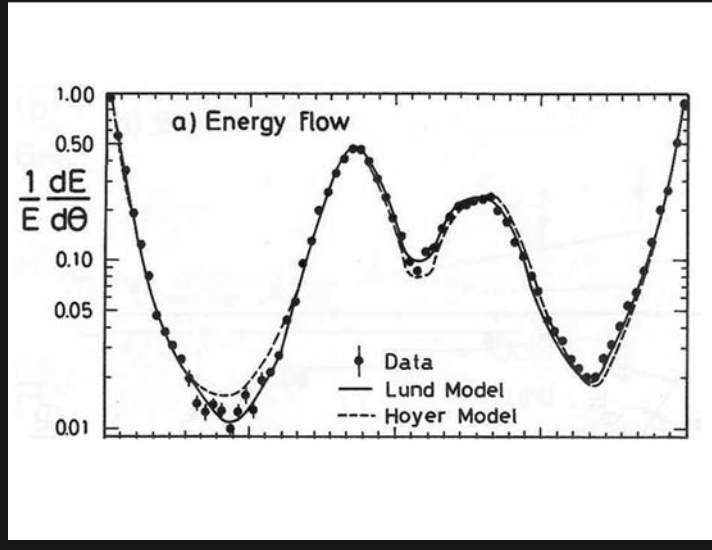


Lundamodellen för högenergikollisioner

Om den framgångsrika Lundamodellen för högenergikollisioner – teoretiska idéer möter en experimentell verklighet.

Färgade kvarkar

M Gell-Mann

Yoishiro Nambu

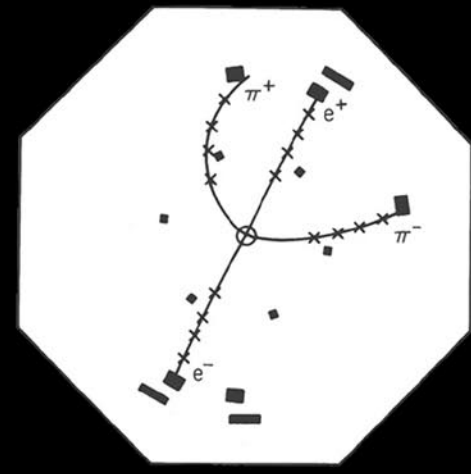
Under 1930-talet visste man att vanlig materia består av atomkärnor (protoner och neutroner) och kring dem cirkulerande elektroner. Under 40- och 50-talen upptäcktes många partiklar, hadroner, som tycktes lika elementära som protonen och neutronen. De växelverkar inbördes via den starka kärnkraften.

1964 framförde både M Gell-Mann och G Zweig hypotesen att hadronerna har mindre beståndsdelar, så kallade kvarkar Y Nambu föreslog att kvarkarna förekommer i tre varianter, färger, som växelverkar genom utbyte av gaugebosoner, gluoner.

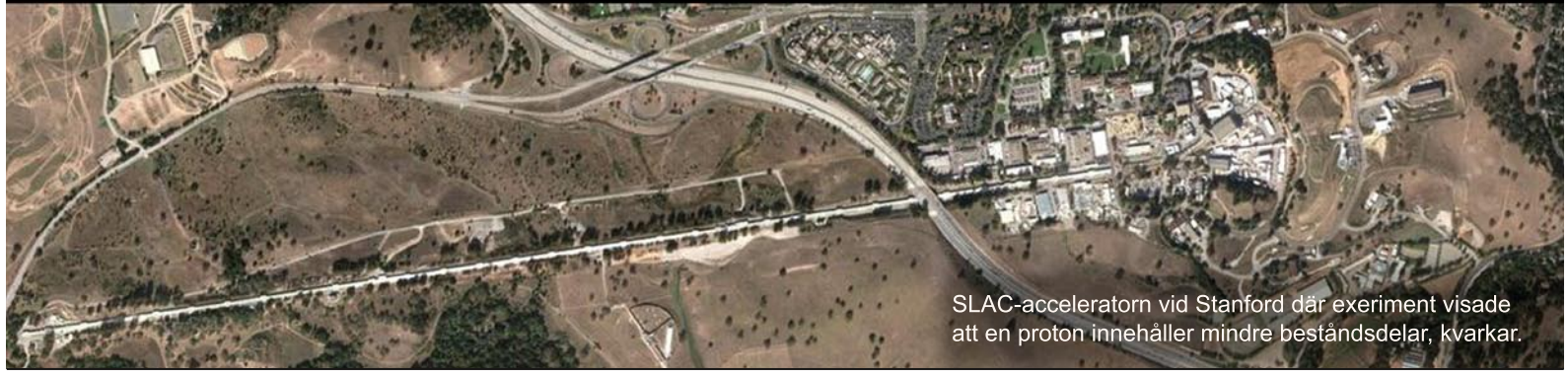
Kvarkarna observeras

1968 genomfördes vid SLAC i Stanford experiment med spridning av 20 GeV elektroner mot protoner. Resultatet påminde om Rutherfords experiment med spridning av alfa-partiklar mot guld, vilka visade att atomen har en koncentrerad kärna. På liknande vis kunde SLAC-experimentet tolkas som spridning av elektronerna mot mindre beståndsdelar i protonen.

Sedan man 1974 också påvisat en partikel som innehöll en ny kvark, charmkvarken, vilken var förutsagd av kvarkteorin, ansåg en majoritet fysiker att kvarkhypotesen troligtvis var korrekt.

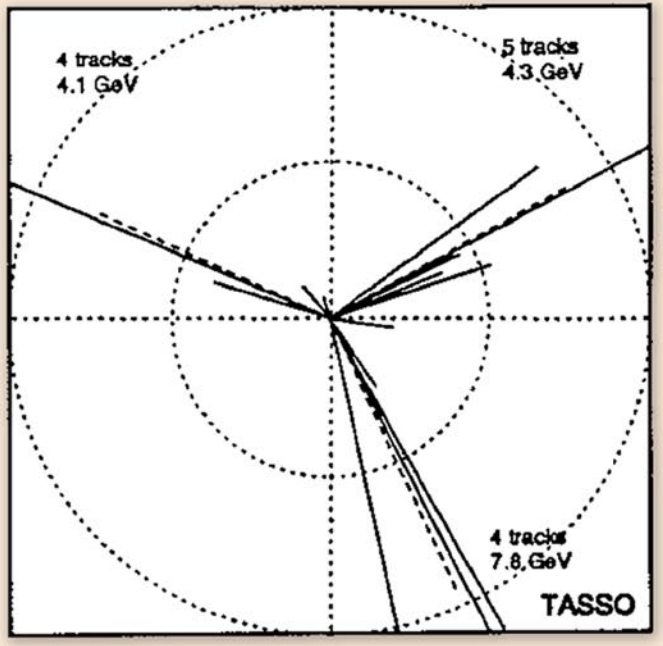


Spår från en J/psi-partikel som sönderfaller till pi^+, pi^-, e^+, e^-. J/psi består av en charmkvark och dess antikvark.



SLAC-acceleratorn vid Stanford där exeriment visade att en proton innehåller mindre beståndsdelar, kvarkar.

Kvantkromodynamik (QCD)



Figur från TASSO-experimentet vid DESY i Hamburg, som påvisade gluonens existens, och därmed QCD-teorins riktighet. Bilden visar tre partikelskurar som kommer från en kvark, en antikvark och en gluon, vilka skapats i en kollision mellan en elektron och en positron.

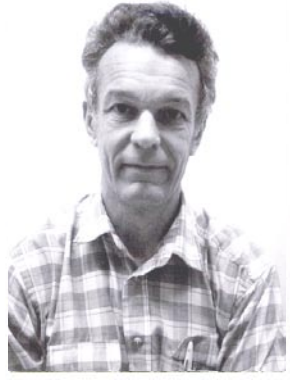
1972 formulerades en konsistent hypotetisk teori för den starka kraften, kvantkromodynamik (QCD), baserad på Gell-Manns och Nambus idéer om färgade kvarkar och masslösa gluoner.

Teorin bekräftades 1979, då gluonens existens påvisades i elektron-positron-kollisioner.

QCD:s ekvationer kan dock lösas endast då kvarkar eller gluoner är mycket nära varandra. Annars behövs QCD-inspirerade modeller.

Starten

Bo Andersson



Gösta Gustafson

När Gunnar Källén kom till Lund 1958 samlade han omkring sig en livaktig grupp doktorander, som studerade fältteoretiska problem. Källén avled 1968 och hans elever spreds över världen.

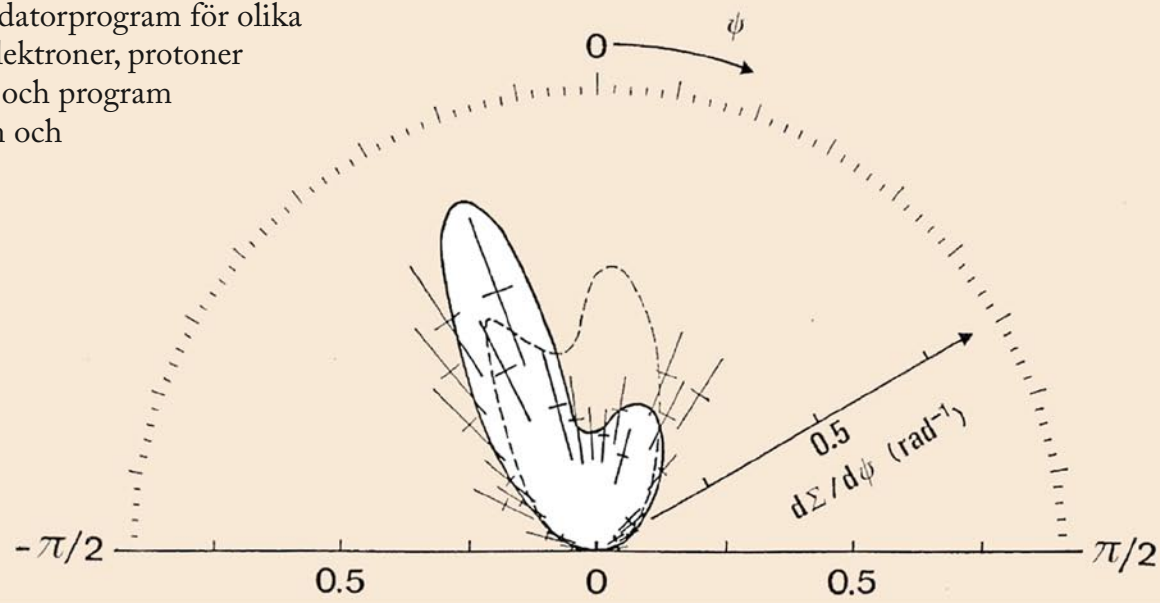
I mitten av 1970-talet fanns det alltfler tecken på att kvarkar utgör materiens grundstenar. Bo Andersson och Gösta Gustafson, som då återkommit till Lund, beslöt 1976 att tillsammans med doktoranden Carsten Peterson studera detta, för dem nya, område. Det blev starten på vad som senare kom att kallas Lundamodellen.

Tidig utveckling

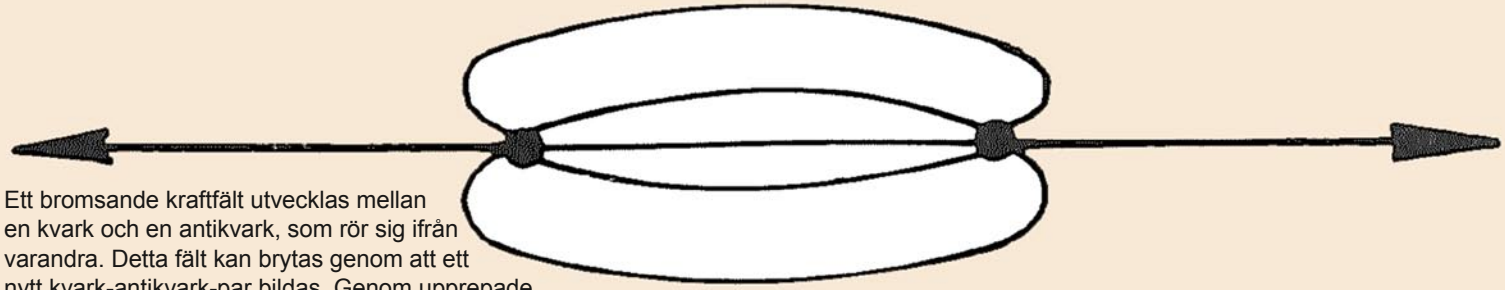
Carsten Peterson doktorerade 1977 och lämnade snart Lund men i hans ställe kom nya duktiga doktorander in i kvarkprojektet. Särskilt Torbjörn Sjöstrand, Bo Söderberg, Gunnar Ingelman och, något senare, Hans-Uno Bengtsson gjorde viktiga insatser. Arbetet att förstå och beskriva högenergikollisioner utvecklades.

Lundamodellen och Lund Monte Carlo blev samlingsnamn för modeller och datorprogram för olika typer av kollisioner mellan elektroner, protoner och kärnor. I dessa modeller och program utgör strängfragmenteringen och kvark-gluon-kaskader viktiga element.

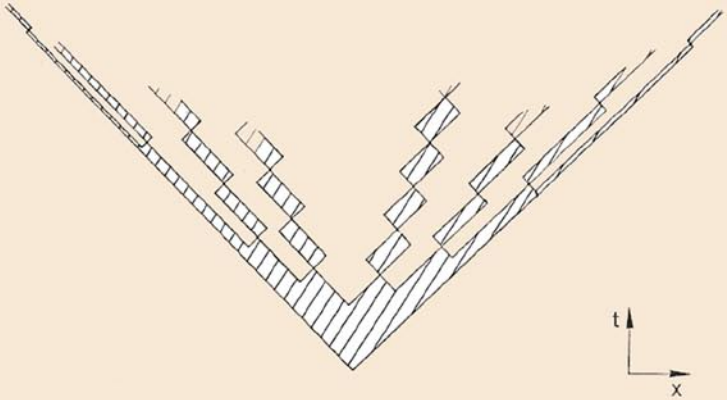
Resultat från ett tidigt arbete av Andersson-Gustafson-Ingelman-Sjöstrand. Figuren visar vinkelfördelningen av energi i händelser med gluonutsändning i elektron-proton-kollisioner. Heldragen linje visar Lundamodellens förutsägelse.



Kvark-fragmentering



Ett bromsande kraftfält utvecklas mellan en kvark och en antikvark, som rör sig ifrån varandra. Detta fält kan brytas genom att ett nytt kvark-antikvark-par bildas. Genom upprepade sådana uppbrott erhålles flera bundna kvark-antikvark-system. Dessa utgör de observerade partiklarna i en skur (en jet) i kvarkens och en i antikvarkens riktning.



Processen visad i ett rumtidsdiagram, med tiden uppåt. Kraftfältets utsträckning anges med den streckade ytan.

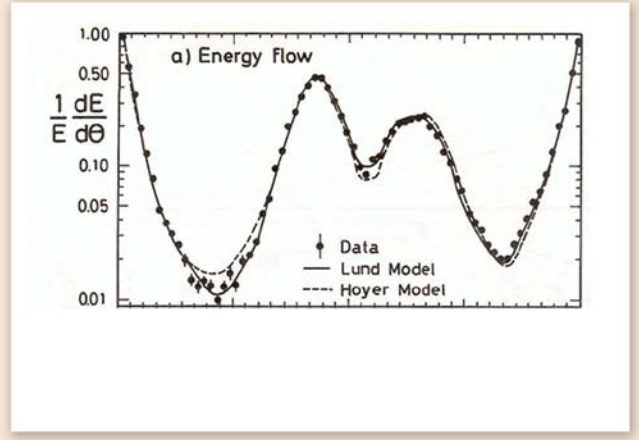
Vid högenergetiska kollisioner mellan exempelvis en elektron och en proton kan en kvark slås ut ur protonen, men eftersom den inte kan isoleras, materialiserar den sig som en skur, en jet, av hadroner (bundna tillstånd av ett kvark-antikvark-par eller av tre kvarkar).

Liknande skurar uppstår i reaktioner där elektron-positron-par övergår i ett kvark-antikvark-par. I ett viktigt arbete från 1977 formulerades en modell för beskrivning av hur energin hos en högenergetisk kvark omvandlas till en sådan jet.

Gluon-fragmentering

Modellen för jet-fragmentering förfinades, och utvecklades 1979 till att också beskriva fragmentering av gluon-jettar (då en gluon med hög energi inte heller kan isoleras, ger också den upphov till en jet av hadroner). Det kraftfält som binder samman partiklarna antas här likna en masslös relativistisk sträng, och modellen kallas för the Lund String Fragmentation Model.

Modellen förutsade en bestämd asymmetri hos de bildade partiklarna i elektron-positron-kollisioner, och det väckte stor uppmärksamhet då denna observerades experimentellt 1980.



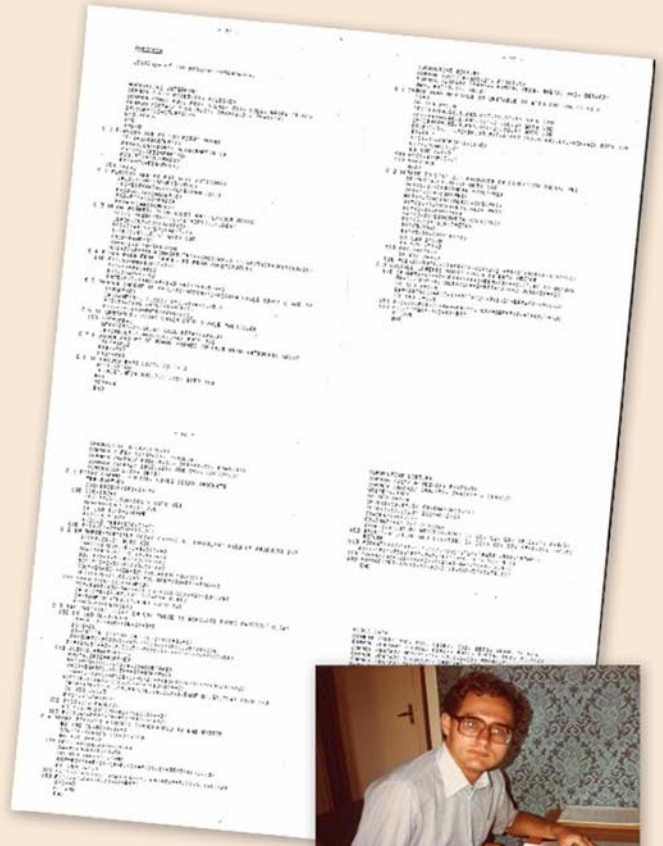
Kraftfältet kan approximeras med en mycket tunn sträng. I Lundamodellen uppfattas en gluon som en *kink* på strängen. Figuren visar hur strängen rör sig och brister i flera bitar.

Monte Carlo

En högenergikollision är så komplex att den inte kan behandlas analytiskt. Det blev därför nödvändigt att komplettera modellerna med simuleringsprogram. Sådana program kallas allmänt Monte Carlo-program.

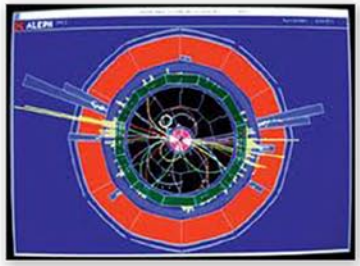
Lunda-MC utvecklades för kollisioner mellan alla tänkbara elementarpartiklar och även atomkärnor. De användes både för planering av experiment och analys av resultaten.

En särställning intas av programmet PYTHIA, med Torbjörn Sjöstrand som huvudförfattare, vilket nu är världens mest använda program för högenergikollisioner.

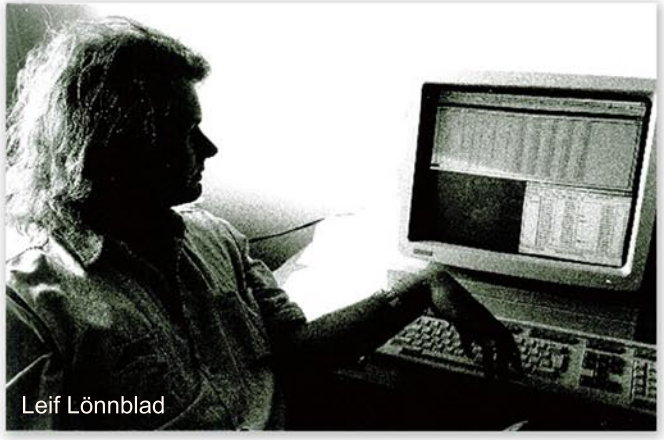


Det första Monte Carlo-programmet från 1978 fick plats på en A4-sida. Dagens version (2014) innehåller ca 100 000 rader programkod.

Kvark-gluon-kaskader



I LEP-acceleratorn vid CERN i Genève kolliderar elektroner och positroner med hög energi. Det bildas då en kvark, en antikvark och ett större antal gluoner. Produktionen av sådana multi-gluon-tillstånd beskrivs väl i dipolformuleringen som simuleras i MC-programmet ARIADNE.

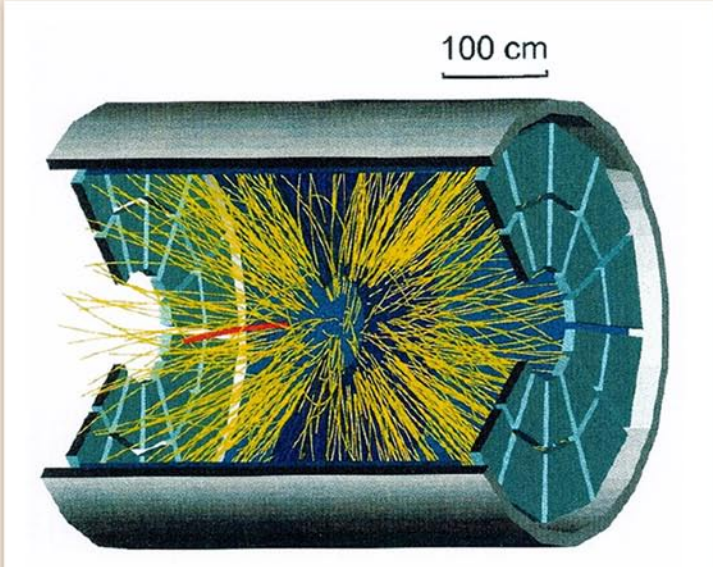


Leif Lönnblad

Då kvarkar kolliderar sänds gluoner ut. Dessa gluoner kan sedan sända ut nya gluoner i en kaskad. Vid högre energier får dessa kaskader stor betydelse för resultatet. Modeller av kaskaderna bildar viktiga komponenter i beskrivningen av högenergikollisioner. En dipol-formulering av sådana kaskader utvecklades av Gösta Gustafson och Ulf Pettersson.

Simuleringsprogrammet ARIADNE, med Leif Lönnblad som huvudförfattare, har varit speciellt framgångsrikt för att beskriva elektron-positron-kollisioner. Dipolformalismen tillämpas nu allmänt för beskrivning av kvark-gluon-kaskader.

Kärnkollisioner



I kollisioner mellan atomkärnor kan ett stort antal partiklar bildas. Figuren visar en kollision vid RHIC-acceleratorn i Brookhaven utanför New York.

Att arbeta tillsammans med experimentalister har varit mycket värdefullt. Ett samarbete mellan Bo Andersson och experimentalisten Ingvar Otterlund angående kärnkollisioner startade redan 1974, innan Lundamodellen kom igång.

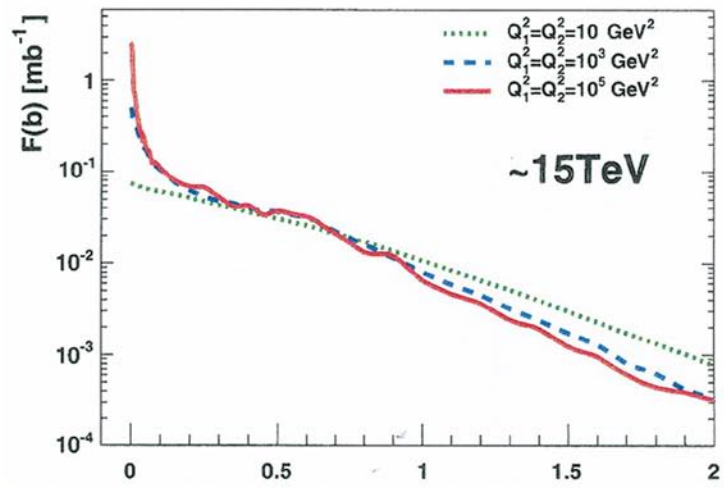
Detta samarbete återupptogs under 1980-talet med utvecklingen av Fritiof-modellen, där teoretikern Bo Nilsson-Almqvist och experimentalisten Evert Stenlund gemensamt stod för simuleringsprogrammet.

Studier av kärnkollisioner har nu tagits upp på nytt i samband med utvecklingen av DIPSY-modellen.

Hög gluontäthet

Vid höga kollisionsenergier kan tätheten av gluoner med låg energi bli mycket hög. Då nås en gräns, bortom vilken gluonerna inte längre kan behandlas som individuella, utan växelverkar koherent. Sådana effekter förväntas uppträda tidigare vid kärnkollisioner, och är där viktiga vid analyser av en eventuell fasövergång till ett kvark-gluon-plasma.

Effekter av hög gluontäthet har inkluderats i en modell kallad DIPSY. Modellen är särskilt lämpad för att studera effekter av fluktuationer och korrelationer, med tillämpningar för kollisioner mellan elektroner, protoner och kärnor.



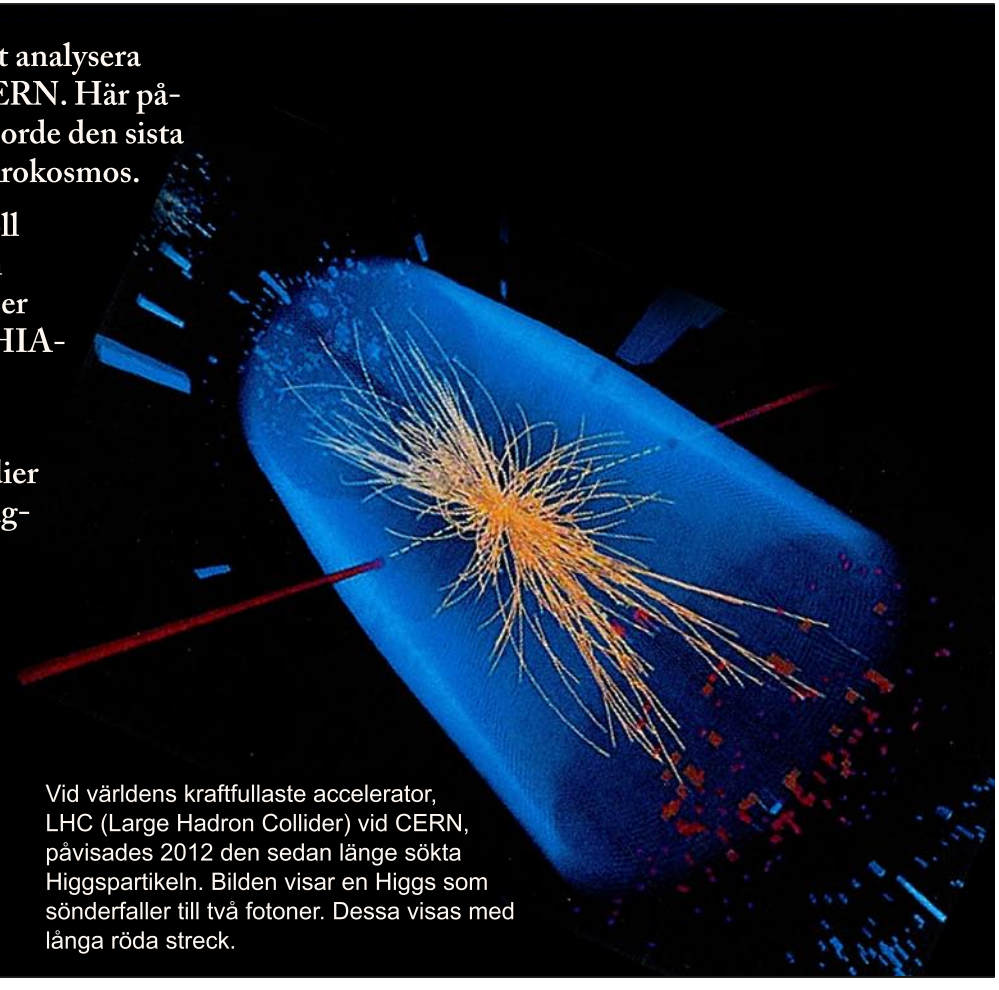
Korrelation mellan två gluoner i en proton med hög energi, där b anger avståndet mellan dem i transvers led. Toppen vid b = 0 visar att många gluoner befinner sig nära varandra. Detta är betydelsefullt för möjligheterna att två gluoner sprids samtidigt i en proton-proton kollision.

Fysik bortom standardmodellen

Forskningsarbetet koncentreras nu på att analysera resultaten från LHC-acceleratorn vid CERN. Här påvisades Higgspartikeln år 2012. Den utgjorde den sista komponenten i standarmodellen för mikrokosmos.

En bland 10 miljarder kollisioner innehöll en Higgs. Därför var det viktigt att ha en god beskrivning, både av vanliga händelser och av en förväntad Higgs-signal. PYTHIA-MC:t spelade här en viktig roll.

Arbetet fortsätter med noggrannare studier av Higgs-partikeln, och sökandet efter signaler som eventuellt kan knytas till den mörka materien i universum.



Vid världens kraftfullaste accelerator, LHC (Large Hadron Collider) vid CERN, påvisades 2012 den sedan länge sökta Higgspartikeln. Bilden visar en Higgs som sönderfaller till två fotoner. Dessa visas med långa röda streck.

Utbildning och samarbete

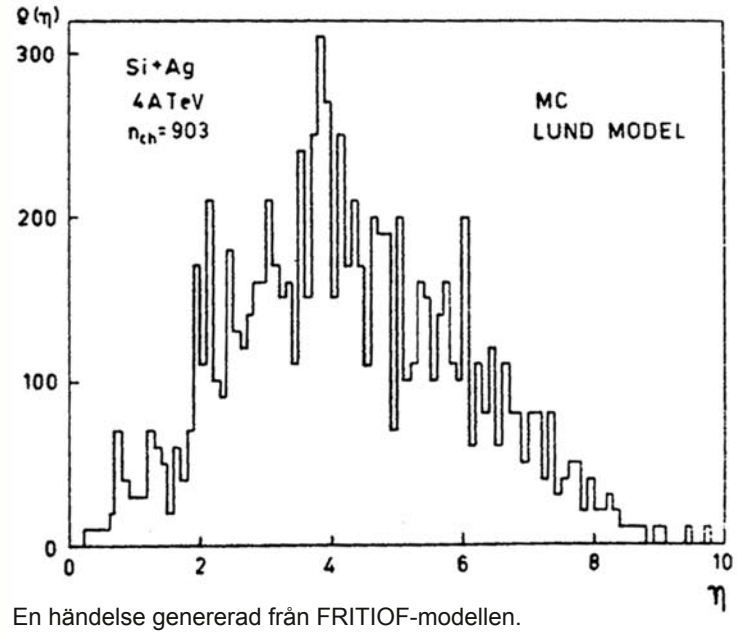
Fler än 30 doktorander har fått sin forskarutbildning genom arbete med Lundamodellen. Av dessa fortsätter Torbjörn Sjöstrand och Leif Lönnblad som professorer i Lund. Gunnar Ingelman har bildat en filial till Lundamodellen i Uppsala. Några doktorander har övergått till att arbeta i den teoretiska biofysikgruppen startad av Carsten Peterson i Lund.

Kontakterna med den experimentella högenergifysikgruppen på Fysicum har varit mycket fruktbara, bland annat i utvecklingen av FRITIOF-modellen. Under senare år har grupperna tillsammans handlett sju EU-finansierade doktorander.

Hans-Uno Bengtsson, Bo Andersson och Gösta Gustafson. Hans-Uno Bengtsson (1953-2007) ägnade sig, efter doktorsexamen och postdoc-period vid UCLA, särskilt, och med stor framgång, åt undervisning (som lärare och studierektor vid institutionen), föreläsande, författande och översättningar.

Viktiga steg i utvecklingen

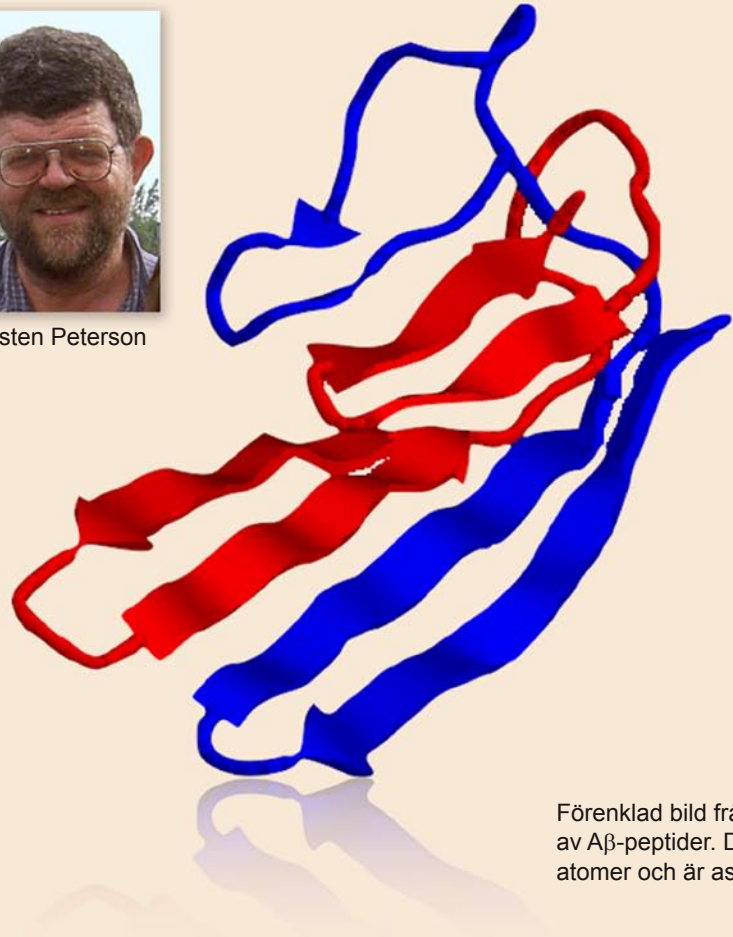
- Modell för kvark-jet-fragmentering (1977)
- En modell för elektron-hadron- och hadron-hadron-kollisioner kallad fragmenteringsmodellen (1977)
- Första Monte Carlo-programmet (1978)
- The Lund string fragmentation model (1979)
- Modell för protonkollisioner baserad på multipla kvark-gluon-kollisioner. Starten för PYTHIA (1986)
- FRITIOF, en modell för kollisioner mellan hadroner och/eller kärnor (1986)
- Dipol-formulering av gluon-kaskader, ARIADNE (1988)
- PYTHIA utvecklas till ett standardprogram, som också inkluderar hypotetiska reaktioner, så som Higgs och supersymmetriska partiklar (gradvis utveckling under många år)
- Saturering och små x, DIPSY (2005)



En händelse genererad från FRITIOF-modellen.
Figuren från 1986 visar fördelning av partiklar i en högenergetisk kollision mellan en kisel- och en guldkärna.

Teoretisk biofysik

Carsten Peterson

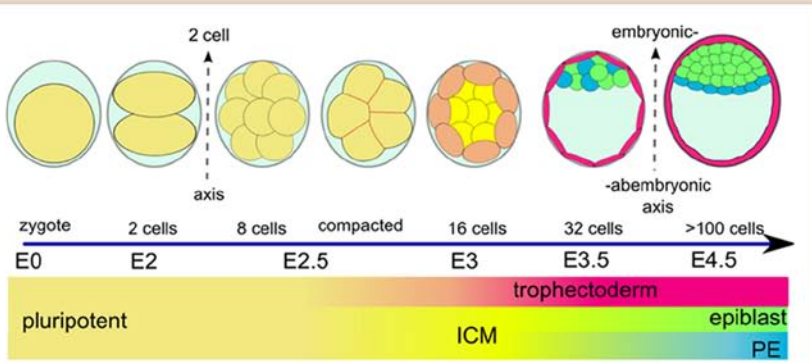


Förenklad bild från modellering av aggregering av Aβ-peptider. Denna peptid består av ca 600 atomer och är associerad med Alzheimers sjukdom.

Carsten Peterson började sin karriär med vad som skulle bli Lundamodellen men gick sedan över till att studera gitter-QCD där rumtiden diskretiserats på ett gitter med metoder från statistisk mekanik.

Det senare utgjorde en plattform för ett steg i utvecklingen 1988 till en serie nya tvärvetenskapliga ämnesområden; mönsterigenkänning, svåra optimeringsproblem, proteinveckning och identifikation av biomarkörer för cancerdiagnos.

Stamceller tar beslut



Schematisk bild av embryots utveckling de första 4-5 dagarna från en till cirka hundra celler. Det yttre (trophectoderm) och inre (endoderm) lagret ansvarar för näringsförsörjning och gränsdragningar mellan framtida organ respektive.

För tillfället har modellering av proteiner och geners dynamik hos stamceller för att dirigera de senares öde blivit ett stort fokus.

Här studeras hur miljoner blodkroppar kan bildas dagligen från relatvt få blodstamceller i benmärgen samt de första stegen i den embryonala utvecklingen.

Anders Irbäck och Mattias Ohlsson har framgångsrikt utvecklat egna inrikningar inom proteindynamik och kliniska frågeställningar.