

Wim Lintzen

Cursus

De grote vragen van de Kosmos

Deel 3

Het nieuwe paradigma van de
kosmologie

Cursus grote vragen Kosmos

INDELING CURSUS

1. De inventaris van het heelal
2. De methode van de wetenschap
3. Het nieuwe paradigma van de kosmologie
4. Vele heelallen of één heelal?
Of een heelal dat zichzelf verklaart?

Cursus grote vragen Kosmos

Deel 3 van de cursus:

HET NIEUWE PARADIMA VAN DE KOSMOLOGIE

met als onderwerpen:

1. Moderne kosmologie, fase 1
2. Het nieuwe paradigma
3. Donkere materie en donkere energie
4. De babyfoto van het heelal
5. Ontwikkeling van de kosmos

Cursus grote vragen Kosmos

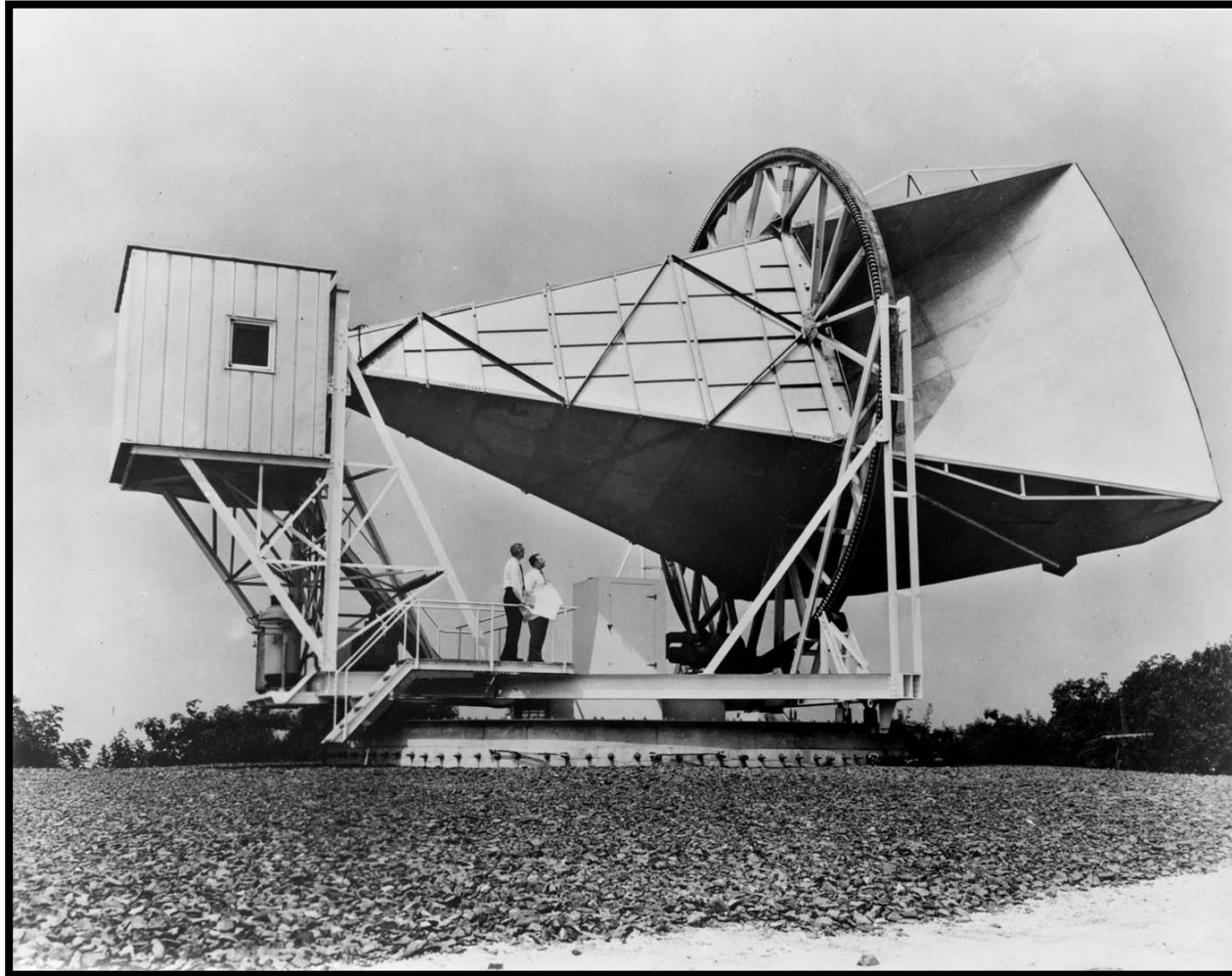
1. MODERNE KOSMOLOGIE, FASE 1

- Om goed te kunnen begrijpen wat er gebeurt in de kosmologie, blijven we gebruik maken van de hypothetisch-deductieve methode
- Dat betekent dat we nagaan:
 - Wat is de theorie?
 - Wat zijn de hypothesen
 - Wat zijn de waarnemingen?

Cursus grote vragen Kosmos

- **Moderne kosmologie, fase 1: 1965 - 1998**
- ***De theorie van een simpel big bang heelal: dit is een uitdijend en vertragend heelal***
- De uitdijing wordt veroorzaakt door de kracht van de Big Bang
- De vertraging wordt veroorzaakt door de afremmende werking van de zwaartekracht van alle massa's in het heelal
- Dit heelal is nog redelijk overzichtelijk en begrijpelijk

De antenne van Penzias en Wilson, waarmee in 1965 de kosmische achtergrondstraling werd ontdekt, die als 'bewijs' gold voor de Big Bang



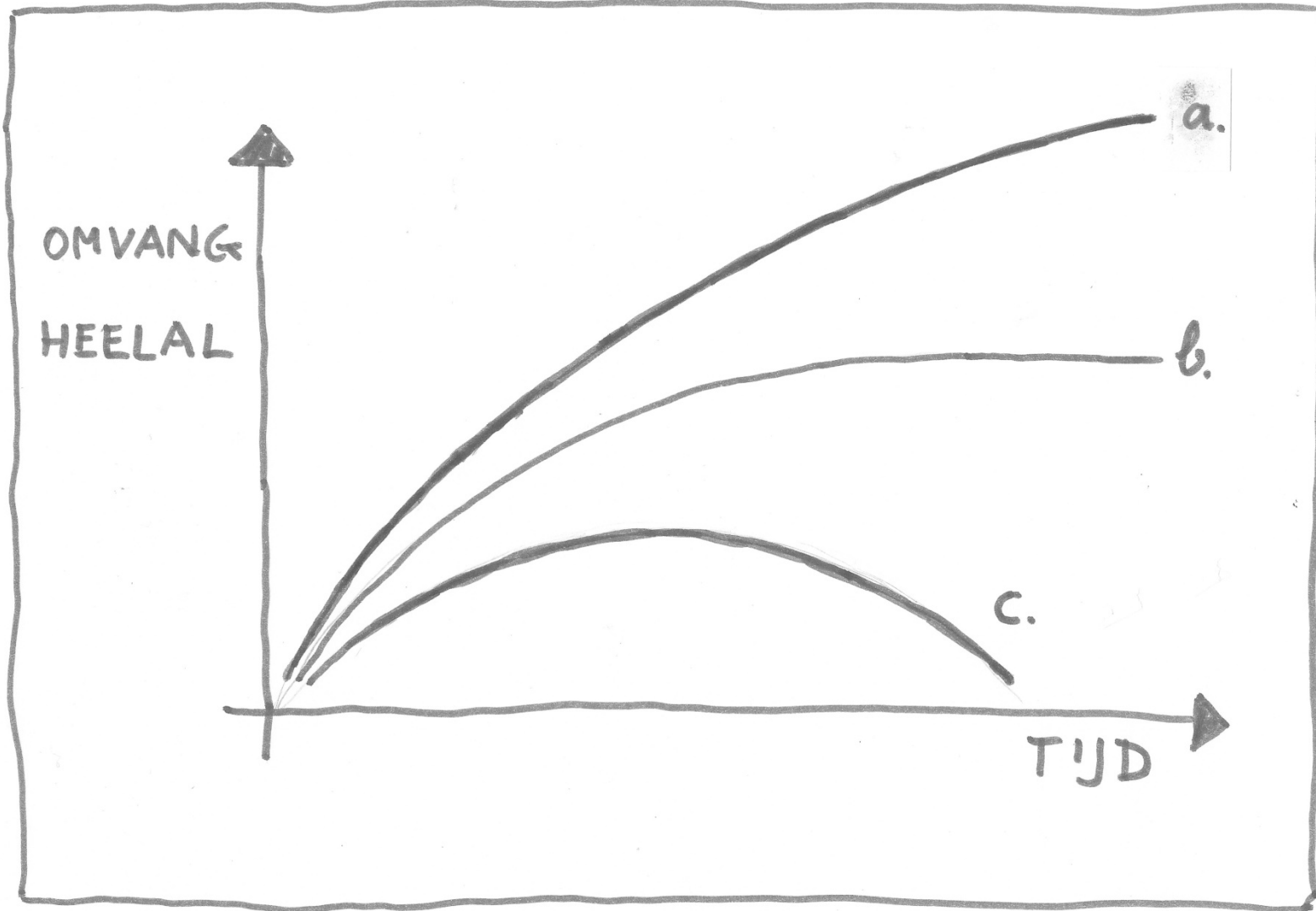
Cursus grote vragen Kosmos

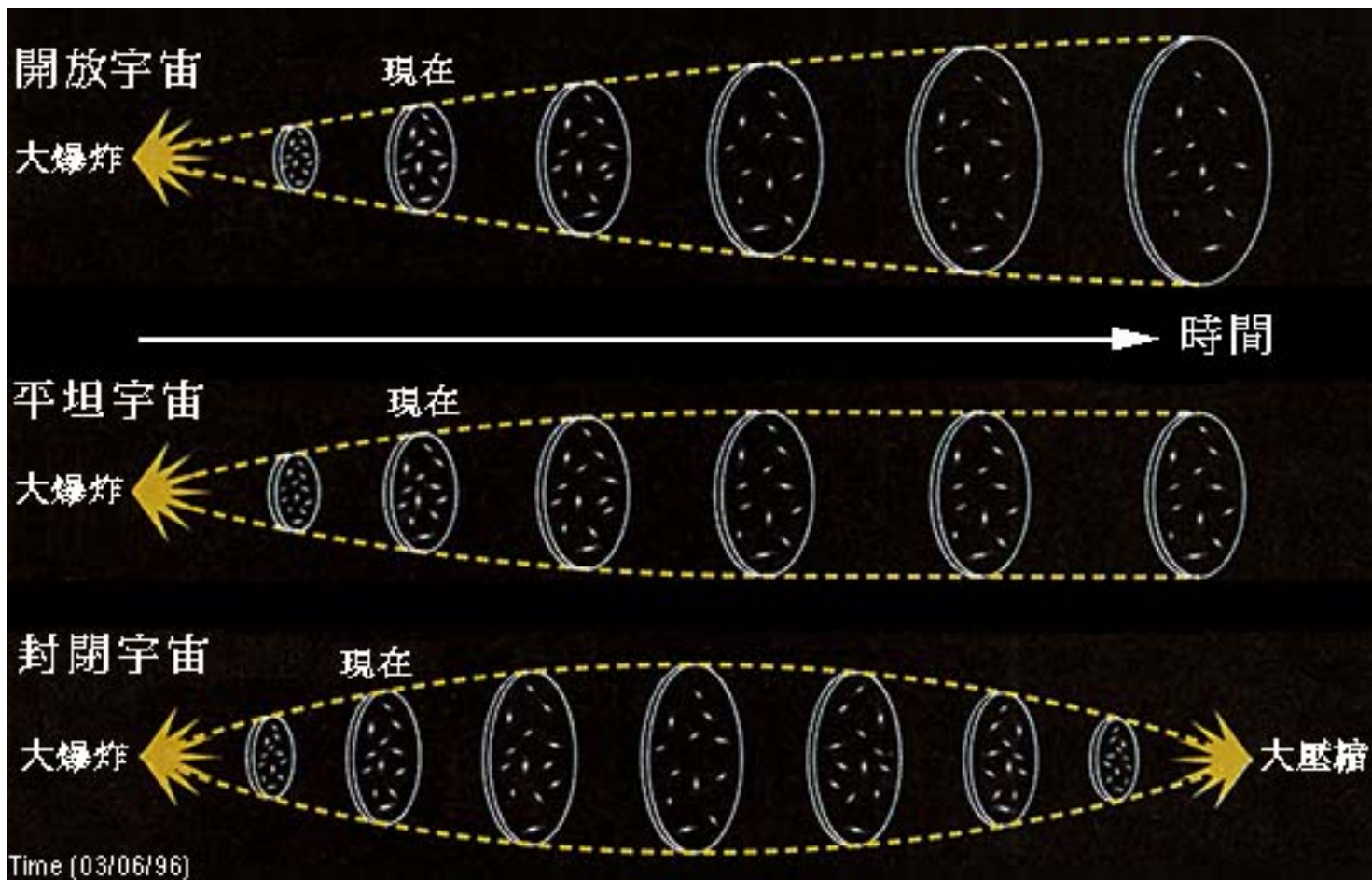
- In de beschrijving door de algemene relativiteitstheorie van Einstein (*een theorie over 'ruimte en tijd' en over 'materie en energie'*) wordt het heelal dynamisch als gevolg van twee energieën:
- De ***zwaartekrachtenergie*** = **Z** = het afremmen van de uitdijing = het 'weerstand' van de tijdruimte-energie = positieve energie
- De ***uitdijingsenergie*** = **U** = het 'creëren' van tijdruimte = het opbouwen van energie in de tijdruimte-kromming = negatieve energie

Cursus grote vragen Kosmos

- Deze theorie voorspelt *drie scenario's* voor de **dynamiek van het heelal** als gevolg van de balans tussen **Z** en **U**
 - a. Als massa heelal klein is, d.w.z. **Z < U**; *dan blijft heelal alsmaar uitdijen, zij het steeds langzamer*
 - b. Als massa heelal kritisch is, d.w.z. **Z = U**; *dan dijt heelal uit en bereikt een omvang die stabiel blijft*
 - c. Als massa heelal groot is, d.w.z. **Z > U**; *dan dijt heelal uit en krimpt weer in*

Drie heeel-scenario's (hypothesen), volgend uit de algemene relativiteitstheorie van Einstein



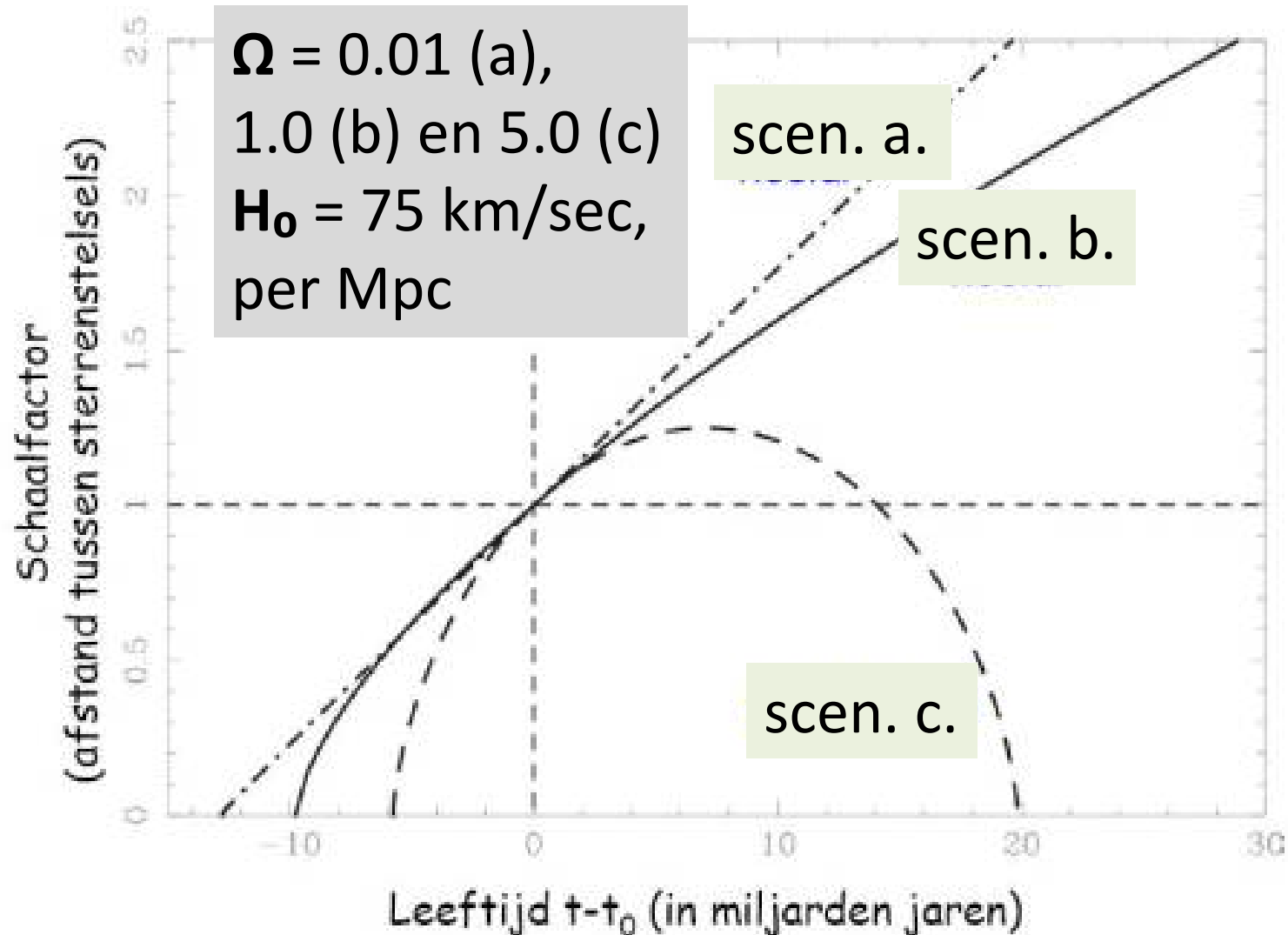


Cursus grote vragen Kosmos

- De algemene relativiteitstheorie is wiskundig gezien **een uiterst lastige theorie:**
 - 20 vergelijkingen en 10 onbekenden
- *Onder speciale omstandigheden* kan de **dynamiek van het heelal** worden beschreven door de Friedmann vergelijking:
- In deze vergelijking spelen twee parameters een cruciale rol:
 - De uitdijingsnelheid op dit moment: H_0
 - De waarde van de massadichtheid: Ω

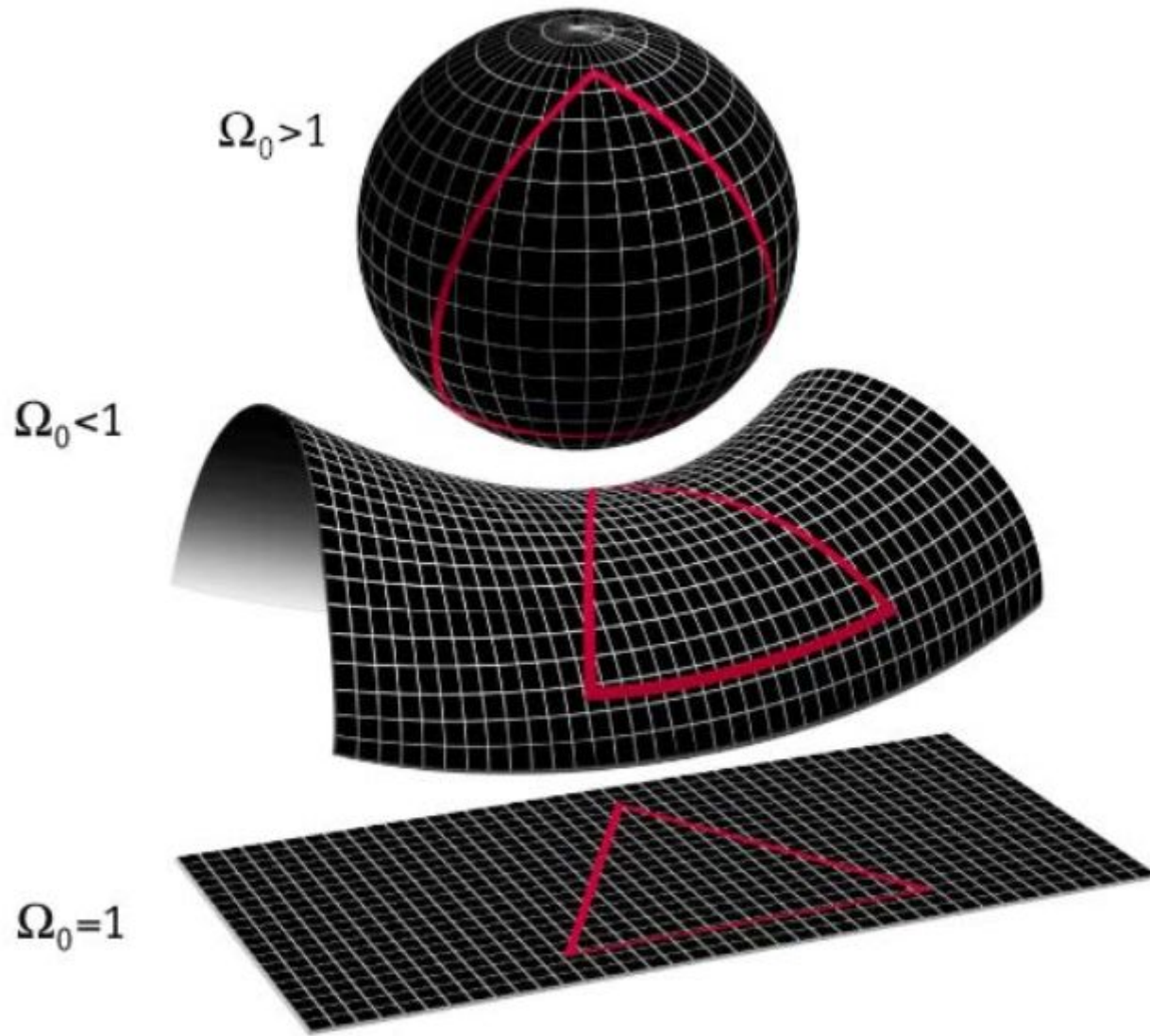
Standaardheelal (Friedmann, 1924)

evolutie heelal



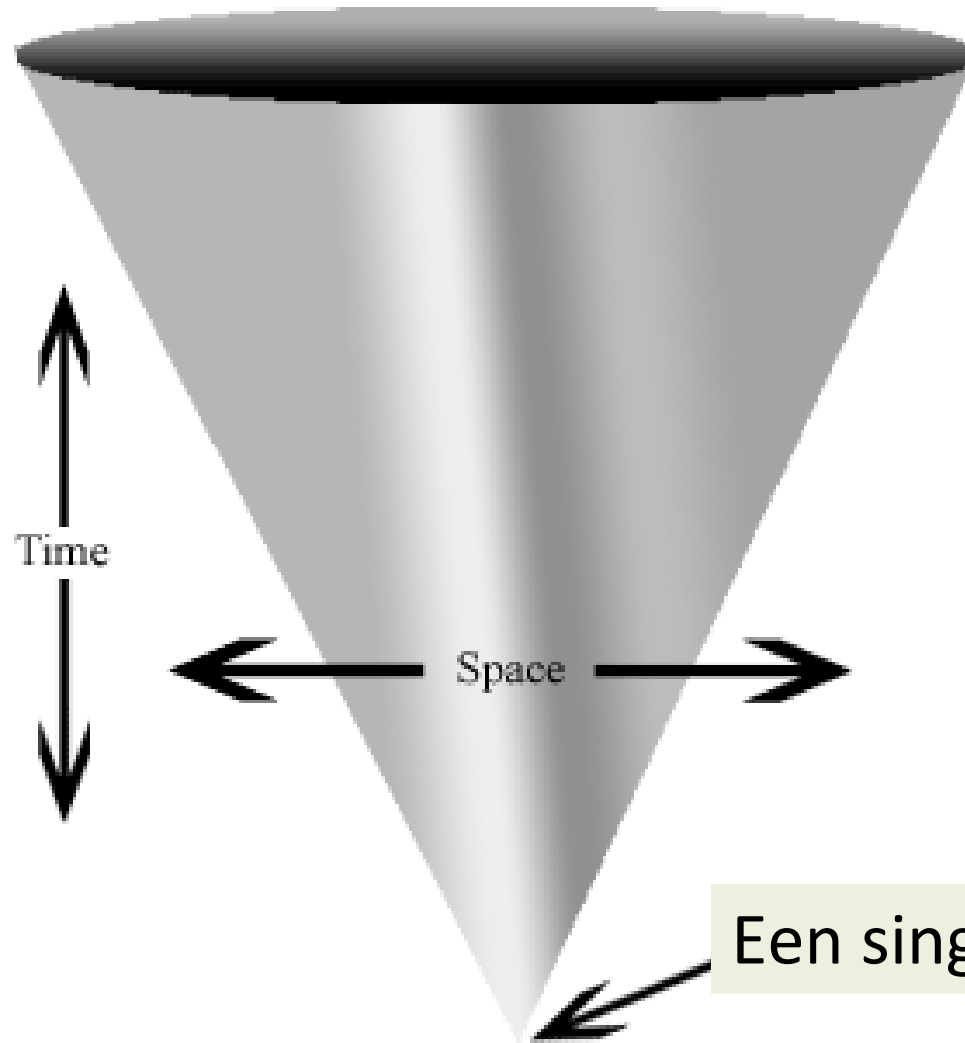
Cursus grote vragen Kosmos

- Een tweede voorspelling die volgt uit de algemene relativiteitstheorie van Einstein, is:
de kromming van de ruimtetijd
- De kromming van ruimtetijd = de energie-spanning van massa
- Ook hier drie scenario's of hypothesen:
- De ruimtetijd van het heelal:
 - is 'gesloten' bij hoge massadichtheid
 - is 'open' bij lage massadichtheid
 - blijft 'vlak' bij een kritische dichtheid



Cursus grote vragen Kosmos

- Een speciale hypothese die consistent is met de algemene relativiteitstheorie, luidt:
- ***het heelal heeft een begin in de tijd***
- Deze hypothese volgt uit een speciale, topologische wiskunde (Roger Penrose) en laat in Einstein's theorie een singulariteit toe
- Een *singulariteit* beschrijft de situatie van een punt waarop de tijd stilstaat en de natuurwetten het laten afweten
- ***Voorbeelden: het zwarte gat en de big bang***



Een singulariteit

Cursus grote vragen Kosmos

- Wat is het 'succes' van de big bang theorie, fase 1?
- Dat is de eenvoud en helderheid van de beschrijving van het heelal:
 - 1: één big bang is voldoende om het heelal te laten ontstaan
 - 2: Als je H_0 en Ω kent via meting, dan heb je ook de dynamiek van het heelal te pakken
 - 3: het heelal zal enkel uitdijen volgens een vertragend patroon; Λ remt hoe dan ook af

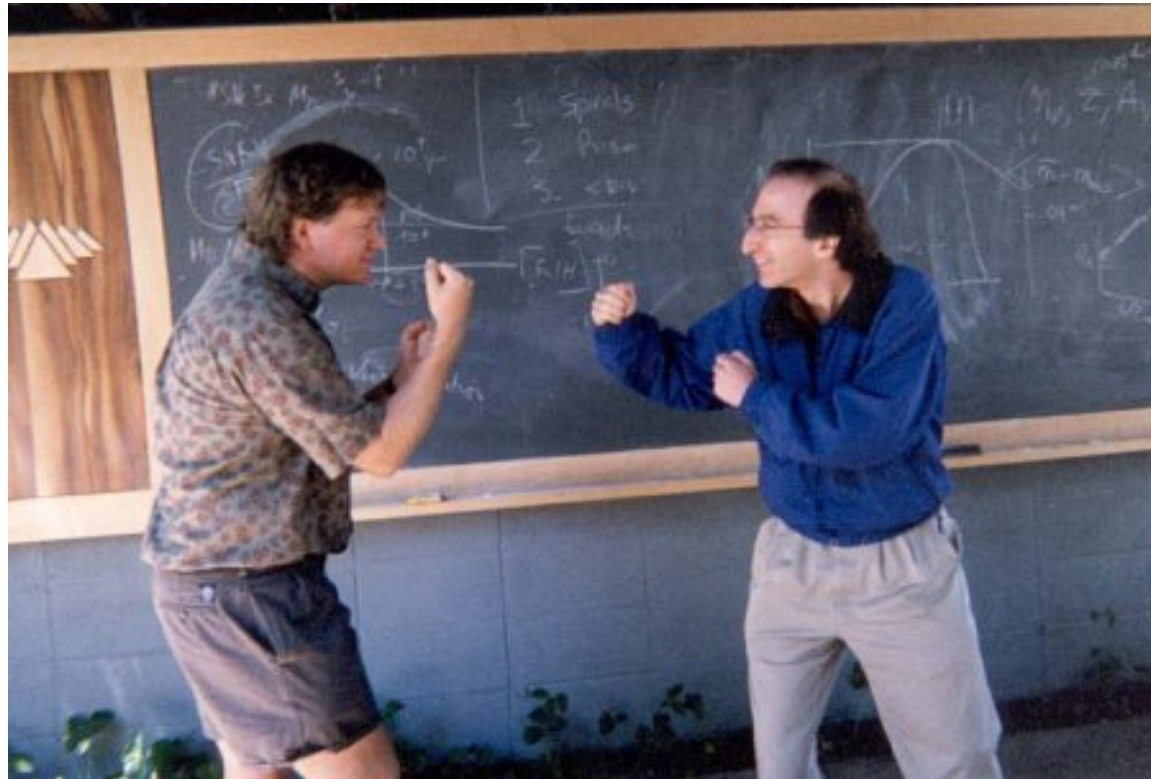
Cursus grote vragen Kosmos

- Risico bij 1: Stel dat de kracht van de big-bang niet voldoende is om zo'n enorm heelal te laten ontstaan. ***Wat dan?***
- Risico bij 2: H_0 en Ω zijn weliswaar duidelijke parameters, maar ze zijn ***lastig te meten*** en de waarde er van volgt niet uit de theorie.
- Risico bij 3: Wat als het heelal niet vertraagd maar versneld uitdijt? ***Dat is in deze scenario's uitgesloten! We hebben alleen Z en U.***

Cursus grote vragen Kosmos

- Maar het ongelooflijke gebeurde in 1998
- Uit waarnemingen aan supernova's bleek dat het heelal de laatste 5 miljard jaar niet vertraagd, maar versneld uitdijde
- De kosmologen stonden versteld
- Dit was een veel complexer en ontoegankelijker heelal dan gedacht
- Het was een grote schok, want dit zou gepaard gaan met een verschuiving van paradigma

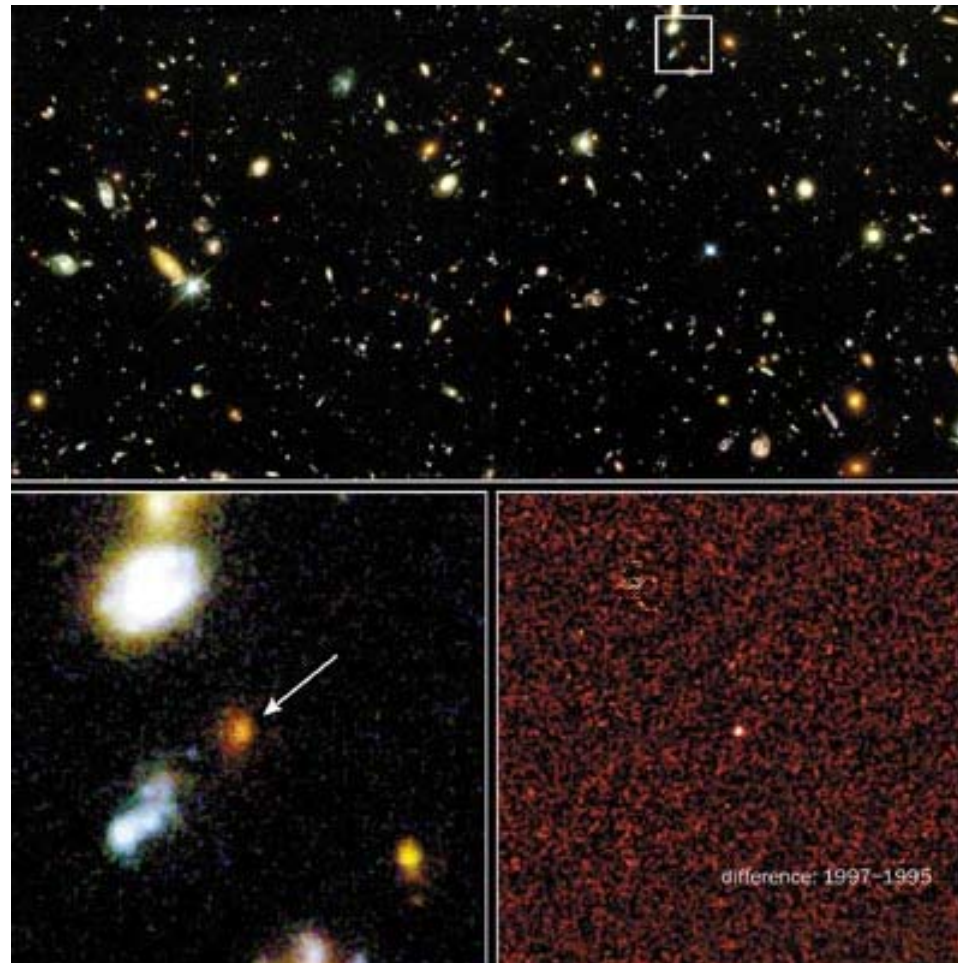
Brian Schmidt en Saul Perlmutter, in 1998 de ontdekkers van een versnellend heelal

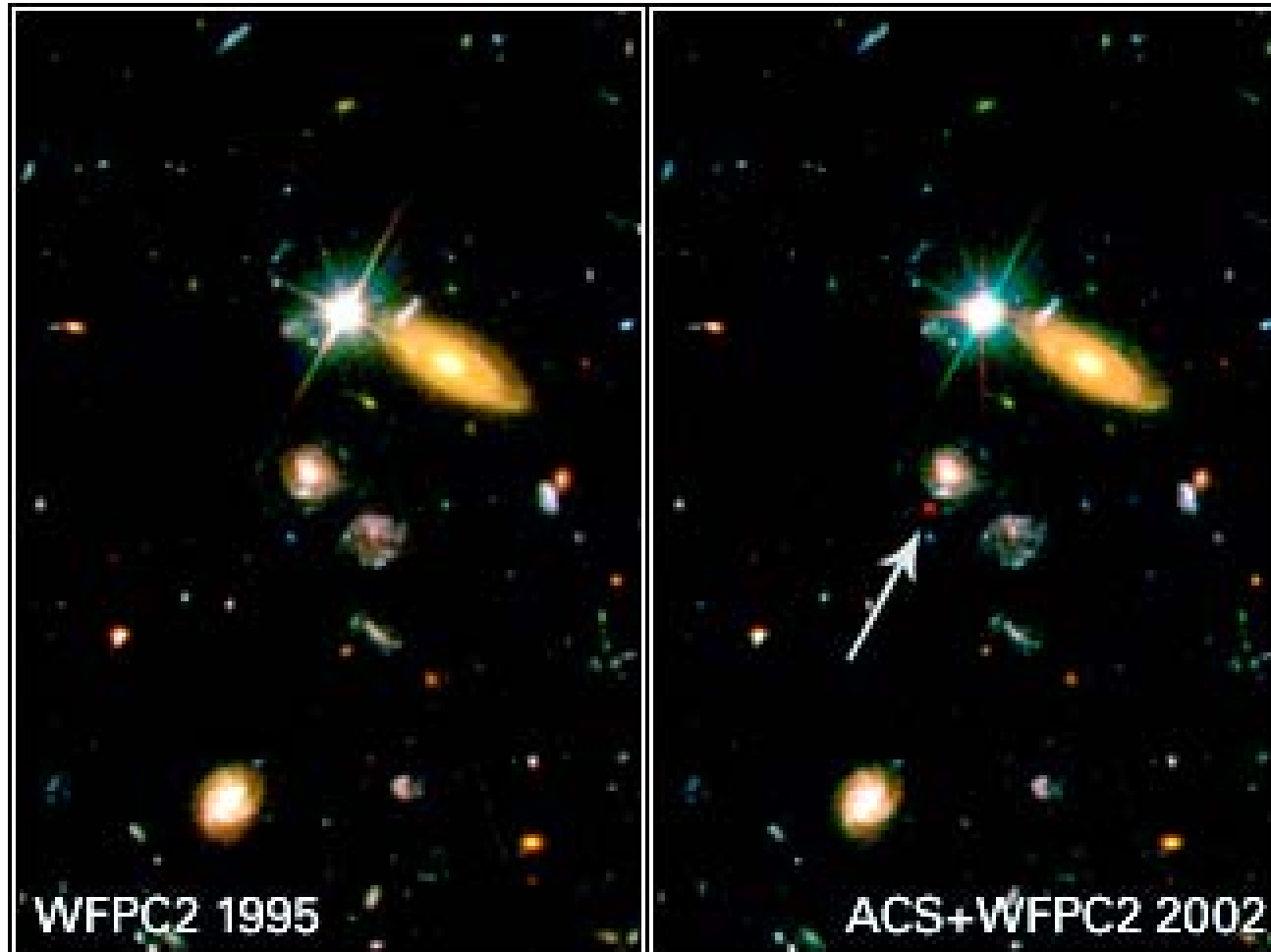


Cursus grote vragen Kosmos

- Wat waren de waarnemingen van Schmidt en Perlmutter?
- Ze bekeken ieder met hun team enkele tientallen supernova explosies
- De supernova's bleken allemaal zwakker te schijnen dan was verwacht.
- De enige oorzaak die kon worden bedacht was dat ze verder weg stonden dan de theorie van een vertragend heelal voorspelde
- Conclusie: **het heelal dijt versneld uit**

Het onderzoek naar supernova's gebeurt met de grootste telescopen, die in verre melkwegstelsels sterren kunnen onderscheiden





Cursus grote vragen Kosmos

- Schmidt en Perlmutter deden voor de nieuwe kosmologie wat Penzias en Wilson deden voor de oude kosmologie
- Penzias en Wilson ontdekten in 1965 de kosmische achtergrondstraling: het 'definitieve' bewijs van de big bang en ***een revolutionaire start van de moderne kosmologie***
- Schmidt en Perlmutter ontdekten in 1998 de versnelling van de kosmos: ***een radicale vernieuwing van de moderne kosmologie***

Cursus grote vragen Kosmos

2. HET NIEUWE PARADIGMA

- De ontdekking van 1998 maakte de weg vrij voor een nieuwe fase in de kosmologie:
- **DE INFLATOIRE KOSMOLOGIE**
- Wat is de theorie?
- Wat zijn de hypothesen?
- Wat zijn de waarnemingen?

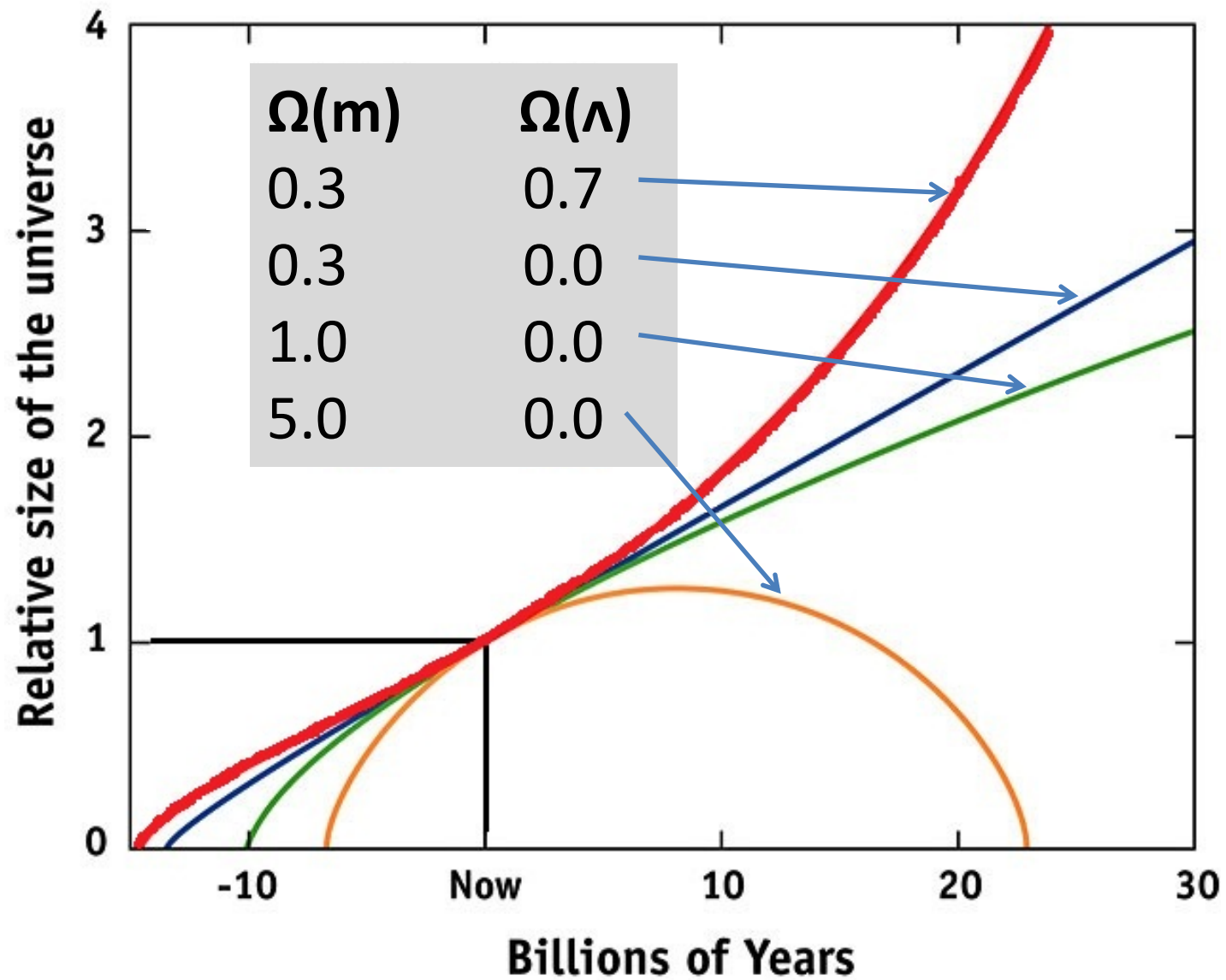
Cursus grote vragen Kosmos

- **Moderne kosmologie, fase 2: 1998 - 20..**
- ***De theorie van een complex big bang heelal: dit is een uitdijend en versnellend heelal***
- De uitdijing wordt veroorzaakt door de kracht van ***twee big bangs***: een kleine en een grote
- Aanvankelijk vertraagde een gigantische massa de uitdijing van het heelal, later versnelde de uitdijing a.g.v. een ***anti-zwaartekracht***
- Dit heelal is nogal gecompliceerd en veel moeilijker te begrijpen dan het 'oude' heelal

Cursus grote vragen Kosmos

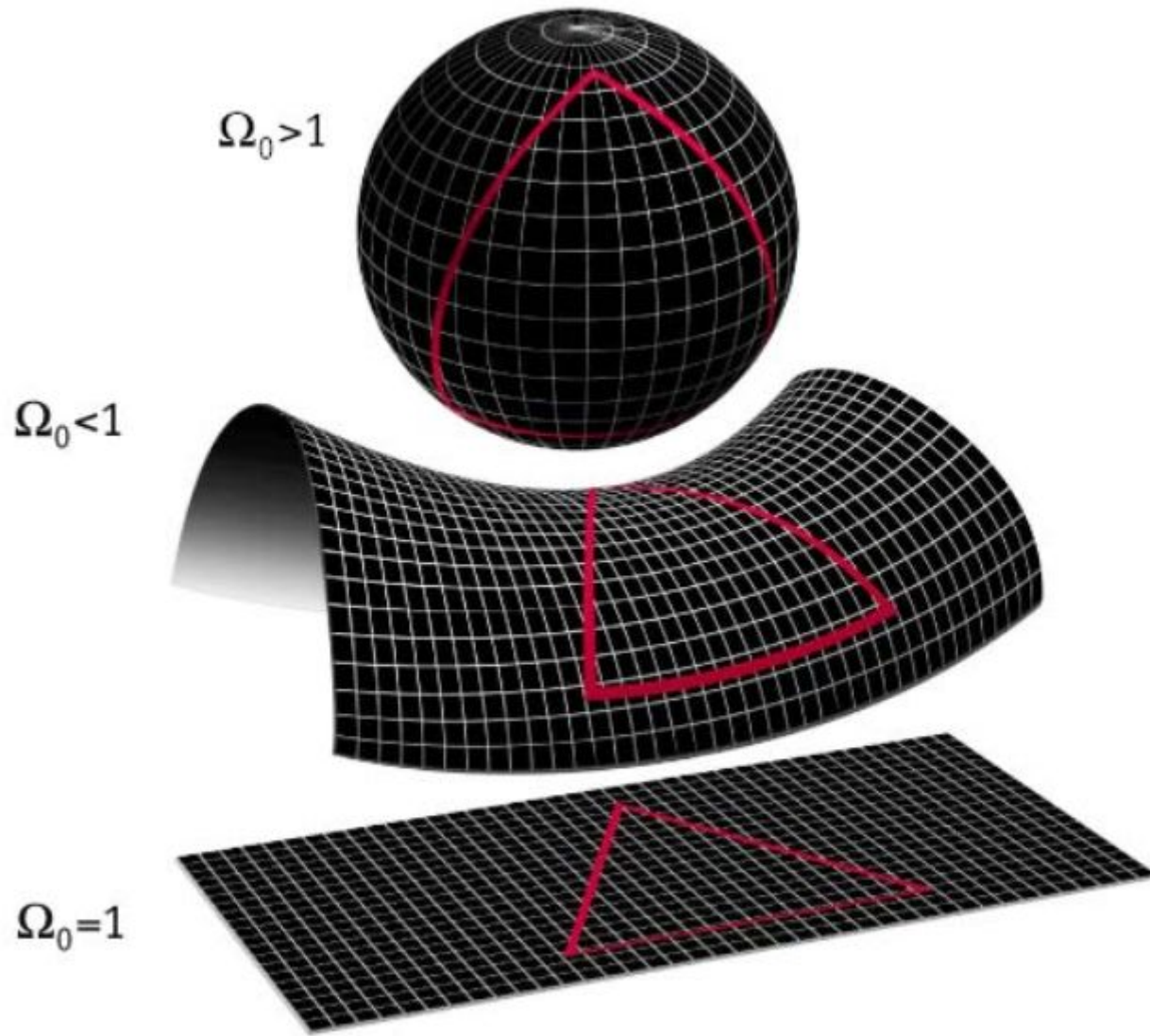
- We kunnen echter *opnieuw* (!) een beschrijving geven via de algemene relativiteitstheorie van Einstein en dan krijgen we: ***een heelal dat complex dynamisch is***
- De dynamiek wordt beschreven door de **Friedmann-Lemaître vergelijking**:
- In deze vergelijking spelen nu meerdere parameters een rol:
 - de uitdijingsnelheid op dit moment: H_0
 - de dichtheid van gewone+donkere materie: $\Omega(m)$
 - de dichtheid van donkere energie: $\Omega(\Lambda)$

EXPANSION OF THE UNIVERSE



Cursus grote vragen Kosmos

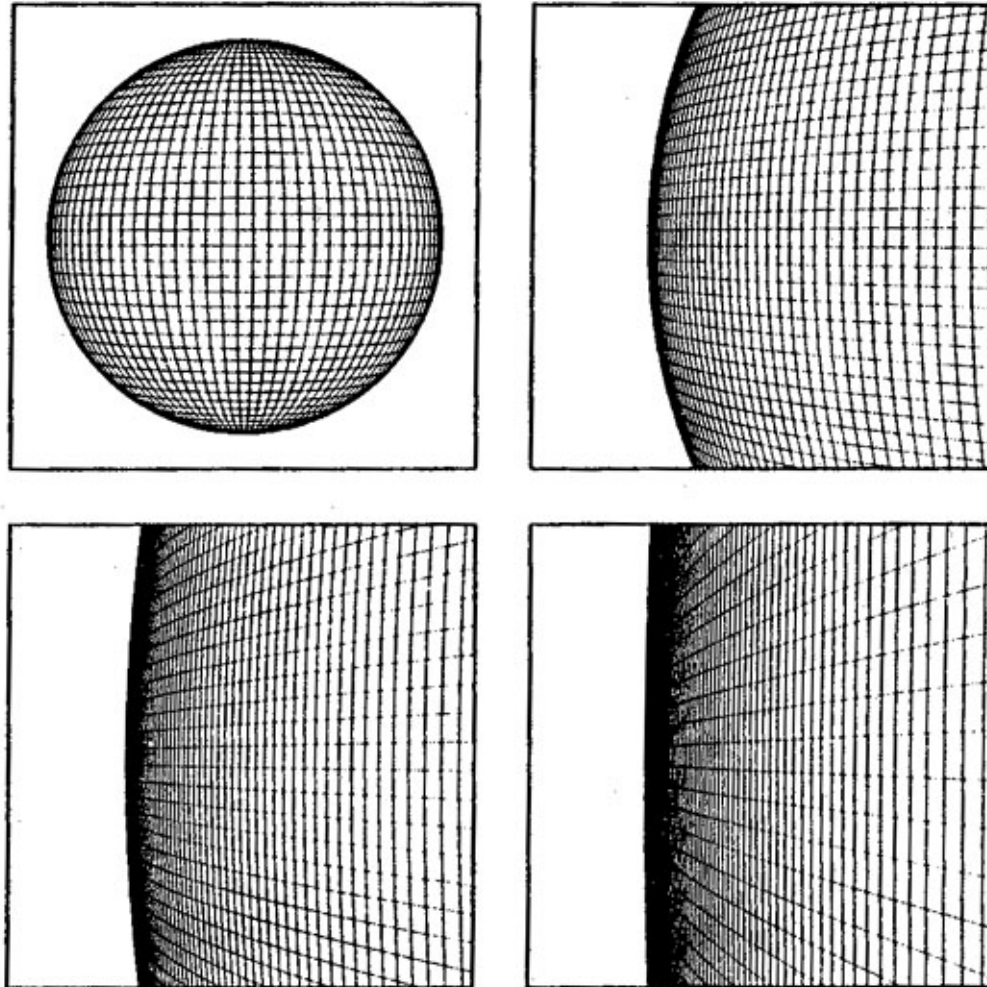
- De tweede voorspelling die volgt uit de algemene relativiteitstheorie van Einstein:
de kromming van de ruimtetijd
- De kromming van ruimtetijd = de energie-spanning van massa/energie
- Nu wordt ook de donkere energie als 'massa' meegerekend, en dus geldt nog steeds:
- De ruimtetijd van het heelal:
 - is 'open' bij lage massa/energie
 - is 'gesloten' bij hoge massa/energie
 - blijft 'vlak' bij een kritische massa/energie



Cursus grote vragen Kosmos

- Een derde hypothese die, **los** van Einstein's theorie, al langer in de lucht hing: ***het heelal heeft een tweede big bang ondergaan***
- *Waarom is het heelal zo gigantisch groot, maar ook zo uniform?*
- In de jaren tachtig werd als antwoord de ***theorie van de inflatie*** ontwikkeld; een ultrasnelle opblazing van de ruimte in de eerste seconde van het heelal
- Deze theorie leidt tot een **kernhypothese**, namelijk: ***het heelal is 'vlak'***

Het effect van inflatie:
Een 'bol' met een vlak oppervlak



Cursus grote vragen Kosmos

- Sinds 2003 beschikken we over een babyfoto van het heelal waaruit blijkt: **het heelal IS vlak!!!**
- Als het heelal vlak is, dan moet voldaan zijn aan ***de kritische dichtheid***
- Dan moet gelden: **$\Omega(m) + \Omega(\Lambda) = 1 = 100\%$**
- Nu blijkt uit allerlei metingen:
 Ω (gewone, lichtgevende materie) $\approx 5\%$
- Waar blijft dan de overige **95%**?
- *Hypothese 1*: **Ω (donkere materie) $\approx 25\%$**
- *Hypothese 2*: **Ω (donkere energie) $\approx 70\%$**

Cursus grote vragen Kosmos

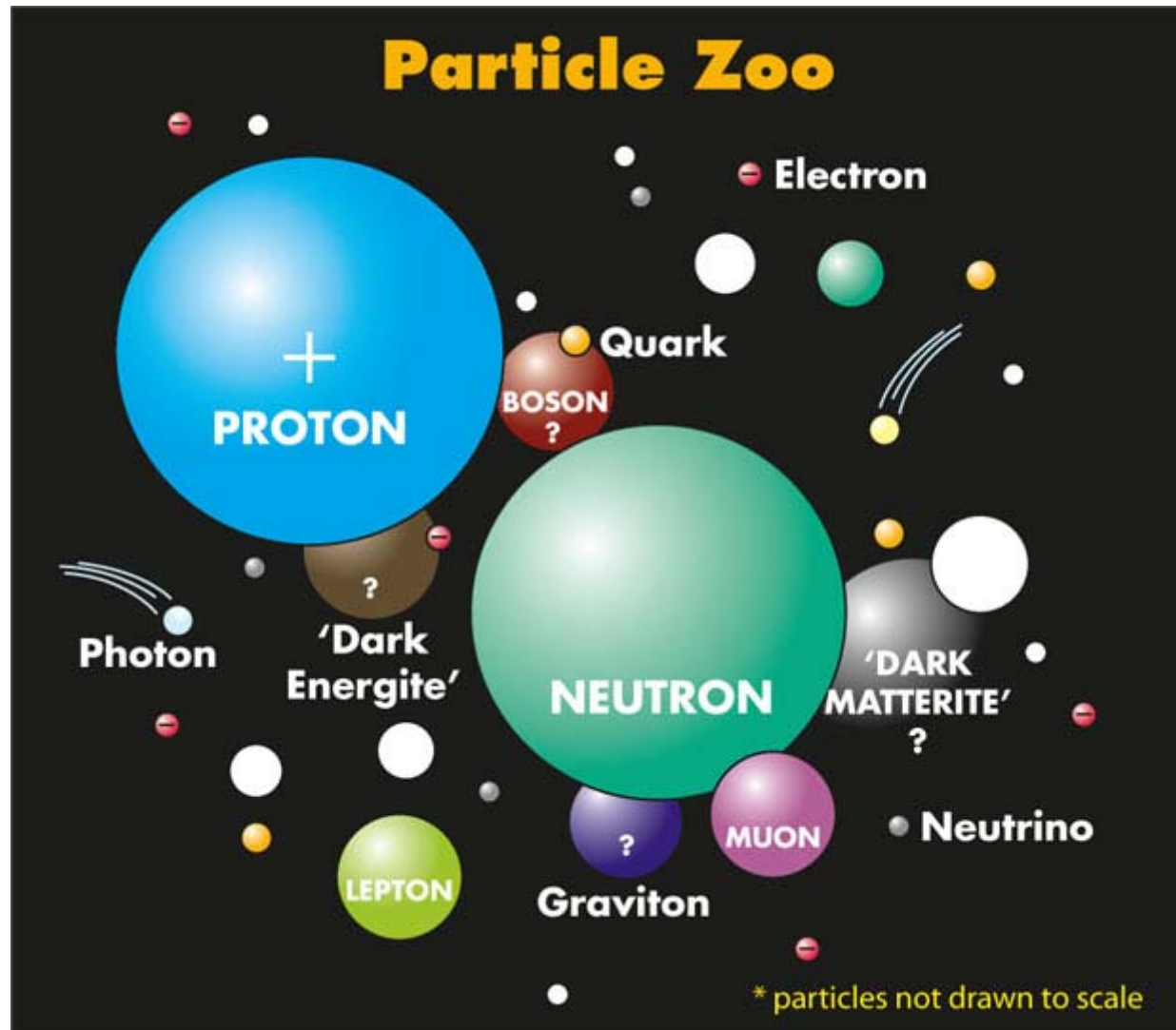
3. DONKERE MATERIE EN DONKERE ENERGIE

- De inflatoire kosmologie gaat gepaard met twee riskante hypothesen: **het bestaan van donkere materie en donkere energie**
- Tot nog toe weet niemand *waaruit* ze bestaan!
- Vanwaar dan deze hypothesen?
- Ze vervullen een 'Neptunus' rol; ze geven **vanuit** Einstein's theorie een ***vernieuwing van inzicht***. Het heelal is altijd meer dan we weten

Cursus grote vragen Kosmos

- Wat is donkere materie?
- Niemand die het weet, maar er zijn wel veronderstellingen
- Het gaat om zware, atomaire deeltjes die niet reageren met protonen, neutronen en elektronen (de bouwstenen van het atoom) of met fotonen (= lichtdeeltjes)
- Ze worden genoemd: WIMP's, d.w.z. 'weak interacting massive particles'

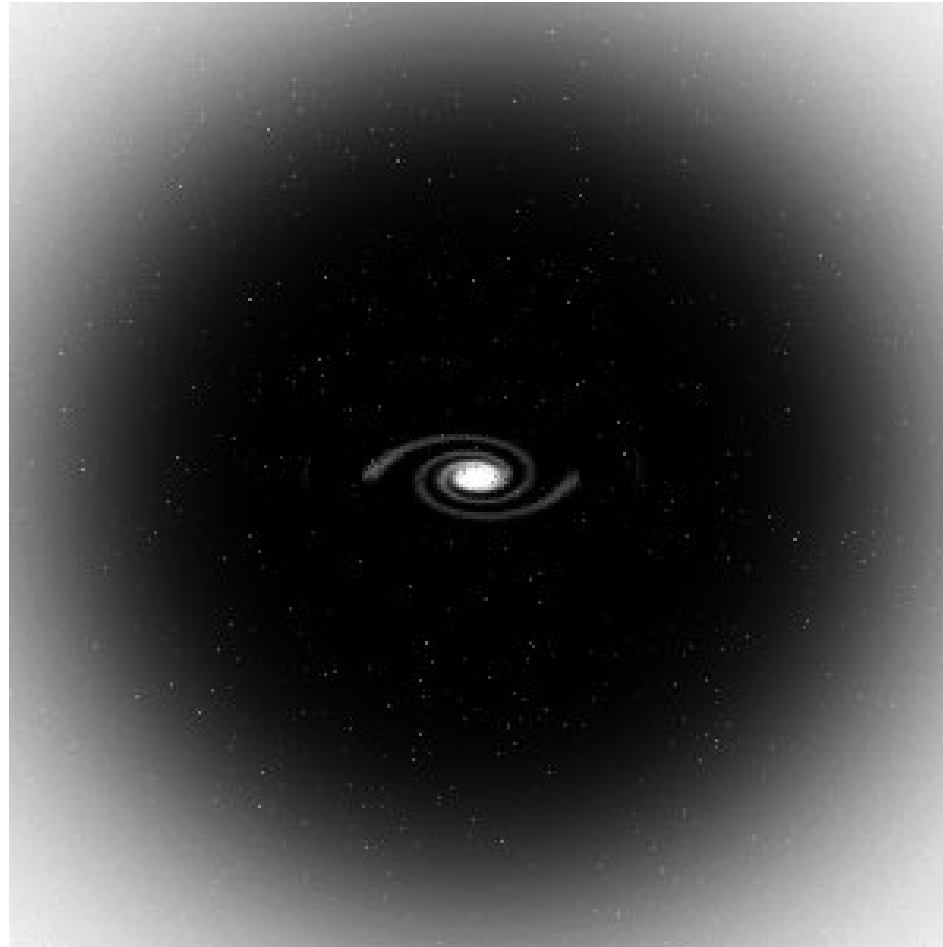
De wereld van elementaire deeltjes



Cursus grote vragen Kosmos

- Waarom 'geloven' kosmologen in het bestaan van donkere materie?
- Om minstens 5 redenen:
 1. de snelle rotatie van een melkwegstelsel
 2. het instorten van galactische wolken
 3. de extra werking van een gravitatielens
 4. de formatie van clusters en superclusters
 5. de vorming van een 'grote schaal' structuur

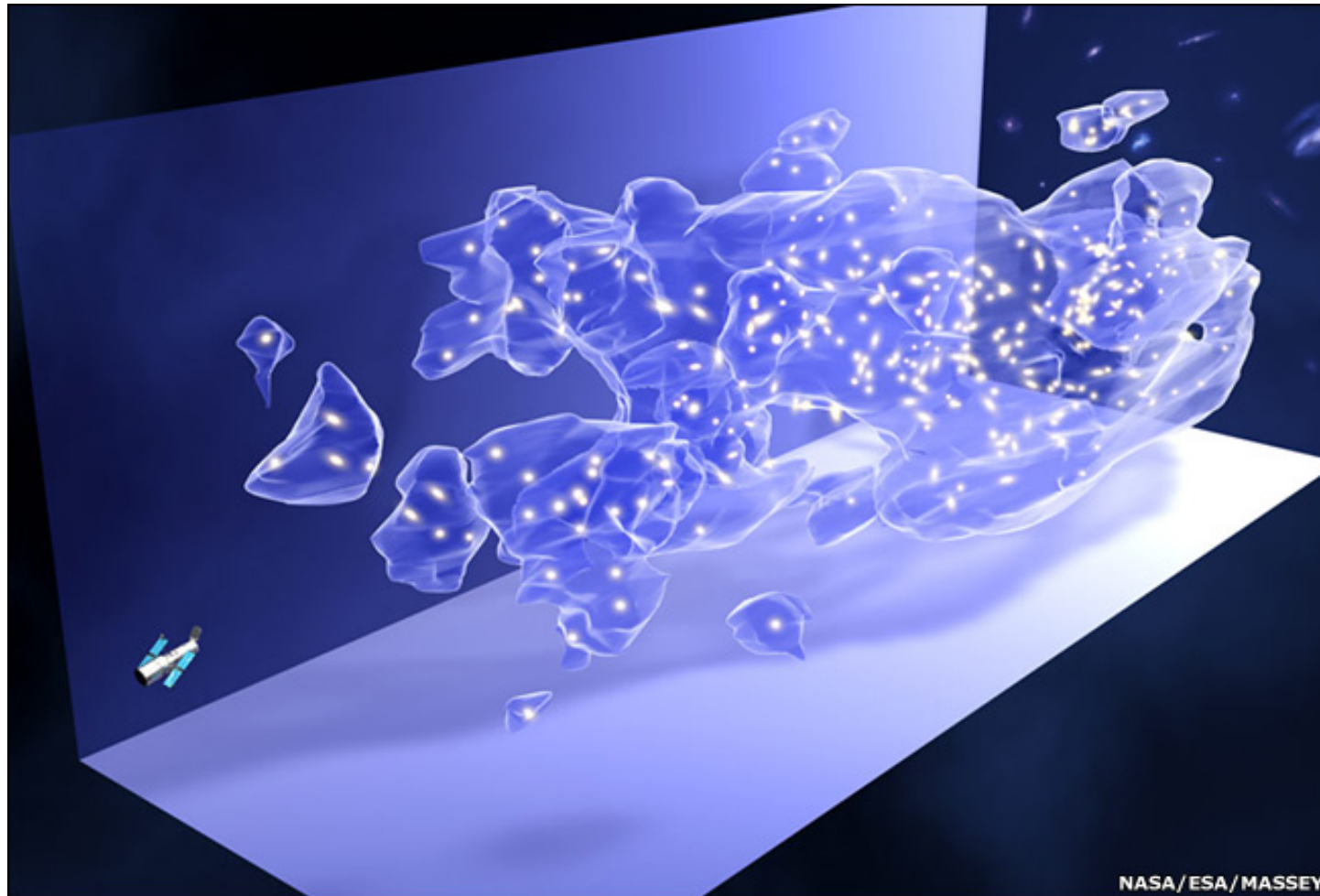
De halo rond een melkwegstelsel bestaat grotendeels uit donkere materie



De lenswerking van groepen van melkwegstelsels verraaft de sterke aanwezigheid van donkere materie



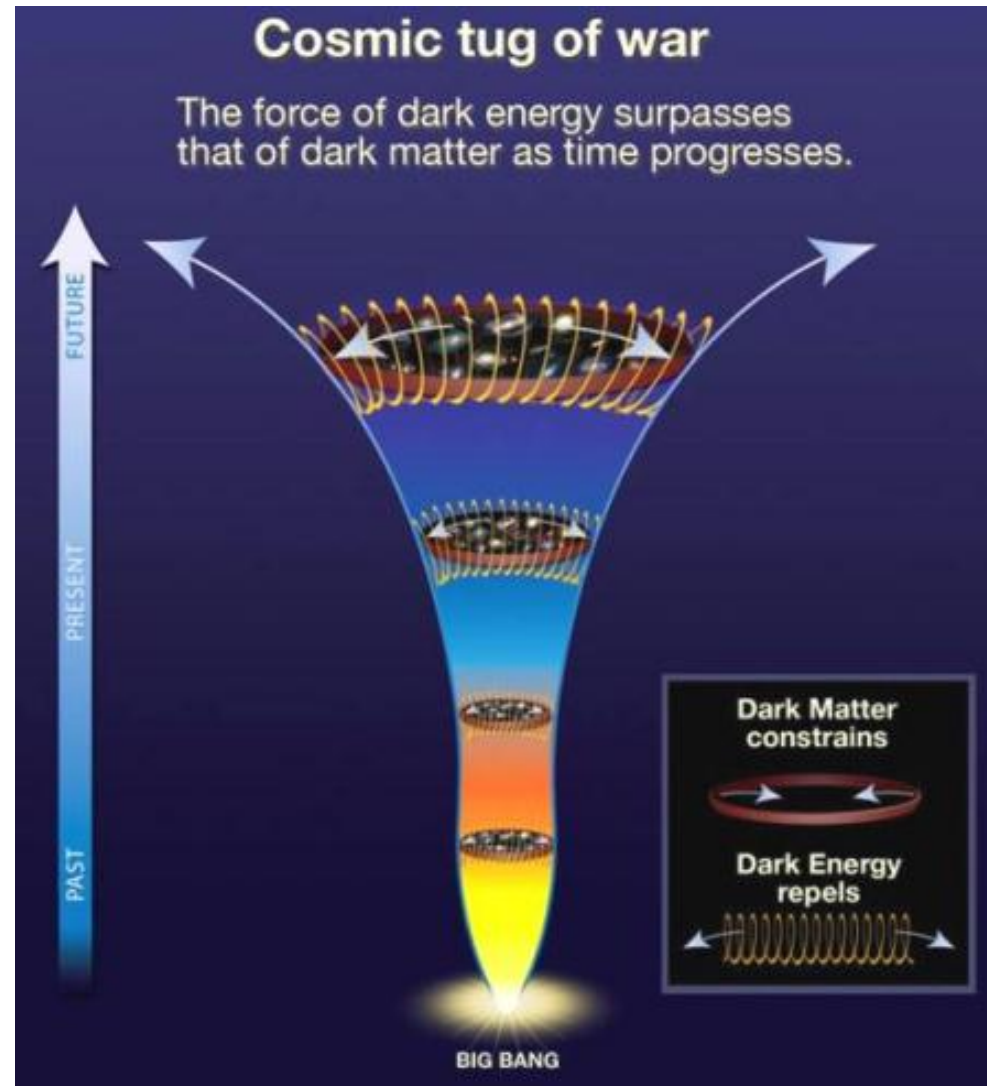
Donkere materie is cruciaal voor de vorming van melkwegstelsels en de vorming van grootschalige structuren van stelsels



Cursus grote vragen Kosmos

- De **donkere materie** zorgt voor extra gravitatie en dus voor extra vertraging van de uitdijing
- De **donkere energie** gaat daar tegen in met een versnelling van de uitdijing
- Maar wat is donkere energie?
- Is dit een *antizwaartekracht* in de vorm van *vacuümenergie*?
- Of is dit een nieuw soort *materieveld*, ook wel *kwintessens* genoemd?
- **Niemand die het weet!**

Een touwtrekken tussen twee kosmische krachten



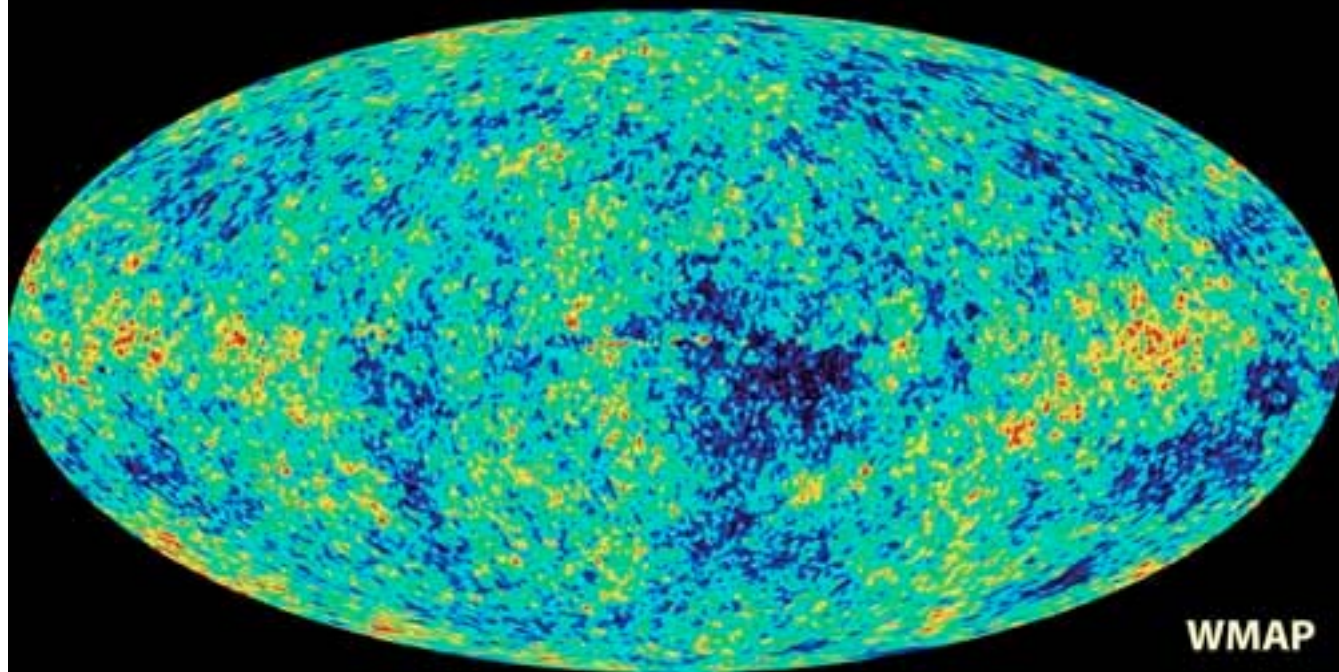
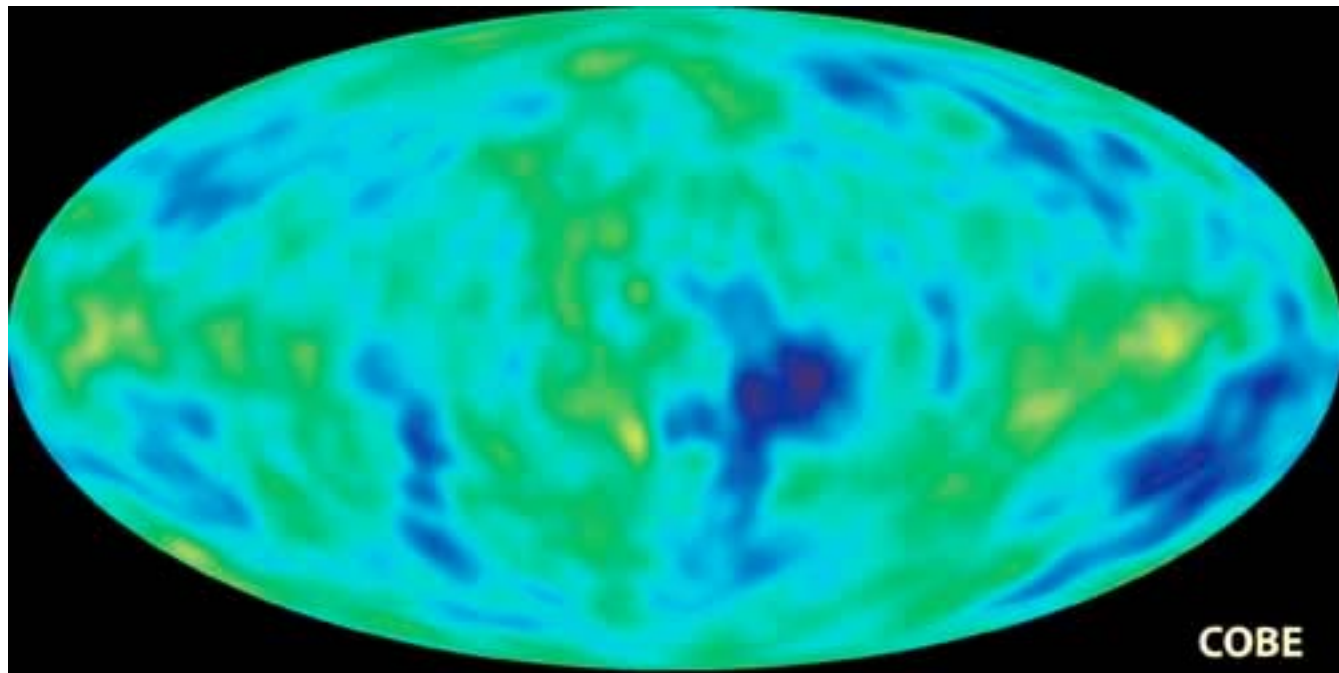
De
zwaarte-
kracht
die
vertraagt

De anti-
zwaarte-
kracht
die
versnelt

Cursus grote vragen Kosmos

4. DE BABYFOTO VAN HET HEELAL

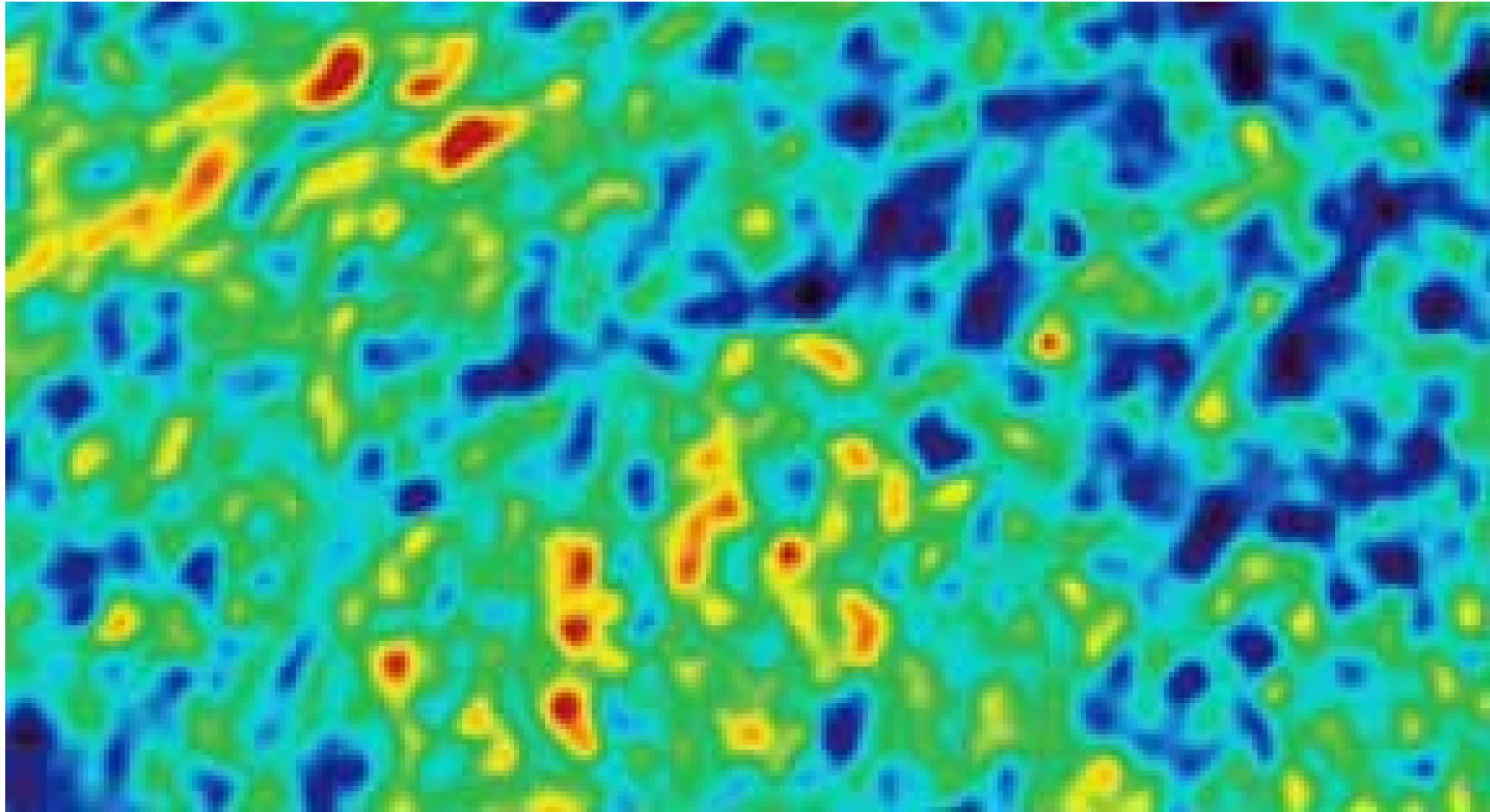
- De babyfoto's van het heelal zijn de meest spectaculaire foto's van de huidige kosmologie (**1992, 2003, 2012**)
- Het instrumentarium in de satellieten (**COBE, WMAP, Planck**) stond technologisch op het hoogste niveau en was extreem gevoelig
- Zo was er in deze satellieten een temperatuurmeter aan boord die het verschil kon meten van **eenhonderdduizendste** graad!!!



Cursus grote vragen Kosmos

- Wat zien we op de babyfoto?
- We zien de **kosmische achtergrondstraling**, uitgesmeerd over het hemeloppervlak.
- De foto is een '**radio-foto**'; we 'zien' microgolven, in verschillende kleuren weergegeven.
- We kijken naar **het 'uitgerekte' licht** van een heet kosmisch gasplasma **380.000 jaar na de big bang**.
- Dit licht is dus meer dan 13 miljard jaar oud en laat ons heldere en donkere gebieden zien.

Heldere en donkere gebieden in
de kosmische achtergrondstraling



Cursus grote vragen Kosmos

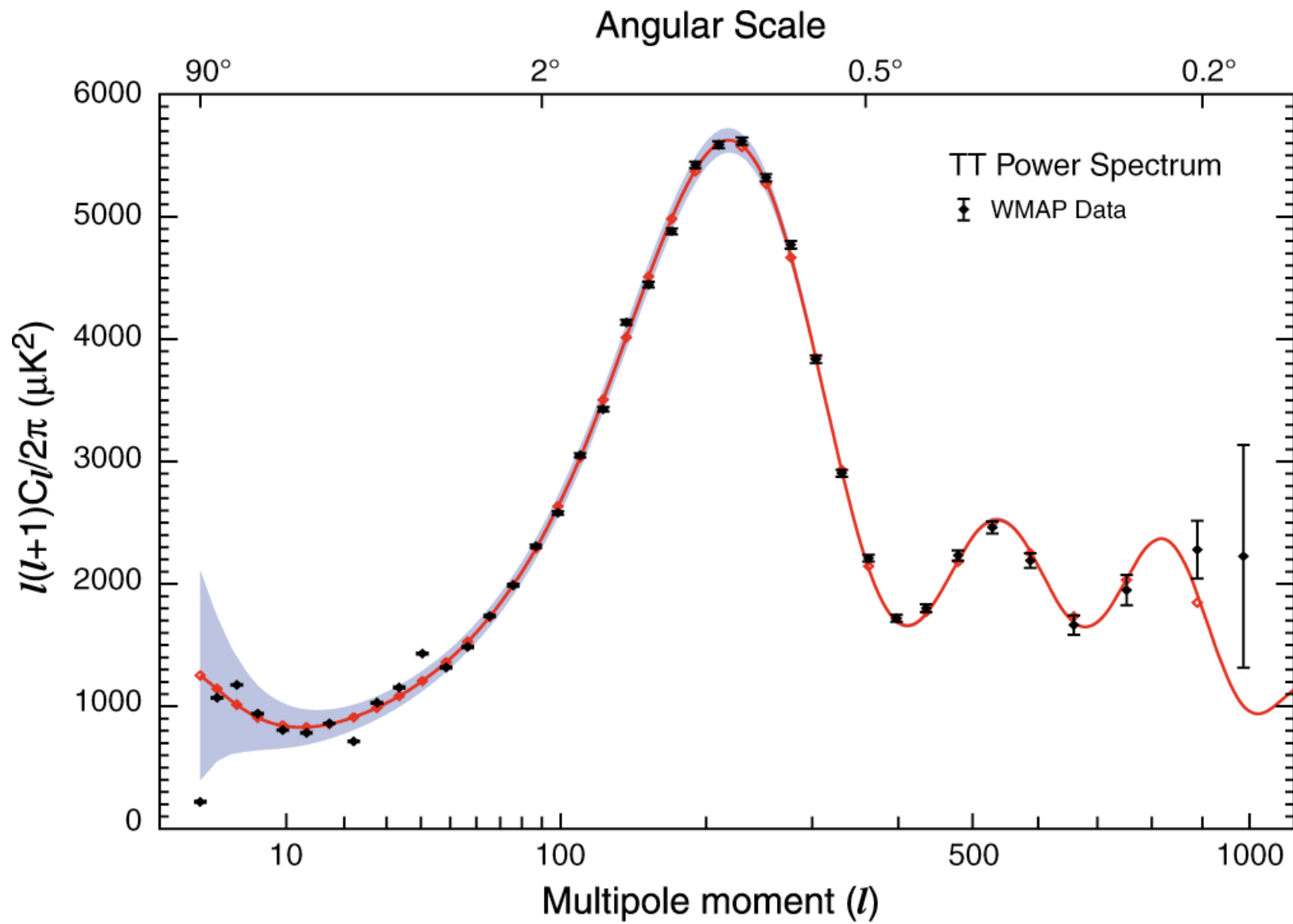
- Wat stellen de heldere en donkere gebieden in de CMB voor?
- Ze laten minieme temperatuurverschillen zien, die corresponderen met ***dichtheidsfluctuaties***
- In gebieden met een hoge temperatuur zit het **gasplasma** dichter opeengepakt dan in gebieden met een lage temperatuur
- Aldus laten de temperatuurverschillen op de babyfoto ***rimpelingen in het gas*** zien: aldus zien we de eerste vormen van evolutie, het ontstaan van ***grootschalige structuren***

Cursus grote vragen Kosmos

- Tussen 2003 en 2007 kwamen de resultaten van de WMAP satelliet beschikbaar
- ***Centraal daarin staat het Power Spectrum***
 1. Dit dient als bewijs van een vlak heelal
 2. Het legt daarmee ook vast wat de huidige samenstelling is van het heelal: $\Omega(m)$ en $\Omega(\Lambda)$
 3. En het fungeert als ijkpunt voor de berekening van de dynamica van het heelal: hoe groot is H_0 ?

Cursus grote vragen Kosmos

- Het Power Spectrum is een **grafiekbeeld**, o.b.v. *informatie uit de babyfoto*, waarin:
 - op de x-as (heldere en donkere) gebieden zijn aangegeven ***van groot naar klein***
 - op de y-as van die gebieden de ***temperaturen en dichtheden*** zijn weergegeven
- Aldus ontstaat een golvende lijn met een paar kenmerkende pieken



Cursus grote vragen Kosmos

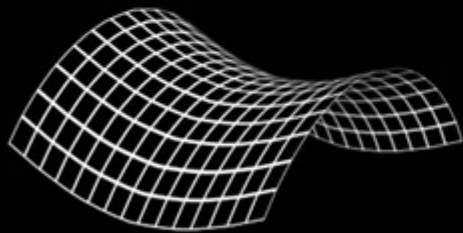
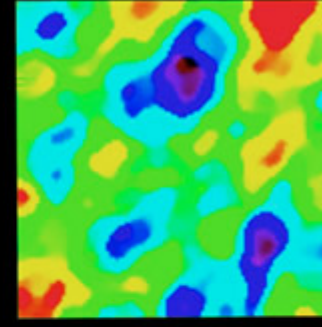
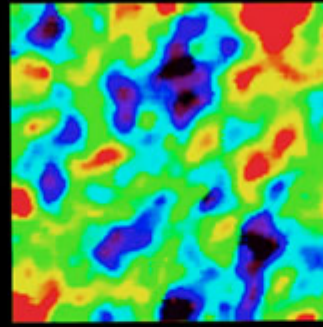
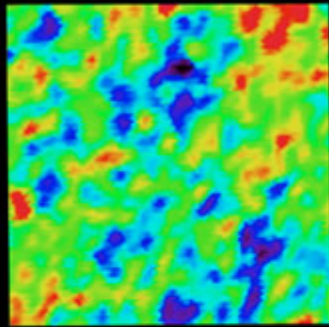
- De rode, doorgetrokken lijn in het power spectrum is een hypothese: **het is de voorspelde lijn voor een gasplasma in een vlak heelal.**
- De punten op de rode lijn stellen waarnemingen voor, gedaan door de WMAP satelliet en later door de Planck satelliet.
- De waarnemingen blijken exact te kloppen met de hypothese, de lijn die vooraf berekend is voor een gasplasma in een vlak heelal.

Cursus grote vragen Kosmos

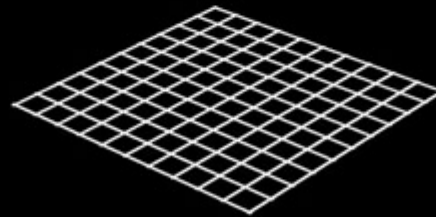
Hoe zien we de 'vlakke' geometrie van het heelal?

- ***Kosmologen kunnen berekenen hoe groot het gebied is bij de hoogste piek***
- Die grootte hangt samen met de leeftijd van het heelal op 380.000 jaar na de big bang
- We zien dat gebied nog steeds '**net zo groot**', **dus** is er sprake van ***een vlak heelal***
- Zouden we het gebied kleiner zien (als door een verkleinglas), dan was het heelal open
- Zouden we het gebied groter zien (als door een vergrootglas), dan was het heelal gesloten

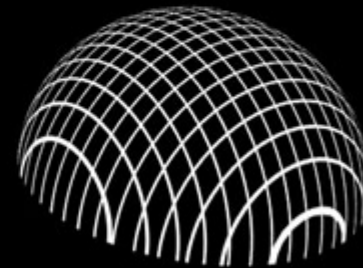
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN

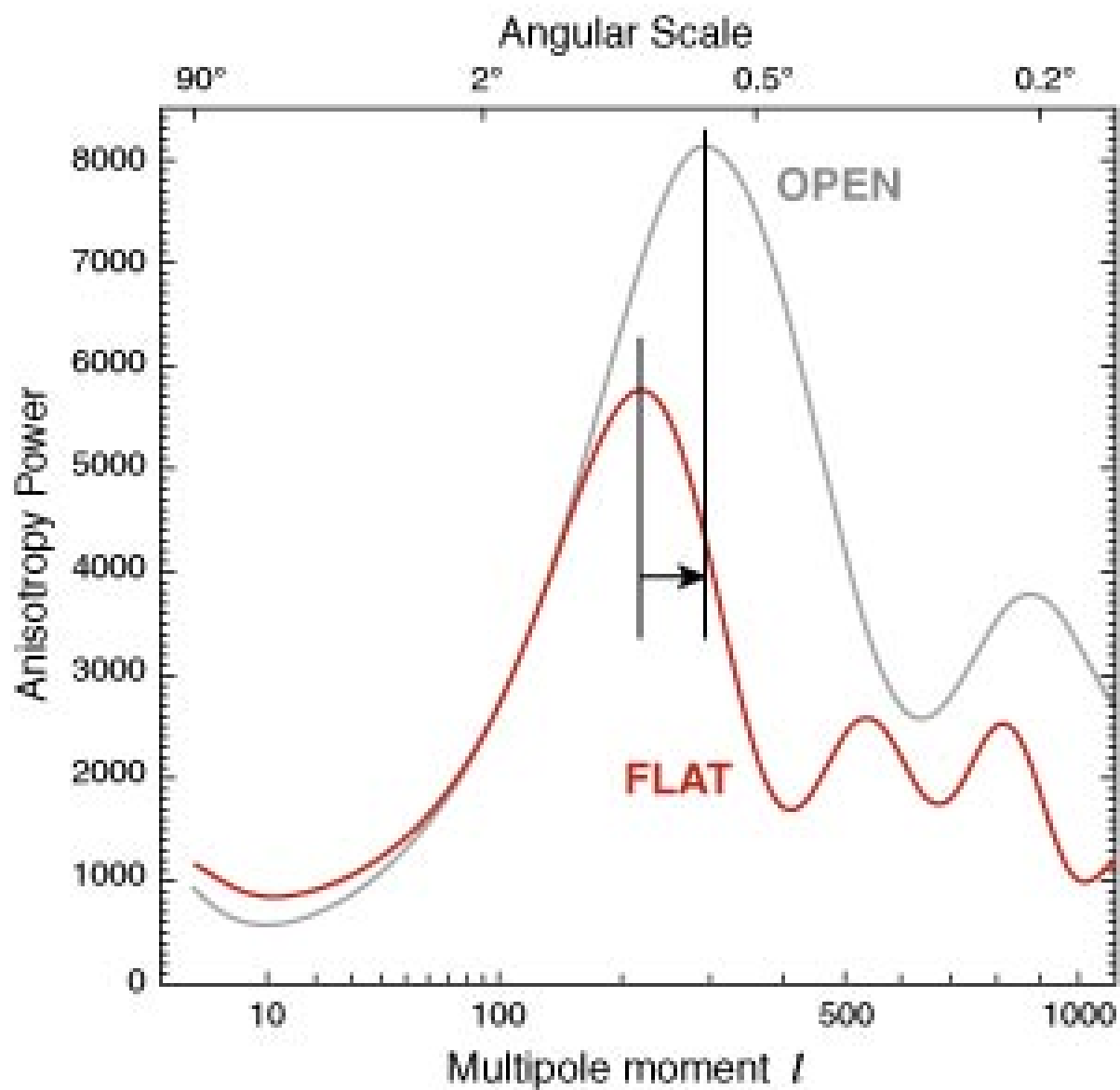
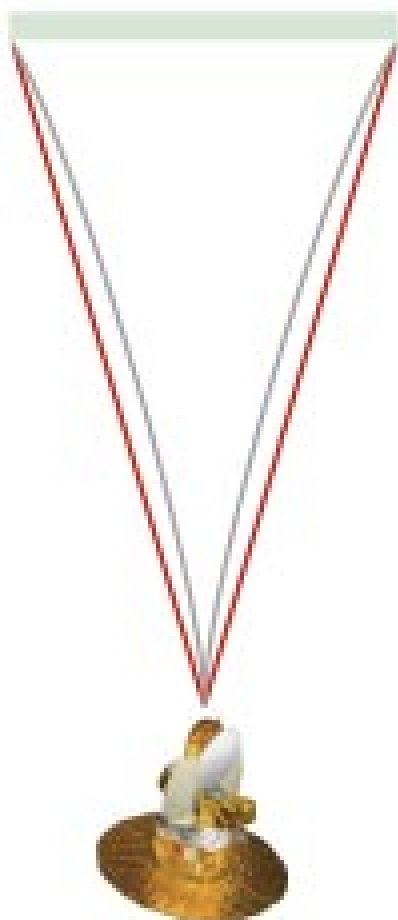


FLAT



CLOSED

Standard Ruler:
1° arc measurement of
dominant energy spike



Cursus grote vragen Kosmos

5. ONTWIKKELING VAN DE KOSMOS

- Einstein's theorie blijft een centraal kader voor de beschrijving van de ontwikkeling van de kosmos; **de theorie blijkt enorm krachtig!**
- Kosmologen (zoals Stephan Hawking, Martin Rees, e.a.) hebben voortdurend nieuwe toepassingen kunnen bedenken
- We zetten hier '***zo beeldend mogelijk***' de verschillende momenten en periodes van **de ontwikkeling van de kosmos** op een rijtje

Cursus grote vragen Kosmos

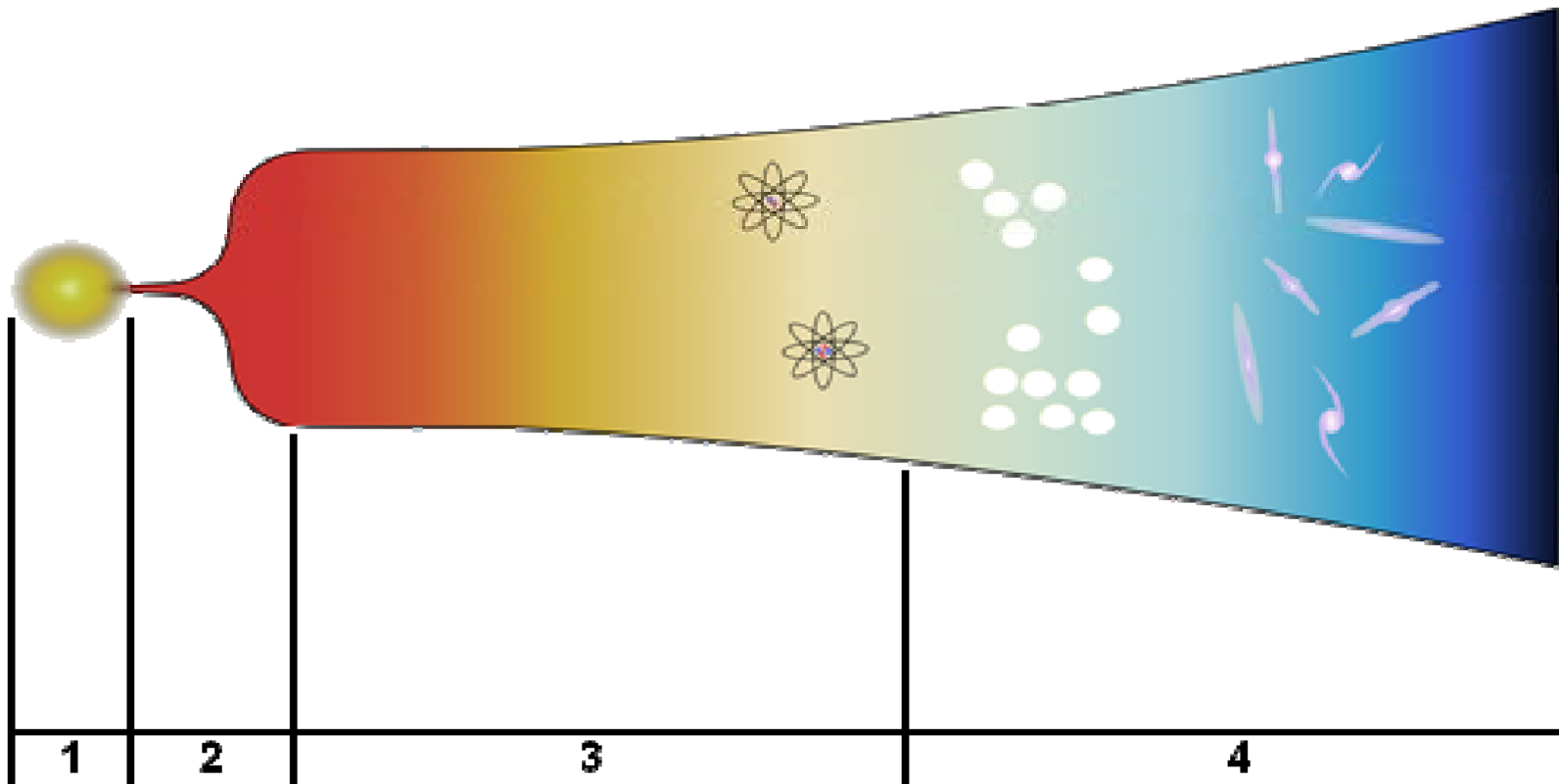
- Wanneer we de ontwikkelingen van het heelal op een rijtje zetten dan doen we dat door het heelal te zien als **een boek waarin we kunnen terug bladeren**
- En we moeten ons met name verplaatsen in het licht dat ons bereikt, d.w.z. we moeten gaan beseffen en ons afvragen **hoe oud of jong het licht is** dat ons bereikt
- Alleen zo kunnen we begrijpen welke stadia het heelal heeft doorlopen

1 = de kleine big bang: de oerknal

2 = de grote big bang: de inflatie

3 = tot 380.000 jaar na BB: de mistwolk

4 = ontwikkeling tot nu toe: de evolutie



Cursus grote vragen Kosmos

- **1: De oerknal**
- Dit is de kleine big bang
- Uit het 'vacuum' ontsnapt een zekere hoeveelheid energie en materie
- Er ontstaat ruimte en tijd
- Dit is een wereld die we nog steeds aan het verkennen zijn; denk bijvoorbeeld aan het Higgs deeltje en aan de donkere materie

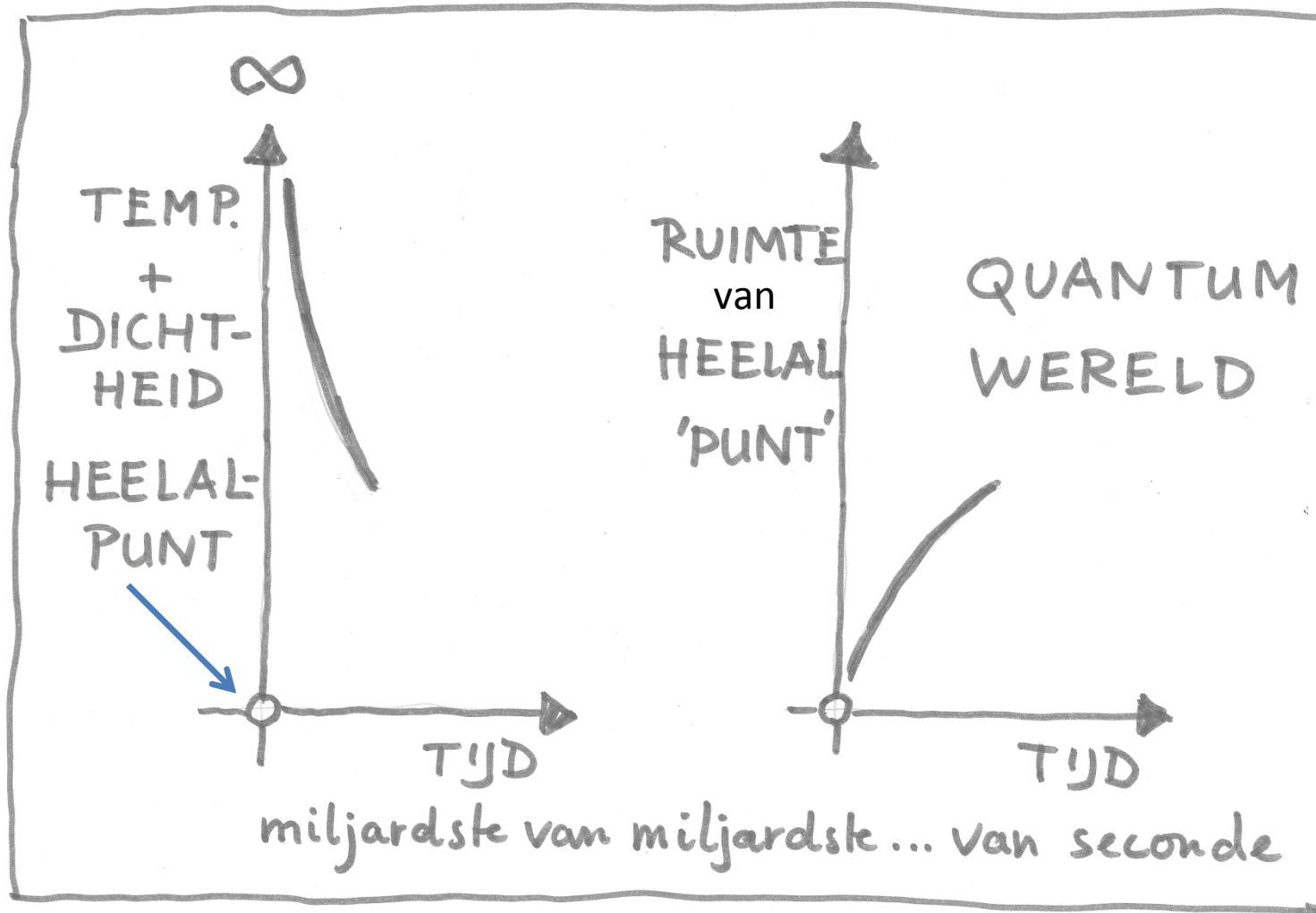
Cursus grote vragen Kosmos

- De eerste fase van de oerknal is nog steeds **zeer mysterieus**
- De kosmologie beschikt niet over directe observaties (!!!), maar probeert het proces theoretisch te begrijpen op basis van:
 - het standaardmodel, die een ‘theorie van alles’ wil bieden,
 - de algemene relativiteitstheorie die de ontvouwing van ruimte en tijd beschrijft, en
 - de recente ‘snaartheorie’

Cursus grote vragen Kosmos

- Volgens het singulariteits-theorema begint het heelal in zijn eerste big bang met:
- een oneindig hoge temperatuur
- een oneindig hoge dichtheid
- een oneindig kleine 'ruimte', niet meer dan een oneindig klein punt
- Een stilstaande tijd die nog in beweging moet komen: $t = 0$ seconde

De 'kleine big bang': het allereerste begin van het heelal

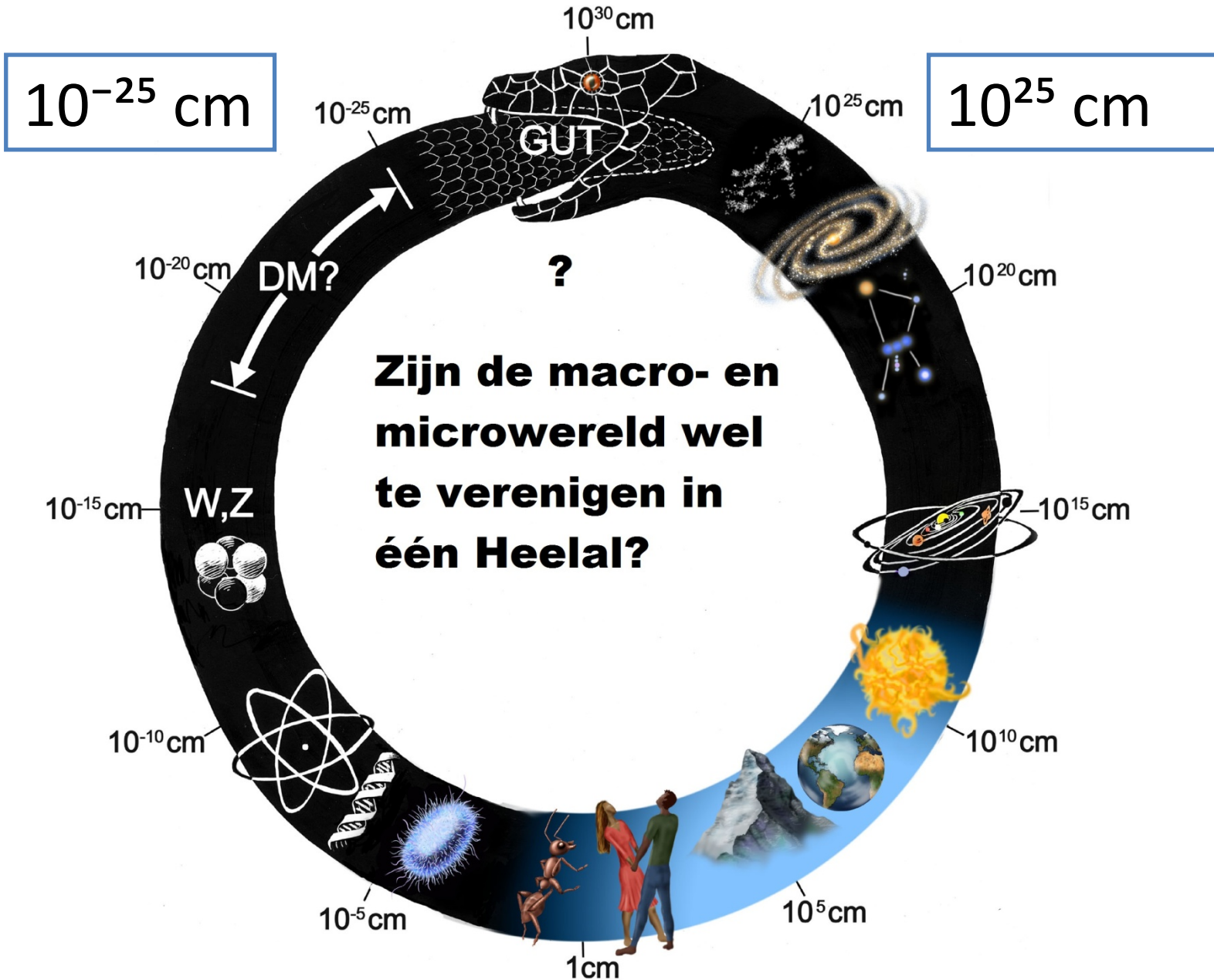


Cursus grote vragen Kosmos

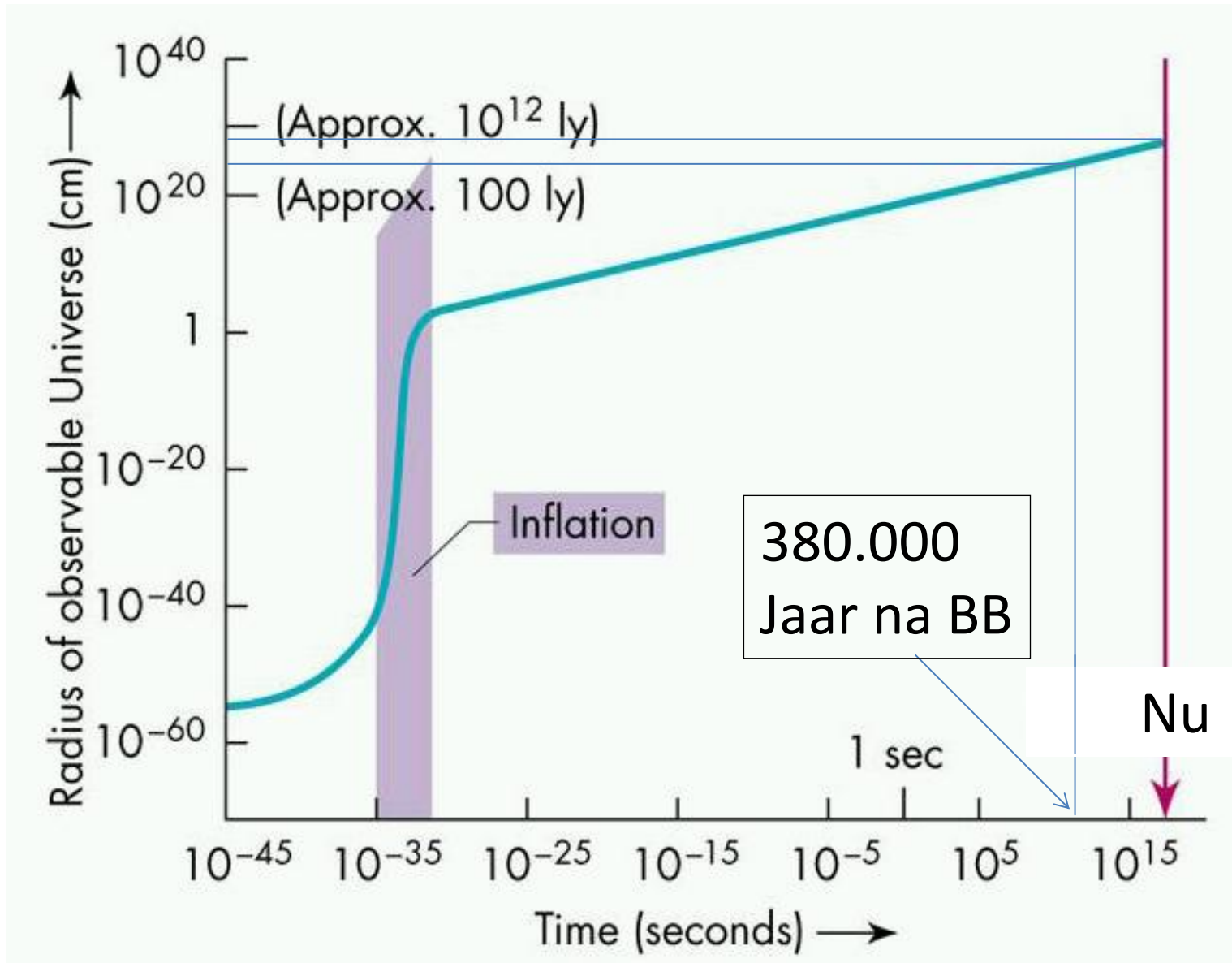
- Al heel snel daalt de temperatuur doordat de enorme hitte-energie de 'materie' uit elkaar drukt
- Dit betekent dat het heelal gaat uitdijen
- Het 'maakt' nu 'ruimte' en 'tijd'
- Einstein's theorie kan aan het werk:
materie en energie enerzijds en ruimte en tijd
anderzijds werken op elkaar in volgens de
algemene vergelijking van Einstein

Cursus grote vragen Kosmos

- Maar voor de quantummechanica begint het heelal pas bij $t = 10^{-43}$ seconde
- Want dan pas is er energie beschikbaar in de vorm van 'quanta'
- Kosmologen en fysici zijn nog steeds bezig om Einstein's theorie en de quantummechanica aan elkaar te koppelen
- De opgave is te laten zien hoe een slang zich in zijn staart kan bijten



De inflatie grafisch weergegeven (log. schaal !)

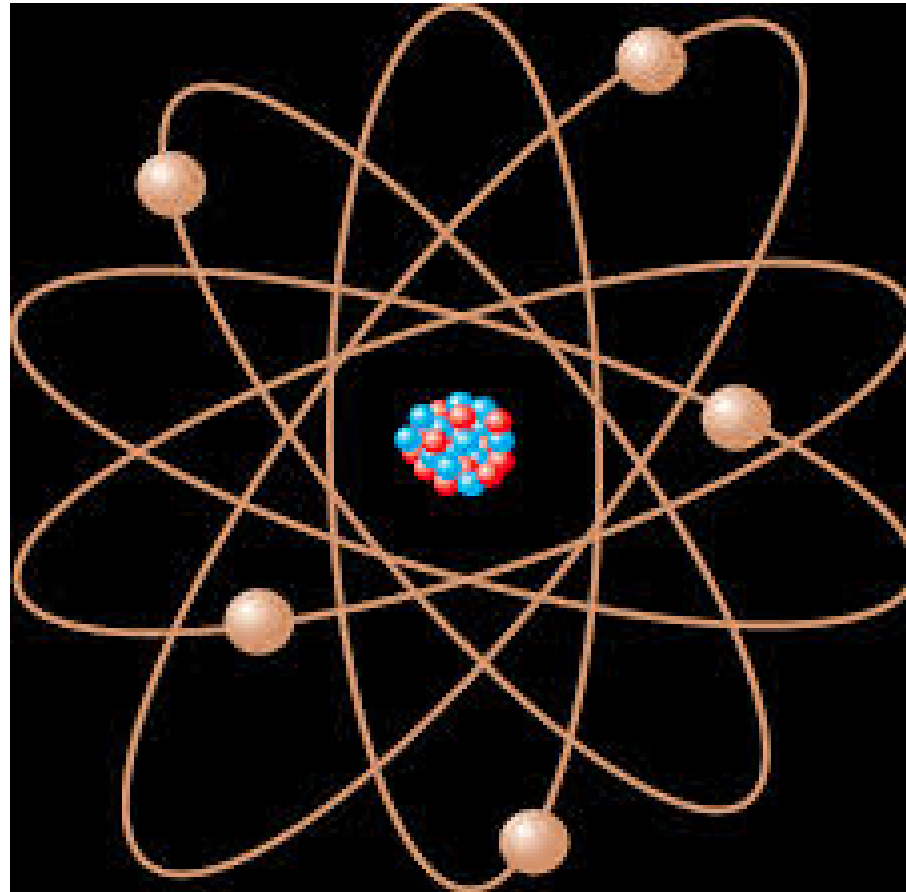


Cursus grote vragen Kosmos

- De inflatietheorie is niet makkelijk te begrijpen
- Zij staat in principe los van Einstein's theorie!
- Het gaat hier om een bepaalde fase-overgang
- Het heelal raakt onderkoeld en verzamelt in een fractie van een seconde een gigantische (negatieve) vacuum-energie die in evenwicht is met een gigantische (positieve) uitdijings-energie
- Het heelal blaast zichzelf dus op **zonder dat het haar (netto) energie kost !**

Cursus grote vragen Kosmos

Aan het einde van de inflatie-periode stijgt de temperatuur van het heelal weer enorm en ontstaat uit de gigantische warmte-energie **alle materie van het heelal:**
volgens $m = E/c^2$



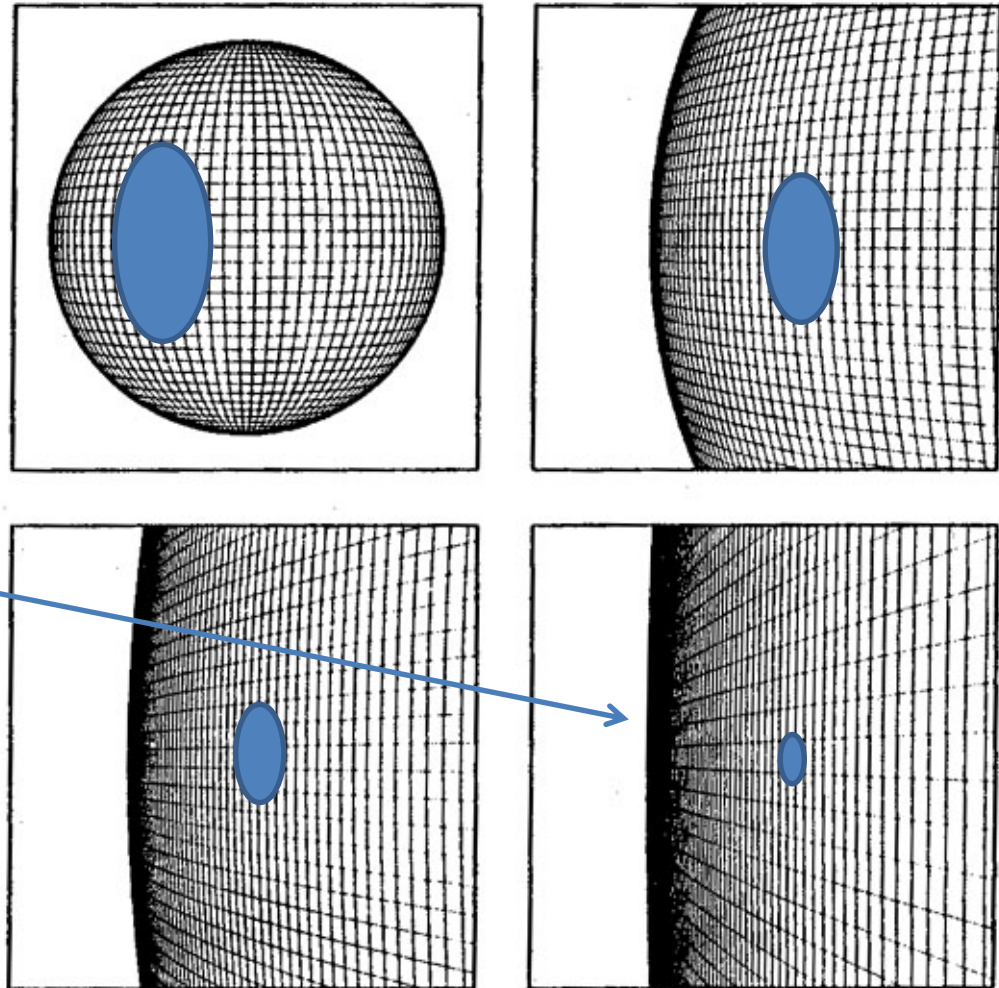
Cursus grote vragen Kosmos

- Het heelal heeft zich tijdens de inflatieperiode opgeblazen met een snelheid, die vele malen hoger is dan de lichtsnelheid! **Superluminaal!!**
- Dat heeft geweldige gevolgen voor wat we te zien krijgen van het heelal
- Het heelal bestaat nu uit ontelbaar vele regio's, die *causaal niet meer verbonden* zijn
- Elke regio bevindt zich op een klein deeltje van het gigantische ballonoppervlak

Hoe onze regio een steeds kleiner gebiedje wordt in het totale, oneindige heelal

Onze regio is op $t = 10^{-35}$ sec. een minuscule regio geworden in een gigantisch heelal.

Onze **waarnemings-horizon** is 10^{-25} cm. t.o.v. een heelal met een straal van 1 cm! (zie ook grafiek inflatie)



Cursus grote vragen Kosmos

- **3: De mistwolk**

- Gedurende 380.000 jaar was het heelal een gigantische mistwolk, een superheet gasplasma
- Dit plasma ontstond tijdens de tweede big bang
- Het plasma is een mistige gaswolk van *kriskras* bewegende atoomkernen, elektronen en fotonen
- Pas als de elektronen zich binden aan de atoomkernen (bij een temp. van 3000 K), kunnen de fotonen (de lichtdeeltjes) zich los maken van de gaswolk en een reis beginnen door de ruimte

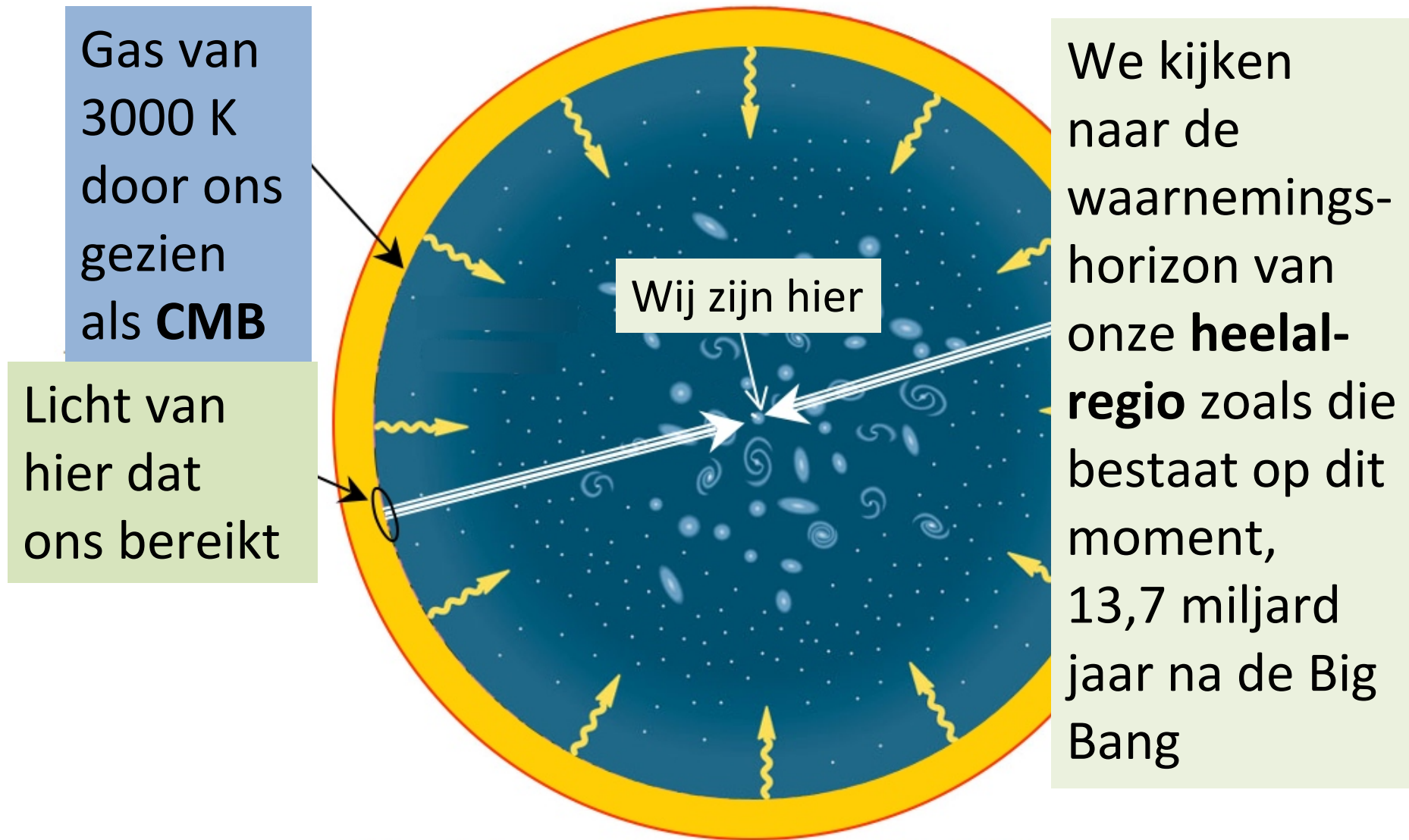
Cursus grote vragen Kosmos

- De kosmische achtergrondstraling (**CMB**) is de straling die vrijgekomen is op $t = 380.000$ jaar
- Deze oerstraling **is onze eerste directe waarneming** (!!!) en laat ons de gaswolk zien die het heelal **toen** was, nl. een **uiterst gelijkmatig** verspreide wolk van materie
- Zij laat ons ook zien dat er in deze superhete gaswolk al **zeer geringe concentraties** te vinden zijn die later zullen **uitgroeien tot: melkwegstelsels, sterren en planeten**

Cursus grote vragen Kosmos

- **De CMB die we nu waarnemen is afkomstig van de waarnemingshorizon van onze heelal-regio**
- Op dit moment bereikt ons van deze grens het licht dat 13,7 miljard jaar gereisd heeft
- Vroeger (miljarden jaren geleden) was onze waarnemingshorizon kleiner; ons bereikte toen 'jonger' CMB-licht dat minder lang gereisd had
- We zien dus nu **de CMB** afkomstig van de grens van een heelalgebied dat een doorsnee heeft van ruim **27 miljard lichtjaar** (zie plaatje)
- Dit is nog steeds **een heel kleine heelal-regio!!!**

Different parts of the CMB are not in contact



Gas van 3000 K door ons gezien als **CMB**

Licht van hier dat ons bereikt

Wij zijn hier

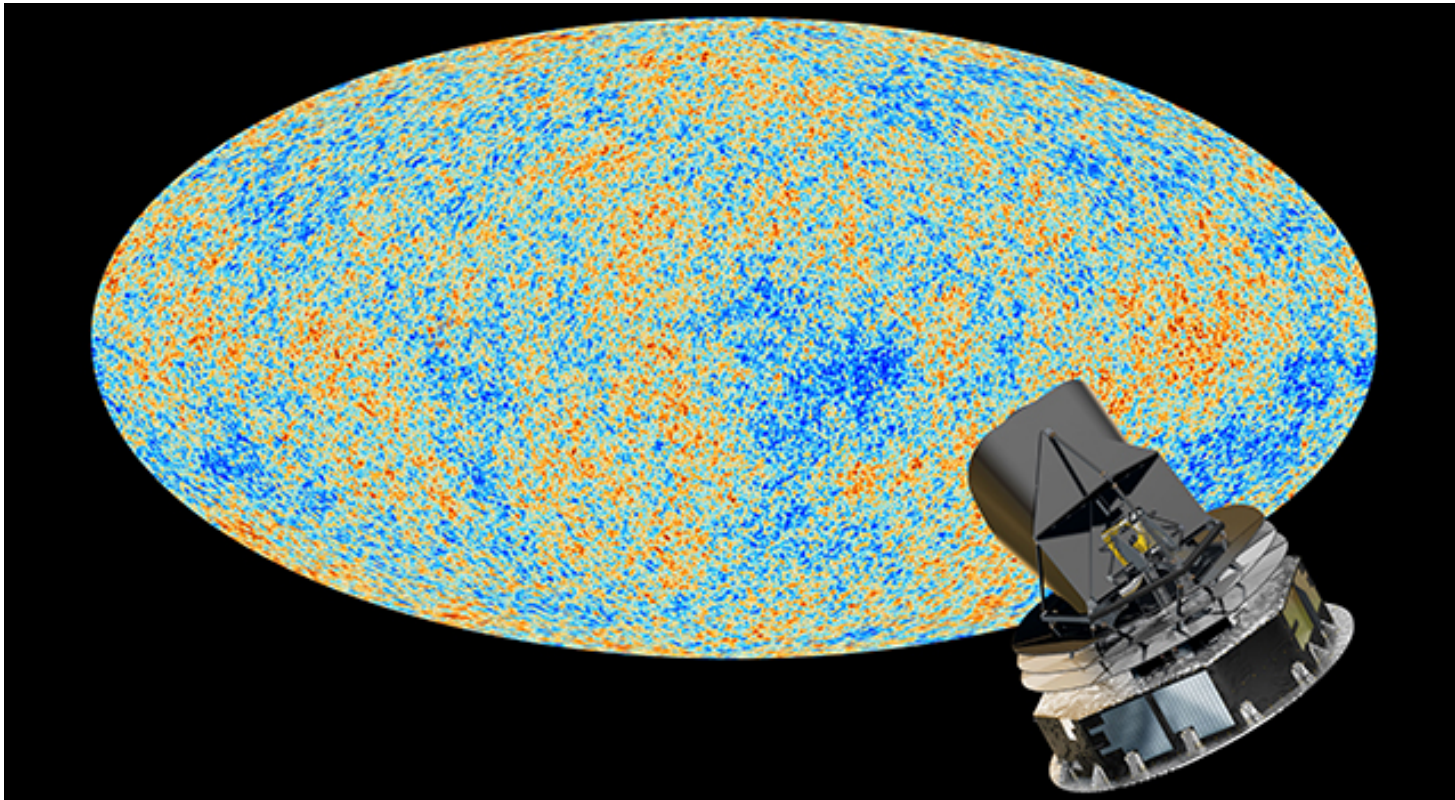
We kijken naar de waarnemingshorizon van onze **heelal-regio** zoals die bestaat op dit moment, 13,7 miljard jaar na de Big Bang

The Astronomer's view of the Universe

Cursus grote vragen Kosmos

- We kunnen nu met de theorie van Einstein **twee bewegingen** berekenen in de gaswolk
- 1. Enerzijds hoe het heelal **als geheel** aan het uitdijen is, namelijk als een vlak heelal dat eerste vertraagt en later versnelt
- 2. Anderzijds hoe **lokaal** allerlei superkleine structuren die op de babyfoto te zien zijn, zullen gaan uitgroeien tot de grote en complexe structuren in het heelal

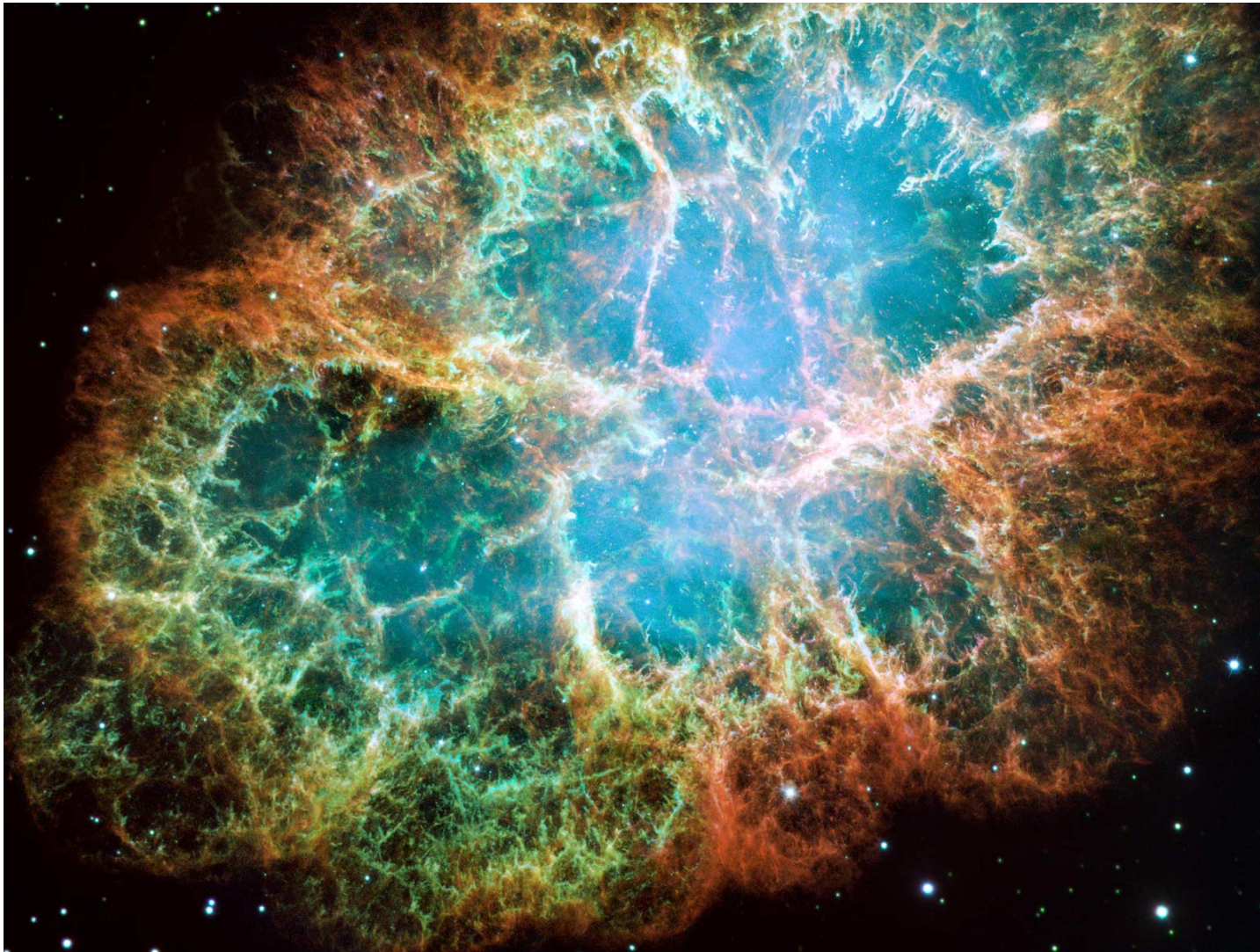
De Europese Planck satelliet heeft tot nog toe de meest nauwkeurige waarneming gedaan van **de gaswolk aan de grens van onze heelal-regio**



Uit de oergaswolk van atomen kunnen zich nu allerlei structuren gaan ontwikkelen



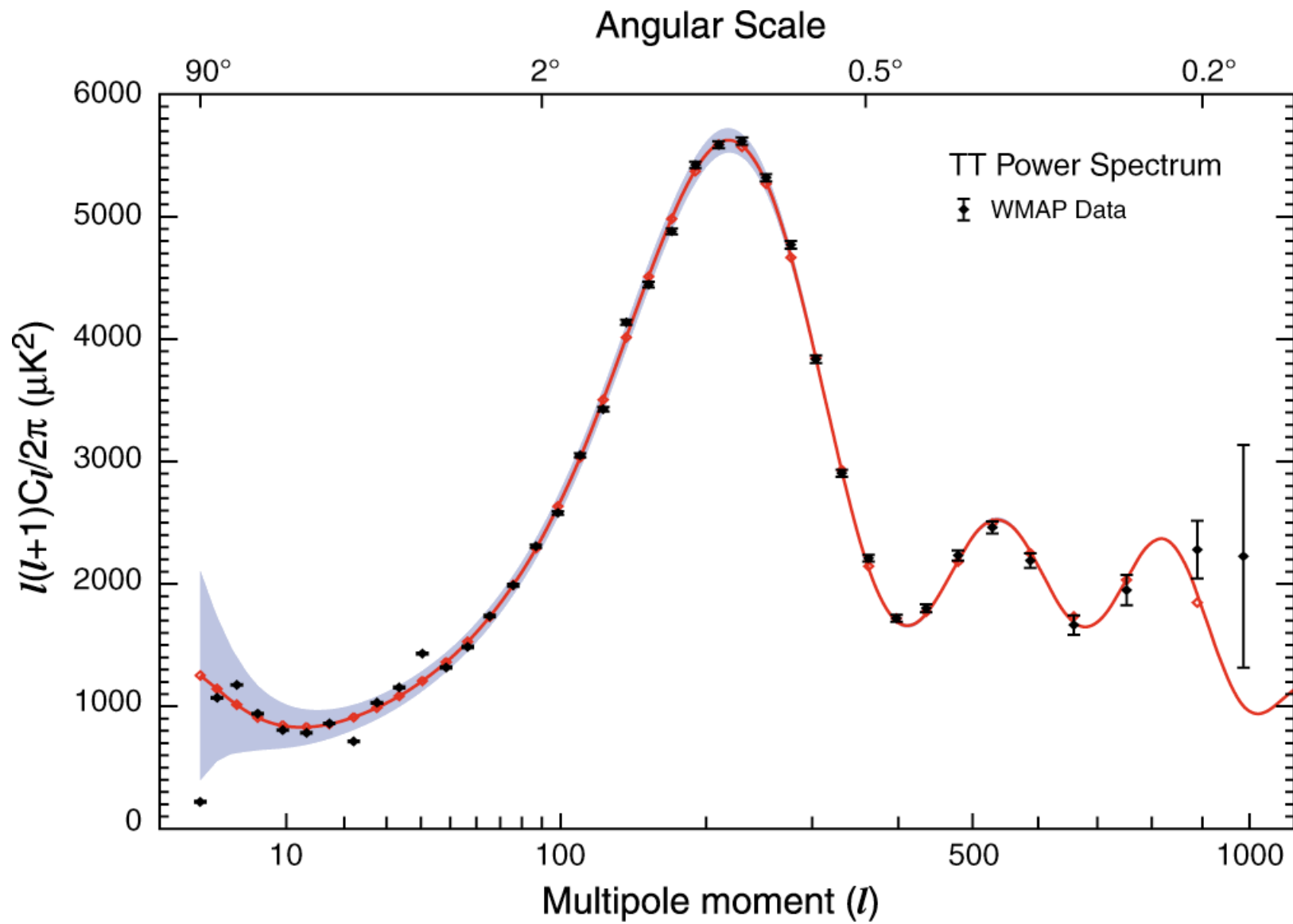
Maar voordat wij er zijn moet eerst nog **een supernova** ontploffen die ons van het nodige materiaal voorziet;
wij bestaan uit relatief jong sterrenstof



Cursus grote vragen Kosmos

- **4: De evolutie**

- Er is onderscheid tussen de dynamica en de evolutie van het heelal; beide worden berekend via Einstein's theorie
- De dynamica geeft de beweging van het heelal als geheel weer, m.b.v. H_0 , $\Omega(m)$ en $\Omega(\Lambda)$
- De evolutie beschrijft de ontwikkeling van **sterrenstelsels, sterren en planeten**
- Voor beide berekeningen is het **Power Spectrum** een belangrijke randvoorwaarde



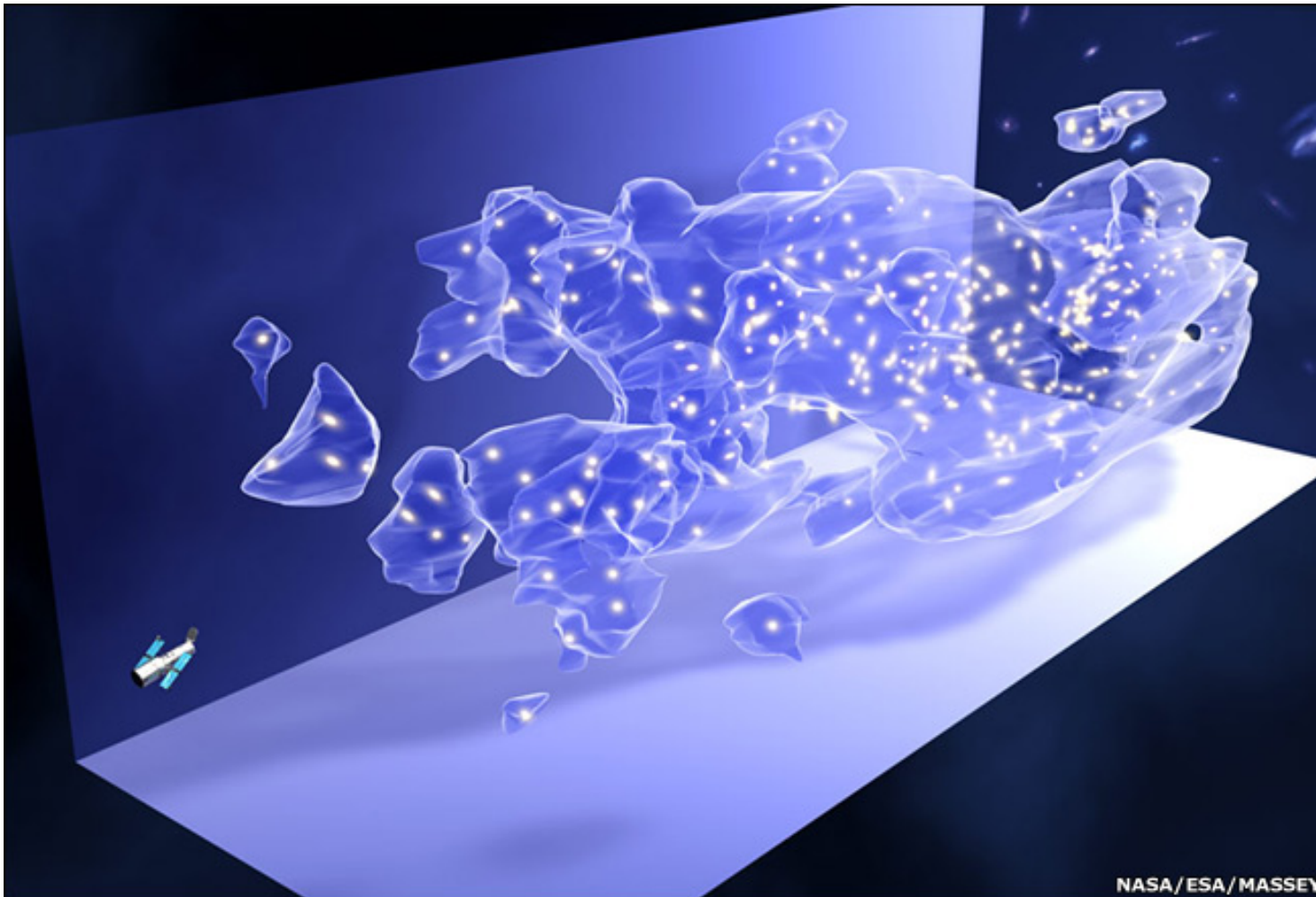
Cursus grote vragen Kosmos

- Met Einstein's theorie kan worden beschreven hoe structuren in het heelal evolueren
- De theorie legt via een gravitatieveld de verbinding tussen **een lokale massa** en de ruimtetijd-kromming om die massa
- De theorie verklaart het samentrekken van gaswolken tot sterren en melkwegstelsels
- De theorie verklaart ook hoe objecten gaan bewegen in het gravitatieveld

Cursus grote vragen Kosmos

- Hoe verklaren we de grote structuren die we in het heelal zien, het netwerk van melkwegstelsels?
- Kosmologen proberen **vanuit** de variaties die ze zien in **de CMB**, zo goed mogelijk te simuleren hoe dit gigantische netwerk tot stand komt
- Er worden goede resultaten behaald op basis van een gravitatie die ingrijpt op 5% gewone materie en 25% donkere materie
- **De hypothese van donkere materie wordt sterker**

De grote zichtbare structuren in het heelal (clusters van melkwegstelsels) worden verklaard vanuit donkere materie die als **een onzichtbare wolk** om ze heen hangt



In deze kosmische structuren zijn ons melkwegstelsel, onze zon en onze aarde als nietig puntjes verdwenen.

Waar zijn wij?

