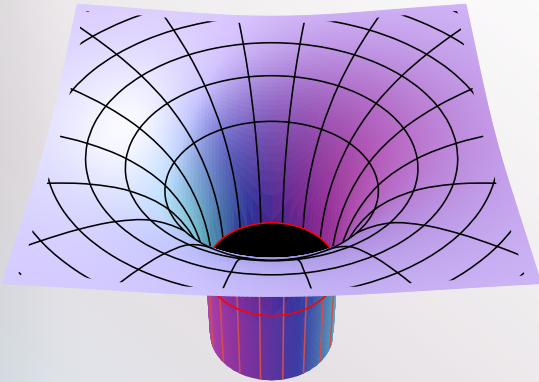
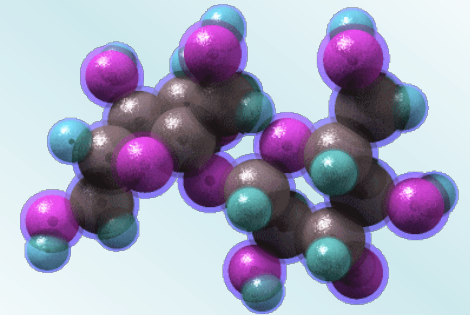


Natuurkundig Gezelschap te Utrecht

Opgericht in 1777



Zwarte Gaten en Kwantummechanica



Gerard 't Hooft, Universiteit Utrecht

6 februari 2018

Het Standaardmodel



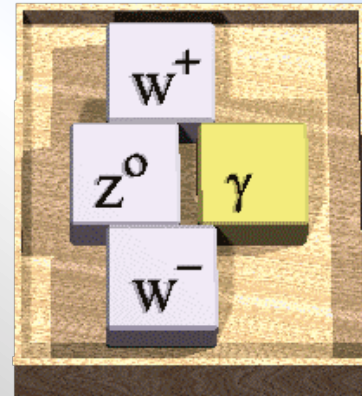
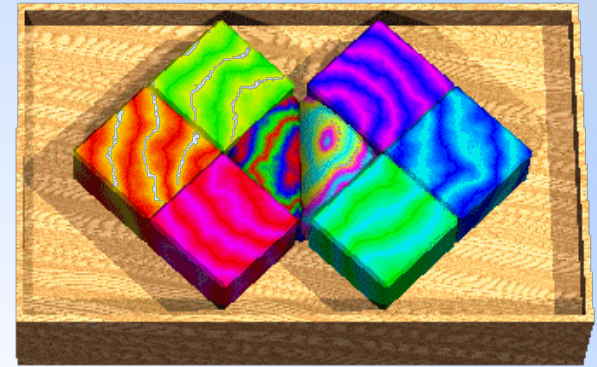
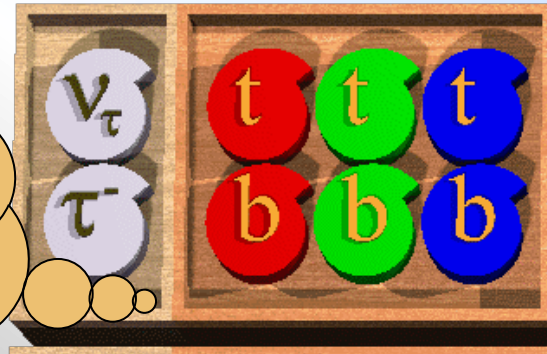
Het Standaardmodel

leptons

quarks

gluons

τ -neutrino
 μ -neutrino
muon
e-neutrino
electron

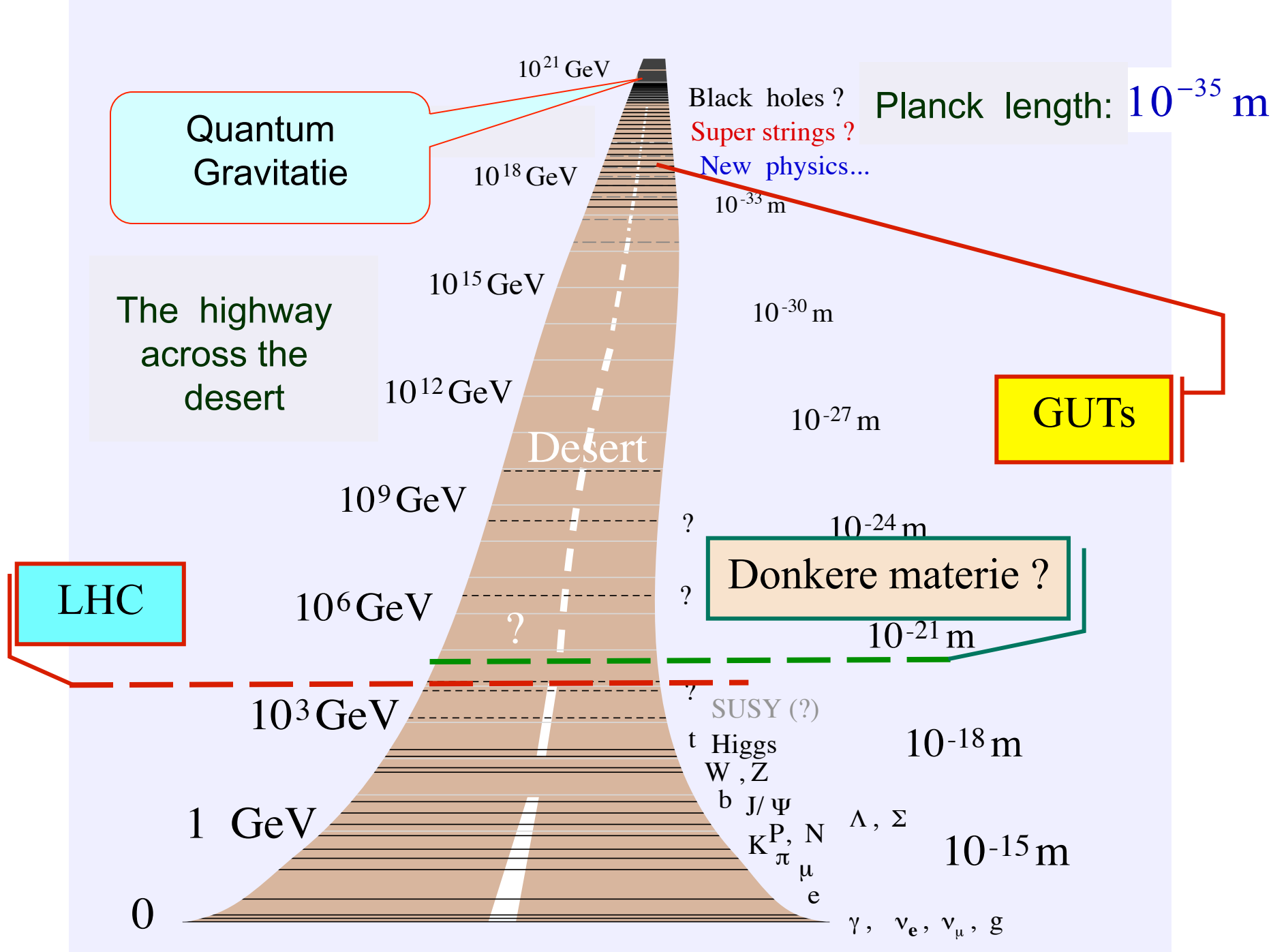


Higgs

Zwakte of EM
Waar is GRAVITATIE?

Waar is DONKERE MATERIE?

Waar is DONKERE ENERGIE?



Quantum Gravitatie

Black holes ?
Super strings ?
New physics...

Planck length: 10^{-35} m

10^{18} GeV

10^{-33} m

The highway across the desert

10^{15} GeV

10^{-30} m

10^{12} GeV

10^{-27} m

GUTs

Desert

10^9 GeV

10^{-24} m

Donkere materie ?

10^6 GeV

10^{-21} m

LHC

10^3 GeV

SUSY (?)

10^{-18} m

1 GeV

t Higgs
W, Z

10^{-15} m

0

b J/ψ
K^P, N
π μ e

Λ, Σ

γ, ν_e, ν_μ, g

Smallest Black holes?

???

Quantum
Gravitation

Planck length: 10^{-35} m

Black holes ?

Super strings ?

New physics...

The highway
across the
desert

10^{18} GeV

10^{-33} m

10^{15} GeV

10^{-30} m

10^{12} GeV

10^{-27} m

GUTs

Desert

Donkere materie ?

10^9 GeV

10^{-24} m

LHC

10^6 GeV

10^{-21} m

10^3 GeV

SUSY (?)

10^{-18} m

1 GeV

t Higgs
W, Z

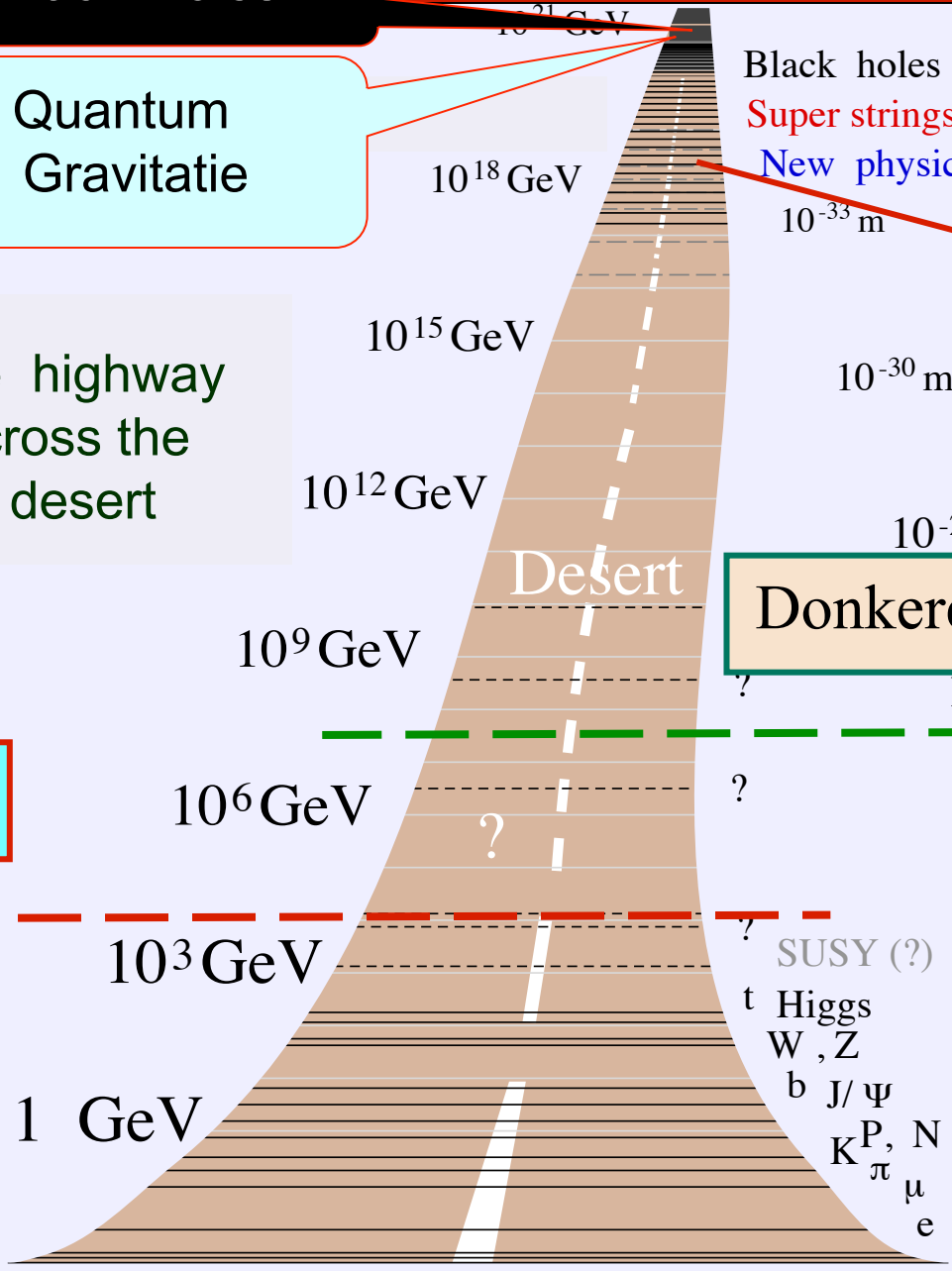
10^{-15} m

0

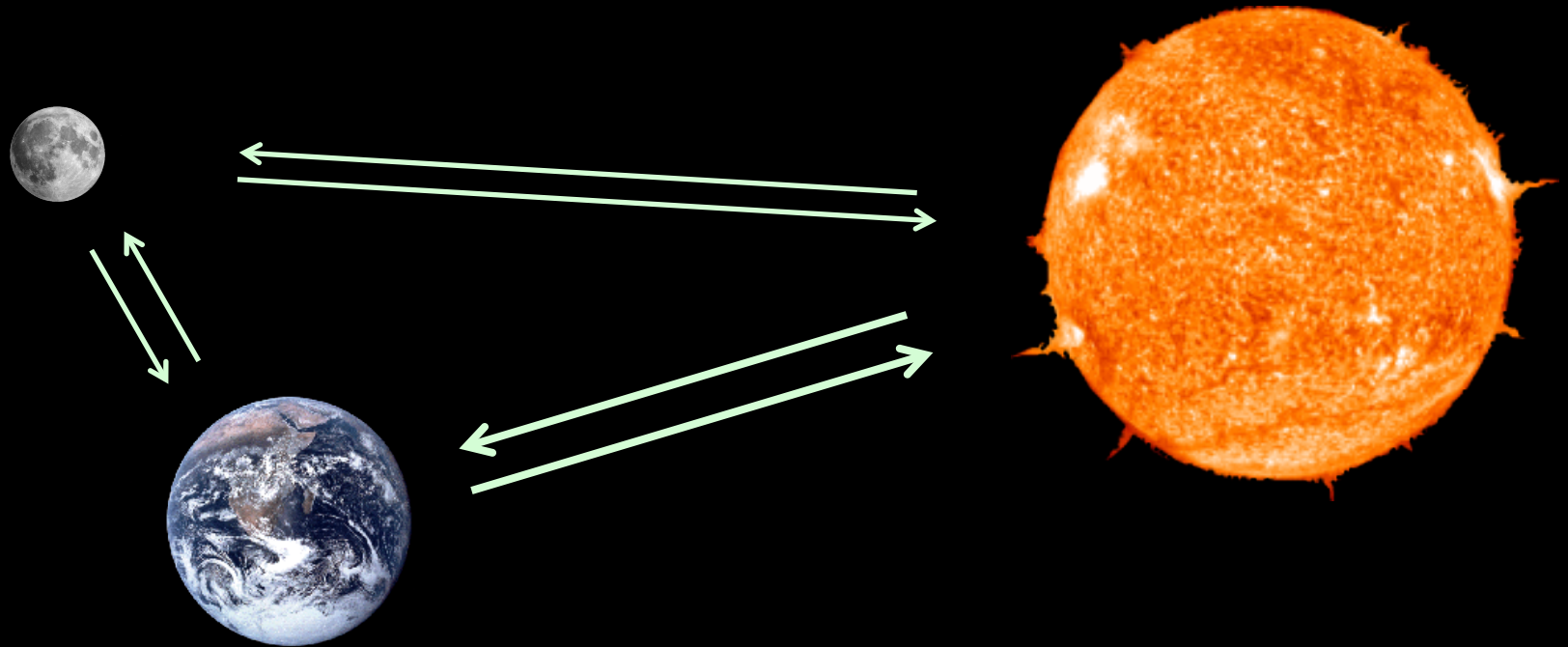
b J/ψ
K^P, N
π μ
e

Λ, Σ

γ, ν_e, ν_μ, g

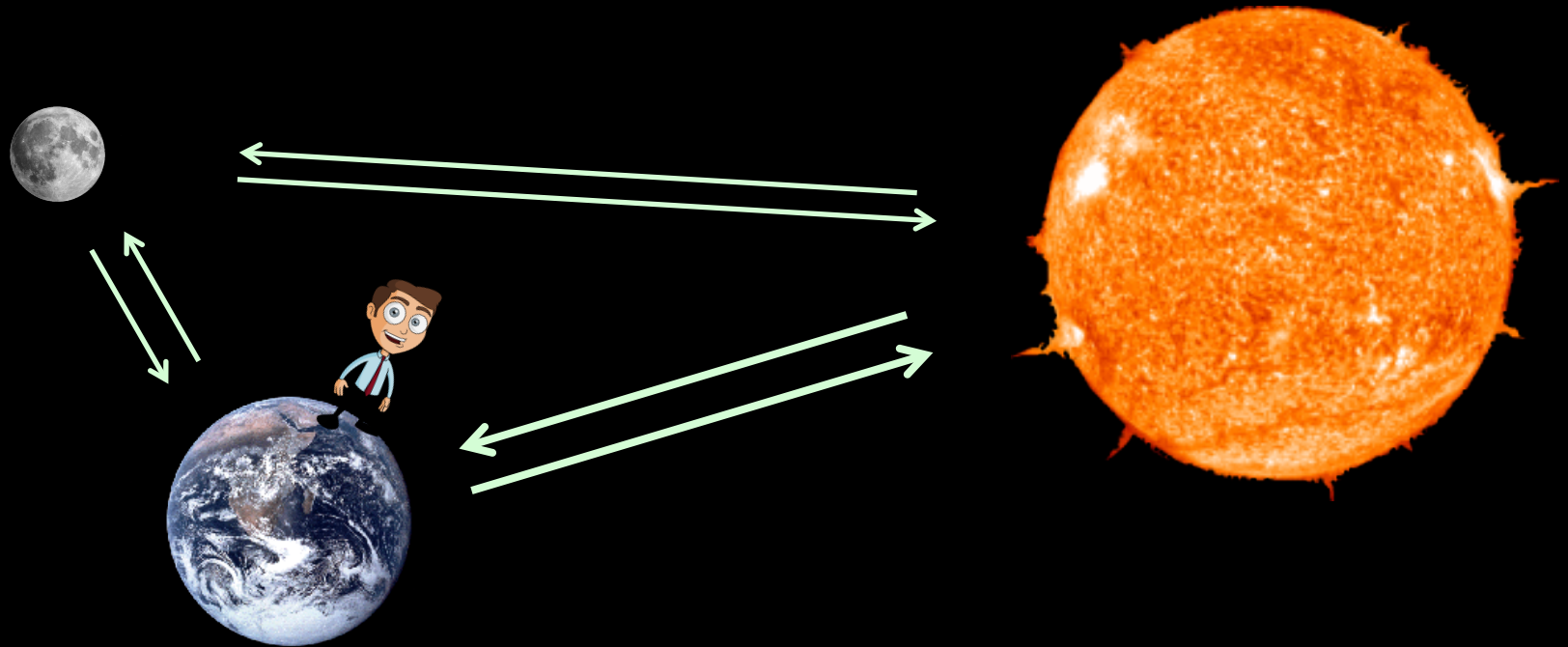


De zwaartekracht is een universele kracht, die uitsluitend afhangt van de massa's van de objecten



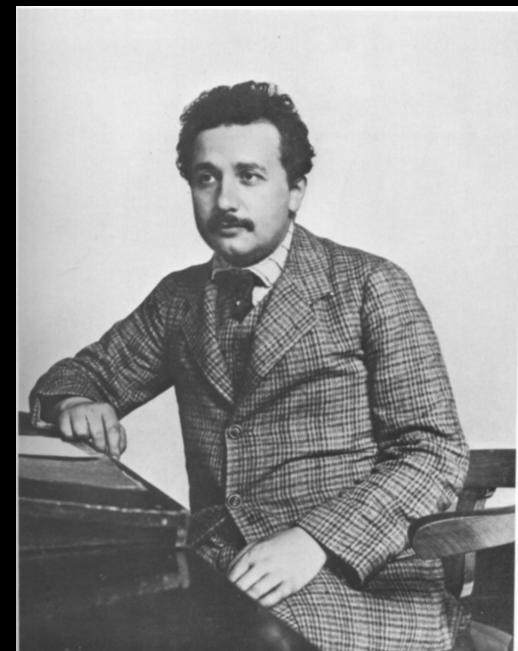
De zwaartekracht is een universele kracht, die uitsluitend afhangt van de massa's van de objecten

Hij trekt ook alle objecten op aarde naar het middelpunt



Zwaartekracht werkt alleen in op massa, niets anders.
Altijd aantrekkend, nooit afstotend

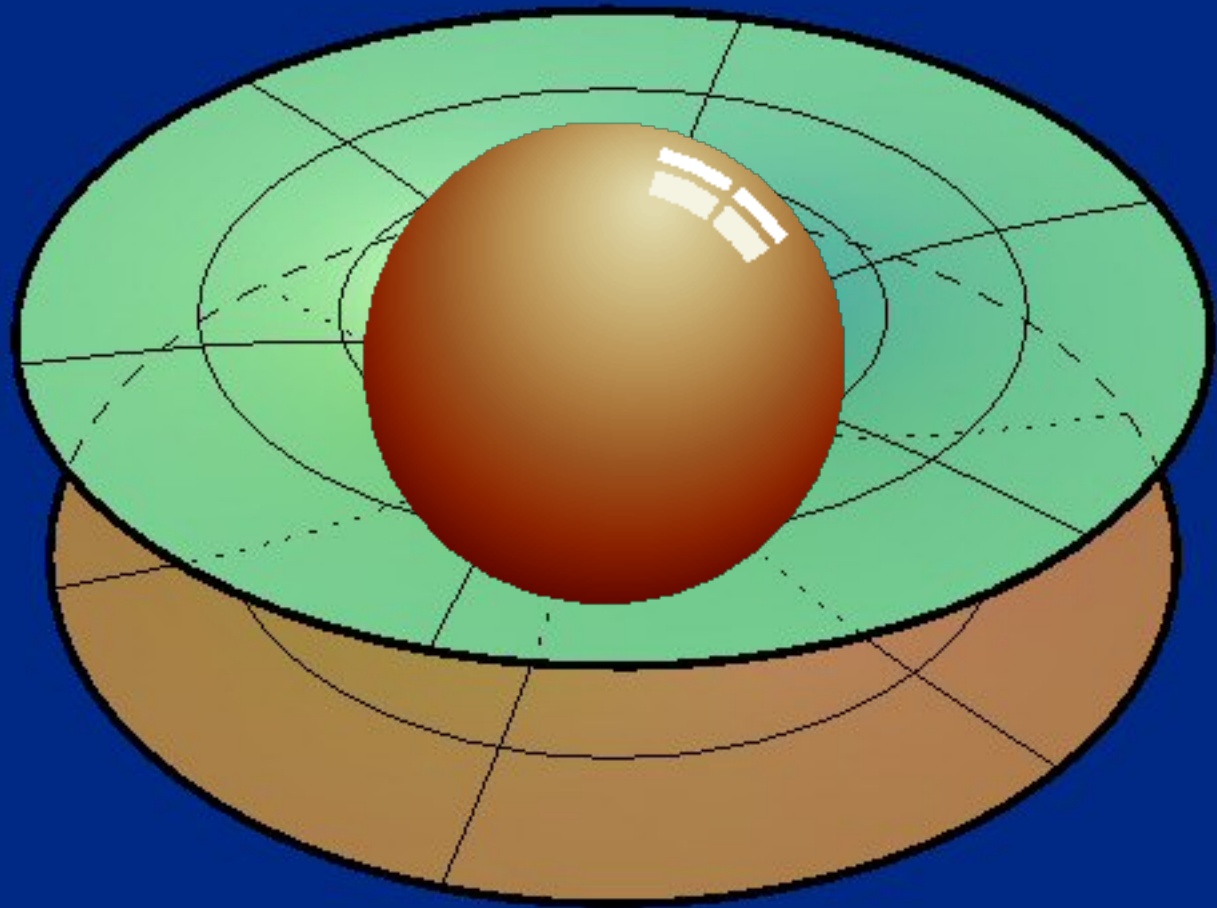
Dit stelde Albert Einstein in staat een fundamentele
fundamental theorie te ontwikkelen genaamd *Algemene
Relativiteit*, die zwaartekracht in verband brengt met
kromming van ruimte en tijd.

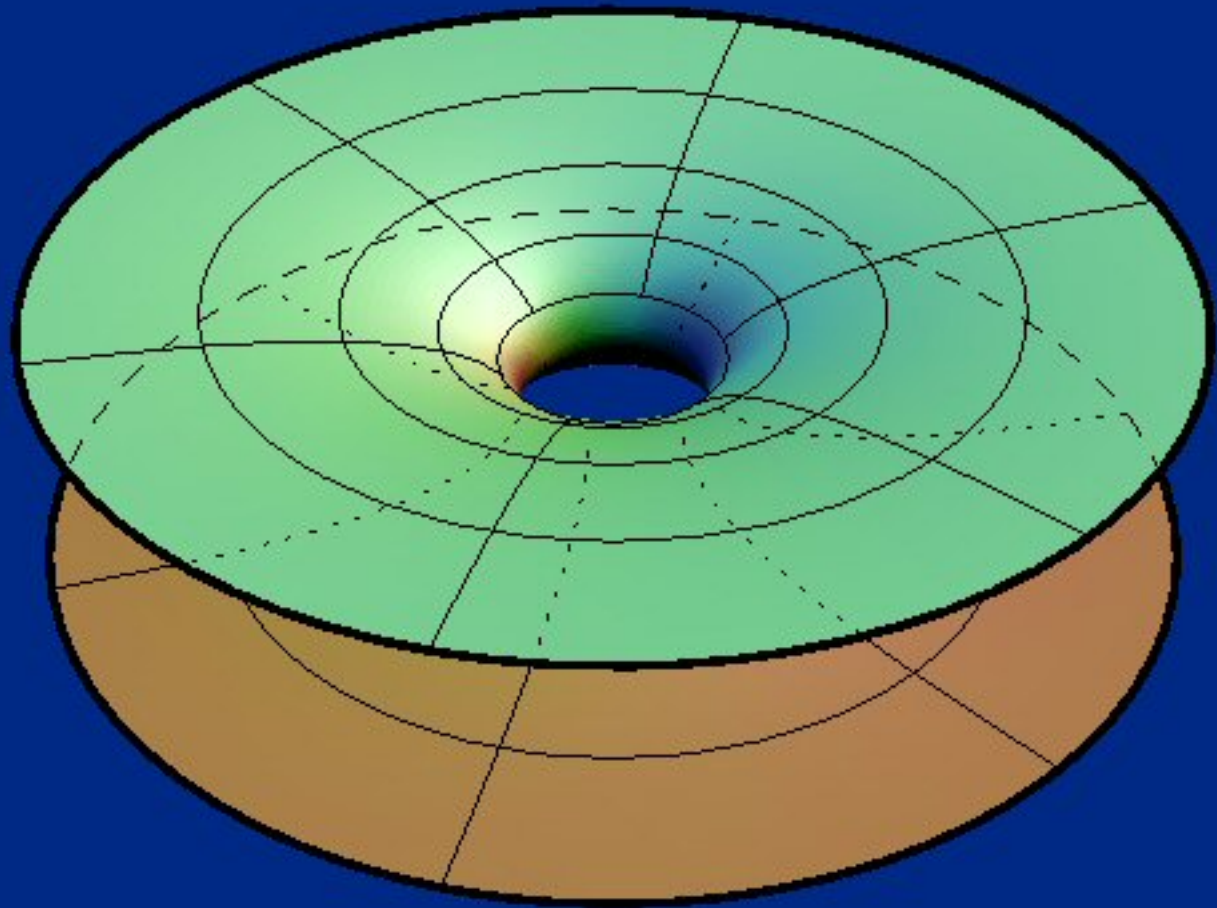




Karl Schwarzschild 1916

“Über das Gravitationsfeld
eines Massenpunktes nach
der Einsteinschen Theorie”





Zwart Gat

of Wormgat ?

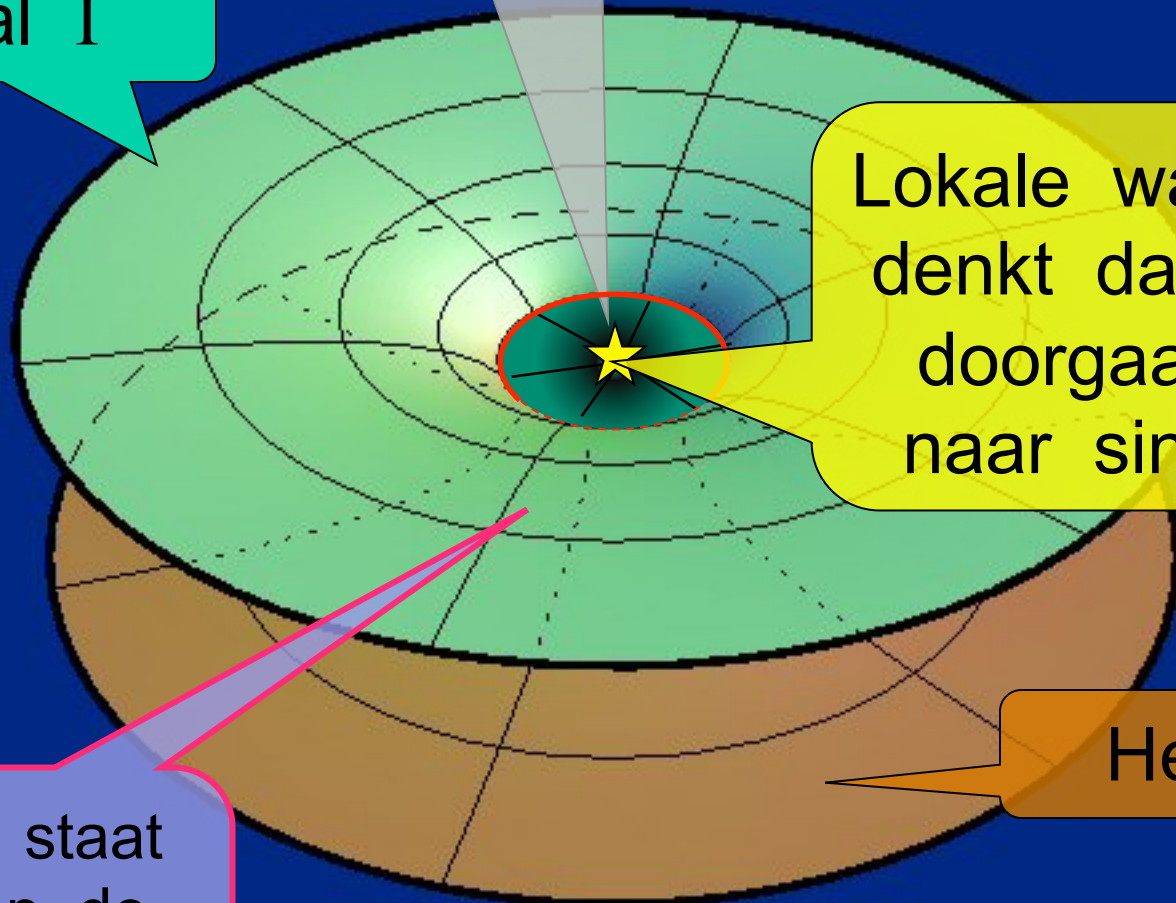
Heelal I

Lokale waarnemer
denkt dat de tijd
doorgaat, reist
naar singulariteit

Heelal II

“Tijd” staat
stil op de
horizon

Daarom is reizen van het ene
heelal naar het andere onmogelijk



Gezien door
verre waarnemer:

Tijd staat stil
op horizon



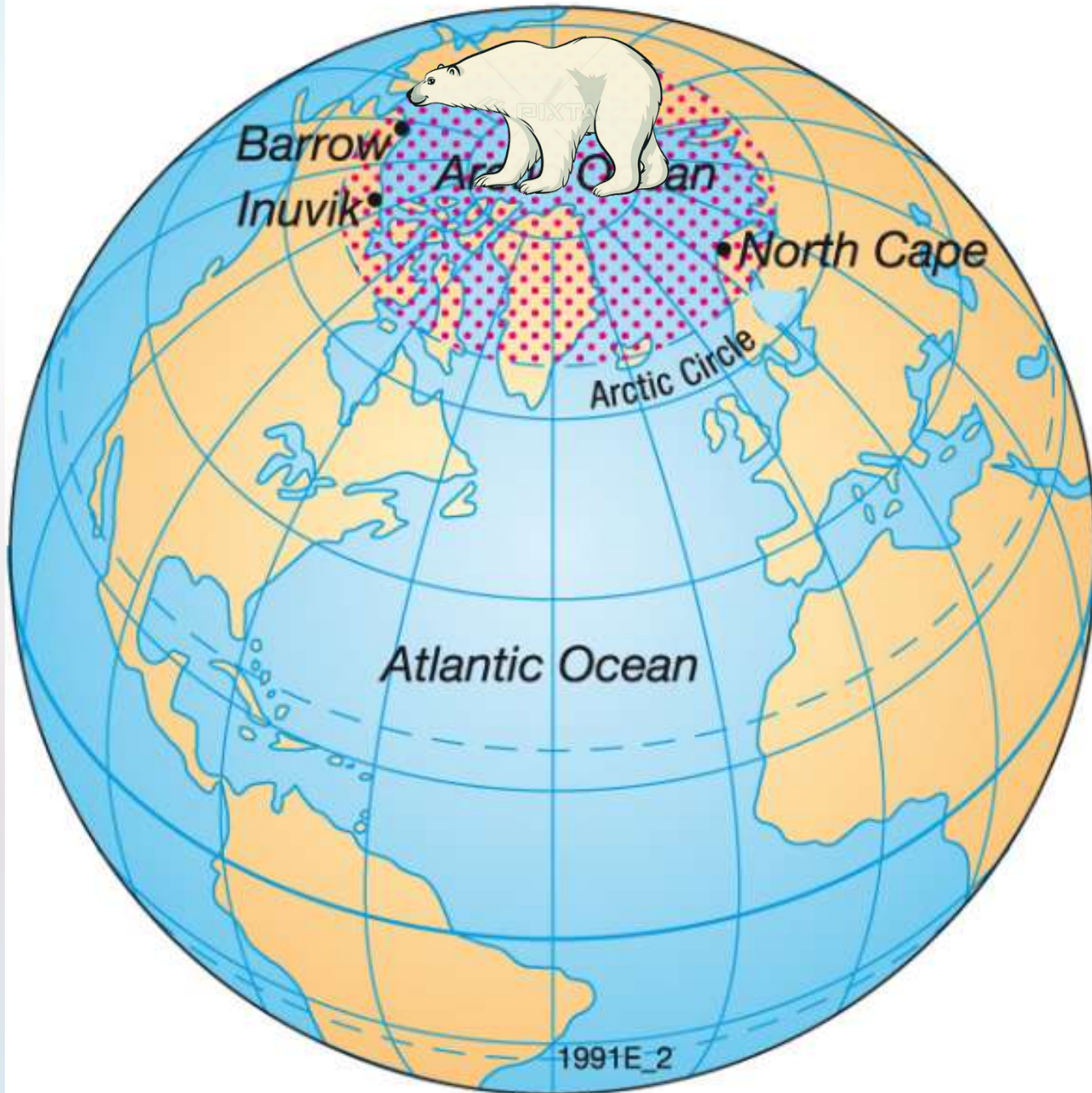
Volgens
astronaut
zelf:

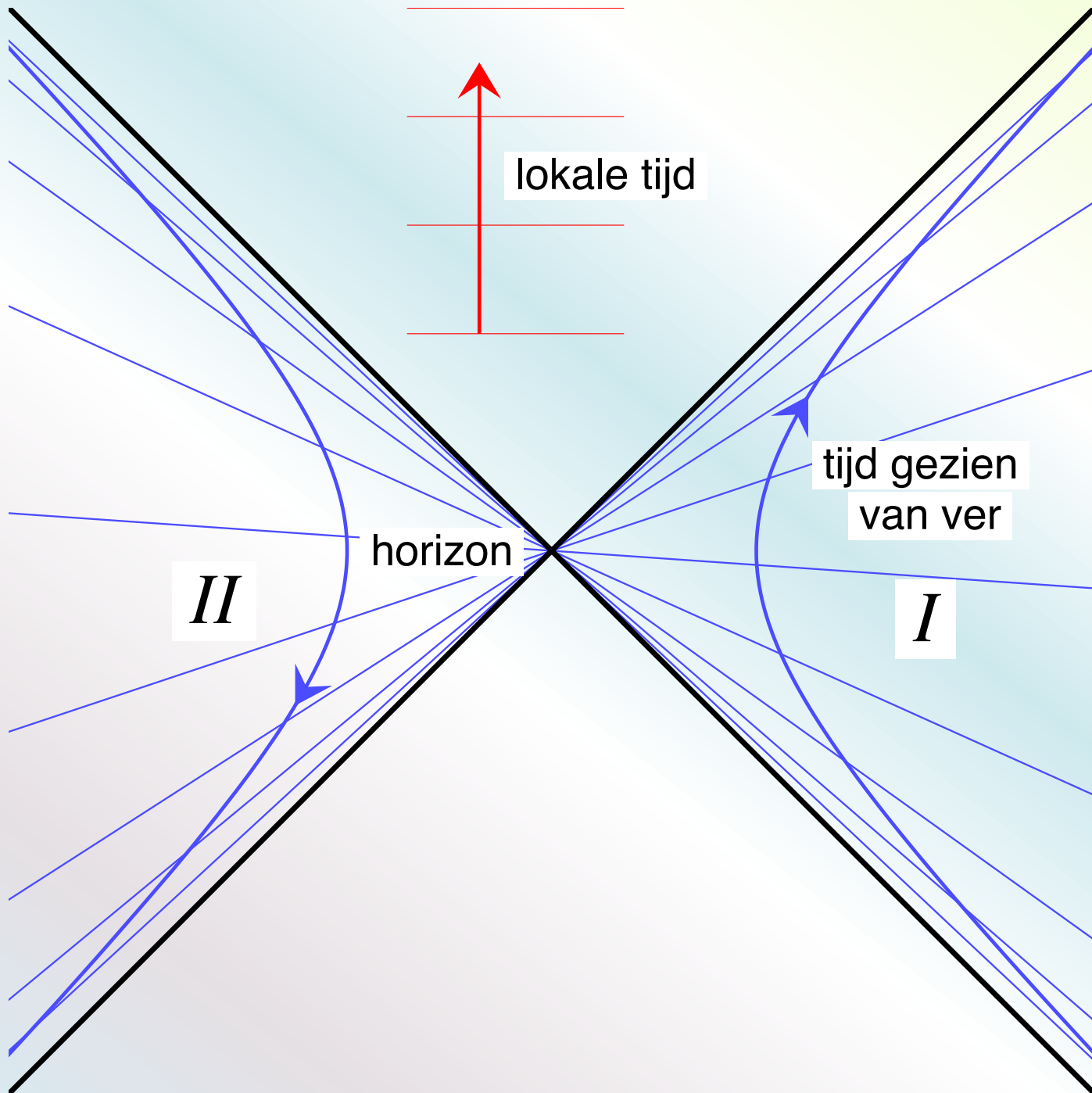
vervolgt
hij zijn
weg

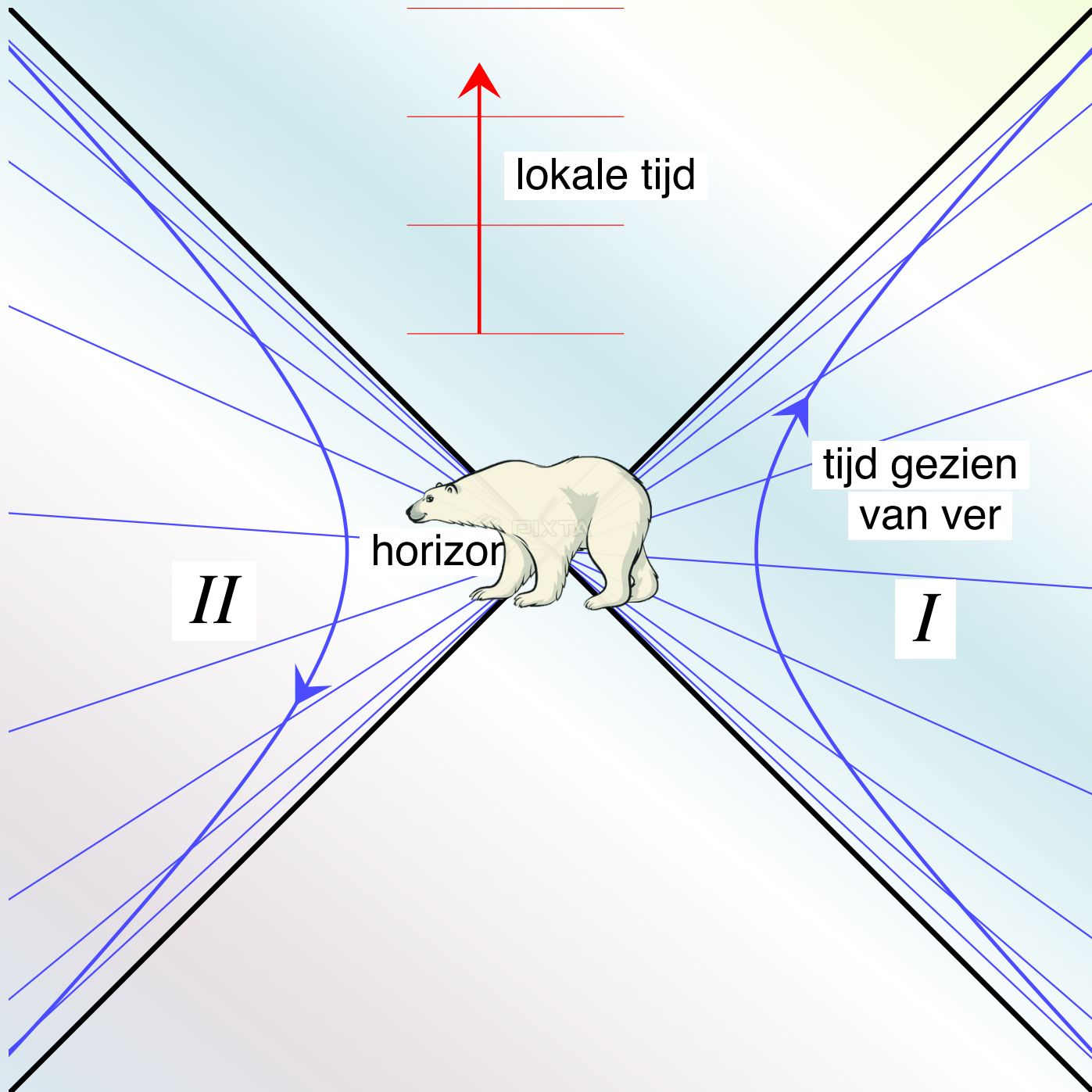


Waarnemers ondervinden de *tijd* verschillend.
Wiskundig gevolg daarvan: dan nemen ze
ook de *deeltjes* anders waar

Waar gaat de astronaut naartoe?







lokale tijd

tijd gezien
van ver

horizon

II

I

Als U zwarte gaten vreemd vindt ...

stop daar dan eens de kwantummechanica bij !

Deeltjesfysici willen kunnen begrijpen hoe de kwantumgravitatie werkt.

Waar bevinden zich de sterkst denkbare zwaartekrachtsvelden?

Die velden zijn het sterkst *in de kleinst denkbare zwarte gaten!*

Willen we de sterkst denkbare zwaartekrachtsvelden begrijpen, dan moeten we de gedachten-experimenten doen met de kleinst denkbare zwarte gaten.

Ook al weten we niet hoe zwate gaten kleiner dan een zonsmassa in ons heelal kunnen zijn gevormd, zijn het wel legitieme oplossingen van Einstein's vergelijkingen.

Wat zou de kwantummechanica ermee doen?

$$h / 2\pi = \hbar = 1.0546 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ sec}^{-1}$$

$$G_N = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ sec}^{-2}$$

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m / sec}$$

Planck Eenheden

$$L_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} = 1.616 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

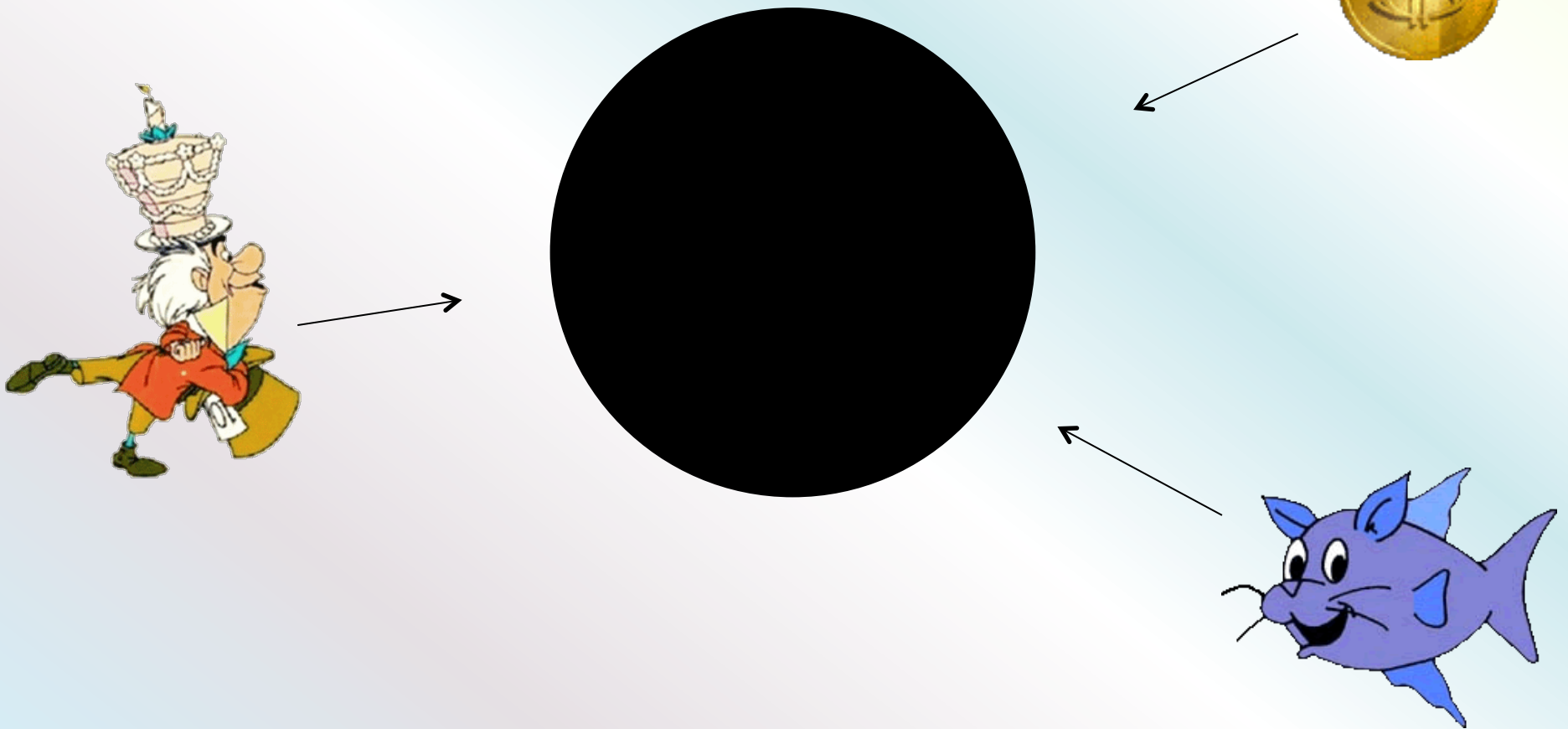
$$M_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} = 21.8 \text{ } \mu \text{ g}$$

$$T_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^5}} = 5.39 \times 10^{-44} \text{ sec}$$



Stephen Hawking's grote ontdekking:

Zwarte gaten ...



Stephen Hawking's grote ontdekking:

Zwarte gaten zenden deeltjes uit!



Omdat de materiedeeltjes waaruit een zwart gat lang geleden kan zijn ontstaan, al lang zijn verdwenen, moeten we aannemen dat een waarnemer die er nu, veel later, in valt, geen deeltjes meer waarneemt.

Hij/zij neemt een *vacuum waar*.

Alle annihilatie-operatoren zijn dan nul.

Maar de definitie van annihilatie- en creatie-operatoren is tijdsafhankelijk.

En de waarnemer op afstand ervaart *tijd anders*. Die waarnemer vindt dat de annihilatie-operatoren niet nul zijn. Daarom ziet die waarnemer deeltjes ...

(een kwantummechanisch effect !)

Hawking berekende hoeveel deeltjes er langs deze weg uit komen:

het zwarte gat is een gloeilamp:
de uitgaande deeltjes hebben een
thermisch spectrum.

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \approx 6.169 \times 10^{-8} \text{ K} \times \frac{M_{\odot}}{M_{BH}}$$

Alle deeltjes-soorten kunnen er uitkomen

Dit betekent wel dat het gat energie verliest, dus ook massa, zodat het ook kleiner wordt, en heter. De totale, netto stralingsintensiteit neemt toe, totdat:



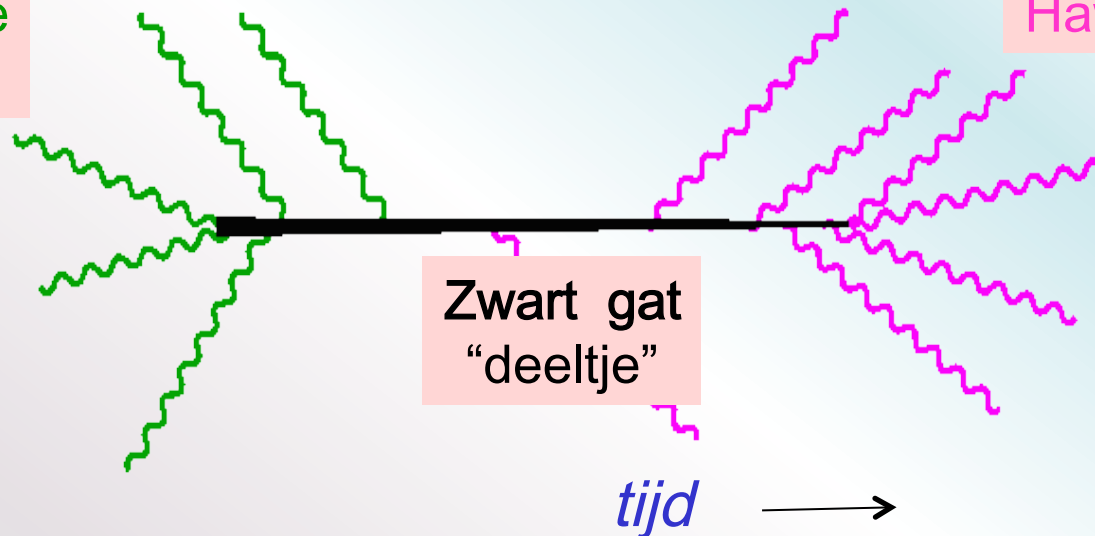
En zo stellen we vast dat zwarte gaten zich net zo gedragen als gewone materie:
er kan wat in gaan, en er komt wat uit.

Zijn zwarte gaten gewone
“elementaire deeltjes”?

Zijn elementaire deeltjes
gewone “zwarte gaten”?

Imploderende
materie

Hawking deeltjes



Hebben zwarte gaten daarom een discreet spectrum van deeltjes-toestanden? *Ja, volgens de QM*

Fermi's "Golden Rule":

Totale waarschijnlijkheid van de eindtoestand =

$$|\text{Amplitude}|^2 \times \left(\begin{array}{c} \text{volume fase-ruimte van} \\ \text{de eindtoestand} \end{array} \right)$$

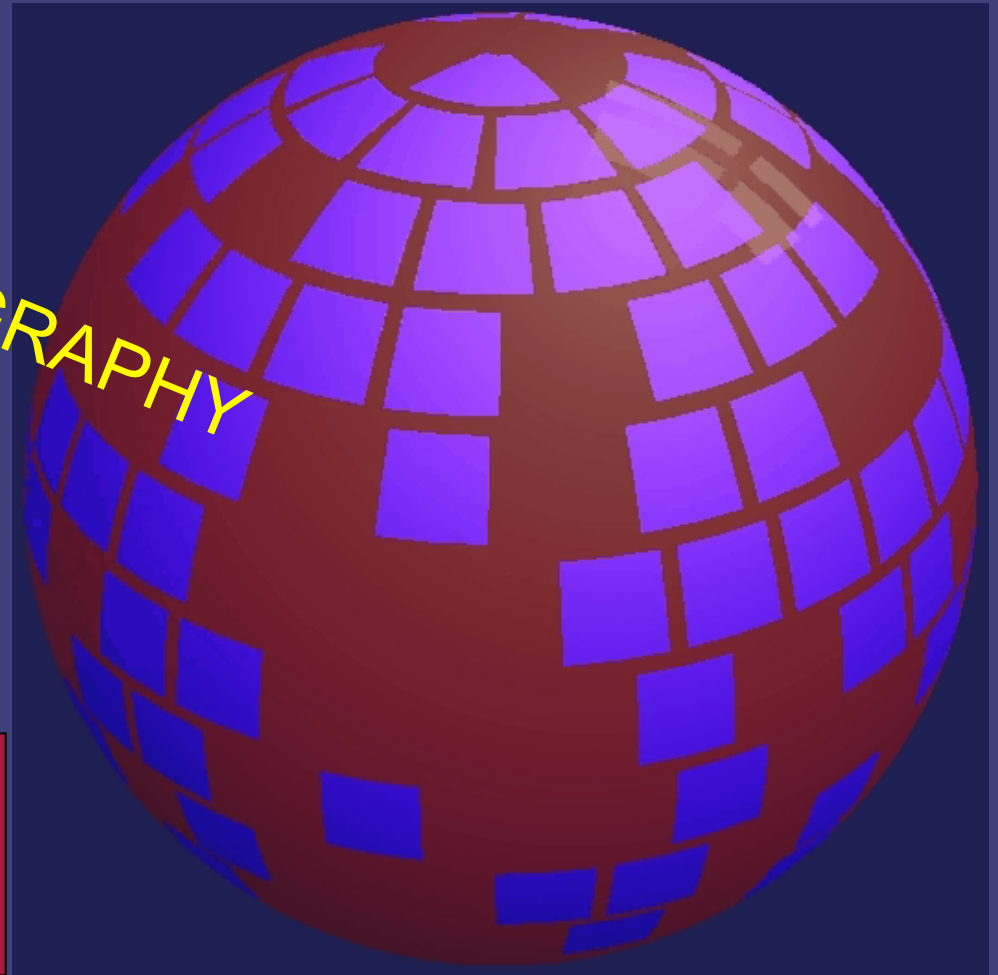
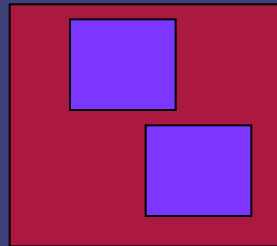
Gebruik nu tijdsomkeer-invariantie:

$$\rightarrow \frac{\text{faseruimte eindtoestand}}{\text{faseruimte begin-toestand}}$$

Zo krijg je het volume van de faseruimte van een
zwart gat — en die kenden we nog niet!
Uitkomst: zwarte gaten kunnen we *tellen*:

rangnummer is een
binair getal dat
precies op de horizon
past: een bit op
 $0.724 \times 10^{-65} \text{ cm}^2$

plus een vast
aantal bits ...



Nu we dit alles weten, zouden we ook moeten kunnen uitrekenen hoe al deze eigenschappen van een kwantum-zwart-gat in de tijd evolueren.

Toch ?

Dan hebben we orde en regelmaat aangebracht in de wereld van de Planck dimensies !

Dan hebben we de vergelijkingen voor kwantum-gravitatie deeltjes.

Maar hoe moet dit als die deeltjes in het zwarte gat kunnen verdwijnen ??

De Informatieparadox van het zwarte gat

THE BLACK HOLE WAR

LEONARD SUSSKIND

MY BATTLE WITH
STEPHEN HAWKING
TO MAKE THE
WORLD SAFE FOR
QUANTUM MECHANICS

Hier klopt iets niet !!



Leonard Susskind,
2008

Alternatieve theorieën:

1. Doordat deeltjes in het gat verdwijnen gaat de kwantum-coherentie verloren; het zwarte gat laat zich niet door kwantum-toestanden beschrijven (probleem: energiebehoud)

Hawking ~ 1975

2. Informatie blijft behouden, maar verzamelt zich na de explosie in een achterblijfsel (probleem: oneindige kwantum-degeneratie van de achterblijfsels)

3a. Informatie komt er samen met de Hawking deeltjes uit *doch pas aan het eind*

3b. Informatie komt er samen met de Hawking deeltjes *onmiddellijk* uit .

Alternatieve theorieën:

1. Doordat deeltjes in het gat verdwijnen gaat de kwantum-coherentie verloren; het zwarte gat laat zich niet door kwantum-toestanden beschrijven
(probleem: energiebehoud)

2. Informatie blijft behouden, maar verzamelt zich na de explosie in een achterblijfsel
(probleem: oneindige kwantum-degeneratie van de achterblijfsels)

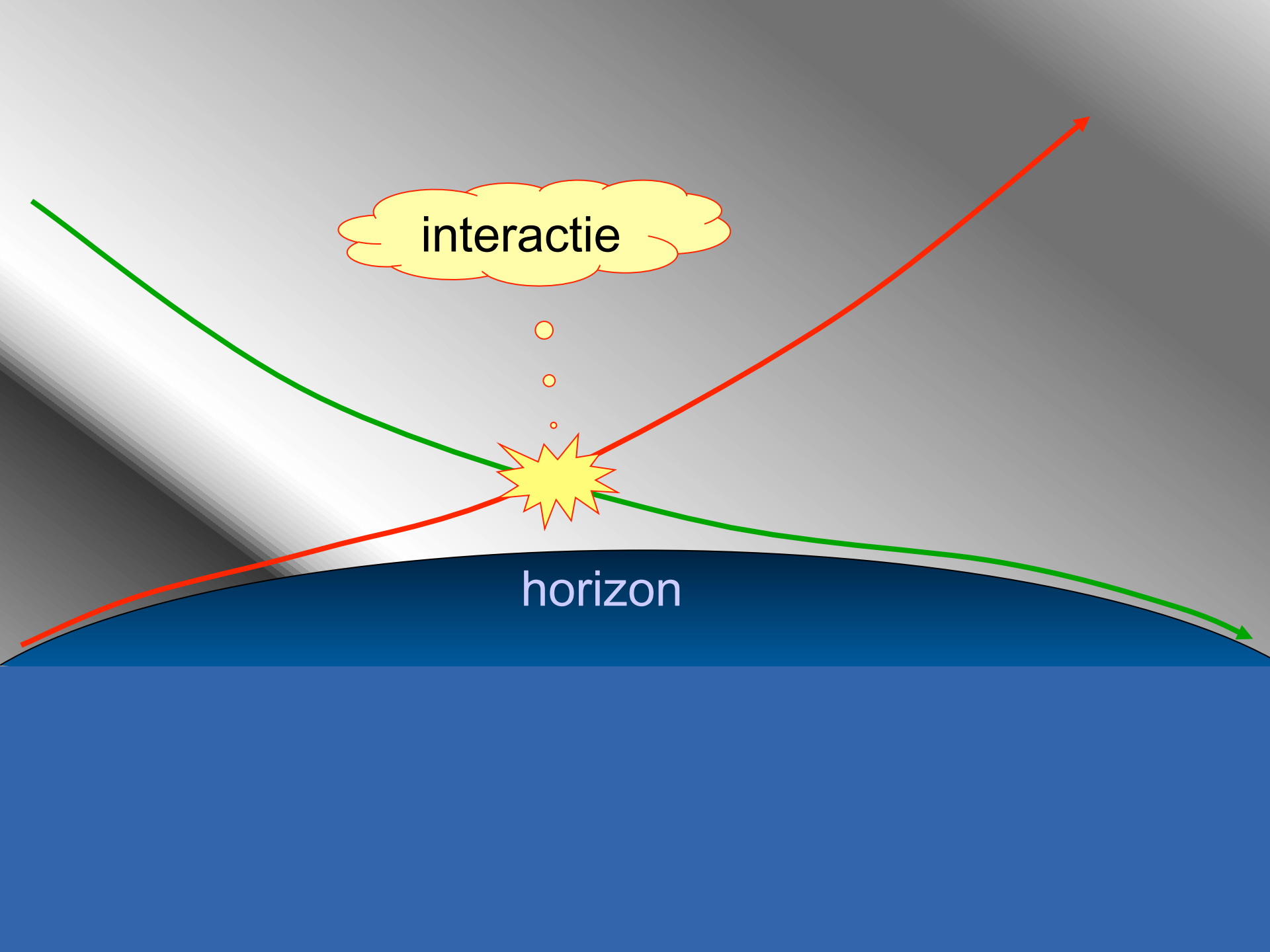
Hawking ~ 2000

3a. Informatie komt er samen met de Hawking deeltjes uit *doch pas aan het einde*

Hawking ~ 2015

3b. Informatie komt er samen met de Hawking deeltjes *onmiddellijk* uit .

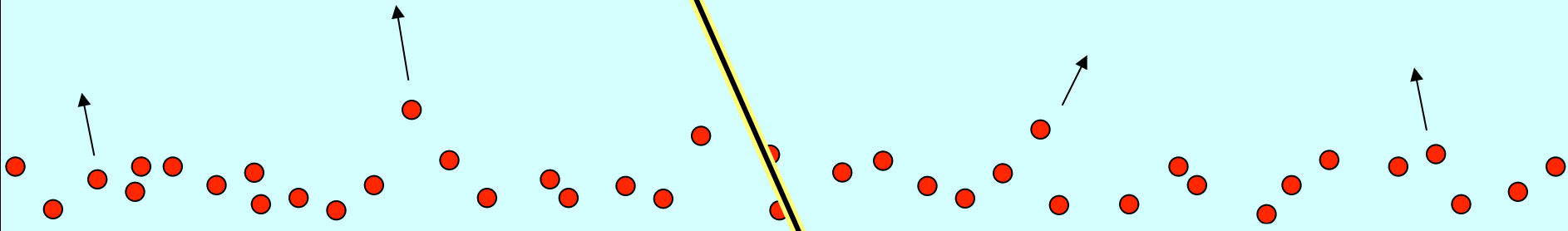
Wij ~ 1984 - heden



interactie

horizon

Door de gravitatie-terugstoot te berekenen kunnen we zien hoe uitgaande deeltjes een voet-afdruk ondergaan van de ingaande deeltjes

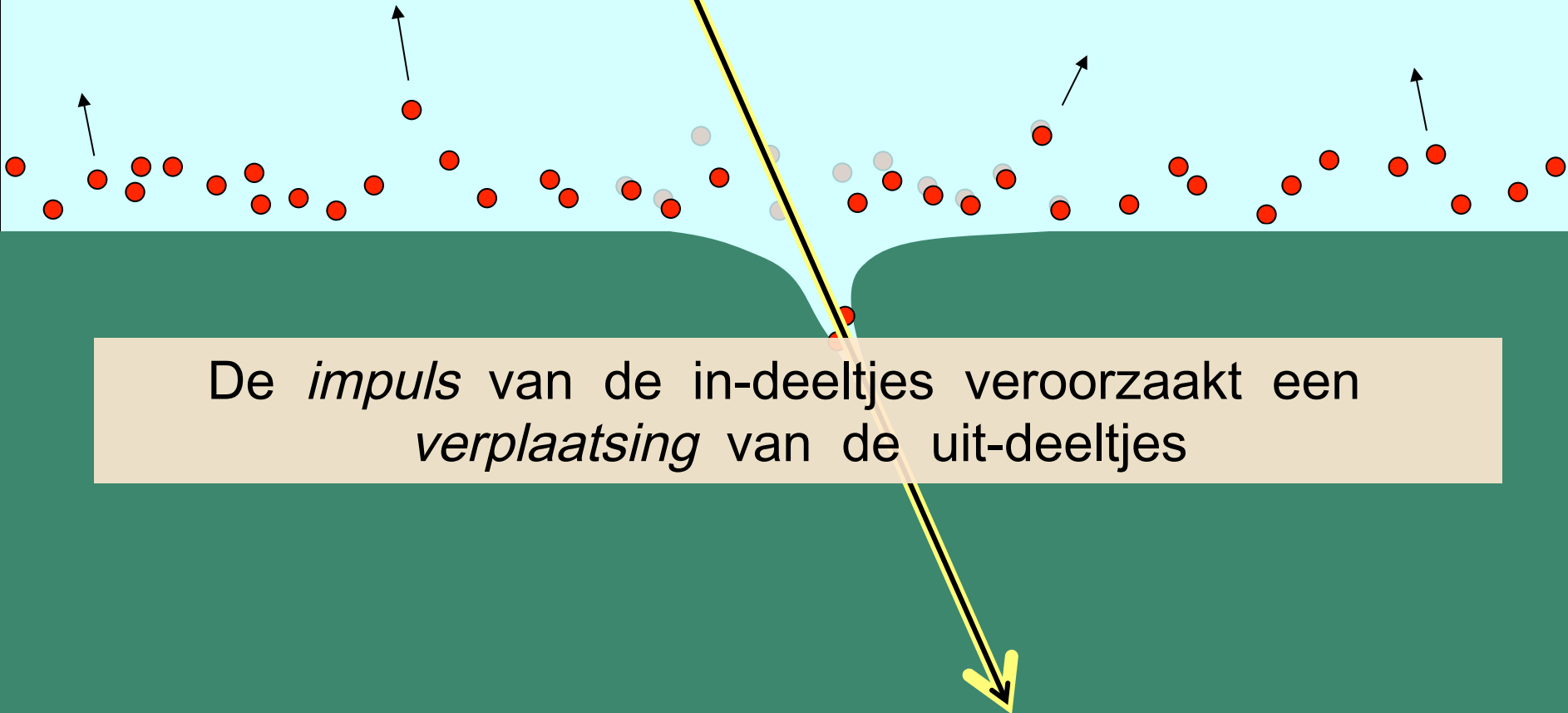


De *impuls* van de in-deeltjes veroorzaakt

...



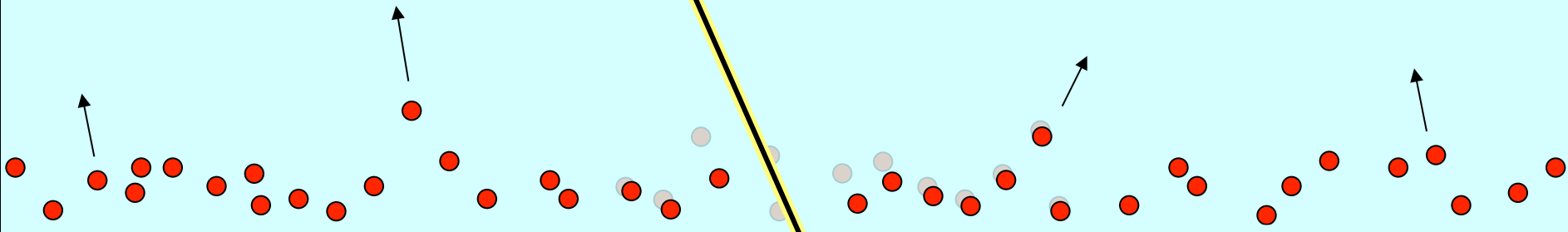
Door de gravitatie-terugstoot te berekenen kunnen we zien hoe uitgaande deeltjes een voet-afdruk ondergaan van de ingaande deeltjes



De *impuls* van de in-deeltjes veroorzaakt een *verplaatsing* van de uit-deeltjes



Door de gravitatie-terugstoot te berekenen kunnen we zien hoe uitgaande deeltjes een voet-afdruk ondergaan van de ingaande deeltjes



Het bijzondere daarvan: impuls en plaats beïnvloeden elkaar door de kwantum-onzekerheidsrelaties (commutatierregels)



Dat is een verhelderend idee:

posities van de uitgaande deeltjes kunnen zo *volledig* worden bepaald door wat erin ging

Dit werkt fantastisch. We hoeven bijna niets te veranderen aan wat we al wisten van de fysica, behalve ...

Dat is een verhelderend idee:

posities van de uitgaande deeltjes kunnen zo *volledig* worden bepaald door wat erin ging

Dit werkt fantastisch. We hoeven bijna niets te veranderen aan wat we al wisten van de fysica, behalve ...

Als een deeltje door het wormgat verdwijnt, waar gaat het dan naartoe?

En nu hebben we de vergelijkingen, dus kunnen we precies zien welk antwoord werkt, en wat niet!

De deeltjes kunnen niet naar een ander heelal gaan, want ze blijven praten met elkaar. Dit zou de wetten van de causaliteit schenden...

“Heelal II” moet *precies even* “fysisch” zijn als Heelal I
Maar wat en waar is heelal II?

Er is maar een antwoord mogelijk:

Heelal II is de *andere kant* van hetzelfde zwarte gat!
(antipodale identificatie)

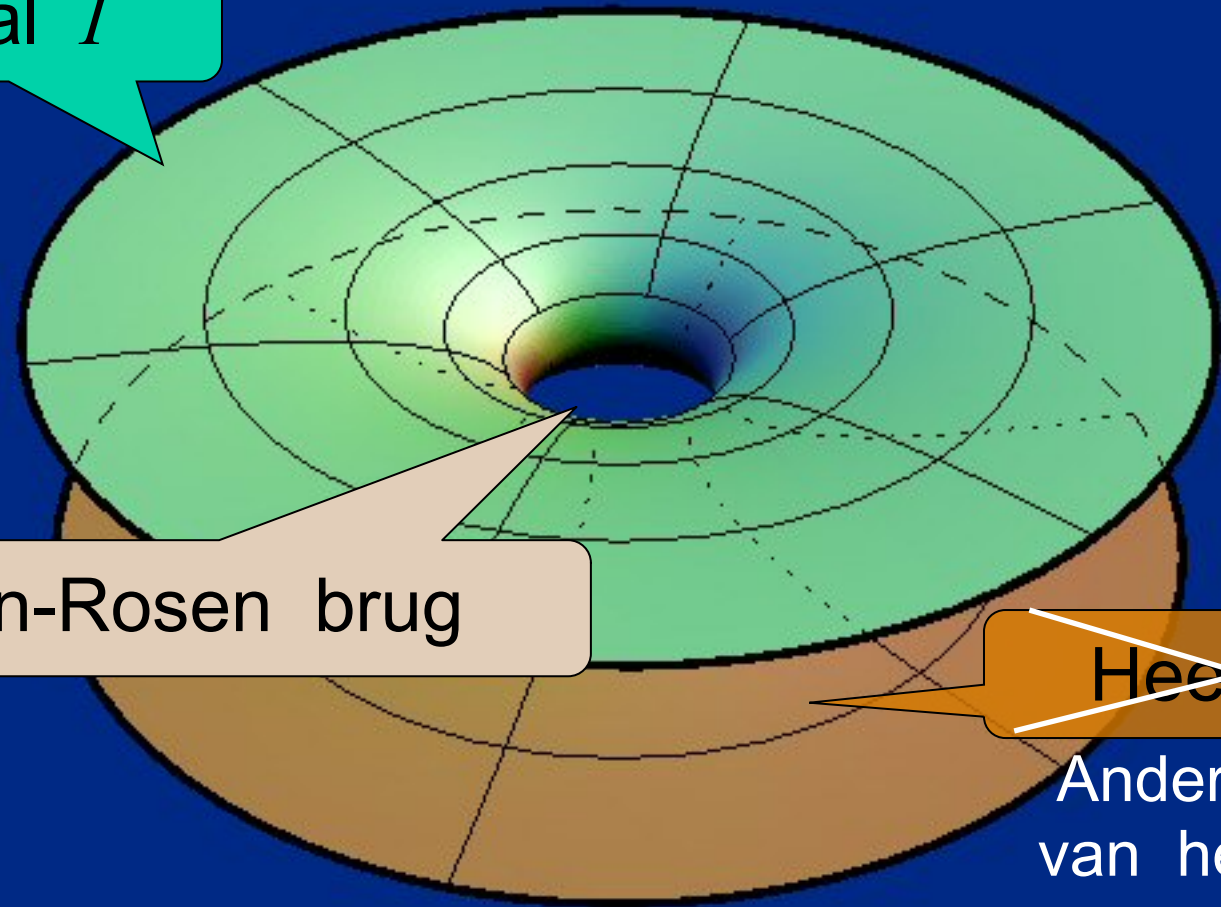
AA
We geloven nu dat de Einstein-Rosen brug eenvoudigweg tegenoverliggende kanten van hetzelfde zwarte gat met elkaar verbindt !

Heelal *I*

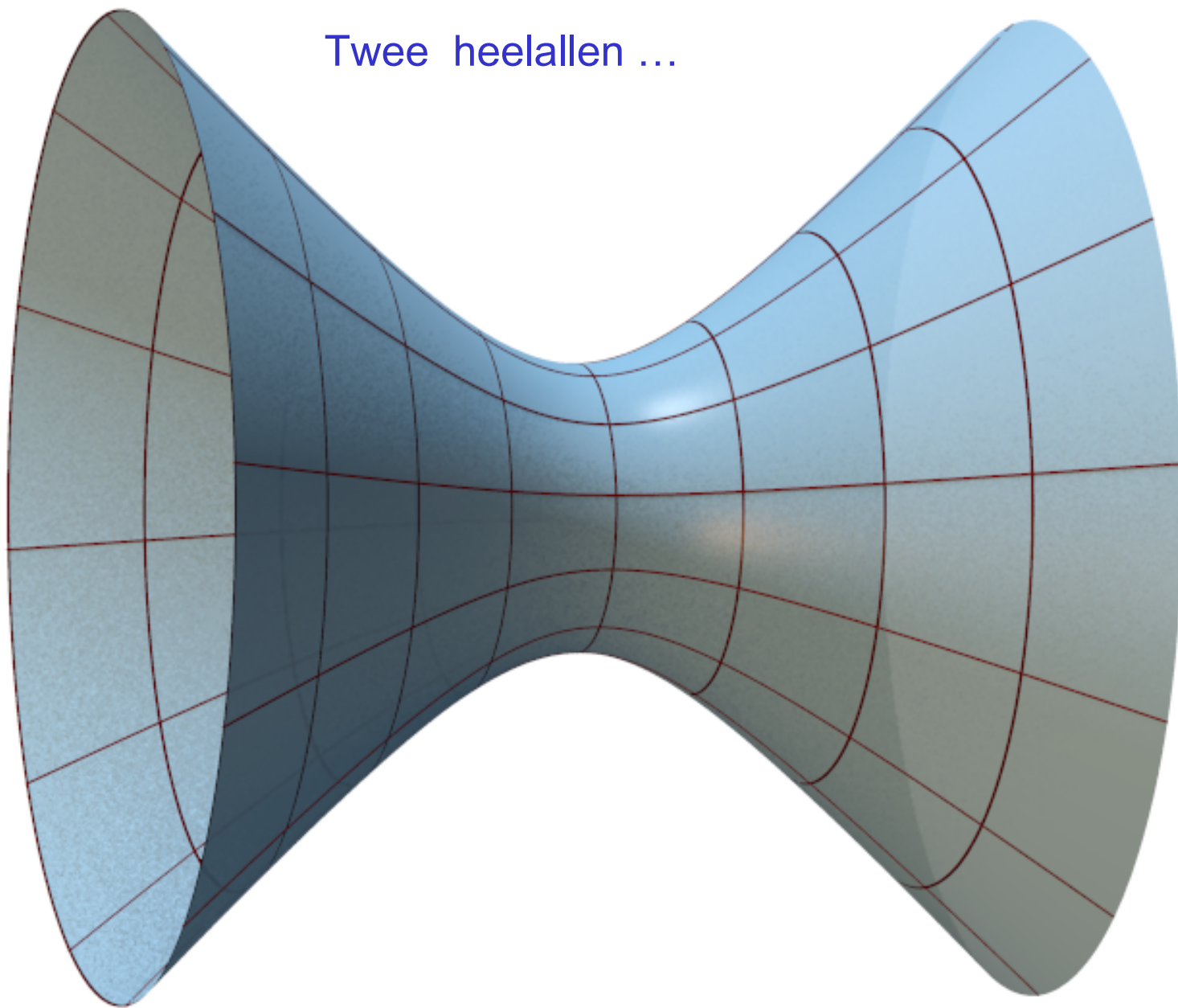
Einstein-Rosen brug

~~Heelal *II*~~

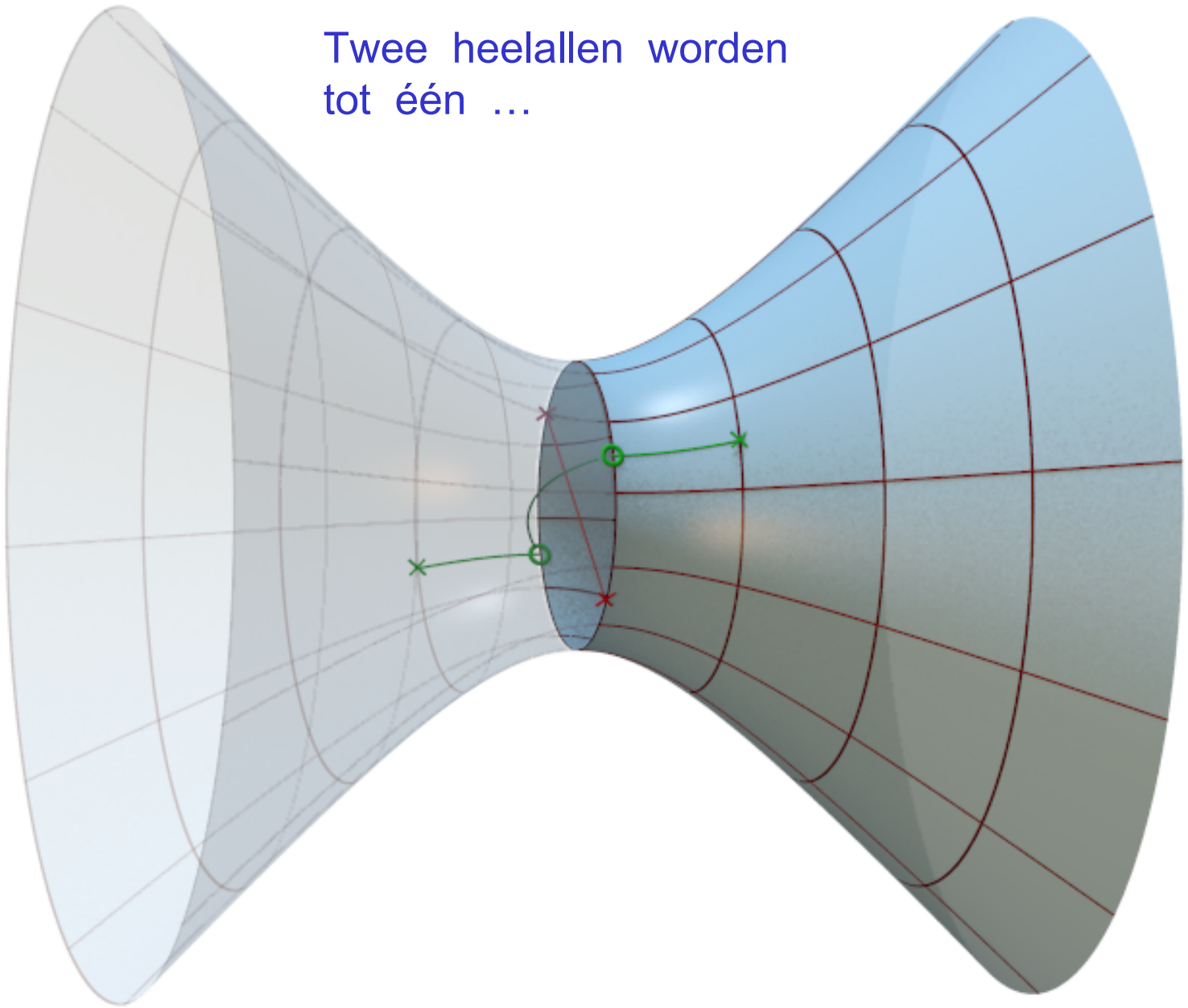
Andere kant van hetzelfde zwarte gat



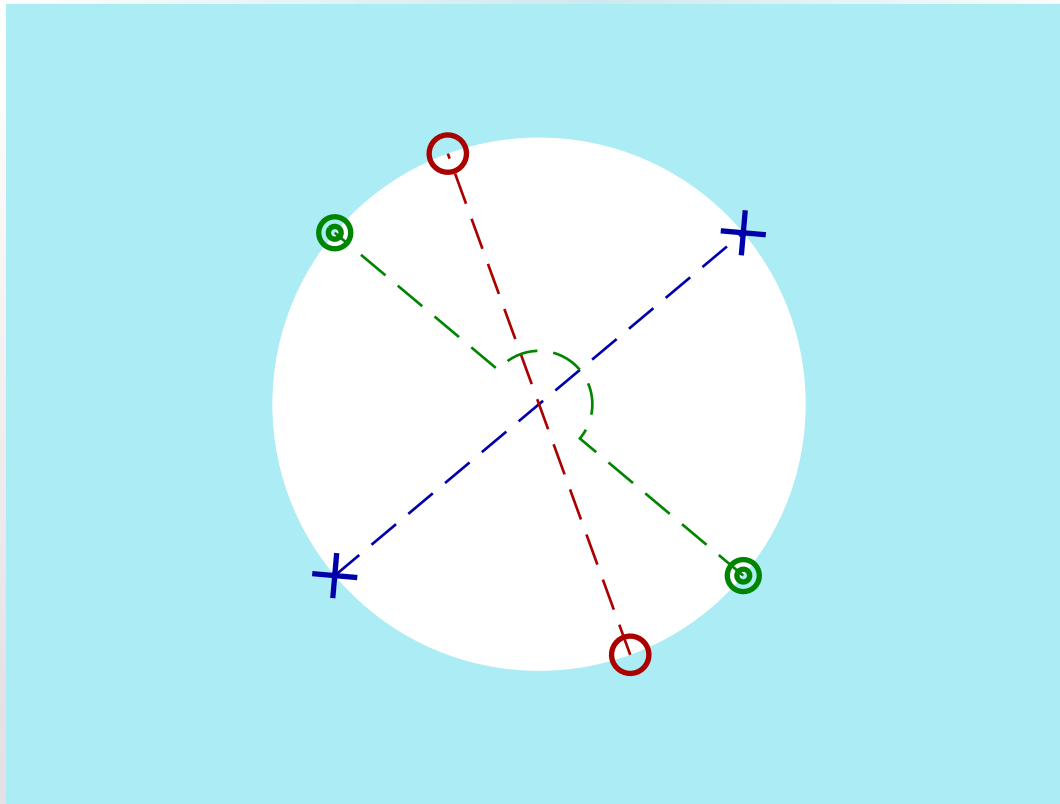
Twee heelallen ...



Twee heelallen worden
tot één ...



Antipodale identificatie ...
verwijdert de binnenkant van het gat!



Een zwart gat is niets anders dan een bolvormig stukje ruimte dat uit de ruimte-tijd is weggesneden. Tegenover elkaar liggende delen (de antipoden) worden aan elkaar gelijmd.

Zoiets kan in de “gewone” Minkowski ruimte-tijd niet gebeuren (er zou een singulariteit ontstaan).

In een zwart gat zou dit ook een singulariteit in de oorsprong zijn, maar die zit daar toch al, in de oneindig verre toekomst, en is daarom fysisch onschadelijk.

Bij elkaar lossen deze ideeën ook andere problemen op (“firewall”)

De stroom ingaande deeltjes bepaalt nu de stroom uitgaande deeltjes met een matrix – de S-matrix – die unitair is, en die we kunnen uitrekenen:

$$S = \begin{pmatrix} F^+ & F^- \\ F^- & F^+ \end{pmatrix}; \quad \begin{aligned} (F^+)^2 + (F^-)^2 &= 1 \\ (F^+)^\dagger F^- + (F^-)^\dagger F^+ &= 0 \end{aligned}$$

F^- verbindt heelal I met heelal II, zodat die deeltjes met elkaar praten. Die term weglaten zou unitariteit verbreken.

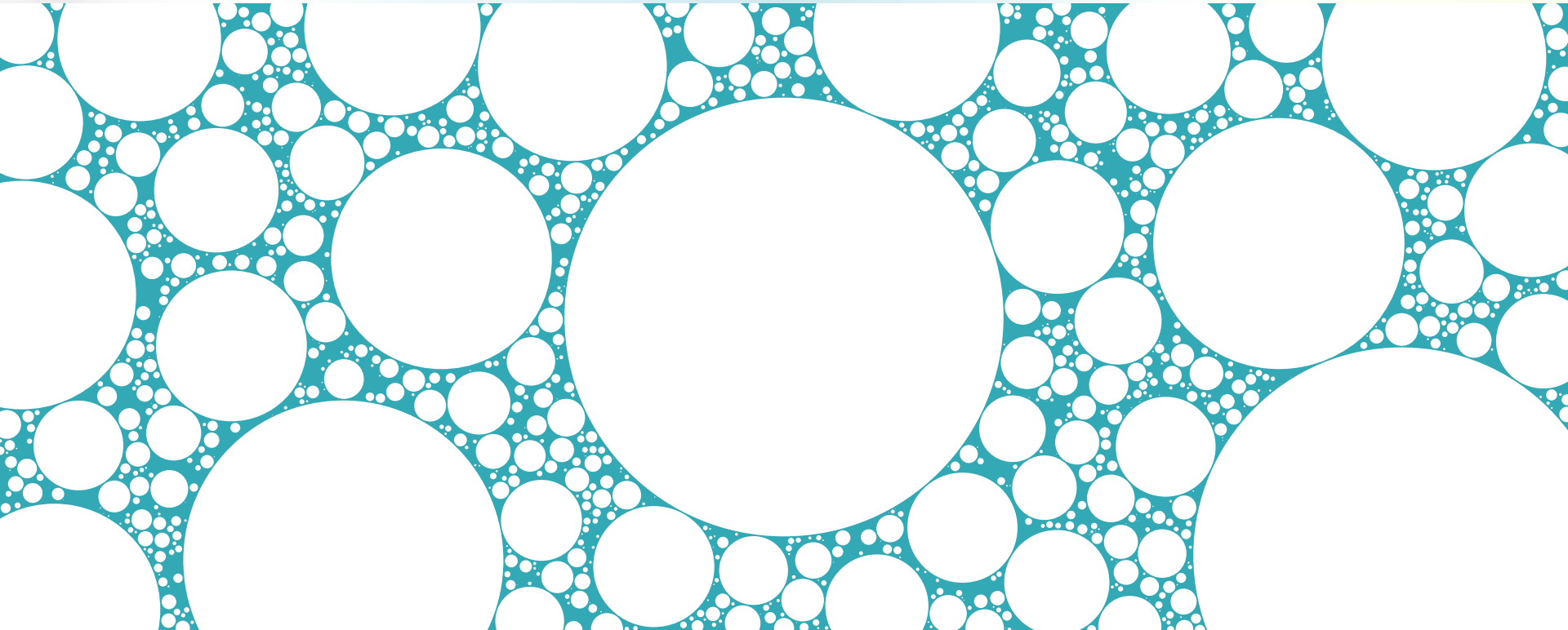
Maar er zijn onbeantwoorde vragen

Die “gravitationele terugstoot” hangt alleen van de impuls van de deeltjes af. Niet van het soort deeltje. Als er verschillende soorten deeltjes zijn met dezelfde impuls, is de S-matrix niet unitair meer.

Wel kunnen we naar de “electromagnetische terugstoot” kijken. Maar het Standaardmodel met de vele verschillende soorten deeltjes lijkt nog ver weg ...

Denkbare oplossing: de resulterende algebra lijkt op die van de snarentheorie.

Ruimte en tijd kunnen “virtuele zwarte gaten” bevatten. Hun “vacuolen” kunnen er ruimte-tijdschuim van maken ...



e-Print: [arxiv:1612.08640 \[gr-qc\] \(2016\)](https://arxiv.org/abs/1612.08640)

See also:

https://www.staff.science.uu.nl/~hooft101/lectures/GtHBlackHole_2017.pdf