

# Om diffraktion af laserlys og kvantemekanikkens snarlige fald

PETER PEDERSEN, Skive Gymnasium – LMFKbladet nr. 8 1989

Meddelelsen om den kolde fusion har sat mit sind i oprør i en sådan grad, at jeg nu har besluttet at offentliggøre nogle overvejelser og eksperimenter, som jeg har brændt inde med i snart 15 år. Ganske vist er der jo ikke endnu opnået enighed om, hvorvidt kold fusion er fup eller fakta, men **hvis** det er faktum, er det klart, at det betyder den hidtil alvorligste udfordring for kvantemekanikken. Denne artikel handler iøvrigt overhovedet ikke om Pons og Fleischmanns fantastiske påstand, men derimod om min egen vej væk fra det etablerede.

At kvantemekanikkens billede af atomet er en absurditet, bestemte jeg mig til allerede i slutningen af 3.g på Viborg Katedralskole. Jeg nægtede ganske enkelt at købe forestillingen om, at elektronerne som i sig selv vistnok småbitte størrelser hopper rundt på en eller anden principielt uberegnelig måde og derved giver atomet en fast form. Jeg kunne nok fornemme, at teorien havde en vis matematisk elegance og slagkraft, men at tro, at den repræsenterede en fysisk virkelighed var mig umuligt. Så da jeg startede på Aarhus Universitet i 1969, var jeg fuld af naiv reformiver. Jeg har holdt fast til denne dag, men på trods af et utal diskussioner med høje som lave er jeg vistnok forblevet alene i mistroen.

Det første spørgsmål, man som revolutionær må tage stilling til, er bølge-partikel dualiteten og usikkerhedsrelationen og den dertil knyttede filosofi. Det tog mig en time at nå frem til en fast overbevisning om, hvorledes disse ting forholder sig. Vi har en række eksperimenter, hvori lys uden nogen form for diskussion opfører sig som bølger. Vi har andre eksperimenter, hvor lys opfører sig som partikler. Lægger man nu to og to sammen, når man uundgåeligt frem til, at der i optiske forsøg optræder **såvel** bølger som partikler. Det er givetvis fotonerne, der påvirker nethinden, så vi konkluderer, at lys består af partikler. Disse partikler må imidlertid sædvanligvis være ledsaget af bølger, som kan påvirke dem og dirigere

dem ind i bestemte retninger, specielt i forbindelse med interferenseksperimenter. Det synes nødvendigt at antage, at fotonerne under passende omstændigheder ved vekselvirkning med atomer selv kan skabe bølger med den rigtige bølgelængde. Hvorledes skulle man ellers kunne forstå, at f.eks. lys fra stjernerne stadig kan udvise interferens, da bølgenes amplitude må aftage med afstanden? Fotonernes virkninger kender vi, men der mangler naturligvis et bevis for **bølgenes** selvstændige eksistens.

Ovenstående idé er så indlysende, at andre nødvendigvis må være kommet på den. Den første var de Broglie, der opfattede bølgerne som "pilotbølger" for partiklerne. Han opgav tanken igen, vistnok fordi han ikke kunne forstå, hvorledes sådanne bølger skulle kunne opsplittes i forhold til en partikel i interferensforsøg. Først i januar 1952 genfremsættes teorien af David Bohm i en artikel i Physical Review. Han giver her en helt klar fremstilling af, hvorledes elektroners adfærd i et dobbeltspalteeksperiment kan fortolkes deterministisk (på samme måde som den statistiske mekanik er deterministisk). Jeg har i fig. 1 søgt at illustrere ideen, men vil iøvrigt overlade det til læseren selv at lave en fortolkning. Desværre betyder Bohm, at hans teori altid fører til samme intensitetsfordeling som kvantemekanikken. Dette forekommer mig meget usand-

synligt. Hvis bølgerne har en reel selvstændig eksistens og således uden tvivl repræsenterer energi – så **må** der kunne forekomme virkninger, som ikke er forudset i kvantemekanikken, især efter laserens fremkomst. Her må vi jo antage, at alle de fra atomerne udgående småbølger er i fase og dermed danner et usædvanligt stærkt samlet felt.

Ud fra denne tanke begyndte jeg at eksperimentere med lasere i de lange gange på Fysisk Institut (om natten). Da bølger har det med at brede sig til siden, synes det sandsynligt, at de i nogen afstand er mærkbare også uden for selve laserbeamen. Ved på passende måde at sprede lys (fotoner) ud i dette område, skulle det så være muligt at se interferens i situationer, der ikke er tilladt ifølge den etablerede teori. Det er faktisk utroligt let at frembringe usædvanlige intensitetsfordelinger, og selv om jeg egentlig er sikker på, at disse er i modstrid med kvantemekanikken, kræves der for et fuldgyldigt bevis målinger med en følsom detektor (følsom fordi de pågældende interferensstriber er meget smalle), og sådant apparatur har jeg ikke haft adgang til. Under min søgen faldt jeg imidlertid over en ny type diffraktionsmønster, som intetsteds er beskrevet i litteraturen, og som ganske utvetydigt modbeviser den traditionelle diffraktionsteori, baseret på Huygens princip. Det er disse forhold, resten af denne

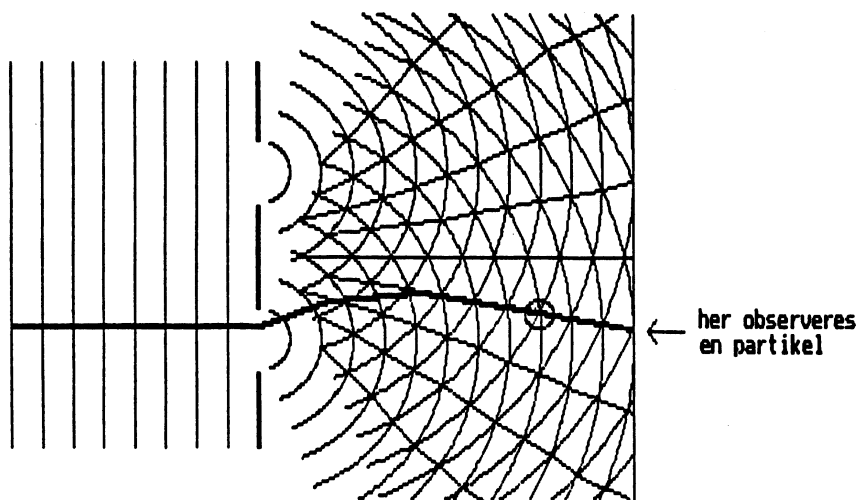


Fig. 1

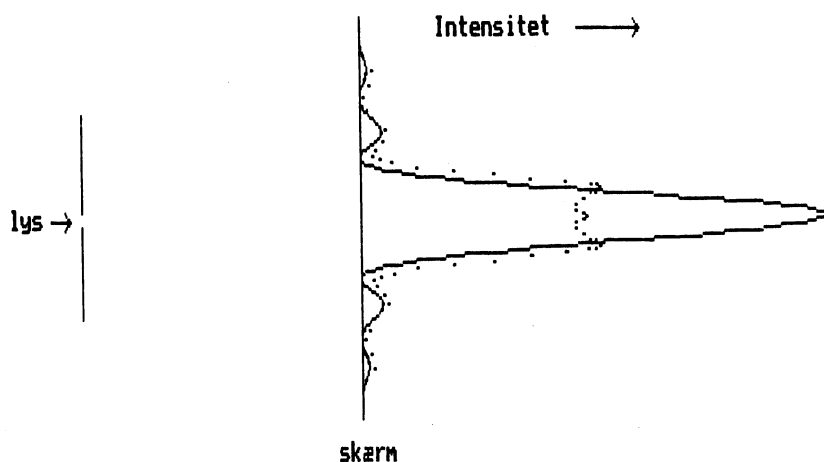


Fig. 2

artikel handler om. Eksperimenterne er helt banale, og af udstyr kræves kun en skolelaser, nogle skærme og et målebånd.

Lad mig først minde om forskellen på diffraktion og interferens. Diffraktion handler om de mønstre, der opstår ved lysets bøjning om en kant eller gennem en enkelt spalte. Interferens er resultatet af overlejringen af lys fra to eller flere spalter. Ud fra denne definition skulle man tro, at diffraktion var teoretisk simplere end interferens, men forholdet er det omvendte. Det er let at forstå interferensmønstre, hvorimod diffraktions-teorien fra starten har voldt store kvaler.

På fig. 2 er vist en situation, hvor et parallelbundet lys sendes ind mod en smal spalte. I nogen afstand fra spalten observeres nu det såkaldte Fraunhofer mønster med et bredt centralt maksimum, omgivet af en række mindre ækvistant placerede maksima og minima. Intensitetsfordelingen er illustreret med den fuldt optrukne kurve. Det første forsøg på forklaring blev givet af Thomas Young, der gjorde den naturlige antagelse, at der spredtes nye bølger fra spaltens to kanter. Disse bølger vil naturligvis interferere, og giver faktisk den rigtige afstand mellem toppene. Desværre forudsiges der maksimum, hvor der ses minimum og omvendt! Efter denne fiasko blev det Fresnel, der reddede bølge-teorien ved at genindføre Huygens princip og supplere det med ide-

en om interferens. Ifølge denne nu universelt anerkendte model fremkommer diffraktionsmønstret ved superposition af elementarbølger fra samtlige punkter af bølgefronten i spalteåbningen. Det er et typisk eksempel på en teori, der stiller sig tilfreds med formelle matematiske betragtninger og lader hånt om den fysiske intuition. Sagen er, at det jo er umuligt – selv i en ætermodel – at give nogen fornuftig grund til, at der netop skulle udgå bølger fra punkter i **åbningen**.

En spalte kan opfattes som værende begrænset af to skærme, stillet ved siden af hinanden. Tilfældigt kom jeg ved mine laserforsøg til at forskyde disse skærme i forhold til hinanden langs strålingen. Dette gav straks anledning til nye smuk-

ke og meget skarpe diffraktionsmønstre. Opstillingen samt to mønstre er skitseret på fig. 3. Afstanden  $a$  mellem kanterne bør være nogle cm, og afstanden  $b$  fra den sidste kant til observationsskærmen nogle m. I den øverste opstilling ses et antal minima (måles intensiteten i disse, er den nul), som ligger tættere og tættere, jo længere man kommer væk fra den oprindelige laserstråle. Ser man på den nederste opstilling, er placeringen af minima og maksima i alt væsentlig den samme, men parallelforskudt opefter. Forskellen er, at forbindelseslinien mellem kanterne (forlænget til punktet  $O$  på skærmen) er rykket til den modsatte side af laserstrålen, og det virker herved som om et enkelt minimum er "druknet" i det intense centrale maksimum, som svarer til den oprindelige uafbøjede stråle, men er bredt noget ud i forhold til den. Virkelige eksperimentelle kurver er vist i fig. 4a og 4b. De er fremkommet ved at lade papirbanen på en  $X-t$  skriver trække en lille fotocelle gennem mønstret, samtidigt med at skriveren registrerede signalet.

Anbringer man en **enkelt** skærm i laserstrålen, ses en vifte af lys, der breder sig til begge sider af den oprindelige stråle, altså også i høj grad ind i "skyggeområdet". Når man derfor vil forklare mønstrene i fig. 3 og fig. 4, er det umuligt **ikke** at tænke på interferens mellem bølger,

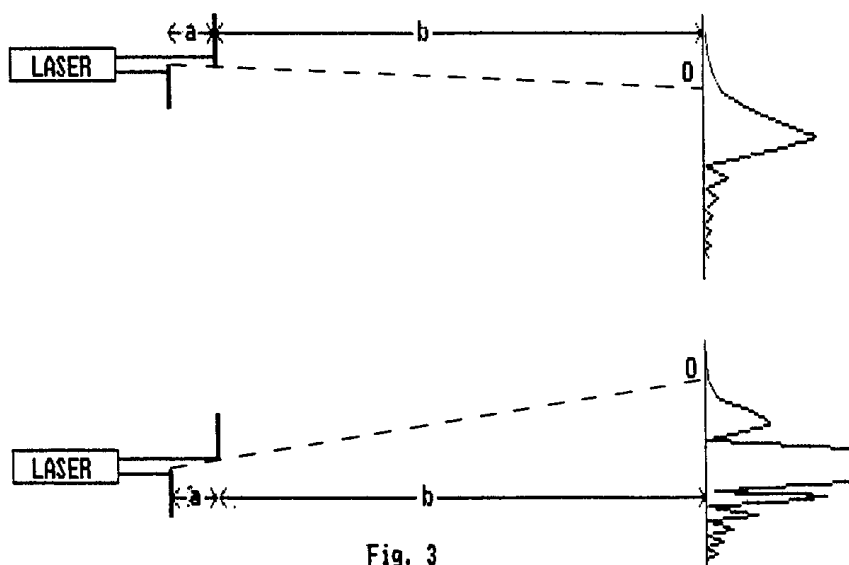


Fig. 3

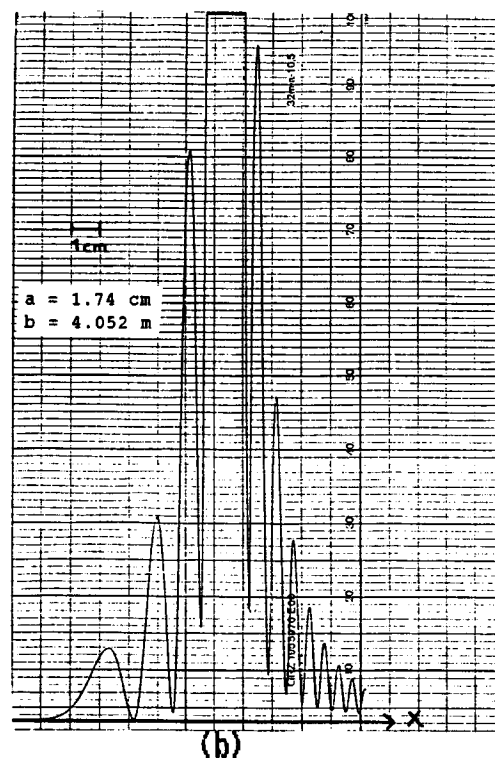
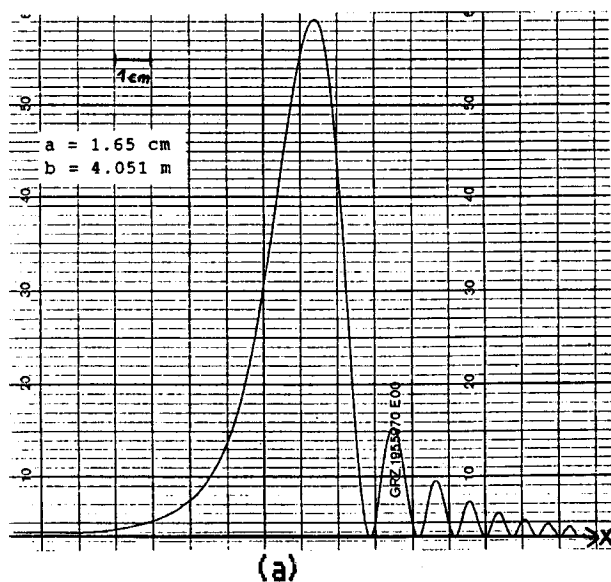


Fig. 4

udgående fra de to kanter (jeg takker min gode ved Lars Karlsen, fordi han gjorde mig opmærksom på dette). Modsat er det mildt sagt svært at se, hvilke flader man skulle indlægge ved en anvendelse af Huygens princip. Det er dog også klart, at den klassiske situation i fig. 2 er et specialtilfælde af det her beskrevne fænomen. Man skal jo blot forestille sig, at afstanden  $a$  i opstillingen på fig. 3 nederst går mod nul. Prøv at udføre eksperimentet! Det er derfor relevant at overveje, om ikke Youngs teori kan modificeres på en sådan måde, at den trods alt kan forklare diffraktion gennem en spalte.

På fig. 5 øverst har jeg illustreret Youngs hypotese, som den fungerer for et planparallelt bølgetog, der kommer ind mod en enkelt skærm. Den oprindelige bølge afskæres skarpt og fortsætter kun uden for skærmen. Til gengæld spredes eller reflekteres en cirkulær bølge fra kanten. Denne starter i modfase med den oprindelige bølge i overensstemmelse med de almindelige refleksionslove. Ved nærmere eftertanke forekommer denne figur ikke helt rimelig. Specielt virker det unatur-

ligt, at den oprindelige bølgefront skulle blive afskåret skarpt og "geometrisk" ved kanten. Vi har jo alle set, hvorledes vandbølger bøjer ind i skyggeområdet som udtryk for, at bølgeamplituden ikke kan falde diskontinuert til nul. Jeg foreslår derfor den ændring, der er vist nederst på fig. 5. Den oprindelige bølge fortsætter uforstyrret uden for skærmen, men afbøjes cirkulært ind i skyggeområdet. Denne cirkulære bølge har centrum

i kanten og er naturligvis i fase med den oprindelige bølge. Endvidere antager jeg som Young, at der spredes en bølge fra kanten i modfase med den oprindelige. I modsætning til Young regner jeg dog ikke med, at denne i væsentlig grad mærkes i skyggeområdet eftersom spredningen må ske på kantens forside, og denne er i alt fald i mine eksperimenter mange bølgelængder bred.

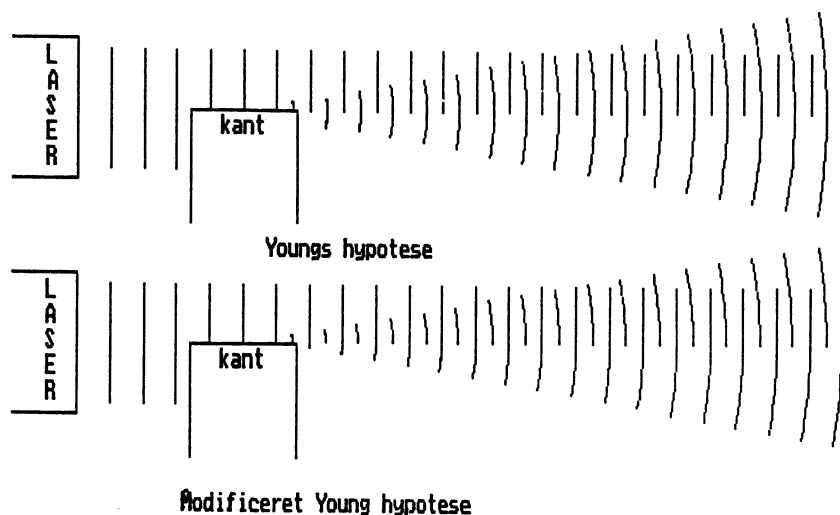


Fig. 5

Om man vil, kan man opfatte fig. 5 som et bud på den kvalitative karakter af løsningen til bølgeligningen. Mange vil måske mene at vide, at dette matematiske problem forlængst er løst af Kirchhoff, og at resultatet svarer til Huygens princip. Kirchhoffs løsning er imidlertid ikke stringent, idet han havde nogle problemer med randværdibetingelserne, og vi ved jo, hvor kritisk afhængig løsningen til en differentialligning er af netop disse betingelser. Den eneste eksakte beregning er mig bekendt af Sommerfeld for en uendelig tynd skærm af en uendelig god leder, og hans resultat er identisk med Youngs hypotese!

Anvender vi den modificerede hypotese på fig. 2, er det klart, at vi har fået indført et faseskift på  $180^\circ$  mellem de interfererende bølger fra kanterne, hvorfor teorien nu giver den rigtige placering af de ydre maksima og minima. Der er dog ingen indlysende grund til, at intensiteten i et minimum skal være præcis nul, som man finder eksperimentelt. Endnu værre er det, at der tæt på centrum må forventes i det mindste lokalt minimum, men som bekendt er der et kraftigt maksimum. Jeg har antydnet en mulig intensitetsfordeling med den punktformede kurve. Der er intet håb om at kunne bringe denne kurve i detaljeret overensstemmelse med den fuldt optrukne eksperimentelle. Ikke desto mindre vil jeg foreløbigt ignorere dette tilsyneladende alvorlige problem og i stedet se på, i hvor høj grad hypotesen kan bruges til at forklare mine egne eksperimenter.

På fig. 6 betegner  $O$  som før forbindelseslinien  $K_1K_2$  mellem kanterne forlængt til skæring med observationsskærmen. Endvidere betegner  $M$  positionen af et maksimum eller minimum; sammenlig med fig. 3 øverst.  $x$  er afstanden  $OM$ . I punktet  $O$  – svarende til  $x = 0$  – vil de interfererende bølger være i modfase, og der vil derfor være minimum. Bølgen fra  $K_1$  er nemlig i fase med den oprindelige bølge, da vi befinder os i "skyggeområdet" for  $K_1$ . Bølgen fra  $K_2$  er derimod spredt (eller reflekteret) og følger faseforskudt

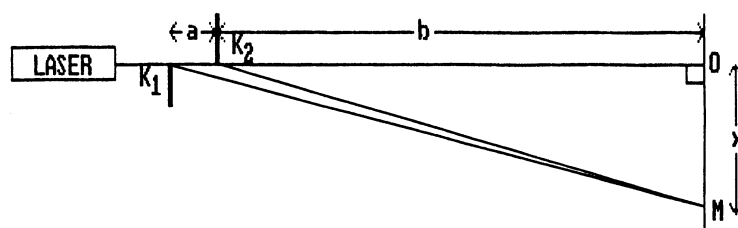


Fig. 6

$180^\circ$ . Vejforskellen mellem de to bølger er på dette sted  $K_1O - K_2O = a$ . Bevæges  $M$  bort fra  $O$  formindskes vejforskellen, og for hver gang den er mindsket med en halv bølgelængde fås et maksimum eller minimum. Betingelsen for minimum eller maksimum er derfor

$$K_1M - K_2M = a - n \cdot \lambda$$

$$\sqrt{x^2 + (a+b)^2} - \sqrt{x^2 + b^2} = a - n \cdot \lambda$$

hvor  $\lambda = 632,8$  nm er bølgelængden, og  $n$  er et af tallene  $0, \frac{1}{2}, 1, 1\frac{1}{2}, 2, 2\frac{1}{2}$  o.s.v.

Man kan nu lave en simpel Taylorapproximation af de to kvadratrødder. Hvis man er lidt utryk ved at trække to sådanne approksimationer fra hinanden, kan man i stedet for først kvadrere på begge sider af lighedstegnet, og så lave rækkeudvikling af den herved fremkomne ene kvadratrod. I begge tilfælde finder man efter en smule regneri, at der for små  $x$  gælder

$$x = \sqrt{\frac{2\lambda(a+b)b}{a}} \sqrt{n}$$

I praksis er det umuligt at fastlægge punktet  $O$ 's beliggenhed med nogen grad af nøjagtighed.  $x$  vil derfor kun være kendt på nær en arbitrær konstant. I fig. 7 er med trekanten vist en typisk måleserie svarende til opstillingen fig. 3 øverst. Hver trekant svarer til et minimum (det første er ubestemt og ikke medtaget). Rent praktisk foretoges målingerne ved at lægge et stykke papir på observationsskærmen og markere de meget skarpe minima med en blyant. Når  $x$  afbildes som funktion af  $\sqrt{n}$  forventes ifølge ovenstående en ret linje med hældning

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\lambda(a+b)b}{a}}$$

Som det ses, er overensstemmelsen særdeles fin. Hældningen er bestemt med mindste kvadraters metode. Hvis man i stedet forsøger sig med at antage, at de to bølger begge starter i fase i forhold til den oprindelige bølge (Youngs egen hypotese), viser det sig, at punkterne ikke længere ligger så pænt på linie, og at der nu er en afvigelse mellem den eksperimentelle og teoretiske hældning på over 10 %.

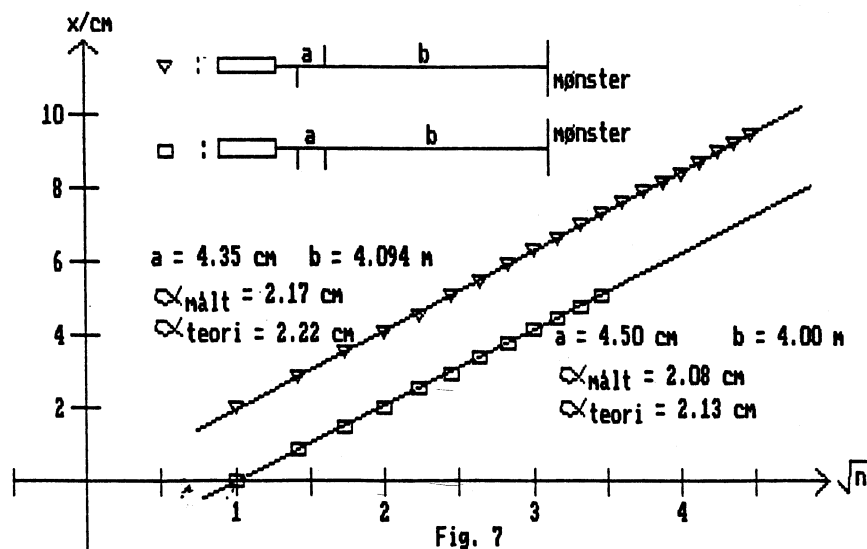
Med firkanterne er vist en lignende måleserie, men nu med de to skærme placeret på **samme** side af laserstrålen. Dette giver nøjagtig samme type diffraktion, hvilket jeg anser for en meget vigtig pointe. Det forekommer nemlig komplet umuligt at forestille sig **nogen** teori, baseret på superposition af Huygens bølger fra passende indlagte matematiske flader, der kan give ens resultat, uanset om forhindringerne er på samme eller modsatte side af laserbeamet.

Igen er overensstemmelsen med teorien fin. Som før har jeg antaget, at de interfererende bølger er i modfase i punktet  $O$ . Dette må antyde, at bølgen fra kant 2 er fremkommet ved spredning af den **spredte** bølge fra kant 1, hvilket stemmer med, at kant 2 i det pågældende forsøg var skubbet lidt ind foran kant 1. I andre situationer må man forestille sig, at faseforholdene er anderledes, men det har jeg ikke undersøgt nærmere.

Endelig har jeg i fig. 8 undersøgt den eksperimentelle kurve i fig. 4b, svarende til en opstilling som fig. 3 nederst. Igen er  $x = 0$  valgt vilkårligt, men tilsyneladende heldigt. Da jeg her har en kvantitativ intensitetsfordeling, er det muligt også at udmåle maksima. Med samme antagelser



angående faserne som før, skal det første maksimum svare til  $n = 1/2$ , det efterfølgende minimum til  $n = 1$  o.s.v. indtil  $n = 3$ . Det brede centrale maksimum kan naturligvis ikke indpasses i dette mønster (det har tydeligvis at gøre med det oprindelige beam). Her er der "forsvundet" mindst et minimum. Det første minimum efter den centrale plet antages at svare til  $n = 4 1/2$ , idet bølgerne på denne side har **samme** fase i forhold til den oprindelige bølge. Atter ligger punkterne fint på linje, omend måske ikke helt så overbevisende som i fig. 7. Afvigelsen mellem den målte og teoretiske hældning er 6 %, men det regner jeg med skyldes måleusikkerheden på  $a$ , da  $a$  her er lille.



Den modificerede Young hypotese giver altså en udmærket forklaring af maksima og minima i de her omtalte diffraktionsmønstre, men igen er det indlysende, at der ikke er noget håb om en detaljeret beskrivelse af intensiteterne, især i situationer som fig. 3 nederst og fig. 4b. For at antyde, hvorledes dette problem sandsynligvis kan klares, vil jeg vende tilbage til min tolkning af bølge-partikel dualiteten. Ifølge denne er det jo fotonfordelingen, der registreres, og ikke bølgens intensitet, og jeg ser ingen grund til at formode, at disse to størrelser altid er i detaljeret overensstemmelse. Der vil antagelig være en generel tendens til, at fotonerne er "pænere" fordelt end bølgerne. Bølger og partikler spredes i vifter fra hver kant, og der dannes i rummet et sæt interferenskurver. Det synes rimeligt at antage, at fotonerne vil tendere mod at bevæge sig vinkelret på bølgefronterne. Ved passage af kurver, der repræsenterer konstruktiv interferens, vil partiklerne modtage knæk i den pågældende retning. Forudsat at begge bølger har passende stor amplitude, vil en given foton efter et passende antal passager og knæk til sidst bevæge sig i en af interferensretningerne. Selv om de to bølger ikke har helt samme amplitude, kan man på denne måde udmærket forestille sig, at der til sidst overhovedet ikke vil være fotoner i et interferensminimum.

Ovenstående gælder ikke tæt på udbredelsesretningen for den oprindelige bølge. Hvis f.eks. i fig. 2 en foton fra spalten bevæger sig ind i det centrale bølgeminimum, vil den ikke passere kurver med konstruktiv interferens og følger ikke blive afbøjet yderligere. På dette sted bliver der derfor fotomaksimum, eftersom antallet af fotoner, der bevæger sig netop i denne retning naturligvis vil være særligt stort.

For at opsummere, mener jeg her helt utvetydigt at have modbevist den klassiske diffraktionsteori, baseret på Huygens princip, og jeg har som alternativ antydning en kombineret bølge-partikel model. Det er interessant, at Newton forestille-

de sig, at hans lyspartikler bevægede sig i en æter, hvor der ind imellem opstod nogle "rystelser". Der melder sig straks en række interessante spørgsmål. Er det muligt lige så let at lave to-kant diffraktion med almindelig lys? Hvis ja, hvorfor har fænomenet da været overset siden 1820? Har diffraktionsmønstre lavet med vand- eller lydbølger – hvor der garanteret ikke optræder "fotoner" – samme udseende som ved lys? Hvad med radio- eller mikrobølger? Jeg mener, at det må være helt i den nye bekendtgørelsens ånd at give sig i kast med sådanne spørgsmål. Man kunne f.eks. invitere eksperter til at give en forklaring.

