

Jedinice u nuklearnoj fizici

U praktičnoj nuklearnoj fizici dužina se izražava u fermijima /F/ = $10^{-15} m$, a nuklearni udarni presjeci u barnima / 1 barn = $10^{-24} cm^2$ /

Energije se izražavaju u eV ili većim jedinicama

$$1 \text{ eV} = 10^{-3} \text{ keV} = 10^{-6} \text{ MeV} = 10^{-9} \text{ BeV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Mase također mogu biti izražene u jedinicama energije / MeV-ima / upotrebljavajući mc^2 umjesto m . Tako na primjer, za elektron vrijedi da je masa mirovanja elektrona 0,51101 MeV jer mc^2 numerički izražen u MeV-ima ima tu vrijednost. Na sličan način se količina gibanja može izraziti u jedinicama MeV/c. Potrebno je naći umnožak količine gibanja i brzine svjetlosti u MeV-ima. Brojčani iznos će nam tada davati količinu gibanja u MeV/c.

Relativistička relacija između ukupne energije / koja uključuje energiju mirovanja / i količine gibanja je :

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Možemo razlikovati dva ekstremna slučaja

$$E = mc^2 + \frac{p^2}{2m} \quad \text{nerelativistički slučaj}$$

$$E = cp \quad \text{ekstremno relativistički slučaj}$$

Na dva načina možemo testirati pojedini slučaj u smislu da li da primijenimo relativističku ili nerelativističku relaciju.

Relativističku relaciju primijenjujemo u :

1/ Ako je kinetička energija čestice usporediva ili veća od energije mirovanja mc^2 .

2/ Ako je količina gibanja jednaka ili veća od mc .

Osnovne karakteristike jezgre

1/ Radius jezgre s masenim brojem A

$$R = 1,2 \cdot A^{1/3}$$

2/ Dekrement mase $\Delta = M - A$ gdje je M izotopna masa atoma

u atomskim jedinicama mase A/M / $1/12$ mase atoma C^{12} / A maseni broj izražen u istim jedinicama.

3/ Defekt mase jezgre

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

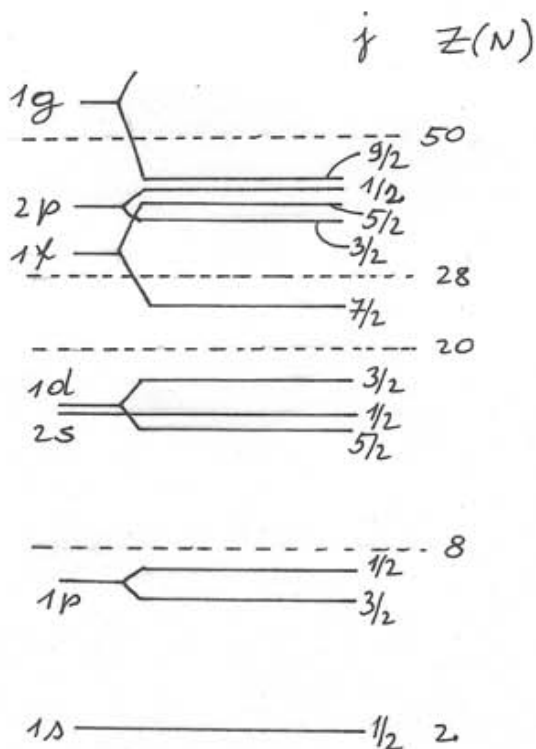
gdje je Z naboj jezgre / u jedinicama elementarnog naboja e / m_H masa atoma vodika, m_n masa neutrona.

4/ Weizsäckerova formula za energiju vezanja jezgre

$$E(\text{MeV}) = 14 A - 13 A^{2/3} - 0,58 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 19 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{33,5}{A^{3/4}} \delta$$

gdje je $\delta = \begin{cases} +1 & \text{za parne } Z \text{ i } A \\ 0 & \text{za neparni } A / Z \text{ proizvoljan} \\ -1 & \text{za neparni } Z \text{ i parni } A \end{cases}$

5/ Model jezgrenih ljusaka. Slika prikazuje "ljuske" međusobno odijeljene isprekidanom crtom. j - je unutarnji kvantni broj / $j = l + s$ / nukleona. $Z(N)$ je broj protona ili neutrona.



- 1/ Odredite gustoću jezgre uz pomoć relacije za radius jezgre.
- 2/ Ocijenite gustoću električnog naboja jezgre. Pretpostavite približnu jednakost broja protona i neutrona u jezgri.
- 3/ Nađite energiju vezanja jezgre deuterija, tricija i Be^9 , ako je poznat "dekrement mase" $\Delta = M - A = 0,01410, 0,01605, 0,01219$ AJM za deuterij, tricij i Be^9 .
- 4/ Koliku bi minimalnu energiju trebalo utrošiti za razbijanje jezgre O^{16} na 4 jednaka dijela / $M-A$ za O^{16} iznosi $-0,00509$, a za He^4 $0,00260$ /
- 5/ Kao rezultat sinteze jezgre Li^6 i H^2 dobivaju se dvije alfa čestice. Energija vezanja po jednom nukleonu u tim jezgrama je $5,33, 1,11$ i $7,08$ MeV za Li^6, H^2 i He^4 . Odredite energiju koja se oslobađa u toj sintezi.
- 6/ Uz pomoć Weizsäckerove formule za energiju vezanja jezgre odredite energiju vezanja po jednom nukleonu za jezgre ${}_{23}\text{V}^{50}$ i ${}_{80}\text{Hg}^{200}$.
- 7/ Pretpostavite da je energija vezanja / prema Weizsäckerovoj formuli / neprekinuta funkcija od Z i zanemarite spinsku δ korekciju.
 - a/ Odredite Z za koji je jezgra s masenim brojem A najbolje vezana / najveća energija vezanja /
 - b/ Nađite odnos broja neutrona i broja protona u tom slučaju.
- 8/ Pomoću modela ljusaka napišite konfiguraciju osnovnih stanja jezgre ${}_3\text{Li}^7, {}_6\text{C}^{13}, {}_{12}\text{Mg}^{25}$.
- 9/ Pomoću modela ljusaka odredite spin / moment vrtnje / osnovnih stanja slijedećih jezgara :

$${}_1\text{H}^3, {}_8\text{O}^{17}, {}_{14}\text{Si}^{29}.$$

Udarni presjek

Totalni udarni presjek je vjerojatnost raspršenja po jednom centru raspršenja sveden na jedinični upadni tok u jedinici vremena.

$$\sigma_{\text{TOT}} = \frac{\Delta N}{N n}$$

Diferencijalni udarni presjek $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ je vjerojatnost raspršenja u neki smjer po jednom centru raspršenja sveden na jedinični upadni tok i jedinični prostorni kut. Dakle

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\Delta N}{N n \Delta\Omega} \quad \Delta N = f(\vartheta, \varphi) \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = F(\vartheta, \varphi)$$

Broj raspršenih čestica ovisi o smjeru raspršenja, jer sam mehanizam procesa nipošto ne mora biti izotropan. S druge strane o veličini upadnog kuta $\Delta\Omega$ kojeg obuhvaća detektor ovisi broj raspršenih čestica ΔN kojeg će detektor detektirati. Tu ovisnost uklanjamo dijeleći s veličinom prostornog kuta $\Delta\Omega$ kojeg obuhvaća detektor. Dakle diferencijalni udarni presjek ovisi o smjeru raspršenja koji je dan kutevima ϑ i φ , ali ne ovisi o prostornom kutu $\Delta\Omega$, pod kojim detektor vidi metu.

Prostorni kut je po definiciji $\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{r^2}$, gdje je ΔS površina a r udaljenost od mjesta iz kojeg promatramo površinu ΔS . U našem slučaju je to udaljenost od mete do detektora. Taj je račun približan jer zanemarujemo dimenziju mete / uzimamo da je meta točkasta /.

- 10/ Snop čestica nalijeće na kuglu radiusa R i elastično se od nje odbija. Koliki je udarni presjek za to raspršenje?
- 11/ Koliki je udarni presjek za Rutherfordovo raspršenje alfa čestica na Al na kutu $\vartheta = 90^\circ$ ako je energija alfa čestica 1 MeV? Koliko će čestica u sekundi detektirati poluvodički detektor promjera 1 cm, udaljen od mete 5 cm, ako je upadni snop 10^6 čestica / $\text{cm}^2 \text{s}$. Neka je meta vrlo malih dimenzija kružnog oblika / $r = 0,3 \text{ cm}$ / debljine $14 \mu\text{m}$.
- 12/ Izračunajte broj alfa čestica energije 10 MeV, koje se rasprše u prostor omeđen kutevima $\theta_1 = 90^\circ$ i $\theta_2 = 180^\circ$ na foliji zlata površine 1 cm^2 debljine 4 mg cm^{-2} , a tok neka je 10^6 čestica po cm^2 u sekundi.

- 13/ Koji se postotak deuteronu energije 8 MeV rasprši u prostor omeđen kutovima $\theta_1 = 45^\circ$ i $\theta_2 = 90^\circ$, na aluminijskoj foliji debeloj 27 mg/cm^2 ?
- 14/ Snop rendgenskih zraka raspršuje se na foliji kositra površine 1 cm^2 , a debljine $\times \rho = 10 \text{ mg/cm}^2$. Detektor je smješten pod kutem od 60° prema smjeru upadnih X zraka. Udaljenost detektora od mete iznosi 10 cm, a promjer mu je 2 cm. Intenzitet upadnog snopa je $4 \cdot 10^7$ fotona po cm^2 . Detektor je registrirao 157 fotona. Odredite o kojem je izotopu kositra riječ, ako znamo da se radi o Thomsonovom raspršenju X zraka.
- 15/ Koji se postotak neutrona energije 14 MeV rasprši pri prolazu kroz olovnu foliju / Pb^{208} / debelu $0,8 \text{ g/cm}^2$?
- 16/ Neutroni energije 15 MeV raspršuju se na foliji niklja / Ni^{58} / Postotak raspršenih neutrona je 2,68%. Koliko je debela folija?
- 17/ Koliki je omjer raspršenih X zraka prema upadnim kod Thomsonovog raspršenja na grafitu debelom 5 mm? Gustoća grafita je $2,25 \text{ g/cm}^3$
- 18/ Intenzitet kolimiranog snopa X zraka reducira se samim raspršenjem na 78% od početne vrijednosti pri prolazu kroz foliju ugljika debelu 0,5 cm i gustoće $2,25 \text{ g/cm}^3$. Na temelju tih podataka nađite broj elektrona u atomu ugljika.
- 19/ Kroz komoru ispunjenu dušikom pod normalnim uvjetima, prolazi struja monokromatskih neutrona / $0,025 \text{ eV}$ / intenziteta 10^8 neutrona /s. Nađite udarni presjek za reakciju / n, p / ako je ustanovljeno da se za vrijeme 0,01 s, na 1 cm dužine snopa stvori 95 protona.

Radioaktivni raspad

- 20/ Kinetička energija alfa čestice, emitirane iz jezgre Ra^{213} iznosi 6,9 MeV. Nađite brzinu odskoka rezidualne jezgre. / primijenite zakon o sačuvanju količine gibanja /
- 21/ Nađite energiju koja se oslobađa prilikom alfa raspada jezgre Po^{213} . Energija emitirane alfa čestice iznosi 8,34 MeV.

- 22/ Odredite količinu topline koju daje jedan gram alfa radio-aktivnog izotopa Ac^{225} , za period vremena jednakom srednjem životu zadane jezgre. Energija emitiranih alfa čestica je 5,8 MeV. / Napomena: srednje vrijeme života $T = \frac{T}{\ln 2}$ gdje je T vrijeme za koje se raspadne polovina zadanih jezgara /
- 23/ Nađite širinu kulonske barijere / dužinu tuneliranja / za alfa česticu emitiranu iz jezgre ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ energije 5,5 MeV.
- 24/ Nađite ukupnu kinetičku energiju čestica koje nastaju raspadom neutrona, prethodno na miru.
- 25/ Nađite kolika je brzina jezgre ${}_{80}\text{Hg}^{198}$ nakon emisije gama zrake energije 412 KeV, ako je prethodno bila na miru. Za koliko je umanjena energija gama zrake zbog toga?

Kvadrupolni i magnetski momenti jezgre

Kvadrupolni moment dan je izrazom: $Q_2 = \frac{1}{e} \int \rho r^2 \left(\frac{3}{2} \cos^2 \vartheta - \frac{1}{2} \right) d\tau$

To je klasični izraz za kvadrupolni moment. U kvantnoj mehanici se dobije dvostruka vrijednost:

$$Q_2 / \text{kvantnomehanički} / = 2 Q_2 / \text{klasični} /$$

Ako jezgru shvatimo kao elipsoid / rotacioni /, onda se kvadrupolni moment može izraziti kao: $Q_2 = \frac{4}{5} Z \eta R^2$

gdje su: ηZ - efektivni broj protona koji sudjeluju pri formiranju kvadrupolnog momenta

$$R - \text{srednji radius jezgre} / R = R_0 A^{1/3} /$$

Potrebno je računati s vrijednošću $R_0 = 1,07 \text{ fm}$.

Magnetski moment jezgre $\mu = g \mu_N \sqrt{j(j+1)}$ gdje je μ_N nuklearni magneton / $\mu_N = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2$ /, a j nutarnji kvantni broj. Češće se susreće "maksimalna projekcija" vektora μ na smjer vanjskog magnetskog polja / Z os /

Faktor g ima slijedeće vrijednosti:

| Čestica | Orbitalno gibanje ($j=l$) | Vlastita rotacija ($j=s$) |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| | g_l | g_s |
| elektron | -1 | -2 |
| proton | 1 | 5,586 |
| neutron | 0 | -3,826 |

- 26/ Pokaži da je kvadrupolni moment kugle u kojoj su naboji jednoliko prostorno raspoređeni jednak nuli.
- 27/ Nađite kvadrupolni moment jezgre koja ima jedan proton na ekvatoru jezgre uz pretpostavku sferne simetrije ostalih naboja. Neka je radius jezgre 4 fermija.
- 28/ Koliki je kvadrupolni moment jezgre $^{209}_{83}\text{Bi}$, ako pretpostavimo da se posljednji proton giba na površini jezgre u ekvatorijalnoj ravnini?
- 29/ Koliki je efektivni broj protona koji sudjeluju pri formiranju kvadrupolnog momenta jezgre lutecija $^{176}_{71}\text{Lu}$, kojoj je kvadrupolni moment jednak 700 fm^2 ?
- 30/ Ocijenite vrijednost projekcije magnetskog momenta deuteronu čiji se nukleoni nalaze u s stanju, ako znate g-faktore za proton i neutron.
- 31/ Odredite projekcije magnetskih momenata jezgre H^3 i He^3 , čiji se nukleoni nalaze u s stanju.

Prolaz teških nabijenih čestica kroz materiju

Impuls koji nabijena čestica predaje jednom elektronu dan je relacijom :

$$p = \frac{Z e^2}{2\pi b v_c \epsilon_0}$$

gdje su : Z -redni broj nabijene čestice

b - udaljenost na kojoj nabijena čestica prolazi kraj elektrona

v_c - brzina nabijene čestice

ϵ_0 - apsolutna dielektrična konstanta vakuuma

Ukupni gubitak energije po svim elektronima po jedinici puta dan je relacijom:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4}{4\pi\epsilon_0 m_e} \frac{Z^2}{v_c^2} \eta \ln \frac{v_c^2 m_e}{k v}$$

gdje je : m_e - masa mirovanja elektrona

η - broj elektrona u jedinici ^{volumena} vremena

v - srednja frekvencija obilaska elektrona oko jezgre

Tu relaciju možemo i drugačije pisati, ako uvedemo masu teške čestice M

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4}{8\pi\epsilon_0^2 m_e} \frac{M Z^2}{E} \eta \ln \frac{2E m_e}{M k v}$$

gdje su : E - kinetička energija upadne čestice

M - masa teške čestice