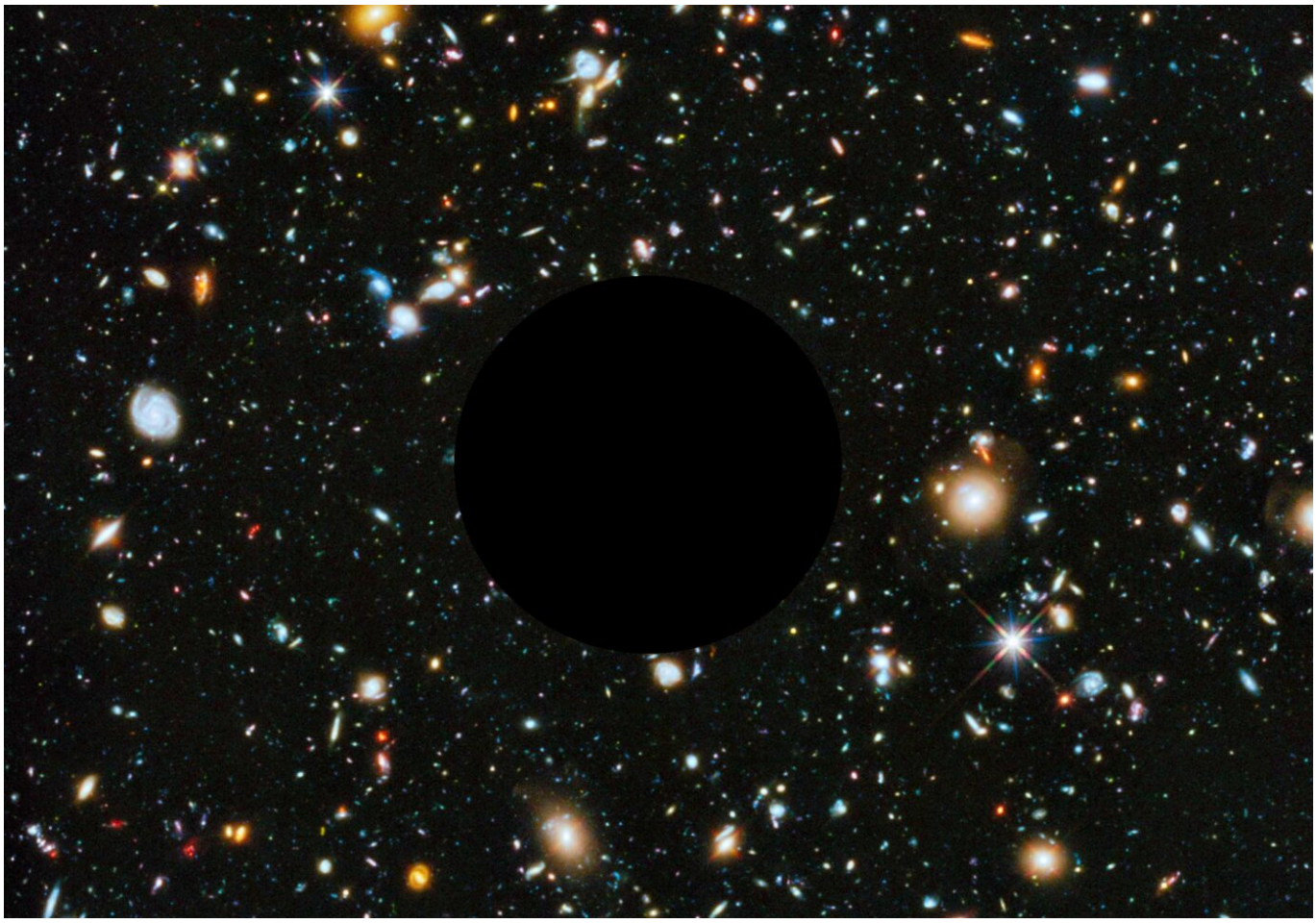
Einsteins gat in de ruimtetijd

Hij is hét idool van menig natuurkundige: Albert Einstein. Einstein dankt zijn populariteit aan de talloze wetenschappelijke successen die hij behaalde aan het begin van de 20e eeuw en is waarschijnlijk een van de bekendste wetenschappers uit de geschiedenis. Toch moest ook het genie Einstein soms lang zoeken naar de juiste oplossingen voor natuurkundige problemen, en nam ook hij in zijn zoektocht wel eens een flinke omweg.



Afbeelding 1. Een gat in de ruimtetijd? Einstein vroeg zich af wat er zou gebeuren als er een ‘gat’ in de ruimtetijd zou zitten: een gebied helemaal zonder energie of materie. Foto achtergrond: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI).

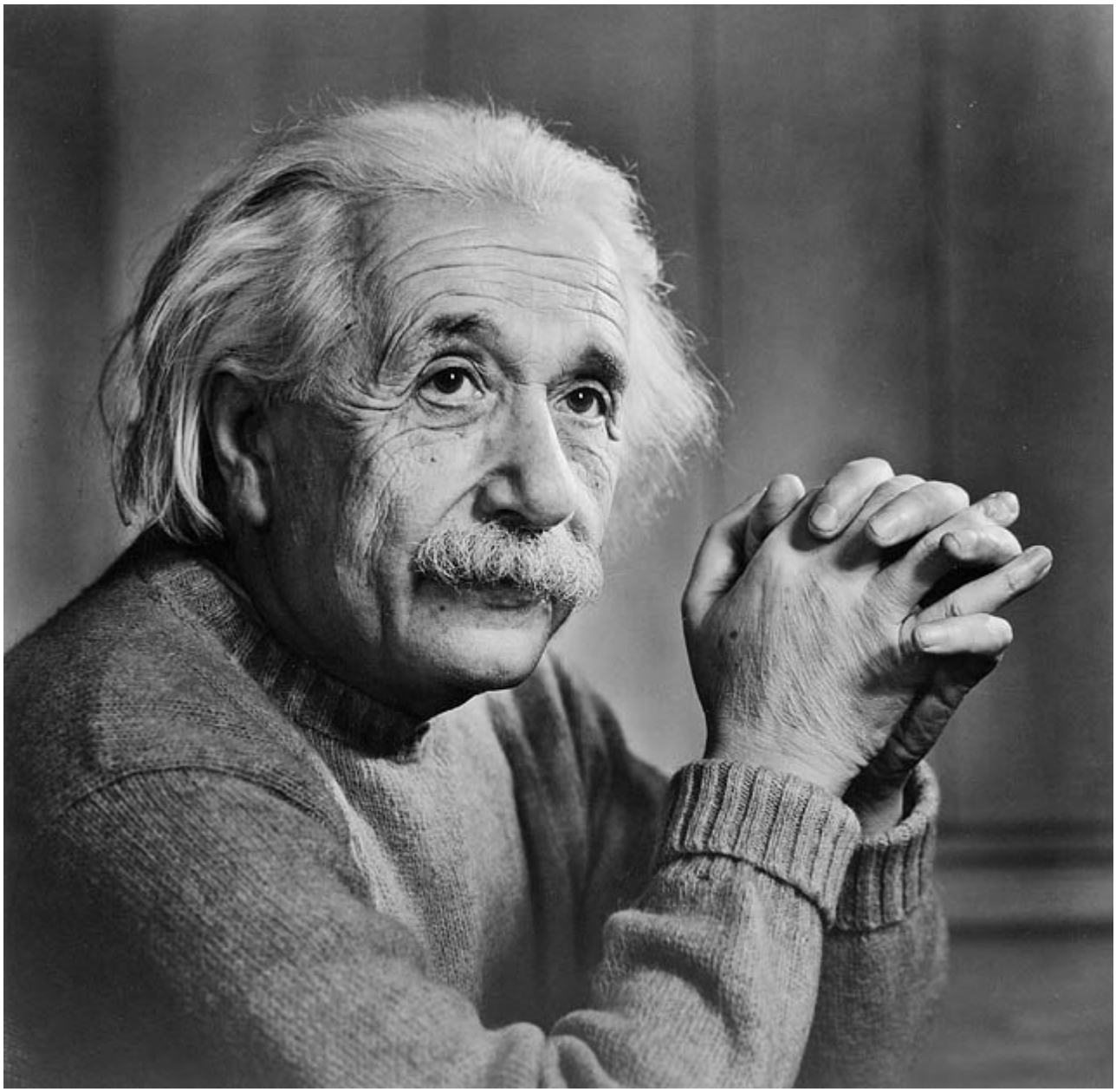
Een van Einsteins grote successen is de algemene relativiteitstheorie, waarmee hij in 1916 in staat was om zwaartekracht vele malen nauwkeuriger te beschrijven dan mogelijk is met Newtons zwaartekrachtstheorie. In 1913 had Einstein samen met de wiskundige Marcel Grossman de fundamenten van deze theorie al uitgewerkt, maar één belangrijke component miste nog: het lukte Einstein en Grossman maar niet om oplossingen te vinden die 'algemeen covariant' zijn. Zonder die algemene covariantie was hun theorie niet in staat om naast vlakke ruimtetijd ook *gekromde* ruimtetijd goed te beschrijven. Aangezien dat laatste een essentieel onderdeel was voor een beschrijving van zwaartekracht, vormde dat gebrek een groot probleem. Het zou nog bijna drie lange, moeizame jaren duren voordat Einstein een oplossing vond.

Algemene covariantie weerspiegelt het idee dat alle coördinatenstelsels die je kunt kiezen gelijkwaardig zijn: voor het beschrijven van de natuur is er niet één beter dan een andere. Met andere woorden: algemeen covariante oplossingen van een zwaartekrachtstheorie zijn geldig, ongeacht in welke ruimtetijdcoördinaten je ze uitdrukt, en een algemene *coördinatentransformatie*, een verandering van coördinaten, zal het bestaansrecht van de oplossing niet aantasten. Dat Einsteins theorie niet voldeed aan het criterium van algemene covariantie, en dus niet in staat was om gekromde ruimtetijd op een fysisch consistente manier te beschrijven, baarde hem veel zorgen.

In plaats van verder te zoeken naar een algemeen covariante theorie, benaderde Einstein in 1913 het probleem van een andere kant. Hij beargumenteerde juist waarom het *onmogelijk* zou zijn om zo'n coördinaat-onafhankelijke theorie te vinden. Hiervoor bedacht hij een gedachte-experiment. Stel je een ruimtetijd voor die gevuld is met materie. In die ruimtetijd zit een 'gat': een stuk waar zich geen enkele materie of andere vorm van energie bevindt. Einstein vroeg zich af: als ik de ruimte om zo'n gat heen volledig kan beschrijven en alle details erover weet, kan ik dan ook het gat zelf op een eenduidige, unieke manier beschrijven? In het bijzonder: kan ik dan ook beschrijven wáár het gat zich bevindt in de ruimtetijd?

Het antwoord was nee. Uit Einsteins berekeningen volgde dat de ruimte buiten het gat door *verschillende* covariante oplossingen op dezelfde manier beschreven wordt, maar dat deze verschillende oplossingen een ándere beschrijving van het gat zelf geven. Volgens deze redenering kan het gat zich dus op verschillende plekken in de ruimtetijd bevinden. Einstein

was van mening dat dit resultaat betekenende dat er meerdere fysische realiteiten bestaan waarin het gat er steeds anders uit ziet maar die verder overal exact hetzelfde zijn – en daarmee verliest een algemeen covariantie theorie zijn deterministische vermogen. Die uitkomst was voor Einstein zo moeilijk te accepteren, dat hij concludeerde dat de oplossingen van zijn zwaartekrachtstheorie, of welke andere fysische theorie dan ook, *niet* algemeen covariant kunnen zijn.



Afbeelding 2. Albert Einstein. Einstein, vele jaren nadat hij het ‘gat-probleem’ had opgelost en de algemene relativiteitstheorie had afgerond.

Met dit ‘gat-argument’ in gedachten werkte Einstein vanaf 1913 verder aan een

zwaartekrachtstheorie die slechts beperkt covariant is: waarvan de oplossingen alleen gelijk blijven onder een beperkte set van transformaties. Dit bleek echter ook geen gemakkelijke opgave. Na verloop van tijd stapelden de problemen zich ook in deze theorie op, totdat Einstein zijn zoektocht na twee jaar staakte. In de wetenschap dat de grote wiskundige David Hilbert zich inmiddels ook had gestort op een algemeen covariante theorie, koos Einstein ervoor om het gat-argument te negeren en hervatte hij zijn eerdere zoektocht naar een algemeen covariante theorie van de zwaartekracht. In november 1915 slaagden zowel hij als Hilbert erin om de theorie in algemeen covariante vorm op te stellen. Dit werd de theorie die we tegenwoordig kennen als de algemene relativiteitstheorie.

Pas een jaar later schreef Einstein een artikel waarin hij rechtvaardigde waarom hij het gat-argument overboord kon gooien. Als je instemt met het idee dat alle oplossingen die je na coördinaattransformaties krijgt dezelfde fysische situatie beschrijven, dan moet je het idee opgeven dat de coördinaten waarmee de positie van het gat beschreven wordt zélf fysisch zijn, beargumenteerde hij. Elke oplossing van Einsteins vergelijkingen brengt via de zogeheten *metriek* met zich mee hoe de lokale coördinaten van het gat geïnterpreteerd moeten worden. Die metriek is een wiskundig object dat aangeeft hoe de coördinaten in relatie tot elkaar staan, en wat fysische eenheden zoals lengte betekenen. Dat maakt het mogelijk is dat oplossingen met verschillende coördinaten tóch hetzelfde fysische gat beschrijven. Zo werd het gebrek aan determinisme van de theorie omgezet naar een wiskundige vrijheid: er is maar één fysische werkelijkheid, die op verschillende wiskundige manieren beschreven kan worden.

Lang werd gedacht dat het gat-argument een tijdelijke fout van Einstein was, een uitstapje in zijn hobbelige zoektocht naar een covariante theorie. In de jaren 80 trok het argument echter opnieuw de aandacht van natuurkundigen en filosofen. Zij onderzochten of het gat-argument een antwoord kan geven op de vraag: is ruimtetijd iets *relatiefs*? Volgens sommigen leidt de aanname dat de ruimtetijdcoördinaten niet fysiek betekenisvol zijn, namelijk tot de conclusie dat ruimtetijd geen fundamentele, absolute entiteit kan zijn: het zijn immers de *relaties* tussen verschillende punten in het coördinatenstelsel die bepalen waar het gat zich bevindt. Of dit de juiste interpretatie is van Einsteins argument is nog steeds een punt van discussie. Hoe dan ook: Einsteins ‘fout’ heeft geleid tot een reeks aan nieuwe interessante discussies, vragen en kennis over de natuur.

Meer lezen over het gat-argument? Veel van de informatie uit dit artikel komt van deze website: https://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/#EinFalHol