

## KONSTANTE I FORMULE ZA DRUGI DIO KOLEGIJA

### **OSNOVE NUKLEARNE FIZIKE**

U nuklearnoj fizici rabe se jedinice koje se ne uklapaju posve u SI sustav jedinica, a sve zbog praktičnih razloga i tradicije, kao i standardne jedinice koje se uklapaju u standardni sustav. Prikazujemo najznačajnije od njih, kao i najčešće pokrate vrlo korisne pri računanju :

Brzina svjetlosti	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Avogadrov broj	$N_A = 6,022 \cdot 10^{26} \text{ molekula po kg molu}$
Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ $\hbar = 1,05457 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 0,65821 \cdot 10^{-21} \text{ MeVs}$ $\hbar c = 197,3270 \text{ MeVfm}$
Elementarni naboj	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1,44 \text{ MeVfm}$
Konstanta fine strukture	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137,036}$
Boltzmanova konstanta	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1} = 0,8617 \cdot 10^{-4} \text{ eVK}^{-1}$
Atomska jedinica mase	$u = 1,660538 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = m_u$ $m_u c^2 = 931,494 \text{ MeV}$
Elektron	$m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $\frac{m_e}{m_u} = \frac{1}{1823}$ $m_e c^2 = 0,510998 \text{ MeV}$
Proton	$m_p = 1,672621 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $\frac{m_p}{m_u} = 1,00727647$ $m_p c^2 = 938,272 \text{ MeV}$
Vodikov atom	$m_H = 1,6735333 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $\frac{m_H}{m_u} = 1,007825$

	$m_H \cdot c^2 = 938,783 \text{ MeV}$
Neutron	$m_n = 1,67492716 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
	$\frac{m_n}{m_u} = 1,008664915$
	$m_n c^2 = 939,565 \text{ MeV}$
Faktori pretvorbe	Fermi $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
	MeV $1 \text{ MeV} = 1,602176 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
	$\frac{1 \text{ MeV}}{c^2} = 1,783 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Udarni presjek (barn)	$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$
Klasični radijus elektrona	$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2,818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Godina	$1 \text{ god} = 3,1536 \cdot 10^7 \text{ s}$

## DODATNE FORMULE

**Radius jezgre:**  $R = 1,2 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-15} m$

### Udarni presjek

a) Totalni:  $\sigma_{TOT} = \frac{\Delta N}{N \cdot n}$ ,

to je vjerojatnost raspršenja po jednom centru raspršenja sveden na jedinični upadni tok u jedinici vremena, gdje su

- $N$  = intenzitet upadnih čestica
- $\Delta N$  = intenzitet raspršenih čestica
- $n$  = broj centara raspršenja po jediničnoj površini mete

Ako se meta sastoji od izotopa masenog broja  $M$  (u atomskim jedinicama mase), što je približno jednako broju nukleona  $A$ , vrijedi:

$$n = \rho \frac{N_A}{M} \Delta x,$$

gdje su:

$\rho$  = gustoća materijala mete

$N_A$  = Avogadrov broj

$\Delta x$  = debljina mete

b) Diferencijalni:  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\Delta N}{Nn\Delta\Omega}$ ,

to je vjerojatnost raspršenja u neki smjer  $(\vartheta, \varphi)$  po jednom centru raspršenja sveden na jedinični upadni tok i jedinični prostorni kut, gdje  $\Delta\Omega$  predstavlja prostorni kut raspršenja.

Približno vrijedi relacija  $\Delta\Omega \simeq \frac{\Delta S}{r^2}$ , gdje su:

$\Delta S$  = površina detektora koji registrira raspršeni tok čestica,  
 $r$  = udaljenost spomenute površine od mete raspršenja.

## Prolaz teških nabijenih čestica kroz materiju

Impuls koji nabijena čestica predaje jednom elektronu dan je relacijom:

$$p = \frac{Ze^2}{2\pi b v_\epsilon \epsilon_0}, \text{ gdje su}$$

$Z$  – redni broj nabijene čestice

$b$  – udaljenost na kojoj nabijena čestica prolazi kraj elektrona

$v_\epsilon$  – brzina nabijene čestice

$\epsilon_0$  – apsolutna dielektrična konstanta vakuuma

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

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4}{8\pi\epsilon_0^2 m_e} \frac{M \cdot Z^2}{E} \eta \ln \frac{2Em_e}{M\hbar f}$$

gdje su:

$E$  – kinetička energija upadne čestice

$M$  – masa teške čestice

$\eta$  – broj elektrona u jedinici volumena

Veličinu  $\hbar f$  nalazimo tabeliranu. Iz relacije za gubitak energije po jedinici puta moguće je računati doseg:

$$R = -\int_{E_0}^0 \frac{dE}{\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0^2 m_e} \frac{M \cdot Z^2}{E} \ln \frac{2Em_e}{M\hbar f}} = -\int_{E_0}^0 \frac{dE}{f(E)}.$$

U slučaju različitih nabijenih čestica iste brzine relativan doseg tih čestica se odnosi kao:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{M_1 Z_2^2}{M_2 Z_1^2}.$$

## Prodiranje EM zračenja kroz materiju

Elektromagnetsko zračenje prilikom prolaska kroz materiju može se raspršiti i može biti posve apsorbirano. Ako gledamo procese raspršenja razlikujemo dva slučaja, tzv. Thomsonovo raspršenje u slučaju malih energija manjih od 0,5 MeV, te Comptonovo raspršenje. Kod Thomsonovog raspršenja energija raspršene zrake jednaka je energiji upadne zrake. Kod Comptonovog raspršenja energija raspršene zrake manja je od energije upadne zrake. Prilikom apsorpcije elektromagnetskog zračenja može doći do fotoefekta, ili do tvorbe para elektron-pozitron u polju jezgre. Osim ovih procesa ima još nekoliko drugih, no oni su zanemarivi prema navedenim procesima.

## 1. Thomsonovo raspršenje

Thomsonov udarni presjek:

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2$$
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2}.$$

## 2. Comptonovo raspršenje

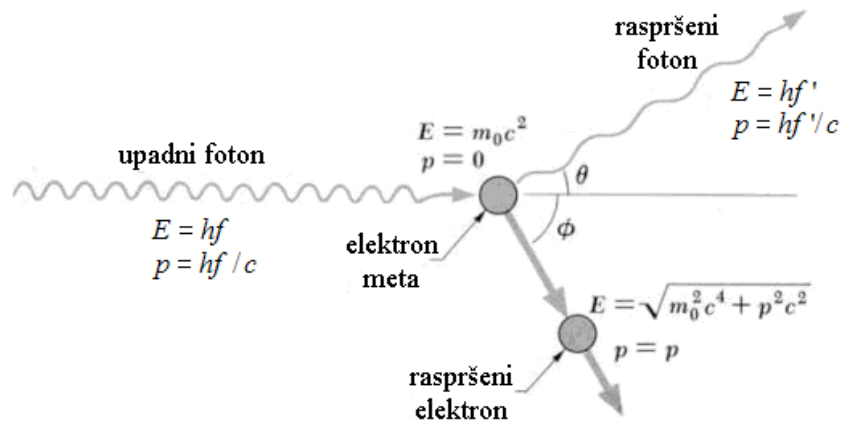
Energija raspršenja gama zrake E dana je relacijom:

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2} (1 - \cos \vartheta)}$$

$E_0$  - energija upadne zrake

$E$  – energija raspršene gama zrake

$\vartheta$  - kut pod kojim se raspršila gama zraka



Jednostavnim transformacijama relacija dobiva oblik:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \vartheta).$$

gdje je:

$\lambda$  - valna duljina raspršene gama zrake

$\lambda_0$  - valna duljina upadne gama zrake

Comptonova valna duljina:  $\frac{h}{mc} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ m}.$

Diferencijalni udarni presjek dan je relacijom:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left( \frac{E}{E_0} \right)^2 \left( \frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - \sin^2 \vartheta \right).$$

### Fotoefekt

Energija elektrona jednaka je upadnoj energiji gama zrake umanjenoj za energiju vezanja:

$$E_e = E_\gamma - W.$$

Totalni udarni presjek dan je relacijom:

$$\sigma = \sigma_T \frac{Z^5}{137^4} \cdot 8 \cdot \left( \frac{mc^2}{E} \right)^{7/2},$$

gdje je:

$\sigma_T$  - Thomsonov udarni presjek

$Z$  – redni broj sredstva u koje je zračenje prodrlo

$E$  – energija upadne zrake

Diferencijalni udarni presjek dan je relacijom:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = K \frac{\sin^2 \varphi}{\left( 1 - \frac{v}{c} \cos \varphi \right)},$$

gdje je:

$\varphi$  - kut emisije fotoelektrona prema smjeru upadne zrake

$K$  – konstanta koja ovisi o materijalu

$v$  - brzina fotoelektrona

### Prigušenje EM zračenja u materiji

Zakon prigušenja dan je ovom relacijom:

$$N = N_0 e^{-\mu x},$$

gdje je:

$N_0$  – broj upadnih gama zraka na površinu mete

$N$  – broj upadnih zraka na nekoj debljini mete  $x$

$\mu$  - linearni koeficijent prigušenja

Osim linearnog koeficijenta prigušenja često se upotrebljava maseni koeficijent prigušenja  $\mu / \rho$ ,  
kojemu je jedinica  $\text{cm}^2 / \text{g}$ . Tada zakon prigušenja glasi:  $N = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho}(x\rho)}$ .

### **Prolaz elektrona kroz materiju**

Gubitak energije elektrona zbog zračenja glasi:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \frac{4r_0^2}{137} E \cdot N \cdot Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}},$$

gdje su:

$r_0$  - klasični radijus elektrona

$E$  – energija elektrona

$N$  – broj atoma u jedinici volumena

$Z$  – redni broj atoma sredstva kroz koji prolazi elektron

Omjer između gubitka energije elektrona zbog zračenja i zbog ionizacije:

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}} = \frac{Z \cdot E(\text{MeV})}{800}.$$

Ako je gubitak energije zračenje dominantan tada vrijedi :

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{l_{rad}}},$$

gdje je  $E$  prosječna enerija elektrona a  $l_{rad}$  je radijacijska duljina.

Domet elektrona prilikom prolaza kroz materiju dan je u dobroj aproksimaciji ovim empiričkim relacijama:

$$R_0(g / \text{cm}^2) = 0,52(\text{MeV}) - 0,09 \quad 0,5 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV}$$

$$R_0(g / \text{cm}^2) = 0,53(\text{MeV}) - 0,106 \quad 1 \text{ MeV} < E < 20 \text{ MeV}$$

Ako neki materijal obasjamo elektronima, energija unazad raspršenih elektrona ovisi o sastavu folije. Vrijedi ova empirička relacija:

$$E_{\max}(\text{MeV}) = 0,54 \cdot Z^{1/5},$$

gdje je  $E_{\max}$  maksimalna energija unazad raspršenih elektrona.

## Prolaz neutrona kroz materiju

Totalni udarni presjek:  $\sigma_t = \sigma_e + \sigma_i + \sigma_\gamma + \sigma_f + \dots$

Apsorpcijski udarni presjek:  $\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \dots$  gdje su  $\sigma_p$  i  $\sigma_\alpha$  udarni presjeci za (n, p) i (n,  $\alpha$ ) reakcije.

Definira se i *totalni udarni presjek za raspršenje*  $\sigma_s$  kao suma udarnih presjeka za elastično i neelastično raspršenje. Stoga vrijedi:  $\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$  i  $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$ .

Makroskopski totalni udarni presjek:  $N \cdot \sigma_t = \Sigma_t$  [ $L^{-1}$ ].

Srednji slobodni put neutrona:  $\lambda = 1/\Sigma_t$ .

Prigušenje neutronske snop:  $\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\sigma_t \cdot N \cdot x}$ , gdje je  $\Phi_0$  upadni fluks neutrona, a je  $N$  gustoća broja čestica u meti na kojima se vrše interakcije, a  $\sigma_t$  je totalni udarni presjek.

## Kvadrupolni moment jezgre

To je fizikalna veličina koja predstavlja mjeru odstupanja oblika jezgre od sfernog oblika. Definira se kao

$$Q_2 = \frac{1}{e} \int \rho(3z^2 - r^2) dV \quad (m^2),$$

gdje je  $e$  elementarni naboj,  $\rho$  je gustoća naboja a  $r$  jest radijvektor do diferencijalnog elementa volumena  $dV$ .