

## Hawkingstraling

Een zwart gat is een object waarvan de zwaartekracht zo groot is dat zelfs licht er niet meer aan kan ontsnappen: de ontsnappingsnelheid is groter dan de lichtsnelheid.

Onlangs is het wetenschappers gelukt om uit een enorme hoeveelheid afzonderlijke opnamen een beeld van een zwart gat te construeren.

Op 10 april 2019 werd de eerste foto ooit van een zwart gat gepubliceerd. Zie figuur 1.

figuur 1



De massa van een ster uit de hoofdreeks is af te leiden uit het stralingsvermogen met behulp van de volgende formule:

$$\frac{P}{P_{\text{zon}}} = \left( \frac{M}{M_{\text{zon}}} \right)^{3,8} \quad (1)$$

hierin is:

- $P$  het stralingsvermogen van de ster
- $P_{\text{zon}}$  het stralingsvermogen van de zon
- $M$  de massa van de ster
- $M_{\text{zon}}$  de massa van de zon

Als de massa van een ster groter is dan 12 keer de massa van de zon, zal deze uiteindelijk een zwart gat worden. Op de uitwerkbijlage staat een Hertzsprung-Russell diagram. Hierin is een ster gemarkeerd.

3p **23** Bepaal of deze ster zal eindigen als een zwart gat.

Om te kunnen ontsnappen aan de gravitatiekracht van een zwaar hemellichaam moet de snelheid groter zijn dan de ontsnappingsnelheid van dat hemellichaam. Deze is te berekenen met de volgende formule:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (2)$$

hierin is:

- $v$  de ontsnappingsnelheid in  $\text{m s}^{-1}$
- $G$  de gravitatieconstante in  $\text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$
- $M$  de massa van het hemellichaam in  $\text{kg}$
- $r$  de afstand tot aan het middelpunt in  $\text{m}$

- 3p 24 Leid formule (2) af met behulp van formules uit het informatieboek.

Bij een zwart gat geldt dat op een bepaalde afstand van het middelpunt de benodigde ontsnappingssnelheid gelijk is aan de lichtsnelheid. Deze afstand wordt de schwartzschildstraal  $r_s$  genoemd. Alles wat dichterbij komt dan  $r_s$  zal nooit meer aan het zwarte gat kunnen ontsnappen. Hoewel er bij snelheden in de buurt van de lichtsnelheid rekening moet worden gehouden met de relativiteitstheorie blij je voor de berekening van de schwartzschildstraal de klassieke formule (2) te kunnen gebruiken.

- 2p 25 Bereken de schwartzschildstraal van een zwart gat met een massa die 20 keer zo groot is als die van de zon.

Onder andere Stephen Hawking voorspelde in 1974 dat zwarte gaten in staat zijn om straling uit te zenden, ondanks het feit dat niets aan een zwart gat kan ontsnappen. Deze straling wordt hawkingstraling genoemd. Als gevolg hiervan verliest een zwart gat energie, wat ten koste gaat van de massa. Zwarte gaten ‘verdampen’ als het ware.

Hawkingstraling is tot nu toe nog niet experimenteel waargenomen. De reden daarvoor is dat de straling, als de voorspelling klopt, zeer moeilijk waarneembaar is.

Om het verdampen van een zwart gat te beschrijven beschouwde Hawking dit als een zwarte straler met straal  $r_s$  en temperatuur  $T$ . De hawkingstraling wordt in dit model dus beschreven met een planck-kromme. Voor de temperatuur geldt dan:

$$T = \frac{1,227 \cdot 10^{23}}{M} \quad (3)$$

- 2p 26 Leg uit waarom hawkingstraling moeilijk waarneembaar is.

Voor het verband tussen het uitgestraalde vermogen door een zwart gat en de massa bestaat het volgende verband:

$$P \propto M^{-2} \quad (4)$$

hierin betekent het symbool  $\propto$  ‘evenredig met’.

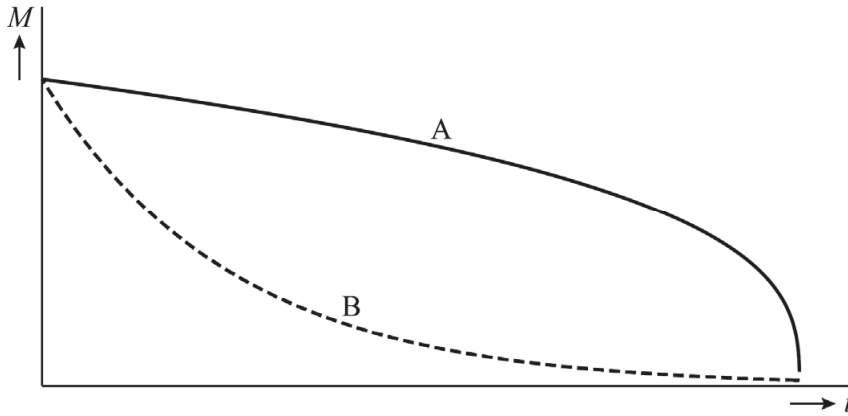
- 3p 27 Toon met behulp van formule (2) en formule (3) en een formule uit het informatieboek aan dat het verband in formule (4) klopt.

**Let op: de laatste vraag van dit examen staat op de volgende pagina.**

Door de hawkingstraling verliest een zwart gat voortdurend energie en daarmee ook massa. Hierbij geldt dat het massaverlies evenredig is met de uitgestraalde energie van het zwarte gat.

In figuur 2 zijn twee  $(M,t)$ -grafieken getekend.

**figuur 2**



- 2p 28 Leg uit welke grafiek, A of B, het juiste verband weergeeft tussen de massa van een zwart gat en de tijd.

---

**Bronvermelding**

Een opsomming van de in dit examen gebruikte bronnen, zoals teksten en afbeeldingen, is te vinden in het bij dit examen behorende correctievoorschrift.