

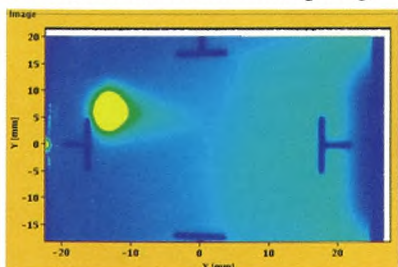
LHC ti år fra nu

Af Peter Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

En række nylige artikler i KVANT har beskrevet CERNs Large Hadron Collider (LHC). Det er den nyeste "energifront" i udforskningen af universets elementære bestanddele. Vor viden om disse ting vil altid være begrænset af energien af de elementære prober, som bruges til at undersøge stoffet. Hvis man leder efter en ny elementær partikel med høj masse, så skal man bruge høj energi til at skabe den i laboratoriet, og hvis man leder efter meget små bestanddele af stoffet, så skal man bruge en meget lille bølgelængde, dvs igen en meget høj energi. Partikelfysik er således totalt afhængig af stadigt at kunne skubbe energifronten længere ud ved hjælp af partikel-acceleratorer. Med LHC åbnes store muligheder for opdagelser i et energiområde.

LHC status

Acceleratoren og de tilhørende partikel-detektorer stod færdige på CERN den 10. september 2008 efter 18 års konstruktion og endnu længere forberedelsestid. På dagen forsøgt det at sende to protonstråler hver sin vej rundt i de to 27 km lange strålerør. Dette første forsøg skete under kolossal mediebevågenhed og successen af forsøget kan tydeligt aflæses i ansigterne på tilskuerne i kontrolrummet, som eksempelvis LHC projektlederen og generaldirektøren for CERN vist på figur 1 og 2.



Figur 1. Det første bundt partikler, som blev ført igennem CERNs acceleratorkompleks og her dukker op ved "punkt 3" i LHC ringen.



Figur 2. Udviklingen følges med stor begejstring af ledende fysikere ved CERN.

Ugen efter gik man videre med at afprøve den sidste ottendedel af acceleratorens superledende magneter ved fuld strømstyrke. Først da var denne sektor nået ned på operationstemperaturen på 1,9 kelvin. Her gik det desværre galt. En fejl i en elektrisk forbindelse mellem to magneter forårsagede et udslip af helium, der resulterede i ødelæggelser af komponenterne omkring forbindelsen. Det var et kulsort uheld, imod hvilket det er svært at sige hvordan man kunne have garderet sig.

Denne skade vil forsinke de første kollisioner mellem de to protonstråler til næste forår. Dels vil reparationerne tage tid og dels tager det lang tid at

nedkøle en sektor (alene fra 300 til 80 kelvin tager det tre uger samt 64 lastbiler fyldt med flydende luft og herefter tager det endnu seks uger at køle de 4.700 tons med helium ned til sluttemperaturen). Det er planen at forsætte sommeren over med kollisioner ved 10 TeV (tera elektron-volt) og først derefter forsøge sig med maximal-energien på 14 TeV.

LHC efter 10 år

Der vil så gå flere år med at forsøge at aftvinge naturen svar på de spørgsmål, som acceleratoren blev sat i verden til at studere, såsom om der virkeligt eksisterer en Higgs-partikel, der giver alle andre partikler masse. Naturen garanterer jo ingenting, men lad os antage at man efter fem år har fundet Higgs-partiklen samt visse antydninger af ny fysik uden for standardmodellen.

Hvad skal der så ske? Yderligere fremskridt med det eksisterende udstyr vil være op ad bakke. På det tidspunkt vil det tage fem år at halvere den statistiske usikkerhed på resultaterne. Læg mærke til at dette er *efter* at have indregnet stadige forbedringer i acceleratorens virkemåde. Herefter vil det være helt umuligt at forbedre præcisionen ved bare at fortsætte. Ydermere vil kvadrupol-magneterne omkring kollisions-punkterne ophøre med at fungere på grund af strålingsbeskadigelse. En fuld udnyttelse af LHCs potentiale vil således kræve en eller anden form for kvalitativ forbedring om fem-ti år. Det er bestemt ikke for tidligt at bekymre sig om dette, idet det erfaringsmæssigt tager mange år at planlægge, udføre og ikke mindst at financiere større acceleratorprojekter.

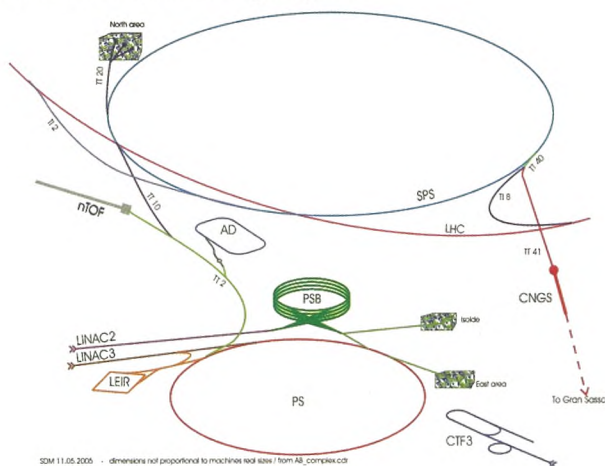
Energi-opgradering (DLHC)

Den første mulige opgradering, som falder i tankerne, er en forøgelse af energien i strålerne. Dette studeres under overskriften "Double energy LHC" eller DLHC. Det vil kræve helt nye dipolmagneter med nye superledende materialer og være meget dyrt. Måske ville det faktisk bedre kunne betale sig at genoplive det amerikanske SSC projekt, der aborterede i begyndelsen af 1990'erne. En 80 km lang tunnel under prærien i Texas eksisterer faktisk stadigvæk. Man kan i hvert fald roligt sige, at det vil være en stor udfordring at få en energiopgradering vedtaget politisk. Derfor fokuseres på at øge luminositeten.

Luminositet-opgradering (SLHC)

En alternativ måde at udvide rækkevidden i energi er at opgradere intensiteten i de kolliderende proton-stråler. Protonerne består som bekendt af kvarker og gluoner, og det er i virkeligheden de elementære sammenstød mellem disse bestanddele, som vi er interesseret i. Der er imidlertid rigtigt mange bestanddele, som hver bærer kun en lille brøkdel af protonens energi. Det er uhyre sjældent, ved høje proton energier, at finde en kvark der bærer over halvdelen af protonens energi. Men med tilstrækkeligt statistik kan man i princippet finde disse sjældne tilfælde og på den måde skubbe energigrænsen længere ud.

Hvordan skulle det lade sig gøre? Først og fremmest kræver det en generel fornyelse af dele af CERNs infrastruktur. Problemet med levetiden af kvadropolerne omkring kollisionspunkterne er allerede nævnt. Men der er også helt basale elementer i infrastrukturen, som er tæt på at være udtjente allerede nu. Det gælder elementer i injektionskæden af mindre accelerators, se figur 3, der til sidst afleverer protonerne i LHC – ikke mindst Proton Synchrotronen (PS) og den lineære accelerator (LINAC 3), der er fra 1960. CERN har allerede et program, finansieret af et ekstraordinært bidrag fra medlemslandene, til fornyelse af denne injektionskæde, som ses på figur 3.



Figur 3. CERNs acceleratorkompleks.

Hernæst er det planen at forøge antallet af protoner per bundt med mindst 70% og samtidigt fokusere dem mere på kollisionspunktet. Det er ikke noget man bare gør, for acceleratoren opererer selvfølgelig allerede med det maximale antal protoner, der kan lade sig gøre uden at Coulomb-kræfter blæser de kolliderende bundter op så partiklerne mistes. Man kan undgå dette ved f.eks. at forøge den lille vinkel hvorunder bundterne støder sammen, så de hurtigere end nu bliver adskilt fra hinanden igen. Men alle sådanne tiltag kræver en ombygning af acceleratorelementerne omkring kollisionspunktet. Tætheden af partikler, som strømmer ud i detektorerne ved hver kollision af bundterne, vil også forøges enormt (ca. en faktor ti), hvilket kræver en ombygning af de detektordele, der er tættest på strålerøret. Alligevel vil en opgradering af luminositeten være en betydeligt mindre bekostelig sag end en opgradering af

energien og det er så hvad CERN satser på. Den planlagte opgradering af LHC til en Super-LHC (SLHC) forventes at starte omkring 2012-14.

Fysik gevinsten

Hvad kan man få ud af en opgradering? Idéen er at klemme det sidste ud af acceleratoren. Antag at Higgs bosonen er fundet. Så vil en opgradering bedre kunne bestemme dens koblinger til fermioner og gauge-bosoner, såvel som etablere dens *skalare* natur, den overmåde vigtige egenskab af nul spin. Uden sådanne målinger vil der altid være tvivl om, hvad det egentligt er, man har fundet.

Ydermere vil fundet af en Higgs på 100 GeV skalaen automatisk kræve en udvidelse af standardmodellen med ny fysik, såsom super-symmetri, ekstra dimensioner eller andre nye symmetrier, som f.eks. kunne give sig udtryk i eksistensen af nye generationer af tunge gauge-bosoner. Alle disse teorier vil som typisk signatur have en ny partikel, som jo må være meget tung idet den endnu ikke er set. I så fald vil en energiopgradering være mere effektiv end en luminositetsopgradering til at finde partiklen.

Men en luminositetsopgradering vil dog kunne udvide grænserne med små 30%. Det er faktisk signifikant, idet man naturligt også ønsker at den nye partikel skal udpege forklaringen på det mørke stof, som åbenbart udgør seks gange mere af vores univers end det stof som stjerner og bedstemødre er lavet af, dvs. standardmodellens stof. Massen af de elementarpartikler, som udgør det mørke stof, er nemlig begrænset ovenfra af astrofysiske observationer, såsom den kosmiske mikrobølgestråling. Samtidigt er det sådan, at hvis de nye partikler er for tunge, kan de ikke reparere på de logiske problemer i standardmodellen, som oprindeligt motiverede idéen om deres eksistens. Alt dette er for at sige at en 30% udvidelse af grænserne er ikke til at kimse af.

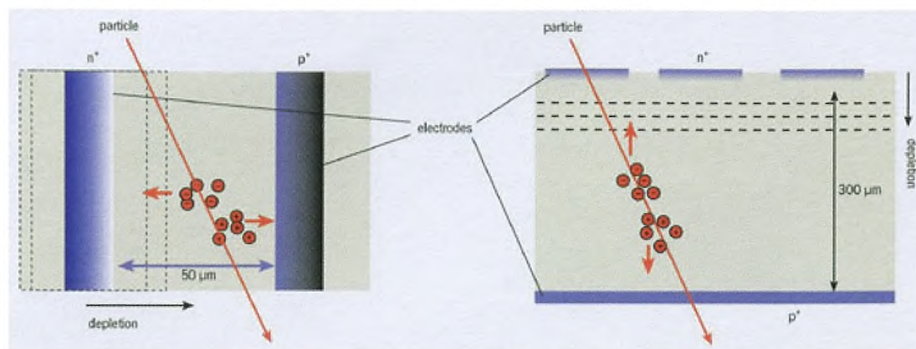
Antag så, at Higgs bosonen ikke er fundet. I så fald skal standardmodellen skrottes, men ny fysik (nye stærke vekselvirkninger mellem gauge-bosoner) vil dukke op på en energiskala af nogle få TeV, medmindre man da også skal skrotte kvantemekanikken. En luminositetsopgradering ville f.eks. afsløre tilstedeværelsen af en resonans ved 2 TeV i spredningen af tunge vektorbosoner, som ellers ikke ville være synlig. Igen vil en energiopgradering være endnu bedre, men en luminositetsopgradering sandsynligvis god nok.

Detektor opgraderinger

Efter 5-10 års kørsel vil de indre detektorer, der kan genkende spor af elektrisk ladede partikler og måle deres impuls ud fra deres afbøjning i et magnetfelt, være stærkt beskadiget af stråling og stå til udskiftning. Men selve teknologien skal også fornyes, idet der ved SLHC vil være for mange tilfælde af to partikler der rammer den samme kanal og for mange strålingsskader med den eksisterende teknologi. Tætheden af sensorer må bringes til at matche den forøgede tæthed af partikler og strålingshårdheden skal forøges. Det er også

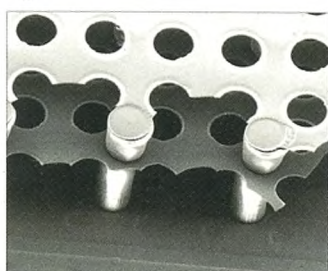
målsætninger som er af meget stor interesse for rumteknologien og for medicinsk diagnostik.

En af idéerne til udskiftning af de nuværende silicium sensorer er at begrave de n- og p-dopede områder i en tredimensional (3D) struktur dybt nede i silicium



Figur 4. Til venstre ses skematisk en ny 3D silicium detektor hvor elektroderne er anbragt som mikroskopiske stave nede i "bulk" materialet i stedet for på overfladen som i det traditionelle 2D design til højre. Dette giver en kortere driftlængde for de frigjorte elektron-hulpar – og dermed mindre chance for at ramme en fælde. Resultatet bliver et bedre signal.

En anden genial idé er de såkaldte GEM (gas electron multiplier) og *MicroMegas*. Det er små gasfyldte detektorer, hvor ladede partikler, som passerer forbi, frigør elektroner fra gas-atomerne. Men i stedet for at multiplicere disse elektroner ved en højspændt tråd ligesom i en Geigertæller, så bruger man et fint gitter, som multiplicerer ionisationselektronen op til en byge af elektroner med samme størrelse som hullerne i gitteret (se figur 5). Denne byge kan læses ud med en 2D silicium pixel detektor anbragt nedenunder hullerne, hvor størrelsen af pixel-elektroderne er sammenlignelig med hullerne. Dette giver en stedsbestemmelse med under en tiendedel millimeters nøjagtighed på rigtigt mange punkter på partiklens bane, men uden at skulle bruge nær så meget silicium, som hvis partikelkoordinaterne skulle leveres af silicium-detektorer alene uden gasforstærkning.



Figur 5. Ved hjælp af moderne mikromekaniske metoder lånt fra elektronikindustrien kan man lave en "Geigertæller" der måler to-dimensionale koordinater på en ladet partikel, som passerer forbi, med en præcision ned til 20 mikron, som er den typiske diameter af hullerne.

En udskiftning af de indre detektorer (og også visse ændringer i de ydre detektorer) til at klare den stærkt forøgede partikelstråling vil være nødvendig, men synes også at være indenfor rækkevidde fra de igangværende R&D projekter.

Andre idéer

CERN satser i første omgang på denne opgradering, som kan træde i kraft omkring 2017. I flere år har der foregået R&D projekter og et egentligt forslag til

materialet. Det forøger strålingshårdheden at gå til 3D, idet afstanden mellem elektroderne er meget mindre end i den traditionelle 2D struktur (se figur 4), hvilket forbedrer opsamlingen af ladninger på trods af "fælder" skabt af den intense stråling.

CERNs Council vil blive gjort færdigt i 2009. Men der er mange andre idéer på banen, som til en vis grad er konkurrenter til midlerne. Det drejer sig først og fremmest om meget spændende projekter, der sigter på bygge en lineær elektron-positron collider, som i detaljer vil kunne studere de antydninger af ny fysik, der antages at blive opdaget ved LHC. Et internationalt projekt, International Linear Collider (ILC), er i design-fasen og kunne være operationsdygtigt omkring samme tidspunkt som SLHC. Projektet er dog noget hæmmet af nogle store budgetnedsikringer i USA og Storbritanien for et år siden. Et andet projekt er CERN-drevet. Det hedder Compact Linear Collider (CLIC) og vil komme noget senere på banen, men til gengæld med meget højere kollisionseenergi. Der er endvidere parallelle udviklingsspor af maskiner til særlige studier. Det gælder en fremtidig "neutrino-fabrik", en "super b-kvarke-fabrik", samt muligheden for at lave LHC om til en elektron-proton collider. Vi vil kigge nærmere på mulighederne for en fremtidig, post-LHC, udvidelse af energigrænsen, i senere numre af KVANT.

Litteratur

- [1] Fysik-motivation for SLHC og planer i ATLAS: <http://atlas.web.cern.ch/GROUPS/UPGRADES/>
- [2] Micropattern detektorer: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/35458> (brug iøvrigt search faciliteten i CERN Courier til at finde mange andre artikler)



Peter H. Hansen er lektor ved Niels Bohr Institutet. Han har arbejdet i USA med elastisk protonspredning, siden ved CERNs SPS collider, som opdagede W- og Z-bosonerne, herefter ved LEP med fokus på hadronfysik og afprøvning af den elektrosvage teori og nu ved ATLAS-eksperimentet ved LHC, hvor han beskæftiger sig med rekonstruktionen af ladede spor i den indre detektor.