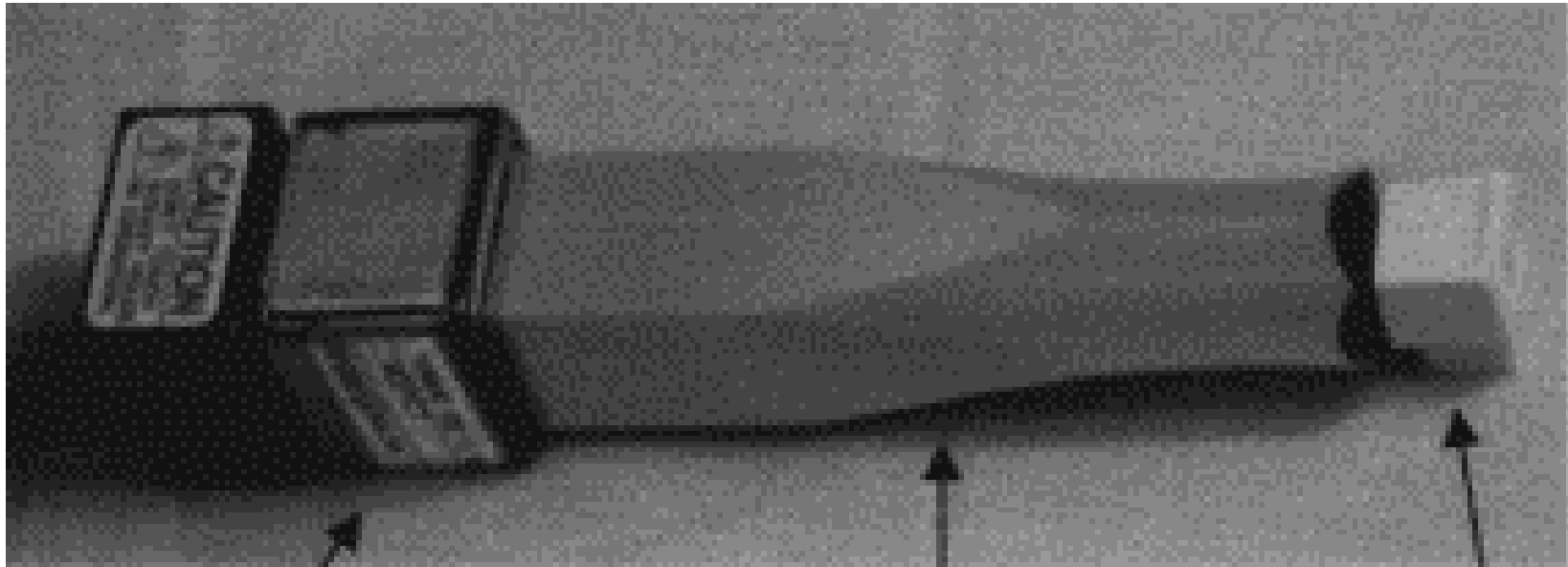


W.H. Sweet, New Engl.J.Med, Vol.245 (1951)875  
Massachusetts General Hospital

# Współczesne urządzenia PET



# Detektor scyntylacyjny



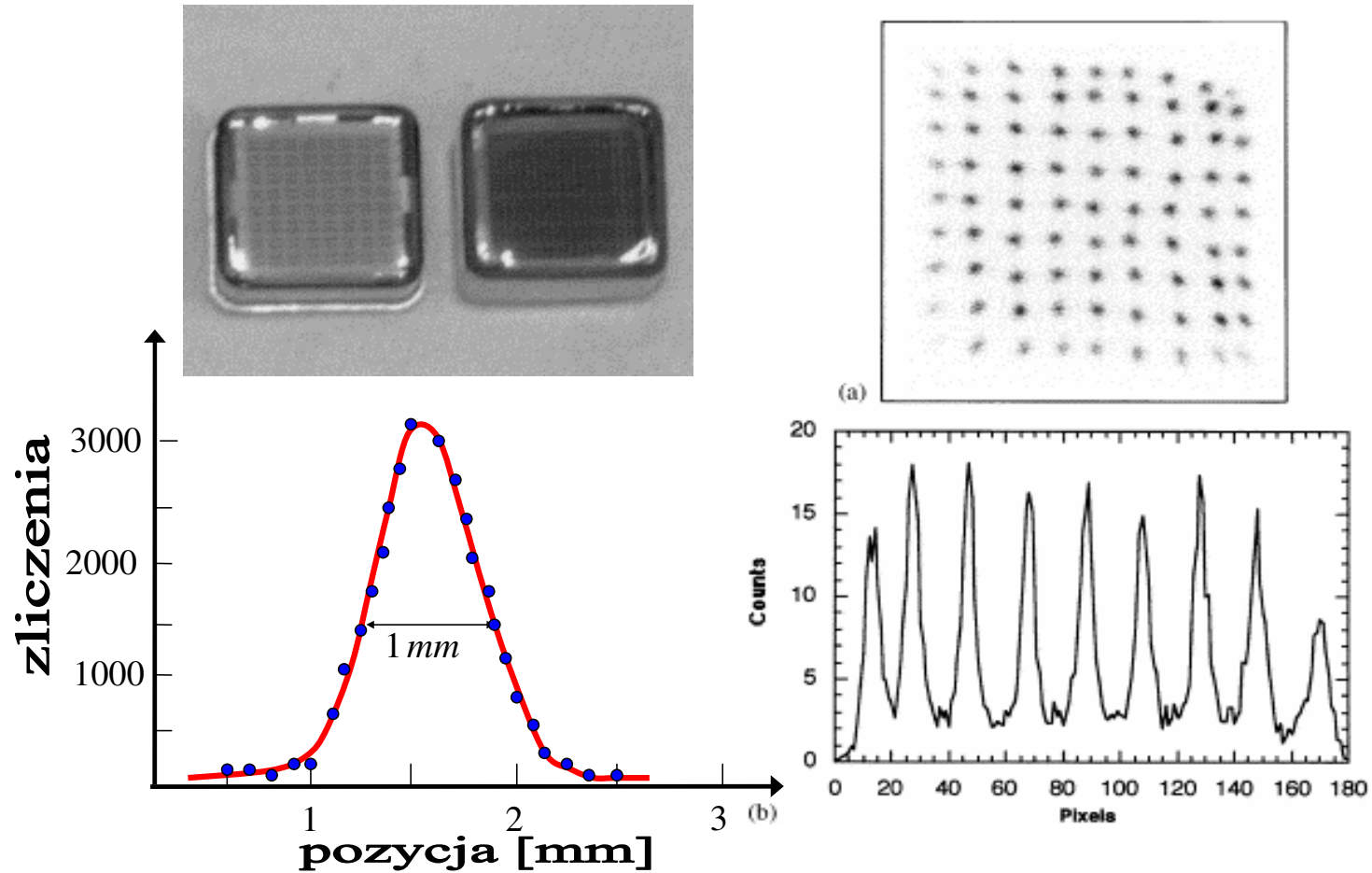
Position sensitive PMT

Fiber bundle

LSO array

	NaI	CsF	BGO
Czasowa zdolność rozdzielcza [ns]	1,5	0,4	7
Energetyczna zdolność rozdzielcza [%]	7	30	12
Wydajność detekcji fotonów 511 keV [%]	45	50	67

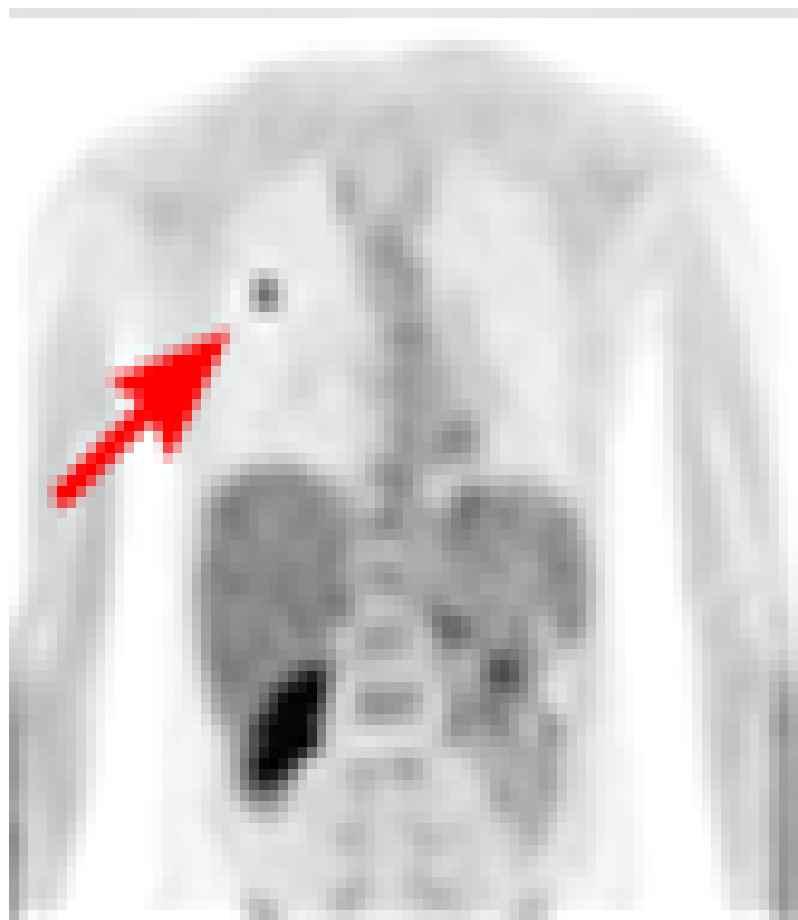
# Pozycyjnie czuły fotonowielacz



Y. Shao et al, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Research, A777 (2002)486

## **$^{18}\text{F}$ FDG-PET w onkologii: rozpoznanie guza złośliwego**

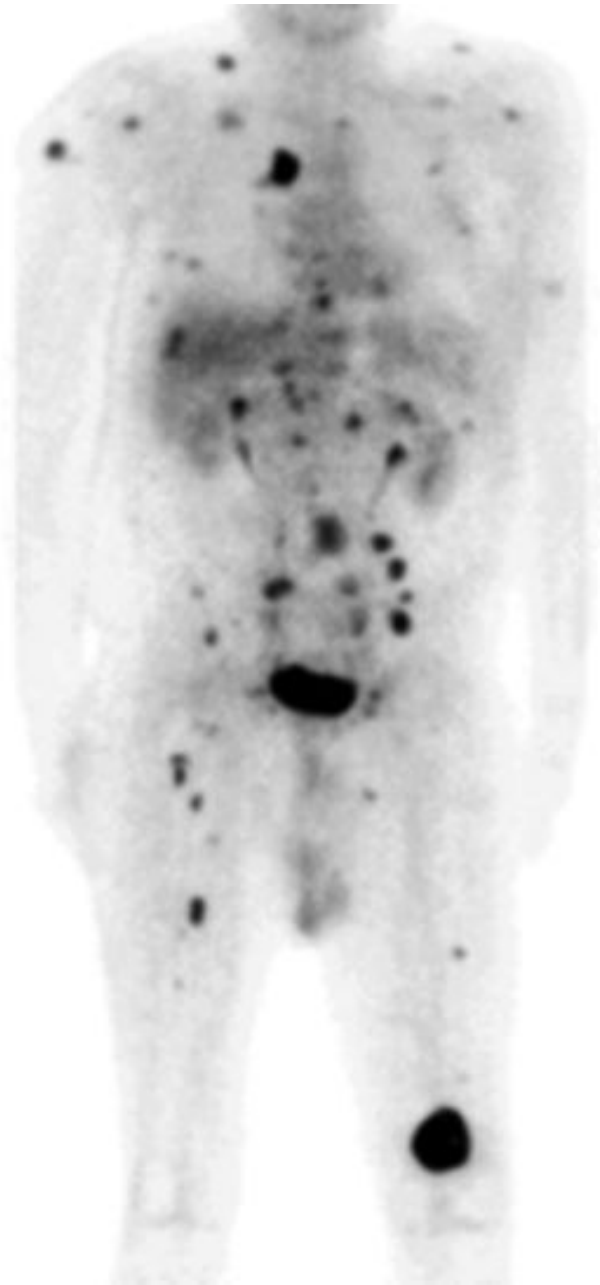
---



**Przerzut raka sutka do płuc**

## **<sup>18</sup>FDG- PET ocenia zaawansowanie**

---

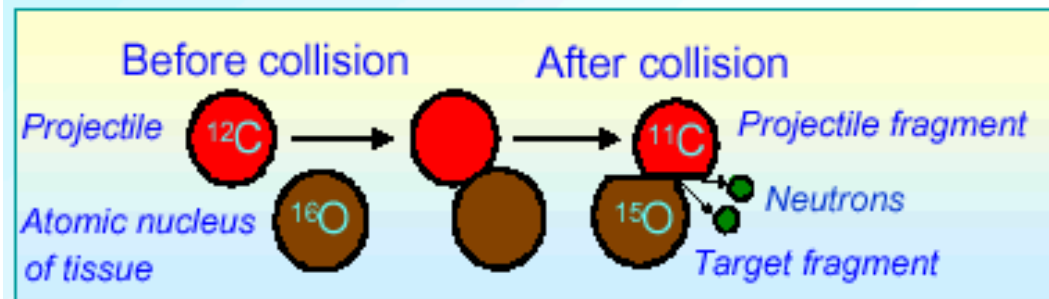


**Wznowa czerniaka : po wykonaniu PET  
odstąpiono od planowanej resekcji  
guza kończyny dolnej**



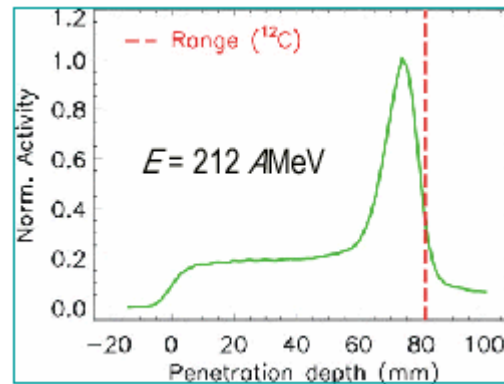
# Reakcije fragmentacije (W. Enghardt, FZR)

## The principle

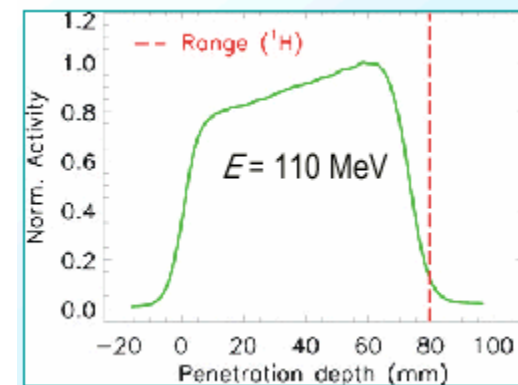


### Cross sections:

$^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, \text{X})^{15}\text{O}$ :	84 mb
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$ :	56 mb
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{10}\text{C}$ :	5 mb
$^1\text{H}(^{16}\text{O}, \text{pn})^{15}\text{O}$ :	50 mb
$^1\text{H}(^{12}\text{C}, \text{pn})^{11}\text{C}$ :	40 mb
$^1\text{H}(^{12}\text{C}, \text{p}2\text{n})^{10}\text{C}$ :	2 mb



Ion induced  $\beta^+$  activity  
(dominated by projectile f.)

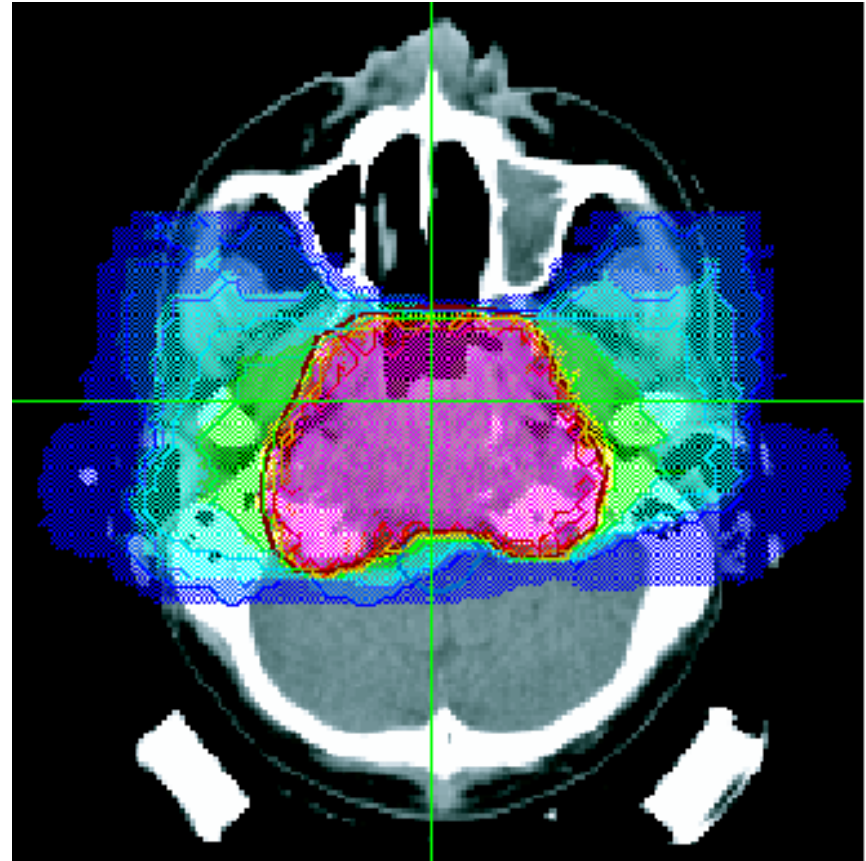
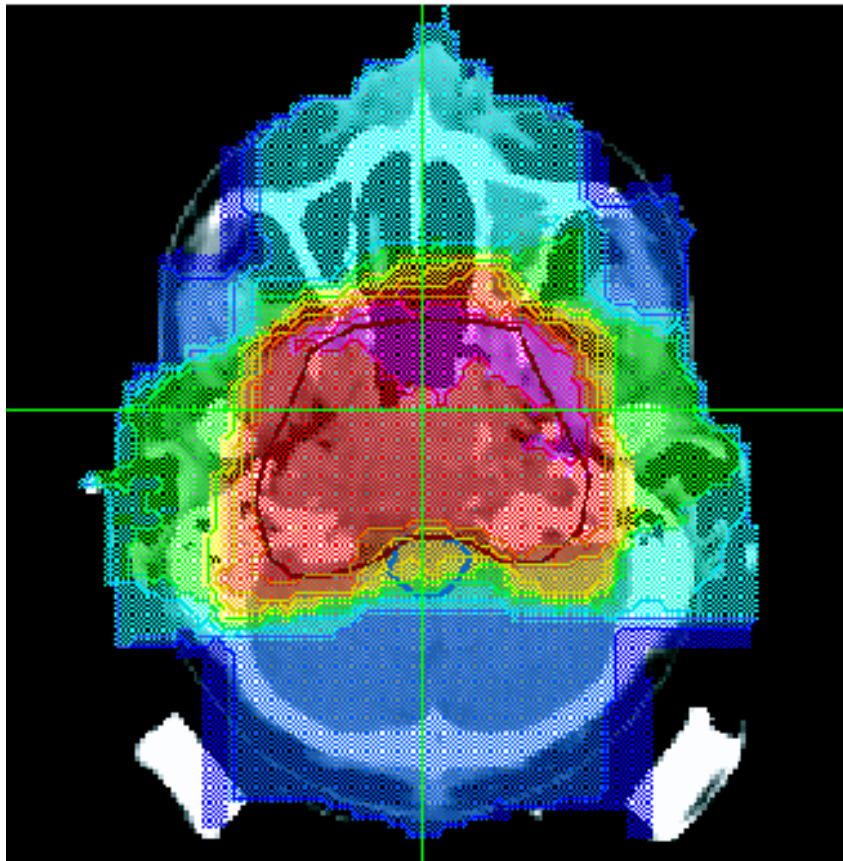


Proton induced  $\beta^+$  activity  
(dominated by target fragm.)

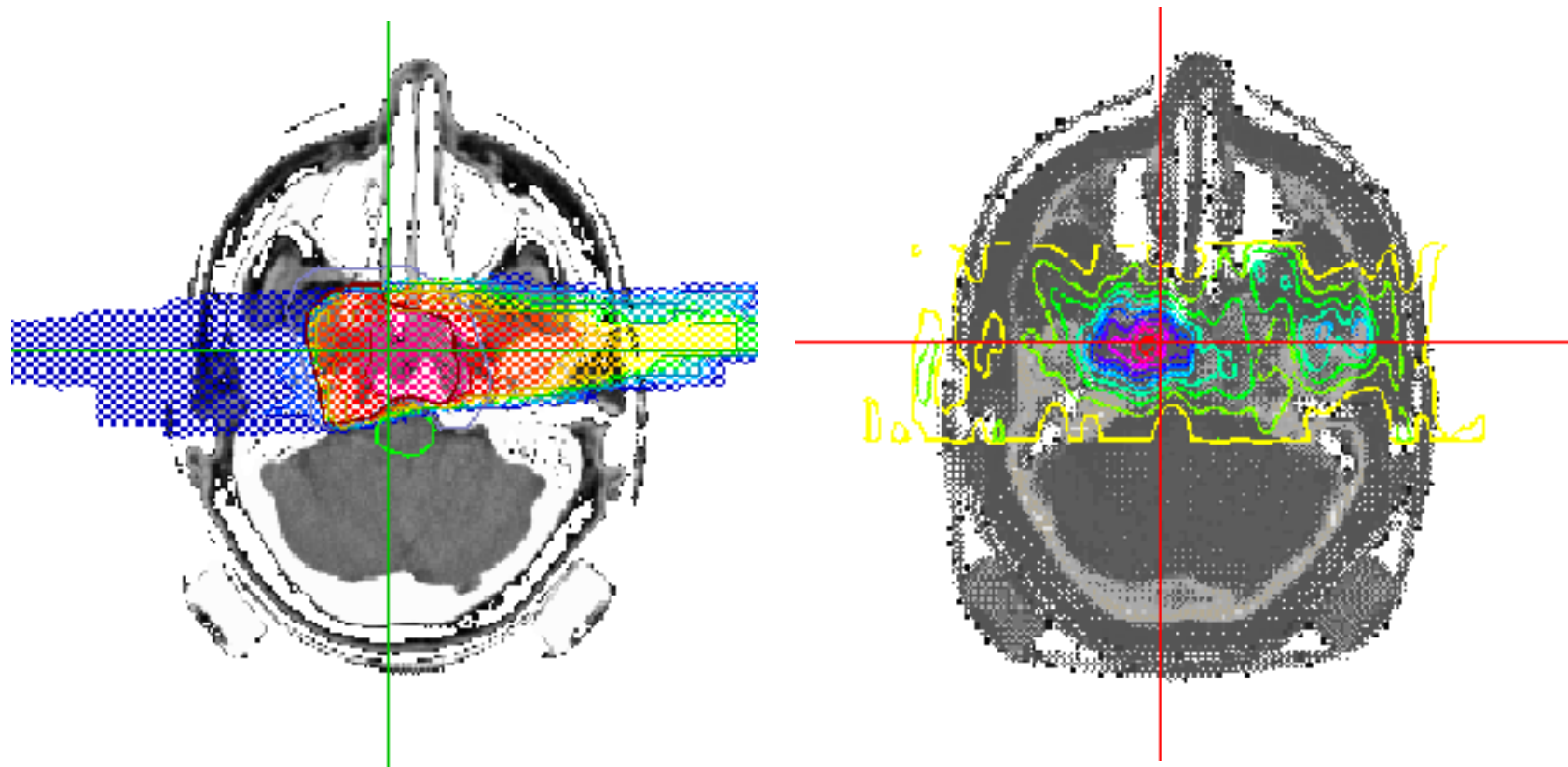
Wiązka  
 $^{12}\text{C} + \text{PET}$   
@ GSI



# Porównanie planów naświetlań: konwencjonalne vs terapia ciężkojonowa



# Korelacja pomiędzy rozkładem dawki i aktywnością $\beta^+$ ( GSI Darmstadt)



## Literatura:

Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii, red. A. Hrynkiewicz i E. Rokita, PWN, 2000

Człowiek i promieniowanie jonizujące, red. A. Hrynkiewicz, PWN, 2001

P. Jaracz, Promieniowanie jonizujące w środowisku człowieka, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, 2001