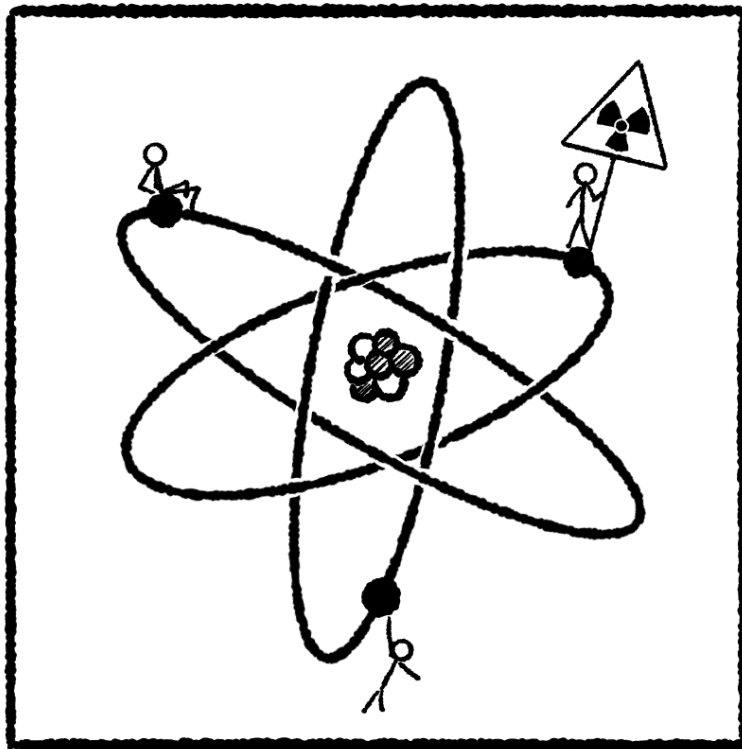


Mike Vandal Auerbach

ATOMER

Version 1.0

10. januar 2023



Atomer

Version 1.0, 2023

Værdien af forskellige konstanter er, med mindre andet er angivet, taget fra Databog Fysik Kemi, 11. udgave.[1] Billeder uden kildeangivelse er egne billeder.

Disse noter er skrevet til fysikundervisning på stx og må frit anvendes til ikke-kommercielle formål.

Noterne er skrevet vha. tekstformateringsprogrammet $\text{\LaTeX}$, se www.tug.org og www.miktex.org.
Figurer og diagrammer er fremstillet i *pgf/TikZ*, se www.ctan.org/pkg/pgf.

Disse og andre noter kan downloades fra www.mathematicus.dk.



Materialet er udgivet under en »Kreditering-Ikkekommerciel-Deling på samme vilkår 4.0 International«-licens (CC BY-NC-SA 4.0).

Mike Vandal Auerbach, 2023.

Indhold

1	Atomers opbygning	5
1-1	Historien om atomet	5
1-2	Standardmodellen	9
1-3	Atomets opbygning	10
1-4	Atomkernen	11
1-5	Elektronerne	13
1-6	Isotoper	14
2	Emission og absorption	17
2-1	Spektre	18
2-2	Hydrogenatomet	21
3	Radioaktivitet	23
3-1	Typer af radioaktivt henfald	24
3-2	Henfaldsloven	25
3-3	Aktivitet	27
3-4	Måling af aktivitet	28
3-5	Absorption i stof	29
4	Kerneenergi	31
4-1	Massedefekt og bindingsenergi	31
4-2	Q -værdi	32
5	Fission og fusion	35
5-1	Neutroninduceret fission	36
5-2	Fusion i stjerner	38
5-3	Fusionskraftværker	39
	Bibliografi	41
	Billedkilder	42

Atomers opbygning

Ordet *atom* stammer fra det græske *átomos* som betyder »udelelig«. De allerførste teorier om atomer anså atomerne for at være den mindste udelelige enhed af alt stof. I dag ved man at atomer faktisk ikke er udelelige, men selv består af mindre bestanddele, nemlig protoner, neutroner og elektroner – og at protonerne og neutronerne består af endnu mindre partikler kaldet kvarker.

1-1 Historien om atomet

Den græske filosof Leukippos grundlagde i ca. 450 f.v.t. atomteorien. Der er dog intet af Leukippos' arbejde der har overlevet til vor tid,[10] og det er således først og fremmest hans elev Demokrit som udviklede atomteorien i mere detalje, der i dag er kendt som ophavsmanden til atomteorien.[4]

Ifølge Demokrits atomteori består alt stof af udelelige partikler der er så små at de er usynlige. Disse atomer adskiller sig i form og position; nogle af dem har kroge og pigge på overfladen der gør at de kan hænge sammen. Han forestillede sig at alt stofs egenskaber kan forklares ud fra kollisioner og kombinationer af disse atomer.[3] Det var en rent filosofisk teori uden empirisk evidens – der var altså på ingen måde tale om en videnskabelig teori.[10]

Den første videnskabelige teori om atomer kom fra den engelske fysiker og kemiker John Dalton i begyndelsen af det 19. århundrede. Ud fra sit arbejde med partialtryk af gasser fandt Dalton ud af at bestemte gasser altid optrådte i bestemte vægtforhold. Herved kom han frem til at alle stoffer måtte bestå af nogle bestemte grundelementer, dvs. atomer.[8]

I 1897 opdagede den engelske fysiker J.J. Thomson at atomer indeholdt elektroner,[14] og han opstillede derfor i 1903 en model af atomet som en positivt ladet kugle hvori elektronerne bevægede sig rundt i koncentriske skaller.[4] Det viste sig dog ret hurtigt at denne model ikke var sand.

I 1909 arbejdede den newzealandske fysiker Ernest Rutherford i Manchester. Han foreslog den fysikstuderende Ernest Marsden at han skulle lave forsøg med α -partikler der blev sendt igennem et tyndt metalfolie. Forventningen var at α -partiklerne der er positivt ladede, ville afbøjes af den positive ladning i atomerne i metalfoliet, og man kunne ud fra denne afbøjning få bedre styr på atomets struktur.

Det overraskende resultat af forsøget var at nogle af α -partiklerne blev afbøjet så meget at de blev skudt direkte tilbage.[10] Rutherford

konkluderede at de positive α -partikler måtte være blevet afbøjet af en tæt positiv ladning i metalfoliet. Det betød at der i atomet måtte befinde sig en meget lille og meget tæt positiv kerne, 100 000 gange så lille som atomet selv. I 1911 opstillede Rutherford derfor en atommodel hvor elektronerne bevægede sig rundt om den positive atomkerne som planeter i et solsystem.[4]

Men der var et problem med Rutherfords model. Hvis elektronerne var i en bane omkring atomkernen ville de hele tiden skifte retning, dvs. de ville have en acceleration. Elektroner er negativt ladede partikler, og man vidste fra Maxwells teori om elektromagnetisme at ladede partikler der accelereres, vil udsende elektromagnetisk stråling. Elektronerne ville således miste deres energi og deres baner omkring atomkernen ville så blive mindre og mindre, indtil atomerne til sidst kollapsede.

Idet atomer er stabile, måtte der en anden forklaring til. Den danske fysiker Niels Bohr løste problemet med en ad hoc løsning da han i 1913 opstillede sin atommodel[10] der byggede på følgende postulater:

Postulat 1 Atomer kan kun eksistere i ganske bestemte stationære tilstande med hver deres bestemte energi.

Postulat 2 Et atom kan springe fra tilstand m til tilstand n ved at udsende en foton med energien $E_n - E_m$.

Disse to postulater løste problemet med at elektronbanen skulle kunne blive gradvist mindre idet elektronerne så kun kunne være i bestemte baner og ikke derimellem.

De to postulater virker grebet ud af den blå luft, men faktisk byggede Bohr sine ideer på tidligere resultater om det lys der udsendes fra atomer. Man vidste at atomer udsendte lys med ganske bestemte bølgelængder, de såkaldte *spektrallinjer*. Den østrigske fysiker Johann Balmer havde i 1885 vist at bølgelængderne af nogle af hydrogens spektrallinjer kunne beskrives ved formlen[2]

$$\lambda = 3645 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \cdot \left(\frac{m^2}{m^2 - n^2} \right),$$

hvor $n = 2$, og m er et helt tal større end 2.

Flere fysikere, bl.a. svenskeren Johannes Rydberg, arbejdede på dette tidspunkt med at forklare hydrogens og andre atomers spektrallinjer, og man fandt ud af at Balmers formel kan generaliseres.[4] Formlen ser i sin moderne form således ud:

Bølgelængden af hydrogens spektrallinjer

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

hvor $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ og $m > n$.

Konstanten R kaldes *Rydbergs konstant*.

Ved at udnytte dette resultat kunne Bohr vise at hydrogens spektrallinjer kunne forklares hvis man antog at hydrogens elektron kun

kunne befinde sig i faste baner, og at energien i bane nr. n var givet ved

$$E_n = -\frac{h \cdot c \cdot R}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ er Plancks konstant, $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ er lysets fart, og $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ er Rydbergs konstant.

Bohrs model var dog ikke perfekt. Faktisk kunne den kun forklare hydrogen-atomet helt præcist. Men modellen blev alligevel grundlaget for meget af det videre arbejde med atomets struktur.

Bohr havde udledt sin formel for energien i de enkelte elektronbaner ved at antage at elektronen dannede en form for stående bølge om atomkernen. Den franske fysiker Louis de Broglie fik derfor den idé at ligesom lys kunne være både bølger og partikler, så kunne partikler som elektroner også forstås som bølger. Ud fra de Broglies ideer kunne den østrigske fysiker Erwin Schrödinger i 1926[10] opstille en ligning for partiklers bevægelse. Schrödingers ligning omhandler ikke partiklerne bevægelse direkte, men behandler i stedet den såkaldte *bølgefunktion*. Fortolkningen af bølgefunktionen kom senere da den tyske fysiker Max Born fandt ud af bølgefunktionen angiver *sandsynligheden* for at finde en partikel et bestemt sted.

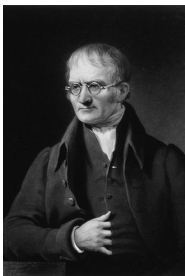
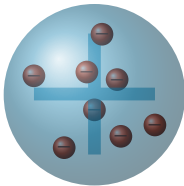
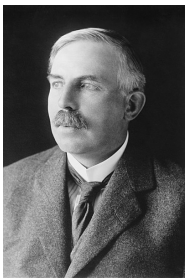
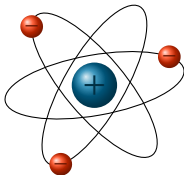
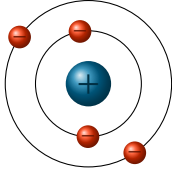
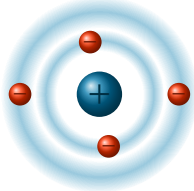
Figur 1.1 viser en oversigt over hvordan fysikkens forståelse af atomet har udviklet sig. Bemærk at strukturen af atomkernen ikke er taget med i beskrivelsen. Det var først i 1919 at Ernest Rutherford identificerede protonen som en del af atomkernen.[5] Han formodede at der også måtte være en neutral partikel i kernen, en formodning der viste sig at være sand da den engelske fysiker James Chadwick opdagede neutronen i 1932.[10]

Man vidste nu at atomet bestod af en kerne af protoner og neutroner samt elektroner der var bundet til atomkernen. Protonerne har positiv elektrisk ladning, og elektronerne har en (lige så stor) negativ ladning, dvs. det er elektriske kræfter der holder elektronerne bundet til atomkernen. De positive protoner i atomkernen frastøder hinanden, men grunden til at atomkernen er stabil er at protoner (og neutroner) tiltrækker hinanden med den såkaldte *stærke kernekraft*.

Under arbejdet med at forstå denne kraft fandt man frem til at protonerne og neutronerne i virkeligheden ikke var fundamentale partikler, men selv bestod af andre partikler. I 1964 beskrev de amerikanske fysikere Murray Gell-Mann og George Zweig uafhængigt af hinanden disse partikler der endte med at blive kaldt *kvarker*. [10] Det viste sig at den elektriske ladning af kvarkerne var brøkdele af elektronens ladning, således at en proton består af to kvarker med en positiv ladning på $\frac{2}{3}$ af elektronens ladning og én kvark med en negativ ladning på $\frac{1}{3}$ af elektronens ladning.

I den atommodel man har i dag, består atomerne således af en positivt ladet kerne med elektroner udenom, og kernen består af protoner der er positivt ladede, og neutroner der ikke har en ladning. Protonerne og neutronerne består så hver især af tre såkaldte kvarker.

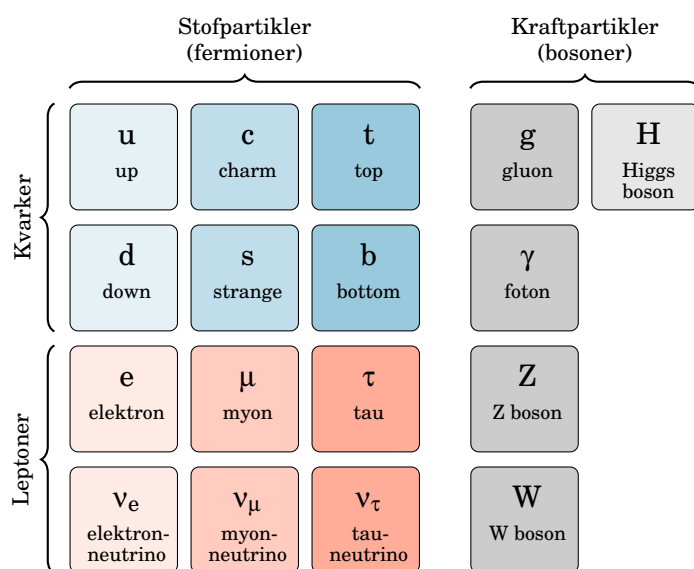
Figur 1.1: En hurtig oversigt over hvordan billedet af atomet har udviklet sig over tid. Billedkilder: [24], [18], [23], [22], [16]

1803		John Dalton forestillede sig atomerne som små kugler.	
1904		J.J. Thomson mente at atomerne bestod af en positivt ladet kugle hvori elektronerne bevægede sig.	
1911		Sir Ernest Rutherford lavede en model hvor atomkernen var positiv og elektronerne bevægede sig i baner udenom som planeter i et solsystem.	
1913		Niels Bohr I Bohrs atommodel bevægede elektronerne sig i helt faste baner omkring atomkernen, de såkaldte elektronskaller.	
1926		Erwin Schrödinger Schrödinger fandt frem til en ligning der kunne beskrive sandsynlighederne for at finde elektronerne bestemte steder i atomet.	

1-2 Standardmodellen

Det viser sig at de kvarker som protoner og neutroner består af, ikke er de eneste kvarker der findes. De mange opdagelser der er blevet gjort siden kvantemekanikkens begyndelse, har ført til den model man i dag har for stofs opbygning. Modellen kaldes *standardmodellen*, og den blev udviklet i begyndelse af 1970'erne.[13]

Ifølge modellen er alt stof opbygget af kvarker og leptoner, en gruppe partikler der bl.a. indeholder elektronen. Der findes 6 forskellige kvarker og 6 forskellige leptoner der hver især kan inddeles i 3 »generationer«. Den første generation indeholder de letteste og mest stabile elementarpartikler: up- og down-kvarkerne samt elektronen og elektronens neutrino. Det er disse partikler der udgør normalt stof. De næste to generationer består af tungere »versioner« af den første generation. Det samlede billede kan ses på figur 1.2 herunder.



Figur 1.2: Standardmodellen indeholder 12 elementarpartikler og 5 bosoner der overfører kræfterne mellem dem.

Figur 1.2 er dog ikke helt komplet. Hver af de 12 fermioner har nemlig en såkaldt *antipartikel*. F.eks. findes der en antiup-kvark som er antipartiklen til up-kvarken. Antiup-kvarken har samme masse som up-kvarken, men den modsatte ladning. På samme måde findes der også en anti-elektron (også kaldet en *positron*) der har samme masse som en elektron, men hvor elektronens ladning er $-e$, er positronens ladning $+e$. Hvis en partikel møder en antipartikel, vil de to udslette hinanden (processen kaldes *annihilation*) og omdannes til energi.

Til højre på figur 1.2 ses de såkaldte bosoner, partikler der er ansvarlige for overførsel af kræfter. Der findes i alt 4 naturkræfter: Tyngdekraften, den stærke kernekraft, den svage kernekraft og den elektromagnetiske kraft. Disse kræfter virker i standardmodellen ved overførsel af kraftpartikler (bosoner) mellem stofpartikler. Den stærke kernekraft overføres gennem gluoner, den svage kernekraft gennem W- og Z-bosoner, mens den elektromagnetiske kraft overføres af fotoner.

Higgs-bosonen som var forudsagt af modellen i lang tid, blev endeligt opdaget i 2012. Denne partikel kan forklare hvordan stofpartikler

får masse. Dog mangler der en vigtig brik i standardmodellen, den forklarer nemlig kun 3 af de 4 naturkræfter. Tyngdekraften kan ikke forklares vha. standardmodellen, dvs. standardmodellen er ikke en fuldstændig beskrivelse af stofs mindste bestanddele.

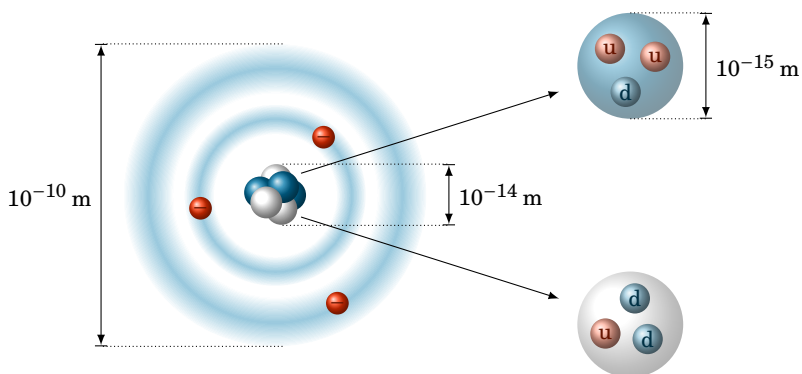
1-3 Atomets opbygning

I dag ved man at alt stof er opbygget af atomer. Disse atomer er opbygget som på figur 1.3 med en kerne af protoner og neutroner. Fordi protoner og neutroner befinder sig i atomkernen, kaldes de også *nukleoner*.¹ Uden om kernen finder man elektronerne.

Nukleonerne er opbygget af endnu mindre partikler kaldet kvarker. Således er protonen opbygget af to up-kvarker og én down-kvark, mens neutronen er opbygget af én up-kvark og to down-kvarker. Kvarkerne kan dog ikke eksistere frit, en kvark eksisterer altid i en bundet tilstand med andre kvarker.

¹Fra latin *nucleus* »kerne«.

Figur 1.3: Atomets opbygning. Atomet består af en kerne af positivt ladede protoner og neutrale neutroner. Uden om kernen befinder elektronerne sig. Protonerne og neutronerne består hver af tre kvarker; protonerne består af 2 up-kvarker og 1 down-kvark, mens neutronerne består af 1 up-kvark og 2 down-kvarker. Størrelsesangivelserne på figuren er tilnærmede værdier.



Protoner har en positiv elektrisk ladning, mens neutronerne er neutrale; elektroner har en negativ elektrisk ladning. Det er tiltrækningen mellem positiv og negativ elektrisk ladning der binder elektronerne til atomkernen. Protonens og elektronens ladning har altid den samme størrelse, denne størrelse kalder man *elementarladningen*, dens størrelse er

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Protonens ladning er e , mens elektronens ladning er $-e$.

Elementarladningen har fået sit navn fordi det er den mindste elektriske ladning der kan eksistere frit. Dog har kvarkerne mindre ladning end elementarladningen: up-kvarker har ladningen $\frac{2}{3}e$, og down-kvarker har ladningen $-\frac{1}{3}e$. Men som nævnt ovenfor kan kvarker ikke eksistere frit, dvs. man kan ikke isolere en elektrisk ladning mindre end e .

Da elektronerne og protonerne har elektriske ladninger af samme størrelse, men med modsat fortegn, er et atom neutralt hvis det indeholder lige mange elektroner og protoner.

På figur 1.3 er der angivet nogle størrelser for diameteren af et atom, atomkernen og nukleonerne. Disse tal er tilnærmede værdier idet både atomets og kernens diameter afhænger af hvor mange nukleoner der er i kernen og hvor mange elektroner der er udenom.

Enheder

Som man kan se af de tilnærmede mål for atomets radius, er atomer meget små. De har altså også en meget lille masse, og ofte vil man derfor måle massen af et enkelt atom i enheden u (unit). Der gælder

$$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Massen af en proton, en neutron og en elektron står målt i unit i tabel 1.4.

Øvelse 1.1

Et hydrogenatom består af én proton og én elektron. Hvad er massen af et hydrogenatom målt i unit og i kilogram?

Energien i de enkelte elektronskaller er også meget lille. Energien måles derfor ofte i enheden *elektronvolt* (eV) i stedet for joule. Der gælder at

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

1 eV svarer til den kinetiske energi en elektron vil modtage hvis den accelereres op af et spændingsfald på 1 V.

Øvelse 1.2

For at løsrive elektronen fra et hydrogenatom, skal man tilføre en energi på 13,6 eV til atomet. Hvor meget er det i joule?

Tabel 1.4: Massen af elementarpartiklerne i atomet.

Partikel	m / u
Proton	1,0073
Neutron	1,0087
Elektron	0,00055

1-4 Atomkernen

I atomkernen finder man de positivt ladede protoner og de neutrale neutroner. Idet positive elektriske ladninger frastøder hinanden, må disse partikler være bundet til hinanden af en kraft der er stærkere end den elektriske frastødning. Denne kraft kaldes den *stærke kernekraft*, og den virker på korte afstande mellem kvarkerne i protonerne og neutronerne.

Hvis atomkernen kun bestod af protoner ville den elektriske frastødning mellem protonerne være stærkere end den stærke kernekraft, og atomkernen ville således ikke kunne eksistere. Men fordi neutronerne ikke har elektrisk ladning, men stadig er påvirket af den stærke kernekraft, er det samlet set den stærke kernekraft der »vinder«. I atomkerner med mange protoner, er der derfor også mange neutroner.

De kræfter der virker inde i atomkernen, er væsentligt større end den elektriske tiltrækning mellem atomkernen og elektronerne udenom. Det kræver derfor meget mindre energi at løsrive elektronerne fra et atom end det gør at spalte atomkernen. Atomkernen er altså temmeligt stabil, og det er derfor antallet af protoner i atomkernen der bestemmer atomets kemiske egenskaber.

Atomer med lige mange protoner i kernen opfører sig altså kemisk set ens, dvs. det er antallet af protoner i kernen der bestemmer hvilket grundstof der er tale om. En oversigt over grundstofferne kan

Figur 1.5: Det periodiske system

man finde i det såkaldte *periodiske system* (se figur 1.5) der viser alle grundstofferne i rækkefølge efter deres *atomnummer*, Z , der er lig med antallet af protoner i atomkernen. Det første atom i det periodiske system er således hydrogen (H) der har atomnummer 1, dvs. atomet har én proton i kernen.

1-5 Elektronerne

Selvom det er atomkernen der bestemmer atomets kemiske egenskaber, dannes kemiske forbindelser ved interaktioner mellem atomernes elektroner.

På figur 1.3 er elektronerne tegnet i en sløret bane omkring atomkernen. Grunden til dette er at elektronerne ikke befinder sig i veldefinerede baner omkring atomkernen. Til gengæld har elektronerne en veldefineret potentiel energi. Hvis man skal tegne en model af et atom, giver det derfor mening at tegne et såkaldt *energiniveau-diagram* der angiver de mulige potentielle energier for elektronerne i et bestemt atom, se figur 1.6.

Figuren viser de første 5 energiniveauer i hydrogen. Et hydrogenatom indeholder én proton, dvs. et neutralt hydrogenatom indeholder én elektron. Denne elektron kan have en potentiel energi svarende til én af niveauerne i diagrammet (figuren viser de første 5 energiniveauer, men i virkeligheden er der uendeligt mange). Bemærk at de potentielle energier alle er negative. Det skyldes at den potentielle energi sættes til 0 når elektronen er løsrevet fra atomkernen. En elektron der er bundet til en atomkerne, har mindre potentiel energi end en fri elektron, og herved bliver de potentielle energier negative for elektronerne i et atom.

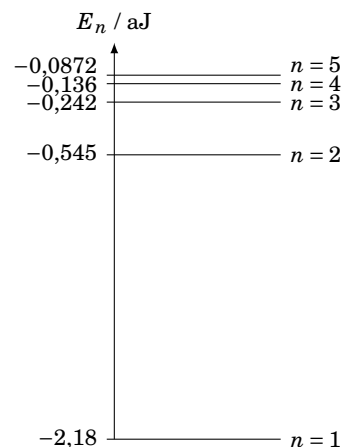
Af historiske årsager kaldes energiniveauerne også *skaller*.² Det laveste energiniveau ($n = 1$) kaldes *K-skallen*, herefter følger *L-*, *M-* og *N-skallen* (svarende til $n = 2, 3$ og 4). I nogle fremstillinger af atomet tegner man skallerne som cirkelformede baner omkring atomkernen (se figur 1.7). Skallerne har her intet at gøre med elektronernes fysiske placering i atomet, de er blot en model for hvilken potentiel energi elektronerne har. Denne pointe er nemmere at huske hvis atomerne repræsenteres med energinivaudiagrammer som på figur 1.6.

Et atom vil normalt befinde sig i *grundtilstanden* hvor alle elektroner har så lidt potentiel energi som muligt. For hydrogenatomet betyder det at atomets ene elektron vil befinde sig i på energiniveauet $n = 1$ (dvs. i *K-skallen*). For atomer med flere elektroner bliver det lidt mere kompliceret – det viser sig nemlig at *K-*, *L-*, *M-* og *N-skallerne* kun kan indeholde hhv. 2, 8, 18 og 32 elektroner. Generelt kan skal nr. n indeholde $2n^2$ elektroner.

Øvelse 1.3

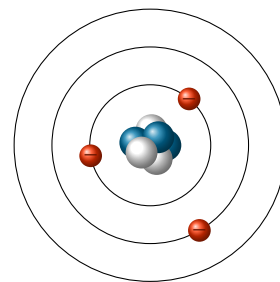
Den femte elektronskal ($n = 5$) i et atom kaldes *O-skallen*. Hvor mange elektroner kan denne skal indeholde?

Figur 1.8 viser fordelingen af de 13 elektroner i et aluminiumatom i grundtilstanden. Idet *K-skallen* kan indeholde 2 elektroner, befinder

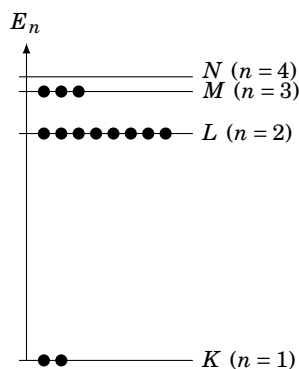


Figur 1.6: De første 5 energiniveauer i hydrogen.

²Navnet stammer fra Niels Bohrs atommodel hvor elektronerne bevægede sig i faste cirkulære baner omkring atomkernen. Herved dannede banerne koncentriske kugleskaller omkring atomkernen.



Figur 1.7: Et lithiumatom hvor elektronskallerne er tegnet som cirkulære baner.



Figur 1.8: Fordelingen af elektroner i et aluminium-atom i grundtilstanden.

de første 2 elektroner sig her, dernæst befinder der sig 8 elektroner i L -skallen, og de sidste 3 elektroner befinder sig i M -skallen.

Bemærk at der ikke er angivet størrelsen af de potentielle energier på figur 1.8. For hydrogen findes der en simpel formel til at beregne størrelsen af den potentielle energi, det gør der ikke for andre atomer. Så snart et atom indeholder mere end én elektron vil den potentielle energi af en elektron nemlig afhænge både af tiltrækningen fra atomkernen, men også af den elektriske frastødning fra de andre elektroner. Faktisk vil alle elektronerne i f.eks. L -skallen ikke have præcis den samme potentielle energi.

1-6 Isotoper

Hvis to atomer har det samme antal protoner i kernen er de kemisk set ens. Men selv om antallet af protoner er det samme, kan antallet af neutroner være forskelligt. To atomer der har det samme antal protoner, men et forskelligt antal neutroner i kernen, kalder man *isotoper*³ af det samme grundstof. F.eks. findes der isotoper af hydrogen med ingen, én eller to neutroner i kernen.

De forskellige isotoper af hydrogen skrives ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ og ${}^3_1\text{H}$. I denne notation er det øverste tal nukleontallet (dvs. det samlede antal neutroner og protoner), men det nederste tal er protontallet (som også er lig med kernens positive ladning).

En atomkerne med et bestemt antal protoner og neutroner kaldes et *nuklid*, og nuklider kan beskrives med notationen

$${}^A_Z\text{X},$$

hvor A er nukleontallet, og Z er protontallet/ladningstallet. Neutrontallet N (antallet af neutroner) kan beregnes som $N = A - Z$.

Eksempel 1.4

Nuklidet ${}^{20}_8\text{O}$ er et oxygen-atom med 8 protoner og 12 neutroner i kernen (dvs. i alt 20 nukleoner).

Når man ved at der er tale om et oxygen-atom, ved man allerede at der er tale om et atom med 8 protoner i kernen. Ottetallet i ${}^{20}_8\text{O}$ er altså ikke strengt nødvendigt at skrive. Dette nuklid kan derfor også skrives som ${}^{20}\text{O}$ eller O-20.

Øvelse 1.5

Bestem antallet af protoner og neutroner i nukliderne ${}^4_2\text{He}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ og ${}^{239}_{94}\text{Pu}$.

Som det fremgår af tabel 1.4, er massen af både en proton og en neutron ca. 1 u, mens elektronens masse er meget lille. Det er altså nukleonerne der primært bidrager til atomets masse; og da hver nukleon har en masse på ca. 1 u, svarer antallet af nukleoner nogenlunde til atomets masse målt i unit. Der gælder altså at den tilnærmede masse af nuklidet ${}^A_Z\text{X}$ kan beregnes vha. formlen

³Ordet isotop kommer fra græsk *isos* same/ens og *topos* sted, fordi isotoperne ligger samme sted i det periodiske system.

$$m({}_Z^AX) \approx A \cdot 1 \text{ u} .$$

Eksempel 1.6

At atom af xenon-isotopen ${}_{54}^{130}\text{Xe}$ (eller blot Xe-130) har en masse på ca. 130 u. Omregnet til kg er massen

$$m({}_{54}^{130}\text{Xe}) \approx 130 \text{ u} = 130 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 2,16 \cdot 10^{-25} \text{ kg} .$$

Øvelse 1.7

Bestem massen af nukliderne ${}_{18}^{47}\text{Ar}$ og ${}_{92}^{235}\text{U}$ i unit og i kg.

Øvelse 1.8

Udfyld de manglende felter i tabellen.

Nuklid	A	Z	N	m / kg
S-39				
	74	30		
		11	20	

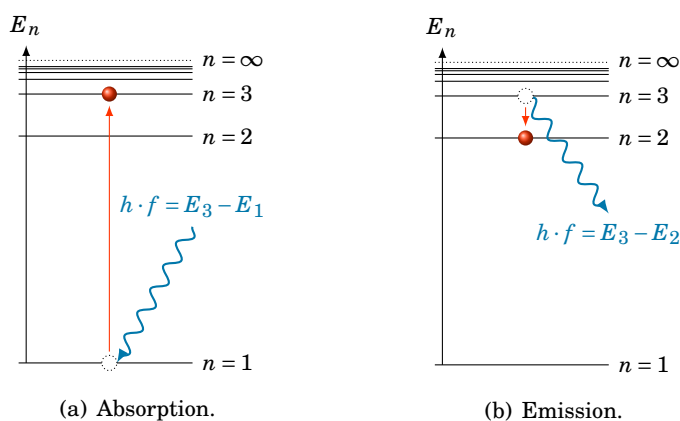
Emission og absorption

Som nævnt i sidste kapitel befinder elektronerne i et atom sig på forskellige energiniveauer der er kendetegnet ved en bestemt potentiel energi. Når et atom befinder sig i *grundtilstanden* har alle elektronerne så lav en potentiel energi som muligt.

Tilfører man energi til en af atomets elektroner, kan man »løfte« elektronen til et niveau med en højere energi. Energien kan tilføres ved at elektronen rammes af en foton hvis energi svarer præcist til energiforskellen mellem de to energiniveauer. Elektronen vil så *absorbere* (optage) fotonen og herved få en højere potentiel energi, dvs. lande på et energiniveau med en højere potentiel energi. Når dette sker, altså når en eller flere af elektronerne har en højere energi end i grundtilstanden, kaldes atomet *exciteret*.

I et exciteret atom har en eller flere af elektronerne således mere energi end i grundtilstanden. Denne energi kan *emitteres* (udsendes) i form af en foton hvorved en elektron »springer« fra et højere energiniveau til et lavere. Fotonens energi svarer til energiforskellen mellem de to niveauer.

Figur 2.1 viser hvorledes absorption og emission foregår. Ved absorption optager elektronen en foton hvorved den springer til et højere energiniveau. Fotonens energi svarer til energiforskellen mellem de energiniveauer, elektronen springer mellem. Ved emission udsendes der en foton, og elektronen springer til et niveau med en lavere energi.



Figur 2.1: Et atom kan absorbere eller emittere en foton, herved springer en elektron til et energiniveau med en højere potentiel energi (absorption) eller et energiniveau med en lavere potentiel energi (emission). Niveauet markeret med $n = \infty$ svarer til at elektronen er løsrevet fra atomkernen, den potentielle energi er her 0.

2-1 Spektre

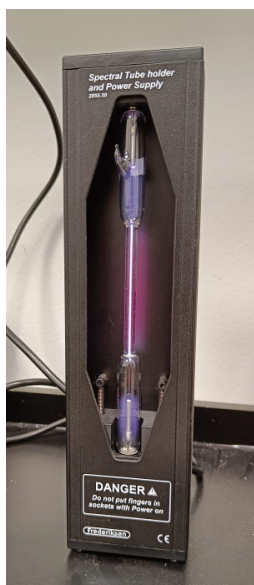
De fotoner der udsendes fra exciterede atomer, har energier der svarer til energiforskellen mellem to energiniveauer. Der kan altså kun udsendes fotoner der svarer til sådanne energier. Det betyder at et atom kun kan udsende lys med ganske bestemte bølgelængder, og disse bølgelængder afhænger af energiniveauerne i det enkelte atom.

Idet den potentielle energi af energiniveauerne er forskellig for de forskellige grundstoffer, vil forskellige grundstoffer altså udsende lys med forskellige bølgelængder. Spektret af lys som et bestemt grundstof udsender bliver altså på en måde en slags »fingeraftryk« for dette grundstof.

Figur 2.2 viser en hydrogenlampe der indeholder et glasrør fyldt med hydrogengas. Man får gassen til at lyse ved at sætte højspænding over glasrøret. Herved bliver atomerne i gassen exciterede og udsender lys der er karakteristisk for hydrogen. Det lyserøde lys man ser, består af en blanding af alle de synlige bølgelængder som hydrogen kan udsende.

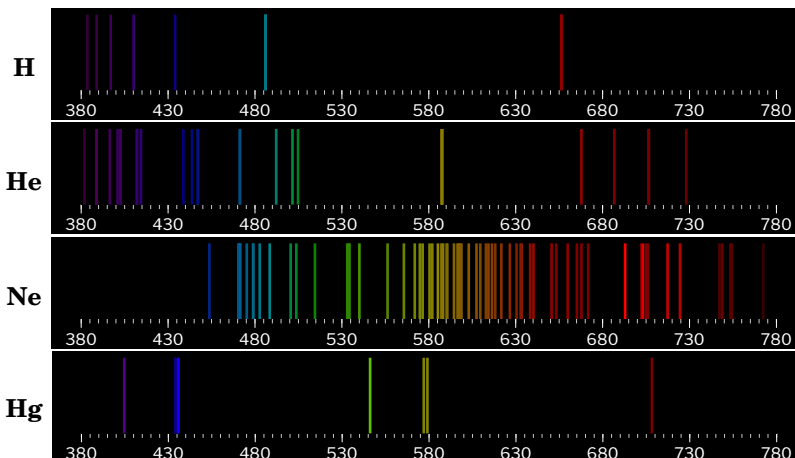
Man kan sende lyset fra hydrogenlampen gennem et optisk gitter og på denne måde få lyset fra lampen delt ud i de enkelte bølgelængder som hydrogenatomerne udsender. Disse bølgelængder kaldes hydrogens *emissionsspektrum*.

Figur 2.3 viser emissionsspektrene for de fire grundstoffer hydrogen, helium, neon og kviksølv. Som man kan se på figuren, er de fire spektre forskellige, og det betyder at man ud fra en måling af *spektrallinjerne* (dvs. bølgelængderne af det lys der udsendes) kan identificere de forskellige grundstoffer.



Figur 2.2: En hydrogenlampe.

Figur 2.3: Emissionsspektre for hydrogen, helium, neon og kviksølv. Skalaen under spektrene angiver bølgelængden i nm.



Øvelse 2.1

En exciteret gas udsender lys med bølgelængderne 447 nm og 667 nm.

a) Hvilket af grundstofferne på figur 2.3 er der tale om?

Når et atom udsender (eller absorberer) en foton, svarer fotonens energi til energiforskellen mellem de energiniveauer den springer mellem. For fotoner gælder der den følgende sammenhæng mellem energi

og frekvens

$$E = h \cdot f ,$$

hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ er Plancks konstant.

Idet fotonen er en lyspartikel, opfylder den også bølgeligningen for lys, $\lambda \cdot f = c$, hvor c er lysets fart. Det betyder at der må gælde den følgende sammenhæng mellem bølgelængden og energien af en foton,

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} ,$$

hvilket giver denne formel for bølgelængden

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} .$$

Eksempel 2.2

Kviksølv har to energiniveauer med energierne $-4,98 \text{ eV}$ og $-2,71 \text{ eV}$.^[9] Hvis en elektron springer mellem disse niveauer, vil energiforskellen være

$$E = -2,71 \text{ eV} - (-4,98 \text{ eV}) = 2,27 \text{ eV} .$$

Dette svarer til en bølgelængde på

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,27 \text{ eV}} \\ &= 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 546 \text{ nm} . \end{aligned}$$

Dette lys kan ses som den grønne linje i kviksølvs spektrum på figur 2.3.

Øvelse 2.3

En gas af hydrogenatom udsender lys med bølgelængden 656 nm .

- Hvad er frekvensen af dette lys?
- Hvad er energien af én foton?

Øvelse 2.4

Cadmium har en spektrallinje med bølgelængden $228,8 \text{ nm}$.

- Hvilken slags lys er der tale om?

Spektrallinjen fremkommer når en elektron springer fra et exciteret niveau A til grundtilstanden. Grundtilstanden for cadmium har energien $-8,994 \text{ eV}$.

- Bestem energien E_A af det exciterede niveau A .

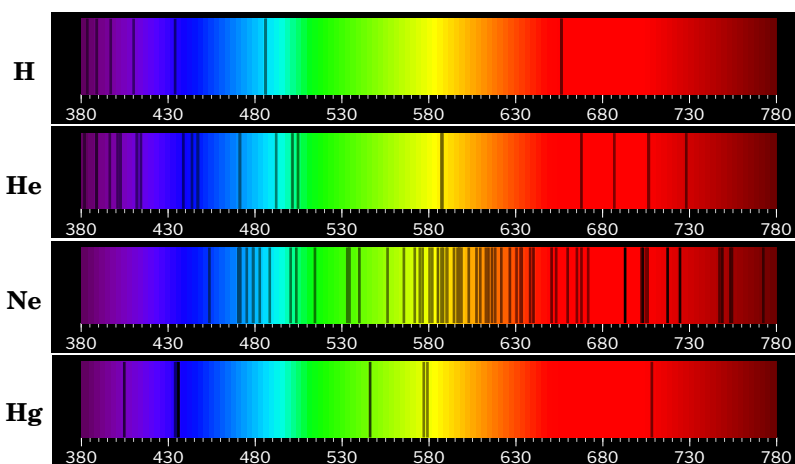
Cadmium har et andet exciteret energiniveau B med energien $E_B = -1,652 \text{ eV}$.

- Hvad er bølgelængden af det lys der udsendes ved overgangen fra niveau B til A ?
- Hvilken farve har dette lys?

Lige som atomer kun kan udsende lys hvis bølglængder svarer til helt bestemte overgange i atomet, så kan de også kun absorbere lys med disse bestemte bølglængder. Hvis man sender hvidt lys (altså lys der indeholder alle bølglængder) gennem en gas, vil gassens atomer absorbere helt bestemte bølglængder. Det lys der kommer ud på den anden side, vil derfor mangle disse bølglængder. Resultatet af dette er et *absorptionsspektrum*.

Figur 2.4 herunder viser absorptionsspektrene for de samme fire grundstoffer som på figur 2.3. Her kan man se at de bølglængder der er afbildet på emissionsspektrene svarer fuldstændigt til de mørke linjer i absorptionsspektrene.

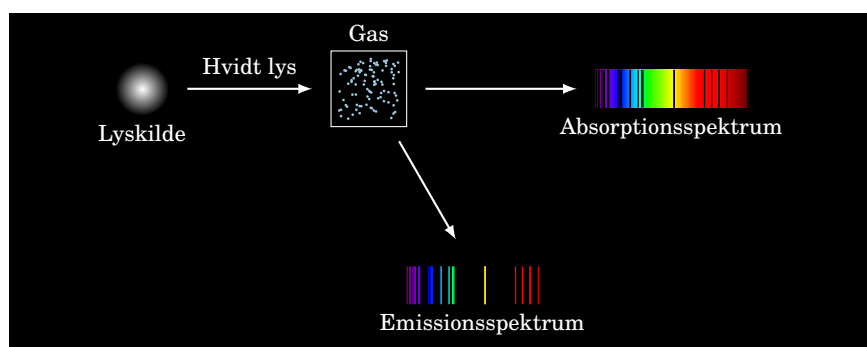
Figur 2.4: Absorptionsspektre for hydrogen, helium, neon og kviksølv. Skalaen under spektrene angiver bølglængden i nm.



Når en gas absorberer lys, bliver gassens atomer exciterede. De vil derefter henfalde til grundtilstanden, og det absorberede lys vil blive udsendt igen. Grunden til at man overhovedet ser et absorptionsspektrum, er at det lys der udsendes fra de exciterede atomer, udsendes i vilkårlige retninger.

Dette ses illustreret på figur 2.5. Hvidt lys sendes gennem en gas, herved absorberer gassens atomer lys med helt bestemte bølglængder. Dette lys udsendes igen, men i en vilkårlig retning. Dette fører til at disse bølglængder vil være meget svagere i den direkte linje af det hvide lys, mens man i alle andre retninger vil kunne observere et emissionsspektrum af det lys der udsendes fra gassen.

Figur 2.5: Når man sender hvidt lys gennem en gas, vil man kunne måle et absorptionsspektrum der hvor det hvide lys har passeret gassen. I alle andre retninger vil man måle et emissionsspektrum.



2-2 Hydrogenatomet

Det er generelt ikke muligt at opstille en simpel formel til at beregne energiniveauerne i de enkelte grundstoffer. Undtagelsen herfra er hydrogenatomet som er det simpleste af alle atomerne. Som beskrevet i kapitel 1 kan energiniveauerne i hydrogen beregnes vha. formlen

Energiniveauerne i hydrogen

$$E_n = -\frac{h \cdot c \cdot R}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Konstanterne der indgår i formlen er Plancks konstant, lysets fart, og Rydbergkonstanten. Der gælder at

$$\begin{aligned} h \cdot c \cdot R &= 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \\ &= 13,6 \text{ eV}. \end{aligned}$$

Dette betyder at formlen for energiniveauerne i hydrogen kan skrives som

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Eksempel 2.5

Energiniveauerne $n = 2$ og $n = 3$ i hydrogen har de potentielle energier

$$\begin{aligned} E_2 &= -\frac{13,6 \text{ eV}}{2^2} = -3,40 \text{ eV} \quad \text{og} \\ E_3 &= -\frac{13,6 \text{ eV}}{3^2} = -1,51 \text{ eV} \end{aligned}$$

Hvis elektronen i et exciteret hydrogenatom springer fra $n = 3$ til $n = 2$, vil der blive udsendt en foton med energien

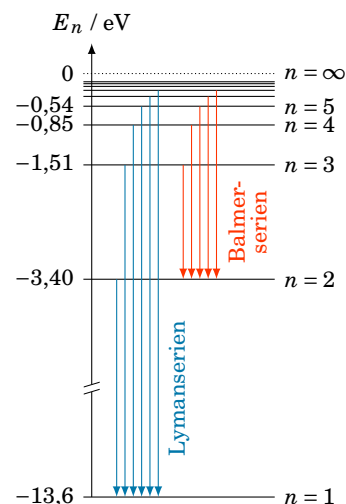
$$E = E_3 - E_2 = -1,51 \text{ eV} - (-3,40 \text{ eV}) = 1,89 \text{ eV}.$$

Dette svarer til bølglængden

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,89 \text{ eV}} \\ &= 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 656 \text{ nm}. \end{aligned}$$

Én af hydrogens spektrallinjer vil altså være rødt lys med en bølglængde på 656 nm.

Det viser sig at de synlige linjer i hydrogens spektrum alle svarer til spring til elektronskal nr. 2. Disse linjer har fået navnet Balmer-serien efter Johann Balmer som var den første der fandt en formel der beskrev linjerne. Det lys der udsendes ved spring til skal nr. 1 (grundtilstanden), er ultraviolet lys, disse kaldes Lyman-serien. Lys der udsendes ved spring til skal nr. 3 og 4, er infrarødt lys, disse linjer kaldes hhv. Paschen- og Brackett-serien. Figur 2.6 viser nogle af energiniveauerne i hydrogen samt pile der illustrerer hhv. Lyman- og Balmer-serien.



Figur 2.6: Energiniveauerne i hydrogen samt Lyman- og Balmer-serien.

Øvelse 2.6

Et exciteret hydrogenatom befinder sig i tilstanden $n = 5$ og henfalder til grundtilstanden.

- a) På hvor mange måder kan det lade sig gøre for elektronen at springe fra energiniveauet $n = 5$ til $n = 1$?
- b) Forklar for hver af disse måder hvor mange fotoner der udsendes.

Øvelse 2.7

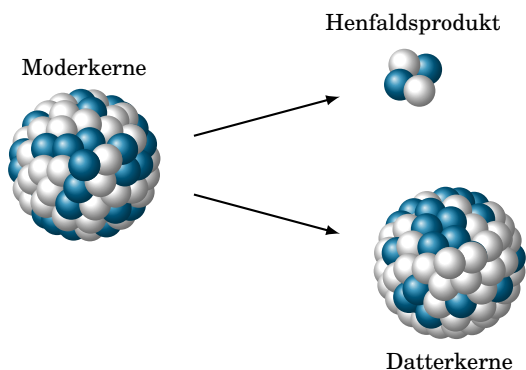
En elektron i et exciteret hydrogenatom springer fra energiniveauet $n = 5$ til $n = 2$.

- a) Hvad er bølgelængden af den udsendte foton?
- b) Hvilken farve har dette lys?

Radioaktivitet

Atomkerner består af protoner og neutroner. Protonerne er som bekendt elektrisk ladede så de frastøder hinanden, og det der holder sammen på atomkernen er den stærke kernekraft der skaber tiltrækning mellem nukleonerne. Det betyder at atomkerner er stabile når de indeholder protoner og neutroner i det rigtige forhold, og jo større atomkernerne er, jo mindre sandsynligt er det at atomkernen er stabil.

Når et nuklid er *radioaktivt*, betyder det at atomkernen ikke er stabil. Den er tilstrækkeligt stabil til at nuklidet kan eksistere i et vist tidsrum, men på et eller andet tidspunkt vil atomkernen *henfalde*, dvs. omdannes til en anden atomkerne. Figur 3.1 illustrerer et sådant radioaktivt henfald. En atomkerne, kaldet *moderkernen*, henfalder til en anden atomkerne, kaldet *datterkernen*, ved at udsende et *henfaldsprodukt*.



Figur 3.1: Et radioaktivt henfald. Moderkernen henfalder til en datterkerne og et henfaldsprodukt – som her er en ${}^4_2\text{He}$ -kerne.

Et radioaktivt henfald er et eksempel på en kernereaktion, dvs. en ændring af atomkernen. Ved sådanne kernereaktioner er bestemte størrelser altid bevaret. F.eks. er der altid energibevarelse, dette behandles nærmere i kapitel 4 nedenfor. Det samlede antal nukleoner er også bevaret, ligesom der er den samme mængde elektrisk ladning før og efter kernereaktionen.

Derudover er der bevarelse af en størrelse kaldet *leptontallet*. Leptoner er en samling af partikler der indeholder bl.a. elektronen og elektronens neutrino samt deres antipartikler (se også afsnit 1-2). Leptoner (elektronen og neutrinoen) har leptontallet +1, mens deres antipartikler har leptontallet -1. De fire bevarelsessætninger ses samlet herunder.

Bevarelsessætninger for kernereaktioner

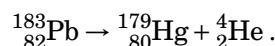
1. Den samlede energi, inklusive masseenergi, er bevaret.
2. Nukleontallet er bevaret.
3. Den samlede elektriske ladning er bevaret.
4. Leptontallet er bevaret.

3-1 Typer af radioaktivt henfald

Når en atomkerne henfalder, kan det ske på ganske bestemte måder. Herunder beskrives α - β - og γ -henfald. Andre eksempler på kernereaktioner er fission og fusion der beskrives i kapitel 5.

 α -henfald

Ved et α -henfald udsendes en α -partikel fra atomkernen. En α -partikel er det samme som en ${}^4_2\text{He}$ -kerne, dvs. den består af 2 protoner og 2 neutroner. Et eksempel på et α -henfald er henfaldet af blyisotopen ${}^{183}_{82}\text{Pb}$ til kviksølvisotopen ${}^{179}_{80}\text{Hg}$:



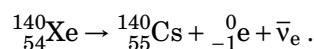
Hvis man undersøger denne reaktion, kan man se at der er bevarelse af nukleontallet, ladningen og leptontallet (se tabel 3.2). Leptontallet er 0 både før og efter reaktionen da der slet ikke optræder nogen leptoner i denne kernereaktion.

Øvelse 3.1

Opstil et reaktionsskema for α -henfaldet af ${}^{220}\text{Ra}$.

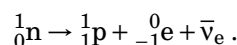
 β^- -henfald

Der findes to typer af β -henfald, β^- og β^+ . I et β^- -henfald, udsendes der en elektron fra atomkernen. Et eksempel er betahenfaldet af ${}^{140}_{54}\text{Xe}$:



Partiklen $\bar{\nu}_e$ er elektronens antineutrino. Denne partikel sørger for at der er bevarelse af leptontallet. Leptontallet før kernereaktionen er nemlig 0 (der er ingen leptoner på venstre side), mens tallet efter reaktionen også er 0 (idet leptontallet for elektronen er +1, mens det for antineutrinoen er -1).

Ved et β^- -henfald omdannes en neutron i atomkernen til en proton, en elektron og en antineutrino:



Denne reaktion finder også sted for frie neutroner, dvs. neutroner der ikke er bundet i en atomkerne.

Øvelse 3.2

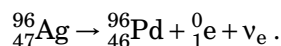
Opstil et reaktionsskema for β^- -henfaldet af ${}^{126}\text{Cd}$.

Tabel 3.2: Nukleontal, ladning og leptontal før og efter α -henfaldet af Pb-183.

	Før	Efter
Nukleontal	183	179 + 4
Ladning	82	80 + 2
Leptontal	0	0

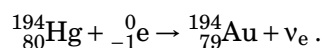
β^+ -henfald

Ved et β^+ -henfald udsendes der en *positron* (en antielektron) og en neutrino. Dette sker ved at en proton henfalder til en neutron og en positron. Et eksempel er henfaldet af $^{96}_{47}\text{Ag}$:



Elektronindfangning

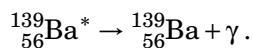
Elektronindfangning er egentlig en speciel udgave af et β -henfald. Her indfanges en af atomets elektroner, og denne elektron omdannes sammen med en proton til en neutron. Den indfangne elektron kommer fra atomets inderste elektronskal, *K*-skallen; denne kernereaktion kaldes derfor også *K*-indfangning. Et eksempel er henfaldet af $^{194}_{80}\text{Hg}$:



γ -henfald

Ligesom atomer kan være exciterede når deres elektroner befinder sig i en tilstand med højere energi end grundtilstanden, kan atomkerner også være exciterede. Dette kan ske når en atomkerne henfalder; i dette tilfælde kan den dannede datterkerne befinde sig i en exciteret tilstand.

Et γ -henfald forekommer når en exciteret atomkerne henfalder til grundtilstanden. Herved udsendes en foton (en γ -partikel) med meget høj energi. F.eks. henfalder $^{139}_{55}\text{Cs}$ ved et β^- -henfald til $^{139}_{56}\text{Ba}^*$, hvor $*$ markerer at der er tale om en exciteret atomkerne. Denne atomkerne henfalder derefter ved et γ -henfald:



Øvelse 3.3

Forklar hvilke af de følgende kernereaktioner der kan lade sig gøre, og hvis ikke, forklar så hvorfor?

- a) $^{214}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{211}_{84}\text{Po} + ^4_2\text{He}$
- b) $^{227}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{223}_{88}\text{Ra} + ^4_2\text{He}$
- c) $^{81}_{36}\text{Kr} + ^0_{-1}\text{e} \rightarrow ^{81}_{34}\text{Se} + \nu_e$
- d) $^{122}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{122}_{55}\text{Cs} + ^0_1\text{e}$
- e) $^{87}_{35}\text{Br} \rightarrow ^{87}_{36}\text{Kr} + ^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}_e$

3-2 Henfaldsloven

Når man taler om radioaktivt henfald, kan man i realiteten intet sige om hvornår et enkelt atom vil henfalde. Det eneste man kan sige noget om, er *sandsynligheden* for at et atom vil henfalde i et givet tidsrum. Da der oftest er et ufatteligt stort antal atomer til stede i en given

prøve, betyder det i praksis at en bestemt procentdel af atomerne vil henfalde i et givet tidsrum.

Det vil altså sige at antallet af atomkerner er en eksponentiel funktion af tiden. Hvis N_0 betegner antallet af atomkerner til tiden $t = 0$, vil antallet N af atomkerner til tiden t altså være givet ved

$$N = N_0 \cdot e^{-k \cdot t},$$

hvor k kaldes henfaldskonstanten. Denne sammenhæng kalder man *henfaldsloven*. Størrelsen k , der kaldes *henfaldskonstanten*, hænger sammen med hvor stor en procentdel af atomerne der henfalder i et givet tidsrum.

Øvelse 3.4

Nuklidet Ag-110 har henfaldskonstanten $k = 0,0407 \text{ s}^{-1}$. En prøve indeholder $6,72 \cdot 10^{13}$ Ag-110-atomer til tiden $t = 0$.

- a) Hvor mange Ag-110-atomer er der tilbage i prøven efter 8 minutter?

Da en bestemt procentdel af kernerne henfalder pr. sekund, må antallet af kerner være halveret inden for et ganske bestemt tidsrum. Dette tidsrum kaldes *halveringstiden* og betegnes $T_{1/2}$. Anvender man de sædvanlige regneregler for eksponentialfunktioner, finder man at

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}.$$

Idet der dermed også må gælde at $k = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$, kan henfaldsloven også skrives som

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Eksempel 3.5

Nuklidet Na-22 har en halveringstid på 2,605 år. En prøve indeholder $N_0 = 7,3 \cdot 10^{11}$ Na-22-atomer. Efter 8 år vil indholdet af Na-22-atomer i prøven være

$$N = 7,3 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{8 \text{ a}}{2,605 \text{ a}}} = 8,7 \cdot 10^{10}.$$

Som beskrevet ovenfor kan henfaldsloven altså skrives op på flere måder. De to mest anvendelige er de følgende.

Henfaldsloven

Antallet af atomer af et radioaktivt nuklid er givet ved

$$N = N_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{eller} \quad N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}},$$

hvor k er henfaldskonstanten, og $T_{1/2}$ er halveringstiden. Sammenhængen mellem disse to konstanter er

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}.$$

Øvelse 3.6

Det radioaktive nuklid ^{137}Cs har en halveringstid 30,17 år. En prøve indeholder 80 fg ^{137}Cs .

- a) Hvor lang tid går der før prøvens indhold af ^{137}Cs er faldet til 20 fg?

Øvelse 3.7

Alle levende organismer indeholder kulstof, og en bestemt procentdel af dette kulstof udgøres af det radioaktive nuklid C-14 der har en halveringstid på 5715 år.

Under udgravningen af en jernalderlandsby finder man nogle træstolper. Deres indhold af C-14 måles til at være 79% af C-14-indholdet i nutidige træstolper.

- a) Hvor gamle er stolperne?

3-3 Aktivitet

Når man måler på en radioaktiv prøve, er det som regel den radioaktive stråling man måler på, og ikke antallet af radioaktive atomer. Men hvor meget radioaktiv stråling der kommer fra en given prøve hænger naturligvis sammen med hvor mange atomer der henfalder i et givet tidsrum.

Man definerer derfor *aktiviteten* af en prøve af et radioaktivt stof til at være antal henfald pr. tid, dvs.

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

så længe Δt er tilstrækkeligt lille til at antallet af atomkerner ikke ændrer sig nævneværdigt i dette tidsrum.

Fortegnet i formelen 3.1 skyldes at størrelsen ΔN er tilvæksten i antallet af atomkerner, og denne tilvækst er negativ (fordi antallet af atomer falder). Når man skifter fortegnet, bliver A derved en positiv størrelse.

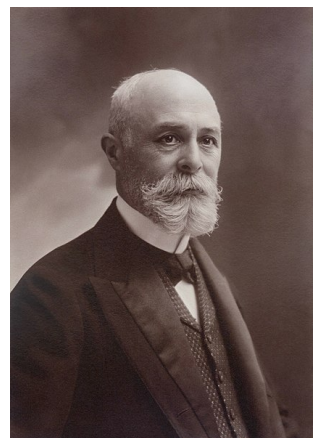
SI-enheden for tid er sekunder, og enheden for aktivitet bliver så s^{-1} . Når det drejer sig om aktivitet, kaldes denne enhed becquerel (Bq) efter den franske fysiker Henri Becquerel (1852–1908) der var den første der opdagede radioaktivitet.[6]

Eksempel 3.8

Naturligt forekommende kalium indeholder en lille brøkdel af det radioaktive nuklid K-40 der har en meget lang halveringstid på 1,28 mia. år. En prøve af et kaliumsalt undersøges, og der måles $6,17 \cdot 10^4$ henfald i løbet af 30 min.

Aktiviteten af denne prøve er så

$$A = \frac{6,17 \cdot 10^4}{30 \text{ min}} = \frac{6,17 \cdot 10^4}{30 \cdot 60 \text{ s}} = 34,3 \text{ Bq}.$$



Figur 3.3: Henri Becquerel.[20]

Tidsrummet Δt i formelen (3.1) skal som sagt være tilstrækkeligt lille. Hvis det er tilfældet, kan man også anvende formelen til at beregne antallet af atomkerner der henfalder i dette lille tidsrum som

$$-\Delta N = A \cdot \Delta t.$$

Hvis man gør tidsrummet gradvist mindre, ser man også at formelen (3.1) kan skrives som

$$A = -\frac{dN}{dt},$$

og dvs.

$$A = -\frac{d}{dt} (N_0 \cdot e^{-k \cdot t}) = -(-k) \cdot N_0 \cdot e^{-k \cdot t},$$

hvilket betyder at

$$A = k \cdot N.$$

Af denne sammenhæng ses at aktiviteten er proportional med antallet af radioaktive atomer. Dette er egentlig ikke så overraskende, da man må forvente dobbelt så meget stråling når der er dobbelt så mange atomer, osv. Man kan også se ud af sammenhængen at henfaldskonstanten k er et mål for hvor stor en brøkdel af atomerne der henfalder pr. tid.

Idet aktiviteten er proportional med antallet af atomer, og antallet af atomer er en aftagende eksponentialfunktion af tiden, må aktiviteten ligeledes være en aftagende eksponentialfunktion af tiden, dvs.

$$A = A_0 \cdot e^{-k \cdot t}.$$

Øvelse 3.9

En prøve indeholder 6,2 µg af det radioaktive nuklid ^{22}Na der har en halveringstid på 2,605 år.

- Hvor mange atomer af nuklidet ^{22}Na indeholder prøven?
- Hvad er aktiviteten?
- Hvad er aktiviteten efter 7 år?

Øvelse 3.10

En kilde der indeholder et radioaktivt nuklid, har en aktivitet på 78 kBq. Efter 8 timer er aktiviteten faldet til 52 kBq.

- Beregn halveringstiden for det radioaktive nuklid.
- Hvor mange radioaktive atomkerner indeholdt kilden ved målingernes start?

3-4 Måling af aktivitet

Aktivitet af en radioaktiv kilde kan måles med et såkaldt *Geiger-Müller-rør* (se figur 3.4). Røret omsætter den stråling der passerer ind i røret til et elektrisk signal. Når man måler over et bestemt tidsrum, får

man derfor et tælleantal som resultat; dette tælleantal viser hvor mange partikler Geiger-Müller-røret har registreret i dette tidsrum.

Tælleantallet er ikke lig med aktiviteten idet en radioaktiv kilde vil udsende stråling i alle retninger, og Geiger-Müller-røret kun kan registrere stråling i én retning. Men tælleantallet er proportionalt med aktiviteten. Man skal dog tage højde for at tælleantallet også indeholder den stråling der kommer fra omgivelserne, den såkaldte *baggrundsstråling*. Hvis man vil måle aktiviteten af en kilde, skal denne baggrundsstråling derfor trækkes fra.

Idet henfaldet af et radioaktivt nuklid sker med en hvis sandsynlighed, vil man heller ikke nødvendigvis få det samme tælleantal hver gang man måler. Hvis f.eks. en kilde indeholder 10 000 radioaktive atomer der alle har en sandsynlighed på 3% for at henfalde inden for det næste minut, så betyder det at ca. 300 atomer vil henfalde inden for det næste minut – men ikke *præcis* 300 atomer. Der kan altså sagtens henfalde f.eks. 256, 298 eller 317 atomer.

Eksempel 3.11

En radioaktiv kilde placeres foran et Geiger-Müller-rør, og tælleantallet over 30 s måles 10 gange. Det giver resultaterne

52, 67, 43, 78, 59, 60, 49, 51, 72, 55 .

En god vurdering af det »rigtige« tælleantal får man ved at tage gennemsnittet af disse værdier:

$$\frac{52 + 67 + 43 + 78 + 59 + 60 + 49 + 51 + 72 + 55}{10} = 58,6 .$$

Som eksemplet ovenfor viser, giver det altså mening at måle tælleantallet flere gange. En anden mulighed er at måle tælleantallet over længere tid. I eksemplet målte man tælleantallet over 30 s ti gange; man kunne også have målt tælleantallet over 300 s.

3-5 Absorption i stof

Når man sender radioaktiv stråling gennem stof, vil denne stråling kunne interagere med stoffets atomer. Radioaktiv stråling består af enten α -, β - eller γ -partikler, dvs. ${}^4_2\text{He}$ -kerner, elektroner/positroner eller energirige fotoner.

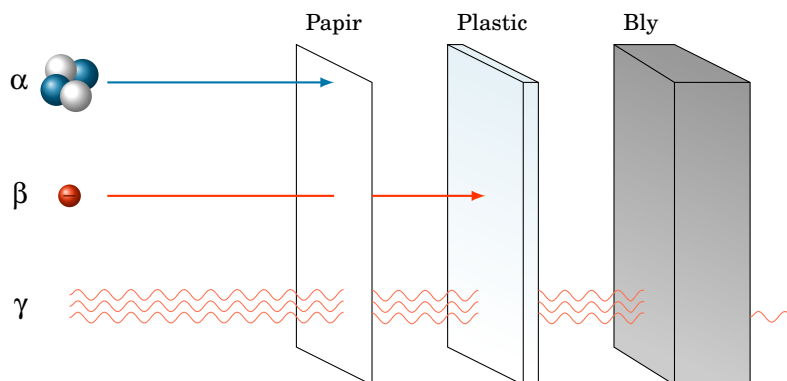
Af disse partikler er α -partiklen den med den største masse, efterfulgt af β -partikler. γ -partikler, der er fotoner, er masseløse. Det betyder α -stråling i princippet er farligst idet disse partikler overfører meget mere energi end β - og γ -partikler; til gengæld er de også nemmere at bremse pga. deres store masse.

Figur 3.5 viser hvor meget der skal til at bremse de forskellige partikler. α -partikler kan pga. deres store masse bremses af et simpelt stykke papir. Plastic, træ og tynde metalfolier kan bremse β -stråling, mens γ -stråling bedst bremses med et tykt lag bly. Dog vil noget af γ -strålingen passere selv et tykt blylag.



Figur 3.4: Et Geiger-Müller-rør tilsluttet en tæller.

Figur 3.5: Absorption af radioaktiv stråling. α -partikler kan bremses af et stykke papir. For β - og γ -partikler skal der lidt mere til.



α - og β -partiklers interaktion med stof er ganske komplicerede fænomener, men γ -stråling er nemmere at beskrive. γ -partikler er fotoner, og fotoner interagerer med atomer ved at blive absorberet. Dvs. når man sender γ -stråling gennem et stof, har hver foton en sandsynlighed for at blive absorberet, og denne sandsynlighed vokser med tykkelsen af stoffet. Processen kan derfor – helt analogt med henfaldene beskrevet ovenfor – beskrives ved en eksponentialfunktion

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x},$$

hvor I er intensiteten af den radioaktive stråling, x er tykkelsen af stoffet, og μ er en konstant der kaldes *absorptionskoefficienten*. Størrelsen af μ afhænger både af stoffet og af γ -partiklernes energi.

Som man kan se af formlen ovenfor må absorptionskoefficienten μ have standardenheden m^{-1} . Man kan desuden se at der må findes en *halveringstykkelse* som er den tykkelse af et bestemt stof der skal til for at halvere intensiteten af strålingen. Denne må så kunne beregnes som

$$x_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu}.$$

Øvelse 3.12

Det radioaktive nuklid ^{137}Cs henfalder ved β^- -henfald til en exciteret bariumisotop der herefter henfalder ved et γ -henfald.

- a) Opstil et reaktionsskema for henfaldet af ^{137}Cs .

Den udsendte γ -partikel har en halveringstykkelse i bly på 6,5 mm.

- b) Bestem absorptionskoefficienten μ .
 c) Bestem hvor stor en brøkdel af gammastrålingen der er tilbage når strålingen passerer gennem et blylag med en tykkelse på 20 mm.

Kerneenergi

I begyndelsen af det 20. århundrede var fysikerne klar over at der fandtes en sammenhæng mellem masse og energi. Mange fysikere havde arbejdet med at finde den korrekte sammenhæng, og Albert Einstein er i dag kendt for at have fundet frem til formlen[12]

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

hvor c er lysets fart.

Denne formel som Einstein publicerede i 1905, siger at energi og masse er ækvivalente. Dette bliver især tydeligt når man undersøger atomkerner.

Når man regner på atomkerner, anvender man sjældent SI-enheder for masse og energi, disse måles oftest i unit og elektronvolt. Det giver derfor mening at udtrykke konstanten c^2 vha. disse enheder. Lysets fart c er som bekendt $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s, dvs.¹

$$\begin{aligned} c^2 &= (2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 8,988 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 \\ &= 8,988 \cdot 10^{16} \text{ J/kg} = 931,5 \text{ MeV/u}. \end{aligned}$$

¹I denne beregning udnyttes det at J kan udtrykkes ved grundenheder som

$$J = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}.$$

Energi og masse er altså ækvivalente, og en masse på 1 u svarer til en energi på 931,5 MeV.

Der gælder følgende ækvivalens mellem masse og energi:

$$E = m \cdot c^2 \quad (4.1)$$

Konstanten $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s er lysets fart, og der gælder tillige at $c^2 = 931,5 \text{ MeV/u}$.

Øvelse 4.1

Hvis en masse på 1 kg kunne omdannes til ren energi, hvor meget energi (i joule) vil der så blive frigivet?

4-1 Massedefekt og bindingsenergi

Ser man på et atom af nuklidet ${}^8_3\text{Li}$, så består atomet af 3 protoner og 5 neutroner (8 tilsammen) samt 3 elektroner. Da man kender massen af en proton, en neutron og en elektron (se tabel 1.4), burde man kunne beregne massen af ét ${}^8_3\text{Li}$ -atom som

$$3 \cdot m_p + 3 \cdot m_e + 5 \cdot m_n = 3 \cdot m({}^1_1\text{H}) + 5 \cdot m_n,$$

hvor $m({}_1^1\text{H})$ er massen af ét ${}_1^1\text{H}$ -atom (der netop indeholder én proton og én elektron, dvs. $3{}_1^1\text{H}$ -atomer indeholder 3 protoner og 3 elektroner).

Slår man de enkelte masser op og sætter ind i beregningen, finder man at

$$3 \cdot m_{\text{H}} + 5 \cdot m_{\text{n}} = 3 \cdot 1,007\,825\,032 \text{ u} + 5 \cdot 1,008\,664\,916 \text{ u} \\ = 8,066\,799\,676 \text{ u}.$$

Men hvis man slår massen af et ${}_3^8\text{Li}$ -atom op, finder man at massen er 8,022 487 36 u. Hvad er årsagen til den »manglende« masse?

Årsagen kan findes i formlen 4.1. Når de 8 nukleoner i ${}_3^8\text{Li}$ bindes til hinanden, har de en lavere potentiel energi end når de eksisterer frit. Den frigivne potentielle energi ses ved forskellen i masse på de frie og de bundne partikler. Denne masseforskel kaldes *massedefekten*. Massedefekten for ${}_3^8\text{Li}$ er altså

$$m_{\text{defekt}} = 8,066\,249\,676 \text{ u} - 8,022\,487\,36 \text{ u} = 0,044\,312\,32 \text{ u}.$$

Denne beregning kan generaliseres til den følgende formel for massedefekten.

Massedefekt

Massedefekten for nuklidet ${}_Z^AX$ er

$$m_{\text{defekt}} = Z \cdot m({}_1^1\text{H}) + N \cdot m_{\text{n}} - m({}_Z^AX),$$

hvor $N = A - Z$ er neutrontallet.

Massedefekten er altså den masse der er blevet omdannet til energi når nukleonerne bliver bundet til hinanden i atomkernen. Dette svarer altså til atomkernens *bindingsenergi*. Energien kan beregnes vha. formel 4.1. For ${}_3^8\text{Li}$ bliver bindingsenergien

$$E_{\text{binding}} = m_{\text{defekt}} \cdot c^2 \\ = 0,044\,312\,32 \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV/u} \\ = 41,28 \text{ MeV}$$

Øvelse 4.2

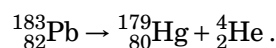
Bestem massedefekten og bindingsenergien for nukliderne ${}_{10}^{21}\text{Ne}$ og ${}_{79}^{197}\text{Au}$.

4-2 Q-værdi

Ved kernereaktioner der forløber spontant, er den samlede masse før reaktionen større end den samlede masse efter reaktionen, dvs. noget af massen omdannes til energi. Denne dannede energi kaldes reaktionens *Q-værdi*.

Eksempel 4.3

α -henfaldet af Pb-183 forløber således:



Her er massen før reaktionen

$$m_{\text{før}} = m({}_{82}^{183}\text{Pb}) = 182,99187 \text{ u} ,$$

og massen efter reaktionen er

$$\begin{aligned} m_{\text{efter}} &= m({}_{80}^{179}\text{Hg}) + m({}_2^4\text{He}) \\ &= 178,981834 \text{ u} + 4,002603 \text{ u} = 182,984437 \text{ u} . \end{aligned}$$

I princippet bør man trække massen af elektronerne fra idet man skal anvende kernemasserne og ikke atommasserne. Men da der er 82 elektroner på hver side, og det er masseforskellen der bruges til at beregne Q -værdien, gør det ingen forskel for resultatet.

Henfaldet giver så et massetab på

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{efter}} - m_{\text{før}} \\ &= 182,984437 \text{ u} - 182,99187 \text{ u} = -0,007433 \text{ u} . \end{aligned}$$

Ud fra dette massetab og formel (4.1) kan man beregne kerne-reaktionens Q -værdi:

$$Q = -\Delta m \cdot c^2 = 0,007433 \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 6,924 \text{ MeV} .$$

Et α -henfald af Pb-183 frigiver altså en energi på 6,924 MeV.

Ud fra eksemplet ses det at Q -værdien af en kernereaktion kan beregnes vha. formlen

Q-værdi

$$Q = -\Delta m \cdot c^2 ,$$

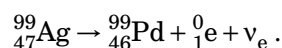
hvor $\Delta m = m_{\text{efter}} - m_{\text{før}}$ er ændringen i masse.

Q -værdien angiver hvor meget energi der frigives ved den pågældende kernereaktion. Den frigivne energi bliver til kinetisk energi af reaktionsprodukterne.

Hvis Q -værdien er positiv, frigives der energi ved reaktionen, og der er således mulighed for at den kan forløbe spontant. Er Q -værdien derimod negativ, skal der tilføres energi for at reaktionen kan forløbe.

Eksempel 4.4

Nuklidet ${}_{47}^{99}\text{Ag}$ henfalder ved et β^+ -henfald. Reaktionsskemaet ser derfor således ud:



Massen før reaktionen er

$$m({}_{47}^{99}\text{Ag}) - 47 \cdot m_{\text{e}} .$$

Her trækkes elektronens masse fra sølvatomets masse, idet det er atomkernerne der indgår i reaktionen; og derfor er det atomkernes masse og ikke massen af det neutrale atom, man har brug for. Efter reaktionen er massen

$$m({}_{46}^{99}\text{Pd}) - 46 \cdot m_e + m_e = m({}_{46}^{99}\text{Pd}) - 45 \cdot m_e .$$

Her lægges en enkelt elektronmasse til til sidst, fordi den dannede positron har samme masse som en elektron. Neutrinoens masse er så lille at den kan regnes for 0.[11].

Forskellen i masse bliver så

$$\begin{aligned} \Delta m &= (m({}_{46}^{99}\text{Pd}) - 45 \cdot m_e) - (m({}_{47}^{99}\text{Ag}) - 47 \cdot m_e) \\ &= m({}_{46}^{99}\text{Pd}) - m({}_{47}^{99}\text{Ag}) + 2 \cdot m_e \\ &= 98,911\,768\,\text{u} - 98,917\,60\,\text{u} + 2 \cdot 0,000\,549\,\text{u} \\ &= -0,004\,73\,\text{u} . \end{aligned}$$

Dvs. Q -værdien for dette henfald er

$$Q = -\Delta m \cdot c^2 = 0,004\,73\,\text{u} \cdot 931,5\,\text{MeV/u} = 4,406\,\text{MeV} .$$

Øvelse 4.5

Nuklidet ${}_{30}^{79}\text{Zn}$ henfalder ved et β^- -henfald.

- Opstil et reaktionsskema for dette henfald.
- Bestem Q -værdien.

Øvelse 4.6

Nukliderne ${}_{5}^{14}\text{B}$, ${}_{50}^{107}\text{Sn}$ og ${}_{86}^{217}\text{Rn}$ er alle radioaktive.

- Find ud af hvordan de tre nuklider henfalder.
- Opstil reaktionsskemaer for de tre henfald.
- Bestem henfaldenes Q -værdier.

Fission og fusion

Hvis man skal sammenligne bindingsenergiene for forskellige nuklider, giver det ikke meget mening at sammenligne bindingsenergiene direkte. F.eks. er bindingsenergien for $^{12}_6\text{C}$ 92,16 MeV, mens den er 1783,86 MeV for $^{235}_{92}\text{U}$. Den store forskel skyldes at kulstofatomet indeholder 12 nukleoner, mens uranatomet indeholder 235.

Fordi atomer kan indeholde meget forskellige antal nukleoner, kan man bedre sammenligne dem hvis man i stedet kigger på bindingsenergien pr. nukleon, som man finder ved at dividere bindingsenergien med nukleontallet A . For $^{12}_6\text{C}$ finder man så at bindingsenergien pr. nukleon er

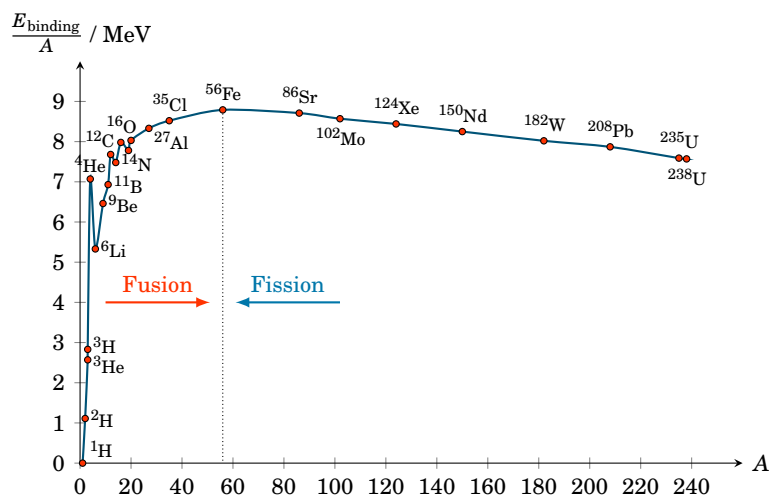
$$\frac{E_{\text{binding}}}{A} = \frac{92,16 \text{ MeV}}{12} = 7,68 \text{ MeV},$$

mens den for $^{235}_{92}\text{U}$ er

$$\frac{E_{\text{binding}}}{A} = \frac{1783,86 \text{ MeV}}{235} = 7,59 \text{ MeV}.$$

Bindingsenergien pr. nukleon er altså en smule mindre for uran end den er for kulstof.

For de fleste nuklider ligger bindingsenergien pr. nukleon mellem 7 og 8 MeV. Figur 5.1 viser en graf over bindingsenergi pr. nukleon som funktion af nukleontallet A . Som man kan se på grafen, er bindingsenergien pr. nukleon lav for nuklider med lave nukleontal og højest ved Fe-56, hvorefter bindingsenergien falder igen for nuklider med høje nukleontal.



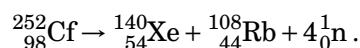
Figur 5.1: Bindingsenergi pr. nukleon for diverse nuklider.

Det betyder at man kan frigive energi ved at forene atomkerner med lave nukleontal, og at man ligeledes kan frigive energi ved at

splitte atomkerner med høje nukleontal til mindre kerner. Den første proces kaldes fusion, den sidste fission.

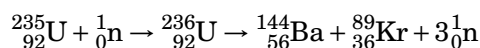
Fusion er altså en proces hvorved små atomkerner forenes til større. To atomkerner vil altid frastøde hinanden da de begge har positiv elektrisk ladning. Hvis to atomkerner skal kunne overvinde denne frastødning og komme tæt nok på hinanden til at de to kerner »smelter sammen«, skal de altså bevæge sig meget hurtigt, dvs. have en meget høj temperatur. Fusion er derfor en proces der ikke sker spontant ved stuetemperatur.

Fission kan derimod ske spontant ved lave temperaturer. Her vil en ustabil atomkerne med mange nukleoner spaltes til to mindre kerner og evt. nogle løse neutroner. Et eksempel herpå er spaltning af Cf-252:



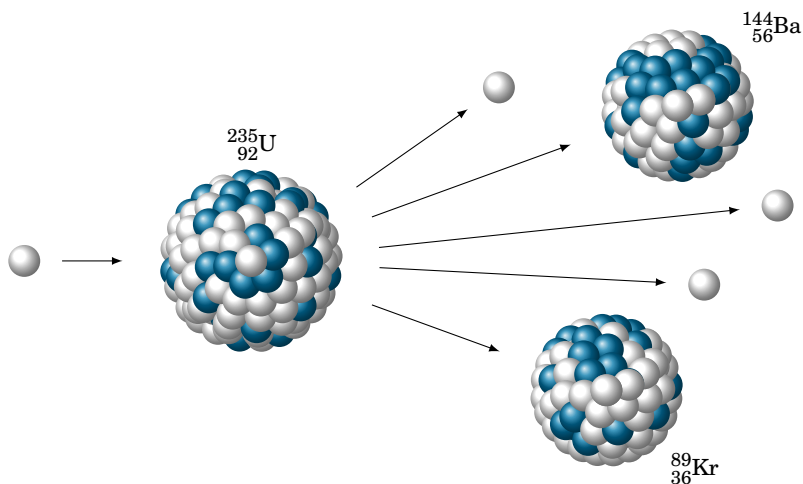
5-1 Neutroninduceret fission

Det viser sig at man kan fremkalde fissionsreaktioner i visse atomkerne hvis man kan få dem til at optage en neutron. En af de mest kendte fissionsprocesser er fission af U-235. Hvis en U-235-kerne optager en neutron, bliver den til en ustabil U-236 kerne der ret hurtigt fissionerer. Et eksempel på dette er processen



der er illustreret på figur 5.2.

Figur 5.2: Neutroninduceret fission. En U-235-kerne rammes af en neutron, hvorved den spaltes til en Ba-144-kerne, en Kr-89-kerne og 3 frie neutroner.



Der frigives i gennemsnit 200 MeV energi og 2,4 neutroner for hver fissionsreaktion. Hver af disse frigivne neutroner kan potentielt ramme et nyt U-235-atom og derved fremkalde en ny fissionsreaktion. Herved vil hver fissionsreaktion føre til 2,4 nye fissionsreaktioner og hver af disse vil igen føre til 2,4 nye fissionsreaktioner osv. Denne kædereaktion vil udvikle sig eksponentielt, og derved vil der frigives mere og mere energi.

Dette sker dog ikke i naturen. Årsagen hertil er at U-235-isotopen kun udgør 0,72% af naturligt forekommende uran, det meste består



Figur 5.3: Fission af U-235 kan udnyttes til militære eller fredelige formål. Billedet til venstre viser en atombombeprøvesprængning i Nevadaørkenen i USA.[21] Til højre ses et atomkraftværk i Grohnde i Tyskland.[19]

af isotopen U-238 som ikke fissionerer. Hvis man vil fremkalde en kædereaktion, er det derfor nødvendigt at opkoncentrere U-235-isotopen. Desuden er det nødvendigt at have en tilstrækkeligt stor masse af uran, idet de dannede neutroner skal have en tilstrækkelig sandsynlighed for rent faktisk at ramme et uranatom. Den tilstrækkelige masse for at en kædereaktion kan gå i gang, kaldes den *kritiske masse*.

Hvis de rigtige betingelser er til stede, kan det altså lade sig gøre at få U-235 til at indgå i en kædereaktion hvor der fortløbende dannes energi. Hvis man intet gør for at standse denne kædereaktion, vil man ret hurtigt få en eksplosion – dette er princippet i en atombombe. Sørger man derimod for at stabilisere reaktionen sådan at den dannede energi ikke vokser eksponentielt, men i stedet holder en fast rate, kan man udnytte denne energi til f.eks. at producere elektricitet.

Atomkraftværk

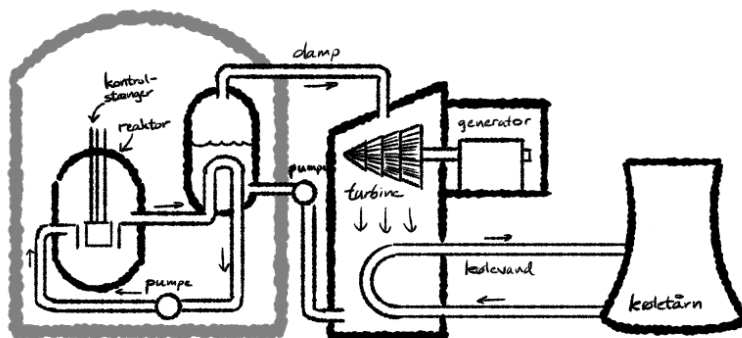
Grundprincippet i et atomkraftværk er det samme som i et kulfyret kraftværk: Man fordamper vand og bruger dampen til at drive en turbine der driver en generator som producerer elektrisk energi. Forskellen består i at man anvender fissionsprocesser til at fordampe vandet med.

Reaktoren i et atomkraftværk indeholder beriget uran, dvs. uran der indeholder mere U-235 end naturligt forekommende uran. For at kædereaktionen ikke skal løbe løbsk, er der placeret såkaldte *kontrolstænger* af grafit i reaktoren. Grafit absorberer neutroner, og ved at skyde kontrolstængerne længere ind i reaktoren eller trække dem længere ud, kan man kontrollere kædereaktionen i reaktoren. Hvis reaktoren bliver for varm, skyder man kontrolstængerne længere ind; herved absorberes der nogle af neutronerne og kædereaktionens hastighed sænkes. Omvendt kan man hæve kædereaktionens hastighed ved at trække kontrolstængerne længere ud.

Figur 5.4 viser en skitse af et atomkraftværk. Reaktoren indholder vand der varmes op. Dette vand pumpes vha. rør gennem en »dampgenerator«. Reaktorvandet er ikke i kontakt med vandet i dampgeneratoren, men der udveksles varme mellem de to, hvorved der dannes vanddamp under højt tryk. Denne vanddamp får en turbine til at dreje rundt og herved dannes der elektrisk energi i en generator. Vanddampen passerer herefter rør med kølevand, således at dampen bliver til flydende vand igen, hvorefter det pumpes tilbage til dampgeneratoren. Kølevandet afgiver sin varme til omgivelserne i *køletårne* der ofte har en meget karakteristisk form (se figur 5.3 og 5.4).¹

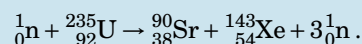
¹Formen er en såkaldt hyperboloid. Denne form øger fordampningen og dermed afkølingen fra køletårnet.

Figur 5.4: Således fungerer et atomkraftværk. Reaktoren varmer vand op. Denne varme overføres til en beholder hvori der dannes vanddamp under højt tryk som efterfølgende driver en generator.



Øvelse 5.1

Et atomkraftværk producerer elektrisk energi med effekten 1000 MW. Energien produceres ved fission af U-235, f.eks. ved processen



- Bestem Q -værdien af denne proces.
- Hvor mange gange skal denne proces foregå pr. sekund for at man opnår en effekt på 1000 MW?
- Hvor mange kg U-235 skal kraftværket bruge om året?

Kraftværket anvender beriget uran hvor andelen af U-235 er 5%.

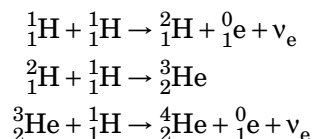
- Hvor mange kg beriget uran skal kraftværket bruge om året?

5-2 Fusion i stjerner

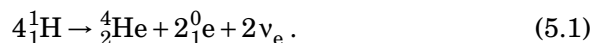
Som nævnt ovenfor sker fusionsprocesser ikke spontant ved stuetemperatur. Faktisk skal temperaturen være flere millioner grader celsius for at der er en nævneværdig sandsynlighed for at en fusionsproces sker.

Én af de steder hvor man kan støde på disse betingelser, er i stjerners indre. Faktisk er det fusionsprocesser der er årsagen til at stjernerne lyser. I det indre af vores egen stjerne Solen foregår der en række fusionsprocesser hvor hydrogenkerner smelter sammen til helium. Der er tale om den såkaldte *proton-proton-cyklus* som består af tre trin:²

²Reaktionskæden har dette navn fordi den begynder med at to H-1-kerner (dvs. to protoner) fusionerer.



Nettoreaktionen af disse tre reaktioner er



Øvelse 5.2

Solens udstrålede energi stammer fra processen (5.1), herved udstråler den effekten $3,826 \cdot 10^{26}$ W.

- Bestem Q -værdien for processen (5.1).
- Hvor mange gange sker denne fusionsproces på 1 s?
- Hvor meget masse taber Solen herved pr. sekund?

Solens masse er $1,989 \cdot 10^{30}$ kg.

- Hvor stor en brøkdel af sin masse omdanner Solen til energi i løbet af 1 år?

5-3 Fusionskraftværker

Hvis man ser på figur 5.1, kan man se at grafen er meget mere stejl på venstre side end på højre side. Det betyder at man kan få en del mere energi ud af en fusionsreaktion end man kan ved f.eks. spaltning af uran. Det ville derfor være rigtig smart hvis atomkraftværker anvendte fusion i stedet for fission.

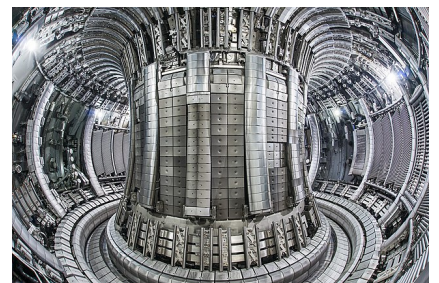
Det er dog ikke lykkedes at bygge et fungerende fusionskraftværk endnu, idet der er rigtigt mange vanskeligheder der først skal overvindes. Som nævnt ovenfor sker fusionsreaktioner ikke spontant ved stuetemperatur, men de sker f.eks. i stjerners indre hvor temperaturen er flere millioner grader celsius. Ydermere er trykket i centrum af en stjerne umådeligt højt, dvs. hvis man lave de samme fusionsprocesser her på jorden, skal man faktisk op på en endnu højere temperatur.

For at få hydrogen til at fusionere her på Jorden skal man have varmet hydrogengassen op til ca. 100 mio. °C. Det siger sig selv at intet materiale kan modstå en sådan temperatur. Heldigvis er det dog sådan at når man varmer en gas op til så høj en temperatur, vil atomerne bevæge sig så hurtigt at elektronerne ikke længere er bundet til atomkernerne. I stedet for en gas har man altså en masse frie atomkerner og elektroner – et såkaldt *plasma*. Idet atomkernerne og elektronerne ikke er bundet til hinanden, består plasmaet af en række elektrisk ladede partikler, og disse kan man holde indespærret i et kraftigt magnetfelt.

Der findes en del forsøgsreaktorer rundt omkring i verden. Mange af disse er konstrueret som en såkaldt *tokamak* hvor fusionsplasmaet holdes indespærret i et donut-formet kammer (se figur 5.5). Den største af disse er Joint European Torus (JET) i Storbritannien der har kørt eksperimenter siden 1983.[7]

En endnu større tokamak er ITER (latin for »vejen«), en kæmpestor forsøgsreaktor der lige nu er ved at blive bygget i Sydfrankrig. De første forsøg i reaktoren er planlagt til 2025. Håbet er at denne reaktor kan opnå en såkaldt Q -faktor på 10, dvs. at den producerer 10 gange så meget energi som man pumper ind i den for at starte fusionen.[15]

Det er ikke teknisk fordelagtigt at anvende samme fusionsreaktio-

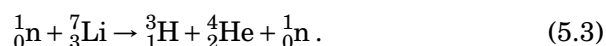


Figur 5.5: Fusionsreaktoren JET (Joint European Torus). Billedet viser tokamakken set indefra.[17]

ner som i f.eks. Solen, i stedet anvender man reaktionen



Hydrogenisotopen ${}^2_1\text{H}$ (kaldet *deuterium*) kan udvindes af f.eks. havvand. Til gengæld er isotopen ${}^3_1\text{H}$ (*tritium*) mere besværlig idet den er radioaktiv med en meget kort halveringstid på 12,3 år. Dette nuklid fremstilles derfor i reaktoren ved en reaktion med lithium



Der er dog mange problemer der skal løses før det er muligt at bygge et kommercielt fusionskraftværk. F.eks. er målet for ITER at opnå en Q -faktor på 10, men den reelle Q -faktor er faktisk mindre idet der slet ikke er medregnet den elektriske energi der bliver brugt på at pumpe termisk energi ind i reaktoren. I virkeligheden er Q -faktoren tættere på 1, dvs. reaktoren bruger lige så meget energi som den producerer.

Men generelt er Q -værdien blevet højere og højere for hver ny forsøgsreaktor man har bygget, så det kan sagtens være inden for rækkevidde at få skabt en reaktor der har en reel Q -værdi over 1. Det er dog et større problem at det endnu ikke er lykkedes at hente energien ud af en fusionsreaktor. Dvs. der bliver godt nok frigivet energi inde i reaktoren, men denne energi bliver derinde. For at man kan bygge et funktionelt fusionskraftværk, skal man altså have løst problemet med at få overført termisk energi fra det 100 mio. °C varme plasma til omgivelserne, således at der kan produceres elektrisk energi – og selvfølgelig uden at ødelægge reaktorvæggene i processen.

Øvelse 5.3

Et fusionskraftværk på 1000 MW producerer energi vha. processen (5.2).

- Bestem Q -værdien for processen (5.2).
- Hvor mange gange skal denne proces foregå pr. sekund for at man opnår en effekt på 1000 MW?

Den tritium der anvendes i reaktoren dannes ved processen (5.3).

- Hvor stor en masse af lithium skal kraftværket anvende om året?

Bibliografi

- [1] Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard og Ove Grønbæk Østergaard, red. *Databog fysik kemi*. 11. udg. F & K forlaget, 2012.
- [2] Johann J. Balmer. »Notiz über die Spektrallinien des Wasserstofs«. I: *Annalen der Physik und Chemie* 25.3 (1885).
- [3] Sylvia Berryman. »Democritus«. I: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Red. af Edward N. Zalta. Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/democritus/> (hentet 28.05.2022).
- [4] Florian Cajori. *A History of Physics in its Elementary Branches (through 1925): Including the Evolution of Physical Laboratories*. New York, N.Y.: Dover Publications, Inc., 1962.
- [5] John Campbell. *Rutherford, transmutation and the proton*. CERN Courier. 8. maj 2019. URL: <https://cerncourier.com/a/rutherford-transmutation-and-the-proton/> (hentet 28.05.2022).
- [6] *Henri Becquerel – Biographical*. Nobel Prize Outreach. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/becquerel/biographical/> (hentet 03.01.2023).
- [7] *JET: the Joint European Torus*. UK Atomic Energy Authority. URL: <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus/> (hentet 05.01.2023).
- [8] Helge Kragh. »John Dalton«. I: *Den Store Danske* på *lex.dk*. 7. maj 2020. URL: https://denstoredanske.lex.dk/John_Dalton (hentet 27.05.2022).
- [9] National Institute of Standards and Measurement. *Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data*. Nov. 2013. URL: <https://www.nist.gov/pml/handbook-basic-atomic-spectroscopic-data> (hentet 06.01.2023).
- [10] Roger G. Newton. *From Clockwork to Crapshoot: a history of physics*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2007.
- [11] Laboratory for Nuclear Science. *A new upper limit on the mass of neutrinos*. MIT News. 14. feb. 2022. (Hentet 10.01.2023).
- [12] Tony Rothman. *Was Einstein the First to Invent $E = mc^2$?* Scientific American. 24. aug. 2015. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/was-einstein-the-first-to-invent-e-mc2/> (hentet 29.12.2022).
- [13] *The Standard Model*. CERN. URL: <https://home.cern/science/physics/standard-model> (hentet 28.12.2022).
- [14] Harry Varvoglis. *History and Evolution of Concepts in Physics*. Springer International Publishing, 2014.
- [15] *What is ITER?* ITER organization. URL: <https://www.iter.org/proj/inafewlines> (hentet 06.01.2023).

Billedkilder

- [16] *Erwin Schrödinger*. Nobelstiftelsen. 1933. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/summary/>.
- [17] EUROfusion. *An internal view of the Joint European Torus vessel with a complete metallic wall of beryllium and tungsten*. Maj 2013. URL: <https://www.euro-fusion.org/media-library/fusion-experiments/>.
- [18] *Joseph John Thomson*. Nobelstiftelsen. 1906. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/summary/>.
- [19] Heinz-Josef Lücking. *Atomkraftwerk Grohnde in Niedersachsen, Deutschland*. 11. jul. 2009. URL: <https://commons.wikimedia.org/>.
- [20] Paul Nadar. *Fotografi af Henri Becquerel*. 1890–1908. URL: <https://commons.wikimedia.org/>.
- [21] National Nuclear Security Administration, Nevada Site Office. *BADGER Explosion*. 18. apr. 1953. URL: <https://commons.wikimedia.org/>.
- [22] *Niels Bohr*. Nobelstiftelsen. 1922. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/summary/>.
- [23] *Sir Ernest Rutherford*. Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/pictures/item/2014716719/>.
- [24] Charles Turner. *John Dalton: British physicist*. Maleri. 1834.