

Kvark-gluon plasma i det tidlige univers

Af Jens Jørgen Gaardhøje, Niels Bohr Institutet og Discovery-centret, Københavns Universitet

Det tidlige univers bestod, indtil omkring en milliontedel sekund efter Big Bang, af en blanding af de partikler vi i dag anser for fundamentale: kvarkerne, og leptonerne og de kraftformidlende partikler, gluoner, fotoner, W- og Z-bosoner og gravitoner (disse sidste er dog endnu ikke påvist eksperimentelt). Omkring dette tidspunkt var Universets tæthed og temperatur faldet så meget, at de letteste kvarker kunne bindes i baryonerne tre ad gangen, og derved danne f.eks. protoner og neutroner. Siden det første mikrosekund har kvarkerne været gemt væk i kernepartiklerne.

Den stærke vekselvirkning

At alle kvarkerne blev indespærret i baryonerne og ikke overlevede Universets ekspansion i fri tilstand, skyldes en særlig egenskab ved den stærke vekselvirkning mellem kvarker.

Vekselvirkningsenergien mellem kvarker vokser nemlig lineært med afstanden imellem dem, hvorfor det bliver umuligt at "rive" en kvark fri. Desuden besidder såvel kvarker som gluoner en særlig egenskab, der kaldes for farve. Der er tre farver, arbitrært kaldt rød, grøn og blå. Alle eksperimenter, der er blevet udført igennem de seneste 50 år, har vist at det ikke er muligt at isolere en partikel med farve, men at de observerbare partikler i naturen alle er farveløse. F.eks. er baryonerne farveløse, fordi de består af tre kvarker med hver sin farve. Det betyder også, at vekselvirkningen mellem baryoner ikke foregår direkte ved udveksling af gluoner, men ved udveksling af farveneutrale partikler, såkaldte mesoner, der består af en kvark og en antikvark, og som hhv. bærer en farve og dennes antifarve.

Omvendt, aftager vekselvirkningen mellem kvarker, når de er tæt på hinanden. Ved meget små afstande ($< 10^{-16}$ m) er vekselvirkningen mellem kvarker så lille, at man kan opfatte dem som frie partikler. Man taler om asymptotisk frihed. Det var for udarbejdelsen af teorien om den stærke vekselvirkning, også kaldet Quantum Chromo Dynamics (QCD), der blandt andet forudsiger og forklarer dette fænomen, at David Gross, David Politzer og Frank Wilzek fik Nobelprisen i fysik i 2004.

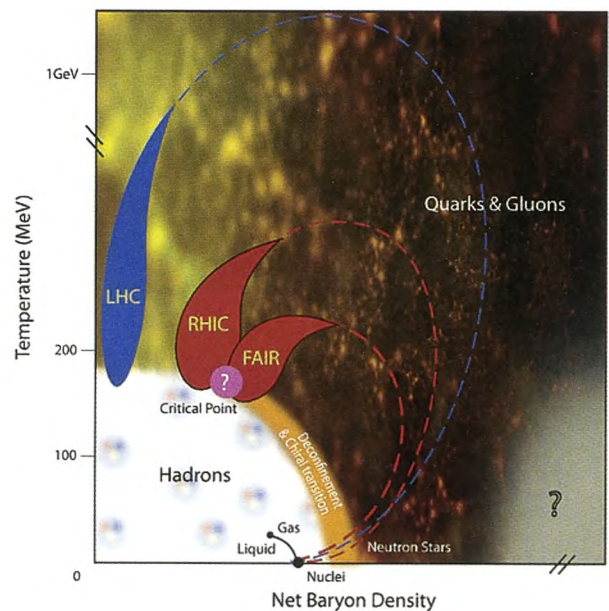
Fasediagrammet for stærkt vekselvirkende stof.

Faserne af stof, der vekselvirker via den elektromagnetiske kraft, er velkendte. F.eks. optræder vand i fast form (is) ved lav temperatur, omdannes til flydende form ved 0°C og omdannes til damp ved 100°C (ved et tryk på 1 atmosfære). I vands tilfælde er faseovergangene af 1. orden, dvs. de foregår ved konstant tryk og temperatur og involverer abrupte ændringer af f. eks. rumfanget.

Fasediagrammet for stof, der vekselvirker gennem den stærke kraft er langt mindre veletableret, end det er tilfældet for vand.

I det tidlige og meget kompakte univers, var afstanden mellem de forskellige partikler lav. Kvarker og

gluoner var derfor sikkert asymptotisk frie og eksisterede i en plasmalignende tilstand, der benævnes Quark-Gluon Plasma (QGP). Som følge af ekspansionen af Universet og den deraf faldende temperatur, fandt der en overgang sted fra QGP-fasen til hadrongas-fasen, en tilstand af stoffet, der består af hadroner (en fællesbetegnelse for baryoner og mesoner, dvs. partikler der består af kvarker). Ved meget høje stoftætheder, som dem der formodes at eksistere i det indre af neutronstjerner, forestiller man sig, at stoffet eksisterer som "koldt" QGP.



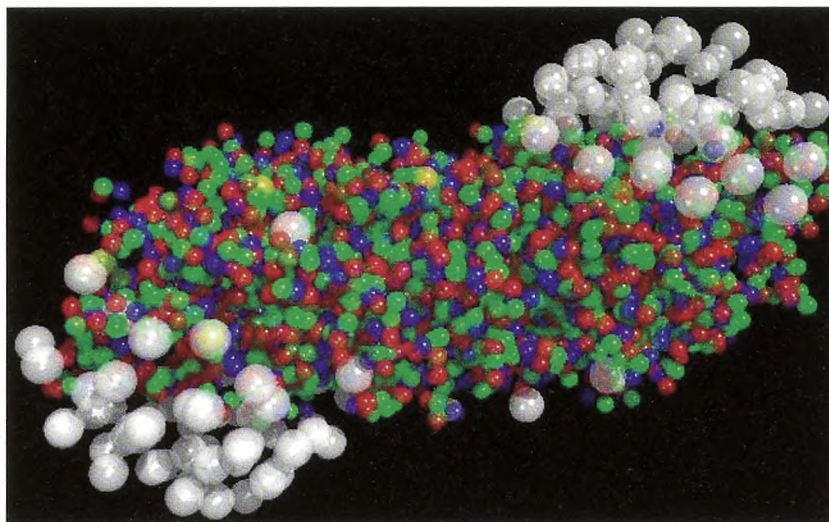
Figur 1. Fasediagram for stof, der vekselvirker gennem den stærke kraft.

Omfattende numeriske beregninger, baseret på QCD-teorien, forudsiger, at overgangen mellem kvark-gluon plasma og hadrongas-tilstandene, finder sted ved en temperatur på omkring 2000 milliarder grader (svarende til ca. 175 MeV, målt i energienheder). For et univers der udvider sig adiabatisk (det vil sige uden indgriben udefra, fra Gud eller andre), kan man udlede en simpel relation mellem temperatur og tid:

$$T[\text{K}] = \frac{1,5 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t[\text{sek}]}} \quad (1)$$

Det er denne relation, der tillader os at tidsfæste be-
givenheden så forholdsvis præcist. Teorien forudsiger
at faseovergangen, i visse områder, er af 1. orden og
i andre af 2. orden, adskilt af et kritisk punkt, der
ikke er stadfæstet endnu, samt at endnu flere ekso-
tiske tilstande kan eksistere, som eksempelvis farve-
superledere. Figur 1 viser et muligt fasediagram for
stof, der vekselvirker stærkt.

Igennem de seneste 25 år er der foregået omfattende
bestræbelser på at studere fasediagrammet eksperimen-
telt. Metoden udnytter at man, ved at accelerere tunge
atomkerner (f.eks. guld, ^{197}Au , eller bly, ^{208}Pb) op
til høje energier og bringe dem til at kolliderer, kan
producere et meget stort antal partikel-antipartikelpar i
et område, der ikke er meget større end to atomkerner.
At man kan omdanne (bevægelses-)energi til stof på
denne måde følger af Einsteins berømte ligning, $E = mc^2$.



Figur 2. Computersimulering af en kollision mellem to blyatomkerner ca. 10^{-23} sek. efter første kontakt. De farvede kugler illustrerer de mange kvark-antikvark par der dannes i en fuldstændig efterligning af tilstanden i det tidlige univers.

Kvark-gluon plasmatografi

Gennem eksperimenter, ved stadigt voksende kolli-
sionsenergier, er det lykkedes at danne stofområder,
der nu når op på temperaturer over dem som QCD
forudsiger for kvark-gluon plasmaovergangen. Der er
flere "termometre", der kan tages i anvendelse for at
bestemme de ekstreme temperaturer. De spænder fra
målingen af produktionssandsynligheden for at danne
hadroner med forskellig masse, til direkte målinger
af de gammastråler, der udsendes under den første
afkøling.

At man kan identificere og studere kvark-gluon plas-
ma, er blevet vist gennem især to typer eksperimenter
ved RHIC, der har fundet sted i det seneste ti-år.

Jet-undertrykkelse.

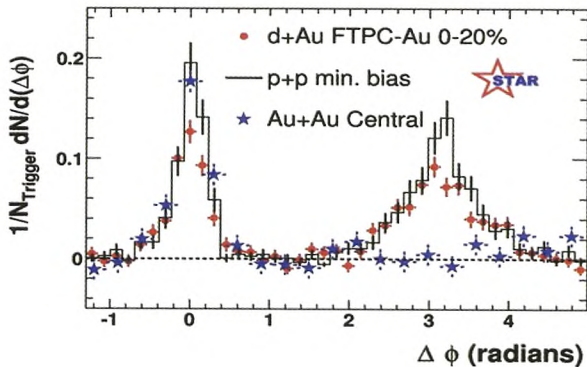
Når to tunge atomkerner støder sammen, kan man
forestille sig, at der sker flere processer samtidigt. Dels
dannes der et stort antal kvarker og antikvarker, når
kernepartikler i de to kerner støder sammen, og dels

I eksperimenter ved Relativistic Heavy Ion Collider
(RHIC), ved Brookhaven National Laboratory, i USA,
kan man producere op til 6000 ladede partikler i hver
centrale kollision mellem guldkerner. Disse partikler
vidner om en uhørt høj energitæthed under kollisioner-
ne – i et uhyre kort tidsrum. Der er gode grunde til at
mene, at der under sammenstødene dannes et kvark-
gluon plasma. Fordi kernerne støder sammen med prak-
tisk talt lysets hastighed, er kollisionsforløbet imidlertid
ovre i løbet af blot ca. 10^{-22} sek. Til sammenligning
bestod Universet af QGP i hele 10^{-6} sekunder, dvs. ca.
 10^{16} gange længere tid. Ikke desto mindre opfører det
lille energirige stofområde, der dannes i overlappet mel-
lem de to kolliderende atomkerner, sig som et lille styk-
ke tidligt univers. Overladt til sig selv vil det ekspandere
og afkøles, og stoffet vil gennemløbe de forskellige
mulige faser, indtil reaktionprodukterne (hadroner og
andre partikler) kan registreres i avancerede detektorer,
der omslutter kollisionspunktet – et lille Big Bang.

kan enkelte kvarker, fra hver af de kolliderende kerner,
spredes næsten elastisk på hinanden og bevæge sig
igennem den samtidigt dannede tætte sky af andre kvar-
ker og gluoner. Sådanne "hårde stød" mellem kvar-
ker er velkendte fra de mere elementære kollisioner mellem
protoner og fører til, at der udsendes et antal hadroner i
modsatte retninger, såkaldte "jets". Jets dannes netop
fordi vekselvirkningen mellem de to spredte kvarker
øges med afstanden imellem dem, og fører til, at der
er energi nok til at danne nye kvark-antikvark par, der
samler sig til hadroner udsendt langs de oprindelige
spredte kvarkers bevægelsesretning.

Når begge processer sker samtidigt, vil de spredte
kvarker vekselvirke med skyen af producerede kvarker,
antikvarker og gluoner, og kan miste energi, inden
de hadroniserer og bliver til jets. Energitabet skyldes
f.eks. stimuleret udsendelse af gluoner som følge af
vekselvirkningerne i mediet. Konsekvensen af denne
vekselvirkning på kvark-gluon niveau er, at jetenergien
modificeres i kollisioner mellem store atomkerner i

forhold til tilsvarende stød mellem protoner ved samme energi. Dette fænomen er meget klart blevet demonstreret ved RHIC af de 4 eksperimenter (se figur 3) og antyder, at man ved denne type eksperimenter har adgang til en egentlig kvark-gluon-plasma tomografi, som vi kender det fra f.eks. røntgen tomografi.



Figur 3. 'Jet quenching' ved RHIC. Figuren viser antal målte partikler i jets for forskellige reaktioner som funktion af vinklen imellem den, når der trigges på en jet ved 0 grader. Bemærk, at for Au+Au kollisioner absorberes den modsatte jet.

Elliptisk flow.

Overlapområdet mellem to kolliderende atomkerner med cirkulært tværsnit har en mandelformet facon. Ved meget høje energier dannes der i overlappet massevis af nye partikler med høje impulser. Overtrykket resulterer i, at partikler har nemmere ved at undslippe langs 'mandelens' smalle akse end langs den længere akse, hvilket udmønter sig i en forskel i antal målte partikler i forskellige retninger. Forskellene afhænger af, hvordan partiklerne vekselvirker indbyrdes under den resulterende ekspansion. Det har vist sig muligt ved RHIC, for første gang, at reproducere dette strømningmønster ("elliptisk flow") ud fra hydrodynamiske beregninger. Beregningernes succes kræver dog, dels at vekselvirkningerne foregår meget hurtigt, dvs. på kvark-gluon tidskala, 10^{-23} s, dels at der stadig er en betydelig vekselvirkning. Målinger er derfor i overens-

stemmelse med, at der dannes et system med kvark-gluon frihedsgrader, der dog ikke er kendetegnet ved asymptotisk frihed, men snarere væskelignende.

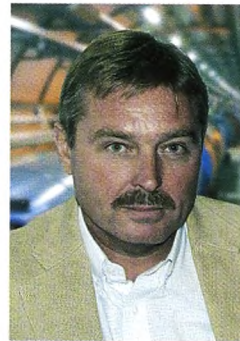
Fremtiden – ALICE-eksperimentet ved LHC

De to beskrevne eksempler på målinger illustrerer, at det nu er muligt at danne og studere kvark-gluon stof under jordiske forhold. Eksperimenterne antyder dog også, at vi først er ved at komme ind i kvark-gluon plasmaområdet og uden tvivl er tæt på faseovergangsområdet til normalt stof. Med voksende kollisionsenergi vil det være muligt at forøge temperaturen betydeligt og derved realisere stoftilstande, der er tættere på den "ideale gas", kendetegnet ved asymptotisk frihed som QCD forudsiger.

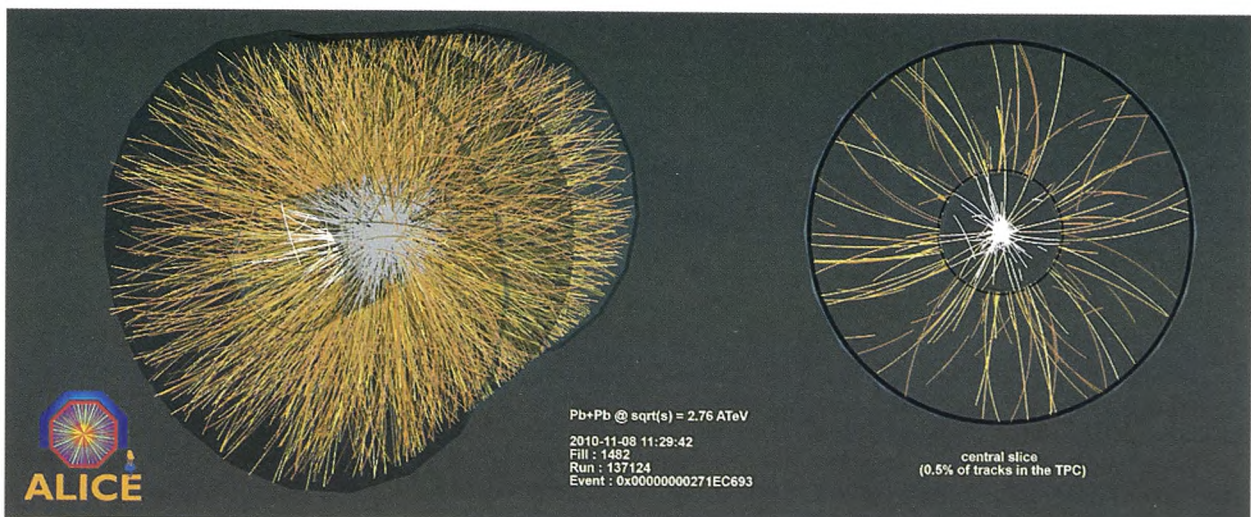
Large Hadron Collider (LHC) ved CERN begyndte, den 8. november, at kolliderer blykerner ved 14 gange højere energi (se figur 4), end det er muligt ved RHIC. Med det slagkraftige ALICE-eksperimentet ved LHC er vi godt rustet til systematisk at udforske de fysiske processer, der har kendetegnet det tidlige univers.

Litteratur

- [1] RHIC whitepapers. *Nuclear Physics* **A757** (2005).
- [2] The Large Hadron Collider: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [3] ALICE-eksperimentet: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>



Jens Jørgen Gaardhøje er professor ved Niels Bohr Institutet, med-talsmand for BRAMHS-eksperimentet ved RHIC samt projektleder ved ALICE-eksperimentet ved LHC på CERN.



Figur 4. En af de første Pb+Pb kollision målt i ALICE-detektoren ved CERN mandag d. 8. november 2010 kl. 11.29.42.