

Naloge iz Osnov moderne fizike

1 Osnove posebne teorije relativnosti

1.1 Galilejeve transformacije

1. Na zračni drči poženemo dva enaka vozička z nasprotno enakima hitrostima drugega proti drugem. Vozička se sprimeta in obmirujeta.
 - a) Kako je z ohranitvijo gibalne in kinetične energije?

Vemo: skupna gibalna količina se ohranja; na začetku je skupna gibalna količina enaka $mv + (-mv) = 0$, na koncu pa tudi 0, saj vozička obmirujeta. Skupna kinetična energija na začetku je $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mv^2$, na koncu pa 0. Na koncu gre $Q = mv^2$ toplote v okolico.
 - b) Kako opiše poskus opazovalec na enem od vozičkov? Velja ohranitev gibalne količine tudi zanj? Koliko kinetične energije se zanj pretvori v toploto? Skiciraj gibanje vozičkov pred in po trku, kot ga vidi opazovalec.
 - c) Kako pa opiše poskus opazovalec, ki se do trka giblje skupaj z enim od vozičkov, po trku pa nadaljuje gibanje v isti smeri z enako hitrostjo? (Zanj se vozička po trku gibljeta v nasprotno smer.) Se zanj gibalna količina ohranja? Koliko kinetične energije se izgubi? Nariši skico.

1.2 Postulati moderne fizike

1. Če bi bila hitrost svetlobe manjša kot je, ali bi bili relativistični pojavi bolj ali manj očitni kot so sedaj? Opiši obnašanje v svetu, v katerem bi bila hitrost svetlobe enaka zvočni hitrosti!
2. Elektronski curek v katodni cevi televizorja lahko potuje po zaslonu hitreje kot svetloba. Ali ni to v nasprotju s teorijo relativnosti?

1.3 Podaljšanje časa

1. Atlet, ki se je naučil nekaj fizike, je vedel naslednje: časovni interval, ki ga z Zemlje izmerijo na premikajoči se ladji je daljši kot časovni interval, ki ga izmerijo na ladji za ista dogodka. Zato je predlagal, da bi poskusil postaviti svetovni rekord v teku na 100 m tako, da bi čas teka meril opazovalec na premikajoči se ladji. Ali je njegov predlog dober?

2. Opazovalec na vesoljski ladji, ki se giblje s hitrostjo $0,7 c$ glede na Zemljo, izmeri, da avto na Zemlji v štiridesetih minutah prepotuje določeno razdaljo tja in nazaj. Koliko časa je potreboval za pot šofer na Zemlji?
3. Opazovalca, eden na Zemlji in drugi v vesoljski ladji, ki se giblje s hitrostjo $2,00 \cdot 10^8$ m/s glede na Zemljo, nastavita svoji uri na enak čas, ko ladja zapusti Zemljo. Koliko časa mine prvemu (drugemu), ko se uri razlikujeta za sekundo? Ali se zdi opazovalcu na Zemlji, da teče vesoljčeva ura hitreje, počasneje ali enako hitro kot njegova?
4. Kako hitra bi morala biti vesoljska ladja, da bi se vesoljci postarali pol manj kot Zemljani?
5. Kako hitra mora biti vesoljska ladja, da v obdobju enega dne na ladji minejo štirje dnevi na Zemlji?
6. Letalo leti s hitrostjo 300 m/s. Koliko časa bi morale preteči za potnike na letalu, da bi razlika na urah potnikov v letalu in mirujočih na Zemlji dosegla 1 s? Koliko časa pa bi morale preteči, če bi bila svetlobna hitrost enaka zvočni?
7. Vesoljska ladja Appolo 11, ki je leta 1969 prva pristala na Luni, se je oddaljevala od Zemlje s hitrostjo $1,08 \cdot 10^4$ m/s. Koliko je daljši dan na vesoljski ladji za opazovalca na Zemlji od dneva vesoljca na ladji?
8. Metka je na vesoljski ladji, ki potuje s hitrostjo $0,60 c$ glede na Zemljo. Janko opazuje vesoljsko ladjo z Zemlje. V trenutku, ko Metkina ladja leti mimo Zemlje, vključita oba vsak svojo stoparico. Janko v nekem trenutku ugotovi, da je Metkina ladja prepotovala $9,0 \cdot 10^7$ m. Kolikšen čas kaže tedaj njegova ura in kolikšen čas kaže Metkina ura (vidi Janko)? Ko Metka na svoji uri odmeri čas 0,400 s, kolikšen čas kaže tedaj Jankova ura (vidi Metka)?
9. V ozračju se gibljejo mioni, ki jih rodijo kozmični delci v vrhnjih plasteh ozračja, s hitrostjo $0,994 c$ navpično navzdol. Na vrhu hriba s števcem v eni uri ulovijo 568 mionov. Koliko mionov doseže vznožje hriba 2100 m nižje, če je lastni razpadni čas miona $2,2 \cdot 10^{-6}$ s? Koliko mionov pa bi doseglo vznožje, če ne bi bilo podaljšanja časa? Pri poskusu so s števcem ob vznožju hriba v eni uri ujeli 412 mionov.
10. Nek delec ima v mirovanju razpadni čas $1,0 \cdot 10^{-7}$ s. Kolikšno razdaljo prepotuje s hitrostjo $0,99 c$, preden razpade?
11. Alfa Centauri je 4,4 svetlobna leta oddaljena od Zemlje. S kolikšno hitrostjo bi morala potovati z Zemlje do Alfe Centauri vesoljska ladja, da bi potovanje za potnike v njej trajalo 10 let? Koliko časa bi vesoljska ladja potovala za opazovalca z Zemlje?
12. Dvojček A naredi krožno vožnjo s hitrostjo $0,6 c$ do zvezde, ki je 12 svetlobnih let daleč. Dvojček B ostane medtem na Zemlji. Oba si vsako leto ob obletnici odhoda pošljeta signal. Koliko signalov pošlje A? Koliko signalov pošlje B? Koliko signalov in kdaj prejme B? Koliko signalov in kdaj prejme A?

1.4 Dopplerjev pojav

1. Vesoljska ladja, ki se oddaljuje od Zemlje s hitrostjo $0,97 c$, oddaja EM signal s frekvenco $1,00 \cdot 10^4$ Hz. Kolikšna je frekvenca valovanja, ki ga zazna sprejemnik na Zemlji?
2. Galaksija Ursa Major se od Zemlje oddaljuje s hitrostjo 15000 km/s. Ena od karakterističnih črt sevalnega spektra te galaksije ima valovno dolžino 550 nm. Kolikšno valovno dolžino te črte astronomi izmerijo na Zemlji?
3. Frekvence spektralnih črt svetlobe iz oddaljenih galaksij so samo $2/3$ tako velike kot frekvence spektralnih črt z najbližjih zvezd. S kolikšno hitrostjo se oddaljene galaksije oddaljujejo?
4. Avto se s hitrostjo 150 km/h približuje policijskemu radarju. Radar oddaja signal s frekvenco 15 GHz. Kolikšno spremembo frekvence zazna detektor hitrosti?
5. Motorist je zapeljal skozi rdečo luč. Sodniku za prekrške je trdil, da je zaradi hitrosti, s katero se je približeval semaforju, videl namesto rdeče ($\lambda = 620$ nm) zeleno ($\lambda = 540$ nm) luč. Sodnik se je strinjal z možno razlago in je določil kazen v znesku enega evra za vsak km/h, ki je nad dovoljeno hitrostjo 50 km/h. S kolikšno hitrostjo je vozil motorist? (Kolikšna je bila kazen?)
6. Vesoljska ladja, ki se oddaljuje od Zemlje, oddaja radijske valove s stalno frekvenco $1,00 \cdot 10^9$ Hz. Če sprejemnik meri frekvenco signala na Hz natančno, pri kateri hitrosti ladje zazna spremembo med relativističnim in klasičnim Dopplerjevim pojavom?
7. Vesoljska ladja se približuje Zemlji. Z ladje pošljejo proti Zemlji radarski signal s frekvenco $1,00 \cdot 10^9$ Hz. Odbiti signal na ladji prestrežejo in izmerijo, da ima frekvenco $1,50 \cdot 10^9$ Hz. Kolikšna je hitrost ladje glede na Zemljo?
8. Vesoljska ladja se približuje Zemlji s hitrostjo $0,6 c$ pod kotom 30° glede na zveznico z radijskim sprejemnikom na Zemlji. Kolikšno frekvenco izmeri opazovalec na Zemlji, če oddaja ladja signal s frekvenco $1,00 \cdot 10^9$ Hz?

1.5 Skrčitev dolžin

1. Astronavt, ki je na Zemlji visok natanko $1,80$ m, stoji v vesoljski ladji v smeri vožnje. Ladja se oddaljuje od Zemlje s hitrostjo $0,9 c$. Kolikšna je njegova višina za opazovalca na ladji? Kolikšna je njegova višina za opazovalca na Zemlji?
2. Astronavt stoji v vesoljski ladji v smeri vožnje. Opazovalec na Zemlji izmeri, da je visok $1,3$ m. Ladja se oddaljuje od Zemlje s hitrostjo $0,6 c$. Kolikšna je višina astronavta v vesoljski ladji?
3. Metrska palica je za opazovalca videti le 50 cm dolga. Kolikšna je njena hitrost glede na opazovalca? Kako dolgo leti mimo opazovalca? Palica je vzporedna smeri gibanja.

4. Koliko časa potrebuje metrska palica, ki se giblje s hitrostjo $0,1 c$ glede na opazovalca, da preleti opazovalca? Palica je vzporedna smeri gibanja.
5. Lastni razpadni čas nekega delca je 10 ns . Kolikšno razdaljo prepotuje delec v laboratorijskem sistemu preden razpade, če je njegov razpadni čas, merjen v laboratorijskem sistemu, 20 ns ?
6. Neka zvezda je 36 svetlobnih let oddaljena od Zemlje. Koliko časa bi s hitrostjo $0,98 c$ z Zemlje do nje potovala vesoljska ladja za opazovalca na Zemlji? Koliko časa pa za vesoljca na ladji? Kolikšno prepotovano razdaljo izmerijo vesoljci?
7. Metrska palica miruje v laboratorijskem sistemu. Leži v ravnini xy in oklepa z osjo x kot 30° . Kolikšen kot oklepa ta palica z osjo x' v sistemu, ki se giblje s hitrostjo $0,9 c$ v smeri osi x ? Kako dolga je v tem sistemu? Osi x in x' sta vzporedni.
8. Antena vesoljske ladje oklepa kot 10° glede na dolgo os ladje. Ladja se oddaljuje s hitrostjo $0,7 c$ od Zemlje. Kolikšen kot oklepa antena z dolgo osjo ladje za opazovalca na Zemlji?
9. Kolikšno dolžino palice nameri opazovalec, ki se giblje glede na palico s hitrostjo $0,9 c$ pod kotom 30° proti smeri palice? Kolikšen je za opazovalca, za katerega palica miruje, kot med smerjo palice in smerjo gibajočega se opazovalca? Lastna dolžina palice je 1 m .

1.6 Lorentzove transformacije

1. Opazovalec zazna dve eksploziji, eno v neposredni bližini in drugo $2,00 \text{ ms}$ kasneje 100 km daleč stran. Drugi opazovalec zazna obe eksploziji na istem kraju. Koliko časa preteče med eno in drugo eksplozijo za drugega opazovalca?
2. Opazovalec zazna dve eksploziji, ki se zgodita v istem hipu. Ena je v neposredni bližini in druga 100 km daleč. Drugi opazovalec zazna obe eksploziji v oddaljenosti 160 km . Koliko časa preteče med eno in drugo eksplozijo za drugega opazovalca?
3. Ob 6.00 zjutraj se istočasno ugasnejo luči v New Yorku in Bostonu. Kaj vidi opazovalec iz vesoljske ladje, ki se giblje v smeri New York $\rightarrow$ Boston s hitrostjo $0,9 c$? Razdalja med obema krajema je 290 km .
4. V Bostonu luči ugasnejo $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ kasneje kot v New Yorku. S kolikšno hitrostjo in v kateri smeri bi se morala gibati vesoljska ladja, v kateri bi potniki opazili, da se luči ugasnejo hkrati? Razdalja med obema krajema je 290 km .
5. V soboto točno opoldne po Sloveniji preverjajo delovanje siren. V Kopru vključijo sireno ob 12.00 , v Murski Soboti, ki je po zračni črti 220 km oddaljena od Kopra, pa $0,5 \text{ ms}$ kasneje. S kolikšno hitrostjo in v kateri smeri se giblje vesoljska ladja, s katere opazijo, da se sirene v Kopru in v Murski Soboti vključijo hkrati? Kako daleč narazen sta Koper in Murska Sobota za opazovalca na vesoljski ladji?

6. Vesoljska ladja se oddaljuje od Zemlje s hitrostjo $0,8 c$. Ko je od Zemlje oddaljena $6,66 \cdot 10^8$ km, pošljejo proti njej z Zemlje radijski signal. Po kolikšnem času doseže signal ladjo za opazovalca na Zemlji in po kolikšnem času za opazovalca na ladji?
7. Palica se giblje vzdolž merila. Ko izmerimo dolžino palice z merilom v referenčnem sistemu, v katerem merilo miruje, je palica dolga 4,0 m. Ko zaznamujemo lego obeh koncev palice ob istem merilu tako, da sta dogodka sočasna v sistemu palice, pa izmerimo 9,0 m. Kolikšna je lastna dolžina palice in s kolikšno hitrostjo se palica giblje glede na merilo?
8. Prva vesoljska ladja leti z Zemlje proti oddaljeni zvezdi in doseže za opazovalca na Zemlji po treh mesecih vesoljsko postajo, ki miruje glede na Zemljo v oddaljenosti 0,2 svetlobnega leta. V tem trenutku pošljejo z Zemlje za njo drugo vesoljsko ladjo s hitrostjo $0,98 c$. Čez koliko časa in kje se ladji srečata za opazovalca na Zemlji? Koliko kaže tedaj ura na drugi vesoljski ladji?
9. Na divjem zahodu se šerif vozi z vlakom s hitrostjo 50 m/s. Skozi okno opazi dva revolveraša, ki stojita vzporedno s tirom in 50 m narazen. Šerif na vlaku s svojimi supernatančnimi merilnimi napravami izmeri, da oba moža ustrelita istočasno. Katerega naj aretira, ker je v njunem sistemu prvi sprožil: prvega, mimo katerega se pelje, ali drugega? S kolikšno zamudo je ustrelil tisti, ki je ustrelil drugi? Kje na poti med njima je bila v tistem trenutku prva krogla, ki se giblje s hitrostjo 370 m/s?
10. Mačke vrste *Felis einsteinii* živijo točno sedem let po svoji lastni telesni uri. Takoj ko se mačka te vrste skoti, jo pošljemo z vesoljsko ladjo s hitrostjo $0,8 c$ z Zemlje proti Siriusu. Kako daleč od Zemlje (v sistemu Zemlje) je mačka v trenutku, ko umre? Takoj, ko mačka umre, pošljejo z vesoljske ladje radijski signal proti Zemlji. Koliko časa mine za Zemljana od takrat, ko se mačka skoti, do trenutka, ko prejmejo radijski signal?
11. Vesoljska ladja je v lastnem sistemu dolga 200 m. Glede na Zemljo se giblje s hitrostjo $0,95 c$. V nekem trenutku z zadnjega konca ladje pošljejo svetlobni signal proti njenemu sprednjemu koncu. Čez koliko časa zaznajo signal na sprednjem koncu ladje, gledano v lastnem sistemu ladje? Koliko časa traja potovanje svetlobnega signala z zadnjega na sprednji konec ladje za opazovalca z Zemlje?
12. V laboratorijskem sistemu se gibljeta v isti smeri dva nestabilna delca z enakima hitrostima $0,99 c$. V laboratorijskem sistemu je razdalja med njima 120 m. V njunem lastnem koordinatnem sistemu v nekem trenutku delca hkrati razpadeta. Koliko časa mine med obema razpadoma za opazovalca v laboratorijskem sistemu? Kateri delec razpade prej?
13. Galaksija Andromeda je od Zemlje oddaljena 2,2 milijona svetlobnih let. S kolikšno hitrostjo mora potovati vesoljska ladja od Zemlje proti Andromedi, če se vesoljci na njej na tej poti postarajo za 20 let? Ko vesoljska ladja pripotuje do Andromede, pošljejo z nje radijski signal proti Zemlji. Koliko časa mine na Zemlji od vzleta vesoljske ladje z Zemlje do sprejetja radijskega signala? Kolikšno razdaljo med Zemljo in Andromedo izmerijo vesoljci?

1.7 Transformacije hitrosti

1. Telo, ki se giblje s hitrostjo $0,5 c$ glede na opazovalca, razpade na dva dela, ki odletita s hitrostima $0,6 c$ v smeri nazaj in $0,5 c$ v smeri naprej v težiščnem sistemu. Kolikšni hitrosti izmeri opazovalec?
2. Opazovalec na Luni vidi dve vesoljski ladji, A in B, ki se približujeta ena drugi. Opazovalec izmeri obe hitrosti, ki sta $0,8 c$ za A in $0,9 c$ za B. Kolikšno hitrost približevanja Luni izmeri opazovalec iz ladje A? S kolikšno hitrostjo se mu približuje ladja B? Enako za opazovalca na ladji B. . .
3. Prva ladja se oddaljuje od Zemlje s hitrostjo $0,8 c$, druga pa leti v isti smeri s hitrostjo $0,9 c$. Kolikšna je hitrost prve ladje za vesoljca v drugi in kolikšna je hitrost druge ladje za vesoljca v prvi?
4. Mirujoči opazovalec vidi dva delca, ki se gibljeta eden proti drugemu s hitrostima $0,99 c$ glede na opazovalca. Kolikšna je hitrost enega delca glede na drugega?
5. Mirujoči opazovalec vidi dve vesoljski ladji, ki se gibljeta ena proti drugi. Prva ima hitrost $0,8 c$, druga pa $0,2 c$. S kolikšno hitrostjo se druga vesoljska ladja približuje prvi za nekoga, ki se pelje s prvo ladjo?
6. Dve vesoljski ladji z lastnima dolžinama $100 m$ se gibljeta ena proti drugi s hitrostima $0,85 c$ merjeno z Zemlje. Kako dolga je posamezna ladja za opazovalca na Zemlji? Kolikšna je hitrost prve ladje za opazovalca na drugi ladji? Kako dolga je prva ladja za opazovalca na drugi ladji?
7. Vesoljska ladja z dolžino $100 m$ se giblje s hitrostjo $0,5 c$. Z zadnjega konca ladje izstrelijo proti sprednjemu delu kroglo. Opazovalec na Zemlji izmeri, da je hitrost krogle $0,9 c$ glede na Zemljo. Koliko časa leti krogla s konca ladje do njenega sprednjega dela, merjeno na ladji?
8. Neko telo se giblje v ravnini xy s komponentama hitrosti v_x in v_y . Kolikšna je hitrost v' tega delca v referenčnem sistemu, ki se giblje s hitrostjo V vzdolž pozitivne osi x ?
9. V laboratorijskem sistemu se giblje delec v ravnini xy s hitrostjo $0,7 c$ pod kotom 40° glede na os x . Kolikšna je hitrost tega delca v sistemu ladje, ki se giblje s hitrostjo $0,9 c$ v smeri pozitivne osi x ? Kolikšen kot oklepa smer gibanja delca z osjo x v tem sistemu?

1.8 Energija in gibalna količina

1. Jakost svetlobnega toka s Sonca, ki pada pravokotno na Zemljino površino, je $1400 W/m^2$. Za koliko se masa Sonca zmanjša vsako sekundo? Oddaljenost Zemlje od Sonca je $1,49 \cdot 10^{11} m$.

2. Kolikšni sta kinetična energija in hitrost protona, katerega gibalna količina je enaka $800 \text{ MeV}/c$? Mirovna energija protona je 938 MeV .
3. Kolikokrat je masa relativističnega delca, katerega hitrost je za stotinko manjša od svetlobne hitrosti, večja od njegove mirovne mase?
4. Gostota mirujočega telesa je ρ_0 . S kolikšno hitrostjo se giblje telo, če je njegova gostota večja za 25 %?
5. V pospeševalniku dobimo protone s kinetično energijo 6000 MeV . Za koliko kilometrov na sekundo je njihova hitrost manjša od svetlobne?
6. Fotonsko raketo poganja nasprotna sila curka svetlobe. Kolikšno hitrost doseže raketa v opazovalnem sistemu, v katerem je na začetku mirovala, ko izseva polovico začetne mase?
7. Gibalna količina protona je $10,0 \text{ GeV}/c$. Za koliko odstotkov je hitrost protona manjša od svetlobne hitrosti?
8. Pri kolikšni hitrosti delca je njegova relativistična gibalna količina dvakrat tolikšna kot klasična?
9. Pri kolikšni hitrosti je kinetična energija delca enaka njegovi mirovni energiji?
10. Poišči zvezo med kinetično energijo in gibalno količino relativističnega delca! Kolikšna je gibalna količina protona s kinetično energijo 500 MeV ? Kolikšna je kinetična energija protona z gibalno količino $500 \text{ MeV}/c$?
11. Delec z mirovno maso m_0 in kinetično energijo W_k trči v enak mirujoč delec. Kolikšna je mirovna masa delca, ki je iz začetnih dveh delcev nastal ob trku? S kolikšno hitrostjo se giblje?
12. Mirujoč kaon K^0 spontano razpade v dva piona, π^+ in π^- . Kako se novonastala delca gibljeta? Kolikšni sta njuni hitrosti? Masa kaona K^0 je $8,87 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$, masa vsakega od pionov π^+ in π^- pa $2,49 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$.
13. Mirujoč nevtralni delec Λ spontano razpade v proton in negativni pion π^- . Novonastali proton ima kinetično energijo $5,3 \text{ MeV}$. Kako se novonastala delca gibljeta? Kolikšni sta njuni gibalni količini? Kolikšna je mirovna masa delca Λ ? Mirovna energija piona π^- je 140 MeV .

1.9 Relativistični delci v polju

1. Elektron se giblje v homogenem električnem polju z jakostjo $1,75 \text{ kV/m}$. Kolikšna je njegova hitrost po eni μs , če na začetku miruje? Kolikšno pot preleti elektron v tem času? Kolikšna je naposled njegova kinetična energija?
2. Elektron na začetku miruje v električnem polju z jakostjo 10 kV/cm . Po kolikšnem času je njegova kinetična energija enaka njegovi mirovni energiji?

3. Kolikšen je pospešek elektrona v električnem polju z jakostjo 10 kV/cm v trenutku, ko je njegova kinetična energija enaka mirovni? Elektron je na začetku miroval.
4. V trenutku $t = 0$ relativističen proton prileti s hitrostjo $0,9 c$ v homogeno električno polje z jakostjo 10^6 V/m , ki je pravokotno na smer njegovega gibanja. Kolikšen je kot med smerjo gibanja protona in začetno smerjo gibanja po eni μs ?
5. Elektron, ki sprva miruje, pospeši napetost $1,02 \cdot 10^6 \text{ V}$. Nato prileti v prečno homogeno magnetno polje z gostoto $0,048 \text{ T}$ tako, da zakroži pravokotno na silnice. Kolikšen je polmer tira?

2 Delčne lastnosti valovanja

2.1 Fotoni

1. Kolikšno frekvenco in valovno dolžino ima svetloba, katere fotoni imajo energijo 100 MeV ?
2. Koliko fotonov svetlobe z valovno dolžino 555 nm mora v eni sekundi vstopiti v oko skozi zenico, da oko še zazna svetlobo? Pri tej valovni dolžini je minimalna gostota svetlobnega toka, ki jo oko zazna, $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$, če je curek širši kot zenica. Premer zenice je 5 mm .
3. Točkast vir elektromagnetnega valovanja z valovno dolžino 589 nm seva z močjo 10 W enakomerno na vse strani. Kolikšna je gostota fotonskega toka na m^2 v oddaljenosti 2 m od vira valovanja?
4. Laser odda svetlobni pulz, ki je dolg $0,13 \text{ ms}$ in ima energijo 10 J . Kolikšen je povprečni svetlobni tlak tega curka na zaslon, če je premer curka na zaslonu $10 \mu\text{m}$ (1 mm)? Refleksijski koeficient zaslona je $0,5$.
5. Majhno idealno zrcalo z maso 10 mg je obešeno na lahko vrvico dolžine 10 cm . Za kolikšen kot se odkloni zrcalo, ko ga zadene laserski pulz z energijo 12 J ? Svetloba vpada pravokotno na zrcalo. Odkod zrcalu kinetična energija?
6. Ravno zrcalo je pravokotno na sončne žarke. Kolikšen je tlak svetlobe na ploskev zrcala, ki ima odbojnost $0,9$? Gostota svetlobnega toka s Sonca je $1,4 \text{ kW/m}^2$. Zrcalo prebarvamo s črnim lakom, ki vso svetlobo vpije. Kolikšen je zdaj tlak svetlobe na ploskev?

2.2 Fotoefekt

1. Fotokatodo iz cezija, ki ima izstopno delo $1,97 \text{ eV}$, osvetljuje svetloba z valovno dolžino 450 nm . Kolikšna je največja kinetična energija izstopajočih elektronov? Kolikšna negativna napetost mora biti med elektrodama, da v fotocelici ne teče noben tok?

2. Mejna valovna dolžina za fotoefekt na cinku je 340 nm. Kolikšna je zaporna napetost na fotocelici, ki jo osvetljuje svetloba z valovno dolžino 280 nm?
3. Neko kovino osvetljujemo s svetlobo z dvema različnima valovnima dolžinama 350 nm in 540 nm. Največji hitrosti izstopajočih elektronov se razlikujeta za faktor 2. Kolikšno je izstopno delo za to kovino?
4. Zaporna napetost za elektrone, ki jih iz fotokatode izbija svetloba z valovno dolžino 491 nm, je 710 mV. Ko fotokatodo osvetljuje svetloba z drugo valovno dolžino, je zaporna napetost 1,43 V. Kolikšno je izstopno delo za kovino, iz katere je fotokatoda? Kolikšna je valovna dolžina svetlobe v drugem primeru?
5. Srebrna krogla visi v vakuumirani stekleni buči na neprevodni vrvici. Premer krogle je 2 cm, izstopno delo za srebro pa 4,7 eV. Kolikšen je naboj na krogli, če jo osvetljuje svetloba z valovno dolžino 200 nm?
6. Pri opazovanju fotoefekta na kalciju izmerimo mejno zaporno napetost v odvisnosti od valovne dolžine svetlobe:

λ [nm]	254	313	365	405
U [V]	1,95	0,98	0,50	0,14

 Kolikšna je Planckova konstanta?
7. Elektromagnetno valovanje z valovno dolžino 300 nm pada na fotocelico, ki deluje v področju nasičenja. Občutljivost celice za to valovno dolžino je 4,8 mA/W. Koliko fotoelektronov izbije posamezen foton?
8. Na fotocelico s površino 4 mm² svetimo pravokotno z enobarvno svetlobo z valovno dolžino 550 nm. Jakost svetlobnega toka je 1 kW/m². Kolikšno je izstopno delo za snov, iz katere je fotokatoda, če je zaporna napetost enaka 1,2 V? Kolikšen tok teče skozi fotocelico, če je nanjo priključena prevodna napetost, in če povzroči fotoefekt 5 % fotonov, ki padejo na fotokatodo?

2.3 Rentgenska svetloba

1. Elektroni v televizijski cevi so pospešeni z napetostjo 10 kV. Kolikšna je najmanjša valovna dolžina, ki jo seva televizijski ekran? Katero valovanje je to?
2. Ko se napetost na rentgenski cevi poveča na 2,5-kratno začetno vrednost, se kratkovalovna meja rentgenskega spektra premakne za 25 pm. Kolikšna je začetna napetost na rentgenski cevi?
3. Kalijev klorid kristalizira v kubični mreži. Gostota kristala je $1,98 \cdot 10^3$ kg/m³. Molekulska masa KCl je 74,55 u. Kolikšna je razdalja med najbližjimi atomi v kristalu? Pod katerimi koti se pojavijo Braggovi odboji, če osvetljujemo kristal z rentgensko svetlobo z valovno dolžino 0,1 nm?

4. Ozek curek rentgenski žarkov vpada na kristal natrijevega klorida. Najmanjši vpadni kot, pod katerim se še pojavi zrcalni odboj rentgenskih žarkov, je $4,1^\circ$. Razdalja med mrežnimi ravninami (med atomi v kristalu) je 0,28 nm. Kolikšna je napetost na rentgenski cevi?
5. Kolikšna je kratkovalovna meja zveznega spektra rentgenske svetlobe (najmanjša valovna dolžina rentgenskih žarkov), če je hitrost elektronov, ko padejo na katodo, 0,85 c ? S kolikšno napetostjo so bili elektroni pospešeni?

2.4 Comptonski efekt

1. Kolikšna je frekvenca fotona rentgenske svetlobe, ki ima gibalno količino enako $1,1 \cdot 10^{-23}$ kgm/s? Kolikšna pa je njegova valovna dolžina? Gibalno količino izrazi tudi v MeV/ c .
2. Curek rentgenske svetlobe se siplje na tarči. Valovna dolžina žarkov, ki se gibljejo pod kotom 45° glede na smer vpadnega curka ima valovno dolžino 2,2 pm. Kolikšna je valovna dolžina žarkov v vpadnem curku?
3. Ozek curek X-žarkov vpada na snov, na kateri se Comptonsko siplje. Valovni dolžini sipane svetlobe pod kotom 60° in 120° se razlikujeta za faktor 2. Kolikšna je valovna dolžina vpadlih žarkov, če predpostavimo, da se sipajo na prostih elektronih?
4. Foton z gibalno količino 1,02 MeV/ c se siplje na mirujočem prostem elektronu. Gibalna količina fotona se spremeni na 0,255 MeV/ c . Pod kolikšnim kotom se je sibal foton?
5. Pri eksperimentu je valovna dolžina vpadnih rentgenskih žarkov enaka 10,0 pm, valovna dolžina sipanih žarkov pa 10,5 pm. Kolikšna je po sipanju gibalna količina (velikost in smer) elektronov, na katerih se je ta svetloba sipala?
6. Foton z energijo 1,00 MeV se siplje na mirujočem elektronu. Kolikšna je kinetična energija Comptonovega elektrona, če se valovna dolžina sipanega fotona spremeni za 25 %?
7. Foton z valovno dolžino 6,0 pm se na mirujočem elektronu siplje pod pravim kotom. Kolikšna je frekvenca sipanega fotona? Kolikšna je kinetična energija Comptonovega elektrona?
8. Foton se siplje na mirujočem prostem elektronu za kot 120° . Elektron odleti s kinetično energijo 0,45 MeV. Kolikšna je bila energija fotona pred sipanjem?
9. Kolikšna je energija fotona, če ima elektron po trku z njim lahko največ 50 keV energije?
10. Foton, čigar energija je enaka mirovni energiji elektrona, se Comptonsko siplje na elektronu. Elektron po trku odleti pod kotom 40° glede na začetno smer gibanja fotona. Kolikšna je energija sipanega fotona?

11. Foton z valovno dolžino 12 fm se Comptonsko siplje na mirujočem protonu. Valovna dolžina sipanega fotona je 13,5 fm. V kateri smeri se je sipal foton? Kolikšna je gibalna količina protona po sipanju?
12. Foton se Comptonsko siplje na relativističnem elektronu. Po trku elektron obmiruje, foton pa spremeni smer gibanja za 60° . Kolikšna je sprememba valovne dolžine fotona?
13. Rentgenska svetloba se Comptonsko siplje na prostih mirujočih elektronih. Po sipanju imajo najhitrejši elektroni kinetično energijo 0,19 MeV. Kolikšna je valovna dolžina svetlobe, ki se siplje? (Razmisli, v katerih okoliščinah ima elektron največ kinetične energije!)
14. Foton, čigar energija je enaka mirovni energiji elektrona, se Comptonsko siplje na elektronu. Foton po sipanju odleti pod kotom 90° glede na smer svojega gibanja pred sipanjem. Kolikšna je kinetična energija elektrona? V kateri smeri, glede na začetno smer gibanja fotona, se elektron giblje?

2.5 Tvorba parov

1. Pozitron s kinetično energijo 1 MeV trči v elektron z enako kinetično energijo, ki se giblje v nasprotni smeri, in se z njim anihilira. Kolikšno valovno dolžino imata fotona, ki pri procesu nastaneta?
2. Pozitron s kinetično energijo 20 MeV se v letu anihilira z mirujočim elektronom. Kolikšni sta energiji nastalih fotonov γ , od katerih eden odleti v smeri naprej in drugi v nasprotni smeri? Pod kolikšnim kotom proti prvotni smeri pa odletita fotona, če imata enako energijo? Kolikšna je tedaj njuna energija?
3. Pozitron s kinetično energijo 500 keV se v letu anihilira z mirujočim elektronom. Nastala fotona odletita v smeri gibanja pozitrona in v nasprotni smeri. Kolikšni sta energiji fotonov?
4. Pri neki jedrski reakciji se hitri proton s kinetično energijo 6 GeV zaleti v mirujoč proton. Kolikšen del energije, ki jo ima hitri proton, se lahko porabi za nastanek novih delcev?
5. Pri trku fotona z mirujočim elektronom nastane par elektron-pozitron:

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + (e^- + e^+)$$

Kolikšna mora najmanj biti energija fotona, da je reakcija mogoča? Primerjaj rezultat z energijo, ki je potrebna za tvorbo parov v bližini atomskega jedra.

6. Kolikšna mora biti vsaj kinetična energija elektrona, ki se zaleti v drug mirujoči elektron, da lahko nastane dodatni par elektron-pozitron?

7. Pokaži, da je najmanjša energija fotona, ki lahko tvori par $e^- - e^+$ v bližini mirujočega jedra z maso M enaka

$$2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{M}\right),$$

kjer je m_e mirovna masa elektrona.

2.6 Fotoni v gravitacijskem polju

1. Sonce ima maso $2 \cdot 10^{30}$ kg in polmer $7 \cdot 10^8$ m. Kolikšen je gravitacijski rdeči premik za svetlobo z valovno dolžino 500 nm, ki jo izseva Sonce?
2. Nekatera atomska jedra oddajajo pri prehodu iz vzbujenega stanja v osnovno stanje fotone rentgenske svetlobe. Energija vzbujenega stanja atoma $^{57}_{26}\text{Fe}$ je za 14,4 keV večja od energije osnovnega stanja. Masa atoma $^{57}_{26}\text{Fe}$ je $9,5 \cdot 10^{-26}$ kg. Kolikšen delež energije, ki se sprosti pri prehodu iz vzbujenega v osnovno stanje prevzame jedro? Koliko se zaradi tega spremeni valovna dolžina emitiranih fotonov? Nekateri kristali so tako trdno vezani, da gibalno količino ob prehodu prevzame celoten kristal. Kolikšen delež energije prevzame kristal, ki tehta 1 g? Pri eksperimentu, ki je potrdil obstoj gravitacijskega rdečega premika, so kot vir monokromatske svetlobe uporabili tak kristal. 20 m nižje so postavili enak kristal, ki naj bi fotone absorbiral. Kolikšna je bila valovna dolžina izsevanih fotonov in koliko se je le ta spremenila zaradi spremembe gravitacijske energije? Ali je bila širina emisijske črte dovolj ozka, da so gravitacijski premik lahko izmerili?
3. Kolikšen je Schwarzschildov radij Sonca? Masa Sonca je $2 \cdot 10^{30}$ kg.
4. S spektrometrom, ki ima za vidno svetlobo ločljivost 0,1 nm, merimo spekter sevanja Sonca, ki ima maso $2,0 \cdot 10^{30}$ kg. Kolikšen največji ali najmanjši bi moral biti polmer Sonca, da bi lahko opazili gravitacijski rdeči premik za svetlobo z valovno dolžino 500,0 nm?

3 Valovne lastnosti delcev

3.1 De Brogliejevi valovi

1. Kolikšna je valovna dolžina zrna peska, ki tehta 1 mg in ga nosi veter s hitrostjo 20 m/s? Poišči razmerje med njegovo valovno dolžino in njegovim premerom, če je gostota peska približno 2 kg/dm^3 .
2. Foton in delec imata enako valovno dolžino. Kolikšno je razmerje med njunima gibalnima količinama, polnima energijama in kinetičnima energijama? Obravnavaj klasičen, relativističen in ultrarelativističen delec!
3. Zelena svetloba ima valovno dolžino 550 nm. S kolikšno napetostjo mora biti pospešen elektron, da ima enako valovno dolžino?

4. Kolikšni sta valovni dolžini elektrona s hitrostjo $1,0 \cdot 10^8$ m/s in elektrona s hitrostjo $2,0 \cdot 10^8$ m/s?
5. Kolikšne so de Brogliejeve valovne dolžine elektrona, protona in atoma urana z energijo 100 eV?
6. Kolikšna je valovna dolžina elektrona z energijo 40 keV? Elektrone s tolikšnimi energijami uporabljajo v elektronskih mikroskopih.
7. Pri kolikšni hitrosti elektrona se njegovi valovni dolžini izračunani relativistično in klasično razlikujeta za 1 %?
8. Pri kolikšni energiji je valovna dolžina elektrona (protona) enaka njegovi Compton-ski?
9. Izpelji relativistični izraz za valovno dolžino elektrona v odvisnosti od pospeševalne napetosti! Posebej obravnavaj obe skrajni možnosti — zelo veliko in zelo majhno pospeševalno napetost.
10. V katodni cevi običajnega televizorja pospeši elektrone napetost 25 kV. Kolikšna je njihova valovna dolžina, če računaš klasično in kolikšna, če računaš relativistično?

3.2 Fazna in grupna hitrost

1. Valovni paket nastane kot superpozicija dveh potujočih valovanj,

$$s_1 = s_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t) \quad \text{in} \\ s_2 = s_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t),$$

kjer so $k_1 = 1,00 \text{ m}^{-1}$, $\omega_1 = 2,00 \text{ s}^{-1}$, $k_2 = 1,01 \text{ m}^{-1}$, $\omega_2 = 2,03 \text{ s}^{-1}$. Kolikšna je fazna in kolikšna je grupna hitrost valovnega paketa?

2. Fazna hitrost oceanskih valov je $\sqrt{g\lambda/2\pi}$, kjer je g težni pospešek. S kolikšno hitrostjo se prenaša energija oceanskih valov?
3. Kolikšne so fazne in grupne hitrosti elektronov s hitrostmi $0,001 c$, $0,5 c$ in $0,999 c$?
4. Elektron in proton imata enako hitrost ($0,001 c$; $0,5 c$; $0,999 c$). Poišči razmerje njunih valovnih dolžin, faznih in grupnih hitrosti!
5. Elektron in proton imata enako kinetično energijo (5 keV; 500 keV; 1 GeV; 100 GeV). Poišči razmerje njunih valovnih dolžin, faznih in grupnih hitrosti!

3.3 Uklon delcev

1. Razdalja med atomi kamene soli je 0,282 nm. Kolikšna je kinetična energija nevtronov, katerih valovna dolžina je enaka tej medatomske razdalji?

2. Curek elektronov z energijo 54 eV pada na nikljevo tarčo. Ko elektron vstopi v tarčo, se njegova potencialna energija spremeni za 26 eV. Primerjaj hitrosti in valovni dolžini elektronov pred in po vstopu v tarčo!
3. V kristalu so kristalne ravnine v razmiku 0,21 nm. Kolikšno najmanjšo energijo morajo imeti elektroni, da še dobimo Braggov odboj? Kolikšno najmanjšo energijo pa morajo imeti nevtroni?
4. Elektroni s kinetično energijo 250 keV gredo skozi grafitno ploščico. Kolikšen je polmer (prvega) kolobarja na zaslonu 30 cm za ploščico, če je razdalja med vrstami ogljikovih atomov 0,12 nm?
5. Curek elektronov vpada pravokotno na režo širine 1 μm . Kolikšna je hitrost elektronov, če je širina centralnega maksimuma, ki nastane na 50 cm oddaljenem zaslonu, 0,36 mm?
6. Ozek curek elektronov vpada na kristal aluminija pod kotom 30° glede na površino aluminija. Razdalja med sosednjima ravninama v aluminiju je 0,2 nm. Pri neki napetosti, s katero pospešujemo elektrone, se pojavi zrcalni odboj curka elektronov. Če povečamo pospeševalno napetost na 2,25-kratno začetno napetost, se v isti smeri ponovno pojavi zrcalni odboj. Kolikšna je začetna pospeševalna napetost?
7. V nekem kristalu so razdalje med atomi enake 0,15 nm. Razdaljo so izmerili s sipanjem elektronov na tem kristalu. Prvi odboj se je pojavil pod kotom 22° . S kolikšno napetostjo so bili pospešeni elektroni?
8. Curek elektronov, od katerih ima vsak kinetično energijo 180 eV, vpada pravokotno na površino kristala niklja. Odbojni maksimum četrtega reda opazimo pri kotu 55° glede na pravokotnico na površino kristala (vpadno smer). Kako ležijo mrežne ravnine glede na površino kristala in kolikšna je oddaljenost med njimi?

3.4 Načelo nedoločenosti

1. Primerjaj nedoločenosti v hitrostih za elektron in proton, ki sta omejena v škatli z dimenzijo 1 nm!
2. Primerjaj energiji elektrona in protona, ki sta ujeta v škatli z dimenzijo 10 fm!
3. Z upoštevanjem principa nedoločenosti ugotovi, kolikšna bi bila energija elektrona, ki bi se zadrževal v območju jedra ($r \approx 10^{-15}$ m)!
4. Kolikšna je najmanjša napaka, ki jo naredimo pri meritvi hitrosti elektrona, protona ali delca z maso 1 mg, če je položaj delca znan na 1 μm ?
5. Koliko časa potrebujemo, da izmerimo kinetično energijo elektrona, čigar hitrost je 10 m/s, z natančnostjo najmanj 1 %? Koliko časa pa potrebujemo, da izmerimo z enako natančnostjo kinetično energijo muhe, ki tehta 1 g in ima enako hitrost?

6. Pokaži, da je za delec, čigar nedoločenost v položaju je reda velikosti njegove valovne dolžine ($\Delta x \approx \lambda$), nedoločenost v hitrosti istega velikostnega reda kot sama hitrost delca!

4 Atomska struktura

4.1 Bohrov model atoma

1. S kolikšno hitrostjo bi krožil elektron okoli jedra v vodikovem atomu po klasični obravnavi, če bi bil od jedra oddaljen en Bohrov polmer a_0 ? Ali je potreben relativističen račun?
2. V Bohrovem modelu atoma je elektron neprestano v gibanju. Kako je lahko njegova energija negativna?
3. Elektron se iz mirovanja daleč od protona začne protonu približevati. Kako se spreminja elektronska valovna dolžina v odvisnosti od oddaljenosti od protona? Kolikšna je valovna dolžina elektrona, ko je le še za Bohrov radij oddaljen od protona? Kolikšno je razmerje med valovno dolžino elektrona v osnovnem stanju Bohrovega atoma in valovno dolžino elektrona, ki se je protonu približal iz mirovanja v neskončni oddaljenosti? Da bi se elektron in proton vezala v vodik, se mora elektron znebiti odvečne energije. Koliko?
4. Elektron se nahaja v drugem vzbujenem stanju ($n=3$) helijevega iona He^+ .
 - a) Kolikšen je po Bohrovem modelu radij kroženja elektrona v tem stanju?
 - b) Koliko različnih fotonov lahko izseva elektron pri prehodu v osnovno stanje? Kolikšne so njihove valovne dolžine?

Bohrov radij je 0,053 nm, energija osnovnega stanja vodikovega atoma pa $-13,6 \text{ eV}$.

5. Kolikšen je polmer kroženja elektrona v osnovnem stanju dvakrat ioniziranega atoma litija? Kolikšen je ta polmer glede na polmer kroženja elektrona v osnovnem stanju vodikovega atoma?
6. Izpelji enačbo za energijska stanja ioniziranega atoma helija He^+ in litija Li^{2+} . Skiciraj energijske nivoje za oba iona in jih primerjaj z energijskimi stanji atoma vodika. Ioniziran atom He^+ nastane, ko mirujoč delec α ujame elektron. Pri tem izseva foton. Kolikšna je njegova valovna dolžina?
7. Poišči kvantno število, ki določa Zemljino gibanje okoli Sonca! Masa Zemlje je $6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, njena oddaljenost od Sonca je $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ in krožilna hitrost $3,0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$.
8. Predpostavi, da proton in elektron veže skupaj le gravitacijska sila. Izračunaj energijske nivoje takega vodikovega atoma, polmer Bohrovega osnovnega stanja in njegovo ionizacijsko energijo!

9. Primerjaj nedoločeno gibalno količino elektrona, ki je ujet v področje velikosti Bohrovega radija, z gibalno količino elektrona v osnovnem stanju Bohrovega atoma!
10. Delec z maso m se giblje po krožnem ravninskem tiru v osnosimetričnem potencialu $V(r) = kr^2/2$. Uporabi Bohrov predpis za kvantizacijo orbital in poišči polmere orbit ter energijske nivoje delca v tem potencialu.

4.2 Spektri, prehodi

1. Razredčen plin sestavljajo atomi vodika v osnovnem stanju. Katere spektralne serije bodo prisotne v absorpcijskem spektru?
2. Kako vpliva gibanje atomov na njihov absorpcijski oziroma emisijski spekter?
3. Mirujoča proton in elektron se vežeta in tvorita vodikov atom v osnovnem stanju. Pri tem je emitiran en sam foton. Kolikšna je njegova valovna dolžina? Kolikšna je valovna dolžina fotona, če je nastali atom vodika v prvem vzbujenem stanju?
4. Koliko različnih valovnih dolžin je v emisijskem spektru vodikovih atomov, ki so v stanju z $n = 5$?
5. V plinski svetilki se nahaja ioniziran plin s po enim elektronom na vsak ion elementa. Ko plin vzbujamo, v izsevanem spektru opazimo tri črte, ki ustrezajo fotonom z valovno dolžino 25,6, 30,4 in 164 nm.
 - a) V katero stanje so vzbujeni ioni pred sevanjem?
 - b) Izračunaj vrstno število elementa, katerega ioni se nahajajo v svetilki!

Energija osnovnega stanja vodikovega atoma je $-13,6 \text{ eV}$.

6. Vodikov atom je v 5. vzbujenem stanju ($n = 6$). Koliko različnih fotonov lahko emitira pri prehajanju v osnovno stanje? Kolikšna je valovna dolžina fotona z največjo energijo in kolikšna je valovna dolžina fotona z najmanjšo energijo?
7. Kolikšne so štiri najdaljše valovne dolžine izsevanih fotonov, ki ustrezajo v spektru vodikovega atoma v Bohrovem modelu prehodom iz višjih vzbujenih stanj v prvo vzbujeno stanje (Balmerjeva serija)?
8. Kolikšna mora biti vsaj valovna dolžina svetlobe, s katero ioniziramo atome vodika, ki so v prvem vzbujenem stanju?
9. Vodikov atom je v stanju, ki ima vezavno energijo $0,85 \text{ eV}$. Z emisijo fotona preide v stanje, ki ima energijo za $10,2 \text{ eV}$ višjo od energije osnovnega stanja. Kolikšna je valovna dolžina izsevanega fotona? Prikaži ta prehod na diagramu energijskih stanj vodikovega atoma, energijske nivoje pa označi z ustreznimi kvantnimi števili!

10. Atomi vodika v vročem plinu se termično gibljejo. Povprečna velikost hitrosti atomov vodika pri neki temperaturi je 3000 m/s. Za koliko so lahko spremenjene valovne dolžine svetlobe, izsevane pri prehodih iz drugega vzbujenega stanja v osnovno?
11. Ko vzbujen atom emitira foton, nekoliko odrine jedro atoma, ki ima zato nekaj kinetične energije. Upoštevaj ta efekt v izračunu frekvence emitirane svetlobe! Kolikšna je ta sprememba pri prehodu iz drugega v prvo vzbujeno stanje atoma vodika?
12. Vodikov atom na začetku miruje in je v 3. vzbujenem stanju ($n = 4$). Ko izseva foton, preide naravnost v osnovno stanje. S kolikšno hitrostjo se po prehodu giblje vodikov atom? Kolikšna je valovna dolžina izsevanega fotona?
13. Kolikšna mora biti ločljivost spektrometra $\delta\lambda$, da lahko z njim razločimo prvih dvajset črt Balmerjeve serije (ki ustreza prehodom v prvo vzbujeno stanje vodikovega atoma z $n = 2$)?

5 Kvantna mehanika

5.1 Valovne funkcije in pričakovane vrednosti

1. Delec je omejen v smeri x , njegovo valovno funkcijo zapišemo kot $\psi = ax$ v področju med $x = 0$ in $x = 1$, $\psi = 0$ pa povsod drugod. Določi konstanto a ! Kolikšna je verjetnost, da je delec med $x = 0,45$ in $x = 0,55$? Kolikšna je pričakovana vrednost lege delca $\langle x \rangle$?
2. Normaliziraj valovno funkcijo $\psi = Axe^{-x^2/(2a)}$, kjer merimo x v nanometrih in je $a = 1 \text{ nm}^2$. Kolikšna je verjetnost, da najdemo delec med $-0,1 \text{ nm}$ in $0,1 \text{ nm}$? Kolikšna je kinetična energija delca, če je delec elektron?
3. Valovno funkcijo nekega delca lahko opišemo z izrazom $\psi = A \cos^2(x/a)$ v območju $-\pi/2 < (x/a) < \pi/2$, kjer je $a = 1 \text{ nm}$ in merimo x v nm. Kolikšna je verjetnost, da najdemo delec v območju $0 < x < (\pi/4) \text{ nm}$? Kolikšna je pričakovana vrednost kvadrata lege tega delca? Kolikšna je pričakovana vrednost kinetične energije tega delca, če je delec elektron?

5.2 Delec v enodimenzionalni jami

1. Elektron je v neskončni potencialni jami, ki je široka $0,1 \text{ nm}$. Zapiši valovne funkcije elektrona in energije lastnih stanj! Kako se valovne funkcije spremenijo, če enkrat obravnavаш, da se jama razteza od 0 do a , drugič pa od $-a/2$ do $a/2$ ($a = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$)?
2. Kolikšna bi bila energija delca z maso $1 \mu\text{g}$ v neskončno globoki potencialni jami s širino 1 cm v najnižjih stacionarnih stanjih? V katerem stanju je energija $1 \cdot 10^{-7} \text{ J}$?

Kolikšna je razlika med sosednjimi energijskimi nivoji pri tej energiji? Ali lahko pri merjenju ločimo sosednji energijski stanji?

- Korespondenčni princip trdi, da so rezultati za velika kvantna števila enaki klasičnim. Pokaži, da je za $n \rightarrow \infty$ verjetnost, da najdemo delec, ujet v neskončni potencialni jami, med x in $x + \Delta x$, neodvisna od x , torej enaka pričakovani vrednosti po klasični obravnavi!
- Značilna lastnost rešitev Schrödingerjeve enačbe je ortogonalnost funkcij, ki pripadajo različnim kvantnim številom. Ortogonalnost pomeni, da velja naslednja zveza:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_n^* \psi_m dV = \delta_{n,m} = \begin{cases} 1; & n = m \\ 0; & n \neq m \end{cases}$$

Preveri veljavnost gornje trditve za rešitve Schrödingerjeve enačbe v neskončni enodimenzionalni potencialni jami.

- Linearna kombinacija dveh valovnih funkcij, ki sta rešitvi valovne enačbe, je tudi rešitev iste valovne enačbe. Kolikšna je normalizacijska konstanta A za kombinacijo

$$\psi = A \left(\sin \frac{\pi x}{L} + \sin \frac{2\pi x}{L} \right)$$

valovnih funkcij delca v neskončni potencialni jami s širino 2 nm z $n = 1$ in $n = 2$. Izračunaj tudi povprečno vrednost energije, če je delec elektron!

- V neskončno globoki pravokotni potencialni jami s širino $2x_0 = 1$ nm (jama je med $-x_0$ in x_0) je elektron, katerega stanje opišemo z valovno funkcijo $\psi(x) = A(x_0^2 - x^2)$. Kolikšna je povprečna vrednost energije elektrona v tem stanju?
- Delec je v neskončni pravokotni potencialni jami, široki L ($V(x) = 0$ za $-L/2 < x < L/2$ in $V(x) = \infty$ drugje). Valovna funkcija, ki opiše stanje tega delca, je

$$\psi(x) = A_0 \psi_0(x) + A_1 \psi_1(x),$$

kjer je $A_1 = 1/2$ in kjer ustrezata ψ_0 in ψ_1 osnovnemu in prvemu vzbujenemu stanju v tej jami. Kolikšen je A_0 ? Kolikšna je verjetnost, da najdemo delec nekje med $x = L/4$ in $x = L/2$?

- Kolikšna je povprečna kinetična energija elektrona, ki ga opišemo z valovno funkcijo

$$\psi(x) = \begin{cases} A \sin^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right) & ; 0 < x < a \\ 0 & ; \text{drugje} \end{cases}$$

in je $a = 0,1$ nm? Najprej izračunaj normalizacijsko konstanto.

- Elektron je v prvem vzbujenem stanju v neskončni enodimenzionalni potencialni jami s širino 0,1 nm. Izračunaj pričakovane vrednosti $\langle x \rangle$, $\langle x^2 \rangle$ in energije! Kje v jami se elektron najverjetneje nahaja?

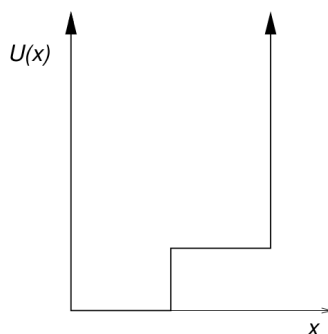
10. V neskončni potencialni jami je ujet elektron, ki pri prehodih med osnovnim in vzbujenimi stanji izseva oz. absorbira foton. Kolikšna naj bo širina potencialne jame, da bo energija fotona pri prehodu med osnovnim in 1. vzbujenim stanjem enaka kot pri prehodu med osnovnim in 1. vzbujenim stanjem vodikovega atoma? Za koliko se v tem primeru razlikujeta energiji fotonov iz potencialne jame in vodikovega atoma, ki jih dobimo pri prehodu iz 2. vzbujenega v osnovno stanje? Energija osnovnega stanja vodikovega atoma je $-13,6 \text{ eV}$, mirovna energija elektrona pa 511 keV .

11. V neskončni potencialni jami širine 4 nm med $x = 0$ in L se nahaja elektron z valovno funkcijo

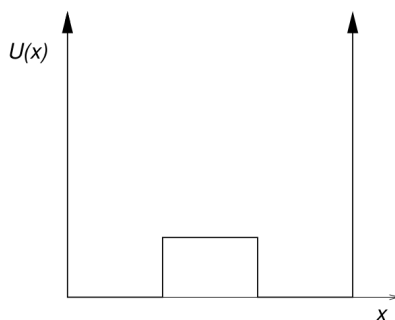
$$\psi(x) = A \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 - \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right].$$

- Določi normalizacijsko konstanto A !
 - Izračunaj pričakovano vrednost lege elektrona!
 - Kolikšna je verjetnost, da elektron najdemo v levi polovici jame?
12. Kolikšna je verjetnost, da je delec v srednji tretjini neskončne enodimenzionalne potencialne jame, če je v prvem vzbujenem stanju?
13. Elektron je v enorazsežni potencialni jami z globino 20 eV in širino $0,2 \text{ nm}$ v osnovnem stanju. Kolikšna je energija osnovnega stanja? Zapiši normalizirano valovno funkcijo osnovnega stanja. Kolikšna je verjetnost, da najdemo delec izven območja potencialne jame?
14. Izračunaj energijo elektrona, ki je v osnovnem stanju v potencialni jami s širino 1 nm . Ena od sten je neskončno visoka, druga pa je visoka 10 eV . Koliko vezanih stanj je v taki jami? Zapiši valovno funkcijo tega elektrona! Izračunaj verjetnost, da je delec na področju končne stene! Izračunaj tudi energije prvih dveh vzbujenih stanj!
15. Izračunaj energijo elektrona, ki je v prvem (drugem) vzbujenem stanju v potencialni jami s širino 1 nm ! Ena od sten je visoka 20 eV , druga pa 10 eV . Zapiši valovno funkcijo tega elektrona. Izračunaj verjetnost, da je delec na področju izven jame. Izračunaj tudi energije vzbujenih stanj.
16. Shematično, a v ključnih detajlih natančno in razvidno, nariši krajevna dela valovnih funkcij, ki opišeta osnovno (na prvi graf) in prvo vzbujeno stanje (na drugi graf) delca v enodimenzionalni potencialni jami, široki 1 nm in globoki 20 eV ! Na tretji graf pa nariši, kako bi se krajevni del valovne funkcije osnovnega stanja spremenil, če bi bila stena jame na eni strani visoka le 10 eV (in na drugi 20 eV)! Komentiraj spremembe.
17. *Elektron je v 2 nm široki neskončni enodimenzionalni jami, ki ima na sredini sto-

pnico visoko 5 eV. Izračunaj energijske nivoje!



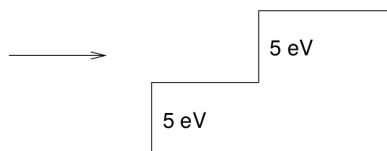
18. *Elektron je v 3 nm široki neskončni enodimenzionalni jami, ki ima na sredini prag visok 5 eV in širok 1 nm. Izračunaj energijske nivoje!



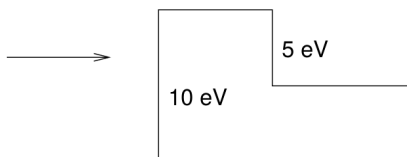
5.3 Prost delec

1. Zapiši valovno funkcijo elektrona, ki se giblje v določeni smeri in ima energijo 100 eV. V 1 m debeli plasti, ki je pravokotna na smer gibanja, je 1 elektron.
2. Zapiši valovno funkcijo, s katero lahko opišemo curek elektronov s kinetično energijo 10 eV! Gostota električnega toka v tem curku je 1 A/cm².
3. Curek elektronov z energijo 10 eV zadene na pravokotni potencialni prag, ki je visok 3 eV. Kolikšen del elektronskega toka se odbije?
4. Curek elektronov z energijo 10 eV zadene na pravokotni potencialni prag, ki je globok 3 eV. Kolikšen del elektronskega toka se odbije?
5. Curek elektronov s kinetično energijo 5 eV z leve strani vpada na potencialni skok višine 4 eV.
 - a) Kolikšna je gibalna količina prepuščenih elektronov? Kaj pa njihova valovna dolžina?

- b) Kolikšna je transmisivnost potencialnega skoka za obravnavane elektrone?
- c) Zapiši nastavek za valovno funkcijo elektronov desno od potencialnega skoka, če le-tega zvečamo na 7 eV! Kolikšna je v tem primeru karakteristična vdorna globina elektronov?
6. Na pravokotni potencialni prag višine 12 eV pošljamo curek elektronov.
- a) Kolikšna naj bo njihova kinetična energija, da bo prepustnost ovire točno $1/2$?
- b) Kolikšna je v tem primeru valovna dolžina prepuščenih elektronov?
7. Curek elektronov z energijo 10 eV zadene na pravokotno potencialno oviro, visoko 8 eV in široko 0,5 nm. Kolikšen del elektronskega toka je prepuščen?
8. Curek elektronov z energijo 10 eV zadene na pravokotno potencialno oviro, visoko 12 eV in široko 0,1 nm. Kolikšen del elektronskega toka je prepuščen?
9. Curek elektronov z energijo 7 eV zadene na 10 eV visok pravokotni potencialni prag. Zapiši krajevni del valovne funkcije tega curka, če je gostota toka v vpadnem curku 1 A/cm^2 .
10. Curek elektronov z energijo 3 eV zadene 10 eV globoko in 0,1 nm široko pravokotno potencialno jamo. Kolikšen del elektronskega toka se odbije?
11. Elektronski curek pada na potencialni skok take oblike, kot kaže slika. Zapiši nastavek za valovno funkcijo tega curka elektronov za naslednje primere, če je gostota električnega toka v njem 1 mA/mm^2 :



- (a) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 3 eV.
- (b) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 7 eV.
- (c) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 12 eV.
- (d) curek pada z desne, kinetična energija elektronov je 3 eV.
12. Elektronski curek pada na potencialno oviro take oblike, kot kaže slika. Zapiši nastavek za valovno funkcijo tega curka elektronov za naslednje primere, če je gostota električnega toka v njem 1 mA/mm^2 :



- (a) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 3 eV.
- (b) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 7 eV.
- (c) curek pada z leve, kinetična energija elektronov je 12 eV.
- (d) curek pada z desne, kinetična energija elektronov je 3 eV.
- (e) curek pada z desne, kinetična energija elektronov je 7 eV.
- (f) curek pada z desne, kinetična energija elektronov je 12 eV.

5.4 Harmonski oscilator

1. Na 25 cm dolgo nitko je obešena utež z maso 1 g. Kolikšna je energija osnovnega stanja? Ali ga lahko opazimo? Nihalo niha z amplitudo 1 mm. Kateremu kvantnemu številu ustreza to nihanje?
2. Kolikšna je energija elektrona, ki je v osnovnem (prvem vzbujenem, drugem vzbujenem) stanju harmonskega oscilatorja z osnovno frekvenco $2 \cdot 10^{15}$ Hz? Kolikšen je k ? Kolikšna je v teh primerih verjetnostna gostota v središču harmonskega oscilatorja in na klasičnih mejah?
3. Poišči pričakovani vrednosti $\langle x \rangle$ in $\langle x^2 \rangle$ v osnovnem in prvem vzbujenem stanju harmonskega oscilatorja!
4. Harmonski oscilator ($\nu = 10^{10}$ Hz, $m = 10^{-30}$ kg) niha z energijo $3\hbar\omega/2$. Določi meje klasičnega nihanja in klasično verjetnostno gostoto za delec! Zapiši valovno funkcijo tega delca! Kolikšna je verjetnost, da je delec zunaj meja klasičnega nihanja?
5. Eno od stanj delca z maso m v enodimenzionalni potencialni jami $V(x) = \frac{1}{2}kx^2$ opišemo z valovno funkcijo $\psi(x) = Ae^{-\alpha x^2}$, kjer je A normalizacijska konstanta in je α pozitivna konstanta. Pokaži, da je zapisana valovna funkcija zares lastno stanje v taki potencialni jami in ugotovi, čemu je enaka α ter kolikšna je energija zapisanega stanja!
6. Eno od lastnih stanj delca v enorazsežnem harmonskem potencialu opišemo z valovno funkcijo

$$\psi(x) = \left(\frac{2m\omega^3}{\pi\hbar^3} \right)^{1/4} x e^{-(m\omega/2\hbar)x^2}.$$

Poišči zvezo med ω in k (vstavi $\psi(x)$ v valovno enačbo). Kolikšna je energija tega stanja? Katero stanje je to?

7. Valovno funkcijo elektrona (mirovna masa 511 keV) zapišemo kot linearno kombinacijo

$$\psi = a_2\psi_2 + a_3\psi_3$$

lastnih stanj harmonskega oscilatorja z lastno frekvenco $\omega = 3 \times 10^{15}$ /s, kjer je $a_3 = 1/\sqrt{3}$.

- Določi vrednost koeficienta a_2 !
- Kolikšna je pričakovana vrednost energije elektrona?
- Izračunaj pričakovano vrednost lege elektrona, če za lastna stanja harmonskega oscilatorja velja

$$x\psi_n = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}} \left(\sqrt{n+1}\psi_{n+1} + \sqrt{n}\psi_{n-1} \right).$$

Namig: Z operatorjem x deluj na dano valovno funkcijo, nato pa jo pomnoži z ψ^* . Kateri členi „preživijo“ integracijo?

- Na 1 m dolgi vrvi visi utež z maso 200 g. Kolikšen je koeficient k v potencialni energiji tega nihala, če jo zapišemo $V = \frac{1}{2}k\varphi^2$? Kot φ je kot odmika nihala od ravnovesja, merjeno v radianih. Nihalo izmaknemo za 5° iz ravnovesne lege in spustimo. V katerem kvantnem stanju je? Pokaži, da je pri tem n razlika v amplitudi nihanja med sosednjima kvantnima stanjema enaka

$$\Delta\varphi = \frac{\hbar}{m\sqrt{gl^3}} \varphi.$$

5.5 Schroedingerjeva enačba v treh dimenzijah

- Elektron je v neskončno globoki 2D potencialni jami s širino 0,1 nm v smereh x in y . Koliko kvantnih števil opisuje eno stanje elektrona v taki jami? Izračunaj energije osnovnega in prvih petih vzbujenih stanj, zapiši njihova kvantna števila ter ustrezne valovne funkcije!
- V neskončno globoki 3D potencialni jami s širinami 0,05 nm, 0,1 nm in 0,2 nm v smereh x , y in z je elektron. Koliko kvantnih števil opisuje eno stanje? Izračunaj energije osnovnega in prvih petih vzbujenih stanj, zapiši njihova kvantna števila ter ustrezne valovne funkcije!
- V tridimenzionalni neskončni potencialni jami so trije elektroni. Stranice jame so dolge 1 nm, 2 nm in 4 nm. Zapiši (normalizirane) valovne funkcije vseh treh elektronov, če je njihova skupna energija minimalna. Kolikšna je? Kolikšna je verjetnost, da najdemo elektron v delu jame, ki je po obliki kvader in ga omejujejo na treh ploskvah stene jame, stranice pa ima pol krajše kot so stranice jame? (Nariši si!)

6 Statistična mehanika

6.1 Maxwell–Boltzmannova statistika

- Pri kateri temperaturi je tisočina atomov v plinu enoatomnega vodika v prvem vzbujenem stanju?

2. Temperatura na površju Sonca je približno 5000 K. Koliko odstotkov vodikovih atomov je v osnovnem, prvem, drugem, tretjem, ... vzbujenem stanju? Upoštevaj degeneracijo različnih nivojev.
3. Množica elektronov, od katerih je vsak v svoji neskončno visoki 1D potencialni jami s širino 0,9 nm, je v temperaturnem ravnovesju pri temperaturi 1500 K. Kolikšno je razmerje med številom elektronov v drugem vzbujenem stanju in številom elektronov v prvem vzbujenem stanju?

6.2 Energije molekul v idealnem plinu

1. Poišči povprečno hitrost ($\langle v \rangle$) in koren iz povprečnega kvadrata hitrosti ($v_{\text{rms}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$). Tri molekule se gibljejo v isti smeri, dve imata hitrost 1,00 m/s, tretja pa 3,00 m/s. Kolikšni sta $\langle v \rangle$ in v_{rms} , če se tretja molekula giblje v nasprotni smeri kot prvi dve?
2. Kolikšna je povprečna kinetična energija molekul kisika pri sobni temperaturi? Primerjaj jo z energijo, ki je potrebna za razbitje kisikove molekule in je reda velikosti 1 eV. Kolikšna je termična kinetična energija 1 kg plina O_2 pri temperaturi 20 °C?
3. Pri kateri temperaturi je povprečna kinetična energija vodikovih molekul enaka vezavni energiji vodikove molekule 4,5 eV?
4. Kolikšno je razmerje med de Brogliejevo valovno dolžino kisikovega atoma pri temperaturi 20 °C in njegovim premerom $4 \cdot 10^{-10}$ m?
5. Kolikšna je razširitev spektralne črte z valovno dolžino 656,3 nm v emisijskem spektru vodika, ki ima temperaturo 500 K?
6. Izračunaj najverjetnejšo velikost hitrosti molekul v plinu. Kolikšna je ta hitrost za kisikove molekule pri sobni temperaturi (20 °C)?
7. Kolikšna je povprečna vrednost obratne vrednosti hitrosti za kisikove molekule pri sobni temperaturi?
8. Gostota toka nevtronov v curku, ki izhaja iz posode, v kateri so nevtroni v termičnem ravnovesju pri 300 K, je 10^{12} nevtronov/(m²s). Kolikšna je gostota nevtronov v tem curku, če je po razdelitev hitrosti Maxwellska?

6.3 Planckov zakon

1. Koliko je fotonov v 1 cm³ prostora, v katerem je sevanje v termičnem ravnovesju pri temperaturi 1000 K? Kolikšna je njihova povprečna energija?
2. Termograf meri energijski tok, ki ga izsevajo posamezni deli kože na človeškem telesu. Za koliko odstotkov se razlikujeta energijska toka, ki ju sevata dela kože s temperaturama 34 °C in 35 °C?

3. Sončne pege so videti temne, ker je na teh mestih temperatura le 5000 K. Izven območja peg je na površju Sonca temperatura okoli 5800 K. Kolikšno je razmerje svetlobnih tokov?
4. Za koliko odstotkov bi se zmanjšala gostota svetlobnega toka, ki prihaja s Sonca na Zemljo, če bi bila temperatura površine Sonca 10 % nižja kot je sedaj?
5. Koliko let traja, da Sonce izseva 1 % svoje mase? Masa Sonca je $2,0 \cdot 10^{30}$ kg, radij Sonca $7,0 \cdot 10^8$ m, temperatura njegovega površja pa $5,8 \cdot 10^3$ K.
6. Pri temperaturi 500 °C ravno zaznamo žarenje črnega telesa. Pri temperaturi 750 °C je telo že živo rdeče barve. Če isto telo pri temperaturi 500 °C seva 1,00 kW, kolikšna je sevalna moč pri temperaturi 750 °C?
7. Oцени, kolikšen delež svetlobnega toka izseva Sonce pri valovnih dolžinah rumene svetlobe med 570 nm in 590 nm, za katero je človeško oko najbolj občutljivo. Predpostavi, da je temperatura na Sončevem površju 6000 K.
8. Primerjamo sevanje črnega telesa s sevanjem plina dvakrat ioniziranih atomov litija. Na kolikšno temperaturo moramo segreti črno telo, da bo vrh njegovega spektra sovpadal s spektralno črto plina pri prehodu iz drugega vzbujenega v osnovno stanje?
9. Zvezda Sirij je najsvetlejša zvezda na nočnem nebu. Njen radij je $1,18 \times 10^6$ km, temperatura površja pa 9940 K. S kolikšno svetlobno moč seva Sirij? Kolikšen delež te moči izseva v modrem delu spektra pri valovnih dolžinah med 460 in 480 nm?
10. Kovinska krogla z radijem 10 cm seva kot črno telo z močjo 100 W. Kolikšna je njena temperatura? Kolikšen delež celotne moči izseva v 1 nm širokem oknu valovnih dolžin okrog valovne dolžine, kjer je intenziteta sevanja največja?
11. Kolikšna je gostota energije v vesolju zaradi prasevanja, katerega spekter ustreza temperaturi 2,7 K? Oцени število fotonov v kubičnem metru hladnega vesolja ob predpostavki, da imajo vsi fotoni enako valovno dolžino, ki ustreza maksimumu Planckove porazdelitve!
12. Kolikšen del celotnega izsevanega toka se izseva kot vidna svetloba pri žarnici s temperaturo nitke 1200 °C, če seva kot črno telo?
13. Kolikšen delež energijskega toka v sončni svetlobi se izseva pri valovnih dolžinah, ki so manjše od 100 nm? Sonce seva kot črno telo s temperaturo 5500 K.
14. Temperatura Sončevega površja je 6000 K. Kolikokrat več energije odda s sevanjem v območju rumene in zelene svetlobe z valovno dolžino med 530 nm in 550 nm, v primerjavi z energijo, ki jo odda s sevanjem vijolične na enem (med 350 nm in 370 nm) in rdeče na drugem robu (med 680 nm in 700 nm) vidnega dela spektra?
15. Svetlobni tok, ki ga izseva Sirius, najsvetlejša zvezda na našem nebu, je $1,2 \cdot 10^{28}$ W (26-krat več kot Sonce). Vrh porazdelitvene funkcije $dJ^*/d\lambda$ je pri $\lambda_0 = 290$ nm. Kolikšen je polmer Siriusa?

6.4 Fermi–Diracova statistika

1. Kolikšna je Fermijeva energija v bakru, ob predpostavki, da vsak atom prispeva en elektron v elektronski plin? Gostota bakra je $8,94 \text{ kg/dm}^3$, relativna atomska masa atoma bakra pa $63,5 \text{ u}$ ($u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).
2. S Fermijevo energijo izrazi povprečno energijo elektronov v kovini pri absolutni ničli.
3. Fermijeva energija v bakru je $7,04 \text{ eV}$. Izračunaj razmerje med približno povprečno energijo elektronov v bakru pri sobni temperaturi in njihovo povprečno energijo, ki bi jo imeli, če bi zanje veljala Maxwellska porazdelitev.
4. Fermijeva energija v srebru je $5,51 \text{ eV}$. Kolikšna je povprečna energija prostih elektronov v srebru pri 0 K ? Pri kolikšni temperaturi imajo atomi klasičnega plina tako povprečno kinetično energijo? Kolikšno hitrost bi v klasični obravnavi pripisali takim elektronom?
5. Elektronski plin ima temperaturo T in Fermijevo energijo ε_F . Pri kateri energiji E_1 je verjetnost, da so stanja zasedena, enaka 5% ? Pri kateri energiji E_2 je verjetnost, da so stanja zasedena, enaka 95% ? Energiji E_1 in E_2 izrazi v kT in ε_F ! Kolikšna je verjetnost, da je zasedeno stanje s Fermijevo energijo?
6. Gostota aluminija je $2,70 \text{ g/cm}^3$ in njegova atomska masa $26,97 \text{ u}$. Vsak atom aluminija odda v elektronski oblak v kristalu 3 elektrone. Efektivna masa elektronov v aluminiju je $0,97 m_e$. Kolikšna je Fermijeva energija v aluminiju?
7. Koliko elektronov prispeva v elektronski oblak vsak svinčev atom? Gostota svineca je $1,1 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$, Fermijeva energija je $9,4 \text{ eV}$ in atomska masa $207,2 \text{ u}$.
8. Kolikšen del prostih elektronov je v vzbujenih stanjih pri temperaturi 20°C in kolikšen pri temperaturi tališča bakra 1083°C ?
9. Kolikšen del prostih elektronov v kovini ima kinetično energijo, ki je večja od polovice največje kinetične energije elektronov v tej kovini pri temperaturi 0 K ?

Rešitve

1 Osnove posebne teorije relativnosti

1.1 Galilejeve transformacije

1.

1.2 Postulati moderne fizike

1.

2.

1.3 Podaljšanje časa

1. Ne, opazovalec na ladji bi izmeril daljši čas.

2. 29 minut

3. (3,93 s; Zemljanu se zdi, da teče vesoljčeva ura počasneje, vesoljcu pa se zdi, da teče Zemljanova ura počasneje.

4. $2,6 \cdot 10^8$ m/s

5. $v/c = \sqrt{15}/4$

6. $63,5 \cdot 10^3$ let; 0,9 s

7. $5,6 \cdot 10^{-5}$ s

8. 0,50 s; 0,40 s; 0,32 s

9. 400; 24

10. 210 m

11. $v/c = 0,40$; 11 let

12. A pošlje 32, B pošlje 40 signalov, A prejme 8 (Zemlja $\rightarrow$ zvezda) + 32 (zvezda $\rightarrow$ Zemlja) signalov.

1.4 Dopplerjev pojav

1. 1234 Hz
2. 578 nm
3. $v/c = 5/13$
4. $\Delta\nu = 4170$ Hz
5. $v = 0,14 c = 1,5 \cdot 10^8$ km/h
6. 13,4 km/s
7. $v = 0,2 c$
8. $1,665 \cdot 10^9$ Hz

1.5 Skrčitev dolžin

1. 1,8 m; 0,785 m
2. 1,625 m
3. $v/c = \sqrt{3}/2$; $1,9 \cdot 10^{-9}$ s
4. 33,1 ns
5. 5,2 m
6. 36 let in 9 mesecev; 7 let in 4 mesece; 7,16 svetlobnih let
7. 0,63 m; 53°
8. $13,9^\circ$
9. 0,49 m; $14,1^\circ$

1.6 Lorentzove transformacije

1. 1,97 ms
2. 0,416 ms
3. V Bostonu ugasnejo prej; $\Delta t = -2$ ms
4. $0,052 c$; smer NY $\rightarrow$ B
5. $2,05 \cdot 10^8$ m/s; smer Koper $\rightarrow$ Murska Sobota; 161 km
6. 11100 s; 3700 s

7. $6,0 \text{ m}$; $2,2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
8. $1,1 \text{ leto} + 3 \text{ mesece}$; $1,089 \text{ sv. leto}$; $9,8 \text{ mesecev}$
9. prvega; $2,8 \cdot 10^{-14} \text{ s}$; $10,3 \text{ pm}$
10. $9,3 \text{ svetl. let}$; 21 let
11. $6,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}$; $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
12. Prvi delec razpade $20 \mu\text{s}$ kasneje.
13. $u/c = 1 - 4,13 \cdot 10^{-11}$; $4,4 \text{ milijone let}$; $20 \text{ svetlobnih let}$

1.7 Transformacije hitrosti

1. $-0,143 c$; $0,8 c$
2. v_B v sistemu A je $-0,9884 c$; v_A v sistemu B je $0,9884 c$
3. $-0,36 c$; $0,36 c$
4. $0,99995 c$
5. $0,862 c$
6. $52,7 \text{ m}$; $0,987 c$; $16,1 \text{ m}$
7. $0,46 \mu\text{s}$
8. Transformirata se obe komponenti hitrosti, $v'_x = (v_x - V)/(1 - v_x V/c^2)$, $v'_y = (v_y/\gamma)/(1 - v_x V/c^2)$.
9. $v'_x = -0,71 c$; $v'_y = 0,38 c$; $\varphi' = 152^\circ$

1.8 Energija in gibalna količina

1. $4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$
2. 295 MeV ; $0,65 c$
3. $7,09 \text{ krat}$
4. $v = 0,447 c$
5. $c - v = 2750 \text{ km/s}$
6. $\gamma = 5/4$, $v/c = 3/5$
7. $0,44 \%$

8. $v/c = \sqrt{3}/2$
9. $v/c = \sqrt{3}/2$
10. 1,09 GeV/c; 125 MeV
11. $M_0c^2 = \sqrt{2m_0c^2(W_k + 2m_0c^2)}$; $v/c = \sqrt{W_k/(W_k + 2m_0c^2)}$
12. Gibljeta se v nasprotnih smereh z enakima hitrostima $v = 0,83 c$.
13. Gibljeta se v nasprotnih smereh, gibalni količini sta po velikosti enaki 100 MeV/c;
 $m_\Lambda c^2 = 1115 \text{ MeV}$.

1.9 Relativistični delci v polju

1. 0,72 c; 126 m; 0,22 MeV
2. 3 ns
3. $2,2 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$
- 4.
5. (dm

2 Delčne lastnosti valovanja

2.1 Fotoni

1. $2,4 \cdot 10^{22} \text{ Hz}$; 0,0124 pm
2. 55
3. $5,9 \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$
4. 49 bar; 490 Pa
5. $0,46^\circ$
6. $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$; $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$

2.2 Fotoefekt

1. 0,76 eV; 0,76 V
2. 0,77 V
3. 1,87 eV

4. 1,80 eV; 381 nm
5. $1,6 \cdot 10^{-12}$ As
- 6.
7. 0,02; vsak 51. foton izbije en e^-
8. 1,04 eV; 89 μ A

2.3 Rentgenska svetloba

1. 0,123 nm; rtg
2. 29,5 kV
3. 0,315 nm; $9,13^\circ$; $18,5^\circ$
4. 30,7 kV
5. 2,7 pm; 490 kV

2.4 Comptonski efekt

1. $5 \cdot 10^{18}$ Hz; 60 pm
2. 1,5 pm
3. 1,2 pm
4. 120°
5. 0,077 MeV/c; $\vartheta = 67,2^\circ$
6. 0,2 MeV
7. $\nu = 3,56 \cdot 10^{19}$ Hz; 59 keV
8. 0,675 MeV
9. 140 keV
10. 335 keV
- 11.
12. $\Delta\lambda = (4\hbar/mc) \sin^2(\vartheta/2)$, $\Delta\lambda = 1,2$ pm
13. 3,7 pm
- 14.

2.5 Tvorba parov

1. 0,81 pm
2. 20,76 MeV; 0,26 MeV; 12,7°; 10,5 MeV
3. 1,183 MeV; 0,317 MeV
4. 33 %
5. 2,04 MeV; 1,02 MeV
6. 3,06 MeV
- 7.

2.6 Fotoni v gravitacijskem polju

1. 1,05 pm
2. $1,35 \cdot 10^{-7}$; $1,15 \cdot 10^{-8}$ nm; $1,28 \cdot 10^{-29}$; 0,085 nm; $1,6 \cdot 10^{-16}$ nm; da
3. 1,5 km
4. $R \leq 7,3 \cdot 10^3$ km

3 Valovne lastnosti delcev

3.1 De Brogliejevi valovi

1. $3,3 \cdot 10^{-29}$ m; $10^{-26} - 10^{-25}$
2. $p_\gamma/p_d = 1$ vedno; $E_\gamma/E_d = v/c$; $pc/\sqrt{W_0^2 + (pc)^2}$; 1;
 $E_\gamma/W_{k,d} = 2c/v$; $pc/(-W_0 + \sqrt{W_0^2 + (pc)^2})$; 1
3. $4,9 \cdot 10^{-6}$ V
4. 6,86 pm; 2,71 pm
5. 123 pm; 2,86 pm; 0,186 pm
6. 6 pm
7. $0,423 \cdot 10^8$ m/s
8. 0,21 MeV; ...
9. $hc/\sqrt{2W_0eU + (eU)^2}$; $hc/(eU)$; $h/\sqrt{2meU}$
10. 7,70 pm; 7,61 pm

3.2 Fazna in grupna hitrost

1. $v_f = (\omega_1 + \omega_2)/(k_1 + k_2)$; $v_g = (\omega_2 - \omega_1)/(k_2 - k_1)$
2. $v_f/2$
3. $v_g = 0,001\ c$; $0,5\ c$; $0,999\ c$; $v_f = 1000\ c$; $2\ c$; $1,001\ c$
4. 1840; 1; 1
5. $\lambda_p/\lambda_e = 0,023$; $0,028$; $0,59$; $0,99$; ...

3.3 Uklon delcev

1. 0,010 eV
2. v pred $0,0146\ c$; v po $0,0177\ c$; λ pred $166\ \text{pm}$; λ po $136\ \text{pm}$
3. $8,4\ \text{eV}$; $0,0046\ \text{eV}$
4. $5,46\ \text{mm}$
5. $2,0 \cdot 10^6\ \text{m/s}$
6. $150\ \text{V}$
7. $118\ \text{V}$
8. $0,21\ \text{nm}$

3.4 Načelo nedoločnosti

1. $5,8 \cdot 10^4\ \text{m/s}$; $31,7\ \text{m/s}$
2. $9,5\ \text{MeV}$; $53\ \text{keV}$
3. reda $100\ \text{MeV}$
4. $57,6\ \text{m/s}$; $0,031\ \text{m/s}$; $5,2 \cdot 10^{-23}\ \text{m/s}$
5. $0,12\ \text{ms}$; $10^{-31}\ \text{s}$
6. $\Delta v = v/(4\pi)$

4 Atomska struktura

4.1 Bohrov model atoma

1. $2,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$
2. $W = W_k + W_p$; $W_p < 0$; $W_k > 0$; Ker je elektron vezan, velja $W_k < |W_p|$,
3. $\lambda = h / (e_0 \sqrt{m / (2\pi\epsilon_0 r)})$; $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; $\sqrt{2}$; $13,6 \text{ eV}$
- 4.
5. $1,75 \cdot 10^{-11} \text{ m}$; $r_1 / a_0 = 1/3$
6. $E_0 = 13,6 \text{ eV}$; $\text{He}^+ : -4E_0/n^2$; $\text{Li}^{2+} : -9E_0/n^2$; $22,8 \text{ nm}$
7. $2,57 \cdot 10^{74}$
8. $r_B = 1,2 \cdot 10^{29} \text{ m}$; $E_n = -E_0/n^2$; $E_0 = 2\pi^2 G^2 m_p^2 m_e^3 / h^2 = 4,23 \cdot 10^{-97} \text{ J}$
9. $\Delta x = 2r_B \rightarrow \Delta p / p_0 = 1/4$
10. $r_n = \sqrt{n\hbar / (m\omega)}$; $E_n = n\hbar\omega$, $\omega = \sqrt{k/m}$, $n = 1, 2, 3, \dots$

4.2 Spektri, prehodi

1. Lymanova serija
2. Črte niso ostre, ampak zaradi Dopplerjevega pojava razširjene.
3. 90 nm ; 361 nm
4. 10
- 5.
6. 15 ; 94 nm , $7,5 \mu\text{m}$
7. 659 nm ; 488 nm ; 436 nm ; 412 nm
8. 361 nm
9. Prehod $n = 4 \rightarrow n = 2$; 487 nm .
10. $1,02 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$
11. $\lambda_0 = 651 \text{ nm}$; $\Delta\lambda = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$
12. 7500 m/s ; 97 nm
13. $0,3 \text{ nm}$

5 Kvantna mehanika

5.1 Valovne funkcije in pričakovane vrednosti

1. $\sqrt{3}; 0,075; 0,75$
2. $A = \sqrt{2/\sqrt{\pi}} \text{ nm}^{-3/2}; 0,00075; 0,058 \text{ eV}$
3. $A = \sqrt{8/3\pi} \text{ nm}^{-1/2}; P[0, \pi/4 \text{ nm}] = 0,462; \langle x \rangle = 0; \langle x^2 \rangle = 0,197 \text{ nm}^2; \langle W_k \rangle = 1,98 \text{ eV}$

5.2 Delec v enodimenzionalni jami

1. $[0, a] : \psi_n = A_n \sin k_n x; A_n = \sqrt{2} \cdot 10^5 \text{ m}^{-1/2}; k_n = n\pi \cdot 10^{10} \text{ m}; E_n = n^2 E_1; E_1 = 37,1 \text{ eV}; n = 1, 2, 3, \dots$
2. $5,5 \cdot 10^{-54} \text{ J}; 4,2 \cdot 10^{23}; 4,7 \cdot 10^{-31} \text{ J}$
3. $n \rightarrow \infty : (2/a) \int_x^{x+\Delta x} \sin^2(n\pi x/a) dx = \dots = \frac{2a}{an\pi} \frac{1}{2} \Delta y = \dots; y = n\pi x/a$
- 4.
5. $A = 1/\sqrt{2} \text{ nm}; 0,23 \text{ eV}$
6. $A = \sqrt{15/(16x_0^5)}; 0,38 \text{ eV}$
7. $A_0 = \sqrt{3}/2; 0,26$
8. $A = \sqrt{8}/(3a); 50,6 \text{ eV}$
9. simetrična jama $[-L/2, L/2]: \langle x \rangle = 0; \langle x^2 \rangle = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ nm}^2; 152 \text{ eV}; \dots$
- 10.
- 11.
12. 0,20
13. $E_0 = 4,4 \text{ eV}; P[\text{izven}] = 0,0725$
14. $E_0 = 0,329 \text{ eV}; 5; \dots$
- 15.
- 16.
17. $E_0 = 0,313 \text{ eV}; E_1 = 1,246 \text{ eV}; E_2 = 2,769 \text{ eV}; E_3 = 4,737 \text{ eV}$
- 18.

5.3 Prost delec

1. $\psi = Ae^{i(kx-\omega t)}$; $A = 1 \text{ m}^{-1/2}$; $k = 51,6 \text{ nm}^{-1}$; $\omega = 1,53 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$
2. $\psi = Ae^{i(kx-\omega t)}$; $A = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3/2}$; $k = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}$; $\omega = 1,53 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$
3. 0,79 %
4. 0,43 %
- 5.
- 6.
7. 86 %
8. 46,7 %
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.

5.4 Harmonski oscilator

1. $3,3 \cdot 10^{-34} \text{ J}$; $3 \cdot 10^{25}$
2. 4,1 eV; 12,3 eV; 20,5 eV; 143 N/m; klasična meja: $x_{\max} = \sqrt{\hbar\omega_0/k}$
3. $\langle x \rangle_{0,1} = 0$; $\langle x^2 \rangle_0 = \hbar/(2m\omega_0)$; $\langle x^2 \rangle_1 = 12\hbar/(\pi m\omega_0)$.
4. $x_0 = 71 \text{ nm}$; $P_{\text{klas}} = 1/(\pi\sqrt{x_0^2 - x^2})$; ...
5. $\alpha = \sqrt{km}/(2\hbar)$; $E = \frac{1}{2}\hbar\sqrt{k/m}$.
6. $\omega = \sqrt{k/m}$; $E = \frac{3}{2}\hbar\omega = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega$, $n = 1$.
- 7.
8. $k = mgl$; $n = 9,1 \cdot 10^{30}$.

5.5 Schroedingerjeva enačba v treh dimenzijah

1. $2; E_{\text{osn}}(n_x = n_y = 1) = 2 E_0, E_0 = (\pi^2 \hbar^2) / (2ma^2); E_1(n_x = 1, n_y = 2) = E_2(n_x = 2, n_y = 1) = 5 E_0; E_3(n_x = n_y = 2) = 8E_0; E_4(n_x = 1, n_y = 3) = E_5(n_x = 3, n_y = 1) = 10 E_0; \psi_{n_x, n_y}(x, y) = \frac{2}{a} \sin(n_x \pi x / a) \sin(n_y \pi y / a)$
2. $3; E_{\text{osn}}(n_x = n_y = 1 = n_z) = 21 E_0 / 16, E_0 = (\pi^2 \hbar^2) / (2ma^2); b = 2a, c = 4a; E_1(n_x = n_y = 1, n_z = 2) = 24 E_0 / 16, E_2(n_x = n_y = 1, n_z = 3) = 29 E_0 / 16, E_3(n_x = n_z = 1, n_y = 2) = 33 E_0 / 16, E_4(n_x = n_y = 1, n_z = 4) = E_5(n_x = 1, n_y = n_z = 2) = 36 E_0 / 16, \psi_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = \sqrt{8/abc} \sin(n_x \pi x / a) \sin(n_y \pi y / b) \sin(n_z \pi z / c)$
3. $\dots; 3/8.$

6 Statistična mehanika

6.1 Maxwell–Boltzmannova statistika

1. 14260 K
2. Deleži atomov stanjih: osnovno $1 - 2,11 \cdot 10^{-10}$, 1. vzbujeno $2,11 \cdot 10^{-10}$, 2. vzbujeno $5,8 \cdot 10^{-12}, \dots$
3. $n(2)/n(1) = 0,4$

6.2 Energije molekul v idealnem plinu

1. $\langle v \rangle = 5/3 \text{ m/s}, \sqrt{\langle v^2 \rangle} = 1,9 \text{ m/s}; \langle v \rangle = -1/3 \text{ m/s}, \sqrt{\langle v^2 \rangle} = 1,9 \text{ m/s}$
2. $\langle Wk \rangle = 0,063 \text{ eV pri } 20^\circ \text{C}; 1,9 \cdot 10^5 \text{ J}$
3. $4,2 \cdot 10^4 \text{ K}$
4. 0,0715
5. 15,5 pm
6. najverjetnejša hitrost $= \sqrt{2kT/m}; 390 \text{ m/s}$
7. $\langle 1/v \rangle = \sqrt{2m/(\pi kT)}$
8. $N/V = 4 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$

6.3 Planckov zakon

1. $2,03 \cdot 10^{10}$; 0,233 eV
2. 1,3 %
3. 1,81
4. 34,4 %
5. $1,45 \cdot 10^{11}$ let
6. 3,07 kW
7. 2,5 %
- 8.
- 9.
- 10.
11. $4,01 \cdot 10^{-14}$ J/m³; $2,16 \cdot 10^8$
- 12.
- 13.
14. $E_{\text{ru-ze}} = 1,23 E_{\text{vijol}} = 1,26 E_{\text{rd}}$
15. $1,30 \cdot 10^6$ km

6.4 Fermi–Diracova statistika

1. 7,04 eV
2. $3 \varepsilon_F / 5$
3. Maxwell: $\langle E \rangle = 0,038$ eV; FD: $\langle E \rangle = 4,225$ eV
4. 3,31 eV; $2,56 \cdot 10^4$ K; $1,08 \cdot 10^6$ m/s
5. $E_{1,2} = \varepsilon_F \pm kT \ln 19$; 0,5
6. 12 eV
7. 4
8. 0,36 %; 1,66 %
9. 64,6%