

# Seminarium 2

## Źródła promieniowania



# Zagadnienia

- Klasyfikacja, źródła i porównanie właściwości fizycznych promieniowania stosowanego w diagnostyce i terapii medycznej.
- **Laser. Zasada działania.**
- Właściwości promieniowania laserowego. Rodzaje laserów stosowanych w medycynie.
- **Zastosowanie laserów w medycynie.**
- Akceleratory cząstek stosowane w medycynie i ich charakterystyka: liniowy akcelerator elektronów oraz synchrociklotron w terapii nowotworów.



# Rodzaje promieniowania

- **Elektromagnetyczne (EM)** – opisywane jako fala lub jako kwanty promieniowania (fotony - cząsteczki o masie 0)
- **Korpuskularne (cząstkowe, cząsteczkowe)** – strumień cząstek o masie  $\neq 0$  poruszających się z dużymi prędkościami



# Ilościowy opis promieniowania

**Natężenie promieniowania  $I$**   
(intensywność, strumień energii)

$$I = E \cdot N \quad [\text{W/m}^2]$$

$E$  – energia cząsteczki, kwantu

$$N = n/t/S$$

$n$  – liczba cząstek lub fotonów

$t$  – czas,  $S$  - powierzchnia



# Prędkość propagacji

- **Promieniowanie elektromagnetyczne:**  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- **Promieniowanie cząsteczkowe:**  $v < c$   
(np. elektrony o energii 100 keV –  $v = \frac{1}{2} c$ )
- **Żadna informacja nie może być propagowana z prędkością większą niż  $c$**



# Dualizm korpuskularno-falowy

Promieniowanie można opisywać jako **falę**,  
lub **strumień cząstek**.

Światło – strumień fotonów, albo fala elektromagnetyczna.

Promieniowanie  $\beta$  – strumień elektronów, albo fala materii.

Propagacja dźwięku – strumień fononów, albo fala akustyczna.



# Dualizm korpuskularno-falowy

Fala EM ( $c, \lambda, T, \nu$ )

Foton ( $E, p, m=0$ )

$$E = h\nu$$

$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  - stała Plancka

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

$$E[eV] = \frac{1240}{\lambda} [nm]$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$



# Dualizm korpuskularno-falowy

Dwa sposoby opisu promieniowania EM można traktować jako dwie formy opisu strumienia energii. Rozpatrujemy obiekty o rozmiarach  $a$ :

$$\lambda/a \approx 1 \rightarrow \text{fala}$$

$$\lambda/a \ll 1 \rightarrow \text{foton}$$

**Analogia:**

**krople w strumieniu wody z prysznicą.**





# Dualizm korpuskularno-falowy

Dwoista natura jest nie tylko cechą promieniowania, lecz również materii (hipoteza de Broglie'a).

## Promieniowanie elektromagnetyczne (EM)



# Opis falowy promieniowania EM

Ładunek w punkcie (0,0,0) przyśpieszany przez działanie siły periodycznej  $\sin(2\pi\nu t)$  w kierunku osi Y wytwarza falę elektromagnetyczną poruszającą się wzdłuż osi X.

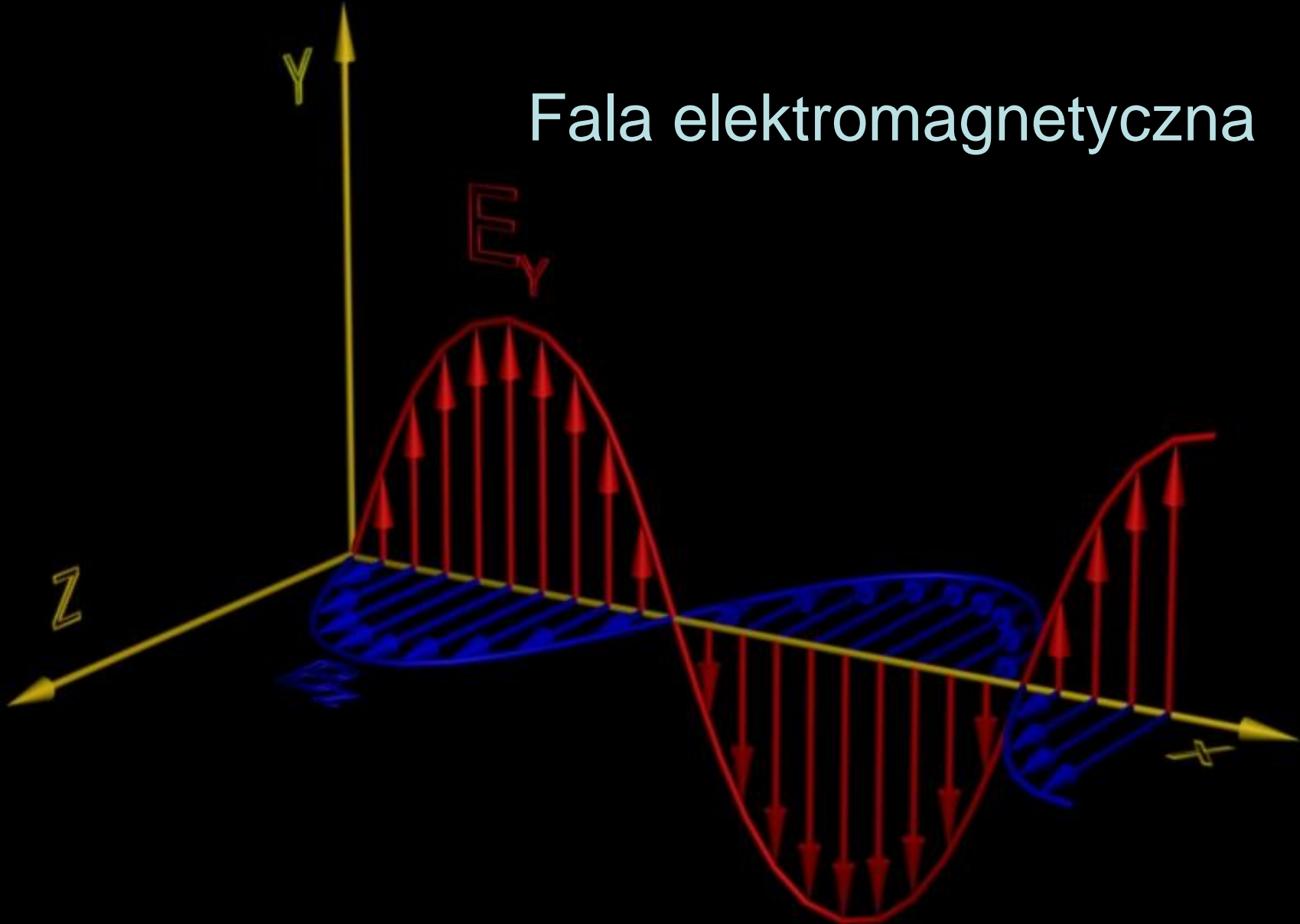
Falę elektromagnetyczną stanowi pole elektryczne indukujące pole magnetyczne, które z kolei wytwarza pole elektryczne itd.

Promieniowanie EM charakteryzowane jest wektorem pola elektrycznego  $E$  i wektorem indukcji magnetycznej  $B$ . Wektory te są wzajemnie prostopadłe, a ich amplituda zmienia się w czasie.



# PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE

## Fala elektromagnetyczna



# Opis falowy promieniowania EM

W opisie fali stosujemy:

- 1) Długość fali –  $\lambda$  [m]
- 2) Częstotliwość –  $\nu$  [Hz]
- 3) Okres fali –  $T$  [s]
- 4) **Prędkość fali –  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s**

$$\lambda = cT \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \quad T = \frac{1}{\nu}$$



# Opis kwantowy promieniowania

Promieniowanie elektromagnetyczne może być alternatywnie opisywane jako strumień kwantów o energii wyrażanej wzorem Plancka:

$$E = h \cdot c / \lambda$$

gdzie:  $c$  – prędkość światła

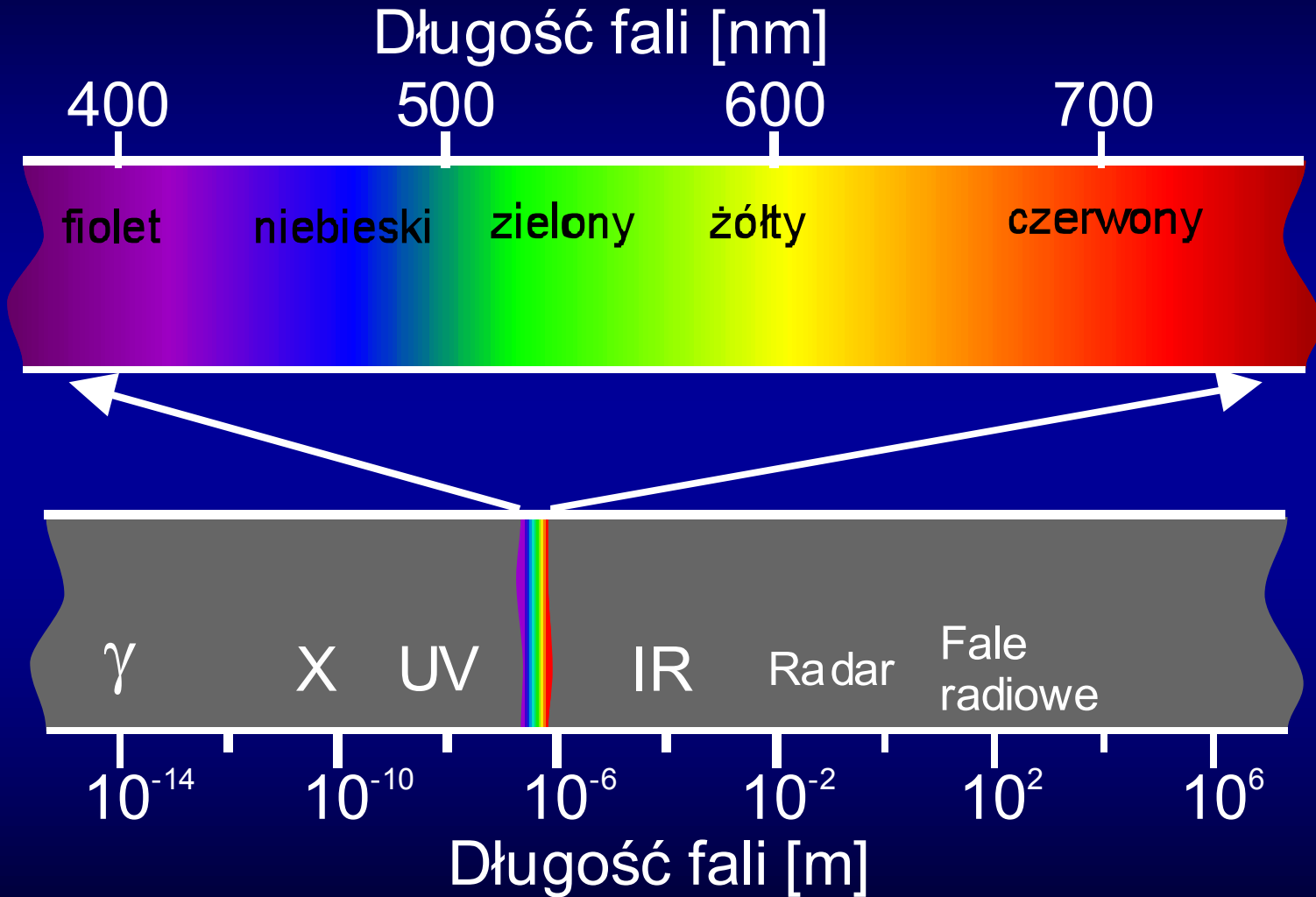
$\lambda$  - długość fali

$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  (stała Plancka)

⇒ Dualizm korpuskularno-falowy



# Widmo promieniowania EM



Fale radiowe 10 kHz - 300 GHz

Fale submilimetrowe 100  $\mu\text{m}$  - 1 mm

Podczerwień 780 nm - 100  $\mu\text{m}$

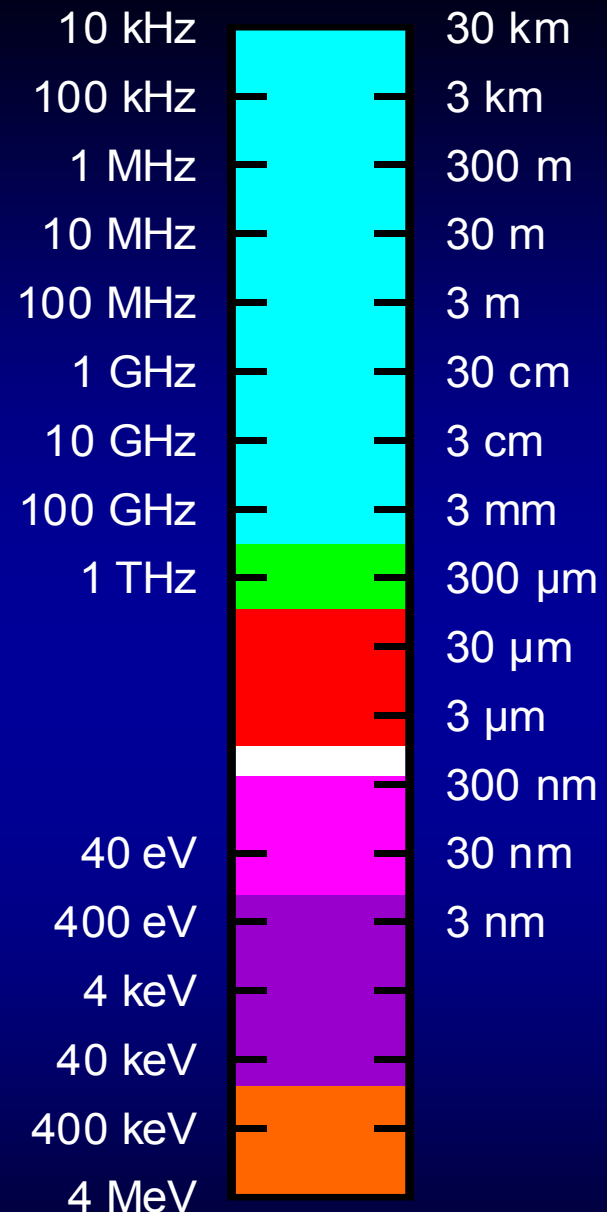
Światło widzialne 380 - 780 nm

Nadfiolet 10 nm - 380 nm

Promieniowanie rentgenowskie (X)

120 eV - 120 KeV

Promieniowanie gamma >120 keV



# Lasery

## Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Podstawowe procesy leżące u podstaw  
działania lasera to:

- **pompowanie optyczne**
  - **inwersja obsadzeń**
  - **emisja wymuszona**





# Laser rubinowy

- laser na ciele stałym ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  domieszkowany  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0.05%).
- pręt o średnicy 1 cm i długości 30 cm.
- pręt „owinięty” lampą błyskową służącą do pompowania optycznego.
- atomy chromu posiadają specyficzny układ stanów energetycznych sprzyjający powstawaniu inwersji obsadzeń.



# Laser rubinowy

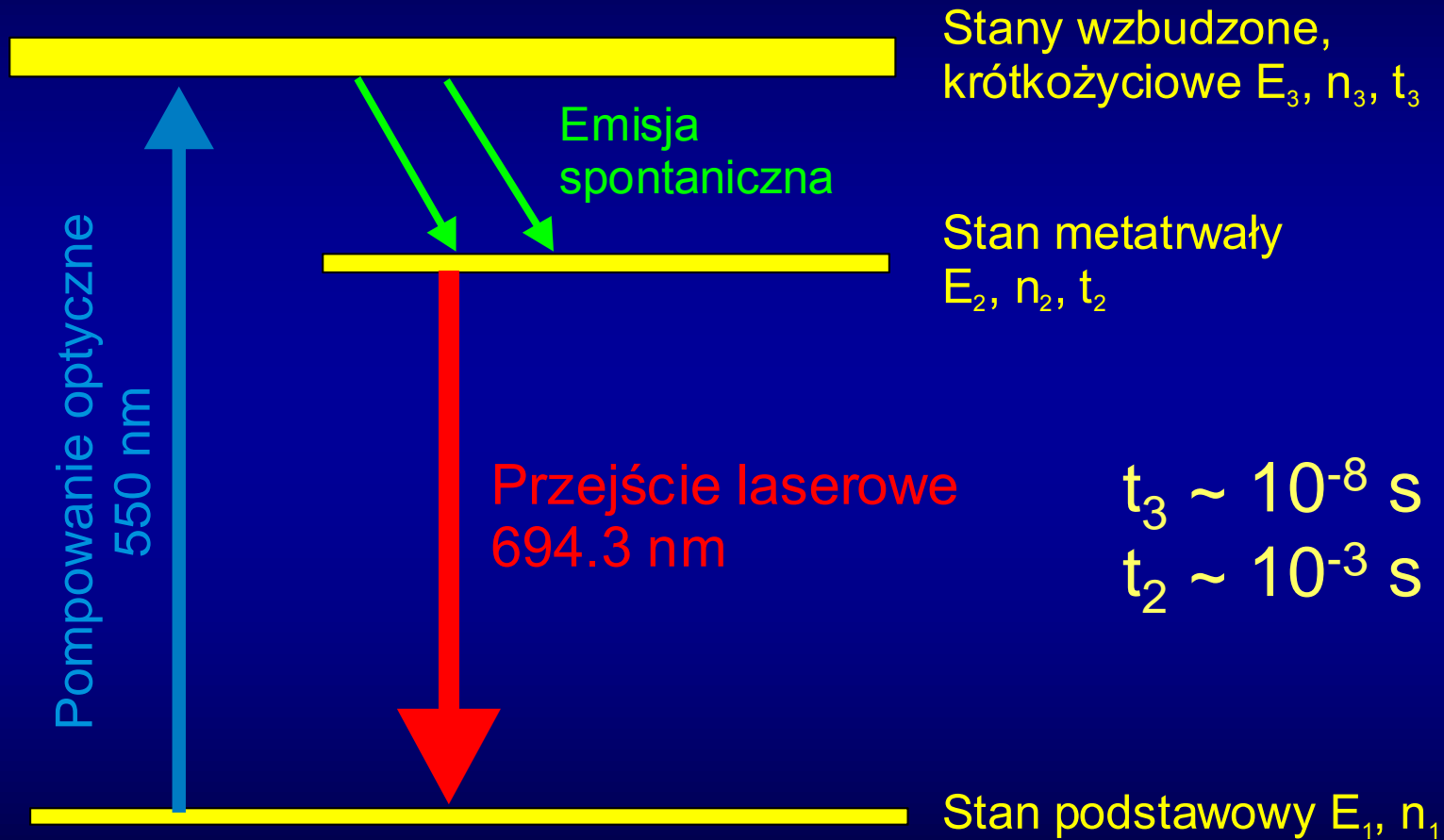
W strukturze poziomów energetycznych chromu istnieją trzy stany oznaczone jako: 1, 2 i 3 ( $E_1 < E_2 < E_3$ ).

W równowadze  $n_1 \gg n_2 \gg n_3$  (n oznacza liczbę atomów w danym stanie).

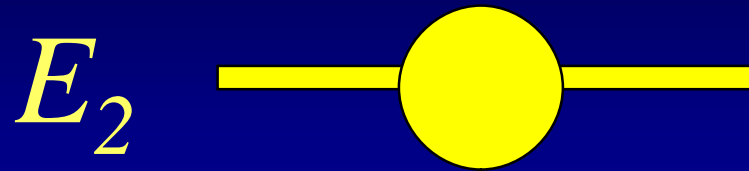
Podczas **pompowania optycznego** atomy przechodzą w stan  $E_3$ . Ze stanu  $E_3$  następuje **emisja spontaniczna** do stanu  $E_2$ , a następnie ze stanu  $E_2$  do stanu  $E_1$ . Ponieważ czas życia stanu  $E_2$  jest znacznie dłuższy niż stanu  $E_3$ , to pojawia się coraz więcej atomów w stanie wzbudzonym  $E_2$  (**inwersja obsadzeń**):  $n_1 > n_2$ .



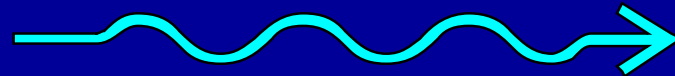
# Laser rubinowy



# Laser rubinowy – emisja wymuszona



$$h\nu = E_2 - E_1$$



LASER.EXE



# Własności światła laserowego

- monoenergetyczność
- naturalna kolimacja
- krótki impuls

$10^{-9}$ - $10^{-12}$ s → duża moc w impulsie

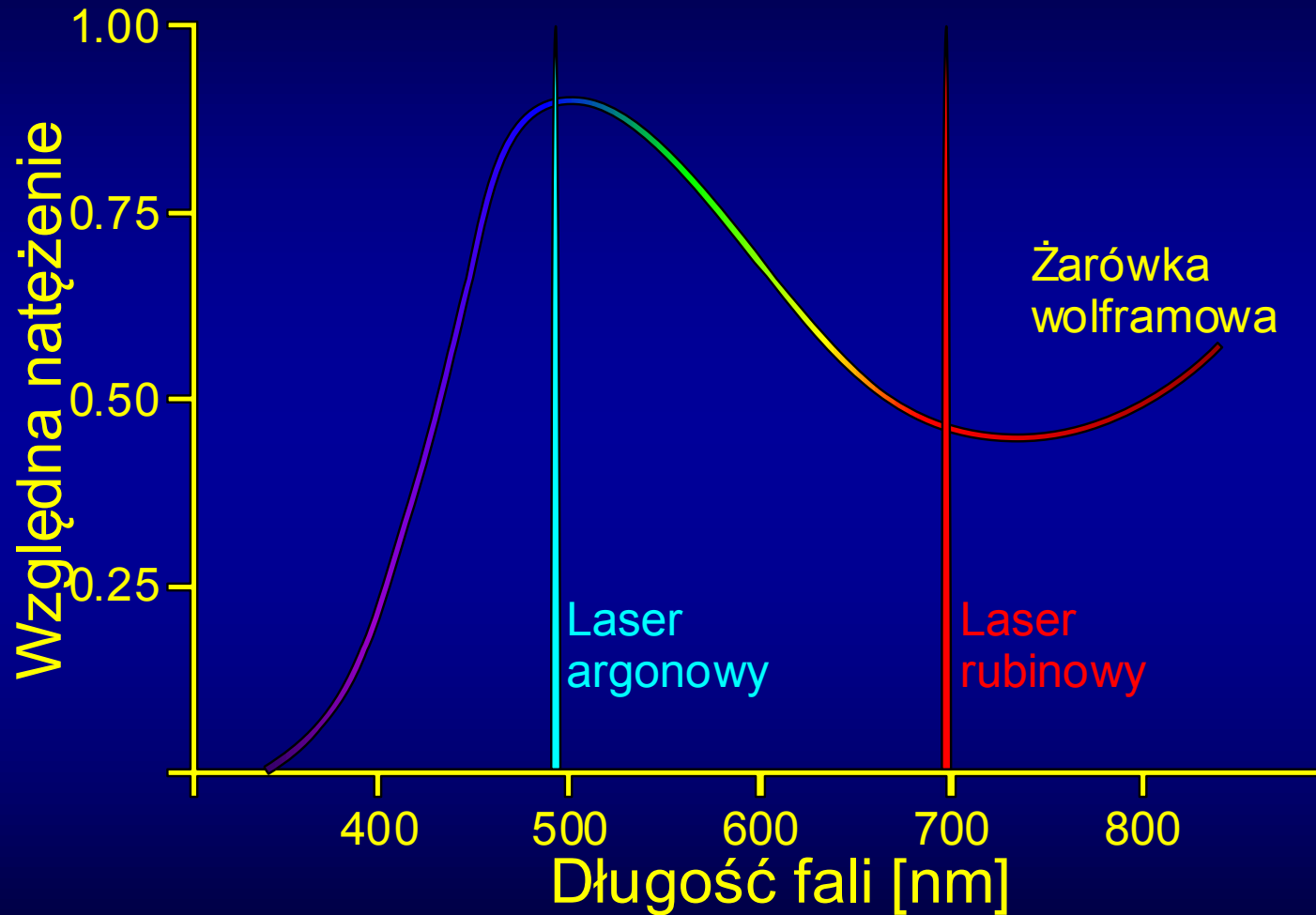
1 mJ w 1 ns → 1MW

średnia moc przy częstotliwości repetycji impulsów

10 Hz = 10 mW (około 1/100 mocy ręcznej latarki).



# Monoenergetyczność



# Monoenergetyczność

Substancja aktywna	$\lambda$ [nm]	Zakres
Rubinowy	694	VIS
CO <sub>2</sub>	10600	IR
Nd:YAG	1060	IR
He-Ne	633	VIS
Jonowy (Ar <sup>+</sup> , Kr <sup>+</sup> )	458 ÷ 515	VIS
Półprzewodnikowy	630 ÷ 904	VIS, IR
Ekscymerowy (XeF, XeCl, KrF)	193 ÷ 351	UV
Barwnikowy	400 ÷ 700	VIS



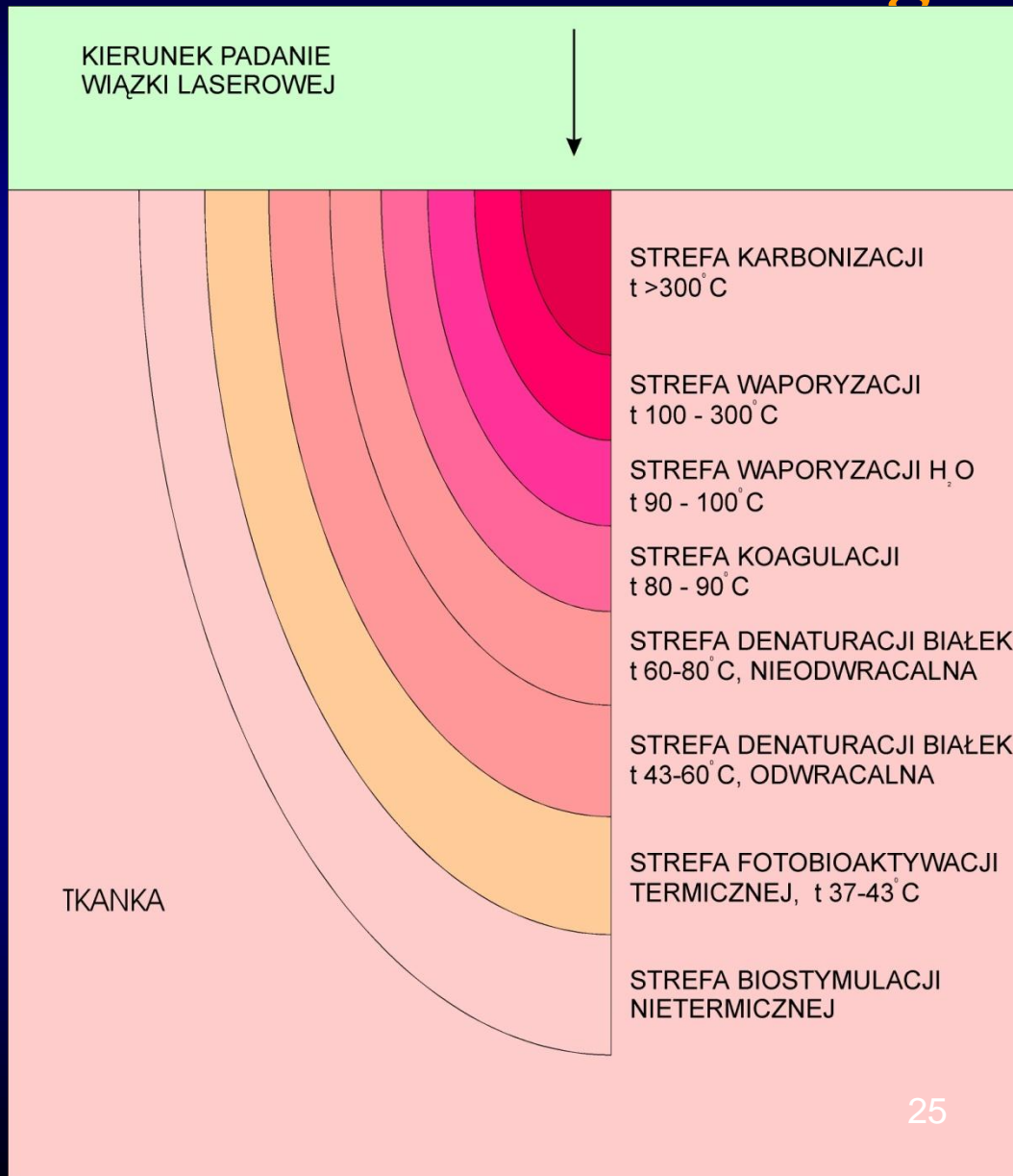
# Rodzaje laserów

- He-Ne (wzbudzenie atomów He, które oddziałując następnie z Ne wzbudzają stan metastabilny Ne).
- CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He (N<sub>2</sub> pompowany dzięki wyładowaniu elektrycznemu, akcja laserowa pomiędzy stanami cząsteczkowymi CO<sub>2</sub>, He przeprowadza cząsteczki CO<sub>2</sub> do stanu podstawowego).
- Jonowe (akcja laserowa dla jonów gazów szlachetnych Ar<sup>+</sup> lub Kr<sup>+</sup>).
- Nd:YAG (kryształ granatu itrowo-glinowego (Ytrium-Aluminium-Garnet – YAG) domieszkowany neodymem, istnieją też lasery YAGowe domieszkowane erbem lub holmem: Er:YAG, Ho:YAG).
- Półprzewodnikowe [dioda półprzewodnikowa (złącze p-n) wykonana z arsenku galu (GaAs) domieszkowana tellurem (Te) lub cynkiem (Zn)].
- Ekscymerowe (akcja laserowa w dimerach gazów szlachetnych i chlorowców, cząsteczki (ArF, KrF, XeCl, XeF) istnieją tylko w stanie wzbudzonym).
- Barwnikowe (akcja laserowa w cząsteczkach barwników organicznych).





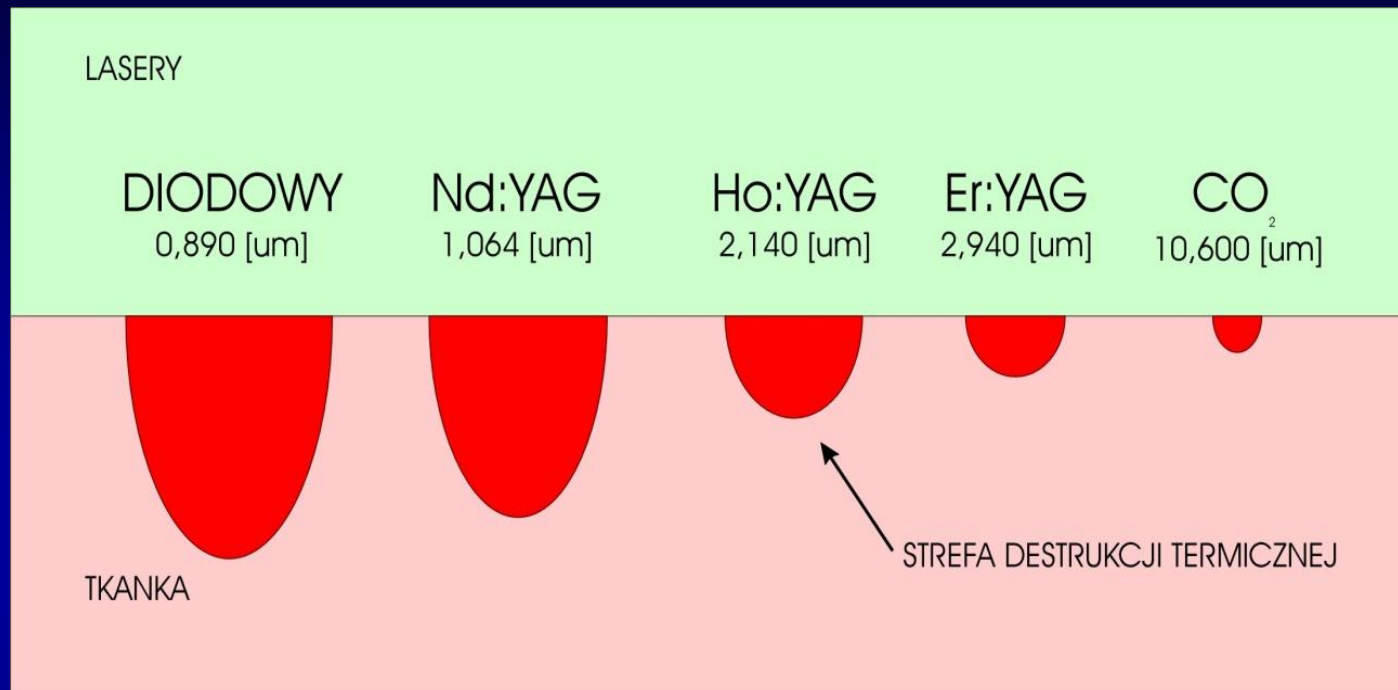
# Mechanizmy oddziaływania światła laserowego z tkanką



Schematyczne  
zobrazowanie  
przekroju krateru  
po kontaktowej  
ingerencji wiązką  
lasera w tkankę  
miękką.



# Zastosowanie laserów w medycynie



Porównanie wielkości strefy destrukcji termicznej tkanek w aspekcie transmisji oraz absorpcji promieniowania laserowego w tkankach.

# Zasady bezpieczeństwa podczas pracy z laserem

**Laser** → ~100 W/cm<sup>2</sup> (impulsowo 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup>)

→ głębokość penetracji ~mm → skóra i oczy

**Słońce** → 900 W/m<sup>2</sup> (0.09 W/cm<sup>2</sup>)

## Stosowane normy w ochronie przed promieniowaniem laserowym

**Maximum Permissible Exposure = MPE [ J/cm<sup>2</sup> ]**

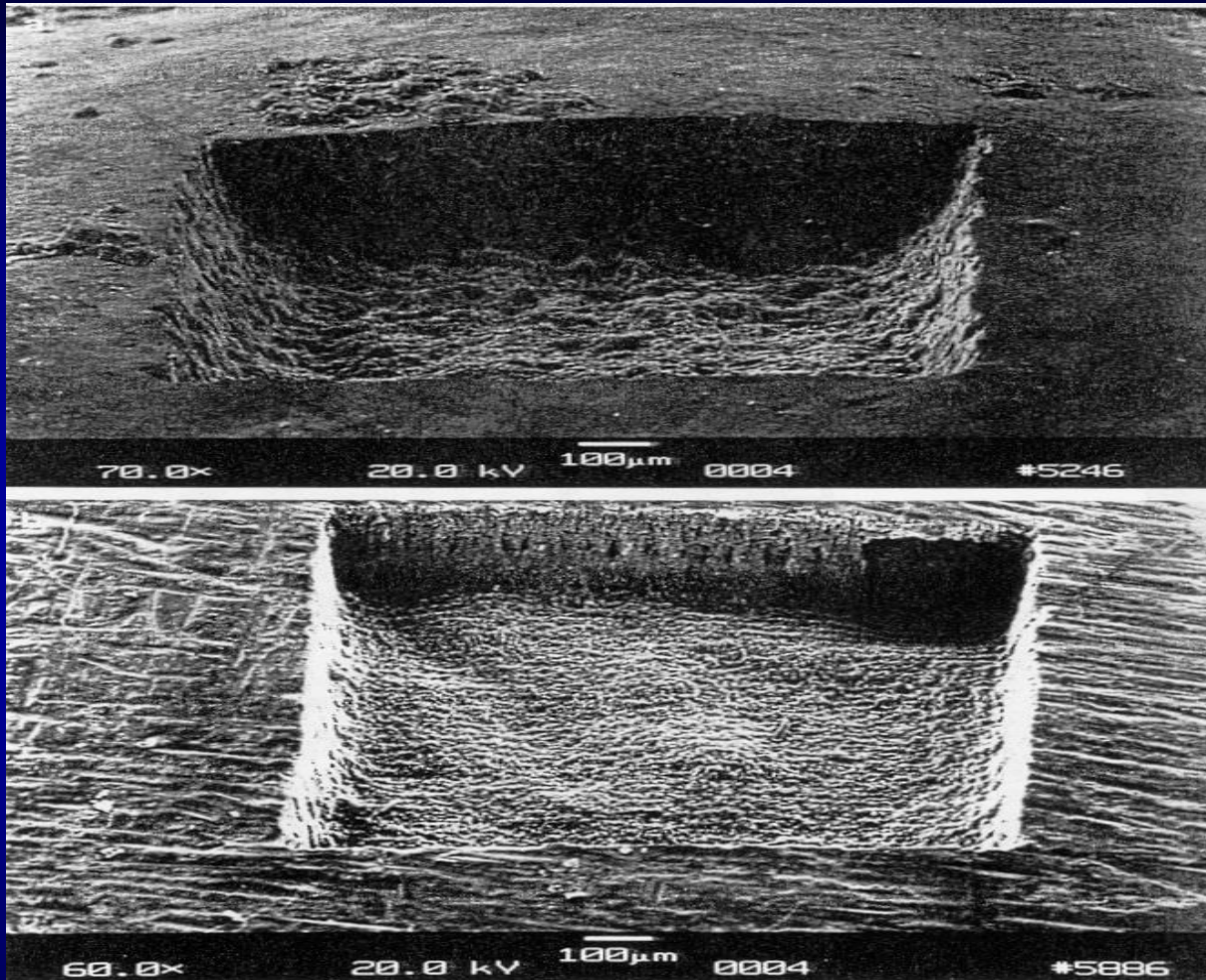
**MPE zależy od czasu ekspozycji i długości fali**

**Oczy** → MPE = (10<sup>-7</sup> ÷ 10<sup>-3</sup>) J/cm<sup>2</sup> → okulary ochronne

**Skóra** → MPE = (10<sup>-1</sup> ÷ 1) J/cm<sup>2</sup>



# Lasery w stomatologii



Działanie „noża laserowego” na tkankę zęba

# Rodzaje promieniowania korpuskularnego:

- ciężkie cząstki naładowane (p, d,  $\alpha$ , ...)
- neutrony
- $\beta^+$  (pozytony),  $\beta^-$  (elektrony)

# Źródła promieniowania korpuskularnego:

- 1) Izotopy promieniotwórcze
- 2) Reaktor jądrowy
- 3) Akceleratory

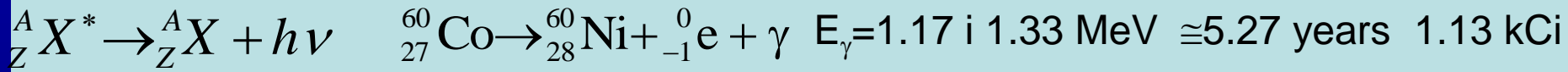
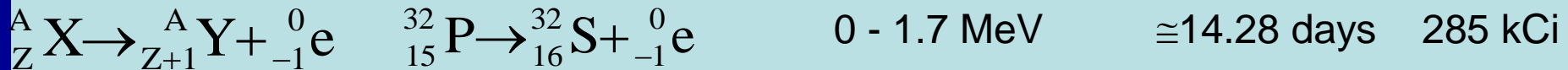
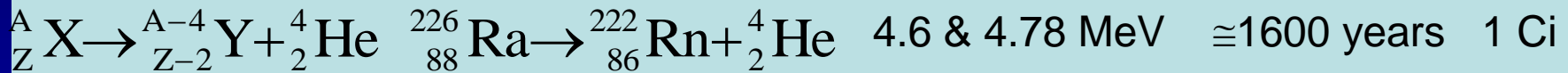
**Promieniowanie korpuskularne zawsze wywołuje jonizację.**



# Źródła cząstek naładowanych

(p, d, α, β<sup>-</sup>, β<sup>+</sup>, ...)

- źródła promieniotwórcze – rodzaje rozpadów



rozpady naturalne (α, β<sup>-</sup> i γ) są odpowiedzialne za istnienie czterech tzw. szeregów promieniotwórczych (aktynowy, torowy, uranowy i neptunowy)



# Akceleratory

## Ładunek elektryczny w polu

Pole magnetyczne

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Ruch jednostajny po spirali  
prostopadle do kierunku  
wektora indukcji  
magnetycznej  
(o ile  $v \neq 0$ , bo na ładunek  
nieruchomy pole magnetyczne nie działa;  
kształt toru zależy od kierunku prędkości  
początkowej, może być kołowy)

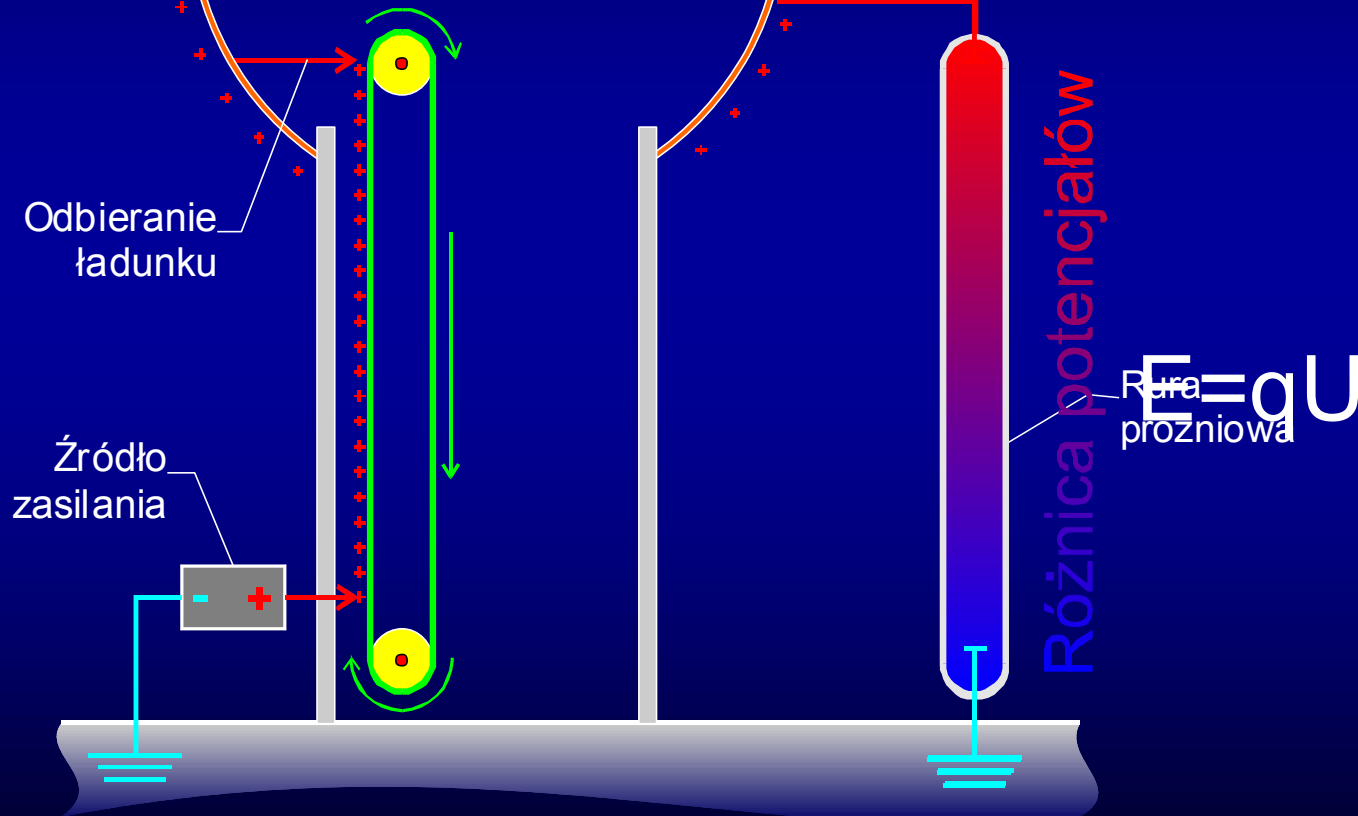
Pole elektryczne

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Ruch prostoliniowy  
przyśpieszony wzdłuż  
linii sił pola  
(o ile  $v_0 = 0$ , w przeciwnym  
wypadku kształt toru zależy od  
kierunku prędkości początkowej  
i może mieć kształt paraboli)

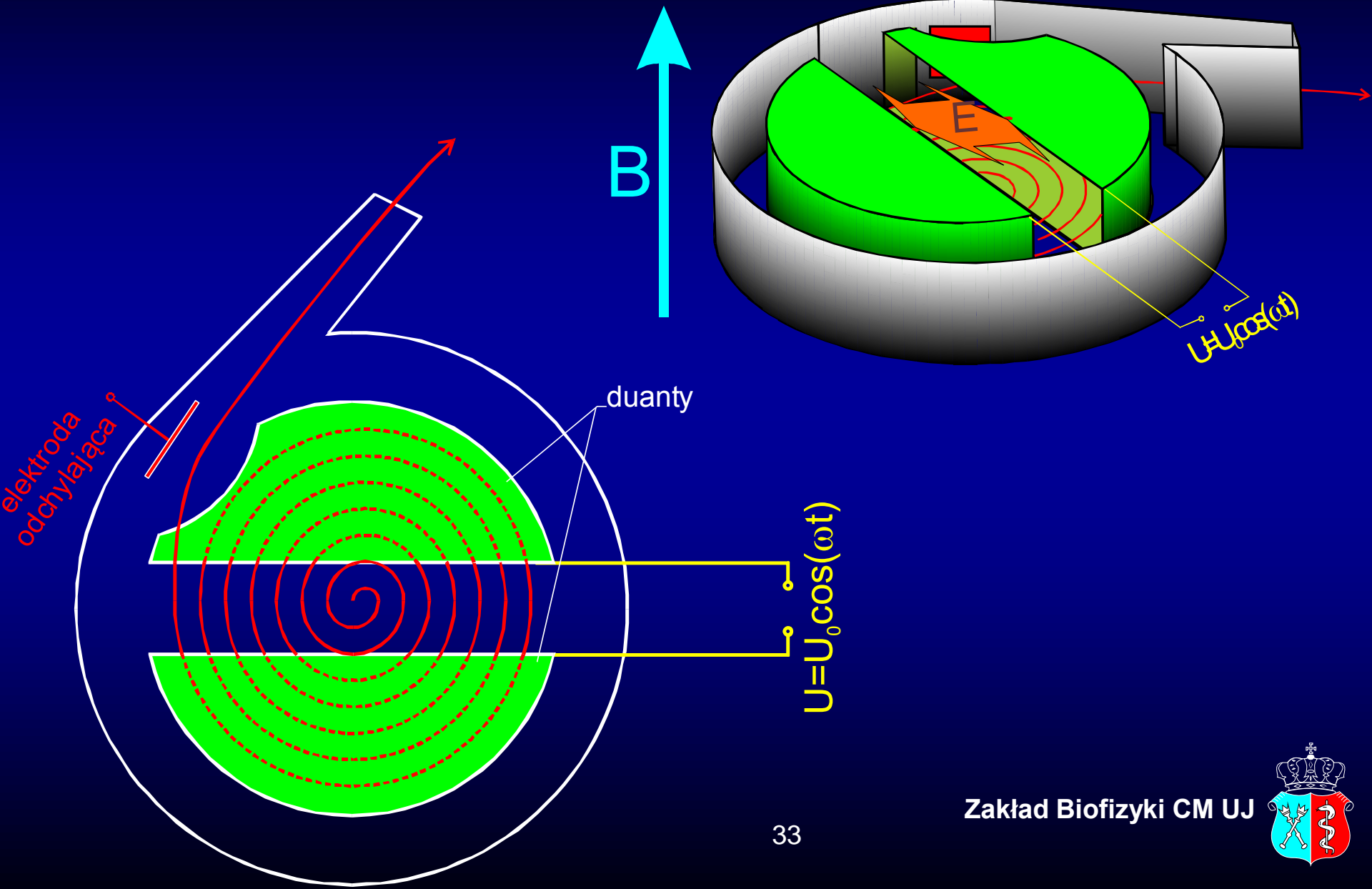


# Akcelerator liniowy (generator van de Graffa)





# Akcelerator kołowy (cyklotron)



# Akcelerator kołowy

Na poruszający się ładunek  $q$  o masie  $m$  i prędkości  $v$  działa siła Lorentza i siła odśrodkowa.

( $T$  – okres,  $f$  – częstotliwość,  $r$  – promień)

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{qBr}{m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$



# Akcelerator kołowy

$$v = \frac{qBr}{m} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$$

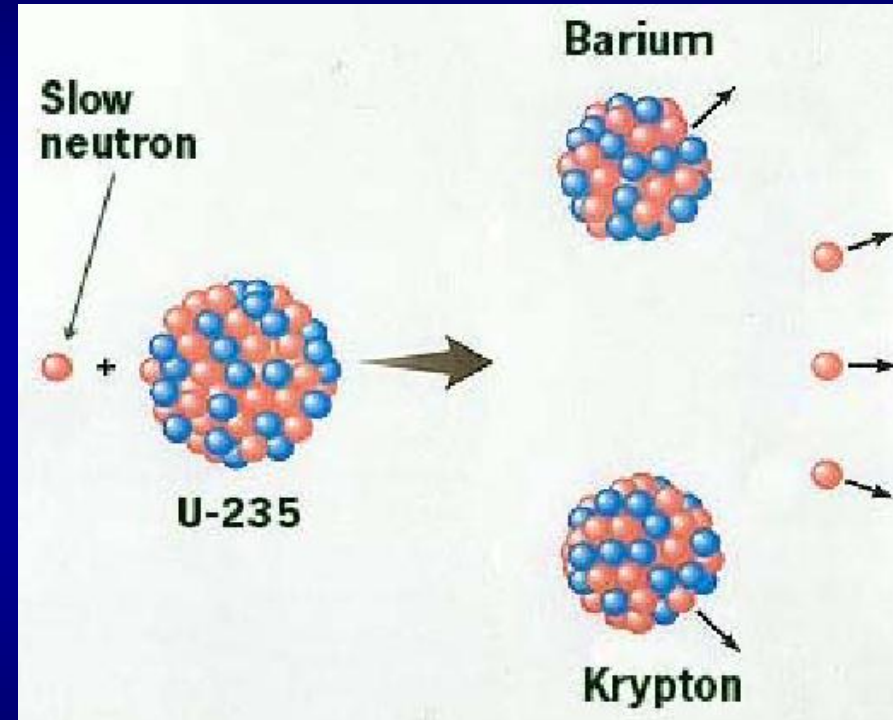
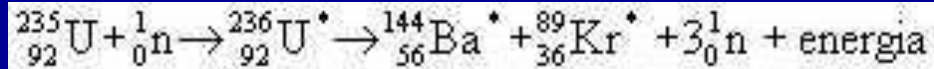
W celu osiągnięcia wysokich energii trzeba stosować silne pola albo urządzenia zapewniające duże promienie toru cząstek.



# Źródła neutronów

- reaktor jądrowy – kontrolowana reakcja rozszczepienia,

np.:

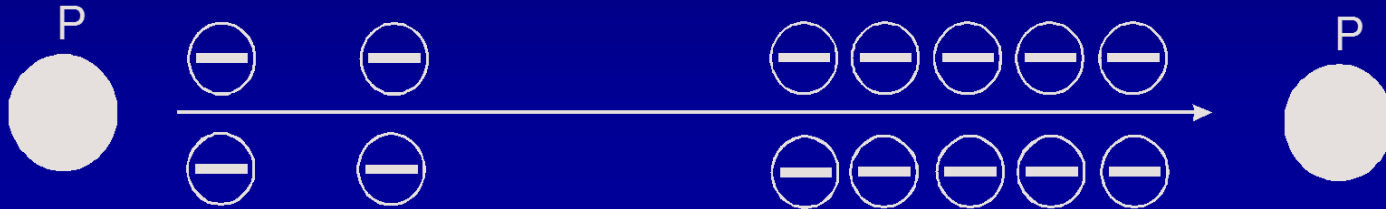


- bomba atomowa

- naturalne i sztuczne reakcje jądrowe

# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią

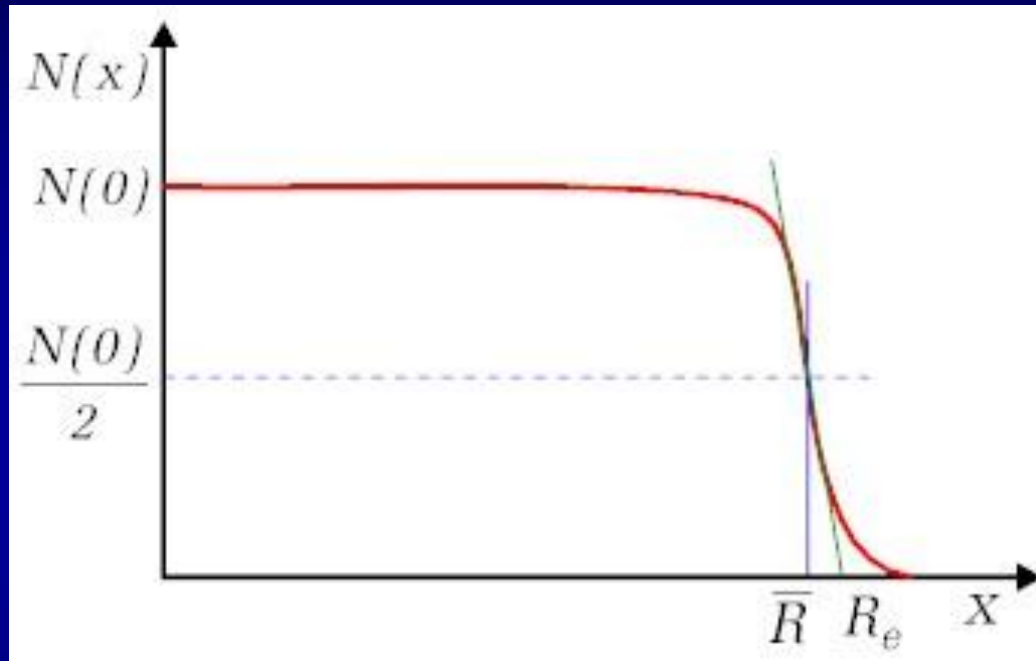
→ oddziaływanie z elektronami ośrodka



- energie wybitych elektronów  $\sim \text{keV}$
- elektrony te absorbowane są w niewielkiej odległości od toru cząstki  $p$
- tak więc energia przekazywana jest do niewielkiej objętości (masy) ośrodka
- stopniowe spowalnianie wiązki protonów



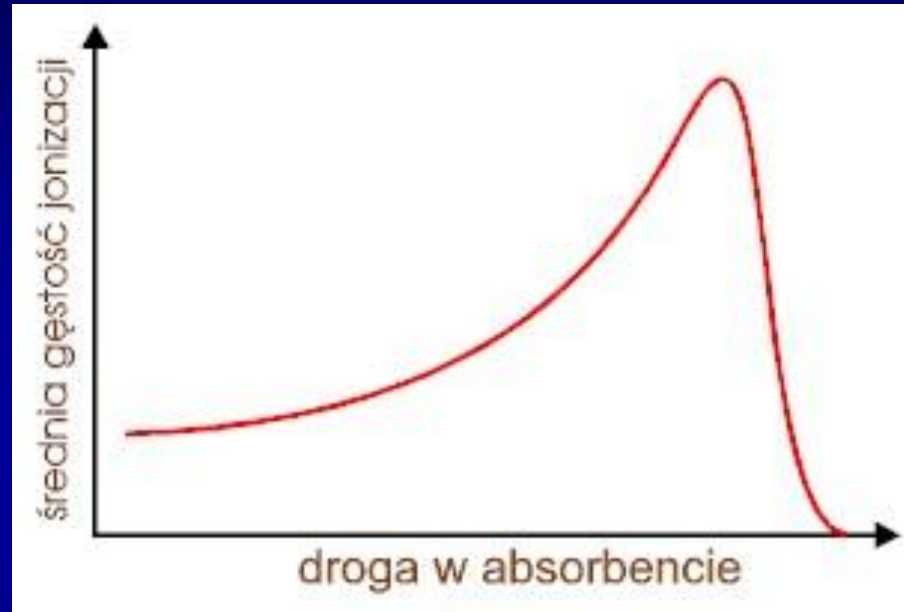
# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią



**Przykładowa zależność liczby ciężkich cząstek naładowanych od długości ich drogi w absorbencie (zasięg średni -  $\bar{R}$  ; zasięg ekstrapolowany -  $R_e$  )**



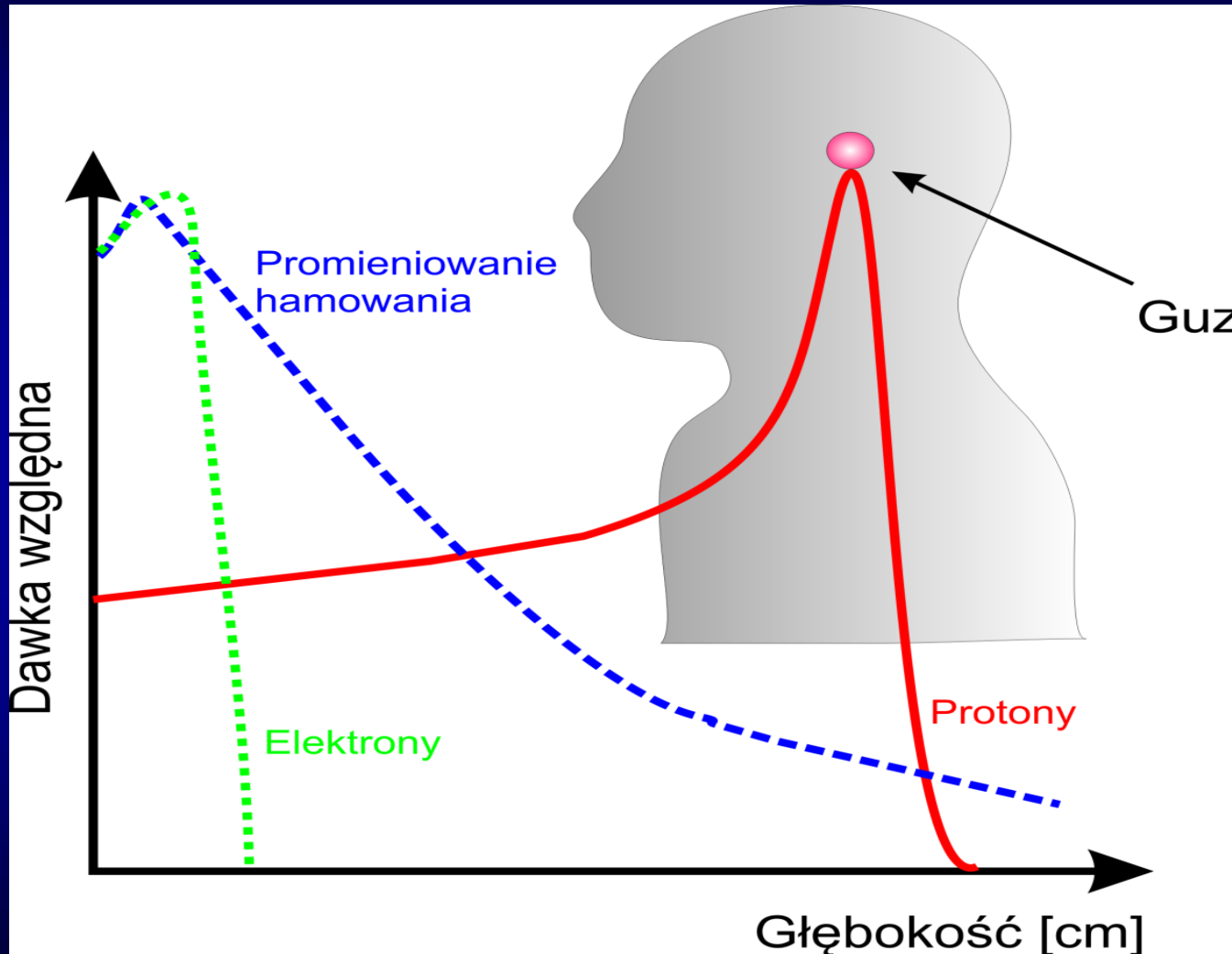
# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią



"**Krzywa Bragga**" - średnia gęstość jonizacji w funkcji drogi cząstki w ośrodku materialnym (absorbencie). Największa gęstość jonizacji jest w końcowej części toru → **terapia hadronowa**

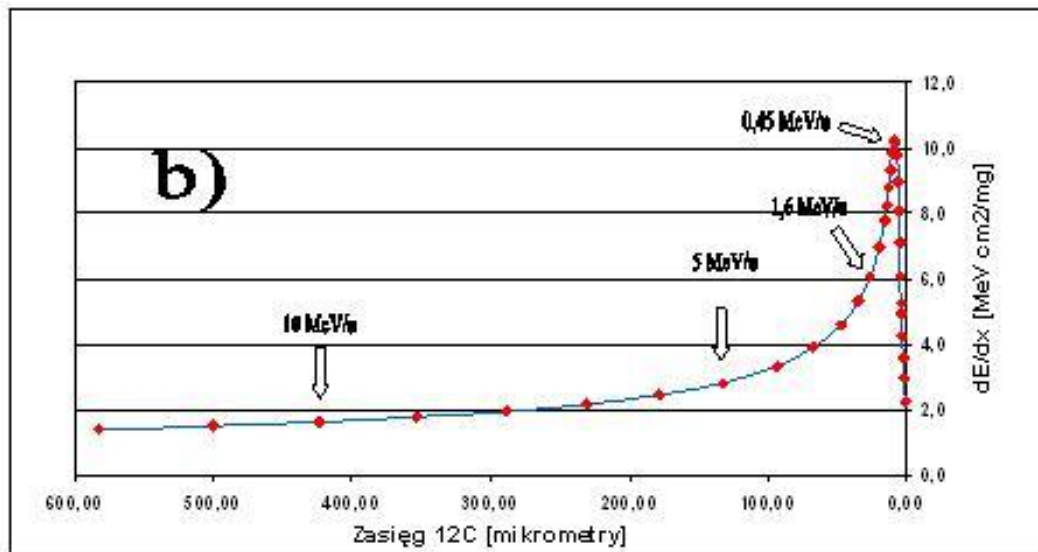
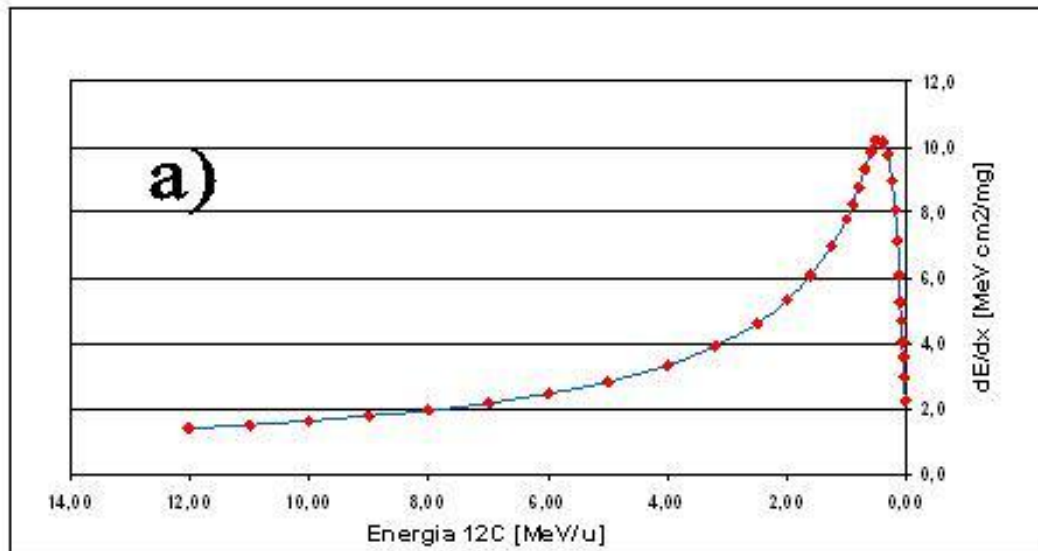


# Terapia hadronowa





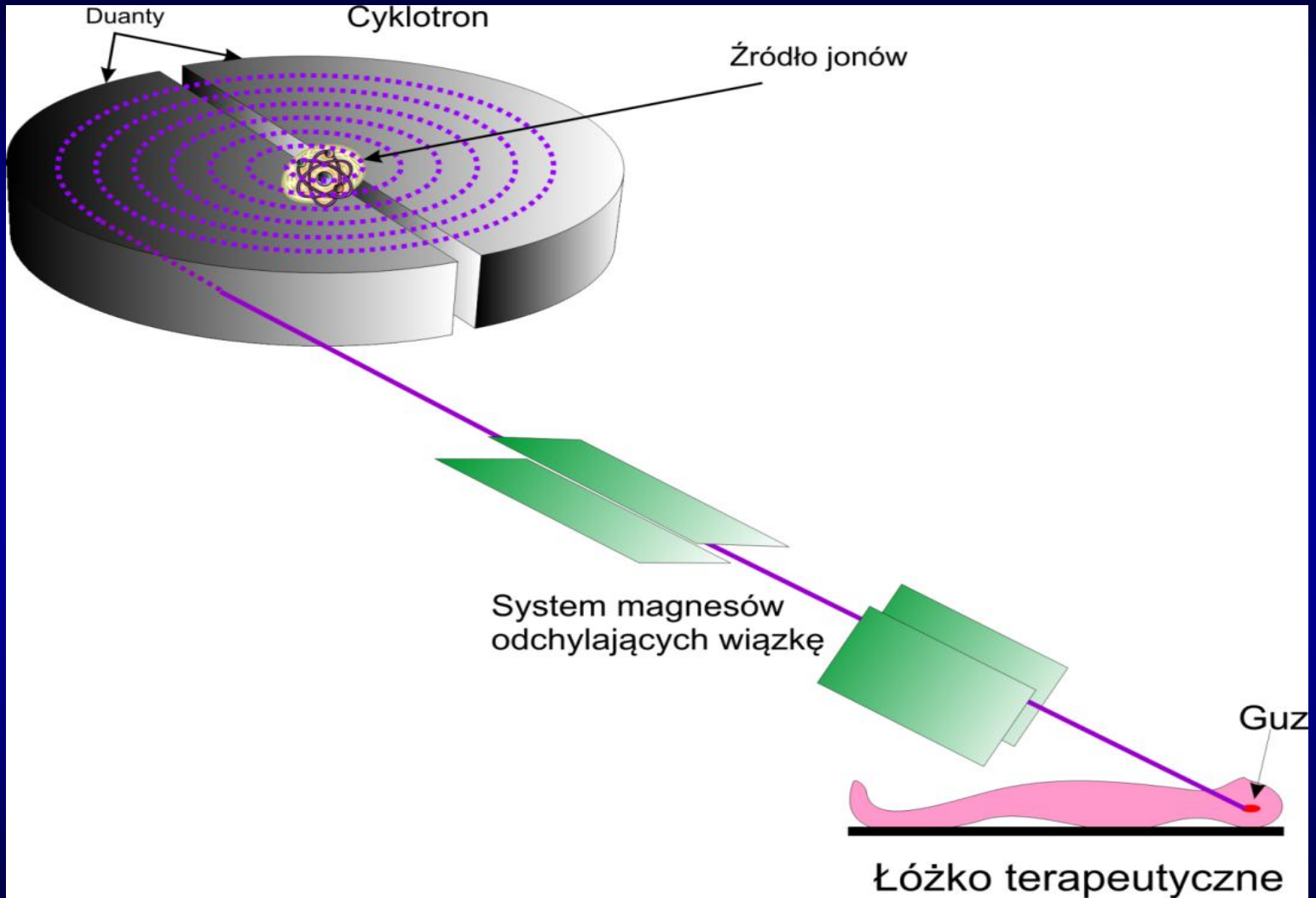
# Terapia hadronowa C12



$dE/dx$  dla jonów węgla w wodzie w funkcji energii na nukleon (a) i w funkcji zasięgu z zaznaczeniem wybranych energii (b).

W/g Northcliffe and Schilling [4]

# Terapia hadronowa



# Terapia hadronowa C12

1

Cyklotron

przyśpiesza protony do  $2/3$  prędkości światła

4

Układ formujący wiązkę terapeutyczną

Dysza

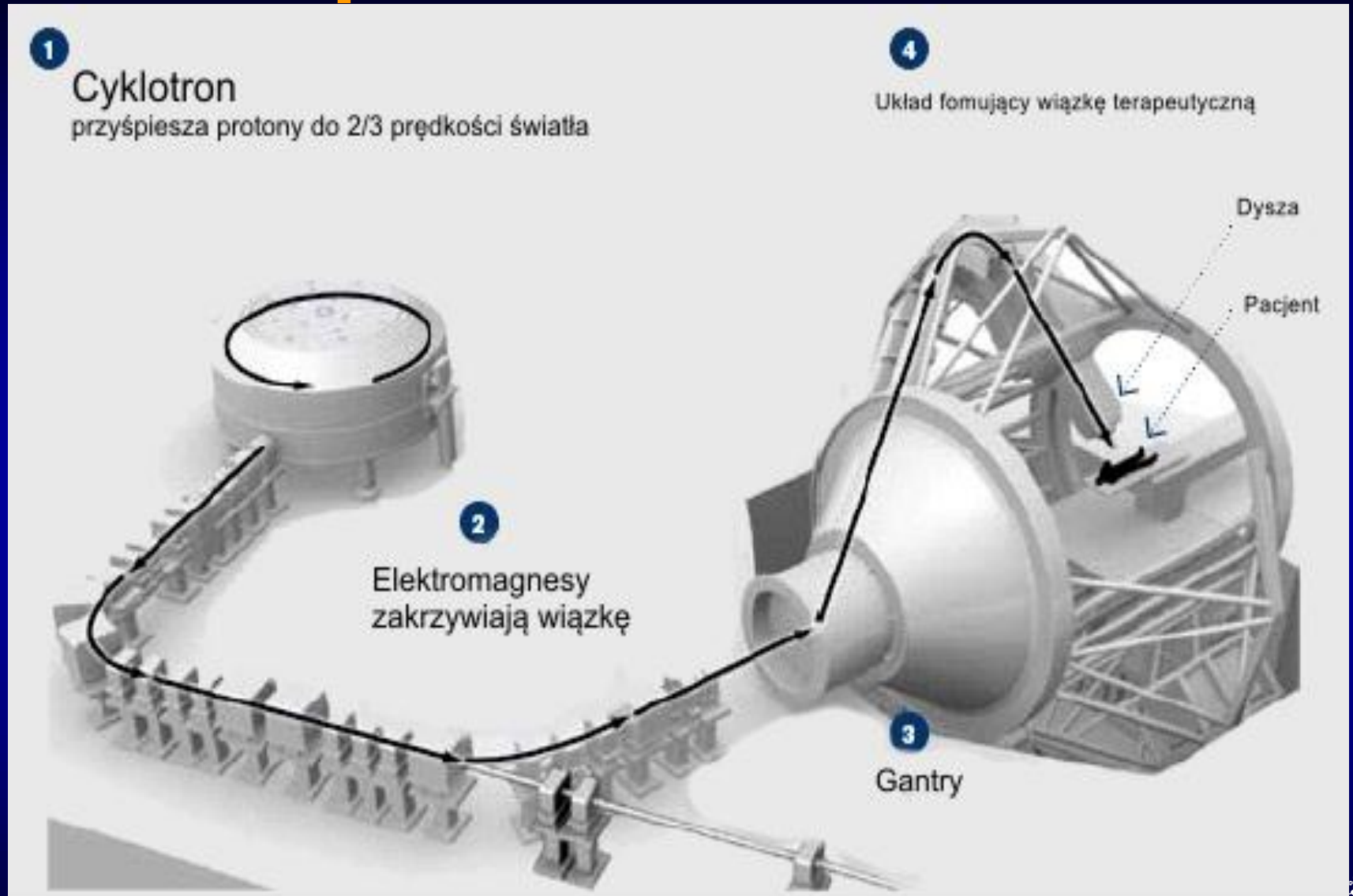
Pacjent

2

Elektromagnesy zakrzywiają wiązkę

3

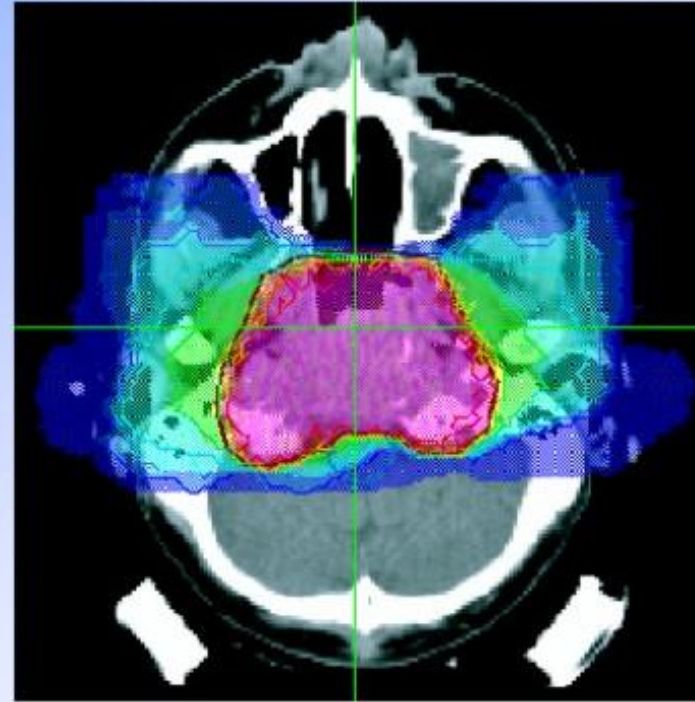
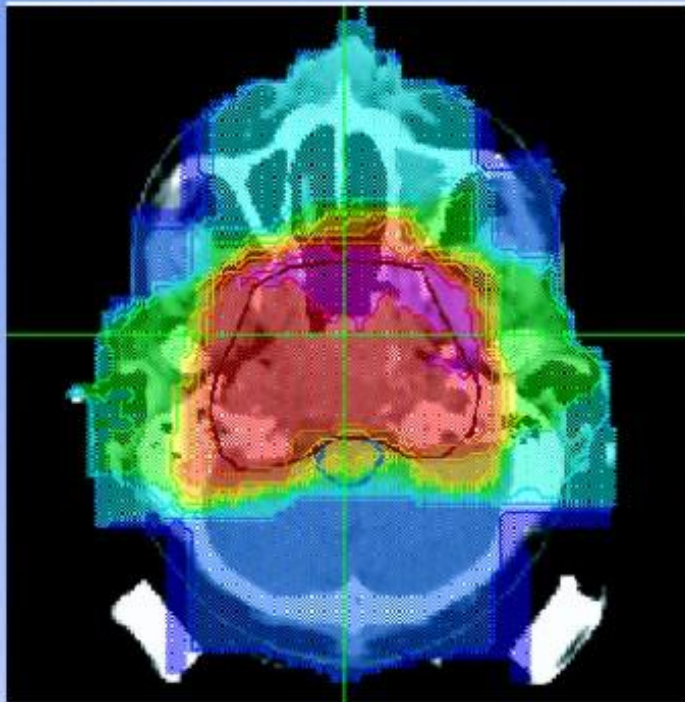
Gantry



# Terapia hadronowa C12 skuteczność i bezpieczeństwo

Porównanie planów naświetlań:  
konwencjonalne vs terapia ciężkojonowa

---



Seminarium  
Kielce, 2005



# Gantry ze stołem terapeutycznym w Centrum Cyklotronowym Bronowice



# Stanowisko dla radioterapii protonowej nowotworów oka w Centrum Cyklotronowym Bronowice



# **Koniec Seminarium 2**

**Następne seminarium:  
BUDOWA MATERII**

