

Frå klassisk mekanikk til kvantemekanikk: Litt bakgrunn/historie

Så langt i kurset: **Klassisk mekanikk**.

Klassisk mekanikk vart i hovudsak utvikla av Newton og andre på 16- og 1700-talet. Denne teorien var lenge trudd å vere gyldig for alle tenkjelege typar materielle objekt (planetar, steinar, sandkorn osv.), uansett storleik.

Klassisk mekanikk er ein del av klassisk fysikk, som også (bl.a.) inneheld teorien for **(klassisk) elektromagnetisme** (ferdig utvikla av Maxwell i 1865). Denne teorien predikerte bl.a. eksistensen av elektromagnetiske bølger som bevegar seg med lyshastigheiten. Lys vart dermed forstått å vere ei elektromagnetisk bølge.

I tillegg hadde lys blitt observert å vise bølgeoppførsel som interferens og diffraksjon i eksperiment gjort tidlegare på 1800-talet. Så både teori og eksperiment viste at lys var eit bølgefænomen.

Dette var statusen rundt år 1900. Men i åra som følgde vart nye fysiske fenomen oppdaga som ikkje kunne forklarast vha. klassisk fysikk. Dei viste at

- (i) lys kunne framvise partikkeleigenskapar i tillegg til bølgeeigenskapar
- (ii) materielle partiklar som elektron og nøytron kunne framvise bølgeeigenskapar

Vi seier at både lys og materielle partiklar framviser **bølge-partikkel-dualisme**. Avhengig av typen eksperiment, kan enten bølge- eller partikkelnaturen vere mest prominent.

Oppdagingar i atomfysikk:

- elektronet (1897), atomkjernen (1911), protonet (1917), nøytronet (1932).
- karakteristiske diskrete emisjons- og absorpsjonsspektra for forskjellige atom (vart etterkvart forklart som ein konsekvens av at atom hadde diskrete energinivå).

Desse eksperimentelle oppdagingane førte til ei "krise" for teoretisk fysikk. Fram til 1925 vart ein del viktige idear og hypotesar lanserte, men det var først i 1925-1928 at nye gjennombrot førte til utvikling av ein koherent teori, som fekk namnet **kvantemekanikk**.

Kvantemekanikk

Kvantemekanikk representerte ein revolusjon i fysikken (i endå større grad enn den spesielle og generelle relativitetsteorien). Kvantemekanikk inneheld element som er heilt fråverande i klassisk fysikk og som strir mot intuisjon og «sunn fornuft». Dei viktigaste slike elementa vi kjem bort i dette kurset er

- **Kvantisering**: Mange fysiske storleikar (inkl. energi) kan kun ha bestemte, diskrete, verdier.
- **Bølgje-partikkel-dualisme**: Lys og materielle partiklar kan framvise både partikkel- og bølgeeigenskapar.
- **Probabilistisk natur**: Mens klassisk fysikk er fullstendig **deterministisk**, kan ein i kvantefysikken kun predikere **sannsynlegheiter** for utfall av eksperimentelle målingar.

(Sjølv om kvantemekanikk er den fundamentale teorien, er det likevel ofte/som regel mogeleg i staden å bruke klassisk mekanikk når ein skal analysere **makroskopiske** lekamar (lekamar som består av eit makroskopisk antal atom). Den kvantemekaniske beskrivinga kan altså i slike tilfelle «reduserast» (forenklast) til ei klassisk beskriving. Dette er vi sjølvsagt godt kjende med frå før: Vi trengde ikkje kvantemekanikk då vi analyserte bevegelsen til t.d. tennisballar!)

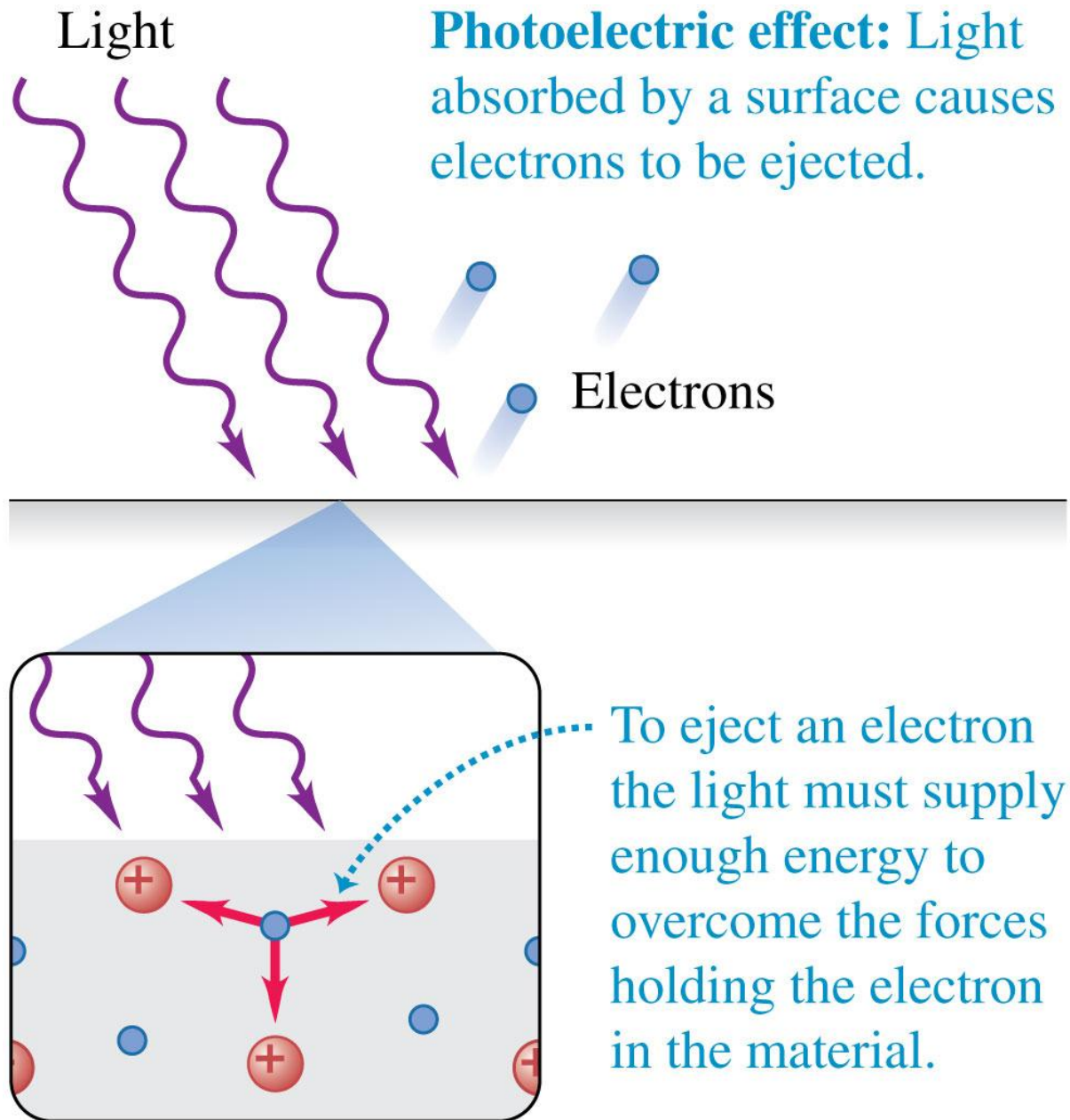
Kvifor skal de lære om kvantemekanikk?

- Det er kvantefysikk som er den grunnleggjande fysiske teorien, ikkje klassisk fysikk => alle med høgare utdanning innan teknologifag bør (?) ha ein viss kjennskap til kvantemekanikk.
- Utviklinga av kvantemekanikken representerer eit høgdepunkt for menneskeleg intellektuell aktivitet og prestasjon.
- Kvantemekanikken er essensiell for å forstå mykje naturvitskap (særleg innan fysikk og kjemi).
- Kvantemekanikk har viktige teknologiske anvendelsar. T.d. er elektronikkindustrien basert på halvleiarteknologi. Ein kan ikkje forstå halvleiarar utan kvantemekanikk! Viktig for utvikling av bl.a. solcelleteknologi.
- Framtidig teknologiutvikling vil innebære ytterlegare miniatyrisering, slik at forståing og utnytting av kvanteeffekter vil spele ei viktigare rolle.

Men aller viktigast (?): Kvantemekanikk er fascinerande!

Partikkelnaturen til lys

Figure 38.1



Fotoelektrisk effekt. Foton og fotonenergi

I dette eksperimentet blir lys med ein viss frekvens f sendt mot ei metalloverflate.

Ein observerer at:

- Dersom $f < f_0$, der f_0 er ein karakteristisk frekvens for metallet, blir ingen elektron slått laus frå metallet uansett kor stor intensiteten i lysstrålen er.
- Dersom $f > f_0$ blir elektron slått laus frå metallet, og deira kinetiske energi E_k er uavhengig av lysintensiteten men avheng i staden av frekvensen f som $E_k = h(f - f_0)$ (her er $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js: "Plancks konstant").

Desse observasjonane er uforståelege frå klassisk elektromagnetisk teori, som seier at energien i elektromagnetiske bølger er proporsjonal med intensiteten (frekvensen kjem ikkje inn).

Einstein (1905) forklarte den fotoelektriske effekten ved å anta at lys består av **diskrete kvant** (partiklar seinare døypt «**foton**») med energi

$$E = hf$$

Eit elektron som absorberer eit foton aukar energien sin med hf . Men denne energien må vere minst W for å frigjere elektronet frå metallet (sjå tabell på neste side for verdier av W).

Når $hf > W$ går resten av fotonenergien til å gi elektronet kinetisk energi, dvs. $E_k = hf - W$.

Dette stemmer med eksperimenta og gir $f_0 = W/h$. Auka intensitet i lysstrålen betyr berre fleire foton og påverkar ikkje E_k . (Einstein fekk Nobelprisen i 1921 spesielt for denne forklaringa av den fotoelektriske effekten.)

Table 38.1 Work Functions of Several Elements

Element	Work Function (eV)
Aluminum	4.3
Carbon	5.0
Copper	4.7
Gold	5.1
Nickel	5.1
Silicon	4.8
Silver	4.3
Sodium	2.7

Bevegelsesmengd til foton. Compton-spreiing.

Seinare foreslo Einstein (og andre) at foton også har bevegelsesmengd p gitt ved

$$p = h/\lambda \quad (*)$$

der $\lambda = c/f$ er bølgjelengda til lyset.

Utleiing: Relativistisk partikkelkinematikk gir $p = E/c$ for masselause partiklar (foton må vere masselause for å kunne gå med lyshastigheiten c som er ei fartsgrense i relativitetsteorien).
Bruk av $E = hf$ for fotonenergien gir då (*).

(*) vart seinare brukt til å forklare **Compton-spreiing** (1923), eit eksperiment der røntgenstråling (EM bølger med svært høg frekvens) blir spreidd på elektron. Eksperimentet viste at den spreidde strålinga har større bølgjelengd enn den innsende strålinga. Klassisk EM teori kunne ikkje forklare dette utfallet.

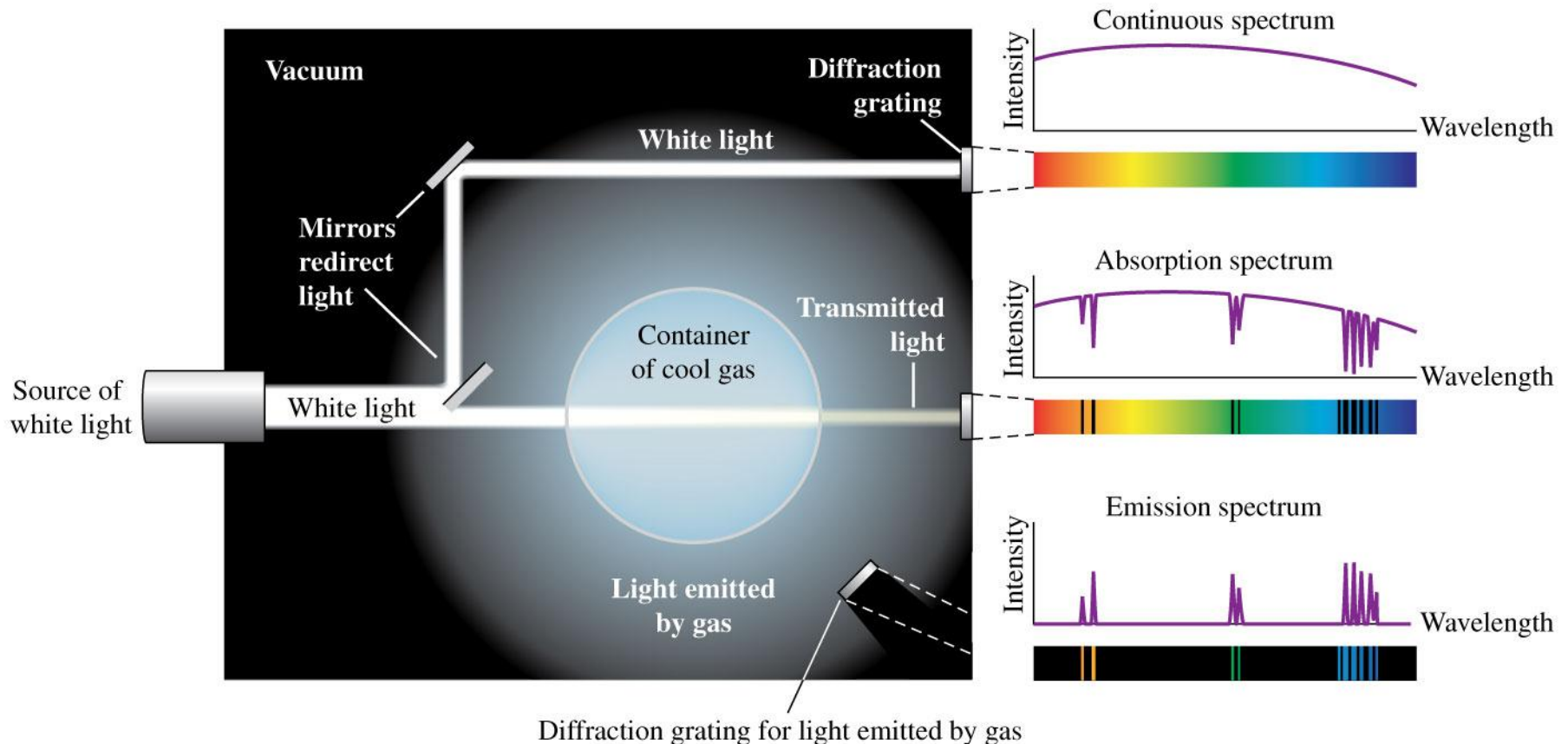
I den kvantefysiske forklaringa er den innkommande bølga ein straum av foton. Når eit foton kolliderer med eit elektron, gir det frå seg både energi og bevegelsesmengd til elektronet (total energi og bevegelsesmengd til foton + elektron er bevart). Det spreidde fotonet har difor mindre av begge. Vha. (*) forklarar dette at det spreidde fotonet har større bølgjelengd.

Atomspektra.

Diskrete energinivå

Atomspektra

- Atomære gassar kan kun absorbere og emittere lys med bestemte diskrete frekvensar.
- Kva frekvensar som blir absorberte/emitterte varierer med grunnstoffet.
- Det fanst inga forklaring på desse diskrete frekvensspektra innan den klassiske fysikken.



Bohrs atommodell (1913)

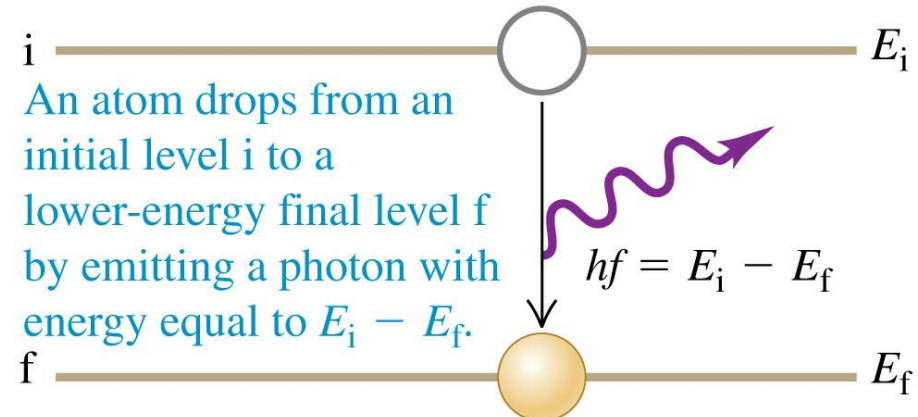
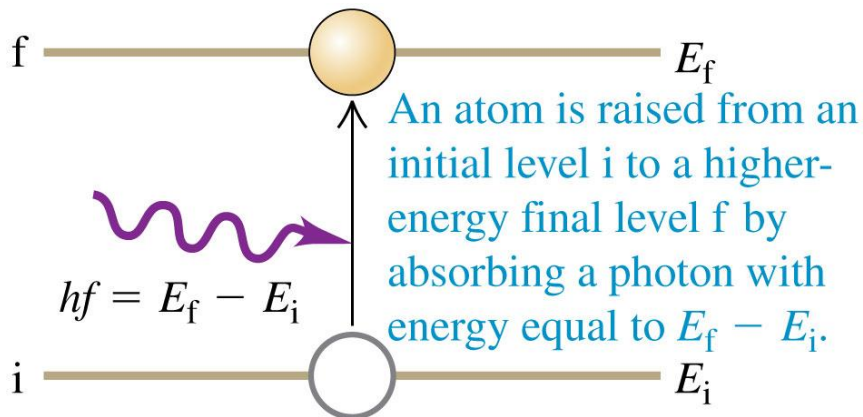
Niels Bohr foreslo ein atommodell som kunne forklare spektra for hydrogenatomet.

Bohr antok at tilstandane til eit atom

- (a) har diskrete energinivå, dvs. kun visse energiar er tillatne («energikvantisering»)
- (b) er stasjonære (dvs. stabile).

Begge antakelsane involverer brot med klassisk fysikk. [Ang. (b): Klassisk elektromagnetisk (EM) teori predikerer at ein akselererende lada partikkel sender ut EM stråling. Iflg. denne teorien burde dermed eit elektron i eit atom miste energi og spiralere inn mot atomkjernen.]

Bohr forklarte dei diskrete atomspektra ved at eit atom kan kun absorbere eller emittere foton med energi hf som er lik skilnaden mellom to energinivå i atomet:



Bohrs modell var radikal og nyskapande, og representerte eit stort steg framover. Den kunne forklare atomspektra for hydrogen og «hydrogen-liknande» atom.

Men den ga ikkje korrekte resultat for andre atom.

Modellen predikerte også at elektrona går i sirkelbaner rundt atomkjernen, med kun bestemte, diskrete verdiar av sirkelradien tillatne. Dette er ikkje korrekt.

Diskrete, stasjonære energinivå er (skulle det vise seg) faktisk ein konsekvens av elektronet sin bølgenatur, som er uforeinleg med veldefinerte partikkelbaner.

I det følgjande skal vi sjå på teoretiske idear og eksperimentelle bevis for bølgenaturen til elektron og andre partiklar.

Bølgjenaturen til partiklar

de Broglie-bølgjelengd (og –frekvens) for partiklar

Vi har sett at lys/EM stråling har både bølge- og partikkelnatur («bølge-partikkel-dualisme»).

Louis de Broglie (1924) foreslo at materielle partiklar (som t.d. elektron og proton) skulle også kunne framvise bølgeeigenskapar, og dermed også vise bølge-partikkel-dualisme.

de Broglie foreslo at bølgjelengda og frekvensen til materielle partiklar (dvs. partiklar med masse) er relatert til hhv. bevegelsesmengda og energien på same måte som for foton (som er masselause partiklar).

Bølgjelengd: $\lambda = h/p$

Ved å bruke at $p = mv$ for ikkje-relativistiske partiklar får ein då

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Dette vert kalla **de Broglie-bølgjelengda** til partikkelen. I tillegg er partikkelen sin frekvens

$f = E/h$ som for foton (men med $E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$ for ikkje-relativistiske partiklar)

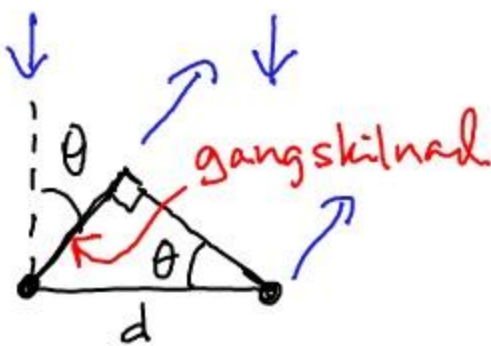
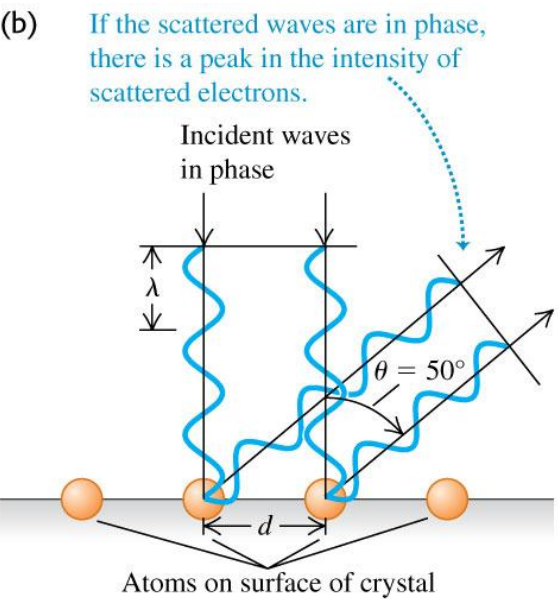
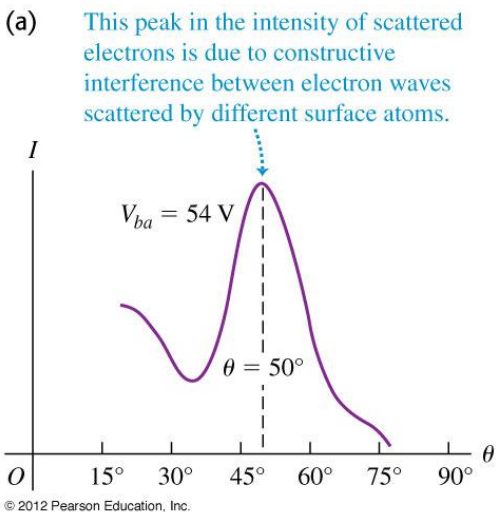
de Broglie bølgjelengda til makroskopiske objekt er så utruleg lita at den har ingen observerbare konsekvensar. Men de Broglie-bølgjelengda til mikroskopiske partiklar kan vere av same storleik som atomære dimensjonar (1 Ångstrøm = 0.1 nm). Då kan ein gjere eksperiment der bølgenaturen til partiklane kjem inn.

Første observasjon av elektronets bølgenatur:
Davisson-Germer-eksperimentet (1926).

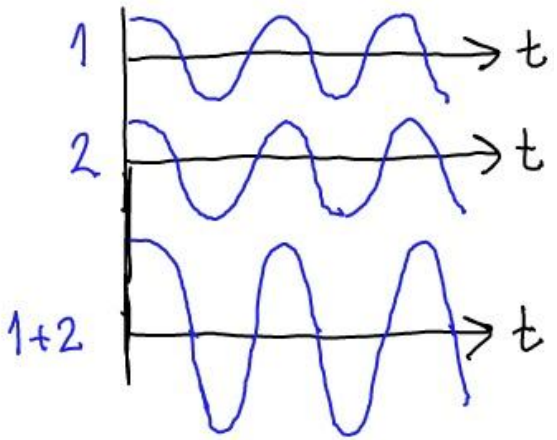
Straum av elektron sendt mot krystall av nikkel. Observasjon: sterke maksima i intensiteten av spredde elektron ved bestemte spreiingsvinklar (sjå figur til høgre).

Resultata minna om tilsvarande eksperiment der røntgenstråling vert sendt inn i staden for elektron.

For røntgenstrålingseksperimentet var resultata forståtte som eit bølgefænomen: Innkommande bølgetog i fase. Utgåande bølgetog vil vere i fase dersom **gangskilnaden** $d \sin \theta$ er lik eit heilt antal bølglengder.



Då vil bølgene addere i fase («konstruktiv **interferens**»).



Dermed får ein intensitetsmaksima for spreining ved vinklar θ som oppfyller

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (*)$$

der $m = 1, 2, 3 \dots$

Verdien av d kan finnast frå eksperimentet med røntgenstråling (sidan då kjenner ein frekvensen og dermed bølgjelengda til fotona).

Kan måle vinklane som gir maks intensitet i eksperimentet med elektron. Kan då finne bølgjelengda til elektrona frå (*).

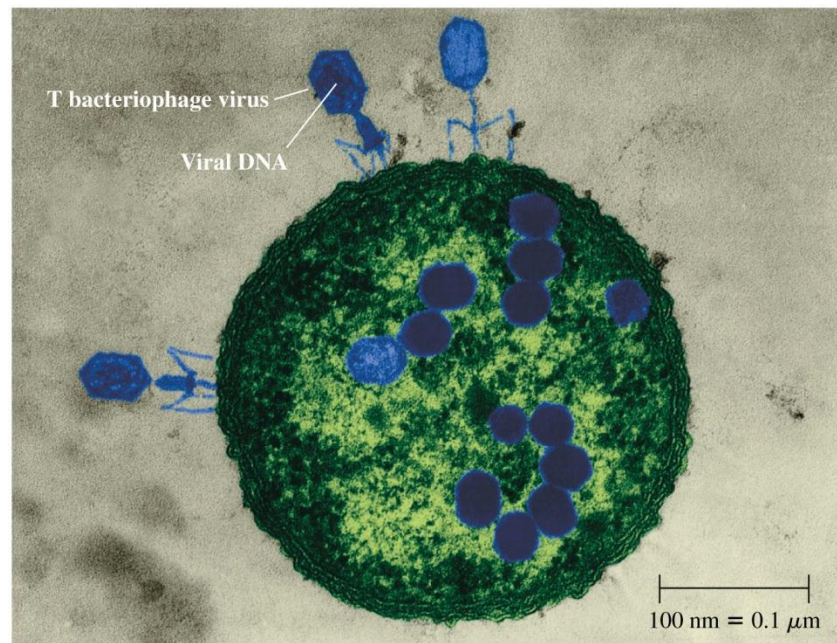
Davisson og Germer fann at denne bølgjelengda stemde med de Broglies formel $\lambda = \frac{h}{mv}$ (dei fann verdien av λ frå formelen ved å setje inn for farten v som kan reknast ut fra kjent akselerasjon oppnådd ved å sende elektrona gjennom eit elektrisk felt).

Anvendelse: elektronmikroskop

Oppløysinga til eit mikroskop (som avgjer kor små objekt ein kan sjå) er avhengig av storleiken på bølgjelengda. Jo mindre bølgjelengd, jo betre oppløysing.

Optiske mikroskop bruker synleg lys med bølgjelengd ~ 500 nm. Kan ikkje sjå objekt mindre enn eit par hundre nm.

Elektronmikroskop er basert på bruk av elektron, som har bølgjelengd som kan vere tusenvis gonger mindre enn for lys. Elektronmikroskop kan difor ha ei oppløysing som er tusenvis gonger betre enn optiske mikroskop.



Dobbelspalteeksperimentet

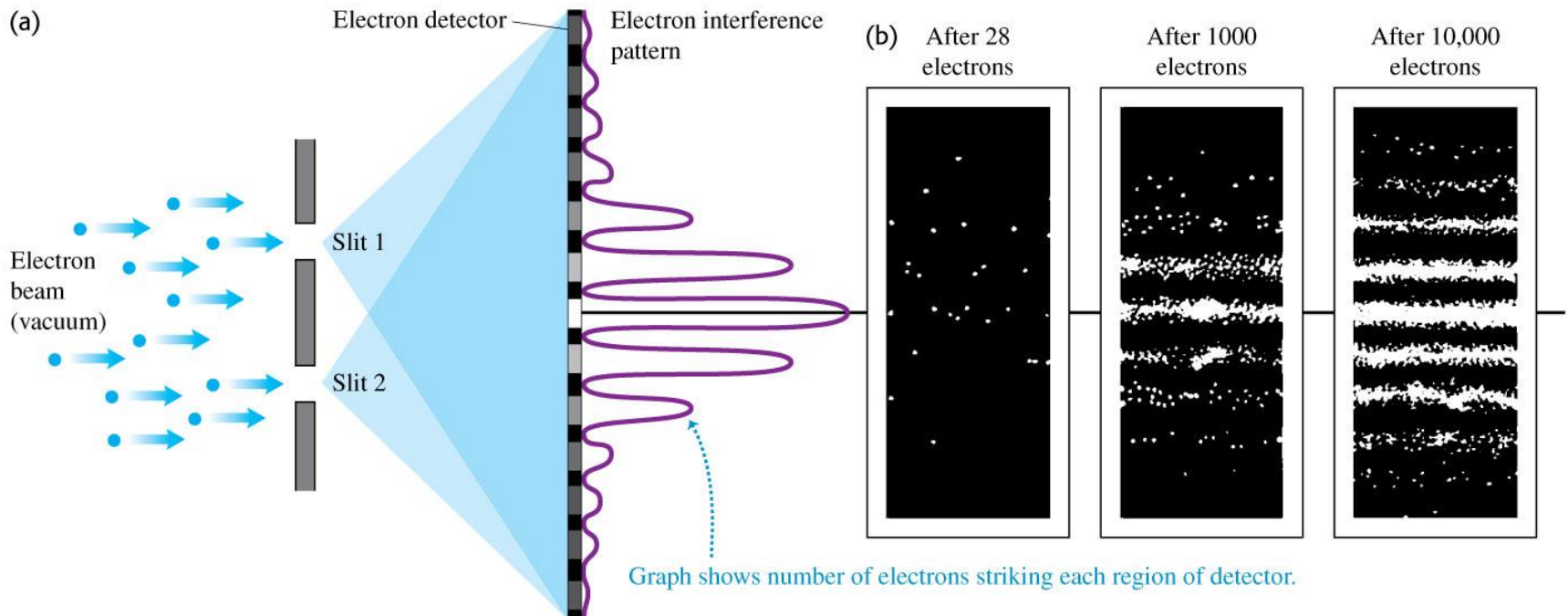
Sender elektron gjennom to spalter. Observerer karakteristisk interferensmønster for intensiteten av treff på skjermen: maksima for vinklar gitt av $d \sin \theta = m \lambda$

⇒ **bølgjenatur**

Men kvart elektron blir detektert på eit bestemt punkt på skjermen (kvite dottar i figuren)

⇒ **partikkelnatur**

Ein kan ikkje predikere kvar på skjermen eit elektron treff. Ein kan (vha. kvantemekanikk) kun predikere sannsynet for treff som ein funksjon av posisjonen på skjermen. Dette sannsynet er proporsjonalt med den observerte intensiteten.



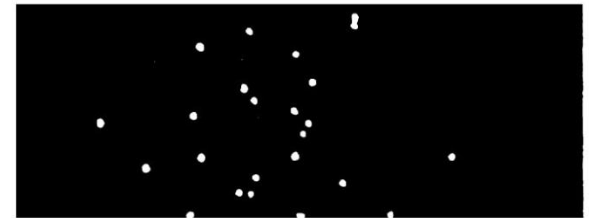
Dobbelspalteeksperimentet (framhald)

Dersom ein gjer observasjonar ved spaltene som gjer ein i stand til å finne ut kva spalte elektron går gjennom, forsvinn interferensmønsteret!

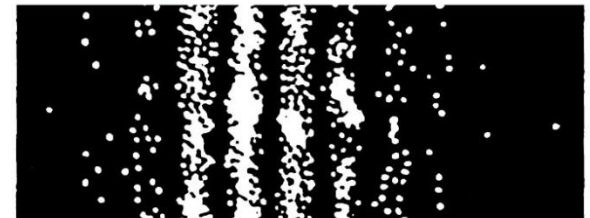
Ein kan kanskje lure på om interferensmønsteret oppstår pga. interferens mellom forskjellige elektron som går gjennom forskjellige spalter. Men det gjer det ikkje. Ein kan nemleg skru ned intensiteten på elektronstraumen så mykje at kun eitt elektron går gjennom systemet om gongen. Ein finn då at det same interferensmønsteret oppstår. Dvs. eit elektron «går gjennom begge spaltene» og interfererer med seg sjølv!

Same type interferensmønster finn ein dersom ein brukar andre partiklar (t.d. nøytron, foton) i dobbelspalteeksperimentet (sjå figuren til høgre for eit eksperiment med foton).

After 21 photons reach the screen



After 1000 photons reach the screen



After 10,000 photons reach the screen

