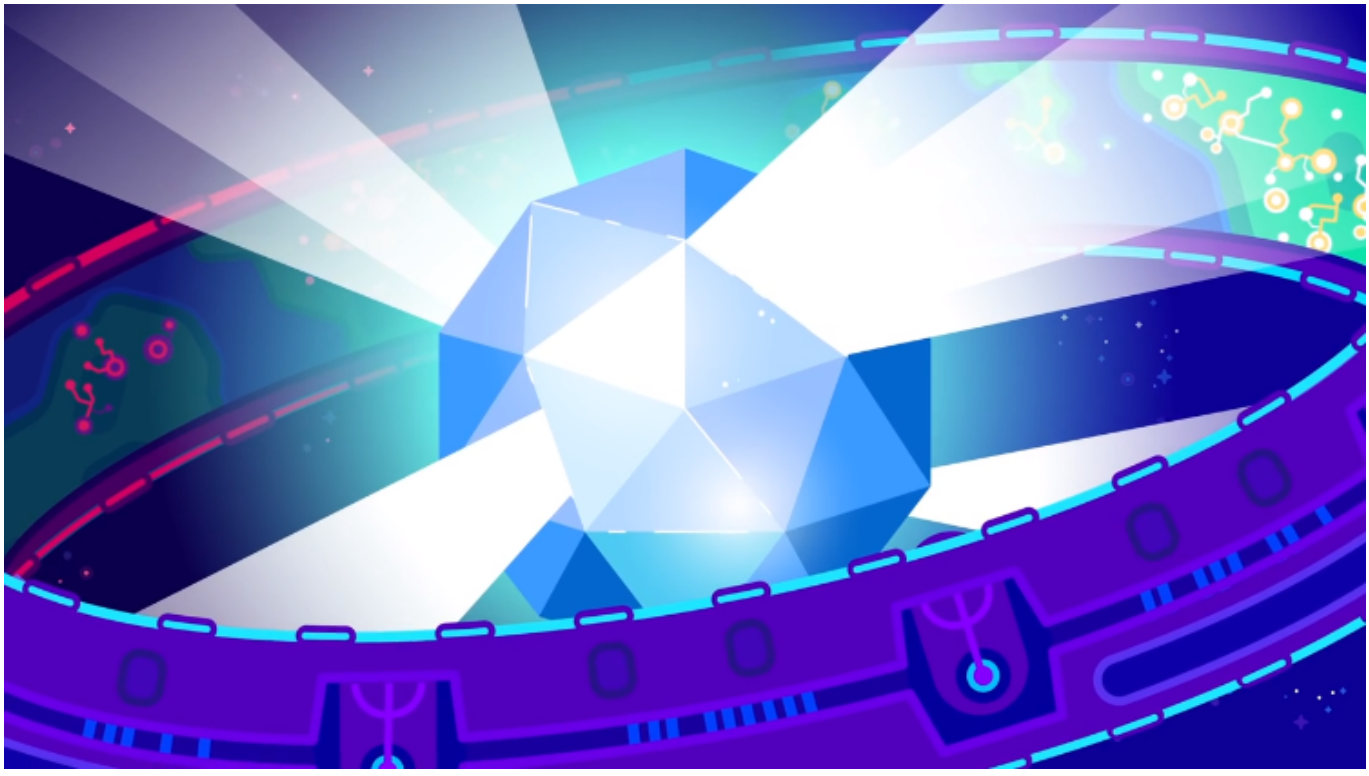
Superradiantie en zwartgatbommen

Onderzoek naar radicale gevolgen van Einsteins algemene relativiteitstheorie spreekt enorm tot de verbeelding. In het bijzonder zijn zwarte gaten een voorspelling die steeds meer verrassingen achter de hand heeft; de een nog fantastischer dan de ander. Dat we dergelijke singulariteiten in de ruimtetijd kunnen onderzoeken is op zich al bijzonder, maar elke wetenschapper weet natuurlijk dat de belangrijkste vraag om te stellen is: hoe laat ik dit ontploffen? Het antwoord luidt: aan de hand van superradiantie. Wat dat is? We leggen het even uit, maar zijn niet verantwoordelijk voor de gevolgen.



Afbeelding 1. Een zwartgatbom.

Een zwartgatbom zit verscholen achter een enorme ronde spiegel die resonante superradiantie in de hand

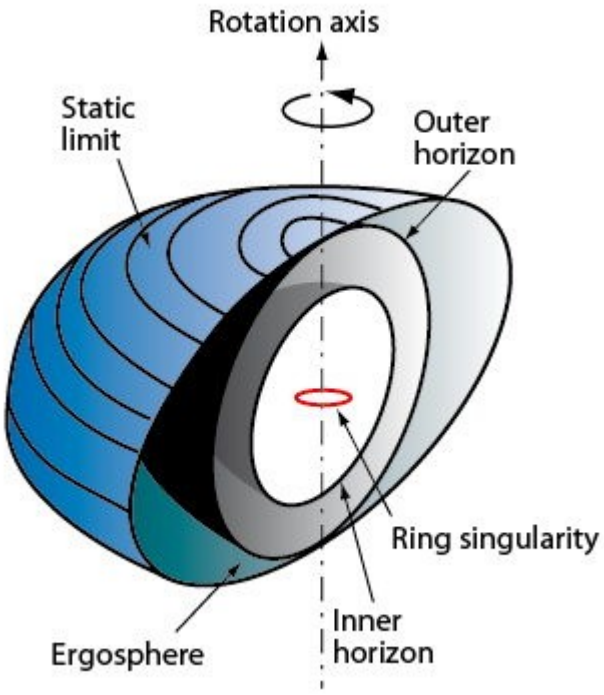
werkt. Afbeelding: Kurzgesagt.

De natuurkunde kent verschillende soorten straling: denk bijvoorbeeld aan alfastraling uit onstabiele atoomkernen, of zwaartekrachtstraling van samensmeltende zwarte gaten. Het meest voor de hand liggende type straling is de elektromagnetische, waaronder ook zichtbaar licht valt. Ongeacht het type, wordt de term “radiantie” gebruikt voor de intensiteit van de straling die een meetapparaat gericht op de bron kan waarnemen. Radiantie is een goede maat voor bijvoorbeeld de helderheid van een kaars voor je oog, of de zichtbaarheid van een sterrenstelsel voor een telescoop.

Superradiantie, vervolgens, geeft een fenomeen aan waarbij de helderheid van een object versterkt wordt: de stralingsintensiteit wordt vergroot door een (vaak niet zo vanzelfsprekend) fysisch effect. Er zijn verschillende processen waarbij sprake kan zijn van superradiantie. Een grote hoeveelheid gasdeeltjes kan bijvoorbeeld op een zogenaamd “coherente” manier wisselwerken met inkomende straling, zodat het gas de straling omzet in een krachtige puls die lijkt op die van een gepulste laser. Naast dit quantum-optische verschijnsel, is een ander voorbeeld het spectaculaire Unruh-effect, dat aan bod kwam in het QU-dossier over zwarte gaten. Een versnellende waarnemer ziet thermische straling, waar een waarnemer in rust alleen het vacuüm registreert. Hier wordt de helderheid van een object dus niet zomaar versterkt, maar ontstaat die schijnbaar uit het niets! In beide voorbeelden is er meer straling dan op het eerste gezicht verwacht werd, en spreekt men daarom van superradiantie.

Het type superradiantie waar we het in dit artikel over willen hebben, heeft alles te maken met een van onze favoriete onderwerpen: zwarte gaten. En niet *zomaar* zwarte gaten, maar die van het Kerr-type (zie afbeelding 2), oftewel: ronddraaiende zwarte gaten. Hoe paradoxaal het voor een “gat” ook mag klinken, een zwart gat kan wel degelijk rond zijn as draaien, en doet dat soms honderdduizenden keren per seconde. Vergelijk dat met de zon: slechts één omwenteling in de 27 dagen! Als het om zwarte gaten gaat, schieten superlatieven ons duidelijk steeds te kort. In zo’n massieve zwarte tol zit natuurlijk ook enorm veel energie verscholen – energie die we in principe kunnen gebruiken om een bom van kosmische proporties te maken. Niet dat de Quantum Universe-redactie nu direct op het oorlogspad wil, en in de praktijk zal het maken van een dergelijke bom de eerstkomende millennia ook nog wel niet mogelijk zijn, maar het is wél interessant om over de

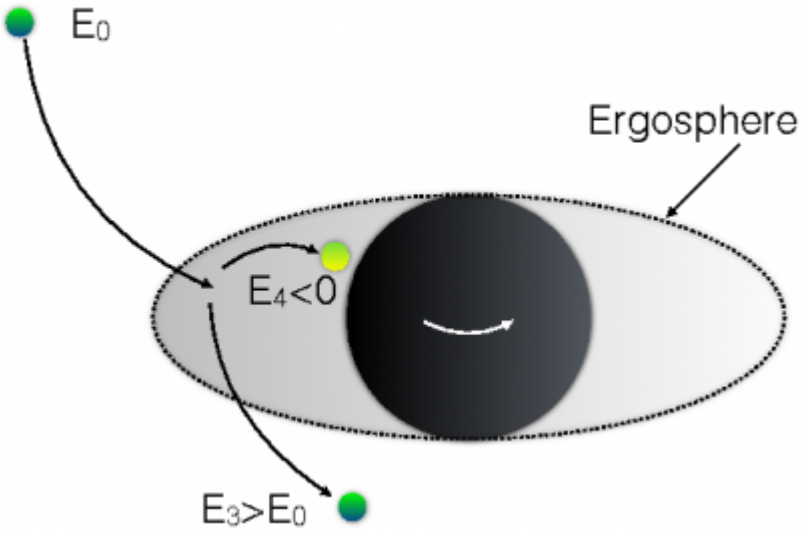
onderliggende natuurkunde na te denken. Dus stel: we willen een kwaadaardige buitenaardse civilisatie vernietigen. Hoe pakken we dat aan?



Afbeelding 2. Een roterend zwart gat.Een zwart gat van het Kerr-type draait rond zijn as, en de omliggende ruimtetijd is om die reden wel wat complexer dan die van zijn stilstaande tegenhanger van het Schwarzschild-type. Belangrijk voor het oogsten van energie, is de ergosfeer. Deze bevindt zich tussen de statische limiet (het laatste punt waar objecten niét worden gedwongen mee te draaien) en de buitenste waarnemingshorizon (waarlangs terugkeer onmogelijk is). Afbeelding: e-Luminesciences.

Om een bom te maken, moeten ergens energie uit vrijkomen, en willen we zo veel mogelijk energie in zo kort mogelijke tijd winnen. Ten eerste is de vraag dus: hoe krijgt men energiewinst uit zwarte gaten? Allesbepalend is een bijzondere regio die een Kerr-type zwart gat omringt: de “ergosfeer”. Veel eigenschappen van dit gebied klinken als sciencefiction, maar de minst begrijpelijke is misschien wel dat de tijdsdimensie en een ruimtedimensie (een hoekcoördinaat, om precies te zijn) binnen deze grens van betekenis wisselen. In deze zone dwingen de wetten van Einsteins algemene relativiteitstheorie ieder deeltje daardoor om mee te draaien in de richting van het zwart gat: het is fysisch *onmogelijk* om te blijven stilstaan. Nog een gevolg daarvan is dat het mogelijk is voor een object om negatieve massa-energie te hebben, wat het intrigerende “Penrose-effect” veroorzaakt.

Het Penrose-effect, een jaar geleden hier beschreven door Watse Sybesma, is een eerste manier om energie te winnen uit een zwart gat (zie afbeelding 3). In essentie wordt tijdens het Penrose-proces een blok materie in de ergosfeer gegooid, om er na een tijd met minder massa maar méér bewegingsenergie uit te komen. Dit effect is daarom de *massieve* tegenhanger van superradiantie, en eveneens een fantastische theorie, maar niet erg zinvol om de boel mee op te blazen. Voor een bom willen we dat de gewonnen energie zich snel verspreidt, en niets gaat sneller dan elektromagnetische straling. Gelukkig kan ook straling in de ergosfeer versterkt worden, aan de hand van de gravitationele tegenhanger van het zogenaamde Zel'dovich-Misner-effect.



Afbeelding 3. Het Penrose-proces.Dit is een schematische weergave van het Penrose-proces. Binnenin de ergosfeer staat een object (donkergroen) een deel van zijn massa (lichtgroen) af. De afgestane massa heeft in dat domein een negatieve massa-energie. De energie die het object overhoudt is daarom groter dan de oorspronkelijke energie. Zie ook dit artikel. Afbeelding: Maximal efficiency of the collisional Penrose process, E. Leiderschneider en T. Piran.

Zonder al te veel in detail te treden, houdt dit effect in dat een roterend zwart gat energie kan overbrengen ("dissiperen") op elektromagnetische straling die de ergosfeer betreedt, zelfs zonder daarbij massa op te offeren aan het zwart gat, zoals wel het geval is bij het Penrose-proces. De voorwaarde daarvoor is dat de frequentie van de straling kleiner is dan de rotatiefrequentie van het draaiende zwarte gat. Aan deze "superradiante conditie" wordt voor een zwart gat dat honderdduizend keer per seconde om zijn as draait, dus voldaan voor golven in het laagfrequente radiospectrum. Als zulke golven de ergosfeer kunnen worden

ingestuurd op zo'n manier dat ze aan de gulzige greep van de binnenste, waarnemingshorizon kunnen ontsnappen, worden ze opnieuw de ruimte in gelanceerd met een grotere amplitude en dus grotere energie. De energie die de golven gewonnen hebben, komt uit de rotationele energie van het zwarte gat, dat nu dus nét iets trager rond zijn as draait!

De volgende stap is snel gemaakt: wat nu, als aan de ontsnapte golf niet wordt toegestaan weer de veilige interstellaire ruimte op te zoeken? Wat als die versterkte golf *meteen* terug de ergosfeer kan worden ingejaagd, en zo steeds meer van de rotatie van het zwart gat consumeert? Vergelijkbaar met de exponentiële versterking in de nucleaire reactie van een kernbom, zou dit algauw leiden tot een opstapeling van een enorme energie. Een energie die na een tijd niet meer houdbaar is en met de explosieve kracht van een supernova het universum in wordt gejaagd. Een futuristische samenleving die in staat is een bolvormige spiegel rond een zwart gat te bouwen (zoals in afbeelding 1), zou op die manier een bom kunnen bouwen waarvan huidige dictatoren en criminelen gelukkig alleen maar kunnen dromen.

Afbeelding 4. Een waterstofbom.Het resultaat van het krachtigste massavernietigingswapen dat de aarde

“rijk” is, is de waterstofbom. Een zwartgatbom zou wel 10^{27} keer krachtiger kunnen zijn. Afbeelding: Three Lions (Getty Images) via CNCB.

Hoewel het natuurlijk erg vermakelijk is om na te denken over manieren waarop aliens elkaar het leven zuur kunnen maken, heeft dit staaltje theorie ook wetenschappelijke toepassingen. Ten eerste zou een zwartgatbom die precies onder controle gehouden wordt – vergelijkbaar met een kernsplitsingreactor – een bron van bruikbare energie kunnen zijn voor samenlevingen die moeten overleven in een verre toekomst waar alle sterren zijn uitgedoofd.

Relevanter voor de hedendaagse wetenschap zijn echter de toepassingen op de zoektocht naar natuurkunde voorbij het standaardmodel. Een superradiante instabiliteit zou, zo blijkt namelijk, algauw een zwart gat afremmen en doen “ontploffen” – als er ten minste een exotisch bosonveld bestaat met een ultralicht massief deeltje. Zulke hypothetische deeltjes spelen een belangrijke rol in de zoektocht naar donkere energie, maar of ze ook echt bestaan is nog niet bekend. Observeren astronomen geen bommen, en wél een groot aantal snel draaiende zwarte gaten, dan kunnen dergelijke velden als oplossing voor het probleem van het donker universum worden uitgesloten. Verwonderlijk hoe alle onderdelen van elementair onderzoek aan elkaar kunnen worden gelinkt!

Het is bijzonder leuk om als fundamenteel wetenschapper te mogen piekeren over de meest extreme mogelijkheden die het universum ons aanreikt. Energie stelen van de zwarte monsters van de kosmos is zeker een van die denkpistes. Nu nog hopen dat de dictator van de galactische confederatie hier niet al te gauw achter komt.

Voor een erg leuk geanimeerd filmpje over zwartgatbommen verwijzen we naar Kurzgesagt via deze link.