

Tandem Accelerator Laboratoriet  
**Niels Bohr Institutet**

Udgivelsen af denne beskrivelse af Tandem Accelerator Laboratoriet ved Niels Bohr Institutet er muliggjort gennem støtte fra nedenstående virksomheder med hvilke Institutet gennem flere år, har haft et frugtbart samarbejde om udvikling og levering af avancerede instrumenter og apparater.

BBT Instrumenter ApS  
*ORTEC detektorer og elektronik*

LUTRONIC ApS  
*LECROY analog og digital elektronik*

DANFYSIK A/S  
*Ion stråle styring*

Digital Equipment Corporation A/S  
*Elektronisk databehandling*

SC METRIC A/S  
*HARSHAW scintillatorer fra Quartz and Silice, Holland*

## Et Nyudstyret Laboratorium

Niels Bohr Institutet ønsker med denne publikation at præsentere sit Tandem Accelerator Laboratorium. Ikke fordi der her i 1991 er tale om et nyt laboratorium. Men fordi laboratoriet gennem de seneste år er blevet udbygget og fornyet på så mange områder, at der i dag er tale om et fornyet laboratorium med helt nye muligheder og et bredere videnskabeligt sigte.

Niels Bohr Institutets Tandem Accelerator Laboratorium blev indviet i november 1962. Dets placering som nabo til den nybyggede Atomforsøgsstation Risø kan ses som et eksempel på den handlekraft Niels Bohr lagde for dagen, når det gjaldt om at udvikle forskningen på sit institut. Siden midten af 1930'erne, da Niels Bohr radikalt omlagde instituttets forskning fra atomfysik til kernefysik, havde grunden på Blegdamsvej kunnet rumme de stadig større apparater, som den kernefysiske forskning forudsatte. Dette havde ført til bygningen af et højspændingsanlæg, en cyklotron og to elektrostatiske generatorer. Efter den anden verdenskrig blev anlæggene udvidet og stærkt moderniseret. Disse anlæg var for deres tid avancerede installationer, som gav grundlag for kernefysiske undersøgelser, hvoraf adskillige idag må betragtes som klassiske.

Hen mod slutningen af 1950'erne udvikledes i USA en ny type elektrostatiske generator, den såkaldte tandem accelerator. Med denne accelerator kunne kernefysikerne udføre undersøgelser med en hidtil ukendt præcision på stort set alle atomkerner. Desuden kunne den nye accelerortype frembringe projektiler af mange forskellige typer.

Niels Bohr indså straks værdien af at råde over en sådan accelerator, som tilmed kunne købes stort set som en færdig maskine. Omkostningerne ville være betydelige, men det egentlige problem viste sig være at skaffe plads til en ny accelerator på arealerne på Blegdamsvej, som allerede var overbebyggede. Planer om at udvide ind i Fælledparken måtte opgives. I stedet opstod så tanken om at bygge ved Risø, en tanke som hurtigt blev realiseret. Dog ikke uden betænkeligheder, fordi det ville føre til to geografisk adskilte dele af instituttet.

Siden sin oprettelse har Tandem Accelerator Laboratoriet været hjemsted for en omfattende eksperimentel forskning med stærke internationale forbindelser. Gennem accelerator fornyelser og udvikling af nyt eksperimentelt udstyr har laboratoriet ikke alene fulgt med tiden, men har til sta-

Niels Bohr Institutets Tandem Accelerator Laboratorium ved Roskilde.





*Tandem acceleratoren. Den store tryktank er fyldt med en isolerende gas ved 10 atmosfæres tryk. Hermed kan der opretholdes en spænding på op til 10 millioner volt mellem terminalen i midten af acceleratoren og maskinens ender.*

dighed været i stand til at sætte sit præg på den internationale udvikling af kernefysikken.

I 1970 blev den oprindelige tandemaccelerator,

## Accelerator Anlægget

En accelerator er et apparat, som kan bringe atomare partikler op på høje hastigheder. Accelererede partikler anvendes ved mange forskellige fysiske eksperimenter og til en række industrielle formål. Den accelerator, som findes på Niels Bohr Institutets Tandem Accelerator Laboratorium, bringer partikler (atomkerner) op på 5-10 % af lysets hastighed. Det svarer til, at hver af kernepartiklerne i den accelererede kerne har en energi på 5-10



*Acceleratorens ionkilde og injektor er omgivet af et bur, da de befinder sig på højspænding. Ionerne forlader injektoren gennem et vakuumrør, hvorpå de skydes ind i Tandemacceleratoren til venstre.*

som kunne nå en højspænding på 6.5 millioner volt, udskiftet med en større til 10 millioner volt. Dette blev den sidste større udbygning gennem mere end femten år.

Forskellige større planer om en ny accelerator måtte opgives af økonomiske grunde. Men i 1985 påbegyndte Institutet ved eget personale konstruktionen af en lineær efteraccelerator, som sigtede mod en fordobling af anlæggets partikelenergi. Denne udbygning blev finansieret af Undervisningsministeriets bevilling til fornyelse af forskningsapparatur. Efteracceleratoren blev taget i drift i 1989. Den har givet Laboratoriet mulighed for at accelerere tunge ioner til energier, som er særlig interessante for kernefysiske undersøgelser af hurtigt roterende atomkerner, et område hvor Laboratoriet har en meget stærk international placering.

Sideløbende med konstruktionen af acceleratoranlægget er der sket en total fornyelse af det eksperimentelle udstyr. Der er opbygget to komplekse og avancerede detektorsystemer til studier af gamma stråler fra kernereaktioner. Disse systemer, NORDBALL og HECTOR er resultatet af omfattende internationale samarbejdsprojekter. Desuden er der etableret et anlæg til studiet af atomare klynger.

MeV (millioner elektronvolt). Det er en velegnet energi til studiet af mange aspekter af atomkernerens opbygning.

Acceleratoren på Laboratoriet er idag et helt anlæg, som består af fire accelerators hængt efter hinanden. Anlæggets opbygning er vist på midtersiderne.

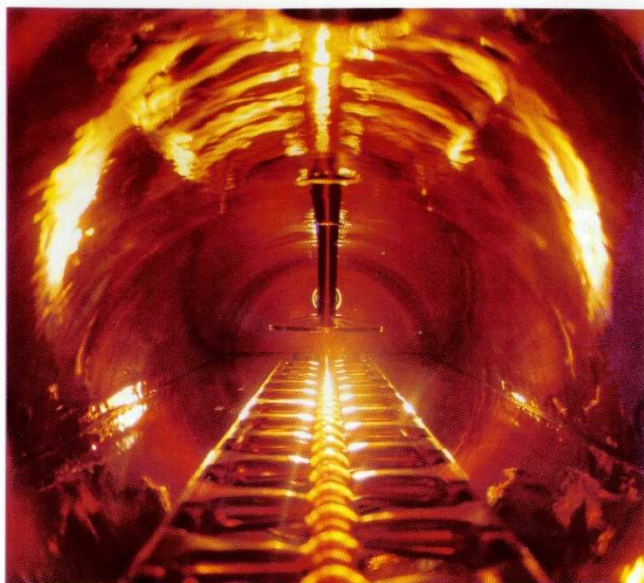
Man kan kun accelerere ladede partikler. Ladningen er den "hank" som de elektriske felter i acceleratoren kan tage fat i. Skal man accelerere en bestemt atomkerne, eksempelvis af titan (Ti), må man først udfra neutrale titan-atomer skaffe sig ladede titan-ioner. Tandemacceleratorens princip kræver, at disse ioner er negative, dvs. Titaner hvorpå der er hængt en ekstra elektron. De negative ioner dannes i anlæggets ionkilde, hvorpå de som første trin accelereres til en energi på omkring 120 keV. Ionerne skydes så ind i tandemacceleratorens accelerationsrør hvor de påvirkes af maskinens høje spænding. Spændingen

stiger jævnt gennem accelerations-røret fra nul ved indgangen op til ca. 9 millioner volt på terminalen. Ionerens energi stiger tilsvarende. Idet de når terminalen passerer de et tyndt kulfolie, som berøver dem ikke blot den ekstra elektron, men herudover yderligere et antal elektroner, eksempelvis 9. Man siger, at atomet "strippes". Atomets positive kerneladning gør nu ionen positiv med 9 ladninger. De positive ioner løber videre gennem accelerationsrøret på den modsatte side af terminalen, hvor hver ladning nu bidrager til accelerationen. Halvvejs gennem accelerationsrøret stripes ionen endnu en gang til 15 positive ladninger. På vejen ud vinder ionerne derfor meget mere energi end på vejen ind.

De 117 MeV, som ionerne nu har opnået, er ikke nok til at frembringe de kerneprocesser der har interesse for den aktuelle forskning. Derfor må partiklerne accelereres yderligere, hvilket sker med den nye efteraccelerator.

*Den nye efteraccelerator har to tanke, som i modsætning til tandemacceleratoren, er lufttomme. Når partikler fra tandemacceleratoren passerer igennem efteracceleratoren fordobles deres energi.*





Et kig ind i en af efteracceleratorens tanke. Tankens inder side er forkobret. Inde i tanken skabes et elektrisk vekselfelt ved indkobling af en kraftig radiosender. Partiklerne accelereres ved at passere den vekselspænding, som opstår mellem de rørformede elektroder, der ses nederst i billedet.

Efteracceleratoren er i virkeligheden to acceleratorefter hinanden. Princippet bygger på, at man indvendigt i en tank med ledende vægge kan skabe et svingende elektromagnetisk felt. Hver accelerator består af en cylindrisk vakuumtank. Ned langs acceleratorens akse sidder en række kobberrør på række, fæstnet på "fingre", som skiftevis kommer fra højre og venstre. Fingrene rækker lidt ind mellem hinanden, og således at rørene sidder overfor hinanden med et mellemrum. Den elektriske svingning, som har en frekvens på 100 MHz, bevirker, at et øjeblik er det venstre "hånd" som er positiv og højre negativ. Partikler som befinder sig i gabet mellem to rør, vil da mærke en fremadrettet kraft fra det elektriske felt mellem rørene og vil accelereres i denne retning. En halv svingningsperiode senere har "hænderne" skiftet rolle, og feltet er nu bagudrettet. Det er jo den forkerte retning, men i mellemtiden har ionerne bevæget sig fremad, og er kommet i ly inde i det skjærmende kobberrør. En halv periode senere er feltet igen fremadrettet, og partiklerne bliver igen accelereret. De to acceleratorefter har tilsammen 50 rørstykker og et tilsvarende

antal gab. Når alle gabene er passeret, har ionerne nået en energi på eksempelvis 225 MeV, eller omkring det dobbelte af hvad de havde, da de kom ud af tandemacceleratoren. Ionerne sendes nu videre til forsøgsområdet, hvor de kolliderer med atomkernerne i et ganske tyndt folie på størrelse med et frimærke.

Dette kunne være moderne kunst. Det er imidlertid dele til efteracceleratoren, fremstillet på Laboratoriets værksted.



## Laboratoriets Forskningsområde

Tandem Accelerator Laboratoriets forskning drejer sig om stoffets opbygning og egenskaber på mikroskala. Den vedrører altså små stykker stof. Stykker på størrelse med et atom. Stykker som består af flere atomer. Stykker som kun er en del af et atom.

Når man siger, at noget er "stort" eller at noget er "lille", mener man dermed i forhold til noget andet. Det gælder også indenfor atomfysikken.

Et atom er i forhold til vore daglige omgivelser en lille ting. Der er milliarder af milliarder af atomer i det mindste støvgran. Der kan ligge omkring ti millioner atomer ved siden af hinanden på en millimeter, o.s.v.

Men i atomfysikkens verden er et atom en stor ting, som kan deles i mindre bestanddele. Det komplette atom består af en sky af elektroner. Elektronskyen omgiver atomets kerne. Kernen selv fylder kun lidt i atomet. Dens udstrækning er kun omkring en 1/100 000 af det komplette atoms udstrækning, men rummer næsten hele atomets masse. Også kernen kan deles i mindre bestanddele. Den består af op til omkring 100 positivt ladede protoner og et omtrent tilsvarende antal neutroener, som er elektrisk neutrale. Protoner og neutroner er kernens elementære byggestene og betegnes under ét som nukleoner. Men de seneste tiårs forskning har vist, at også disse partikler kan betragtes som sammensatte af mindre bestanddele, kvarker. Man har imidlertid aldrig set kvarkerne som selvstændige frie partikler, kun som bestanddele af kernepartiklerne.

Den forskning som drives på Niels Bohr Institutets Tandem Accelerator Laboratorium vedrører især atomets kerne. Et objekt som altså er lille i forhold til hele atomet, men større end de protoner og neutroner det er sammensat af.

Meget af det 20. århundredes fysiske forskning har drejet sig om den måde, hvorpå stoffet opbygges af sine bestanddele, både her på jorden og andre steder i universet. Til hvert niveau af opbygningen svarer karakteristiske fænomener og karakteristiske eksperimentelle metoder.

Set udefra er et atoms egenskaber i høj grad knyttet til elektronskyen, som derfor ofte kaldes

det ydre atom. Det er her, man skal søge forklaringen på, at atomer kan binde sig til hinanden og danne molekyler af de mange forskellige kemiske forbindelser. Nogle, som ammoniak, har molekyler som kun indeholder nogle få atomer (4), mens andre, især de store biokemiske molekyler, kan indeholde flere hundrede tusinde atomer. Det ydre atom afgør også de fleste af stoffernes ydre egenskaber: Om de er faste stoffer, væsker eller gasser. Om de leder elektriciteten. Hvilken farve de har, og hvilke spektrallinier de under passende forhold kan udsende.

Atomkernen fører under jordiske forhold en mere ubemærket tilværelse. Vi mærker først og fremmest til atomkernen ved, at den bestemmer stoffernes masse. At bly er tungere end aluminium hænger sammen med den meget forskellige masse, disse stoffers atomkerner har. Men under mere ekstreme forhold viser atomkernerne lige så varierede og afgørende egenskaber som dem, der er knyttet til det ydre atom. Det er disse egenskaber, som studeres ved Tandem Accelerator Laboratoriet.

Man lærer om stofferne og deres opbygning ved at påvirke dem på passende vis, og så iagttage hvordan de reagerer. De kemiske stoffers forhold kan man undersøge ved at varme dem op, ved at opløse dem i forskellige væsker eller ved at bringe dem i kontakt med hinanden. En fysiker vil især interessere sig for den energi en påvirkning sker med. Opvarmning, opløsning, bestråling med lys eller hvad det nu kan være, drejer sig om påvirkninger, som udtrykt i elektronvolt (eV) ligger fra brøkdelen af en elektronvolt til nogle få elektronvolt.

Ofte udtrykker man i stedet for påvirkningen som en temperatur. Rødgulde (700 grader) svarer således til en påvirkning på 0.1 eV. Påvirkninger i energiområdet omkring 1 eV er velegnede til at undersøge atomernes forhold. Anvendelse af højere energier vil i mange tilfælde ikke være hensigtsmæssig, da atomerne så kan flyve fra hinanden i stedet for at danne forbindelser, eller atomerne kan gå i stykker (dvs. tabe nogle af deres elektroner og blive til ioner). Det er langt

### Enheder for partikel energier

Hvor vi til dagligt beskæftiger os med energier i Joule (en 60 Watt pære forbruger 60 Joule i sekundet), anvender man for naturens mindste bestanddele en energiskala, der er sat i relation til den mindste elektriske ladning, en såkaldt elementarladning. Elektronen har en ladning svarende til en negativ elementarladning, protoner en tilsvarende positiv ladning.

Energien 1 eV (elektronvolt) er den energi en elementarladning opnår ved at blive accelereret i en elektrisk spænding på 1 Volt. Det svarer til  $1.602 \cdot 10^{-19}$  Joule. I kernefysik er de relevante energier Megaelektronvolt (1 MeV), dvs. 1 million elektronvolt. I partikelfysik er de 1 GeV (Gigaelektronvolt), dvs. 1 milliard elektronvolt.

fra altid, at den største påvirkning giver den største indsigt.

Også atomkerner studeres ved at udsætte dem for ydre påvirkninger. Men her skal der mere til end for de ydre atomer. Typisk skal man anvende energier, som er en million gange større. Påvirkninger i området 1-100 MeV. Er påvirkningen væsentlig mindre, sker der ingenting. Førrige års opstandelse omkring "kold fusion" skyldtes jo netop, at det blev hævdet, at påvirkninger i området 1 eV kunne give kernefysiske effekter. Tilsvarende, går man højere i påvirkning end nogle få hundrede MeV, så vil atomkernerne have tendens til at flyve fra hinanden, eller der vil skabes helt andre partikler, end dem kernen er opbygget af.

Det, at der ved tilstrækkelig høj energi kan dannes nye partikler, bringer os til et andet område, partikelfysikken. Det er nu mindre atomkernen som et sammensat system, man ser på, det er systemets enkeltdele. Gennem de sidste 40-50 år har man gennem anvendelse af større og større energier, i påvirkninger kernepartikler imellem, fået kendskab til mange mærkelige skabninger i den fysiske Zoo. Sideløbende hermed har man fået dybere indsigt i naturens lovmæssigheder også under disse ekstreme forhold, som bringer os tilbage til sekunderne efter verdens skabelse i den kosmiske ildkugle.

Det er studiet af de mindste afstande, de mindste objekter, som kræver de største energier. Et

komplet atom kan man påvirke med nogle få eV. Kernen, som er 100 000 gange mindre, kræver energier, som er en million gange større. Og de mindste afstande, hvor man ser på skabelsen af nye partikler, kræver energier vel over 100 MeV.

Hvert trin på denne energiskala, som man undertiden kalder kvantestigen, har sine eksperimentelle metoder. Kemi kan man studere i et reagensglas opvarmet med en gasflamme. Ønsker man større påvirkninger må man ty til apparatur, som kan bringe atomer, elektroner eller atomkerner op på højere hastighed og så studere, hvad der sker, når disse atomare projektiler kolliderer med andre atomer. Det er til sådanne undersøgelser man behøver acceleratore. Acceleratorer findes i mange forskellige udformninger og størrelser. Små maskiner på et laboratoriebord til studier af det ydre atom. Røntgenanlæg i stuestørrelse, hvor accelererede elektroner kan skabe forvirring i det ydre atoms inderste dele. Kernefysiske acceleratore, som fylder fra en sal til hele bygningskomplekser, og som byder på et omfattende arsenal af ioner af forskellig ladning og tyngde. Endelig, acceleratorene til partikelfysiske undersøgelser, som har omkredse på snesevis af kilometer.

En accelerator kan sammenlignes med en hammer. En hammer kan anvendes til at slå på forskellige genstande for at finde ud af, hvordan de er indrettede. Store slag med forhammeren til nogle formål, små slag med bækhammeren til andre formål. Man kan ikke sige, at en stor accelerator er bedre end en lille. Det drejer sig først og fremmest om at have adgang til det rigtige instrument til den foreliggende opgave. Store acceleratore er dyrere end små. Men selv mindre acceleratore er kostbare anlæg, som kun kan anskaffes af få laboratorier. Til gengæld kan hver accelerator anvendes til mange forskellige typer undersøgelser indenfor det energi område, den nu er konstrueret til. Derfor er acceleratorfysikere idag et meget rejsende folkefærd, som søger hen til den accelerator, som bedst opfylder de krav, som deres undersøgelser stiller. Niels Bohr Institutets Tandem Laboratorium har fra dets oprettelse stået åbent for talrige udenlandske forskere og forskningsgrupper. Tilsvarende har forskere fra Tandemlaboratoriet i mangfoldige tilfælde udnyttet acceleratore og andet udstyr på fremmede laboratorier.

## Kvantefysik med 200 Partikler

I den subatomare verden gælder kvantefysikkens spilleregler. Et kvantesystem kan kun befinde sig i bestemte energitilstande, der svarer til forskellige kombinationer af systemets bevægelsestilstande. Tilstandene kan beskrives ved såkaldte bølgefunktioner. Til et givet bølgemønster svarer en karakteristisk energi, på samme måde som de forskellige toner i et musikinstrument modsvarer stående bølger af forskellig frekvens og dermed også energi.

Atomkernen udgør et særligt laboratorium til undersøgelse af kvantefysikkens love. Atomkerner består af et begrænset antal partikler (op til ca. 250) af to slags, neutroner og protoner. Dette antal er på den ene side stort nok til at give årsag til et kompliceret samspil mellem bestanddelene og dog så lille, at bidraget fra den enkelte kvante-partikel til det globale systems egenskaber ikke går tabt, men kan studeres i detalje.

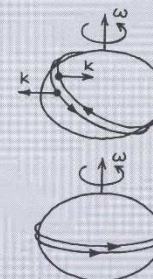
Det ovenfor nævnte samspil mellem kernepartiklerne, der bindes sammen af en særlig korrigerende og tiltrækkende kernekraft, giver årsag til overraskende fænomener, som ikke er nemme at forudsige, selv om man kender den enkelte isolerede kernepartikels egenskaber godt. Atomkerner kan i visse tilfælde beskrives forbavsende godt ved at antage, at alle kernens partikler danner et middelfelt, hvori den enkelte partikels bevægelse kan beskrives som upåvirket af de andre. I andre situationer domineres systemets egenskaber af de kollektive træk, hvor alle partikler deltager i en fælles bevægelse, eksempelvis rotation. Dette er netop et af hovedtemaerne indenfor moderne kernefysik: At studere systemegenskaberne snarere end den enkelte partikels egenskaber.

### Hurtigt roterende atomkerner

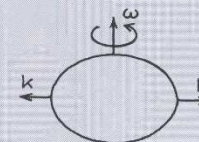
Upåvirkede atomkerner befinder sig i deres laveste energitilstand. De meddeler sig ikke til omverden og er derfor vanskelige at studere. Ved at bombardere dem med andre atomkerner kan man imidlertid tilføre overskudsenergi, som de siden vil genudsende i form af stråling, der kan måles i laboratoriet.

### Kræfter i roterende atomkerner

Partikler, der bevæger sig i forhold til et roterende reference system, påvirkes af Coriolis og centrifugalkræfter.



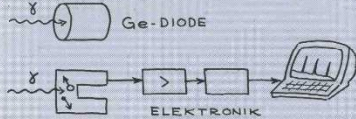
I atomkerner virker en særlig korrigerende kraft, par-kraften, mellem kernepartiklerne. Man kan, lidt forenklet, forestille sig, at partiklerne ordner sig parvis, i baner med modsat omløbsretning. Når atomkernen roterer, virker Coriolis kraften på partiklerne, således at baneplanerne vrides fra hinanden. Er rotationen kraftig nok kan par-kraften overvindes og partiklerne tvinges til at rotere samme vej. Denne og andre typer af effekter kan genkendes ud fra mønstret af de udsendte gamma stråler.



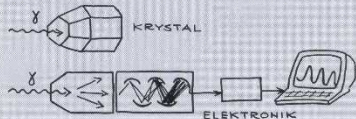
Centrifugal kræfter påvirker alle partikler i den roterende atomkerne og kan forårsage at kernen deformeres og bliver fladtrykt. Ved meget høje omdrejningshastigheder bliver centrifugalkræfterne så stærke, at kernen spaltes i to stykker (fissionerer). De energier som kan opnås med det nye acceleroranlæg er netop så høje, at man kan frembringe et stort antal atomkerner med rotationshastigheder op til fissionsgrænsen.

## Måling af gamma stråling

Fælles for måling af stråling i subatomar fysik er anvendelsen af detektorer, der omformer strålingens energi til et elektrisk signal. Dette signal kan siden forstærkes og bearbejdes elektronisk, samt digitaliseres således, at det kan lagres i en datamaskine til videre analyse.



I en germanium énkrystal løsrives gamma strålerne elektroner og positive ladninger, der kan opsamles på en elektrode. I germanium detektorer opsamles næsten alle ladninger. Dette giver en skarp energibestemmelse (energiopløsning). Men der er tekniske grænser for størrelsen af germanium krystaller, og de er meget kostbare.



I en scintillator, som BGO eller BaF<sub>2</sub>, omdannes gamma strålingens energi til lys, der kan løsrive elektroner fra en lysfølsom belægning. Antallet af elektroner mangedobles siden i en fotomultiplikator. Scintillatorer kan produceres med større volumen, har bedre tidsopløsning, og er billigere end germanium detektorer, men deres energiopløsningsevne er mere end 20 gange dårligere.

Denne stråling kan enten udgøres af nukleoner, enkelte kernepartikler eller større stykker af kernen, afhængig af kollisionens voldsomhed. Den kan også udgøres af gamma stråling, elektromagnetisk stråling med høj energi. Hovedparten af gamma strålingen udsendes, når atomkernen har kølet så meget af, at der ikke længere er energi nok til at løsrive en kernepartikel.

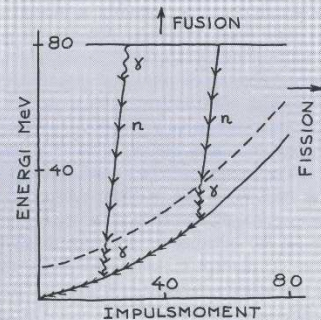
Den eksperimentelle bestemmelse af denne gamma strålings egenskaber (gamma stråle spektroskop) er et meget værdifuldt redskab til at indhøste ny viden om atomkerners indre struktur. Dette skyldes, at den nøjagtige måling af gamma

strålernes energi, vinkelfordeling og indbyrdes tidsmæssige sammenhæng tillader at karakterisere de enkelte kvantetilstande i detalje.

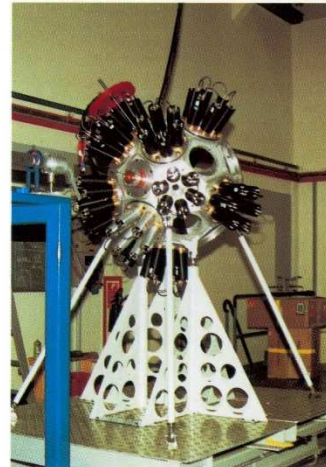
I de senere år har studiet af gamma stråler, udsendt fra hurtigt roterende atomkerner etableret sig som den væsentligste metode til at studere kernestruktur. Nogle af de effekter der optræder i roterende kerner skyldes, at rotationen medfører at de enkelte kernepartikler påvirkes af centrifugal- og Corioliskræfter, der ændrer deres bevægelsesmønster. Disse kræfter er ellers velkendte fra andre roterende koordinatsystemer, som f. eks. Jordens. Det er centrifugalkraften, der er skyld i Jordens lidt fladtrykte form. Corioliskræfterne er ansvarlige for hav- og atmosfærestrømmingers afbøjning mod højre på den nordlige halvkugle.

For at frembringe hurtigt roterende atomkerner må man benytte hurtige og tunge projektiler (tunge ioner) fra en accelerator. Disse kan da fusionere (smelte sammen) med målkernerne, således at der dannes en ny og tungere atomkerne med høj omdrejningshastighed. Når et sådant system skaffer sig af med sin overskudsenergi og

## En kernes henfald



En atomkerne, der dannes ved en fusions reaktion med tunge ioner, kan skabes med høj rotation og indre energi. Kernen vender tilbage til sin grundtilstand ved først at udsende partikler (f. eks. neutroner, som vist) og dernæst gamma stråler. Kernen kan også udsende gamma stråler med meget høj energi tidligt efter dannelsen.



NORDBALL i opbygningsfasen. De mange forskellige detektorer, som NORDBALL består af fastspændes på en ramme med 32 felter, der har samme form som en fodbold. Alle detektorer er modulært opbygget, således at NORDBALL nemt kan ombygges til forsøg der kræver andre detektorer.

rotation kan der udsendes op til 30-35 gamma stråler indenfor den første milliardtedel ( $10^{-9}$ ) sekund efter fusionen. I mellemtiden har kernen roteret omtrent lige så mange gange om sin akse, som Jordens har drejet om sin siden dens skabelse. Kernen har da også gennemlevet en række forskellige faser og sædvanligvis ændret sin form og facon flere gange. Blandt de mere aparte former, kan nævnes de for nyligt opdagede superdeformerede atomkerner, hvis facon nærmest minder om en amerikansk fodbold, med et akse forhold på 2:1. Teoretiske beregninger forudsiger, at endnu mere langstrakte kerner (med akseforhold 3:1) findes i naturen.

## NORDBALL multidetektoren

Kortlægningen af en atomkernes livsforløb stiller store krav til det eksperimentelle udstyr. Ikke alene skal den enkelte kernereaktion identificeres ud af de titusinder af reaktioner, der finder sted i hvert sekund, også så mange gamma stråler som muligt fra den enkelte kernereaktion skal måles. Dette kræver et måleinstrument, der kan genkende en reaktion på nogle få milliardtedele af et sekund, overstå målingen i løbet af nogle få milliontedele sekund, dække en væsentlig del af den kugleflade, der omslutter reaktionsstedet samt bestemme gamma strålernes energi og retning med høj præcision.

NORDBALL gamma stråle multidetektoren. Instrumentet består af 20 germanium detektorer omsluttet af anti-Compton skjold til undertrykkelse af spredt gamma stråling. Desuden er systemet udstyret med en indre kugle bestående af 60 BaF<sub>2</sub> detektorer. NORDBALL er et samarbejde mellem 8 nationer, 15 forskergrupper og 75 fysikere.



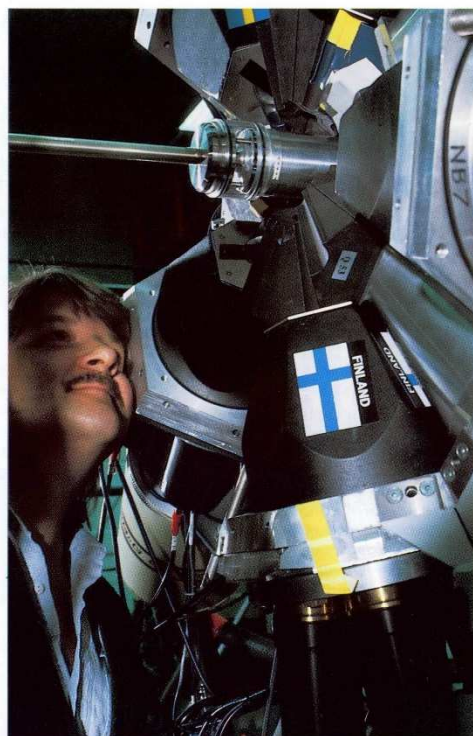
Disse krav leder til et modulært gamma stråle instrument bestående af et stort antal gamma stråle detektorer med høj opløsningssevne og effektivitet anbragt i en kugleformet geometri.

Idet de enkelte detektorer er meget kostbare, overstiger det samlede instrument de fleste mindre landes økonomiske formåen og må realiseres som et samarbejde mellem forskningsgrupper fra forskellige lande.

NORDBALL detektorsystemet, der fornylig er taget i anvendelse ved Niels Bohr Institutets Tandem Accelerator Laboratorium, udgør et af de mest avancerede instrumenter i verden til undersøgelser af atomkerners struktur. Instrumentet er resultatet af et samarbejde, der oprindeligt startede mellem de Nordiske lande Danmark, Finland, Norge og Sverige. Samarbejdet er siden blevet udvidet til også at omfatte laboratorier i Holland, Italien, Japan og Tyskland. Omkring 15 forskergrupper fra de forskellige lande har bidraget til konstruktionen af forskellige dele af instrumentet, og omkring 75 fysikere er involveret i forskningsprojekter med NORDBALL. Det samlede projekt repræsenterer en investering på næsten 40 millioner kroner. Heraf beløber Danmarks andel sig til omkring 8 millioner kroner.

NORDBALL består af 20 store højopløsnings germanium detektorer med tilhørende skjold af BGO (Bismut-Germanat-Oxid) scintillatorer, hvis formål er at undertrykke spredt gamma stråling. Detektorerne er monteret i en kugleformet ramme med 32 felter (som en overdimensioneret fodbold). De resterende 12 felter tjener som udgang for en indre detektorkugle, bestående af 60 bariumdifluorid detektorer. Denne kugle tillader at bestemme dels antallet og dels den samlede energi af den udsendte gamma stråling.

Der er til NORDBALL udviklet et stort antal specielle detektorer til bestemte formål. Således kan detektorerne i den ene halvdel af NORDBALL erstattes med

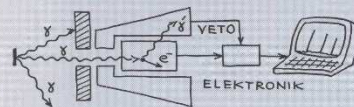


Ari Virtanen, fra Jyväskylä i Finland, betragter reaktionsstedet i den åbne NORDBALL. Kernereaktionerne finder sted i et tyndt folie på størrelse med et frimærke placeret midt i instrumentet. I forbindelse med hver kernereaktion udsendes der 20-30 gamma stråler, der registreres i de forskellige typer detektorer, som NORDBALL udgøres af.

særlige neutrondetektorer til måling af antallet og energifordelingen af de neutroner, der fordampes i henfaldets tidlige faser. Instrumentet kan udstyres med endnu en indre detektorkugle til måling af ladede partikler. Desuden er der udviklet fintfølsomme apparatur til levetidsbestemmelse af energitilstande. Det store arsenal af forskelligartet apparatur gør NORDBALL til et særdeles fleksibelt og slagkraftigt instrument.

### Anti-Compton spektrometeret

En germanium krystal har et volumen på omkring 60-70 cm<sup>3</sup>. Dette er ikke nok til at stoppe den overvejende del af den indfaldende gamma stråling helt i selve detektorkrystallen. For gamma stråler med energier på 0.2 til 1 MeV dominerer Compton spredning. Ved denne proces spredes gamma strålen på en elektron i krystallen. Elektronen afleverer sin energi til detektoren, men den spredte gamma stråle undslipper ofte med en del af energien.



Man måler derfor ikke den fulde energi. Den type fejlmålinger, der følger fra denne proces, kan undgås ved at omslutte germanium tælleren med et scintillator skjold, der anvendes til at registrere den spredte stråling. Ved et veto mod hændelser, hvor der samtidig registreres gamma stråling i germanium krystallen og i scintillatoren, kan den uønskede baggrund af fejlmålinger reduceres med en faktor på mere end 10.

### NORDBALL konsortiet

NORDBALL projektet er et samarbejde mellem følgende laboratorier, der udover at medfinansiere instrumentet også yder støtte til driften.

Danmark:	Niels Bohr Institutet
Finland:	Jyväskylä Universitet
Holland:	KVI, Groningen
Italien:	LNS, Catania INFN og Milano Universitet
Japan:	Hiroshima Universitet INS, Tokyo Kyushu Universitet Tsukuba Universitet
Norge:	Oslo Universitet
Sverige:	CTH, Göteborg Lund Universitet MSI, Stockholm Uppsala Universitet
Tyskland:	Bonn Universitet

Shiro Mitarai, fra Kyushu Universitetet i Japan, er ved at samle den mindste af de tre detektorkugler, som NORDBALL består af. Denne detektor består af 24 silicium skiver til måling af de protoner og alfa partikler, der udsendes ved kernereaktionerne.



## En Rundgang på Laboratoriet

Acceleratoren, laboratoriets hovedinstrument, består af injektoren, tandem acceleratoren, og to efteracceleratorer, som vist på grundplanen. En rundgang kan følge samme rute, som partikler, der accelereres. Eksempelvis atomer af titan,  $^{48}\text{Ti}$ , som accelereres til en energi på 225 MeV.

**0:** Ionbevægelsen foregår i et vakuum på omkring en milliardtedel atmosfære. Det lave tryk kræver moderne pumper og selvsagt, at acceleratoren er tæt.

**1:** Negative ioner dannes i ionkilden ved bombardement af en titan pille med cæsium-ioner (sputtering). En positiv elektrode trækker ionerne ud fra ionkilden og tilfører dem en energi på 20 keV.

**2:** Ionkilden danner også ioner man ikke er interesseret i. De sorteres fra, idet ionstrålen afbøjes  $90^\circ$  i en analysemagnet med magnetfeltet indstillet således, at kun Ti-ionerne slipper igennem.

**3:** Ionkilden og afbøjningsmagneten befinder sig på negativ højspænding, som frastøder de negative ioner. Denne del af anlægget er i virkeligheden en selvstændig accelerator, som kaldes injektoren. Den giver ionerne en energi på 150 keV (0,26% af lyshastigheden).

**4:** Injektoren skyder ionerne ind i tandem acceleratoren, ved jordpotentiale.

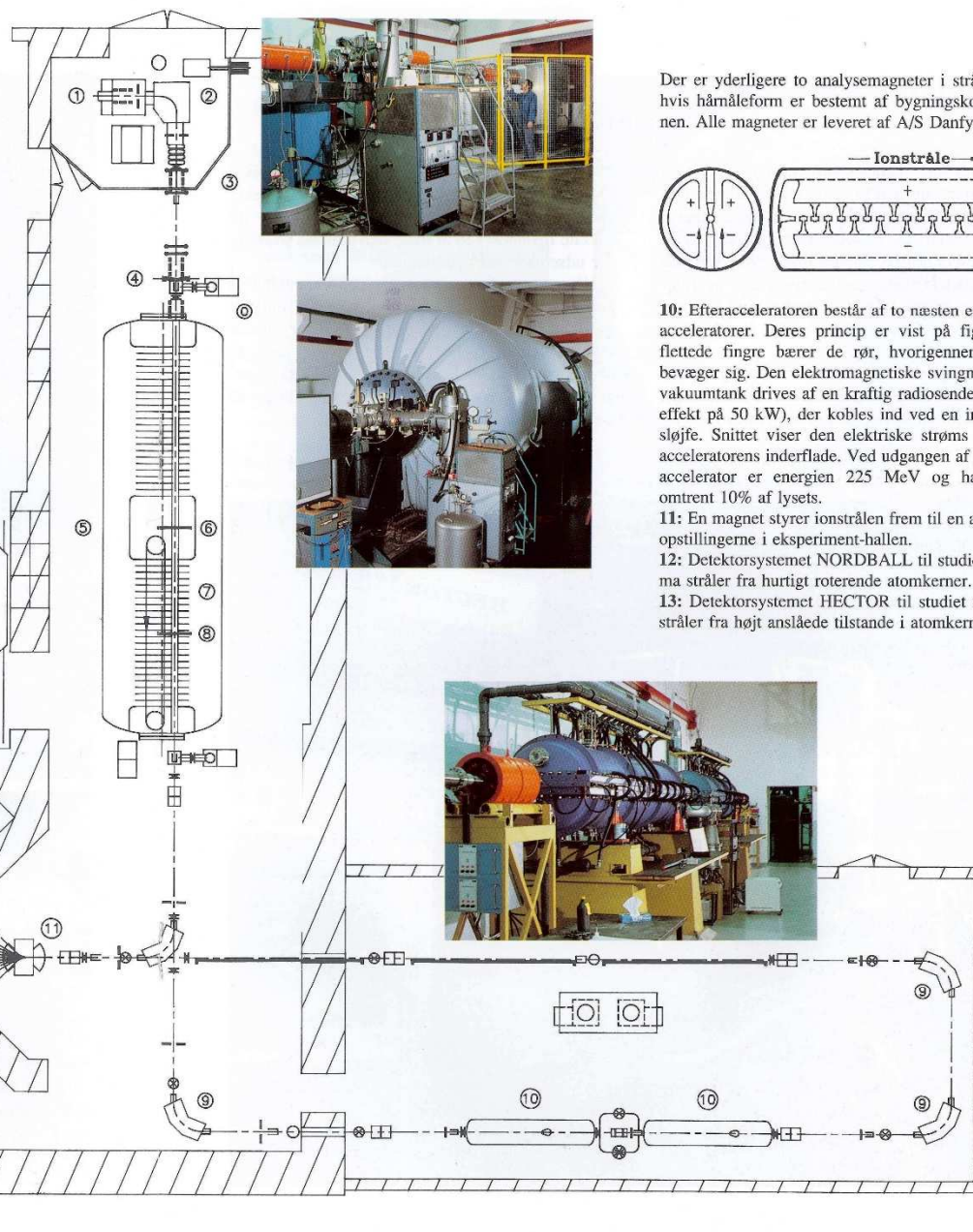
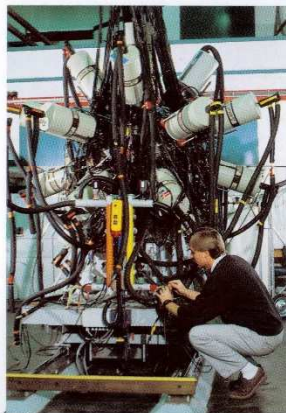
**5:** Acceleratorens midterste sektion (terminalen) oplades til + 9 millioner volt, med et transportbånd af gummi. Spændingen, som er jævnt fordelt langs accelerationsrøret, accelererer ionerne. Ved terminalen har de opnået en energi på 9 MeV (2% af lysets hastighed).

**6:** Midt i terminalen passerer ionerne et tyndt kulfolie. Her mister de den ekstra elektron de fik i ionkilden, og yderligere 6-10 elektroner. Ud af kulfoliet kommer der derfor ioner med et tilsvarende antal positive ladninger. Vi følger dem, der har 9 ladninger.

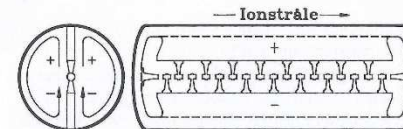
**7:** Hver ladning bidrager til accelerationen, som derfor er meget kraftigere end før.

**8:** Ionerne stripes yderligere til 15 positive ladninger. Ved udgangen af tandemacceleratoren er energien 117 MeV og hastigheden 7.2 % af lysets.

**9:** Ionerne analyseres i en afbøjningsmagnet. Kun ioner med den rigtige energi og ladning fortsætter.



Der er yderligere to analysemagneter i strålegangen, hvis håmåleform er bestemt af bygningskonstruktionen. Alle magneter er leveret af A/S Danfysik.



**10:** Efteracceleratoren består af to næsten ens linære accelerators. Deres princip er vist på figuren. De flettede fingre bærer de rør, hvorigennem ionerne bevæger sig. Den elektromagnetiske svingning i hver vakuumtanks drives af en kraftig radiosender (med en effekt på 50 kW), der kobles ind ved en induktionsløkke. Snittet viser den elektriske strøms forløb på acceleratorens inderflade. Ved udgangen af den sidste accelerator er energien 225 MeV og hastigheden omtrent 10% af lysets.

**11:** En magnet styrer ionstrålen frem til en af forsøgsopstillingerne i eksperiment-hallen.

**12:** Detektorsystemet NORDBALL til studiet af gamma stråler fra hurtigt roterende atomkerner.

**13:** Detektorsystemet HECTOR til studiet af gamma stråler fra højt anslåede tilstande i atomkerner.



## Ophedede Atomkerner

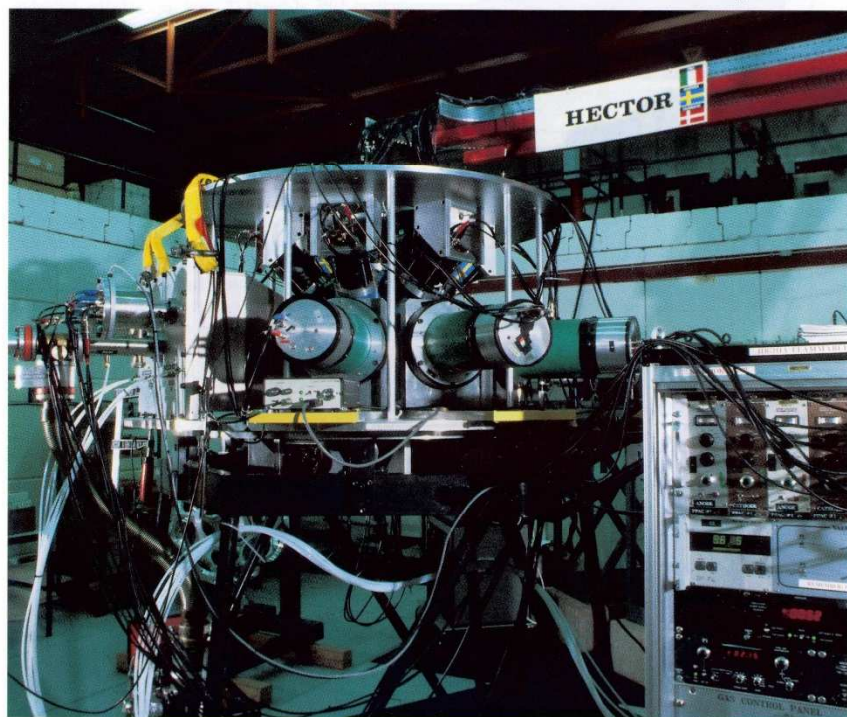
Atomkerner, der skabes i laboratoriet ved fusion (sammensmeltning) af to atomkerner, dannes med en betragtelig overskudsenergi. Denne energi fordeles blandt de enkelte kernepartikler som bevægelsesenergi, på samme måde, som termisk energi fordeles blandt partiklerne i en opvarmet væske eller luftart. Man kan derfor også tale om varme og kolde atomkerner og om atomkerners temperatur.

Kolde atomkerner domineres af kvantefysikkens spilleregler. Atomkerne kan kun befinde sig i tilstande, der karakteriseres ved bestemte kvantetal

for energi, omdrejningshastighed, osv. Idet disse tilstande oftest er adskilt, bliver det muligt eksperimentelt at iagttage overgange mellem de enkelte tilstande ved at måle den gamma stråling, der udsendes ved overgangen.

Når en atomkerne opvarmes vokser antallet af mulige energitilstande dramatisk, idet den samlede energi kan fordeles på utallige måder blandt kernens partikler. Det er derfor ikke længere muligt ved forsøg at adskille de enkelte overgange. Derfor bliver de målte energifordelinger af gamma stråler kontinuerte.

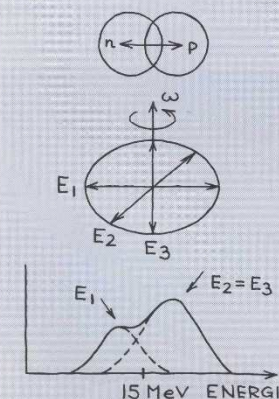
*HECTOR multidetektoren til undersøgelse af ophedede atomkerner. Instrumentet er et Dansk-Italiensk-Svensk samarbejde. Med HECTOR kan man måle den gamma stråling, der udsendes umiddelbart efter at atomkerner er dannet i en fusions reaktion.*



## Kæmpe dipol resonanser

Sammenstød mellem tunge ioner fører ofte til dannelsen af en sammensmeltet atomkerne med høj energi (temperatur). En del af den tilførte energi kan gå til at anslå stærke vibrationer i atomkernen, umiddelbart efter dannelsen.

Den dominerende vibrationsform er den såkaldte elektriske dipol resonans. Den svarer til en vibration i modfase af atomkernens protoner og neutroner. I deformerede kerner opstår der uafhængige svingninger langs kernens 3 hovedakser. Vibrationerne, der kan sammenlignes med svingninger af fjedre med forskellig stivhed, har forskellige energier.



Vibrationerne kan dæmpes ved udsendelse af gamma stråler med meget høje energier. En måling af energifordelingen af denne stråling tillader derfor en bestemmelse af aksernes længde og dermed af den ophedede atomkernes form og deformation. Ved at sammenligne den målte form med teoretiske beregninger kan man få oplysninger om hvor stor indflydelse enkelte kvantetilstande har på formen.



*Verdens største énkrystal af bariumdifluorid. HECTOR består af 8 sådanne scintillations detektorer, der omdanner gamma strålers energi til lys. Det særlige ved disse detektorer er, at de kan give information om tidspunktet for strålingens ankomst med en nøjagtighed på omkring en halv milliardtedel sekund.*

Det viser sig, at mange træk ved ophedede atomkerner kan beskrives alene ved brug af begreber hentet fra den klassiske fysik, og udviklet i forbindelse med beskrivelsen af eksempelvis luftarter og væskedråber. Andre træk kræver inddragelse af den kvantefysiske beskrivelse. Et centralt emne i moderne kernefysik er undersøgelsen af gyldighedsområdet for disse to, meget forskellige, beskrivelser af stof på det subatomare niveau.

Ved tilstrækkelig høje kerntemperaturer bliver bevægelsesenergien af de enkelte kernepartikler så høj, at den overstiger den bindingsenergi, der holder partiklerne bundne i selve atomkernen. Under sådanne ekstreme forhold sættes der til sidst en grænse for atomkernens eksistens. Atomkernen fordampes nemlig et stort antal kernepartikler fra overfladen eller eksploderer i et stort antal fragmenter bestående af lette atomkerner.

## HECTOR detektorsystemet

Umiddelbart efter de er dannet ved en tung ions kollision kan der i ophedede atomkerner anslås stærke vibrationer.

Egenskaberne af disse vibrationer, de såkaldte kæmperesonanser, afhænger af atomkernens egenskaber, som eksempelvis dens udstrækning og deformation samt graden af orden eller kaos i kernen.

HECTOR multidetektorsystemet, der er opstillet ved Tandem Accelerator Laboratoriet er et avanceret instrument til måling af den højenergetiske gamma stråling, der udsendes når kæmpe resonanser i atomkerner dæmpes. Instrumentets hovedbestanddel er 8 store énkrystaller af bariumdifluorid (BaF<sub>2</sub>). Detektorsystemet er et resultat af et samarbejde mellem Milano Universitet, Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg og Tandem Accelerator Laboratoriet. Instrumentet repræsenterer en samlet investering på omkring 3 mill. kroner. Heraf er halvdelen danske midler.

Instrumentet består desuden af et multiplicitets

## De Tekniske Afdelinger

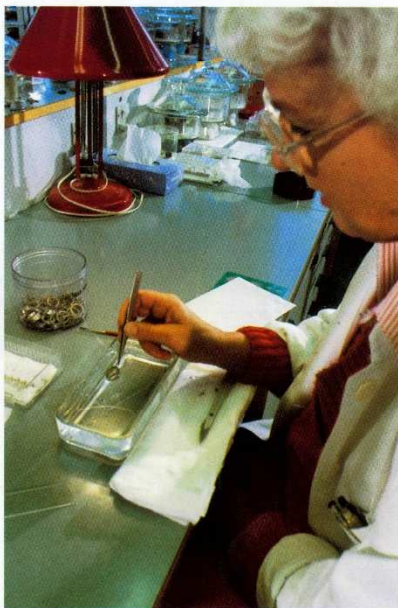
Forskningen ved Laboratoriet kræver i stor udstrækning specielt fremstillet udstyr. Ligeledes kræver den daglige drift af det omfattende anlæg en konstant vedligeholdelse. Laboratoriet råder derfor over et mekanisk værksted til præcisionsfremstilling af dele til acceleratorene og til forsøgsopstillingerne. Desuden findes der et vakuum værksted til konstruktion og vedligeholdelse af de mange forskellige vakuumsystemer. Elektronik værkstedet reparerer og udvikler nye elektroniske enheder til forsøgsapparatet og til datamaskinerne.

Ved kernereaktioner beskydes tynde folier af forskellige stoffer med projektiler fra acceleratoren. Disse folier (targets), der oftest består af sjældne masseseparatorerede isotoper, fremstilles på kemi afdelingen. Folierne er enten valset ned til en tykkelse af blot nogle få tusindedele millimeter eller fordampet på et tyndt bærefolie. Kemi afdelingen bistår også ofte udenlandske laboratorier med fremstilling af særlige targets. På det kemiske laboratorium fremstilles også de tynde kulstof folier til brug ved stripningen af ionerne i Tandem acceleratoren.

filter, opbygget af 14 mindre BaF<sub>2</sub> detektorer, til måling af de roterende varme atomkerners omdrejningshastighed. Endelig indgår et partikel-tællersystem til bestemmelse af kernereaktionens art (spredning, fusion eller fission).

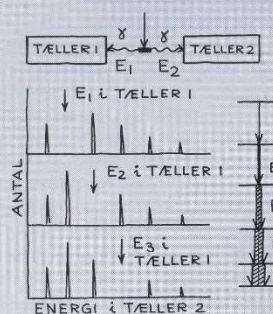
HECTOR detektorerne giver meget hurtige tidssignaler. Denne egenskab er af stor betydning for studiet af kernereaktioner ved meget høje energier. Ved disse reaktioner produceres et stort antal meget energirige (hurtige) partikler. Med HECTOR bliver det muligt at adskille disse partikler fra gamma strålerne ved at måle deres flyvetid fra reaktionsstedet. HECTOR instrumentet medbringes derfor også i forbindelse med forsøg ved større accelerator anlæg i udlandet, eksempelvis ved SARA cyklotronanlægget i Grenoble. Her undersøges grænserne for ordnet bevægelse i ophedede atomkerner.

Fremstilling af kulstof folier til Tandem Acceleratoren på kemi afdelingen. Folierne er blot omkring 50 atomlag tykke.



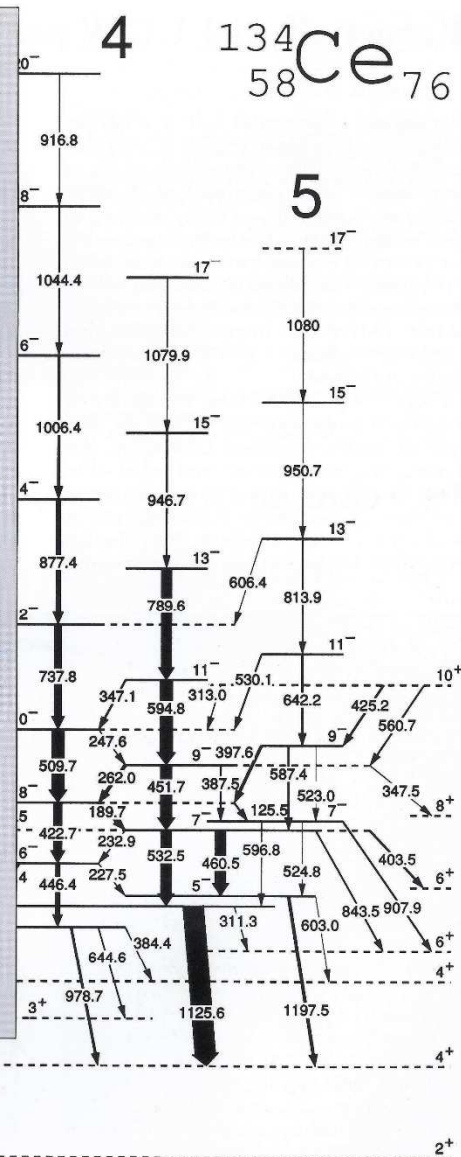
## Gamma-gamma koincidenser.

En vigtig metode er den såkaldte koincidenismetode. Her undersøger man det tidsmæssige sammenfald mellem gamma stråler i to eller flere detektorer. I praksis forlanger man sammenfald indenfor 10-30 10<sup>-9</sup> sekund. Sådanne sammenfald skyldes gamma stråler i kaskade, dvs. henfald i samme atomkerne. Sammen med de målte gamma stråle energier tillader koincidenzmålingerne opbygningen af detaljerede energi diagrammer for kernens kvantetilstande.



Figuren illustrerer metoden, der anvendes ved opbygning af niveaudiagrammer. Hvis detektor 1 registrerer en gamma stråle med energi E1, er denne gamma stråle ikke synlig for detektor 2. Spektralfordelingen for detektor 2 indeholder derfor kun de andre gamma stråler, der er i koincidenens med E1. Når detektor 1 registrerer energien E2, mangler E2 i spektret for detektor 2, men ikke E1, E3 osv.

Puslespillet bliver mere kompliceret hvis der i samme kaskade er flere gamma stråler med samme energi. Da må man forlange koincidenens mellem 3 detektorer eller mere. Da hver detektor er lille, er sandsynligheden for at fange 3 gamma stråler forsvindende med mindre man råder over mange detektorer.



## Kernekraft ved 1 GeV per Nukleon.

Når energien i sammenstød mellem atomkerner bliver tilstrækkelig stor afslører det sig, at også de enkelte kernepartikler er sammensatte og har en indre struktur. Derfor kan en nukleon, på samme måde som et atom eller en kerne, anslås til en mere energirig tilstand. Den anslåede nukleon kan for en kort tid eksistere som en del af en kerne. Spørgsmålet er da, hvordan påvirker tilstedeværelsen af en sådan eksotisk partikel kernens egenskaber? Og omvendt: hvordan påvirker kernen partiklens egenskaber i forhold til dens egenskaber i fri tilstand?

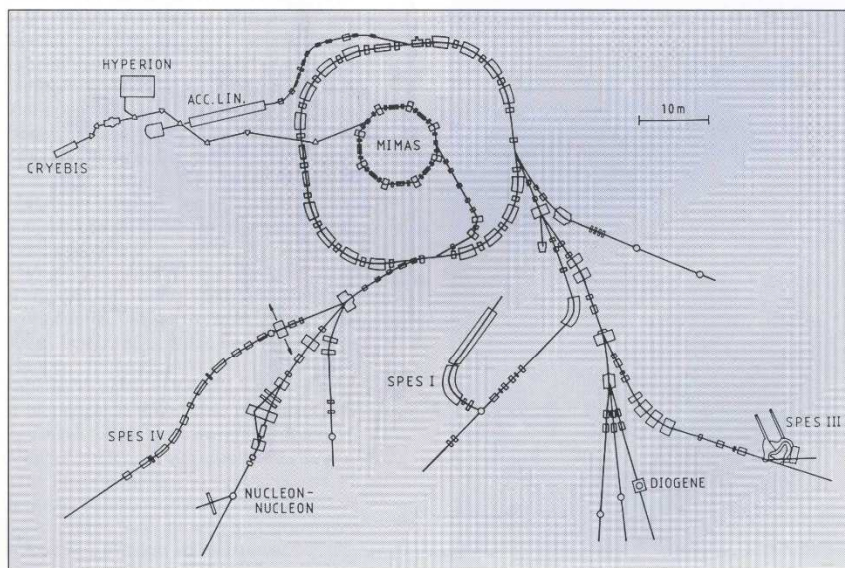
Ekspirer indenfor dette område kræver langt højere projektil energier end dem der rådes over på Tandem Accelerator Laboratoriet. Men Laboratoriets brede kontakt med udenlandske forskergrupper giver adgang til at udføre forsøg ved andre typer acceleratører i samarbejde med de lokale grupper. Et samarbejde, som Tandem Accelerator Laboratoriet kan bidrage væsentligt

til, blandt andet i kraft af et veludbygget dataanlæg og gennem den styrke der ligger i den tætte kontakt til Niels Bohr Institutets teoretiske fysikere.

### SATURNE acceleratoren

En forskergruppe ved Laboratoriet har igennem flere år deltaget i eksperimenter ved acceleratorsanlægget SATURNE ved Paris.

SATURNE acceleratoren er et meget omfattende og fleksibelt anlæg, hvis grundrids er vist på figuren herunder. Acceleratoren, der foruden hovedaccelerationsringen også består af foracceleratoren MIMAS, kan accelerere ioner op til energier på mere end 1 GeV (1 milliard elektronvolt) per kernepartikel. Denne energi er mere end 200 gange højere end den Tandem Laboratoriet kan frembringe. Saturne er forsynet med flere ionkilder. Heriblandt ionkilder der producerer

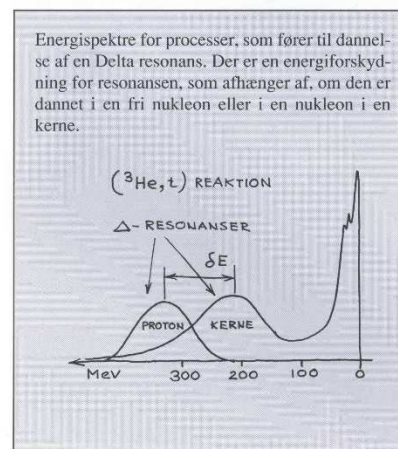


polariserede ioner. Disse ioner, hvis spin akse har en bestemt orientering i rummet, er velegnede til at undersøge fænomener, der er knyttet til kernepartiklernes spin. Specielt de såkaldte spin-bølger. Spin-bølger er en grundlæggende anslagsform i kerner, hvor spinnets af et større antal kernepartikler i fællesskab ændrer retning i rummet.

### Delta Resonanser

Ved de energier der er nødvendige for at anslå spin-bølger i atomkerner, er det også muligt at anslå en proton eller en neutron til dens laveste energitilstand, som har en overskudsenergi på omkring 300 MeV. Denne tilstand kaldes for Delta resonansen. Delta resonansen svarer til en omdannelse af en kernepartikel på kvark niveau.

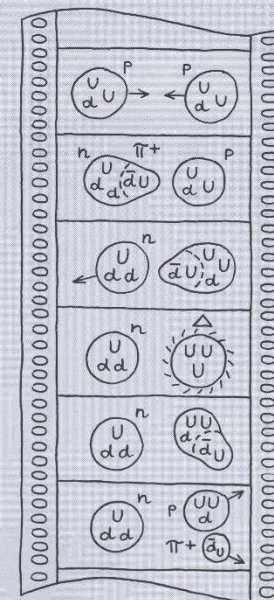
Eksempelvis kan man danne en Delta resonans i en kollision mellem en atomkerne og en proton. Protonen vekselvirer med en partikel i atomkernen og dukker op igen i form af en neutron. Undervejs er en del af den indkomne partikels energi brugt til at skabe Delta resonansen. Denne henfalder siden hen under dannelse af en pion. Pionen, en anden partikeltype, vekselvirer kraftigt med de øvrige nukleoner i kernen.



### Kvarks i atomkerner.

En Delta resonans dannes i et sammenstød mellem to protoner:

- 1: Hver proton  $uud$  er opbygget af tre kvarks, to  $u$  kvarks og en  $d$  kvark. Betegnelserne stammer fra engelsk  $up$  og  $down$ , som er kvanteværdier for en egenskab der kaldes  $smag$ .
- 2: Vekselvirkningen danner i den ene proton en positiv pion bestående af en  $anti-d$  og en  $u$ .
- 3: Pionen overføres til den anden proton. Tilbage bliver  $udd$ , som er en neutron, der udsendes.
- 4: I den resterende partikel forenes  $d$  og  $anti-d$  i en tilintetgørelsesproces (annihilation). Den tilbageblevne partikel  $uuu$  er den anslåede Delta resonans.
- 5: Parret  $d+anti-d$  gendannes hvorefter også pionen kan gendannes.
- 6: Pionen og den gendannede proton flyver fra hinanden.



## Grænsen til Faste Stoffer

De fleste af os oplever hver eneste dag, at atomer og molekyler, som befinder sig på luftform, kan slå sig sammen og danne faste eller flydende partikler: Regndråber eller snefnug er klynger af vandmolekyler. Det er klynger af kulstofatomer, vi ser i de sodpartikler, der stiger op fra stearinlysets flamme.

Klyngefysikken studerer dette stadium af materien mellem, på den ene side, det enkelte atom eller molekyle, og på den anden side, det faste stof eller væske. Det interessante er, at klyngernes egenskaber, smeltepunkt, ledningsevne, bindingsenergi og ioniseringspotentialer er helt forskellige både fra atomets og fra det faste stofs egenskaber.

Klynger har således deres eget liv og egne love. Disse love er forskellige fra dem, der behersker atomernes og atomkernernes opbygning, men der er alligevel tilstrækkelig mange analogier til, at man i kvanteteorien for klyngerne kan udnytte

den viden, som er opbygget i forbindelse med studiet af atomer og atomkerner.

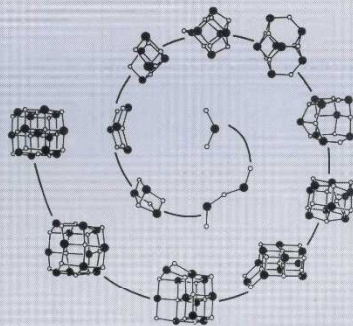
Man kan forestille sig, at klyngernes kimdannelse og vækst sker ved, at to molekyler eller atomer til at begynde med finder sammen. Et tredje lejr sig til, osv. Derefter vokser klyngerne trinvis. Det første interessante spørgsmål er nu, hvor langt man skal ud i vækstspiralen, før det bliver trivielt. Dermed menes, at man er nået frem til en klynge, der er så stor, at dens egenskaber ikke afviger væsentligt fra en makroskopisk krystals egenskaber. Det er jo karakteristisk, at de egenskaber, der regnes for interessante ved faste stoffer ikke afhænger af, om der er tale om en større eller mindre klump af stoffet.

Det andet interessante spørgsmål er, om man under denne vækst ud langs spiralen støder på særlige lovmæssigheder, som hverken kan findes hos luftarter eller hos makroskopiske krystaller.

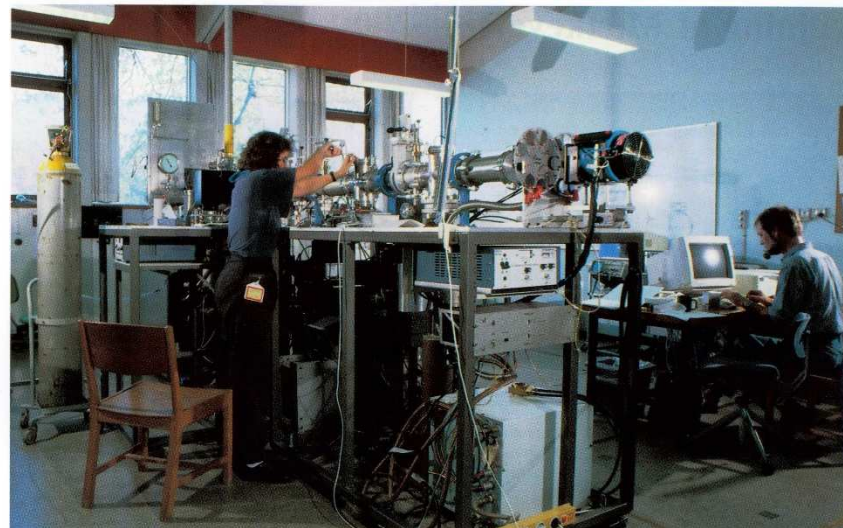
### Kvantefysik eller geometri?

Samlinger af kvantepartikler med særlig stabilitet er kendt fra andre områder af fysikken. De mest stabile atomer er ædelgasserne He, Ne, Ar, Kr, Xe og Rn, hvor det er antallet af elektroner omkring kernen, som betinger stabiliteten. For atomkerne forekommer også særlig stabilitet for bestemte antal protoner eller neutroner. Disse bestemte antal kaldes for magiske tal.

For klynger gælder det imidlertid, at ikke alle klynger udviser de samme magiske tal. Klynger af f. eks. Xenon atomer udviser rene geometriske pakninger som kaldes MacKay ikosaedre. De består alle af et ulige antal atomer. Til forskel herfra er natrium (Na) klyngernes magiske tal bestemt ved valenselektronernes bølgeegenskaber, dvs. bestemt af kvantefysiske love. Et særligt kendetegn ved klynger er, at deres magiske tal, i princippet, kan udvides i det uendelige. For atomer og atomkerner er antallet begrænset af det antal protoner, der kan samles i en enkelt kerne. Dette antal overstiger ikke 100, da kernen ellers sønderledes af de frastødende elektriske kræfter.



Vækstspiralen for de første 13 stadier af klynger af natriumklorid. Figuren viser en teoretisk beregning af T. P. Martin.



Klyngeacceleratoren er et selvstændigt accelerator anlæg til studiet af overgangen mellem atomer og faste stoffer. Klynger af atomer dannes i en dyse i den fjerneste ende af anlægget. Klyngernes masse bestemmes derefter i massespektrometret for enden af accelerationsrøret ved en flyvetidsmåling.

Ved Laboratoriet studeres klynger af grundstoffet natrium (Na). Klyngerne produceres ved ekspansion af Na-damp gennem en fin dyse ud i et lufttomt kammer. Ved afkøling og sammenstød mellem Na-atomerne kondenserer disse til klynger af forskellig størrelse. Derefter ioniseres klyngerne og de accelereres. Klyngernes masse kan så bestemmes ved massespektrometri.

De målte massespektre viser, at visse klyngestørrelser er hyppigere end andre. Dette kan forklares ved en større bindingsenergi, og dermed en større stabilitet for specielle størrelser klynger. Herved etableres rækken af magiske tal for Na-klynger til 8, 20, 40, 58, 92, 138, 196, 260, 340, 440, 554. Men målet på Laboratoriet er at nå op til et par tusinde, hvor nye, hidtil ukendte, kvanteeffekter måske sætter ind.

En fysikstuderende i gang med analysen af måleresultaterne. Institutet er en del af det Naturvidenskabelige Fakultet ved Københavns Universitet, og Institutets videnskabelige stab underviser på alle trin af fysikstudiet. På Tandem Accelerator Laboratoriet er der gode muligheder for at deltage i spændende og højteknologiske projekter.

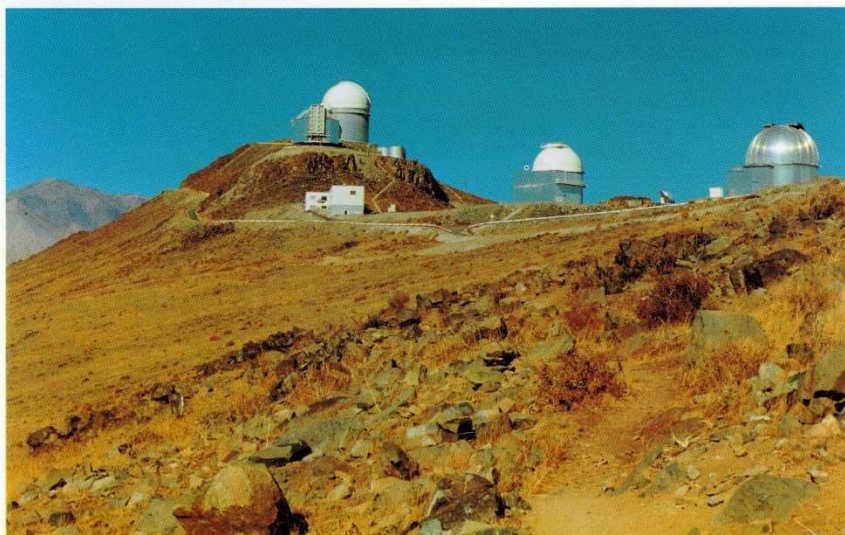


## Vejning af Mælkevejen

Et grundlæggende problem i astrofysikken er bestemmelsen af galakseres masse. Hvis man ved hvad galakserne vejer individuelt, og man kender antallet af dem per volumenhed i Universet, kan man beregne Universets middel-massetæthed. Dette gør det muligt at forudsige Universets fremtidige skæbne. Hvis middel-massetætheden i Universet er mindre end eller lig en vis kritisk værdi, vil Universet fortsætte sin nuværende ekspansion i al uendelighed. Hvis derimod massetætheden overstiger den kritiske værdi, vil de tiltrækkende gravitationskræfter mellem galakserne stoppe ekspansionen, og Universet vil trække sig sammen til en tilstand af meget høj tæthed.

Forskere ved Institutet, deltager i astronomiske undersøgelser af vores egen galakse, Mælkevejen, bl. a. gennem observationer af såkaldte blå horisontal gren stjerner, der er blandt de ældste i Mælkevejen. Hertil anvendes 2.2 m teleskopet på La Silla observatoriet i Andesbjergene, der befin-

*La Silla observatoriet ved European Southern Observatory (ESO) i Andesbjergene. Her langt fra lys og forurening er der gode forhold for at observere fjerne og lysvage astronomiske objekter.*



### Usynligt stof

En række epokegørende observationer har i de senere år ændret synet på galaksernes masser, idet meget tyder på at der kan være ca. 10-100 gange mere usynligt stof end synligt stof, i Universet.

Moderne metoder til undersøgelse af forekomsten af usynligt stof i universet bygger blandt andet på analyser af rotationen af galakser, satellitobservationer af røntgenstråling, og undersøgelser af stjerner beliggende langt fra galaksernes centrum.

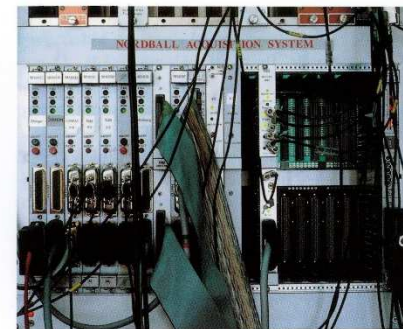
der sig ca. 600 km nord for Santiago de Chile på den sydlige halvkugle. Tandem Accelerator Laboratoriet har til kikkerten konstrueret en særlig følsom fotonetektor til måling af spektre af svage astronomiske objekter.

## Laboratoriets Datamaskiner

I alle faser af moderne kernefysiske forsøg gøres der omfattende brug af datamater. Ved Laboratoriet indgår datamaskiner i forbindelse med opsætningen af eksperimenterne, ved opsamling af måledata, ved den efterfølgende analyse af måleresultaterne og ved sammenligning med teoretiske modelberegninger.

Under eksperimenterne strømmer en stor mængde data om de målte kerneprocesser konstant fra detektorerne og den tilhørende elektronik. Datastrømmen går til en klynge af kompakte datamater, der arbejder parallelt med en foranalyse af informationerne. De originale data, samles igen og lagres på magnetbånd. Analysen er foreløbig og foretages for at fysikerne kan kontrollere om målingerne forløber korrekt. Via det datanet, der binder afdelingens mange forskellige datamater sammen, hentes de foreløbige resultater og vises løbende som histogrammer på grafiske terminaler. Datanettet tillader tillige, at foreløbige resultater lagres på afdelingens centrale datamat.

Den videre analyse foretages efter forsøgets afslutning. Eksperimentet kan da gentages med de originale data, som er lagret på magnetbånd. I denne fase foretager man mere tidskrævende beregninger på de målte størrelser og undersøger komplicerede sammenhænge mellem dem. Hertil kræves stor regnekraft, lagerplads og hurtige grafiske arbejdsstationer.

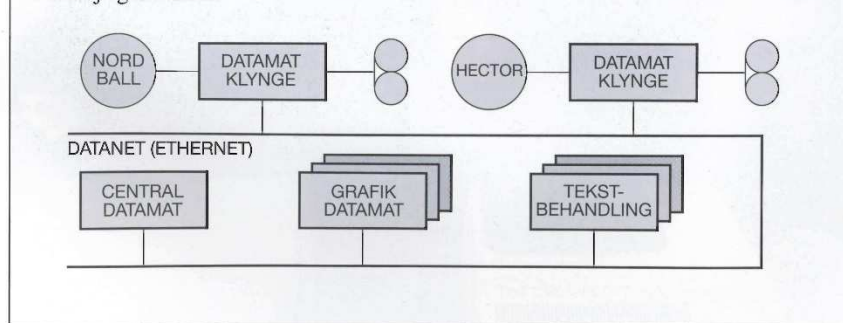


*En klyngedatamat udlæser data fra en kernereaktion. Hvert modul er en datamat, som får sin særlige opgave, som den løser samtidig med de andre. Når alle er færdige, flettes data sammen og lagres på magnetbånd.*

Laboratoriets dataanlæg er i stadig forandring i takt med kravene fra eksperimenterne og udviklingen af nye tekniske muligheder. Laboratoriet har flere gange selv udviklet datasystemer, før disse blev kommercielt tilgængelige.

I disse år foregår der en stigende international standardisering, som gør det nemmere at udbygge anlæggene og indpasse ny datateknologi. Standardiseringen betyder også, at komplicerede programmer kan udveksles med laboratorier verden over.

### Datavej og funktioner



## Internationalt Samarbejde.

Niels Bohr Institutets virke er præget af en omfattende kontakt og udveksling af viden med forskere fra de fleste af verdens lande. Denne tradition, der blev grundlagt af Niels Bohr, har gjort hans institut til et internationalt samlingssted for fysikere.

Det internationale samarbejde udfolder sig på mange måder. Institutets forskere benytter udenlandske acceleratoranlæg. Udenlandske forskere benytter tilsvarende Laboratoriets installationer og bidrager på afgørende måde til dets videnskabelige produktion. Til stadighed opholder der sig omkring 6-10 gæsteforskere for perioder af et år eller længere ved Laboratoriet. Gæsteforskerne modtager danske stipendier, eller medbringer mid-

ler fra hjemlandet. Endvidere besøges Laboratoriet hvert år for kortere perioder af 20-30 udenlandske forskere i forbindelse med løbende samarbejde.

Der har udviklet sig en tradition for, at Laboratoriet er vært for større internationale konferencer om aktuelle forskningsproblemer. Disse konferencer samler ofte flere hundrede fysikere fra alle dele af verden.

Det fornyede laboratorium, som er omtalt i det foregående, er idag velrustet til fortsat at være med i og præge den mest aktuelle forskning. Dette er, ikke mindst, muliggjort ved den værdifulde støtte, som laboratoriet modtager fra mange private fonde.

*Et forskerhold ved eksperimentets kontrolstation. Et typisk kernefysik forsøg varer mellem 2-3 dage og flere uger. Under forsøget måles der i døgndrift.*



### Redaktion:

Bent Elbek  
Jens Jørgen Gaardhøje  
Kenny Hagemann

*Tandem Accelerator Laboratoriet,  
Niels Bohr Institutet,  
4000 Roskilde, Danmark.  
Tlf. (45) 42 37 16 16.*

ISBN 87-89656-00-8

Tryk: AKA-PRINT ApS, Århus