

BEN MOTTELSON

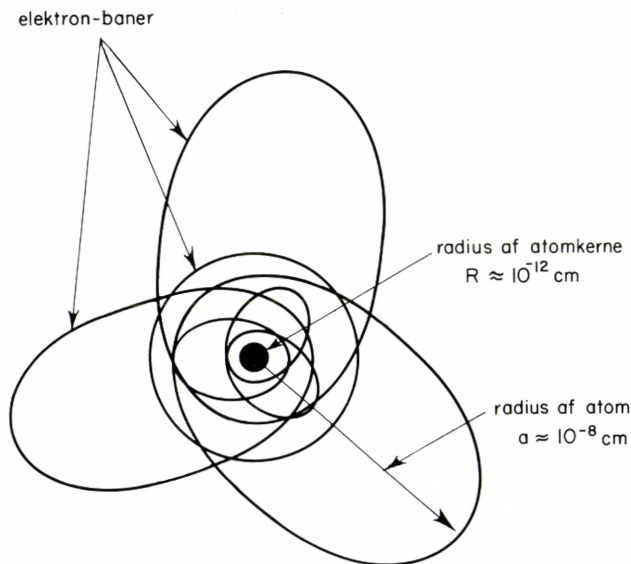
Niels Bohr og udviklingen af begreber vedrørende atomkernestruktur

Emnet for dette kapitel er af en anden karakter end de andre i samlingen. De andre beskriver den omvæltning i fysikkens forestillingsverden og den ændring i fysiksprogets egentlige grammatik, som blev os påtvunget af kvantebegrebets opdagelse. Her drejer det sig om nogle af de grundlæggende udviklinger i udforskningen af atomkerner – fysikerens forsøg på at opnå forståelse af kernens egenskaber på basis af samspillet mellem systemets bestanddele. Dette giver os lejlighed til at se eksempler på, hvorledes den moderne fysiske forskning har kunnet trænge ind i en uanet ny verden og på basis af en beskrivelsesramme, skabt af kvanteteorien, har kunnet udvikle egnede begreber til forståelse af et hjørne af denne verden. Temaet er snarere udforskning i og forståelse af en ny verden end skabelse af et helt nyt sprog til at udtrykke fysiske erfaringer.

Som en sidebemærkning synes jeg, det er interessant at se, hvorledes problemer af den art, vi møder i udforskningen af atomkerner, dvs. problemer vedrørende atomare systemer med mange partikler, er kommet til at spille en central rolle i en stor del af al den aktuelle forskning inden for fysikken. I forskningsområder så forskellige som studium af stoffets ejendommelige egenskaber nær det absolutte nulpunkt i temperatur, atomers og molekylers egenskaber, atomkerners struktur og selv egenskaber hos de såkaldte kvarker og gluoner, som udgør protonens bestanddele, er man stillet over for spørgsmålet om, hvorledes systemegenskaber opstår, om helhedens kollektive træk som udtryk for mønstre i bestanddelenes bevægelser. Denne gennemgående problemstilling giver en meget smuk og inspirerende sammenhæng til de ofte ret specialiserede og forskellige udviklinger inden for fysikkens deldiscipliner.

Men lad os nu komme i gang med kernefysikkens problemer. Som omtalt i første kapitel blev atomkernen opdaget af Rutherford i 1911 på basis af studier over spredning af α -partikler (dvs. hurtige He-kerner) i deres passage gennem tynde folier af forskellige stoffer. Til at begynde med måtte atomkernen betragtes som en elementarpartikel, altså udele-

Fig. 1.
 Atomet og
 atomkernerne;
 størrelser.



$$\frac{R}{a} \approx 10^{-4} \approx \frac{\text{kirsebær}}{\text{foldbold-bane}}$$

lig og uforanderlig – en tung, lillebitte, positivt ladet partikel siddende midt i ethvert atom (se fig. 1). Der var dog næsten fra starten antydninger af atomkernens sammensatte natur. Atomkernerne findes nemlig i en række forskellige heltallige størrelser – dvs. kernernes ladning, Z , målt i enheder af elektronens ladning, kan være $Z = 1, 2, 3, \dots$; ligeledes kan kernernes masser M tilnærmelsesvis udtrykkes som hele tal, A , gange protonens masse, M_p ,

$$\begin{aligned} M &= AM_p \\ A &\approx 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Disse forhold fører naturligt til forestillinger om kernen som et sammensat system bestående af elementære byggesten, der hver for sig har en masse svarende nogenlunde til protonens masse.

Denne antagelse blev stærkt støttet af Rutherfords opdagelse (1919) af den første kunstigt fremkaldte kernereaktion. Rutherford opdagede at: når en alfa partikel (*skabt* ved henfald af polonium) *rammer* en kvælstofkerne, *skabes* derved en hurtig proton og en (iltkerne-)rekyl (se også fig. 2)



Den sidste ligning beskriver Rutherfords kernereaktion i en moderne notation, hvor hver atomkerne, der optræder, er beskrevet med $\frac{A}{Z}$ (kemisk symbol); denne og alle andre kernereaktioner overholder nogle meget vigtige bevarelsessætninger, blandt andet bevarelse af ladning $Z_1 + Z_2 + \dots = Z_1^* + Z_2^* + \dots$ og bevarelse af massetal $A_1 + A_2 + \dots = A_1^* + A_2^* + \dots$, hvor ladningerne (masserne) for de kerner, som optræder i reaktionens begyndelsesstade, er $Z_1, Z_2 \dots (A_1, A_2 \dots)$, mens de tilsvarende størrelser for sluttetilstandens kerner er $Z_1^*, Z_2^* \dots (A_1^*, A_2^* \dots)$.

Vi er nu kommet til 1920'erne. De erfaringer, jeg har nævnt, gjorde det overvejende sandsynligt, at atomkerner er sammensatte systemer; men der kom ikke nogen frugtbar teoridannelse over kernestrukturen, dvs. forklaring af kernens egenskaber på basis af samspil mellem kernens elementære bestanddele. Vi kan i dag se, at denne udvikling ikke kunne

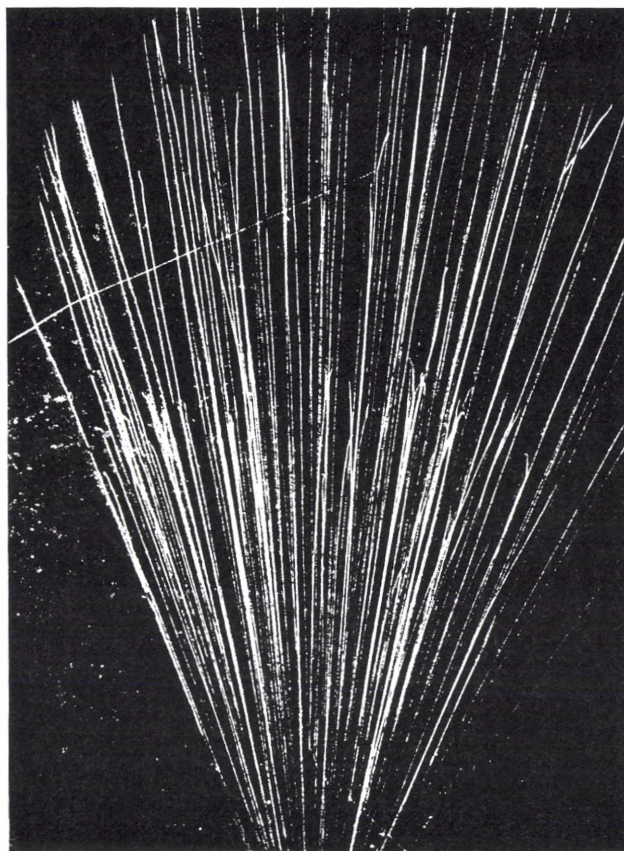
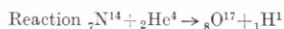


Fig. 2. Tågekammer-billede af alfa-partikel-baner. De fleste alfa-partikler løber lige ud, indtil de gradvis bliver bremset på grund af utallige stød mod luftens molekyler. I et enkelt tilfælde rammer en alfa-partikel en kvælstofkerne (øverst og lidt til højre for midten); resultatet af stødet er en løsrevet brint-kerne, der løber ud til venstre og en ilt-kerne-rekyl, som fortsætter næsten lige ud.



komme i gang, førend man havde opdaget kernens egentlige bestanddele.

Denne opdagelse blev færdiggjort af Chadwick i 1932 med hans påvisning af en ny partikel, neutronen, skabt i en kernereaktion mellem α -partikel og beryllium



Jeg kan ikke her gå nærmere ind på omstændighederne omkring opdagelsen af neutronen ud over at nævne, at allerede i 1920 havde Rutherford spekuleret over den mulige eksistens af en partikel med masse nær ved protonens masse, men med nul elektrisk ladning, en partikel som han forestillede sig bestående af en elektron og en proton tæt bundet sammen. Han og Chadwick havde siden 1920 brugt enhver lejlighed til at lede efter denne formodede nye partikel, og det lykkedes endelig i 1932.

Kort efter neutronens opdagelse var det Heisenberg, der indså to ting: For det første, at den nyfundne neutron sammen med protonen kunne betragtes som atomkernernes fundamentale byggesten. Denne beskrivelse giver en tolkning af kernens heltallige kvantetal (A, Z) således:

Z = antal af protoner

A = antal af protoner + antal af neutroner.

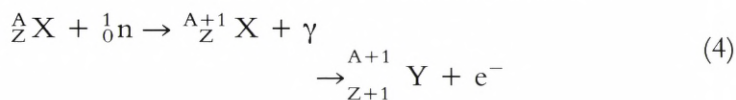
Og for det andet kunne Heisenberg konkludere, at der måtte være en ny naturkraft til at holde kernerne sammen. På dette tidspunkt kendte man kun de elektriske og magnetiske kræfter og tyngdekraften. I kernerne virker de elektriske kræfter frastødende mellem protonerne, og tyngdekraften er alt, alt for svag til at holde kernerne sammen. Derfor måtte der være en ny naturkraft, som kunne virke tiltrækkende mellem neutroner og protoner, og derved holde kernerne sammen. Denne nye naturkraft måtte virke med meget stor styrke, idet man vidste, at den energi, som måtte tilføres en kerne for at løsrive en neutron eller proton, er cirka en million gange større end den tilsvarende energi, som skal til for at løsrive en elektron fra et atom. Denne voldsomme kraft mellem neutroner og protoner har senere vist sig at være det første eksempel i en hel familie af fænomener, kaldet de »stærke vekselvirkninger«, som spiller en afgørende rolle for stoffets atomstruktur. Det er stadig en gåde, hvorfor elektroner er helt upåvirkede af disse stærke vekselvirkninger, som er så vigtige for neutroner og protoner.

Det næste skridt i udforskningen af atomkernerne blev taget af Enrico Fermi og hans medarbejdere i Rom. Fermi indså, at den nylig opdagede

neutron måtte være et meget nyttigt værktøj i studiet af kernerne. Lad mig forklare lidt om hvorfor. Langt det meste af den oplysning, vi har om atomare systemer (og det er lige så sandt for den aktuelle forskning i dag som for forskning i 30'erne eller 20'erne) kommer fra opstillinger, hvor man – groft beskrevet – lader to atomare systemer støde sammen og iagttager de partikler eller stråler, som udsendes efter dette sammenstød. Med en smule poetisk overdrivelse kan vi sammenligne denne fremgangsmåde med en situation, hvor man står i et mørkt rum, hvori en skulptur bliver ramt af en vandstråle. Ens viden om skulpturen må så bygges op af erfaringen om, hvordan sprøjtene fordeler sig.

I begyndelsen af 30'erne var det meget svært at få atomkerner til at støde sammen, fordi de kernepartikler, man rådede over, ikke havde tilstrækkelig energi. Alle kernepartikler, der indeholder protoner, har positive elektriske ladninger og frastøder derfor hinanden. Frastødningen bevirker, at kernepartikler kun kan igangsætte en kernereaktion, hvis de først har tilstrækkelig energi til at overvinde denne frastødning og trænge helt ind til hinanden. De store maskiner, som kan danne meget energirige kernepartikler, kom først senere i udviklingen, og i 30'erne var de tilgængelige partikler kun i stand til at trænge ind til de allerletteste kerner. Men neutronen har ingen ladning og kan derfor trænge ind og fremkalde kernereaktioner i selv de tungeste kerner.

Det var denne helt specielle egenskab ved neutroner, som Fermi fik øje på, og han og hans medarbejdere begyndte at bestråle alle mulige stoffer med neutroner. De kunne straks erfare, at næsten hver gang et nyt stof blev bestrålet med neutroner, blev der dannet nye radioaktive stoffer. Det var virkelig en revolution i kerneforskning. Hvor man i de 15 år siden Rutherford's opdagelse af reaktionen mellem He og N havde fundet en yderligere håndfuld af kunstige kernereaktioner, kunne Fermi nu, inden for et par måneder, vise cirka et halvhundrede nye reaktioner. Han kunne vise, at i de fleste tilfælde var reaktionen af formen



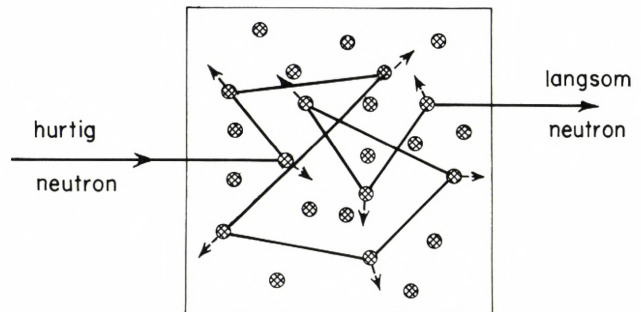
hvor den nydannede atomkerne ${}^{A+1}_Z X$ kunne iagttages på grund af dens radioaktive henfald vist på den anden linie. Symbolet γ på højre side i ligning (4) antyder, at gammastråler bliver udsendt samtidig med dannelsen af kernen ${}^{A+1}_Z X$.

Et af de vigtigste spørgsmål, som umiddelbart melder sig, er spørgsmålet om effektiviteten af neutronen i denne proces; dvs. hvor meget

radioaktivitet der bliver dannet, når et givet antal neutroner passerer en afmålt mængde af et givet stof. Straks begyndte man at iagttage højst interessante variationer i denne effektivitet; f.eks. blev det næsten tilfældigt opdaget, at neutroner, som først havde passeret igennem et stykke paraffin eller vand, var meget mere effektive end neutroner, der kom direkte fra kilden. Fermi indså straks, at paraffin fremkaldte en nedbremsning af neutronen. I disse forsøg blev neutronerne nemlig skabt i α -Be-reaktioner (se ligning (3)) med ret høje hastigheder (ca. en tiendedel af lysets hastighed). I paraffin vil en sådan hurtig neutron støde mod en proton (kernen i et brintatom, hvoraf der er mange i paraffin), og da masserne af neutronen og protonen er næsten ens, vil de to partikler efter stødet i gennemsnit have lige megen energi, dvs. neutronens energi bliver halveret. Den lidt langsommere neutron vil snart igen støde ind i en anden proton i paraffinen, og igen bliver neutronens energi halveret. Efter tyve stød er energien nede på en milliontedel af den oprindelige (se fig. 3). Vi har nu at gøre med en ret langsom neutron, og forsøgene viste, at disse langsomme neutroner i de fleste tilfælde var meget mere effektive i deres reaktioner med kerner end de oprindelige hurtige neutroner – denne nedbremsning kunne i nogle tilfælde forøge mængden af produceret radioaktivitet 10 til 100 gange.

Fig. 3.

Nedbremsning af neutroner i paraffin



$$v \text{ (hurtig neutron) } \sim \frac{1}{10} c$$

$$v \text{ (langsom neutron) } \sim 10^{-5} c$$

$$c = \text{lysets hastighed} = 3 \times 10^{10} \text{ cm / sek.}$$

Disse opdagelser vakte betydelig opsigt i fysikernes kredse, og snart kom flere af verdens ledende teoretiske fysikere med teoretiske analyser af langsomme neutroners reaktioner med atomkerner. Jeg vil gerne gengive hovedpunkterne i disse analyser, delvis fordi de spillede en vigtig rolle som baggrund for Niels Bohrs formulering af compound-kernebegrebet, men også fordi de giver en værdifuld illustration af de værktøjer og den forestillingsverden, som fysikere på dette tidspunkt anvendte i deres analyse af kerneproblemer. Analysen er givet i fig. 4 og fører til følgende konklusioner:

1. Sandsynligheden for neutronindfangning varierer omvendt proportionalt med neutronens hastighed; dette forklarer den forøgede sandsynlighed for reaktioner med nedbremsede neutroner!
2. Sandsynligheden for reaktion med langsomme neutroner skal variere med energien på samme simple måde for alle stoffer.
3. Sandsynligheden for neutronindfangning selv for meget langsomme neutroner er sammenlignelig med eller mindre end sandsynligheden for en reaktion, hvor neutronen til sidst kommer ud af den ramte kerne og fortsætter (en såkaldt spredningsreaktion).

Det er vigtigt at lægge mærke til det grundlæggende billede af neutronens bevægelse i kernen, som danner basis for denne teoretiske analyse; man antager, at bevægelsen er upåvirket af de andre kernepartiklers bevægelser, men kun er bestemt af den totale tiltrækning, som frembringes af hele kernen. Dette billede er en direkte overførsel af erfaringer fra beskrivelsen af atomer, hvor den giver et udmærket udgangspunkt for forståelsen af en elektrons bevægelse inde i atomet.

Som sagt, den fremførte analyse kunne give en forklaring på forøgelsen af indfangningseffektiviteten ved nedbremsning af neutroner; men snart kom nye eksperimentelle erfaringer, som passede yderst dårligt med den analyse. Til at begynde med kom der målinger, som viste, at sandsynligheden for indfangning af langsomme neutroner kunne blive meget, meget større end for spredning – ved nogle atomkerner mere end tusind gange større. Og så kom den helt forvirrende erfaring, at sandsynligheden for indfangning kunne variere ret voldsomt med energien som f.eks. vist i fig. 5. (Desværre er der ikke her lejlighed til at beskrive de elegante forsøg, som førte til opdagelsen af denne effekt; de målinger, som er vist i fig. 5, er resultatet af en meget mere moderne måleteknik.)

Vi kan af disse målinger direkte se, at neutronen forbliver betydelig længere i kernen end forventet ud fra de foregående analyser. Argumen-

tet er følgende: Som Jørgen Kalckar beskriver ovenfor, er der altid i kvantebeskrivelsen en gensidig relation mellem nøjagtigheden i en energibestemmelse ΔE og det tidsinterval Δt , som skal bruges til at foretage bestemmelsen (Heisenbergs usikkerhedsrelationer)

$$\Delta E \cdot \Delta t > \frac{h}{2\pi} \quad (5)$$

hvor det er Plancks konstant, der står på højre side.

Fra neutronens reaktion med Cd kan vi se stærke variationer for en

Fig. 4. Analyse af langsomme neutroners reaktioner med atomkerner, givet af Bethe, Fermi og andre (1935)

I. Hastighed (v) og bølgelængde (λ)

(i) udenfor kernen

$$v_{ud} \sim 10^{-5}c$$

$$\lambda_{ud} = \frac{h}{Mv_{ud}} \sim 10^{-8} \text{ cm}$$

$c = \text{lysets hastighed}$
 $h = \text{Plancks konstant}$
 $M = \text{neutronens masse}$

(ii) inde i kernen

$$v_{ind} \sim \frac{1}{3}c$$

(neutronens binding til kernen kendes fra energien, som skal til for at løsrive neutronen)

$$\lambda_{ind} \sim 4 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

II. Opholdstid i kernen, t_{ind}

(i) tid til at gennemløbe kernen, τ_0

$$\tau_0 = \frac{2R}{v_{ind}} \sim \frac{10^{-12} \text{ cm}}{10^{10} \text{ cm/sek}} = 10^{-22} \text{ sek.}$$

(ii) spejling ved overgang fra v_{ind} til v_{ud}

$\mathcal{S} = \text{gennemtrængningskoefficient}$

$$\sim \frac{\lambda_{ind}}{\lambda_{ud}} \sim 10^{-4} \text{ til } 10^{-5}$$

(iii) opholdstid

$$t_{ind} = \tau_0 \frac{1}{\mathcal{S}} \sim 10^{-17} \text{ til } 10^{-18} \text{ sek.}$$

Fig. 4. (fortsat)

III. Gammastråling; kernens bevægelse sammenlignes med svingninger i en lille antenne.

T = sandsynlighed for stråling pr. sekund

= antennes effekt/energi i én gammakvante

$$= \left(\frac{1}{3} \frac{(2\pi\nu)^4}{c^3} p_0^2 \right) \frac{1}{h\nu} \quad \nu = \text{svingningstal for gammastråling}$$

$$= \frac{E}{h}$$

E = energi i én gammakvante

h = Plancks konstant

p_0 = antennes »dipolmoment«

$$\sim \left(\frac{Ze}{A} \right) R$$

R = kernens radius $\sim 10^{-12}$ cm

$$T \sim 10^{17}/\text{sek.}$$

. . . sandsynlighed for udstråling

$$= t_{\text{ind}} \cdot T \lesssim 1 \text{ for langsomme neutroner}$$

$$\text{NB: udstråling} \propto \frac{1}{v_{\text{ud}}} \text{ p.g.a. } \mathcal{G} \text{ (se II (ii))}$$

ændring $\Delta E \approx 0.1$ eV, som ifølge ligning (5)* kræver et tidsinterval $\Delta t \sim 5 \times 10^{-15}$ sek. eller mere end tusind gange længere end den teoretiske beregning af den tid, neutroner kunne blive inden i en Cd-kerne (se fig. 4). Det er klart, at der er noget helt galt med vores teoretiske udgangspunkt!

Det var Niels Bohr, der først og klarest indså, at disse eksperimentelle erfaringer måtte føre til en radikal ændring i opfattelsen af kernestrukturer og kernereaktioner; det nye billede, som han foreslog, hedder *compound-kernen*, og jeg skal snart forsøge at beskrive dette begreb. Men først vil jeg citere to beretninger fra fysikere, som var yngre forskere på Niels Bohr Institutet på dette tidspunkt.

Otto Frisch, som vi skal møde igen i forbindelse med forklaring af kernespløtning, skrev:

* Værdien af Plancks konstant er $(h/2\pi) = 1.1 \times 10^{-27}$ ergs sek = 6.5×10^{-16} eV sek.

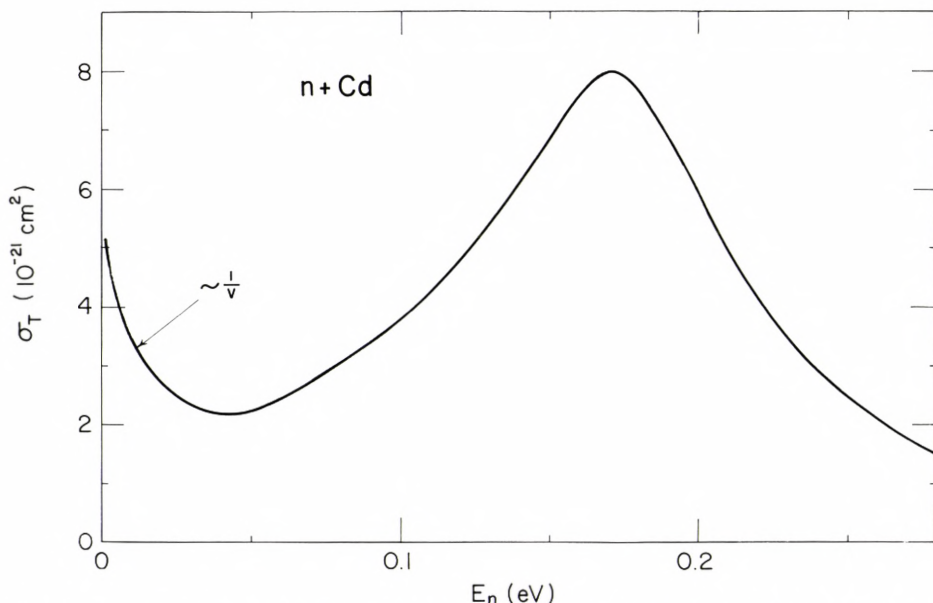


Fig. 5. Sandsynlighed for reaktion af en neutron med en cadmium-kerne. Neutronens energi er angivet i enheder af »elektron-volt«, d.v.s. den energi en elektron ville få ved at gennemløbe en elektrisk spænding på een volt.

Fermi havde nemlig fundet ud af, at neutroner kunne bremses, ved at man lod dem passere gennem stoffer, der indeholdt brint, som f.eks. paraffin eller vand, og at sådanne neutroner meget let blev indfanget af kerner. Dette var særdeles overraskende. Efter hvad man dengang troede om kerner, skulle selv en langsom neutron som oftest passere tværs gennem kernen med ringe sandsynlighed for at blive indfanget. Bethe i USA havde forsøgt at beregne denne sandsynlighed, og jeg husker det kollokvium – i slutningen af 1935 – hvor en eller anden fortalte om Bethes afhandling. Bohr blev ved med at afbryde, og jeg undrede mig, lidt utålmodigt, over at han ikke lod taleren blive færdig. Så standsede Bohr brat midt i en sætning og satte sig ned; hans ansigt var pludselig ganske livløst, og vi var bange for, at han var blevet dårlig. Men efter nogle sekunders forløb rejste han sig igen og sagde med sit undskyldende smil: »Nu forstår jeg det.« Den forståelse, han nåede frem til ved hint mindeværdige kollokvium, er blevet kendt som »compound-kernen«.

En lignende oplevelse er beskrevet af den amerikanske forsker John Wheeler, som senere kom til at arbejde sammen med Niels Bohr om et meget væsentligt bidrag til forståelse af kernespaltningsprocessen. Wheeler skriver (min oversættelse):

Jeg skal aldrig glemme den dag, jeg første gang hørte om disse resultater og deres betydning. Nyheden kom i et seminar i København, arrangeret med kort varsel for at høre om nyheder fra Rom bragt hjem af Christian Møller, der havde tilbragt påskeferien 1935 med Fermigruppen. De store tværsnit, Møller fortalte om, af reaktioner af langsomme neutroner, var helt uforenelige med de forestillinger om atomkerner, man havde dengang. Ifølge disse forestillinger kunne en neutron gennemløbe en atomkerne uden sammenstød på samme måde som elektroner i atomer eller planeter i solsystemet. Møller havde kun talt cirka en halv time og var kun lige begyndt at gennemgå Romgruppens resultater, da Bohr trådte frem og tog ordet. Bohr talte, medens ideerne faldt ham ind. Bohr beskrev, hvordan de store tværsnit fører til forestillinger af stik modsat idéindhold: En gennemsnitlig fri vejlængde for de enkelte neutroner, som er kort i forhold til kernens størrelse. Han sammenlignede en sådan samling af partikler med en væskedråbe. Han understregede, at »compound-kernen« ikke ville kunne huske, hvordan bevægelsesmønsteret blev dannet. Det var klart, før Bohr var færdig og seminariet slut, at en revolutionær omvæltning i opfattelse var under opsejling. Andre lærte om det gennem jungletelegrafien, før han gav sit første foredrag om emnet for det danske Videnskabernes Selskab den 27. januar 1936 med en efterfølgende artikel i Nature.

Disse beretninger giver lidt af et billede af stemningen og stilen i diskussionerne på Niels Bohr Institutet på dette tidspunkt, men jeg må fortælle, at der er stærke indicier for, at Frisch's og Wheelers beretninger beskriver to forskellige seminarer. Det er derfor umuligt, at begge disse lejligheder kan være øjeblikket for undfangelsen af »compound-kerne«-ideen. Jeg er tilbøjelig til at være enig med professor Rudolf Peiels, der har gennemgået alle de mange breve og manuskripter i Niels Bohr Arkivet og konkluderet, at Bohr havde tænkt længe over disse problemer og gradvis udviklet compound-kerne ideen. De dramatiske begivenheder beskrevet af Frisch og Wheeler må således svare til lejligheder, hvor endnu en vigtig brik i dennes opbygning faldt på plads.

Det centrale dokument i compound-kerne-historien er Bohrs artikel i Nature, nævnt i Wheelers beretning. Det var om denne artikel, at Weisskopf skrev i 1955,

Sjældent har en enkelt afhandling i den grad domineret et af fysikkens forskningsområder, som Bohrs foredrag for det Kgl. Danske Viden-

skabernes Selskab i 1936, hvor han foreslog ideen om compound-kernen. I de 18 år, der er gået siden dens publicering, har den haft en afgørende indflydelse på alle analyser af kernereaktioner.

Dog vil enhver, der kigger på denne afhandling, straks erfare, at den er ganske anderledes end næsten alle de andre afhandlinger om teoretisk fysik, som han har set. Den er kun på fem sider og indeholder ingen formler, ingen kvantitative eksperimentelle data, ingen udregninger af specifikke tal, som kunne sammenlignes med eksperimentelle resultater. Den består udelukkende af en beskrivelse af nogle billeder (af forhold i atomkernerne) og en diskussion af, hvorledes disse billeder kunne bruges til at forklare vigtige træk i de nylig fundne resultater i atomkerneforskningen. I denne diskussion er det meget vigtigt for Bohr at fremhæve den store forskel mellem atomet, en luftig struktur med stor afstand mellem de enkelte elektroner, og atomkernen, et tætpakket system, hvor de enkelte neutroner og protoner er i konstant berøring med hinanden. Medens atomets arkitektur fører til sammenligninger med planetsystemer, skal atomkernerne ifølge Bohr snarere sammenlignes med en væskedråbe, hvor molekylerne fylder næsten hele volumenet, men alligevel kan deltage i kollektive strømninger eller bølger.

Jeg kender ingen billeder, som bedre belyser compound-kernens egentlige tankegang, end de to lysbilleder, som Bohr selv brugte i sine foredrag i Videnskabernes Selskab. Det første (fig. 6) illustrerer den store forskel i et reaktionsforløb, afhængig af om den indkommende partikel støder mod de enkelte partikler af det ramte system eller ej. Hvis de enkelte kugler i midterområdet af figuren er fjernet, vil den indkommende kugle løbe ind på den ene side, få et skub og derefter løbe ud på den anden side. Reaktionstiden bliver ganske kort. Det skub, kuglen får på vejen ind, og den barriere, som den skal overvinde for at komme ud, giver en billedlig forestilling om kernens tiltrækning på en indkommende neutron.

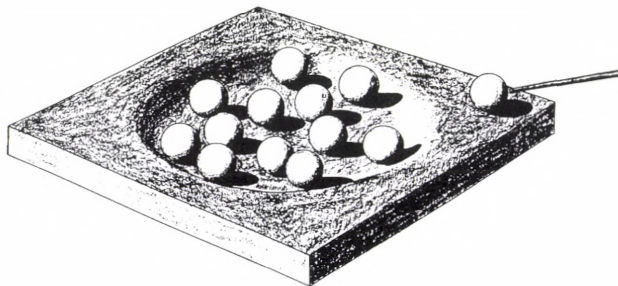


Fig. 6.

Men hvis nu den indkommende neutron kan ramme andre neutroner og protoner, så bliver reaktionens forløb et ganske andet. Den indkommende neutron vil meget hurtigt ramme en af disse partikler, og så vil energien blive delt mellem de to, og derefter vil ingen af dem have tilstrækkelig energi til at komme ud; de vil kunne løbe ud mod kernens kant, men dér vil kernens tiltrækning tvinge dem tilbage. Hver af disse to vil nu snart igen ramme andre af kernens partikler, og snart bliver energien fordelt over alle de tilstedeværende partikler. Disse partikler fortsætter med at støde ind i hinanden og udveksle energi. Der må således gå en overordentlig lang tid, før den meget usandsynlige situation opstår, hvor en af partiklerne har fået næsten hele energien og derfor har mulighed for at løbe ud af kernen. Dette forløb betyder en mange tusinde ganges forøgelse af reaktionstiden (sammenlignet med det forløb, som vi beskrev før, hvor neutronen bare løb uhindret gennem kernen).

Denne forøgelse af reaktionstiden giver forklaringen på den store sandsynlighed for indfangning af neutronen, idet kernens udstrålingskraft pr. sekund forbliver næsten konstant al den tid, neutronen opholder sig inde i kernen. Når tiden bliver så meget længere, så bliver sandsynligheden for udsendelse af gammastråling ganget med den samme store faktor.

Endnu mere umiddelbart er det klart, at forøgelsen af reaktionstiden åbner mulighed for en forståelse af de ejendommelige variationer i sandsynligheden for neutronindfangning, som vi har set i fig. 5. Når varigheden er så meget længere, er det ikke længere noget problem at få store variationer i sandsynligheden for strålingsudsendelse med lille variation i neutronens energi. En formel, som giver en detaljeret beskrivelse af den iagttagne energivariation, blev afledt af Breit og Wigner i USA samtidig med og uafhængigt af Bohrs udvikling af compound-kerne-begrebet.

Essensen af compound-kerne-begrebet, som antydet i billedform i fig. 6, er, at en indkommende neutrons energi hurtigt bliver fordelt på alle de tilgængelige partikler i den ramte kerne. Dette fører for det første til en meget stor forøgelse i reaktionstiden og for det andet til et meget kompliceret mellemstadium i reaktionen, hvor energien er fordelt over alle de tilgængelige partikler. Efter dette komplicerede mellemstadium må reaktionens endelige afslutning være bestemt af statistiske love uden »hukommelse« for den proces, hvorved systemet er blevet dannet.

Det andet billede, som Bohr benyttede i sit foredrag i Videnskabernes Selskab (fig. 7), viser en skematisk tegning af energierne af en kernes kvantetilstande. Et sådant billede er noget mere teknisk og en god del

mere abstrakt end de andre begreber, som jeg har omtalt; men jeg har taget det med, fordi begrebet er så centralt i al kvantefysik, også i den aktuelle forskning over en bred front. Det er igennem tyding af mønster og struktur i tilsvarende billeder, at fysikere først fik en dyb indsigt i atomer og molekyler, senere i atomkerner og nu i atomare systemer fra superledere til kvarker. Disse mønstre kan ses som en slags kode, hvori de atomare systemer giver præcise udtryk for deres indre bevægelser. En stor del af al kvantefysik i dette århundrede er knyttet til den gradvis voksende indsigt i tyding af denne kode.

Men lad os nu se på Niels Bohrs originale indsigt i kernens spektre. På dette tidspunkt kendte man nogle eksempler på de laveste tilstande i enkelte kerner, og kendte deres energi, som er groft sagt en million gange så stor som energien, der kan anslå et atom. Bohr forestillede sig, på basis af analogien til en væskedråbe, at disse laveste anslag kunne svare til kollektive svingninger i kernens form eller til trykbølger i kernen. Med voksende energi vil det være muligt at anslå mange forskellige typer af kollektive svingninger. Den totale energi vil være summen af energien i de forskellige typer svingninger. Antallet af kvantetilstande

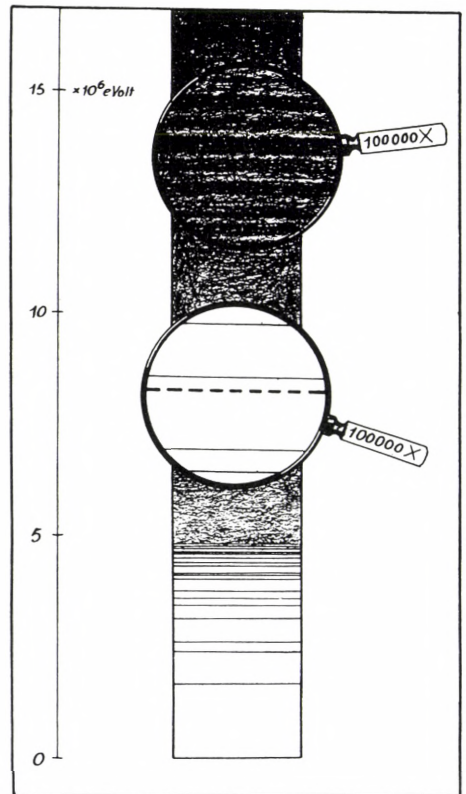
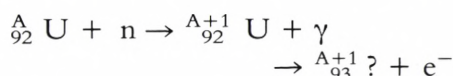


Fig. 7.

svarer til antallet af de forskellige måder, på hvilke den totale energi kan opdeles mellem de mange forskellige typer af svingninger. Når vi derfor opnår tilstrækkelig høj energi, bliver der et enormt antal af kernetilstande, og energiforskellen mellem tilstandene bliver tilsvarende mindre. Alle de mange, mange tilstande kan blive sat i sving af en neutron, der kommer ind i kernen udefra. Dette står i skarp kontrast til forholdet i et atom, hvori en hurtig elektron passerer igennem; oftest passerer elektronen lige igennem, men hvis den skulle støde ind i en enkelt elektron, bliver kun denne elektron flyttet fra en bane til en anden, og så er der ganske få kvantetilstande i det tilsvarende spektrum.

Straks efter at Niels Bohr havde vist vejen, blev det nye billede af kernens struktur taget op af en lang række andre fysikere og videreudviklet og anvendt til at beskrive de mange igangværende kerneforskningsforsøg. Niels Bohr selv bidrog til denne videreudvikling, især i et vigtigt arbejde gennemført sammen med den danske medarbejder Fritz Kalckar. Det er ikke her muligt at fortælle om de mange fænomener, som således blev forstået på basis af compound-kerne-ideen. Men jeg vil gerne antyde noget af denne udvikling ved at fortælle lidt om opdagelsen og fortolkningen af kernespaltningen.

Denne historie går tilbage til Fermis forsøg i 1934, hvor han og hans medarbejdere på systematisk vis bestrålede alle mulige stoffer med neutroner; deriblandt blev uran, det tungeste af de kendte grundstoffer, bestrålet. De fandt ud af, at ligesom i næsten alle de andre bestrålede stoffer blev der dannet nye radioaktive stoffer i bestrålet uran. Dette var meget spændende, fordi man kunne forestille sig, at



hvor det stof, der blev skabt således med ladning $Z = 93$, måtte være et nyt grundstof, som ikke ellers findes her på jordkloden – et menneskeskabt grundstof. Som sagt, bestråling af uran skabte radioaktivitet; men problemet var, at ikke kun ét radioaktivt stof blev dannet, men mindst fem, og det var ikke muligt at indpasse disse stoffer hverken i det periodiske system af grundstoffer eller i radioaktive familier. Fermi og hans gruppe kom aldrig videre med dette problem, selv om mange forsøg blev gennemført.

Først fire år senere kom det afgørende fremskridt med disse problemer, da Hahn og Strassmann i Berlin viste, at et af de radioaktive stoffer, skabt med neutronbestråling af uran, var kemisk ikke til at skelne fra barium (${}_{56}\text{Ba}$). Men hvordan kan neutronbestråling af uran ($Z = 92$)

skabe en atomkerne med $Z = 56$? det var næsten ikke til at tro på. Hahn og Strassmann skrev i deres afhandling (min oversættelse): »Som kemikere må vi på basis af de kort beskrevne forsøg ændre benævnelserne Ra, Ac, Th i det ovenfor angivne skema til Ba, La, Ce. Som kernekemikere, et fag der på sin vis ligger tæt på fysik, kan vi endnu ikke tage dette spring, som ville være i konflikt med alle tidligere erfaringer i kernefysik.« Men deres kemi stod fast.

Det var Frisch og Meitner, som gav forklaringen på, hvordan dette kunne ske. Den afgørende udvikling i deres tanker er beskrevet af Frisch selv. Han var på juleferie i Sverige sammen med Lise Meitner, som var hans tante. Han skriver:

Jeg havde altid haft for skik at fejre jul med hende i Berlin. Denne gang blev hun inviteret til at tilbringe julen hos nogle svenske venner i Kungälv (i nærheden af Göteborg), og hun inviterede nu mig med. Det skulle blive det mest betydningsfulde besøg i hele mit liv. Da jeg kom ud fra mit hotelværelse efter den første nat i Kungälv, fandt jeg Lise Meitner i færd med at studere et brev fra Hahn, øjensynlig meget forvirret over det. Jeg ville diskutere et nyt eksperiment, jeg var ved at planlægge, med hende, men hun ville ikke høre efter; jeg måtte læse det brev. Dets indhold var virkelig så forbløffende, at jeg i begyndelsen var tilbøjelig til at stille mig skeptisk. Hahn og Strassmann havde fundet, at de tre stoffer ikke var radium, kemisk set; det havde nemlig vist sig, at det var umuligt at adskille dem fra det barium, som de havde tilsat for at lette de kemiske undersøgelser. De var, omend modstræbende og tøvende kommet til den konklusion, at det var isotoper af barium.

En formodning om, at de alligevel havde begået en fejl, blev afvist af Lise Meitner; hun forsikrede mig, at Hahn var alt for god en kemiker til, at dette kunne være muligt. Men hvordan kunne da barium blive dannet af uran? Man havde aldrig før fraspaltet dele af atomkerner, der var større end protoner og heliumkerner (alfa-partikler), og den tanke, at et større antal af sådanne fragmenter skulle blive fraspaltet på én gang, kunne afvises; dertil var der ikke energi nok. Det var heller ikke muligt, at urankernen kunne være blevet spaltet midt over. En atomkerne er jo ikke som et skørt legeme, der kan spaltes eller brækkes i stykker. Bohr havde fremhævet, at atomkernen langt snarere lignede en væskedråbe. Måske kunne en dråbe deles i to mindre dråber, hvis det foregik mere gradvis, ved at den først blev aflang, dernæst snævredes ind på midten for til sidst nærmere at blive revet

end brækket i to stykker. Vi vidste, at der var stærke kræfter, der ville modvirke en sådan proces, på lignende måde som overfladespændingen hos en almindelig væskedråbe modvirker dens deling i to mindre dråber. Men atomkernen adskilte sig på ét væsentligt punkt fra en almindelig dråbe: den var elektrisk ladet, og man vidste, at dette ville formindske virkningen af overfladespændingen.

Da vi var kommet så vidt, satte vi os ned på en træstamme (hele diskussionen havde fundet sted, medens vi vandrede i sneen gennem skoven, jeg med ski på, Lise Meitner uden) og begyndte at regne på nogle papirlapper. Vi kom til det resultat, at urankernens ladning virkelig var stor nok til næsten fuldstændigt at ophæve virkningen af overfladespændingen; urankernen kunne faktisk være en temmelig ustabil dråbe, der var rede til at dele sig ved den mindste påvirkning (såsom stødet fra en neutron).

Et par dage senere rejste jeg temmelig spændt tilbage til København. Jeg var ivrig efter at forelægge vore spekulationer – på dette tidspunkt var det faktisk ikke andet – for Bohr, der netop skulle rejse til USA. Da jeg fik fat på Bohr, havde han kun nogle få minutter tilovers, men jeg var næppe begyndt at tale, før han slog sig for panden og udbrød: »Sikke nogle idioter, vi har været allesammen! Men dette her er jo vidunderligt! Det er netop sådan, det må være! Har De og Lise Meitner skrevet en afhandling om det?« Jeg sagde, at det havde vi ikke, men vi ville gøre det straks. Så styrtede han af sted for at nå båden.

Bohr blev straks helt optaget af de nye perspektiver, som denne opdagelse åbnede for. De næste par skridt i denne udvikling er beskrevet i en livlig beretning af Léon Rosenfeld, som rejste sammen med Bohr på denne tur til USA. Han skriver:

Nu springer jeg til sidst over til de dage i begyndelsen af 1939, da vi kom til Princeton med den store nyhed, at Frisch og Meitner lige havde forklaret Hahn og Strassmanns opdagelse som en spaltning af urankernen. På skibet havde vi under hele sejladsen drøftet de dertil knyttede teoretiske problemer, og Bohr havde som sædvanlig fundet det afgørende punkt at gribe sagen an på: Spaltningen viste sig at passe udmærket ind i den almindelige beskrivelse af kernereaktioner baseret på compound-kerne-begrebet; den svarede til en deformation af compound-kernen førende til dens spaltning i to omtrent lige store dele, og det var nemt at forstå, at for de tungeste kerner skulle den proces

ikke være mindre sandsynlig end udsendelsen af enkelte neutroner. Mere vidste vi ikke, indtil Placzek (vistnok en af de første dage i februar) ankom til Princeton, og vi så ham ved morgenmaden i Nassau Club.

»Nu,« bemærkede Bohr under samtalen, der naturligvis drejede sig om fissionen, »er vi endelig fri for alle disse isomerer af transuraner.« Dette fremkaldte imidlertid en skarp protest fra Placzek, idet han især fremhævede vanskeligheden ved at forene den temmelig skarpe indfangningsresonans i uran ved 10 eV med det glatte forløb af fissionstværsnittet i det samme energiområde. Ved thorium derimod, der har en lignende resonans for indfangning af langsomme neutroner, kan fissionen kun fremkaldes ved hurtige neutroner; tærskelen ligger ved 1,5 MeV. Da Bohr hørte dette, blev han rastløs, og snart rejste han sig fra sin stol. »Lad os gå til Fine Hall,« (hvor han havde sit arbejdsværelse), sagde han til mig; og jeg var vel nødt til at følge ham, medens Placzek overlodes til sin skæbne. Undervejs (der var kun fem minutters gang) var Bohr ganske tavs, fordybet i tanker. Men da vi kom ind i arbejdsværelset, styrtede han hen til tavlen, idet han sagde til mig: »Nu skal du høre, jeg har det hele!« Og uden et ord begyndte han at tegne på tavlen. Han tegnede først en figur forestillende det totale neutrontværsnit for thorium som funktion af energien således, fig. 8a.

Dernæst tegnede han ved siden af en fuldstændig identisk figur (blot med 0.5 MeV for fissionstærskelen), men han mærkede den med U^{238} og skrev massetallet 238 meget omhyggeligt med tykke cifre. Til slut tegnede han under den sidstnævnte figur fig. 8b.

Igen blev massetallet, nu 235, fremhævet med et stort forbrug af kridt. Det var velkendt, at indfangningsresonansen skulle tilskrives den hyppige uranisotop med massetal 238; thi ellers ville maksimum overstige den af teorien fastlagte absolutte grænse. Men: hvad Bohr nu havde indset, var, at fraværelsen af resonans for fission i det samme energiområde kun kunne betyde, at denne isotop slet ikke spaltes ved neutroner med sådanne energier og altså opfører sig kvalitativt ligesom thorium; til gengæld må netop den sjældne isotop med massetal 235 besidde et meget stort tværsnit for fission ved langsomme neutroner. Her havde vi en af disse typiske logiske analyser, som lynhurtigt kunne foregå i Bohrs hjerne; og der manglede heller ikke denne gang den sædvanlige skuffelse, da det viste sig, at næsten ingen af de fysikere, som i de følgende dage hørte Bohrs argument, kunne vurdere dets kraft. De sagde alle: »Det er en interessant hypotese, ... nu må vi gøre forsøg ...«.

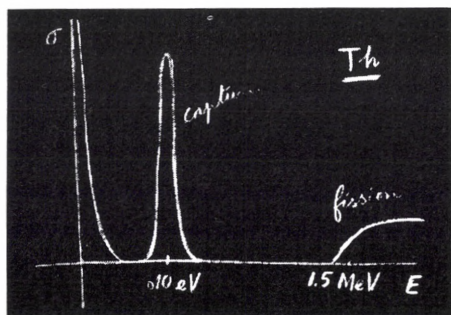


Fig. 8a.

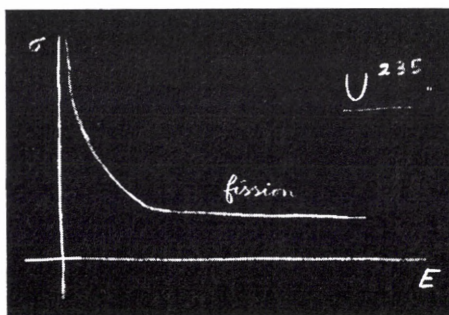


Fig. 8b.

Bohr kunne gå videre og forklare forskellen mellem ^{232}Th og ^{238}U på den ene side og ^{235}U på den anden side med kernens »pairing effect«; det var kendt, at alle kerner med lige antal af neutroner (eller protoner) har en større bindingsenergi, end hvis dette tal er ulige – kernepartikler vinder en ekstra binding ved at danne par. Når ^{235}U har et ulige antal neutroner, vil tilførsel af en neutron skabe et ekstra par, og således bliver den frigjorte energi større end ved tilførsel af en neutron til ^{232}Th eller ^{238}U , hvor alle neutroner er parrede i forvejen. Denne ekstra energi er lige nok til at bringe systemet $^{235}\text{U}+n$ over tærskelen for kernespløtning, medens $^{238}\text{U}+n$ og $^{232}\text{Th}+n$ først kan nå denne tærskel, når neutronen medbringer ca. 1 MeV af kinetisk energi.

Det er måske unødvendigt at sige, at dette forhold, som Niels Bohr afslørede på basis af et smukt og strengt logisk argument, blev af afgørende betydning for den senere anvendelse af kernespløtningsprocessen såvel til militærvåben som til udnyttelse som fredelig energikilde. Niels Bohr fortsatte sin analyse af en lang række fænomener knyttet til kernespløtningsprocessen og publicerede seks måneder senere sammen med John Wheeler en skelsættende afhandling, som har dannet grundlag for alt senere arbejde med dette emne, helt op til vore dage.

Jeg kan ikke her nærmere beskrive de mange fysiske ideer og resultater, som dette værk indeholdt, men jeg vil gerne til slut give et kort indblik i compound-kernens senere skæbne i fysikkens udvikling. Efter den anden verdenskrig kom der et vældigt opsving i bestræbelserne på at udforske atomkernens egenskaber – en indsats, der blev båret af forskere i alle verdensdele. Et af de første resultater af denne store indsats blev en eksperimentel konstatering af, at sandsynligheden for, at en indkommende neutron vil ramme en kernepartikel inde i kernen, er meget mindre, end man havde troet i tiden siden undfangelsen af compound-kernedejen. En neutron kan faktisk gennemløbe hele atomkernen, måske end-

da flere gange, inden den støder sammen med en af kernepartiklerne. Derfor må man sige, at et af de centrale argumenter, som blev brugt som begrundelse for compound-kernen, viste sig at være forkert; men alligevel havde denne idé dannet grundlag for næsten alt, hvad man forstod angående atomkerner. Niels Bohr tog dette paradoks op og skrev nogle foreløbige ideer om dets løsning i et notat (1949), som er opbevaret i Niels Bohr Arkivet, men som aldrig blev publiceret.

Andre tog også dette emne op, og det viste sig, at det ikke var nødvendigt for compound-kerne-dannelse, at neutronen skulle støde sammen med en kernepartikel, inden den havde gennemløbet kernen en enkelt gang. I en kvantebeskrivelse må man tage hensyn til neutronens bølgeegenskaber, og en bølge ville blive stærkt spejlet ved kerneoverfladen (se diskussion i fig. 4). Neutronen kan derfor ikke komme ud efter kun ét gennemløb af kernen, men bliver tvunget til at gå frem og tilbage mange gange, inden den kommer ud. Hvis sandsynligheden er stor for sammenstød inden for det nu meget længere tidsrum, imedens neutronen løber frem og tilbage, vil det sammenstød til sidst føre til en energifordeling mellem alle de tilgængelige partikler og dannelse af en compound-kerne. Jeg skal ikke forfølge disse ideer videre, da de fører hen til perioden, efter at Niels Bohr var aktiv deltager, men jeg synes, at det var værdifuldt at tage disse sidste med, fordi de giver et smukt eksempel på, hvorledes man i fysikkens udvikling ofte oplever, at store landvindinger fra en tidligere tid senere kan se ud til at være i konflikt med nyere erfaringer. Det ligger i sagens natur, at det, der var sandt før, stadig er sandt; og derfor, som vi har set det med compound-kerne-begrebet, bliver de gamle landvindinger som regel bevaret, men nu indpasset i en større ramme.

Citerede artikler

- O. R. Frisch, i: *Niels Bohr, Hans liv og virke fortalt af en kreds af venner og medarbejdere*, Schultz Forlag (1964).
- J. A. Wheeler, i: *Nuclear Physics in Retrospect, Proceedings of a Symposium on the 1930's*, University of Minnesota Press (1979).
- V. F. Weisskopf and F. L. Friedman, i: *Niels Bohr and the Development of Physics*, Pergamon Press (1955).
- L. Rosenfeld, i: *Niels Bohr, Et mindeskrift*, Fysisk Tidsskrift (1963).