

KVANT Oktober 3 2018

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 29. årgang



- TRE-FOTON-KORRELATIONER
- ANTIKKENS GÅDEFULDE TANDHJUL
- KILONOVAEN OG OPRINDELSEN AF GULD
- MÅNEN – EN FABELAGTIG UDSILLING PÅ LOUISIANA
- G-2-EKSPERIMENTET – DEN MEST NØJAGTIGE TEST AF KVANTEELEKTRODYNAMIKKEN
- KVANTEMEKANISK SIMULERING AF ELEKTRONDYNAMIKKEN I IONSTRÅLEKRÆFTTERAPI

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Elektro
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie Søgård (Facebookredaktør og AS)
Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnement tegnes på www.kvant.dk.
Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:
christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2300 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart
materiale i farver. Henvendelser om an-
noncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk
(tlf. 28 91 87 74).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2500.

Produktionsplan

Nr. 4-18 udkommer ca. 1. december
Nr. 1-19 udkommer ca. 15. marts
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Antikkens gådefulde tandhjul <i>John Rosendal Nielsen</i>	3
Kilonovaen og oprindelsen af guld <i>Jonatan Selsing</i>	9
Tre-foton-korrelationer <i>Nina Stiesdal</i>	13
Kvantemekanisk simulering af elektrondynamikken i ionstrålekræftterapi <i>Adrian Bøgh Salo, Andreas Alberg-Fløjborg, Ilia A. Solov'yov</i>	18
G-2-eksperimentet – den mest nøjagtige test af kvanteelektrodynamikken <i>Bernhard Lind Schistad</i>	21
Månen – en fabelagtig udstilling på Louisiana <i>Finn Berg Rasmussen</i>	30
KVANT-nyheder <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	28
Aktuelle bøger <i>Michael Cramer Andersen og Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	32
Åreforkalkning – breddeopgave 77 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	34
Foreningsnyt – kommende foredrag	35
Nul! <i>Mogens Esrom Larsen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser måneformørkelsen den 27. juli, og er fotograferet fra Athen af Anthony Ayiomamitis, der flere gange tidligere har taget billeder for KVANT. Jordens atmosfære afbøjer en del af sollyset, så det rammer Månen og giver den flotte røde farve. Læs også Finn Berg Rasmussens anmeldelse af en ny udstilling på Louisiana om Månen.



KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Antikkens gådefulde tandhjul

Af John Rosendal Nielsen, Aurehøj Gymnasium og KVANT

For ikke så længe siden stødte jeg ved et tilfælde på en bog med den inciterende titel "50 fund – højdepunkter i arkæologien". Jeg blev imidlertid en smule skuffet, da jeg måtte konstatere, at ét af de i mine øjne væsentligste fund i nyere tid inden for den græske arkæologi ikke var nævnt. Der er nærmere bestemt tale om den såkaldte Antikythera-mekanisme, som for nuværende bedst kan beskrives som en samling bronzefragmenter af forskellig størrelse. I det følgende vil jeg forsøge at beskrive denne mekanismes funktion og betydning.

Skibet er ladet med

For omkring 2100 år siden mødte et skib sin skæbne, da det led skibbrud ved øen Antikythera – syd for Peloponnes. Årsagen til skibbruddet kan vi kun gisne om, men skibet var formentligt blevet overrasket af et stormvejr, der betød, at skibet ramte de farlige skær ved øen. Vraget skulle ligge der i 2000 år, før det blev fundet af svampedykkere fra Symi i år 1900. Svampedykkerne havde søgt ly for en storm ved øen og ville undersøge stedet for gode badesvampe, nu hvor de alligevel var i området. I stedet bjergede de en stor arkæologisk skat med mange statuer i marmor og bronze, som blev bragt til det Nationalarkæologiske Museum i Athen, hvor man kan se dem den dag i dag.



Figur 1. Antikythera-mekanismen i dens nuværende tilstand. Disse fragmenter er brikker i et puslespil, hvor de fleste af brikkerne mangler. Hvis fragmenterne blev samlet, ville Mekanismen formentligt være på størrelse med en skotøjsæske.

Imellem de mange fine skatte fandt museumsfolkene en undseelig bronzeklump, hvor man tydeligt kunne se tandhjul og nogle antydninger af græske bogstaver. Filologer og søfartshistorikere blev kaldt til Athen for at studere dette objekt, der blev kendt som Antikythera-mekanismen.¹ En heftig debat begyndte imellem forskerne, som ikke kunne blive enige om, hvad Mekanismen var for noget. Nogle historikere – især de med en søfartsbaggrund – mente, at det var et søfartsinstrument, eftersom man havde fundet Mekanismen på et skib. Der blev også tilkaldt en anerkendt tysk filolog ved navn Albert Rehm (1871-1949), som fandt inskriptionerne

¹Kaldes for Mekanismen i resten af artiklen.

Pachon og *sterigmos* på Mekanismen. *Pachon* er det græske navn på en ægyptisk måned, og den ægyptiske kalender blev ofte benyttet i den græske astronomi, da den var mere regelmæssig end den græske kalender. *Sterigmos* er et græsk teknisk begreb for det tidspunkt, hvor en planet skifter direkte bevægelse til retrograd bevægelse eller omvendt. Rehm ræsonnerede, at Mekanismen var et planetarium. Fælles for alle disse teorier i perioden 1901–1940 var, at de var baseret på overfladiske observationer og spinkle ræsonnementer.



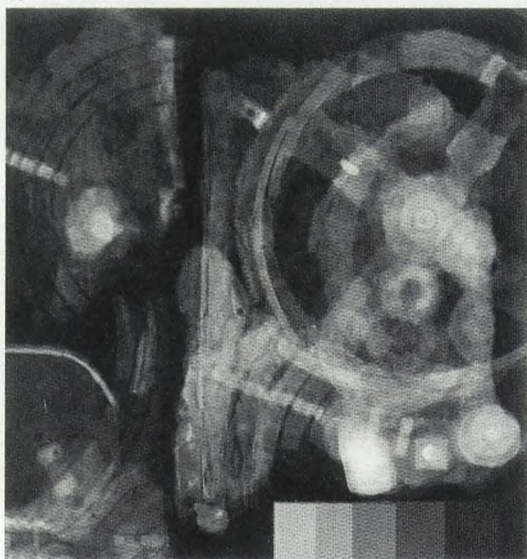
Figur 2. Øen Antikythera med det omkringliggende område. Det er sandsynligt, at skibet kom fra Rhodos eller fra den tyrkiske vestkyst. Svampedykkerne var på vej hjem til Symi.

Pionerforskningen

Det var først i 1970'erne, at fundet blev undersøgt grundigt med røntgenudstyr. Undersøgelserne blev ledet af en engelsk fysiker og videnskabshistoriker ved navn Derek de Solla Price (1922–1983), der havde en betragtelig forskningskarriere bag sig ved bl.a. Yale University [1]. Price havde længe haft en interesse i Mekanismen, men han kunne ikke få finansieret det nødvendige tekniske udstyr m.h.p. at foretage en videnskabelig undersøgelse. Først i 1971 faldt brikkerne på plads, og man kunne således begynde at gennemlyse bronzestykkerne med røntgenstråler, og resultaterne publicerede Price i en større monografi [2].

Røntgenbillederne gav det første indblik i, hvorledes Mekanismens tandhjul så ud, og de var tilstrækkeligt detaljerede til, at man kunne se nogle af tænderne på tandhjulene. Desværre var billederne ikke tydelige nok, eller tandhjulene var ganske enkelt ikke fuldstændigt

bevarede. Man var derfor nødt til at estimere det totale antal tænder i tandhjulet ved at bestemme tænderne i et mindre segment af tandhjulet og så vurdere, hvor stor en del af tandhjulet segmentet udgjorde. Denne metode kan naturligvis være hæftet med en lille usikkerhed, da det forudsætter, at tænderne sidder jævnt fordelt.



Figur 3. Øverst: Et eksempel på Prices røntgenbilleder. Nederst: Price med sin model af Mekanismen.

Det lykkedes dog Price og hans to hjælpere at bestemme antallet af tænder på flere af tandhjulene forholdsvis præcist, men desværre havde Price allerede en forudindtaget mening om Mekanismens funktion, hvilket betød, at hans model af fundet, som skulle være baseret på røntgenundersøgelserne, var upræcis og unødigt kompliceret [3]. Han havde blandt andet introduceret et differentialtandhjul, som var baseret på en – desværre – fejlfortolkning af et røntgenbillede, og differentialtandhjulet var en unødigt kompliceret løsning på noget, som kunne klares med almindelige tandhjul.

Et vigtigt resultat af Prices undersøgelser var dateringen af skibsvraget, som gav en indirekte datering af Mekanismen. Skibets planker blev bestemt ved kulstof-14-metoden, hvilket gav en datering på $220 (\pm 43)$ f.Kr. [2]. Han fik desuden bestemt den kemiske sammensætning af to fragmenter, hvor man fandt, at det drejede sig om en bronzelegering med 5% tin og resten kobber. Prices analyse af fundet var, at den måtte være en analog computer og et astronomisk instrument fra den sene hellenistiske periode.

Dateringsproblematikken

I 1976 blev der arrangeret en ny ekspedition til Antikythera. Det var selveste Jacques Cousteau, der var manden bag denne ekspedition. Der blev ikke fundet yderligere fragmenter af Mekanismen, men der blev fundet enkelte statuetter og endnu mere vigtigt: mønter. Der er således foreløbigt fundet 36 sølvmønter og minimum 40 bronzemønter. De er vigtige, fordi mønter kan give os et fingerpeg om, hvor skibet var fra, og en datering, m.h.t. hvornår skibet senest sejlede fra havn.



Figur 4. Øverst: Jacques Cousteau fremviser statuetterne. Nederst: to af mønterne fra Efesos og Pergamon (Tyrkiets vestkyst) er dateret til år 95–92 og 85–76 f.Kr..

Sølv mønterne er blevet dateret til perioden 95–60 f.Kr. [4], men enkelte bronzemønter kan muligvis være yngre. Dette kunne tyde på, at skibet må have forladt havnen omkring samme tidspunkt som mønternes datering. Begrundelsen herfor er, at skibet er blevet dateret til ca. 220 f.Kr., og selv med usikkerheden på kulstof-14-dateringen ville det stadig betyde, at skibet var meget gammelt. Et hundrede år gammelt skib i

antikken ville være usædvanligt, men om det ville være umuligt, er svært at afgøre. Vores viden om antikkens skibe – og specielt med hensyn til skibenes holdbarhed – er stadig begrænset.

Mønterne giver en nedre grænse for, hvornår skibet sejlede fra havn. Skibet kan ikke afsejle en havn med mønter, der endnu ikke er prægede, og derfor må skibet have sejlet fra havn i tidsrummet 95-60 f.Kr. Skibet kunne sagtens være afsejlet senere, men det ville bare gøre skibstømmeret ældre, hvilket er tvivlsomt. Det er derfor en rimelig hypotese at antage, at skibet afsejlede tidligt i den angivne periode.

Sølv mønterne er tetradrakmer, hvis nutidige værdi svarer til ca. 1000 kroner, og de blev almindeligvis kun benyttet til større handelstransaktioner. Der blev fundet 36 tetradrakmer ombord på skibet, hvoraf 32 var fra Pergamon, mens de sidste fire var fra Efesos. Antallet af bronzemønter er ukendt, da bronzemønterne har været vanskeligere at skille fra hinanden, men der er tale om mindst 40. Omfanget af bronzemønternes korrosion er omfattende, hvilket betyder, at kun seks er blevet identificeret. Tre af bronzemønterne er fra Sicilien, og de resterende tre er fra Lilleasien, og disse mønter er specielt interessante, da de formentligt blev benyttet af søfolkene i deres daglige transaktioner. Mønternes geografiske ophav giver et billede af, hvilket område skibet sejlede i. Uden at vi kan angive den præcise rejse, kan vi godt antage, at det er sandsynligt, at skibet sejlede fra Tyrkiets vestkyst eller nærliggende øer imod vest, hvilket passer godt med vrgets beliggenhed ved Antikytheras østkyst. De fleste forskere formoder, at skibet var på vej mod Italien, Sicilien eller det græske fastlands vestkyst, og nærmere kommer vi ikke skibets destination.

Mekanismen efter Price

Price var en af de store inden for videnskabshistorisk forskning, hvilket betød, at hans fortolkning stod uantastet frem til midten af 1980'erne. I 1985, to år efter Prices død, kom den australske computerhistoriker Allan Bromley fra Sydney University med en kritik af Prices model, da han havde testet Prices teori med Meccano-byggesæt og fundet modellen ubrugelig. Bromley instruerede en urmager i Sydney i at bygge en simplere model. En væsentlig ændring ved Bromleys model var, at når man roterede håndtaget på indgangshjulet én omgang, flyttede viserne på skiverne sig præcis med den vinkel, som svarede til den daglige ændring.

En stor forbedring af modellen var afsløringen af to tandhjuls funktioner. Price havde fundet to tandhjul med 15 og 63 tænder, hvilket ikke gav mening. Derfor ændrede han antallet til 16 og 64 og formodede, at de var en del af en ukendt fireårs cyklus. Bromley holdt fast på det oprindeligt opmålte antal på 15 og 63 tænder og kom frem til, at tandhjulene kunne vise en $4\frac{1}{2}$ års cyklus.² Fire gange $4\frac{1}{2}$ års cyklus giver 18 år eller

223 måneder,³ hvilket er svarende til Saros-cyklussen – perioden mellem to solformørkelser med næsten ens placering.



Figur 5. Øverst: Allan Bromley (1947–2002) og hans model. Nederst: Michael Wright i sit værksted med sin første model af Mekanismen.

Det stod dog klart for Bromley, at det var nødvendigt med yderligere undersøgelser af Mekanismen og i starten af 1990'erne startede Bromley et samarbejde med Michael Wright, som var kurator ved British Museum. Bromley og Wright havde fået en tilladelse og penge til at undersøge fragmenterne med en teknik, der er kendt som lineær røntgentomografi. For at udføre denne røntgenundersøgelse måtte Wright opfinde en opstilling, der tillod fragmenterne at blive gennemlyst, hvilket resulterede i billeder med fantastiske detaljer og dybde. I 1998 blev Bromley⁴ alvorligt syg og måtte overlade forskningen til Michael Wright, der publicerede resultaterne og lavede en model ud fra røntgenbillederne i 2006.

Antikythera Mechanism Research Project

Året før Wrights artikel begyndte flere forskere fra hovedsageligt England og Grækenland at danne en forskningsgruppe ved navn *Antikythera Mechanism Research Project* (AMRP), da de mente at der stadig var meget at udforske ved Mekanismen. De valgte at ignorere Wrights forskning, hvilket har medført en del gnidninger imellem Wright og enkelte af forskerne i gruppen. AMRP-gruppen har anvendt fire forskellige metoder til at undersøge Mekanismen [4]:

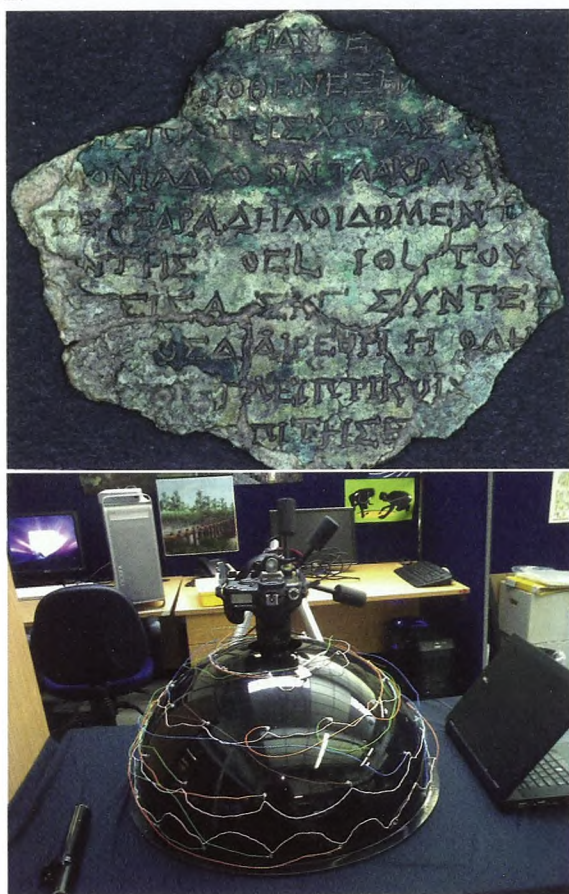
²Den eneste måde, hvorpå jeg kan få en cyklus på $4\frac{1}{2}$ år, er, hvis tandhjulene havde 14 og 63 tænder.

³Måneder er her synodiske, hvilket vil sige, at deres varighed er ca. 29,5 dage (mere herom i næste artikel). Årets længde regnes for at være 365,25 dage.

⁴Allan Bromley døde af Hodgkin's lymphoma i 2002.

- a) Polynomial Texture Maps
- b) Digital fotografering
- c) Computer Tomografi
- d) Kemisk analyse med røntgenspektroskopi.

Holdets undersøgelser har bekræftet mange af Wrights tidligere resultater, men der er også kommet andre resultater frem. Et af de vigtigste bidrag, som AMRP-gruppen har opnået igennem deres undersøgelser, er kommet fra *Polynomial Texture Maps* (eller PTM). Denne teknik er udviklet af Hewlett-Packard-laboratoriet i USA under ledelse af Tom Malzbender [5]. PTM kan groft sagt beskrives som digitale billeder, der er taget med blitz fra mange forskellige vinkler. Der dannes med PTM et tredimensionelt billede af Mekanismens overflade, og sammen med målingerne med røntgentomografien har holdets undersøgelser forøget antallet af tydede tegn i inskriptionerne på Mekanismen.



Figur 6. Øverst: Et eksempel på PTM af Mekanismen, hvor man tydeligt kan se inskriptionerne. Nederst: Opstilling, hvor kameraet er øverst på kuplen, og ledningerne mellem de små blitz sidder rundt om på kuplen.

Planetariet

I modsætning til Wrights håndgribelige model har AMRP-gruppen lavet en computeranimation baseret på deres forskning. Når man kigger på det, som vi i dag kalder for Mekanismens forside, bemærker man enkelte forskelle i deres modeller, men kigger man nærmere efter, opdager man, at det er overfladiske forskelle, og man er meget enig om udformningen af forsiden. Forskerne er enige om, at Mekanismens forside var et planetarium, hvor positionen af Solen, Månen og de fem kendte planeter – Merkur, Venus, Mars, Jupiter

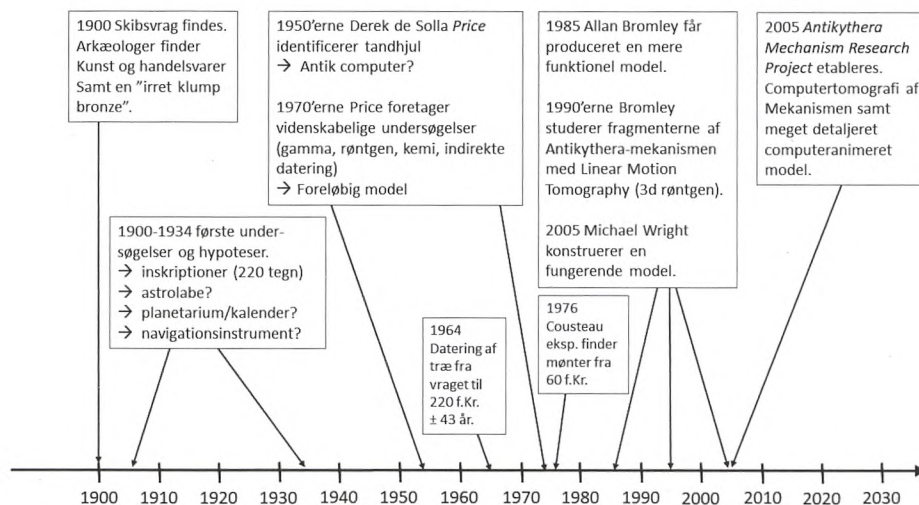
og Saturn – er placeret i forhold til stjernetegnene. På siden af kassen var der et håndtag, som man drejede, og derved fik de syv visere for Solen, Månen og planeterne til at bevæge sig rundt. Der var formentligt farvede perler på hver af viserne, som var indgraveret med de græske navne for himmellegemerne. De farvede perler fulgte en tradition, hvor hvert himmellegeme blev symboliseret ved en ædelsten. For eksempel vil den røde perle repræsentere Ares eller Mars. De græske navne for planeterne, Solen og Månen er vist på tabellen nedenfor.

Solen	Helios
Månen	Selene
Merkur	Hermes
Venus	Afrodite
Mars	Ares
Jupiter	Zeus
Saturn	Kronos



Figur 7. Der er ikke de store forskelle på forsiderne af Wrights model (øverst) og AMRP-gruppens computeranimerede model (nederst). Det mest iøjnefaldende er de manglende perler på viserne og inskriptioner hos Wright.

Tidslinje over arkæologiske og videnskabelige undersøgelser



Viserne pegede på to runde skiver, hvoraf den første var delt i tolv dele – én for hvert stjernetegn i dyrekredsen. Den anden og ydre skive var delt i 13 dele, hvoraf de 12 dele var lige store, mens den sidste 13. del var væsentlig mindre. Denne skive angav det ægyptiske kalenderår, der havde 12 måneder á 30 dage og 5 overskydende dage – de såkaldte epagomenale dage. Den ægyptiske kalender blev ofte benyttet i astronomien, da den tilnærmelsesvis fulgte Jordens omløbstid om Solen, og kalenderen var meget enkelt opbygget.⁵ De to runde skiver kunne placeres uafhængigt af hinanden, og skiven med den ægyptiske kalender havde 365 huller, hvor en lille pind kunne sættes i, så den ægyptiske kalenderskive kunne placeres efter årets stjernetegn [6]. Grunden hertil var, at den ægyptiske kalender ikke havde en skuddag hvert fjerde år – en af de få svagheder ved denne kalender.

Viseren for Månen havde en speciel udformning, da den var repræsenteret af en perle, hvoraf den ene halvdel af dens overflade var malet sort og den anden var malet hvid. Perlen var indkapslet i skiven, således at den kunne dreje rundt og vise månens fase som nymåne og fuldmåne. Nøjagtigheden af Solens og Månens visere på Mekanismen er utrolig stor, da der er tegn på, at der er taget hensyn til deres acceleration og deceleration ved at anvende en epicyklisk tilgang med tandhjulene.

Antikkens kosmos

Forståelsen af kosmos i antikken var begrænset af de observationer, som man kunne udføre. Uden teleskoper og andet udstyr var man henvist til, hvad man kunne se med det blotte øje. Det betød, at man kun kendte til Solen, Månen, de fem planeter – Merkur, Venus, Mars, Jupiter og Saturn – samt de klareste stjerner.

Dette kosmos var allerede kendt hos de tidligere civilisationer såsom den ægyptiske og den mesopotamiske, der benyttede astronomien til astrologisk forudsigelse og til tidsmåling om natten. Observatører af natte-

himlen i de ægyptiske og mesopotamiske civilisationer havde bemærket en regularitet i planeternes bevægelse. Specielt havde man opdaget, at planeternes fremkomst på himlen havde faste synodiske⁶ perioder.

De tidligste astronomiske tekster, som vi har fra Mesopotamien, er kileskrifttavler kendt under navnet *Enuma Enu Enlil* [6], hvor observationerne, som er beskrevet på tavlerne, kan spores tilbage til den gamle Babylonske periode, d.v.s. 1950–1595 f.Kr. De beskriver, hvilke varsler planeterne gav anledning til. De mesopotamiske konger var gudernes repræsentanter på Jorden, og deres gøren og laden var forbundet med himmellegemerne. Et par eksempler herpå kunne være [6]:

“Hvis Jupiter bærer udstråling: Kongen har det godt og landet vil blive glad.” og

“Hvis der er en formørkelse i Simānu (månen): Der vil blive oversvømmelse og vandet vil bære jorden væk”.

Der var en sammenhæng imellem de astronomiske fænomener og de jordiske aktiviteter i disse varsler. Derfor blev det nødvendigt for mesopotamiske astrologer at forudsige de astronomiske fænomener, så man med forskellige religiøse ritualer kunne forberede sig på gode eller dårlige hændelser. Dette gav anledning til kataloger af observationer af disse synodiske astronomiske begivenheder, som de græske astronomer fik indblik i. Grækerne var ikke kun interesserede i at lave varsler, men de ønskede også at forstå universet. Astrologer var også blevet astronomer.

Et af de vigtigste formål med de astronomiske observationer var at bestemme opbygningen af universet. De første naturfilosoffer, som ikke inddrog guderne i kosmologien, levede i græske bystater på den nuværende tyrkiske vestkyst, hvor det var geografisk oplagt, at de havde haft handelskontakt til civilisationerne i Mesopotamien og Ægypten. Der er også tydelige spor af mesopotamisk påvirkning i græsk tidsinddeling og

⁵Mere om den ægyptiske kalender i en kommende artikel.

⁶Synodiske perioder er tidsrummet mellem, at et astronomisk fænomen gentager sig selv – observeret fra Jorden. Et astronomisk fænomens sideriske periode er omløbstiden i forhold til fiksstjernerne, som f.eks. en planet tager for at udføre en hel tur omkring Solen. Den synodiske periode er længere, fordi Jorden også bevæger sig omkring Solen.

kalendere, men det vil ikke være overraskende, dersom grækerne har haft adgang til de mesopotamiske kataloger over observationer af planeter, sol- og måneformørkelser. Ifølge Herodot skulle Thales fra Milet have forudsagt en solformørkelse, hvilket han kun kunne have gjort, hvis han havde haft adgang til de astronomiske kataloger fra Mesopotamien. Vi ved desværre ikke meget om babylonsk kosmologi, og derfor er det svært at sige, hvilken indflydelse Mesopotamien har haft på græsk kosmologi. Babylonierne havde for eksempel ingen præferencer m.h.t. om universet var geocentrisk eller heliocentrisk, hvilket kom til at fylde en del hos grækerne.



Figur 8. En middelalderlig repræsentation af det fremherskende verdensbillede i antikken (t.v.) med tilføjelse af Paradisets have (t.h.). Det aristoteliske verdensbillede havde den uperfekte Jord i centrum, Solen, Månen og fem kendte planeter i kugleskaller. I den yderste kugleskal fandtes stjernerne, og uden for denne skal var gud eller gudernes domæne. I antikken var dette verdensbillede ét af mange muligheder, og grækerne har sikkert elsket at diskutere, hvilket verdensbillede der var det korrekte.

De fleste græske naturfilosoffer argumenterede typisk for et geocentrisk univers, hvor alle himmellegemerne bevægede sig omkring Jorden, men der var også afvigelser fra dette synspunkt. Pythagoræerne mente for eksempel, at Solen var i centrum for det kendte univers. Noget tilsvarende mente den senere astronom og matematiker Aristarchos (ca. 310–230 f.Kr.), og han benyttede sit heliocentriske verdensbillede til at bestemme en afstand til Solen og Månen. Selvom der altså var astronomer og naturfilosoffer, som foretrak det heliocentriske verdensbillede, var det geocentriske verdensbillede det mest fremherskende, da man ikke kunne forestille sig, at afstandene til stjernerne var så store. På trods af, at vores viden om græsk astronomisk historie er større end vores viden om den babylonske, er størstedelen af perioden på cirka tusind år indhyllet i mørke, og der er blot nogle få lyspunkter. Vi kender ofte kun indirekte til de forskellige naturfilosoffer og deres teorier, da enkelte græske forfattere nævnte dem i deres få overleverede værker.

Det mekaniske univers

Antikythera-mekanismen har givet os indsigt i, hvordan grækerne forestillede sig universet. Regelmæssighederne i himmellegemernes bevægelse på nattehimmelen har givet anledning til, at de kunne repræsenteres med

tandhjul. Men hvilken teori ligger til grund for bevægelsen af Mekanismens himmellegemer? AMRP-gruppen mener, at det er sandsynligt, at Mekanismens indre planeter blev styret ud fra en ren epicyklisk teori, mens de ydre planeter krævede, at konstruktøren tog hensyn til, at selv i den geocentriske model kunne Jorden ikke være placeret præcis i centrum. I den eccentricke epicykliske teori var Jorden forskudt fra centrum, mens planeterne stadigvæk bevægede sig i en mindre cirkelbane omkring en større cirkelbane omkring Jorden som i en normal epicyklisk teori. Da det er begrænset, hvor mange tandhjul, vi kender til, er det også begrænset, hvad vi kan sige om, hvorledes teorien skal realiseres med tandhjul. Der er ikke enighed om, hvilke tandhjul og teorier, der ligger til grund for Mekanismens planetarium.

Selvom man ikke kan blive enige om det indvendige tandhjul, som skulle føre viserne rundt, kan man blive enige om det udvendige udseende. Michael Wright er således en af de få, som har lavet en velfungerende model i metal og træ. Brugen af Mekanismen ville slide på tandhjulene, og det er ikke utænkeligt, at den har været ændret med tiden. Måske er den ligefrem blevet føjet sammen af to andre dele, der hver især udgør forsiden og bagsiden af Mekanismen. Forskerne er enige om, at Mekanismen må være en del af en længere håndværkstradition i Grækenland. Hvis det modsatte er tilfældet, vil det svare til, at en urmager lavede et finmekanisk ur uden de mange års tidligere udvikling af ure.

I næste artikel vil jeg kigge nærmere på Mekanismens såkaldte bagside og Grækenlands mange kalendere.

Litteratur

- [1] Om Price på Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Derek_J._de_Solla_Price
- [2] Derek de Solla Price (1974) *Gears from the Greeks, Transaction of the American Philosophical Society*, bind 64, del 7.
- [3] Jo Marchant (2008) *Decoding the Heavens*, Windmill Books.
- [4] Nikolaos Kaltsas m.fl. (red.) (2012) *The Antikythera Shipwreck – the ship, the treasures, the mechanism*, Museum Catalogue.
- [5] Om Polynomial Texture Mapping, www.hpl.hp.com/research/ptm/
- [6] Alexander Jones (2017) *A Portable Cosmos*, Oxford University Press.
- [7] Om Enuma Anu Enlil på Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Enuma_Anu_Enlil



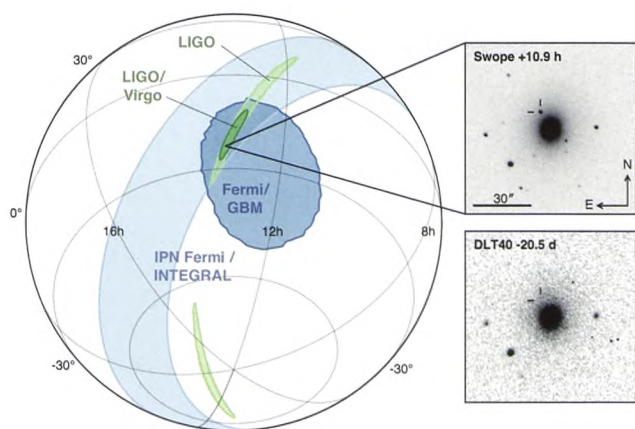
John Rosendal Nielsen er lektor ved Aurehøj Gymnasium, hvor han underviser i fysik. Han beskæftiger sig desuden med videnskabshistorie og kosmologi.

Kilonovaen og oprindelsen af guld

Af Jonatan Selsing, *The Cosmic Dawn Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet*

I denne artikel vil jeg introducere et fænomen, som først for ganske nyligt er trådt frem på den astronomiske scene, nemlig kilonovaer. Kilonovaer har vist sig at være nogle af de mest eksotiske, sjældne og samtidig betydningsfulde begivenheder, der sker i universet. En kilonova er et resultat af sammenstødet mellem to neutronstjerner eller en neutronstjerne og et sort hul. I sammenstødet bliver neutronstjernemateriale slynget ud i universet, og af dette materiale dannes nogle af de tungeste grundstoffer, vi kender, f.eks. ædelmetaller som guld, sølv og platin.

Den 17. august 2017 skete der noget specielt i de tre tyngdebølgedetektorer, der bliver drevet af det, der kaldes LIGO/Virgo-samarbejdet. For første gang registrerede detektorerne det karakteristiske "tyngdebølge-skvulp" fra et binært system, hvis totale vægt var mindre end ca. 2,8 solmasser, hvilket svarer til massen af to neutronstjerner [1]. Uafhængigt heraf, og forsinket med 1,7 s, detekterede GBM-instrumentet (Gamma-ray Burst Monitor) ombord på rumteleskopet *Fermi* et kort signal af gammastråler, der svarer til den type signal, vi kender fra såkaldte korte gammaglimt. Derfra vidste vi med det samme, at tyngdebølgesignalet blev udsendt næsten samtidigt med en eller anden form for elektromagnetisk stråling. Det betød, at vi havde mulighed for for første gang i verdenshistorien at se det optiske modstykke til et tyngdebølgesignal. Dette optiske modstykke var på forhånd blevet anslået til at være lysstærkt nok til, at vi ville kunne se det selv på betragtelig afstand, og samtidig havde teoretikere forudset, at det potentielt kunne være kilde til nogle af de tungeste grundstoffer i universet [3]. På grund af formodningen om, at modstykket ville være betydningsfuldt, var det vigtigt at sikre en hurtig opfølgning med teleskoper, inden det optiske lys blev for svagt til at måle.



Figur 1. Lokaliseringen af kilonovaen baseret på ankomst-tidspunktet af tyngdebølgesignalet til de forskellige detektorer, samt GBM-lokaliseringen. Figuren er taget fra [2].

Ved at triangulere på baggrund af ankomst-tidspunktet af signalet i tre tyngdebølgedetektorer placeret i hver sin ende af USA og i Italien kunne LIGO/Virgo finde frem til, at dette sammenstød skete over den sydlige halvkugle inden for et område med en størrelse på

28 kvadratgrader (til sammenligning fylder Månen ca. en kvart kvadratgrad på himlen). Dette lyder måske ikke af meget, men et typisk areal, som et teleskop kan dække af gangen, er få procent af en kvadratgrad, så det kræver mange billeder at dække hele området. 10,9 timer efter den næsten samtidige observation af tyngdebølger og gamma-stråler blev det optiske modstykke fundet. Detektionsbillederne er vist i figur 1, hvor det øverste højre billede er det første billede, der blev taget af kilonovaen. Så snart det optiske modstykke blev fundet, var usikkerheden på positionen så lille, at en verdensomspændende opfølgningskampagne kunne iværksættes, hvor teleskoper, der dækker hele det elektromagnetiske spektrum, kunne pege mod dette nyopdagede astronomiske fænomen.

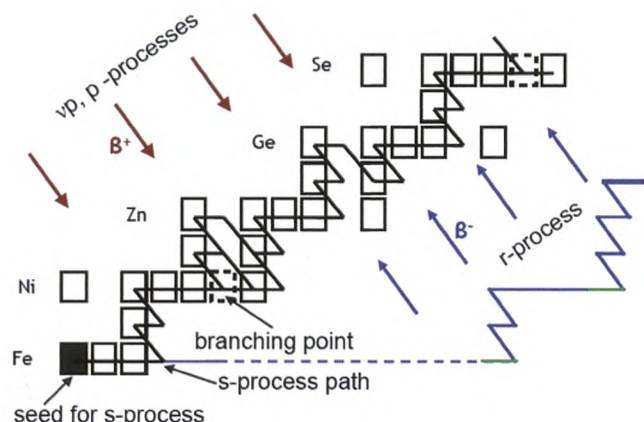
Baggrund

For at forstå, hvorfor der var så stor interesse for at detektere fænomenet, samt hvorfra navnet kilonova stammer, kræves lidt baggrundsviden.

Den kemiske sammensætning af universet er på ethvert tidspunkt et produkt af startbetingelserne og de processer, der undervejs virker for at drive den kemiske berigelse. Big Bang efterlod et univers primært bestående af hydrogen og helium (plus naturligvis mørkt stof, som ikke består af de sædvanlige grundstoffer). Tyngdekraften fik uergassen og det mørke stof til at klumpe sig sammen for til sidst danne stjerner og galakser. Under tilpas høj tæthed og temperatur (der bliver opnået inde i stjernernes centrum) undergår hydrogen og helium kernefusioner. Fire hydrogenkerner støder sammen og danner helium, tre heliumkerner støder sammen og danner karbon, en karbonkerne og en heliumkerne støder sammen og danner ilt, o.s.v. På denne måde bliver grundstofferne tungere og tungere. Denne proces kan lade sig gøre, fordi bindingsenergien af tungere grundstoffer (op til jern) er højere end for lettere grundstoffer. Der kan derfor vindes energi ved at omdanne lette grundstoffer til tunge. Denne fusionsproces er energikilden til alle "tændte" stjerner i universet.

De højeste bindingsenergier per nukleon findes i grundstofferne jern ($^{56}_{26}\text{Fe}$) og nikkel ($^{58}_{28}\text{Ni}$) med atomnummer hhv. 26 og 28 og massetal på hhv. 56 og 58. Atomnummeret betyder, at de hver indeholder hhv. 26 og 28 protoner, og massetallene betyder, at de hver indeholder hhv. 56 og 58 protoner og neutroner. Fordi jern og nikkel har de højeste bindingsenergier, er det også

de tungeste grundstoffer, der naturligt laves ved fusion. Tungere grundstoffer end jern og nikkel er allesammen lavet på basis af neutronindfangning. Neutronindfangning betyder, at en atomkerne optager en fri neutron. Dette kan ske, fordi neutronen er ladningsløs, og der ikke er nogen elektrostatiske frastødning mellem atomkernen og den frie neutron. Ved en neutronindfangning stiger massetallet for et grundstof med 1, fordi der er kommet en ekstra neutron i kernen. Hvis en jernkerne og en fri neutron støder sammen, føree det til processen: $^{56}_{26}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}_{26}\text{Fe} + \gamma$, hvor n er neutronen, og γ er en foton. $^{57}_{26}\text{Fe}$ er en stabil isotop af jern, men hvis indfangningen af neutroner fortsættes, vil det til sidst kunne føre til processen: $^{58}_{26}\text{Fe} + n \rightarrow ^{59}_{26}\text{Fe} + \gamma$. $^{59}_{26}\text{Fe}$ er ikke en stabil isotop og vil betahenfalde til kobolt, en elektron og en anti-elektronneutrino ($^{59}_{26}\text{Fe} \rightarrow ^{59}_{27}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$), hvorved atomnummeret stiger med 1. Betahenfald er den proces, hvor en neutron henfalder til en proton og en neutrino.

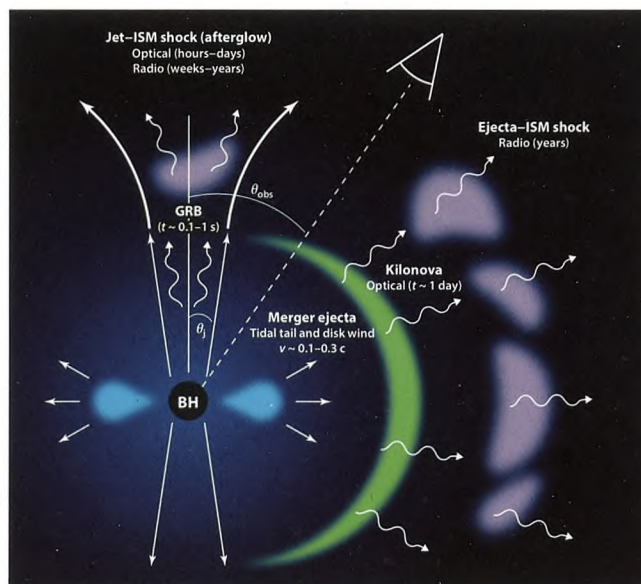


Figur 2. Illustration af s - og r processen. S -processen er den sorte streg, der følger de mest stabile isotoper. Steder, hvor der er huller i "isotopstigen", gør, at s -processen skal bruge lang tid på at kravle opad i atomtal. R -processen, derimod, kan meget hurtigt berige kimgrundstoffer til de tungeste grundstoffer i vores periodiske system.

r -processen

Neutronindfangningsprocessen opdeles i to klasser, som bliver separeret på baggrund af neutronindfangningsraten – altså hastigheden, hvormed neutroner bliver fanget – i forhold til betahenfaldsraten. s -processen, hvor s står for slow, betyder, at neutronindfangningsraten er langsommere end betahenfaldet. I s -processen vil enhver neutronindfangning til en ustabil isotop være efterfulgt af et betahenfald til et grundstof med én proton mere og derfor højere i det periodiske system. s -processen kan i princippet give alle de tungere grundstoffer op til polonium ($^{210}_{84}\text{Po}$), men er for langsom til at kunne berige vores univers i tilstrækkelig grad. r -processen (r står for rapid), derimod, er den hurtigste proces, hvor neutroner bliver indfanget hurtigere, end det nye element kan nå at betahenfalde. Denne proces kan virke på meget korte tidsskalaer og har i princippet ikke nogen øvre grænse for, hvor tunge grundstoffer den kan lave. Problemet med r -processen er, at den kræver en enorm tæthed af frie neutroner – en tæthed, der i praksis er meget svær at opnå. Der er dog ét

sted i universet, hvor neutrontætheden er enorm, nemlig neutronstjerner. Neutronstjerner er restproduktet af en stor del af de supernovaer, der har hydrogen i deres spektre (type II), og er kompakte objekter, der ikke er større end ca. 10 km i diameter. Neutronstjerner vejer som regel omkring 1,4 gange så meget som vores Sol og består sandsynligvis i høj grad af neutroner. De har en tynd ydre skal af jern. Grunden til deres store andel af neutroner er, at tyngdekraften er så høj, at de elektroner og protoner, der måtte være, er blevet presset sammen til neutroner. Hvis man på én eller anden måde kan få en neutronstjerne revet fra hinanden, ville det kunne give den tilstrækkelige tæthed af frie neutroner til at drive r -processen.



Figur 3. Skematisk oversigt over, hvordan vi forestiller os, kilonovaen bliver dannet. Centralt er det nydannede sorte hul (BH), hvor de to blå "dråber" repræsenterer de to neutronstjerner, der er ved at smelte sammen. (ISM = Interstellare Medium og GRB = Gammaglimt (Gamma Ray Burst)). Figuren er fra [4].

Neutronstjernesammenstød

I 1974 blev det første binære neutronstjernesystem fundet, kaldet Hulse-Taylor-systemet. Her fandt man det første bevis for tilstedeværelsen af tyngdestråling fra henfaldet af omløbsbanen af dette system. Henfaldet af omløbsbanen af de to neutronstjerner betyder, at de langsomt bevæger sig nærmere og nærmere hinanden under udsendelse af tyngdebølger i overensstemmelse med Einsteins generelle relativitetsteori. De to neutronstjerner i Hulse-Taylor-systemet vil støde sammen om ca. 300 millioner år.

Sammenstødet mellem to neutronstjerner har, fordi det er det optimale sted for r -processen, været fokus for en del teoretiske undersøgelser. De modeller, der er udviklet for sammenstødet, viser enstemmigt, at en væsentlig del af den totale masse vil blive slynget ud i rummet i det plan, som neutronstjerne roterer om hinanden. Grunden til dette er, at som omløbsbanen henfalder, vil rotationshastigheden af systemet stige. På et tidspunkt, ca. samtidigt med at de to neutronstjerner støder sammen, vil rotationshastigheden af de yderste

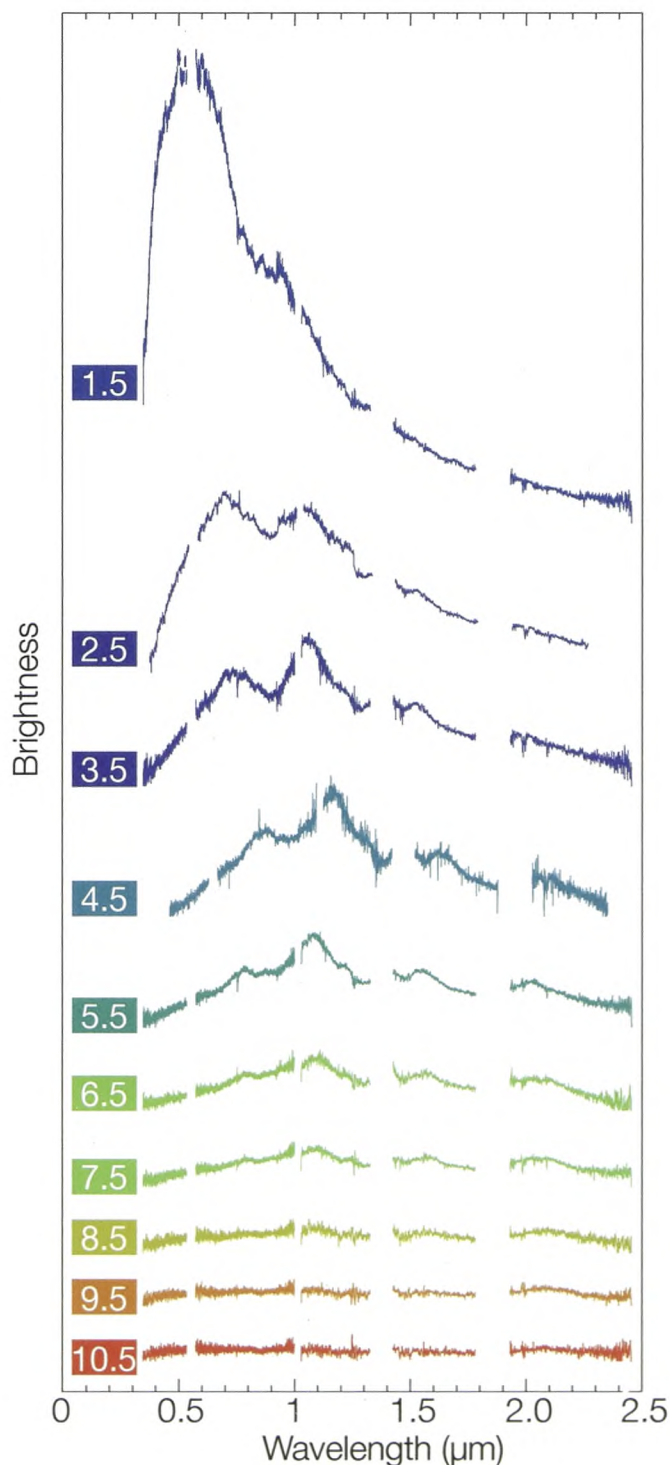
dele af neutronstjernerne være hurtigere end undvigelshastigheden for et binært neutronstjernesystem, hvorfor de vil blive slynget ud. Den store mængde, nu frie, neutroner vil med det samme blive absorberet af jern-laget og drive r -processen hele vejen til de tungeste grundstoffer. De nydannede, meget tunge grundstoffer vil så beta-henfalde og radioaktivt spalte sig under udsendelse af en meget stor mængde lys. De teoretiske modeller forudsiger, at den totale mængde lys, der bliver udsendt, vil være ca. 1000 gange så stor som den mængde lys, der bliver udsendt ved en normal nova. Deraf navnet kilonova – tusind gange så lysstærk som en nova. Det friske r -processyntetiserede materiale vil indeholde alle de tungeste grundstoffer i det periodiske system – inklusive guld, sølv og platin, samt radioaktive isotoper som uran og thorium.

Neutronstjernesammenstød har yderlige to fysiske signaturer, som var yderst eftersøgte. Hidtil havde man ikke nogle troværdige målinger af, hvilke systemer, der giver anledning til korte gammaglimt. Med den samtidige detektion, at et kort gammaglimt og tyngdebølger fra et neutronstjernesammenstød, var der endegyldigt bevis for, at i hvert fald nogle korte gammaglimt bliver lavet af neutronstjernesammenstød. Den anden signatur er den, at “lydstyrken” af tyngdebølger er bestemt af perioden af bølgen. Fra rødforskydningen af værtsgalaksen og denne periode kan vi ret præcist måle en absolut afstand – en måling, der er meget svær at lave, og som har stor betydning for vores estimater af universets alder og udvidelseshistorie.

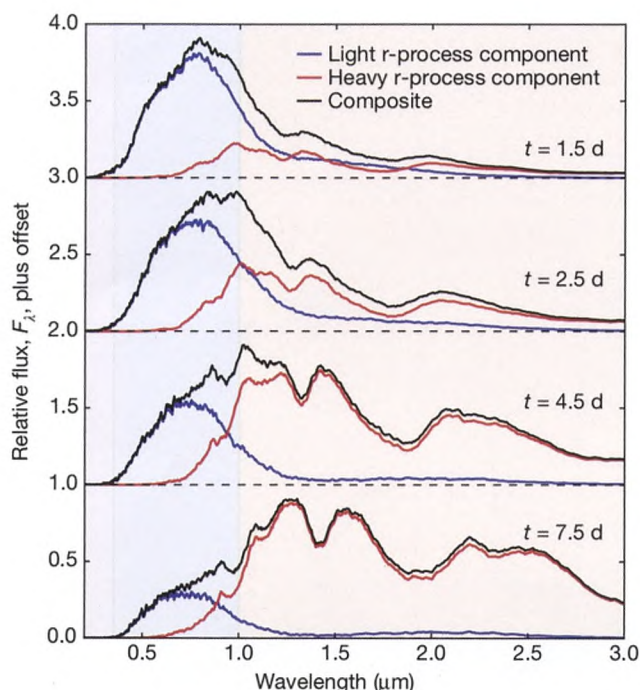
Observationer

Fordi neutronstjerne-sammenstødet var forudset med stor forventning, var det højt prioriteret på observationsprogrammer på teleskoper verden over. Derfor findes der et væld af observationer på tværs af hele det elektromagnetiske spektrum fra røntgenstråling til radiobølger af kilonovaen. Observationerne bekræfter dele af de teoretiske forestillinger om, hvordan sådan et fænomen måtte se ud, hvor især det optiske lys afslører, at de tungeste grundstoffer må være tilstede. Den mest detaljerede information fås fra et sæt spektroskopiske observationer i Chile taget med VLT-instrumentet X-shooter, der iøvrigt er delvist bygget i Danmark med støtte fra Carlsbergfondet. De er vist i figur 3. Spektrene viser, at kilonovaen udsendte en stor del af lyset i den ultraviolette del af spektret til at starte med, men som dagene gik, blev en større del af lyset udsendt ved længere bølgelængder. Dette er lige netop det tegn, vi ville forvente at se, hvis materialet, der udsender lyset, hovedsageligt består af r -procesgrundstofferne. Det er svært at identificere signaturer fra individuelle grundstoffer i spektrene, modsat hvad der er muligt i spektre af supernovaer. Grunden til dette er, at vi ikke har tilstrækkelig viden om overgangene i de grundstoffer, som udsender lyset, samt at udbredelseshastigheden af det lysende materiale nærmer sig 30 procent af lysets hastighed. Den enorme hastighed gør, at alle individuelle signaturer bliver spredt ud i bølgelængder på grund af hhv. rød- og blåforskydninger af lyset. Den store udbredelseshastighed af det lysende

materiale stemmer godt overens med modellerne, hvor de to neutronstjerner drejer rundt om hinanden med en hastighed, der er tæt ved lysets, kort før de brager sammen.



Figur 3. Spektre af kilonovaen AT2017gfo. Hvis man sammenligner spektrene med de teoretiske spektre i figur 4, kan man se, at den kvalitative overensstemmelse er stor. Alle spektrene har brede signaturer og en udvikling, hvor lyset med de korte bølgelængder forsvinder relativt til de længere. Vi kan også se, at der stadig er betydelige forskelle mellem de teoretiske og de observerede spektre. Spektrene her er præsenteret i [6] og [7].



Figur 4. Syntetiske spektre af en kilonova. De forskellige paneler viser tidsudviklingen, hvor man kan se, at en større del af lyset blev udsendt ved længere bølgelængder i de senere tider. Dette er, fordi de tungeste grundstoffer fortrinsvis absorberer det blå lys. Denne figur er fra [5].

Teoretiske modeller

Inden den første kilonova blev fundet, var der allerede udviklet detaljerede modeller for, hvordan de kunne se ud. Baseret på vores viden om atomfysik og simuleringer af sammenstødet mellem de to neutronstjerner var det muligt at forsøge at forudsige, hvordan lyset fra en kilonova ville se ud. Det er det, der er vist i figur 4. Her har man taget en mængde neutronstjernemateriale og ladet det henfalde ifølge lovene for kernefald.

Disse simuleringer tillader, at vi for ethvert tidspunkt kan finde grundstofsammensætningen og på baggrund af denne forsøge at forudsige, hvordan lyset fra en sådan sammensætning vil se ud. Ens for en kombination af de tunge grundstoffer er, at de absorberer forholdsvis mere af lyset med kortere bølgelængder. Det lys, der ikke kan slippe ud ved de kortere bølgelængder, slipper så ud ved længere bølgelængder, og kilonovaen vil derfor fremstå mere rød. Den store mængde blandede, radioaktive stoffer fra alle de tungeste grundstoffer i det periodiske system gør desuden, at lysstyrken skal falde på en meget karakteristisk måde – noget, vi ser reproduceret i målingerne fra kilonovaen.

Som man kan se ved at sammenligne de teoretiske spektre i figur 4 med de observerede spektre i figur 3, er der både ligheder og forskelle. Den overordnede struktur ser nogenlunde ens ud med spektre domineret af brede signaturer, der udviser en udvikling fra lys domineret af kortere bølgelængder til længere bølgelængder. Positionerne af de enkelte signaturer og deres relative størrelse er imidlertid ikke forudsagt korrekt. Dette skyldes primært, at de tungeste grundstoffer stadig er relativt uudforsket land, hvor antallet af overgange og

deres styrker stadig er ukendte. Dette skyldes primært, at udforskningen af dette er en meget dyr og besværlig affære.

Konklusioner

Denne detektion af tyngdebølger sammen med en kilonova er så betydningsfuld, fordi der med ét er blevet ført bevis for adskillige store, ubesvarede spørgsmål. Denne opdagelse har bidraget afgørende til forståelsen af, hvad oprindelsen til disse korte gammaglimt er (i hvertfald én kanal). Den viser også, hvor i hvert fald nogle af de tungeste grundstoffer bliver dannet. Dette betyder, at det guld, du måske har i dine tandfyldninger, på dine fingerringe, om din hals eller i din computer sandsynligvis er blevet syntetiseret på et eller andet tidspunkt, før Jorden blev skabt, i et sammenstød mellem to neutronstjerner.

Litteratur

- [1] Abbott, B. P. m.fl. (2017) GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, *Physical Review Letters*, 119, 161101.
- [2] Abbott, B. P. m.fl. (2017) Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *The Astrophysical Journal Letters*, 848:L12.
- [3] Lattimer, J. M. & Schramm, D. N. (1974) Black-hole-neutron-star collisions. *The Astrophysical Journal Letters*, 192:L145.
- [4] Berger, E. (2014) Short-Duration Gamma-Ray Bursts, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 52:43–105.
- [5] Kasen, D. m.fl. (2017) Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 80–84.
- [6] Pian, E. m.fl. (2017) Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 67–70.
- [7] Smartt, S. J. m.fl. (2017) A kilonova as the electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source, *Nature*, bind 551, nr. 7678, side 75–79.



Jonatan Selsing er postdoktoralforsker på The Cosmic Dawn Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og forsker i optiske modstykker til tyngdebølger.

Tre-foton-korrelationer

Af Nina Stiesdal, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet

Fotoner vekselvirker ikke under normale omstændigheder, men vi har i et nyligt eksperiment observeret ikke-trivielle korrelationer imellem tre fotoner. Denne korrelation, der kan tolkes som en foton-fotonvekselvirkning, laves ved at bruge ultrakolde Rydberg-atomer som medium. Ved at bruge Rydberg-atomer kan vi få et ensemble af kolde atomer til at opføre sig som et enkelt atom – et superatom – som kobler særligt stærkt til et lysfelt.¹

Lys og information

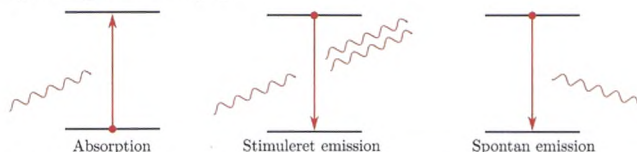
Lys består af partikler, fotoner. Når vi er udenfor på en lys sommerdag, bliver vores øjne ramt af millioner af milliarder af fotoner i sekundet. Derfor er det under normale omstændigheder hverken nødvendigt eller muligt at undersøge enkelt-fotoneffekter. Yderligere vekselvirker fotoner ikke med hinanden under normale omstændigheder.

Fordi fotoner ikke vekselvirker og bevæger sig med lysets hastighed, er de ideelle til at sende kvanteinformation. Det bliver fx relevant, når enkelte qubits i en kvantecomputer eller flere kvantecomputere skal kommunikere. I modsætning til almindelige computere, der arbejder med bits, der kan være enten 0 eller 1, arbejder kvantecomputere med qubits, der kan være i superpositioner af 0 og 1. Det betyder, at flere qubits, der interagerer, kan udforske mange mulige beregninger på samme tid.

Fotoners høje hastighed og den manglende vekselvirkning bliver imidlertid et problem, når information skal behandles videre. Derfor er der en stor interesse i konstruerede vekselvirkninger imellem fotoner til brug i kvantekommunikations- og kvanteinformationsteknologi [1, 2]. Det er det, vi arbejder med.

For at få fotoner til at vekselvirke er det nødvendigt med et medium, der kan facilitere vekselvirkningen. Sådan et medium kaldes et ikke-lineært medium, fordi mediets opførsel ikke afhænger lineært af antallet af fotoner, der sendes ind.

Ikke-lineære effekter for lys er velkendt fra mange felter. Man bruger fx ikke-lineære krystaller til at lave laserlys med bølgelængder, der ellers ikke er nemme at producere. Ikke-lineære effekter vil ofte afhænge af antallet af fotoner, og indtil nu har man kun kunnet observere ikke-lineære effekter på enkelt-fotonniveau i to systemer, nemlig i højfinesse-kaviteter og med Rydberg-atomer [3].



Figur 1. To-niveausystemet kan gennemgå tre fundamentale processer: absorption, stimuleret emission og spontan emission.

Det mest simple medium, man kan forestille sig, der kan opføre sig ikke-lineært, er et to-niveausystem. Et to-niveausystem er et modelsystem, som nu om dage kan

tilnærmes i mange fysiske systemer. To-niveausystemer blev allerede beskrevet af Einstein, og er et modelsystem for et atom. Systemet har, som navnet antyder, to energiniveauer, en grundtilstand og en exciteret tilstand. Man kan forestille sig de to tilstande som to elektron-orbitaler. Energiforskellen imellem de to tilstande giver systemets resonansfrekvens. Systemet kan exciteres fra grundtilstanden til den exciterede tilstand af en indkommende foton. Sandsynligheden for excitation er størst, hvis fotonens frekvens er tæt på resonansfrekvensen.

Når systemet er i den exciterede tilstand, vil det som regel henfalde spontant til grundtilstanden og udsende en foton med resonansfrekvensen. Der er imidlertid også en anden proces, der kan føre til henfald. Dette er stimuleret emission, en proces, som kan finde sted, hvis systemet er exciteret, og en foton med resonansfrekvensen “kommer forbi”. Under stimuleret emission henfalder systemet og udsender en foton, men denne foton er identisk med den foton, der “kom forbi”. Faktisk vil de to fotoner ikke være til at skelne fra hinanden.

Stimuleret emission i et to-niveausystem er et eksempel på, hvordan to ikke-korrelerede fotoner kan blive korrelerede, og man kan strække denne abstraktion til at sige, at fotonerne har vekselvirket, og at denne vekselvirkning er blevet medieret af to-niveausystemet.

Hvis man sender elektromagnetisk stråling ind på et to-niveausystem, kan man regne sig frem til, at man vil observere oscillationer i populationen af de to energiniveauer. Disse oscillationer kaldes Rabi-oscillationer. Systemet kan selvfølgelig kun være enten i grundtilstanden eller i den exciterede tilstand, men sandsynligheden for, at det befinder sig i fx den exciterede tilstand, vil oscillere.

Når man observerer Rabi-oscillationer i populationen af de to niveauer, betyder det også, at der må være en tilsvarende Rabi-oscillation i det lysfelt, man sender ind, da en excitation koster præcis én foton, og et henfald frigiver præcis én foton. Det er imidlertid ikke noget, man normalt observerer, fordi der under almindelige omstændigheder skal relativ høj intensitet til for at drive synlige Rabi-oscillationer. Hvis der er høj intensitet, bliver enkelt-foton-oscillationer usynlige i baggrunden. Hvordan oscillationerne ser ud, og dermed om oscillationerne er synlige, afhænger af de parametre, der gælder for systemet. Oscillationsfrekvensen er givet af Rabi-frekvensen, som beskriver koblingen mellem lysfeltet og systemet.

¹Denne artikel var en af vinderne i DFSs posterkonkurrence på årsmødet i år.

Rabi-frekvensen for et to-niveausystem afhænger af $g_0\sqrt{\mathcal{R}_{\text{in}}}$, hvor $\mathcal{R}_{\text{in}}$ er den indkommende fotonrate og g_0 er en koblingskonstant. Når man arbejder med enkelte fotoner bliver $\sqrt{\mathcal{R}_{\text{in}}}$ nødvendigvis meget lille. Derfor er det svært at observere Rabi-oscillationer med få fotoner, idet man skal have et system med en meget stor koblingskonstant.

I vores eksperiment udnytter vi netop Rydberg-atomer til at lave et medium, der opfører sig som et enkelt to-niveausystem, men som har en langt højere koblingskonstant end enkelte atomer.

Rydbergatomer

Når man bruger Rydberg-atomer til at lave ikke-lineær optik, benytter man sig af excitation af alkaliatomer til energitilstande med høj energi. Disse tilstande kaldes Rydberg-tilstande, og atomer med en elektron i en Rydberg-tilstand kaldes Rydberg-atomer. Rydbergatomer er rumligt meget store. Størrelsen afhænger af elektronens tilstand, men $10\ \mu\text{m}$ er meget almindeligt. $10\ \mu\text{m}$ er kæmpestort! Til sammenligning er et atom i grundtilstanden normalt i omegnen af $0.2\ \text{nm}$, mens E-coli-bakterier bliver omkring $2\ \mu\text{m}$ lange.

Rydberg-atomer er meget stabile, hvilket virker meget kontraintuitivt, da energigevinsten ved et henfald er meget høj. Henfaldsraten afhænger imidlertid af, hvor stort overlap, der er imellem elektronens bølgefunktion for den tilstand, den henfalder fra, og tilstanden, den henfalder til. For de højtliggende tilstande er der kun et meget lille overlap med grundtilstanden, og energigevinsten ved at henfalde til en nærliggende Rydberg-tilstand er meget lille.

Selv om Rydberg-atomerne henfalder langsomt, er de meget følsomme over for perturbationer med elektriske og magnetiske felter [4], netop fordi de er så store, at de kan have et stort dipolmoment. Det betyder også, at Rydberg-atomer er meget følsomme over for hinanden. De Rydberg-atomer, vi arbejder med, giver anledning til et van-der-Waals-potentiale for de omkringliggende Rydbergatomer. Det vil sige, at to Rydberg-atomer vil frastøde hinanden på korte afstande.

Sagt på en anden måde vil et Rydberg-atom ændre energierne af Rydberg-tilstandene hos omkringliggende atomer. Man kan derfor tale om en blokadesfære omkring et Rydberg-atom. Grundtilstandsatomer inden for blokadesfæren kan ikke exciteres til en Rydberg-tilstand med den samme laser, som exciterede det første grundtilstandsatom til en Rydberg-tilstand. Det kan de ikke, fordi deres energiniveauer er blevet flyttet så meget, at fotonerne er ude af resonans med overgangen.

Hvor langt denne blokaderadius rækker, afhænger dels af Rydberg-tilstanden, der exciteres til, og dels af Rabi-frekvensen for det drivende felt. I vores tilfælde er vores blokaderadius mellem 10 og $20\ \mu\text{m}$, afhængigt af hvor mange fotoner vi sender ind.

Der bliver forsket meget i Rydberg-atomer, og Rydberg-atomer er blevet brugt til at realisere en lang række af logiske værktøjer, der afhænger af enkelte fotoner. Det er fx fasegates og -kontakter, transistorer og absorbatoren for bare at nævne nogle få, og Rydberg-

atomer kan bruges til at lagre fotoner og til at undersøge entanglement både mellem atomer, mellem fotoner og atomer, og mellem fotoner.

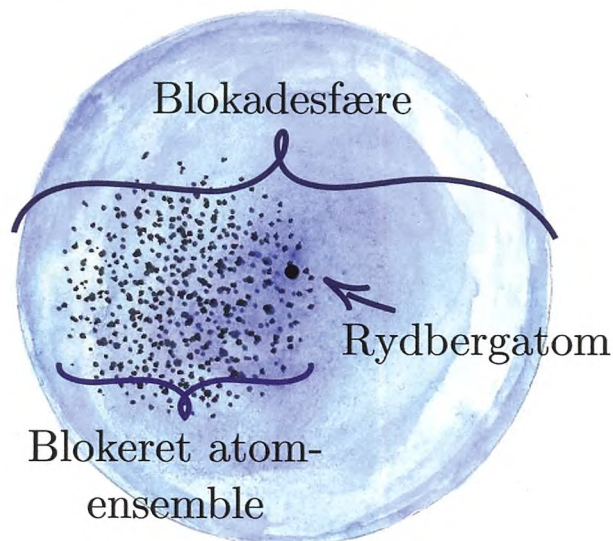
Superatomer

Ét system, man kan realisere med Rydberg-blokaden, er et Rydberg-superatom. Et superatom er et ensemble af atomer, der kollektivt opfører sig som et enkelt atom. Det er netop et Rydberg-superatom, som vi bruger i vores eksperimenter. Vi laver et superatom ved at holde et ensemble af N -atomer inden for det volumen, der er defineret af en Rydberg-blokaderadius for en specifik Rydberg-tilstand.

Fordi hele atomensemblet er inden for denne blokadesfære, kan der kun være en enkelt excitation i systemet – så snart et atom er exciteret, er der ingen af de andre atomer, der er i resonans med lysfeltet.

Selv om systemet kun kan have en enkelt excitation, bidrager alle atomerne inden for den givne blokaderadius til excitationsstyrken. Det betyder, at superatomets kobling til lysfeltet bliver meget stærkere end koblingen for et enkelt atom. For et superatom bestående af N -atomer, bliver koblingen mellem lyset og superatomet en faktor $\sqrt{N}$ større end for et enkelt atom [5]! Den forstærkede kobling til lysfeltet gør, at vi kan observere ændringer i lysfeltet på selv enkelt-fotonniveau.

Rydberg superatom



Figur 2. Illustration af et Rydberg-superatom. Et atomensemble kan opføre sig som et superatom, når det er så småt, at alle atomer er inden for en blokadesfære uanset hvilket af atomerne i ensemblet, der exciteres til den relevante Rydberg-tilstand.

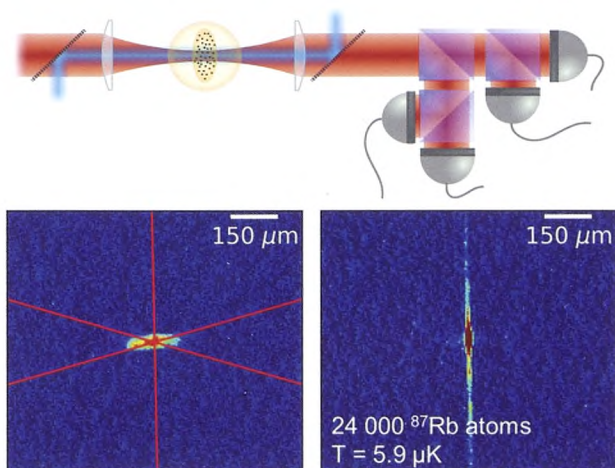
Vores opstilling

Når vi laver et superatom i laboratoriet, bruger vi rubidium-87 (^{87}Rb), som vi har i et vakuumkammer. Vi starter ved stuetemperatur og et tryk på $2 \cdot 10^{-10}$ mbar. Et tryk så lavt finder man ellers kun i det interstellare rum. På grund af vores valg af laserfrekvenser køler og fanger vi kun ^{87}Rb i vores system.

Fra denne meget tynde gas af rubidium ved stuetemperatur laver vi et lille atomensemble ved hjælp

af laserkøling og optiske pincetter. Vi er selvfølgelig interesseret i et atomensemble, der er mindre end blokaderadiusen i den retning, vi sender lys ind. I denne retning er vores ensemble $6,5 \mu\text{m}$ ($1/e$ af den gaussiske tæthedsfordeling). Med laserkøling, som er nødvendig for at få stor Doppler-udbredelse i atomernes energiniveauer, kan vi køle det lille ensemble til en temperatur på omkring $5,9 \mu\text{K}$, hvilket er omtrent en halv milliard gange koldere end temperaturen i det ydre rum!

Med parametrene, som vi vælger for vores lasere, får vi en Rydberg-blokaderadius i størrelsesordenen $15 \mu\text{m}$, hvilket er væsentligt større end dimensionen af vores probe-stråle og ensemblet langs denne. Derved har vi realiseret et Rydberg-superatom, da hele systemet er inden for det volumen, en blokaderadius definerer.



Figur 3. En skitse af vores opstilling og to billeder af vores atomensemble. Kun laserne, der bruges til at undersøge enkelt-fotoner, er tegnet ind på skitsen. Det er vist, hvordan lyset detekteres på fire enkelt-fotondetektorer. Den lille klump atomer, der ses på de to billeder i bunden, er kolde atomer i en laserfælde (se teksten).

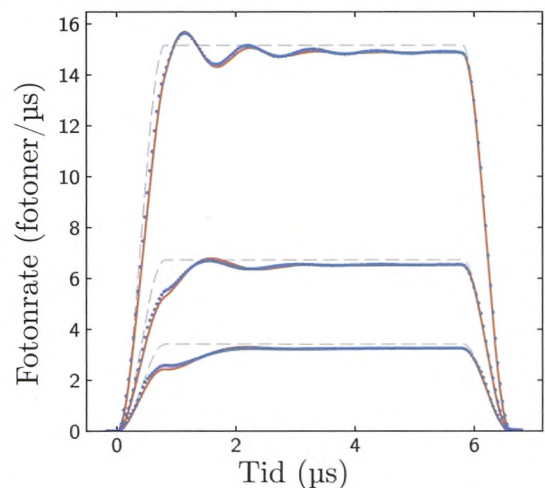
For at lave og undersøge vores superatom sender vi en svag lyspuls, der kan excitere et atom til Rydberg-tilstanden igennem atomensemblet. Efterfølgende detekteres det svage lys på fire enkelt-fotondetektorer, og vi kan begynde at undersøge, om vi har korrelationer i lyset efter superatomet. Til de forsøg, der vises her, har vi brugt hvert atomensemble til at lave 1.000 målinger. Efter disse 1.000 målinger slukker vi de lasere, vi bruger til at køle og fastholde vores atomer med. Så fordampes atomensemblet, og vi kan lave referencemålinger. Bagefter kan vi loadet et nyt ensemble. Et enkelt datasæt er baseret på omkring 38.000 atomensembler, som vi har foretaget 1000 målinger på! Det lyder helt vildt, men man er nødt til at tage så meget data for at få ordentlig statistik, da de effekter, vi kigger efter, er meget små og hurtigt forsvinder i støj. Heldigvis er vores eksperiment meget hurtigt, så det tager kun en lang arbejdsdag at tage et datasæt.

Figur 3 viser en forsimplet skitse af vores opstilling og billedgengivelse af vores atomensemble i den optiske pincet. Til højre er vores optiske pincet lavet af to krydsede laserstråler, og til venstre er atomensemblet begrænset yderligere med en ekstra laserstråle. På den måde kan vi få vores atomensemble mindre end en

blokaderadius. Linjerne tegnet oven på figuren viser laserstrålerne.

Resultater

Det gennemsnitlige signal på en af de fire enkelt-fotondetektorer er vist på figur 4. Figuren viser målinger for tre forskellige fotonrater, nemlig 3,4, 6,7 og $15,2$ fotoner pr. μs . De grå, stiplede linjer viser referencesignalet. Referencesignalet tager vi uden et superatom, og det betyder, at referencesignalet viser det indkommende signal. Prikkerne er de målte værdier, når et superatom er tilstede. Man ser, at superatomet introducerer Rabi-oscillationer i fotonraten.

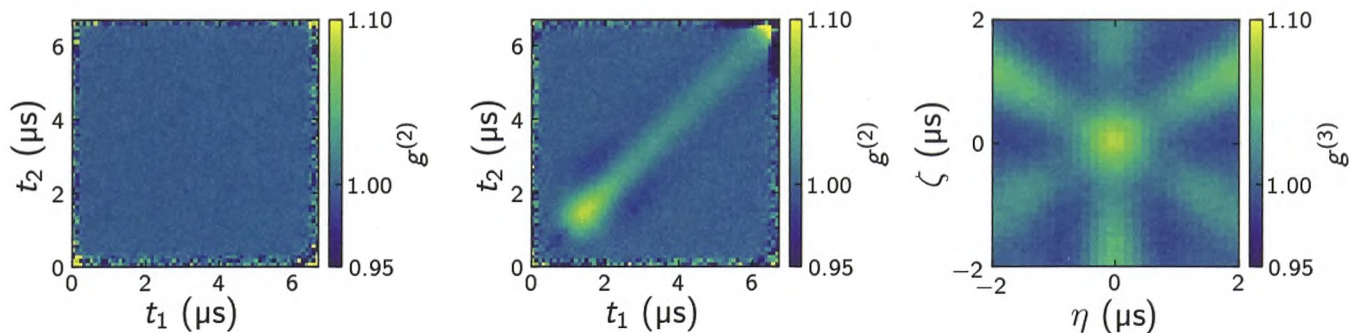


Figur 4. Rabi-oscillationer i fotonraten for tre forskellige indkommende fotonrater (se teksten).

Som sagt er Rabi-oscillationer normalt noget, man ser i tilstandspopulationen i et to-niveausystem, men her observerer vi dem altså i antallet af fotoner. Det er ikke overraskende, at oscillationer i populationen af de to tilstande hører sammen med oscillationer i antallet af fotoner, da en enkelt foton absorberes for at excitere systemet. Det er dog ikke noget, man normalt observerer eller overhovedet taler om, eftersom det elektriske felt, der driver to-niveausystemet normalt antages at være klassisk, og dermed er fluktuationer på enkelt-fotonniveau ikke målbare.

Her er koblingen imellem to-niveausystemet og det elektriske felt imidlertid så stærkt, at vi kan nøjes med så få fotoner i vores foton-puls, at enkelt-fotonmodulationer kan måles. Vi kan måle de tilsvarende Rabi-oscillationer i Rydberg-populationen – det vil sige den exciterede tilstand af to-niveausystemet. Den er ikke vist her. Eftersom Rabi-frekvensen afhænger af fotonraten, er oscillationsfrekvensen størst for den højeste fotonrate.

Signalet vist på figur 4 er signalet på en enkelt-fotondetektor. For at undersøge korrelationer imellem fotoner, sammenholder vi resultaterne fra flere forskellige detektorer. Man måler den slags korrelationer med korrelationsfunktionen, som man i princippet kan udregne til arbitrær orden. Man bruger tit andenordenskorrelationsfunktionen – som måler korrelationer mellem op til to fotoner – som mål for, om en lyskilde er klassisk eller ikke-klassisk, og om man fx har realiseret en enkelt-fotonkilde [3].



Figur 5. Andenordens- og tredjeordenskorrelationsfunktion. Figuren til venstre, samt den midterste figur, viser andenordenskorrelationsfunktioner for en fotonrate på 3,4 fotoner pr. μs . De absolutte tider på to enkelt-fotondetektorer afsat på akserne, og værdierne af andenordenskorrelationsfunktionssignalet er givet ved farvekoden. Figuren til venstre viser referenceværdien, det vil sige den målte korrelationsfunktion, når der ikke er et superatom, mens den anden figur viser andenordenskorrelationsfunktion med et superatom. Figuren længst til højre viser tredjeordenskorrelationsfunktion for samme fotonrate.

Det lys, vi sender ind i vores forsøg, er kohærent laserlys. Andenordenskorrelationsfunktion for kohærent lys er 1 overalt, fordi fotonerne ikke er korrelerede. Det er det, vi observerer for vores reference-signal. Når vi sender lys igennem et superatom, ser vi derimod korrelationer, der er forskellige fra 1. To-fotonkorrelationsfunktion for et Rydberg-superatom er vist på figur 5. Figuren til venstre viser reference-signalet. Lyset er ikke korreleret, og derfor har signalet samme værdi over det hele. Det midterste plot på figur 5 viser andenordenskorrelationsfunktion for fotonrate 3,4 fotoner pr. μs .

På figuren ser man, at der er en stribe langs $t_1 = t_2$, hvor det er mere sandsynligt at observere to samtidige fotoner, end hvis fotonerne var tilfældigt fordelt. På hver side af denne linje er der linjer, hvor det er mindre sandsynligt at observere to samtidige fotoner. Det kan forstås således, at fotonerne i den indkommende puls bliver omorganiseret af superatomet, så de er mere tilbøjelige til at forlade systemet samtidigt end med et lille tidsinterval imellem dem.

Da vi optager signaler på fire enkelt-fotondetektorer, er det også muligt at undersøge korrelationer mellem mere end to fotoner. I forbindelse med mit speciale undersøgte vi korrelationer mellem tre fotoner.

Dette er imidlertid en smule mere besværligt end to-fotonkorrelationen, idet man får en tredimensional matrix, hvor hvert punkt i absolut tid på de tre detektorer, (t_1, t_2, t_3) , har tilskrevet en værdi for $g^{(3)}$. Dette tredimensionelle system er svært at plote direkte, og derfor transformerer vi til Jacobi-koordinater, hvor de tre tidskoordinater udskiftes med et massemidtpunktskoordinat og to relative koordinater.

Et eksempel på tredjeordenskorrelationsfunktion er vist længst til højre på figur 5. Her ser man, at vi ikke plottes i absolut tid, men med η og ζ , som er relative koordinater i forhold til et massemidtpunktskoordinat.

Tredjeordenskorrelationsfunktionen indeholder imidlertid information om korrelationer mellem op til tre partikler, det vil sige ikke kun om tre korrelerede fotoner, men også om to korrelerede fotoner, der ankommer samtidig med en tredje tilskuerfoton. Signalet fra rene tre-fotonkorrelationer er meget svagt i forhold til signalet fra to-fotonkorrelationer. Derfor viser vi ikke

tredjeordenskorrelationsfunktion, men derimod den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion. Den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion får man ved at trække andenordenskorrelationsfunktionerne fra tredjeordenskorrelationsfunktion. På den måde ser vi rene tre-fotonkorrelationer.

Figuren til højre i figur 6 viser den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion for 15,2 fotoner pr. μs . Man ser en struktur af sekskantede ringe af højere og lavere sandsynlighed for, at tre fotoner ankommer samtidig. Denne struktur er meget anderledes end strukturen for tredjeordenskorrelationsfunktion, fordi tredjeordenskorrelationsfunktionens primære bidrag kommer fra korrelationer imellem to fotoner. Her viser vi resultater for en højere fotonrate end på figur 5, fordi det giver et bedre indtryk af strukturen i vores resultater. For en lavere fotonrate ser man ikke lige så mange oscillationer, og resultaterne bliver visket mere ud.

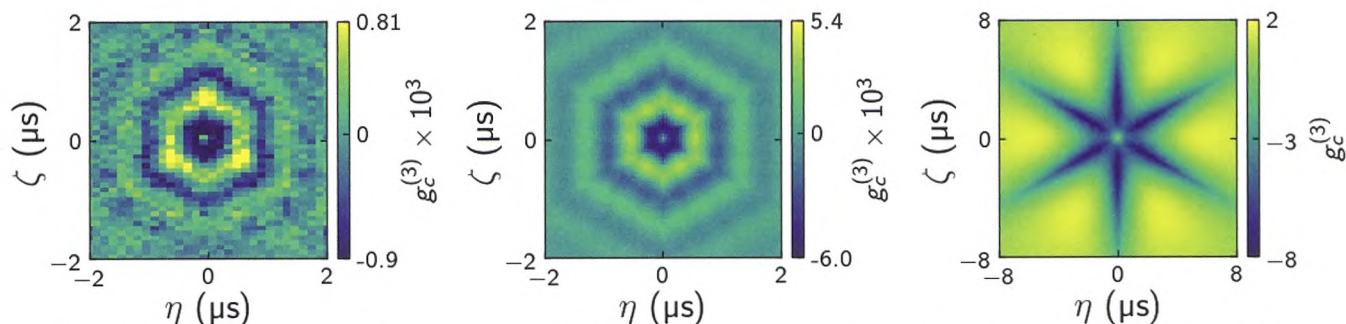
Den midterste figur på figur 6 viser simulerede resultater for de samme parametre, som vi bruger i eksperimentet. De simulerede figurer er baseret på en model for superatomet, som er blevet udviklet i samarbejde med en teoretisk gruppe på Universitt Stuttgart [5]. Den simulerede figur vist her er venligst udlånt af Jan Kumlin fra Universitt Stuttgart.

Umiddelbart er der god kvalitativ overensstemmelse mellem de simulerede resultater, som teorien forudsiger, og de eksperimentelle resultater. Der er dog en forskel i skala, som til dels skyldes detektionseffektiviteten for enkelte fotoner i eksperimentet. Den uperfekte detektion giver anledning til en udmring af kontrasten og forklarer den kvantitative uoverensstemmelse.

Fordi signalet i den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion er så småt, anser vi det for en eksperimentel bedrift, da den nødvendige signal-to-noise-ratio kræver et meget stabilt setup.

Mikroskopisk forståelse

For at forstå hvilken mekanisme, der giver anledning til, at tre fotoner bliver korrelerede, har vores samarbejdspartnere fra Universitt Stuttgart analytisk lst en simplificeret model for vores system for en tre-foton-tilstand. Den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion for dette simplificerede system er vist på



Figur 6. Den sammensatte tredjeordenskorrelationsfunktion. Figuren til venstre viser tredjeordenskorrelationsfunktionen for 15,2 fotoner pr. μs , som vi måler den fra eksperimentet. Den midterste figur viser simulerede resultater for de samme parametre. På akserne ser man, at vi har transformeret til Jacobi-koordinater og ikke længere har absolutte tider, men derimod to relative koordinater. Værdien af tredjeordenskorrelationsfunktionssignalet er givet ved farvekoden. Den store forskel i skala skyldes, at vi ikke har perfekt detektion på vores enkelt-fotondetektorer. Figuren til højre viser den teoretiske udregning for et idealiseret system, der beskriver et to-niveausystem uden de tabsmekanismer, vi skal tage højde for i det eksperimentelle system. Den teoretiske model har en top af høj sandsynlighed i midten, som forklares med en bunden tilstand for tre fotoner.

figur 6 til højre. For denne løsning viser det sig, at den teoretisk sammensatte korrelationsfunktion har visse elementer tilfælles med den simulerede og den eksperimentelt målte sammensatte korrelationsfunktion, nemlig en central top af højere sandsynlighed for samtidige fotoner. Denne top er primært forårsaget af en bunden tilstand af tre fotoner.

Det kan lyde mærkeligt, at et enkelt to-niveausystem kan give anledning til det, teoretikerne kalder en bunden tilstand for tre fotoner, men det simpleste billede, man kan forestille sig, er, at sandsynligheden for stimuleret emission afhænger af, hvor mange fotoner, der er tilstede. Altså, hvis to fotoner er tilstede er sandsynligheden for emission højere, end hvis en enkelt er tilstede. Stimuleret emission kan dermed forklare, hvordan tre fotoner kan være korrelerede.

For kort at opsummere: vi har i et eksperiment undersøgt, hvad der i princippet er et to-niveausystem. To-niveausystemet er det mest simple system, der kan korrelere fotoner, men vi observerer alligevel noget, der for os er overraskende og spændende, nemlig korrelationer mellem mere end bare de to fotoner, man ellers altid forbinder med to-niveausystemet.

Det næste projekt, vi har i tankerne, er, at man kan lave et system med flere superatomer i serie. Vi er interesserede i, hvordan superatom nummer to ændrer den allerede ikke-trivielle lyspuls, der kommer ud af superatom nummer et. Da man ikke vil kunne sige, hvor ændringer i lyspuls kommer fra, vil det også være en måde at realisere sammenfiltrering af vores atomensembler.

Ud over, at man kan bruge vores superatom og Rydberg-atomer generelt til at undersøge fundamentale egenskaber af to-niveausystemet, kan man også forestille sig mange andre anvendelser, fx inden for behandling af kvanteinformation. Det er allerede blevet vist, at et superatom kan bruges som foton-fratrækker, det vil sige, at superatomet altid absorberer en enkelt foton uanset hvor mange fotoner, man sender igennem systemet [6].

I dag sendes næsten al information gennem lyslederkabler. Det kan være, at vi i fremtiden kommer til at sende en lille del som lys, men med kvanteinformation indkodet i fasen på enkelte fotoner, og det kan være, at Rydberg-atomer på det tidspunkt spiller en rolle som et

værktøj, der kan give os kontrol over selv det mindste lysglimt!

Litteratur

- [1] H. J. Kimble. The quantum internet. *Nature*, 453(7198):1023–1030, jun 2008.
- [2] V. Giovannetti. Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit. *Science*, 306(5700):1330–1336, nov 2004.
- [3] M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, and S. V. Polyakov. Invited Review Article: Single-photon sources and detectors. *Review of Scientific Instruments*, 82(7):071101, jul 2011.
- [4] Thomas F. Gallagher and Cambridge University Press. *Rydberg Atoms*. Cambridge University Press, 1994.
- [5] Asaf Paris-Mandoki, Christoph Braun, Jan Kumin, Christoph Tresp, Ivan Mirgorodskiy, Florian Christaller, Hans Peter Büchler, and Sebastian Hofferberth. Free-space quantum electrodynamics with a single rydberg superatom. *Phys. Rev. X*, 7:041010, Oct 2017.
- [6] C. Tresp, C. Zimmer, I. Mirgorodskiy, H. Gorniaczyk, A. Paris-Mandoki, and S. Hofferberth. Single-photon absorber based on strongly interacting rydberg atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 117:223001, Nov 2016.



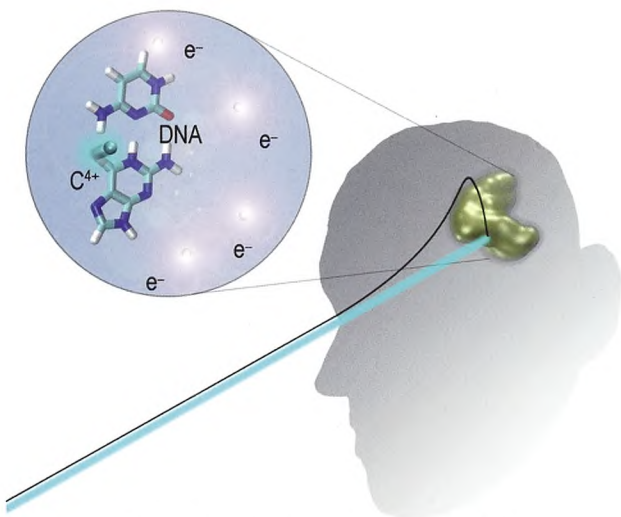
Nina Stiesdal har netop færdiggjort sit speciale i fysik ved SDU, hvor hun har arbejdet med ikke-lineær kvanteoptik, og i september startede hun som ph.d.-studerende på SDU. Hun er tidligere redaktør på studentermagasinet for Fysik, Kemi og Farmaci på SDU.

Kvantemekanisk simulering af elektrondynamikken i ionstrålekræftterapi

Af Adrian Bøgh Salo, Andreas Alberg-Fløjborg og Ilia A. Solov'yov, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet

Ionstrålekræftterapi vinder kraftigt frem som behandlingsform. Selvom behandlingen giver gode resultater og de kliniske effekter er veldokumenterede, er der stadig mangler i forståelsen af den underliggende fysik. Det komplicerede ligger i, at man for at kunne give en akkurat beskrivelse af hele processen er nødt til at tage højde for effekter på mange forskellige niveauer, fra kvantemekanisk skala til effekter på celler og væv. Vi har simuleret nogle af de kvantemekaniske processer, der påvirker en kræftcelles DNA. Artiklen her giver et kort overblik over relevansen og vigtigheden i at studere de kollisionsprocesser, der er en del af IBCT, og hvordan de grundlæggende processer kan modelleres med tidsafhængig kvantemekanik.¹

Strålebehandling mod kræft begyndte så småt for over et århundrede siden med røntgenstråler, som har vist sig at være et effektivt værktøj til bekæmpelsen af sygdommen. I slutningen af 1950'erne begyndte de første forsøgsvisse behandlinger med protonstråler til behandling af kræft, men først i 1990 blev et anlæg taget i brug i et hospitalsmiljø. Det har med tiden vist sig, at tungere ioner kan være en fordel at bruge, og kulstofkerner har vist sig at være velegnede. I Danmark er der ved at blive etableret et partikelterapianlæg i Århus under navnet Dansk Center for Partikelterapi (DCPT). Alt dette kan man læse mere om i Kvant nr. 2 fra 2016, som var et temanummer om hospitalsfysik [1].



Figur 1. En stråle af kulstofioner rammer en kræfttumor i hjernen. På mikroskopisk plan rammer en kulstofkerne et stykke DNA fra kræfttumoren, hvorved en masse elektroner slås fri, hvilket giver anledning til en kaskade af følgevirkninger, som leder til kræftcellens død. Den sorte linie illustrerer Bragg-kurven som beskriver energiafsættelsen langs strålens bane.

I de seneste år er interessen for ionstrålekræftterapi (fork. IBCT fra engelsk *Ion Beam Cancer Therapy*) taget til i forbindelse med, at dens effektive virkning på visse kræfttyper, fx hjernetumorer, er blevet mere åbenbar, og teknologien efterhånden er modnet. Det, der adskiller IBCT fra traditionel strålebehandling, er den måde, hvorpå energien fra strålen afsættes i vævet.

IBCT anvender typisk en stråle af protoner eller kulstofkerner i modsætning til fotoner. Den afsatte energi ved IBCT følger Bragg-kurven, vist som en sort kurve med top tæt ved enden (figur 1). Det vil sige, at hovedparten af energien afsættes mod enden af partiklens bane igennem vævet, hvorefter energiafsættelsen stopper helt [2]. I modsætning til dette er energien, der afsættes ved brug af fotoner, størst ved det yderste væv, hvorefter dosis falder jævnt. Det er derfor med IBCT meget nemmere at aflevere en præcis mængde energi til en tumor og samtidig passe på skrøbeligt omkringliggende væv.

På mikroskopisk niveau ved vi, at kulstofkernerne fra strålen kolliderer med molekyler i kræftcellerne. Hovedparten af skaden til kræftcellen forårsages af sekundære elektroner eksempelvis produceret ved kollision mellem kulstofkernerne og vandmolekyler. Nogle af kulstofkernerne vil dog kolliderer med DNA i kræftcellen, og vi har i dette projekt undersøgt, hvad der sker på kvantemekanisk niveau under sådan en kollision. Vi ved, at en stor del af den skade, IBCT forårsager på kræftceller, er resultat af frie elektroner med høj energi [3, 4]. Det er derfor vigtigt og relevant at undersøge elektronernes dynamik for at forstå oprindelsen til den kaskade af effekter, der i sidste ende fører til kræftcellens død [5]. Det er her, kvantemekanikken kommer os til hjælp, og ved hjælp af supercomputeren Abacus 2.0 har vi opsat en række simuleringer, som afklarer, hvordan elektronerne (i fx kræftcellens DNA) reagerer på kollisionen.

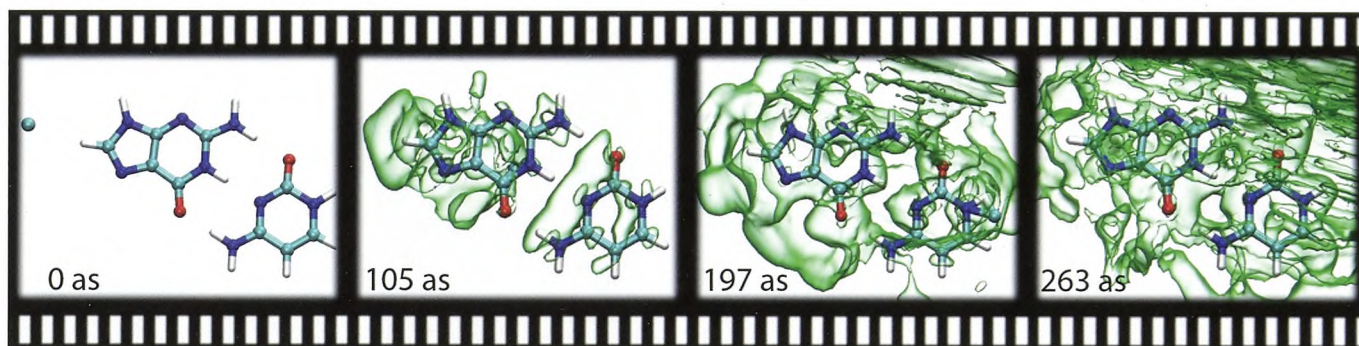
Computersimulering af kvantemekanik

Vi har i vores undersøgelse brugt et stykke DNA bestående af et enkelt basepar indeholdende cytosin og guanin og brugt en kulstofion med kraftig positiv ladning som projektil, så det stemmer overens med en realistisk situation ved IBCT. Det vil sige, at den proces, vi modellerer, er en kollision mellem en C^{4+} -ion og et cytosin-guanin-basepar [6].

Kvantemekanik tager udgangspunkt i Schrödinger-ligningen,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

¹Denne artikel var en af vinderne i DFSs posterkonkurrence på årsmødet i år.



Figur 2. Videoillustration af en eksplosiv kollision mellem C^{4+} og cytosin-guanin-basepar. Den grønne sky beskriver skyen af elektroner, som rives løs fra baseparret i løbet af kollisionen. Den illustrerede proces er ovre i løbet af nogle få hundrede attosekunder (as). Et attosekund svarer til 10^{-18} sekunder.

som beskriver, hvordan kvantepartikler, såsom elektroner, opfører sig. I bund og grund handler simuleringen om at løse denne ligning for alle elektronerne i systemet, og på denne måde kan vi beskrive den tidlige udvikling af kollisionen og dermed undersøge elektroner udbredelse i forløbet.

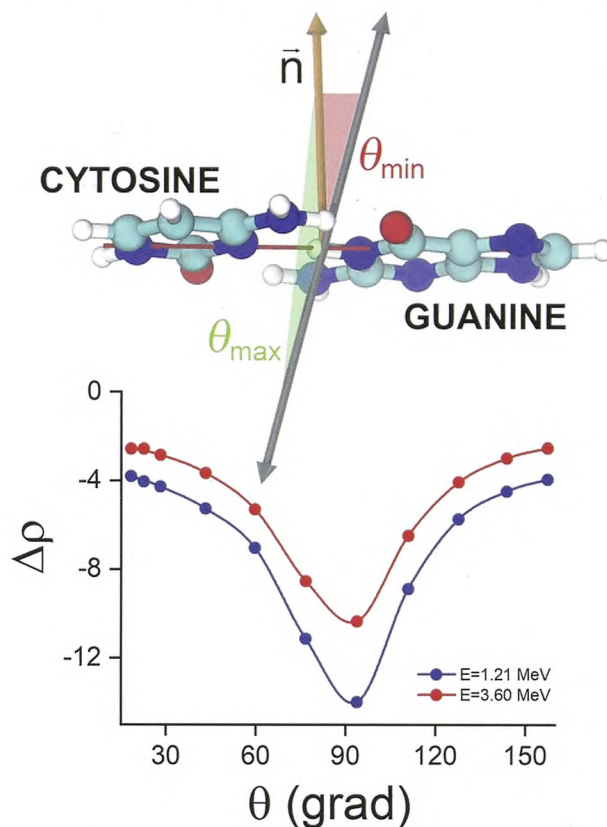
Den specifikke metode, vi har brugt til at løse ligningerne for elektronernes bevægelse, er det, man kalder tæthedsfunktionalteori (engelsk density functional theory, fork. DFT [7, 8]), som er en metode, der bruger den rumligt afhængige elektrontæthed til at beskrive systemer med mange elektroner. Det er en fordelagtig metode til at simulere systemet, da beregningerne bliver mindre krævende end ved at løse Schrödingerligningerne.

Beregningerne begrænses til et rumligt område, der lige akkurat er stort nok til at indeholde baseparret og projektilet i sin bane gennem kollisionsprocessen. Systemet er således blevet simuleret i en kasse, hvor ligning (1) løses i hvert punkt i kassen.

Resultaterne fra simuleringerne blev undersøgt af et analyseprogram, som vi udviklede specielt til formålet, så der kunne holdes øje med udviklingen af elektrontætheden omkring udvalgte dele af systemet. Resultatet fra en af simuleringerne er illustreret på figur 2, hvor den grønne sky beskriver skyen af elektroner, som bliver revet løs i løbet af kollisionen. Figuren viser, at effekten af kollisionen eksplosivt skyder elektroner ud af molekylet i løbet af nogle få hundrede attosekunder.

For at kunne danne et komplet billede af, hvordan en kollisionsproces forløber, er vi nødt til at tage højde for, at baseparret kan vendes på mange forskellige måder, og at kulstofkernen kan ramme andre steder end blot i centrum af baseparret. Derfor blev der kørt 50 simuleringer sideløbende, hvor der mellem hver simulering var ændret en lille smule på vinklen mellem kulstofkernens bane og baseparret, samt hvor på molekylet projektilet ville ramme. Figur 3 viser effekten af at beskyde baseparret fra forskellige vinkler, θ , med to forskellige værdier for den kinetiske energi af kulstofkernen, specifikt 3.60 MeV (rød) og 1.21 MeV (blå). Vinklen θ defineres som vinklen mellem normalvektoren for planet, som baseparret ligger i, og projektilets bane. Den største effekt blev observeret ved $\theta = 90^\circ$, hvilket svarer til, at kulstofkernen rammer baseparret

langs dets plan og derfor har en lang bane igennem målet. Mængden af "elektrontæthed", der forsvinder fra baseparret i løbet af kollisionen, angives med $\Delta\rho$, og ud fra kurverne vil man så derfor forvente, at der vil blive slået op mod 13 elektroner løs ved en sådan kollision.



Figur 3. Effekten af at rotere cytosin-guanin-parret har markant indflydelse. Når vinklen mellem kulstofkernens bane og baseparret justeres, har det stor indflydelse på, hvor mange elektroner, der bliver slået fri.

Det går meget godt i tråd med Bragg-kurven, da en kulstofkerne har en kinetisk energi på omtrent 3.6 MeV lige inden Bragg-kurvens top, mens en kinetisk energi på 1.21 MeV passer på en kulstofkerne omkring Bragg-kurvens toppunkt (se figur 1).

Perspektivering

Med vores simuleringer kan vi forhåbentlig bidrage til en større generel forståelse af sammenhængen mellem

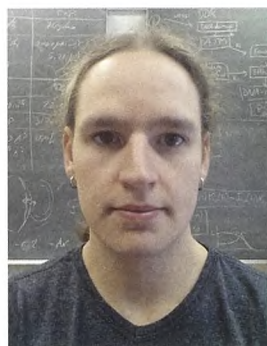
alle de processer, der er en del af IBCT. Vi har meget konkret vist, at tilstedeværelsen af en kraftigt ladet kulstofion forstyrrer baseparret nok til, at der er grobund for dannelsen af frie elektroner, som kan vekselvirke med den indeholdende celle, og derved starte den kaskade af effekter, der i sidste ende fører til cellens død. Vi har vist, at orienteringen af baseparret kan have en stor indflydelse på mængden af elektroner, der frigøres, og der er derfor behov for yderligere teoretiske og beregningsmæssige studier, så de opnåede resultater kan kobles sammen med eksisterende teoretiske modeller, samt fysiske observable, der kan måles eksperimentelt.

Det arbejder vi på allerede nu, hvor vi bruger data fra simuleringerne til at beregne tværsnittet for kollisionprocessen og derved komme tættere på at give et tal på, hvor mange elektroner man gennemsnitligt kan forvente at slå fri per kollision.

I sidste ende er målet at bidrage til, at hospitalsfysikerne kan beregne dosis endnu mere præcist, så behandlingerne kan blive så skånsomme og effektive som muligt.

Litteratur

- [1] Christian Skou Søndergaard. Strålebehandling med partikler. *Kvant*, 27(2):28–31, 2016.
- [2] Pernille Bræmer-Jensen and Ulrik I. Uggerhøj. Protonterapiens fysik – en kort udledning af bragg-kurven og dens top. *Kvant*, 28(2):13–18, 2017.
- [3] William P. Levin, Hanne Kooy, Jay S. Loeffler, and Thomas F. DeLaney. Proton beam therapy. *British Journal of Cancer*, 93:849–854, 2005.
- [4] Eugene Surdutovich and Andrey V. Solov'yov. Multi-scale approach to the physics of radiation damage with ions. *The European Physical Journal D*, 68:353–383, 2014.
- [5] Eugene Surdutovich, Oleg I. Obolensky, Emanuele Scifoni, Igor Pshenichnov, Ivan Mishustin, Andrey V. Solov'yov, and Walter Greiner. Ion-induced electron production in tissue-like media and dna damage mechanisms. *The European Physical Journal D*, 51:63–71, 2009.
- [6] Adrian Bøgh Salo, Andreas Alberg-Fløjborg, and Ilia A. Solov'yov. Free-electron production from nucleotides upon collision with charged carbon ions. *Phys. Rev. A*, 98:012702, 2018.
- [7] Miguel A. L. Marques, Neepta T. Maitra, Fernando M. S. Nogueira, Eberhard K. U. Gross, and Angel Rubio. *Fundamentals of Time-Dependent Density Functional Theory*, volume 837. Springer, 2012.
- [8] Erich Runge and Eberhard K. U. Gross. Density-functional theory for time-dependent systems. *Physical Review Letters*, 52:997–1000, 1984.



Adrian B. Salo specialestuderende på SDU med Ilia Solov'yov som vejleder, og beskæftiger sig med udvikling og anvendelse af software til kvantemekaniske beregninger på biomolekyler, samt analyse af store datasæt.



Andreas Alberg-Fløjborg er specialestuderende på SDU med Ilia Solov'yov som vejleder, og beskæftiger sig med simulering af kollisioner mellem ioner og cellemembraner, som eksemplificeres i de tidlige faser af ionstråleterapi.



Ilia Solov'yov er lektor ved SDU med en baggrund i teoretisk og beregningsmæssig fysik og biofysik. Hans gruppe (quantbiolab.com) beskæftiger sig med simuleringer på mange niveauer for at undersøge teori og egenskaber i biomolekyler og uorganiske intelligente materialer.

PFEIFFER **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumpe
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
 Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
 www.pfeiffer-vacuum.com

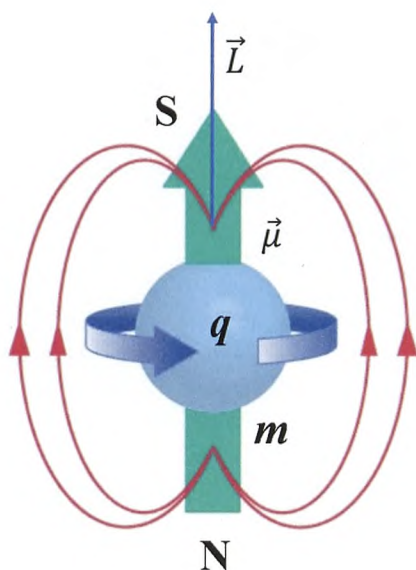
G-2-eksperimentet – den mest nøjagtige test af kvanteelektrodynamikken

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

Målingen af myonens anomale magnetiske moment er en af de mest nøjagtige målinger, der er udført i naturvidenskaben. Ved at måle frekvensen af oscillationer i retningen af spin for myoner i en lagerring, er det muligt at bestemme det magnetiske moment med en relativ nøjagtighed på mere end en hundredetusindels promille. Denne måling kan sammenlignes med teoretiske beregninger baseret på kvantefeltteori og standardmodellen. Denne sammenligning udgør den bedste test, vi har på nogen fysisk teori. Men de mest nøjagtige målinger afviger fra de teoretiske beregninger med ca. tre standardafvigelser. Dette opfattes af mange fysikere som bevis på, at der eksisterer ny ukendt fysik hinsides standardmodellen. For at afgøre om afvigelsen er en statistisk tilfældighed eller en reel effekt, er hele eksperimentet flyttet til Fermilab, hvor målingerne vil blive gentaget med fire gange større nøjagtighed.

I klassisk elektrodynamik vil en elektrisk ladet partikel med ladning q , impulsmoment $\vec{L}$ og masse m , have et magnetisk dipol moment givet ved (figur 1):

$$\vec{\mu} = \frac{q}{2m} \vec{L} \quad (1)$$



Figur 1. Klassisk magnetisk moment.

I kvantemekanikken er impulsmomentet kvantiseret. Elektronen er en punktformet partikel, men har alligevel et indbygget indre impulsmoment i form af spin-kvantetallet s . Da elektronen er en fermion, har den halvtalligt spin, det vil sige at $s = \pm\hbar/2$ (to muligheder, spin op og spin ned). Ifølge klassisk elektrodynamik skulle den derfor have et magnetisk moment på $\vec{\mu} = -e/(2m_e) \cdot \vec{s}$ (hvor e er elementarladningen og m_e er elektronmassen).

Allerede i 1925 var det klart (for eksempel fra Stern-Gerlach-eksperimentet), at elektronen har et magnetisk moment, men at den klassiske formel ikke passer [1]. I stedet skal der tilføjes en korrektionsfaktor g_s , så formelen bliver:

$$\vec{\mu}_e = g_s \frac{-e}{2m_e} \cdot \vec{s} \quad (2)$$

Denne korrektionsfaktor, kaldet Landé-g-faktoren, kunne eksperimentelt bestemmes til ca. 2.

Da Paul Dirac i 1928 fandt sin berømte relativistiske ligning for elektronens bølgefunktion, kunne g-faktoren bestemmes teoretisk [2]. Dirac-ligningen giver $g_s = 2$ for alle fermioner (partikler med halvtalligt spin). Det er almindeligt at udtrykke det magnetiske dipolmoment ved hjælp af enheden en Bohrmagneton

$$\mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2m_e} \quad (3)$$

Udtrykt ved Bohrmagnetonen bliver formelen for elektronens magnetiske dipolmoment:

$$\vec{\mu}_e = -g_s \cdot \mu_B \cdot \frac{\vec{s}}{\hbar} \quad (4)$$

Det anomale magnetiske moment

Efter succesen med at forklare elektronens magnetiske moment med Dirac-ligningen, var det forventet, at protonen også ville have en g-faktor på 2, da den også er en fermion, men i 1933 kunne Otto Stern måle, at protonen har en g-faktor på ca. 5,5 [3]. Senere viste det sig, at neutronen også har et stort magnetisk moment, selv om den har ladning 0 [4]. Dette var et stort problem i mange år (spinkrisen), men i dag har vi en dybere forståelse af, hvorledes baryoners magnetiske moment skyldes et samspil af bidrag fra kvarkernes magnetiske momenter og deres relativistiske bevægelse (selv om vi har problemer med at opnå korrekte beregninger).

I 1947 viste nøjagtige målinger af hyperfinstrukturen i brintspektret (opsplitning af spektrallinjerne på grund af vekselvirkningen mellem elektronens magnetiske moment og magnetfeltet skabt af elektronens banebevægelse omkring protonens magnetfelt), at opsplitningen af dobbeltlinjerne svarende til de to orienteringer af elektronens spin (spin op og spin ned) var større end teoretisk beregnet [5].

Dette fik Julian Schwinger til i 1948 at foreslå, at elektronens g-faktor er en lille smule større end 2, og at denne afvigelse kunne skyldes udveksling af virtuelle fotoner, noget som vil give en lidt større g-faktor

end den en-foton vekselvirkning, som er grundlag for potentialet i Dirac-ligningen [6].

Denne afvigelse kaldes det anomale magnetiske moment a , og det er almindeligt at definere det ved at skrive elektronens magnetiske moment som:

$$\vec{\mu}_e = -(1 + a) \cdot \mu_B \cdot \frac{\vec{s}}{\hbar}. \quad (5)$$

hvor $a = (g - 2)/2$. Her svarer det første led (1 Bohrmagneton) til værdien fra Dirac-ligningen og kaldes derfor for elektronens Dirac-moment. Det næste led a kaldes elektronens anomale magnetiske moment.

Kvanteelektrodynamikken

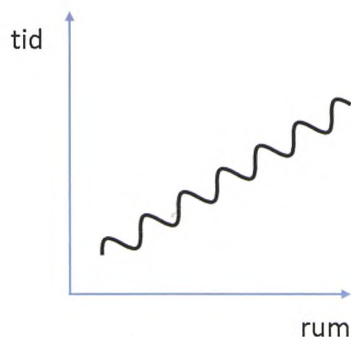
Kvanteteorien for den elektromagnetiske vekselvirkning (som også er ophav til magnetisk moment) kaldes kvanteelektrodynamikken (herefter kaldet QED). Den blev udviklet i løbet af en ca. 35-årig periode efter fremkomsten af Dirac-ligningen i 1928. Den er i fuld overensstemmelse med både kvantemekanikken og den specielle relativitetsteori.

I QED beskrives vekselvirkningen mellem elektrisk ladede partikler som udsendelse og absorption af kvanter af det elektromagnetiske felt. Disse kvanter er fotoner. Richard P. Feynman, som er en af teoriens fædre, har forklaret, at den kan beskrives ved hjælp af tre fundamentale processer:

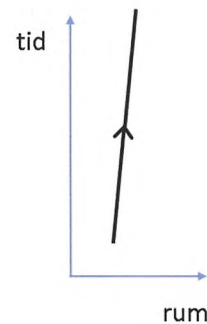
- En foton går fra et sted og en tid til et andet sted og en anden tid
- En elektron går fra et sted og en tid til et andet sted og en anden tid
- En elektron udsender eller absorberer en foton i et sted og et tidspunkt

Feynman opfandt også et simpelt diagram som illustrerer de tre processer. Diagrammet lader x-aksen betegne rumdimensionerne, og y-aksen er tidsdimensionen. En partikel betegnes som en linje, mens en foton betegnes som en bølgelinje. Partikler har en tidspil, der peger opad, mens antipartikler har en tidspil, der peger nedad.

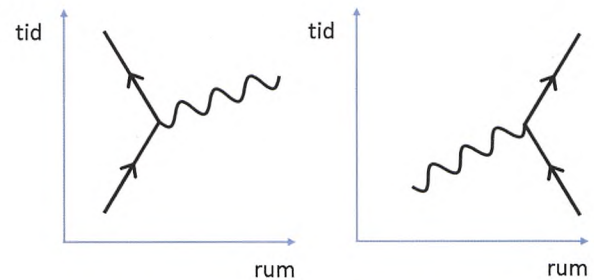
De tre fundamentale processer kan dermed illustreres ved:



Figur 2. En foton går fra et sted og tid til et andet sted og tid.



Figur 3. En elektron går fra et sted og tid til et andet sted og tid.



Figur 4. En elektron udsender eller absorberer en foton i et sted og et tidspunkt.

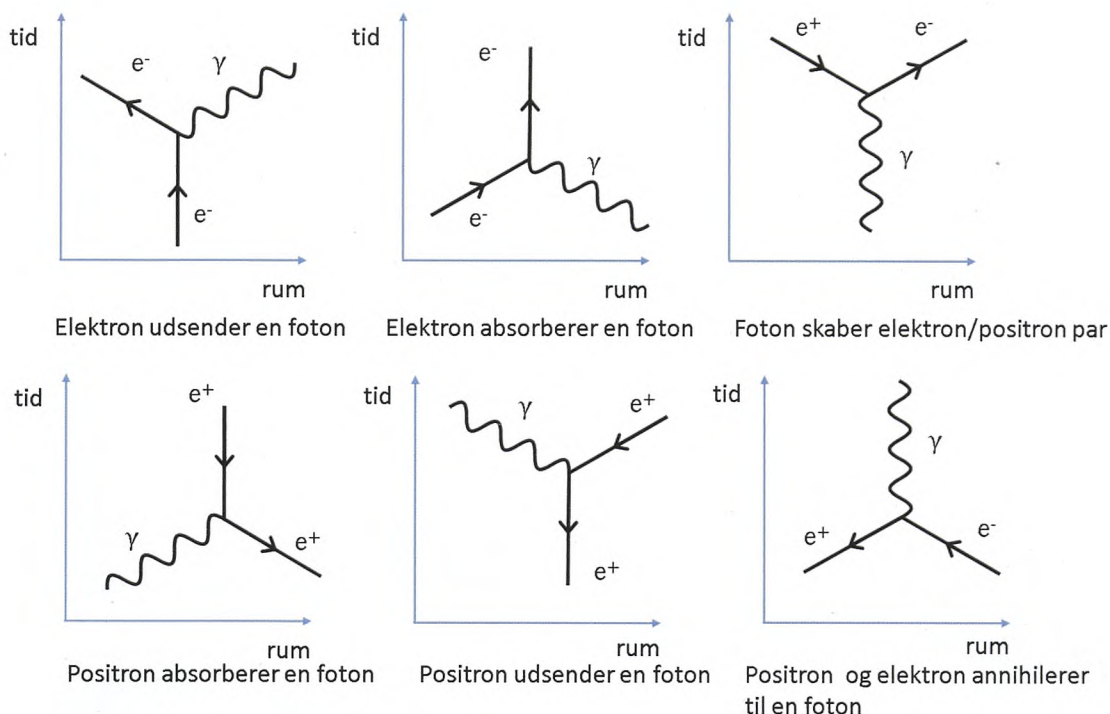
Ved at kombinere disse simple diagrammer, kan vi beregne sandsynligheden for enhver elektromagnetisk vekselvirkning. Hvert diagram repræsenterer en amplitude (som har en tilhørende kompleks matematisk funktion). Den tilhørende sandsynlighed er kvadratet af absolutværdien af amplituden. QED fortæller os ikke, hvorledes en partikel kommer fra A til B, men derimod hvorledes vi beregner sandsynligheden $P(A,B)$ for, at partiklen kommer fra A til B. Denne kan beregnes ved at summere bidragene fra alle amplituder, som fører fra A til B, det vil sige alle tænkelige processer, som har A som begyndelsestilstand og B som sluttetilstand, selv de umulige processer, som ikke lokalt bevarer energi og impuls.

Ved at udnytte at antipartikler er partikler, hvor tidspilen peger nedad, kan vi ved at rotere det simple tre-ben-diagram repræsentere alle de fundamentale vekselvirkninger i QED, som vist på figur 5.

Hver linje i et Feynman-diagram har et tilhørende matematisk udtryk, og for hvert forgreningspunkt skal der multipliceres et udtryk, som repræsenterer vekselvirkningen. Dette medfører, at amplituden falder med $1/137$ ($= \alpha =$ finstrukturkonstanten) for hvert forgreningspunkt.

Da en amplitude vil være en funktion af partiklernes impuls, må vi også integrere denne funktion over alle mulige værdier af impulsen for at finde sandsynligheden.

De indkommende og udgående partikler er fysisk observerbare og må have en energi og impuls som opfylder Einsteins energi-impuls-sætning fra den specielle relativitetsteori:



Figur 5. Seks fundamentale vekselvirkninger i QED.

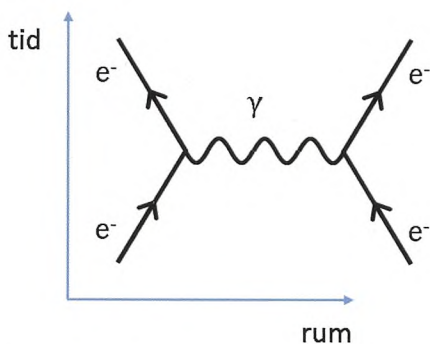
$$E^2 = m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2 \quad (6)$$

Vi siger, at disse reelle partikler ligger på masseskallen, fordi deres impulsvektor ligger på en kugleskal med radius lig med $E/c - mc^2$.

De *indre* partikler, derimod, har en mere tvivlsom fysisk eksistens, og deres energi og impuls opfylder ikke Einsteins energi-impuls-sætning. Vi kalder disse partikler for virtuelle partikler. De ligger ikke på masseskallen.

Vi kan nu betragte et par simple vekselvirkninger i QED. Når to elektroner frastøder hinanden, udveksler de virtuelle fotoner. Vi kalder fotonerne virtuelle, fordi de ikke har en observerbar fysisk eksistens og derfor ikke behøver at opfylde lovene for energi- og impulsbevarelse, de skal bare opfylde Heisenbergs usikkerhedsrelation.

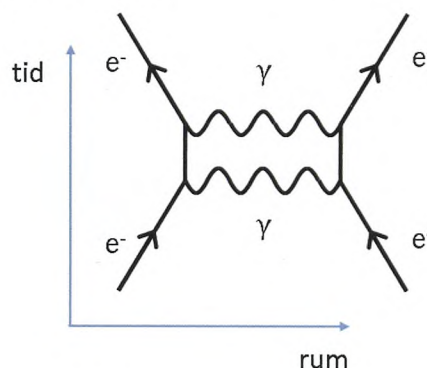
Det simpleste Feynman-diagram for vekselvirkning mellem to elektroner er udveksling af en foton. Det tilhørende diagram er:



Figur 6. Frastødning mellem to elektroner.

Vi ser, at fotonen udsendes og absorberes samtidig. Det må den godt, da det er en virtuel partikel. En

sådan foton kaldes rumlig (space-like). Dette diagram er det dominerende bidrag til Coulombs lov. Men der er også bidrag for mere komplicerede diagrammer som for eksempel to fotoner:

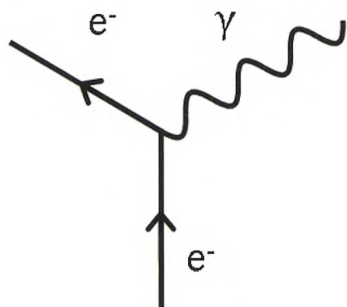


Figur 7. Udveksling af to fotoner.

For at beregne sandsynligheden for at elektronerne spredes i en bestemt vinkel, når de kolliderer, må vi summere amplituderne fra alle diagrammer med to elektroner i sluttstanden. Dette lyder som en umulighed, men her bliver vi hjulpet af, at ethvert forgreningspunkt medfører, at amplituden falder med en faktor 137. Vi kan derfor nøjes med kun at medregne de simple diagrammer med få forgreningspunkter. Diagrammet i figur 7 indeholder fire forgreningspunkter og har derfor en amplitude på ca. $1/137^2$ af diagrammet med en foton.

Det magnetiske moment skyldes også den elektromagnetiske vekselvirkning. I QED er det simpleste diagram, som bidrager til det magnetiske moment, udveksling af en foton. Diagrammet er vist på figur 8.

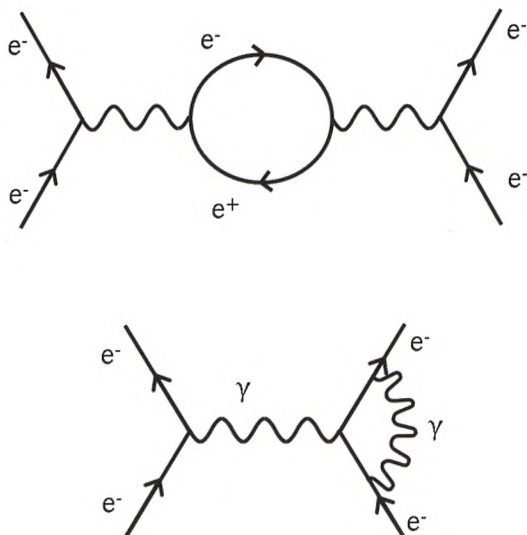
Dette diagram med en foton giver $g_s = 2$ i Dirac-ligningen.



Figur 8. Magnetisk moment i Dirac-ligningen.

Vakuumpolarisation

Som vi har set, er elektronens magnetiske moment en lille smule større end $g_s = 2$. Det fik Julian Schwinger til at foreslå, at denne afvigelse kunne skyldes bidrag fra mere komplicerede Feynman-diagrammer. Lad os prøve at betragte diagrammer med fire forgreningspunkter. Vi har allerede set et diagram med to fotoner (figur 7), men der er flere diagrammer med to fotoner:



Figur 9. Diagrammer med to fotoner.

Det første diagram i figur 9 er specielt interessant. Her udsendes en foton, som så kortvarigt danner et elektron/positron-par, som derefter annihilerer til en ny foton. Diagrammer, som danner virtuelle partikel/antipartikel-par, er ophav til et meget interessant fænomen, som kaldes vakuumpolarisation. De medfører, at der i vakuum kortvarigt opstår elektrisk ladede virtuelle partikler. Disse virtuelle partikler giver sig fysisk til kende i en række effekter:

- Ifølge Schrödinger-ligningen skulle energiniveauerne i brintatomet kun afhænge af hovedkvantetallet n . I Dirac-ligningen opstår en opsplitning af spektrallinjerner med forskellige asimutale kvantetal j . Men på grund af vakuumpolarisationen "tværes" elektronpositionen ud med ca. 0,4 pm. Dette medfører, at energiniveauerne forskydes en lille smule. Effekten på j kaldes *Lamb shift* [7].

- Vakuumpolarisationen afskærmer elektronens ladning. Ved korte afstande opfører elektronen sig, som om

den havde en større ladning end elementarladningen. Dette kan observeres i spredningsforsøg med elektroner.

- Der opstår en tiltrækning mellem elektrisk ledende plader i vakuum, selv om de ikke har ladning. Fænomenet kaldes *Casimir-effekten*.

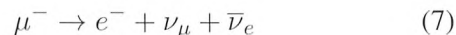
- Vakuumpolarisation ved begivenhedshorisonten omkring et sort hul er ophav til *Hawking-stråling*, som tapper energi fra hullet (denne effekt er ikke observeret).

- Det magnetiske moment afviger fra løsningen af Dirac-ligningen. Afvigelsen kaldes det *anomale magnetiske moment*.

Myonen, elektronens tungere fætter

I 1936 opdagede Carl D. Anderson og Seth Neddermeyer en ny elementarpartikel i kosmisk stråling [8]. Den havde en masse på 105,66 MeV/c² og samme ladning som elektronen. Efter en del forvirring om, hvad det var for en partikel, blev det efterhånden klart, at det var en tungere fætter til elektronen. Den fik navnet myonen og er også en lepton ligesom elektronen. Faktisk har den alle egenskaber til fælles med elektronen, bortset fra massen, som er ca. 207 gange elektronmassen.

Vi ved i dag, at myonen ifølge standardmodellen tilhører anden generation af elementarpartiklerne sammen med s-kvarken, c-kvarken og myon-neutrinoen. Myonen er ustabil og henfalder til en elektron, en myon-neutrino og en elektron-antineutrino:



En myon i hvile har en levetid på 2 μ s, men hvis den bevæger sig med høj hastighed, forlænges levetiden på grund af relativistisk tidsforlængelse.

Ligesom elektronen, har myonen en antipartikel (anti-myonen) med positiv elektrisk ladning. Alle Feynman-diagrammer vi kan tegne med elektroner, vil også være gyldige med myoner.

Hver kvadratmeter af Jordens overflade rammes af ca. 10.000 myoner per minut. De kommer fra kosmisk stråling, som rammer molekylerne i den øvre atmosfære. På grund af den relativistiske tidsforlængelse kan de ramme jorden (se for eksempel [17]).

De myoner, som rammer jorden, skabes, når mesoner henfalder ved hjælp af den svage vekselvirkning. Mesoner er beslægtet med nukleonerne (de er også hadroner), men i stedet for tre kvarker, består de af en kvark og en anti-kvark. Når protoner i kosmisk stråling rammer atmosfæren, dannes der tit π mesoner (også kaldet pioner). Et par eksempler på henfald af en pion er:

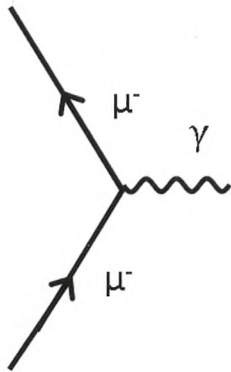


Myonen opfylder også Dirac-ligningen og har et anomalt magnetisk moment ligesom elektronen. Men i modsætning til elektronen er myonens anomale magnetiske moment større end forudset fra teoretiske beregninger. Vi vil derfor koncentrere os om myonen i resten af denne artikel.

Teoretisk beregning af myonens magnetiske moment

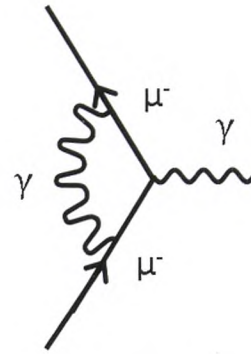
Vi vil nu se på, hvorledes vi beregner myonens magnetiske moment ud fra QED. Det første bidrag kommer fra Dirac-ligningen. Det tilhørende Feynman-diagram er vist i figur 10. Den virtuelle foton til højre repræsenterer vekselvirkningen med det eksterne magnetfelt, som bruges til at måle det magnetiske moment. Diagrammet viser en myon, som afbøjes af magnetfeltet.

Vi kender allerede resultatet, da Dirac-ligningen giver $g_s=2$ og dermed $a=0$.



Figur 10. Bidrag fra Dirac-ligningen.

Men i kvantefeltteori skal vi summere amplituderne fra alle diagrammer, som giver samme begyndelses- og sluttstand. Det næste bidrag blev foreslået af Julian Schwinger i 1948. Det indeholder en virtuel foton, som udsendes af myonen, inden den vekselvirker med magnetfeltet og absorberes igen bagefter. Det er vist på figur 11.



Figur 11. Diagram med en virtuel foton.

Dette diagram giver

$$a^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{\pi} = 0,0011617 \quad (10)$$

hvor $\alpha=1/137,0359991146$ er finstrukturkonstanten.

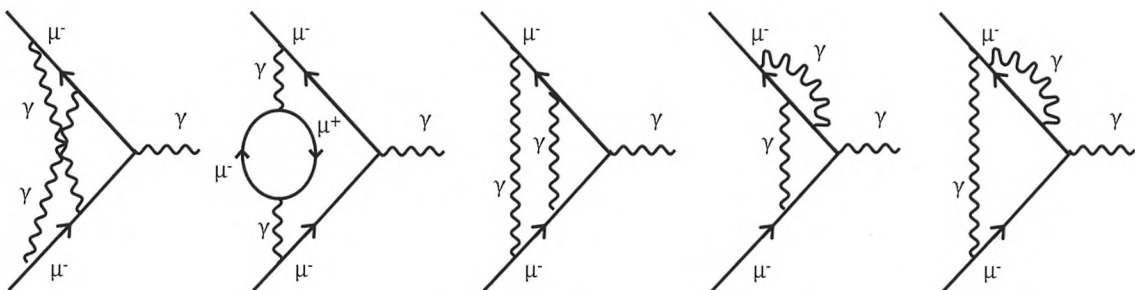
Det næste bidrag kommer fra diagrammerne med to virtuelle fotoner. Vi tager først dem, hvor der kun indgår myoner og fotoner.

Der er totalt syv, fordi de to sidste også kan spejles vertikalt. Når vi summerer disse bidrag, får vi en ny korrektion til g-faktoren [9] og [10]:

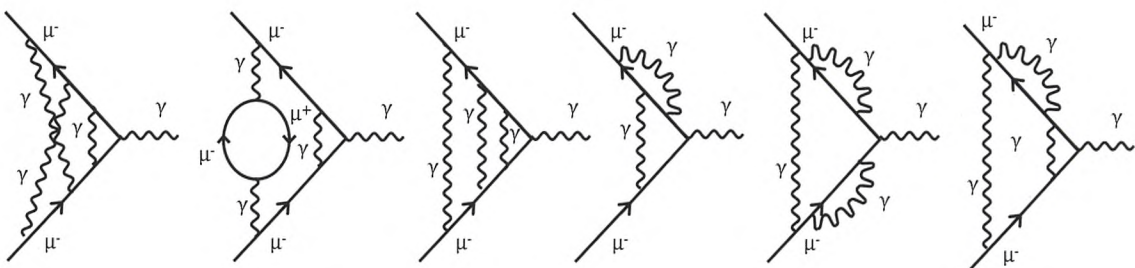
$$a^{(4)} = -0,328478965 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \quad (11)$$

Dernæst skal vi summere alle diagrammer med tre fotoner. Nu begynder der at blive rigtig mange (totalt er der 72 diagrammer). Et udvalg af eksempler er vist i figur 13.

Diagrammet giver en ny korrektion til g-faktoren [11] (oven i de to foregående).



Figur 12. Feynman-diagrammer med to fotoner.



Figur 13. Diagrammer med tre fotoner.

$$a^{(6)} = 1,181241456 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \quad (12)$$

Hvis vi går videre med diagrammerne med fire fotoner, er der totalt 891 Feynman-diagrammer, der skal summeres. Resultatet bliver [12]:

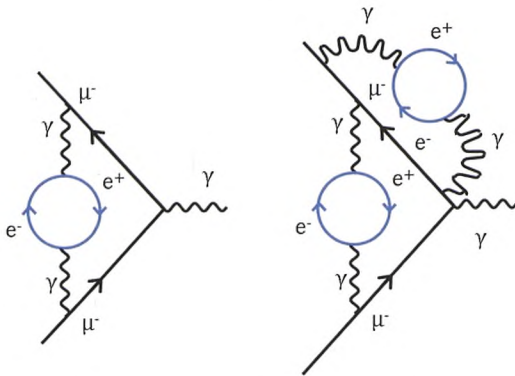
$$a^{(8)} = -1,728335 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 \quad (13)$$

Hvis dette var hele sandheden, ville myonens anomale magnetiske moment være summen:

$$a = a^{(2)} + a^{(4)} + a^{(6)} + a^{(8)} = 0,001159652181, \quad (14)$$

som giver en g-faktor: $g_s = 2a + 2 = 2,00231930436$

Her har vi kun taget hensyn til diagrammer med myoner og fotoner. Men en virtuel foton kan også skabe virtuelle elektron/positron-par, som vist på figur 14. Disse diagrammer kaldes elektronloop-diagrammer.



Figur 14. Eksempler på elektronloop-diagrammer.

Når vi summerer disse diagrammer, får vi nye bidrag til det anomale magnetiske moment. Elektron-diagrammer med to fotoner giver:

$$a_e^{(4)} = 1,094258311184 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \quad (15)$$

Vi skal også medtage bidrag fra elektronloop-diagrammerne med tre og fire fotoner. Vi får:

$$a_e^{(6)} = 1,92045513033 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \quad (16)$$

$$a_e^{(8)} = 10,83920166 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 \quad (17)$$

Men vi er ikke færdige endnu. Elektronen og myonen har en storebroder kaldet τ -(tau)-leptonen. Den indgår i teorien på lige fod med elektronen og giver de eksakt samme diagrammer, men med en meget højere masse.

De tilsvarende bidrag fra τ -loopdiagrammer med to og tre fotoner er:

$$a_e^{(4)} = 0,00007856426 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \quad (18)$$

$$a_e^{(6)} = -0,0017823348 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \quad (19)$$

Bidraget fra diagrammer med fire eller flere fotoner er for lille til at påvirke resultatet.

Men vi har også bidrag fra blandede diagrammer, hvor det ene loop er en tau, og det andet er enten en elektron eller en myon.

Dette giver yderligere korrektioner:

$$a_e^{(4)} = 0,0005276617 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \quad (20)$$

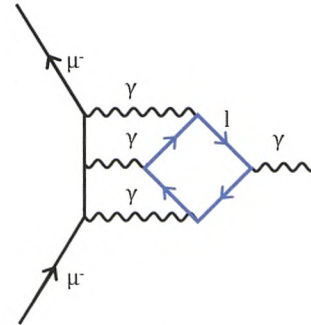
$$a_e^{(6)} = -0,04618837 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \quad (21)$$

Vi skal nu summere bidragene fra alle disse processer. Det giver:

$$a = a^{(2)} + a^{(4)} + a^{(6)} + a^{(8)} + a_e^{(4)} + a_e^{(6)} + a_e^{(8)} + a_\tau e^{(6)} = 0,0011655810325, \quad (22)$$

som giver en g-faktor: $g_s = 2a + 2 = 2,00233116206$.

Selv om en foton ikke har elektrisk ladning og derfor ikke selv kan udsende og absorbere fotoner, kan den danne elektron/positron-par, som har ladning. Dette giver ophav til foton-fotonspredning via vakuumpolarisation, såkaldt Delbrück-spredning. Et eksempel på en sådan proces er vist i figur 15, hvor virtuelle fotoner fra myonen vekselvirker med et virtuelt lepton/anti-leptonpar.



Figur 15. Foton-fotonspredning via leptonloop.

Der er mange varianter af lignende diagrammer. Totalt giver de et bidrag på

$$a_{\gamma\gamma}^{(6)} = 20,9500677285 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \quad (23)$$

$$a_{\gamma\gamma}^{(8)} = 121,9269 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 \quad (24)$$

Når vi summerer alle bidrag fra diagrammer, som involverer den elektromagnetiske vekselvirkning i 4 loops (8. orden i $\frac{\alpha}{\pi}$) får vi: $a = 0,0011658471439$

Den tilhørende g-faktor bliver: $g_s = 2a + 2 = 2,00233169429$.

I denne beregning har vi kun taget højde for loopdiagrammer, som involverer leptoner (e, μ, τ). Men der findes tilsvarende diagrammer med virtuelle hadroner (π -mesoner, K-mesoner osv.). Da mesoner indeholder et kvark/anti-kvarkpar, giver disse diagrammer en meget mindre amplitude (der skal skabes to virtuelle partikler i

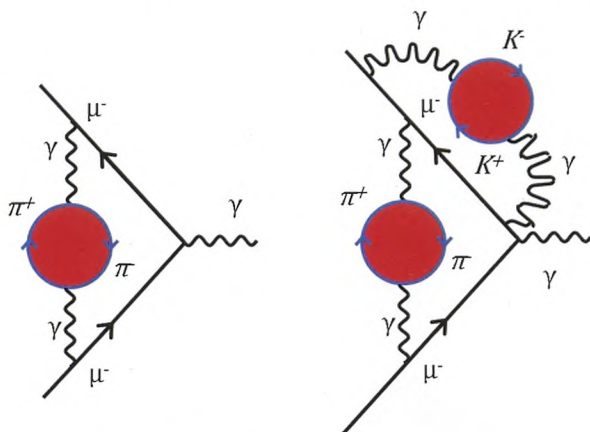
hvert forgreningspunkt). Eksempler på loopdiagrammer med hadroner er vist på figur 16.

De bedste teoretiske beregninger med indtil tre loopdiagrammer giver et bidrag til g-faktoren på:

$$a_{\mu}^{(6)}(H) = 6901 \cdot 10^{-11} \quad (25)$$

Tilsvarende beregning af fire loopdiagrammer giver:

$$a_{\mu}^{(8)}(H) = -97,9 \cdot 10^{-11} \quad (26)$$

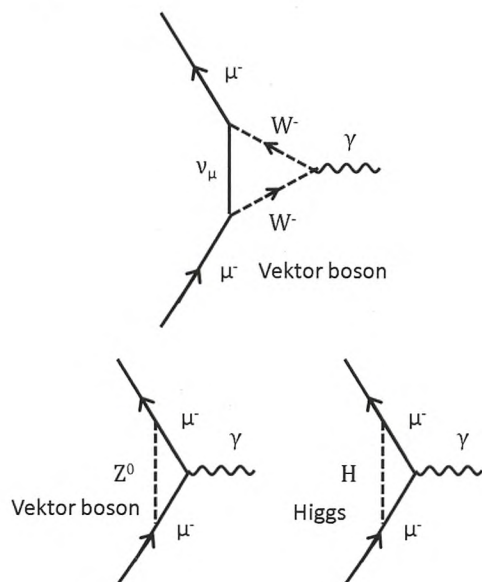


Figur 16. Eksempler på hadron-loopdiagrammer.

Vi tager også bidraget med fra foton-fotonspredning i hadrondiagrammer:

$$a_{\mu}^{(6)}(H) = 11 \cdot 10^{-10} \quad (27)$$

Vi er dog ikke helt i mål. Hidtil har vi kun beregnet diagrammer, som involverer den elektromagnetiske vekselvirkning (udveksling af virtuelle fotoner). Men myonen kan også udsende og absorbere vektorbosoner (W^+ , W^- , Z^0) og Higgs-bosoner via den svage vekselvirkning. Første ordens diagrammer af denne type er vist på figur 17.



Figur 17. Eksempler på diagrammer med bosoner.

Når vi summerer bidragene fra disse og lignende, mere komplicerede diagrammer, får vi et bidrag fra den svage vekselvirkning på:

$$a_{\mu}^{EW} = 15,4 \cdot 10^{-10} \quad (28)$$

For en sikkerheds skyld snupper vi også den nyeste beregning af fem-loopdiagrammerne med myoner, elektroner og tau-loops:

$$a_{\mu}^{(10)} = 663 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 = 4.483 \cdot 10^{-11} \quad (29)$$

Når vi lægger alt dette sammen, får vi standardmodellens forudsigtelse af myonens magnetiske moment [13]:

$$a_{\mu}^{SM} = 0,00116591785(61). \quad (30)$$

Den tilhørende g-faktor er:

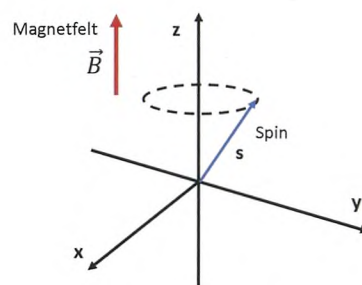
$$g_s = 2a + 2 = 2,00233183571(22) \quad (31)$$

I denne beregning er der medtaget bidrag fra ca. 15.000 Feynman-diagrammer.

Måling af myonens magnetiske moment

Når vi har ofret så meget besvær på at beregne myonens magnetiske moment, er det, fordi det kan måles med fantastisk nøjagtighed. Dette giver os mulighed for at sammenligne standardmodellens teoretiske beregninger med fysiske målinger og derved efterprøve teorien med ti decimalers nøjagtighed. Vi skal her se på, hvorledes vi udfører denne måling.

Når en myon befinder sig i et magnetfelt, vil spin (og dermed magnetisk moment) præcessere (rottere) omkring magnetfeltets retning, præcis som en snurretops akse roterer (figur 18).



Figur 18. Præcession af spin i magnetfelt.

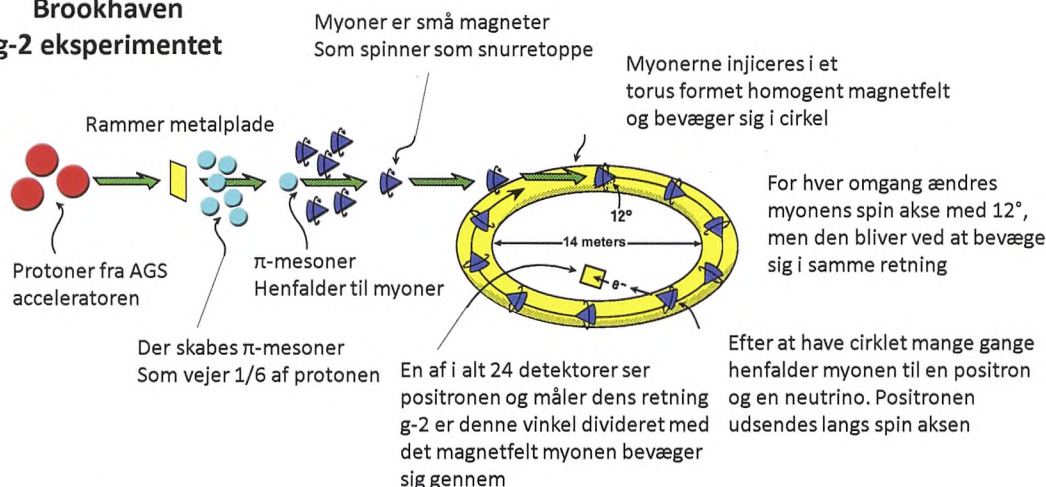
Frekvensen for denne rotation (som kaldes Larmor-frekvensen) er givet ved formelen:

$$\omega = \frac{egB}{2m_{\mu}} \quad (32)$$

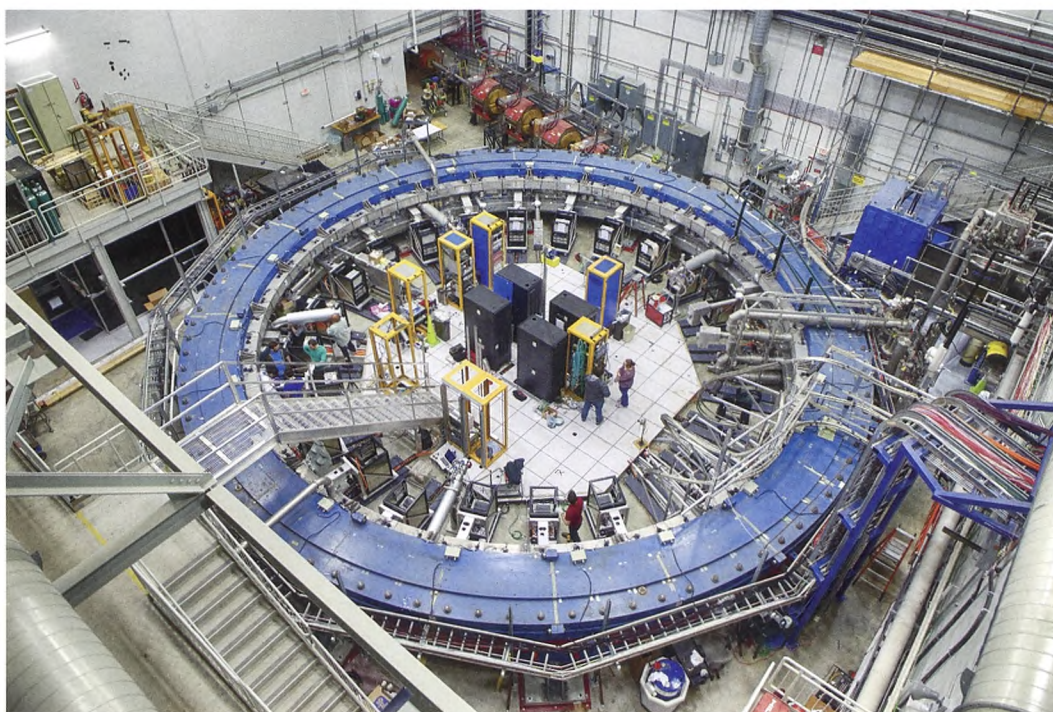
Hvor e er elementærladningen, B er magnetfeltstyrken og g er g-faktoren. Vi kan derfor bestemme g-faktoren ved at måle Larmor-frekvensen.

Den mest nøjagtige måling af myonens g-faktor er foretaget ved Brookhaven National Laboratory uden for New York. Her anvendte man en lagerring, som blev fyldt med anti-myoner. Myonerne blev skabt ved, at protoner fra laboratoriets accelerator ramte en metalplade, hvorved der skabes en række sekundære partikler. Af disse blev der skabt et strålebundt af positive π -mesoner, som derefter henfalder til anti-myoner. Disse blev opsamlet, polariseret og injiceret i en lagerring med et meget homogent magnetfelt.

Brookhaven g-2 eksperimentet



Figur 19. Brookhavens g-2-eksperiment.



Figur 20. Brookhavens myonlagerring.

Inde i magnetfeltet vil myonens spin rotere omkring lagerringens magnetfelt med Larmor-frekvensen. (Dette er lidt forenklet, i virkeligheden påvirkes frekvensen også af beam-parametre). For hver omgang i ringen drejes myonens spinakse med 12° , uden at bevægelsesretningen påvirkes. Efter at have cirkuleret mange omdrejninger, henfalder anti-myonen til en positron og en neutrino. Positronen udsendes langs med myonens spinakse. Ved at måle vinklen på de udsendte positroner, kan man derfor bestemme Larmor-frekvensen. Princippet er illustreret i figur 19.

Brookhavens myonring med tilhørende detektorer til positroner er vist på figur 20.

For at måle Larmor-frekvensen kan man nu observere variationer i intensiteten af positroner som funktion af tiden. Her vil frekvensen kunne ses som periodiske variationer i positronsignalet som vist på figur 21.

Ved at studere signalet fra positron-detektorerne kunne fysikerne ved Brookhaven-eksperimentet foretage en meget nøjagtig bestemmelse af Larmor-frekvensen og dermed bestemme g -faktoren. Resultatet var:

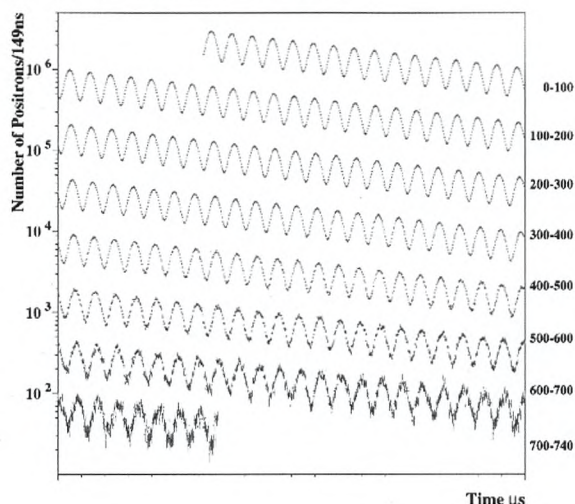
$$g_s^{EXP} = 2,0023318421(46) \quad (33)$$

Vi sammenligner med det teoretiske resultat fra standardmodellen:

$$g_s^{SM} = 2,00233183571(22) \quad (34)$$

Her ser vi, at på trods af, at vi har en fantastisk overensstemmelse i de første ti cifre, er der en forskel på ca. tre standardafvigelser. Vi kan derfor konkludere, at hvis der ikke er systematiske fejl i enten målinger eller beregninger, afviger målingerne fra de teoretiske

beregninger. Dette indikerer, at der findes fysiske processer, som påvirker vakuumpolarisationen og som ikke er indeholdt i standardmodellen!



Figur 21. Svingninger i positronsignalet ved g-2-eksperimentet.

For at finde ud af om denne afvigelse er en statistisk anomali eller en reel fysisk effekt, er det vigtigt at målingen af myonens magnetiske moment bliver udført med væsentlig større nøjagtighed. Derfor er hele myonlagerringen demonteret og transporteret fra Brookhaven til Fermilab ved Chicago. Ved Fermilab bliver der mulighed for at fylde væsentlig flere myoner i ringen [15]. Man regner med at kunne lave nye målinger med en usikkerhed på 0,14 ppm, det vil sige en faktor fire bedre end målingerne fra Brookhaven. Dette vil klart kunne vise, om den nuværende afvigelse er en statistisk tilfældighed, eller om der er reel fysik hinsides standardmodellen. Dataopsamling ved Fermilab forventes at starte i år.

Det er interessant, at der er konstateret en tilsvarende afvigelse mellem teori og eksperiment for Lambskiftet for myonisk brint [16]. Dette er brintatomer, hvor elektronen er erstattet af en myon. Her er der en uoverensstemmelse på fem standardafvigelser. Dette tyder på, at der er ny fysik i myonens magnetiske moment.

Konklusion

Målingen af myonens magnetiske moment er den mest nøjagtige måling, der er udført i naturvidenskabens historie. Den teoretiske forudsigelse ud fra standardmodellen er baseret på beregning af bidrag fra et femcifret antal Feynman-diagrammer, som repræsenterer amplituder af virtuelle partikler i vakuum. Sammenlignet med beregningerne afviger målingerne med tre standardafvigelser. Hvis denne afvigelse fastholdes efter mere nøjagtige målinger, som nu udføres ved Fermilab, betyder det enten, at der findes fysiske processer eller partikler, som ikke er en del af standardmodellen, eller, at der er fejl i beregningerne. Det første ville være en stor opdagelse.

Litteratur

- [1] W. Gerlach og O. Stern (1922) *Z. Phys.*, 8, 110; (1922) *Z. Phys.*, 9, 349; (1924) *Z. Phys.*, 9, 353.
- [2] P. A. M. Dirac (1928), *Proc. R. Soc.*, A117, 610, og (1928) A118, 351.
- [3] R. Frisch og O. Stern (1933) *Z. Phys.*, 85, 4; I. Estermann og O. Stern (1933) *Z. Phys.* 85, 17.
- [4] L. W. Alvarez og F. Bloch (1940) *Phys. Rev.* 57, 111.
- [5] J. E. Nafe, E. B. Nelson og I. I. Rabi (1947) *Phys. Rev.* 71, 914; D. E. Nagel, R. S. Julian og J. R. Zacharias (1947) *Phys. Rev.* 72, 971.
- [6] J. Schwinger (1948) *Phys. Rev.* 73, 416L; (1949) *Phys. Rev.*, 76, 790.
- [7] W. E. Lamb og R. C. Retherford (1947) "Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method", *Phys. Rev.*, 72, 241.
- [8] S. H. Neddermeyer og C. D. Anderson (1937) "Note on the nature of cosmic ray particles", *Phys. Rev. Lett.*, 51, 884.
- [9] A. Petermann (1957) *Phys. Rev.*, 105, 1931.
- [10] C. M. Sommerfield (1957) *Phys. Rev.* 107, 328.
- [11] S. Laporta og E. Remiddi (1996) *Phys. Lett.*, B379, 283.
- [12] T. Kinoshita og M. Nio (2006) *Phys. Rev.*, D73, 013003.
- [13] J. P. Miller, E. de Rafael, B. L. Roberts og D. Stöckinger (2012) "Muon (g-2): Experiment and Theory", *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 62, 237.
- [14] G. W. Bennett m.fl. (2002) "Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.7 ppm", *Phys. Rev. Lett.*, 89, 129903.
- [15] W. Gohn (2016-01-01). "The muon g-2 experiment at Fermilab".
- [16] R. Pohl m.fl. (2010) "Quantum electrodynamics: A chink in the armour?", *Nature* 466, 213.
- [17] U. Uggerhøj (2016) *Speciel Relativitetsteori*, Århus Universitetsforlag.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

Månen – en fabelagtig udstilling på Louisiana

Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet



Figur 1. Fritz Lang: Frau im Mond (1929), Foto: Horst von Harbou / Deutsche Kinemathek.

I 2019 vil 50-året for den første landing af et menneske på Månen blive markeret mange steder – sikkert ganske særligt i USA. Når Louisiana allerede i år har valgt Månen som emne for sin store efterårsudstilling, er det derfor ikke en utidig tyvstart, men snarere rettidig omhu: det er nemlig lykkedes at låne genstande, der ellers skal bruges af andre næste år, fx af den amerikanske rumfartsorganisation NASA.

Louisiana er kendt for sine udstillinger af moderne kunst, og man mødes da også straks af to kunstneriske installationer: først et selvspillende flygel, der gengiver måneskinssonatens indledning "reflekteret fra månens overflade", – en blandet fornøjelse – derefter en særlig lypære, hvis spektrum skulle svare til fuldmånens.

Det fascinerende måneskin har inspireret ældre såvel som moderne kunstnere til betagende malerier. Med lang eksponeringstid er der fotograferet landskaber, hvor man er lige ved at tro, at de er set i dagslys. Særligt interessant er alle de myter og ritualer, der knytter sig til Månen. Næsten alle kulturer har haft forestillinger om Månens indflydelse på mennesker og deres tilværelse, og udstillingen viser masker, billeder og tekster med relation hertil.

Udstillingen rummer imidlertid rigtigt megen naturvidenskab og rumfartsteknologi. Man kan følge den historiske udvikling af stadigt mere detaljerede, håndlavede kort og billeder af Månens overflade, hvor begyndelsen blev gjort af Galilei på basis af historiens første observationer med kikkert. Hans akvareller, udlånt fra et arkiv i Firenze, er udstillingens scoop (set med en naturvidenskabsmands øjne). Der er naturligvis også eksempler på de uhyre detaljerede fotos, som NASA publicerer.

Månelandingen 1969 (Apollo 11) har fået sin egen sal både med en rumdragt og andre tekniske ting og med kunst inspireret af rumalderen, fx har maleren Robert Rauschenberg opholdt sig hos NASA i en periode og har fundet stof til en stribe billeder. En lille tegnefilm illustrerer vægtløshedens problemer. Ren underholdning er der i den kendte gamle film "Le Voyage dans la

Lune" (Georges Méliès 1902), hvor et rumskib skydes til Månen med en kanon, og nogle velklædte herrer med høj hat og stok stiger ud og har drabelige skærmydsler med måneboerne.

Fremtiden kan man fantasere meget om, og ideerne om kolonisering i rummet fører til projekter om rumstationer, påklædning og overlevelsesstrategier. Der er også mulighed for at teste sin egnethed som astronaut. Meget relevant er det at lytte til en astronauts egen beretning om, hvordan det er at vende tilbage til Jorden efter et langt ophold på den internationale rumstation.

Udstillingens sidste tema er kaldt "Dyb tid". Her drejer det sig om Jorden og Månens fælles tilblivelses-historie, igen med både kunstneriske og videnskabelige indslag, fx et stort udvalg af sten og meteoritter og en månesten. En hånd med negle tjener til at minde om, at Månen fjerner sig fra Jorden med omtrent samme hastighed, som en negl vokser.



Figur 2. Videnskabelig model af Månen konstrueret af Johann Friedrich Julius Schmidt og Thomas Dickert, Tyskland (1898), Foto: Field Museum Library/Getty Images.

Blandt de kunstværker, som er skabt specielt til udstillingen, kan man i virtual reality opleve en kunstners forestilling om at stå på månens overflade. Det var ikke den svimlende eller skrækindjagende oplevelse, jeg havde forventet, selv om en sten kom flyvende og slog hul i mit visir. Det var slet og ret langtrukket – men sådan er der vel på Månen. Udbyttet syntes ikke at stå i rimeligt forhold til ressourceforbruget: 4 hjælpere og 4 sæt hardware (hjelm med briller, handsker, en rygsæk formodentlig indeholdende computeren).

Alt i alt en omfattende og varieret udstilling, der taler til både fornuft og følelse. Den er værd at bruge tid på, også med børn.

KVANT-nyheder

Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Måling på Sydpolen bekræfter at en blazar er en neutrinkilde

ASTROFYSIK. En detektion på Sydpolen af en neutrino har bekræftet hypotesen, om at der dannes neutrinoer i blazarer. Det er Icecube-detektoren, som befinder sig under isen på Sydpolen, der har detekteret neutrinoen. Da neutrinoer har en meget lille masse (en elektron-neutrinos masse er ukendt, men den er vurderet til at være meget mindre end elektronens masse), og da neutrinoer ikke har nogen ladning, kan de bevæge sig langt uden at vekselvirke med stof, og uden at blive accelereret eller afbøjet af elektromagnetiske felter.

En blazar er et supermassivt sort hul i en galakse, der udsender en jet i begge retninger, vinkelret på galakseplanet, af gammastråling og højenergetiske partikler. Partiklerne er typisk protoner og elektroner, og bliver i deres bane påvirket af magnetfelter, og vi kan derfor ikke finde ud af hvor de oprindelig kom fra. Derfor leder Icecube efter neutrinoer, som bevæger sig i en ret linje igennem Universet.

Icecube er et gitter af detektorer under isen, der måler neutrinoens bane i 3D. Det er sjældent, at en neutrino vekselvirker med stof, men hvis den vekselvirker med en kerne i isen, produceres en muon, der efterlader et spor i detektoren, som kan måles.

Detektektionen af neutrinoens bane i alle tre rumdimensioner viste i samarbejde med forskellige teleskoper på Jorden, at der netop der, hvor neutrinoen var udsendt fra, også blev udsendt en højenergetisk gammastråling, som kun kan genereres af en blazar. Det bekræftede teorien om, at blazarer udsender en jet af partikler med bl.a. neutrinoer. Da neutrinoer ofte skabes i partikelhenfald, kan observationen fortælle, hvilke partikler der dannes i blazarer, og hvordan blazarer kan accelerere partikler og gammastråling til de enorme energier.

Neutrinforskningen er særlig vigtig, da forskerne mener at neutrinoer kan være med til at forklare hvorfor stof vandt over antistof lige efter Big Bang, og derfor bevirkede, at der kunne formes planeter og stjerner.

IceCube Collaboration, "Multi-messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A", *Science*, 361, DOI: 10.1126/science.aat1378

IceCube Collaboration, "Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert", *Science*, 361, DOI: 10.1126/science.aat2890

Universets manglende masse er fundet

ASTROFYSIK. Astronomerne har endelig fundet de sidste dele af det manglende univers, som har været skjult siden midten af 1990'erne (og nej, det er ikke det mørke stof, som fortsat er et mysterium). På grundlag af teoretiske undersøgelser af, hvor meget stof, der blev skabt under Big Bang, har man beregnet, at alt det, man kunne se – stjerner, gasskyer og alle de såkaldte baryoner – kun udgjorde omkring 10 % af, hvad der skulle være.

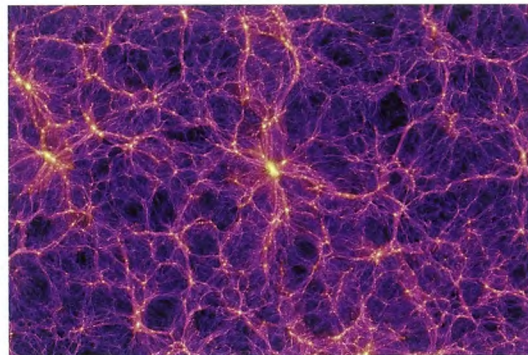
Computersimuleringer viste allerede i slutningen af 1990'erne, at mange af baryonerne ville være i en varm, diffus form og ikke inde i galakserne, men imellem dem. At stoffet er varmt, skyldes gravitationskræfter, der opvarmer gassen til millioner af grader. Desværre er varm, diffus gas ekstremt vanskelig at finde, men i 2014 havde astronomer efterhånden identificeret omkring 70 % af massen.

Nu har astronomer i tre nylige artikler identificeret de manglende dele af det almindelige stof i universet, og stoffet blev fundet, hvor man havde forventet at finde det, nem-

lig i galaksefilamenterne. Galaksefilamenter er trådlignende strukturer med en typisk længde på 70 til 150 megaparsec (230 til 490 millioner lysår), som udspænder rummet mellem galakserne og derfor er de største kendte strukturer i det observerbare univers.

Det er to forskerhold, der har fundet de sidste 30 % ved at bruge data fra Planck-satelitten til at identificere galaksepar. Efter at have stablet billeder af en million galaksepar oven på hinanden, blev de enkelte tråde af galaksefilamenter pludselig synlige i det ellers tomme intergalaktiske rum.

Resultatet er bekræftet af et tredje forskerhold, der brugte lyset fra en fjern kvasar til at måle gassen i det intergalaktiske rum, som lyset rejste igennem. Normalt bruger man atomart brint, da der er meget af det, men på grund af de høje temperaturer i filamenterne, er brinten ioniseret og absorberer derfor ikke lys.



I stedet brugte gruppen ilt, som er langt mindre hyppig, men til gengæld bliver ilt ikke er fuldt ioniseret. Ud fra mængden af ilt, kunne gruppen herefter ekstrapolere til den samlede mængde af gas mellem Jorden og kvasaren, og resultatet viste igen de manglende 30 %.

Forskergruppen vil nu observere flere kvasarer med nye røntgen- og UV-teleskoper med større følsomhed, men konklusionen er, at de manglende baryoner er fundet.

arxiv.org/abs/1709.10378, arxiv.org/abs/1805.04555, arxiv.org/abs/1806.08395

Gennemsnitlig personlighed

PSYKOLOGI. Det er ikke så tit, at fysikere beskæftiger sig med psykologi, men det har en gruppe fra Northwestern University i Illinois gjort ved at bruge "big data"-algoritmer på 1,5 million personlighedstests. Forskerne mener selv, at det er den hidtil største undersøgelse af sin art.

Personlighedstests bygger på teorier om, at vores personlighed udmønter sig i en række grundlæggende træk, og analyserne viste, at personlighederne kan samles i fire hovedgrupper. Tre af disse grupper, som forskere betegner som henholdsvis reservede, selvcentrerede og rollemodeller, er allerede kendt af psykologer, mens den fjerde vigtige gruppe – den gennemsnitlige – er helt ny. På trods af den lidt kedelige betegnelse, så scorer gennemsnitlige mennesker lidt over gennemsnittet for neuroticisme (bekymringstendens), ekstraversion (udadvendthed), venlighed og samvittighedsfuldhed. De ligner endda rollemodeller bortset fra, at de er mere bekymrede og mindre åbne.

Undersøgelsen viste, at yngre mennesker har større sandsynlighed for at have den selvcentrerede personlighedstype, mens ældre mennesker har tendens til at være rollemodeller. Ifølge undersøgelsen bevæger vi os i løbet af livet igennem forskellige personlighedstyper, og på et tidspunkt oplever de fleste af os derfor også at vi er meget gennemsnitlige. Her kan vi så glæde os over, at resultatet viste, at det faktisk er meget positivt at være gennemsnitlig.

M. Gerlach m.fl., A robust data-driven approach identifies four personality types across four large data sets, *Nature Human Behaviour*, 2, DOI: 10.1038/s41562-018-0419-z

Aktuelle bøger

Af Michael Cramer Andersen og Jens Olaf Pepke Pedersen



Videnskabsteori til stx

Mads Rangvid m.fl., "Vidensmønstre – Basal videnskabsteori i stx", 2. udgave Systime 2018, 149 sider, 205 kr. Fås også som ibog for 25 kr. <http://vidensmoenstre.systime.dk>.

Denne bog henvender sig til elever og lærere i det almene gymnasium, som efter 2017-reformen skal have videnskabsteori (20 timer) i forbindelse med flerfaglige forløb.

Bogen er bygget praktisk op med to introduktionskapitler om "Viden og videnskab" og "De tre fakulteters kendetegn" (disse kapitler findes offentligt tilgængelige på bogens hjemmeside). Herefter følger 8 kapitler med begrebspar, der skal hjælpe til at beskrive de mønstre, der kendetegner den viden, der formidles i gymnasiet. Eksempler på sådanne begrebspar er: teoretisk/praktisk, empirisk/formel, kvantitativ/kvalitativ, faktuel/normativ osv. Bogen er med andre ord ikke en gennemgang af de store videnskabsteoretiske "skoler", som f.eks. positivisme, paradigmatheori, hermeneutik eller socialkonstruktivisme. Til sidst er der kapitler med bl.a. metoder til at reflektere videnskabsteoretisk i ens studieretningsprojekt, om innovation i flerfaglige projekter og om videnskabens fællestræk.

Med den praktiske opbygning af bogen, hvor der er mange eksempler (cases) og opgaver, sikres en mere konkret forståelse. Hvis læreren derudover kan relatere begreberne til sit fag, bliver det muligt for eleverne at se kritisk på de metoder, de lærer i fagene.

Sproget er let at forstå, og målene med videnskabsteori konkretiseres mange steder. Eksemplerne inddrager alle fagene i gymnasiet, så der er noget relevant for alle. Bogen kan imidlertid også virke rodet, da den ikke er opbygget i fag. Som faglærer skal man være forberedt på at blive præsenteret for mange metoder og begreber, som nok er ukendte, men netop er centrale i andre fag. Det kan være med til at bygge bro mellem fagene. I opgaverne styrkes evnen til at vælge passende metoder og fag i undersøgelser af forskellige problemstillinger. Med gymnasireformen i 2017 blev det tværfaglige fag "Almen studieforberedelse" (AT) nedlagt og erstattet af en række flerfaglige forløb. I AT var der et fokus på fagenes metoder, men de blev typisk behandlet adskilt i fagene og kun sjældent konfronteret mellem fagene.

Der var krav om, at produktet skulle være en synopsis. I et fag som fysik er en synopsis nærmest

uegnet til at rapportere eksperimentelt arbejde. I valget af emner, der berørte to – eller nogle gange tre – fag måtte eksperimenter typisk udelades til fordel for litteraturstudier. Det faglige udbytte i fysik blev ofte ret overfladisk, men fagets perspektiver blev udvidet i spændende retninger.

Eleverne møder fortsat en række flerfaglige forløb, men produkterne kan være forskellige og tilpasses fagene. Det er et lille fremskridt. Eleverne skal som hidtil skrive en opgave i historie og dansk i 1.g, en opgave i nogle af deres studieretningsfag i 2.g og endelig i 3.g et individuelt studieretningsprojekt med to selvvalgte fag. Disse opgaver skal opbygge elevernes skriftlige kompetencer frem imod studieretningsprojektet. Ind imellem disse flerfaglige skriftlige opgaver er der nogle andre samarbejder mellem flere fag, der kan vælges mere frit.

Et vigtigt mål med de flerfaglige forløb er, at eleverne bliver bevidste om fagenes metoder og kan se forskelle i fagenes metoder. Det er særligt her, at videnskabsteorien skal tænkes ind. Der skal undervises 20 timer i videnskabsteori, og disse timer vil i praksis blive spredt ud over de flerfaglige forløb over tre år. Hvis det overlades til faglærerne uden koordination af indholdet, er der en fare for, at eleverne ikke får det ønskede overblik, men snarere bliver forvirrede. En bedre ide vil være at inddrage f.eks. en filosofilærer og afholde et eller to mere sammenhængende forløb i 2.g og 3.g.

Hvis videnskabsteoriens begreber skal give mening, skal de sættes i relation til det, eleverne selv arbejder med i fagene, og det kender faglærerne bedst. Der er altså en stor udfordring i at tilrettelægge flerfaglige forløb gennem tre år, som tilgodeser elevernes studieretningsfag og kobler videnskabsteorien på konkrete eksempler, som eleverne arbejder med, og hvor det hele ikke overlades til faglærere uden nogen speciel viden om videnskabsteori, men også inddrager f.eks. en filosofilærer. Bogen er et godt udgangspunkt for, at eleverne arbejder med konkrete anvendelser af de basale begreber. Hvis man derudover ønsker at lære om de større skoler i videnskabsteorien, må der supplerende litteratur til.

For at sikre, at eleverne selv har mulighed for at skabe sammenhæng i en så fragmentarisk og krævende konstruktion, skal de skrive deres refleksioner ned i en "portfolio". Hensigten med denne er, at de efter tre års flerfaglige forløb kan se tilbage på, hvad de har lært, herunder hvad de har lært om videnskabsteori.

Hvis alle disse intentioner skal lykkes, vil det være en fordel med en grundbog som denne, hvor eleverne i ro og mag kan lære lidt basal videnskabsteori. Bogen kan derfor varmt anbefales.

Der er også udgivet bøger om grundlæggende videnskabsteori på andre forlag, og for læreren vil det være godt at have flere på hylden.

MCA



Hvad himlen kan fortælle

Gertrude Kiel, "Hvad himlen kan fortælle os – videnskabshistorier for børn", Character Publishing, 251 sider, 350 kr,

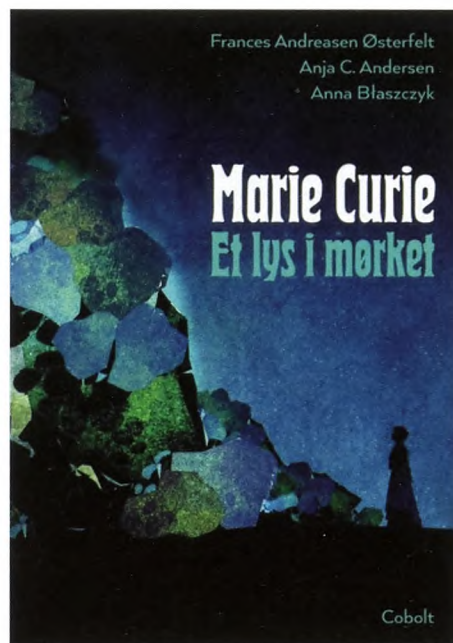
William er lige blevet færdig med 2. klasse, det er sommerferie, men hans far er læge og udsendt til Etiopien, og hans mor skal på kursus i en hel uge. Desværre er den sure tante Gunvor Williams eneste familie, og de to er derfor tvunget til at være sammen hele ugen.

William er sikker på, at det bliver den kedeligste uge i hans liv, men det går naturligvis helt anderledes, og tante Gunvor viser sig slet ikke at være så sur. De første dage siger tanten dog ikke mere end det mest nødvendige til William, der til gengæld taler med sin tandbørste og spiller Minecraft. Men han opdager også en kasse børnebøger og begynder at læse i "Løven, heksen og garderobeskabet", og snart går han også på opdagelse i rækkehuset for at finde den magiske dør. I sin jagt efter døren finder han kasser med mærkelige ting, som bliver grundlaget for en række samtaler med tante Gunvor, der begynder at interessere sig for William.

Tanten viser sig at have en fortid som astrofysiker på universitetet, og efterhånden som dagene går, udvikler samtalerne sig til en hel gennemgang af astronomiens historie fra sumererne og grækerne til Kopernikus, Tycho Brahe, Kepler, Galilei, Rømer og Newton. Vi hører om deres arbejde, de instrumenter, som de brugte, og de tanker, de gjorde sig, og undervejs bliver der også tid til at tale om religion og naturvidenskab og om de videnskabelige metoder. Bogen når vidt omkring (og måske også for vidt, i betragtning af, at William først lige er blevet færdig med 2. klasse).

Bogen er fint illustreret med gode tegninger, "gamle" breve m.m. og efter hvert kapitel et resume i form af nogle fakta-sider. Den kan sammenlignes med en naturvidenskabelig udgave af "Sofies Verden", og det er et vellykket forsøg på at skrive en videnskabshistorie for børn. Der er stor sandsynlighed for, at de voksne, der læser med, også vil lære meget nyt.

JOPP



Et lys i mørket

Frances Andreassen Østerfelt og Anja C. Andersen. Illustrator: Anna Blaszczyk, "Marie Curie – Et lys i mørket", Forlaget Cobolt, 136 sider, 298 kr.

Marie Curie er den eneste, der har fået Nobelprisen i to forskellige fag. I 1903 fik hun som en af de første Nobelprisen i fysik og i 1911 også Nobelprisen i kemi. Priserne fik hun for sit arbejde med radioaktive stoffer, og sammen med sin mand Pierre Curie opdagede hun blandt andet grundstofferne radium og polonium. Hun blev siden den første kvindelige professor på Sorbonne Universitetet i Paris.

Marie Curie blev født i 1867, da Warszawa var under russisk herredømme. Hun kom fra beskedne kår, hvor hendes far var gymnasielærer i fysik og matematik, og hendes mor var pianist, sanger og lærer. Som den yngste af familiens fem børn, var det ikke oplagt, at hun på mange måder skulle blive en pionér i naturvidenskaben, men hun var i besiddelse af en helt usædvanlig viljestyrke.

Da hun som kvinde ikke kunne blive optaget på et universitet i Warszawa, flyttede hun i 1891 til Paris. Her møder hun fysikeren Pierre Curie, som hun i 1895 gifter sig med, men ægteskabet bliver kort med Pierres tragiske død i 1906. Nogle år senere bliver hun centrum for en skandale, hvor hun i franske aviser anklages for at have et forhold til fysikeren Paul Langevin, der var gift og havde fire børn.

Marie Curie dør i 1934 af leukæmi, som hun sandsynligvis udviklede efter de mange års arbejde med radioaktive stoffer.

Der er skrevet mange bøger om Marie Curies liv og forskning, men nu findes historien også som tegneserie. Det er den polske tegner, Anna Blaszczyk, der har lavet de flotte og collageagtige tegninger. Bogen henvender sig nok mest til større børn, men selvom teksterne er korte, er der mange detaljer om Marie Curie, som sikkert også vil være nye og interessante for voksne læsere.

JOPP

Åreforkalkning - - breddeopgave 77 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 77 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 77. Åreforkalkning

Hvor meget skal blodtrykket procentvis øges for at sikre den samme blodgennemstrømning ved 5 % formindskelse af årernes indvendige diameter på grund af åreforkalkning? Begrund svaret.

Løsning

Lad os lave et overslag ved at regne på en stationær laminar strømning gennem et rør. Vi vil gerne vide, hvor meget trykgradienten i åren skal øges for at sikre den samme blodgennemstrømning ved 5 % formindskelse af årernes indvendige diameter. Vi leder efter en formel, der udtrykker trykgradienten dP/dx som funktion af blodets volumenstrøm Q , årens radius r og blodets viskositet η ,

$$\frac{dP}{dx} = -(\text{ukendt tal}) Q^\alpha r^\beta \eta^\gamma \quad (1)$$

Dimensionen af de indgående størrelser er $[dP/dx] = \text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}$, $[Q] = \text{L}^3\text{T}^{-1}$, $[r] = \text{L}$ og $[\eta] = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$. Kravet om samme dimension på begge sider af lighedstegnet medfører derfor

$$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2} = (\text{L}^3\text{T}^{-1})^\alpha \text{L}^\beta (\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1})^\gamma \quad (2)$$

$$= \text{M}^\gamma \text{L}^{3\alpha+\beta-\gamma} \text{T}^{-\alpha-\gamma}, \quad (3)$$

og ved afstemning af potenserne af basisdimensionerne M, L og T hver for sig, fås ligningssystemet

$$\text{M} : 1 = \gamma \quad (4)$$

$$\text{L} : -2 = 3\alpha + \beta - \gamma \quad (5)$$

$$\text{T} : -2 = -\alpha - \gamma, \quad (6)$$

med løsningen $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, -4, 1)$. Den efterspurgte formel er derfor af dimensionsgrunde nødvendigvis

$$\frac{dP}{dx} = -(\text{ukendt tal}) Q r^{-4} \eta \quad (7)$$

Formlen kan bruges til at se på en ændring $d(dP/dx)$ af dP/dx som følge af en ændring dr af r ,

hvor Q og η samtidigt er fastholdt. Ved differentiation af ligning (7) med hensyn til r fås

$$d(dP/dx) = -(\text{ukendt tal}) Q (-4r^{-5} dr) \eta. \quad (8)$$

Herefter fås ved division af ligning (8) med ligning (7)

$$\frac{d(dP/dx)}{(dP/dx)} = -\frac{4dr}{r}. \quad (9)$$

En relativ formindskelse $-dr/r$ af r på 5 % hænger derfor sammen med en relativ forøgelse af trykgradienten og dermed blodtrykket på 4 gange 5 %, altså 20 %. Hvis den samme blodgennemstrømning skal opretholdes.

Kommentar

Det "ukendte tal" vides at være $8/\pi$ ifølge Poiseuilles lov. Hvis en studerende til eksamen havde husket Poiseuilles lov og taget udgangspunkt i den, havde det været i orden. Da hjælpemidler ikke er tilladt ved eksamen, bortset fra et på begge sider beskrevet A4-ark efter eget valg, er det imidlertid usikkert, om de studerende har loven præsent. Men de skal så kunne udlede den ved dimensionsanalyse, som vist.

En toppræstation ville være at undersøge, hvad svaret på opgaven er, hvis det ikke antages, at blodet strømmer laminart, men tværtimod gennemført turbulent. Hvad hvis arbejdet, som trykforskellene udfører, ikke som ved laminar strømning bliver omsat til varme afhængig af størrelsen af η , men derimod bliver omsat til makroskopisk kinetisk energi i hvirvelbevægelser afhængig af blodets massefylde ρ ? Så skal dimensionsanalysen gennemføres med ρ^γ på η^γ 's plads i ligning (1). I stedet for ligning (2)-(3) får vi da

$$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2} = (\text{L}^3\text{T}^{-1})^\alpha \text{L}^\beta (\text{ML}^{-3})^\gamma \quad (10)$$

$$= \text{M}^\gamma \text{L}^{3\alpha+\beta-3\gamma} \text{T}^{-\alpha}, \quad (11)$$

som fører til ligningssystemet

$$\text{M} : 1 = \gamma \quad (12)$$

$$\text{L} : -2 = 3\alpha + \beta - 3\gamma \quad (13)$$

$$\text{T} : -2 = -\alpha, \quad (14)$$

med løsningen $(\alpha, \beta, \gamma) = (2, -5, 1)$. Den efterspurgte formel er derfor af dimensionsgrunde

$$\frac{dP}{dx} = -(\text{ukendt tal}) Q^2 r^{-5} \rho \quad (15)$$

i stedet for ligning (7).

Modsat ligning (7) kan ligning (15) dårligt udregnes på anden måde end ved dimensionsanalyse.

Svarende til udledningen af ligning (8) fra ligning (7) og konklusionen ud fra den, viser ligning (15), at trykket og trykgradienten i den fuldt udviklede turbulente grænse, på grund af -5 eksponenten for r , procentvis skal øges med 5 gange $5\% = 25\%$ for at opretholde den samme blodgennemstrømning ved en 5% mindskning af årernes diameter.

Der er altså ikke så stor forskel på besvarelsen af opgaven i den turbulente og den laminare grænse. I intervallet med Reynolds tal herimellem kunne man derfor (men ikke med sikkerhed) antage et svar i samme retning som for de store og små Reynolds tal. Regnestykket er idealiseret ved at se bort fra, at årerne er elastiske med radier, der indstiller sig efter blodtrykket. Og blodstrømningen foregår pulseret og ikke som en jævn strømning. Alligevel skønner min kollega Johnny Ottesen, der som matematisk biolog professionelt har arbejdet med blodgennemstrømning i årerne, at svaret $20-25\%$ ikke er noget dårligt bud på en besvarelse af opgaven.

Opgaven giver som antydning muligheder for besvarelser på flere niveauer. Det kræver mere at udlede ækvivalenten til Poiseuilles lov ved dimensionsanalyse end at have loven ved hånden og rykke rundt på den til brug her. Og det kræver endnu mere at overveje og gennemføre den supplerende udledning i den turbulente grænse for at undersøge, hvor meget konklusionen i den laminare grænse afhænger af at være i denne grænse. Vores vurdering er, at det er godt, hvis breddeopgaverne

i almindelighed, som her, giver mulighed for besvarelser på flere niveauer. Det bidrager til at gøre det muligt at formulere opgaverne som et enkelt spørgsmål, uden at det bliver svært at differentiere imellem opgavebesvarelserne. Vi ønsker ikke den traditionelle opbygning af opgaver via hjælpespørgsmål, med mulighed for at skrabbe nok point sammen ved eksamen via hjælpespørgsmålene, uden at hovedspørgsmålet berøres. Det skyldes først og fremmest, at vores undervisning baserer sig på tidligere eksamenssæt med den indholdsmæssige styring, der ligger heri. Både svage og stærke studerende skal fastholdes på interessen i at svare på hovedspørgsmålene i undervisningen. Deres udbytter af undervisningen er forskellige, hvilket ses af deres eksamensbesvarelser. Men de får den samme oplevelse af, hvad målene med undervisningen er.

Breddeopgave 78. Korrespondens mellem Doppler- og Compton-effekten

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen februar 2017, nr. 78 i rækken her i KVANT):

Temperaturen på 200 millioner grader af plasmaet i fusionsreaktoren JET måles ved at undersøge hastighedsfordelingen af plasmapartiklerne ved hjælp af frekvensfordelingen af reflekteret laserlys fra partiklerne. Er det de reflekterede lys fra elektronerne eller fra ionerne i plasmaet, der giver den bedste temperaturbestemmelse? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Foreningsnyt – kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Oktober				
15/10	19.15	Tyngdebølger, kilonovaer og oprindelsen af guld	Jonatan Selsing	AS (Kbh)
22/10	19.00	Tyngdebølger, kilonovaer og oprindelsen af guld	Jonatan Selsing	AS (Aarh)
22/10	19.30	Vulkanisme: årsag og virkning	Paul Martin Holm	SNU
November				
5/11	19.15	Udforskning af det højenergetiske univers	Desiree Della Monica Ferreira	AS (Kbh)
12/11	19.00	Udforskning af det højenergetiske univers	Desiree Della Monica Ferreira	AS (Aarh)
12/11	19.30	Pandemier – historiens store dræbere	Nils Strandberg Pedersen	SNU
26/11	19.15	Verdens mest avancerede robotteleskop	Mads Fredslund Andersen	AS (Kbh)
December				
3/12	19.00	Verdens mest avancerede robotteleskop	Mads Fredslund Andersen	AS (Aarh)
10/12	19.30	Når Jorden står for skud – asteroidenedslag og livets udvikling på Jorden	Henning Haack	SNU
Januar				
21/1	19.15	Solar activity and cosmic rays	Heidi Korhonen	AS (Kbh)
28/1	19.00	Solar activity and cosmic rays	Heidi Korhonen	AS (Aarh)
28/1	19.30	Udforskningen af Mars – to nye missioner	Morten Bo Madsen	SNU
Februar				
18/2	19.15	ICECUBE	Morten Ankersen Medici	AS (Kbh)
25/2	19.00	ICECUBE	Morten Ankersen Medici	AS (Aarh)
25/2	19.30	Kepler-missionen: Stjernesang og planetdans	Jørgen Christensen-Dalsgaard	SNU

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Aud.F/G122, 8000 Aarhus C.

SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturvidenskab.net, facebook.com/SNU1824).

Nul!

Af Mogens Esrom Larsen, Institut for Matematiske Fag, Københavns Universitet



Figur 1. Odysseus og hans mænd blinder Polyfemos. Detalje fra græsk vase (Det arkæologiske museum i Eleusis).

“Ingen vil dræbe mig!” råbte Polyfemos til sine venner, da Odysseus havde stukket hans øje ud.¹ Odysseus havde kaldt sig ved navnet “Ingen” eller på græsk, outis.

Sprogligt har man kunnet betegne ingenting, mens man ikke følte et behov for et talsymbol. Hverken i Assyrien, Kina eller Indien, selv om man fandt på positonstalsystemer.

Det for os så naturlige 0, fx i tallet 10, blev blot markeret med en tom plads. Så i det assyriske 60-talsystem kunne 1 betyde 1 eller 60. Der optæder i det 2. århundrede f.v.t. en enkelt markering af den tomme plads med et par skråstreger. Måske er det det første skrevne 0 i verden?

Men da Ptolemaios i det 2. århundrede e.v.t. i sin *Almagest* oversætter astronomiske tabeller fra assyriske til græsk, har han et problem. Tabellerne indeholder to hexagesimaler, altså 60-ende dele og 3600-ende dele, som vi jo kender så godt under betegnelserne minutter (små) og sekunder (anden små). Han valgte at løse problemet med 0 minutter og nogle sekunder, der nødtigt skulle misforstås som minutter, ved at markere minuttallet med o, en heldig forkortelse for det græske ord for intet.

Heldet er, at da grækerne skrev tal som

bogstaver, alpha = 1, beta = 2 osv, var o = omikron taltegn for 70, der jo ikke kunne misforstås som et antal minutter.

Senere i brugen af arabertal med et nul som “.” blev det udvidet til et lille o for tydeliggørelsens skyld.

Hos os blev tallet 0 ikke benævnt “ingen” eller “intet”, men vi lånte ordet nul fra tysk, null, der er lånt fra latin nullus, “end ikke én”.

Nul var i min barndom nummeret på en sporvogn, der dog kun fandtes i en tegneserie, “Nullerten”.

Men, som Storm P fik sagt: “Ingenting kommer af Ingenting, undtagen Lommeuld.”



Figur 2. Claudius Ptolemæus (ca. 100–170) med armillarsfære (maleri fra 1476).

Referencer:

- [1] Karl Menninger (1992) *Number Words and Number Symbols, A Cultural History of Numbers*, New York.

¹ Otto Steen Dues oversættelse af Odysseén.