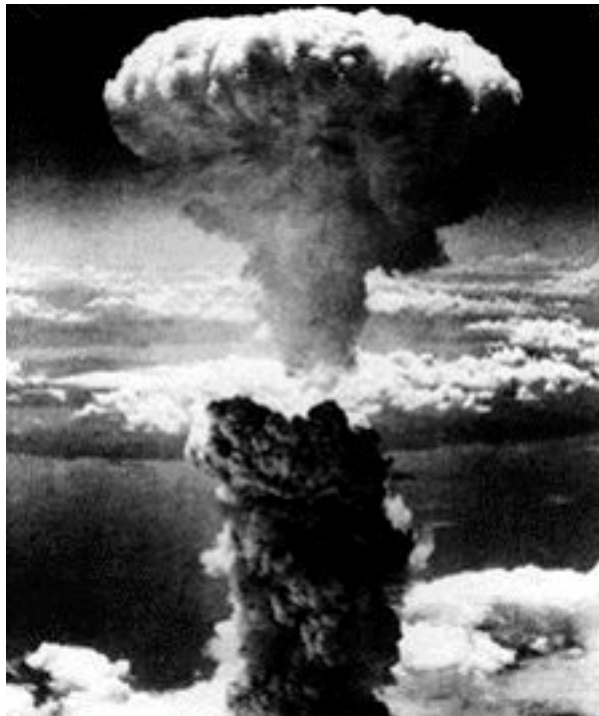


Fysikkprosjekt Elektrisitet og Magnetisme
Høsten 2004

Atombombe

Historikk, teori og fysiske virkninger



Arne Skodvin Kristoffersen og Henrik Hemmen

Innholdsfortegnelse

<u>Innledning</u>	3
<u>Historikk</u>	3
Veien til atombomben	3
Einsteins brev til Roosevelt	5
Manhattanprosjektet	7
Trinity	9
Andre atomprogram	9
<u>Fisjonsteori</u>	10
Kort om fisjon	10
Mer omfattende om fisjon	10
Kjedereaksjoner ved fisjon	13
Kritisk masse	13
Anriket brennstoff	14
<u>Atombombers oppbygning</u>	17
Little Boy	17
Fat Man	19
H-bombe	19
<u>Følgene av en atomeksplosjon</u>	20
Elektromagnetisk Puls (EMP)	20
EMP-effekter ved detonasjon nær bakken.	22
EMP-effekter ved detonasjon utenfor atmosfæren	23
Noen andre konsekvenser ved detonasjon av atombomber	25
<u>Oppsummering</u>	26
<u>Bibliografi</u>	27

Innledning

Kjernefysiske våpen har siden 1945 vært menneskenes farligste våpen. Supermaktenes atomvåpenarsenal kan utslette alt menneskelig liv, men virker samtidig så avskrekkende at det hindrer nye verdenskriger. Vi vil i dette prosjektet se på historien bak utviklingen av atomvåpen og teorien som ligger bak. Vi greier ut om de kjernefysiske prosessene bak fenomenet og ser på et par prinsippskisser for forskjellige atombombeopsett. Vi har også gått nærmere inn på de elektromagnetiske effektene ved en atombombesprengning, og avslutter med en betraktning rundt navnet atombombe.

Historikk

Veien til atombomben

Man kan kanskje si at veien til atombomben startet i 1919 da den New Zealandske fysikeren Ernest Rutherford gjennomførte den første kunstige transmutasjon av et grunnstoff da han forandret flere nitrogenatomer til oksygenatomer i et forsøk utført ved universitetet i Manchester (Rutherford jobbet på Cavendish-laboratoriet ved universitetet i Cambridge, men utførte eksperimentet i Manchester). Rutherford oppdaget en høyenergipartikkel med positiv ladning som viste seg å være en hydrogenkjerne. Proton, som denne subatomære partikkelen ble kalt, fikk i 1932 selskap av nøytron, etter oppdagelse av James Chadwick. Nøytronet fikk sitt navn fordi det ikke har en elektrisk ladning. Før oppdagelsen av nøytronet hadde man problemer med å forstå at et grunnstoff kunne forekomme med forskjellig masse, selv om de hadde likt antall protoner og elektroner, men Chadwicks oppdagelse forklarte dette mysteriet. De forskjellige variantene av et grunnstoff, med samme protontall og elektrontall, men med forskjellig nøytrontall, ble kalt isotoper. De tre mest vanlige isotopene av uran, for eksempel, er $^{234}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ og $^{238}_{92}\text{U}$. De har alle 92 protoner i kjernen, og 92 elektroner i baner rundt, men henholdsvis 142, 143 og 146 nøytroner i kjernen.

1932 var et godt år for atomfysikk, for i tillegg til oppdagelsen av nøytronet, ble engelskmannen J.D. Cockroft og iren E.T.S. Walton de første som klarte å dele et atom. Dette ble gjort ved å bombardere litium med protoner generert av en partikkelakselerator. Resultatet ble at en litiumkjerne ble delt til to heliumkjerne. Dette forsøket ble utført på Cavendish-laboratoriet ved universitetet i Cambridge.



Lawrence, Seaborg og Oppenheimer ved kontrollpanelet til Lawrences syklotron

Partikkelakseleratorer skulle spille en viktig rolle i atomfysikken. Det var nødvendig å akselerere en partikkel til en meget høy hastighet for at den skulle kunne penetrere en atomkjerne og dele kjernen.

Kanskje den mest kjente partikkelakseleratoren er Ernest Lawrences *syklotron*, som han oppfant rundt 1930 (og fikk nobelprisen for i 1939).

Denne maskinen akselererte partikler ved hjelp av en høyfrekvensspenning plassert i et magnetfelt. Den første maskinen var bare 10 cm i diameter, mens en maskin bygget noe senere med diameter 25 cm kunne akselerere partikler til en energi på omtrent 1MeV.

Et problem med syklotroner på 1930-tallet var at de brukte positivt ladete protoner og alfapartikler. Alfapartikler er heliumkjerner, bestående av to protoner og to nøytroner, og kan skrives som He^{2+} . Disse møtte en naturlig motstand i målet, som var positivt ladete atomkjerner. Selv de kraftigste syklotroner på denne tiden kunne akselerere partikler slik at de anslagsvis bare traff atomkjernen en av en million ganger. Dette problemet gjorde at fysikere, selv om de forstod at dette var et meget viktig område å forske på, ble mer eller mindre oppgitt over de enorme energimengdene som måtte til for å oppnå så lite.



Enrico Fermi bidro med både teoretisk og praktisk arbeid til utviklingen av kjernefysikken

Løsningen kom i 1934, da den italienske fysikeren Enrico Fermi begynte å akselerere nøytroner og sende dem inn i atomkjerner istedenfor protoner. Men Fermi hadde ikke tenkt på Einsteins berømte masse/energi-relasjon $E = mc^2$. Nøytronene kolliderte med kjernene med så stor fart at store deler masse ble erstattet av energi. Fermi og hans kolleger bombarderte i et forsøk 63 stabile kjerner, og produserte 37 nye radioaktive kjerner! Da fant de ut at nøytronene måtte dempes på en eller annen måte før de nådde kjernene. Fermi oppdaget at både karbon og hydrogen fungerte som *moderatorer*, for å få farten til nøytronene ned slik at de ville oppholde seg lengre i nærheten av kjernene og dermed ha større sjanse for å bli oppfanget.

Et grunnstoff Fermi sendte nøytroner mot var uran, som på denne tiden var det tyngste grunnstoffet man kjente. Forskere var uenige om hva Fermi egentlig hadde oppnådd med sine forsøk med uran. Noen mente at han ikke hadde oppnådd annet enn å lage *transuranske stoffer* (*transuranske stoffer er elementer som blir produsert ved partikkelbombardement av uran, for eksempel plutonium og neptunium*), mens andre påpekte at de kjemiske egenskapene til sluttproduktene lignet lettere stoffers egenskaper. Fermi selv var usikker, og de nærmeste årene kastet flere og flere forskere seg inn i kampen om å finne løsningen på dette problemet. Ved juletider 1938 kom svaret, fra det nazistiske Tyskland.

De tyske radiokjemikerne Otto Hahn og Fritz Strassmann bombarderte forskjellige stoffer med nøytroner i laboratoriet sitt i Berlin, og gjorde en bemerkelsesverdig oppdagelse. Mens atomkjerner vanligvis bare forandret seg i liten skala ved et slikt nøytronbombardement, skjedde det noe oppsiktsvekkende når uran ble utsatt for samme forsøk. Urankjernene forandret seg radikalt, og delte seg opp i to omtrent like store kjerner. Disse nye kjernene var ikke transuranske elementer slik mange trodde Fermi hadde produsert, men var faktisk radioaktive bariumisotoper. Og som andre hadde påpekt ved Fermis forsøk, lignet ikke bare sluttproduktene lettere stoffer, de var også det. Men den viktigste oppdagelsen i forsøkene til Hahn og Strassmann var allikevel at sluttproduktene hadde mindre masse enn den

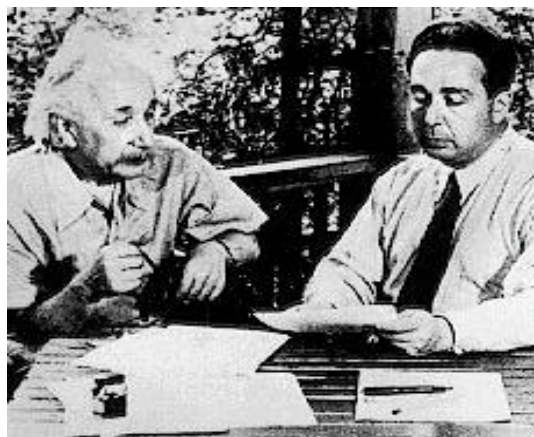
opprinnelige. Konklusjonen var at den manglende massen måtte ha blitt omgjort til energi ifølge Einsteins berømte relasjon. Lise Meitner og hennes nevø Otto Frisch satte i gang med det teoretiske arbeidet og kom snart frem til at så mye energi hadde blitt frigjort, at man hadde oppdaget et helt nytt fenomen. Meitner ga prosessen navnet *fisjon*, som opprinnelig er et uttrykk fra biologi og betyr deling eller spalting. Enrico Fermi hadde faktisk fisjonert uran i 1934, men kunne ikke forklare hva som hadde skjedd.

Meitner og Frisch tok kort tid etter sin oppdagelse kontakt med den danske fysikeren Niels Bohr, og opplyste ham om funnet. Bohr reiste til New York, og tok med seg den nye kunnskapen til USA. Amerikanske fysikere hadde gjort seg bemerket ved eksperimentell fysikk på 1930-tallet, og med nye teoretiske resultater fra Europa ble USA fra starten av krigen et sentrum for kjernefysisk forskning. Bohr og amerikaneren John A. Wheeler jobbet sammen ved Princeton-universitetet (hvor også Einstein holdt til), og utviklet det teoretiske arbeidet fra Europa videre. Samtidig jobbet Fermi og den ungarske fysikeren Leo Szilard, som i likhet med de fleste europeiske vitenskapsfolk i USA på denne tiden hadde emigrert på grunn av nazistisk og fascistisk forfølgelse, flittig på Columbia-universitetet med kjernereaksjoner. I mars 1940 hadde de funnet ut at det var $^{235}_{92}\text{U}$ -isotopen av uran som ville fisjonere best, og siden denne isotopen var så sjelden måtte en også utvikle gode anrikingsmetoder for å kunne utføre eksperimenter med denne isotopen.

Einsteins brev til Roosevelt

Albert Einstein skrev den 2. august 1939 et brev til president Franklin D. Roosevelt. I brevet forklarte Einstein om den nye oppdagelsen at grunnstoffet uran kunne benyttes som en meget viktig energikilde i den umiddelbare fremtid. Basert på arbeider av Joliet i Frankrike og Fermi og Szilard i USA kunne en konkludere med at det måtte være mulig å oppnå en kjernereaksjon i en stor uranmasse, der store mengder energi og et stort antall radium-lignende stoffer blir frigjort. Einstein presiserte at dette nok kunne muliggjøres i nær fremtid.

Einstein forklarte også at dette nye fenomenet nok ville lede til produksjon av bomber, og at det var sannsynlig at svært kraftige bomber av denne sort ville kunne fremstilles. Videre nevnte Einstein litt om hvor i verden man kunne finne uran; svært lite i USA, en del i Canada og tidligere Tsjekkoslovakia, mens klart størst andel fantes i Belgisk Kongo. Han foreslo at Roosevelt snarest burde opprette en kontakt mellom den amerikanske regjering og gruppen fysikere i USA som jobbet med kjernefysikk og kjernereaksjoner.



Albert Einstein og Leo Szilard jobber med brevet til president Roosevelt

Til slutt kunne Einstein fortelle at Tyskland hadde stoppet alt salg fra urangruven i Tsjekkoslovakia (som de kontrollerte), og at dette kunne indikere at Tyskland hadde fått øynene opp for dette nye fenomenet.

Franklin D. Roosevelt skrev tilbake til Einstein den 19. oktober 1939, og kunne fortelle at han hadde nedsatt en komité, som skulle ledes av sin nære venn og rådgiver, Alexander Sachs. I komiteen satt representanter fra hæren og marinen, og de skulle arbeide med saken omtrent som Einstein hadde anbefalt.

Denne beslutningen av Roosevelt, var den første av mange som skulle lede til det prosjektet vi kjenner som *The Manhattan Project*, eller *Manhattanprosjektet*.

President Roosevelt opprettet den 21. oktober 1939 en urankomité, som skulle ledes av Lyman J. Briggs. Denne komiteen skulle koordineres med Sachs' komité, men altså fokusere på uran. Blant annet hvordan USA skulle få tilgang på mest mulig uran, hvordan de skulle anrike den og annen relatert forskning.

Amerikanerne hadde begynt den lange prosessen som skulle lede til en ferdig utviklet atombombe. 1. november 1939 kom den første rapporten fra urankomiteen. De anbefalte at regjeringen skulle innvilge penger til å kjøpe fire tonn grafitt (til bruk som moderatorer) og 50 tonn uranoksid. Fermi uttalte sent i 1939 at han helt klart så muligheter til å bruke uran som energikilde, men at det ikke ville være praktisk mulig å lage en atombombe, på grunnlag av at den ville bli altfor tung.



I begynnelsen av 1940 innså amerikanerne at USA sannsynligvis kom til å bli involvert i krigen. Dette var en faktor som påvirket regjeringen til å bevilge mer penger til atomprosjektet, og da spesielt til forskning på anriking av uran. En annen faktor var Ernest O. Lawrence, som brukte mye av sin tid til å kjempe for dette. Lawrence var kjent for sin utrettelighet og sitt glødende engasjement.

Urankomiteen, fra v. Urey, Lawrence, Conant, Briggs, Murphree og Compton

Han demonstrerte sin kreativitet ved å bygge om sin syklotron til et massespektrometer som kunne anvendes til å separere uranisotoper. Lawrence ble også utnevnt som Briggs' rådgiver i urankomiteen, noe som naturlig nok førte til økt finansiell støtte til forskerne.

I juli 1941 kom et etterlengtet gjennombrudd. En britisk gruppe forskere kalt MAUD-gruppen framla for amerikanerne en rapport som viste til denne gruppens forskningsarbeid angående muligheten for å utvikle atomvåpen.

MAUD-rapporten estimerte teoretisk at en kritisk masse mye mindre enn tidligere antatt ville være tilstrekkelig for å produsere en stor eksplosjon. En bombe på denne størrelsen ville ikke være problematisk å frakte med fly. Rapporten kunne også skilte med spesifikke planer om hvordan å sette sammen en slik bombe. Dette gav amerikanerne en ny giv i forskningen, etter en periode med stagnasjon og en del pessimisme fra høyere hold. I bakhodet lå også tanker

om at tyskerne kunne ha kommet langt med sitt sannsynlige atomprosjekt, og man økte på ny ressurser og bevilgninger for å være så langt framme som mulig. Nå ble endelig Fermi inkludert i den innerste forskningskrets, og samtidig ble også Harold C. Urey tatt med på grunn av hans arbeid med isotopseparering og kunnskap om tungtvann som moderator. Urankomiteen fikk ordre fra den nasjonale forsvar- og forskningskomiteen om å fokusere på praktisk testing av det teoretiske beskrevet i MAUD-rapporten.

Etter angrepet på Pearl Harbor den 7. desember 1941, ble USA involvert i krigen. Like etter dette, kom urankomiteen frem til at selv før innholdet i MAUD-rapporten kunne testes praktisk, var sjansene så store for at teorien stemte, at de krevde innvilget store summer til anriking av uran. De fikk klarsignal av Roosevelt, og både Urey, Lawrence og Arthur H. Compton ble satt som sjefer for prosjektet. Urey fokuserte på gassdiffusjon og sentrifugering, Lawrence på elektromagnetisk separasjon og å finne ut mer om det nyoppdagede stoffet plutonium, mens Compton fikk i oppdrag å kjøre små praktiske tester med kjedereaksjoner og bombedetonasjoner. Atomprogrammet hadde etter hvert utviklet seg fra et program uten verken tidsfrister eller penger, til å bli et meget målrettet program med mer enn nok pengestøtte, men tiden var til gjengjeld meget knapp. Det var nå et race for å utvikle en atombombe før fienden.

Den 28. desember 1942 kom den endelige bekreftelsen fra president Roosevelt. Bekreftelsen som iverksatte *Manhattanprosjektet*. Det var et prosjekt med gigantiske proporsjoner, og gikk ut på å bygge blant annet et enormt gassdiffusjonsanlegg, en ny fabrikk for elektromagnetisk separasjon, en installasjon for fremstilling av plutonium, og fasiliteter for produksjon av tungtvann.

Manhattanprosjektet

På mange måter fungerte Manhattanprosjektet på samme måte som et stort industriselskap. De kjøpte inn råvarer, og foredlet dem med tanke på bruk i produksjon av et produkt. Ved slutten av krigen beregnet man at Manhattanprosjektet hadde kostet rundt 2.2 milliarder dollar. Dette inkluderte bygging av fasiliteter og anlegg i både Tennessee, Washington og New Mexico. I tillegg kom all den økonomiske støtten til universiteter og forskningsbaser over store deler av USA. Men det som skilte dette prosjektet fra et industriselskap var at det her ble investert store summer i noe helt nytt og uprøvd, og at alt foregikk i ytterste hemmelighet. Både hurtighet, effektivitet og hemmelighold ble kjennetegn på Manhattanprosjektet.

Området rundt en liten småby i Tennessee, som senere fikk navnet Oak Ridge (*uklart hva denne byen het før og under 2. verdenskrig*) ble valgt som første byggeplass for nye anlegg. Her ble det bygget på et område kalt Y-12, som blant annet skulle huse det



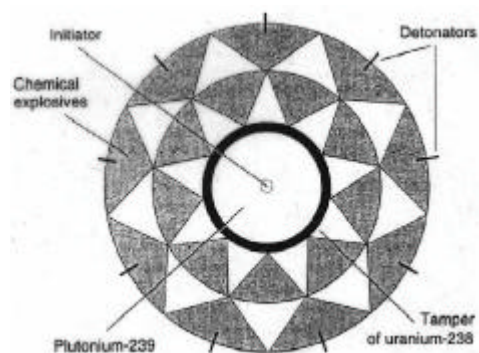
Det racerbaneformede anlegget for elektromagnetisk separasjon.

store anlegget for elektromagnetisk separasjon. I dette anlegget bygget Lawrence et kjempemessig massespektrometer. Bare magneten som skulle produsere magnetfeltet hadde en diameter på nesten 5 meter. Man estimerte at massespektrometeret kunne anrike opptil 100 gram uran om dagen.

Byggingen av et nytt stort anleggsområde begynte i februar 1943 ved Hanford, Washington. Her skulle mye av det anrikede uranet lagres, av sikkerhetsårsaker, i spesielle vannavkjølte stabler. Det ble også bygget fire fabrikker for fremstilling av plutonium, og fasiliteter for testing av fisjon ved plutonium. Hanford sies i dag å være det mest radioaktive området i USA.

Den siste delen av Manhattanprosjektet ble bygget ved Los Alamos, New Mexico i begynnelsen av 1943. Her var det J. Robert Oppenheimer som var sjef, og anlegget hadde som mål å designe og produsere atombomber. Avgjørelsen om å la Oppenheimer ha toppstillingen ble av enkelte kritisert fordi han ikke hadde vunnet en nobelpris. Men kritikken forsvant raskt, da han viste seg å være en meget dyktig og effektiv direktør for Los Alamos-anlegget. Samarbeidet mellom militærets øverste representant, general Leslie Groves og Oppenheimer ble etter hvert et slags symbol på hele Manhattanprosjektet, både fordi de gjorde en formidabel innsats, og fordi de jobbet med det mest konkrete prosjektet, den praktiske fremstillingen av bomben.

Tidlige eksperimenter med både uran og plutonium gav positive resultater. Uran emiterte nøytroner i løpet av en milliarddels sekunder, som var akkurat tidsnok i den kjernefysiske verden for en effektiv eksplosjon. Og tester med plutonium viste at dette nye stoffet emiterte nøytroner både hurtigere og i større antall enn uran. Både teori og praksis viste nå at en kunne bruke begge disse stoffene i en bombe, der sannsynligheten mer enn antydte et vellykket resultat. Nå kunne man begynne å planlegge strukturen på bombene. Våpnene måtte være en slags skytevåpen som kunne slå sammen subkritiske masser med høy hastighet. Men uranbomben var enklere, og man fokuserte mest på den mer kompliserte plutoniumbomben, som måtte ha en høyere detonasjonshastighet på grunn av den økte faren for predetonasjon. To *plutoniumskytevåpen* ble bestilt og testet, deretter ble det bestilt to *uranskytevåpen*. Faren for predetonasjon ved en plutoniumbombe ble vurdert som for stor til at en kunne risikere å benytte et *plutoniumskytevåpen* i krig, og fra en idé av ungaren John von Neumann, begynte man å utvikle et implosjonsvåpen for plutonium. Denne typen ville virke raskere enn et



Tidlig prinsipskisse av en implosjonsbombe

skytevåpen, og dermed senke faren for en for tidlig eksplosjon til et minimum. En subkritisk masse ville bli satt under et så stort trykk ved en symmetrisk implosjon at en stor nok eksplosjon ville finne sted. Denne bomben ville trenge mindre plutonium, og dermed kunne bomben bli tidligere ferdig. I mars 1944 hadde forskerne klart å lage to implosjonsbomber og begynte å teste dem ved å slippe dem fra bombefly, men resultatene var ikke tilfredsstillende. Både effektivitet og problemer med for små mengder plutonium plaget Oppenheimer og hans medarbeidere.

På våren 1945 var uranbomben klar. Los Alamos hadde så sterk tro på denne bomben at de anså prøvesprengninger som unødvendig. Deadline satt av forsvaret for levering av bombene

var 1. august samme år. Problemet var nå å få ferdig plutoniumbomben i tide. Etter intenst arbeid med implosjonsteknologi og etter å ha produsert plutonium over evne klarte de den 16. juli 1945 å klargjøre en plutoniumbombe for prøvesprengning.

Trinity

Bomben ble plassert på toppen av et rundt 30 meter høyt tårn i et øde område ca. 340 km sør for Los Alamos, som Oppenheimer hadde navngitt *Trinity*, inspirert av diktene til John Donne.

Nøyaktig klokken 05.30 om morgenen, mandag 16. juli 1945 begynte atomalderen. Oppenheimer og de aller fleste andre involverte observerte fra bunkere plassert i en sirkel rundt detonasjonsstedet, omtrent 10 km unna. Eksplosjonen lyste opp himmelen med enorm lysstyrke over ørkenen mens tårnet under bomben ble pulverisert. Asfalt rundt tårnet ble omdannet til grønn sand. En 200 tonns container plassert 800 m fra *ground zero* ble blåst overende av den kraftige sjokkbølgen som fulgte eksplosjonen. Og mens den oransje skyen utvidet seg, oppstod det en ny sky, smalere enn den første. Skyen steg til værs og flatet ut. Dens soppform har siden vært et symbol på enorme krefter og store ødeleggelser.



I dag er det reist et minnesmerke ved Trinity

Oppenheimer uttalte senere at denne erfaringen fikk ham til å tenke på *Prometheus*, som ble straffet av *Zeus* for å ha gitt ild til menneskene. Han tenkte også på *Alfred Nobel*, som hadde håpet at oppdagelsen av dynamitt ville få slutt på all krig. Den skremmende destruktive kraften som kom med atombomber og deres bruksområder skulle komme til å hjemsøke mange av de involverte fra Manhattanprosjektet resten av livet.

Suksessen til sprengningen på *Trinity* gjorde at Los Alamos også klarte å levere plutoniumbomben til den fastsatte deadline. Uranbomben fikk navnet *Little Boy*, mens den større plutoniumbomben ble kalt *Fat Man*. De ble sluppet over henholdsvis Hiroshima og Nagasaki i Japan, den 6. og 9. august 1945. (Det meste av historikken bygger på informasjon fra www.atomicarchive.com)

Andre atomprogram

Britene bidro mye til teoretisk forskning tidlig under 2. verdenskrig, men hadde ikke ressurser til å følge opp et atomprogram mens de samtidig kjempet for sin egen eksistens i krigen. De godtok derfor amerikansk lederskap, og sendte sine fremste forskere til alle fasiliteter kontrollert av Manhattan-prosjektet.

Tyskland hadde i motsetning til hva de allierte fryktet, ikke kommet særlig langt i sitt atomprogram. Tyske forskere hadde fokusert på fisjon, men klarte altså ikke å produsere atomvåpen. Både Russland og Japan hadde også lignende program. De første vellykkede sovjetiske prøvesprengninger fant ikke sted før i 1949, mens japanerne ikke klarte å opprettholde prioriteten av atomprogrammet på grunn av det stadig økende presset mot slutten

av krigen. Det var altså kun amerikanerne, som både kom sent inn i krigen, og var beskyttet av sin fjerne beliggenhet, som klarte å fullføre et atomprogram fra oppdagelsen av fisjon i laboratoriet til den ferdige bomben.

Fisjonsteori

Kort om fisjon

Hovedprinsippet for en atombombe er det fysiske fenomenet fisjon. Fisjon er kort sagt en prosess der en tung atomkjerne deles i to omtrent like store kjerner samtidig som det frigjøres energi.

Fisjon kan forekomme på tre måter; spontant, ved å eksitere atomkjernen ved tilførsel av energi eller ved induksjon.

Spontan fisjon

Spontan fisjon forekommer særdeles sjelden i naturen, og i teorien må en atomkjerne som skal ha mulighet til å fisjonere spontant ha $Z^2/A > 18$ ($Z = \text{protontall, dvs. antall protoner i atomkjernen}$, $A = \text{nukleontall, dvs. summen av nøytroner og protoner i atomkjernen}$), men den sannsynlige grensen er ifølge Bohr og Wheelers beregninger på rundt $Z^2/A \approx 48$. En atomkjerne med Z^2/A mindre enn 18 vil være enten for stabil til å fisjonere spontant eller ikke ha nok *elektron skall* til å kunne oppnå den nødvendige eksitasjonsenergi. Sannsynligheten for at denne spontane prosessen skal forekomme er svært liten helt opp til de tyngste atomkjernene. Siden spontan fisjon er en form for radioaktiv nedbrytning, kan man beregne sannsynligheten basert på halveringstiden til et gitt atom.

Spontan fisjon er definert som sannsynligheten per sekund for at et gitt atom vil fisjonere spontant – altså uten ytre påvirkning.

Eksitert atomkjerne (induksjon ved partikkelbombardement)

Ved å eksitere atomkjernen kan man oppnå nok energi til at en fisjon skal kunne forekomme. Dette kan skje ved at en bombarderer kjernen med partikler. Minimumsenergien for de fleste tunge atomkjerner som kreves for en fisjonsprosess ligger mellom 4 og 6 MeV.

Indusert fisjon ved nøytroner

Den vanligste måten å fremkalle fisjon på er å indusere den ved å sende nøytroner mot atomkjerner. Bindingsenergien til det oppfangede nøytronet er i noen tilfeller nok til å eksitere atomkjernen slik at energinivået overstiger det nødvendige for at fisjonsprosessen skal kunne finne sted.

Mer omfattende om fisjon

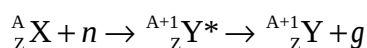
De fleste atomkjerner som blir bombardert av en eller annen partikkel eller av gammastråling, vil gjennomgå en forandring. En innkommende partikkel kan binde seg til kjernen, en

bestanddel av kjernen kan emitteres, eller det kan bli emittert stråling fra kjernen i form av energi. Alle kombinasjoner av disse er også mulig, hvilken kombinasjon avhenger av kjernens opprinnelige oppbygning, hva slags partikler som sendes mot den, og hva slags hastighet disse har. Felles for alle er at atomkjernen forandres.

Fisjon skiller seg fra andre kjernereaksjoner ved at denne prosessen må starte med en tung atomkjerne, for så å deles i to omtrent like store kjerner i tillegg til et utslipp av energi. Når en atomkjerne blir tilstrekkelig tung (*en atomkjerne defineres vanligvis som tung ved protontall 80-90 og større*), er de frastøtende kreftene mellom protonene i kjernen nesten like store som de tiltrekkende kjernekreftene som holder kjernen sammen. Dette betyr at de tunge atomkjernene er ustabile, og er de eneste som egner seg i fisjonsprosesser.

En typisk fisjonsprosess vil alltid ha utgangspunkt i en tung atomkjerne. Et nøytron sendes inn i atomkjernen, der den ideelt sett skal binde seg til kjernen for å eksitere den. Nøytroners bindingsenergi er vanligvis rundt 6 eller 7 MeV. Denne energien er i de fleste tilfeller nok til å starte en fisjonsprosess, men i enkelte atomkjerner er det ikke tilstrekkelig. Da må nøytronene ha en viss kinetisk energi i tillegg. Dette oppnås enklest ved å la hastigheten på nøytronene være meget høy. Problemet med dette er at høyhastighetsnøytroner vil ha vanskeligere for å binde seg til kjernen. En tilpasning av nøytronets akselererte hastighet fra partikkelakseleratoren gjøres ved hjelp av moderatorer, som ofte består av hydrogenisotoper (*f. eks tungtvann, som er vann der hydrogenatomet er av isotopen deuterium*) eller karbon (*grafitt*). Moderatorene forårsaker elastiske kollisjoner som senker hastigheten på partiklene.

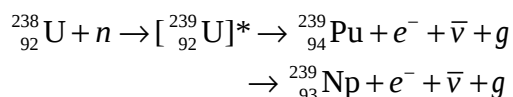
Dersom en atomkjerne blir eksitert oppstår det som regel kollektive vibrasjoner rundt kjernens likevektsform. Dersom eksitasjonsenergien er liten, er oscillasjonene små. Da vil før eller siden eksitasjonsenergien bli frigjort i form av stråling, og kjernen returnerer til sin likevektsform. Denne prosessen kalles radioaktiv nøytronoppfanging og kan beskrives som:



(n = nøytroner, g = elektromagnetisk gammastråling, som er fotoner med meget høy energi)

Men, hvis eksitasjonsenergien er tilstrekkelig høy, kan kjernen bevege seg så langt bort fra sin likevektsform at den elektriske frastøtingen mellom protonene dominerer over kjernekreftene som holder kjernen kompakt. Da vil sjansen være stor for at kjernen vil fisjonere ved å dele seg opp i to omtrent like store deler istedenfor å returnere til likevektsformen.

Noen atomkjerner vil kun fisjonere dersom et nøytron med høy hastighet blir fanget opp. Dersom det i en slik kjerne blir sendt inn et moderert nøytron, er ikke bindingsenergien tilstrekkelig til å starte en fusjonsprosess, og det vil isteden produseres et tyngre stoff. For ${}^{238}_{92}\text{U}$ vil dette resultere i produksjon av neptunium eller plutonium ifølge prosessen:



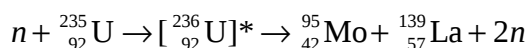
($\bar{\nu}$ = antinøytrinoer, som er antimateriens svar på elementærpartiklene nøytrinoer, e^- = elektroner)

Årsaken til disse forskjellige egenskapene blant atomkjernene har sin forklaring i kjernenes struktur og oppbygning. En $^{235}_{92}\text{U}$ -kjerne er av typen *lik-odde*, som betyr at protontallet er et partall og nukleontallet er et oddetall. Denne kjernen har 143 nøytroner, og når et nytt nøytron blir oppfanget oppstår det en kjerne av typen *lik-lik*; $^{236}_{92}\text{U}$. Det oppfangede nøytronet blir her *paret* med det ene *frie* nøytronet som er i kjernen fra før, og det vil frigjøres en *paringsenergi* på omtrent 0.57 MeV som følge av dette.

En $^{238}_{92}\text{U}$ -kjerne derimot, er av typen *lik-lik* i utgangspunktet, og når den da fanger opp et nøytron, oppstår det en *lik-odde*-kjerne, uten et *fritt* nøytron som det oppfangede nøytronet kan *pares* med. Det blir da heller ikke frigjort energi.

En kjerne som får ekstra energi som følge av en nøytronparring, har et forsprang på en kjerne som ikke får det, og har dermed lettere for å starte en fisjonsprosess.

Når et nøytron har bundet seg til en atomkjerne, er kjernen et øyeblikk i eksitert tilstand. $^{235}_{92}\text{U}$ er en kjerne som blir eksitert ved oppfangning av et *lavhastighetsnøytron*. Reaksjonen vil for eksempel bli:



(* betyr at kjernen er i den ustabile eksitasjonsfasen)

Fra Einsteins berømte masse/energirelasjon $E = mc^2$ kan vi beregne hvor mye energi som blir frigjort i denne fisjonsprosessen:

De opprinnelige massene er:

$$\text{Nøytronmasse} + {}^{235}_{92}\text{U-masse} = 1.0090 \text{ amu} + 235.0439 \text{ amu} = 236.0529 \text{ amu}$$

(amu = atomic mass unit, masseenheter for atomer)

Massen til $[{}^{236}_{92}\text{U}]^*$ er 236.0456 amu, så det er i den eksiterte tilstanden altså en manglende masse på 0.0073 amu. Dette korresponderer til en eksitasjonsenergi på 6.796 MeV.

De endelige massene er:

$$\begin{aligned} & {}^{95}_{42}\text{Mo-masse} + {}^{139}_{57}\text{La-masse} + 2 \text{ nøytronmasse} = 94.9058 \text{ amu} + 138.9061 \text{ amu} \\ & + 2 * 1.0090 \text{ amu} = 235.8299 \text{ amu} \end{aligned}$$

Vi ser at masseforskjellen mellom opprinnelig og endelig masse er

$$236.0529 \text{ amu} - 235.8299 \text{ amu} = 0.223 \text{ amu}$$

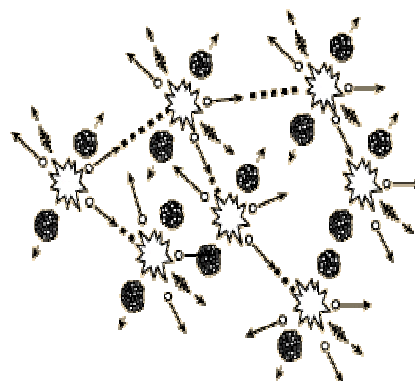
Dette tilsvarer en energi på 207.16 MeV, som opptrer i form av kinetisk energi fra sluttproduktene. I tillegg til denne energien, vil de to nye kjernene ofte være ustabile og derfor frigjøre energi i form av emitterte elektroner, nøytrinoer og gammastråler helt til de når en stabil form.

Når man tenker på at når det fra ett eneste atom kan frigjøres så mye energi som 207 MeV, må man absolutt gjenkjenne det enorme energipotensialet fisjonsprosesser kan realisere.

Kjedereaksjoner ved fisjon

Det er to ting ved fisjon som spiller en vesentlig rolle for at fisjonsprosessen skal være av praktisk betydning. Det ene er at det må frigjøres nøytroner i prosessen, og det andre er at det må frigjøres energi.

Hovedprinsippet med en atombombe er også at det skal frigjøres store mengder energi, og det skal skje ved fisjon. Men det holder ikke at én atomkjerne fisjonerer, man må få et meget stort antall kjerner til å fisjonere. For å få dette til, må det skje en kjedereaksjon. Ved fisjon av en atomkjerne deles kjernen i to deler og det frigjøres energi i form av kinetisk energi fra fisjonsproduktene. Disse produktene er i tillegg til de to nye kjernene og gammastråling, også nye nøytroner (det sendes gjennomsnittlig ut 2.5 nøytroner i en fisjon). De nye nøytronene beveger seg med stor hastighet mot andre atomkjerner i nærheten, og kan fanges opp av disse for å skape en ny fisjon. Den nye fisjonen sender ut ytterligere nøytroner, som igjen kan kollidere med nye atomkjerner, og en kjedereaksjon oppstår.



Figuren viser en typisk kjedereaksjon

Kritisk masse

For at en gitt masse med et stoff som kan fisjonere skal kunne opprettholde en kjedereaksjon, må massen være såkalt *kritisk*. Massen er kritisk først og fremst ved en spesifikk minimumsstørrelse som avhenger av hva slags materiale som fisjonerer. Denne størrelsen avhenger igjen av flere faktorer, som konsentrasjon av det fisjonerbare stoffet og dets geometriske oppbygning. En masse kalles *subkritisk* dersom den er mindre enn en kritisk masse, og *superkritisk* dersom den er større.

Hvis det skjer i en kjedereaksjon at mer enn ett nøytron per fisjon vil produsere en ny fisjon, vil antall fisjoner øke eksponentielt og kjedereaksjonen vil være divergent. Det er dette som skjer i en atombombe, i motsetning til i en atomreaktor, der fisjonsprosessen er kontrollert. I en atombombe er det viktig å ikke ha én kritisk masse samlet. Da kan en spontan fisjon starte en kjedereaksjon for tidlig og naturligvis forårsake store skadevirkninger.

Anriket brennstoff

Uran og plutonium er de to stoffene som blir brukt i atombomber. Men en kan ikke benytte en hvilken som helst isotop av disse stoffene for å starte en fisjonsprosess. $^{235}_{92}\text{U}$ er den ideelle isotopen for fisjon av uran, mens $^{239}_{94}\text{Pu}$ er ideelt for plutonium.

Naturlig uran består av 0.0055 % $^{234}_{92}\text{U}$, 0.7205 % $^{235}_{92}\text{U}$ og 99.274 % $^{238}_{92}\text{U}$. Den siste isotopen, som det finnes klart mest av, vil som nevnt tidligere ikke fisjonere hvis den blir utsatt for lavhastighetsnøytroner, og ved oppfangning av høyhastighetsnøytroner vil det produseres et tyngre stoff, og da ofte plutoniumisotopen $^{239}_{94}\text{Pu}$.

For å få et *brennstoff* som er mest mulig effektivt for fisjon, vil man helst ha så høy prosentandel av den ideelle isotopen som mulig. For uran vil man forsøke å *anrike* den naturlige massen så mye som mulig. Å anrike uran vil altså si å øke prosentandelen $^{235}_{92}\text{U}$ i uranmassen.

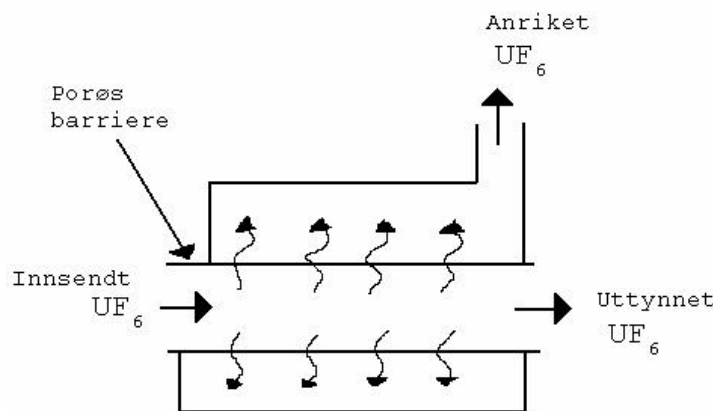
Forskerne i Manhattanprosjektet benyttet fire forskjellige metoder for å anrike uran; *gassdiffusjon*, *termisk diffusjon*, *elektromagnetisk separasjon* og *sentrifugering*.

Gassdiffusjon

Gassdiffusjon er en prosess basert på molekylær effusjon (utgytelse). Denne prosessen omhandler det som skjer når en gass blir separert fra vakuum ved bruk av en porøs barriere som inneholder mikroskopiske hull. Gassen passerer gjennom hullene på grunn av trykkforskjellen på de to sidene av barrieren (se fig). Det er flere *kollisjoner* per flateenhet på den siden som har høyest trykk, og gassen vil passere gjennom hullene til det oppstår en likevektstilstand. Den skotske kjemikeren Thomas Graham oppdaget at effusjonsraten gjennom hullene var invers proporsjonal med kvadratroten av massen. Dermed ville lettere molekyler bevege seg raskere gjennom hullene enn tyngre. I denne prosessen ble det brukt uran i gassform, uranheksafluorid (UF_6). Effektiviteten på en slik prosess kan skrives som forholdet:

$$\frac{^{238}\text{UF}_6}{^{235}\text{UF}_6} = \frac{352}{349} = 1.0086$$

(Forklaring på forholdstallene: Fluoret har nukleontall 19. $19 \cdot 6 = 114$, $238 + 114 = 352$)



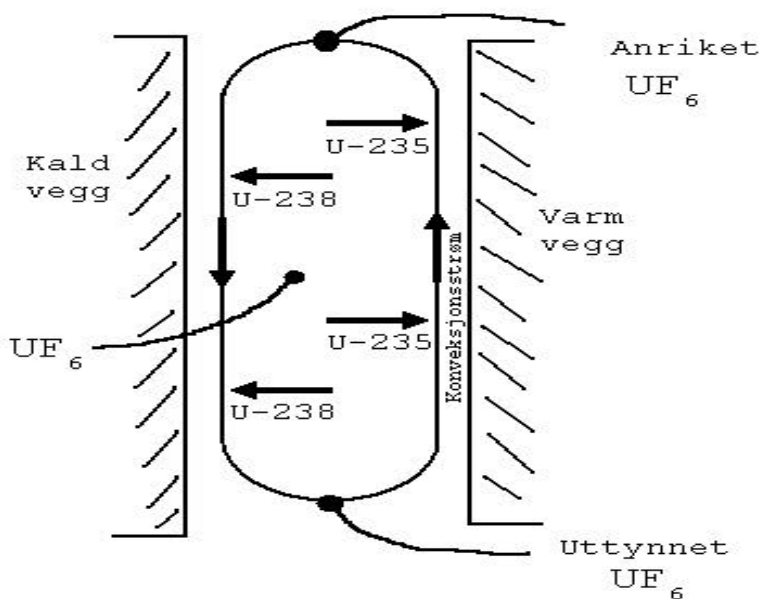
Skisse av gassdiffusjonsprinsippet

Fordi dette forholdet er så lite, trenges det rundt 4000 slike gassdiffusjoner for å oppnå en akseptabel prosentandel $^{235}_{92}\text{U}$. Barrieren må være tilstrekkelig porøs for å oppnå en god *flyt* av gass gjennom hullene. Heksafluorid er meget korroderende, så nikkel eller aluminiumoksid er best egnet som barrieremateriale fordi de ikke vil reagere med gassen.

Problemet med denne måten å anrike uran på er at et slikt system vil være uhyre kostbart, bruke store mengder energi og kreve mye vedlikehold.

Termisk diffusjon

Termisk diffusjon benytter varmetransport gjennom et tynt lag bestående av væske eller gass for å separere isotoper. Ved å nedkjøle det tynne laget på den ene siden og varme det opp på den andre, vil det oppstå konveksjonsstrømmer. En strøm oppover på den varme siden og en strøm nedover på den kalde siden. Under slike forhold vil de lettere $^{235}\text{UF}_6$ -molekylene diffundere mot den varme siden, mens de tyngre $^{238}\text{UF}_6$ -molekylene diffunderer mot den kalde siden. Etter hvert vil de to isotopene hope seg opp henholdsvis oppe og nede på det tynne laget (se fig).



Denne metoden var mye rimeligere og enklere enn gassdiffusjonsmetoden, men brukte faktisk mer energi. Uranet ble typisk først anriket ved termisk diffusjon, for så å bli videre anriket ved en av de to andre prosessene.

Skisse av en tenkt termisk diffusjon

Elektromagnetisk separasjon

Denne anrikingsmetoden er basert på prinsippet av et massespektrometer. Det går ut på at en ladet partikkel vil følge en sirkelbane når den passerer gjennom et uniformt magnetisk felt (se fig).

En kilde sender ut ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ - og ${}^{238}_{92}\text{U}^+$ -ioner. Disse ionene er produsert fra det faste stoffet urantetrafluorid, UF_4 , som blir oppvarmet til den spesifikke koketemperaturen for dette stoffet, og deretter bombardert med elektroner for å lage U^+ -ioner. Ionene blir sendt fra kilden gjennom et spenningsfall V som akselererer ionene. Ionenes hastighet i det de kommer inn i magnetfeltet kan beregnes ved å benytte at endringen i potensiell energi gjennom spenningsfallet tilsvarer endringen i kinetisk energi for ionene:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Ionene følger en sirkelbane når de har kommet inn i magnetfeltet. Da kan vi påvise at baneradien r til en gitt partikkel er proporsjonal med partikkelens masse m :

Sentripetalakselerasjon i magnetfeltet,

$$a = \frac{v^2}{r}$$

og Newtons 2. lov gir:

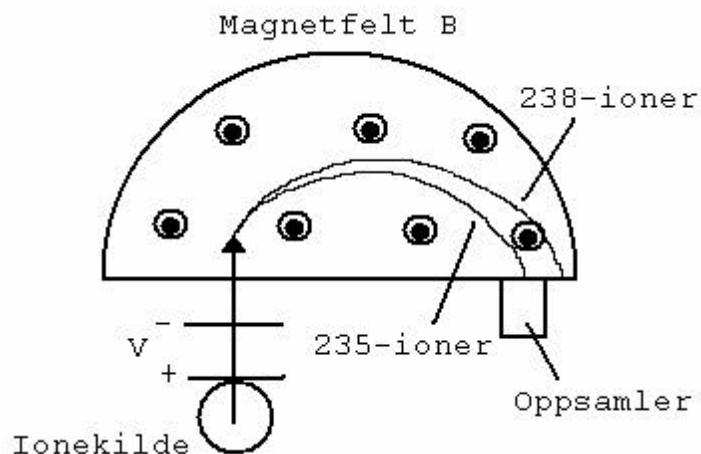
$$F = m \frac{v^2}{r} = evB \Rightarrow r = \frac{mv}{eB}$$

Ut fra dette kan vi se at r er proporsjonal med $\sqrt{m}$:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Vm}{e}}$$

Og siden ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ - og ${}^{238}_{92}\text{U}^+$ -ioner har forskjellig masse, vil de ha en viss forskjell i baneradius. Dermed kan en plassere en *oppsamler* slik at kun ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ -ionene vil bli fanget opp.

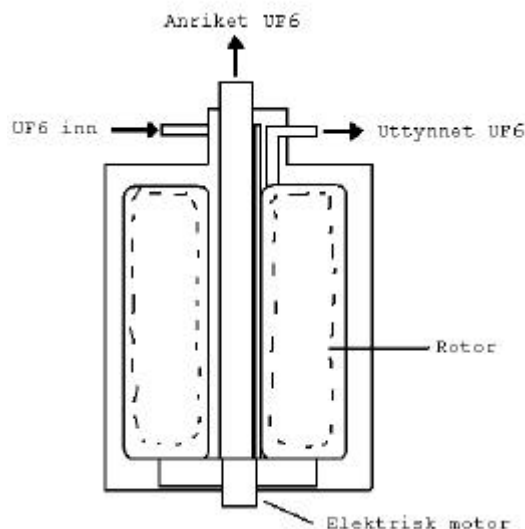
Det har dog vist seg i praksis, at denne metoden for anriking av uran har en stor hake. Mindre enn halvparten av de opprinnelige ${}^{235}_{92}\text{U}^+$ -ionene blir fanget opp, så effektiviteten av denne prosessen er lav.



Figuren viser en skisse av et massespektrometer, der ioner blir sendt inn i et magnetfelt og avbøyes

Sentrifugering

Den vanligste metoden for anriking av uran i senere tid er å sentrifugere UF_6 -gass i en tank som inneholder en elektrisk drevet sylindrerformet rotor. Rotoren roterer meget hurtig og sentrifugalkrefter presser de tyngre uranisotopene tettere mot veggen enn de lettere (se fig). Sentrifugeringen har på grunn av sin lave kostnad i forhold til andre anrikingsmetoder mer og mer overtatt som den fremste metoden for anriking av uran. Til sammenligning bruker en gassentrifuge omtrent 10 % av energien en gassdiffusjon (og enda mindre i forhold til termisk diffusjon) må bruke for å anrike en tilsvarende mengde uran. *(Fisjonsteoridelen bygger hovedsakelig på informasjon fra [7])*



Enkel skisse av en sentrifuge for anriking av uran

Atombombers oppbygning

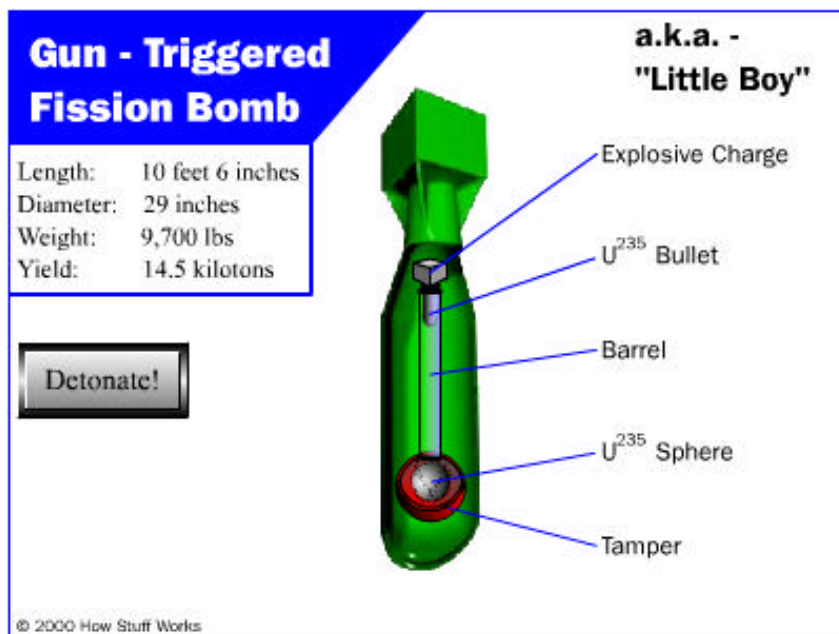
Hvor mange atombomber som har blitt konstruert, og nøyaktig hvordan de fungerer er vanskelig å vite. Selv hvilke land som faktisk har atombomber er usikkert. USA og Russland har i hvert fall hatt tusenvis av bomber, og nye land som Nord-Korea og Iran kan være i ferd med å skaffe seg det. Det finnes ikke en entydig måte å lage en atombombe på, og mange forskjellige oppsett har vært forsøkt. Helt konkret hvordan de er satt sammen og fungerer er militære hemmeligheter, men vi skal se kort på noen forskjellige prinsipper. De to atombombene som ble brukt ved avslutningen av andre verdenskrig er gode eksempler.

Little Boy

Prinsippet for den første atombomben, *Little Boy*, er enkelt, selv om det praktiske oppsettet er vanskelig. Man trenger:

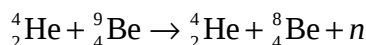
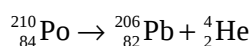
- Radioaktivt materiale som spaltes så raskt at man kan få en kjedereaksjon
- Å holde materialet samlet lenge nok til å få en kraftig eksplosjon
- Å sørge for at kjedereaksjonen starter når man vil den skal starte.

Det radioaktive materialet brukt i Little Boy var uran. For å få kjedereaksjonen til å gå raskt nok hadde man økt innholdet $^{235}_{92}\text{U}$ til 90 %. For å unngå en for tidlig kjedereaksjon var det nødvendig å dele uranet opp i subkritiske masser. Måten dette ble løst på var ved å plassere en mengde uran i ene enden av bomben, og en mindre bit i den andre. Til sammen ville disse bitene danne en kritisk masse. Ved å skyte den minste biten inn i den største og samtidig starte en nøytrongenerator fikk man detonasjon av atombomben.



Figur av Little Boy med spesifikasjoner. Hentet fra www.howstuffworks.com

Uranet er formet rundt en liten mengde polonium og beryllium atskilt fra hverandre. Når urankulen blir skutt inn i den større mengden, kommer poloniumet og berylliumet sammen, og vi får følgende reaksjon:



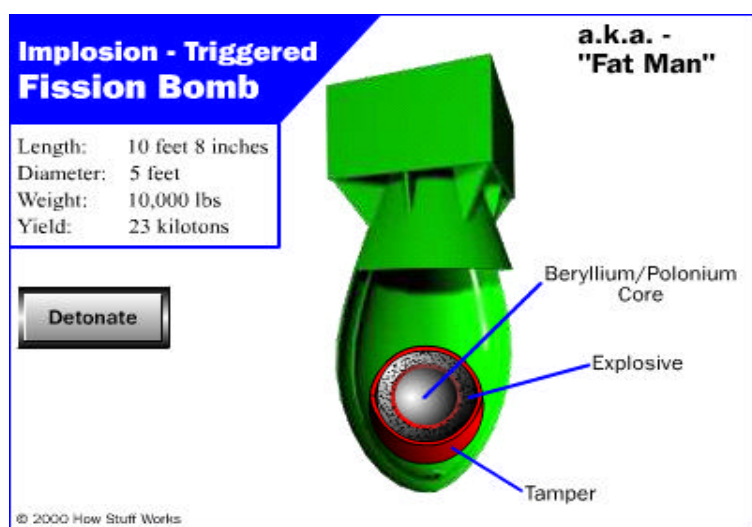
Den radioaktive isotopen $^{210}_{84}\text{Po}$ sender ut alfapartikler. Alfapartiklene kolliderer med ^9_4Be , som sender ut et nøytron. Nøytronene starter videre kjedereaksjonen i uranet.

Rundt det radioaktive materialet har man, for å minske mengden materiale nødvendig for å få kritisk masse, et nøytronskjold. Nøytroner fra nøytrongeneratoren og fra spaltet uran som ikke har blitt fanget opp av fisjonsmaterialet, blir fanget opp av skjoldet. Skjoldet består av materiale som sender ut nye nøytroner ved absorpsjon av nøytroner, og en del av disse vil bli sendt tilbake inn i kjernen. Antall nøytroner som kan brukes til fisjon blir derved høyere. Det beste materialet for nøytronskjold er ^9_4Be , som kan sende ut 2 nøytroner ved absorpsjon av ett nøytron. I Little Boy var det derimot av $^{238}_{92}\text{U}$, som også er brukbart.

Dette bombeoppsettet var man så sikker på at ville virke at man ikke engang foretok prøvesprengninger. Faren for detonasjon ved flykrasj eller andre ulykker var allikevel for stor til at den ble videreutviklet. Little Boy ble derfor den eneste bomben av denne typen som ble sprengt av USA.

Fat Man

Den andre atombomben, som ble sluppet på byen Nagasaki, var nesten dobbelt så kraftig som Little Boy, selv om den veide omtrent det samme. Istedenfor å føre to atskilte subkritiske masser sammen, hadde man en subkritisk kule med $^{239}_{94}\text{Pu}$, som man ved å minske volumet på gjorde superkritisk. Fordi plutonium fisjonerer meget raskt kan det ikke brukes i atombomber med Little Boy-design. Ved implosjon er det derimot praktisk mulig, og gir bedre effekt enn å bruke uran.



Figur som viser Fat Man med spesifikasjoner. Hentet fra www.howstuffworks.com

Kulen med plutonium er pakket inn i sprengstoff og et nøytronskjold. Ved detonasjonen av sprengstoffet øker trykket rundt kulen, som blir presset sammen. Samtidig startes nøytrongeneratoren inni kulen, og kjedereaksjonen begynner.

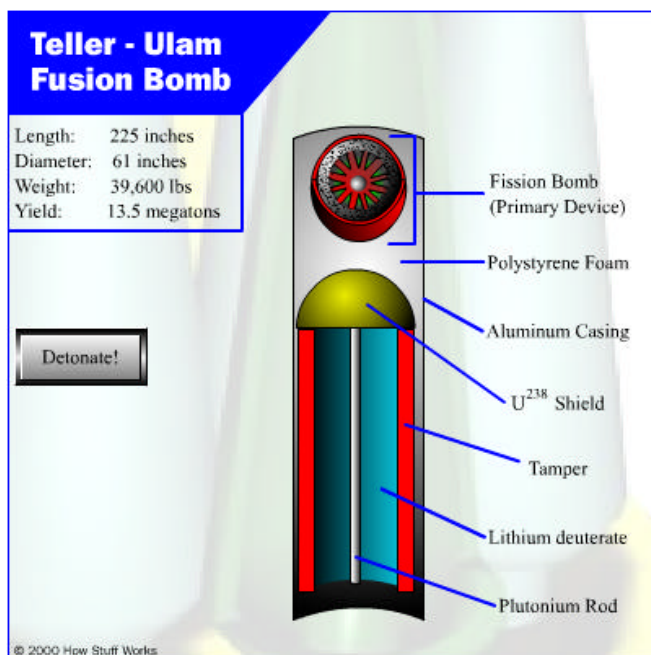
Det vanskeligste aspektet ved dette oppsettet er å få trykket fra sprengstoffet til å komprimere plutoniumet jevnt rundt hele kulen. Ettersom eksplosjonen spres fra der man tenner på eksplosivene, må man ha mange detonasjoner av sprengstoffet samtidig, spredt rundt kulen. Selv dette viste seg å ikke være godt nok. Istedenfor en sammentrykt kule, fikk man en slags golfballeffekt, fordi kulen ble mest sammentrykt ved de forskjellige detonatorene (noe som faktisk førte til større overflateareal). Fisjonen startet, men trykket økte så fort at plutoniumet presset seg ut mellom "hullene i golfballen" før sprengkraften ble stor nok. Ved å bruke en komplisert blanding av hurtig og sakte eksploderende sprengstoff, greide man likevel til slutt å få til implosjon, og Fat Man var et faktum.

H-bombe

De første atombombene utnyttet forholdsvis lite av energien i det kjernefysiske materialet (www.howstuffworks.com hevder Little Boy 1,5 % og Fat Man 17 %) og man lette derfor etter mer effektive måter å lage bombene på. Den enkleste forandringen var å lage et tomrom i

midten av plutoniumskulen og fyller det med materiale som kunne fusjonere (eks. deuterium og tritium). Det høye trykket ved fisjonen av plutoniumet gjorde fusjon mulig, og siden energien frigjort ved fusjon er høyere enn fisjonen var dette ønskelig. Begrensninger ved hvor mye fusjonsmaterie man kunne plassere inni plutoniumet, og beregninger som viste at fusjonsmaterie utenfor plutoniumet ville bli sprengt bort før det rakk å fusjonere gjorde at man begynte å lete etter et helt nytt design for fusjonsbomber.

Teller-Ulam-designet løste dette. Prinsippet at man detonerer en fisjonsbombe ved siden av fusjonsbomben, og bruker energien i røntgenstrålene fra denne til å øke trykket i materialet som kan fusjoneres. Ved samtidig å ha fusjonsmateriale i sentrum av fusjonsmaterien får man høyt trykk, varme og frie nøytroner som utløser fusjonen. (Atombombeoppsettene bygger på informasjon fra www.howstuffworks.com)



Figur av en H-bombe á la Teller-Ulam.
Hentet fra www.howstuffworks.com

Følgene av en atomeksplosjon

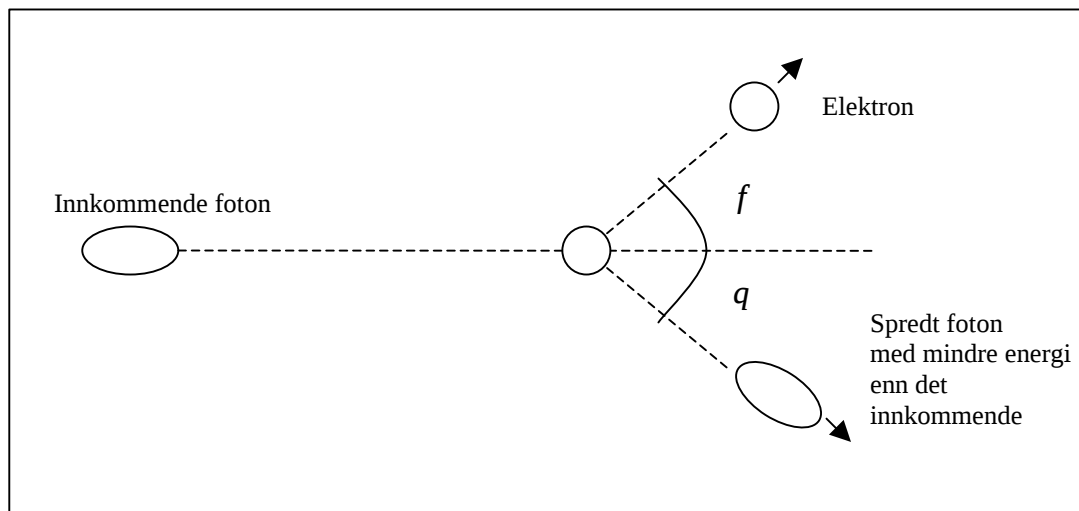
En atombombe har enormt ødeleggende krefter. Så kraftige at man betegner sprengkraften i kilo- eller megatonn TNT. Vi har sett nærmere på den elektromagnetiske siden ved en atombombesprengning.

Elektromagnetisk Puls (EMP)

Ved detonasjon av en atombombe er en del av energien som utløses gammastråling som spres radielt ut fra bomben. Denne gammastrålingen har flere opphav. Den kan sendes ut som en direkte følge av fusjonsprosessen, der en del av masseenergien frigjøres som gammafotoner. Den oppstår også når nøytroner fra fisjonen blir fanget opp av kjernen til ikke-spaltbare kjerner. Kjernen blir da eksitert, og vil ved å sende ut en eller flere gammastråler miste denne energien. Eller den kan oppstå når nøytroner fra fisjonen kolliderer med og overfører energi til

atomkjerner uten å bli tatt opp i kjernen. Atomkjernene sender ut gammafotoner når de returnerer fra eksitert tilstand til grunntilstand.

Alle disse gammautstrålingene oppstår i løpet av noen få milliondels sekund etter detonasjonen av atombomben, og danner sammen den *øyeblikkelige gammastrålingen*, eller *prompt gamma radiation*. Restene av materialet som er blitt spaltet, og en del av materialet som ikke er blitt spaltet er radioaktivt med kort levetid, og vil også sende ut gammastråling. Dette vil pågå over tid og kalles *forsinket gammastråling*, eller *delayed gamma radiation*. Den elektromagnetiske pulsen kommer som en følge av den øyeblikkelige gammastrålingen.



Compton-effekten (Kopi av fig 2.23 i Serway mfl.)

Når gammastrålingen treffer atomene i atmosfæren, kan vi få frigjort elektroner. Det er flere effekter som fører til dette, avhengig av fotonenes energi. Den første, og den som bidrar mest er Compton-effekten (oppdaget av Arthur Compton i 1922). I korte trekk går det ut på at et høyenergifoton som treffer et fritt elektron vil bli avbøyd av elektronet, og noe av fotonets energi overføres til elektronets kinetiske energi.

Vi får også frigjort elektroner ved den fotoelektriske effekten (beskrevet av Einstein i 1905) som oppstår når fotoner med høyere energi enn bindingsenergien til elektronene blir totalt absorbert av elektronene i et atom. Fotonenergien går da både til å frigjøre elektronene fra atomene og til elektronets kinetiske energi.

Til sist kan gammafotoner, med energi større enn 1.02 MeV, som passerer nært en atomkjerne annihileres og danne et elektronpar. Siden paret består av et positivt og et negativt elektron vil dette ikke bidra til EMP (motsatt ladning gir motsatt effekt).

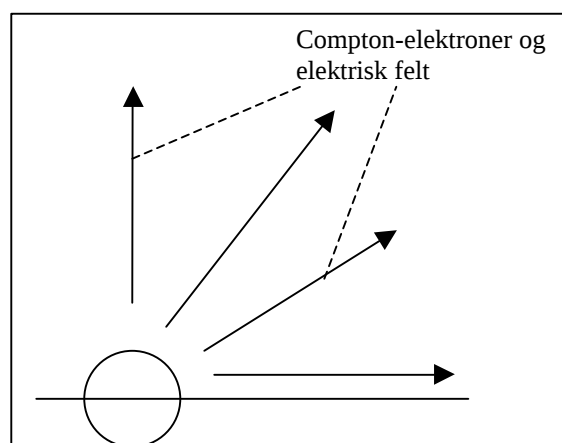


Illustrasjon av tenkt detonasjon over en by.
(Hentet fra <http://popularmechanics.com>)

Den elektromagnetiske pulsen fra en atombombe har forskjellig karakter og virkning avhengig av hvor bomben blir detonert (størrelsen på bomben er naturligvis også en faktor, men bare kvantitativt). Vi skal her bare ta for oss to detonasjonsområder: nær bakken og utenfor atmosfæren. Det kan nevnes at en detonasjon i middels høyde har mange av de samme egenskapene som en nær-bakke-detonasjon, men med større asymmetriske komponenter pga jordoverflaten.

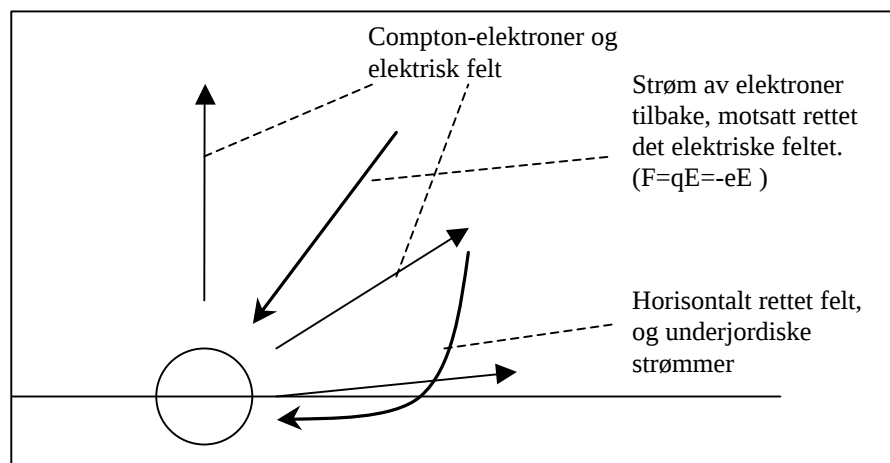
EMP-effekter ved detonasjon nær bakken.

Som nevnt over vil den øyeblikkelige gammastrålingen fra bomben treffe luftmolekylene rundt den, og ved Compton-effekten (hovedsakelig) slå løs elektroner fra molekylene. Disse elektronene beveger seg med høy hastighet vekk fra de tyngre luftmolekylene, med størst fartskomponent rettet radielt vekk fra eksplosjonen. Den relative forflytningen av de negative elektronene og de positive ionene gir opphav til et sterkt elektrisk felt. Gjennomsnittlig avstand et gammafoton forflytter seg før den kolliderer med et elektron er ca 200m.



Compton elektronene spres radielt fra bomben og danner elektriske felt (De følgende tre figurene er variasjoner av fig 1.5 i Ricketts mfl)

Det elektriske feltet som oppstår virker på elektroner i atmosfæren som ikke er truffet av gammafotonene, og fører til en strøm av elektroner tilbake mot detonasjonsområdet. Ettersom jord har høyere ledningsevne enn luft, vil jorden kortslutte denne strømmen ved små høyder. Vi får da også et horisontalt rettet felt og strømmer i jorden.



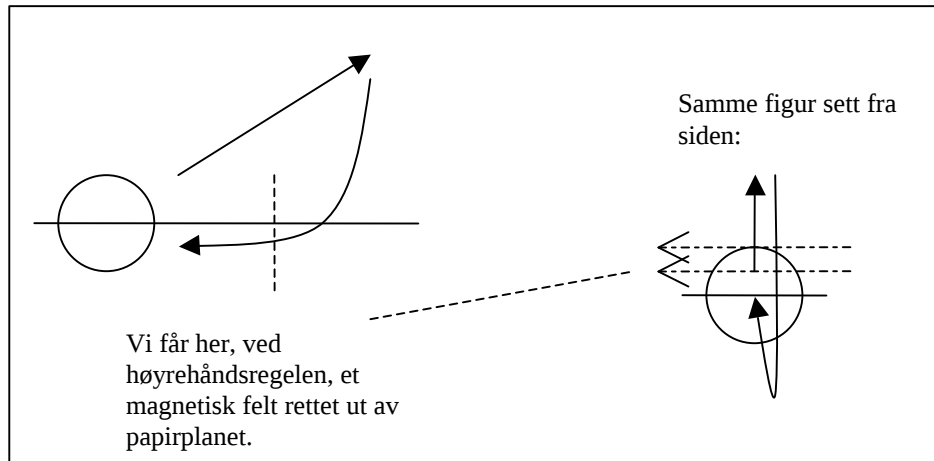
De tjukke pilene viser strøm og elektriske felt tilbake mot bomben

Arne Skodvin Kristoffersen og Henrik Hemmen

Side 22 av 27

09.11.2004

Ser vi på en krets av Compton-elektroner i luften og strømmen av elektroner tilbake mot detonasjonsområdet i bakken, skjønner vi også at dette må føre til et magnetisk felt rettet vinkelrett på radien.

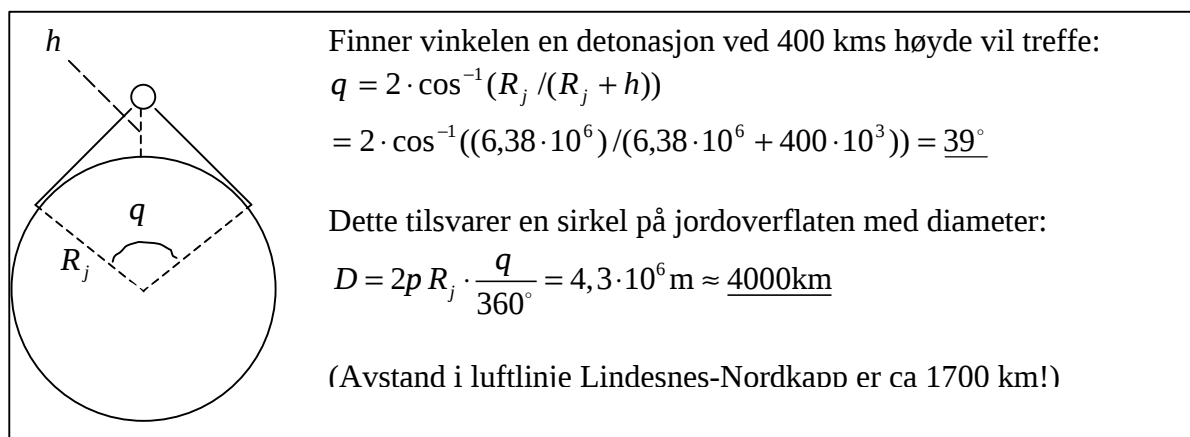


Resultierende magnetiske felt

Det radielle elektriske feltet er forholdsvis kraftig (Ricketts nevner størrelsesordenen 10^5 V/m i noen millisekunder [4]), men avtar hurtig med avstanden. På store avstander vil komponentene på hver side av bomben kansellere hverandre (analogt med feltet fra en dipol langs dipolaksen). Store EMP-effekter fra nær-bakke-detonasjon har vi derfor bare i det området der bomben også har andre ødeleggende effekter.

EMP-effekter ved detonasjon utenfor atmosfæren

I motsetning til den begrensede utstrekningen av EMP ved nær-bakke-detonasjon kan detonasjoner utenfor atmosfæren få effekter over hele kontinenter. I prinsippet vil den elektromagnetiske pulsen kunne nå alt land som er synlig fra detonasjonsområdet.

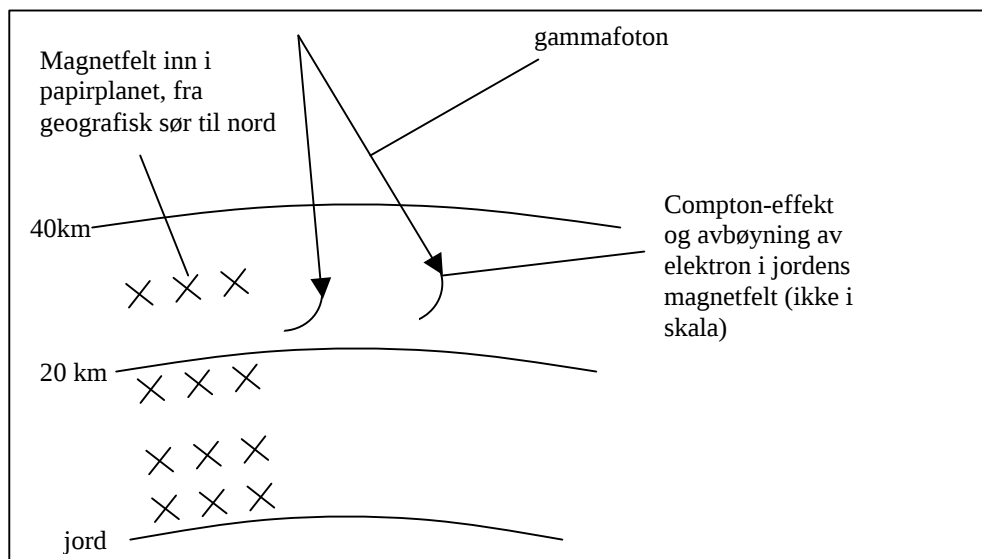


Figur og utregning av EMPens rekkevidde

Den største delen av den øyeblikkelige gammastrålingen blir sendt ut i løpet av ca 10 ns, følgende regnestykke gir oss da en gammapuls med lengde i størrelsesorden noen få meter:

$$s = vt \approx c \cdot 10\text{ns} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} \text{ m} = \underline{3\text{m}}$$

Ved større høyder enn 40 km er atmosfæren så tynn at gammastrålene kan stråle ut nesten uten å reagere med luftmolekylene. Fra 40 km og nedover vil vi derimot få Compton-spredning. Nesten alle gammafotonene har kollidert med elektroner innen de når en høyde over jorden på 20 km. Mellom 40 og 20 km er avstanden Compton-elektronene bruker på å stoppe ca 100 m.



Avbøyning av Compton-elektronene i jordens magnetfelt

Fra figuren over skjønner vi at vi (ved ekvator) vil få liten EMP-effekt i retning sør/nord fra detonasjonsområdet, fordi Compton-elektronene her går tilnærmet parallelt med magnetfeltet. Effekten avhenger riktignok av hvilken breddegrad detonasjonen skjer på. På grunn av manglende måleresultater og varierende fotonenergi er det vanskelig å si noe nøyaktig om hvordan feltene i EMPen vil være. Vi kan allikevel gjøre noen antagelser, og si noe om hvordan feltet vil spres:

Om størstedelen av elektronene blir avbøyd som på figuren over vil vi få magnetfelt inn i papirplanet vinkelrett på radiell retning, i tillegg til radielt rettede elektriske felt. Det elektromagnetiske feltet spres utover med lysfarten og holder derfor følge med gammastrålingen. For hver gang noe av gammastrålingen går over til energi i Compton-elektronene vil feltet øke. Når all gammaenergien er absorbert vil det fortsette å ekspandere som et kuleskall til det treffer jorden.

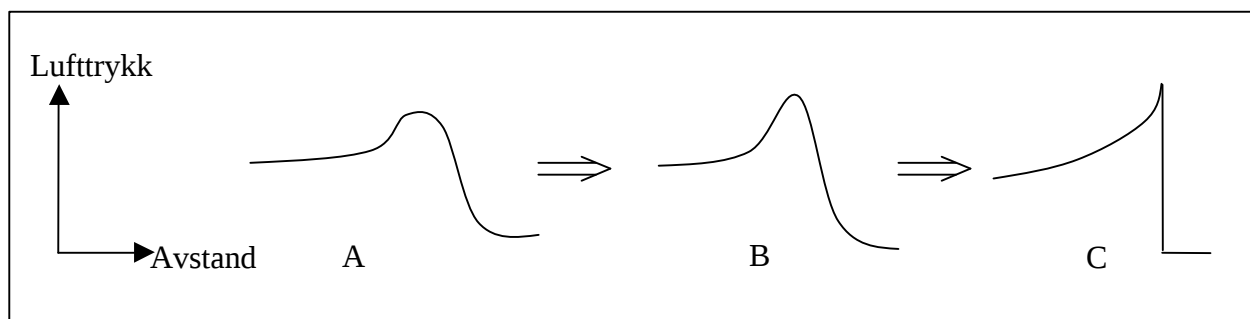
Siden atmosfæriske atombomber ikke er noe som lett kan utføres på laboratoriet, og USA og Sovjet inngikk avtale om å stoppe atmosfæriske prøvesprengninger i 1968 er eksakte måledata vanskelig å få tak i (og i beste fall militære hemmeligheter). Federation of American Scientist hevder at EMPen fra Compton-elektronene varer omtrent 1 mikrosekund, og at det induerte elektriske feltet kan komme opp i størrelsesorden 10-talls kV/m. Man kan lett forstå at så høy spenning i strømledninger, telefonledninger, eller elektriske ledere generelt kan

kortslutte elektriske systemer. (EMP-delen bygger hovedsakelig på informasjon hentet fra [4] og [2].)

Noen andre konsekvenser ved detonasjon av atombomber

Trykkbølge (sjokkbølge)

Fisjonen ved sprengningen skaper en enormt høy temperatur som varmer opp gassene og materialet rundt bomben. Øker du temperaturen i en gass, vil trykket også øke. Dette trykket fører til at gassens volum øker, og vi får en trykkbølge som beveger seg vekk fra bomben. Straks etter sprengningen vil trykkbølgen ha form omtrent som bølge A under. Ettersom temperaturen og trykket bak bølgefronten er høyere enn trykket foran vil gassene bak fronten ha høyere fart enn fronten, og etter en kort stund får vi dannet en sjokkbølge lik bølge C. Bølgen spres utover med denne formen, men avtar i intensitet. 10 sekunder etter detonasjonen, 4 km unna, er bølgen fremdeles sterk nok til å knuse vinduer, men er nesten uten energi 12 km unna [2].



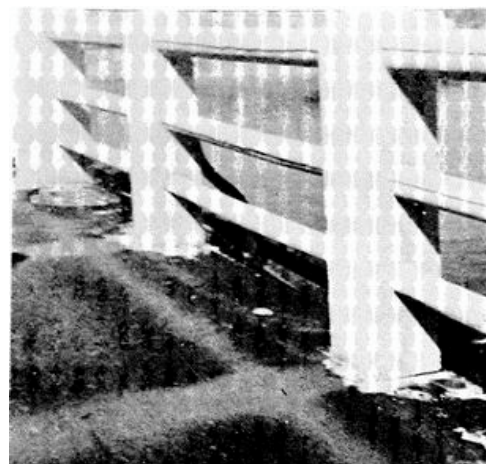
Utviklingen av trykkbølgen fra atombombe (kopi av fig. 1.57 i Glasstone)

Termisk stråling

Ved en atombombesprengning dannes det en ildkule med temperatur helt opp i flere millioner Kelvin. Dette er nær det vi finner i sentrum av solen. Kulen vil, selv om temperaturen synker til noen tusen kelvin noen hundredeler etter sprengningen, utstråle en intens varmestråling. Avhengig av atmosfæriske forhold (forurensning, lufttetthet etc.) vil dette kunne gi hudskader på over 4 kms avstand [2].

En viktig faktor som forsterker skadeeffekten er at varmestrålingen sendes ut over et kort tidsintervall. Hvis den samme energien hadde blitt utstrålet over lengre tid ville varmen som oppstår ved absorpsjon blitt mindre. Dette fordi varmen ville blitt transportert vekk fra legemet som absorberer energien. Fordi strålingen er begrenset til noen sekunder med veldig høy energi, blir varmen også høy.

Strålingen går i rette linjer vekk fra bomben, og områdene skjult fra bombestrålingen vil ikke bli påvirket av den termiske strålingen. Et eksempel på dette kan sees til høyre.



I skyggen bak dette gjerdet er asfalten ikke blitt svidd (bildet hentet fra Glasstone)

Oppsummering

I noe av kildematerialet vi har brukt til dette prosjektet har forfatterne vært påpasselige med å bruke navnet kjernefysiske våpen (nuclear), istedenfor atombomber. De begrunner dette ved at energien til bombene kommer fra atomkjernen, og derfor ikke omfatter hele atomet. Vi mener at vi i dette prosjektet har vist at navnet atombombe allikevel er mest passende. Effektene til bomben tar form som molekylære trykkbølger så vel som elektromagnetiske feltvariasjoner og strømmer. Selv om eksistensen til atomåpen og deres bruk i krig er et omstridt tema, var deres utvikling en katalysator for kjernefysikken. Dette er noe vi fremdeles drar nytte av i kjernefysiske kraftverk og i teoretisk forskning.

Bibliografi

- [1] L.Bedash – *Scientists and the Development of Nuclear Weapons* - Humanities press - 1995
- [2] S.Glasstone – *The Effects of Atomic Weapons* - The Combat Forces Press - 1950
- [3] R.Rhodes – *Dark Sun* - Simon & Schuster - 1995
- [4] L.W. Ricketts; J.E. Bridges; J.Miletta – *EMP Radiation and Protective Techniques* - John Wiley & Sons - 1976
- [5] H.D. Young; R.A. Friedman – *University Physics/Sears and Zemansky/*
- [6] M. Alonso; E. Finn – *Physics/Addison-Wesley*
- [7] L. Wilets – *Theories of nuclear fission* - Clarendon Press - 1964

http://www.awe.co.uk/main_site/scientific_and_technical/featured_areas/dpd/computational_physics/nuclear_effects_group/electromagnetic_pulse/index.html

<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/emp.htm>

<http://www.abc.net.au/science/k2/moments/s380431.htm>

<http://www.howstuffworks.com/nuclear-bomb.htm/printable>

<http://science.howstuffworks.com/e-bomb.htm/printable>

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/5971/emp.html>

<http://popularmechanics.com/science/military/2001/9/e-bomb/print.phtml>

<http://www.barryrudolph.com/pages/atomic.html>

<http://www.ssb.no/aarbok/geografi.html>

<http://www.spartacus.schoolnet.co.uk/2WWatom.htm>

<http://www.atomicarchive.com/>

<http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Chemistry/NuclearChemistry/NuclearWeapons/FirstChainReaction/FirstNuclWeapons/mainpage.htm>

<http://www.chemcases.com/2003version/nuclear/nc-07.htm>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/u235chn.html>