

Niels Bohrs indsats i fysikken

Af Christian Møller og Mogens Pihl

Niels Bohrs første videnskabelige arbejde er, som nævnt andet steds i bogen, den besvarelse af en prisopgave, stillet af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, for hvilken han i 1907 fik guldmedaljen, og som ligger til grund for hans første offentliggjorte afhandling i *Philosophical Transactions of the Royal Society* i 1909, der blev efterfulgt af en anden afhandling fra samme emnekreds i *Proceedings of the Royal Society* 1910.

Det drejer sig i disse afhandlinger om omhyggeligt og sindrigt gennemførte eksperimentelle undersøgelser over *svingninger af væskestråler* betinget af overfladespændingen, ledsaget af en udvidelse af en herom og om væskedråbers svingninger fremsat teori af Rayleigh. Mange år senere vendte Bohr tilbage til denne problemkreds, nemlig da han i årene kort før den sidste verdenskrig udviklede en teori for visse processer i atomkernerne, der bygger på en sammenligning af disse kerner med væskedråber, der er bragt i svingninger under særlige forhold, hvilket vi senere vil gå lidt nærmere ind på.

Alle Bohrs øvrige afhandlinger er af teoretisk karakter, men han bevarede stedse en stærk interesse for den eksperimentelle forskning, til hvis gennemførelse han ofte var i stand til at give gode råd. Hans store forståelse herfor blev af væsentlig betydning for mange af de eksperimentelle arbejder, der udgik fra det af ham oprettede *Institut for Teoretisk Fysik*, hvor brugen af ordet »Teoretisk« sigter på, at der her skulle foregå en grundforskning, og ikke på en eksklusiv brug af teoretiske eller matematisk-fysiske metoder.

Det næste arbejde er doktordisputatsen fra 1911 om *metallernes elektronteori*. Dette meget betydningsfulde værk står nu for os som slutstenen på den af Drude, J. J. Thomson og Lorentz indledte udvikling. Formålet var at forklare metallernes egenskaber – særligt deres evne til at lede varme og elektricitet – på den klassiske mekaniks og elektrodynamiks grundlag udfra forestillingen om forholdsvis frit bevægelige elektroners tilstedeværelse i disse stoffer. I dette arbejde viser Bohr både bærekraften

af de klassiske teorier anvendt på denne problemstilling og den begrænsning, disse teorier her møder. Men det antydes endnu ikke hvilke fundamentalt nye synspunkter, der er nødvendige.

I 1913 fandt så det store gennembrud sted, der indledte en ny epoke i fysikkens historie. I dette år offentliggjorde Bohr seks afhandlinger, i hvilke et væld af gamle og nye fænomener pludselig bragtes i forbindelse med hinanden og anskuedes ud fra en dybere sammenhæng. En sammenhæng, der ganske vist afslørede en vidtgående begrænsning i rækkevidden af den klassiske fysiks forestillinger og teorier, men som dog samtidig indeholder en klar forståelse af, at den klassiske fysik bevarer sin gyldighed inden for det erfaringsområde, hvoraf den er opstået. Interessen for samspillet mellem de klassiske teorier, der er en rationalisering af dagliglivets fysiske erfaringer, og de til forståelsen af visse atomfysiske erfaringer nødvendige, helt nye træk var, som vi skal se, et af hovedmotiverne i Bohrs forskning.

I det første arbejde fra dette begivenhedsrige år bygger Bohr endnu helt på den klassiske mekanik. Rutherford, hos hvem han havde studeret i nogle inspirerende måneder i Manchester, havde jo i 1911 opstillet sin atommodel. Ifølge denne består hvert grundstofatom af en positivt ladet kerne, hvori praktisk talt hele atomets masse er samlet, og omkring hvilken befinder sig et for grundstoffet karakteristisk antal negativt ladede partikler, elektroner, således at atomet er neutralt udadtil. På grundlag af denne model undersøger Bohr nu, hvorledes bevægede, elektrisk ladede partikler bremses ved gennemgang gennem stof. Der foreligger – ved vi nu – netop her et særtilfælde, hvor den klassiske mekaniks love er gyldige med rimelig tilnærmelse. Det var ud fra eksperimentelle undersøgelser af sådanne partiklers passage gennem tynde metalhinder, at Rutherford var nået frem til sin atommodel, idet han opdagede, at de positivt ladede alfa-partikler sommetider afbøjes stærkt – ja, en sjælden gang endog kastes tilbage i en retning næsten modsat af indfaldsretningen – hvilket kun kan forklares ved, at der i metalhinden findes relativt meget tunge, positive ladninger, nemlig atomkernerne, der frastøder alfa-partiklerne, når de kommer i nærheden af dem. Bohr undersøgte nu teoretisk, hvad der sker med sådanne elektrisk ladede partikler, når de passerer gennem tykkere lag af stof.

Dette problem om *ladede partiklers passage gennem stof* tog han op ved flere, senere lejligheder, og så sent som i 1948 offentliggjorde han en sammenfattende afhandling om dette emne i Det Kgl. Danske Videnska-

bernes Selskabs Meddelelser, der blev så efterspurgt, at det har været nødvendigt at trykke den i stadig nye oplag.

Det var dog de tre hovedafhandlinger om *atomernes og molekylernes struktur* fra 1913, som markerede det egentlige gennembrud, der så i tiden indtil omkring midten af tyverne – hvor det næste gennembrud fandt sted – efterfulgtes af en rig udvikling både med hensyn til den mere detaljerede og forfinede udformning af de af Bohr opstillede principielle metoder til at angribe atomfysikkens problemer på, og hvad angår disse metoders anvendelse til forklaring af et væld af erfaringer om stoffernes fysiske og kemiske egenskaber. Med den plads, der her står til rådighed, er det selvfølgelig ikke muligt at gå i enkeltheder, men vi skal forsøge at give et indtryk af grundtankerne i Bohrs atomteori og nogle af de vigtigste resultater, han nåede frem til. Dernæst vil vi omtale hans ligeledes overmåde betydningsfulde bidrag til afklaringen af den erkendelsesteoretiske situation, der begyndte at aftegne sig for fysikerne efter det næste gennembrud omkring midten af tyverne, og som han selv længe havde forudset og været optaget af. Endelig vil vi antyde hans bidrag til forståelsen af visse processer, der foregår inde i tunge atomkerner, hvor hans indsats blev af afgørende betydning for indledningen af den udvikling, der førte til kerneenergiens frigørelse.

Udgangspunktet for Bohrs atomteori er erkendelsen af, at Rutherfords atommodel sammenholdt med den klassiske fysik ikke kan forklare den *stabilitet*, vi alle fra dagliglivets erfaringer ved, at atomerne er i besiddelse af. Systemet af den positive kerne med de herom kredsende elektroner må ifølge den klassiske elektrodynamik uundgåeligt udstråle lys med det resultat, at elektronernes baner skrumper ind for til sidst at falde sammen med atomkernen. Herved skulle frekvensen (d. v. s. antallet af svingninger pr. sekund, der jo er karakteristisk for lysets farve) af det udsendte lys vokse jævnt, hvilket er i uoverensstemmelse med, at atomerne under passende forhold udsender lys med bestemte, fra hinanden adskilte og for grundstofferne karakteristiske frekvenser, som man iagttager i de såkaldte *liniespektre*.

Bohr brød nu med den klassiske fysik ved at antage eller postulere, at atomernes elektroner kun kan være til stede i bestemte, såkaldte *stationære tilstande*, som han anskueliggjorde ved særligt udvalgte baner, i hvilke elektronerne kredser rundt, idet han videre – og stadig i modstrid med den klassiske fysik – postulerede, at så længe en elektron befinder sig i en så-

dan bane, udstråler den ikke lys. Ifølge hans teori udsender et atom kun lys, når en elektron springer fra en stationær tilstand med højere energi til en lavere tilstand med lavere energi. Er den højere energi E_2 og den lavere energi E_1 er frekvensen ν af det ved dette såkaldte *kvantespring* udsendte lys bestemt ved

$$h\nu = E_2 - E_1$$

hvor h er en universel konstant, den såkaldte Planck'ske konstant; $h\nu$ må da ifølge energisætningen fortolkes som energien af det udsendte lys. Vi skal om lidt gå nærmere ind på det forhåndenværende fysiske grundlag, som ledte Bohr til at opstille denne sammenhæng, men vil først fremdrage endnu et væsentligt træk ved hans teori. Nemlig det såkaldte *korrespondensprincip*.

Dette princip går i korthed ud på kravet om, at den nye teori i den grænse, hvor den anvendes på erfaringer, som den klassiske fysik på tilfredsstillende vis har kunnet gøre rede for, må stemme overens med denne. Mere konkret betyder dette i den foreliggende situation, at i den grænse hvor den udsendte strålings frekvens er lille – og det er den for spring mellem de langt borte fra kernen beliggende udvalgte baner – må der bestå overensstemmelse mellem den klassiske fysiks og den nye atomfysiks udsagn om arten af det udsendte lys, f. eks. må de ved ovenstående ligning beregnede frekvenser for overgangen mellem nærliggende baner langt ude stemme overens med de frekvenser, en elektron ifølge den klassiske elek-

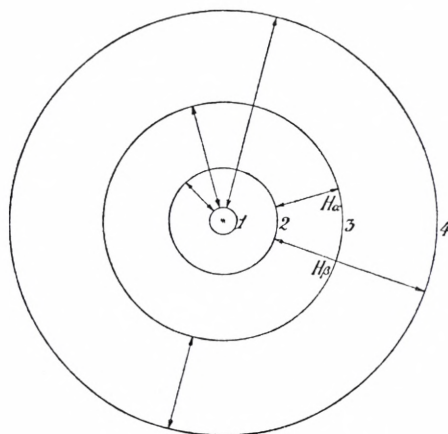


Fig. 1. Skematisk fremstilling af de første fire stationære baner i brintatomet. Pilene angiver mulige overgange mellem de stationære tilstande

trodynamik udsender ved at kredse nogen tid i en bane, der så langt ude kan vises kun langsomt at skrumpes ind.

I den her givne abstrakte formulering kan korrespondensprincippet måske forekomme ret selvfølgelig. Men ved at kombinere dette krav med de grundlæggende kvantepostulater, var det muligt at drage vidtgående slutninger om de atomare systemers opførsel selv i situationer, hvor man er langt fra den klassiske grænse. Det var næsten utroligt, hvad Bohr kunne få ud af den konsekvente og stædige fastholden ved dette princip, som han i 1918 kunne give en meget almen og kvantitativ formulering. Man kunne vende sagen på hovedet og sige, at han lærte fysikere at tænke på en sådan måde, at uomgængeligheden af, at enhver gammel og prøvet teori skal være indeholdt i den nye og mere omfattende teori, bliver udnyttet som et overmåde frugtbart, systematisk princip i bestræbelserne på at vinde dybere indsigt. Og det afgørende her er netop den kvantitative udnyttelse af dette almene princip.

Den ovennævnte sammenhæng mellem frekvensen af det ved et kvantespring mellem to stationære tilstande udsendte lys og atomets energitab var forberedt gennem tidligere undersøgelser, først og fremmest af Planck og Einstein. Planck havde ved århundredeskiftet vist, at omsætningen af energi mellem stof og stråling kun kunne ske i endelige energiportioner eller *kvanter*. Således kan lys af frekvensen ν kun opsluges (absorberes) af stof i mindste portioner af størrelsen $h\nu$, hvor h siden da kaldes for *Plancks konstant*. På lignende måde kan ifølge Bohrs atomteori et atom kun absorbere lysenergi af en frekvens ν dersom $h\nu$ er lig med en energiforskel $E_2 - E_1$ mellem energierne af atomet i de to af dets stationære tilstande. Herved vil en elektron da blive løftet fra tilstanden med den lavere energi E_1 til tilstanden med den højere energi E_2 . Ovenstående formel for sammenhængen mellem frekvens og energiændring er således gyldig både for lysemission (lysudsendelse) og lysabsorption (opslugning af lys). Et atom kan altså kun absorbere lys af de frekvenser, det selv kan emitte. Endelig bemærkes, at et atom i tilstanden med lavest energi (*grundtilstanden*) besidder en særlig art af stabilitet, idet det ikke ved emission kan overføres til andre tilstande.

Ved den såkaldte *fotoelektriske effekt*, som Einstein havde givet forklaringen på i 1905, sker der en løsrivelse af elektroner fra en metaloverflade, men først for lys af en tilpas høj frekvens, idet frekvensen skal være så stor, at det hertil hørende energikvant $h\nu$ er tilstrækkeligt til at meddele

elektronen så meget energi, at den kan slippe bort fra metaloverfladen imod de her virkende tiltrækningskræfter. Er frekvensen for lille, vil selv en nok så kraftig bestråling ikke kunne frigøre nogen elektron. For store frekvenser vil der endda blive energi tilovers til at give de udløste elektroner større fart – det vil sige større kinetisk energi – og desto mere, jo større frekvensen af det bestrålende lys er. En forøgelse af lysets intensitet bevirker derimod ikke en forøgelse af de enkelte elektroners kinetiske energi – der udelukkende er bestemt ved, hvad der efter løsrivelsen er blevet tilovers af energikvantet $h \nu$ – men bevirker, at et større antal elektroner frigøres pr. tidsenhed.

Ved kvantespring i et atom fra en stationær tilstand til en anden udsendes der altså portioner af lysenergi, de såkaldte *lyskvanter* eller *fotoner*, således at energien af en foton med frekvens ν er $h \nu$. Det er, som om lys udsendes fra det enkelte atom som en *partikel*. *Intensiteten* af det lys af en bestemt frekvens, der udsendes af en samling atomer, d.v.s. den til frekvensen hørende lysenergi, der udstråles pr. tidsenhed, må da være bestemt ved *antallet af fotoner* af den betragtede frekvens, der udsendes pr. tidsenhed, eller antallet af hertil hørende kvantespring som pr. tidsenhed finder sted i de tilstedeværende atomer.

Bohr var lige fra begyndelsen klar over, at disse kvantespring ikke kan sammenlignes med den klassiske fysiks processer, idet det i princippet er umuligt at angive metoder til at beregne, *hvornår* en elektron springer fra en stationær tilstand, og til *hvilken* stationær tilstand den vil springe i det næste tidsrum. Man er dog i stand til at angive *sandsynlighederne* – de såkaldte *overgangssandsynligheder* – for, at en elektron i et bestemt tidsrum vil springe fra en stationær tilstand til stationære tilstande med lavere energier. Disse overgangssandsynligheder er udtryk for de relative hyp-pigheder af de forskellige kvantespring i et stort antal atomer under samme ydre forhold og kan da måles ved intensiteterne af det til de forskellige frekvenser hørende lys.

I den klassiske fysik kan intensiteterne, der her er bestemt ved svingningsudslagene af lysbølgerne, beregnes ved hjælp af elektrodynamikkens love, og under benyttelse af korrespondensprincippet kunne Bohr da fremkomme med visse udsagn om de nævnte overgangssandsynligheder.

Et væsentligt træk ved Bohrs atomteori var naturligvis fastlæggelsen af de stationære baner. Han angav herfor visse såkaldte *kvantiseringsregler*, der senere blev mere alment formuleret af Sommerfeld og Wilson. En helt

almen formulering af princippet for opstillingen af sådanne kvantiseringsregler blev i 1918 givet af Bohr på grundlag af en tanke af Ehrenfest og i samarbejde med Kramers. Det blev i denne sammenhæng også muligt for ham at udtrykke korrespondensprincippet på en almen form.

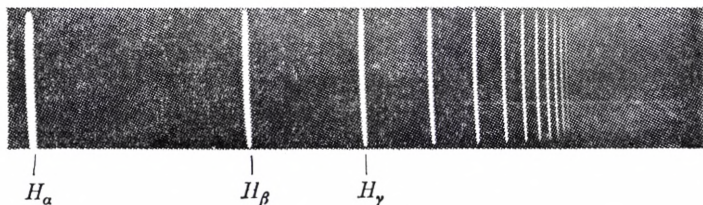


Fig. 2. En serie linier i brintspektret

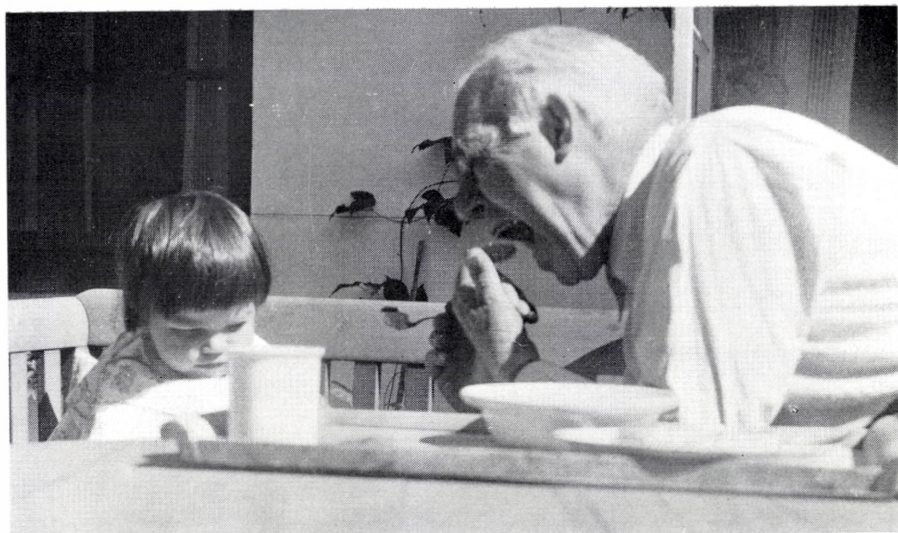
I det første arbejde fra 1913 kunne Bohr straks beregne frekvenserne af de til det simpleste af alle atomer hørende spektrallinier, nemlig frekvenserne af *brintspektret* (fig. 2). Brintatomet består af en kerne med kun én elektron udenom, og det var empirisk kendt, at frekvenserne af brintspektret kunne udtrykkes ved den såkaldte *Balmerske formel*

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

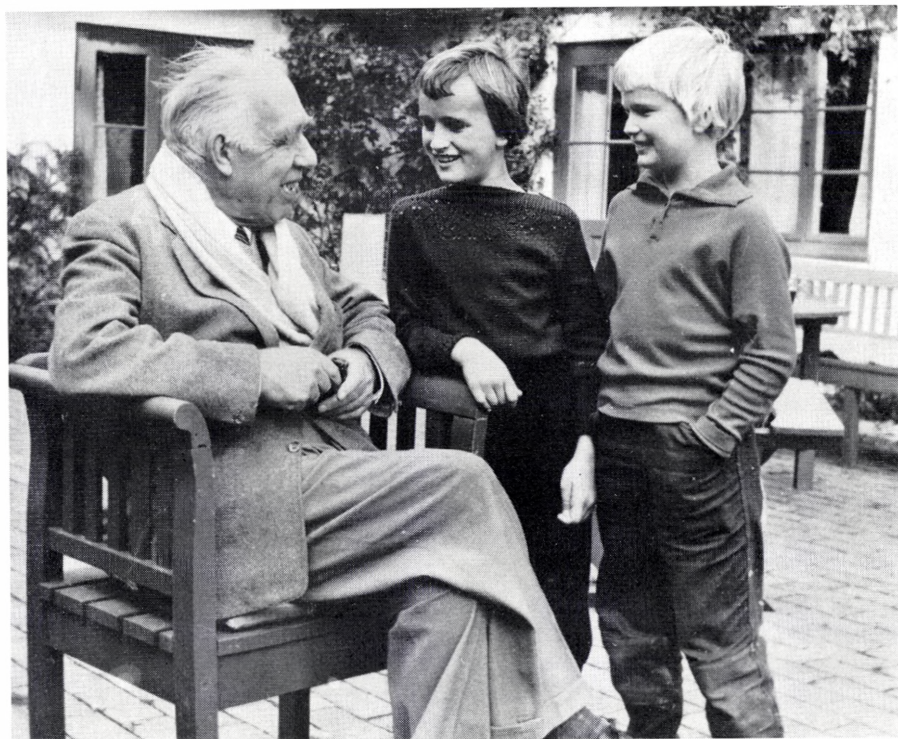
hvor R er en konstant, den såkaldte *Rydbergkonstant*, og m og n er hele, positive tal. Bohr kunne nu i fineste overensstemmelse med iagttagelserne beregne værdien af Rydbergkonstanten udtrykt udelukkende ved de atomare konstanter e , m , c og h , hvor e er elektronens ladning, m dens masse, c lyshastigheden og h den førnævnte Planck'ske konstant. Et resultat, der gjorde et meget stærkt indtryk.

Dette var dog kun en af de første store triumfer. Bohr kunne desuden i disse første arbejder fra 1913 vise, at visse spektre, som hidtil havde været tilskrevet brint, må hidrøre fra ioniseret helium, d. v. s. en heliumkerne med én elektron uden om, idet den til dette grundstof hørende anden elektron er bortrevet. Og han kunne vise, at en lille forskel i Rydbergkonstanten for brintspektret og den tilsvarende konstant for spektret af det ioniserede helium hidrører fra forskellen i masserne af brint- og heliumkernen.

Vi har allerede i det foregående antydnet visse træk af udviklingen af Bohrs atomteori imod en mere omfattende formulering af det principielle



Et barnebarn skal lære at spise



Med børnebørn i Tisvilde



Dronning Elizabeth af England, prins Philip og det danske kongepar på besøg i æresboligen på Carlsberg



Niels Bohr med den indiske premierminister Nehru under et besøg på Risø

indhold, men de væsentligste grundtanker findes allerede klart udtrykte i de første afhandlinger fra 1913. En side af teorien, vi endnu ikke har omtalt, er derimod de anvendelser, Bohr i de følgende år gjorde af sin teori til at forklare det slægtskab mellem grundstofferne, som kommer til udtryk ved det allerede i forrige århundrede opstillede såkaldte *periodiske system* (fig. 3).

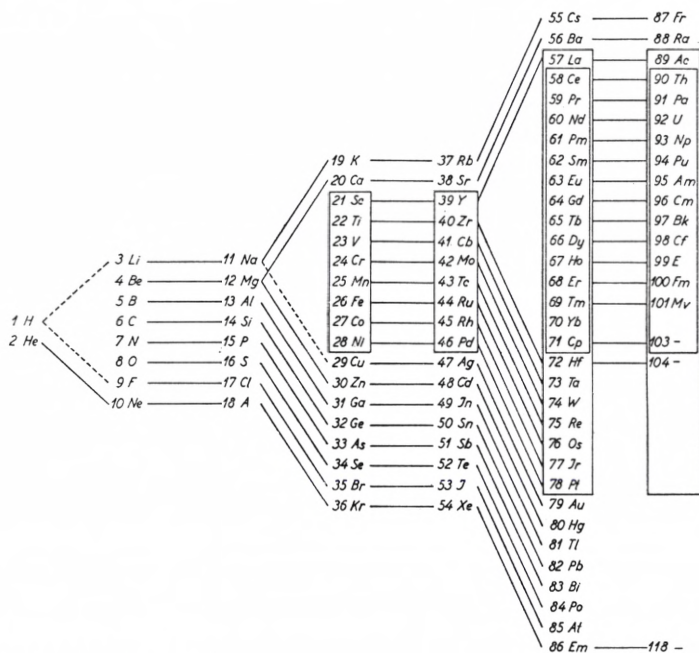


Fig. 3. Grundstoffernes periodiske system. Hvert grundstof er anført med sit atomnummer og det i kemien benyttede symbol. Linierne forbinder grundstoffer med beslægtede kemiske egenskaber. Diagrammet er ført à jour og man har medtaget de senere fremstillede nye grundstoffer; deres egenskaber har også vist sig at svare til de forudsigelser der kunne gøres ud fra Bohrs teori

Opstilles grundstofferne efter stigende atomvægt, og lader man visse pladser stå åbne, vil kemisk og fysisk beslægtede grundstoffer optræde med bestemte mellemrum eller *perioder*. De åbne pladser svarer da til de uopdagede grundstoffer og ved at sammenligne deres plads i opstillingen med de kendte grundstoffers plads, kunne man i grove træk forudsige sådanne endnu ukendte grundstoffers egenskaber, ligesom forudsigelserne kunne tjene til at finde visse uopdagede grundstoffer, idet beslægtede stoffer har tilbøjelighed til at følges ad – de opfører sig jo ensartet under

de kemiske og fysiske operationer, der anvendes til at skille dem fra andre stoffer.

Rutherfords atommodel førte snart til erkendelsen af, at et grundstofs nummer i det periodiske system – hvor man begynder med det letteste atom, brint, og fortsætter efter stigende atomvægt, idet også »hullerne« – eller de uopdagede grundstoffer tages med i nummereringen – simpelthen er lig kernens elektriske ladning (målt med elementarladningen e som enhed) eller med antallet af elektroner omkring kernen. Dette tal kaldes for *atomnummeret*. (En nærmere undersøgelse viste senere, at nogle grundstoffer er blandinger af atomer med lidt forskellige atomvægte, d.v.s. lidt forskellige kernemasser, men med samme fysiske og kemiske egenskaber – bortset fra de radioaktive egenskaber der er knyttede til kernen, og de egenskaber der direkte afhænger af kernemassen. Sådanne forskellige atomer, der hører til samme grundstof, kaldes for *isotoper*, og må altså gives samme atomnummer. I overensstemmelse hermed skal de anbringes på samme sted i det periodiske system.) Det er altså en kendsgerning, at de fleste fysiske og kemiske egenskaber ved grundstofferne udelukkende er bestemt ved kerneladningen, idet herved deres plads i det periodiske system er fastlagt.

På forhånd kunne man jo vente, at elektronerne omkring kernen i et uforstyrret atom kunne være grupperet eller arrangeret således, at selv om deres antal for to atomer var det samme, ville atomerne på grund af helt forskellige konfigurationer af elektronerne besidde væsentligt forskellige egenskaber. Men Bohr kunne nu vise, at fordelingen af elektronerne på forskellige stationære baner omkring en kerne respekterer visse almene krav, som bevirker, at der ikke består nogen mulighed for en sådan flertydighed, altså nogen mulighed for at der til et bestemt atomnummer skulle kunne eksistere atomer med så forskellige egenskaber, at der er tale om forskellige grundstoffer. Atomnummeret karakteriserer ifølge hans teori virkelig grundstoffet fuldt ud. Han støttede sig her særligt på den viden om elektronkonfigurationerne, som de forskellige slags spektre af lys, der udsendes fra grundstofferne, bærer vidnesbyrd om, samt på sine studier over elektriske og magnetiske felters indflydelse på elektronfigurationerne og hermed på spektrene.

Yderligere var Bohr i stand til at give en forklaring på det for det periodiske system karakteristiske træk, at beslægtede grundstoffer optræder med bestemte mellemrum eller perioder. De fysiske og kemiske egenskaber,

der i deres ligheder er karakteristiske for beslægtede grundstoffer, er i almindelighed knyttede til fordelingen af elektronerne på de *yderste baner*, idet disse elektroner ikke er så fast knyttet til kernen, og hermed i deres adfærd ikke er så uforanderlige som de indre elektroner. Ud fra tydingen af de kemiske og især de spektroskopiske data lykkedes det nu Bohr at drage slutninger om, hvorledes elektronerne grupperer sig, efterhånden som man går frem i det periodiske system. Det følger af hans betragtninger, at den samme gruppering af de yderste elektroner gentager sig med regelmæssige mellemrum, hvilket forklarer periodiciteten i grundstoffernes egenskaber. Det røber et karakteristisk træk ved Bohrs måde at anskue problemerne på, at det først og fremmest var en intuitiv forståelse af de fingerpeg, de empiriske data gav, der ledte ham til disse resultater. De skulle imidlertid komme til at bane vejen til den dybere forståelse af lovmæssighederne, der først opnåedes gennem det af Pauli formulerede såkaldte »udelukkelsesprincip«, som vi dog ikke her kan gå nærmere ind på.

Som et resultat af sin teori kunne Bohr vise, at det dengang endnu uopdagede grundstof med atomnummeret 72 havde andre egenskaber, end man fra anden side havde forudsagt, og at det derfor som følge af disse egenskaber måtte forventes at optræde i mineraler, hvor grundstoffet Zirkonium er til stede. Dette førte til opdagelsen af grundstoffet nr. 72 i 1922–23 af Hevesy og Coster, som døbte det *Hafnium* efter byen København (på latin Hafnia), idet opdagelsen fandt sted på Bohrs institut.

Trods de store resultater, som Bohrs atomteori kunne opvise, havde ikke mindst Bohr selv lige fra begyndelsen fremhævet ikke blot begrænsningen i de anvendte metoders rækkevidde, men tillige ufuldstændigheden af det grundlag, hvorpå teorien hvilede. Disse mangler trådte stadig klarere frem i den første halvdel af tyverne, dels fordi teorien viste sig ude af stand til at redegøre for en række finere detaljer i atomspektrene og dels på grund af de paradokser, som den samtidige anvendelse af klassiske billeder og kvantebegreberne gav anledning til.

Det er således allerede ovenfor nævnt, hvorledes lys i visse situationer optræder som et bølgefænomen, medens det i andre har karakter af partikler, de såkaldte fotoner. Den tanke, at en lignende dualitet skulle gøre sig gældende også for elektronernes vedkommende fremsattes af de Broglie, og elektronernes bølgeegenskaber blev kort derefter påvist ved iagttagelsen af interferensmønstre ved elektroners gennemgang gennem en krystal.

Med udviklingen af den såkaldte *kvantemekanik*, hvortil de første afgørende bidrag blev givet af Heisenberg, Schrödinger og Dirac, trådte atomfysikken ind i en ny fase. Medens Bohrs grundlæggende forudsætning om, at et atom kun kan eksistere i adskilte tilstande (stationære tilstande) blev opretholdt, blev det muligt at beskrive disse tilstande uden nogen henvisning til sådanne klassiske forestillinger som elektronernes baner. Kvantemekanikkens indhold kan således karakteriseres som et sæt regnearter, ved hjælp af hvilke man kan bestemme de forskellige iagttagelige størrelser såsom energiværdierne for atomernes stationære tilstande, og sandsynlighederne for, at et atom der befinder sig i en given stationær tilstand overgår til andre mulige stationære tilstande under udsendelse af stråling. Som det er omtalt i det foregående, har sådanne overgangsprocesser en statistisk karakter, og dette træk genspejles direkte i den kvantemekaniske formalisme, hvis forudsigelse altid har form af en angivelse af sandsynlighederne for de forskellige mulige udfald af et givet forsøg.

Kvantemekanikken fejrede hurtigt mange store triumfer ved i detaljer at kunne redegøre for en lang række atomfysiske fænomener, men på grund af den abstrakte matematiske form frembød den mere fysiske tydning af teorien store vanskeligheder, der kun gradvis blev overvundet i de efterfølgende år.

Et afgørende fremskridt opnåedes af Heisenberg, der viste, at den begrænsning, som virkningskvantet h medfører med hensyn til anvendelsen af de klassiske forestillinger, kan udtrykkes ved hjælp af de såkaldte *ubestemthedsrelationer*. Et eksempel på disse er relationen

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h$$

hvor Δq er den ubestemthed, der er knyttet til angivelsen af en partikels position langs en forelagt retning, medens Δp betegner ubestemtheden i partiklens bevægelsesmængde (d.v.s. produktet af massen og hastigheden) i denne retning. Medens partiklens position *eller* dens bevægelsesmængde kan bestemmes med vilkårlig nøjagtighed, er den nøjagtighed, hvormed det er muligt samtidigt at definere partiklens position og bevægelsesmængde, således altid underkastet en begrænsning givet ved ovenstående relation. Det er netop denne gensidige begrænsning, der giver spillerum for de typiske kvantefænomener. Har vi derimod at gøre med fænomener, hvori den samlede virkning er stor i forhold til det elementære virkningskvantum h , bliver

den ved ubestemthedsrelationen udtrykte begrænsning uvæsentlig, og under sådanne forhold går den kvanteteoretiske beskrivelse over i den klassiske i overensstemmelse med korrespondensprincippet krav.

Den videre udvikling blev især præget af Niels Bohrs indsats. Lige fra kvantemekanikkens fremkomst havde han, klarere end de fleste samtidige fysikere, set at den fulde godkendelse af de nye teorier – accepten af alle kvantemekanikkens konsekvenser – måtte medføre et endnu mere radikalt brud med tilvante forestillinger, end man til at begynde med troede var tilfældet. Først og fremmest fordi vi herved belæres om, at de *iagttagelses-situationer*, der foreligger, når vi beskæftiger os med atomernes egenskaber, i visse grundlæggende træk er helt forskellige fra dem, vi kender fra dagliglivets erfaringer, d.v.s. fra den klassiske fysik.

Ved at underkaste den kvantemekaniske beskrivelse og iagttagelses-situationen i atomfysikken en dybtgående analyse, nåede Bohr frem til en fuldstændig afklaring af de principielle problemer, der havde præget atomfysikken siden kvanteteorien første dage. Vor hele opfattelse af vilkårene for naturbeskrivelsen kom herved i ny belysning, der måtte få vidtrækkende konsekvenser for den almindelige erkendelsesteoretiske diskussion. Disse spørgsmål var gennem årene emnet for talrige afhandlinger fra Bohrs hånd, i hvilke han søgte at få problemstillingens principielle karakter til at træde stadig klarere og skarpere frem. Mange af disse afhandlinger kan læses uden særlige faglige forudsætninger (se f. eks. »Atomteori og naturbeskrivelse« (1958) og især »Atomfysik og menneskelig erkendelse« (1957), af hvilken en fortsættelse er fremkommet på engelsk og også er under udgivelse på dansk). Problemer vedrørende kvantemekanikkens fortolkning og de almindelige erkendelsesteoretiske konsekvenser, der er knyttet hertil, er også omtalt i flere af bidragene i denne bog, f. eks. i Kleins, Heisenbergs og Rosenfelds.

I de ofte meget dramatiske diskussioner, hvorunder disse spørgsmål gradvis afklaredes, spillede idealiserede tankeeksperimenter, der var egnede til at fremhæve de tilsyneladende paradokser, en stor rolle. Vi skal derfor kort omtale et enkelt sådant eksempel, som er hentet fra Bohrs artikel (optrykt i »Atomfysik og menneskelig erkendelse«) om de berømte diskussioner med Einstein, der vil blive stående som klassiske i videnskabens historie.

Vi betragter en forsøgsopstilling som vist på fig. 4. En strøm af elektroner (eller fotoner) falder fra venstre ind på den første skærm, hvor-

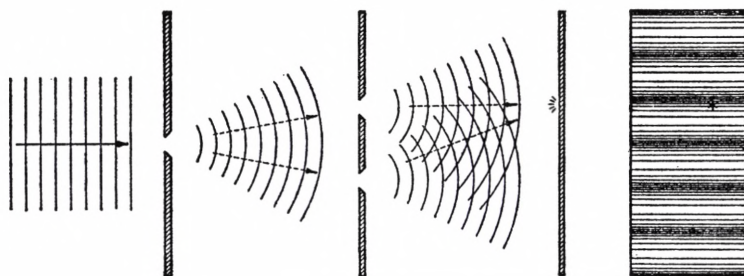


Fig. 4

igennem et nærmere afgrænset strålebunt forplanter sig videre mod den næste skærm, der er forsynet med to spalter. Ved en sådan opstilling er det muligt at studere bølgeegenskaberne ved elektronerne. Som det er kendt fra vandbølger og almindelige optiske fænomener, vil de fra de to spalter i den anden skærm udgående bølgetog interferere med hinanden, og vi vil på den fotografiske plade bagved skærmen iagttage et *interferensmønster* med skiftevis lyse og mørke striber. Dette er antydnet længst til højre på figuren, hvor den fotografiske plade ses forfra. Interferensmønstret dannes ved den samlede virkning af et stort antal individuelle processer, som hver for sig frembringer en lille plet på den fotografiske plade, der angiver, hvor den pågældende elektron har ramt.

Vi ser, hvorledes på den ene side elektronens vekselvirkning med den fotografiske plade, i lighed med den ovenfor omtalte fotoelektriske effekt, finder sted i et bestemt punkt i overensstemmelse med partikel-forestillingen, medens på den anden side fordelingen af pletterne følger en lov, der kun kan forstås på grundlag af bølgeforestillingen. Særlig tydeligt bliver dette tilsyneladende paradoks, hvis vi spørger, igennem *hvilken* spalte elektronen gik ved en af de individuelle processer, hvoraf interferensmønstret opbygges. Dersom dette spørgsmål kunne tillægges nogen mening, måtte vi slutte, at elektronens opførsel efter passagen gennem den ene spalte afhænger af tilstedeværelsen af den anden spalte, gennem hvilken vi vidste, at den ikke var passeret, men som alligevel er medbestemmende for interferensmønstret. Dette interferensmønster ville nemlig forsvinde, hvis man lukkede en af spalterne.

Dette tilsyneladende paradoks finder sin opløsning derved, at enhver måling, der ville tillade at afgøre, gennem hvilken spalte elektronen er passeret, nødvendigvis medfører en sådan ændring af forsøget, at enhver iagt-

tagelse af interferensmønstret udelukkes. For eksempel kunne man undersøge, om elektronen efter passagen gennem den første skærm bevæger sig opad eller nedad. Dette kunne afgøres ved at bestemme den rekylbevægelse, som denne skærm modtager ved, at elektronen under passagen ændrer sin bevægelsesretning. Vi må imidlertid tage hensyn til, at skærmens opførsel er underkastet de kvantemekaniske lovmæssigheder, således at en fastlæggelse af dens bevægelsesmængde ifølge ubestemthedsrelationerne medfører, at det ikke længere er muligt at definere dens position med vilkårlig nøjagtighed. Nu vil en flytning af skærmen lidt op eller ned bevirke en forskydning af interferensstriberne på den fotografiske plade, og det er let at vise, at hvis man ønsker at bestemme skærmens bevægelsesmængde med en nøjagtighed, der er tilstrækkelig til at afgøre, om elektronen bevæger sig mod den øverste eller den nederste spalte i den anden skærm, er den dertil knyttede ubestemthed i definitionen af skærmens position netop så stor, at interferensmønstret helt udtværes.

Det her fremførte eksempel illustrerer det *helhedstræk*, der er karakteristisk for kvanteprocesserne. Vi ser, hvorledes forsøg på at underdele fænomenerne for at forfølge deres forløb på den måde, vi er vant til fra den klassiske fysik, strandeder på, at vi derved tvinges til at ændre de eksperimentelle betingelser således, at vi nu har at gøre med helt nye fænomener, der, som Bohr udtrykte det, er *komplementære* til de oprindelige.

Niels Bohr vendte atter og atter tilbage til sådanne eksempler for på stadig ny måde at belyse kvantefænomenernes natur og fremhæve, hvor vigtigt det er, at de begreber, vi benytter ved beskrivelsen, har et entydigt indhold. Således har man mulighed for at skærpe det tilsyneladende dilemma, som det ovenfor diskuterede eksempel frembyder, ved at bemærke, at man endog kan vente til *efter* at elektronen har passeret gennem apparatet med at afgøre hvilket af de komplementære fænomener, man vil studere. Man kan nemlig indrette forsøgsopstillingen således, at man selv efter at elektronen har ramt den fotografiske plade stadig kan *vælge*, om man vil bestemme rekylbevægelsen af den første skærm og dermed få oplysning om, gennem hvilken af de to spalter elektronen passerede. Eller om man vil fastlægge skærmens position, hvorved pletten på den fotografiske plade må opfattes som hørende til et interferensmønster, betinget af begge spalters tilstedeværelse.

Hvor fremmedartet, ja ligefrem chokerende denne situation end måtte synes, ser vi, at ethvert element af modstrid eller mystik forsvinder, når

vi gør os klart, at et fysisk fænomen, som Bohr så stærkt fremhævede det, først er et sikret begreb, når hele den forsøgsopstilling, hvorunder det fremtræder, er fastlagt. I det omtalte eksempel drejer det sig om et valg mellem to hver for sig veldefinerede, men hinanden udelukkende forsøgsopstillinger, der tillader studiet af forskellige, komplementære fænomener. Den sidstnævnte skærpede problemstilling svarer nøje til den, der kom til at spille så stor en rolle i forbindelse med diskussionerne mellem Bohr og Einstein, således som det er beskrevet i Rosenfelds bidrag. De i logisk henseende analoge iagttagelsessituationer, som Bohr fremdrog fra andre erfaringsområder, først og fremmest inden for psykologien, er også omtalt i det nævnte bidrag.

I forbindelse med Bohrs overvejelser vedrørende kvantemekanikkens iagttagelsesproblemer skal sluttelig nævnes de undersøgelser, han i 1933 og senere i 1950 foretog sammen med Rosenfeld over elektrodynamikkens måleproblemer, d.v.s. komplementariteten mellem de til bestemmelsen af forskellige elektrodynamiske feltstørrelser i deres afhængighed af tid og sted nødvendige iagttagelsessituationer.

Vi vender dernæst opmærksomheden mod det tredie hovedområde, hvor Bohr gjorde en banebrydende indsats: hans bidrag til en dybere indsigt i *atomkernernes struktur* og til forståelsen af visse her forekommende processer.

Som tidligere omtalt kan der til et bestemt atomnummer, altså til et bestemt grundstof, svare forskellige isotoper, hvis kerner har forskellig masse, medens antallet af elektroner udenom er det samme, således at de fleste fysiske og kemiske egenskaber – der, som nævnt, er betinget af processer i elektronverdenen udenom kernen – er de samme. Udsendelsen af *radioaktiv stråling* er derimod knyttet til processer i kernerne, og i denne henseende kan isotoper have vidt forskellige egenskaber.

Alle atomkerner er sammensatte af to slags partikler: *protoner*, der simpelthen er brintkerner, og *neutroner*, der er partikler med omtrent samme masse som protonerne, men uden elektrisk ladning. En proton og en elektron har modsatte ladninger: protonens positiv og elektronens negativ, således at antallet af protoner i kernen må være lige med antallet af elektroner uden for kernen, da atomet udadtil er elektrisk neutralt. Forskellen mellem to isotoper må da bero på, at neutronantallet i kernerne er forskelligt. Man kan i øvrigt opfatte protonen og neutronen som to forskellige *tilstande* af samme partikel: *nukleonen*.

Ved kerneprocesser vil to protoner og to neutroner ofte blive bundet sammen til en heliumkerne, d.v.s. en alfa-partikel.

Bohr opstillede nu en model for atomkernerne og de mellem de enkelte bestanddele af disse virkende kræfter, som fik meget stor betydning for hele udviklingen af atomkernefysikken i årene før sidste verdenskrig, og udfra hvilken han for tunge kerner – altså kerner indeholdende et forholdsvist stort antal nukleoner – opnåede kvantitative resultater, som stemte smukt overens med eksperimenterne.

Især gjaldt det de ændringer, der foregår i atomkernerne, når de beskydes med lette atomare partikler. Udfører man et sådant bombardement med *ladede* partikler, såsom protoner, deuteroner eller alfa-partikler, der på grund af kernens elektriske ladning frastødes af denne, må de – for at kunne overvinde denne frastødende virkning – bringes op på betydelige hastigheder. *Neutroner* derimod, der ikke har nogen elektrisk ladning og derfor ikke frastødes af kernen, vil, selv med forholdsvis ringe bevægelsesenergi, kunne trænge ind i den.

Når den ankommende partikel er trængt ind i kernen, vil den tilføre denne energi, men på grund af den tætte sammenpakning af nukleoner i kernen og den stærke vekselvirkning mellem dem vil denne energi meget hurtigt fordele sig blandt alle nukleonerne. Vi får på denne måde en særlig tilstand, som Bohr kaldte for den sammensatte kerne (compound-kernen) eller mellemkernen, fordi den danner et mellemlid mellem udgangssituationen, hvor kernen og den bombarderende partikel var uden for hinanden, og forsøgets slutresultat. Er compound-kernen ikke altfor tung, er der to muligheder for det næste trin i processen. *Enten* kan energien gå bort i form af stråling, med det resultat, at den indfaldende partikel forbliver indfanget i kernen. Alt efter den indfaldende partikels karakter opstår der da en ny isotop af det oprindelige grundstof eller et grundstof forskelligt fra det oprindelige. *Eller* også kan energien, der hele tiden på uregelmæssig måde udveksles mellem nukleonerne, ved en tilfældighed samle sig på en af dem, som derved får så megen energi, at den kan overvinde de kræfter, der holder den fast, og rive sig løs fra compound-kernen.

Forholdene ligner meget dem, man har at gøre med i en *væskedråbe*, der består af mange smådele (molekyler). Tilfører man en væskedråbe energi, vil den blive opvarmet, hvilket svarer til, at dens enkelte molekyler kommer i hurtigere bevægelse. Også her er der en stadig udveksling af bevægelsesenergi mellem de forskellige molekyler, og engang imellem

koncentreres der ved tilfældige fluktuationer så megen energi på et enkelt molekyle, at det overvinder de kræfter, der holder dråben sammen (overfladespændingen) og river sig løs fra denne. Man har da at gøre med en fordamning af væsken.

Denne analogi viste sig at være uhyre frugtbar og vejledende ved forklaringen af et stort antal fænomener, både kvalitativt og kvantitativt. På Instituttets værksted lod Bohr fremstille modeller, der skulle tjene til at illustrere forholdene, ganske vist ikke i en væskedråbe, men i en samling af elastiske stålkugler. De kræfter, der holder kernen sammen, blev i modellen anskueliggjort ved, at stålkuglerne befandt sig i en fordybning, som de under normale forhold ikke kunne komme ud af. Bombardementet af »atomkernen« foretoges med kugler, der løb ned ad en skrå rende og derved fik en af udgangshøjden afhængig hastighed. Når de indfaldende kugler skulle repræsentere ladede partikler, blev kernen forsynet med en ydre vold (fig. 5), således at partiklerne for at komme



Fig. 5

over denne måtte have passende store hastigheder. For indfaldende neutroner så kernen derimod ud som vist på fig. 6, hvor der ikke er nogen vold omkring fordybningen, og her har endda ganske langsomme kugler,

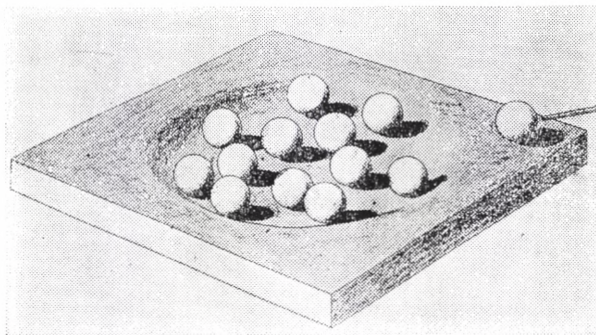


Fig. 6

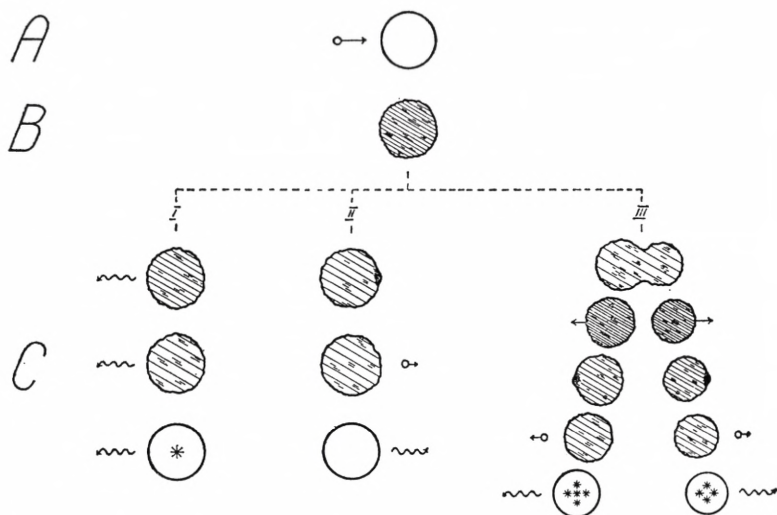


Fig. 7

der har fået et svagt stød med billardkøen, mulighed for at trænge ind i kernen. Når kuglen er gledet ned i fordybningen, støder den sammen med de deri liggende kugler («nukleonerne»), og man kan iagttage, hvordan de alle kommer i livlig bevægelse, der dog – i modsætning til forholdene i en væskedråbe eller en atomkerne – hurtigt dæmpes på grund af gnidning.

Det var en stor triumf for Bohrs teori, at man i 1939 på grundlag af dråbemodellen kunne forklare den såkaldte fission, hvor kerner af meget tunge grundstoffer, først og fremmest uran, spaltes i to næsten lige store dele, når de bombarderes med neutroner. Ved disse stoffer kommer der nemlig til de to før omtalte omdannelser af compound-kernen endnu en tredje mulighed: spaltningen. I store træk går ræsonnementet ud på følgende. Forsøget starter med, at en urankerne (den store hvide cirkel øverst i fig. 7) rammes af en neutron (den lille cirkel). Pilen skal anskueliggøre neutronens hastighed. I første omgang optages neutronen i kernen og der dannes en compound-kerne, hvis overskud af energi, tilført af neutronen, er antydnet ved skravering. Nu er der tre muligheder for processens videre forløb: I) Den overskydende energi kan gå bort i form af stråling, og neutronen forbliver indfanget. Der er da dannet en ny uranisotop. II) Ved en tilfældig koncentration af energien på en af neutronerne i compound-kernen får denne neutron energi nok til at rive sig løs fra kernen.

III) Compound-kernens energi giver anledning til svingninger af hele »væskedråben«, og denne kommer herved til at antage en aflang form. Takket være de frastødende elektriske kræfter, der virker mellem de protoner der findes i kernen, vil en sådan forlængelse af dråben resultere i, at den ikke går tilbage til den kugleformede tilstand, men tværtimod bliver mere og mere aflang og sluttelig spaltes i to dele, der igen på grund af de frastødende elektriske kræfter slynges bort fra hinanden med meget store energier. Fissionen minder derfor om den spaltning af en elektrisk ladet vanddråbe, der kan finde sted, når dråben sættes i svingning. Efter fissionen (III) løsrives der – som antydnet på tegningen – endnu neutroner fra de to fragmenter.

Det endelige resultat afhænger af konkurrencen mellem disse tre muligheder. Man kan behandle fænomenet kvantitativt ud fra de kendte eller beregnede sandsynligheder for de forskellige processer. Disse sandsynligheder afhænger både af den indfaldende neutrons hastighed, og – meget væsentligt – af den bombarderede kernes struktur. Der er således stor forskel mellem isotoper af samme grundstof, alt efter om kernen indeholder et lige eller ulige antal nukleoner. Denne forskel gør sig f. eks. gældende mellem de to uranisotoper, der findes i det i naturen forekommende uran, idet den sjældne isotop, der indeholder 235 (ulige antal) nukleoner, har en betydelig større fissionssandsynlighed end den hyppigt forekommende isotop, der indeholder 238 (lige antal) nukleoner. Dette forhold spiller en afgørende rolle i hele spørgsmålet om frigørelse af atomkerneenergien. Endnu før Bohr i samarbejde med Wheeler havde udarbejdet en kvantitativ teori, der kunne redegøre for mange af de karakteristiske træk ved fissionsprocessen, kunne Meitner og Frisch ud fra kvalitative overvejelser på grundlag af dråbemodellen vise, at de af Hahn og Strassmann i 1938 gennemførte forsøg, hvori uran blev bombarderet med neutroner, og som ellers var vanskelige at forstå, fandt en naturlig forklaring gennem antagelsen, at der foregår en spaltning af urankernen. Den ved fissionen udløste energi kunne beregnes og blev kort efter påvist i forsøg udført af Frisch på Instituttet i København (og omtrent samtidig i U.S.A.), og hvorom han beretter i sit afsnit i bogen.

I et uforglemmeligt møde i Selskabet for Naturlærens Udbredelse omtalte Niels Bohr i december 1939 de af fissionsprocessen betingede muligheder for atomenergiens frigørelse – også de uhyggelige muligheder for destruktiv anvendelse heraf. For at uranfissionen skal kunne udnyttes, ved

at en kædeproces sættes igang, kan man blande den i naturen forekommende uranisotopblanding med en særlig slags brinholdige stoffer, hvorved neutronernes hastigheder nedsættes ved sammenstød, hvilket Bohr i dette foredrag nævner som en mulighed, man må have for øje. Han omtaler her også, hvorledes en separation af den uranisotop, der ved neutronbombardementet bringes til fission, så den foreligger i større mængde, vil kunne benyttes til en bombe med en sprængkraft, der er millioner af gange større, end den verden hidtil havde set. Men han mente, at en sådan isotopadskillelse ville være et teknisk problem af så uhyre dimensioner, at det næppe kunne løses foreløbig. Her forløb udviklingen imidlertid hurtigere, end han havde forestillet sig. Under krigens pres var man få år efter i U.S.A. igang hermed.

De store banebrydere i fysikken kan vanskeligt sammenlignes, netop fordi deres indsats er betinget af en for hver af dem særegen originalitet i måden at angribe problemerne på. Bohr hørte til de allerstørste, og den kommende tid vil utvivlsomt vise, at den fysiske belæring, han skænkede os, er endnu mere vidtrækkende, end vi i dag kan gøre os det klart. Det er ikke overdrevet at sige, at han har lært fysikerne at tænke på en ny måde.