

### 3. Delci in interakcije

Cilj: Iz česa je nastajalo vesolje? Zgodovina in danjšje razumevanje kaj je svetloba in začetki kvantne mehanike.

#### 3.1 Zgodovina razumevanja snovi

##### 3.1.1. Snov

Snov ima maso' zavzema prostornino in je atipična.

#### - Antična Grčija

Empedokel: 4 večje osnovne elemente (voda, zrak, ogenj, zemlja)

Grški atomizem (Demokrit, Leukip) (5. in 4. stoletje p.n.š.)

- atom = majhen, neelastičen delček snovi  
nelepljiv

- med delci se porušujejo v zamkah

- koncept praznine

Aristotel: - 4 elementi, ki imajo svoja naravna mesta  
(384-322 p.n.š.) - gibanje brez zunanjega vzroka

Brez eksperimenta, razglabljanje s pomočjo logike

#### - Renescansa in atomizem

- Galileo (1564-1642): - Zavrže Aristotela fiziko z eksperimenti  
- telesu ohranjajo hitrost, če ni zunanje sile  
"1. Kontinuirni zakon"  
- oče sodobne znanosti

- Rene Descart (1596-1650): - vse fiziko sestavljeno iz majhnih delcev  
- Snov je razsežna (prostorna)

- Robert Boyle (1627-1691): - prvi kemik  
- atomi, spojine, zmesi  
- snov = delci različnih velikosti in snovi

## Sodobni atomizem (18. stoletje):

- Isaac Newton (1643-1727): končni delci z maso in za njih veljajo Newtonovi zakoni
- Rudjer Bošković (1711-1787): - prva matematična teorija atomov in trdnosti snovi (elastičen vzor med gradniki)
  - Dubrovniška republika
  - Zagrebski inštitut
- John Dalton (1766-1844): - elementi so sestavljeni iz atomov
  - vsi atomi davega elementa so enaki, a različni od atomov drugega elementa
  - elementi se sestavljajo v spojine
  - atomov ne moremo ustvariti in uničiti.
- Avogadro (1776-1856): Pri istem tlaku in temperaturi je v ovadi ista količina snovi (Št. molekul) neodvisna od mase in velikosti molekul
  - $V = k \cdot n$        $n$ ... množica snovi
  - $V$ ... volumen
  - $k = 6.02 \cdot 10^{23}$  molekul

Pomembni: 1. - cdf
- James Clerk Maxwell (1831-1879): kinetična teorija plinov = množica majhnih delcev, ki se naključno gibajo, trkajo med seboj in s steno posode.
  - Plinski zakon  $pV = nRT$ , izpeljane pravilnost in difuzija
- Albert Einstein (1879-1955): Brownovo gibanje "nehtega" delca v čvrstem teku 1905
- Jean Perrin (1870-1942): <sup>(1908)</sup> "Experiment su Brownov gibanje. Nobelova 1926" delo na nezvezni strukturi snovi

### 3.1.2 Svetloba

Empedokel (494-434 p.n.š): žarek izhaja iz vsakega očesa

Evklid (330 p.n.š): osnove geometrije optike so žarek, odboj

Descartes: valovanje v enakomerni medijini, fizikalna optika.  
Odboj in lom svetlobe

Newton: svetloba sestavljena iz delcev, beli svetloba razbije na spekter

Huygens: valovna teorija svetlobe

Young: uklon na dveh režah

Maxwell: svetloba je oblika elektromagnetnega valovanja

Maxwellove enačbe (1873):  
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Planck: sevanje črnega telesa le če poveljavati, da izsevanja/absorpcije poteka v diskretnih paketkih

TEŽAVE v začetku 20. stoletja:

- sevanje črnega telesa in kako razložiti spekter
- fotoelektrični pojav: prag za izhaja uje elektronov
- diskretni spekter svetlobe

Literatura: J. Strnad: Razvoj fizike

### 3.1.3 Polje in začetek moderne fizike

Polje je fizikalna količina (skalar, vektor, tenzor), ki ima vrednost v vsaki točki prostora in časa.  $T(\vec{r}, t) = T(x, y, z, t)$

Zgodovinski: - opis delovanja na daljavo in je retardiran  
- izvor polja so naboji  $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^2} \frac{q}{r}$   
- povzročila sila  $\vec{F} = q\vec{E}$   
- Coulombov zakon  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

- Mislili so, da opisuje delovanje nekaya mehanika (etna), a ni bil najden (Michelson-Morley eksperiment)

- Einsteinova posebna teorija relativnosti pomeni, da je polje neodvisna fundamentalna entiteta

- kvantna teorija: vse (svet, sonce) opisemo s kvantno poljem  $\psi(\vec{r})$  in včasih delo imo svoje polje.


- Delci so vzbudene polja = valovni paketi  
(stanje z višjo energijo)

Zapis:  $\psi(\vec{r}, t)$  - kvantna je to stvarilka


- kvantni operator

- Ni pravega razumevanja, ker QM polje ne miruje

Dualnost: delce ali valovanje sta samo dve konfiguraciji polja

Delce = valovni paket 

- Polžena velikost in delna dolžina položaj
- Gibalna količina in energija
- Načelo nedoločnosti: če točnost nič ne vem o momentu  $\Delta p \rightarrow \infty$

Valovanje: ravni val 

- Velikost in položaj nista določena (razmosen v prostoru)
- Delokaliziran

Ta dva primera le ekstremna, možne vse vmesne  $\Delta x$

Superpozicija: valovni paket sestavi mo št. linearnih kombinacij ravnih valov

Kaj je solobno deljemenje "osnovnega" delca: potrditev polja, čigar vzburitev (kvant) so ti delci

3.1.4.) Standardni model in osnovni delci  
 = mejsodelnejša kvantna teorija polja, ki opisuje snov in interakcije z vidika osnovnih delcev - izredno natančna

Fermioni ~ SNOV			
generacija	I	II	III
kvarki	u	c	t
	d	s	b
leptoni	e	$\mu$	$\tau$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	↑ večna vidnesnovi		

Bozoni ~ Interakcija

- $\gamma$  foton  $\rightarrow$  EM interakcija
- g. gluon  $\rightarrow$  močna interakcija
- $Z^0, W^\pm$   $\rightarrow$  šibka interakcija
- Higgs  $H^0$   $\rightarrow$  delci dobijo maso

Vsaki delček ima pripadajoči antidelček.

Delček + antidelček se anihilirata ali nastaneš nova para iz vakuma

FERMIONI: 2 delčka ne moreta biti v istem stanju/mestu.

Priklusom gradniki snovi.

Obnašajo kot male vrtenke (spin), ki je polštevilski  $\Rightarrow S = \pm \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$

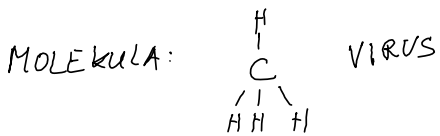
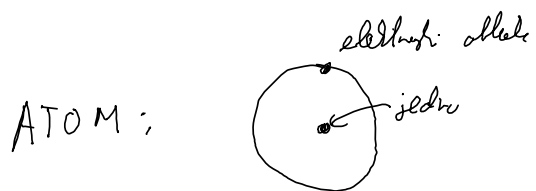
BOZONI: radi v istem stanju/mestu. Nosilci interakcije  
Npr. celobojna sila med  $e^-$  je posledica izmenjave fotonov

Spin je celštevilski  $S = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

LEPTONI: majhni delci brez močne interakcije

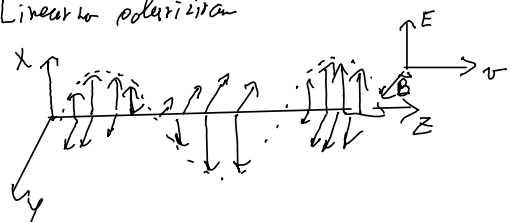
NUKLEONI: sestavljeni delci, npr.  $p = uud$

$n = udd$



3.2.) SVETLOBA polje fotonov iz EM sevanja

Linearno polarizirana



$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$\vec{B} \perp \vec{E}_0$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = 2\pi \nu \quad \omega = ck$$

Spekter:  $\gamma$  X UV VIS IR MW Radio LUX (AM)

$\lambda$  1Å 10nm 400 - 700nm 1mm 10cm 10m

ionizajoče, mutacije, rak

### 3.2.1 Sevanje črnega telesa

Telena pri končni T sevajo svetlobo, nev. zaradnice z nitter plošča na el. stekleni žilavi žilji - IR kamere

Klasični stika :- migelanje atomov in e<sup>-</sup>  
- pospešeni nabiti delci sevajo EM valovanje (Maxwell)  
- različne energijske naloge vodi da zveznega in širokega spektra

Črno telo = absorbira vsa svetlobo, ki pada nanj.  
Idealizacija, kaj je spekter odvisen le od temperature.

Dobro približek: majhna luknja v steklu, žerjavo notranje stene stalno temperatura (Stefan)

Kirchhoffov zakon o termičnem sevanju: Zateba v termičnem ravnovesju sta za fiksno  $\lambda$  absorpcija in emisija enaki

$$\frac{dj}{d\lambda} = (1 - a(\lambda)) \frac{dj}{d\lambda} \Big|_{\text{črno}} \quad a = \text{odbojnost}$$

$j$  ... gostota energijskega toka

$$j = \frac{P}{S}$$

P ... moč

S ... površina

Primer: - solarna konstanta

$j = 1360 \text{ W/m}^2$  → srebrni žepiči pri sevanju v hladnih razmerah

Intenziteta:  $I(\lambda) = \frac{dj}{d\lambda}$

Stefan-Boltzmannov zakon (1879):

$$j = \sigma T^4$$

Boltzmannova konstanta

$$k_B = 1.3 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Planckova k.

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

↑  
Prvič nastopa Planckova konstanta

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Wienov zakon:  $\lambda_{\text{max}} T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$

500 nm (modri svetloba)  $\leftrightarrow$  5800 K

0.11 cm  $\leftrightarrow$  2.7 K

Cosmic microwave background

Penzias, Wilson

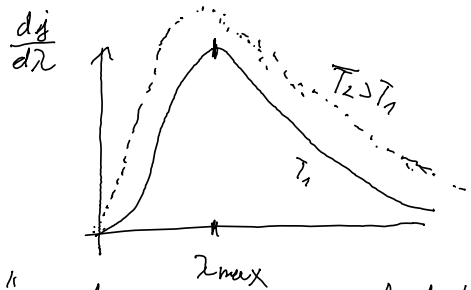
2.7 K je "temperaturna rešja".

Pomenba: Valovanje lahko pripisemo Temperaturo.

Termična ravnovesje med snovjo in sevanjem.

Planckov zakon

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$



Planck je zvezo najprej "ugibal", potem je odšel s predpostavko "nikala", ki so morala povezana z atomi.

Vsako nikalo ima porazdelitev energij, ki je sorazmerna z kvantno frekvenco nikala  $E = h\nu = \hbar\omega$ .

Planck ni predlagal, da je svetloba kvantizirana, a je dobil dobro ujemanje z eksperimentom. Šele čez 20 let se sprijazni z implikacijami in interpretacijami svoje formule.

FOTON Sodobni koncept fotona: Einstein 1905 (čudežno leto)

Osnovni delec, kvant EM valovanja, nosilec električne in magnetne i-erakcije, boson, lastni antidelec

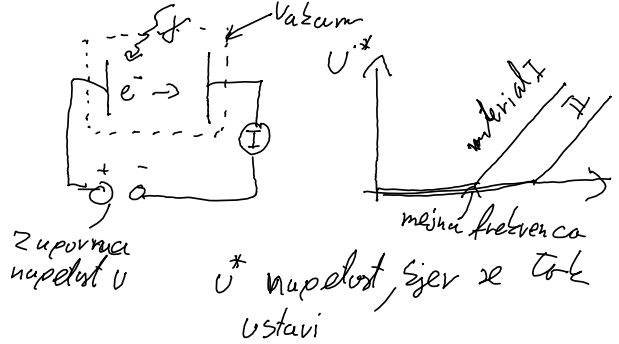
Nastanek: prehod med stanji, kreacija in anihilacija



### 3.2.2 Fotoefekt (Einstein Nobelova 1921)

Svetloba izlazi  $e^-$  iz snovi in obstaja minimalna energija,  $\Phi$  ji pravimo izstopno delo  $\Phi$ .

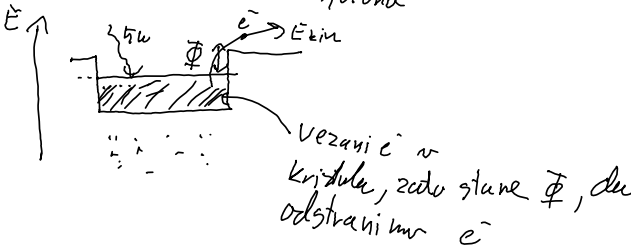
Fotocelica / foto dioda



Izhitje iz snovi  $h\nu = \Phi + E_{kin}$

↑  
energija fotona

← kinetična energija  $e^-$



Povečana intenziteta: - več  $e^-$ , a enako  $E_{kin}$

Povečana frekvenca svetlobe: - višje  $E_{kin}$ , enako št.  $e^-$

Drugega stika slika slika Planck, ker je kvantizirana absorpcija. če bi bila kvantizirana absorpcija, bi po dolgem času z nizko intenziteto prišlo do absorpcije.

Ta slika ni bila sprejeta med celotno fizikalno skupnostjo šele v 20. letih. kvantna elektrodinamika se razvija v 50. Danes sprejeta.

Millikan: 1909 odkril osnovnega naboja  $e^-$  Nobelova 1923  
1916 ocenil Planckove kvantite

3.2.3 Comptonova sipanje = sipanje fotona na  $e^-$   
 Foton je brezmasni delec  $m=0$  in potuje  $v=c$  v  
 vakuumu.

$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 \rightarrow E = p \cdot c$  p... gibalna količina  
 Posebna teorija relativnosti Planck  $E = h\nu$

$pc = h\nu$   $k = \frac{2\pi}{\lambda}$   
 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \equiv \hbar k$

Foton ima gibalno količino in lahko ustvari pritisk:  
 (tradicionalna lastnost delcev)

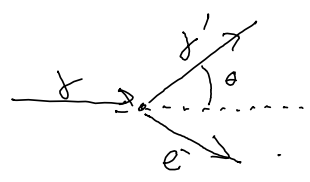
Tlak  $p_0 = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{\Delta t S} = \frac{\Delta E}{c \Delta t S} = \frac{P}{S} \frac{1}{c} = \frac{j}{c}$  svetlobni tok

Primer: a) tlak fotonski iz sonca na Zemlji

$p_0 = \frac{1300 \text{ N/m}^2}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 10 \mu\text{Pa}$  proti zvezni  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

b) Laserko hlajenje (Nobelova '97 Cohen-Tannoudis) c) Vozeljevo jedranje

Comptonova sipanje



$\Delta \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$   
 $\lambda_c = \frac{h}{mc} = 0.0024 \text{ nm}$   
↑  
Röntgenovi žarki

Izpeljava preko drveni-ve energije in gib. količine:

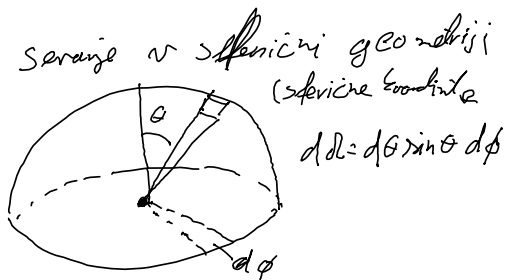
$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$  daljša izpeljava, glej  
 $\frac{hc}{\lambda} + mc^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$  Strnad fiziku II.

klasično  
 Thompsonova: foton nima momenta  $\Delta \lambda = 0$  (elastično sipanje) in  
 sara kot dipol  $1 + \cos^2 \theta$

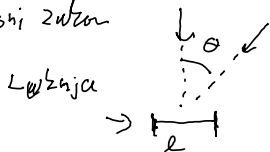
Pomen: dužina debljina ni samo volumni  
 pajar, a tudi ceter delcev z gibalno količino,  
 čigar energija je sorazmerna frekvenci.

- Podatek: kpeljava Stefanovega zakona iz Planckovega

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1 \right)^{-1}$$



Kosinusni zakon



$$e' = l \cos\theta$$

$$j = \frac{P}{S} = \int_0^\infty d\nu I(\nu, T) \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi =$$

$$= 2\pi \int_0^\infty d\nu I(\nu, T) \underbrace{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta}_{\textcircled{1}}$$

$$\textcircled{1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(2\theta) d\theta \stackrel{x=2\theta}{=} \frac{1}{4} \int_0^\pi dx \sin(x) = \frac{\cos(0) - \cos(\pi)}{4} = \frac{1}{2}$$

↓

$$j = \pi \int_0^\infty d\nu I(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^\infty d\nu \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \stackrel{x = \frac{h\nu}{k_B T}}{=} \frac{2\pi h}{c^2} \left( \frac{k_B T}{h} \right)^4 \int_0^\infty dx \frac{x^3}{e^x - 1} =$$

$$= \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2} T^4 \quad \text{Stefanov zakon}$$