

# Wykłady z Fizyki 12



Zbigniew Osiak

Jądra

## **ORCID**

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

## **OZNACZENIA**

**B** – notka biograficzna

**C** – ciekawostka

**D** – propozycja wykonania doświadczenia

**H** – informacja dotycząca historii fizyki

**I** – adres strony internetowej

**K** – komentarz

**P** – przykład

**U** – uwaga

**Zbigniew Osiak** (Tekst)

**WYKŁADY Z FIZYKI**  
Jądra

**Małgorzata Osiak** (Ilustracje)

© Copyright 2013 by  
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.  
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji  
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej  
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3942-6

e-mail: [zbigniew.osiak@gmail.com](mailto:zbigniew.osiak@gmail.com)

“*Wykłady z Fizyki – Jądra*” są dwunastym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem dwunastego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

- 
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

## Wykład 26

---

# Jądra

**dr Zbigniew Osiak**

Rysunki wykonała

**Małgorzata Osiak**

- 
- Fizyka jądrowa 09
  - Jądro atomowe 13
  - Izotopy, izobary, izotony, izomery, liczby magiczne 30
  - Jądra radioaktywne (promieniotwórcze) 38
  - Mechanizmy rozpadów promieniotwórczych 50
  - Prawo rozpadu promieniotwórczego 57
  - Szeregi promieniotwórcze, datowanie promieniotwórcze 62
  - Reakcje jądrowe 65
  - Reaktor jądrowy 78
  - Promieniowanie jonizujące 83
  - Detekcja promieniowania jonizującego 86
  - Dozymetria promieniowania jonizującego 97
  - Źródła energii gwiazd 109



- Fizyka jądrowa 10
- Promieniotwórczość 11
- Pierwiastki promieniotwórcze 12

- 
- Fizyka jądrowa  $\Leftrightarrow$  dział fizyki zajmujący się budową i własnościami jąder atomowych, reakcjami jądrowymi, przemianami promieniotwórczymi, oddziaływaniem promieniowania jonizującego z materią oraz energetyką jądrową.

• Promieniotwórczość  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na emisji przez jądra atomowe promieniowania elektromagnetycznego i korpuskularnego w wyniku samorzutnych procesów jądrowych, takich jak wychwytywanie elektronu, rozpady alfa, beta minus i beta plus.

**H** Promieniotwórczość rud uranu odkrył przypadkowo Becquerel w 1896. Kolejne dwa pierwiastki promieniotwórcze polon i rad odkryli Maria i Piotr Curie w 1898.

**B** Henri Becquerel (1852-1908), francuski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

**B** Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

**B** Maria Skłodowska-Curie (1867-1934), polsko-francuska chemiczka, laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 1903 oraz z chemii w 1911.

- Pierwiastki promieniotwórcze  $\Leftrightarrow$  pierwiastki mające jedynie izotopy promieniotwórcze oraz pierwiastki, które oprócz izotopów trwałych mają również izotopy promieniotwórcze.

- Jądro atomowe 14
- Proton 15
- Neutron 17
- Nukleony 20
- Liczba atomowa 21
- Liczba masowa 22
- Nuklid 23
- Siły jądrowe 24
- Defekt masy 25
- Energia wiązania 26
- Modele jądrowe 27
- Hiperjądra 28
- Przekrój czynny 29

• Jądro atomowe  $\Leftrightarrow$  centralna część atomu składająca się z protonów i neutronów, mająca dodatni ładunek elektryczny, w której skupiona jest prawie cała masa atomu. Jądra atomowe oznaczają się takimi samymi symbolami jak pierwiastki chemiczne, zaznaczając z lewej strony symbolu na górze liczbę nukleonów, a na dole – liczbę protonów. Liczba neutronów w jądrze jest równa różnicy tych dwóch liczb.

**H** Jądro atomowe odkrył Rutherford podczas badań nad rozpraszaniem cząstek alfa przez złote folie w 1911.

**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

- Proton (p)  $\Leftrightarrow$  cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego, mająca masę ( $m_p$ ) i ładunek ( $q_p$ ), wynoszące odpowiednio:

$$m_p = 1,67262171 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p \cdot c^2 = 938,272029 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836,15267261$$

$$q_p = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $m_e$  – masa elektronu

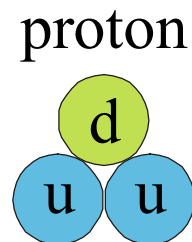
- Proton jest fermionem o spinie  $1/2$ , utworzonym z trzech kwarków (uud), ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny proton jest stabilny, jego okres półtrwania wynosi ponad  $1,6 \cdot 10^{33}$  lat.

**H** Proton odkrył Rutherford w 1919.

**H** Moment magnetyczny protonu odkrył Stern.

**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

**B** Otto Stern (1888-1969), niemiecko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1943.



- Kwarkowy model protonu



- Neutron (n)  $\Leftrightarrow$  cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego. Masa ( $m_n$ ) neutronu wynosi:

$$m_n = 1,67492728 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

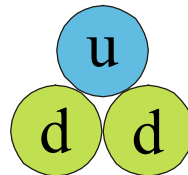
$$m_n \cdot c^2 = 939,565360 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_n}{m_e} = 1838,6836598$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $m_e$  – masa elektronu

- Neutron jest fermionem o spinie  $1/2$ , utworzonym z trzech kwarków (udd), nie ma ładunku elektrycznego, ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny neutron jest niestabilny, jego okres półtrwania wynosi  $614,6 \pm 1,3$  s, ulega rozpadowi wskutek rozpadu beta minus.

neutron



- Kwarkowy model neutronu

**H** Neutron przewidział Rutherford w 1920, a odkrył Chadwick w 1932.

**H** Moment magnetyczny neutronu wyznaczyli Bloch i Alvarez w 1940.

**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

**B** Sir James Chadwick (1891-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935.

**B** Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

**B** Felix Bloch (1905-1983), amerykański fizyk pochodzenia szwajcarskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1952.

- 
- Nukleony  $\Leftrightarrow$  protony i neutrony, podstawowe składniki jąder atomowych.

- 
- Liczba atomowa ( $Z$ )  $\Leftrightarrow$  liczba protonów znajdujących się w jądrze atomowym, nazywana też liczbą Moseleya.

**B** Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), angielski fizyk.

- 
- Liczba masowa (A)  $\Leftrightarrow$  liczba nukleonów znajdujących się w jądrze atomowym.

---

• Nuklid  $\Leftrightarrow$  atom o ściśle określonej liczbie protonów i neutronów znajdujących się w jego jądrze.

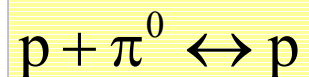
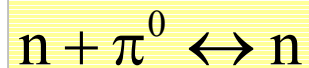
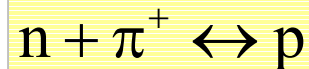
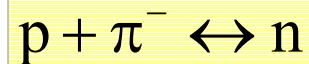
**C** Istnieje więcej niż 2500 nuklidów, większość z nich to nuklidy radioaktywne.

**H** Pojęcie nuklidu zaproponował Kohman w 1947.

**U** Pojęcie nuklidu bywa mylone z pojęciem izotopu.

**B** Truman Paul Kohman (1916-2010), amerykański chemik.

- Siły jądrowe  $\leftrightarrow$  krótkozasięgowe siły działające między nukleonami w jądrach. Siły jądrowe nie zależą od ładunków elektrycznych oddziałujących nukleonów, są takie same między protonami oraz między neutronami, a także między neutronami i protonami. Na odległościach z przedziału  $(0,3 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$  m są siłami przyciągającymi, a na odległościach mniejszych od  $0,3 \cdot 10^{-15}$  m są siłami odpychającymi. Pierwszą teorię sił jądrowych przedstawił Yukawa w 1935. Nośnikami sił jądrowych w jego teorii są mezony.



**B** Hideki Yukawa (1907-1981), japoński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1949.



- 
- Defekt masy ( $\Delta m$ )  $\Leftrightarrow$  różnica sumy mas nukleonów swobodnych i masy utworzonego z nich jądra atomowego. Energia równoważna defektowi masy jest równa energii wiązania jądra.

- Energia wiązania (E)  $\Leftrightarrow$  energia potrzebna do rozdzielenia danego jądra atomowego na protony i neutrony, równoważna defektowi masy ( $\Delta m$ ) tego jądra.

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

- c – wartość prędkości światła w próżni

• Modele jądrowe  $\Leftrightarrow$  modele budowy jąder atomowych mające na celu wytłumaczenie różnych własności jąder. Znane są następujące modele jądrowe: alfowy, dołu potencjału, gazu Fermiego, kolektywny, kropłowy, nadprzewodnictwa, powłokowy, rotacyjny, sferoidalnego rdzenia i uogólniony.

**H** Powłokowy model jądra atomowego był badany przez Goepfert-Mayer i Jensena.

**B** Maria Goepfert-Mayer (1906-1972), amerykańska fizyczka pochodzenia niemieckiego, laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 1963.

**B** Johannes Hans Daniel Jensen (1907-1994), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1963.

• Hiperjądra  $\Leftrightarrow$  jądra atomowe zawierające co najmniej jeden hiperon lambda zero.

**P** Jądro hiperwodoru 3 składa się z protonu, neutronu i hiperonu lambda zero.

**H** Pierwsze hiperjądro odkryli Danysz i Pniewski w 1952.

**B** Marian Danysz (1909-1983), polski fizyk.

**B** Jerzy Pniewski (1913-1989), polski fizyk.

- Przekrój czynny ( $\sigma$ )  $\Leftrightarrow$  pole powierzchni ( $\sigma$ ) płaskiej tarczy zastępującej w rozważaniach jądro oddziałujące z bombardującą go cząstką.

$$[\sigma] = \text{m}^2 = 10^{28} \text{ b (barnów)}$$

- Przekrój czynny jest miarą prawdopodobieństwa zajścia danej reakcji jądrowej.

- Izotopy 31
- Deuteron 32
- Tryton 33
- Izobary 34
- Izotony 35
- Izomery 36
- Liczby magiczne 37

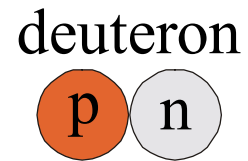
• Izotopy  $\Leftrightarrow$  nuklidy, których jądra mają taką samą liczbę protonów, ale różną liczbę neutronów.

**P** Izotopami są nuklidy  ${}^5_3\text{Li}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^7_3\text{Li}$  i  ${}^8_3\text{Li}$ .

**H** Nazwę izotopy zaproponował Soddy w 1913.

**B** Sir Frederick Soddy (1877-1956), brytyjski chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii 1921.

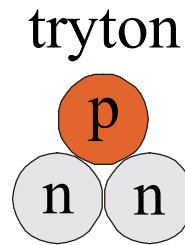
- Deuteron (d, D)  $\Leftrightarrow$  jądro deuteru składające się z jednego protonu i jednego neutronu.



- Protonowo-neutronowy model deuteronu

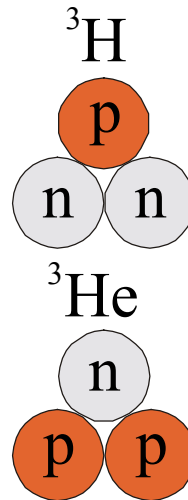


- Tryton (T)  $\Leftrightarrow$  jądro trytu składające się z jednego protonu i dwóch neutronów.



- Protonowo-neutronowy model trytonu

- Izobary  $\Leftrightarrow$  nuklidy, których jądra mają taką samą liczbę nukleonów, ale różną liczbę protonów.



- Izobary o trzech nukleonach

- Izotony  $\Leftrightarrow$  nuklidy, których jądra mają taką samą liczbę neutronów, ale różną liczbę protonów.

**P** Izotonami są nuklidy  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{15}_7\text{N}$  i  ${}^{16}_8\text{O}$ .

---

- Izomery  $\Leftrightarrow$  nuklidy, których jądra różnią się tylko energią (znajdując się w różnych stanach kwantowych). Przejście wzbudzonego jądra do stanu podstawowego jest związane z emisją fotonu gamma.

**H** Izomery odkrył Hahn w 1921.

**B** Otto Hahn (1879-1968), niemiecki fizyko-chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1944.

- 
- Liczby magiczne  $\Leftrightarrow$  liczby protonów lub/i neutronów w jądrach atomowych należące do zbioru (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). Jądra magiczne mają dużą energię wiązania i są bardzo stabilne (trwałe).

- Jądra radioaktywne (promieniotwórcze) 39
- Atomy znaczone 40
- Promieniowanie korpuskularne 41
- Cząstka alfa (jądro atomu helu  $^4\text{He}$ ) 42
- Cząstka beta minus (elektron) 43
- Cząstka beta plus (pozytron) 44
- Neutrino elektronowe 45
- Antyneutrino elektronowe 47
- Promieniowanie gamma 48
- Zjawisko (efekt) Mössbauera 49

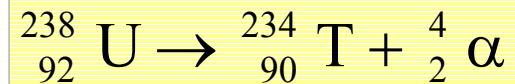
- Jądra radioaktywne (promieniotwórcze)  $\Leftrightarrow$  niestabilne jądra atomowe spontanicznie emitujące korpuskuły i promieniowanie elektromagnetyczne wskutek procesów, takich jak samorzutne rozszczepienie, rozpad alfa, rozpad beta minus, rozpad beta plus oraz wychwytywanie elektronu.

- Atomy znaczone  $\Leftrightarrow$  atomy izotopu promieniotwórczego wprowadzone do organizmu człowieka (lub układu technicznego), umożliwiające wyznaczenie stężenia domieszkowanej nimi substancji oraz jej ruchu i przemian w układzie. Atomy znaczone, nazywane też wskaźnikami izotopowymi, wykorzystywane są między innymi w diagnostyce medycznej.



- 
- Promieniowanie korpuskularne  $\Leftrightarrow$  strumień elektronów, pozytronów, protonów, neutronów lub cząstek alfa emitowanych podczas rozpadów jąder promieniotwórczych.

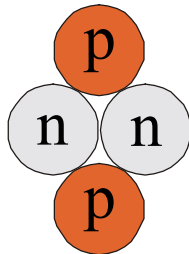
- Cząstka alfa ( $\alpha, {}^4_2\text{He}^{2+}$ )  $\Leftrightarrow$  cząstka składająca się z dwóch neutronów i dwóch protonów, inaczej mówiąc, jest to jądro izotopu helu  ${}^4_2\text{He}$ . Cząstki alfa są emitowane przez niektóre pierwiastki promieniotwórcze, np.



**H** Nazwę cząstka alfa wprowadził Rutherford w 1897.

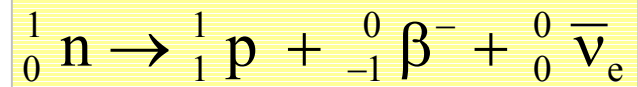
**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

cząstka alfa



- Protonowo-neutronowy model cząstki alfa

- Cząstka beta minus ( $\beta^-$  lub  $\beta$ )  $\Leftrightarrow$  elektron emitowany przez jądro atomowe w wyniku transformacji neutronu w proton, zwanej rozpadem beta minus.

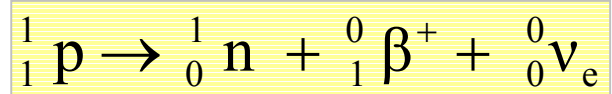


- ${}^0_0\bar{\nu}_e$  – antyneutrino elektronowe

**H** Nazwę cząstka beta wprowadził Rutherford w 1897.

**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

- Cząstka beta plus ( $\beta^+$ )  $\Leftrightarrow$  pozyton emitowany przez jądro atomowe w wyniku transformacji protonu w neutron, zwanej rozpadem beta plus.



- ${}^0_0\nu_e$  – neutrino elektronowe

- Neutrino elektronowe ( $\nu_e$ )  $\Leftrightarrow$  cząstka fundamentalna pierwszej generacji, powstająca podczas rozpadu beta plus. Neutrino elektronowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie  $1/2$ , ma masę mniejszą niż  $50 \text{ eV}/c^2$ . Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

**H** Istnienie neutrino elektronowego postulował Pauli w 1930, nazywając je neutronem. Nazwę neutrino zaproponował Fermi w 1933. Neutrino elektronowe odkryli Reines i Cowan oraz ich współpracownicy w 1956.

**B** Wolfgang Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

**B** Frederick Reines (1918-1998), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995.

**B** Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), amerykański fizyk.

- 
- Antyneutrino elektronowe ( $\bar{\nu}_e$ )  $\Leftrightarrow$  antycząstka neutrina elektronowego, będąca leptonem, powstająca podczas rozpadu beta minus.

- Promieniowanie gamma ( $\gamma$ )  $\Leftrightarrow$  fotony o energiach większych niż 12,4 keV, emitowane między innymi przez wzbudzone jądra atomowe oraz podczas anihilacji cząstki i antycząstki.

**H** Promieniowanie gamma odkrył Villard w 1900.

**B** Paul Ulrich Villard (1860-1934), francuski fizyk.

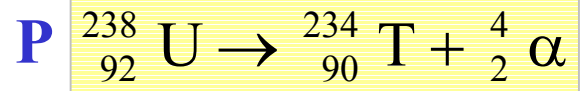


- Zjawisko (efekt) Mössbauera  $\Leftrightarrow$  zjawisko odkryte przez Mössbauera w 1957, polegające na bezdrzutowej emisji i absorpcji promieniowania gamma przez jądra atomowe w sieci krystalicznej.

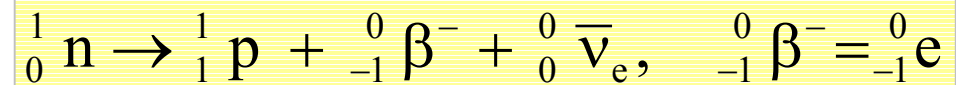
**B** Rudolf Ludwig Mössbauer (1929-2011), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1961.

- Rozpad alfa 51
- Rozpad neutronu (rozpad beta minus) 52
- Rozpad protonu (rozpad beta plus) 53
- Konwersja wewnętrzna 54
- Wychwył elektronu 55
- Reguła przesunięć Fajansa-Soddy'ego 56

- Rozpad alfa  $\Leftrightarrow$  emisja przez jądro atomowe cząstki alfa. Nowo powstałe jądro ma liczbę masową o cztery jednostki mniejszą oraz liczbę atomową o dwie jednostki mniejszą. Rozpad alfa jest przykładem zjawiska tunelowego.



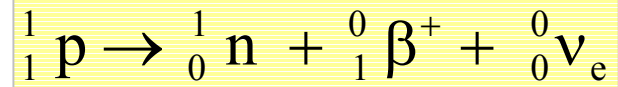
- Rozpad neutronu (rozpad beta minus)  $\Leftrightarrow$  emisja elektronu (e) przez jądro, będąca skutkiem przekształcenia się w jądrze neutronu (n) w proton (p).



- ${}^0_0\bar{\nu}_e$  – antyneutrino elektronowe
- Nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden większą, a jego liczba masowa nie zmienia się.



- Rozpad protonu (rozpad beta plus)  $\Leftrightarrow$  emisja pozytronu przez jądro, będąca skutkiem przekształcenia się w jądrze protonu (p) w neutron (n).



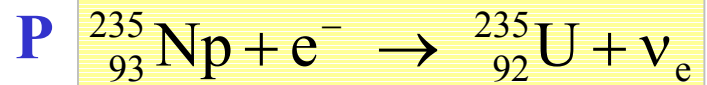
- ${}^0_0\nu_e$  – neutrino elektronowe
- Nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden mniejszą, a jego liczba masowa nie zmienia się.

- Konwersja wewnętrzna  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na tym, że wzbudzone jądro przechodząc ze stanu o wyższej energii do stanu o niższej energii przekazuje różnicę tych energii ( $E_\gamma$ ) elektronowi orbitalnemu. Elektron ten zostaje dzięki temu emitowany przez atom, uzyskując energię kinetyczną ( $E_e$ ) daną poniższym równaniem:

$$E_e = E_\gamma - E_w$$

- $E_w$  – energia wiązania elektronu

- Wychwył elektronu  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegajĄce na wnikięciu do jĄdra elektronu orbitalnego ( $e^-$ ). Jeden z protonów w jĄdrze przekształca się w neutron i neutrino elektronowe ( $\nu_e$ ), które jest emitowane przez jĄdro. Wychwył przez jĄdro elektronu orbitalnego z powłoki K nazywany jest wychwytem K.



**H** Wychwył K odkrył Alvarez w 1937.

**B** Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

- Reguła przesunięć Fajansa-Soddy'ego  $\Leftrightarrow$  reguła stanowiąca, że:
- W wyniku rozpadu alfa nowo powstałe jądro ma liczbę masową o cztery jednostki mniejszą oraz liczbę atomową o dwie jednostki mniejszą.
- W wyniku rozpadu beta minus nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden większą, a jego liczba masowa nie zmienia się.
- W wyniku rozpadu beta plus nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden mniejszą, a jego liczba masowa nie zmienia się.

**H** Regułę przesunięć sformułowali niezależnie Soddy w 1911, oraz w postaci rozszerzonej Fajans w 1913.

**B** Sir Frederick Soddy (1877-1956), brytyjski (angielski) chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1921.

**B** Kazimierz Fajans (1887-1975), polsko-amerykański fizykochemik.

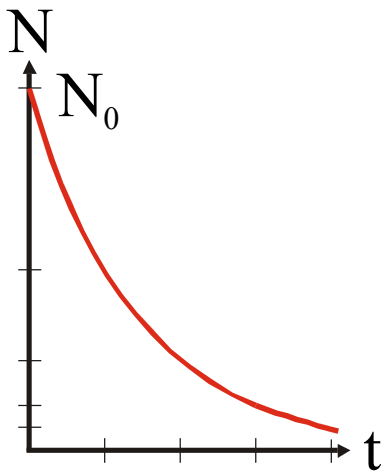


- Prawo rozpadu promieniotwórczego 58
- Okres połowicznego rozpadu (zaniku) 59
- Stała rozpadu (zaniku) 60
- Średni czas życia jądra 61

- Prawo rozpadu promieniotwórczego  $\Leftrightarrow$  prawo głoszące, że liczba (N) jąder pozostających po czasie (t) w wyniku rozpadów promieniotwórczych dana jest równaniem

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

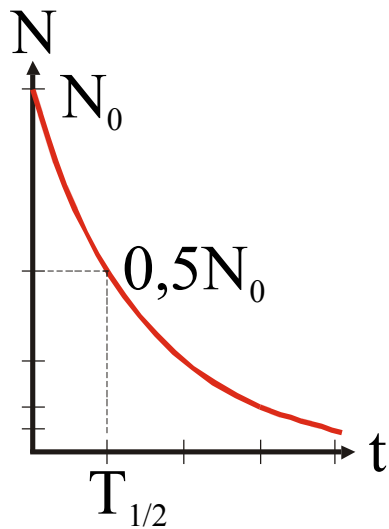
- $N_0$  – początkowa liczba jąder
- $\lambda$  – stała rozpadu (zaniku)



- Wykres zależności liczby jąder (N), które pozostały w próbce pierwiastka promieniotwórczego, od czasu (t).

- Okres połowicznego rozpadu (zaniku) ( $T_{1/2}$ )  $\Leftrightarrow$  przedział czasu, w ciągu którego rozpada się połowa liczby jąder danego pierwiastka promieniotwórczego.

**P**  ${}^{235}_{92}\text{U} : T_{\frac{1}{2}} = 7,2 \cdot 10^8 \text{ lat.}$   ${}^{238}_{92}\text{U} : T_{\frac{1}{2}} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ lat.}$   ${}^{232}_{90}\text{Th} : T_{\frac{1}{2}} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ lat.}$



- Wykres zależności liczby jąder (N), które pozostały w próbce pierwiastka promieniotwórczego, od czasu (t);  $T_{1/2}$  jest czasem połowicznego rozpadu.

- Stała rozpadu (zaniku) ( $\lambda$ )  $\Leftrightarrow$  stosunek szybkości rozpadów promieniotwórczych ( $-dN/dt$ ) do aktualnej liczby jąder ( $N$ ).

$$\lambda = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt}, \quad [\lambda] = \frac{1}{s}$$

- Stała rozpadu, średni czas życia jądra ( $\tau$ ) oraz okres połowicznego rozpadu ( $T_{1/2}$ ) powiązane są relacjami:

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

- Średni czas życia jądra ( $\tau$ )  $\Leftrightarrow$  średnia arytmetyczna czasów życia danej populacji jąder atomowych.

$$\tau = \ln 2 \cdot T_{\frac{1}{2}} \approx 0,7 \cdot T_{\frac{1}{2}}$$

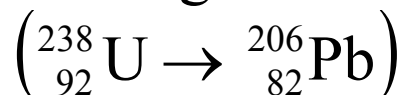
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- $T_{1/2}$  – okres połowicznego rozpadu
- $\lambda$  – stała rozpadu

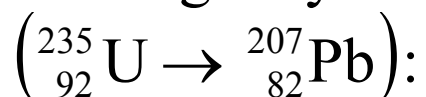
- Szeregi promieniotwórcze 63
- Datowanie promieniotwórcze 64

- Szeregi promieniotwórcze  $\Leftrightarrow$  nuklidy promieniotwórcze powstające z innych nuklidów promieniotwórczych wskutek rozpadu alfa lub beta. Wszystkie trzy naturalne szeregi promieniotwórcze zaczynają się od nuklidów o dużym okresie połowicznego rozpadu, a kończą na trwałych izotopach ołowiu.

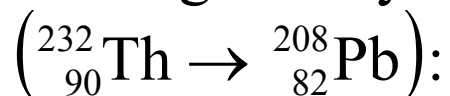
- Szereg uranowy:



- Szereg aktynowy:



- Szereg torowy:



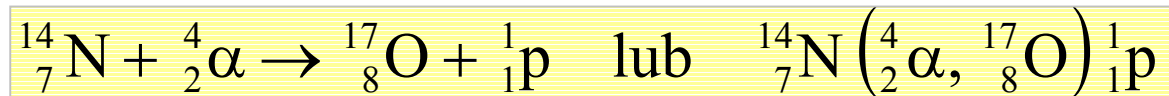
- Datowanie promieniotwórcze  $\Leftrightarrow$  metoda wyznaczania wieku substancji polegająca na pomiarze aktywności zawartych w niej izotopów promieniotwórczych.



- Reakcje jądrowe 66
- Reakcja rozszczepienia 67
- Masa krytyczna 69
- Bomba atomowa 70
- Projekt Manhattan 71
- Reakcja termojądrowa (fuzja) 73
- Bomba wodorowa 74
- Kontrolowana synteza jądrowa 75
- Tokamak 76
- Zimna fuzja 77

- Reakcje jądrowe  $\Leftrightarrow$  procesy zachodzące podczas wzajemnego oddziaływania jąder z jądrami lub jąder z cząstkami elementarnymi. W reakcjach jądrowych spełnione są zasady zachowania ładunku elektrycznego, masy, energii, pędu, momentu pędu, liczby barionowej, liczby leptonowej, trzeciej składowej izospinu, dziwności oraz parzystości.

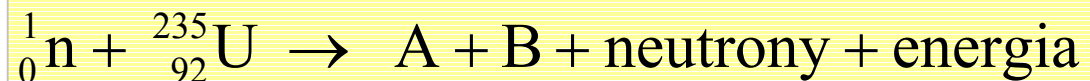
**H** Pierwszą sztuczną reakcję jądrową przeprowadził Rutherford w 1919. Bombardując jądra azotu cząstkami alfa, otrzymał jądra tlenu i protony.



**B** Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

- Reakcja rozszczepienia  $\Leftrightarrow$  reakcja jądrowa, w której jądro samorzutnie lub wskutek bombardowania go cząstkami elementarnymi rozpada się na mniejsze fragmenty. W reakcji rozszczepienia jądra atomowego wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas (spoczynkowych) substratów jest większa od sumy mas (spoczynkowych) produktów.

**H** Badania, które przeprowadzili Fermi i Segrè w 1934, Hahn i Strassmann w 1938 oraz Frisch i Meitner w 1939, doprowadziły do odkrycia łańcuchowej reakcji rozszczepienia uranu.



- A, B – produkty rozpadu jądra uranu

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

**B** Emilio Gino Segrè (1905-1989), włosko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959.

**B** Otto Hahn (1879-1968), niemiecki fizykochemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1944.

**B** Fritz Strassmann (1902-1980), niemiecki fizykochemik.

**B** Otto Robert Frisch (1904-1979), austriacko-brytyjski fizyk.

**B** Lise Meitner (1878-1968), austriacko-szwedzka fizyczka.

• Masa krytyczna  $\Leftrightarrow$  minimalna masa materiału rozszczepialnego, wystarczająca do tego, aby nastąpiła w nim łańcuchowa reakcja rozszczepienia jąder atomowych.

**P** Przybliżone wartości mas krytycznych dla  ${}_{92}^{235}\text{U}$  i  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  wynoszą odpowiednio 52 kg i 10 kg.

- Bomba atomowa  $\Leftrightarrow$  bomba, w której zachodzi niekontrolowana reakcja łańcuchowa samorzutnego rozszczepienia jąder atomowych  ${}_{92}^{235}\text{U}$  lub  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Temperatura w chwili wybuchu jest rzędu  $10^8$  K.
- Bomba atomowa nazywana jest też bombą jądrową.

•Projekt Manhattan  $\Leftrightarrow$  nazwa przedsięwzięcia mającego na celu budowę bomby atomowej. Projekt realizowany był w latach 1942–1947, zakończył się powodzeniem. Uczestniczyli w nim między innymi Alvarez, Bohr, Compton, Einstein, Fermi, Franck, Lawrence oraz Oppenheimer.

**B** Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

**B** Niels Henrik David Bohr (1885-1962), duński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1922.

**B** Arthur Holly Compton (1892-1962), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

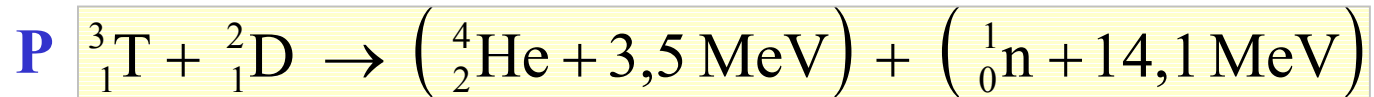
**B** James Franck (1882-1964), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1925.

**B** Ernest Orlando Lawrence (1901-1958), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1939.

**B** J. Robert Oppenheimer (1904-1967), amerykański fizyk.

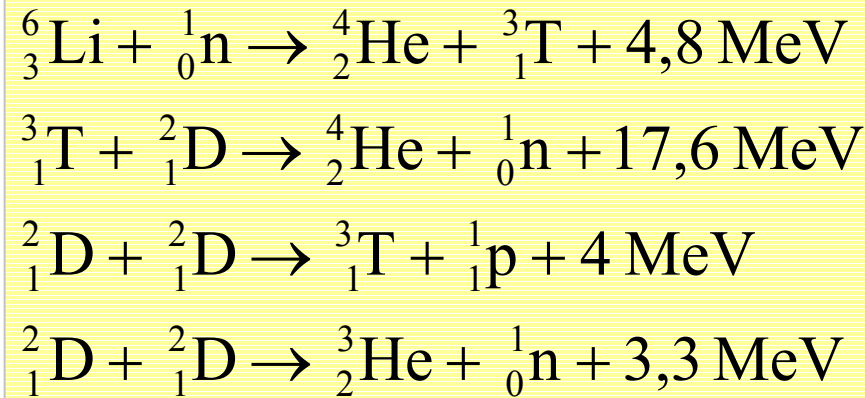


- Reakcja termojądrowa (fuzja)  $\Leftrightarrow$  reakcja jądrowa, w której z dwóch jąder lekkich powstaje nowe jądro. W reakcji termojądrowej wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas (spoczynkowych) substratów jest większa od sumy mas (spoczynkowych) produktów. Do zajścia reakcji termojądrowej wymagana jest temperatura rzędu  $10^8$  K, stąd przedrostek termo w nazwie tej reakcji.



- Reakcja termojądrowa nazywana jest też reakcją termonuklearną, syntezą jądrową lub fuzją jądrową.

- Bomba wodorowa  $\Leftrightarrow$  bomba, w której zachodzi niekontrolowana reakcja termojądrowa syntezy jąder helu z nuklidów  ${}^2_1\text{D}$ ,  ${}^3_1\text{T}$  oraz  ${}^6_3\text{Li}$ .



- Zapalnikiem w bombie wodorowej jest bomba atomowa. Bomba wodorowa nazywana jest też bombą termojądrową lub termonuklearną.

- Kontrolowana synteza jądrowa  $\Leftrightarrow$  reakcja termojądrowa (fuzja) przebiegająca w pełni kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Jedną z możliwości jest przeprowadzenie tej reakcji w “naczyniu” utworzonym z odpowiednio uformowanego silnego pola magnetycznego, którego źródłem są nadprzewodnikowe elektromagnesy. Zapalnikiem jest laser o gigantycznej mocy.

- Tokamak  $\Leftrightarrow$  urządzenie służące do wytwarzania i przechowywania gorącej plazmy, co umożliwia przeprowadzenie kontrolowanej reakcji termojądrowej (fuzji). Pierwszy tokamak zbudowano w Moskwie w 1956. Nazwa **tokamak** pochodzi od pierwszych sylab rosyjskich słów **т**ороидальная **к**амера с **м**агнитными **к**атушками (toroidalna komora z magnetycznymi cewkami).

- 
- Zimna fuzja  $\Leftrightarrow$  kontrolowana synteza jąder lekkich pierwiastków (fuzja), którą można przeprowadzić w zdecydowanie niższej temperaturze niż  $10^8$  K.

- Reaktor jądrowy 79
- Moderator neutronów 80
- Ciężka woda 81
- Reflektor neutronów 82

• Reaktor jądrowy  $\Leftrightarrow$  urządzenie służące do przeprowadzania kontrolowanej reakcji łańcuchowej rozszczepienia jąder atomowych  $^{235}_{92}\text{U}$  lub  $^{239}_{94}\text{Pu}$  zachodzącego samorzutnie lub wskutek bombardowania tych jąder neutronami.

**C** Pierwszy polski reaktor jądrowy o nazwie Ewa powstał 14 czerwca 1958 w Świerku pod Warszawą. Pierwszy na świecie reaktor jądrowy uruchomiono w 1942 w Chicago.

- 
- Moderator neutronów  $\Leftrightarrow$  materiał służący do spowalniania neutronów w reaktorze. Dobrymi moderatorami neutronów są woda, ciężka woda oraz grafit.



- Ciężka woda  $\Leftrightarrow$  woda, której cząsteczki są utworzone z atomu tlenu (O) i dwóch atomów deuteru ( ${}^2_1\text{D}$ ).

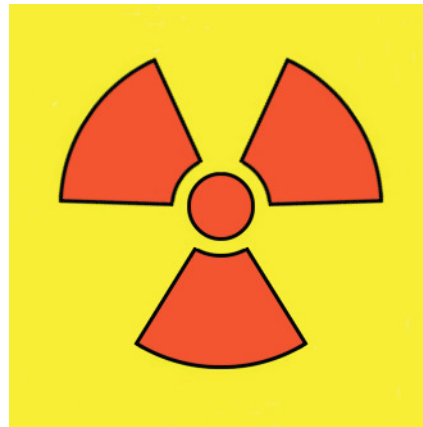


- Ciężka woda stosowana jest jako moderator neutronów w reaktorach jądrowych.

- 
- Reflektor neutronów  $\Leftrightarrow$  warstwa grafitu, wody, ciężkiej wody lub berylu otaczająca rdzeń reaktora i odbijająca część uciekających z niego neutronów.

- Promieniowanie jonizujące 84
- Radioliza 85

- Promieniowanie jonizujące  $\Leftrightarrow$  promieniowanie elektromagnetyczne (rentgenowskie, gamma) lub korpuskularne (elektrony, pozytrony, protony, neutrony, cząstki alfa) powodujące jonizację materii.



- Znak ostrzegający przed promieniowaniem jonizującym

- 
- Radioliza  $\Leftrightarrow$  przemiana chemiczna zachodząca pod wpływem promieniowania jonizującego.

- Detekcja promieniowania jonizującego 87
- Detektor 88
- Licznik Geigera-Müllera 89
- Licznik scyntylicyjny 90
- Komora Wilsona 91
- Komora pęcherzykowa 92
- Komora iskrowa 93
- Układ koincydencyjny 94
- Promieniowanie tła 95
- Promieniowanie kosmiczne 96

- Detekcja promieniowania jonizującego  $\Leftrightarrow$  czynność polegająca na rejestrowaniu promieniowania jonizującego oraz badaniu jego parametrów.

- 
- Detektory  $\Leftrightarrow$  przyrząd lub materiał służący do rejestrowania promieniowania i badania jego właściwości. Najprostszym detektorem jest klisza fotograficzna.



• Licznik Geigera-Müllera  $\Leftrightarrow$  przyrząd, skonstruowany przez Geigera i Müllera w 1928, służący do zliczania fotonów oraz naładowanych cząstek promieniowania jonizującego. Stanowi go zamknięta szklana rura wypełniona gazem. Wewnątrz znajdują się dwie metalowe elektrody, do których przyłożone jest wysokie napięcie, jedną z nich jest drucik umiejscowiony na osi licznika, druga ma kształt cylindryczny. Cząstka wpadająca przez okienko do licznika powoduje jonizację gazu, a w następstwie krótkotrwały przepływ prądu elektrycznego. Kolejne impulsy elektryczne są zliczane przez odpowiedni układ elektroniczny.

**B** Hans Wilhelm Geiger (1882-1945), niemiecki fizyk.

**B** Walther Müller (1905-1978), niemiecki fizyk.

- Licznik scyntylacyjny  $\Leftrightarrow$  przyrząd służący do zliczania fotonów oraz cząstek (w tym neutronów) promieniowania jonizującego. Energia kinetyczna cząstki lub energia fotonu, przekazana atomom lub cząsteczkom scyntylatora, powoduje błyski (scyntyłacje) rejestrowane przez fotopowielacz i zliczane przez odpowiedni układ elektroniczny.

- Komora Wilsona  $\Leftrightarrow$  urządzenie służące do wizualizacji torów cząstek elementarnych obdarzonych ładunkiem elektrycznym podczas ich przelotu przez mieszaninę powietrza (lub innego gazu) i przesyconej pary wodnej (lub innej cieczy). Wzdłuż toru cząstki tworzą się małe kropelki cieczy wskutek skraplania się pary przesyconej na centrach kondensacji, jakimi stają się zjonizowane cząsteczki powietrza.
- Komora Wilsona jest też nazywana komorą mgłową.

**H** Komorę mgłową, skonstruowaną po raz pierwszy przez Wilsona w 1911, udoskonalił Blackett w 1932.

**B** Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), szkocki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927.

**B** Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948.

• Komora pęcherzykowa  $\Leftrightarrow$  urządzenie służące do wizualizacji torów cząstek elementarnych obdarzonych ładunkiem elektrycznym podczas ich przelotu przez przegrzaną ciecz. Wzdłuż toru cząstki tworzą się małe pęcherzyki. Cieczami stosowanymi w komorze pęcherzykowej są ciekły wodór, hel, ksenon, propan oraz eter etylowy. Stan przegrzania cieczy uzyskuje się wskutek gwałtownego obniżenia ciśnienia.

**H** Komorę pęcherzykową wynalazł Glaser w 1952, a udoskonalił Alvarez.

**B** Donald Arthur Glaser (1926-2013), amerykański fizyk i neurobiolog, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1960.

**B** Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

- Komora iskrowa  $\Leftrightarrow$  urządzenie służące do wizualizacji torów cząstek elementarnych obdarzonych ładunkiem elektrycznym. Stanowi ją układ równoległych elektrod w postaci płytek lub drutów metalowych znajdujących się w pojemniku wypełnionym helem i neonem. Co druga elektroda jest uziemiona, pozostałe elektrody mają wysoki potencjał. Jony wytworzone przez badaną cząstkę powodują wyładowanie iskrowe między odpowiednią parą elektrod.

**H** Komorę iskrową wynalazł Fukui.

**B** Shuji Fukui (ur. 1923), japoński fizyk z Nagoya University.

- 
- Układ koincydencyjny  $\Leftrightarrow$  układ elektroniczny rejestrujący tylko sygnały pojawiające się równocześnie na jego wejściach.

- 
- Promieniowanie tła  $\Leftrightarrow$  promieniowanie jonizujące pochodzące z innych źródeł niż źródło badane.

- Promieniowanie kosmiczne  $\Leftrightarrow$  promieniowanie pochodzące z przestrzeni kosmicznej. Jednym ze źródeł tego promieniowania jest Słońce.

**H** Promieniowanie kosmiczne odkrył Hess w 1912.

**B** Victor Franz Hess (1883-1964), austriacki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1936.



- Dozymetria promieniowania jonizującego 98
- Aktywność źródła promieniotwórczego 99
- Bekerel 100
- Kiur 101
- Dawka pochłonięta 102
- Grey 103
- Rad 104
- Dozymetr 105
- Współczynnik jakości promieniowania 106
- Równoważnik dawki 107
- Siwert 108

- Dozymetria promieniowania jonizującego  $\Leftrightarrow$  nauka zajmująca się pomiarami dawek promieniowania jonizującego i aktywności źródeł promieniotwórczych.

- Aktywność źródła promieniotwórczego ( $A$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna, określona jako szybkość rozpadów populacji radioaktywnych jąder.

$$A \stackrel{\text{df}}{=} -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad [A] = \frac{1}{s} = \text{Bq}, \quad [\lambda] = \frac{1}{s}$$

- $\lambda$  – stała rozpadu (zaniku)
- $N$  – aktualna liczba jąder

- Bekerel (Bq)  $\Leftrightarrow$  jednostka aktywności źródła w układzie SI. 1 Bq jest aktywnością źródła promieniotwórczego, w którym zachodzi jeden rozpad na jedną sekundę.

$$1 \text{ Bq} = \frac{1}{1 \text{ s}}$$

**C** Nazwa bekerel pochodzi od nazwiska Becquerel.

**B** Henri Becquerel (1852-1908), francuski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

- Kiur (Ci)  $\Leftrightarrow$  jednostka aktywności źródła promieniotwórczego.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

**C** Nazwa kiur pochodzi od nazwiska Curie.

**B** Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

**B** Maria Skłodowska-Curie (1867-1934), polsko-francuska chemiczka, laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 1903 oraz z chemii w 1911.

- Dawka pochłonięta (D)  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna będąca stosunkiem energii (E) promieniowania jonizującego pochłoniętego przez ciało do jego masy (m).

$$D = \frac{E}{m}, \quad [D] = \text{Gy} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

- Grey (Gy)  $\Leftrightarrow$  jednostka dawki pochłoniętej w układzie SI. 1Gy jest dawką pochłoniętego przez ośrodek promieniowania jonizującego w ilości 1J na 1kg.

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} = \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ s}^2}$$

- C** Nazwa grej pochodzi od nazwiska Gray.
- B** Louis Harold Gray (1905-1965), brytyjski fizyk.

- Rad  $\Leftrightarrow$  jednostka dawki pochłoniętej.

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

- Nazwa **rad** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **r**adiation **a**bsorbed **d**ose.



- Dozometr  $\Leftrightarrow$  przyrząd służący do pomiaru dawki promieniowania jonizującego. Dozometr nazywany jest też dawkomierzem.

- Współczynnik jakości promieniowania (QF)  $\Leftrightarrow$  bezwymiarowy czynnik liczbowy charakteryzujący szkodliwość biologiczną różnych rodzajów promieniowania jonizującego.

### Przykłady

Promieniowanie gamma:  $QF = 1$ .

Cząstki beta:  $QF = 1$ .

Cząstki alfa:  $QF = 20$ .

Neutrony: w zależności od energii kinetycznej  $QF = 2 \div 11$ .

- Równoważnik dawki ( $H_T$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna będąca iloczynem dawki pochłoniętej ( $D$ ) i współczynnika jakości promieniowania ( $QF$ ).

$$H_T = D \cdot (QF), \quad [H_T] = Sv = \frac{J}{kg}$$

- Siwert (Sv)  $\Leftrightarrow$  jednostka równoważnika dawki pochłoniętej w układzie SI.

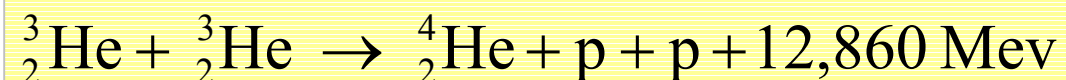
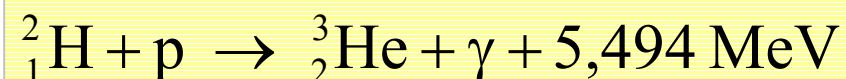
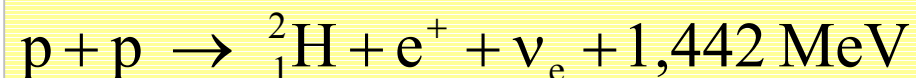
$$1 \text{ Sv} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} = \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ s}^2}$$

**C** Nazwa siwert pochodzi od nazwiska Sievert.

**B** Rolf Maximilian Sievert (1896-1966), szwedzki lekarz i fizyk.

- Cykl protonowo-protonowy 110
- Potrójny proces alfa 111
- Cykl węglowo-azotowo-tlenowy 112

- Cykl protonowo-protonowy  $\Leftrightarrow$  cykl reakcji jądrowych stanowiący źródło energii gwiazd.



**H** Cykl protonowo-protonowy podali Bethe i Critchfield w 1938.

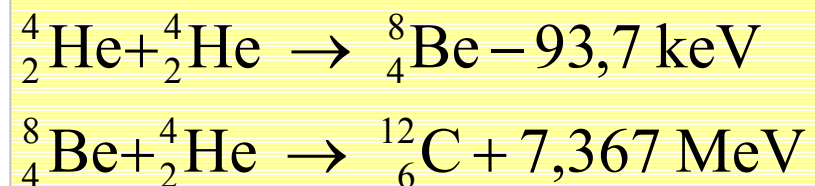
**B** Hans Albrecht Bethe (1906-2005), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1967.

**B** Charles Louis Critchfield (1910-1994), amerykański fizyk teoretyk.

• H. A. Bethe and C. L. Critchfield: *The Formation of Deuterons by Proton Combination*. Physical Review **54**, 4 (June 23, 1938) 248-254.

• H. A. Bethe and C. L. Critchfield: *On the Formation of Deuterons by Proton Combination*. Physical Review **54**, 10 (1938) 862-862.

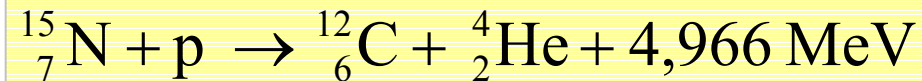
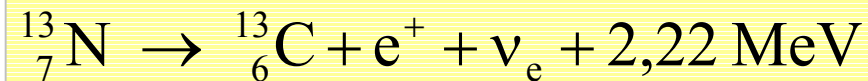
- Potrójny proces alfa  $\Leftrightarrow$  cykl reakcji jądrowych stanowiących źródło energii gwiazd, w którym trzy jądra helu-4 (cząstki alfa) przekształcają się w jądro węgla-12.



**H** Potrójny proces alfa zaproponował Salpeter w 1952.

**B** Edwin Ernest Salpeter (1924-2008), australijsko-amerykański astrofizyk pochodzenia austriackiego.

- Cykl węglowo-azotowo-tlenowy  $\Leftrightarrow$  cykl reakcji jądrowych zachodzących w centrum gwiazdy, stanowiący źródło jej energii.





**H** Cykl węglowo-azotowo-tlenowy opisał Weizsäcker w 1937 i 1938 oraz niezależnie Bethe w 1939.

**B** Hans Albrecht Bethe (1906-2005), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1967.

**B** Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007), niemiecki fizyk i filozof.

•C. F. von Weizsäcker: *Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne*.  
Physikalische Zeitschrift **38** (1937) 176-191.  
Physikalische Zeitschrift **39** (1938) 633-646.

•H. A. Bethe: *Energy Production in Stars*.  
Physical Review **55**, 5 (1 March 1939) 434-456.





# Wykłady z Fizyki 12



Zbigniew Osiak

Jądra