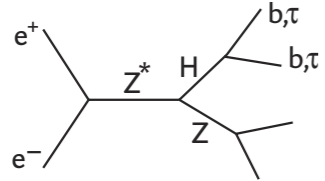


Het uur der waarheid II

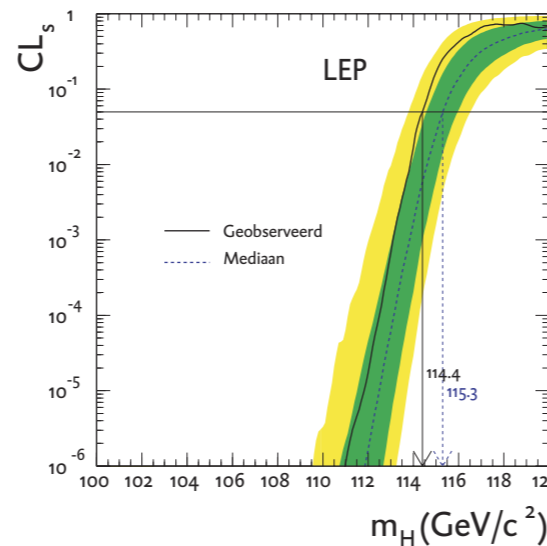
In 2007 moet bij CERN in Genève de Large Hadron Collider van start gaan. Een van de belangrijkste doelstellingen van dit megaproject is het onderzoeken van de higgs-sector van het standaardmodel van de elementaire deeltjes, die in brede kring als een 'missing link' in onze kennis van de subatomaire wereld gezien wordt. In het eerste artikel in het vorige NTvN bespraken wij de theoretische achtergronden. Hieronder zullen wij de experimentele situatie van dit moment samenvatten *Sijbrand de Jong en Ronald Kleiss*

Zoals besproken in [1], is de meest in het oog springende eigenschap van het neutrale, spinloze higgsdeeltje het feit dat het sterker koppelt aan de andere standaardmodeldeeltjes naarmate hun massa groter is. Om die reden was de Large Electron Positron (e^+e^-)-botser (LEP) op CERN bij Genève een ideale plaats om higgsdeeltjes te maken. In de eerste fase is bij LEP de zwaartepuntsenergie van de inkomende e^+ en e^- bundels vrijwel precies op de massa van het Z boson afgesteld. Op die manier is de werkzame doorsnede om Z deeltjes te maken het hoogst en zijn er meer dan vijf miljoen Z deeltjes per botsingspunt geproduceerd. In totaal waren er vier van die botsingspunten waar respectievelijk de ALEPH, DELPHI, L3 en OPAL detector stonden opgesteld. Omdat het Z deeltje zwaar is, koppelt het higgsdeeltje er vrij sterk aan. Het proces om higgsdeeltjes te produceren is in dat geval in feynmandiagrammen uitgedrukt.



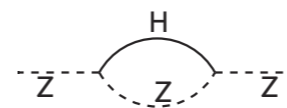
De vervalbreedte van het higgsdeeltje is in het standaardmodel veel kleiner dan die van het Z boson, zodat in de eindtoestand altijd een reëel higgsdeeltje en een virtueel Z boson worden geproduceerd.¹ In een tweede fase van LEP is de zwaartepuntsenergie, dat wil zeggen de totale hoeveelheid energie die beschikbaar is voor deeltjesproductie, verhoogd van $\sqrt{s} = m_Z c^2$ GeV naar $\sqrt{s} = 206$ GeV. In dat geval kunnen zowel de Z als de H in de eindtoestand reëel worden geproduceerd zolang de massa van het higgsdeeltje $m_H < \sqrt{s} - m_Z$ is. Zolang

het higgsdeeltje een massa heeft van minder dan circa 130 GeV valt het dominant (80 – 90 %) in een b- en een anti-b-quark en voor 6 – 8 % in een $\tau^+\tau^-$ leptonpaar. Deze vervalfracties hangen enigszins af van de massa van het higgsdeeltje, maar worden met een precisie van beter dan een procent voorspeld binnen het standaardmodel. Het verval van het Z boson is zeer nauwkeurig gemeten: het valt in 3,4 % van de gevallen in elk van de leptonparen e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ en $\tau^+\tau^-$, voor 19,9 % in een $\nu\bar{\nu}$ -paar (zonder onderscheid te maken in het soort neutrino) en voor 69,9 % in quarkparen, $q\bar{q}$. In het laatste geval is het verval in vijf van de zes bestaande quarks, namelijk, $q = u, d, c, s, b$, omdat twee maal de massa van de topquark (m_t) meer is dan de massa van het Z boson en dat verval dus kinematisch verboden is. Als de Z valt in quarkparen, is dit in 21,7 % van de gevallen een $b\bar{b}$ -paar. In de LEP experimenten werd productie van higgsdeeltjes in de volgende topologieën gezocht, die samen ongeveer 94 % van de totale productie dekken: $e^+ + e^- \rightarrow Z^0 + H^0 \rightarrow$ (lepton-antilepton of quark-antiquark) + $b\bar{b}$ -paar of $\tau^+\tau^-$. De strategie van de analyse bestaat uit het selecteren van de gebeurtenissen met een aantal criteria, zoals het aantal geladen leptonen, het aantal quarkjets,² de impuls-on-



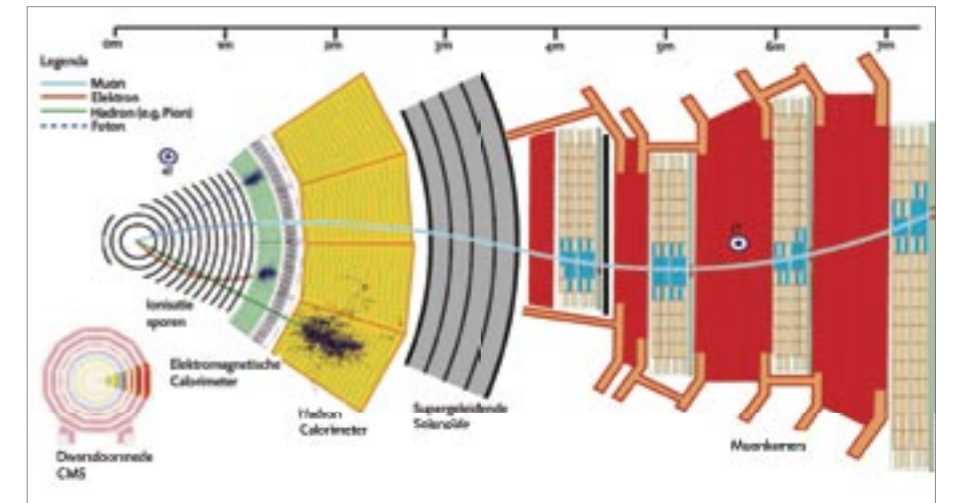
Figuur 1 De waarschijnlijkheid voor het observeren van een signaal van higgsdeeltjes (CL_s) als functie van de hypothese voor de massa van het higgsdeeltje (m_H). De stipplijn geeft de mediaan verwachte curve in afwezigheid van signaal voor higgsdeeltjes geschat met een simulatie. De donkere en lichte grijze band geven de gebieden met 68 % en 95 % kans dat de geobserveerde curve in het grijze gebied valt indien er geen higgsdeeltje bestaat, wederom gebaseerd op Monte-Carlo simulatie. De vette doorgetrokken lijn geeft de feitelijk geobserveerde curve in de gecombineerde data van de vier LEP experimenten. Tot 114,4 GeV is de kans dat een higgsdeeltje is geobserveerd minder dan 5 %. Deze kans neemt zeer snel af met afnemende massa.

teerd die geen higgsdeeltje bevatten (de achtergrond). Behalve achtergrond die door goede reconstructiesoftware en strenge selectiesneden tot willekeurige kleine proporties kan worden teruggedrongen (denk hierbij bijvoorbeeld aan quarkparen die door annihilatie van e^+e^- in Z bosonen of fotonen en hun daaropvolgende verval gevormd worden en waarvan bijvoorbeeld twee geladen deeltjes per abuis als geïsoleerde geladen leptonen worden geïdentificeerd), is er ook een *irreducibele* achtergrond van bijvoorbeeld de productie van Z bosonparen, waarbij één Z valt in een $b\bar{b}$ -paar. De verschillende analyses zijn geoptimaliseerd met neurale netwerken en *likelihood*-methoden, zodat voor elk van de vier LEP experimenten in elk van de zoektopologieën efficiënties van 20 tot 60 % zijn gehaald bij een achtergrond van minder dan één tot enkele gevallen. Deze resultaten zijn vervolgens gecombineerd met een geoptimaliseerde statistische methode [2]. Het resultaat van al deze moeite is te zien in figuur 1. Bij LEP is uiteindelijk geen signaal voor het higgsdeeltje gezien, waaruit de conclusie wordt getrokken dat de massa m_H met meer dan 95% zekerheid niet kleiner dan 114,4 GeV/ c^2 kan zijn. Behalve door directe productie zijn effecten van het standaardmodel-higgsdeeltje ook indirect waarneembaar door quantumcorrecties te beschouwen op andere processen, zoals $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow q\bar{q}$, waarbij luscorrecties, zoals in onderstaande figuur aangegeven, een rol spelen.



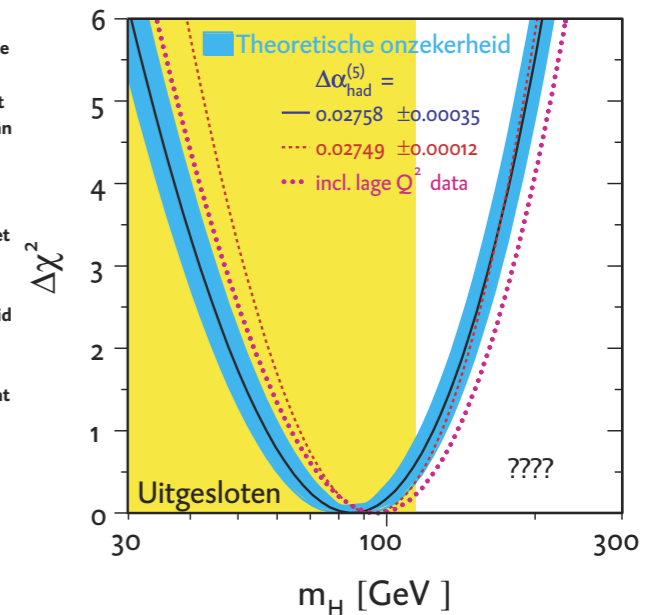
Deze correcties hangen af van de logaritme van de massa van het higgsdeeltje, $\log(m_H)$. Door een buitengewoon nauwkeurige meting van alle mogelijke elektrozwakke processen bij LEP kan $\log(m_H)$ als een van de vrije parameters in het standaardmodel worden gefit. De recentste voorlopige resultaten [3] van een dergelijke fit zijn gegeven in figuur 2. Als de 95 %-zekerheidsomgrens op de massa van het higgsdeeltje in aanmerking wordt genomen en de waarschijnlijkheidscurve wordt genormeerd op het interval van 114,4 GeV tot

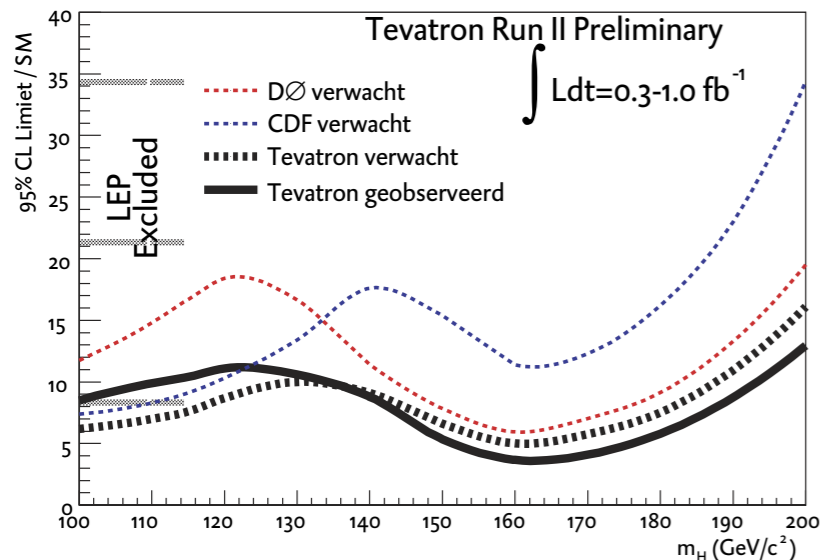
Detectoren voor hoogenergetische deeltjes



Moderne detectoren in de deeltjesfysica volgen vrijwel allemaal dezelfde opbouw. Hierbij worden geladen deeltjes gemeten door het ionisatiespoor dat ze achterlaten in dunne vastestoffellers en tellers die met gas werken. Deze detectoren worden zo ijl mogelijk gehouden om verstrooiing van deeltjes tegen te gaan. Daarna volgt een laag calorimeters, die de meeste neutrale en geladen deeltjes volledig stoppen, waarbij de energie van die deeltjes wordt gemeten. Elektronen en fotonen worden in betrekkelijk korte afstand geabsorbeerd en door de calorimeter in de diepte te segmenteren kunnen deze deeltjes worden onderscheiden van hadronen (deeltjes met quarks), die veel dieper in de calorimeter doordringen. Neutrino's en muonen dringen dwars door de calorimeters heen. Muonen zijn geladen en laten een ionisatiespoor achter. Dit wordt gebruikt door aan de buitenkant nog een sporendetector te zetten, de zogenaamde muon-kamers. Neutrino's zijn redelijkerwijze niet detecteerbaar, maar het effect ervan kan worden ingeschat, door de impuls van alle andere deeltjes in alle mogelijke richtingen te meten en de wet van behoud van impuls de niet gemeten componenten op te sporen. Hiervoor is het nodig om een detector te bouwen die het interactiepunt goed omsluit. De illustratie geeft een indruk van hoe de verschillende deeltjes zichtbaar worden gemaakt. De taartpunt die getoond wordt is in werkelijkheid een van vele die samen het interactiepunt omringen.

Figuur 2 Fit van de massa van het higgsdeeltje en enkele andere parameters van het standaardmodel aan de LEP precisie-metingen. Het minimum van de curve correspondeert met $\chi^2/\text{vrijheidsgraad} = 18/13$ en dus een fitwaarschijnlijkheid van ongeveer 17%. Dit is het recentste voorlopige resultaat [3].



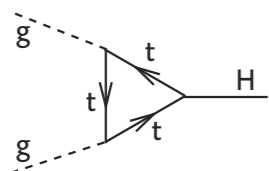


Figuur 3 Limiet bij 95% CL op de werkzame doorsnede genormeerd op de SM werkzame doorsnede als functie voor de massa van het higgsdeeltje voor alle voorlopige analyses van CDF en DØ gecombineerd [4].

oneindig, is een eenzijdige bovenlimiet voor de massa van het higgsdeeltje af te leiden van $m_H < 199$ GeV bij 95 % zekerheid. In samenvatting laten de experimentele LEP-resultaten zien dat onder de aanname dat het standaardmodel – inclusief de minimale standaardmodel-higgs-sector – geldig is, de massa van het higgsdeeltje met meer dan 95 % zekerheid in het interval $114,4 < m_H < 199$ GeV moet liggen, met een voorkeur voor een lage massa in dit interval. In zekere zin kan worden gezegd dat de massa van het standaardmodel-higgsdeeltje bij LEP is gemeten met een precisie van ongeveer $25 \text{ GeV}/c^2$.

HIGGSJACHT BIJ DE TEVATRON

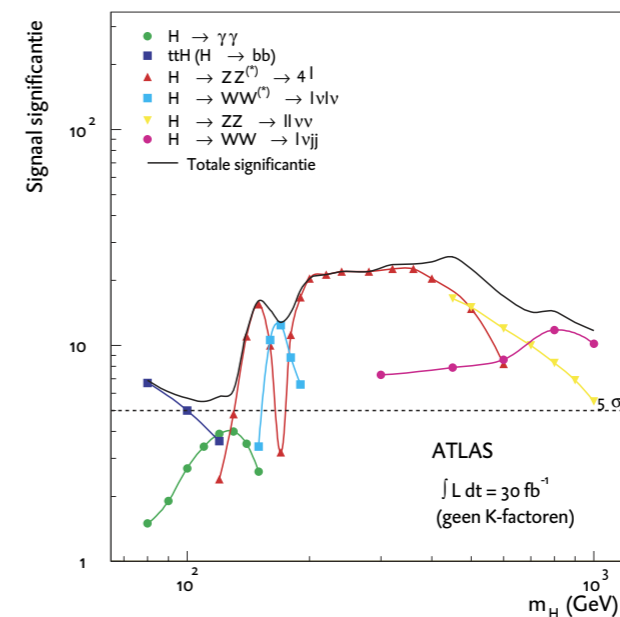
De LEP-botser is in 2000 gesloten.³ Op dit moment is de versneller met de hoogste energie de Tevatron $p\bar{p}$ botser op Fermilab bij Chicago. Ook bij het Tevatron is de productie van Z of W vectorbosonen waarvan vervolgens een higgsdeeltje “afstraalt” ($Z \rightarrow ZH$ of $W \rightarrow WH$) een van de belangrijkste kanalen om higgsdeeltjes te produceren. Echter, daarnaast kan het higgsdeeltje ook rechtstreeks worden geproduceerd uit de fusie van twee gluonen, de dragers van de sterke kernkracht. Dit is een wat curieus proces, want gluonen hebben geen rustmassa en higgsdeeltjes koppelen dus niet direct aan gluonen. In het volgende quantumcorrectieproces wordt die koppeling echter indirect wel gerealiseerd.



Dit proces heeft een relatief grote waarschijnlijkheid doordat alle drie de koppelingen groot zijn. De gluonen koppelen aan de topquarks met de sterke koppelingsconstante van orde 0,1, terwijl de koppeling van topquarks aan het higgsdeeltjes zelf een koppelingsconstante heeft van ongeveer 1.⁴ De enige onderdrukking van dit diagram komt dus van de topquarks in de loop die allemaal virtueel moeten zijn en zo voor een propagatoronderdrukking zorgen. Omdat gluonen in hoog-energetische (anti-)protonen rijkelijk voorhanden zijn, is het productieproces $gg \rightarrow H$ een stuk waarschijnlijker dan de productie van higgsdeeltjes in associatie met een Z of W boson. Experimenteel is het heel lastig het proces $gg \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$ waar te nemen, omdat $b\bar{b}$ -paren via de sterke wisselwerking geproduceerd worden met duizenden per seconde, terwijl we via gluonfusie hooguit zo'n duizend higgsdeeltje verwachten in de totale achtjarige levensduur van de Tevatron experimenten. Dat betekent een signaal-ruisverhouding van minder dan 1 op 10^8 voor gevallen met een vergelijkbare signatuur. Tot op heden heeft nog niemand een analysetechniek gepubliceerd die hier succes kan hebben. Voor grote higgsdeeltjesmassa kan het higgsdeeltje in W^+W^- paren vervallen en die leiden tot eindtoestanden in de detector die wel goed van de achtergrond kunnen worden onderscheiden, waarbij de irreducibele W^+W^- relatief klein is. Dus dit directe productiekanal is belangrijk in het gebied met grote higgsdeeltjesmassa ($m_H > 130 \text{ GeV}/c^2$). Daarentegen kunnen de gevallen waarin ook een W of Z wordt geproduceerd in associatie met het higgsdeeltje wel vrij makkelijk worden herkend door de W

en Z vervallen te reconstrueren en dan nog twee b-quarkjets te eisen in de gebeurtenis. Van deze gevallen verwachten we in enige jaren tijd slechts enkele honderden en het kritisch punt is dan ook om deze gevallen efficiënt te registreren en te reconstrueren. De beste gevoeligheid voor detectie van higgsdeeltjes wordt, net als bij LEP, verkregen door alle analyses van alle mogelijke vervalkanalen en van de twee Tevatron-experimenten CDF en DØ te combineren. Dit is door de uiteenlopende gevoeligheid van de verschillende analyses een niet-triviale taak waarvoor nog geen sluitende analytische formules bekend zijn, maar er is wel veel werk gedaan aan benaderingsformules die bijna optimaal zijn. Het resultaat van de combinatie van de verschillende analyses is te zien in figuur 3. De verschillende analyses zijn op verschillende hoeveelheden data uitgevoerd corresponderend⁵ met geïntegreerde luminositeiten van 0,3 tot $1,0 \text{ fb}^{-1}$. Inmiddels is zo'n 2 fb^{-1} aan data beschikbaar voor analyse en zal in 2008 meer dan 4 fb^{-1} beschikbaar zijn. Ook worden de analysetechnieken steeds beter en is de efficiëntie voor de herkenning van b-quarks met zo'n 50 % toegenomen. Dit betekent dat met name voor $m_H < 140$ GeV de gevoeligheid meer dan evenredig met de geanalyseerde luminositeit zal toenemen in het komende jaar. De combinatie van de verschillende analysekanalen is nog niet optimaal, mede omdat nog niet alle analyses voor alle mogelijke massa's van het higgsdeeltje zijn geoptimaliseerd. De verwachting is dat eind 2008 de gevoeligheid voor uitsluiting van massa's van het higgsdeeltje onder de 170 GeV in het standaardmodel beter dan 95 % is. Dit betekent nog niet dat als een higgsdeeltje bestaat

Figuur 4 Verwachte significantie in standaarddeviaties voor een ontdekking van het higgsdeeltje als functie van de massa van het higgsdeeltje voor een geïntegreerde luminositeit van 30 fb^{-1} bij het ATLAS-experiment [5]. Het CMS-experiment heeft een vergelijkbare gevoeligheid.



met een massa in dit massabereik het dan ook gevonden zal zijn, daarvoor zijn aanzienlijk meer data of aanzienlijk efficiëntere analyses nodig. Wel is waarschijnlijk dat als er een standaardmodel-higgsdeeltje is met een massa onder de 170 GeV bij het Tevatron de eerste hints zullen worden gezien. Bij een gunstige statistische fluctuatie (dat wil zeggen er worden aanzienlijk meer gevallen dan gemiddeld geproduceerd) is meer dan een hint mogelijk.

DE LARGE HADRON COLLIDER: BUIGEN OF BARSTEN

In 2007 zal de Large Hadron Collider (LHC) van start gaan. Bij de LHC zal de bundelenergie zeven keer hoger zijn dan bij het Tevatron en de luminositeit wel zo'n honderd keer. De piekenergie zal eerst in 2008 worden gehaald en de luminositeit zal vanaf die tijd nog toe moeten nemen tot de ontwerpwaarde. Tegen 2010 kan een geïntegreerde luminositeit worden verwacht van 30 fb^{-1} , waarbij uit figuur 4 blijkt dat het hele mogelijke massabereik van het standaardmodel-higgsdeeltje wordt gedekt door ATLAS [5] en CMS, de twee concurrerende experimenten bij de LHC. Bij de LHC kan een standaardmodel-higgsdeeltje ons niet ontlopen. Blijkt het standaardmodel-higgsdeeltje niet te bestaan, dan kan bij de LHC worden gekeken naar de productie van W bosonparen. Uit studie daarvan zal dan blijken wat een alternatief mechanisme kan zijn om de bovenmatige stijging van de WW werkzame doorsnede te beteugelen.

CONCLUSIE

Het higgsmechanisme is een noodzakelijk onderdeel van het standaard-

model. Dit mechanisme voorspelt het bestaan van het higgsdeeltje met nauwkeurig omschreven eigenschappen, maar met als grote onbekende de massa van dit higgsdeeltje. Er bestaan theoretische en experimentele begrenzingen van de mogelijke massa van het standaardmodel-higgsdeeltje. Zowel bij het Tevatron als de LHC is productie van higgsdeeltjes in dit massabereik mogelijk. In de periode 2008/2009 zal voor het standaardmodel en het daarin beschreven higgsmechanisme het uur van de waarheid slaan. Tussen het Tevatron en de LHC zal in die tijd een nek-aan-nek-race zijn om de eerste hints van het standaardmodel-higgsdeeltje te zien, of om het bestaan van het higgsdeeltje voor grote gebieden in de massa van het higgsdeeltje uit te sluiten. Als het higgsdeeltje niet blijkt te bestaan moet er op de energieschaal van 1 TeV nieuwe fysica zijn, die onder andere kan worden opgespoord door naar de productie van WW bosonparen te kijken bij LHC energie. Bij de LHC zal dus hoe dan ook duidelijk worden of in het standaardmodel alles op zijn plaats valt of wat er voorbij het standaardmodel aan nieuwe fysica is.

REFERENTIES

- 1 S. de Jong en R. Kleiss, 'Het uur der zwaarheid' (1), NTvN 73-2 (2007) 42.
- 2 'Search for the standard model Higgs boson at LEP', LEP Working Group for Higgs boson searches and ALEPH Collaboration and DELPHI Collaboration and L3 Collaboration and OPAL Collaboration (R. Barate et al.), Phys. Lett. B565 (2003) 61-75.
- 3 De recentste voorlopige resultaten van de precisiemetingen bij LEP zijn te vinden op <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>.



Ronald Kleiss (links) en Sijbrand de Jong (rechts) zijn hoogleraar in respectievelijk de theoretische en de experimentele hoge energie fysica aan de Radboud Universiteit Nijmegen. Hun interesse gaat uit naar de grenzen van het standaardmodel. Zij zijn beiden actief betrokken bij de inspanningen ten behoeve van de LHC.

- 4 De recentste voorlopige resultaten van de zoektocht naar het higgsdeeltje bij het Tevatron zijn te vinden op <http://tevnpfwg.fnal.gov/>.
- 5 De voorspellingen voor de fysicamogelijkheden van het ATLAS-experiment, daarbij inbegrepen het potentieel om het higgsdeeltje te ontdekken is te vinden op <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/TDR/access.html>.

NOTEN

- 1 We noemen een deeltje reëel als de relatie tussen zijn energie, impuls en rustmassa wordt gegeven door $E^2 = p \cdot pc^2 + m^2c^4$. Door de onzekerheidsrelatie van Heisenberg is het mogelijk deze relatie voor korte tijd te schenden. Hoe groter de schending, hoe korter de tijd dat dat mogelijk is. Deeltjes waarvoor de reële energie-impuls-massa relatie is geschonden noemen we virtueel. Ze komen bijvoorbeeld als tussentoestand voor in interacties.
- 2 Quarks komen door de aard van de sterke wisselwerking niet vrij voor, maar in combinaties van een quark met een anti-quark (een meson, zoals het pion) en van drie quarks (een baryon, zoals het proton). Een gevolg is dat als een quark met geweld uit zo'n stabiele combinatie wordt gehaald, het de beschikbare energie zal gebruiken om mesonen (en soms baryonen) te vormen als een soort kralenketting achter zich aan. In een experiment wordt dit zichtbaar als een gecollimeerde stroom van deeltjes, die we een 'jet' noemen.
- 3 Dat heeft nog enig tumult veroorzaakt: op dat moment waren er signalen dat mogelijk een higgsdeeltje bij $m_H \approx 115$ GeV zou zijn gezien: echter, bij nadere, nauwkeurigere analyse bleek dit alarm loos.
- 4 Dat de massa van de topquark zodanig is dat de koppeling tussen topquark en higgsdeeltje een sterkte heeft van 1 is natuurlijk wel verdacht toevallig, maar tot op heden is er geen goede verklaring voor.
- 5 In de elementaire deeltjesfysica wordt werkzame doorsnede uitgedrukt in de eenheid barn (b). Een barn is 10^{-28} m^2 . Luminositeit of helderheid die over de tijd is geïntegreerd wordt dan uitgedrukt in b^{-1} , waarbij een luminositeit van $x \text{ b}^{-1}$ en een werkzame doorsnede van $y \text{ b}$ gemiddeld $x \cdot y$ gevallen oplevert.