Universets tidlige utvikling

Øyvind Grøn
email: oyvind.gron@hioa.no

TAF 1. oktober 2012

Universet ved plancktiden

Et mulig scenario for universet ved plancktiden,
umiddelbart før Det store smellet inntraff:

Ved plancktiden var tidrommet og rommet
i en fluktuerende, kvantisert tilstand
med plancktiden og plancklengden
som kvanter for tid og lengde.

Plancktiden og plancklengden er henholdsvis

$$t_P = \frac{1}{c^2}\sqrt{\frac{G\hbar}{c}} = 5{,}4 \cdot 10^{-44}\, s \quad , \qquad l_P = ct_P = \frac{1}{c}\sqrt{\frac{G\hbar}{c}} = 1{,}6 \cdot 10^{-35}\, m$$

Plancklengden kan gis en fysiske tolkning
som jeg vil presentere på de neste sidene:

La oss tenke oss en lyspartikkel, dvs. et foton med energi

$$E = \hbar f = \hbar \frac{c}{\lambda}$$

der f er frekvensen og λ bølgelengden i bølgebeskrivelsen av lyset.

Vi tenker oss nå at energien til fotonet
befinner seg innenfor et sfærisk område med radius lik
to ganger bølgelengden.

Det er fristende å tenke seg at
siden fotonet beveger seg med lysets hastighet,
er det uendelig mye lengdekontraktert
slik at det har uendelig stor utstrekning
i sitt eget hvilesystem.

Men ifølge relativitetsteorien
eksisterer ikke noe hvilesystem for et foton.
Det beveger seg med lysets hastighet i ethvert referansesystem.

Fotonenergien økes slik at bølgelengden minskes.

Massen til fotonet er

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{\hbar}{c\lambda}$$

Når massen økes blir utstrekningen til massefordelingen mindre.

Det betyr at gravitasjonsfeltet til fotonet blir sterkere.

Dette har en interessant konsekvens som lettest lar seg forstå hvis vi tenker ut fra en relativistisk modell for rommet.

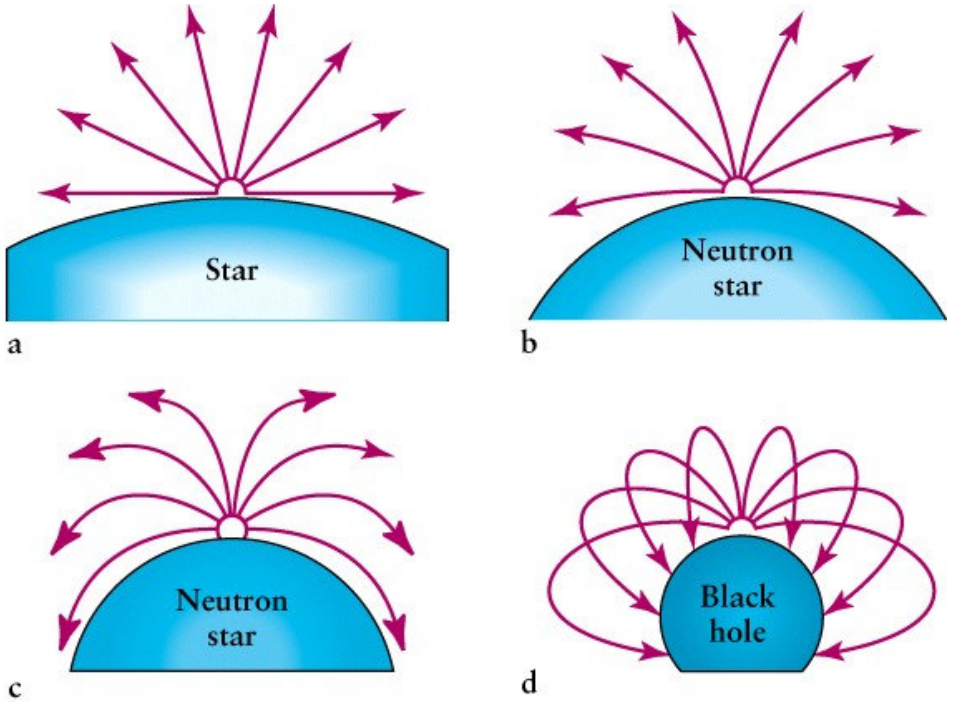
Simen Bræck og Øyvind Grøn er i gang med å utvikle en
River model of space – en elvmodell for rommet.

Der definerer vi rommet som samtidige hendelser
i en strøm av referansepartikler som faller fritt.

Når vi snakker om at selve rommet utvider seg i
i et ekspanderende univers,
tenker vi på galaksehopene som referansepartikler for rommet.

Rommet ”renner ” utover i det som kalles ”the Hubble flow”.

På samme måte renner rommet inn mot et massivt legeme,
for eksempel jorda.
Hastigheten ved legemets overflate er *unnslipningshastigheten*
som er lik 11,2 km/s ved jordoverflaten.
Ved overflaten av et svart hull er
unnslipningshastigheten lik lyshastigheten.
Romelven renner inn mot et svart hull
med økende fart jo lavere man er,
og med lysets hastighet helt nede ved overflaten av et svart hull.



Et svart hull har en radius som kalles
Schwarzschild radien. Den er

$$R_s = \frac{2Gm^2}{c^2}$$

Vi går nå tilbake til vårt foton.
Når det klemmes sammen så mye at
romelven renner nedover med lysets hastighet
i avstanden to bølgelengder fra sentrum,
dvs. ved overflaten av massefordelingen til fotonet,
er energien og massen blitt så stor,
og utstrekningen så liten,
at *fotonenergien danner et svart hull*
med Schwarzschild radius lik to ganger fotonenergiens bølgelengde,

$$R_s = 2\lambda,$$

Innsetting for R_S og λ gir

$$\frac{2Gm}{c^2} = \frac{2\hbar c}{E}$$

Innsetting av $E = mc^2$ gir

$$\frac{Gm}{c^2} = \frac{\hbar}{mc}$$

Dermed fås

$$m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = m_P = 2{,}2 \cdot 10^{-8}\, kg$$

som kalles *planckmassen*.

Bølgelengden til fotonet blir da

$$\lambda = \frac{1}{c}\sqrt{\frac{G\hbar}{c}}$$

som er lik plancklengden.

Vi har da følgende fysiske tolkning av plancklengden:

Plancklengden er bølgelengden til et foton
som har så stor energi og så liten utstrekning
at det danner et svart hull.

Dette gir oss følgende bilde av tidrommets kvantetilstand
som kan ha eksistert ved plancktiden
rett før Det store smellet:

I tidrommets kvantetilstand var det
tett i tett med fluktuerende svarte hull
som alle besto av et foton
med bølgelengde lik plancklengden.

Hvert av de svarte hullene hadde en masse lik planckmassen. Den gjennomsnittlige massetettheten var omtrent lik plancktettheten som er

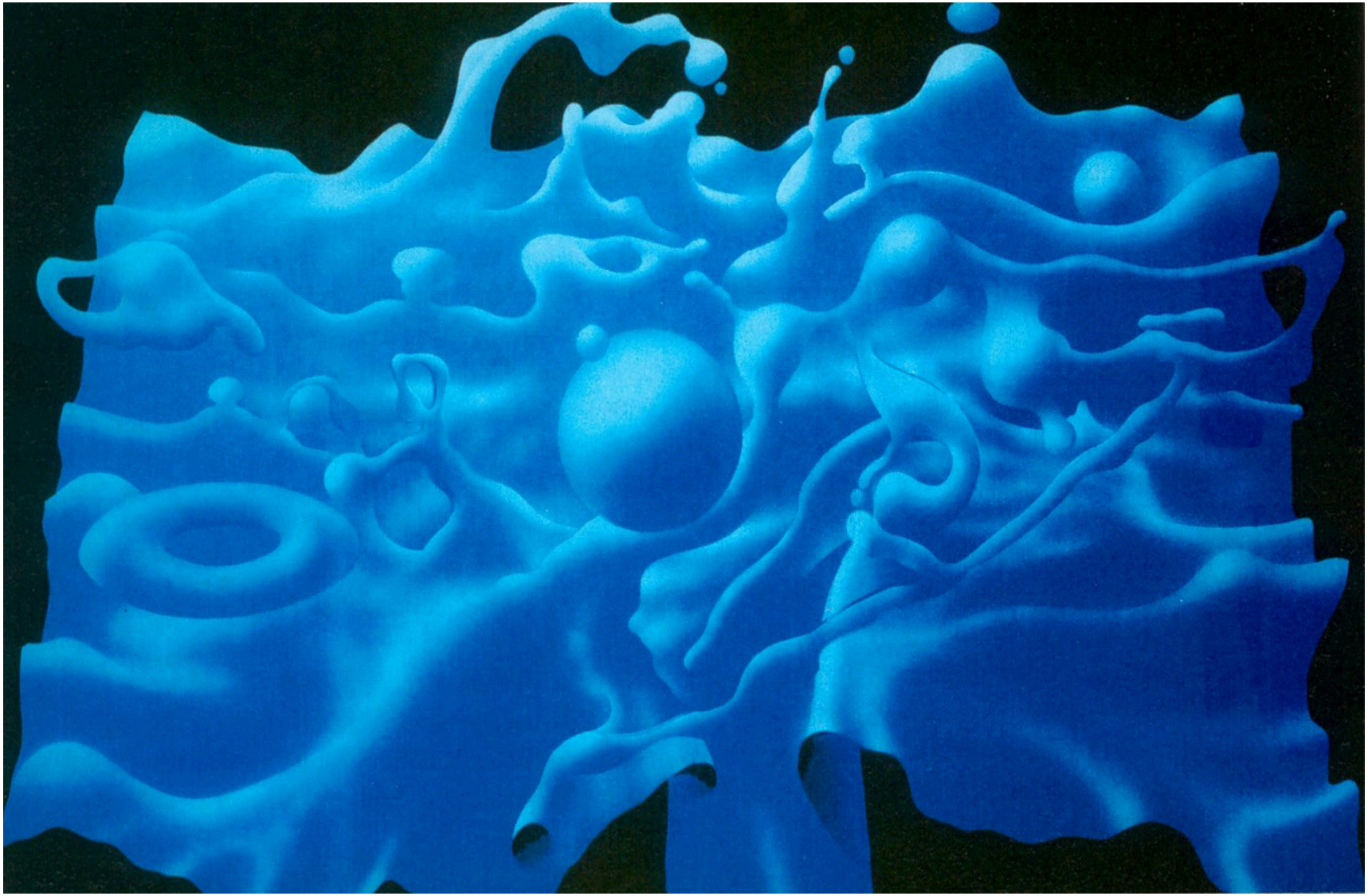
$$\rho_P = \frac{m_P}{l_P^3} = 5{,}1 \cdot 10^{96} \frac{kg}{m^3}.$$

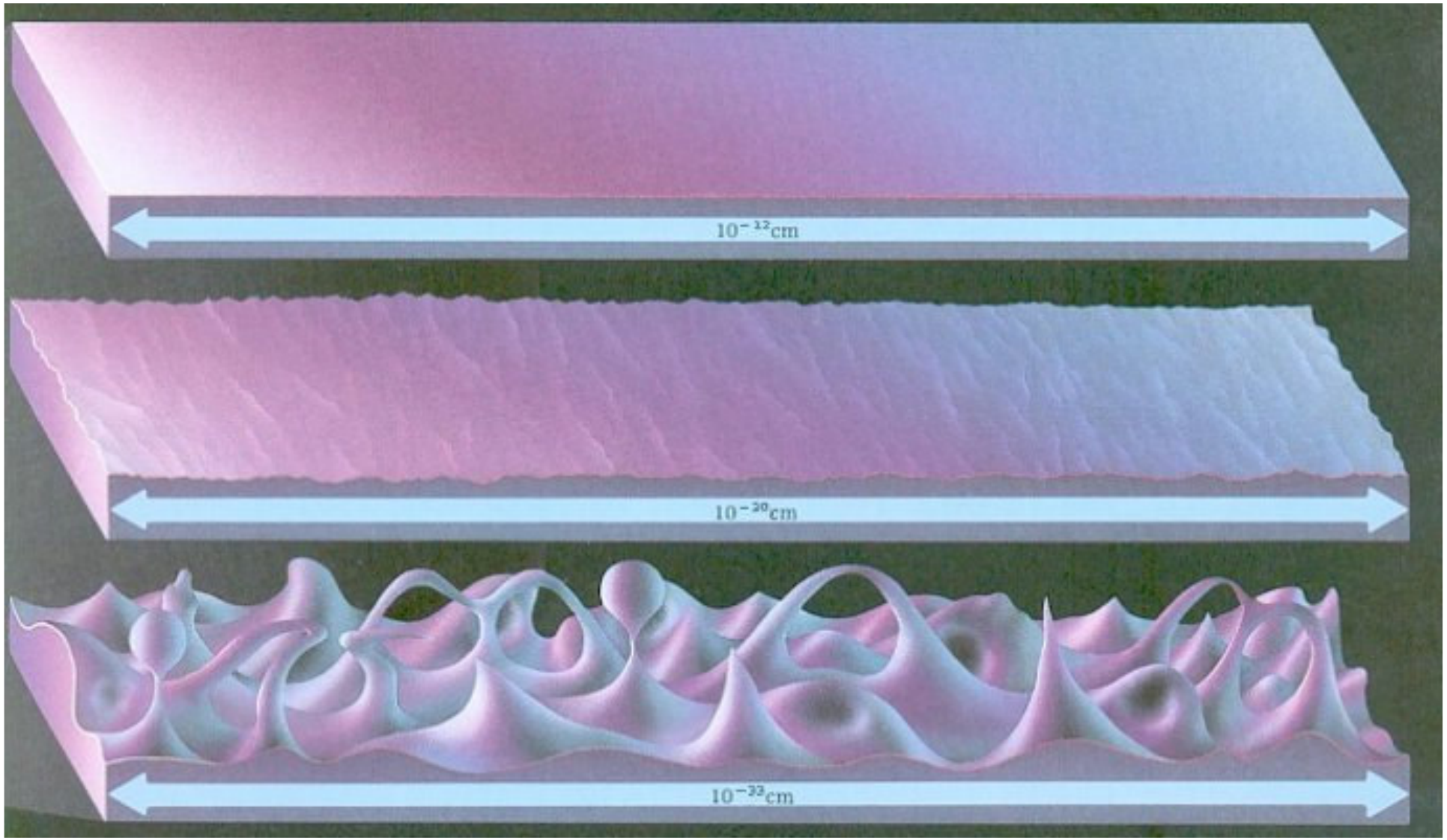
Hawking-temperaturen til de svarte hullene er

$$T_H = \frac{m_P c^2}{8\pi k} = \frac{T_P}{8\pi} = 5{,}6 \cdot 10^{30} K,$$

der k er Boltzmanns konstant, og T_P er plancktemperaturen.

Hvordan universet kan ha vært ved plancktiden.





Ved plancktiden var rommet trolig et boblende kaos av fluktuerende foton-svarte hull der ikke bare krumningen, men også topologien fluktuerte vilt.

Hva skjedde ved Planck-tiden ?

Kanskje oppsto vårt univers ved dette tidspunktet som en kvantefluktuasjon dominert av **vakuumenergi.**

Beregninger tyder på at denne vakuumdominerte perioden varte i 10^{-33} sekunder.

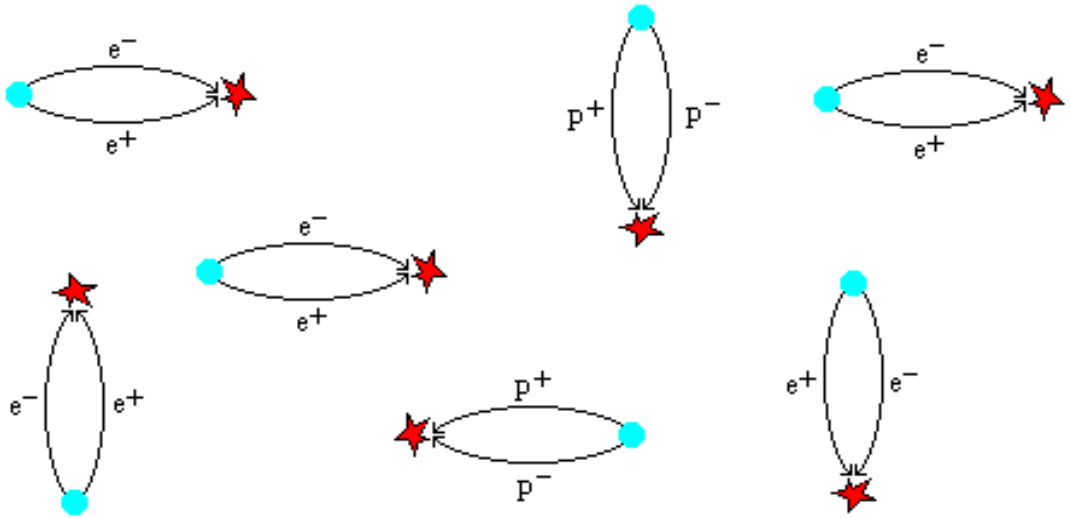
Den kalles **inflasjonsepoken**.

Hva vakuumenergien er for noe,
vet vi ikke, men det er mange muligheter:

Trolig er et av bidragene til vakuumenergien at partikkel-antipartikkelpar oppstår og forsvinner i form av kvantemekaniske fluktuasjoner.

Quantum Vacuum

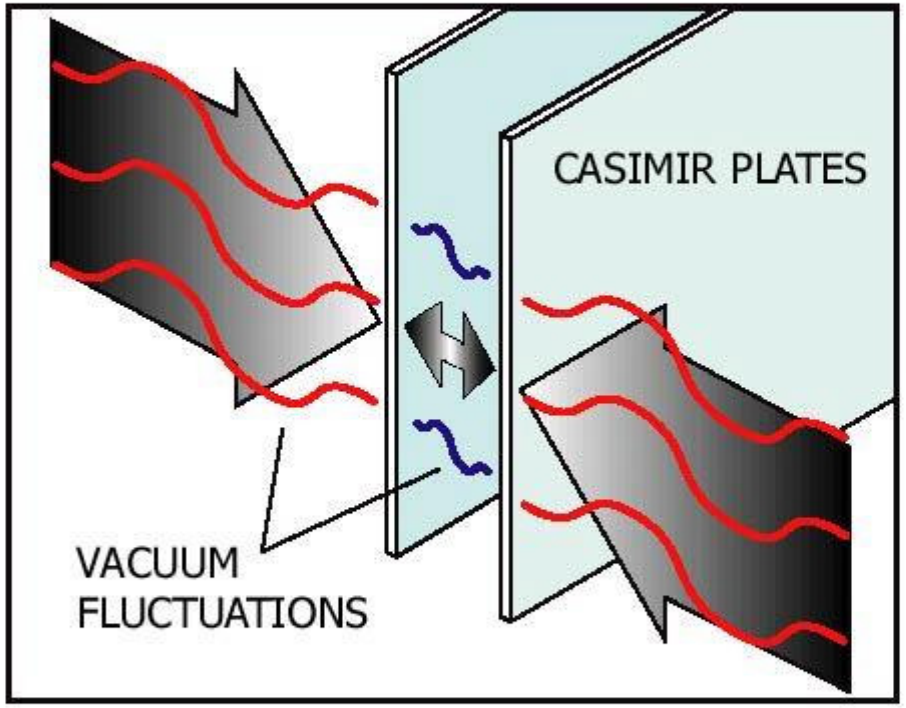
the quantum vacuum cannot be perceived or measured directly since it appears to be empty, in fact it is filled with potentiality



within the quantum vacuum, pairs of virtual matter and anti–matter particles are continually created and destroyed, borrowing their mass/energy by the uncertainity principle. They do not exist as observable entities, but their existence is exerted on other particles as a subtle pressure (called the Casimir effect)

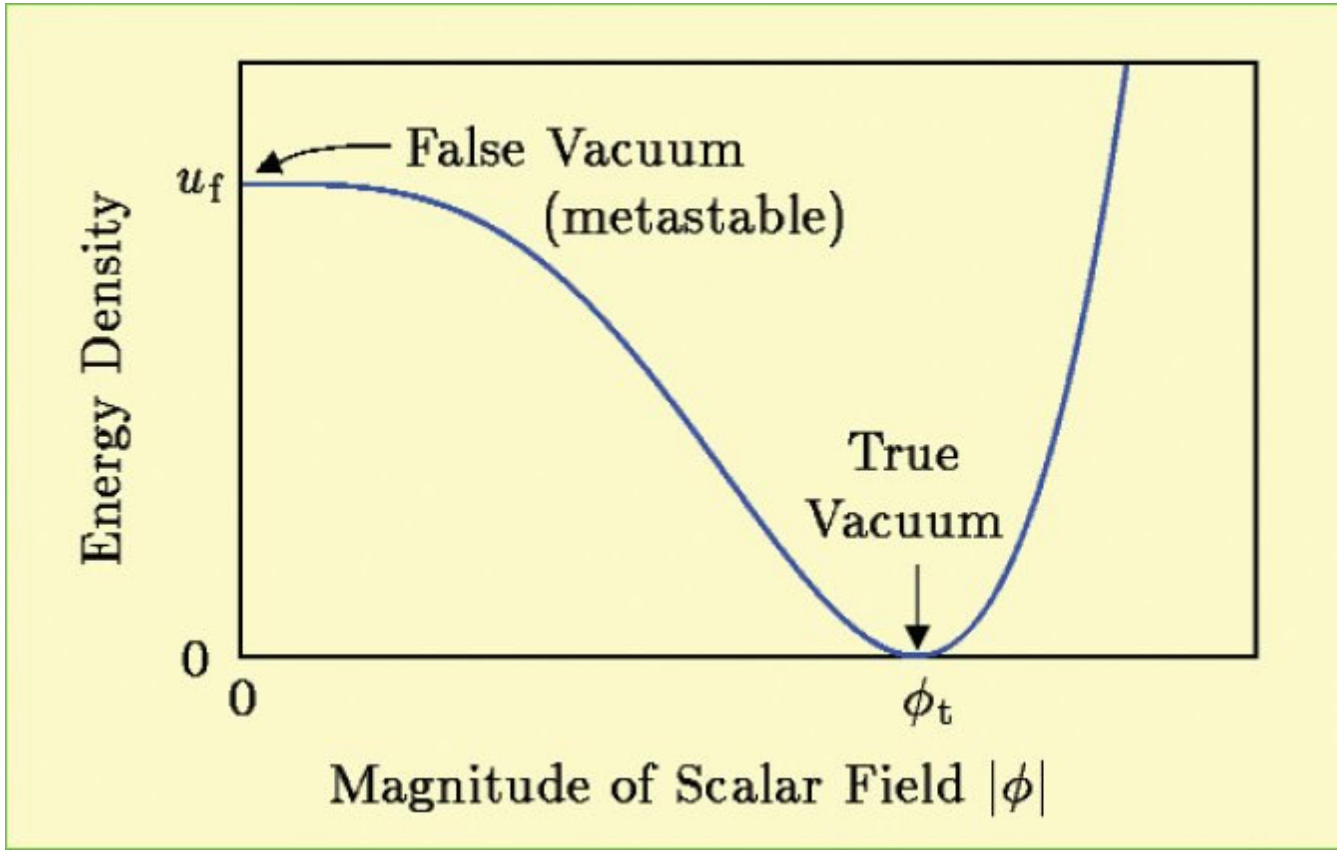
Casimir Effect: *a physical manifestation of zero-point energy*

H. Casimir



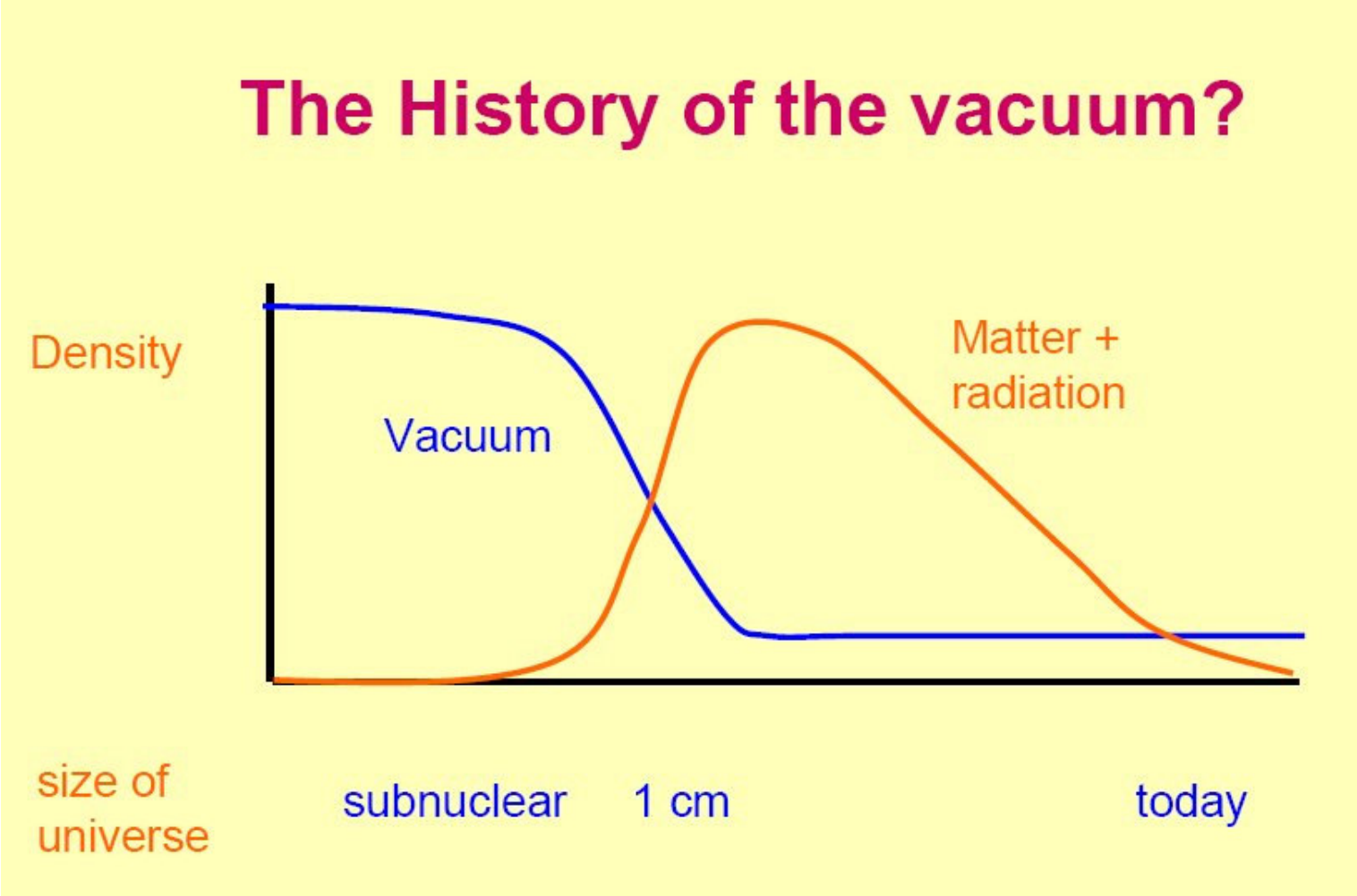
…made of the same "stuff" as Λ?

Den mørke energien kan være en form for ”Higgsenergi”, dvs. en vakuumenergi som er slik at når elementærpartiklene vekselvirker med den, får de masse.



Vakuumenergiens tetthet beskrives ved hjelp av et skalarfelt.
Vakuum kan eksistere i ulike tilstander kalt falskt og ekte vakuum.

Inflasjonsperioden



Vi skal nå se på noen av den ukjente vakuumenergiens egenskaper.

Når fysikerne går over fra ett referansesystem
for eksempel perrongen i en jernbanestasjon,
til et annet, si et tog som farer forbi,
sier de at de foretar en Lorentz transformasjon.

Hvis man ikke kan måle fart i forhold til vakuumenergi,
må vakuumenergien ha samme egenskaper
observert fra perrongen og fra toget.
Fysikerne sier at da må
egenskapene til vakuumenergien være Lorentz-invariante.
Jeg vil kalle en slik
Lorentz-Invariant Vakuum-Energi for LIVE.

Frastøtende gravitasjon

Ifølge Einsteins relativitetsteori er akselerasjonen til den kosmiske ekspansjonen gitt ved

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3} a(\rho + \frac{3p}{c^2})$$

Negativt trykk bidrar med frastøtende gravitasjon.
Negativt trykk er det samme som strekk.
Et medium i en tilstand av stort nok strekk,

$$p < -(1/3)\rho c^2$$

vil kunne forårsake frastøtende gravitasjon.
Dette er en relativistisk virkning.
I den Newtonske grensen, som kan tas ved å la $c \to \infty$,
forsvinner trykkets gravitasjonsvirkning.

LIVE er et medium i en tilstand av strekk.
Hvis man ikke kan måle hastighet i forhold til vakuumenergi, følger det fra relativitetsteorien at den har et negativt trykk,

$$p = -\rho c^2 .$$

Da er tyngdeakselerasjonen proporsjonal med

$$\rho_{grav} = -2\rho$$

som er negativ siden massetettheten er positiv. Det betyr at *vakuumenergi forårsaker frastøtende gravitasjon,*

og at i en LIVE-dominert inflasjonsepoke vil universet ha akselerert ekspansjon.

En av de merkelige egenskapene til LIVE er at
den har konstant tetthet under universets ekspansjon.
Følgelig fikk universet en enorm økning av vakuumenergi
under inflasjonsfasen.

Vi skal nå se hvordan dette kan forstås.

Varme er energioverføring på grunn av temperaturforskjell.

Homogent univers → ingen temperaturforskjeller → ingen varme,
Q=0, dvs. **universets ekspansjon er adiabatisk.**

Dette har en viktig konsekvens.

Vi betrakter et medbevegende volum V innenfor en kuleflate
med sentrum i en tilfeldig valgt observatør.
Kuleflaten ekspanderer sammen med rommet.

Termodynamikkens 1. lov sier at
varme er lik endring i indre energi pluss volumarbeid

$$dU+pdV=Q.$$

Ved en adiabatisk ekspansjon er Q = 0,
og termodynamikkens 1. lov tar formen

$$dU+pdV = 0.$$

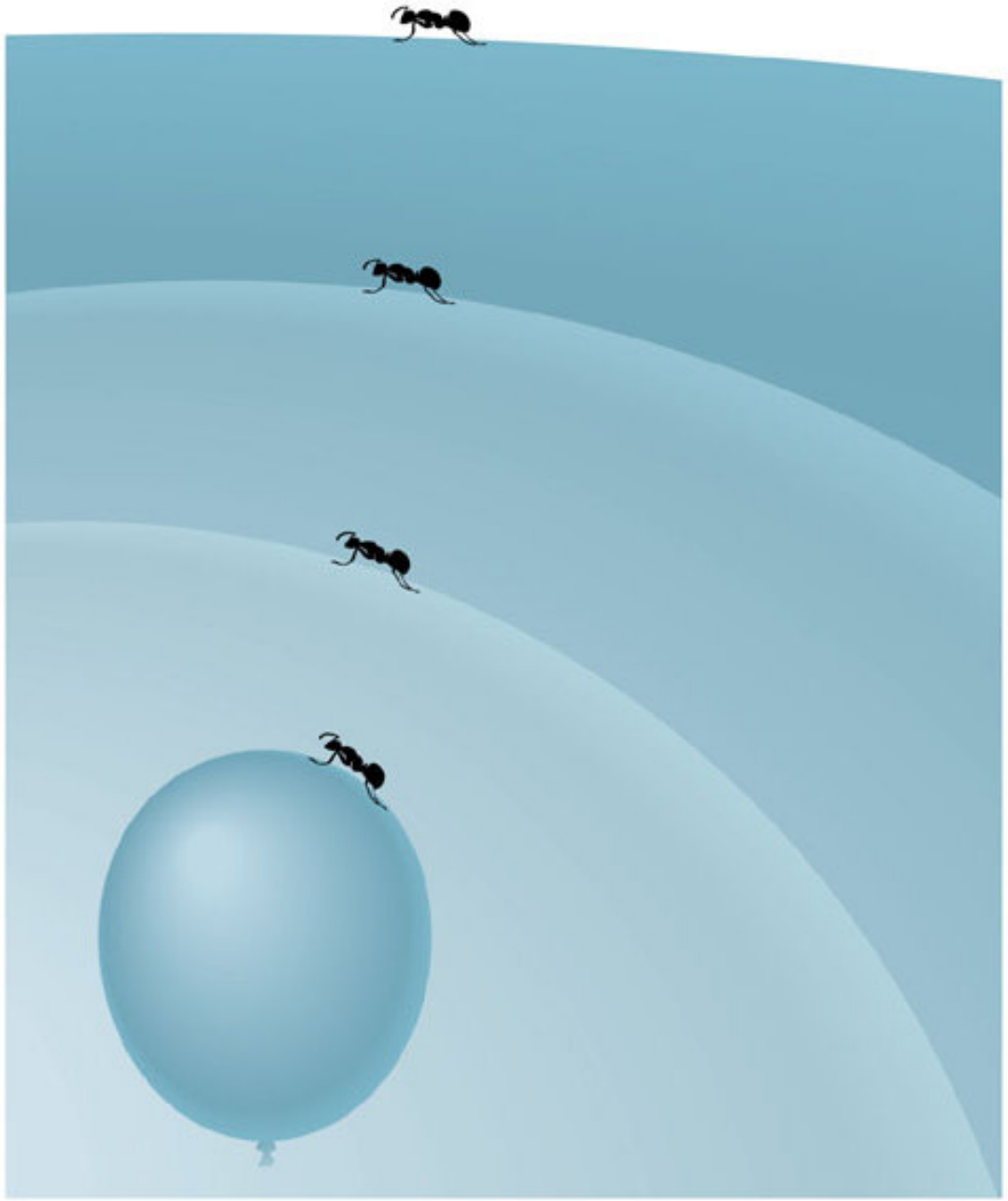
Tilstandslikningen for LIVE er $p = - \rho c^2$ der ρ er massetettheten.
Dermed tar adiabatlikningen formen

$$dU = \rho c^2 \, dV$$

Den fysiske betydningen av denne likningen er:
Ved kuleflaten som utgjør grensen for det ekspanderende området med volum V som omgir observatøren,
utfører omgivelsene et arbeid som fører energi
fra området utenfor kuleflaten til området innenfor.

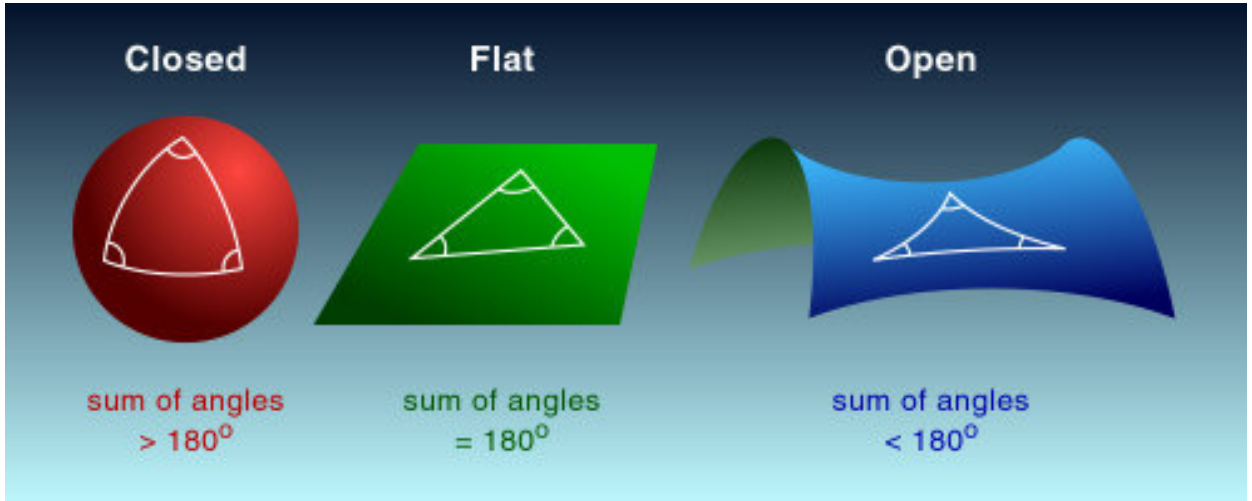
Dermed øker vakuumenergien i V på en slik måte
at vakuumenergiens tetthet opprettholdes.

Dette betyr at i den LIVE-dominerte inflasjonsfasen
hentes energi fra det uendelig fjerne
slik at det blir mer vakuumenergi innenfor et volum
som ekspanderer sammen med rommet.



Inflation of universe flattens overall geometry like the inflation of a balloon, causing overall density of matter plus energy to be very close to critical density

Kritisk tetthet



I et univers med kritisk tetthet er det euklidsk romlig geometri.

I vårt univers svarer den kritiske tettheten til at det er ett hydrogenatom per kubikkmeter.

Ved slutten av inflasjonsfasen gikk vakuumenergien over til stråling og elementærpartikler som
kvarker, elektroner og nøytrinoer.

Hvis LIVE er en form for Higgsenergi
skjedde dette 10^{-33} s etter den opprinnelige kosmiske kvantefluktuasjonen der vårt univers oppsto.

Vi skal nå se på hva som skjedde videre i det første sekundet av universets historie.

Den elektrosvake epoken

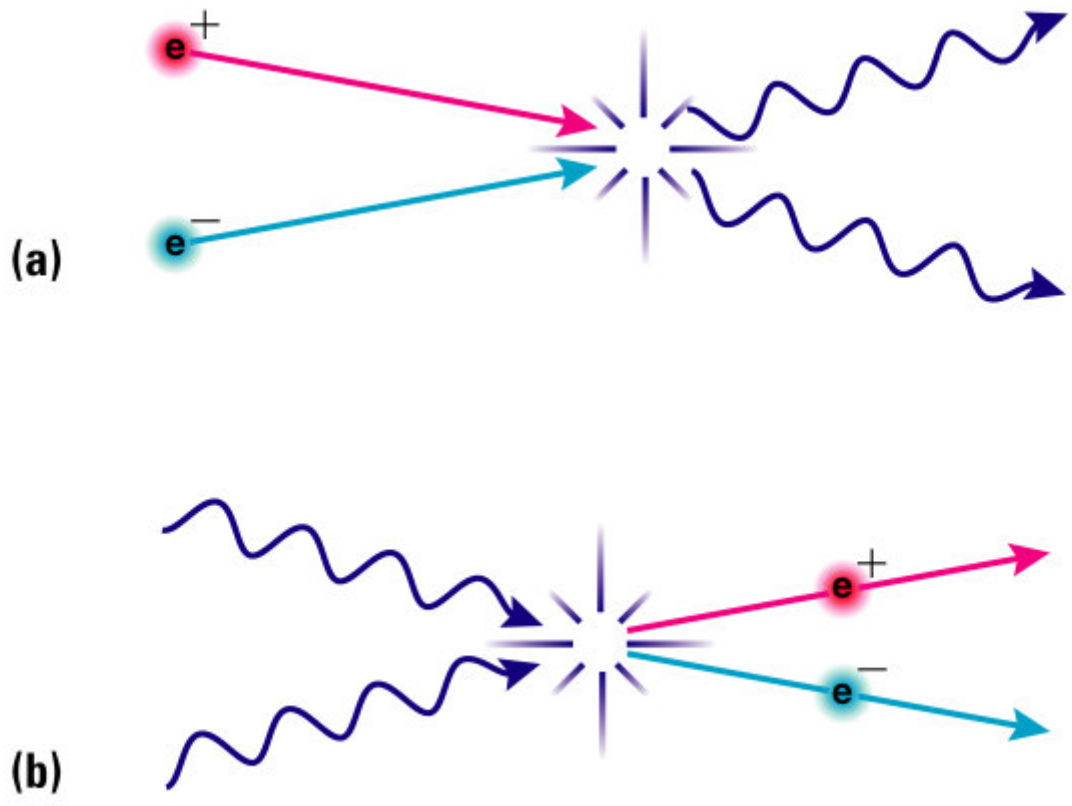
varte fra 10^{-33} sekunder til 10^{-12} sekunder.

Intens stråling fylte universet og skapte alle slags partikkel-antipartikkel-par som raskt gikk over til stråling igjen.

I mesteparten av denne perioden var det ingen forskjell på den elektromagnetiske kraften og den svake kjernekraften.

Ved slutten av denne perioden ble
den elektromagnetiske kraften og
den svake kjernekraften forskjellige.

Partikkel-antipartikkelpar gikk over til stråling



Copyright © Addison Wesley

Og stråling gikk over til partikkel-antipartikkelpar

Det oppstår mer materie enn antimaterie

I den elektrosvake perioden eller den etterfølgende kvarkperioden ble materien skapt,

kanskje omkring 10^{-12} s etter Big Bang.

Det ble dannet flere partikler enn antipartikler:

For hver ti milliarder partikkel-antipartikkel-par

ble det skapt en partikkel ekstra.

Dette hindret at all materie og antimaterie

ble omdannet til stråling.

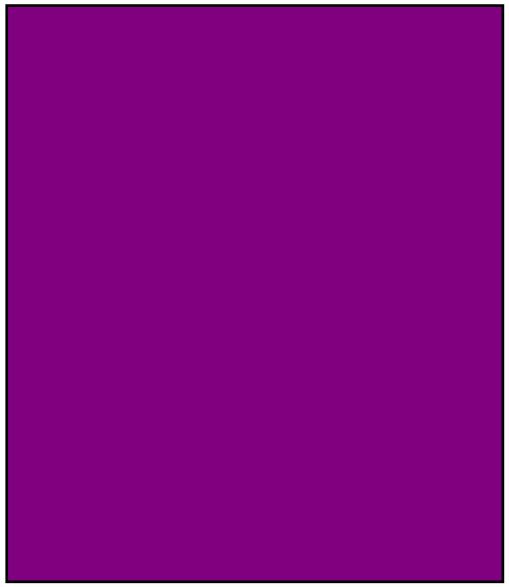
Kvark asymmetri i det tidlige Univers

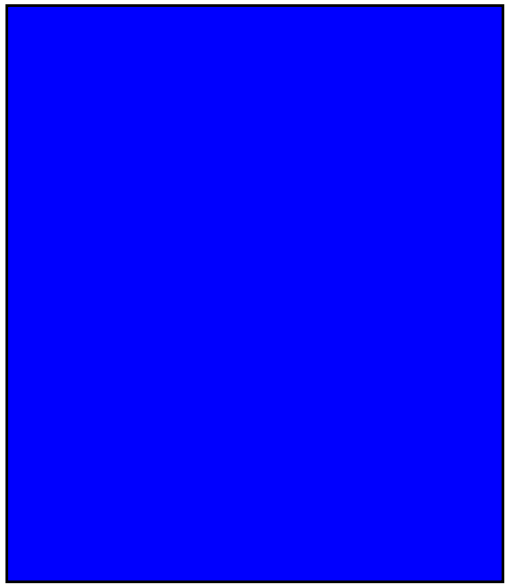
Materie og antimaterie ble skapt i like mengder under Big Bang.
Men en liten asymmetri i materiens egenskaper gjorde at for hver:

10,000,000,000 antikvarker

oppsto

10,000,000,001 kvarker





Kvark- epoken

Kvark-epoken varte fra 10^{-12} s til 10^{-5} s.

I denne perioden eksisterte frie kvarker.
Perioden ble avsluttet med at kvarkene slo seg sammen til protoner og nøytroner.

Protonene, dvs. kjernene til hydrogenatomene,
ble altså dannet omtrent
et hundetusendels sekund etter Big Bang.

Lepton-epoken

Denne epoken varte fra
et hundretusendels sekund til omtrent 10 sekunder.

Leptoner er partikler som ikke merker den sterke kjernekraften.

I denne epoken var de dominerende partiklene elektroner, positroner, nøytrinoer, antinøytrinoer og fotoner.

Det var også protoner og nøytroner tilstede,
men i mindre antall enn leptonene.

Lepton-epoken fts.

Ved tiden fra et sekund til ti sekunder etter Big Bang
var temperaturen sunket til omtrent en milliard grader.
Da var ikke fotonenergien stor nok til
at strålingen kunne omdannes til elektron-positron par.
Dermed ble isteden størsteparten av elektron-positron parene omdannet til stråling.

Mesteparten av den kosmiske mikrobølge bakgrunnsstrålingen ble produsert fra elektron-positron annihilering
da universet var omtrent 3 sekunder gammelt.

Nøytrinoene

Da universet var 0,1s gammelt ble det gjennomsiktig for nøytrinoene.
Fra da av beveget nøytrinoene seg fritt.

Det betyr at hvis vi kunne detektere kosmiske nøytrinoer,

ville vi sett hvordan universet var 0,1 s etter Big bang.

Kosmisk nukleosyntese

Den kosmiske nukleosyntesen varte fra 100 s til 1000 s,

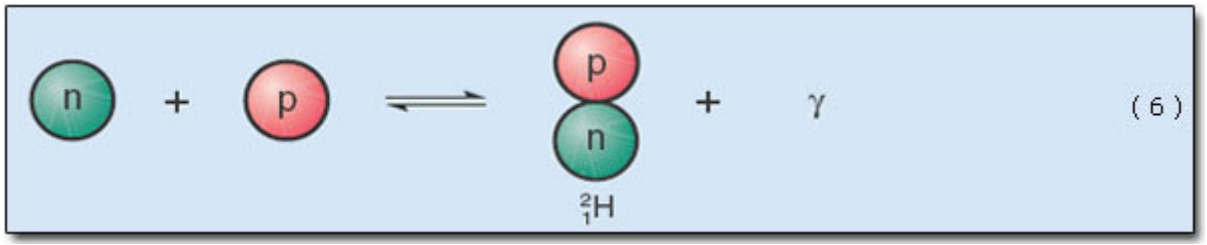
dvs. den varte i omtrent et kvarter.

I denne perioden ble det først og fremst dannet atomkjerner av helium.

Hydrogenatomets kjerne består av bare et proton.

Den første reaksjonen som skjedde var at protoner og nøytroner

slo seg sammen til atomkjerner av **deuterium**.



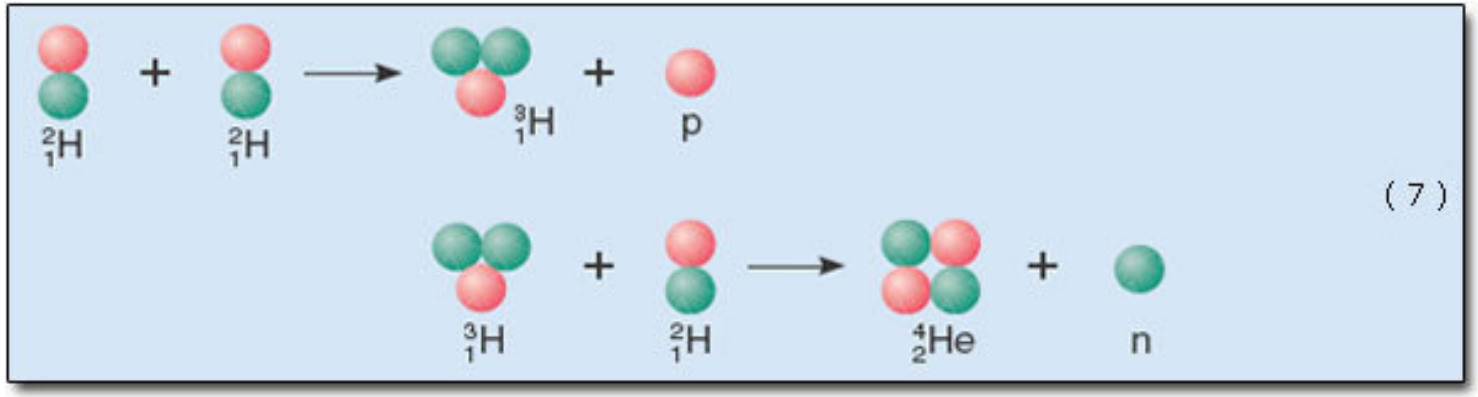
Deuterium er en hydrogenisotop

siden den bare har ett proton i kjernen.

Tungtvann består av deuterium og oksygen.

Kosmisk nukleosyntese fts.

Så slo deuteriumkjerner seg sammen og dannet tritiumkjerner.



Videre dannet kjernene av tritium og deuterium atomkjerner av helium samt frie, ustabile nøytroner med levetid på omtrent 11 minutter.

Da universet var et kvarter gammelt,

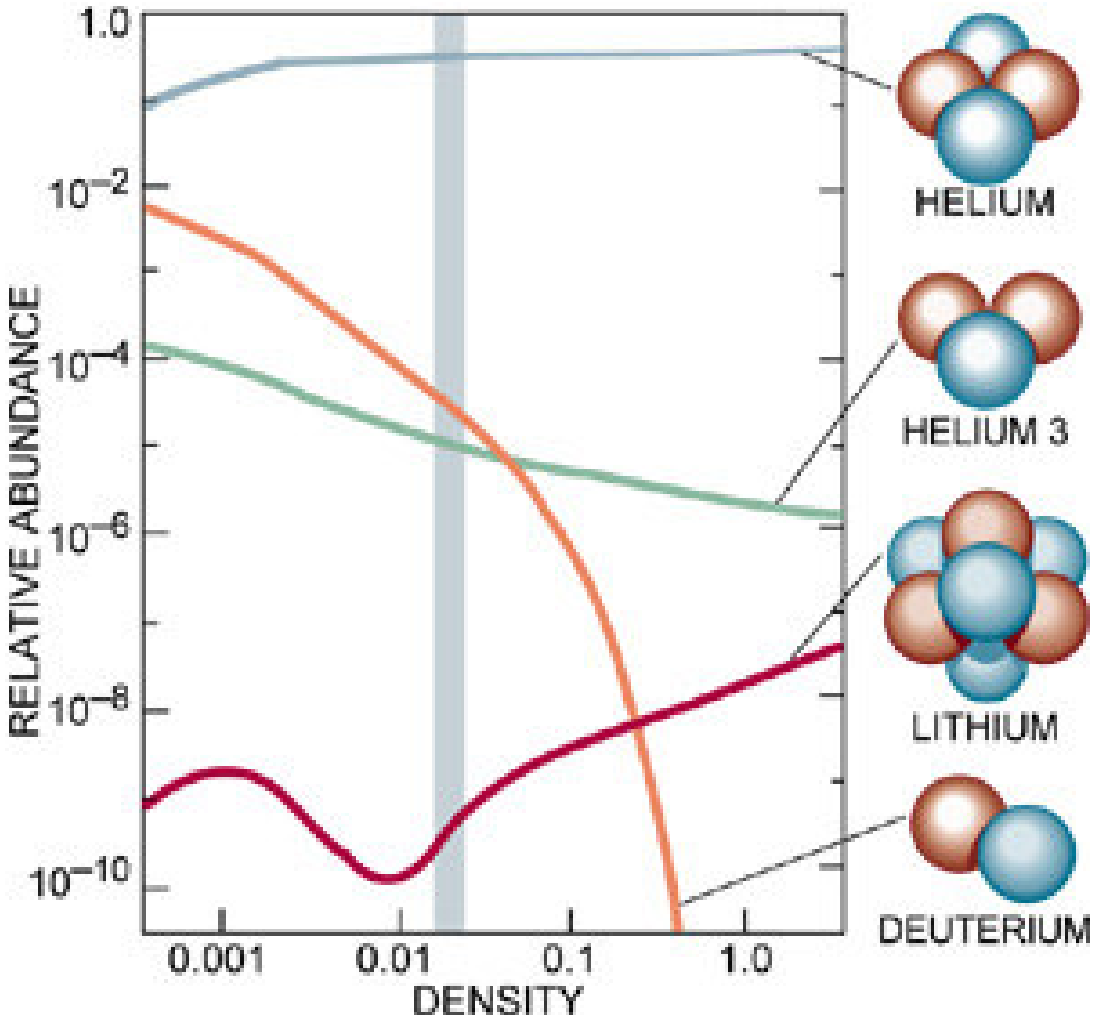
besto materien av omtrent 75 % hydrogen,

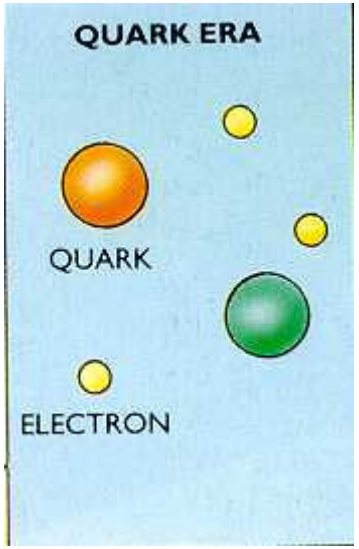
24 % helium og små mengder litium.

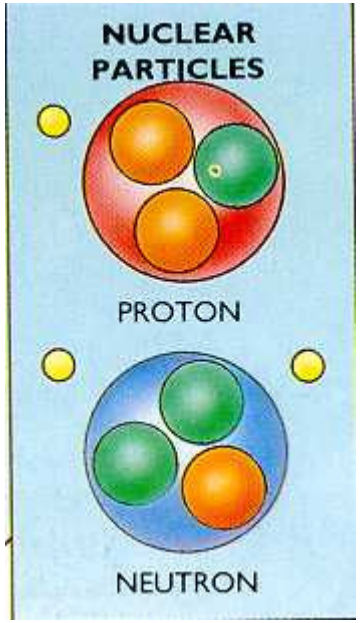
I tillegg var det nøytrinoer og fotoner.

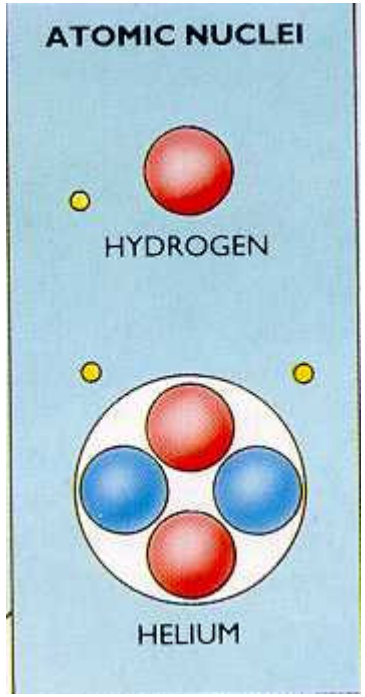
Kosmisk nukleosyntese fts.

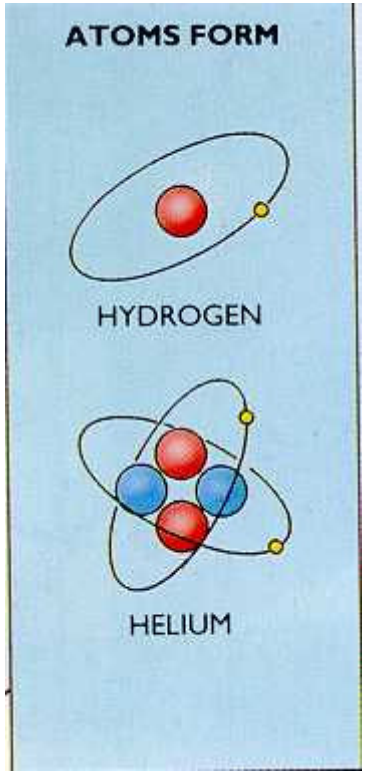
Den nederste skalaen viser tettheten av vanlig materie (protoner og nøytroner) i forhold til kritisk tetthet. Kurvene er beregnete mengdeforhold for helium, helium 3, litium og deuterium ut fra teorien for kosmisk nukleosyntese. Den grå stripen passer med de observerte mengde-forholdene. Det er overensstemmelse mellom teori og observasjoner dersom tettheten av vanlig materie er 4 % av den kritiske tettheten.







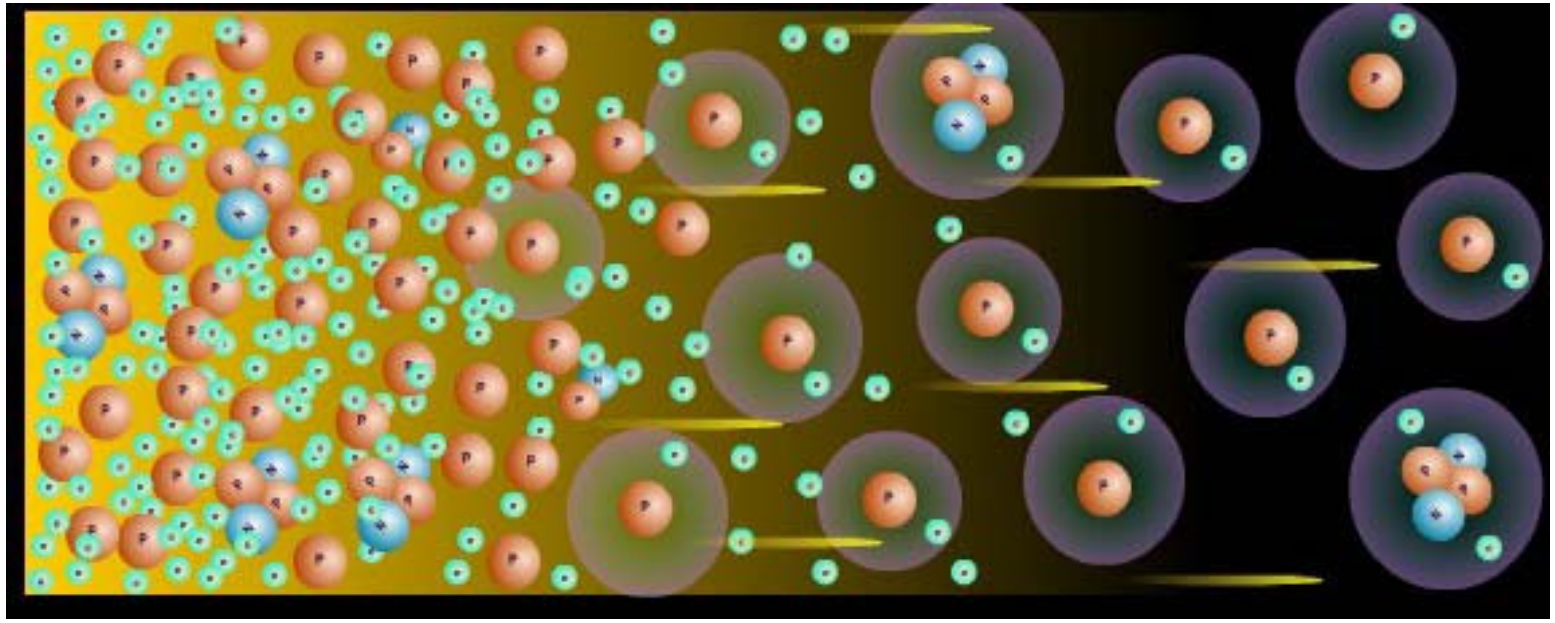


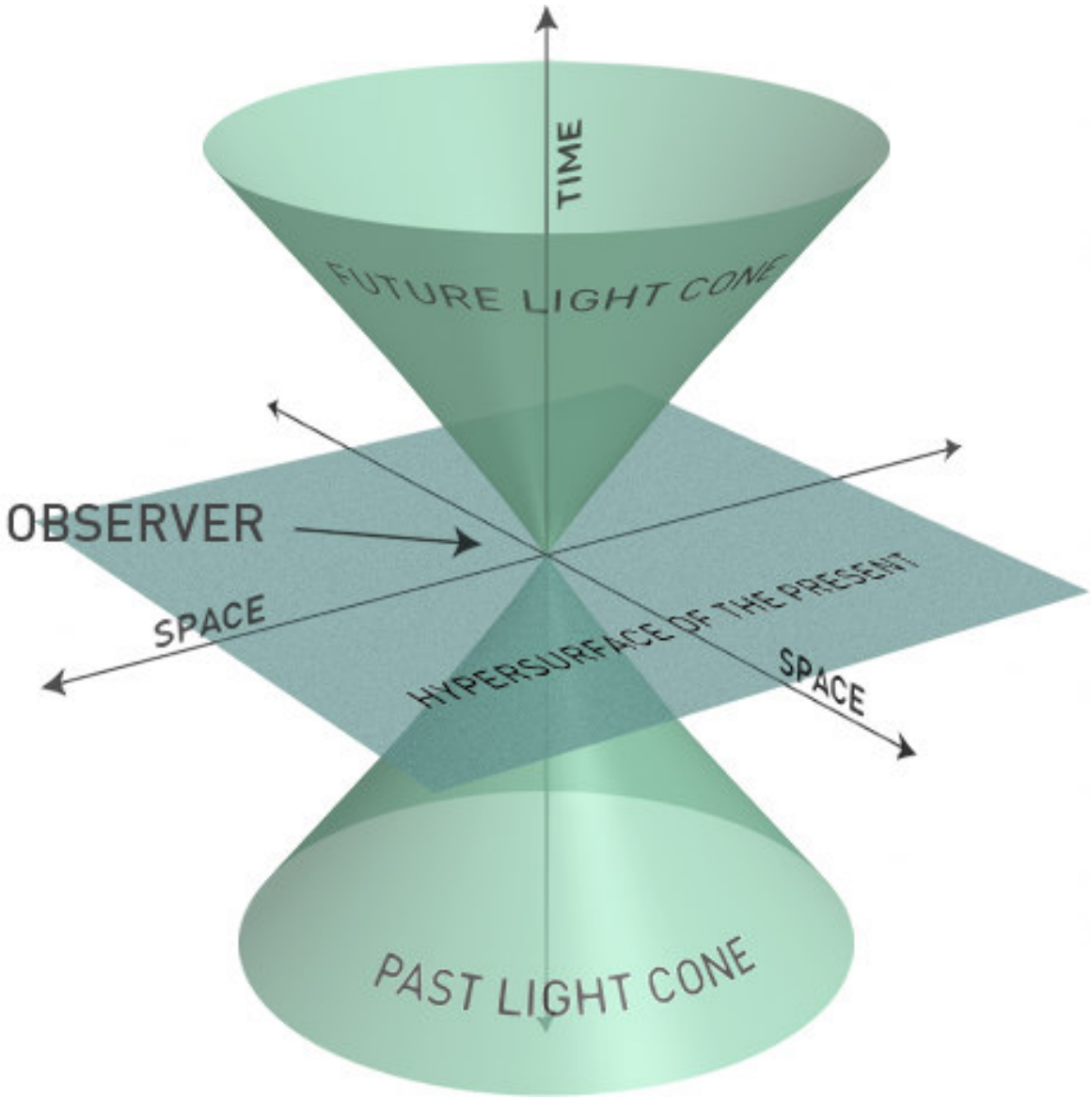


Før 1/100 000 s | før 100 s | 100 s – 15 min | 380.000 år

Omtrent 400 000 år etter Big Bang sank temperaturen til 3000 grader. Før den tiden var universet varmere, og energirike fotoner hindret elektroner i å bli fanget av protoner. I de første 400 000 årene var universet ugjennomsiktig fordi det var fylt av et varmt plasma.

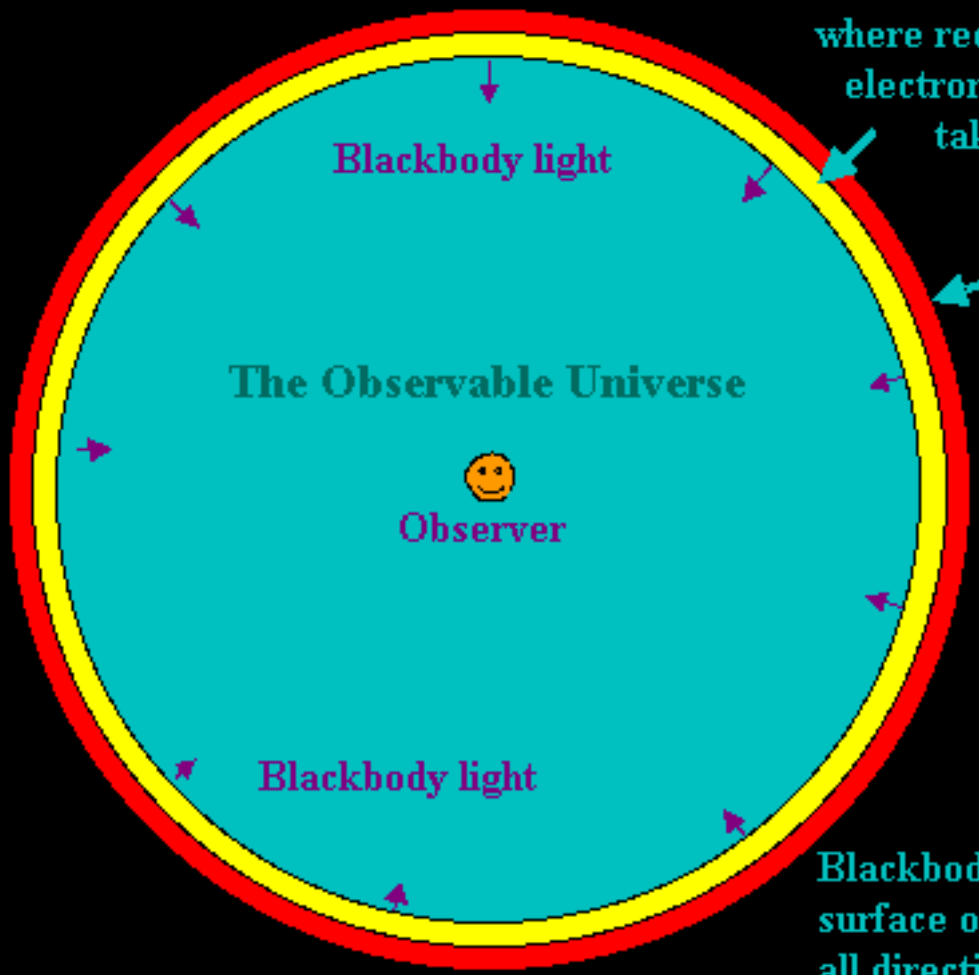
400 000 år etter Big Bang ble de første hydrogenatomene dannet. Dermed forsvant flesteparten av de frie elektronene, og fotonene kunne bevege seg fritt. Universet ble gjennomsiktig for den strålingen som nå observeres som den kosmiske mikrobølgebakgrunnsstrålingen.





Vi observerer langs den fortidige lyskjeglen.
Vi ser et objekt slik det var da det sendte ut lyset vi mottar.
Når vi observerer utover i universet, observerer vi bakover i tiden.

A Pictorial History of the CMB

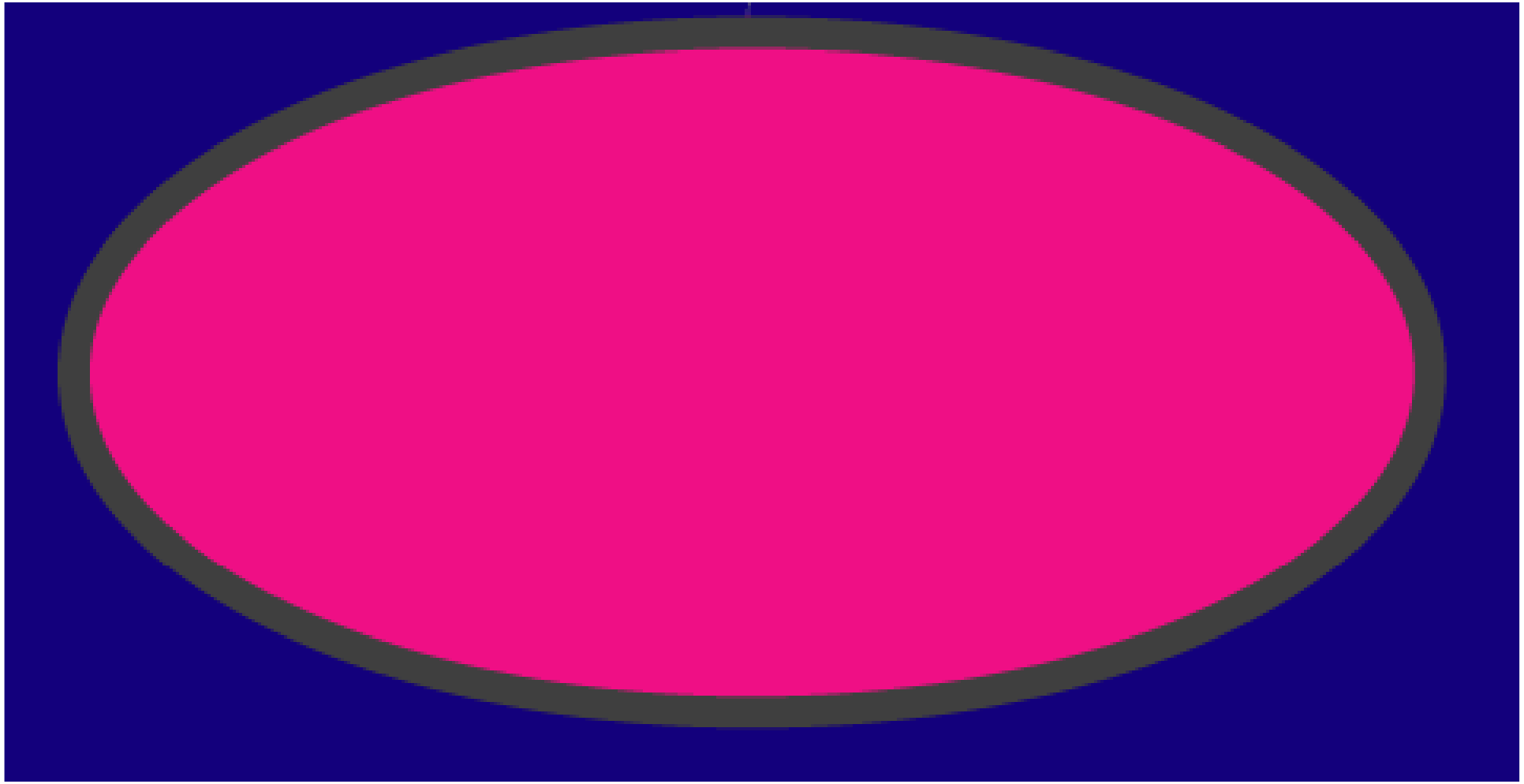


Last Scattering Surface where recombination of electrons and protons takes place.

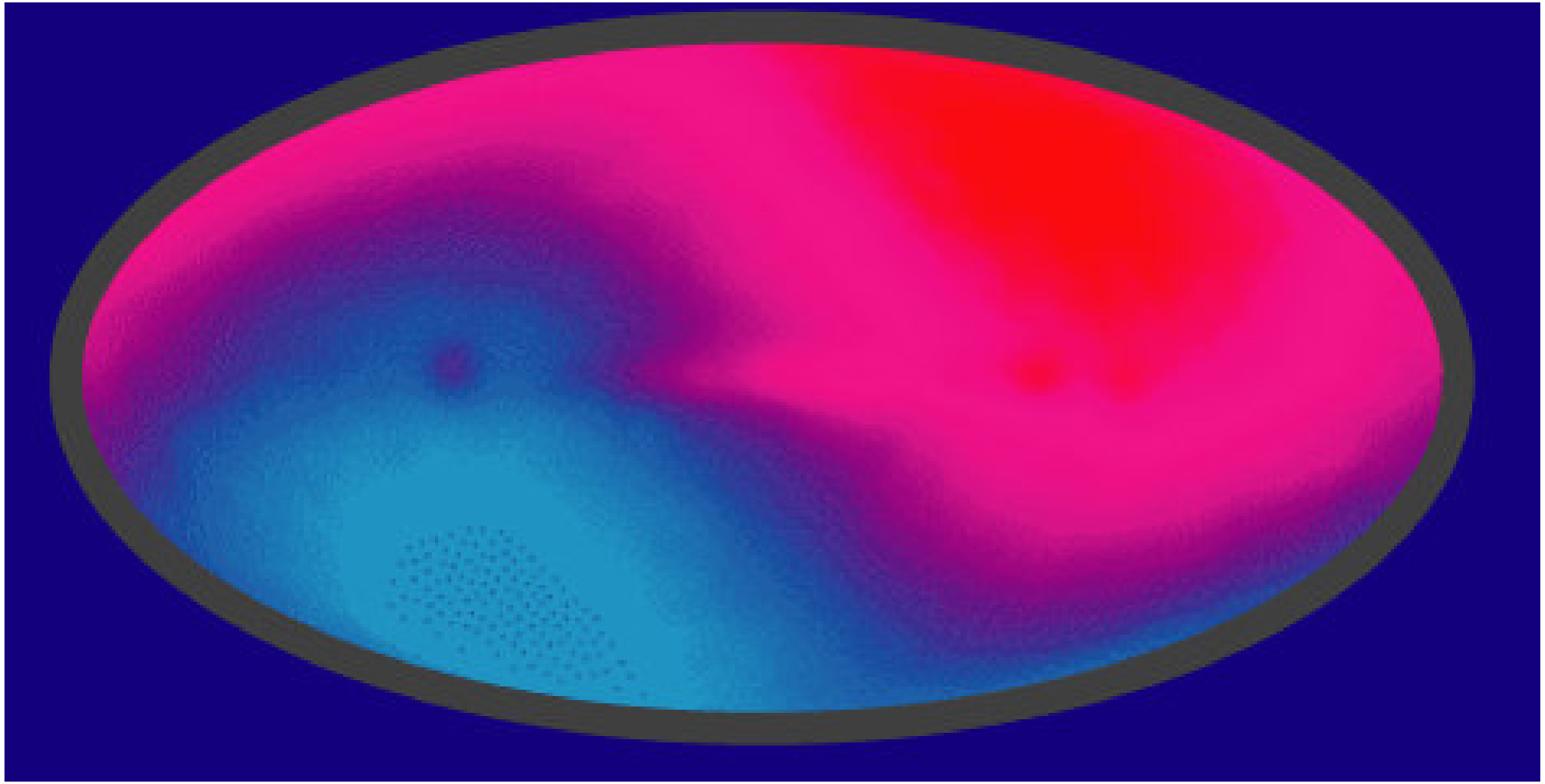
Edge of Observable Universe- distance light could have traveled over age of universe.

Blackbody light emitted in the surface of last scattering travels in all directions. We only see that portion which happens to set off in a direction that leads it into one of our detectors.

Da man observerte bakgrunnsstrålingen med en nøyaktighet på en hundredels grad, fant man samme temperatur i alle retninger.

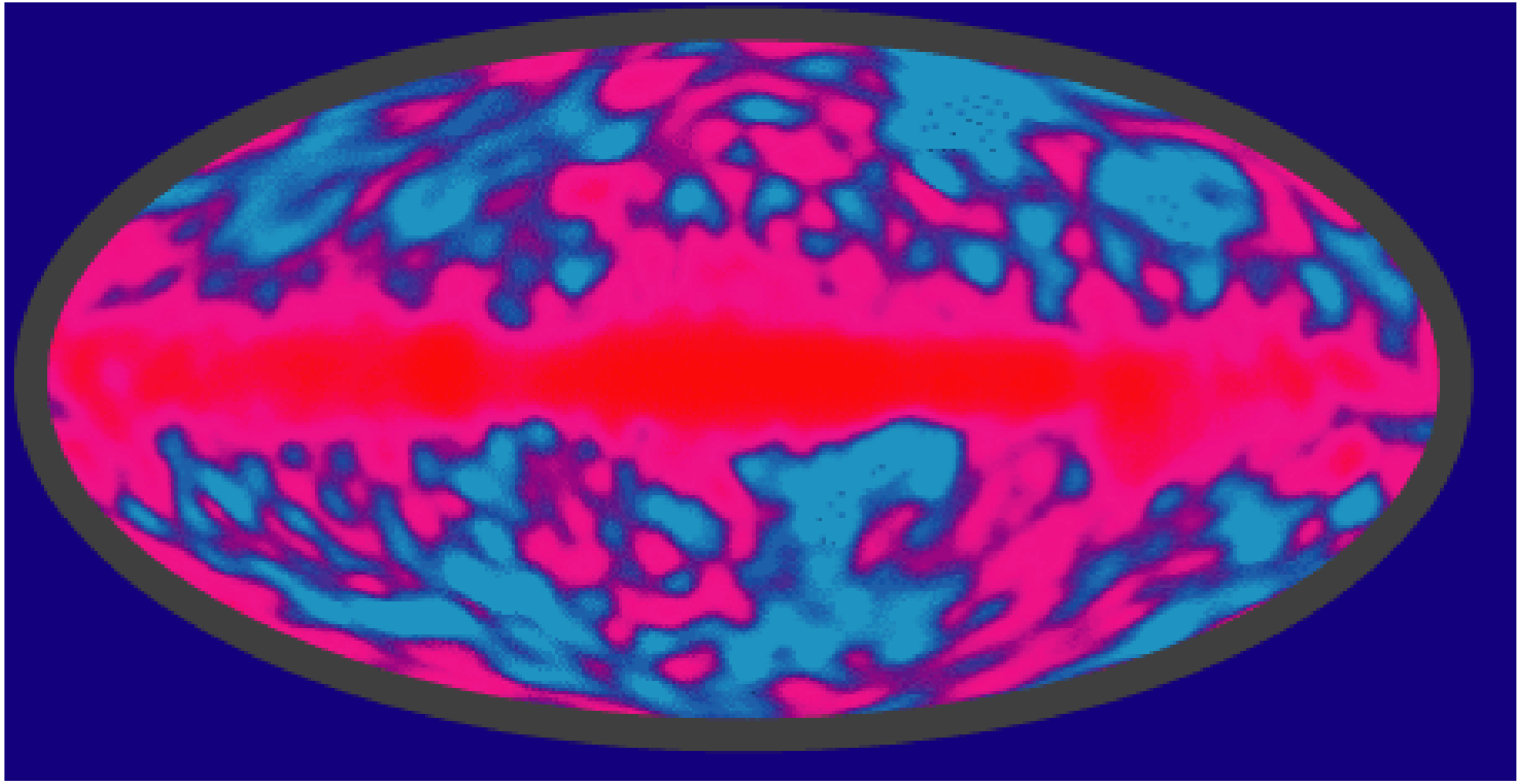


Med en nøyaktighet på en tusendels grad så resultatet av temperaturmålingene slik

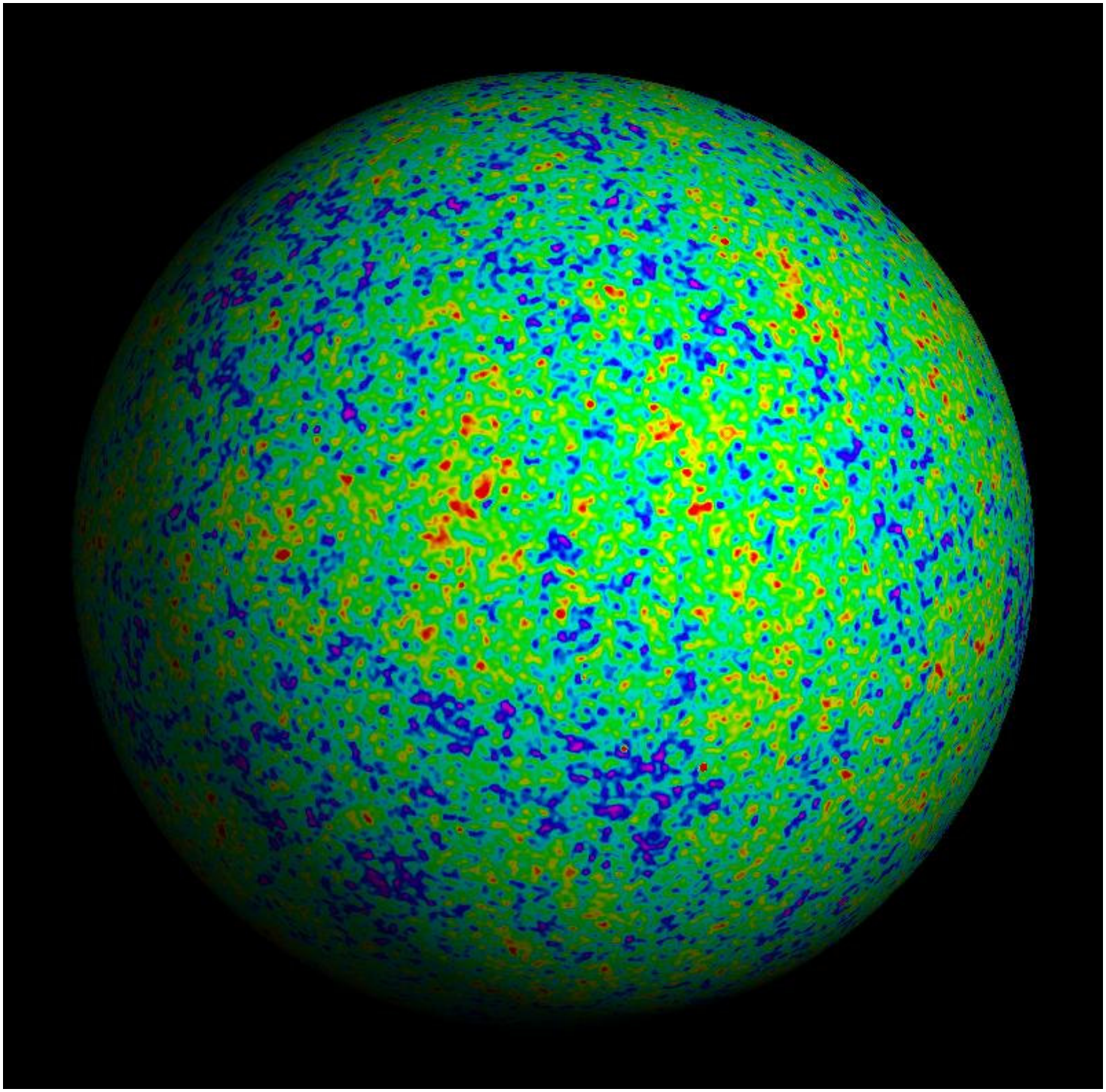


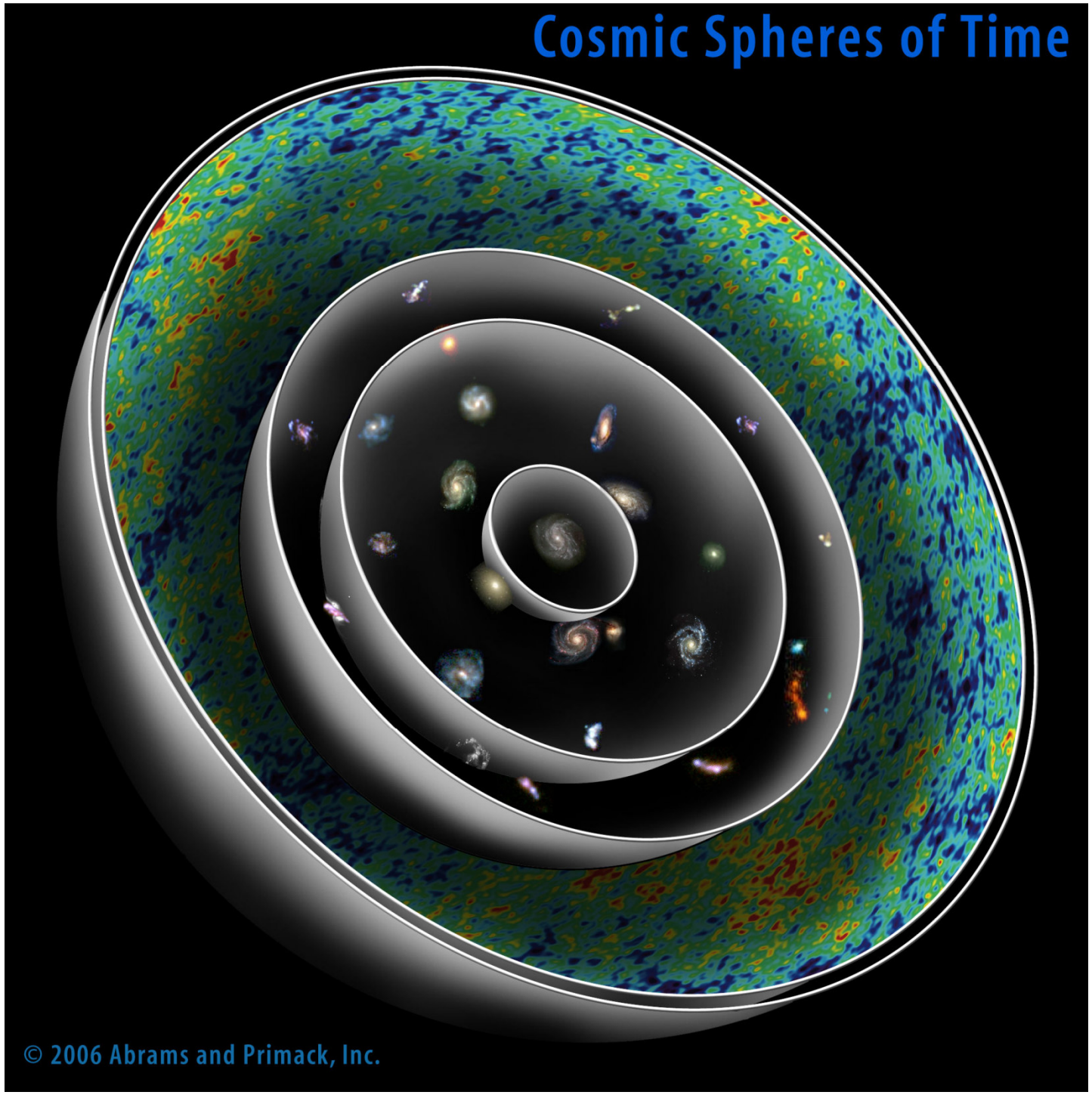
Dette mønsteret kalles en dipol og har et maksimum og et minimum (rødt og blått) i motsatte retninger på himmelen. Det skyldes at vi beveger oss gjennom bakgrunnsstrålingen og er en dopplereffekt. Temperaturen er høyere i bevegelsesretningen og lavere i motsatt retning.

Hvis vi fjerner dipolen og øker nøyaktigheten til en hundretusendels grad, ser resultatet av COBE-målingene slik ut:

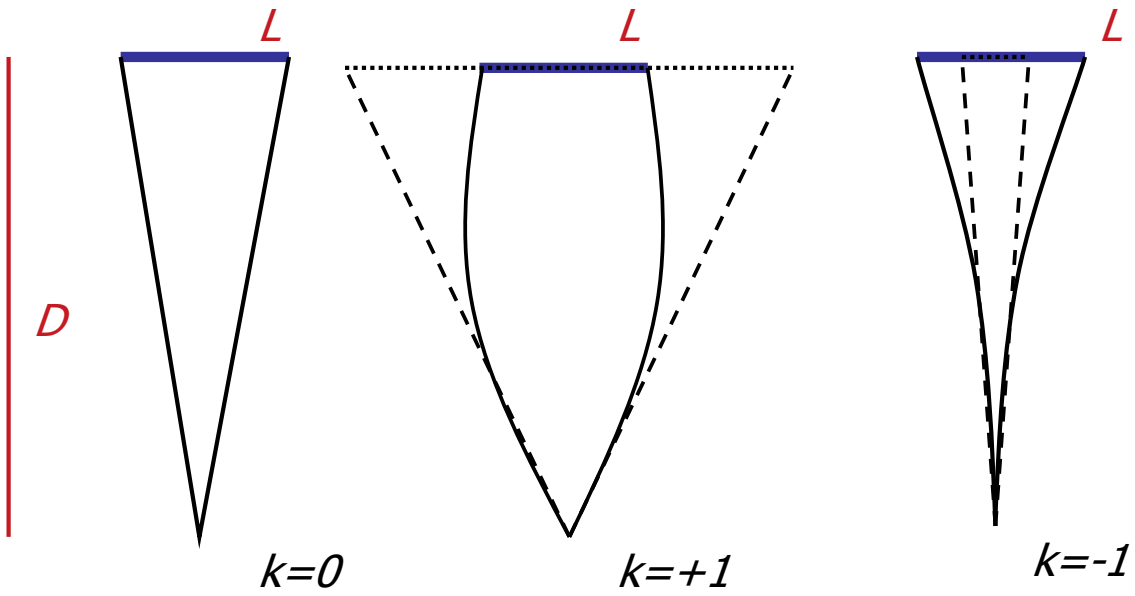


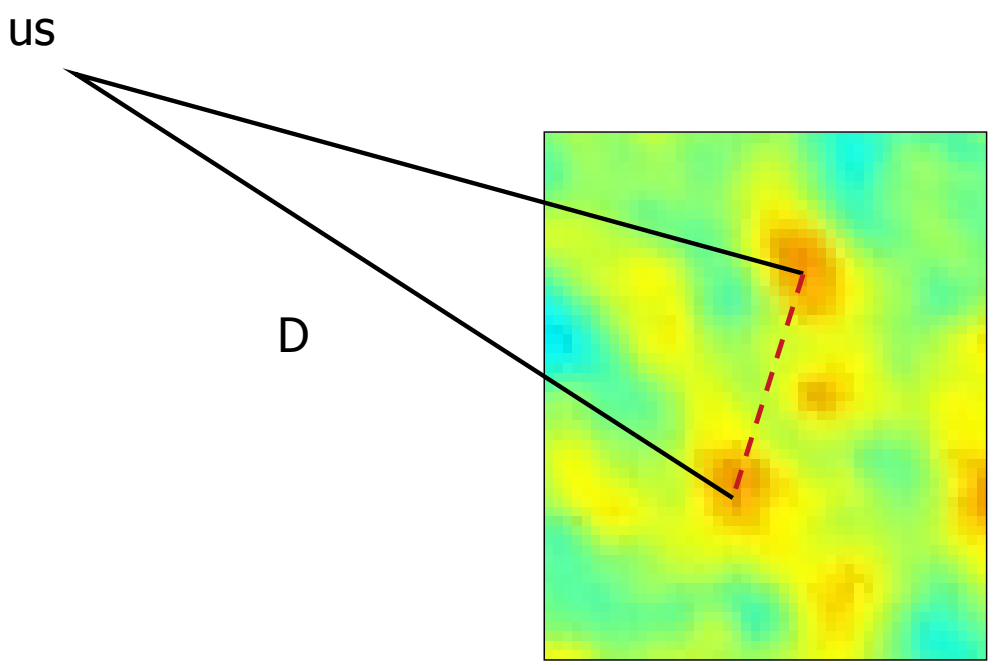
Det vannrette, brede båndet skyldes økt temperatur I retning av vår galakse, Melkeveien. De andre temperaturvariasjonene skyldes kvantefluktuasjoner I inflasjonsperioden i den første brøkdelen av et sekund av universets historie. Disse fluktuasjonene ble forstørret av gravitasjon og satte sitt avtrykk på bakgrunnsstrålingen da universet ble gjennomsiktig omtrent 400.000 år etter Big Bang.



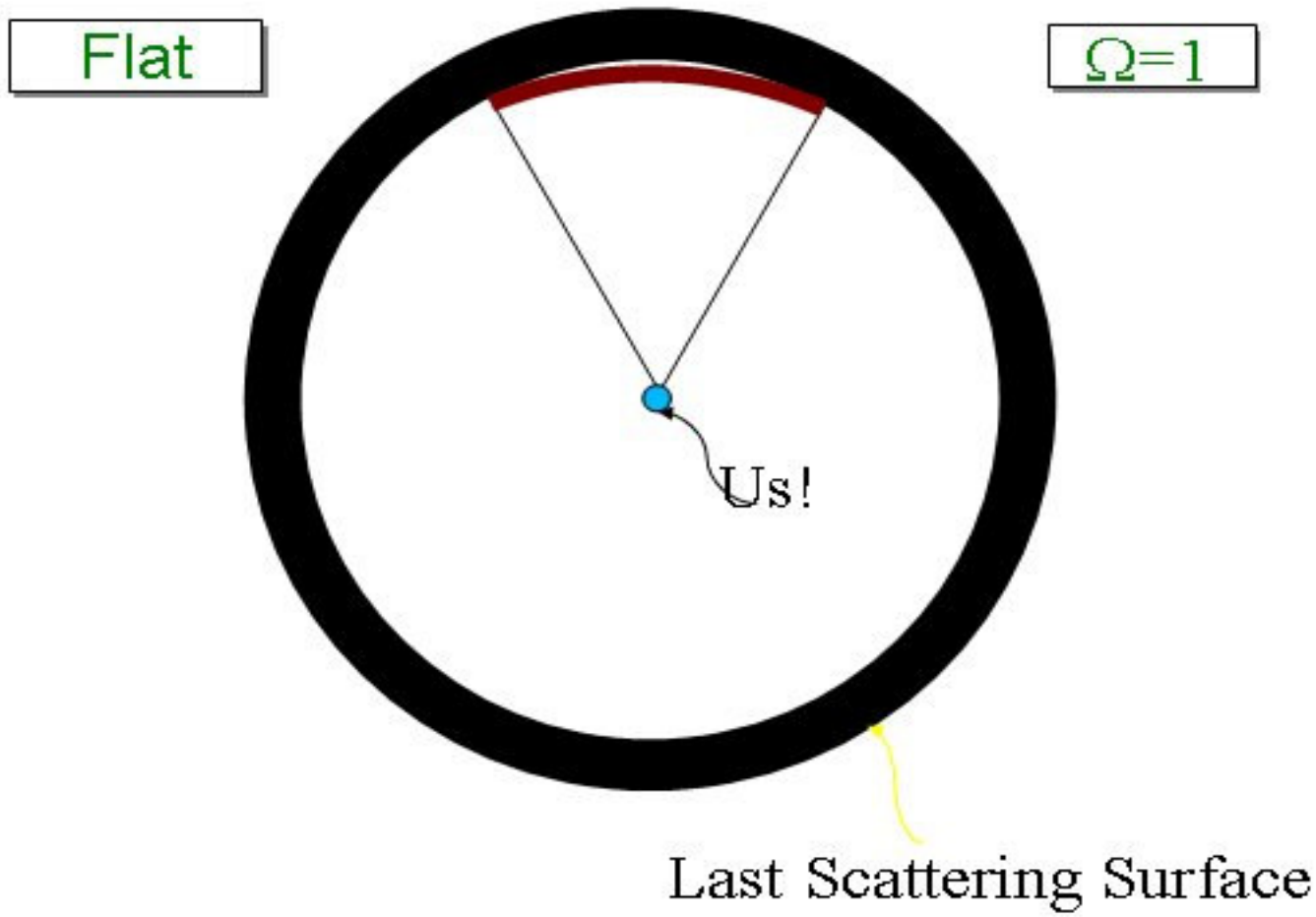

Cosmic Spheres of Time
© 2006 Abrams and Primack, Inc.

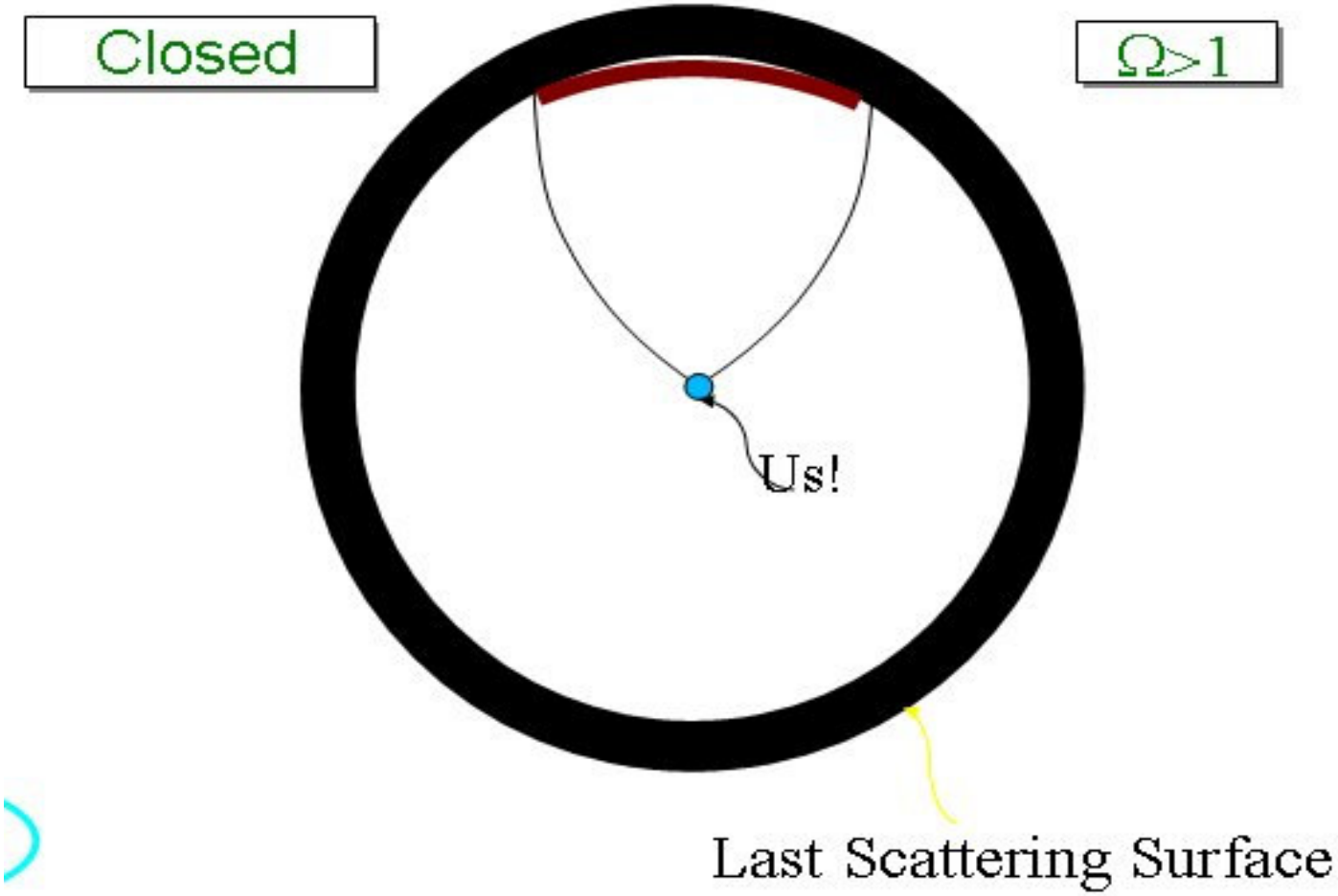
Kosmisk triangulering

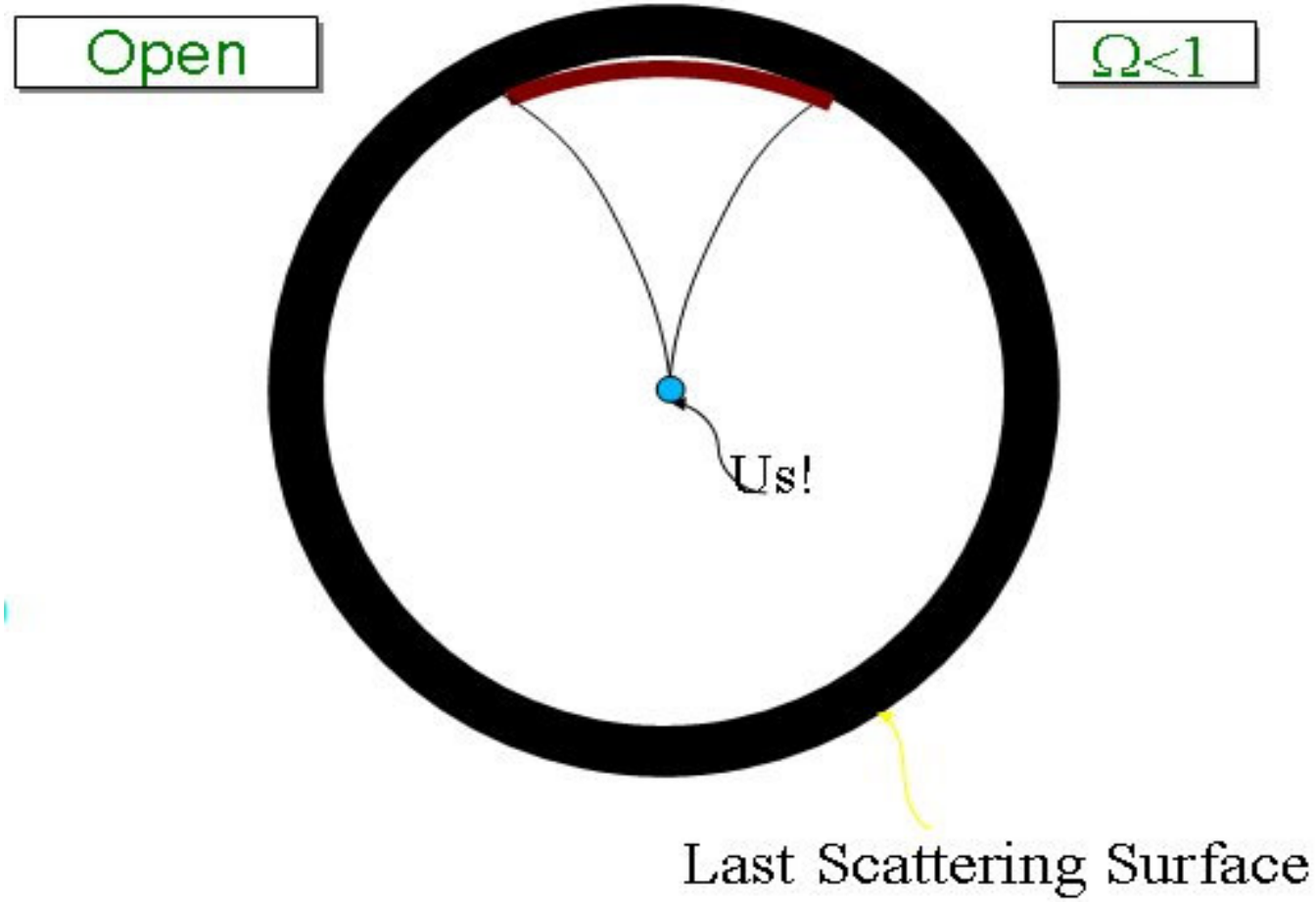




Avstanden, s, mellom to temperaturminima er lik bølgehastigheten i de akustiske svingningene i det kosmiske plasmaet ganger 400 000 år.
Hastigheten kan beregnes, og dermed er s kjent.
På 13,7 milliarder lysårs avstand
vil s utspenne en vinkel på omtrent en grad i et flatt univers.

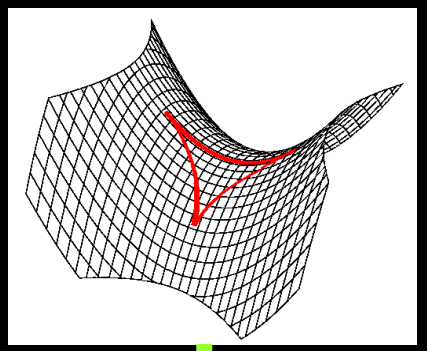

Flat
Ω=1
Us!
Last Scattering Surface


Closed
Ω>1
Us!
Last Scattering Surface

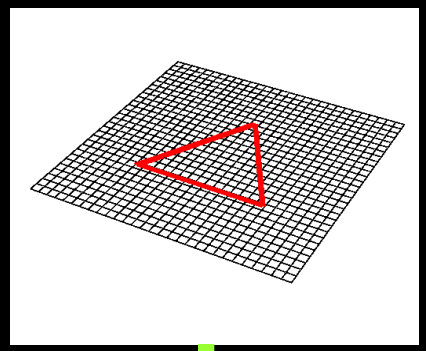

Open
Ω<1
Us!
Last Scattering Surface

UNIVERSETS GEOMETRI KAN MÅLES FRA BAGGRUNDSSTRÅLINGEN

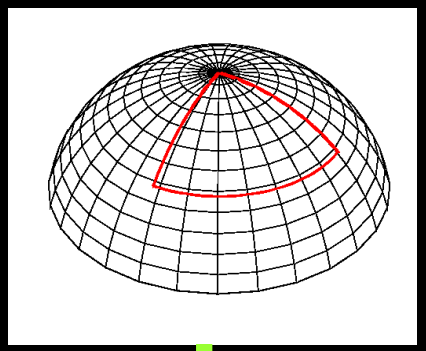
Åbent univers
$\Omega<1$

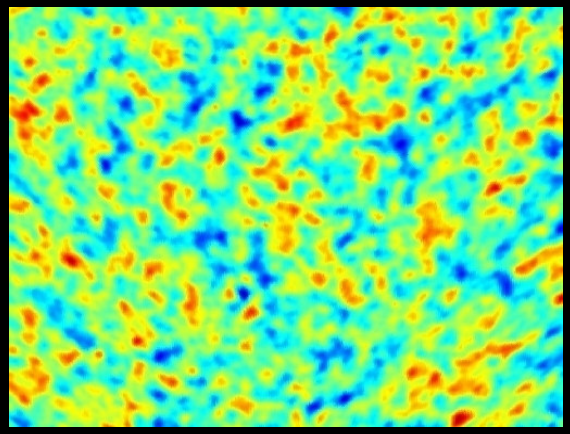


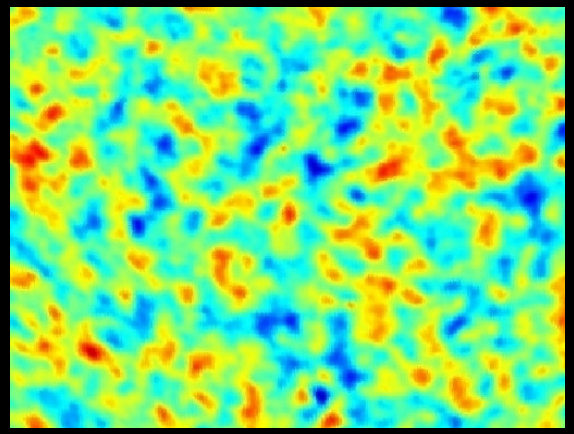
Fladt univers
$\Omega=1$

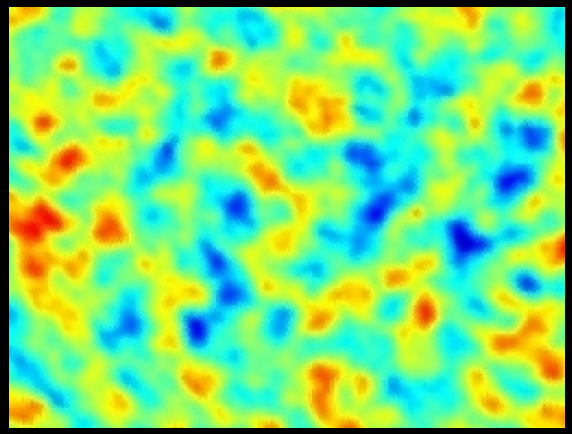


Lukket univers
$\Omega>1$

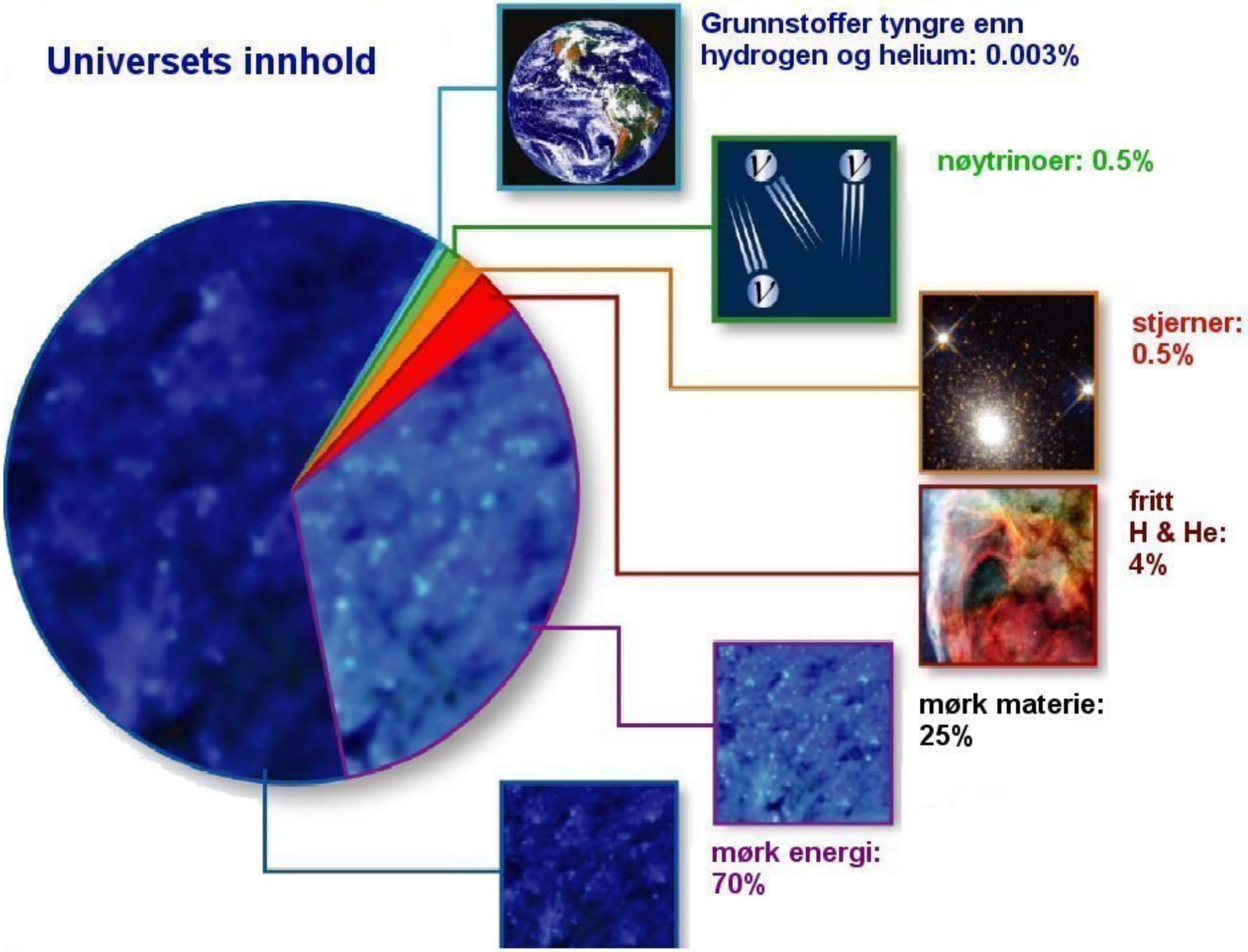


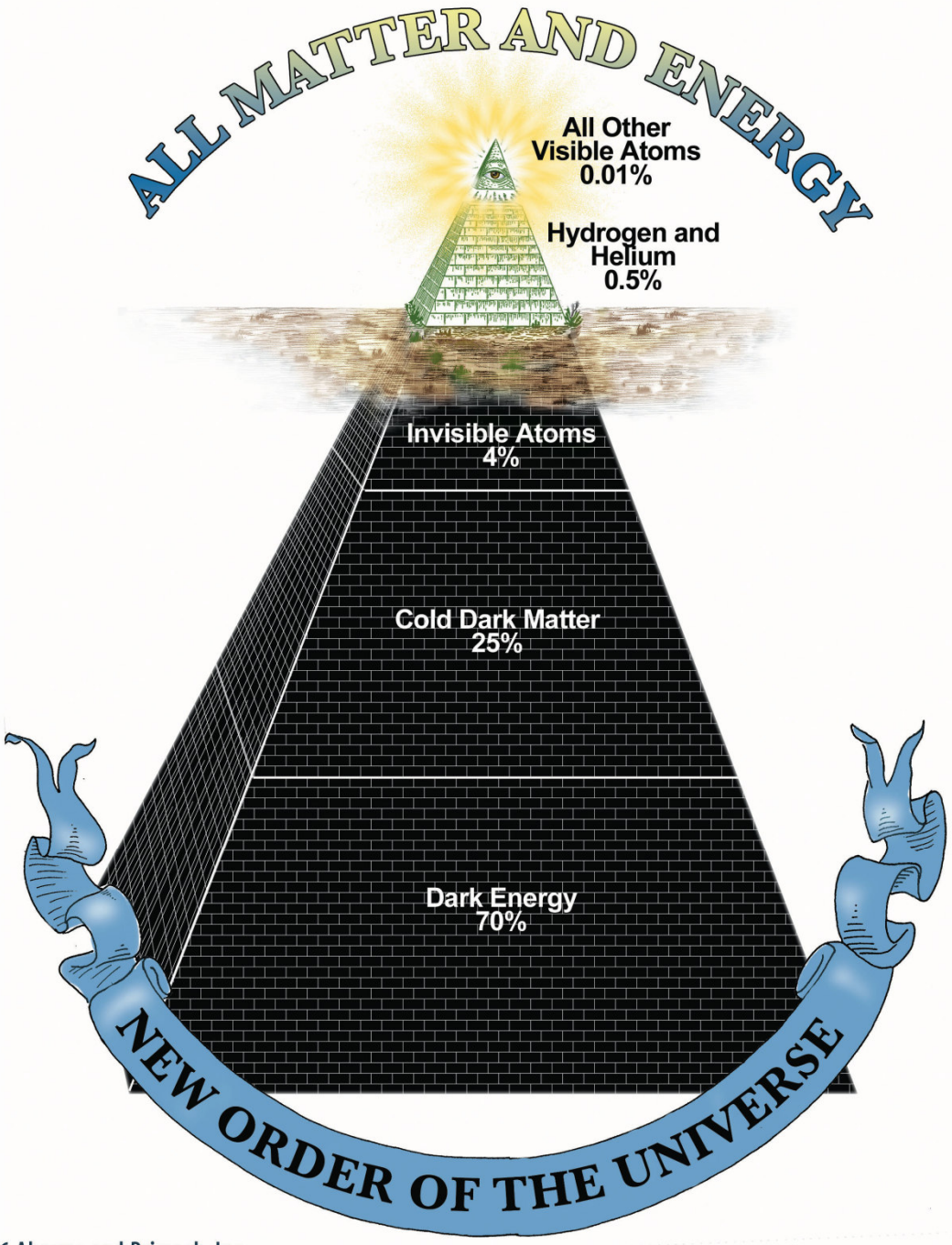






Universets innhold





© 2006 Abrams and Primack, Inc