

# Seminarium 5

## Oddziaływanie promieniowania z materią



# Rodzaje promieniowania

- **Elektromagnetyczne (EM)**
  - jonizujące ( $\gamma$ , X, UV)
  - nie-jonizujące (VIS, IR, mikrofale, radiowe).
- **Cząsteczkowe (korpuskularne)**
  - ciężkie cząstki naładowane (p, d,  $\alpha$ , ...)
  - neutrony
  - $\beta^+$  (pozytony),  $\beta^-$  (elektrony).



# Jonizacja

Oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z materią zależy od relacji pomiędzy energią kwantów i energiami wiązań elektronów w atomach. Promieniowanie korpuskularne również wywołuje jonizację.

Zakres EM	Energia [eV]
Radiowe	$< 10^{-6}$
Mikrofale	$\sim 4 \cdot 10^{-5}$
IR	$10^{-3} - 10^{-1}$
VIS	$\sim 2.5$
UV	$\sim 40$
X, $\gamma$	$> 1000$

Atom	Energia [eV]
Li	5.3
Be	9.1
B	8.1
C	11.0
N	14.1
O	13.2
F	16.9
Ne	20.9

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

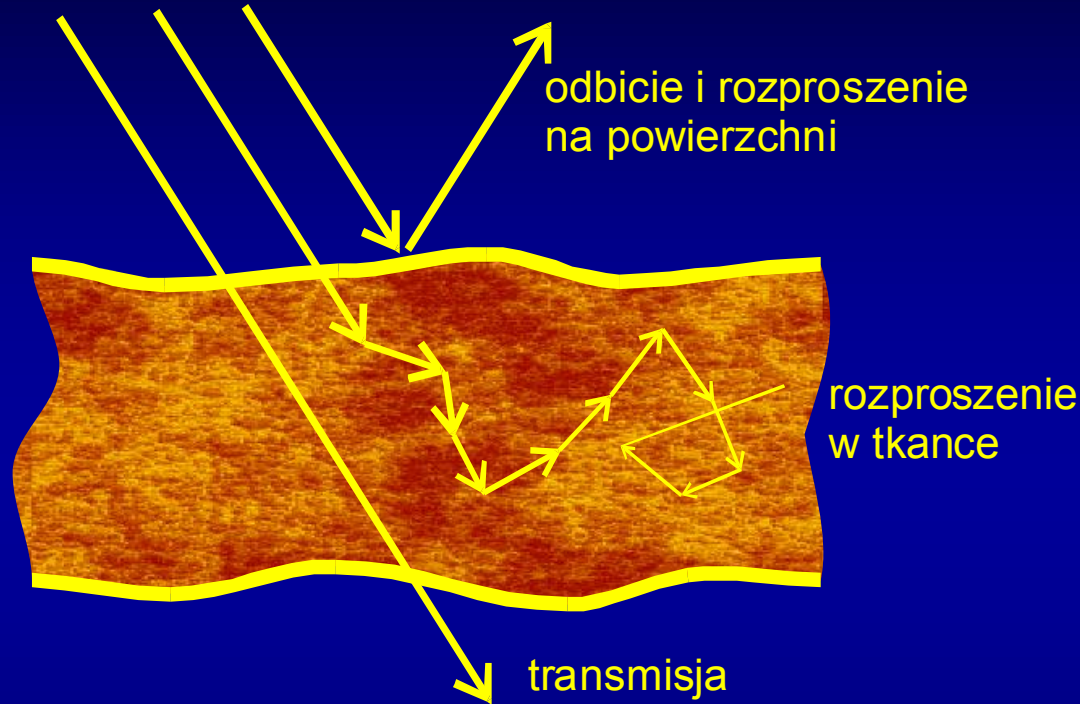


# Oddziaływanie promieniowania z układami biologicznymi

- Poziom fizyczny
- Poziom chemiczny
- Poziom biologiczny



# Promieniowanie EM



Udział poszczególnych procesów zależy od energii promieniowania i materiału absorbentu (układy biologiczne → lekkie pierwiastki  $Z_{\max} = 20$ ).

# Promieniowanie EM

- **Promieniowanie  $\gamma$  i X** → **promieniowanie jonizujące**  
→ zanedbujemy efekty powierzchniowe  
→ oddziaływanie głównie z elektronami na powłokach atomowych.
- **Promieniowanie UV / VIS / IR** → należy uwzględnić  
→ efekty powierzchniowe oraz oddziaływanie na poziomie molekularnym.
- **Mikrofale, fale radiowe** → uwzględniamy  
→ efekty powierzchniowe i kształt obiektów.

**Uwaga:**

W oddziaływaniach istotnych jest wiele procesów  
→ ograniczamy się do najbardziej istotnych.



# Poziom fizyczny

Opis na poziomie fizycznym  
sprowadza się do opisu  
przekazu energii do ośrodka  
penetrowanego przez  
promieniowanie.



# Mechanizmy oddziaływania promieniowania X z materią.





# Promieniowanie X o energiach mniejszych niż 200 keV (zjawiska podstawowe)

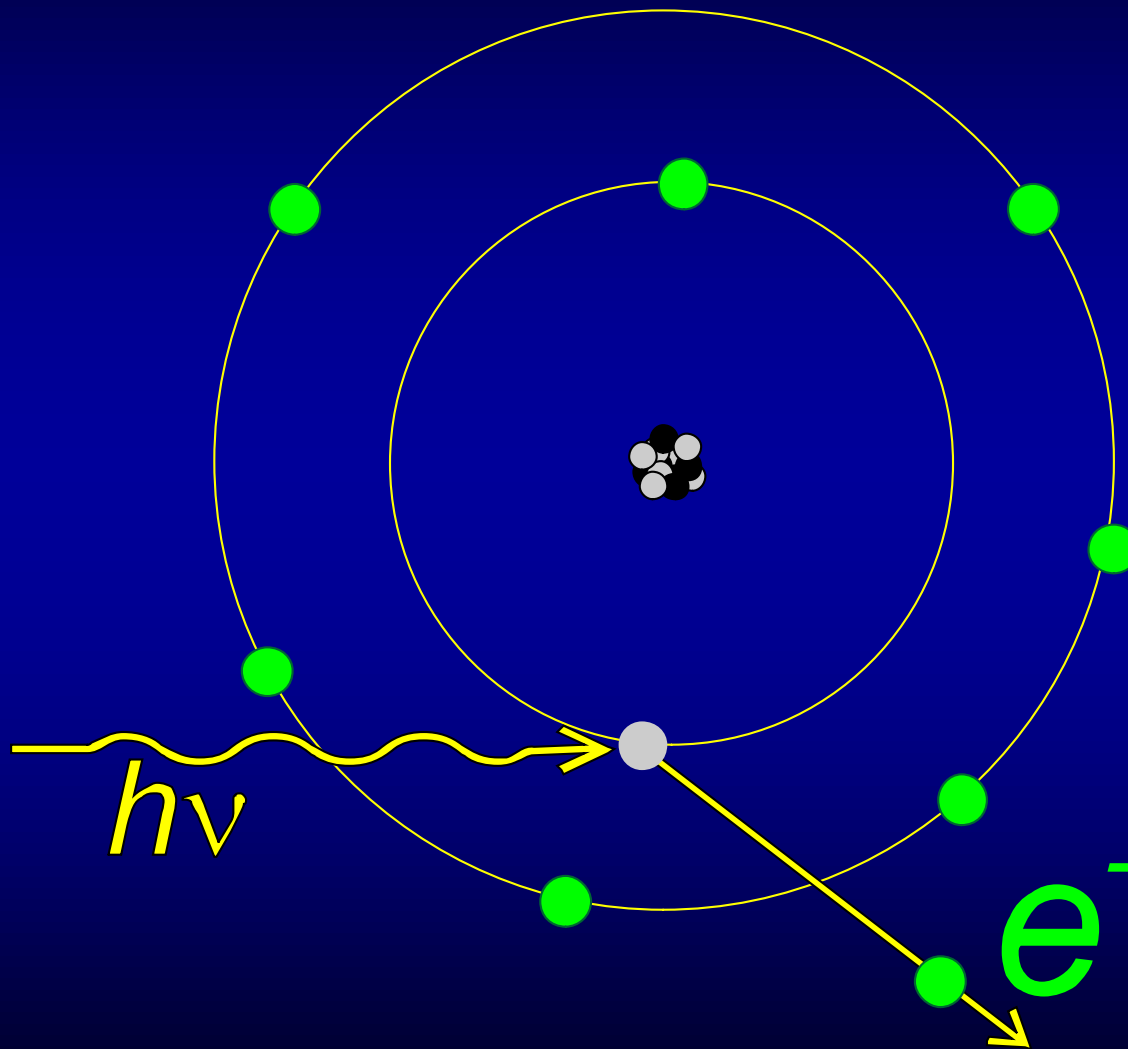
- Efekt fotoelektryczny.
- Rozpraszanie niekoherentne (ze zmianą  $\lambda$ ) = efekt Comptona.
- Rozpraszanie koherentne (bez zmiany  $\lambda$ ) = efekt Rayleigha.

Względne prawdopodobieństwo poszczególnych efektów zależy od energii promieniowania i składu pierwiastkowego ośrodka → liczbowo opisuje się je przez tzw. **przekroje czynne** na dany proces:

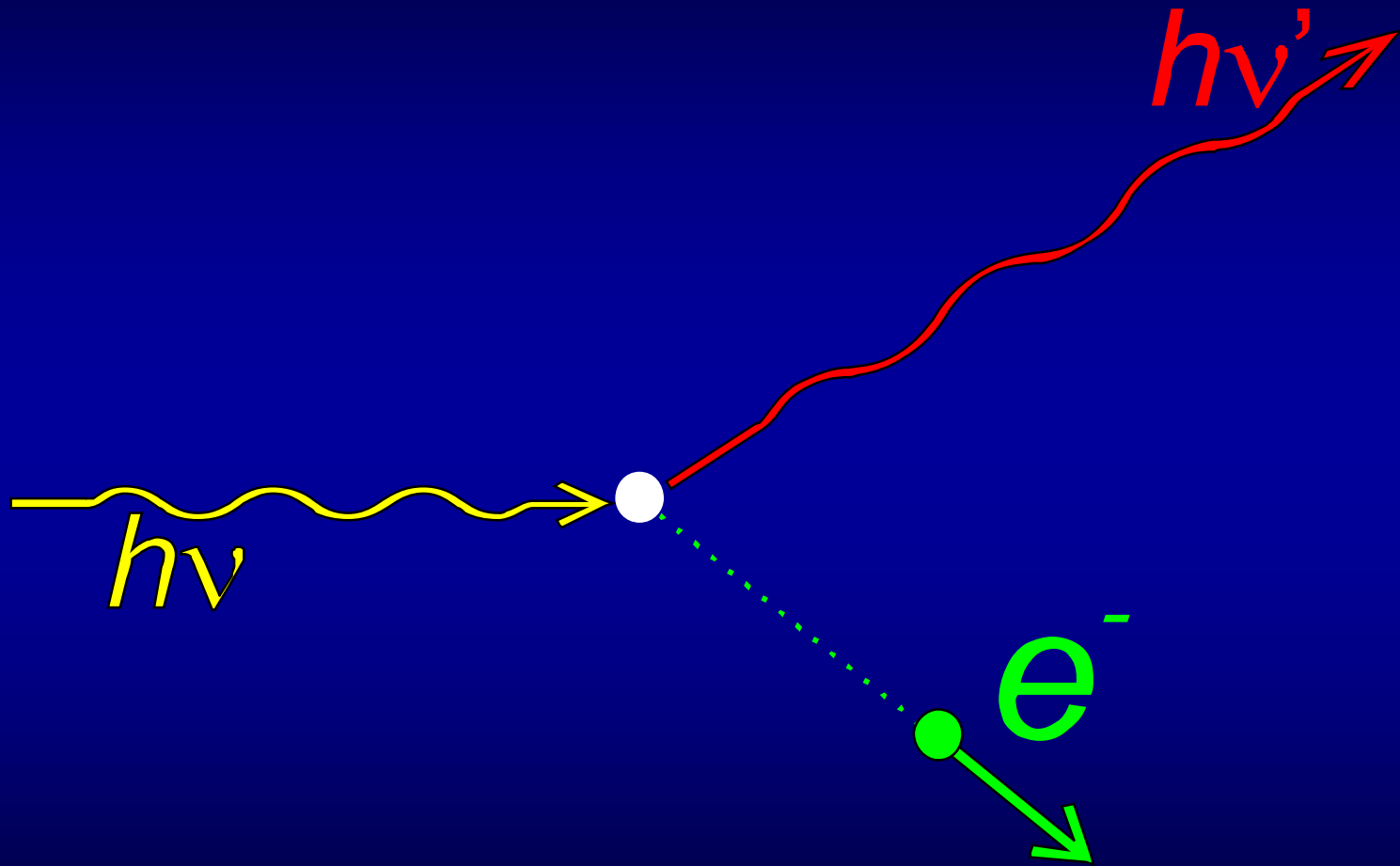
$$\sigma = \sigma_F + \sigma_K + \sigma_N$$



# Efekt fotoelektryczny



# Rozpraszanie comptonowskie



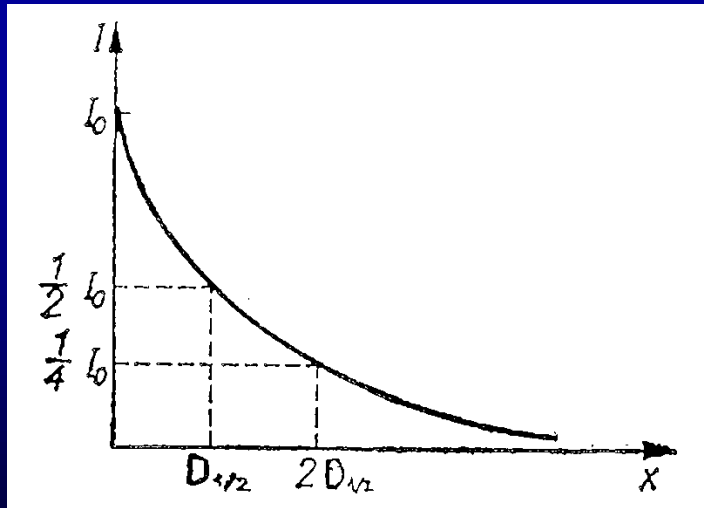
# Prawo osłabienia promieniowania elektromagnetycznego.



# Prawo osłabienia

## Założenia:

- $N$  centrów (atomów, cząsteczek) w  $1 \text{ cm}^3$
- Prawdopodobieństwo oddziaływania pojedynczego centrum  $\rightarrow \sigma$
- $\mu \rightarrow$  liniowy współczynnik osłabienia  $\rightarrow \mu = \sigma * N$  [1/cm]
- Natężenie wiązki padającej  $\rightarrow I_0$
- Chcemy wyznaczyć natężenie wiązki przechodzącej  $\rightarrow I(x)$ , gdzie  $x$  oznacza grubość absorbentu.



$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$D_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$



# Prawo osłabienia

$\mu \rightarrow$  zależy od  $Z$ ,  $\lambda$  i stanu skupienia ( $d$ )

$\mu_m = \mu/d$  – masowy współczynnik osłabienia [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{d}(xd)}$$

$xd$  – gęstość powierzchniowa [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]

$$\mu_m = \frac{\mu}{d} \sim Z^4 \lambda^3$$

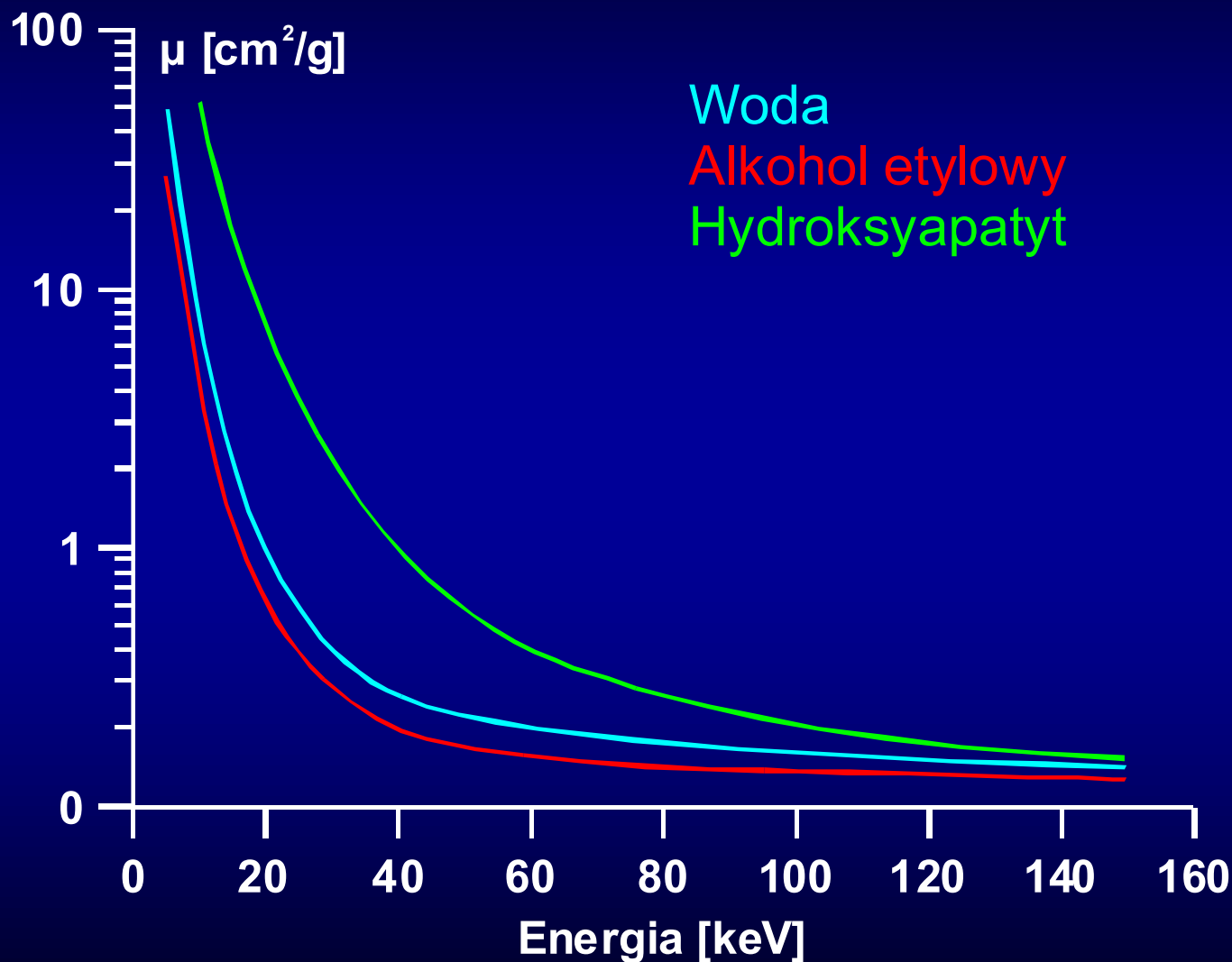


# Efektywna liczba atomowa

Substancja	$Z_{\text{eff}}$	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
Beryl	4,00	1,85
Tłuszcz	5,92	0,91
Woda	7,42	1,00
Mięsień	7,46	1,08
Powietrze	7,64	0,00129
Aluminium	13,0	2,7
Kość (trzon)	14,0	1,87
Wapń	20,0	1,55
Molibden	42,0	10,22
Jod	53,0	4,94
Wolfram	74,0	19,3
Ołów	82,0	11,34



# Masowe współczynniki osłabienia





# Współczynnik absorpcji

## Uwaga:

We wzorach występują współczynniki osłabienia, określające zmianę natężenia wiązki.

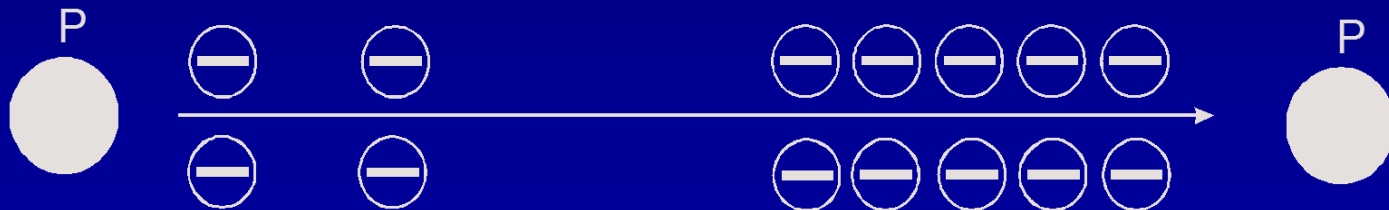
W zagadnieniach ochrony radiologicznej istotna jest pochłonięta energia, a nie zmiana natężenia wiązki. Z tego powodu korzysta się z tzw. współczynnika absorpcji, określającego prawdopodobieństwo pochłonięcia kwantu energii w absorbencie.

W zakresie energii promieniowania X stosowanych w radiologii zachodzi przybliżona równość współczynnika osłabienia i współczynnika absorpcji.



# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią

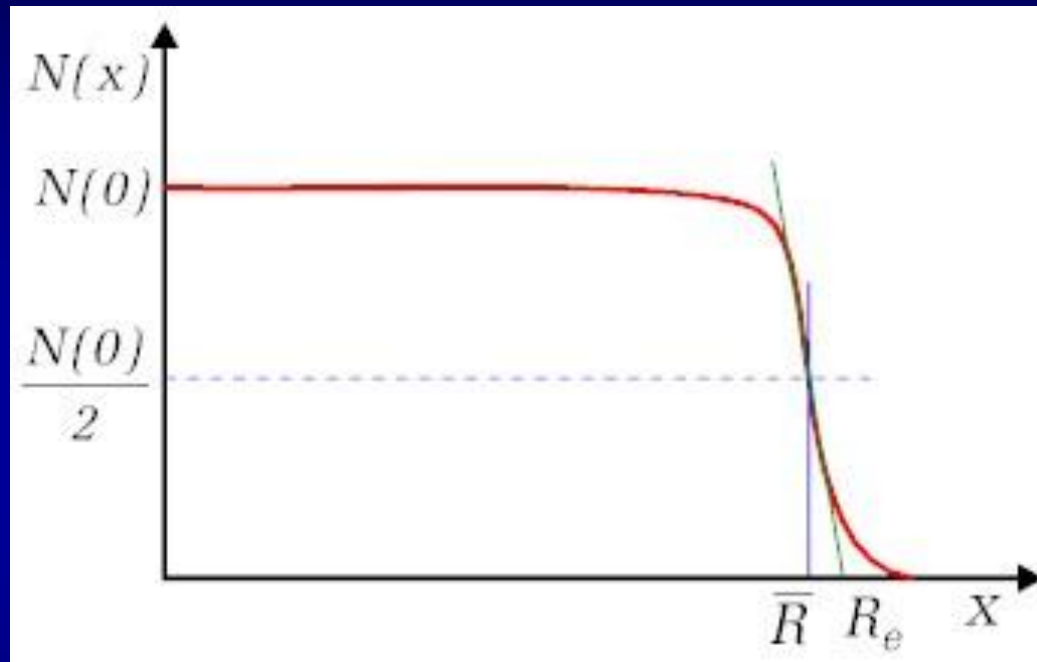
→ oddziaływanie z elektronami ośrodka



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



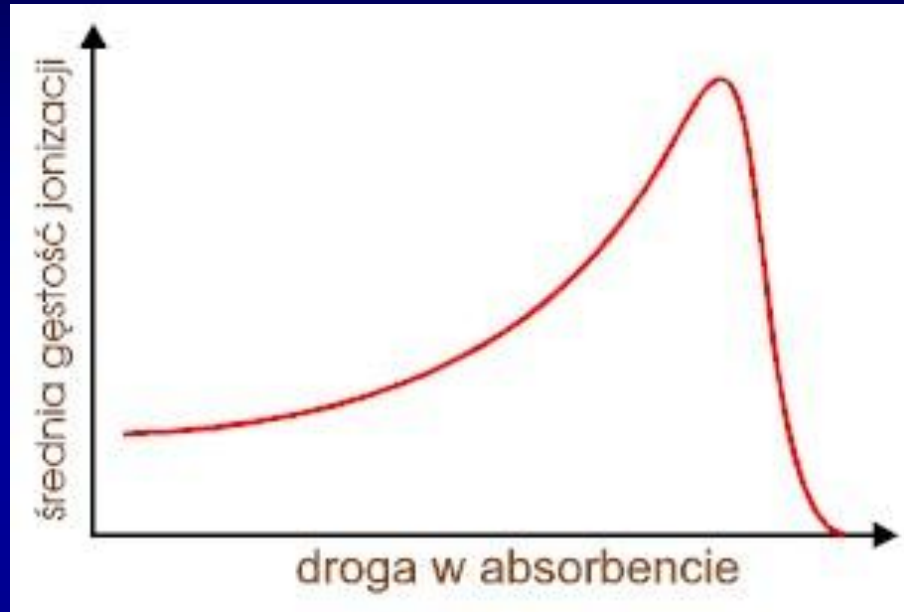
# Oddziaływanie ciężkich cząstek naładowanych z materią



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

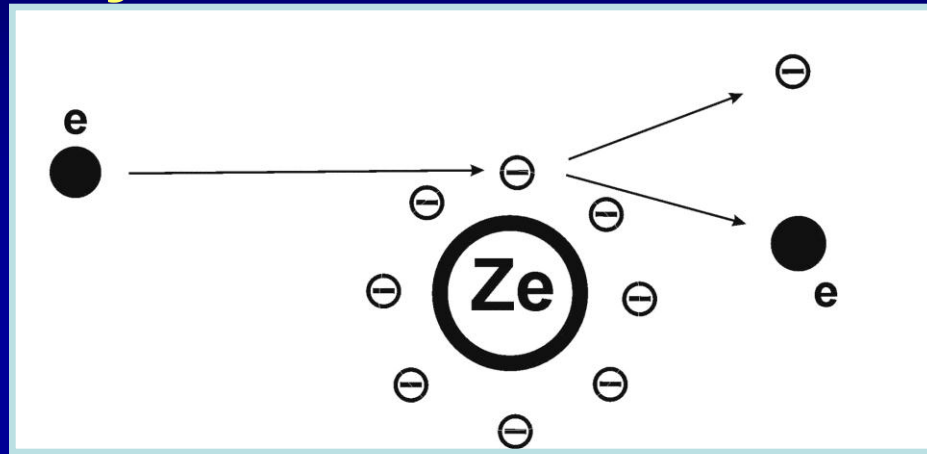


"**Krzywa Bragga**"- średnia gęstość jonizacji w funkcji drogi cząstki w ośrodku materialnym (absorbencie). Największa gęstość jonizacji jest w końcowej części toru → terapia hadronowa.



# Oddziaływanie elektronów (cząstek $\beta^-$ ) z materią

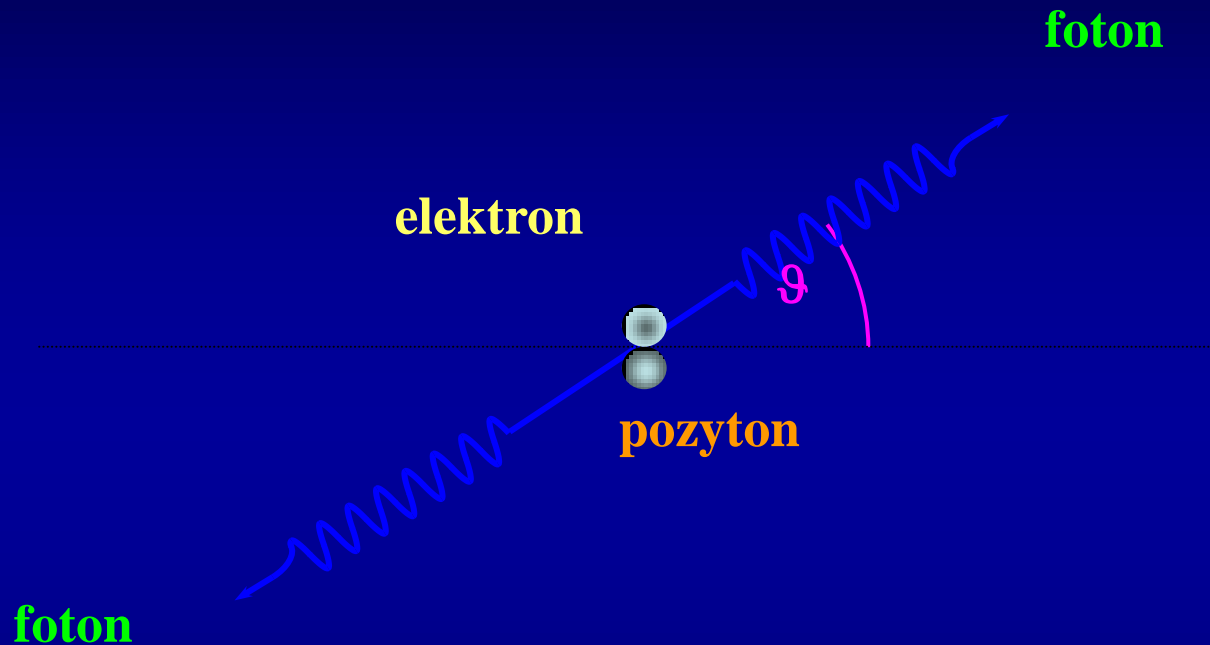
→ oddziaływanie z elektronami ośrodka.



- możliwy jest przekaz dużej części energii padającego elektronu.
- energia jest przekazywana do znacznie większej objętości absorbenta, niż w przypadku protonów.
- w oparciu o wzory empiryczne wyznaczana jest warstwa pochłaniająca 99% elektronów.



# Oddziaływanie pozytonu ( $\beta^+$ ) z elektronem ( $\beta^-$ ) = anihilacja



Znikają elektron i pozyton, pojawiają się 2 koincydencyjne fotony ( $E_\gamma \cong 0.511$  MeV), rozbiegające się pod kątem  $180^\circ$ .

Zastosowanie w medycynie: PET.



# Brachyterapia i zastosowania.



# Brachyterapia

Brachyterapia- jedna z technik leczenia w radioterapii, polegająca na bezpośrednim napromienianiu zmian chorobowych przez umieszczenie źródła/eł promieniowania  $\gamma$  lub  $\beta$  w miejscu guza lub w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Podstawowym zastosowaniem brachyterapii jest leczenie zmian nowotworowych. Moc dawki promieniowania źródła jest największa w guzie i maleje poza jego objętością; ( $1/r^2$ ).

## Odmiany brachyterapii:

- brachyterapia wewnątrztkankowa: umieszczenie źródła promieniowania w guzie.
- brachyterapia wewnątrzjamowa: umieszczenie źródła promieniowania w bezpośrednim sąsiedztwie guza poprzez naturalne otwory w ciele pacjenta (jama ustna, drogi rodne, itd.).
- brachyterapia powierzchniowa: umieszczenie źródła promieniotwórczego na skórze- leczenie zmian powierzchniowych.
- brachyterapia śródnaczyniowa: źródła promieniotwórcze umieszczane są w naczyniach krwionośnych.
- brachyterapia śródoperacyjna.





# Brachyterapia

## Podział brachyterapii ze względu na czas i intensywność napromieniowywania:

- HDR (ang. High Dose Rate)- krótki czas napromieniowania (zazwyczaj kilka minut); używane źródło o bardzo wysokiej aktywności promieniowania.
- LDR (ang. Low Dose Rate )- zabieg długotrwały (najczęściej trwa około doby); zastosowanie źródeł o znacznie niższej aktywności promieniotwórczej (nowotwory układu rozrodczego).
- PDR (ang. Pulse Dose Rate)- aplikator umieszczony w ciele pacjenta przez długi czas; źródło promieniotwórcze jest na zmianę wpuszczane i wyciągane z ciała pacjenta. Dawka stosowana w PDR ma wartość pośrednią pomiędzy używanymi w HDR i LDR.
- Ultra LDR- nazwa odnosi się do terapii izotopami o niskiej aktywności promieniotwórczej, umieszczanymi na stałe w ciele pacjenta.



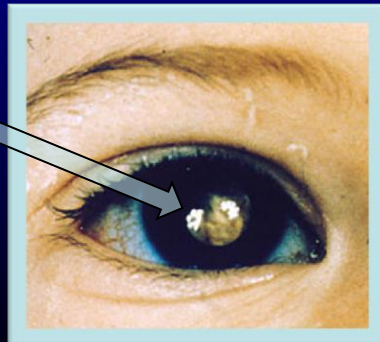
# Brachyterapia

## Radionuklidy stosowane w teleradioterapii i brachyterapii.

Pierwiastek		Czas połowicznego rozpadu	Promieniowanie	
nazwa	izotop		wykorzystywane w terapii	Energia [keV]
Cez	Cs-137	30 lat	fotony	$\gamma$ : 662
Kobalt	Co-60	5,26 lat	fotony	$\gamma$ : 1173 $\gamma$ : 1332
Złoto	Au-198	2,7 dnia	fotony	$\gamma$ : 412
Jod	I-125	59,6 dnia	fotony	X: 27 – 32
Iryd	Ir-192	74 dni	fotony	$\gamma$ : 316 468 308 296
Rad	Ra-226	ok. 1600 lat	fotony	$\gamma$ : 800 (śr.)
Stront / itr	Sr-90, Y-90	28,1 lat	elektrony	$\beta$ : 546 maks. 195,8 (śr.)
Kaliforn	Cf-252	2,65 lat	neutrony	n: 2350 (śr.) 3,8 neutr./rozpad
Ruten	Ru-106	369 dni	elektrony	$\beta$ : 39,4 maks.

(„Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii” pod red. A. Hrynkiewiczza, E. Rokity, PWN, Warszawa 2000)

**Siatkówczak (retinoblastoma)-wewnątrzgałkowy nowotwór złośliwy oka.**



„Igły” stosowane w brachyterapii raka gruczołu krokowego oraz scyntygrafia kości u pacjenta z wieloma przerzutami raka prostaty do kości.



# Brachyterapia

Melanoma; Au-198.



Przed terapią

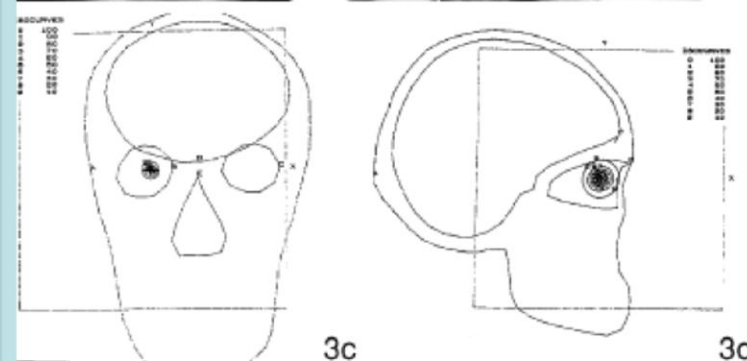
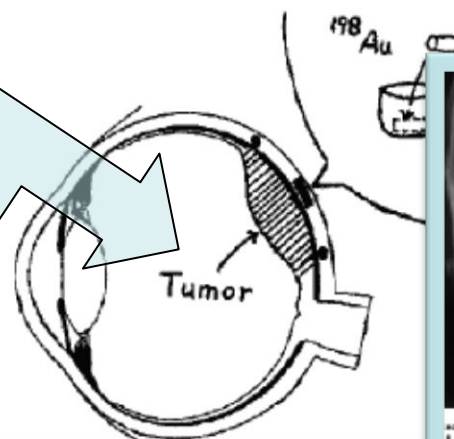


Fig. 3. Skull X-ray after the second brachytherapy (a, b), and the dose histogram (c, d).



Po zakończeniu terapii

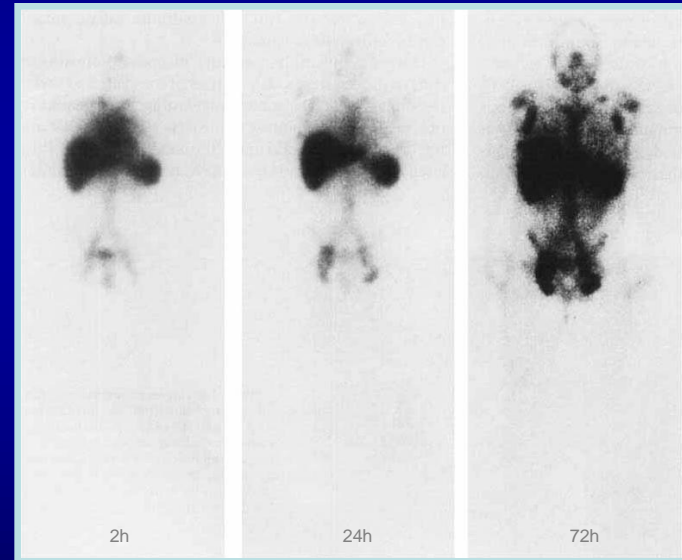
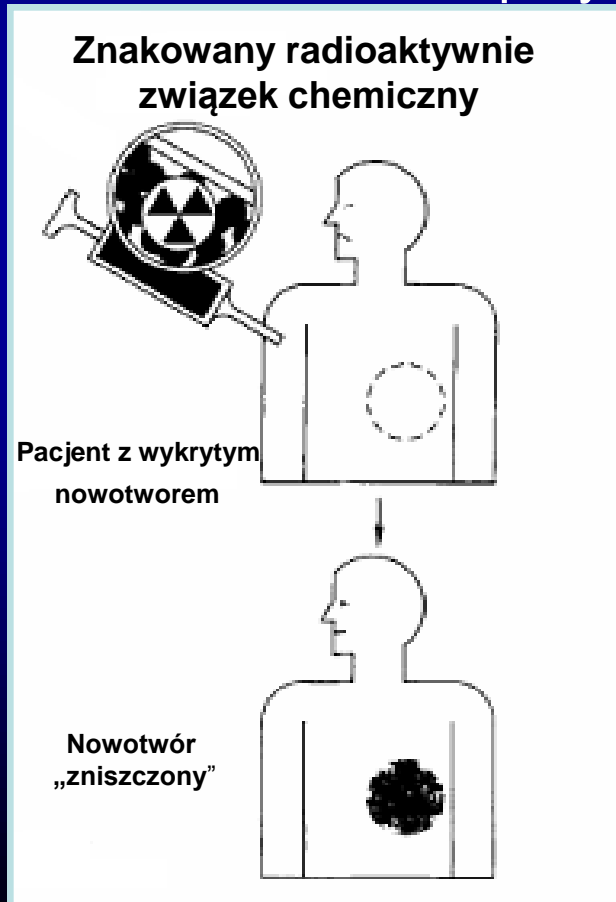
Fig. 4. MR imaging one year after therapy shows that the tumor has nearly disappeared.

W trakcie terapii



# Radioimmunoterapia.

Immunoradioterapia – metoda diagnostyczno-terapeutyczna wykorzystująca użycie radioaktywnie oznaczonych nośników, których przeciwciała rozpoznają komórki rakowe by się do nich przyczepić i zniszczyć je.



Obraz ciała pacjenta z rozległym chłoniakiem z limfocytów T pod dożylnym podaniem 5 mCi  $^{111}\text{In}$  T101 („magic bullet”).



**Dawka ekspozycyjna i pochłonięta.  
Moc dawki. Równoważnik dawki.  
Podać jednostki stosowane w  
ochronie radiologicznej.**



# Dawka ekspozycyjna (E)

## Absorpcja w powietrzu

$$[E] = 1 \text{ C/kg}$$

$$[E] = 1 \text{ R (rentgen)}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

$$1 \text{ R} = 258 \text{ } \mu\text{C/kg} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$



# Dawka pochłonięta (D)

## Absorpcja w dowolnej substancji.

D można mierzyć w fantomach i wyliczać poprzez pomiar dawki ekspozycyjnej i znaną energię jonizacji atomów wchodzących w skład tkanki.

→ radiometry, dozymetry

$$[D] = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy (grej)}$$

$$[D] = 100 \text{ erg/g} = 1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ R} = 8.69 \text{ mGy}$$



# Moc dawki (P)

Dawka pochłonięta w jednostce czasu.

$$P=D/t$$

[P] = 1 Gy/h      [P] = 1 Gy/min      [P] = 1 Gy/rok





# Równoważnik dawki (H)

E oraz D opisują jedynie pochłoniętą energię, nie mówiąc o **skutkach biologicznych**, które zależą od:

- (1) rodzaju promieniowania (różne mechanizmy oddziaływania),
- (2) naświetlonego organu

H uwzględnia rodzaj promieniowania:

$$H = D \cdot W_R$$

$W_R$  - współczynnik wagowy promieniowania

$$[H] = 1 \text{ Sv (siwert)} = 1 \text{ J/kg}$$



# Wagowe współczynniki promieniowania

Rodzaj promieniowania	$W_R$
Fotony	1
Elektrony	1
Protony > 2 MeV	5
Ciężkie jony	20
Neutrony < 10 keV	5
Neutrony (100-2000 keV)	20
Neutrony > 20 MeV	5



# Efektywny równoważnik dawki ( $H_E$ )

$H_E$  uwzględnia rodzaj promieniowania i rodzaj naświetlanego narządu:

$$H_E = \sum_T w_T H_T$$

$w_T$  – współczynnik wagowy tkanek

$$[H_E] = 1 \text{ Sv}$$

**Średnia roczna  $H_E$  w Polsce  $\rightarrow$  3,3 mSv**  
(od promieniowania naturalnego)



# Efektywny równoważnik dawki ( $H_E$ )

Tkanka lub narząd	$W_T$
Gruczoły płciowe	0.20
Szypik kostny	0.12
Jelito grube	0.12
Płuca	0.12
Żołądek	0.12
Pęcherz moczowy	0.05
Gruczoły sutkowe	0.05

Tkanka lub narząd	$W_T$
Wątroba	0.05
Przełyk	0.05
Tarczycza	0.05
Skóra	0.01
Kości (powierzchnia)	0.01
Pozostałe	0.05
<b>Razem:</b>	<b>1.00</b>



# Dawka progowa

**Minimalna dawka wywołująca efekt.**

<b>Organ / tkanka</b>	<b>Efekt</b>	<b>H [Sv]</b>
<b>Jądra</b>	<b>Czasowa niepłodność</b>	<b>0.15</b>
	<b>Trwała niepłodność</b>	<b>3.5 ÷ 6.0</b>
<b>Soczewka</b>	<b>Zmętnienie</b>	<b>0.5 ÷ 2.0</b>
	<b>Katarakta</b>	<b>5.0</b>
<b>Szypik kostny</b>	<b>Odwracalne zahamowanie funkcji krwiotwórczych</b>	<b>0.5</b>



# Dawka letalna (śmiertelna)

$LD_{50}^{30}$  ( $H_E$ ) – dawka po dostarczeniu której następuje śmierć połowy populacji w ciągu 30 dni.

Organizm	$LD_{50}^{30}$ [Sv]
Wirus	5000
Wąż	800
Nietoperz	150
Szczur	8
Człowiek	2.5 ÷ 3
Pies	2.6



# Limity dawek

	Zawodowy	Ogólny
$H_E$ roczna ( $\leftrightarrow$ 5 lat) [mSv]	50 (20)	1
Rogówka (H) [mSv]	150	15
Skóra (H) [mSv]	500	50
Ręce, stopy (H) [mSv]	500	50



# Oddziaływanie światła z materią. Zależność współczynnika pochłaniania od długości fali.





# Promieniowanie UV / VIS / IR

- 1) Efekty powierzchniowe.
- 2) Możliwe efekty wzbudzenia, jonizacji i dysocjacji dla bardzo wielu cząsteczek.
- 3) Rozpraszanie ramanowskie i reyleighowskie.

Wykazaliśmy, że w oddziaływaniu promieniowania X i  $\gamma$  z materią biorą udział elektrony atomowe. O oddziaływaniu decyduje liczba elektronów (liczba atomowa).

W oddziaływaniu promieniowania UV / VIS / IR biorą udział cząsteczki. Występuje wiele progów absorpcji. Proces zależy silnie od składu absorbentu. Ustalenie zależności pomiędzy oddziaływaniem a liczbą atomową nie jest możliwe.



# Promieniowanie E-M nie-jonizujące

<u>Zakres E-M</u>	<u>Częstotliwość [Hz]</u>	<u>Długość [m]</u>	<u>Energia [eV]</u>
LF(ELF)	$<10^3$	$>10^5$	$<10^{-9}$
Radiowe, TV	$\sim 10^8$	$>1$	$\sim 10^{-6}$
Mikrofale, Radar	$10^{10}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$\sim 4 \cdot 10^{-5}$
IR	$10^{12} \div 10^{14}$	$10^{-3} \div 10^{-6}$	$\sim (10^{-3} \div 10^{-1})$



# Prawo Lamberta - Beera

$$I(t) = I(0)e^{-\varepsilon ct}$$

$c$  – stężenie

$\varepsilon$  – molowy współczynnik absorpcji [1/cm/mol]

$t$  – grubość absorbentu.

Prawo Lamberta - Beera wykorzystuje się do wyznaczania stężenia roztworów w spektrometrach **UV / VIS**.



# Absorpcja promieniowania w tkance

$$I(t) = I(0)e^{-2\alpha t}$$

**$I$  – strumień energii (natężenie promieniowania)**

**$t$  – grubość tkanki**

**$\alpha$  – współczynnik absorpcji.**

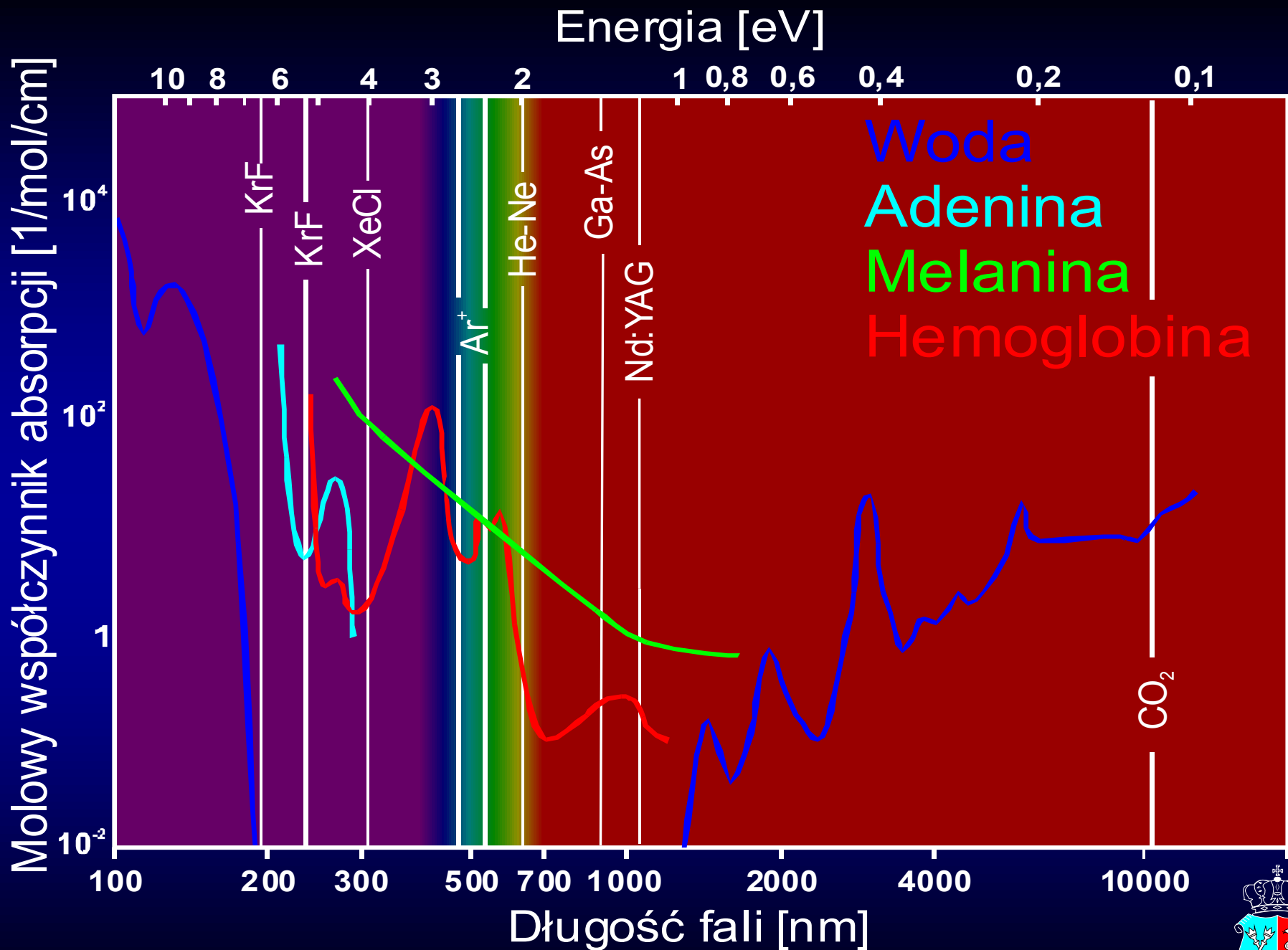


# Głębokość penetracji

GP – grubość tkanki równa  $1/\alpha$

$$\frac{I(GP)}{I(0)} = e^{-2} = 0.135$$





# Promieniowanie UV

UV-A → (315 ÷ 400) nm

UV-B → (280 ÷ 315) nm

UV-C → (100 ÷ 280) nm

Promieniowanie słoneczne 900 W/m<sup>2</sup> na  
poziomie morza → VIS + UV-A + UV-B

## Wpływ UV

- 1) Zmiany skórne → nowotwory skóry
- 2) Oczy → katarakta.



# Terapia świetlna.

**Lampa kwarcowa**- rodzaj lampy wyładowczej, w której źródło promieniowania nadfioletowego powstaje poprzez wzbudzenie par rtęci bądź gazów szlachetnych pod wpływem pola elektrycznego. Lampa ta jest wykonywana ze szkła kwarcowego, które w niewielkim stopniu pochłania promieniowanie tej długości. Rodzaje lamp kwarcowych: bakteriobójcze, terapeutyczne.

**Lampy Sollux**- używane w zabiegach ciepło-leczniczych (termoterapia). Efekt ogrzania skóry- skutek promieniowania podczerwonego.

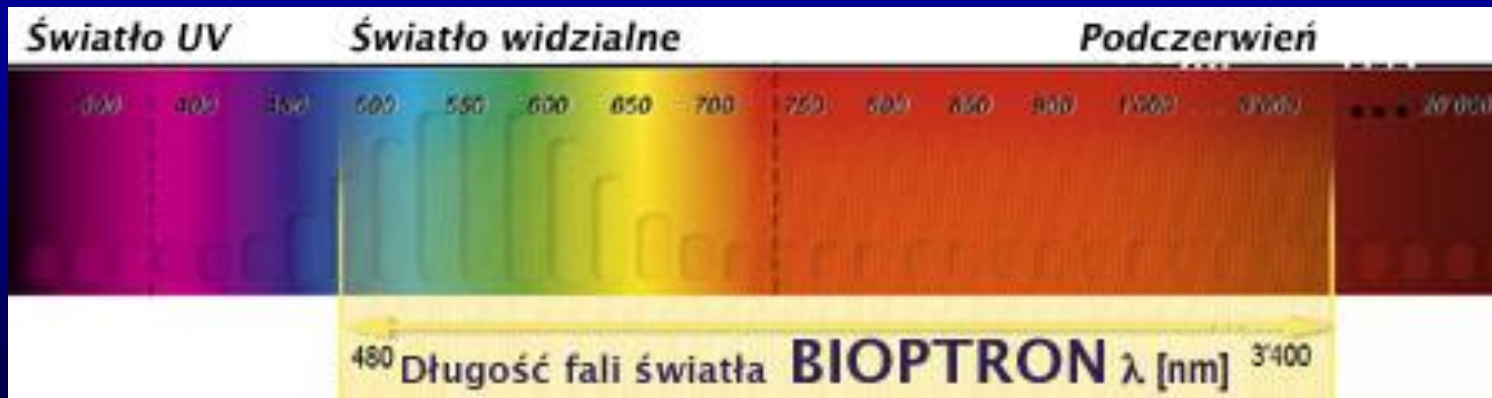
Przykłady stosowania zabiegów cieplnych: stany zapalne, stany po oparzeniach, przykurcze, blizny, zrosty, trądzik różowaty i młodzieńczy, półpasiec, odmrożenia, bóle mięśniowe, trudno gojące się rany. Zastosowanie: szpitale, przychodnie, gabinety fizykoterapeutyczne, kosmetyczne.





# Terapia świetlna

**System Terapii Światłem BIOPTRON-** urządzenie medyczne ze specjalnym mechanizmem optycznym, emitujące światło z zakresu widma elektromagnetycznego wytwarzanego w naturze przez Słońce, ale bez promieniowania UV. Terapia może wzmacniać procesy regeneracyjne organizmu i stymulować różne procesy biologiczne. Poprawia mikrocyrkulację, harmonizuje procesy przemiany materii, wzmacnia system obrony organizmu, sprzyja gojeniu się ran, obniża natężenie bólu.



# **Pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości w medycynie (diatermia krótko- i mikrofalowa).**



# Diatermia- ogrzewanie tkanek:

1) Diatermia krótkofalowa → objętościowa →  
 $\nu = 27,12 \text{ MHz}$ .

2) Diatermia mikrofalowa → powierzchniowa →  
 $\nu = 2,42 \text{ GHz}; \lambda = 12,4 \text{ cm}; \nu = 0,43 \text{ GHz}; \lambda = 69 \text{ cm}$

Ogrzewanie tkanek metodą diatermii może czasami powodować nadmierny wzrost temperatury. W celu uniknięcia tego efektu, stosuje się pola impulsowe (np. indukcyjna diatermia monoelektrodowa - **Terapuls**).



# Diatermia



**Terapia zatok przy pomocy diatermii krótkofalowej z zastosowaniem elektrod kondensatorowych.**

# Terapuls



Działa na potencjał błon komórkowych, zmieniając w efekcie właściwości fizykochemiczne tkanek, wywołując tym samym efekt przeciwzapalny, przeciwbólowy i przeciwobrzękowy.



# Działanie fal radiowych na organizmy żywe. Absorpcja promieniowania, SAR (Specific Absorption Rate).



# Dawka dla promieniowania E-M nie-jonizującego

Odpowiednikiem dawki dla promieniowania E-M nie-jonizującego jest **SAR** (*Specific Absorption Rate*).

**SAR** = wielkość pochłoniętej energii pola E-M przez jednostkę masy układu biologicznego w jednostce czasu.

$$\text{SAR} = c * \Delta T / \Delta t \quad [ \text{W/kg} ]$$

$c$  → ciepło właściwe [J/K\*kg]

$\Delta T$  → wzrost temperatury [K]

$\Delta t$  → czas obserwacji [s]



# Dawka dla promieniowania E-M nie-jonizującego

- Dla człowieka uśredniona bezpieczna wartość SAR wynosi **0,4 W/kg**.
- W miastach gęstość mocy ( P/S ) promieniowania E-M **> 10 mW/m<sup>2</sup>**.



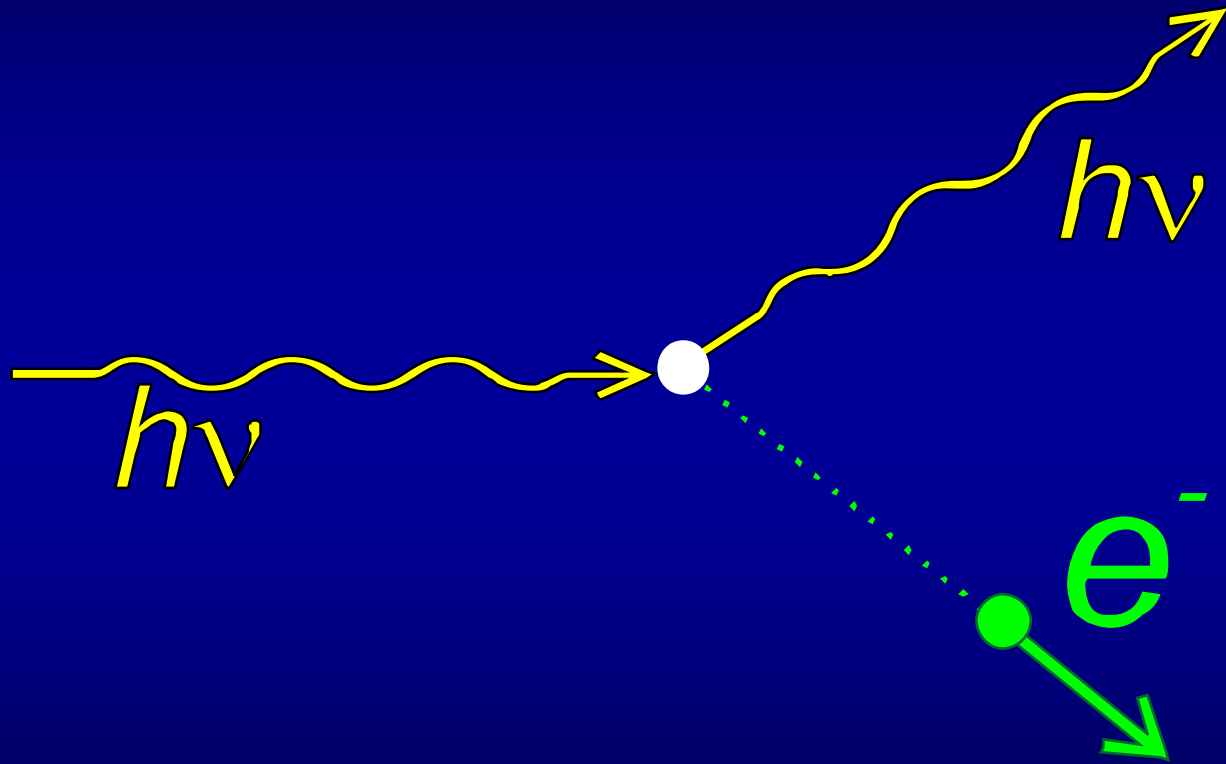


# Materiały uzupełniające

Na kolejnych przezroczach znajdują się materiały uzupełniające do tematu wykładu.



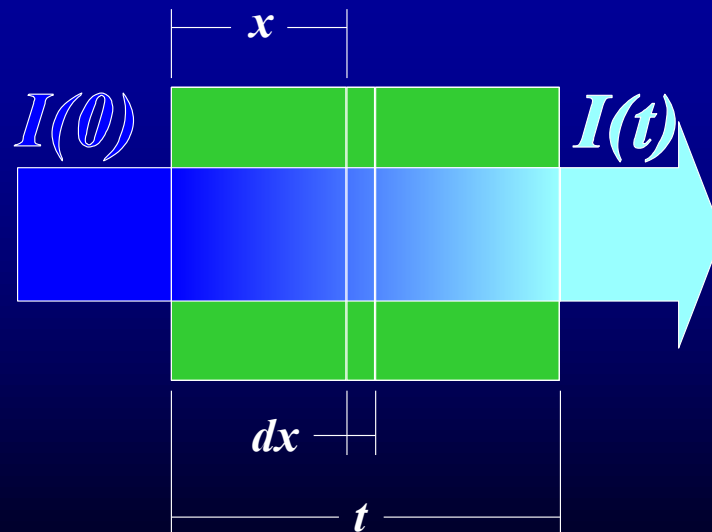
# Rozpraszanie reyleighowskie

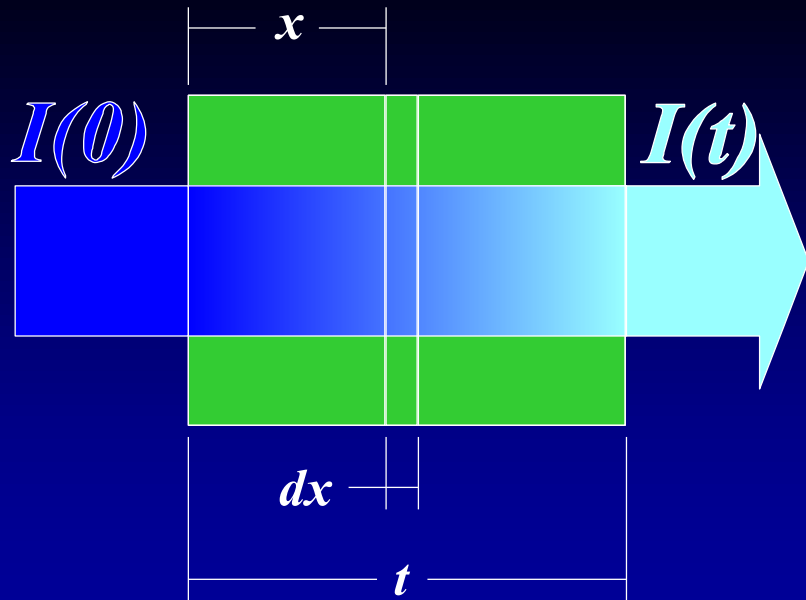


# Prawo osłabienia

Założenia:

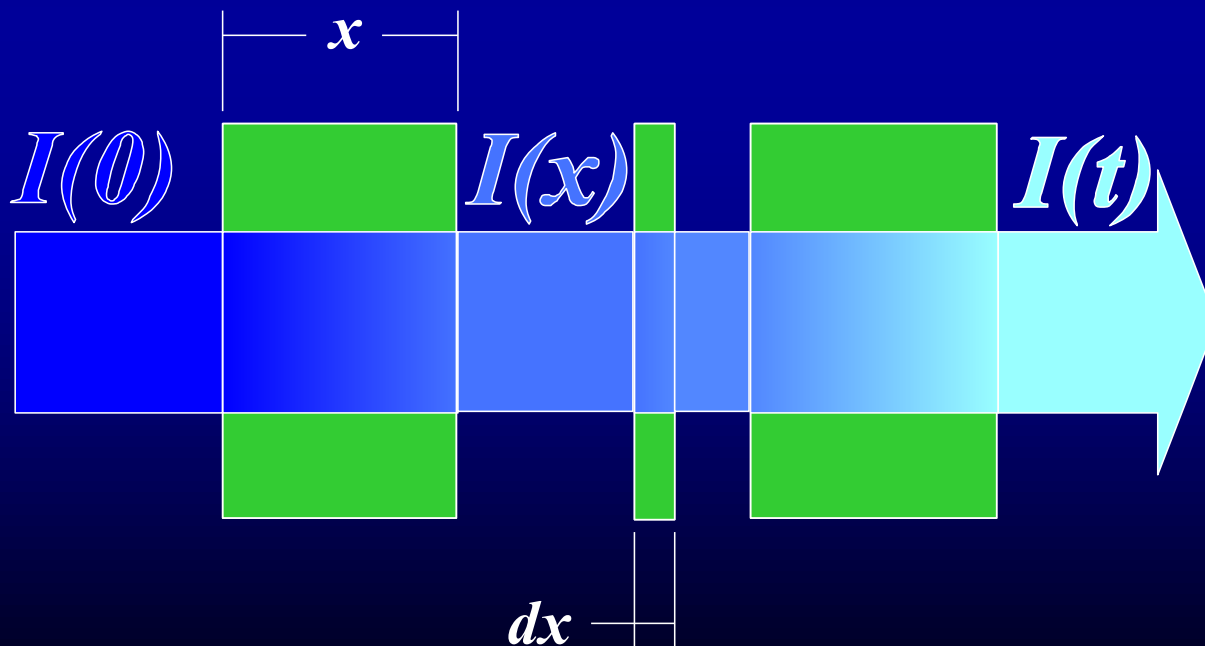
- $N$  centrów (atomów, cząsteczek) w  $1 \text{ cm}^3$
- Prawdopodobieństwo oddziaływania pojedynczego centrum  $\rightarrow \sigma$
- Natężenie wiązki padającej  $\rightarrow I(0)$
- Chcemy wyznaczyć natężenie wiązki przechodzącej  $\rightarrow I(t)$ , gdzie  $t$  oznacza grubość absorbentu.





$$dI(x) = -\sigma I(x) N dx$$

$$I(t) = I(0) e^{-\sigma N t}$$



# Promieniowanie X

## opis mikroskopowy

- W zakresie energii promieniowania X dominującym efektem jest rozpraszanie nie-koherentne (Comptona).
- Przekrój czynny na rozpraszanie nie-koherentne jest proporcjonalny do liczby atomowej (do liczby elektronów).
- Wprowadza się pojęcie efektywnej liczby atomowej dla substancji złożonych z różnych pierwiastków.

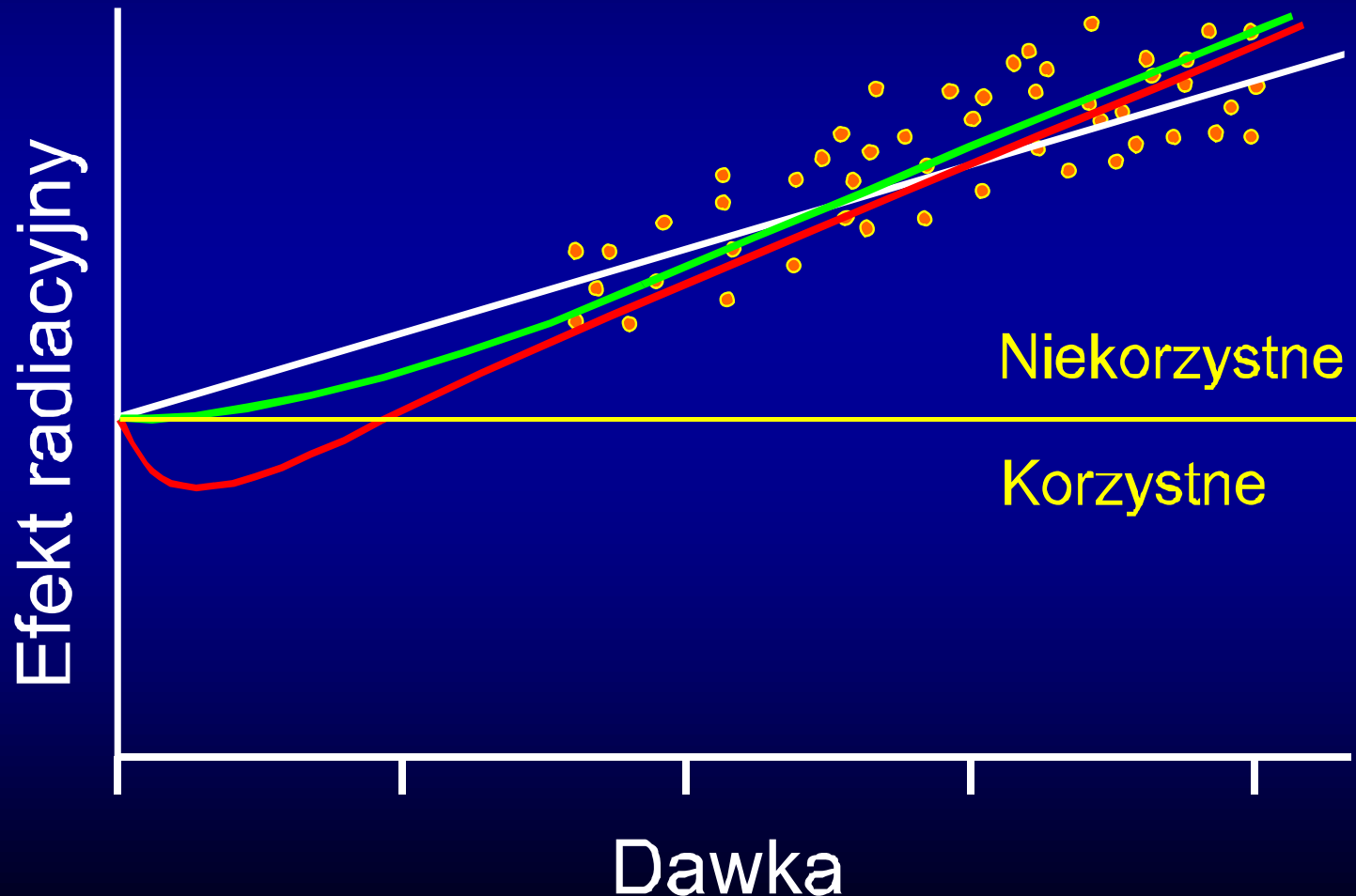
$$Z_{eff} = \sqrt[2.94]{f_1 Z_1^{2.94} + f_2 Z_2^{2.94} + \dots + f_n Z_n^{2.94}}$$

$f_i$  – ułamek całkowitej liczby elektronów pierwiastka o liczbie atomowej  $Z_i$  w związku, albo mieszaninie.

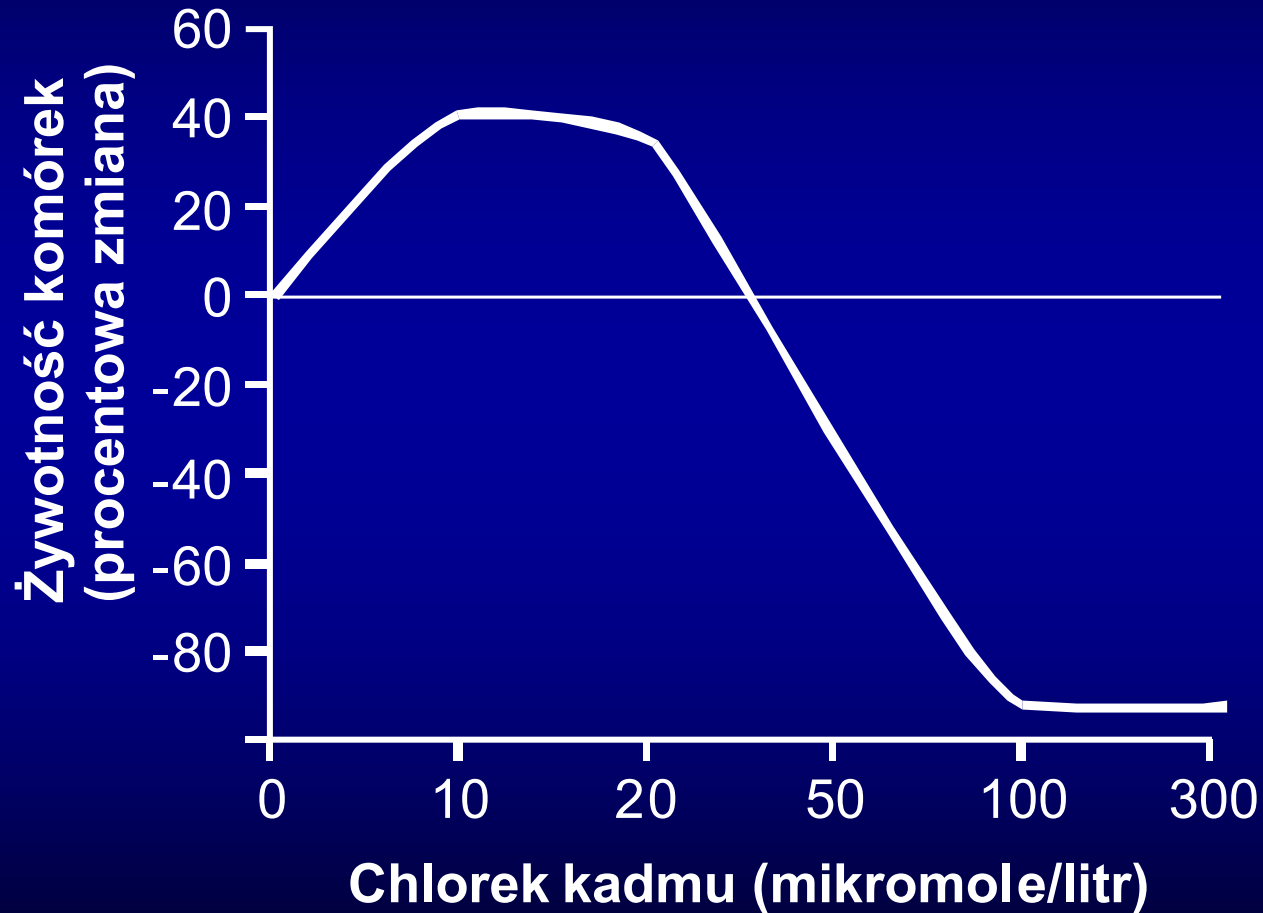


# Hormeza radiacyjna

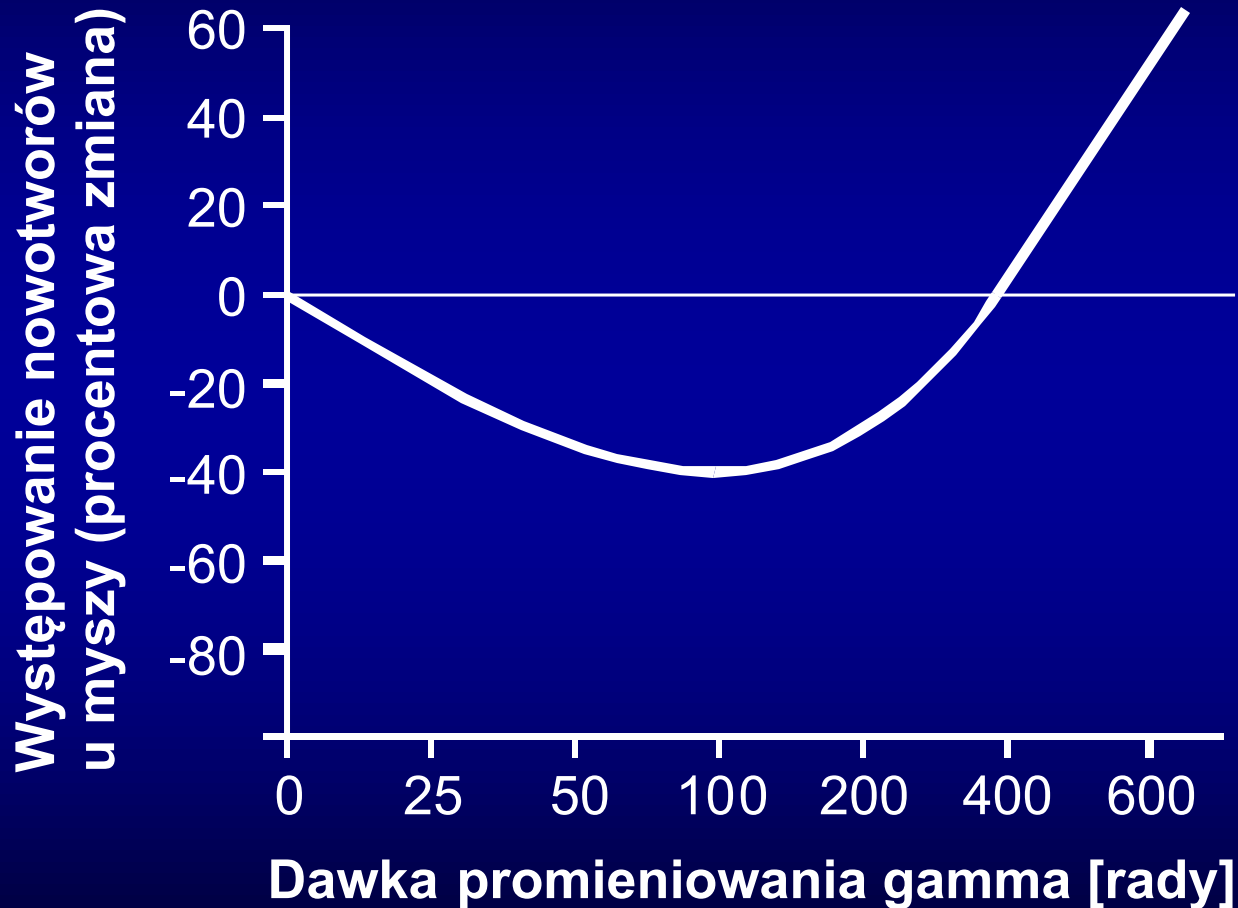
Duże dawki są z pewnością szkodliwe, ale nie wiadomo, czy tak samo jest z małymi dawkami. Istnieją pewne przesłanki, że małe dawki wpływają wręcz korzystnie.



# Przykłady hormezy



# Przykłady hormezy



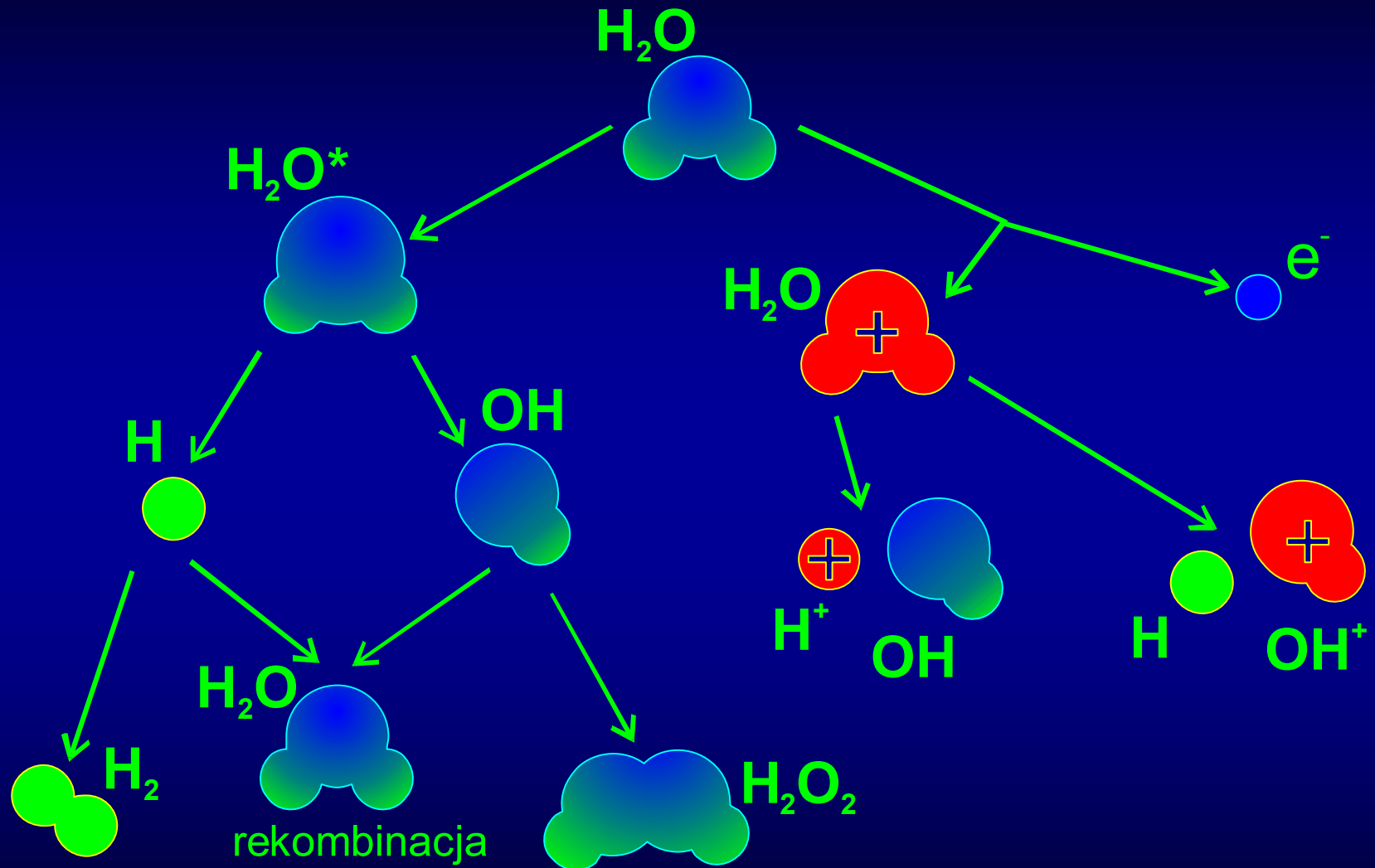


# Poziom chemiczny

- dysocjacja cząsteczek (1)
- wzbudzenie cząsteczek (2)
- jonizacja (3)
  
- (1)+(2)+(3) → radioliza (fotoliza)
  
- asocjacja atomów w cząsteczki
- polimeryzacja
- fotosynteza.



# Radioliza wody



# Poziom biologiczny

- Opis makroskopowy → ochrona radiologiczna.
- Oddziaływanie bezpośrednie → poziom fizyczny.
- Oddziaływanie pośrednie → poziom chemiczny.

**W ochronie radiologicznej oddziaływanie promieniowania opisuje się poprzez określenie ilości energii (dawki promieniowania) dostarczonej do układu.**

