

# Niels Bohr Institutet og forskningen på CERN

*John Renner Hansen, Niels Bohr Institutet*

Niels Bohr Institutet har igennem seks årtier været tæt knyttet til udviklingen af det europæiske center for partikelfysik, CERN, i Geneve. Relationen går helt tilbage til Niels Bohr, som i tiden lige efter 2. verdenskrig lagde et stort arbejde i at få etableret et fælles europæisk laboratorium til studier af subatomare fænomener. Siden har forskere fra Niels Bohr Institutet bidraget til helt basale eksperimenter, som har gjort nogle af de mest centrale opdagelser og foretaget målinger på naturens mindste byggesten og af de kræfter, der holder partiklerne sammen i fx protoner og neutroner.

## Niels Bohr Institutet og CERN

Niels Bohr Institutet har lige fra starten af CERN i 1953 været tæt knyttet til organisationen og har bidraget til mange af de videnskabelige landvindinger, som CERN har muliggjort. Fysikerne, der bruger CERN, arbejder inden for et bredt spektrum af emner, lige fra lavenergifænomener i atomfysikken til fænomener, der i naturen kun skete i et meget kort tidsrum efter Big Bang for 13,8 milliarder år siden. Dengang var energitætheden tilstrækkeligt høj til at skabe tilstande, som i dag kun kan genskabes i laboratorierne ved hjælp af kilometerstore acceleratorsystemer. Udover de eksperimentelle faciliteter er CERN hjemsted for en teoriafdeling, hvor samspillet mellem de eksperimentelle resultater og de teoretiske idéer skaber udvikling mod en bedre forståelse af naturen.

## Partikelfysik

Fascinationen ved det absolut største og det absolut mindste i naturen har gennem tiden udfordret mennesker til at udnytte den højeste teknologiske kunnen for at flytte grænserne for den erkendelse, vi har om de to ekstremer. I den ene ende findes kosmos, som beskrives med de største afstande, de længste tider og de største objekter. Det er her, det hele begynder i et Big Bang for 13,8 milliarder år siden. Mikrobølgebaggrundsstrålingen og lyset fra fjerne galakser fortæller os om en fantastisk udvikling frem til det univers, vi observerer i dag. I den modsatte ende findes elementarpartiklerne, med de korteste afstande og tider samt de mindste genstande. Det er en moderne erkendelse, at det hele hænger sammen, og at man ikke kommer til at forstå den kosmologiske udvikling, hvis man ikke forstår naturen på de mindste skalaer og omvendt aldrig vil få en fuld forståelse af mikrokosmos, uden også at undersøge universet på de største skalaer.

Gennem historien er det, vi kender som de mest elementære partikler til stadighed blevet mindre og lettere. Men det er en gammel erkendelse, formuleret af Demokrit i det fjerde århundrede før vores tidsregning, at stof kun kan brydes ned til en vis mindste bestanddel – atomet. De udelelige atomer kan samles igen som byggeklodser til nye objekter, som bliver synlige og brugbare. Det er den grundfilosofi, der henover kemien, atomfysikken og kernefysikken er ført med som en centralt antagelse i partikelfysikken.

Partikelfysikken er læren om de absolut mindste

partikler og om de kræfter, som de påvirker hinanden med, og som endelig har nået den udelelighed, som Demokrit forudsagde for 2500 år siden. Niels Bohr Institutets medarbejdere har gennem hele instituttets 100-årige historie været på forkant i denne udvikling. Fra Niels Bohrs grundlæggende opdagelse af atomernes kvanteegenskaber, over kernefysikken hvor Åge Bohr og Ben Motelson med deres model for atomkernen og deres nobelpriser fik sat fokus på instituttets aktiviteter. De sidste 60 års deltagelse i centrale eksperimenter på CERN er en naturlig del af denne udvikling.

## CERN

Når man undersøger mindre og mindre partikler, skal der til stadighed bruges større og større instrumenter. På et tidspunkt bliver det så dyrt, at de enkelte universiteter og senere de fleste lande ikke selv kunne finde de nødvendige ressourcer til projekterne. Efterkrigstidens Europa var et ideelt sted at begynde et overnationalt samarbejde om noget så upolitisk som studiet af de mindste partikler, og derigennem finde finansiering til de dyre accelerators og måleinstrumenter. Europa var dengang splittet, og et diplomatisk projekt om videnskab – science diplomacy – blev brugt til at samle kræfterne om noget, man ikke kunne være politisk uenige om på tværs af nationer. Niels Bohr lagde et stort arbejde i at få etableret et fælles europæisk laboratorium, og det lykkedes i 1951.

Elleve lande, heriblandt Danmark, nedfældede en aftale om European Council for Nuclear Research, som senere skulle blive til Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, forkortet til CERN. Det var centralt, at organisationen ikke måtte bruges til militære formål, og at viden skabt af organisationen skal deles med alle. CERNs konvention siger direkte, at "The Organization shall have no concern with work for military requirements and the results of its experimental and theoretical work shall be published or otherwise made generally available." Dette var helt i tråd med de tanker, der fik Niels Bohr til at sende sit brev om en åben verden til De Forenede Nationers Generalforsamling den 9. juni 1950, og som nu snart 75 år senere gennemsyrrer ideen om "Open Science", en demokratisering og fredeliggørelse af videnskab bredt forstået. Mere jordbundet var CERN-projektet også et forsøg på at standse den hjerneflugt fra Europa mod USA, som man havde oplevet under og efter 2. verdenskrig.

CERN blev etableret på en bar mark uden for Geneve lige op til grænsen mellem Schweiz og Frankrig. Det gav gode muligheder for de udvidelser, som organisationen senere har gennemført. Man har flere gange måtte bygge nye accelerators med endnu højere partikelenergi til rådighed, når grænsen for, hvad man kunne lære med de "gamle" maskiner, var nået.



**Figur 1.** Mange af CERNs grundlæggere samlet til 3. session i det midlertidige CERN-råd, Amsterdam den 4. oktober 1952. Niels Bohr ses øverst i anden række fra venstre, med sin uundværlige pipe.

Princippet i forskningen er meget simpelt. Tag protoner, også kendt som den positivt ladede kerne i brintatomet, accelerér dem til en høj energi og send dem ind mod noget stof, hvor de rammer atomkernerne. Observér, hvad der kommer ud af sammenstødene. Sammenlign derefter observationerne med teoretiske forudsigelser for derigennem at bestemme, om teorien holder, eller om den har brug for justeringer eller måske en total nytænkning.

Ideen med at sende protoner ind mod et fast stykke stof er simpel, men har den ulempe, at en meget stor del af protonens energi ikke kan bruges til at skabe nye partikler med. En stor del af energien går til at opfylde loven om impulsbevarelse. Kort sagt, den samlede bevægelse skal bevares før og efter et sammenstød. Dette løste CERNs acceleratorfolk ved at sende to protonstråler imod hinanden. To kolliderende protoner med samme fart, men i hver sin retning, har samlet set ingen impuls. Det fælles massemidt punkt bevæger sig ikke. Metoden blev senere raffineret ved at erstatte den ene stråle af protoner med en stråle af antiprotoner, så man derved skabte en proton-antiproton-kollider. Senest har man brugt elektroner og anti-elektroner (positroner), inden man i Large Hadron Collider er gået tilbage til at kolliderer protoner fra to modsatrettede stråler. Alt sammen for at skabe så høj energi i sammenstødene som muligt og samtidig høj intensitet i strålerne, så man også får mange sammenstød at studere. For en indføring i partikelacceleratorer se [1].

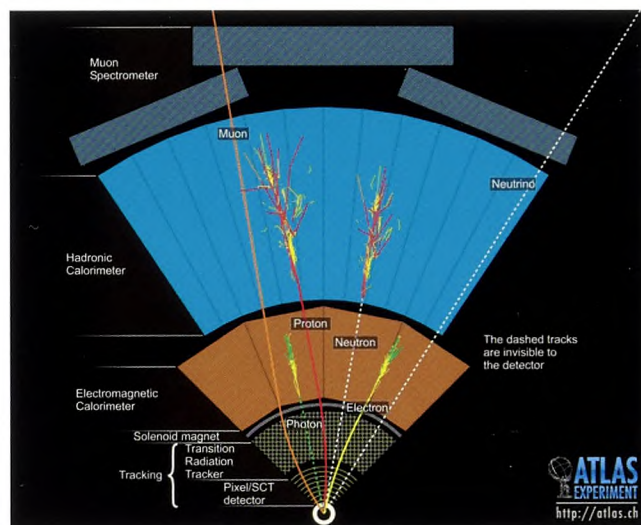
Helt vildt bliver det, når man i stedet for at lade protoner kolliderer sender tunge ioner, fx blykerner, imod hinanden. De to kerner smelter sammen i et område med så høj temperatur og tryk, at protoner og neutroner nærmest smelter og danner et plasma, kvark-gluon-

plasma, som kunne have været til stede i det meget tidlige univers.

Richard Feynman sammenlignede metoden med at smadre to gammeldags vækkeure sammen og notere, hvad der kommer ud, tandhjul, fjedre, møtrikker, visere . . . , i hvilke retninger, og med hvilken fart. Gør det en million gange og forsøg så at rekonstruere, hvordan vækkeuret er bygget.

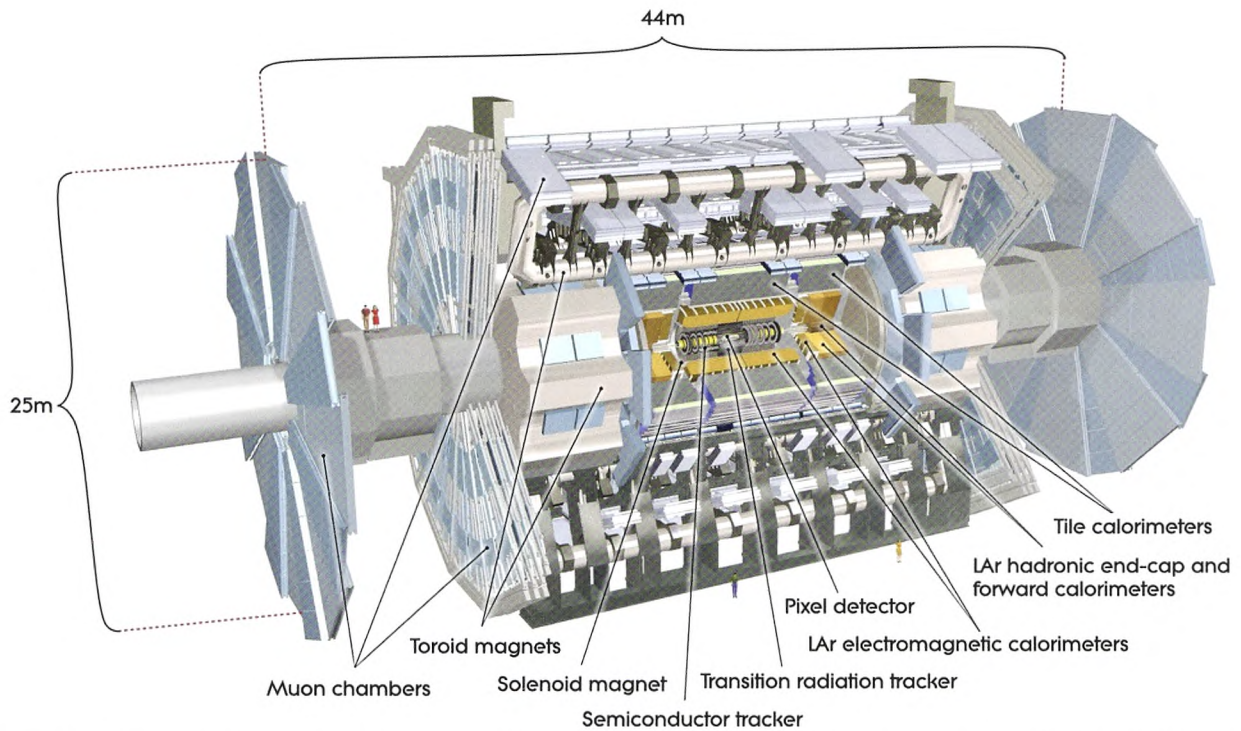
## Eksperimenternes opbygning

Undersøgelsen af, hvad der sker, når to partikler støder sammen med høje energier, går ud på at identificere og måle energi og retning af de partikler, der kommer ud fra sammenstødspunktet, ligesom i Feynmans tankeeksperiment med vækkeurene. Selvom der produceres hundredevis af forskellige partikler i sammenstødene, er de fleste så kortlivede, at de reelt ikke flytter sig, inden de henfalder til mere stabile partikler. Det er derfor relativt få forskellige partikeltyper, man skal koncentrere sig om, de typer, som lever længe nok til at komme hele vejen ud til måleinstrumenterne. Essentielt er det elektroner, myoner, protoner, neutroner,  $\pi$ - og k-mesoner samt fotoner.



**Figur 2.** 30°-udsnit af ATLAS-detektoren ved CERNs Large Hadron Collider. Protonerne støder sammen i punkt nedest på figuren. Partiklerne passerer spordetektoren, det elektromagnetiske kalorimeter, det hadroniske kalorimeter og til sidst myondetektoren. Hele opstillingen er omgivet af et kraftigt magnetfelt.

Figur 2 illustrerer et 30°-tværsnit af en traditionel eksperimentel opstilling, i dette tilfælde ATLAS ved CERNs Large Hadron Collider. Se figur 3, hvor hele detektoren er vist. De enkelte detektorkomponenter er anbragt som dåser med stigende radius og længder og med sammenstødspunktet i centrum. Det hele er pålagt et magnetfelt, som i dette tilfælde går vinkelret ud af billedets plan. Inderst i spordetektoren måles retning og impuls af de ladede partikler, derefter energien af elektroner og fotoner i det elektromagnetiske kalorimeter, efterfulgt af energimålingen af protoner, neutroner, og mesoner i hadron-kalorimeteret. Myonerne farer lige igennem alt og efterlader sig kun et svagt spor af ioner, dvs. atomer, hvor en eller flere elektroner er slået af. Neutrinoer farer lige igennem uden nogen form for sig-



**Figur 3.** ATLAS-detektoren med spordetektoren inderst, kalorimetre udenom og muon-kamre yderst, det hele indhyllet i et magnetfelt, som skabes af solenoidmagneten mellem spordetektorerne og kalorimetrene. ATLAS har ud over den centrale solenoide også et sæt spoler yderst, som skaber et magnetfelt cirkulært omkring de indkomne protonstråler.

nal. Krumningen af sporene giver partiklernes impuls (bevægelsesmængde). Jo højere impuls, jo mere lige er sporet. Ved at kombinere de forskellige signaler kan man identificere partiklerne. Fx afsætter en elektron et signal i spordetektoren og afsætter alt sin energi i det elektromagnetiske kalorimeter. En neutron giver ingen signaler i spordetektoren og i det første kalorimeter, men afsætter sin energi i hadronkalorimeteret.

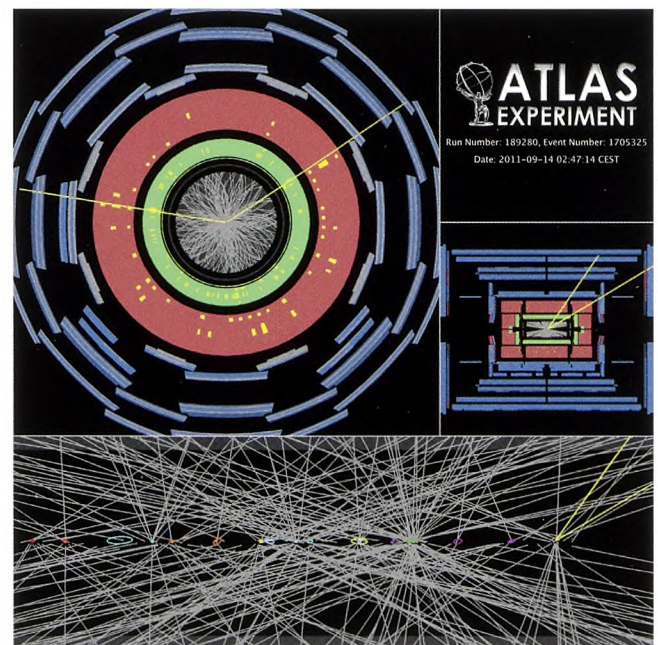
En rekonstrueret begivenhed fra ATLAS, figur 4, hvor man inderst ser spor af ladede partikler, derefter energi afsat af elektroner og fotoner (grønt område), fulgt af hadronisk energi (orange område), og to myoner, som løber hele vejen igennem. Udover det sammenstød, der har skabt de to myoner, kan man på figuren se 11 andre sammenstød, som er sket samtidigt inden for ca. 1 cm. Det siger noget om den præcision, man skal bruge i eksperimenterne, for ikke at blande partikler fra to eller flere uafhængige sammenstød sammen. For en indføring i eksperimenterne på CERN se [2].

### Mystikken om de mange partikler

Man havde, allerede inden CERN blev etableret, set tre helt forskellige elementarpartikeltyper, leptoner, hadroner og fotoner. Elektronen er den mest kendte lepton og den første af de nye elementarpartikler til at blive opdaget allerede i 1899 af J.J. Thomson. Dertil myonen, en elektronlignende partikel, men 207 gange tungere end elektronen, observeret i den kosmiske stråling af Anderson og Neddermeyer i 1936. Og så den mærkelige neutrino, som af W. Pauli i 1930 blev indført, for at forstå hvorfor elektronerne fra  $\beta$ -radioaktivitet ikke altid har den samme energi.

Den næste type partikler kaldes hadroner og relaterer sig til atomkernerne. Protonen og neutronen er de mest

kendte hadroner.



**Figur 4.** Rekonstrueret begivenhed i ATLAS-detektoren ved LHC.

Sidst men ikke mindst betydningsfuldt har vi fotonen, lyskvantet, som Planck indførte i 1896 for at forstå strålingen fra et absolut sort legeme. Albert Einstein viste i 1905 gennem den fotoelektriske effekt, at indførelsen af lyspartiklen ikke alene var et matematisk trick for at løse et problem, men at lys både kan beskrives som bølger og som energipakker, fotoner.

Med adgangen til mere kraftfulde accelerators og effektive detektorsystemer fx på CERN opdagede

man i hundredevis af nye elementarpartikler, der alle kunne karakteriseres som hadroner. Noget tydede på, at man var ved at afdække et endnu dybere lag af elementarpartikler.

Det krævede nytænkning, og i 1964 foreslog Murray Gell-Mann og George Zweig uafhængigt af hinanden, at hadronerne var opbygget af mindre byggesten kaldet kvarker. For at få det hele til at gå op behøvede man blot tre forskellige kvarker, kaldet up (u), down (d) og strange (s). Det var ikke let at overbevise kollegerne om, at kvarkteorien var den rigtige vej frem. Specielt det faktum, at kvarkerne ikke kunne have ladninger med et helt multiplum af protonens ladning, faldt ikke i god jord. For at få de tre kvarker på plads må ladningerne fordeles med  $+2/3$  protonladning til u-kvarken og  $-1/3$  protonladning til både d- og s-kvarkerne. Lægger man nu ladningerne fra to u-kvarker sammen med en d-kvark, får man  $+1$ , altså en proton, og lægger man to d-kvarker sammen med en u-kvark får man  $0$ , en neutron. Tager man en u-kvark sammen med en anti-u-kvark ( $\bar{u}$ )<sup>2</sup>, får man  $0$  ladning, en neutral  $\pi$ -meson, mens en u sammen med en  $\bar{d}$  giver  $+1$ , den positivt ladede  $\pi$ -meson. Og så er det bare at gå i gang med at konstruere nye partikler, fx uds ( $\lambda^0$ ),  $s\bar{u}$  ( $K^+$ ) osv. og derefter lede efter dem i naturen. Senere er modellen udvidet, så der nu er tre familier af kvarker og leptoner, hvor de letteste er (u(p), d(own),  $e^-$ ,  $\nu_e$ ), den mellemste (c(harme), s(trange),  $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ) og de tungeste (t(op), b(ottom),  $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$ ). Et udestående spørgsmål var så, om der kan være flere, endnu tungere familier.

### De fundamentale kræfter og partiklernes masse

Modellen indeholder derudover en forklaring på tre af naturens fire fundamentale kræfter. Det er ikke muligt at beskrive tyngdekraften konsistent sammen med de andre kræfter inden for kvantemekanikken, hvilket er nødvendigt for at forstå tyngdekraftens virkemåde. I modellen beskrives kræfter som udveksling af partikler mellem elementære byggestene, kvarker og leptoner. Den elektromagnetiske kraft er udveksling af fotoner, Plancks lyspartikel. De stærke kernekræfter skabes gennem udveksling af gluoner, limpartikler, og de svage kernekræfter, som er årsag til  $\beta$ -radioaktive henfald, fremkommer gennem udveksling af W- og Z-bosoner. Fotonen bliver dermed medlem af en ny gruppe partikler, de kraftoverførende. Da modellen blev fremsat af Glashow, Weinberg og Salam i 1967–68, var W- og Z-partiklerne alene forudsigelser fra en matematisk model, som det krævede eksperimenter at be- eller afkræfte. Den samlede model for partikler og kræfter går under navnet Standardmodellen. For en indføring i Standardmodellen se [3,4]

For at få modellen til at fungere var man nødt til at lade alle partikler i modellen være masseløse. Masse får partiklerne ved at vekselvirke med Higgs-partikler, der er allestedsnærværende i vakuum. Massen får partiklerne, fordi det er "svært" at trænge gennem vakuum, og de partikler, som vekselvirker stærkest med Higgspartiklen, får de største masser. Igen en matematisk konstruktion, der må be- eller afkræftes i laboratoriet.

### Niels Bohr Institutets deltagelse på CERN

Forskere fra Niels Bohr Institutet har gennem mere end 40 år deltaget i eksperimenter, som har undersøgt og i utrolig grad bekræftet Standardmodellens forudsigelser. Der er tale om bidrag til store langvarige internationale projekter, som her kun kan nævnes med udpegning af de centrale resultater. Niels Bohr Institutet har med stor succes været med til at afklare de store oprindelige udestående spørgsmål i Standardmodellen; W-, Z- og Higgspartiklernes fysiske eksistens, antallet af familier af fundamentale byggesten, (der er kun tre), og egenskaberne ved den stærke kernekraft. Bidragene til eksperimenterne har været mangfoldige og inden for alle dele af moderne partikelfysik; komplekse spor-detektorer og kalorimetre, styrings-, kalibrerings- og dataindsamlingselektronik, algoritmer og programmer til datareduktion og -analyse, samt simuleringer af detektorernes forventede signalmønstre. De studerende er blevet udfordret og oplært i de mest avancerede måleprocesser, altid på forkant af hvad der er teknisk muligt.

Her følger de centrale eksperimenter på CERN, som Niels Bohr Institutet har deltaget i. Årstallene angiver den periode, hvor eksperimentet indsamlede data.

- R807: 1977–1983, proton-proton-kollisioner ved 28 GeV massemidtpunktsenergi (CM-energi). Stærke bidrag til vores forståelse af de stærke kernekræfter.
- UA2 [5]: 1980–1986, proton-antiproton-kollisioner ved op til 630 GeV CM-energi; opdagelsen af W- og Z-partiklerne, jets-fysik, der klart viser, at der er hårde objekter inden i protoner og antiprotoner, hvilket er afgørende for forståelsen af de stærke kernekræfter.
- ALEPH [6] og DELPHI [7]: 1989–2001, elektron-positron-kollisioner med op til 210 GeV CM-energi; gennem målingen af antallet af lette neutrinoer, blev antallet af familier begrænset til tre. Kun hvis den tilhørende neutrino har en masse højere end halvdelen af Z-partiklens masse, kan en fjerde familie komme på tale, og da de tre første neutrinoer har en forsvindende masse, anses dette for usandsynligt. Dertil mange analyser som bekræfter alle Standardmodellens forudsigelser.
- ATLAS [8] 2009–2030'erne, proton-proton-kollisioner ved op til 14.000 GeV CM-energi; Opdagelsen af Higgs-partiklen. Et væld af målinger, som alle bekræfter Standardmodellen inden for de statistiske usikkerheder.
- ALICE [9] 2012–2030'erne, bly-bly-collider ved ca. 5 TeV per nukleon; klare indikationer på nye faser for stof, der formodes at have været tilstede i det tidlige univers, og som havde indflydelse på universets tidlige udvikling; underbygger vores grundlæggende forståelse af de stærke kernekræfter.

## Fremtiden

Mange af de emner, som denne artikel har berørt, vil også i fremtiden have stor bevågenhed. "Science diplomacy" vil i den nuværende situation med de genopståede øst-vest-spændinger utvivlsomt komme til at spille en afgørende rolle for genetableringen af den gensidige troværdighed. På samme måde som CERN gjorde det i efterkrigstidens Europa. På den videnskabelige front er arbejdet langt fra gjort færdigt. Vi ved, at Standardmodellen ikke er hele sandheden. Den forklarer fx ikke det mørke stof og mørk energi, der udgør henved 95 % af alt stof i universet. Den forklarer heller ikke, hvorfor der ikke er lige så meget antistof som stof i universet. Det er et faktum, som vi kan være glade for, men som ikke er forstået ud fra Standardmodellen. Og så giver den oplagt forkerte svar, når man lader den beskrive ekstremt høje energitætheder, fx at det er mere end 100 % sikkert, at visse processer finder sted i det tidlige univers. Og så mangler vi helt at forstå tyngdekraften ud fra Standardmodellens begrebsapparat. Der er nok at tage fat på, og Niels Bohr Institutet er en del af fremtiden, både inden for partikelfysik og astronomi og altid både med bidrag til eksperimenter og observationer på den ene side og teoridannelse på den anden.

## Litteratur

- [1] <https://home.cern/science/accelerators>
- [2] <https://home.cern/science/experiments>
- [3] <https://home.cern/science/physics/standard-model>
- [4] <https://fysikleksikon.nbi.ku.dk/s/standardmodellen>
- [5] <https://home.cern/science/experiments/ua2>
- [6] <https://home.cern/science/experiments/aleph>
- [7] <https://home.cern/science/experiments/delphi>
- [8] <https://home.cern/science/experiments/atlas>
- [9] <https://home.cern/science/experiments/alice>



John Renner Hansen er lic.scient. og professor i eksperimentel partikelfysik ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Han har bidraget til CERN-eksperimenterne UA2, ALEPH og ATLAS

## Lodret frit fald

### – breddeopgave 96 og 97 med didaktisk kommentar

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 løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var disse breddeopgaver (nr. 96 og 97 i rækken her i Kvant):

#### Breddeopgave 96 og 97. Lodret frit fald

*Ifølge Galilei skulle Aristoteles have ment, at en sten, tabt fra toppen af masten på et skib i fart, vil lande et stykke henne ad dækket, hvorimod Galilei var sikker på, at stenen lander for foden af masten. Er afstanden imellem de to formodede landingssteder til at konstatere? Begrund svaret.*

*På grund af Jordens rotation om sin egen akse falder en tabt sten fra det ca. 100 m høje rådhusårn i København ikke lodret ned til tårnets fod, selvom den ikke fik noget sidelæns skub, da den blev tabt. Hvorfor det? Kan det måles? Begrund svarene.*

#### Løsninger

Hvad angår den første opgave, vil en tabt sten ifølge Aristoteles søge direkte imod sit "naturlige sted" ved i forhold til Jorden at bevæge sig lodret nedad. Da skibet samtidigt bevæger sig i vandret retning, vil stenen lande et stykke henne ad dækket. Men ifølge Galilei og inertiens lov vil stenen blive ved med at have skibets vandrette hastighed under dens fald, som derfor sker langs med masten til dens fod.

Hvis vi kalder mastens højde  $h$ , skibets fart  $v$  og tyngdefeltstyrken  $g$ , giver nutidens måde at regne på  $h = \frac{1}{2}gt^2$ , dvs  $t = \sqrt{2h/g}$  for tiden, det tager stenen at falde. Ifølge Aristoteles er stykket, stenen lander henne ad dækket, derfor givet ved:

$$d = vt = v\sqrt{2h/g} \quad (1)$$

Indsættes  $h = 10$  m,  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> og  $v = 20$  km/time