# Masa ujete energije

## Zotkini dnevi odprtih vrat jesen 2026

Borut Jurčič Zlobec

26. oktober 2026

# Standardni model in Higgsovo polje

- Po standardnem modelu v fiziki delcev osnovni delci nimajo mase.
- Nekateri delci pridobijo maso iz enega od dveh virov.
- Prvi je Higgsovo polje in drugi je ujeta energija.
- Tu nas bo zanimalo predvsem, kako dobi maso ujeta energija.
- Ujeli bomo foton, delec svetlobe, ki je bozon elektromagnetne interakcije.

Več o Higgsu na povezavi.

*Peter Higgs je za predlog rešitve problema mase elementarnih delcev leta 2013 dobil Nobelovo nagrado, po tem ko so v trkalniku v Cernu leta 2012 zaznali Higgsov Bozon.*

# Higgsovo polje

- Higgsovo polje posreduje nekaterim elementarnim delcem maso preko Higgsovega mehanizma.
- Ključna ideja Higgsovega mehanizma je, da vakuum ni prazen, ampak je napolnjen s Higgsovim poljem.
- Higgsovo polje reagira (se pogovarja) z nekaterimi osnovnimi delci, kot so fermioni (med njimi elektroni), in z `W` ter `Z` bozoni (ti prenašajo šibko jedrsko silo).
- Brezmasni delci se gibljejo le s svetlobno hitrostjo. Ne morejo mirovati. Po posebni teoriji relativnosti čas za njih stoji, ker se pomikajo s svetlobno hitrostjo. Interakcija s Higgsovim poljem ovira gibanje delca. Ta se zato giblje počasneje kot svetloba, zaradi česar mu čas teče. Gibalna količina delca postane $p = m\,v$, kjer je $v$ hitrost delca in $m$ njegova masa.

# Zakon ekviparticije

- Izrek o enakomerni porazdelitvi (ekviparticiji) pravi, da se energija enakomerno porazdeli med vse energetsko dostopne prostostne stopnje sistema.
- To ni posebej presenetljiv rezultat in ga lahko razumemo, povedano na drugi način, da sistem teži v stanje z maksimalno entropijo tako, da bo razpoložljivo energijo enakomerno porazdelil med vse dostopne načine gibanja.
- Kinetična energija molekul v plinu se porazdeli med kinetično energijo gibanja, vrtenja in elastično energijo valence, ki veže atome molekule.

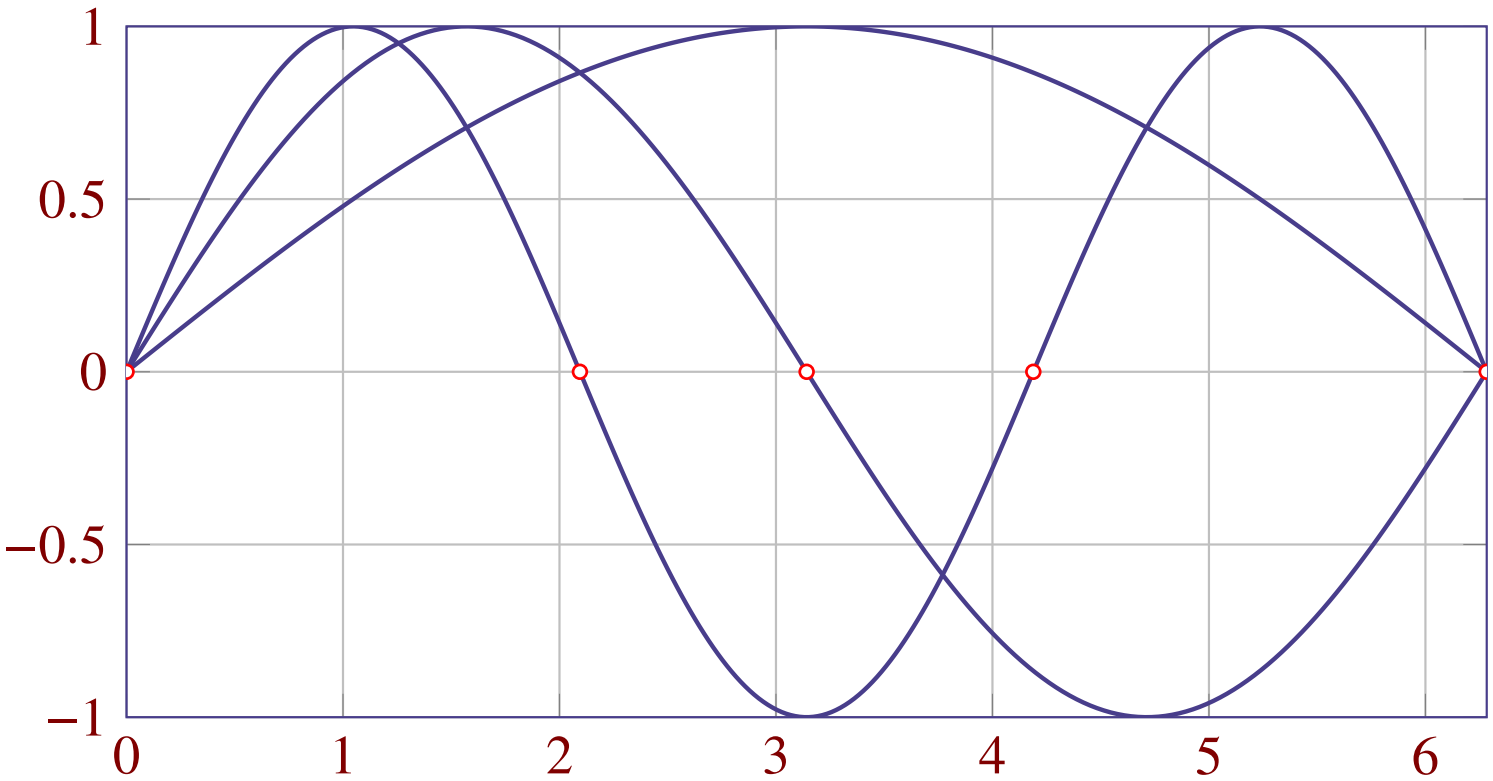
# Sevanje črnega telesa

- V začetku 20 stoletja je bilo v fiziki odprto vprašanje, kako črno telo seva elektromagnetno energijo v različnih valovnih dolžinah, odvisno od temperature.
- Pri sobni temperaturi telesa sevajo v infrardečem spektru.
- Pri višjih temperaturah je valovna dolžina krajša.
- Temperatura površja Sonca je $6000\,\mathrm{K}$.
- Večina sevanja je v vidni svetlobi.
- Najintenzivnejše je na sredi vidnega spektra $500\,\mathrm{nm}$, to je v rumenozeleni svetlobi.
- Postavilo se je vprašanje, kakšna je frekvenčna porazdelitev gostote energije sevanja.

# Rayleigh-Jeansova teorija

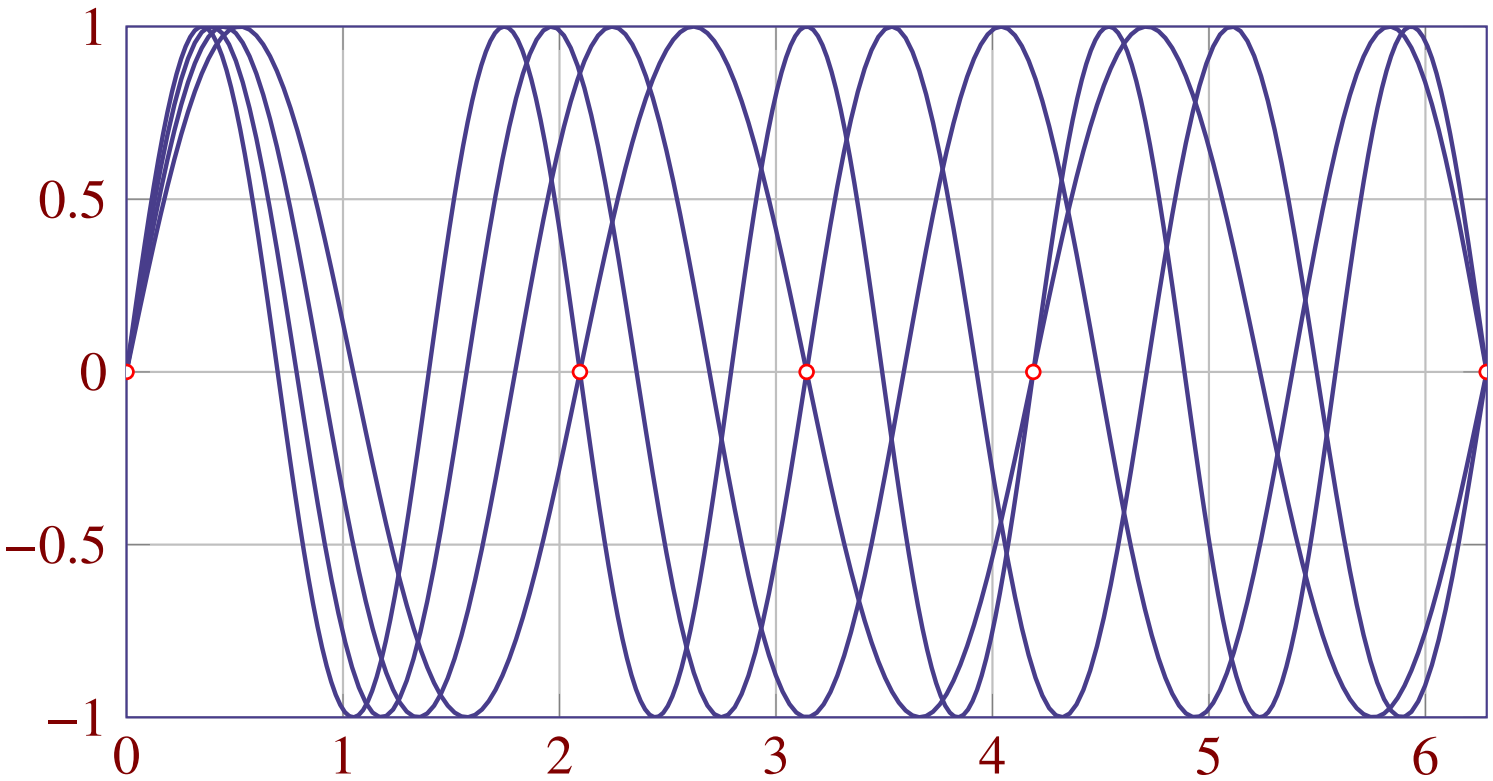
- Jeans je skupaj Rayleighem poskušal razložiti spektralno porazdelitev sevanja črnega telesa z uporabo klasične fizike.
- Črno telo sta predstavila kot votlo kocko, katere notranje stene so zrcala.
- Stacionarno stanje elektromagnetne radiacije znotraj kocke predstavljajo stojni valovi, to so valovi, ki imajo vozlišča na njenih stenah.
- Valovanja imajo vse možne različne valovne dolžine stojnih valov.
- Valovne dolžine so $\lambda = 2d/n$, kjer je $d$ razdalja med stenama in $n \in \mathbb{N}$.
- Njuna ideja temelji na načelu ekviparticije energije, ki pravi, da vsak val dane valovne dolžine prejme enak odmerek energije.

# Enodimenzionalno stojno valovanje




Po načelu ekviparticije vsak posamezni val dane valovne dolžine prejme v povprečju enak odmerek energije $\langle E \rangle = k_B\, T$, kjer je $k_B$ Boltzmannova konstanta in $T$ absolutna temperatura.

# Enodimenzionalno stojno valovanje




Pri višjih frekvencah, ozirma manjših valovnih dolžinah, je v danem intrevalu $\Delta\lambda$ več stojnih valov.

# Rayleigh-Jeansova porazdelitev

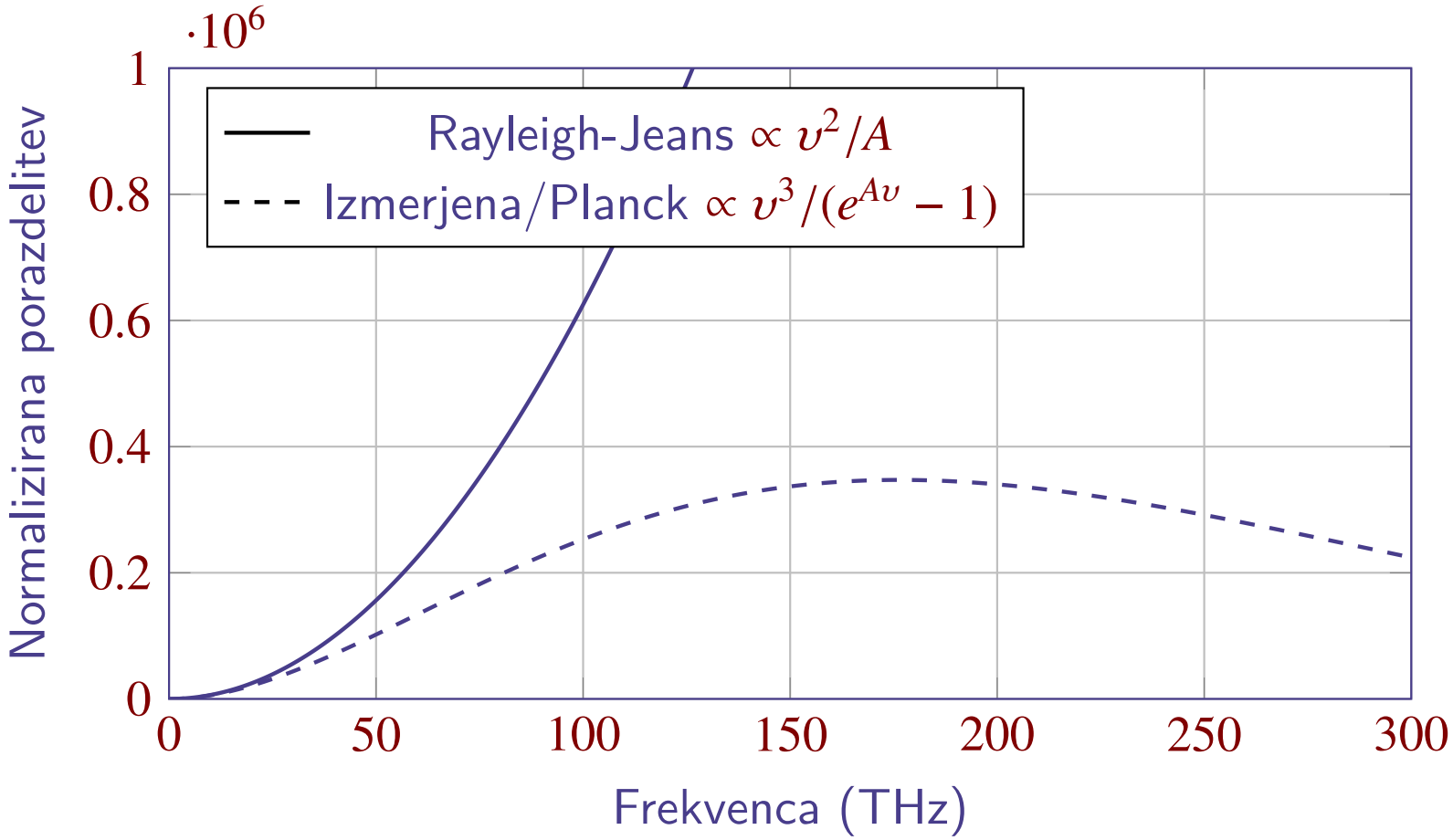
- Vsako stojno elektromagnetno valovanje prispeva energijo $k_B T$.
- Gostota energijskega spektra:
  Število stojnih valov na enoto frekvenčnega intervala v prostornini $V$ je

$$dN = \frac{8\pi\upsilon^2}{c^3} V \, d\upsilon,$$

  kjer je $c$ hitrost svetlobe in $\upsilon$ je frekvenca, $\upsilon = c/\lambda$.
- Energija vsakega stojnega vala je $k_B T$, zato je energijska gostota enaka

$$u(\upsilon, T) = \frac{8\pi\upsilon^2}{c^3} k_B T.$$

- To je znana Rayleigh-Jeansova porazdelitev.




Slika 1: Primerjava normaliziranih spektralnih porazdelitev za $T = 300\,\mathrm{K}$.

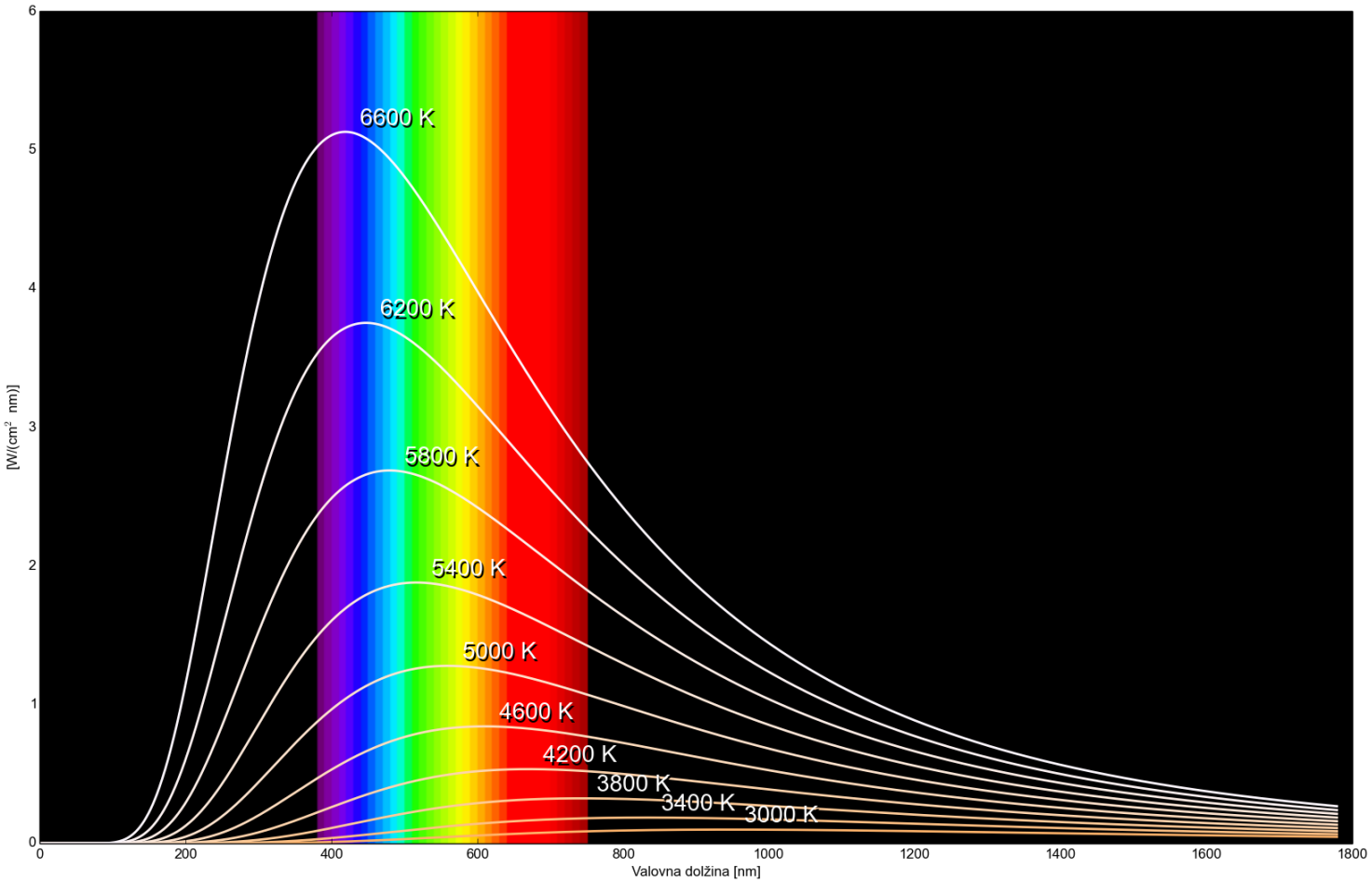
Pri nizkih frekvencah se obe porazdelitvi ujemata; pri visokih frekvencah Rayleigh-Jeansova porazdelitev nerealno narašča, medtem ko Planckova porazdelitev sledi izmerjeni porazdelitvi in pada proti 0 za visoke frekvence.

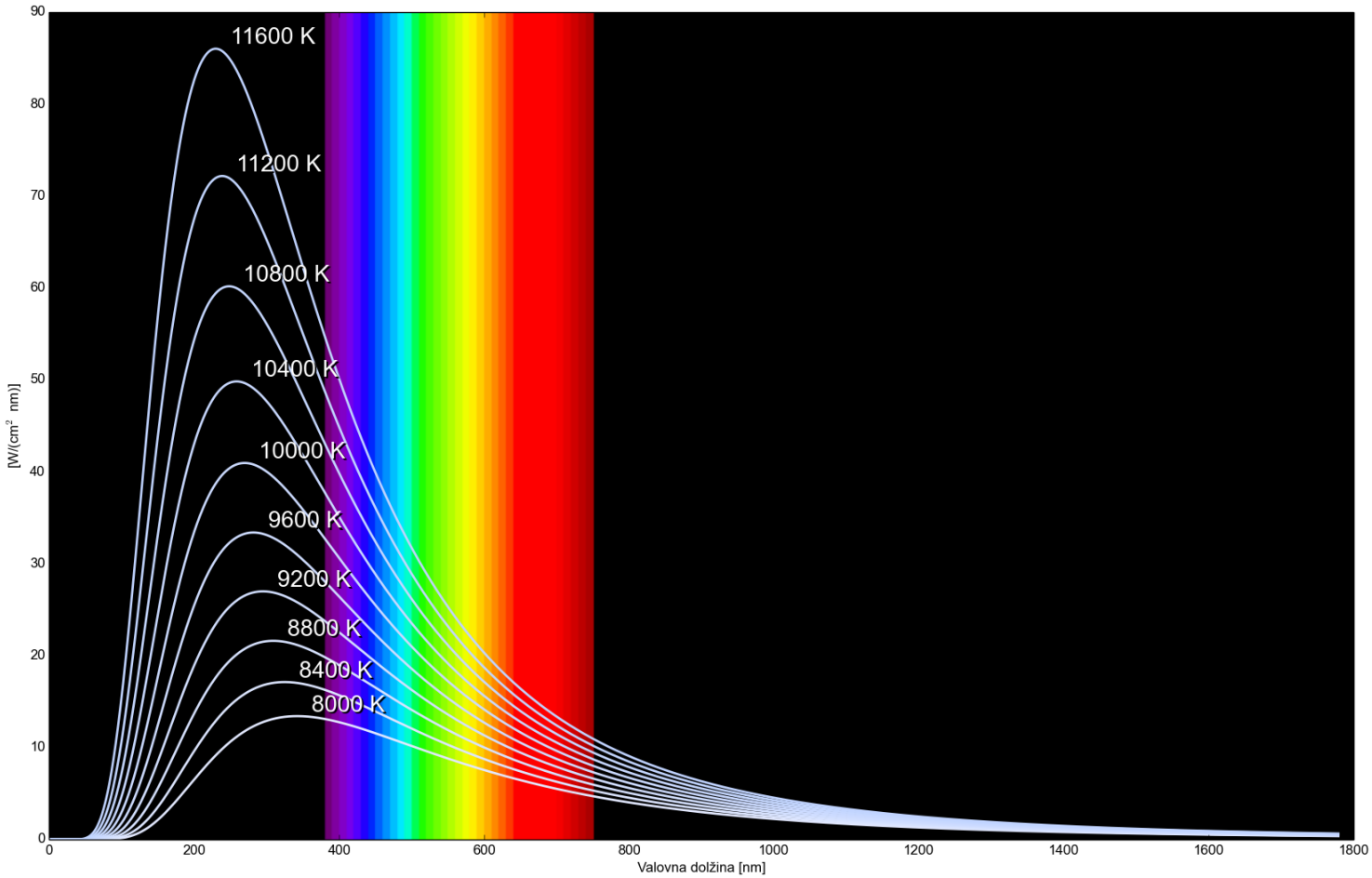
# Max Planck in sevanje črnega telesa

- Max Planck (1858–1947) je bil nemški fizik.
- Kot študent je Max vprašal svojega profesorja za nasvet.
  Želel je študirati fiziko, vendar pa mu je profesor odsvetoval rekoč:
  *V fiziki ni več veliko dela, ostalo je le še nekaj malega lukenj za zapolnit.*
  Vendar se je Max kljub temu odločil za študij fizike.
- Usoda je hotela, da je bil začetnik kvantne mehanike, ki je poleg teorije relativnosti popolnoma spremenila pogled na fiziko v dvajsetem stoletju.
- Vse se je začelo, ko je leta 1900 dobil nalogo, da določi temperaturo žarilne nitke inkandescentne žarnice, tako da bo v spektru njenega žara največji možni prispevek vidne svetlobe.
- Zadel je ob problem, ki je bil v tistem času eden največjih nerešenih problemov v fiziki. To je bila ena od tistih lukenj, o katerih je govoril njegov profesor Philipp von Jolly.

Več o tem na povezavi Planck.

# Sevanje črnega telesa




11600 K
11200 K
10800 K
10400 K
10000 K
9600 K
9200 K
8800 K
8400 K
8000 K
[W/(cm² nm)]
Valovna dolžina [nm]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800

# Ultravijolična katastrofa

- To je bil nerešen problem frekvenčne porazdelitve gostote energije sevanja črnega telesa.
- Kakšna je gostota energije za posamezne valovne dolžine?
- Zberemo razliko $d\lambda$ in pogledamo energijo sevanja za valovne dolžine, ki se razlikujejo za $d\lambda$.
- Klasična Rayleigh-Jeansova rešitev, ki sloni na principu ekviparticije, ne more predvideti pravih vrednosti za majhne valovne dolžine.
- Pri majhnih valovnih dolžinah je število stojnih valov znotraj intervala $d\lambda$ veliko.
- Če upoštevamo princip ekviparticije, bi delež energije za majhne valovne dolžine šel preko vseh meja.
- To protislovje je bilo znano pod imenom *ultravijolična katastrofa*.

# Planckova porazdelitev

- Planck je rešil problem tako, da je predpostavil, da krajše valovne dolžine potrebujejo več energije za vzbujanje kot dolge.
- Vzel je najpreprostejši možni model, da je energija obratno sorazmerna z valovno dolžino.
- Ker je $\lambda = c/\upsilon$, je energija premo sorazmerna s frekvenco.
- Z drugimi besedami, Planck je rešil problem s kvantizacijo energije elektromagnetnega sevanja $E = h\upsilon = hc/\lambda$.
- Sedaj pa so postale kratke valovne dolžine težje dostopne, ker so potrebovale več energije za vzbujanje.
- Tako je postalo jasno, zakaj gre energijska gostota proti nič, ko gre valovna dolžina proti nič.

$$B_\upsilon(T) = \frac{2h\upsilon^3/c^2}{e^{h\upsilon/(kT)} - 1}, \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1}$$

*Za rešitev problema je dobil Max Planck leta 1918 Nobelovo nagado.*

# Ujeta energija

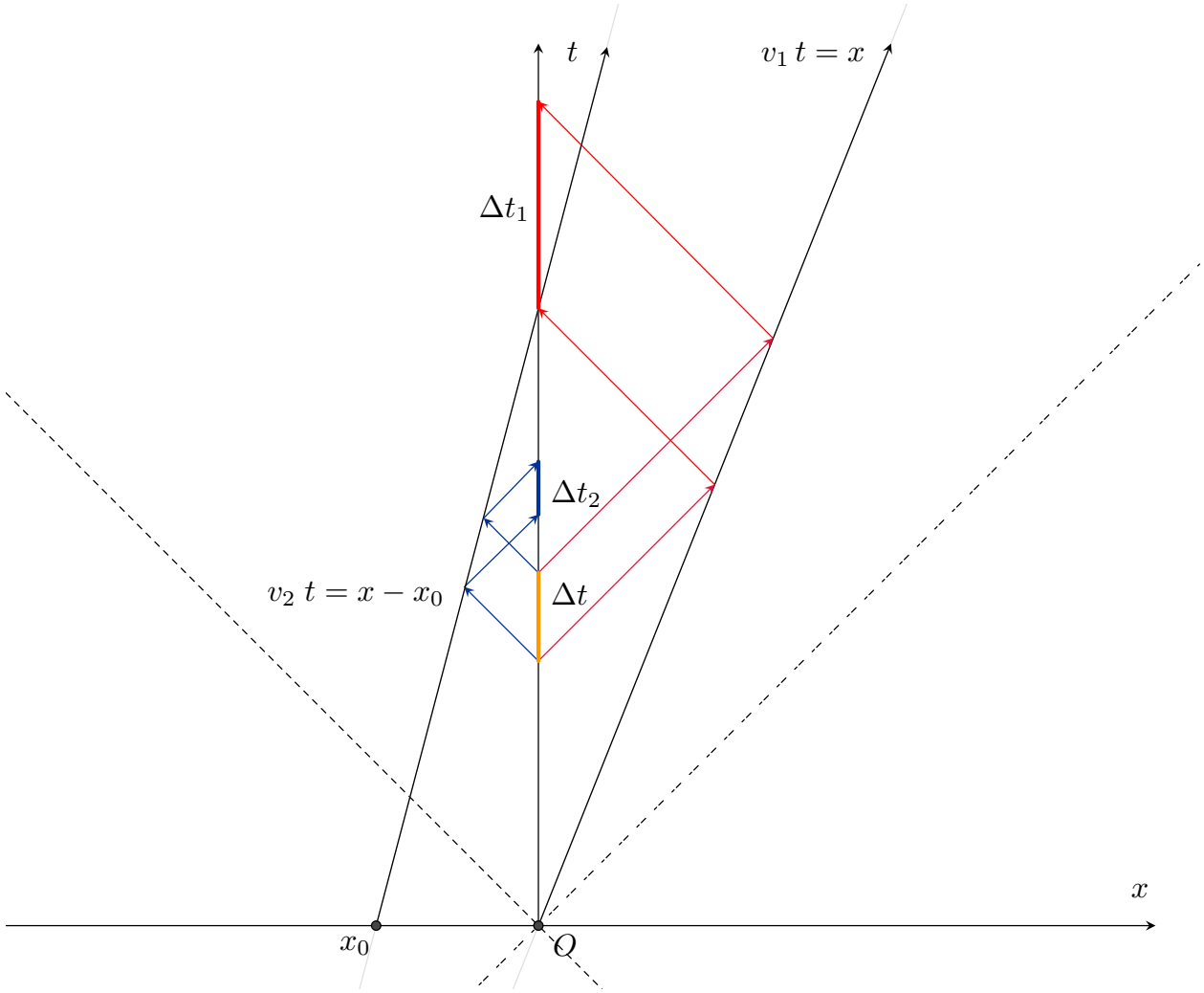
Masa osebe, ki tehta 70 kilogramov, je sestavljena iz 35 gramov mase elektronov in 700 gramov čiste mase kvarkov, to je fermionov, ki sestavljajo protone in nevtrone v atomih snovi. To je vsa masa, ki je posledica interakcije s Higgsovim poljem. Vsa ostala masa je posledica ujete energije gluonov, ki so bozoni, prenašalci krepke jedrske sile znotraj protonov in nevtronov. Gluoni so, enako kot fotoni, brezmasni delci. Več o tem si lahko ogledate v prispevku na povezavi.

# Dopplerjev pojav

- Valovna dolžina svetlobe svetila, ki se giblje proti opazovalcu, se skrajša, če pa se svetilo oddaljuje od njega, se valovna dolžina podaljša.
- Slika 2 predstavlja svet Minkowskega.
- Izbrali smo enote tako, da je svetlobna hitrost $c$ enaka $1$, $c = 1$.
- Premica $v_1 t = x$ je svetovnica oddaljujočega se opazovalca, ki se oddaljuje s hitrostjo $v_1$.
- Premica $v_2 t = x - x_0$ je svetovnica opazovalca, ki se nam približuje s hitrostjo $v_2$.

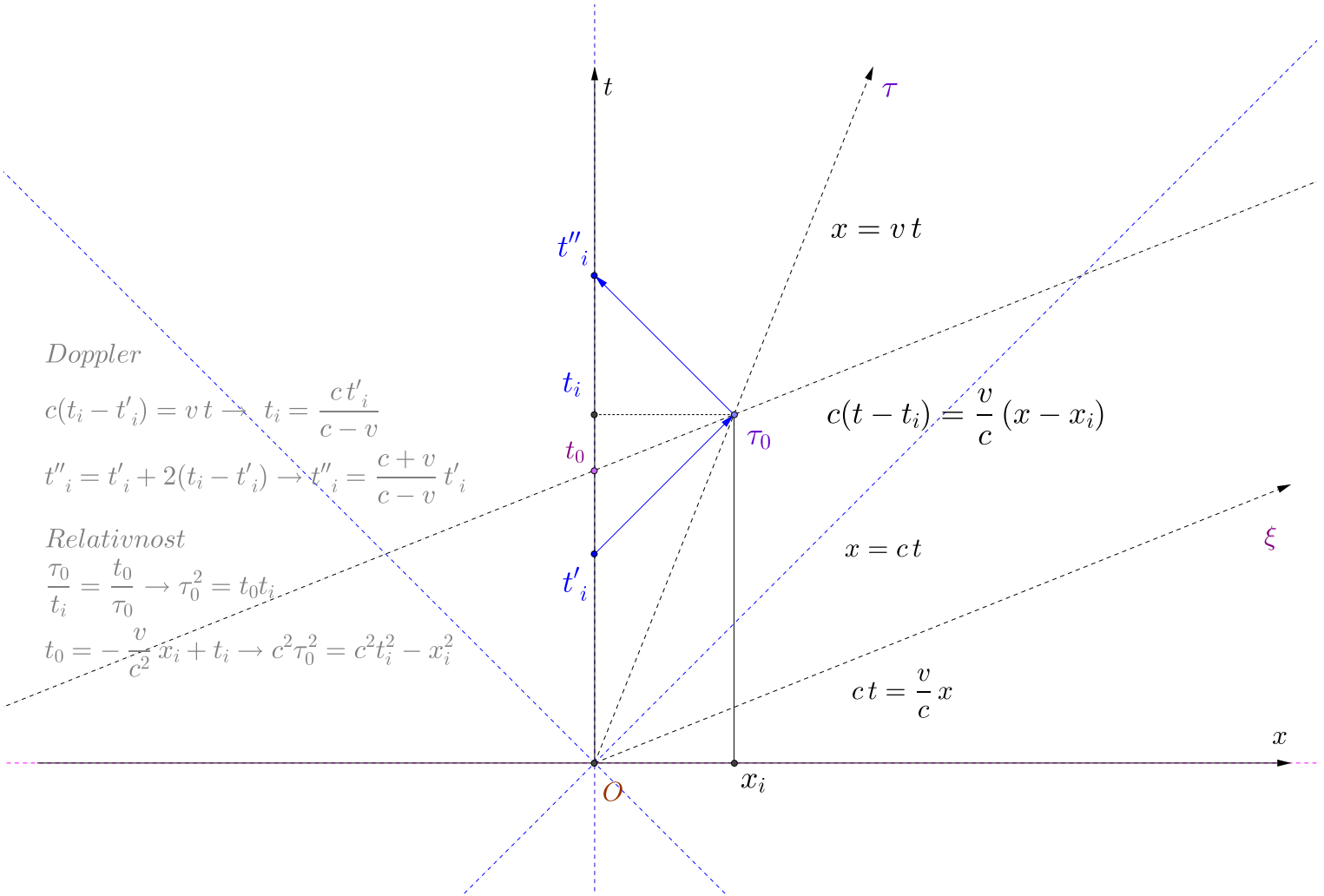
$$\Delta t_1 = \Delta t \sqrt{\frac{1 + v_1/c}{1 - v_1/c}} \quad \Delta t_2 = \Delta t \sqrt{\frac{1 - v_2/c}{1 + v_2/c}}$$

# Dopplerjev pojav




Slika 2: Dopplerjev pojav

# Prostor Minkowskega



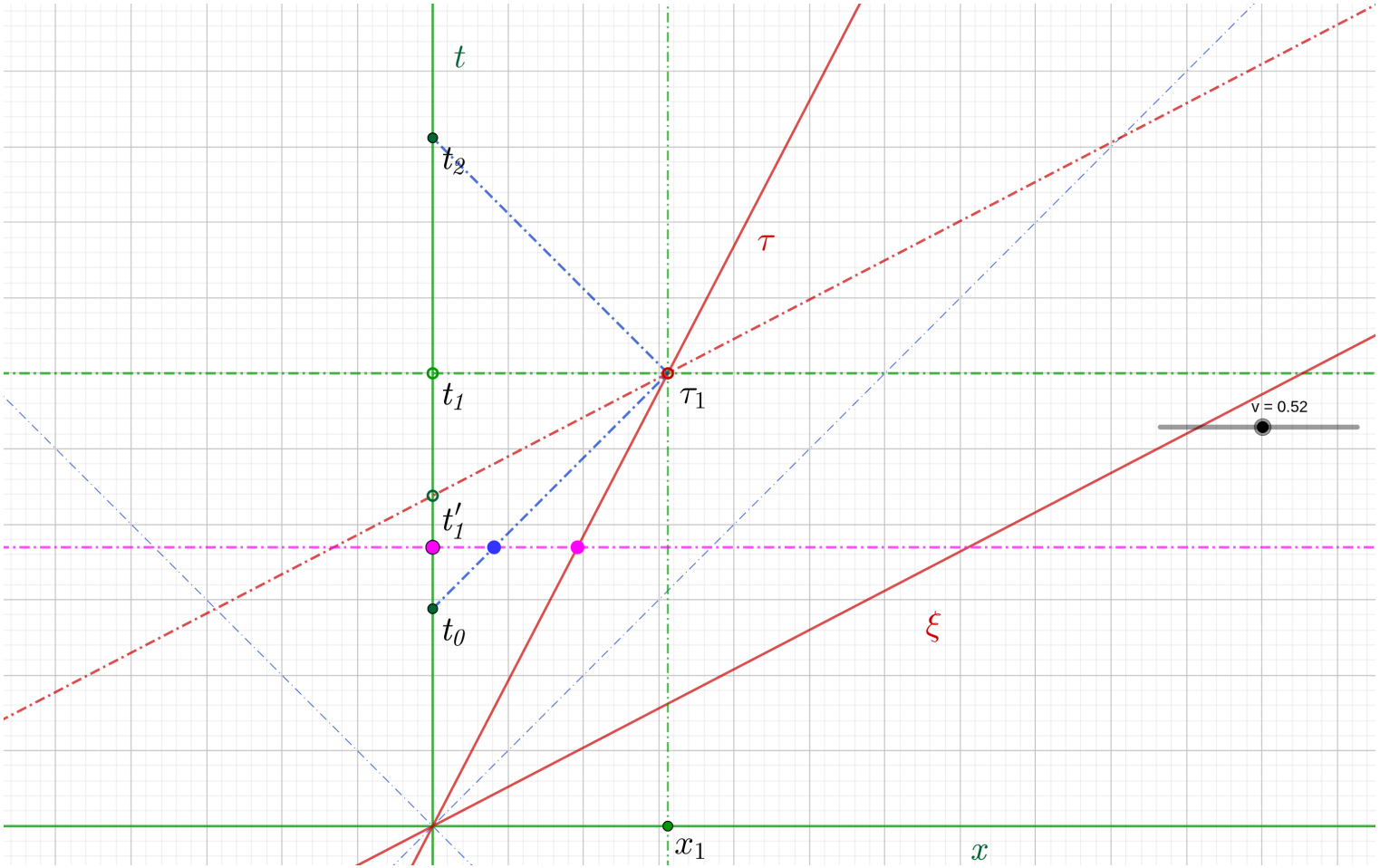

Slika 3: Doppler in relativnost v prostoru Minkowskega

# Prostor Minkowskega

- Dogodek je točka v ravnini Minkowskega, ki je določen z dvema koordinatama: $T = (t, x)$, $t$-kdaj in $x$-kje.
- Pot, ki veže dogodke je svetovnica.
- Principa relativnosti:
  1. Svetlobna hitrost je v vseh sistemih konstantna, je enaka $c$.
  2. Inercialni sistemi (sistemi, ki se gibljejo enakomerno drug glede na drugega) so ekvivalentni.
     Določena je edino njihova relativna hitrost, ni absolutnega mirovanja.
- Na sliki 3 sta označena sistema $(t, x)$ in $(\tau, \xi)$, ki se gibljeta s hitrostjo $v$ drug glede na drugega. Referenčni sistem, iz katerega gledamo dogajanje, je sistem $(t, x)$.
- Enote izberemo tako, da je hitrost svetlobe enaka $c = 1$.
- Poti svetlobe so vzporedne osema $ct = \pm x$.
- Poti svetlobe v sistemu $(\tau, \xi)$ so vzporedne osema $c\tau = \pm\xi$.

- Zadnji dve točki sledita iz prvega principa relativnosti.
- V času $t_i'$ opazovalec v sistemu $(t, x)$ pošlje svetlobni signal opazovalcu, ki miruje v sistemu $(\tau, \xi)$.
- Ta prestreže signal v svojem času $\tau$ in ga vrne nazaj.
- Opazovalec v sistemu $(t, x)$ prejme vrnjeni signal v svojem času $t_i''$.
- Premice istočasnosti v danem sistemu so vzporedne s prostorsko osjo sistema.
- Čas $t_i$ predstavlja dogodek v sistemu $(t, x)$, ki je istočasen z dogodkom $\tau_0$, ko je drugi opazovalec sprejel signal.
- Dogodek $t_0$ pa je istočasen z dogodkom $\tau_0$ v sistemu $(\tau, \xi)$.
- Razmerje med časoma $t_i''/t_i'$ razkrije faktor pri Dopplerjevem pojavu.
- Lastni čas $\tau_0$ drugega opazovalca izračunamo iz zveze $\tau_0/t_i = t_0/\tau_0$, ki sledi iz drugega principa relativnosti.
- Svet minkowskega

# Svet Minkowskega




Slika 4: Svet Minkowskega

# Fotonska škatla

- Odkod sistemu z ujetim fotonom masa?
- Foton bomo ujeli v fotonsko škatlo, ki jo bomo predstavili s hipotetičnim brezmasnim optičnim vlaknom dane dolžine. Na koncih vlakno zapirata ogledali. Tako se foton giblje po vlaknu le sem in tja.
- Foton ima svojo gibalno količino $p = E/c = \frac{h\nu}{c} = h/\lambda$. Ko se foton odbije od zrcala, se mu spremeni smer gibanja in s tem smer gibalne količine.
- Zaradi zakona o ohranitvi gibalne količine mora predati zrcalu dvakratnik svoje gibalne količine, ki jo je imel pred trkom.
- To pomeni, da svetloba na zrcalu povzroči majhen, a merljiv tlak, ki ga imenujemo radiacijski tlak.
- V mirujoči fotonski škatli foton izvaja enak nasprotno usmerjen tlak na obe zrcali.
- Njegova valovna dolžina se ohranja, le smer gibanja se spreminja.

# Gibalna količina fotonske škatle

- Vzemimo, da se fotonska škatla giblje enakomerno s hitrostjo $v$ v smeri svoje osi.
- Njena gibalna količina je enaka povprečni gibalni količini fotona, ko se giblje v smeri gibanja škatle in ko se giblje v nasprotni smeri.
- Zaradi gibanja škatle v mirujočem sistemu zaznamo Dopplerjev učinek.
- Ko se foton giblje v nasprotni smeri gibanja škatle, se mu pri odboju frekvenca poveča, ker se ogledalo giblje v nasprotni smeri gibanja fotona, in zmanjša, ko se foton odbije od nasprotnega zrcala.

Povprečna gibalna količina fotona, ko se le-ta premika v eni in drugi smeri, je enaka:

$$p = \frac{h\upsilon}{2c}\left(\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}\right) = \frac{h\upsilon}{c^2}\frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

kjer je $\upsilon$ frekvenca fotona, gledano v sistemu, ki se giblje skupaj s škatlo.

# Masa fotonske škatle

- Energija fotona: $E = h\upsilon$.
- Po enačbi $E = m\,c^2$ tej energiji $E$ ustreza masa $m$.

$$\frac{h\upsilon}{c^2} = \frac{E}{c^2} = m.$$

- Relativistična sprememba mase $m$ zaradi gibanja s hitrostjo $v$ je enaka

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

- Gibalna količina fotonske škatle je potemtakem $m'v$.
- Masa $m = h\upsilon/c^2$ je mirovna masa fotonske škatle.

# Začetki

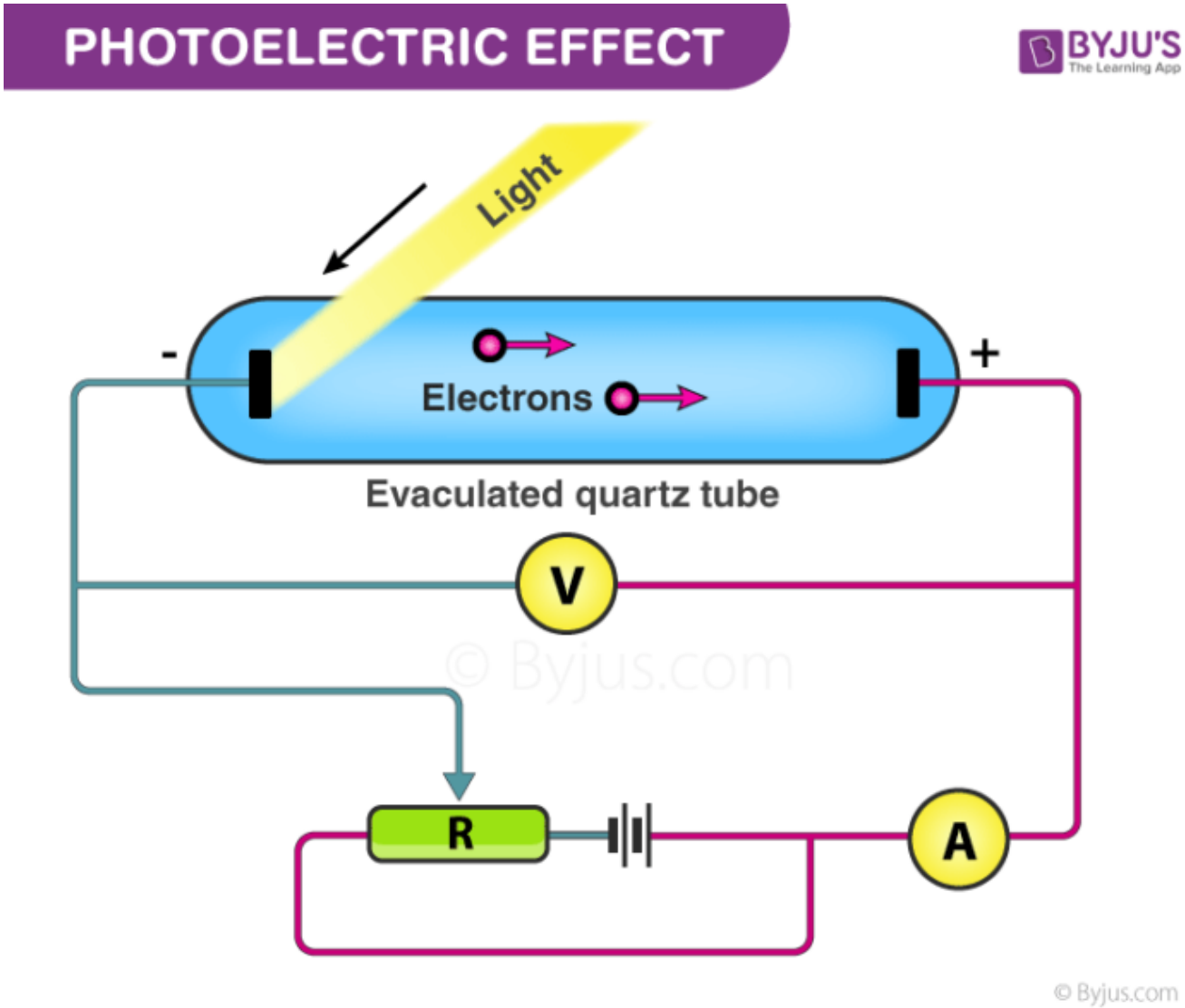
- 1887 Heinrich Hertz:
  Odkril fotoelektrični pojav med poskusi z elektromagnetnimi valovi.
- 1888 Wilhelm Hallwachs:
  Pokazal, da ultravijolična svetloba povzroči, da negativno naelektrena kovinska plošča izgublja električni naboj.
- 1897–1899 J. J. Thomson:
  Odkril elektron in raziskoval električno nabite delce, ki se sproščajo pri fotoefektu.
- 1902 Philipp Lenard:
  Eksperimentalno raziskal energijo fotoelektronov in ugotovil, da njihova največja kinetična energija ni odvisna od intenzitete svetlobe.
- 1900–1901 Max Planck:
  Razvil kvantno hipotezo za energijo sevanja črnega telesa, ki je bila pomembna za nadaljnji razvoj kvantne teorije.
- 1905 Albert Einstein:
  Pojasnil fotoefekt s hipotezo, da se svetlobna energija izmenjuje v posameznih kvantih, in izpeljal enačbo fotoefekta.
- 1914–1916 Robert A. Millikan: Z natančnimi meritvami preveril Einsteinovo enačbo fotoefekta in določil Planckovo konstanto.
- 1923–1925 Arthur H. Compton:
  Z raziskavami sipanja rentgenskih žarkov na elektronih dodatno prispeval k sprejetju kvantne narave svetlobe.

# Fotoefekt

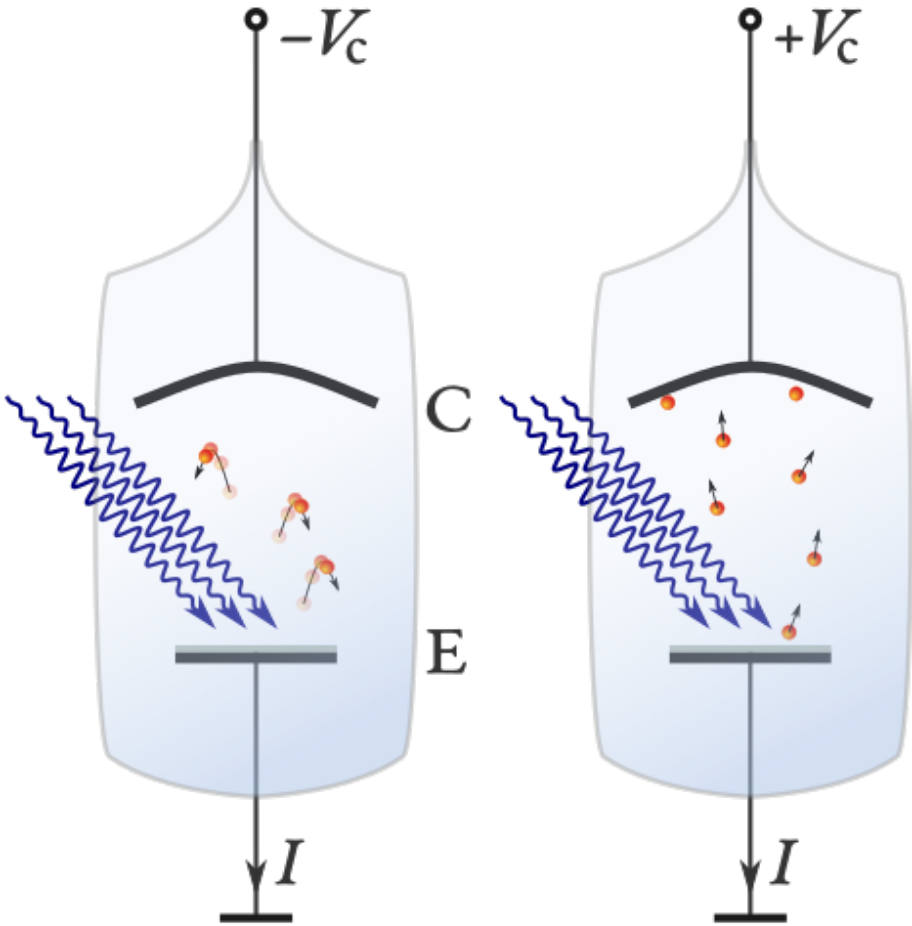
Fotoefekt je pojav, pri katerem svetloba (fotoni), ki pade na površino kovine, izbije iz nje elektrone. Fotoni izbijejo elektrone le, če imajo dovolj energije. Ta pojav dokazuje korpuskularni značaj svetlobe. Svetloba se vede kot tok delcev (Einstein, 1905).
Za razlago pojava je dobil Einstein leta 1921 Nobelovo nagrado.

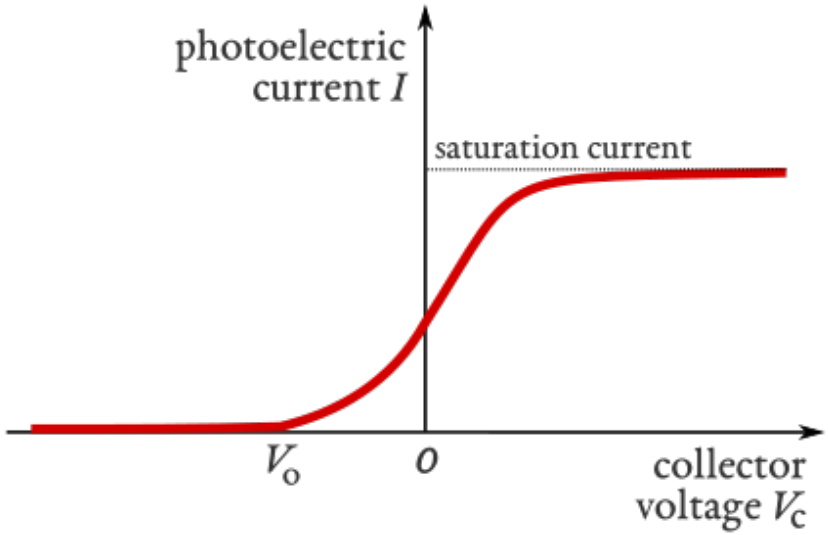
- Energija fotona: $E = h\upsilon$.
- Einsteinova enačba fotoefekta: $h\upsilon = W + E_k$.
  - $W$ – izstopno delo (energija vezave elektrona v kovini),
  - $E_k$ – kinetična energija izbitih elektronov.
- Kinetična energija elektrona: $E_k = mv^2/2$.
  - $m$ – masa elektrona,
  - $v$ – hitrost elektrona.
- Mejna frekvenca (elektron ravno izstopi): $h\upsilon_0 = W$.
- Kinetična energija elektrona je $E_k = V_0 q$,
  - kjer je $V_0$ je negativna napetost, ki ustavi elektron in
  - $q$ je naboj elektrona.

# Vakuumska cev



# Napetost $V_0$


$-V_c$
$+V_c$
C
E
I
I


photoelectric current $I$
saturation current
$V_o$
$o$
collector voltage $V_c$