

**RADIOCHEMIA
ŚRODOWISKA**

Bogdan Skwarzec

**RADIOCHEMIA
ŚRODOWISKA**

Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego
Gdańsk 2021

Recenzent
prof. dr hab. Jerzy W. Mietelski

Redaktor Wydawnictwa
Justyna Widzicka

Projekt okładki i stron tytułowych
Maksymilian Biniakiewicz

Skład i łamanie
Maksymilian Biniakiewicz

Publikacja dofinansowana ze środków
Wydziału Chemii Uniwersytetu Gdańskiego

© Copyright by Uniwersytet Gdański
Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego

ISBN 978-83-8206-111-6

Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego
ul. Armii Krajowej 119/121, 81-824 Sopot
tel.: 58 523 11 37; 725 991 206
e-mail: wydawnictwo@ug.edu.pl
www.wyd.ug.edu.pl

Księgarnia internetowa: www.kiw.ug.edu.pl

Druk i oprawa
Zakład Poligrafii Uniwersytetu Gdańskiego
ul. Armii Krajowej 119/121, 81-824 Sopot
tel. 58 523 14 49

Spis treści

Podziękowania	11
Przedmowa	13
1. Zagadnienia wstępne	15
1.1. Budowa materii	15
1.2. Liczba atomowa i masowa	17
1.3. Izotopy i izobary	18
1.4. Masa i energia	19
2. Promieniotwórczość	21
2.1. Rozpad promieniotwórczy i zjawiska towarzyszące	21
2.1.1. Samorzutne przemiany jądrowe	21
2.1.2. Promieniotwórczość naturalna i sztuczna	22
2.1.3. Prawo przesunięć promieniotwórczych – prawo Soddy’ego i Fajansa	24
2.1.4. Prawo rozpadu promieniotwórczego	24
2.1.5. Aktywność i jej jednostki, aktywność właściwa, równowaga promieniotwórcza	26
2.1.6. Reakcje jądrowe	28
3. Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią	31
3.1. Przenikliwość promieniowania jonizującego	31
3.2. Radioliza	32
3.3. Dawki promieniowania jonizującego – dozymetria	35
3.3.1. Wpływ promieniowania jonizującego na materię żywą	37
3.3.2. Wpływ małych dawek promieniowania jonizującego na życie organizmów	44
4. Normy ochrony radiologicznej	47
5. Naturalne tło promieniowania	55

6. Radionuklidy naturalne i sztuczne	58
6.1. Naturalne pierwiastki promieniotwórcze	59
6.1.1. Długożyjące nuklidy promieniotwórcze powstałe w procesie tworzenia materii pierwotnej.	59
6.1.2. Nuklidy promieniotwórcze kosmogeniczne	59
6.1.3. Szeregi promieniotwórcze	61
6.1.4. Ciepło radiogeniczne Ziemi	63
6.2. Pochodzenie sztucznych pierwiastków promieniotwórczych w środowisku przyrodniczym.	65
6.2.1. Próbne wybuchy jądrowe	65
6.2.2. Fabryki przerobu wypalonego paliwa jądrowego.	67
6.2.3. Materiały promieniotwórcze stosowane w przemyśle jądrowym	68
6.2.4. Katastrofy satelitów oraz samolotów wojskowych	68
6.2.5. Energetyka jądrowa.	69
6.2.6. Katastrofa jądrowa w Czarnobylu i Fukushima	71
7. Analiza nuklidów promieniotwórczych	89
7.1. Metody radiometryczne	89
7.1.1. Spektrometria promieniowania gamma	91
7.1.2. Spektrometria promieniowania beta	93
7.1.3. Spektrometria promieniowania alfa	95
7.1.4. Neutronowa analiza aktywacyjna	96
7.2. Zastosowanie metod radiochemicznych w badaniach środowiska – aspekty analityczne.	97
7.2.1. Pomiar aktywności naturalnych i sztucznych emiterów promieniowania gamma i beta ^{40}K , ^{90}Sr i ^{137}Cs	97
7.2.2. Pomiar produktów aktywacji neutronowej ^{55}Fe , ^{60}Co i ^{63}Ni	103
7.2.3. Pomiar aktywności naturalnych i sztucznych emiterów promieniowania alfa ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu i ^{241}Pu	105
7.3. Ocena błędów stosowanych metod radioanalitycznych	117
8. Radionuklidy w organizmie człowieka.	119
8.1. Występowanie.	119
8.2. Pobieranie z wodą pitną	122
8.3. Pobieranie z żywnością	124
8.4. Pobieranie z powietrza	128
8.4.1. Radon ^{222}Rn	128
8.4.2. Pobieranie z dymem papierosowym	130
9. Radionuklidy w ekosystemach lądowych, wodnych i morskich.	135
9.1. Radionuklidy w środowisku lądowym	135
9.2. Skażenie radiochemiczne środowiska przyrodniczego wokół hałdy fosfogipsów w Wiślinie w pobliżu Gdańska	143

9.3. Radionuklidy w środowisku wodnym, morskim i ekosystemie Morza Bałtyckiego.	156
9.3.1. Radionuklidy w wodach i organizmach południowego Bałtyku.	161
9.3.2. Polon, uran i pluton w ptakach morskich	175
9.4. Radionuklidy w osadach dennych Morza Bałtyckiego	177
9.4.1. Radionuklidy w osadach dennych południowego Bałtyku.	180
9.5. Oddziaływanie i migracja polonu, uranu i plutonu w ekosystemie południowego Bałtyku	193
9.6. Spływ radionuklidów z dorzecza Wisły, Odry i rzek Przymorza	196
10. Zastosowanie radionuklidów w technice, medycynie i nauce.	210
10.1. Energetyka jądrowa	210
10.2. Broń jądrowa, termojądrowa i neutronowa.	215
10.3. Medycyna nuklearna.	218
10.4. Geochronologia izotopowa	223
10.5. Przykłady innych zastosowań radionuklidów	235
11. Odpady promieniotwórcze	238
Bibliografia.	243
Piśmiennictwo.	243
Strony internetowe	249
Wykaz skrótów oraz słownik stosowanych terminów i pojęć.	251
Spis rysunków	255
Spis tabel	259
Dodatek	
Maria Skłodowska-Curie (1867–1934) – rodowód, życie i odkrycia naukowe oraz naukowa spuścizna.	263



Bogdan Skwarzec – profesor nauk chemicznych, nauczyciel akademicki Uniwersytetu Gdańskiego, wykładowca na kierunkach chemia, ochrona środowiska oraz bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna. Wybitny i uznany na arenie międzynarodowej specjalista z zakresu chemii i radiochemii środowiska, chemii jądrowej i ochrony radiologicznej oraz chemicznej i radiochemicznej analizy śladowej.

Profesor jest twórcą gdańskiej szkoły radiochemii, radioekologii i analizy radiochemicznej. Jego badania mają w Polsce charakter pionierski, głównymi obszarami Jego działalności naukowej są

zakrojone na szeroką skalę studia nad obecnością, nagromadzeniem i rozprzestrzenieniem w środowisku przyrodniczym naturalnych radionuklidów: polonu (^{210}Po), ołowiu (^{210}Pb) i uranu (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U) oraz sztucznych: żelaza (^{55}Fe), niklu (^{63}Ni), plutonu (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) i ameryku (^{241}Am).

Profesor Bogdan Skwarzec pracował w latach 1979–1999 w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie, a następnie na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego, gdzie kierował Katedrą Chemii Analitycznej (1999–2009), Katedrą Analityki i Radiochemii Środowiska (2010–2013), a obecnie kieruje Katedrą Chemii i Radiochemii Środowiska (od 2014). Opublikował ponad 150 prac (w tym ponad 100 w czasopismach z listy filadelfijskiej, często cytowanych w światowym piśmiennictwie naukowym, 3 monografie oraz 15 rozdziałów w książkach). Wygłosił ponad 70 wykładów na zaproszenie. Jest autorem lub współautorem ponad 250 prezentacji konferencyjnych. Był promotorem w 12 przewodach doktorskich oraz opiekunem ponad 100 prac magisterskich i licencjackich. Z jego inicjatywy 3 osoby uzyskały stopień doktora habilitowanego. Odbył staże naukowe w: Instytucie Badań Morza (Rostock-Warnemünde, Niemcy, 1983), Instytucie Radiofizyki Uniwersytetu w Lund (Szwecja, 1984–1992) oraz Laboratorium Morskiej Radioaktywności Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) (Monako, 1984). Profesor jest lub był członkiem 2 komitetów PAN (Chemii Analitycznej i Badań Morza), towarzystw naukowych (m.in. Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Gdańskiego Towarzystwa Naukowego, International Nuclear Chemistry Society) oraz członkiem Rad Redakcyjnych czasopism „Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry” oraz „ISRN Environmental Chemistry”.

Podziękowania

Dziękuję moim współpracownikom (dr hab. Alicji Boryło, prof. UG; dr hab. Dąmarze Strumińskiej-Parulskiej, prof. UG; dr. Grzegorzowi Olszewskiemu i st. technik Olimpii Bławat) oraz doktorantom (prof. dr. hab. Piotrowi Stepnowskiemu, kmdr. dr. hab. Jackowi Fabisiakowi, prof. AMW; dr. Pawłowi Gacy, dr Annie Jahnz, dr. Krzysztofowi Kabatowi, dr Magdalenie Pawlukowskiej, dr Małgorzacie Prucnal, dr Agnieszce Tuskowskiej i dr. Janowi Ulatowskiemu) za wspólną pracę badawczą na przestrzeni ostatnich 25 lat, której rezultaty zostały zebrane w niniejszej książce i mają istotny udział w rozwoju gdańskiej radiochemii.

Przedmowa

Człowiek od zarania dziejów podlegał działaniu promieniowania jonizującego, które było i jest niezbędne do rozwoju życia na Ziemi, czasami jednak promieniowanie to może stanowić zagrożenie. Z tego powodu wiedza z zakresu występowania, nagromadzania oraz obiegu pierwiastków promieniotwórczych, choć wciąż niepełna, jest ciągle przedmiotem szerokiego zainteresowania, a jednocześnie źródłem wielu nieporozumień, emocji i obaw. Książka podaje czytelnikowi nie tylko zasób podstawowej wiedzy o promieniowaniu jonizującym, izotopach promieniotwórczych w środowisku przyrodniczym i ich znaczeniu dla człowieka, ale także wyjaśnia szereg wątpliwości, nakreśla korzyści i straty wynikające z zastosowania radionuklidów oraz ukazuje „blaski i cienie” rozwoju energetyki jądrowej.

Książka Profesora Bogdana Skwarca pt. *Radiochemia środowiska* jest owocem Jego licznych wykładów dla studentów i doktorantów oraz zawiera wyniki kierowanych przez Niego badań naukowych dotyczących środowiska wodnego i lądowego Polski oraz południowego Bałtyku. W końcowym dodatku monografii zamieszczono biografię oraz osiągnięcia naukowe Marii Skłodowskiej-Curie, która zainspirowała autora książki do wyboru tematyki swoich badań naukowych. Dołączenie tego rozdziału ma również istotny walor dydaktyczny, gdyż świadomość znaczenia odkryć naukowych oraz wiedza o życiu naszej wielkiej rodaczki wśród studentów w Polsce jest bardzo ograniczona. Aby wypełnić istniejącą lukę, Autor wygłosił wiele wykładów i napisał kilka artykułów o życiu i badaniach naukowych Marii Skłodowskiej-Curie.

Książka *Radiochemia środowiska* jest przeznaczona dla studentów i doktorantów wielu kierunków, takich jak: chemia, biologia, fizyka, energetyka jądrowa, bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna, medycyna nuklearna, ochrona środowiska i oceanologia.

1. Zagadnienia wstępne

1.1. Budowa materii

Największym osiągnięciem fizyki XX wieku jest poznanie tajemnicy budowy materii. Składa się ona z niezwykle małych cząstek – tzw. cząstek elementarnych. Kiedy lista odkrytych cząstek sięgnęła setki, okazało się, że niektóre wcale nie są podstawowe, lecz składają się z jeszcze mniejszych cegiełek. Współczesna teoria budowy materii opiera się na Modelu Standardowym, który jest powszechnie obowiązującą teorią w fizyce cząstek elementarnych, opisującą oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne (trzy z czterech podstawowych oddziaływań przyrody, nie ujmuje grawitacji). W sumie w Modelu Standardowym występują 24 rodzaje cząstek elementarnych, z których jest zbudowana materia: 12 fermionów (cząstki budujące ciała materialne) i 12 bozonów (kwanty pól, czyli cząstki, które są nośnikami oddziaływań podstawowych). W aktualnym wariantcie Modelu Standardowego jest jeszcze dodatkowy bozon – tzw. bozon Higgsa, odpowiedzialny za nadanie niezerowych mas cząsteczkom elementarnym.

Fermiony są podstawowymi elementami budującymi materię trwałą, która nas otacza, i tworzą trzy generacje (rodziny, po cztery cząstki w każdej):

1. elektron, neutrino elektronowe, kwark górny (u) i kwark dolny (d);
2. mion, neutrino mionowe, kwark dziwny (s) i kwark powabny (c);
3. taon, neutrino taonowe, kwark niski (b) i kwark wysoki (t).

Oprócz tego należy uwzględnić 12 rodzajów antycząstek do wymienionych fermionów: pozyton (antycząstka elektronu o ładunku +1), dodatni mion i taon, 6 antykwarków oraz 2 antyneutrina. Tylko fermiony pierwszej generacji (elektron, mion, taon i 3 neutrina) są stabilne i tworzą rodzinę leptonów. Neutrino nie mają ładunku, a pozostałe 3 cząstki mają ładunek równy -1 . Z kolei kwarki

mają ułamkowe ładunki ($-1/3$ lub $+2/3$ ładunku elementarnego) i nigdy nie występują w naturze osobno (czyli jako cząstki swobodne). Mogą łączyć się w taki sposób, żeby wypadkowy ładunek powstałej cząstki był zerowy lub stanowił całkowitą krotność ładunku elementarnego. Na przykład dwa kwarki górne i jeden dolny (uud) tworzą proton (ładunek $+1$), a jeden kwark górny i dwa dolne (udd) tworzą neutron (ładunek 0). Proton i neutron, łącząc się ze sobą, tworzą jądro atomowe. Z kolei antykwarki przenoszą ładunek $-2/3$ lub $+1/3$. Jak dotąd nigdy nie zaobserwowano kwarków i antykwarków w stanie wolnym, tzn. niepołączonych w inne cząstki. Dowolny kwark może łączyć się z dowolnym antykwarkiem, tworząc mezon.

W Modelu Standardowym oddziaływania (elektromagnetyczne, słabe i silne) są przenoszone przez specjalne cząsteczki (kwanty pola) zwane bozonami. Z 12 rodzajów bozonów 8 to tzw. gluony (obojętne cząstki o masie spoczynkowej zero, są podobne do mezonów i nie są kolejnym rodzajem cząstek elementarnych), które są odpowiedzialne za przenoszenie oddziaływań silnych. Z pozostałych bozonów 3: wuony (W^+ i W^-) i zeton (Z^0) są odpowiedzialne za przenoszenie oddziaływań słabych, natomiast foton pośredniczy w przenoszeniu oddziaływań elektromagnetycznych.

Model Standardowy przewiduje także istnienie cząstki, która oddziałując z innymi cząstkami, nadaje im masę – jest to bozon skalarny Higgsa, czyli kwant pola Higgsa, które nadaje niektórym fermionom (np. elektronowi), czy też innym bozonom (wuony i zeton), masę spoczynkową w zjawisku spontanicznego załamania symetrii. Istnienie tej cząstki udało się potwierdzić doświadczalnie w 2012 roku, kiedy 4 lipca dwa niezależne zespoły naukowców z Europejskiego Centrum Badań Jądrowych (CERN) ogłosiły, że wykryły nowy bozon charakteryzujący się cechami przypisywanymi bozonowi Higgsa. Zbadane właściwości dowodzą, że jest to bozon Higgsa, ale nie pozwalają na razie stwierdzić, czy istotnie jest to ten przewidziany przez Model Standardowy (czyli czy ma wszystkie właściwości przewidziane przez ten model).

Ze wszystkich obecnie znanych tzw. fundamentalnych cząstek elementarnych na potrzeby radiochemii dokonano wyboru niektórych z nich, a ich charakterystykę fizyczną zaprezentowano w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane cząstki elementarne

Nazwa	Symbol	Masa spoczynkowa (m_e)*	Ładunek**	Średni czas życia (s)	Odkrycie
1. Leptony					
a. elektron	e^-	1	-1	trwały	1897 – J.J. Thomson
neutrino elektronowe	ν_e	$1,43 \cdot 10^{-5}$	0	trwałe	1932 – W. Pauli (postulował) 1956 – F. Reines i C. Cowan
b. mion	μ	207	-1	$2,197 \cdot 10^{-6}$	1937 – C.D. Anderson
neutrino mionowe	ν_μ	< 0,49	0	trwałe	M. Schwartz, L. Lederman i J. Steinberger
c. taon	t	3480	-1	$3,1 \cdot 10^{-13}$	1975 – M. Perl
neutrino taonowe	ν_t	< 137	0	trwałe	F. Reines
d. pozyton	e^+	1	+1	trwały	1928 – P. Dirac i 1932 – C.D. Anderson
2. Kwarki					
a. górny (<i>up</i>)	u	650	+2/3	-	1964 – G. Zweig i M. Gell-Mann wysunęli hipotezę istnienia kwarków
dolny (<i>down</i>)	d	650	-1/3	-	
b. dziwny (<i>strange</i>)	s	950	-1/3	-	
powabny (<i>charm</i>)	c	3030	+2/3	-	
c. denny (<i>bottom</i>)	b	9250	-1/3	-	
szczytowy (<i>top</i>)	t	$3,5 \cdot 10^5$	+2/3	-	1994 – odkryto kwark „top”

* Masę spoczynkową cząstek wyrażono jako wielokrotność masy spoczynkowej elektronu (m_e):
 $1 m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$

** Ładunek elektronu = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

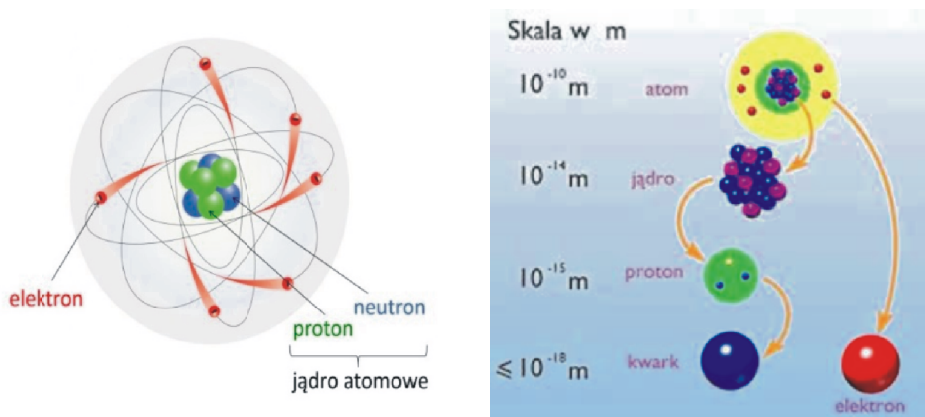
Źródło: opracowanie własne, Skwarzec 2002: 8.

1.2. Liczba atomowa i masowa

Atom zbudowany jest z protonów, neutronów i elektronów, przy czym nukleony tworzą jądro, wokół którego krążą elektrony (rys. 1). Budowę atomu i jego jądra opisują dwie liczby:

Liczba atomowa (Z) – liczba protonów w jądrze (równa liczbie elektronów w atomie). Określa ona jednocześnie numer porządkowy pierwiastka w układzie okresowym.

Liczba masowa (A) – liczba nukleonów (suma protonów i neutronów).



Rys. 1. Schemat budowy atomu i rozmiary jego składników

Źródło: (po lewej) www.energiajadrowa.pl/cztery-tysiace-kwadrilionow-atomow-w-twoim-ciele/ [dostęp: 11.11.2020]; (po prawej) www.szlif.if.uj.edu.pl/documents/92342383/91399fc6-4714-49f6-9246-771c7d5b8ca7 [dostęp: 11.11.2020].

1.3. Izotopy i izobary

Izotopy – odmiany atomu, które różnią się liczbą neutronów w jądrze (izotopy pierwiastka mają tę samą liczbę atomową). Wszystkie izotopy danego pierwiastka mają te same własności chemiczne. Różnią się własnościami fizycznymi (masą i promieniem jądra, całkowitą energią wiązania), które wykorzystuje się do rozdzielania izotopów. Jedynie izotopy wodoru są przykładem odstępstwa od reguły o podobieństwie własności chemicznych. Ze względu na różnice mas rzędu 100% i 200% [w stosunku do wodoru lekkiego ^1_1H (prot)] występują tu dość znaczne różnice własności chemicznych i stąd inne symbole chemiczne tych izotopów: D (deuter) – ^2_1H i T (tryt) – ^3_1H . Wszystkie pierwiastki występujące w przyrodzie są mieszaniną izotopów. Na przykład dla niklu skład izotopowy jest następujący: ^{58}Ni (68,0%), ^{60}Ni (26,2%), ^{61}Ni (1,1%), ^{62}Ni (3,7%) i ^{64}Ni (1,0%).

Nuklid – to określony rodzaj atomu, jeśli istnieje w ciągu mierzalnego czasu. Nuklidami są izotopy trwałe i promieniotwórcze jakiegos pierwiastka, a także

izomery jądrowe, nie są zaś krótkotrwałe stany przejściowe występujące w reakcjach jądrowych.

Izobary – atomy różnych pierwiastków chemicznych, których jądra zawierają taką samą liczbę nukleonów (liczbę masową), lecz różnią się liczbą atomową, np.: $^{17}_7\text{N}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{17}_9\text{F}$ lub $^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$.

1.4. Masa i energia

Jednostka masy atomowej – początkowo j.m.a. była masą atomu wodoru, później 1/16 masy atomu tlenu, obecnie 1/12 masy atomu izotopu węgla (^{12}C). Masa 12 kg węgla (^{12}C) zawiera $6,023 \cdot 10^{26}$ atomów. Masa 1 atomu węgla (^{12}C) wynosi $12/6,023 \cdot 10^{23}$ g, a zatem $1 \text{ j.m.a.} = 1/12 \text{ masy } ^{12}\text{C} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$.

Jednostki energii stosowane w fizyce jądrowej

1 elektronowolt – jest to energia, jaką uzyska elektron w polu elektrycznym o różnicy potencjałów równej 1 voltowi. Częściej jednak stosujemy jednostki pochodne: $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

Wiedząc, że ładunek elektronu = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, zaś $1 \text{ V} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$, można obliczyć, że:

$$1 \text{ eV} = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1})$$

Ponieważ $1 \text{ C} = \text{A} \cdot \text{s}$ oraz $1 \text{ J} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$, otrzymujemy ostatecznie:

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ 1 \text{ MeV} &= 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \end{aligned}$$

Równowartość masy i energii

Według teorii względności Einsteina każda masa jest równoważna pewnej energii i odwrotnie – każda energia równoważna jest pewnej masie zgodnie ze wzorem:

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

gdzie: E – energia, m – masa i c – stała (równa $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Energię równoważną 1 jednostce masy atomowej obliczamy z zależności:

$$\begin{aligned} E = m \cdot c^2 &= 1 \text{ j.m.a.} (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = (1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) (9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}) = \\ &= 14,94 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 14,94 \text{ J} \end{aligned}$$

Ponieważ $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, otrzymujemy ostatecznie:

$$1 \text{ j.m.a.} = 931 \text{ MeV}$$

Defekt masy i energii wiązania

Jądro atomu o liczbie atomowej Z i liczbie masowej A zawiera $(A-Z)$ neutronów. Wydawałoby się, że masę jądra można obliczyć jako sumę mas wchodzących w skład jego nukleonów: $Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$. Tymczasem doświadczenie wskazuje, że w rzeczywistości masy jąder są mniejsze od sumy mas tworzących je nukleonów. Różnicę ΔM pomiędzy sumą mas wszystkich nukleonów a masą jądra M nazywamy defektem masy:

$$\Delta M = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M$$

Podczas łączenia oddzielnych nukleonów w jądro zostaje wydzielona energia odpowiadająca powyższej różnicy mas. Aby „rozerwać” jądro na składniki, należy tę energię dostarczyć. Energię równoważną defektowi masy nazywamy energią wiązania jąder. Zgodnie z równaniem Einsteina energia wiązania ΔE wynosi:

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

Ważna jest znajomość energii wiązania przypadającej na jeden nukleon, czyli energii wiązania jednego nukleonu w jądrze. Wielkość ta stanowi pewną miarę trwałości jądra. Im większa wartość tej energii, tym trwalsze jądro. Dla przykładu obliczmy:

1. energię wiązania deuteronu (jądra atomu deuteru ${}^2\text{H}$), wiedząc, że masy wynoszą odpowiednio: dla protonu – $1,007825 \text{ j.m.a.}$, neutronu – $1,008665 \text{ j.m.a.}$ i deuteronu – $2,014102 \text{ j.m.a.}$

$$\begin{aligned} \text{defekt masy } \Delta M &= (m_p + m_n) - m_d = (1,007825 + 1,008665) - 2,014102 = \\ &= 0,002288 \text{ j.m.a.} \end{aligned}$$

Ponieważ $1 \text{ j.m.a.} = 931 \text{ MeV}$, to energia wiązania deuteronu wynosi $2,16 \text{ MeV}$. Zatem na 1 nukleon przypada $1,08 \text{ MeV}$.

2. (korzystając z danych z przykładu 1) energię wiązania cząstki α (jądra atomu ${}^4\text{He}$), której masa $m_\alpha = 4,002604 \text{ j.m.a.}$

$$\begin{aligned} \Delta M &= (2m_p + 2m_n) - m_\alpha = (2,01565 + 2,01733) - 4,002604 = 0,030376 \text{ j.m.a.} = \\ &= 28,28 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Ponieważ cząstka α składa się z 4 nukleonów, więc energia wiązania 1 nukleonu wynosi w tym przypadku $7,07 \text{ MeV}$. Cząstka α jest zatem układem znacznie trwalszym od deuteronu.



Wydawnictwo
Uniwersytetu Gdańskiego

ISBN 978-83-8206-111-6