

# Hur fungerar en kärnreaktor?

Några reaktorfysikaliska grundbegrepp  
med tillämpning på  
den första nukleära kedjereaktionen.

Bengt Pershagen

Utgivet till utställningen  
Kärnenergin 50 år  
på Tekniska Museet i Stockholm  
2 december 1992  
Reviderad oktober 2002

# Inledning

När världens första kärnreaktor startades den 2 december 1942 under ledning av Enrico Fermi i provisoriska lokaler under läktaren till ett fotbollsstadion i Chicago, tog människan för första gången en energikälla i bruk som inte direkt eller indirekt härrörde från solens energi. Ved, kol, olja och naturgas är olika former av lagrad solenergi som sedan frigörs vid förbränningen. Även vattenkraften har samband med solenergin: den vattenavdunstning som solstrålningen åstadkommer över hav och land kommer tillbaka i form av regn och snö och ger upphov till de forsar och fall som vi utnyttjar för vår elförsörjning.

Vid vanliga förbränningsprocesser frigörs kemisk energi genom reaktioner mellan atomer av organiska ämnen och luftens syre. Energin i en kärnreaktor däremot alstras genom reaktioner mellan atomkärnor av uran och neutroner. Härvid klyvs kärnan i två delar som flyger isär med stor hastighet. Genom klyvningsfragmentens uppbromsning omvandlas deras rörelseenergi till värme. Värmet överförs till ett kylmedium för vidare utnyttjning. I en kokvattenreaktor bringas kylmediet till kokning i själva reaktorn som således har samma funktion som ångpannan i en vanligt värmekraftverk.

Under krigsåren var utvecklingen inriktad på militära tillämpningar, vilket satte sin prägel på den efterföljande civila utvecklingen. Lättvattenreaktorn fick en flygande start i USA tack vare erfarenheterna från reaktorer för ubåtsdrift. Genom president Eisenhowers initiativ "Atoms for Peace" 1953 blev lättvattenreaktortekniken tillgänglig även för andra länder. Idag är lättvattenreaktorerna helt dominerande med mer än 85 % av den installerade kärnkrafteffekten. Under 1991 producerade kärnkraften 17 % av världens elektricitet. Det är ungefär lika mycket som vattenkraften ger.

## Atomkärnans byggnad

För att förstå vad som händer i en kärnreaktor måste man se på materiens minsta byggstenar, atomerna, och deras inre. Varje atom består av en liten central atomkärna och ett relativt glest hölje av elektroner. Atomkärnan innehåller praktiskt taget hela atomens massa. Den är sammansatt av två slags partiklar, protoner och neutroner. Protonen är identisk med atomkärnan i vanligt väte. Den har en positiv elementarladdning (minsta existerande laddning). Neutronen har i det närmaste samma massa som protonen men saknar laddning. Elektronen är 1836 gånger lättare än protonen och har en negativ elementarladdning.

Summan av antalet protoner och neutroner bestämmer atomkärnans massa och kallas masstalet. Antalet protoner är lika med atomkärnans laddning och kallas atomnumret, därför att det bestämmer platsen för atomen ifråga i grundämnenas periodiska system. Antalet elektroner runt kärnan är lika med antalet protoner i en neutral atom.

Den lättaste atomen, den vanliga väteatomen, består av en proton och en elektron. Atomer som tillhör samma grundämne har samma antal protoner, dvs. samma atomnummer, men kan ha olika antal neutroner, dvs. olika masstal. Atomer med samma atomnummer men olika masstal kallas isotoper. Det finns t ex tre isotoper av väte: vanligt väte med masstalet 1, tungt väte (deuterium) med masstalet 2 och tretungt väte (tritium) med masstalet 3. Det tyngsta i naturen förekommande grundämnet är uran med atomnumret 92. Naturligt uran har två isotoper: uran-238 med masstalet 238 och uran-235 med masstalet 235.

# Atomkärnans bindningsenergi

En kärnreaktion är en process där en atomkärna reagerar med en annan partikel så att dess massa, laddning eller energitillstånd ändras. Kärnreaktioner kan liksom kemiska reaktioner antingen kräva tillskott av energi eller innebära frigörelse av energi. Energiomsättningen får man enklast fram genom att se på atomkärnornas massor. Om man t ex tar den enklaste sammansatta kärnan, kärnan av tungt väte, som består av en proton och en neutron, så finner man att dess massa är något mindre än summan av en protons och en neutrons massor. På samma sätt har en kärna av vanligt helium, som består av två protoner och två neutroner, en massa som är ungefär 0,8 % mindre än summan av två protoners och två neutroners massor. En ännu något större "massförlust" finner man t ex hos den vanliga syrekärnan med åtta neutroner och åtta protoner.

Vart har massan tagit vägen? Förklaringen ges genom den speciella relativitetsteorin, som las fram av Albert Einstein 1905. Enligt denna är energi  $E$  och massa  $m$  likvärdiga enligt lagen  $E=mc^2$  där  $c$  är ljusets hastighet, dvs 300.000 km/s. Energi och massa är därför inte var för sig konstanta utan endast summan av dem, omräknade enligt Einsteins formel.

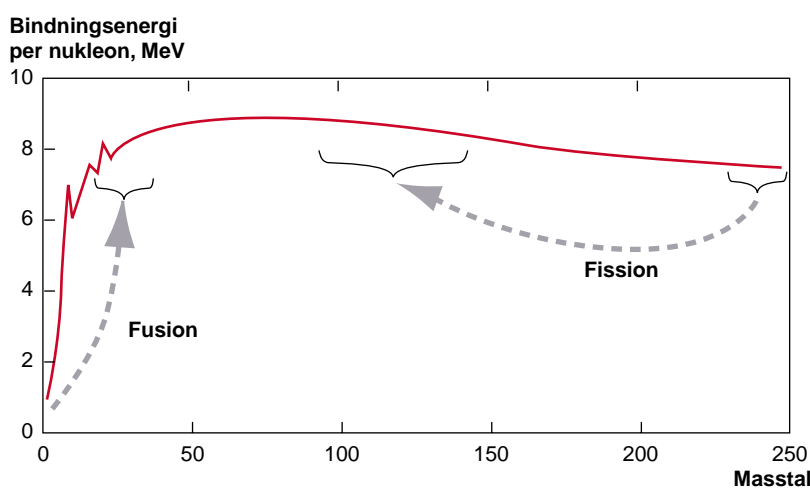
När en proton och en neutron reagerar med varandra under bildning av en tung vätekärna, frigörs en energimängd som är lika med den massförlust som uppstår, multiplicerad med  $c^2$ . Omvänt gäller naturligtvis att för sönderdelning av den tunga vätekärnan i en fri neutron och en fri proton måste minst så mycket energi tillföras som enligt Einsteins lag svarar mot massförlusten.

Ju större massförlusten i en kärna är jämfört med det tillstånd då alla neutroner och protoner är fria, desto större energimängd måste tillföras. Massförlusten per kärnpartikel är ett mått på hur kraftigt kärnpartiklarna är sammanhållna och kallas därför också kärnans specifika bindningsenergi. Bindningsenergin varierar med antalet partiklar i kärnan, figur 1. För lätta kärnor växer den till ett maximum vid cirka 50 kärnpartiklar. Här, ungefär motsvarande grundämnet järn, är de sammanhållande krafterna mellan kärnpartiklarna störst. För tyngre kärnor sjunker bindningsenergin långsamt.

Kurvan över bindningsenergin visar vilka kärnreaktioner som ger energi om de kan åstadkommas. Sammanslagning eller fusion av lätta kärnor till tyngre med masstal mindre än 50 innebär en ökning av massförlusten per kärnpartikel, alltså en frigörelse av energi. På samma sätt frigörs energi vid klyvning eller

fission av tunga kärnor. Det bör understrykas att kurvan endast visar att energiutvinning är teoretiskt möjlig, en annan fråga är om de erforderliga kärnreaktionerna kan genomföras i praktiken och på ett ekonomiskt rimligt sätt.

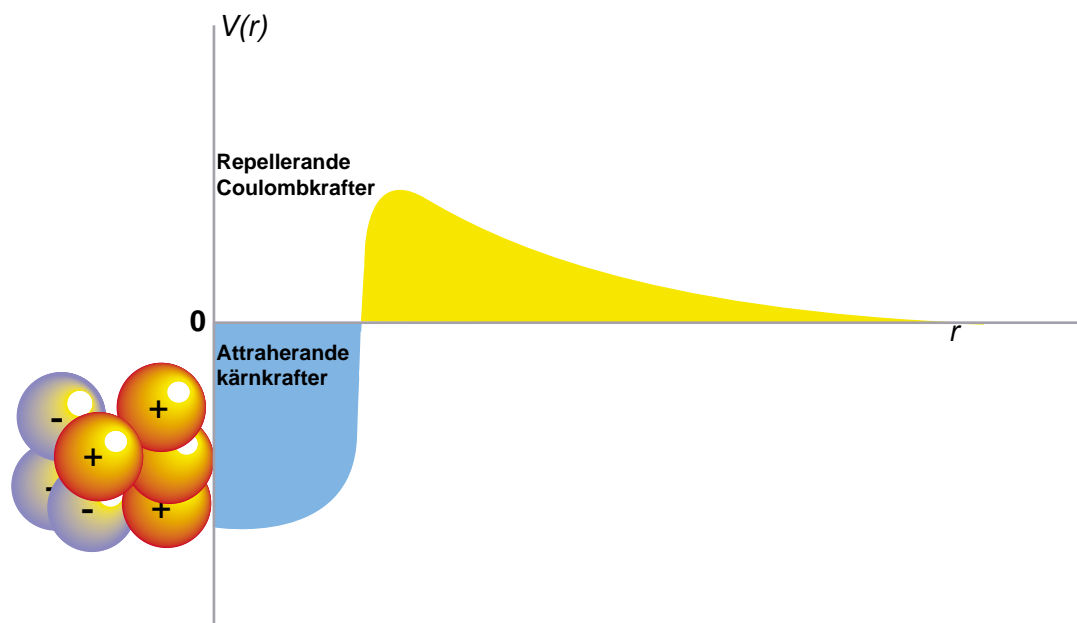
Uppenbarligen hindras de önskade kärnreaktionerna på något sätt, annars skulle bara kärnor med masstal omkring 50, där kärnpartiklarna är hårdast



Figur 1 Atomkärnornas bindningsenergi

sammanbundna, finns i naturen. Hindret är kärnornas positiva laddning som sätter upp en barriär mot såväl sammansmältning av lätta kärnor som sönderfall av tunga. Denna så kallade coulombbarriär, figur 2, visar hur energin för en laddad partikel varierar med avståndet från kärnans centrum.

Gropen i centrum representerar de attraherande kärnkrafterna och vallen den repellerande coulombkraften. För att en kärna utifrån skall kunna tränga in i en annan kärna måste dess rörelseenergi övervinna den potentiella energin i coulombbarriären. För att en kärna skall sönderfalla måste den "inre" energin hos en kärnpartikel höjas så att coulombbarriären kan överkommas eller genomträngas.



Figur 2 Principskiss av Coulombbarriären

Redan på 1930-talet spekulerade man i att kunna utnyttja sammanslagning av atomkärnor för energiproduktion. Man visste att sådana fusionsprocesser mellan vanliga vätekärnor försiggår i solen och stjärnorna och är den till synes outtömliga källa varur dessa hämtar sin energi. Kärnreaktioner av detta slag lyckades man också åstadkomma i laboratorieskala genom att använda kärnor som projektiler och i så kallade acceleratorer ge dem hög hastighet och bombardera andra kärnor med dem. Den höga hastigheten behövs för att tränga genom coulombbarriären, men på grund av atomkärnornas små dimensioner blir träffsannolikheten mycket liten. Den energi som går åt för att åstadkomma kärnreaktioner på detta sätt är därför ofantligt mycket större än den som frigörs vid kärnsammanslagningen. Denna väg att utvinna kärnenergi är därför inte praktiskt framkomlig.

# Fissionsprocessen

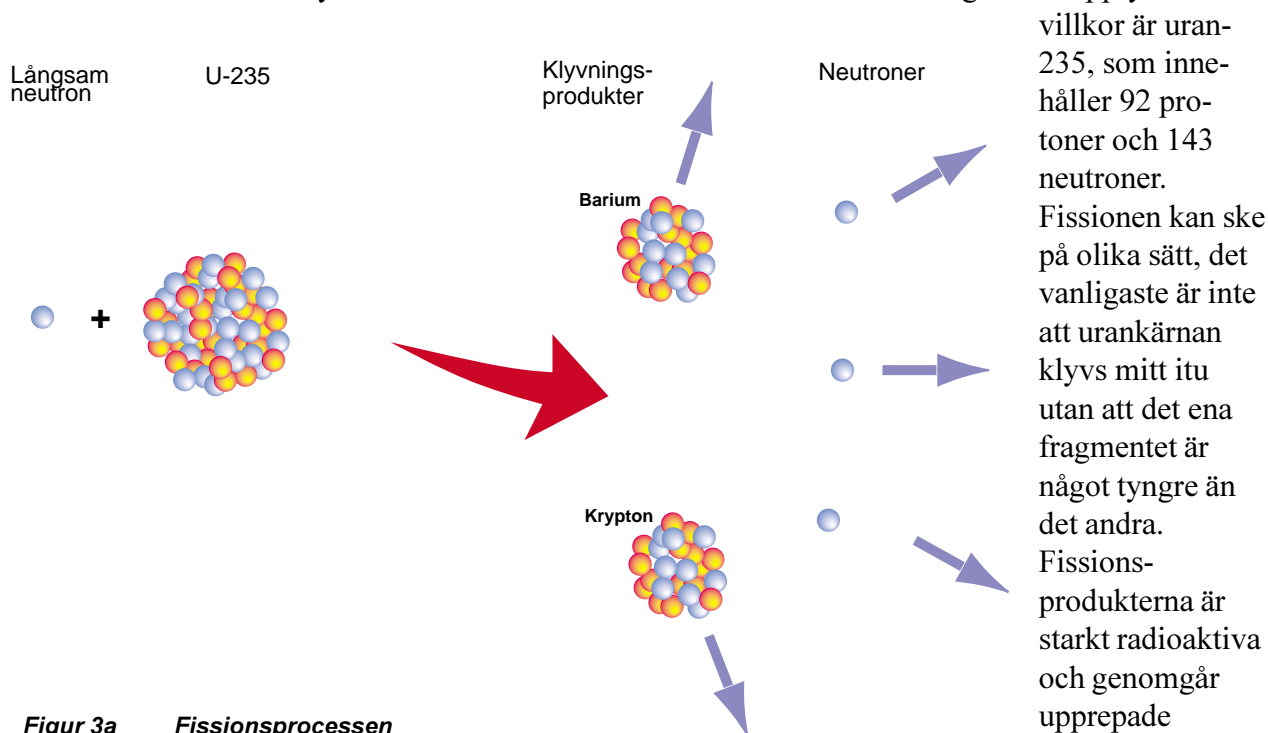
Efter upptäckten av neutronen 1932 började man undersöka dess användning som projektil vid kärnbombardemang. Neutronen har fördelen att vara elektriskt neutral och hindras därför inte av coulombbarriären att tränga in i kärnan. Neutronen påverkas inte heller nämnvärt av atomernas elektronhöljen och har därför stor genomträngningsförmåga jämfört med laddade partiklar.

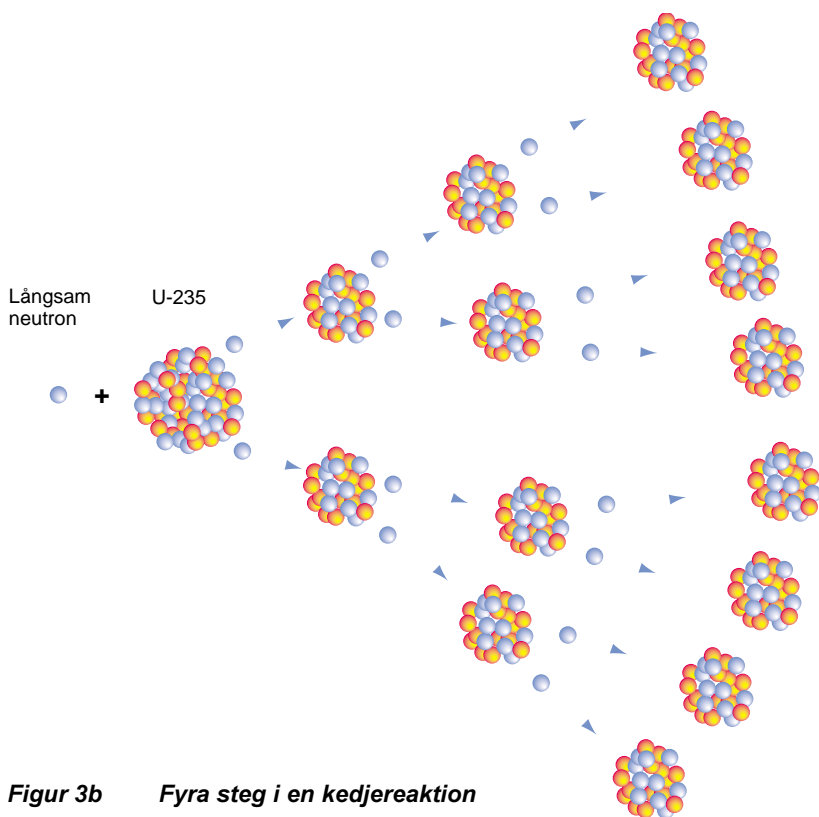
Fria neutroner förekommer inte i naturen eftersom de normalt är bundna i atomkärnor. Vill man använda neutroner som projektiler måste man först frigöra dem genom primära kärnreaktioner. En klassisk neutronkälla är radiumberyllium-källan. Den använder sig av heliumkärnor (s k alfapartiklar) som naturligt utsänds från radium till att beskjuta berylliumkärnor, varvid neutroner frigörs.

Vid undersökning av kärnreaktioner mellan neutroner och uran gjorde tyskarna Hahn och Strassmann 1938 en upptäckt som österrikarna Meitner och Frisch senare samma år tolkade som klyvning eller fission av urankärnan. Som ovan sagts leder en sådan fission till energiutveckling. I och för sig var det inte så märkligt, även om den frigjorda energin per fissionsreaktion var ovanligt stor; man hade ju redan tidigare åstadkommit åtskilliga kärnreaktioner med energiutveckling.

Det från praktisk synpunkt väsentliga var att man snart kunde påvisa att två å tre nya neutroner utsändes samtidigt med fissionen. Tack vare detta kunde man kanske åstadkomma en kedjereaktion i uranet och därmed ett förlopp som gav möjlighet till utvinning av kärnenergi i stor skala. Problemet var att söka ordna så att av de utsända två å tre neutronerna åtminstone en kunde fås att åstadkomma en ny fission, varefter de vid denna fission i sin tur frigjorda neutronerna återigen minst en förde reaktionen vidare etc., se figur 3a och 3b.

Alla tunga kärnor kan klyvas om de bombarderas med neutroner av tillräckligt hög hastighet, men bara sådana som innehåller ett udda antal neutroner är lätt klyvbara. Det enda i naturen förekommande atomslaget som uppfyller detta





**Figur 3b** Fyra steg i en kedjereaktion

omvandlingar under utsändande av strålning tills de slutligen blir stabila.

När en urankärna klyvs frigörs en energi av drygt 200 miljoner elektronvolt (MeV). En elektronvolt (eV) är den energienhet som vanligen används inom atomfysiken. Den är lika med den energi en elektron får om den genomlöper ett spänningsfall på en volt.

Mätt med vardagens mått är 1 eV en ofattbart liten enhet eller närmare bestämt  $1,60 \times 10^{-19}$  wattsek (joule). Vid varje fission frigörs således  $200 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} = 3,2 \times 10^{-11}$  wattsek, dvs det behövs  $3,1 \times 10^{10}$  fissioner per sekund för att producera en effekt av 1 watt.

Men om man betänker att 1 kg kärnbränsle innehåller cirka  $2,5 \times 10^{24}$  uranatomer, följer att om samtliga kärnor klyvs så frigörs inemot 23 miljoner kilowattimmar.

Uttryckt på annat sätt är den energi som produceras vid fullständig fission av 1 kg uran är likvärdig med den som erhålls vid förbränning av 2,7 miljoner kg kol. I dagens lättvattenreaktorer utnyttjas dock bara en bråkdel av uranet, så att 1 kg naturligt uran i praktiken är ekvivalent med ungefär 16 000 kg kol.

Större delen av den energi som frigörs vid fission är rörelseenergi hos fissionsprodukterna. De har mycket kort räckvidd och stannar i uranet inom någon millimeter från platsen för fissionen. Rörelseenergin omvandlas till ett slags friktionsvärme som gör att uranbränslet blir hett. Det är denna värme som överförs till ett kylmedium och utnyttjas till att alstra ånga och driva en turbogenerator för elproduktion i ett kärnkraftverk.

Neutronerna som utsänds vid fission har en genomsnittlig energi av ungefär 2 MeV, vilket motsvarar en hastighet av 20 000 km/s. En bråkdel av neutronerna utsänds inte omedelbart vid fission utan först något senare i samband med vissa fissionsprodukters sönderfall. Dessa fördröjda neutroner har en avgörande betydelse för möjligheten att hålla kedjereaktionen under kontroll.

## Neutrontvärsnitt

En neutron som sänds ut vid fission går i genomsnitt bara någon centimeter innan den kolliderar med en atomkärna. Då kan olika processer inträffa beroende på neutronens energi och atomslaget. För tunga atomslag, speciellt uran-235, kan en ny fission äga rum, men för andra kärnor sker antingen absorption eller spridning av neutronen. Vid absorption övergår den träffade kärnan till en tyngre isotop av atomslaget ifråga, som oftast är radioaktiv och omvandlas under utsändning av strålning. Vid spridning studsar neutronen, ungefär som en biljardboll, mot målkärnan och förlorar energi, mera ju lättare denna är.

Sannolikheten att den ena eller den andra processen skall inträffa bestäms genom experiment. Man skulle vänta sig att atomkärnans genomskärningsyta, som är av storleken  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>, vore ett mått på träffytan. I själva verket kan träffytan vara många gånger större men också mycket mindre än vad som svarar mot genomskärningsytan. Man talar därför om en effektiv träffyta eller tvärsnitt. Enheten för tvärsnitt är "barn", där 1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup> (efter eng. barn = lada, "as big as a barn"). Den bok där alla neutrontvärsnitt finns samlade kallas följdriktigt för "barnboken".

Neutroner som utsänds vid fission har hög hastighet och betecknas som snabba neutroner. Genom spridningskollisioner med lätta atomkärnor bromsas neutronerna. Genom upprepade kollisioner förlorar neutronerna mer och mer energi och kommer till slut i jämvikt med de bromsande atomernas värmerörelse, om de inte dessförinnan absorberats. Man talar då om termiska neutroner, vars medelenergi således bestäms av det bromsande mediets temperatur. Vid rumstemperatur är denna medelenergi 0,0253 eV, vilket motsvarar en neutronhastighet av 2200 m/s, ungefär som en gevärskula.

Tvärsnitten för de flesta ämnen uppvisar stora variationer med energin hos neutronerna. Absorptions- och fissionstvärsnitten är i allmänhet ungefär 100 gånger större för termiska än för snabba neutroner, medan spridningstvärsnitten är ungefär konstanta. För vissa energier mellan de snabba och termiska områdena antar absorptionstvärsnitten mycket höga värden, karakteristiska för s k resonanser i atomkärnans inre energi. Man talar om då om resonansabsorption. Resonansabsorption i uran-238 är en betydande källa till neutronförlust i en reaktor.

Som nämnts är uran-235 den enda i naturen förekommande lätt klyvbara atomen. Med lätt klyvbar eller fissil menas att den kan klyvas av termiska neutroner. Uran-235 förekommer till 0,71 % i naturligt uran, medan resten huvudsakligen är uran-238. Uran-238 är inte fissil men kan, liksom många andra tunga ämnen, klyvas av snabba neutroner. Tvärsnittet för sådan snabb fission är alltför lågt i jämförelse med konkurrerande processer för att man på denna grund skall få till stånd en självunderhållande kedjereaktion i naturligt uran.

När en neutron absorberas i uran-238 bildas uran-239, som är instabil och omvandlas till neptunium-239 som i sin tur övergår till plutonium-239. Neptunium och plutonium är konstgjorda grundämnen med atomnummer 93 och 94. De kallas transuraner därför att de kommer närmast efter uran i det periodiska systemet. Omvandlingen av neptunium-239 till plutonium-239 sker spontant på i genomsnitt några tiotal minuter under utsändning av strålning. Plutonium-239 är liksom uran-235 fissil och därför ett värdefullt kärnbränsle.

## Kriticitet

En första förutsättning för att en nukleär kedjereaktion skall kunna hållas igång är att minst en av de vid varje fission utsända neutronerna kan åstadkomma en ny fission. Det är en betydande svårighet därför att neutronerna mycket lätt går förlorade genom andra processer än fission. Den viktigaste orsaken till förluster är absorption men i varje ändligt system förekommer också förluster till omgivningen, dvs läckning av neutroner.

Neutronförlusten genom läckning är i stort sett proportionell mot systemets begränsningsyta och ökar därför när systemets volym ökar. Samtidigt ökar också vid i övrigt oförändrade förhållanden produktionen av neutroner i systemet i ungefär samma proportion som systemets volym växer. Det som har betydelse för neutronhushållningen är den relativa neutronförlusten, dvs. förhållandet mellan läckning och produktion, som följaktligen förhåller sig ungefär som systemets yta till dess volym. Denna kvot minskar när systemets volym ökar. Alldeles oavsett hur man valt sammansättningen hos det system där man vill åstadkomma en kedjereaktion finns det därför alltid en viss minsta storlek för att en självunderhållande reaktion skall komma igång. Denna storlek hos systemet kallas den kritiska storleken.

Vid exakt kriticitet är neutronproduktionen i systemet precis lika med neutronförlusterna. Om produktionen är större än förlusterna säger man att systemet är överkritiskt. På motsvarande sätt betecknar som underkritiskt ett system som inte av sig självt kan underhålla en kedjereaktion. Eftersom tiden för en neutron som utsänds vid fission att åstadkomma en ny fission endast är en bråkdel av en sekund, behöver det bara finnas någon procents överskott eller underskott på neutroner för att kedjereaktionen mycket snabbt skall växa eller avstanna.

I ett kärnvapen strävar man efter att åstadkomma ett avsevärt överkritiskt system. Härvid sammanförs två eller fler stycken var för sig underkritiska delar som tillsammans bildar ett överkritiskt system. Därefter försöker man hålla samman systemet så länge som möjligt för att energiutvecklingen skall bli så kraftig som möjligt. Det leder då till en explosion.

I en reaktor måste man hela tiden hålla kedjereaktionen under kontroll, dvs. man får se till att reaktorn vid drift hela tiden är exakt kritisk och låta den vara obetydligt överkritisk respektive underkritisk endast vid de tillfällen man vill öka eller minska effekten, såsom vid start eller avstängning. Regleringen av reaktoreffekten möjliggörs av de fördröjda neutronerna och åstadkoms i första hand genom ökning eller minskning av neutronabsorptionen i reaktorn.

## Moderatormaterial

I ett stycke naturligt uran kan man inte få till stånd en självunderhållande kedjereaktion hur stor volym man än tar till, beroende på att absorptionen i uran-238 är större än neutronproduktionen i uran-235 vid de energier fissionsneutronerna har. Ett sätt att kringgå denna svårighet är att bromsa neutronerna. Då ökar sannolikheten för fission i uran-235. Visserligen ökar också absorptionstvärsnittet för uran-238 med minskande neutronenergi, men fissionstvärsnittet för uran-235 ökar relativt sett mera, så att betingelserna för en kedjereaktion blir gynnsammare.

För att åstadkomma denna bromsning av neutronerna blandar man upp uranet med en s k moderator. Enligt vad som tidigare sagts sker neutronbromsning mest effektivt med lätta atomer. Av mekanikens lagar följer att urankärnorna själva med en massa som är mer än 200 gånger så stor som neutronens är praktiskt taget helt överksamma som moderatorkärnor, medan det vore idealiskt om man kunde använda en moderator, vars atomkärnor hade samma massa som neutronen, dvs. som enbart innehöll väteatomer. Det första praktiskt användbara material som då kan komma ifråga är vanligt vatten. Sett från nedbromsningssynpunkt är också vatten det bästa moderatormaterial som finns. Det behövs i medeltal 118 kollisioner med vätekärnor för att bromsa en neutron till termisk energi från den energi den har när den utsänds vid fission. Därvid tillryggalägger neutronen knappt 6 cm från platsen för fission.

Man måste emellertid också ta hänsyn till att man genom moderatormaterialet tillfört ytterligare en källa till absorption av neutroner. Tyvärr absorberar vätekärnor neutroner ganska lätt, så att det varken med vatten eller med något annat vätehaltigt material är möjligt att åstadkomma en praktiskt användbar kedjereaktion med naturligt uran. Man får därför gå till tyngre atomkärnor än väte. Närmast till hands ligger då den näst tyngsta atomkärnan, dvs. den tunga vätekärnan och användning av tungt vatten som moderator. Där är absorptionen av neutroner mycket liten, och tungt vatten är därför en utmärkt moderatorsubstans som går att kombinera med naturligt uran till en reaktor. Tungt vatten ingår till ungefär 0,015 % i naturligt vatten och kan framställas därur genom någon separationsprocess som utnyttjar de små olikheter i egenskaper som finns mellan lätt och tungt vatten.

Jämte tungt vatten är det bara kol i form av grafit som har fått praktisk användning som moderatormaterial i samband med naturligt uran. Kolkärnan har masstalet 12 och är därmed från bromsningssynpunkt en avsevärt sämre moderator än tungt vatten. Det behövs i genomsnitt 114 kollisioner med kol mot 25 med deuterium för att bromsa ner en fissionsneutron till termisk energi. Ren grafit har också ett högre absorptionstvärsnitt än tungt vatten. Den kritiska storleken för en grafitreaktor blir därför större än för en tungvattenreaktor. Å andra sidan är grafit ett betydligt billigare material och mera lättillgängligt i naturen. Det var därför förklarligt att den första nukleära kedjereaktionen åstadkoms med naturligt uran som bränsle och grafit som moderator i Fermi-reaktorn i Chicago 1942.

# Fermi-reaktorn

Uppbyggnaden av den första kärnreaktorn beskrivs i en artikel av Walter Zinn [1], som själv medverkade i arbetet. Några huvuddata för reaktorn är sammanställda i tabell 1.

**Tabell 1**     *Data för Fermi-reaktorn*

<b>Reaktortyp</b>	Grafitmodererad natururanreaktor, ökyld och oskärmad
<b>Reaktoreffekt</b>	Max 200 watt värme
<b>Plats</b>	West Stands, Chicago, Illinois, USA
<b>Byggstart</b>	Oktober 1942
<b>Första kriticitet</b>	15.25 den 2 december 1942
<b>Nedmonterad</b>	Mars 1943
<b>Form och dimension</b>	Tillplattad rotationsellipsoid, höjd 618 cm, diameter 776 cm
<b>Bränslepositioner</b>	22 000 hål i grafiten med 8,25 cm diameter
<b>Hålavstånd</b>	20,95 cm
<b>Bränsleladdning</b>	5630 kg metalliskt uran 32 900 kg UO <sub>2</sub> 3690 kg U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
<b>Moderator</b>	57 lager grafit, vardera 10,48 cm högt 40 000 bitar 10,48x10,48x41,91 cm Vikt 385 500 kg inkl reflektor

Bränsleform	Antal	Material	Höjd	Diameter	Vikt
Cylinder	2060	U-metall	5,72 cm	5,72 cm	2,72 kg
Cylinder	840	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7,62	7,62	1,80
Cylinder	540	UO <sub>2</sub>	7,62	7,62	2,07
Pseudosfär*	14840	UO <sub>2</sub>	8,26	8,26	2,14
Pseudosfär	1200	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8,26	8,26	1,81

\* En pseudosfär är en cylinder med 8,26 cm höjd och diameter, där ändarna skurits av i 45 graders vinkel

Det är instruktivt att beskriva en neutrons livshistoria i reaktorn. När en snabb neutron sänds ut vid fission kan följande hända:

Det finns en liten chans att neutronen absorberas av uran innan dess energi har avsevärt minskats. Om det sker, kan det hända att urankärnan klyvs. Men sannolikheten för sådan snabb fission är vanligen bara någon procent. Om systemet innehåller mycket grafit kommer kollisioner med kolkärnor att snabbt bromsa neutronen till energier under den gräns, vid cirka 0,1 MeV, där fission av uran-238 inte längre är möjlig.

I det stora flertalet fall absorberas inte neutronen som snabb utan förlorar energi genom kollisioner med kolkärnor. Som ovan sagts behövs drygt hundra-talet kollisioner för att bromsa neutronen till termiska energier. Under bromsningen kan det hända att neutronen går förlorad genom resonansabsorption i uran-238. Det är ett av reaktorfykikens viktigaste problem att konstruera reaktorn så, att resonansabsorptionen i uran blir så liten som möjligt under bromsningen.

Om neutronen inte absorberas under bromsningen, når den så småningom termisk energi, där den till slut absorberas av antingen uran eller kol. Om uranet och kolet vore homogent blandade skulle sannolikheten för dessa processer stå i proportion till absorptionstvårsnittet för uran och kol multiplicerade med de atomära koncentrationerna.

När man konstruerar ett kedjereagerande system vill man ha så stor absorption i uran som möjligt av termiska neutroner samtidigt som resonansabsorptionen skall vara så liten som möjligt. Men dessa krav är motstridiga, eftersom man för att öka den termiska absorptionen vill ha ett uranrikt system, medan å andra sidan ett system som innehåller en relativt liten mängd moderator får en ineffektiv bromsning och därför en stor chans för resonansabsorption. Uppenbarligen får man söka ett optimalt förhållande mellan moderator och uran.

I stället för att blanda uranet och kolet homogent kan man försöka hitta en mera gynnsam fördelning av de båda komponenterna. Det visar sig vara möjligt i betydande grad tack vare följande omständighet. Neutrontvårsnittet för resonansabsorption i uran under nedbromsningen har mycket skarpa toppar. Om man därför fördelar uranet i klumpar i kolet, kan man vänta sig att uranet i det inre av en klump kommer att vara skärmat av ett tunt ytlager för neutroner med en energi nära en resonansstopp, eftersom nästan alla neutroner med den energin kommer att absorberas av uranatomerna i ytskiktet. Resonansabsorptionen för en uranatom inuti klumpen blir därför mycket mindre än för en ensam atom.

Givetvis kommer självabsorptionen i en klump att reducera inte bara resonansabsorptionen utan också absorptionen av termiska neutroner i uranet. Men man kunde tidigt visa teoretiskt och bekräfta genom experiment att vinsten genom den minskade resonansabsorptionen vida överstiger förlusten genom den försämrade absorptionen av termiska neutroner.

En termisk neutron som absorberas i uran kan antingen leda till fission eller gå förlorad genom ren absorption utan fission. Sistnämnda process kallas infångning. Om neutronen absorberas i uran-235 leder det i flesta fall till fission, varvid i medeltal 2,5 nya neutroner emitteras, men den kan också infångas utan fission. Absorption i uran-238 leder däremot till ren infångning.

Naturligt uran är en blandning av de båda atomslagen. Antalet neutroner som emitteras per absorption i naturligt uran beror därför på tvärsnittet för de olika processerna. Dessa var inte kända med tillräcklig noggrannhet under den första tiden efter upptäckten av fission. Det var därför i början en öppen fråga om en självvunderhållande kedjereaktion överhuvudtaget var möjlig med naturligt uran. Antalet emitterade neutroner per absorption, det så kallade  $\eta$ -värdet, måste ju med god marginal vara större än 1.

$\eta$ -värdet för termiska neutroner i uran är den kanske viktigaste naturkonstanten inom reaktorfysiken. Fermi bedömde på ett tidigt stadium innan ännu tillräckligt noggranna mätningar fanns att  $\eta$ -värdet för naturligt uran var ca 1,3, vilket visade sig vara en förbluffande god uppskattning. Senare mätningar har visat att värdet är 1,326 vid 0,0253 eV. Man kan säga att Fermi-reaktorns största betydelse låg i att den bevisade att en kedjereaktion var möjlig med naturligt uran.

## Anriktat uran

Eftersom det är uran-238 i det naturliga uranet som gör det svårt att få igång en självunderhållande kedjereaktion kan man förbättra villkoren genom att avlägsna uran-238 och anrika uranet på uran-235. Sådan anrikning kan ske på flera sätt som utnyttjar små skillnader i fysikaliska egenskaper hos uranisotoperna. På grund av den relativt ringa skillnaden i massa blir dock separationsprocessen mycket energikrävande och därmed dyrbar.

Anriktat uran underlättar i hög grad möjligheterna att få igång en kedjereaktion. Man kan således utan tillsats av moderatormaterial och med endast kilogramkvantiteter höganriktat uran uppnå kritisk storlek och t o m starkt överkritiska system, såsom i kärnvapen. På grund av frånvaron av moderator arbetar sådana system med snabba neutroner.

För reaktortekniken innebär tillgången till anriktat uran en större valfrihet ifråga om moderator, konstruktionsmaterial och kylmedel. Vanligt vatten kan med fördel användas som moderator och kylmedel. I dagens kraftproducerande lättvattenreaktorer är anrikningsgraden i färskt bränsle 3-4 % uran-235.

## Lättvattenreaktorer

I Fermi-reaktorn var uranet fördelat i cylindriska eller nära sfäriska klumpar inbäddade i grafit i ett kubiskt mönster. Reaktorns effekt var mycket låg, maximalt 200 watt, varför ingen särskild kylning krävdes. I kraftproducerande reaktorer är bränslet ordnat i form av stavar eller stavknippen i moderatorn. En sådan anordning har något sämre neutronekonomi än ett kubiskt arrangemang men gör det lättare att kyla bränslet, vilket är nödvändigt för praktiska tillämpningar.

I en typisk lättvattenreaktor har bränslet formen av kvadratiske stavknippen, bränslepatroner, som bildar ett regelbundet mönster i vanligt vatten som tjänstgör både som moderator och kylmedel. Bränslepatronerna och moderatorn/kylmedlet utgör tillsammans reaktorns härd. Bränslestavarna är kapslade i rör som skall förhindra direkt kontakt mellan bränsle och kylmedel, då ogynnsamma kemiska reaktioner skulle kunna inträffa och radioaktiva fissionsprodukter komma ut i kylmedlet. Själva bränslet är urandioxid,  $UO_2$ , och kapslingsmaterialen en lågabsorberande zirkoniumlegering, Zircaloy.

I härden finns styrostavar för reglering av reaktorns effekt. Styrostavarna innehåller högabsorberande material. Deras funktion är dubbel: de skall kunna hålla reaktorn precis kritisk vid normal drift och stänga av den vid behov och hålla den avställda reaktorn säkert underkritisk.

Härden omges av en reflektor av vatten, vars uppgift är att sprida tillbaka neutroner till härden och därmed minska neutronläckningen. Härd och reflektor är inneslutna i en trycktank av stål. Reaktortanken är omgiven av en strålskärm av betong som dämpar och absorberar den strålning som härrör dels från själva fissionsprocessen, dels från sekundärt aktiverade konstruktionsmaterial i reaktorn.

Vid bränslets bestrålning med neutroner under reaktordriften förändras dess sammansättning. Uran-235 förbrukas, plutonium byggs upp och fissionsprodukter bildas. Som ett mått på bestrålningen används vanligen energiutveck-

lingen per vikt bränsle, den specifika utbränningen. Förändringarna i bränslesammansättningen leder till att härdens kedjereagerande förmåga försämras, framför allt genom att förbrukningen av fissila atomer är större än nyproduktionen, men också på grund av ökande neutronförluster genom absorption i fissionsprodukter. Så småningom kan reaktorn inte längre hållas kritisk. Man har då nått gränsen för bränslets fysikaliska utbränning.

Bildningen av fissionsprodukter liksom även den direkta inverkan av snabba neutroner på atomerna i bränsle och kapsling innebär förändringar i material-egenskaperna. Vid fission uppstår ju två atomer i stället för en, vilka tar upp större plats i atomgittret. Vissa fissionsprodukter är gasformiga och ger ett inre övertryck i bränslet som kan ge dimensionsförändringar med i värsta fall kapslingsbrott som följd. Den gräns till vilken bränsle kan bestrålas utan att fissionsprodukter kommer ut i kylvattnet eller att bränslestavar på annat sätt mekaniskt förstörs kallas den metallurgiska utbränningen. Den sammanhänger intimt med bränslets konstruktion.

Det finns två typer av lättvattenreaktorer: kokvattenreaktorer och tryckvattenreaktorer. I en kokvattenreaktor tillåts vattnet att koka i härdens. Ångan leds till en turbin som driver en elgenerator. I en tryckvattenreaktor är hela reaktortanken fylld med vatten av så högt tryck att det inte kokar. Ånga alstras i särskilda ånggeneratorer utanför själva reaktorn, vilket kräver dubbla kylkretsar.

Både för tryckvattenreaktorn och kokvattenreaktorn ges ångan till turbinen en temperatur av ungefär 285 °C och ett tryck av cirka 7 MPa. Tvåkretssystemet i tryckvattenreaktorn medför, på grund av temperaturskillnaden över ånggeneratortank, att reaktorvattnets temperatur blir högre än i kokvattenreaktorn. I praktiken är utgående vattentemperatur cirka 320 °C och driftrycket drygt 15 MPa i en typisk tryckvattenreaktor. Dessa data bestäms egentligen genom valet av Zircaloy som kapslingsmaterial, vilket begränsar kapslingens temperatur till cirka 350 °C för att man skall undvika skador på kapslingen.

I Sverige finns numera åtta kokvattenreaktorer (BWR, Boiling Water Reactor) levererade av ABB-Atom och tre tryckvattenreaktorer (PWR, Pressurized Water Reactor) av det amerikanska företaget Westinghouses konstruktion. I tabell 2 har några data för kokvattenreaktorn Forsmark 3 och tryckvattenreaktorn Ringhals 4 sammanställts.

Figur 4 visar reaktortanken med härd och interna delar för en kokvattenreaktor av Forsmark-typ. Man ser härdens styrstavar som går in underifrån. Vid normal drift står vattennivån ovanför härdens övre kant. Blandningen av kokande vatten och ånga leds till ångseparatorer ovanför härdens där ångan avskiljs. Den torkas i fuktavskiljare och leds till turbinen. Den ånga som avleds ersätts med matarvatten som blandas med det vatten som kommer från ångavskiljarna och strömmar ner i spalten mellan moderatortanken och reaktortanken. Det pumpas upp genom härdens igen med de interna cirkulationspumparna i botten av reaktortanken. Härdstrilen ovanför härdens är till för att förse härdens med kylvatten om den ordinarie kylningen skulle strejka.

## Slutord

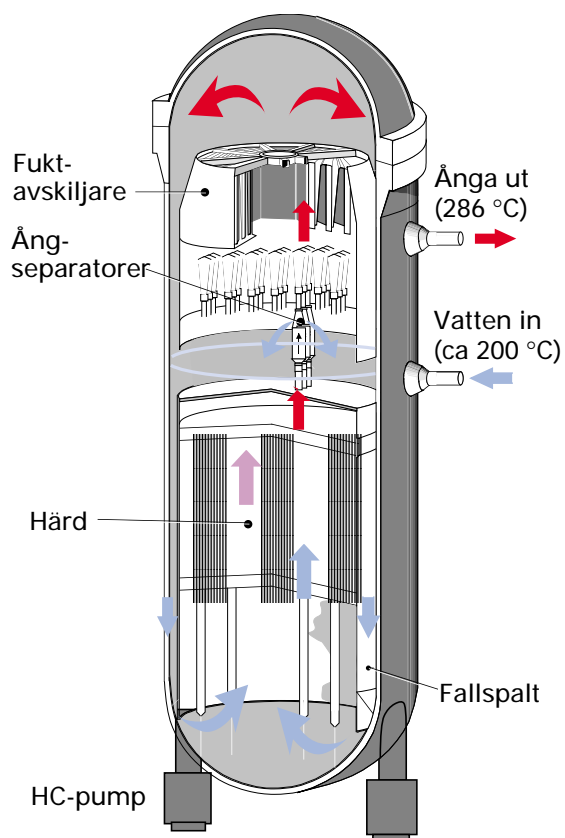
Principerna för hur kärnenergi kunde frigöras i stor skala stod klara redan kort tid efter upptäckten av fissionsreaktionen 1938. Den grundläggande reaktorteorin utvecklades i USA under de första krigsåren, främst av en handfull europeiska emigranter: Enrico Fermi, Leo Szilard, Edward Teller och Eugene Wigner, tre av dem märkligt nog från Ungern. Det praktiska genomförandet krävde ökade kunskaper om kärnfysikaliska grunddata och tillgång till delvis nya material av en dittills ouppnådd renhet. Problemen löstes på relativt kort tid genom en massiv insats av forskare och tekniker inom ett projekt, som kom att inte bara förändra den politiska maktstrukturen i världen utan också öppna möjligheter till en praktiskt taget ousinlig energikälla för fredligt bruk. Det stämmer till eftertanke att skillnaden mellan framgång och misslyckande hängde på värdet av några kärnfysikaliska naturkonstanter. Dessbättre visade sig naturen gynnsam.

## Referenser

- 1 W H Zinn; The first nuclear chain reactor, 50 Years with Nuclear Fission, American Nuclear Society, 1989. Svensk översättning i Kärnenergi 50 år, IVA, Föreningen Kärnteknik, Tekniska museet, 1992
- 2 E Fermi; Elementary theory of the chain-reacting pile, Science Vol 105, January-June 1947

Tabell 2 Några data för Forsmark 3 och Ringhals 4

Parameter	Enhet	Forsmark 3	Ringhals 4
Reaktortyp		BWR	PWR
Eleffekt	MWe	1158	915
Värmeeffekt	MWt	3300	2783
Ångflöde	kg/s	1780	1521
Kylflöde	kg/s	12100—13100	12860
Drifttryck	MPa	7,0	15,5
Bränslevikt	ton U	126,3	72,4
Antal bränslepatroner		700	157
Antal stavpositioner per patron		Upp till 100	264
Bränslelängd	mm	3750	3658
Stavdiameter	mm	9,62	9,5
Antal styrvastavar		169	48
Reaktortank			
höjd	m	20,8	13,0
diameter	m	6,4	3,99
vägg tjocklek	mm	150	200
vikt	ton	760	330



Figur 4 Reaktortank med interna delar för en kokvattenreaktor av Forsmarktyp