

Niels Bohr og Kvanteatomet

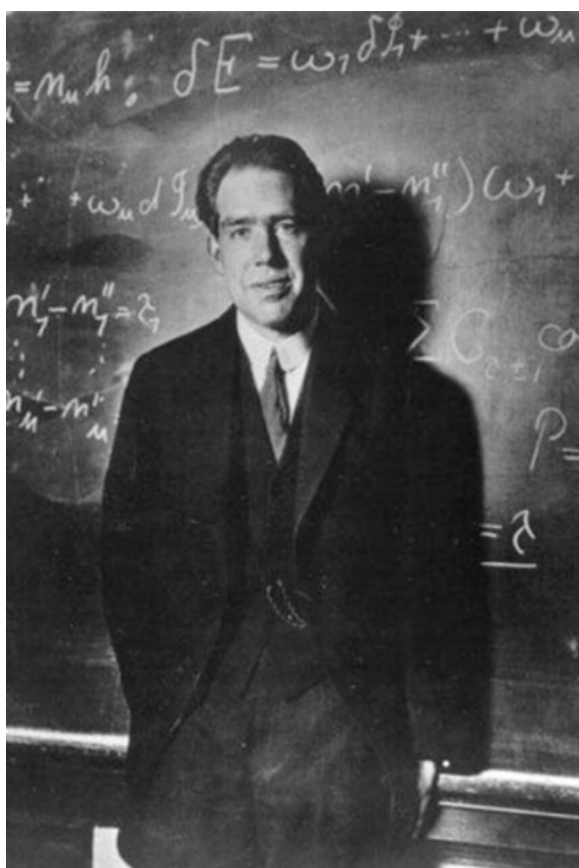
Af Louis Nielsen

Cand. Scient. i fysik og astronomi

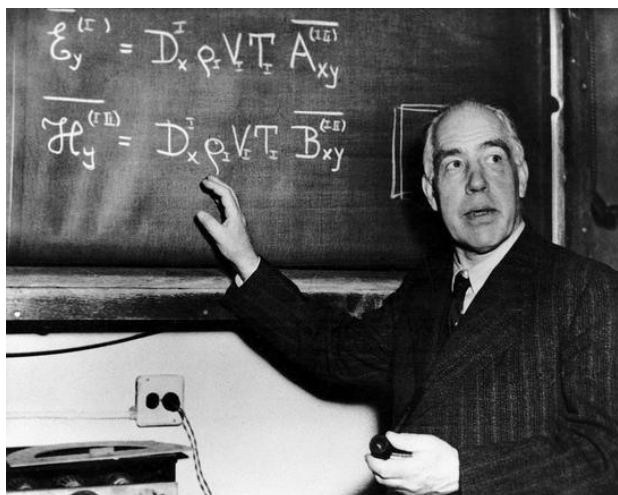
Niels Bohrs 100-årige atom-model

I 2013 fejres 100-året for den revolutionerende kvante-model af atomet, som den danske fysiker **Niels Bohr (1885-1962)** udtænkte og udviklede i 1913. For sin atomteori fik Niels Bohr Nobelprisen i fysik i 1922.

I det følgende lidt om Niels Bohrs liv og lidt om hans 100-årige kvantemodell af atomet.



Niels Bohr i 1923
Han holder foredrag på Yale University



Niels Bohr forklarer om Fysik

Niels Bohr levede på rette tid og var på de rigtige steder, men uden tidligere opfindelser og opdagelser, kunne Niels Bohr ikke have udtænkt sin model om kvante-atomet. Niels Bohr formulerede to postulater, som grundlag for sin atommodel. Her vil vi betegne postulatene:

- 1) Energi-postulateret og 2) Foton-postulateret.

De kan formuleres:

- 1) En elektron i et atom kan kun befinde sig i nogle ganske bestemte energitilstande, i hvilke der ikke udsendes energi.
- 2) Når en elektron, i et kvantespring, overgår fra en højere energitilstand E_n til en lavere energitilstand E_m , så vil energiforskellen $\Delta E = (E_n - E_m)$ blive udsendt som én foton, et svingende energi-kvantum, med en energi E_{foton} , der er ligefrem proportional med fotonens frekvens f , svarende til en ganske bestemt farve lys.

Niels Bohrs postulater i matematisk formulering

Postulat 1:

Størrelsen af elektron-energien i de forskellige atomare tilstande kan vi forkortet betegne med følgende:

$$(1) \quad E_1, E_2, E_3, \dots E_m, \dots E_n, \text{ osv.}$$

Indeksene m og n er naturlige tal 1, 2, 3, ... osv. der nummererer energitilstandene og med $n > m$.

Postulat 2:

Da loven om energibevarelse antages at gælde, så gælder følgende sammenhæng:

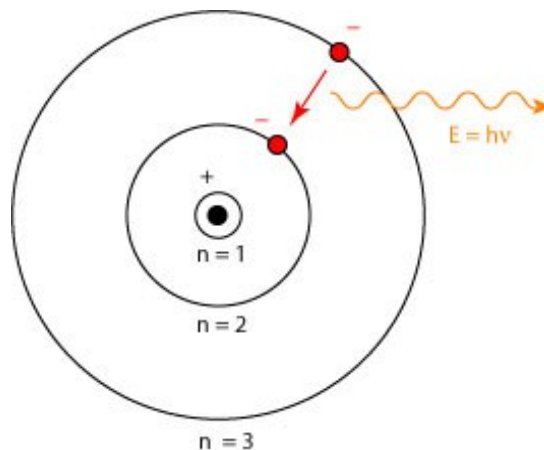
$$(2) \quad \Delta E = (E_n - E_m) = E_{\text{foton}} = h \cdot f$$

I ligning (2) angiver $\Delta E = (E_n - E_m)$ elektrons energitab, når den overgår fra en højere energi E_n til en lavere energi E_m .

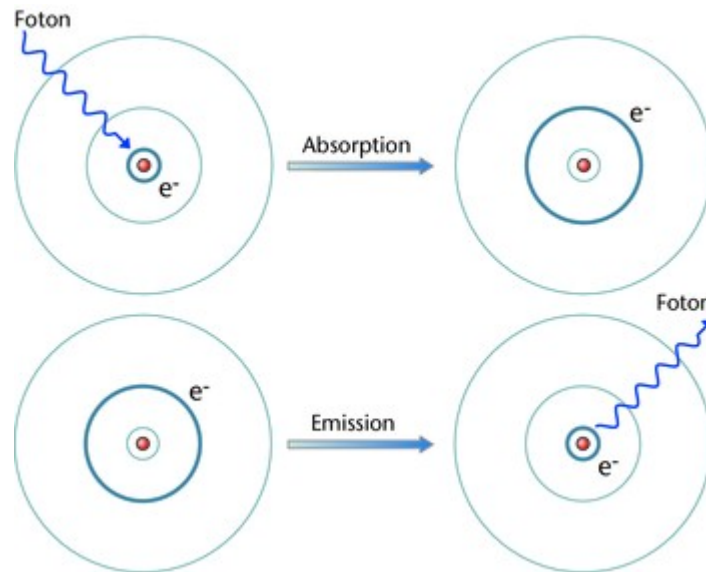
Udtrykket $E_{\text{foton}} = h \cdot f$ er lig med den energi som én foton med frekvensen f har. Der gælder således:

$$(3) \quad E_{\text{foton}} = h \cdot f$$

Størrelsen h er Plancks konstant med en målt talværdi $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s.



**Elektronspring efterfulgt af en udsendt foton.
På figuren er frekvensen betegnet med bogstavet 'ny'.**



**Billedbeskrivelse af Bohrs kvantemodel.
Optagelse og udsendelse af én foton**

Teknologi på godt og ondt

Vort nuværende teknologiske samfund med alle dets elektrotekniske apparater og instrumenter er - på godt og ondt - et resultat af de opdagelser og opfindelser, der er blevet gjort i løbet af de seneste par hundrede år.

Eksempelvis ville en mobiltelefon eller en computer ikke være opfundet, hvis ikke det elektriske batteri først var blevet opfundet og man efterfølgende kunne få den viden om stoffets atomer, som bl.a. Niels Bohrs forskning bidrog til.

Ej heller ville man, uden viden om atomet, kunne have udviklet et så dødbringende våben som atombomben.

Som fysikeren **Albert Einstein (1879-1955)** sagde, da han fik kendskab til, at atombomben var opfundet og virkede efter en naturlov, han havde opdaget: "Havde jeg vist, at min opdagelse kunne være grundlaget for et så umenneskeligt våben, så ville jeg hellere have været urmager!"

Fra tidernes morgen har mennesket oplevet, frygtet og undret sig over de mægtige naturkræfter, der viser sig i lyn og torden. Men først for få hundrede år siden blev man klar over, at lyn var forårsaget af elektriske og magnetiske kræfter, der var iboende i stoffets byggesten, atomerne.

Sortlegeme-stråling

For at kunne 'forklare' udstrålingen fra et 'absolut sort legeme' måtte den tyske fysiker **Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947)** i år 1899 antage, at strålingen bestod af bestemte afmålte energiportioner, energikvanter, siden kaldt fotoner (af græsk 'fotos'; lys).

Energien af hvert energi-kvantum viste sig at være ligefrem proportional med strålingens frekvens f . Proportionalitets-konstanten kaldes Plancks konstant og betegnes med h . (Planck benyttede et andet bogstav).

Fotoelektrisk effekt

Den fotoelektriske effekt blev opdaget i 1888 af **Wilhelm Hallwachs (1859-1922)**. Opdagelsen førte til konstruktionen af fotocellen, der blev opfundet i 1893 af de tyske fysikere **Julius Elster (1854-1920)** og **Hans Friedrich Geitel (1855-1923)**.

Albert Einstein (1879-1955) gav en forklaring af den fotoelektriske effekt i 1905, hvor han gjorde brug af kvantebeskrivelsen af elektromagnetisk stråling, idet han benyttede energiudtrykket for én foton, som Max Planck havde indført.

Det var for den fotoelektriske teori, at Einstein fik Nobelprisen i fysik for året 1921. Den blev uddelt i 1922 sammen med Nobelprisen i fysik for året 1922, der blev tildelt Niels Bohr.

Niels Bohr og hans forældre

Niels Henrik David Bohr blev født den 7. oktober 1885 på adressen Ved Stranden 14 i København. Han blev født samme dag som moderen Ellen Adler Bohr fyldte 25 år.

Den store neoklassicisme bygning, hvor Niels Bohr blev født, ligger over for Christiansborg Slot. I bygningen boede Niels Bohrs mormor **Jenny Adler (1830-1902)**, der var enke efter den velhavende dansk-jødiske bankmand **David Baruch Adler (1826-1878)**, der bl.a. var med til at grundlægge Privatbanken i 1856 og Handelsbanken i 1873. (Det var i Privatbanken, at man første gang i Danmark kunne indløse checks.)

Niels Bohrs far **Christian Harald Lauritz Peter Emil Bohr (1855-1911)** gjorde karriere ved Københavns Universitet. Han blev cand.med. i 1878. I 1880 blev han dr. med. på en afhandling om fedtindholdet i mælk. Han begyndte sin karriere som assistent hos professor **Peter Ludvig Panum (1820-1855)**, der grundlagde den moderne fysiologi i Danmark og som har givet navn til Panum Institutet.

Niels Bohrs moder **Ellen Adler Bohr (1860-1930)** var af jødisk afstamning og datter af Jenny og David Baruch Adler. Christian Bohr mødte hende, da han underviste ved et forberedelseskursus til adgangsprøven ved Københavns Universitet. I 1875 kom en forordning, der gav kvinder adgang til at studere ved Københavns Universitet.

Niels Bohrs forældre blev borgerligt viet på Københavns Rådhus den 14. december 1881.

Da Panum døde i 1855 var Christian Bohr blandt tre ansøgere til at efterfølge ham. Den 23. februar 1886 blev Christian Bohr udnævnt til Panums efterfølger og med titlen Lektor. Ægteparret Christian og Ellen Bohr flyttede også ind i Panums professorbolig i Bredgade 62, hvor Niels Bohrs bror Harald blev født i 1887. De to brødre boede på denne adresse indtil de havde fået deres doktorgrader.

Da Niels Bohr blev født var faderen således lektor i fysiologi. I 1890 blev han udnævnt til professor i fysiologi og i 1905/06 var han også rektor for Københavns Universitet.



Christian Bohr (1855-1911)

Christian Bohr blev indstillet til Nobelprisen. Bohr-effekten

Christian Bohr er kendt for sin forskning i åndedrættets funktion og opdagelsen af, hvordan gassen kuldioxid er impliceret i hæmoglobins afgivelse af ilt. Denne ilt/kuldioxid-effekt kaldes 'Bohr-effekten'. Og for denne opdagelse, blev han i 1907 og 1908 indstillet til Nobelprisen i fysiologi eller medicin, dog uden at få den.

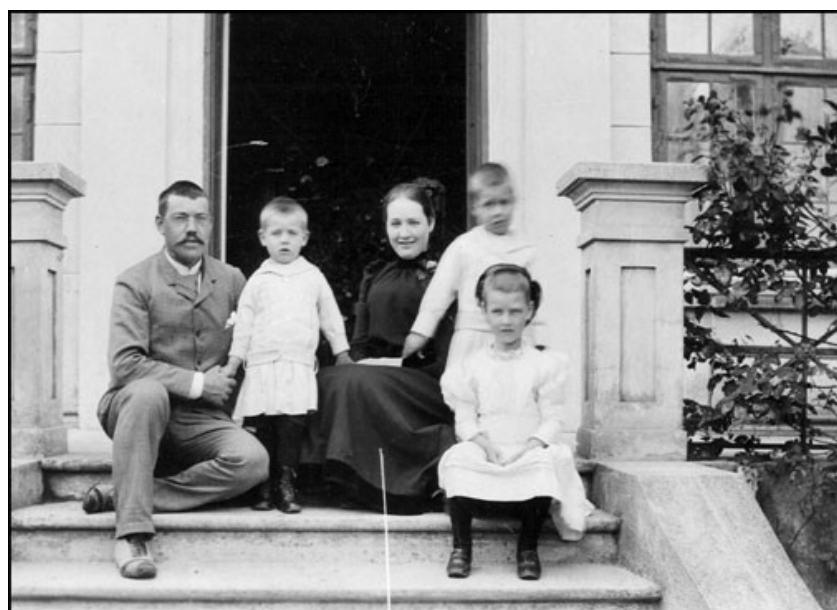
I 1885 fik Christian Bohr en sølvmedalje fra Det Kongelige Videnskabernes Selskab. Prisen fik han for en artikel, der beskrev, hvordan gassen ilt ved lave tryk afviger fra Boyle-Mariottes ideallov.

Niels Bohrs søskende

Niels Bohr havde to søskende. Søsteren Jenny der blev født i 1883 og broderen Harald født i 1887.



Ellen Adler Bohr med børnene Harald, Jenny og Niels



Niels Bohr med far, mor og sine søskende Harald og Jenny i 1890

Søsteren Jenny havde et følsomt sind. Hun studerede historie ved Københavns Universitet og lærte sig også engelsk. I 1916 bestod hun en eksamen i pædagogik. I en periode underviste hun i historie og dansk på Hanna Adlers Fællesskole, en skole for både piger og drenge. Skolen blev grundlagt af moderens søster **Hanna Adler (1859-1947)**.

Efterhånden blev søsteren Jenny mere og mere sindslidende. Moderens død i 1930 har muligvis gjort hende mere syg, så meget, at hun blev indlagt på det psykiatriske hjem Oringe ved Vordingborg, hvor hun døde i 1933.

Broderen Harald, der var halvandet år yngre end Niels, blev en kendt matematiker og professor i matematik ved Den Polytekniske Læreanstalt (I dag kaldt Danmarks Tekniske Universitet, DTU) og Københavns Universitet.

De to brødre var meget knyttet til hinanden, som to tvillinger. En meget stor sorg var det for Niels, da Harald i en alder af 63 år døde i 1951.

Første danske kvinder med magistergrad i fysik

Hanna Adler var i øvrigt den ene af de to første kvinder i Danmark, der i 1892 fik en magistergrad i fysik. Den anden kvinde var *Kirstine Bjerrum Meyer (1861-1941)*, der også blev den første danske kvinde, som fik en doktorgrad i fysik.

Skolegang og videre studier

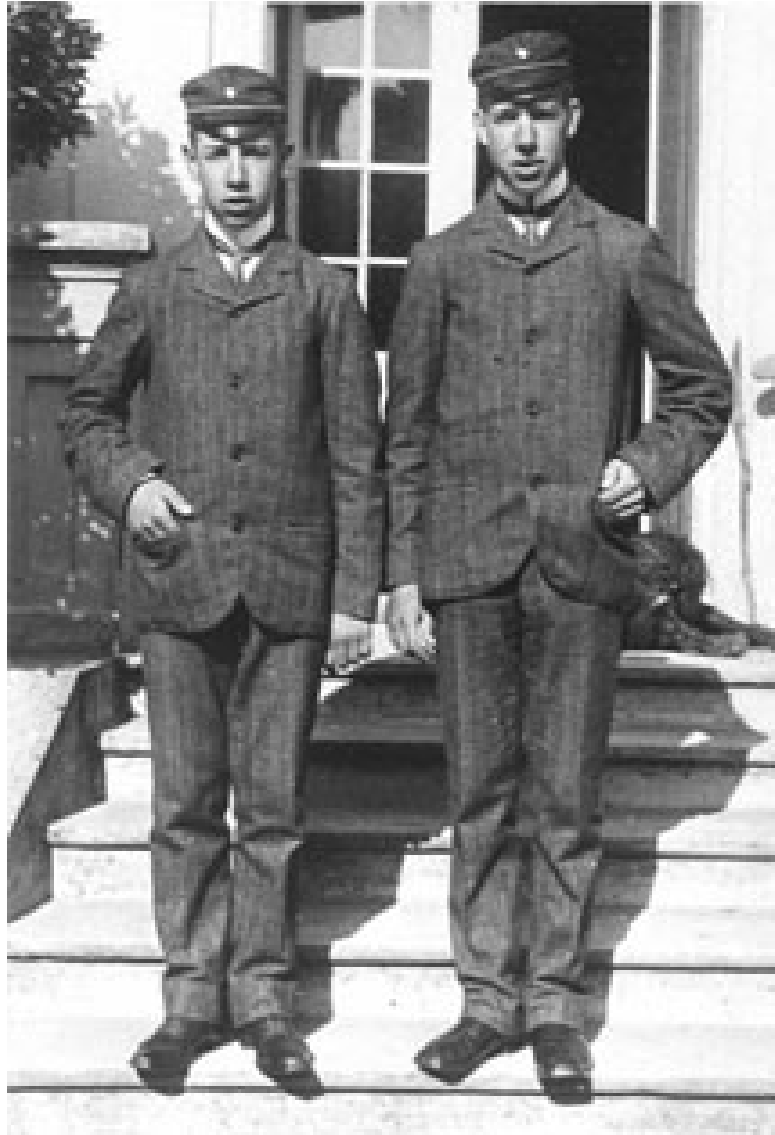
Den 1. oktober 1891 begyndte Niels sin skolegang på Gammelholm Latin – og Realskole.

Niels Bohrs forældre var ikke religiøse, men fordi deres børn ikke skulle føle sig anderledes end de andre klassekammerater, blev Niels hans søster Jenny og broderen Harald alle tre døbt i Garnisonskirken den 6. oktober 1891.

I 1903 blev Niels student fra Gammelholm Latin – og Realskole.



Studenter fra Gammelholm Latin – og Realskole 1903



Brødrene Harald og Niels Bohr i 1904

I efteråret 1903 begyndte Niels Bohr studier på Københavns Universitet. Som hovedfag valgte han fysik og som bifag astronomi, matematik og kemi.

Undervisningen foregik primært på Den Polytekniske Lærestalt. Som lærer i fysik fik Bohr fysikeren **Christian Christiansen (1843-1917)**, der havde været professor siden 1886 ved både Universitetet og Den Polytekniske Lærestalt.

Christian Christiansen er bl.a. kendt for opdagelsen af den såkaldte anomale lysdispersion. Han forskede også i krystallers optiske egenskaber, gnidningselektricitet, varmeledning og luftstrømmes fysik.

Det Matematisk-Naturvidenskabelige Fakultet blev ved et kongeligt dekret oprettet den 1. september 1850. Specielt var det efter forslag fra **Hans Christian Ørsted (1777-1851)**, der også var en af hovedpersonerne i oprettelsen af Den Polytekniske Lærestalt, der åbnede i 1829. H. C. Ørsted blev fakultetets første professor i fysik, i eksperimentel fysik.

Prisopgave om væskers overfladespænding

I 1905/06 arbejdede Niels Bohr på besvarelsen af en prisopgave, der blev stillet af Videnskabernes Selskab.

Prisopgaven blev offentliggjort i februar måned 1905 og besvarelser skulle afleveres senest den 30. oktober 1906.

Den 23. februar 1907 fik Bohr meddelelse om, at han havde vundet guldmedalje for sin besvarelse.

Opgaven drejede sig om en eksperimentel bestemmelse af en væskes overfladespænding ved at studere de svingninger, som en ikke-cirkulær stråle foretager, når den strømmer ud fra et cirkulært cylindrisk rør. Prisopgaven er en af de få eksperimentelle opgaver, som Niels Bohr har beskæftiget sig med. Forsøgene blev udført i faderens fysiologiske laboratorium.

Mag.scient. og forlovelse med datter af apoteker

I september og oktober 1909 gik Niels Bohr til de afsluttende eksaminer. Først skulle han lave laboratorieforsøg i tre dage, hver på otte timer. En dag i kemi og to dage i fysik. I oktober var han til overvåget skriftlig eksamen uden hjælpemidler (sic!) i tre dage. To dage i matematik og en dag i fysik.

I løbet af foråret og sommeren 1909 besvarede Niels Bohr sin skriftlige opgave til magisterkonferens.

Magister-opgavens titel, der var formuleret af fysik-professor Christian Christiansen lød:

”Der gives en Fremstilling af Elektrontheoriens Anvendelse til Forklaring af Metallernes fysiske Egenskaber”.

Niels Bohr afleverede besvarelsen i slutningen af juni og han fik sin eksamen den 2. december 1909.

Samme år som Niels blev magister mødte han Margrethe Nørlund, der var datter af apoteker **Alfred Christian Nørlund (1850-1925)** og **Emma Ottine Sophie Holm (1862-1962)** fra Slagelse.

Niels studerede sammen med hendes bror **Niels Erik Nørlund (1885-1981)**, der blev direktør for Geodætisk Institut. Og broderen **Poul Nørlund (1888-1951)** der blev direktør for Nationalmuseet.

I 1910 blev Niels Bohr og Margrethe Nørlund forlovet, og samme år blev broderen Harald dr.phil. i matematik.

Diskussionsgruppen Ekliptika

Niels Bohr var sammen med omkring 12 andre, bl.a. brødrene Nørlund, medlem af en diskussionsgruppe, som blev kaldt *Ekliptika*, opkaldt efter det der på dansk kaldes Dyrekredsen med de tolv stjernetegn. Deltagerne mødtes regelmæssigt for at diskutere bl.a. filosofiske problemstillinger.

Andre medlemmer af Ekliptika var broderen Harald; *Viggo Brøndal (1887-1942)*, der blev professor i romansk filologi; *Einar Cohn (1885-1969)*, der blev økonom; *Kai Henriksen (1888-1940)*, der blev afdelingsleder på Zoologisk Museum og *Edgar Rubin (1886-1951)*, der blev professor og indførte den moderne psykologi i Danmark; *Peter Skov (1883-1967)*, der blev ambassadør i bl.a. Sovjetunionen og *Vilhelm Slomann (1885-1962)*, der blev direktør for Kunstindustrimuseet.

Faderens død og Doktordisputats

Den 3. februar 1911 mistede Niels Bohr pludselig sin far, der døde af hjertestop knap 56 år gammel. Han blev brændt og bisat på Assistens Kirkegaard, ikke langt fra H. C. Ørsteds og H. C. Andersens gravsteder. Begravelsen foregik uden præst.

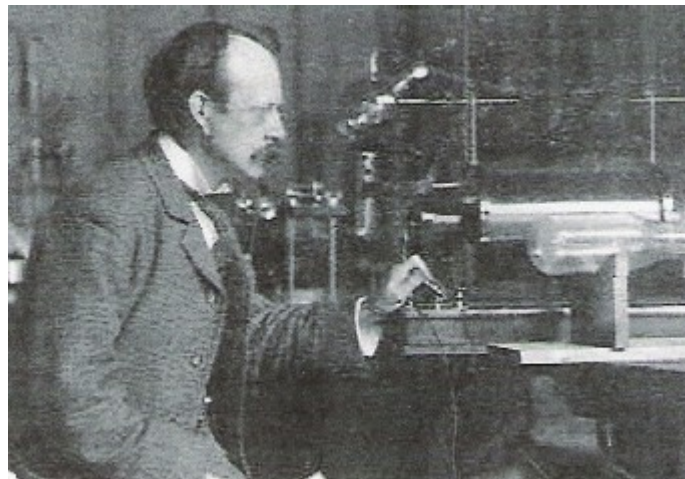
Sin magister-afhandling udvidede Bohr til en doktordisputats, som han tilegnede mindet om sin afdøde fader. Titlen på doktordisputatsen er: "Studier over Metallernes Elektrontheori".

Disputatsen blev godkendt den 12. april og den blev forsvaret den 13. maj 1911, hvorefter Niels Bohr blev dr.phil.

Besøg hos opdagerne af elektronen og atomkernen

Efter forsvaret af sin doktordisputats fik Niels Bohr et stipendium til et studieophold hos elektronens opdager den engelske fysiker **Joseph John Thomson (1856-1940)**.

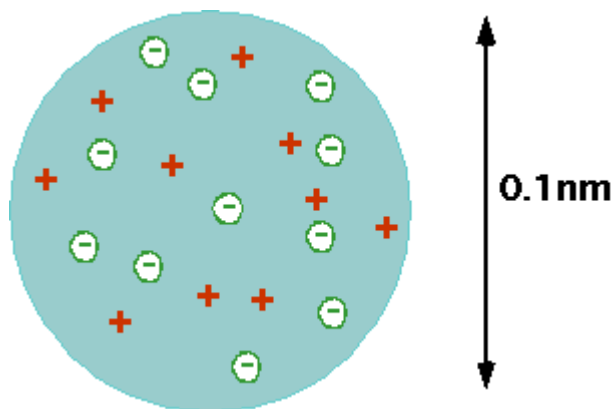
I 1897 opdagede og påviste Thomson eksistensen af elektronen, der er en partikel med elektrisk kraftvirkning og som er en grundlæggende byggesten i alt almindeligt kendt stof.



Joseph John Thomson (1856-1940)
Påviste i 1897 elektronens eksistens.

'Rosinbolle-modellen' af et atom

Som en følge af sin påvisning af elektronen opstillede Thomson en atom-model, kaldet Thomsons 'rosinbolle-model'. I modellen svarer 'rosinerne' til elektronerne, der tænkes at svinge frem og tilbage i en 'bolle' bestående af en jævnt fordelt positiv elektrisk ladning. Modellen kunne dog ikke give en acceptabel forklaring af bl.a. grundstoffernes linje-spektre. Thomson forsvarede og udviklede sin model i næsten tyve år, også efter at *Niels Bohr* (1885-1962) i 1913 havde fremsat sin kvantemodell af atomet.



'Rosinbolle-modellen'.

Elektronerne tænkes at svinge i en positiv elektrisk substans.

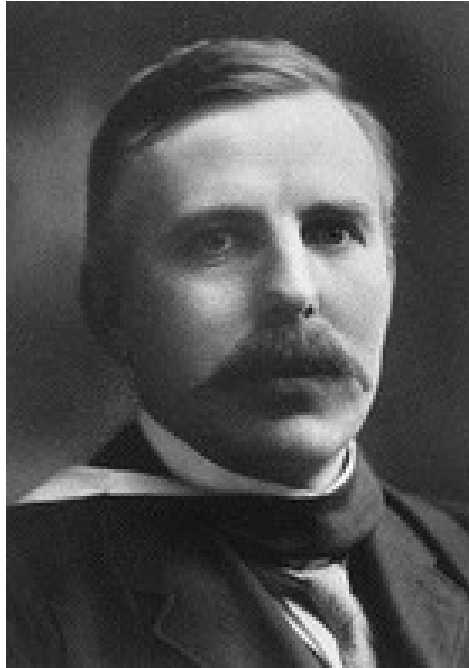
I 1906 fik Thomson Nobelprisen i fysik for sine studier af elektriske udladninger i fortyndede gasser. Et resultat af disse studier var bl.a. opdagelsen af elektronen.

Læs mere på: <http://louis.rostra.dk/andreart/elektronen.html>

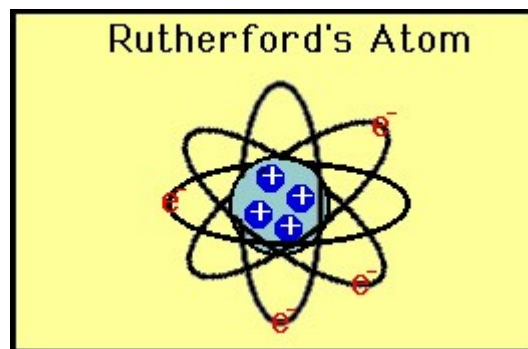
Rutherfords atom-model 1911

I 1911 offentliggjorde **Ernest Rutherford (1871-1937)** sin opdagelse af den positivt elektriske atomkerne.

På grundlag af forsøg med spredning af alfapartikler på metalfolier opstillede Rutherford i 1911 en model af et atom. I denne model er det meste af massen og den positive elektricitet koncentreret i atomets såkaldte kerne. Omkring denne centrale kerne bevæger de negativt elektriske elektroner sig. For det letteste og mindste atom, hydrogen, er kernens udstrækning omkring hundrede tusinde gange mindre end udstrækningen på omkring 10^{-10} meter af den bane som elektronen bevæger sig i. Modellen beskrev Rutherford i maj-nummeret af "*Philosophical Magazine*". Artiklens titel var: "*The scattering of alpha and beta Particles by Matter and the Structure of the Atom*". Rutherfords model minder om den atom-model som japaneren **Hantaro Nagaoka (1865-1950)** opstillede i 1904.



Ernest Rutherford (1871-1936).



Rutherfords atommodel

Læs mere om Rutherford på: <http://louis.rostra.dk/andreat/Rutherford.html>

Niels Bohr hos Ernest Rutherford

I begyndelsen af april 1912 ankom Niels Bohr til Manchester, hvor han studerede hos Rutherford indtil juli måned. Bohrs kvante-model af atomet fra 1913 er en videreudvikling af Rutherfords 'planet-model'. Rutherford interesserede sig mest for atomkernernes struktur og deres reaktionsforhold.

Niels Bohr blev interesseret i, hvordan elektronerne bevæger sig, hvordan de er fordelt omkring kernen og, hvordan deres energiforandringer kunne føre til udsendelse af lys med ganske bestemte farver svarende til bestemte bølgelængder (frekvenser).

Fra 1914 til 1916 havde Bohr en stilling som docent ved Rutherfords laboratorium.

Ernest Rutherford hjalp Niels Bohr med offentliggørelse af hans kvantemodell fra 1913.

I øvrigt blev Rutherford en meget nær ven af Bohrfamilien.

Udmeldelse af folkekirken og ægteskab

Efter sit studieophold hos Ernest Rutherford rejste Bohr hjem for at blive gift med sin forlovede. Forinden havde Bohr den 16. april 1912 meldt sig ud af folkekirken, som også hans bror Harald gjorde inden han blev gift.

Den 1. august 1912 blev Niels Bohr og Margrethe Nørlund gift. De blev viet på Slagelse Rådhus.



Niels Bohr på vej hjem fra England i 1912

Hydrogens linjespektrum

Målinger viser, at en hydrogen gas udsender lys, der fordeles i nogle karakteristiske og adskilte linjer af forskellig farve. Hydrogen har, som alle stoffer, en specifik farvestregkode, et specifikt linjespektrum.

De fire synlige linjer i hydrogens spektrum blev opdaget i 1853 af den svenske fysiker og astronom **Anders Jonas Ångström (1814-1874)**.

De bølgelængder (frekvenser) som disse farvelinjer svarer til, blev udmålt af den tyske matematiker og fysiker **Julius Plücker (1801-1868)** i 1859 og mere nøjagtigt af Ångström i 1860.

Naturvidenskabens evolution

Vores viden om Naturen og dens lovmæssigheder og den heraf mulige teknologi er resultater af et par hundrede års naturvidenskabelige opdagelser og teknologiske opfindelser.

Naturvidenskaben og teknologien er under stadig udvikling – på godt og ondt.

For eksempel ville man ikke kunne have opdaget og studeret de atomare partikler, som stof består af, hvis ikke bl.a. følgende var blevet opdaget og opfundet:

- Konstruktion af Luftpumper, der kan udpumpe luften fra en lukket beholder.
- Konstruktion af Højspændingskilder, der stabilt kan etablere flere tusinde volt elektrisk spændingsforskel.

Spektralanalyse – atomernes 'stregkode'

I 1859 udviklede tyskerne **Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899)** og **Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)** en eksperimentel metode til at analysere det lys, der kan udsendes af forskellige stoffer. De opdagede, at de forskellige grundstoffer udsender lys af ganske bestemte farver. Et bestemt grundstof er karakteriseret ved, at have et ganske bestemt farvespektrum. De forskellige atomer kan siges at have en atomar 'stregkode'. Metoden kaldes spektralanalyse.

Sollysets spektrum blev første gang analyseret af englænderen **Isaac Newton (1642-1727)** i 1660'erne. Newton sendte sollys gennem et gennemsigtigt trekantet glasprisme, der opdeler det hvide lys i de samme farver som er indeholdt i en regnbue. Da det dannede farvebillede forekom at svinge som et lille 'spøgelse' kaldte Newton farvebilledet et 'spektrum', efter det græske ord for 'spøgelse'. På latin betyder 'spectrum' 'noget man ser for sig', af 'spectare': 'se på'.

Spektroskopet blev udviklet i 1814 af den tyske instrumentmager **Joseph Fraunhofer (1787-1826)**. Han benyttede det til studier af de mørke linjer - de fraunhofer'ske linjer - i solspektret.

Fortolkningen og 'forståelsen' af grundstoffernes spektre førte til atommodellerne af bl.a. Thomson, Rutherford og Bohr.



Hydrogens karakteristiske linjespektrum
 Øverst et absorptionsspektrum. Nederst et emissionsspektrum.
 Den vandrette linje angiver bølgelængderne angivet i nanometer.

Balmer-formlen. Bohr forklarer hydrogens farvestregkode

Niels Bohrs kvante-model af atomet er en videreudvikling af Rutherfords atommodel, der med den daværende fysikviden ikke kunne eksistere.

Det afgørende 'kvantespring' i Bohrs tankeudvikling til en kvantemodell var en empirisk formel, den såkaldte Balmer-formlen. Formlen blev fundet og formuleret o. 1885 af schweizeren **Johann Jakob Balmer (1825-1898)**.

I 1890 blev Balmer-formlen benyttet mere generelt af den svenske fysiker **Johannes Robert Rydberg (1854-1919)**, der har givet navn til den konstant, der indgår i Balmer-formlen. Formlen kaldes derfor også Rydberg-formlen eller Balmer-Rydberg formlen.

Med Balmer-formlen kan man beregne de bølglængder, som man siden 1860'erne havde målt for de forskellige farver lys, som en hydrogengas kan udsende.

Niels Bohr fik først kendskab til Balmer-formlen i februar måned 1913 da fysikeren **Hans Marius Hansen (1886-1956)**, der i Göttingen havde udført forsøg med udmåling af spektre, fortalte ham om den.

Balmers Formel

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

I formlen indgår følgende størrelser:

λ er bølglængden af en udsendt foton.

R er den såkaldte Rydberg-konstant, der før Bohrs teori var empirisk bestemt med talværdien:

$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ meter}^{-1}$$

Tallene m og n er de såkaldte hovedkvantetal med $n > m$.

Balmer beregnede bølglængderne for $m = 2$ og $n = 3, 4, 5$ og 6 .

Teoretisk succes med beregning af Rydberg-konstanten

Niels Bohrs kvante-model af hydrogenatomet, der er formuleret i et fysik-matematisk sprog, kunne beregne de målte lysfarvers bølglængder.

Den største succes for Bohrs teori var hans teoretiske beregning af den såkaldte Rydberg-konstant R , som man havde en empirisk talværdi for.

Bohr viste, at R er bestemt af så grundlæggende størrelser som elektronens masse, dens elektriske ladning, Plancks konstant og lysets hastighed. Niels Bohr benyttede cgs-måleenhedssystemet baseret på centimeter, gram og sekund.

Hvis Rydberg-konstanten angives i SI-enhedssystemet, baseret på enhederne meter, kilogram og sekund, som det er gjort her, så indgår også vakuums elektriske permittivitet.

Rydberg-konstanten

$$R = \frac{m_e \times e^4}{8 \times \epsilon_0^2 \times h^3 \times c}$$

I Rydberg-konstanten indgår følgende grundlæggende fysiske størrelser:

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, elektronens masse.

$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C, elektrisk ladning af elektron.

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s, Plancks konstant.

$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, vakuums elektriske permittivitet.

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s, lysets hastighed i vakuum.

Med de angivne tal fås for R en værdi i overensstemmelse med den tidligere empirisk bestemte værdi:

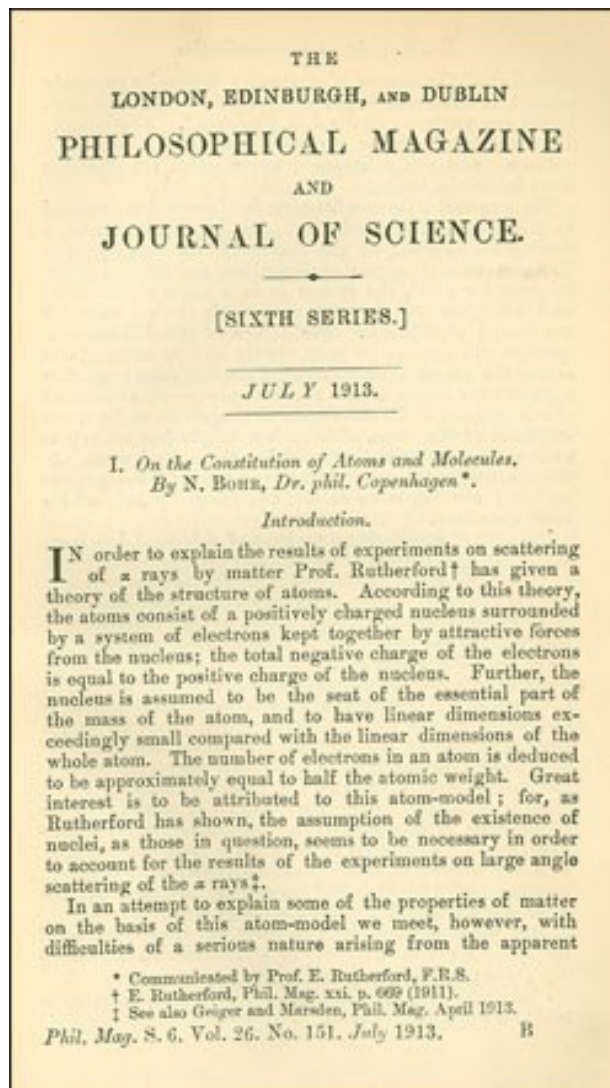
$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Artikel om kvante-atomet

I løbet af året 1913 blev Bohr færdig med artikler, hvori han redegør for sin kvante-model af atomer.

En artikel med teorien udkommer i juli måned 1913 i tidsskriftet: "*Philosophical Magazine and Journal of Science*".

Titlen på artiklen er: "*On the Constitution of Atoms and Molecules*".



Første side af Bohrs artikel i Philosophical Magazine juli 1913

I september 1913 udkom en artikel, hvor Bohr behandler atomer, der er tungere end hydrogen og noget om grundstoffernes periodiske system. I november udkom en artikel der beskæftigede sig med strukturen af molekyler.

Negative reaktioner på Bohrs kvante-model

Ikke alle ville acceptere Bohrs revolutionerende kvantemodell af atomet, der stred mod al tidligere fysikviden.

Interessant er det, at den tyske fysiker **Max Planck (1858-1947)**, der i år 1900 havde indført kvantebegrebet, havde svært ved at acceptere Bohrs kvanteteori.

Allerede før Bohr fik offentliggjort sin kvante-model for hydrogen-atomet, havde Ernest Rutherford, efter at have læst manuskriptet, følgende kommentar, der her citeres fra Abraham Pais fremragende bog side 174:

"Der forekommer mig at være ét alvorligt problem i Deres hypotese, hvad de utvivlsomt selv er klar over, nemlig hvordan en elektron bestemmer den frekvens, den vil vibrere i, når den går fra den ene stationære tilstand til den anden? For mig at se må man antage, at elektronen på forhånd ved, hvor den skal standse". (Reference: Abraham Pais; Niels Bohr og hans tid. Forlaget Spektrum (1996)).

I 1917 stillede Einstein spørgsmålet: Hvordan ved et lyskvantum, en foton, i hvilken retning det skal bevæge sig?

Også **Lord Rayleigh (1842-1919)** var meget kritisk over for Bohrs teori. Han sagde, at han ikke selv kunne bruge teorien til noget.

Elektronens opdager Joseph John Thomson nævnte i sine forelæsninger om atomets struktur ikke Bohrs atom-model før i 1936, fire år før sin død.

Ideal kvantemodel

Niels Bohrs første kvantemodel for hydrogenatomet er en idealiseret model, der gjorde de matematiske beregninger lettere. F.eks. antog Bohr, at elektronen i hydrogenatomet bevæger sig i cirkelbaner omkring en 'uendelig' tung positiv elektrisk ladet kerne. (Protonen blev først påvist i 1919).

I sine beregninger af elektronens energi medtog Bohr kun elektronens kinetiske energi og den elektrostatisk potentielle energi.

Kvanteenergiene, dvs. de adskilte energi-værdier, var en matematisk konsekvens af den såkaldte kvantebetingelse, som Bohr antog.

Bohr antog, at elektronens såkaldte impuls-moment, defineret ved produktet af elektronens masse m_e , hastigheden v i en cirkelbane og dennes radius r , er lig med et naturligt tal n gange Plancks konstant h divideret med 'cirkeltallet' $2\cdot\pi$.

Bohr antog således, at der gælder følgende kvantebetingelse:

$$m_e \cdot v_n \cdot r_n = n \cdot h / (2 \cdot \pi)$$

Tallet n , der er et naturligt tal, kaldes hovedkvantetallet.

Med kvantiseringen af impulsmomentet følger, at elektronens mekaniske energi også er kvantiseret, dvs. kun kan antage ganske bestemte adskilte talværdier.

Hydrogens finstruktur. Relativistisk effekt. Elektronens kvantetal

Niels Bohrs oprindelige ideale kvantemodel for hydrogenatomet kunne ikke forklare alle de observationer, som hydrogen-spektrene viste.

Spektrene viser det man kalder finstruktur med flere spektrallinjer.

For at kunne forklare hydrogen-spektrrets finstruktur videreudviklede Niels Bohr og andre fysikere den ideale kvantemodel, som Bohr fremsatte i 1913.

Man fik bedre overensstemmelse med forsøgsdata, hvis man antog, at elektronen bevæger sig i ellipsebaner og, hvis man tog hensyn til, at elektronens masse varierer med hastigheden i banen.

Beregninger på ellipsebaner blev foretaget af den tyske fysiker **Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868 – 1951)**, der også medtog relativistisk masseforøgelse.

At elektronens bevægelse også skaber magnetiske felter og dermed er i besiddelse af magnetisk energi blev også medtaget i mere detaljerede beregninger.

Zeemann-effekten

I 1896 opdagede den hollandske fysiker **Pieter Zeeman (1865 – 1943)**, at der sker en opsplitning af hydrogens linjespektrum, hvis den lysudsendende hydrogengas befinder sig i et magnetfelt. Denne magnetfelt-effekt kaldes efter opdageren *Zeeman-effekten*.

Stark-effekten

Hvis en hydrogengas udsættes for et elektrisk felt, så opsplittes nogle spektrallinjer. Effekten blev opdaget i 1913 af den tyske fysiker **Johannes Stark (1874 – 1957)** og kaldes derfor *Stark-effekten*.

Elektronens fire kvantetal

I den udvidede Bohrske kvantemodell for hydrogenatomet kunne de observerede effekter forklares ved at tillægge elektronen fire kvantetal. De fire kvantetal er:

- 1) Hoved-kvantetallet, der nummererer elektronbanerne.
- 2) Det azimutale kvantetal, der er knyttet til elektron-banens 'form'. ('Baneforms-kvantetal')
- 3) Det magnetiske kvantetal, der er knyttet til det magnetfelt, som den elektrisk ladede elektron frembringer ved sin bevægelse omkring atomkernen.
- 4) Spin-kvantetallet, der karakteriserer elektronens 'egen-impulsmoment' kaldet elektronspin.

Professor i teoretisk fysik, Fysik-institut og Nobelpris

I 1916 blev Niels Bohr udnævnt som den første professor i teoretisk fysik ved Københavns Universitet.



Niels Bohr som 30-årig i 1916

I 1921 førte Bohrs engagement til oprettelse af Universitetets 'Institut for Teoretisk Fysik'. Mange af verdens førende fysikere er siden kommet til instituttet, hvor de har diskuteret og lavet beregninger på ikke mindst atomernes fysik. I 1965 blev instituttet omdøbt til Niels Bohr Institutet (ja, uden to t'er).



**Universitetets 'Institut for Teoretisk Fysik' blev indviet i 1921.
I 1965 blev det omdøbt til 'Niels Bohr Institutet'.**



**Berømte fysikere i Aditorium A på Niels Bohr Institutet.
På første række fra venstre:
Oskar Klein, Niels Bohr, Werner Heisenberg,
Wolfgang Pauli, Georg Gamow og Lev Landau.**

Nobelpris i Fysik

I 1922 fik Niels Bohr tildelt Nobelprisen i fysik. Med prisen fulgte et pengebeløb på omkring 120.000 svenske kroner. For disse penge købte Bohr i 1924 et sommerhus i Tisvilde.

For og bagside af



Nobelprismedaljen

1919: Protonen, der er elektriske atomkerne, bliver

ansvarlig for den positivt påvist.

Opdagelse af et ukendt

I januar 1923 offentliggjorde eksperimentalfysiker **Dirk** ungarske fysiske kemiker (**1885 – 1966**), at de havde Da deres opdagelse blev gjort København, har grundstoffet Københavns latinske navn



grundstof

den hollandske **Coster (1889 – 1950)** og den **Georg Charles von Hevesy** opdaget et nyt grundstof. ved deres forskning i fået navnet Hafnium, efter Hafnia.

Bohrs kvantemodel i Kina fra

Niels Bohrs kvantemodel af atomet blev offentliggjort i det kinesiske tidsskrift XUEYI (Viden og Videnskab) i 1920. Artiklen var skrevet af **Changshou Zhou**.

I løbet af de næste 15 år blev Bohrs teori udbredt til mange videnskabskredse i Kina.

En aktiv formidler af Bohrs teorier og tanker var den kinesiske professor **GeGe (1922-2007)**, der oversatte Bohrs artikler til kinesisk.

På sin jordrejse i perioden januar til juni i 1937, hvor Niels Bohr besøgte USA, Japan og Sovjetunionen kommer Bohr også til Kina, hvor han modtages ved en stor reception og, hvor han også giver en forelæsning. Bohrs forelæsning blev oversat til kinesisk og bragt i videnskabstidsskriftet XUEYI i 1937.

1920

Komplementaritets-betegnelsen. Hvad er lys? Bølger eller partikler?

Hvad er lys? Den engelske fysiker **Isaac Newton (1642-1727)** mente, at lys bestod af nogle uhyre små partikler, korpuskler, der blev udsendt fra en lysgivende kilde. I modsætning hertil argumenterede den hollandske fysiker **Christiaan Huyghens (1629-1695)**, at lys var en svingningsudbredelse, en bølge, der udbreder sig i et allestedeksisterende medium.

Hvem har ret, Newton eller Huyghens?

Forsøg har vist, at lys i visse forsøg 'opfører' sig som bølger. Dette gælder i forsøg, hvor to eller flere lysstråler mødes og danner interferens-mønstre.

Ved den såkaldte fotoelektriske effekt, hvor lys kan løsrive elektroner fra et stof, i sådanne forsøg 'opfører' lys sig som en strøm af individuelle partikler.

Spørgsmålene er:

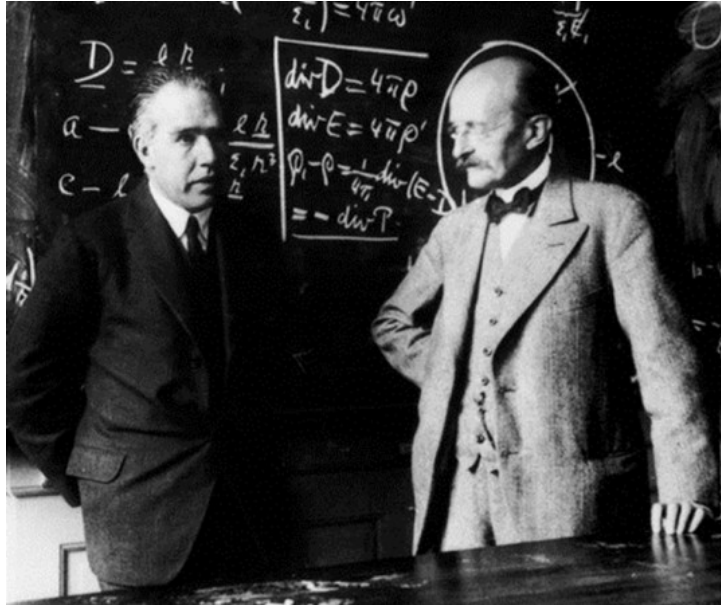
- 1) Kan lys samtidigt optræde både som 'bølger' og som 'partikler' iagttaget i ét specifikt forsøg?
- 2) Eller udelukker de to forskellige 'opførsler', som lys kan udvise, hinanden?

Niels Bohr mente at det er forsøgsopstillingen, der afgør, hvordan lys vil 'opføre' sig. Han indførte derfor betegnelsen 'komplementaritet'. 'Bølger' og 'partikler' er komplementære aspekter af fænomenet 'lys'. Vi kan kun få den komplette viden om fænomenet 'lys' ved at foretage begge forsøg.

1927: Niels Bohr fortæller den 16. september om 'komplementaritets-princippet' i et foredrag ved et møde i Como i Italien, hvor man fejrer 100-året for *Alessandro Voltas* (1745-1827) død.



Niels Bohr og Albert Einstein i 1925, hvor de diskuterer hjemme hos Paul Ehrenfest (1880-1933) i Leiden



Max Planck hos Niels Bohr i 1930

Ægteparret Bohrs sønner

Niels Bohr og hans hustru fik seks sønner. Den ældste søn Christian druknede i en sejlbådsulykke, kun 19 år gammel, kort tid efter sin studentereksamen i 1934.

Den yngste søn Harald døde da han var omkring 10 år gammel, sandsynligvis af meningitis.

De andre sønner er:

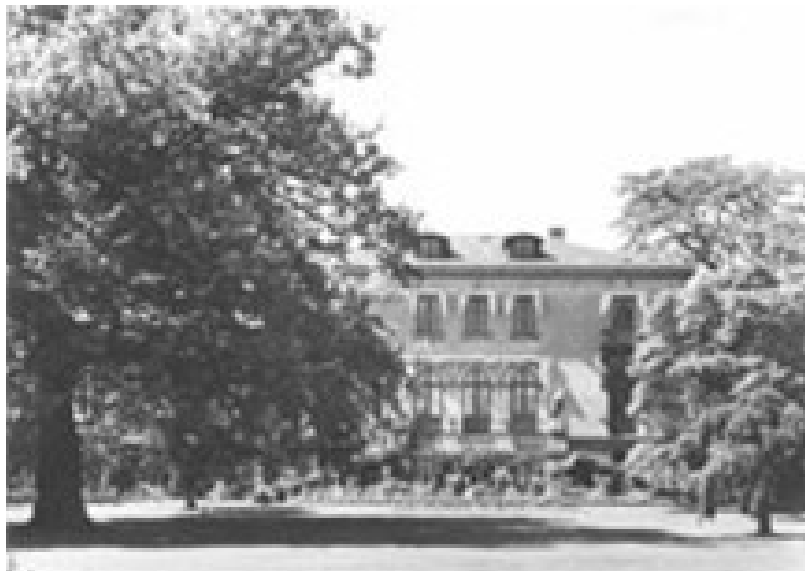
- *Hans Henrik Bohr (1918-2010)*, der var læge.
- *Erik Bohr (1920-1990)*, der var civilingeniør.
- *Åge Niels Bohr (1922-2009)*, der var en kendt teoretisk fysiker, der i 1975 lige som sin far fik Nobelprisen i fysik.
- *Ernest David Bohr* der er født i 1924. Han har været højesteretsadvokat. Han er opkaldt efter fysikeren Ernest Rutherford, der var en meget nær ven af Bohrfamilien.



**Niels Bohr med sine fem sønner.
Fra venstre: Ernest, Erik, Christian, Hans og Åge.**

1930: Den 20. juni modtager Bohr Planck-medaljen.
Den 30. november døde Niels Bohrs mor af kræft.

1932: Familien Bohr får tildelt Carlbergs æresbolig, som de flytter ind i.



Carlbergs Æresbolig

1932: Den engelske fysiker *James Chadwick (1891-1974)* påviser eksistensen af neutronen, en elektrisk neutral byggesten i atomkernen.

1936: Niels Bohr fremsatte sammen med den amerikanske teoretiske fysiker *John Archibald Wheeler (1911 – 2008)* den såkaldte væskedråbe-model for atomkernen.

Bohrs liv som flygtning

Den 29. september 1943 blev Niels Bohr og hustru, der er af jødisk slægt, rådet til at flygte til Sverige.

Bohr tog senere videre til London og USA, hvor han bl.a. besøgte Los Alamos, der var et af de steder, hvor konstruktionen af atombomben foregik.

Det skal bemærkes, at Niels Bohr ikke var med i udviklingen af atombomben!

Året 1944

Brev fra Kapitza

Den 20.april: Bohr modtager et brev fra den russiske fysiker *Pjotr Leonidovitj Kapitza (1894-1984)*.

Kapitza inviterede Bohr med familie til Sovjetunionen. Bohr afslog dog venligt invitationen

Møde med Churchill

Den 16. maj: Niels Bohr blev modtaget af den britiske premierminister **Winston Leonard Spencer Churchill (1874-1965)**. Bohr foreslår international åbenhed om videnskab og teknologi, hvilket dog med bestemt bliver afvist af Churchill.

Til en bekendt refererede Bohr mødet med Churchill som frygteligt. Churchill havde skældt ham ud, som var han en skoledreng.

Da Bohr spurgte om Churchill ville modtage et brev, hvori Bohr ville redegøre for sine synspunkter, så svarede Churchill, at han gerne ville modtage brev fra Bohr, men det skulle ikke handle om politik.

Møde med Roosevelt

Den 26. august: Niels Bohr modtages af præsident **Franklin Delano Roosevelt (1882-1945)**.

Roosevelt var noget mere venlig end Churchill havde været. Begge afviste dog Bohrs forslag om videnskabelig åbenhed.

Den 18. september: Roosevelt og Churchill afviser Niels Bohrs forslag om åbenhed.

Churchill var nervøs for at Bohr ville afsløre viden om atombombeprojektet til **Josef Stalin (1879 – 1953)**, så han råder til, at man holder øje med Bohrs forbindelser, specielt dem i Rusland.

I december 1944 fik Bohr et brev fra Albert Einstein, hvori Einstein foreslår en internationalisering af militær.

Året 1945

Den 12. april: Præsident Franklin Roosevelt dør.

Den 4. maj: De tyske tropper i Danmark overgiver sig.

Den 6. august: Atombombe kastes over den japanske by Hiroshima. Det er en Uran-bombe der kaldes "Little Boy".

Den 9. august: En plutonium-atombombe kaldet "Fatman" kastes over Nagasaki.

Den 11. august: Den engelske avis 'The Times' bringer en artikel af Niels Bohr med titlen "Videnskab og Civilisation". I artiklen redegør han for sine tanker om en åben verden.

Den 25. august: Niels Bohr og hustru vender hjem til Danmark.

Tildeling af Elefantordenen i 1947

I 1947 fik Niels Bohr, som en af de få ikke-kongelige, Elefantordenen, der er den højeste danske orden.

Som våbenskjold valgte Bohr yin/yang-symbolet, Tai-Ji-Tu symbolet. Han valgte det efter forslag fra den tyske historiker **Hanna Kobylinsky (1907-1999)**, der var ekspert i kinesisk historie og gift med Bohrs nære medarbejder **Stefan Szymon Rozental (1903-1994)**.

Yin og Yang symboliserer modsætninger. Yin det kvindelige modtagende princip og Yang det aktive mandlige princip. Yin/Yang-symbolets tilhørende motto er: "Contraria sunt Complementa", hvilket betyder: "Modsatninger er komplementære".

Våbenskjoldet befinder sig i Frederiksborg Slotskirke.



Niels Bohrs våbenskjold med Yin-Yan symbolet

En åben Verden. Åbent brev til FN.

Ligesom Albert Einstein var Niels Bohr tilhænger af en åben verden, hvor videnskabelige opdagelser ikke skulle holdes hemmelige.

I 1950 sendte han det såkaldte åbne brev til FN, hvor han redegør sine tanker om, hvordan menneskeheden kan undgå konflikter.



Niels Bohr oplæser i 1950 sit åbne brev til De Forenede Stater

1955: Den 1. april gik Niels Bohr af som professor ved Københavns Universitet, men han fortsatte som leder af Institutet. Hans fysik-professorat blev i 1956 overtaget af sønnen Åge Bohr. Den 18. april døde Albert Einstein.

1956: Bohr sender sit andet brev til De Forenede Stater. Det var under opstanden i Ungarn.

1957: Bohr fik tildelt "*Atoms for Peace Award*", en pris fra 'Ford Foundations'.



Niels Bohr ved sit institut i 1957

Besøg på Herlufsholm

I 1960 besøgte Niels Bohr Herlufsholm, hvor han var med til at indvie en ny bygning kaldet Fysikum. Det var en ny fysik og kemi afdeling til de naturvidenskabelige studier.

På det såkaldte herlovianer-sprog, kaldes fysiklokalet og kemilokalet, hvor gymnasieeleverne undervises, Fysikum og Kemikum. Det lokale, hvor grundskolens elever undervises, kaldes Mysikum, en ordforkortelse af 'Museumbygningens lokale'.

I 100 året for Niels Bohrs atomteori indvier Herlufsholm nye undervisningslokaler til de naturvidenskabelige fag.

Det sidste år

Efter en meget aktiv juni måned i 1962 med foredrag i USA og Tyskland, får Niels Bohr en mindre hjerneblødning.

Niels Bohr og hustruen Margrethe når dog, at fejre deres guldbryllup den 1. august 1962.

Den 18. november 1962 får Niels Bohr, lige som sin far, hjertestop og dør.

Niels Bohr blev bisat på familiegravstedet på Assistens Kirkegård, hvor også hans forældre, sønnen Christian, hans bror Harald og hans hustru Margrethe, der døde i 1984, ligger begravet.

Danmarks berømte fysiker er ikke mere, men hans kvanteteori om atomet og hans filosofiske tanker om Naturen og menneskesamfundet lever videre!

Lidt litteratur om Niels Bohr, hans liv og forskning:

Mindebogen: Niels Bohr, skrevet af venner og medarbejdere. J.H. Schultz Forlag (1964).

Niels Blædel: Harmoni og Enhed. Forlaget Rhodos (1985).

Stefan Rozental: NB: Erindringer om Niels Bohr. Forlaget Gyldendal (1985).

Abraham Pais: Niels Bohr og hans tid. Forlaget Spektrum (1996).

David Favrholt: Filosofien Niels Bohr. Informations Forlag (2009).

Louis Nielsen
Maj og august 2013