

LEP – verdens hurtigste accelerator

Steno Museets udstilling Det nysgerrige menneske rummer et afsnit, der handler om, at udforskningen af naturen ofte kræver særlige redskaber. F.eks. at man er nødt til at bygge nogle af verdens største måleinstrumenter for at studere stoffets mindste dele.

Den helt centrale museums-genstand i udstillingen *Det nysgerrige menneske* er et

10 meter langt og lige så mange tons tungt stykke af det, der engang var verdens største partikelaccelerator.

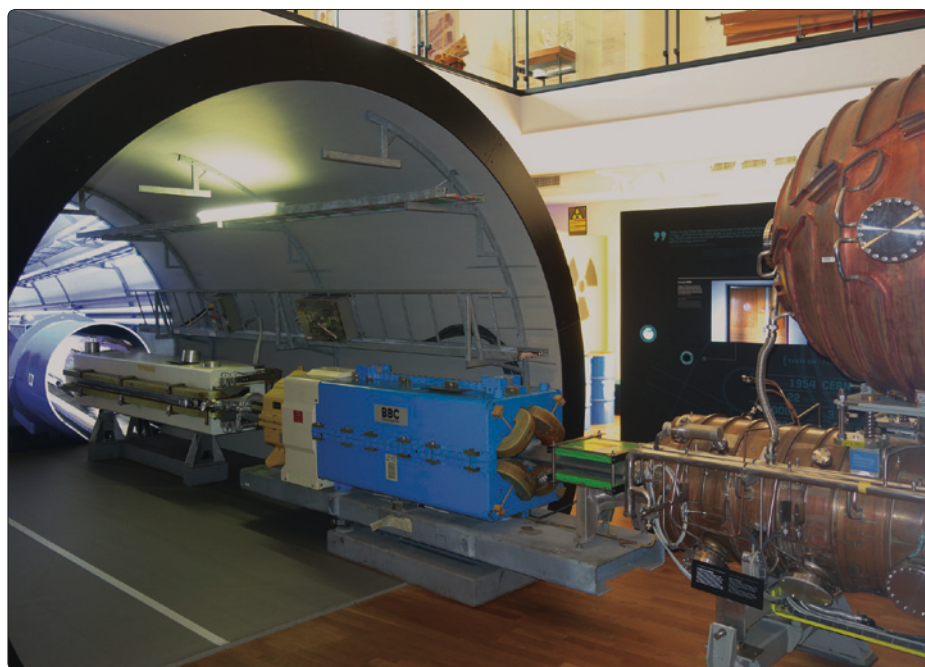
For at give et realistisk indtryk af dette både unikke og monumentale apparat er acceleratordelene placeret i et rekonstrueret stykke af den næsten 27 km lange underjordiske tunnel, hvori de i sin tid blev brugt til at accelerere elektroner op til lysets hastighed. Der kan man

så kikke nærmere på de enorme elektromagneter, som blev brugt til at styre elektronerne.

Men hvorfor har man overhovedet bygget så stor en accelerator? Hvordan var den opbygget, og hvordan fungerede den?

Flere og flere partikler

I årene efter 2. verdenskrig blev der flere steder i verden bygget stadig kraftigere



I udstillingen Det nysgerrige menneske kan man opleve 10 m af partikelacceleratoren LEP, som i sin tid var verdens største. Foto: Hans Buhl.



LEP-acceleratoren, som havde en omkreds på næsten 27 km, lå under jorden mellem Genève's lufthavn og Jura-bjergene. Selve CERN-området ligger til venstre i billedet, hvor man også ser et par af de mindre acceleratorer afmærket. Den stiplede linje markerer grænsen mellem Schweiz og Frankrig. Foto: CERN.

“atomknusere” med henblik på at studere stoffets grundlæggende struktur ved at smadre atomkerner hårdere og hårdere mod hinanden og studere de fragmenter, der blev dannet i sammenstødene.

Det førte til, at fysikerne opdagede flere og flere eksotiske og ekstremt kortlivede elementarpartikler. Efterhånden tegnede de mange forskellige partikler et ret uoverskueligt billede af stoffets opbygning. En overgang talte man ligefrem

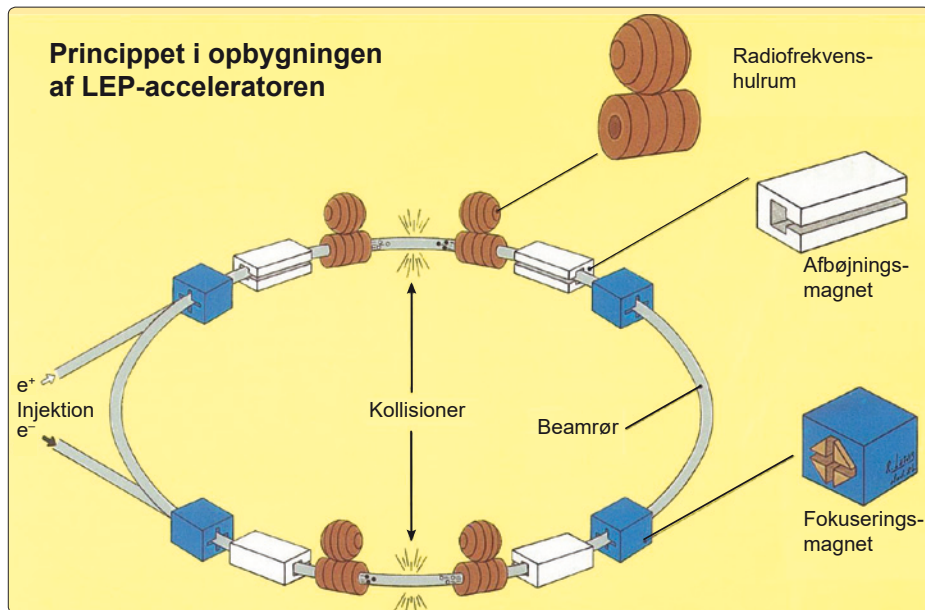
om the Particle Zoo, fordi der hele tiden dukkede nye partikler op. Som den ansete fysiker Enrico Fermi sagde til en af sine studerende: “Unge mand, hvis jeg kunne huske navnene på alle disse partikler, ville jeg have været botaniker.”

Teorier og eksperimenter

Opdagelsen af de mange nye partikler satte de teoretiske fysikere på hårdt arbejde i forsøget på at finde et system i rodet. Lidt i stil med, hvordan Mendelejev

et århundrede tidligere havde ordnet grundstofferne i det periodiske system. Efter adskillige frugtesløse hypoteser fremkom der i 1960'erne en overbevisende teori om, at de mange partikler blot var forskellige kombinationer af nogle endnu mere elementære partikler, som kaldtes kvarker. Ligesom atomer er forskellige kombinationer af elektroner, protoner og neutroner.

Omvendt satte teoretikerne også eksperimentalfysikerne i sving, fordi deres te-



Elektronerne og positronerne løber inde i det grå, lufttomme beamrør. De accelereres i de brune radiofrekvenshulrum, afbøjes i de lange, hvide hestekomagneter og fokuseres i de blå firpolede magneter, der fungerer som magnetiske linser. Rundt om kollisionstederne var der bygget store detektorer. Tegning: CERN.

orier af og til forudsagde helt nye partikler, som man så skulle i gang med at lede efter. Blandt disse hypotetiske partikler var de såkaldte W- og Z-partikler, som ifølge teorien overfører den svage kernekraft, som bl.a. er ansvarlig for β -henfald af radioaktive atomkerner. Hvis man kunne dokumentere, at de faktisk findes, var man et stort skridt nærmere at forstå dette fundamentale fænomen.

I forsøget på at fastslå eksistensen af disse partikler,

der blot fandtes som ligninger på papir, udviklede eksperimentalfysikerne nye og avancerede eksperimenter, som var specielt designet til at "kikke" efter dem. Det gav resultat i 1983, hvor det lykkedes et par forskningsgrupper på CERN, det fælles europæiske center for kerne- og partikelfysik i Genève, at påvise partiklerne ved hjælp af en cirkulær accelerator på næsten 7 km i omkreds, som skød stråler af protoner og anti-protoner mod hinanden.

LEP: En W- og Z-fabrik

Selvom eksperimenterne havde opfyldt deres formål, vidste man på forhånd, at de ikke ville være i stand til at studere de nye partiklers egenskaber i større detalje. Derfor var det allerede i 1981 blevet besluttet at bygge en meget større accelerator, som var særlig velegnet til at frembringe utallige Z'er og W'er, så man kunne undersøge dem grundigere. Denne maskine, som var verdens største, stod færdig i 1989. Og det

er den, som man nu kan opleve et stykke af på Steno Museet.

Den ringformede accelerator, som havde en omkreds på 26,7 km, blev bygget i en tunnel ca. 100 m under jordens overflade. Byggeriet, som kostede over 7 mia. kr., var det største anlægsprojekt i Europa, indtil byggeriet af Eurotunnelen gik i gang i 1988.

Acceleratoren var konstrueret til at sende stråler af hhv. elektroner og anti-elektroner (positive elektroner, som derfor kaldes positroner) hver sin vej rundt i ringen, så de kunne bringes til at kollideres på udvalgte steder. Deraf navnet Large Electron-Positron Collider, LEP.

Pointen ved denne type

accelerator er, at ingen materielle partikler ifølge naturens love kan bevæge sig hurtigere end lysets hastighed. Så hvis man bliver ved med at accelerere f.eks. elektronerne i LEP, vil de i henhold til Einsteins relativitetsteori reagere ved at bliver tungere og tungere i stedet for at bevæge sig hurtigere, jo nærmere de kommer lysets hastighed.

Når LEP kørte med sin højeste energi, blev elektronerne ca. 200.000 gange tungere, end når de er i hvile! Det var denne enorme ekstra masse, der blev omdannet til bl.a. W- og Z-partikler i sammenstødene.

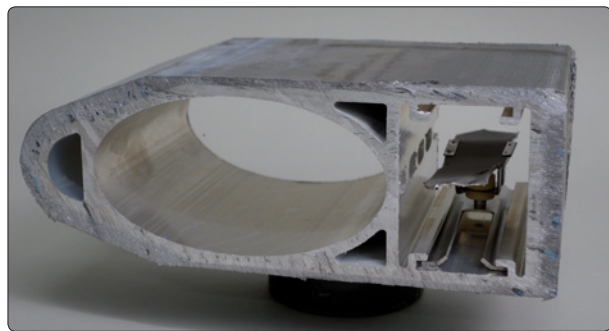
Dette svarer til, at elektronerne i LEP var under en milliardtedel procent fra at

bevæge sig med lysets hastighed. LEP-acceleratoren har stadig verdensrekorden for menneskeskabte partikelhastigheder, selvom der findes andre accelerators med højere energier.

Ekstrem præcision

Når elektronerne og positronerne susede afsted med næsten lyshastigheden, kunne de nå at tage over 11.200 omgange i sekundet. Det siger sig selv, at der så ikke måtte være ret meget slinger i kursen, når de skulle holdes i den samme bane i timevis. Derfor var mange af de dele, som acceleratoren var opbygget af, placeret med en nøjagtighed på 0,1 mm. Med denne nøjagtighed kunne LEP f.eks. "mærke" de små deformationer, som Månen skaber af Jorden gennem tidevandskræfterne.

LEP-acceleratoren var et ekstremt komplekst apparat, som bestod af utallige dele til at accelerere, overvåge og kontrollere elektronstrålerne. Men der var fire grundelementer, som udgjorde hovedparten af acceleratoren. Disse fire grundelementer, som alle kan ses i Steno Museets udstilling, er beskrevet i det følgende.



Det ovale beamrør målte 13 cm × 7 cm. De små kanaler langs røret var til kølevand. Metalbåndet i det rektangulære rum til højre havde en speciel belægning, som fangede eventuelt tilbageværende luftmolekyler i røret ligesom fluepapir. Foto: Hans Buhl.

Beamrøret

Når elektronstrålerne skulle bevæge sig med lysets hastighed, var det vigtigt med "fri bane". Derfor løb strålerne i nogle blyforede, vandkølede aluminiumsrør med et meget dybt vakuum, så der ikke var nogen luftmolekyler, de kunne støde ind i. Lufttrykket i røret var mere end 10^{12} gange lavere end udenfor. Det er ikke meget mere end trykket på overfladen af Månen, som ikke har nogen atmosfære. Det betød, at en elektron i gennemsnit kunne bevæge sig et lysår, inden den stødte ind i noget.

Afbøjningsmagneter

Til at give elektronstrålen en krum bane, så den kunne løbe rundt og rundt i ringen, udnyttede man, at en ladet partikel afbøjes, når den bevæger sig i et magnetfelt. Derfor var der på alle de krumme stykker af ringen anbragt nogle langstrakte

elektromagneter med hesteskoform. Tidligere havde man lavet denne slags magneter af massivt jern, men LEP's dipolmagneter blev lavet som en sandwichstruktur af skiftevis jernplader og cement, hvilket gjorde dem både lettere og billigere. I alt var der over 3300 afbøjningsmagneter med en samlet længde på omkring 20 km.

Fokuseringsmagneter

En elektronstråle har en tilbøjelighed til at sprede sig, bl.a. fordi elektronerne i strålen har samme ladning og derfor frastøder hinanden. Derfor var man også nødt til at gøre noget for at fokusere strålen, så den blev så tynd og intens som muligt. Det gjorde man med særlige elektromagneter med fire eller seks poler, der fungerede som magnetiske linser. I alt var der ca. 800 af de 4-polede quadrupolmagneter og ca. 500 af de 6-polede sextupolmagneter i LEP-acceleratoren.

Accelerationsenheder

Den fjerde og sidste hovedbestanddel var de "motorer", der accelererede elektronerne til nær lysets hastighed. De var baseret på, at ladede partikler accelereres, når de befinder sig i et elektromagnetisk felt. Så populært sagt fyldte man nogle tønder på beamrøret med radiobølger, som partiklerne kunne "surfe" på og derved komme op i fart. Derfor kaldes de også for radiofrekvenshulrum. Der var placeret 128 af disse accelerationsenheder rundt langs ringen.

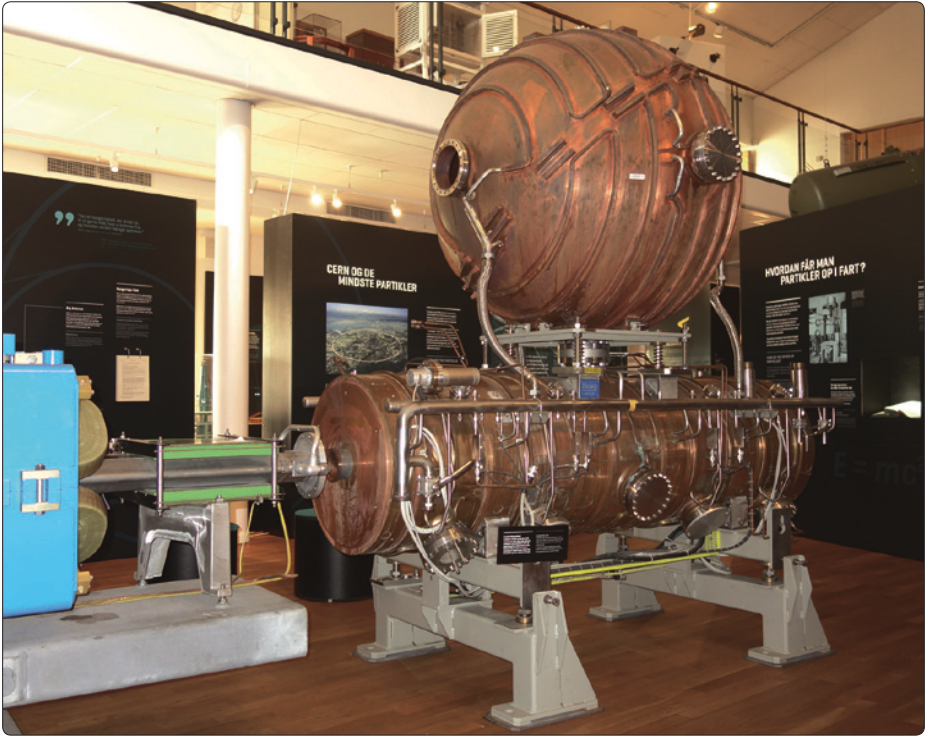
Hvad lærte vi af LEP

Et helt centralt resultat af LEP-eksperimenterne er, at det var muligt at bestemme W- og Z-partiklernes masse med meget stor nøjagtighed. Da disse masser indgår i mange af de partikelfysiske ligninger, har det haft stor betydning for nøjagtigheden af partikelfysikkens grundlæggende teori, standardmodellen.

Der blev ligeledes lavet meget grundige undersøgel-



Hovedparten af LEP-acceleratoren bestod af de lange, hvide hesteskomagneter, som afbøjede elektronstrålerne, så de krummede lige tilpas. Ind imellem var der så anbragt fir- og sekspolede fokuseringsmagneter. Tegning: CERN.



Accelerationsenheden fra LEP fylder godt i udstillingen. Kuglen ovenpå havde til formål at spare energi. Man havde nemlig beregnet, at radiobølgerne, som accelererede partiklerne, mistede mindre energi, hvis de blev flyttet op i kuglen, når der ikke kom partikler igennem cylinderen forinden. Foto: Hans Buhl.

ser af, hvor hurtigt den ekstremt ustabile Z-partikel henfalder, og hvor mange forskellige partikler, den henfalder til. Derved kunne det fastslås, at der findes tre og kun tre forskellige generationer af elementarpartikler, hvilket også er essentielt i forhold til standardmodellen.

Alting har en ende

LEP blev anvendt til forsøg

i 11 år, og det anslås, at der i den periode blev brugt ca. 2000 mandår på forskningsarbejdet. Men alting har en ende – selv en ring – og i november 2000 blev LEP lukket for at give plads til en endnu kraftigere accelerator i den samme tunnel, nemlig den såkaldte Large Hadron Collider, LHC, som kolliderer protoner i stedet for elektroner

og positroner. Det giver alt andet lige meget mere energi i sammenstødene, da protoner er næsten 2000 gange tungere end elektroner. Derved blev det i 2012 muligt at finde endnu en teoretisk forudsagt partikel, nemlig Higgs-partiklen, efter flere årtiers søgen. Men det er en helt anden historie.

Hans Buhl