



Dit *Deep Field South*-beeld van de ruimtetelescoop Euclid biedt een blik op het zuidelijke sterrenbeeld Horologium. Er is zestien keer ingezoomd ten opzichte van het oorspronkelijke beeld. De vele sterrenstelsels die zichtbaar zijn hebben verschillende vormen en kleuren omdat ze variëren inleeftijd en afstand (beeld: ESA/Euclid/Euclid Consortium/ NASA, beeldverwerking door J.-C. Cuillandre, E. Bertin, G. Anselmi).

Onbegrepen astrofysica

Dit wordt een stukje met weinig inhoud, want we weten niet wat we missen. Maar niet-weten is geen schande, dus schrijf ik het toch. Eigenlijk is het andersom: niet-weten is waar de pret het grootst is.

'Big Data'

Astrofysica is natuurkunde zonder experimenten. Sterrenkundigen moeten wachten tot het heelal ze een seintje stuurt. Intussen kunnen zij nieuwe instrumenten bouwen. Die detecteren vooral fotonen. Tot ruwweg het jaar 2000 ging het daarbij hoofdzakelijk om het uitbreiden van het frequentiespectrum, van laagfrequente radiogolven tot en met harde gammastraling. In de afgelopen decennia ging het vooral om het vergroten van de gevoeligheid, waardoor de sterrenkunde het tijdperk van de 'big data' heeft betreden.

Bijvoorbeeld: de definitieve productie van de GAIA-satelliet zal de posities, snelheden, en kleuren van bijna twee miljard sterren omvatten – en de briljante bijvangst aan planetoïden, exoplaneten, zwarte gaten en toevalstreffers is reusachtig. Zo ook met andere telescopen: waar vroeger een hele nacht waarnemen een korrelige foto van een paar sterrenstelsels opleverde, vangen we er nu honderden, in verbluffend detail en op verscheidene golflengten tegelijk.

Dankzij deze toevloed is het mogelijk om een soort schijnexperimenten te doen. Bijvoorbeeld: als de waarnemingen laten zien dat sommige elliptische sterrenstelsels een zwart gat in hun centrum verbergen, kun je de veronderstelling dat zoiets voor al zulke stelsels geldt 'experimenteel' toetsen aan de enorme databestanden die beschikbaar zijn.

Natuurlijk is het wel mogelijk om specifiek gerichte waarnemingen te doen. Een recent voorbeeld is de Euclid-satelliet, die een 600-megapixel camera heeft waarmee in zes jaar tijd een derde van de hemel met een resolutie van 0,1 boogseconde in kaart wordt gebracht, honderd gigabyte

per dag. Het doel is in eerste instantie om de ruimtelijke verdeling van twee miljard sterrenstelsels te bepalen, om daarmee de inhoud en de dynamica van het nabije heelal te bestuderen. Toch blijft sterrenkunde een kwestie van wachten. Niet alleen op de binnenkomst van fotonen, maar ook van gravitatiegolven, en een zeer beperkte flux van deeltjes. Op die gebieden zijn de laatste jaren grote vorderingen gemaakt: denk aan de waarnemingen van samensmeltende zwarte gaten of extreem energetische neutrino's. Maar dat onderzoek is zo pril dat er nog niets is gevonden dat duidt op nieuwe natuurkunde.

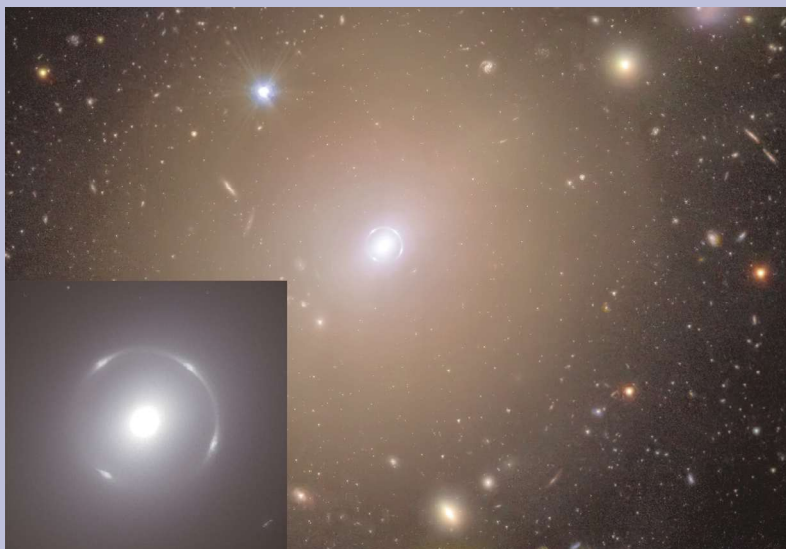
Dat geldt grotendeels ook voor de meer klassieke waarnemingen. Uit de overdonderende hoeveelheid gegevens, die de nieuwste generaties telescopen hebben opgebracht, heeft de astrofysica veel geleerd. Maar er zijn weinig aanwijzingen dat er nieuwe natuurkunde nodig is om de gemeten data te verklaren. In elk geval niets dat vergelijkbaar is met de ontdekking van de zwaartekracht, waarmee de astronomische wetten van Kepler konden worden geduid.

Bekend terrein

Astrofysica is in eerste instantie de toepassing van bekende natuurkunde op kosmische verschijnselen. De onderste laag bestaat uit de quantumveldentheorie en de algemene relativiteitstheorie. De daarvan afgeleide quantummechanica en speciale relativiteitstheorie liggen daarboven, met daarop de elektro-, thermo- en gasdynamica. Tot veler verbazing speelt ook de scheikunde een belangrijke rol, vooral bij de interstellaire materie, en bij de vorming van sterren en planetenstelsels.

De natuurkunde moge bekend zijn, astrofysische processen zijn dat niet. Het werk van de astrofysicus is dus vooral het bedenken, berekenen en toetsen van mechanismen die de waarnemingen moeten verklaren, op grond van bekende fysica. Nieuwe natuurkunde mag pas als laatste redmiddel.

Op dit moment zijn nieuwe mechanismen vooral nodig op een van de meest klassieke sterrenkundige terreinen: het ontstaan van structuren zoals sterrenstelsels, sterren, en planeten (het heelal komt straks aan de beurt). Het overkoepelende scenario is al eeuwen bekend: samentrekken van materie door de zwaartekracht. De daarbij vrijkomende energie moet worden afgevoerd, grotendeels in de vorm van elektromagnetische straling. Mechanismen van stralingstransport zijn dus essentieel, maar uiterst complex. Vooral bij de eerste generaties van sterren, ruwweg drie- tot vijfhonderd miljoen jaar na de oerknal, levert dat grote problemen op. Recente waarnemingen suggereren dat sterrenstelsels veel eerder zijn ontstaan dan uit de bekende mechanismen volgt. Structuurvorming is niet alleen een kwestie van 'hoe dump ik mijn energie', maar ook van 'waar berg ik mijn impulsmoment'. Het algemeen aanvaarde antwoord is, dat een samentrekkende gaswolk een langzaam draaiende pit vormt (denk: de zon), omringd door een snel draaiende 'accretie'-schijf (planetenstelsel). Om in zo'n schijf impulsmoment naar buiten te transporteren is wrijving nodig, en die blijkt onvoldoende te zijn. Hier komen magnetische velden en de scheikunde te hulp. In de accretieschijf ontstaan uiterst ingewikkelde ketens van moleculaire reacties, waarbij de instraling door de jonge ster



Een minuscule deel van de gigantische hoeveelheid waarnemingen die de Euclid-satelliet na slechts een jaar al heeft opgeleverd. De vage vlek is een elliptisch sterrenstelsel. De heldere pit in het midden is de centrale sterrenzwerm daarvan. De ring daaromheen is het beeld van een ander sterrenstelsel, veel verder weg, dat toevallig precies achter het voorgrondstelsel staat. Door de kromming van de ruimte, veroorzaakt door de sterren en eventueel 'donker spul', zien we dat verre stelsel als een ring. De vier vlekken (zie inzet) ontstaan doordat het voorgrondstelsel niet bolsymmetrisch is, maar elliptisch (beeld: European Space Agency en Euclid Consortium).

een belangrijke rol speelt. Moleculen gaan samen en vormen uiterst kleine stofdeeltjes, die groeien tot losse vlokken, zoiets als pinda's van piepschuim. Door botsingsprocessen kunnen die groeien totdat de zwaartekracht ook hier dominant wordt, zodat planeten ontstaan als eindbestemming van het impulsmoment.

Dit zijn processen die op bijzonder ingewikkelde manier samenwerken. Dat geldt ook voor de vorming van sterrenstelsels: ook daar spelen zwaartekracht, stralingstransport en kernfusie, met als toevoeging wat kosmische expansie en de gloed van de oerknal. Maar vooralsnog zijn er geen aanwijzingen voor iets nieuws. Bij het doorrekenen van zulke mechanismen zijn altijd nieuwe algoritmes nodig. Omdat het hier over natuurkunde gaat, zal ik niet verder uitweiden over rekenmethoden, hoewel ik die altijd boeiend vind.

Kosmologische kwesties

Het is opmerkelijk hoe weinig aanwijzingen het heelal ons aanreikt voor nieuwe natuurkunde. Het klopt allemaal, of tenminste bijna. Dat komt

deels door de aard van de theorie. Als je een astrofysisch mechanisme wilt doorrekenen, moet je eerst de begin- en randvoorwaarden bedenken. Die, en de vrije parameters, geven de theoreticus grote speelruimte. Misschien wel te veel, want het lijkt er soms op dat je alles wel kloppend kunt maken. Toch zijn er twee grote gebieden waar nieuwe natuurkunde waarschijnlijk nodig is. Ten eerste, de 'spagaat' ('Hubble tension') van het Hubble-getal H_0 , een grootte die aangeeft hoe snel het Heelal uitdijt. Die wordt afgeleid uit waarnemingen van supernovae, en ook uit waarnemingen van de rimpelingen van de kosmische microgolf-achtergrondstraling (de 'gloed van de oerknal'). Het verschil tussen de twee zo gevonden waarden van H_0 is ongeveer vijfmaal groter dan de standaarddeviatie σ van elke afzonderlijke waarde. Omdat een verschil van 3σ geldt als zeer significant, lijkt deze spagaat onoverbrugbaar. Het is mogelijk dat nieuwe natuurkunde nodig is om de H_0 -spagaat te sluiten, maar misschien is het daarvoor nog te vroeg. Sterrenkundig bepaalde grootheden zijn het eindresultaat

van een ingewikkeld samenstel van waarnemingen en interpretaties, waar systematische fouten overal op de loer liggen, en die zijn niet met standaarddeviaties te vangen.

Ten tweede, een kosmische zoektocht rondom natuurkunde van ruim een eeuw geleden: Einsteins algemene relativiteitstheorie (ART), die de structuur en de evolutie van ruimte en tijd beschrijft. Die structuur is merkbaar door de kromme banen van materie en licht in een gekromde ruimte. Waarnemingen van sterren (baanbeweging en snelheid) en van het licht (gravitatie-lens-effect) laten zien dat materie zo snel beweegt, en dat het licht zozeer wordt afgebogen, dat de ruimte-tijd in het diepe heelal veel sterker gekromd is dan verwacht. Zichtbare 'baryonische' materie draagt slechts 5 procent bij, de rest komt van onzichtbaar, 'donker' spul. Van de onbekende 95 procent gedraagt ongeveer een derde zich als materie, de rest als energie.

De 'donkere energie' wordt tot dusver beschouwd als een eigenschap van de ruimte zelf. Dat zit zo. Reeds een jaar nadat Einstein in 1916 zijn ART had gepubliceerd, bewees Georges Lemaître dat een homogeen isotroop heelal niet statisch kan zijn, en dus een begin ('oerknal') gehad moet hebben. Dat beviel Einstein niet, dus bedacht hij nieuwe natuurkunde door aan de lege ruimte een vaste energiedichtheid Λ toe te schrijven. Omdat die 'kosmologische constante' Λ onveranderlijk is, wordt het heelal opgeblazen, want hoe meer ruimte, hoe meer energie. Dat is tegengesteld aan wat materie doet, zodat een statisch heelal mogelijk wordt door materie en energie tegen elkaar af te wegen. Maar De Sitter toonde in 1917 aan dat het evenwicht tussen die twee instabiel is: als de ruimte een infinitesimaal beetje zou uitdijen, ploft het exponentieel uit elkaar.

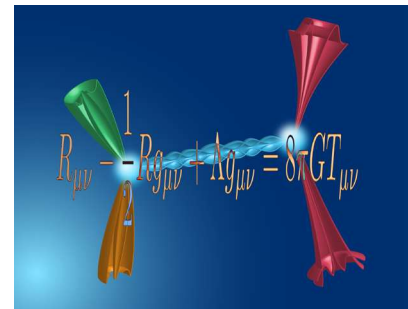
De 'donkere energie' die uit de astronomische waarnemingen lijkt te volgen wordt meestal toegeschreven aan Λ . De grootte daarvan is nu het favoriete speeltje van kosmologen, en wordt helaas gebruikt als een 'matsfactor'. Bijvoorbeeld om eerst de oerknal exponentieel te versnellen ('inflatie'),

maar daarna dat ‘inflaton’-veld de kop in te drukken zodra je het niet meer nodig hebt. Maar de kosmologische constante is een eigenschap van de ruimte zelf. Zolang er ruimte is, kun je Λ niet naar believen aan- of uitzetten. In talloze kosmologische publicaties wordt daarbij verwezen naar de energiedichtheid van het vacuüm in de quantumveldentheorie (QFT). Die is 10^{120} maal groter dan wat astronomisch nodig is. Men veronderstelt dat het heelal superfijn is afgestemd om die kloof te overbruggen, gezien het feit dat wij bestaan om sterrenkunde te doen. Dat is geen nieuwe natuurkunde, maar vacuüm-hocuspocus. Het is prima om Einsteins kosmologische constante (een eigenschap van de ruimte) te koppelen aan de quantummechanica (eigenschappen van deeltjes), maar je moet daar wel fatsoenlijke en toetsbare natuurkunde voor bedenken.

Donkere mysteries

Het oerknalmodel is op dit moment de enige serieuze kandidaat voor de beschrijving van ons heelal. Maar het staat vast dat het onvoldoende is. Immers, vroeger was er minder ruimte. Dus was er ooit een tijd, voor welke er ‘geen plaats genoeg was’ voor de deeltjes. Of, anders gesteld, een tijd dat quantumgedrag noodzakelijk gekoppeld moest zijn aan het gedrag van ruimte en tijd. Om die koppeling te beschrijven is niet alleen nieuwe natuurkunde nodig, maar zelfs een geheel nieuwe soort natuurkunde. De ART is deterministisch: gegeven een begintoestand en een stel randvoorwaarden, ligt het hele systeem vast. Maar met quantumgedrag is dat niet zo: in de QFT kun je alleen bepalen wat de waarschijnlijkheid is dat twee toestanden (zeg ‘begin’ en ‘eind’) aan elkaar gekoppeld zijn. Dat betekent een fundamenteel verschil tussen ART en QFT, waarvan zelfs conceptueel geen overbrugging bekend is, laat staan iets als een bewegingsvergelijking. We kunnen moed putten uit ‘donkere materie’, want die lijkt een meer begrijpelijk deel van de donkere sector te zijn, hoewel we geen aanwijzingen kennen dat het spul vergelijkbaar

is met baryonische materie. Met de waarnemingen van de ruimtetelescoop Euclid is het mogelijk om de kromming van de ruimte, door middel van het gravitatie-lens-effect, te correleren met de materie van de in die ruimte aanwezige sterrenstelsels. Anders gezegd: het gedrag van ruimte-tijd, baryonische materie, en donker spul gezamenlijk in kaart te brengen. Dat opent de mogelijkheid om een toestandsvergelijking te formuleren voor de samenhang tussen donkere ‘materie’ en ‘energie’, analoog aan de toestandsvergelijking van gewone materie (‘gaswetten’), die de basis werd van de deeltjestheorie (thermodynamica van Boltzmann en Gibbs) en zelfs quantumgedrag (statistiek van Bose-Einstein en Fermi-Dirac). Een toestandsvergelijking beschrijft de gasdruk P als een factor κ maal een macht γ van de dichtheid ρ van het gas: $P = \kappa \rho^\gamma$. Fysisch gezien is P een energiedichtheid, en κ is een functie van de entropie. Vertaald naar het Nederlands luidt de toestandsvergelijking dus: “De hoeveelheid energie per kubieke meter is een functie van de hoeveelheid materie per kubieke meter”. Ik stel me voor dat de toestandsvergelijking van ‘donker spul’ analoog is, waarin Λ (de dichtheid van ‘donkere energie’) de plaats inneemt van P , en ρ wordt vervangen door de massadichtheid μ van ‘donkere materie’. De entropie moet dan volgen uit de statistiek van de ‘materiedeeltjes’, bijvoorbeeld à la Boltzmann, of als quanta, of waarschijnlijk nog iets anders. Kortom: $\Lambda = \kappa \mu^\gamma$. Terzijde: dit is een gok mijnerzijds, met garantie tot de voordeur. Als uit de Euclid-waarnemingen zo’n toestandsvergelijking kan worden afgeleid, door het gedrag van Λ en μ in de ruimte te meten, zouden we een antwoord kunnen krijgen op de vraag of dat donkere spul ook uit deeltjes bestaat. Als het antwoord ‘ja’ is, volgt uiteraard meteen de vraag: geldt dat dan ook voor ruimte en tijd? Astrofysica is een weerbarstig werktein omdat het een gigantisch bereik aan schaalgrootten omvat. Ruimte, tijd, massa, en veel meer. Elk nadeel heeft zijn voordeel, niet alleen voor de navolgers van Kees Boeke’s geniale



Symbolische schets van het grootste onopgeloste probleem van de (astro-) fysica: het in overeenstemming brengen van de relativistische quantummechanica (feynmandiagram) en de algemene relativiteitstheorie (einsteinvergelijking). Zolang dit niet is opgelost, hebben we geen beschrijving van de allereerste momenten van ons heelal (beeld: uit Gravity does not exist, door Vincent Icke).

‘Tiendesprongen’, maar ook voor allen die op nieuwe natuurkunde jagen. Want dankzij die lijn van klein naar groot bestaat de hoop dat de eigenschappen van elementaire deeltjes kunnen worden gekoppeld aan die van ruimte en tijd, met hulp van de astrofysica.

We moeten roeien met de riemen die we hebben, maar toch heeft het sloepje *Natuurkunde* al vele prachtige kosmische stranden bezocht. Daarbij zijn we nooit op weg gegaan naar ‘een punt aan de horizon’. Want midden op de oceaan omvat de horizon 360 graden in de rondte, en waar zou je dat punt dan zetten? Het enige dat de fysicus kan doen, is doorroeien, en het karige rantsoen van scheepsbesluit dankbaar opknabbelen. De geschiedenis leert ons dat er ooit weer mooi land in zicht komt. Tot die tijd bevat het scheepsjournaal weinig meer dan deze opsomming over rare verschijnselen op verre eilanden, en speculaties over monsters voorbij de horizon. Leuk voor later, als we eindelijk weten wat er achter al die onbegrepen waarnemingen zit. Misschien heeft het je op een idee gebracht. In dat geval: veel plezier in Stockholm!

Vincent Icke is hoogleraar theoretische astrofysica aan de Universiteit Leiden. Daarnaast is hij beeldend kunstenaar en actief betrokken bij de popularisatie van de wetenschap.
 icke@strw.leidenuniv.nl