

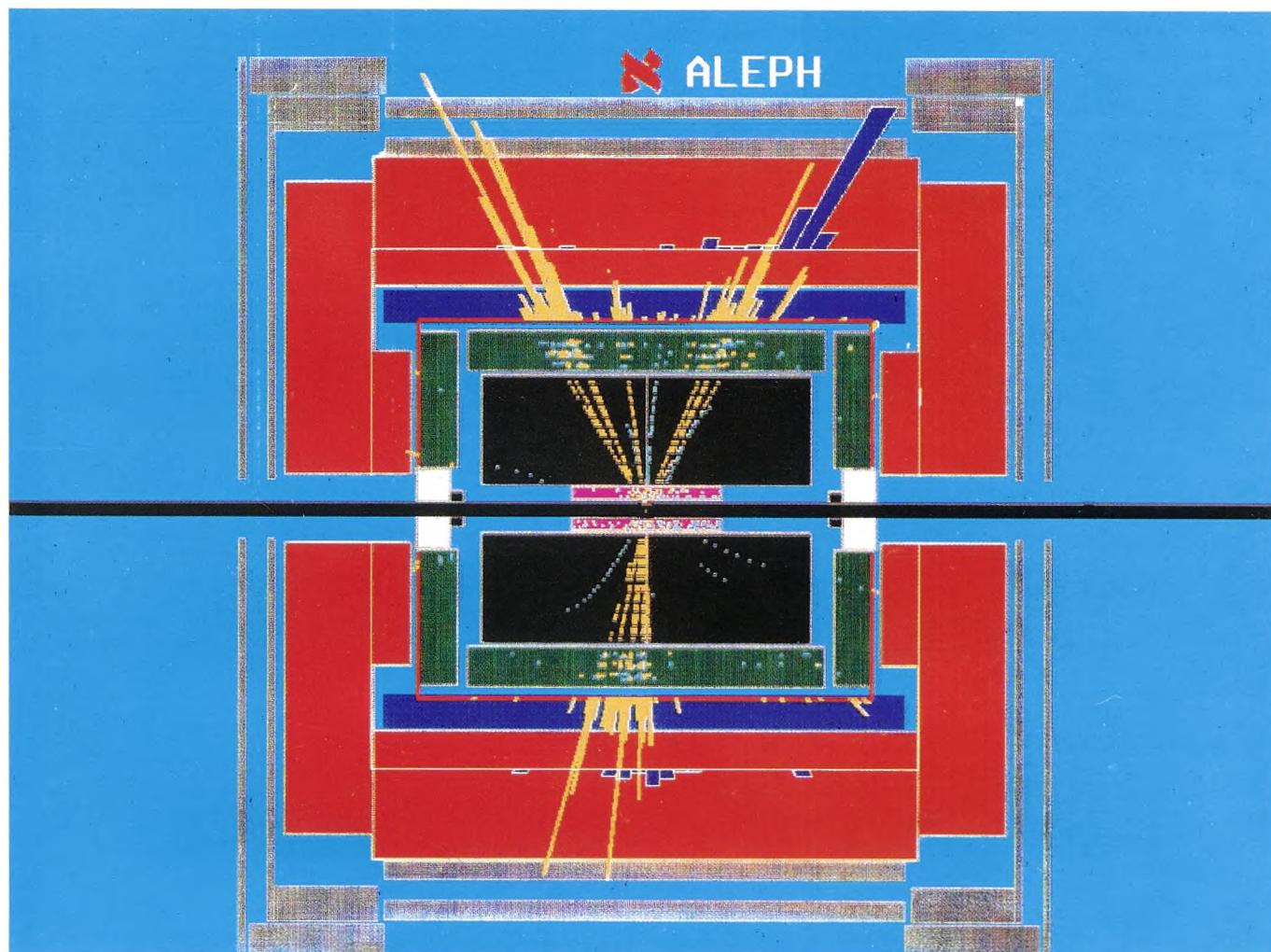
KVANT

marts
1992

1

Fysisk Tidsskrift

3. årgang



TEMANUMMER OM ELEMENTARPARTIKELFYSIK • STANDARDMODELLEN •

STRENGTEORI • KOSMOLOGI OG PARTIKELFYSIK • NEUTRINOER • PH.D. SPALTEN • NYT

FRA DANSK FYSISK SELSKAB • FYSIKUDREDNINGEN • FYSIKLEGESTUEN I HOLLAND

Girokort til DFS indlagt

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

c/o Institut for fysik og astronomi
Ny Munkegade
Aarhus Universitet
DK-8000 Århus C

Telefax : 86 12 07 40
E-mail : kvant@dfi.aau.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab

Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Jørgen Friis Bak (ansv.)
Det naturvidenskabelige fakultet
Århus Universitet
Jørn Christiansen
Torsten Freltoft (annoncer)
NKT Research Centre
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut
Københavns Universitet
Finn Berg Rasmussen
Fysisk Laboratorium
Københavns Universitet
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

KVANT udkommer 4 gange årligt og er
medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år (i Danmark).

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og gælder for repro-
klart materiale. Henvendelser om annoncer til
Torsten Freltoft, NKT Research Centre,
telefon 43 48 35 69, telefax 43 63 00 99.

Oplag: 3000
Tryk: AKA-print
ISSN 0905-8893

Indhold:

Elementarpartikelfysik

John Renner Hansen 1
Elementarpartikelfysikken beskæftiger sig med de mindste byggestene i naturen og de kræfter, der virker med dem. Til de eksperimentelle studier er det nødvendigt med gigantiske accelerators og detektorer - hele universet inddrages egentlig også som et laboratorium!

Elementarpartikelfysikkens Standardmodel

J.D.Hansen 2
Elementarpartikelfysikken befinder sig i dag i en besynderlig situation. Den såkaldte Standardmodel forklarer tilsyneladende alle observerede fænomener i et utroligt energiinterval, og alligevel er de fleste fysikere overbeviste om, at der må være en anden og mere fundamental teori.

Strengteorien

Jens Lyng Petersen 10
For at kunne give en samlet beskrivelse af samtlige fundamentale partikler og deres vekselvirkninger har teoretikerne formuleret strengteorier, hvor partiklerne opfattes som tilstande af én og samme kvantestreng.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

..... 13
Nye bestyrelser for selskabet og sektionerne — Mødekalender for 1992 — På årsmødet i 1991 blev der fremlagt forslag om et fælles årsmøde og om oprettelse af en dansk vinterskole for Ph.D.-studenter (forskerstudenter) — Kommentar til forslaget om fælles årsmøde.

Betaling af kontingent til Dansk Fysisk Selskab.

Rapport fra udvalget om oprettelse af vinterskole for Ph.D.-studerende.

Per Hedegaard 17

Kosmologi og partikelfysik

Charlotte Fløe Kristjansen 18
Studiet af universet og studiet af elementarpartiklerne virker umiddelbart som to diametralt modsatte forskningsområder. I realiteten er der imidlertid en tæt sammenknytning, specielt i forbindelse med Universets skabelse.

Har neutrinoerne en endelig hvilemasse?

Jon Wulff Petersen 22
Neutrinoerne er den næsten usynlige lillebror i partikelfamilierne. Der udfoldes for tiden store bestræbelser på at finde ud af om den har en masse forskellig fra 0. Hvis det er tilfældet, næsten uanset hvor lille den er, vil det have en markant indflydelse på vores verdensbillede.

Ph.D. spalten

..... 28
Udredning af den danske fysikforskning.

Jørgen Friis Bak 30
Den endelige rapport fra det nedsatte udvalg er udkommet. Hovedproblemet for dansk fysik er den store udskiftning om 10-15 år, når hovedparten af de nuværende fysikere går på pension. Hvorledes klares fornyelsen? Hvorledes får vi uddannet tilstrækkeligt med fysikere?

"A flying circus of physics"

Nina Troelsgaard Jensen 31
Fysiklegestuen har været en tur i Holland.

Bog anmeldelse 32

Forsiden:

Figuren viser et Z^0 henfald til et kvark par og en gluon, som hver omdannes til pi-mesoner, observeret af ALEPH detektoren på CERN. Den sorte vandrette streg viser beam-røret hvor elektronerne og positronerne bevæger sig i modsat retning og bringes til at støde sammen i midten af billedet.

Elementarpartikelfysik

John Renner Hansen, Niels Bohr Institutet

Elementarpartikelfysik er den gren af naturvidenskaben, som beskæftiger sig med de mindste byggesten i naturen og med de kræfter, som virker imellem dem. Kemien repræsenterede i slutningen af forrige århundrede datidens "elementarpartikelfysik", indtil atomfysikken — og efter den kernefysikken — i dette århundrede overtog studiet af de mindste objekter. Det område, som senere skilte sig ud fra kernefysikken for at blive til nutidens elementarpartikelfysik, blev allerede etableret i halvtredserne. Nye målemetoder gjorde det muligt at observere en række egenskaber ved naturens mikrostruktur, som ikke var beskrevet af den ellers velfungerende kvanteelektrodynamik (QED) og Fermi-teorien for de svage kernekræfter. Sammen med et stadig stigende — og uoverskueligt antal identificerede elementarpartikler, skabte de uforklarede egenskaber grundlaget for udviklingen af den teori vi i dag betegner elementarpartikelfysikkens Standardmodel. Denne model beskriver med stor succes opbygningen af stof og de kræfter, som virker mellem stoffets bestanddele. Desværre har det indtil nu kun været muligt at beskrive tre kræfter inden for rammerne af denne model, nemlig den stærke og den svage kernekraft samt den elektromagnetiske kraft. Gravitationskraften, naturens fjerde og svageste kraft, står stadig for sig selv uden en egentlig kvantemekanisk beskrivelse.

Det eksperimentelle program for moderne elementarpartikelfysik er så kostbart, at det kun kan gennemføres i internationalt regi. I Europa findes to centre for elementarpartikelfysik, CERN i Geneve og DESY i Hamburg. Disse centre har gennem tiden delt forskningsfeltet mellem sig, så de eksperimentelle programmer i videst mulig udstrækning har suppleret hinanden. Indtil for tre år siden var hovedaktiviteten på CERN eksperimenter med hadroner som primære projektiler, mens man på laboratoriet i Hamburg var beskæftiget med elektron-positron sammenstød. For tiden er rollerne delvist byttet om. På CERN studerer man ved LEP elektron-positron sammenstød, mens man ved DESY er ved at lægge sidste hånd på en ny maskine, HERA, hvor sammenstød mellem protoner og elektroner ved meget høje energier kan frembringes. Begge aktiviteter har til formål at afprøve Standardmodellen og specielt at finde de svagheder, som på længere sigt kan skabe basis for en mere endelig teori. For på trods af dens succes har Standardmodellen også mange mindre gode sider. F.eks. er den metode, med hvilken man indfører partiklernes masse, ikke helt tilfredsstillende. Desuden har modellen et stort antal frie parametre.

Planlægningen af den næste accelerator ved CERN er allerede langt fremme. Navnet LHC, for Large Hadron Collider, antyder, at CERNs forskningsaktivitet efter år 2000 atter bliver eksperimenter med hadroniske projektiler. I LHC skal protoner støde mod protoner med så stor energi, at selv elementarpartikler, som er fire gange tungere end Uranatomet ($1000 \text{ GeV}/c^2$), kan blive produceret i tilstrækkeligt stort antal. Målet er at finde Higgs partiklen og top-kvarken.

Higgs-partiklen, som sandsynligvis er den tungeste af de to, kan have en masse på helt op til $1000 \text{ GeV}/c^2$.

Indenfor teoretisk højenergifysik findes der mange forskellige retninger, som alle prøver at bringe os videre end Standardmodellen. Et af de senere års mere omtalte teoretiske tiltag, strengteorier, har endog vist en mulig vej til at forene gravitationskraften med de øvrige tre kræfter. Disse teoretiske konstruktioner er født med kvantegravitation. Men desværre er de endnu ikke tilstrækkeligt gennemarbejdet til at give egentlige forudsigelser og således ikke istand til at overtage Standardmodellens plads som den bedste beskrivelse af mikro-kosmos. Andre teoretikere arbejder på først at kvantisere gravitationskraften for derefter om muligt at forene den med de andre kræfter. Super Symmetri og Technicolor er navne på andre næsten udødelige ideer, som er udsprunget af Standardmodellens mangelfuldhed, og som en god del af det eksperimentelle program går ud på at undersøge.

Danmark har en lang tradition for deltagelse i højenergifysik, både blandt teoretikere og eksperimentatorer. Den eksperimentelle aktivitet har været koncentreret på Niels Bohr Institutet, hvor to grupper deltager i LEP eksperimenterne ALEPH og DELPHI. Begge grupper har deres rod i tressernes og halvfjerdsernes hadron eksperimenter på CERN. Grundlæggende bidrag, som f.eks. de første observationer af hadron jetter i proton-proton og proton-antiproton sammenstød og opdagelsen af W og Z partiklerne, blev gjort af eksperimenter, som de to grupper har ydet en væsentlig indsats ved. Når de nuværende eksperimenter er tilendebragt i slutningen af dette årti, er det planen at deltage i ét LHC eksperiment. Forarbejdet til dette begyndte allerede for flere år siden.

Arbejdet indenfor teoretisk højenergifysik har også sit tyngdepunkt på Niels Bohr Institutet. Af områder, man beskæftiger sig med, kan nævnes kosmologi, kvantegravitation og superstrenger. Alle er interessante teoridannelser, hvoraf nogle måske senere vil kunne undersøges eksperimentelt.

Med dette nummer af KVANT prøver vi at give et øjebliksbillede af højenergifysikken, som den ser ud anno 1992. Det er oplagt ikke muligt at give et fuldstændigt billede, men ved at samle fire artikler om Standardmodellen, Strengteori, Kosmologi og Neutrinofysik, håber vi at give et dækkende indtryk af dette forskningsområde*.

Referencer:

- 1) *LHC, Fremtidens elementarpartikelfysik-laboratorium.* KVANT 2, nr. 1, 13 (1991).

* I et af de næste numre vil der yderligere blive bragt en artikel om tungionsfysik (*red.*).

Elementarpartikelfysikkens Standardmodel

J. D. Hansen, Docent ved Niels Bohr Institutet

Elementarpartikelfysikken befinder sig i dag i en besynderlig situation. Den såkaldte Standardmodel forklarer tilsyneladende alle observerede fænomener i et utroligt energiinterval, og alligevel er de fleste fysikere overbeviste om, at der må være en anden og mere fundamental teori.

Man har indtil nu observeret fire fundamentale kræfter i naturen: tyngdekraften, den elektromagnetiske kraft, den stærke kernekraft og den svage kernekraft. Tyngdekraften, der er den kraft, som har været studeret i længst tid, var udgangspunktet for den klassiske mekanik, som den blev opstillet af Newton. Alligevel er det stadig den, vi forstår dårligst. Dette skyldes, at den almene relativitetsteori, der var Einsteins generalisering af Newtons teori, har vist sig vanskeligt forenelig med kvantemekanikken, den teori, der blev påbegyndt af Niels Bohr, og som erstatter Newtons klassiske mekanik på det atomare plan. Ser man bort fra tyngdekraften, har vi i dag noget, der nærmer sig en forenet teori for de øvrige kræfter. Det teoretiske grundlag blev etableret i 60'erne og 70'erne. Den eksperimentelle verifikation skete i 70'erne og især i 80'erne ved SPS og nu ved LEP på CERN.

Den teoretiske baggrund.

Man forestiller sig i dag, at "stof" er fermioner. Fermioner er partikler, som har den egenskab, at to af dem ikke kan optage samme kvantetilstand. Man kan sige, at stof er karakteriseret ved, at det "fylder" noget. Anderledes forholder det sig, når vi taler om de kræfter, der binder

"stoffet" sammen. De kan relateres til partikler med den egenskab, at flere af dem godt kan befinde sig i samme kvantetilstand. Disse kaldes bosoner. Dermed kan de danne makroskopiske kraftfelter, som vi kender det i den klassiske fysik indenfor elektromagnetismen. Forskellen mellem de to partikeltyper forklares gennem en egenskab svarende til et angulært moment, som kaldes spin. Bosonernes spin er heltallige (0, 1, 2, ...), mens fermionernes spin er halvtallige ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, ...).

Tabel 1 Naturens elementære byggestene opdelt i tre familier. Hver familie består af to kvarker og to leptoner.

	Kvarker		Leptoner	
Elektrisk ladning	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	-1	0
1. familie	Ned d	Op u	Elektron e	e -neutrino η_e
2. familie	Sær s	Charme c	Myon μ	μ -neutrino η_μ
3. familie	Bund b	Top t	Tau τ	τ -neutrino η_τ

I Standardmodellen, der beskriver elektromagnetisme, de svage og de stærke kernekrafter, består stoffet af spin $\frac{1}{2}$ fermioner fordelt i 3 "familier", som vist i tabel 1. Hver familie består af to slags kvarker og to slags leptoner. De to kvarker og den ene lepton har elektrisk ladning og masse,

Ækvivalensen mellem masse og energi

I partikelfysikken anvendes hele tiden at $E=mc^2$.

Energienhed

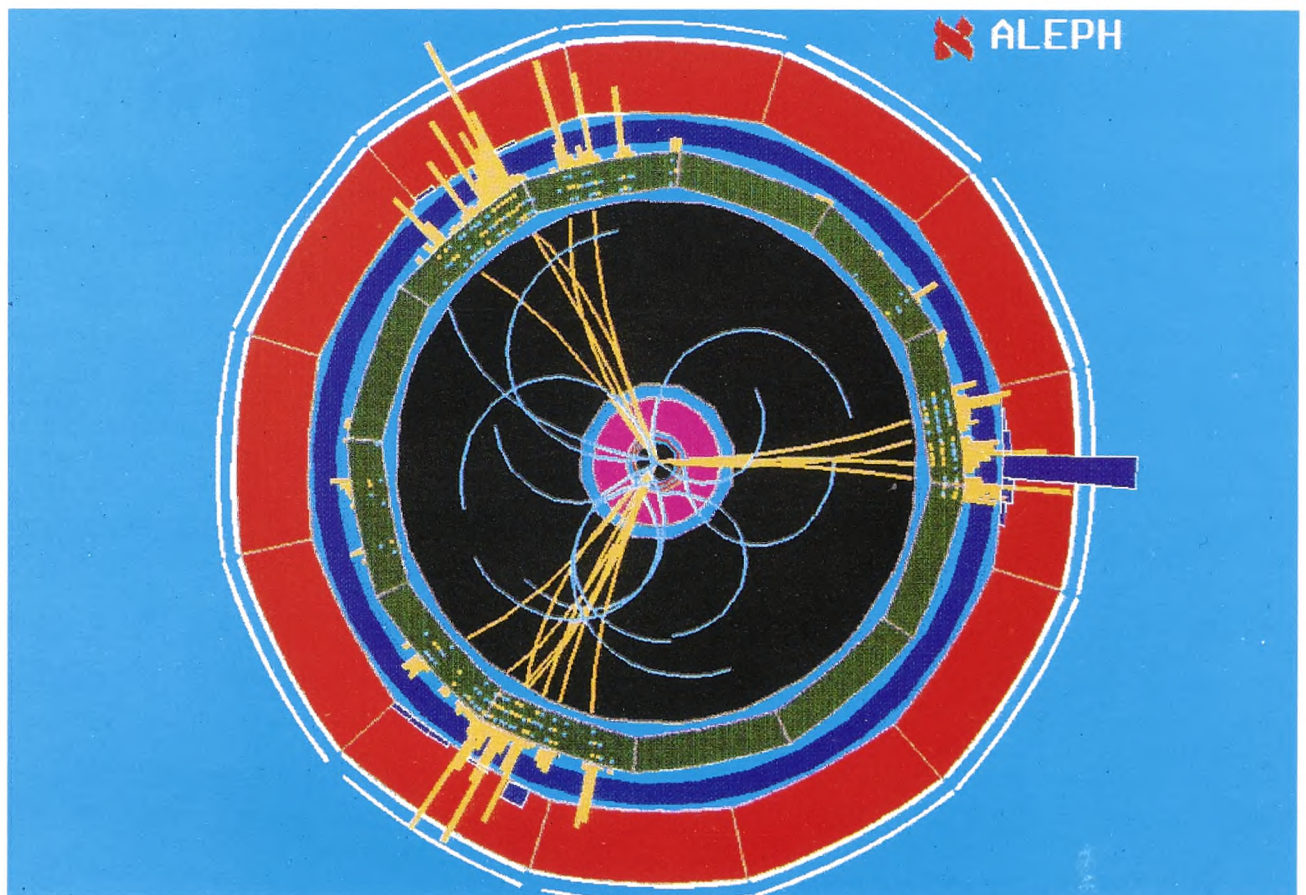
Når en elektrisk ladet partikel med ladningen e passerer et spændingsfald på 1 Volt, får den en energi på 1 eV. Sædvanligvis angives energi i denne enhed indenfor partikelfysikken, typisk som $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$. Masser angives f.eks. i GeV/c^2 .

Antipartikler

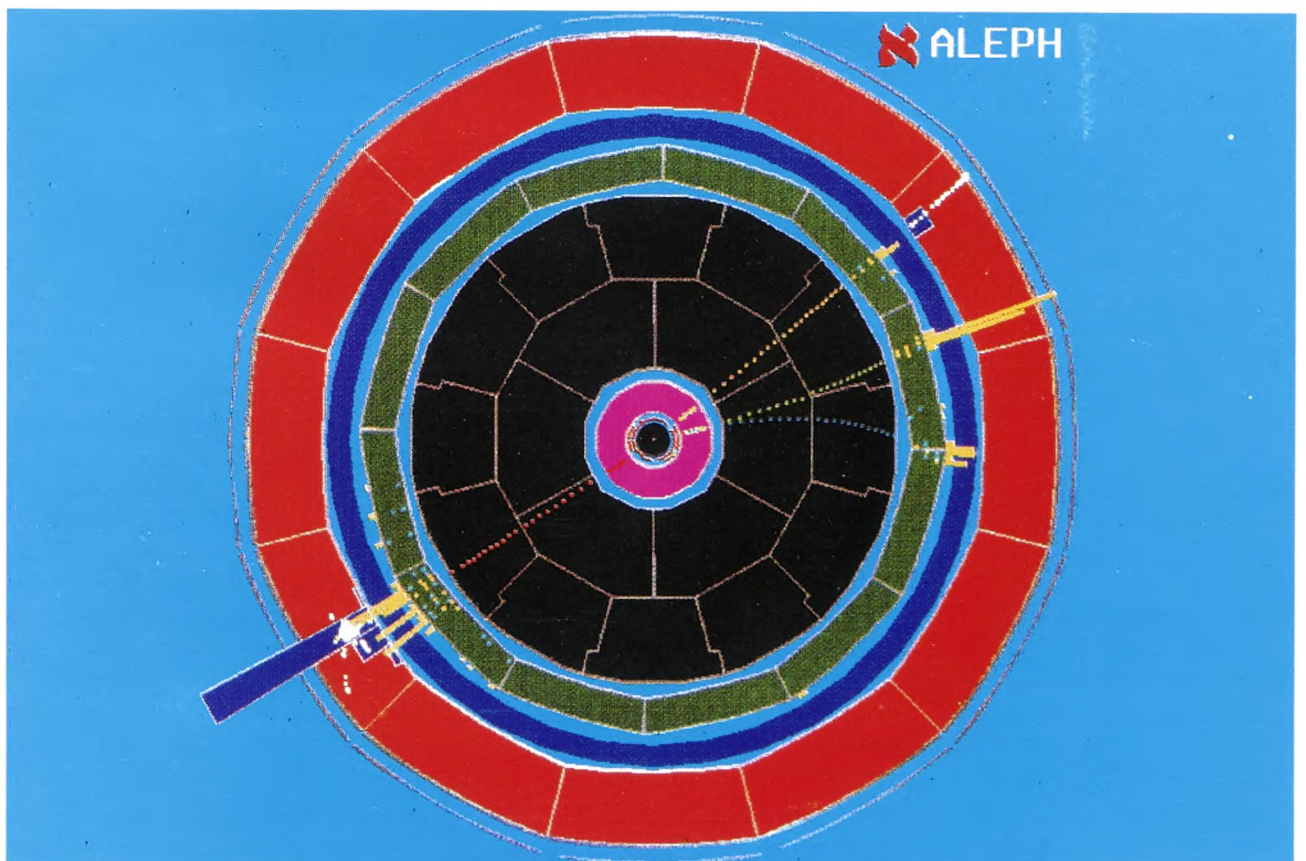
Når "ren" energi omdannes til partikler, vil der blive dannet partikel-antipartikel par, hvor antipartiklen har modsatte egenskaber: den har den modsatte elektriske ladning og tæller -1 i partikelregnskabet. Den sidste egenskab gør at partikeltallet er uændret ved den omtalte pardannelse. Antipartikler markeres ved at sætte en streg over partikel-betegnelsen: $\bar{p}$ er en antiproton. Dog betegnes elektronens antipartikel, positronen, med e^+ , og ikke med $\bar{e}$.

Ordliste

baryoner:	partikler, sammensat af tre kvarker f.eks. proton og neutron.
mesoner:	partikler, bestående af kvark-antikvark, f.eks. pion eller K-meson.
hadroner:	partikler, der består af kvarker (baryoner og mesoner).
leptoner:	partikler, der ikke består af kvarker (elektroner og neutrinoer).
W^+ , W^- , Z^0 :	Bærere af den elektrosvage kraft (sammen med fotonen, der bærer den elektromagnetiske del).
Higgs-partikel:	hypotetisk partikel, der kan forklare partiklernes masse, hvis den eksisterer.
QED	Den kvanteelektrodynamiske teori, der bl.a. forklarer elektronens opførsel i mindste detalje.
QCD	Den kvantekromodynamiske teori, der beskriver kvarkers opførsel.



Figur 1. En Z^0 henfalder til et τ par. Hver τ henfalder til π -mesoner og en τ -neutrino. Z^0 dannes i sammenstødet mellem en elektron og en positron.



Figur 2. En Z^0 henfalder til et kvark par og en gluon. Disse omdannes hver især til en jet af π -mesoner.

hvorimod det sidste familiemedlem er ladnings og masseløs. Første familie består af op-kvarken, ned-kvarken, elektronen og den masseløse elektron-neutrino. Den engelske navngivning for kvarkerne er "up" og "down". Ladningen af de fire fermioner er $\frac{2}{3}e$ og $-\frac{1}{3}e$, $-e$ og 0, hvor e er protonens ladning. Normalt stof er opbygget af medlemmerne af første familie.

Hver af de to næste familier har en tungere elektron-lignende partikel, som kaldes henholdsvis myonen og tau-leptonen. De øvrige leptoner er masseløse og har ingen elektrisk ladning. De kaldes for myon- og tau-neutrinoen. En observation af et par af tau-leptoner fra tredje familie kan ses i figur 1. På lignende måde gentages kvarkernes egenskaber i de næste familier. Blot bliver familiemedlemmerne tungere. I den anden familie kaldes kvarkerne "charm" og "sær" eller "charm" og "strange" og i den sidste "top" og "bund" eller "bottom". Som det vil blive omtalt senere har LEP-eksperimenterne vist, at Standardmodellen med masseløse neutrinoer kun kan have 3 familier.

Til enhver af disse partikler hører der en tilsvarende antipartikel med samme masse og spin men med modsat fortegn for ladningen. F.eks. er positronen elektronens antipartikel.

Både kvarker og de ladede leptoner har elektromagnetiske vekselvirkninger, der formidles af fotonen, som er en spin 1 partikel. Styrken af denne vekselvirkning er normalt målt i enheder af finstrukturkonstanten α (som er proportional med kvadratet på den elektriske elementarladning, og har en værdi på $\frac{1}{137}$). Teorien for disse vekselvirkninger hedder Quantum Electro Dynamics eller QED. Fotonen er masseløs og bærer ingen elektrisk ladning.

De stærke kræfter, som kun virker mellem kvarkerne, binder disse sammen til hadroner, hvoraf der findes to typer: baryoner, der er opbygget af tre kvarker, som derfor er fermioner, og mesoner, der er opbygget af en kvark og en antikvark. Mesoner er derfor bosoner. To af baryonerne, nemlig protonen og neutronen, danner de kerner, som normalt stof er opbygget af.

Kvarker er ikke observeret som frie partikler. De observeres indirekte som punktformige spredningscentre inde i f.eks. protonen á la Rutherford's opdagelse af atomkernen eller i form af en smal stråle, kaldet en jet, bestående af hadroner.

De stærke kræfter formidles af 8 forskellige masseløse spin 1 partikler, som kaldes gluoner. Heller ikke gluoner er observeret som frie partikler. Et eksempel på, hvordan man alligevel indirekte kan observere dem, er vist i figur 2. Her vises henfaldet af en Z^0 -boson til et kvark-antikvark par og en gluon. Begivenheden er vist i en plan som indeholder stødretningen. Alle tre partikler har inden for en afstand af ca. 10^{-15} m fra sammenstødspunktet skabt en jet af partikler, hvis samlede energi og impuls er et mål for den oprindelige partikels energi og bevægelsesretning. Den samme begivenhed, men set vinkelret på stødretningen vises på forsiden. Kvarkerne har i modsætning til leptonerne en "stærk" ladning, hvoraf der er tre slags. Ladningerne kaldes farver. Navnet er valgt så kvarkerne i baryonerne har farverne rød, grøn og blå, der tilsammen giver en farveløs

partikel. Mesonerne har en farve og en antifarve, og er ligeledes farveløse. For at en blå kvark kan vekselvirke med en rød må gluonerne have farve. Dette er i modsætning til QED hvor den tilsvarende kraftformidler, fotonen, er ladningsløs. Styrken af den stærke kernekraft er målt i enheder af α_s (proportional med kvadratet på farveladningen), som er finstrukturkonstanten for QCD. Teorien for de stærke vekselvirkninger kaldes Quantum Chromo Dynamics eller QCD.

De svage vekselvirkninger er aktive mellem alle fermionerne og formidles af W-bosonerne og Z-bosonen. Betahenfald af kerner er resultatet af de svage kernekrafter. Under denne proces udsendes en virtuel W-boson, som efter meget kort tid henfalder til et elektron-antielectron-neutrino par. Styrken af dette henfald beskrives ved hjælp af Fermikonstanten, G_F . Sammenhængen mellem G_F og W-bosonens masse, m_W , er:

$$G_F = \frac{\alpha \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot \sin^2(\Theta_W) \cdot m_W^2}$$

I dette udtryk er forholdet mellem den elektriske ladning, e , og den svage ladning, g , skrevet som:

$$\frac{e}{g} = \sin(\Theta_W),$$

som definerer Weinberg-vinklen Θ_W . Værdien af $\sin^2(\Theta_W)$ er ca. 0,23. De elektromagnetiske og de svage vekselvirkninger er forenet ved, at Θ_W giver en sammenhæng mellem W- og Z-bosonerne masse, nemlig:

$$m_W = m_Z \cdot \cos(\Theta_W)$$

En mere detaljeret beskrivelse af Standardmodellen giver korrektioner til ovenstående udtryk, som afhænger af energien og af kvarkernes masse og antallet af Higgs-bosoner og deres masser, se senere.

De eksperimentelle observationer.

Op til dette punkt er alt godt. Man har observeret alle de nævnte partikler, undtagen den tungeste kvark, top-kvarken. Den store triumf for partikelfysikken i 80'erne var netop observationen af W- og Z-bosonerne. Massen af W-bosonerne er $80,230 \pm 0,350 \text{ GeV}/c^2$ og af Z-bosonen $91,182 \pm 0,021 \text{ GeV}/c^2$, hvor protonens masse er $0,938 \text{ GeV}/c^2$. Det kræver noget ekstra arbejde at forstå, hvorfor nogle partikler har en masse og andre ikke. I den grundlæggende teori er nemlig alle bosonerne masseløse. En mulig løsning findes ved at gå til så lavenergetisk et område som superledning. Det viser sig, at fotonen får en masse, hvis den under passende omstændigheder lukkes inde i en superleder. Dette skyldes dens vekselvirkning med et kondensat af elektronpar. Indføres et tilsvarende kondensat i Standardmodellen ved hjælp af Higgs-partiklen, som er en boson med spin 0, får W- og Z-bosonerne masse og kommer derved i overensstemmelse med eksperimenterne. Higgs-bosonen giver

også anledning til masser for kvarker og elektroner, myoner og tau-leptoner, men holder meget passende fotonen og neutrinoerne masseløse. Omkostningen for at klare masseproblemet er dog endnu en partikel: Higgs-partiklen.

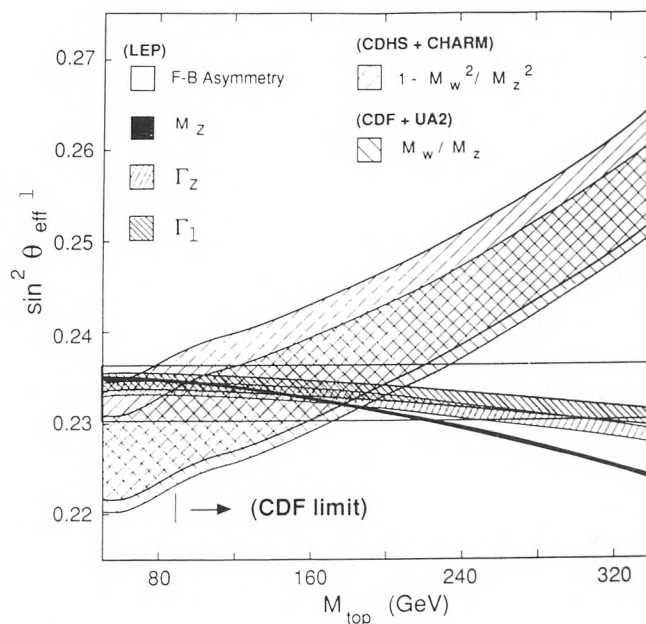
Den første måling, der blev foretaget ved LEP, var Z-bosonens tværsnit som funktion af energien, se figuren i artiklen af C. Fløe Kristjansen i dette nummer af KVANT. Tværsnittet er et mål af sandsynligheden for at producere en Z-boson ved en given sammenstødsenergi af de kolliderende elektroner og positroner. Den energi, ved hvilken sandsynligheden er størst, er Z-bosonens masse, m_Z . Z-bosonens levetid kan findes ud fra bredden af kurven. En kortere levetid giver en bredere kurve.

Ved at måle tværsnittet for hvert enkelt af de synlige Z^0 henfalds kanaler kan man bestemme tværsnittet for henfald til neutrinoer, som ikke lader sig observere direkte. På denne måde har man bestemt antallet af forskellige neutrinoer til at være 3. Under antagelse af, at massen af alle neutrinoer er mindre end $m_Z/2$, giver dette således, at der ikke eksisterer flere familier, idet enhver familie indeholder en neutrino.

Mange målinger kan udtrykkes ved hjælp af Weinberg-vinklen Θ_W . Eksempler herpå er forholdet mellem W- og Z-bosonernes masse målt indirekte ved spredning af neutrinoer på kerner eller ved sammenstød af protoner og antiprotoner. Andre eksempler er massen af W- eller Z-bosonen, målinger af asymmetrier i vinkelfordelingene af forskellige Z^0 henfald, samt forskellige partialbredder af Z-bosonen. I en mere detaljeret beskrivelse af Standardmodellen er Weinberg-vinklen ikke konstant, men en funktion af den overførte energi samt top-kvarkens og Higgs-bosonens masser. Således giver en måling af $\sin^2(\Theta_W)$ ikke kun ét tal når f.eks. $\sin^2(\Theta_W(m_Z^2))$ bestemmes v.h.a. vinkelasymmetrimålingerne i Z^0 henfald. Man får en hel kurve som en funktion af top-kvarkens masse, når værdien af Higgs-massen lægges fast. Sådanne kurver er vist i figur 3¹, hvor Higgs-massen er sat til $200 \text{ GeV}/c^2$. Afhængigheden af denne er iøvrigt lille. Da disse kurver alle måler den samme vinkel skal de krydse hinanden for den rigtige top-kvark masse. Den nedre grænse kommer fra et eksperiment ved FNAL's (Fermilab) proton-antiproton kollider i USA. Målinger offentliggjort ved EPS konferencen i Geneve i 1991, gav grænserne for top-kvarkens masse $m_{\text{top}} = 130 \pm 30 \text{ GeV}/c^2$.

Det, at LEP eksperimenterne endnu ikke har observeret Higgs-bosonen, har sat en nedre grænse på $57 \text{ GeV}/c^2$ for dens masse. En øvre grænse på ca. $1000 \text{ GeV}/c^2$ ($1 \text{ TeV}/c^2$), kommer fra unitaritetssantagelsen, som siger at sandsynligheder må addere op til 1. Indsætter man i Standardmodellen en Higgs-partikelmasse, som er større end ca. $1 \text{ TeV}/c^2$, bliver den beregnede sandsynlighed for overgangen af et par af Z-bosoner til et par af W-bosoner større end 1. Ved at variere Higgs-bosonens masse kan man opnå grænser for denne ved at kræve at kurverne i figur 3 skal krydse hinanden. Den før omtalte conference gav en øvre grænse på $1 \text{ TeV}/c^2$.

Andre observationer bekræfter i stor udstrækning Standardmodellen. F.eks. forudsiger den, at sandsynligheden for Z^0 henfald til e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ eller $\tau^+\tau^-$ er ens. Indenfor de



Figur 3. $\sin^2(\Theta)$ versus m_{top} for forskellige målinger med m_{Higgs} sat lig $200 \text{ GeV}/c^2$.

eksperimentelle måleusikkerheder er dette udsagn stadig korrekt. Desværre er dette et eksempel på et udsagn som kun eksperimentelt kan modbevise, aldrig bevise.

Standardmodellen forudsiger også, at en ladet lepton under udsendelse af en W-boson kan omdanne sig til en neutrino men kun til en neutrino fra samme familie. Anderledes forholder det sig med kvarkerne. Her kan en kvark med ladningen $+2/3$ omdanne sig til en bestemt linearkombination af kvarker med ladningen $-1/3$ under udsendelse af en W^+ -meson. Disse linearkombinationer fremkommer formelt ved at multiplicere vektoren bestående af kvarker med ladningen $-1/3$ med en matrix kaldet Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-matricen. De 16 elementer i matricen er bestemt af tre drejningsvinkler og en fasevinkel.

Det har længe været kendt, at $\bar{K}^0$ mesonen, som er opbygget af en s-kvark og en anti-d-kvark, spontant kan omdanne sig til en K^0 meson, som er dannet af en anti-s-kvark og en d-kvark. Tilsvarende omdannelse er observeret for mesoner, hvor s-kvarken eller d-kvarken er udskiftet med en b-kvark. Sådanne mesoner kaldes henholdsvis B^0 - og B_s^0 -mesoner.

Man har yderligere observeret et lille såkaldt CP-brud mellem en K^0 -meson og en $\bar{K}^0$ -meson. CP er den kombinerede ladningskonjugation (partikel $\rightarrow$ antipartikel) og paritets (spejlings) operator. Med andre ord; i modsætning til hvad der almindeligvis er antaget, er der forskel på stof og antistofs måde at vekselvirke på. Dette er indtil videre det eneste sted, en sådan forskel er observeret. Standardmodellen forklarer CP-bruddet ved hjælp af fasevinklen i CKM-matricen og forudsiger derfor også et CP-brud for B^0 -mesoner. Da effekten er lille, vil det kræve en kraftig forøgelse af LEP's luminositet at observere dette ved LEP.

*APD er
så sikre
på sine
kryo-pumper...*

*der ydes
3 års
garanti.*



APD tilbyder nu den længste garantitid inden for kryo-pumpe-industrien... tre år... dobbelt så lang tid som nogen andre. De teknologiske fordele ved APD's kompressorer, som er specielt designet til helium, kombineret med APD's service- og garantipakke, gør APD's kryo-pumper til de bedste, der findes.

Det simple design giver problemfri drift og let markedsservice. APD's driftssikkerhed har stået sin prøve... igen og igen. Mere end 2000 apparater har været på markedet i en periode på 4 til 5 år, og **kun eet eneste** har vist defekter.

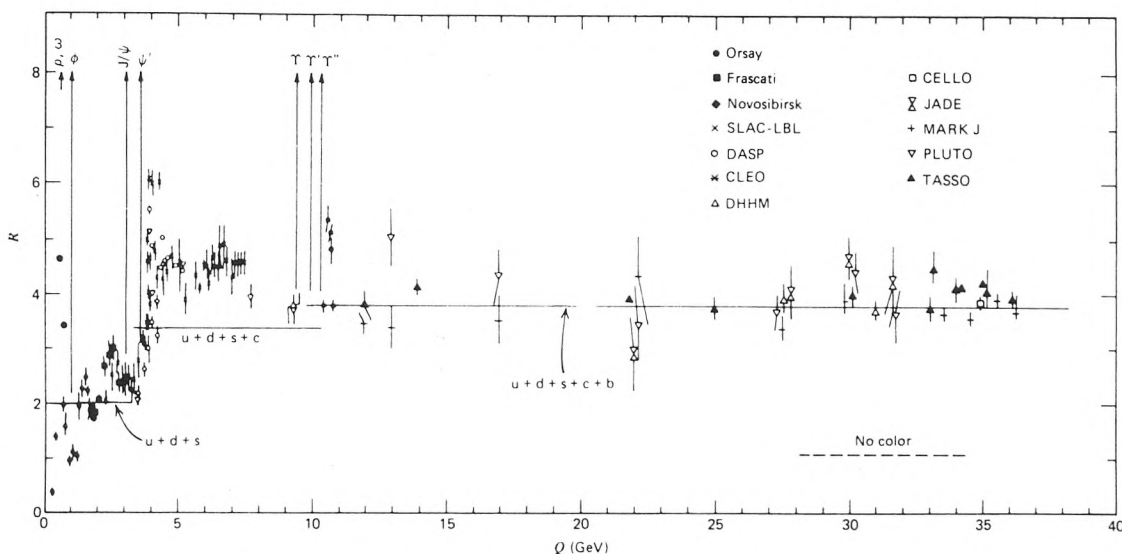
Derfor, hvis De foretrækker sikkerhed fremfor driftsproblemer, så ring til:



AAGE CHRISTENSEN A/S
INGENIØR- OG HANDELSVIRKSOMHED

SKELMOSEVEJ 10
DK-2500 VALBY

TELEFON 45 36 44 24 44
TELEFAX 45 36 44 20 24



Figur 4. Forholdet mellem tværsnittet for produktion af hadroner i elektron-positron sammenstød og tværsnittet for myon produktion.

Luminositeten er et mål for antallet af mulige sammenstød. Andre muligheder er bygning af nye accelerators f.eks. en såkaldt b -fabrik eller LHC, se senere.

Higgs-bosonens vekselvirkning med sig selv skaber problemer for Standardmodellen. En måde at løse dette på er, at indføre en ny partikel svarende til hver af de allerede kendte partikler, de såkaldte super-symmetriske partikler. Ingen af disse er observeret, så der er endnu intet eksperimentelt bevis på, at dette er den rigtige vej frem. De nye grænser for top-kvarkens masse giver grænserne $m_H > 41 \text{ GeV}/c^2$ for den CP-lige neutrale Higgs og $m_A > 20 \text{ GeV}/c^2$ for den CP-ulige tilstand. Ellers finder man, at de øvrige supersymmetriske partikler alle har en masse større end ca. $45 \text{ GeV}/c^2$. Større energi og flere eksperimentelle begivenheder vil kunne bringe disse grænser op.

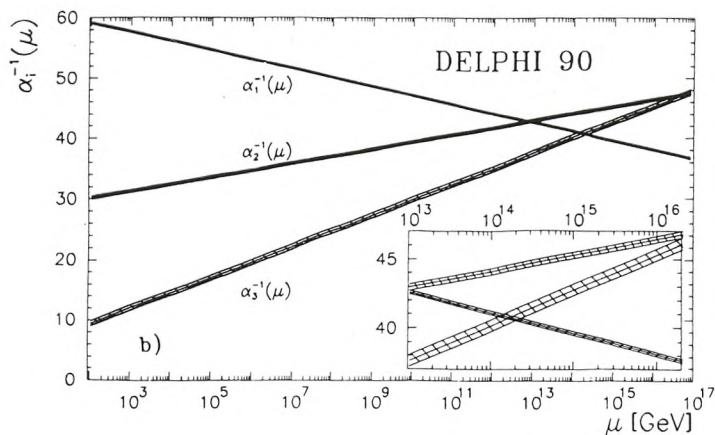
En vigtig egenskab af QCD er eksistensen af de tre forskellige ladninger eller farver. Oprindeligt var man nødt til at indføre farver p.g.a. en baryon kaldet Δ^{++} . Den er opbygget af tre u -kvarker, med parallelt spin og uden angulært moment mellem dem. En sådan tilstand er umulig, da kvarkerne er i samme kvantetilstand, medmindre de hver har yderligere en egenskab, f.eks. forskellig "farve". En eksperimentel observation af de tre farver kommer fra en måling af R , som er vist i figur 4. R er forholdet mellem tværsnittet for produktion af hadroner i elektron-positron sammenstød og tværsnittet for myon produktion. Dette forhold er lig summen af kvadratet på ladningerne af alle de forskellige kvarker, som kan produceres. Den eneste mulige forklaring af resultaterne er, at ladningerne er som i tabel 1 altså trediedels, og at der findes tre slags af hver type. Mere detaljerede beregninger giver korrektioner til dette forhold, som er proportionale med α_s . En anden mulighed for at måle α_s kommer fra forholdet mellem antallet af begivenheder med tre og to jetter, som er proportionalt med α_s .

En elektrisk ladning vil polarisere vakuummet omkring sig ved at danne virtuelle ladningspar, som er orienterede, så ladninger med modsat fortegn vender mod den oprindeli-

ge ladning og derved afskærmer den. Den effektive ladning måles ved påvirkningen af en testladning. Styrken af denne påvirkning vil afhænge af afstanden på en måde, der er forskellig fra en situationen uden polarisering. For QED finder man, at den effektive ladning eller α øges, når afstanden formindskes eller når energien øges, idet mindre afstande svarer til større energier.

For de stærke vekselvirkninger, QCD, er det omvendt. Her mindskes α_s med stigende energi. Dette forklares ved, at gluonerne tiltrækker hinanden og derfor ikke spredes, som det er tilfældet med fotoner. Der dannes en streng. At α_s øges, når afstanden øges, er derfor også forklaringen på, at kvarker ikke er observeret som frie partikler. Ved at sammenligne målinger af α_s ved små og ved store energier har man fundet den forventede variation, som i Standardmodellen er en logaritmisk afhængighed. Der spekuleres ofte på om de forskellige α 'er bliver ens ved en højere energi, som det forudsiges af GUT-teorien, Grand Unified Theory. Figur 5 viser en logaritmisk ekstrapolation til højere energier⁴. De viste α -er er $\alpha_1 = 5 \cdot \alpha / (3 \cdot \cos^2(\Theta_W))$, $\alpha_2 = \alpha / \sin^2(\Theta_W)$, og $\alpha_3 = \alpha_s$. Det er muligt, at få kurverne til at krydse ved samme energi ved at indføre supersymmetriske partikler med en masse omkring 1 TeV. Teorien forudsiger størrelsen af et knæk i alle kurverne, kun stedet kan vælges "frit". Teorien forudsiger således at $\sin^2(\Theta_W)$ vil vokse fra knapt $2/8$ til $3/8$. GUT forudsiger også at protonen er ustabil. Dens levetid afhænger af ved hvilken energi kurverne krydser hinanden. Men krydspunktet sker ved så stor en energi, at den nuværende nedre grænse på 10^{32} år af protonens levetid respekteres.

Vinkelfordelingen af jetterne tillader en bestemmelse af gluonens spin. Specielt gør vinkelfordelingen af gluonerne i begivenheder, hvor der produceres to kvarker og to gluoner, det muligt at bevise, at en gluon kan dele sig i to gluoner. Noget tilsvarende er ikke muligt for en foton.



Figur 5. Ekstrapolation af α 'er til højere energier, hvor $\alpha_1 = 5 \cdot \alpha$ ($3 \cdot \cos^2(\Theta_W)$), $\alpha_2 = \alpha \sin^2(\Theta_W)$, og $\alpha_3 = \alpha_s$.

Næste generation af eksperimenter.

Med LEP-II øges energien så meget, at par af W -bosoner kan produceres. Ved at måle produktionstværsnittet som funktion af energien findes W -bosonens masse og levetid. Disse er givet i Standardmodellen, når de andre parametre er fastlagt. Sådanne målinger er derfor en test af denne. Samtidigt er vinkelfordelingen af de udsendte W -bosoner en kritisk test af Standardmodellen.

Der er netop i efteråret 1991 observeret en polarisation af LEP's stråler. Dette vil snart gøre det muligt at bestemme Z -bosonens masse med en præcision på 9 MeV/ c^2 . Mere udstyr er dog krævet for at kunne lave egentlige eksperimenter med polarisation. Sådanne eksperimenter er meget følsomme tests af Standardmodellen, og giver derfor de bedste målinger af teoriens parametre, herunder masser.

To meget væsentlige partikler, top-kvarken og Higgs-bosonen, mangler som nævnt at blive "opdaget", inden Standardmodellen kan betragtes som endeligt eftervist. Findes top-kvarken derfor ikke inden for det tidligere angivne masseinterval, er det et stærkt indicium for, at Standardmodellen allerede ved relativ lave energier ikke er korrekt. Er top-kvarkens masse mindre end 160 GeV/ c^2 , er det sandsynligt, at den vil blive set inden udgangen af 1999 af et af de to eksperimenter ved FNAL. Dog med relativ ringe statistik.

Udover de to "opdagelser" må man se efter effekter, som ikke forudsiges af Standardmodellen. For selvom modellen beskriver alle hidtidige observationer perfekt, er det muligt, at den bryder sammen, når et højere energiregime bliver undersøgt. Det er også muligt, at der findes mere end én Higgs-boson, og at kvarker og leptonerne, som vi i dag betragter som fundamentale, er sammensatte partikler. Men bindingsenergien mellem disse nye hypotetiske fundamentale partikler overstiger langt de kollisionens energier, som vi med de nuværende accelerators har til rådighed.

De fleste af disse fænomener kan kun observeres, hvis man bygger en ny accelerator med langt højere kollisionensenergi. Ved CERN har man siden 1983 arbejdet på et projekt, hvor energikoncentrationen under partikelsammen-

stødene er tilstrækkelig stor til at producere nye partikler med masser helt op i 1 TeV/ c^2 området. Projektet går under navnet Large Hadron Collider forkortet til LHC^{2,3}. I den allerede eksisterende 27 km lange LEP tunnel er der tilstrækkelig plads til at placere en ny ring af superledende magneter ovenpå den allerede eksisterende elektron-positron kollider, LEP. Det er tanken at lade bundter af protoner cirkulere i to rør, således at protonerne i det ene rør bevæger sig i modsat retning af protonerne i det andet. Hver proton vil have en energi på 8 TeV, eller ca. 9 gange mere end der før har været til rådighed ved proton-antiproton kollideren på FNAL.

Få regner med, at Standardmodellen er den endelige teori, da den indeholder så mange parametre. I den minimale Standardmodel antages det, at neutrinoerne, gluonerne og fotonen alle er masseløse, og at der kun findes en Higgs-boson. Alligevel er der 18 frie parametre, som er:

- De seks kvarkmasser m_d, m_u, m_s, m_c, m_b og m_t .
- De tre leptonmasser m_e, m_μ og m_τ .
- Styrken eller ladningen af de tre vekselvirkninger udtrykt f.eks. ved α , α_s og G_F .
- Massen af Z^0 -bosonen.
- Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-matricens tre drejningsvinkler og ene fasevinkel.
- Massen af Higgs-bosonen m_H .

Vi har ingen forståelse af de store masseforskelle mellem de 3 familier af fermioner. Endvidere er der et alvorligt hierarki problem, hvis man prøver at integrere Standardmodellen i en mere omfattede teori, hvor enhedsladningerne for de elektromagnetiske-, de svage- og de stærke vekselvirkninger optræder mere naturligt. I sådanne teorier bliver masseskalaen, vi kender i Standardmodellen, pludselig unaturlig lille, hvis man opretholder den simple Higgs mekanisme. Endelig er det fra et rent teoretisk synspunkt svært at tro på, at partikler, der som Higgs-partiklen har spin 0, eksisterer som fundamentale partikler. Derimod er der intet, som udelukker, at de reflekterer eksistensen af to tæt bundne spin $1/2$ partikler og dermed ukendt fysik. Motivationen for LHC er derfor:

- Søgen efter top-kvarken.
- Søgen efter Higgs-partiklen og undersøgelse af de fysiske mekanismer associeret med det af Higgs-partiklen skabte symmetribrud.
- Søgen efter den forventede nye fysik nær den såkaldte Fermi energi, der approksimativt er 300 GeV, og hvor det forventes, at de svage vekselvirkninger bliver stærke og derfor vil give os information om afvigelserne fra den simple Standardmodel.
- Søgen efter B -mesonernes CP-brud.
- Andre muligheder, som er ikke er blevet omtalt her, er dels studiet af sammenstød mellem tunge ioner og dels mellem LEP's elektroner og LHC's protoner.
- Søgen efter det uventede!!!

Referencer.

- 1) D.Decamp et al. (The ALEPH collaboration) *Improved Measurement of Electroweak Parameters from Z-decays into Fermion pairs*. CERN-PPE 91-105.
- 2) John Renner Hansen *LHC. Fremtidens elementarpartikelfysik-laboratorium KVANT 2* nr.1, 13 (1991).
- 3) *Design Study of the Large Hadron Collider (LHC)* CERN 91-03
- 4) U. Amaldi, W. de Boer og H. Fürstenau: *Comparison of Grand Unified Theories with electroweak and strong coupling Constants measured at LEP*. CERN-PPE 91-44.



Jørn Dines Hansen er docent ved Niels Bohr Institutet, var fra 1965 til 1973 ansat som research physicist ved CERN afbrudt af en periode som research assistant professor ved universitet i Urbana, Illinois fra 1970 til 1972, ansat som følgeforskningsstipendiat ved Niels Bohr Institutet fra 1973 til 1977, herefter lektor indtil udnævnelsen som docent i 1991. Leder nu gruppen, der arbejder på LEP eksperimentet ALEPH.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



Finvakuumpumper fra ALCATEL HIGH VACUUM

I 1962 udviklede ALCATEL fiberrotorskiven til finvakuumpumper i stedet for de dengang anvendte blødstøbte stållameller. Nu kunne hastigheden øges til 1500 rpm og pumpen kobles direkte til en asynkron 220 eller 380 volt motor. Vægten reduceredes med op til 75%, og Verdens mest handy finvakuumpumpe til forskning og industri var skabt. Pumperne har i 30 år gennemgået en løbende udvikling, og nu har ALCATEL lagt alle sine erfaringer i den nye PASCAL serie, 5 – 10 – 15 og 21 m³h⁻¹ med et sluttryk ved tør N₂ bedre end 8×10⁻⁵hPa og en vægt f.eks. for 21m³h⁻¹ på 26,8 kg. PASCAL serien er særdeles servicevenlig, og mange af vore kunder vedligeholder selv deres pumper. Vi udfører hurtigt alle reparationer her i Danmark på samtlige typer fra 1962 til i dag.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLÆKSØGERE & 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**

Strengteorien

Jens Lyng Petersen, Niels Bohr Institutet

Indledning

I løbet af det 20. århundrede har fysikere taget et kæmpe-skridt i retning af at forstå “Verden” på “det fundamentale” niveau: Hvad er stoffet “lavet af”? — og hvordan vekselvirker det? Denne “fundamentale” viden er indeholdt i elementarpartikelfysikkens “Standardmodel”¹. Fysikere har i vores århundrede præsteret meget andet, der indtil videre er langt mere *nyttigt*, men nu er det altså denne fundamentale indsigt, der optager os her.

Standardmodellen baserer sig på den specielle relativitetsteori og kvanteorien, og på en fortællelse af “stof” som opbygget af kvarker og leptoner, der vekselvirker med hinanden via “gauge-felter”: det elektromagnetiske felt, gluon-feltet i QCD og $W^\pm$ - og Z^0 -felter. “Felterne” afslører sig ofte som felt-kvanter: fotoner, gluoner, $W^\pm$ - og Z^0 -partikler. Til alt dette kommer Einsteins almene relativitetsteori for tyngdekrafterne eller *gravitationskræfterne*.

Særlig når denne sidste teori tages med, bliver det meget fristende at formulere den tese, at den mest centrale opdagelse i alt dette er, at naturens fundamentale frihedsgrader er “geometriske” (se for eksempel reference 2), snarere end “numeriske”: Felternes værdier afhænger af noget, der naturligt fortolkes som et koordinatvalg: et “gauge”-valg, og det geometriske aspekt fastlægger næsten entydigt de tilhørende “naturlove”.

Standardmodellen stemmer med stort set alle kendte observationer. Alligevel: Standardmodellen kan *ikke* være den endelige sandhed om “fundamental fysik”. Der er for mange ubesvarede spørgsmål: Hvorfor er der 3 kvarkfarver, 8 gluoner, 2 W -bosoner, én Z -boson og én foton? Hvorfor er der 3 fermion-familier? Hvad er det for noget med Higgs-mesonerne¹? Hvorfor er fermionernes masser så forskellige? — og så små i forhold til Planck-massen (se lidt senere)?

Helt galt er det med Einsteins almene relativitetsteori: For at den kan forenes med kvanteteorien, må der postuleres helt nye vekselvirkninger, som ved de anslagsenergier, vi idag kan præstere, er usynlige, men som vil spille en dominerende rolle ved energier højere end Planck-energien²,

$$E_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G_N}} = 1,22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$$

($\hbar$ er Plancks konstant divideret med 2π , c er lyhastigheden, G_N er Newtons gravitationskonstant.) Denne karakteristiske energi (pr. partikel) var nok rådende ved universets fødsel (“Big Bang”), men den er ca. 10^{16} gange højere end vore dages acceleratorenergier, og det er absurd at forestille sig at man (nogensinde?) skulle blive i stand til at producere sådanne anslagsenergier. Det har ikke skortet på tanker om, hvad kvantegravitation kunne betyde, men det er først med strengteorien, tankerne har fået et mere seriøst indhold.

Enhver forståelse vil dog nødvendigvis føre til en revolutionerende ny opfattelse af rum og tid: ved afstande mindre end *Planck-længden*:

$$L_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{G_N \hbar}{c^3}} = 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

vil det ikke længere have nogen mening at tale om rum og tid! Disse begreber er fuldstændigt bundet til kvante-gravitations-teoriens *klassiske grænse*.

Strengte

I strengteorien, specielt siden 1984, ses alle “fundamentale” partikler som særligt simple tilstande af én og samme kvante-*streng*. En redegørelse for strengteoriens historiske udvikling fra sidst i 1960’erne vil her føre for vidt. Der henvises til litteraturlisten^{2,3}.

Strengteorien har en tendens til at dele fysikere i “tilhængere og skeptikere”.

“Skeptikerne” fremfører, at for at *ekscitere* (anslå) strengen kræves en energi af størrelsesorden Planck-energien tilført en enkelt elementarpartikel, og det kommer vi “aldrig” til at kunne. Men det er jo strengt taget først når man har påvist en sådan ekscitation, at man begynder at se tegn på : en streng. Man kan forestille sig strengene som bittesmå gummibånd (her tænkes kun på lukkede strengene) af udstrækning omtrent som Planck-længden. Strengene kan være i deres grundtilstand med lavest mulig energi (i.e. masse), men de kan også eksciteres til højere og højere svingningstilstande med fononer, der løber den ene eller den anden vej rundt langs strengen. Disse anslagsformer er aldeles afgørende for mange af strengteoriens vidunderlige egenskaber, men det er altså også lige netop dem, vi ingen chance har for at undersøge eksperimentelt! Det er klart en alvorlig indvending.

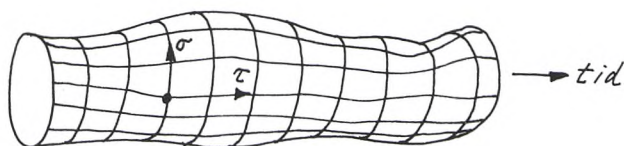
Heroverfor peger “tilhængerne” f.eks. på følgende forhold:

- De laveste strengtilstande (og dem *kan* vi studere), opfører sig forbløffende nok som partikler, der vekselvirker dels netop via gauge-kræfter, dels via gravitationskræfter! Disse kvalitative forhold er *uundgåelige* i en strengteori. Og streng-gravitationskræfterne ser ud til netop at *kunne* forenes med kvanteteorien. Strengte “forklarer” hvorfor verdens frihedsgrader er geometriske.
- I det teoretiske arbejde med strengteorien har det vist sig igen og igen, at matematiske vanskeligheder, der umiddelbart så uhyrlige ud, har kunnet løses og har givet anledning til særdeles interessant ny matematisk forskning.

- Strengteorien har været med til at udvikle andre discipliner, som f.eks. i studiet af kritiske fænomener i overflader, der er noget tættere på "rigtig fysik".
- Her vil jeg forsøge at fremhæve nogle principielle forhold i forbindelse med det begrebsmæssige grundlag for *kvantegravitation*. Det er måske i strengteoriens evne til at kaste skarpt nyt lys over fundamentale aspekter af kvantefysik, at dens største værdi foreløbigt ligger.

Hvad er rum og tid?

Lad os først minde om partikel-bølge-dualiteten: Den pointe, at et *kvantefelt* undertiden kan anses så det næsten opfører sig som klassiske *partikler*, undertiden så det næsten opfører sig som et klassisk *felt*. Hvis vi derfor i strengteori har forstået visse *partikler* som visse streng-tilstande, så har vi også (via kvantefysik) forstået de tilhørende *felter*! At en strengtilstand kobler til andre ligesom en foton, betyder så, at strengteorien indeholder det elektromagnetiske *felt*. Endnu mere grundlæggende for tanken: At vi i strengteorien altid finder en graviton (tyngdebølge-kvant, der formidler gravitationen) betyder, at vi også har (en generalisering af) hele Einsteins almene relativitetsteori for tyngdefelter. Men Einsteins indsigt var, at tyngdefelterne var udtryk for rummets og tidens geometri, specielt, at et tyngdefelt repræsenterer en *afvigelse* fra Euklidisk geometri (eller bedre: *Minkowskisk geometri*, da tidskoordinaten hører med). Altså: det "medium" (rum og tid), som strengen bevæger sig igennem, er selv et felt hørende til én af strengens egne tilstande! Tilsvarende for alle andre felter og strengtilstande: Strengteori er enten en *teori for alting* (hvis den er rigtig) eller en *teori for ingenting* (hvis den er forkert), men den kan ikke være en teori for noget og ikke for andet. Herved indtager den en særligt pretentiøs stilling.

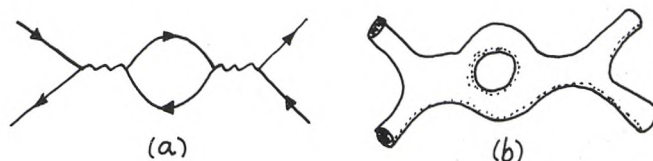


Figur 1. En streng, der "rejser" gennem rum og tid udspænder en "verdensflade" i Minkowski-rummet. Fladen parametriseres ved 2 koordinater, (σ, τ) .

Lad os prøve at uddybe lidt. Fig. 1 viser en streng, der "bevæger sig gennem rum og tid". Vi kan parametrisere et punkt på den lukkede streng ved en parameter, σ , som kunne løbe på en enhedscirkel, og ved en "tids-agtig" koordinat, τ . Dette punkt på strengen befinder sig så i et bestemt rum-tids-punkt med koordinaterne, $X^\mu(\sigma, \tau)$, hvor $\mu=0$ er tidskoordinaten og $\mu = 1, 2, \dots, d$ er rumkoordinater og hvor d "synes" at være 3. Et berømt "problem" for strengteori har været, at d måtte være 25, så $d+1=26$ (for "superstreng", som vi ellers ikke vil gå ind på her, var tallet 10 i stedet for 26). Siden midten af 1980'erne har vi

forstået at dette slet ikke behøver at være tilfældet. Vi kan nu beskrive strenge, der bevæger sig gennem langt mere komplicerede "rum", hvor (populært sagt) nogle af dimensionerne er "krøllet op", så for eksempel kun 4 dimensioner "overlever" som rum-tids-dimensioner. Tallet 26 består i den forstand, at den mikroskopiske "dimension" skal have denne værdi. De opkrøllede dimensioner er uhyre velkomne: det er detaljer ved dem, der giver anledning til fastlæggelse af præcis, hvad det er for en gauge-teori, strengen beskriver etc. Men mange muligheder er her tilstede.

Den pointe, vi særligt ønsker at fremhæve er følgende: Strengens bevægelse gennem sin baggrunds-rum-tid giver anledning til en *afbildning* $(\sigma, \tau) \rightarrow X^\mu(\sigma, \tau)$ af et 2-dimensionalt område ind i denne baggrund. Afbildningen selv er et 2-dimensionalt felt! Streng-teori bliver på denne måde en teori, hvor de basale størrelser (frihedsgrader) er *2-dimensionale feltteorier*. Og dette ganske uanset hvad dimensionen er af rum-tid.



Figur 2. Spredningsamplituder beregnes i kvantefeltteori og i strengteori efter analoge regler. I fig. 2a ses et Feynman-diagram i kvante-elektrodynamik, og i fig. 2b et tilsvarende strengdiagram. I grænsen hvor "rørene" i strengdiagrammets verdensflade bliver meget tynde, går dets værdi over i resultatet fra sædvanlig feltteori.

Fig. 2 antyder hvordan spredningsamplituder beregnes i strengteori, henholdsvis almindelig kvantefeltteori. De beskrives i feltteori ved en sum af Feynman-diagrammer. For at beregne ét Feynman-diagram, skal der principielt udføres et stykke matematisk arbejde, der svarer til at løse et (lidt kompliceret) problem i en *klassisk* feltteori. I strengteori skal der tilsvarende udføres et stykke matematisk arbejde, der svarer til at løse en 2-dimensionale *kvantefeltteori*. Begge resultater skal integreres passende.

Men hvilken 2-dimensionale kvantefeltteori skal benyttes? På dette punkt er der de senere år sket en betydelig afklaring i vores forståelse. Før ca. 1984 kendte man kun et par stykker, der overhovedet kunne komme på tale, og der var et vist håb om, at strengteorien mere eller mindre éntydigt selv fastlagde hvilke muligheder, der var. Forskellige muligheder omtaltes som forskellige "strengteorier". Idag er forståelsen helt forandret. Vi kender *uendeligt* mange 2-dimensionale teorier, der er relevante. Men de repræsenterer forskellige konfigurationer for én og samme strengteori, og forholdet er iøvrigt følgende:

Vi har fremhævet, at den "baggrundsmangfoldighed", som strengen bevæger sig "igennem" selv er at opfatte som

en del af strengteorien. Vores sædvanlige rum og tid er blot det simpleste eksempel. Lad os spørge: Hvad er betingelsen for, at disse "streng-baggrundsfelter" tilfredsstiller *klassiske* bevægelsesligninger (så vi "klassiske" mennesker kan "mærke" dem på sædvanlig vis)? Det har været muligt at formulere et meget smukt svar herpå: Betingelsen er, at den 2-dimensionale kvantefeltteori hører til en særlig udsøgt klasse: De såkaldte *konforme* feltteorier. Det fører desværre for vidt, at begrunde dette forhold i detalje, men lad os give en forestilling om, hvad det betyder. Hertil er det bekvemt at betragte det nært forbundne problem, hvor vi "analytisk fortsætter" vores feltteori til imaginær tid. En sådan "Wick-rotation" spiller en central rolle i al moderne feltteori. Denne procedure relaterer éntydigt kvantefeltteori-problemet til et vist problem i statistisk mekanik, her vedrørende et 2-dimensionalt overfladesystem. At vores teori er konform invariant, betyder, at det 2-dimensionale overfladesystem er *kritisk* og undergår en 2. ordens faseovergang. Specielt, at der ingen karakteristisk korrelationslængde optræder. En sådan teori besidder en enorm symmetri beskrevet ved den uendelig-dimensionale konforme gruppe (beslægtet med gruppen af alle vinkeltro kortprojektioner). Det har vist sig, at dette forhold tillader at løse de tilhørende kvantefeltteorier eksakt. Der er blevet udviklet en imponerende mængde ny matematisk fysik hertil. Grunden til at konform feltteori er så analyserbar beror utvivlsomt på dens nære slægtskab med teorien for analytiske komplekse funktioner, der jo blev et af de store matematiske bygningsværker i forrige århundrede.

Af særlig betydning viser de tilfælde sig at være, hvor teorien er invariant under en endnu større (uendelig-dimensionel) gruppe end den konforme, specielt med såkaldte supersymmetriske udvidelser. Man kan argumentere for, at de baggrundsmangfoldigheder, der har størst chance for at svare til vores kendte verden (dvs Standardmodellen) må involvere såkaldte Calabi-Yau mangfoldigheder, der først for relativt nylig er blevet kendt af matematikerne. Man kender endnu ikke nogen koordinatfremstilling for dem, så det kunne se ret håbløst ud at anvende dem i strengteori. Men her har et af de mange mirakler i strengteorien manifesteret sig: Visse superkonforme, eksakt løsbare 2-dimensionale kvantefeltteorier svarer præcist til sådanne fænomenologisk interessante mangfoldigheder. Forbindelsen er uhyre indirekte, men rummer et tankevækkende eksempel på hvordan information om naturens frihedsgrader og dynamik er indkodet i en sådan fundamental kvantefysisk ramme. For eksempel er disse (super-)konforme feltteorier *ikke* konstrueret ved at "kvantisere" visse klassiske teorier først. De er "født" i deres fuldt kvantiserede skikkelse, og det bliver for så vidt et sekundært (men nok så vigtigt!) spørgsmål at forstå den fysiske fortolkning af deres frihedsgrader i diverse klassiske grænser. Specielt er det ikke altid *a priori* klart hvilke frihedsgrader, der skal fortolkes som "rum og tid"! Det kommer an på en nærmere analyse, hvad den fysiske fortolkning er af alle den konforme feltteoris operatorer, herunder også de, der repræsenterer rum og tid.

Det er måske et af de mest tilfredsstillende træk ved strengteorien og dens forhold til kvantegravitation, at den

ikke baserer sig på en formulering, der forudsætter en parametrisering af rum og tid. Det eneste, vi nemlig på forhånd kan sige med sikkerhed om en teori for kvantegravitation er, at rum- og tids-begreber er klassiske idealiseringer, der uvægerligt bryder sammen ved afstande under Planck-skalaen. Rum og tid bør derfor netop fremstå som sekundære størrelser knyttet til visse klassiske grænser i en endelig, tilfredsstillende teori.

Vi ser altså, at strengteoriens *klassiske* løsninger svarer éntydigt til 2-dimensionale konforme kvantefeltteorier (begrænset til at have "effektiv" dimension 26). Spredningsamplituden for strengtilstande, der bevæger sig gennem denne klassiske baggrund, beskrives af eksakte løsninger til den 2-dimensionale kvantefeltteori. Mere præcist: Hvis den 2-dimensionale konforme kvantefeltteori er formuleret på en flade med kugletopologi, fås den *klassiske løsning* til spredningsproblemet, og hvis den 2-dimensionale teori formuleres på en (Riemann-) flade med en eller flere "hanke" (se fig. 2b), fås højere og højere ordens kvantekorrektioner til spredningsamplituden. På den måde forstår vi ret detaljeret kvante-streng-perturbations-teori.

Forskningen har de seneste år især været optaget af nye udviklinger i retning af at forstå strengens kvantiseringsproblem ud over denne perturbative formulering. Det er først når dette problem er forstået, at man kan håbe på at forstå f.eks. hvilke klassiske strengløsninger, dynamikken vil foretrække. Foreløbigt har det kun været muligt at behandle konforme feltteorier svarende til fysisk set meget urealistiske situationer, men håbet er, at den indsigt, der herved opnås, kan benyttes mere generelt. Foreløbigt har denne forskning på ny afdækket et mylder af "mirakuløse" forbindelser mellem diverse områder i matematisk fysik. Men en nærmere behandling fortjener en særlig artikel ved lejlighed.

Referencer.

- 1) J.D. Hansen, *Elementarpartikelfysikkens Standardmodel*, KVANT (dette nummer).
J.L. Petersen, *Elementarpartikler, om felter, kvarker og kvanter*, Gyldendals intro (1991)
- 2) J.L. Petersen, *Superstreng* Fysisk Tidsskrift **85**, 103 (1987)
- 3) M.B. Green, J.H. Schwarz and E. Witten, *Superstring Theory vols. I & II*, Cambridge University Press (1987).
J. Sidenius, *Strengteorien*, Gyldendals intro (forår 1992)



Jens Lyng Petersen er lektor i teoretisk fysik ved Niels Bohr Institutet siden 1975. Han blev cand. scient. i 1966 og havde flere tidsbegrænsede ansættelser ved NBI, Nordita og på CERN inden 1975. Siden har han bl.a. været visiting scientist på CERN 1988-1989.

Bestyrelse for Dansk Fysisk Selskab, 1992

Nils O. Andersen, H.C.Ørsted Institutet, Københavns Universitet (formand)

Jens Peter Lynov, Forskningscenter Risø

Brian Bech Nielsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Jens Onsgaard, Fysisk Institut, Odense Universitet

Torsten Freltoft, NKT Research Center

Mette Vedelsby, Frederiksborg Gymnasium

Dan Birkedal, Danmarks Tekniske Højskole

Bestyrelser for Dansk Fysisk Selskabs sektioner, 1992

Faststofsektionen:

Per-Anker Lindgård, Forskningscenter Risø (formand)

Bjarne S. Clausen, Haldor Topsøe A/S

Per Hedegaard, H.C.Ørsted Institutet, Københavns Universitet

Arne Nylandsted Larsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kell Mortensen, Forskningscenter Risø

M.P. Sørensen, MIDIT, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby

Søren Keiding, Fysisk Institut, Odense Universitet

Atomfysiksektionen:

Nis Bjerre, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet (formand)

Helge Knudsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Jens Juul Rasmussen, Forskningscenter Risø

Paolo Sibani, Fysisk Institut, Odense Universitet

Erling Veje, H.C.Ørsted Institutet, Københavns Universitet

Sektionen for Kerne-, partikel- og astrofysik:

Niels Rud, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet (formand)

Thomas Døssing, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Jens Jørgen Gårdhøj, Niels Bohr Institutet, Risø

Peter Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Aksel Jensen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Niels Lund, Dansk Rumforskningsinstitut, Lyngby

Niels Kjær Nielsen, Fysisk Institut, Odense Universitet

Sektionen for uddannelse og undervisning:

Poul V. Thomsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet (formand)

Peter Colding Jørgensen, Fysisk Institut, DLH

Karin Beyer, INFUFA, Roskilde Universitetscenter

Erik Both, Laboratoriet for Teknisk Fysik, Danmarks Tekniske Højskole

Ole Goldbech, Direktoratet for Folkeskolen

Christian Pedersen, Zahles Seminarium

Carl Jørgen Veje, Fysisk Institut, Danmarks Lærerhøjskole

DFS Mødekalender for 1992

6-10 april	Atomfysiksektionen : Fourth European Conference on Atomic and Molecular Physics, Riga
7-10 maj	Faststofsektionen : Joint Nordic Spring Meeting, Nyborg Strand
21-22 maj	Sektionen for Uddannelse og Undervisning : Hvad stiller vi op med de nye studerende?, Middelfart
26-27 november	DFS-årsmøde, Danmarks tekniske Højskole

Fra årsmødet i Dansk Fysisk Selskab

Følgende to forslag blev fremlagt til debat af Nils O. Andersen, formand for Dansk Fysisk Selskab.

På de næste sider følger dels en kommentar til det første forslag, og dels en rapport, der er et resultat af det andet forslag.

Forslag om fælles forårsmøde for DFS-sektionerne i maj 1993

Baggrund:

En række kolleger har fremført det vanskelige i at deltage i to årlige, nationale møder: et årsmøde i DFS-regi, samt et (evt. flere) forårsmøde(r) i sektionsregi, hvorfor man ofte må vælge mellem det mere generelle sigte (årsmødet) og ens specifikke fagområde (sektionsmødet). Endvidere har institutbestyrere udtrykt betænkelighed ved udgifterne forbundet med deltagelse i flere mødearrangementer. Endelig har der fra uddannelses-stederne været beklagelse over tidspunktet for årsmødet, som kolliderer med undervisningsforpligtelser for såvel lærere som studerende, hvorimod forårsmøderne placeres udmærket, umiddelbart efter semesterets ophør.

Der findes således i praksis i øjeblikket ingen arrangementer, der samler hoved-parten af landets fysikere. Som en mulig afhjælpning på de nævnte problemer har man peget på den struktur, som bl.a. APS og vore skandinaviske søsterorganisationer praktiserer, samt de gode erfaringer med fælles forårsmøder, som med succes har været afholdt især af faststoffysik- og atomfysiksektionen. DFS' bestyrelse fremlægger i konsekvens heraf følgende forslag til drøftelse blandt medlemmerne:

Forslag:

Det foreslås, at der i sidste halvdel af maj 1993 afholdes et 2-dages møde, fælles for alle DFS' sektioner. Indholdet struktureres med dels plenarforedrag af høj faglig/pædagogisk kvalitet ved danske og udenlandske forskere, dels parallelsessioner efter behov for de faglige sektioner, der gør det muligt for speciale- og Ph.D.-studenter at fremlægge deres arbejde, samt en postersession. Til at varetage tilrettelæggelsen udpeger sektionerne og DFS et programudvalg. DFS's generalforsamling for 1993 med fysikprisoverrækkelse afholdes under mødet. DFS' årsmøde i november 1993 bortfalder.

Som lokalitet vælges et sted, der er væsentligt billigere end Nyborg Strand, LO-skolen, o.l. DFS er blevet foreslået steder, hvor et 2-dages møde kan afholdes indenfor de samme økonomiske rammer som de traditionelle møder på Nyborg Strand, ligesom der er fremhævet særligt billige indkvarteringsmuligheder for studerende.

Forslag til "Danish Graduate School in Physics, Astronomy and Geophysics"

Arrangører: Københavns Universitet, Aarhus Universitet, Odense Universitet.

Formål: Afholdelse af intensive kurser/kursusmoduler i fysiske, astronomiske og geofysiske emner for studerende på overbygnings/Ph.D. niveau, fortrinsvis indenfor emner, som af faglige, kapacitetsmæssige, eller andre grunde ikke indgår i (visse af) de arrangerende universiteters faste uddannelsesprogram. Kurserne er meritgivende på de tre uddannelsessteder.

Målgruppe: Studerende på overbygnings- og Ph.D.-uddannelsen ved de tre ansvarlige universiteter (som har meget sammenlignelige uddannelsesforløb), meget gerne suppleret med deltagere fra andre danske, nordiske og udenlandske højere uddannelsesinstitutioner.

Undervisere: Lærere fra de ansvarlige universiteter, gerne suppleret med undervisere fra andre danske, nordiske og udenlandske uddannelsesinstitutioner, virksomheder, nationallaboratorier, etc.

Sted: Kurset placeres på skift på de tre universiteter.

Tidspunkt: Primært en 2-ugers periode (sidst) i januar. Andre tidspunkter kan dog også komme på tale, efter behov.

Financiering: De deltagende institutioner. Mulighederne for støtte fra Forskerakademiet, NORDITA, NorFA, etc. bør undersøges.

Tidshorisont: Der stiles mod en forsøgsperiode på 3 år.

Dansk Fysisk Selskabs rolle: Tænkes primært at være initiativtagende og koordinerende i fødslesfasen. Når ideen skal sættes i værk, er det mere naturligt institutionernes fælles ansvar, herunder at stå som ansøgere til og modtagere af eventuelle økonomiske tilskud.

Koordination og planlægning: Der nedsættes et fagligt og geografisk dækkende udvalg på ca. 5 personer, som forestår udarbejdelsen af et konkret oplæg, i kontakt med de lokale institutter, undervisningsudvalg og studienævn.

Forslag til medlemmer af udvalget:

- Per Hedegaard og Klaus Mosegaard, KU
- Aksel Jensen og Jes Madsen, AU
- Søren Keiding, OU

Rammebeløb: 5 000 kr fra DFS til udvalgets arbejde. Forhåbentlig vil institutterne støtte med rejsepenge, etc.

Kommentar til forslag om fælles forårsmøde for sektionerne i maj 1993

Det har i de sidste år været vanskeligt at opnå en ønskelig tilslutning til det traditionelle DFS-årsmøde med den indbyggede generalforsamling, arrangeret af DFS hovedbestyrelse. Dette til trods for fortrinlige programmer med gode foredrag, som burde kunne være af af generel interesse; for ikke at tale om uddelingen af NKT-prisen. Et møde med dette indhold og ovenikøbet lidt tid til at tale sammen, plus en eventuel fælles middag kan sagtens afholdes på en dag et centralt sted i Danmark, hvis man ønskede at spare tid og penge. En togbillet vil koste 2-300 kr. Det kan ikke være rejsepris eller tidspunkt, der begrænser deltagelsen - noget andet er hvis mødet udstrækkes til to dage inkluderende en overnatning.

En mulighed er simpelthen at lave et effektivt endags DFS-årsmøde på en passende dag, med fremragende foredrag og hvor prisuddelingen og det efterfølgende prisforedrag bliver en begivenhed, som alle fysikere synes de bør overvære.

Muligvis kunne man dog ikke samle hovedparten af de danske fysikere til et sådant møde. DFS bestyrelse forslår så, hvorfor ikke lægge generalforsamlingen og uddelingen af NKT-prisen sammen med den største af DFS aktiviteter, nemlig faststofsektionens forårsmøde, som i så fald skal udvides til tre dage (to overnatninger) og så samtidig afholde årsmødet og andre sektioners møder, evt. integreret. For at holde prisen nede må mødet afholdes et mindre centralt, billigere sted. I bedste fald ville der så komme flere deltagere til både det ene og det andet.

Faststofsektionen velkommer nye tiltag, men vil dog gøre opmærksom på at der er visse problemer i N.O. Andersens forslag. Sektionerne i DFS har vidt forskellig størrelse og aktivitetsniveau og ville ikke alle have behov for et tredages møde. Faststofsektionen lægger vægt på et aktuelt og kontant fagligt indhold med mulighed for at især de yngre forskere kan fremlægge deres resultater i et forum af international standard. Vi har besvær med at få tilstrækkelig tid inden for den nuværende ramme og ville sagtens kunne bruge noget af en tredje dag. I år var der 120 deltagere og

65 poster, hvoraf mange med fordel kunne have været mundtlige bidrag. I 1990, hvor det var et fællesarrangement med atomfysiksektionen, var der også 120 deltagere og 41 poster. Ohms lov gælder ikke for disse tal, det er kun DFS ret symbolske støtte og arbejdet, der fordobles. Det vigtigste er at bibeholde det meget gode faglige indhold - også af hensyn til at skaffe bevillinger til udenlandske kendte navne. Vi har derfor foreslået at DFS-årsmødet i det væsentligste kan lægges i forlængelse af faststofsektionens forårsmøde, (enten blot på anden eftermiddag uden ekstra overnatning eller) således at prisuddelingen kan foregå på den anden aften med et prisforedrag der tydeligt henvender sig til alle fysikere, så kan foredrag/møder af generel karakter (evt. på dansk) holdes på den tredje dag, de øvrige sektioners møder kan afholdes parallelt og uafhængigt, men med tid til fælles samvær. Men faststofsektionens møde kan ikke inkludere flere plenarforedrag af almen interesse og samtidig bibeholde den faglige intensitet. Med andre ord det må være det fagligt orienterede forårsmøde, der driver foretæget og ikke DFS-årsmøde, blot henlagt til om foråret.

Som konklusion ser vi meget gerne en udbygning af faststofsektionens forårsmøde, forudsat det ikke forringer det faglige indhold og at mødet bibeholder en vis materiel standard samt at det kan afholdes til ca. samme pris, specielt for de studerende, som vi plejer at kunne støtte væsentligt takket være private fondsmidler. Vi håber en forlænget tid og et billigere sted ikke vil kunne få negative virkninger.

Til slut kan nævnes at faststofsektionen til næste år, Maj 1992, netop forsøger en ny udvidet udgave af forårsmødet på Nyborg Strand, hvor vi har inviteret de øvrige nordiske lande med. Det er organiseret som tre fokuserede sessioner om nært beslægtede emner bestående af tre Nordiske symposier, plus en fjerde generel session med adgang til andre faststof bidrag som vil blive arrangeret ud fra indkomne bidrag. Vi inviterer herved alle interesserede til et stort fremmøde til fire spændende dage.

Per-Anker Lindgård, formand for faststofsektionen

Anvendelse af det indlagte girokort: Medlemskontingent til Dansk Fysisk Selskab

I de eksemplarer af bladet, der postomdeles, skulle der befinde sig et girokort i midten af bladet. Det skal anvendes til indbetaling af medlemskontingent til Dansk Fysisk Selskab for 1992.

Det skal *kun* anvendes af dem, der er eller vil være medlemmer af selskabet. Hvis man modtager KVANT som medlem af Selskabet for Naturlærens Udbredelse eller som abonnent på bladet, kan man se bort fra dette indbetalingskort. Unge under uddannelse kan blive ungdomsmedlem af et af selskaberne og derved få KVANT for 75 kroner per år.

Skulle girokortet være faldet ud — og man ønsker at betale medlemskontingent til Dansk Fysisk Selskab — kan et nyt fremskaffes ved henvendelse til Lene Körner den anførte adresse.

Henvendelser om abonnement og medlemsskab af DFS eller SNU til:

Lene Körner
Matematisk Institut
Universitetsparken 5
2100 København Ø

Ny organisation af medlems- og forsendelseslister

KVANT udsendes som et medlemsblad for to foreninger samtidig med at det er muligt at tegne et selvstændigt abonnement. Denne konstruktion har medført visse problemer, men vi håber at vores forsendelsesliste er ved at være korrekt. For at holde styr på de forskellige medlems-

og forsendelseslister, vil de fremover blive bestyret af Lene Körner på ovennævnte adresse.

Adresseforandringer kan meddeles til postvæsenet, som herefter giver besked til KVANT, og dermed til DFS og SNU.

SEKTIONEN FOR UDDANNELSE OG UNDERVISNING
indbyder til konference over temaet:

HVAD SKAL VI "STILLE OP MED" DE NYE STUDERENDE?

Konferencen fokuserer på overgangen fra gymnasiet til de videregående uddannelser og på den indledende fysikundervisning på højere læreanstalter.

Konferencen er først og fremmest tænkt som et forum for udveksling af information og inspiration: Hvad gør man rent faktisk rundt omkring? Hvordan informerer man potentielle nye studerende? Hvilke undervisningsformer og pensum tilbydes på de forskellige uddannelser og niveauer? Hvad betyder gymnasireformen for vores tilrettelæggelse? Hvorledes er adgangskrav og gennemførsel?

Konferencen afholdes på Dansk Folke Feries kursuscenter i Middelfart d. 21.5.1992 kl. 14 til 22.5.1992 kl. 14. Pris ca. 750 kr.

Der vil ikke blive annonceret yderligere i KVANT! Er du interesseret i at deltage, eller ønsker du blot at modtage yderligere oplysning om indhold mm, så ring eller skriv til: Lektor Erik Both, Laboratoriet for teknisk fysik, Bygning 307, DTH, 2800 Lyngby. Tlf. 42 88 24 88, lokal 3151 eller direkte tlf. 45 93 12 22 lokal 3151.

Uanset konferencens lidt snævre emne er fysiklærere fra alle undervisningsniveauer meget velkomne til at deltage!

Graduate-vinterskoler i fysik

Per Hedegaard, formand for DFS Graduate School udvalg

Baggrund

I disse år gennemgår Ph.D.-uddannelserne i fysik i Danmark store forandringer. I Århus har man allerede gennemført den såkaldte FUP-plan, og København og Odense ventes meget snart at følge efter med deres planer. Ifølge disse planer vil Ph.D.-studieprogrammerne starte allerede efter 4 års studier i fysik. Der vil hermed indgå et meget større indslag af systematisk undervisning i mere avancerede emner. For at sikre den nødvendige bredde i uddannelsen er det ønskeligt at de kurser der udbydes dækker et stort udvalg af emner indenfor fysik, geofysik og astronomi. Dette kan være vanskeligt at klare for den enkelte institution, så stor mobilitet af de studerende er nødvendigt, således at man for eksempel i et semester flytter til en anden institution for at følge et bestemt kursus. Et andet bidrag til at øge den faglige bredde og samtidig skabe et fagligt netværk for de studerende, er at samle landets Ph.D.-studerende i en kortere periode og her give dem intensive kurser. Denne skitse er netop et forslag til etablering af en sådan vinterskole for Ph.D.-studerende i fysik i Danmark. Forslaget er udarbejdet af et udvalg bestående af folk fra Københavns Universitet (Klaus Mosegård, Geofysisk Institut og Per Hedegaard (formand) Fysisk Laboratorium), Aarhus Universitet (Jes Madsen og Aksel Jensen, Institut for Fysik og Astronomi) og Odense Universitet (Per Morgen, Fysisk Institut).

Tid, sted og varighed

Der afholdes *et kursus årligt* i januar måned. Første gang i januar 1993. Kurserne afholdes som *internatkurser*, f.eks. på Sandbjerg (Aarhus Universitets kursus ejendom) for at sikre deltagere og undervisere lejlighed til at vekselvirke socialt og muliggøre aftenarrangementer.

Kurserne starter med indkvartering og introduktion søndag eftermiddag/aften. Mandag til fredag er fulde arbejdsdage. Hjemrejse påbegyndes lørdag morgen.

Form

Kurserne består af tre forløb, hver varetaget af en forelæser, som også fungerer som "instruktor". Forløbene afvikles med hver en times forelæsning om formiddagen (ialt 5 timer per emne), mens eftermiddagen afsættes til gruppearbejde, startende med diskussions- og regneopgaver den første dag, men med hurtig drejning i retning af større "projekter" med tilknytning til et af forelæsningssemnerne. F.eks. kan grupperne designe et eksperiment til belysning af en central problemstilling (denne form har haft stor succes på nordiske astronomi-forskerkurser, hvor grupper er blevet bedt om at definere og planlægge observationsprogrammer. Ideen forudsætter, at der medbringes et passende udvalg af tidsskrifter, bøger og proceedings). Der afsættes tre eftermiddage til projekterne, og resultaterne præsenteres for de øvrige fredag eftermiddag. *Aftenerne* benyttes til korte

deltagerforedrag om egne Ph.D.-projekter, inspirerende gæsteforelæsninger, samt sociale aktiviteter.

Emnerne for forelæsningerne skal vedrøre centrale begreber fra moderne fysik/astronomi/geofysik, som ikke normalt er dækket på de enkelte studier. De tre emner skal ikke nødvendigvis hænge sammen; måske er det endda en fordel, hvis de er disjunkte, da en emnemæssig bred skole potentielt kan tiltrække flere studenter end et tilsyneladende kursus. *Forelæsernes evner* som pædagoger og inspiratorer er det primære udvælgelseskriterium. Forelæserne skal instrueres nøje om hensigten med kurset, nemlig at give et bredt udsnit af Ph.D.-studerende indsigt i dele af den moderne fysik, som *ikke* er deres daglige arbejdsområde. De skal benytte en skabelon, hvor første forelæsning giver en *bred* oversigt over forelæserens fagområde (supraledning, kosmologi,...) anden til fjerde forelæsning giver en grundig indføring i en central problemstilling (BCS-teori, galaksedannelse,...), og femte forelæsning skitserer aktuelle forskningsprojekter, herunder eventuelt forelæserens egne kæpheste.

Forelæserne udarbejder på forhånd et kompendium, som dækker de behandlede emner. Materialet udarbejdes i samråd med kursusarrangørerne, og sidstnævnte sørger for kopiering. Der udsendes på forhånd litteraturlister og/eller kopi af relevant baggrundsmateriale, som deltagerne forpligter sig til at studere før kurset.

Evaluerings

Efter kurset udstedes et bevis for aktiv deltagelse. Det skal på forhånd sikres, at institutionerne merit-godkender kurserne på dette grundlag.

Økonomi

50 deltagere af 500 kroner per døgn (kost og logi) i 6 døgn plus 300 kroner per deltager til transport, ialt 165 000. Hertil kommer honorar på 5 000 kroner til hver forelæser, udgifter til undervisningsmaterialer, sociale arrangementer m.m. Totaludgift per kursus: 200 000 kroner. Der bør sikres midler til en 3-årig forsøgsperiode i løbet af 1992.

Fremtiden

På længere sigt vil det være naturligt om de forskellige faggrupperinger (astronomi, geofysik, faststoffysik, kernefysik, atomfysik, partikelfysik, ikke-lineær dynamik osv.) danner Ph.D.-udvalg (f.eks. i Dansk Fysisk Selskabs regi), der havde ansvaret for undervisninger i deres felt. De vil så have ansvaret for at nye faglige udviklinger hurtigt kommer på programmet. Ikke alle felter vil være repræsenterede ved hver vinterskole, men det bør tilstræbes, at man kommer hele vejen rundt i løbet af en 3-årig periode, som det er forsøgt i ovennævnte skitse.

Kosmologi og partikelfysik

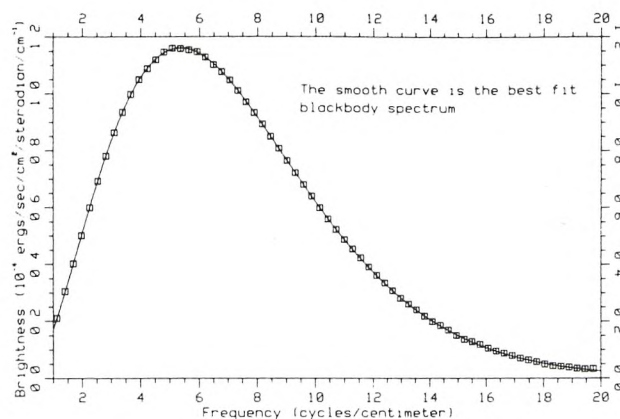
Charlotte Fløe Kristjansen, Niels Bohr Institutet

Ordet kosmologi er afledt af det græske ord *kósmos*, som betyder verden. Kosmologi er læren om universets struktur og udvikling. I kosmologien har man lige som i partikelfysikken en standardmodel. Kosmologiens standardmodel er baseret på Einsteins almene relativitetsteori og den antagelse, at universet kan betragtes som homogent og isotropt. Den almene relativitetsteori relaterer universets dynamik til dets energitæthed, men fortæller ikke på hvilken form eller i hvilken mængde, universets energi optræder. Med til Standardmodellen hører en antagelse om, hvilken type stof universet består af. Derimod må universets faktiske energitæthed (og visse integrationskonstanter) bestemmes ved observationer.

Standardmodellen er et succesrigt første skridt på vejen til forståelsen af universet. Modellen har givet anledning til adskillige forudsigelser, som er blevet bekræftet ved observationer. Den nok mest omtalte af Standardmodellens forudsigelser er den, som bygger på de færreste forudsætninger, nemlig forudsigelsen om, at universet ikke er statisk, men enten udvider sig eller trækker sig sammen. Denne forudsigelse er uafhængig af universets partikelindhold. Den blev bekræftet i 1929 af E. Hubble, som observerede, at lyset fra fjerne galakser modtages rødforskudt på jorden, og deraf sluttede, at universet ekspanderer. Med blot én yderligere, ikke særlig restriktiv antagelse om typen af stof, universet består af, følger det endvidere af Standardmodellen, at der har været et tidspunkt (for ca. 15 mia. år siden), hvor afstanden mellem alle punkter i universet var lig nul. Dette resultat udtrykkes ofte ved, at universet blev født ved et såkaldt Big Bang. I Standardmodellen antages det, at det tidlige univers bestod af en gas af relativistiske partikler i termisk ligevægt. Da tætheden var meget stor, må temperaturen have været meget høj. Denne periode i universets historie kaldes for den strålingsdominerede æra. Efterhånden som universet har udvidet sig, er dets temperatur aftaget, og kun masseløse partikler er vedblevet at være relativistiske. På et tidspunkt er energitætheden hidrørende fra ikke relativistiske partikler kommet til at dominere over energitætheden hidrørende fra relativistiske partikler, og den strålingsdominerede æra er blevet afløst af den såkaldte stofdominerede æra. Den kosmologiske standardmodel kaldes af indlysende årsager også for "The Hot Big Bang Model".

For at forstå hvorfor universet ser ud, som det gør i dag, er det nødvendigt at kende naturen af de vekselvirkninger, der fandt sted under de ekstreme forhold, som herskede i det tidlige univers. Forståelsen af vekselvirkninger ved høj energi er netop målet for partikelfysikken, så her smelter kosmologiens og partikelfysikkens interessesfærer sammen. Enhver antagelse om universets partikelindhold må naturligvis være i overensstemmelse med partikelfysikkens resultater og må modificeres i takt med, at disse modificeres.

Omvendt må antagelser i partikelfysikken modificeres, hvis de har kosmologiske konsekvenser, som ved observationer viser sig ikke at være korrekte. Via denne vekselvirkning mellem de to felter har man opnået en konsistent beskrivelse af universet tilbage til $t = 10^{-10}$ s. Undervejs har der været adskillige eksempler på, at ideer eller resultater fra det ene felt har influeret kraftigt på det andet.



Figur 1. Baggrundsstrålingens spektrum observeret fra COBE satellitten. Den fuldt optrukne kurve er Planckkurven for temperaturen 2,735 K.

Den ide, at temperaturen i det tidlige univers var meget høj blev fremsat af Gamow i 1940'erne. Gamow havde i mange år beskæftiget sig med kernefysik og begyndte at spekulere over, hvordan dannelsen af universets grundstoffer kunne være foregået. Han indså, at de relative forekomster af brint og helium — de to grundstoffer, som udgør hovedparten af universets masse — kunne forklares, hvis man antog, at det tidlige univers havde indeholdt meget højenergetiske fotoner, og at stof og stråling havde været i termisk ligevægt. Det blev snart erkendt, at Gamows fotongas stadig måtte være til stede i universet i dag. En fotongas i termisk ligevægt med et materiale har en frekvensfordeling, som følger en Planck kurve. Den oprindeligt højenergetiske stråling bliver afkølet, efterhånden som universet udvider sig, og på et tidspunkt ophører den med at vekselvirke med stoffet. Frekvensfordelingen vil dog fortsat følge en Planck kurve, fordi alle fotoners bølgelængde under universets ekspansion forøges med samme faktor. Gamow og hans kolleger beregnede, at strålingens nuværende temperatur måtte være ca. 5 K. Denne kosmiske baggrundsstråling blev opdaget i 1961 af to radioastronomer, Penzias og Wilson. Siden da er baggrundsstrålingen blevet analyseret i stadig større detalje. Senest har man via satellit foretaget målinger af baggrundsstrålingen uden for jordens atmosfære. Målingerne har med endnu større tydelighed end tidligere bekræftet baggrundsstrålingens termiske natur (se figur 1).

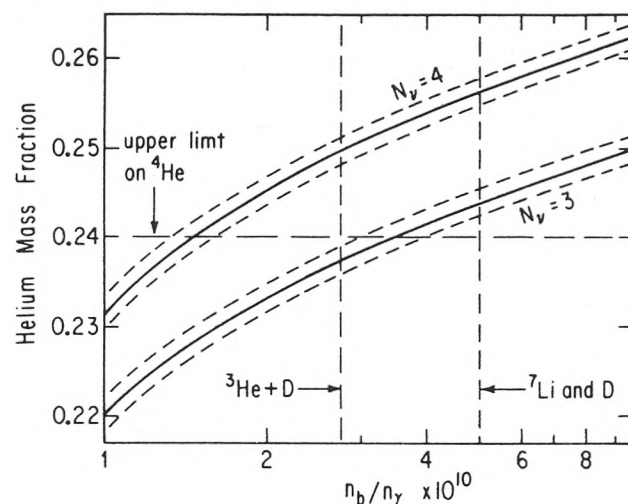
Strålingens temperatur bestemtes til 2,735 K. Observationer har ligeledes vist, at baggrundsstrålingen er særdeles isotrop. Opdagelsen af baggrundsstrålingen var en stor triumf for Big Bang modellen og en tilskyndelse til fortsat samarbejde mellem partikelfysikere (dengang kernefysikere) og kosmologer.

I takt med udviklingen af kernefysikken blev forståelsen af dannelsen af kernestof (nukleosyntesen) ved universets skabelse mere nuanceret. Man indså, at kun de allerletteste grundstoffer var blevet dannet i det tidlige univers. De tungere grundstoffer opstod langt senere ved kerneprocesser i stjernernes indre. Ved hjælp af teorien for den primordiale (oprindelige) nukleosyntese er man i stand til at beregne den relative forekomst af lette grundstoffer i universet. I beregningerne indgår flere parametre, hvis værdier ikke er eksakt kendte. Det er imidlertid bemærkelsesværdigt, at den observerede relative forekomst af lette grundstoffer kan opnås uden at komme i konflikt med andre eksperimenteres bånd på disse parametre.

Teorien for nukleosyntesen er nu så veletableret, at man benytter den observerede relative forekomst af de lette grundstoffer til at sætte grænser for de i teorien indgående parametre. En af disse parametre er antallet af lette neutrinoer. Forekomsten af ^4He sætter en øvre grænse for dette antal. For at finde årsagen til denne sammenhæng skal man tilbage til de første sekunder efter Big Bang. Til tiden $t = 10^{-2}$ s var universets temperatur 10^{11} K. Energitætheden var domineret af relativistiske partikler, hvis typiske energi var af størrelsesordenen 10 MeV. Neutroner og protoner blev holdt i termisk ligevægt via vekselvirkninger med elektron-neutrinoer. Til tiden $t = 1$ s var den typiske energi for de relativistiske partikler faldet til 1 MeV, hvilket er mindre end masseforskellen mellem en proton og en neutron. Omkring dette tidspunkt ophørte neutrinoerne derfor med at inducere neutronproduktion. Da var forholdet mellem antallet af neutroner og protoner som 1:7. Endnu kunne ingen stabile kerner eksistere. Nukleosyntesen begyndte først ca. 100 s senere, hvor temperaturen var faldet til 10^9 K og den typiske energi for universets fotoner var 0,1 MeV. Stort set alle universets neutroner blev bundet i ^4He -kerner. Nogle få gik til dannelsen af ^3He , ^2D og ^7Li . De overskydende protoner forblev enlige. Efter yderligere 10^{13} s er fotonernes energi faldet til ca. 10 eV, og det bliver muligt for neutrale atomer at eksistere. Snart efter afkobler strålingen fuldstændigt fra stoffet. Efter rekombinationen består universets masse overvejende af brint.

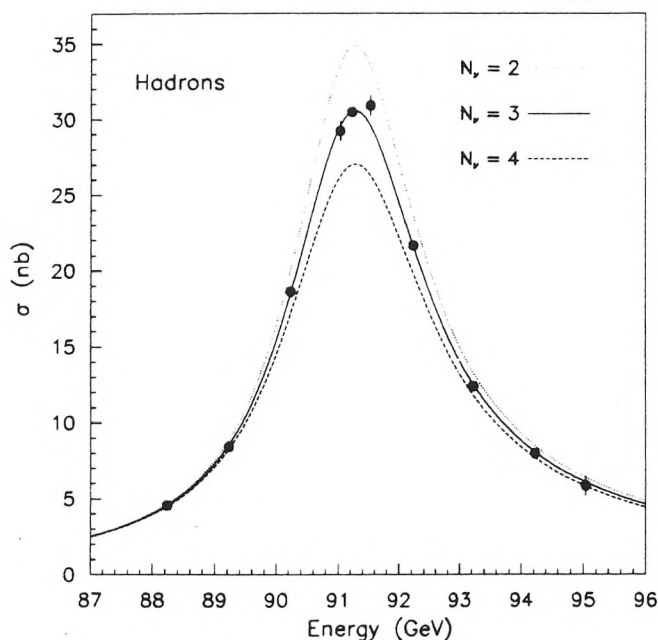
Den relative forekomst af de øvrige lette grundstoffer afhænger af flere faktorer. En af dem er forholdet mellem tætheden af protoner og neutroner og tætheden af fotoner, n_p/n_γ . Jo større dette forhold er, jo hurtigere forløber de kernereaktioner, der leder til dannelsen af grundstoffer tungere end brint. Betydningen af denne parameter er imidlertid langt mindre for ^4He end for ^3He , ^2D og ^7Li . Det, som bestemmer den relative forekomst af ^4He , er n_n/n_p , forholdet mellem antallet af neutroner og protoner ved nukleosyntesens start. Når neutrinoerne afkobler fra stoffet, har n_n/n_p den værdi, som er karakteristisk for termisk ligevægt ved den pågældende temperatur. Herefter ændres

n_n/n_p kun ved, at neutronerne henfalder. Hvor mange neutroner, som når at henfalde inden nukleosyntesens start, afhænger dels af neutronens henfaldstid, og dels af hvor lang tid der går, før universets temperatur er faldet tilstrækkeligt meget til, at stabile kerner kan eksistere. Sidstnævnte afhænger af universets ekspansionshastighed, som igen er bestemt af dets energitæthed. Jo større energitæthed, jo hurtigere ekspanderer universet, og jo hurtigere falder dets temperatur. Ved den temperatur, som vi her betragter, hidrører energitætheden alene fra relativistiske partikler og er desto større, des flere arter af relativistiske partikler der er til stede.



Figur 2. Kosmologiens bestemmelse af n_ν . Beregnede værdier for den relative forekomst af ^4He som funktion af forholdet mellem antallet af protoner og neutroner og antallet af fotoner for forskellige værdier af n_ν . Udværgningen af kurverne for $n_\nu=3$ og $n_\nu=4$ skyldes usikkerheden på neutronens levetid. Den horisontale og de to vertikale liner er grænser på de indgående parametre sat ved observationer.

Af lette partikler, som er til stede her ca. 1 s efter Big Bang, kender vi fotonen og neutrinoerne ν_e , ν_μ og ν_τ . Målinger af den relative forekomst af ^4He fortæller os, at der højst er tre neutrinoer, som er relativistiske ved energien 1 MeV (se figur 2). Tallet 3 som astrofysikernes øvre grænse på antallet af lette neutrinoer, n_ν , er resultatet af en analyse foretaget i 1990. Den ide, at man kunne bruge forekomsten af ^4He til at sætte en sådan grænse, stammer imidlertid fra midten af halvfjerdserne. Den første analyse gav $n_\nu \leq 7$. Resultatet vakte partikelfysikernes interesse. Opdagelsen af τ -leptonen ved SLAC i 1976 havde vist, at der var flere familier af partikler end to som oprindeligt antaget. Dette ledte til spekulationer om, hvorvidt antallet af familier var begrænset. Partikelfysikernes standard model gav intet svar. Eftersom hver familie af partikler i Standardmodellen indeholder netop én neutrino, kom kosmologiens standardmodel svaret nærmere. Siden 1976 har partikelfysikere fundet yderligere to tredje familis partikler, nemlig b -kvarken og τ -neutrinoen. Man mangler nu blot at påvise eksistensen af den såkaldte top kvark for at have hele familien.



Figur 3. Partikelfysikkens bestemmelse af n_v . Tværsnittet for hadronproduktion i e^+e^- kollisioner som funktion af energien i tyngdepunktssystemet.

I dag ved man, at man ikke skal forvente at finde yderligere familier af partikler med samme egenskaber som de allerede kendte: De tre neutrinoer ν_e , ν_μ og ν_τ vejer mindre end henholdsvis 12 eV, 0,27 MeV og 35 MeV — og eksperimenter ved LEP har for nyligt vist, at der kun findes tre neutrinoer med hvilemasse under 45 GeV. Dette bånd på antallet af lette neutrinoer er man kommet frem til ved at studere den såkaldte Z^0 partikel. Z^0 partiklen vejer ca. 90 GeV. Den er ikke stabil, men kan henfalde til par af kvarker, ladede leptoner eller neutrinoer, forudsat henfaldsprodukternes hvilemasse ikke overstiger 90 GeV. Henfaldet sker hyppigst til kvarker. Kvarker kan som bekendt ikke eksistere frit. At henfaldet er sket via denne kanal ses af, at slutprodukterne er hadroner. Levetiden for Z^0 partiklen afhænger af antallet af mulige henfaldskanaler. Jo flere henfaldsmuligheder, des kortere levetid. Z^0 partiklen kan produceres i e^+e^- kollisioner. I figur 3 ses, hvorledes den giver sig til kende som en resonans i tværsnittet for hadronproduktion ved sådanne kollisioner. Resonansens bredde er proportional med Z^0 'ens levetid, og tværsnittets maksimum er omvendt proportionalt med kvadratet på levetiden. Det præcise udseende af resonanskurven kan beregnes for forskellige værdier af n_v . Sammenligning med eksperimenter viser, at $n_v=3$ (se figur 3). At man finder samme bånd på n_v ved eksperimenter ved LEP som ved observationer af stjerner og galakser er et tydeligt tegn på, at både kosmologiens og partikelfysikkens standardmodel er skridt i den rigtige retning, når det gælder vor forståelse af universet.

Eksperimenterne ved LEP viser endvidere, at partikelfysikkens standardmodel er gyldig ved energier på op til mindst 100 GeV. Der er derfor god grund til at tro, at modellen giver en korrekt beskrivelse af universets partikelindhold tilbage til det tidspunkt, hvor den typiske energi for

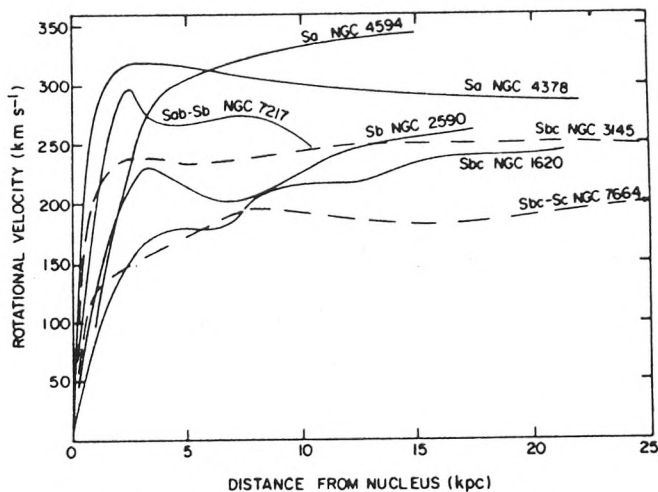
de relativistiske partikler var af denne størrelsesorden, dvs. tilbage til $t = 10^{-10}$ s. Af partikelfysikkens standardmodel følger, at en vigtig begivenhed i universets historie indtraf omkring tidspunktet $t = 10^{-5}$ s. Da blev kvarkerne for evigt bundet i hadroner. Med LHC bliver det muligt at teste partikelfysikkens standardmodel op til energier på 1000 GeV — eller om man vil at genskabe forholdene i universet, som det så ud 10^{-12} s efter Big Bang.

Selv om de to standardmodeller har fejret mange store triumfer, er de langt fra endegyldige teorier. Begge efterlader mange uafklarede spørgsmål.

I kosmologien er det spørgsmål, som trænger sig mest på: “Hvor stor er universets energitæthed?” Det er nemlig energitætheden, som bestemmer universets fremtidige skæbne. Hvis energitætheden overstiger en vis kritisk energitæthed, ρ_c , vil universets ekspansion på et tidspunkt ophøre og efterfølges af sammentrækning. Universet vil således gå til grunde i et “Big Crunch”. Hvis energitætheden derimod er mindre end eller lig den kritiske tæthed, vil universets ekspansion fortsætte for evigt. I tilfældet $\rho = \rho_c$ vil ekspansionshastigheden gå mod nul for $t \rightarrow \infty$, mens den for $\rho < \rho_c$ vil gå mod en konstant positiv værdi. Energitætheden udtrykkes bekvemt ved hjælp af parameteren $\Omega = \rho/\rho_c$. Ved observationer har man anslået, at synligt stof, dvs. stof, som giver sig til kende via elektromagnetiske vekselvirkninger, bidrager til Ω med 0,01. En stor del af universets masse hidrører imidlertid fra stof, som kun kan observeres i kraft af dets gravitationelle vekselvirkning med synligt stof. Dette “usynlige” stof benævnes “dark matter”. Der er eksperimentelle indikationer for dark matter på alle skalaer fra nogle få kiloparsec (kpc) op til mange hundrede Mpc.

Et eksempel er de såkaldte flade rotationskurver for spiralgalakser (se figur 4). Stjernerne i en spiralgalakse roterer om galaksens centrum. Observationer viser, at luminositeten i en sådan galakse aftager eksponentielt med afstanden fra centret. Hvis massetætheden opførte sig på samme måde, ville rotationshastigheden for stjerner i galaksens yderste dele aftage med kvadratroden af afstanden fra centrum. Man observerer imidlertid ikke nogen aftagen af rotationshastigheden. Efter at være vokset op til en vis værdi synes denne at forblive konstant helt ud til kanten af den synlige galakseskive. Ud fra de flade rotationskurver for spiralgalakser følger det, at $\Omega > 0,1$. Der er en svag tendens til, at Ω bestemt ved såkaldte dynamiske metoder, Ω_{dyn} , vokser med de betragtede afstande. Således finder man ved anvendelse af virialteoremet på superhobe, at $\Omega_{\text{dyn}} \approx 0,3$.

Næste spørgsmål, som melder sig, er: “Hvad består universets masse af?” Vor egen og vore nære omgivers masse er domineret af bidrag fra protoner og neutroner. Umiddelbart ville man forvente, at det samme gjaldt universets masse. Som det fremgår af figur 2, sætter observationer af den relative forekomst af lette grundstoffer en øvre grænse på, hvor meget protoner og neutroner kan bidrage til Ω . Denne øvre grænse er $\Omega_{n,p} < 0,1$. En del af universets masse må således være af ikke baryonisk natur. I denne forbindelse kan man undre sig over, hvorfor universets faktiske energitæthed er så tæt på den kritiske



Figur 4. Rotationskurver for syv forskellige spiralgalakser.

energitæthed ($\rho > 0,3 \rho_c$). Den kosmologiske standardmodel giver intet svar. Energitætheden er en fri parameter i modellen. Dette er et af flere eksempler på, at Standardmodellen tillader universet at se ud, som det gør, men ikke forklarer, hvorfor det gør det. Et andet eksempel vedrører den kosmiske baggrundsstråling. Som nævnt tidligere udviser denne en særdeles høj grad af isotropi. Den relative temperaturforskel mellem stråling fra forskellige retninger i rummet er så lille som 10^{-5} uanset størrelsen af den betragtede rumvinkel. Imidlertid følger det af Standardmodellen, at to fotoner, der når os fra retninger, hvis vinkelseparation er større end ca 2° , hidrører fra områder, som ikke var i kausal kontakt, da strålingen afkoblede fra stoffet. Der er således ikke umiddelbart nogen grund til, at baggrundsstrålingen skulle være isotrop på alle vinkelskalaer. Antagelsen om isotropi og homogenitet er tydeligvis noget, som må påtvinges Standardmodellen. Vi må også selv tilvejebringe en forklaring på, hvorledes der med denne isotropi og homogenitet kunne opstå de perturbationer i energitætheden, som er nødvendige for galaksedannelsen. Endelig er det observerede overskud af stof i forhold til antistof i universet heller ikke noget, Standardmodellen forklarer.

Partikelfysikkens standard model lider af samme type utilstrækkelighed som kosmologiens. Der er utilfredsstillende mange parametre, hvis værdier man kun kan slutte sig til ved eksperimenteres hjælp. Et af de vigtigste mål inden for partikelfysikken har længe været at forstå Standardmodellen som et relik af en større, mere fuldstændig teori. Håbet er selvfølgelig, at Standardmodellens parametre så vil kunne afledes af denne, mere fuldstændige teori. I arbejdet med at udvikle en sådan teori lader man sig lede af den ide, at alle vekselvirkninger kan beskrives som forskellige sider af samme kraft. En fælles beskrivelse af de svage og de elektromagnetiske vekselvirkninger er allerede opnået i Standardmodellen. Man taler således om én, elektrosvag kraft. At denne kraft i vor verden manifesterer sig på to tilsyneladende meget forskellige måder forklares ved, at en faseovergang, som separerer kraften i to, finder sted ved energier på omkring et par hundrede GeV. Energier af

denne størrelsesorden er typiske for universet 10^{-12} s efter Big Bang. Der er blevet gjort mange anstrengelser for ligeledes at opstille en fælles teori for den elektrosvage kraft og den stærke kernekraft — en såkaldt GUT (grand unified theory). I følge GUT's er vore dages forskellige fremtoning af de elektrosvage og de stærke vekselvirkninger resultatet af en faseovergang, som skete ca. 10^{-35} s efter Big Bang, hvor den typiske energi for de relativistiske partikler var 10^{15} GeV. Man har trods de mange anstrengelser endnu ikke fundet en helt tilfredsstillende GUT. Der er imidlertid adskillige eksempler på, at anstrengelserne har tilvejebragt mulige forklaringer på nogle af Den kosmologiske standard models dunkle punkter. Det vil desværre føre for vidt at komme ind på disse resultater her. Der henvises i stedet til referencerne. Det ultimative mål for partikelfysikken er at forene alle vekselvirkninger i en stor teori — en såkaldt TOE (Theory of Everything). En sådan teori må foruden de tre allerede omtalte vekselvirkninger også inkludere tyngdekraften. Tyngdekraften skiller sig allerede ud fra de andre kræfter 10^{-43} s efter Big Bang, hvor den typiske energi for universets relativistiske partikler er 10^{19} GeV. For at kunne opstille en TOE må vi kunne kvantisere tyngdekraften. Hvorledes dette skal gøres, er endnu uvist, men lykkes det, vil det sandsynligvis bringe os nærmere en forståelse af universets oprindelse.

Referencer

- 1) J. Horgan, *Universal Truths*, Scientific American, Oktober 1990
- 2) *Intersection between Elementary Particle Physics and Cosmology*, Jerusalem Winter School for Theoretical Physics, 28 Dec 1983 — 6 Jan 1984, World Scientific, 1986
- 3) Proceedings of Nobel Symposium 79, Gräntåvallen, Sweden, June 11-16, 1990, Physica Scripta T36, 1991



Charlotte Fløe Kristiansen Ph.D. studerende ved Niels Bohr Institutet. Arbejder med kvantegravitation.

Har neutrinoerne en endelig hvilemasse?

Jon Wulff Petersen, Institut for Fysik og Astronomi

Introduktion

Den uanselige — og næsten usynlige — elementarpartikel, neutrinoen, har siden trediverne spillet en vigtig rolle i bestræbelserne på at forstå den svage vekselvirkning, som bl.a. giver anledning til betahenfald. Men hvad der om muligt er endnu vigtigere er, at den måske — som den eneste — vil være i stand til at vise vejen for den næste generation af teorier om elementarpartikelfysik.

Omend imponerende fremskridt er blevet gjort, står flere fundamentale spørgsmål om neutrinoens egenskaber i dag stadig i et af fysikkens brændpunkter: Har neutrinoen en masse? Hvilken slags partikel er neutrinoen i kvantemekanisk henseende? Er de neutrinoer vi observerer f.eks. efter betahenfald kvantemekaniske “rene” tilstande eller blandinger af nogle os endnu ubekendte egentilstande.

Denne artikel forsøger at tage pulsen på forskningen på disse punkter, men forsøger også at give et bud på, hvor svarene vil komme fra i fremtiden. Hovedvægten vil ligge på eksperimentelle resultater med kun beskedne forsøg på at forklare de teoretiske udviklinger, som disse resultater kunne medføre.

Historien om neutrinoer begyndte i 1930 med et berømt brev fra Wolfgang Pauli til et møde i Tübingen, som han desværre ikke havde tid til at deltage i¹. Heri gjorde Pauli rede for det paradoks, at energispektret af elektroner udsendt i betahenfald var kontinuerligt, i modsætning til f.eks. gammaspektre. De to eneste modeller, man havde, var, at energi og impuls ikke var bevaret i kernen, eller — og denne løsning foretrak Pauli, omend tøvende — at en hidtil ikke observeret tredje part var involveret i betahenfaldet. Han døbte denne hypotetiske partikel neutronen, men måtte — da den neutron, vi kender i dag, senere blev fundet — omdøbe den til neutrinoen; et navn som Enrico Fermi havde fundet på. Pauli's brev førte på trods af udbredt skepsis overfor teorien til en intensivering af udviklingen af kalorimetriske eksperimenter til at lede efter en meget svagt vekselvirkende og meget let partikel. Disse anstrengelser kronedes dog først med held i 1953 i et eksperiment udført af Reines and Cowan². Allerede i 1934 havde Fermi dog fremsat en komplet teori for betahenfald³; en teori, der så overbevisende redegjorde for formen af energispektret af de udsendte elektroner, at det medførte en gradvis anerkendelse af eksistensen af neutrinoer. Senere har det vist sig, at der er i alt tre forskellige slags neutrinoer, opkaldt efter de leptoner, de optræder sammen med, nemlig elektron-, myon-, og tau-neutrinoer. De seneste resultater fra LEP eksperimenterne på CERN synes i øvrigt at bevise, at vi ikke skal vente at finde flere nye neutrinoer (for nærmere detaljer, se artiklen af Dines Hansen foran i bladet).

Siden begyndelsen af tresserne har man udviklet et sæt teorier, som er i stand til at beskrive alle fænomener omkring den svage og den elektromagnetiske vekselvirk-

ning, inklusive alle eksperimentelle resultater opnået ved de store accelerators rundt om i verden. Disse teorier, som ofte refereres til som Standardmodellen bruger som byggestene tre familier af partikler, hver bestående af 2 leptoner og 2 quarks. Desværre efterlader disse teorier også nogle fundamentale, åbne spørgsmål, hvoraf nogle af de mest påtrængende er: Hvorfor er der tre partikler af hver “slags”? og hvorfor har partiklerne de masser de har? Derfor er der brug for en mere generel teori, som er i stand til a priori at besvare sådanne og lignende spørgsmål. Hvor Standardmodellen antager at alle neutrinoerne er masseløse, får de i generaliserede modeller oftest helt naturligt en endelig masse. Forudsigelserne varierer dog fra neV til GeV. En eksperimentel bestemmelse af mindst én endelig neutrino-masse vil give et kraftigt fingerpeg om, hvilke generaliseringer er de mest relevante. En interessant forudsigelse er, at neutrino-masserne skulle forholde sig til hinanden ligesom masserne af de tungere mesoner:

$$m(\nu_e) / m(\nu_\mu) / m(\nu_\tau) = m(e) / m(\mu) / m(\tau).$$

Om de tre tunge leptoner ved man, at partiklerne er Diracpartikler, d.v.s. at hver partikel er forskellig fra sin antipartikel (eksempelvis elektronen og positronen). For neutrinoerne vides dette ikke; de kunne eventuelt tænkes at være deres egne antipartikler, såkaldte Majoranapartikler. For masseløse neutrinoer er forskellen af akademisk betydning, idet det ikke påvirker målelige størrelser; men så snart neutrinoen får en masse bliver dette til et nøglespørgsmål.

Hvis mindst en af neutrinoerne er massiv, bliver flere forskellige fænomener pludseligt mulige:

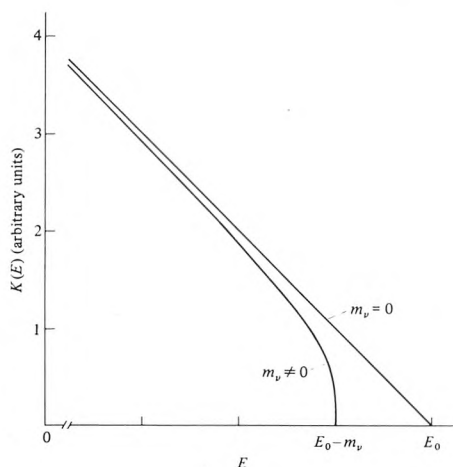
- De neutrinoer, vi ser, behøver ikke at være de sande egentilstande for den svage vekselvirkning i kvantemekanisk forstand; de kunne være en blanding af hidtil ukendte egentilstande.
- Neutrinoer kunne af samme grund skifte type fra at være f.eks. elektron-neutrinoer til at være myon-neutrinoer.
- Neutrinoer kunne henfalde.
- Hvis neutrinoerne er massive Majoranapartikler, bliver dobbelt betahenfald uden neutrinoemission muligt.

I det følgende ser vi først på situationen for de direkte forsøg på at bestemme neutrinoers masse. Senere ser vi på forsøg på at eftervise de afledte fænomener, som blev skitseret ovenfor.

Kinematiske massebestemmelser

Det første man ville tænke på, når man skal bestemme en partikels masse, ville være at måle dens hastighed og energi uafhængigt af hinanden og derved bestemme dens masse. På

grund af neutrinoernes ringe vekselvirkning med stof (de passerer for eksempel relativt uhindret gennem Jorden!) er denne fremgangsmåde ikke mulig. I stedet kan man måle energispektret af elektroner udsendt i betahenfald. Dette spektrum kan lineariseres — det såkaldte Kurie-plot — som vist i figur 1. I nærheden af spektrets endepunkt får en endelig neutrinomasse en dramatisk indflydelse på spektrets form: spektret dropper lodret til nul ved en energi, som er endepunktsenergien minus neutrinoens masse (omregnet til ækvivalent energi). Denne effekt blev forudsagt af Fermi's teori i 1934, og har været jagtet stort set lige siden.

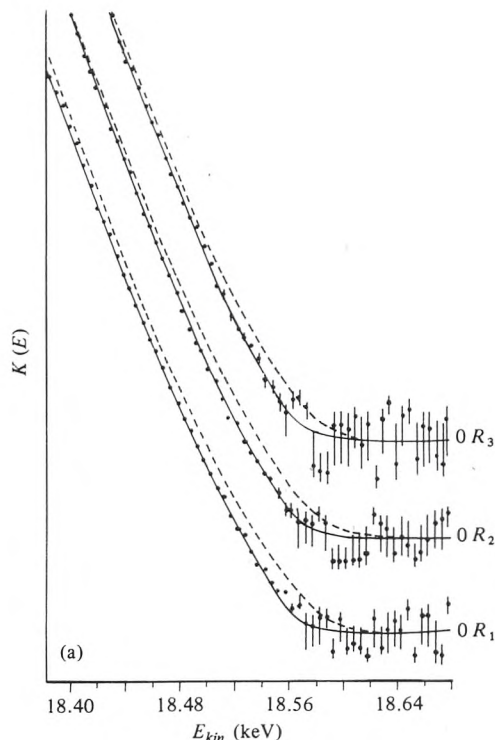


Figur 1. Indflydelsen af en endelig neutrinomasse på energispektret for elektroner i et beta-henfald.

I 1980 fik fysikken et mindre chok, da en russisk gruppe ledet af Prof. Lubimov fra ITEP Institutet i Moskva rapporterede⁴ at have set effekten af en endelig neutrinomasse i deres Kuriespektrum fra henfaldet af tritium til ^3He . Dette henfald har siden halvtredserne været det foretrukne til sådanne målinger, hovedsagelig p.gr.a. den lave endepunktsenergi på kun 18,8 KeV. Figur 2 viser tre spektre rapporteret i 1985. Man bemærker, at den dramatiske effekt forudsagt i figur 1 ikke eksisterer i en virkelig måling; dette skyldes at bestemmelsen af elektronens energi ikke kan foretages vilkårlig nøjagtigt. De russiske målinger mundede ud i en masse på ca. 30 eV for elektron antineutrinoen. Dette medførte naturligvis en voldsom aktivitet for at af- eller bekræfte dette sensationelle resultat. Desværre er resultaterne indtil nu kun negative og forskellige eksperimenter, heraf et med dansk deltagelse, har sat øvre grænser på massen på mellem 10 og 18 eV.

Disse målinger er meget vanskelige og særdeles langvarige, og man kan ikke forvente, at resultaterne kan forbedres en faktor ti inden for en overskuelig fremtid.

Tilsvarende målinger for myon- og tau-neutrinoer har heller ikke resulteret i positive resultater; p.t. er de øvre grænser henholdsvis 250 KeV og 35 MeV. Disse resultater er i sagens natur mindre kritiske end målingerne på elektronneutrinoen, men selv hvis massernes forhold er som forudsagt i ligningen ovenfor, er tritium resultaterne de mest kritiske.



Figur 2. Tre målte elektron-spekte, vist som Kurie-plot, der indikerer en neutrinomasse på omkring 30 eV.

Neutrino oscillationer

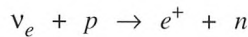
De russiske resultater fra 1980 blev også startskuddet for intensiverede eftersøgninger af afledte effekter af eksistensen af massive neutrinoer. Den mest spektakulære af disse effekter er neutrino oscillationer⁵. De neutrinoer, vi ser, behøver nemlig ikke være de sande egentilstande. Derfor kan bølgefunktionen for en neutrino i fri flugt bestå af flere komponenter med faseforskelle imellem sig. Derfor vil en detektor, der er følsom overfor en bestemt type neutrinoer og som bevæges langs flyveretningen for en neutrinostråle, se et periodisk varierende tælleantal; heraf navnet på effekten. Bølgelængden for disse oscillationer er givet ved:

$$L_{\text{osc}} = \frac{kE_\nu}{m_i^2 - m_j^2}$$

hvor k er en konstant, E_ν er neutrinoenergien, og $m_{i,j}$ er de to neutrinomasser. Som man ser af formelen, er det nok, hvis blot en af neutrinoerne har en masse.

Et typisk eksperiment består derfor i at anvende en stærk neutrino kilde, og måle tælleantallet fra en bestemt proces i en detektor som funktion af afstanden mellem kilde og detektor, hvorefter man leder efter afvigelser mellem det målte og det forventede tælleantal. En kernereaktor er en meget stærk kilde af elektron-antineutrinoer med en energi op til 8 MeV. To meget følsomme eksperimenter af denne slags er blevet

udført ved en schweizisk og en fransk reaktor. Her blev reaktionen:

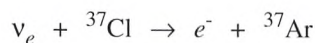


anvendt, og begge reaktionsprodukter, positronen og neutronen, blev detekteret og energianalyseret. Lad os for simpelhed antage at den udsendte neutrino, ν_e , er en linearkombination af to egentilstande, ν_1 og ν_2 , og at den kan konverteres til en myonneutrino:

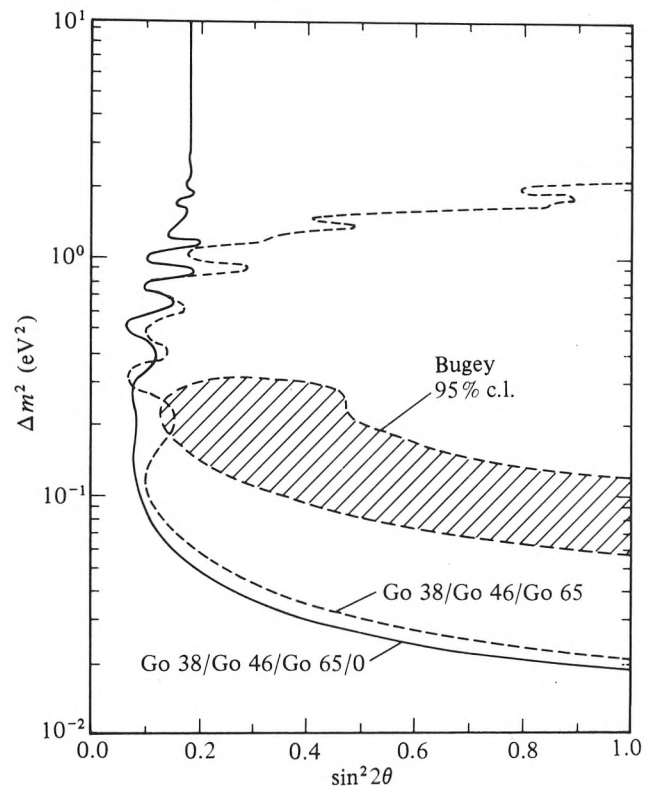
$$\begin{aligned}\nu_e &= \cos\Theta \nu_1 + \sin\Theta \nu_2 \\ \nu_\mu &= -\sin\Theta \nu_1 + \cos\Theta \nu_2\end{aligned}$$

Styrken af oscillationsprocessen kan nu måles ved størrelsen $\sin^2(2\Theta)$. Resultaterne af reaktoreksperimenterne kan så beskrives ved hjælp af todimensionale fremstillinger af tilladte, sammenhørende værdier af $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ og $\sin^2(2\Theta)$, som vist på figur 3. Området ovenfor og til højre for den fuldtotrukne linie er udelukket af det schweiziske Gosgen eksperiment, mens det skraverede område viser et område tilladt af de franske målinger i Bugey. De franske forskere så med andre ord en unormal afstandsafhængighed i deres resultater, som dog ikke kunne bekræftes af det andet eksperiment. Denne situation er stadig uafklaret, men flere målinger er undervejs. Det skal bemærkes, at disse eksperimenter er følsomme for masser helt ned til 0,1 eV, hvilket er bedre end de direkte målinger. Til gengæld ses en effekt kun for en oscillationsstyrke over ca. 10 %. Eksperimenter med neutrinostråler fra højenergiacceleratorer kan her være følsomme for betydeligt mindre oscillationsstyrker, helt ned til $\sin^2(2\Theta) = 10^{-3}$. En hel række eksperimenter har her givet negative resultater, som udelukker alle kombinationer af Δm^2 værdier over ca. 10 eV² og $\sin^2(2\Theta)$ over ca. 0,001.

En særlig interessant neutrinkilde er solen. Solen er en meget stærk neutrinkilde, specielt for ganske lave energier (op til 0,4 MeV). Siden 1970 har en amerikansk gruppe under ledelse af R.Davis⁶ målt på neutrinoer fra solen ved hjælp af en 380.000 liter stor detektor, anbragt i en mineskakt 1400 meter under havets overflade. Man anvender her reaktionen (omvendt betahenfald) :



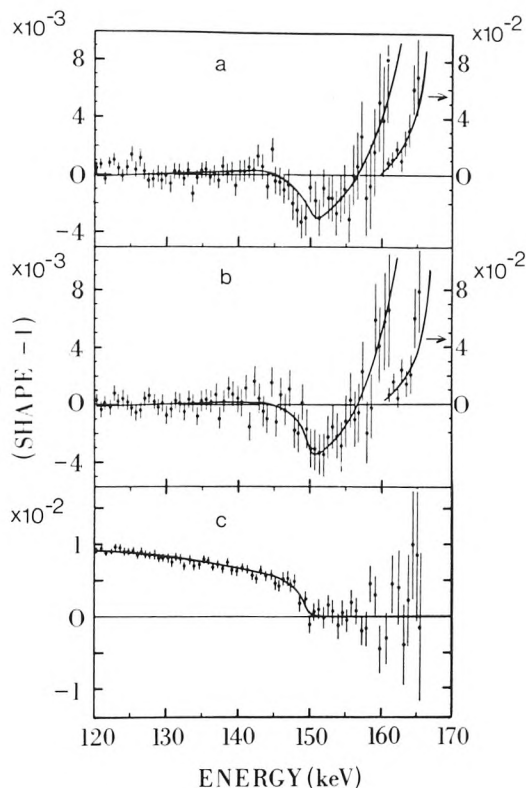
som producerer cirka en radioaktiv ${}^{37}\text{Ar}$ kerne per dag. En gang hver anden måned tømmes tanken ved en kemisk rensning for de producerede Ar kerner (cirka 50 !!), som derefter tælles ved hjælp af deres henfald. Denne process har en selektivitet på cirka 10^{29} , hvilket er ganske formidabelt. Det observerede antal begivenheder er over en lang årrække konsekvent lavere end, hvad man ville forvente ud fra en modelberegning af processerne i solen. Disse beregninger er ganske komplicerede, og neutrinoerne, som bidrager til den observerede reaktion, udgør kun en meget lille del af det samlede solneutrinospektrum. Derfor har man kun tøvende overvejet, om denne mangel på neutrinoer kunne skyldes en oscillationsprocess, som får



Figur 3. Grænser for neutrinomassen for forskellig styrke af neutrinooscillationerne.

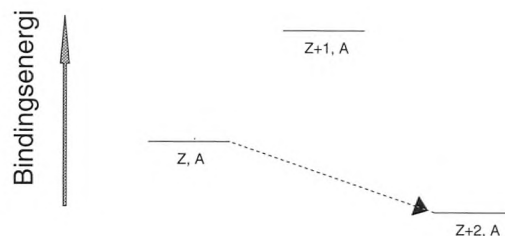
elektronneutrinoer til at forsvinde på vej herved til os til fordel for f.eks. myonneutrinoer, som ikke ville give noget signal i Davies' eksperiment. Disse overvejelser er blevet forstærket af teoretiske modeller, der postulerer at kraftige forstærkninger af oscillationsprocesserne kan forekomme p.gr.a. den lange flyvevej i solen, hvor tætheden af materiale er meget højere end i vacuum. Dette har ført til starten på to gigantiske eksperimenter i hhv. USA og USSR, hvor en anden reaktion, nemlig med ${}^{71}\text{Ga}$ anvendes. Denne reaktion er følsom overfor de væsentlige energiskabende processer i solen, og skulle være meget lidt følsom for små fejl i de teoretiske modeller for solen. De første resultater fra disse eksperimenter viser også her en markant mangel på ankomende neutrinoer; altså en bekræftelse af Davis' resultat! For at opnå disse markante effekter har man p.gr.a. den lange flyvevej kun brugt for oscillationsstyrker af størrelsesorden 10^{-4} og Δm^2 værdier 10^{-4} to 10^{-7} eV². Så små værdier kan man ikke forestille sig at kunne måle med laborieteknikker.

En anden måde at detektere oscillationsfænomenet på består i at lede efter udsendelse af "forkerte" neutrinoer i f.eks. betahenfald. Også her har man gjort sig store anstrengelser for at lede efter sjældne begivenheder med andre neutrinoer end de forventede, hovedsagelig i eksperimenter ved de store acceleratorer. Besynderligt nok er den mest opsigtsvækkende effekt dog kommet fra et ganske enkelt eksperiment, udført af J.Simpson og hans medarbejdere⁷. Her blev elektronspektret fra betahenfald af tritium og ${}^{35}\text{S}$ målt meget omhyggeligt med henblik på at finde et over-



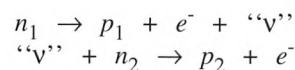
Figur 4. Spektre fra Simpsons eksperiment, der antyder eksistensen af en tung neutrino med en masse på omkring 17 keV.

lejret betaspektrum med en lavere endepunktsenergi og et ganske lille forgreningsforhold. Dette ville nemlig være signaturen for en "forkert", tung neutrino udsendt i konkurrence med det normale henfald. Figur 4 viser for to sæt data (a og b), at spektret kan analyseres ved at antage, at en neutrino med en masse på 17 KeV udsendes med en sandsynlighed på 0,8 % per henfald. Figur 4c viser spektret afbildet normeret til et spektrum uden udsendelse af tunge neutrinoer, og man ser tydeligt overlejringen med et betaspektrum med et helt andet endepunkt. Denne tilsyneladende uskyldige effekt, som ikke har kunnet reproducere i alle eksperimenter, har voldsomme konsekvenser, hvis den viser sig at være ægte: For det første har man herved fundet den første massive neutrino. For det andet er de neutrinoer vi observerer ikke egentilstande; d.v.s. oscillationer forekommer. For det tredje må den udsendte, tunge neutrino hovedsagelig være tauneutrinoen. Denne kan derfor ikke være stabil, idet astrofysiske begrænsninger — nemlig at universet masse ikke kan være domineret af disse neutrinoer — udelukker at en sådan partikel kan have en levetid sammenlignelig med eller længere end universets alder. Sidst men ikke mindst beviser det entydigt at Standardmodellen ikke er tilstrækkelig. Der er altså rigelig motivation for at af- eller bekræfte eksistensen af dette fænomen. En gruppe danske fysikere forsøger at gøre dette ved måling på intern bremsestråling, som er en proces, der er analog til betahenfald. Eksperimentet opnår derved den fordel at detekttere fotoner i stedet for elektroner. Eksperimentet udføres ved hjælp af radioaktive kilder fremstillet på CERN.

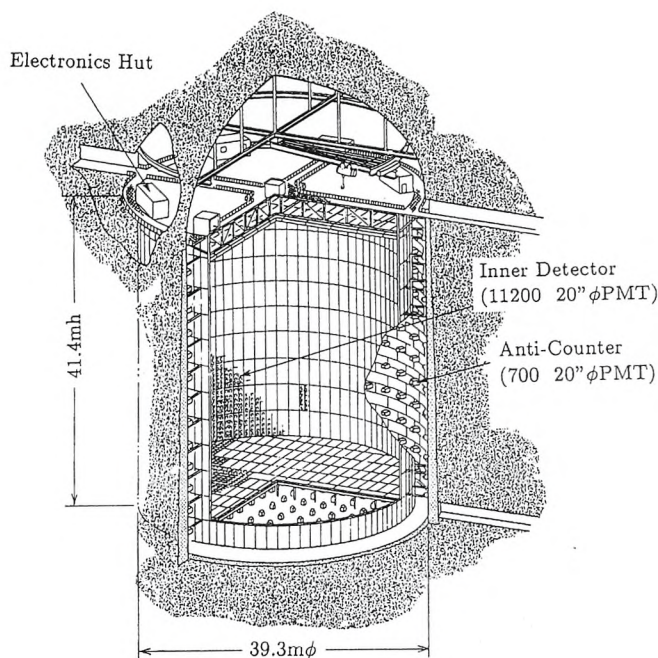


Figur 5. Skematisk henfaldsdiagram, der viser situationen, hvor almindeligt beta-henfald er forbudt, mens dobbelt beta-henfald er muligt.

Den eneste type eksperiment, som i øjeblikket er i stand til at skelne Diracneutrinoer fra Majorananeutrinoer er dobbelt betahenfald. For nogle kerner er almindeligt betahenfald energetisk forbudt, hvorimod dobbelt betahenfald er muligt (se figur 5). Dette kan nu foregå enten som en anden ordens proces, d.v.s. som to betahenfald i forlængelse af hinanden med udsendelse af det dobbelte antal partikler, eller ved den alternative proces skitseret her:



Her kræves selvfølgelig at neutrinoen er sin egen antipartikel, dvs. en Majorananeutrino, for at reaktionen kan



Figur 6. Tegning af den planlagte japanske Super Kamiokanda neutrino detektor.

forløbe således. Herved udsendes altså ingen neutrinoer og energispektret af de udsendte elektroner har en meget karakteristisk signatur. Denne proces eftersøges i en lang række eksperimenter, som indtil nu ikke har fundet tegn på at denne kanal er åben; men det kan bestemt ikke udelukkes at man engang i fremtiden vil være i stand til at den vej at løse mysteriet om, hvilken type neutrinoer vi egentlig har med at gøre.

I forbindelse med den synlige supernova i Den Lille Magellanske Galakse i 1987, blev der på jorden for første gang detekteret ankomsten af neutrinoer fra en ikke kontinuerlig kilde. Dette har betydet starten på en ny epoke, som man kan betegne som neutrinoastronomiens tidsalder. Konstruktionen af en række gigantiske, underjordiske neutrino-detektorer til detektion af neutrinoer fra fremtidige supernova-ekspllosioner eller andre astrofysiske megaproceser planlægges i øjeblikket. Den mest imponerende af disse kommende detektorer er den japanske Super-kamiokande, som er vist skematisk på figur 6. Med sådanne detektorer kan man f.eks. forestille sig, at bestemme neutrinomasser ved hjælp af forskelle i deres ankomsttidspunkter, på grund af den lange flyvevej fra en anden galakse og hertil, altså et galaktisk flyvetidsspektrometer!

Referencer.

- 1) L.M.Brown, Physics Today, September 1978, s.23 og referencer heri.
- 2) F.Reines, C.L.Cowan, Nature **178**, s.446 (1956).
- 3) E.Fermi, Z.Physik **88**, s.161 (1934).
- 4) V.Lubimov et.al., Phys.Letters **B94**, s.266 (1980).
- 5) se f.eks. J.L.Vuilleumier, Rep.Prog.Phys. **40**, s.1293 (1986).
- 6) J.K.Rowley et.al., AIP Conf.Ser. **126** (1985).
- 7) A.Hime, N.A.Jelly, Phys.Letters **B257**, s.441 (1991) og referencer til A.Himes arbejder sammen med John Simpson refereret heri.



Jon Wulff Petersen er uddannet på Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet, hvor han også har gennemført et licentiatstudium indenfor faststoffysik. Siden har han arbejdet med bestemmelse af neutrinoers masse, som post-doc ved universitetet i Zürich, senere som seniorstipendiat ved Acceleratorudvalget i tilknytning til CERN.

Edwards High Vacuum Turbomolekularpumper

- ★ 4 basistyper
- ★ High Power DC-motor
- ★ 40 flangevarianter
- ★ Ny EXT E økonomiversion
- ★ 17 modeller
- ★ Lavt støj- og vibrationsniveau



Edwards High Vacuum er en af verdens førende producenter af vakuumpumper og -udstyr. Den nye EXT E version gør det nu muligt at anskaffe en Turbomolekular Vakuumpumpe til en fornuftig pris. Kan køles enten med luft eller vand, og kan styres af den normale EXC350 og EXC500 Turbo-kontroller. Edwards High Vacuum er også Dry Pumps, Diff. Pumps, Vakuüm måleinstrumenter, Frysetørningsanlæg og På-dampningsanlæg.

Ring for yderligere oplysninger!

Marielundvej 36
2730 Herlev
4291 75 11

Buch & Holm A/S

 Spectra-Physics

**Spectra
Diode Labs**

 **LASOTRONIC**

 **uniphase**

 **ANDO**

 **PHOTON
inc.**

 **JOBIN
YVON**

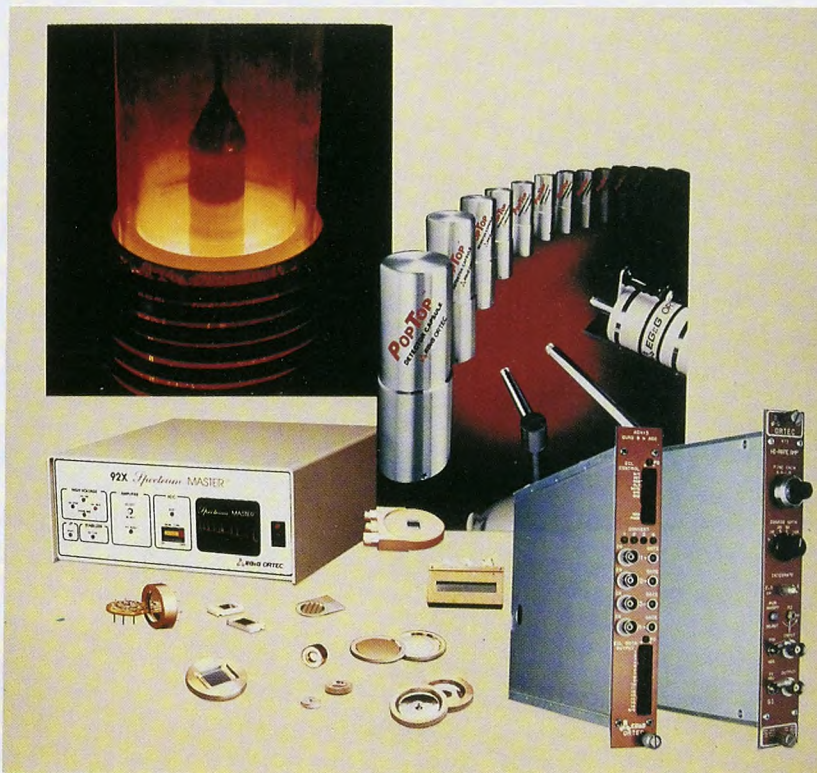
OPHIR

 **Exciton**

burleigh

 **LASER
PHOTONICS**

 **UNITED
DETECTOR
TECHNOLOGY**



**TOOLS
of the
TRADE**

- Radiation
- Detection
- Measurement
- Analysis

**EG&G
ORTEC**

**Den danske leverandør
af radioaktivitetsmåle-
udstyr samt laser -
og opto - elektronik
fra de førende
fabrikanter**



 **laser science, inc.**

 **micro-
control**

 **EG&G ORTEC**

QUESTEK

 **EG&G
GAMMA SCIENTIFIC**

 **EG&G
FIBER OPTICS**

 **Quanta-Ray**

 **EG&G PRINCETON
APPLIED RESEARCH**

 **PHOTON
CONTROL**

b.b.t.
instrumenter

**BBT Instrumenter ApS
Dr. Olgasvej 6
DK-2000 Frederiksberg**

**Telefon 3119 82 08
Telefax 3119 87 47
Telex 35 326 bbt dk**

**ELEKTRONIK
ELEKTROMEDICIN
ELEKTROKEMI
FORSKNING
UNDERVISNING**

Ph.D spalten

Redigeret af Mads Hammerich,
H.C.Ørsted Institutet, Københavns Universitet

Ph.D-spalten er en ny fast rubrik i KVANT. Formålet er at orientere om den løbende Ph.D. produktion indenfor fysik i Danmark. Håbet er at produktionens størrelse gør det umuligt. Spalten har endnu ikke fundet sin form. Den plads, der kan levnes omtalen af det enkelte projekt, bliver afhængig af antallet af afsluttede og indrapporterede Ph.D. arbejder. Spalten vil kun i en indledende fase foretage opsøgende arbejde for at få korte resumeer fra forfatterne. Derfor skal nyligt og snarligt afsluttede Ph.D.-ere hermed kraftigt opfordres til at skrive et ultrakort og helst hypertilgængeligt resume af arbejdet og sende det til KVANTS redaktion mærket "Ph.D.-spalten".

Lars Mandrup er født i 1961 og er Ph.D. fra Det fysiske Institut ved Århus Universitet i 1991. Han arbejder nu som adjunkt ved Aarhus teknikum.

Hans Ph.D. afhandling bærer titlen **Quark model calculations of protonium annihilation into two mesons**. Om dette arbejde skriver Lars Mandrup:



Arbejdet er gjort indenfor teoretisk mellemenergifysik. Det overordnede mål var at undersøge vekselvirkningerne mellem quarks. Da disse ikke kan isoleres, må man istedet benytte processer, hvor de optræder i meget begrænset antal. Et af de simpleste systemer er nukleon-antinukleon annihilation til to mesoner, hvor tre quarks og tre antiquarks vekselvirker og danner to quark-antiquark par. Denne proces er undersøgt både ved model-uafhængig analyse og ved brug af specifikke quarkmodel vekselvirkninger. De effektive quark model vekselvirkninger er konstrueret på grundlag af både en rearrangement model, hvor en quark og en antiquark annihilere og de øvrige omfordeler sig til de to mesoner, og en annihilationsmodel, hvor to par annihilere og et nyt skabes, som sammen med det overlevende quark-antiquark par danner de to mesoner... På grundlag af disse vekselvirkninger er henfaldsbredder, forgreningsforhold og vinkelfordelinger blevet beregnet for proton-antiproton annihilation fra de atomare protoniumstilstande til mulige to-meson tilstande... Af en sammenligning med eksperimentelle data fra CERN fremgår det, at ingen af enkelte quarkmodel vekselvirkninger kan reproducere data. Sammenligningen bliver væsentligt bedre, hvis en linearkombination af alle de effektive vekselvirkninger benyttes, men der er stadig store afvigelser der indikerer at der mangler væsentlige elementer i de effektive quark model vekselvirkninger i annihilationsprocessen.

Jens Engholm Pedersen født i 1960, blev Ph.D. i 1991 på afhandlingen: **Rare earth doped fibre optical amplifiers**. Arbejdet blev udført på DFI og Jydsk Telefon, støttet af ATV under erhvervsforskeruddannelsen. Arbejder nu som videnskabelig medhjælp ved Fysisk Institut, Odense Universitet.



Jens Engholm har ikke sendt et resume, men derimod adskillige siders summary fra sin afhandling. Han kan nu læse, hvor galt det kan gå at overlade sammenfatningen til redaktøren:

Indenfor fiberoptisk langdistancekommunikation er der et stort behov for fiberoptiske forstærkere, så signalet kan forstærkes med jævne mellemrum langs fiberen og inden detektion hos modtageren. I disse forstærkere eksiteres et forstærkermedium i kernen af en fiber, ved at man lyser på det. Ideen er så, at signalfotoner skal få de eksiterede ioner til at henfalde ved stimuleret emission, hvorved signalet forstærkes. Erbium baserede forstærkere er kendte, men de arbejder kun i 1500nm området. Til transmissionsvinduet i kvarts ved 1300nm arbejdes der med neodymium baserede forstærkere. Det har været vanskeligt at opnå forstærkning i disse fibre på grund af 'excited state absorption', hvor både signal og forstærkning forsvinder, ved at signalfotoner eksiterer neodymiumatomer ud af det øvre laserniveau. Arbejdet viser, at denne mekanisme kan bekæmpes ved at bruge et fluorid baseret glasmateriale istedet for kvarts som vært for neodymium ionerne. Et eksperimentelt arbejde viser, at der kan opnås en forstærkning på 7dB for en pumpeeffekt på 100mW i et bredt spektralområde omkring 1330nm.

En andet problem er, at ikke alene signalfotoner, men også spontant udsendte fotoner, kan forstærkes. Derved begrænses forstærkningen, og støjen øges. En af ideerne i arbejdet er at fjerne det spontant udsendte lys med en absorber eller et antal filtre langs forstærkerfibren, således

at forstærkningen ikke røres. Det blev eksperimentelt vist, at denne effekt virkelig er den begrænsende faktor i det undersøgte system, og at dette ellers er lovende. Det blev teoretisk vist, at det skulle være muligt at opnå både høj forstærkning og lav støj, hvis man kan absorbere det spontant udsendte 1050nm lys.

Mads Hammerich født 1953 blev Ph.D. på arbejdet: **Monitoring with tunable CO₂ waveguide lasers**. Arbejdet blev udført på Fysisk Laboratorium ved Københavns Universitet som led i et FTU-projekt. Er for tiden ansat som vikar ved Fysisk Laboratorium, Københavns Universitet.



Arbejdets tre afsnit beskæftiger sig med laserspektroskopi på molekyler. En af motivationerne er ønsket om at kunne detektere små mængder af et stof i en luftprøve, her ammoniak i røggas fra et forbrændingsanlæg. Dette gøres

ved at lade prøven absorbere pulser af lys fra en laser og ved at lytte efter de trykpulser, der opstår i prøven, når den absorberede energi omsættes til varme. Metoden kaldes 'fotoakustisk detektion' og det blev vist, at den kan anvendes til at detektere ammoniakkoncentrationer på under 1ppm, selv ved kuldioxydkoncentrationer på adskillige procent, og på trods af, at de to stoffer absorberer på frekvenser med en relativ adskillelse på kun $6 \cdot 10^{-6}$.

Denne høje selektivitet blev først og fremmest opnået ved anvendelsen af specielt udviklede tunbare lasere, men også ved at udnytte de molekylodynamiske forskelle på de to stoffer, der gør de to signaler kvalitativt forskellige.

I to udvidelser af dette arbejde vises det, hvordan det er muligt dels at variere prøvens temperatur over et meget bredt område — og derved kunne måle vigtige spektrale data i dette område — dels at forøge de tilgængelige laserfrekvenser ved at fordoble laserlysets frekvens med et udbytte der er tilstrækkeligt til spektroskopiske formål.

Wide-Range Turbomolecular Pumps

Turbo 180 H
Turbo 450 H

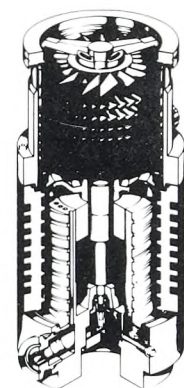


Two pumps in one!

Wide-range turbomolecular pumps with additional pumping system on the backing pressure side are the ideal pumps for producing hydrocarbon-free high and ultra high vacuum.

Some special features:

- High backing pressure (up to 13 mbar) allows use of dry membrane-type backing pumps
- Ultimate pressure $< 1 \times 10^{-10}$ mbar at 10 mbar backing pressure
- High volume flow rate up to 1 mbar



Turbomolecular pump system

Holweck molecular pump system

BALZERS

Nordiska Balzers AB
Baunegårdsvej 7 L
DK-2820 Gentofte
Tel. 31-68 32 61
Fax. 31-68 22 55

Balzers AG
FL-9496 Balzers
Liechtenstein
Tel. 075-441 11
Fax. 075-427 62

Udredning af den danske fysikforskning

Jørgen F. Bak, redaktør



Den endelige rapport for udvalgets arbejde er nu blevet udsendt. Arbejdet blev indledt i efteråret 1990, som omtalt i december 1990 i KVANT.

Umiddelbart vil man ikke blive overrasket ved at læse rapporten, hvis man blot har en smule kendskab til dansk fysikforskning. Det er jo et sundt tegn, der betyder i den fornemmelse man umiddelbart har, er nogenlunde dækkende for den reelle situation. Hermed ikke sagt at rapporten er uinteressant. Det er sundt at kunne få underbygget det "man godt ved" med konkrete tal og argumenterede påstande. Udredningsarbejdet skulle også resultere i nogle forslag til løsning af problemerne - og det vil der givetvis blive en del diskussion af.

Men lad os nu gøre det lidt mere konkret. Rapporten konkluderer at den danske fysikforskning er af international kvalitet og at der findes forskningsgrupper, der er med blandt de førende i verden. Den faglige bredde er stort set dækket, idet dog plasmafysikken er havnet på et sidespor, hvilket der bør tages hensyn til i den kommende tid. Omfanget af forskningen er under niveauet i sammenlignelige lande, men kvalitet er i første omgang vigtigere end kvantitet.

Hovedproblemet, som rapporten fremdrager, er aldersprofilproblemet. Hvad gør vi om 10 til 15 år når hovedparten af staben går på pension (og - uden at det nævnes i rapporten - der også sker et voldsomt frafald blandt gymnasielærerne)? Hvorledes bevares kontinuiteten og hvad kan man gøre for at hjælpe med rekrutteringen af nye fysikere. Hvis der ikke gøres noget vil Danmark i løbet af ti år tabe sin internationale position. Udvalget foreslår at der dels indføres en engangskvote på 45 stillinger for fysikere mellem 35 og 45 år, og at der fra nu af årligt ansættes omkring syv nye fysikere om året (cirka en tredobling af det nuværende niveau).

Et andet væsentligt problem er af strukturel karakter. Ved at se på de tre største institutioner, Københavns Universitet, Aarhus Universitet og Danmarks Tekniske Højskole har man konstateret at den Århusianske model med ét stort institut uden formelle indre bindinger giver en fleksibel og stærk basis for at kunne udnytte ressourcerne og giver mulighed for ændringer uden større problemer. På den baggrund foreslår udvalget at fysikken både på Københavns Universitet og på DTH samles under et institut.

På Københavns Universitet foreslås den eksperimentelle højenergifysik, Dansk Rumforskningsinstitut og den observationelle astronomi samlet i den nyindrettede Røckerfellerbygning mellem Niels Bohr-Institutet og H.C.Ørsted-Institutet. På NBI samles den teoretiske fysik for kerne-, partikel- og komplekse systemers fysik, samt astrofysik. Endelig samles faststoffysikken og atomfysikken på HCØ. De tre bygningskomplekser samles under en fælles institutledelse på fem videnskabelige medarbejdere.

På DTH foreslås den samme model anvendt, idet der konstrueres ét fysisk institut med fire underliggende labora-

torier (der hver har deres bygningskompleks). Der foreslås den samme ledelsesmæssige struktur.

Det sidste væsentlige problem drejer sig om uddannelsen af fysikere i Danmark. I de seneste 10 år er der kun uddannet halvt så mange fysikere i forhold til befolkningen som i andre vestlige lande. Det er specielt et problem i forhold til den ovennævnte aldersprofil. Det lave kandidatall skyldes dels en lav rekruttering og en lav gennemførelsesprocent. Både i København og Århus er der i de seneste år gjort en stor indsats i form af en mere intensiv undervisning for at øge gennemførelsesprocenten. Det vil nok være muligt at nå en fordobling af kandidatproduktionen. Der opfordres også til at der gøres en indsats for at øge rekrutteringen. Endelig anbefales det at forskeruddannelsen formaliseres mere, som det allerede er sket i Århus, hvilket dels skulle effektivisere den og samtidig kunne den tage noget af trykket af kandidatuddannelsen, og derved forhåbentlig støtte væksten i denne.

Denne kommentar til evalueringen bygger på hovedrapporten fra udvalget. Derudover er der udsendt syv under-rapporter og fire bind med statistiske oplysninger. Hele dette materiale giver et godt grundlag for at diskutere løsninger på de anførte problemer - og måske føre nogle af arbejdsgruppens anbefalinger ud i livet. Jeg tror ikke at der er nogen der vil være interesseret i at dansk fysik går i stå. Uanset hvad man mener er der et påtrængende behov for at der sker ændringer, og det er da givet at det vil ændre situationen for nogle af de involverede. Men lad os håbe at det ikke vil forhindre nødvendige ændringer således at faget kan holde sin position og - hvem ved - måske komme ind i en vækstfase!

Man må måske ikke sige det ret højt - men det er jo ikke første gang at der har været en evaluering - alt og alle er igennem møllen for tiden. I mange tilfælde sker der simpelthen det, at der ikke sker noget som helst bagefter. Når pressekonferencerne er overstået og ministeriet har fået arkiveret sagen lægger støvet sig, og alle de, der har rubbet neglene eller har kæmmet håret og set artige ud falder tilbage i den daglige gænge som om intet var hændt.

Det kan også være et resultat af denne evaluering. Men det håber jeg ikke, for det er nu der skal ske noget, hvis ikke toget skal gå i stå om 10 år. Det vil på mange måder være noget af en katastrofe.

Problemet løser sig ikke ved et diktat ovenfra. Det kræver engagement og dermed at der er mange, der lægger forslag og ideer frem eller diskuterer problemerne i mere eller mindre offentligt regi. KVANT stiller naturligvis gerne sine spalter til rådighed til formålet.

Rapporten kan bestilles ved henvendelse til Undervisningsministeriets Forskningsafdeling, telefon: 33 11 43 00.

“A Flying Cirkus of Physics”

Nina Troelsgaard Jensen, Stud.scient. ved Københavns Universitet

De fysikstuderendes Legestue har haft sin internationale debut; 10 studerende deltog i begyndelsen af oktober i den såkaldte “National Science Week” i Holland.

De første forberedelser blev taget ved en konference afholdt i 1990 af EPS (European Physics Society). Her deltog 5 studerende fra Fysisk Laboratorium, Københavns Universitet. Under konferencen blev der udskrevet en konkurrence, hvor deltagerne skulle præsentere deres interesseområder ved at fremstille en plakat. De danske deltagere valgte at præsentere ideen om Legestuen (“Megen læsning gør stolt og pedantisk, megen iagttagelse gør klog, medgørlig og nyttig” G.C. Lichtenberg 1742-99) og vandt førsteprisen. En af de andre deltagere på konference var PR-chefen for universitetet i Amsterdam og specielt for NIKHEF (Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica), Jacques Visser. Han fandt ideen god, så god at han inviterede Legestuen til at deltage i et planlagt PR-fremstød på NIKHEF i oktober 1991, uden nogensinde at have set os i funktion. Udfordringen blev selvfølgelig taget op og det første tegn på internationaliseringen blev verifikationen af Legestuens udenlandske navn, hvorunder den var blevet præsenteret på EPS-konferencen: A Flying Cirkus of Physics.

Torsdag den 3. oktober drog 10 studerende afsted mod Amsterdam. 3 kørte turen i en lejet varevogn medbringende udstyr til godt 40 eksperimenter og de resterende 7 tog nattoget. Deltagernes humør svingede natten igennem mellem forventningens glædesrus og en voksende bekymring for hvilke forventninger vi ville blive mødt med. Alle bekymringer blev imidlertid gjort til skamme da vi fredag ved frokosttid mødte på NIKHEF. Jacques Visser og hans usædvanligt effektive sekretær Jolanda Maas udstyrede os straks med skilte der åbnede de fleste døre og gav gratis frokost hver dag. Rundt omkring hang plakater med Legestuens navn og det var tydeligt at den danske delegation var en ventet attraktion. De forventninger der stilledes til vores formåen lå på et ganske andet niveau end de forestillinger vi havde gjort os under togturen.

Fredagen blev brugt til at pakke udstyret ud og opstille eksperimenterne i en stor montagehal på NIKHEF. Hallen var indrettet som en slags marked med overdækkede borde og vi fordelte os blandt de eksperimenter hollænderne selv havde opstillet.

Jacques Visser havde gjort et stort arbejde med at advisere pressen og lørdag var der fjernsynsoptagelse. I det hele taget gjorde pressen et stort nummer ud af den nationale naturvidenskabelige uge som vi var en del af.

Søndag gik det løs for alvor. Universitetet som helhed holdt åbent hus og på NIKHEF startede vi om morgenen med at fremvise og forklare eksperimenterne for nogle hollandske studerende, der så forklarede forsøgene og fysikken bag dem for de besøgende på hollandsk. I løbet af

søndagen besøgte 2000-3000 mennesker NIKHEF og dette store antal skal ses i lyset af at NIKHEF kun var ét ud af alle de af universitetets institutter der deltog i OPEN DAG - arrangementet. Vores opgave i løbet af dagen bestod i at sørge for at intet manglede og i det hele taget træde til hvis der var brug for det. Systemet med at forklare på engelsk til nogle hollandske studerende om formiddagen og så være tjenende ånder resten af dagen gentog sig de følgende dage til og med torsdag, blot var de besøgende nu skoleklasser der havde bestilt tid til at komme.

Fredag var fridag og vi benyttede lejligheden til at se Amsterdam i dagslys og til at få genoprettet søvnbalancen. Om aftenen havde de hollandske studerende arrangeret “DÅNSK PARTY”.

Lørdag skulle vi deltage i et arrangement på Royal Tropical Institute. Bygningen er oprindeligt bygget som museum for de mange hollandske kolonier, deraf navnet, og det er en utrolig flot bygning med søjler og marmor over det hele. Her i disse fornemme omgivelser satte vi, under nøje overvågning af vagtpersonale, vores forsøg op. Igen kom de hollandske studerende og showet kørte. Blandt de besøgende var en del deltagere fra en konference om formidling af naturvidenskab og da Legestuen har ambitioner om at udbygge sine internationale kontakter lagde vi alle kræfter i at præsentere os så attraktivt som muligt. Og det gav bonus: A Flying Cirkus of Physics er inviteret til at deltage i en 2 ugers Science-festival i Edinburgh i april 1992. Vi har en svævende invitation til National Science Week i Amsterdam igen i 1992 og endelig arbejdes der på deltagelse i Verdensudstillingen i Sevilla i Spanien i 1992.

Fysisk Laboratoriums Legestue er som det ses blevet en stor succes. Ikke alene udbredes kendskabet til og interessen for fysik, de deltagende studerende lærer også en masse om det at formidle et sædvanligvis vanskeligt tilgængeligt stofområde. Legestuens dagligdag er at fungere som forsøgslokale for fysikstuderende legebørn i alle aldre. Her kan man efterprøve allehånde teorier i praksis. Derudover arrangeres fremvisning af forsøg for skoleklasser, enten på laboratoriet eller ude på skoler og biblioteker. Som det sidste nye er vi begyndt at lave naturvidenskabelige shows på Eksperimentarium i København i samarbejde med den biokemiske pendant til Legestuen. Endelig har vi bibeholdt vores oprindeligt eneste udadvendte aktivitet: 2 gange 2 dage med åbent hus i Studenterhuset i Købmagergade. Vi fylder huset med eksperimenter og så kan folk på Strøget opleve lidt af fysikkens forunderligheder, ganske gratis.

BOGANMELDELSE

Niels Bohr's Times. In Physics, Philosophy and Polity.

Abraham Pais

Clarendon Press, Oxford 1991. ISBN 0-19-852049-2.

(Tilsendt fra Harck og Gjellerups Boghandel, Fiolstræde 31, 1171 København K) Pris: 375 kr.

Forfatteren af dette imponerende værk er fysiker, hollænder af fødsel og uddannelse, men Pais lærte sig omgående dansk, da han i 1946 kom på studiebesøg på Institutet for teoretisk Fysik i København. Han kom snart i nært samarbejde med Niels Bohr, og senere har de også arbejdet sammen, i Princeton og andre steder. Engang i 80'erne spurgte en fremtrædende yngre fysiker Pais om, hvad det egentlig var, Bohr havde gjort; spørgeren kendte godt Bohrs atomteori fra 1913, men den var jo forlængst erstattet af kvantemekanikken. Pais fortæller i denne bog om Bohrs betydning for fysikken, for dens filosofiske baggrund, og for samfundet, og det er åbenbart på tide med en sådan biografi.

Vi læser om Bohrs slægt gennem generationer, om hans barndom, om hans studietid i København, i Cambridge hos J. J. Thomson og i Manchester hos Rutherford, og om hans mangeårige arbejde for oprettelsen af **Institutet**. Institutet startede småt, men udviklede sig til et internationalt anerkendt mekka for atomfysik, hvortil fysikere strømmede fra alverdens lande: Kramers, Hevesy, Heisenberg, Pauli, Gamow,... Pais fortæller livligt og let læseligt herom, og samtidig ret bredt om baggrunden for begivenhederne, fysikkens udvikling gennem tidligere tider. Vi kommer om ad Brahe, Bartholin, Rømer, Ørsted og andre danske, sammen med Kirchhoff, Bunsen, Maxwell, Balmer og mange flere. Fysikere kan her opfriske, hvad de hørte i studietiden, og såvel fysikere som ikke-fagfolk vil kunne have fornøjelse og udbytte af Pais' fremstilling. Bogen er ikke nogen lærebog i fysik, omend mange fysiske emner omtales; snarere må den karakteriseres som uddrag af fysikkens historie med hovedvægt på de for en Bohr-biografi relevante områder.

Omtalen af Bohrs atomteori fra 1913 hører ikke til de bedste afsnit i bogen. Ovenikøbet præsenteres man endnu en gang for den udtalelse, at Bohr kun havde beskæftiget sig med cirkulære baner, og at han naturligvis ikke vidste noget om degenerationen af de elliptiske baner (side 187); dette modsiges klart af Bohrs foredrag i Fysisk Forening¹, som Pais ellers, i lighed med andre, anser for den klareste redegørelse for Bohrs 1913 arbejde. Der er andre små skønhedspletter, men de overskygges dog langt af bogens gode sider, først og fremmest det udmærkede billede, som den tegner af Bohrs personlighed og af hans enorme betydning.

Atomteorien fra 1913 førte til en rivende udvikling inden for den teoretiske og den eksperimentelle atomfysik, både i København og andre steder. Bohrs næste store indsats var, som fremhævet af Pais, hans *korrespondensprincip*, der bl.a. tillod ham at formulere en række udvalgsregler, og som var et vigtigt hjælpemiddel ved opstillingen af Bohrs periodiske system, fremsat i det år (1922), han fik Nobelprisen. Bohrs betydning for fremkomsten af kvantemekanikken (1925-26) omtales detaljeret, selv om Pais betoner, at det ikke er kvantemekanikkens historie, han skriver. Bohrs *komplementaritetsbegreb*, oprindeligt fremsat i Como 1927, men

skærpet i flere omgange i den følgende snes år, gør ham til en af dette århundredes betydeligste filosoffer (efterfølger af Kant), siger Pais. I denne forbindelse fremhæver Pais Bohrs definition af "the word **phenomenon** to refer exclusively to observations obtained under specified circumstances, including an account of the whole experiment" (At sammenligne med Kants "das Ding an sich").

I forbindelse med omtalen af komplementaritet og Bohr-Einstein diskussionen bringer Pais et par værdifulde sider med spørgsmål, som hans studerende har stillet, sammen med hans svar dertil. På spørgsmålet, om Bohr var en guru, omgivet af tilbedende disciple, svarer Pais, at Bohr efter bedste evne forsøgte på simpel vis at meddele sine tanker til andre, men at han ikke var særligt god til det; at "discipline" respekterede ham, men også ofte førte heftige diskussioner med ham (hvad han iøvrigt opmuntrede til). Einstein sagde om Bohr: "he utters his opinions like one perpetually groping and never like one who believes he is in possession of definite truth".

I 1930'erne gennemgik Institutet en meget betydelig udvidelse i forbindelse med Bohrs omstilling til kernefysik. Bogen omtaler Bohrs indsats som "fund raiser" for at skaffe penge til bygninger og accelerators m.v., såvel som hans videnskabelige indsats ved fremsættelsen af compound-kerne-modellen, som i en årrække var den dominerende teori for kernereaktioner, og som han med stort held udnyttede i sit berømte arbejde sammen med Wheeler, "Mechanism of Nuclear Fission" (1939).

Som bekendt måtte Bohr i 1943 flygte fra Danmark. Han blev involveret i arbejdet med atombomben, men endnu mere i spekulationer over, hvordan Verden ville være efter atombomben. I samtaler med Roosevelt og Churchill stillede han forslag om åbenhed, men det kom der ikke noget ud af. Kravet om åbenhed fastholdt han imidlertid gennem de følgende år og gav udtryk for det i sine "Open Letters" til de Forenede Nationer i 1950 og 1956. Han var således en "pioneer of Glasnost", men i det politiske liv blev dette først i hundredåret for hans fødsel, 1985, fulgt op af Gorbachov. På det videnskabelige område har internationalt samarbejde og åbenhed derimod været i højsædet på Bohrs Institut, både før og efter anden verdenskrig, ligesom på de institutioner, som Bohr senere har stået fadder til: Nordita, CERN og Risø.

I hvert af bogens 23 kapitler findes en lang liste med henvisninger. Til slut er der et personregister med over 400 navne og et omfangsrigt sagsregister samt et appendiks med en kronologisk oversigt over de vigtigste begivenheder.

Referencer:

- 1) N. Bohr, Fysisk Tidsskrift **12**, 97 (1914) eller **60**, 185 (1963).

N. O. Lassen, Niels Bohr Institutet

Vejledning for forfattere

Redaktionen af KVANT modtager meget gerne artikler fra læserne. Indholdet af artiklerne bør være forståelig for personer med interesse for fysik - således at en god gymnasieelev vil få noget ud af at læse artiklen. Det gør ikke noget at der optræder enkelte (og enkle) formler i teksten. Illustrationer til artiklerne er meget velkomne.

Det er håbet at der vil komme en række rubrikker - der er allerede en debatside, som er åben for indlæg om alt hvad der rører sig om fysik. Bladet vil også bringe meddelelser fra Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse, ligesom omtale af arrangementer, der kan have interesse for fysikinteresserede vil blive bragt. Da der kun kommer fire numre om året (se planlagte udgivelsestidspunkter nederst på denne side) skal der gives meddelelse om et givet arrangement i god tid, hvis det skal kunne komme med i bladet.

Redaktionen vil også stræbe efter at kunne bringe korte notitser med friske nyheder og anmeldelser af bøger af interesse for fysikere.

Vejledning i udformning af artikler til KVANT

For at lette produktionen modtages artikler helst på elektronisk facon. Det kan enten være som elektronisk post til e-mail adressen

kvant@dfi.aau.dk

eller på en DOS-formatet diskette, der sendes til

KVANT

c/o Institut for Fysik og Astronomi

Ny Munkegade

8000 Århus C

eller afleveres til et redaktionsmedlem sammen med eventuelle figurer, og - *meget vigtigt* - et billede og en præsentation af forfatteren, i stil med de præsentationer, der findes i slutningen af hver artikel i dette nummer.

Debat

Debatsiderne er åbne for indlæg om emner der har med fysik at gøre. De første to indlæg har handlet om forsknings- og undervisningspolitik, men der er mange andre emner der kan tages op.

Korte bemærkninger til en forhåbentlig interessant debat er også velkomne. Debatindlæg sendes til redaktionen.

Teksten kan være skrevet i WordPerfect, Word, T_EX eller som en ren ASCII-fil. Hvis det ikke er muligt at aflevere teksten i et af disse formater, kan en papirudgave af artiklen naturligvis anvendes.

Formler og specielle symboler kan indsættes i teksten med WordPerfect eller T_EX. De modtages dog også gerne på papir.

Illustrationer og billeder til artiklerne afleveres separat - det er (endnu) en kvalitetsmæssig fordel at indsætte disse i artiklen på sædvanlig facon. Undlad venligst at afsætte plads til dem i teksten, men placer figurforklaringen til sidst eller for sig selv.

Tabeller og opstillinger ønskes enten i WordPerfect format eller som opstillinger med tabulatorer. Brug ikke for megen energi på at lave "snedige" opstillinger med linier og lignende.

- Overskriften skrives med store bogstaver.
- Forfatternavne skrives med kursiv.
- Afsnitoverskrifter skrives med fed skrift.
- Der er ingen tomme linier mellem afsnit, men de indledes med en indrykning (tabulering).
- Referencer anføres i teksten med et løftet ciffer, og anføres til sidst i artiklen med nummer, forfatter, artikel (eventuelt bind-nummer med fed skrift), sidetal og årstal i parentes.
- Husk et billede og en kort præsentation af forfatteren.

Tidsfrister

Korte notitser og meddelelser til nummer 2, 1992, der vil udkomme i maj, skal være indsendt senest den 5. april.

Fremover er produktionsplanen at der vil udkomme et nummer i månederne februar, maj, august og oktober/november. Artikler til disse numre skal være afleveret senest den 1. januar, 15. marts, 15. juni og 15. september.

Abonnement på KVANT

koster 135 kr for en årgang og vil blive opkrævet pr. giro. Nye abonnenter vil modtage eventuelle tidligere numre af den løbende årgang. Medlemmer af Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse vil modtage bladet som et medlemsblad.

Abonnement tegnes ved at skrive til

Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø

Drømme-sx til drømme-pris



Køreklar Tulip dc *compact*
386sx, 40 Mb,
14" VGA lavstrålingsskærm,
DOS 5.0 og Tulip Menu

Kr. 7.990,-
(Inkl. moms kr. 9.988,-)

Merpris farveskærm kr. 2.000,-
Merpris 100 Mb kr. 2.000,-
Priser ekskl. moms

Tlf. 86 91 11 55 oplyser nærmeste forhandler!

Tulip[®] computers
Det europæiske kvalitetsmærke