

Gammakvant i tyngdefelt

– breddeopgave 90 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt to nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 90 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 90. Gammakvant i tyngdefelt

Ved forsøg med emission af γ -kvanter fra kerner og påfølgende absorption i kerner af samme slags er der konstateret forskellige resultater, når henholdsvis kilde og absorber befinder sig lodret over hinanden, og når de befinder sig i samme vandrette plan. Forklar dette forhold. Begrund svaret.

Løsning

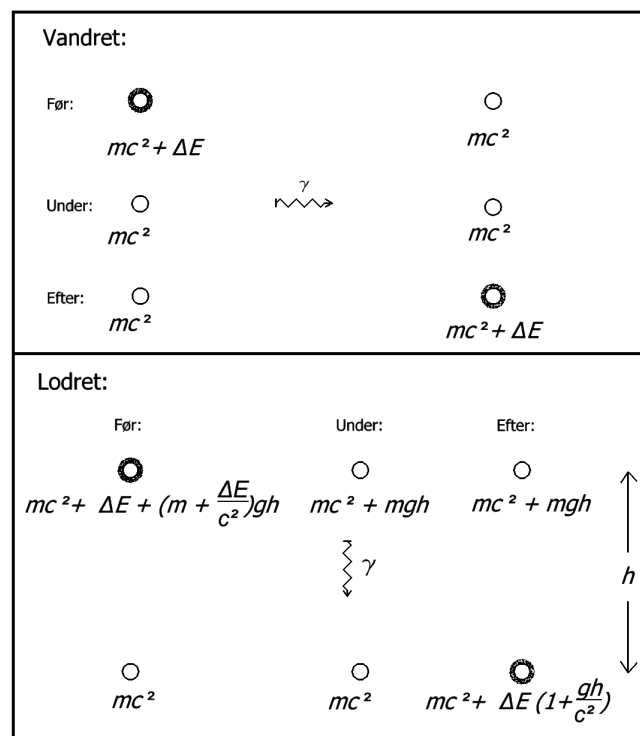
Figur 1 opsummerer overførsel af energi fra en anslået kerne til en kerne i grundtilstanden via et γ -kvant, når henholdsvis kilde og absorber befinder sig i samme vandrette plan eller lodret over hinanden. Det er antaget, at overførslen kan ske rekylfrit uden tilførsel af kinetisk energi til kernerne ved hverken emissionen eller absorptionen af γ -kvantet. Det svarer til at antage kernernes hvilemasse i grundtilstanden, m , for meget stor. I det følgende står c for lysets hastighed, ΔE for anslagsenergien af den anslåede kerne, g for tyngdefeltstyrken, og h for afstanden imellem kilde og absorber i det lodrette tilfælde.

I det vandrette tilfælde betyder energibevarelsen, når vi ser bort fra rekyll, at den absorberende kerne bliver bragt i den anslåede tilstand, den emitterende kerne havde. I det lodrette tilfælde er sagen mere kompliceret. Da de anslåede kerner har hvilemassen $m + \Delta E/c^2$ ifølge ækvivalensen imellem hvilemasse og hvileenergi, er den potentielle energi i det lodrette tilfælde $(m + \Delta E/c^2)gh$ i forhold til absorberens position. Efter udsendelsen af γ -kvantet har kernen den potentielle energi mgh . Energibevarelsen fra før udsendelsen af γ -kvantet til efter absorptionen af kvantet fører da til, at den anslåede absorberende kerne har fået forøget sin energi med $\Delta E(1 + gh/c^2)$ i kontrast til ΔE i det vandrette tilfælde af rekylfri resonansabsorption. Hvis ellers absorptionen kan finde sted.

Kommentar

At komme på den ide, at resonansabsorptionen kunne ske rekylfrit, er ikke trivielt. Det var det, Rudolf Mössbauer realiserede i en vandret opstilling i 1958 og

fik 1961-Nobelprisen i fysik for. Mössbauer-effekten er grundlæggende et kvantemekanisk fænomen. En emitterende kerne vil før emissionen af γ -kvantet ifølge usikkerhedsrelationen have sin impuls p_f sandsynlighedsfordelt omkring $p_f = 0$ med spredningen $\Delta p = \hbar/2\Delta x$, hvis kernen kun kan bevæge sig inden for et begrænset område, Δx , som det er tilfældet i kondenseret stof. \hbar er Plancks konstant divideret med 2π . Efter udsendelsen af γ -kvantet fra kernen, vil dens impuls p_e være sandsynlighedsfordelt med samme spredning, men, på grund af impulsbevarelsen, nu omkring $p_e = -p_\gamma$. Alligevel vil der være en rimelig sandsynlighed for, at emissionen sker rekylfrit, svarende til $p_e = p_f$, hvis $\Delta p/p_\gamma$ er et stort nok tal.



Figur 1. Vandret og lodret rekylfri kerneresonansabsorption.

På samme måde, som der er en vis sandsynlighed for rekylfri emission, er der tilsvarende en vis sandsynlighed for rekylfri absorption. Derfor kan Mössbauer-effektens rekylfri resonansabsorption finde sted.

Et år efter Mössbauers opdagelse blev effekten brugt

af Pound og Rebka til at eftervise, at fotoner vinder energi ved fald på 22,5 m i Jordens tyngdefelt [1,2].

Det er denne eftervisning, som figur 1 og opgaven egentlig handler om. Ifølge figuren skal den absorberende kerne på grund af antagelsen om rekylfrihed og energibevarelse under processen absorbere energien $\Delta E(1+gh/c^2)$. Hvorimod den emitterende kerne afgav energien ΔE . Fra emission til absorption er γ -kvantets energi derfor øget med $\Delta Egh/c^2$. Den relative energiøgning er altså gh/c^2 . Den relative øgning af γ -kvantets frekvens ν er tilsvarende givet ved $\Delta\nu/\nu = gh/c^2$. Da energiniveauerne i den absorberende kerne er diskrete, kan absorptionen i figur 1 ikke umiddelbart finde sted. Absorptionen kræver en tilpasning af γ -kvantets energi til ΔE . Til det formål udnytter Mössbauers set-up Doppler-skiftet af frekvensen ved bevægelse af den absorberende kerne i forhold til den emitterende med varierende fart. Absorptionen fandt da sted ved farten u , givet ved

$$\frac{u}{c} \approx \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c^2}. \quad (1)$$

Herved blev det bekræftet, at fotoner øger deres energi relativt med gh/c^2 , når de falder afstanden h i Jordens tyngdefelt.

Læg mærke til, at formlen ikke blev udledt ud fra den generelle relativitetsteori, som den normalt tages som en konfirmation af. Udledningen benytter energibevarelse, newtonsk mekanik og ækvivalensen mellem hvilemasse og hvileenergi udledt fra den specielle relativitetsteori. Ved eksperimentelt at vise, at fotoner accelereres i et tyngdefelt, foregriber Pound og Rebka logisk set den generelle relativitetsteori. Men teorien er altså ikke tvingende for at forklare eksperimentet. Modsat den berømte måling af lysets bøjning omkring Solen ved solformørkelsen i 1919. Her var der en faktor 2 til forskel mellem en newtonsk beregning på fotoner tillagt træ og tung masse svarende til deres energi og den generelle relativitetsteoris beregning, hvor der også må tages hensyn til rummets krumning.

Opgaven er ikke en sædvanlig breddeopgave. Den bevæger sig ud over breddekursets nuværende pensum.

I almindelighed lægger vi vægt på overensstemmelse mellem eksamensopgaver og undervisningsopgaver i en grad, så undervisningen som det vigtigste bygger på tidligere eksamensopgaver. I megen undervisning kan det være et problem, som det hedder på engelsk, at "the matter meant, the matter taught, the matter learnt, and the matter assessed" ikke hænger tæt nok sammen. Vores måde at sikre sammenhængen imellem kursets formål, undervisningen, de studerendes læring, og vurderingen heraf ved eksamen, er da den radikale; at lade formålet styre udarbejdelsen af eksamensopgaverne og lade undervisningen fra starten basere sig på tidligere eksamensopgaver, så de studerende derved fra starten samtidigt kan orientere sig mod eksamen og formålet med kurset. Opskriften er ikke uden problemer. Den er som at lære nogen at svømme ved at skubbe dem i vandet. Og det kræver opmærksomhed på de studerendes ve og vel. Herunder at vi overholder overensstemmelsen mellem karakteren af de opgaver, der arbejdes med i undervisningen, og karakteren af eksamensopgaverne.

Med opgaven her, der ikke har været stillet som eksamensopgave, men alligevel benyttes i undervisningen, har vi ikke kunnet stå for fristelsen til at give udsyn til noget, der ikke er eksamenspensum. Men det er undtagelsesvist, at vi i undervisningen arbejder med opgaver, der ikke har eller kunne have været stillet til eksamen.

Breddeopgave 91 og 92. Benzinforbrug og covid-smitte

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne overveje løsningen til disse opgaver til breddekurset på RUC (fra eksamen juni 2011 og eksamen januar 2021, nr. 91 og 92 i rækken her i Kvant):

Hvordan afhænger benzinforbruget og CO₂-udledningen ved bilkørsel per kørt kilometer af hastigheden, der køres med? Begrund svaret.

I lukkede rum er der fare for at blive smittet med coronavirus, selvom der holdes afstand, hvis ikke der luftes ud. Det skyldes, at mikrodråber (aerosoler) af virussen hænger i længere tid i luften, og derfor kan bevæges længere rundt, end de større dråber, som undgås ved at holde afstand. Hvordan afhænger den tid, som mikrodråberne hænger i luften, af deres størrelse? Begrund svaret.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] R. V. Pound og G. A. Rebka (1959) "Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance", *Phys.Rev.Lett.*, bind 3, side 439–441.
- [2] R. V. Pound og G. A. Rebka (1960) "Apparent weight of photons", *Phys.Rev.Lett.*, bind 4, side 337–341.

Generalforsamling i Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab holder generalforsamling den 17. april 2021. Det nøjagtige tidspunkt og sted for generalforsamlingen meldes ud senere.

Inge Lehmanns Legat

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab indkalder ansøgninger til Inge Lehmanns Legat, med ansøgningsfrist den 1. april 2021.

Legatet skal fortrinsvis anvendes til længerevarende forskningsophold eller videregående forskningsuddannelse i udlandet for forskere, der har afsluttet deres ph.d.-uddannelse eller på anden vis har opnået tilsvarende erfaring.

Legatet tildeles (1) forskere inden for geofysik – primært til studier af Jordens indre og dens overfladelag – eller (2) forskere inden for empirisk psykologi. Empirisk forskning baseret på data gives forrang, og rent teoretisk forskning støttes kun undtagelsesvis.

For yderligere information henvises til Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskabs hjemmeside www.royalacademy.dk. Vi minder ansøgerne om, at de enkelte krav til ansøgning (fx sideantal) skal overholdes.

Ved rejseaktivitet må afrejse tidligst være den 1. juni 2021.