

Radioaktivitet



Indhold

Kapitel 1: Atomets opbygning og vejen til forståelsen af radioaktivitet.....	2
Kapitel 2: Farlighed, baggrundsstråling og måling af radioaktivitet	8
Kapitel 3: Typer af radioaktiv stråling	15
Kapitel 4: Radioaktivt henfald, datterkerner og halveringstid	24
Kapitel 5: Atombomben.....	33
Kapitel 6: Atomkraft	41

prompt og fagligt indhold af Mads Lenskjær - opstilling chatGPT 4o

Kapitel 1: Atomets opbygning og vejen til forståelsen af radioaktivitet

Indledning

I dette kompendie skal vi dykke ned i noget, du sikkert forbinder med atombomber og atomkraftværker: **radioaktivitet**. Du har måske set en film, hvor jorden er blevet giftig og ubeboelig efter en atomkrig. Men radioaktivitet er meget mere end skrækscenarier og science fiction. Faktisk er det en **helt naturlig del af din hverdag**. Det spiller en afgørende rolle inden for lægevidenskab, industri, arkæologi og geologi og meget mere – og forståelsen af radioaktivitet hjælper os med at forstå, hvordan verden omkring os hænger sammen.

Afsnit 1. Radioaktivitetens opdagelse

Forestil dig, at du er forsker i slutningen af 1800-tallet. Du arbejder med **fluorescerende stoffer** – materialer, som kan lyse i mørke, hvis de først har været belyst. Men en dag sker der noget mærkeligt. Et stof lyser uden at være blevet udsat for lys. Man kan ikke se lyset direkte, men på en særlig fotoplade efterlader det mørke pletter – **selv om pladen har ligget i totalt mørke!**

Det var den franske fysiker **Henri Becquerel**, der i **1896** opdagede dette fænomen. Han kaldte det for **radioaktiv stråling**. Snart viste det sig, at især uranholdige stoffer som **uranmalm** kunne udsende denne mystiske stråling. Det blev starten på en vild videnskabelig rejse ind i atomets indre.

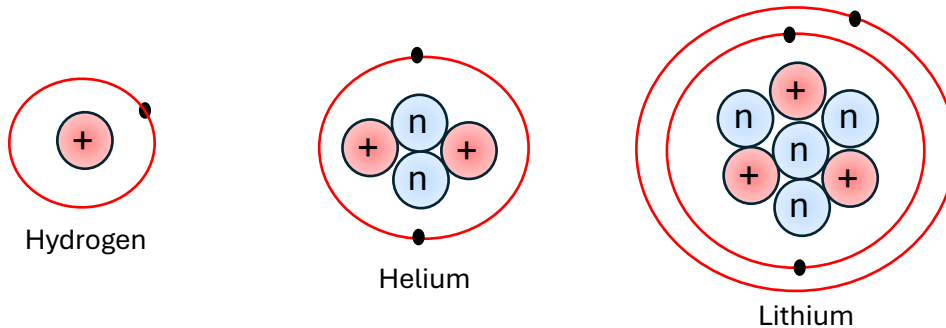
Afsnit 2. Atomets opbygning

Du har sikkert hørt, at alt stof er opbygget af **atomer**. Der findes 92 naturlige grundstoffer, og hvert atom består af endnu mindre partikler: **protoner**, **neutroner** og **elektroner**. Førhen troede man, at atomer ikke kunne deles op i mindre dele. Men med opdagelsen af radioaktivitet stod det klart, at noget foregik inde i selve atomet da strålingen viste sig at komme inde fra selve atomet.

I **1897** opdagede **J.J. Thomson** elektronen – en **negativt ladet partikel**, som vejer næsten ingenting og bevæger sig uden for atomets kerne. I **1911** opdagede **Ernest Rutherford**, at næsten hele atomets masse er samlet i en **tæt, positiv kerne**, og at det meste af atomet ellers er tomt. Her befinder sig de **positivt ladede protoner**.

I **1913** fandt **Henry Moseley** ud af, at **antallet af protoner** i kernen – og ikke massen – bestemmer hvilket grundstof der er tale om. Det kaldes **atomnummeret**, og det er det tal, du ser i det periodiske

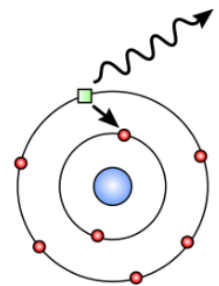
system. Men der var stadig noget, der ikke passede: *Når man målte atomets masse, vejede det mere, end antallet af protonerne kunne forklare.* I 1932 opdagede **James Chadwick** den manglende partikel: **neutronen**. En neutral partikel, som findes i kernen og har omtrent samme masse som en proton.



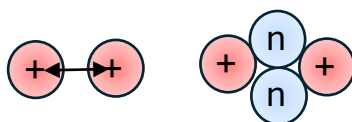
Afsnit 3. Bohrs atommodel

Nu havde forskerne afsløret atomets vigtigste byggeklodser. Men der var stadig en udfordring: *Hvorfor falder elektronerne ikke bare ned i den positivt ladede kerne, som de burde, ifølge fysikkens regler?* Og hvorfor udsender atomer kun **bestemte farver** (lys) og ikke et blandet spektrum?

Den danske fysiker **Niels Bohr** løste i 1913 problemet med sin atommodel. Han foreslog, at elektroner kun kan befinde sig i bestemte **baner** eller **elektronskaller** omkring kernen – ligesom planeter, der kredser om solen. Det fungerer lidt ligesom en elevator – man kan ikke gå ud på 2,5 sal men enten 2 sal eller 3 sal. Elektronerne kan hoppe fra én bane til en anden, men aldrig være "midt imellem". Når de hopper en bane længere ind, udsendes lys med en bestemt farve, svarende til energiforskellen mellem banerne.



I hver elektronskal fandt man ud af at der kun er plads til et bestemt antal elektroner: 2 i den inderste, 8 i den næste, og derefter 18, 32. Da der altid er **lige mange elektroner og protoner** i et atom, kan man tegne et atoms elektronskaller ud fra dets atomnummer ved at afsætte elektronerne indefra og ud.



Afsnit 4. Neutronens rolle

Neutronen har en vigtig opgave i kernen: *den hjælper med at holde sammen på de positivt ladede protoner, som ellers ville frastøde hinanden.* Jo flere protoner, jo flere neutroner skal der til for at skabe **stabilitet** i kernen. Hvis balancen mellem protoner og neutroner bliver skæv, kan kernen blive **ustabil** – og det kan føre til **radioaktivstråling**.

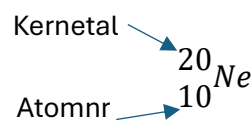
Fordi atomer vejer så lidt, bruger man en særlig måleenhed, som kaldes **unit (u)**. En proton og en neutron vejer hver 1 unit, mens elektroner næsten intet vejer ($1/2000$ unit). Derfor kan man finde antallet af neutroner ved at tage **atomets masse minus antal protoner**. Fx har natrium (Na) en masse på 23 u og 11 protoner:

$$\text{Antal neutroner i Natrium} = \text{Vægt} - \text{Antal Protoner} = 23 \text{ u} - 11 = 12 \text{ neutroner.}$$

Afsnit 5. Isotoper

I begyndelsen af 1900-tallet opdagede forskere, at nogle atomer af samme grundstof har **forskellig masse/vægt**. Fx fandt man, at de fleste **neon-atomer** vejer 20 u, men nogle få vejer 22 u. Først troede man, det var en fejl, men siden viste det sig, at disse var **isotoper** – varianter af det samme grundstof med **forskelligt antal neutroner**.

Neon-20 har 10 protoner og 10 neutroner, mens Neon-22 har 10 protoner og 12 neutroner. Isotoper skrives ofte med deres masse: **Neon-20** eller som neuklidnotation:



Mange isotoper er stabile, men nogle er **radioaktive**.

^{19}Na	^{20}Na	^{21}Na	^{22}Na	^{23}Na	^{24}Na	^{25}Na
^{18}Ne	^{19}Ne	^{20}Ne	^{21}Ne	^{22}Ne	^{23}Ne	^{24}Ne
^{17}F	^{18}F	^{19}F	^{20}F	^{21}F	^{22}F	^{23}F

Afsnit 6. Isotopkortet

I dag kender vi **hundredvis af isotoper**. I det periodiske system ser du kun den mest almindelige udgave af hvert grundstof, men bag hvert grundstof gemmer sig mange flere.

Et **isotopkort** er et særligt skema, hvor alle kendte isotoper er placeret. Hver række i isotopkortet indeholder isotoper af et atom. I række 1 er der derfor alle isotoper af Hydrogen atomnr 1. I række nr 2

alle isotoper af Helium osv. Udover isotoperne kan man også se, hvilke isotoper der er **stabile (sorte felter)**, og hvilke der er **radioaktive** (farvede felter). Mange radioaktive isotoper udsender enten **alfa-, beta- eller gammastråling**, som du snart skal høre mere om.

Afslutning

I dette kapitel har du fået et overblik over den fascinerende opdagelseshistorie bag atomets opbygning – og grundlaget for radioaktivitet. Du har lært om protoner, neutroner, elektroner og isotoper. Du har set, hvordan forskere gradvist afslørede atomets struktur og hvordan radioaktivitet opstår, når der er ubalance i kernen.

Det lyder måske vildt, at du lever med radioaktive stoffer omkring dig – men det gør du. Det kaldes **baggrundsstråling**, og det skal vi dykke ned i i næste kapitel.

Arbejdsspørgsmål:

Hvad er for et fænomen der leder frem til opdagelsen af radioaktive stoffer?

Beskriv hvad et atom er opbygget af og tegn en tegning af hvordan du forestiller dig det ser ud?

Hvornår og i hvilken rækkefølge er de forskellige elementarpartikler inde i atomet opdaget?

	Opdaget
Elektron	
Proton	
Neutron	

Ekstra: Hvordan finder Rutherford ud af at det meste af atomet er tomt?

Hvis man får at vide at Natrium har atomnr 11. Hvad fortæller det om natriums opbygning?

Tegn atom nr 12 Magnesium ved at bruge Bohrs atommodel?

Hvis man sætter to protoner sammen - hvad vil de så gøre?

Hvilken rolle spiller neutronerne i atomets kerne?

Hvad vejer de forskellige elementarpartikler

	vægt
Elektron	
Proton	
Neutron	

Hvor mange neutroner indeholder Natrium når det har atomnr 11 og vejer 23 unit?

Hvor mange neutroner indeholder Klor når den har atomnr 17 og vejer 35 unit?

Forklar hvad en isotop er?

Brug nuklidnotationen at opskrive kulstof-14 og Kalium-40?

Find carbon/kulstof på et isotopkort. Hvor mange forskellige udgaver (isotoper) findes der af Carbon?

Hvordan ser man om et isotop er radioaktivt eller stabilt?

Undringsspørgsmål:

Hvis man ikke kan se et atom – hvordan kan man så egentlig være sikker på, at det findes?

Hvad ville der være sket, hvis Becquerel ikke havde glemt sin fotoplade i skuffen?

Hvis Bohrs model er så “gammel”, hvorfor bruger vi den stadig i undervisningen?

Hvordan ville verden se ud, hvis alle isotoper var stabile og ingen af dem radioaktive?

Hvad siger det om videnskab, at det tog over 30 år at forstå atomets opbygning – og at vi stadig lærer nyt?

Undersøg selv: Hvordan kan elektronbaner og elektronspring skabe farver og lys?

Kapitel 2: Farlighed, baggrundsstråling og måling af radioaktivitet

Indledning

I forrige kapitel så vi på, hvordan man i slutningen af 1800-tallet og starten af 1900-tallet langsomt kortlagde atomets indre med protoner, elektroner og neutroner. Vi så, at neutronerne spiller en vigtig rolle ved at holde sammen på de positivt ladede protoner i kernen. Men vi så også, at der kan opstå ubalance i kernen, hvilket kan føre til udsendelse af radioaktiv stråling. I dette kapitel skal vi se nærmere på, hvordan man måler radioaktivitet, hvor det findes i hverdagen, og hvorfor det kan være farligt.

Afsnit 1. Ioniserende stråling og hvorfor det er farligt

Mange ved allerede, at radioaktivitet kan være farligt, og det er en vigtig grund til, at affald fra atomkraft skal håndteres med stor forsigtighed. *Men hvad gør det farligt?* Forskellen mellem radioaktive stoffer og radioaktiv stråling er vigtig: *De radioaktive **stoffer** er selve de ustabile atomer, mens strålingen er den **energi**, de udsender.* Det er strålingen, der kan skade os.

Radioaktiv stråling er farlig, fordi den er **ioniserende**. Det betyder, at den kan slå elektroner løs fra atomer i din krop og danne **ioner**. Disse ioner kan ødelægge molekyler, f.eks. proteiner eller DNA. Et almindeligt mål for strålingen er vandmolekyler (H_2O), som der er masser af i kroppen. Når et vandmolekyle rammes, kan det blive til H_2O^+ fordi molekylet nu har overvægt af positive protoner. H_2O^+ vil herefter forsøge at få elektronen tilbage fra andre molekyler. Dette skaber en kædereaktion, der kan forstyrre kroppens funktion. Ved meget høje doser holder kroppen simpelthen op med at fungere – det kaldes *stråledøden*. Det sker kun ved ekstreme begivenheder som en atombombe.

Afsnit 2. Stråling og risiko for kræft

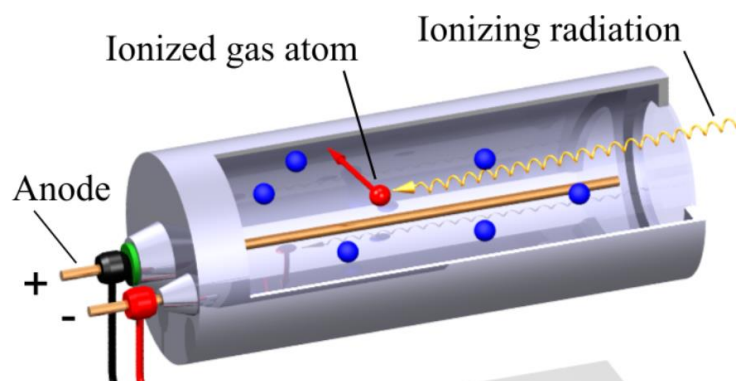
Selv lavere doser af stråling kan være farlige over tid. Det skyldes, at ioner kan beskadige DNA inde i cellernes kerner. DNA er kroppens software – det styrer alle processer i kroppen. Hvis DNA'et får fejl pga. stråling, kan det resultere i celler, der begynder at opføre sig forkert. De fleste fejl i DNA'et er enten ubetydelige eller bliver rettet af

kroppen selv. Nogle gange går det dog galt for en celleds DNA hvorefter kroppens immunforsvar effektivt slår den ihjel. Med alderen kan det dog ske at en celle slipper igennem kontrollen og bliver til



en **kræftcelle**. Kræftceller deler sig ukontrolleret og danner knuder/svulster fyldt med kræftceller. Med tiden kan kræftcellerne sprede sig til hele kroppen hvorefter den ikke kan fungere og man dør.

En af de første, der arbejdede med radioaktivitet, var **Marie Curie**. Hun lavede banebrydende opdagelser, men døde senere af leukæmi – en form for blodkræft. Hendes notesbøger og instrumenter er stadig så radioaktive, at de kun kan ses bag beskyttende glas. Dengang kendte man ikke til strålingens farlighed og troede faktisk, at det kunne have helbredende effekter. Man kunne endda købe sodavand med radioaktive stoffer i. Det var en dyrt købt lære.



Afsnit 3. Måling med geiger-müller-rør

Den ioniserende effekt af stråling kan bruges til at **måle** radioaktivitet. Et af de mest kendte apparater er et **Geiger-Müller-rør** (også kaldet GM-rør eller geigertæller). Inde i røret er der en gasart. Når stråling rammer gassen, slår den elektroner fri, og der opstår ioner i gassen. Disse ioner gør det muligt for en elektrisk strøm at løbe mellem to elektroder i røret. Hver gang dette sker, giver apparatet et lille **bip** – så jo flere bip, jo mere stråling.

I fysiklokalet skal man være forsigtig med GM-røret. Det har en tynd membran, som strålingen skal passere. Hvis membranen beskadiges, slipper gassen ud, og røret virker ikke længere. Derfor er der ofte en beskyttelseskappe på. Når den tages af for at få nøjagtige målinger, skal man være ekstra opmærksom.

Afsnit 4. Enheder: Bq, Gy og Sv

Ligesom vi måler temperatur i grader og vægt i kilogram, bruger vi også bestemte enheder til at måle radioaktivitet. En af de vigtigste er **Becquerel (Bq)**, som angiver hvor aktivt et radioaktivt stof er. Helt konkret fortæller 1 Bq, at der sker 1 radioaktivt henfald pr. sekund. Når et radioaktivt atom henfalder betyder det at der udsendes radioaktiv stråling. Jo flere henfald, desto større aktivitet har stoffet.

Men det er ikke nok at vide, hvor mange henfald der sker. Det er også vigtigt at vide, hvor meget energi denne stråling overfører til kroppen. Derfor bruger man enheden **Gray (Gy)**. 1 Gy svarer til, at strålingen har afsat 1 joule energi i 1 kilogram kropsvæv. Det fortæller altså, hvor meget stråling kroppen modtager.

Endelig er det vigtigt at vurdere, hvor skadelig strålingen er. Her bruger man enheden **Sievert (Sv)**. Sievert tager højde for, hvilken type stråling der er tale om (fx alfa, beta eller gamma), og hvilket væv i kroppen der rammes. Det er derfor den bedste enhed til at vurdere den biologiske virkning på kroppen.

Til sammenligning blev der tidligere brugt nogle ældre enheder: **rad** (i stedet for Gy) og **rem** (i stedet for Sv). I dag bruger man internationalt **Gy og Sv**, men i fx USA bruges rad og rem stadig visse steder. $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$, og $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

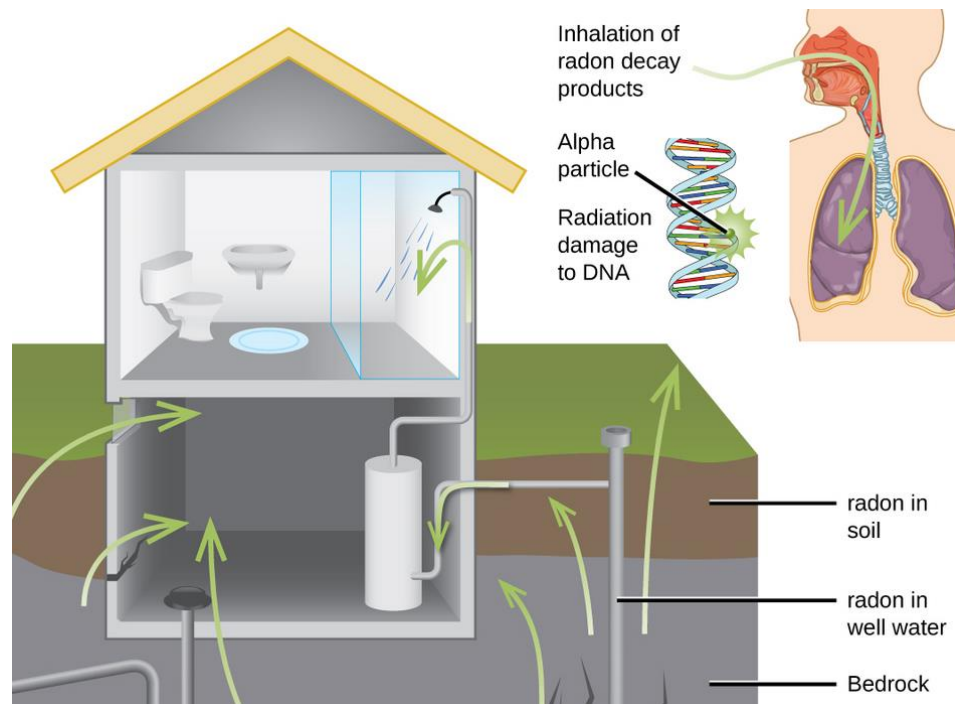
En dødelig stråledosis er omkring **4-5 Sv**. Det lyder voldsomt, men i hverdagen får vi kun omkring **0,004 Sv om året** (4 mSv), og det meste kommer fra **naturlige kilder**.

Afsnit 5. Baggrundsstråling

Baggrundsstråling er den naturlige stråling, du bliver udsat for hele tiden. Den kommer fra:

- **Rummet:** Sol og stjerner sender stråling, som delvist bremses af atmosfæren.
- **Jorden:** Mineraler i undergrunden indeholder radioaktive stoffer.
- **Bygninger:** Materialer som beton og mursten kan indeholde radioaktive grundstoffer.
- **Din krop:** Isotoper som **kulstof-14** og **kalium-40** findes naturligt i kroppen.
- **Menneskeskabte kilder:** Røntgenbilleder, atomkraft, radioaktive lægemidler.

Baggrundsstrålingen kan måles med et GM-rør, men fordi radioaktivitet udsendes tilfældigt, varierer målingerne. Derfor tager man ofte flere målinger og finder et gennemsnit. For visse arbejdsgrupper er baggrundsstrålingen speciel vigtig. Det gælder selvfølgelig dem som arbejder med radioaktive stoffer men også personer som arbejder på et fly som f.eks. en pilot eller stewardesse. Grunden er at atmosfæren beskytter os imod strålingen fra rummet og når de befinder sig i et fly i 10 km's højde er der mindre beskyttelse.



Afsnit 6. Radon og kulstof-14

Et vigtigt radioaktivt stof i Danmark er **radon**. Det er en gas, som siver op fra jorden og kan samle sig i huse, især i ældre huse med kældre. Om vinteren er problemet størst, fordi varm luft i huset suger radon op gennem sprækker i huset. Man kan mindske risikoen ved at **lufte ud** eller tætné gulve og vægge. Radon er den **næst hyppigste årsag til lungekræft** efter rygning.

Kulstof-14 er en naturlig isotop i kroppen, som giver lidt radioaktivitet indefra. Det er slet ikke farligt, fordi mængden er så lille. Faktisk er mange almindelige ting, som fx **bananer**, også radioaktive pga. **kalium-40** – men igen, i så små mængder, at det ikke udgør en risiko.

Afslutning

I dette kapitel har vi set, hvordan radioaktivitet måles, og hvor den findes i hverdagen. Selvom det kan lyde skræmmende, lever vi alle sammen trygt med **baggrundsstråling** omkring os. Kroppen er god til at beskytte sig, og lidt stråling kan faktisk holde vores immunforsvar i form – et fænomen kaldet **hormese**. Men det er stadig vigtigt at forstå forskellen på strålingstyper og deres styrke. I næste kapitel skal vi netop se på de tre forskellige former for radioaktiv stråling: **alfa-, beta- og gammastråling**.

Arbejdsspørgsmål:

Hvad er forskellen mellem radioaktive stoffer og radioaktiv stråling

Forklar hvad det betyder at strålingen kan være ioniserende?

Hvad kan ioniseringen skade inde i kroppen?

Prøv at forklare hvorfor det kan være et problem at vandet inden i kroppen bliver ioniseret?

Forklar hvilken rolle DNA spiller inde i kroppen

Hvad har ioniserende stråling med kræftceller at gøre?

Hvad kendetegner en kræftcelle og hvordan kan den være farlig?

Et Geiger-muller-rør bruges til at måle stråling. Prøv at forklare hvordan det gør det?

På hvilken måde udnytter GM røret den ioniserende effekt af strålingen?

Hvad er der sket når der er sket et henfald?

Hvad er enhedens forkortelse og hvad fortæller enheden om strålingen?

	Enhed	Beskrivelse
Becquerel		
Gray		
Sievert		

Hvilken måleenhed(er) ville du benytte hvis du skulle ind og besøge et radioaktivt område som f.eks. atomkraftværket Tjernobyl?

Hvorfor måler man den dødelige dosis i Sivert og ikke Gray eller Becquerel?

Forklar hvad baggrundsstrålingen er?

Hvor kommer baggrundsstrålingen fra?

Kan du komme på nogle jobs udover dem i fly hvor baggrundsstrålingen er relevant at forholde sig til ud?

Der er ofte særlige regler for gravide i forhold til baggrundsstråling. Hvordan kan det være?

Forklar hvad problemet med radon er i danske huse?

Hvis det viste sig at der var radon i din kælder. Hvad ville du så gøre?

Ekstra: Undersøg vha. et isotop kort hvad det er for noget stråling radon udsender?

Strålingen kan også komme inde fra kroppen selv. Hvilken isotop er der her tale om?

Slå op i et isotopkort og finde ud af hvilken type stråling dette isotop udsender?

Undringsspørgsmål:

Hvis stråling er usynlig og lydløs – hvordan ville verden være, hvis vi kunne se den?

Kan det passe, at lidt stråling måske er sundt – og hvor går grænsen mellem farlig og ufarlig?

Hvorfor tror du, at folk engang troede, at radioaktive stoffer var helbredende?

Hormese er et spændende begreb. Kan du tænke på andre steder hvor det også kunne have betydning for dig?

Forsøg: Måling af baggrundsstråling

Vi skal undersøge den baggrundsstråling som vi er omgivet af i dagligdagen!

Resultater:

	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Gennemsnit
100 sek						
Gennemsnit 10 sek						

Behandling af Resultater:

- Hvorfor ændre baggrundsstrålingen sig fra måling til måling?

- Hvorfor skal man foretage flere målinger i forsøget - er en ikke nok?

forsøg: Radioaktiv sten fra Grønland eller saltet KaliumChlorid

Prøv at mål den radioaktive stråling fra en Grønlandsk sten eller saltet KaliumChlorid! Når du/I har målt strålingen skal man huske at baggrundsstrålingen jo er en del af disse målinger! Derfor skal man trække baggrundsstrålingen fra som jo lige er blevet målt!

	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Gennemsnit
100 sek				
Gennemsnit 10 sek				
Fratrukket Baggrundsstråling				

Kapitel 3: Typer af radioaktiv stråling

Indledning

I det forrige kapitel så vi på den stråling, som vi lever med i vores dagligdag. Vi så, hvordan man kan måle strålingen med et Geiger-Müller-rør og hvilke enheder der bruges. Vi så også, hvorfor stråling kan være farligt, navnlig fordi den er ioniserende og kan skade kroppens celler og DNA for derved at føre til kræft. I dette kapitel skal vi se på de forskellige typer af stråling og deres egenskaber. I forrige kapitel blev ordet "*henfald*" brugt som betegnelse for det, der sker, når et radioaktivt stof udsender stråling. Det fænomen går vi nu mere i dybden med.

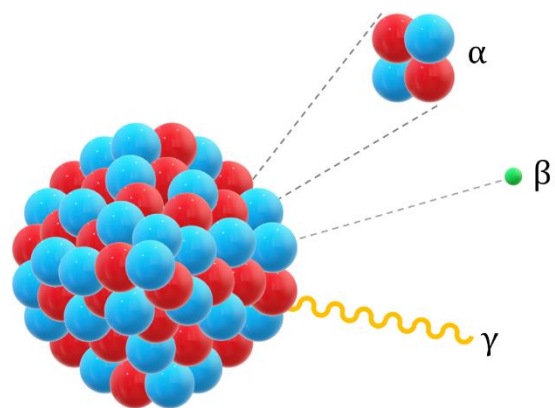
Afsnit 1. Strålingsformer: Partikel og elektromagnetisk

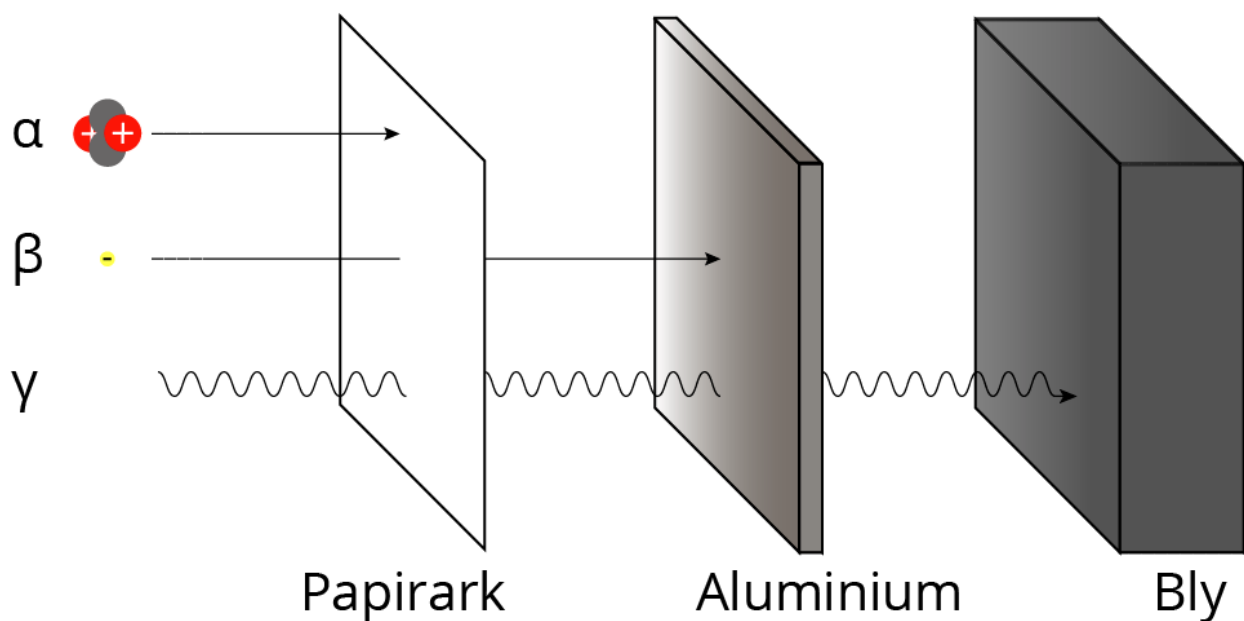
Radioaktiv stråling deles overordnet i to typer: **partikelstråling** og **elektromagnetisk stråling**.

Partikelstråling består af små partikler, som har masse, mens elektromagnetisk stråling består af bølger og har derfor ikke masse.

Der findes tre typer radioaktiv stråling: **alfa (α)**, **beta (β)** og **gamma (γ)**. Alfastråling består af heliumkerner (2 protoner og 2 neutroner) og tilhører derfor partikelstrålingen. Betastråling består af elektroner og er også partikelstråling. Gammastråling er elektromagnetiske bølger og tilhører den anden type.

Det specielle ved radioaktiv stråling er, at den **altid kommer fra kernen af et atom**. Det gælder også beta-stråling, selvom elektroner normalt findes i elektronskallerne. Radioaktiviteten opstår fordi der er en ubalance inde i selve kernen imellem neutronerne og protonerne. Strålingen skal ses som et forsøg på at løse denne ubalancen.

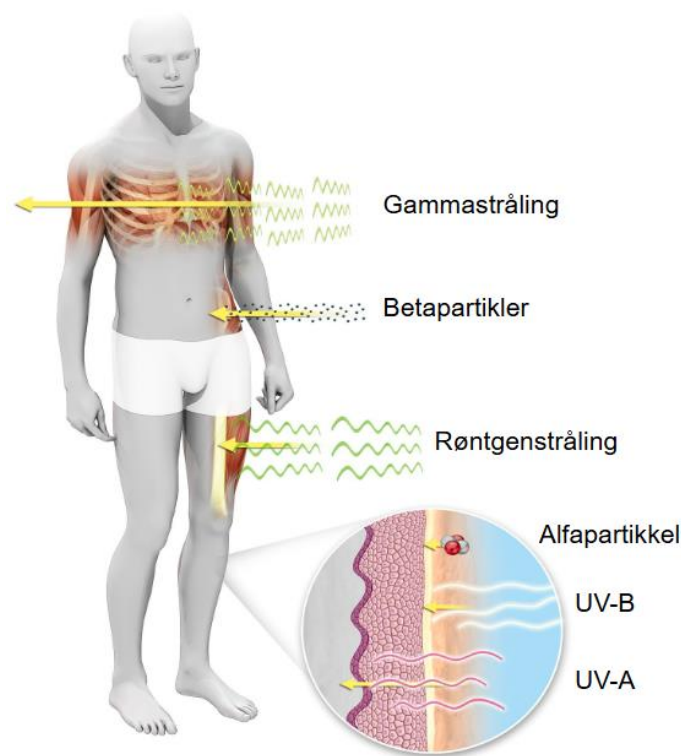




Afsnit 2. Gennemtrængningsevne og beskyttelse

Vi har tidligere set, hvordan stråling kan give kræft og forårsage strålesyge. Det er derfor vigtigt at vide, hvordan man kan beskytte sig. Strålingens farlighed afhænger meget af dens evne til at trænge ind i kroppen:

- **Alfastråling** er den letteste at stoppe. Den består af store, tunge partikler og bevæger sig kun ca. 10 cm i luft, fordi den hurtigt bremses. Et stykke papir kan stoppe alfastråling fuldstændigt.
- **Betastråling** består af lette elektroner, der kan bevæge sig hurtigere og trænger længere ind end alfastråling. Den stoppes dog effektivt af en tynd aluminiumsplade.
- **Gammastråling** er meget gennemtrængende, da den er en bølge og ikke en partikel. Den kan gå gennem menneskekroppen og de fleste materialer. Kun tykke lag bly eller beton kan bremse gammastråling effektivt.



Afsnit 3. Farlighed og virkning

En af de vigtigste enheder til at måle farligheden af stråling er **Sievert (Sv)**, som vi gennemgik i sidste kapitel. Den biologiske skade afhænger af strålingens type og hvor i kroppen, den rammer.

- **Alfastråling** er ret ufarlig uden på kroppen, fordi den ikke kan trænge igennem huden. Men hvis man indånder eller indtager et stof, der udsender alfastråling, er det ekstremt farligt. Alfastrålingen smadrer cellerne indefra fra kroppen selv.
- **Betastråling** kan trænge lidt ind i huden og er derfor farligere end alfastråling, men ikke så farlig som gamma.
- **Gammastråling** trænger gennem kroppen og kan skade indre organer. Den er mindre lokal, men kan give skader bredt.

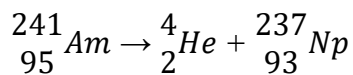
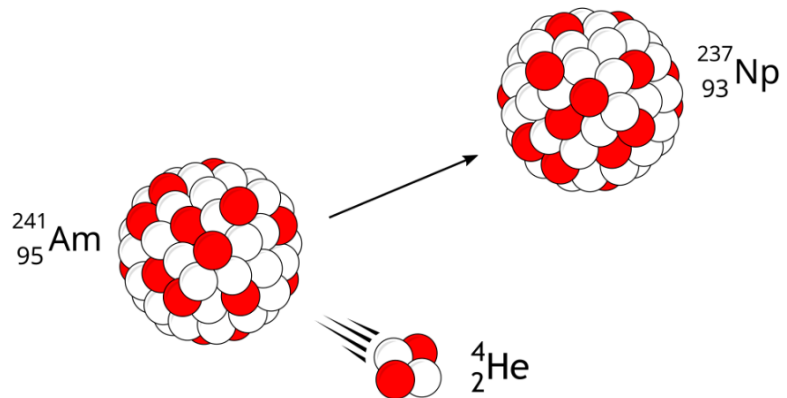
Et kendt eksempel på, hvor farligt det kan være, når radioaktive stoffer kommer ind i kroppen, er sagen om **Alexander Litvinenko**. Han var en tidligere russisk agent, som blev forgiftet i 2006 med **polonium-210**, et alfastrålende stof. Fordi det kom ind i kroppen, kunne alfastrålingen gøre voldsom skade, og han døde smertefuldt tre uger senere.

Afsnit 4. Alfa-henfald

I fysiklokalet findes alfa-kilder, fx

Am-241, som er Americium med atomnummer 95 og kernetal 241. Når Am-241 udsender en alfapartikel, mister det 2 protoner og 2 neutroner fra kernen. Det betyder, at atomnummeret falder fra atomnr 95

til 93, og grundstoffet forvandles fra **Americium** til **Neptunium**. Kernetallet falder med 4, fra 241 til 237.



Dette kaldes **grundstof-forvandling**, fordi kernen har mistet protoner og dermed er blevet til et andet grundstof. Det er antallet af protoner der bestemmer atomnummeret.

Afsnit 5. Beta-henfald

I fysiklokalet findes også beta-kilder, fx **Sr-90**

(strontium). Betastråling udsendes, når en

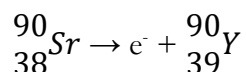
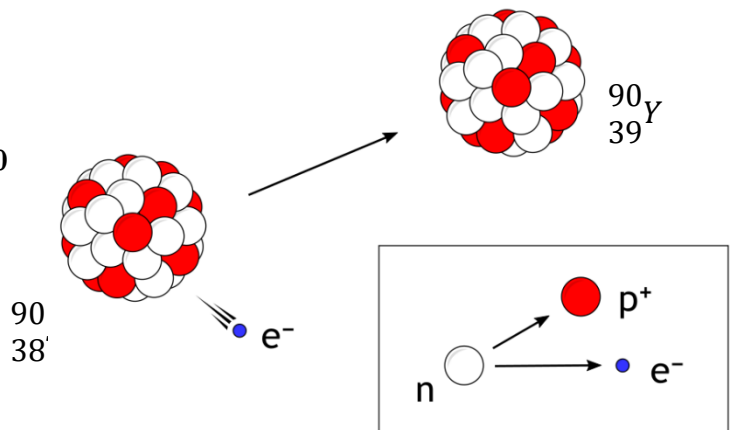
neutron i kernen omdannes til en

proton og en elektron. Elektronen

forlader kernen som betastråling. Da der

kommer en ekstra proton, stiger

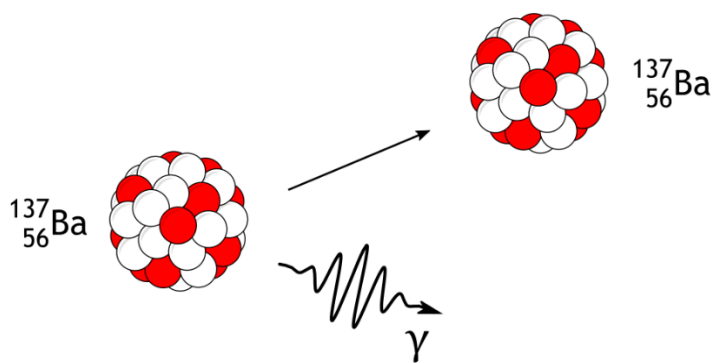
atomnummeret med 1, og Sr-90 bliver til **yttrium (Y-90)**. Kernetallet ændres ikke, fordi der er samme antal partikler i alt.



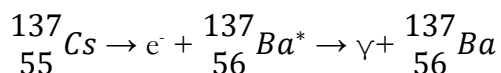
Der findes også **beta-plus**-henfald, hvor en proton bliver til en neutron og en **positron** (en positiv elektron). Positroner er elektronens antipartikel og bruges bl.a. i PET-scanninger.

Afsnit 6. Gammastråling

Gammastråling opstår ofte i forbindelse med alfa- eller beta-henfald. Når et atom har henfaldet, kan det efterlades i en ”ophidset” (exciteret) tilstand med ekstra energi. Denne energi frigives som en **gammastråle**.



I fysiklokalet er gammakilden en **Cs-137** (cæsium), som har atomnr 55, og som er betaaktivt. Når Cs-137 udsender en elektron bliver den til Barium Ba-137*. Det nye grundstof, **Ba-137*** (barium med en stjerne), har den ekstra energi, som straks udsendes som gammastråling og bliver til Ba-137.



Afsnit 7. Praktiske anvendelser af stråling

Indtil nu har vi mest fokuseret på, hvordan radioaktiv stråling kan være skadelig for mennesker. Men netop fordi strålingen kan skade og dræbe celler, kan den faktisk også være nyttig. Et godt eksempel finder du i supermarkedets krydderiafdeling. Mange krydderier, som sælges i Danmark, er blevet bestrålet med fx gammastråling. Det gør man for at dræbe bakterier, som ellers kunne give madforgiftning. Bestrålingen gør dem altså mere hygiejniske – uden at ændre smagen eller gøre dem farlige at spise. I nogle lande bruges samme metode også til at bestråle frugt og grønt for at forlænge holdbarheden. Det er dog ikke tilladt i Danmark.

Afslutning

I dette kapitel har vi set, hvordan alfa-, beta- og gammastråling fungerer, og hvad der sker under et henfald. Det er fascinerende, at et atom kan omdannes til et andet grundstof gennem radioaktivt henfald. Det var netop sådan en ”forvandling”, alkymisterne drømte om i middelalderen. I virkeligheden sker det dog kun for radioaktive stoffer og ikke for almindelige stabile atomer. I næste kapitel skal vi se på, hvordan disse radioaktive atomer over tid og gennem flere henfald bliver stabile atomer.

Arbejdsspørgsmål:

Hvad skyldes radioaktivitet?

Hvad dækker de 3 typer stråling over:

	Symbol	Hvad består det af?
Alfa		
Beta		
Gamma		

Hvilken type er partikel stråling og hvilken er elektromagnetisk stråling

	Partikel	Elektromagnetisk bølge
Alfa		
Beta		
Gamma		

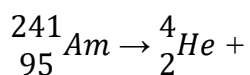
hvad kan stoppe strålingstyperne

	Stopper ved Partikel
Alfa	
Beta	
Gamma	

Hvilken stråling er farligst at blive udsat for udenfor kroppen?

Hvorfor kan alfastråling være ufarligt udenfor kroppen men farligt hvis det kommer ind i kroppen?

Hvad bliver Americium-241 til?

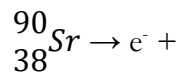


Hvorfor falder kernetallet med 4 og atomnummeret med 2?

Forklar hvad en grundstofforvandling er?

Hvad sker der i et betahenfald?

Hvad bliver Strontium-90 til?



Hvorfor ændres kernetallet ikke i når et radioaktivt atom udsender betastråling?

Er der egentlig også her tale om en grundstofforvandling?

Hvad består et beta-plus henfald af?

Kan du regne ud hvad der sker inde i kernen i et beta-plus henfald?

Hvordan opstår en gammastråle?

Opstår der en grundstofforvandling når et radioaktivt atom udsender en gammastråle?

Ekstra: Undersøg selv hvad der egentlig sker når et atom bliver exciteret?

At bestråle krydderier er smart - Kan du se nogle andre anvendelsesmuligheder af stråling i samfundet?

Undringsspørgsmål:

Hvis du kunne styre, hvilke grundstoffer der blev til hvilke gennem radioaktivt henfald, hvilke materialer kunne du så "*lave*" – og hvad kunne det bruges til?

Hvis stråling kan bruges til at dræbe bakterier i krydderier – kunne man så også bruge det til at bekæmpe sygdomme i kroppen? Hvordan?

Hvad ville der ske med vores kroppe, hvis vi levede på en planet uden atmosfære og derfor ingen beskyttelse mod kosmisk stråling?

Hvis du skulle opfinde en ny måde at beskytte mennesker mod gammastråling, hvordan kunne det så se ud?

Forsøg: Gennemtrængningsevnen.

Vi skal undersøge hvad der kan stoppe den radioaktivestråling.

Baggrundsstråling: _____ (pr 10 sekund)

Afstand fra GM-rør til kilde: _____ cm

Alfa α	Nr 1 (pr 10 s)	Nr 2 (pr 10 s)	Nr 3 (pr 10 s)	Nr 4 (pr 10 s)	Gennemsnit (pr 10 s)	Stråling (minus baggrund)
Uden noget						
1 papir						
Plastik						
Aluminium						

Behandling af Resultater:

- Stoppes alfastrålingen af de ting som sættes ind foran?

- Selv efter at baggrundsstrålingen er trukket fra kommer der noget stråling igennem! Hvad kan forklaringen på dette være?

Beta (β)	Nr 1 (pr 10 s)	Nr 2 (pr 10 s)	Nr 3 (pr 10 s)	Nr 4 (pr 10 s)	Gennemsnit (pr 10 s)	Stråling (minus baggrund)
Uden noget						
1 papir						
Aluminium 0,5 cm						
Bly 0,5 cm						

Behandling af resultater:

- Hvad stopper betastråling? _____
- Når du sammenligner beta-målingerne med gamma er beta højere. Hvordan kan det være?

Gamma (γ)	Nr 1 (pr 10 s)	Nr 2 (pr 10 s)	Nr 3 (pr 10 s)	Nr 4 (pr 10 s)	Gennemsnit (pr 10 s)	Stråling (minus baggrund)
Uden noget						
Aluminium 0,5 cm						
Aluminium 1 cm						
Bly 0,5 cm						
Bly 1 cm						

Behandling af resultater:

- Hvad stopper gammastråling? _____
- Hvor meget bly skal der egentlig til for at stoppe gammastrålingen (prøv)? _____ cm

Kapitel 4: Radioaktivt henfald, datterkerner og halveringstid

Indledning

I forrige kapitel fokuserede vi på, hvad der sker inde i kernen, når der sker et radioaktivt henfald. Vi så, hvordan alfa- og betahenfald giver en grundstofforvandling, hvilket betyder, at atomet skifter fra en type til en anden. En vild transformation, der svarer til, at et menneske pludselig blev til en hund. Vi så også, hvordan strålerne kan trænge igennem selv tykke blyplader og skade kroppen. I dette kapitel skal vi se nærmere på, hvad der sker efter et radioaktivt atom er henfaldet, begrebet halveringstid og nogle anvendelser af radioaktivitet.

Afsnit 1. Isotopkortet og henfald

I kapitel 1 så vi, hvordan man i isotopkortet kan finde alle de isotoper, som et atom kan have. Hver række i kortet svarer til et grundstof, og hver felt i rækken er en isotop. Den viden kan vi nu bruge til at se på, hvordan atomer bevæger sig i kortet, når de henfalder.

Ved et alfahenfald forlader 2 protoner og 2 neutroner kernen. Atomnummeret falder med 2, og kernetallet med 4. Fx bliver Am-241 (Americium, nr. 95) til Np-237 (Neptunium, nr. 93). I isotopkortet svarer det til at gå to rækker ned og to pladser til venstre.

				²³⁷ Cm	²³⁸ Cm	²³⁹ Cm	²⁴⁰ Cm	²⁴¹ Cm	²⁴² Cm	²⁴³ Cm	²⁴⁴ Cm
²³³ Am	²³⁴ Am	²³⁵ Am	²³⁶ Am	²³⁷ Am	²³⁸ Am	²³⁹ Am	²⁴⁰ Am	²⁴¹ Am	²⁴² Am	²⁴³ Am	
²³² Pu	²³³ Pu	²³⁴ Pu	²³⁵ Pu	²³⁶ Pu	²³⁷ Pu	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	
²³¹ Np	²³² Np	²³³ Np	²³⁴ Np	²³⁵ Np	²³⁶ Np	²³⁷ Np	²³⁸ Np	²³⁹ Np	²⁴⁰ Np	²⁴¹ Np	
²³⁰ U	²³¹ U	²³² U	²³³ U	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁷ U	²³⁸ U	²³⁹ U	²⁴⁰ U	
²²⁹ Pa	²³⁰ Pa	²³¹ Pa	²³² Pa	²³³ Pa	²³⁴ Pa	²³⁵ Pa	²³⁶ Pa	²³⁷ Pa	²³⁸ Pa	²³⁹ Pa	

<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

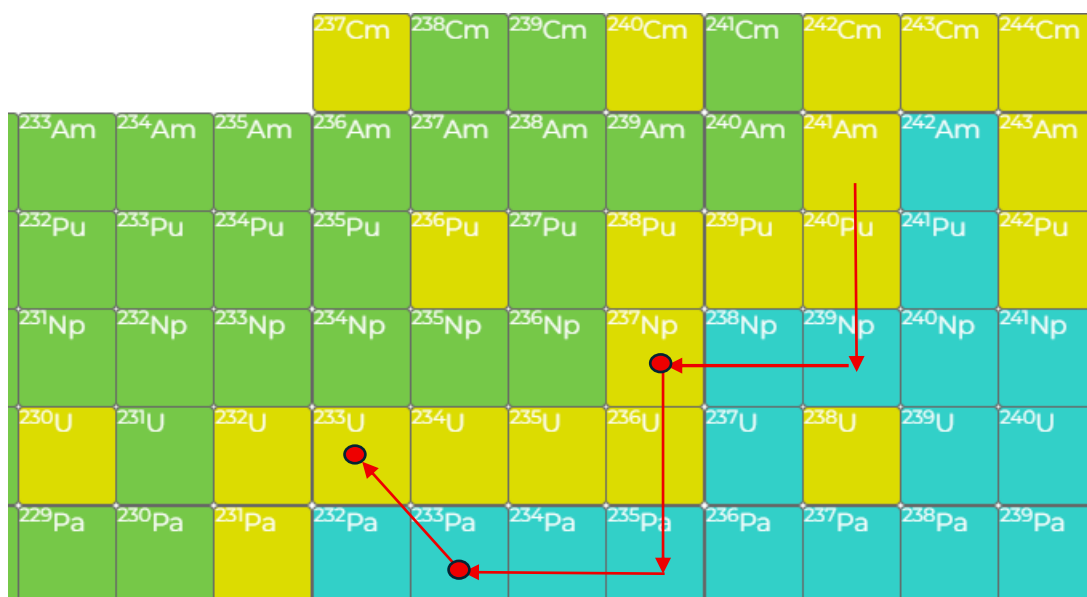
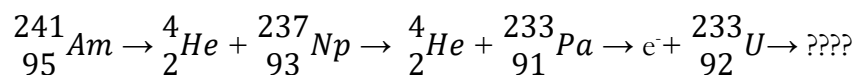
Gul = alfa, blå = beta minus, grøn = beta plus

Ved et betahenfald omdannes en neutron til en proton og en elektron. Elektronen forlader kernen, og atomnummeret stiger med 1, mens kernetallet er uændret. Fx bliver Sr-90 (strontium, nr. 38) til Y-90 (yttrium, nr. 39), hvilket i isotopkortet svarer til at gå en række op og en plads til venstre - altså skråt op.



Afsnit 2. Datterkerner

Am-241 bliver til Np-237, men Np-237 er også radioaktiv. Den kaldes en **datterkerne**, og den henfalder videre til Pa-233, som også er radioaktiv. Pa-233 henfalder som betakilde til U-233, som også henfalder. Denne kæde fortsætter, indtil atomet ender som et stabilt grundstof, fx Bismuth, Bly eller Thallium.



Det betyder, at selvom en radioaktiv kilde kun indeholder én slags atom til at begynde med, vil den over tid komme til at indeholde en hel række datterkerner. Derfor består alfakilden i fysiklokalet ikke kun af Am og Np, men også af de mange datterkerner, som dannes med tiden.

Afsnit 3. Halveringstid

Halveringstid er en vigtig egenskab ved radioaktive stoffer. Et godt hverdagsbillede på halveringstid er koffein som findes i kaffe og energidrik. Hos de fleste mennesker tager det cirka 4 timer at nedbryde halvdelen af koffeinen i kroppen. Drikket man to kopper kaffe kl. 20, er der én kop tilbage kl. 24, en halv kop kl. 4 og en kvart kop kl. 8. Det bliver hele tiden det halve.

Radioaktive stoffer har meget forskellige halveringstider. Uran-238 har fx en halveringstid på 4,6 milliarder år, mens andre som fx Barium-137* kun har en halveringstid på 2,6 minutter. Den korte halveringstid betyder, at stoffet henfalder hurtigt og dermed hurtigt bliver mindre radioaktivt.

Afsnit 4. Halveringstidsforsøg med Barium-137

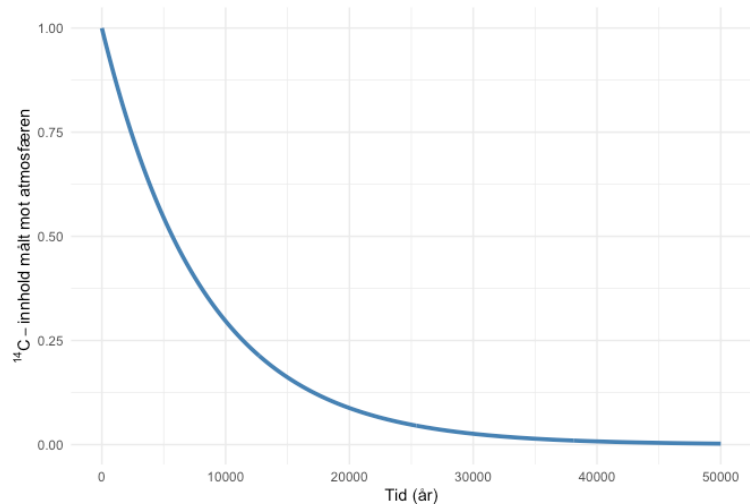
I fysiklokalet findes en generator med Cs-137, som er betaaktiv og har en halveringstid på 30 år. Når Cs-137 henfalder, dannes Barium-137*, som er gammaaktiv og har en halveringstid på kun 2,6 minutter. Ved at sende en væske igennem generatoren får man en opløsning med Barium-137*, som kan måles med et GM-rør. Over 15 minutter kan man se, hvordan aktiviteten falder markant.

Grafen over henfaldet danner ikke en ret linje, men en kurve, som falder hurtigt i starten og langsommere senere. Det kaldes en **eksponentielt aftagende** graf.

Afsnit 5. Jordens alder og kulstof-14-metoden

Uran-238 har en halveringstid på 4,6 milliarder år, og det kan bruges til at bestemme jordens alder. Ved at sammenligne mængden af Uran-238 og mængden af det stabile henfaldsprodukt Bly-206 i gamle bjergarter kan man beregne, hvor gammel jorden er.

Til yngre fund bruges **kulstof-14-metoden**. Inde i alle levende organismer findes en smule radioaktivt kulstof-14. Når organismen dør, bliver kulstof-14 ikke længere erstattet, og mængden begynder at falde med en halveringstid på 5730 år. Ved at måle mængden af kulstof-14 i fx knogler eller træ kan man beregne, hvor længe det er siden, organismen var i live.



Afsnit 6. Anvendelse i medicin og industri

I medicinen bruges radioaktive stoffer til at se, hvordan kroppen fungerer. Fx kan man sprøjte **technetium-99m** ind i kroppen. Det er gammaaktivt og har en halveringstid på ca. 6 timer. Stoffet bindes til molekyler, som søger mod bestemte organer - f.eks. sukker. Strålingen opfanges udenfor kroppen og giver billeder af, hvor aktiviteten er størst.

Det bruges til at undersøge nyrer, knogler, hjerte og meget mere. Fordi technetium-99m hurtigt henfalder, er det relativt sikkert at bruge.

I industrien bruges radioaktive stoffer fx til at finde lækager i rørsystemer. Man sender et sporstof ud i vandet og måler, hvor strålingen kommer ud. Også her bruges stoffer med kort halveringstid, så der ikke sker forurening.

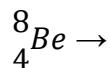
Afslutning

Det er fascinerende, at radioaktive stoffer kan bruges så bredt – fra at datere jordens alder til at redde liv på hospitaler. Det er også tankevækkende, at de fleste tunge radioaktive grundstoffer ender som bly eller bismuth. Tænk på de kilder, vi bruger i fysiklokalet – nogle er ældre end dig og har dannet mange datterkerner. I næste kapitel skal vi se på, hvordan man har udnyttet radioaktivitet i noget af det mest dramatiske, mennesket har skabt: *atombomben*.

Arbejdsspørgsmål:

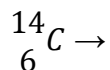
Find Beryllium-8 (Be-8) i isotopkortet. Hvilken type stråling udsender Be-8?

Lav et henfald af Be-8?



Find Carbon-14/kulstof-14 i isotopkortet. Hvilken type stråling udsender C-14?

Lav et henfald af C-14



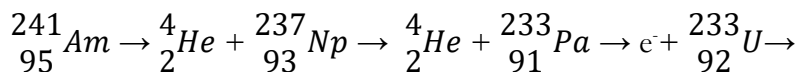
Hvad er en datterkerne når man snakker radioaktive stoffer?

Forklar hvad der menes med at de radioaktive kilder i fysik/kemi lokalet ikke er rene men består af andre radioaktive atomer?

Med din viden om gammastråling - hvilken type stråling kunne en gammakilde så også udsende?

Tag og henfald Am-241 og forsæt indtil du rammer et stabilt atom

(brug udsnittet af isotopkort på næste side)

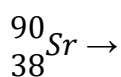


²²¹ U	²²² U	²²³ U	²²⁴ U	²²⁵ U	²²⁶ U	²²⁷ U	²²⁸ U	²²⁹ U	²³⁰ U	²³¹ U	²³² U	²³³ U
²²⁰ Pa	²²¹ Pa	²²² Pa	²²³ Pa	²²⁴ Pa	²²⁵ Pa	²²⁶ Pa	²²⁷ Pa	²²⁸ Pa	²²⁹ Pa	²³⁰ Pa	²³¹ Pa	²³² Pa
²¹⁹ Th	²²⁰ Th	²²¹ Th	²²² Th	²²³ Th	²²⁴ Th	²²⁵ Th	²²⁶ Th	²²⁷ Th	²²⁸ Th	²²⁹ Th	²³⁰ Th	²³¹ Th
²¹⁸ Ac	²¹⁹ Ac	²²⁰ Ac	²²¹ Ac	²²² Ac	²²³ Ac	²²⁴ Ac	²²⁵ Ac	²²⁶ Ac	²²⁷ Ac	²²⁸ Ac	²²⁹ Ac	²³⁰ Ac
²¹⁷ Ra	²¹⁸ Ra	²¹⁹ Ra	²²⁰ Ra	²²¹ Ra	²²² Ra	²²³ Ra	²²⁴ Ra	²²⁵ Ra	²²⁶ Ra	²²⁷ Ra	²²⁸ Ra	²²⁹ Ra
²¹⁶ Fr	²¹⁷ Fr	²¹⁸ Fr	²¹⁹ Fr	²²⁰ Fr	²²¹ Fr	²²² Fr	²²³ Fr	²²⁴ Fr	²²⁵ Fr	²²⁶ Fr	²²⁷ Fr	²²⁸ Fr

²⁰⁹ Fr	²¹⁰ Fr	²¹¹ Fr	²¹² Fr	²¹³ Fr	²¹⁴ Fr	²¹⁵ Fr	²¹⁶ Fr	²¹⁷ Fr	²¹⁸ Fr	²¹⁹ Fr	²²⁰ Fr	²²¹ Fr	²²² Fr
²⁰⁸ Rn	²⁰⁹ Rn	²¹⁰ Rn	²¹¹ Rn	²¹² Rn	²¹³ Rn	²¹⁴ Rn	²¹⁵ Rn	²¹⁶ Rn	²¹⁷ Rn	²¹⁸ Rn	²¹⁹ Rn	²²⁰ Rn	²²¹ Rn
²⁰⁶ At	²⁰⁷ At	²⁰⁸ At	²⁰⁹ At	²¹⁰ At	²¹¹ At	²¹² At	²¹³ At	²¹⁴ At	²¹⁵ At	²¹⁶ At	²¹⁷ At	²¹⁸ At	²¹⁹ At
²⁰⁵ Po	²⁰⁶ Po	²⁰⁷ Po	²⁰⁸ Po	²⁰⁹ Po	²¹⁰ Po	²¹¹ Po	²¹² Po	²¹³ Po	²¹⁴ Po	²¹⁵ Po	²¹⁶ Po	²¹⁷ Po	²¹⁸ Po
²⁰⁴ Bi	²⁰⁵ Bi	²⁰⁶ Bi	²⁰⁷ Bi	²⁰⁸ Bi	²⁰⁹ Bi	²¹⁰ Bi	²¹¹ Bi	²¹² Bi	²¹³ Bi	²¹⁴ Bi	²¹⁵ Bi	²¹⁶ Bi	²¹⁷ Bi
²⁰³ Pb	²⁰⁴ Pb	²⁰⁵ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Pb	²¹⁰ Pb	²¹¹ Pb	²¹² Pb	²¹³ Pb	²¹⁴ Pb	²¹⁵ Pb	²¹⁶ Pb
²⁰² Tl	²⁰³ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁰⁵ Tl	²⁰⁶ Tl	²⁰⁷ Tl	²⁰⁸ Tl	²⁰⁹ Tl	²¹⁰ Tl	²¹¹ Tl	²¹² Tl	²¹³ Tl	²¹⁴ Tl	²¹⁵ Tl
²⁰¹ Hg	²⁰² Hg	²⁰³ Hg	²⁰⁴ Hg	²⁰⁵ Hg	²⁰⁶ Hg	²⁰⁷ Hg	²⁰⁸ Hg	²⁰⁹ Hg	²¹⁰ Hg	²¹¹ Hg	²¹² Hg	²¹³ Hg	²¹⁴ Hg
²⁰⁰ Au	²⁰¹ Au	²⁰² Au	²⁰³ Au	²⁰⁴ Au	²⁰⁵ Au	²⁰⁶ Au	²⁰⁷ Au	²⁰⁸ Au	²⁰⁹ Au	²¹⁰ Au	²¹¹ Au	²¹² Au	²¹³ Au

Henfald Sr-90 indtil det bliver stabilt?

^{86}Zr	^{87}Zr	^{88}Zr	^{89}Zr	^{90}Zr	^{91}Zr	^{92}Zr	^{93}Zr
^{85}Y	^{86}Y	^{87}Y	^{88}Y	^{89}Y	^{90}Y	^{91}Y	^{92}Y
^{84}Sr	^{85}Sr	^{86}Sr	^{87}Sr	^{88}Sr	^{89}Sr	^{90}Sr	^{91}Sr
^{83}Rb	^{84}Rb	^{85}Rb	^{86}Rb	^{87}Rb	^{88}Rb	^{89}Rb	^{90}Rb



Hvordan vil du forklare halveringstid?

Hvis man nu forestillede sig en kaffedrikker som nedbrød koffeinen hurtigere og havde en halveringstid på 2 timer istedet for 4 timer. Prøv at lave senariet?

Kl 20 = 2 kopper kaffe

Kl 22 =

Kl

Kl

Kl

Hvis du har drukket en kop kaffe - forsvinder den så nogensinde inde i din krop?

Hvilken form for stråling udsender Barium-37*

Prøv at forklare hvordan man kan udnytte halveringstid til at måle alderen af arkæologiske fund?

Hvis du ville undersøge hjernen med f.eks. technetium-99 skal det bindes til et molekyle. Hvilket molekyle ville du vælge at binde det radioaktive stof til?

Med din viden om halveringstid - overvej da om det radioaktive stof nogensinde forsvinder inde i kroppen?

Undringsspørgsmål:

Hvad ville der ske, hvis man brugte et radioaktivt stof med en alt for lang halveringstid i medicinske undersøgelser?

Hvordan påvirker det dit syn på verden at vide, at gamle bjerge og dine egne knogler indeholder atomer, som henfalder lige nu?

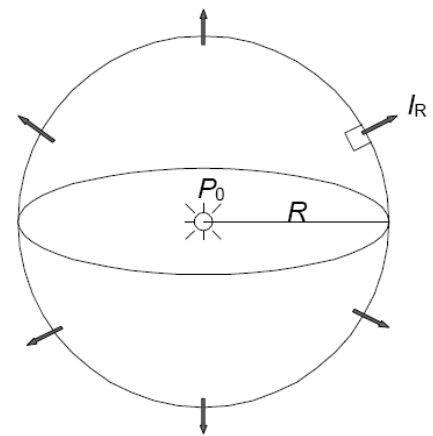
Forsøg: Afstands kvadratloven

Det virker logisk at jo længere væk man kommer fra en radioaktiv kilde jo svagere må strålingen blive! Dette kendes også fra en lyskilde f.eks. solen! Jo længere væk man kommer fra solen jo svagere bliver solens lys fordi lyset jo spredes i et større område!

Lad os prøve dette i virkeligheden ved at flytte gamma kilden længere og længere væk fra GM-røret!

Man kan beregne strålingen ud fra følgende formel:

$$\text{Radioaktivitet i afs tan den} = \frac{\text{radioaktivitet fra kilden i 0cm afs tan d}}{(4 * \pi * R^2)}$$



Baggrundsstråling: _____

Gamma (γ)	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Gennemsnit	Stråling (minus baggrund)	Beregnet
0 cm							
1 cm							
2 cm							
4 cm							
8 cm							

Forsøg: Halveringstid

Vi skal måle halveringstiden for Barium*-137. Med en halveringstid på 2,6 min vil det være praktisk at vælge måleintervaller på 26 sekunder (39 s eller 52 s)

	Tid (s)	stråling		Tid (s)	stråling		tid (s)	Stråling		Tid (s)	stråling
1	26		7	182		13	338		19	494	
2	52		8	208		14	364		20	520	
3	78		9	234		15	390		21	546	
4	104		10	260		16	416		22	572	
5	130		11	286		17	442		23	598	
6	156		12	312		18	468		24	624	

Passer halveringstiden på 2,6 min for Barium*-137?

Kapitel 5: Atombomben

Indledning

Du har sikkert set en film eller en serie, hvor en atombombe kastes og en karakteristisk paddehattesky stiger op mod himlen. Du har måske også set den ødelæggelse, selv en lille atombombe kan forårsage, og hvordan alt bliver lagt øde. Du har måske hørt om den kolde krig i 1900-tallet, som aldrig blev til en rigtig krig, fordi brugen af atombomber ville betyde menneskehedens – og måske livets – udslettelse.

Men hvordan kan en så lille bombe indeholde så meget energi, at én af de største bomber, Tzar-bomben, kunne udslutte det meste af Sjælland? I dette kapitel skal vi se på, hvor energien kommer fra, og hvordan en atombombe fungerer.

Afsnit 1. Einsteins formel og kerneenergi

Året 1905 er et særligt spændende år i videnskabens historie. Det er nemlig året, hvor Einstein fremsætter sin relativitetsteori. I teorien indgår den berømte formel:

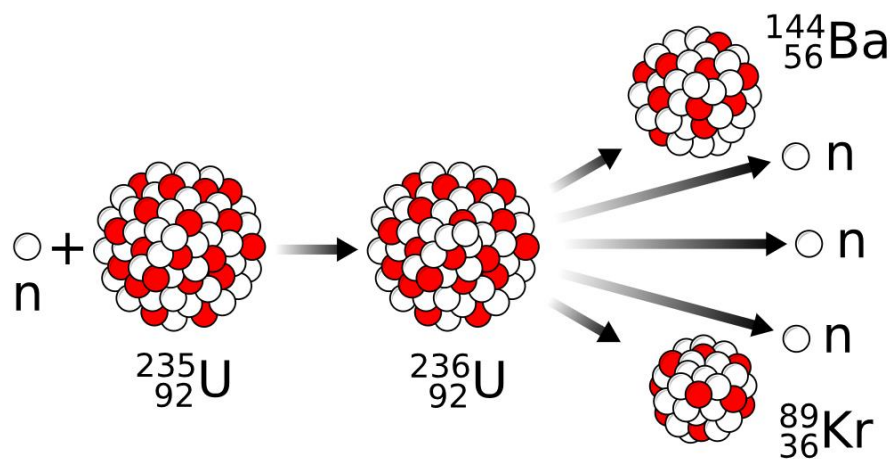
$$E = m \cdot c^2$$

hvor E er energi, m er masse og c er lysets hastighed (ca. 300.000.000 m/s). Det betyder, at masse og energi er to sider af samme sag hvor energien er bundet i massen i form af kerneenergi. Hvis man kunne frigive alt den kerneenergi der er bundet i massen i 1 g benzin, ville man få 90.000.000.000.000 Joule. Til sammenligning indeholder 1 gram benzin kun kemisk energi der kan frigive ca. 42.700 Joule.

Teoretisk kunne man altså bygge et våben, der omdanner masse til energi, og som derfor ville have en enorm ødelæggelseskraft – et masseødelæggelsesvåben. Det var dog stadig kun teori, men det er en af grundene til, at Einstein senere kaldtes atombombens fader – selvom det ikke er hele historien.

Afsnit 2. Fission

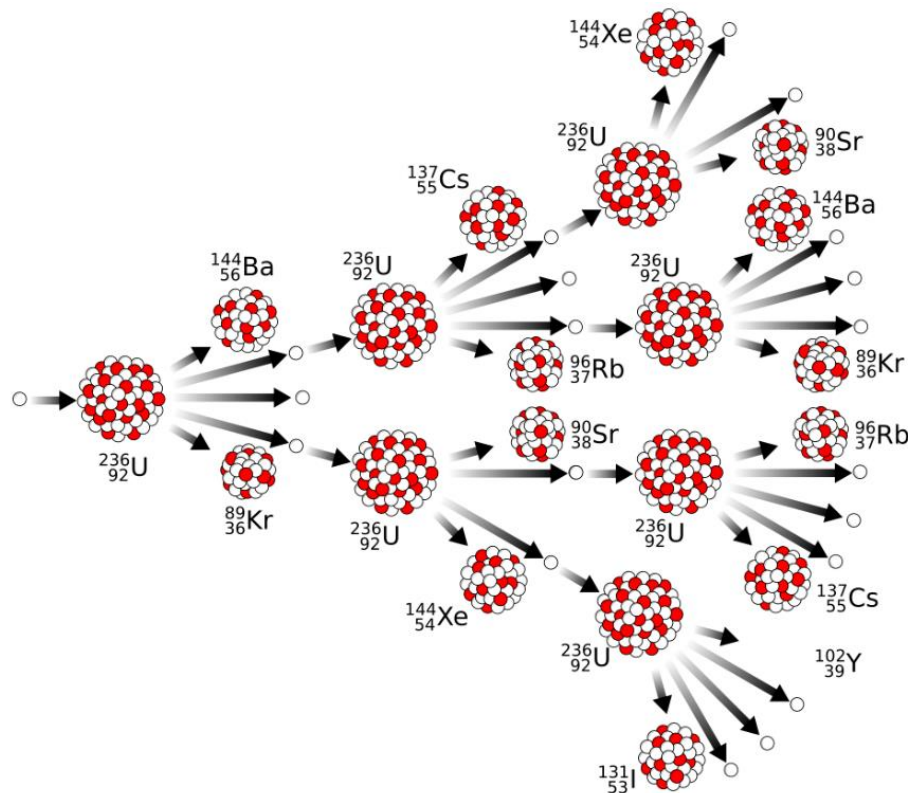
I 1938 eksperimenterede de tyske kemikere Otto Hahn og Fritz Strassmann med at bombardere Uran-235 med neutroner. Sammen med fysikeren Lise Meitner, som var flygtet fra Nazi-Tyskland, opdagede de, at Uran-235 ikke blot absorberede neutronen, men blev spaltet/delt i to mindre atomer – Barium-144 og Krypton-89 – og udsendte 3 nye neutroner. Dette fænomen blev kaldt **fission**.



Ved fissionen mistes lidt masse, og ifølge Einsteins formel omdannes denne masse til energi. I 1939 udgives den første artikel om fission, og nyheden når hurtigt til USA. Einstein, sammen med fysikeren Szilárd, skriver et brev til præsident Roosevelt og advarer om, at Nazi-Tyskland kunne udvikle en atombombe. Det sætter gang i det amerikanske **Manhattan-projekt**, som skulle udvikle verdens første atombombe.

Afsnit 3. Kædereaktionen

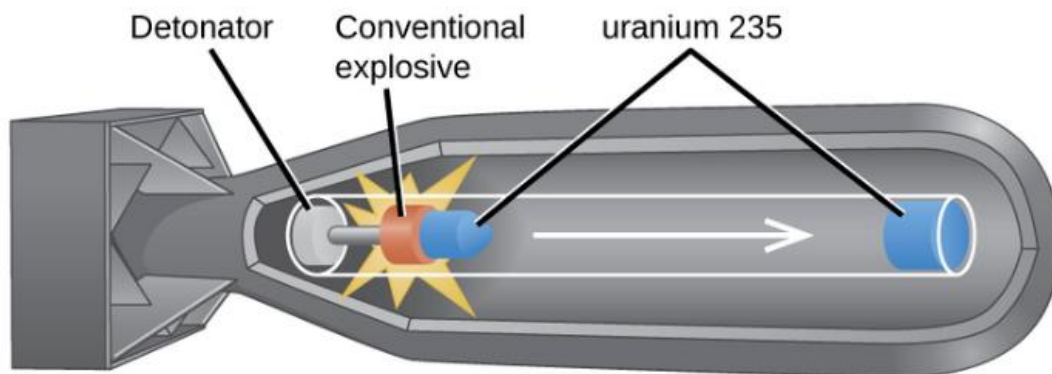
Hvis man skulle skabe en atombombe, var det ikke nok med én enkelt fission. Energien fra én spaltning er forsvindende lille. For at kunne lave en bombe, måtte man finde en måde at få milliarder af fissioner til at ske næsten samtidig – *men hvordan kunne man få det til at ske, og endda uden at skulle skyde neutroner manuelt ind i hver eneste Uran-235 kerne?*



Det store gennembrud her var erkendelsen af, at de 3 neutroner, der udsendes ved fission, kan ramme nye Uran-235-kerner. Hver fission kan sætte gang i tre nye fissioner som hver leverer 3 neutroner. De 3 neutroner bliver altså til 9 neutroner, 27 neutroner osv. Fissionen fordobler sig lynhurtigt og vokser **eksponentielt**. Det kaldes en **kædereaktion**. Det minder om hvordan en lille gnist kan antænde en steppebrand – det starter med én flamme, men i løbet af ingen tid breder ilden sig til store områder, fordi hver lille flamme kan tænde flere nye. Det er denne eksplosive spredning, der er nøglen til atombombens enorme kraft.

Afsnit 4. Atombombens opbygning

Men en kædereaktion opstår ikke bare sådan af sig selv. For at den kan ske, skal Uran-235 samles i en **kritisk masse**. Hvis mængden er for lille, forsvinder neutronerne uden at sætte gang i nye fissioner. En atombombe bygges derfor med to klumper Uran-235 eller flere, som hver for sig ikke er over den kritiske masse. Ved detonationen skubbes klumperne sammen, og mængden bliver pludselig stor nok. Kædereaktionen løber derefter hurtigt.



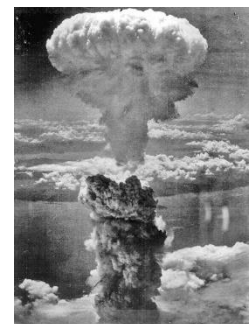
I naturen findes der meget Uran, men det meste er Uran-238, som ikke kan bruges. Derfor var en af de store udfordringer at udskille nok Uran-235 til bomben. Dette kaldes for berigelse af Uran

Afsnit 5. Ødelæggelseskraft og paddehatteskyen

Når bomben eksploderer, udsendes der først en intens **varmestråling**. Tæt på bomben kan temperaturen overstige 1000 grader. Dernæst kommer en **tryk-bølge**, som knuser alt på sin vej. Efter noget tid trækkes luften tilbage, og der opstår ildebrande. Området omkring bomben deles ofte i zoner:

- **Zone 1:** Alt ødelagt, ingen overlever
- **Zone 2:** Brandskader, 3. gradsforbrændinger, høj dødelighed
- **Zone 3:** Vinduesruder sprænges, lettere skader

Derudover falder der **radioaktivt nedfald**, som giver strålesyge og øget risiko for kræft mange år efter.



Paddehatteskyen dannes, fordi den varme luft fra bomben stiger op gennem atmosfæren. Når varmen rammer tropopausen (grænsen mellem troposfære og stratosfære) virker tropospausen som et låg der får skyen til at brede sig ud til siderne og danner den velkendte form. Denne type sky kan også ses ved store vulkanudbrud.

Afsnit 6. Brintbomber og Hiroshima

I 1945 afsluttede USA Anden Verdenskrig ved at kaste to atombomber over Japan. Den første ramte byen Hiroshima og blev kaldt "*Little Boy*". Den anden blev kastet over Nagasaki og hed "*Fat Man*".

Disse bomber havde en sprængkraft på henholdsvis cirka 15.000 og 20.000 tons TNT. Ødelæggelserne var enorme og markerede samtidig enden på anden verdenskrig og begyndelsen på atomalderen.

I de efterfølgende år begyndte supermagterne at udvikle endnu kraftigere bomber – nemlig brintbomber. I modsætning til almindelige atombomber, bygger brintbomber på fusion – den proces, der foregår i Solens indre. Her smelter brintkerner sammen til helium, og noget af massen forsvinder og omdannes til energi. For at starte denne proces i en brintbombe anvendes en almindelig fissionsbombe som en slags tændsats.

Den kraftigste bombe, der nogensinde er lavet, er den sovjetiske Tzar-bombe, som har en sprængkraft på hele 100 millioner tons TNT. Det svarer til, at en stor del af Sjælland kunne blive lagt øde, hvis en sådan bombe blev brugt dér. Brintbomber repræsenterer dermed en helt ny skala af ødelæggelseskraft sammenlignet med de første atombomber som i virkeligheden i dag er taktiske bomber.

Afsnit 7. Atomkapløb og atomvinter

Efter Anden Verdenskrig startede den **kolde krig** mellem USA og Sovjetunionen. Begge parter oprustede med atomvåben, og man frygtede en **global atomkrig**. En fuld krig kunne medføre **atomvinter**: eksplosionerne ville slynge støv op i atmosfæren og blokere sollys i årevis. Det ville blive koldt og mørkt, planter ville dø, og fødekæder ville bryde sammen.

Den glade 80'er-sang "*Vamos a la Playa*" handler i virkeligheden om livet efter en atomkrig. Teksten beskriver, hvordan verden ser ud efter bomben: "*vi går til stranden, bomben er sprunget, havet er roligt, der er ingen forurening*". En dyster virkelighed pakket ind i dansevenlig musik.

Afslutning

Atombomben er måske det mest destruktive mennesket nogensinde har skabt. Men frygten for den har også forhindret nye storkrige og banet vej for teknologisk udvikling. I næste kapitel ser vi på, hvordan man har forsøgt at bruge kernekraften til noget fredeligt: **atomkraftværker**.

Arbejdsspørgsmål:

I Einsteins berømte formel: $E = m \cdot c^2$ betyder bogstaverne noget bestemt - men hvad?

$E =$

$m =$

$c =$

Når man siger at energi og masse er to sider af samme sag - hvad menes der så?

I eksemplet med 1 g benzin fremkommer to forskellige energimængder målt i Joule. Hvilke former for energi angiver de to forskellige tal? (90.000.000.000.000 J og 42.700 J)

Hvad tror du at Hahn, Strassmann og Mietner havde forventet i eksperimentet med neutronen der blev skudt mod U-235?

Hvad har ordet fission med det som faktisk skete i eksperimentet?

Hvor kommer energien fra som opstår i fissionen?

Hvorfor er de 3 neutroner som opstår i fissionen vigtige?

I nogle tilfælde opstår der 2 neutroner og ikke 3. Prøv at forestille dig hvor mange fissioner det kan udvikle sig til i hvert led i kædereaktionen?

1 fission = 2 neutroner

2 fission =

3

Forklar med dine egne ord hvad en kædereaktion går ud på?

Hvad går den kritiske masse ud på?

Hvad går berigelse af uran ud på og hvorfor er det vigtigt?

Undersøg selv: hvor meget uran-235 skal der være i uranen for at man kan lave en atombombe?

Prøv at forklare hvordan man vil opleve at en atombombe blev kastet i forskellige afstande?

Hvad er årsag til den klassiske paddehattesky man ofte ser i film når en atombombe bliver detoneret?

Prøv selv at gå ind på nukemap og kast en bombe der hvor du bor?

<https://nuclearsecrecy.com/nukemap/>

Hvad sker der i fusion?

Hvordan fungerer en brintbombe?

Hvad dækker ordet atomvinter over?

Kan du komme på andre populære sange der handler om frygten for en atomkrig og dets konsekvenser?

Undringsspørgsmål:

Ville verden have set anderledes ud i dag, hvis Einstein aldrig havde fremsat $E=mc^2$?

Hvordan kan frygten for atomvåben både føre til fred og samtidig true menneskehedens eksistens?

Kunne man forestille sig en teknologi, der omdanner masse til energi uden ødelæggelse?

Hvad ville der ske, hvis en atombombe blev brugt i dag – ville vi ende i en atomvinter?

Undersøg selv: Hvad kræves der for at udnytte fusion til fredelige formål?

Kapitel 6: Atomkraft

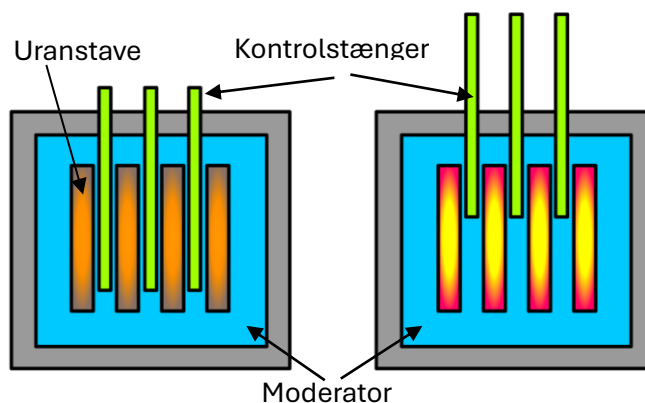
Indledning

I forrige kapitel så vi, hvordan man ved at skyde en neutron ind i en Uran-235-kerne kunne få den til at dele/spalte sig i to mindre atomer og et antal neutroner. De dele, der kom ud af denne spaltning, vejede mindre end den oprindelige kerne. Noget af massen var forsvundet – men intet forsvinder uden videre, så spørgsmålet var: *hvad blev det til?* Med Einsteins berømte relativitetsteori stod det klart, at den forsvundne masse var blevet til energi. Hvis man kunne spalte mange milliarder Uran-235-atomer på én gang, ville man stå med en utroligt kraftfuld energikilde. I kapitlet om atombomben så vi også, hvordan en kædereaktion kunne gøre dette muligt, fordi der ved hver spaltning opstår nye neutroner, som kan fortsætte processen. Men det stod også hurtigt klart for forskere og politikere, at man måske kunne bruge denne energi til andet end våben – nemlig som en effektiv og næsten CO₂-fri energikilde. Et kraftværk, der udnytter denne proces kontrolleret, kaldes et atomkraftværk. Det er det, vi nu skal se nærmere på.

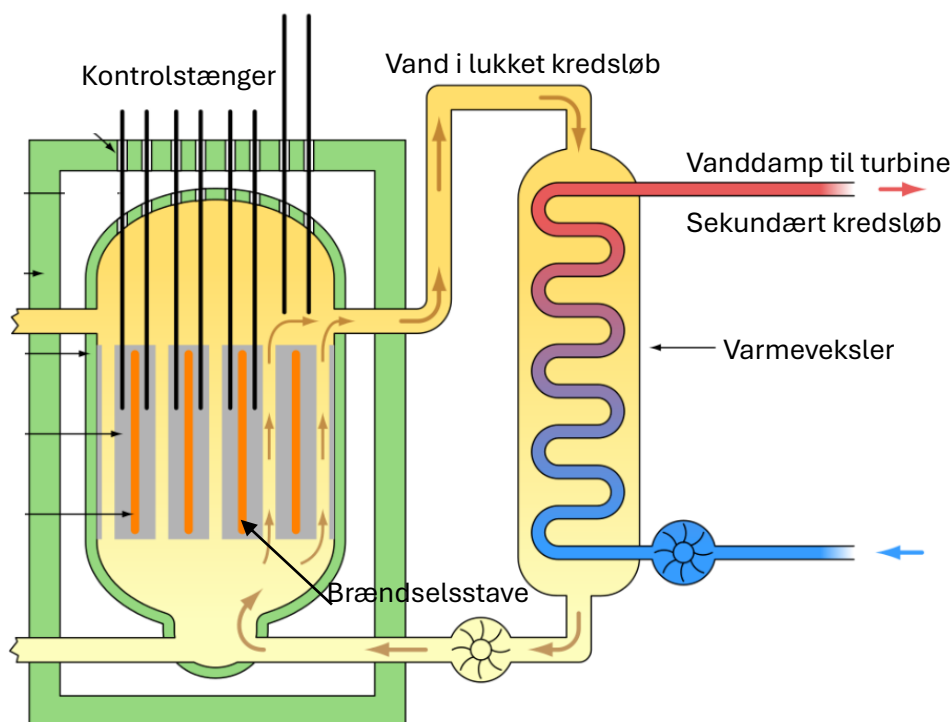
Afsnit 1. Den kontrollerede kædereaktion

En atombombe er en ukontrolleret kædereaktion. Men for at kunne udnytte den frigivne energi på en sikker måde, må man kontrollere denne proces. Det gør man i et atomkraftværk gennem en kontrolleret kædereaktion. Her foregår fissionen i uranbrændselsstave, men i modsætning til bomben sørger man for, at antallet af neutroner holdes i balance.

Kontrollen sker bl.a. med såkaldte kontrolstænger, som kan skydes ind og ud mellem uranstavene. Kontrolstængerne er lavet af materialer som cadmium, der kan opsuge neutroner. Når de skubbes ind, absorberer de flere neutroner og dæmper eller stopper kædereaktionen. Når de trækkes ud, kan flere neutroner fortsætte spaltningen. Derudover anvender man en moderator – et stof, som nedsætter hastigheden på neutronerne, så de lettere kan spalte Uran-235. Dette kan f.eks. være tungtvand eller grafit (kulstof).



På sin vis kan man sige, at et atomkraftværk er som en kontrolleret version af en atombombe. Det siger sig selv, at det kræver meget høj sikkerhed for at undgå ulykker.

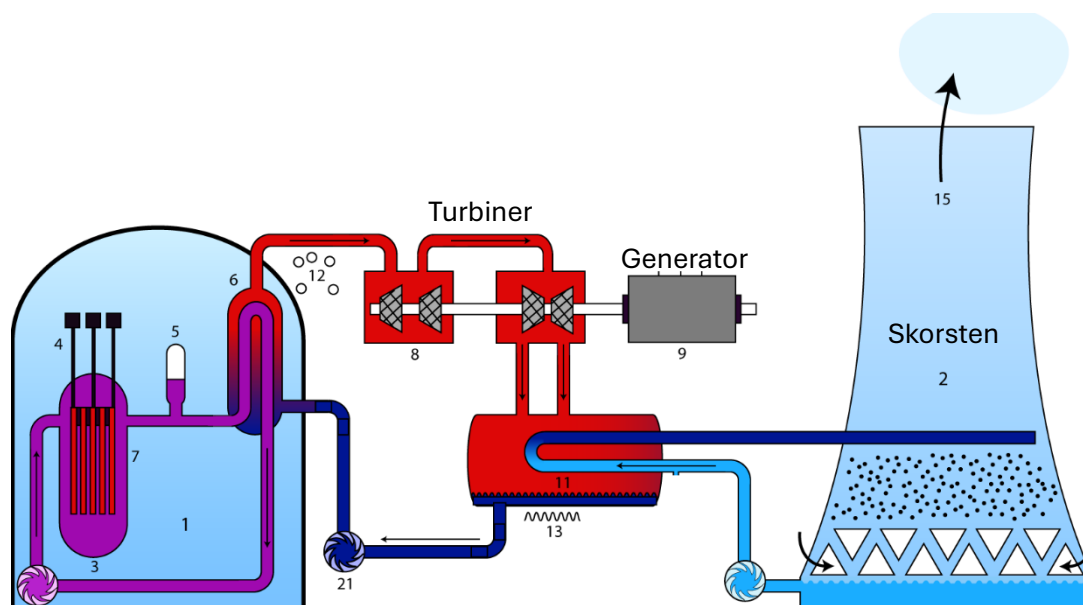


Afsnit 2. Hvordan et atomkraftværk virker

Hjertet i et atomkraftværk er reaktoren. Her sidder brændselsstavene med uran sammen med kontrolstængerne. Rundt om disse findes vand, som opvarmes af den varme, der frigives ved fissionen. Dette vand cirkulerer i et lukket kredsløb, så det aldrig kommer ud og forurener omgivelserne.

Varmen fra reaktoren bruges til at opvarme en anden vandkreds via en varmeveksler. Dette sekundære vand opvarmes til damp, som driver en stor turbine – lidt som en vindmølle, men med damp i stedet for vind. Turbinen driver en generator, der laver elektricitet ved hjælp af bevægende magneter og spoler (induktionsprincippet). Efter at dampen har drevet turbinen, afkøles den og bliver til vand igen, som kan opvarmes på ny.

De store, ikoniske "*skorstene*" man ofte forbinder med atomkraftværker, bruges ikke til at udlede forurening, men til at afkøle vanddampen i det ydre kredsløb. Dog har ikke alle værker sådanne tårne – nogle, som f.eks. det tidligere Barsebäckværk i Sverige, bruger havvand til køling i stedet.



Afsnit 3. Når noget går galt – Tjernobyl

Et atomkraftværk er mere end blot teknologi – det er også en potentiel risiko. Derfor er reaktoren omgivet af tykke betonmure, som både skal holde strålingen inde og beskytte mod ydre angreb. Men som vi så med ulykken i Tjernobyl i 1986, kan ting gå grueligt galt.

Ulykken skete under en sikkerhedstest, hvor man slukkede for mange automatiske systemer og trak kontrolstængerne langt ud. Reaktoren kom ud af kontrol, og da man forsøgte at sætte kontrolstængerne tilbage, virkede det mod hensigten – de havde nemlig grafit i spidsen, som midlertidigt øgede kædereaktionen. Resultatet blev en eksplosion, hvor reaktordækslet blev sprængt af, og store mængder radioaktivt materiale slap ud i atmosfæren.

Ulykken skyldtes både menneskelige fejl og designfejl i reaktoren. En af de store konsekvenser var en brand, der sendte radioaktive partikler op i luften og spredte dem over store dele af Europa.

Afsnit 4. Radioaktivt nedfald og sundhed

De farligste stoffer, der slap ud fra Tjernobyl, var ikke Uran eller Plutonium – de er for tunge og faldt hurtigt til jorden nær ulykkesstedet. Problemet var lettere grundstoffer som Cæsium-137, Strontium-90 og Iod-131. De spredes nemt med vinden og kan optages af planter og dyr.

Cæsium-137 minder kemisk om kalium fordi de begge står i første hovedgruppe, kroppen kan derfor optage det som var det kalium. Strontium-90 ligner calcium og kan derfor lagres i knoglerne. Iod-131

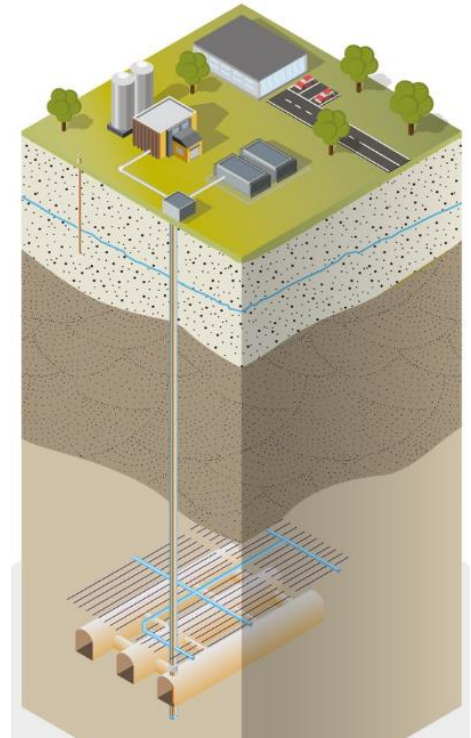
optages i skjoldbruskkirtlen. Alle tre stoffer udsender stråling, der kan skade celler og give kræft. Derfor delte man i mange lande jodtabletter ud, så kroppen ikke ville optage det radioaktive Iod.

Heldigvis drejede vinden af mod nord, og det meste af det radioaktive nedfald ramte Sverige og Norge – men også Danmark blev ramt i mindre grad.

Afsnit 5. Atomaffald og opbevaring

Et atomkraftværk bruger 20–30 tons uran om året. Det meste er Uran-238, som ikke spaltes, men stadig bliver radioaktivt. Problemet er, at affaldet forbliver farligt i titusinder af år. Det er derfor nødvendigt med sikre og langsigtede løsninger.

I Sverige og Finland har man udviklet metoder til at opbevare affaldet dybt nede i stabile bjerglag. Disse geologiske lag er nøje udvalgt, fordi de har ligget uforstyrret i millioner af år og ikke påvirkes af jordskælv eller istider. Affaldet pakkes i stål kapsler omsluttet af kobber og sænkes ned i huller omgivet af bentonitler, der forhindrer vand i at trænge ind. Denne metode kaldes KBS-3 og regnes som en af de sikreste i verden.



Danmark har ikke atomkraft, men vi har atomaffald fra forsøgsreaktorer ved Risø. Dette affald opbevares i dag i midlertidige lagre på Risø – en udfordring, som stadig mangler en permanent løsning.

Afsnit 6. Nye typer reaktorer – smeltet salt

Fremtiden byder måske på nye typer atomkraftværker, som er mindre og mere sikre. Et eksempel er smeltet salt-reaktorer (MSR), hvor brændslet er opløst i en flydende saltblanding. Fordelen er, at reaktoren regulerer sig selv: *hvis den bliver for varm, udvider saltet sig, og kædereaktionen bremser automatisk.*

Disse reaktorer kan bygges små – måske så små, at de kan være i en container. De kunne placeres, hvor der er brug for strøm, f.eks. i udviklingslande eller områder med høj energiefterspørgsel, som datacentre. Problemet er dog, at saltet tærer hurtigt på materialerne, og derfor er teknologien endnu ikke klar til udbredt brug.

Smeltet salt kan virke som en helt ny opdagelse men det er det egentlig ikke. Da man i sin tid udviklede atomkraft stod man overfor valget mellem smeltet salt og de konventionelle atomkraftværker. Det kan virke underligt at man ikke valgte den mere sikre reaktorer. Problemet var dog at en smeltet salt reaktor ikke kan bruges til at lave de radioaktive stoffer som skal bruges i en atombombe.

Afslutning

Debatten om atomkraft er blusset op igen, også i Danmark. Nogle ser det som en vigtig løsning i klimakampen, mens andre frygter risikoen og affaldet. Spørgsmålet er kompliceret og involverer både teknologi, politik, geografi og samfundsøkonomi. Men jo mere du ved, desto bedre kan du tage stilling. Derfor er det vigtigt, at vi lærer om atomkraft – både for at forstå historien og for at kunne diskutere fremtiden.

Arbejdsspørgsmål:

Hvad er det i fissionen/spaltningen der er årsag til kædereaktionen?

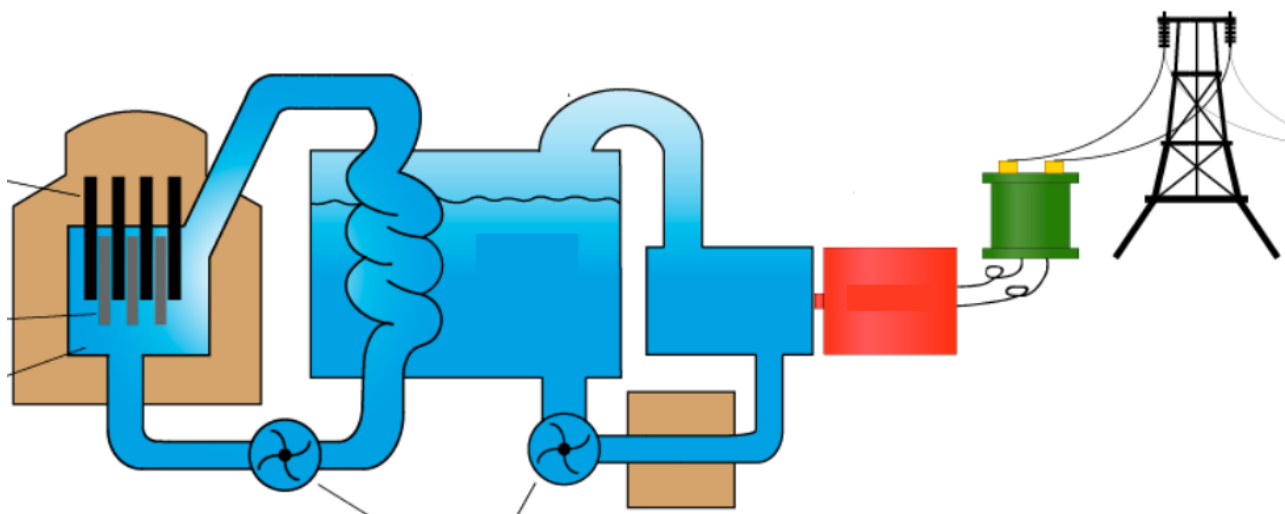
Hvad fanger kontrolstængerne i en atomreaktor?

Hvad vil der ske når man skubber kontrolstængerne ind i atomreaktoren?

hvad vil der ske hvis man trækker kontrolstængerne ud af atomreaktoren?

hvilken rolle spiller moderatoren i atomreaktoren?

Skriv navnene på delene af atomkraftværket?



Hvilken rolle spiller varmeveksleren?

Hvilken opgave har turbinen i atomkraftværket?

Hvor bliver elektriciteten lavet i værket?

Hvilken funktion har den store skorsten på atomkraftværket?

Hvorfor er der nogle atomkraftværker der ikke har disse store skorstene?

Hvordan kan det være grafitten i enden af Tjernobyls kontrolstænger kunne få kædereaktionen til at gå hurtigere når kontrolstænger jo skal få den til at gå langsommere?

Hvorfor er Cæsium-137 et problem for levende væsner?

Hvorfor er det et problem at Strontium-90 ligner Calcium?

Undersøg vha. et isotopkort hvilken slags stråling de 3 radioaktive stoffer udsender?

	type af stråling
Cæsium-137	
Strontium-90	
Iod-131	

<https://sharedstatic.alinea.dk/fysikkemi/isotopkort/>

Hvis disse stoffer kom ind i din krop - hvad kunne man så forestille sig at det kunne få af konsekvenser for dig?

Forklar hvad problemet med affaldet fra atomreaktoren er?

Hvorfor er det vigtigt at affaldet opbevares et sted hvor der ikke er jordskælv?

Kunne du forestille dig et sted hvor det ville være mindre smart at opbevare affaldet?

Hvorfor skulle en smeltet salt reaktorer være mere sikker end et klassisk atomkraftværk?

Hvor synes du at man burde placere et atomkraftværk i Danmark hvis vi besluttede at tillade det?

Undringsspørgsmål:

Hvad ville der ske, hvis man brugte atomkraft i alle lande – ville det løse klimakrisen eller skabe nye problemer?

Hvorfor tror du at de pakker de radioaktive stoffer ind i kobber?

Kan man stole på, at mennesker i fremtiden stadig forstår advarsler om atomaffald, som vi graver ned i dag?

Er det ansvarligt at opbevare affald i jorden i 100.000 år, når vi ikke ved, hvem der bor der til den tid?

Hvorfor føles atomkraft farligere end fx kulkraft, selvom det udleder langt mindre CO₂?