

Kärn energin 50 år

Utgiven 2 december 1992, på dagen 50 år efter
den första självunderhållande och kontrollerade
kärnklyvningen vid University of Chicago, USA.
Reviderad oktober 2002

INNEHÅLL

Förord av Olle Gimstedt	3
KARL-ERIK LARSSON	
Kärnkraftens framväxt och utveckling	4
SIGVARD EKLUND	
Lise Meitner och Otto Robert Frisch	14
WALTER H ZINN	
Den första nukleära kedjereaktionen	21
BENGT PERSHAGEN	
Pionjärerna	31
År för år	34
Från tungt till lätt vatten	37
Tvåhundra år med uran	40
Naturens egen kärnreaktor	43

Redaktion:

Bengt Pershagen och Carl-Erik Wikdahl

Utgivare:

Ingenjörsvetenskapsakademien,
Föreningen Kärnteknik och
Tekniska Museet, Stockholm

Förord

"The Italian navigator has landed in the new world". Så lydde de ord som Arthur Compton, nobelpristagare i fysik, yttrade den 2 december 1942 i sitt telefonsamtal från Chicago med James Conant, som befann sig i Washington som rådgivare till president Roosevelt. Han hade just bevittnat hur hans kollega, nobelpristagaren Enrico Fermi, och dennes medarbetare, i en uran-grafitstapel i en squash-hall, tillhörande University of Chicago, hade åstadkommit den första självunderhållande, kontrollerade kärnklyvningen. Den utvecklade effekten var blygsam, några watt. För Fermi och hans kolleger var resultatet inte överraskande. De betraktade det som det ingenjörsmässiga realiserandet av en process, får vilken den vetenskapliga bakgrunden redan fanns sedan flera år tillbaka.

Under de senaste femtio åren har vi bevittnat tre epokgörande teknologiska genombrott, halvledartekniken, rymdtekniken och utnyttjandet av kärnenergin. Halvledartekniken har på ett explosionsartat sätt vidgat vår förmåga att insamla, bearbeta och överföra information, vilket även kan sägas om rymdtekniken. Kärnenergin har gett oss en ny energikälla som redan genom dagens fissionsreaktorer i hög grad bidrar till vår kraftförsörjning och som i fortsatta utvecklingsformer, bl a via fusions- och acceleratorteknik, öppnar möjligheter att för en obegränsad framtid lösa jordens energiproblem. Det finns därför anledning att göra en tillbakablick för att inplacera experimentet i Chicago för femtio år sedan i sitt historiska sammanhang.

IVA, Föreningen Kärnteknik och Tekniska Museet har samarbetat vid tillkomsten av utställningen "Kärnenergin 50 år". Den vill visa de viktigaste milstolparna i den vetenskapliga och tekniska utvecklingen och presentera några av pionjärerna inom området. Föreliggande skrift omfattar ett antal artiklar som ger en fördjupad bakgrund till vad som visas på utställningen. Här ger Karl-Erik Larsson, professor emeritus, KTH, en redogörelse för kärnkraftens framväxt och utveckling och visar hur denna baseras på fysikens utvidgade världsbild alltsedan Newton. Exempel på enskilda forskares insatser med anknytning till Sverige ges av Sigvard Eklund, Director General Emeritus IAEA, i sina personliga erinringar av Lise Meitner och Otto Robert Frisch. En berättelse om arbetet som ledde till den första nukleära kedjereaktionen lämnas av en som var med i Chicago 1942, fysikern Walter Zinn. Bengt Pershagen, själv den verkliga föregångsmannen inom svensk reaktor fysik, har skrivit artiklar om pionjärerna, uranet och den naturliga reaktorn samt kalendarier över utvecklingen internationellt och i Sverige. Dessa tjänar också som bakgrundstexter till utställningen på Tekniska Museet. Till alla dem som på olika sätt medverkat framföres ett varmt tack.

Olle Gimstedt

KARL-ERIK LARSSON

Kärnkraftens framväxt och utveckling

En översikt

Vetenskap och teknik före 1895

Omkring 1895 ansåg många forskare att fysikens världsbild i stort sett var avrundad och färdig. Den långa utvecklingskedjan från renässansen till 1800-talets slut hade sett den mekanistiska världsbilden utmejslas till fulländning. Galileo Galilei hade runt 1600-talets början funnit vissa grundläggande mekaniska naturlagar rörande exempelvis fallande föremål. Isaac Newton fulländade den mekanistiska världssynen i sin "Principia", eller mera fullständigt i svensk översättning "Naturvetenskapens Matematiska Principer", som utkom 1687. De revolutionerande dragen i denna utveckling var dels att man byggde sina slutsatser på en solid grund av observationer och dels att man tog matematiken till hjälp för sin världsbild. Därmed kunde man använda sina enstaka observationer till att dra mera generella slutsatser och det blev möjligt att beräkna och förutsäga händelseförlopp styrda av naturlagar om bara begynnelsevillkoren var kända. Under 1700- och 1800-talen utvecklades andra fysiska och kemiska vetenskaper allt snabbare.

Man studerade ljusets egenskaper och fann det mest sannolikt att ljuset var en vågrörelse fortplantad i den skenbara eter, ett tänkt medium som penetrerade universum. Man studerade värmets egenskaper och natur och kunde bygga upp en stolt matematisk struktur kallad termodynamik som beskrev alla kända värmeprocesser. De första staplande stegen för uppbyggnad av kunskap om elektriciteten som tagits av sådana som Ampere, Volta och Faraday ledde genom Clerk Maxwells matematiska formuleringar av elektrodynamiken under 1800-talet till perfektionens höjd. Kort sagt, 1800-talets optimism hade drivit de fysiska vetenskaperna till en skenbar avrundning och avslutning, inget väsentligt återstod att upptäcka. Kemister sysslade visserligen med begrepp som atomer och molekyler men tveksamheten i vida kretsar inför dessa begrepp var stor. Man kan notera att den tyske Nobelpristagaren i kemi år 1909, Wilhelm Ostwald, framställde en doktrin som gjorde allt tal om atomer onödigt. Han övergav inte sin tro förrän runt 1912 då överväldigande bevis för atomers realitet hade frambragts.

Parallellt med den vetenskapliga utvecklingen växte det nya industrisamhället fram. Ångmaskiner och elektriska generatorer ersatte gradvis människors och djurs muskelarbete. När befolkningstillväxten började märkas kunde sålunda nya försörjningsmöjligheter skapas inom andra näringsgrenar än de rent agrara. Det fanns skäl till viss optimism.

Den vetenskapliga revolutionen 1895-1939

Den nya tiden inom vetenskapen som korrigerade själve Newtons mekanik, fastlade definitivt atomers existens och struktur samt skapade en helt ny mekanik för tillämpning inom atomernas mikroskopiska värld inleddes av en handfull fantasifulla forskare.

Albert Einstein genomförde djuplodande spekulationer rörande Galilei- och Newton-mekniken och lyckades 1905 formulera en första korrigerad variant i sin speciella relativitetsteori. Denna teori understöddes bl a av observationer utförda av amerikanerna A.A. Michelson och E.W. Morley. De hade visat att någon eter inte existerade utan att ljushastigheten är en konstant storhet hur man än mäter den i förhållande till jordbanan runt solen. Ljushastighetens konstans i alla system var ett av Einsteins grundpostulat. En märklig konsekvens av detta antagande blev bl a att man kunde framställa den totala energien av en masspartikel i rörelse som summan av en vanlig Newtonsk kinetisk energi och en viloenergi; den senare enligt den berömda formeln, $E=mc^2$, där E är energin, m är massan och c är ljusets konstanta hastighet. Något av ett hokus-pokus för många av samtidens vetenskapsmän.

Den andra gruppen av upptäckter rörde det som kom att utvecklas till inte endast atomfysik utan till det nya begreppet kärnfysik. Det inledningsvis ledande namnet var Ernest Rutherford, men hans stora upptäckter föregicks av Henri Becquerels upptäckt att uran utsänder en dittills okänd genomträngande strålning. Det blev en kvinna som tog upp forskningen runt denna strålning, nämligen Marie Sklodowska Curie. Hon fann nämligen att inte endast uran utan även torium utsänder liknande strålning och - vad mera var - att vissa uranhaltiga mineraler utsänder en ännu mer intensiv strålning. Detta ledde henne till upptäckten av de nya strålningsutsändande ämnena polonium och radium. Hon gav strålningsfenomenet namnet radioaktivitet. Det var alltså en kvinna som myntade detta ord. Rutherford tog upp forskningen kring radioaktiviteten och det blev klarlagt att man hade att göra med tre olika slag; alfa-, beta- och gamma-strålning. Det visades också att alfa-strålningen bestod av snabba helium-partiklar, beta-strålning av de mycket lätta elektronerna, bärare av negativ elektricitet, och att gamma-strålning var elektromagnetisk strålning ca en miljon gånger energirikare än den tidigare kända ljusstrålningen.

Madame Curies och Rutherfords arbeten visade att ämnen kunde övergå i varandra, något som kallas transmutation. Rutherford upptäckte att atomer måste ha huvuddelen av sin massa koncentrerad i en mycket liten volym inom atomen som kom att benämnas atomkärna (1911). Han fann också att när ovan nämnda alfa-partiklar bombarderade luftens kväve så uppkommer en kärnreaktion som resulterar i en form av syre samt en vätekärna (1919). Den senare har hög energi. Frågan varifrån denna kom kunde endast besvaras genom Einsteins ovan givna formel för vilomassornas energiinnehåll; massändringen i kärnreaktionen ledde till energifrigörelse.

Den tredje gruppen av upptäckter vilka ledde till den nya atommekaniken, kallad kvantmekanik, inleddes år 1900 av Max Planck som visade att strålningen från en svart kropp (ugn) kunde förklaras om man antog att strålningen sändes ut respektive absorberades inte kontinuerligt utan i en sorts energipaket.

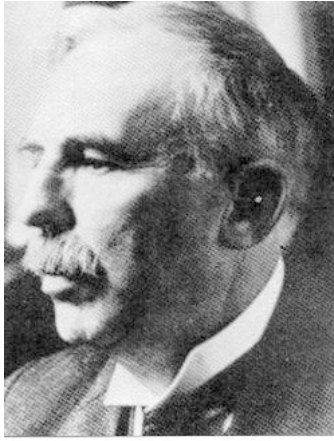
Einstein använde sig 1905 av denna nya ide för att förklara fakta rörande observationen att elektroner slås ur ur metallytor vid bestrålning med ljus, den så kallade fotoelektriska effekten. Han fick 1921 års nobelpris för denna insats varigenom Plancks hypotes fick en handgriplig betydelse; ljuset kunde uppträda som ett kvantum eller nästan en partikel. Detta syntes stå i diametral motsats till den stora mängd observationer som visade att ljus var en vågrörelse.

En annan fantasifull tillämpning av Plancks kvanthypotes utfördes av dansken Niels Bohr, som uppfann en ny konstruktion för atomen, vilken byggde på Rutherford's kärnmodell. Bohr föreslog att elektroner rörde sig i stabila banor runt atomkärnan ungefär som planeter runt solen. När en elektron hoppade från en viss bana till en annan bana närmare kärnan utsändes enligt Bohrs hypotes ett kvantum ljusenergi i enlighet med Plancks ursprungliga teori. Problemet var emellertid hur elektroner kunde hålla sig svävande i konstanta banor runt den lilla atomkärnan. Bohr hade använt Newtons klassiska mekanik i sin modell.

Dessa gåtor fick sin lösning genom formuleringen av den nya mekaniken tillämplig i atomvärlden, kallad kvantmekanik, av Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger och Paul Dirac oberoende av varandra 1924-26. Men det visade sig att Galileis, Newtons och Einsteins strängt deterministiska värld gick förlorad i atomvärlden; exaktheten ersattes av sannolikheter och oskärpa.

Efter dessa inledande revolutionerande 25 år på nya seklet följde ett dramatiskt 1930-tal med en ny generation forskare. Fortfarande var det oklart hur atomkärnan var uppbyggd. 1932 var det dags för en av Rutherford's elever, James Chadwick, att upptäcka det som läromästaren hade trott nämligen en neutral partikel som beståndsdel av atomkärnan. Denna döptes till neutronen och bilden av atomen var nu ganska komplett; skal av elektroner som rör sig kring en tiotusen gånger mindre kärna sammansatt av neutroner och vätekärnor eller protoner. Ett par år senare upptäckte dottern till Marie Curie, Irene Curie, tillsammans med maken Frederic Joliot att atomkärnor vid lämplig bestrålning kan bli konstgjort radioaktiva, en upptäckt som ledde till ett nobelpris till de båda makarna.

I Italien var vid denna tid den unge forskaren Enrico Fermi verksam inom kärnfysiken tillsammans med en grupp unga medarbetare. Han intresserade sig för den konstgjorda radioaktiviteten och gissade helt riktigt att den neutrala neutronen var en idealisk projektil att åstadkomma radioaktiviteten ifråga. Av en tillfällighet fann han att långsamma neutroner kunde vara hundrafaldigt överlägsna i att åstadkomma kärnreaktioner jämfört med de snabba neutroner som kommer ut ur en naturlig neutronkälla. Snabba neutroner visade sig bli bromsade genom att kollidera med lämpliga lätta atomer som väte eller kol. Han använde sina långsamma neutroner för att aktivera alla atomslag han kunde komma över och studerade de därav skapade radioaktiviteterna. När han bestrålade uran fann han märkliga resultat vilka han bl a trodde berodde på att han funnit nya grundämnen tyngre än uran. De skulle ha uppstått genom att en neutron adderats till uranatomens massa. Detta var dock icke den slutliga lösningen på uranproblemet. Trots detta misstag var dock Fermis upptäckter - framför allt av långsamma neutroners stora reaktionsbenägenhet - av den avgörande betydelse att han tilldelades 1938 års nobelpris i fysik.



Ernest Rutherford



Marie Curie



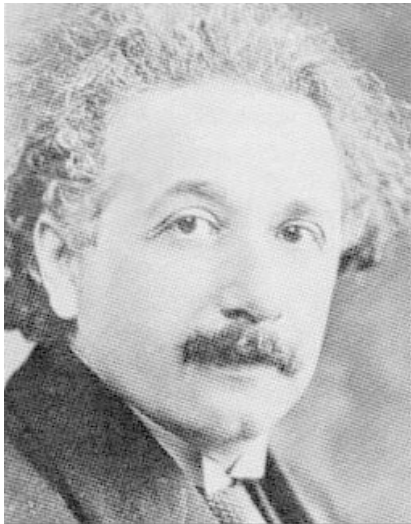
Otto Hahn och Lise Meitner

Den slutliga lösningen av uranproblemet gavs av en tysk forskargrupp Otto Hahn, Fritz Strassmann samt fristående från dem Lise Meitner. Hahn och Strassmann kunde experimentellt visa att då de bestrålade uran med långsamma neutroner så erhöll de bl a ett grundämne barium som mera har en atomvikt motsvarande halva uranets. Vad hade hänt? Hahn och Strassmann gav inte svaret i sin rapport alldeles i början av 1939. Men Hahn hade i december 1938 skrivit till sin f d medarbeterska Lise Meitner, av judisk börd, vilken strax tidigare tvingats fly från Hitlers Tyskland och som nu vistades i Sverige. Hon funderade under julen 1938 över den nya observationen och kom tillsammans med sin unge systerson Otto Robert Frisch fram till att urankärnan kluvits, att två kärnfragment måste existera och att en mycket stor energimängd måste ha frigjorts i klyvningen. Han kallade processen för fission. Så hade då en kvinna, tillfälligt bosatt i Kungälv i Sverige, gjort den slutliga upptäckt som visade sig öppna dörren till utnyttjande av den stora energi som ligger bunden i atomkärnor.

Redan på våren 1939 kunde en forskargrupp hos Frederic Joliot i Paris konstatera att cirka två-tre neutroner frigöres i klyvningsprocessen. Samma upptäckt gjordes ungefär samtidigt av Szilard och Fermi i USA. Därmed förelåg möjligheten att åstadkomma en sk kedjereaktion i en uranmassa. Utvinning av kärnenergi låg inom räckhåll.

Andra världskriget och den första kärnreaktorn

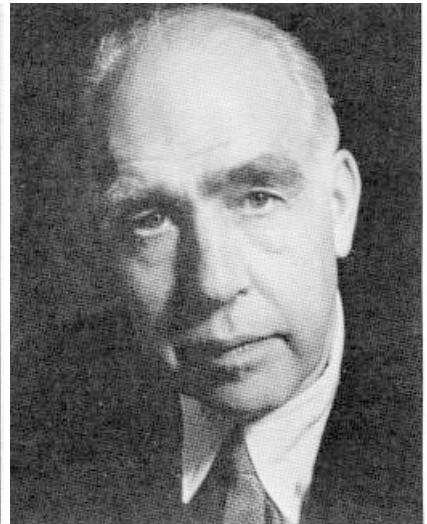
Från 1933 sedan nationalsocialismen segrat i Tyskland började judiska forskare i allt stridare ström lämna Tyskland och så småningom även Italien, Österrike och andra länder under tyskt inflytande. Efter mellanlandningar i andra europeiska västländer fortsatte de i regel sin flykt till USA. Einstein från Berlin, en rad skickliga forskare såsom Leo Szilard, Eugene Wigner och Edward Teller från Ungern, och framför allt Enrico Fermi från Rom hamnade tillsammans med dussintals andra vetenskapsmän av absolut toppklass slutligen i USA. Detta kom att betyda en totalomsvängning i den vetenskapliga världen; genom andra världskriget och nazismens förjagande av judiska forskare från Europa till USA försvann Västeuropas vetenskapliga ledarroll och den övergick till USA. Med det amerikanska sinnet för tekniska tillämpningar innebar detta att den vetenskapliga revolutionen nu snabbt kom att omsättas i en teknisk sådan.



Albert Einstein



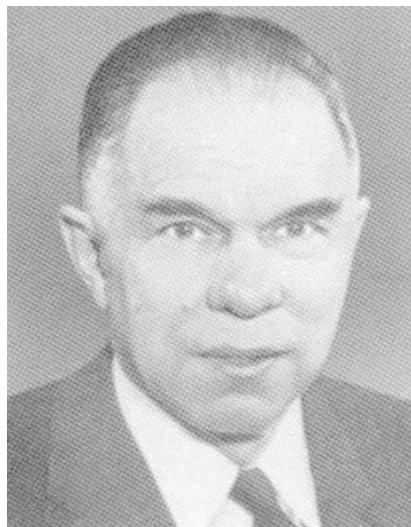
James Chadwick



Niels Bohr



Otto Robert Frisch



Glenn T Seaborg



Enrico Fermi

Några forskare som flytt från Europa och som insett möjligheten med kärnenergi och - vad värre var - möjligheten till en ny typ av bomb baserad på fissionsprocessen i uran levde från 1939 i skräck för att nazi-Tyskland skulle framställa en dylik superbomb. Men den amerikanska militären och administrationen var svåra att väcka. Ovan nämnda Szilard och Wigner lyckades dock övertala Einstein att underteckna ett av dem skrivet brev till president Roosevelt vari de nya möjligheterna påpekades. Detta ledde emellertid ej till att kärnforskningen påskyndades med omedelbar verkan. Forskarna med Fermi i spetsen fortsatte sin verksamhet i liten skala under ytterligare ett par år, nu hemlighöll de dock sina resultat. Men så småningom vaknade den amerikanska administrationen och från 1941 och framför allt från 1942 togs beslutet att under militär sekretess satsa för fullt på konstruktionen av en atombomb. Projektet döptes till Manhattan Project och redan innan man alls startade någon kontrollerad kedjereaktion i uran togs beslut att bygga nya gigantiska forsknings-, utvecklings- och produktionscentra för ändamålet. De förlades till Oak Ridge i Tennessee, Hanford i staten Washington och Los Alamos i New Mexico.

Fermi fick stadigt ökande resurser och under 1941-42 samlades allt större mängder rent uran och ren grafit, ett slags kol, att användas i världens första kärnreaktor som bränsle respektive bromsmaterial för neutronerna. De geniala hjärnorna under Fermis ledning lyckades med konststycket; den 2 december 1942 kunde man i ett provisoriskt laboratorium i Chicago dit Fermis experiment flyttats från New York, konstatera att man i en stor uppstaplad grafitmassa med regelbundet instuckna uranklumpar nått ett stadium av självgående, kontrollerad kedjereaktion; man hade nått vad som på tekniskt språk kallas kritisk storlek eller kriticitet. Stapeln hade formen av ett tillplattat klot med höjden 616 cm och diametern 776 cm och innehöll 385 ton grafit och 38 ton uran.

Man hade nu dragit in alla kompetenta fysiker och kemister i jätteprojektet. Det var unga, entusiastiska forskare varav ett stort antal antingen redan var nobelpristagare eller skulle komma att bli sådana.

Anledningen till att startandet av en kärnreaktor var så viktig för atombombprojektet var att man upptäckt ett nytt grundämne tyngre än uran, som man döpt till plutonium. Detta ämne framställdes i mikrogramskala för första gången 1941 av ett forskarlag i USA under ledning av svenskättlingen Glenn Seaborg (nobelpristagare 1951). Detta nya ämne liknar det som Fermi trodde sig ha sett redan 1935. Det bildas t ex då en uran-isotop med atomvikten 238 bestrålas med neutroner. Detta plutonium är lätt klyvbart till skillnad från uran 238 och bedömdes bli ett bra bombmaterial. I den självgående reaktorn däremot klyves huvudsakligen den andra uran-isotopen med atomvikt 235. Tyvärr förekommer uran-235 bara till 0,7 procent i naturligt uran medan det svårklyvbara uran 238 förekommer till 99,3 procent. Det gällde alltså att genom neutronbestrålning i stora produktionsreaktorer omvandla uran 238 till det lätt klyvbara plutonium. Till viss del sker detta automatiskt i alla kärnreaktorer av idag, men under kriget gällde det att koncentrera ansträngningen på denna speciella tillverkning. Detta skedde i stora reaktorer i Hanford där även det bestrålade uranet kemiskt bearbetades i en sk upparbeitungsprocess varur plutoniet erhålles rent. Den andra vägen att göra en atombomb var att separera ut uran-235 ur det naturliga uranet, en svår och mycket dyrbar process som amerikanerna utförde i Oak Ridge. Redan 1945 fanns såväl uran-235 som plutonium i tillräcklig mängd för

en bomb. Själva bombkonstruktionen utfördes i Los Alamos. Den första provbomben avfyrades på den s k Trinity Site inom White Sands militära provområde i New Mexico den 16 juli 1945. Den 6 och 9 augusti fälldes de atombomber över Japan vilka satte punkt för andra världskriget.

Bakom denna militära framgång på atomområdet låg en lång rad nya upptäckter och uppfinningar. De hemlighölls nu mycket strängt i tron att man kunde förhindra konkurrenter att göra om denna gigantiska utveckling hemma hos sig. Som är väl känt misslyckades denna strategi. Huvudkonkurrenten Sovjetunionen sprängde sin första atombomb redan 1949 varefter den nukleära kapprustningen tog fart under det kalla krigets långa, 40-åriga period fram till 1989. Världen tvingades in i den militära atomåldern.

Perioden 1945-1955

I och med avfyrandet av atombomberna uppenbarades den stora atomhemligheten för hela världen. Många, ja, alla nationer som hade en rimlig chans att utveckla kärnenergiprojekt försökte nu efter kriget att göra detta. Efter amerikanskt mönster bildades "atomenergikommissioner" eller liknande organisationer för tillämpad kärnforskning och utveckling. Borta var nu de små idylliska atomlaboratorierna från tiden före 1939. Nu var det fråga om s k big-science med satsningar i mångmiljonklassen jämfört med tusentals-klassen före kriget. Målet med satsningen var delat: somliga länder satsade för fullt för att bygga upp ett eget kärnvapen t ex England, Frankrike och Kina, medan andra mera kom att sikta mot de fredliga möjligheterna med kärnenergi som en ny och mycket lovande energikälla. I många länder hade man båda alternativen i tankarna från början, t ex i Sverige.

Hemlighållandet av kärntekniska data gjorde framstegen långsamma och begränsade alternativen. I USA m fl länder provade man omedelbart efter kriget idéer om nya kärnreakortyper för civila ändamål. Perioden 1945-55 är kanske den ur reaktorutvecklingssynpunkt intressantaste. Då provades nya reaktortyper, framför allt i USA, som hade både uran-235 i anrikad form samt plutonium tillgängligt. Detta möjliggjorde för deras tekniker att studera alla möjliga slags reaktortyper med naturligt och anrikat uran samt med olika neutronbromsande material, s k moderatorer, som tungt vatten, lätt vatten, grafit, beryllium eller kombinationer därav.

I de länder som saknade anrikat uran-235 var möjligheterna begränsade. De enda moderatorer som var praktiskt möjliga med naturligt uran var grafit och tungt vatten. Så började man exempelvis i England med grafit, i Frankrike med grafit och tungt vatten, i Sverige med tungt vatten. Sådana reaktorer kunde utvecklas till elproducenter eller värmeproducenter eller bådadera. De kunde också - i enklare versioner - användas för produktion av plutonium, vilket dock krävde den dyrbara och komplicerade kemiska uppberedningsprocessen.

Inför hotet av den senare utvecklingen kom USAs president Eisenhower 1953 via ett tal i FN med förslaget om ett "atoms-for-peace"-program. Förslaget innebar att USA och andra nationer som hade tillgång till större mängder naturligt uran samt till anrikat uran-235 skulle ställa sådant material till förfogande för nationer som önskade utveckla ett fredligt kärnenergiprogram. Överlåtandet av dessa uran-produkter skulle vara förbundet med inspektionsvillkor så att

endast fredlig kärnenergiutveckling kom ifråga. Eisenhower föreslog också att en stor atomkonferens skulle hållas vid vilken atomhemligheter nödvändiga för fredligt bruk skulle släppas fria. Detta var ett nödvändigt drag av presidenten. Intresserade länder skulle annars förr eller senare ha skaffat sig kunskaper och material.

Den stora konferensen hölls i Genève i september 1955 i FNs regi och kan sägas utgöra vattendelaren i efterkrigsutvecklingen på atomområdet. En enorm utvecklingsoptimism utbröt efter konferensen. Många länder, t ex Sverige, planerade nu för ett stort kärnenergiprogram. Men många problem återstod.

Genombrottet för kärnkraften efter 1955

De länder som tidigare inte haft tillgång till uran-235 i anrikad form hade startat projekt som inte krävde anrikad uran. Så t ex Sverige. I Sverige hade man inom det halvstatliga bolaget AB Atomenergi satsat på utveckling av ett kärnkraftprogram med tungt vatten som moderator och naturligt uran som bränsle. För en del länder, t ex just Sverige, syntes detta ligga väl till för att skapa oberoende och handlingsfrihet på kärnkraftområdet. Vi äger i våra skiffrar i t ex Västgötaberget som Billingen stora uran-reserver av låg halt. Provbrytning i Ranstadsverket visade emellertid att kostnaden för svenskt uran blev högre än det internationella priset.

En annan faktor som ledde till att den svenska linjen (tungt vatten och naturligt uran) slutligen övergavs till förmån för en annan utveckling var just det som Eisenhower åsyftat; det blev möjligt att köpa anrikad uran med högre halter av uran-235 till mycket rimliga priser.

En tredje faktor var erfarenheterna från USA att man i början av 60-talet lyckades konstruera kärnkraftverk i avsevärd storleksklass - med en el-effekt ut på nätet av flera hundra miljoner watt (MW) till elpriser som kunde konkurrera med elpriset från olje- eller koleldade kraftverk trots det då mycket låga oljepriset. De amerikanska storföretagen Westinghouse och General Electric svarade nu för stora utvecklingsinsatser.

Svensk kraftindustri visade stort intresse för den amerikanska vägen som innebar att man övergav den svenska linjen och övergick till lätt vatten (=vanligt vatten) som moderator och anrikad uran som bränsle. Sådana reaktorer kunde utföras i två olika versioner, antingen som kokareaktorer eller som tryckvattenreaktorer. I Sverige kom kokar-versionen att utvecklas vid först ASEAs kärnkraftavdelning senare vid det av ASEA och staten bildade bolaget ASEA-ATOM (numera helprivata ABB-ATOM). I Sverige beställde kraftföretagen vid Barsebäck (två reaktorer), Forsmark (tre), Oskarshamn (tre) och Ringhals (fyra) under 60-talets senare del och början av 70-talet sammanlagt tolv reaktorer. Dessa färdigställdes mellan 1972 och 1985. Utvecklingen blev likartad i många andra länder, den amerikanska tanken segrade i de allra flesta fall. De länder som gick den andra vägen påminnande om den svenska linjen är få, t ex Kanada och Indien. Av världens drygt 400 kraftreaktorer är 85 procent av den lättvattenmodererade sorten med anrikad uran.

Den svenska kärnkraften levererar idag gott och väl hälften av all el-energi till nätet. Den andra hälften genereras i stort sett av vattenkraft. I en del länder t ex Frankrike och Belgien är andelen kärnkraftgenererad el ännu högre än i

Sverige. En del länder med industriell kapacitet har å andra sidan ingen kärnkraft alls, t ex våra grannar Norge och Danmark. I Asien är Japan ledande med en avsevärd kärnkraftutbyggnad och ett brett kärntekniskt forskningsprogram. Sett i världsperspektiv bidrar kärnkraften idag med ca 17 procent av all genererad el-energi.

Kärnkraftmotstånd och framtidsperspektiv

Från mitten av 1960-talet växte ett visst motstånd mot kärnkraftutbyggnad fram. Det började i USA och som framhållits av t ex den svenska forskaren Hannes Alfvén var målet för detta motstånd från början inte den fredliga kärnkraften utan kärnvapnen. Men för att hålla den allmänna amerikanska civila proteströrelsen från Vietnamkrigets dagar på 60-talet vid liv övergick proteströrelsens ledande gestalter till en protest mot fredlig kärnkraft. Det ansågs nämligen inte opportunt att i anti-kommunismens högberg propagera mot de kärnvapen som av många betraktades som det viktigaste hindret mot en kommunistinvasion. I många länder har diskussionen kring framför allt två kärnkraftfenomen utgjort kritikens kärna. För det första kan reaktorolyckor leda till spridning av radioaktiva ämnen över betydande områden. För det andra ger kärnkraften ett radioaktivt avfall varav ca 10 procent klingar av mycket långsamt och kräver säker förvaring under hundratusentals år.

När det gäller reaktorolyckor har de två typexemplen redan ägt rum nämligen den skärsmältan i en Three Mile Island-reaktor i Harrisburg, USA och den mera explosiva reaktorexkursionen i Tjernobyl, Sovjet. Den första ledde inte till några bestrålningar av utomstående människor. Reaktortanken visade sig kunna kvarhålla det nersmälta uranet och den omgivande reaktorinneslutningen förhindra utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen. Den andra olyckan däremot som orsakades av att reaktorn plötsligt blev starkt överkritisk sedan den delvis tappats på det viktiga neutronabsorberande och kylande vattnet, ledde till väsentliga radioaktiva utsläpp. Denna Tjernobyltyp av reaktor är helt enkelt ej lämplig som kraftreaktor.

De i den västra industrivärlden förekommande reaktorerna har gradvis förbättrats och risker för större radioaktiva utsläpp minskar ständigt. När det gäller det radioaktiva avfallet har många länder f n planer på geologisk deponering av detsamma. Man har sålunda planer att placera det djupt ner i berggrunden där det lämnas att avklinga.

Det ska dock framhållas att de nuvarande planerna för hantering av använt kärnbränsle knappast torde komma att utgöra den slutliga lösningen sett i ett längre perspektiv. Detta använda bränsle utgör långt ifrån bara avfall - atomsoapor kallade - det innehåller nämligen huvudsakligen oanvänt uran till mer än 95 procent. Bara ca 3 procent utgör egentligt avfall, dvs klyvningsprodukter. Dessa består alltså av de två kärnhälvor som Lise Meitner visualiserade julen 1938. Ytterligare någon procent avfall består av plutonium och andra radioaktiva tunga ämnen som i princip är klyvbara och alltså användbara som kärnbränsle och kunde ge energi.

I framtiden måste vi sålunda föreställa oss att man tar det använda bränslet tillvara och återanvänder det undan för undan tills alltsammans som är klyvbart också är klivet. Samtidigt kan det bli tekniskt möjligt att omvandla de lång-

livade radioaktiva klyvningsprodukterna till mera kortlivade radioaktiva ämnen som sedan snabbt blir stabila och därmed ofarliga från strålningssynpunkt. Kärnkraft ska sålunda kunna genereras under överskådlig tid med stor säkerhet och utan etiska problem. Tankar och teknik för sådana projekt har följt kärnkraften under dess utveckling. I dessa dagar synes de åter få liv i en ny form genom att koppla reaktor- och accelerator-teknik till varandra.

Den kärnfysik som formades av generationerna i början av seklet har vunnit en lysande högteknologisk tillämpning och bidragit till den växande världsbefolkningens energiförsörjning. Rutherford, som dog 1937, trodde att kärnenergi i industriell skala aldrig skulle kunna utvinnas. Han tog fel. En del människor tror att kärnkraften är borta efter några årtionden. Mycket tyder på att också denna för den kärntechnologiska eran dystra profetia kommer på skam. Människoandens ständiga sökande och tankens kraft kommer sannolikt att lösa även atomålderns problem. Lika lite nu som år 1895 kan forskningen anses avslutad.

Litteratur

Emilio Segre: *From X-rays to Quarks*, University of California, Berkley, USA, 1980.

Laura Fermi: *Atoms in the Family*, University of Chicago Press, USA, 1954

James W Kunetka: *City of Fire*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1978

Arnulf K Esterer and Luise A. Esterer: *Prophet of the Atomic Age: Leo Szilard*, Julian Messner, New York, USA, 1976.

Leslie R. Groves: *Now it can be told*, Da Capo Press, New York, USA, 1975.

Karl-Erik Larsson: *Kärnkraftens historia i Sverige*, Svenska Fysikersamfundets årsbok Kosmos band 64, 1987. Almqvist & Wiksell Periodical Co.

I detta arbete ges ytterligare referenser.

SIGVARD EKLUND

Lise Meitner och Robert Frisch

Några erinringar

Atergivet med tillstånd från Årsskrift Föreningen Gamla Kungälv 1989 efter ett föredrag den 13 april 1989 i samband med uppsättandet av en minnesplatta över formulerandet av en förklaring till upptäckten av urankärnans klyvning.

Meitner och Frisch var släkt med varandra. Meitner, född 1878, var tredje barnet i advokaten Philipp Meitners och hans hustru Hedwig familj, som med tiden kom att omfatta åtta barn, varav fem flickor och tre pojkar. Det tredje barnet fick namnet Elise som snabbt blev Lise. Det hus i Wien där hon föddes existerar fortfarande och har nyligen försetts med en minnestavla. Frisch, född 1904, var son till Meitners äldre syster Augusta (Gustl) i hennes äktenskap med bokförläggaren Justinian Frisch.

Både Lise och Otto Robert kom från familjer som genom sina intressen och sociala ställning aktivt deltog i det österrikiska kulturlivet, så som det frodades i den kejserliga österrikisk-ungerska monarkin. Lise fick gå fem år i folkskola och sedan tre år i en högre skola.

Skolgången var över 1892. Att hon skulle få följa sin längtan efter universitetsstudier var alla ense om i familj en, men det fanns inga gymnasier för flickor. Först 1899 öppnades universiteten för kvinnor. Den studentexamen som erfordrades för inträde, kunde förvärfvas genom privat examen avlagd vid ett gymnasium. De erforderliga kunskaperna fick inhämtas genom privatkurser, och från 1898 arbetade hon tillsammans med två kamrater för att inhämta vad som krävdes.

Åren 1892-1901, de förlorade åren som hon kallade dem, förvärvade Lise kompetens som lärare i franska. Om planerna på universitetsstudier gick om intet, skulle hon därigenom kunna försörja sig i framtiden. Genom sina lektioner bidrog hon också till familjens försörjning och systemen Gustls musikstudier.

Man kan jämföra Lises situation med ungraren Eugene Wigners, när han bad sin far om tillåtelse att studera fysik vid universitetet. Fadern, en välbärgad industriman som inte visste mycket om fysik, bad sonen ta reda på hur många professorer i fysik det fanns i Ungern. När sonen gav besked om att det bara fanns en professur sa fadern: "Du får först ta examen i kemisk teknologi så jag vet att du kan försörja dig, sen får du studera vad du vill". Wigner belönades 1963 med nobelpriset i fysik.

År 1901 fick Lise Meitner sitt studentbetyg och kunde skriva in sig i filosofiska fakulteten vid Wiens universitet för att studera fysik och matematik.

Det musikintresse som föräldrahemmet väckt hos henne levde kvar också under tiden vid universitetet, inte minst tack vare de billiga biljetterna till operans Olymp, platser längst bak direkt under taket. Hon har många gånger berättat för mig hur Olymp blev för henne en musikalisk himmel där hon kunde följa föreställningarna eller konserterna med partitur i handen.

Åren 1902-1905 följde hon Ludwig Boltzmanns föreläsningar, sedan denne efter ett tvåårigt uppehåll i Leipzig återvänt till sin gamla professur. Otto Robert Frisch vittnar om den betydelse Boltzmann haft för hennes utveckling. Hon studerade fysik för honom i en atmosfär av idealism.

Fysikstudierna avslutades 1905 med en avhandling om värmeledning, och Lise blev promoverad till Dr. Phil. Hon var den andra kvinnan som fick doktorsgraden i fysik och den fjärde som blev promoverad till doktor vid universitetet i Wien.

De följande två åren skrev hon ett par avhandlingar om radioaktivitet, trots att hon då var mer intresserad av teoretisk än experimentell fysik. Efter Boltzmanns bortgång 1906 kände hon starkt behovet av en kunnig lärare och vände sig först till Marie Curie, som 1903 fått ett delat nobelpris i fysik tillsammans med sin man Pierre och Henri Becquerel. Men svaret från Curie var negativt, och hon skrev då till den tyske teoretiske fysikern Max Planck vid universitetet i Berlin, som accepterade henne som åhörare.

När Meitner kom till Berlin 1907, som hon trodde för några terminer, det skulle bli 31 år, visste hon inte att kvinnor inte hade tillträde till högskolor i Preussen. I det övriga Tyskland hade sedan 1896 kvinnor fått avlägga studentexamen, och sedan 1900 hade de tillgång till universitet och högskolor. Hon visste inte heller att Plancks principiella inställning till kvinnliga högskolestuderande var att de endast undantagsvis kunde accepteras. Men hon hade tydligen imponerat på Planck som tog emot henne, och mellan henne och Planck och hans familj utvecklades en livslång vänskap. De hade också ett gemensamt intresse för musik, Planck var en skicklig pianist. Meitner hade emellertid också fått smak för experimentell fysik och kom på så sätt i kontakt med Otto Hahn, som arbetade hos nobelpristagaren Emil Fischer, sockerkemisten, i dennes institut för kemi.

Fischer var bekant för att inte tolerera studentskor varken på föreläsningarna eller institutet men gick till slut med på att Lise kunde få arbeta i ett källarrum som ursprungligen var avsett som snickarverkstad, om hon lovade att inte visa sig på själva institutet. Det hände att hon vid intressanta föreläsningar smög sig in under bänkarna i hörsalen för att få del av den visdom som förväntades komma från katedern. Hahn och Meitner kom att samarbeta på ett utomordentligt sätt. De kompletterade varann inte bara genom sina olika specialiteter, Hahn kemist, Meitner fysiker, men också genom sin olika läggning. Hahn var mera intuitivt arbetande, Meitner mer kritisk med ständiga frågor: vad händer och varför?

De talrika publikationerna från Hahn och Meitner väckte också Fischers intresse för kärnkemi och han ställde mer laborierutrymme till bådas förfogande. När kvinnliga studenter 1908 fick tillträde till universitetet i Preussen, ordnade Fischer så att Meitner fick tillgång till institutets laborier och lät till och med inrätta en damtoalett.

Meitner arbetade med Hahn i snickarverkstaden till 1912, då ett nytt Kaiser Wilhelm Institut öppnades. Där fick Hahn ledningen för en avdelning för kärnkemi och Meitner fick fortsätta som icke avlönad gästforskare. Planck hade emellertid ordnat så att hon fått ett förordnande som universitetsassistent, för övrigt den första kvinnliga i Preussen. Från Prag fick hon också ett erbjudande

att bli docent där, samtidigt som man ställde en professur i utsikt. Dessa erbjudanden gjorde intryck på institutsledningen, och Meitner blev förordnad till vetenskaplig medarbetare på institutet med lön.

En annan viktig händelse vid denna tid: Hahn gifte sig. Det inverkade inte på Hahn och Meitners vetenskapliga samarbete, men många ställde sig frågan: "Kommer hon själv aldrig att gifta sig?" Hennes systerson Frisch upplevde en gång hur en av hans vänner ställde denna fråga, varvid hon svarade: "Min käre vän, för sånt har jag helt enkelt aldrig tid".

Ett år efter första världskrigets utbrott anmälde sig Lise frivilligt som röntgensköterska vid fronten men återvände på Hahns enträgna begäran efter ett par år till institutet, där hon tillsammans med Hahn avslutade arbetet med identifieringen av protaktinium. Som ett uttryck för den uppskattning av hennes kapacitet man kände, fick hon 1918 en egen radiofysikalisk avdelning vid institutet och löneförmåner som gjorde det möjligt för henne att för första gången skaffa sig en egen våning. Hon såg gärna gäster hos sig, och vid ett sådant tillfälle var den framstående och korpulente kemisten Otto von Bayer inbjuden, Han brukade skryta med att han på många år inte sett sina fötter. Då han fick klart för sig att det var Meitners födelsedag föreslog han att de skulle göra en byteshandel. "Om ni talar om hur gammal ni är, ska jag avslöja min vikt." Lise svarade omgående: "Det är ingen hederlig affär. Ni kan magra, men jag kan inte bli yngre".

Först 1920 fick kvinnor i Preussen rätt att förvärva titeln professor, och 1922 fick Meitner av filosofiska fakulteten vid Berlins universitet rätten att undervisa studenter. Hon behövde inte göra något habiliteringsarbete men måste hålla en installationsföreläsning som hon gav titeln "Radioaktivitetens betydelse för kosmiska processer". En journalist som skulle referera föreläsningen kallade ämnet kosmetiska processer! Först 1926 fick Meitner formell bekräftelse på att hon var en, som det hette, "ausserordentliche nicht beamte Professorin". Hon fick undervisa till 1933 då hon efter Hitlers makttillträde som icke arier blev fråntagen sin rätt att föreläsa.

Meitners systerson, Otto Robert Frisch, född 1904, hade 1926 fått sin doktorsgrad i fysik vid universitetet i Wien och flyttade 1927 till Berlin för en befattning vid Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Han delade sin mosters intresse för musik, de spelade fyrhändigt tillsammans, och hon introducerade honom i Berlins rika musikliv och, inte att förglömma, det akademiska livet där Frisch tack vare Meitner fick tillträde till de berömda onsdagskollokvierna vid universitetet. Där fanns Einstein, Planck, Nernst, ja, man skröt över att första bänken i auditoriet var upptagen av idel nobelpristagare.

Kring Einstein cirkulerade en mängd historier. En som Frisch berättar i sina minnen tilldrog sig då Einstein hade föreläst för det fysiska sällskapet i en stad i östra Tyskland. Sedan Einstein talat, frågade ordföranden om någon ville ställa frågor, varvid en ung man som satt längst bak stod upp och på bruten tyska sa ungefär så här: "Vad professor Einstein sagt är inte så dumt. Men hans andra ekvation följer inte av den första och fordrar ett antagande som inte är bevisat och är f ö inte invariant som den borde vara". Varenda åhörare hade nu vänt sig om och stirrade på den djärve unge mannen. Alla utom Einstein. Han var vänd mot svarta tavlan och sa efter en minut: "Vad den unge mannen sagt är fullständigt korrekt. Ni kan glömma allt jag sagt idag". Den unge mannen var Lev Landau, som sedan blev en av de främsta teoretiska fysikerna i Sovjetunionen.

Frisch blev kvar i Berlin till 1930, då han blev erbjuden en befattning hos Otto Stern i Hamburg. Han kunde stanna där till 1933 då Stern måste börja söka befattningar utanför Tyskland för sina icke ariska medarbetare. Han försökte först hos Marie Curie, men hon hade inte någon plats. Det lyckades bättre med Patrick Blackett som var chef för fysikavdelningen vid ett college i London och där ett år senare Niels Bohr vid ett besök erbjöd Frisch att komma till Köpenhamn. I glädjen över erbjudandet skrev Frisch till sin mor: "Nu behöver du inte längre vara orolig för mig. Gud allsmäktig själv har tagit mig i västknappen och talat vänligt till mig".

I sin utomordentliga självbiografi med den anspråkslösa titeln "What little I remember", som utkom några månader före Frischs död 1979, har han givit en fängslande skildring av livet och verksamheten på Bohrs institut tiden 1934-1939. I slutet av perioden hade den politiska situationen i Europa försämrats till den grad att även Frisch, som inte var direkt politiskt intresserad och aldrig politiskt aktiv, kom till slutsatsen att det bara var en tidsfråga när också Danmark skulle ockuperas och Frisch därigenom åter vara utan ett hemland.

Innan så blev fallet hade Lise Meitners situation totalt förändrats och hon hade i sista stund, i juli 1938, lämnat Tyskland för att över Holland och Danmark så småningom ta sig till Sverige.

Vid Hitlers makttillträde var Lise Meitner 55 år. Sedan 1907 hade hon levt och verkat i Berlin. Kaiser Wilhelm Institutet för kemi, och i synnerhet Hahns och Meitners avdelningar, var trots de inrikespolitiska händelserna fortfarande oaser för forskarna, och Meitner bestämde sig för att bli kvar vid institutet och sin verksamhet där. Efter kriget beklagade hon detta beslut och skriver till Hahn "genom att jag stannade kvar har jag understött hitlerismen". Men en god sak förde hennes envishet med sig. Hon lyckades 1934 övertyga Hahn om att de skulle starta ett nytt gemensamt arbete på bestrålning av uran med neutroner, något som Fermi hade gjort tidigare och därvid trodde sig ha upptäckt nya element, tyngre än uran. Hahn och Meitner var medvetna om att undersökningar liknande dem de själva planerade göra också pågick i Paris under ledning av Irene Curie och Frederic Joliot.

Hahn-Meitner gruppen utvidgades 1935 med Fritz Strassmann som arbetade som assistent vid Kaiser Wilhelm Institutet i egenskap av specialist på analytisk kemi. Samma år föreslog Planck ännu en gång Hahn och Meitner får nobelpriset i kemi får 1936. Max von Laue föreslog 1936 Lise Meitner ensam får nobelpriset i fysik får 1937. Som österrikiska skulle hon kunna ta emot priset vilket var förbjudet för tyska medborgare.

Den 12 mars 1938 ockuperade Tyskland Österrike, eller som termen löd, Österrike blev anslutet till Tyskland, varigenom Meitner blev tysk medborgare. Hon konfronterades med ett rykte att universitetslärare i framtiden inte skulle få tillstånd att lämna Tyskland och blev full av ångest över möjligheten att tvingas vara kvar under de nya förhållandena. I juli 1938 kunde hon tack vare hjälpsamma holländska vänner och en förstående holländsk regering passera gränsen mellan Tyskland och Holland och efter ett uppehåll i Holland fortsätta till Köpenhamn. Bohr erbjöd henne att stanna på hans institut men hon avböjde, kanske därför att Otto Robert Frisch redan fanns där. Manne Siegbahn, den svenske nobelpristagaren i fysik, hade också erbjudit henne en arbetsplats i sitt

nya institut i Stockholm, vilket hon accepterade. Institutet hette då Forskningsinstitutet för Fysik och heter nu Manne Siegbahn Institutet efter grundaren.

Efter ankomsten till Sverige bodde Lise Meitner den första tiden hos Eva von Bahr-Bergius som hon kände sedan Wien och Berlin. I Stockholm bodde hon länge på hotell. Det nya landet, obekantskapet med språket och de främmande människorna gjorde att hennes tillvaro i Sverige blev en helt annan än den i Tyskland, där hon hade varit chef för en institution och haft tillgång till medarbetare och assistenter och en utrustning för sina experiment. Hennes ekonomiska ställning var också osäker, och det är inte förvånande att hon i sin korrespondens med gamla vänner gav uttryck för depression.

Julen 1938 tillbringade Lise Meitner i Kungälv hos Eva von Bahr-Bergius. Otto Robert Frisch brukade fira jul hos Lise Meitner i Berlin, och det var överenskommet att traditionen med julfirandet skulle bestå, även om platsen denna gång måste bli Kungälv. "Mitt livs mest betydelsefulla besök" säger Frisch i sina minnen om tiden i Kungälv.

När Frisch och Meitner möttes på morgonen efter Frischs första natt i Kungälv var han ivrig att tala om sina arbeten vid Bohrs institut och Meitner var angelägen att diskutera ett brev, daterat den 19 december, som hon just fått från Hahn och där han redogjort för de analyser han och Strassmann utfört, vilka måste tolkas så att vid neutronbestrålningen av uran hade bildats bl a barium.

Det låg några centimeter snö på marken i Kungälv med någon sol och några minusgrader. Frisch var angelägen att åka skidor, men Lise Meitner som inte hade några skidor, traskade bredvid sin skidande systerson medan man diskuterade vilken fysikalisk process som kunde leda till uppkomsten av atomkärnor bara hälften så stora som urankärnan. Bohr hade tidigare lanserat en droppmodell för att beskriva atomkärnors beteende. Meitner och Frisch slog sig ner på en trädstam för att göra ett överslag av energibalansen i en process där en urankärna delas i två ungefär lika stora delar. Det blev klart för dem att processen både var möjlig och måste leda till frigörandet av en energi av cirka 200 MeV eller ungefär 50 miljoner gånger mer än vid förbränningen av en kolatom. Frisch gav också senare processen ett namn: fission, i analogi med den biologiska klyvningen av en cellkärna.

Den 1 januari 1939 skriver Lise Meitner i ett brev till Hahn i Berlin: "Vi har läst och funderat på era resultat, och det är kanske möjligt rent energetiskt att en så tung atomkärna kan spricka sönder".

En dag senare är Frisch tillbaka i Köpenhamn och berättar för Bohr, som står i begrepp att fara till Amerika, om sina överläggningar med Lise Meitner. Bohr tar sig för pannan och säger: "Vilka idioter vi varit allesammans". Ett viktigt steg hade tagits med upptäckten och förklaringen av ett nytt fysikaliskt fenomen. Redan den 16 januari 1939 kunde Bohr inför en fysikerkonferens själv lämna en redogörelse men redan dessförinnan hade nyheten spritt sig genom yttranden som Bohr fällt. Den omedelbara spridningen av Hahn-Strassmann-Meitner-Frischs slutsatser ledde till att arbeten sattes igång i många laboratorier där lämplig utrustning fanns att tillgå. Meitners hela familj flydde från Österrike. Hennes äldre syster Gustl och dennes man Justinian Frisch, Otto Roberts föräldrar, flyttade till Sverige för att bo tillsammans med Lise i en våning hon lyckats hyra, och där så småningom Lises tillhörigheter från Berlin kunde tas emot.

Själv flyttade hon från Siegbahns institut till fysikinstitutionen vid Tekniska Högskolan, där professor Gudmund Borelius ställde arbetsrum till förfogande, och senare till IVAs försöksstation, där AB Atomenergi hade nya lokaler i samband med byggandet av den första svenska forskningsreaktorn. År 1949 blev hon svensk medborgare och hennes ekonomiska villkor förbättrades. Hon blev kvar i Sverige till 1959 då hon flyttade till Cambridge i England för att vara i närheten av Frisch, hans föräldrar och andra släktingar som då bodde där.

Ännu vid 81 års ålder var Lise vid god vigör både fysiskt och intellektuellt, antingen det rörde sig om vandringar i de österrikiska bergen eller föreläsningar utomlands. Strax före sin 90-årsdag dog hon 1968, den enda kvarlevande av de åtta barnen till Philipp och Hedwig Meitner.

Lise Meitner publicerade under sitt liv cirka 150 arbeten. Vi kan idag bara ana vilka svårigheter hon hade att övervinna som kvinnlig vetenskapare i en tid och i ett land där kvinnoemancipationen inte hade många förespråkare och varifrån hon senare måste fly.

Under sitt långa liv fick hon dock ta emot många bevis på den vetenskapliga världens uppskattning av sina insatser. Nobelpriset i kemi för 1944 gavs 1945 till Otto Hahn "för upptäckten av tunga atomkärnors klyvning". Lise Meitner beklagade sig aldrig i samtal med vänner eller i privat korrespondens över att Hahn ensam fick priset. År 1966 fick Hahn, Lise Meitner och Strassmann dela det amerikanska Enrico Fermi-priset. Det var första gången priset gavs till icke-amerikanare och första gången en kvinna fick del av priset. För många kändes det särskilt tillfredsställande att alla tre som lång tid arbetat tillsammans och bidragit till "upptäckten av tunga atomkärnors klyvning" till slut blev gemensamt belönade.

Meitner var inte bara intellektuellt rikt utrustad. Hon hade många intressen utöver de vetenskapliga, var varmt mänsklig och hade en fängslande berättarförmåga. I Sverige blev hon en källa till inspiration för många yngre fysiker som kände sig dragna till att arbeta inom kärnfysiken.

Min hustru och jag hade stor glädje av samvaron med henne sedan hon kommit till Sverige, och det var en oförglömlig upplevelse att 1963 få hälsa henne välkommen till oss i Wien och bli en del av hennes föreläsning i Urania, stadens klassiska föreläsningssal för allmänbildning i vidaste bemärkelse, berätta om sitt verksamma liv.

Otto Robert Frisch hade träffat den australiske fysikern Mark Oliphant när denne en gång besökte Köpenhamn och anförtrott honom sina bekymmer för framtiden i Danmark. Genom Oliphant fick han kontakt med Rudolf Peierls och James Chadwick, vilken senare ordnade så att Frisch som engelsk medborgare, vilket han blev, kunde få anställning i Los Alamos i USA, där resultaten av det amerikanska atomprogrammet sammanfattades i uppgiften att utveckla ett atomvapen.

Med konstruktionen av den första atomladdningen som sprängdes i Alamogordo den 16 juli 1945 hade vetenskapsmännen löst den förelagda uppgiften. När därför John Cockcroft erbjöd Frisch att bli chef för en avdelning av det nya atomforskningscentret Rarwell, inte långt från Oxford, accepterade Frisch. Men uppmärksamheten var riktad på honom, och redan 1947 blev han erbjuden en professur i Cambridge som tidigare hade innehaft av sådana

fysikens stormän som Dewar, Faraday, Maxwell och Rutherford. "Endast en dåre skulle vägra" sa Chadwick då Frisch frågade honom om råd, och Frisch följde kallelsen.

Otto Robert, som han kallades i familjen, var för sina vänner enbart Robert med undantag för perioden i Los Alamos då han kallades Otto, därför att det fanns så många Robert där, var en utomordentlig fysiker och en nästan professionell musiker. "Big physics" och stora forskningsteam passade honom inte. Han var nästan en eremit i sin experimentella verksamhet och ville helst ha bara en eller ett par medarbetare med sig, som fick syssla med de olika prylar han tyckte om att sätta ihop till sinnrika instrument för att lösa speciella problem. Tillsammans med Peierls gjorde han en första uppskattning av den mängd uran-235 som krävs för att underhålla en kedjereaktion. Att den erforderliga mängden var så liten, förde tankarna direkt till möjligheten att bygga isotopseparatorer för produktion av uran-235.

I Los Alamos var han inte knuten till någon speciell grupp utan fick arbeta efter i huvudsak eget tycke, välkommen överallt på grund av sin tilldragande personlighet och sin förmåga att snabbt tränga in i ett problem och föreslå goda lösningar. Han var en mycket omtyckt person, humoristisk och alltid villig att musicera närhelst det var möjligt. Hans intresse för musik och hans utomordentliga framförande gjorde att hans konserter i Cambridge blev mycket uppskattade, när han hade mer tid för sådant sedan han blivit pensionerad från professuren. "Musik betraktar jag som mitt första språk" brukade han säga.

Otto Robert Frisch kommer att ihågkommas som en framstående fysiker som bidrog till fysikens utveckling inte bara genom sina vetenskapliga arbeten i främsta ledet utan också genom sin undervisning i samband med professuren och genom sina många böcker.

Ett halvt århundrade har gått sedan Lise Meitner och Otto Robert Frisch möttes i Kungälv för att fira jul tillsammans. De gjorde detta trots vad som hänt en av dem, Lise, som måst fly från sitt land. Den tolkning de kom fram till av Hahn och Strassmanns upptäckt öppnade nya vägar för fysiken. Vetenskapsmän runt om i världen var mogna för att acceptera de nya rönen. Den snabbhet med vilken framsteg har gjorts sedan dess i att använda kärnenergi för fredliga ändamål är förvånande.

Cirka 400 reaktorer i världen genererar nu 16 % av all elektricitet, i Sverige ungefär 50 %. Man bör komma ihåg i detta sammanhang att den sista uppfinningen och den sista förbättringen säkert ännu inte har gjorts på området!

WALTER H ZINN

Den första nukleära kedjereaktionen

Översättning av en artikel i "50 Years with Nuclear Fission", National Academy of Sciences, Washington, D.C., and National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, April 25-28, 1989, med tillstånd av American Nuclear Society.

*Översättning och kommentarer av Bengt Pershagen.
(Förklaringar till ord med asterisk ges i ordlistan efter artikeln)*

Flera detaljerade redogörelser har lämnats om det arbete vid Columbia* och Chicagouniversitetet som ledde till förverkligandet av en kedjereaktion med naturligt uran den 2 december 1942. Det är inte min avsikt att här nämna alla de experiment och teoretiska spekulationer som gjordes under tiden från januari 1939 till december 1942. Som ibland observatör och också aktiv deltagare tänker jag bara att berätta om de steg jag minns och som enligt min mening var viktigast för att åstadkomma det slutliga resultatet.

Vid Columbia mottogs nyheten om upptäckten av uranfissionen vid jultiden 1938 och blev naturligtvis en sensationell överraskning, särskilt för de fysiker som sysslade med neutronforskning. John Dunning använde cyklotronen* i Columbia som neutronkälla* och kunde snabbt se spår av fissionsprodukter* i en jonkammare* ansluten till en oscillograf. Jag hade en neutronkälla i form av en accelerator* med deuterium* - deuterium-reaktion och ett antal jonkammare, varför det var mycket lätt att göra samma observation. Så långt överraskningen.

Enrico Fermi hade just anslutit sig till Columbia-fakulteten och blev genast medelpunkten för diskussioner om betydelsen av upptäckten av fission. Det behöver inte sägas att möjligheten av en kedjereaktion stod helt klar i alla våra spekulationer.

Frågan om hur många neutroner som utsändes vid fission blev därför av central betydelse.

Fermi med sin stora erfarenhet av neutronforskning satte igång att finna svaret i ett experiment där en sfär av uranoxid bestrålades med neutroner från en radonberyllium-källa*, båda placerade i en tank med manganlösning. Mätning av den inducerade radioaktiviteten i mangan med och utan uran visade att neutroner verkligen utsändes vid fission och att antalet i genomsnitt var större än 2,0. Resultatet rapporterades av H L Anderson, E Fermi och H B Hanstein tidigt 1939¹.

Jag startade ett experiment med användning av D-D-acceleratorn som jag hoppades skulle avslöja prompta* neutroner, om de existerade. D-D-reaktionen ger neutroner med en högsta energi av 2,5 MeV. Genom att ställa in jonkammaren så att den bara registrerade neutroner ovanför denna energi, kunde man

¹ H L Anderson, E Fermi, H B Hanstein; *Production of neutrons in uranium bombarded by neutrons*, Phys Rev 55(1939)797.

detektera fissionsneutroner* om deras energi var större än 2,5 MeV. Med uranoxid närvarande såg jag några få neutroner men antalet var för litet för att vara av värde.

Så kom Leo Szilard in i bilden som besökare till Columbia vid den tiden. Han såg mitt experiment och det värdelösa resultatet och drog genast den uppenbara slutsatsen att om fissionsneutronerna huvudsakligen hade en energi som var lägre än 2,5 MeV skulle de inte visa sig i experimentet. Han sa att en fotoneutronkälla* med en mycket lägre högsta energi skulle förbättra chanserna att upptäcka fissionsneutroner.

Jag hade ingen sådan källa, men Szilard erbjöd sig att skaffa en. Jag sa, "bra, gör det". På några veckor hade han skaffat fram ett block av berylliummetall och en kapsel som innehöll ett gram radium. Vi arrangerade kvickt om experimentuppsättningen för att passa den nya fotoneutronkällan* och vid första försöket såg vi ett avsevärt antal pulser på oscillografen, förorsakade av fissionsneutroner. Det uppskattade antalet neutroner per fission var $2,0^2$. Dessa två experiment vid Columbia, grovt sett i överensstämmelse, och liknande resultat av franska forskare motiverade en kraftfull insats för att se om en kedjereaktion var möjlig med naturligt uran.

Men många frågor återstod att besvara. Var fissionen med långsamma* neutroner att hänföra till den sällsynta isotopen U-235? Rapporter från Bohr och Wheeler påstod ganska bestämt det. Men varken Fermi eller Szilard ville medge att isotopseparation* var den enda vägen till en kedjereaktion. John Dunning, Eugene Booth och Harold Urey valde att följa isotopseparationsvägen, så att dekanus Pegrum måste fördela de små tillgängliga resurserna till två hårt arbetande och krävande grupper, åtminstone tills den federala regeringen kunde övertalas att ge stöd. Leo Szilards målmedvetna, fantasirika och framgångsrika ansträngningar att göra president Roosevelt uppmärksam på saken är väl kända och jag ska inte vidare beröra det här. Efter publiceringen av ovannämnda resultat antog Columbia-gruppen gradvis en policy att inte publicera. Det berodde mest på Szilards enträgenhet.

Nästa steg var ett första försök till ett skitterexperiment* av Fermi, Anderson och Szilard. Femtio små burkar med uranoxid placerades i en stor tank med utspädd manganlösning. Fotoneutronkällan i centrum gav neutroner som bromsades av vätet i vattnet. Flera neutroner var närvarande i vattnet i lösningen med uran än utan. Man rapporterade 1,2 emitterade fissionsneutroner per absorberad neutron³. Experimentet hade tre viktiga konsekvenser: (1) det stod klart att absorptionen* i väte skulle omöjliggöra en kedjereaktion med vatten som moderator* och naturligt uran; (2) betydelsen av resonansabsorptionen* i uran blev en fråga av högsta angelägenhet; (3) den gynnsamma uppskattningen av antalet emitterade neutroner per absorberad neutron befäste tron att Fermi och Szilard hade rätt i påståendet att en kedjereaktion skulle vara möjlig utan isotopseparation.

2 L Szilard, W H Zinn; *Instantaneous emission or fast neutrons in the interaction of slow neutrons with uranium*, Phys Rev 55(1939)799.

3 H L Anderson, E Fermi, L Szilard; *Neutron production and absorption in uranium*, Phys Rev 56(1939)284.

Under tiden från hösten 1939 till sommaren 1941 gjordes ett stort antal experiment och beräkningar för att förbättra kunskapen om förutsättningarna för en kedjereaktion, nästan alla under ledning av Fermi. Herbert Anderson undersökte resonsansabsorptionen av neutroner i uran, vilket visade på nödvändigheten att placera uranet i åtskilda klumpar för att undvika den avsevärda aptiten hos uran-238 att "äta upp" neutroner innan de kunde bromsas ned till termiska* energier. I detta ämne gjordes, i nära samarbete med Fermi, viktiga insatser av en grupp vid Princetonuniversitetet under ledning av Eugene Wigner.

Under tiden hade Fermi och Szilard kommit fram till att kol i form av grafit måste väljas som moderator om det skulle finnas någon chans till en kedjereaktion i en nära framtid. Alternativet var tungt vatten som inte fanns tillgängligt i tonkvantiteter vilka det skulle ta minst flera månader att producera.

Så snart de första sändningarna grafit började anlända, mätte Fermi och Anderson absorptionen av neutroner och fann att tvärsnittet* var tillräckligt litet för att göra grafit till ett möjligt val som moderator.

I flera andra experiment mättes tvärsnitt för växelverkan mellan både snabba* och långsamma neutroner och uran. Allteftersom tekniken förbättrades erhöles resultat med mycket bättre noggrannhet.

Hela tiden var Szilard i hårt arbete med att övertala företag att leverera så mycket av sin renaste uranoxid och grafit som möjligt. På sommaren 1941 hade hans ansträngningar resulterat i att tonkvantiteter av båda materialen hade levererats. Grafiten var verkligen imponerande eftersom varje 4x4x12 tum bit var omsorgsfullt inlindad i vaxpapper.

Jag erinrar mig ett annat av Szilards anskaffningsjobb. Någon gång 1940 fiskade han upp ett litet föremål ur sin ficka och undrade om jag ville se lite uranmetall. Jag minns inte varifrån han fått det men han påpekade att det var något unikt. Han frågade om jag kunde bestämma värmeledningsförmågan för provet. Jag satte ihop en enkel apparat och när jag fick fram ett gynnsamt resultat reagerade Szilard med synbar glädje. För honom var kedjereaktionen redan en realitet och han spekulerade i hur en energiproducerande maskin skulle se ut.

I samarbete med Edward Teller uppfann Fermi någon gång 1941 den så kallade exponentialstapeln* som utan tvekan var det viktigaste steget av alla i utvecklingsarbetet mot en kedjereaktion. Detta redskap visade sig vara nyckeln till att finna och undvika alla ogynnsamma faktorer. Resultatet av ett exponentialförsök* var att multiplikationskonstanten bestämdes. Den definierades som antalet dotterneutroner producerade genom absorptionen av en neutron i föregående generation, i en struktur av oändlig utsträckning. Multiplikationskonstanten kallades "k". Om k befanns vara större än 1 är en kedjereaktion möjlig, även om den erforderliga storleken på anordningen inte är bestämd. Om k är mindre än 1 är ingen kedjereaktion möjlig. Benämningen "stapel"* låter som en hög material rätt och slätt. I själva verket byggdes staplarna upp med en noggrannhet i dimensionen som var det absolut bästa som forskarna kunde nå. Ordet exponentiell härrör från det sätt på vilket neutronintensiteten avtar uppåt i en moderatorkolonn med källan i botten. Huvudinsatsen vid både Columbia och Chicago gällde att finna villkoren för att k-värdet är större än 1. Det var ungefär vid den tiden 1941 som Fermi höll ett föredrag för vår lilla grupp om frågan hur man ska reglera en självunderhållande kedjereaktion. Alla vi som deltog i arbetet på projektet var bekymrade för reglerproblemet. Fermi visade nu att den

tidigare upptäckta fördröjda* emissionen av neutroner från vissa fissionsprodukter gav en enkel metod att hålla effektutvecklingen i en kedjereaktion vid vilken önskad nivå som helst.

Szilards arbete med anskaffning av material och den federala regeringens pengar möjliggjorde ett första exponentialförsök i augusti 1941. Fyrtioåtta kubiska boxar av järnplåt var och en innehållande 60 pund (27,22 kg) svart uranoxid (U308) placerades i ett 16 fots (48,8 mm) gitter i en grafitkolonn med 8 fots (244 mm) sida och 11 fots (335 mm) höjd. Analys av neutronintensiteten längs kolonnens axel gav $k = 0,87$. Fastän detta resultat var en aning nedslående pekade det också på vägar till förbättring, t ex:

- 1 Ta bort järnplåten i boxarna, den gav för mycket parasitisk* absorption av neutroner.
- 2 Pressa uranoxiden till täta kutsar med en 100 tons hydraulpress. (John Marshall hittade pressen på en skrotgård i New Jersey och lät sätta den i stånd)
- 3 Placera uranoxiden i blindhål i grafiten och undvik på så sätt onyttig absorption i behållare för uranet.
- 4 Avlägsna luft och fukt från anordningen. Det var känt att kväve hade ett avsevärt absorptionstvärnsnitt för termiska neutroner. Det gjordes genom att en plåtkapsel byggdes som kunde sänkas ned över exponentialstapeln, evakueras och fyllas med koldioxid. Kolonnen kunde också värmas för torkning.

Jag hade det föga avundsvärda jobbet att informera den förträfflige professorn i geologi som hade sitt kontor i våningen ovanför om att hans skrivbord och matta måste flyttas så att vi kunde borra ett hål genom betonggolvet under skrivbordet. Det var nödvändigt för att fästa en krok i taket på rummet under för att kunna lyfta plåtkapseln och sänka ner den över grafitstapeln. Även om han verkade förbryllad över vår begäran gav han nådigt sitt tillstånd eftersom han visste att vi höll på med något slags tokigt experiment. Resultatet av alla ändringar blev en ökning av k till 0,918.

En stor kvarstående osäkerhet var renheten för stapelmaterialen. Vi försökte förmå grafitbolagen att ändra tillverkningstekniken för att undvika föroreningar, speciellt bor med dess exceptionellt höga absorptionstvärnsnitt för termiska neutroner. För att få en föreställning om renheten för uran sattes alla på att samla föroreningar från vår uranoxid genom en separationsmetod med eter. Det innebar att skaka, under en avsevärd tid, 5 gallons (18,9 l) damejeanner med en lösning av uranoxid och eter. Jag kommer ihåg att Edward Teller deltog i detta mödosamma arbete vid ett av sina besök.

Typiskt för Fermi mätte vi resultatet av de samlade föroreningarna inte genom kemisk analys utan genom ett experiment med långsamma neutroner. Fermi sa att vårt uran helt enkelt var smutsigt. Senare fick jag i uppgift att indoktrinera kemisterna vid det bolag som ansvarade för reningen av uranet med eterseparation i konsten att mäta föroreningar genom neutronabsorption.

En ny och angelägen uppgift för kedjereaktionsprojektet började 1941 som resultat av upptäckten vid Berkeley* av fissionen av plutonium med termiska neutroner. Plutonium kunde framställas i makroskopisk mängd genom infång-



BIRTH OF THE ATOMIC AGE

Oljemålning av Gary Sheahan. Världens första självunderhållande, kontrollerade kedjereaktion är ett faktum - i Chicago 2 december 1942.



- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 Thomas Brill | 11 Enrico Fermi |
| 2 R G Nobles | 12 Walter Zinn |
| 3 L A Slotin | 13 Norman Hilberry |
| 4 Frank H Spedding | 14 W Rudolph Kanne |
| 5 Leo Szilard | 15 William P Overbeck |
| 6 Crawford H Greenewalt | 16 Herbert L Anderson |
| 7 Samuel K Allison | 17 Eugene P Wigner |
| 8 R F Christy | 18 Mrs Leona Woods Marshall |
| 9 Arthur H Compton | 19 William J Sturm |
| 10 Philip G Koontz | 20 George L Weil |

På reaktorn står Harold V Lichtenberger, Warren E Nyer samt Alvin C Graves.

ning* av neutroner i uran-238 i en kedjeregerande stapel. Effektproduktion var fortfarande ett mål men fick stå tillbaka för möjligheten att tillverka vapenmaterial.

Arthur Compton utnämndes till chef för stapelprojektet och beslöt förlägga huvudlaboratoriet till Chicago-universitetet. Tidigt 1942 flyttades Columbia-gruppen bestående av Fermi, Szilard, Anderson, Weil, Marshall, Feld, Wattenberg och Zinn med hela sin utrustning till universitetet i Chicago.

Vid Metallurgiska Laboratoriet, som det kallades, hade Samuel Allison redan börjat exponentialförsök. Columbia-gruppen förenade sig med en större grupp som arbetade i en squash-hall under en läktare till ett fotbollsstadion. Med hjälp av den gamla hydraulpressen som producerade urancyllindrar med hög täthet byggdes nya exponentialuppställningar och mättes. Comptons assistent, Norman Hilberry, var ansvarig för materialanskaffningen till staplarna. Leveranserna ökade i en takt som vida överskred det bästa som Szilard hade lyckats

åstadkomma. Omkring den 1 juni nåddes ett k-värde på 0.995 med stapel nummer 5. Förbättringen jämfört med den sista Columbia-stapeln berodde nästan helt och hållet på den förbättrade renheten hos grafiten.

Fermi var nu säker på att fortsatta förbättringar av renheten som redan hade demonstrerats men inte omsatts i produktion skulle föra k-värdet över 1, så att möjligheten till en kedjereaktion var ställd utom allt tvivel. Frågan var bara hur stor anordning som skulle krävas.

Med Comptons godkännande beslöt man fortsätta med att planera för att testa en självunderhållande stapel före slutet av 1942. Vi var nu ett projekt inom Manhattan District under general Groves. Tidplaner sattes upp och måste tas på allvar. Fermi hade rykte om sig att vara mycket försiktig med uppskattningar och beräkningar och våra planer på den självunderhållande stapeln återspeglade den attityden. Huvuddragen i planen var följande:

För att utnyttja neutroner effektivt är en sfär bättre än en cylinder. Därför utformades pressverktygen för uranoxiden så att de gav cylindrar med rundade kanter. Verktygen hade lång leveranstid eftersom de måste göras av finslipat verktygsstål på grund av nötningen från uranoxiden. Benämningen pseudosfärer myntades för de uranoxidbitar som gjordes med det nya verktyget.

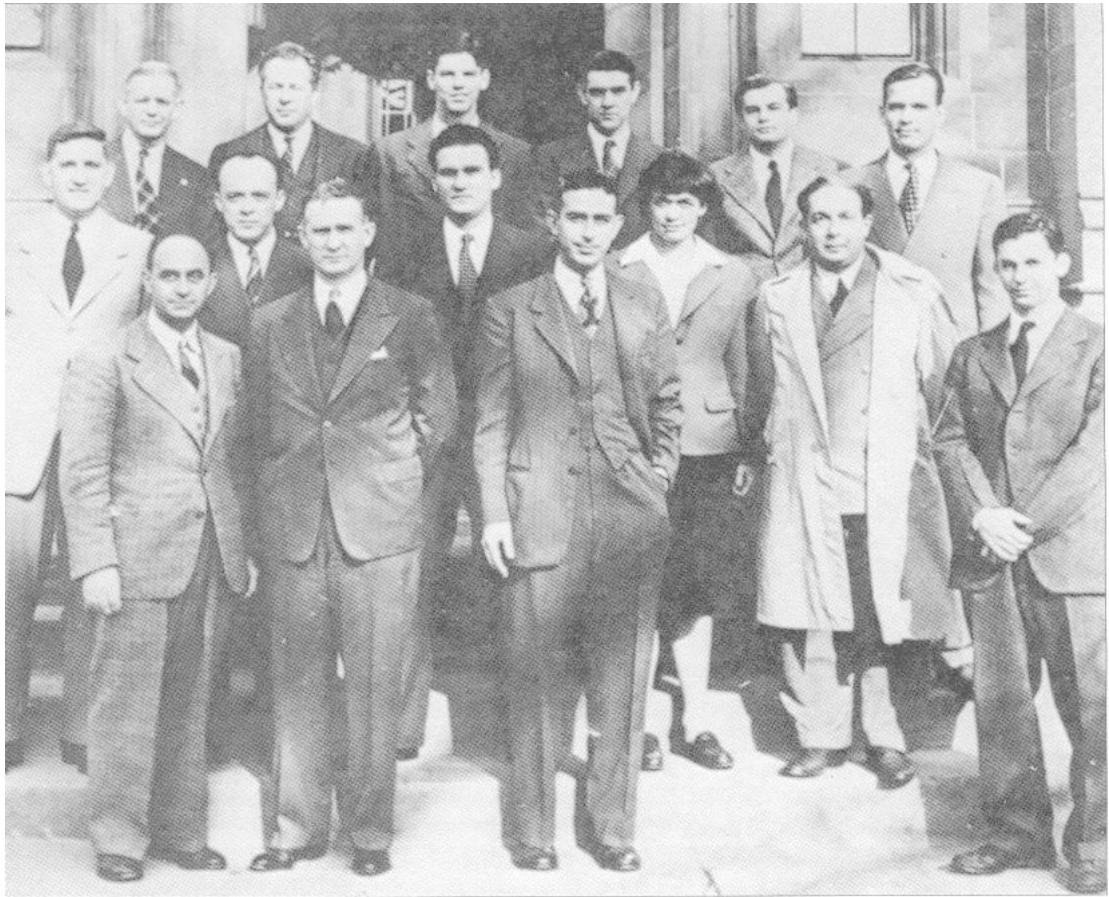
Formen på det föreslagna stapeln skulle också vara sfärisk med en diameter på 20 till 25 fot (610-762 mm). Den storleken skulle kräva all grafit som väntades levererad till årets slut och stämde dessutom med Fermis uppskattningar av hur mycket k-värdet kunde överstiga 1. En stor mängd trävirke anskaffades för att bygga en vagga för den undre halvan av grafitfären.

Luft skulle avlägsnas och till den ändan gav sig Herbert Anderson ut att skaffa ett hölje av ballongtyg som skulle omsluta hela stapeln. Prov hade visat att visat att luft kunde pumpas bort från en grafitkolonn genom en sådan anordning.

Genom experiment visste vi att ett 8 tums (203 mm) gitteravstånd* var nära optimalt för de 4,75 pounds (2,15 kg) pseudosfärerna av uran. All grafit beställdes därför så att den kunde slipas till 4x4 tums (102x102 mm) storlek. Provslipning visade att en tillfredsställande finish kunde åstadkommas med 4 1/8 tums dimension. Fermi medgav att en sådan ändring låg inom felgränserna för den optimala storleken. När grafit bearbetas får man inga spån utan ett fint damm som, lagrad i tunnor, snart fyllde det begränsade utrymmet under läktaren. Jag ville köra materialet till en tipp i Chicago men armens säkerhetsfolk sa "nej, det är sekretessbelagt material". Så dammet skickades tillbaka till leverantören, vilket löste vårt problem men troligen vållade en del förskräckelse hos leverantören.

Under sommaren 1942 byggdes och mättes flera dussin exponentialstaplar. Inte alla var inriktade på den kedjereagerande teststapeln. Planer var på gång för produktionsreaktorer som väntades utveckla mycket värme, så att exponentialstaplar användes för att studera inverkan av kylsystem mm. Omkring augusti visade emellertid en exponentialstapel som använde eter-renad brun uran oxid (UO_2) ett k-värde på 1,04. Nu var en självunderhållande stapel av rimlig storlek en visshet.

Tidigt i november hade vi till hands 456 ton grafit i fyra renhetsklasser och ungefär 22 000 pseudosfärer av pressad oxid om totalt 52,25 ton. Uppbyggnaden av teststapeln tog bara tre veckors arbete i dag- och nattskift av fysiker,



*Några ur Manhattan-projektets innersta cirkel möts igen i Chicago, år 1946.
Översta raden från vänster: Norman Hilberry, Samuel Allison, Thomas Brill, Robert Nobles, Warren Nyer, Marvin Wilkening. Mellersta raden: Harold Agnew, William Sturm, Harold Lichtenberger, Leona W. Marshall, Leo Szilard. Nedre raden: Enrico Fermi, Walter Zinn, Albert Wattenberg, Herbert Anderson.*

instrument- och reglerspecialister och assistenter. En självunderhållande reaktion nåddes med 385 ton grafit, 40 ton oxid och cirka 6 ton ren uranmetall i cylinderform som hade anlänt när byggarbetet var i gång och som placerades nära centrum av grafitfären. Den mindre storleken jämfört med vad vi hade uppskattat i juni berodde på uranmetallen. Utan metall skulle en självunderhållande storlek med oxid ha nåtts innan teststapeln slog i rummets tak. Den lägliga leveransen av metall gjorde jobbet avsevärt lättare. I viss mening var själva händelsen den 2 december en antiklimax. Under sista veckan av uppbyggnadsarbetet stod det klart att självunderhållande kriticitet skulle uppnås väl innan fulla vertikala diametern nåtts och att ballongen för att evakuera stapeln inte skulle behövas.

Jag kan försäkra er att vi alla var högeligen nöjda över att ha uppfyllt det löfte som Arthur Compton gett general Groves att vi skulle vara hemma före jul. Det låg också en stor tillfredsställelse i att bevisa att Fermi och Szilard hade haft rätt i att en kedjereaktion kunde nås med naturligt uran.

Experimentet den 2 december, förutom att det för första gången demonstrerade frigörelse av kärnenergi i stor skala, gav stimulans åt hela projektet. Manhattan District och ansvariga regeringskommittéer insåg nu att det fanns en klar möjlig väg till en atomexplosion. Som vi förstod två och ett halvt år senare fullföljdes den vägen med obeveklig beslutsamhet.

ORDLISTA

De flesta ordförklaringarna är hämtade från TNC 90 Kärnenergiordlista, utgiven 1990 av Sveriges Mekanstandardisering och Tekniska Nomenklaturcentralen.

absorption

kärnprocess i vilken den inkommande partikeln försvinner

accelerator

apparat i vilken kinetisk energi tillförs laddade partiklar i en stråle

Berkeley

universitet i San Francisco

Columbia

universitet i New York

cyklotron

accelerator där de laddade partiklarna ges höga energier genom upprepade energitillskott från ett elektriskt växelfält mellan två elektroder placerade i ett transversellt magnetfält

deuterium

väteisotop med masstalet två

exponentialförsök

försök med en underkritisk anordning av reaktormaterial och en oberoende neutronkälla för bestämning av de reaktorfysikaliska egenskaperna hos anordningen

exponentialstapel

underkritisk anordning av grafit, uran i form av oxid eller metall, och en neutronkälla

fissionsneutron

neutron som utsänds under eller efter fission och som har kvar sin ursprungliga energi

fissionsprodukt

atomslag bildat direkt vid fission eller vid radioaktivt sönderfall av en sådan atomkärna

fotoneutron neutron

frigjord vid växelverkan mellan en foton (kvantum av elektromagnetisk strålning) och en atomkärna

fördröjd neutron

neutron som utsänds från vissa fissionsprodukter som bildats genom radioaktivt sönderfall. På grund av sönderfallet är den fördröjd i förhållande till tidpunkten för fissionen

gitteravstånd

avståndet mellan två bränsleelement i en regelbunden anordning av bränsle och moderator

gitterexperiment

reaktorfysikaliskt experiment med bränsleelement ordnade i ett regelbundet mönster i en moderator

infångning

upptagande av ytterligare en partikel, t ex en neutron, i en atomkärna

isotop

en av flera atomslag med samma atomnummer men olika masstal

isotopseparation

avskiljning av en eller flera isotoper från de övriga i ett grundämne

jonkammare

gasfylld strålningsdetektor som utnyttjar uppsamling av den elektriska laddning som genom jonisation alstras i dess känsliga del

långsamma neutroner

neutroner med lägre energi än en övre gräns som i reaktorfysiken ofta sätts vid 1 eV

MeV

beteckning för megaelektronvolt där $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

moderator

material, vanligen av lätta atomer, som används för att bromsa neutroner genom kollisioner med atomkärnor

neutronkälla

material eller anordning som kan avge neutroner

parasitisk absorption

absorption av neutroner utan åstadkommande av fission eller annan önskad process

prompt

neutron neutron som utsänds vid fission utan mätbar fördröjning

radium-berylliumkälla

naturlig neutronkälla i vilken neutronerna erhålls genom att alfapartiklar (heliumatomkärnor) eller gammakvanta från radium får beskjuta beryllium. Med gammakvanta fås fotoneutroner med en högsta energi av 0,51 MeV.

radon-berylliumkälla

naturlig neutronkälla av radongas och berylliumpulver inneslutet i en tillsmält glasampull

resonansabsorption

neutronabsorption i ett energiområde inom vilket många atomslags neutron-tvärsnitt uppvisar toppar

snabba neutroner

neutroner med energi över en viss gräns som i reaktorfysiken vanligen sätts omkring 0,1 MeV

stapel (eng. pile)

föråldrad term för reaktor

termiska neutroner

neutroner som helt eller delvis är i termiskjämvikt med det ämne de befinner sig i

tvärsnitt

mått på sannolikheten att en viss reaktion ska äga rum mellan inkommande strålning, t ex neutronstrålning, och en målpartikel

BENGT PERSHAGEN

Pionjärerna

Några förgrundsgestalter inom forskningen och deras roll för den tidiga kärnenergiutvecklingen

Albert Einstein (1879-1955, nobelpristagare 1921): född i Ulm i Tyskland, upprätthöll professurer i Zürich, Prag, Berlin och Princeton. Framlade 1905 inom loppet av tre och en halv månad tre var för sig revolutionerande avhandlingar inom olika grenar av fysiken. I en av dem skapade han den speciella relativitetsteori och visade hur Newtons mekaniska lagar måste modifieras för objekt som rör sig med en hastighet nära ljusets. Något senare samma år publicerade han också sin berömda relation $E=mc^2$. Åren 1907-1915 arbetade han fram sin allmänna relativitetsteori, en generalisering av Newtons teori för tyngdkraften. Lämnade Tyskland 1933 för att därefter vara knuten till Institute for Advanced Studies i Princeton, USA. Skrev i augusti 1939 ett brev till president Roosevelt om kärnkraftens vapentekniska möjligheter och vad det skulle innebära om tyskarna först utnyttjade dem.

Ernest Rutherford (1871-1937, nobelpristagare 1908): född i Nya Zeeland, kom till Cambridge i England 1895, upprätthöll professurer i fysik i Montreal, Manchester och Cambridge. Framlade 1902 (tillsammans med F Soddy) en teori för de naturligt radioaktiva grundämnenas sönderfall och gjorde stora insatser för att fastställa de enskilda leden i de radioaktiva serierna. Åren 1911-1912 utarbetade han sin atommodell. Enligt denna är huvuddelen av atomens massa koncentrerad till en liten, positivt laddad central kärna runt vilken negativt laddade elektroner kretsar. Rutherford åstadkom 1919 den första konstgjorda kärnreaktionen genom att bombardera kväve med heliumkärnor (alfapartiklar) varvid vätekärnor kastades ut från kväveatomerna med mycket hög hastighet.

Niels Bohr (1885-1962, nobelpristagare 1922): född i Köpenhamn, professor vid Köpenhamns universitet. Publicerade 1913 tre epokgörande uppsatser, där han reformerade Rutherfords atommodell, baserat på två grundläggande postulat. Enligt det ena kan elektronerna i en atom bara befinna sig i stationära banor, och enligt det andra kan en elektron övergå från ett stationärt tillstånd till ett annat genom en ny process, varvid ljus utsänds eller absorberas. Från 1919 fick Bohr tillgång till ett nyuppfört Institut för Teoretisk Fysik i Köpenhamn. Det blev under de följande decennierna ett centrum för den utveckling inom atomfysiken som ledde fram till formuleringen av kvantmekaniken. År 1936 framlade han en "vattendrops"-modell för atomkärnan som han 1939 (tillsammans med J A Wheeler) använde för att förklara fissionsreaktionen.

James Chadwick (1891-1974, nobelpristagare 1935): född i England, elev och medarbetare till Rutherford, satt internerad i Tyskland under första världskriget, tillbaka i Cambridge, sedan professor i Liverpool. Rutherford hade 1920 i en föreläsning inför den engelska vetenskapsakademien nämnt om möjligheten av en "atom med massan ett och laddningen noll". Chadwick klarlade 1932 att den genomträngande strålning som utsänds när heliumkärnor (alfapartiklar) bestrålar beryllium utgörs av neutroner.

Enrico Fermi (1901-1954, nobelpristagare 1938): född i Rom, universitetsstudier i Pisa, professor i Rom 1926, flyttade till USA 1938, arbetade först vid Columbiauniversitet i New York, från 1942 vid universitetet i Chicago och från 1946 vid ett nyinrättat institut för kärnforskning där. År 1934 påbörjade han tillsammans med en grupp medarbetare försök med neutronbestrålning av atomkärnor. Av en tillfällighet fann han att den inducerade radioaktiviteten blev väsentligt kraftigare om neutronerna först bromsades i vätehaltiga material, t ex paraffin. Han hade därmed upptäckt långsamma (termiska) neutroner och han utarbetade en teori för bromsning av neutroner. Man bestrålade bl a uran med långsamma neutroner och observerade därvid märkliga radioaktiva ämnen vars identitet man dock inte lyckades fastställa. Efter flykten till USA arbetade Fermi tillsammans med medarbetare på att åstadkomma en självunderhållande kedjereaktion med naturligt uran. Försöken kröntes med framgång den 2 december 1942. Han utarbetade tillsammans med E P Wigner den grundläggande teorin för kärnreaktorn.

Otto Hahn (1879-1968, nobelpristagare 1944): född i Tyskland, utbildades i kemi vid universitetet i Marburg, arbetade hos Rutherford i Montreal, professor vid universitetet i Berlin 1910-1934, direktör vid Kaiser-Wilhelm-institutet för kemi i Berlin 1928-1945. Ledde en grupp för kärnkemi från 1906, som vann stor respekt genom ytterst noggranna experiment över de radioaktiva ämnernas strålning och egenskaper. I sökandet efter transurana grundämnen vid bestrålning av uran med långsamma neutroner fann han tillsammans med F Strassmann 1938 att en av produkterna var barium. De hade därmed upptäckt uranklyvningen och barium var en klyvningsprodukt.

Lise Meitner (1878-1968): född i Wien, studerade fysik och matematik vid universitetet i Wien där hon som andra kvinna tog doktorexamen i fysik 1905. Kom 1907 till Berlin och inledde ett långt och fruktbart samarbete med Hahn vid Kaiser-Wilhelm-institutet för kemi. Blev professor vid Berlins universitet 1926 men fräntogs rätten att föreläsa efter Hitlers makttillträde 1933. Lämnade Tyskland 1938 för att via Holland och Danmark så småningom ta sig till Sverige. Tillsammans med O R Frisch tolkade hon vid jultiden 1938 i Kungälv Hahn och Strassmanns resultat som uranklyvning. Meitner stannade i Sverige till 1959 då hon flyttade till England.

Otto Robert Frisch (1904-1979): född i Wien, systerson till Lise Meitner, doktor i fysik vid Wiens universitet 1926, flyttade till Berlin 1927, Hamburg 1930, Köpenhamn 1934, Birmingham 1939, Liverpool 1940 och Los Alamos 1943. Från 1945 var han chef för en avdelning vid det brittiska atomforskningscentret i Harwell, och från 1947 professor i Cambridge. Kort tid efter tolkningen 1938 tillsammans med Meitner av uranklyvningen, som av Frisch gavs namnet fission, demonstrerade han i Köpenhamn fissionen genom ett enkelt experiment. Frisch gjorde (tillsammans med R Peierls) 1939 en uppskattning av den kritiska storleken för en sfär av uran-235 under olika förhållanden. Han genomförde i april 1945 i Los Alamos ett sinnrikt experiment som slutgiltigt bevisade möjligheten av en kärnexplosion.

Leo Szilard (1898-1964): född i Budapest, studerade i Budapest och Berlin, doktor i fysik 1922, docent vid universitetet i Berlin till 1933, då han flyttade till England. Mellan 1924 och 1934 sökte han ensam eller tillsammans med Albert Einstein 29 patent i Tyskland. Ansökte 1934 om patent på frigörelse av kärnenergi genom en nukleär kedjereaktion med neutroner, där han bl a beskrev det som senare kom att kallas kritisk storlek. Kom till USA 1938. Påvisade (tillsammans med W Zinn) experimentellt att neutroner utsänds vid fission. Framlade 1939 förslag till utformning av en kärnreaktor med naturligt uran. Påpekade betydelsen av fission med snabba neutroner och kom 1943 med idén till den snabba brytreaktorn. Szilard verkade tidigt för sekretess inom kärnenergiforskningen för att inte en eventuell tysk kärnvapenutveckling skulle underlättas. Var en av initiativtagarna till Einsteins brev till president Roosevelt.

Eugene P Wigner (f 1902, nobelpristagare 1963): född i Ungern, studerade kemiteknik vid tekniska högskolan i Berlin och sedan teoretisk fysik. Kom till Princetonuniversitetet i USA 1930. Återvände dit 1938 efter ett mellanspel vid Wisconsin universitet i Madison. Tillsammans med Szilard initiativtagare till Einsteins brev till Roosevelt. Utvecklade tillsammans med Fermi den grundläggande teorin för kärnreaktorn, speciellt för resonansabsorption i uran-238. Var under tiden 1942-1945 ledare för den teoretiska gruppen vid "Metallurgical Laboratory" i Chicago, som utarbetade konstruktionen av produktionsreaktorerna i Hanford. Tilldelades halva nobelpriset 1963 för sina studier över atomkärnans byggnad.

Glenn T Seaborg (f 1912, nobelpristagare 1951): född i Michigan av svensk-amerikanska föräldrar. Tog doktorsexamen i kemi 1937 vid Berkeley-universitetet. Upptäckte 1941 (tillsammans med J W Kennedy och AC Wahl), genom att bestråla ett uranprov med neutroner från en cyklotron, ett grundämne med atomnummer 94 och masstal 239, som senare gavs namnet plutonium. Påvisade att plutonium-239 som väntat är fissil, dvs klyvbar med långsamma neutroner. Seaborg var under en tid ordförande i den amerikanska atomenergikommissionen, bl a 1967 då OKG träffade avtal om anrikning av uran för Oskarshamn 1, som det första i sitt slag med ett enskilt företag.

ÅR FÖR ÅR

Några milstolpar i kärnenergens vetenskapliga och tekniska historia

- 1932 Neutronen identifieras av engelsmannen J Chadwick. Dess existens hade tidigare förutsagts av E Rutherford.
- 1934 Konstgjord radioaktivitet upptäcks av de franska forskarna F Joliot och I Joliot-Curie genom bombardemang av aluminium med heliumkärnor (alfapartiklar), varvid en radioaktiv isotop av grundämnet fosfor bildas.
- 1934 En forskargrupp i Rom under ledning av E Fermi bestrålar olika grundämnen med neutroner och finner att den inducera de radioaktiviteten ökas kraftigt om neutronerna bromsas i vätehaltigt material (paraffin). De hade därmed upptäckt långsamma (termiska) neutroner. Fermi utarbetar teori får bromsning av neutroner.
- 1938 Tyskarna O Hahn och F Strassmann bestrålar uran med neutroner och finner att det leder till bildning av bl a radioaktivt barium.
- Österrikarna L Meitner och O R Frisch tolkar vidjultiden i Kungälv Hahn och Strassmanns resultat som en klyvning av urankärnan. Processen ges namnet fission.
- 1939 O R Frisch demonstrerar i början av januari i Köpenhamn fissionsreaktionen genom ett enkelt experiment.
- 1939 Dansken N Bohr och amerikanen J A Wheeler visar teoretiskt att uran-235 men inte uran-238 är klyvbar med långsamma neutroner. Båda de naturligt förekommande uranisotoperna är klyvbara med snabba neutroner liksom andra tunga atomkärnor.
- Franska och amerikanska forskare visar att nya neutroner utsänds vid fission, vilket ger möjlighet till en kedjereaktion.
- Danska och amerikanska forskare påvisar att en bråkdel av neutronerna utsänds en kort stund efter själva fissionsprocessen, s k fördröjda neutroner. Detta möjliggör kontroll av kedjereaktionen.
- 1940 Amerikanen L A Turner förutser att ett hittills okänt atomslag med atomnummer 94 och masstal 239 bör vara lätt klyvbart och kunna framställas genom neutronbestrålning av uran. Det skulle öppna en annan väg än isotopseparation av uran för framställning av klyvbart material.
- 1941 Amerikanerna G T Seaborg, E McMillan, J W Kennedy och E C Wahl upptäcker grundämnet 94 som ges namnet plutonium. De bekräftar genom experiment att plutonium-239 är lätt klyvbar.
- 1942 Den första självunderhållande kedjereaktionen åstadkoms med naturligt uran och grafit i Chicago av ett forskarlag under ledning av E Fermi den 2 december kl 15.25.
- 1943 Iden till den snabba bredreaktorn framläggs av L Szilard i USA.

- 1944 Den första forskningsreaktorn med naturligt uran och tungt vatten tas i drift vid Argonne-laboratoriet i Chicago.
- Den första reaktorn med anrikat uran tas i drift i Los Alamos, New Mexico, USA. Det är en homogen lättvattenreaktor med höganrikat uran och låg effekt, 25 kW värme.
- 1946 Den första reaktorn med plutonium tas i drift i Los Alamos. Det är också den första reaktor som drivs med snabba neutroner. Den har rent plutonium som bränsle och kyls med kvicksilver, värmeeffekt 25 kW.
- 1951 Den första experimentella blyreaktorn startar vid den amerikanska atomenergikommissionens forskningsstation i Arco, Idaho. Reaktorn har en värmeeffekt av 1,4 MW, anrikat uran som bränsle och kyls av en blandning av flytande natrium och kalium. Den är historisk i så måtto att man med den för första gången demonstrerade elproduktion (100 W) med värme från en kärnreaktor.
- 1953 Första tryckvattenreaktorn med anrikat uran och vanligt vatten tas i drift i Arco, Idaho. Det är prototypen för den reaktor som 1955 installeras i ubåten Nautilus.
- Grundprincipen för kokvattenreaktorn demonstreras i en serie experiment reaktorer med låg effekt i Arco, Idaho.
- President Eisenhower lanserar programmet "Atoms for Peace" i ett tal inför FN s generalförsamling. I programmet föreslås att information om kärnenergi verksamhet ska frigges och uranbränsle ställas till förfogande för alla länder som önskar utveckla kärnenergin för fredligt bruk.
- 1954 Ett demonstrationskraftverk om 5 MW elektrisk effekt tas i drift i Obninsk, USSR. Reaktorn är grafitmodererad och lättvattenkyld med anrikat uran som bränsle. Reaktorn är urtypen för en serie kraftproducerande reaktorer som senare uppförts i f d Sovjetunionen, bl a i Tjernobyl.
- 1955 FN anordnar i månadsskiftet augusti-september den första Genevekonferensen om "The Peaceful Uses of Atomic Energy".
- 1956 Den första kraftproducerande experimentella kokvattenreaktorn om 5 MWe tas startar i Lemont, Illinois. Reaktorn är konstruerad vid Argonne-laboratoriet, ägs av atomenergikommissionen och drivs av Argonne.
- 1956 Anrikat uran blir tillgängligt på kommersiella villkor genom att den amerikanska atomenergikommissionen publicerar en prislista.
- Det första industriella kärnkraftverket i väst startar i Calder Hall, Storbritannien. Verket har en effekt av 40 MWe och en gaskyld grafitmodererad reaktor med naturligt uran som bränsle.
- Det första byggnadstillståndet får ett kärnkraftverk utfärdas av atomenergikommissionen till ett privatägt kraftföretag. Det gäller tryckvattenreaktorn Indian Point - 1 med 260 MWe effekt.

- 1957 Det första demonstrationskraftverket med en tryckvattenreaktor om 60 MWe startar i Shippingport, Pennsylvania. Reaktorn, som har hög-anrikt bränsle, är konstruerat av Westinghouse Corporation, ägs av den amerikanska atomenergikommissionen och drivs av kraftbolaget Duquesne Light Co.
- 1957 Det första privatägda demonstrationskraftverket med en kokvattenreaktor om 10 MWe, tas i drift i Pleasanton, California. Reaktorn är konstruerad av General Electric, som också äger och driver anläggningen tillsammans med kraftbolaget Pacific Gas and Electric.
- Det internationella atomorganet IAEA bildas och tar säte i Wien. IAEA tjänar som världens centrala mellanstatliga forum för vetenskapligt och tekniskt samarbete för kärnenergens fredliga användning.
- 1960 Det första storskaliga kärnkraftverket med kokvattenreaktor startar i Dresden, Illinois. Effekten är 180 MWe. Reaktorn är konstruerad av General Electric och ägs och drivs av kraftföretaget Commonwealth Edison Co.
- 1961 Det första storskaliga kärnkraftverket med tryckvattenreaktor startar i Rowe, Massachusetts. Effekten är 110 MWe. Reaktorn är konstruerad av Westinghouse och ägs och drivs av kraftföretaget Yankee Atomic Electric Power Co.
- 1963 Det amerikanska kraftbolaget Jersey Central beställer för första gången på rent kommersiella villkor hos General Electric ett kärnkraftverk med kokvattenreaktor om 560 MWe. Reaktorn tas i drift 1969.

FRÅN TUNGT TILL LÄTT VATTEN

Utvecklingen i Sverige 1945-1974

- 1945 Atomkommittén inrättas. I kommittén ingår ett tiotal representanter för förvaltning, vetenskap och industri.
- 1947 AB Atomenergi bildas med staten som huvudsaklig aktieägare och med uppgift att organisera den kraftinsats som förutses bli nödvändig om ett program för praktiskt utnyttjande av kärnenergi ska kunna genomföras inom rimlig tid.
- 1951 Första mätningar av resonansabsorption i uran utförs av E Hellstrand och R Persson vid Atomenergi. Som neutronkälla användes cyklotronen vid forskningsinstitutet för fysik i Frescati.
- 1953 Ett extraktionsverk för framställning av uran startar i Kvarntorp, baserat på en process som utarbetats av E Svenke. Anläggningen har en kapacitet av 5 ton uran per år.
- Första mätningar med stavar av uran i lätt vatten utförs i den underkritiska anläggningen Zebra vid Atomenergis lokaler i IVAs försöksstation vid Drottning Kristinas väg i Stockholm. Mätningarna visar att kriticitet inte är praktiskt möjlig med naturligt uran och vanligt vatten.
- 1954 Den första svenskbyggda forskningsreaktorn R1 blir kritisk den 13 juli kl 18.59 i ett bergrum vid Drottning Kristinas väg. I reaktorn ingår cirka 2900 kg naturligt uran kapslat i aluminiumrör med ungefär 3 cm diameter och cirka 6600 kg tungt vatten. Reaktorns nominella effekt är 600 kW värme.
- 1955 Atomenergis forskningsstation i Studsvik börjar byggas.
- Atomkraftkonsortiet Krångede AB & Co (ARK) bildas. De ursprungliga intressenterna är Krångede, Sydkraft, Stockholms Elverk, Stora Kopparberg, Uddeholm, Skandinaviska Elverk, Hammarforsen och Gullspång.
- 1956 Den statliga atomenergiutredningen avger sitt betänkande. Den föreslår ett kraftfullt utvecklingsarbete, närmast inriktat på "reaktorer med naturligt uran och tungt vatten för värmeverk med eller utan elgenerering och stora elkraftverk". AB Atomenergi föreslås få huvudansvaret för utvecklingsarbetet. Riksdagen beslutar om atompolitiken i enlighet med utredningens förslag.
- 1957 Tillstånd ges enligt atomenergilagen för reaktorn R3 i Ågesta. Reaktorn dimensioneras för en effekt av 65 MW, varav 55 MW tas ut som värme och 10 MW som el. Ägare är Vattenfall, Atomenergi och Stockholms Energiverk.
- Avtal tecknas mellan Vattenfall och Atomenergi om samarbete för ett kärnkraftverk om 100 MWe med en reaktor R4 för tungt vatten under tryck. Atomenergi förutsätts svara för reaktordelen och Vattenfall för stationen i övrigt.

- 1958 Statsmakterna anvisar de första medlen till ett kärnkraftverk i Marviken och beslutar uppföra ett uranverk i Ranstad med en kapacitet av cirka 120 ton uran per år.
- 1959 ARK inlämnar koncessionsansökan för Simpevarvs atomkraftverk. Ansökan baseras på en preliminär offert från General Electric, USA, på en 60 MWe kokvattenreaktor
- Forskningsreaktorn RO tas i drift i Studsvik. Den möjliggör kritiska mätningar vid obetydlig värmeeffekt ("nolleffekt") för studium av de reaktor fysikaliska egenskaperna hos anordningar av uranbränsle i tungt vatten.
- 1960 Materialprovningsreaktorn R2 startar i Studsvik. Det är en lättvattenreaktor av tanktyp med anrikat uran som bränsle och en effekt av 30 MW värme. Reaktorn levereras av det amerikanska företaget ACF-Industries.
- 1961 Forskningsfaciliteten TZ (tryckzebra) tas i drift i Studsvik. Den tillåter underkritiska mätningar på tungvattenhärdar vid höga tryck och temperaturer.
- 1962 Marvikenprojektet läggs om från tryckvattenreaktor till kokvattenreaktor med naturligt uran och tungt vatten.
- ASEA börjar utveckla en kokvattenreaktor med anrikat uran och lätt vatten.
- 1963 Statsmakterna beviljar koncession för Marviken som en tungvattenreaktor med kokning och möjlighet till nukleär överhettning. Anläggningen dimensioneras för cirka 200 MWe vid drift med överhettning och svag-anrikat uran. Beredskapsdrift är möjlig med naturligt uran.
- Ågesta-reaktorn når första kriticitet i juli.
- 1964 Ågesta når full effekt och leverans av värme och el under våren.
- AKK begär anbud från ASEA på en kokvattenreaktor med anrikat uran och lättvatten med en effekt av minst 300 MWe.
- ASEA lämnar preliminär offert i november på en nyckelfärdig anläggning om 400 MWe.
- En snabb nolleffektreaktor, FR-0, tas i drift i Studsvik.
- 1965 Oskarshamnsverkets Kraftgrupp AB bildas och beställer Oskarshamn 1. Ranstadverket står färdigt för provdrift.
- Ett samarbetsavtal träffas mellan ASEA och Atomenergi om utveckling av lättvattenreakortekniken.
- 1966 Regeringen beviljar koncession för Oskarshamn 1
- 1967 OKG träffar avtal med den amerikanska atomenergikommissionen om anrikning av uran för Oskarshamn 1.
- 1968 ASEA-Atom bildas genom avtal mellan staten och ASEA. Avtalet gäller t o m utgången av 1979.
- Vattenfall beställer Ringhals 1 och 2. Ringhals 1 är en 750 MWe kokvattenreaktor från ASEA-Atom och Ringhals 2 en 800 MWe tryckvattenreaktor från Westinghouse-Monitor.

- 1969 Nolleffektreaktorn KRITZ tas i drift i Studsvik. Den tillåter rektorfyssiska mätningar på lättvattenhårdar vid höga temperaturer.
- 1970 Regeringen beslutar om avveckling av Marvikenprojektet.
Oskarshamn 1 uppnår första kriticitet den 12 december.
- 1971 Oskarshamn 1 infasas för första gången på nätet i augusti, då 30 MW matas ut.
- 1972 Kontraktsenlig leverans och invigning av Oskarshamn 1.
AB Svensk Kärnbränsleförsörjning, SKBF, numera omdöpt till Svensk Kärnbränslehantering, SKB, bildas.
AB Kärnkraftutbildning, AKU, numera Kärnkraftsäkerhet och Utbildning, KSU, bildas.
- 1974 Driften i Ågesta avbryts och verksamheten avvecklas.

Referenser

Svensk atomenergipolitik, Motiv och riktlinjer rör statens insatser på atomenergiområdet 1947-1979, Industridepartementet 1970

Olle Gimstedt; *Från atom till kärnkraft*, OKG AB 1985

Karl-Erik Larsson; *Kärnkraftens historia i Sverige*, Kosmos 1987

Harry Brynielsson: *Utvecklingen av svenska tungvattenreaktorer*, Dædalus 1989/90

TVÅHUNDRA ÅR MED URAN

År 1789 tog den tyske kemisten Martin Heinrich Klaproth ett prov av mineralet pechblände från Joachimsthal silvergruva i Böhmen. Han upphettade provet med träkol och kunde isolera ett nytt ämne som han gav namnet uran efter den nyligen upptäckta planeten Uranus. Den substans han hade separerat var inte grundämnet självt utan urandioxid. Den franske kemisten Eugene Peligot visade 1841 hur man kunde framställa metallen. Det nya grundämnet användes bara i mycket begränsad utsträckning, huvudsakligen för att färga glas. Under hela 1800-talet producerades inte mer än ungefär 150 ton uranmalm från gruvor i Böhmen och Sachsen.

Klaproth kunde inte veta att han upptäckt det sista grundämnet i naturen. Grundämnenas periodiska system presenterades inte förrän ungefär hundra år senare av ryssen Mendelejev. Ännu mindre kunde han ana den verkliga betydelsen av sin upptäckt, som låg i den klyvbara isotopen uran-235.

Början till en förändrad roll får uran kom 1896, då fransmannen Henri Becquerel upptäckte radioaktiviteten. I samband med studier av fluorescens i uranglas, orsakad av den nyligen upptäckta röntgenstrålningen, fann han av en tillfällighet att uranet sände ut en ny typ av strålning. Hans arbete fortsattes av Marie och Pierre Curie som lyckades framställa radium, en produkt av uranets sönderfall i pechblände.

Radium är starkt radioaktivt och dess strålning kunde användas för medicinska ändamål. Men extraktionen var mycket besvärlig och det gick åt flera ton pechblände för att få fram ett gram radium. Priset på radium blev högt och det skapade en efterfrågan på uran. Omkring 1920 upptäcktes i dåvarande Belgiska Kongo rika uranmalmer som exploaterades av det belgiska gruvföretaget Union Minière. Priset låg ännu på 1930-talet vid omkring 50 000 USD per gram, när produktion startades av Eldorado Co. vid Stora Björnsjön i Kanada, där en stor fyndighet av pechblände upptäckts.

En andra uranrush skapades efter upptäckten av uranklyvningen 1938 och förverkligandet av den första nukleära kedjereaktionen 1942. Det var först fråga om militära tillämpningar. Manhattan-projektet i USA krävde stora mängder uran, dels för anrikning av den fissila isotopen uran-235, dels för laddning av produktionsreaktorer för framställning av vapenplutonium. Uranboomen accelererade under det kalla kriget och kulminerade omkring 1960. Då sjönk den militära efterfrågan och stora lager av uran ackumulerades.

En tredje våg av efterfrågan inleddes med president Eisenhowers utspel 1953 om "Atoms for Peace". I mitten på 50-talet demonstrerades civil elkraftproduktion från industriella storskaliga kärnreaktorer. Ett decennium senare öppnades orderböckerna för kommersiell kärnkraft. Beställningarna ökade stadigt och fick ytterligare stimulans genom oljekrisen 1973. Massiva kärnkraftprogram planerades. Osäkerhet uppstod om urantillgångarna var tillräckliga för behoven, vilket gjorde att priserna steg och skapade en ny uranrush.

Som ett svar på den ökade efterfrågan intensifierade man prospekteringen efter uran. Stora nyupptäckter gjordes just när det började stå klart att tidigare prognoser av elkraftbehovet varit för optimistiska. Det uppstod ett överskott på elproduktionskapacitet och många kärnkraftverk avbeställdes. Långtidskontrakt för urananrikning höll efterfrågan uppe under en viss tid, men så småningom föll uranproduktionen i västvärlden från 44 000 ton U per år 1980 till cirka 32 000 ton 1990. Sedan 1987 har årsproduktionen legat under behoven, som 1990 var cirka 44 000 ton.

Skillnaden mellan produktion och behov har täckts från lager. Som ett resultat av överskottet i produktionskapacitet har uranpriset sjunkit och ligger för närvarande (1992) i området 50-60 USD/kgU för långtidskontrakt.

Världens kända tillgångar på uran som kan framställas till kostnader lägre än 80 USD/kgU uppgår till cirka 2,6 miljoner ton U. Mer än 80 % av tillgångarna finns i fem länder: Australien, Kanada, Niger, Sydafrika och f d Sovjetunionen. Därtill kommer uppskattade, men hittills oupptäckta reserver om drygt 7 miljoner ton U, som kan framställas med kostnader upp till 130 USD/kgU.

Dagens lättvattenreaktorer utnyttjar endast ungefär 0,6 % av uranråvaran för energiproduktion. Det beror främst på att den fissila isotopen uran-235 bara ingår till 0,7115 viktprocent i det naturliga uranet. Lättvattenreaktorerna använder låganrikat uranbränsle, som innehåller 3-4 % uran-235. Vid anrikningsprocessen går en del uran-235 förlorat som restprodukt. I reaktorn omvandlas en del av den icke-fissila isotopen uran-238 till fissilt plutonium. I själva verket kommer ungefär en tredjedel av energiproduktionen i en typisk lättvattenreaktor från självgenererat plutonium. Inte desto mindre finns betydande mängder outnyttjat uran-235 och plutonium kvar i det bränsle som tas ut ur reaktorn.

Man strävar på olika sätt efter att förbättra uranutnyttjningen i nuvarande och framtida reaktorer, vilket är nödvändigt om kärnkraften ska bli en uthållig energikälla. Men råvarubasen är ingalunda liten ens med dagens låga utnyttjningsgrad. Kända och uppskattade reserver räcker i minst 100 år med nuvarande teknik. Med bridreaktorer skulle upp till 70 % av uranet kunna utnyttjas, dvs tillgången på bränsleråvara ökar hundrafalt, vilket skulle göra kärnkraften till en i praktiken nära nog outtömlig energikälla.

Tekniken för anrikning av uran utvecklades i USA under Manhattan-projektet till framställning av höganrikat uran-235 för vapenändamål. Man använde sig av gasdiffusion för separation av uranisotoperna, dvs man utnyttjade egenskapen att en gas, i detta fall uranhexafluorid UF_6 diffunderar olika fort genom ett poröst membran, beroende på dess molekylvikt. De molekyler som innehåller uran-235 diffunderar något snabbare än de som innehåller uran-238. Skillnaden är dock mycket liten, varför man måste upprepa processen flera tusen gånger för att få en avsevärd anrikning. Sådana gasdiffusionsanläggningar blir därför mycket stora och dyra och kräver mycket el för att pumpa runt gasen.

Stora gasdiffusionsanläggningar finns utom i USA också i England och Frankrike. I f d Sovjetunionen, som också har stora anrikningsanläggningar, används en annan teknik, baserad på gascentrifugering. Denna teknik utnyttjas också i en europeisk anläggning i Nederländerna och i Japan. Mindre gas-

diffusionsanläggningar finns i Argentina och Kina. Dessutom finns en mindre experimentanläggning i Sydafrika, som utnyttjar en annan teknik. Behovet av anrikat uran för civila ändamål uppgår för närvarande till drygt hälften av produktionskapaciteten.

Nyligen meddelades att USA har träffat avtal med Ryssland om att köpa anrikat uran från skrotade kärnvapen. I avtalet ingår att uranet ska anpassas till civilt bruk. Det torde innebära att uranet blandas med naturligt uran till en anrikningsnivå som lämpar sig för kommersiella reaktorer. Man har uppskattat att låganrikat uran motsvarande cirka 10 nuvarande årsbehov skulle kunna bli tillgängligt från avvecklade kärnstridsspetsar i USA och Ryssland. Då förverkligas den bibliska profetian (Jes 2:4) "att göra svärden till plogbillar".

Referens

IAEA Yearbook 1991, International Atomic Energy Agency, Wien, 1992

NATURENS EGEN KÄRNREAKTOR

Uran är inget ovanligt ämne i jordskorpan, även om rika fyndigheter är förhållandevis sällsynta. Det är nästan lika vanligt som koppar och bly och mycket vanligare än silver och guld. Det var ännu vanligare i förhistorisk tid när det hade haft mindre tid på sig att sönderfalla. När jorden bildades för ungefär 4,5 miljarder år sedan, måste det ha funnits omkring två gånger så mycket uran-238 och hundra gånger så mycket uran-235 som idag. Det kan man lätt räkna ut med kännedom om den takt dessa atomer sönderfaller med, som varit känd sedan upptäckten av radioaktiviteten i slutet av förra århundradet.

I maj 1972 upptäckte några franska fysiker att malmen från en viss uran-gruva i Gabon i västra Afrika hade en onormalt låg halt av uran-235. Utgångspunkten för det hela var att en rutinanalys gav 0,7171 atomprocent U-235, medan det allmänt accepterade värdet är 0,7202 % ($\pm 0,0006$), ett värde som ansetts konstant för allt uran man funnit på jorden och månen. Tack vare en noggrann analytiker, som inte gav sig i första taget, blev det fastslaget att det inte rörde sig om något systematiskt fel i analysen, utan att man stod inför ett helt nytt fenomen. Ett forskningsprojekt sattes igång och man kom snart till slutsatsen att en naturlig kedjereaktion måste ha ägt rum på platsen för ett par miljarder år sedan - en fossil reaktor, som fick namn efter platsen, Oklo.

Malmen i Oklo är av sedimentärt ursprung och har en ålder av 1700-1800 miljoner år. Den genomsnittliga uranhalt är 0,4-0,5 %, men man hade också funnit några 0,5-1 m tjocka zoner med betydligt högre halt, i området 10-20 %, och i vissa mindre fickor ända upp till 160 % uran. Det visade sig att koncentrationen av uran-235 i dessa fickor var 0,4-0,5 %. Man hittade till och med ett prov med så låg halt som 0,296 %. Sammanlagt hade man tagit ut cirka 700 ton med onormalt lågt innehåll av uran-235. Förklaringen är att zonerna med låg halt uran-235 har fungerat som kärnreaktorer för cirka 1800 miljoner år sedan, så att den fissila isotopen delvis bränts ut. Man får komma ihåg att halten uran-235 då var cirka 3 %, dvs ungefär den anrikning som används i dagens lättvattenreaktorer. Den definitiva bekräftelsen på att kedjereaktioner verkligen ägt rum fick man genom masspektrometriska analyser som visade på närvaron av vissa karakteristiska fissionsprodukter i malmen.

Även med tillgång till låganrikat uran måste ganska speciella förhållanden råda för att en självunderhållande kedjereaktion ska komma till stånd. Det måste finnas vatten närvarande för att bromsa neutronerna och det får inte finnas ämnen som absorberar för mycket neutroner. Omfattande reaktorfysikaliska analyser av fransmannen Roger Naudet har visat att villkoren för kriticitet var uppfyllda i Oklo. Huvudmineralet innehåller cirka 15 % kemiskt bundet vatten och inga högabsorberande ämnen. Man kan dessutom räkna med att det fanns extra vatten närvarande eftersom uranet avsattes under vatten.

Analyserna visar att den kedjereagerande förmågan i första hand beror på dels halten uran i malmen, dels förhållandet mellan volymerna vatten och uran. Beräkningarna ger vid handen att det behövs en uranhalt av minst 30 % för kriticitet. Det optimala volymförhållandet är då cirka 0,4. Det kritiska området kan ha varit cirka 2 m i diameter och 2 dm tjockt, en "pannkakshärd" som man säger idag.

Av vissa reaktor fysikaliska skäl kan man sluta sig till att kedjereaktionerna varit verksamma i flera hundra tusen år. Reaktoreffekten var inte större än cirka 15 kW, dvs ungefär som en liten forskningsreaktor idag. Den totala energiutvecklingen uppskattas omkring 100 TWh. Det motsvarar två tredjedelar av elproduktionen i Sverige under ett år.

Hur har naturen kunnat reglera kedjereaktionerna under så lång tid? Den dagliga regleringen kan ha skett genom variation av mängden vatten som sugits upp i malmen. När vatteninnehållet ökar, ökar den kedjereagerande förmågan och därmed effektutvecklingen. Det leder till att vattnet bli varmt och avdunstar så att vatteninnehållet minskar och reaktionen avstannar. När så vatten sugts upp igen av porerna i mineralet, blir reaktorn kritisk igen och processen upprepas.

Det är svårare att förklara hur reaktionen kunnat pågå i så lång tid. Halten uran-235 minskar ju hela tiden på grund av utbränning. Man skulle kunna tänka sig att nytt uran avsatts undan för undan, men det verkar inte troligt. Däremot har Naudet gett en plausibel förklaring. Den går ut på att reaktorn ursprungligen innehållit små mängder bor eller något annat ämne med hög neutronabsorption. När t ex en boratom absorberar en neutron omvandlas den till en atom av ett ämne med låg neutronabsorption. När således det ursprungliga boret undan för undan försvinner, "bränns ut", genom neutronabsorption, förbättras reaktorns kedjereagerande förmåga. Man kan då tänka sig att förbättringen hållit jämna steg med den försämring som beror på utbränningen av uran-235. Denna teknik med "brännbar absorberator" används faktiskt i dagens lättvattenreaktorer.

De fossila reaktorerna i Oklo är de enda man hittills känner till, men man kan fråga sig om de inte också förekommit på andra ställen i forntiden. Det måste i så fall ha varit för ett par miljarder år sedan, eftersom halten uran-235 måste haft en viss storlek. Malmen måste dessutom ha innehållit låga halter neutronabsorberande material och kunnat ta upp tillräckligt med vatten för neutronbromsningen. Platsen där sådana reaktorer funnits måste ha varit stabil i motsvarande lång tid för att intakta reaktionszoner ska finnas kvar. Med tanke på de omvandlingar som skett i stora delar av jordskorpan under de långa tidrymder det är fråga om, är det knappast sannolikt att hitta uranformationer som genomgått så litet förändringar som i Oklo. Oklo-fenomenet har visat sig få stor praktisk betydelse för bedömningen av säkerheten hos djupförvar för använt kärnbränsle. Det omfattande material som samlats i studierna av de fossila reaktorerna har gett en god kunskap om den geokemiska stabiliteten hos den aktuella typen av mineral och på transporten av ämnen som bildas vid uranklyvningen. Studierna visar att kortlivade fissionsprodukter transporterades bort en bit, men att de flesta långlivade finns kvar på platsen. Uran har vandrat högst ett tiotal meter, medan plutonium inte flyttat sig alls. De flesta avfallsprodukterna har omvandlats till stabila ämnen, exempelvis bly.

Referens

Eigil Andersen; De "fossile" kjernereaktorer i Gabon, *Fra Fysikkens Verden* 38 (1976).