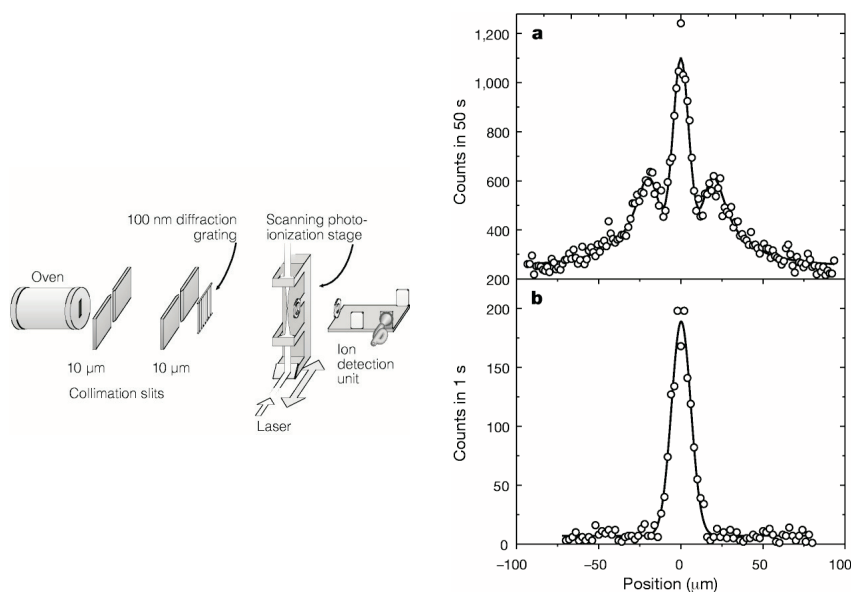


02

Diffraction och interferens



Interferens med C_{60} -molekyler. Till höger visas intensitetsfördelningen (a) med gitter och (b) utan gitter. Även partiklar uppvisar alltså vågegenskaper. (Arndt *et al.*, Nature **401** (1999) 680.)

Laborationens syfte är att du ska 1) få en grundläggande förståelse för diffraction och interferens och 2) lära dig använda en optisk spektrometer.

Förkunskapskrav är att du har grundläggande kunskaper om superpositionsprincipen och Huygens princip.

Du skall före laborationen läsa igenom detta lab-PM och tillhörande avsnitt i kursboken. Hemuppgifterna 1–10 på sidan 5 skall arbetas igenom före laborationstillfället.

1 Inledning

I den här laborationen skall vi studera ljusets vågegenskaper och särskilt fenomen som diffraktion och interferens. Vi kommer bland annat att se hur ljus böjs av när det passerar smala spalter och hur man kan använda gitter för att göra noggranna våglängdsbestämningar.

Interferensfenomen studerades av den välkände Isaac Newton redan på 1600-talet (Newtons ringar). Hans något mindre kände kollega, Francesco Maria Grimaldi från Bologna i Italien lär samtidigt ha gjort de första observationerna av diffraktion genom att iaktta ljusa band i skuggan bakom en stav. Ingen av dem kunde dock förklara sina observationer på ett tillfredställande sätt. Man hade problem med att förstå ljusets natur. Bestod ljuset av partiklar (korpuskler) eller var det fråga om någon slags vågrörelse? Newton förespråkade partikel- eller korpuskelmodellen. Idéerna om ljus som en vågrörelse grundlades av engelsmannen Robert Hooke och holländaren Christiaan Huygens under slutet av 1600-talet. Den senare introducerade därvid *etern* i dess moderna form som kom att bli ett seglivat begrepp. Under 1700-talet förblev korpuskelteorin förhärskande, mycket tack vare Newtons starka inflytande på den tidens vetenskapsmän. Den engelske läkaren, fysikern och egyptologen Thomas Young försökte vid tre tillfällen mellan 1801 och 1803 återuppliva vågteorin i uppläsningar av sina papper inför Royal Society. Efter experiment med dubbelspalter hade han lagt till en ny idé, interferensprincipen [1]:

”When two undulations, from different origins, coincide either perfectly or very nearly in direction, their joint effect is a combination of the motions belonging to each.”

Young utsattes dock för hård kritik. I Frankrike arbetade en annan anhängare av vågteorin, Augustin Jean Fresnel, oberoende av Young. Han lyckades bland annat beräkna diffraktionsmönster från olika sorters öppningar. Efterhand vann vågteorin mark. Man insåg via polarisationsexperiment att ljus måste vara en transversell vågrörelse och 1825 var anhängarna till korpuskelteorin få. Skotten James Clerk Maxwell sammanfattade 1865-1870 all kunskap om elektromagnetismen i sina fyra ekvationer. Ur dessa var det möjligt att visa att elektromagnetiska fält kunde utbreda sig som transversella vågor i etern. Utbredningshastigheten ($c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$) visade sig vara i stort sett densamma som den experimentellt uppmätta ljushastigheten. Slutsatsen var klar: ljus är en elektromagnetisk vågrörelse. Maxwell själv uttryckte det så här [1]:

”This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat,

and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.”

En solid teoretisk grund för förståelsen av ljus hade därmed lagts. Den klassiska elektromagnetiska teorin för ljus håller än idag (eterbegreppet har dock avskaffats), även om man nu ser den som en approximation till mer fullständiga teorier [1, 2, 3].

Under 1900-talet har man visat att även partiklar har vågegenskaper. Clinton Joseph Davisson och L.H. Germer rapporterade 1927 om experiment där elektroner sköts mot en nickelkristall [4]. I vissa riktningar observerades interferenstoppar i den spridda intensiteten. Resultaten kunde förklaras om man antog att atomerna i kristaller sprider elektronerna som vågor med våglängd $\lambda = h/p$, där h är Plancks konstant och p elektronernas rörelsemängd (en kristall kan sägas fungera som ett tredimensionellt diffraktionsgitter). Sedan dess har andra diffraktionsexperiment genomförts med elektroner, till exempel diffraktion vid en skarp kant. Man har även visat att tyngre partiklar har vågegenskaper. Bilden på framsidan av detta lab-PM visar hur fullerener, fotbollsformade C_{60} -molekyler, ger upphov till interferenstoppar efter att ha passerat ett gitter [5]. Fullerener är därmed de hittills tyngsta partiklar för vilka man kunnat påvisa vågegenskaper.

I den här laborationen behandlas grundläggande fenomen. Men steget till tillämpningar är inte så långt. Några blandade exempel:

- Optisk spektroskopi bygger på att man kan bestämma energin hos ljus och därigenom till exempel få detaljerad information om material på atomär nivå [6]. Detta kan göras med hjälp av gitter i spektrometrar (man kan även använda prisma-spektrometrar, Fabry-Perotinterferometrar eller fouriertransformtekniker). En av föregångarna inom spektroskopin var för övrigt Joseph Fraunhofer som tillverkade det första gittret 1823. I dagens laboratorium används lasrar och avancerad optik för att till exempel studera struktur och dynamik i glaser med hjälp av Ramanspektroskopi.
- Diffraktionstekniker används sedan början av 1900-talet för att bestämma strukturen på atomär nivå i olika kristallina material, från vanligt koksalt till biomolekyler i kristallin form [7]. Förutom röntgenstrålning, som är ljus med kort våglängd, kan elektroner och neutroner användas (partiklar har enligt kvantfysiken vågegenskaper). Typiska avstånd mellan atomer i fasta material är av storleksordningen $\text{\AA} = 10^{-10}$ m. De minsta objekt man kan se med vanliga mikroskop är av storleksordningen μm . Diffraktion är alltså en väldigt kraftfull teknik.

Med STM (sveptunnelmikroskop) kan man i och för sig ”se” enskilda atomer, men bara då dessa sitter på ytor.

- Diffraktionsoptik är ett relativt nytt forskningsområde [8]. Med hjälp av datorer och mikrolitografi kan små, avancerade gitter framställas, så kallade *kinoformer*. Kinoformer kan användas för att manipulera laserljus. Tillämpningsområden finns inom optoelektroniken och laseroptiken. Kinoformer kan till exempel komma till användning i extremt snabba A/D-omvandlare (se Ny Teknik 2000:24).
- Upplösningsförmågan i optiska instrument, till exempel våra ögon, är begränsad av diffraktion (även linsfel begränsar upplösningsförmågan). Titta på denna text genom ett litet hål i en bit papper, så kommer du se att upplösningen försämras. Upplösningsförmågan är relaterad till strålningens våglängd (Rayleighs upplösningskriterium). Detta är anledningen till att man med elektronmikroskop kan se mycket mindre föremål ($\sim \text{nm}$) än i vanliga ljusmikroskop ($\sim \mu\text{m}$). Elektroner med hög energi har nämligen mycket kortare våglängd än synligt ljus.

I nästa avsnitt presenteras apparaturen som används i laborationen. Sedan följer hemuppgifter (skall göras i förväg) och laborationsuppgifter.

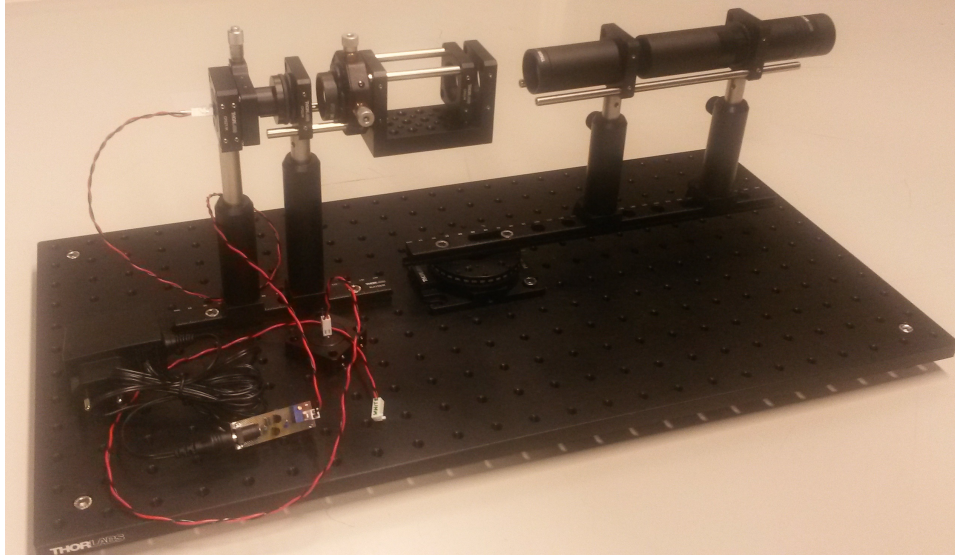
2 Apparatur

Diffraktions- och interferensmönster studeras lämpligen med en optisk spektrometer (se figur 1). En lampa med en smal spalt framför utgör en smal ljuskälla. Linser i kollimatoren bryter ljuset till parallella strålar (plana vågor) som infaller på diffraktionsobjektet (enkelspalt, dubbelspalt eller gitter). Utgående plana vågor samlas ihop i kikaren. Det resulterande diffraktionsmönstret kan beskådas genom att titta in i kikaren. Man ser då också ett hårkors. Kikaren är vridbar runt diffraktionsobjektet och under kikaren avläses vinkeln α .

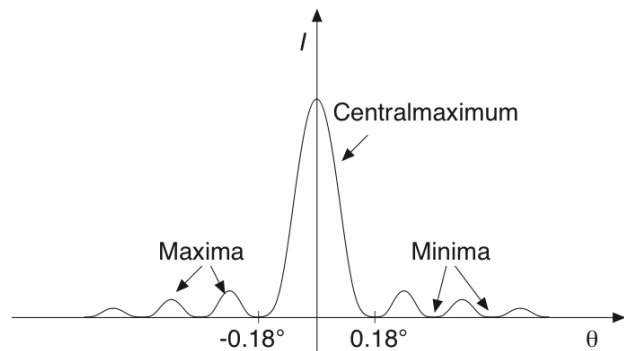
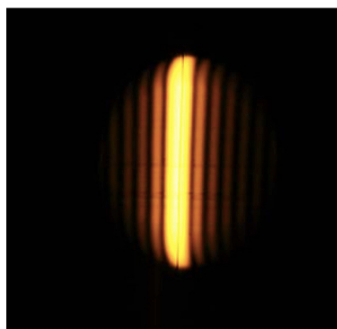
För att kunna se någonting, och för att villkoren för Fraunhoferdiffraktion (plana vågor in och ut) skall vara uppfyllda, måste man hitta en kompromiss där mönstret är skarpt samtidigt som det har tillräcklig intensitet. Detta uppnås med att justera kollimatorspalten.

Vad man ser när man tittar i spektrometers kikare kan vara något liknande fotot i figur 2 som visar ett mönster från en enkelspalt. För att läsa av en vinkel vrider man kikaren så att hårkorset hamnar på det ställe man vill läsa av och läser av vinkelskalan under kikaren. Med mikrometerskruvorna kan vridningen finjusteras.

Diffraktionsmönster kan också studeras med en laser som ljuskälla. Laser ger redan från början parallellt och koherent ljus, så någon spektrometer



Figur 1: Optisk spektrometer som används i laborationen.



Figur 2: Till vänster visas ett diffraktionsmönster från en enkelspalt. Till höger visas motsvarande intensitetsfördelning. Topparna svarar mot de ljusa linjerna (maxima) och dalarna mot de mörka (minima).

behövs ej. Mönster studeras i så fall på en skärm (titta aldrig in i en laserstråle).

Det mönster man ser kan man, oavsett experimentell metod, representera genom att rita intensiteten I som funktion av vinkeln. Man brukar då räkna vinklar från centralmaximumet. Detta kallas en *intensitetsfördelning*. Till höger i figur 2 visas intensitetsfördelningen för mönstret till vänster i samma figur.

3 Hemuppgifter

Uppgifter 1–10 skall göras före laborationstillfället. Till din hjälp finns ett kortfattat teoriavsnitt i bilaga 1 (se din lärobok för utförligare behandling).

1. Vilka villkor kännetecknar Fraunhoferdiffraktion och hur kan man på ett enkelt sätt uppfylla dessa villkor?
2. Använd Huygens princip för att kvalitativt förklara varför ljus böjer av när det passerar en smal spalt.
3. Härled, med ett enkelt resonemang på ett par rader, villkoret för intensitetsminima i mönstret från en enkelspalt ($b \sin \theta = m\lambda$, där $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, b är spaltbredden och λ ljusvåglängden). Rita figur.
4. Beskriv Youngs dubbelspaltexperiment. Vilka villkor måste allmänt vara uppfyllda för att ett interferensmönster skall kunna observeras?
5. Härled, på ett par rader, villkoret för intensitetsmaxima i mönstret från en dubbelspalt ($d \sin \theta = m\lambda$, där $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ och d är avståndet mellan spaltöppningarna). Rita figur.
6. Skissa intensitetsfördelningen från en dubbelspalt.
7. Beskriv hur ett diffraktionsgitter fungerar. Vad är principal- och sekundärmaxima?
8. Härled, med ett enkelt resonemang på ett par rader, villkoret för principalmaxima i mönstret från ett gitter ($d \sin \theta = m\lambda$, där $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Rita figur. Vilka antaganden gör du?
9. Hur skall ett gitter utformas för att diffraktionsfaktorns inverkan på intensitetsfördelningen ska bli så liten som möjligt?
10. Skissa intensitetsfördelningen från ett gitter med $N = 5$. Avståndet mellan spalterna är d och diffraktionens inverkan kan försummas. Hur förändras intensitetsfördelningen om a) gitterkonstanten ökas och b) antalet spalter ökas?

4 Laborationsuppgifter

Uppgift 1: Demonstration av modellspektrometer (utföres av laborationshandledare)

En spektrometer byggs på en optisk bänk i fyra steg enligt följande (se figur 3):

- a) Ordna parallella strålar från en vitljuslampa, sätt in spektrometergittret ($d = 1.67 \mu\text{m}$), och studera mönstret långt borta. Hur mäter man upp våglängden för t.ex. det gröna ljuset?
- b) Sätt in en lins bakom gittret och studera mönstret på en skärm. Hur får man nu fram avböjningsvinkeln för det gröna ljuset? Hur kan man mäta vinkeln om linsen är för liten för att fånga upp det avböjda ljuset?
- c) Ordna en markör på skärmen med hjälp av ett hårkors och ytterligare en lins. Se till att alla förstår strålgången.
- d) Modifiera spektrometern så att man kan betrakta mönstret direkt med ögat. Använd 6 V lampspänning och smal ingångsspalt.

Uppgift 2: Enkelspalt

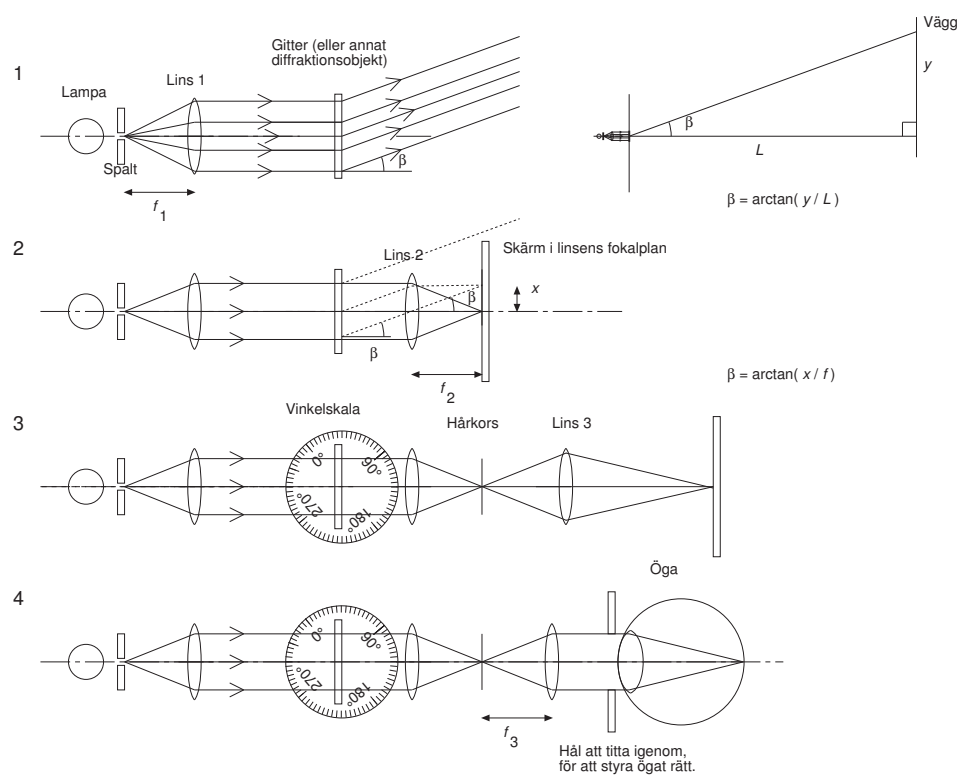
Använd en spektrometer för studera hur ljus böjs av när det passerar en enkelspalt (diffraction). Spaltens bredd b kan varieras kontinuerligt. Följande moment skall utföras (använd den gula ljusdioden med $\lambda = 591 \text{ nm}$):

- a) Skissa intensitetsfördelningarna från enkelspalten med spaltbredd 0.4 mm och 1 mm. Rita i samma skala. Kommentera eventuella skillnader.
- b) Använd enkelspalten med $b = 0.4 \text{ mm}$ och mät vinkeln till de tre första minimumen räknat från centralmaximum. Jämför med teoretiska värden.

Uppgift 3: Dubbelspalt

Studera interferens genom att titta på hur ljus beter sig vid passage genom en dubbelspalt.

- a) Skissa intensitetsfördelningen från dubbelspalten ("Blende mit Doppelspalt"). Se till att kollimatorspalten är optimalt inställd så att mönstret blir så tydligt som möjligt.



Figur 3: Fyra konfigurationer av modellspektrometern.

- b) Avskärma den ena av spalterna, till exempel med en bit papper, och rita den nya intensitetsfördelningen. Använd samma skala som ovan och jämför.
- c) Ser interferensmönstret från dubbelspalten ut som du förväntat dig? Vad beror eventuella skillnader på? Förklara varför mönstret ser ut som det gör.
- d) Bestäm spaltavståndet d . Mät över flera maxima för att förbättra noggrannheten. Verkar resultatet rimligt?

Uppgift 4: Gitter

I förra uppgiften tittade vi på en dubbelspalt ($N = 2$). Nu skall vi se vad som händer när antalet spalter (N) ökar.

- a) Skissa intensitetsfördelningarna från gitter med $N = 4, 5$ och 6 .
- b) Vad händer med lägena för principalmaxima, antalet sekundärmaxima och bredd och intensitet på principalmaxima när N ökas?

Öka antalet spalter ytterligare. Använd gittren med 20, 40 och 80 linjer/cm. Studera hur vinkeln mellan två principalmaxima beror av gitterkonstanten d .

- c) Vad händer med vinkeln mellan två principalmaxima om gitterkonstanten d halveras?
- d) Kan du nu se några sekundärmaxima? Vart tog de vägen?

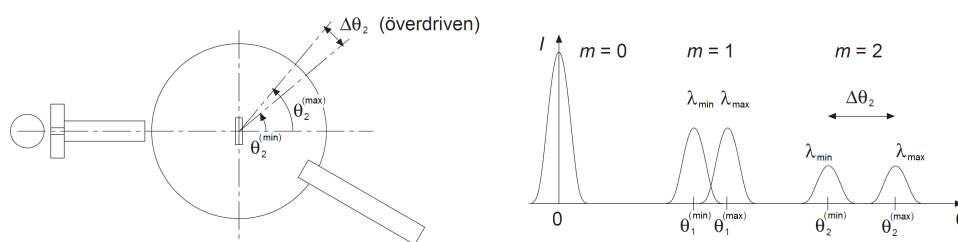
Använd nu spektrometergittret med 600 linjer/mm för att studera ljuset från den gula ljusdioden.

- e) Det står i specifikationerna att våglängden för dioden är $\lambda = 591$ nm. Är den monokromatisk?

Ljus som består av flera våglängder delas av ett gitter upp i sina individuella våglängdskomponenter. Du skall bestämma våglängdsintervallet för ljuset som emitteras av den gula ljusdioden, $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$. Våglängdsskillnaden kan bestämmas med spektrometern (figur 4). Ett sätt är att mäta vinkeln $\Delta\theta_m = \theta_m^{(\max)} - \theta_m^{(\min)}$ mellan intensitetsmaxima (av en viss ordning m) för våglängdskomponenterna på vardera sida intervallet. Genom att differentiera gitterekvationen ($d \sin \theta = m\lambda$) får vi våglängdsskillnaden (visa detta!)

$$\Delta\lambda = \frac{d \cos \theta_m}{m} \Delta\theta_m, \quad (1)$$

där θ_m är vinkeln till maximum för komponenten med kortast våglängd ($\Delta\theta$ måste anges i radianer).



Figur 4: Ljus som består av flera våglängdskomponenter separeras av ett gitter.

- f) Använd spektrometergittret (600 linjer/mm) och den gula ljusdioden. Bestäm $\Delta\lambda$. Verkar resultatet rimligt?

Uppgift 5: Gitter med vit ljuskälla

Byt ljuskälla till den vita ljusdioden. Använd gittret med $N = 7$ på spaltplattan. Studera hur vinkelavståndet mellan två maxima beror av ljusets våglängd. Mät vinklarna till det röda och det blå ljuset.

- Vad händer med vinkeln mellan två maxima om våglängden ökar?
- Vilken viktig formel har verifierats i och med observationerna i denna och förra uppgiften?

Använd spektrometergittret (600 linjer/mm) med $d = 1.67 \mu\text{m}$ för att bestämma ögats känslighet. Mät vinkeln till 1:a ordningens spektrum, dels för det violetta ljusets början (det vill säga gränsen till ultraviolett) och dels för det röda ljusets slut (gränsen till infrarött) på båda sidorna om centralmaximum.

- Beräkna våglängderna. Jämför resultaten med tabellvärden.

Referenser

- [1] E. Hecht. *Optics*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 3:e upplagan, 1998. Gedigen men något pratig kursbok i optik. Mycket av historiken i inledningen är hämtad från denna bok (en del är också hämtat från Ditchburn).
- [2] R. W. Ditchburn. *Light*. Blackie & Son Limited, London, 2:a upplagan, 1963. Fyllig optikbok av det äldre slaget.

- [3] R. P. Feynman. *QED The strange theory of light and matter*. Penguin Books, Harmondsworth, 1990. Populärvetenskaplig men seriös bok om QED (kvantelektrodynamik), den bästa modell som finns idag för att beskriva hur ljus och materia uppför sig och växelverkar. Skriven av en av männen bakom QED.
- [4] C. Davisson och L. H. Germer. *Nature*, 119:558, 1927.
- [5] M. Arndt, O. Nairz, Julian Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw och A. Zeilinger. *Nature*, 401:680, 1999.
- [6] S. Svanberg. *Atomic and molecular spectroscopy*. Springer, Berlin, 1992. Introduktion till spektroskopi.
- [7] L. Bragg. *Scientific American*, s. 58, juli, 1968. Introduktion till röntgendiffraktion. För mer detaljer, se någon bok om fasta tillståndets fysik.
- [8] J. Bengtsson. *Diffraction optics design*. Doktorsavhandling, CTH, 1999.