

LHC-acceleratoren

Af Mogens Dam, Gruppen for eksperimentel højenergifysik, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Efter en 15 år lang design- og konstruktionsperiode står LHC-acceleratoren dette efterår endelig over for sin "jomfrurejse". I artiklen gennemgås argumenterne, der ledte frem til LHC, og acceleratorens vigtigste egenskaber.

Historisk perspektiv

De første tanker omkring en *Large Hadron Collider* (LHC) ved CERN – det europæiske forskningslaboratorium for partikelfysik ved Geneve – daterer helt tilbage til slutningen af 1970'erne. På det tidspunkt leverede CERN's SPS-accelerator protoner med energier på op til 300 GeV. I begyndelsen af 1980'erne udvidede man SPS'en, så man i samme strålerør kunne accelerere protoner og anti-protoner i modsat omløbsretning. Ved at bringe protoner og anti-protoner til kollision opnåede man en langt højere effektiv kollisionsenergi, hvilket i 1983 ledte til den eksperimentelle eftervisning af vektorbosonerne, Z^0 og $W^\pm$. Fra dens formulering i slutningen af 1960'erne havde teorien, som siden blev kendt under betegnelsen *Standardmodellen*, vundet større og større anerkendelse. Eftervisningen af $W^\pm$ - og Z^0 -bosonerne var en stor succes for Standardmodellen, som ikke alene havde forudsagt deres eksistens, men også havde givet korrekte forudsigelser om deres masser.

Hovedformålet med CERN's næste store acceleratorprojekt, *Large Electron Positron collider* (LEP), var en præcis udmåling af egenskaberne af Z^0 og $W^\pm$. I modsætning til SPS, kolliderede LEP ikke protoner mod anti-protoner, men derimod elektroner mod positroner. Dette har den fordel, at idet elektroner og positroner er elementære partikler, vil disse ved kollision annihilere totalt, hvorved den fulde kollisionsenergi står til rådighed til produktion af nye partikler. En stråleenergi på 46 GeV var derfor tilstrækkelig for produktion af Z^0 (hvileenergi 91 GeV), mens W -bosoner (hvileenergi 80 GeV), som må skabes parvist, produceredes for stråleenergier over 80 GeV.

Det vel nok vigtigste resultat fra LEP (1989–2000) er, at de stofflige elementarpartikler optræder i Naturen i præcis tre *generationer*. Derudover har LEP bidraget til meget præcise test af Standardmodellen. Standardmodellen har forholdsvis få frie parametre og forudsiger præcise relationer mellem forskellige målbare størrelser. Ingen signifikante afvigelser fra modellens forudsigelser blev observeret ved LEP, og også senere målinger har bekræftet modellens indre konsistens. Centralt i Standardmodellen står *Higgs-mekanismen*, som forklarer, hvordan elementarpartikler får masse. Uden Higgs-mekanismen er kun masseløse partikler tilladte. Udover at generere masser forudsiger Higgs-mekanismen eksistensen af en ny partikel, den såkaldte *Higgs-boson*. I sig selv giver Standardmodellen ingen forudsigelse for Higgs-bosonens masse,

men LEP var i stand til at sætte en nedre grænse på 114,1 GeV/ c^2 ved at kigge efter direkte tegn efter Higgs-bosonen. Derudover kan man med udgangspunkt i de præcise LEP-data benytte Standardmodellen til at give en indirekte forudsigelse af Higgs-massen. Man får herved en øvre grænse på knap 200 GeV/ c^2 .

Et vigtigt mål for LHC-programmet er eftervisningen af Higgs-bosonens eksistens. Hvis det virkelig skulle lykkes at finde en Higgs-boson med en masse i overensstemmelse med LEP-grænsen, ville det være en umådelig succes for Standardmodellen. Imidlertid lader Standardmodellen mange grundlæggende spørgsmål åbne, og der er god grund til at søge videre efter en underliggende mekanisme, der kan give dybere indsigt. Ét af disse grundlæggende spørgsmål er, *hvorfor* naturen har valgt det således, at de stofflige elementarpartikler optræder i præcis tre generationer. For et muligt svar må man kigge hinsides Standardmodellen efter såkaldt *ny fysik*.

LHC-projektet

LHC-projektet blev officielt godkendt i 1994 som CERN's næste skridt i udforskningen af naturens mindste bestanddele. Med projektet ønskede man at tage et skridt på omkring en størrelsesorden op ad energiskalaen. Acceleratoren, som skulle kolliderer protoner mod protoner, skulle konstrueres i LEP-tunnellen, og dermed have en omkreds på 27 km. Stråleenergien skulle være 7000 GeV.

Med LHC vender CERN tilbage fra at kolliderer elektroner og positroner til at kolliderer protoner. Grænsen for hvor højt man kunne nå i energi med en cirkulær elektron-accelerator var simplethen nået med LEP. For at holde en partikel-stråle i en cirkulær bane må strålen afbøjes ved hjælp af et magnetfelt. Herved udsendes såkaldt *synkrotronstråling*. Energita-bet herved er proportional med $(E/m)^4/\rho^2$, hvor E og m er partiklens energi og masse, og ρ er banens krumningsradius. I LEP's sidste fase ved en stråleenergi på 100 GeV betød dette et energitab på 2,8% per omgang (96 mikrosekunder) – et energitab, der måtte kompenseres ved fortsat acceleration af strålerne. Ved at gå over til protoner forøges m med en faktor 1836, hvorved synkrotronstrålingen i praksis elimineres.

Ved skiftet til protoner opstår der imidlertid et andet problem. En proton er ikke en elementarpartikel, men et sammensat system bestående af *kvarker* og *gluoner*. Energien, der er til rådighed til produktion af nye partikler, er dermed ikke givet ved de to kolliderende

protoners fulde energi, men kun ved den brøkdel, der bæres af de to bestanddele, som faktisk kolliderer. Og hvor meget energi bærer så hver af protonens elementære bestanddele? Det kan man ikke svare præcist på, idet der løbende sker en udveksling af energi mellem bestanddelene. Yderligere er antallet af bestanddele ifølge kvantemekanikken ikke veldefineret. Bestanddelenes energi er dermed givet ved en sandsynlighedsfordeling. Hvis vi som en tommelfingerregel går ud fra, at hver af bestanddelene bærer omtrent en tiendedel af protonenergien, ser vi, at vi med en stråleenergi på 7000 GeV får dækket området op til omkring 1000 GeV i eftersøgningen efter ny fysik.

Luminositet

En af de største eksperimentelle udfordringer ved at kolliderer protoner ved høj energi er det meget ufordelagtige forhold mellem sandsynligheden for at producere en interessant begivenhed (indeholdende fx. en $W^\pm$, en Z^0 , eller måske endda en Higgs-boson!) og den totale sandsynlighed for at de to protoner vekselvirker med hinanden. Ved LHC ligger dette forhold på mellem 10^{-7} (for $W^\pm$) og 10^{-11} (for Higgs). Hvis det overhovedet skal give mening at kigge efter Higgs-partiklen, må vi kræve, at der produceres noget i retning af én i timen. Man ser da hurtigt, at acceleratoren må kunne levere omtrent 10^9 proton-proton-vekselvirkninger per sekund. Raten af begivenheder udregnes som produktet af et *tværsnit*, som er en egenskab knyttet til den betragtede proces, og intensiteten, hvormed de to stråler rammer hinanden—den såkaldte *luminositet*. Totaltværsnittet for proton-proton-vekselvirkninger ved LHC er knap 100 mb, hvor 1 mb er 10^{-27} cm^2 . Der kræves dermed en luminositet på $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, som da også er designværdien for LHC.

Netop hensynet til den høje luminositet var afgørende for, at man valgte at kolliderer protoner mod protoner frem for protoner mod anti-protoner. Anti-protoner kunne simplethen ikke produceres i tilstrækkelig høj rate. Strålerne i en partikelaccelerator er ikke kontinuerte strømme af partikler. Derimod er partiklerne samlet i diskrete bundter af nogle få centimeters længde. For at maksimere luminositeten har man tre parametre at spille på:

- forøgelse af antallet af partikelbundter,
- forøgelse af antallet af partikler per bundt, og
- formindskelse af strålernes tværsnitareal i kollisionspunktet.

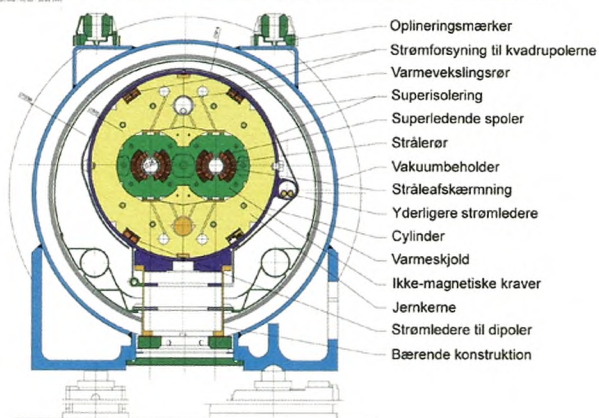
For LHC vil der være godt 10^{11} protoner i hver af de 2808 bundter, der roterer i hver retning. Bundterne er adskilt fra hinanden med kun 25 ns, hvilket stiller ekstreme krav til de eksperimentelle opstillinger. Strålerne er 16 mikrometer i diameter ved kollisionspunkterne.

Magnetsystem og køling

I LHC accelereres partikler med samme elektriske ladning i modsat omløbsretning. For at holde strålerne i deres baner, har man da, i modsætning til SPS og LEP, brug for to dipol-systemer med omvendt polaritet.

Et tværsnit af en dipol-magnet er vist i figur 1. I én kompakt struktur huses to strålerør med tilhørende elektriske vindinger til at danne det magnetiske felt. Kun ved de fire eksperimentelle områder føres de to strålerør sammen, så strålerne kan kolliderere.

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



Figur 1. Tværsnit af en dipolmagnet.

Stråleenergien på 7000 GeV begrænses af, hvor kraftigt et magnetfelt man kan opretholde i dipol-magneterne. Det kraftige felt på 8,3 Tesla leveres af ialt 1232 *superledende* dipol-magneter. Yderligere 392 kvadrupol-magneter sørger for fokusering af strålerne. Alle magneter er dobbeltløbende.



Figur 2. En 15 m lang, 27 tons tung dipol-magnet sænkes ned gennem en af adgangsskakterne til LHC-tunnelen 100 m nede.



Figur 3. Dipol-magneter på plads i tunnelen.

Hjertet i de superledende magneter er 6 mikrometer tynde tråde af en niobium-titanium-legering, som er superledende ved temperaturer under 10 K. Ved sådanne lave temperaturer vil altså en elektrisk strøm kunne løbe i trådene uden modstand. Sammen med kobber er 6000 sådanne tråde samlet til 1 mm tykke ledere, hvoraf der er anvendt ialt over 250.000 km til fremstillingen af LHC-magneterne. Den typiske strømstyrke i hver af de 1 mm tykke ledere er 800 A.

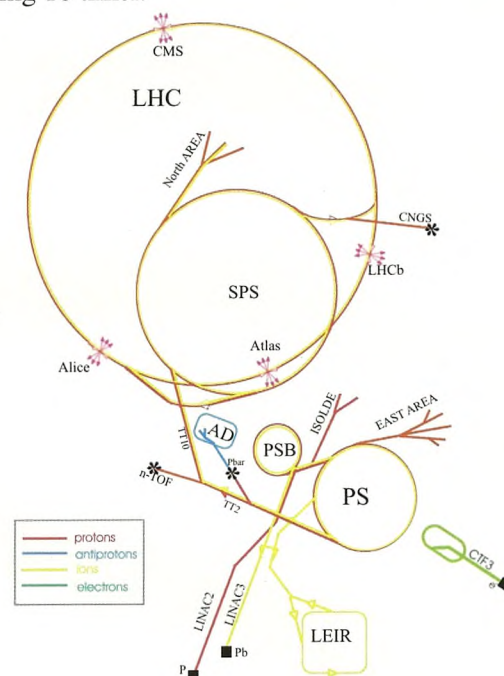
For at køre LHC er det nødvendigt at køle magneterne ned til under den kritiske temperatur, hvor de bliver superledende. Nedkølingen foregår ved hjælp af flydende helium. I princippet havde det været tilstrækkeligt at køle ned til 4,5 K, hvor helium bliver flydende, men i praksis har man valgt at køle helt ned til 1,8 K, som ligger under temperaturen, hvor helium bliver *superflydende*. Udover at have en forsvindende viskositet, har superflydende helium den egenskab, at den har en uendelig stor varmeledningsevne. Den er dermed den perfekte væske i LHC's gigantiske køleanlæg. Ialt holdes 40.000 tons materiale nedkølet til 1,8 K ved anvendelse af 96 tons helium.

Acceleratorkomplekset

Inden protonerne bringes til kollision i LHC har de allerede en lang rejse bag sig i CERN's acceleratorkompleks (figur 4).

Først skabes de nøgne protoner ved at skrabe elektronerne af en brintgas i en såkaldt *duoplasmatron*. Via en lineær accelerator (Linac 2) accelereres protonerne op til 0,05 GeV, før de føres til PSB, hvor de accelereres

op til 1,4 GeV. Derefter går turen via CERN's 40 år gamle PS, hvor de accelereres op til 28 GeV, til SPS, hvor de accelereres op til 450 GeV. Ved at vælge én af to ekstraktionslinjer fra SPS ledes protonerne enten i positiv eller negativ omløbsretning i LHC, hvor de endeligt accelereres op til kollisionsenergien på 7000 GeV. Accelerationssekvensen tager omkring 20 min, og når strålerne er på plads, forventes deres levetid at være omkring 10 timer.



Figur 4. CERN's acceleratorkompleks.



Figur 5. Luftfoto af CERN-området med LHC- og SPS-acceleratorerne indtegnet. Bemærk lufthavnen i højre side af billedet. Det primære CERN-område er det trekantede, tæt bebyggede område lige neden for SPS-ringen.

Eksperimenter

LHC er udstyret med fire eksperimentelle områder, hvor strålerne bringes til kollision. Ved hvert område er der konstrueret store eksperimentelle opstillinger i et samarbejde mellem hundredevis af fysikere fra både europæiske og oversøiske universiteter.

To af eksperimenterne, ATLAS og CMS, er såkaldte *general purpose experiments*, som har til opgave at kigge bredt efter alle typer af kendt såvel som ukendt fysik. En del af Standardmodellens parametre vil kunne bestemmes med forøget præcision, men måske mest spændende er eftersøgningen efter ny fysik.

Det tredje eksperiment, LHCb, er specialiseret til at studere fysikken af en af de tunge kvarker, *beauty-kvarken*. Herved søger man specielt at forøge vores viden om en lille asymmetri mellem stof og anti-stof, der er observeret i naturen. Denne asymmetri kan have været aktiv i Universets tidligste fase og være bestemmende for, at der i Universet næsten udelukkende findes stof og næsten intet anti-stof.

Det fjerde eksperiment, ALICE, udnytter at LHC udover proton-proton-sammenstød, også kan producere sammenstød mellem to bly-ioner. Ved sådanne sammenstød skabes ekstremt høje energitætheder, hvorved man vil være i stand til at studere stof under forhold, der ligner dem, der var rådende kort efter Big Bang.

To forskningsgrupper ved Niels Bohr Institutet deltager i henholdsvis ALICE- og ATLAS-eksperimenterne.

LHC-programmet

I LHC-programmet skelner man mellem to driftsperioder, som hver strækker sig over en periode på tre år. I første periode planlægges det at køre LHC med en luminositet på omkring en tiendedel af designværdien. Der produceres herved 10^8 proton-proton-vekselvirkninger per sekund, tilsvarende godt to vekselvirkninger for hver gang to partikelbundter mødes (hver 25 ns). I anden periode vil man gå over til at køre acceleratoren ved så høj en luminositet som overhovedet muligt. Der er to årsager til dette todelte program. For det første er LHC et meget kompliceret apparat, som det vil tage tid at lære at kende og drive optimalt. Men mindst lige så vigtigt er hensynet til eksperimenterne. Ved høj luminositet med omkring 25 vekselvirkninger per 25 ns, vil det eksperimentelle apparatur til en vis grad gå i mætning, hvorfor den eksperimentelle opløsning forventes at være dårligere. Programmet kan sammenfattes således, at man i første periode ønsker at køre eksperimenterne med optimal følsomhed, hvorved man kan foretage målinger med højeste præcision. Dernæst skrues man fuldt op for luminositeten for at udnytte LHC's potential fuldstændigt i eftersøgningen af ny fysik.

LHC står over for at starte op dette efterår. Skønt alle dipol-magneter før installeringen var testet til 8,3 T, har det vist sig, at nogle få har brug for en ekstra såkaldt "training cycle" for igen at kunne klare den

høje strømstyrke, uden at de superledende egenskaber bryder ned. Man har valgt at udsætte denne træning til vinterperioden, hvor LHC alligevel vil være lukket ned, og kører derfor i år med en lidt reduceret feltstyrke og en tilsvarende reduceret stråleenergi på 5000 GeV. Det er endnu uvist, hvor meget luminositet LHC vil levere dette efterår, men eksperimenterne håber på i det mindste, at få nok data til at kunne studere detektorernes opførsel under realistiske betingelser. Fra foråret 2009 regner man med at starte op ved design-energien på 7000 GeV og i løbet af året at nå op på den planlagte luminositet tilsvarende den første treårsperiode.

Efter 15 års forberedelse er fysikresultater fra LHC endelig inden for rækkevidde. Hvis naturen viser sig fra sin venlige side, vil vi måske allerede inden for det kommende år se de første tegn på ny fysik fra LHC.



Mogens Dam arbejdede indtil sidste år med det danske bidrag til ATLAS' spordetektor, TRT. Har det seneste år arbejdet på udvikling af algoritmer til den såkaldte triggerering, altså online udvælgelse af interessante begivenheder.

PFEIFFER  **VACUUM**

**NY Turbopumpe
HiPace™**



Ring for yderligere information

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk