

# Metody i Techniki Jądrowe - wykłady

Maciej Standerski

24 listopada 2023

## 1 Wykład (06.10.2023)

### 1.1 Wstęp

Email: jan.pluta@pw.edu.pl

Strona: [www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj](http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj)

Wykłady: zdalnie

Wycieczki: 5-6 w piątki

Insytucje CCB Kraków SOLARIS

Zaliczenie: kolokwium (3 tematy do opracowania przez 1,5h, każdy z tematów punktowany jest na max 10 pkt, do zaliczenia kolokwium wymagane jest 51% wszystkich punktów możliwych do zaliczenia. Kolokwium można zaliczyć w dwóch terminach. Kolokwium ustne (30 minut)).

### 1.2 Wykład wstępny: Metody i techniki jądrowe w środowisku, przemyśle i medycynie

Ewolucja wiedzy na temat struktury materii

Eksperyment Rutherforda

99,9% masy atomu to masa jądra

Rozmiary jądra są 4 rzędy wielkości mniejsze niż rozmiary atomu

Cząstki fundamentalne i ich własności

Różnice między cząstkami elementarnymi a fundamentalnymi Cząstki elementarne: proton, neutron, mezon, itd. Cząstki fundamentalne: kwarki i leptony

Oddziaływania fundamentalne (model standardowy)

Potencjał w przypadku kwarków jest potencjałem rosnącym (musimy dostarczać więcej energii by rozdzielić parę kwarków, bo ich energia potencjalna rośnie, nie da się rozdzielić kwarków)

Aby uwolnić kwarki należy je podgrzać ( $10^{12}K$ !!!) lub ścisnąć ( $\rho = 10^{8}t/cm^3$ )

Diagram fazowy materii hadronowej (przejście pomiędzy fazą hadronową a fazą kwarkowo-gluonową,  $1eV$  odpowiada  $11000K$ , na osi poziomej gęstość barionowa, na pionowej temperatura)

Ewolucja wszechświata (Edwin Hubble - odkrycie, że wszechświat się rozszerza)

Plazma kwarkowo-gluonowa może stanowić rdzenie gwiazd neutronowych (prawdopodobnie!!!).

Plazmę kwarkowo-gluonową można uzyskać korzystając z metody zderzenia ciężkich jonów w akceleratorze.

Obecność promieniowania na codzień: - promieniowanie kosmiczne (istnieje wysokość, na której promieniowanie kosmiczne jest największe)

13,8 miliardów lat temu narodził się wszechświat.

Główny skład dawki promieniotwórczej uzyskiwanej na codzień:

- radon - 40,6%
- gamma - 13,8%
- promieniowanie kosmiczne 8,5%
- radionuklidy naturalne wewn. organizmu 8,3%

- zastosowania medyczne, awaria czarnobyla, inne - 25,8%

Radon - izotop promieniotwórczy będący wynikiem rozpadu radu. Znajduje się w powietrzu, dostaje się do niego z ziemi. Do budynków przenika przez szczeliny w ścianach.

Szkodliwość promieniowania alfa są 20 razy większa niż promieniowania gamma. Nie jest ono jednak bardzo przenikliwe. Kartka papeiru jest w stanie je zatrzymać. Jednak jeśli źródła promieniowania alfa dostaną się do organizmu, mogą uszkodzić organy wewn. Najbardziej przenikliwa jest wiązka neutronów.

Wykorzystanie promieniowania jonizującego:

- defektoskopia przemysłowa
- techniki radiacyjne
- radiometryczna aparatura przemysłowa
- analiza aktywacyjna
- znaczniki promieniotwórczej
- urządzenia do radiacyjnego utrwalania żywności
- energetyka jądrowa/termojądrowa

Instytucje jądrowe w okręgu warszawskim:

- Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku
- Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
- Państwowa Agencja Atomistyki
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
- Centrum Onkologii - Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie
- Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Układ okresowy posiada obecnie 118 pierwiastków.

## 2 Wykład (13.10.2023)

### 2.1 Budowa jądra atomowego

Proton (kwarki uud)

Neutron (kwarki udd)

Model Thomsona atomu (Model ciasta z rodzynkami)

Eksperyment Ernesta Rutherforda (stworzył model planetarny atomu)

### 2.2 Jak wyznaczyć rozmiary jądra atomowego

Na podstawie eksperymentu Rutherforda możemy wyznaczyć rozmiary jądra atomowego. Cząstka alfa wystrelona bezpośrednio w kierunku jądra atomowego zostanie wyhamowana przez pole elektryczne jądra atomowego, po czym zostanie przez nie odepchnięta. Jeżeli nadamy cząstce alfa wystarczająco dużo energii kinetycznej, aby przezwyciężyła ona wpływ pola elektrycznego atomu, wówczas cząstka osiągnie odległość od centrum jądra atomowego równą promieniowi tego jądra. W momencie zetknięcia się cząstki alfa z jądrem atomowym modele rozprzyszczenia cząstki przez jądro atomowe (eksperyment Rutherforda) przestanie obowiązywać, gdyż wtedy dojdzie wpływ sił jądrowych, których model nie uwzględnia.

Jak można to wyznaczyć.

Energia kinetyczna cząstki alfa wynosi:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

Z drugiej strony potencjał kulombowski w odległości  $r$  od jądra atomowego wynosi

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha Q_N}{r} \quad (2)$$

Gdzie ładunek  $q_\alpha = 2e$ , natomiast ładunek jądra atomowego wynosi  $Q_N = Z \cdot e$ , gdzie  $Z$  jest liczbą atomową badanego pierwiastka. Stąd równanie na potencjał można zapisać następująco:

$$V = \frac{Z \cdot e^2}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (3)$$

W momencie zetknięcia się cząstki alfa z jądrem atomowym cała energia kinetyczna cząstki równa się z energią potencjalną:

$$E_k = V \rightarrow R = \frac{Z \cdot e^2}{2\pi\epsilon_0 E_k} \quad (4)$$

### 2.3 Jak wyznaczyć masę jądra atomowego

Spektrometr masowy jest to urządzenie pozwalające na pomiar masy czątek oraz jąder atomowych poprzez przepuszczenie cząstki przez pole elektryczne i magnetyczne. Na początku emitowana jest cząstka, która następnie rozpędzana jest w polu elektrycznym urządzenia. Cząstka nabywa wówczas energię kinetyczną, która wynosi:

$$E_k = \frac{Mv^2}{2} = qU \quad (5)$$

gdzie  $U$  jest napięciem pola elektrycznego, w którym cząstka jest rozpędzana. Następnie cząstka wpada w obszar pola magnetycznego. W polu magnetycznym na cząstkę działa siła Lorentza, która powoduje zakrzywienie toru ruchu cząstki. Promień, jaki zatacza cząstka w polu magnetycznym wynosi:

$$r = \frac{Mv}{qB} \quad (6)$$

Na podstawie tych dwóch równań możemy wyznaczyć masę cząstki:

$$M = \frac{qr^2 B^2}{2U} \quad (7)$$

### 2.4 Rozkład gęstości materii jądrowej

Neutrony i protony są rozłożone w jądrze atomowym w sposób losowy, a nie jak by się mogło wydawać protony skoncentrowane na zewnątrz jądra z powodu działań sił kulombowskich, a neutrony wewnątrz jądra. Wynika to stąd, że wewnątrz jądra atomowego większy wpływ mają siły jądrowe, a nie kulombowskie. Wzór na promień jądra atomowego:

$$R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad (8)$$

gdzie  $R_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1,3 \text{ fm}$  jest stałą która określa w przybliżeniu rozmiary protonu i neutronu, a  $A$  - liczba masowa, czyli liczba nukleonów w jądrze atomowym.

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{r-R_a}} \quad (9)$$

### 2.5 Energia wiązania jądra atomowego

Wzór na energię wiązania (deficyt masy).

$$E_w = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_j)c^2 \quad (10)$$

gdzie  $Z$  - liczba atomowa (liczba protonów),  $N$  - liczba neutronów,  $m_p$  - masa spoczynkowa protonu,  $m_n$  - masa spoczynkowa neutronu,  $M_j$  - masa jądra atomowego.

Wykres średniej energii wiązania nukleonu w funkcji liczby masowej  $A$ . **Na kolokwium na pewno się pojawi pytanie. Należy wiedzieć, co ten wykres opisuje i co z niego wynika.** Maksymalna energia przypadająca na nukleon przypada dla żelaza Fe-58 i wynosi ok.  $9 \text{ MeV}$ .

## 2.6 Model kroplowy

Model ten stanowi analogię kropli cieczy, która skubpia zbiór cząstek i jeśli nie jest poddana działaniu czynników zewn., zachowuje trwałość i kształt zbliżony do kulistego. W przypadku jądra rozpatruje się następujące czynniki określające energię wiązania nukleonów:

$$E_w = E_{obj} + E_{pow} + E_{Coul} + E_{sym} + E_{par} \quad (11)$$

gdzie  $E_{obj} = a_0 A$  - czynnik objętościowy,  $E_{pow} = -a_p A^{2/3}$  - czynnik powierzchniowy,  $E_{Coul} = -a_c Z^2 A^{-1/3}$  - czynnik kulombowski,  $E_{sym} = -a_s (A - 2Z)^2 / A$  - czynnik symetryczny,  $E_{par} = \delta A^{-3/4}$  - czynnik wynikający z tendencji do łączenia się nukleonów w pary.

## 2.7 Siły jądrowe

Oddziaływanie silne działające pomiędzy kwarkami. Wykres sił działających na nukleony w jądrze atomowym. **(na kolokwium)**

Własności sił jądrowych:

- siły jądrowe nie zależą od ładunku elektrycznego
- są krótkozasięgowe, rzędu  $10^{-15} \text{ m}$ .
- charakteryzuje je własność wysycania. Każdy nukleon oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami.
- zależne od wzajemnej orientacji spinów nukleonów, nie tylko od odległości między nukleonami

## 2.8 Model gazu Fermiego

Model oparty na tym, że nukleony nie są traktowane jako związane, ale swobodne. Swoboda ta jest jednak przez barierę studni przyciągającego potencjału jądra. Obowiązuje w nim zakaz Pauliego, zakazującego dowolnym dwóm nukleonom obsadzenia tego samego stanu energetycznego.

Co to są liczby kwantowe - liczby opisujące dyskretne wielkości fizyczne[1], np. poziomy energetyczne cząstek[2], atomów, jąder atomowych, cząsteczek gazów, elektronów swobodnych czy w sieci krystalicznej itd. Wikipedia - Liczby kwantowe. Cztery główne liczby opisujące stan kwantowy:

- główna - odpowiada za energię
- poboczna - odpowiada za moment orbitalny
- magnetyczna - odpowiada za wartość rzutu momentu orbitalnego na wyróżnioną oś
- spinowa - odpowiada za wartość spinu

Chromodynamika kwantowa (teoria).

Jeżeli np. proton osiągnie energię potencjalną większą niż studnia potencjału, to wówczas może wydostać się z tej studni. Jej energia potencjalna zamienia się na energię kinetyczną. Oznacza to również, że nie możemy zauważyć (w większości przypadków, wyjątek stanowią przypadki, gdy w grę wchodzi zjawisko tunelowania kwantowego) emisji cząstek z jąder atomowych o energiach niższych niż górna granica potencjału studni, bowiem dla niższych energii cząstki nie są w stanie wydostać się ze studni potencjału jądra atomowego.

Dodatkowo, aby proton mógł doprowadzić do rozszczepienia jądra atomowego, musi on mieć na tyle dużą energię, aby pokonać barierę studni potencjału. Natomiast w przypadku neutronów efekt ten zachodzi przy niskich energiach. Samo wprowadzenie neutronu do jądra atomowego powoduje jego destabilizację i może prowadzić do rozszczepienia jądra i wydzielenia przy tym ogromnej ilości energii.

## 2.9 Model powłokowy

Opisuje zachowanie "jąder magicznych" (2,8,20,28,50,82,126,...). Model opisuje, iż nukleony znajdują się na powłokach.

## 3 Wykład (20.10.2023) - źródła promieniotwórcze

Aktualnie 118 pierwiastków zarejestrowanych.

### 3.1 Przemiany promieniotwórcze

Przekształcenie jądra w inne z równoczesną emisją cząstki,  $\alpha$ ,  $\beta$  lub  $\gamma$ . Przemiany promieniotwórcze należą do klasy procesów stochastycznych. (Przemiany chemiczne nie mają wpływu na zmiany jądra atomowego).

Przemiana alfa:

- emitowane z atomów ciężkich (liczba masowa rzędu 200)
- jądro atomu helu
- wzór na przemianę alfa
- im większa jest energia emitowanej cząstki tym mniejsza jest szerokość bariery potencjału i tym bardziej jest prawdopodobny rozpad
- energia uwalniana w rozpadzie określona jest przez różnicę mas jądra macierzystego i produktów rozpadu  $Q_\alpha = (M(X) - [M(Y) + M(a)]) \cdot c^2$ ,  $Q_\alpha = ([E_w(Y) + E_w(a)] - E_w(Y)) \cdot c^2$
- w rezultacie przemiany alfa z jądra wyemitowana jest cząstka alfa
- energia rozpadu  $Q_\alpha = E_k(\alpha) \left[ 1 + \frac{m_\alpha}{m_Y} \right]$
- energia emitowanych cząstek alfa dla danej przemiany jest dobrze określona, co jest konsekwencją faktu, że rozpad jest dwuciałowy

Rozpad beta:

- beta "+" i beta "-"
- w trakcie przemiany beta "-" następuje zmiana neutronu w proton i emisja elektronu oraz antyneutrina elektronowego
- Rozpad beta jest rozpadem trzyciałowym
- w trakcie rozpadu emitowane jest
- przemiana beta-minus może zachodzić, jeśli masa atomu pocz jest mniejsza od masy atomu końcowego
- w trakcie rozpadu beta-plus następuje zamiana protonu w neutron i emitowany jest pozyton i neutrino elektronowe
- energie pocz pozytonów są większe niż
- wychwyty elektronów - proces zbliżony do procesu beta-plus
- z orbity atomowej przez jądro atomowe
- warunek wychwyty  $M_A(Z, A) > M_A(Z - 1, A)$
- następuje wówczas również emisja fotonu rentgenowskiego oraz emisja elektronu z bardziej zewnętrznej powłoki atomu, zwanym elektornem Augere'a.

Ścieżka stabilności - stanowią ją wszystkie stabilne jądra atomowe. Dla jąder lekkich prosta jest zbliżona do prostej  $N = Z$ . Im większa liczba atomowa, tym bardziej ścieżka odbiega od tej prostej. Aby jądro było stabilne, siły jądrowe muszą równoważyć siły oddziaływania kulombowskiego. Dla cięższych jąder odpowiednia liczba neutronów zapewnia stabilność.

Przemiana gamma:

- towarzyszy rozpadom alfa lub beta. Cząstka gamma emitowana jest w trakcie przemiany wzbudzonego jądra atomowego do stanu podstawowego.
- konwersja wewnętrzna - proces, w którym miejsce emisji fotonu następuje wyemitowanie elektronu z jednej z powłok atomowych.  $X_Z^A + e_{at}^- \rightarrow X_Z^A + e^-$ . Współczynnik wewnętrznej konwersji  $\alpha = \frac{p_e}{p_\gamma} = \frac{N_e}{N_\gamma}$
- stan wzbudzony nazywamy stanem izomerycznym, przejście izomeryczne (zachodzi z pewnym opóźnieniem)
- widmo elektronów emitowanych w wyniku rozpadu jąder atomowych patrz wykład.

Rozpad jądrowy z emisją protonu - mało prawdopodobne

Rozpad jądrowy z emisją neutronu

Rozszczepienie spontaniczne (przykładowo rozpad kalifornu-252)

### 3.2 Schematy promieniotwórcze

Nuklid początkowy, typ rozpadu, nuklid końcowy

### 3.3 Prawo rozpadu promieniotwórczego

24.11 - spotkanie obecność obowiązująca

Rozpad promieniotwórczy nie jest wynikiem wpływu czynników zewnętrznych na jądro atomowe i nie zależy od wcześniejszych jego losów. Rozpad ma charakter stochastyczny.

$$N(t) = N_0 \cdot \exp -\lambda t \quad (12)$$

gdzie  $\lambda$  jest współczynnikiem zwanym stałą rozpadu,  $N_0$  jest początkową liczbą jąder.

Przy rozpadzie przez bardzo krótki przedział czasu, rozumiemy taki czas, dla którego liczba jąder po rozpadzie jest zbliżona do liczby jąder przed rozpadem. Np. 5 rozpadów na 10 jąder nie będzie krótkim czasem, ale już 5 rozpadów na 1000000 jąder będzie krótkim czasem.

Liczba jąder, które uległy rozpadowi:

$$N_0 - N(t) = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (13)$$

Średni czas życia:  $\tau = 1/\lambda$

Czas połowicznego zaniku/rozpadu - taki czas w którym połowa jąder nie ulega rozpadowi

$$T = \frac{\log 2}{\lambda} = \log 2 \cdot \tau \quad (14)$$

Aktywność źródła - liczba rozpadów zachodzących w jednostce czasu.

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\log 2 \cdot t/T} \quad (15)$$

### 3.4 Sukcesywne rozpady promieniotwórcze

Występuje, gdy po rozpadzie jednych jąder promieniotwórczych powstają inne jądra promieniotwórcze. Jaka jest aktywność takiego układu, gdzie jedno jądro powstaje, a inne ulegają rozpadowi?

Szereg promieniotwórczy

Przykład dla przypadku jąder promieniotwórczych typu 1 i 2, gdzie 2 powstaje z rozpadu 1, a z rozpadu 2 powstaje jądro stabilne.

### 3.5 Naturalne źródła promieniotwórcze

Szeregi promieniotwórcze

Pierwiaski naturalne muszą mieć czas połowicznego rozpadu porównywalne z czasem istnienia Ziemi (rzędu miliardów lat).

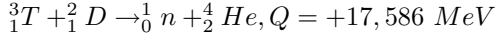
Istnieją cztery szeregi promieniotwórcze: torowy, naptunowy, uranowo-radowy, uranowo-aktywny.

### 3.6 Sztuczna promieniotwórczość

Źródła neutronów, to na ogół układy izotopowe, w których wykorzystuje się źródło cząstek naładowanych. Cząstki te wywołują następnie reakcje jądrowe w których emitowany jest neutron.

Często stosowane jest źródło radowo-berylowe.

Reakcje typu  $(d, n)$  - tzw. generatory neutronów



Reakcja będąca podstawą energetyki termojądrowej

Źródła rozszczepieniowe

Produkcja neutronów w reaktorach termojądrowych

### 3.7 Wiązki promieniowania jonizującego

Wiązka promieniowania jonizującego- strumień cząstek naładowanych, jonizujących emitowanych w określonym kierunku.

Źródła promieniotwórcze tworzą cząstki o określonych energiach. W zastosowaniach medycznych, przemysłowych potrzebne są cząstkami o wyższych energiach.

Urządzenia służące do przyspieszania cząstek naładowanych nazywamy akceleratorami.

Częstość cyklotronowa:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m}$  (Alvares) - częstotliwość, w jakiej naładowana cząstka o ładunku  $q$  i masie  $m$  zatacza okrąg w polu magnetycznym o indukcji  $B$ . Ważne - częstość ta nie zależy od prędkości cząstki.

### 3.8 Spektrometry magnetyczne i akceleratory

Spektrometr masowy (prof. Danysz).

Spektrometr magnetyczny

Akceleratory: liniowe i kołowe

Generator Greinachera lub Cockrofta-Waltona

Generator Van de Graffa (domianą detektora typu Van de Graffa jest tzw. Pelletron)

Akceleratory typu tandem

## 4 Wykład (27.10.2023)

### 4.1 Źródła promieniotwórcze dla celów medycznych

Radionuklidy i radioizotopy - jakie cechy powinny mieć:

1. Okres rozpadu taki, aby zapewnić optymalny stosunek uzyskiwanej informacji badanego organu do dawki promieniowania aplikowanej w zabiegu 2. promieniowanie gamma, nie powinno zawierać prom. alfa i beta (wyjątek stanowi diagnostyka PET) 3. Energia emitowanych fotonów zawiera się w zakresie 100 - 150 keV. Dla wyższych trudna kolimacja wiązki 4. Związki chem. które umożliwiają wchłanianie do badanych organów i szybkie wydalanie z organizmu

Stosowane metody otrzymywania źródeł dla celów medycznych: 1. Reakcje zachodzące pod wpływem neutronu z reaktora jądrowego (w reaktorze powstają ogromne ilości neutronów, neutrony emitowane w reakcji rozszczepienia, do reaktora wstawiane są próbki takich izotopów, które pod wpływem neutronów ulegają aktywacji, dzięki czemu uzyskujemy związki aktywne wykorzystywane w medycynie) 2. Reakcje wywoływane przez cząstki naładowane przyspieszane w akceleratorach 3. Nuklidy uzyskiwane w reakcjach rozszczepienia ciężkich jąder atomowych - sposób uzyskania dla celów medycznych w tej metodzie są inne niż w pkt. 1 i 2 Aktywność zależy od: 1. czasu napromienienia izotopu wyj. 2. Przekrój czynny reakcji jądrowej 3. stała rozpadu izotopu produkowanego 4. wielkość tarczy wyrażana przez liczbę jąder w jednostce objętości 5. gęstość strumienia wyrażana w liczbie cząstek na jednostkę czasu

Aktywność nasycenia - wzór

Produkcja źródeł promieniotwórczych w reaktorze jądrowym

Reakcje wywoływane są przez neutrony termiczne, w wyniku których następuje powstanie radioizotopów.

Nuklidy prom. uzyskiwane w reakcjach rozszczepienia wykorzystywane do celów medycznych:

- Mo-99
- I-131
- Xe-133

Wykres: rozkład liczb masowych produktów rozszczepienia, które pojawiają się w wyniku rozszczepienia jądra uranu-235

Najczęściej używany radioizotop w celach medycznych: technet-99m

Spełnia wszystkie wymagania radioizotopów:

- czas połowicznego rozpadu: 6h
- energia emitowanego promieniowania gamma - 140 keV, optymalna do rejestracji przez detektory scyntylacyjne NaI(Tl) (jodek sodu aktywowany talem)
- pozyskiwanie możliwe jest z pomocą łatwych w transporcie generatorów, może być generowany w stacjach diagnostycznych
- promieniowaniu gamma nie towarzyszy inny rodzaj promieniowania, emisja fotonów jest rezultatem przejścia ze stanu izomerycznego tego izotopu do stanu podstawowego

SPECT - źródło emitujące fotony znajduje się wewnątrz ciała człowieka

Izotop technetu-99m uzyskiwany jest podczas rozpadu beta- izotopu Molibdenu-99. Okres rozpadu Mo-99 to 66 h. W wyniku przejścia technetu-99m ze stanu izomerycznego do stanu podstawowego emitowany jest foton o energii 0.141 MeV. Ta energia wykorzystywana jest do diagnostyki medycznej.

Stan izomeryczny - emisja fotonu z tego stanu następuje z opóźnieniem

Generator technetu: Po uzyskaniu Tc-99m od razu wstrzykujemy go do ciała pacjenta.

W kolumnie znajduje się  $Al_2O_3$  z zaabsorbowanym molibdenem sodu ( $Na_2^{99}MoO_4$ ). Kolumna w grubej osłonie ołowianej. Fiolka niebieska zawiera sól fizjologiczną. Czerwona fiolka ma wypompowane powietrze, co umożliwia proces zasysania.

Znajdujący się pod fiolką filtr przeciwbakteryjny zapewnia sterylność zasysanego roztworu.

Generator wymywa (elucja) przez sól fizjologiczną (eluent) z kolumny, powstający w skutek rozpadu molibdenu, metastabilny izotop technetu-99m w postaci nadtechnetu sodu ( $Na^{99m}TcO_4$ ) (eluat)

Rozpad sukcesywny dla molibdenu i technetu

Technetu nie może być dużo więcej niż molibdenu, gdyż czas rozpadu technetu jest prawie 11 razy krótszy niż molibdenu. Stąd aktywność sukcesywna układu Mo-Tc

Porowata powierzchnia, ponieważ następuje proces adsorpcji.

Wykres - zmiana aktywności zawartego w kolumnie molibdenu i technetu dla przypadku, kiedy technet jest codziennie usuwany z generatora (co 24 h).

## 4.2 Generator neutronów w przemyśle

Nie ma źródeł, które bezpośrednio rozpadają się z emisją neutronu

Potrzebne są reakcje fuzji jądrowej:  $D + D \rightarrow T(1.01MeV) + p(3.02MeV)(50\%)$

$D + D \rightarrow {}^3He(0.82MeV) + n(2.45MeV)$

Inna reakcja:  $D + T \rightarrow {}^4He(3.5MeV) + n(14.1MeV)$

Aby mogło dojść do tych reakcji, jony muszą pokonać barierę kulombowską wynikającą z działającej pomiędzy nimi odpychającej siły elektrostatycznej. Realizuje się to przez przyspieszanie wiązki jonów deuteronów lub/i trytonów do energii ok 100-1509 keV i doprowadzenie do zderzeń przyspieszonych jonów z tarczą zawierającą także deuterony lub /i trytony. Tarcza ma postać wodorku tytanu/skandu/cyrkonu.

Energia neutronu jest 4x większa niż energia cząstki alfa.

Reakcja wykorzystywana do uzyskiwania wiązek neutronów o energii 14.1 MeV.

Przemysł wykorzystanie - Ministerstwo Budowy Dróg i Mostów (badanie struktury gleby i skał).



### 4.3 Wiązki promieniowania jonizującego - kontynuacja

$a = qE/m$  - przyspieszenie cząstki o ładunku  $q$  i masie  $m$  w polu el.  $E$ .

$r = \frac{mv}{qB}$  - promień, z jakim cząstka zatacza okrąg w polu magnetycznym

Symulacja działania pelletronu: Pelletron animation

Akceleratory liniowe - generowane jest napięcie zmienne, do co drugiego segmentu. Jony w ekranach poruszają się ze stałą prędkością. Pomiędzy segmentami jony są przyspieszane. Energie jonów uzyskiwanych z użyciem akceleratorów liniowych są rzędu keV.

Inne rozwiązanie akceleratora liniowego zaproponował Alvarez. (wukorzystanie stojącej fali EM).

Inny sposób do przyspieszania elektronów: przy bardzo dużych energia elektrony mają prędkości relatywistyczne. Do przyspieszenia wykorzystuje się bieżącą falę elektromagnetyczną. Ruch elektronu można porównać do ruchu surfera na fali. Cząstka porusza się na "zbożu fali" EM.

Akceleratory kołowe - aby uzyskać energie większe niż w akceleratorach liniowych. Do przyspieszania ciężkich jonów.

Cyklotron

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{AM_nv}{qB} = \frac{M_nv}{(q/A)B}$$

Liczba obrotów jakie wykonuje cząstka wykonuje w jednostce czasu:  $\nu = 1/T = \frac{v}{2\pi r} = \frac{(q/A)B}{2\pi M_n}$

Elektrony w cylindrze zderzają się z atomami wprowadzanymi do cylindra, jonizując je. Następnie jony są ściągane za pomocą pola el. stanowiącego ekstrakotr. Jony następnie dostają się do obszaru działania pola magnetycznego. Ponieważ promień ruchu cząstek w polu magn. zależy od ich ładunków, dzięki temu możemy dokonać selekcji jonów w zależności od ładunku.

Obszary, gdzie działa pole magnetyczne nazywamy duantami (biegunnikami). Pomiędzy duantami znajduje się natomiast pole el., które rozpędza jony. Generator pola elektrycznego ma tak dobraną częstotliwość zmian kierunku pola el. (częstotliwość cyklotronowa), aby cząstki zawsze były przez nie przyspieszane. Pole to jest zsynchronizowane z ruchem cząstek.

Co należy uwzględnić przy budowie cyklotronu: relatywistyczny przyrost masy, który może spowodować desynchronizację ruchu jonów i pola el. (zmieniamy pole elektryczne w funkcji cząstek), wyprowadzenie wiązki z pola w odpowiednim momencie

Akcelerator synchroniczny

System ogniskowania wiązki w jonowodach (jony wyprowadzone z akceleratora odpychają się siłami kulombowskimi. Aby wiązka się nie rozszerzyła (jony nie uległy rozproszeniu), stosowane są systemy ogniskowania wiązek).

Transport i ogniskowanie wiązki (jonowody)

Magnesy kwadrupolowe (cząstki poruszające się lewo/prawo jest ogniskowana w kierunku poziomym, poruszające góra/dół ogniskowane w kierunku pionowym)

Magnesy dipolowe służą do zmiany kierunku wiązki.

Synchrotron - wraz ze wzrostem relatywistycznym masy cząstki, zwiększane jest pole magnetyczne, co sprawia, że promień ruchu cząstki jest zachowany.

Synchrotron w RHIC Brookhaven National Laboratory (USA) (IF PW bierze udział w projekcie STAR)

CERN: LHC (Large Hadron Collider) gdzie przeprowadzane są 4 eksperymenty: ATLAS, ALICE, CMS, LHCb.

### 4.4 Propagacja promieniowania jonizującego w ośrodku materialnym

Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią pozwala na jego detekcję.

Promieniowanie alfa może być zatrzymane przez naskórek, ale jest niebezpieczne, gdy dostanie się do wnętrza organizmu człowieka.

Promieniowanie beta można zatrzymać przy użyciu kilku milimetrowej warstwy aluminium.

Prom. gamma nie przeniknie przez grubą warstwę ołowiu.

Wiązkę neutronów może zatrzymać b. gruba warstwa betonu.

Przekrój czynny

Liczba usuniętych z wiązki cząstek jest proporcjonalna do grubości warstwy materiału (liczba cząstek "usuniętych z wiązki" mogły zostać albo pochłonięte, albo rozproszone. To że cząstki nie znajdują się w wiązce,

nie oznacza, że cząstki zostały w pełni pochłonięte przez materiał. To może również oznaczać, że część cząstek rozproszyła się na materiale i nie zostały one wychwycone przez detektor):

$$dn = -\sigma \cdot n \cdot N \cdot dx$$

$N[cm^{-3}]$  - liczba cząstek centrum rozpraszania

$\sigma[cm^2]$  - przekrój czynny przypadający na jedno centrum rozpraszające (kolokwium)

Stosowaną jednostką powierzchni przekroju czynnego jest barn [ $1barn = 10^{-24}cm^2$ ]

$\frac{dn}{n} = -\sigma N dx$  - jeśli zmiana jest na tyle mała, to można stosować ten wzór (dx jest infinitesimalnie mała)

$n = n_0 e^{-\sigma N x}$  - prawo opisujące osłabienie wiązki promieniowania przechodzącej.  $n$  jest liczbą cząstek, które pozostały w cząstce. Liczba cząstek (prawo osłabienia wiązki, nie stosujemy dla ciężkich cząstek) które zostały usunięte z wiązki wynosi:

$$n_0 - n = n_0(1 - e^{-\sigma N x})$$

Iloczyn  $\sigma N = \mu_x[cm^{-1}]$  jest nazywany liniowym współczynnikiem osłabienia wiązki (kol).

Grubość materiałów wyraża się w gęstości powierzchniowej  $d = \rho x[g/cm^2]$  (kol).

Jeśli stosujemy gęstość powierzchniową, to w równaniu na prawo osłabienia wiązki korzystamy z masowego współcz. osłabienia:  $\mu_d = \frac{\mu_x}{\rho}(kol)$

Średnia droga swobodna  $\lambda = 1/\mu$ , jeżeli mamy masowy współczynnik osłabienia, to droga swobodna jest wyrażana w  $[g/cm^2]$ . (kol)

Rozproszenie cząstek wiązki jonizującej może nastąpić pod różnymi kątami:

- kąt rozpraszania (kol) - kąt bryłowy (zależy od kąta  $\theta$  (zenitalny) i kąta  $\phi$  (azymutalny)) (kol)

$$d\sigma = \sigma(\theta, \phi)d\Omega$$

Elementy kinematyki relatywistycznej

Masa spoczynkowa cząstki  $m_0$ .

Masa relatywistyczna cząstki  $m$ .

Równanie łączące masę cząstki z jej energią:  $E = mc^2$

$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$  - współczynnik Lorentza (zakres ), gdzie  $\beta = v/c$ .

$$\gamma = m/m_0$$

Pełna energia cząstki wynosi:  $E = E_k + m_0 c^2$ , gdzie drugi człon jest energią spoczynkową cząstki.

Relatywistyczny związek pomiędzy masą, energią i pędem cząstki:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Skrócenie Lorentza:  $l' = l/\gamma$

Dylatacja czasu:  $t' = t\gamma$

Wielkość "rapidity" (pośpieszność):  $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_z}{E-p_z}$

Wielkość ta jest addytywna względem transformacji Lorentza.

## 5 Wykład (3.11.2023)

Przed wizytami należy podać Imię, Nazwisko, nr dowodu osobistego lub legitymację

- 1 grudnia - Świerk 8:00 wyjazd sprzed Gmachu głównego
- 8 grudnia - Składowisko odpadów promieniotwórczych 8:00 wyjazd
- 15 grudnia - Instytut Fizyki Plazmy
- 22 grudnia - Środowiskowe Lab ciężkich jonów
- 
- 12 Stycznia - CLOR

Do instytutów warszawskich dojazd we własnym zakresie

24 października - wykład Wacław Gudowski - obecność obowiązkowa

## 5.1 Propagacja promieniowania jonizującego w ośrodku materialnym - kontynuacja

Aplikacja - Kinematyka relatywistyczna

### 5.1.1 Oddziaływanie z materią promieniowania gamma

Komora pęcherzykowa - detektor śladowy promieniowania jonizującego. Proces wrzenia cieczy zachodzi na niejednorodnościach, czyli w tym przypadku na śladach pozostawionych przez cząstki promieniowania jonizującego. Ze wstrzykiwaniem cząstek do komory synchronizuje się błysk, który powoduje obniżenie ciśnienia wewnątrz komory, i co sprawia, że ścieżki zostają utrwalone.

Ciekły ksenon, gęstość 2x większa niż gęstość wody. Między punktami A i B oraz A i C przeleciał foton, który nie pozostawił za sobą śladu. Dopiero w punktach B i C nastąpiły generacje par elektron-pozyton.

Fotony oddziałują z materią w następujący sposób:

- zjawisko fotoelektryczne - pochłonięcie fotonu przez atom i emisja z powłoki leżącej w pobliżu jądra  $\gamma + \text{atom} \rightarrow \text{atom}^+ + e^-$ ,  $E_k = E_\gamma - W$ , elektron Augere'a,  $\sigma_{ph} = C \cdot \frac{Z^k}{E_{gamma}^n}$  - wzór na przekrój czynny, charakteryzuje prawd-stwo zajścia efektu fotoelektrycznego. Dla niskich energii  $k = 4.0$  i  $n = 3.5$ , dla bardzo wysokich  $k = 4.6$  i  $n = 1.0$
- efekt Comptona - rozproszenie fotonu na gausiswobodnym elektronie. Część energii fotonu pozostaje w materiale, w przeciwieństwie do zjawiska fotoelektrycznego.  $\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e'^-$ ,  $E_1 = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$ , gdzie  $\theta$  jest kątem rozproszenia,  $\alpha = E_0/m_0c^2$  jest stosunkiem energii fotonu do energii spoczynkowej elektronu. Komptonowska długość fali elektronu:  $\lambda_C = \frac{h}{m_0c}$ , a  $\Delta\lambda$  jest przesunięciem komptonowskim. Kiedy następuje rozproszenie pod małym kątem, a kiedy pod dużym? Wzór Kleina-Nishiny opisuje rozkład kątowy rozproszenia fotonu w efekcie Comptona. Przekrój czynny  $\sigma_C^3 \propto \frac{\ln \epsilon}{\epsilon}$ , w stanie końcowym mamy dwie cząstki, zatem przekrój czynny składa się z dwóch części, w jednym jest foton rozproszony, w drugim elektron rozproszony.  $\sigma_{CS} = \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \sigma_C^e$ ,  $\sigma_{ca} = \sigma_C^e - \sigma_{CS}$ . Rozproszone elektrony i fotony mogą być groźne dla zdrowia.
- zjawisko tworzenia par elektron-pozyton.  $\gamma + (A, Z) \rightarrow e^+ + e^- + (A, Z)$ , zjawisko to nie może zajść w próżni, w zjawisku musi towarzyszyć trzecie ciało (jądro atomowe), energia fotonu musi być większa od energii spoczynkowej razem elektronu i pozytonu. Przekrój czynny:  $\sigma_p = \left(\frac{e^2}{m_0c^2}\right)^2 \alpha Z^2 f(E_\gamma)$ , gdzie  $\alpha = 137$

Współczynniki osłabienia wiązki pochłaniania (absorpcji) - współczynnik charakteryzujący to, ile promieniowania zostało zaabsorbowane w ciele/materialu.

Rys. 3.2.8. - zapamiętać rysunek, bo trzeba będzie go narysować na kolokwium

Kiedy elektron zostaje wyhamowywany i jego kierunek ruchu zostaje zmieniony, emitowany jest foton, nazywamy to promieniowaniem synchrotronowym.

### 5.1.2 Oddziaływanie z materią ciężkich cząstek naładowanych

Cząstki ciężkie to takie o masie znacznie większej od masy elektronu.

Starty energii cząstki na wytworzenie jednej pary jonów zależą od rodzaju materiału dla gazów nie różnią się zbyt i wynoszą kilkadziesiąt eV, np. dla powietrza ok. 35 eV.

Na wyhamowanie cząstek ciężkich wymagane jest wiele aktów jonizacji.

Formuła Bethe-Bloch'a

**Charakter promieniowania pod względem zasięgu**

Zasięg wiązki fotonów w materii jest nieskończony. Ma charakter probabilistyczny.

W przypadku cząstek ciężkich cząstka jest wyhamowywana przez materię. Promieniowanie cząstek ciężkich ma charakter zasięgowy.

Średnie straty energii

Zasięg cząstki w materiale

Formuła Bethe-Blocha - jakie są średnie straty jonizacyjne na jednostkę długości drogi ( $r_e$  - klasyczny promień elektronu,  $I$  - potencjał jonizacyjny,  $\delta$  - czynnik uwzględniające ekranowanie cząstki padającej przez pole elektronów ośrodka)

Rys. 3.2B.1 - na kolokwium (starty energii na jednostkę długości drogi w powietrzu dla kule typów cząstek)  
Pomiary strat jonizacyjnych

Promieniowanie Czerenkowa - powstaje, gdy cząstka przechodzi przez dany ośrodek z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku.

Zależność liczby ciężkich cząstek naładowanych danego typu i energii od długości ich drogi w absorbencie (ważne np. dla terapii hadronowej)

Droga w absorbencie - na kolokwium. Im większe są straty jonizacyjne, tym większa musi być gęstość jonizacji absorbenta. Dlatego gęstość rośnie wraz z drogą w absorbencie, aż do pewnego momentu, kiedy coraz więcej cząstek ulega wyhamowaniu, cząstek zaczyna być coraz mniej w wiązce, i coraz mniejsza jest jonizacja. Ta zależność wiąże się z poprzednią zależnością liczby cząstek i energii długości ich drogi w absorbencie.

Krzywa Bragg

## 6 Wykład (24.11.2023)

Gość wykładu: prof. Wacław Gudowski

4 generacja reaktorów jądrowych a SMRy (Small Modular Reactor)

ADS - accelerator driven system

HTR - High Temperature Reactor (Reaktor wysokotemperaturowy)

Każda przemiana energii z jednej w inną formę energii związana jest ze stratami: sprawność określa wielkość takich strat

Ciepło odpadowe - energia tracona na sposób ciepła, niewykorzystywana w procesie generowania energii (w SMRach stara się zniwelować ciepło odpadowe).

Energetyka - dział nauki, który zajmuje się przetwarzaniem dostępnych form energii na postać łatwą do wykorzystania przy zasilaniu wszelkich procesów przemysłowych, a także napędzaniu maszyn i urządzeń używanych w życiu codziennym.

Źródła: nieodnawialne (spalanie paliw kopalnych), odnawialne (słoneczna, wiatrowa, geotermalna, biomasa, wodna), pierwotne (energia jądrowa, zrównoważona).

Wytwarzanie energii el.:

- procesy elektrochemiczne jak w bateriach
- efekt termoelektryczny
- poruszające się pole magnetyczne
- paliwa ogniowe
- efekt fotowoltaiczny
- efekt piezoelektryczny

Reakcja jądrowa:

W wyniku rozszczepienia powstają produkty (jądra), które posiadają dużą energię kinetyczną. Energię tę oddają do otoczenia w postaci ciepła (podgrzewają wodę). Dodatkowo neutrony wywołują kolejne reakcje jądrowe oraz mogą być wchłaniane przez jądro uranu 238 tworząc wzbudzone jądro w wyniku czego powstaje w wyniku rozpadu promieniotwórczego Np239 i Pu239.

W fuzji jądrowej:

Większość energii zabiera neutron, energię od neutronu ciężko jest odebrać (trudniejsze niż odebranie energii od produktów rozszczepienia).

Energia jądrowa jest najnowszą technologią energetyczną odkryta w latach 1938/1942.

Neutrony emitowane przez produkty rozpadu uranu pozwalają na sterowanie reaktora (reaktory opóźnione, neutrony te opóźniają procesy zachodzące w reaktorze)

Najcięższy stabilny izotop: Pb-82

U-238 ma czas połowicznego rozpadu 4,6 mld lat (wiek Ziemi, rozpadowi uległa połowa jąder na Ziemi).

Mnożenie neutronów - stosunek między ilością neutronów w pokoleniu drugim do neutronów w pokoleniu pierwszym.

Pochłonięcie rezonansowe - pochłonięcie neutronu przez jądro pierwiastka (piki na wykresie zależności przekroju czynnego od energii neutronu)

P TNL - probability thermal non-leakage

$k_{eff}$

gdy współczynnik jest mniejszy niż 1, to nie ma reakcji.

gdy współczynnik jest 1, to reakcja jest stabilna

gdy współczynnik jest większy niż jeden, to moc reaktora wzrasta

stan krytyczny (powinno być stan stabilny)- moc się nie zmienia

Uśredniony czas życia = ok. 0,08 s (czas reakcji reaktora rzędu kilku minut, a nie sekund - reaktory opóźnione)

Sprężenie zwrotne - naturalne mechanizmy które zmniejszają reakcję łańcuchową.

Sprężenia temperaturowe (większość sprężeń jest negatywna, ale trzeba uważać na pozytywne)

paliwo jądrowe, moderator (substancja, w której neutrony mogą się poruszać bez strat), chłodziwo (transport energii do użytecznej części systemu, substancja odbierająca ciepło wygenerowane przez rozszczepienia), zbiornik reaktora, pręty sterujące, obudowa bezpieczeństwa

Uran z izotopem U-235 nazywa się uranem wzbogaconym.

Promieniotwórczość jest odwrotnie proporcjonalna do czasu połowicznego rozpadu.

Dobrym moderatorem jest ciężka woda, a drugim moderatorem jest grafit (pręty sterujące).

Reaktory: BWR (z gotującą się wodą) i PWR (ciśnieniowe).

Reaktor termiczny - na neutronach termicznych

Reaktor prędkości - na neutronach prędkich (niespowolnione)

Dlaczego potrzebne są reaktory nowszego typu?

Generacja 4 reaktorów:

- chłodzony ciekłym sodem
- chłodzony ciekłym ołowiem
- chłodzony gazem
- wysokotemperaturowy chłodzony gazem (warto rozwijania)
- z nadkrytyczną parą wodną
- na ciekłych solach (reaktor badawczy, ale nie komercyjny)

SMRy (moc do 300 MW)

Kiur i ameryk nie są dobre jako paliwo, ponieważ zależą od nich pozytywne sprzężenia zwrotne, które mogą prowadzić do sytuacji krytycznych. Dodatkowo w wyniku ich rozpadu powstaje mało neutronów opóźnionych, co zmniejsza stopień kontroli reakcji łańcuchowej.

C-14 5730 lat

Autokar 1 grudnia 7:30.

8 grudnia - wykład