

Gravitatie en de dynamica van ruimtetijd

door

Jo van den Brand en Mark Beker
Nationaal instituut voor subatomaire fysica, Nikhef
Science Park 105, Amsterdam

1 Inleiding

Virgo is een interferometer met armen van elk 3 kilometer lengte en bevindt zich in de buurt van Pisa in Italië. Wetenschappers van het Nationaal instituut voor subatomaire fysica, Nikhef [1], in samenwerking met collega's uit Frankrijk en Italië, gebruiken dit instrument in hun zoektocht naar het vinden van rimpels in ruimtetijd, zogenaamde gravitatiegolven.



Figure 1: De Virgo gravitatiegolf detector nabij Pisa, Italië, wordt gebruikt door een Frans - Italiaans - Nederlands samenwerkingsverband. The armen van de interferometer zijn 3 km lang.

Albert Einsteins Algemene Relativiteitstheorie (ART) werd gepubliceerd in 1915 en bood de wetenschap een radicaal nieuwe manier om te begrijpen hoe ruimte, tijd en gravitatie met elkaar in verband staan. Het werd meteen het beste wetenschappelijk fundament om structuur in ons heelal op grote schaal te begrijpen. In 1929 ontdekte Edwin Hubble dat verre sterrenstelsels allemaal van ons af bewegen. Einsteins relativiteitstheorie geeft een natuurlijke onderbouwing van deze volledig onverwachte recessie van sterrenstelsels in het verre heelal, namelijk dat de ruimte zelf aan het expanderen is. In 1970 werd door Stephen Hawking en Roger Penrose bewezen dat zwarte gaten een eigenschap zijn van alle oplossingen van Einsteins gravitatievergelijkingen. Zwart, omdat hun gravitatie zo intens is, dat zelfs licht niet eruit kan ontsnappen. Sterrenkundigen weten nu dat zwarte gaten gevonden worden in bijna elk sterrenstelsel, inclusief onze eigen Melkweg. Ze hebben ook geconcludeerd uit waarnemingen aan de banen van neutronensterren, dat de door Einstein voorspelde vibraties in het weefsel van ruimtetijd zelf moeten bestaan, de zogenaamde gravitatiegolven. Experimentele fysici zijn er echter tot nu toe niet in geslaagd om hun instrumenten gevoelig genoeg te maken om deze golven rechtstreeks te detecteren.

Ondanks haar grote successen weten we dat de algemene relativiteitstheorie niet het laatste woord over gravitatie kan zijn. Het is immers een klassieke theorie en moet dus falen op de Planckschaal. Op dit moment is er geen complete kwantumtheorie van gravitatie en is gravitatie

nog niet geünificeerd met de andere fundamentele velden. Een aantal jaren geleden hebben astronomen de natuurkunde op haar grondvesten doen schudden met de ontdekking van donkere materie en donkere energie. De algemene relativiteitstheorie heeft geen vrije parameters en doet solide en specifieke voorspellingen. Moeten we haar daarom niet nu experimenteel onderzoeken op een manier die nog nooit gedaan is: in het gebied van sterke gravitatievelden? Kunnen we dat doen door gravitatiegolven te observeren die gegenereerd worden wanneer twee zwarte gaten of neutronensterren samensmelten? Zullen gravitatiegolven op deze wijze voor het eerst rechtstreeks worden gedetecteerd? Zullen we dan afwijkingen vaststellen van Einsteins algemene relativiteitstheorie? Kunnen we gravitatiegolven meten die geproduceerd zijn ten tijde van inflatie, de Oerknal? En als dat lukt, wat zullen we dan leren over deeltjesfysica op energieschalen die immens hoger zijn dan wat bereikbaar is met onze versnellers? Hoe atomen zich onder de hoge temperaturen en drukken die geassocieerd zijn met de sterke gravitatievelden nabij een zwart gat? Dienen we geen uitvoerige studie van de ruimtetijdstructuur van zwarte gaten te maken?

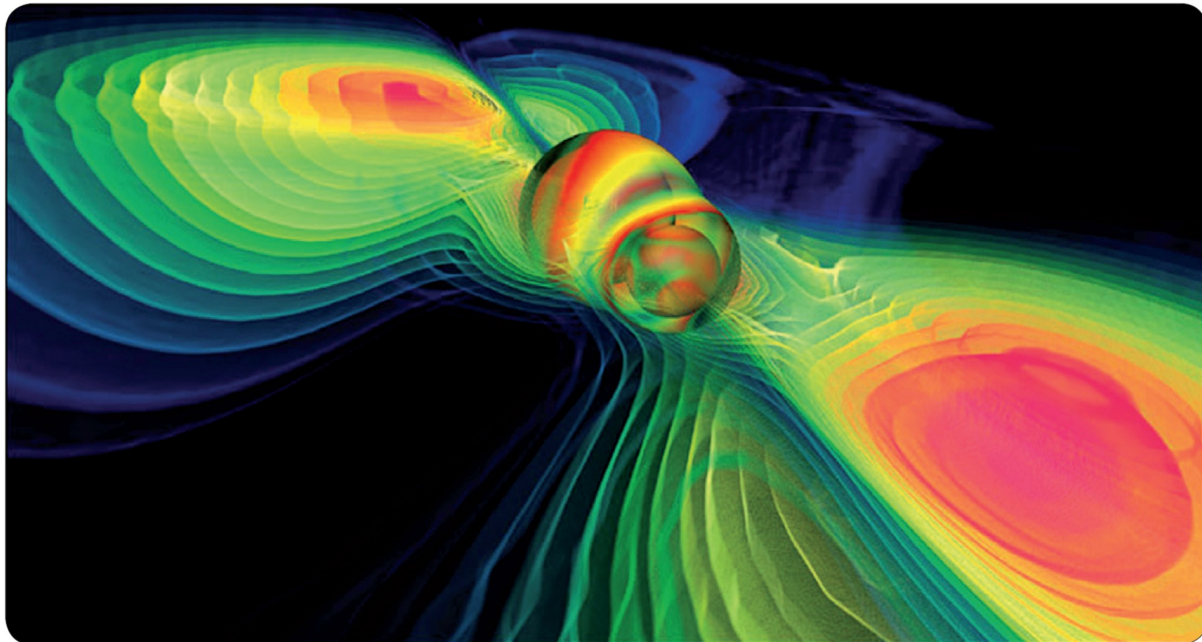


Figure 2: *De complexiteit van gravitatiegolven kan met grote precisie gemodelleerd worden met supercomputers. Bron: MPI for Gravitational Physics / W. Benger - ZIB.*

Gedurende duizenden jaren is het heelal bestudeerd met licht en andere vormen van elektromagnetische straling (recent zijn er ook neutrino's gebruikt). Interferometers als Advanced Virgo en daarna Einstein Telescope zullen een nieuw venster openen door rechtstreeks te kijken naar de golven in ruimtetijd waarmee ons heelal gevuld is. Dit biedt nieuwe kansen om precisiemetingen uit te voeren aan sterke en dynamische gravitatievelden. Zulke metingen zullen elk barstje in het anders zo solide en succesvolle bouwwerk van de relativiteitstheorie onthullen. Omdat gravitatiegolven tijd en ruimte zonder verzwakking kunnen doordringen, zullen de interferometers golven oppikken van de meest compacte gebieden van materie, de vroegste stadia van de Oerknal en de meest extreme krommingen van ruimtetijd vlakbij zwarte gaten.

2 Advanced Virgo

Wetenschappers van het Nikhef willen deel uitmaken van het team dat de eerste rechtstreekse waarneming van gravitatiegolven doet. Hiervoor is het zogenaamde Advanced Virgo project gestart, dat in de periode 2011 - 2014 de gevoeligheid van Virgo met een factor 10 wil verbeteren. Het waarnemingsvolume neemt toe met de derde macht van de afstand waarmee de detector het heelal in kan kijken. Op dit moment heeft Virgo een horizon tot de Virgo cluster, vandaar de naam, waardoor er ongeveer 1500 sterrenstelsels binnen de waarnemingsgrens liggen. Advanced Virgo brengt de kans op een ontdekking met een factor 1000 dichterbij, waardoor zelfs in de meest pessimistische astronomische scenario's gravitatiegolven binnen weken tot maanden gedetecteerd kunnen worden, als de detector in 2015 weer operationeel wordt.



Figure 3: Eindspiegel van de input-mode cleaner van Virgo. De figuur toont de nieuwe spiegel en reactiemassa die ontworpen en geconstrueerd is door Nikhef. De spiegel bevat magneetjes en wordt met spoelen in de reactiemassa gepositioneerd. Spiegel en massa zijn opgehangen met draden aan een zogenaamde Marionette. Bron: Bruno van Wayenburg, NRC, July 2008.

Virgo is een Michelson interferometer, waarbij $1.06 \mu\text{m}$ infrarood light invalt op een beam-splitter, waarbij het licht 50-50% gesplitst wordt voor de twee $L = 3 \text{ km}$ lange armen. Elke arm bevat naast de eindspiegel ook een zogenaamde ingangsspiegel, waardoor er een Fabry-Perot cavity wordt gevormd. De finesse van deze cavity is zodanig gekozen dat voor Virgo de effectieve armlengte wel 450 km bedraagt. Het optisch vermogen dat is opgeslagen in deze cavities benadert 1 megawatt. In normaal bedrijf wordt de interferometer zó afgeregeld, dat de foto-detector zich op een donkere "fringe" van het interferentiepatroon bevindt. Als er nu een gravitatiegolf invalt op de interferometer, dan wordt de ruimte met een kwadrupoolverdeling vervormd. Hierbij wordt typisch één arm ΔL langer, terwijl de andere arm korter wordt. Dit leidt ertoe dat de perfecte

duisternis op de foto-detector wordt opgeheven en er licht wordt waargenomen. Virgo is in staat om faseverschuivingen te meten van de donkere "fringe" van 1 op de miljard radialen en op deze manier vervormingen van de ruimte met een precisie van $\Delta L \approx 10^{-21} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ voor frequenties tussen 10 Hz en 10 kHz te meten. Dit betreft arm-lengte verschillen die 10 ordes van grootte kleiner zijn dan een Ångström. Om deze gevoeligheden te halen moeten de fysici van Virgo talloze experimentele uitdagingen overwinnen. Nikhef leidt een aantal van deze projecten over diverse disciplines, van seismische ruisonderdrukking tot innovatieve optische componenten.

De gevoeligheid van een gravitatiegolfdetector is bij lage frequenties ($f < 100 \text{ Hz}$) gelimiteerd door seismische trillingen. Door menselijke activiteit zoals het gebruik van auto's, treinen en door de industrie beeft de grond al met vele grootte-orde meer dan de gewenste precieze. Het onderdrukken van deze trillingen is noodzakelijk voor het goed functioneren van de detector. De optische componenten van de interferometer kunnen daarom niet zomaar op een optische tafel geplaatst worden, maar moeten geïsoleerd worden van de grond. Dit wordt gerealiseerd met in serie geschakelde seismische dempers. Deze maken gebruik van de mechanische tweede orde laag-doorlaat filter eigenschappen van harmonische oscillatoren zoals pendula en massa-veersystemen. Voor een optimale damping bij de gewenste frequenties worden de systemen ontworpen voor zeer lage eigenfrequenties. Hiermee halen we voor de interferometer spiegels een seismische ruis onderdrukking van een factor 10^{15} .

Ook aan de optische kant van Advanced Virgo wordt bij Nikhef gewerkt aan nieuwe technologie. De fase-camera is een van de meest cruciale diagnostische sensoren voor het frequentie selectief kunnen detecteren van afwijkingen in de golffront van het laserlicht als gevolg van thermische aberraties op de spiegels van Advanced Virgo. De ontwikkeling van een eerste generatie fase-camera is bijna gereed en het prototype zal binnen korte tijd worden geïnstalleerd in Italië. De tweede generatie fase-camera's zal 20 maal sneller zijn dan de eerste generatie, waardoor deze ook opgenomen kan worden in feedback loops en compensatiesystemen. Deze technologie zal gebruik maken van een combinatie van high-performance time-of-flight type CMOS camera's met FPGA digitale signaalprocessen om signalen tot 40 MHz te kunnen meten.

3 Einstein Telescope

De gravitatie wetenschappers richten zich ook op de toekomst. Met de vraag; "hoe zal over 15 jaar de volgende generatie gravitatiegolf detectoren eruit zien?", is een jaar geleden begonnen aan de ontwerpfase voor het Einstein Telescope project. Einstein Telescope (ET) zal de gevoeligheid van Advanced Virgo met een factor 10 overtreffen. Met de bijbehorende factor 1000 in waarnemingsvolume zullen dagelijks verstoringen van ruimtetijd gedetecteerd kunnen worden. Einstein Telescope zal bestaan uit drie in elkaar gevouwen interferometers, met hun armen over de zijden van een gelijkzijdige driehoek. Elk zijde huisvest dan twee overlappende interferometer armen met elk een lengte van 10 km. Met deze configuratie is het mogelijk om een volledige reconstructie te maken van de richting en polarisatie van invallende gravitatiegolven. De invloed van seismische verstoringen als gevolg van menselijk activiteit neemt af met de diepte. Daarom zal ET in zijn geheel ondergronds gebouwd worden. Dit heeft ook als voordeel dat de detector zich in een zeer stabiele omgeving bevindt. Ondanks de seismisch stille locatie zullen de spiegels van de interferometers nog steeds van 12 m hoge superdempers voorzien worden.

Door Brownse bewegingen van atomen op de oppervlakte en ophangingen van de spiegels wordt bij sommige frequenties de gevoeligheid verstoord. Om deze effecten tegen te gaan worden kritische componenten van ET gekoeld met cryogene technologie tot 20 K. Dat vormt een behoorlijke uitdaging, gezien het feit dat de hele interferometer zich in vacuüm bevindt en dat elk contact met optische elementen trillingsvrij dient te zijn.

ET zal in 2025 operationeel zijn. Met een dergelijk observatorium zal gravitationele astronomie de geheimen van zwarte gaten ontrafelen, het bestuderen van het ruimtetijd gedrag van de Oerknal mogelijk maken, alsmede kosmologische metingen van donkere energie en materie. Einsteins relativiteitstheorie zal onder de meest extreme gravitatievelden worden getest. Zal het deze testen doorstaan, of zullen ETs bevindingen een experimentele hint geven die kan leiden tot een vereniging van zwaartekracht en kwantummechanica?

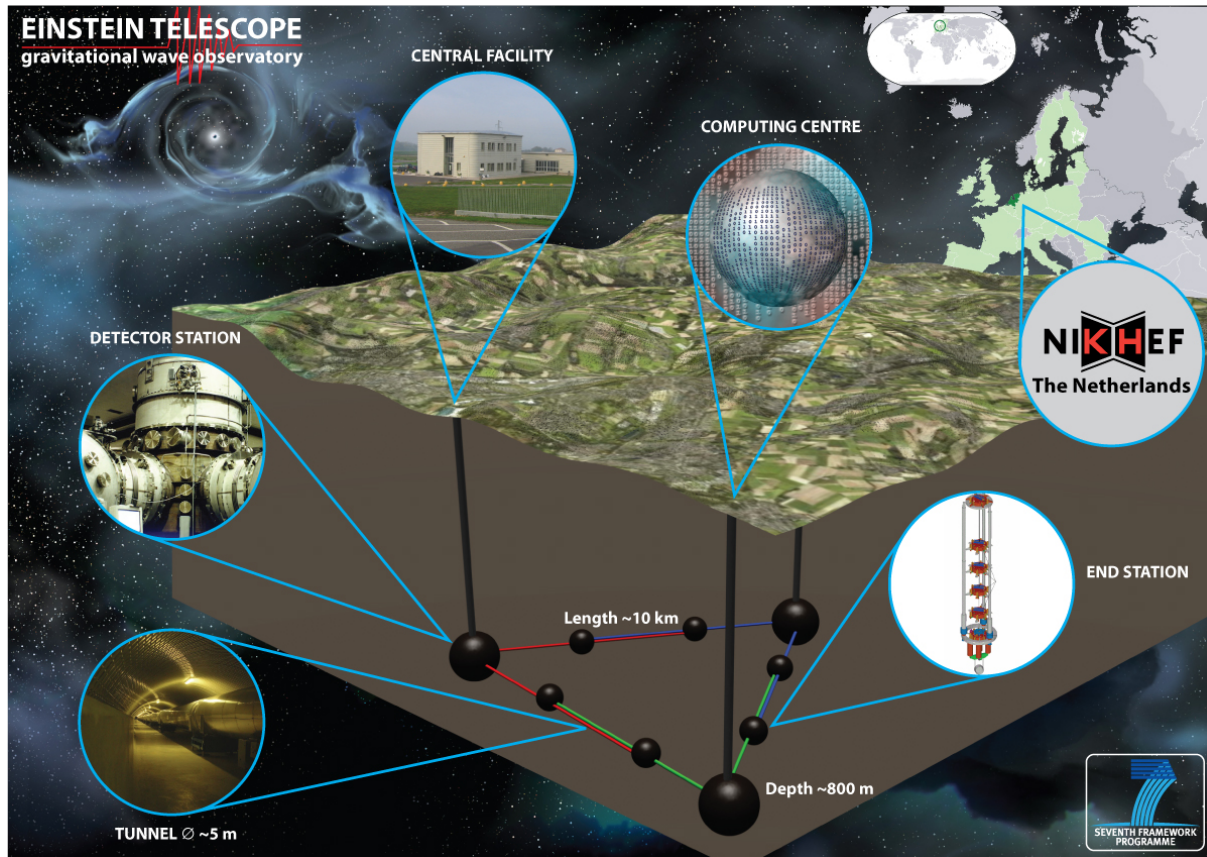


Figure 4: Conceptuele schets van het Einstein Telescope observatorium voor gravitatiegolven. Drie interferometers met 10 km lange armen zijn ondergronds geplaatst om microseismische en gravity-gradient ruis te onderdrukken. De optische componenten bevinden zich in ultra-hoog vacuum in een cryogene omgeving.

Binnen de "gravitational physics" groep van het Nikhef zijn wetenschappers en technici werkzaam aan de realisatie van bovenstaand programma [2, 3]. Dit omvat instrumentatie activiteiten als seismische verzwakkingssystemen en fase-camera's, maar ook de ontwikkeling van analyse software die de signalen van gravitatiegolven uit de instrumentele ruis moeten worden gefilterd. Hierbij wordt intensief gebruik gemaakt van de Grid-computing infrastructuur van het Nikhef.

References

- [1] <http://www.nikhef.nl/wetenschap-techniek/astrodeeltjesfysica/zwaartekrachtgolven>
- [2] <http://www.nikhef.nl/voor-gebruikers/afdelingen/wetenschappelijke-afdelingen/gw/>
- [3] Neem contact op voor verdere informatie: jo@nikhef.nl