

Gianfranco Bertone

Achter de schermen van het heelal

Van higgsdeeltje tot donkere materie

Vertaald door Ronald Jonkers

2014 Prometheus • Bert Bakker Amsterdam

Voor Nadia. En voor onze zoon Francesco, de liefste afleiding die een schrijver zich kan wensen.

De uitgever heeft getracht alle rechthebbenden van de illustraties te achterhalen. Indien iemand meent dat haar/zijn rechten niet zijn gehonoreerd, kan zij/hij contact opnemen met Prometheus te Amsterdam.

Oorspronkelijke titel *Behind the Scenes of the Universe*

© 2013 Gianfranco Bertone

Behind the Scenes of the Universe: From the Higgs to Dark Matter, first edition, was originally published in English in 2013. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

© 2014 Nederlandse vertaling Prometheus • Bert Bakker

en Ronald Jonkers

Omslagontwerp Bart van den Tooren

Foto omslag Ralf Kaehler, Oliver Hahn en Tom Abel (КIPAC)

Foto auteur Maria van Rooijen

www.prometheusbakker.nl

ISBN 978 90 351 4202 2

Inhoud

Woord vooraf 7

1 Een duister raadsel 11

Een blik achter de schermen 16

Het onbekende afwenden 20

Het zoeken naar donkere materie 22

De nakende revolutie 26

2 Sluimerend in het donker 29

Het onzichtbare zien 32

Donkere steigers 36

Heelal op vestzakformaat 46

Confucius' kat 55

3 Monsters 59

Een bekend landschap 59

De zuilen van Hercules 67

Terra incognita 71

Monsters 77

4 De kosmische show 87

Het doek gaat op 90

Proloog 95

Plot 101

Steracteurs 104

5 De Zwitserse donkere-materiefabriek 109

De ring 110

Onbekend gebied betreden 118

Het higgsboson 124

De onuitgesproken angst 129

6 Ondergrondse mijnen, met uitzicht 133

Meevallers en tegenslagen 136

Het Duitse 141

De Trage en de Vreemdeling 144

Kordaat aanpakken 149

7 Signalen uit het heelal 155

Het bleke licht van donkere materie 157

Antimaterieboodschappers 163

Flitsen in het ijs 166

Zwarte gaten en andere monsters 169

8 De weg naar de toekomst 175

Het ogenblik van de waarheid 175

Het nachtmerriescenario 179

De gevolgen van succes 184

En wat dan nog? 195

Noten 199

Illustratieverantwoording 205

Woord van dank 209

Register 213

Woord vooraf

Een buitengewone ontdekking heeft onlangs de kosmologie en de deeltjesfysica op hun grondvesten doen wankelen en aanleiding gegeven tot een wetenschappelijke revolutie die op een ingrijpende manier verandering heeft gebracht in ons begrip van de kosmos waarin wij leven – en dit proces is nog lang niet afgesloten.

In de jaren twintig en dertig van de vorige eeuw waren sterrenkundigen die zich buiten de gebaande paden bewogen al opmerkelijke afwijkingen opgevallen in de beweging van hemellichamen in verre sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels, maar pas tegen het einde van de twintigste eeuw zag de wetenschappelijke gemeenschap zich geconfronteerd met een verbluffende conclusie: het heelal is gevuld met een onbekende, ongreepbare substantie die *wezenlijk verschilt* van alles wat wij ooit met onze telescopen hebben waargenomen of in onze laboratoria hebben gemeten.

Deze substantie wordt *donkere materie* genoemd en vormt een van de belangrijkste uitdagingen voor de moderne natuurwetenschap. Het bestaan ervan is veel meer dan een academische curiositeit, aangezien donkere materie het onzichtbare steigerwerk biedt dat alle astrofysische structuren in het heelal bijeenhoudt. Als je het uit een sterrenstelsel zoals onze eigen Melkweg zou verwijderen, zouden alle sterren en planeten als kogels de intergalactische ruimte in vliegen.

In de afgelopen dertig jaar hebben we veel geleerd over de eigenschappen van deze raadselachtige stof. Zo hebben we met een zeer verfijnde nauwkeurigheid gemeten in welke enorme hoeveelheid het in het heelal voorkomt, en we weten nu dat het aandeel van de donkere materie veel groter is dan dat van de materie waarmee wij vertrouwd zijn. We weten nog niet van welke aard deze donkere materie is, maar we kunnen met goed vertrouwen zeggen dat ze opgebouwd moet zijn uit *nieuwe, tot op heden nog niet ontdekte deeltjes*, tenzij we compleet om de tuin worden geleid door een groot aantal zeer uiteenlopende astrofysische en kosmologische waarnemingen.

Deze ontdekking heeft verbluffende gevolgen. Het buitengewone spektakel dat de kosmos biedt – de dans van planeten rond een ster, het uiterlijk van fijne kant van verre nevels, de hevige botsing van reusachtige sterrenstelsels, en uiteindelijk het grote raadsel van ons eigen bestaan – speelt zich af op een kolossaal onzichtbaar podium dat is gebouwd van zich nog steeds uitbreidende halo's van onzichtbare materie. En wij zijn als menselijke wezens gemaakt van een betrekkelijk zeldzame vorm van materie in het heelal: we zijn *speciaal*, op een manier die we nooit hadden kunnen vermoeden.

Er is over de hele wereld een wedloop gaande om donkere materie aan te wijzen, en hiertoe wordt gebruikgemaakt van experimentele faciliteiten met onder andere de deeltjesversneller van het CERN en een verscheidenheid aan astrodeeltjesexperimenten die ondergronds en in satellieten boven de aardatmosfeer plaatsvinden.

In dit boek, dat zich richt op de in natuurwetenschap geïnteresseerde lezer, beschrijf ik de strategieën die door wetenschappers werden voorgesteld om ons *achter de schermen* van het heelal te begeven, om de geaardheid van donkere materie te bepalen. Ik stel dat we op het punt staan een fundamentele verschuiving mee te maken in het denken over de natuur. Er zijn

dertig jaren verstreken sinds de huidige toonaangevende theorieën werden ontwikkeld om het vraagstuk van de donkere materie op te lossen, en op zijn minst twee generaties natuurkundigen hebben gedetailleerde voorspellingen uitgewerkt voor een grote verscheidenheid aan experimenteel onderzoek, en zij hebben steeds grotere en gevoeliger apparatuur gebouwd om donkere-materiedeeltjes aan te treffen.

Nu is de tijd gekomen om ofwel deze theorieën uit te sluiten en over te stappen op een nieuwe aanpak, of om donkere materie te ontdekken en de weg voor te bereiden naar een nieuw tijdperk van kosmologie en deeltjesfysica.

Gianfranco Bertone

Een duister raadsel

Op 12 december 2010 vond er in de bergachtige provincie Sichuan een ontmoeting plaats tussen leden van de Chinese Staatsraad en vertegenwoordigers van de Tsinghua-universiteit in Peking, om 's werelds diepste ondergrondse natuurkundige laboratorium voor het onderzoek naar astrodeeltjes te openen: een grot met een omvang van 1400 kubieke meter die was uitgehakt in het gesteente van de berg Jinping op een diepte van 2500 meter onder het aardoppervlak.

Op vrijwel hetzelfde tijdstip was 13.000 kilometer zuidelijker een ploeg onderzoekers bezig heet water in het ijs van het Ant-actisch Plateau te pompen om het laatste van een reeks van tachtig gaten te boren, met een doorsnee van 60 centimeter en een diepte van 2500 meter, om in dat gat de laatste keten detectoren te laten zinken van de zogeheten IceCube telescoop. Daarmee kwam een eind aan de bouwfase die zeven jaar tevoren was begonnen, en kon men met het eigenlijke experiment beginnen.

Op een nog onwaarschijnlijker plek haalde een groep astronauten aan boord van de NASA Space Shuttle Endeavour op 19 mei 2011 de zes ton wegende detector AMS-02 uit het ruim van de bevoorradingsshuttle en droeg het apparaat over aan de bemanning van het internationale ruimtestation ISS, tijdens een spectaculaire operatie met behulp van robotarmen op een hoogte van 350 kilometer bóven de zeespiegel.¹

Dit zijn slechts de meest recente toevoegingen aan een zich in hoog tempo uitbreidende lijst van indrukwekkende wetenschappelijke instrumentaria voor de astrodeeltjesfysica, een tak van wetenschappelijk onderzoek in het overgangsgedebied tussen astrofysica en deeltjesfysica dat een explosieve groei kent: satellieten voor de ontdekking van gammastraling en antimaterie, die zich vrij in een omloopbaan rond de aarde bewegen of die zijn bevestigd aan het ISS, neutrino telescopen die zijn ingegraven in het ijs van de Zuidpool of die verankerd liggen op de bodem van de Middellandse Zee, en deeltjesversnellers die elementaire deeltjes met een extreem hoge energie op elkaar laten botsen.

De wetenschap hoopt door het combineren van de gegevens van al deze experimenten licht te kunnen werpen op een van de grootste onopgeloste problemen van de moderne natuurwetenschappen, een mysterie dat ons begrip van de kosmos en onze plaats daarin op losse schroeven zet: de *donkere materie*. De wortels van dit raadsel reiken tot ver terug in de tijd, maar pas sinds kort toont het vraagstuk van de donkere materie zich als het onontkoombare probleem dat de grondvesten van de kosmologie en de deeltjesfysica doet wankelen.

Onze opvattingen over de aard van de kosmos verliepen lineair vanaf het begin van de twintigste eeuw, toen Hubble de uitdijing van het heelal ontdekte. Maar toen de wetenschap in de jaren zeventig probeerde om met behulp van alle stukjes van de kosmische puzzel (zoals de overvloed aan lichte scheikundige elementen in het heelal, de beweging van sterren in melkwegstelsels en de afwijking van de gemiddelde snelheid, de snelheidsdispersie, van sterrenstelsels in sterrenhopen) zich een totaalbeeld te vormen en een samenhangend kosmologisch model op te stellen, bleken de stukjes niet te passen. Om de puzzel te voltooien was het nodig om uit te gaan van het bestaan van een nieuwe vorm van materie, *donkere materie*.

In een artikel dat op 1 oktober 1974 verscheen in het gerenommeerde *Astrophysical Journal*, beschreven kosmologen van naam van de universiteit van Princeton de reusachtige verschuiving in de manier van denken als volgt met woorden die insloegen als een bom:

Er bestaan in toenemende mate en met steeds groter wordende overtuigingskracht redenen om aan te nemen dat voor de massa van de gewone sterrenstelsels een waarde wordt gehanteerd die een factor 10 of meer te klein is.²

Een factor 10! Met één klap waren alle bekende sterrenstelsels die tientallen jaren waren waargenomen en bestudeerd, de *gewone* stelsels en het gas waarvan werd aangenomen dat hun structuur duidelijk was, akelig groot geworden, te massief en eerlijk gezegd nogal bizar. Niemand kon meer zeggen waar ze van gemaakt waren, of waaruit wat dan ook in de kosmos bestond. Het geijkte beeld van een melkwegstelsel waarvan men zich voorstelde dat het bestond uit een eenvoudige schijf van sterren die samen met hun planeten rond een gedeeld middelpunt cirkelden in een zee van verdund gas, was op slag onnauwkeurig geworden en leek een verkeerde voorstelling van zaken te zijn. Het gas en de sterren waren slechts een klein gedeelte van een veel grotere en massievere *halo* van onzichtbare materie.

De gevolgen van deze nieuwe opvattingen zijn verbijsterend en gaan zo diep dat we pas in het beginstadium verkeren als het erom gaat ze te doorgronden. Het belangrijkste van alles is vermoedelijk dat het bestaan van sterren, zwarte gaten, supernova's, planeten en dus ook de planeet aarde, mogelijk wordt door een soort 'kosmische steigers' die bestaan uit donkere materie. Zodra je de donkere materie uit een sterrenstelsel verwijdert, zullen de sterren en planeten als kogels alle kanten op vliegen door de ruimte tussen de stelsels. Dit betekent ook dat wij men-

sen niet gemaakt zijn van dezelfde materie als waaruit het merendeel van de kosmos is samengesteld: we zijn *bijzonder*, op een manier die we niet hadden verwacht.

In de moderne kosmologie biedt de donkere materie als het ware het podium voor de kosmische show, een podium dat ontstond toen het heelal jong was, lang voor het tijdstip waarop de sterren begonnen te stralen en planeten zich vormden, en deze fase ontwikkelt zich nog steeds verder. Het is niets anders dan *de dragende structuur van het heelal*. Deze levert in één keer antwoord op veel vragen in de astrofysica en de kosmologie, en verschaft een hecht op zichzelf staand kader voor de structuur en de ontwikkeling van het heelal.

Nu laten natuurkundigen zich niet zo eenvoudig overtuigen. We zijn er vooral niet op uit om een nieuwe zienswijze te introduceren, laat staan een nieuwe vorm van materie, als daar geen harde, onomstotelijke bewijzen voor worden aangedragen. Ook al duiden astrofysische waarnemingen op het bestaan van deze onbekende component van het heelal, toch kunnen we deze stof niet zomaar aanvaarden voordat we de eigenschappen ervan hebben kunnen meten en bestuderen in onze laboratoria. Of, zoals Robert Pirsig zegt in zijn *Zen en de kunst van het motoronderhoud*:

Bij het werkelijke doel van de wetenschappelijke methode gaat het erom je ervan te overtuigen dat de Natuur je er niet toe verleidt te denken dat je iets meent te weten wat je in feite niet weet.

De lijst met oplossingen die werden voorgesteld om licht te doen schijnen op de kwestie van de raadselachtige donkere materie is zéér lang en omvat uiteenlopende ideeën zoals wijzigingen in de zwaartekracht, of nieuwe deeltjes, of ook zeer zwakke sterren en spiegelwerelden, en ook nu nog stromen er nieuwe verklaringen binnen.

Dit heeft tot gevolg dat voor de ongeoefende waarnemer de moderne fysicapublicaties soms doen denken aan oude manuscripten, zoals een middeleeuws bestiarium of Egyptische teksten op papyrus, waarin bekende dieren figureren naast extreme monsters en andere denkbeeldige wezens. Het wemelt er van de exotische deeltjes met uitzonderlijke namen en nog veel uitzonderlijker eigenschappen, die zich vermengen met de toch al rijke en heterogene dierentuin van bekende deeltjes en velden.

Natuurkundigen hebben wel iets weg van de eerste geografen die buiten de grenzen van de bekende landen monsters en andere denkbeeldige wezens tekenden. Om de donkere materie te verklaren verzonnen ze nieuwe deeltjes die de terra incognita van de deeltjesfysica zouden bevolken. Zulke kandidaten voor de donkere materie te ontdekken, of uit te sluiten dat deeltjes voor die titel in aanmerking komen, dat behoort tot de grootste natuurwetenschappelijke uitdagingen van de eenentwintigste eeuw.

Misschien blijken ze alleen te bestaan in de fantasie van de deeltjesfysici, zoals dat met de mythologische monsters uit vroegere beschavingen het geval was. Maar net zoals zulke oude monsters in feite een vertekende waarneming van bestaande dieren bleken te zijn, bestaat de hoop dat we door zorgvuldig opgezet onderzoek uiteindelijk de deeltjes van de donkere materie zullen ontdekken om zodoende een van de donkerste vraagstukken van de moderne wetenschap tot klaarheid te brengen.

In dit boek gaat het om het zoeken naar donkere materie: de redenen die natuurkundigen in het bestaan ervan doen geloven, de theorieën die werden opgesteld om de stof te verklaren, en de mondiale wedloop die op dit moment in volle gang is om de donkere materie te identificeren.

Ik stel dat we de volgende vijf tot tien jaar getuige zullen zijn

van een revolutie op dit onderzoeksgebied, omdat we ofwel donkere-materiedeeltjes zullen vinden, zodat er een geheel nieuwe tak van wetenschap zal ontstaan, of omdat we zullen zien hoe de overheersende theorieën aan gewicht zullen verliezen en wij genoopt zullen zijn opnieuw grondig na te denken over onze beschrijving van de kosmos.

Een blik achter de schermen

Als je in een wolkeloze nacht naar de hemel kijkt zie je de Melkweg als een heldere lichtbaan die langs het firmament is gespannen. Het besef dat wat Joyce beschreef als de *infinite lattiginous scintillating uncondensed milky way* (oneindig lactigineus fonkelende ongecondenseerde melkweg) niets anders is dan het uit sterren en gas bestaande schijfvormige sterrenstelsel waarin wij leven, *van binnenuit gezien*, is voor veel mensen een bron van ontzag en inspiratie, en sommigen voelen de rillingen over hun rug lopen als ze hieraan denken. De hemel krijgt hierdoor een zeker perspectief en het verleent diepte aan het anderszins zo platte, tweedimensionale koepelgewelf van de hemel.

Als je je blik omhoog richt op het sterrenbeeld Boogschutter, kijk je naar het galactisch centrum dat tegelijkertijd het midden vormt van de schijf met sterren en gas van ons melkwegstelsel, die nagenoeg alles omvat wat we met het blote oog aan de hemel kunnen zien, en het midden van een bolvormige hoeveelheid donkere materie, de halo, die ongeveer tienmaal groter is dan de schijf en ook tienmaal zoveel massa bezit.

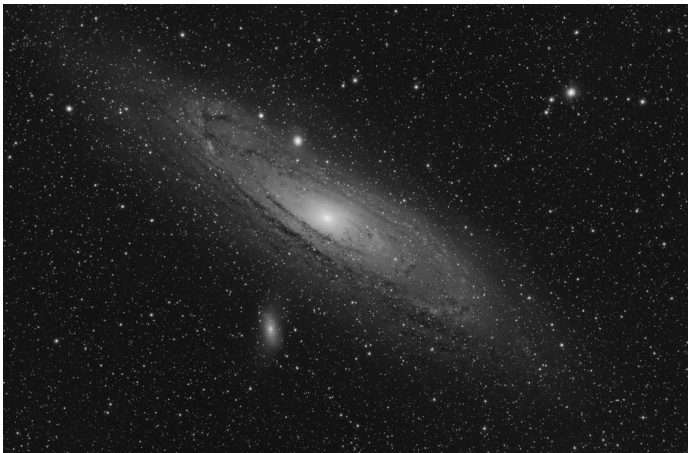
De dichtheid van deze halo is betrekkelijk groot. Door elke vierkante centimeter van de bladzijde die je leest, passeren elke seconde ongeveer 30.000 donkere-materiedeeltjes met een snelheid van ongeveer 100 kilometer per seconde.³ Dat we deze deeltjes ondanks het feit dat we er constant mee worden gebombardeerd niet waarnemen, komt door het feit dat er een slechts zeer

zwakke interactie bestaat tussen deze deeltjes en de gewone materie, en dat zorgt er eveneens voor dat donkere materie zich zo moeilijk laat meten.

De Melkweg bevat veel *substructuren*, kleinere concentraties donkere materie met weinig sterren en gas, waarvan een gedeelte zelfs zichtbaar is voor het blote oog, zoals de Magelhaense wolken. Maar de grootste concentratie donkere materie buiten de Melkweg wordt gevormd door de Andromedanevel, ons gelijkvormige sterrenstelsel (afbeelding 1.1).

We kunnen dit stelsel zelfs met het blote oog waarnemen als een vaag soort ster in de groep sterrenbeelden die hun naam ontlene aan de mythe van Perseus. Maar een opname met een telescoop onthult dat we hier te maken hebben met een prachtige spiraal van sterren en gas, met eenzelfde vorm en omvang als onze eigen Melkweg. Het is het verste object dat wij met het blote oog kunnen zien, en het enige buiten de Melkweg gelegen object dat vanaf de noordelijke aardhelft kan worden waargenomen.

Met een foto via een telescoop kunnen we meer dan uitslui-



Afbeelding 1.1 De Andromedanevel, ons gelijkvormige sterrenstelsel.

tend de schoonheid bewonderen. We weten sinds Newton hoe we de snelheid kunnen berekenen van een object dat door middel van de zwaartekracht aan een bepaalde massa gebonden is: hoe sneller het hemellichaam, des te groter de massa. Zo kunnen we de snelheid van de aarde en van alle andere planeten in hun omloopbaan rond de zon berekenen als we de omvang van hun baan kennen. Maar als we deze techniek toepassen om de snelheid van de sterren in de Andromedanevel te berekenen gaat het mis.

Dit was al in 1939 waargenomen door Horace W. Babcock: de Andromedanevel roteert zeer snel met een grote straal, *alsof* het merendeel van de massa in de buitenste gebieden zou liggen. Enkele jaren eerder had Fritz Zwicky, een Zwitserse sterrenkundige die in Californië onderzoek verrichtte, een cluster van ongeveer duizend sterrenstelsels in het sterrenbeeld Coma Berenices (Hoofdhaar) waargenomen met de telescoop van Mount Wilson, dezelfde 2,5 meter telescoop die Edwin Hubble tien jaar tevoren had gebruikt om de uitdijning van het heelal te bewijzen.

In het artikel waarin Zwicky zijn resultaten bekendmaakte, schrijft hij, nadat hij eerst had geklaagd over de lichtvervuiling van de stad Los Angeles (in 1931!), dat de stelsels in de cluster een nogal grote snelheidsdispersie vertoonden, en hij trok daaruit de conclusie dat de Coma Cluster veel meer massa leek te bevatten dan uit de zichtbare sterrenstelsels viel af te leiden.

Als dit zou worden bevestigd, zouden we het verbluffende feit krijgen dat er een veel grotere hoeveelheid donkere dan licht reflecterende materie aanwezig is.⁴

Ook andere aanwijzingen leken de hypothese van het bestaan van donkere materie te staven, totdat in de jaren zeventig rotatiecurven werden uitgebreid tot grotere stralen en toegepast op veel andere sterrenstelsels, waarmee de aanwezigheid werd be-

wezen van grote hoeveelheden massa op een veel grotere schaal dan de omvang van de schijfvormige sterrenstelsels.⁵

Op dit moment stamt de indrukwekkendste rechtstreekse aanwijzing voor het bestaan van donkere materie van de interpretatie van zwaartekrachtlenzen, een bekend effect dat berust op de algemene relativiteit van Einstein en dat werd afgeleid van de kernidee van deze theorie.⁶ De beroemde astrofysicus John Wheeler vat de theorie achter het effect als volgt samen:

De massa schrijft de ruimtetijd voor hoe zij zich moet krommen en de ruimtetijd schrijft de massa voor hoe zij dient te bewegen.⁷

Voorals grote massa's dwingen de ruimte zich significant te krommen en wel zo dat licht eromheen wordt gebogen waardoor de beelden van voorwerpen die zich ver op de achtergrond bevinden worden vertekend. Door grote concentraties massa kijken heeft daarom wel iets weg van het kijken door een goudviskom. Je ziet wat er aan de andere kant is, maar aangezien het optische pad van de lichtstralen niet rechtuit verloopt, krijg je een vertekend beeld te zien.

Deze effectieve techniek stelt ons in staat de massa van grote structuren in het heelal te bepalen, zoals clusters van sterrenstelsels. Deze massa blijkt veel groter te zijn dan de massa van alle sterren en het gas in de cluster, en levert daarmee het bewijs voor het bestaan van donkere materie. Bovendien is op zijn minst in één geval het totaal van de massa fysiek verschoven ten opzichte van de zichtbare materie, een gegeven met dramatische gevolgen voor theorieën die de donkere materie zouden willen elimineren door een wijziging in de wetten van de zwaartekracht.⁸

Het onbekende afwenden

We worden dus gedwongen te aanvaarden dat er in het heelal nog iets is naast gewoon gas en sterren. Er bestaan sterke aanwijzingen dat donkere materie niet kan zijn opgebouwd uit gewone materie; daarom móeten er nieuwe deeltjes bestaan, tenzij we volkomen op een dwaalspoor zijn gelokt door een zeer uiteenlopend aanbod van astrofysische en kosmologische waarnemingen.

Op dit punt overschrijdt het probleem van de donkere materie de grenzen van de astrofysica en de kosmologie, vakgebieden die zich bezighouden met de grootste structuren van het heelal, en het wordt een groter en nog meer elementair raadsel dat een beroep doet op ons begrip van de deeltjesfysica, het vakgebied dat de fundamentele bestanddelen van de materie en hun wisselwerking bestudeert. Het zogenaamde *Standaardmodel* van de deeltjesfysica verschaft een ongelooflijk nauwkeurige beschrijving van alle bekende elementaire deeltjes en hun onderlinge wisselwerking, maar uit kosmologische waarnemingen moeten we opmaken dat wat we tot nog toe hebben waargenomen slechts het topje van de ijsberg is.

De kwestie van de donkere materie is tegenwoordig zo belangrijk omdat het merendeel van de deeltjesfysici om volstrekt op zichzelf staande redenen meent dat het Standaardmodel geen werkelijk fundamentele theorie is, maar veeleer een vereenvoudigde versie, die slechts geldig is voor een beperkt energiebereik. Dit komt overeen met de zwaartekracht, waarvan bekend is dat de theorie die Newton erover opstelde bij benadering een vereenvoudigde versie was van Einsteins algemene relativiteitstheorie.⁹

Neutralino's, axionen, steriele neutrino's, spiegeldeeltjes, Kaluza-Kleinfotonen, gravitino's, neutrino's: de nieuwe theorieën die in de afgelopen dertig jaar werden voorgesteld ter uitbrei-