

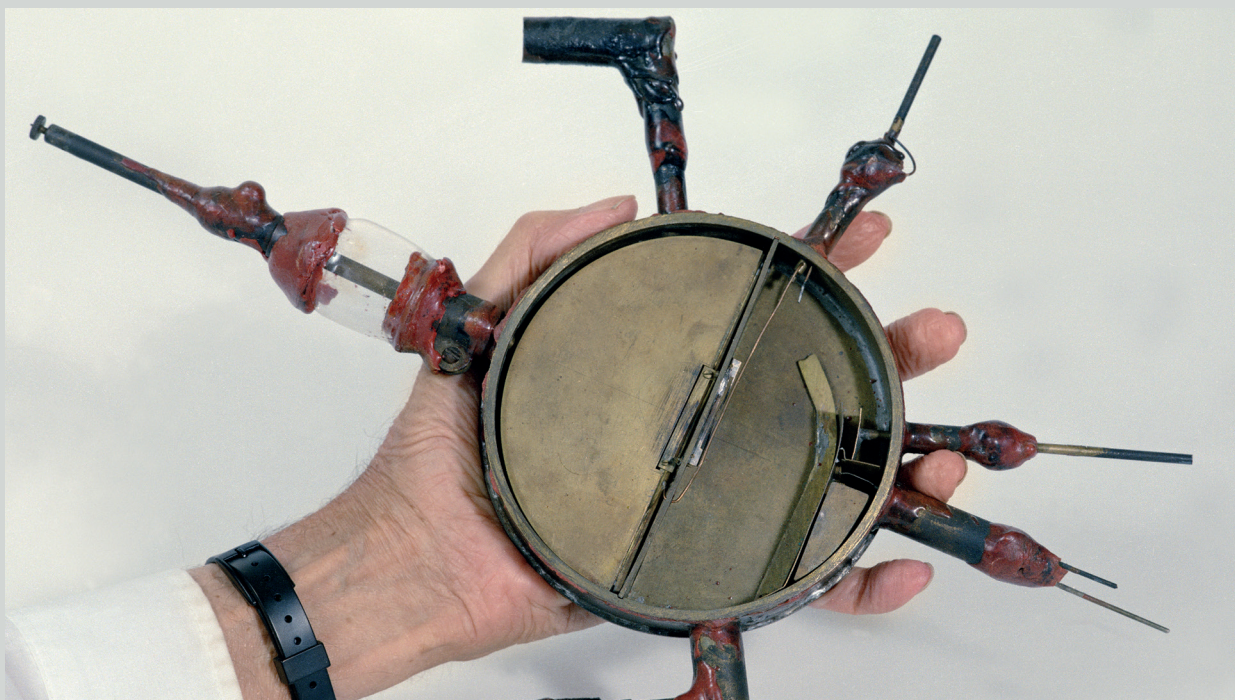
De volgende versneller

Wat de telescoop is voor astronomen en de microscoop voor biologen, is de deeltjesversneller voor hoge-energiefysici. Hoe hoger de energie van een deeltjesbotsing en hoe meer we er we produceren, hoe preciezer we de fundamentele materie kunnen bestuderen. Voor de volgende grote versneller, waar we nieuwe fundamentele deeltjes hopen te ontdekken, liggen nu drie projecten op de tekentafel.

Het principe van een deeltjesversneller berust op het principe dat de energie van geladen deeltjes toeneemt wanneer ze in een spanningsverschil versneld worden: een elektronvolt (eV) is de energie die een elektron of proton krijgt als het door een spanning van 1 volt versneld wordt. De eerste cyclotronversneller had een doorsnede van zo'n tien centimeter en de meermaals versnelde protonen bereikten een

maximale energie van zo'n 80.000 eV. De huidige recordenergie staat op naam van de LHC, de Large Hadron Collider op het Europese deeltjeslab CERN, met een omtrek van 27 kilometer. In deze versneller worden protonen versneld, dit jaar voor het eerst zelfs tot een energie van 6,8 TeV. De protonen vliegen meer dan tienduizend keer per seconde een rondje door de ring, waarbij ze een snelheid van meer dan 99,999999%

van de lichtsnelheid bereiken. Dankzij de grotere ring en de sterkere magneten die de deeltjes in de bocht houden, bereiken deze versnellers een energie die bijna honderd-miljoen keer zo hoog is als de energie die Lawrence een eeuw geleden bereikte. Door versnelde deeltjes op elkaar te knallen, wordt met gebruik van $E=mc^2$ de botsingsenergie omgezet in massa van nieuw geproduceerde deeltjes. De mogelijke tekortko-



Figuur 1. De eerste cyclotron, ontwikkeld en gebouwd in 1931 door Ernest Lawrence, paste in een handpalm [1].

mingen van het standaardmodel, de theorie die de fundamentele deeltjes en hun interacties beschrijft, worden door deeltjesfysici grofweg op twee manieren onderzocht. Aan de ene kant door het verbeteren van de precisie van de meting van bekende deeltjes (zoals het higgsboson) en die metingen te vergelijken met de voorspellingen van de theorie. En aan de andere kant door het zoeken naar de directe productie van voorspelde deeltjes (zoals donkere materie), door het verhogen van de botsingsenergie. Een paar keer per decennium komt de internationale deeltjesfysicagemeenschap bij elkaar om de plannen voor de volgende versneller te bespreken. In 2020 kwam Europa met de update van de ESPP (European Strategy for Particle Physics), dit jaar publiceren de Amerikanen de zogenoemde Snowmass-update van hun strategie. De voorgestelde nieuwe versnellers zijn te onderscheiden in drie categorieën: (1) rechte versnellers, (2) ronde versnellers en (3) versnellers van muonen. Alledrie proberen zij met ho-

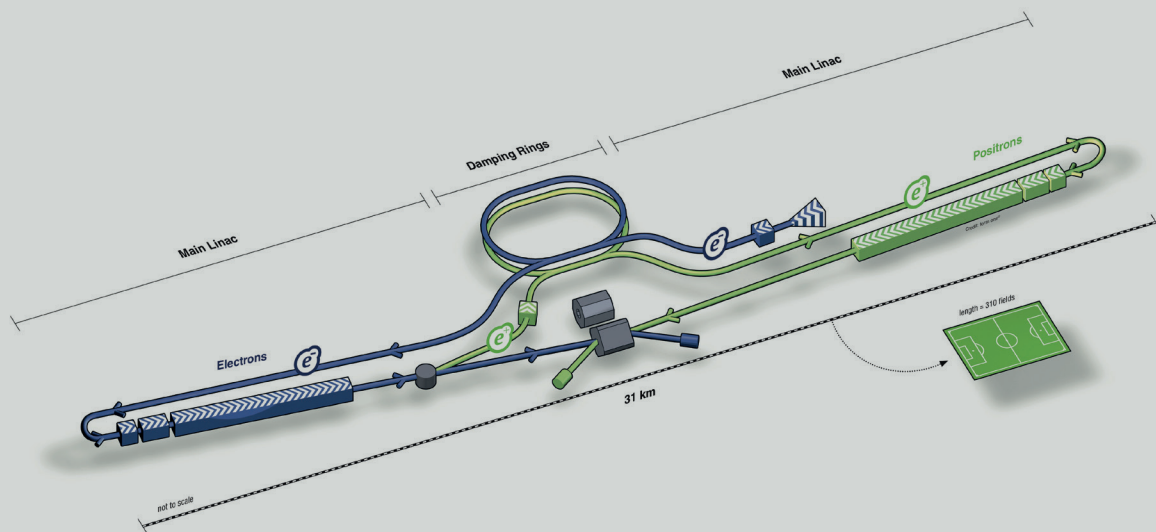
gere energieën of verbeterde precisie nieuwe ontdekkingen te doen, maar ieder op hun eigen manier.

Lineaire versneller

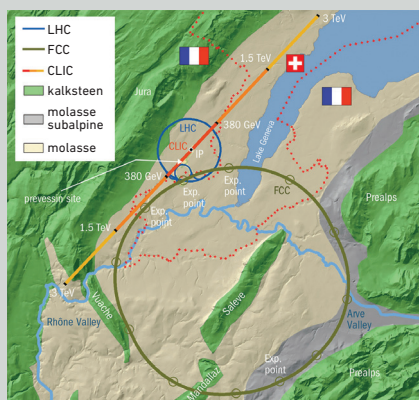
De huidige LHC-versneller versnelt protonen, die opgebouwd zijn uit drie quarks. Bij een botsing tussen protonen wordt slechts een gedeelte van de beschikbare energie gebruikt, en een aanzienlijk deel van de botsingen zal leiden tot de productie van achtergrondprocessen. Een nieuwe versneller die hier geen last van heeft, is de elektron-positronversneller. Omdat elektronen elementaire deeltjes zijn en positronen de antideeltjes van elektronen zijn, leidt dit tot botsingen met een maximale fractie aan signaalprocessen. Hierdoor kunnen de eigenschappen van geproduceerde deeltjes zoals het higgsboson nog nauwkeuriger geanalyseerd worden. De meest voorgestelde volgende versneller is een machine die elektronen en positronen in een rechte baan van enkele tientallen kilometers versnelt en op elkaar laat knallen.

Deze lineaire versneller is ontworpen om botsingen te genereren bij een energie van 250 GeV, waardoor deze als 'higgsfabriek' fungeert. Bij die botsingsenergie worden aan de lopende band higgsbosonen (met een massa van 125 GeV) geproduceerd, die dan heel precies bestudeerd kunnen worden. Dankzij het grote aantal higgsbosonen en het minimum aan achtergrondprocessen die op deze manier in de deeltjesdetectoren worden gegenereerd, kan het higgsboson, in 2012 ontdekt op CERN, bij deze higgsfabrieken typisch een factor tien preciezer gemeten worden dan wat er uiteindelijk mogelijk is bij de huidige LHC.

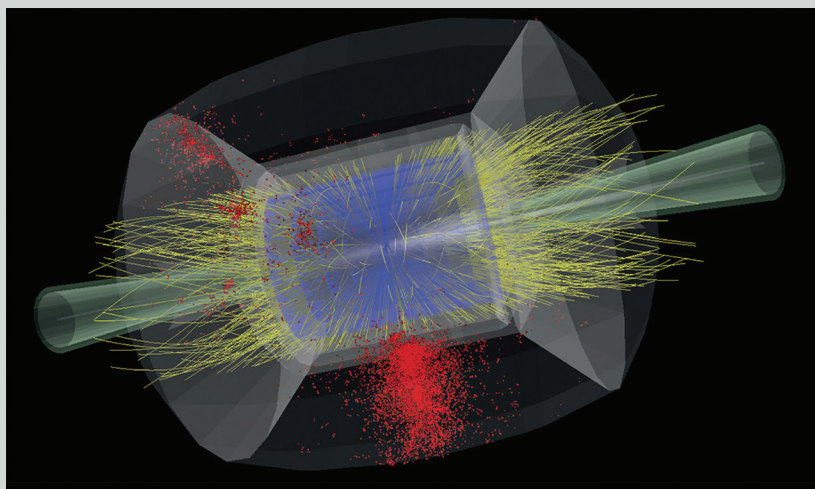
Japan toont al een tijd interesse om een lineaire versneller (ILC) te bouwen, maar ook Europa heeft een alternatief voorstel voor een lineaire versneller (CLIC). Sinds kort is er ook nog een nieuw voorstel in de Verenigde Staten: de Cool Copper Collider oftewel C3. De technologie voor deze higgsfabrieken is al grotendeels ontwikkeld, waardoor deze



Figuur 2. Illustratie van de International Linear Collider (ILC), de lineaire versneller die is voorgesteld in Japan. De geplande lengte is ruim driehonderd voetbalvelden [2].



Figuur 3. Illustratie van voorgestelde versnellers op CERN: de rechte CLIC-versneller (rood) en de ronde FCC-versneller (groen), vergeleken met de bestaande LHC-versneller (blauw) [3].



Figuur 4. Simulatie van de productie van een higgsboson bij een muoncollider. In rood zijn de jets zichtbaar van het higgsboson, omgeven door achtergrondsporen afkomstig van de bundel [4].

het komende decennium al gebouwd zouden kunnen worden, en de lineaire versneller heeft als voordeel dat deze ook nog hogere energieën kan bereiken, simpelweg door de versneller te verlengen.

Circulaire versneller

Om het aantal botsingen bij een

lineaire versneller te maximaliseren, worden de bundels van elektronen en positronen sterk gefocust. Toch worden niet alle versnelde deeltjes gebruikt voor een botsing, sommige vliegen voorbij het interactiepunt zonder een higgsboson te produceren. Een ronde versneller heeft hier veel minder last van.

Vergeleken met de lineaire versneller heeft een circulaire versneller het voordeel dat deeltjes door magneten in de bocht worden gehouden en zo meerdere malen kunnen worden hergebruikt. Daardoor kunnen er in een cirkelvormige versneller nog grotere hoeveelheden botsingen plaatsvinden. Meer botsingen betekent dat er meer

higgsbosonen bestudeerd kunnen worden, wat uiteindelijk weer een betere meetprecisie oplevert. Daardoor is deze circulaire versneller nog preciezer dan de lineaire higgsfabriek. Naast precisiemetingen van het higgsboson (met een massa van 125 GeV) staan er bij een cirkelvormige versneller ook precisiemetingen van het W-boson (80 GeV), het Z-boson (91 GeV) en het top-quark (173 GeV) op het programma. Door de precisiemetingen van deze deeltjes te vergelijken met allerlei voorspellingen kunnen er inconsistenties gezocht worden tussen de metingen en de voorspellingen van het standaardmodel. Hoewel het standaardmodel alle deeltjes en hun interacties vooralsnog succesvol beschrijft, weten we dat de theorie niet volledig is. De vergelijking van theorie en precieze metingen kunnen aanwijzingen geven voor de barsten in de theorie.

Om later ook direct op zoek te gaan naar nieuwe deeltjes, worden er na de elektronen in dezelfde ring protonen versneld. Deze botsingen bevatten meer achtergrondruis en zijn dus minder schoon, maar dankzij de hogere massa van protonen kan er een hogere energie behaald worden. Dankzij de hogere massa in $E=mc^2$ vergroten hogere botsingsenergieën de kans op ontdekkingen van nieuwe, massievere deeltjes.

De grootste technologische uitdaging van de circulaire versneller zijn de magneten voor de proton-protonbotsers. De LHC-versneller gebruikt ruim duizend supergeleidende magneten van de NbTi-technologie, gekoeld tot -271°C en met een sterkte van 8 tesla, meer dan 100.000 keer zo sterk als het aardmagneetveld. Met nieuwe technologie (Nb₃Sn of hoge-temperatuur supergeleidende magneten), en een grotere versnellertunnel, kunnen er energieën tot wel 100 TeV behaald worden.

In Europa is nu voorgesteld om de FCC te bouwen (Future Circular Collider), waarbij eerst elektron-antielektronbotsingen gecreëerd worden (FCC-ee) en daarna proton-protonbotsingen (FCC-hh). Dit voorstel maakt gebruik van de bestaande infrastruc-

tuur op CERN en begint op z'n vroegst in 2040, na het einde van de LHC. China heeft een soortgelijk plan: zij stellen voor te beginnen met de CepC (een elektron-positronbotser) en daarna de SppC (proton-proton). De precieze locatie van het Chinese project ligt nog niet vast.

ontwikkeling voor nodig. Om te zien of een muoncollider realistisch is, zal er de komende jaren eerst een succesvol model (of prototype) gebouwd moeten worden.

Bij de toekomstige versneller willen we meer leren over het higgsboson en we hopen ook nieuwe deeltjes te

“Bij de toekomstige versneller willen we meer leren over het higgsboson en we hopen ook nieuwe deeltjes te ontdekken, zoals bijvoorbeeld leptiquarks of donkere materie.”

Muoncollider

Een voorstel dat de voordelen van de andere voorstellen combineert is de muoncollider. Het muon is een evenknie van het elektron, maar dan zwaarder. Het botsen van muonen heeft zowel de voordelen van de elektronbotsingen (schone botsingen) als de voordelen van de protonbotsingen (hoge botsingsenergie).

De technologische uitdaging van dit type versneller is de relatief korte levensduur van een muon, slechts twee microseconde. Dankzij de relativiteitstheorie kan de levensduur van muonbundels in de versneller wel gerekt worden, maar ook voor relativistische muonen blijft het desalniettemin een technologische uitdaging om een bundel met voldoende muonen te creëren voor een deeltjesversneller.

Hoewel dit project al decennia op de wensenlijst stond, werd een echte muoncollider lange tijd niet realistisch geacht. Hier lijkt nu verandering in te komen: zowel Europa als de Verenigde Staten tonen interesse om dit type versneller te ontwikkelen, maar hier is nog wel onderzoek en

ontdekken, zoals bijvoorbeeld leptiquarks of donkere materie. Maar behalve fysica en technologie, zijn ook duurzaamheid [5] en betaalbaarheid van groot belang. Niet alleen wetenschap, maar ook politieke keuzes zullen uiteindelijk de doorslag geven welke van deze voorstellen daadwerkelijk gebouwd worden.

Tristan du Pree is stafonderzoeker aan het Nikhef (Nationaal Instituut voor Subatomaire Fysica) en docent hoge-energiefysica aan de UT.
tdupree@nikhef.nl

REFERENTIES

- 1 E.O. Lawrence' first cyclotron', <https://sciencesprings.wordpress.com/2022/02/01/from-symmetry-building-the-quantum-workforce/e-o-lawrence-first-cyclotron>.
- 2 International Linear Collider, <https://linearcollider.org>
- 3 Tunnelling for physics, CERN Courier, <https://cerncourier.com/a/tunnelling-for-physics>.
- 4 Sketching out a muon collider, CERN Courier, <https://cerncourier.com/a/sketching-out-a-muon-collider>.
- 5 <https://physicsworld.com/a/cerns-proposed-100-km-circumference-higgs-factory-has-lower-environmental-impact-than-competing-designs-finds-study>.