

ATLAS-detektoren ved LHC

Af Esben Bryndt Klinkby, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

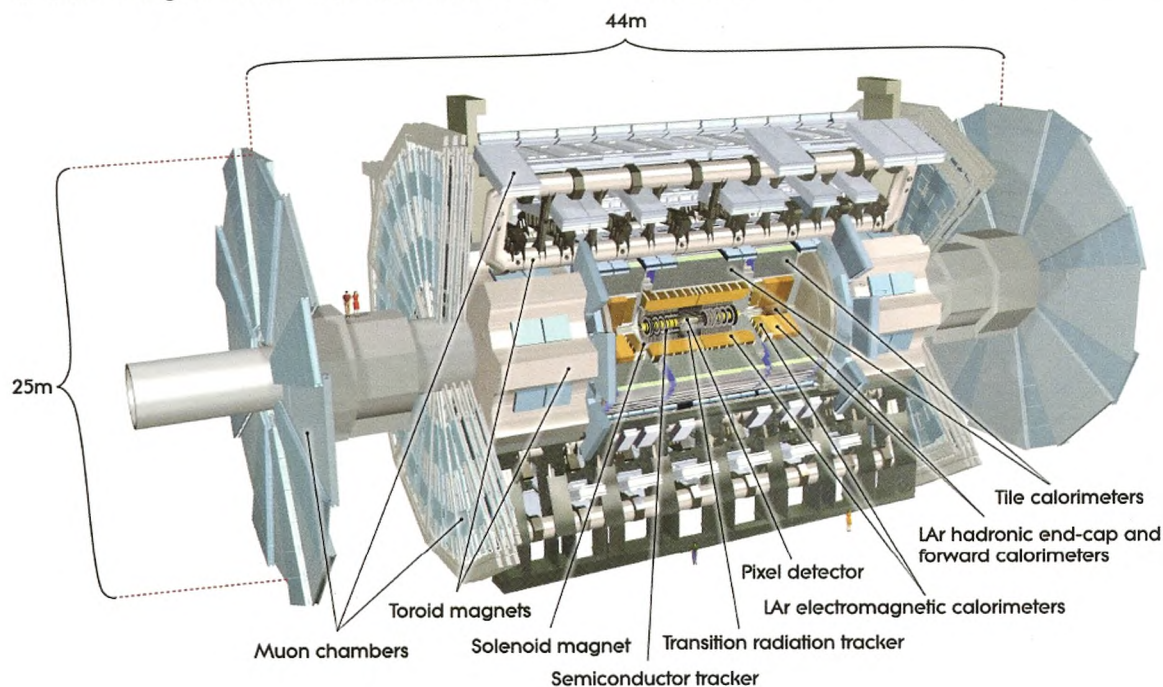
I disse dage accelereres de første protoner i Large Hadron Collider (LHC) ved det europæiske forskningscenter CERN ved Geneve. Som beskrevet i den første artikel i dette blad er LHC en cirkulær accelerator med en omkreds på 27 km placeret i en tunnel 100 m under Jordens overflade. Acceleratoren er i stand til at forsyne protoner med en rekordhøj energi på 7 TeV (teraelektronvolt = 10^{12} eV) inden de to modsat rettede stråler bringes til kollision på udvalgte positioner langs ringen. Omkring disse punkter er der bygget detektorer, hvis formål er at måle hvad der skete under kollisionen – denne artikel handler om ét af disse eksperimenter: ATLAS eksperimentet [1].

ATLAS detektoren

LHC-acceleratoren indeholder to strålerør hvori protoner accelereres og fastholdes i kredsløb ved hjælp et kraftigt magnetfelt på cirka 8 T. Ved kollisionspunkterne bringes protonerne så tæt på hinanden at de kan vekselvirke via den stærke kernekraft hvorved dele af protonernes kinetiske energi omdannes og skaber nye partikler via Einsteins berømte formel: $E = mc^2$. Grunden til at ikke al energien ($7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$) er tilrådighed til at danne nye partikler er, at vekselvirkningen kun involverer to kvarker - de resterende fortsætter langs stråleretningen. En uheldig følge heraf er, at den totale energi (og dermed impuls) i kollisionen ikke er kendt. I det transversale plan, kan impulsbevarelsen imidlertid udnyttes idet de indkomne protoner vides at bevæge sig udelukkende i den longitudinale retning, dvs impuls i den transversale retning før kollisionen er forsvindende. Ved ydermere at sørge for at detektoren indeslutter kollisionspunktet på nær strålerøret således at alle de skabte partiklers impuls/energi måles, kan impulsbevarelsen benyttes i den transversale plan. Det betyder at selv i begivenheder hvor der dannes en

svagtvekselvirkende neutrino eller en anden *usynlig* partikel, kan impulsen af denne beregnes som den *manglende impuls* ved at udnytte impulsbevarelse, samt det faktum at alle andre partiklers impuls bestemmes via eksplicitte målinger af de spor som partikler afsætter i ATLAS detektoren.

ATLAS-detektoren er designet til at have bredest mulige anvendelsesmuligheder, dvs. at man ved ATLAS både forventer at have et godt redskab til at lede efter *ny fysik* – såsom Higgs og supersymmetri, der er beskrevet i andre artikler i dette blad – samt endvidere at være i stand til at måle kendte partikelegenskaber med større nøjagtighed. Det sidste er vigtigt idet vores nuværende forståelse af de fundamentale partikler og deres vekselvirkninger foreskriver at hvis vi kan måle visse parametre meget præcist, så kan vi udnytte dette til at forudsige størrelsen af andre parametre – for eksempel parametre der kendetegner ny fysik. Ved altså at foretage præcisionsmålinger af kendte partikelegenskaber kan vi dels lave et konsistentstjek af vores model og dels forudsige hvorledes ny fysik kunne se ud i detektoren.

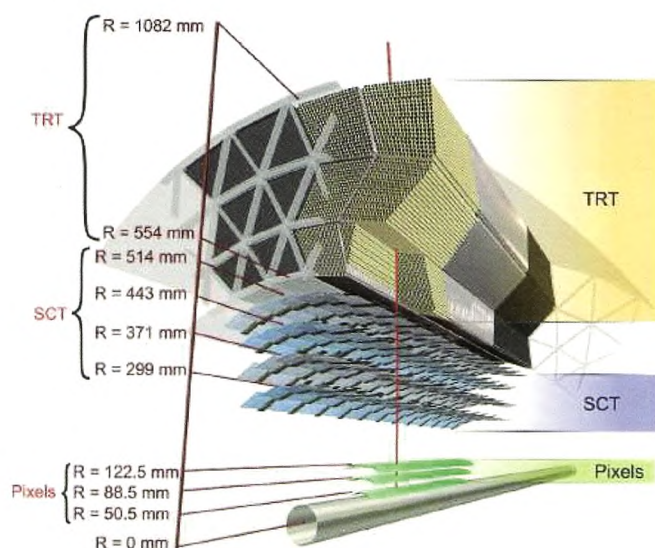


Figur 1. ATLAS-detektoren. Bemærk de enorme dimensioner illustreret ved menneskene på tegningen.

For bedst muligt at opfylde disse ambitioner er det nødvendigt at være i stand til at foretage præcisionsmålinger af:

- Elektroner og myoner.
- Fotoner (lys kvantum).
- Ikke vekselvirkende partikler som neutrinoer måles ud fra manglende impuls.
- Jets af partikler.

Det er nødvendigt at måle de mange forskellige størrelser i et miljø med 20 overlappende begivenheder, der i alt resulterer i ca. 2000 partikler skabt for hvert



Figur 2. Til venstre ses den centrale del af sporfindingsdetektoren, med de tre subdetektorer beskrevet i teksten. Til højre er illustreret hvorledes de forskellige partikler der kan dannes ved en kollision vekselvirker med ATLAS-detektoren.

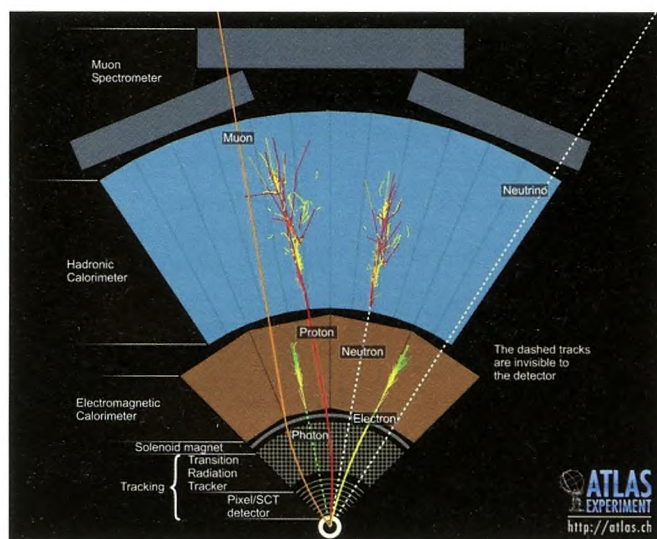
Nærmest kollisionspunktet er "Pixel-detektoren", der med sine 80 millioner målekanaler giver 3 målinger per spor hver med en præcision på 10 mikrometer $\times$ 115 mikrometer i henholdsvis den transversale og longitudinale retning. Detektoren er placeret blot få centimeter fra kollisionspunktet og er bygget af silicium der er i stand til fungere selv under de enorme strålingsrater den bliver udsat for.

Den næste subdetektor en partikel møder er Semi-Conductor Tracker (SCT). Denne detektor er ligeledes baseret på silicium og med sine 6 millioner udlæsningsstriber er den i stand til at bestemme to punkter pr spor med en opløsning på 17 mikrometer (580 mikrometer) i den transversale (longitudinale) retning. Grundet dels økonomi og dels hensynet til at bestemme partikeltypen er den sidste og største sporfindingsdetektor baseret på gas. Transition Radiation Tracker (TRT) består af cirka 400.000 stråfyldt med xenon og adskilt af radiatorer. Når ultrarelativistiske partikler passerer en radiator dannes *transition radiation* som følge af ændringer i det lokale dielektrikum. Denne stråling absorberes senere i xenonet hvor det giver anledning

25 ns. Den høje begivenhedsrate og partikeldensitet stiller høje krav til blandt andet elektronikkens hurtighed, robusthed samt sporfindingspræcisionen og har ført til designet af ATLAS-detektoren som er beskrevet nedenfor.

Sporfindingsdetektoren

For at kunne rekonstruere hvad der skete under en kollision er det blandt andet nødvendigt at måle sporene af de forskellige partikler i detektoren. Helt fundamentalt gøres dette ved at måle små energiafsætninger og sammensætte disse til spor. I ATLAS-detektoren (se figur 1) løses denne opgave af sporfindingsdetektoren, som i sig selv består af tre subdetektorer, arrangeret i en løgstruktur som illustreret i figur 2.



til kraftig ionisation der opsamles på en anode og derved giver et punkt på sporet. Siden produktionen af transition radiation afhænger af den indkomne partikels (Lorentz) gammafaktor ($\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$) kan målingerne bruges til at adskille de sjældne, men interessante elektroner fra den enorme baggrund af pioner siden deres masser og dermed typiske gammafaktorer er så forskellige. Selv pioner og andre tunge partikler som ikke, eller kun i ringe grad, giver anledning til transition radiation kan spores via TRT'en idet alle ladede partikler vil ionisere xenongassen i et vist omfang – blot ikke i nær samme grad som transition radiation fotoner.

Målingerne i de tre subdetektorer kombineres efterfølgende hvorved der dannes et spor. For at måle impulsen udnyttes det at hele sporfindingsdetektoren er indkapslet i en magnet, der har til hensigt at afbøje sporene hvorved deres impuls kan beregnes via afbøjningsradiussen. Fælles for de tre subdetektorer beskrevet her er, at partiklernes vekselvirkning med dem er baseret på elektromagnetismen. Dvs. at kun ladede partiklers spor kan måles.

Kalorimetre og myondetektor

Den næste detektor partiklerne møder på deres vej væk fra kollisionspunktet er det elektromagnetiske kalorimeter som har til formål at stoppe partikler og måle den totale afsatte energi. Herved måles energien ikke bare af de ladede partikler, men også neutrale partikler. I det elektromagnetiske kalorimeter bruges absorber plader af bly for at tvinge partiklerne til at vekselvirke. Herved dannes en byge af ladede sekundære partikler (se figur 2 t.h.) der efterfølgende ioniserer flydende argon og ionisationen driver, som følge af et kraftigt elektrisk felt, til en anode hvor et signal kan opsamles. Ved at bruge mange lag af skiftevis absorbere og detektorer kan partiklerne til sidst bremses helt og deres totale energi aflæses ud fra det totale signals størrelse.

Som navnet antyder er det elektromagnetiske kalorimeter især beregnet til energimålinger af partikler der virker via den elektromagnetiske vekselvirkning – dvs. leptoner, men også fotoner der via vekselvirkning med detektoren konverterer til elektroner. Man kan skelne en byge fra en elektron fra en fotonbyge idet sidstnævnte ikke har noget spor pegende imod sig. Hadroner, såsom protoner og neutroner lader sig kun i ringe omfang bremse og herved måle af det elektromagnetiske kalorimeter, og for at undgå at dele af bygen af sekundære partikler fortsætter bagud igennem detektoren hvorved energimålingen bliver upræcis, komplementeres det elektromagnetiske kalorimeter af et hadronisk kalorimeter. Princippet bag det hadroniske kalorimeter er den samme som for det elektromagnetiske: en sandwich af absorbere, her jern, og detektorelementer, her scintillatorer.

Idet partiklerne fra en kollision er meget energirige (ofte hundreder af GeV) er kalorimetrene nødt til at være meget dybe for at undgå at dele af bygen passerer helt igennem kalorimetrene. Dette er en af grundene til de enorme dimensioner af ATLAS-eksperimentet – se figur 1. De eneste partikler der ikke stoppes af kalorimetrene er myoner og så selvfølgelig neutrinoerne som slet ikke vekselvirker med detektoren. For at måle myonspor benyttes blandt andet TRT-lignende gasdetektorer, hvor det udnyttes at myoner er ladede og dermed ioniserende partikler. Siden myondetektorerne og dermed også resten af ATLAS-detektoren er indkapslet i en enorm magnet, kan myonernes impuls og dermed energi beregnes ud fra sporenes krumning i det kraftige magnetfelt (op til 4 T).

Databehandling

Andre artikler i dette blad beskriver forskellige interessante fysikscenarier som ATLAS-eksperimentet vil lede efter. Fælles for de mest interessante begivenheder hvor der f.eks. dannes en Higgs- eller en supersymmetrisk partikel er, at de teoretisk forudsiges at forekomme yderst sjældent, hvis de altså overhovedet forekommer. I typiske teoretiske modeller forudsiges at højst én begivenhed ud af en milliard indeholder ny fysik. Ydermere vil begivenheder som indeholder ny

fysik ligne begivenheder indeholdende velkendt fysik så meget, at det kun er muligt at skelne dem på et statistisk grundlag – altså hvor mange af en given type begivenheder forudsiger kendt fysik at vi skulle finde kontra hvor mange er rent faktisk observeret. For at kunne opdage ny fysik er det altså ikke blot nødvendigt at finde nålen i høstakken, men det er nødvendigt at gøre det mange gange. Af disse årsager er LHC designet til at lave hvad der svarer til en partikel-partikel kollision hvert nanosekund, og tilsvarende er ATLAS-detektoren designet til at kunne håndtere denne rate. Siden ATLAS-detektoren i alt har cirka 150 millioner måleenheder der læses ud ca. 40 millioner gange hvert sekund, 15 millioner sekunder hvert år, er det klart at selv med vore dages regnekraft og lagringsmedier er det ikke muligt at lagre eller behandle sådanne datasæt. For at afhjælpe dette problem benyttes en såkaldt *trigger* hvis formål er at frasortere uinteressante begivenheder allerede inden de lagres. Sorteringen er baseret på en række kriterier der groft sagt er et udtryk for hvorledes vi forestiller os at interessant fysik burde se ud i detektoren. Et eksempel kunne være hvis der er meget energi afsat i det elektromagnetiske kalorimeter hvilket kunne tyde på at en højenergetisk elektron eller foton er blevet skabt. En højenergetisk elektron kunne skyldes et henfald fra en supersymmetrisk partikel og tilsvarende kunne en højenergetisk foton stamme fra et henfald af en Higgs partikel. En sådan begivenhed er potentielt interessant og gemmes. Sorteringen forfines ved at inkludere målinger fra stadigt flere subdetektorer og til sidst er raten af interessante begivenheder reduceret til cirka 100Hz hvilket er tilstrækkelig lavt til at lagring og efterfølgende databehandling er mulig. Computerressourcerne der er nødvendige for at foretage lagring og databehandling, altså rekonstruktionen af spor osv baseret på de enkelte subdetektorers målinger, er dog stadig så omfattende, at man har måtte opgive at gøre det centralt på CERN. I stedet sendes dataene direkte fra detektoren til en række computercentre verden over, hvor databehandling og lagring finder sted. Efterfølgende kan fysikere over hele verden få adgang til data, lagret eksempelvis i København.

Forberedelser

Som det vel nok fremgår af afsnittene ovenfor er ATLAS-detektoren umådelig kompliceret og det er derfor af afgørende betydning at teste de forskellige detektordele, udlæsingen, databehandlingen osv. allerede inden LHC foretager de første kollisioner. Denne forberedelse har allerede foregået i flere år for eksempel ved at udsætte et udsnit af ATLAS detektoren for et såkaldt *testbeam*. Herved kan de enkelte detektordele testes under kontrollerede forhold, nemlig når de beskydes med kendte partikler med en kendt energi.

For også at teste den færdigbyggede detektor udnyttes det, at der selv i ATLAS-hulen mere end hundrede meter under jordens overflade findes kosmisk stråling – typisk myoner dannet i den øvre atmosfære. Ved at rekonstruere sporene fra sådanne myoner kan

man teste hvorvidt de forskellige detektordele er placeret korrekt i forhold til hinanden og om udlæsningen af de forskellige kanaler virker korrekt osv.

Både resultaterne fra testbeam i de enkelte detektordele, samt de kombinerede tests baseret på kosmisk stråling, har været yderst tilfredsstillende: ATLAS-detektoren ser ud til at fungere fuldt ud i overensstemmelse med specifikationerne. Til trods for års intense forberedelser er der dog ingen der med sikkerhed kan vide hvorledes detektoren kommer til at virke når den udsættes for de første proton-proton kollisioner. Inden vi finder ud af hvorvidt ATLAS-detektoren er i stand til at afvise naturen nogle af dens allerdybeste hemmeligheder, følger først nogle meget spændende måneder hvor partikelfysikere verden over arbejder på højtryk for at få detektoren til at virke optimalt – alt imens de holder vejret i spænding!

Litteratur

- [1] ATLAS: Detector and physics performance technical design report. Volume 1 CERN-LHCC-99-14
- [2] For mere information om partikelfysik på dansk: <http://www.nbi.dk/~klinkby/PartikelFysik.pdf>
- [3] Atlas hjemmeside: <http://atlas.ch/>



Esben Klinkby er ansat som forskningsassistent ved Niels Bohr Institutet og har netop forsvaret sin ph.d. som omhandler måling af W-bosonens masse samt simulering af TRT'en ved ATLAS-eksperimentet.

Standardmodellens partikler og kræfter

Af Esben Bryndt Klinkby, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Eksperimenter har vist at atomer i sig selv ikke er fundamentale, men består af elektroner, protoner og neutroner. Så vidt vides er elektronen fundamental, hvorimod protoner og neutroner er opbygget af kvarker. Udover de byggesten der er nødvendige for at opbygge atomer – og dermed alt stoffet omkring os – findes der også andre fundamentale partikler. Denne artikel opsummerer de fundamentale partikler vi kender til idag og kræfterne der virker imellem dem.

Byggestenene: Kvarker og leptoner

- **Kvarker:** kan kombineres til protoner, neutroner, pioner osv.
- **Leptoner:** er partikler såsom elektroner og neutrinoer. Leptoner indgår ikke i opbygningen af protoner og neutroner, og dermed ikke i opbygningen af kernestof.

Såvidt vides er både leptoner og kvarker fundamentale, hvilket vil sige at de ikke har nogen indre struktur.

Klassificering

Kvarker og leptoner klassificeres i tre familier ud fra deres ladning og masse:

Kvarker

Ladning/ e	1. familie	2. familie	3. familie
+2/3	Up (u) [1,5-3,0] MeV/c ²	Charm (c) [1,2-1,3] GeV/c ²	Top (t) [171-176] GeV/c ²
-1/3	Down (d) [3-7] MeV/c ²	Strange (s) [70-120] MeV/c ²	Bottom (b) [4,1-4,3] GeV/c ²

En elektronvolt, eV, er den energi en elektron opnår ved at gennemløbe et spændingsfald på 1V; 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Da masse ifølge Einstein kan skrives: $m = E/c^2$ bliver partikelfysikkens enhed for masse: eV/c². Bemærk de store forskelle i masserne: topkvarken er 100.000 gange tungere end up-kvarken.

Leptoner

Ladning/ e	1. familie	2. familie	3. familie
-1	Elektron (e) 0,51 MeV/c ²	Myon (μ) 106 MeV/c ²	Tau (τ) 1,8 GeV/c ²
0	Elektron-neutrino (ν _e) < 2 eV/c ²	Myon-neutrino (ν _μ) < 2 eV/c ²	Tau-neutrino (ν _τ) < 2 eV/c ²

Bemærk også her de store forskelle i masserne: En τ-partikel vejer 3500 gange mere end en elektron. 2. og 3. familie er kopier af den 1. familie og afviger primært fra denne ved deres højere masse. Grunden til at vi i naturen næsten udelukkende finder partikler fra første familie, skyldes et vigtigt begreb i partikelfysikken, nemlig stabilitet. For partikler fra 2. og 3. familie eller sammensætninger af sådanne, er det