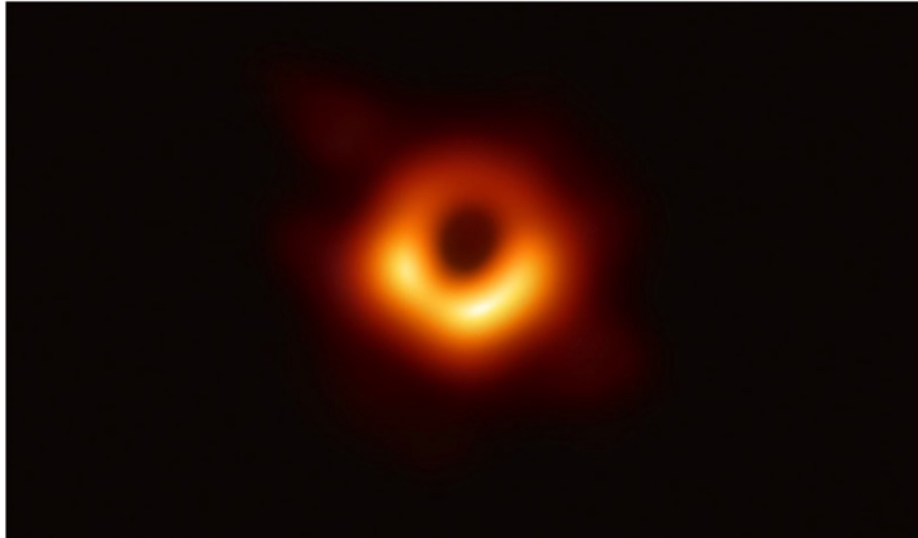


Afbeelding van een zwart gat

Een les over hemelmechanica en optische eigenschappen van een telescoop



Samenvatting

In deze les ga je een model maken over de manier waarop de afbeelding van het zwarte gat in het midden van ons sterrenstelsel, gemaakt door de Event Horizon Telescoop, tot stand is gekomen.

Vakinhoudelijke leerdoelen:

- Je kan uitleggen welke processen invloed hebben op de zichtbaarheid van de schaduw en de ring in het telescoopbeeld van het zwarte gat;
- Je kan uitleggen hoe de eigenschappen van de accretieschijf en de spin van het zwarte gat invloed hebben op de vervorming van de ring in het telescoopbeeld;
- Je kan uitleggen welke eigenschappen van de telescoop het oplossend vermogen bepalen en hoe dat de zichtbaarheid van het zwarte gat beïnvloed.

Leerdoelen systeendenken:

- Je kan systeemgedrag beschrijven aan de hand van lineaire causale ketens;
- Je kan analyseren hoe meerdere factoren tegelijkertijd invloed uitoefenen op veranderingen binnen een systeem, en kan deze factoren expliciet onderscheiden;
- Je kan oorzaken van ambiguïteit in een systeem identificeren.

Voornaam:

Achternaam:

Klas:

Datum:

Opmerkingen door docent:

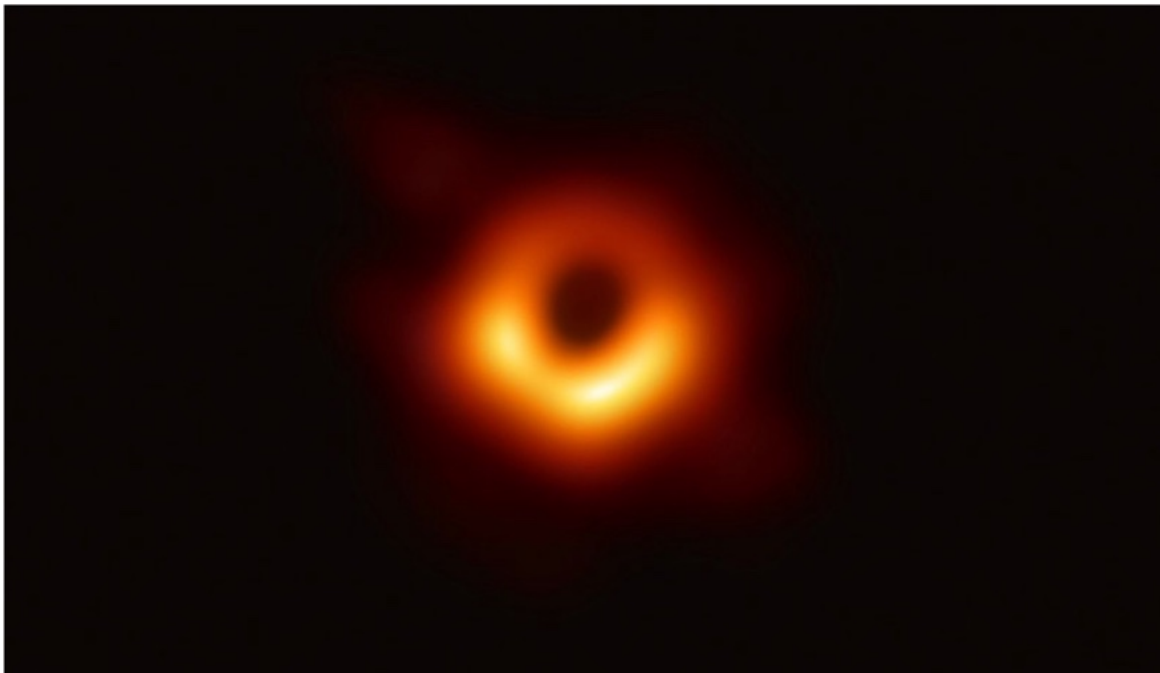
1. Introductie

In mei 2022 maakte de Event Horizon Telescoop (EHT) het eerste beeld van het zwarte gat in het centrum van ons sterrenstelsel, de Melkweg. Dit zwarte gat heet Sagittarius A*. Het zwarte gat heeft deze naam gekregen omdat het zich bevindt op het deel van de hemel waar het sterrenbeeld Boogschutter staat.

Een **zwart gat** is een extreem dicht object met zo'n sterke zwaartekracht dat er niets uit kan ontsnappen zodra het te dichtbij komt, zelfs licht niet. Sommige zwarte gaten ontstaan wanneer zeer massieve sterren het einde van hun levensduur bereiken en onder hun eigen zwaartekracht instorten. Omdat er zoveel massa in zo'n kleine ruimte wordt geperst, wordt de zwaartekracht ontzettend groot. Zwarte gaten die op deze manier ontstaan, hebben een massa van ongeveer 10-100 keer de massa van onze Zon. Dit soort "kleine" zwarte gaten komen voor in het gehele Melkwegstelsel.

Sommige zwarte gaten zijn veel massiever en bereiken miljoenen tot miljarden keer de massa van onze zon. Deze superzwarte zwarte gaten bevinden zich enkel in de centra van sterrenstelsels. Sagittarius A* is een van deze superzwarte zwarte gaten en bevindt zich in het midden van ons Melkwegstelsel. Sagittarius A* heeft een massa die ongeveer vier miljoen keer zo groot is als de massa van de zon. Het is niet precies bekend hoe deze zware zwarte gaten ontstaan, maar men denkt dat ze samen groeien met het omliggende sterrenstelsel.

Hoewel we een zwart gat niet direct kunnen zien (omdat het geen licht uitzendt), kunnen we wel zien wat er eromheen gebeurt. Heet, gloeiend gas nabij het zwarte gat geeft ons belangrijke aanwijzingen. In de afbeelding van Sagittarius A*, gemaakt door de Event Horizon Telescoop (Figuur 1) is er een donker gebied in het midden, de schaduw genoemd, omgeven door een heldere lichtring. Dit licht komt niet van het zwarte gat zelf, maar van net buiten het zwarte gat. De ringvorm ontstaat doordat licht van het gloeiende gas en stof, dat rond het zwarte gat wervelt, door de enorme zwaartekracht van het zwarte gat wordt afgebogen.



Figuur 1- Afbeelding van het zwarte gat in het centrum van ons sterrenstelsel, gemaakt door de Event Horizon Telescope. Beeldcredits: EHT.

2. DynaLearn starten

Er zijn meerdere manieren om in te loggen. Gebruik één van de twee onderstaande opties. Controleer daarna of het inloggen is gelukt (zie 'even controleren').


Via een code:


1. **Ga** naar DynaLearn (<https://create.dynalearn.nl/>).
2. **Klik** op 'inloggen met code', links onderin.
3. **Vul** de projectcode en je (school)email adres in.
4. **Kopieer** de code uit de bevestigingsmail van de afzender *dynalearn.nl* (zie eventueel het spam folder) en **vul** de overige gegevens in.
5. **Log in** op DynaLearn.

Via een e-mail uitnodiging:

1. **Kopieer** de inloggegevens uit de uitnodigingsmail van de afzender *dynalearn.nl*.
2. **Ga** naar DynaLearn (<https://create.dynalearn.nl/>).
3. **Log in** op DynaLearn.

Even controleren!

Na inloggen kom je automatisch in de witte werkruimte van de opdracht. Je herkent het aan het grijze vraagteken aan de rechterkant in het scherm . Ontbreekt het vraagteken? Doe dan eerst:

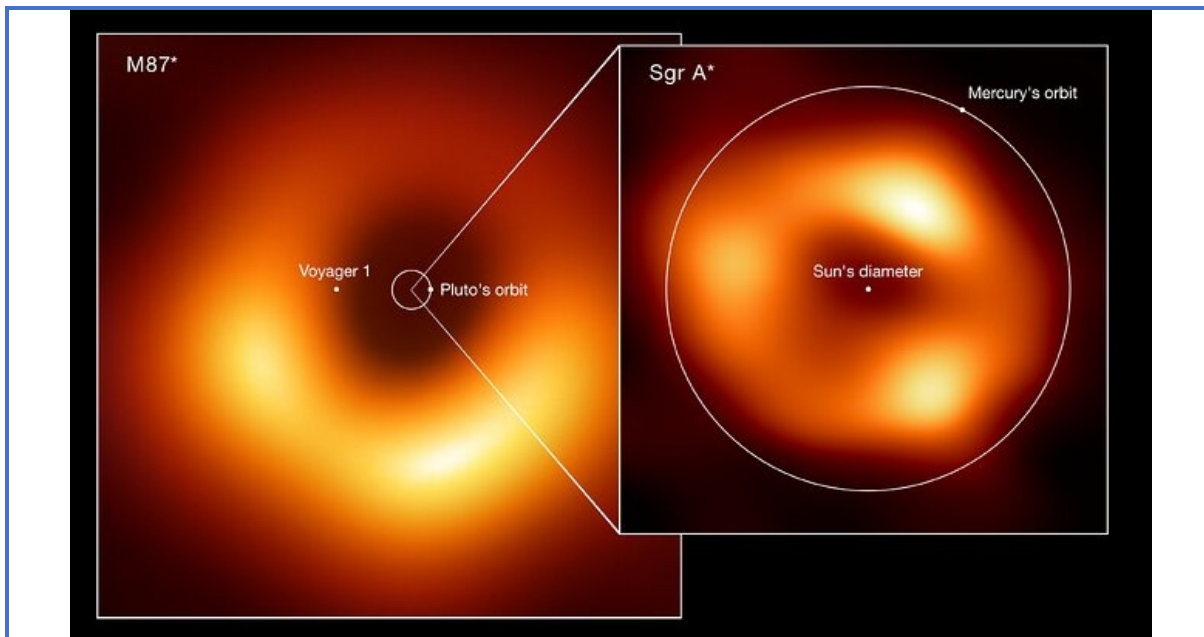
- **Klik** in DynaLearn op . **Klik** op 'Kies richtmodel'.
- **Kies** 'Afbeelding van een zwart gat' en **druk** op 'Laden'.

Model opslaan en beginnen:

1. **Klik** op  linksboven. Verander de modelnaam in 'Afbeelding van een zwart gat' en **klik** op 'Opslaan'.
2. Hoe ga je verder aan de slag? **Volg** gewoon de stappen in dit werkboek. Let op! Je kan geen stappen overslaan. Vraag om hulp als je er bij een bepaalde stap niet uitkomt. De video-functie  in DynaLearn laat zien hoe modelonderdelen gemaakt kunnen worden. Er zijn voor het maken van een aantal modelonderdelen ook hulpbronnen in de bijlage van de lesbrief. In de **kaders** staat een korte uitleg van de modelonderdelen. Zet een vinkje ✓ door het nummer van een stap die je hebt uitgevoerd. Zo hou je bij waar je bent gebleven.

3. Eigenschappen van een zwart gat

1. Lees Bron 1.



Figuur 2 – Groottevergelijking van de twee zwarte gaten die door de Event Horizon Telescope zijn afgebeeld.
Beeldcredits: EHT.

Bron 1. Wat bepaald hoe we een zwart gat zien?

De zichtbaarheid van de schaduw van een zwart gat in een afbeelding hangt af van verschillende factoren. Voor zwarte gaten in het centrum van sterrenstelsels geldt dat hoe groter de massa van het sterrenstelsel is, hoe meer gas en stof het zwarte gat kan "voeden". Dit betekent dat het zwarte gat kan groeien en in de loop van de tijd massiever kan worden. Een zwart gat met een grotere massa zal ook een grotere diameter hebben. Wanneer een zwart gat een grotere diameter heeft, is de schaduw ervan gemakkelijker zichtbaar te maken in telescoopbeelden.



Naast de diameter van het zwarte gat speelt ook de afstand tussen het zwarte gat en de telescoop een belangrijke rol. Zelfs een groot zwart gat wordt moeilijk te observeren als het heel ver van ons verwijderd is. Hoe groter de afstand tot het zwarte gat, hoe moeilijker het is het zwarte gat en zijn schaduw vast te leggen. Voor de twee zwarte gaten die tot nu toe zijn afgebeeld, is de grootte waarop we ze aan de hemel zien gelijk aan hoe we een appel op de maan zouden zien, gezien vanaf de aarde. Figuur 2 vergelijkt de groottes van de twee zwarte gaten die zijn gefotografeerd door de Event Horizon Telescoop: Sagittarius A* in onze Melkweg en de veel grotere M87*. Hoewel M87* meer dan duizend keer zwaarder is dan Boogschutter A*, ligt hij ook veel verder weg. Hierdoor lijken beide zwarte gaten ongeveer even groot aan de hemel.

2. Lees Kader 1.





Kader 1. Entiteit en grootheid





Een entiteit is meestal een fysiek ding in een systeem (bijv. auto, mens).

Een grootheid is een meetbare eigenschap van een entiteit (bijv. temperatuur, lengte).

3. **Maak** de entiteiten *Sterrenstelsel* en *Zwart Gat* (zie  → ).
4. **Lees** Kader 2.



Kader 2. Hulpfunctie




Als het vraagteken  of een ingrediënt in je model  rood is, dan is er iets niet in orde. Klik op het vraagteken  voor een hint. Klik vervolgens op een nummer, bijvoorbeeld  om te zien waar de fout in je model zit. Gebruik het vraagteken alleen als je er zelf niet uitkomt!

5. **Maak** de configuratie (zie  → ) *in het centrum van* tussen de entiteiten *Zwart Gat* en *Sterrenstelsel*.
6. **Maak** de grootheid *Massa* van de entiteit *Sterrenstelsel* (zie  → .
7. **Maak** de grootheid *Massa* van de entiteit *Zwart Gat*.
8. **Lees** Kader 3.






Kader 3. Een oorzaak-gevolg verband





In DynaLearn zijn er twee typen verbanden:

- Positief verband : de grootheden veranderen dezelfde kant op (als grootheid 1 toeneemt, dan neemt grootheid 2 ook toe)
- Negatief verband : de grootheden veranderen tegengesteld (als grootheid 1 toeneemt, dan neemt grootheid 2 af. Of andersom: als grootheid 1 afneemt, dan neemt grootheid 2 toe)

9. **Maak** een verband ( of ) tussen de grootheden *Massa* van de entiteit *Sterrenstelsel* en *Massa* van de entiteit *Zwart gat* (zie  → .
10. **Lees** Kader 4.

Kader 4. Verandering van een grootheid.



Een grootheid  kan veranderen. Dit wordt aangegeven met . Het delta symbool (δ) is het wiskundige teken voor verandering (ook wel de afgeleide). Het pijltje omlaag () is een afname, de nul () is constant en de het pijltje omhoog () is een toename.

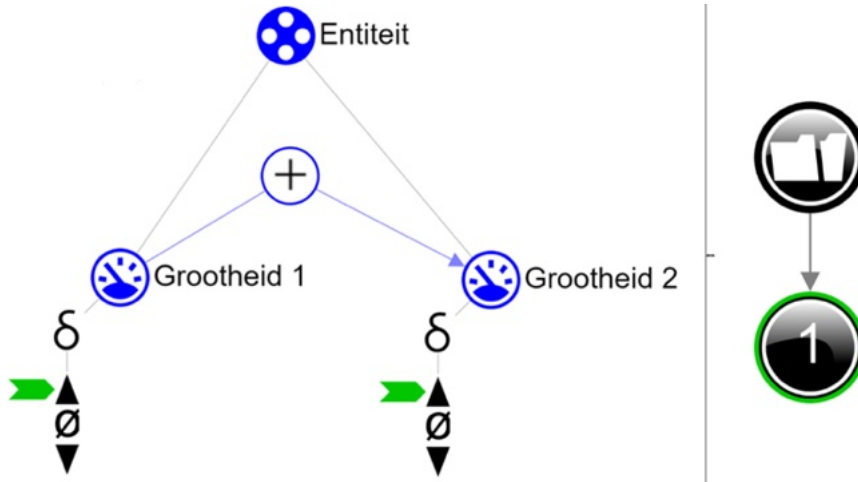
11. We gaan kijken naar de invloed van de massa van het sterrenstelsel op de massa van het zwarte gat. **Stel in** als beginverandering (zie  → ) dat we kijken naar sterrenstelsels met grotere massa's. **Klik** bij *Massa* van de entiteit *Sterrenstelsel* op  en **selecteer** . Het ziet er dan als volgt uit:





12. Lees Kader 5.

Kader 5. De uitkomst van een simulatie aflezen.

Na het starten van een simulatie (met ) verschijnt aan de rechterkant een venster waarin de mogelijke toestanden van het systeem worden aangegeven. Er is in dit voorbeeld één mogelijke toestand .






Je kunt de toestand aanklikken om de uitkomst van de simulatie te bekijken. De toestand krijgt dan een groene rand. In het model worden de verandering voor deze toestand aangegeven met een groene pijl . In het model valt af te lezen dat in toestand  *Grootheid 1* toeneemt en dat daardoor *Grootheid 2* ook toeneemt.

13. Start de simulatie . Streep de verkeerde antwoorden door in de zinnen hieronder.

De relatie tussen de massa van het sterrenstelsel en de massa van het zwarte gat is *negatief/positief*. Als we kijken naar sterrenstelsels met toenemende massa's, zal de massa van de bijbehorende zwarte gaten *afnemen/gelijk blijven/toenemen*.

14. Lees Kader 6.

Kader 6. Hulpfunctie

Als het uitroepteken  verschijnt dan is er iets niet in orde tijdens de simulatie. Klik op het vraagteken  voor een hint. Klik vervolgens op een nummer, bijvoorbeeld  om te zien waar de fout in je simulatie zit.

15. Maak de twee entiteiten *Afbeelding* en *Schaduw*.16. Maak de configuratie *bevat* tussen *Afbeelding* en *Schaduw*, en de configuratie *van een* tussen *Afbeelding* en *Zwart gat*.17. Voeg de grootheden *Diameter*, *Afstand* en *Zichtbaarheid* toe aan de juiste entiteit.

18. **Maak** twee verbanden tussen de nieuw gemaakte grootheden onderling en één met een al eerder gemaakte grootheid in het model.
- Let op de juiste richting (van welke grootheid naar welke andere grootheid?)
 - Is het een negatief \ominus of een positief \oplus verband?
19. Is je scherminhoud een beetje rommelig? **Klik** op  om alles netjes uit te lijnen. **Klik** op  om je model passend te maken op je scherm. **Gebruik** deze knoppen regelmatig.
20. **Stel** in als beginverandering:
- Massa van Sterrenstelsel* neemt toe;
 - Afstand van Zwart gat* neemt toe.
21. **Start** de simulatie . Er ontstaan nu drie toestanden. We noemen dit **ambigüiteit**. **Bekijk** de verschillende toestanden en **streep** de verkeerde antwoorden **door** in de zinnen hieronder.

Toestand 1:

De zichtbaarheid van de schaduw in de afbeelding van het zwarte gat *neemt af/blijft hetzelfde/neemt toe*. Dit komt doordat de invloed van de toenemende diameter van het zwarte gat *kleiner is dan/even groot is als/groter is dan* de invloed van de toenemende afstand van het zwarte gat tot de waarnemer.

Toestand 2:

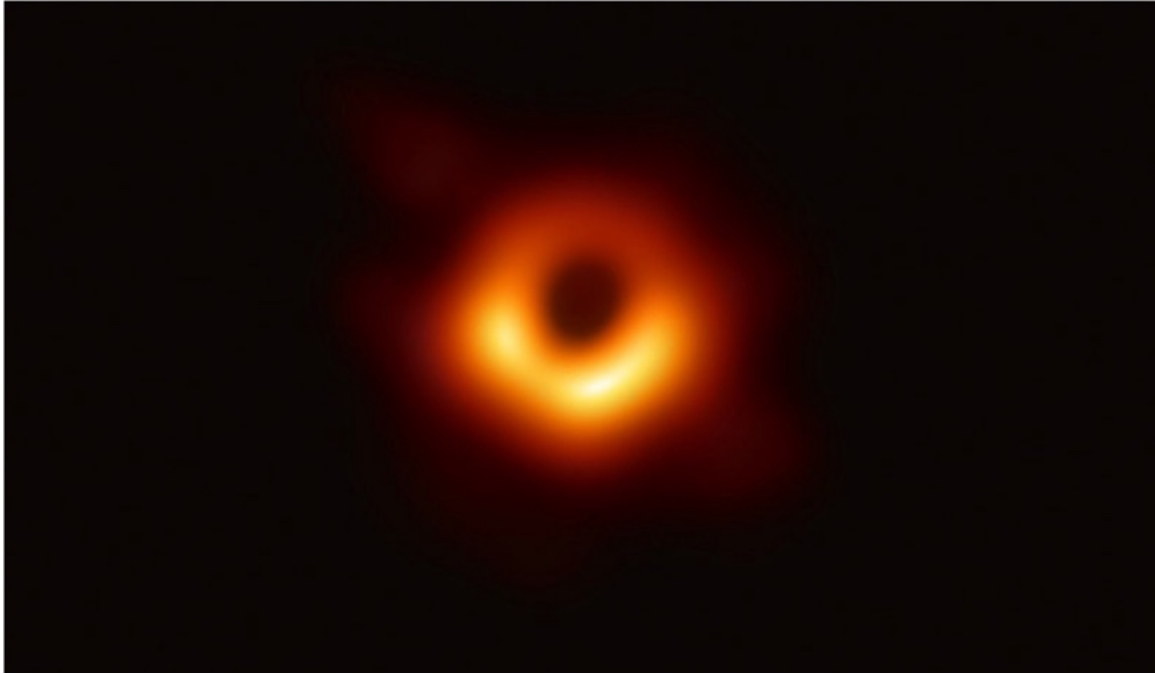
De zichtbaarheid van de schaduw in de afbeelding van het zwarte gat *neemt af/blijft hetzelfde/neemt toe*. Dit komt doordat de invloed van de toenemende diameter van het zwarte gat *kleiner is dan/even groot is als/groter is dan* de invloed van de toenemende afstand van het zwarte gat tot de waarnemer.

Toestand 3:

De zichtbaarheid van de schaduw in de afbeelding van het zwarte gat *neemt af/blijft hetzelfde/neemt toe*. Dit komt doordat de invloed van de toenemende diameter van het zwarte gat *kleiner is dan/even groot is als/groter is dan* de invloed van de toenemende afstand van het zwarte gat tot de waarnemer.

4. Meer eigenschappen van het zwarte gat

1. Lees Bron 2.





*Figuur 3 – De helderheid van de accretieschijf in de afbeelding van het zwarte gat is niet homogeen.
Beeldcredits: EHT.*

Bron 2. Wat beïnvloed hoe we de ring van een zwart gat zien?

Rond een zwart gat bevindt zich een draaiende schijf van gas, stof en andere kleine deeltjes. We noemen dit de **accretieschijf**. Deze materialen hebben een grote snelheid en worden warm, waardoor ze gaan gloeien. Op afbeeldingen van een zwart gat zien we een heldere **ring** om de schaduw heen (Figuur 3). Deze ring in de afbeelding wordt veroorzaakt door het licht dat wordt uitgezonden door heet materiaal in de accretieschijf. Een deel van het licht, afkomstig van het gloeiende materiaal uit de accretieschijf, kan nog net ontsnappen aan de hoge zwaartekracht van het zwarte gat en bereikt de aarde. De ring in de afbeelding geeft een beeld van het materiaal in de accretieschijf vlak voor het in het zwarte gat valt.

De **accretiesnelheid** geeft aan hoeveel materiaal het zwarte gat per seconde aantrekt. Bij een hogere accretiesnelheid ontstaat er meer wrijving tussen het materiaal in de accretieschijf waardoor deze meer gaat gloeien. Daardoor neemt de **helderheid** van de ring in de afbeelding toe.

Als we gedetailleerder naar de afbeelding van het zwarte gat kijken, zien we dat de ring niet overal dezelfde helderheid heeft. Er is vaak duidelijk een heldere en minder heldere kant in de ring te zien. Dit komt doordat de accretieschijf rond het zwarte gat draait. Materiaal dat naar ons toe beweegt lijkt helderder, terwijl materiaal dat van ons af beweegt zwakker lijkt. De **spin** van het zwarte gat, hoe snel het zwarte gat om zijn as draait, beïnvloedt hoe het licht in de ring voor de waarnemer eruitziet (**vervorming**). Hoe meer de vervorming toeneemt, hoe minder homogeen de ring zichtbaar is, wat zorgt voor een meer 'bobbelige' ring.

2. **Maak** twee nieuwe entiteiten: *Accretieschijf* en *Ring*.
3. **Maak** twee configuraties (namelijk *om* en *bevat*) tussen de nieuw gemaakte entiteiten en twee andere entiteiten in het model.
4. **Voeg** vier nieuwe grootheden toe aan het model. **Gebruik** Bron 2 voor hulp.
5. **Maak** drie verbanden tussen de nieuwe grootheden en een andere grootheid in het model.
6. Is je schermhoud een beetje rommelig? **Klik** op  om alles netjes uit te lijnen.
7. **Stel** de volgende beginverandering in:
 - *Massa* van het *Sterrenstelsel* blijft constant;
 - *Afstand* blijft constant;
 - *Accretiesnelheid* neemt af;
 - *Spin* neemt af.
8. **Start** de simulatie  en bekijk het simulatieresultaat. **Maak** de onderstaande tabel correct (**streep** de verkeerde antwoorden **door**). **Geef** ook een korte uitleg van het ontstaan van iedere toestand.

| Simulatie-uitkomst | Helderheid van de ring | Geef je uitleg |
|--------------------|---|----------------|
| Toestand 1 | <i>neemt af/blijft constant/neemt toe</i> | |
| Toestand 2 | <i>neemt af/blijft constant/neemt toe</i> | |
| Toestand 3 | <i>neemt af/blijft constant/neemt toe</i> | |

5. Eigenschappen van de telescoop

1. Lees Bron 3.



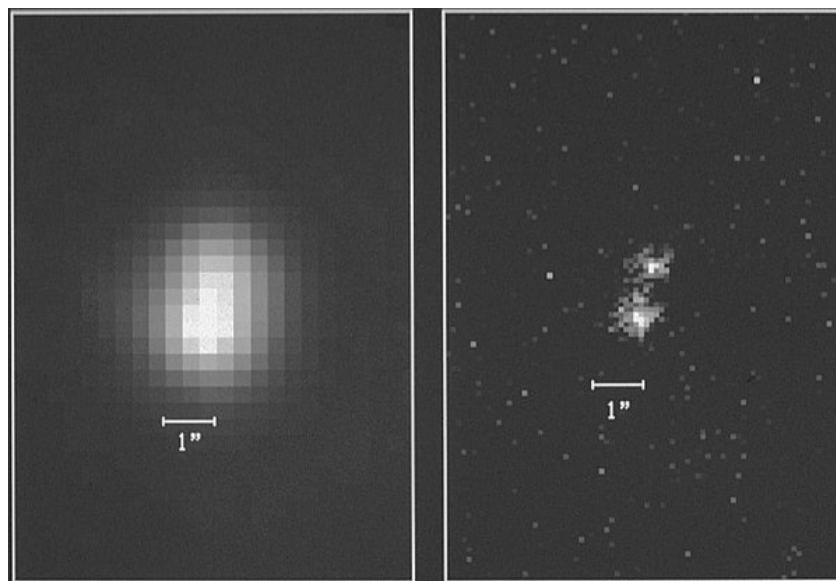
Figuur 4 – Links: Een radiotelescoop. Rechts: Het netwerk van telescopen van de Event Horizon Telescoop.
Beeldcredits: EHT.

Bron 3. De Event Horizon Telescoop

De Event Horizon Telescoop (EHT) is een speciaal type telescoop dat het universum observeert met behulp van radiogolven, een vorm van licht met veel langere golflengten dan zichtbaar licht. De golflengte bepaalt de eigenschappen van de golf en hoe deze met materie interacteert. Deze lange golflengten zijn nuttig omdat ze door gas en stof kunnen gaan die ‘gewoon’ licht blokkeren, waardoor we de gebieden rond zwarte gaten zichtbaar kunnen maken.

De EHT is niet één enkele telescoop, maar een wereldwijd netwerk van radiotelescopen die samenwerken alsof ze één enorme telescoop ter grootte van de aarde zijn (Figuur 4). Door hun signalen te combineren kan de EHT extreem scherpe beelden vastleggen—scherp genoeg om zwarte gaten zichtbaar te maken.

2. Lees Bron 4.



Figuur 5 – Twee beelden van hetzelfde deel van de hemel, waarbij het beeld rechts is genomen met een telescoop met een hoger oplossend vermogen. Beeldcredit: ESA.

Bron 4. Eigenschappen van een telescoop

Wanneer we een afbeelding van de ruimte maken, staan op de afbeelding regelmatig twee objecten zeer dicht bij elkaar. We kunnen ze alleen als twee objecten identificeren als de beelden in de afbeelding elkaar niet overlappen.

Het vermogen van een telescoop om twee objecten die dicht bij elkaar liggen te scheiden, wordt het **oplossend vermogen** genoemd.

Een telescoop met een groter oplossend vermogen kan kleinere details zichtbaar maken. Wanneer het oplossend vermogen van een telescoop hoger is, kunnen twee objecten die dicht naast elkaar liggen beter van elkaar worden onderscheiden (Figuur 5). Ook kan de exacte grootte en omvang van de schaduw van het zwarte gat beter in het beeld worden gebracht.

Wanneer een telescoop een grotere **diameter** heeft, valt er meer licht in, waardoor objecten duidelijker van elkaar kunnen worden onderscheiden. Door de hogere lichtinval is het ook mogelijk om zwakkere objecten zichtbaar te maken. Je kunt een grotere telescoop zien als een grotere 'lichtemmer' die meer licht vangt en daarmee zelfs objecten die weinig licht uitstralen zichtbaar maken.

Licht heeft een golfkarakter en vertoont diffractie rond objecten. Diffractie is het buigen van lichtgolven wanneer deze om een obstakel heengaan, waardoor het beeld minder scherp lijkt. Deze diffractie is sterker bij gebruik van licht met grote **golflengten**, waardoor het moeilijker wordt om twee objecten van elkaar te onderscheiden. Wanneer een telescoop licht met kleinere golflengten gebruikt, neemt het oplossend vermogen toe.

3. **Maak** de entiteit *Radiotelescoop*.
4. **Maak** een configuratie aan tussen *Radiotelescoop* en een andere entiteit in het model.
5. **Voeg** drie nieuwe grootheden toe aan het model. **Lees** Bron 4 voor hulp.
6. **Maak** drie verbanden tussen de nieuwe grootheden en een andere grootheid in het model.
7. Als je de schaduw van het zwarte gat zo groot mogelijk in de afbeelding weer wilt geven, zijn er twee grootheden aan de telescoop die je kunt beïnvloeden. Welke twee grootheden zijn dit en moeten deze hoeveelheden afnemen, hetzelfde blijven of toenemen? **Vul** hieronder je antwoorden **in**.

De twee grootheden die het oplossend vermogen beïnvloeden zijn:

De golflengte van het licht dat door de telescoop wordt gebruikt, heeft een *negatieve/positieve* invloed op het oplossend vermogen. Om de zichtbaarheid van de schaduw van het zwarte gat te vergroten, moet golflengte *afnemen/constant blijven/toenemen*.

De diameter van de telescoop heeft een *negatief/positieve* invloed op het oplossend vermogen. Om de zichtbaarheid van de schaduw van het zwarte gat te vergroten, moet de diameter van de telescoop *afnemen/constant blijven/toenemen*.

8. **Stel** de initiële verandering **in** zoals in je hebt beschrijven bij de voorgaande opdracht.
9. **Stel** de overige initiële veranderingen als volgt **in**:
- *Massa* van het *Sterrenstelsel* neemt toe;
 - *Afstand* neemt toe;
 - *Accretiesnelheid* neemt af;
 - *Spin* neemt af.
10. Hoeveel eindtoestanden verwacht je met deze initiële veranderingen? Geef een korte uitleg:

Verwachting van aantal eindtoestanden: _____

Uitleg:

11. **Start** de simulatie  en bekijk het resultaat. Negen ambigue toestanden ontstaan. **Bekijk** de verschillende simulatie-uitkomsten en **streep** de verkeerde antwoorden **door** in de zinnen hieronder.

Toestand 1, 2 en 3

In deze toestanden hangt de verandering in zichtbaarheid van de schaduw af van het *afnemende/toenemende* oplossend vermogen van de telescoop, de *afnemende/toenemende* afstand tot het zwarte gat en de *afnemende/toenemende* diameter van het zwarte gat.

- Deze verandering(en) in *oplossend vermogen/afstand/diameter* zorgen ervoor dat de zichtbaarheid van de schaduw toeneemt.
- Deze verandering(en) in *oplossend vermogen/afstand/diameter* zorgt ervoor dat de zichtbaarheid van de schaduw afneemt.

Deze tegengestelde effecten resulteren in een ambigu simulatieresultaat voor de zichtbaarheid van de schaduw.

Toestand 1, 4 en 7

In deze toestanden hangt de verandering in helderheid van de ring van het zwarte gat af van de *afnemende/toenemende* accretiesnelheid, en de *afnemende/toenemende* vervorming van het zwarte gat.

- Deze verandering in de *accretiesnelheid/vervorming* zorgt ervoor dat de helderheid van de ring toeneemt.
- Deze verandering in de *accretiesnelheid/vervorming* zorgt ervoor dat de helderheid van de ring afneemt.

Deze tegengestelde effecten resulteren in een ambigu simulatieresultaat voor de helderheid van de ring.

12. Was je voorspelling over het aantal ontstane toestanden correct? Zo niet, leg dan uit wat negen ambigue toestanden veroorzaakt.



Mijn voorspelling *was/was niet* correct.

Verklaring voor negen ambigue simulatie-uitkomsten:

13. Lees Kader 7 om te bepalen of je model compleet is.

Kader 7. Voortgangsbalk

Onder in het scherm staat de *voortgangsbalk* (zie voorbeeld hieronder).

Bij entiteit staat:  4/4/0, dit betekent: 4 gemaakt, 4 nodig, 0 fout. Bij grootheid staat:  5/17/1: dit betekent: 5 gemaakt, 17 nodig, 1 fout. Als alle cijfers groen zijn, is dat type afgehandeld.

 4/4/0   3/3/0  5/17/1  0/26/0 # 12/24