

DE EINSTEINTELESCOOP

Blik op Oneindig

Alexander Sevrin
Archisman Ghosh
Ken Haenen
e.a.



KVAB STANDPUNTEN

90

Koninklijke Vlaamse Academie van België
voor Wetenschappen en Kunsten - 2024

DE EINSTEINTELESCOOP

Blik op Oneindig



KVAB Press

KVAB STANDPUNTEN

90

Concept cover: Francis Strauven
Ontwerp cover: Charlotte Dua
Afbeelding: Marco Kraan - Nikhef

De tekening van het Paleis der Academiën is een reproductie van het originele perspectief van Charles Vander Straeten in 1823. Jozef Cantré ontwierp het logo van de KVAB in 1947.

De KVAB Standpunten worden gepubliceerd door de Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten, Hertogsstraat 1, 1000 Brussel.
info@kvab.be - www.kvab.be

DE EINSTEINTELESCOOP

Blik op Oneindig

Alexander Sevrin (VUB & KVAB)

Archisman Ghosh (UGent), Ken Haenen (UHasselt)

Thomas Hertog (KU Leuven)

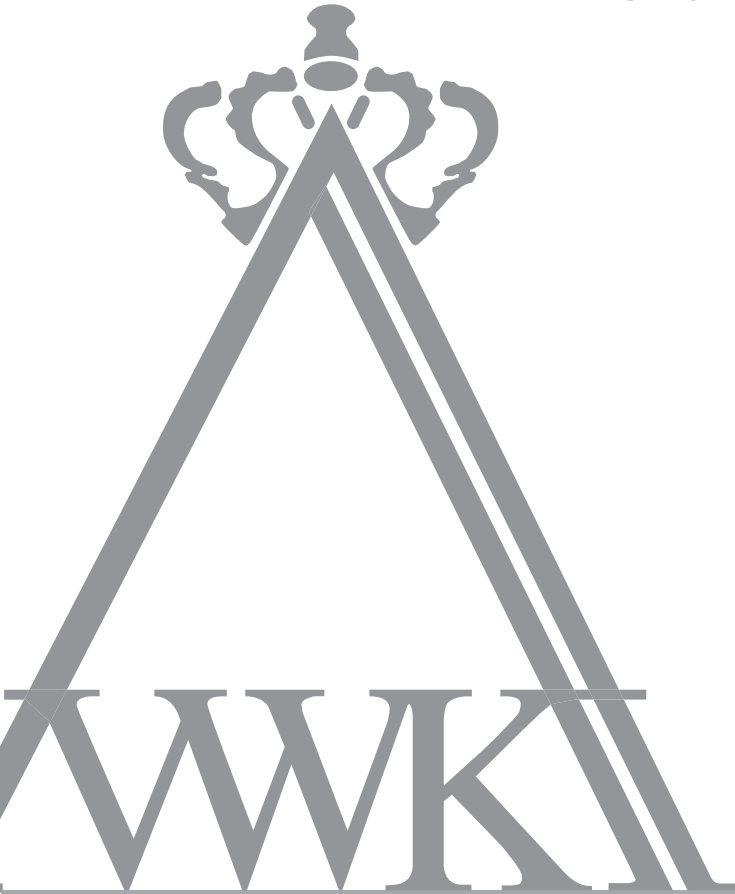
Hans Plets (FWO)

Dirk Van Dyck (UAntwerpen & KVAB)

Jürgen Van Gorp (FWO)

Bernard Vanheusden (UHasselt)

Nick van Remortel (UAntwerpen)



Gedeeltelijke reproductie is toegelaten mits uitdrukkelijke bronvermelding.
Partial reproduction is permitted provided the source is mentioned.

Aanbevolen citeerwijze: Alexander Sevrin, Archisman Ghosh, Ken Haenen,
Thomas Hertog, Hans Plets, Dirk Van Dyck, Jürgen Van Gorp, Bernard
Vanheusden, Nick van Remortel, *De Einsteintelecoop, Blik op Oneindig*,
KVAB Standpunt 90, 2024.

© Copyright 2024 KVAB
D/2024/0455/06
ISBN 9789065692320

Drukkerij Universa

DE EINSTEINTELESCOOP

Blik op Oneindig

INHOUD

Inleiding	10
1. Zwaartekrachtgolven: een kennismaking	
1.1 De algemene relativiteitstheorie en de gekromde ruimtetijd.....	12
1.2 Zwarte gaten	13
1.3 Gravitatiegolven	14
1.4 Hoe detecteren we gravitatiegolven?	15
1.5 In het oog springende ontdekkingen.....	16
1.6 Wat hopen we te ontdekken?.....	17
1.7 Slotgedachte	19
2. De technologie	
2.1 Historisch kader	20
2.2 Huidige inzichten	21
2.3 Nood aan een nieuwe generatie instrumenten.....	22
2.4 De fysica die mogelijk wordt met ET.....	23
2.5 Het ontwerp van de Einsteinotelescoop.....	25
3. De socio-economische impact	
3.1 De socio-economische impact van Big Science-projecten (BSP's).....	27
3.2 Impact van de Einsteinotelescoop op Vlaanderen: aanpak en methodologie.....	28
3.3 Impact van de Einsteinotelescoop op Vlaanderen: resultaten	29
3.4 Motor voor STEM-profielen	30
3.5 Een langetermijnvisie voor de Einsteinotelescoop.....	34
4. Referenties	36
5. Aanbevelingen.....	38

Samenvatting

Op 14 september 2015, net geen eeuw nadat Einstein hun bestaan voorspelde, werden zwaartekrachtsgolven – rimpels in tijd en ruimte die zich met de snelheid van het licht voortplanten – voor het eerst geobserveerd. Dit luidde het begin van een nieuw tijdperk in: de mensheid kreeg er een nieuw paar ogen bij. Inderdaad, tot dan namen we ons universum waar gebruik makend van ofwel elektromagnetische straling (zoals zichtbaar licht) ofwel kosmische straling (zoals neutrino's). Met het vermogen om zwaartekrachtsgolven te meten, hebben we nu een nieuwe wijze om het heelal te verkennen. Ultiem draagt ze zelfs de belofte in zich om door te dringen tot het prilste begin van onze kosmos.

Om de stap naar een echte "zwaartekrachtsgolvenastronomie" te zetten hebben we evenwel een nieuwe generatie aan waarnemingsinstrumenten – gigantische interferometers – nodig. Het Europees project, de Einsteintelecoop (ET), dat al meer dan anderhalf decennium op de tekentafel ligt, is ongetwijfeld het verst gevorderd. ET wordt een driehoekige interferometer met zijdes van 10 km lengte die zowat tweehonderdvijftig meter diep in grote tunnels onder de grond komt te liggen. Er zijn momenteel drie kandidaat-locaties om deze enorme internationale wetenschappelijke infrastructuur te huisvesten, waaronder de streek rond het drielandenpunt België-Duitsland-Nederland. De uiteindelijke beslissing omtrent de locatie van ET wordt niet voor 2027 verwacht.

Dit standpunt drukt het belang uit dat de Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten aan dit wetenschappelijk infrastructuurproject hecht. De impact ervan valt nauwelijks te overschatten, en dit niet alleen op wetenschappelijk, maar ook op economisch en maatschappelijk vlak. Daarom laten we een bevattelijke inleiding op de wetenschap en de technologie van ET volgen door een uitgebreide verkenning van de socio-economische mogelijkheden die eruit voortvloeien voor de regio. We sluiten het standpunt af met een reeks aanbevelingen.

Executive summary

On September 14, 2015, just under a century after Einstein predicted their existence, gravitational waves – ripples in the fabric of time and space that propagate at the speed of light – were observed for the first time. This marked the beginning of a new era: humanity gained a new pair of eyes. Indeed, until then, we observed our universe using either electromagnetic radiation (such as visible light, radio waves or X-rays) or cosmic particle radiation (such as neutrinos). With the ability to observe gravitational waves, we now have a totally novel way to explore our Universe. Ultimately, it even holds the promise of observing the very beginning of our cosmos.

To take the step towards true “gravitational wave astronomy,” we need a new generation of observational instruments – gigantic interferometers. The European project, the Einstein Telescope (ET), which has been on the drawing board for more than a decade and a half, is undoubtedly the most advanced project. ET will be a triangular interferometer with sides of 10 km in length, located about two hundred and fifty meters deep in large underground tunnels. There are currently three candidate locations to host this enormous international scientific infrastructure, including the region around the tri-border area of Belgium-Germany-Netherlands. The final decision regarding the location of ET is not expected before 2027.

This “point of view” expresses the importance that the Royal Flemish Academy of Belgium for Science and the Arts attaches to this international scientific infrastructure project. Its impact can hardly be overestimated, not only scientifically but also economically and socially. A comprehensible introduction to the science and technology of ET is followed by an extensive exploration of the socio-economic opportunities ET will offer to the region. We conclude the point of view with a series of recommendations.

Voorwoord

De reeks Standpunten van de Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten draagt bij tot een wetenschappelijk onderbouwd debat over actuele maatschappelijke en artistieke thema's. De auteurs, leden en werkgroepen van de Academie schrijven in eigen naam, onafhankelijk en in volledige intellectuele vrijheid. De goedkeuring voor publicatie door één of meerdere Klassen van de Academie waarborgt de kwaliteit van de tekst. Dit Standpunt werd goedgekeurd voor publicatie door de Klasse Natuurwetenschappen op 15 december 2024.

Inleiding

Al sinds de prehistorie kijkt de mensheid vol verwondering naar de sterrenhemel. Millennialang deden we dat met onze eigen ogen. We observeerden het zichtbare licht dat de sterren en andere hemelobjecten uitstralen of weerkaatsen. De komst van de telescoop in het begin van de 17de eeuw maakte van de sterrenkunde of astronomie een volwaardige wetenschappelijke discipline.

14 september 2015...

Onze kennis van het universum nam in de loop van de 20ste eeuw exponentieel toe sinds we de hemel niet enkel middels het zichtbare licht observeren, maar het volledige elektromagnetische spectrum benutten: naast het zichtbaar licht nu ook via radiogolven, infrarode straling, ultraviolette straling, X- en gammastralen. De astronomie nam een nog hogere vlucht toen we het heelal niet alleen via elektromagnetische straling maar ook via subatomaire deeltjes, die bijvoorbeeld geproduceerd worden bij de ontploffing van oude sterren, begonnen waar te nemen. In het bijzonder denken we dan aan neutrino's: hoogenergetische, ultralichte en zwak interagerende deeltjes die geproduceerd worden bij zeer gewelddadige gebeurtenissen in het heelal en die vervolgens nagenoeg ongehinderd hun weg voortzetten naar ons, waar we ze op aarde waarnemen met gigantische detectoren, zoals de IceCube-detector op Antarctica. Dit vormde het begin van een nieuwe discipline binnen de natuurkunde: de multi-messengerastronomie, de tak van de sterrenkunde die het heelal bestudeert met behulp van verschillende boodschappers. In dit geval zijn dat dus elektromagnetische straling en subatomaire deeltjes.

En toen was er de ochtend van 14 september 2015. Op dat moment gebeurde er iets dat de kiem van een ongeziene revolutie in de sterrenkunde in zich droeg. In twee gigantische detectoren – reusachtige interferometers – in Louisiana en Washington State observeerde men voor de allereerste keer zwaartekrachtgolven. Deze rimpels in tijd en ruimte die zich met de snelheid van het licht voortplanten, vinden hun oorsprong in een cataclysmische gebeurtenis: het samensmelten van twee zwarte gaten, anderhalf miljard lichtjaren van ons verwijderd. Zwaartekrachtgolven werden al in 1916 voorspeld door Einstein. Het gaat hier om een totaal nieuwe boodschapper. Hoewel ze bijzonder zwak en bijgevolg uitermate moeilijk waar te nemen zijn, worden ze door niets gehinderd, waardoor we ook dat deel van het universum kunnen waarnemen dat niet toegankelijk is voor elektromagnetische straling, zoals het heel duistere universum op het moment dat sterren nog niet bestonden.

De Einsteintelecoop?

Momenteel zijn er vier grote detectoren van zwaartekrachtgolven: de twee LIGO-detectoren in Louisiana en Washington State, de Virgo-detector bij Pisa in Italië en de KAGRA-detector in de Kamioka-mijn in Japan. Dit zijn de zogenaamde tweedegeneratiedetectoren. Ze nemen nu ongeveer eenmaal per week een kosmische gebeurtenis waar. We zijn dan ook nog ver verwijderd van wat we 'zwaartekrachtgolvenastronomie' zouden

kunnen noemen. Vooraleer we hierover kunnen spreken zouden we veel meer – en liefst alle – gebeurtenissen willen waarnemen. Dat is precies het doel van de derdegeneratiedetectoren van zwaartekrachtgolven. Dit Standpunt bespreekt het Europese initiatief om dit megaproject te realiseren.

Al sinds het begin van de 21ste eeuw ligt de Einsteintelecoop (ET) op de tekenplank, een revolutionaire derdegeneratiedetector van zwaartekrachtgolven. Hij wordt tienmaal gevoeliger dan de huidige detectoren, wat ons in staat zal stellen om duizend keer meer gebeurtenissen te detecteren dan nu het geval is. Ook nieuwe fysische fenomenen die ons tot nu toe ontsnappen zullen duidelijk waarneembaar worden. De bouw van de Einsteintelecoop houdt unieke uitdagingen in: niet enkel moeten er tal van radicaal nieuwe technologieën ontwikkeld worden, ook duurzaamheid wordt een centraal aspect van het ET-project en daarnaast moet er ook een managementstructuur komen die het mogelijk maakt om zo'n gigantische infrastructuur efficiënt uit te baten. De doelstellingen van ET vereisen verder dat de detector gebouwd wordt in een stille, dunbevolkte omgeving, wat dan weer grote socio-economische uitdagingen met zich meebrengt.

Oorspronkelijk waren twee regio's kandidaat om de gigantische wetenschappelijke infrastructuur te huisvesten: Sardinië in de buurt van de Sos Enattos-mijn en de regio in de buurt van het drielandenpunt België-Duitsland-Nederland (de Europese Maas-Rijnregio, EMR). Recent kwam daar een derde kandidaat bij: Lusatia in Saksen, in de buurt van het drielandenpunt Duitsland-Polen-Tsjechië. De beslissing over de locatie wordt wellicht pas in de loop van 2027 genomen. Als ET in de EMR-regio komt, zal dit grote gevolgen hebben, voor Limburg en voor heel Vlaanderen. Dit is dan ook een geschikt moment om een Standpunt van de Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten te wijden aan het Einsteintelecoop Project.

We beginnen met een inleiding in de betrokken wetenschap en belichten daarin zowel de zwaartekrachtgolven zelf als de detectiemethodes die gebruikt worden om ze te observeren en de wetenschappelijke vragen die hierdoor binnen ons bereik komen. Vervolgens komt ET zelf aan de beurt. In dat luik zetten we de unieke technologische en wetenschappelijke uitdagingen uiteen. Daarna komen de socio-economische aspecten aan bod. We eindigen dit Standpunt met een reeks aanbevelingen.

1. Zwaartekrachtgolven: een kennismaking

1.1 *De algemene relativiteitstheorie en de gekromde ruimtetijd*

Gravitatiegolven zijn trillingen van de ruimtetijd die zich met de snelheid van het licht voortplanten en dwars door alles heen gaan. Dat we hun bestaan kennen, volgt uit de algemene relativiteitstheorie uit 1915 en toonde Albert Einstein zelf al meteen in 1916 aan. Die theorie denkt immers over gravitatie in geometrische termen, met name de geometrie van de ruimtetijd zelf. De algemene relativiteitstheorie vat de zwaartekracht op als een manifestatie van de buiging van het veld van de ruimtetijd door massa en energie. Zo stelt zij dat de aarde rond de zon draait, niet zozeer omdat een mysterieuze kracht zich over zo'n enorme afstand laat gelden, zoals Newton poneerde, maar omdat de massa van de zon de ruimte om zich heen enigszins vervormt. Die kromming creëert een soort dal dat de aarde (en de andere planeten) in nagenoeg elliptische banen rond de zon loodst. Net zo deukt de massa van onze planeet de ruimte rondom zich ietwat in, wat satellieten zoals het internationaal ruimtestation ISS en ook de maan als vanzelf in een baan om de aarde houdt. Het is bovendien niet alleen de ruimte die gekromd raakt, maar ook de tijd, een verschijnsel waarmee bijvoorbeeld in het gps-systeem rekening wordt gehouden.

Einsteins algemene relativiteitstheorie ontleent haar verbluffende voorspellende kracht aan het feit dat zij die dialoog tussen materie, energie en het weefsel van de ruimtetijd vervat in een wiskundige vergelijking:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

De vergelijking is niet moeilijk te lezen. Aan de rechterkant zien we alle materie en energie in de ruimtetijd, de grootte $T_{\mu\nu}$. De linkerkant beschrijft de geometrie, $G_{\mu\nu}$, van de ruimtetijd. Het gelijkheidsteken in het midden is waar de magie plaatsvindt: het vertelt met wiskundige precisie hoe de geometrie van de ruimtetijd links gekoppeld is aan een gegeven constellatie van materie en energie rechts. Deze relatie is volgens Einstein wat we als de zwaartekracht ervaren. Zoals de Amerikaanse natuurkundige John Archibald Wheeler het verwoordde: "Materie vertelt de ruimtetijd hoe ze zich moet krommen. Ruimtetijd vertelt materie hoe ze moet bewegen." Kortom, de algemene relativiteitstheorie blies leven in ruimte en tijd. Einstein transformeerde het weefsel van de ruimte en de stroom van de tijd van een abstracte, onwrikbare achtergrond in een vervlochten, haast tastbaar fysisch veld dat kan vervormen en veranderen.

Het duurde niet lang of er kwam ondersteunend bewijs voor de algemene relativiteitstheorie, met name doordat ze de beroemde Mercurius-anomalie verklaarde, een ontdekking die Einstein de krachtigste emotionele ervaring van zijn leven noemde – "alsof de Natuur had gesproken". Maar de echte doorbraak van de theorie kwam er in 1919. In dat jaar zette de Britse astronoom Arthur Eddington een expeditie op touw naar het Portugese eiland Principe aan de West-Afrikaanse kust om er tijdens een totale zonsverduistering de positie van sterren te meten. Als Einstein gelijk had en massa inderdaad de ruimtetijd kromt, dan zou sterrenlicht dat net langs een zwaar object als

de zon passeert niet in een rechte lijn mogen reizen, maar afgebogen moeten worden, zodat de positie van de ster aan de hemel lichtjes verschuift. Dat was precies wat Eddington en zijn team ontdekten: de sterren waren inderdaad verschoven!

Deze eerste tests van de algemene relativiteitstheorie waren weliswaar een triomf voor de theorie, maar ze gaven alleen informatie over de kromming van het ruimteweefsel in ons zonnestelsel. Die is bijzonder klein, omdat het gravitatieveld er naar astronomische maatstaven zeer zwak is.¹ De afwijkingen van Newtons oude zwaartekrachttheorie in het zonnestelsel zijn dan ook zeer beperkt. De algemene relativiteitstheorie had echter nog grote verrassingen in petto, waar ook Einstein helemaal niet op voorbereid was. De waaier gaat van zwarte gaten tot het uitdijende heelal.

1.2 Zwarte gaten

De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat, als je een willekeurig object voldoende samenperst – bijvoorbeeld de zon tot een bol met een diameter van slechts enkele kilometer – de kromming van de ruimte zo extreem wordt dat alles wat in de buurt komt, nooit meer kan ontsnappen. Er vormt zich een gebied waarin zelfs licht gevangen wordt gehouden: er ontstaat een zwart gat.

Aanvankelijk beschouwden wetenschappers – onder wie ook Einstein zelf – het verschijnsel ‘zwarte gaten’ louter als een wiskundige eigenaardigheid van de algemene relativiteitstheorie, zonder enige relevantie voor de natuurkunde of astronomie. Bovendien heerste er enorme verwarring over de aard van het oppervlak van zwarte gaten, tegenwoordig ‘de horizon’ genoemd. Pas in de jaren 1950 trok de nevel rond zwarte gaten enigszins op. Bovendien werd alsmar duidelijker dat de implosie van de resterende materie aan het einde van de levenscyclus van voldoende zware sterren effectief tot de vorming van zwarte gaten kan leiden. Dit betekende dat zwarte gaten bepaald geen excentrieke wiskundige curiositeit waren, maar integendeel een volwaardig deel uitmaken van het kosmische ecosysteem. Astronomische waarnemingen in de daaropvolgende decennia onderbouwden het bestaan van zwarte gaten sterk. Alleen al onze melkweg telt waarschijnlijk vele miljoenen zulke zwarte gaten.

Algemeen wordt aangenomen dat er aan de waarnemingshorizon van grote zwarte gaten weinig te zien of te beleven valt, maar die horizon is wel van grote betekenis voor de diepere structuur van de gekromde ruimtetijd. Achter de horizon wisselen ruimte en tijd namelijk als het ware van rol. Als een onversaagde astronaut zich voorbij de horizon in een zwart gat zou wagen, zal de vervorming van het ruimteweefsel ervoor zorgen dat hij in de richting van het centrum moet blijven bewegen. De radiale ruimtelijke dimensie binnen de horizon van zwarte gaten gedraagt zich dus eerder als een tijdsdimensie, als een richting waarin je niet kunt stoppen of terugkeren, maar vooruit moet blijven gaan. De singulariteit die in het centrum op je wacht, waar de kromming van de ruimtetijd oneindig wordt, is niet zozeer een plek in de ruimte, maar veeleer een moment in de

¹ Einsteins vergelijking bevat een grootte, $8\pi G/c^4$, die de massa van de materie aan de rechterkant vermenigvuldigt. De numerieke waarde van deze grootte is extreem klein. Dat betekent dat je een gigantische hoeveelheid massa of energie nodig hebt om de ruimtetijd, die aan de linkerkant van de vergelijking staat, een weinig te krommen. Om een idee te geven: de massa van de aarde doet de ruimte in onze omgeving slechts met een grootteorde van 10^{-9} afwijken van de normale euclidische ruimte. Wat de kromming aan het oppervlak van de zon betreft, spreken we over een grootteorde van 10^{-6} .

tijd – het laatste moment. Deze singulariteit met haar oneindige vervorming is waar – beter gezegd: wanneer – Einsteins vergelijking al haar voorspellende kracht verliest. Bij singulariteiten rijdt zelfs de algemene relativiteitstheorie zich vast.

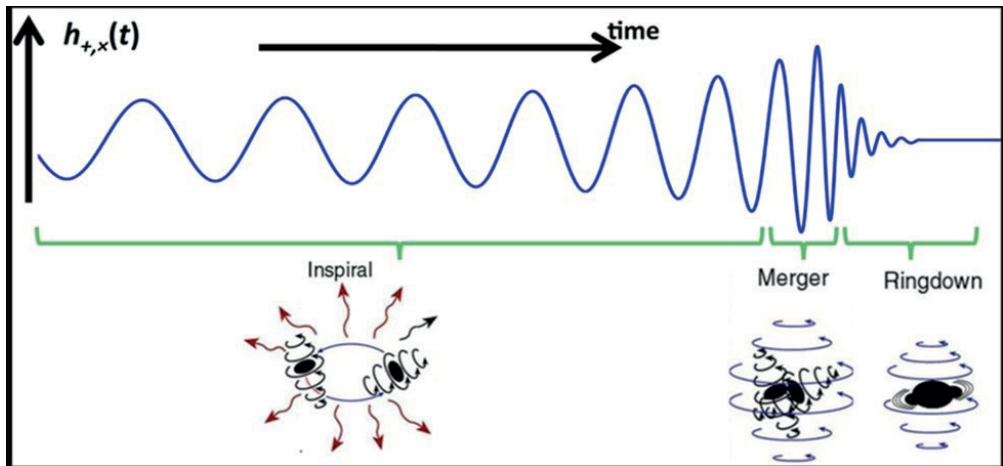
Deze extreme eigenschappen maken zwarte gaten uiterst geschikt als laboratorium, niet enkel om de algemene relativiteitstheorie in haar meest extreme omstandigheden te testen, maar ook om die theorie met de kwantummechanica te verenigen tot een alomvattende theorie die de macro - en de microwereld in één overkoepelend wiskundig kader beschrijft. Meer zelfs, sommige van de meest fundamentele discussies in de hedendaagse hoge-energiefysica gaan precies over de vraag of en op welke manier kwantumprocessen van betekenis zijn in de omgeving van de horizon van zwarte gaten en wat ons dat vertelt over hun interne structuur – en bij uitbreiding over de oerknal, want een uitdijend heelal is in wiskundig opzicht een zwart gat dat binnenstebuiten is gekeerd. Gedurende decennia was dit een louter theoretisch debat, maar de geboorte van de astronomie met gravitatiegolven bracht hierin een revolutionaire verandering.

1.3 *Gravitatiegolven*

Wat gebeurt er wanneer twee zeer compacte objecten, zoals zwarte gaten of neutronensterren, in elkaars buurt komen en om elkaar heen beginnen te wentelen? De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat dit gravitatiegolven opwekt, rimpelingen van de ruimtetijd die zich met de snelheid van het licht voortplanten en ongehinderd dwars door alles heen gaan. Dit is een mooi voorbeeld van hoe Einsteins vergelijking werkt: twee zwarte gaten die om elkaar heen draaien vormen een periodiek veranderende samenstelling van massa's. De ruimtetijd reageert daarop met haar eigen periodieke verstoringen. Dat zijn gravitatiegolven.

Gravitatiegolven onttrekken grote hoeveelheden energie aan wentelende zwarte gaten, waardoor die in een spiraalbeweging naar elkaar toe bewegen, sneller om elkaar heen beginnen te wentelen en uiteindelijk versmelten tot één groter zwart gat. Zulke fusies van zwarte gaten zijn veruit de heftigste verschijnselen in het heelal. Eén versmelting van zwarte gaten kan een uitbarsting van gravitatiegolven teweegbrengen die sterker is dan de intensiteit van al het licht van alle sterren binnen onze kosmologische horizon bij elkaar. Niettemin is de amplitude van de ruimterimpelingen die bij zulke botsingen worden opgewekt extreem klein, omdat het ruimteweefsel zo buitengewoon rigide is. Dit maakt het ontzettend moeilijk om explosies van gravitatiegolven daadwerkelijk waar te nemen, ondanks hun ontzaglijke intensiteit.

Het precieze patroon van de puls van gravitatiegolven die wordt opgewekt bij de versmelting van twee zwarte gaten of neutronensterren (of telkens één van beide), kan op basis van de algemene relativiteitstheorie zeer nauwkeurig berekend worden. De puls bevat een weelde aan informatie, gaande van de massa's en rotatiesnelheden van de initiële zwarte gaten, tot hun afstand van ons en de precieze kromming van de ruimtetijd in de omgeving van hun horizonten. Figuur 1 schetst zo'n golfpatroon waarin de drie fasen van het proces – 'inspiral', 'merger' en 'ringdown' – duidelijk te onderscheiden zijn.



Figuur 1: De samensmelting van twee compacte objecten gaat gepaard met het uitzenden van gravitatiegolven. Door de evolutie in de vorm van de golf kunnen we drie fasen onderscheiden in het proces. Tijdens de eerste en langste fase ('inspiral') naderen de compacte objecten elkaar in een spiraalvormige beweging. Het uitzenden van gravitatiegolven onttrekt energie aan het binair systeem, waardoor hun onderlinge afstand afneemt. Deze fase heeft een langzame start, maar naarmate beide hemellichamen dicht bij elkaar komen, bewegen ze sneller om elkaar heen, waardoor ze meer energie in de vorm van gravitatiegolven uitzenden en in een steeds hoger tempo naar elkaar toe 'spiraleren'. Dit uit zich in een oscillerend patroon, waarbij zowel de amplitude als de frequentie toeneemt naarmate beide objecten dicht bij elkaar komen. Wanneer ze voldoende dicht tot elkaar genaderd zijn, voltrekt de tweede fase ('merger') zich: beide objecten smelten samen tot een nieuw, zij het sterk vervormd object. In de laatste fase ('ringdown') schudt het resulterende hemellichaam deze vervormingen als het ware van zich af door opnieuw gravitatiegolven uit te sturen. (Bron: M. Favata/SXS/K. Thorne)

1.4 Hoe detecteren we gravitatiegolven?

Maar hoe manifesteert een puls van gravitatiegolven van kosmische oorsprong zich op aarde? Hoe neem je dergelijke golven waar? Gravitatiegolven veroorzaken minuscule, periodieke uitdijingen en inkrimpingen van de ruimte, waarbij de ruimte in de ene richting krimpt wanneer ze in de andere uitdijt. Er komen geen licht- of materiedeeltjes aan te pas. Het gaat om een zuiver geometrisch fenomeen dat enkel betrekking heeft op de onderlinge afstand – de ruimte – tussen objecten. Dit gegeven bracht Ray Weiss in de jaren 1970 op het idee om gravitatiegolven te meten met behulp van een L-vormig laboratorium. Bij de passage van een puls van gravitatiegolven zou volgens Einsteins theorie de ene arm van de L moeten krimpen, terwijl de andere lichtjes uitzet. Hiermee lag Weiss aan de basis van het ontwerp van de huidige generatie gravitatiegolfobservatoria. Dat zijn er drie: het LIGO-observatorium in de Verenigde Staten dat bestaat uit twee identieke L-vormige opstellingen (één in Hanford, Washington, en een tweede in Livingston, Louisiana, op een tiental milli-lichtseconden van elkaar verwijderd; het Virgo-observatorium in Pisa en ten slotte het ondergrondse KAGRA-observatorium in Japan. Samen vormen ze het LVK-netwerk.

Het heeft vele jaren werk en technologische innovatie geleverd om het meest gevoelige meetinstrument dat ooit werd ontworpen ongevoelig te maken voor alles wat géén gravitatiegolf van kosmische oorsprong is. Decennia later is het resultaat een verbluffend technologisch hoogstandje waarin men met behulp van laserstralen het verschil in

lengte tussen twee loodrechte vacuümbuizen van 4 kilometer tot op een duizendste van de diameter van een proton kan meten, net voldoende om de meest krachtige uitbarstingen van gravitatiegolven op te vangen. Een dergelijke fenomenale precisie is van dezelfde orde als de lengte- en tijdsschalen die bestudeerd worden in de Large Hadron Collider in het CERN.

Het LIGO-observatorium in de Verenigde Staten schreef op 14 september 2015 de eerste rechtstreekse waarnemingen van gravitatiegolven op zijn naam. Het uitermate zwakke signaal bleek afkomstig te zijn van twee zwarte gaten, respectievelijk 29 en 36 keer zo zwaar als de zon, die 1,3 miljard jaar geleden samensmolten tot één groter zwart gat dat 62 keer zwaarder was dan de zon, met een diameter van enkele honderden kilometer. Dat is drie zonmassa's minder dan wanneer je de massa's van de twee initiële zwarte gaten bij elkaar optelt. Het is precies het energie-equivalent² van deze drie zonmassa's dat omgezet is in gravitatiegolven en waardoor we dit in volstrekte duisternis gehuld proces konden waarnemen.

In de jaren sinds 2015 heeft het LVK-netwerk in drie opeenvolgende waarnemingsrondes van telkens meerdere maanden 93 dergelijke uitbarstingen van gravitatiegolven gedetecteerd. Die waren telkens veroorzaakt door de samensmelting van twee zwarte gaten of neutronensterren, in de verschillende mogelijke configuraties. Technologische verbeteringen zorgden intussen voor een geleidelijke toename van de frequentie van detecties: van één detectie om de zes weken in de eerste observatieronde ging men naar één waarneming per vijf weken in de tweede ronde, en steeg het aantal vervolgens aanzienlijk tot bijna twee per week in de derde ronde en drie per week in de vierde observatieronde. In februari 2025 overschreed de teller van het totale aantal detecties de kaap van 275.

1.5 In het oog springende ontdekkingen

Enkele detecties springen bijzonder in het oog. Uiteraard is er de hoger beschreven allereerste detectie, GW150914, waarin twee zwarte gaten samensmolten tot een nieuw zwart gat. Dit gaf ons op dat ogenblik – de befaamde foto van het zwart gat M87* in 2017 – de meest directe bevestiging van het bestaan van zwarte gaten.

Op 17 augustus 2017 zorgde GW170817 voor een nieuwe mijlpaal. Voor het eerst waren we getuige van de samensmelting van twee neutronensterren. Dit proces zendt zowel gravitatiegolven als elektromagnetisch licht uit en beide vormen van informatie werden ook daadwerkelijk gemeten. Hierdoor geldt GW170817 als de echte start van de zogenaamde multi-messengerastronomie (nadat eerder al wel de combinatie van elektromagnetisch licht en neutrino's gemeten werd bij een supernova, en van elektromagnetisch licht en kosmische stralen bij een zonnevlam). Als toemaatje bracht GW170817 ook de bevestiging van de theoretische verwachting dat gravitatiegolven zich effectief met de lichtsnelheid voortplanten.

Sommige detecties leveren verrassende informatie op die niet compatibel lijkt met wat tot dusver werd aangenomen. Zo luidt de verwachting dat er geen compacte hemellichamen voorkomen met een massa tussen 2 en 5 zonmassa's, respectievelijk de

² Dus een manifestatie van Einsteins relatie tussen massa en energie, $E=mc^2$.

veronderstelde bovengrens voor neutronensterren en de ondergrens voor zwarte gaten. GW190814 en GW230529 suggereren evenwel dat die (*lower*) *mass gap* minder leeg zou kunnen zijn dan gedacht.

Deze spectaculaire resultaten van het LVK-netwerk zijn nog maar het prille begin van de gravitationele astronomie. Er is een wereldwijd verspreid netwerk van nieuwe observatoria nodig om de detectie van gravitatiegolven verder te ontwikkelen tot een volwaardige tak van de astronomie. Dit brengt ons bij het project van de Einsteintelecoop, het onderwerp van dit Standpunt.

De Einsteintelecoop (verder: ET) kan de pionier worden van dit nieuwe netwerk. Hij moet van de upgrade naar de derde generatie observatoria een ware kwantumsprong maken, in eerste plaats door de gevoeligheid van de instrumenten aanzienlijk op te drijven. Het streefdoel is een verbetering met factor tien, wat betekent dat je in elk van de drie ruimtelijke dimensies tien keer verder kan kijken. Hierdoor wordt het volume van het universum dat toegankelijk wordt voor de gravitationele astronomie in één klap duizend keer groter. Van wekelijks enkele waarnemingen van uitbarstingen van gravitatiegolven van samensmeltende zwarte gaten zullen we hierdoor naar tienduizenden per jaar gaan.

1.6 Wat hopen we te ontdekken?³

Met de rechtstreekse waarneming van gravitatiegolven breekt een nieuw tijdperk aan voor de natuurkunde en de astronomie. We beleven een waar 'Galileo-moment', een punt in de geschiedenis van de wetenschap waarop de mensheid op een heel nieuwe manier naar het universum leert kijken. Tot voor kort waren astronomen voor de studie van de kosmos haast uitsluitend aangewezen op informatie die vervat zat in lichtgolven die ons vanuit de ruimte bereiken en op de sporadische neutrino's. (Dit zijn zeer lichte en zeer energetische deeltjes die amper reageren, die bij cataclysmische gebeurtenissen – zoals het ontploffen van een ster – ontstaan en die ons vanuit het diepste van het heelal bereiken.) Waarnemingen van gravitatiegolven verschaffen ons nu ook toegang tot het donkere heelal, dat wordt gedomineerd door de dynamiek van zwarte gaten, donkere materie en donkere energie, en de gekromde ruimtetijd zelf.

Enerzijds wordt het hierdoor mogelijk om sommige van de meest spectaculaire en mysterieuze voorspellingen van de relativiteitstheorie met grote nauwkeurigheid te verifiëren. Anderzijds zullen de gegevens meer inzicht bieden in de eindfase van de evolutie van zware sterren en het mettertijd zelfs mogelijk maken om de hele geschiedenis van het heelal te reconstrueren. Aangezien de donkere kant niet minder dan 95% van alle energie in het heelal herbergt, is er bijzonder veel ruimte voor ontdekkingen. En dus voor verrassingen.

In de eerste plaats mogen we een drastische toename van het aantal detecties verwachten, zoals al vermeld. Door de gevoeligheid van het instrument met een factor 10 te verhogen zal ET een volume van het heelal ontsluiten dat duizendmaal groter is. Terwijl we met de bestaande detectoren van de tweede generatie hopen uit te komen

³ Voor de geïnteresseerde lezer: The Science of the Einstein Telescope, ook bekend als ET's Bluebook, is inmiddels beschikbaar, zie <https://arxiv.org/pdf/2503.12263>. Deze massieve tekst van meer dan 850 bladzijden geeft een zeer gedetailleerd overzicht van de wetenschappelijke vragen die met de Einsteintelecoop beantwoord zullen worden.

op enkele honderden signalen per jaar, zou ET tienduizenden detecties per jaar moeten opleveren.

Verder in het heelal kijken betekent meteen ook verder terugkijken in de tijd. Hierdoor zullen we samensmeltingen van neutronensterren kunnen meten uit de periode toen de stervorming in het heelal op haar hoogtepunt was. We zullen ook informatie krijgen over wat er zich in de kern van een neutronenster afspeelt wanneer die in het samensmeltingsproces door getijdenkrachten wordt verscheurd. Dit zal een beter inzicht geven in de kernfysische processen. Daarnaast zal de combinatie met elektromagnetische waarnemingen een schat aan informatie genereren over de vorming van elementen als goud en platinum bij botsingen van neutronensterren.

Verder verwachten we een schat aan nieuwe informatie over elementaire deeltjesfysica. Die discipline 'voorspelt' immers dat de fysica zelf enkele malen van gedaante gewisseld is gedurende de prilste geschiedenis van ons heelal. De gedaanteverwisselingen gebeurden niet overal tegelijk. Er waren als het ware zeepbellen waarbinnen de nieuwe wetten al golden, terwijl daarbuiten nog de oude van kracht waren. Die bellen groeiden en botsten uiteindelijk, waardoor er gigantische hoeveelheden zwaartekrachtgolven werden geproduceerd. Die uitstervende zwaartekrachtgolven kunnen nog steeds geobserveerd worden en leveren zeer waardevolle informatie op over fysische gebeurtenissen bij energieën die vele malen hoger zijn dan de hoogste energieën die in deeltjesversnellers op aarde bereikt kunnen worden.

Aangezien de samensmelting van zwarte gaten nog sterkere signalen oplevert, zullen we voor dit type verschijnsel zelfs nog verder kunnen teruggaan. Dat moet ons inzicht geven in de frequentie van het voorkomen van zwarte gaten in het vroege heelal en in de rol van zwarte gaten in de vorming en evolutie van sterrenstelsels.

Door botsingen van zwarte gaten met een hoge betrouwbaarheid waar te nemen kunnen we nieuwe regimes van sterk vervormde ruimtetijd testen, en zo meteen ook de geldigheid van de relativiteitstheorie. Dat brengt ons op het domein van de fundamentele fysica, met de vermeende incompatibiliteit tussen de (klassieke) relativiteitstheorie en de kwantumfysica. De precisie van detectoren als ET zou ons ook in staat moeten stellen om te zoeken naar gravitatiegolven die de signatuur in zich dragen van nieuwe soorten exotische compacte objecten, die afwijken van ons huidige begrip van zwarte gaten.

Als we aan het testen van de relativiteitstheorie en de zoektocht naar mogelijke andere donkere objecten dan zwarte gaten nog toevoegen dat donkere deeltjes rond samensmeltende compacte hemellichamen een meetbare impact op de gravitatiegolf moeten hebben, komt ET in beeld om een van de meest prangende problemen in de hedendaagse fysica op te lossen: de aard van donkere materie. Die zou immers te verklaren zijn ofwel door een dieperliggende gravitatietheorie, of door donkere objecten, of door donkere materiedeeltjes.

Ook de aard van donkere energie kan mogelijk door ET opgehelderd worden. Aangezien de afstand tot de bron als het ware in de gravitatiegolf gecodeerd zit, zullen we zwarte gaten en neutronensterren kunnen gebruiken als kosmische mijlpalen. Dit zal resulteren in nieuwe inzichten over het vermeende aandrijfmechanisme voor de waargenomen versnelde uitdijing van het heelal.

Daarnaast is er goede hoop dat we met ET ook andere bronnen van gravitatiegolven zullen kunnen meten, zoals pulsars of supernovae. In combinatie met metingen van elektromagnetisch licht en (in het geval van supernovae mogelijk ook) neutrino's kan dit ons beeld van deze astrofysische verschijnselen aanscherpen, verdiepen en bijstellen.

Of ET ons in de buurt zal brengen van de ultieme Heilige Graal, de oerknal, blijft een open vraag. De verwachting is dat er bij het ontstaan van het heelal gravitatiegolven zijn opgewekt die vervat zitten in de hele ruimte. Dit doet denken aan de metingen van de elektromagnetische achtergrondstraling, de nagloed van de oerknal. Er bestaat evenwel een wezenlijk verschil. Het heelal werd pas zowat 380.000 jaar na de oerknal transparant voor elektromagnetische straling, waardoor het als het ware een muur heeft opgetrokken voor lichttelescopen, waar zelfs de meest performante telescopen als de James Webb Space Telescope nooit doorheen kunnen kijken. Voor zwaartekrachtgolfdetectoren bestaat deze beperking niet.

1.7 Slotgedachte

Bij dit alles mag niet de indruk ontstaan dat ET in een klap alle nog openstaande fundamentele vragen zal beantwoorden. Net zoals Galileo's optische telescoop aanleiding gaf tot een hele waaier aan complementaire telescopen die elk een stukje van het heelal in een deeltje van het elektromagnetische spectrum onderzoeken, zal ET een onderdeel vormen van een netwerk van gravitatiegolfdetectoren op aarde en in de ruimte. Dat netwerk van gravitatiegolfdetectoren vormt op zijn beurt een onderdeel van een nog groter, overkoepelend netwerk, naast elektromagnetische telescopen en meetapparatuur voor andere boodschappers uit de ruimte, zoals neutrino's.

Antwoorden op de fundamentele vragen vallen dan ook veeleer te verwachten uit het samenspel en de complementariteit van de componenten van dit overkoepelende netwerk. Dit alles in de wetenschap dat elk nieuw antwoord onvermijdelijk weer nieuwe en wellicht nog diepere vragen zal oproepen.

Het wetenschappelijke, intellectuele en culturele belang van de bouw van ET in onze achtertuin, die tot het einde van de 21ste eeuw een belangrijke schakel zal vormen in het geheel dat we hierboven hebben geschetst, valt nauwelijks te overschatten. In welke mate dat zich ook vertaalt in een socio-economisch belang voor de regio, is het onderwerp van het derde hoofdstuk in dit Standpunt.

2. De technologie

2.1 Historisch kader

Fundamentele doorbraken in moderne experimentele fysica gebeuren zelden of nooit van de ene op de andere dag. Ze zijn eerder bij regel dan bij uitzondering het resultaat van decennialang pionierswerk waarin geloof, visie en vastberadenheid van inventieve wetenschappers en ingenieurs samengaan met evoluties in hoogtechnologische materialen en methodes. Het zou ons te ver leiden om de hele kleurrijke geschiedenis te schetsen die heeft geleid tot de ontdekking van gravitatiegolven en het ontstaan van de observationele gravitatiegolvenastronomie, maar het is belangrijk te beseffen dat de ontwikkeling en validatie van de technologie die we vandaag de dag gebruiken in gravitatiegolvenonderzoek al in de jaren 1950 zijn begonnen.

Pionierswerk werd onder meer verricht door J. Weber in de Verenigde Staten en V. Braginsky in de Sovjet-Unie. Inzichten en overwegingen inzake de amplitudes, het frequentiebereik en de detectiesnelheid van gravitatiegolven vormden de onderzoeksfocus van onder meer R. Weiss (MIT, USA), K. Thorne (Caltech, USA), H. Billing (Garching, Germany) en R. Drever (Glasgow, UK). Zij dreven de ontwikkeling aan van de eerste generatie grootschalige Fabry-Perot-Michelson-interferometers (GEO600 [1], LIGO [2], TAMA [3], Virgo [4]), die sinds de jaren 1980 evolueerden tot de huidige state-of-the-art gravitatiegolvenobservatoria (AdvLIGO [5], AdV [6], en KAGRA [7]) waarvan de gevoeligheid met een factor 10 gestegen is in vergelijking met hun initiële versies. Deze instrumenten vormen al sinds kort na de ontdekking van gravitatiegolven in 2015 een globaal netwerk van vier interferometers die verspreid zijn over de Verenigde Staten, Italië en Japan. Een vijfde interferometer, gebaseerd op het AdvLIGO-concept, is momenteel in opbouw in India en zou tegen 2027 operationeel kunnen zijn.

In de huidige omstandigheden is het bestaande netwerk van gravitatiegolvenobservatoria in staat om gravitatiegolven te meten die zijn uitgezonden gedurende de laatste seconden tot zelfs fracties van een seconde door compacte binaire systemen van twee zwarte gaten, twee neutronensterren of de combinatie van een neutronenster en een zwart gat. Zij doen dit in een tempo van een handvol detecties per week. Het wereldwijde netwerk van observatoria opereert in cycli van periodes van één tot twee jaar in observationele modus, afgewisseld met periodes van één tot twee jaar voor upgrades die hun gevoeligheid met steeds kleinere incrementele factoren vergroten. Zo is momenteel Observatieperiode 4 (O4) bezig, die begon in mei 2023 en eindigt in de herfst van 2025. We verwachten dat tegen die tijd in totaal 200 compacte binaire systemen geregistreerd zijn, of iets in die orde, alle afkomstig uit onze nabije kosmische omgeving, met een roodverschuiving $z < 2^4$.

⁴ De roodverschuiving z is een afstandsmaat die rekening houdt met het feit dat ons universum uitdijt. Als we licht of zwaartekrachtgolven met een $z=2$ observeren, dan heeft dat licht of hebben die zwaartekrachtgolven er meer dan 10 miljard jaar over gedaan om tot bij ons te geraken. Doordat het heelal ondertussen is uitgedijd, bevindt de bron zich nu ruim meer dan 15,5 miljard lichtjaren van ons.

2.2 Huidige inzichten

Dankzij de huidige instrumenten hebben we sinds de ontdekking van GW150914 opmerkelijke inzichten verworven over de geldigheid van de algemene relativiteitstheorie in omgevingen van een sterk zwaartekrachtveld en bij relativistische snelheden. We hebben momenteel een honderdtal compacte binaire systemen in ons nabije universum geobserveerd waarvan de componenten bestaan uit zwarte gaten of neutronensterren met massa's in het bereik van $1.2 M_{\odot}$ - $85.0 M_{\odot}$.⁵ Dit geeft een eerste, onvolledig beeld van de hele populatie aan zwarte gaten en neutronensterren die ons universum bevolken, van mechanismen die verantwoordelijk zijn voor hun vorming uit de stellaire evolutie en van de dynamica van binaire systemen.

De observatie van de zwaarste binaire zwarte-gatenversmelting (BBH; versmelting GW190521) liet zien dat het mogelijk is om uit de versmelting van twee stellaire zwarte gaten een nieuw zwart gat met massa $150 M_{\odot}$ te produceren, maar over het ontstaan van supermassieve zwarte gaten met massa's van tientallen miljoenen of zelfs vele miljarden $M_{\odot}$ tasten we nog in het duister. Eerste hints van structuren in de statistische verdeling van de massa's en de angulaire impuls (*spin*) van de componenten van compacte binaire systemen wijzen op een complexe dynamica die onze kennis van de stellaire evolutie en populatiedynamica op de proef stelt. Het staat nu vast dat de snelheid waarmee compacte binaire systemen versmelten (de zogenaamde *merger rate*) toeneemt met hun roodverschuiving – anders gezegd: met hun observationele afstand of leeftijd – en dat die een maximum moet bereiken bij roodverschuivingen die met het huidige instrumentarium niet toegankelijk zijn.

Een andere mijlpaal was de observatie van de eerste samensmelting van twee neutronensterren, GW170817. Die observatie ging gepaard met een gelijktijdige waarneming van intense emissies (*bursts*) van gammastraling, geobserveerd na 1,7s door de Fermi-GBM- en INTEGRAL-ruimteemissies. De elektromagnetische signalen werden door tientallen observatoria en ruimteemissies gemeten, gedurende een periode van tientallen dagen. Deze waarnemingen leverden spectaculaire inzichten op over de productie van zware elementen in ons universum, over het feit dat gravitatiegolven zich voortplanten met de lichtsnelheid binnen een relatieve nauwkeurigheid van 15 grootteordes, en over de nucleaire toestandsvergelijking van de materie waaruit neutronensterren zijn opgebouwd.

De gelijklopende observatie van astrofysische objecten met behulp van gravitatiegolven, het elektromagnetische spectrum én aan de hand van de emissie van elementaire deeltjes, neutrino's in het bijzonder, is een nieuw onderzoeksdomein dat nu bekendstaat onder de noemer 'multi-messengerastronomie'. De details in het spectrum van gravitatiegolven die worden uitgezonden door een compact binair systeem bevatten directe informatie over hun afstand, en een observatie van een optische tegenhanger bevat informatie over de roodverschuiving, wat complementaire bepalingen van de Hubble-parameter⁶ mogelijk maakt. Tot nu toe was er slechts één gelijktijdige observatie mogelijk van een compacte binaire versmelting en haar elektromagnetisch evenbeeld.

⁵ Het symbool $M_{\odot}$ staat voor de massa van onze zon.

⁶ De Hubble-parameter (een betere naam was geweest 'de Hubble-Lemaître-parameter', aangezien die een centrale rol speelt in de Wet van Hubble-Lemaître, zoals die is ontdekt door de Leuvense hoogleraar Georges Lemaître) als een maat voor de snelheid waarmee ons universum uitdijt.

Tot op heden zijn er slechts twee versmeltingen geobserveerd van een zwart gat en een neutronenster: GW200105 en GW200115. Deze systemen zijn, vanwege de getijdewerking van het zwarte gat op de neutronenster, bij uitstek een laboratorium voor de studie van nucleaire materie bij extreme dichtheden die onmogelijk op aarde te realiseren zijn. Ten slotte zijn er tot op heden enkel signalen gemeten die afkomstig zijn van compacte binaire systemen van twee zwarte gaten, twee neutronensterren of een combinatie van de twee. We weten dat er tal van andere bronnen van zwaartekrachtgolven moeten bestaan, elk met hun eigen signatuur: roterende neutronensterren met een kleine afwijking van perfecte sfericiteit zenden nagenoeg monochromatische zwaartekrachtgolven uit, exploderende sterren sturen een zeer korte puls van zwaartekrachtgolven uit en het heelal zelf is doordrongen van een achtergrondstraling van zwaartekrachtgolven die bestaat uit de superpositie van alle astrofysische bronnen en uit een mogelijke kosmologische afdruk die afkomstig is uit de vroegste stadia na de geboorte van ons heelal.

2.3 *Nood aan een nieuwe generatie instrumenten*

Wat voorafgaat, illustreert dat we nog maar aan het begin staan van een veelbelovend onderzoeksveld met een informatiedrager die we nauwelijks kunnen meten, laat staan tot in de details begrijpen. De huidige generatie observatoria heeft er ons mee laten kennismaken, maar is door technologische beperkingen niet in staat om dit domein tot in de details verder te exploreren. Tussen 2025 en 2027 zullen de AdvLIGO- en VIRGO-instrumenten wellicht hun laatste grote upgrade ondergaan die hen moet laten evolueren naar hun ultieme ontwerpgevoeligheid, met een factor die ruwweg drie keer beter is dan de huidige. Op dat moment zal hun gevoeligheid onmiskenbaar gelimiteerd worden door hun omvang en keuzes inzake fundamentele technologie. Met andere woorden: de bouw van een nieuwe generatie instrumenten dringt zich op.

De fundamentele concepten van deze nieuwe instrumenten zijn reeds meer dan tien jaar geleden bedacht, in het vooruitzicht van hun realisatie tijdens het komende decennium. In de Verenigde Staten ontstond het Cosmic Explorer-project [8-10] en in Europa de Einsteintelecoop [11,12] als voorstel voor de derde generatie van gravitatiegolvendetectors. Het onderzoeksprogramma dat met beide instrumenten mogelijk wordt werd initieel toegelicht in [13-15]. We kunnen op dit moment een vergelijking maken met de laatste generatie optische telescopen, met de lancering van de James Webb Telescope in 2021 (budget: 10 miljard \$) en met de bouw van de Square Kilometer Array-radiotelescoopen (budget: 2 miljard €), ook gestart in 2021. Beide werden als concept ontworpen in de jaren 1990.

ET is een gravitatiegolvendetector van de derde generatie, waarvan het conceptuele ontwerp in 2011 ontstond met financiering van het zevende European Framework Program (FP7). De studie uit 2011 [9] beschreef de fundamentele ontwerp mogelijkheden van de laserinterferometer, de minimale vereisten van de locatie, een ruwe schatting van de bouwkosten en een mogelijk tijdspad. Het concept van ET bouwt dus voort op de twee vorige generaties van gravitatiegolvendetectors, die zijn gebaseerd op het principe van laserinterferometrie. [16,17]

In juli 2021 werd het ET-project opgenomen in de Europese ESFRI-roadmap. In dit kader werd een vernieuwde conceptuele ontwerpstudie uitgevoerd [18,19] met een bijbehorende kostenraming [20] en kwam er een update van het natuurkundig onderzoek dat met ET kan worden uitgevoerd. [21] In 2023 werd een uitvoerige studie gepubliceerd die de impact onderzocht van verschillende locaties en fysieke afmetingen van de ET-interferometers op belangrijke onderdelen van het observationele programma. [22]

2.4 De fysica die mogelijk wordt met ET

Zoals we eerder vermeldden gaan de gevoeligheid, het frequentiebereik en het observationele potentieel van een gravitatiegolvenobservatorium hand in hand. De frequentie van gravitatiegolven die worden uitgezonden door een compact binair systeem van zwarte gaten, is omgekeerd evenredig met hun massa's. Als het frequentiebereik van een interferometer wordt uitgebreid naar lagere frequenties (lager dan 10 Hz), krijgt men toegang tot zwaardere massa's. Een uitbreiding van de bandbreedte van een interferometer impliceert ook dat de tijdsduur waarin een gravitatiegolf kan worden waargenomen, wordt uitgebreid van fracties van een seconde naar tientallen minuten, wat niet alleen een enorme impact heeft op de informatie die uit het golfpatroon kan worden afgeleid, maar ook impliceert dat andere observatoria van astrofysische/astrodeeltjes tijdig een signaal kunnen ontvangen om naar een elektromagnetische en/of hoogenenergetische tegenhanger te zoeken, in een richting die initieel bepaald is door de gravitatiegolvendetector.

De wetenschappelijke ontdekkingen die we van ET verwachten zullen zich afspelen in diverse deelgebieden van de fysica: fundamentele fysica, astrofysica, kernfysica en kosmologie. Zelfs met de beperkte gevoeligheid van de huidige zwaartekrachtgolvendetectoren hebben we al toegang tot het extreem sterke, zeer dynamische regime van de zwaartekracht, waardoor het nu al mogelijk is om Einsteins algemene relativiteitstheorie te testen in dit onontgonnen gebied. ET zal deze metingen aanzienlijk aanscherpen en zal ofwel Einsteins theorie bevestigen ofwel indicaties geven voor een theorie die verder gaat. Daarnaast zullen we conclusieve antwoorden kunnen geven op fundamentele vragen, zoals de vraag of de zwarte-gatachtige objecten die we waarnemen echt zwarte gaten zijn dan wel exotische alternatieven. Theoretische fysici hebben voldoende alternatieven voorgesteld, zoals bosonsterren, donkere-materiesterren, gravastars of kwantummodificaties van zwarte gaten zoals *fuzzballs* of *firewalls*. Hoe verder we kunnen observeren met een telescoop of met een zwaartekrachtgolvendetector, hoe vroeger in het heelal we kijken. Dat komt omdat de snelheid van het licht of de zwaartekrachtgolven eindig is, en dus langer onderweg is van een verder gelegen bron. Dankzij ET zullen we kunnen terugkijken naar de periode vóór de eerste sterren tot ontbranding kwamen en vóór de eerste sterrenstelsels gevormd werden, de zogenaamde '*dark ages*' van ons universum. Als we daar zwarte gaten observeren die samensmelten, dan weten we dat die niet van stellaire oorsprong zijn, maar dat ze afkomstig zijn van een of ander alternatief kosmologisch mechanisme in het vroege heelal. Zulke zwarte gaten worden *primordial black holes* genoemd. Ze kunnen licht werpen op hoe de eerste sterrenstelsels zijn ontstaan. De samensmeltingen van zwarte gaten en neutronensterren die we waarnemen, brengen het heelal in drie dimensies in kaart. Samen met andere elektromagnetische boodschappers, en tot op zekere hoogte zelfs onafhankelijk daarvan, zullen de ET-waarnemingen helpen om

kosmologische parameters te meten en de grootschalige structuur van materie in het heelal in kaart te brengen. In de context van huidige controverses en discrepanties in de kosmologie, zoals de *Hubble tension* en de *S8 tension*, smeekt de kosmologie om onafhankelijke methodes die de huidige metingen kunnen toetsen en vergelijken met de onderliggende theorie.

Het samensmelten van neutronensterren geeft ons ook toegang tot de ongrijpbare toestandsvergelijking van een neutronenster, die anders niet toegankelijk is voor aardse experimenten. Dit zal ons in staat stellen om de precieze structuur van neutronensterren te begrijpen. Hoewel een handvol detecties met de huidige detectoren al sterke beperkingen hebben opgelegd aan modellen van neutronstermaterie, zijn we nog ver verwijderd van het meten van de exacte fysische parameters. ET zal ons toegang geven tot deze fysica en daarenboven duidelijkheid verschaffen over de aard van de remnanten na een fusie. Bovendien openen neutronensterren de deur naar de multi-messengerastronomie. Tot nu toe hebben we nog maar één detectie van dit type waargenomen: GW170817 leverde al een schat aan nieuwe inzichten op. Dit onderstreept alleen maar de noodzaak van gevoeliger detectoren, zoals ET, die op dagelijkse basis zulke gebeurtenissen zullen waarnemen.

ET zal zeer gevoelig zijn voor de gravitatiegolvenachtergrondstraling, het alomtegenwoordige 'geruis', waarvan een deel van kosmologische oorsprong is. Zo is er een reële mogelijkheid dat processen uit de elementaire deeltjesfysica kort na de oerknal topologische defecten, zoals *cosmic strings* of topologische *domain walls*, geproduceerd hebben. Om deze objecten in deeltjesversnellers op aarde waar te nemen hebben we versnellers nodig met een energie die vele grootteordes hoger ligt dan wat nu mogelijk is. Als ze ooit hebben bestaan, dan hebben ze signaturen achtergelaten die door ET waarneembaar zijn. ET zal dan ook vele nieuwe inzichten in de elementaire deeltjesfysica opleveren.

Al deze wetenschap is grotendeels afhankelijk van vier soorten bronnen: binaire systemen die bestaan uit zwarte gaten en/of neutronensterren (van het soort dat we al hebben waargenomen), supernova-explosies, ronddraaiende neutronensterren en de zwaartekrachtgolvenachtergrond. Het is ook mogelijk dat we met ET iets compleet nieuws en onverwachts ontdekken. En nieuwe ontdekkingen zullen het gebruik van nieuwe analysemethoden voor de geobserveerde gegevens noodzakelijk maken. Gezien het grote aantal binaire systemen dat we al hebben waargenomen, weten we dat alle gegevens van ET zullen verdrinken in een zee van binaire samensmeltingen. Enerzijds moeten we deze signalen scheiden en de signalen identificeren die tot grote ontdekkingen kunnen leiden. Aan de andere kant moeten we de bekende bronnen verwijderen om naar het onbekende te kunnen zoeken. Bovendien moeten we, gezien de grote hoeveelheid gegevens en de luidheid van de signalen, de snelheid en de efficiëntie van de huidige technieken en de nauwkeurigheid van de huidige modellen aanzienlijk verbeteren. Over de hele wereld wordt al hard gewerkt om de gegevensanalyse met ET tot werkelijkheid te maken. Verschillende nieuwe computationele methoden die worden ontwikkeld, zijn gebaseerd op moderne technieken waarin gebruik wordt gemaakt van neurale netwerken en kunstmatige intelligentie. De verwachting is dat deze infrastructuur voor gegevensanalyse mee zal evolueren met de snel veranderende inzichten in de computerwereld.

Een interessante verwante vraag is ook hoe je het best gebruik kunt maken van wat bekendstaat als de '*null stream*', als ET gebouwd wordt met een driehoekige configuratie. Een driehoekige configuratie heeft in zekere zin een redundante detector. Het kan echter mogelijk zijn dat er van deze redundantie gebruik wordt gemaakt om de ruis van de detector beter te begrijpen en te karakteriseren. Dat is dan weer cruciaal voor het extraheren en beschrijven van het signaal in de data.

2.5 *Het ontwerp van de Einsteintelecoop*

ET moet een gravitatiegolvenobservatorium worden van de derde generatie. Om het beoogde fysicapotentieel optimaal te benutten moet zijn gevoeligheid, uitgedrukt in de amplitude spectrale dichtheid (ASD) van het instrument, met een factor 10 beter worden dan de huidige installaties. Ook het frequentiebereik zal significant worden uitgebreid met een totale bandbreedte van enkele Hz tot tientallen kHz.

Om deze gevoeligheid te bereiken moet een groot aantal technologische beperkingen van de huidige generatie telescopen wegvallen. De verbeteringen werden initieel aangedreven door de wens om over een groter aantal observaties te beschikken van compacte binaire systemen met een grote signaal/ruis-verhouding, om zo een precieze gravitatiegolvenastronomie mogelijk te maken [11, 12]. Terwijl de huidige generatie observatoria jaarlijks tot een paar tientallen dergelijke detecties leiden, zal ET dit aantal door zijn hogere gevoeligheid opdrijven naar honderdduizenden per jaar. Een regelmatige observatie van lagefrequentiebronnen in het intermediaire massagebied impliceert de noodzaak om het lagefrequentiebereik van de huidige installaties, dat beperkt blijft tot enkele tientallen Hz, uit te breiden tot frequenties van de orde van enkele Hz.

Deze gevoeligheden kunnen enkel worden bereikt door de armlengte van de interferometers significant uit te breiden: van drie tot vier kilometer in de huidige instrumenten naar tien of meer kilometer. Om dat doel te bereiken is een ondergrondse constructie op 200 tot 300 meter diepte noodzakelijk om de seismische ruis – vooral de ruis die wordt geïnduceerd door menselijke activiteit aan het oppervlak – op een natuurlijke wijze te onderdrukken.

Het oorspronkelijke ontwerp van ET bestaat uit drie in elkaar geschoven ('geneste') interferometers met de configuratie van een gelijkzijdige driehoek. In tegenstelling tot de L-vormige configuraties van de huidige telescopen maakt deze vorm een gelijkaardige gevoeligheid mogelijk voor beide standaardpolarisaties van gravitatiegolven (de zogenaamde +- en x-polarisatie). Bovendien vertoont deze geometrie ook een meer isotroop antennepatroon, wat de richtingsgevoeligheid van de telescoop meer uniform maakt en 'blinde vlekken' vermijdt. Ten slotte laat deze configuratie de implementatie van een '*null stream*' toe: een combinatie van signalen van de drie interferometers die niet gevoelig is voor astrofysische signalen en die als controlesignaal voor de ruisbepaling kan dienen. De gevoeligheid voor lagere frequenties – enkele Hz – stelt ook heel nieuwe eisen aan ruisonderdrukking, die met de huidige technologie buiten bereik liggen.

De oplossing is de ontubbeling van de interferometers. Naast een interferometer die is gebaseerd op de huidige technologie (gevoelig voor de signalen van enkele tientallen Hz tot enkele tientallen kHz), zal men telkens een tweede interferometer bouwen die

in cryogene temperaturen zal opereren. Dat vereist dan weer een radicale hertekening van de optische systemen. Terwijl de huidige gebaseerd zijn op glas, hebben we nu optische systemen nodig die uit puur silicium zijn vervaardigd, een compleet nieuw terrein. Vanwege dit nieuwe materiaal voor spiegels en andere optische componenten moet ook de golflengte van de lasers aangepast worden naar waarden die in de buurt van het infrarode komen. Ook dit is onontgonnen terrein. De ontwikkeling van deze radicaal nieuwe technologieën gebeurt in nieuwe, speciaal voor dit doel opgezette R&D-faciliteiten, waarvan ETpathfinder in Maastricht wellicht een van de belangrijkste is. ETpathfinder kwam er op initiatief van zes Nederlandse universiteiten, die zijn verenigd in het NIKHEF, en vier Vlaamse universiteiten: UAntwerpen, VUB, UGent en KU Leuven (ondertussen neemt ook de UHasselt deel aan het ETpathfinder project). In ETpathfinder, een realistisch model op schaal van een interferometer als ET, worden niet enkel cryogene, op silicium gebaseerde optische systemen ontwikkeld, maar ook talrijke andere innovatieve technologieën, zoals stille koelingstechnieken en nieuwe dempingssystemen.

Recent [23] is ook de mogelijkheid onderzocht om deze doelen te bereiken met een netwerk van twee L-vormige interferometers met een grotere armlengte (een bereik van 15 tot 20 kilometer) en met verschillende onderlinge oriëntaties (gealigneerd en geroteerd in een hoek van 45 graden). De twee zijn gelokaliseerd in het drielandenpunt en in Sardinië, met een onderlinge afstand van ongeveer 1200 kilometer. De details van deze studie leveren een uitgebreide vergelijking op van het detectiepotentieel van alle configuraties, in combinatie met de resulterende nauwkeurigheden op de bepaling van essentiële fysicaparameters van binaire systemen, in het bijzonder de nauwkeurigheid op de bepaling van de richting van het inkomende signaal. De algemene teneur van de vergelijking is dat een configuratie van twee L-vormige interferometers, geroteerd over 45 graden, de beste positiebepaling mogelijk maakt, maar dat ze de observatie van een stochastische achtergrondstraling, die belangrijk is voor kosmologische studies met ET, sterk benadeelt. Een grotere armlengte bevordert het potentieel van elke configuratie, maar heeft een significante impact op de totale constructiekosten, die in goede benadering lineair schalen met de armlengte.

Het is duidelijk dat in elk scenario een spreiding van het netwerk over twee sites voor het project waarschijnlijk aanzienlijke meerkosten met zich meebrengt en mogelijk een extra risico vormt wat de coördinatie van de twee constructiesites betreft, met mogelijke implicaties op de kostenbeheersing, de duurtijd van de constructie en de ingebruikname van beide instrumenten. Aan de andere kant is een opsplitsing een mogelijke uitweg voor politieke impasses, in het geval dat de voornaamste belanghebbenden, in het bijzonder de kandidaat-gastregio's, geen consensus bereiken over de keuze van één enkelvoudige site.

3. De socio-economische impact

Uit de hierboven beschreven kenmerken van de Einsteintelecoop (ET) kunnen we opmaken dat deze infrastructuur een fascinerend wetenschappelijk potentieel heeft, maar ook een brede waaier van andere vormen van impact met zich meebrengt. Een aantal hiervan valt buiten het bestek van dit Standpunt, zoals omgevingsgerelateerde, juridische en duurzaamheidsaspecten. Maar een afweging van de kostprijs tegenover de socio-economische impact kunnen we hier wel maken.

Het hoeft geen betoog dat er een stevig prijskaartje vasthangt aan de bouw van een tunnelstelsel diep onder de grond, met indrukwekkende cavernes op elk van de drie hoekpunten, de ontwikkeling van het grootste vacuümsysteem ter wereld en instrumentele vereisten die ons technologisch vermogen tot het uiterste dwingen. Voor een betrouwbare kostenschattting is het wachten op een gedetailleerd technisch ontwerp, maar volgens schattingen komen de totale kosten voor de bouw van ET in de buurt van 3 miljard euro. Het is gebruikelijk dat de gastlanden van een wetenschappelijke infrastructuur het leeuwendeel van de bouwkosten voor hun rekening nemen, in het bijzonder wat betreft het aandeel van de civiele werkzaamheden.

Daarom bestelden het FWO en POM Limburg een externe studie om de socio-economische impact in kaart te brengen. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste bevindingen samen die uit deze impactstudie naar voren komen. [24] Methodologisch koos externe partner Econopolis ervoor om de impact in te schatten op basis van een comparatieve analyse van reeds bestaande Big Science-projecten, gecombineerd met een input/output-analyse die op Vlaams niveau analyseert in hoeverre ET zal leiden tot meer investeringen, toegevoegde waarde en jobs.

3.1 *De socio-economische impact van Big Science-projecten (BSP's)*

Big Science-projecten (BSP's) zijn grootschalige en complexe onderzoeksinfrastructuren die niet alleen dienen om onze wetenschappelijke kennis te vergroten, maar ook aanzienlijke socio-economische voordelen met zich meebrengen. Ze onderscheiden zich door hun interdisciplinair karakter, de lange looptijd, de internationale samenwerking en hun vermogen om significante maatschappelijke en economische effecten te genereren. Een van de belangrijkste economische voordelen van BSP's is de directe economische return voor de deelnemende landen, via aanbestedingen van goederen en diensten. Deze projecten fungeren als een afzetmarkt voor bedrijven, met name in de hightechsector, en stimuleren zo in de betrokken landen de productie- en innovatiecapaciteit.

Daarnaast bieden BSP's aanzienlijke voordelen voor de gastlanden waar de infrastructuur is gevestigd. Deze regio's profiteren van een verhoogde economische activiteit en werkgelegenheid, zowel tijdens de bouw- als in de operationele fase van het project. De aanwezigheid van een groot onderzoekscentrum trekt gerelateerde bedrijven en internationale organisaties aan, wat bijdraagt tot de vorming van innovatieclusters en het versterken van een regionaal innovatie-ecosysteem. Dit leidt tot een verhoogde aantrekkingskracht van de regio voor wetenschappelijk talent en industriële partners, en kan op lange termijn resulteren in een structurele versterking van de regionale economie.

BSP's dragen ook bij aan de ontwikkeling van *human capital*, met name in de STEM-disciplines (Science, Technology, Engineering, Mathematics). Door hun intensieve samenwerking met universiteiten en onderzoeksinstellingen en aan de hand van educatieve programma's (stages, summerschools en fellowships) stimuleren ze de instroom van studenten en jonge onderzoekers in wetenschappelijke en technologische vakgebieden. Dit verhoogt niet alleen de kwalificaties en vaardigheden van de lokale beroepsbevolking, maar draagt ook bij aan de creatie van een duurzame kenniseconomie. Een belangrijk effect van BSP's is hun vermogen om technologische spill-overeffecten te genereren. Bedrijven die betrokken zijn bij de levering van technologieën en diensten aan deze projecten ontwikkelen vaak innovatieve producten en diensten die hun weg vinden naar bredere markten. Dit leidt tot de creatie van nieuw intellectueel eigendom, nieuwe bedrijfsmodellen en de oprichting van spin-offs en start-ups. Deze technologische spill-overs versterken de concurrentiekracht van bedrijven en dragen bij aan de diversificatie en de groei van de economie.

Tegenover deze voordelen staan ook risico's. Grootschalige infrastructuurprojecten zijn gevoelig voor budget- en tijdoverschrijdingen, organisatorische en logistieke uitdagingen, en politieke spanningen inzake de financiering en de locatiekeuze. Daarnaast vereist de wetenschappelijke relevantie van deze projecten vaak continue upgrades en technologische aanpassingen, wat extra kosten met zich meebrengt. Om de risico's te beheersen is een gedegen risicobeheersingsstrategie noodzakelijk, evenals een goede coördinatie en samenwerking tussen de betrokken partijen.

3.2 *Impact van de Einsteintelecoop op Vlaanderen: aanpak en methodologie*

Deze algemene beschouwingen over BSP's worden in de studie van Econopolis specifiek uitgewerkt en waar mogelijk gekwantificeerd voor het ET-project. Op die manier kan ze inzicht verschaffen in de verhouding tussen de (in casu Vlaamse) investering in ET en de te verwachten socio-economische voordelen voor Vlaanderen. Met dat doel onderzoekt de studie hoe investeringen in ET in verschillende sectoren doorwerken. De input/output-analyse richt zich op de verwachte uitgaven en voordelen gedurende:

- de bouwfase, die naar verwachting een achttal jaar in beslag zal nemen;
- de daaropvolgende operationele fase. De studie richt zich op de eerste dertig operationele jaren.

De studie onderscheidt drie vormen van socio-economische impact:

- de **directe impact** – de totale toegevoegde waarde en werkgelegenheid als gevolg van de bouw van het project;
- de **spill-overeffecten** – de indirecte economische voordelen die voortkomen uit een toename van intellectueel kapitaal en innovatievermogen in de regio;
- de **ecosysteemeffecten** verwijzen naar bredere maatschappelijke en economische veranderingen die ontstaan door het grootschalige en grensoverschrijdende karakter van ET.

Tot slot onderscheidt de studie diverse impactscenario's, op basis van de mate waarin Vlaamse bedrijven deelnemen aan aanbestedingen. Dit leidt tot de definitie van de volgende vier scenario's:

1. Basisscenario

In dit scenario staat de bijdrage van Vlaanderen in verhouding tot het aandeel van de aanbestedingen die Vlaamse bedrijven winnen. Dit wordt beschouwd als een neutrale situatie, waarin Vlaamse bedrijven evenredig met de investering aanbestedingen binnenhalen.

2. Vlaamse valorisatiestrategie-scenario

Dit scenario gaat uit van een situatie waarin Vlaanderen actief inzet op het verhogen van de competitiviteit van Vlaamse bedrijven in het aanbestedingsproces. Dit resulteert in een groter aandeel van de aanbestedingen die naar Vlaamse bedrijven gaan, met een significante impact op de productiewaarde die in de Vlaamse economie terechtkomt. Specifieke sectoren, zoals infrastructuur en het vacuümsysteem, profiteren het meest van deze strategie.

3. Worstcasescenario

Dit scenario gaat ervan uit dat Vlaamse bedrijven er niet in slagen een aanzienlijk deel van de aanbestedingen binnen te halen, met name in belangrijke sectoren als infrastructuur en technologische upgrades. Dit leidt tot een lager aandeel van de productiewaarde dat naar Vlaanderen vloeit.

4. Sardinië-scenario

In dit scenario wordt ET volledig op Sardinië gebouwd. Vlaanderen draagt slechts minimaal bij. Alleen hoogtechnologische componenten worden mogelijk geleverd door Vlaamse bedrijven. De economische effecten voor Vlaanderen zijn hier beperkt.

3.3 Impact van de Einsteintelecoop op Vlaanderen: resultaten

1. Directe impact

De bouwfase genereert cumulatief tussen 295 (worstcasescenario) en 839 (Vlaamse valorisatiestrategie-scenario) miljoen euro aan toegevoegde waarde. Voor het basisscenario komt men uit op 352 miljoen euro. In het Sardinië-scenario beperkt de toegevoegde waarde zich tot 70 miljoen euro.

Op het vlak van tewerkstelling gaat het volgens Econopolis om 2281 baan jaren in het worstcasescenario, terwijl het basisscenario goed is voor 2691 baan jaren en het Vlaamse valorisatiestrategie-scenario 6687 baan jaren zou opleveren. In het Sardinië-scenario beperkt de verwachte tewerkstelling zich tot 511 baan jaren. Een 'baanjaar' wordt gedefinieerd als een voltijdse baan gedurende een jaar.

Voor de **operationele** fase genereert ET volgens Econopolis afgerond (en afhankelijk van het scenario) tussen de 200 en 700 miljoen euro aan toegevoegde waarde in een tijdsbestek van dertig jaar. Dit gaat gepaard met een tewerkstelling van 2300 tot 5500 baan jaren.

De scenario-analyse onderzocht ook de ROI (*return on investment*) voor Vlaanderen. In het basisscenario wordt verwacht dat Vlaanderen een ROI van ongeveer 86% op de geïnvesteerde middelen kan realiseren, terwijl dit bij een succesvolle valorisatiestrategie

kan oplopen tot 226%. Dit betekent dat de Vlaamse economie in dat scenario meer dan het dubbele van de initiële investering terugverdient, dankzij de directe en indirecte economische activiteiten.

Deze cijfers laten zien dat er bij de diverse scenario's sprake is van een aanzienlijke vork voor zowel de bouwfase als de operationele fase, en zowel voor de toegevoegde waarde als de tewerkstelling en de ROI. Als we het wat aparte Sardinië-scenario buiten beschouwing laten, blijkt hieruit het belang van de ontwikkeling van een actieve valorisatiestrategie. Enkele aanbevelingen aan het eind van dit Standpunt betreffen specifiek de vraag wat Vlaanderen precies moet aanbrengen om bedrijven te begeleiden naar de toekomstige aanbestedingen.

2. Spill-overeffecten

Naast de directe en indirecte economische voordelen zijn er ook significante spill-overeffecten te verwachten. Volgens de bevindingen van Fieldhouse & Mertens (2023) kan een positieve schok van 1% in het publieke R&D-kapitaal op termijn leiden tot een productiviteitswinst van 0,2% en een toename van het aantal STEM-doctorandi met 1%. Deze effecten komen vaak pas na enkele jaren volledig tot uiting, maar hun impact op de kenniseconomie en de arbeidsmarkt is aanzienlijk. Gezien de omvang van de investering in ET ten opzichte van de totale publieke R&D-uitgaven in Vlaanderen kan dit project een vergelijkbare impact hebben. De bijdrage van ET kan op termijn leiden tot een significante verhoging van de productiviteit en van het aantal onderzoekers in Vlaanderen, waardoor de regio nog sterker wordt gepositioneerd als innovatieleider.

3. Ecosysteemeffecten

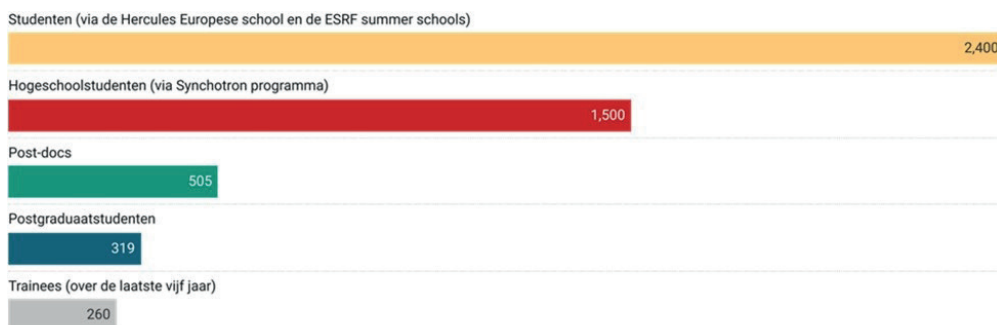
Ecosysteemeffecten zijn een ander belangrijk aspect van de impact van ET op Vlaanderen. De aanwezigheid van een dergelijk grootschalig onderzoeksproject kan een innovatiecluster doen ontstaan, vergelijkbaar met de Einstein Valley. De regio rondom het drielandenpunt biedt een solide basis voor de ontwikkeling van een dergelijk ecosysteem. De strategische ligging, de goede infrastructuur en bestaande kennisinstellingen en bedrijven vormen de eerste kiemen van een Einstein Cluster die in de toekomst kan uitgroeien tot een hightechhub van wereldformaat. Dit ecosysteem kan op zijn beurt bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe industrieën en onderzoeksinitiatieven, wat de economische basis van Vlaanderen op lange termijn versterkt.

3.4 *Motor voor STEM-profielen*

BSP's hebben een unieke aantrekkingskracht die het aantal STEM-profielen in een gastland kan doen stijgen. Deze wetenschappelijke centra spelen een cruciale rol in het bevorderen van wetenschapscommunicatie door middel van initiatieven die zich tot het grote publiek richten, zoals opendeurdagen, lezingen en tentoonstellingen die complexe wetenschappelijke concepten toegankelijk maken voor een breed publiek. Bovendien organiseren de centra leerstages en summerschools waarin studenten en jonge onderzoekers de kans krijgen om praktijkervaring op te doen en in contact te komen met de nieuwste technologieën en onderzoeksmethoden. Dit helpt niet alleen om abstracte begrippen binnen de fysica, de wiskunde en technische opleidingen tastbaar te maken, maar inspireert ook jongeren om een carrière in deze vakgebieden te ambiëren.

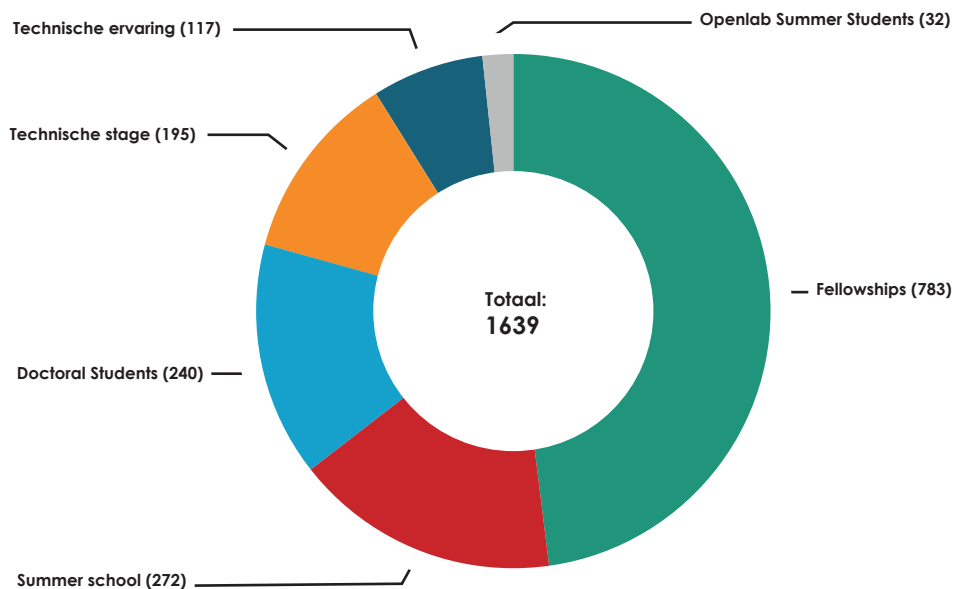
Daarnaast motiveren BSP's ook technische profielen om deel te nemen aan ambitieuze en grensverleggende projecten, wat kan leiden tot een sterk gevoel van trots en betrokkenheid bij het werk. De mogelijkheid om mee te werken aan baanbrekende onderzoeksprojecten en de realisatie van geavanceerde technologische infrastructuur trekken niet alleen wetenschappers aan, maar ook ingenieurs, technici en andere STEM-professionals. Deze projecten fungeren op die manier als katalysator voor het verhogen van de instroom van studenten in technische en wetenschappelijke opleidingen en versterken ook het menselijk kapitaal van het gastland in STEM-disciplines.

Figuur 2 geeft een overzicht van het totale aantal studenten dat sinds de oprichting betrokken was bij programma's van de European Synchrotron Radiation Facility (ESRF). Met meer dan 2400 studenten die deelnamen aan de Hercules Europese school en ESRF-summer schools, en met 1500 hogeschoolstudenten die participeerden aan het Synchrotron-programma, heeft ESRF een breed bereik in wetenschapseducatie. Deze programma's bieden studenten op verschillende niveaus, van hogeschool tot postdoctoraal, de mogelijkheid om deel te nemen aan geavanceerd onderzoek en de ontwikkeling van synchrone stralingstechnologieën. Door zulke intensieve opleidingsprogramma's speelt ESRF een cruciale rol in het inspireren van de volgende generatie wetenschappers en ingenieurs, en draagt het bij aan het versterken van de Europese capaciteit op het gebied van geavanceerde technologieën.



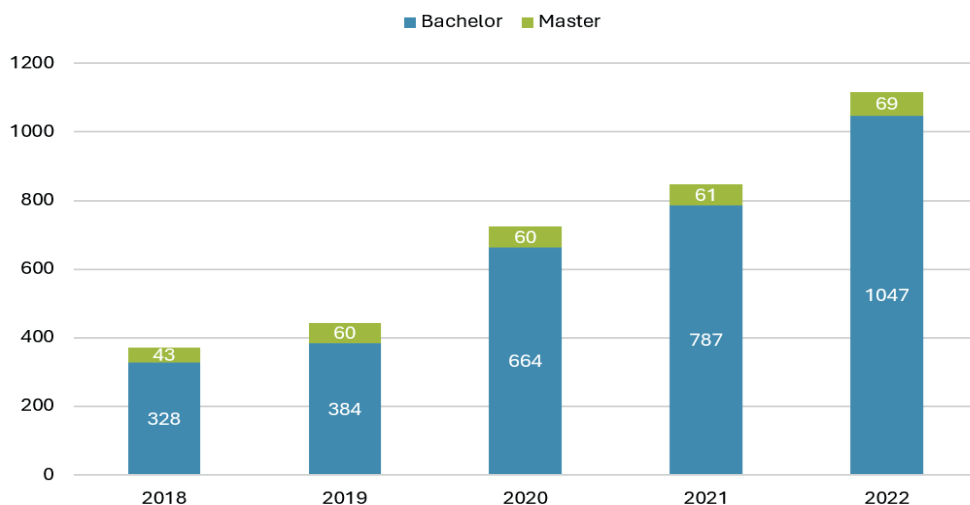
Figuur 2: Aantal studenten die sinds de oprichting aan een ESRF-programma participeerden. Bron: ESRF.

In 2023 namen in totaal 1639 studenten deel aan educatieve activiteiten die werden georganiseerd door CERN, zoals figuur 3 aangeeft. Deze initiatieven gaan van technische stages en summerschools tot fellowships en specifieke programma's, waaronder Openlab Summer Students. Vooral de fellowships (783 deelnemers) hebben een belangrijk aandeel in deze *outreach*. Dit type programma's biedt jonge onderzoekers en studenten de kans om diepgaand betrokken te raken bij onderzoek en ontwikkeling, waardoor ze waardevolle ervaring opdoen in een geavanceerde wetenschappelijke omgeving. Dergelijke initiatieven stimuleren niet alleen de interesse in STEM-opleidingen, ze versterken ook de band tussen academische instellingen en de onderzoekinfrastructuur van CERN, wat bijdraagt aan een verhoogde instroom van STEM-profielen in de regio.



Figuur 3: Aantal STEM-studenten die in 2023 deelnamen aan een CERN-programma. Bron: Cern Annual Report.

Dichter bij huis valt sinds 2018 de opmerkelijke stijging van het aantal STEM-studenten aan de universiteit van Maastricht op (figuur 4), wat min of meer samenvalt met de oprichting van het ETpathfinder-project, de testfaciliteit voor ET. Deze ontwikkeling past binnen de bredere strategie van de universiteit om meer studenten aan te trekken voor opleidingen in de bètawetenschappen, wat een verschuiving inhoudt van haar traditionele focus op politieke wetenschappen en sociale studies. Het ETpathfinder-project fungeert als een cruciaal instrument om deze strategische doelstelling te realiseren. Het project biedt niet alleen een unieke infrastructuur voor geavanceerd wetenschappelijk onderzoek, het vergroot ook de aantrekkingskracht van de universiteit op nieuwe studenten die geïnteresseerd zijn in STEM-opleidingen.

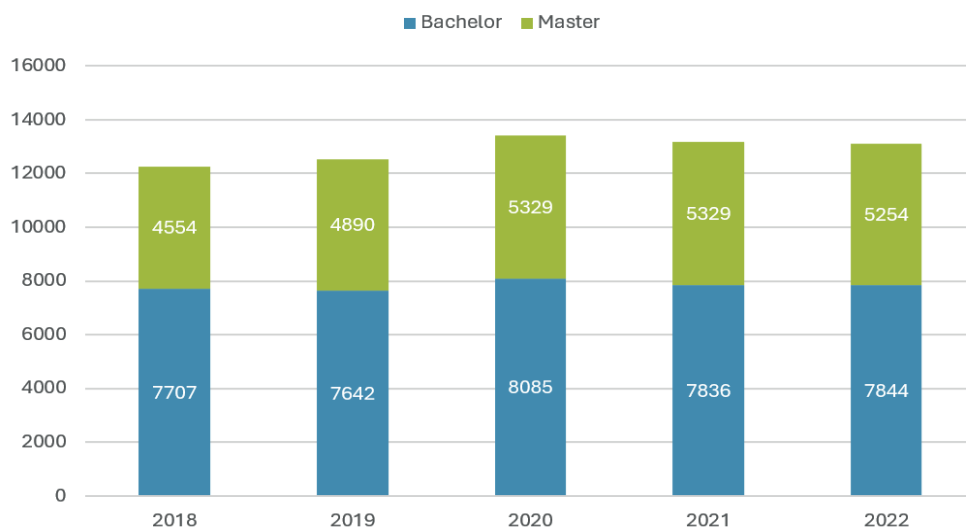


Figuur 4: Aantal STEM-studenten aan de universiteit van Maastricht. Bron: Dienst Uitvoering Onderwijs Nederland.

Aan de universiteit van Maastricht verdrievoudigde het aantal bachelorstudenten tussen 2018 en 2022. Deze groei heeft zich voorgedaan zonder een negatieve invloed op het aantal inschrijvingen bij nabijgelegen instellingen, zoals de Technische Universiteit Eindhoven, wat erop wijst dat ETpathfinder een nieuwe instroom genereert en geen studenten wegtrekt bij andere universiteiten (zie figuur 5).

Deze trend laat zien hoe grootschalige onderzoeksprojecten als ET, zelfs al in de voorbereidende fase, de aantrekkingskracht van een universiteit kunnen vergroten en een katalysator kunnen zijn voor de ontwikkeling van academische programma's die aansluiten bij de behoeften van een regio. ETpathfinder fungeert daarbij niet alleen als wetenschappelijke proeftuin, maar ook als een vehikel dat Maastricht en haar universiteit mogelijkwerijs positioneert als een belangrijke speler op het gebied van astrofysisch onderzoek en technologische innovatie.

Bij dit alles moeten we opmerken dat het succes in het aantrekken van STEM-studenten afhangt van flankerende initiatieven, zoals de integratie in lespakketten en de publieke betrokkenheid door de aanwezigheid van een wervend bezoekerscentrum.



Figuur 5: Aantal STEM-studenten aan de universiteit van Eindhoven. Bron: Dienst Uitvoering Onderwijs Nederland.

Studies wijzen uit dat publieke investeringen in R&D een directe invloed hebben op het aantal STEM-doctorandi. Fieldhouse & Mertens [25] onderzochten de impact van publieke R&D-uitgaven (exclusief voor defensie) in de Verenigde Staten op de instroom van nieuwe doctorandi in STEM-velden. Hun bevindingen laten zien dat een positieve schok van 1% in het publieke R&D-kapitaal na een periode van zeven tot acht jaar leidt tot een significante toename van het aantal STEM-doctorandi. Dit effect neemt met de jaren toe en bereikt zijn piek na ongeveer twaalf jaar: dan is het aantal nieuwe doctorandi met 1% gestegen ten opzichte van het oorspronkelijke niveau. Deze studie bevestigt dat gerichte publieke investeringen in onderzoeksinfrastructuur en wetenschappelijk onderzoek een langdurige en positieve invloed kunnen hebben op de opleiding van hooggekwalficeerd wetenschappelijk personeel en op de versterking van

de academische capaciteit. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat de realisatie van de mogelijkheden die ET biedt op vlak van STEM een significante strategische investering zal vergen in *human power*, in de gedaante van professoren en onderzoekers.

3.5 Een langetermijnvisie voor de Einsteintelecoop

Een groot deel van de voordelen die Vlaanderen dankzij ET kan behalen, is voorwaardelijk en hangt sterk af van een goed afgestemd flankerend beleid. Op basis van de impactanalyse is een langetermijnvisie uitgewerkt met maatregelen die de return van de investering in ET kunnen verhogen, waardoor het maatschappelijk rendement voor Vlaanderen maximaal wordt benut.

Om de competitiviteit bij de aanbestedingsprocedure te garanderen is het essentieel om bedrijven tijdig bij de voorbereidingen te betrekken. Een belangrijke rol is weggelegd voor een *dedicated* Industrial Liaison Officer (ILO), die bedrijven op de hoogte houdt van *tenders* en hen begeleidt bij het inschrijven. Vlaanderen kan hiervoor inspiratie halen uit landen met een succesvolle ILO-strategie, zoals Zwitserland. Daarnaast is een Vlaamse valorisatiestrategie noodzakelijk om sectoren met een hoog potentieel, zoals cleantech en dataprocessing, te ondersteunen. Zo kan Vlaanderen reeds in de aanbestedingsfase competitief worden, wat de directe economische voordelen maximaliseert.

De implementatie van In-Kind Contributions (IKC) kan een instrument zijn om de financiële druk te verlichten en Vlaanderen in staat te stellen om strategische technologieën vroegtijdig veilig te stellen. Dit systeem kan als diplomatiek instrument dienen om de locatiekeuze voor ET te bevorderen en de Vlaamse bijdrage te optimaliseren. Daarnaast biedt een publiek-private samenwerking (PPS) de mogelijkheid om het bouwrisico te verdelen en privé-investeringen aan te trekken, wat de financieringslast voor de overheid vermindert. Vlaanderen beschikt over ervaring en expertise om complexe PPS-structuren succesvol op te zetten, wat de haalbaarheid van ET vergroot.

Spill-overeffecten verwijzen naar de bredere economische impact die ET kan hebben, zoals nieuwe producten, diensten en start-ups die ontstaan door de ontwikkeling van technologieën voor ET. Om deze effecten te maximaliseren is een goede samenwerking en coördinatie binnen het Vlaamse innovatie-ecosysteem cruciaal. VLAIO kan een centrale rol spelen in het faciliteren van de doorstroming van ideeën naar producten. Een programma voor ET-gerelateerde innovaties kan helpen om start-ups te ondersteunen, maar een bredere financieringsaanpak is nodig voor de groeifase. Een ET Innovation Desk kan fungeren als centraal aanspreekpunt voor alle actoren in de innovatieketen en grensoverschrijdende samenwerking bevorderen.

ET kan een blijvende positieve impact hebben op de regionale economie, door de ontwikkeling van een innovatief ecosysteem op de as tussen Luik, Maastricht en Aken, ook de grens van het Vlaams Gewest ter hoogte van de regio rond Voeren. Zo'n ecosysteem kan in de toekomst een Einstein Valley voor specifieke telescooptechnologie vormen. Dit vereist gerichte investeringen in infrastructuur, mobiliteit en huisvesting om een aantrekkelijk vestigingsklimaat te creëren. De regio heeft al een stevige basis met een aantal wetenschappelijke instellingen en bedrijven, maar er is een gericht beleid nodig

om dit potentieel volledig te benutten. ET kan dienen als een instrument om strategische beleidslijnen te versterken, zoals de STEM-Agenda 2030 en de EWI-beleidsnota, door het verhogen van de instroom in STEM-opleidingen en het stimuleren van innovatie. Een optimaal ecosysteem rond ET, met onder andere een bezoekerscentrum, zal niet alleen de regio versterken, maar ook zorgen voor blijvende voordelen, zelfs als de wetenschappelijke relevantie van het project afneemt.

Een gerichte aanpak op elk niveau van deze economische gelaagdheid, gecombineerd met een strategische beleidsintegratie, kan ervoor zorgen dat de investering in ET op de lange termijn voor Vlaanderen niet alleen een wetenschappelijke, maar ook een economische en maatschappelijke meerwaarde creëert.

Referenties

- [1] H. Grote voor de LIGO Scientific Collaboration, "The status of GEO 600", *Classical and Quantum Gravity*, vol. 25 (11), p. 114043 (9pp), 2008. 8.
- [2] B. Abbott et al., (LIGO Scientific Collaboration), "LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory", *Reports on Progress in Physics*, vol. 72 (7), p. 076901, 2009. 8, 351.
- [3] K. Arai en the TAMA Collaboration, "Recent progress of TAMA300", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 120 (3), p. 032010, 2008. 8.
- [4] F. Acernese et al., "Status of Virgo", *Classical and Quantum Gravity*, vol. 25 (11), p. 114045 (8pp), 2008.8.
- [5] The LIGO Scientific Collaboration et al., "Advanced LIGO", 2015 *Class. Quantum Grav.* 32 074001.
- [6] F. Acernese et al., "Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector", 2015 *Class. Quantum Grav.* 32 024001.
- [7] KAGRA collaboration, T. Akutsu et al., "KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector", *Nature Astronomy*, volume 3, pp. 35–40 (2019).
- [8] D. Reitze et al., "Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO", *Bull.Am. Astron. Soc.* 51 no. 7, (2019) 035, arXiv:1907.04833 [astro-ph.IM].
- [9] M. Evans et al., "A Horizon Study for Cosmic Explorer: Science, Observatories, and Community", arXiv:2109.09882 [astro-ph.IM].
- [10] M. Evans et al., "Cosmic Explorer: A Submission to the NSF MPSAC ngGW Subcommittee", arXiv:2306.13745 [astro-ph.IM]
- [11] M. Punturo et al., "The Einstein Telescope: A third-generation gravitational wave observatory", *Class. Quant. Grav.* 27 (2010) 194002.
- [12] M. Abernathy et al., *Einstein Gravitational Wave Telescope: conceptual design study European Gravitational Observatory Document (ET-0106A-10)*, 2011
- [13] B. Sathyaprakash et al., "Scientific Objectives of Einstein Telescope", *Class. Quant. Grav.* 29 (2012)124013, arXiv:1206.0331 [gr-qc]. [Erratum: *Class.Quant.Grav.* 30, 079501 (2013)].
- [14] S. Borhanian en B. S. Sathyaprakash, "Listening to the Universe with Next Generation Ground-Based Gravitational-Wave Detectors", arXiv:2202.11048 [gr-qc].
- [15] V. Kalogera et al., "The Next Generation Global Gravitational Wave Observatory: The Science Book", arXiv:2111.06990 [gr-qc].
- [16] S. Hild, S. Chelkowski en A. Freise, "Pushing towards the ET sensitivity using conventional' technology", arXiv:0810.0604 [gr-qc].
- [17] S. Hild et al., "Sensitivity Studies for Third-Generation Gravitational Wave Observatories", *Class. Quant. Grav.* 28 (2011) 094013, arXiv:1012.0908 [gr-qc].
- [18] ET steering committee et al., "Einstein Telescope: Science Case, Design Study and Feasibility Report", ET-0028A-20, 2020, <https://apps.et-gw.eu/tds/ql/?c=15662>
- [19] ET steering committee et al., "ET design report update 2020", ET-0007A-20, 2020, <https://apps.et-gw.eu/tds/ql/?c=15418>
- [20] M. Punturo on behalf of the ET steering committee, "ET cost book", ET-0000A-20, 2020, <https://apps.et-gw.eu/tds/ql/?c=15277> (access to ET members only).
- [21] M. Maggiore et al., "Science Case for the Einstein Telescope", *JCAP* 2003 (2020) 050, arXiv:1912.02622 [astro-ph.CO].

- [22] A. Utina et al., "ETpathfinder: a cryogenic testbed for interferometric gravitational-wave detector", *Class.Quant.Grav.* 39 (2022) 21, 215008
- [23] M. Branchesi et al., "Science with the Einstein Telescope: a comparison of different designs", *JCAP07* (2023) 068, arXiv:2303.15923 [gr-qc].
- [24] Ortelius (Econopolis), De socio-economische impact van de Einstein Telescope – Impactmeting voor een Vlaamse investering, feb 2025. <https://www.einsteintelelescope-emr.eu/wp-content/uploads/2025/02/Rapport-Econopolis-18-2-2025.pdf>
- [25] AJ Fieldhouse, K Mertens, "The returns to government R&D: Evidence from US appropriations shocks", Federal Reserve Bank of Dallas, Research Department, 2023

Aanbevelingen

1. Nu al moet er ingezet worden op het verspreiden van kennis van de Einsteintelecoop naar middelbare scholen en het ruime publiek, aan de hand van lespakketten en een interactieve website.
2. Vlaanderen moet een beroep doen op ILO- en KT-officers om in een vroeg stadium de industrie en de kennisinstellingen bij het project van de Einsteintelecoop te betrekken.
3. Na de beslissing van de Vlaamse regering voor een eerste reservering van 200 miljoen euro met het oog op de bouw van de Einsteintelecoop in de Euregio Maas-Rijn, dient er overleg met de andere entiteiten in België opgezet te worden. Doel is tot afspraken te komen over zowel de totale bijdrage van België aan de constructiekosten als de intra-Belgische verdeelsleutel van deze bijdrage.
4. Voor het versterken van zowel de wetenschappelijke knowhow als de economische return moet Vlaanderen een valorisatiestrategie ontwikkelen met oog voor de verschillende dimensies en bijbehorende tijdschalen van een internationale wetenschappelijke infrastructuur: ET als infrastructuurproject, als technologisch onderzoeksproject en als Big Science-project.
5. In het licht van aanbeveling 4 dient nagedacht te worden over een subsidieregeling met een holistische kijk op het geheel van Technology Readiness Levels (TRL). Een efficiënte inzet van publieke middelen vereist immers dat er reeds in de wetenschappelijke onderzoeksfase nagedacht wordt over het potentieel om een technologisch concept tot een volwaardig product te laten uitgroeien.
6. Voor VLAIO is een centrale rol weggelegd in het faciliteren van de doorstroming van ideeën naar producten. Zo kan VLAIO instaan voor een goede samenwerking en coördinatie binnen het Vlaamse innovatie-ecosysteem. Onder meer een programma voor ET-gerelateerde innovaties en een bredere financieringsaanpak kunnen helpen om bedrijven te ondersteunen.
7. Als de Einsteintelecoop aan de Euregio Maas-Rijn wordt toegewezen, moet Vlaanderen dringend een inhaalbeweging maken door te investeren in het ZAP-kader van de vijf Vlaamse universiteiten. Momenteel steunt bij dit project de hele wetenschappelijke en technologische inspanning van Vlaanderen op een zeer beperkt aantal professoren, zeker in vergelijking met de ons omringende landen.

RECENTE STANDPUNTEN

66. Jan Rabaey, Rinie van Est, Peter-Paul Verbeek, Joos Vandewalle - *Maatschappelijke waarden bij digitale innovatie: wie, wat en hoe?* KVAB - Denkersprogramma 2019, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2020.
67. Oana Dima (auteur), Dirk Inzé, Hubert Bocken, Pere Puigdomènech, René Custers (eds.), *Genoom-bewerking voor veredeling van landbouwgewassen. Toepassingen van CRISPR-Cas9 en aanverwante technieken*, ALLEA-KVAB/Klasse Natuurwetenschappen, 2020.
68. Marie-Claire Foblets, *De multiculturele samenleving en de democratische rechtsstaat – Hoe vrijwaren we de sociale cohesie?*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2020.
69. Joost Van Roost, Luc Van Nuffel, Pieter Vingerhoets e.a., *De rol van gas in de Belgische energietransitie – Aardgas en Waterstof*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2020.
70. Richard Bardgett, Joke Van Wensem, *Bodem als natuurlijk kapitaal – KVAB Denkersrapport 2020*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2021.
71. Jos Smits e.a., *Multifunctionele eilanden in de Noordzee*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2021.
72. Elisabeth Monard, red., *Kunst, Wetenschap en Technologie in Symbiose*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2021.
73. Jan Wouters, Maaike De Ridder, *De problematiek van de rechtsstaat en democratische legitimiteit binnen de Europese Unie*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2021.
74. Hilde Heynen, Bart Verschaffel, e.a., *Architectuurkwaliteit vandaag, Reflecties over architectuur in Vlaanderen*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, Klasse Kunsten, 2021.
75. Godelieve Laureys, Kries Versluys, e.a., *Language Matters. Taalgebruik en taalbeleid aan de Vlaamse universiteiten*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2022.
76. Bea Cantillon, *Het armoedevraagstuk en de tragiek van de welvaartsstaat, Zeven termen voor een nieuw sociaal contract*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2022.
- 77b. Joos Vandewalle, Marc Acheroy e.a., *Een oproep tot een versnelde digitale transformatie voor België*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, ARB/Klasse Technologie en Samenleving, 2021.
78. Jo Tollebeek, Marc Boone en Karel van Nieuwenhuysse, *Een Canon van Vlaanderen, Motieven en bezwaren*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2022.
79. Luc Taerwe e.a., *Duurzaam beheer van infrastructuur. Niet alleen een kwestie van budgetten*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2022.
80. Willem Salet, Marleen Spiekman, Staf Roels, Tom Coppens, Ivo Van Vaerenbergh, *Naar klimaatneutrale woongebouwen in 2050*, KVAB Denkersprogramma 2022, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, 2022.
81. Sabina Leonelli, Stephan Lewandowsky, *De reproduceerbaarheid van het onderzoek in Vlaanderen: Feitenonderzoek en aanbevelingen*. KVAB Denkersrapport 2022, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen en Menswetenschappen, 2022.
82. Elisabeth Monard e.a., *Vrij onderzoek noodzakelijk voor maatschappelijke uitdagingen, Ruimte voor wetenschap op initiatief van de onderzoeker*, KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, Klasse Menswetenschappen, Jonge Academie, 2023.
83. Herman De Dijn, Gita Deneckere, Danny Praet, Jo Tollebeek, Sabine Verhulst, *Een noodzakelijk goed, Over het blijvende belang van de geesteswetenschappen*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2023.
84. Anne-Marie Simon-Vandenbergen, Kristin Davidse, *Het klimaatdebat in Vlaanderen, Een analyse van taal en communicatie*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, Standpunt 84, 2023.
85. Helga Nowotny Ine Van Hoyweghen, Joos Vandewalle, *AI als aanjager van verandering*, KVAB Denkersrapport 2023, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2023.
86. Luc Steels, Tom Willaert e.a., *Sociale media, Inzichten en Perspectieven*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2023.
87. Annie Cuyt, Hans De Winter, Niel Hens, Charles Hirsch, Johan Meyers, Stefaan Poedts, Kevin Van Geem, Veronique Van Speybroeck, *HPC-Vlaanderen in het Europese supercomputing ecosysteem*, KVAB/Klasse Natuurwetenschappen, 2024.
88. Joos Vandewalle, Erika Vlieghe, Karolien Poels, e.a., *Vertrouwen in de wetenschap(per)*, KVAB/Klasse KVAB/Klasse Technische Wetenschappen, Jonge Academie, KAGB, 2024.



Op 14 september 2015, net geen eeuw nadat Einstein hun bestaan voorspelde, werden zwaartekrachtsgolven – rimpels in tijd en ruimte die zich met de snelheid van het licht voortplanten – voor het eerst geobserveerd. Dit luidde het begin van een nieuw tijdperk in: de mensheid kreeg er een nieuw paar ogen bij. Inderdaad, tot dan namen we ons universum waar gebruik makend van ofwel elektromagnetische straling (zoals zichtbaar licht) ofwel kosmische straling (zoals neutrino's). Met het vermogen om zwaartekrachtsgolven te meten, hebben we nu een nieuwe wijze om het heelal te verkennen. Ultiem draagt ze zelfs de belofte in zich om door te dringen tot het prilste begin van onze kosmos.

Om de stap naar een echte “zwaartekrachtsgolvenastronomie” te zetten hebben we evenwel een nieuwe generatie aan waarnemingsinstrumenten – gigantische interferometers – nodig. Het Europees project, de Einsteintelecoop (ET), dat al meer dan anderhalf decennium op de tekentafel ligt, is ongetwijfeld het verst gevorderd. ET wordt een driehoekige interferometer met zijdes van 10 km lengte die zowat tweehonderdvijftig meter diep in grote tunnels onder de grond komt te liggen. Er zijn momenteel drie kandidaat-locaties om deze enorme internationale wetenschappelijke infrastructuur te huisvesten, waaronder de streek rond het drielandenpunt België-Duitsland-Nederland. De uiteindelijke beslissing omtrent de locatie van ET wordt niet voor 2027 verwacht.

Dit standpunt drukt het belang uit dat de Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten aan dit wetenschappelijk infrastructuurproject hecht. De impact ervan valt nauwelijks te overschatten, en dit niet alleen op wetenschappelijk, maar ook op economisch en maatschappelijk vlak. Daarom laten we een bevattelijke inleiding op de wetenschap en de technologie van ET volgen door een uitgebreide verkenning van de socio-economische mogelijkheden die eruit voortvloeien voor de regio. We sluiten het standpunt af met een reeks aanbevelingen.

De reeks Standpunten van de Academie is een bijdrage tot het wetenschappelijk onderbouwd debat over actuele maatschappelijke en artistieke thema's. De auteurs, leden en werkgroepen van de Academie schrijven in eigen naam, onafhankelijk en met volledige intellectuele vrijheid. De goedkeuring voor publicatie door een of meerdere Klassen van de Academie waarborgt de kwaliteit van de gepubliceerde studies.



**Vlaamse
overheid**