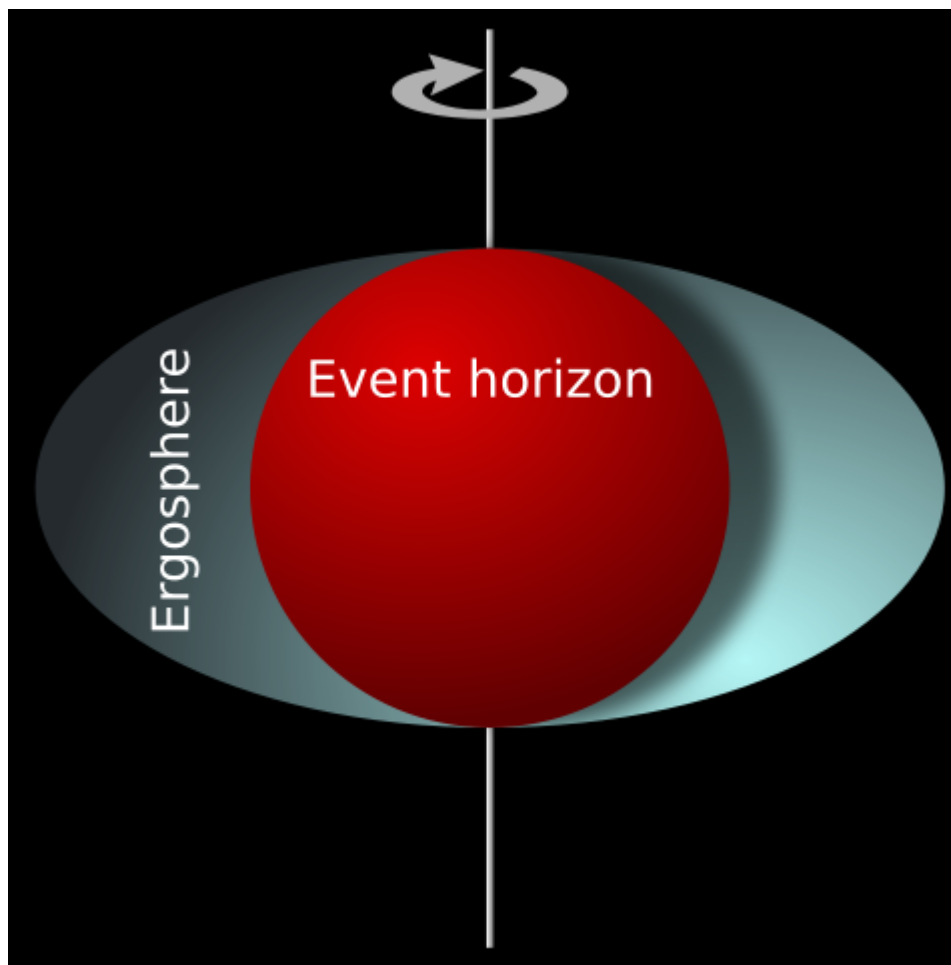


# Het Penroseproces: zwarte gaten uitmelken

**Het woord 'Penroseproces' klinkt misschien alsof het gaat om literaire kost of de berechting van een Zuid-Amerikaanse dictator, maar niets is minder waar: het Penroseproces betreft een wijze om energie te winnen uit een roterend zwart gat - althans, in theorie.**

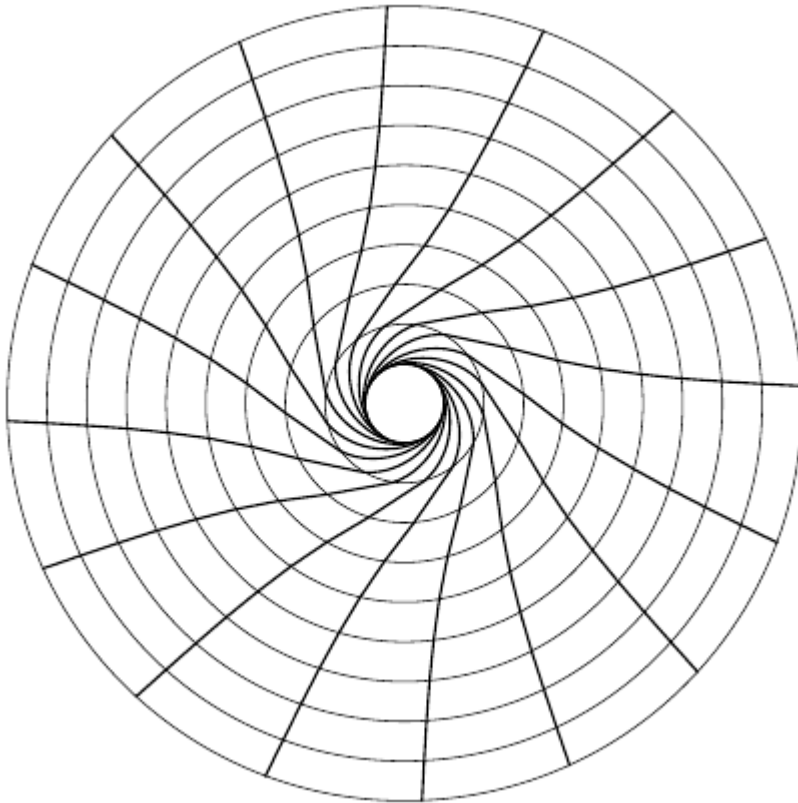




**Afbeelding 1. Een ronddraaiend zwart gat.**Een ronddraaiend zwart gat heeft naast een horizon nog een tweede interessant gebied om zich heen: de ergosfeer. Het bestaan van deze zone leidt tot een verrassende mogelijkheid om energie te winnen uit een zwart gat. Afbeelding: [MesserWoland](#).

## Slepen met de ruimtetijd

Een bekende metafoor voor de vorm van de ruimtetijd in de buurt van een [zwart gat](#) ontstaat als we een bowlingbal op een gespannen deken of opgemaakt bed leggen. Als gevolg van het kuiltje dat de bowlingbal maakt, “kromt” het laken en zullen kleine ballen die over het laken rollen in hun baan afgebogen worden als ze in de buurt van de bowlingbal komen. Door de afbuiging lijkt de bowlingbal de kleine ballen dus aan te trekken: de grote bal lijkt een “kracht” op de kleinere ballen uit te oefenen! Op een soortgelijke wijze kromt een zwart gat de ruimtetijd, waardoor kleine deeltjes aangetrokken lijken te worden: de zwaartekracht.



**Afbeelding 2. Een draaikolk van ruimte.**Een schets van de ruimtetijd zoals die er rond een draaiend zwart gat uitziet. Bron: [StackExchange](#).

Wat gebeurt er nu als een zwart gat niet stilstaat maar om zijn as draait? De ruimtetijd vervormt zich op soortgelijke wijze als wanneer je het laken ergens in het midden vastpakt en dan gaat draaien. De spiralen die op die wijze ontstaan, geven weer hoe verdraaid de ruimtetijd eruit ziet rondom een roterend zwart gat – zie afbeelding 2. De regio waarin dit gebeurt en waar deeltjes geen andere keuze hebben dan de draaiing van het zwarte gat te volgen, heet de *ergosfeer*. Het ontstaan van de ergosfeer wordt veroorzaakt door een effect dat *frame-dragging* heet – vrijuit vertaald: het slepen van het (ruimtetijd)stelsel. Je kan dit effect zien als een soort relativistische versie van de [Corioliskracht](#) – zie het Engelstalige Wikipedia-artikel over [Lense-Thirringprecessie](#) voor meer details daarover.

## Negatieve energie

Het bovenstaande is niet zonder consequenties. In de natuurkunde speelt de grootte van energie een belangrijke rol. Wij willen hier de energie van vrij vallende deeltjes bekijken, vanuit de relativiteitstheorie. In dat geval is de totale energie dus de optelsom van potentiële

zwaartekrachtsenergie, massa-energie (via  $E=mc^2$ ) en kinetische energie, energie die in de beweging zit.

Overigens ook belangrijk: als een voorwerp genoeg energie heeft, dan kan het ontsnappen uit de ergosfeer van een zwart. De ergosfeer moet je dus niet verwarren met de [horizon](#) van een zwart gat – zie ook afbeelding 1. In de ergosfeer van het zwarte gat bestaan er verder regio's waar de *totale* energie, van een vrij vallend deeltje, gezien vanuit een niet-meeroterende waarnemer ver buiten het zwarte gat, negatief is! Dat blijkt een essentieel ingrediënt voor het Penroseproces.



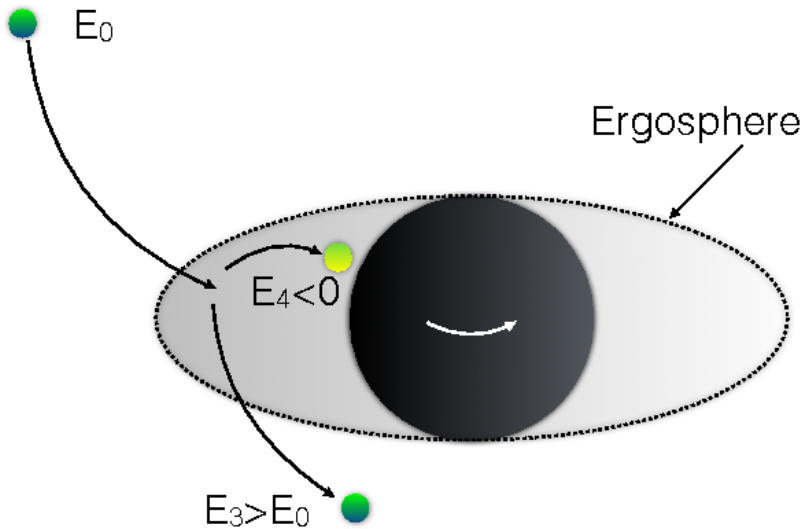
Afbeelding 3. Roger Penrose. Foto: [Biswarup Ganguly](#).

## Energie uit energiebehoud

In 1969 beschreef net Engelse natuur- en wiskundige Roger Penrose dat vallende deeltjes met negatieve energie het essentiële ingrediënt zijn voor het naar hem genoemde effect. Laten we proberen zijn gedachten in receptvorm te bekijken. Stel je voor dat wij ons ergens buiten een roterend zwart gat bevinden (zie afbeelding 4):

1. Neem een deeltje met totale energie  $E_0$ .
2. Laat het deeltje in de ergosfeer vallen.
3. Zorg ervoor dat het deeltje in de ergosfeer zich opsplijt in twee deeltjes, zodat
4. één helft van het deeltje in de regio van negatieve energie valt (met energie  $E_4$ )
5. en de andere helft weer uit de ergosfeer beweegt (met energie  $E_3$ ).

Dankzij energiebehoud weten we dat  $E_0 = E_4 + E_3$ . Aangezien  $E_4$  bij het deeltje in de negatieve regio valt, geldt dat  $E_4 < 0$ . De conclusie is zodoende dat  $E_3 > E_0$ . Oftewel, het deeltje dat de ergosfeer verlaat, heeft meer energie dan waar het invallende deeltje mee begon!



**Afbeelding 4. Het Penroseproces.**Schematische weergave van het Penroseproces. Bron: [Maximal efficiency of the collisional Penrose process](#), E. Leiderschneider en T. Piran.

## De wereld draait niet door

Maar wacht, hebben we nu energie gemaakt uit ... niets? Nee hoor, wees maar niet bang. Het verschil tussen  $E_3$  en  $E_0$  is precies de hoeveelheid draaiingsenergie die het zwarte gat is kwijtgeraakt. Als je dit proces maar vaak genoeg zou herhalen, dan zou je een zwart op deze manier kunnen laten stoppen met roteren. Wat er natuurlijk wél is gebeurd: we hebben (zoals we hieronder zullen zien zelfs op zeer efficiënte wijze) energie aan het zwarte gat onttrokken!

Moeten we nu meteen stoppen met zonnepanelen, windenergie, enzovoort en ons volledig gaan focussen op het uitmelken van zwarte gaten? Dat is maar de vraag. Nog los van het feit dat we niet dicht bij een zwart gat wonen, is er ook het punt dat de deeltjes die weer uit het zwarte gat komen ontzettend veel kinetische energie hebben. Hoe zet je dat weer om in bijvoorbeeld elektrische energie?

Er valt dus nog heel wat uit te zoeken voordat we de eerste zwart-gat-generatoren zullen kunnen gebruiken, maar efficiënt zullen ze wél zijn. Bekijk het onderstaande [MinutePhysics](#)-filmpje als je wilt weten hoe efficiënt het Penrose-proces nu is als we de ontstane kinetische

energie vergelijken met de massa-energie van het oorspronkelijke deeltje.