

SE DET "USYNLIGE"

Europas nye neutron- og røntgenkilder, ESS og MAX IV

Prøv tomografi til billeddannelse og diffraktion til krystalundersøgelser. Lær om acceleratorprincipper.

Danmark og Sverige og en række andre lande i EU arbejder sammen om bygning af neutron- og røntgenkilder i Lund med databehandling i København. Røntgenkilden MAX IV forventes at være i drift fra 2016 og neutronkilden ESS fra 2019. Begge skal bruges til undersøgelse af fremtidens materialer. I denne øvelse skal I lære om de acceleratorprincipper, man benytter for at frembringe strålingen og om undersøgelsesmetoderne: tomografi, som du måske kender fra hospitalsskannere og diffraktion, som begge bruges til at danne billeder af materialernes indre struktur.



Figur 1. Skitse af den kommende neutronkilde, ESS, i forgrunden foran røntgenanlægget MAX IV midt i billedet. I horisonten ses Øresundsbroen. Protoner sendes fra helt forrest i billedet gennem den lineære accelerator ind mod den mindre, runde bygning. Her banker protonerne med stor energi ind i atomkerner, så neutroner "sprøjter" ud i en stråleformet byge. Neutronerne benyttes til materialeundersøgelser i de buede bygninger.



Figur 2. Skitse af den kommende røntgenkilde, MAX IV, med bølgede jordvolde omkring. Jordvoldene dæmper rystelser, så maskinen virker bedst muligt. Elektroner accelereres i en lineær accelerator, som ikke ses på billedet. Elektronerne sendes derefter ind i forskellige ringe, hvor de holdes i cirkelbevægelse ved hjælp af magnetfelter. På særlige steder får de kraftige sidelæns "skub" og udsender som reaktion herpå en fremadrettet røntgenstråling. Røntgenstrålingen benyttes til materialeundersøgelser.

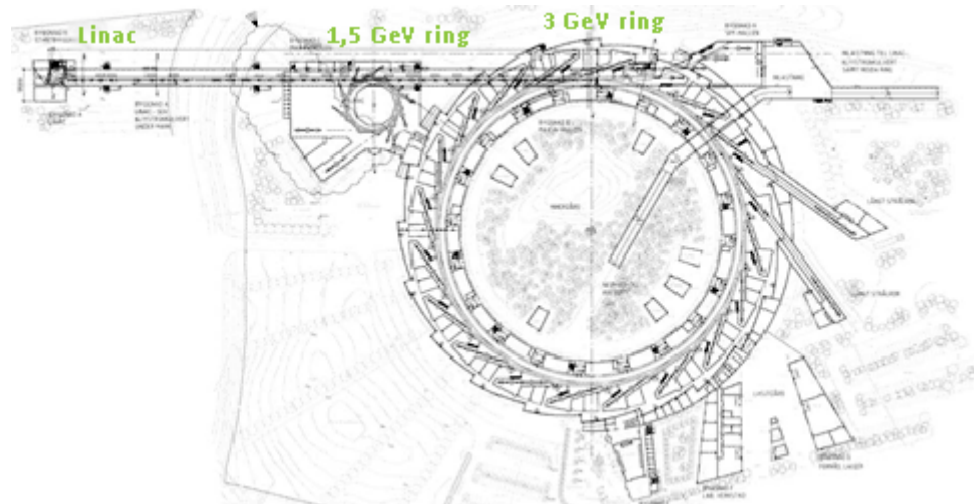
Kilde: <http://www.lunduniversity.lu.se/research-and-innovation/max-iv-and-ess>

ESS = European Spallation Source, dvs. Europæisk neutronfraspaltningsskilde

"Neutrons are uniquely well suited to study condensed matter under extreme conditions, such as high pressure, high magnetic fields or extreme temperatures, due in part to their ability to penetrate cumbersome sample environment equipment and reach the sample. The power of neutron scattering in probing a wide range of time- and length-scales makes it an effective method for understanding the characteristics of matter under such conditions" Kilde: <http://europeanspallationsource.se/probing-matter-under-extreme-conditions-using-neutrons>

MAX IV = Microtron Accelerator for X-rays, dvs. Mikrotonaccelerator til (produktion af) røntgenstråler

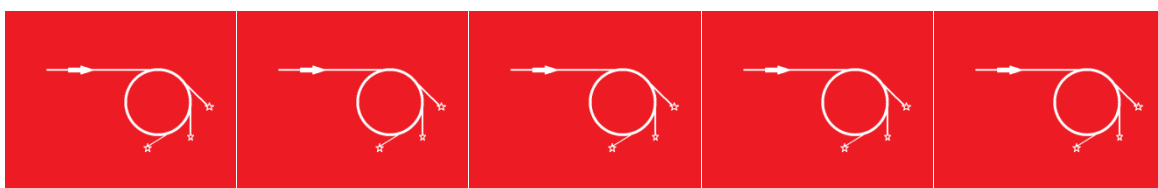
"The electrons will be produced in two electron guns and then accelerated in a 250 meter long linac accelerator to maximum 3400 MeV. Depending on which ring the electrons are being injected into they will be extracted from the linac at different points corresponding to the correct energy of the ring. In contrast to today's storage rings, MAX IV will be injected at full energy. That means that the rings can be filled with electrons continuously once every minute and be held at constant maximum current around the clock." Kilde: <https://www.maxlab.lu.se/maxiv>.



Figur 3. Skitse af den lineære accelerator og de to lagerringe i MAX IV. Kilde: <https://www.maxlab.lu.se/maxiv>

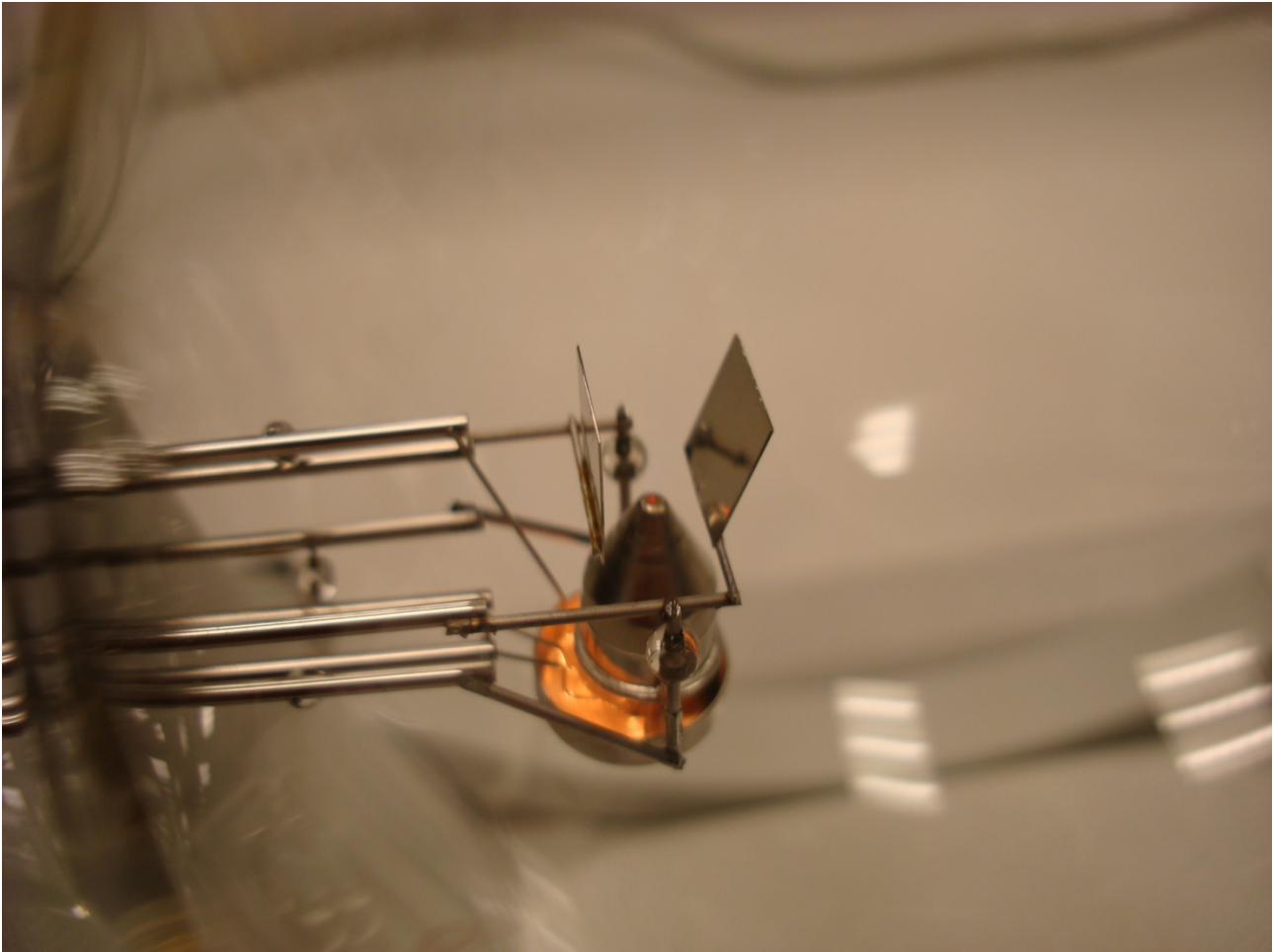
e/m-røret som accelerator – en kort beskrivelse

En lineær accelerator består af et eller flere accelerationsgab, hvor en elektrisk spænding accelererer ladede partikler til højere fart. For at kunne genbruge accelerationsgabene kan man afbøje de accelererede partikler ved hjælp af magnetfelter, således at partiklerne cirkler i ring og accelereres mere og mere for hver gang de passerer et accelerationsgab. Det giver en cirkulær accelerator. I vores e/m-rør (læses: e over m-rør) sidder accelerationsgabene inde i røret, mens magnetpoler sidder uden omkring. Selv om vi kan styre elektronerne i røret rundt i en cirkelbevægelse, kan vi ikke genbruge accelerationsgabene. Det skyldes at elektronerne udsendes fra bunden af en "kop". Herefter accelereres de op i en kegle med hul i toppen (fig. 4), hvorefter de kan styres rundt i en næsten cirkelformet bane til de når tilbage til undersiden af koppen (fig. 6). Hvis man skulle genbruge accelerationsgabene mellem koppen og keglen, skulle man lave et hul i bunden af koppen, så elektronerne kunne tage en tur mere rundt i røret. Men det ville ikke være praktisk til det formål, som røret er bygget til. Jo hurtigere elektronerne bevæger sig, jo sværere er de nemlig at afbøje, så hvis man lod elektronerne køre mange gange rundt, ville deres spor danne cirkler med større og større radier efterhånden som elektronerne havde taget flere og flere ture rundt. Bemærk at den lysende bue i fig. 6 ikke er elektronerne selv, men sporet efter dem. I røret er nemlig en tynd brintgas, som ioniseres, når elektronerne på deres vej rundt i røret støder ind i brintmolekylerne. Når brintmolekylerne gendannes udsendes det blålige lys. Elektronerne taber en lille smule energi ved stødene, så banen bliver ikke helt cirkelformet. Gassen er dog så tynd, at man kan opnå at elektronerne næsten når tilbage til koppen lige under hullet i keglen, se fig. 6.



En accelerator på et bord – en kvalitativ undersøgelse

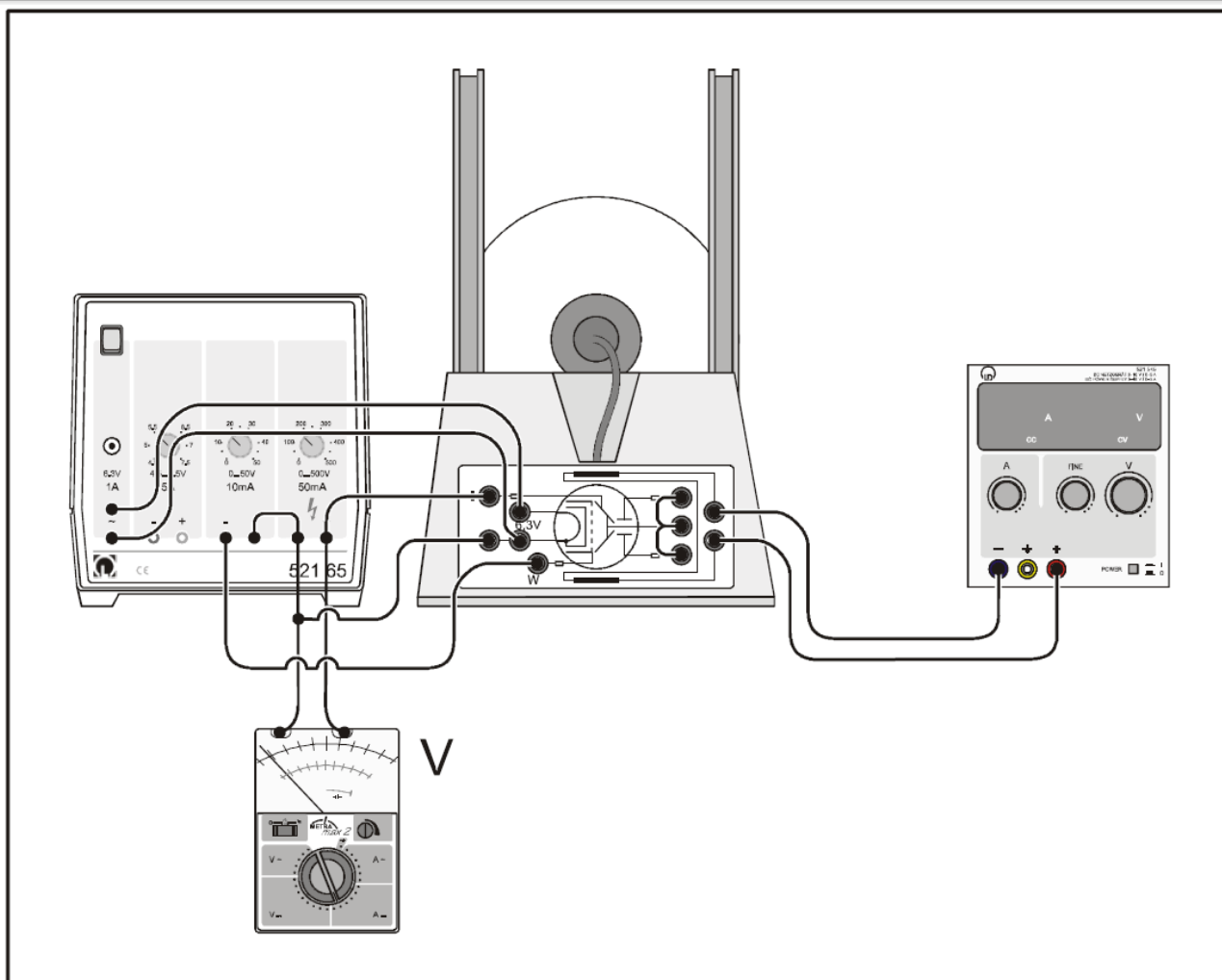
På figur 4 ses et nærbillede af elektronkanonen og figur 6 viser den samlede opstilling med spoler, der leverer magnetfeltet, som afbøjer den accelererede stråle.



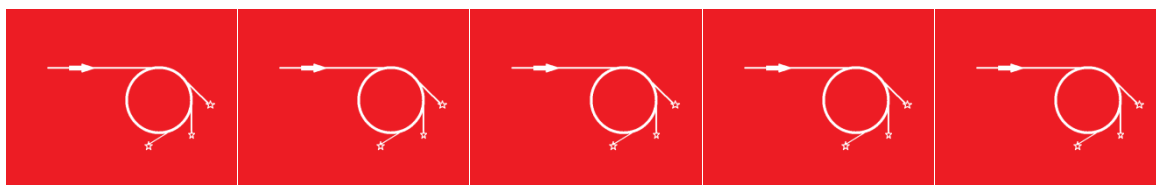
Figur 4. Elektronkanonen i e/m-røret. Elektronerne accelereres mellem den orange-glødende "kop" og den omvendte, hule tragt. Elektronerne trækkes op og ind i tragten af en positiv spænding på nogle hundrede volt. Enkelte af elektronerne vil så ryge ud af hullet i toppen af tragten, som er en afskåret kegle. Uden for tragten sidder plader til elektrisk afbøjning af elektronstrålen. De benyttes ikke særskilt og skal sættes til samme potential som keglen. Hvis der ikke er påtrykt noget magnetfelt vil elektronerne bevæge sig lodret opad. På figur 6 er belysningen dæmpet, et magnetfelt er påtrykt og man ser hvordan strålen af elektroner afbøjes. Det er ikke elektronerne selv, man ser, men sporet efter dem. I røret er nemlig en tynd brintgas, som ioniseres, når elektronerne på deres vej rundt i røret støder ind i brintmolekylerne. Når brintmolekylerne gendannes udsendes det blålige lys. Foto: Nanoteket, DTU Fysik.

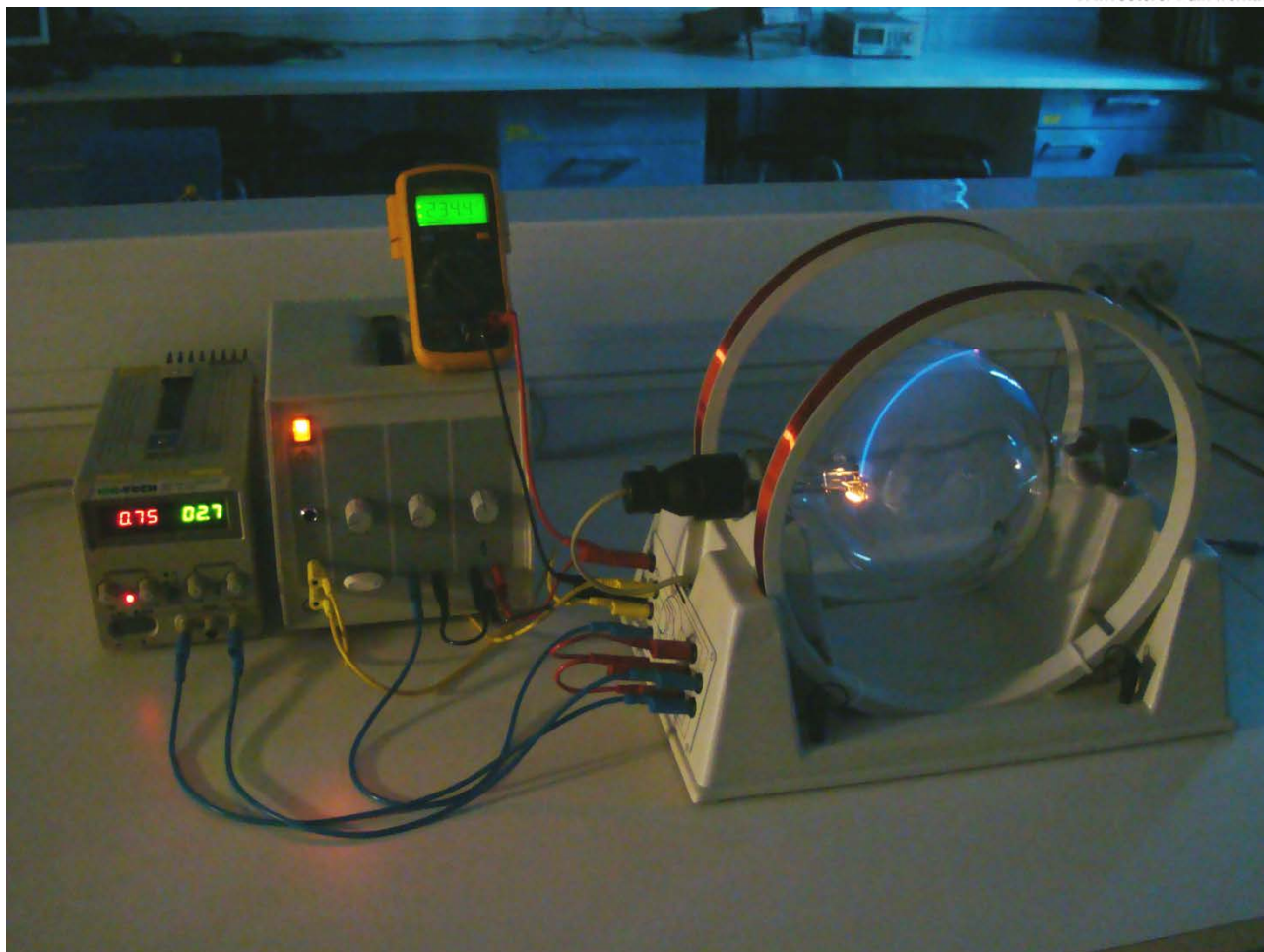


- Bemærk, at I her skal arbejde med højspænding. Højspændingskuben må først tændes, når alle ledninger er sat i.
- Tilkobl røret med ledninger og voltmeter som vist i figur 5.



Figur 5. Ledningsføring til forsyning af e/m-røret og Helmholtzspolen. Fra venstre forsynes glødekathoden med 6,3 V vekselstrøm. Fra højre forsynes Helmholtzspolens to delspoler med magnetiseringsstrøm. I midten ses røret fra bagenden med delspoler langs siden. Tegning: efter Leybold-Heraeus.

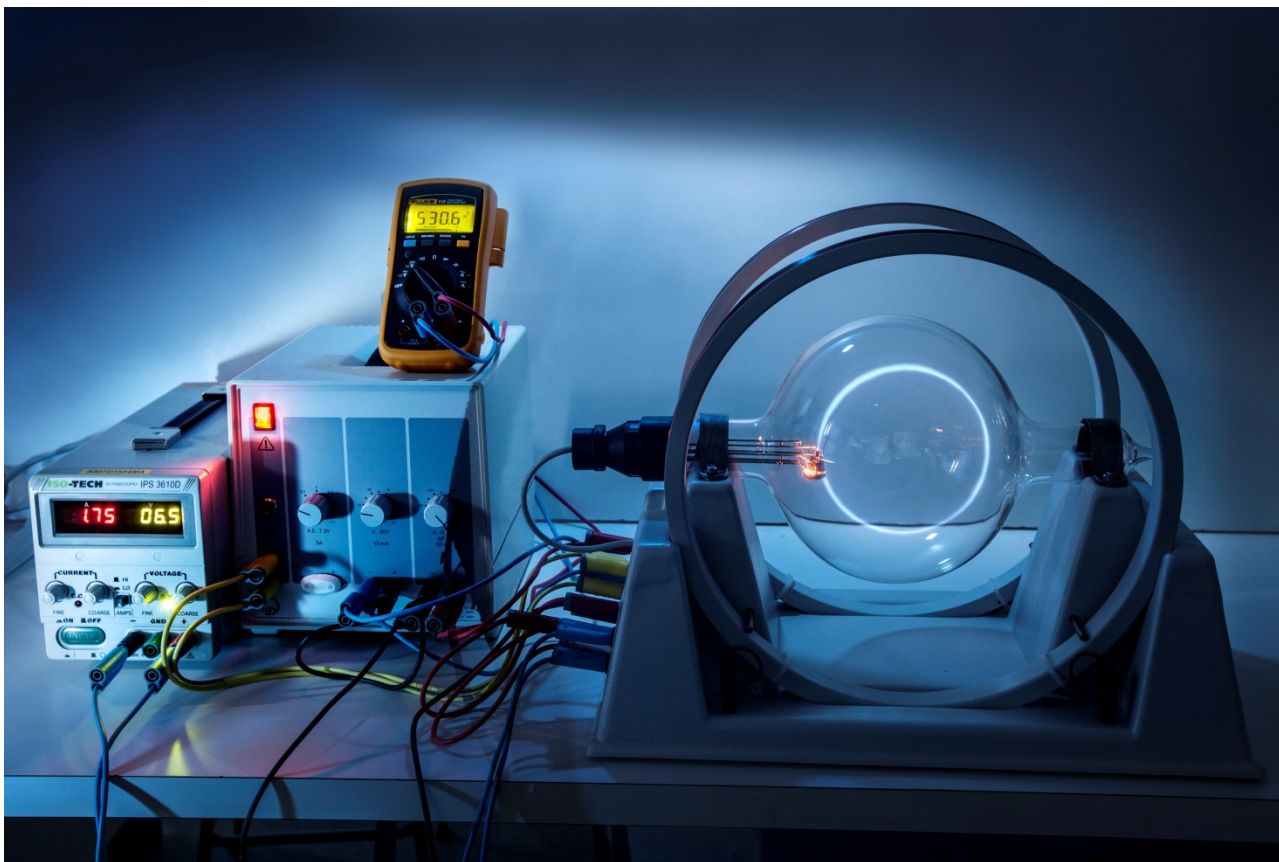




Figur 6. Opstilling til undersøgelse af princippet i en accelerator. Til venstre ses strømforsyningen indstillet på 0,75 A til Helmholtzspolen til højre i billedet. Helmholtzspolen danner et magnetfelt, som afbøjer en elektronstråle. Strålen ses ved sit lysende blå spor i glaskolben. Der hvor strålen rammer kolbens inderside ses en rødviolet plet på rørets overside. Elektronerne i strålen er blevet accelereret op fra den gulligt lysende katode i rørets venstre side (se nærbillede i figur 4). Accelerationsspændingen er nogle hundrede volt og kan aflæses på voltmetret ovenpå spændingskilden. På A-niveau (side 6 og 7) benyttes målingerne til beregning Foto: Nanoteket, DTU Fysik.

- Tænd for højspændingskuben. Stil gitterspændingen på -- 5 volt og accelerationsspændingen på 200 V.
- Katoden begynder straks at lyse op, men der går nogle minutter før den er varm nok til at elektroner kan rives løs. Dette viser sig ved et blåligt lysspor fra keglen lodret op i røret.
- Tænd nu for magnetstrømmen til Helmholtzspolen og sæt den på 1 ampere. Hvad sker der?
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man bytter om på magnetstrømretningen. Prøv! Forklar!
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man nu øger accelerationsspændingen? Prøv! Forklar!
- Hvad vil der ske med elektronbanen, hvis man nu øger magnetstrømmen (MAX 3 A). Prøv! Forklar!

A-niveau: Bestemmelse af e/m



Figur 7. Opstilling til bestemmelse af e/m , dvs. forholdet mellem elektronens ladning og dens masse. Se ledningsdiagram i figur 5. Til venstre ses strømforsyningen indstillet på 1,75 A til Helmholtzspolen til højre i billedet. Helmholtzspolen danner et magnetfelt, som afbøjer en elektronstråle. Strålen ses ved sit lysende blå spor i glaskolben. Baneradius måles med sigteklemmer og spejl, som er afmonteret på fotoet. Elektronerne i strålen er accelereret op fra den gulligt lysende katode i rørets venstre side (se nærbillede i figur 4). Accelerationsspændingen er nogle hundrede volt og kan aflæses på voltmeteret oven på spændingskilden (530,6 V). Foto: Mikal Schlosser.

Elektronen accelereres af et spændingsfald U , så dens kinetiske energi efter acceleration vil være bestemt ved

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

Efter acceleration i det elektriske felt, træder den ind i et homogent magnetfelt B , som vender vinkelret på dens hastighed v . Den beskriver derved en cirkelbevægelse med radius r under påvirkning af en centripetalkraft givet ved Lorentzkraften, dvs.

$$\frac{mv^2}{r} = Bev$$

Fra de to ovenstående formler kan man udlede det ønskede forhold

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(Br)^2}$$

Magnetfeltet i Helmholtzspolen er tilnærmelsesvis homogent, fordi spolen er delt i to halvdele med lige mange vindinger $n=130$ og med en afstand mellem de to delspoler lig med spolens radius $R=150$ mm. Feltet midt i spolen er proportionalt med strømstyrken I i spolen

$$B = kI.$$

Feltet væk fra akse er lidt svagere, hvilket betyder at man for en bane med en diameter på 8 centimeter har $k = 6,7 \cdot 10^{-4} T/A$.

Teknisk indskud: På akse gælder $k = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{n}{R} = 7,8 \cdot 10^{-4} T/A$. Den pudsige trehalvte rod af firefemtede dele

har sin oprindelse i formelen for feltet langs akse af en enkelt cirkulær vinding med radius R i afstanden x fra vindingens centrum

$$B_{\text{enkeltvikling}} = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}.$$

Med afstand R mellem delspolerne bliver $x = R/2$ og ved addition af feltet fra de to delspoler kan man så finde det ovenfor angivne udtryk for k på akse midt mellem de to delspoler.

- Hvordan skal sammenhængen mellem accelerationsspændingen og magnetfeltstyrken være, hvis man holder baneradius konstant?
- Lav en måleserie, hvor I varierer spændingen så meget, som I kan, og hold banediameteren fast på 8 cm ved at indstille spolestrømmen passende. Tegn (I^2, U) -graf, bestem hældning og herfra e/m .
- Hvordan skal sammenhængen mellem accelerationsspændingen og baneradius være, hvis man holder magnetfeltet konstant?
- Lav en måleserie, hvor I holder strømstyrken fast på 1,5 A. Lav passende graf og bestem e/m .
- Elektroner kan ikke vejes direkte. Millikan fandt ved uafhængige forsøg $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$. Beregn elektronens masse.

Alle niveauer: DIFFRAKTION

Krystallinske materials anvendelse

Uden krystaller ville vi ikke have smartphones eller computere eller andre former for moderne elektronik. Vi ville heller ikke have effektive solceller eller nøjagtige ure. Krystaller bruges nemlig som grundmateriale i aktive elektriske enheder. Og forståelsen af krystallers struktur er vigtig, hvis vi f.eks. skal kunne forbedre solceller, som i dag fortrinsvis fremstilles med silicium som grundmateriale. Silicium passer nemlig godt til solspektret og kan opfange lys med en energi i hele det synlige område. Men der er en mindste energi, som kræves af lyset, og som ligger i det infrarøde. Man håber - ved at sammenbygge krystaller af forskellige materialer til en "sandwich" - at kunne lave solceller, som indfanger lys med forskellige frekvenser i hvert sit lag i sandwichen. Det er på denne måde lykkedes det tyske Fraunhofer Institut at fremstille en firelagscelle med en effektivitet på over 44,7 % (2013), hvilket er næsten det dobbelte af, hvad andre har opnået med enkeltlagsceller. Instituttet rapporterede laboratorierekorder på 46,0 % i marts 2016:

(Kilde: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>)

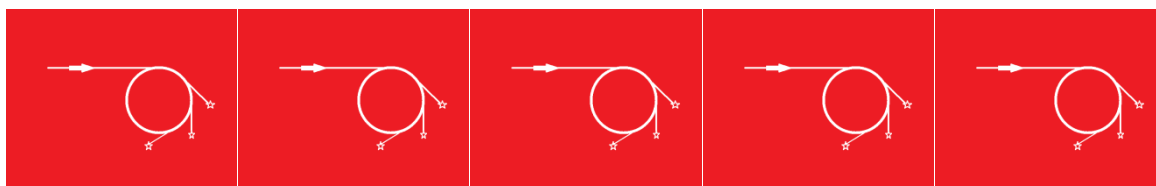
Et andet område inden for energiteknologierne er forbedring af elektrolyseceller, som kan bruges til at gemme elektrisk energi som brændstof, f.eks. ved spaltning af vand til ilt og brint. Brint har en meget høj brændværdi pr kilogram, så meget energi kan gemmes med en forholdsvis lille vægt. I elektrolysecellerne benyttes f.eks. platin som katalysator i form af nanopartikler, der sidder indbygget i elektrolysecellernes elektroder. Man vil gerne erstatte platinet med et billigere stof med lige så gode egenskaber, hvis det kan lade sig gøre. For at kunne finde et sådant stof må man forstå hvilke krystalformer i partiklerne, der er afgørende for deres virkning som katalysator.

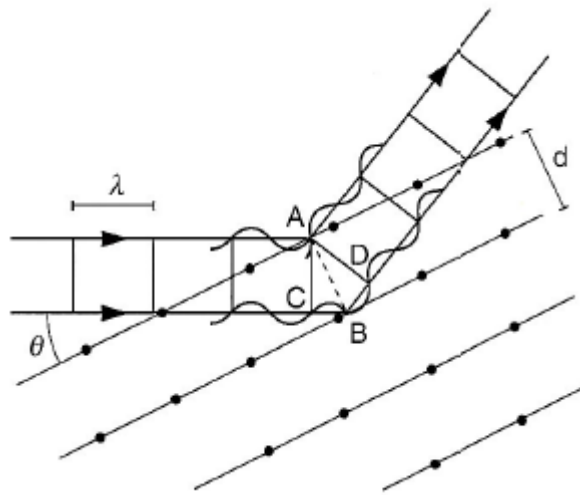
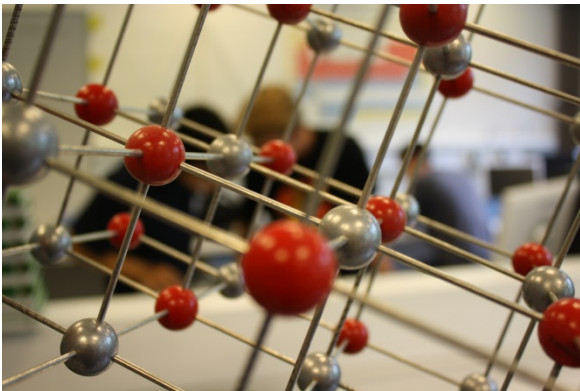
Krystallers struktur

Krystaller er faste stoffer, hvor atomerne sidder i regelmæssige mønstre. Disse mønstre kan bestemmes ved spredning af røntgenstråling i krystallerne. Røntgenstråling har nemlig nogenlunde samme bølgelængde som afstanden mellem atomerne. Det betyder, at der kan opstå konstruktiv interferens, når røntgenbølgerne spredes på atomer fra forskellige lag i krystallen, se figur 8. Metoden kaldes *diffraction*. Hvis afstanden mellem naboplaner i krystallen er d og røntgenstrålingens bølgelængde er λ , vil der opstå konstruktiv interferens ved en række *strefningsvinkler* θ_n bestemt ved Bragg-ligningen

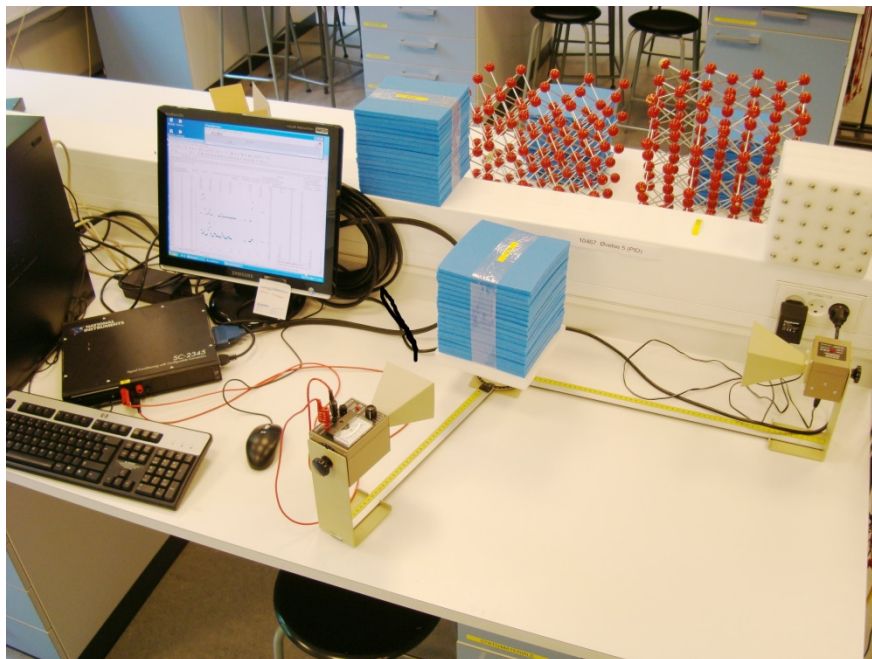
$$n\lambda = 2d \sin \theta_n,$$

hvor heltallet n kaldes *ordenen*. Når orden og krystalplanafstand er kendt, kan diffraktionsvinklerne θ_n forudsiges. Når orden og bølgelængde er kendt kan d bestemmes ved at måle θ_n . Diffraction kan også benyttes med neutroner.

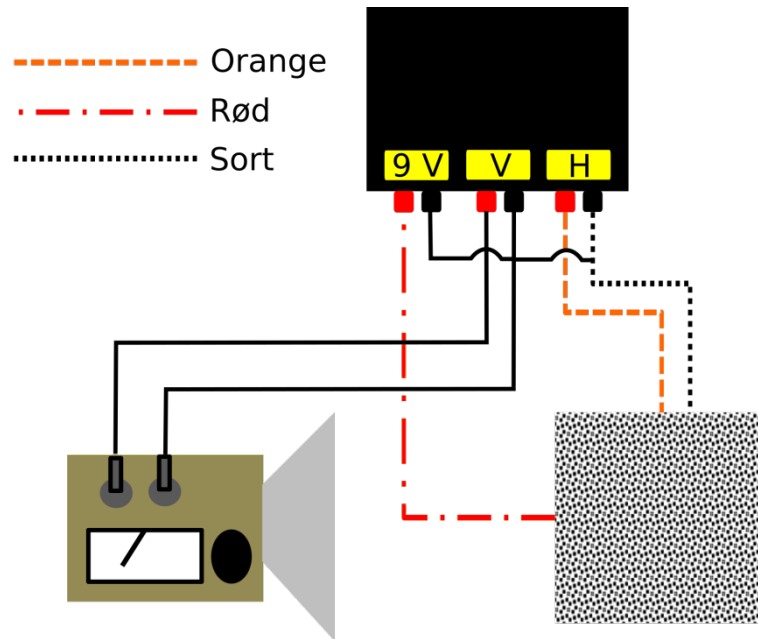




Figur 8. tv. En model af en saltkrystal. Alle atomer har seks naboer. (fotograf: Stefan Petersen). Th. Bragg-betingelse for diffraktion i krystal. Afstanden fra C til D via B er en hel bølgelængde, så bølger fra A og D vil være i fase og derfor interferere konstruktivt. (tegning fra T. Amtrup og O. Trinhammer, Obligatorisk Fysik).



Figur 9. Opstilling til diffraktion. I baggrunden ses røde modeller af krystaller, (tv) rumcentreret kubisk (bcc) og (th) fladecentreret kubisk (fcc). Platin er fladecentreret. De engelske forkortelser står for body centered cubic (bcc) og face centered cubic (fcc). I forgrunden ses mikrobølgeudstyret med en blå krystal monteret. Inde i det blå skum er indbygget stålkugler i lag, der skal forestille atomer ligesom på den hvide krystal længst til højre i billedet. Den hvide krystal er simpel kubisk (sc). I den blå kan bygges sc, bcc og fcc. (foto Ole Trinhammer).

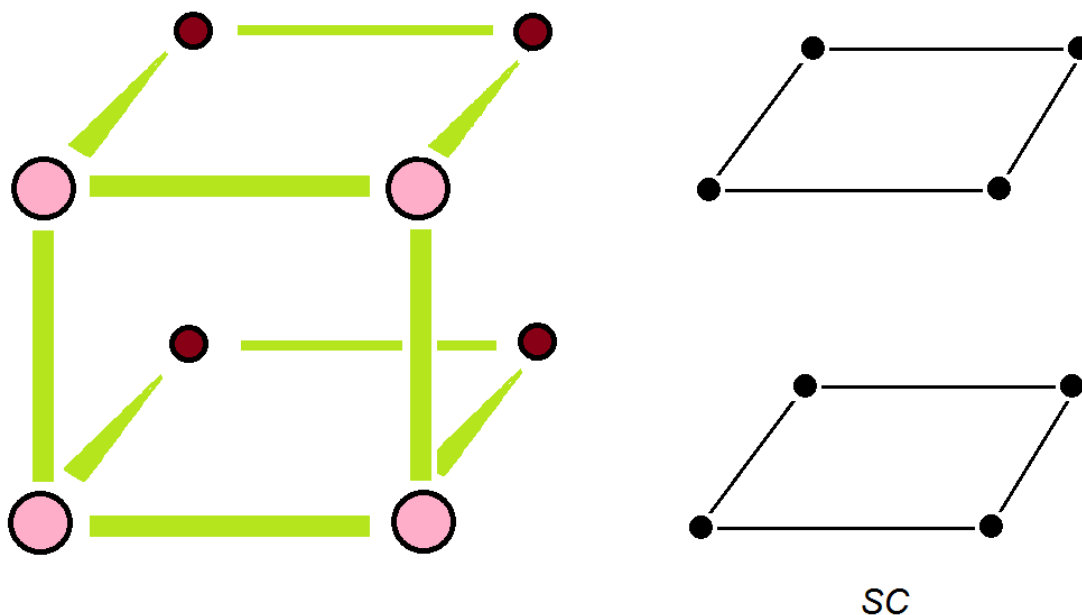


Figur 10. Ledningsføring til diffraktionsforsøget.

Bragg-diffraktion fra simple, kubiske krystaller

- Bestem bølgelængden af mikrobølgerne fra senderen. Dens frekvens er 10,525 GHz.
- Ved hvilke vinkler kan man forvente Bragg-reflektioner for en krystalplanafstand på 3,00 cm?
- Byg en simpel kubisk krystal med krystalplanafstand 3,00 cm. Saml krystallen med tape.
- Monter den sorte skumklods på vinkelmåleren og sæt krystallen ovenpå.
- Placer sender og modtager på vinkelmålerens arme. Armene skal bevæges samtidigt for at mindske belastningen på dem. Indstil armene, så strejfningsvinklen er nul grader.
- Vinkelmåleren er en Hall-sonde, der kan måle ændringer i magnetfeltet fra en lille magnet, som er limet på tandhjulet under den. Hall-sonden forsynes fra datakortet via den "sorte kasse", som også modtager signalet fra sonden og fra mikrobølgemodtageren. Signalerne analyseres af LabView-programmet KrystalldiffraktionUdenRokkevinkel.vi.
- Programmet startes ved at trykke på den lille play-pil i øverste venstre hjørne. Programmet går straks i gang med at måle, så vær klar ved vinkelmålerens arme.
- Nu drejes vinkelmålerens arme i roligt tempo mod hinanden, hvorefter målingerne stoppes ved stopknappen under grafen.
- Kan I finde den/de forudsagte toppe i spektret fra mikrobølgemodtageren?
- Drej nu krystallen 45 grader og bestem ved en ny måling afstanden mellem planerne på skrå.
- Prøv også med krystalplanafstand 6 cm.

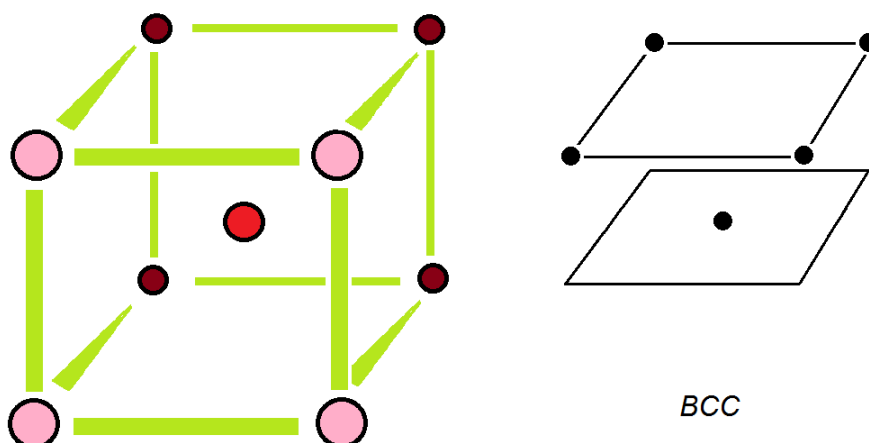
Måske opdager I, at der er sidetoppe ved siden af de toppe, I har forudsagt. Det skyldes, at der kun er et endeligt antal spredningscentre (kugler) i jeres krystal, jf. dobbeltspalteforsøg med lys, hvor centertoppen har sidetoppe omkring sig.



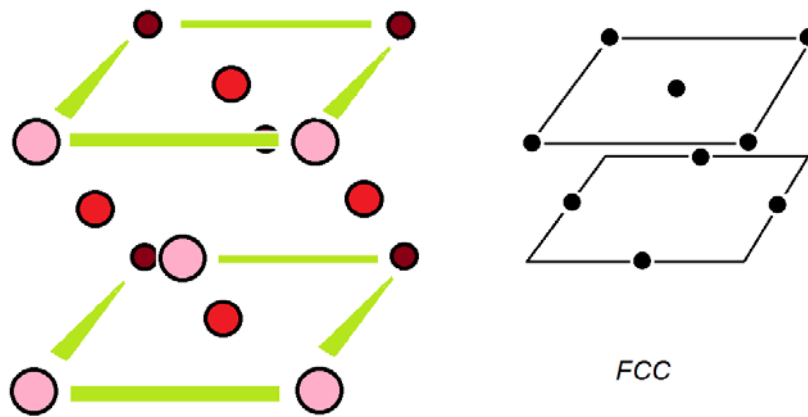
Figur 11. Simple kubisk krystal, kaldet sc (simple cubic). De lyserøde atomer er fremme i billedet, de mørke bagude. Køkkensalt, NaCl krystalliserer i denne form. Det gør polonium også – som det eneste grundstof. (Bemærk at NaCl i røntgendiffraktionsforsøg vil fremtræde som fcc, fordi Na og Cl har forskellig elektronstruktur. Overvej!)

Bragg-diffraktion fra rumcentreret og fladecentreret kubisk krystal

Figur 12 og 13 viser enhedsceller for henholdsvis rumcentrerede (bcc) og fladecentrerede (fcc) krystaller. I kan bygge sådanne krystaller med samme skumlag, som de simpelt kubiske. Blot skal lagene nu være forskellige i forhold til hinanden, som I kan se på skitserne til højre.



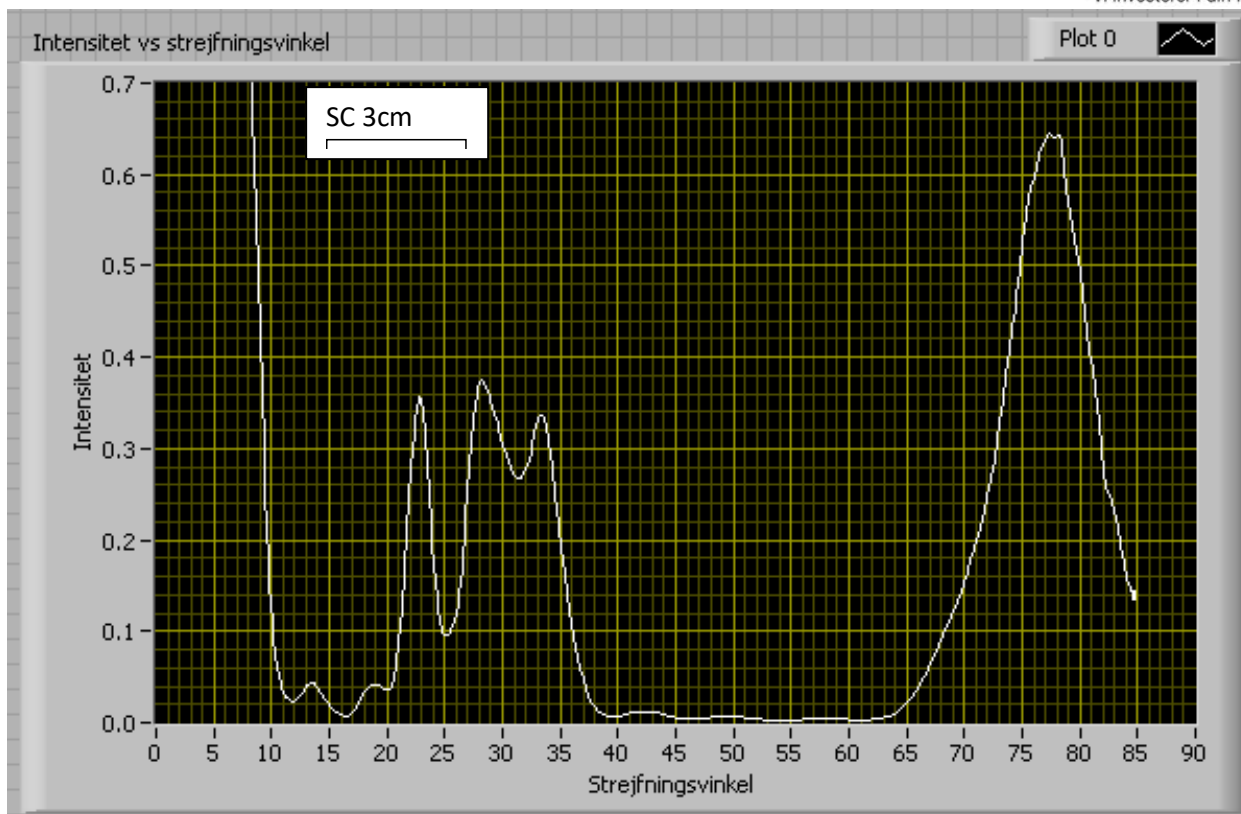
Figur 12. Enhedscelle (tv) for en rumcentreret kubisk krystalstruktur, f.eks. Fe, Cr, Li, Na. Den røde kugle sidder midt i rummet inde i terningen. Til højre er skitseret, hvordan krystallen bygges af skumlag med stålkugler i udvalgte huller.



Figur 13. Enhedscelle (tv) for en fladecentreret kubisk krystalstruktur, f.eks. Al, Cu, Ag, Au, He, Ne, Ar. De røde kugler sidder midt på terningens sideflader. Til højre er skitseret, hvordan krystallen bygges af skumlag med stålkugler i udvalgte huller.

Da kuglerne sidder forskudt for hinanden både i den rumcentrerede og i den fladecentrerede krystal, bliver diffraktionsmønstrene vanskeligere at forstå. Man kan så måle spektrene og opfatte dem som fingeraftryk. Hver krystalstruktur har sit karakteristiske fingeraftryk.

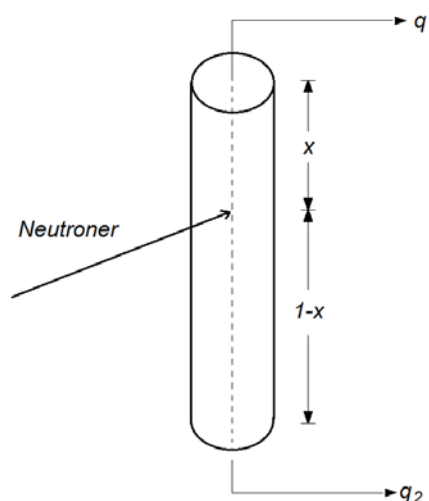
- En fra jeres gruppe, skal nu bygge en af de to typer til jer, uden at fortælle hvilken.
- Mål spektret og udpeg krystaltypen ud fra de fingeraftrykseksempler, der udleveres.



Figur 14. Krystallernes fingeraftryk. Her ses spektret for en simpel kubisk krystal med sidetoppe omkring 1. ordenstoppen ved 28 grader målt med mikrobølger med en bølgelængde på 2,86 cm.

Detektorer

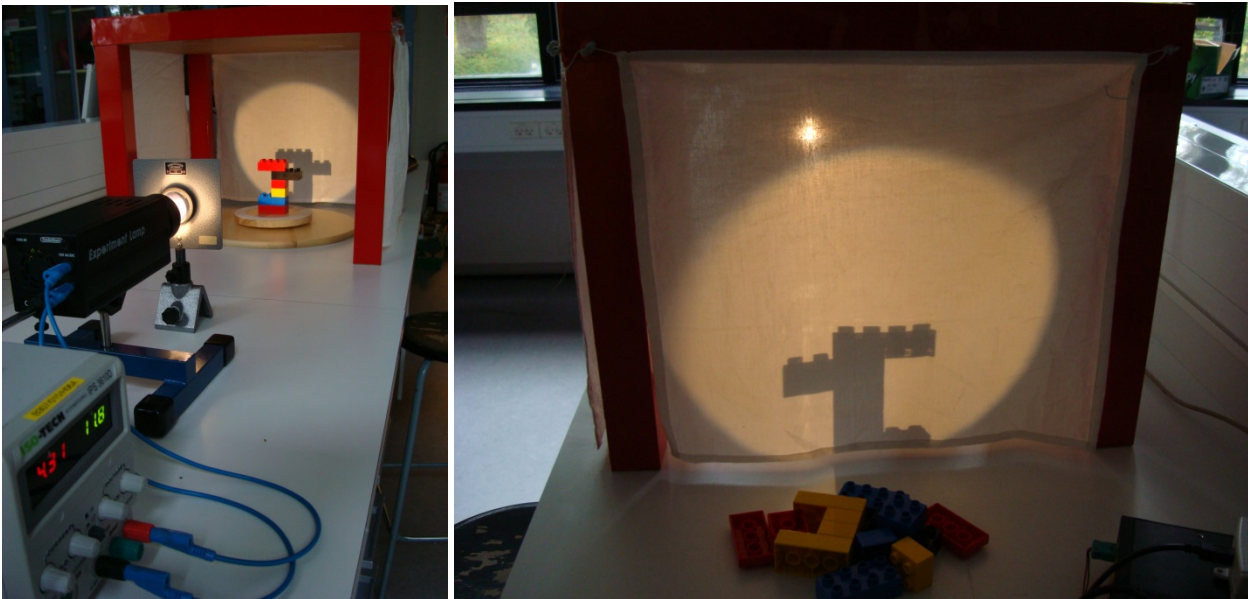
Røntgenstråling og neutronstråling kan detekteres med gasdetektorer, se figur 17. Måske kender du en Geigertæller? Det er et metalrør med en tråd i midten. Tråden gøres elektrisk positiv og rørvæggen negativ. For at måle neutroner fyldes tælleren f.eks. med helium-3, som er en god neutronabsorber. Man får så kernereaktionen ${}_0^1n + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_1^1p + {}_1^3\text{H}$, hvor der dannes en proton og en triton (supertung brintkerne). Begge er ladede og vil ionisere den øvrige gas i røret. Ionerne vil bevæge sig mod rørvæggen, mens elektronerne søger mod tråden. Vælges en tilstrækkelig høj spænding, vil elektronerne sætte gang i en lavine af ioniseringer, så man får en kraftig elektrisk udladning, der giver signal i tråden. Detektoren kan gøres positionsfølsom ved at måle tidsforløbet i ladingpulsene i begge ender af tråden (to RC-led med C fordelt som $x:(1-x)$).



Figur 15. Proportionaltæller med modstandstråd. Ladningerne q_1 og q_2 måles med forstærkere og positionen bestemmes ved $x = q_1 / (q_1 + q_2)$

Alle niveauer: TOMOGRAFI

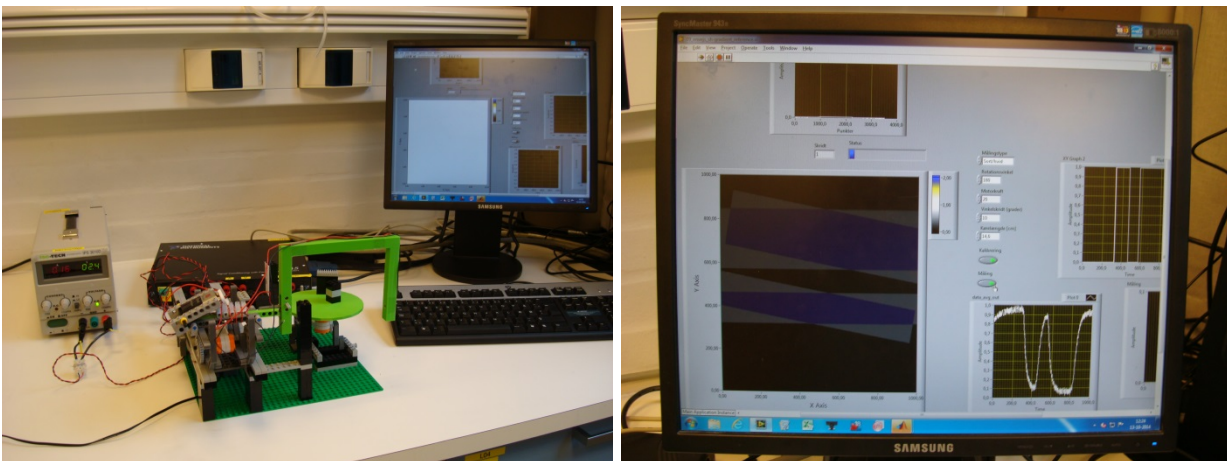
Skygebilleder – geometrisk tomografi



Figur 16. Geometrisk tomografi. Konstruktionen under bordet (t.v.) roteres og rekonstrueres fra skyggen (t.h.).

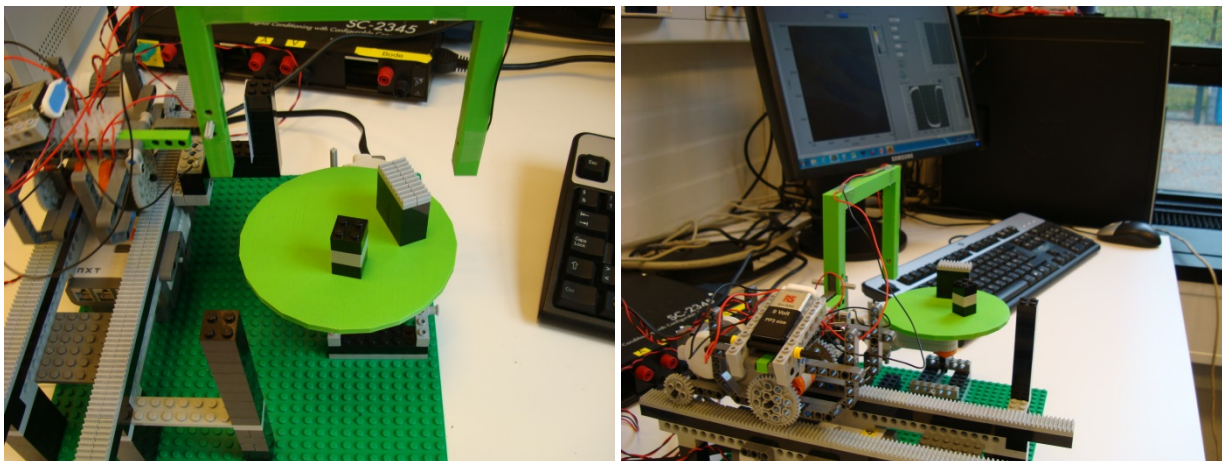
I skal bygge opstillingen vist i figur 16. Når I har opnået et klart skygebillede på klædet, deler I jer i to hold. Det ene hold skal bygge en konstruktion af klodser, som det andet hold ikke må se. Konstruktionen placeres på den roterende plade bag klædet under bordet. Reuterlampen tændes, bordet drejes langsomt rundt. Prøv først med en halv omgang. Lampen slukkes og det andet hold skal nu bygge en kopi af konstruktionen alene ud fra observation af de projicerede skygger. Prøv igen med mere indviklede konstruktioner. Prøv at bygge forskellige konstruktioner, som har samme skyggeprojektion.

Skygebilleder – tomografi ved skanning



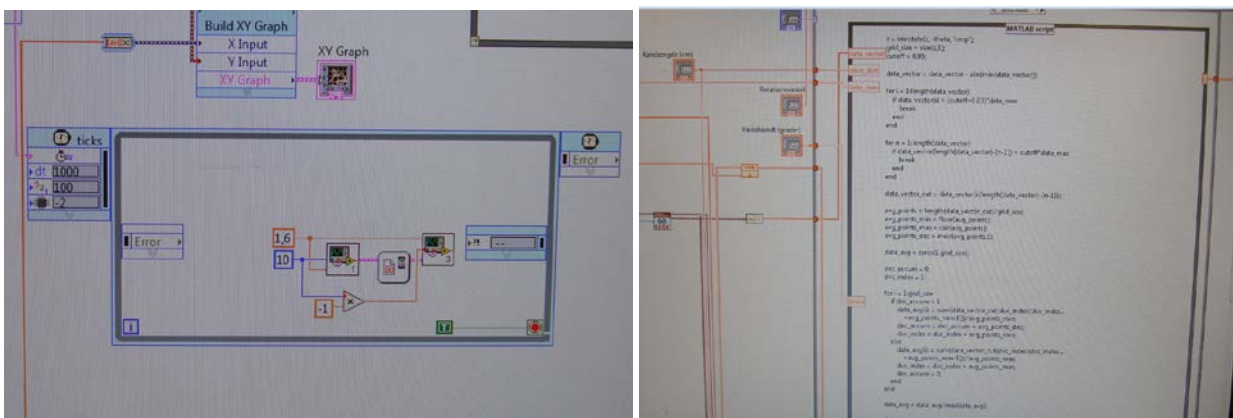
Figur 17. Skanner med infrarødt lys (t.v.) og rekonstruktion på computer (t.h.).

I stedet for hjernens billedbehandling af skygebillederne fra klodserne kan man bruge en skanner og en computer. På figur 17, ser du den skanner, vi har bygget. Det er en robot med to motorer, en infrarød diode og en fotoresistor. I figur 17 t.h. ses de sammenlagte skygebilleder efter to skan. Efter første skan vises et vandret skygebillede. Dernæst er bordet drejet 10 grader og det nye skygebillede er "lagt oven i" det første. Når bordet er drejet en halv omgang, har man i princippet information nok til at rekonstruere et tværsnit af objekterne på bordet. På figur 18, kan du se detaljer i skanneren.



Figur 18. Skannehovedet består af den portformede bjælkekonstruktion. Heri sidder en infrarød diode i venstre side over for en fotoresistor i den højre side. Hver gang skannehovedet har kørt frem og tilbage, drejes bordet et bestemt antal grader, og et nyt skan foretages. Begge motorer styres af robotten, mens signalet fra fotoresistoren sendes til computeren til videre behandling.

I LabView-programmet, som behandler målingerne, kan man vælge "sort-hvid", svarende til den geometriske tomografi ovenfor, eller "gradient", hvor man har mulighed for at se materialetæthed. Prøv først med "sort-hvid" og varier f.eks. indstillingerne af vinkelskridt. Prøv dernæst med to kuvetter med og uden vand, og med og uden frugtfarve.

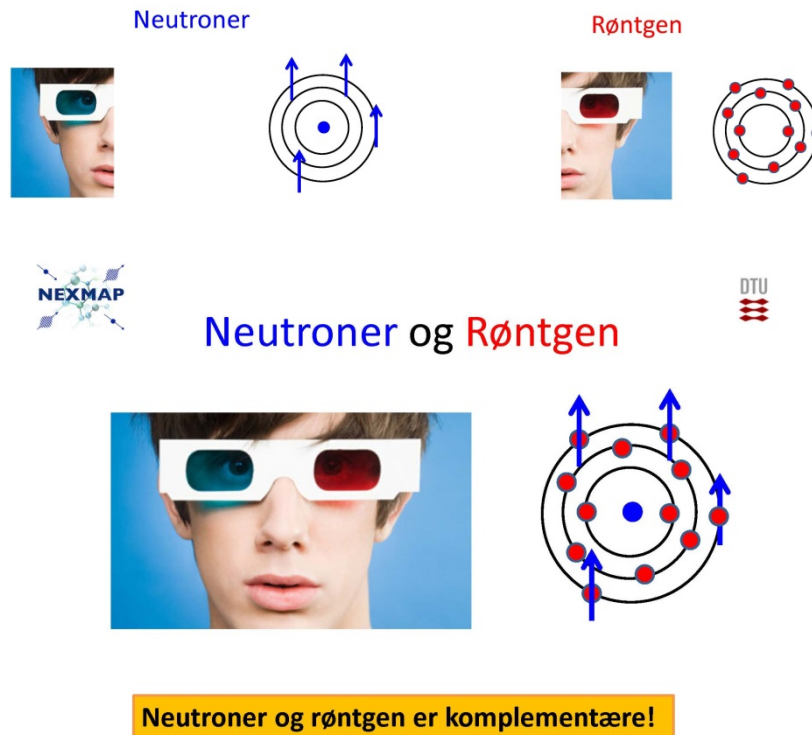


Figur 19. Uddrag af LabView-programmet, som styrer robotten, opsamler målinger og behandler dem. På billedet til venstre ses robotstyringen af motor 1 og 3 i den blå ramme midt i billedet. På billedet til højre ses en MATLAB-procedure, der drejer måleresultaterne fra de enkelte skygebilleder og lægger dem sammen til et samlet billede.

Fotos i figur 16-19: Nanoteket, DTU Fysik.

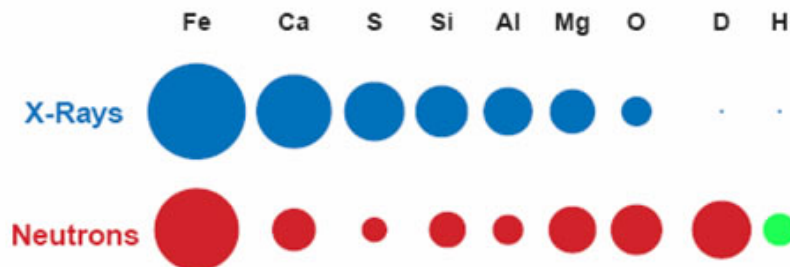
Røntgen og neutroner. Hvorfor begge dele?

Fordi de har komplementære øjne. Det, den ene stråling ser, ser den anden ikke. Røntgenstråling er god til at se elektronernes ladning. Neutronstråler er gode til at se elektronernes spin, dvs. ser magnetiske egenskaber. Røntgenstråling er god til at se tunge grundstoffer, fordi disse stoffer har mange elektroner. Neutronstråling er god til at se forskellige lette grundstoffer og god til at skelne mellem isotoper.



Neutroner og røntgen er komplementære!

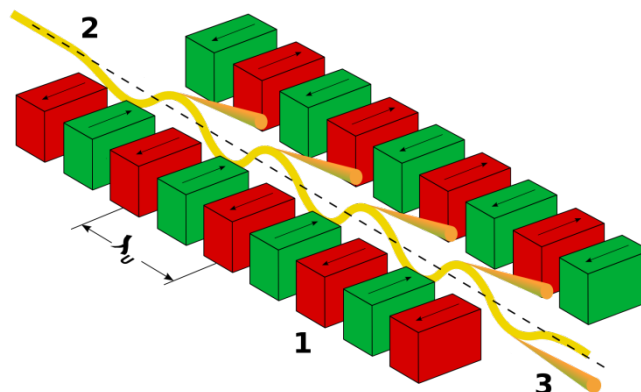
Figur 20. Neutroner ser spin, mens røntgen ser ladning. Figur lavet af Niels Bech Christensen, DTU Fysik.



Figur 21. Røntgen ser tunge, mens neutroner bedre ser lette grundstoffer. Kilde: ne.ncsu.edu.
<http://www.ne.ncsu.edu/nrp/images/npdf/npdpic5.jpg>

Undulatoren. Elektronernes pukkelpist.

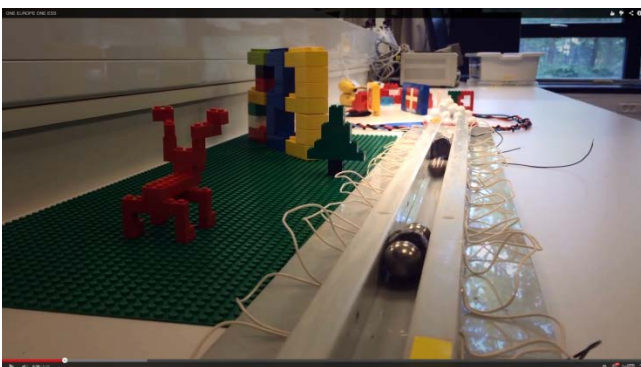
I figur 3 ses tangenter til lagerringene. Det er her røntgenstrålingen kommer ud. Den stammer fra undulatorer, som er indbygget i lagerringen ved tangenternes røringspunkter med cirklen. I undulatorerne udsættes elektronerne for skiftevis sideværts afbøjning i kraftige magnetfelter. Som reaktion udsender de antennestråling, også kaldet synkrotronstråling, som i dette tilfælde indeholder stor intensitet i røntgenområdet. Da elektronerne er meget tæt på lyshastigheden vil strålingen fortrinsvis udsendes i fremadgående retning. Vi kunne kalde det relativistisk kollimering. Efter at elektronerne har udsendt strålingen, fortsætter de rundt i lagerringen og "genbruges" i næste undulator.



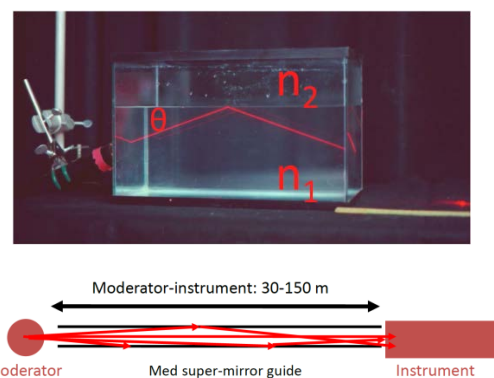
Figur 22. Elektronernes pukkelpist, undulatoren. Elektronerne afbøjes op og ned af skiftende magnetfelter. Herved udsendes røntgenstråling i en fremadrettet kegle, smallere kegle jo højere fart elektronerne har.

Kilde: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Undulator.png>

Spallation og småvinkelspredning. Fra hidsige hvepse til bløde "bølger" af neutroner.



Figur 23. Illustration af ESS'es lineære protonaccelerator med spallationskilden i Nanoteket, DTU Fysik. Fra wolframkernen (dyngen af hvide plastickugler i baggrunden) udsendes hurtige neutroner i alle retninger. Fra lykønskingsvideo.



Figur 24. Efter spallationen modereres neutronerne af et stof med lette atomer, som ved sammenstød dæmper farten af neutronerne. De ledes nu ind i smalle kanaler med f.eks berylliumvægge. Strålingen indsnævres ved totalrefleksion fra beryllium-væggene. Figur lavet af Niels Bech Christensen, DTU Fysik.