

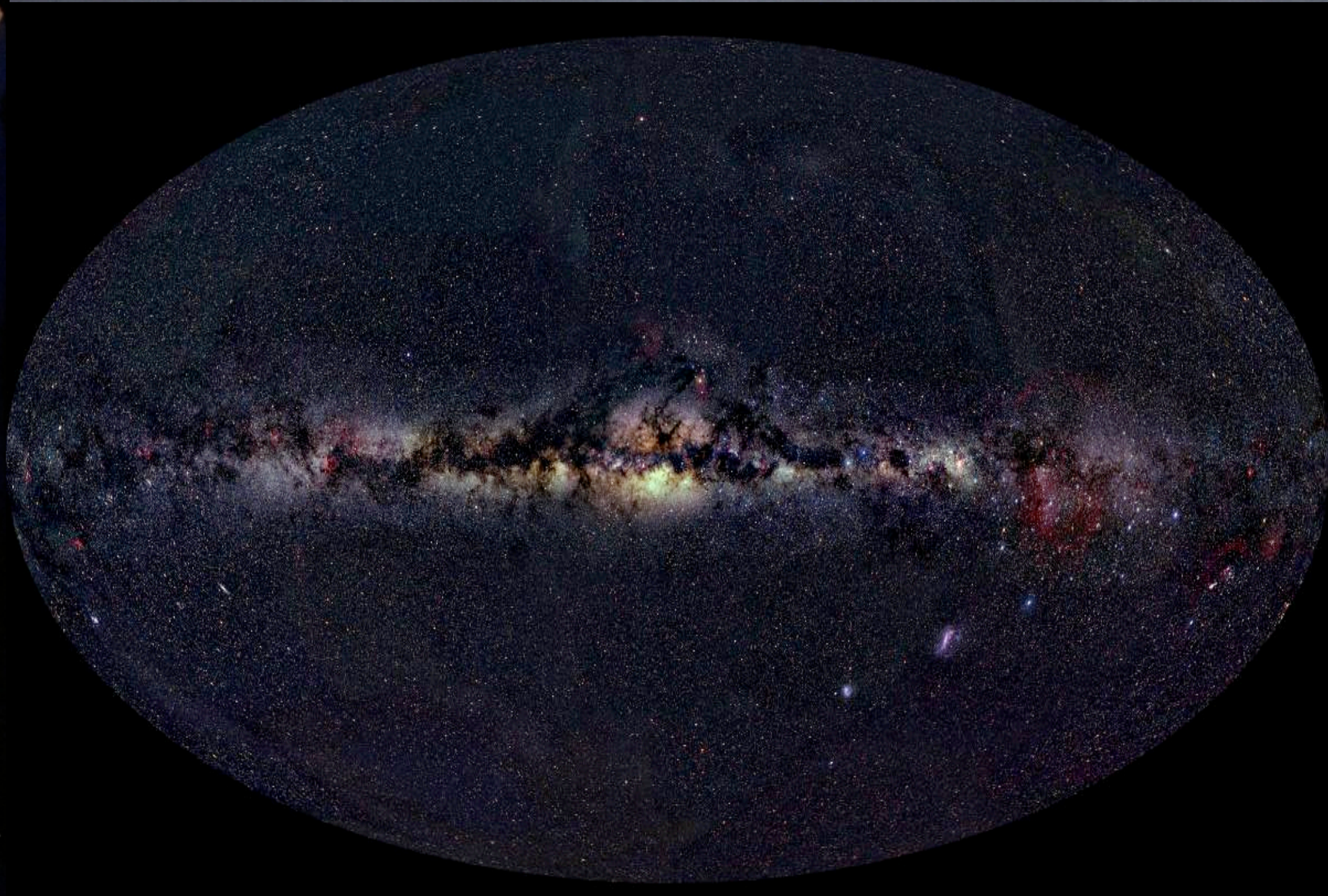
De Donkere Kant van het Heelal

Koen Kuijken
Sterrewacht Leiden, Universiteit Leiden

Achtergrond

- Ons heelal **dijt uit**
- Het heelal begon in de **hete 'oerknal'**,
13.700.000.000 jaar geleden (3x leeftijd v/d zon)
- Sindsdien:
 - wordt het heelal ijler en ijler
 - wordt het steeds kouder
 - zijn sterren en sterrenstelsels gevormd
 - ... en zijn er natuurkundeleraren gekomen die proberen dit allemaal te begrijpen

Waarom sterren/sterrenstelsels?



Leiden Observatory



Universiteit Leiden

Spiraal- en elliptische stelsels



AAT 60

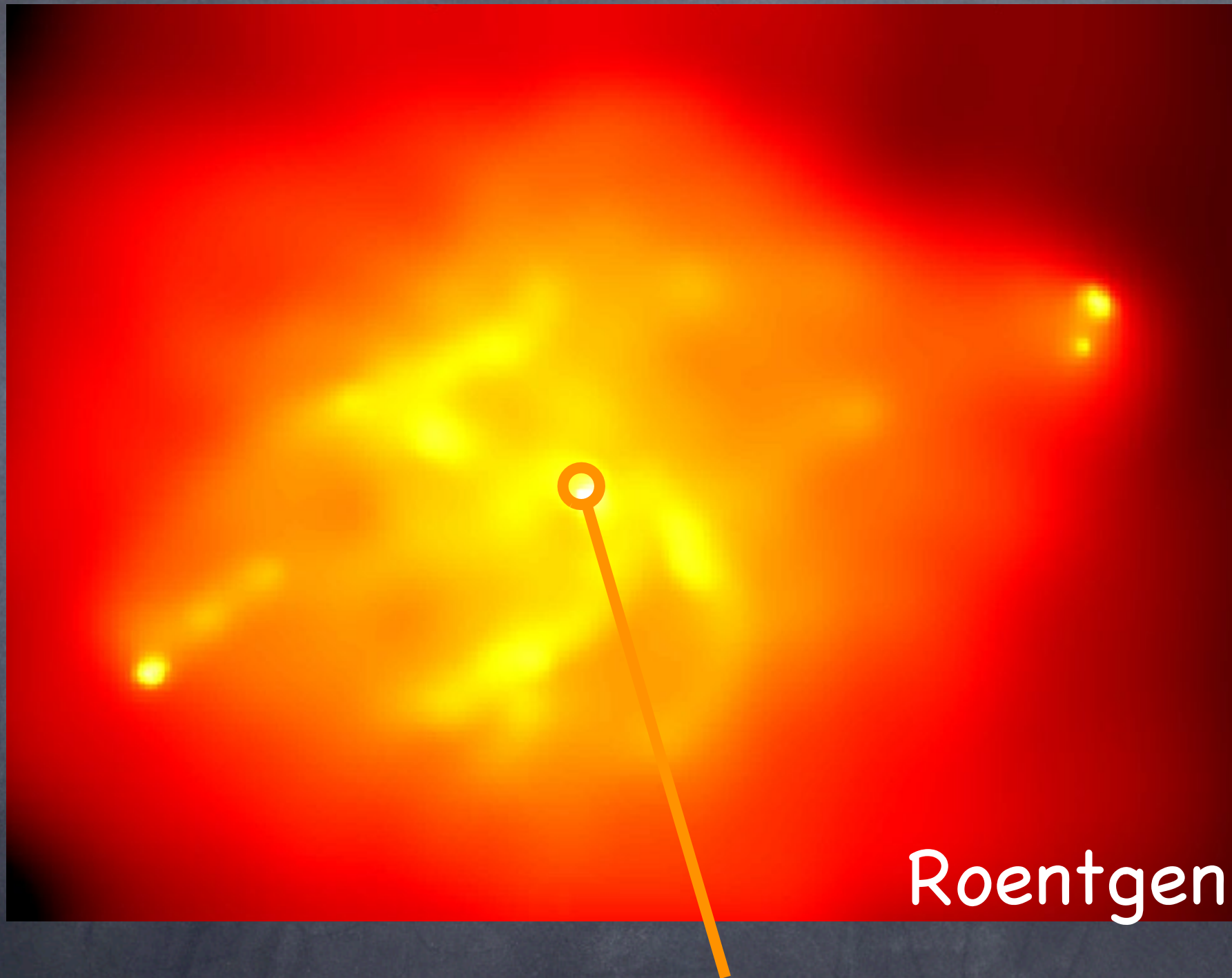
Radiostelsels

Radio



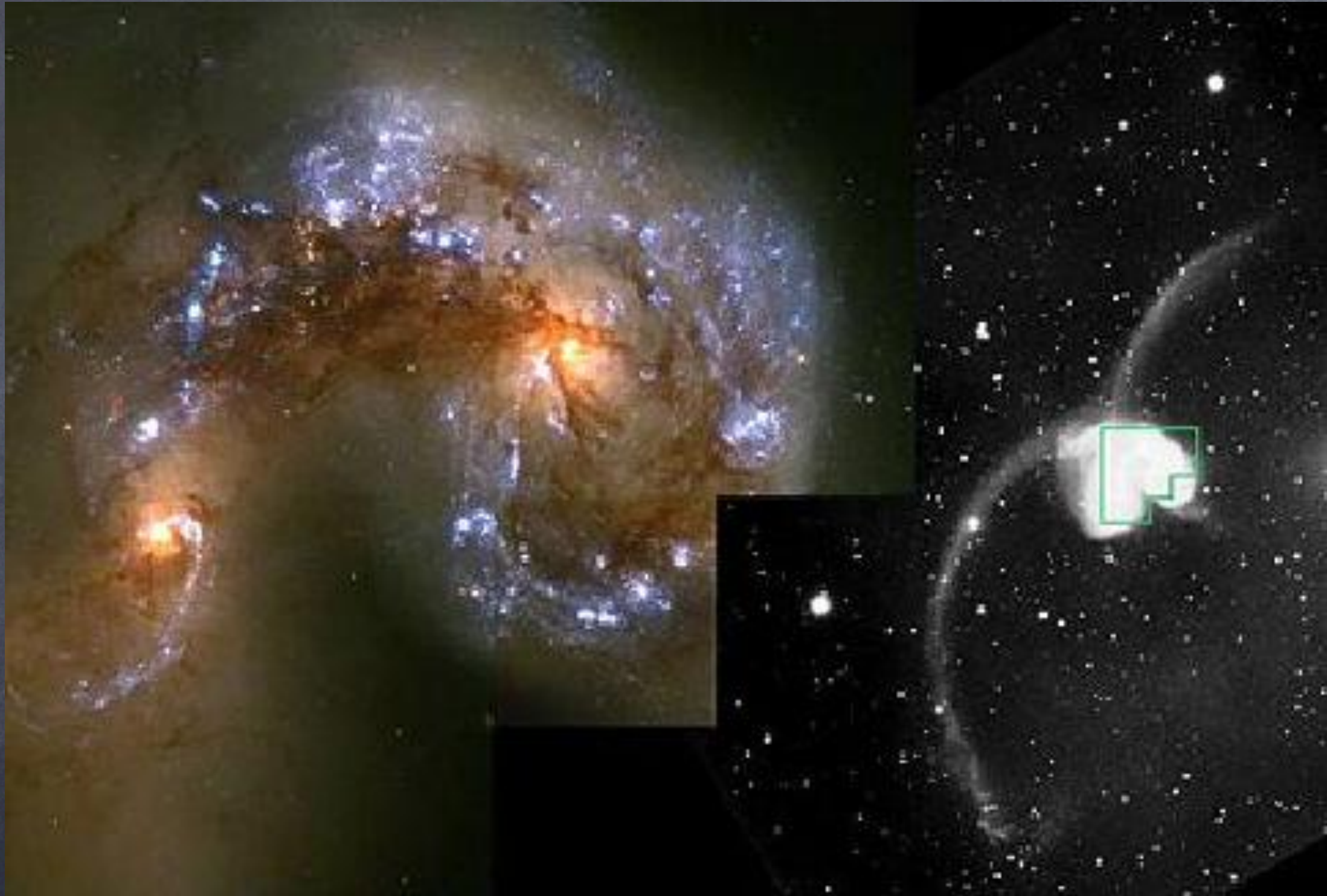
Superzwaar zwart gat (1-1000 miljoen zonsmassa's)

Radiostelsels



Superzwaar zwart gat (1-1000 miljoen zonsmassa's)

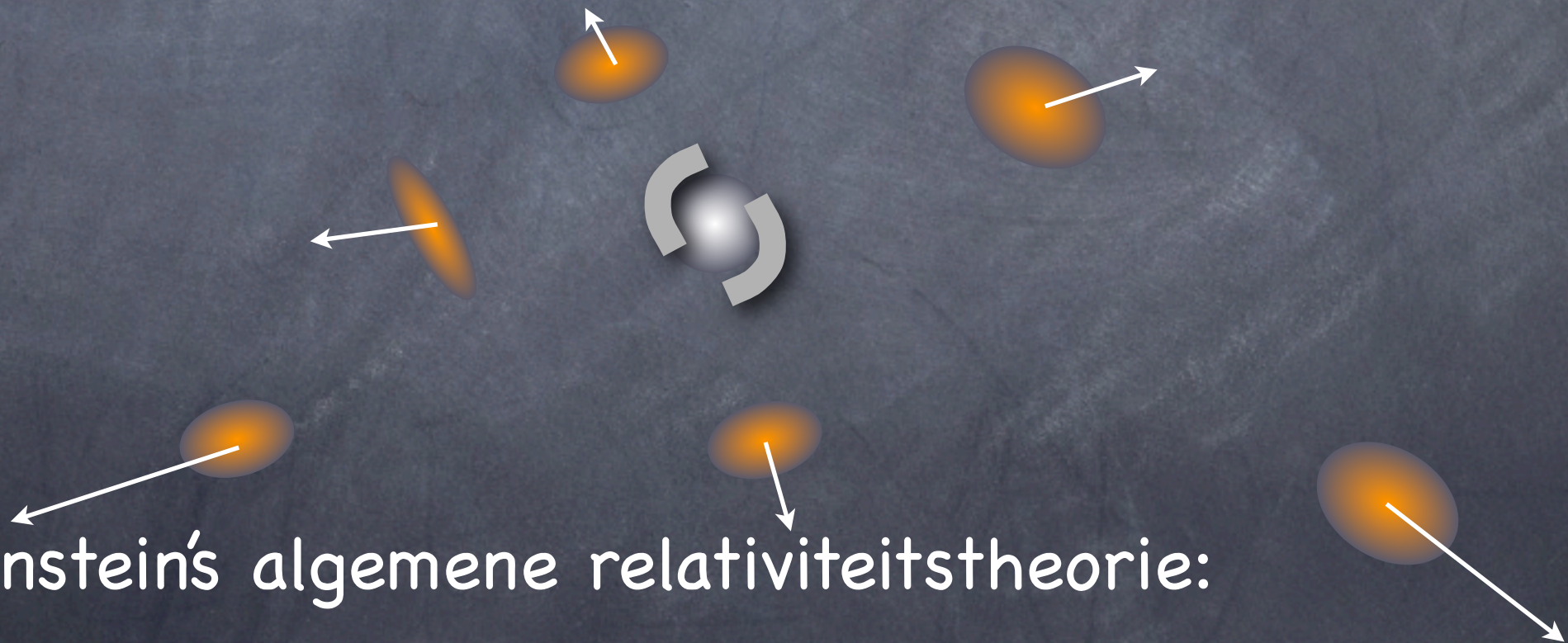
Botsende stelsels



Zo'n 100 jaar geleden...

- Metingen van het Doppler effect op de straling van melkwegstelsels (Slipher, Hubble):

- de meeste stelsels bewegen van ons af
- stelsels **verder weg** bewegen **sneller**

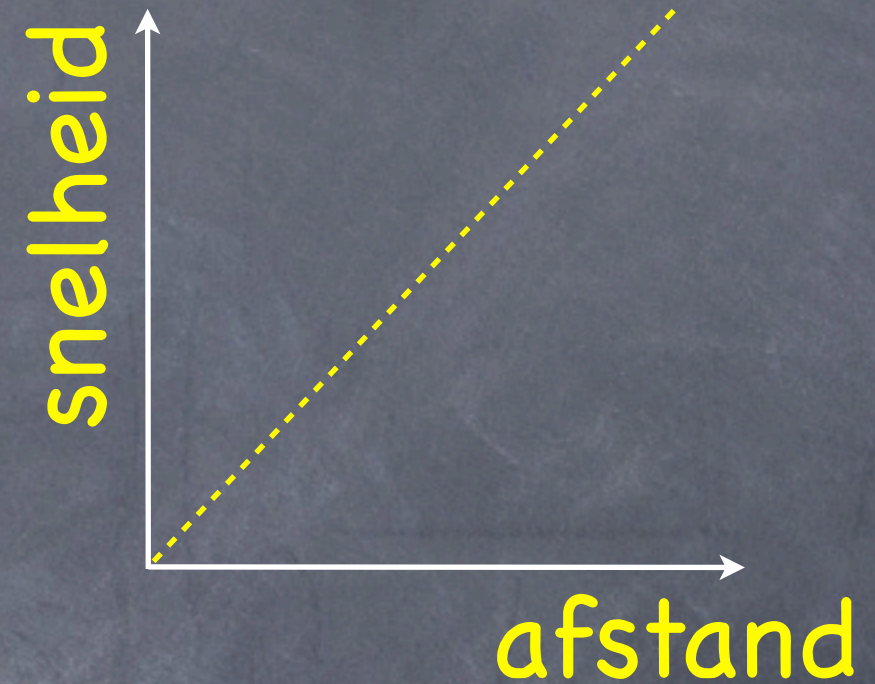


- Einstein's algemene relativiteitstheorie:

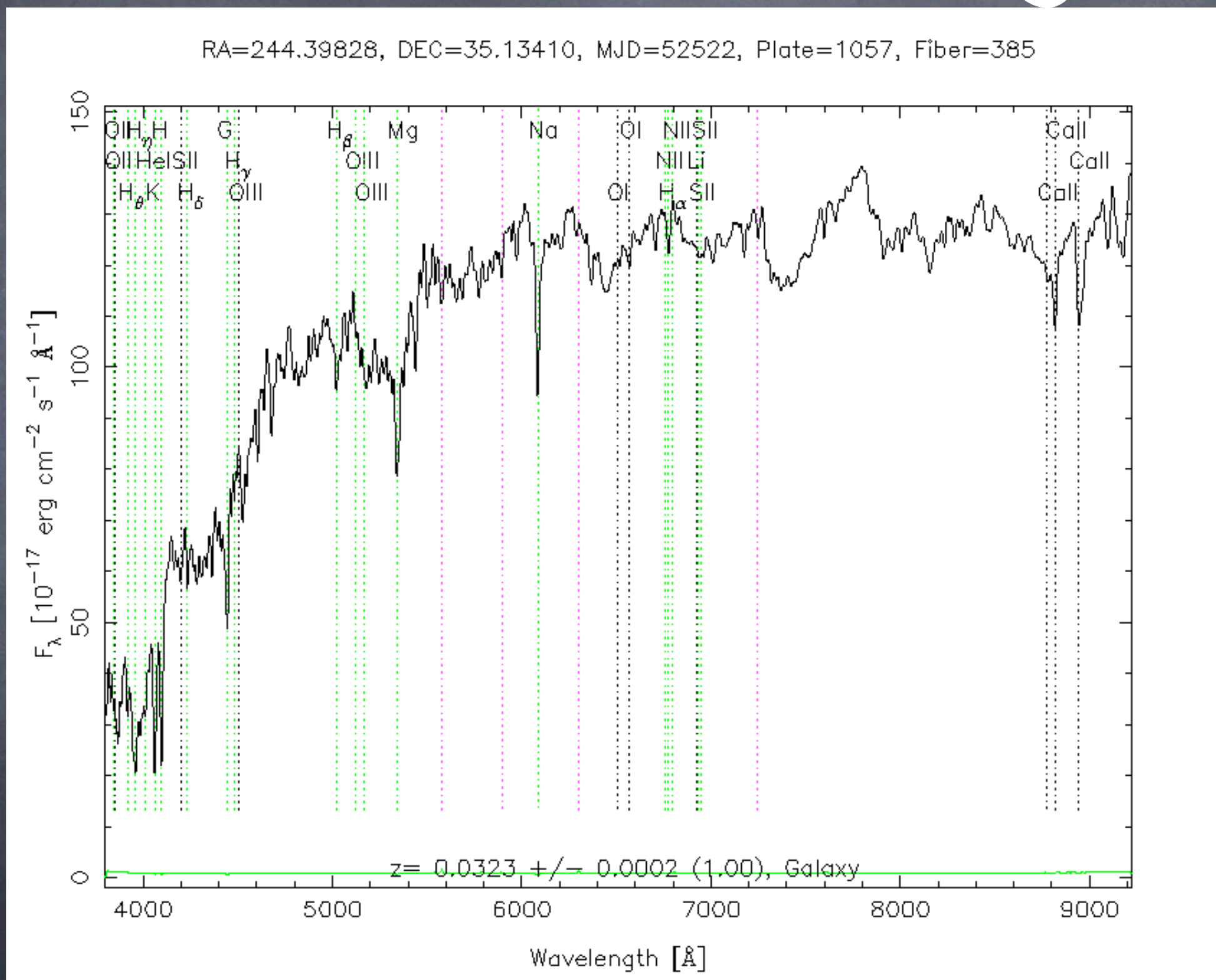
- voorspelt een **dynamisch heelal** (Lemaitre, de Sitter)

Het uitdijken meten

- De wet van Hubble:
 - afstanden and snelheden
- 'Standard candles'
 - bv. sterren van bekend en herkenbaar type
- Doppler effect: roodverschuiving

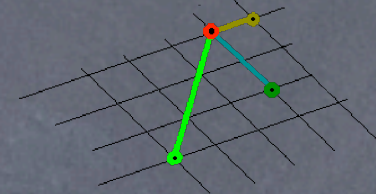
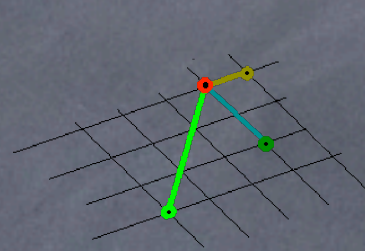


Roodverschuiving



bv. Na D lijn (589.5nm)

Algehele expansie

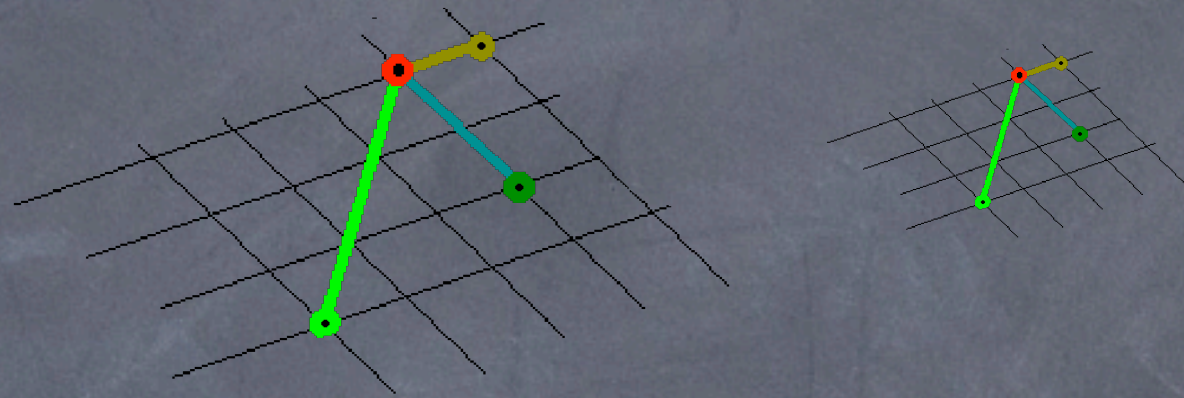


- $V = H_0 D$ is wat je verwacht van een algemene opschaling van het heelal:

Als $d(t) = a(t) d(t_0)$

dan $v(t) = (da/dt) d(t_0)$

Algehele expansie

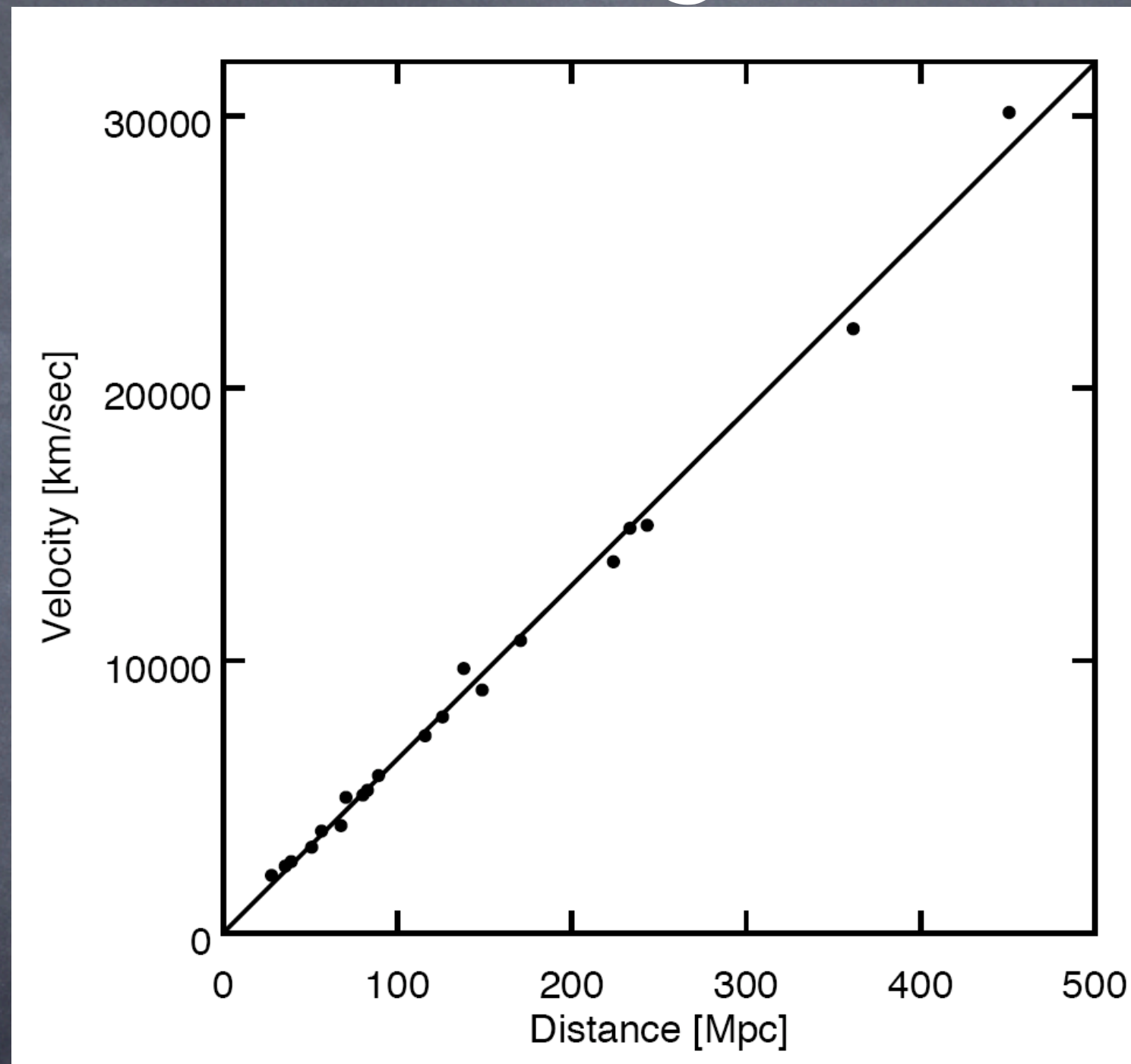


- $V = H_0 D$ is wat je verwacht van een algemene opschaling van het heelal:

Als $d(t) = a(t) d(t_0)$

dan $v(t) = (da/dt) d(t_0)$

De uitdijing meten



Riess et al.
'96

- Nu: Hubble diagram met supernovae

Terugrekenen

- Uitdijingsnelheid van 30.000 km/s op 500.000.000 parsec afstand

- Hoeveel tijd had dat stelsel nodig om zo ver weg te raken?

- $500.000.000 \text{ parsec} = 1.5 \times 10^{22} \text{ km}$

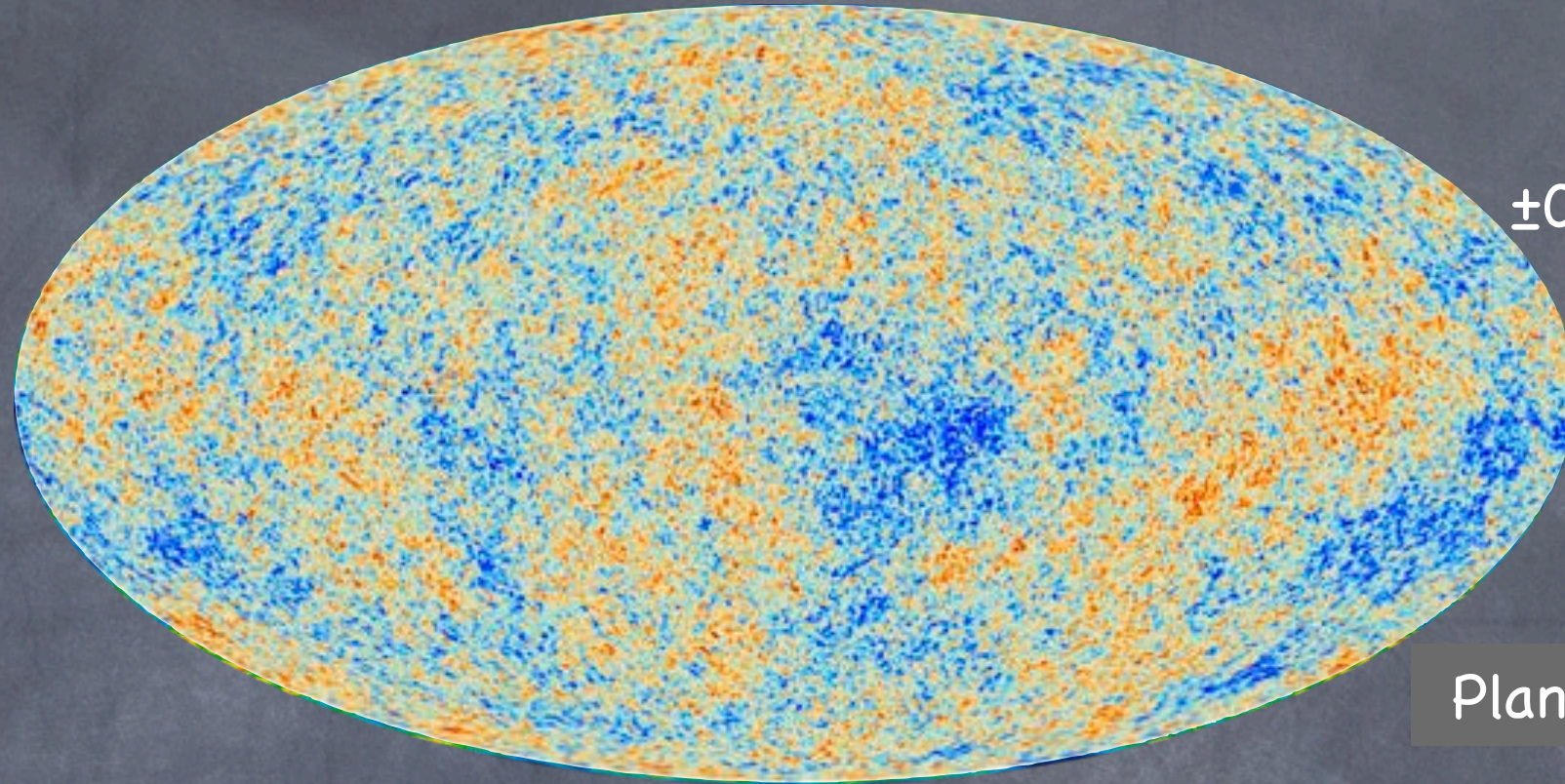
- $1.5 \times 10^{22} \text{ km} / 30.000 \text{ km/s} = 5 \times 10^{17} \text{ s}$

- 13.000.000.000 jaar

Terugkijken

- De lichtsnelheid is eindig (1 lichtjaar/jaar): onze 'horizon' is 13.000.000.000 lichtjaar.
- We zien verre sterrenstelsels toen het heelal jonger was: we kunnen **geschiedenis zien!**
- Dit is de belangrijkste reden voor cosmologen om grotere telescopen te bouwen: niet per se om verder weg te kijken, maar verder terug.

Het oudste licht

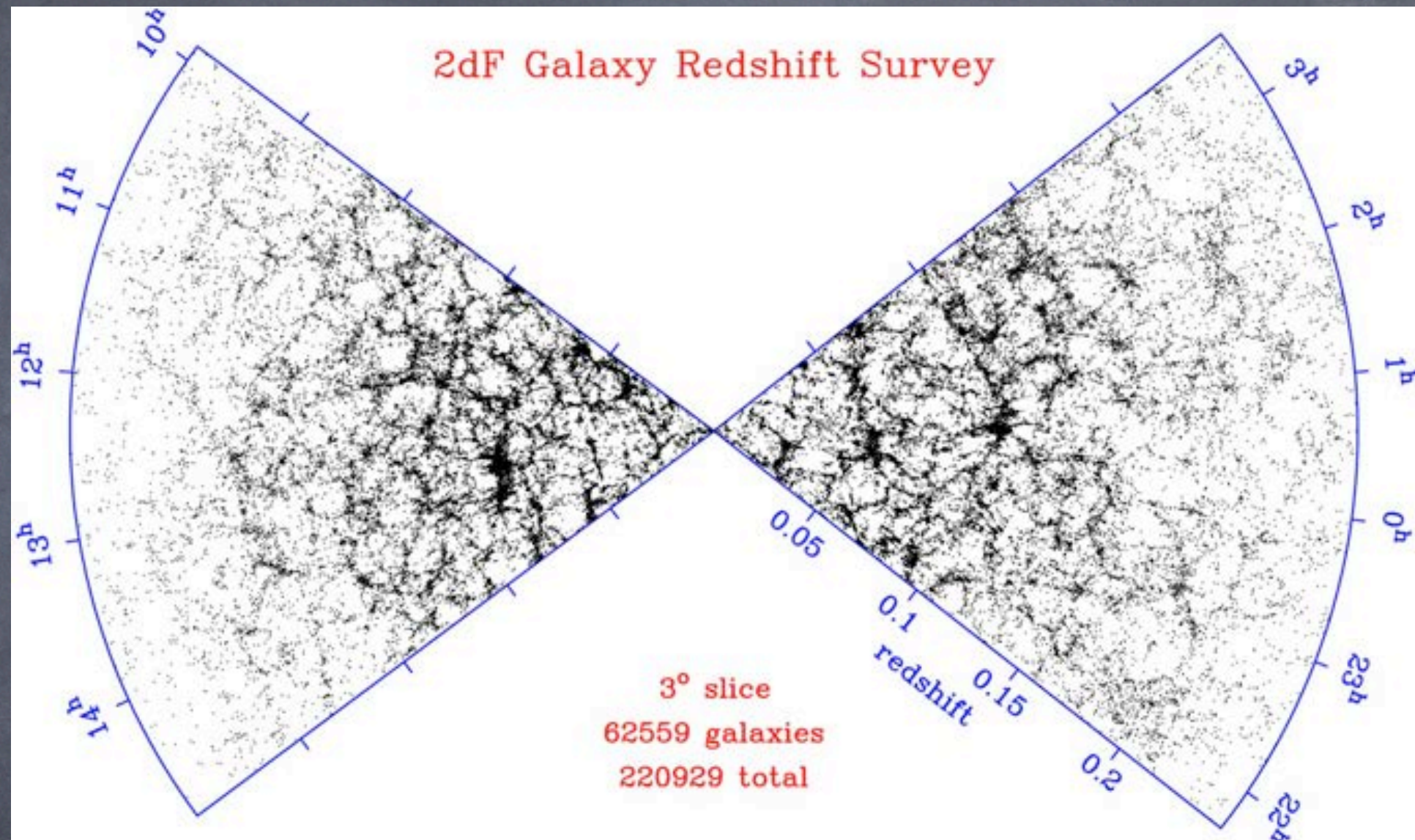


$\pm 0.01\%$ variatie

Planck 2013

- De kosmische achtergrondstraling, uitgezonden toen het heelal nog 1100 x 'kleiner' was dan nu
- Heel homogeen: het heelal had toen nauwelijks structuur

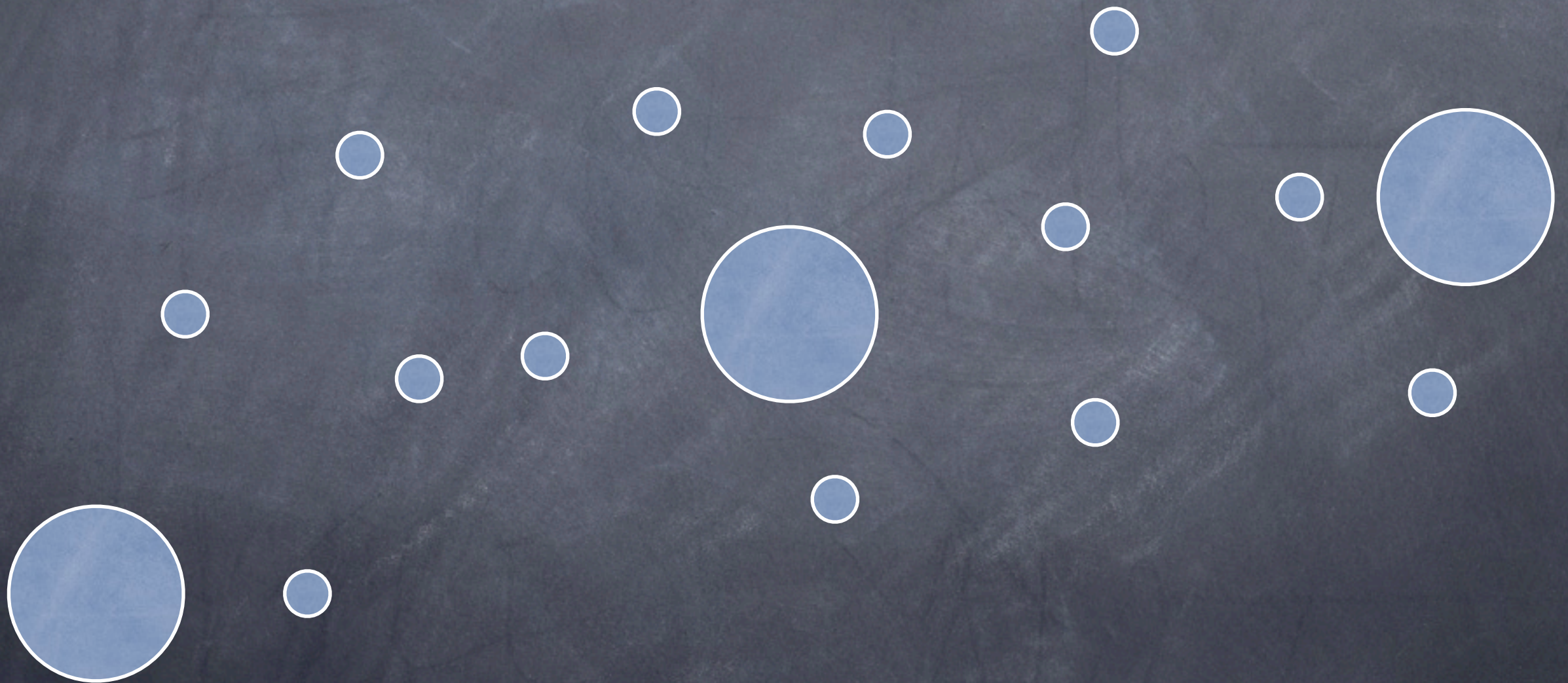
Grote-schaal structuur nu



- Kaart van de verdeling van 1000'en sterrenstelsels: veel structuur

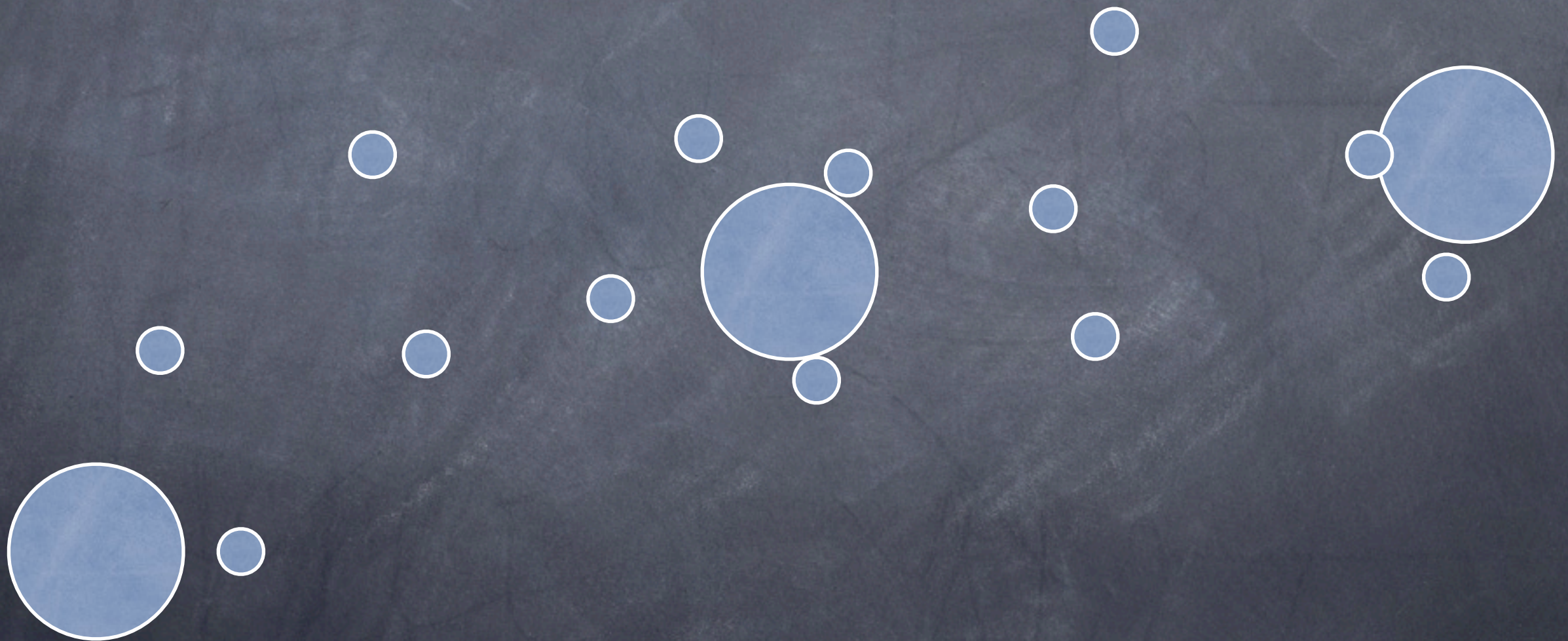
Gravitationele instabiliteit

- Gebieden met meer massa dan hun omgeving trekken meer materie aan



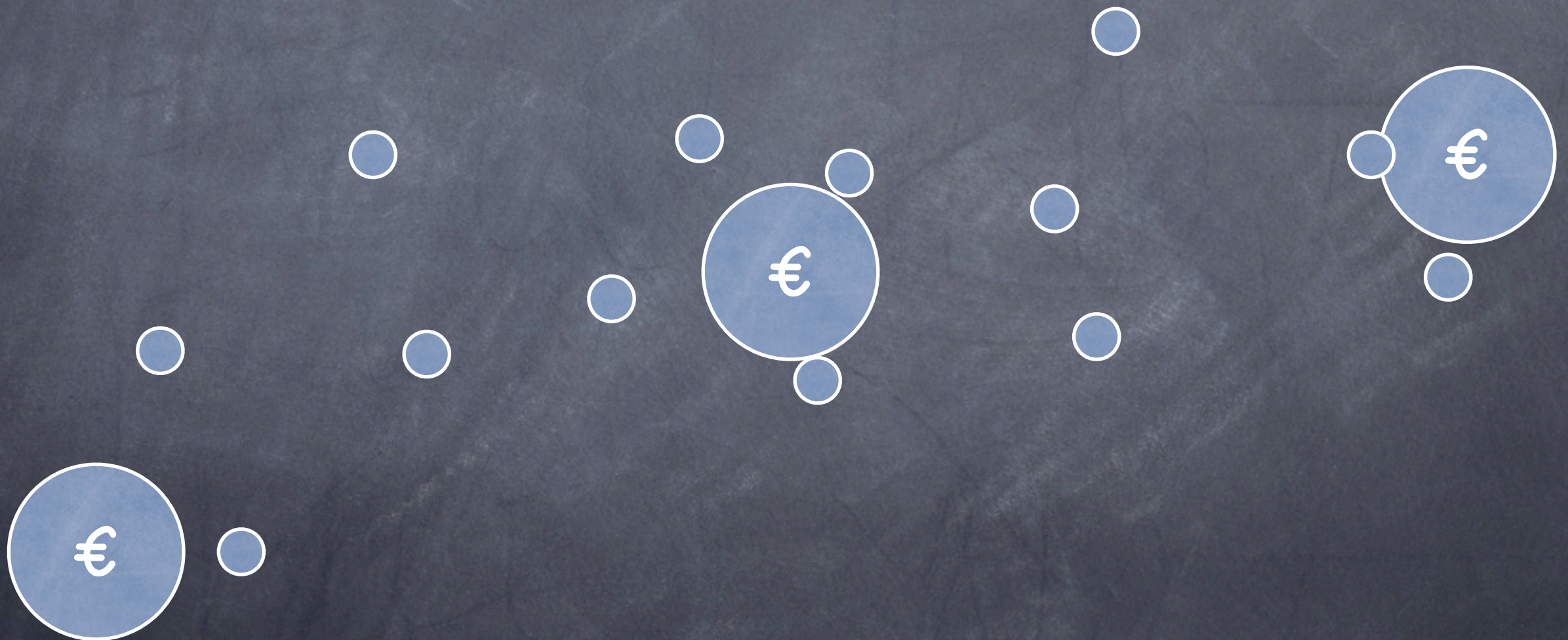
Gravitationele instabiliteit

- Gebieden met meer massa dan hun omgeving trekken meer materie aan



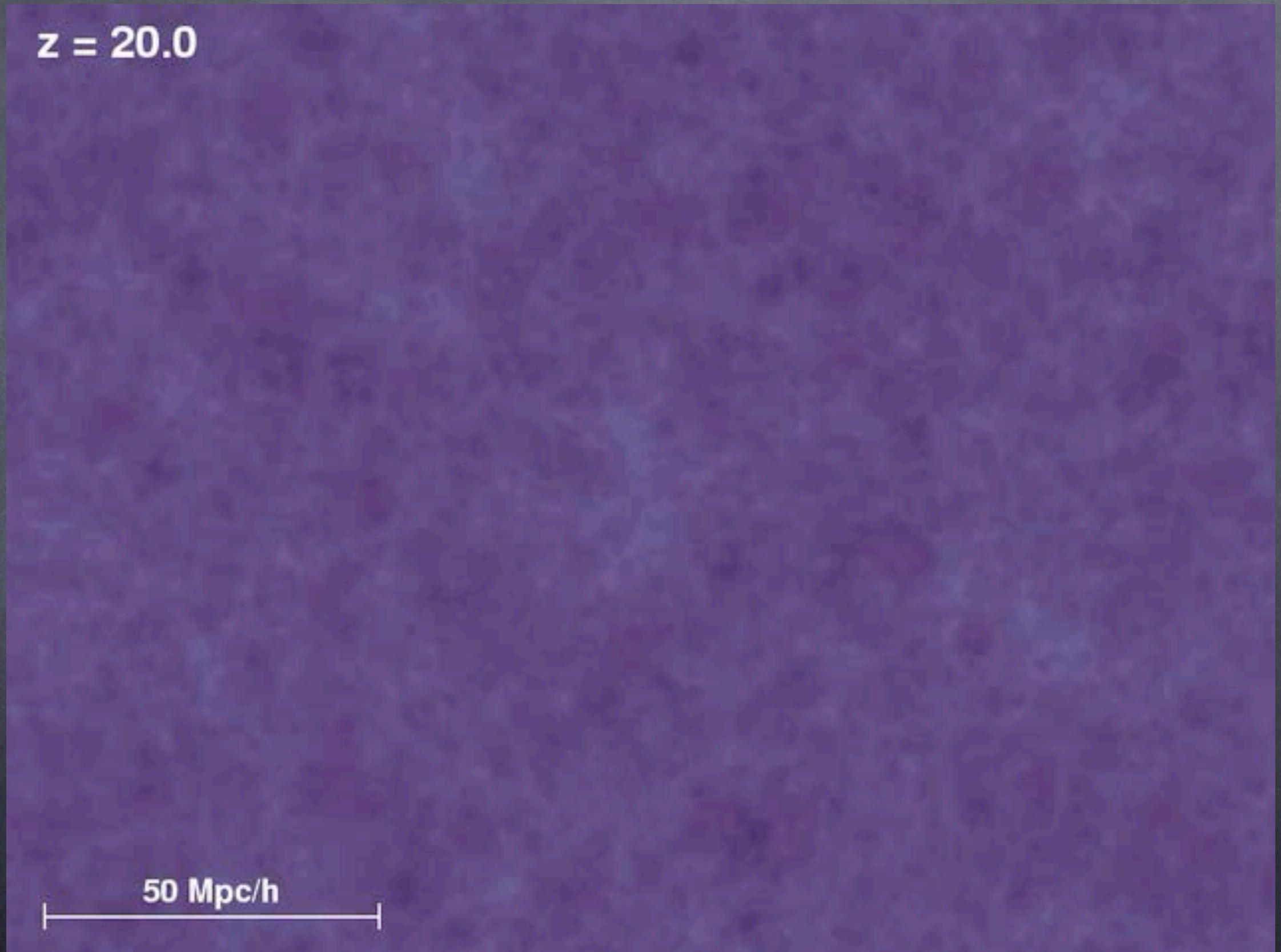
Gravitationele instabiliteit

- Gebieden met meer massa dan hun omgeving trekken meer materie aan

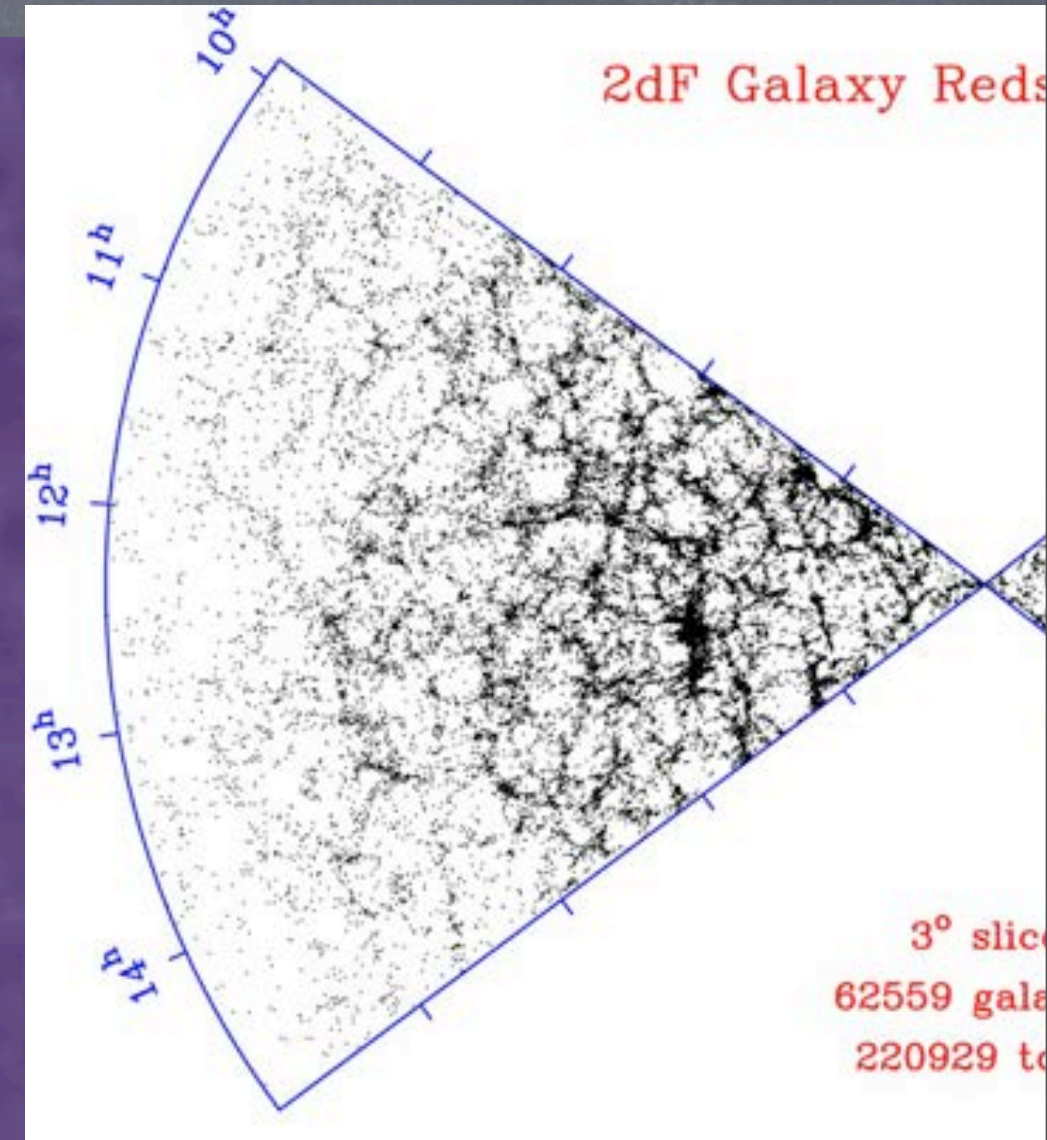


- "The rich get richer"

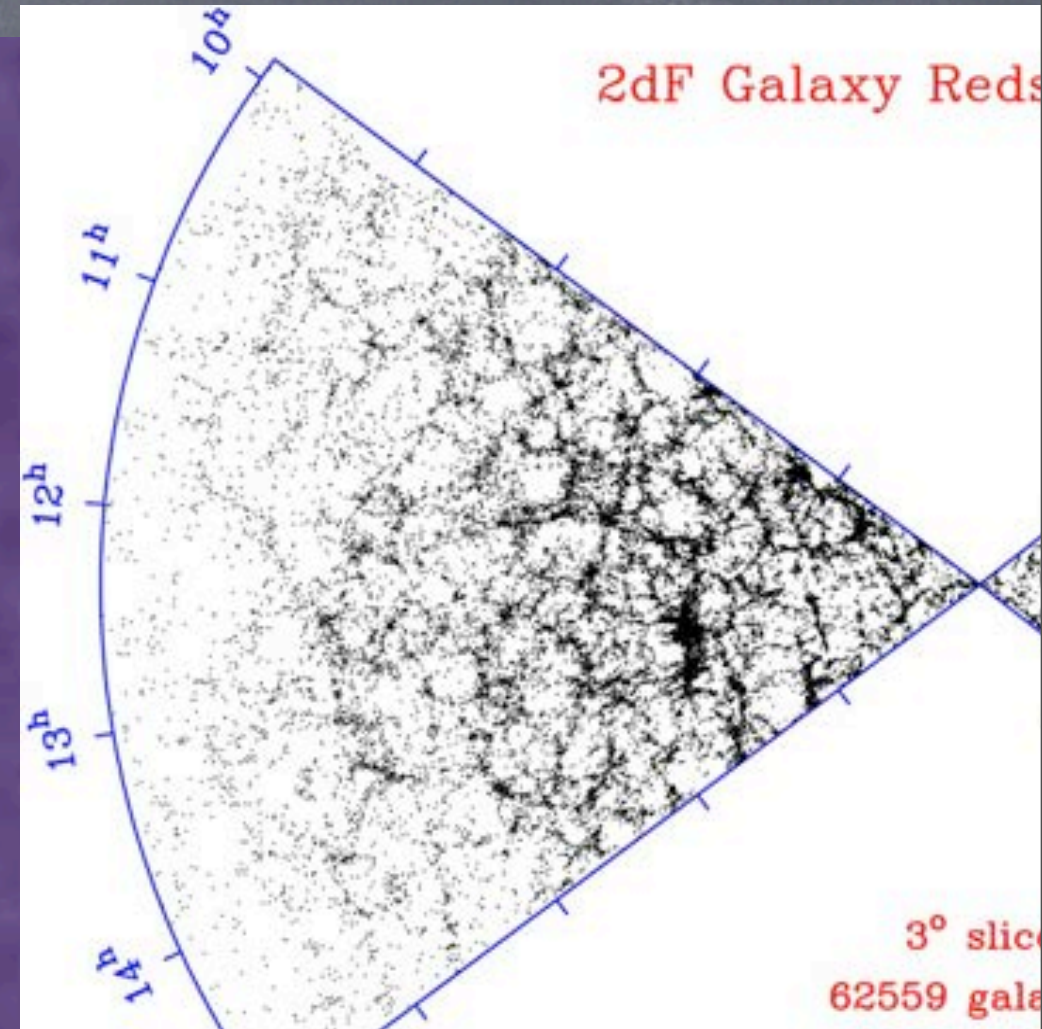
Gravitationele instabiliteit



Gravitationele instabiliteit



Gravitationele instabiliteit



Werkt alleen voldoende als we extra 'donkere'
materie in het model stoppen.
niet waargenomen!
past niet in standaard deeltjesfysica!

Donkere 'halos'



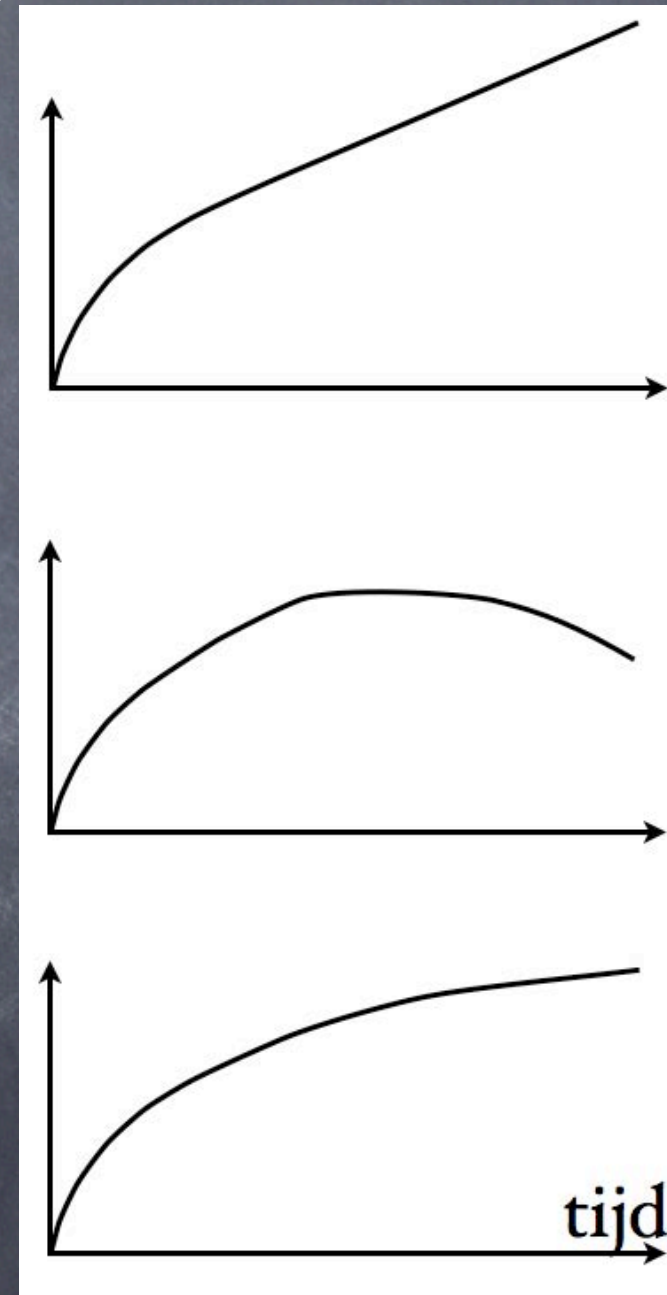
Donkere 'halos'



6–10 x meer donkere materie dan sterren & gas!

Uitdijen van het heelal

- We verwacht(en) dat het uitdijen van het heelal afgeremd wordt door de onderlinge zwaartekracht van melkwegstelsels
- Als er voldoende materie is kan de expansie zelfs helemaal stoppen, en omslaan in een samentrekken
- Afremming = zwaartekracht van sterrenstelsels = hoeveelheid materie
- Maar... metingen wijzen juist op **acceleratie**



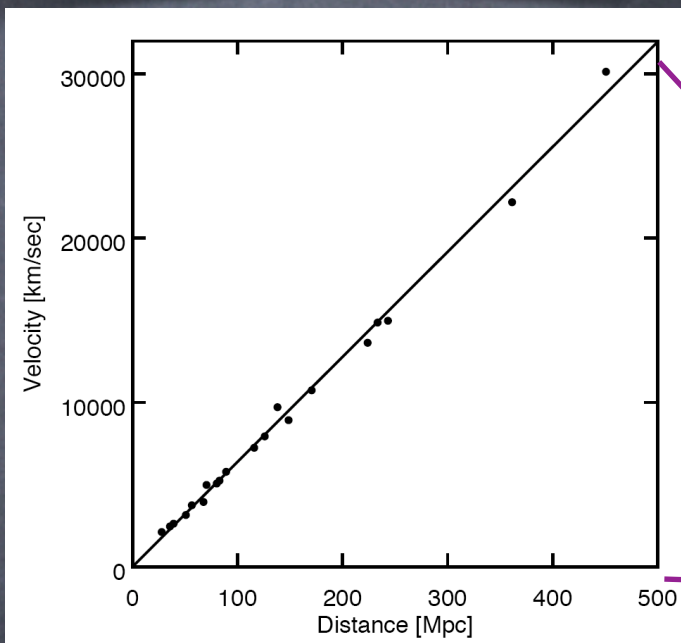
De uitdijingsgeschiedenis



Physics Nobel Prize to Astrophysics

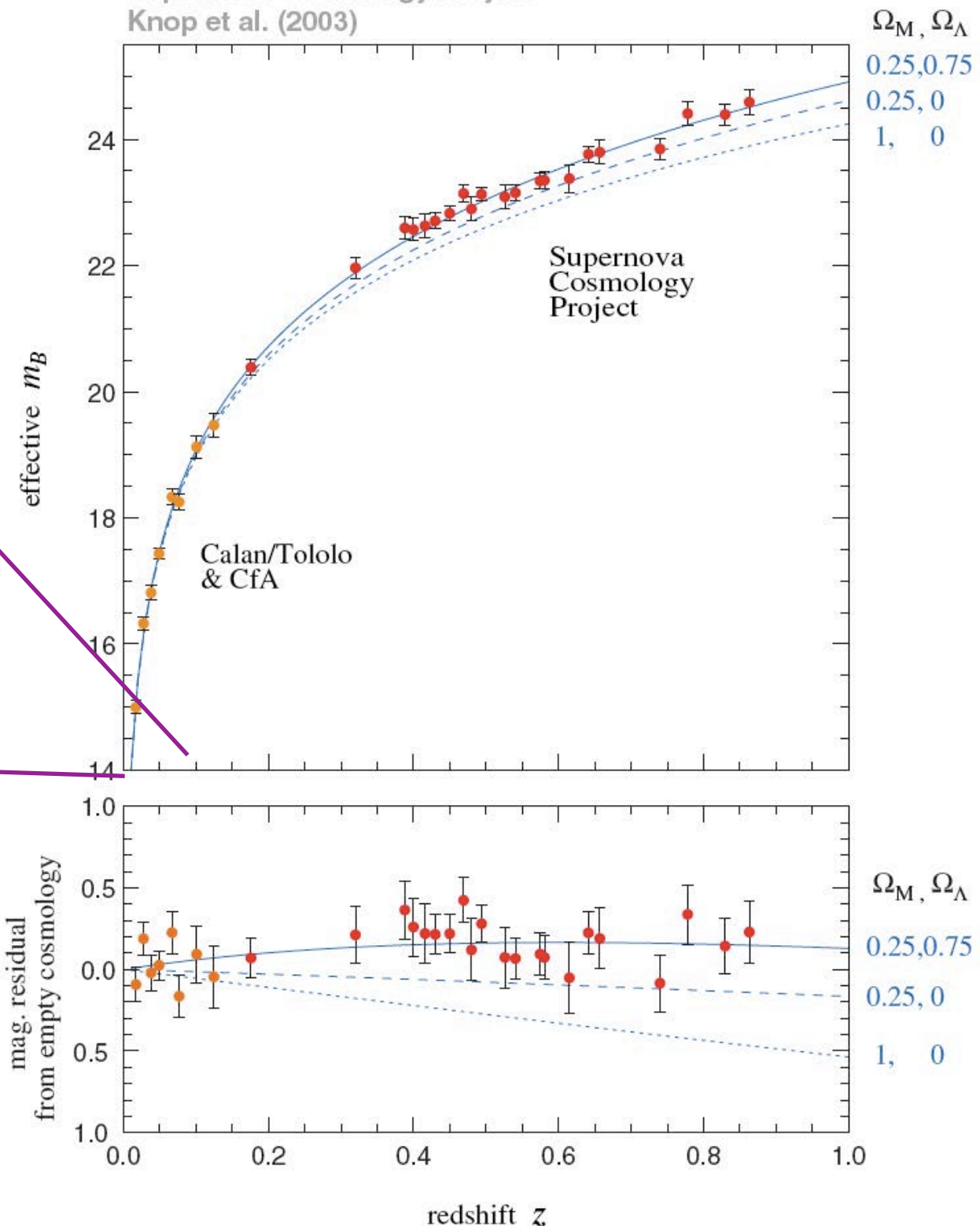
The 2011 nobel prize for physics has been awarded to astronomers Saul Perlmutter, Brian Schmidt and Adam Riess, for discovering the accelerated expansion of the universe using supernovae as standard candles. Their landmark results, presented in 1998, first forced physicists and astronomers to face the evidence for 'dark

expansion of the universe using supernovae as standard candles. Their landmark results, presented in 1998, first forced physicists and astronomers to face the evidence for 'dark



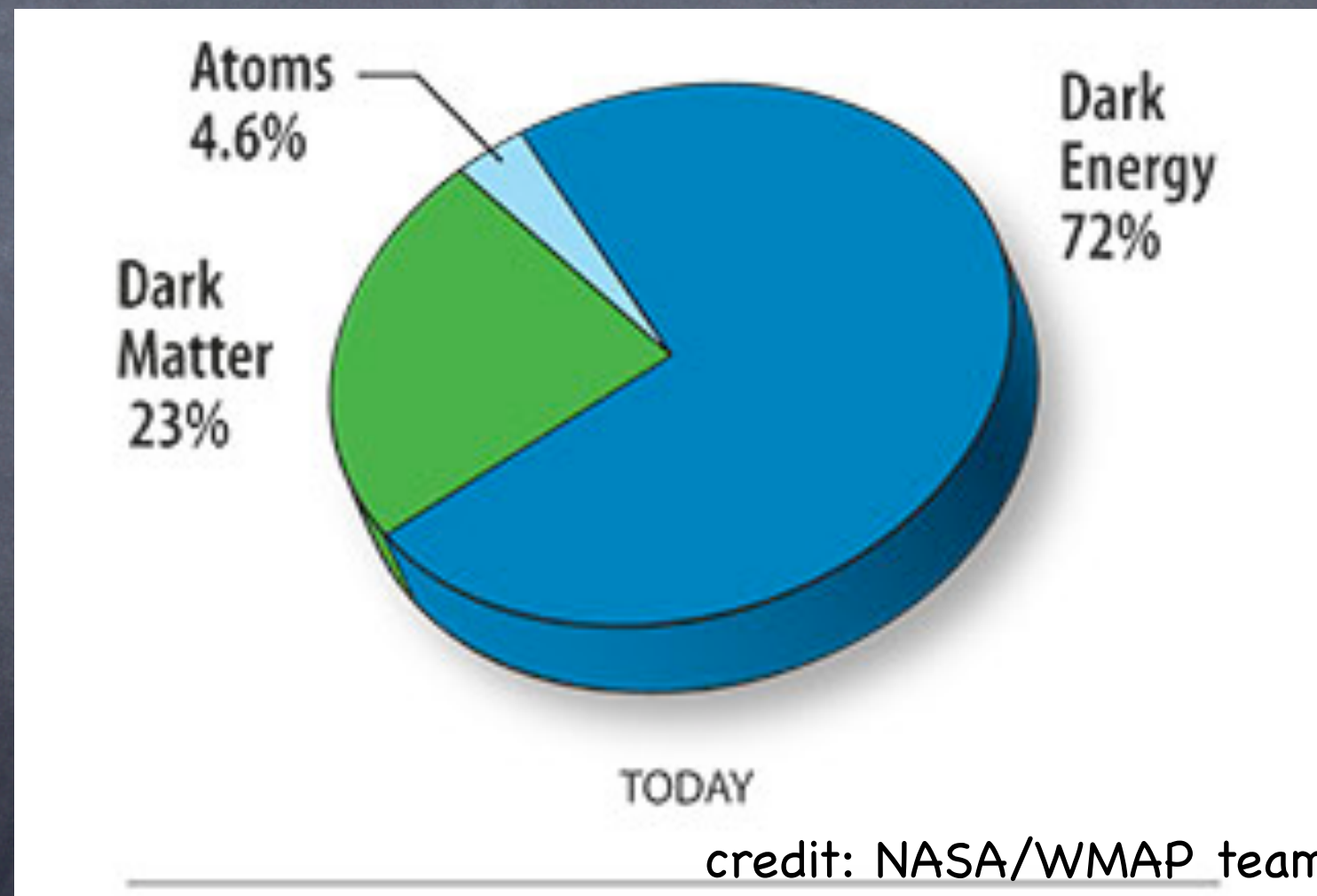
- Supernova Hubble diagram tot 8.000.000.000 lichtjaar ver

Supernova Cosmology Project Knop et al. (2003)

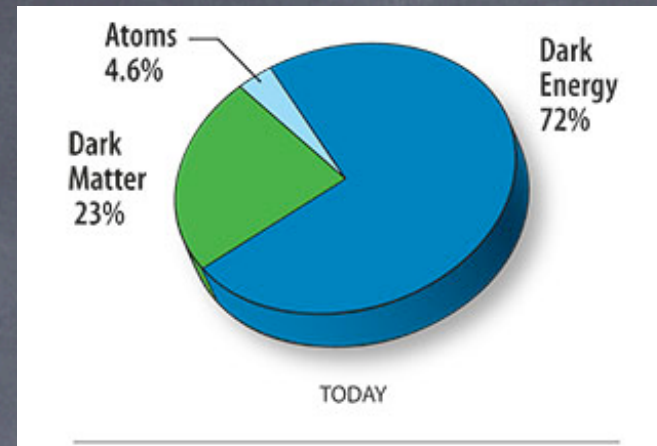


Het grote raadsel

- Simpelste verklaring voor fluctuaties in achtergrondstraling en huidige grote schaal structuur en versnellende expansie:



“The pizza that nobody ordered”



- We kennen de fysica van 95% van de bestanddelen van het heelal niet...

... EPIC FAILURE ... !



EPIC FAILURE

Sometimes there's no excuse.

lo/ MotivatedPhotos.com



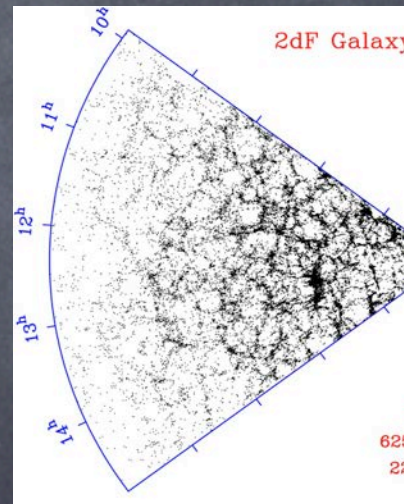
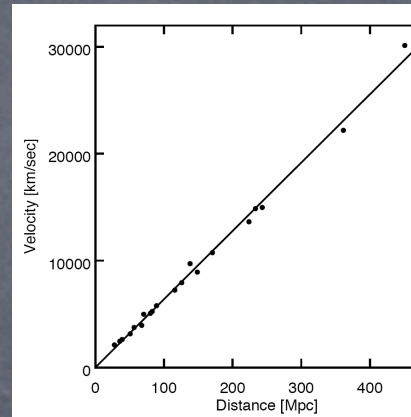


EPIC FAIL

It's worse when you're a commander in chief.

Betere metingen

- We willen weten:
 - hoe de uitdijing verloopt (constant, afnemend, versnellend?)
 - hoe is de donkere materie verdeeld?
 - hoe is de grote schaal structuur gevormd?
- Combinatie van terugkijken in tijd met meten van de uitdijing en de verdeling van materie
- Veel technieken – een veelbelovende is gebruiken van **zwaartekrachtlenzen**



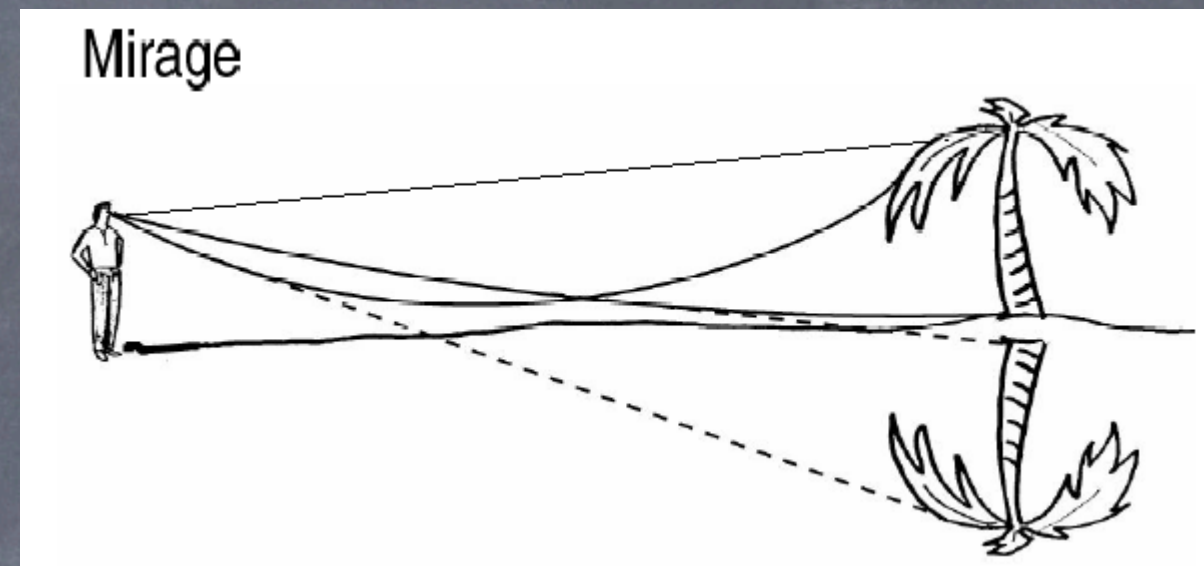
Zwaartekrachtlenzen

- Light 'valt' in zwaartekrachtsveld
- Een object met massa buigt lichtstralen



- Afbuigingshoek: $2 \times (GM/r^2) \times (2r/c) / c = 4GM/rc^2$
- (Newton's gravitatie voorspelt precies de helft)

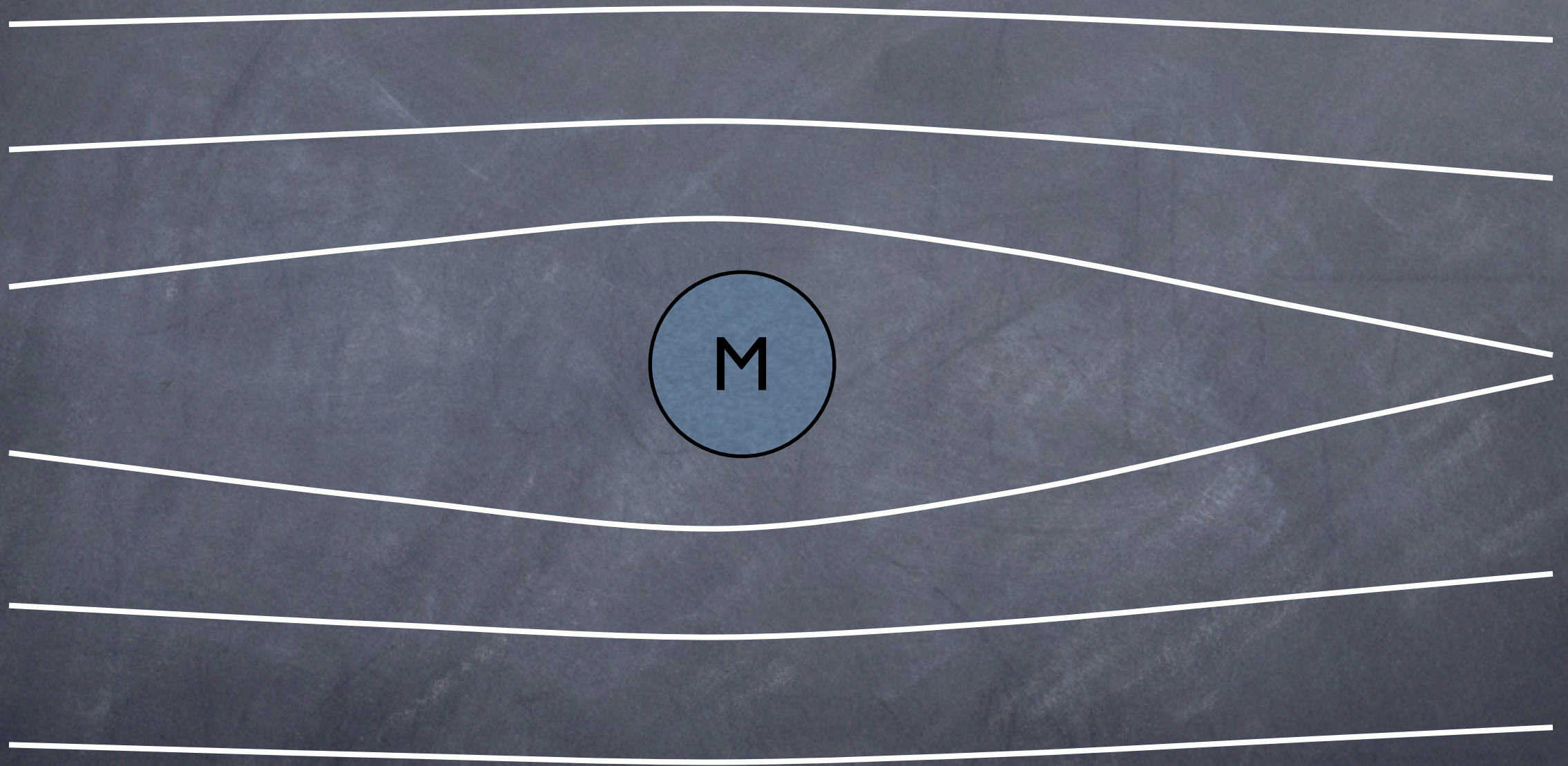
Zwaartekrachtlenzen



- Het licht komt niet uit de oorspronkelijke richting: het is 'gelenst'.
- Geeft meervoudige beeldvorming, of vervorming.
- Buigingshoek meten geeft informatie over de lens (gravitatieveld langs de gezichtslijn)
- Net als seismologie (geluidsgolven)

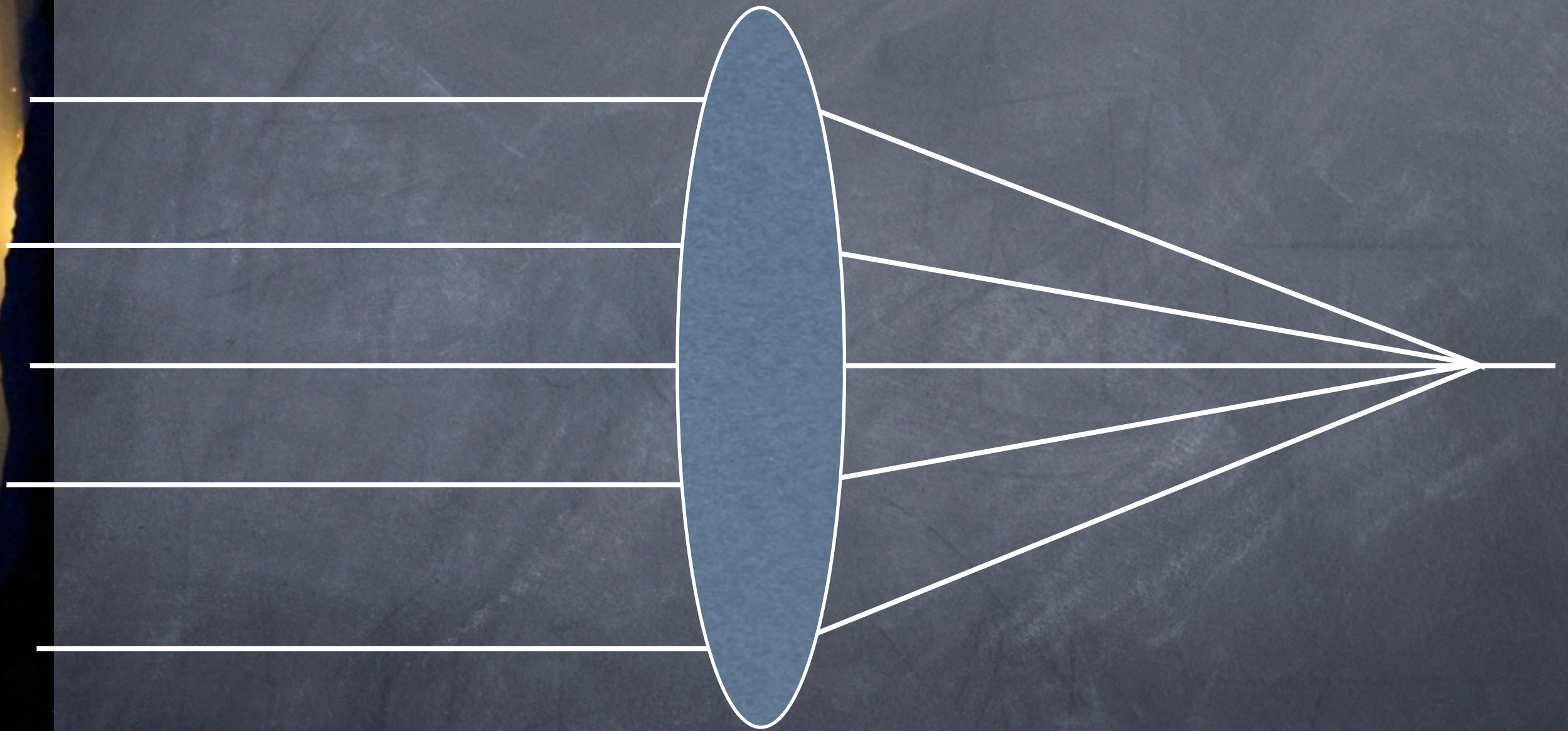
Gravitatielens

$$4GM/c^2r$$



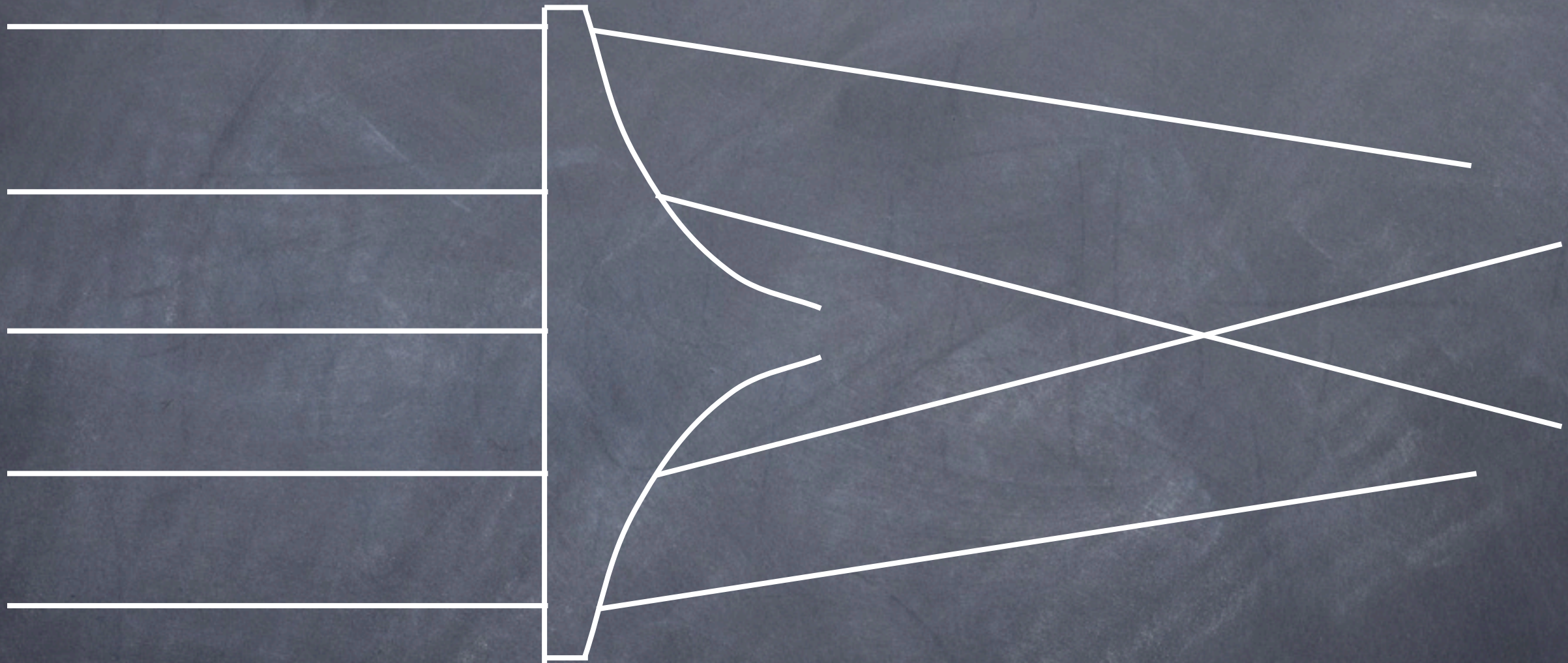
Focusserend effect
Heel zwak:
boogsec-boogmin

Een 'normale' optische lens



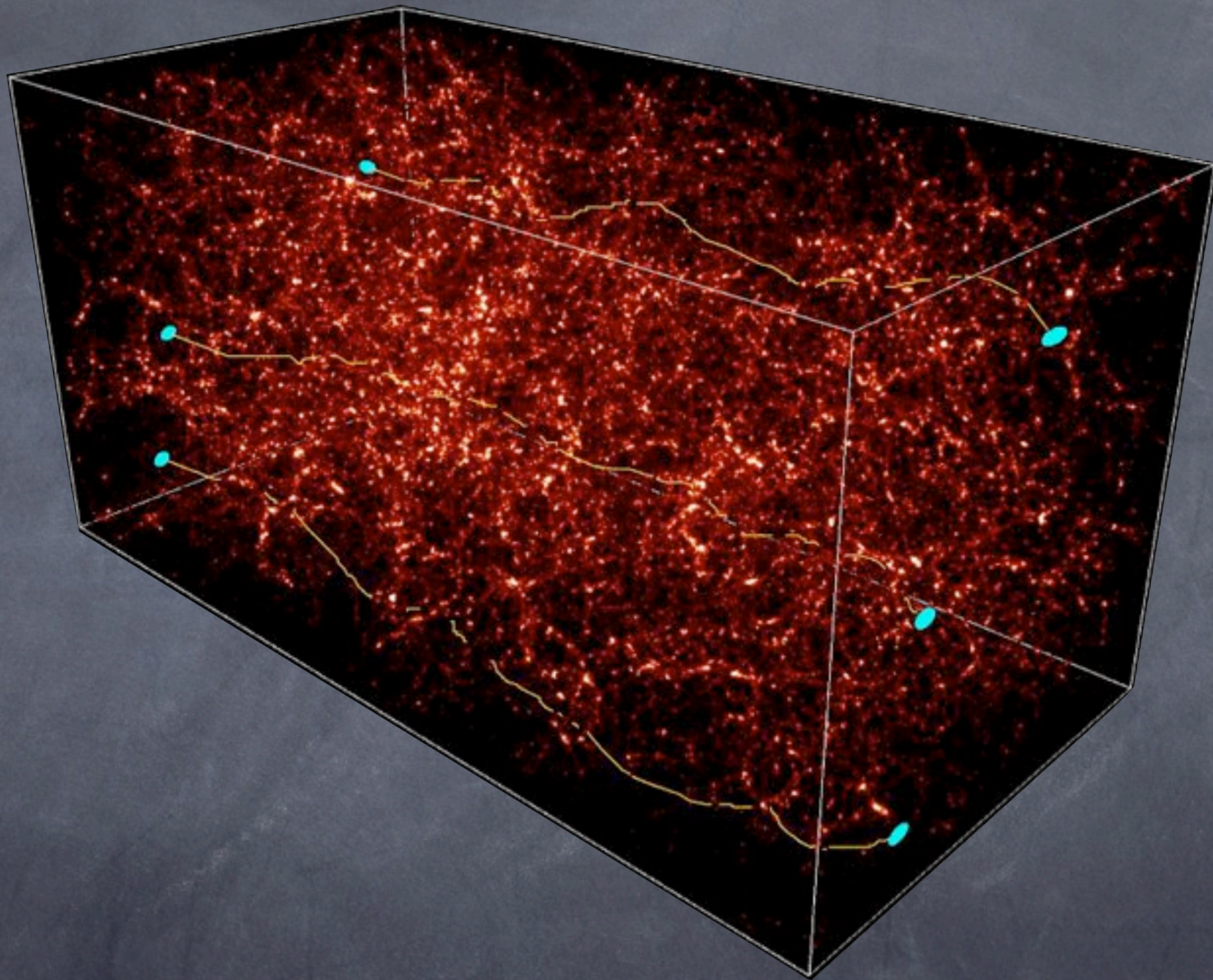
buigt licht het sterkst op grote straal

Gravitatielens simulator



Sferische aberratie --- slechte lens!

Gravitatielenzen in cosmology



- Typische afbuiging is 3 boogminuten = $1/10$ e diameter van de maan.

'Oud vensterglas'

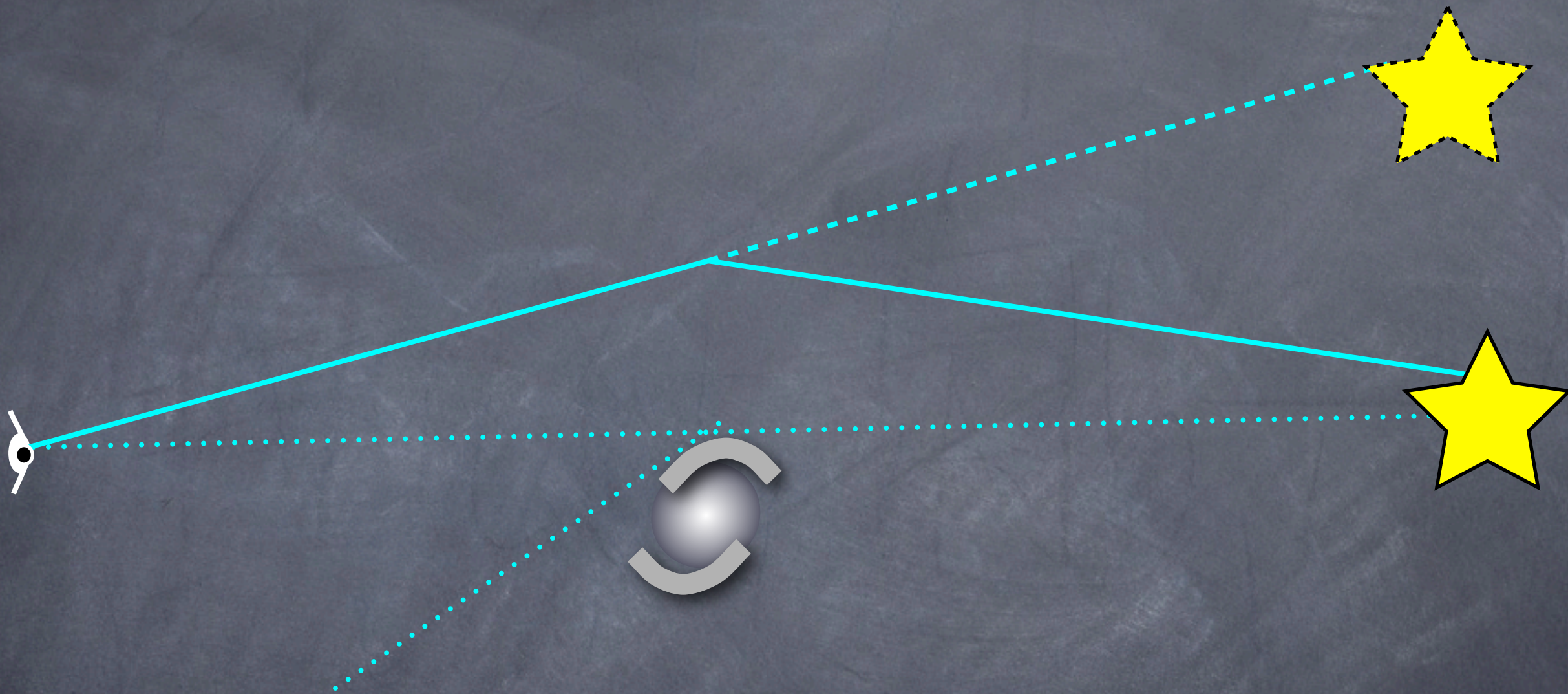
Leiden Observatory



Universiteit Leiden



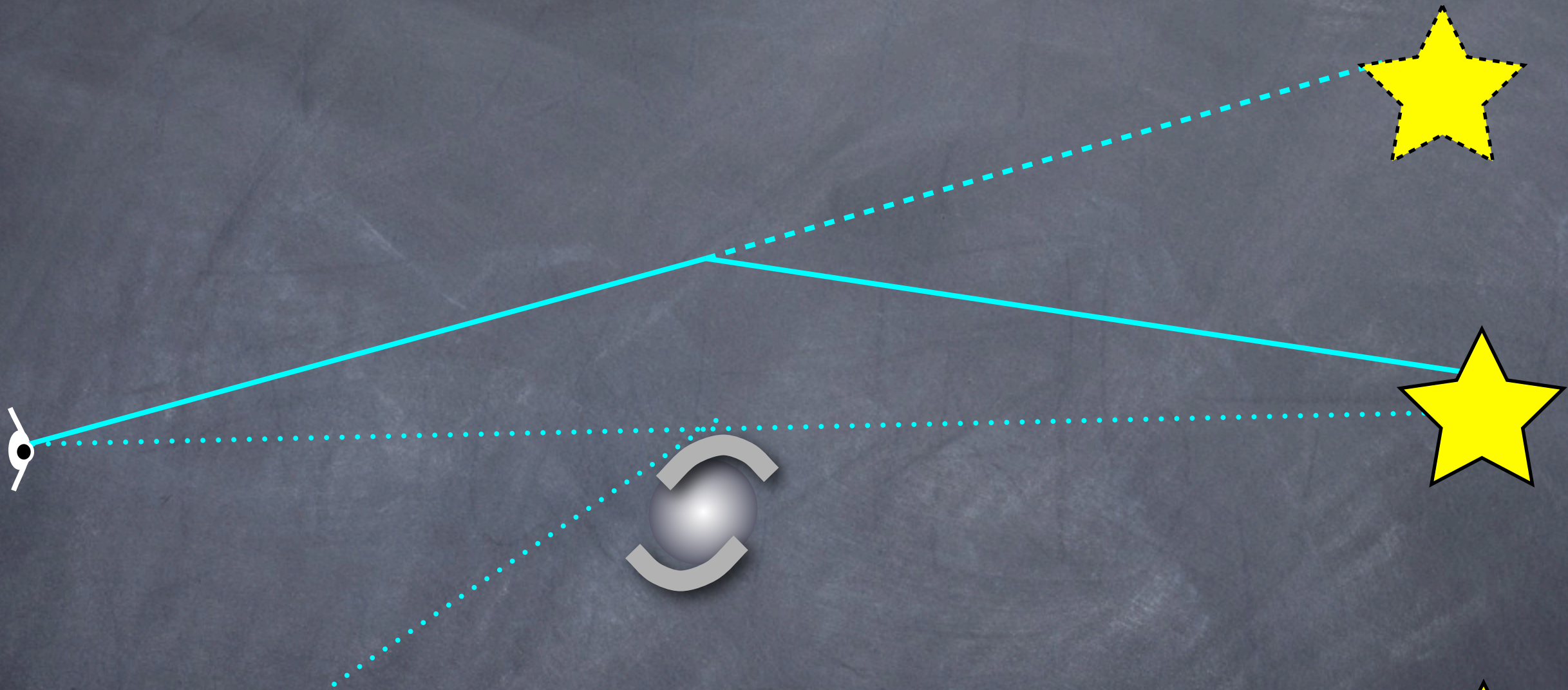
Door een gravitatielens kijken



- Beelden worden 'weggedrukt' van de lens (!)



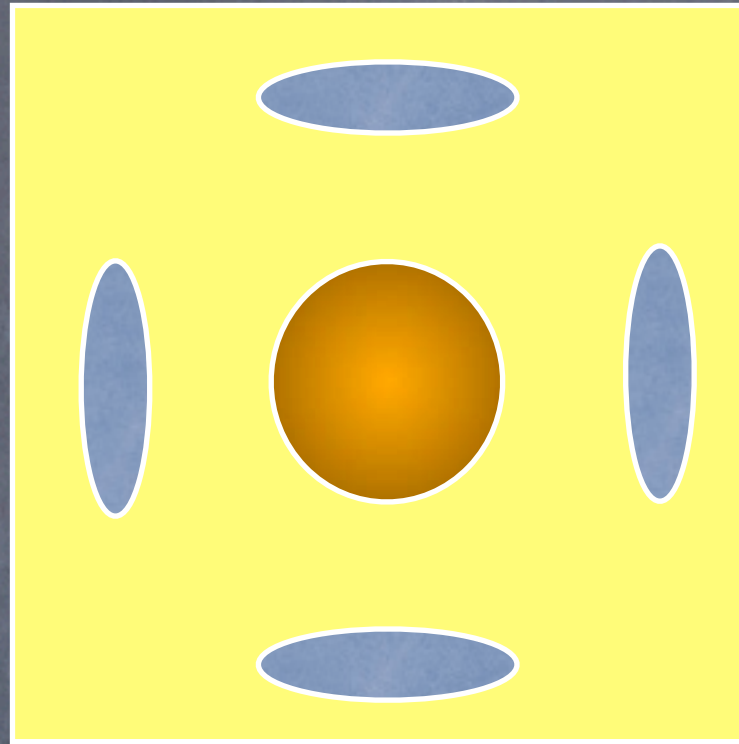
Door een gravitatielens kijken



- Beelden worden 'weggedrukt' van de lens (!)

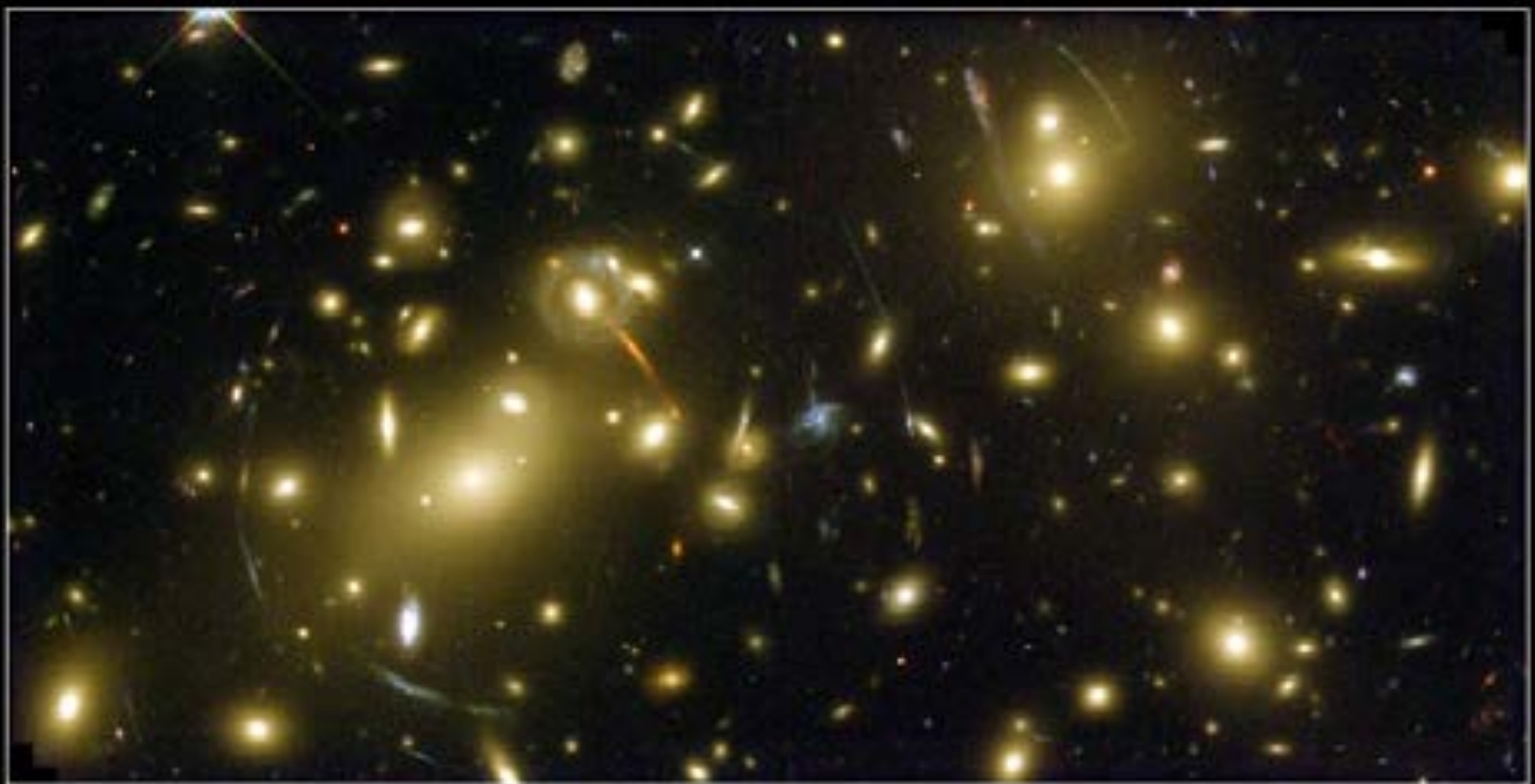


Verschuiven en Vervormen



- Bronnen in de achtergrond worden weggeduwd van massieve voorgrondstelsels
- Verschuiving geeft een karakteristieke vervorming: achtergrondstelsels vormen boogjes om massa concentraties

Een echte gravitatieleens



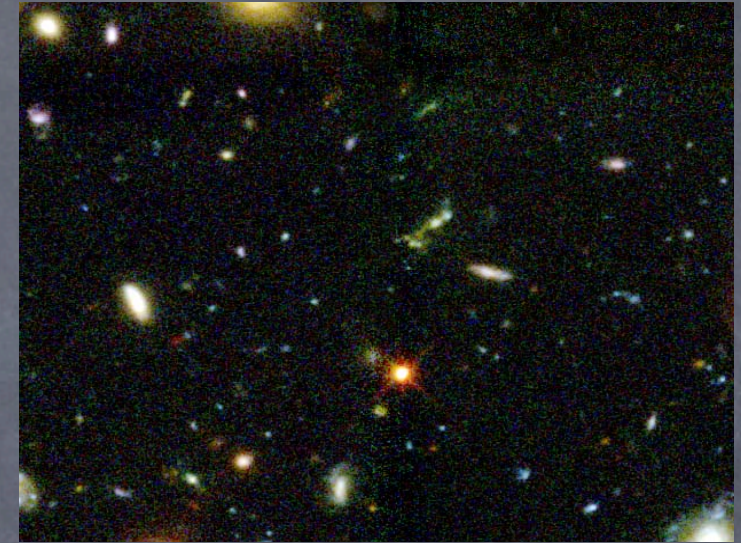
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

- Hubble space telescope opname van één van de zwaarst bekende clusters van melkwegstelsels

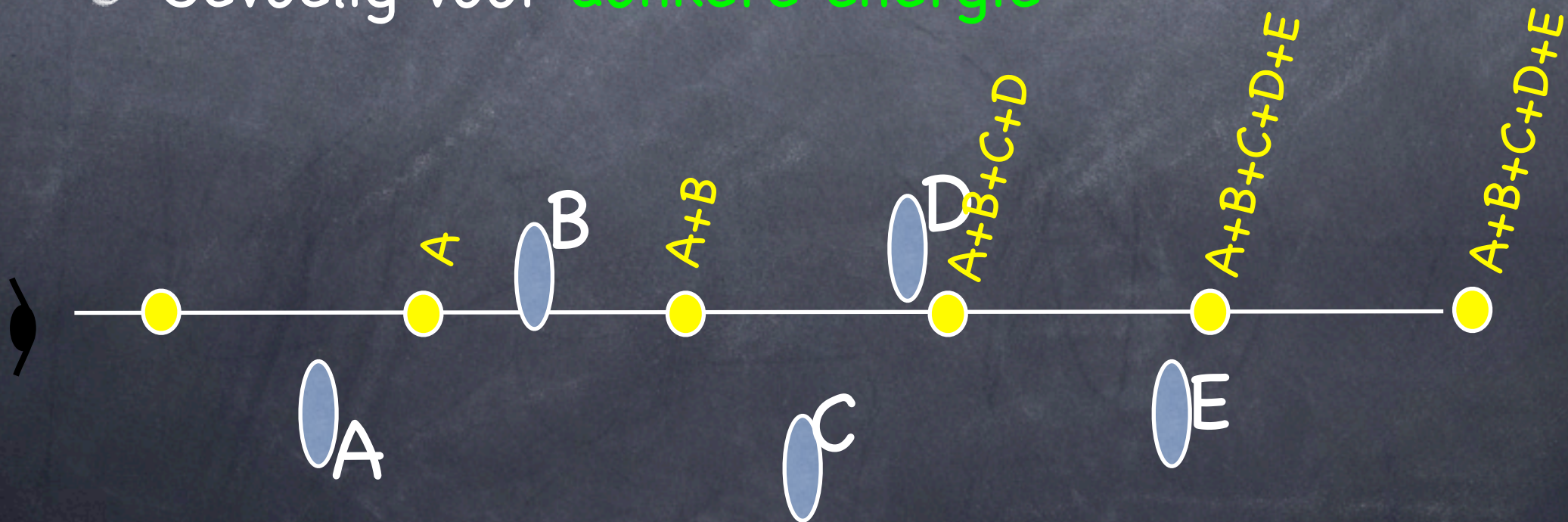
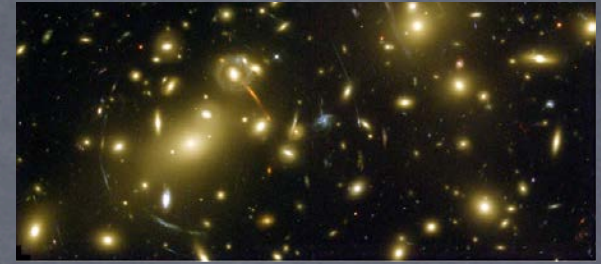
Subtiel effect!



- Metingen worden verstoord door:
 - vertroebeling in de atmosfeer (laatste μ s)
 - vertroebeling in de telescoop (laatste ns)
 - detector effecten (laatste ps)
- ruis

Kosmografie met lenzen

- massa's van melkwegstelsels, clusters
 - hoeveel **donkere materie** bevatten ze?
- 3-D kaarten van materie:
 - '**tomografische**' analyse: reconstructie van snelheid waarmee structuur groeide terwijl het heelal uitdijde
 - Gevoelig voor **donkere energie**



Het KiDS project

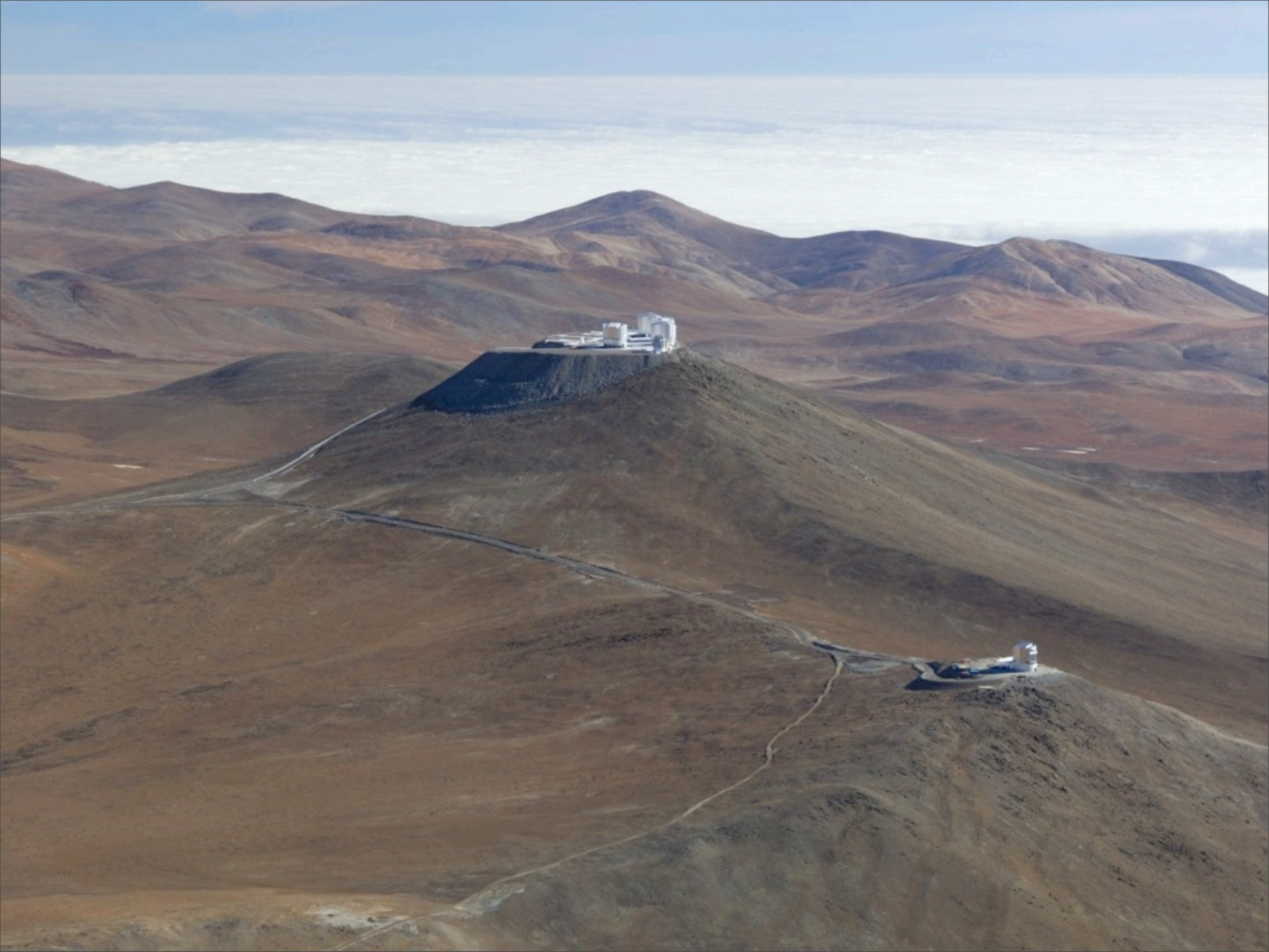


- De **kilo-degree survey**: 1500 vierkante graden (7% van de extragalactische hemel), in 9 kleuren
- Gebruikt twee nieuwe telescopen van ESO in Chili
- Speciale camera for scherpe, grote beelden
- In bedrijf sinds Oktober 2011
- Samenwerking van astronomen in Leiden, Groningen, München, Naples, Padua, Parijs, Edinburgh, Londen



Paranal Observatory

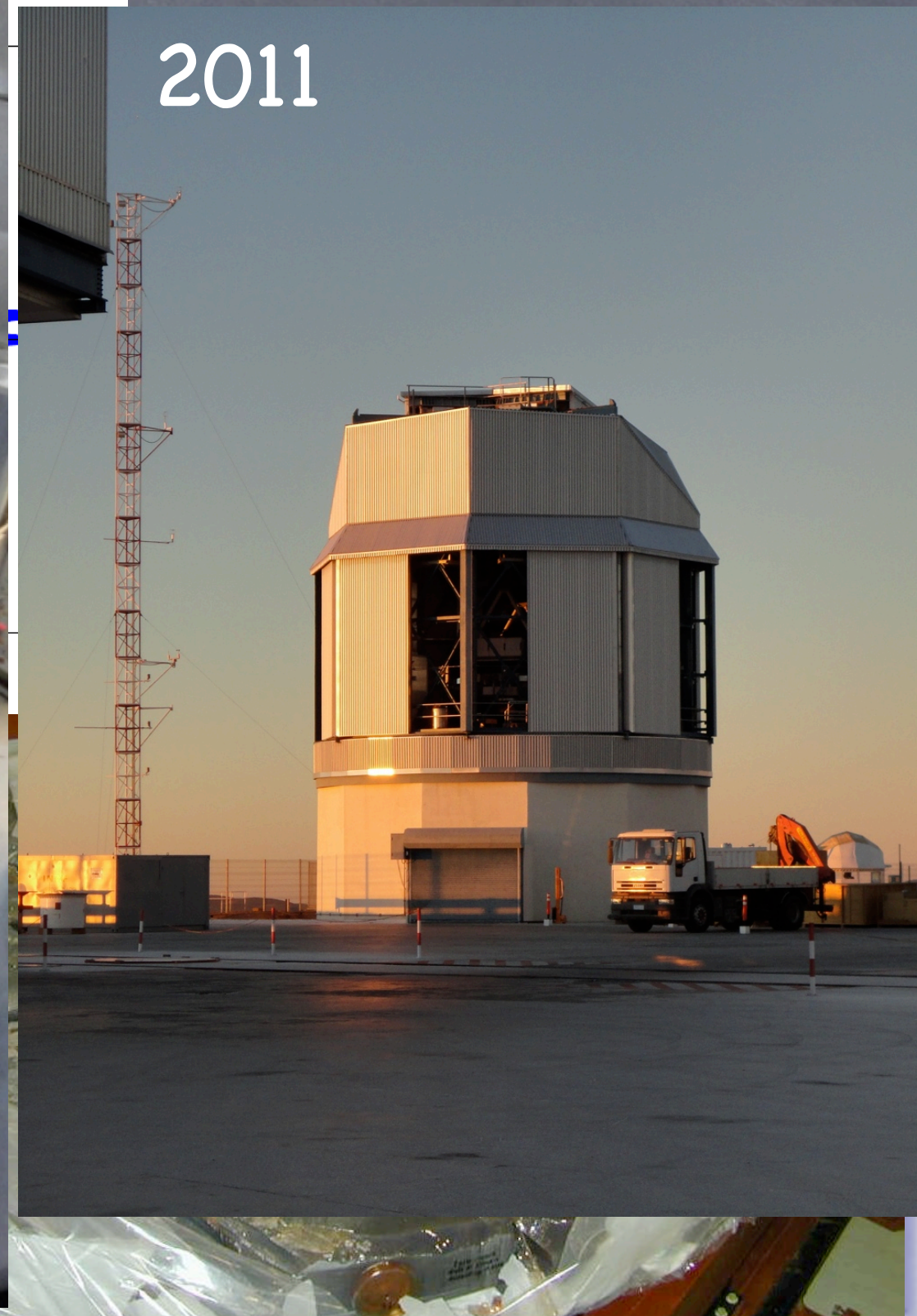
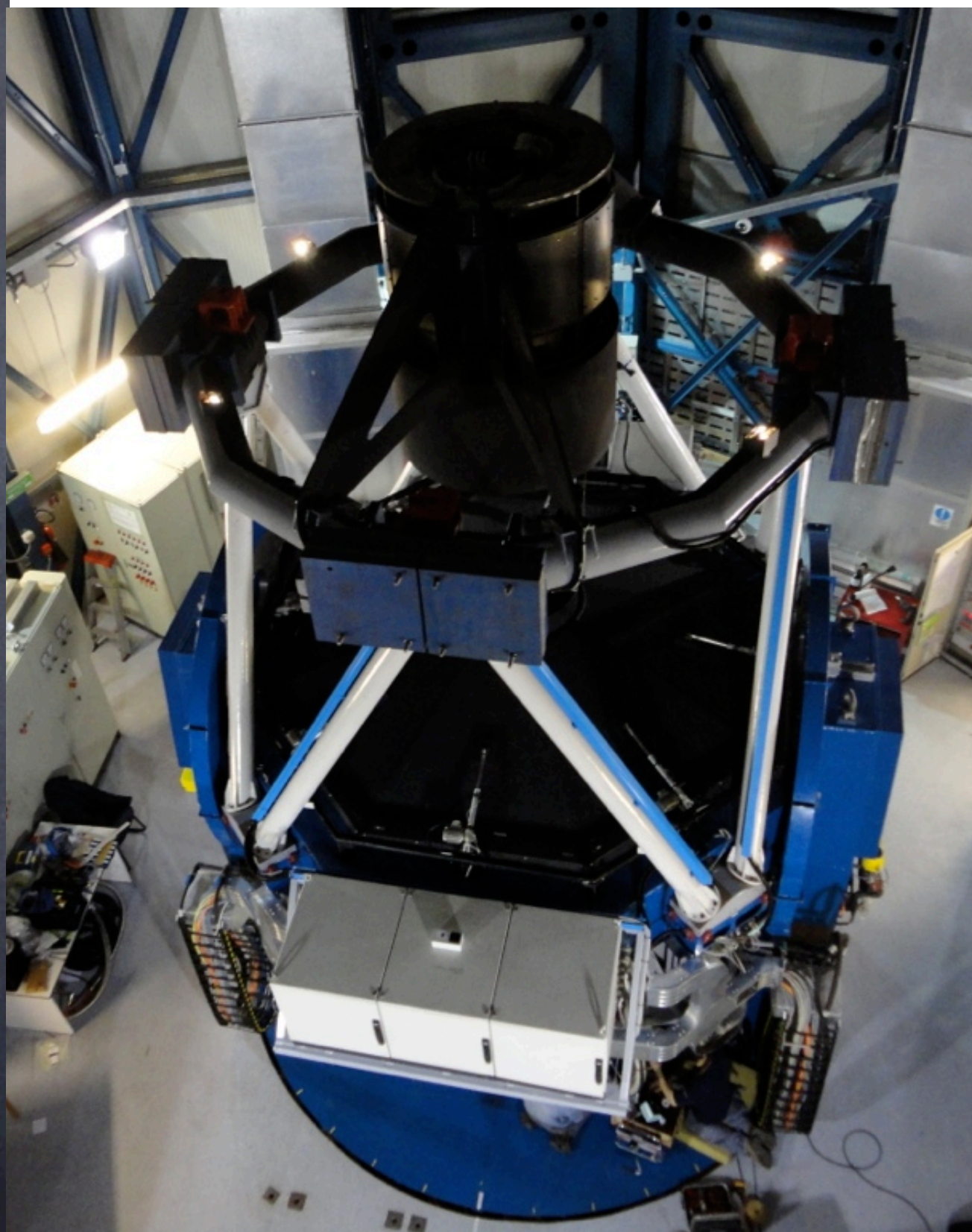




The VLT Survey Telescope

Naples Observatory

2011



Leiden Observatory



Universiteit Leiden

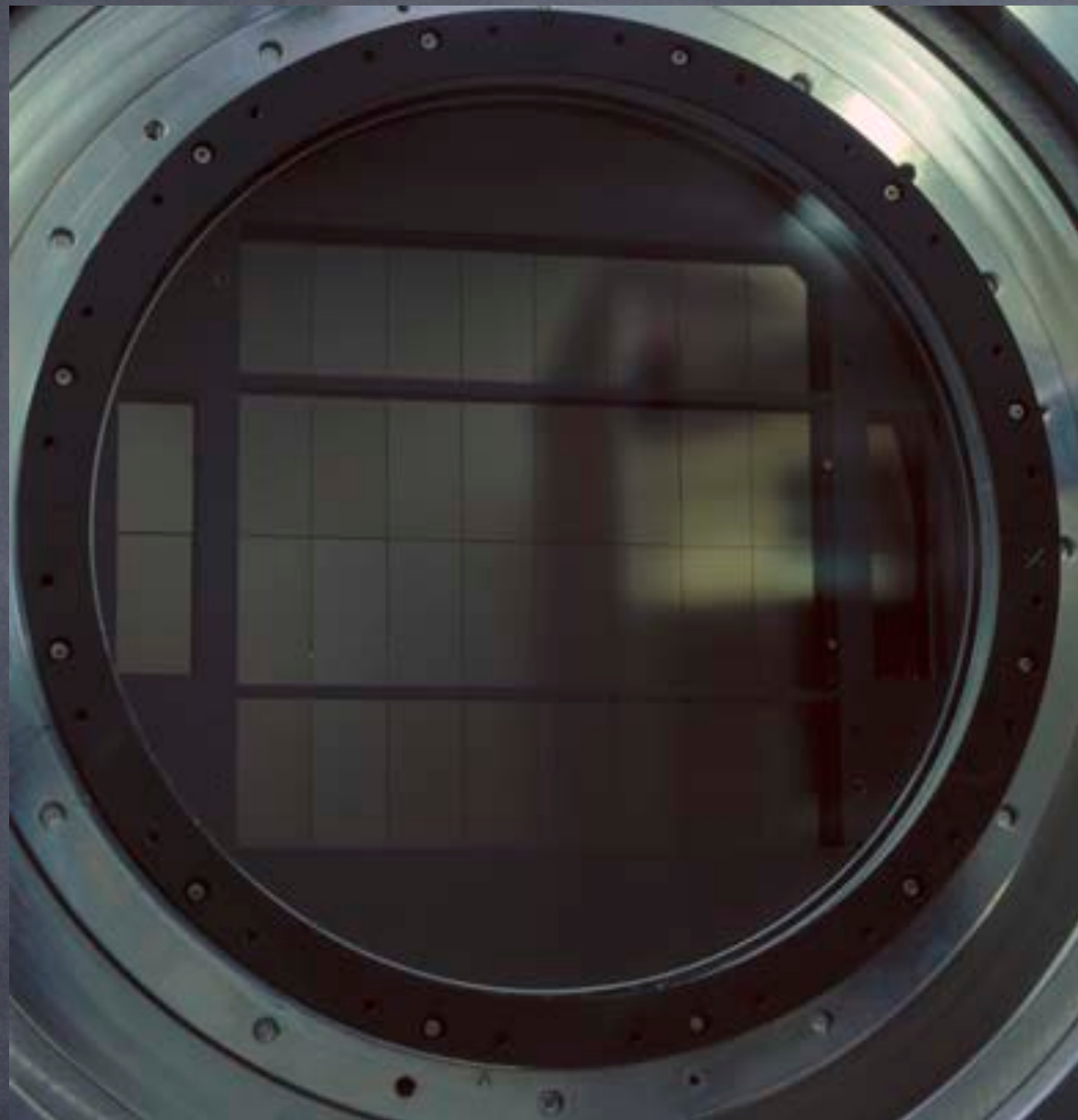
OmegaCAM

Optisch ontwerp voor
scherpe beeldkwaliteit

Auto-focus

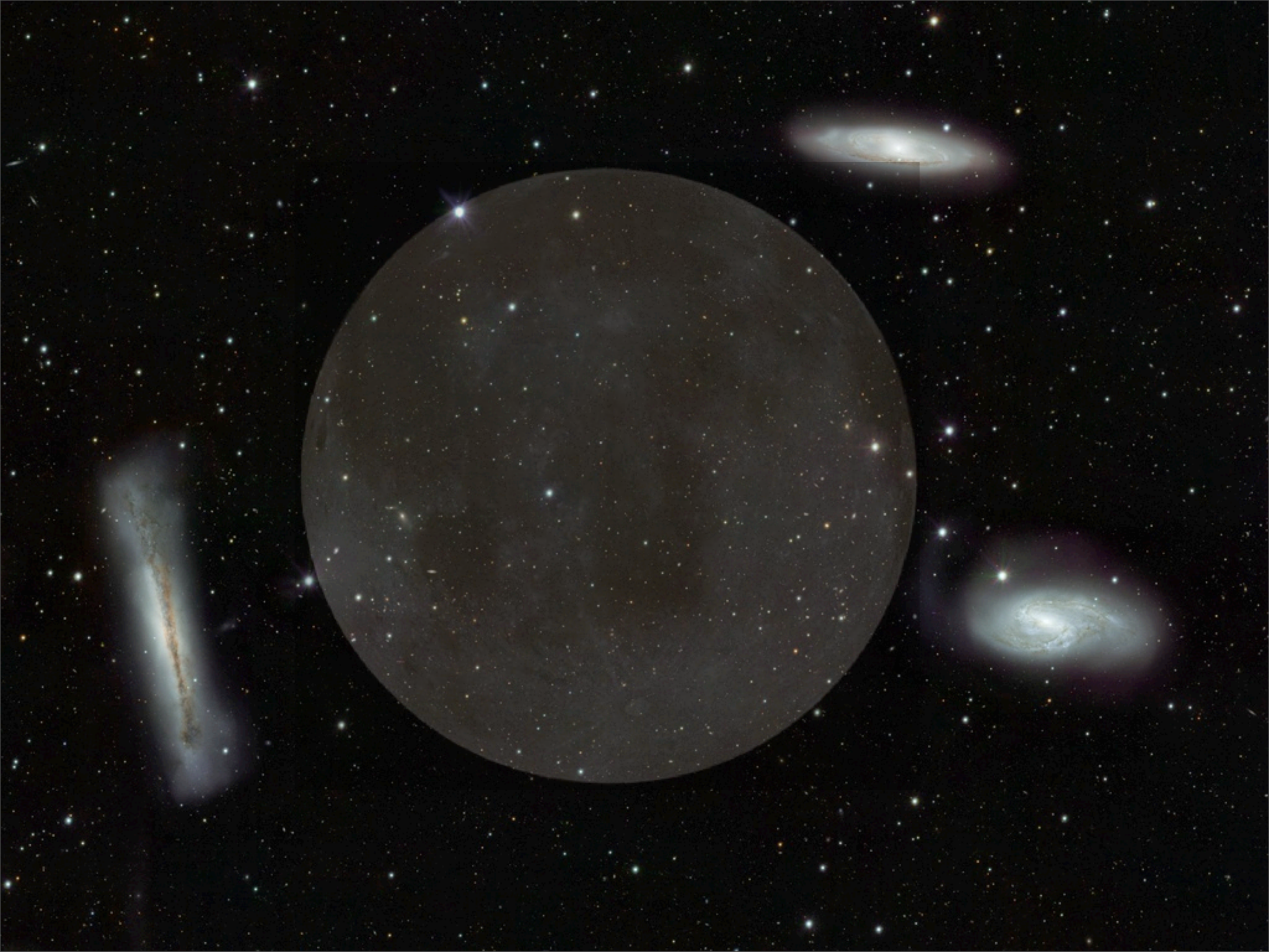
Waarnemingen gebruiken
de beste atmosferische
condities

4 jaar meten

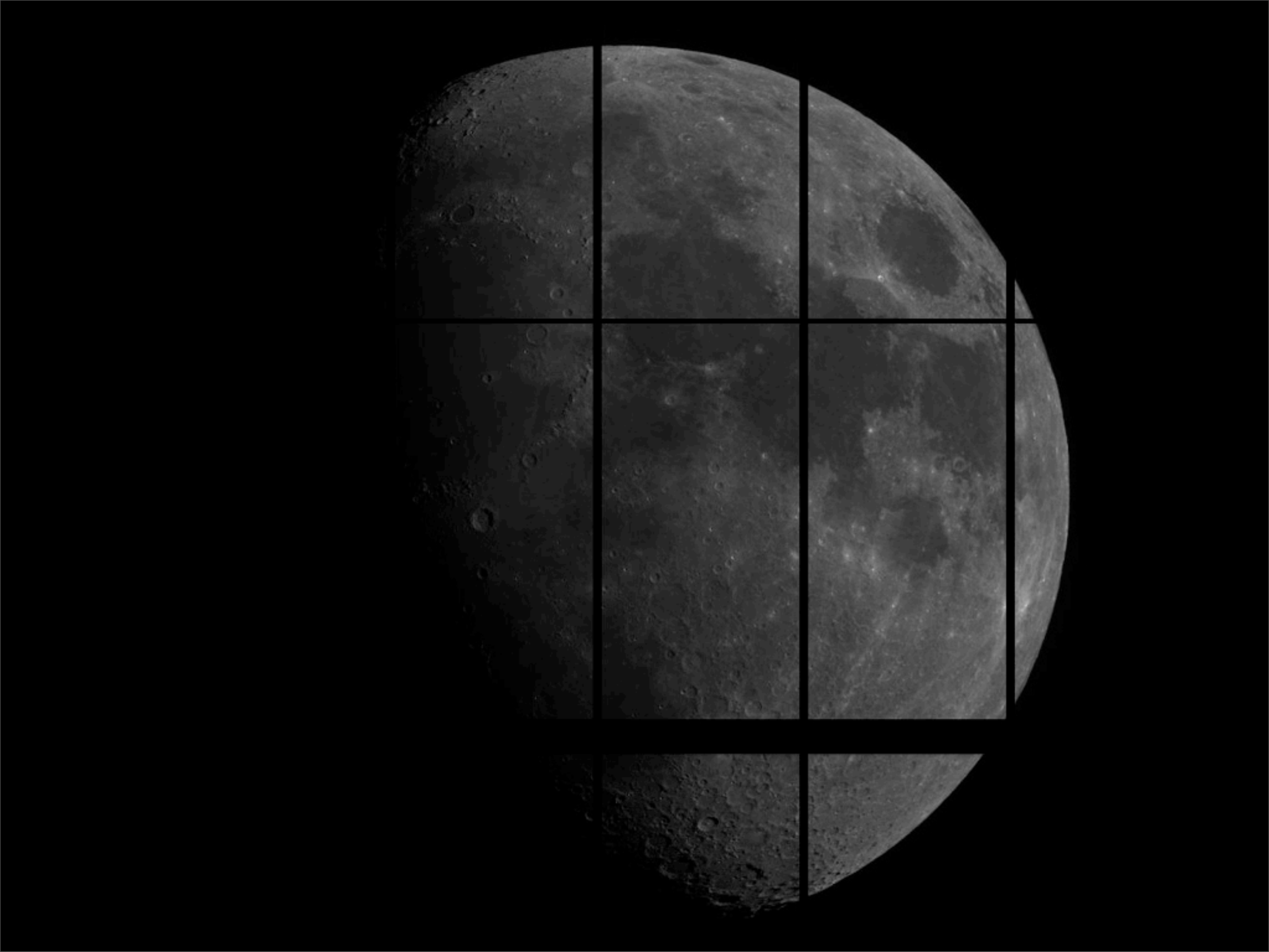


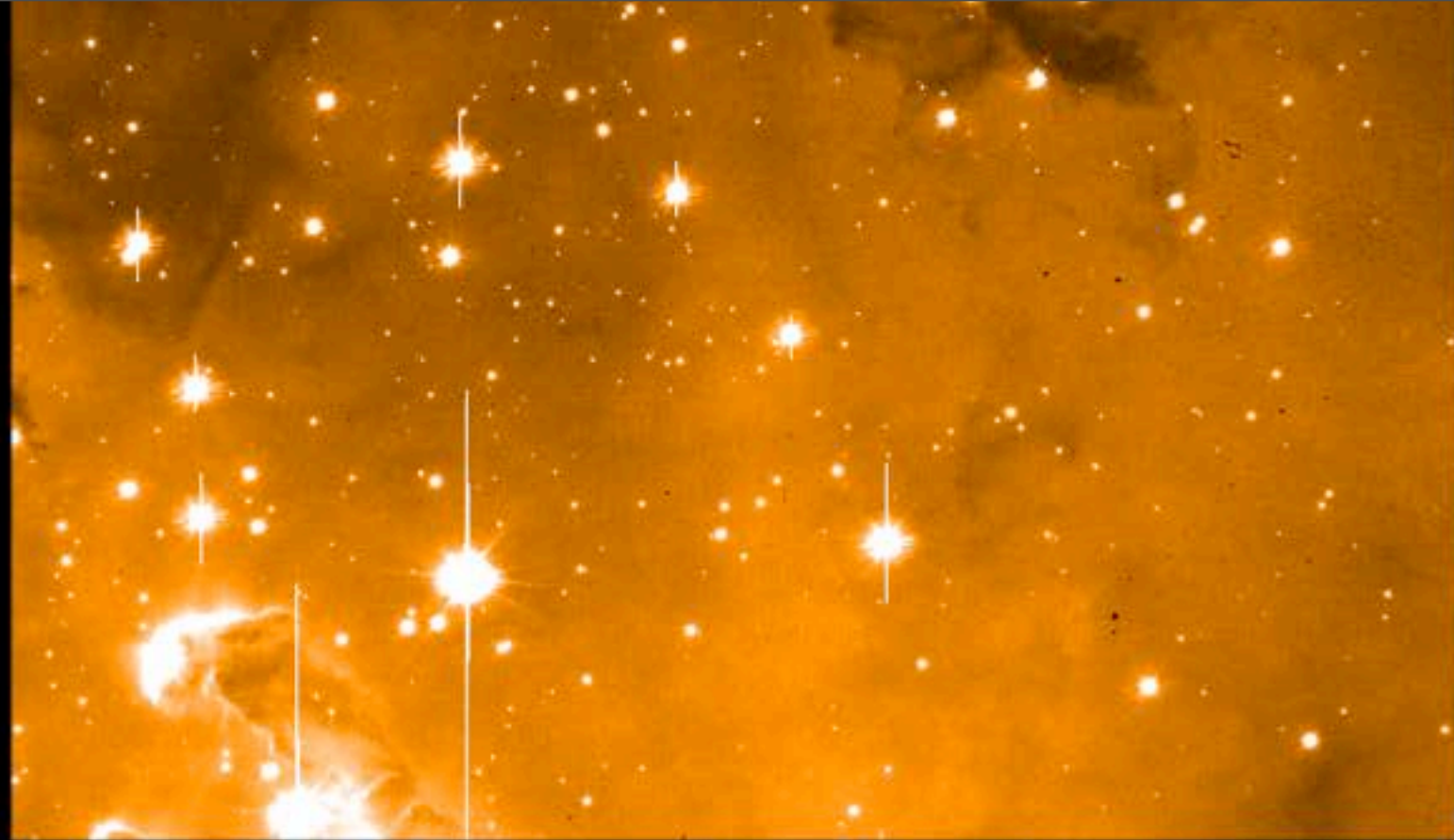
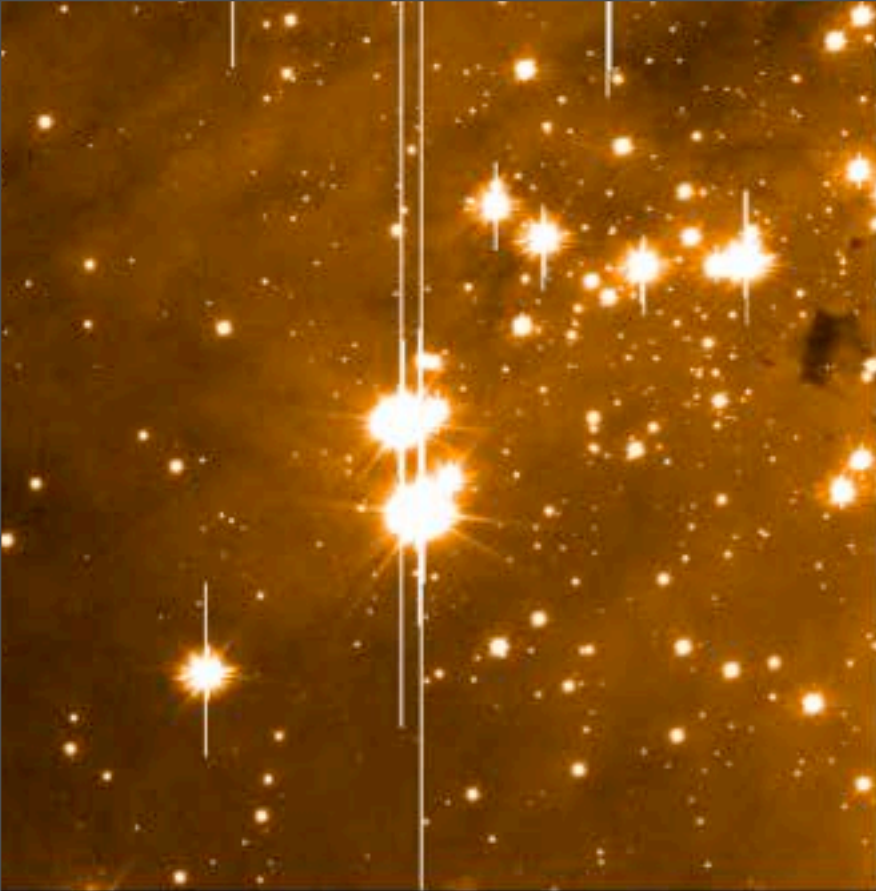
- 300 miljoen pixels (32 CCDs)
- Financiering door NOVA, D, I, ESO











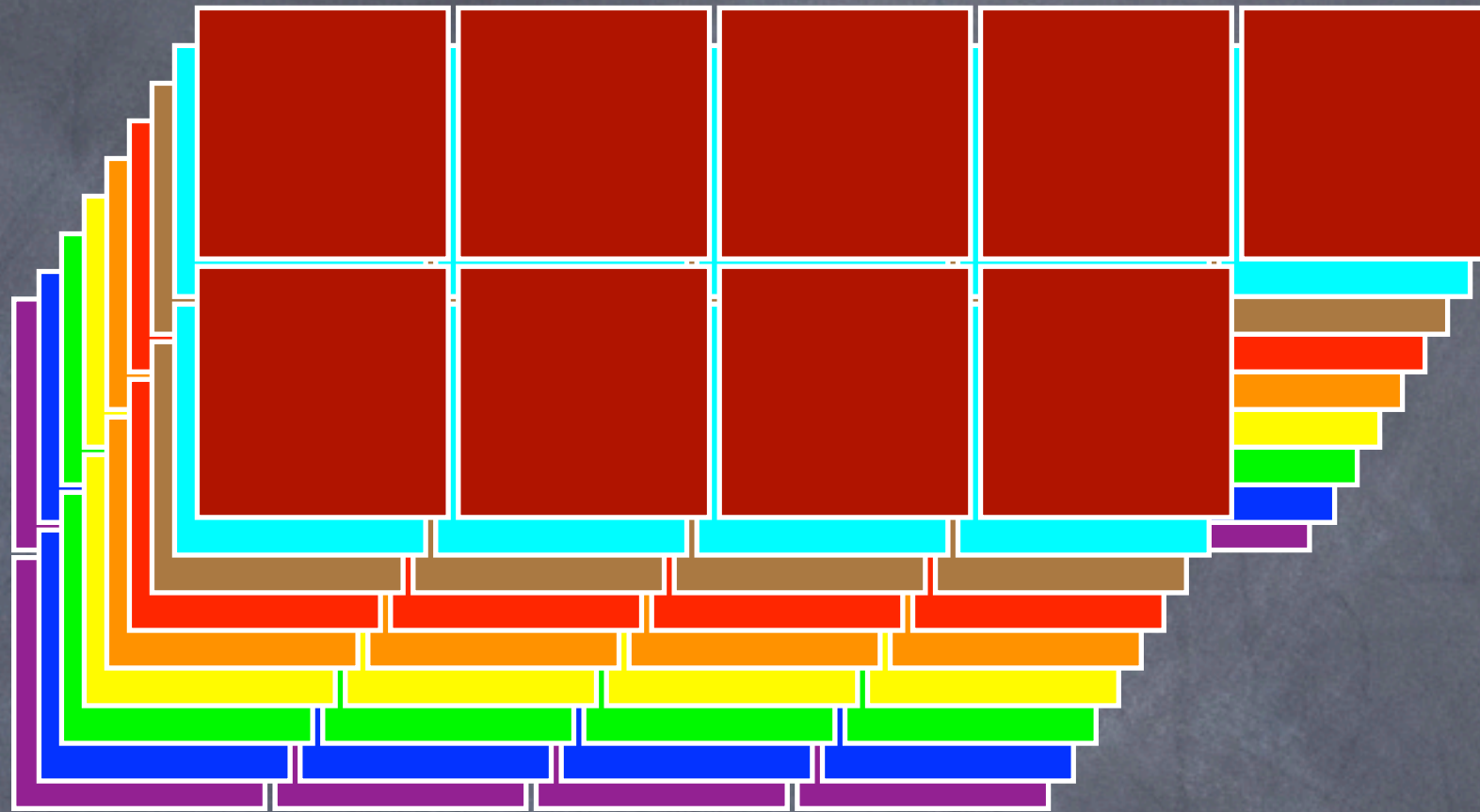




Veeeeel data



Veel data



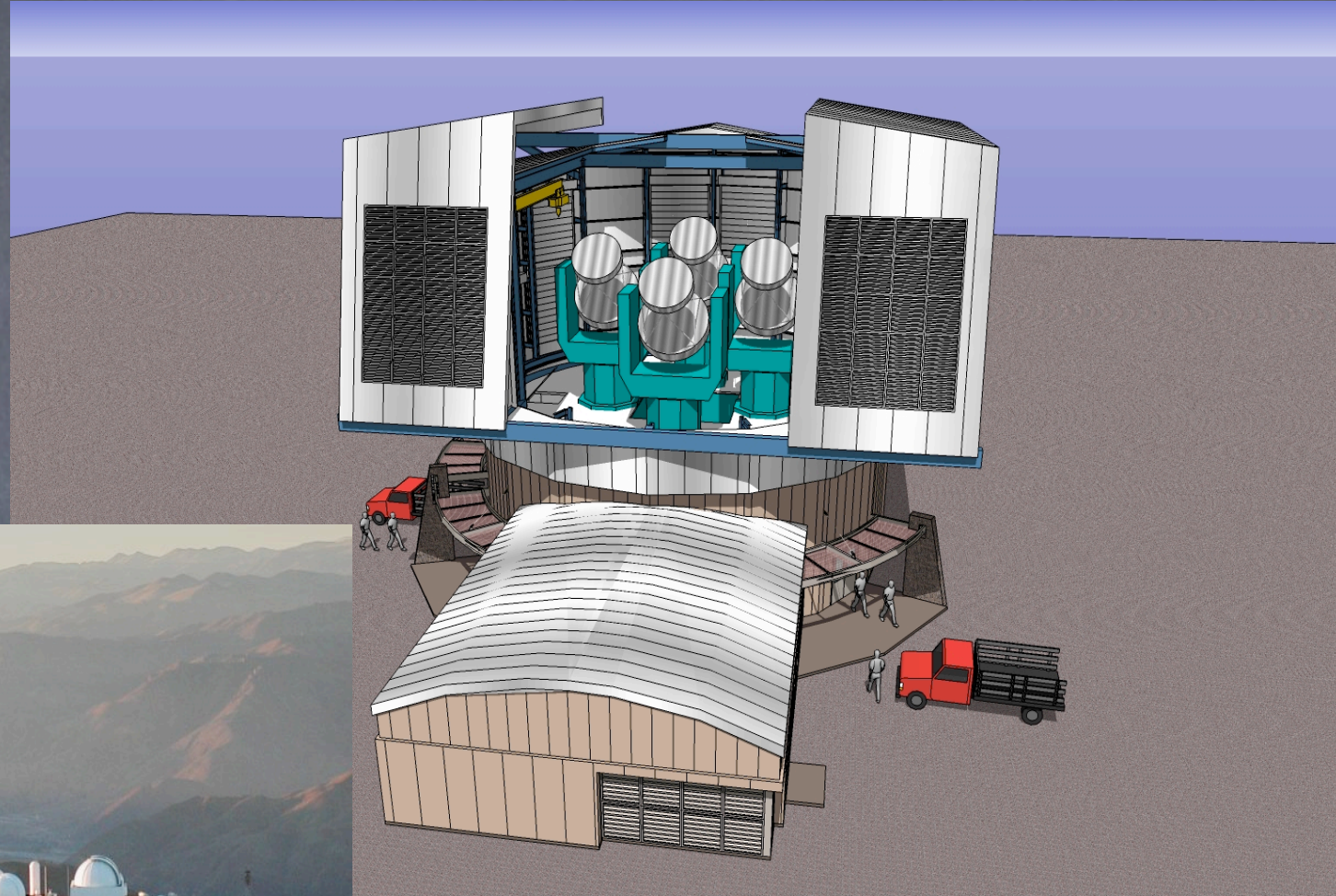
- Elke opname is 1 GB, x 9 kleuren, x 1500 'tegels'
- Speciaal computer archief, automatische verwerkingssoftware, team van data analysten ...
- Tweede 'data release' april 2014.

Doelen voor KiDS

- **grote** 9-kleuren kaart van extragalactische hemel
 - terugkijken tot 8.000.000.000 jaar geleden
 - nauwkeurige roodverschuivingen and vervorming
 - verdeling van materie and evolutie daarvan
- met gravitatielenzen: **uitdijingsgeschiedenis**
- op zoek naar clues over donkere materie and **donkere energie**
- ... en veel mooie astronomie!

Projecten elders

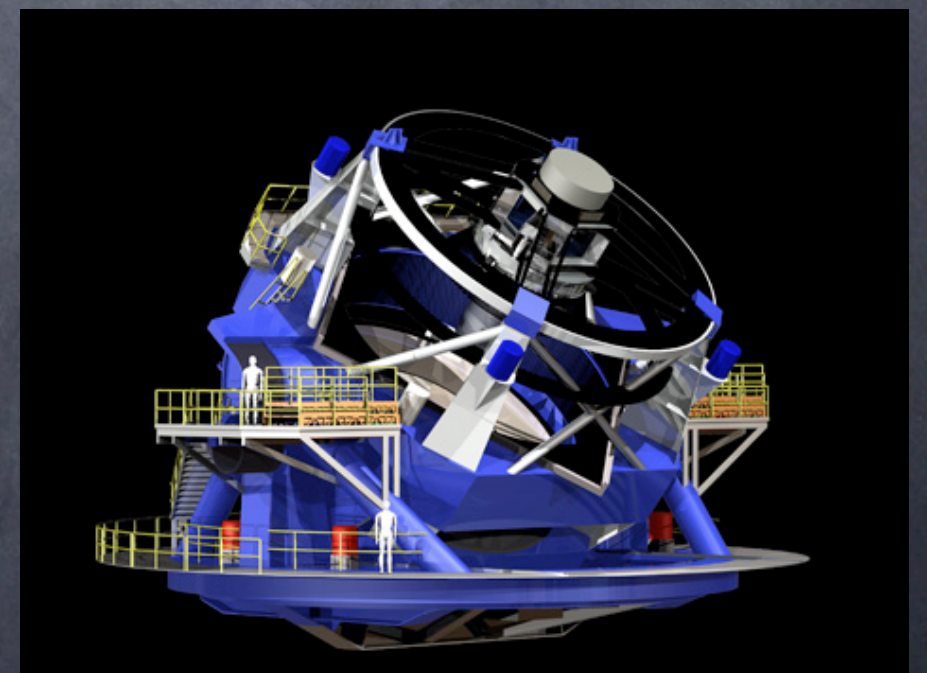
• PanSTARRS



• DES



• LSST

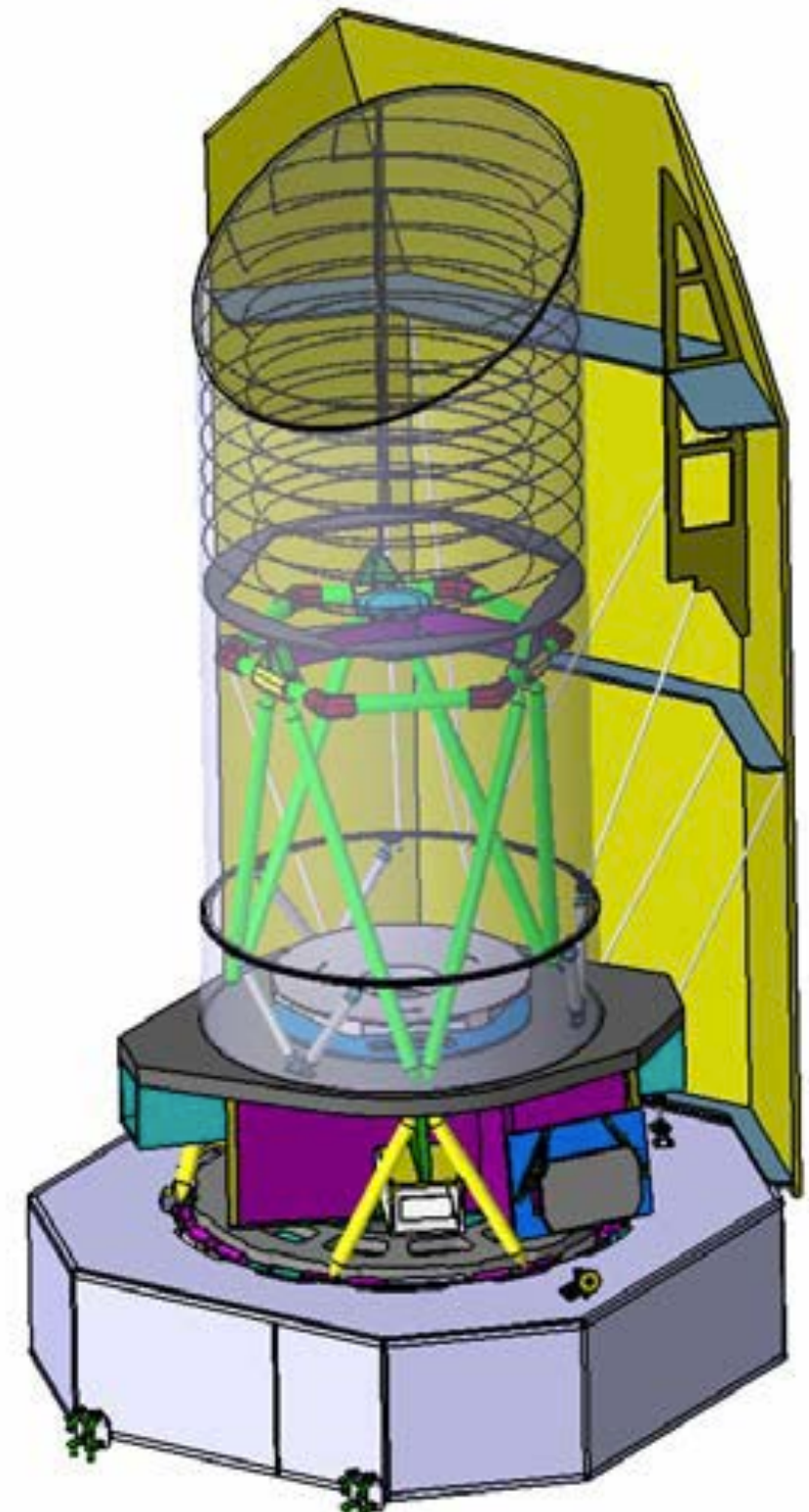


Euclid

- Ultieme metingen zullen uit de ruimte komen
 - ultra-stabiele beelden
 - geen vertroebeling door de atmosfeer
- ESA missie, lancering in 2020
- KiDS & co. zijn perfecte voorbereiding!

Euclid

Mapping the geometry
of the dark Universe



Samenvatting

