

Elektron i proton jako cząstki przyspieszane

Streszczenie

Obecnie znanych jest wiele metod przyspieszania cząstek. Przyspieszane są elektrony, protony, deuterony a nawet jony ciężkie. Wszystkie one znalazły zastosowanie w przemyśle i medycynie. Pozwalają diagnozować choroby, jak i je leczyć.

Słowa kluczowe: cząstki elementarne, elektrony, protony, deuterony, cząstki alfa oraz jony ciężkie, elektrony relatywistyczne

Wprowadzenie

Przyspieszanie cząstek naładowanych można stosować w dość szerokim zakresie wartości masy. Przyspieszać można cząstki elementarne, atomy, jony (monoatomowe i wieloatomowe) a nawet mikro- i makrocząsteczki, których masa wynosi 10^{-10} g. Jednak wzrost masy cząsteczki przyspieszanej, utrudnia sam proces jej przyspieszania tej cząstki, gdyż pogarsza się wartość stosunku ładunku do masy. To zjawisko zadecydowało również, że rozwój fizyki przyspieszania ciężkich molekuł dopiero zaczął się rozwijać. Najpopularniejszymi i najczęściej używanymi w przemyśle, a nawet w medycynie są cząstki:

1. Elektrony [1, 2]

Elektrony to najlżejsze cząstki elementarne oznaczane symbolem e posiadające ładunek $1,602 \times 10^{-19}$ C. Elektrony są najczęściej przyspieszanymi elementarnymi cząstkami. Elektrony można otrzymywać w dużych ilościach. Cechą charakterystyczną tych cząstek jest także łatwość ich przyspieszania, ponieważ charakteryzują się dużą wartością stosunku ładunku do masy. W wyniku ogromnych przyspieszeń elektronu, stwierdzono, że elektron rozpada się na spinon (zachowujący spin elektronu) i orbiton (zachowujący momenty orbity elektronu). Przyspieszone elektrony często wykorzystywane są w medycynie (terapia elektronowa, terapia fotonowa) oraz radioserylizacji.

2. Protony [3]

Protony, są jądrami wodoru, jako cząstki elementarne oznacza się je symbolem p . Protony posiadają ładunek jednostkowy dodatni równy $1,60218 \times 10^{-19}$ C. Ze względu, że wraz z neutronami tworzą jądro zalicza się je do nukleonów. Zaraz po elektronach należą do najczęściej stosowanych cząstek elementarnych przyspieszanych. Stosowane są również w radioterapii mezonowej i neutronowej, produkcji radioizotopów medycznych oraz w szerokim spektrum zastosowań analitycznych.

3. Deuterony [4]

Deuterony są jądrami deuteru (wodór o $A = 2$), oznaczane są symbolem d . Posiadają ładunek identyczny jak protony. Stosowane są w technikach przyspieszania cząstek ze względu na ich łatwość wywoływania reakcji jądrowych (czasem do produkcji neutronów szybkich). Stosowane są w produkcji radioizotopów medycznych.

4. Cząstki alfa

Cząstki alfa są jądrami atomów helu (${}^4\text{He}$), oznaczone są symbolem α . Uważane są za cząstki ciężkie, gdyż są kilkakrotnie cięższe od protonów. Posiadają one dodatni ładunek elektryczny, który jest równy liczbowo podwójnemu ładunkowi jednostkowemu.

5. Ciężkie jony

Ciężkie jony to jony pierwiastków o liczbie atomowej większej niż 2. Mimo, że współczesna technika pozwala przyspieszać wszystkie jony (do uranu) w zastosowaniach radioterapeutycznych szczególne zastosowanie mają lekkie ciężkie jony (do argonu), zwane często nieprawidłowo lekkimi jonami. Ciężkie jony powstają w wyniku bombardowania elektronami atomów obojętnych (o takiej samej liczbie elektronów i protonów) w wyniku czego zostają wybite elektrony. Zatem na atomie powstaje ładunek dodatni równy liczbowo liczbie wybitych elektronów np. bombardowanie atomu ${}^{12}_6\text{C}$

powoduje wybite dwóch elektronów w wyniku czego powstaje $^{12}_6\text{C}^{2+}$ (podwójnie zjonizowany dodatni jon węgla $q=+2$). Masę ciężkiego jonu wyraża się jako sumę podstawowych składowych tego jonu (nukleonów), zaniedbując energię wiązań oraz zaniedbując różnicę mas protonów i neutronów:

$$m_j \approx (Z + N)m_n = Am_n \quad (1)$$

gdzie:

Z – liczba atomowa

N = A – Z – liczba atomów w jądrze

A – liczba masowa

m_n – masa nukleonu

Własność	Cząstki przyspieszane			
	elektron	proton	deuteron	cząstka alfa
Masa spoczynkowa [kg]	$9,110 \times 10^{-31}$	$1,673 \times 10^{-27}$	$3,342 \times 10^{-27}$	$6,644 \times 10^{-27}$
Energia spoczynkowa [MeV]	0,511	938,3	1877	3733
ładunek [$\times 10^{-19}$ C]	-1,602	+1,602	+1,602	+3,204

Tab. 1 Podstawowe parametry cząstek przyspieszanych

Wielkości relatywistyczne

Bardzo ważnym parametrem przyspieszanych cząstek jest ich energia kinetyczna, podawana jest ona w postaci tzw. prędkości względnej:

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (1)$$

gdzie:

β – prędkość względna

v – prędkość cząstki

c – prędkość światła

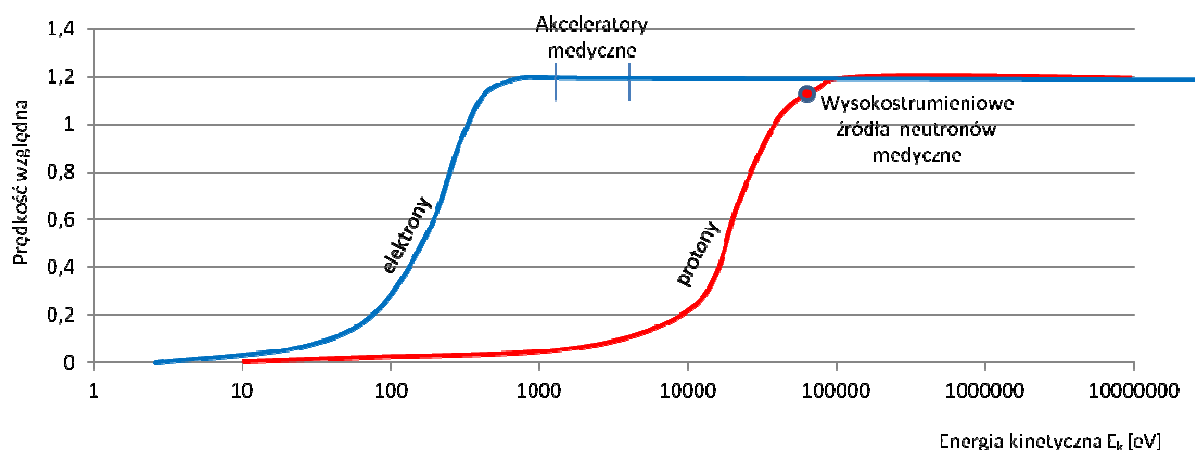
W technice pomiarowej cząstek przyspieszanych w powyższej zależności uwzględnia się masę cząstki:

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2 \quad (2)$$

gdzie:

m_0 – masa spoczynkowa

Zależność energii kinetycznej cząstki od (1) przedstawia poniżej wykres (Rys.1). Z ryciny tej wynika, że elektrony szybko osiągają wysokie prędkości, co jest wynikiem małej masy. Dlatego też elektrony szybciej uzyskują prędkość relatywistyczną, zbliżoną do prędkości światła. W praktyce wykorzystuje się elektrony, które posiadają 90% prędkości światła – elektrony relatywistyczne.



Rys. 1 Zależność prędkości względnej cząstki $\beta = \frac{v}{c}$ od jej energii dla elektronów i protonów oraz zakresy radioterapeutyczne akceleratorów elektronowych.

Masa cząstki poruszającej się z ogromną prędkością – cząstki relatywistycznej opisana jest wzorem:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3)$$

Należy pamiętać, że prędkość względna elektronów poruszających się w zakresie nierelatywistycznym jest pomijana, zaś w relatywistycznych ogrywa znaczącą rolę (Tab.2).

Energia kinetyczna E_k		10 keV	100 keV	200 keV	500 keV	1 MeV	2 MeV	5 MeV	10 MeV	20 MeV	50 MeV	100 MeV
Elektrony	Energia całkowita E_c [MeV]	0,521	0,611	0,711	1,011	1,511	2,511	5,511	10,511	20,511	50,511	100,511
	Prędkość względna $\beta = \frac{v}{c}$	0,1950	0,5483	0,6954	0,8629	0,9411	0,9791	0,9957	0,9988	0,9997	0,9999	0,9999
	Stosunek masy relatywistycznej do masy spoczynkowej	1,020	1,196	1,392	1,979	2,957	4,916	10,79	20,58	40,16	99,01	192,31
Protony	Prędkość względna β	0,0046	0,0147	0,0208	0,0326	0,0465	0,0657	0,1026	0,1451	0,2033	0,3141	0,4283
	Stosunek masy relatywistycznej do masy spoczynkowej	1,0000	1,0001	1,0002	1,0005	1,011	1,0021	1,0053	1,0107	1,0212	1,0533	1,1066

Tab. 2. Prędkości względne β i masy względne elektronów i protonów w zależności od ich energii kinetycznej (na podstawie [5])

Należy zwrócić uwagę, iż elektron o wysokich energiach zyskują również na masie np. przy energii 1 MeV prędkość względna wynosi 94% prędkości światła, a elektron tym samym jest cięższy trzykrotnie od swojej masy spoczynkowej. Elektrony, jako cząstki lekkie bardzo szybko uzyskują energię zbliżoną do wartości prędkości światła, więc podczas ciągłego kontynuowania techniki przyspieszania elektronu nie obserwuje się już znacznych przyspieszeń. Inaczej zachowują się protony, deuterony i jony ciężkie, które jako cząstki ciężkie wolno ulegają przyspieszeniu, mają także mniejszy przyrost masy wraz z przyspieszeniem.

Podsumowując energia cząstki relatywistycznej:

- spełnia równanie ruchu (II zasada dynamiki Newtona)

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

gdzie:

F – siła [N]

p – pęd [Nxs]

t – czas [s]

- obowiązuje definicja pędu cząstki taka jak w fizyce klasycznej (1)

- energia kinetyczna cząstki jest równa pracy wykonanej nad cząstką przez siłę F , podczas przemieszczenia jej z punktu A do punktu B. Założenie: w chwili $t = 0$, $v = 0$

$$E_k = W = \int_A^B F \cdot dr \quad (5)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna [J]

W – praca [J]

F – siła [N]

r – przesunięcie [m]

- Przy małych prędkościach cząstki, $v \ll c$, wzór na energię kinetyczną ma postać:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (6)$$

- Przy prędkościach cząstki porównywalnych z prędkością światła $v \approx c$ wzór na energię kinetyczną ma zupełnie inną postać:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \gamma m_0c^2 - m_0c^2 = m_0c^2(\gamma - 1) = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right] \quad (7)$$

- Z definicji: $m_0c^2 = E_0$ (8)

nosi nazwę energii spoczynkowej,

- energia całkowita cząstki relatywistycznej

$$E = mc^2 \quad (9)$$

Wzór Einsteina na równoważność masy i energii.

Zastosowanie cząstek przyspieszonych

Zastosowania biomedyczne przedstawiono w tabeli 3.

Zastosowanie	Cząstki	Energie cząstek
radioterapia rutynowa, elektronowa i fotonowa	elektrony	6 - 25 MeV
radiosterylizacja, pasteryzacja, konserwacja żywności		2 - 10 MeV
wytwarzanie promieniowania synchrotronowego do angiografii i technik analitycznych		kilkaset MeV – kilku GeV
produkcja radioizotopów	deuterony	2 – 100 MeV
	protony	7 – 20 MeV
radioterapia doświadczalna		70 – 250 MeV
	ciężkie jony	70 – 700 MeV / nukleon
produkcja mezonów do terapii doświadczalnej	protony	<500 MeV
produkcja neutronów do terapii doświadczalnej		kilkadziesiąt MeV
techniki analityczne		
	deuterony	5 – 20 MeV

Tab. 3 Zakresy energii cząstek przyspieszanych w zastosowaniach biomedycznych

Podsumowanie

Przyspieszane cząstki elementarne odgrywają co raz większą rolę w naszym życiu. Fizyka relatywistyczna ma zatem ogromne znaczenie w medycynie, dając możliwość diagnozy, terapii i produkcji odpowiednich leków.

Literatura

[1] <http://physics.nist.gov>

[2] H. Dehmelt. 1988. A Single Atomic Particle Forever Floating at Rest in Free Space. New Value for Electron Radius. Physica Scripta T22: 102–110

[3] S.N. Ahmed et al. 2004. Constraints on nucleon decay via invisible modes from the Sudbury Neutrino Observatory. Phys. Rev. Lett. 92: 102004

[4] Svenska Akademiens ordlista över svenska språket. 2006. Stockholm, Norstedts Akademiska Förlag

[5] W. Scharf. 1994. Akceleratory biomedyczne. Wydawnictwo naukowe PWN