
Einsteins lyskvanter

Reidun Renstrøm *

Grunnlaget for kvanteteoriens utvikling ble lagt ved Max Plancks strålingsteori. Dette er beskrevet i forrige nummer av *Fra Fysikkens Verden*. Det ble etter hvert mange avgjørende bidrag til fortsettelsen av denne spennende og revolusjonerende utviklingen, og ett av de aller viktigste var Albert Einsteins. Her fortsetter historien.

I mars 1905 fikk Conrad Habicht et brev fra sin tidligere studiekamerat, Albert Einstein, som bad om en kopi av Habichts avhandling. Einstein skrev at han selv arbeidet med fire avhandlinger, som Habicht ville få tilsendt, ... *den første kan jeg sende så snart jeg har en kopi. Den handler om stråling og lysenergi og er svært revolusjonerende, som du jo vil få se, dersom jeg får ditt arbeid først.* Om relativitetsteorien skrev han: *Den kinematiske delen vil du sikkert finne interessant.*

Avhandlingen Habicht fikk i posten noen dager senere hadde tittelen: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*,⁽¹⁾ og var i sannhet revolusjonerende. Allerede på første side sannsynliggjøres det at Maxwells elektromagnetiske teori har et begrenset gyldighetsområde: *Lysets bølge-teori, som bygger på kontinuerlige, tredimensjonale funksjoner, egnert seg fortreffelig til forklaring av rent optiske fenomener, og denne bølge-teori vil antakelig aldri bli erstattet av andre teorier. Tross den fullstendige eksperimentelle bekræftelse av teorien for lysets bøyning, refleksjon, brytning osv. så er det tenkelig at en teori for lyset som bygger på kontinuerlige, tredimensjonale funksjoner, vil føre til motstrid med erfaringen, hvis den anvendes på fenomener hvor lys dannes og omdannes.*

Fenomenene Einstein tenker på er sortlegeme-stråling, fotoluminescens og fotoelektrisk effekt, som *lettere kan forstås dersom man antar at lysets energi er diskontinuerlig fordelt i rommet.* Ifølge denne antakelsen fordeles ikke energien fra en lyskilde kontinuerlig over et stadig større område, men består av et endelig antall energikvanter som

er lokalisert i punkter i rommet og som beveger seg uten å deles, og absorberes og emitteres hele.

Lyskvantenes mottakelse

Det var en alminnelig oppfatning blant ledende fysikere at partikkelmodellen for lys lå død og begravet under et vell av eksperimentell bekræftelse av lysets bølgeegenskaper. Romlig lokaliserte kvanter som utbres og absorberes hele, var uforenelig med bølgebeskrivelsen av optiske fenomener gitt ved Maxwells teori, og måtte derfor forkastes. Hvordan i all verden kunne lyskvanter frembringe interferens? Kritikken mot Einsteins hypotese var hard og til tider hånlig.

Plancks energikvanter hadde skapt noe forvirring og skuldertrekk, men hans strålingslov ble anerkjent og anvendt med det samme. Einsteins lyskvanter skapte forargelse og ble forkastet, og loven for fotoelektrisk effekt hadde ingen eksperimentelle data å testes mot. Vi lar en kommentar fra fire lyskvantemotstandere, Planck, Nernst, Rubens og Warburg, representere holdningen til Einsteins hypotese. I et innvalgsforslag til det Prøyssiske Vitenskapsakademi i 1913, uttrykte de stor respekt for Einsteins arbeider, men konkluderte med: ... *man kan si at det blant de store problemer som den moderne fysikk er så rik på, knapt er ett eneste som Einstein ikke har tatt stilling til. At han av og til har bommet i sine spekulasjoner, som for eksempel i hypotesen om lyskvanter, kan en egentlig ikke holde imot ham, for det er selv i de mest eksakte vitenskaper ikke mulig å introdusere nye ideer uten en gang i blant å løpe en risiko.*

Einstein og Planck i 1905

Lyskvantene ble ikke utledet som en konsekvens av Plancks strålingslov, der energielementene inngår. Einstein nevner ikke konstanten h eller Plancks energielementer i 1905-artikkelen, og Plancks strålingslov inngår ikke i hans argumenter for

lyskvanter. Einstein trodde at grunnlaget for Plancks teori var uforenelig med lyskvanthypotesen, og det er først året etter at han etablerte en forbindelse mellom lyskvanter og energikvantiseringen av Plancks resonatorer. Ofte blir lyskvantene fremstilt som et resultat av at Einstein modig trakk konsekvensen av energikvantisering av materie på strålingen. Men slik var det ikke.

Her gis en oversikt over tankegangen som ledet Einstein til et revolusjonerende syn på lysets natur og hans senere forsvarstaler for lyskvantenes eksistens i 1906, 1909 og 1916.

Lyskvanthypotesen og det heuristiske synspunkt

Einstein innleder sin 1905-artikkel med å fremheve motsetningen mellom grunnlaget for fysikkens teorier for partikler og elektromagnetiske prosesser. Tilstanden til et system av partikler bestemmes ved de enkelte partiklens fart og posisjon, mens alle elektromagnetiske fenomener bestemmes ved et sett av kontinuerlige funksjoner. Denne motsetningen var ikke uproblematisk for Einstein, og han stilte spørsmål ved om oppdelingen var i overensstemmelse med naturen.

Både Wien og Planck utledet sine strålingslover ut fra en modell av strålingsfeltet og materien, og testet resultatet mot eksperimentelle data. Einsteins metode var motsatt. Han innså at Wiens lov, som stemte i det høyfrekvente området, var uforenelig med klassisk statistisk mekanikk. Det var derfor rimelig å anta at Wiens lov kunne belyse strålingens ikke-klassiske egenskaper. Planck innførte energikvanter for å få en lov i overensstemmelse med spekteret i det lavfrekvente området, der Wiens lov ikke var korrekt. Grafens maksimum og den eksponentielle formen i det høyfrekvente området, var jo i overensstemmelse med Wiens lov og trengte ingen ny forklaring. Einstein innså at det nettopp var dette forholdet som trengte en forklaring, for i det lavfrekvente området stemte den klassiske strålingsloven, som beskriver verden uten kvanter. I det høyfrekvente området derimot, forutsa klassisk teori at strålingsenergien vokser mot uendelig. Denne konsekvensen gav Paul Ehrenfest navnet *ultrafiolett-katastrofen* i 1906. Det var Rayleigh som i 1900 utledet en strålingslov fra klassisk fysikk uten å innse at klassisk statistisk mekanikk og Maxwells teori uunngåelig ledet til dette katastrofale resultatet. Denne konsekvensen

slo Einstein fast i 1905, men lærebøkene fremstiller den ofte som Plancks motivasjon for å kvantisere energien i 1900.

Sannsynlighet og entropi

Ut fra klassisk termodynamikk og Wiens lov, utledet Einstein et uttrykk for strålingens entropi som funksjon av volumet strålingen okkuperer. Den fysiske betydningen av entropi kommer alltid tydeligere frem når en beregner entropiforandringen assosiert med en prosess. Einstein valgte å utlede uttrykket for entropiforandringen når volumet endres fra v_0 til v , for stråling med energi E og frekvens ν :

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta\nu} \ln \frac{v}{v_0},$$

der β er en av konstantene i Wiens lov.

Denne formelen har en slående likhet med formelen for entropiforandringen for en ideell gass. For n partikler som beveger seg uavhengig av hverandre i et volum v_0 med entropi S_0 , er den relative sannsynligheten W for at gassen skal befinne seg i et delvolum v med entropi S , ifølge Boltzmanns prinsipp:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W,$$

der R er gasskonstanten og N er Avogadros tall.

Denne formelle analogien utforsket Einstein videre, og han lot seg lede av den fysiske betydningen av Boltzmanns prinsipp, og spør: Hva er sannsynligheten for at alle partiklene på et bestemt tidspunkt er i et delvolum v ? Han finner at den er gitt ved:

$$W = \left(\frac{v}{v_0}\right)^n,$$

som gir:

$$S - S_0 = \frac{Rn}{N} \ln\left(\frac{v}{v_0}\right).$$

Formelen for entropiforandringen for stråling og for en gass med n partikler, gir samme resultat hvis :

$$\frac{Rn}{N} = \frac{E}{\beta\nu},$$

som gir:

$$n = \frac{NE}{R\beta\nu},$$

og sannsynligheten for å finne all stråling med energi E og frekvens ν i delvolumet v , er:

$$W = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{\frac{NE}{R\beta\nu}}.$$

Fra dette uttrykket konkluderte Einstein: *Monokromatisk stråling med liten tetthet (i gyldighetsområdet for Wiens formel) oppfører seg fra et termodynamisk synspunkt som om den besto av uavhengige energikvanter av størrelse $R\beta\nu/N$ ($h = R\beta/N$, og lyskvantenes energi er $h\nu$, men Einstein benyttet ikke virkningskvantet).*

Dette utsagnet kunne man velge å betrakte som en interessant analogi mellom fri høyfrekvent stråling og en ideell gass, uten dermed å ta lyskvantene seriøst. Men Einstein gikk videre med et revolusjonerende, heuristisk synspunkt: *Når oppførselen av strålingen til en viss grad kan sammenliknes med en diskret mengde energikvanter, må da ikke lovene for emisjon, absorpsjon og spredning av lys også avspeile den egenskapen?*

Einstein brukte dette synspunktet til å forklare et fenomen vi kaller fotoelektrisk effekt: Når lys treffer et metall, kan metallet sende ut elektroner. Han antok at et elektron i metallet absorberte et lyskvant med energi $h\nu$. En del av denne energien, P , går med til å frigjøre elektronet fra metallet, mens den resterende energien blir elektronets kinetiske energi:

$$h\nu - P = \frac{1}{2}mv^2.$$

Med dette synspunktet kunne lyskvantene ikke lenger betraktes som en merkelig egenskap ved ren stråling i termisk likevekt uten fysiske konsekvenser. Einstein selv tok lyskvantene seriøst og ville innlemme dem i det teoretiske grunnlaget for lovene for stoffers absorpsjon og emisjon av lys. Datidens fysikere måtte ta stilling til denne hypotesen, og de kom til at den var noe sludder. Men i 1922 ble Einstein belønnet med nobelprisen nettopp for anvendelsen av sin hypotese på fotoelektrisk effekt.

La oss se hvordan Einstein forsvarte sitt heuristiske synspunkt de neste årene.

1906: Plancks strålingslov forutsetter lyskvantene

Allerede året etter, i 1906, utgav Einstein en ny artikkel om lyskvantene.⁽²⁾ Nå har han endret sitt syn på Plancks strålingslov, og viser at Plancks teori indirekte forutsetter at lysenergien er kvantisert, for i det Wienske (høyfrekvente) området er en resonators middelenergi mye mindre enn ett lyskvant, $h\nu$. Det betyr at siden ingen resonator kan ha energi mellom 0 og $h\nu$, så har de fleste energien 0,

mens noen få har energi på ett eller flere kvantene. Hvis strålingen hadde vært kontinuerlig fordelt i rommet, var det rimelig å anta at alle resonatorene var blitt påvirket. Men slik er det ikke, og lys må derfor være kvantisert, eller med Einsteins ord: *Overstående overveielser gjendriver etter min mening absolutt ikke Plancks strålingslov; de forekommer meg snarere å vise at Hr. Planck gjennom sin strålingsteori, har innført et nytt hypotetisk element – lyskvantehypotesen – i fysikken.*

1909: Lyskvantene begrunner energifluktuasjon

I 1909 publiserte Einstein to artikler der han argumenterte for sine lyskvantene. Den ene ble presentert på en kongress for tyske vitenskapsmenn og leger i Salzburg i 1909.⁽³⁾ Einsteins ord til forsamlingen var: *Det er udiskutabelt at det finnes en omfattende gruppe av kjensgjerninger vedrørende stråling som viser at lys besitter visse fundamentale egenskaper som langt snarere lar seg begripe ut fra Newtons emisjonsteori for lyset enn fra bølge-teoriens standpunkt. Det er derfor min antakelse at den neste fase i den teoretiske fysikkens utvikling vil bringe oss en lysteori som kan oppfattes som en slags sammensmeltning av bølge- og partikkelteori... bølgestruktur og partikkelstruktur skal ikke betraktes som gjensidig uforenelige.*

Einstein gjorde det klart at strålingens kvantestruktur er virkelig og måtte bli en del av den fremtidige kvanteteorien. Det skulle gå mange år før fysikken hadde en teori som forente bølgestruktur og kvantestruktur, paradoksalt nok på en måte Einstein ikke kunne akseptere.

Einsteins argument for lyskvantenes eksistens i 1909, var hulromsstrålingens energifluktuasjon. Han utledet et uttrykk for energifluktuasjon ut fra Plancks strålingslov. Klassisk fysikk forklarer energifluktuasjon som et resultat av interferens. Men uttrykket Einstein utledet har to ledd, og interferens kan gi opphav til kun det ene; det andre kan forklares ut fra et partikkelbilde av lyset. Det så ut som om "partikkelledet" dominerte i det høyfrekvente området, mens "interferensledet" dominerte i det lavfrekvente området, der klassisk fysikk gjelder. Einsteins ordvalg i denne artikkelen tyder på at han nå oppfatter lyskvantene som partikler. Han var i 1909 alene om å se behovet for en teori som forente partikkel- og bølgeaspektene ved lyset. Denne situasjonen fikk uten tvil betydning

for Einstein og Bohrs ulike oppfatninger av kvantemekanikken slik den forelå i 1925.

Millikan og ”den fotoelektriske likning”

I 1915 verifiserte Millikan likningen for fotoelektrisk effekt. Likevel kommenterte han sitt resultat på følgende måte: *Einsteins fotoelektriske likning forutsier tilsynelatende i hvert enkelt tilfelle nøyaktig de observerte resultater. Men for undertegnende forekommer den semikorpuskulære teori, som er grunnlaget for Einsteins likning, helt uholdbar.*⁽⁴⁾

1916: Einstein utleder Plancks strålingslov, Bohrs frekvenslov og lyskvantenes impuls

I november 1916 skrev Einstein til sin venn Michele Besso: *Et stort lys har gått opp for meg angående emisjon og absorpsjon av stråling.* En dypere forståelse av betydningen av det heuristiske prinsipp (1905) gjorde det mulig for Einstein å utlede Plancks strålingslov kvanteteoretisk. Allerede i 1906 påpekte Einstein at Plancks utledning av strålingsloven inneholdt en fundamental selvmotsigelse: Planck kvantiserte resonatorenes energi for å få det ønskede uttrykket for entropien, mens han lot dem opptre klassisk i utledningen av sammenhengen mellom spektraltettheten og resonator-energien.

I 1916–17 utledet Einstein Plancks strålingslov ved å betrakte kvantiserte ”bohr-atomer” i vekselvirkning med stråling. Avhandlingen fra 1917 het: *Zur Quantentheorie der Strahlung.*⁽⁵⁾ Einstein tenkte seg hulromsstrålingen i likevekt med et atomært system. Han skilte mellom spontan emisjon og induert emisjon og absorpsjon, slik det er i klassisk elektrodynamikk. Sannsynligheten for induert overganger mellom to stasjonære tilstander, E_m og E_n , i atomet, er proporsjonal med spektraltettheten. I likevekt må antall kvantesprang fra tilstand m til tilstand n , balanseres av kvantesprang fra n til m . Dette kravet og Wiens forskyvninglov, ledet Einstein til et uttrykk for spektraltettheten som var i samsvar med Plancks lov dersom han satte $E_m - E_n = h\nu$.

Bohr var begeistret for Einsteins brobygging mellom sortlegeme-stråling og atomteori. Einsteins bruk av analogi mellom klassisk fysikk og kvante-

teori fikk stor betydning for Bohrs formulering av korrespondanseprinsippet, som var avgjørende for utviklingen av atomteorien før man nådde frem til bølgemekanikken.

Einstein oppfattet sin analyse av impulsfluktasjoner for atomer i termisk likevekt med stråling, som det viktigste bidraget til en kvanteteoretisk beskrivelse av strålingsprosessene. Denne analysen ble presentert i 1916–17-avhandlingene. Det er underlig at Einstein, relativitetsteoriens far, ikke gav lyskvantene både energi, $h\nu$, og impuls, $h\nu/c$, da han presenterte dem i 1905. En nærliggende forklaring er at lyskvantene dukket opp som et resultat av anvendelse av statistisk mekanikk på likevekt, hvor relasjoner mellom energi og andre størrelser utledes. Når derimot statistiske fluktasjoner rundt likevektstilstanden analyseres, er både energi og impuls vesentlige, og lyskvantene måtte assosieres med bestemte impulser. Resultatet av hans analyse var at termisk likevekt mellom stråling og molekyler krever at strålingen er fullstendig rettet og at det derfor overføres impulser til molekylet. *Dersom molekylet avgir energien $h\nu$ ved å sende ut stråling uten påvirkning av ytre stråling, så er også denne prosessen rettet. Utgående stråling i form av sfæriske bølger eksisterer ikke. I løpet av en elementær utstrålingsprosess vil molekylet motta en impuls $h\nu/c$, og retningen vil være tilfeldig.*

Hvis det hos Einstein fantes en rest av tvil om lyskvantenes eksistens, sørget impulsteorien for at den forsvant, men noe skritt i retning av *sammensmelting av bølge- og partikkelteori* var denne teorien ikke. Det bekymret Einstein at teorien om en rettet strålingsprosess krenket klassisk kausalitet, for den kunne ikke forutsi tidspunktet for når et eksitert atom ville sende ut et lyskvant, og heller ikke kvantets bevegelsesretning. I klassisk fysikk er man i stand til å forutsi et isolert systems oppførsel til et hvilket som helst tidspunkt hvis tilstanden ved et tidligere tidspunkt er kjent. Til sin venn Besso skrev Einstein: *Jeg føler at vi ikke har avslørt det virkelige spillet den evige skaper av mysterier har presentert for oss.* De fleste fysikerne oppfattet bølgemekanikken som forklaringen, men Einstein trodde ikke bølgemekanikken var den endelige *sammensmeltingen av partikler og bølger*. Han lette etter alternativer resten av sitt liv.

Planck og Bohr mot lyskvantene

Heller ikke Einsteins artikler i 1916–17 fikk datidens ledende fysikere til å konvertere til lyskvantteorien.

Prisen for å akseptere lyskvanter synes å være Maxwells teori for bølgeutbredelse av elektromagnetiske felter, en altfor høy pris. Det var en alminnelig oppfatning at kvanter gjorde seg gjeldende i vekselvirkningen mellom lys og stoff, men ikke i selve strålingen. Blant de mest utholdende motstanderne mot lyskvanter var Planck og Bohr.

I 1907 skrev Planck til Einstein: *Jeg leter ikke etter betydningen av energikvantet i vakuum, men snarere på steder der det forekommer emisjon og absorpsjon, og jeg formoder at det som skjer i vakuum er eksakt beskrevet av Maxwells likninger.* På et møte for fysikere i 1909, kom Planck med en bemerkning som tydelig viser hans ønske om å la strålingen være i fred og heller søke etter løsningen av kvanteparadoksene i vekselvirkningen: *Jeg tror man burde flytte problemene med kvanteteorien til vekselvirkningen mellom materie og stråling.*

Planck begrenset sin kvantehypotese til resonatorene, som representerte materien strålingen vekselvirket med. I 1900 kvantiserte han energien til resonatorene for å kunne telle antall kompleksjoner. Senere, oppsto spørsmålet om hvordan en resonators energi endres når energi absorberes og emitteres. I et foredrag i Det Tyske Fysiske Selskap den 3. februar 1911, svarte han på dette spørsmålet ved å tillate materien (hans resonatorer) å absorbere energi kontinuerlig, mens den fortsatt bare kunne emitte energi i kvanter.

I 1920 holdt Niels Bohr et foredrag i Berlin, og Einstein var en av tilhørerne som hørte ham si: *Jeg skal ikke komme inn på de velkjente vanskeligheter som hypotesen om lyskvanter fører til. . . Fremfor alt skal jeg ikke komme inn på problemet om strålingens natur.*

Bohr var ikke rede til å akseptere lysets partikkelnatur, tvert imot lette han etter måter å unngå lyskvantene på. Bohr innså at dersom energi- og impulsbevaring gjaldt uinnskrenket i individuelle prosesser på mikroskopisk nivå, var lyskvanter uunngåelige. Ved å gi slipp på kravet om energi- bevaring ved emisjon og absorpsjon av stråling, kunne atomenes energi endres diskontinuerlig, mens lysets energi fortsatt ble endret kontinuerlig på klassisk vis. Nå er det viktig å merke seg at loven om energibevaring på det individuelle mikroskopiske nivå, f.eks. ved kollisjoner mellom elektroner og atomer, først ble eksperimentelt bekreftet i 1925.

I 1923 endret situasjonen seg drastisk. Arthur Compton observerte da at når lys spres av elektroner, endres frekvensen som om lyset består av lyskvanter. Energi og impuls blir bevart, som om

det var kollisjoner mellom partikler. Den eksperimentelle bekreftelsen på at lyskvanter har energi og impuls, overbeviste samtidens fysikere. Men Einstein, som ikke hadde tvilt på lyskvanter, var ikke mer fornøyd med kvanteteorien for lys nå enn i 1917, for selv etter mange års bestrebelser hadde man fortsatt to teorier for lys, som ikke har noen logisk sammenheng. En ny teori som harmoniserte partikkel- og bølgeaspektet var ikke utviklet, og ble det heller aldri.

Niels Bohr ble ikke overbevist av Comptons resultat som viste energi- og impulsbevaring i gjennomsnitt over mange individuelle prosesser, noe som ikke stred mot Bohrs "statistiske" synspunkt. Bohr utførte et arbeid sammen med John Slater og Hendrik Kramers, et siste desperat forsøk på å finne en enkel beskrivelse av strålingsfenomenene ved å gi slipp på både kausalitet og energibevarelse.⁽⁶⁾ Om Bohr og hans kollegers bestrebelser, sa Einstein til Born: *Hvis fysikken må oppgi kausalitet, vil jeg heller være skomaker, eller til og med ansatt på en spillebule, enn fysiker.*

I 1925 lyktes det eksperimentalfysikerne A.H. Compton og A.W. Simon⁽⁷⁾ å kontrollere energi- og impulsbevaring i individuelle prosesser, og alt viste seg i være i skjønneste orden! Bohrs reaksjon på resultatet var: *Det er ikke annet å gjøre enn å gi våre revolusjonære bestrebelser en så ærefull begravelse som mulig.*

I 1926 fikk lyskvantene navnet *fotoner* av Gilbert Lewis, som hadde valgt å gi sin avhandling tittelen: *The Conservation of Photons.* Han foreslo i denne avhandlingen å kalle den nye typen "atomer" – som lyset skal består av – for fotoner. Navnet ble nesten umiddelbart tatt i bruk, og i 1927 var emnet for den femte Solvay-konferansen: *Elektroner og fotoner.*

Takk

Takk til Kristoffer Gjøtterud og Ole Knudsen for verdifulle råd og konstruktiv kritikk.

Referanser

1. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.* Annalen der Physik **17**, (1905)
2. A. Einstein: *Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption.* Annalen der Physik **20**, (1906)
3. A. Einstein: *Phys. Zeitschr.* **10**, 817 (1909)
4. R.A. Millikan: *Phys. Rev.* **7**, 355 (1916)

5. A. Einstein: *Zur Quantetheorie der Strahlung*. Phys. Zeitschr. **18**, 121 (1917)
6. N. Bohr, H.A. Kramers and J.C. Slater: *The quantum theory of radiation*. Phil. Mag. **47**, 785 (1924)

Generelle kilder

1. A. Pais: *Subtle is the Lord...* Oxford University Press (1982)
2. A. Pais: *Niels Bohr's Times*. In Physics, Philosophy, and Polity, Oxford University Press (1991)
3. Philip Stehle: *Order, Chaos, Order*. Oxford University Press (1994)

*Høgskolen i Agder

∞