

Run-3 van de Large Hadron Collider

Voor het eerst sinds drie jaar bewegen er weer protonen door de Large Hadron Collider (LHC) op CERN. Zowel aan de versneller als de experimenten is onderhoud gepleegd en zijn er nieuwe detectoronderdelen geïnstalleerd. De eerste proton-protonbotsingen van begin juli markeren de start van run-3, een periode van vier jaar waarin tweemaal zoveel data worden verzameld als in de bestaande dataset. Een goed moment om de balans op te maken door voor elk van de experimenten waaraan Nederlandse wetenschappers een bijdrage leveren te zien wat de belangrijkste resultaten tot nu toe zijn, op welke manier de detector is aangepast en waar het onderzoek zich op richt voor deze nieuwe run.

De Large Hadron Collider

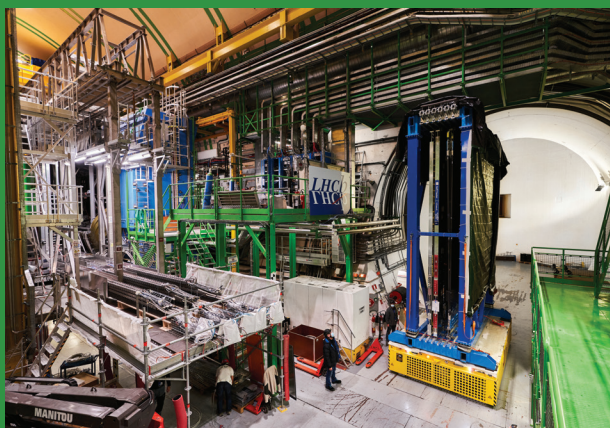
De Large Hadron Collider is de laatste stap in een keten van versnellers waarin bundels protonen (en regelmatig ook zware atoomkernen) tot zeer hoge energie versneld worden en rondjes draaien in de 27 kilometer lange tunnel. Op een aantal punten worden de protonbundels gefocust en kruisen ze elkaar waarna experimenten de vrijgekomen deeltjes registreren die in de botsingen gemaakt worden om zo iets te leren over de deeltjesinteracties. We kunnen zo in detail het bestaande standaardmodel bestuderen, maar hopen vooral ook antwoorden te vinden op de onderdelen die we nog niet begrijpen: de 'nieuwe fysica'. Hoe hoger de botsingsenergie, hoe makkelijker het is om (nieuwe) zware deeltjes te produceren en daarnaast geldt dat hoe meer botsingen je bekijkt, hoe nauwkeuriger je de resultaten kunt vergelijken met de voorspellingen. De maximale energie van

de protonen wordt vastgelegd door de sterkte van de dipoolmagneten (8,33 tesla) en door ervoor te kiezen om dichter tegen de limiet aan te werken is in run-3 de botsingsenergie nu 4,5% hoger dan voorheen (13,6 TeV in plaats van 13 TeV). Ook het aantal botsingen zelf is hoger in de nieuwe run omdat we zowel meer protonen in een bundel hebben kunnen krijgen ($14 \cdot 1,8 \cdot 10^{11}$ in plaats van $1,2 \cdot 10^{11}$) als de bundels beter kunnen focussen. Om de bijbehorende verhoogde datasnelheid aan te kunnen en gebruik te maken van ontwikkelingen in detectietechnieken hebben de experimenten veel werk verzet. Het totaal aantal botsingen in run-3 is ongeveer het dubbele van de bestaande dataset.

Theorie: het standaardmodel en nieuwe fysica

Het onderzoek naar de elementaire deeltjes en hun gedrag heeft een schat aan informatie opgeleverd en alle

deeltjes, hun eigenschappen en de krachten die hun interacties beschrijven zijn gevangen in het zogenoemde standaardmodel (SM). En hoewel het laatst ontbrekende element, het higgs-boson, tien jaar geleden werd ontdekt en veel voorspellingen met zeer grote precisie zijn geverifieerd, zijn er veel vragen waar de theorie geen antwoord op geeft. Zo is er bijvoorbeeld geen verklaring voor de oorsprong van de materie-antimaterie-asymmetrie in het heelal, donkere materie, de grootte van de massa's van deeltjes of de structuur van de drie families en krachten. Het onderzoek bij de LHC hoopt op de nieuwe energieschaal signalen te ontdekken van een onderliggende theorie ('nieuwe fysica') die op al deze vragen een antwoord heeft. Nieuwe fysica openbaart zich als een afwijking van de data ten opzichte van de SM-voorspelling. Om gevoelig te zijn voor deze afwijkingen en optimaal gebruik te kunnen maken van



Links: de nieuwe SciFi-tracker (rechts) wacht in de experimentele hal om zijn plek in het LHCb-experiment in te nemen. Rechts: installatie van de nieuwe vertexdetector van het LHCb-experiment. Foto's: CERN.

de experimentele data, is het erg belangrijk dat de voorspellingen van het standaardmodel met een hoge precisie worden berekend. Dit is niet enkel een kwestie van er met pen en papier voor gaan zitten: uitdrukkingen kunnen zo groot worden dat ze niet meer in het RAM-geheugen van een computer passen en simulaties voor deeltjesbotsingen doen er zo lang over dat het draaien van een simulatie langer duurt dan het uitvoeren van het experiment. Om deze hordes te kunnen nemen moet er onderzoek worden gedaan naar hoe zo'n berekening theoretisch, maar ook praktisch uitgevoerd kan worden. Dit soort berekeningen heeft bijvoorbeeld een verbeterde kennis over de interne structuur van de protonen zelf opgeleverd, wat een cruciaal ingrediënt is voor alle metingen die gedaan worden bij de LHC. Naast het verbeteren van de SM-berekeningen, is het ook interessant om te voorspellen wat nieuwe fysica voor signaal kan geven. Een recente ontwikkeling is effectieve veldentheorie (EFT), waarin de zoektocht naar nieuwe fysica georganiseerd wordt. In EFT wordt het standaardmodel uitgebreid met nieuwe effectieve koppelingen, die (quantum)effecten bevatten van nieuwe deeltjes die nog te zwaar zijn om direct geproduceerd te worden. Dit geeft ons een algemene manier om afwijking in de experimentele data samen te vatten.

Het LHCb-experiment

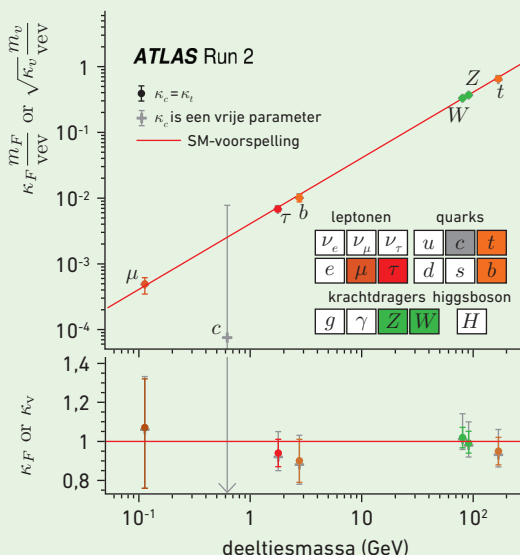
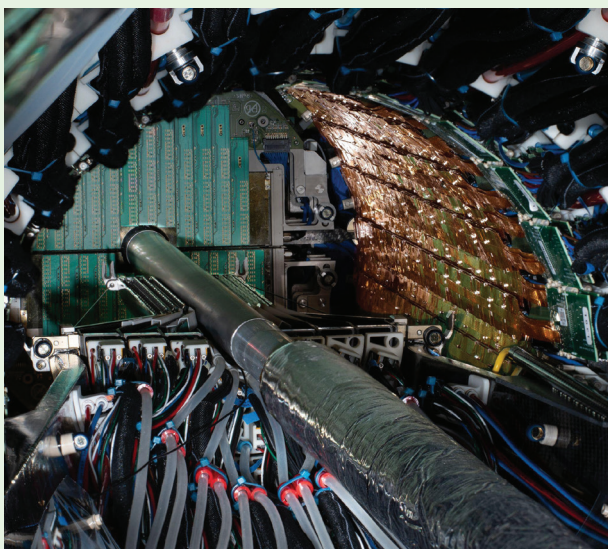
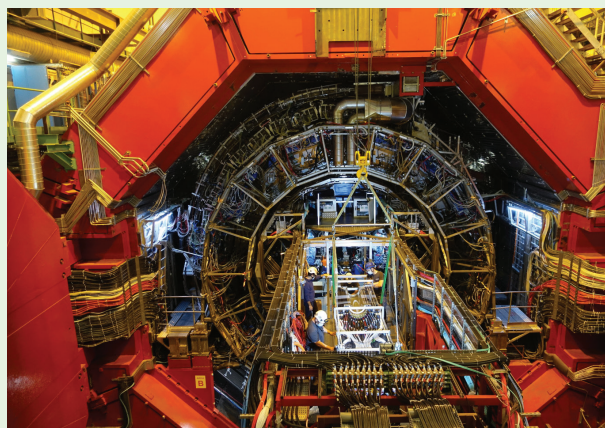
Het LHCb-experiment is zo ontworpen dat kleine effecten met zeer hoge precisie bestudeerd kunnen worden. Een voorbeeld daarvan zijn de subtiele verschillen tussen de vervallen van deeltjes en antideeltjes, omdat deze te klein zijn om de baryogenese in het vroege heelal te verklaren. Daarnaast haalde LHCb het nieuws met de ontdekking van penta-quarks, gevolgd door nog veel meer ontdekkingen van onbekende hadronen die uit vier en vijf quarks bestaan. LHCb zoekt naar tekenen van nieuwe fysica in de (quantum)interferentie tussen reeds bekende en nog onbekende virtuele deeltjes die potentieel te zwaar zijn om direct geproduceerd te worden bij de LHC. In run-1 en run-2 is een aantal zogenoemde flavouranomalieën waargenomen, voornamelijk in zeer zeldzame processen waarbij er een overgang plaatsvindt van een b-quark naar een s-quark en twee leptonen. LHCb ziet dat er te weinig muonen geproduceerd worden (ten opzichte van elektronen) vergeleken met de voorspelling in een theorie met leptonuniversaliteit. De effecten zijn nog niet statistisch significant genoeg en er zijn meer data nodig om een observatie te kunnen claimen. Deze data zullen verzameld worden in run-3 en run-4. Het experiment heeft een grote vernieuwingslag gemaakt en is druk

bezig de nieuwe detector te karakteriseren. De nieuwe data zullen verzameld worden onder andere condities dan voorheen; een vijf keer hogere hoeveelheid proton-protonbotsingen per seconde die een strengere selectie vereist om de interessante botsingen uit de data te filteren. Om dit voor elkaar te krijgen heeft het experiment de hardware vervangen door een systeem van grafische processors (*graphical processing units*, GPU). Deze GPU's filteren alle botsingen die vervolgens worden gekalibreerd en in quasi-realtime worden geanalyseerd op een computercluster die de uiteindelijke dataselectie doet. Om de verhoogde hoeveelheid deeltjes te kunnen verwerken is het centrale trackingsysteem rond het interactiepunt vervangen door een pixeldetector en de detectoren na de magneet zijn nu opgebouwd uit *scintillation fibres*. Beide systemen zijn ontworpen en mede gebouwd op Nikhef.

Met de grotere snelheid van data verzamelen, een verbeterde detector en realtime-selecties verwacht LHC een significante verbetering in de precisie van de eerder genoemde metingen. En de nieuwe oogst uit run-3 zal ongetwijfeld ook weer nieuwe hadronen opleveren.

Het ATLAS-experiment

Het ATLAS-experiment is gebouwd om verschillende soorten hoge-



Linksboven: foto van een van de New Small Wheels op weg naar de ATLAS-detector diep onder de grond. Rechtsboven: de ALICE-detector tijdens de installatie van de *outer barrels* van het *inner trackingsysteem*. De oranje-rode structuur is het juk van de elektromagneet die het magneetveld produceert dat gebruikt wordt om de impuls van de geproduceerde deeltjes te analyseren. Alle detectorsystemen bevinden zich in de magneet, rondom de bundelpijp. In het midden van de foto is een draagstructuur zichtbaar waarin zich vier detectortorlagen bevinden die een halve cirkel beschrijven. Linksonder: het bijna complete *inner trackingsysteem*: in het midden de bundelpijp, met de helft van de *inner barrel*, die bestaan uit drie halve cilinders detectortorlagen en draagstructuur. De *outer barrel*lagen zijn zichtbaar aan de rechterkant. De gele kleur is van flexibele kabels die de voedingsspanning aanvoeren. Foto's: CERN. Rechtsonder: grafiek van de sterkte van de koppeling van deeltjes aan het higgsboson als functie van hun massa. De rode lijn laat de voorspelling van het standaardmodel zien.

energie proton-protonbotsingen in detail te bestuderen. De detector 'ziet' bijna de hele ruimtewinkel en bepaalt eigenschappen zoals energie en richting van de deeltjes die in de botsing geproduceerd worden. Hiermee worden zowel de bekende deeltjes zoals het top-quark en (paren van) krachtdeltjes beter in kaart gebracht, als gezocht naar nieuwe fenomenen en nieuwe deeltjes. De belangrijkste ontdekking is die van het higgsboson, waardoor we begrijpen hoe deeltjes

massa krijgen. In run-2 hebben we verder onderzocht of de koppeling van het higgsboson aan fermionen en krachtdeltjes inderdaad zoals voorspeld direct gekoppeld is aan hun massa. Zowel de hogere botsingsenergie als de toegenomen hoeveelheid botsingen maakt het mogelijk de grenzen te verleggen, zowel in de precisie waarmee we bestaande, vaak zeldzame, processen kunnen bestuderen alsook in de zoektocht naar signalen

van nieuwe fysica. In run-3 zullen we in meer detail het higgsboson bestuderen zoals de koppeling aan lichte quarks en muonen, de levensduur en de koppeling van het higgsboson aan zichzelf. De toegenomen statistiek staat toe dat bekende processen nu ook bestudeerd kunnen worden als functie van de energie of richting van deeltjes. De afwijkingen van de voorspelling in verschillende metingen kan in het EFT-kader gecombineerd worden om de optimale gevoeligheid

te bereiken voor mogelijk verborgen nieuwe fysica.

Tijdens run-3 zijn er bij elke kruising van de protonbundels gemiddeld zestig botsingen in de detector (dat waren er veertig in run-2). De detector moet niet alleen deze data kunnen verwerken en de individuele botsingen uit elkaar kunnen houden, maar vereist ook een strengere en snellere selectie (de trigger) om uit de één miljard botsingen de duizend te selecteren die bewaard kunnen worden. Met de twee nieuwe subdetectoren, de New Small Wheels (NSW), kunnen we niet alleen muonen (deeltjes die een belangrijke rol spelen in veel processen) nauwkeuriger identificeren en reconstrueren, maar hun snelle tijdsresolutie maakt dat we ze vanaf nu ook kunnen gebruiken in de trigger. Run-3 is ook de vuurdoop voor een nieuw en universeel detector-uitleessysteem (FELIX). Bij beide nieuwe systemen zijn Nikhefonderzoekers en technici betrokken geweest.

Het ALICE-experiment

Het ALICE-experiment bestudeert kernmaterie bij extreem hoge temperatuur ($> 10^{12}$ K) en dichtheid die geproduceerd wordt in botsingen van loodkernen in de LHC. Bij die temperaturen ondergaat kernmaterie een faseovergang naar een quark-gluonplasma, waarin quarks, die bij lage temperatuur zijn opgesloten in protonen en neutronen, zich vrij kunnen bewegen over relatief grote afstanden. Doel is om te begrijpen hoe de eigenschappen van deze materie tot stand komen uit het gedrag van de sterke wisselwerking, de fundamentele natuurkracht die quarks bindt in protonen en neutronen.

Tijdens de stillegging (shutdown) heeft de ALICE-detector een aantal belangrijke upgrades ondergaan. De uitlees-elektronica van veel detectoronderdelen is vervangen zodat de detector sneller uitgelezen kan worden en vijftig keer meer botsingen kan meten dan voorheen. Nederlandse onderzoekers hebben gewerkt aan het vervangen van het inner trackingsysteem door een met een hogere plaatsresolutie (miljard pixels van 30×30 micron) zodat het verval

van deeltjes met zware charm- en beauty-quarks beter gereconstrueerd kunnen worden. Om alle meetgegevens te verwerken is ook een nieuwe *event processing farm* geïnstalleerd: 250 computers met elk acht grafische processorkaarten en tachtig petabyte schijfruimte.

De vernieuwde ALICE-detector kan niet alleen metingen herhalen met veel grotere precisie, maar ook kwalitatief nieuwe metingen doen. Zo zullen er metingen gedaan worden van de thermische straling, in de vorm van fotonen en elektron-positronparen, die unieke informatie geeft over de temperatuur van het plasma voordat het afkoelt en hadroniseert, om modelberekeningen van de botsingen te valideren. De metingen uit run-1 en 2 waren hiervoor niet precies genoeg. Er zijn ook open vragen rond de productie van charm-quarks. Als die geproduceerd worden in botsingen kunnen ze niet vrij ontsnappen, maar vormen ze direct gebonden toestanden in combinatie met een anti-quark (meson) of met twee andere quarks (baryonen). Een verrassend resultaat in run-2 was dat er veel meer baryonen met charm-quarks geproduceerd worden bij de LHC dan werd verwacht op basis van metingen in botsingen met elektronenbundels. Met de vernieuwde detector kan ALICE de productie van verschillende typen baryonen in detail in kaart brengen om daarmee beter te begrijpen hoe deze deeltjes gevormd worden.

De toekomst van de LHC

Ook run-3 duurt niet eeuwig en naast het onderzoek zelf zijn veel deeltjesfysici al bezig met de ontwikkeling van nieuwe detectoren. En niet voor niets. Vanaf 2029 zal de LHC zo'n enorme stap maken in hoeveelheid botsingen dat we spreken van de HL-LHC (High-Luminosity LHC). Voor ATLAS zal het aantal gelijktijdige botsingen groeien van zestig naar tweehonderd simultane botsingen. Dit vereist bijvoorbeeld een compleet nieuwe trackingdetector (ITK) om sporen van deeltjes te herkennen en op Nikhef wordt daar nu al druk aan gewerkt. Ook de ontwikkeling van

detectietechnieken staat gelukkig niet stil. De sleutel tot succes voor de drie detectoren in run-4 en run-5 ligt in de ontwikkeling van *fast-timing* detectoren. Deze informatie helpt niet alleen bij het uit elkaar houden van individuele botsingen (die niet precies op het hetzelfde moment en op dezelfde plek plaatsvinden) uit elkaar te houden, maar de tijdsinformatie van 'hits' in de detector helpt ook bij het terugvinden van sporen in de detector en de deeltjestype-identificatie. Samen met de R&D-afdeling en de technische groepen zet Nikhef de komende jaren in op de ontwikkeling van deze technieken en het inpassen van deze technologie in de detectoren en reconstructie-algoritmes voor de toekomst.

Conclusie

Met de herstart van de LHC en de nieuwe detectorelementen breekt er een interessante periode aan waarin we meer zullen leren over de wereld van de elementaire deeltjes. Het wordt spannend om in de komende run te zien of de 'onbegrepen signalen' die we nu zien doorzetten en of we in de nieuwe data eindelijk het antwoord gaan vinden op onze openstaande vragen.

Marco van Leeuwen is senior onderzoeker bij Nikhef. Hij doet onderzoek aan zware-ionenbotsingen bij het ALICE-experiment, waarvan hij vanaf komend jaar de woordvoerder zal zijn.

Patrick Koppenburg is senior onderzoeker bij Nikhef. Hij doet onderzoek aan CP-schending en nieuwe hadronen bij het LHCb-experiment op CERN.

Melissa van Beekveld is postdoc aan de Universiteit van Oxford. Zij is theoretisch natuurkundige (fenomenologie) en werkt aan precisieberekeningen in de deeltjesfysica.

Ivo van Vulpen is universitair hoofddocent aan de UvA en doet onderzoek aan eigenschappen van het higgsdeeltje met behulp van het ATLAS-experiment op CERN.
Ivo.van.Vulpen@nikhef.nl