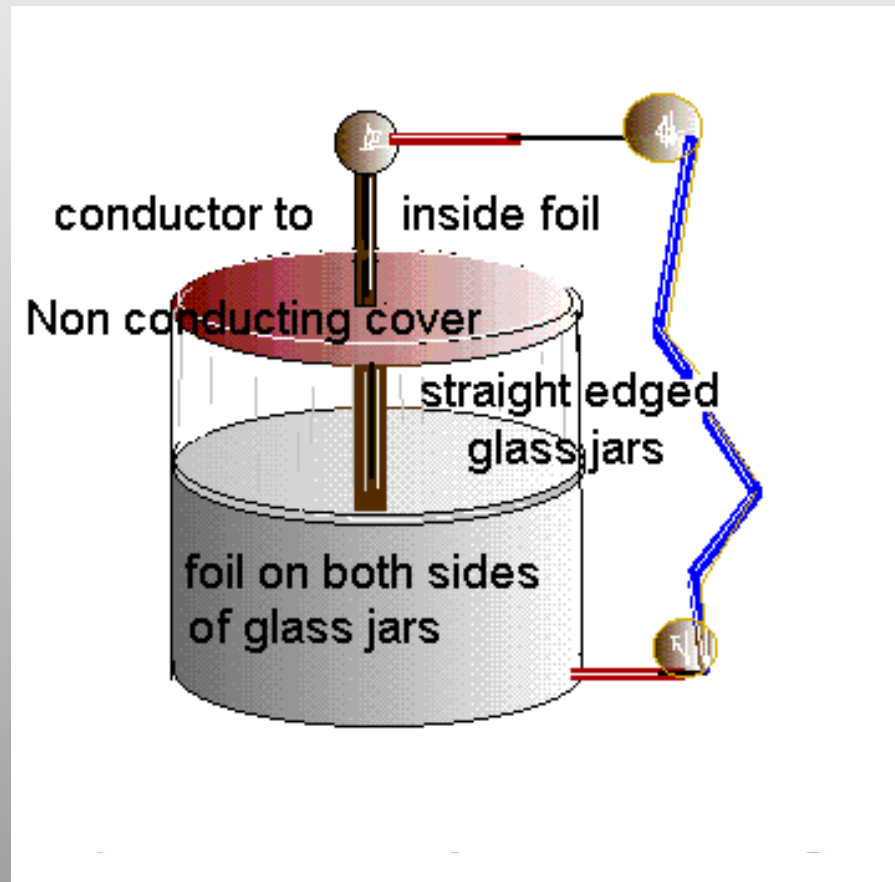


# Van Leidsche Flesch ...



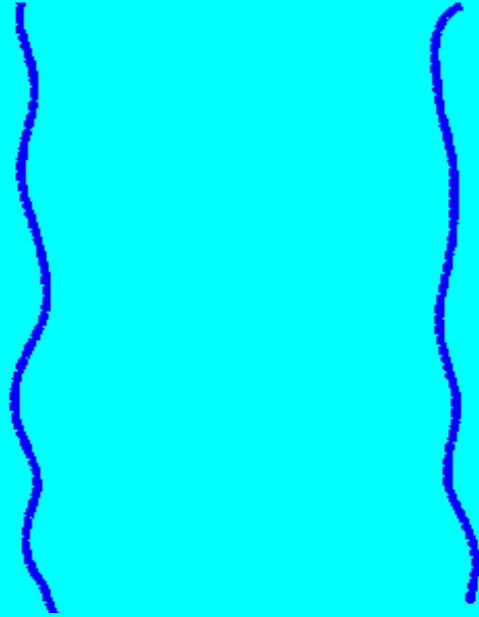
...tot

# Kleinse Fles

- **Introductie**
  - **String Zoologie**
  - **Brane Worlds**
  - **Zwarte Gaten**
- 

# Introductie

“String Theory” is een Theorie van Gravitatie

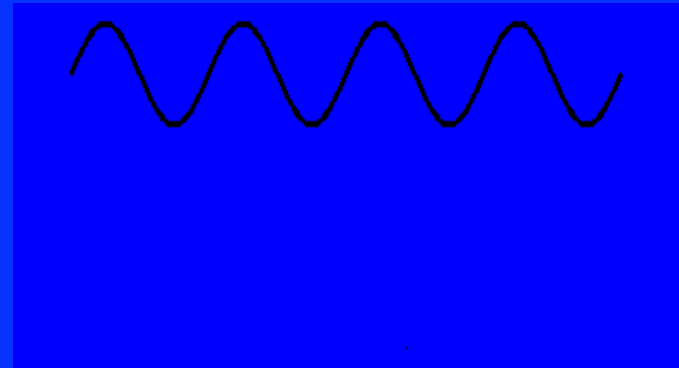
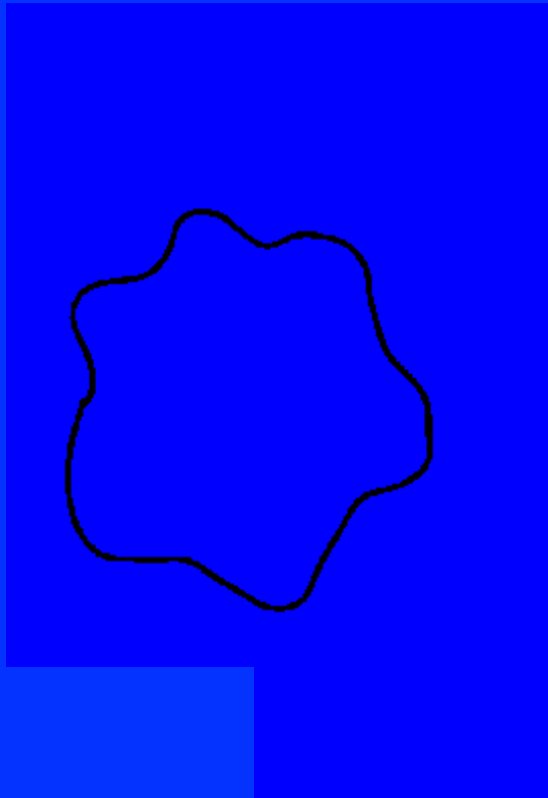


# “The Crux of the Matter”

- **Algemene Relativiteitstheorie**  
stelt geen eisen aan de materie
- **String Gravitatie**  
accepteert alleen String materie

→ Alle materie is opgebouwd uit Strings

# Het String Spectrum



Alle deeltjes zijn vibratie modes

# “String tension” bepaalt:

- Sterkte van Gravitatie
- Massa’s van de deeltjes

Dimensionele analyse:

$$\text{Massa verschillen} \approx \Delta m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

$$\equiv \text{Planck Massa: } 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

Planck Energie:  $1.22 \times 10^{19}$  GeV

Planck Massa:  $2.17 \times 10^{-5}$  gram  
( $1.3 \times 10^{19}$  maal de proton massa)

Planck Lengte:  $1.6 \times 10^{-33}$  cm



---

$$m^2=5M^2$$

---

$$m^2=4M^2$$

---

$$m^2=3M^2$$

---

$$m^2=2M^2$$

---

$$m^2=M^2$$

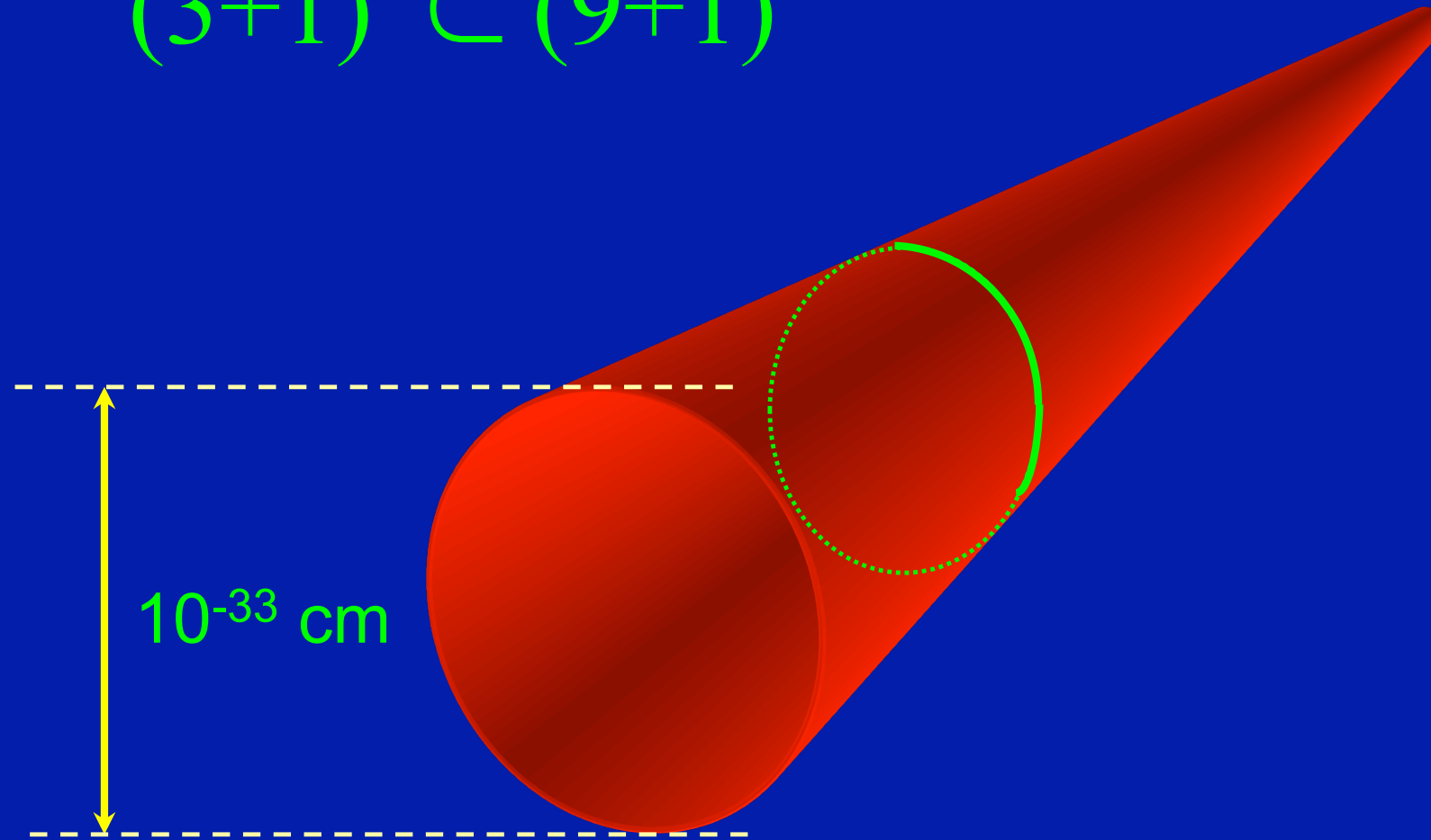
---

$$m=0$$

$$M=M_{\text{planck}}$$

Extra Dimensions:

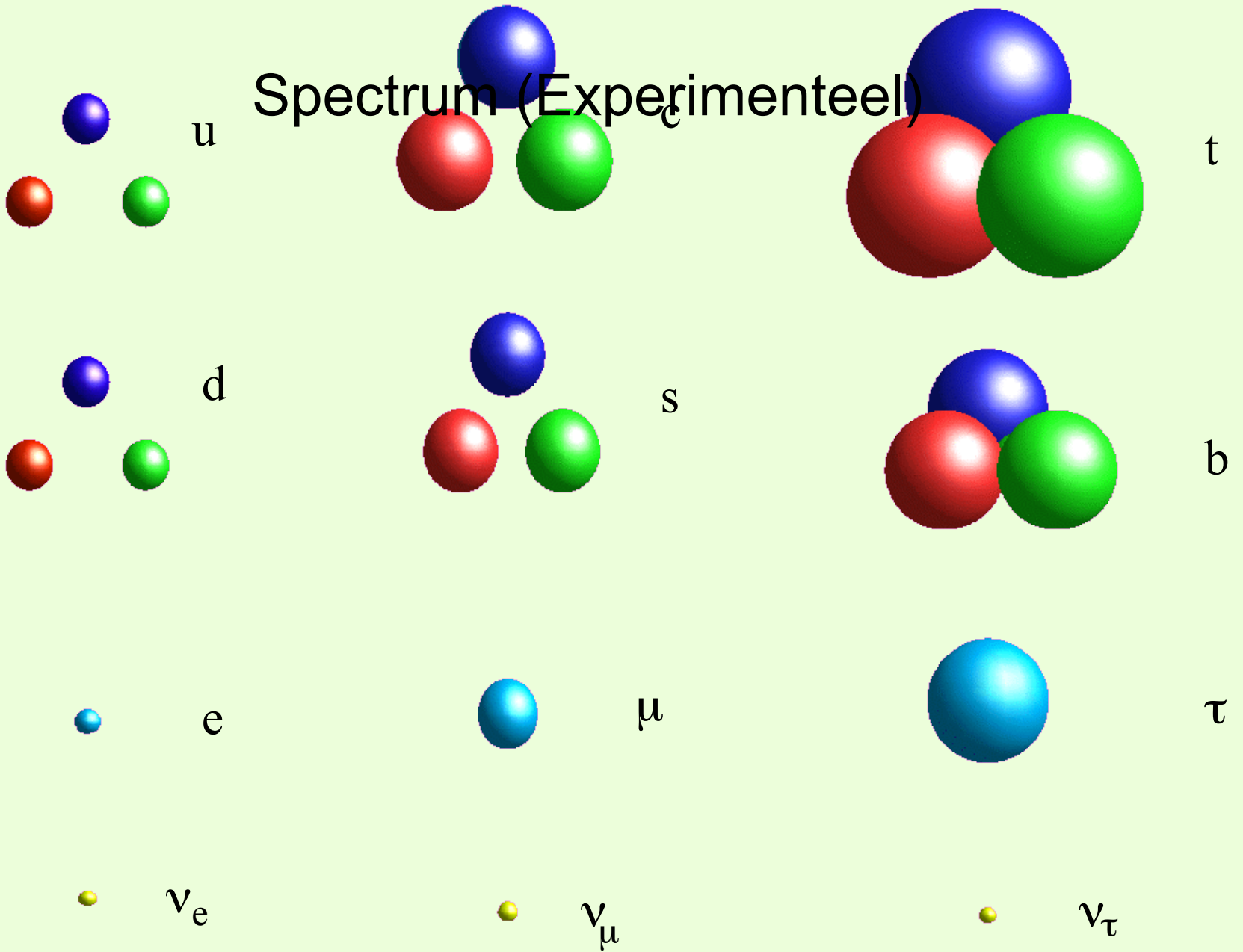
$$(3+1) \subset (9+1)$$



# Spectrum (String Theorie)

- Oneindig aantal zeer zware deeltjes
- Alle waarneembare deeltjes zijn massaloos
- Ontaarding vanwege “extra dimensies”

# Spectrum (Experimenteel)



# Bosonen

- Foton
- $W^+$ ,  $W^-$ , Z
- Gluonen

Vector Bosonen  
( $\rightarrow$  interacties)

- Higgs

Scalar boson  
( $\rightarrow$  massas)

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map. It shows a complex pattern of temperature variations across the sky, represented by a color scale from blue (cooler) to red (warmer). The map is filled with small-scale fluctuations and larger-scale structures, with some white areas indicating regions where data is missing or masked.

## **Bericht UIT DE Cosmos:**

- **Dark, Non-baryonic Mass (tot 90%!**
- **Dark Energy**



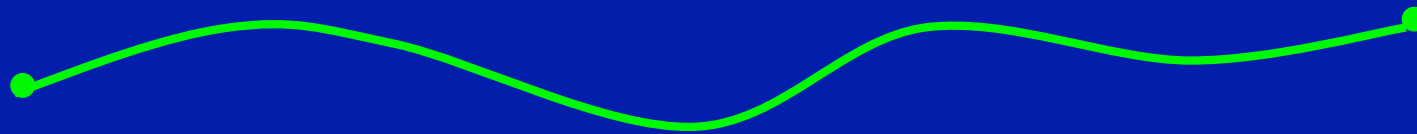
# Unificatie

- Newton: Zwaartekracht en hemelmechanica
- Maxwell: Electriciteit en Magnetisme
- Einstein: Tijd en Ruimte
- Einstein: Gravitatie en Ruimte
- Quantum mechanica: Structuur van materie en electrodynamicica
- Standaard model: Principes van alle interacties
- String Theorie : Materie en interacties

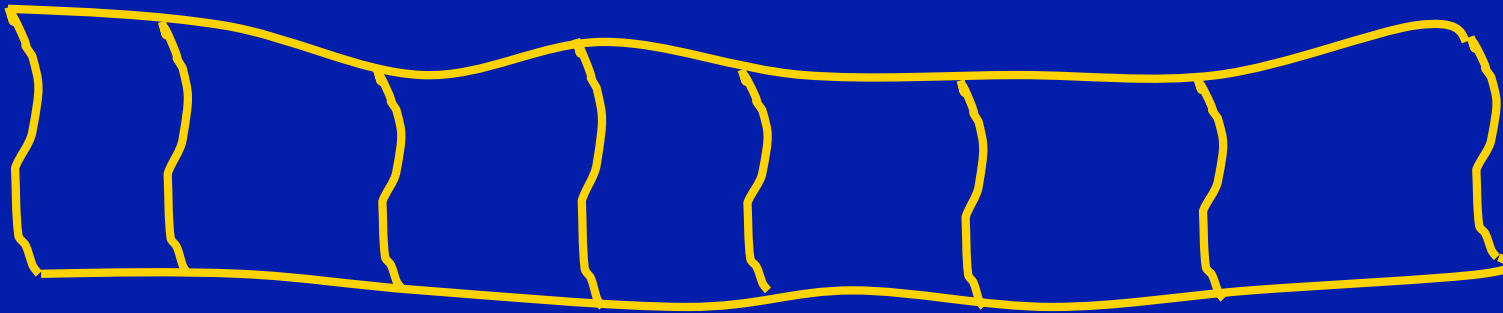
# String Zoology



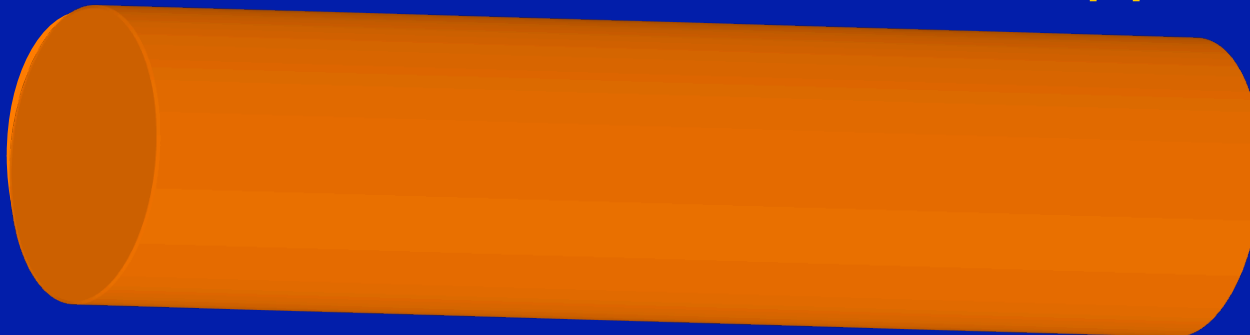
# Deeltjes, Strings, Membranen



Wereldlijn



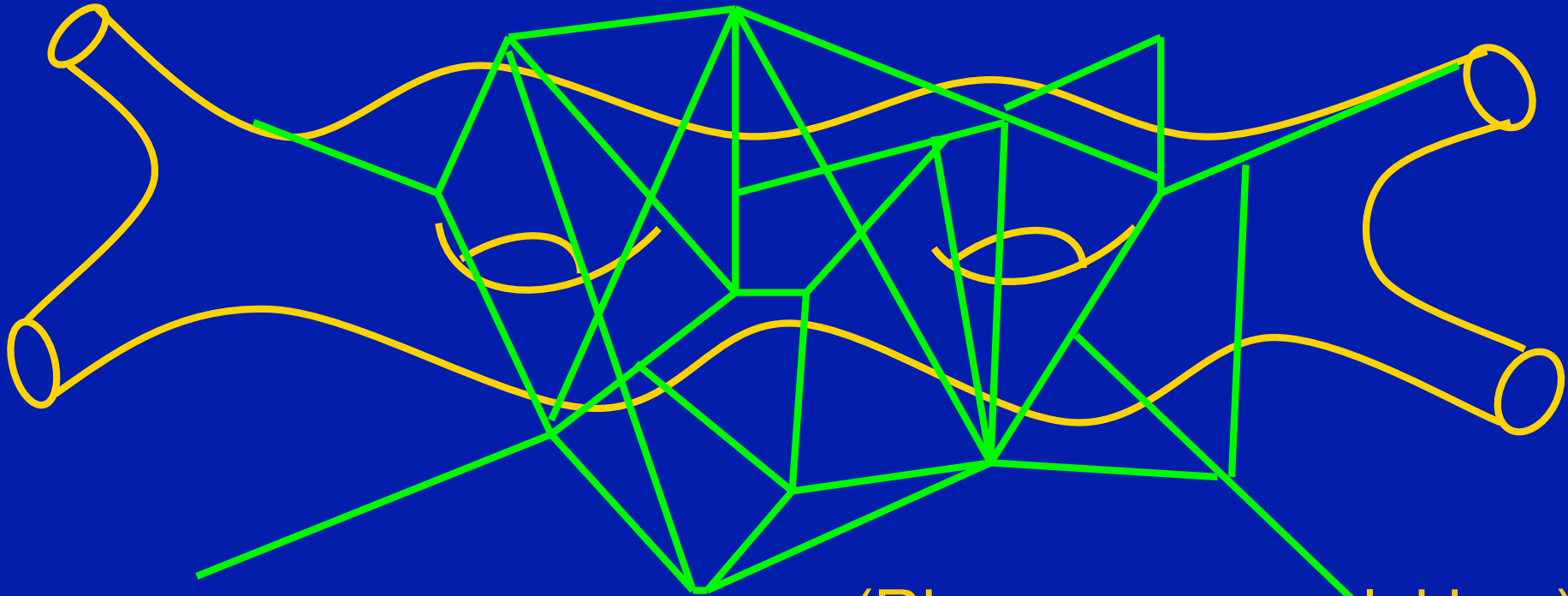
Wereldoppervlak



Wereld  
Volume

# Interacties

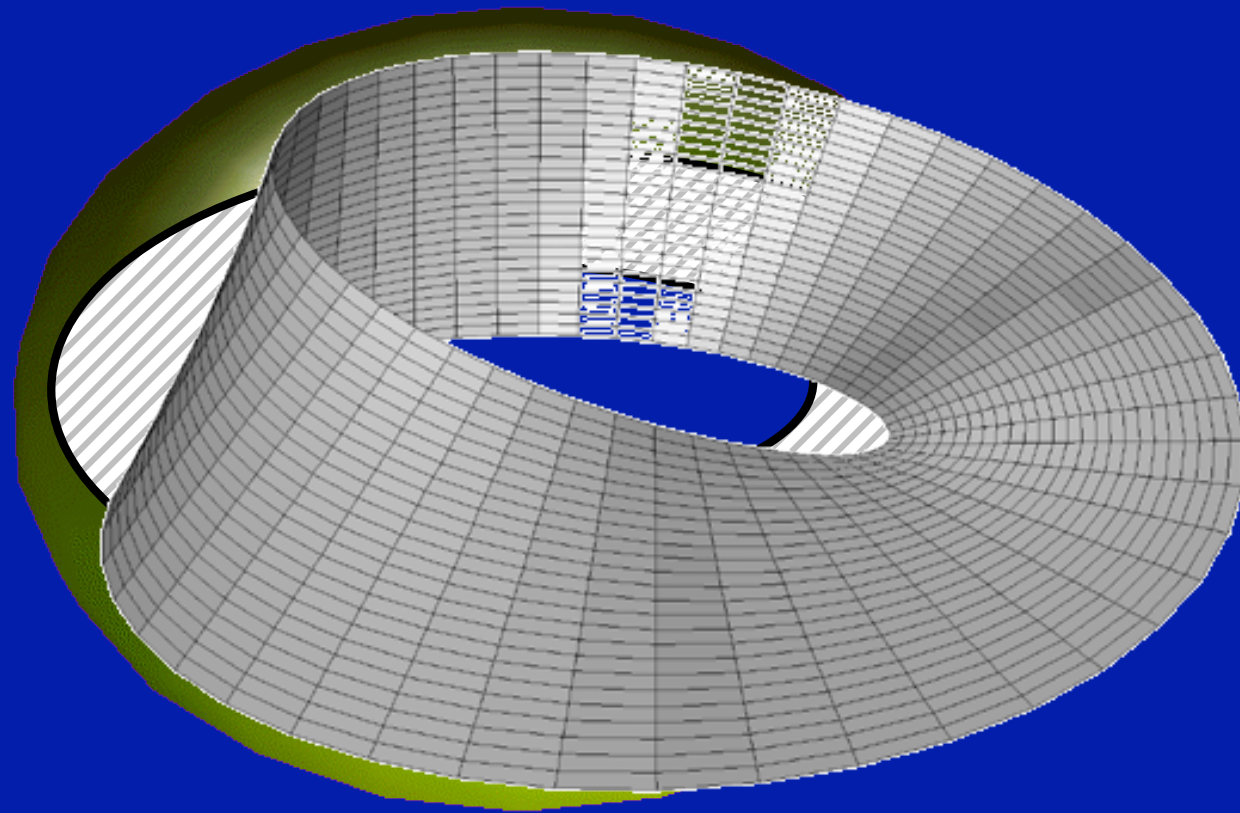
Slingschranen?  
Deeltjes

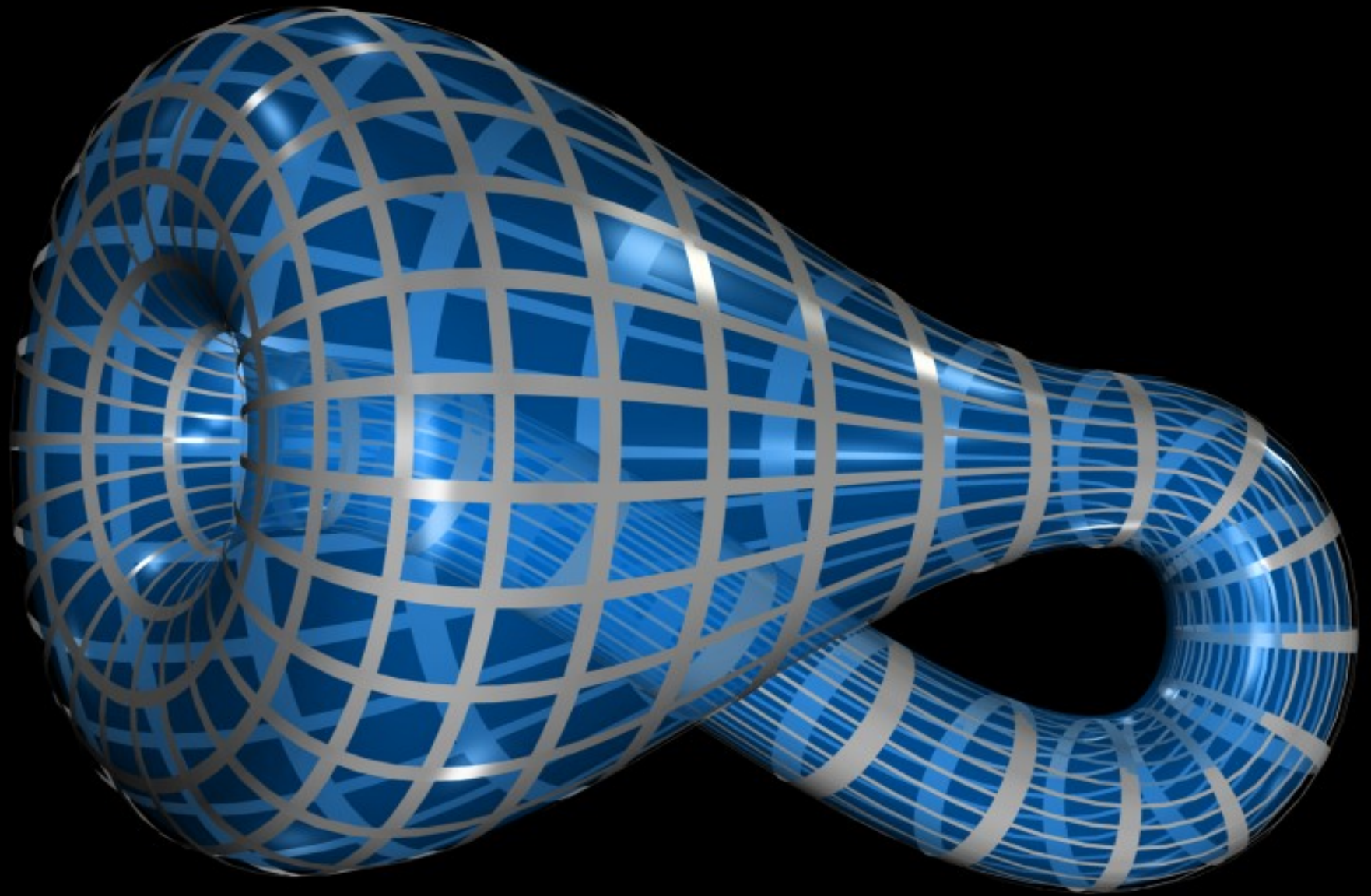


(Riemann-oppervlakken)

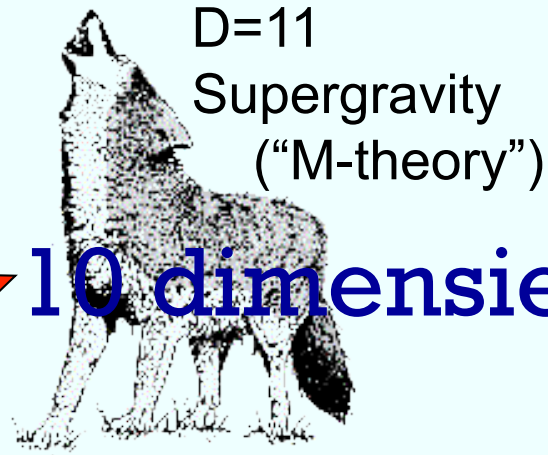
# Gesloten, open (on)georiënteerd

Gesloten, ongeoriënteerd  
Open, ongeoriënteerd



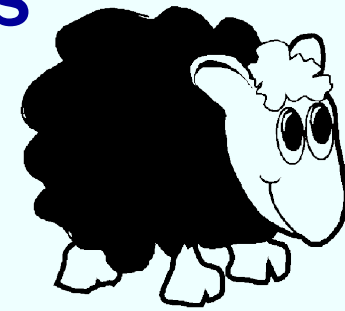
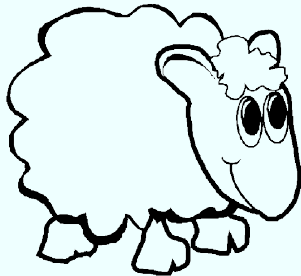


# Open Strings Ongeoriënteerd

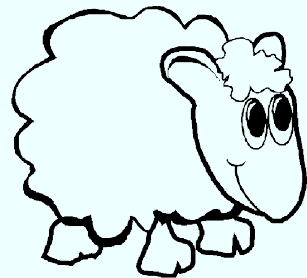


## Strings in 10 dimensies

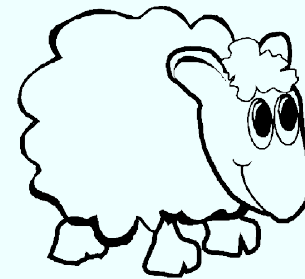
Heterotic  
 $E_8 \times E_8$



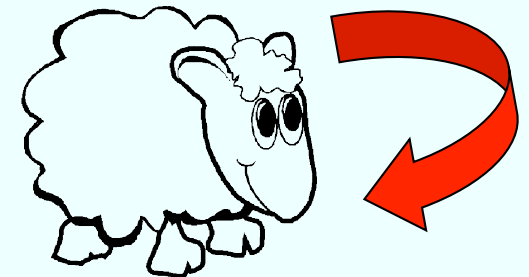
Type I



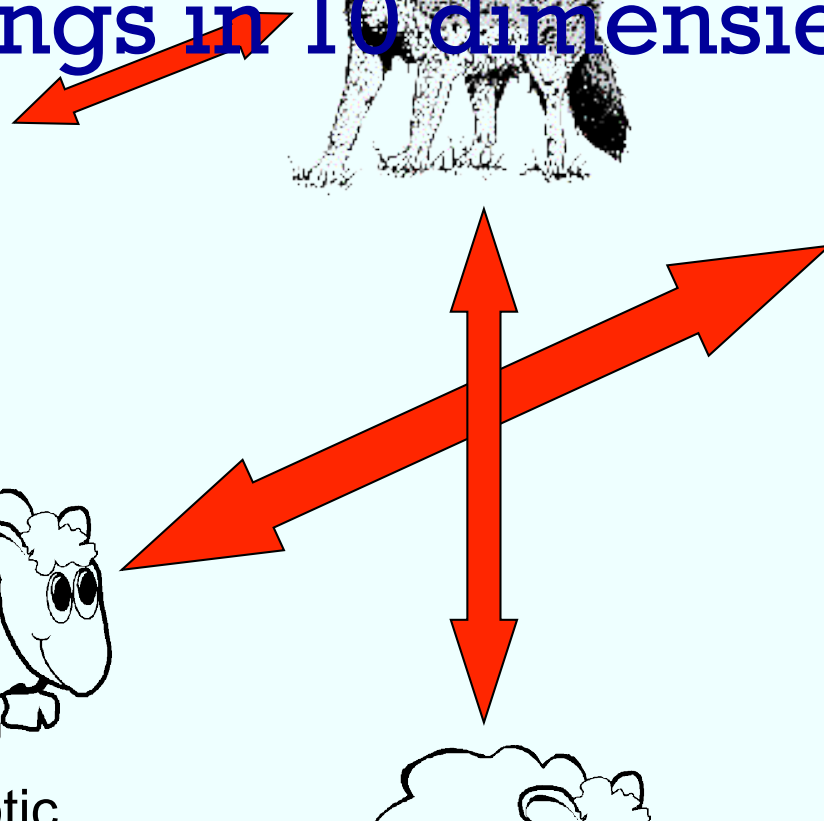
Heterotic  
SO(32)



Type IIA



Type IIB



# Een nieuw gezichtspunt

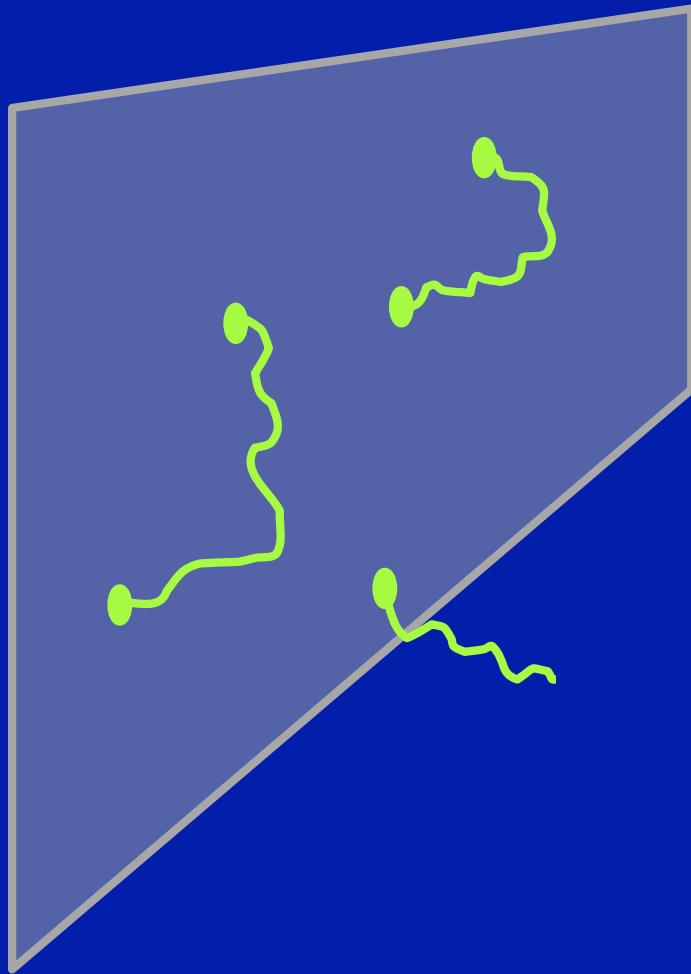
- Strings zijn niet fundamenteel, alleen maar gereedschap
- Er is een nieuwe, unieke, fundamentele theorie
- Deze theorie blijft voorlopig een mysterie
- Heeft een zeer groot aantal “grondtoestanden” met dimensies  
11, 10, ....., 4, ...

# “Brane Worlds”



# D-Branes

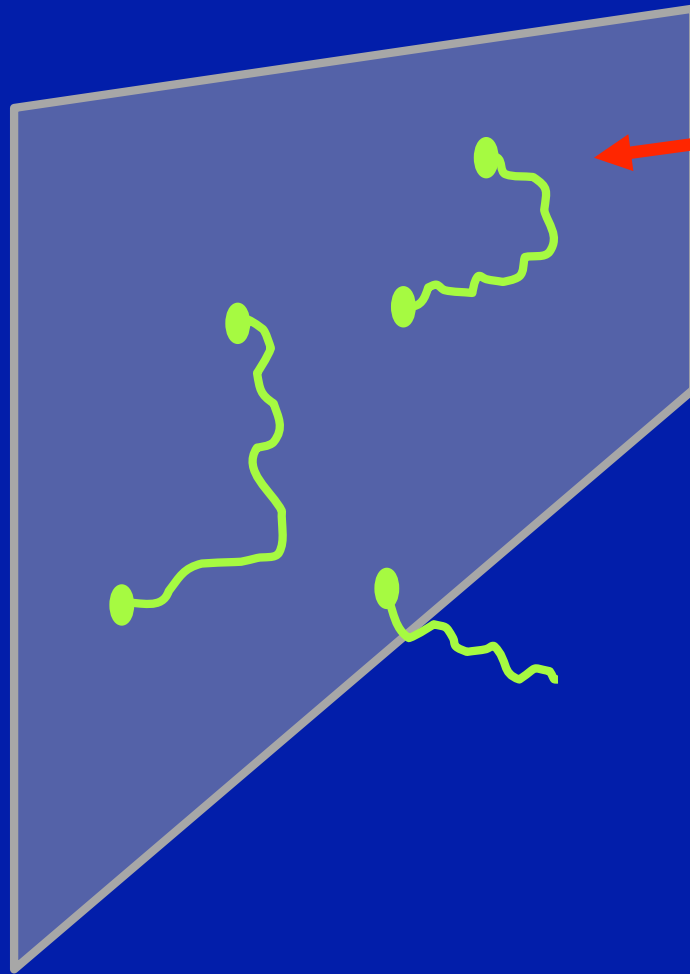
Open strings die op een membraan eindigen



Object van dimensie  $p$   
("p-brane")



# “Brane Worlds”



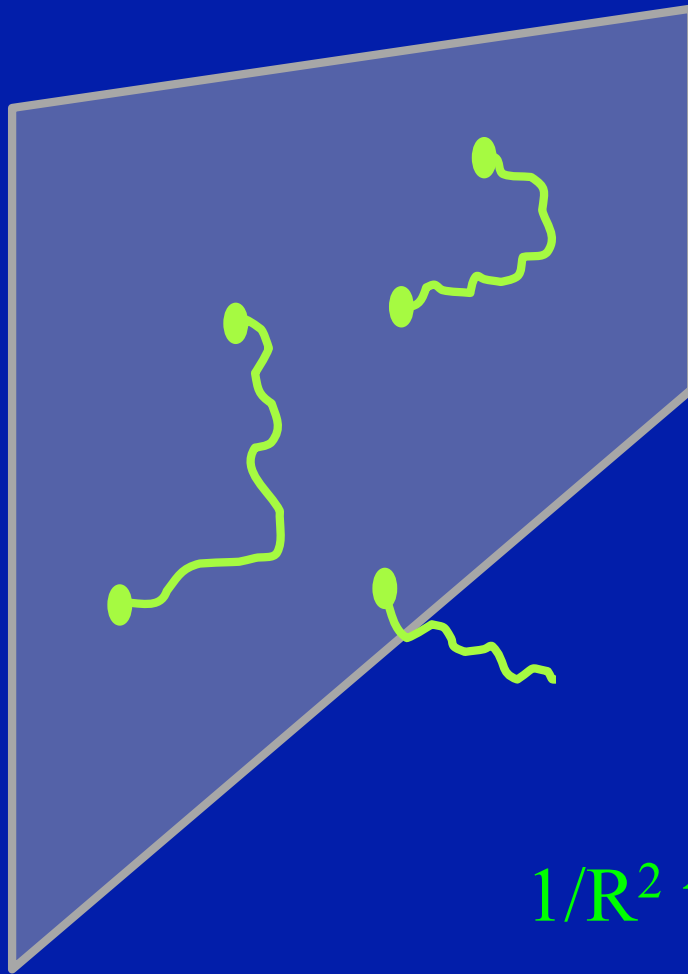
U bent hier!

Op het membraan induceren  
De open strings fotonen,  
quarks, leptonen,...



Standard model

# Brane Worlds (2)



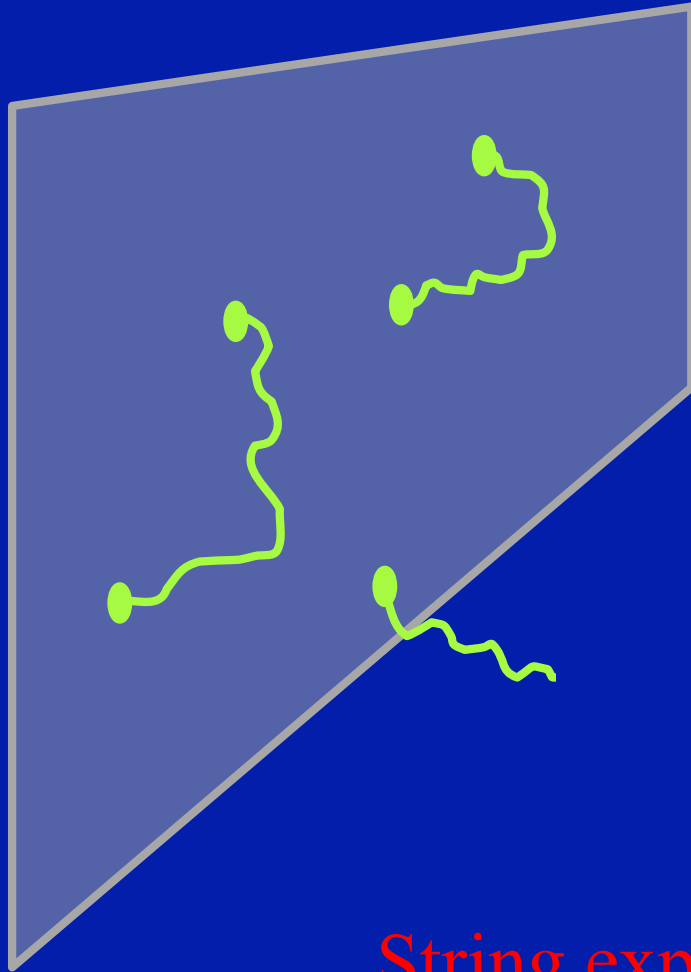
Maar gravitatie ziet  
alle dimensies

$$F = G_N \frac{m_1 m_2}{R^{(D-2)}}$$

$1/R^2$  tested to  $\approx 1$  mm.

(Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali)

# Brane Worlds (3)



Gevolg:

“Planck massa”  
kan  $\approx 1$  TeV zijn!

String experimenten bij LHC ?

# Zwarte Gat

# Hoe testen we String Theorie?

Experimenteel:

- Gravitatie correcties (klassiek en quantum):  
Te klein
- Elementaire deeltjes fysica:  
Te veel mogelijkheden

# Hoe testen we String Theorie?

Theoretisch:

- Interne consistentie  
(Vooral: Quantum gravitatie)
- “Gedanken” experimenten  
(Zwarte gaten, Cosmologie, .... )

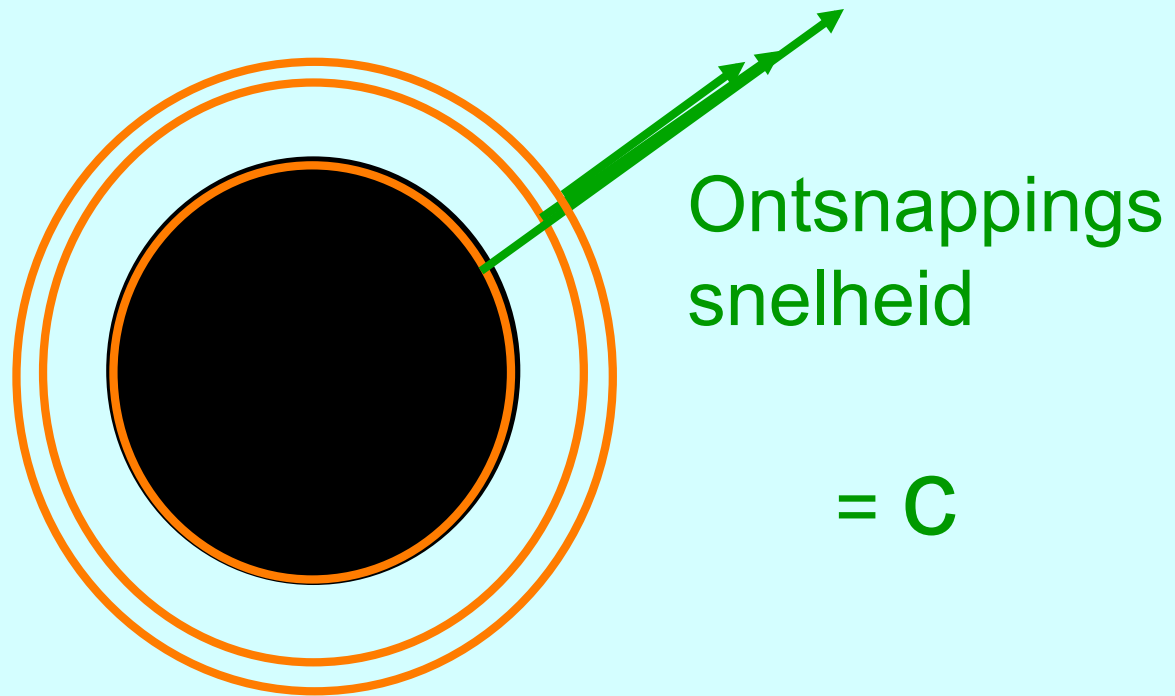
# Quantum Mechanics

vs.

# Algemene Relativiteits theorie

- “Niet renormeerbaar”
- Informatie probleem van Zwarte Gat
- Principes

# Zwart gat





# Eigenschappen (klassiek)

- “Een Zwart Gat heeft geen haar”  
(alleen massa, lading, spin)
- Waarnemer op oneindig ziet een horizon
- Invallende waarnemer ziet niets bijzonders...

# Eigenschappen (quantum)

- Bekenstein: Een Zwart Gat heeft entropie: (\*)

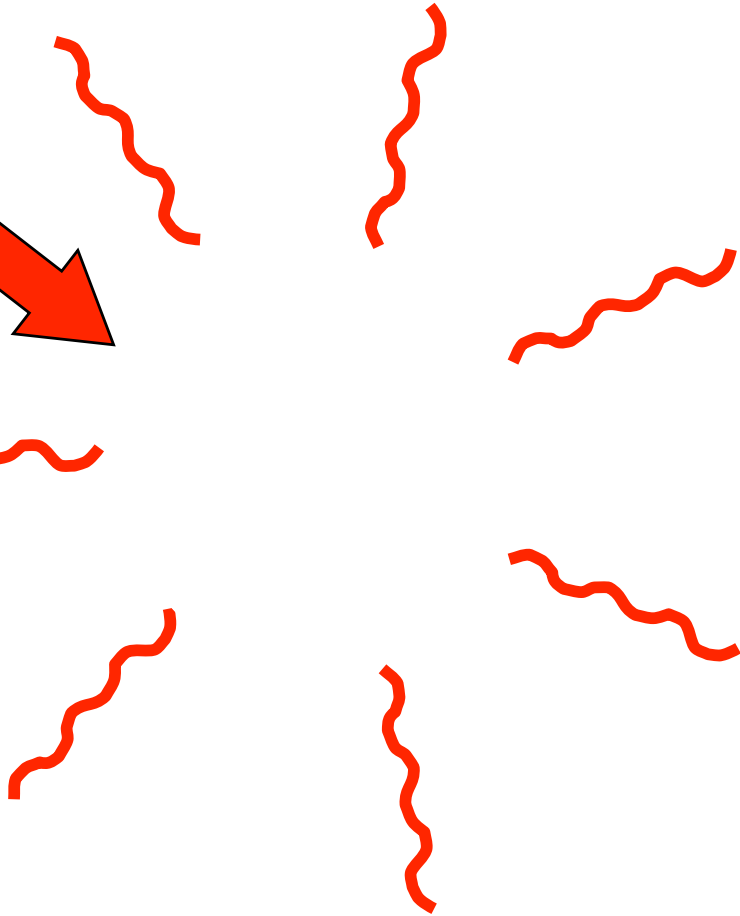
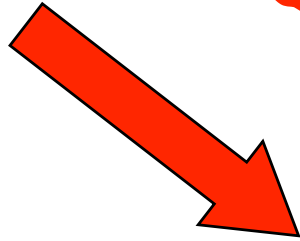
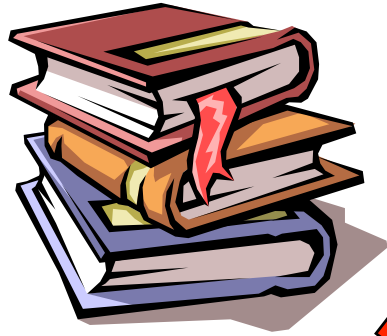
$$S = \frac{A}{4 G_N}$$

- Hawking: Een Zwart Gat heeft een temperatuur en zendt straling uit

(\*)  $S = \log(\Omega)$ . Tweede wet thermodynamica:  $dS > 0$

# Paradoxen

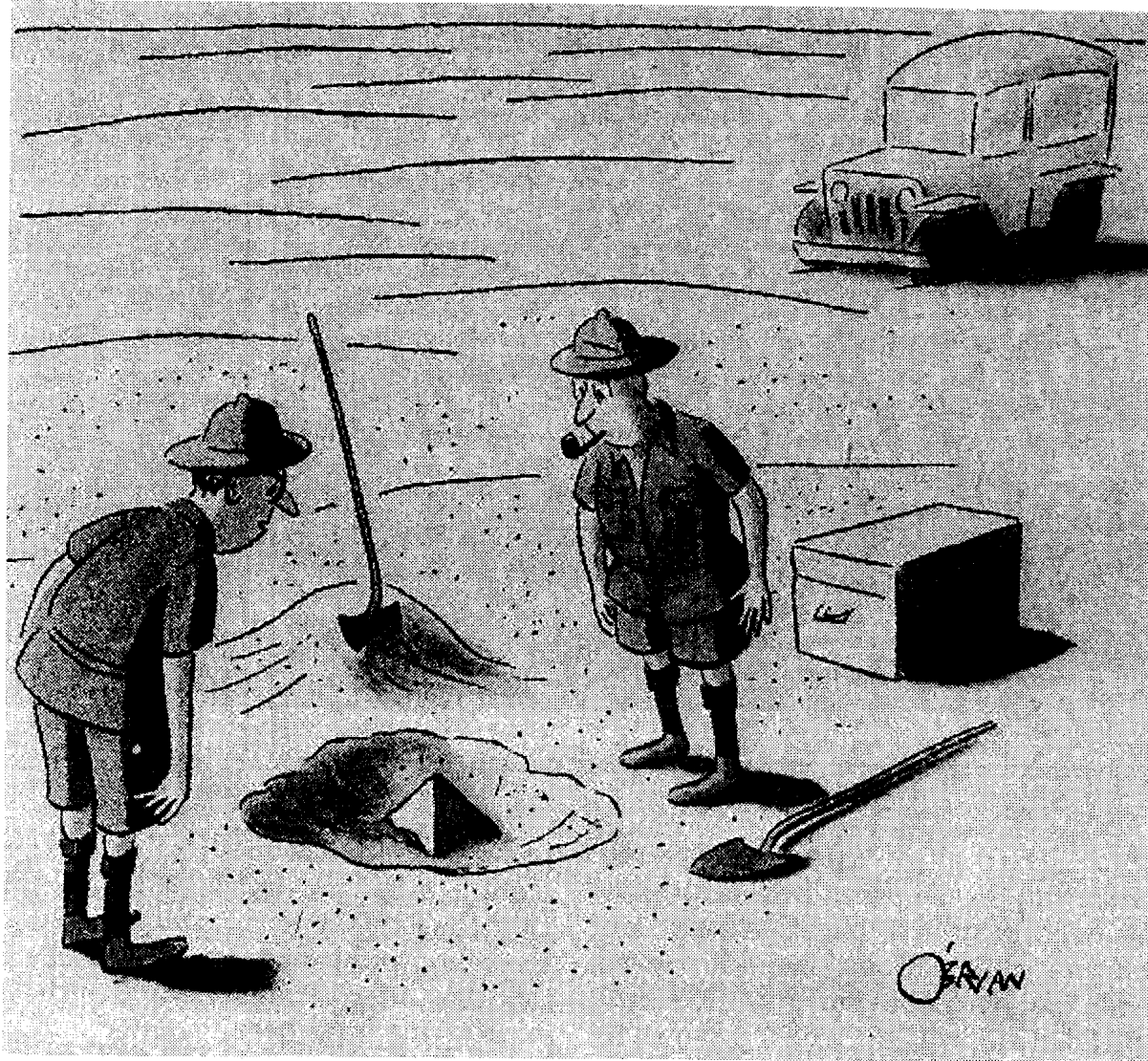
- Entropie probleem:  
Welke micro-toestanden corresponderen met  $S$  ?  
Waarom  $S \approx$  Oppervlak en niet  $S \approx$  Volume ?
- Informatie probleem:  
Unitaire tijds-evolutie?  
Kan een golf-functie in een Zwart Gat verdwijnen?



# Zwarte gaten in String Theorie

- Entropie is berekend voor (zeer speciale) zwarte gaten (D-branen gewikkeld om 6-torus)  
→ correcte antwoord!
- Entropie  $\approx$  Oppervlak suggereert opslag van Informatie als in een hologram (‘t Hooft)  
→ Gerealiseerd in (zeer speciale) string compactificaties

## Conclusie



*"This could be the discovery of the century. Depending, of course, on how far down it goes."*

# Waar houdt Copernicus op?

- Aarde?
- Zonnestelsel?
- Melkweg?
- Onze Materie?
- Ons Heelal?
- Ons Standaard Model?
- String Theory?