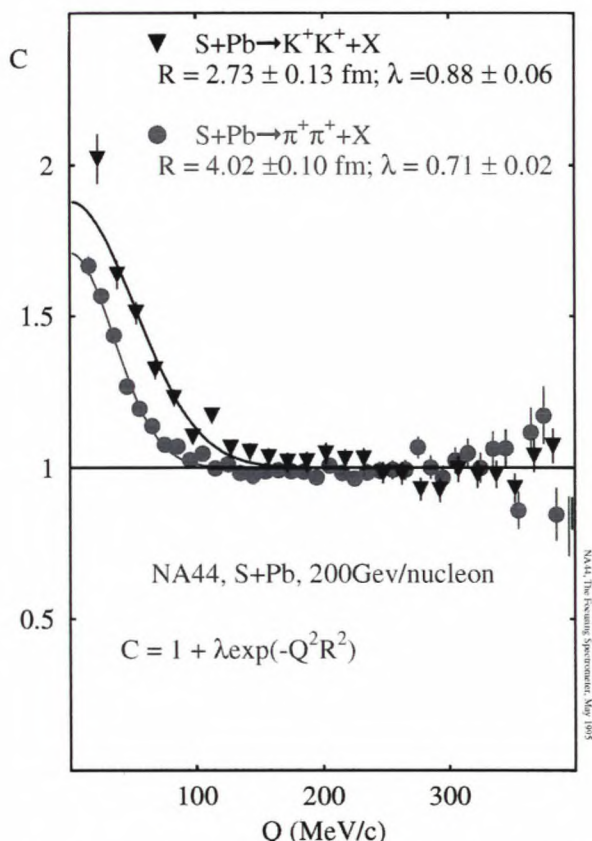


Snapshot's af Små Bang's

Henning Heiselberg, NORDITA
Axel P. Vischer, Niels Bohr Institutet

Jagten på en ny stoffase: quark-gluon plasmaet¹, er gået ind på de internationale laboratorier Brookhaven og CERN. Quark-gluon plasmaet forsøges dannet i højenergetiske tunge kerner kollisioner, som er små eksplosioner eller "Bang's", og genskaber således de første millisekunder i det tidlige Univers efter Big Bang. Vi beskriver, hvorledes quark-gluon plasmaet forsøges dannet i højenergetiske kernekollisioner og målt v.h.a. interferens mellem partikler.



Figur 1. Korrelationsstyrken for positivt ladede pioner (cirkler) og kaoner (trekanter) i centrale $S + Pb$ kollisioner som funktion af den relative impuls $Q \simeq |\Delta p|$ (fra CERN's NA44 eksperiment²). Man observerer, at korrelationsstyrken falder fra 2 til en for relative impulser $Q \simeq 40 \text{ MeV}/c$ for pioner og $Q \simeq 50 \text{ MeV}/c$ for kaoner. Kilestørrelserne er derfor $R \simeq \hbar/Q \simeq 5 \text{ fm}$ for pioner men $R \simeq 4 \text{ fm}$ for kaoner. (se teksten)

Den mindste men varmeste eksplosion på jorden

Når tunge kerner som for eksempel guld eller bly kolliderer ved ultra-relativistiske energier pumper enorme

mængder energi ind i et lille volumen (se figur 2). Herved skabes de højeste energitætheder og temperaturer på jorden og formentligt også i hele universet lige siden det tidlige univers blot få milli-sekunder efter Big Bang.

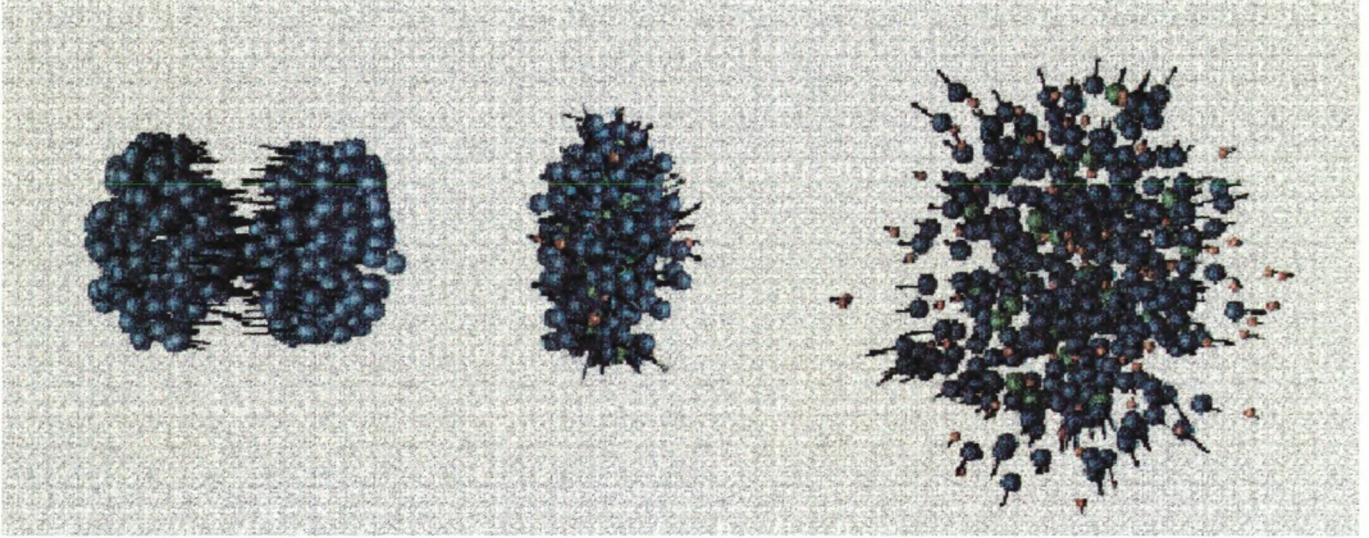
I disse "Små Bang's eller eksplosioner dannes tusindvis af mesoner (quark-antiquark par) i et lille volumen, der dog ekspanderer og afkøles hurtigt. Det vides endnu ikke, om tætheden og temperaturen er stor nok til at mesonerne er smeltet til en ny fase bestående af en plasma af "frie" (deconfined) quarker og gluoner. Fra teoretisk side er man rimeligt overbevist om at fasen forefindes ved temperaturer over ca. 150 MeV ($1 \text{ MeV} \simeq 10^{10}$ grader Kelvin). Tallet på 150 MeV stammer fra beregninger på et uendeligt stort system i temperaturligevægt. Dette er nok et stykke fra virkeligheden i disse kollisioner mellem tunge kerner, hvor plasmaet, der evt. produceres, kun fylder lidt og kun varer kort. Under ekspansionen og afkølingen bindes quarkerne og gluonerne hovedsageligt i mesoner ved temperaturer under ca. 150 MeV . Disse tusindvis af mesoner, der produceres i hver kollision, fortsætter ud i detektorerne, og for at bestemme hastigheden og arten kræves detektorer af størrelse omkring 10 meter på hver led. For at få statistik nok opsamles milliarder af kollisioner, hvilket kræver lynhurtig dataopsamling (se figur 3).

Herefter starter puslespillet: at rekonstruere, hvad der skete under kollisionen, da systemet blot var på størrelse med de kolliderende kerner på blot få fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Da man kun kan måle slutprodukterne - hovedsageligt pioner - får man kun indirekte indsigt i stoffets tilstand og sammensætningen af quark-gluon plasmaet før faseovergangen ved en temperatur omkring 150 MeV .

Man kan drage en analogi til en landskamp i idrætsparken. Alene ud fra menneskemængden, der myldrer ud fra stadion, og deres hastigheder, skal man bestemme resultatet af fodboldkampen! Ved at sammenligne med tidligere kampe med kendt resultat får man en bedre ide om hændelsesforløbet.

Snapshot af eksplosionen

At måle størrelser mindre end bølglængden af synligt lys ($\sim 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m}$) kræver specielle metoder, såsom elektronmikroskoper ($\sim 10^{-9} \text{ m}$) eller scanning tunneling mikroskoper ($\sim 10^{-11} \text{ m}$). Mindre størrelser kan nu måles ved at udnytte partiklers bølgenatur og få identiske partikler til at interferere ligesom lys/fotoner. Tænk på røntgendiffraction, hvor krystallers struktur på atomare afstande kan bestemmes vha. interferens af røntgenstråling. I højenergetiske tungionskollisioner produceres hundredevis identiske mesoner. Da mesoner hører



Figur 2. I denne computer simulation skydes to guldkerner sammen. Energien er 1 GeV per nukleon, så kernerne har samme kinetiske energi som deres hvilemasse. De er på grænsen til at være relativistiske. Ved disse energier er kernerne kun lidt Lorentz forkortede, og der dannes kun få pioner (røde partikler). Ved de højere CERN energier produceres op til $\sim 10^3$ pioner. Pilene viser partiklernes hastighedsvektorer

til klassen af bosoner ligesom fotoner, interferer disse også. Denne såkaldte *Bose-Einstein interferens* kan udnyttes til at bestemme kollisionssystemets størrelser på blot få femtometer!

Den mikroskopiske verden følger kvantemekanikkens regler. Den mest fundamentale lov er Heisenberg's usikkerheds relation. Måles lokaliseringen af en partikel med større og større præcision Δx , tabes nøjagtigheden med hvilken man måler partiklens impuls Δp - og vice versa. Usikkerhedsrelationen skrives ofte som

$$\Delta x \Delta p \gtrsim \hbar, \quad (1)$$

hvor Planck's konstant er $\hbar = h/2\pi \approx 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}/c$ i passende enheder.

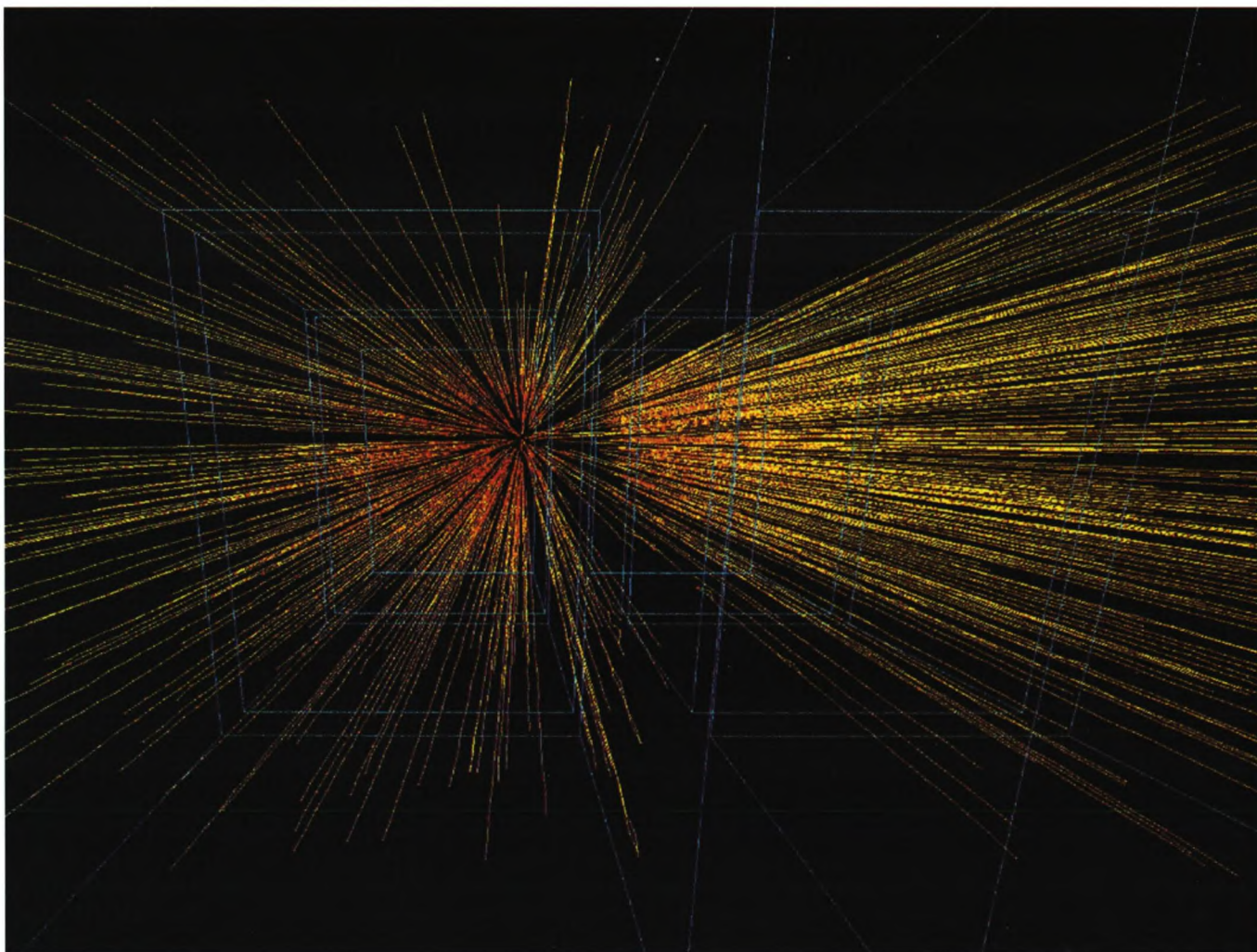
Hvis mesoner undslipper en ildkugle af størrelse R , vil vi kende deres position med en usikkerhed $\Delta x \sim R$. Hvis vi så vælger identiske partikler med en impuls forskel Δp , er vi i det kvantemekaniske område, når $R\Delta p \lesssim \hbar$, og identiske partikler interfererer. I højenergetiske kollisioner med tunge kerner fx $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$ dannes hundredevis af mesoner hovedsageligt pioner (masse $140 \text{ MeV}/c^2$) og lidt færre kaoner (masse $470 \text{ MeV}/c^2$). Vi har i hver kollision tilstrækkeligt med parvise identiske mesoner med lille relativ impuls, så vi kan måle interferensen. Først måler vi så mange pioner, kaoner, etc. som muligt fra hver kollision og deres impulser med stor nøjagtighed. I hver kollision dannes så alle mulige par af identiske partikler, fx to π^+ med impulser p_1 og p_2 og impuls forskel $\Delta p = p_2 - p_1$. Man måler nu korrelationsstyrken

$$C(\Delta p) = \frac{N_{12}(p_1, p_2)}{N_1(p_1) N_2(p_2)}. \quad (2)$$

Her er $N_1(p)$ antallet af en given partikeltype fra en kollision mens N_{12} er antal par med impuls p_1, p_2 . N_{12} er valgt således, at hvis der overhovedet ingen korrelationer forefindes, så er $N_{12} = N_1 N_2$ og korrelationsstyrken er derfor $C = 1$. I det kvantemekaniske område derimod finder man at korrelationsstyrken er $C = 2$. Kort fortalt sker der det, at to identiske partikler med næsten samme impuls ($\Delta p \lesssim \hbar/R$) ikke kan skelnes og deres bølger interfererer konstruktivt. Det interessante område i vores målte korrelationsstyrke er selvfølgelig, hvor den falder fra 2 til 1. Ifølge (1) sker dette når $\Delta p \sim \hbar/R$. Dette sker ifølge figur 1, når $\Delta p \simeq 40 \text{ MeV}/c$. Da $\hbar c \simeq 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ finder vi altså at kildestørrelsen er $R \simeq 5 \text{ fm}$.

Ved at orientere den tredimensionelle impulsvektor Δp i alle retninger kan vi studere et tredimensionelt rumligt "billede" af ildkuglen. Da ildkuglen ekspanderer meget nær lyshastigheden i retningen langs kollisionsaksen fortæller denne længde hvorlænge systemet har ekspanderet. Vi kan således måle størrelse, form, levetid, m.m. af ildkuglen.

Figur 1 viser korrelationsstyrken for pioner og kaoner. For pionerne når $C(\Delta p = 0)$ ikke helt op til værdien 2. Årsagen er formentligt, at billedet forplumres af langlevende tungere mesoner, der henfalder til pioner. Figur 1 viser desuden, at kaonerne har mindre kilderadier end pionerne, $R \simeq \hbar/50 \text{ MeV}/c \simeq 4 \text{ fm}$. Dette gælder også i ekspansionsretningen, så derfor kommer kaonerne ikke bare fra en mindre kilde, men undslipper også tidligere end pionerne.



Figur 3. Den mindste, men varmeste, eksplosion som kan dannes i vores laboratorier (CERN). Rekonstruktion af partikelspor i NA49 detektoren³ fra en central kernekollision ved 200 GeV energi per projektil nukleon. Projektil-kernen er kommet ind fra venstre og kollideret med en target-kerne. Sporene i detektoren er fra de hundredevis af partikler produceret i kollisionen. Rammerne viser grænserne for nogle af detektorerne. Fordelingen af spor i de forskellige retninger skyldes dels at der sendes flest partikler fremad i projektilens retning, men især at detektorerne ikke er lige følsomme i alle retninger.

Dette er bemærkelsesværdigt, hvilket vi ser af følgende analogi til bulldozer episoden i Herstedvester fængsel. Alene ud fra video optagelsen kan vi nok bestemme undvigelsestidspunktet af fangerne og den efterfølgende bølge af politi, men vi kan ikke vide hvorfra i fængslet, de kom! Hertil må vi have anden information end videooptagelsen fx politirapporten. Hvis fangerne og politifolkene var identiske partikler og videokameraet havde haft et interferometer påsat, kunne vi have målt at fangerne kom fra en klump lige indenfor muren, mens politifolkene kom længere indefra og desuden reagerede langsommere. Fangerne vidste derfor nøjagtig, hvor bulldozeren ville ramme.

Interferometri er altså en vigtig kilde til rekonstruktion

af hændelsesforløbet i de "små" bangs. Man kan variere kernestørrelser, kollisionsenergier, stødparametre, m.m., og sammenligne. Udover de eksisterende eksperimenter på Brookhaven ved New York og på CERN ved Geneve bygges der nye accelerators på disse laboratorier. De vil operere ved højere energi med produktion af endnu flere mesoner til følge. I 1999 starter den nye "Relativistic Heavy Ion Collider" i Brookhaven. Den er dedikeret til kollisioner mellem tunge kerner med hver 100GeV per nukleon i tyngdepunktssystemet. I år 2005 vil der på den nye "Large Hadron Collider", der vil operere ved 3TeV , også være et eksperiment, der kolliderer tunge kerner. Forhåbentligt kan partikel interferens metoden her bidrage til endeligt at bevise eksistensen af quark-gluon plasmaet.

Referencer:

1) J.J. Gårdhøje, Naturens Verden, september 1997.
Rasmus Møller, KVANT, september 1993.

2) CERN eksperimentet NA44's hjemmeside:
<http://www.cern.ch/NA44/projects/na44hi.html>

3) NA49 Image Library
http://hpna49-1.cern.ch/NA49/Images/Img_Lib.html

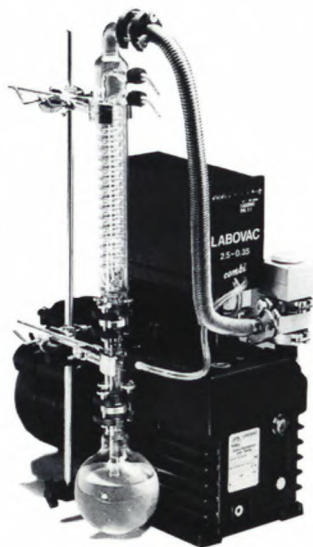


Axel P. Vischer er forsker ved Salomon Brothers, indtil august 1997 ved Niels Bohr Institutet. Han interesserer sig for kernekollisioner, quark-gluon plasmaer, neutronstjerner, mm.



Henning Heiselberg er lektor ved Nordisk Institut for Teoretisk Fysik (NORDITA). Han interesserer sig for kernekollisioner, quark-gluon plasmaer, neutronstjerner, mm.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved højt tryk eller med aggressive gasser. Med en frekvensregulering kan pumpehastigheden fordobles, så man f.eks. hurtigt kan evakuere et anlæg og derefter anvende pumpen som holdepumpe ved lav hastighed. SASKIA's kemisk resistente membran-pumper har liniærdrevne membraner, hvilket sikrer en lang levetid og lavt effektforbrug. En membranpumpe på ca. 30 W kan med de store afgifter på brugsvand hurtigt tjene sig ind, hvis den erstatter en vandstråle-pumpe. SASKIA's TOWER pumpestande er kemipumpestande kombineret med kondensatorer og med instrumentering for indstilling af trykket. SASKIA leverer oliefri pumpestande kombineret med turbomolekularpumper i et handy design og rootspumpestande op til 20.000 m³h⁻¹.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

**WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93**