

Fysica Voorbij het Standaardmodel

Tot 2012 was het Standaardmodel (SM) theoretisch voltooid met de bevestiging van het bestaan van het Higgs-boson in de Large Hadron Collider (LHC) bij CERN. Elk voorspeld deeltje was gevonden. De vergelijkingen ervan doorstonden elke experimentele test met verbluffende precisie.

Toch was de stemming in de fysica er niet een van afronding, maar van onvolledigheid. Net zoals Newtons wetten voor Einstein of klassieke fysica voor kwantummechanica, was het Standaardmodel te succesvol op de schalen die we kunnen testen, maar niet in staat om diepere vragen te beantwoorden. Het was een bijna perfecte kaart – maar alleen van een klein deel van het landschap.

Zwaartekracht: De Ontbrekende Kracht

De meest opvallende omissie is zwaartekracht.

- Het Standaardmodel beschrijft drie van de vier bekende fundamentele krachten: elektromagnetisme, de zwakke kracht en de sterke kracht.
- Zwaartekracht, beschreven door Einsteins **Algemene Relativiteitstheorie (GR)**, is volledig afwezig.

Dit is meer dan een simpele misser. Algemene Relativiteitstheorie beschouwt zwaartekracht als de kromming van ruimtetijd, een glad geometrisch veld, terwijl het Standaardmodel krachten ziet als kwantumvelden die door deeltjes worden gemedieerd. Pogingen om zwaartekracht op dezelfde manier te kwantiseren lopen vast op oneindigheden die niet genormaliseerd kunnen worden.

Het Standaardmodel en GR zijn als twee verschillende besturingssystemen – briljant in hun eigen domein, maar fundamenteel onverenigbaar. Het verzoenen ervan is misschien wel de grootste uitdaging van de fysica vandaag.

Massa van Neutrino's

Het Standaardmodel voorspelt dat neutrino's geen massa hebben. Maar experimenten, beginnend met de Super-Kamiokande-detector in Japan (1998) en wereldwijd bevestigd, toonden aan dat neutrino's oscilleren tussen verschillende smaken (elektron, muon, tau). Oscillatie vereist massa.

Dit was het eerste bevestigde bewijs voor fysica buiten het Standaardmodel. De ontdekking leverde Kajita en McDonald de Nobelprijs op in 2015.

Neutrino's zijn ongelooflijk licht, minstens een miljoen keer lichter dan het elektron. Hun massa wordt niet verklaard door het Standaardmodel – maar kan wijzen op nieuwe fysica,

zoals het **seesaw-mechanisme**, steriele neutrino's, of verbanden met het vroege universum. In sommige scenario's maken zware seesaw-neutrino's **leptogenese** mogelijk, waarbij een lepton-asymmetrie ontstaat in het vroege universum, die later wordt omgezet in de waargenomen **materie-antimaterie-asymmetrie**.

Donkere Materie

Zichtbare materie, beschreven door het Standaardmodel, vormt minder dan 5% van het universum. De rest is onzichtbaar.

- **Donkere materie** (~27% van het universum) manifesteert zich alleen via zwaartekracht: sterrenstelsels roteren sneller dan zichtbare materie toelaat, clusters van sterrenstelsels buigen licht meer dan verwacht, en de kosmische microgolfachtergrond vereist extra onzichtbare massa.
- Geen enkel deeltje in het Standaardmodel kan het verklaren. Neutrino's zijn te licht en te snel. Gewone materie is te schaars.

Theorieën stellen nieuwe deeltjes voor: WIMP's (zware deeltjes met zwakke interactie), axionen, steriele neutrino's, of iets nog vreemders. Maar ondanks decennia van zoeken – ondergrondse detectoren, collider-experimenten, astrofysische waarnemingen – blijft donkere materie ongreepbaar.

Donkere Energie

Nog mysterieuzer is **donkere energie**, de kracht die de versnelde expansie van het universum aandrijft.

- Ontdekt in 1998 door waarnemingen van supernovae, vormt donkere energie ongeveer 68% van het universum.
- In principe kan het worden verklaard als de “vacuümenergie” van kwantumvelden. Maar eenvoudige berekeningen in kwantumveldtheorie voorspellen een vacuüm-energiedichtheid die 120 ordes van grootte te groot is – de slechtste voorspelling in de fysica.

Het **kosmologische constante probleem** is misschien wel de scherpste botsing tussen kwantumveldtheorie en zwaartekracht. Het Standaardmodel zegt niets over donkere energie. Dit is een enorme kloof in ons begrip van de kosmos.

Het Hierarchieprobleem

Een andere diepe puzzel ligt in het Higgs-boson zelf.

De gemeten massa van de Higgs is 125 GeV. Maar kwantumcorrecties zouden het naar de Planck-schaal (10^{19} GeV) moeten duwen, tenzij er wonderbaarlijke opheffingen plaatsvinden. Waarom is het zo licht in vergelijking met de natuurlijke energieschalen van zwaartekracht?

Dit is het **hierarchieprobleem**: de Higgs lijkt onnatuurlijk fijn afgestemd. Fysici vermoeden nieuwe fysica, zoals **supersymmetrie (SUSY)**, die de Higgs-massa kan stabiliseren door partnerdeeltjes te introduceren die gevaarlijke correcties opheffen. (Discussies over **natuurlijkheid** omvatten ideeën van dynamische oplossingen tot **antropische** redeneringen in een mogelijk “landschap” van vacua.)

Materie-Antimaterie Asymmetrie

Het Standaardmodel bevat enige CP-schending, maar veel te weinig om te verklaren waarom het universum vandaag vol is met materie in plaats van gelijke hoeveelheden materie en antimaterie. Zoals hierboven vermeld, bieden mechanismen zoals **leptogenese** (vaak gerelateerd aan de seesaw-oorsprong van neutrino-massa's) een overtuigende manier waarop fysica buiten het Standaardmodel het evenwicht verstoort.

Een Mooie maar Onvolledige Foto

Het Standaardmodel wordt soms “de meest succesvolle theorie in de fysica” genoemd. De voorspellingen komen overeen met experimenten tot 10-12 decimalen. Het verklaart bijna alles wat we zien in deeltjesversnellers en laboratoria.

Maar het is onvolledig:

- Het negeert zwaartekracht.
- Het kan de massa van neutrino's niet verklaren.
- Het kan donkere materie of donkere energie niet verklaren.
- Het laat diepe mysteries zoals het hierarchieprobleem en de materie-antimaterie-asymmetrie onopgelost.

Fysici staan nu voor een bekend moment in de geschiedenis. Net zoals Newtoniaanse mechanica plaatsmaakte voor relativiteit en klassieke fysica voor kwantummechanica, moet het Standaardmodel uiteindelijk wijken voor iets diepers.

De Heilige Graal: Een Verenigde Theorie

Het uiteindelijke doel is een **Grote Verenigde Theorie (GUT)** of zelfs een **Theorie van Alles (ToE)**: een kader dat alle vier de krachten verenigt, alle deeltjes verklaart, en consistent werkt van de kleinste schalen (kwantumzwaartekracht) tot de grootste (kosmologie).

Dit is de heilige graal van de moderne fysica. Daarom duwen onderzoekers versnellers naar hogere energieën, bouwen ze enorme neutrinodetectoren, brengen ze het universum in kaart met telescopen en vinden ze nieuwe en gedurfde wiskunde uit.

De volgende hoofdstukken zullen de belangrijkste kandidaten verkennen:

- **Supersymmetrie (SUSY)** – een symmetrie tussen materie- en krachtdeeltjes.
- **Snaartheorie en M-theorie** – waarin deeltjes trillende snaren zijn en het graviton-deeltje natuurlijk verschijnt.

- **Extra dimensies** – van het vroege Kaluza-Klein-idee tot moderne Randall-Sundrum-modellen.
- **Andere benaderingen** – zoals kwantumzwaartekracht in lussen en asymptotische veiligheid.

Elk van deze ideeën is ontstaan, niet als dogma, maar als wetenschap op zijn best: het opmerken van scheuren, het bouwen van nieuwe theorieën, en het testen ervan tegen de realiteit.

Supersymmetrie: De Volgende Grote Symmetrie?

Fysica heeft een lange geschiedenis van vereniging door symmetrie. Maxwells vergelijkingen verenigden elektriciteit en magnetisme. Speciale relativiteitstheorie verenigde ruimte en tijd. De elektrozwakke theorie verenigde twee van de vier fundamentele krachten. Elke sprong voorwaarts kwam voort uit de ontdekking van een verborgen symmetrie in de natuur.

Supersymmetrie – of SUSY, zoals fysici het liefkozend noemen – is een gedurfd voorstel dat de volgende grote symmetrie twee schijnbaar verschillende categorieën verbindt: **materie** en **krachten**.

Fermionen en Bosonen: Materie versus Kracht

In het Standaardmodel worden deeltjes verdeeld in twee grote families:

- **Fermionen (spin 1/2):** omvatten quarks en leptonen, de bouwstenen van materie. Hun halve-gehele spin betekent dat ze het Pauli-uitsluitingsprincipe volgen: twee identieke fermionen kunnen niet dezelfde toestand bezetten. Dit is waarom atomen gestructureerde schillen hebben en materie stabiel is.
- **Bosonen (gehele spin):** omvatten fotonen, gluonen, W- en Z-bosonen, en Higgs. Bosonen mediëren krachten. In tegenstelling tot fermionen kunnen ze zich opstapelen in dezelfde toestand, vandaar dat lasers (fotonen) en Bose-Einstein-condensaten bestaan.

Kortom: fermionen vormen materie, bosonen dragen krachten.

De Supersymmetrie Hypothese

Supersymmetrie stelt een symmetrie voor die fermionen en bosonen verbindt. Voor elk bekend fermion is er een bosonische partner. Voor elk bekend boson is er een fermionische partner.

- Quarks → **squarks**
- Leptonen → **sleptonen**
- Gluonen → **gluinos**
- Gauge/Higgs-sector → **neutralinos** (mengsel van binos, winos, higgsinos; neutraal) en **charginos** (mengsel van winos, higgsinos; geladen)

("Fotinos" en "zinos" zijn oude bijnamen voor specifieke gauge-toestanden; experimenten zoeken eigenlijk naar de **massatoestanden** die hierboven zijn genoemd.)

Waarom zo'n radicale verdubbeling van de deeltjeswereld voorstellen? Omdat SUSY elegante oplossingen biedt voor enkele van de diepste problemen die het Standaardmodel achterliet.

Het Oplossen van het Hierarchieprobleem

Een van de grootste aantrekkingskrachten van SUSY is haar vermogen om het **hierarchieprobleem** op te lossen: waarom is het Higgs-boson zo licht in vergelijking met de Planck-schaal?

In het Standaardmodel zouden kwantumcorrecties van virtuele deeltjes de Higgs-massa naar enorme waarden moeten duwen. Supersymmetrie introduceert partnerdeeltjes die deze divergenties opheffen. Het resultaat: de Higgs-massa wordt natuurlijk gestabiliseerd, zonder de noodzaak voor fijne afstemming (althans in "natuurlijke" SUSY-spectra).

SUSY en Grote Vereniging

Een andere motivatie voor SUSY komt van krachtenvereniging.

- Het extrapoleren van de koppelingsconstanten van de sterke, zwakke en elektromagnetische krachten naar hogere energieën laat zien dat ze in het Standaardmodel bijna, maar niet helemaal, samenkomen op één punt.
- In SUSY, met bijdragen van partnerdeeltjes, convergeren de constanten prachtig rond 10^{16} GeV.

Dit suggereert dat bij zeer hoge energieën de drie krachten zouden kunnen samensmelten in een **Grote Verenigde Theorie (GUT)**.

SUSY als Kandidaat voor Donkere Materie

Supersymmetrie biedt ook een natuurlijke kandidaat voor **donkere materie**.

Als SUSY correct is, moet een van de partnerdeeltjes stabiel en elektrisch neutraal zijn. De belangrijkste kandidaat is de **lichtste neutralino**, een mengsel van binos, winos en higgsinos.

Neutralinos interageren alleen zwak, wat past bij het profiel van WIMP's (zwak interagerende zware deeltjes). Als ze worden ontdekt, zouden ze de 27% ontbrekende materie van het universum kunnen verklaren.

Experimentele Zoektochten naar SUSY

Decennia lang hoopten fysici dat supersymmetrische deeltjes zouden verschijnen net boven de al onderzochte energieschalen.

- **LEP (CERN, 1990s):** Geen SUSY-deeltjes gevonden tot ~ 100 GeV.

- **Tevatron (Fermilab, 1990s-2000s):** Geen partnerdeeltjes gevonden.
- **LHC (CERN, 2010s-2020s):** Proton-proton botsingen tot **13,6 TeV** (ontwerp: **14 TeV**). Ondanks uitgebreide zoektochten werden geen bewijzen gevonden voor squarks, gluinos of neutralinos tot in het multi-TeV bereik.

Het uitblijven van SUSY bij de LHC was teleurstellend. Veel van de eenvoudigste SUSY-versies, zoals het “Minimale Supersymmetrische Standaardmodel” (MSSM), zijn nu sterk beperkt. “Natuurlijke” spectra zijn zwaarder geworden, wat wijst op meer fijne afstemming als SUSY dicht bij de TeV-schaal ligt.

Toch is SUSY niet uitgesloten. Complexere modellen voorspellen zwaardere of subtielere partnerdeeltjes, misschien buiten het bereik van de LHC of met interacties die te zwak zijn om gemakkelijk te detecteren.

De Wiskundige Elegantie van SUSY

Naast haar fenomenologische motivaties heeft SUSY een diepe wiskundige schoonheid.

- Het is de enige mogelijke uitbreiding van ruimtetijd-symmetrieën die compatibel is met relativiteit en kwantummechanica.
- Supersymmetrische theorieën zijn vaak beter berekenbaar: ze temmen oneindigheden en onthullen verborgen structuren in kwantumveldtheorie.
- In snaartheorie is SUSY essentieel voor consistentie: zonder dit bevat de theorie tachyonen en andere pathologieën.

Zelfs als de natuur SUSY niet implementeert op toegankelijke energieschalen, heeft de wiskunde ervan de fysica al verrijkt.

De Status van Supersymmetrie

Vandaag de dag verkeert SUSY in een vreemde positie.

- Het blijft een van de meest overtuigende kaders voor fysica buiten het Standaardmodel.
- Het lost het hiërarchieprobleem op, ondersteunt vereniging, en biedt een kandidaat voor donkere materie.
- Toch is er nog geen experimenteel bewijs.

Als de LHC en zijn opvolgers niets vinden, kan SUSY alleen gerealiseerd worden op schalen ver buiten ons bereik – of misschien heeft de natuur een heel ander pad gekozen.

Een Methode, Geen Dogma

Supersymmetrie illustreert de wetenschappelijke methode in actie.

Fysici identificeerden problemen: het hiërarchieprobleem, vereniging, donkere materie. Ze stelden een nieuwe en gedurfde symmetrie voor die ze allemaal oplost. Ze ontwierpen experimenten om het te testen. Tot nu toe waren de resultaten negatief – maar dat betekent

niet dat het idee verspild was. SUSY heeft onze gereedschappen aangescherpt, verduidelijkt waar we naar zoeken, en generaties van onderzoek geïnspireerd.

Net als de ether of epicykels ervoor, kan SUSY een opstap zijn naar een diepere waarheid, of het nu het laatste woord is of niet.

Snaartheorie en M-Theorie

Fysica buiten het Standaardmodel wordt vaak gedreven door oplossingen: het oplossen van het hiërarchieprobleem, het verklaren van donkere materie, het verenigen van gauge-koppelingen. Snaartheorie is anders. Het begint niet met een specifieke puzzel. In plaats daarvan begint het met wiskunde – en eindigt met het herschrijven van ons hele concept van ruimte, tijd en materie.

Oorsprong: Een Theorie Geboren uit Mislukking

Verrassend genoeg begon snaartheorie niet als een theorie van alles, maar als een mislukte poging om de sterke kernkracht te begrijpen.

In de late jaren 1960, voordat QCD volledig was ontwikkeld, probeerden fysici de dieren-tuin van hadronen te verklaren. Ze merkten patronen op in verstrooiingsdata die suggererden dat resonanties gemodelleerd konden worden door trillende snaren.

Het “dual resonance model”, geïntroduceerd door Veneziano in 1968, beschreef sterke interacties alsof hadronen excitaties waren van kleine snaren. Het was elegant, maar werd snel verlaten toen QCD bleek de echte theorie van de sterke kracht te zijn.

Toch weigerde snaartheorie te sterven. In haar vergelijkingen lagen opmerkelijke eigenschappen verborgen die verder reikten dan kernfysica.

De Verrassende Ontdekking: Het Graviton

Toen theoretici de trillingen van snaren kwantificeerden, ontdekten ze dat het spectrum noodzakelijkerwijs een **massaloos deeltje met spin 2** bevatte.

Dit was schokkend. Kwantumveldtheorie had laten zien dat een massaloos deeltje met spin 2 uniek is: het moet het kwantum van zwaartekracht zijn, het **graviton**.

Zoals John Schwarz later opmerkte: *“Maar een verrassend feit kwam aan het licht: de wiskunde van snaartheorie bevatte noodzakelijkerwijs een massaloos deeltje met spin 2 – een graviton.”*

Wat begon als een theorie van hadronen had per ongeluk de bouwsteen van kwantum-zwaartekracht voortgebracht.

Het Centrale Idee: Snaren, Geen Punten

In de kern van snaartheorie worden puntdelen vervangen door kleine, eendimensionale objecten: snaren.

- Snaren kunnen **open** (met twee uiteinden) of **gesloten** (lussen) zijn.
- Verschillende trillingstoestanden van de snaar komen overeen met verschillende deeltjes.
 - Een bepaalde trilling verschijnt als een foton.
 - Een andere als een gluon.
 - Een andere als een quark.
 - En één toestand, noodzakelijkerwijs, als een graviton.

Deze eenvoudige verschuiving – van punten naar snaren – lost veel van de oneindigheden op die kwantumzwaartekracht plagen. De eindige grootte van de snaar verspreidt interacties die anders zouden exploderen op nulafstand.

Supersymmetrie en Supersnaren

Vroege versies van snaartheorie hadden problemen: ze bevatten tachyonen (instabiliteiten) en vereisten onrealistische eigenschappen. De doorbraak kwam met de introductie van **supersymmetrie**, wat in de jaren 1970 en 1980 leidde tot **supersnaartheorie**.

Supersnaren elimineerden tachyonen, omvatten fermionen, en brachten nieuwe wiskundige consistentie.

Maar er was een addertje onder het gras: snaartheorie werkt alleen in hogere dimensies. Specifiek, **10 ruimtetijd-dimensies**.

- De vier dimensies die we zien (drie ruimtelijke dimensies, één tijdsdimensie).
- Zes andere dimensies, gecomactificeerd of opgerold op kleine schalen, onzichtbaar voor huidige experimenten.

Dit idee, hoewel radicaal, was niet helemaal nieuw. In de jaren 1920 had de **Kaluza-Klein-theorie** al gesuggereerd dat extra dimensies zwaartekracht en elektromagnetisme konden verenigen. Snaartheorie bracht dit idee nieuw leven in en breidde het enorm uit.

Vijf Snaartheorieën

Tegen het midden van de jaren 1980 ontdekten fysici dat snaartheorie niet uniek is, maar in **vijf verschillende versies** komt:

1. **Type I** – open en gesloten snaren, inclusief georiënteerde en niet-georiënteerde snaren.
2. **Type IIA** – gesloten snaren, georiënteerd, niet-chiraal.
3. **Type IIB** – gesloten snaren, georiënteerd, chiraal.
4. **Heterotisch SO(32)** – gesloten snaren met een hybride structuur.
5. **Heterotisch $E_8 \times E_8$** – een zeer symmetrische versie, later cruciaal voor aansluiting bij realistische deeltjesfysica.

Elke leek wiskundig consistent, maar waarom zou de natuur er een kiezen?

De Eerste Supersnarenrevolutie

In 1984 toonden Michael Green en John Schwarz aan dat snaartheorie automatisch kwantumafwijkingen kan opheffen – iets wat kwantumveldtheorieën zorgvuldig moesten ontwerpen. Deze ontdekking ontketende de **eerste supersnarenrevolutie**, waarbij duizenden fysici zich richtten op snaartheorie als een kandidaat voor een verenigde theorie van alle krachten.

Het was het eerste serieuze kader waarin kwantumzwaartekracht niet alleen consistent was, maar onvermijdelijk.

De Tweede Supersnarenrevolutie: M-Theorie

Midden jaren 1990 vond een tweede revolutie plaats. Edward Witten en anderen ontdekten dat de vijf verschillende snaartheorieën geen concurrenten waren, maar verschillende grenzen van één diepere theorie: **M-theorie**.

Men gelooft dat M-theorie bestaat in **11 dimensies** en niet alleen snaren omvat, maar ook objecten in hogere dimensies, genaamd **branes** (afkorting van membranen).

- Eendimensionale branes = snaren.
- Tweedimensionale branes = membranen.
- Hogere dimensionale branes tot 9 ruimtelijke dimensies.

Deze branes openen nieuwe en rijke mogelijkheden: hele universums kunnen bestaan als driedimensionale branes, zwevend in een hoger-dimensionale bulk, waarbij zwaartekracht in de bulk lekt terwijl andere krachten gebonden blijven. Dit beeld inspireerde moderne extra-dimensie-modellen zoals **Randall-Sundrum**.

Opmerkelijke Voorbeelden: Kaluza-Klein en Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (1920s)**: Stelde een vijfde dimensie voor om zwaartekracht en elektromagnetisme te verenigen. Het idee werd decennia lang verlaten, maar snaartheorie bracht het op een veel grotere schaal tot leven. Gecompectificeerde extra dimensies blijven een kernkenmerk van snaarmodellen.
- **Randall-Sundrum (1999)**: Stelde “vervormde” extra dimensies voor, waarbij ons universum een driedimensionaal brane is, ingebed in hogere dimensies. Zwaartekracht verspreidt zich in de bulk, wat verklaart waarom het zwakker is dan andere krachten. Zulke modellen voorspellen mogelijke signalen in deeltjesversnellers of afwijkingen van Newtons wet op zeer korte afstanden.

Experimentele Aanwijzingen en Uitdagingen

Snaartheorie maakt gedurfde beweringen, maar het testen ervan is ongelooflijk moeilijk.

- **Extra dimensies**: Kunnen zich manifesteren via ontbrekende energiesignalen of **Kaluza-Klein excitaties** – mogelijk voor **gravitons of zelfs Standaardmodel-velden**,

afhankelijk van de configuratie. Collider-beperkingen reiken meestal tot het **multi-TeV** bereik.

- **Gravitons:** Een massaloos deeltje met spin 2 wordt voorspeld, maar het detecteren van een enkel graviton ligt buiten de voorstelbare technologie. Indirecte effecten, zoals afwijkingen in zwaartekrachtgolven, zijn mogelijk.
- **Supersymmetrie:** Snaartheorie vereist SUSY op een bepaalde schaal, maar de LHC heeft nog geen partnerdeeltjes gevonden.
- **Kosmologie:** Het vroege universum, inflatie, en de kosmische microgolfachtergrond kunnen sporen van snaarfysica dragen, hoewel de resultaten tot nu toe onduidelijk zijn.

Ondanks de uitdagingen heeft snaartheorie een vruchtbare voedingsbodem geboden voor wiskunde, en vooruitgang geïnspireerd in geometrie, topologie, en dualiteiten zoals AdS/CFT (die zwaartekracht in hogere dimensies verbindt met kwantumveldtheorie zonder zwaartekracht).

Schoonheid en Controverse

Voorstanders beweren dat snaartheorie de meest veelbelovende weg is naar een verenigde theorie: het omvat kwantumzwaartekracht, verenigt alle krachten, en verklaart waarom het graviton moet bestaan.

Critici stellen dat zonder experimentele bevestiging snaartheorie het risico loopt los te raken van empirische wetenschap. Het enorme “landschap” van mogelijke oplossingen (tot 10^{500}) maakt het moeilijk om unieke voorspellingen af te leiden.

Beide kanten zijn het over één ding eens: snaartheorie heeft onze manier van denken over fysica veranderd en een nieuwe taal geboden voor vereniging.

Op Weg naar een Theorie van Alles

Als supersymmetrie de volgende stap is voorbij het Standaardmodel, is snaartheorie de stap daarna: een kandidaat voor de lang gezochte **Theorie van Alles**.

Haar meest gedurfde bewering is niet dat het alleen het Standaardmodel en zwaartekracht omvat, maar dat deze onvermijdelijke gevolgen zijn van trillende snaren in hogere dimensies. Het graviton is geen toevoeging – het is ingebouwd.

Of de natuur dit pad heeft gekozen, moet nog worden ontdekt.

De Grenzen Verkennen: Experimenten Voorbij het Standaardmodel

Theorieën zijn het levensbloed van de fysica, maar experimenten zijn het kloppende hart. Supersymmetrie, snaartheorie en extra dimensies zijn prachtige wiskundige constructies, maar ze leven of sterven met bewijs. Als ze meer willen zijn dan speculatie, moeten ze sporen achterlaten in de data.

Fysici hebben slimme manieren ontwikkeld om naar deze sporen te zoeken – in versnellers, in de kosmos, en in de structuur van ruimtetijd zelf.

Versnellers: Jacht op Partnerdeeltjes en Gravitons

De Large Hadron Collider (LHC) bij CERN is 's werelds krachtigste deeltjesversneller, die protonen botst met energieën tot **13,6 TeV** (ontwerp: **14 TeV**). Het is het belangrijkste instrument van de mensheid geweest om fysica buiten het Standaardmodel te onderzoeken.

Supersymmetrie in de LHC

- **Zoektocht naar partnerdeeltjes:** ATLAS- en CMS-experimenten hebben data geanalyseerd op zoek naar squarks, gluinos en neutralinos/charginos. Deze verschijnen vaak als “ontbrekende energie”-signalen, omdat SUSY-deeltjes detectie ontsnappen.
- **Resultaten:** Geen bevestigde SUSY-deeltjes gevonden tot in het multi-TeV bereik. Dit heeft veel van de eenvoudigste SUSY-modellen uitgesloten en “natuurlijke” SUSY naar zwaardere, meer fijn afgestemde gebieden geduwd.

Gravitons en Extra Dimensies

- **Kaluza-Klein toestanden:** Als extra dimensies bestaan, kunnen **gravitons of zelfs Standaardmodel-velden** verschijnen als zware KK-excitaties, detecteerbaar als resonanties in di-lepton-, di-foton- of di-jetkanalen.
- **Randall-Sundrum signalen:** Ververmde extra dimensies kunnen graviton-resonanties produceren met karakteristieke hoekpatronen van spin 2.
- **Resultaten:** LHC-zoektochten hebben tot nu toe geen bewijs gevonden, maar hebben beperkingen opgelegd tot in het **multi-TeV** bereik, waardoor de grootte, vervorming en geometrie van extra dimensies worden beperkt.

Microscopische Zwarte Gaten

Sommige theorieën suggereren dat als zwaartekracht sterk wordt op de TeV-schaal, kleine zwarte gaten kunnen ontstaan in LHC-botsingen, die verdampen in uitbarstingen van deeltjes. Zulke gebeurtenissen zijn niet waargenomen.

Precieze Experimenten: Testen van Zwaartekracht op Kleine Schalen

Als extra dimensies bestaan, kan Newtons zwaartekrachtwet instorten op korte afstanden.

- **Torsiebalans-experimenten (“Eöt-Wash”):** Testen de omgekeerde kwadratenwet tot **sub-millimeter schalen** – momenteel **tientallen micrometers (~50 μm)**.
- **Resultaten:** Geen afwijkingen gevonden. Deze experimenten **sluiten** een breed scala aan extra-dimensie-scenario's uit met karakteristieke lengtes **groter dan $\sim 10^{-4}$ meter** (afhankelijk van het model).

Deze tafelblad-experimenten zijn ongelooflijk gevoelig en onderzoeken schalen die ontoegankelijk zijn voor versnellers.

Zwaartekrachtgolven: Een Nieuw Venster op Kwantumzwaartekracht

De ontdekking van zwaartekrachtgolven door LIGO in 2015 opende een nieuw grensgebied.

- **Extra polarisaties / gewijzigde voortplanting:** Sommige kwantumzwaartekracht- of extra-dimensie-modellen voorspellen afwijkingen van GR (extra polarisaties, verstrooiing, of gewijzigde ringdown).
- **Ringdown-spectroscopie:** De “ringdown” van zwarte gaten na een fusie kan subtiele afwijkingen van GR onthullen.
- **Primordiale zwaartekrachtgolven:** Golven van de Big Bang kunnen sporen van snaarfysica dragen, detecteerbaar door toekomstige observatoria zoals LISA of de Einstein Telescoop.

Tot nu toe zijn waarnemingen consistent met GR binnen de huidige onzekerheden, maar hogere precisie kan verrassingen opleveren.

Kosmologie: Het Universum als Laboratorium

Het universum zelf is de ultieme deeltjesversneller.

- **Kosmische microgolfachtergrond (CMB):** Kleine fluctuaties brengen het vroege universum in kaart. Sommige snaarmodellen voorspellen specifieke signalen, zoals niet-Gaussische distributies of oscillerende kenmerken.
- **Inflatie:** De snelle expansie van het universum kan zijn aangedreven door velden gerelateerd aan snaartheorie. Detectie van primordiale B-modes in de CMB zou een sterk bewijs zijn.
- **Zoektochten naar donkere materie:** Neutralinos uit SUSY zijn toonaangevende kandidaten voor donkere materie. Experimenten zoals XENONnT, LUX-ZEPLIN en PandaX zoeken naar WIMP's via nucleaire terugstoot.
- **Axionen:** Snaartheorie voorspelt ook axion-achtige deeltjes, die gedetecteerd kunnen worden via resonante holtes of astrofysische waarnemingen.

Tot nu toe blijft de hemel stil. Donkere materie blijft ongedetecteerd, en kosmologische data komen overeen met het Λ CDM-model zonder duidelijke vingerafdrukken van snaren.

Huidige Status: Beperkingen, Geen Bevestigingen

Decennia van zoeken hebben SUSY, extra dimensies of snaarsignalen niet bevestigd. Maar afwezigheid van bewijs is geen bewijs van afwezigheid:

- SUSY kan bestaan op schalen buiten het bereik van de LHC of in minder voor de hand liggende spectra; negatieve resultaten tot nu toe **begunstigen meer fijn afgestemde versies (“minder natuurlijk”)** als SUSY dicht bij de TeV-schaal ligt.
- Extra dimensies kunnen kleiner, meer vervormd, of op een andere manier verborgen zijn voor huidige sondes.
- Snaartheorie kan alleen detecteerbare sporen achterlaten in het zeer vroege universum, alleen toegankelijk via kosmologie.

Sommige **precieze anomalieën** (bijvoorbeeld de meting van **(g-2)** van de muon en enkele **spanningen in smaakfysica**) blijven **intrigerend maar onopgelost**; ze blijven onderzoek stimuleren zonder het Standaardmodel tot nu toe omver te werpen.

Wat experimenten hebben gedaan, is **de parameterruimte verkleinen**. Ze hebben ons verteld waar SUSY niet is, hoe klein extra dimensies moeten zijn, en hoe sterk of zwak donkere materie kan interageren.

De Weg Vooruit

Toekomstige experimenten beloven dieper te onderzoeken:

- **High-Luminosity LHC (HL-LHC):** Zal 10 keer meer data verzamelen, SUSY onderzoeken tot hogere massa's en zeldzame processen.
- **Future Circular Collider (FCC-hh):** Een voorgestelde 100 TeV-versneller, krachtig genoeg om energieschalen te onderzoeken waar GUT-fysica kan verschijnen.
- **LISA (2030s):** Een op ruimte gebaseerd zwaartekrachtgolfobservatorium, gevoelig voor primordiale signalen uit het vroege universum.
- **Volgende generatie donkere-materie-detectoren:** Met gevoeligheid voor zwakke signalen kunnen ze eindelijk een WIMP of axion vangen.

Wetenschap als Reis

Het experimentele verhaal van fysica buiten het Standaardmodel is geen verhaal van mislukking, maar van proces.

- Negatieve resultaten sluiten eenvoudige modellen uit en scherpen onze theorieën aan.
- Elke beperking leidt ons naar meer verfijnde en voorspellende kaders.
- De afwezigheid van SUSY of extra dimensies op de TeV-schaal vernietigt de ideeën niet – het duwt ze naar nieuw terrein.

Net zoals Rutherfords goudfolie-experiment het pruimenpuddingmodel brak, of LIGO twijfels over zwaartekrachtgolven wegnam, kan de volgende grote ontdekking plotseling komen – en alles veranderen.

Op Weg naar een Theorie van Alles

Eeuwenlang is fysica gevorderd door vereniging. Newton verenigde de hemel en de aarde onder één zwaartekrachtwet. Maxwell verenigde elektriciteit en magnetisme. Einstein verenigde ruimte en tijd. De elektrozwakke theorie toonde aan dat twee zeer verschillende krachten aspecten zijn van één kracht.

De volgende natuurlijke stap is de meest gedurfde tot nu toe: **het verenigen van alle vier de fundamentele interacties** – sterk, zwak, elektromagnetisch en zwaartekracht – in één consistent kader. Dit is de heilige graal van de fysica: **Theorie van Alles (ToE)**.

Waarom een ToE Belangrijk is

Volledige vereniging is niet alleen filosofische schoonheid; het behandelt praktische en conceptuele diepe problemen:

- **Kwantumzwaartekracht:** Algemene relativiteitstheorie stort in op de Planck-schaal (10^{19} GeV). Alleen een kwantumzwaartekrachttheorie kan zwarte gaten en Big Bang-singulariteiten verklaren.
- **Natuurlijkheid en fijne afstemming:** Het hiërarchieprobleem en het kosmologische constante probleem schreeuwen om een diepere verklaring.
- **Parameters van het Standaardmodel:** Waarom hebben deeltjes de massa's en ladingen die ze hebben? Waarom drie generaties quarks en leptonen? Een ToE kan deze mysteries verklaren.
- **Kosmologie:** Donkere materie, donkere energie en inflatie kunnen allemaal gerelateerd zijn aan fysica op de verenigingsschaal.

Een ToE verenigt niet alleen krachten – het verenigt schalen, van de kleinste snaren van kwantumtheorie tot de grootste kosmische structuren.

Supersymmetrie en Grote Vereniging

Supersymmetrie (SUSY), indien gerealiseerd in de natuur, biedt een opstap naar een ToE.

- **Hierarchieprobleem opgelost:** Partnerdeeltjes heffen divergente correcties aan de Higgs-massa op.
- **Gauge-koppelingen verenigd:** Met SUSY convergeren de sterktes van de drie krachten prachtig rond 10^{16} GeV, wat wijst op een **Grote Verenigde Theorie (GUT)**.
- **Kandidaat voor donkere materie:** De neutralino biedt een natuurlijke verklaring voor kosmische donkere materie.

SUSY-geïnspireerde GUT's (zoals SU(5), SO(10), of E_6) stellen zich voor dat bij extreem hoge energieën quarks en leptonen samensmelten in grotere multiplets, en de krachten fuseren in één gauge-groep.

Maar SUSY is nog niet verschenen in experimenten. Als het alleen bestaat op schalen buiten ons bereik, kan zijn verenigende kracht verleidelijk maar verborgen blijven.

Snaartheorie: Kwantumzwaartekracht en Graviton

Snaartheorie gaat verder. In plaats van het Standaardmodel te repareren, herschrijft het de fundamenteën:

- **Snaren, geen punten:** Alle deeltjes zijn trillingen van kleine snaren.
- **Graviton verschijnt natuurlijk:** De massaloze spin 2 excitatie is onvermijdelijk, wat betekent dat kwantumzwaartekracht ingebouwd is.
- **Vereniging:** Verschillende trillingstoestanden produceren alle bekende deeltjes – quarks, leptonen, gauge-bosonen, Higgs – in één kader.
- **Extra dimensies:** Snaartheorie vereist 10 ruimtetijd-dimensies; M-theorie vereist 11, met verborgen dimensies gecompactificeerd of vervormd.

In deze visie is vereniging geen toeval – het is geometrisch. Krachten verschillen omdat snaren op verschillende manieren trillen, gevormd door de topologie van extra dimensies.

M-Theorie en Brane-Werelden

De ontdekking dat de vijf snaartheorieën verbonden zijn door dualiteiten leidde tot M-theorie, een nog groter kader:

- Omvat snaren, membranen en branes in hogere dimensies.
- Suggereert dat ons universum een driedimensionaal brane kan zijn, zwevend in een hoger-dimensionale bulk.
- Biedt natuurlijke verklaringen waarom zwaartekracht zwakker is (het lekt in de bulk) en hoe meerdere universums in een “multiverse” kunnen bestaan.

M-theorie is nog steeds onvolledig, maar het is de meest gedurfde stap naar een ToE die ooit is geprobeerd.

Andere Wegen naar Kwantumzwaartekracht

Snaartheorie en M-theorie zijn niet de enige wegen. Fysici onderzoeken meerdere kaders, elk met verschillende sterke punten:

- **Luskwantumzwaartekracht (LQG):** Probeert ruimtetijd direct te kwantiseren, voorspelt dat ruimte discreet is op de Planck-schaal.
- **Asymptotische Veiligheid:** Suggereert dat zwaartekracht zich goed kan gedragen bij hoge energieën vanwege een niet-triviaal vast punt.
- **Causale Dynamische Triangulaties (CDT):** Bouwt ruimtetijd op uit eenvoudige geometrische bouwstenen.
- **Twistor-theorie en Amplituhedron:** Innovatieve wiskundige kaders die ruimtetijd en verstrooiingsamplitudes heroverwegen.

Hoewel geen van deze nog concurreert met de verenigingsomvang van snaartheorie, illustreren ze de rijkdom van de zoektocht.

De Rol van Experimenten

Een ToE moet uiteindelijk testbaar zijn. Hoewel de Planck-schaal ver buiten het bereik van huidige experimenten ligt, zoeken fysici naar indirect bewijs:

- **Versnellers:** SUSY-deeltjes, extra dimensies, of microscopische zwarte gaten.
- **Precieze tests:** Afwijkingen van Newtons wet op korte afstanden.
- **Zwaartekrachtgolven:** Exotische polarisaties of echo's uit hogere dimensies.
- **Kosmologie:** Sporen van inflatie, kandidaten voor donkere materie, of axionen voorspeld door snaartheorie.

Tot nu toe blijft een ToE buiten bereik, maar elke negatieve resultaat vernauwt de mogelijkheden.

Schoonheid en Uitdaging

Een echte ToE verenigt niet alleen fysica – het verenigt **menselijke kennis**. Het verbindt kwantummechanica en relativiteit, micro en macro, deeltje en kosmos.

Maar het staat voor een paradox: de schaal waarop vereniging plaatsvindt, kan voor altijd buiten experimenteel bereik liggen. Een 100 TeV-versneller onderzoekt slechts een fractie van de weg naar de Planck-schaal. We moeten mogelijk vertrouwen op kosmologie, wiskundige consistentie, of indirecte signalen.

De droom blijft leven vanwege de diepe schoonheid van de kaders. Zoals Witten opmerkte, is snaartheorie niet slechts “een verzameling vergelijkingen”, maar “een nieuw kader voor fysica”.

Wetenschap als Methode, Geen Dogma

De zoektocht naar een ToE gaat niet over het verklaren van snaartheorie, SUSY, of een enkel idee als “de waarheid”. Het gaat over de **wetenschappelijke methode**:

- Het identificeren van scheuren in bestaande theorieën.
- Het voorstellen van nieuwe en gedurfde kaders.
- Het testen ervan tegen de realiteit, ze weggooien of verfijnen indien nodig.

Het verhaal is nog niet afgelopen. Maar juist deze openheid – de weigering om een theorie als heilig te beschouwen – maakt fysica een levende wetenschap, geen dogma.

De Horizon Voor Ons

De komende eeuw van fysica kan onthullen:

- Bewijs voor supersymmetrie of alternatieven ervan.
- Kosmologische data die snaarvoorspellingen bevestigen of weerleggen.
- Een diepe beschrijving van ruimtetijd zelf.

Of misschien is de echte ToE iets dat nog niemand heeft voorgesteld.

Maar de zoektocht zelf – de drang om te verenigen, te verklaren, de natuur als een geheel te zien – is net zozeer een deel van de menselijkheid als de vergelijkingen zelf.

Referenties en Verder Lezen

Supersymmetrie en Grote Vereniging

- Wess, J., en Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., en Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., en Glashow, S. L. (1974). “Unity of All Elementary Particle Forces.” *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Snaartheorie en M-Theorie

- Green, M. B., Schwarz, J. H., en Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (deel 1 en 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (deel 1 en 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., en Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Luskwantumzwaartekracht en Alternatieven

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., en Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Experimentele Beperkingen

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration en Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Toegankelijke Populaire Verslagen

- Green, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.