Torsten Wilner

ATOMARIUM

Dit atomvetenskapen hunnit

Efterföljande artikel är en utvidgning och aktualisering av de artiklar i anslutning till Tekniska Museets Atomarium, som Laborator T. Wilner publicerat i Dædalus 1953, 1954 och 1957.

Tekniska Museets Atomarium är uppbyggt kring en samling atomfysikaliska demonstrationsapparater av originellt slag. Anläggningen är förenad med museets demonstrations- och föreläsningsverksamhet, och den visas endast i samband med föredrag. De arbetande apparaterna och modellerna äga en dramatisk effekt, som enkelt och påtagligt framhäva några av den moderna atomfysikens väsentliga drag. Framställningen har därför något att ge åt alla, oavsett ålder och förkunskaper.

Den här följande beskrivningen ägnas i särskild grad åt kärnfysiken och dess tekniska tillämpningar i samband med utvinning av atomenergi. Atomforskningens resultat ha emellertid på ett genomgripande sätt påverkat naturvetenskapens och teknikens alla områden. Tekniska Museet bygger vidare på den grund som lagts, och intresset knytes därvid även till andra egenskaper hos atomerna, såsom deras förmåga att binda varandra på olika sätt, bilda molekyler och bygga upp materien i alla dess skiftande former. Detta leder in på ett annat av vår tids tekniskt mest betydelsefulla områden, kemien.

Atommodell.

Atomarievisningarna bruka inledas med en allmän orientering över materiens och atomernas byggnad. Bohrs atommodell beskriver atomen såsom en positivt laddad kärna med däromkring i olika banor kretsande negativa elektroner. Elektronhöljet är på detta sätt uppbyggt i olika skal, där elektronerna ha olika innehåll av energi. Varje grundämne har ett karakteristiskt antal kärnladdningar och i grundtillståndet ett däremot svarande antal elektroner i höljet.

Fältelektronmikroskop.

Hos ämnen i form av kristaller motsvaras den yttre regelbundenheten av en bestämd ordning i den inre strukturen. Mycket vackra experiment belysande dessa förhållanden kunna göras med det av Erwin Müller utvecklade fältelektronmikroskopet (1 o. 2). Museet har förvärvat ett exemplar av Leybolds tillverkning. Apparatens huvuddel utgöres av en lufttom, klotformig glaskolv med en i mitten anbragt ytterst fin spets, utgörande en enhetlig kristall av metallen volfram. Inuti kristallen bilda atomerna ett regelbundet gittermönster av kubisk karaktär. Den sida av kolven mot vilken spetsen är riktad är belagd med ett lysämne. Laddas nu spetsen negativt med hög spänning, drivas elektroner direkt ut ur gittret, och detta sker till följd av strukturen med olika intensitet i olika riktningar. Elektronerna stråla radiellt ut mot lysytan, där de framkalla en bild av spetsens ändyta

i omkring femhundratusenfaldig förstoring. Gitterstrukturen framträder här såsom ett vackert och regelbundet mönster med omväxlande ljusa och mörka partier. Den direkta inblick i materiens inre som på detta enkla sätt bjudes är högst märklig. Experimentet kan emellertid drivas längre. Från en särskild glödelektrod förångas en ringa mängd av metallen barium. De bariumatomer som råka slå ned på spetsen framträda inom apparatens bildfält såsom små lysande prickar, företrädesvis grupperade kring vissa bestämda partier av bildmönstret. Uppvärmes nu spetsen — vilket kan ske på elektrisk väg — iakttages värmerörelserna direkt såsom en tilltagande oro hos de enskilda bariumatomerna. Stegras temperaturen tillräckligt, förångas beläggningen på spetsen, de lysande punkterna glesna alltmera, och slutligen framträder volframgittret i sin ursprungliga rena form.

Såväl atomerna själva som de system som byggas upp därav — molekyler eller kristallgitter — kunna upptaga eller avgiva energi. Förloppen ske alltid plötsligt och språngvis. Liksom själva materien visar även energien diskontinuerlig karaktär. När vi se det hela i stort — och ytligt — kunna dessa diskontinuiteter dock ej iakttagas. De nämnda förhållandena spela emellertid en avgörande roll vid alla såväl fysiska som kemiska förlopp.

★

Lysskärm, energinivåer.

Några av elektronhöljenas energiförhållanden kunna ganska påtagligt demonstreras med hjälp av fosforescerande lysfärger, vilka ha en särskild förmåga att upptaga och magasinera ljusenergi. När materialet belyses, upptaga en del av elektronerna energi, och de sägas därvid övergå till högre *energinivåer*. När de återgå till lägre nivåer, utsändes ljus. De högre nivåerna ha här karaktären av magasinsnivåer, där elektronerna ha viss benägenhet att dröja kvar. Värmerörelsen inom materialet ger emellertid då och då impulser, som leda till återgång under utsändande av fosforescensljus. Vid stark avkylning minskas värmerörelsen, tillståndet blir mera stabilt och ljuset dör bort. Energien konserveras i »djupfryst» form. Efter »upptining» återkommer fosforescensljuset, men det dör åter bort alltefter som den upplagrade energien förbrukas. I djupfryst tillstånd kan materialet emellertid behålla den magasinerade energien under lång tid. Förloppet är en motsvarighet till den fixering av ett visst utgångstillstånd som all fryskonservering innebär. Fryskonserverade varor bibehålla därför sin friskhet så länge den låga temperaturen

bibehålles. Uppvärmning av lysfärgen eller bestrålning med infrarött ljus ger motsatt effekt. Ljusstyrkan ökar tillfälligt, men den avtager snabbt genom den ökade förbrukningen av upplagrad energi.

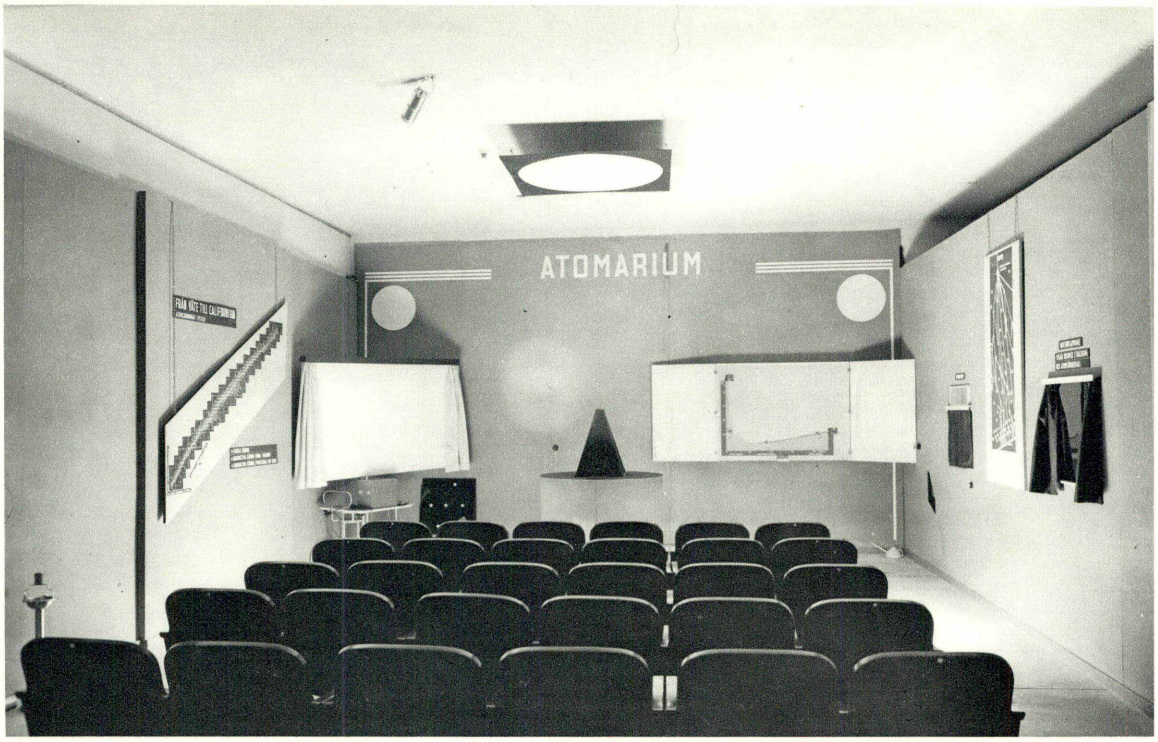
I Atomariet göres försöken direkt på ytan av en större lysskärm, där de framträda på ett effektfullt sätt. Skärmen »laddas» med ljus från en kraftig projektionslampa försedd med bländskydd. Ytan kan kylas ned med ett stycke kolsyreis, och för uppvärmning användes en vanlig elektrisk värmestrålare.

Ett demonstrativt inslag är den »atomporträttering» av åskådarna som lätt göres på lysskärmen. Efter några sekunders belysning framträder den avbildades silhuett såsom en kvarvarande skugga i naturlig storlek. Text och figurer ritas på skärmen i lysande skrift med en särskild liten skrivlampa, och det hela kan snabbt åter tagas bort, om den större lampan användes som »tavelsudd». En »svart» tavla av detta slag är en värdefull tillgång vid experiment i skymning eller i mörker.

När ljus avlämnar energi till elektronerna, sker detta i form av impulser, som hos ljus av olika våglängd ha olika energiinnehåll. Blått ljus är förhållandevis kortvågigt, och det är energirikare än exempelvis det långvågigare gula ljuset. En elektron kan icke lyftas upp till högre energinivå — exciteras — om icke den inkommande ljusimpulsen har energi nog för detta. Detta grundläggande förhållande kan lätt visas med hjälp av lysskärmen. Två glaskärl, det ena innehållande en djupt blå lösning och det andra en gul lösning hålles framför skärmen och genomlysas med en stark lampa. Det energirika ljus som den blå lösningen genomsläpper uppväcker fosforescens, och därför framträder här ingen kvarstående skuggbild. Den gula lösningen absorberar energirikt ljus och genomsläpper trots sin för ögat ljusa färg endast energifattigare sådant. Därför uppkommer här en helt mörk skugga.

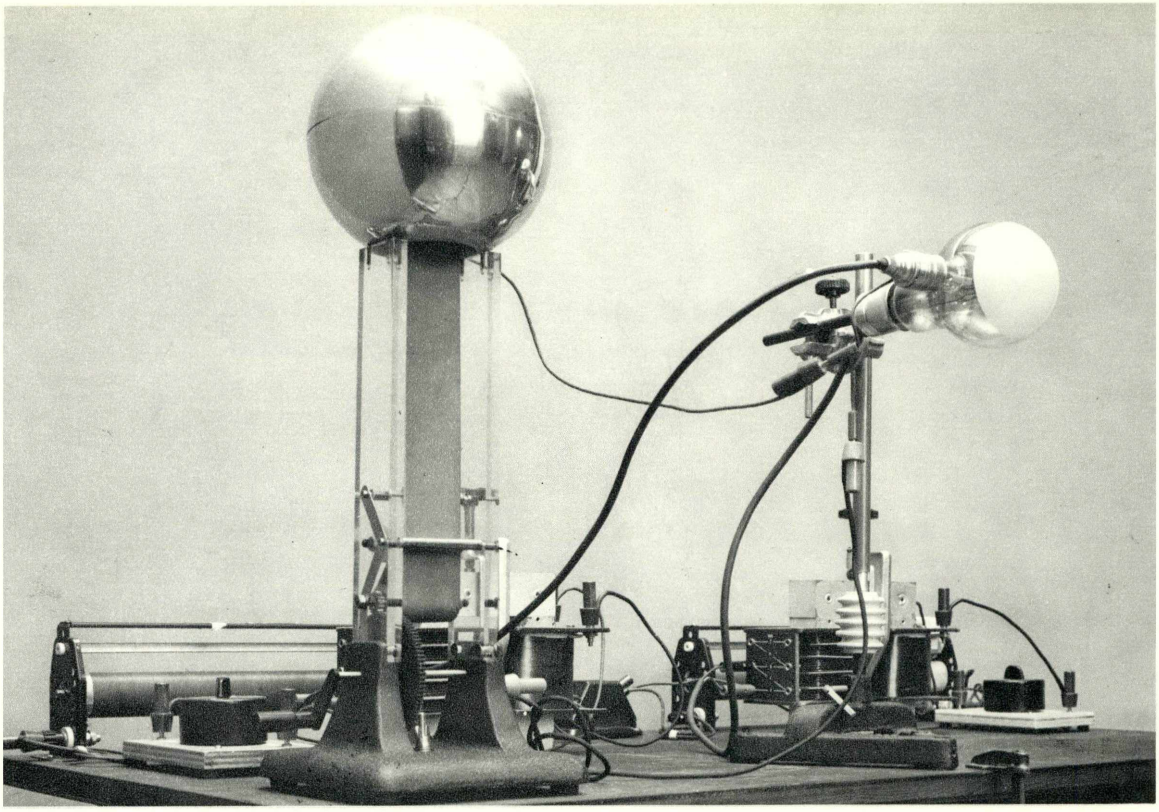
Grunden till materiens olika egenskaper ligger hos atomerna. De flesta av dessa egenskaper, såväl fysiska som kemiska, förmedlas av elektronhöljet, atomens »utåtvända» del. Det är också genom elektronhöljet som atomerna binda varandra, forma molekyler eller kristallgitter och bygga upp materien i alla dess mångskiftande fysiska och kemiska former.

Utom ljuset ha även många andra praktiskt viktiga energiformer sitt ursprung inom elektronhöljet. Vi kunna nämna den kemiska energin, vilken bl.a. kan tillgodogöras såsom förbränningsenergi, samt

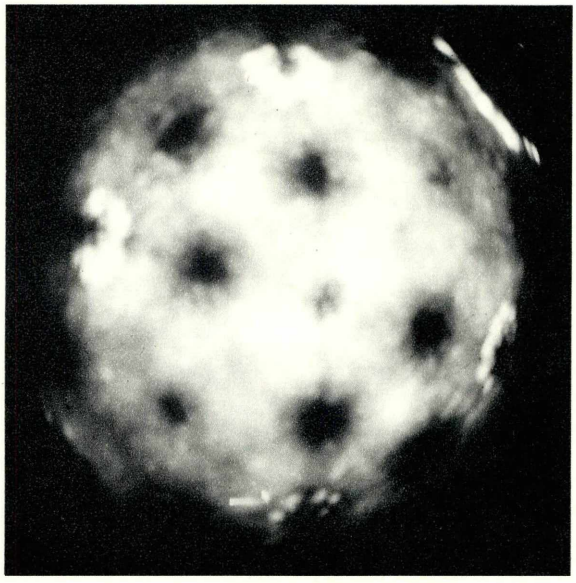




Tekniska Museets Atomarium. Då en del demonstrationer fordra mörkeranpassade ögon, är belysningen i salen starkt dämpad. På en fosforescerande lysskärm demonstreras åtskilliga av atomernas egenskaper. Till höger, i nischer i väggen, visas naturliga atomkärnsönderfall med hjälp av scinstallationsskärm samt en kontinuerligt arbetande dimkammare. I taket projicieras ett partikelspel, som belyser olika kärnprocesser. Atomkärnornas byggnad och den kosmiska strålningens karaktär visas med lysfärgbelagda figurer. Atomkärnornas energiförhållanden samt olika möjligheter att utvinna atomenergi beskrives med hjälp av en anordning, byggande på kärnfysikens bindningsenergikurva.



Fältelektronmikroskop enligt Erwin Müller. I en lufttom glaskolv är en kristall av metallen volfram (genomskärning omkring 0,0002 mm) anbragt. När denna laddas negativt med hög spänning, kastas elektroner ut från kristallen och ge på kolvens lysfärgbelagda sida en »skuggbild» av kristallens struktur med en förstoring av ca 500 000 gånger.

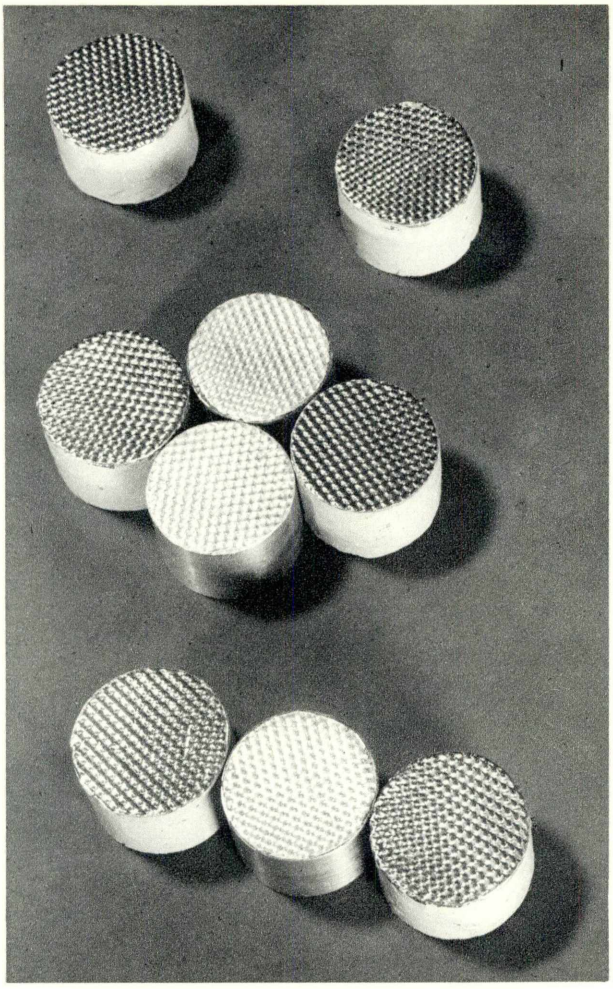


På lysfärgytan framträda regelbundet ordnade mörka fläckar, vilka markera de riktningar i vilka elektronemissionen hämmas av kristallens atomplan. Förångas en ringa mängd av metallen barium inom kolven, framträda på bilden ljusa fläckar, företrädesvis synliga kring de mörka partierna. Dessa fläckar markera enskilda bariumatomer, som slagit ned på kristallytan.

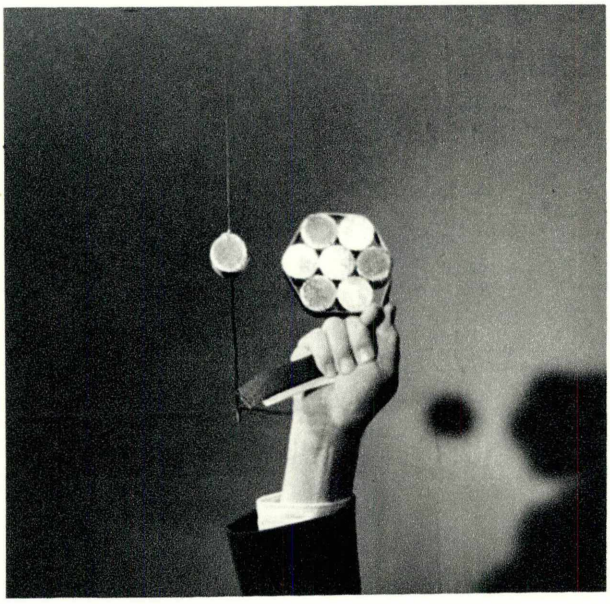
Modeller för att illustrera atomkärnornas byggnad och egenskaper.
Överst: Två magneter, båda med nordpolen riktad framåt, stöta bort varandra i likhet med vad de positivt laddade protonerna göra.

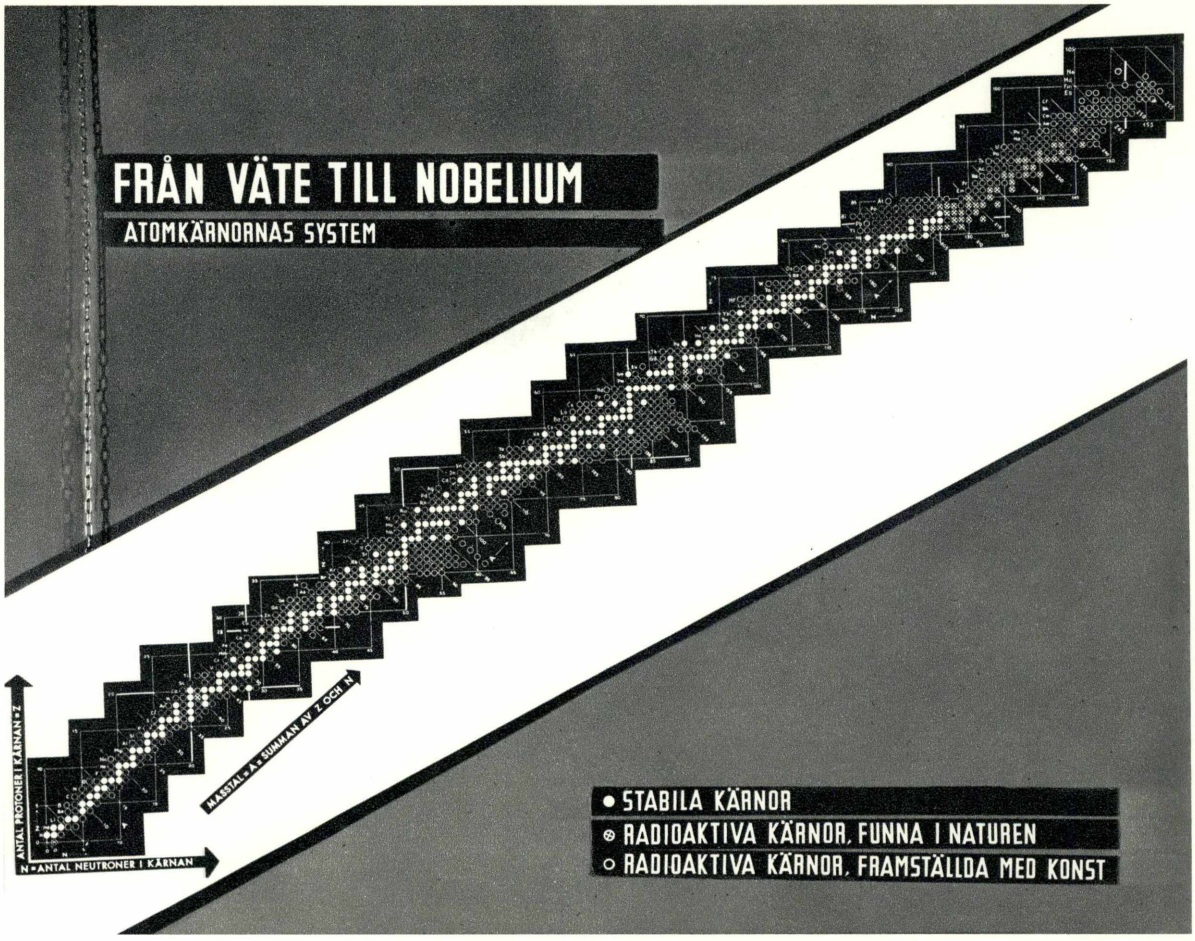
I mitten: Magneterna sammanbindas genom mjukjärnsbitar, som ej ha någon egen bindkraft. Gruppen bildar en modell av atomkärnan i helium 4, alfapartikeln, vilken utmärker sig genom särskilt stabil byggnad. De två magneterna motsvara här protoner och mjukjärnsbitarna neutroner.

Nederst: Kärnan i helium 3 är uppbyggd av två protoner och en neutron. Helium 3 och helium 4 äro isotoper.

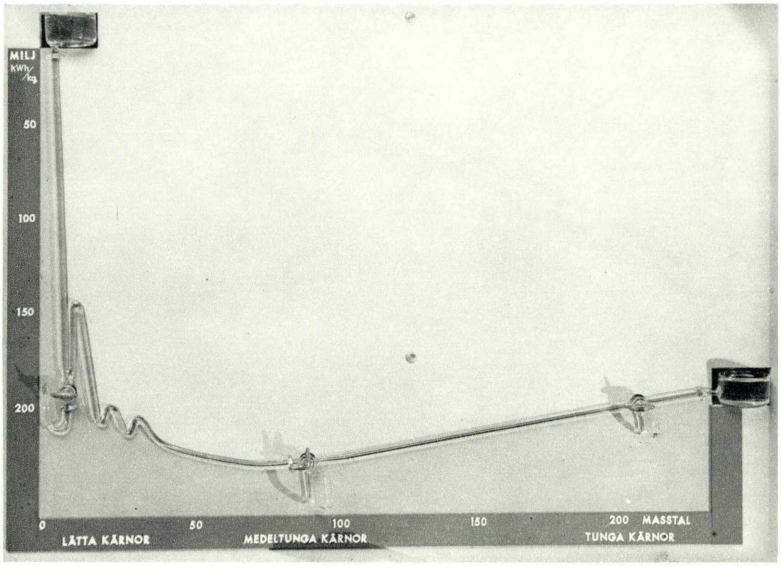


Kraftverkningar mellan en fri proton och en atomkärna. Kärnan tillhör här litium 7. Den består av tre protoner och fyra neutroner. Bortom ett visst avstånd från kärnan repelleras protonen, men nära intill kärnan uppträder attraktion. Kärnan omgives av en potentialbarriär innanför vilken de intensiva kärnkrafterna råda. Modellen, som består av magneter och mjukjärnsbitar, illustrerar dessa förhållanden.





Materien i kärnfysikens ljus — från väte till nobelium. En sammanställning, visande atomkärnornas sammansättning av protoner och neutroner.



Atomkärnornas bindningsenergi — atomenergiens ursprung. Ett diagram, format av ett vattenfyllt glasrör och sträckande sig från väte till uran. Vid rörändarna finnas vattenbehållare, och på några ställen av röret kan vatten tappas ut med olika fallhöjd, illustrerande den energi, som frigöres vid ett antal olika kärnprocesser, såsom naturlig radioaktivitet, urankärnans klyvning och heliumbildning i solen.

elektriciteten. Storleken av de energimängder det här är fråga om kan belysas därav, att den värmemängd, som utvecklas vid förbränning av ett kilogram av något av våra högvärdiga bränslen ungefärligen motsvarar tio kilowattimmar, mätt såsom elektrisk energi.

Atomforskningen har under de senaste årtiondena gjort utomordentliga framsteg. Tolkandet av de experimentella resultaten har med matematikens hjälp lett fram till en helt ny naturvetenskaplig föreställningsvärld med begrepp som sträcka sig långt utanför dem våra vanliga ytligare erfarenheter av tingen ger oss. Museet ser som sin uppgift att söka finna framföringsformer som med nödvändig förenkling dock ge något väsentligt ur allt detta. Från enkla och lättfattliga utgångspunkter ledes resonemanget fram till åskådliga bilder och modeller, vilka belysa de nya begreppen och ge dem levande innebörd. Liknelser bli dock aldrig helt täckande, och de kunna, om de drivas alltför långt, leda till rena motsägelser. Detta är svårigheter, som även den enligt stränga principer arbetande vetenskapen har att kämpa emot, och det här använda bildspråket kan kanske trots sina ofullkomligheter vara en hjälp på vägen in i atomfysikens tankevärld. Den följande framställningen berör delvis något av den djupare fysikaliska bakgrunden till de visade modellerna och försöken.

Atomkärnan.

Sedan vi nu stiftat någon bekantskap med atomens yttre, låta vi tanken glida vidare — allt djupare in emot materiens innersta. Vi stanna inför atomkärnan, den lilla centrala del av atomen, som innehåller huvuddelen av massan samt även i övrigt bär många av atomens viktigaste egenskaper. Kärnans diameter beräknas till blott mellan tiotusendelen och hundratusendelen av atomens yttre, och dess täthet måste följaktligen vara oerhörd. Om det vore möjligt att av den kompakta massa, som bildar det lätta vätets atomkärna, protonen, framställa en kub med en millimeters kantlängd, så skulle vikten av denna lilla volym materia uppgå till över hundratusental ton! Vi ha kanske svårt att fatta den verkliga innebörden av detta, men siffran må på sitt sätt belysa de ytterst säregna förhållanden som råda inom atomkärnan.

Atomkärnans byggnad och egenskaper äro alltjämt föremål för intensiv forskning. Bland andra möjligheter har man tänkt sig att kärnan i likhet med elektronhöljet skulle ha ett slags skalstruktur. Även hos kärnan sker upptagande eller avgivande av energi såsom plötsliga språng, och de yttre egenskaper hos atomen som vi i det föregående berört kunna kanske därför bidraga till att öka förståelsen även

för atomkärnan. Vi måste emellertid från början observera, att de vid kärnförlopp omsatta energimängderna kunna vara miljontals gånger större eller ännu mera än dem vi möta inom atomens yttre delar. När kärnan avger någon del av sitt väldiga energiinnehåll, så sker detta på bekostnad av massan, som minskas i motsvarande grad. Einsteins kända ekvation[1] rörande sambandet mellan massa och energi kan med ord uttryckas så, att när ett gram materia — av vilket slag som helst — helt omvandlas till energi, så uppgår denna till omkring 25 miljoner kilowattimmar. Lagen är helt allmängiltig, men vid de energiförlopp, vi vanligen möta inom materiens yttre, är massförändringen omärkligt liten.

Protoner och neutroner.

Atomkärnorna tänkas uppbyggda av huvudsakligen två slags *elementarpartiklar — protonen* och *neutronen.* Den förra är den positivt laddade kärnan i vanligt lätt väte och den senare en partikel av liknande beskaffenhet men utan laddning. Enligt kända lagar sträva de positiva partiklarna att stöta bort — repellera — varandra, men det hela hålles samman av särskilda oerhört intensiva kärnkrafter, vilka emellertid ha mycket litet verkningsområde.

Såsom redan nämnts, kännetecknas varje grundämne av ett bestämt antal positiva kärnladdningar. Ordnas nu ämnena i följd efter stigande atomvikt och med väte, det lättaste grundämnet, i början, så anger ordningstalet direkt antalet kärnladdningar, d.v.s. antalet protoner i kärnan. Neutroninnehållet kan hos ett och samma grundämne variera inom vissa gränser. Masstalet — sammanlagda antalet partiklar i kärnan — kan sålunda vara olika. Ämnet har olika *isotoper.* De kemiska atomvikterna utgöra ett slags medelvärden som bero på isotopernas inbördes mängdförhållanden, vilka i allmänhet äro ganska konstanta.

Kärnmodell.

I modellerna låta vi nu protonerna motsvaras av korta cylindriska magneter och neutronerna av liknande stycken av omagnetiserat mjukjärn. Hos magneterna utgöras polerna av de plana ändytorna. Hållas nu två magneter sida vid sida och med samma polriktning, stöta de bort varandra i likhet med vad de positivt laddade protonerna göra. Mjukjärnstyckena visa sinsemellan inga avståndsverkningar, men de attraheras av magneterna, och de kunna även förmedla bindning mellan två eller flera varandra repellerande magnet-

[1]) $E=mc^2$, där E är energien, mätt i den fysikaliska enheten erg (1 erg $=2.78\cdot10^{-14}$ kilowattimmar), m är massan, mätt i gram, och c ljushastigheten, $3\cdot10^{10}$ cm per sekund.

stycken. Sammanhållningen gör sig gällande först när modellbitarna kommit varandra tämligen nära, och vi finna här åtskilliga likheter med de krafter som råda inom atomkärnan.

Väte har utom den i naturen rikligast företrädda lätta formen ytterligare två isotoper, deuterium och tritium. Låta vi protonen, den lättaste vätekärnan, representeras av en magnet, så motsvaras deuteriumkärnan, deuteronen, av en magnet och en mjukjärnsbit och tritiumkärnan av en magnet och två mjukjärnsbitar. Nästa grundämne i serien, helium, har fyra kända isotoper med masstal från tre till sex. Kärnan hos den lättaste av dessa, helium 3, representeras av två magneter och en mjukjärnsbit. Kärnan hos isotopen helium 4 innehåller två protoner och två neutroner, och den är kanske mest känd under benämningen *alfapartikel.* Den utmärker sig genom en särskilt framträdande stabilitet i uppbyggnaden, vilket kanske även partikelgrupperingen i modellen kan ge en antydan om. När större kärnor falla sönder, händer det ej sällan, att delar av dem slungas ut i form av alfapartiklar.

Vi kunna nu bygga vidare och steg för steg framställa allt större och tyngre kärnmodeller med varierande grad av inre sammanhållningsförmåga. Jämförelsen med verkliga kärnfysikaliska förhållanden blir visserligen mycket fri — vi röra oss ju bland annat här blott med plana modeller, medan vi inom atomkärnorna måste tänka oss rymdgrupperingar — men vi kunna ändå lätt spåra några av de allmänna lagarna för kärnornas uppbyggnad och stabilitet.

Den elektriska repulsionen begränsar kärnans protonhalt. Å andra sidan nedsättes bindningsförmågan även av alltför hög halt av neutroner. Dessa omständigheter bestämma de gränser, inom vilka kärnsammansättningen kan variera.

Atomernas vintergata.

En väggbild i Atomariet visar en sammanställning omfattande flertalet av de för närvarande kända olika slagen av atomkärnor — från väte till nobelium — sammanlagt långt över tusentalet. Neutronantalet anges i vågrät och protonantalet i lodrät riktning. Kärnorna gruppera sig efter stigande masstal i en långsträckt svärm, som sträcker sig snett uppåt. De lättaste kärnorna innehålla ungefär samma antal protoner som neutroner, och punktsvärmens mittlinje bildar omkring 45° vinkel med axlarna. Längre upp överväger neutronantalet, och lutningen är mindre. Varje horisontalrad omfattar isotoper av ett och samma grundämne, och den kemiska beteckningen är utsatt till vänster därom.

Radioaktivitet. Halveringstid.

De stabila kärnorna, vilka bygga upp huvuddelen av den materia vi i praktiska livet ha att göra med, angives med helt fyllda vita prickar. I naturen förekomma även åtskilliga slags instabila kärnor, å schemat utmärkta med kors. Dessa kärnor tillhöra de naturligt *radioaktiva* ämnena, vilka kännetecknas av ett i mer eller mindre snabb följd pågående ständigt kärnsönderfall. Varje individuellt sönderfallsförlopp sker plötsligt och utan någon iakttagbar regelbundenhet. Här råder den i grunden underbara lag, som vi kalla slumpens. Sett i stort framträder emellertid förloppet med utomordentlig jämnhet och precision, och det kan iakttagas och mätas genom de yttre verkningarna: strålningen och de utslungade kärnfragmenten.

Här framträder ett mycket intressant förhållande: den konstanta halveringstiden. En enkel bild kan kanske klarlägga vad detta innebär. Vi tänka oss en rak vattenbehållare med bottenavlopp så ordnat, att utrinningshastigheten alltid är proportionell mot vattenhöjden i kärlet och därmed också mot den inrymda vattenmängden. Vi kunna nu lätt mäta den tid som går åt för att halva vattenvolymen skall rinna ut. Fortsätta vi, så se vi att efter ytterligare lika lång tid en fjärdedel av den ursprungliga mängden är kvar. Mäta vi vidare på samma sätt, så finna vi varje gång en halvering av den vid föregående avläsning kvarvarande mängden. Vattenflödet sinar långsamt ut på ett sätt som motsvarar radioaktivitetens avtagande. I naturen finna vi ämnen med mycket olika halveringstid. Hos de mest långlivade kan det röra sig om miljarder år eller mera, och dessa ämnen te sig sålunda ganska stabila.

På vårt schema finna vi enstaka naturligt radioaktiva kärnor bland de lättare och medeltunga grundämnena. Högre upp minskar stabiliteten, och från och med masstalet 210 finna vi endast radioaktiva kärnor. Man kan sluta sig till, att det bör finnas en viss storleksgräns, ovan vilken kärnor överhuvud taget ej kunna existera, i varje fall inte under så lång tid, att de kunna påvisas.

Transuraner.

Ända till för ett eller annat årtionde sedan var uran, grundämnet nummer 92, det tyngsta man kände. Numera har man med konst framställt tyngre radioaktiva kärnor, de s.k. *transuranerna,* ända upp till nummer 102, nobelium. En forskargrupp vid forskningsinstitutet för experimentell fysik (Nobelinstitutet vid Kungl. Vetenskapsakademien) i Stockholm kom år 1957 till resultat vilka tolkats som upptäckten av detta nya grundämne. Man anser sig ha ännu ett antal steg kvar på grundämnesskalan, innan slutgränsen är nådd. I sam-

manhanget kan nämnas, att sedan man med konst framställt grundämnet nummer 94, plutonium, så har man även funnit det i små mängder i naturligt pechblände.

Det är den moderna kärnfysikens och kärnkemiens raffinerade hjälpmedel — partikelacceleratorer och atomreaktorer — samt en förfinad fysikalisk och kemisk separationsteknik, som möjliggjort framställningen av transuranerna. På liknande väg har man även med konst framställt *radioaktiva isotoper* av alla övriga grundämnen. Många av dessa äro ganska kortlivade. Man finner halveringstider från de minsta mätbara bråkdelar av sekunder upp till minuter, dagar eller år. I åtskilliga fall rör det sig om lång tid. De instabila kärnornas register är mycket omfattande.

Magiska tal.

Vi kunna genom hela punktsvärmen på vårt schema draga en medellinje, kring vilken de stabila kärnorna ordna sig som ett intressant sicksackmönster med de instabila kärnorna däromkring. Grupperingen röjer åtskilligt om kärnornas inre byggnad. Vissa partikelkombinationer ge kärnor av särskilt utpräglad stabilitet. Så är fallet vid proton- eller neutronantalen 2, 8, 20, 28, 50, 82 och 126, de s.k. »magiska talen», vilka kunna anses markera fullbyggda kärnskal. Längs några av de linjer som markera dessa tal framträder på diagrammet utpräglade anhopningar av stabila kärnor.

Ännu några viktiga egenskaper hos atomkärnan kunna belysas genom experiment med våra magneter och järnbitar. Vi hänga upp en av magneterna på sådant sätt, att den kan pendla åt sidan men ej ändra polriktning. Vi bygga dessutom upp en kärngrupp, motsvarande exempelvis litiumisotopen 7, vilken innehåller tre protoner och fyra neutroner. Liksom tidigare låta vi alla magneterna ha samma polriktning. Närma vi nu kärnmodellen till den fria partikeln, finna vi att denna väjer undan. — En fri proton stötes bort av den positivt laddade kärnan. Inom ett visst kort avstånd från kärnan är emellertid kraftverkan omvänd. Partikeln attraheras. — Motsvarande förhållande framträder tydligt även vid vårt modellförsök, och det sammanhänger här med en viss ompolarisering av partiklarna.

Bindningsenergi, massdefekt.

Som ett tankeexperiment kunna vi föreställa oss förloppet när en atomkärna bygges upp av sina beståndsdelar. Att mot de repellerande elektriska fältkrafterna föra samman de protoner som ingå i kärnan innebär ett betydande arbete. Inom kärnkrafternas verkningsområde äro förhållandena omvända, och här frigöres åter energi

vid sammanbindningens fullbordande. Det sålunda frigjorda arbetet är större än den arbetsinsats som gjorts under förloppets första del, och överskottet benämnes *bindningsenergi.* Då den avgivna energien här hämtas direkt ur massan, kommer den bildade kärnan att vara något lättare än de ursprungliga partiklarna tillsammantagna. Detta innebär en *massdefekt,* som vid de medeltunga kärnorna uppgår till omkring 0,9 % av totalvikten.

Potentialbarriär, tunneleffekt, resonans.

Med tillämpande av klassiska elektrostatiska lagar har man beskrivit förhållandena i kärnans närhet så, att kärnan omgives av en *potentialbarriär,* vilken en mot kärnan slungad positivt laddad partikel måste övervinna för att tränga in i kärnan. En enkel geometrisk bild kan åskådliggöra detta. Den framrusande partikeln far under uppoffrande av rörelseenergi upp för en »backe» med tilltagande branthet för att därpå, när krönet nåtts, plötsligt och under stor energiutveckling störta in emot kärnan, till en nivå som ligger betydligt lägre än den, från vilken partikeln började sin rörelse. Bindningsenergien härrör från denna sistnämnda nivåskillnad.

Nu visa emellertid experimentella resultat, att partikeln kan tränga in i kärnan redan med betydligt lägre energi än vad som motsvarar fulla barriärhöjden. Man har infört begreppet *tunneleffekt* och beskriver förloppet så, att partikeln tränger in i kärnan genom en *potentialtunnel.* Detta jämte andra fenomen beskrives fullständigare under antagande av att de partiklar som bygga upp atomen ha *vågnatur.* De visa sådana egenskaper som kännetecknа vågor och svängningsrörelser, och de kunna framkalla *resonansfenomen.* Den franske fysikern Louis de Broglie har infört begreppet *materievågor.*

Om man intill en spänd fri sträng, exempelvis en gitarr- eller fiolsträng, sjunger en ton, som motsvarar strängens grundton eller någon av dess övertoner, så kommer strängen i svängning, vilket annars icke inträffar. På liknande sätt kan en med viss bestämd resonanshastighet framrusande partikel — en materievåg med bestämt svängningstal — ge större verkan på atomkärnan än partiklar med annan — högre eller lägre — hastighet.

Den svängande strängens beteende illustrerar helt allmänt det sätt, på vilket energiinnehållet hos en atom språngvis förändras. Strängen kan under upptagande av bestämda mängder energi bringas att svänga på vissa bestämda sätt, motsvarande grundton och övertoner, men icke på något annat sätt däremellan.

★

Vågmekanik, kvantmekanik.

Vågmekaniken, som grundats av den tysk-österrikiske fysikern Schrödinger, beskriver atomerna, utgående från lagarna för vågor och svängningsrörelser. Atomen framträder såsom ett system av stående materievågor med så komplicerad struktur, att den i stort sett endast kan beskrivas med matematikens abstrakta formelspråk.

Ett visst grepp om några hithörande frågor kan emellertid fås genom försök med *Chladnis klangfigurer,* som bruka visas på Tekniska Museets Atomarium med en speciellt för detta ändamål byggd apparat (10). En i mitten fast inspänd vågrät stålskiva sättes i vibration medelst en nära skivkanten anbragt elektromagnet, matad med växelström, vars periodtal eller frekvens kan varieras. Skivkanten bringas härigenom att svänga uppåt och nedåt. Svängningarna fortlöpa såsom vågor genom skivan, och när dessa reflekteras vid skivkanten, bildas ett sammansatt vågsystem, som utbreder sig över hela skivan. Vid vissa bestämda svängningstal eller frekvensvärden utbildas stabila *stående vågsystem,* kännetecknade därav, att skivan uppdelas i olika svängande partier med mellanliggande *nodlinjer,* utmed vilka stillestånd råder. Strös nu fin sand på skivan, samlas denna utmed nodlinjerna, och på detta sätt bildas vid en rad bestämda frekvensvärden vackra figurer med olika utseende, ett slags avbildning av de vågstrukturer, som motsvara de olika svängningstalen. Dessa olika svängningstillstånd kunna sägas motsvara bestämda mekaniska energitillstånd hos skivan — en viss motsvarighet till atomernas *energinivåer.* Atomernas materievågsystem — på en och samma gång materia och energi — äro dock ofantligt mycket mera komplicerade än dessa plana mekaniska vågsystem. Materievågsystemen kunna beskrivas såsom flerdimensionella rymdsystem av kraftfält i svängning, *växelfält.*

Den nu antydda vågmekaniska beskrivningen av atomen nödvändiggör ett dubbelt betraktelsesätt i fråga om de elementarpartiklar som bygga upp atomen. Dessa kunna ses än såsom vågsystem och än som partiklar i mera egentlig betydelse. Partiklarnas vågegenskaper yttra sig bland annat i det egendomliga förhållande som benämnes *Heisenbergs osäkerhetsrelation,* vilken utsäger, att det är omöjligt att på en och samma gång med noggrannhet bestämma en partikels läge och hastighet.

Vågmekaniken ansluter sig till *kvantmekaniken,* en form av matematik, som helt schematiskt och utan direkt åskådlighet behandlar

diskontinuiteten hos materien och energien samt den senares uppdelning i »portioner», *kvanta.*

Partikelspel.

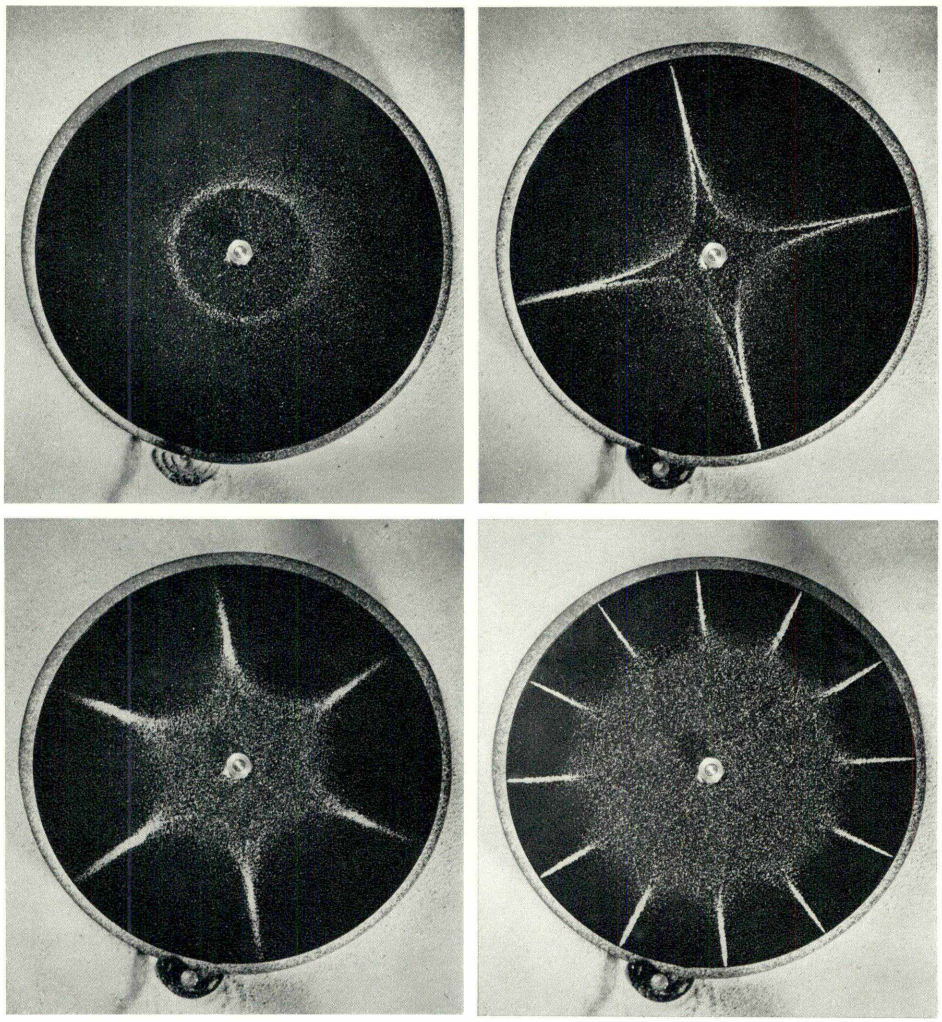
De magnetiska kärnmodeller vi hittills sett kunna kanske uppfattas som ett slags »ögonblicksbilder». De ge ej någon uppfattning om de ständiga växlingarna och energiutbytena inom atomkärnan. En mera levande bild av detta spel kunna vi få genom rörliga modeller. För Atomariet har en sådan modell byggts (6). Kärnan representeras av ett antal magneter, burna av stålfjädrar, vilka äro fästa på en bottenplatta. Omedelbart ovan dessa magneters poler är en »fri» magnet upphängd i en något mera än meterlång pendel, så att den kan röra sig inom kärnmodellens kraftfält utan att direkt beröra de övriga magneterna. Polriktningarna äro sådana, att samtliga magneter repellera varandra. De sammanhållande kärnkrafterna representeras av stålfjädrarna. Alla magneterna äro försedda med små elektriska lampor, vilka genom en enkel lins projiceras såsom lysande punkter på en skärm i taket. Det variationsrika partikelspel som framträder sedan pendeln satts i rörelse erbjuder en ganska fascinerande anblick, och många atomkärnsprocesser kunde här på ett slående sätt efterliknas.

Om den fria partikeln snabbt får passera kärnan, så hinner den under den korta genomloppstiden ej framkalla stor verkan. En långsammare partikel kan ge resonans. Kärnpartiklarna väja undan, och barriären öppnar sig. Kärnan *exciteras,* d.v.s. den övergår i ett energirikt tillstånd. Dess partiklar komma i livlig rörelse under ständiga inbördes energiutbyten.

Den fria partikeln kan eventuellt infångas under överlåtande av hela sin energi åt kärnan. Modellen avger därvid överskottsenergien huvudsakligen därigenom att den sätter omgivande luft i rörelse. Den kärnfysikaliska motsvarigheten är partikelinfångning under utsändande av *gammastrålning,* hård genomträngande strålning, liknande röntgenstrålningen. En ny stabil kärna bildas, en enhet större än den ursprungliga kärnan.

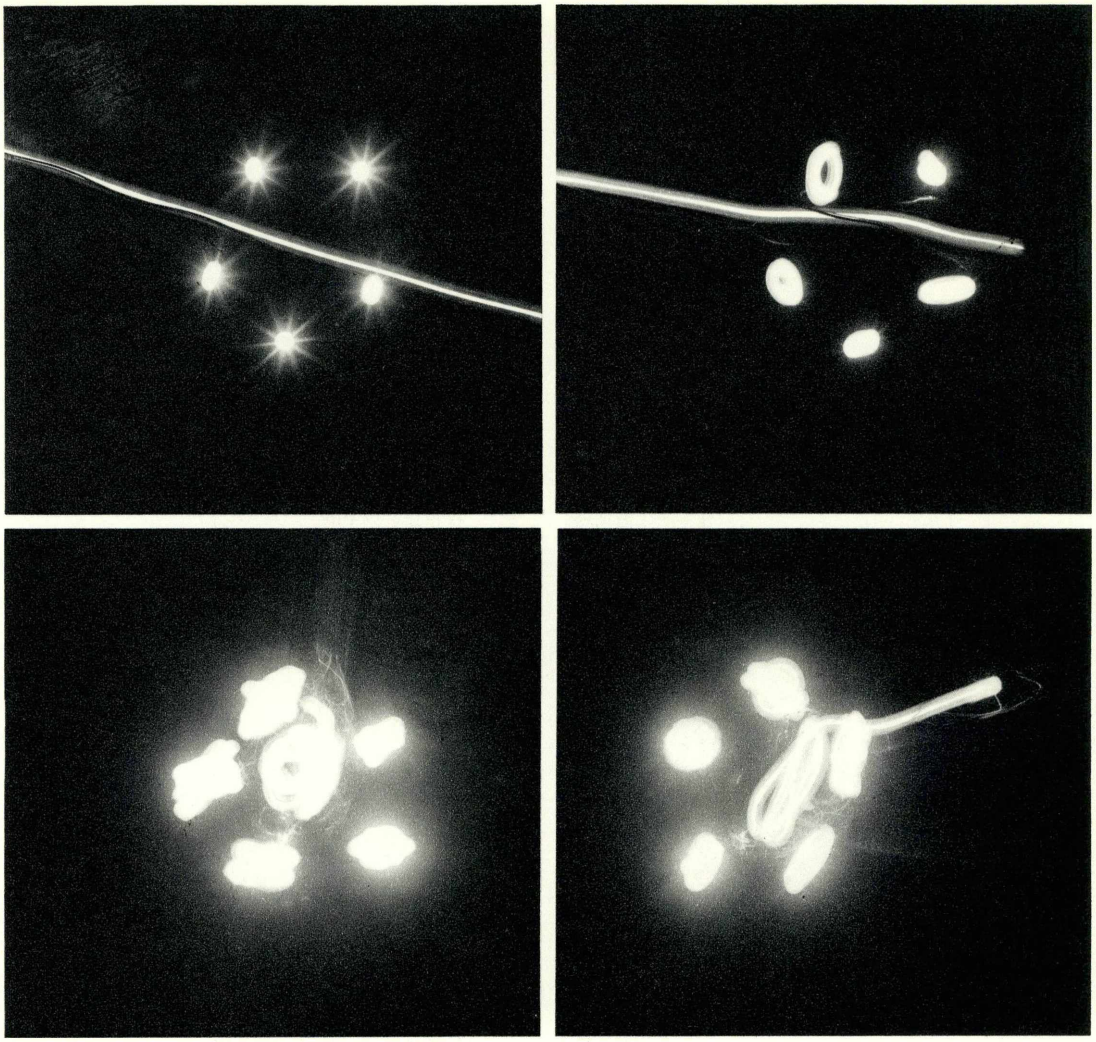
Modellen kan också visa huru den exciterade radioaktiva kärnan efter en stunds intressanta inre variationer slungar ut den inneslutna partikeln. En radioaktiv isotop faller sönder!

Många av de förlopp vi här se utspelas under några sekunder motsvara kärnprocesser som inträffa under oerhört korta tidrymder — miljondels sekunder eller långt därunder. Vi se det hela såsom genom ett »tidsförstoringsglas». En av modellens brister ligger däri, att den



Chladnis klangfigurer i nutida utförande. En i mitten fast inspänd stålskiva sättes i vibration genom energitillförsel från en vid kanten placerad elektromagnet, matad med växelström med reglerbar frekvens. Vid vissa bestämda frekvensvärden råkar skivan i stabila svängningstillstånd med stående vågor. Vågstrukturen kan synliggöras med hjälp av fin sand, som strös på skivan. Sanden samlar sig utmed skivans stillastående nodlinjer.

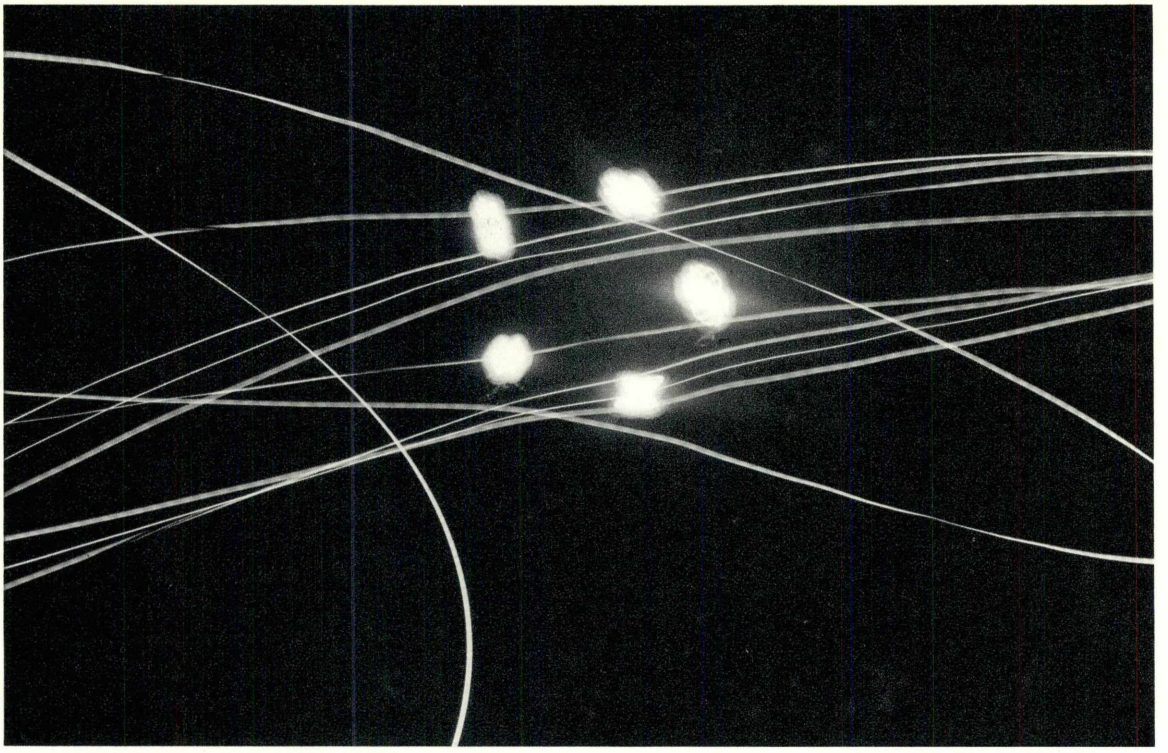
Skivans olika svängningstillstånd kunna betraktas som en viss motsvarighet till atomernas energitillstånd. Enligt vågmekaniken uppfattas atomerna såsom flerdimensionella system av stående materievågor — en form av kraftfält i svängning. Atomen kan upptaga och avge energi i form av strålning. Det finns ett bestämt samband mellan strålningens frekvens och energi, och detta ger möjlighet till mycket noggranna bestämningar av atomernas energitillstånd.



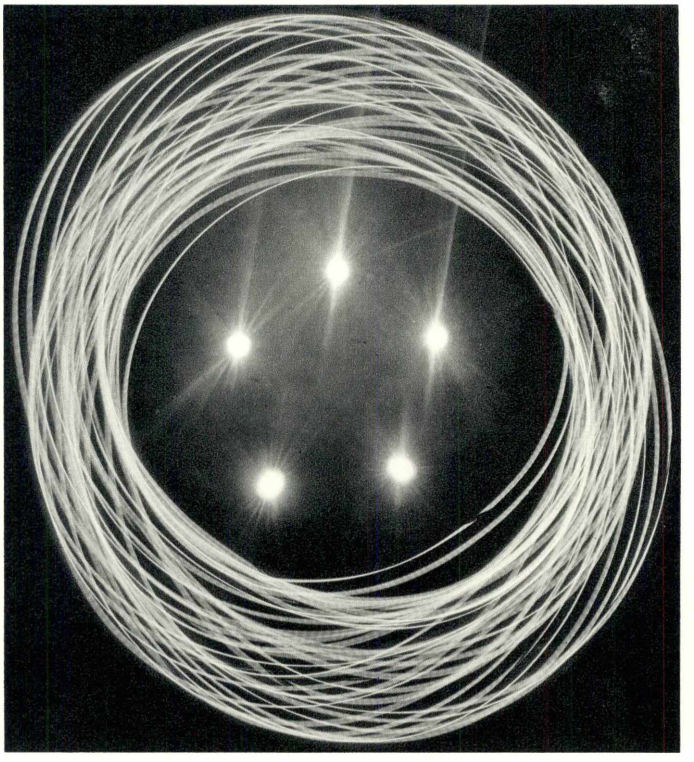
Spel med svängande partiklar. Några av atomkärnans egenskaper åskådliggjorda med museets »atomprojektor». Från vänster till höger:
En snabb partikel kan passera kärnan utan större verkan. En långsammare partikel kan ge resonansverkan. Kärnan exciteras.

Partikeln infångas av kärnan, som avger överskottsenergien utåt i form av gammastråning.

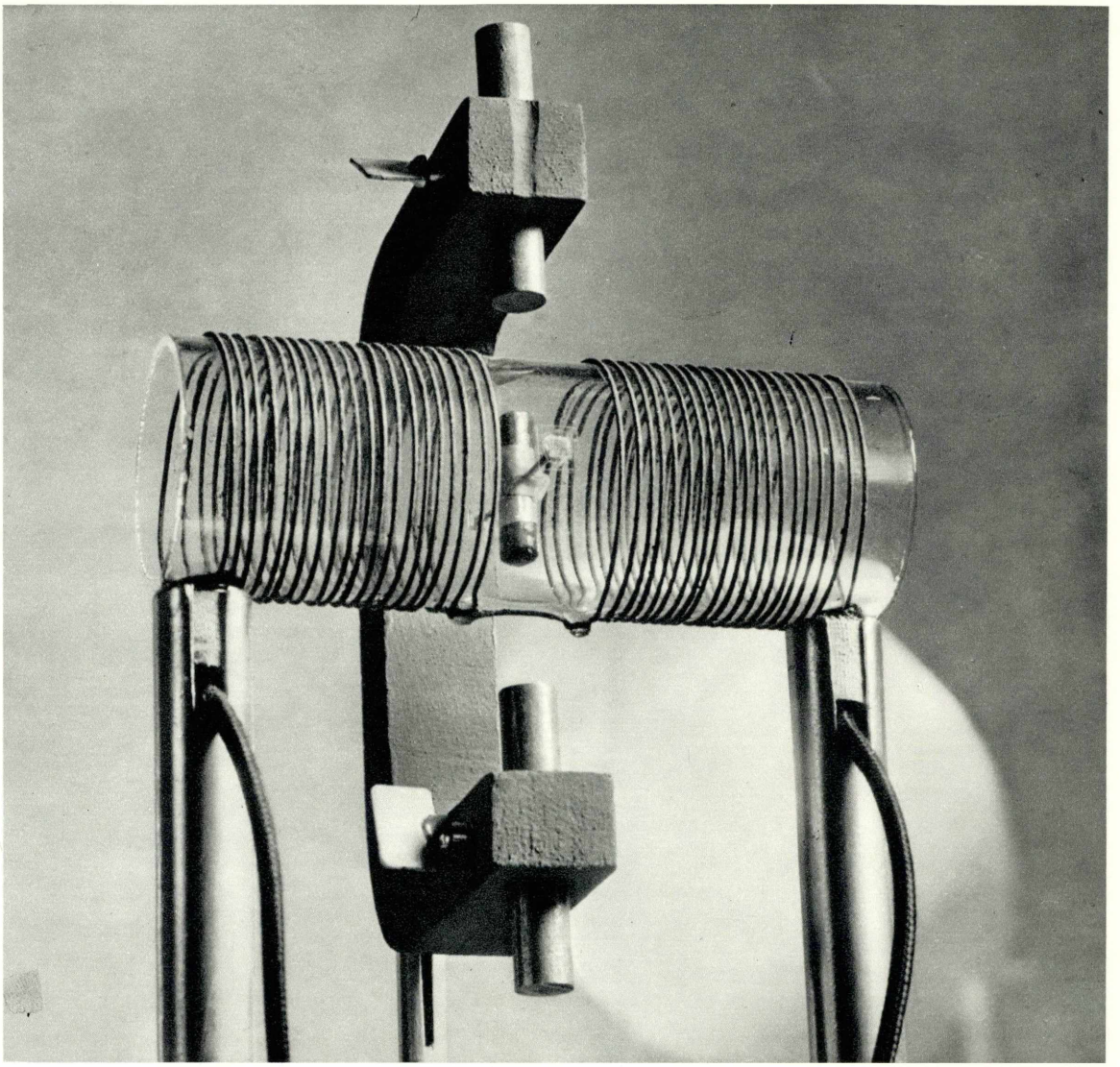
En radioaktiv energirik kärna slungar ut en partikel.



En partikelgrupp föreställande en atomkärna bombarderas av en ström av fria partiklar. Några av partikelbanorna böjas av.



Kärnan omges av en potentialbarriär. Här glider en pendlande partikel utmed kärnmodellens magnetiska barriär.



Resonansförsök. En liten svängbart anbragt magnetstav intar ett bestämt läge i fältet mellan ett par fasta magnetpoler. En omgivande spole matas med ström från en vevdriven telefoninduktor. Vid viss bestämd vridningshastighet och strömfrekvens kommer magnetstaven i intensiv resonanssvängning, vilket inte inträffar vid andra — högre eller lägre — frekvensvärden. Apparaten illustrerar metoder, som användas för noggranna mätningar rörande elektronernas och atomkärnornas egenskaper.

kan antaga godtyckliga energitillstånd, vilka kontinuerligt dämpas, medan atomkärnan, såsom redan sagts, är bunden till vissa bestämda tillstånd, vilka språngvis ändras. Trots detta kan den enkla apparaten ge en viss åskådlighet åt atomkärnans svårtillgängliga värld, och den förmedlar på ett lättfattligt sätt bekantskap med åtskilliga av kärnfysikens begrepp.

Spin, spinresonans.

Även andra resonansverkningar än de redan nämnda göra sig gällande inom atomfysiken. Såväl atomkärnor som elektroner kunna bete sig som små snurror med en magnetstav som axel. Det bidrag till energiinnehållet som detta innebär kallas *spin*. I ett magnetfält sträva partiklarna att enligt kompassnålens princip ställa in sig på bestämt sätt. Liksom hos en vanlig snurra finnas emellertid här olika möjligheter. Snurran kan stå rakt upp och ned, men den kan också »stå på huvudet». Den kan vidare utföra en »virrande» rörelse, en *precessionsrörelse*. Just denna rörelse gör sig gällande hos de partiklar vi nu studera, och antalet precessionsvarv per sekund beror på partikelns magnetiska egenskaper samt det fasta magnetfältets styrka. Pålägges nu från ett par strömspolar ett växelfält, vinkelrätt mot det fasta fältets riktning, så uppträder resonans och energiupptagning, när den pålagda frekvensen stämmer överens med partiklarnas precessionsfrekvens. Genom resonansmätningar enligt denna princip ha de båda amerikanska forskarna Bloch och Purcell kunnat bestämma de magnetiska egenskaperna hos atomkärnor mycket noggrant, och detta har lagt grunden till andra viktiga upptäckter.

På Tekniska Museets Atomarium belysas de nämnda förhållandena med en modellapparat (9), i vilken en liten vridbar magnetstav intar ett bestämt läge i fältet mellan ett par fast anbragta magneter. Ett par spolar, matade med ström från en vanlig telefoninduktor, alstra ett växelfält, vinkelrätt mot det fasta fältet. Vrides nu induktorns vev, observeras lätt, huru den lilla magnetstaven kommer i intensiv resonanssvängning vid viss bestämd vevningshastighet och strömfrekvens, medan den inte nämnvärt påverkas vid andra, högre eller lägre, frekvensvärden.

Cyklotron. Partiklar i elektriska fält.

Kärnomvandlingar kunna framkallas genom bombardemang av materia med laddade partiklar av olika slag. Med hjälp av starka elektriska fält accelereras partiklarna till hög hastighet. I *cyklotroner* och andra anordningar för multipel acceleration genomlöpes fältet ett stort antal gånger, och hastigheten kan därvid närma sig ljusets. Partikelströmmen får såsom en stråle träffa det preparat man vill be-

handla. På detta sätt kunna såväl stabila som radioaktiva nya isotoper framställas i små mängder. Det uppnådda resultatet är starkt beroende av sannolikheten för verksamma kärnträffar.

De oladdade neutronerna kunna ej accelereras i elektriska fält. De frigöras emellertid sekundärt vid många kärnreaktioner, ofta med hög energi, och de ha i sin tur utomordentlig förmåga att framkalla nya omvandlingar. Denna omständighet utnyttjas inom atomtekniken för genomförande av kärnomvandlingar i stor skala i samband med utvinning av atomenergi — eller rättare sagt atomkärnenergi.

Atomenergi.

Innan vi gå in på de praktiskt viktiga områden, som här öppna sig, kan det vara lämpligt att beröra ytterligare några grundföreteelser. Avgörande för många atomfysikaliska förlopp är det sätt, på vilket laddade och oladdade partiklar bete sig i ett elektriskt kraftfält. Några hithörande fenomen visas på Atomariet medelst en apparat, där rörelsen hos en belyst rökstråle — en ström av små partiklar — mellan ett par högspänningselektroder direkt kan följas (5 och 8). De laddade partiklarna vika av i fältriktningen, medan de oladdade partiklarna ej påverkas.

Kärnfysikaliskt sett framträder materien såsom en mycket gles byggnad, där de positivt laddade atomkärnorna äro utspridda med — relativt sett — mycket stora inbördes avstånd. Avståndet mellan kärnorna är omkring tiotusen gånger kärndiametern. I rummet mellan kärnorna röra sig de negativa elektronerna i mer eller mindre bundna banor. Elektronernas vikt är obetydlig jämfört med kärnornas. Den sammanhängande materiens fasthet betingas av de fältkrafter, som råda mellan partiklarna.

Neutroner kunna tämligen obehindrat passera genom all materia utan att hejdas av de elektriska fältkrafter, som råda därinom. De påverkas i sin rörelse endast om de komma i nära kontakt med atomkärnorna, och här finns spelrum för företeelser av mycket skiftande slag. I många fall kunna neutronerna elastiskt stöta mot kärnorna utan bestående åverkan. I andra fall kunna de under energiutveckling »falla» in i kärnan, infångas och eventuellt därefter ge upphov till vidare förändringar eller bildning av radioaktiva kärnor. Ofta visa sig resonansfenomen, d.v.s. neutroner med viss bestämd hastighet ge större verkan än sådana som ha högre eller lägre hastighet.

Vissa atomkärnor, såsom exempelvis de hos uranisotopen med masstalet 235, betecknad U 235, råka efter neutroninfångning i ett mycket labilt tillstånd, och detta har till följd att kärnan klyves i två

nära lika delar, vilka under strålning slungas ut med våldsam energi. Därvid frigöres även överskottsneutroner, vilka ej kunna bindas av de nybildade kärnorna.

Atomreaktor — atommila.

En sådan atomklyvning, genomförd i teknisk skala, är den grundläggande processen i de *atomreaktorer* eller *atommilor,* som numera byggas för forskning och för utvinning av atomenergi. Det finns mindre forskningsreaktorer som lämna en effekt av några få watt, och det finns atomkraftreaktorer utvecklande upp till hundratusentals kilowatt. Man ordnar så, att de genom kärnklyvning frigjorda neutronerna utnyttjas för fortsatt klyvning av kärnor i det omgivande materialet. Processen kommer på detta sätt att löpa vidare såsom en *kedjereaktion.* Man kan här tala om neutronekonomi, och avgörande för resultatet är det sätt, på vilket det utvecklade neutronflödet utnyttjas.

Naturligt uran består till större delen av isotopen U 238, sålunda med masstalet 238. Denna isotop kan upptaga neutroner, men dess benägenhet för klyvning är ej stor. Den lättare klyvbara delen, isotopen U 235, ingår med blott 0,7 %.

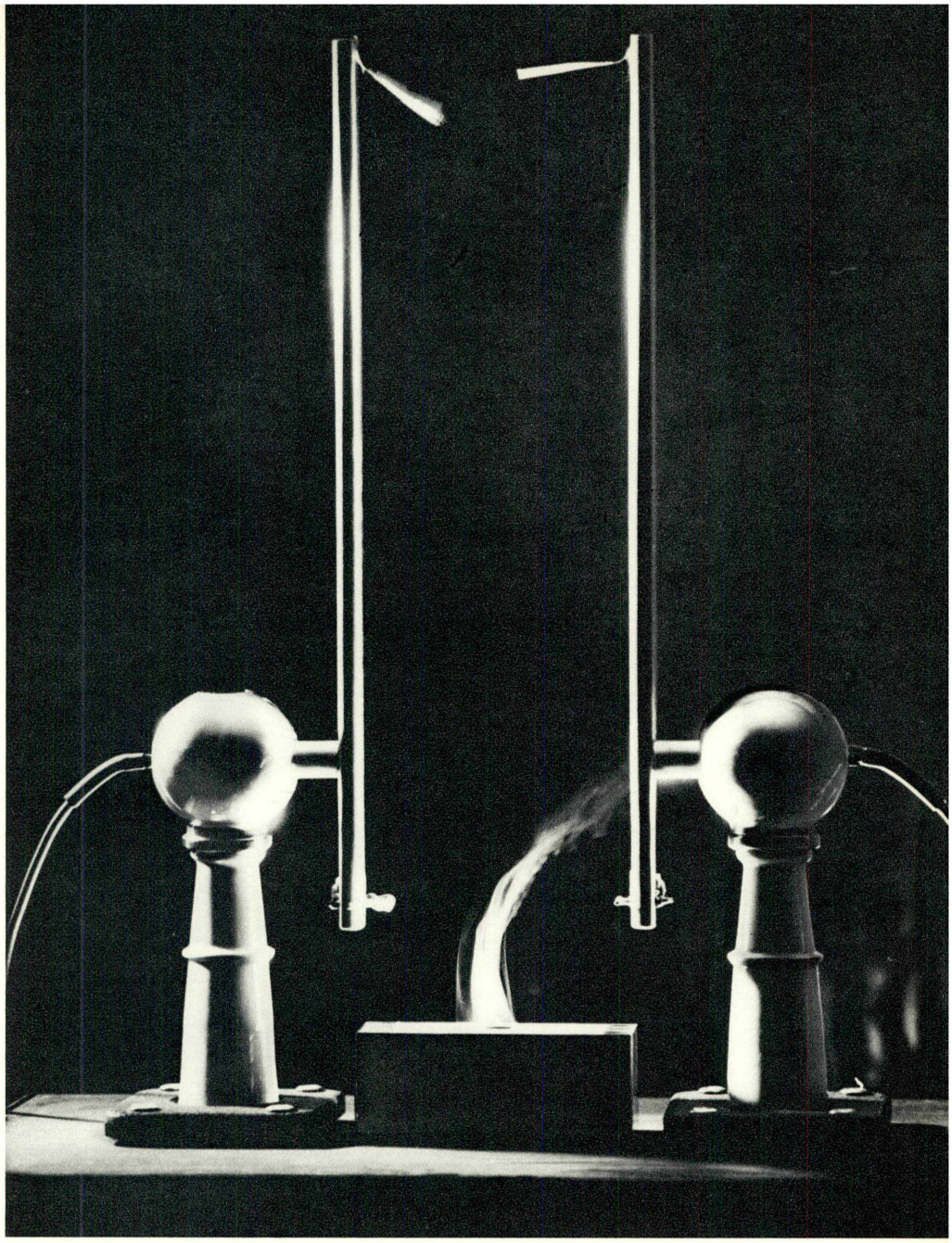
Vi ha sett, att en långsam partikel kan ha större verkan än en snabb. Så är fallet vid klyvning av U 235. Isotopen U 238 visar vid något högre energivärden resonans med ökad benägenhet för neutroninfångning — utan klyvning. En förutsättning för att en klyvningsprocess skall kunna underhållas i naturligt uran är därför att de frigjorda neutronerna bromsas, så att klyvningsreaktionen gynnas, medan den neutronslukande infångningsreaktionen undertryckes. Neutronerna få därför i reaktorn passera en *moderator,* en substans där de genom kärnkollisioner avge energi. Man måste välja ett ämne, vars kärnor ej själva absorbera neutroner. Det bör därtill vara lätta kärnor, vilka vid elastiska stötar upptaga mera energi än tyngre kärnor och därför ha bättre bromsverkan. Lämpliga moderatormaterial äro i detta fall tungt vatten och grafit.

En reaktor kan byggas så, att uranet i form av inkapslade stavar, *bränsleelement,* placeras med noga beräknade mellanrum inom moderatorsubstansen. Består denna av tungt vatten, inneslutes det hela i en behållare av aluminium. Moderatorn kan kompletteras med ett omgivande hölje av grafit, vilket är mycket billigare än tungt vatten, och här återkastas neutroner som annars skulle försvinna ur systemet. Ytterst omges det hela av ett tjockt betonghölje, ofta med inblandning av krossad järnmalm, för att skydda omgivningen mot strålning.

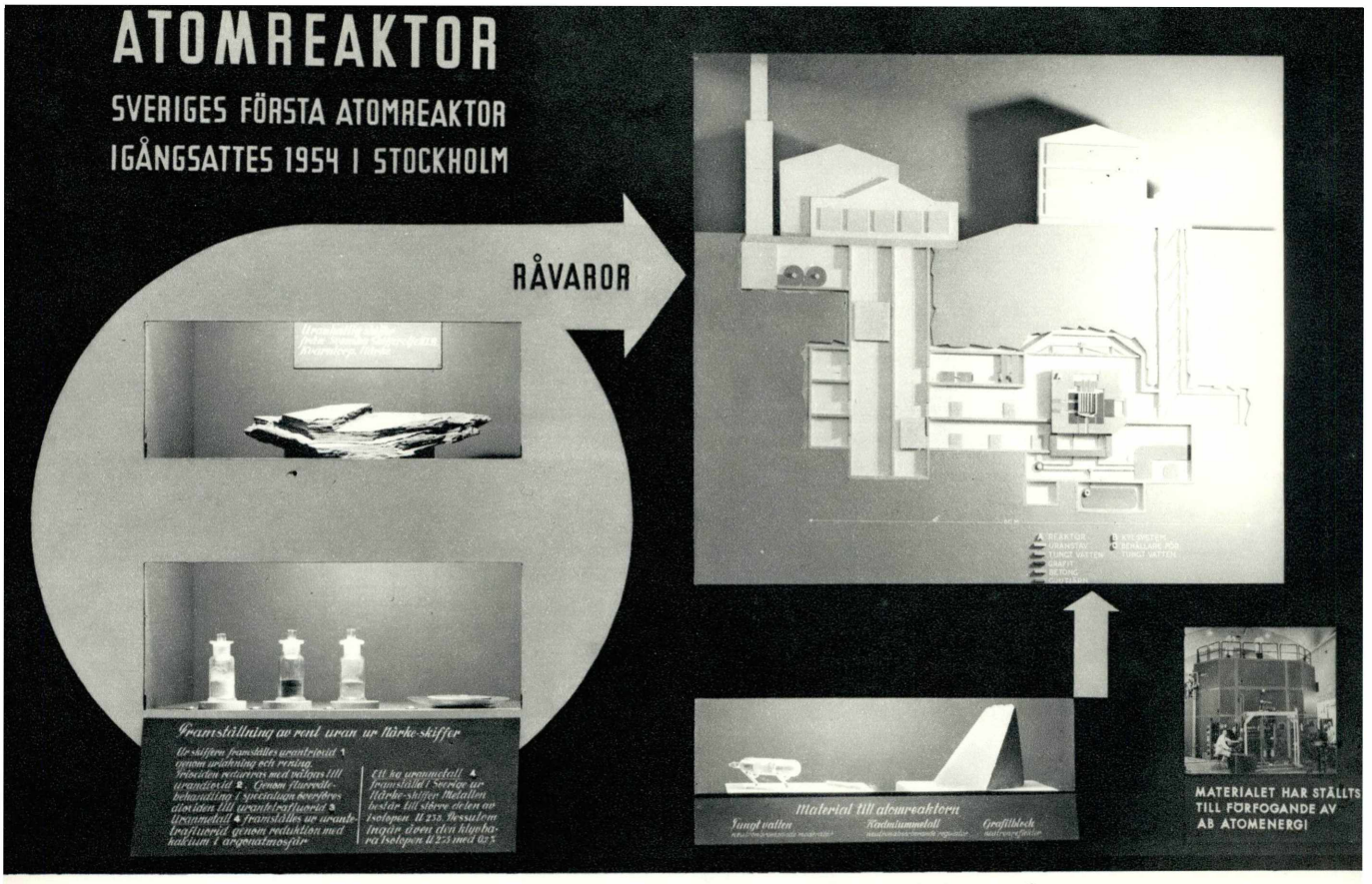
Det är möjligt att nå ett sådant löpande jämviktstillstånd i reaktorn, att för varje kluven urankärna i genomsnitt en av de frigjorda neutronerna får tillfälle att klyva en ny kärna. Reaktorn befinner sig då just på det *kritiska* stadiet, och förloppet fortsätter med oförändrad intensitet. Av praktiska skäl överdimensionerar man det hela något, så att processen i sig själv får benägenhet att öka i styrka. För att hålla det hela i styr och möjliggöra inställning av energiutveckling på önskad nivå förser man reaktorn med automatiskt arbetande regleringsstavar av kadmium eller annat starkt neutronabsorberande material. När stavarna sänkas helt ned i reaktorn, upphör kedjereaktionen. När reaktorn är i drift, hållas stavarna med hjälp av elektroniska styrorgan på sådan nivå, att önskad effekt utvinnes. Reaktorförloppet bestämmes av flera olika faktorer, vilka alla måste behärskas och bringas att samverka. Regleringsorganet måste därför i viss mån ha karaktären av en »tänkande» matematikmaskin. Anordningen är ett ganska typiskt exempel på vad som ibland kallas *autronik*. I händelse av fara falla särskilda säkerhetsstavar ned och stoppa reaktorn.

Vid klyvningsprocessen hos uran 235 omvandlas omkring 0,09 % av materialet till energi. Det övriga finnes kvar i form av klyvningsprodukter. Den utvecklade energin motsvarar omkring 23 miljoner kilowattimmar per kilogram omsatt uran 235. Övervägande delen av denna energi övergår till värme, och det är sålunda i denna form som atomenergien i första hand utvinnes. För att nyttiggöra värmet förser man reaktorn med slutna cirkulationssystem, innehållande en vätska eller i vissa fall en gas, som pumpas runt och överför värmet till användningsstället. Gäller det produktion av elektrisk energi, överföres värmet till ett slags ångpanna, och den där bildade ångan får driva turbiner och generatorer på samma sätt som vid ett vanligt ångkraftverk.

En reliefmodell i Atomariet visar huvudprincipen hos den första experimentreaktor, som byggts hos AB Atomenergi i Stockholm. Den är uppställd i ett bergskyddsrum, och dess konstruktion motsvarar i huvudsak vad som redan sagts. Reaktorn är närmast dimensionerad för en effekt av 300 kilowatt, men den har kortvarigt drivits med 1 000 kilowatt. Det utvecklade värmet tillgodogöres ej vid denna anläggning. Det tunga vattnet pumpas genom en luftkyld värmeväxlare, och dessutom kyles grafiten med luft, som blåses genom särskilda kanaler. Kylluften släppes ut genom en skorsten.



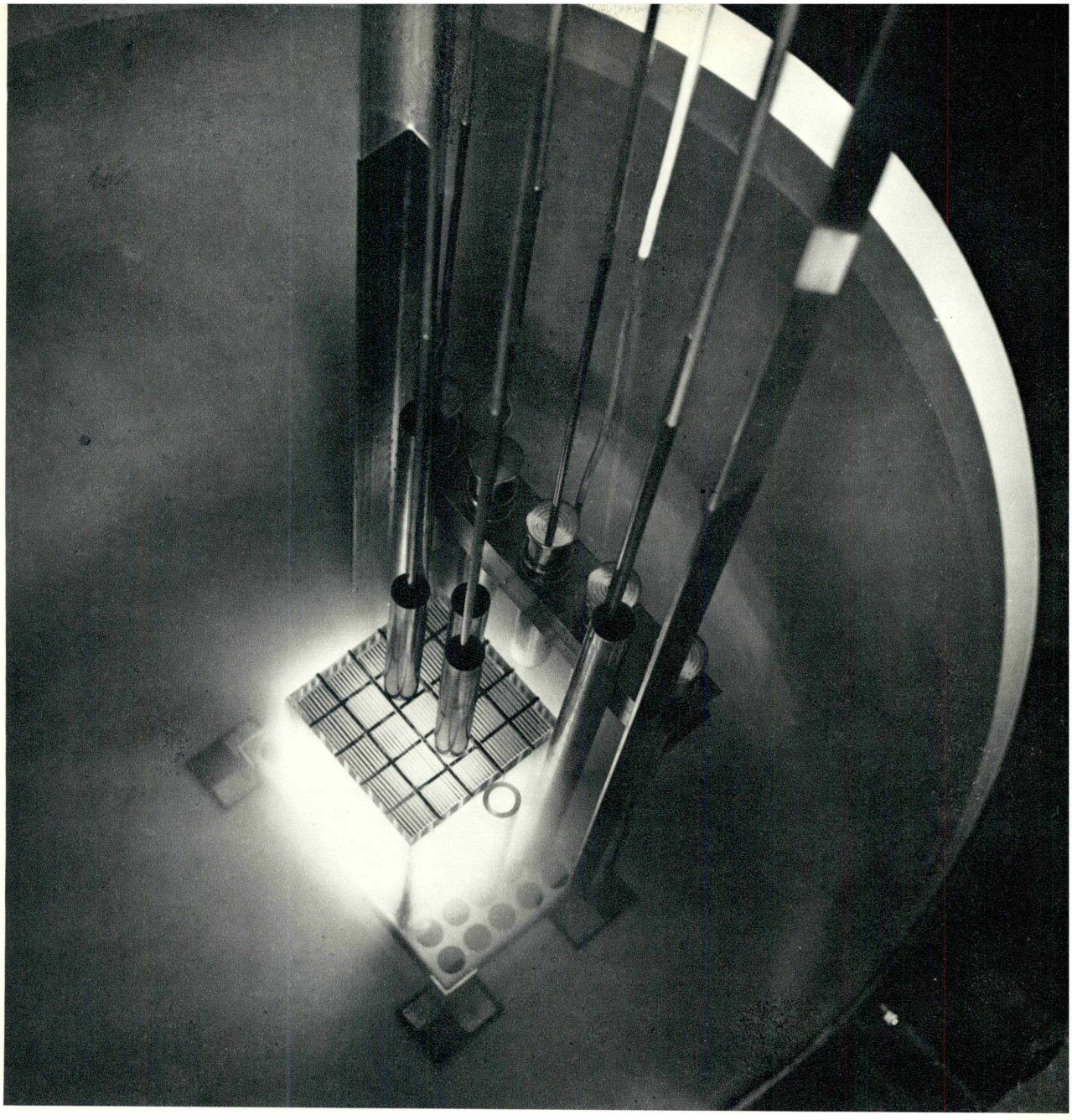
Demonstration — partiklars beteende i elektriska fält. En rökstråle — en ström av små partiklar, svävande i varm uppåtstigande luft — passerar mellan ett par högspänningsförande elektroder, den vänstra positivt och den högra negativt laddad. Partiklarna äro ursprungligen oladdade, och strålen går sin väg rakt uppåt oavsett om elektroderna äro spänningsförande eller ej. Om däremot rökpartiklarna laddas elektriskt, böjes strålen i fältriktningen. På bilden laddas partiklarna positivt därigenom att de få passera en osynlig ström av positiva gasjoner, utsända från en glödtråd på vänstra elektroden. Motsvarande försök kan göras med negativ laddning, varvid strålen böjes åt motsatt håll.



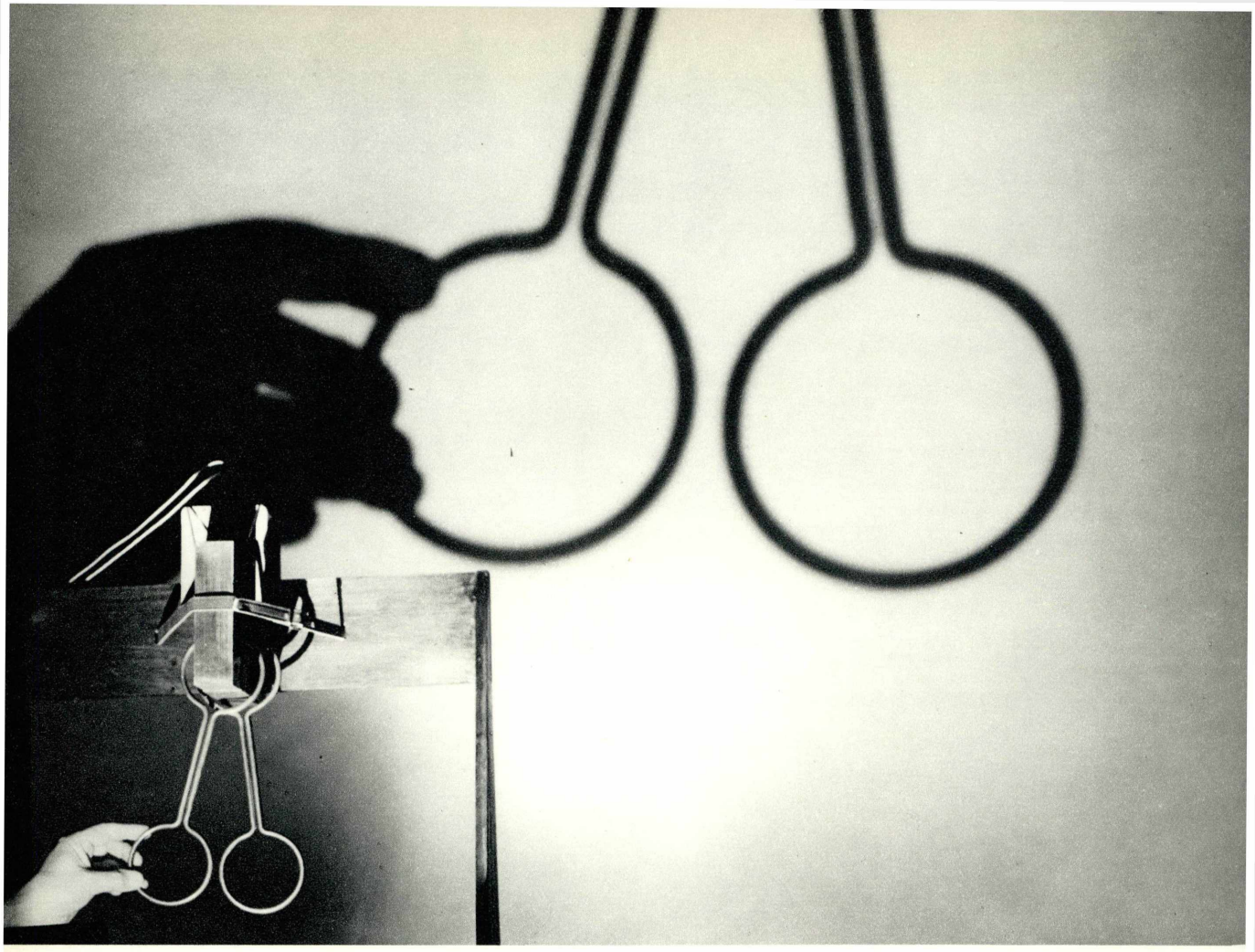
I anslutning till en schematisk modell av den första svenska forskningsreaktorn (R1) visas i museets Atomarium råmaterial (Närkeskiffer), mellanprodukter samt ett kilogram uran, framställt vid AB Atomenergi.



Museibesökare »leta uran» med Geiger—Müllerapparater i Tekniska Museets Atomarium.



Modell av atomreaktor av bassängtyp i museets Atomarium för illustration av Čerenkoveffekten.



Fältverkningar, demonstrerade som skuggspel. Ett par grova kopparringar matas med växelström (omkring 700 ampere, med samma fasläge i båda ringarna). De elektromagnetiska växelfält, som i knippen genomlöpa och omsluta ringarna, kunna ej direkt iakttagas, men de ge sig dock tillkänna på olika sätt. Om ringarna föras mot varandra, repellera de varandra. Vid begynnande överlappning uppträder attraktion, och ringarna sträva att helt täcka varandra.
Matas ringarna med ström i motsatt fasläge (180° fasförskjutning), inträder ett stabilt jämviktsläge — en potentialgrop — när ringarna tangera varandra.

De »immateriella» fältknippena kunna betraktas som huvudagerande vid detta försök. Kopparringarna vila i elektrodynamiska jämviktslägen inom fälten och följa med i dessas rörelser. Försöket ger åtskilliga anknytningar till de kvantteoretiska föreställningarna om energi och materia, fält och elementpartiklar.

Anläggningens huvuduppgift är att möjliggöra forskning och beräkningar till grund för konstruktion av kommande reaktorer för värmealstring och kraftproduktion. Reaktorn har särskilda kanaler, där inkapslade preparat kunna införas i neutronflödet för framställning av radioaktiva isotoper, och öppningar finnas även, genom vilka strömmar av snabba neutroner kunna uttagas för experimentändamål.

Invid modellen visas tillverkningsgången vid framställning av uran ur svensk skiffer. Denna har visserligen låg uranhalt, men den förekommer i mycket stora mängder. Våra urantillgångar kunna därför betecknas som rikliga.

Viktiga förenklingar av atomreaktorernas byggnad kunna uppnås, om man i stället för naturlig uran som bränsle använder en produkt, där innehållet av klyvbart material ökats genom en dyrbar anrikningsprocess. En sådan »snabb» reaktor ställer emellertid starkt ökade krav på regleringsanordningarnas effektivitet, om den kritiska gränsen ej skall överskridas och reaktorn gå ur kontroll. Här finns emellertid möjlighet att bygga relativt lätta reaktorer för fartygsdrift och kanske också för andra ändamål. Intressanta möjligheter bjuder den homogena reaktorn, där bränslet är blandat med moderatorsubstansen eller löst i den flytande moderatorn.

Vid atomkonferensen i Genève 1955 visades i drift en mycket intressant amerikansk experimentreaktor av »simbassäng»-typ. Bränsleelementen bilda här ett lamellerat system av aluminium med inpressad uranoxid, anrikad med avseende på isotopen U 235 till 20 % av uraninnehållet. Det hela är nedsänkt i en i marken nedgrävd, upptill öppen stålbehållare, 3 m i diameter och 7 m djup. På grund av den höga halten av klyvbar isotop kan vanligt vatten användas som moderator. Detta fyller därvid även uppgiften som strålskydd för de åskådare som uppifrån betrakta det hela. Reaktorn kan drivas med en effekt av upp till 100 kW, och när den är i drift visar sig i det klara vattnet omkring bränslesystemet en vackert blålysande ljusslöja, den s.k. Čerenkoveffekten. Fenomenet beror på elektroner, som slungas ut med en hastighet överstigande den i vatten rådande *ljushastigheten,* och härvid bildas ett slags bogvågor, en viss motsvarighet till företeelserna kring ett flygplan, som går med en hastighet över ljudets.

På Atomariet har byggts en modell av denna reaktor i ungefärlig skala 1:6. Genom särskilda anordningar framkallas en ljuseffekt,

som på ett slående sätt efterliknar Čerenkoveffekten, och åskådaren får härigenom ett långt mera påtagligt intryck av det märkliga skeendet i en atomreaktor än vad enbart ord och bilder kunna ge.

Atomtekniken arbetar nu på att vidare utveckla reaktorerna och att få fram specialutföranden för olika ändamål. Här öppnar sig ett stort fält för nykonstruktioner. Problemen äro många såväl i fråga om lämpliga konstruktionsmaterial som när det gäller behandlingen av bränslet och avlägsnandet av de farliga radioaktiva klyvningsprodukterna.

Vid den andra atomkonferensen i Genève, som hölls 1958, visades i modell ett stort antal högeffekt-atomreaktorer, i några fall i full skala. Därtill visades ett antal mindre reaktorer för forskning och undervisning i full drift. En av de senare byggdes i besökarnas åsyn upp på några dagar, visades i drift, och monterades därpå åter ned, ett mycket instruktivt arrangemang. Även om utvecklingen inom den tillämpade atomtekniken kanske gått långsammare än vad de mest utpräglade optimisterna väntat, så gåvo demonstrationerna dock en god bild av imponerande framsteg under de allra senaste åren.

Avelsreaktor.

Bland det intressantaste som bjuds i fråga om nykonstruktioner är kanske den s.k. *breedingreaktorn* — »avelsreaktorn». Vi ha nämnt, att isotopen U 238 upptager neutroner utan klyvning. I stället inträffa radioaktiva omvandlingar, som på kort tid leda till bildning av ett nytt klyvbart ämne, *plutonium*. Genom åtskilligt raffinemang i konstruktionen kan man leda reaktorförloppet så, att jämsides med klyvningsprocessen nytt klyvbart bränsle bildas ur material som i sig självt icke är klyvbart. På detta sätt kan det naturliga uranet utnyttjas på ett mycket fullständigare sätt än vad som annars skulle vara möjligt, och som bränsle kan även *torium* användas. Dessa förbättringar kunna bli avgörande för reaktorekonomin och för atomenergins ekonomiska konkurrenskraft med andra energikällor.

Radioaktiva isotoper.

Vi ha nämnt, huru radioaktiva isotoper kunna framställas i en atomreaktor genom neutronbestrålning av olika preparat. Klyvningsprodukterna innehålla många ämnen av denna typ som också kunna utvinnas.

De radioaktiva isotoperna röja alltid sin närvaro genom den strålning de utsända, och de kunna därför påvisas och mätas även i mycket små mängder. Dessa egenskaper ha gjort dem till utomordentliga hjälpmedel inom forskning, medicin och teknik, när det gäller att närmare utreda komplicerade eller svåråtkomliga förlopp.

I form av starkare preparat ha radioaktiva isotoper fått betydelsefull användning inom medicinen för behandling av tumörer och liknande. Ett relativt billigt litet radioaktivt preparat kan ersätta en hel röntgenanläggning, när det gäller att genomfotografera maskindelar för att söka efter inre felaktigheter.

Strålningsmätning, strålskydd.

Den radioaktiva strålningen kan observeras och mätas genom den *joniserande* verkan den utövar på olika substanser. Strålningsenergi absorberas under frigörelse av elektroner från atomerna, och detta leder till olika fysikaliska och kemiska förändringar. Fotografiska plåtar svärtas, och glas kan vid stark bestrålning ändra färg. Gaser äro normalt elektriskt oledande, men vid bestrålning uppträder viss ledningsförmåga, beroende på uppkomsten av gasjoner. Jonmängden kan mätas på elektrisk väg, och härigenom fås ett mått på strålmängden, *stråldosen.* På detta sätt arbeta vissa av de små fickdosmätare, som användas vid radiologiskt arbete.

En mycket känslig mätanordning är *Geiger-Müllerröret,* vilket ofta har en viss yttre likhet med ett radiorör. Det är fyllt med gas vid lågt tryck. En elektrod i rörets mitt hålles vid en spänning, nära den gräns, vid vilken självständig urladdning uppkommer. Enstaka partiklar eller strålningsimpulser, som passera genom röret, utlösa under dessa omständigheter korta, förstärkta urladdningsstötar, som kunna driva elektroniska mät- och räkneanordningar. Stötarna kunna också avlyssnas såsom knäppar i hörlurar eller högtalare. På Atomariet visas olika typer av Geiger-Müllerapparater, såväl större apparater för vetenskapligt bruk som lätta bärbara sådana, lämpliga för uppspårande av radioaktiva ämnen, exempelvis uran- eller toriumförande mineral.

En förutsättning för ett lyckligt genomförande av kärntekniskt arbete av vad slag det vara må är att betryggande strålskyddsåtgärder vidtagas. En fara ligger däri, att vi icke direkt med våra sinnen kunna iakttaga den radioaktiva strålningen. Effektiv avskärmning måste anordnas, och allt arbete måste utföras med största noggrannhet. Automatisering och avståndsmanövrering är ofta nödvändiga. Genom ständiga strålningsmätningar kontrolleras att skyddsanordningarna äro effektiva och att radioaktiva ämnen ej spridas. Mycket arbete lägges för närvarande ned på studium av strålningens verkan på den levande organismen och på utarbetande av skydd mot skadeverkningar.

Termonukleära processer, solenergi. Väteatomreaktor.

Vid mycket hög temperatur — tiotals miljoner grader eller mera — har atomernas värmerörelse nått sådan intensitet, att den direkt kan framkalla kärnomvandlingar, *termonukleära* processer. Dylika spela stor roll vid stjärnornas utveckling, och de utgöra viktiga led i de gigantiska kosmiska skeenden under vilka vår materia danats. Solen, vars strålning är ett grundläggande villkor för all livsverksamhet här på jorden, anses hämta energi ur en serie termonukleära reaktioner under vilka kärnan i heliumisotopen 4, alfapartikeln, byggs upp ur väte.

De energimängder som frigöras vid dessa förlopp äro betydligt större än vad de för närvarande tekniskt utnyttjade kärnprocesserna ge, och dessutom finns bränsle i praktiskt taget obegränsade kvantiteter. Det ter sig mycket lockande att söka på ett kontrollerbart och tekniskt användbart sätt genomföra liknande reaktioner. Hittills ha alla i större skala med konst framkallade termonukleära förlopp haft karaktären av våldsamma explosioner. Det gäller att »tämja» ett sådant explosionsförlopp, en uppgift som kanske att börja med förefaller ganska orimlig.

På senare år har mycket arbete lagts ned på denna sak i världens ledande forskningscentra. I Sverige bearbetas hithörande problem i såväl Stockholm som Uppsala.

Det första offentliga meddelandet om forskningar på detta område kom 1956 från de ryska forskarna L. A. Artsimovitch och V. Kurchatov. Vid försök med kraftiga elektriska urladdningar i tung vätgas kunde de påvisa energirik röntgenstrålning och frigörelse av neutroner. Detta tydde på att termonukleära reaktioner verkligen åstadkommits, och i detta fall på ett kontrollerbart sätt. En i sammanhanget väsentlig sak är den oerhörda sammanpressning av gasen, närmare 400 000 gånger, som inträffar vid gnistans hopkrympning i det bildade starka magnetfältet.

Kort efter detta offentliggörande meddelades, att såväl i U.S.A. som England omfattande forskningar och experiment utförts inom samma område.

Vid atomkonferensen i Genève 1958 ägnades mycket stort intresse åt detta forskningsområde, och ett stort antal kompletta experimentanläggningar hade ställts upp i full drift inom den tillhörande utställningen.

Det kan vara av intresse att nämna, att svenska försök i samma riktning redan i början av 1930-talet utfördes av J. Tandberg. En

tråd av metallen palladium mättades på elektrolytisk väg med tung vätgas, vilken därigenom redan från början kom att befinna sig under ett tillstånd motsvarande mycket högt tryck. Genom en kraftig elektrisk urladdning, som fick passera tråden, höjdes temperaturen mycket plötsligt, så att materialet förångades, vilket hade ytterligare tryckstegring som följd. Metoden föreföll rymma åtskilliga möjligheter, men en redan tidigare (1927) inlämnad patentansökan avslogs av patentverket, och arbetet kom att taga en annan riktning.

Plasmafysik, magnetohydrodynamik.

Vid den höga temperatur — hundratals miljoner grader — som är nödvändig för att tekniskt användbara termonukleära reaktioner skola kunna äga rum, har materien förlorat sin vanliga karaktär. Den är helt upplöst i fria atomkärnor och elektroner. Denna tillståndsform kallas *plasma,* och man har ibland kallat den för det fjärde aggregationstillståndet, där fast form, vätskeform och gasform äro de tre övriga.

Det är omöjligt att förvara en substans i detta tillstånd i något kärl eller någon behållare av vanlig materia. Plasmat skulle avge värme till kärlväggarna och därigenom förlora sin karaktär, och därtill skulle väggarna förstöras av hettan. Man har därför funnit på ett slags »immateriella» behållare, ett system av magnetiska kraftfält, som likt en osynlig »magnetisk flaska» håller plasmat inom en begränsad volym. När de framrusande elektriskt laddade partiklarna träffa magnetfältet, böjes deras bana. De »studsa» tillbaka, ungefär som om de träffat en vägg. I våra televisionsapparater böjes den energirika elektronstrålen på liknande sätt genom magnetiska fält, som i detta fall snabbt variera, och därigenom »ritas» bilden på skärmen.

Ett plasma i rörelse beter sig mycket egendomligt. Genom rörelsen alstras magnetiska och elektriska fält, som i sin tur återverka på plasmat. Rörelsen blir därför långt mera komplicerad än den man finner hos våra vanliga vätskor och gaser. Här öppnar sig ett helt nytt forskningsfält, *magnetohydrodynamiken,* som introducerats av den svenske fysikern Hannes Alfvén. Inom jordens glödande inre råda magnetohydrodynamikens lagar, och dessa lagar styra också världsrymdens gigantiska processer, där solar och världar uppstå och förgå under omsättning av ofattbara mängder energi. Kanske kan forskningen inom plasmafysiken och magnetohydrodynamiken leda till konstruktion av den hägrande termonukleära *väteatomreaktorn,* som för all överskådlig framtid skulle kunna täcka jordens energibehov.

Bindningsenergien, den energi som frigöres när en atomkärna bygges upp av de ingående elementarpartiklarna, spelar en grundläggande roll vid alla kärnprocesser. Energiutvecklingen vid ett kärnomvandlingsförlopp kan beräknas såsom skillnaden mellan de bildade och de ursprungliga kärnornas bindningsenergi. Detta söker Atomariet — med tillåtliga approximationer — åskådliggöra med hjälp av den inom kärnfysiken välkända *bindningsenergikurvan* i originell framställningsform. I vågrät riktning tänka vi oss de olika atomkärnorna — i detta fall från väte till uran — ordnade efter stigande masstal. Den lodräta axeln anger i »fallande» riktning bindningsenergien, beräknad i miljontal kilowattimmar per kilogram substans. Redan en blick på kurvans form ger en uppfattning om de möjligheter som finnas att utvinna energi ur atomkärnorna. Från ett högt utgångsläge, markerande de lätta kärnornas energiinnehåll faller kurvan brant mot ett minimum, motsvarande de medeltunga kärnorna för att därefter åter långsamt stiga i riktning mot de tyngre kärnorna. Energi frigöres sålunda, när de tyngsta kärnorna sönderfalla till lättare kärnor, belägna närmare kurvans mitt, men ännu mycket mera energi utvecklas, när lätta kärnor sammansmälta under bildning av kärnor inom denna mittelgrupp. Själva kurvan framställes här som ett vattenfyllt glasrör, matat från behållare vid ändpunkterna. På några ställen finnas kranar, där vatten kan tappas ut vid olika fallhöjder, representerande energiutvecklingen vid några olika kärnförlopp, såsom vid naturligt radioaktivt sönderfall, vid urankärnans klyvning samt vid de termonukleära reaktionerna i solen vilka såsom nämnts nu även börja få stor teknisk aktualitet.

Levande energikurva.

Kosmisk strålning.

I naturen möta vi kärnomvandlingar i ytterligare en annan form — den kosmiska strålningen. Från rymden utanför jordatmosfären komma strömmar av oerhört energirika partiklar — protoner eller andra atomkärnor. När dessa löpa in i atmosfären, utlösa de explosionsartade kärnomvandlingar, vilka i sin tur ge sekundära verkningar i upprepad följd. På detta sätt kan en enda infallande partikel framkalla en partikelskur. Förloppets huvuddrag visas i Atomariet på en väggbild i självlysande färg.

Mesoner, hyperoner och »besynnerliga» partiklar.

Vi möta här ett nytt partikelslag, som vi ej förut omnämnt, de gåtfulla *mesonerna.* Dessa anses spela roll vid atomkärnans bindning, och de uppträda fritt i samband med våldsamma energiomsättningar. Mesonforskningen har öppnat nya perspektiv inom atomfysiken. Man har funnit serier av olika slags mesoner med massa eller vikt

från ett par hundra gånger elektronens och uppåt (protonens massa är omkring 1800 gånger elektronens), och man har vidare funnit liknande partiklar som äro tyngre än protonen, de s.k. *hyperonerna*. Även bland fysiker talar man i detta sammanhang om »besynnerliga» partiklar.

Materia-energi, massökning.

Om vi betrakta de »vanliga» partiklar[1] vi hittills stiftat bekantskap med såsom stabila former av »materialiserad» energi, så bilda mesonerna och hyperonerna ett slags mellanformer, som ytterst snabbt förändras eller sönderfalla.

En laddad partikel kan i vakuum med hjälp av elektriska fält accelereras till hög hastighet. Hastighetsökning åtföljes hos alla kroppar av massökning, men vid måttlig hastighet är massökningen omärkligt liten. Ljusets hastighet i vakuum är ungefär trehundratusen kilometer i sekunden, och om partikelhastigheten närmar sig detta värde, ökar massan mycket kraftigt. Här ligger en gräns, som enligt naturens ordning ej kan överskridas. Matematiskt sett skulle partikelns massa bli oändligt stor, om ljushastigheten kunde uppnås. Om en elektron, som bringats upp till en hastighet närmande sig ljusets, utsättes för fortsatt energitillförsel, så kan den i sitt rörelsetillstånd få en massa som ligger långt över protonens. Partikelns vilomassa förblir emellertid oförändrad.[2]

För att närmare studera problem som aktualiserats genom forskningar rörande den kosmiska strålningen har man utvecklat nya typer av acceleratorer, i viss mån byggande vidare på cyklotronens princip, men där huvuddelen av energien tillföres partiklarna genom kraftiga impulser av magnetfält. På sätt och vis likna dessa apparater ett slags transformatorer, där sekundärlindningen består av ett ringformigt urladdningsrör, i vilket partiklarna accelereras. Magnetpulserna framkalla elektriska fält, som driva fram partiklarna.

Bevatron, högenergifysik.

I Berkeley i Californien har man enligt dessa principer byggt den s.k. bevatronen, där protoner kunna accelereras till energivärden över 6 tusen miljoner elektronvolt. (En elektronvolt (eV) är den energi som en elektron får, när den genomlöper ett elektriskt fält, motsvarande en spänning av en volt.) Man har infört särskilda beteckningar

[1]) Neutronen i fritt tillstånd är icke stabil. Den sönderfaller med en halveringstid på 12,8 minuter till en proton och en negativ elektron.

[2]) Inom materiella medier, där ljushastigheten är lägre än i vakuum, kan ljushastigheten överskridas.

för dessa höga energivärden. En mega-elektronvolt (MeV) betyder en miljon elektronvolt, och en giga-elektronvolt (GeV) en miljard elektronvolt eller tusen miljoner elektronvolt. Som jämförelse kan nämnas, att värmerörelsen hos atomer och molekyler vid rumstemperatur ungefärligen motsvarar energien 0.03 elektronvolt (eV). Vill man räkna ut vad bevatronens energivärden motsvarar såsom värmerörelse måste man multiplicera de höga elektronvoltvärdena med 10 000. De temperaturvärden som på detta sätt nås te sig gigantiska till och med i jämförelse med den termonukleära teknikens temperaturvärden på några hundra miljoner grader!

Nära Moskva har man byggt en liknande anordning som ger mera än 10 GeV, och hösten 1959 har man startat en ännu större anläggning vid europeiska kärnforskningsinstitutet (CERN) i Genève. Protonsynkrotronen i detta institut ger över 25 GeV. Den är byggd under markytan, och den ter sig närmast som en stor tunnelbaneslinga med diametern 200 meter. Partikelaccelerationen sker i vakuum i ett genom tunneln löpande ringformat accelerationsrör, mera än 600 meter långt. Röret löper genom ett system av stora elektromagneter, och arbetsplatserna invid röret se närmast ut som tunnelbanestationer med ett innestående långt och tungt tunnelbanetåg. När apparaten är i gång, får givetvis ingen befinna sig inom de närmaste lokalerna med hänsyn till den intensiva strålningen. Från anläggningen uttagas olika strålknippen, som genom särskilda kanaler löpa till speciallaboratorier.

Kraftfält.

Med de nu nämnda stora och dyrbara forskningsanläggningarnas hjälp prövas bärkraften hos några av de föreställningar om energi och materia, som vuxit fram inom den teoretiska fysiken.

Energi är alltid knuten till kraftverken av något slag. Matematiskt uttryckes energin som produkten av en kraft och längden av den väg, utefter vilken kraften arbetar. Den energi, som upplagras exempelvis i ett uppdraget klocklod, beräknas genom multiplikation av lodets tyngd och den längd lodet hissats upp.

Alla kraftverkningar äro knutna till *kraftfält*. Tyngden är en yttring av *gravitationsfältet* kring jorden. Det är även gravitationsfält som styra himlakropparnas rörelser och hålla planeterna i deras omloppsbanor kring solen.

I det föregående ha berörts även andra fält, såsom de *elektriska* och *magnetiska* fälten. Elektriska fält binda elektronerna till atomkärnan och förmedla även atomernas sammanfogning till molekyler och kri-

stallgitter, vilka båda bygga upp materien i stort. Inom atomernas elektriska fält ligger grunden till elektronernas energi. Vid de Atomarieexperiment som visas med lysskärmens hjälp se vi, huru energi i form av ljus kan upptagas av atomernas elektronhöljen och även avgivas därifrån. Energi, bunden i elektronhöljet, kan också frigöras såsom kemisk energi, exempelvis *förbränningsenergi.* Våra ångmaskiner, ångturbiner och förbränningsmotorer ha sedan länge hämtat energi ur denna elektronernas energikälla.

De elektriska och magnetiska fälten kunna enligt den beskrivning, som lämnats redan av Maxwell, ses som yttringar av en och samma grundföreteelse. Ett föränderligt elektriskt fält ger upphov till ett magnetfält, och om ett magnetfält i sin tur förändras eller rör sig, visar sig ett elektriskt fält. Man talar därför om *elektromagnetiska* fält. Hela elektrotekniken bygger på praktiskt utnyttjande av sådana fält. Radiotekniken använder elektromagnetiska vågor, vilka liksom ljuset kunna beskrivas såsom fortlöpande elektromagnetiska fältsvängningar.

I Atomariet demonstreras modellmässigt de krafter som råda inom atomkärnan. Dessa ha sin grund i *kärnkraftfälten,* vilka fysikerna numera äro i färd med att söka närmare utforska. Dessa kraftfält äro bärare av vad vi kalla *atomenergi,* eller rättare uttryckt *atomkärnenergi.* Här ligga energikällor, som redan börjat praktiskt användas och som väntas få alltmera ökad praktisk betydelse.

Enligt Einsteins redan 1905 formulerade relativitetsteori äro materia och energi ytterst en och samma sak. Kraftfält, energi och materia äro därför i grunden förenade med varandra, och den fysikaliska forskningen berör i lika mån samtliga dessa företeelser. Kraftfälten äro generella energibärare överallt, även i det som vi uppfatta som tomrum. Gravitationen går som ett flöde genom hela världsrymden. De ljus- och radiovågor som nå oss från de avlägsnaste nebulosor och andra himlaobjekt vittna om att även det elektromagnetiska fältet har universell utsträckning.

Till Tekniska Museets Atomarium höra några demonstrationsapparater, som utvecklats speciellt för att demonstrera några grundläggande egenskaper hos kraftfälten (4, 11 och 12). Därvid visas bl.a. en av V. Bjerknes angiven modell, i vilken olika slags fältverkningar jämföras med de krafter av statiskt och dynamiskt slag, som verka på föremål, omslutna av vatten. Som annat exempel visas den påtagliga likheten mellan de krafter som styra en gyroskopsnurra och de mag-

netiska fältkrafter som verka på en kompassnål. Gyrokompassen grundas på gyroskopverkan.

I en annan försöksanordning visas elektromagnetiska fältverkningar mellan växelströmförande kopparringar. Ringarna genomlöpas och omgivas av energiflöden i form av växelfält, vilka vi inte kunna upptäcka med våra sinnen. De kunna emellertid påvisas med hjälp av en liten provmagnet, som kommer i vibration. Ringarnas immateriella fältknippen visa inbördes kraftverkningar, som på ett påfallande sätt likna dem som demonstreras med Atomariets partikelmodeller. Redan ett så enkelt försök som detta leder tanken till sambandet mellan energi och materia.

Kvantfältteori.

Liksom materien har sin struktur av atomer och elementarpartiklar, har även energin, ytterst sett, diskontinuerlig struktur. Den uppdelas i grundenheter, *kvanta*. Motsvarande egenskaper måste då även tillkomma kraftfälten, energins bärare. Kraftfältens struktur framträder såsom ett system av olika energitillstånd, som kunna »besättas» med partiklar. Med en mycket enkel bild skulle det hela kunna liknas vid ett »hyllsystem», där partiklar placeras på olika hyllhöjd och med olika energiinnehåll. Den del av den teoretiska fysiken som behandlar de spörsmål som här antytts kallas *kvantfältteori.*

Att även abstrakta teoretiska resonemang kunna leda till experimentella och praktiska resultat skall i det följande visas. Vid teoretiska betraktelser, speciellt rörande elektronernas natur och energi, kom den engelske fysikern Dirac redan före 1930 till högst märkvärdiga resultat. Utom den positiva delen av den skala som betecknar fältens energitillstånd — ett område inom vilket våra vanliga erfarenheter sträcka sig — är även en motsvarande *negativ* del matematiskt möjlig. Denna del antages emellertid normalt vara »fullbesatt» — kvantfysikaliskt sett. Hela detta innehållsrika negativa system är av denna anledning icke iakttagbart. Tillståndet är på något sätt »dött» och orörligt. Ingenting händer, som kan bilda grund för observationer av något som helst slag. Vi uppfatta därför det hela som vakuum — tomrum! Kan emellertid så mycket energi ställas till förfogande, att »någonting» hämtas upp ur det negativa tillståndet, finns möjlighet för att ett observerbart *partikelpar* skall framträda. Detta »någonting», som hämtas upp ur det negativa tillståndet, uppträder som en partikel, och det »hål», som efterlämnas i det förut fullbesatta och låsta negativa systemet, får genom ingreppet möjlighet till rörelse. »Hålet» har alla egenskaper som tillkomma en parti-

Hålteori, partikelpar, materialisation — dematerialisation.

kel av motsatt slag — den förstnämndas *antipartikel.* Förloppet kan uttryckas så, att de båda partiklarna nybildas genom *materialisation* av energi. Sammanträffa de båda motsatta partiklarna, förinta de varandra. »Hålet» utfylles. *Dematerialisation* inträffar under frigörelse av strålningsenergi, och det ursprungliga begynnelsetillståndet av »tomrum» återställes.

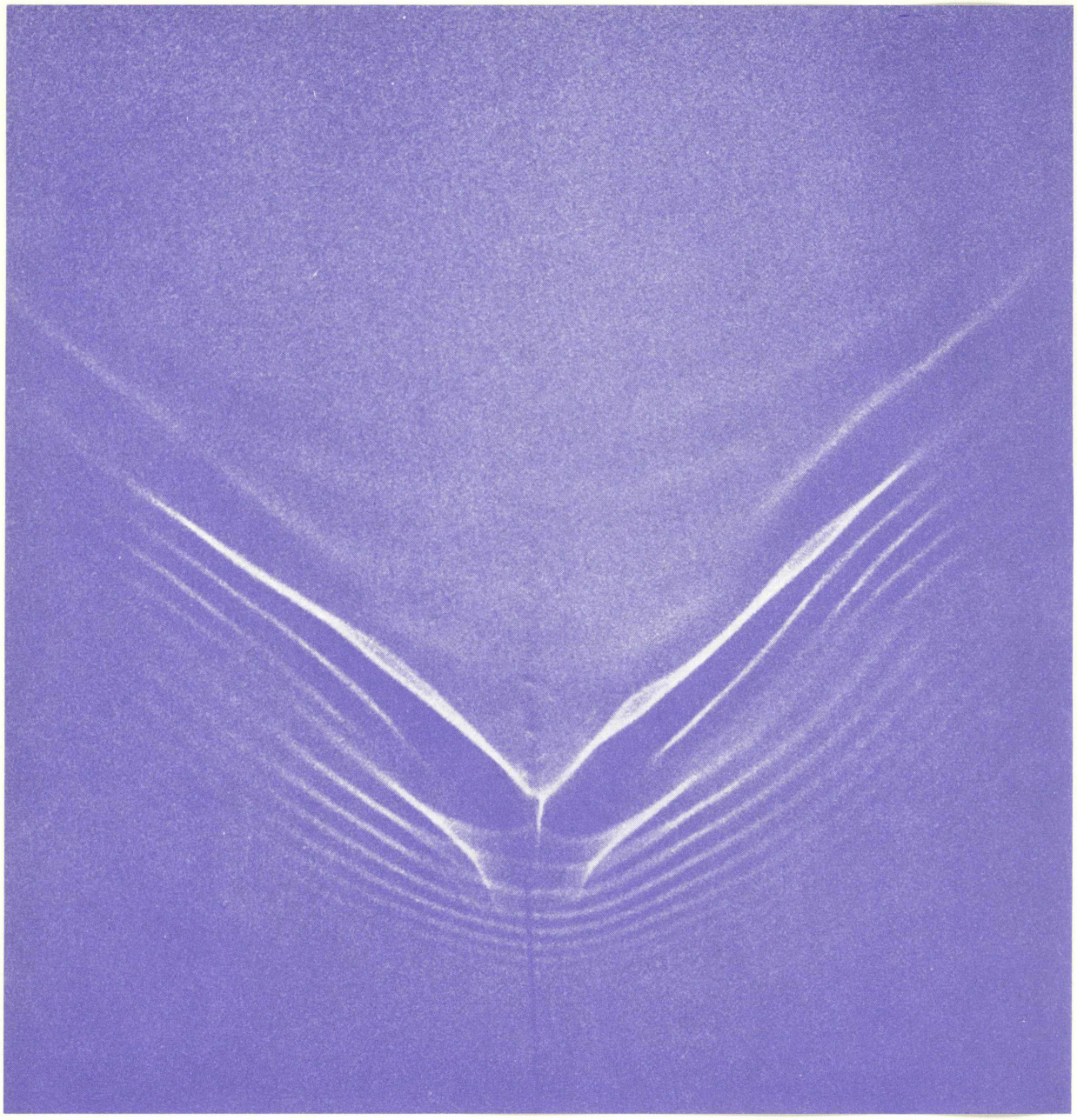
Diracs djärva och till synes orimliga teori bekräftades ganska oväntat genom den svenskättade amerikanske fysikern C. D. Andersons upptäckt av den positiva elektronen, *positronen,* den vanliga negativa elektronens antipartikel. Detta skedde genom studier av den kosmiska strålningen. De parvis bildade partiklarna kunna skiljas därigenom att rörelsebanorna böjas åt motsatta håll i ett magnetfält. Med hjälp av Wilsons dimkammare (som kommer att beskrivas nedan) lyckades Anderson fotografera sådana banor. Mycket snart visades, att sådan parbildning av elektroner är en mycket vanlig företeelse, när atomkärnor träffas av energirik röntgenstrålning eller gammastrålning. Man fick härigenom möjlighet att i detalj studera såväl uppkomsten av sådana partiklar som deras förintelse vid sammanträffande.

En förutsättning för bildningen av ett partikelpar är att en samlad energimängd finns för handen, som enligt Einsteins redan omnämnda ekvation $E=mc^2$ motsvarar partiklarnas sammanlagda massa. Massan av ett par elektroner motsvarar ungefär en megaelektronvolt i energimått. Denna energi bindes vid partiklarnas bildning och frigöres åter vid förintelsen.

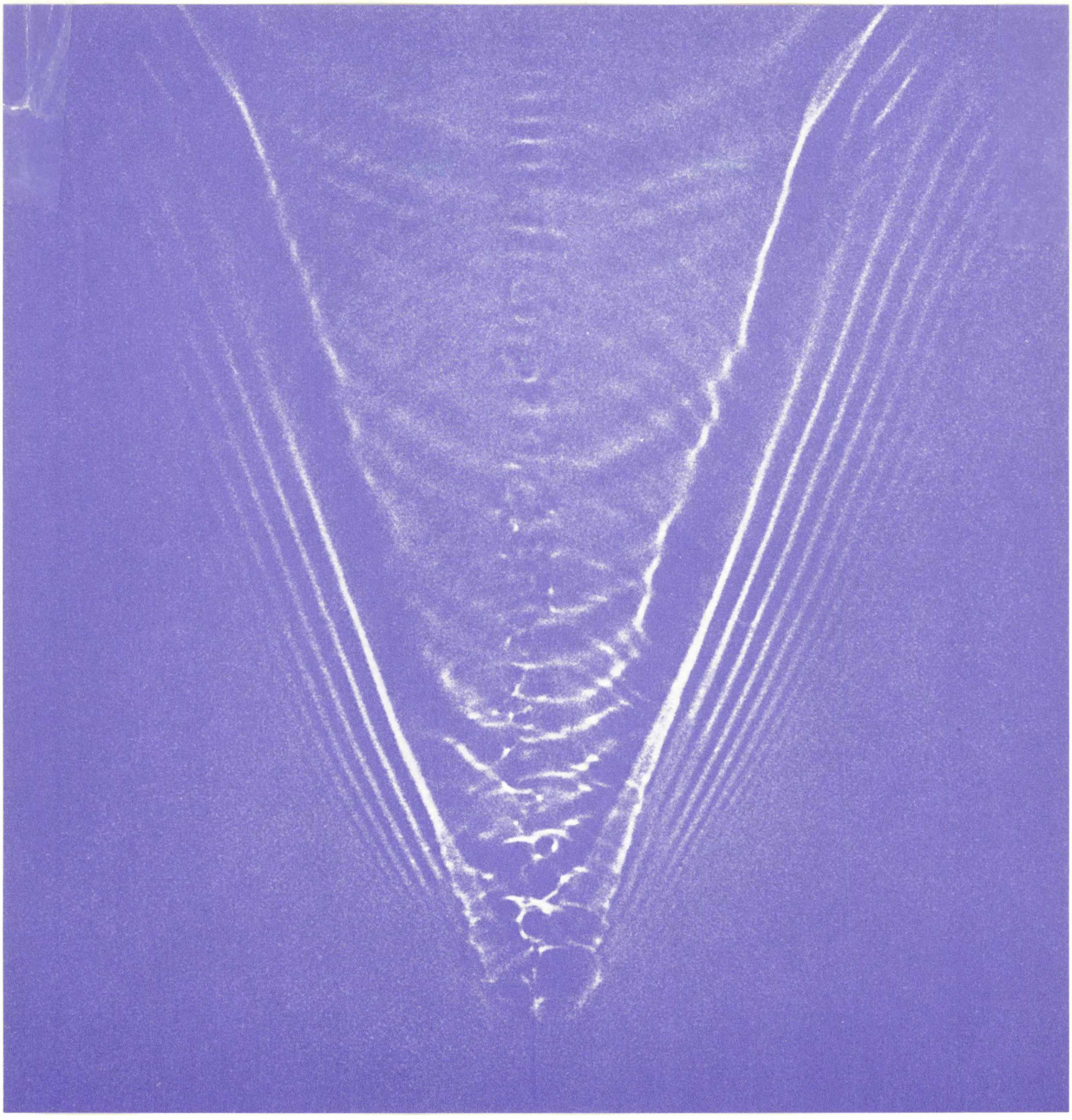
Antiprotonen.

De uppnådda märkliga resultaten ledde till tanken, att även tyngre partiklar skulle kunna alstras på motsvarande sätt. Protonens massa är, såsom redan nämnts, omkring 1800 gånger större än elektronens. Om energikoncentrationen kunde ökas i motsvarande grad, så skulle kanske protoner och dess motpartiklar antiprotoner, negativa protoner kunna framställas. Detta var utgångstanken vid byggandet av bevatronen i Berkeley och vid de arbeten som kommo att utföras av Segré, Chamberlain och medarbetare.

Som energibärare valdes vanliga protoner. Med hänsyn till förutsedda förluster och för att göra utbytet så pass stort, att det fanns någon utsikt att finna ev. bildade antiprotoner, valdes så hög energi som omkring 6 GeV (6 miljarder elektronvolt). Den energirika protonstrålen fick träffa ett kopparbleck. Härvid utslungades en oerhörd mängd partiklar av olika slag. En första uppsortering skedde i ett magnetfält, där banorna för olika partikelslag böjdes i olika grad



Experiment med vattenvågor för att illustrera den av Čerenkov upptäckta effekten. — En partikel, som i ett materiellt medium rör sig med en hastighet överstigande ljusets hastighet i mediet, framkallar en bogvåg med konformad vågfront. I öppna atomreaktorer av bassängtyp visar sig Čerenkoveffekten såsom en blåfärgad ljusslöja kring reaktorkärnan.



Genom optisk mätning av frontvinkeln kan partikelhastigheten bestämmas i en Čerenkovräknare. Detta har bland annat möjliggjort upptäckten av antiprotonen.
Bilderna visa uppkomsten av olika bogvågor i en vattenyta i vilken en kropp föres fram med lägre eller högre hastighet.

och i olika riktning. Negativa partiklar böjdes åt ett håll och positiva åt ett annat, räknat från den ursprungliga rörelseriktningen. Partikelströmmarna kunde på detta sätt uppdelas i olika delströmmar eller strålar. I en viss bestämd sådan stråle kunde antiprotoner väntas förekomma. Det visade sig i verkligheten, att man här kunde finna 2 antiprotoner på 100 000 negativa s.k. π-mesoner med egenskaper som ha viss likhet med antiprotonernas. Att under sådana omständigheter finna just antiprotonerna var svårare än att finna en nål i en höstack, men trots detta kunde sorteringen genomföras med lyckat resultat. En antydan om den härvid använda metodiken kan vara av intresse.

Scintillationsräknare, Čerenkovräknare, bubbelkammare, partikelspår.

Partiklarna registrerades med hjälp av olika samverkande *scintillationsräknare,* och genom särskilda anordningar kunde sådana partiklar borträknas, som uppenbarligen inte voro antiprotoner. Därtill sorterades partiklarna efter olika hastighet med s.k. *Čerenkovräknare.* Båda dessa instrumenttyper komma att närmare beskrivas i det följande. Efter ytterligare och noggrannare hastighetsmätning kunde partiklarnas massa eller vikt beräknas med kännedom om strålens avböjningsvinkel i magnetfältet. Genom dessa och åtskilliga andra kontrollåtgärder kunde antiprotonens existens klart och tydligt påvisas.

Nu återstod att närmare studera de kärnreaktioner antiprotonen kan framkalla samt dess förintelseprocess. Redan från början använde man därvid den av C. F. Powell utvecklade metoden att direkt avbilda laddade partiklars banor såsom spår i emulsionen på en fotografisk plåt. Partiklarna aktivera de bromsilverkorn de passera, och efter framkallning framträda därför partikelbanorna såsom sammanhängande rader av svarta silverkorn. Dessa spår kunna närmare studeras i mikroskop och därvid fotograferas i lämplig förstoring. Bilder av detta slag bruka visas på Atomariet.

Antiprotonspåren sluta som regel med en »stjärna», framkallad av partiklar som slungas ut vid sprängning av en atomkärna, i vilken antiprotonen trängt in och under förintelse reagerat med någon av kärnpartiklarna.

På allra senaste år har ett nytt och betydelsefullt hjälpmedel, den s.k. *bubbelkammaren,* utvecklats för att avbilda laddade partiklars banor. Apparaten utgör ett slags »omvänd» Wilsonkammare. I sin mest avancerade form består apparaten av en närmare två meter lång behållare med glasfönster. Den är fylld med flytande väte med

en temperatur av —253°C. För att hålla en sådan apparat i drift fordras en anläggning som närmast har karaktären av kylindustri. Genom särskilda arrangemang bringas vätskan i ett labilt tillstånd nära kokpunkten. Passera nu laddade partiklar genom vätskan, så framträda banorna såsom mycket vältecknade spår, bestående av små gasbubblor. Detta är den hittills förnämligaste möjligheten att följa enstaka partiklars banor och reaktioner. Anordnas ett magnetfält genom apparaten, kunna olika partikelslag särskiljas genom banornas olika krökning.

Oladdade partiklar, såsom exempelvis neutronen, framkalla ingen direkt verkan i de nu nämnda apparaterna, och detta beror på att inga elektriska fältverkningar finnas mellan sådana partiklar och omgivande atomer, såsom visats i det föregående. Oladdade partiklar kunna emellertid ofta spåras genom indirekta verkningar. Det händer, att ett antiprotonspår slutar helt tvärt och utan synlig verkan. Förloppet är mycket intressant. Partikeln har vid passage nära intill en vanlig proton utbytt laddning med denna och övergått till en oladdad *antineutron*[1]. Den vanliga protonen har övergått till en vanlig neutron. Ingen av dessa partiklar ger direkta spår. Antineutronen röjer sig emellertid, när den längre fram kolliderar med någon atomkärna och förintas under bildning av en »stjärna», liknande den som antiprotonen kan framkalla. Upptäckterna av antiprotonen och antineutronen ha givit ett utomordentligt stöd åt Diracs hålteori och kommit den att framstå såsom något av det mest fascinerande fysiken bjuder.

Ett av de senaste tillskotten i Atomariets demonstrationsserier är en enkel anordning, som i färgprojektion ger en symbolisk bild av uppkomsten och förintelsen av ett partikelpar.

Transistorer, likriktare, fotoceller.

Inom materien finnas energitillstånd, som ligga mycket nära intill varandra. Den energi, som fordras för att flytta en elektron till ett högre energitillstånd kan därför i detta fall vara mycket ringa. Detta förhållande är av utomordentligt stor betydelse inom halvledaretekniken vid utformning av *transistorer, likriktare, fotoceller* och liknande. I dessa förmedlas elektricitetstransporten av såväl negativa elektroner som frilagda »hål». De senare utgöra positiva laddningsbärare.

[1] Den oladdade antineutronen skiljer sig från den vanliga neutronen genom motsatta magnetiska egenskaper. Den kan jämföras med en strömspole, i vilken den magnetiska polriktningen följer en »tumregel», motsatt den vanliga.

Det kan vara lämpligt att något förklara de båda partikelobservationsinstrumenten scintillationsräknare och Čerenkovräknare.

Den förstnämnda utgöres huvudsakligen av en speciellt utvald kristall, genom vilken partikeln får passera. Härvid alstras en ljusglimt, en scintillation, som elektriskt registreras med hjälp av en ljuskänslig fotoelektrisk cell. Om två sådana räknare anordnas med känt avstånd, kan partikelns hastighet noggrant bestämmas genom elektrisk mätning av den korta tid som förflyter mellan passagerna. Förekomma många partiklar, som dessutom ha olika hastighet, kan denna metod ej ensam användas. Man utnyttjar då olika former av Čerenkovräknare, vilkas verkan bygger på den i samband med atomreaktorn omnämnda Čerenkoveffekten.

Partikeln får passera ett genomskinligt fast eller flytande medium. I detta är ljushastigheten lägre än den som råder i vakuum. En partikel med hög energi kan då mycket väl ha högre hastighet än den som ljuset har i mediet. Den går med »överljushastighet» och därvid uppträda, såsom redan nämnts, vissa fenomen som äro analoga med dem vi känna från flygplan som gå med hastighet över ljudets. Det bildas ett system av bogvågor med konisk vågfront. Ju snabbare partikeln går, desto spetsigare blir konens toppvinkel. Denna vinkel kan mätas på optisk väg, och härigenom kan partikelns hastighet automatiskt bestämmas. Čerenkoveffekten har fått namn efter upptäckaren, den ryske fysikern Čerenkov, som jämte forskarkollegerna Frank och Tamm närmare utrett fenomenets natur.

I Tekniska Museets Atomarium demonstreras Čerenkoveffekten modellmässigt med hjälp av vattenvågor, vilka projiceras i taket såsom ett skuggspel. Om en partikelmodell föres fram genom vattnet med större hastighet än den som vattenvågorna ha, så framträder bogvågsbildningen mycket vackert och tydligt. Likaså syns, hur bogvågsvinkeln förändras med hastigheten.

Nyare rön. Naturens osymmetri.

Högenergifysiken har lett till ett närmare klarläggande även av tidigare i och för sig kända företeelser inom radioaktiviteten. Vid det s. k. *betasönderfallet* av atomkärnor utsändas negativa eller positiva elektroner från atomkärnan. Elektronerna kunna icke i enklare bemärkelse sägas utgöra byggstenar i kärnan, men de bildas och utsändas i många fall, då kärnans massa och laddning ej stå i stabilt förhållande till varandra. Genom betasönderfallet ökas eller minskas kärnladdningen, och förloppet innebär sålunda att ett grundämne förvandlas till ett annat.

Vid betasönderfallet framträder en tidigare okänd form av osymmetri, som på teoretisk grund förutsagts av de båda kinesiska forskarna T. D. Lee och C. N. Yang. Inriktas exempelvis betastrålande kärnor av radioaktivt kobolt i ett magnetfält vid låg temperatur, så observeras, att strålningen utsändes med olika intensitet i olika riktningar från kärnan. Naturen tycks skilja på höger och vänster! I vanliga fall äro kärnorna helt fritt inriktade på alla tänkbara sätt, och ingen särskild riktning dominerar. Därför kan denna osymmetriska fördelning inte iakttagas. Upptäckten, som innebär att en av den teoretiska fysikens viktigaste satser, den s.k. *paritetsprincipen,* inte gäller i detta fall, väckte enormt uppseende bland fysikerna, och redan inom ett år efter offentliggörandet, som skedde 1956, belönades upptäckten med nobelpriset.

I vår elementarpartikelöversikt ha vi hittills omnämnt *elektroner, protoner, neutroner, mesoner* och *hyperoner.* I denna samling bör även *fotonerna,* »ljuspartiklarna», omnämnas. Liksom övriga partiklar ha även fotonerna vågkaraktär, och ljuset uppfattas därför i vanliga fall såsom en vågrörelse. Redan vid beskrivningen av lysskärmsexperimenten i Atomariet omnämndes, att atomernas energiinnehåll alltid förändras språngvis. Energi avgives eller upptages härvid i form av »portioner», kvanta. Fotonerna äro just sådana kvanta, och energiinnehållet motsvarar den vid atomens energisprång omsatta energimängden. Nu finns det fotoner med olika energiinnehåll. Hithörande förhållanden ha klarlagts framför allt av Planck och Bohr. Fotonens energiinnehåll är direkt proportionellt mot ljusets svängningstal, frekvens. Denna viktiga lag gäller inte bara ljuset. Den omfattar alla slag av elektromagnetisk strålning — ett vidsträckt register, från radioastronomiens meter- och centimetervågor, över infrarödstrålning, synligt ljus, ultravioletts trålning, röntgenstrålning till atomkärnornas ofattbart kortvågiga gammastrålning. Genom undersökning på spektroskopisk väg av strålningens frekvents eller energi kunna atomernas energitillstånd bestämmas mycket exakt. Detta är av utomordentlig betydelse för atomfysiken.

Vår översikt skulle inte vara fullständig utan omnämnande av *neutrinon,* kanske den gåtfullaste bland elementarpartiklarna. Denna partikel är ytterst svår att spåra, då den saknar laddning och dessutom har försvinnande liten massa. Dess existens förutsattes emellertid på rent teoretisk grund för att förklara vissa energiförluster vid betastrålningen.

Man antog, att den energi, som sålunda inte kunde redovisas, bortfördes av någon partikel av just detta slag. Vid sällsynta tillfällen kan emellertid neutrinon visa sekundära verkningar. Vid träff mot en proton — som i sig själv är stabil — kan denna omvandlas till en neutron och en positiv elektron. Kan man på ett distinkt sätt påvisa den samtidiga uppkomsten av dessa två partiklar, inte bara en utan många gånger, och på ett sätt som uppfyller de matematiska sannolikhetslagarnas krav, så är neutrinons existens bevisad. Att så verkligen kunnat ske är ännu en stor triumf för den nutida raffinerade experiment- och observationstekniken. Neutrinons upptäckare äro de båda amerikanska forskarna Reines och Cowan. Man räknar även med en motpartikel, *antineutrinon.*

Den mångfald former som elementarpartiklarna visa ter sig förbryllande. Den framträdande vågnaturen ger därtill utpräglade drag av ogripbarhet och obestämbarhet hos dessa partiklar, som markera gränsövergången mellan energi och materia. Mycket raffinerade observationer kunna visserligen göras, men själva observationsförfarandet innebär alltid ett allvarligt ingrepp i partikelns tillstånd. Tolkandet av de iakttagelser som göras inom detta område leder till ingenting mindre än upplösning av grunderna för ett invant vardagligt tänkande. Atomvärlden framträder som ett kollektiv, inom vilket många begrepp, som hänföra sig enbart till erfarenheter av den ytligare omvärlden, sakna mening. Här råda förhållanden, som endast kunna beskrivas med matematiska sannolikhetslagar. De distinkta naturlagar, som göra sig gällande i det yttre skeendet, framstå för atomfysikern såsom statistiska yttringar av ett ofantligt stort antal — i och för sig obestämbara — skeenden i mikrokosmos. Ett av forskningens mål är att söka nå en systematisering, i vilken de många detaljiakttagelserna rörande elementpartiklarna kunna samordnas.

Rymdforskning.

Atomfysik och astronomi arbeta hand i hand och berika varandra ömsesidigt. Atomfysikens rön tillämpas såväl inom den astronomiska observationsmetodiken som vid tolkningen av de vunna resultaten. Optiska teleskop och radioteleskop ha utvecklats såväl i storlek som i fråga om prestationsförmåga, och gränsen för observationsfältet flyttas allt längre bort. Helt nya vägar beträdas när raketprojektiler med instrument, försöksdjur och radio sändas ut såsom jordsatelliter eller fria himlakroppar. Redan vid de hittills utförda försöken har man funnit, att jorden omgives av tidigare okända intensiva strålningsbälten. Mycket tyder på, att även människan själv snart står in-

för sina första utflykter i rymden utanför jordatmosfären. I framtiden kunna — kanske med atomenergins hjälp — tekniska förutsättningar skapas för längre rymdfärder med lycklig återkomst. Till slut blir det väl människans livslängd som begränsar färden i tid och rum. Eggande för fantasien är tanken på ömsesidig förbindelse av ett eller annat slag med levande varelser, som kunna finnas på andra himlakroppar.

»Omvänd» materia — antimateria.

Upptäckten av antipartiklarna har givit upphov till nya egendomliga frågor. Fysikaliskt sett synes existensen av »anti-materia», byggd av negativa atomkärnor och positiva elektroner vara möjlig. Sådan materia skulle i och för sig kunna tänkas motsvara vår vanliga materia i fysiskt och kemiskt avseende. Om så är fallet, skulle en »antivärld», byggd av detta motsatta slags materia, inte med astronomiens vanliga hjälpmedel kunna skiljas från den värld vi sedan länge varit vana att räkna med. Atomariets enklaste partikelmodeller utfördes redan från början så att de kunna vändas, vilket motsvarar en omkastning av polariteten. Dessa omvända modeller visa verkningar, som helt motsvara dem vi finna hos de rättvända modellerna. Det är dock ännu ej helt klart, om elementarpartiklarna och deras antipartiklar visa lika utpräglad motsvarighet i detta avseende. Med kännedom om de två motsatta partikelslagens beteende vid sammanträffande kan man dock befara en förintande katastrof, om de båda världarna komma i närmare beröring med varandra. Visserligen finns intet som tyder på, att vi för egen del ha något sådant att vänta inom en överskådlig framtid, men frågan är ett framträdande exempel på, huru nya stora upptäckter alltid skapa nya spörsmål.

Ett positivt inslag i naturforskningen är det förtroliga och öppenhjärtiga internationella samarbete som kan upprätthållas naturvetenskapsmän emellan, alla politiska motsättningar till trots. Detta ger ökat hopp om en lycklig framtid för mänskligheten.

Generell fältteori— »världsformel».

Mycket tankearbete har lagts ned på att söka samla den teoretiska fysikens beskrivning av naturföreteelserna i en enda universell formel, en *generell fältteori.* I detta sammanhang framträda många stora namn, främst Einstein, Heisenberg och Schrödinger. Framtiden får visa, om det är möjligt att förverkliga denna förhoppning om en sammanfattande teori, ur vilken alla tidigare kända naturlagar ytterst skulle kunna härledas.

Naturvetenskapens tankar spänna över världsvidder — från yttersta gränsen av astronomiens observerbara universum till atomerna

och elementarpartiklarna. De fysiska förloppen utspelas inom system av kraftfält, som i gåtfulla flöden genomtränga och uppfylla världsalltet. Fälten äro energiens och materiens bärare. Fysikens kanske yppersta vinning är att i fältsystemen ha spårat en genomgripande struktur, en sällsam vävnad med latenta möjligheter till skapelse av materia, något av en allomfattande kosmisk princip.

★

Atomarievisningarna bruka avslutas med demonstration av naturliga kärnomvandlingar, direkt synliggjorda medelst två av kärnfysikens klassiska instrument: spintariskopet och Wilsonkammaren. De bilda båda, vart och ett på sitt sätt, grunden till nutidens raffinerade atomfysikaliska observationsinstrument.

Scintillationsskärm.

Spintariskopet är grunden till scintillationsräknarna i deras olika former. För Atomariet har apparaten utvecklats till en scintillationsskärm (3) av alldeles nytt slag. En glasskiva, på undersidan beklädd med speciellt preparerade små zinksulfidkristaller (sidotblände) är på ovansidan belagd med ett fastkittat lager av små glaskulor, verkande som ljussamlande linser. Det hela påminner något om de ljusreflekterande material som bl.a. användas till trafikmärken. Skärmen är till konstruktionen inte märkvärdigare än att den lätt kan tillverkas av en händig person. Få nu alfapartiklar som slungas ut vid kärnsönderfall i ett radioaktivt preparat bombardera zinksulfidkristallerna, så kunna enskilda träffar direkt iakttagas på skärmen såsom små ljusglimtar, scintillationer. Den förmåga till mörkerseende som observationen kräver bruka åskådarna förvärva efter en stunds vistelse i Atomariets dämpade belysning.

Wilsonkammare.

Wilsonkammaren står inte spintariskopet efter som förmedlare av direkt kontakt med atomvärlden. Det här visade utförandet (7) grundas på en av Langsdorf angiven, kontinuerligt arbetande konstruktion. Utformningen är så enkel, att många ungdomar, ända ned till tolvårsåldern, med stor framgång byggt sådana apparater efter anvisningar från Atomariet.

På en med tunt svart tyg klädd bottenplatta av plåt, underifrån kyld med ett stycke kolsyreis, står en glasklocka, upptill försedd med en sluten vattenbehållare, vilken på undersidan är klädd med ett poröst tygskikt, fuktat med en blandning av alkohol och vatten. Vattenbehållaren utgör ett slags värmereserv, som underlättar avdunst-

ningen. Ångan utbreder sig långsamt nedåt mot den kalla bottenytan. Inom ett visst skikt invid denna inträder det tillstånd som benämnes övermättning. Den normala kondensationstemperaturen underskrides utan att någon dimutfällning sker.

Passera nu laddade atomfragment genom detta skikt, så utfällas små vätskedroppar i stora mängder längs partikelbanorna, varigenom dessa vid lämplig belysning framträda såsom skarpt markerade dimstreck. En elektrisk spänning som anlägges mellan apparatens övre och undre del ger förbättrade försöksbetingelser. Man kan i denna apparat direkt se, huru även ett ytterst obetydligt radioaktivt preparat slungar ut partiklar i ständig följd. Någon enstaka gång visa partikelspåren en tvär krök eller en förgrening. — En atomkärna i luften har träffats och kanske sprängts! Då och då iakttages även helt fristående partikelspår, härrörande från den kosmiska strålningen.

Intrycket av det underbara mikroskopiska skådespel som här framträder på ett så gripbart sätt förtages knappast av den visade anordningens enkelhet. Det radioaktiva preparatet består av en tändsticka, i ena änden överpudrad med något tiotal milligram pulvriserat pechblände, det uranmineral, från vilket makarna Curie utgingo vid upptäckten av radium. Mineralet innehåller något tiondels gram radium per ton. Radiumvärdet i vårt lilla preparat kan därför uppskattas till ett eller annat hundradels öre! Radium har en halveringstid av 1 620 år, och det nybildas ständigt ur sönderfallande uran. Preparatets livslängd bestämmes därför av uraninnehållet, vars halveringstid överstiger fyra miljarder år. Den lilla obetydliga svarta pulverfläcken, som varje sekund slungar ut ett icke så ringa antal partiklar, har sålunda efter denna ofantliga tidrymd förlorat endast hälften av sin aktivitet. Ännu finnes halva mängden av den sönderfallande substansen kvar — en överväldigande bild av atomernas litenhet och mångfald!

★

De senaste årtiondenas storslagna naturvetenskapliga och tekniska utveckling har nåtts genom ett framgångsrikt samspel mellan en fri forskning, som söker sig nya vägar, och en målmedveten ingenjörskonst. Ganska slående är ofta den snabbhet med vilken de vunna resultaten finna praktisk tillämpning. Samtidigt som den yttre bilden

av detta skeende ter sig alltmera mångskiftande, märkes inom grundforskningen en tydlig strävan att nå enhetliga föreställningar om naturföreteelserna.

Litteratur.

1. *Bäcklund, Birger,* Gittermodell till Fältelektronmikroskopet. Elementa 39 (1956), s. 19.
2. *Staffanson, Eve,* Fältelektronmikroskopet. Elementa 35 (1952), s. 101.
3. *Wilner, Torsten,* Scintillationsskärm. Elementa 33 (1950), s. 239.
4. — Självstudier med experiment. Kosmos 29 (1951), s. 9.
5. — Demonstration av laddade partiklars rörelse i elektriska fält. Elementa 34 (1951), s. 35.
6. — Försök med enkla atomkärnmodeller. Elementa 35 (1952), s. 245.
7. — Kontinuerligt arbetande dimkammare. Elementa 36 (1953), s. 265. (En beskrivning, anpassad för unga experimentatorer, har lämnats i Teknik för Alla nr 22 och 25, 1957.)
8. — Partiklars rörelse i elektriska fält. Dædalus (1954), s. 40.
9. — Resonansförsök. Dædalus (1954), s. 44.
10. — Klangfigurer och atomfysik. Dædalus (1957), s. 42, samt Elementa 41 (1958), s. 41 (Något fullständigare framställning).
11. — Det tyngdlösa tillståndet. Elementa 42 (1959), s. 238.
12. — Försök med växelfält. Elementa 43 (1960), s. 11.

En kort beskrivning med bild av Atomariets bassängreaktormodell lämnades i Dædalus 1956.

Atomforskning och kärnteknik — viktiga data.

1895 Röntgen upptäcker den efter honom uppkallade röntgenstrålningen.

1896 Becquerel upptäcker radioaktiviteten hos uran.

1898 Makarna Curie upptäcka radium och polonium.

1900 Planck grundlägger kvantteorien.

1905 Einstein uppställer relativitetsteorien.

1909 Strömholm och Svedberg göra förutsägelser rörande isotopernas existens.

1911 Rutherford och medarbetare påvisa atomkärnans existens.
Wilson utvecklar dimkammarmetoden.

1912 de Hevesy introducerar de radioaktiva indikatorerna.

1909—1913 Soddy, Thomson m.fl. utreda närmare isotopien.
Aston bygger masspektrografen.

1913 Bohr uppställer sin atommodell.

1919 Rutherford och Chadwick spränga kvävekärnor genom bombardemang med alfapartiklar.

1924 Ising anger principen för multipel partikelacceleration.

1924—1927 de Broglie, Heisenberg och Schrödinger införa nya begrepp inom den teoretiska fysiken: materievågor, kvantmekanik och vågmekanik.

1927 Geiger och Müller introducera räkneröret.
Tandberg påbörjar försök att åstadkomma termonukleära reaktioner och frigörelse av kärnenergi.

1928—1930 Dirac uppställer sin hålteori.

1930—1931 Lawrence och medarbetare konstruera den första cyklotronen.

1932 Urey upptäcker den tunga väteisotopen.

Cockeroft och Walton genomföra de första helt konstgjorda kärnomvandlingarna med i högspänningsfält accelererade partiklar.

Chadwick upptäcker neutronen.

1933 Anderson upptäcker den positiva elektronen, positronen.

1934 Makarna Joliot (Irène Curie-Joliot och F. Joliot) upptäcka den konstgjorda radioaktiviteten.

Heisenberg uppställer teorien att atomkärnorna äro sammansatta av protoner och neutroner.

1937 Yukawas förutsägelse av mesonernas existens bekräftas genom undersökningar över den kosmiska strålningen.

Čerenkov, Frank och Tamm klarlägga den av Čerenkov upptäckta strålningen, Čerenkoveffekten.

1939 Hahn och Strassmann klarlägga urankärnans klyvning genom neutroner. Grundläggande arbeten tidigare utförda tillsammans med Meitner.

Den första svenska cyklotronen byggdes vid Kungl. Vetenskapsakademiens Forskningsinstitut för Fysik i Stockholm på initiativ av M. Siegbahn.

1940 McMillan och Abelson framställa den första transuranen, neptunium.

1942 Fermi och medarbetare starta i Chicago den första atomreaktorn.

1945 De första atombombsprängningarna.

Den svenska atomkommittén tillsättes. Det svenska arbetet på kärnfysikens område hade redan tidigare grundlagts, främst genom insatser av M. Siegbahn.

1947 AB Atomenergi startas för att möjliggöra ett rationellt svenskt arbete på utvinning av atomenergi.

1951 Detonation av den första vätebombladdningen.

En »breeding»-reaktor, avelsreaktor, alstrande elenergi startas i U.S.A. »Breeding» innebär, att klyvbart material nyproduceras i reaktorn i en mängd motsvarande eller överstigande vad som förbrukas för driften.

1954 Den första svenska experimentreaktorn startas hos AB Atomenergi, Stockholm.

Ett första atomkraftverk (5000 kW) igångsättes i Sovjetunionen.

Den första atomdrivna ubåten »Nautilus» sjösättes i U.S.A.

1955 Den första internationella konferensen för atomenergiens fredliga användning hålles i Genève.

Segré, Chamberlain och medarbetare i Berkeley, U.S.A., framställa med konst den negativa protonen, antiprotonen.

FN tillsätter en expertkommitté för utredning av strålningsverkan. I Sverige bedrives vid Radiofysiska Institutionen, Stockholm, ett redan 1921 grundlagt forskningsarbete inom området, samtidigt som kontroll utövas över allt radiologiskt arbete inom landet.

1956 Artsimovitch och Kurchatov meddela, att de vid försök i Sovjetunionen med elektriska urladdningar i tung vätgas påvisat neutronstrålning och hård röntgenstrålning, vilket tolkas så, att termonukleära förlopp framkallats på detta sätt.

Efter detta meddelande har offentliggjorts, att motsvarande försök i stor skala sedan åtskilliga år bedrivits i USA och Storbritannien. Även i Sverige göras liknande försök.

Reines och Cowan i Los Alamos, U.S.A., påvisa experimentellt den av Pauli och Fermi förutsedda neutrinon.

Lee och Yang, två kinesiska forskare, upptäcka den s.k. paritetslagens begränsade giltighet, en förut ej beaktad asymmetri i naturföreteelserna.

I samband med försök med antiprotonen upptäcker en forskargrupp i Berkeley antineutronen.

Det första atomdrivna storkraft-

verket igångsättes i Storbritannien vid Calder Hall.

1957 I strävan att framställa grundämnet nummer 102 kommer ett forskarlag vid Nobelstiftelsens forskningsinstitut för experimentell fysik i Stockholm till resultat som tolkas som upptäckten av detta ämne, vilket får namnet nobelium.

Tidigare framställda transuraner äro:

93 neptunium
94 plutonium
95 americium
96 curium
97 berkelium
98 californium
99 einsteinium
100 fermium
101 mendelevium

En av grundämnet fermiums isotoper (250) framställdes för första gången vid det ovannämnda forskningsinstitutet.

1958 Den andra internationella konferensen för atomenergins fredliga användning hålles i Genève.
Särskilt framträdande äro de många demonstrerade försöksanordningarna rörande plasmafysik och termonukleära reaktioner.

1959 Med hjälp av uppsända rymdprojektiler och jordsatelliter upptäckas tidigare ej kända intensiva strålningsbälten utanför jordatmosfären.

1960 Atomdrivna storkraftverk med olika typer av reaktorer, bl.a. avelsreaktorer, byggas och igångsättas inom stormakterna.

Foto i denna artikel: Olof Ekberg, Hans Hammarskiöld, Torsten Wilner.