

Fremtidige acceleratorer

Af Mogens Dam, Discovery Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Med Large Hadron Collider har CERN et banebrydende fysik-program, der strækker sig omkring to årtier frem i tiden. Sideløbende arbejdes der med planlægning og udvikling af næste generation af acceleratorer. Opdagelsen af Higgs-bosonen har givet et nyt vigtigt pejlemærke for valg af næste acceleratorprojekt. Præcise studier af den nye partikel vil kunne afgøre dens natur og dermed muligvis afdække *ny fysik*, altså fysik hinsides partikelfysikkens Standardmodel. Meget peger på, at den næste store accelerator bliver en elektron-positron-collider. Hvor man i lang tid er gået ud fra, at dette ville blive en lineær collider, har den forholdsvis lave masse af Higgs-bosonen åbnet overvejelser om, hvorvidt en cirkulær collider ville være at foretrække.

Udviklingen af partikelacceleratorer over de seneste otte årtier har været afgørende for udforskningen af den subatomare verden. Mange teknologiske skridt har ledt fra den første 10 cm store cyclotron til CERNs Large Hadron Collider (LHC), som i dag danner basis for omkring 8000 forskeres videnskabelige arbejde. I denne artikel vil jeg forsøge at kigge lidt ud i fremtiden til næste generation af mulige partikelacceleratorer. Ligesom LHC, vil fremtidens accelerators være store og kostbare og vil derfor skulle konstrueres i et tæt internationalt samarbejde. Der må nødvendigvis prioriteres hårdt, og langt fra alle muligheder vil blive implementeret.

Fortid og nutid: LEP og LHC

Før vi kaster os over fremtiden vil vi i dette afsnit tage et kig på den seneste generation af accelerators ved CERN, nemlig LEP og LHC.

De første overvejelser omkring LEP (Large Electron-Positron Collider), som dannede ryggrad i CERNs fysikprogram fra 1989 til 2001, daterer tilbage til midten af 1970'erne. I 1978 besluttedes det således at starte konstruktionen af en maskine med en omkreds på ca. 30 km, og med en maksimal stråleenergi på 90 GeV, som ville kunne opgraderes til 130 GeV, når superledende accelerationsenheder ville blive tilgængelige. Sideløbende opstod der hurtigt planer om at installere en meget energirig proton-accelerator – Large Hadron Collider – i LEP-tunnelen.

LHC har leveret proton-proton-kollisioner siden 2009, og der foreligger idag planer om – først ved øget energi, senere ved øget rate – at køre acceleratoren helt frem til midten af 2030'erne for at udnytte dens fulde potentiale.

Både LEP og det, vi hidtil har set fra LHC, har udgjort yderst succesrige fysikprogrammer. Gennem præcise målinger ved kollisionenergier omkring Z-boson-massen afgjorde LEP-eksperimenterne allerede tidligt et af Naturens store spørgsmål: Der findes tre og kun tre elementære fermion-generationer i Naturen; altså tre generationer af stofflige partikler. Gennem talrige præcisionsmålinger udsattes partikelfysikkens Standardmodel – den altomfavnende teori for Naturens elementære bestandele – for en sand bygeregn af angreb gennem LEP-programmets løbetid. Standardmodellen kom ud sejrende og stod bagefter stærkere end nogen-

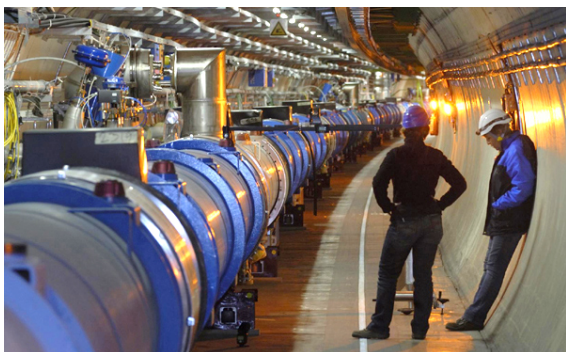
sinde tidligere. Ved udnyttelse af Standardmodellens beregnbare indre bindinger, lykkedes det ved denne proces i første omgang at fastlægge top-kvarkens masse, før denne partikel var eksperimentelt påvist, og i anden omgang at påvise, at Higgs-bosonen måtte være forholdsvis let, en forudsigelse som blev bekræftet ved den spektakulære opdagelse af Higgs-bosonen ved LHC i 2012. LEP/LHC-programmet udgør et smukt eksempel på, hvordan veltilrettelagt infrastruktur – i dette tilfælde acceleratortunnelen og dens installationer – kan danne basis for banebrydende forskning over adskillige årtier.



Figur 1. LEP/LHC-tunnelens placering i landskabet omkring CERN udenfor Geneve. Foto: CERN.

For at forstå betydningen af LEP/LHC-tunnelen dvæler vi et øjeblik ved dens geometri: Der er tale om en cirkulær tunnel med en omkreds på 27 km, som skitseret på figur 1. Cirkulær, fordi man derved kan udnytte de accelererede partikler igen og igen: Ved hver kollision vekselvirker kun en forsvindende brøkdel af hver stråle; den resterende del kommer tilbage én omgang senere parat til en ny kollision. Tunnellens store omkreds har to forskellige forklaringer: én for LEP (elektroner og positroner) og én for LHC (protoner). I en elektron-ring kæmper man mod energitab gennem synchrotronstråling, altså det faktum at ladede partikler, der afbøjes, udstråler fotoner. Energitabet er proportional med forholdet mellem partiklernes energi og masse i fjerde potens og invers proportional med afbøjningsradius, $(E/m)^4/R$. Det stiger derfor meget stejlt for de meget lette elektroner. Ved en stråleenergi på 104,5 GeV – den højeste, der blev opnået ved LEP – var energitabet per omgang således på omkring 4%. Som kompensation måtte der tilføres en kontinuert

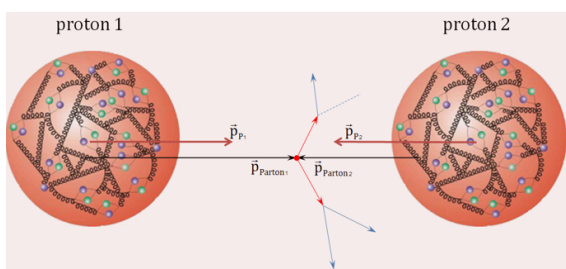
accelerationsenergi på omkring 20 MW. For protonerne i LHC kan der opnås langt højere energier. Når design-energien nås i 2015, vil hver stråle have en energi på 7 TeV (7000 GeV), altså 70 gange højere end ved LEP. Synchrotronstrålingen vil da stadig være forsvindende, idet protoner jo er næsten 2000 gange tungere end elektroner. Hvad der derimod her begrænser energien er styrken af dipolmagneterne, der holder protonerne i deres cirkulære baner. Gennem anvendelse af superledende magneter har man opnået en dipolstyrke på 8,3 Tesla, som er nødvendig for at nå designenergien. Figur 2 viser LHC-acceleratoren med dens voluminøse superledende dipolmagneter.



Figur 2. Et glimt af LHC-acceleratoren. Foto: CERN.

Kollisioner: Elektron-positron eller proton-proton

Som det vil fremgå af det ovenstående, så er det ikke muligt ved en cirkulær elektron-ring at opnå energier, som væsentligt overstiger LEP-energiene: Synchrotronstrålingen aftager kun invers med radius, så en fordobling af energien kræver ikke mindre end en 16-dobling af acceleratorens størrelse for at holde energitabet på samme niveau. Det er således ofte blevet fremført, at LEP var den ultimative cirkulære elektron-positron-collider, hvis energi aldrig ville blive overgået. Fremtiden synes dermed åben for proton-proton-collidere, hvis energi udelukkende er begrænset af dipolstyrken, altså et rent teknologisk problem.



Figur 3. Protoner er sammensatte objekter bestående af kvarker, anti-kvarker og gluoner. Proton-proton-sammenstød er i virkeligheden sammenstød mellem disse bestanddele. Grafik: CERN.

For mange studier er der imidlertid gode grunde til at holde fast i elektron-positron-sammenstød. I modsætning til elektroner og positroner, som er elementære partikler, er protoner sammensatte objekter bestående af kvarker, anti-kvarker og gluoner. Sammenstød mellem protoner er dermed i virkeligheden sammenstød

mellem protonernes bestanddele, se figur 3. Og idet disse bestanddele vekselvirker med hinanden via den stærke kraft, mens de reaktioner, vi er interesserede i, typisk skyldes den svage kraft, så er forholdet mellem raten af interessante hændelser (*signal*) og uinteressante hændelser (*baggrund*) typisk som én til en milliard. Proton-proton-sammenstød kaldes derfor "beskidte". I modsætning hertil kaldes elektron-positron-sammenstød "rene": Her vekselvirker de kolliderende partikler ikke stærkt, men udelukkende via den elektromagnetiske og den svage kraft, og derfor er stort set alle hændelser interessante. Yderligere vil protonernes kolliderende bestanddele ikke bære den fulde stråleenergi, men kun en stokastisk fordelt andel af denne. De elementære sammenstød foregår altså ved energier, som typisk er betydeligt lavere end acceleratorens pålydende energi.

Lineære collidere

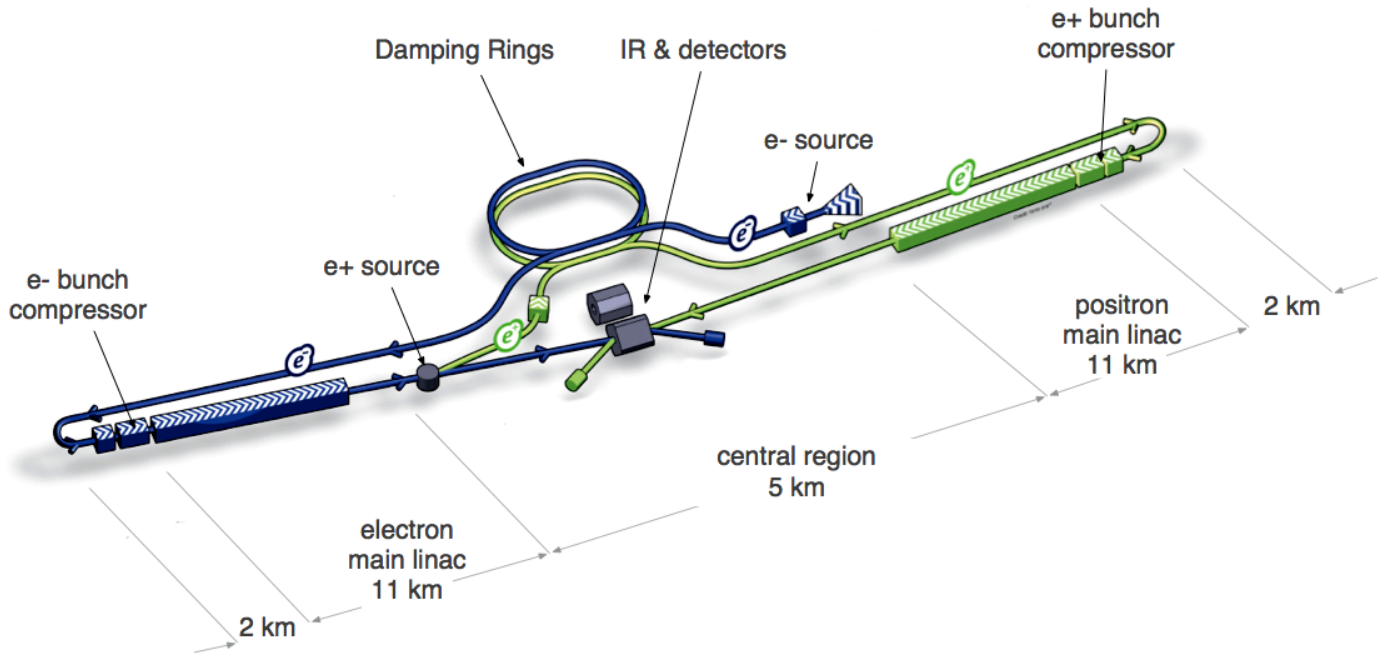
Ønsket om højenergetiske elektron-positron-sammenstød har ledt til studie og udvikling af lineære collidere. Princippet i disse er, at man retter to lineære systemer af meget kraftige accelerationsenheder mod hinanden, accelererer elektroner op i det ene system, positroner i det andet, og lader de to stråler kolliderer på midten, som skitseret på figur 4.

Ved en lineær accelerator undgår man begrænsningen fra synchrotronstråling, men der opstår til gengæld en del nye teknologiske udfordringer, som alle hænger sammen med det faktum, at man her, i modsætning til i det cirkulære tilfælde, kun benytter de samme accelererede partikler én gang. De største udfordringer er:

Accelerationsgradient: For at accelerere partikler til fx 250 GeV må de gennemløbe en spændingsforskel på 250 GV. Ved anvendelse af superledende accelerationsenheder, som opererer ved radiofrekvens, kan man i dag oppebære en gradient på godt 30 MV/m, hvorfor det tager mere end 8 km at nå den ønskede energi.

Fokusering: For at udnytte de accelererede partikler optimalt, må man sørge for, at så stor en andel som muligt faktisk vekselvirker. For at opnå dette, fokuseres strålerne til et ekstremt lille tværsnitsareal før kollision. I praksis planlægger man at fokusere strålerne til nogle få nanometers højde og nogle få hundrede nanometers bredde.

Der findes i dag to bud på en fremtidig lineær collider [1, 2]: i) International Linear Collider (ILC), som tager sigte på en kollisionsenergi på 500 GeV (opgraderbar til 1000 GeV), og ii) Compact Linear Collider (CLIC), som tager sigte på en kollisionsenergi på i første omgang 1000 GeV, senere 3000 eller endda 5000 GeV. Hvor ILC er baseret på superledende accelerationsenheder, som de lader sig bygge i dag, så sigter CLIC mod en større accelerationsgradient på 100 MV/m ved anvendelse af et dobbeltstrålesystem, hvor den egentlige stråle accelereres op via en parallelløbende stråle med højere intensitet og lavere energi. Denne teknologi er stadig ikke fuldt udviklet.



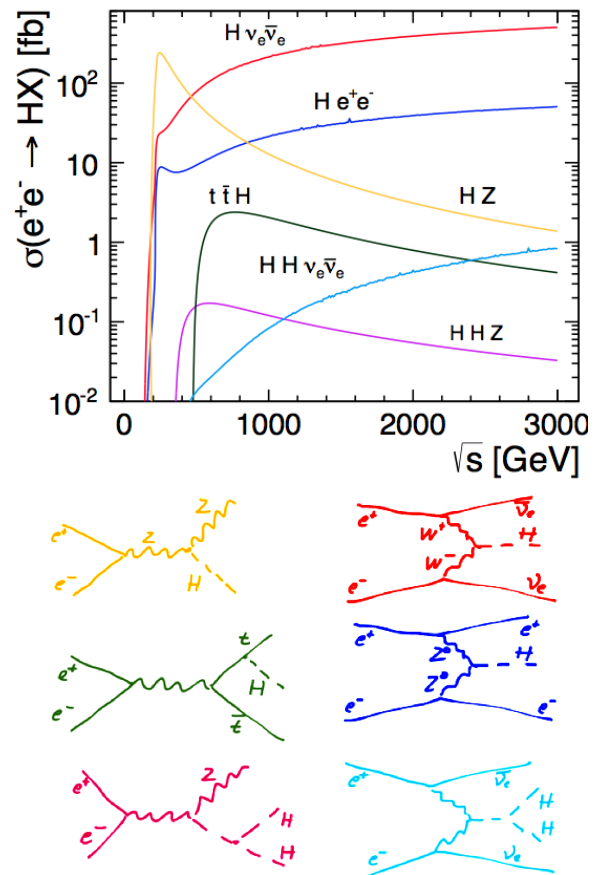
Figur 4. Designskitse af den foreslåede International Linear Collider, ILC. Elektroner accelereres op fra venstre, positroner fra højre. Tegning fra [1].

TLEP: en ny cirkulær elektron-positron-collider

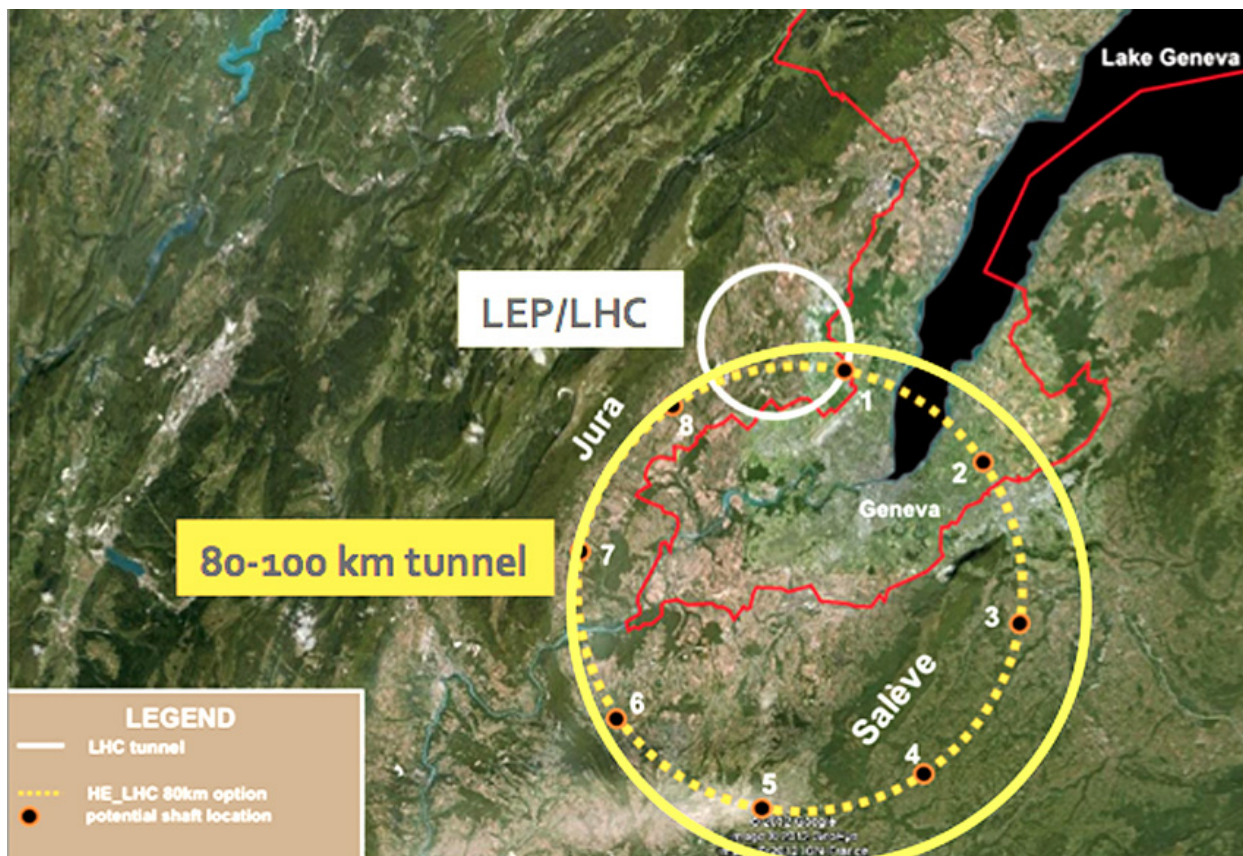
Opdagelsen af Higgs-bosonen ved en forholdsvis lav masse på 125 GeV har betydet en genfødsel af overvejelserne om at bygge en ny stor cirkulær elektron-positron-collider, uofficielt kaldet TLEP [3]. Hovedformålet er at foretage højstatistikmålinger af Higgs-bosonen under rene eksperimentelle forhold. Projektet omtales derfor ofte som en *Higgs factory*, altså en Higgs-fabrik.

Spørgsmålet er, om Higgs-bosonen på alle måder opfører sig som forudsagt af Standardmodellen. Populære udvidelser af Standardmodellen, såsom teorier indeholdende supersymmetri, ekstra dimensioner, eller andet, forudsiger i almindelighed, at Higgs-bosonen vil opføre sig en smule anderledes. Typisk er afvigelserne på procentniveau. En signifikant måling kræver en præcision betydeligt bedre end dette, hvorfor man har brug for at studere af størrelsesorden en million Higgs-henfald.

Som vist på figur 5 er sandsynligheden for at producere en Higgs-boson forholdsvis stor for kollisionsenergi omkring 250 GeV. En sådan energi ville man faktisk kunne have nået i LEP-tunnelen, hvis man havde været parat til at acceptere en fordobling af energitabet via synchrotronstråling. Der har kortvarigt været tanker om at vende tilbage til LEP-tunnelen efter LHC-programmets afslutning, det såkaldte LEP3-projekt. Med TLEP går man imidlertid andre veje og er i færd med at undersøge muligheden af at konstruere en accelerator, der kan levere ekstremt høje begivenhedsrater, i en ny tunnel med en omkreds på 80-100 km i området omkring CERN, se figur 6.

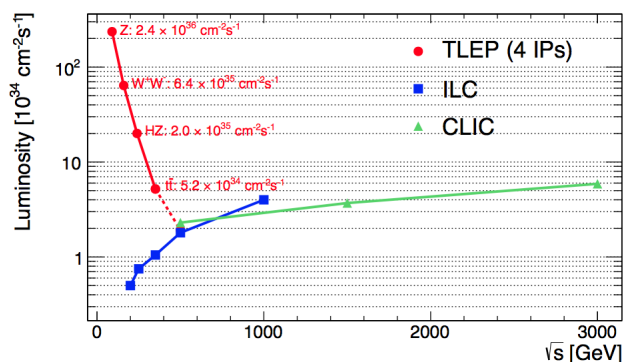


Figur 5. Øverst, tværsnittet (proportional med sandsynligheden) for Higgs-produktion i elektron-positron-sammenstød som funktion af kollisionens energi. De forskellige kurver svarer til forskellige processer, som skitseret nederst med samme farvekode. For lave energier, er den vigtigste proces den, hvor Higgs-bosonen stråles af fra en Z-boson (gul). For højere energier produceres Higgs-bosonen hyppigst ved fusion af to W-bosoner (rød). Figurer: Frank Simon, Max-Planck-Institute for Physics.



Figur 6. Mulig placering af en 80 km tunnel (stiplet linje), som kan huse CERNs FCC-projekt (se senere) og dermed TLEP. En 100 km tunnel (fuld optrukket linje) studeres ligeledes. Den hvide cirkel repræsenterer LHC-tunnelen. Fotografik: [4].

Argumenterne for at gå til en større tunnel er mange: Blandt andet åbnes der hermed mulighed for at gå til noget højere energier, og man slipper for at vente på LHCs afslutning før konstruktionen kan påbegyndes.



Figur 7. Den instantane luminositet for TLEP, ILC og CLIC som funktion af kollisionens energien. Den instantane luminositet er et mål for kollisionens rate. Fra [4].

Hvorfor TLEP er interessant, kan forstås ved at betragte figur 7, der giver et mål proportional med kollisionens rate som funktion af energien for TLEP sammenlignet med ILC og CLIC. Kollisionens rate for TLEP falder dramatisk med energien, men for enhver energi under 500 GeV leverer TLEP langt højere rater end to de lineære collidere. Afsat på TLEP-kurven er fire punkter svarende til planlagte fysikprogrammer.

Z: Omkring 90 GeV foretages studier af Z-bosonen (10^{12} Z-bosoner).

W⁺W⁻: Omkring 180 GeV foretages studier af W-bosonen (10^8 W-bosoner).

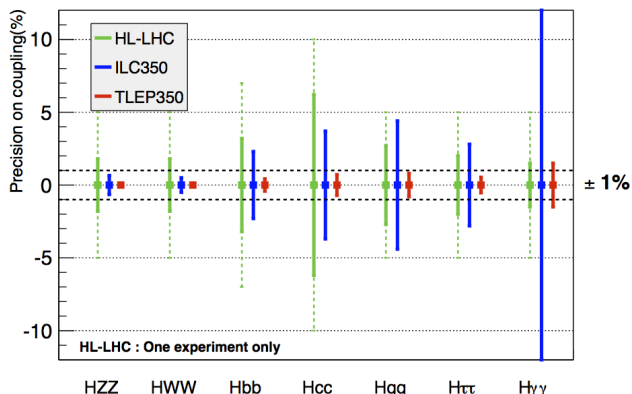
HZ: Omkring 240 GeV foretages studier af Higgs-bosonen (10^6 Higgs-bosoner).

t \bar{t} : Omkring 350 GeV foretages studier af top-kvarken (10^6 top-kvarker).

Som det fremgår, vil alle studier være kendetegnet ved en meget høj statistisk præcision. De to førstnævnte studier udgør en gentagelse af LEP-programmet, men med fem størrelsesordere højere statistik. Populært sagt vil man kunne gentage hele 1990'ernes LEP-program på mindre end en halv time. Det samlede fysikprogram vil have en varighed på omkring 15 år.

Med dette program, vil TLEP levere særdeles præcise målinger af Higgs-bosonens egenskaber, som vist på figur 8. Generelt ligger usikkerhederne komfortabelt inden for det teoretisk mest interessante område på $\pm 1\%$. Imidlertid er den del af TLEP-målingerne, der ikke er direkte relateret til Higgs-bosonen, ligeledes af stor interesse. I særdeleshed vil masserne af W-bosonen og top-kvarken kunne bestemmes til en præcision, der er én til to størrelsesordere bedre end i dag. Dette indebærer en overordenlig præcis test af Standardmodellens konsistens.

På samme måde som LEP-eksperimenterne kunne forudsige Higgs-bosonens masse i et område over det, der var direkte tilgængeligt, vil man med en sådan præcision kunne udtale sig om den eventuelle eksistens af nye partikler og/eller fænomener op til høje energier. Faktisk er præcisionen så god, at man vil være følsom helt op til en masseskala omkring 30 TeV; altså næsten 100 gange højere end TLEPs kollisionsenergi.



Figur 8. Forudsagt præcision på målingen Higgs-bosonens kobling til andre partikler for forskellige fremtidige faciliteter: HL-LHC (grøn) svarer til LHC ved 14 TeV med en 100 gange større datamængde end hidtil indsamlet (stiplede versus fuldt optrukne linjer svarer til forskellige antagelser omkring systematiske usikkerheder); ILC350 (blå) svarer til den samlede planlagte kørsel af ILC ved 250 og 350 GeV; samme for TLEP350 (rød). Det teoretisk mest interessante område svarende til $\pm 1\%$ usikkerhed er fremhævet. Fra [4].

CERNs FCC-program

I februar dette år søsatte CERN det såkaldte FCC-program, hvor FCC står for *Future Circular Colliders*. Programmet skal under ét studere potentiale og muligheder for at konstruere nye cirkulære colliderer ved CERN [5, 6]. Studiet inkluderer dermed både TLEP (som hermed officielt er omdøbt til FCC-ee) og en ny stor proton-proton-collider, FCC-hh. De to maskiner skal kunne huses i samme 80–100 km lange tunnel. Målet for FCC-hh er at nå en kollisionsenergi på 100 TeV for studier af Higgs-bosonen og for direkte søgning efter *ny fysik* op til ekstremt høje masseskalaer. Hvor TLEP stort set kan bygges med kendt teknologi, så vil det for FCC-hh kræve udvikling af kraftigere dipolmagneter: En feltstyrke på 20 Tesla er nødvendig for en 80 km tunnel, mens man kan “nøjes med” 16 Tesla for en 100 km tunnel. Hvor både fysik- og designstudier for TLEP allerede er forholdsvis fremskredne [4], så er overvejelserne omkring FCC-hh foreløbigt langt mindre modne. FCC-studiet arbejder hen imod at udarbejde en *Conceptual Design Report* inden 2018.

Hvad bliver bygget?

Før man giver sig i kast med at konstruere en ny accelerator, er det en god idé at gøre sig klart, hvad man ønsker at bruge den til. Lad os derfor betragte det partikelfysiske landskab her, fire år efter LHCs opstart. Meget kort opsummeret er status den, at Higgs-bosonen er blevet afdækket, mens ingen af talrige søgninger efter

ny fysik op til den masseskala, hvor LHC indtil videre er følsom – generelt op til omkring 1000 GeV – har båret frugt. Netop nu gennemgår LHC udbedringer, som fra næste år skal gøre den i stand til at operere ved design-energien på 14 TeV; næsten en fordobling i forhold til det hidtidige. Yderligere forventes den indsamlede datamængde at fem-dobles inden 2018. Tilsammen vil dette betyde en fordobling af masse-skalaen, op til hvilken LHC er følsom over for *ny fysik*. Det er altså muligt, at vi med LHC netop nu står på tærsklen til nye store opdagelser!

Valget af næste accelerator vil givetvis afhænge af udfaldet af de kommende få års LHC-kørsel. Vi ved allerede at Higgs-bosonen er her og venter på at blive studeret. Hvad, vi ikke ved, er, om LHC vil afdække hints af *ny fysik* i masse-området, som er interessant for ILC og/eller CLIC. Skulle dette være tilfældet, vil interessen for en lineær collider givetvis vokse. I modsat fald må man nøje opveje TLEPs højere præcision for studiet af kendte partikler, inklusive Higgs-bosonen, mod en lineær colliders højere energi-rækkevidde. Beslutter man at anlægge TLEP, vil dette kunne være første skridt i det fulde FCC-program, som med ekstremt højenergetiske proton-proton-sammenstød vil kunne afdække et masseområde, langt højere end det, der er tilgængelig ved nogen lineær collider. Med en sådan beslutning ville CERN have et spændende fysik-program, som rækker betydeligt ind i anden halvdel af dette århundrede.

Litteratur

- [1] International Linear Collider (ILC), <http://www.linearcollider.org>
- [2] Compact Linear Collider (CLIC), <http://clic-study.org>
- [3] Tera-LEP (TLEP), <http://cern.ch/fcc-ee>
- [4] M. Bicer et al. (2014), First Look at the Physics Case of TLEP, *JHEP* **01** (2014) 164, <http://arxiv.org/abs/1308.6176>
- [5] Future Circular Colliders (FCC), <http://cern.ch/fcc>
- [6] Michael Benedikt og Frank Zimmermann (2014), The Future Circular Collider study, *CERN Courier* den 28. marts 2014, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/56603>

Mogens Dam er lektor ved Niels Bohr Institutet og har tidligere arbejdet ved CERNs LEP-collider (med præcise efterprøvnings af Standardmodellen) og HERA-B-eksperimenter på DESY (med konstruktion af apparatur til real-time filtrering af begivenheder). Nu arbejder han ved ATLAS-eksperimentet ved LHC, med målinger af Higgs-bosonen i henfaldskanaler, som indeholder tau-leptoner. Det seneste år har han sideløbende været engageret i planlægningen af en ny stor cirkulær elektron-positron-collider, TLEP, ved CERN.

