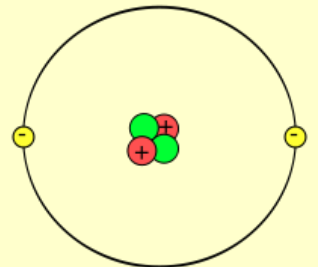


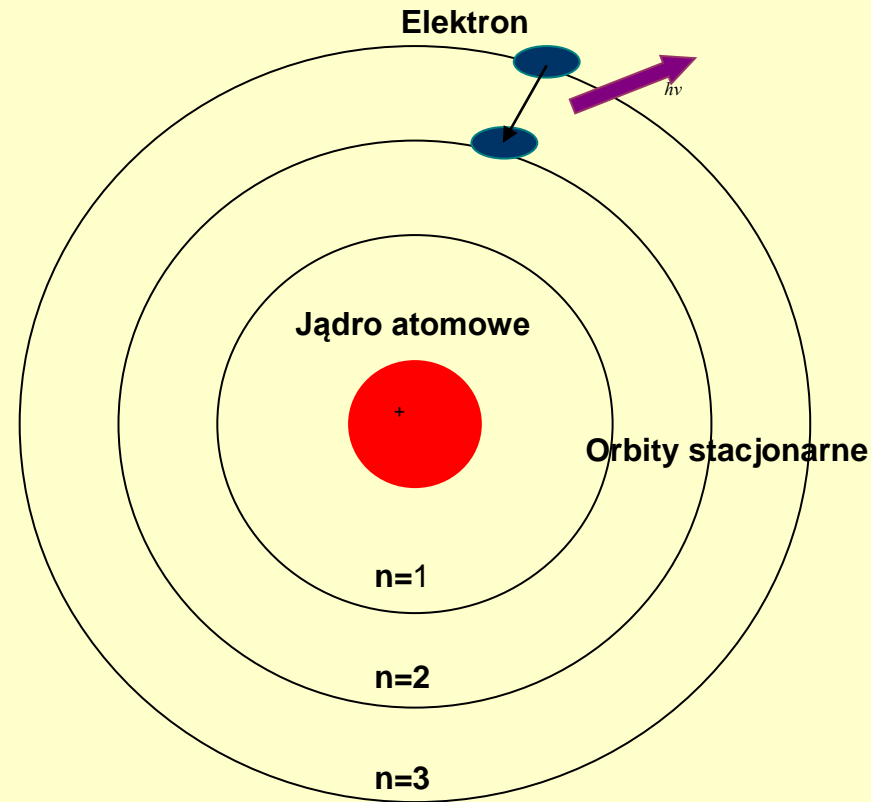
# Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią

**Mirosław Lewocki**

Zachodniopomorskie Centrum Onkologii w Szczecinie  
Instytut Fizyki Uniwersytetu Szczecińskiego



# Model atomu Bohra



$$h\nu = E_p - E_k$$

$E_p$  – energia atomu w stanie początkowym

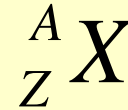
$E_k$  - energia atomu w stanie końcowym

$\nu$  – częstotliwość emitowanego promieniowania

# Budowa jądra atomowego

Jądro atomowe składa się z nukleonów czyli z protonów i neutronów. Atom danego pierwiastka możemy scharakteryzować przy pomocy dwóch liczb

- liczby porządkowej (atomowej)  $Z$
- liczby masowej  $A$ .



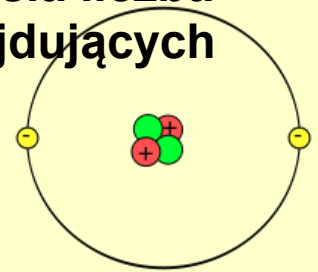
Liczba porządkowa określa liczbę elektronów znajdujących się na powłokach a tym samym ilość protonów w jądrze. Wynika z tego, że ładunek jądra możemy określić poprzez pomnożenie liczby porządkowej  $Z$  przez ładunek protonu (w praktyce jest on równy ładunkowi elektronu z przeciwnym znakiem)



Liczba masowa  $A$  informuje natomiast o liczbie nukleonów znajdujących się w jądrze.

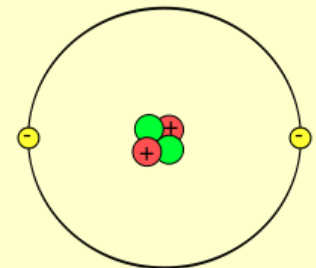
Podsumowując liczbę elektronów i protonów w atomie określa liczba porządkowa  $Z$ , natomiast aby znaleźć liczbę neutronów znajdujących się w jądrze musimy od liczby masowej odjąć porządkową:

$$A - Z$$



# Budowa jądra atomowego

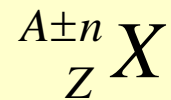
Jadro atomowe w porównaniu do całego atomu zajmuje przestrzeń stosunkowo małą, bowiem jego średnica wynosi  $10^{-15}$  m i jest 100000 mniejsza od średnicy atomu (średnica atomu  $10^{-10}$  m). Masy jąder atomowych zawierają się w przedziale od  $10^{-25}$  kg do  $10^{-27}$  kg. Biorąc pod uwagę małe rozmiary jąder łatwo zauważyć, że ich gęstość jest bardzo duża. Dla przykładu jądro uranu ma gęstość około  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>!



# Budowa jądra atomowego

## *Izotopy*

są to atomy pierwiastków o tej samej liczbie porządkowej a różnej liczbie masowej, czyli różniące się liczbą neutronów. Schematycznie izotopy oznaczają się



gdzie  $n$  jest liczbą naturalną.

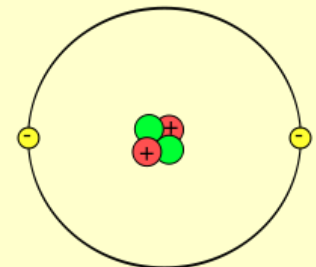
Dla przykładu izotopy atomu wodoru



oznaczają się kolejno

deuter,  ${}_{1}^{2} H$

tryt.  ${}_{1}^{3} H$

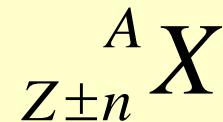


# Budowa jądra atomowego

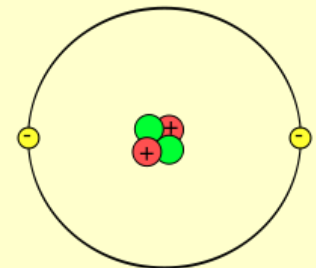
## *Izobary*

są to atomy pierwiastków o jednakowej liczbie masowej  $A$  a różniące się liczbą porządkową  $Z$ . Sugeruje to, że liczba nuklidów jest stała natomiast liczby protonów i neutronów są różne.

Schematycznie oznacza się je



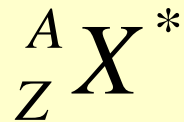
gdzie  $n$  jest liczbą naturalną.



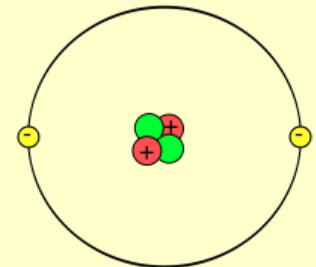
# Budowa jądra atomowego

## *Izomery*

Są to atomy tego samego pierwiastka czyli obie liczby masowa i porządkowa są jednakowe. Poszczególne izomery różnią się między sobą stanem energetycznym jądra. Opisać to można poprzez



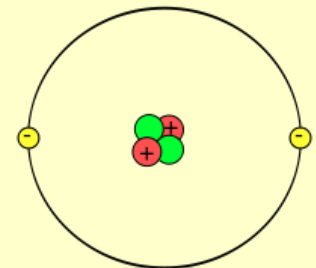
gdzie \* oznaczono jądro w wyższym stanie energetycznym



# Promieniotwórczość i przemiany jądrowe

Promieniotwórczością nazywa się samorzutny rozpad jądra atomowego.

Promieniowanie wysyłane podczas takiego rozpadu to promieniowanie  $\alpha, \beta, \gamma$

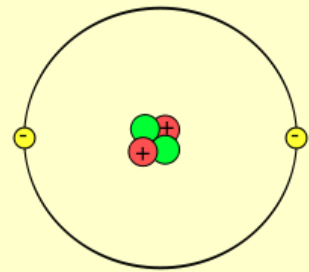
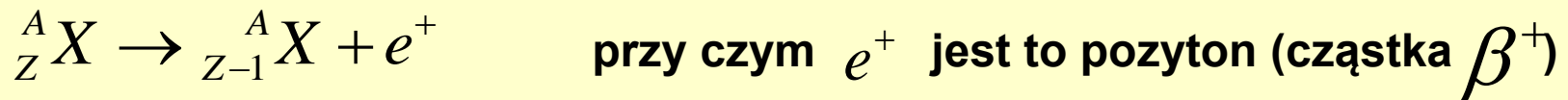


# Promieniotwórczość i przemiany jądrowe

przemiana  $\alpha$

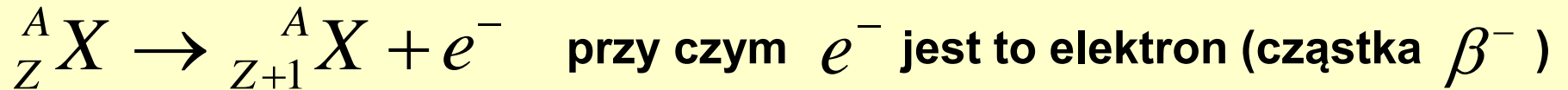


przemiana  $\beta^+$

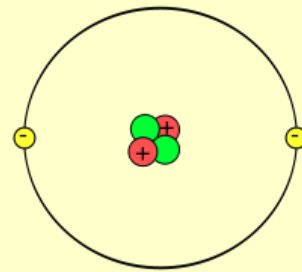
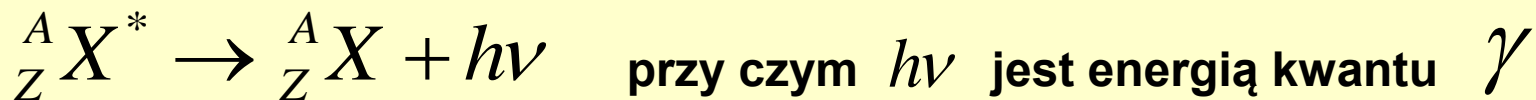


# Promieniotwórczość i przemiany jądrowe

przemiana  $\beta^-$

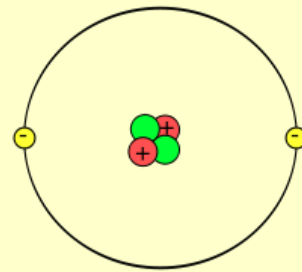


przemiana  $\gamma$



# Promieniotwórczość i przemiany jądrowe

Możliwy jest jeszcze inny rodzaj przemiany jądrowej nazwany *wychwytem K*. Powłoka K jest powłoką położoną najbliżej jądra atomowego i czasem zdarza się, że elektrony z tej powłoki są przez nie wychwytywane. Wówczas elektrony z wyższych powłok zajmują miejsce wychwyconych elektronów emitując przy tym promieniowanie z zakresu X.



# Prawo promieniotwórczego rozpadu

Liczba rozpadających się jader jest proporcjonalna do liczby wszystkich promieniotwórczych jader :

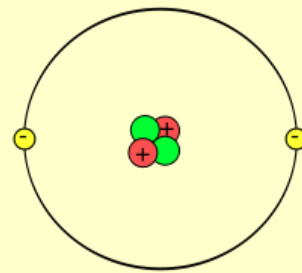
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Stała proporcjonalności  $\lambda$  to stała rozpadu, natomiast  $N$  oznacza liczbę jader

Po przekształceniu  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

Gdzie:

$N_0$  oznacza liczbę jader w chwili początkowej



# Prawo rozpadu promieniotwórczego

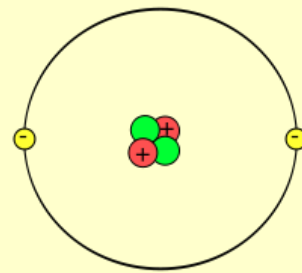
Liczba rozpadających się jader jest proporcjonalna do liczby wszystkich promieniotwórczych jader :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

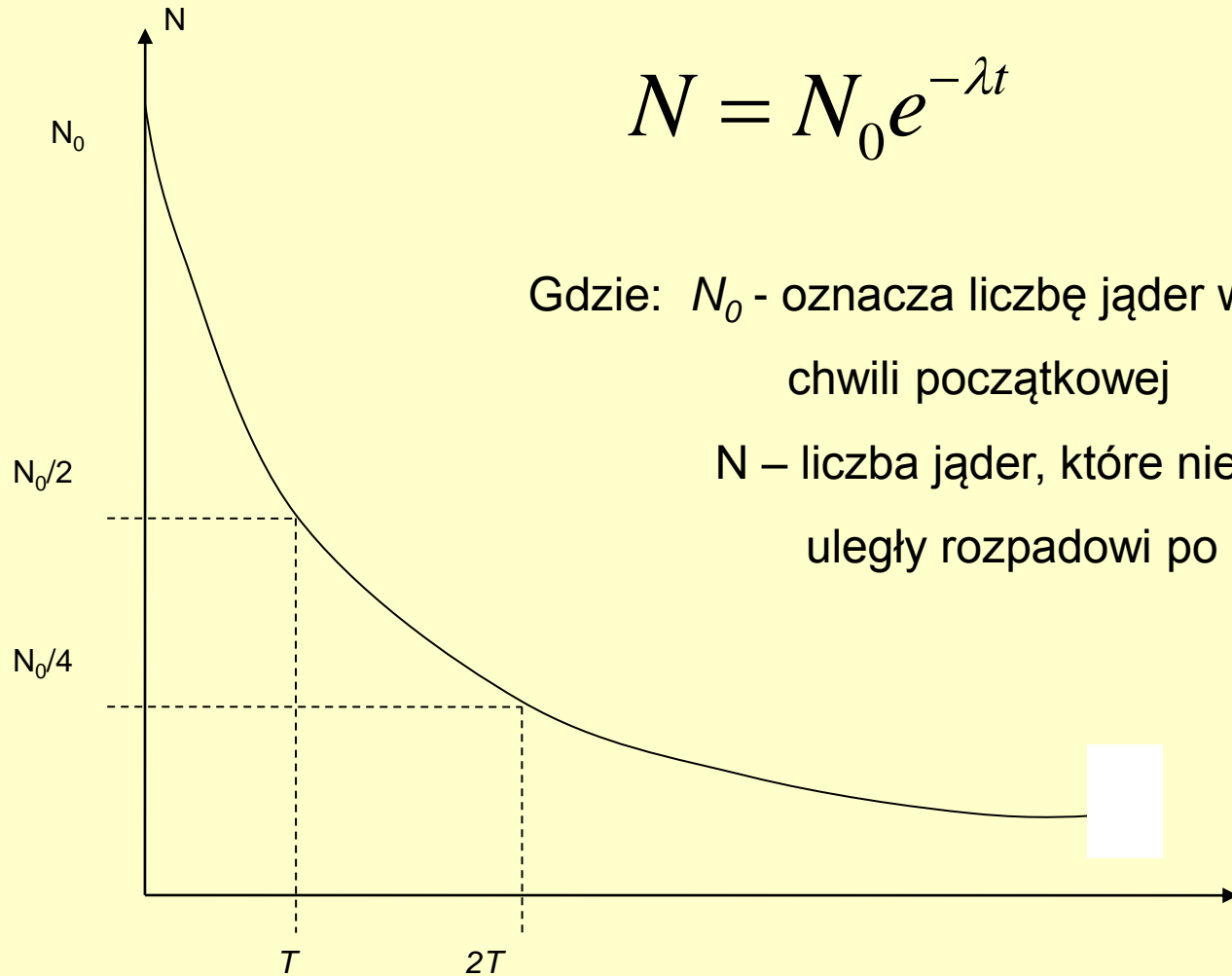
Stała proporcjonalności to stała rozpadu, natomiast  $N$  oznacza liczbę jader. Stała rozpadu określa prawdopodobieństwo rozpadu danego jądra w czasie.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$  - czas po którym rozpadnie się połowa jader nazywamy czasem połowicznego rozpadu.



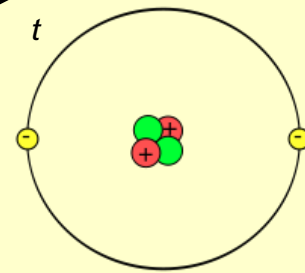
# Prawo rozpadu promieniotwórczego



$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

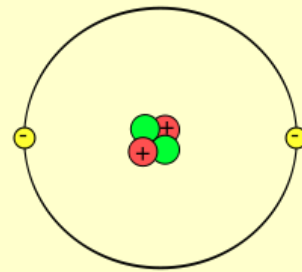
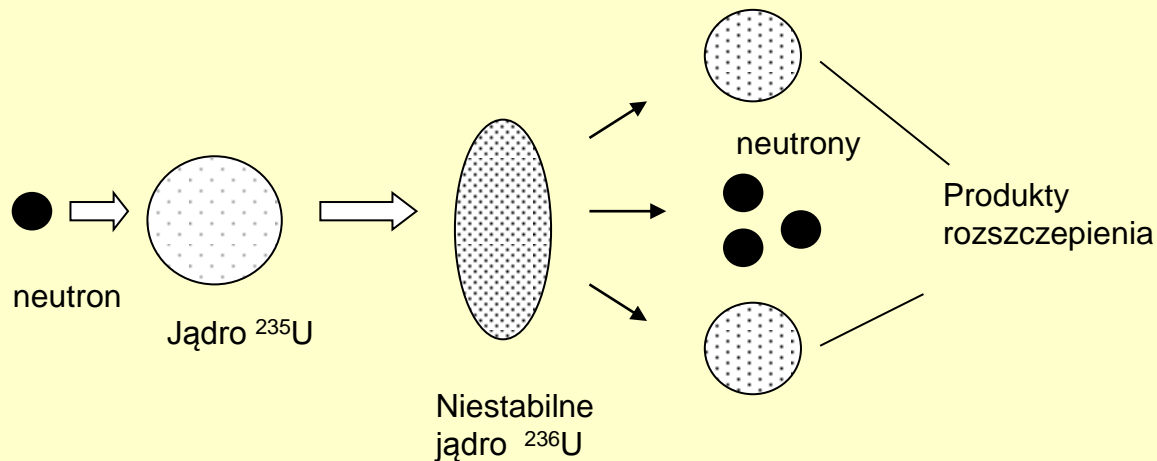
Gdzie:  $N_0$  - oznacza liczbę jąder w chwili początkowej

$N$  – liczba jąder, które nie uległy rozpadowi po czasie  $T$



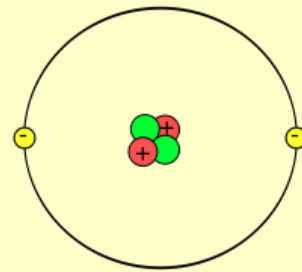
# Rozszczepienie jąder i reakcja łańcuchowa.

Reakcją rozszczepienia jąder nazywa się reakcję polegającą na rozbiciu jądra atomowego na dwa mniejsze fragmenty. Samorzutny rozpad jądra na mniejsze fragmenty jest bardzo rzadki. Najczęściej rozszczepienie zachodzi na skutek bombardowania jądra cząstkami.



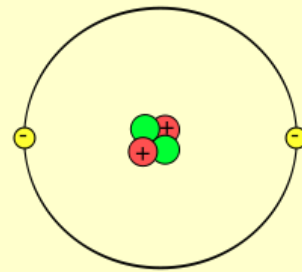
# Rozszczepienie jąder i reakcja łańcuchowa.

Jak wynika z rysunku w wyniku rozszczepienia jądra dodatkowymi produktami są neutrony. Można się więc spodziewać, że będą one inicjować rozpady następnych jąder atomowych co z kolei może prowadzić do reakcji łańcuchowej. Reakcja łańcuchowa polega na gwałtownym rozszczepianiu się jąder atomowych.



# Fizyczne podstawy oddziaływania promieniowania jonizującego z materią

Promieniowaniem jonizującym nazywamy każde promieniowanie cząsteczkowe lub elektromagnetyczne, które oddziałując z materią wywołuje zjawisko jonizacji, tzn. podział atomu na parę jonów. Wybity z orbity elektron nazywamy elektronem swobodnym lub jonem ujemnym, natomiast atom pozbawiony elektronu jest jonem dodatnim.



# Fizyczne podstawy oddziaływania promieniowania jonizującego z materią

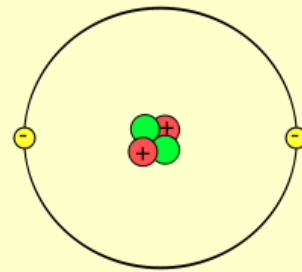
## Źródła naturalne.

Do źródeł naturalnych zaliczamy:

promieniowanie pochodzące od naturalnych nuklidów znajdujących się w skorupie ziemskiej (tor-232, uran-238)

promieniowanie kosmiczne

izotopy promieniotwórcze wchłaniane do organizmu: potas-40, węgiel-14, rad-226 radon-222



# Fizyczne podstawy oddziaływania promieniowania jonizującego z materią

## Źródła sztuczne.

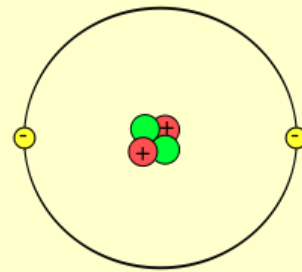
Urządzenia rtg stosowane w medycynie, przemyśle i badaniach naukowych

Akceleratorzy, betatrony, cyklotrony

Reaktory jądrowe

Izotopy wytwarzane w reaktorach jądrowych

Przedmioty codziennego użytku: monitory, farby, zegarki, przyrządy pomiarowe



# Rodzaje i własności promieniowania.

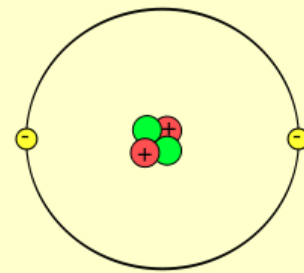
Najczęściej spotykane w przyrodzie promieniowanie jonizujące pochodzące zarówno od źródeł naturalnych jak i sztucznych to:

promieniowanie  $\alpha$

promieniowanie  $\beta$

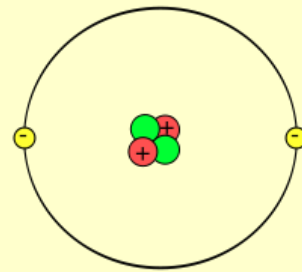
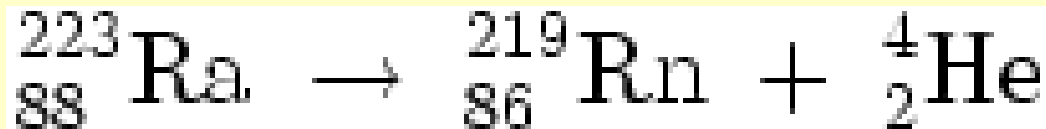
promieniowanie X lub  $\gamma$

promieniowanie neutronowe



# Rodzaje i własności promieniowania.

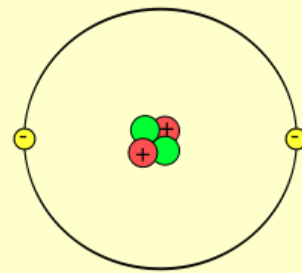
*promieniowanie  $\alpha$*  - cząstki  $\alpha$  są to „obdarte” z elektronów jądra atomu Helu. Zbudowane są z dwóch neutronów i dwóch protonów, mają ładunek elektryczny dodatni. Odchylają się w polu magnetycznym. Promieniowanie  $\alpha$  wykazuje silne właściwości jonizujące. Jest silnie pochłaniane w tkankach, ma ograniczony zasięg (w powietrzu do 10 cm). Powstaje w wyniku promieniotwórczej przemiany jądrowej zwanej rozpadem  $\alpha$ .  
Przykład przemiany, w której następuje emisja promieniowania alfa :



# Rodzaje i własności promieniowania.

Osłony przed promieniowaniem  $\alpha$ :

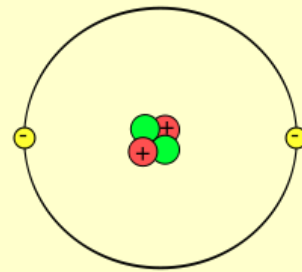
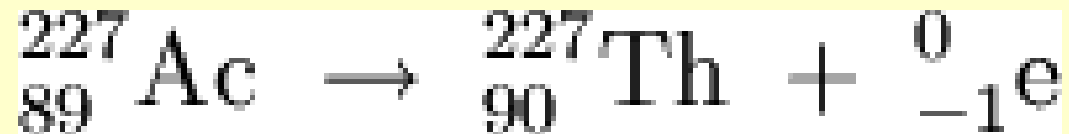
ubranie, kartka papieru, odległość większa od 10 cm



# Rodzaje i własności promieniowania.

*promieniowanie  $\beta$*  - strumień elektronów lub pozytonów. Powstaje w wyniku promieniotwórczej przemiany jądrowej zwanej rozpadem  $\beta$ . Podobnie jak promieniowanie  $\alpha$  ma naturę cząsteczkową. Wykazuje mniejsze właściwości jonizujące. Jest słabiej pochłaniane w tkankach. Zasięg w powietrzu do 10 m

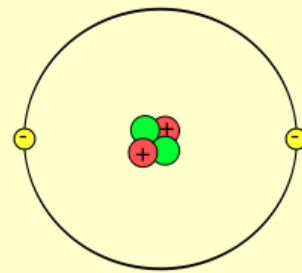
Przykład przemiany, w której następuje emisja promieniowania beta:



# Rodzaje i własności promieniowania.

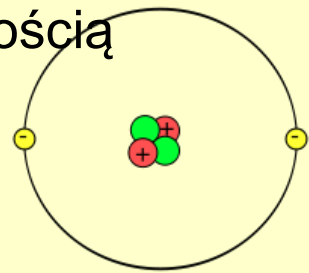
Osłony przed promieniowaniem  $\beta$ :

Materiały lekkie takie jak plastik, parafina, szkło organiczne.  
(Materiały ciężkie nie są zalecane z uwagi na generowanie promieniowania hamowania w ilości proporcjonalnej do kwadratu liczby atomowej)



# Rodzaje i własności promieniowania.

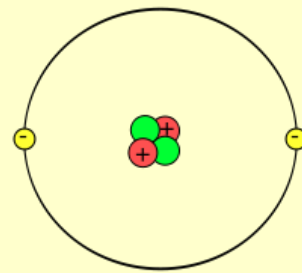
*promieniowanie  $\gamma$*  - Promieniowanie  $\gamma$  w odróżnieniu od  $\alpha$  i  $\beta$  ma naturę falową. Jest to promieniowanie elektromagnetyczne wytwarzane w wyniku przemian jądrowych, zderzeń jąder lub zderzeń elektronów z atomami. Jest bardzo przenikliwe. Niesie z sobą dużą energię. Jest słabo pochłaniane przez materię. (Przyjmuje się, że energia kwantów gamma jest większa od 10 keV. Kwanty o niższej energii zaliczane są do promieniowania rentgenowskiego, powstają zwykle w wyniku wychwytu K np.  $^{55}\text{Fe}$ . {Jednak w większości opracowań rozróżnienie promieniowania  $\gamma$  i rentgenowskiego związane jest nie z energią kwantów lub długością fali, ale sposobem jego wytwarzania).



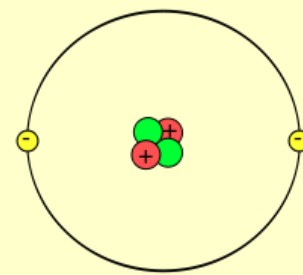
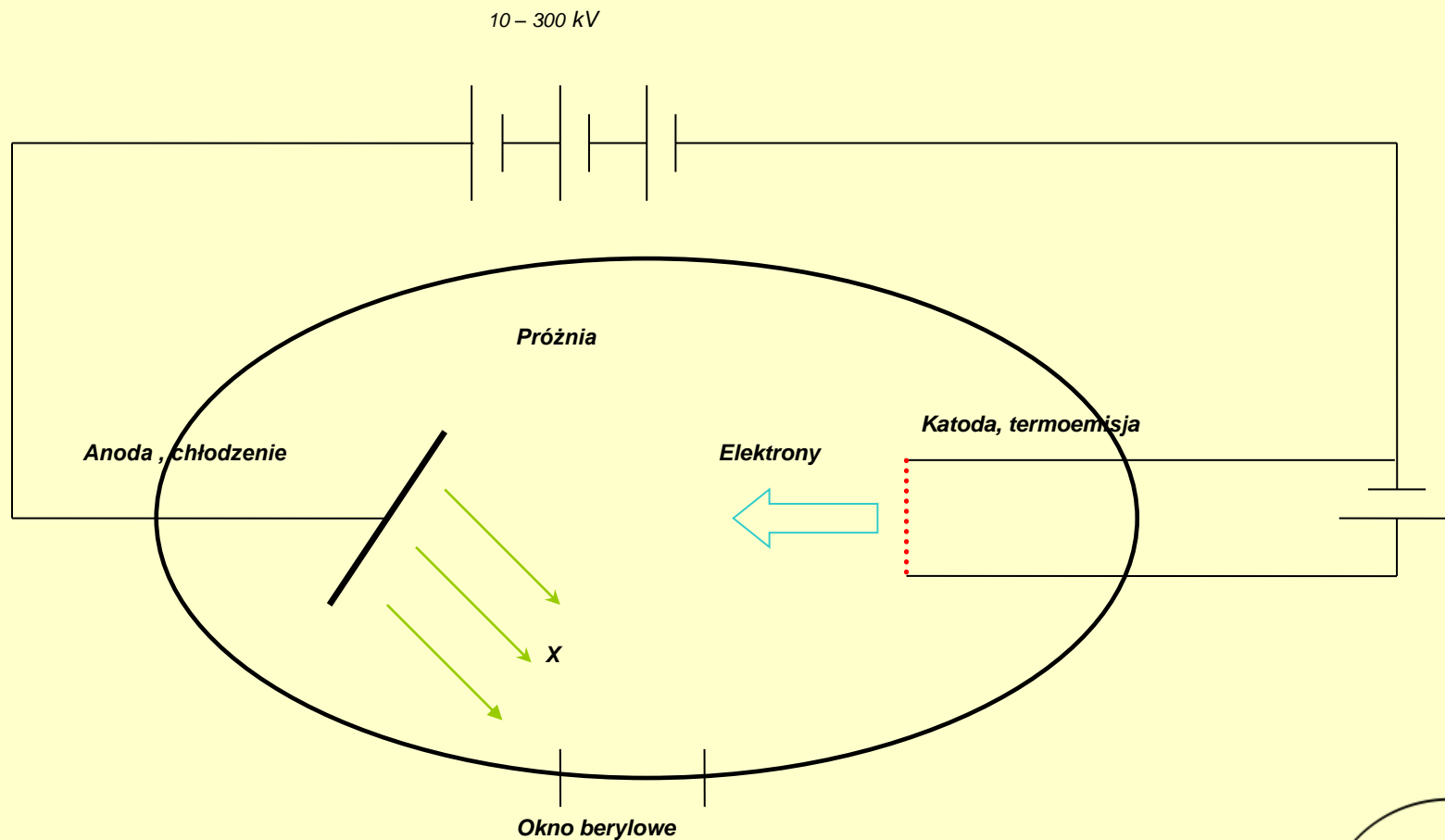
# Rodzaje i własności promieniowania.

Osłony przed promieniowaniem  $\gamma$ :

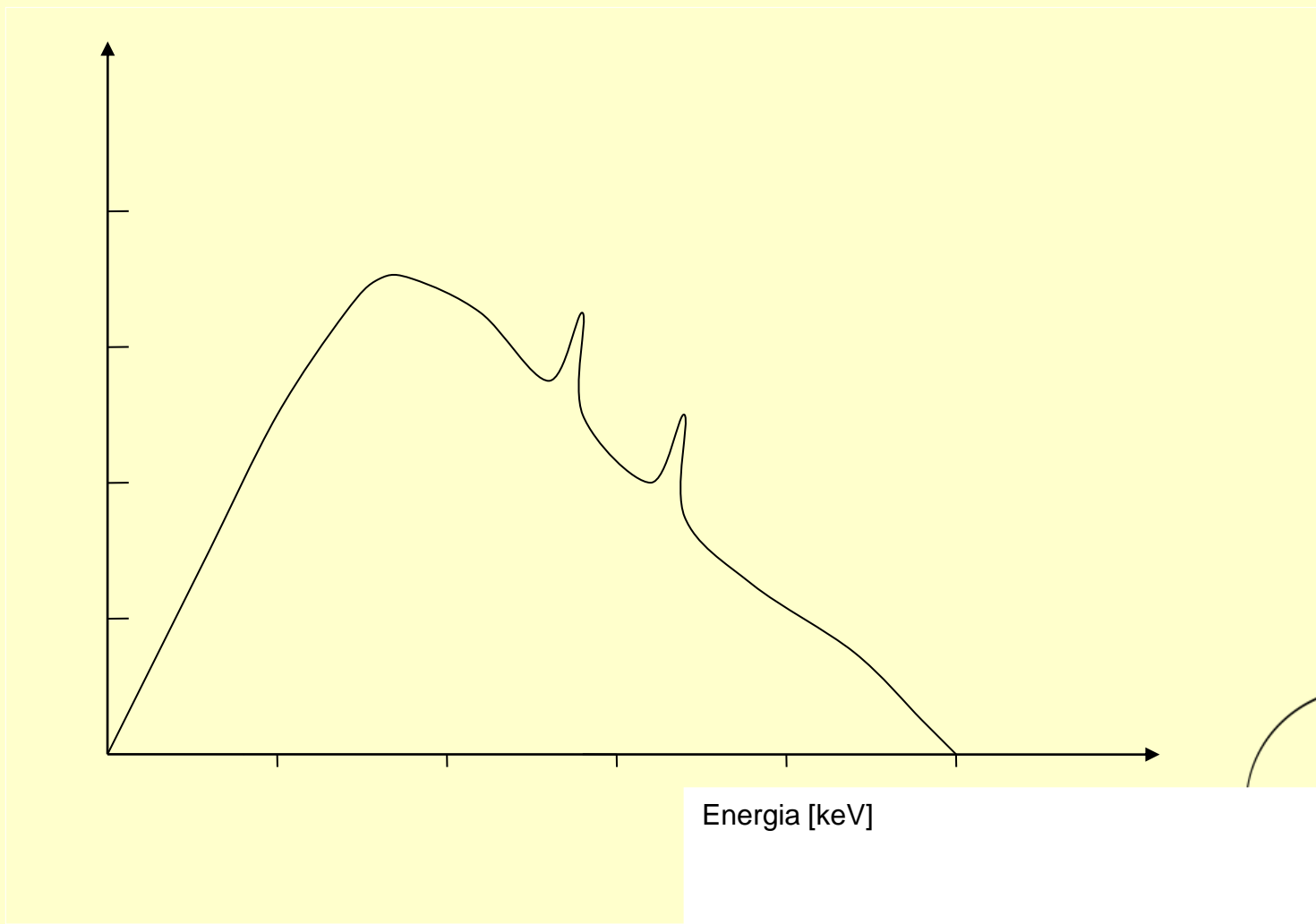
Materiały ciężkie o dużej liczbie atomowej: ołów, żelazo, barytobeton, ruda hematytowa, stop Wood'a itd.



# Wytwarzanie promieniowania w lampach rentgenowskich



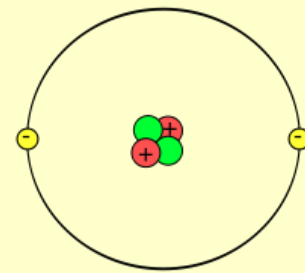
# Wytwarzanie promieniowania w lampach rentgenowskich



# Wytwarzanie promieniowania w lampach rentgenowskich

Paarametry wiązki promieniowania X podlegające regulacji.

Parametr wiązki	Regulacja
natężenie wiązki	prąd anodowy (mA) napięcie anodowe (kV)
Przenikliwość promieniowania	napięcie anodowe (kV)
Dawka	Czas ekspozycji (s)
Wielkość wiązki	kolimator
Kształt widma	Zewnętrzny filtr
Jednorodność	Kratka przeciw rozproszeniowa



# Wytwarzanie promieniowania w lampach rentgenowskich



Mammograf Selenia

Arcadis Orbic



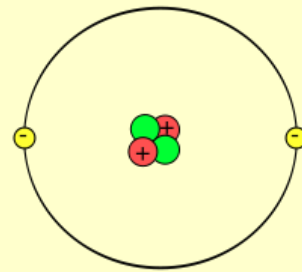
# Wytwarzanie promieniowania w lampach rentgenowskich



Somatom Sensation Open



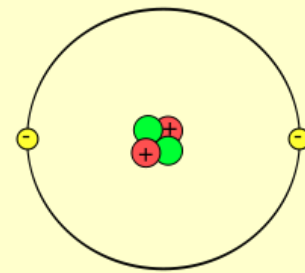
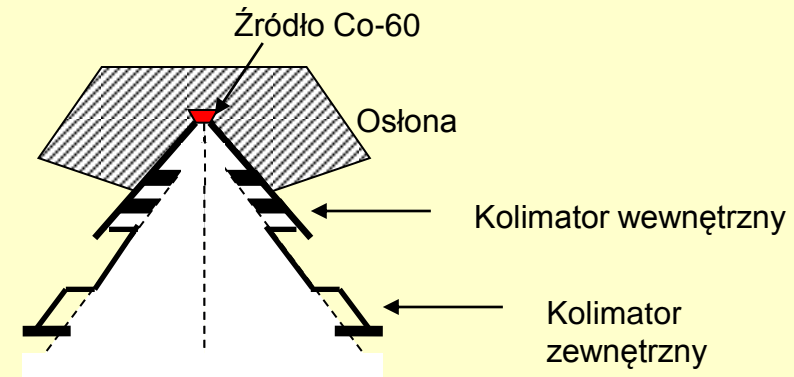
Siemview 3000



# Promieniowanie $\gamma$ generowane w bombie kobaltowej.



Theratron Elite 100



# Promieniowanie $\gamma$ generowane w bombie kobaltowej.

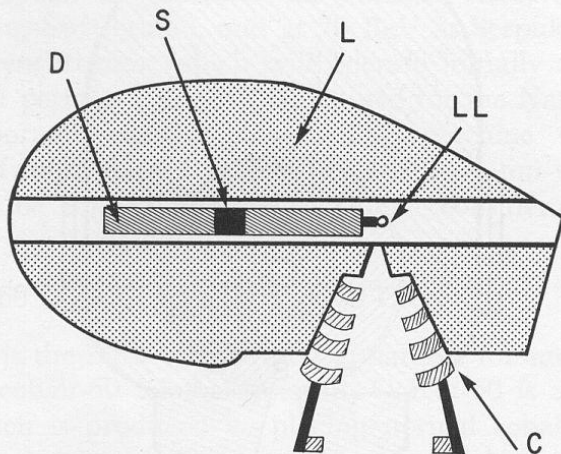


Fig. 5-15. Sourcehead for an AECL cobalt-60 teletherapy unit. D, sliding source drawer; S, source in "off" position; L, lead shielding; LL, localizing light; C, adjustable collimators.

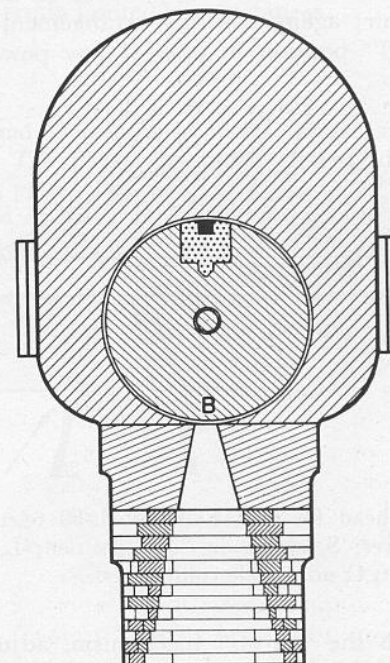
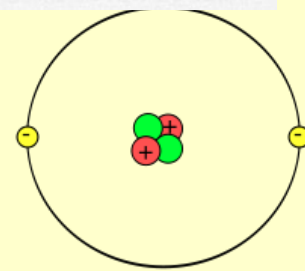
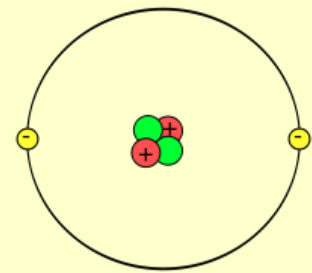
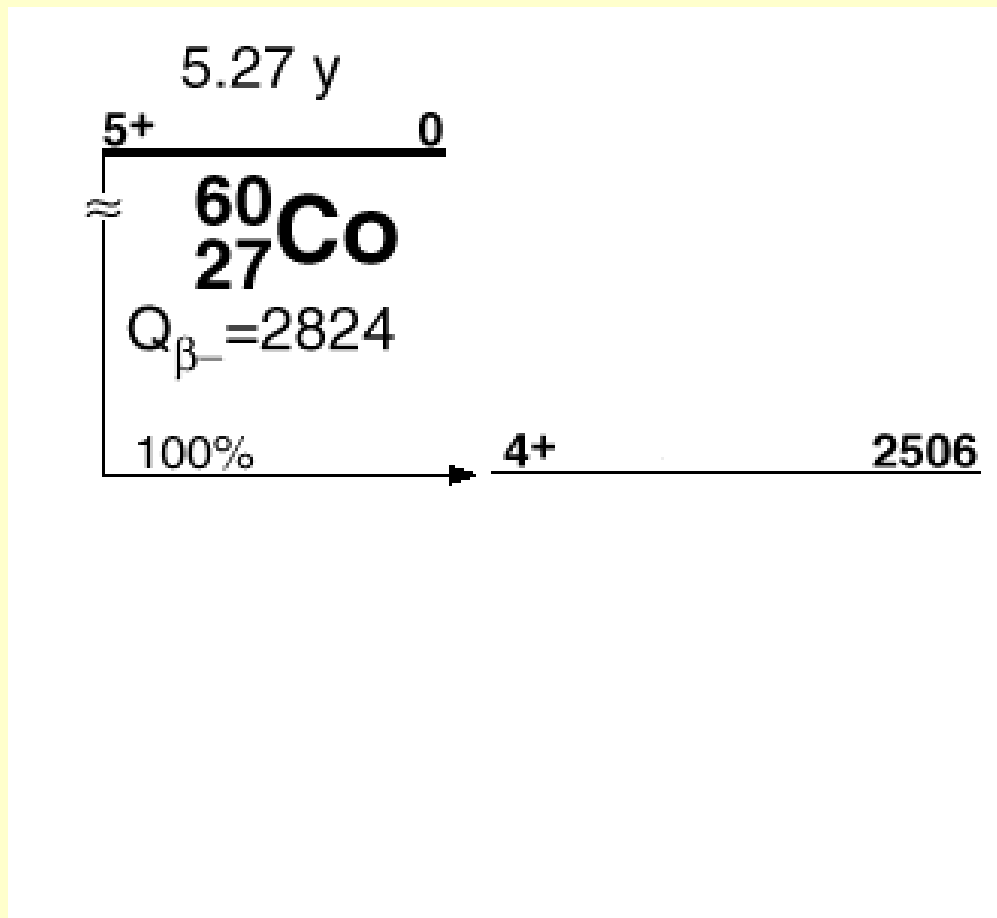


Fig. 5-14. Picker cobalt-60 teletherapy unit. Location of cobalt-60 source in "off" position; B, location of source in "on" position.



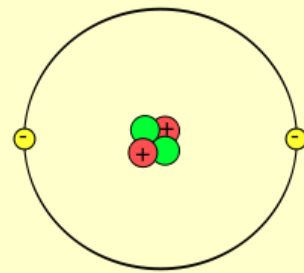
# Promieniowanie $\gamma$ generowane w bombie kobaltowej.



# Promieniowanie generowane przez akceleratory biomedyczne.

**Akcelerator** – są to urządzenia do przyspieszania cząstek naładowanych

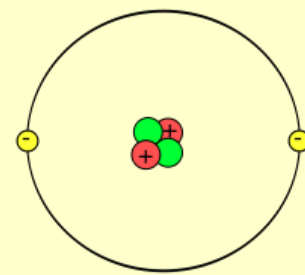
Energia cząstek w akceleratorach rośnie wskutek oddziaływania pola elektrycznego z ładunkiem cząstki. Po osiągnięciu wysokiej energii cząstki trafiają w tarczę (target) i wywołują z jądrami tarczy reakcję jądrowe w wyniku których emitowane są różnego rodzaju cząstki wtórne lub promieniowanie hamowania.



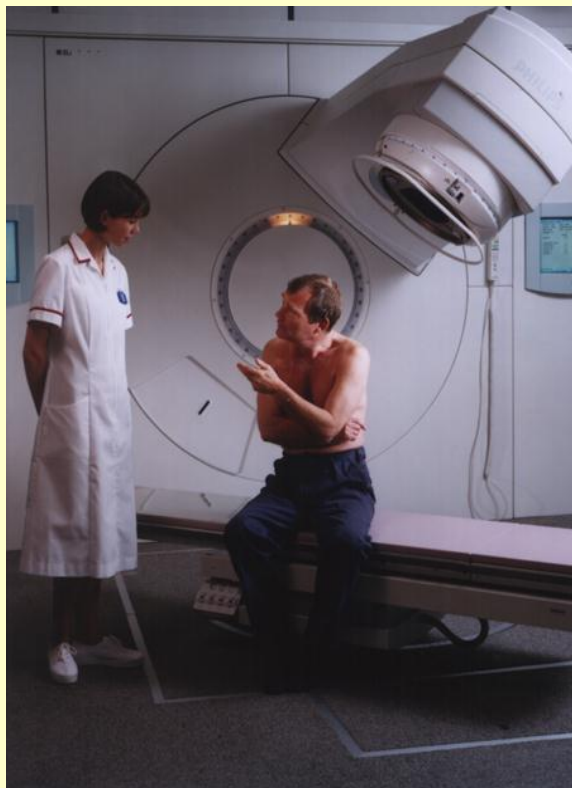
# Promieniowanie generowane przez akceleratory biomedyczne.



Rodzina akceleratorów firmy Siemens



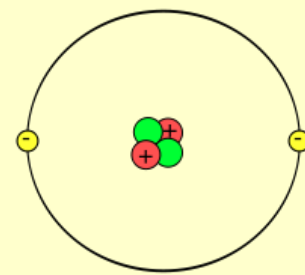
# Promieniowanie generowane przez akceleratory biomedyczne.



Akcelerator Precise  
firmy Elekta

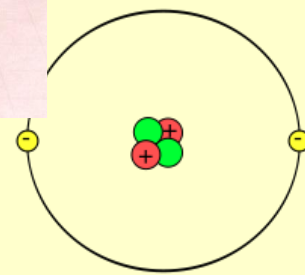


Clinac 2300 – Varian Medical  
Systems, Inc.

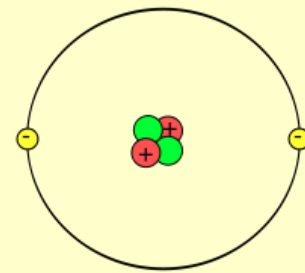
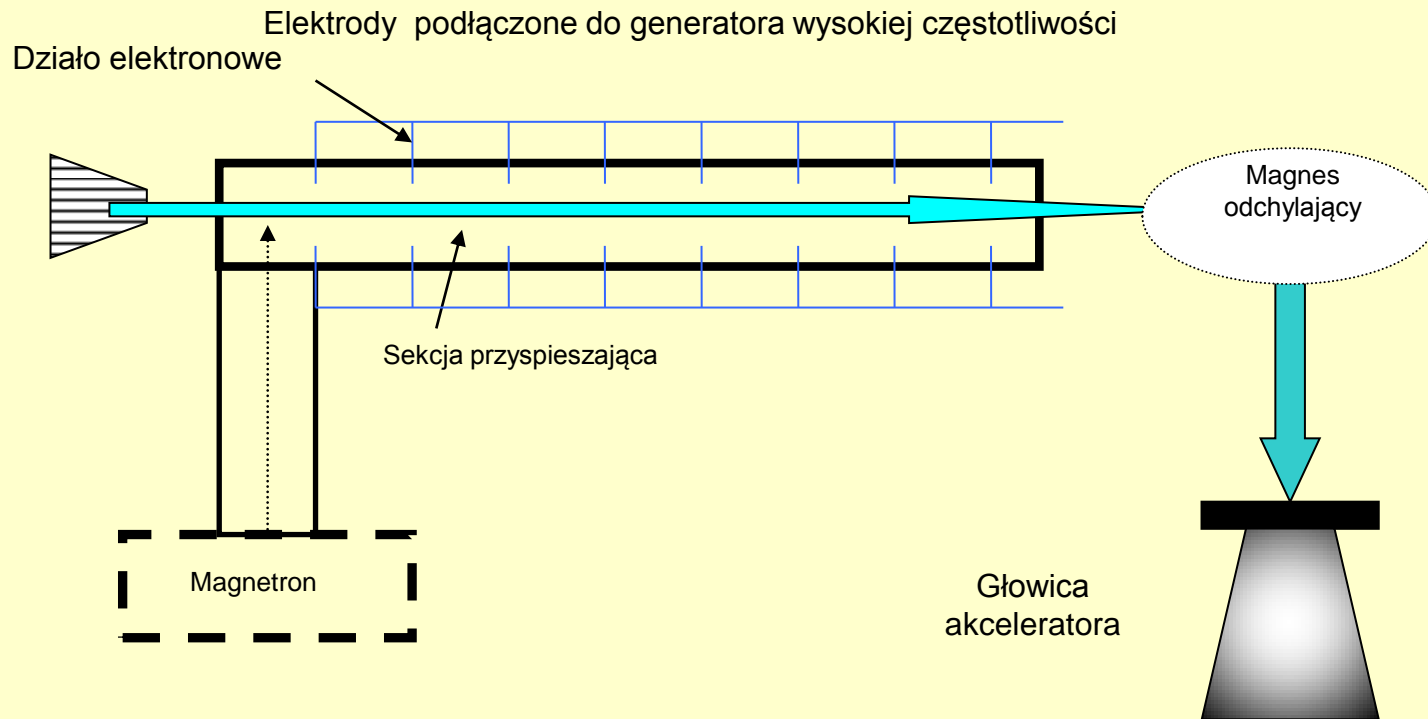


# Promieniowanie generowane przez akceleratory biomedyczne.

MOBETRON – akcelerator  
elektronów do śródoperacyjnej  
radioterapii



# Promieniowanie generowane przez akceleratory biomedyczne.



# Zagrożenia ze strony akceleratorów

## Promieniowanie

- przy energii **6-10 MeV** elektrony tracą swoje energie tylko w wyniku jonizacji i produkcji promieniowania hamowania.

Konieczność stosowania ekranów do pochłonięcia tego promieniowania.

Powyżej **10 MeV** należy brać pod uwagę generowany strumień neutronów. Energia może być przekazywana do jądra przez fotony produkowane wzdłuż toru elektronów co powoduje wzbudzenie jądra i emisję neutronów.

# Zagrożenia ze strony akceleratorów

## Promieniotwórczość wzbudzona

Przy energiach powyżej kilkunastu MeV następuje aktywacja radioizotopów:

w betonie	- Na-22	$T_{1/2}$	2.6 lat
w aluminium	- Na-22		
	- Al.-26	$T_{1/2}$	$7.4 \cdot 10^{10}$ lat
w stali	- Mn-54	$T_{1/2}$	303 dni

# Zagrożenia ze strony akceleratorów

**Gazy radiotoksyczne i toksyczne**

**Aktywacja powietrza następuje przy energii progowej:**

***10.5 MeV***                      ***- aktywacja azotu***

***15.6 MeV***                      ***- aktywacja tlenu***

**Gazy toksyczne:** *ozon, tlenki azotu*

# Inne zagrożenia ze strony akceleratorów

## Uszkodzenia mechaniczne

*(np. Gantry uderza o stół, aplikatory elektronowe zgniatają pacjenta, klocki spadają z półki itd.)*

## Zakłócenia na częstotściach radiowych

*(dot. Sprzętu monitorującego pacjenta, stymulatory serca itd.)*

## Centratory laserowe

# Inne zagrożenia ze strony akceleratorów

## Porażenie prądem

*(Przeciek wody z systemu chłodzacego, dotknięcie wilgotnej powierzchni)*

**Natychmiast wyłączyć aparat!!!**

## Oparzenie

*(lampy halogenowe w zespole kolimatora, radiatory tranzystorów w zasilaczu itd.)*

## Promieniowanie mikrofalowe

## **Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią.**

Promieniowaniem jonizującym nazywamy promieniowanie elektromagnetyczne i cząsteczkowe, które oddziałując z materią oddaje jej swoją energię wywołując podział atomów ośrodka na pary jonów oraz wytworzenie pewnej ilości ciepła. Zjawiska prowadzące do absorpcji promieniowania są dość złożone i zależą od rodzaju i energii promieniowania.

Oddziaływanie promieniowania X lub  $\gamma$  odbywa się na drodze zjawiska fotoelektrycznego, Comptona i tworzenia par elektro-pozyton., które zostały przedstawione wcześniej. W dalszej części zostanie omówione oddziaływanie z materią cząstek naładowanych i neutronów.

# Oddziaływanie cząstek naładowanych z materią.

W procesach oddziaływań cząstek naładowanych z materią dominującą rolę odgrywają oddziaływania z elektronami atomów ośrodka. W wyniku zderzeń elektrony uzyskują energię, pozwalającą na jonizację czyli oderwanie elektronu od atomu, lub wzbudzenie czyli przeniesienie elektronu na wyższy poziom energetyczny. Elektrony oderwane od atomu, mogą – jeśli uzyskały dostatecznie dużą energię wywoływać poprzez oddziaływanie z elektronami kolejnych atomów jonizację wtórną. Liczbę par jonów na jednostkę drogi wytworzoną przez cząstkę pierwotną i elektrony wtórne nazywamy jonizacją właściwą. Gęstość jonizacji zależy od masy i prędkości cząstek.

# Oddziaływanie cząstek naładowanych z materią.

Miarą gęstości jonizacji jest współczynnik LET (*linear energy transfer*) definiowany jako strata energii na jednostkę drogi .

$$LET = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

Często promieniowanie dzieli się na niskoletowe do którego zaliczamy: promieniowanie X,  $\gamma$  i elektrony oraz wysokoletowe: cząstki  $\alpha$ , protony, neutrony, ciężkie jądra, mezony  $\pi$ .

# Oddziaływanie neutronów z materią.

Neutrony jonizują atomy ośrodka w sposób pośredni. Nie posiadając ładunku elektrycznego nie mogą oddziaływać z elektronami atomów. Natomiast mogą przechodząc swobodnie między powłokami elektronowymi oddziaływać z jądrami. W wyniku zderzeń jądra uzyskują dużą energię i jako cząstki naładowane mogą silnie jonizować atomy ośrodka w sposób przedstawiony wcześniej. Poza tym w wyniku zderzeń neutronów z jądrami może dojść do reakcji jądrowych w wyniku których powstaną naładowane cząstki wtórne zdolne do jonizacji atomów.

# Przegląd podstawowych wielkości i jednostek.

Aktywność – określa liczbę przemian jądrowych zachodzących w źródle promieniotwórczym w jednostce czasu

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

gdzie:

A - Aktywność źródła po upływie czasu t

$A_0$  - Aktywność początkowa

$\lambda$  - stała rozpadu charakterystyczna dla danego izotopu

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$  – czas połowicznego rozpadu

Jednostką aktywności w układzie SI jest Beckerem (Bq)

1 Bq - jedna przemiana jądrowa w ciągu 1 sekundy

Jednostka poza układową stosowaną często do opisu źródeł o dużych aktywnościach jest kiur (Ci).

$$1\text{Ci} - 3.7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

# Przegląd podstawowych wielkości i jednostek.

Dawka ekspozycyjna (ekspozycja) – określenie stosowane coraz rzadziej odnoszące się wyłącznie do promieniowania X i  $\gamma$  oraz wyłącznie do powietrza. Efektem oddziaływania promieniowania X lub  $\gamma$  z atomami powietrza może być jonizacja. Ilościowo można ją wyrazić poprzez liczbę par jonów wytworzonych w jednostce masy lub objętości, albo poprzez ładunek elektryczny jonów jednego znaku wytworzonych w jednostce masy lub objętości.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

gdzie:

X - dawka ekspozycyjna

dQ - suma jonów jednego znaku wytworzona w jednostce masy dm w warunkach równowagi elektronowej

Jednostką dawki ekspozycyjnej w układzie SI jest C/kg. Jednostką stosowaną dawniej, poza układem SI jest rentgen 1 R

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

# Przegląd podstawowych wielkości i jednostek.

Dawka pochłonięta (dawka fizyczna) – podstawowa wielkość dozymetryczna określona jako ilość energii  $dE$  przekazana przez promieniowanie elementowi masy materii  $dm$

$$D = \frac{dE}{dm}$$

jednostką dawki pochłoniętej jest w układzie SI jest 1 Gy (Grej)

$$1 \text{ Gy} = \frac{1J}{1kg}$$

Jednostką stosowaną dawniej poza układem SI był 1 rad

$$1 \text{ rad} = \frac{100erg}{1g}$$

(100 ergów energii pochłonięte w 1 gramie materii)

# Przegląd podstawowych wielkości i jednostek.

Kerma (ang. Kinetic energy released per mass unit) – jest to suma początkowych energii kinetycznych wszystkich cząstek naładowanych uwolnionych przez promieniowanie pośrednio jonizujące na jednostkę masy.

Kerma ma dwie składowe: kolizyjną i radiacyjną

$$K = K_{kol} + K_{rad}$$

Energia cząstek naładowanych oddziałujących z atomami ośrodka może zostać tracona w procesach jonizacji i wzbudzeń albo w postaci wytworzonego promieniowania hamowania. Składowa  $K_{rad}$  związana z wytworzeniem promieniowania hamowania jest najczęściej pomijalnie mała i w materiałach o małej liczbie atomowej nie przekracza 1% w zakresie energii 10-20 MeV. Dlatego można przyjąć, że Kerma jest w przybliżeniu równa energii zaabsorbowanej wzdłuż torów wtórnych elektronów. Czyli w przybliżeniu jest równa dawce pochłoniętej.