Universets mørke energi

Nye observasjoner kaster lys over den mørke energiens natur

Øyvind G. Grøn

TAF-Tekna-Nito
Trondheim 16.10.2025

Mørk energi?
Hvorfor snakker vi om det?

Mørk energi er en type energi som trengs for å forklare to observerte egenskaper ved universet:

1. Først retardert, så akselerert kosmisk ekspansjon: De siste 6 milliarder årene har den kosmiske ekspansjonen økt farten.

2. At målinger av temperaturfluktuasjoner har vist at rommet har vanlig euklidsk geometri. Det innebærer at *summen av innholdet i universet har kritisk tetthet*, gitt ved Hubbles konstant.

Hvordan vet vi at den kosmiske ekspansjonen har økt farten de siste 6 milliarder årene?

Kosmisk rødforskyvning

Det er omtrent hundre år siden astronomene oppdaget at universet ekspanderer.

I 1920-årene målte Edwin Hubble og medarbeidere rødforskyvningen til lys fra fjerne objekter og avstanden til objektene.

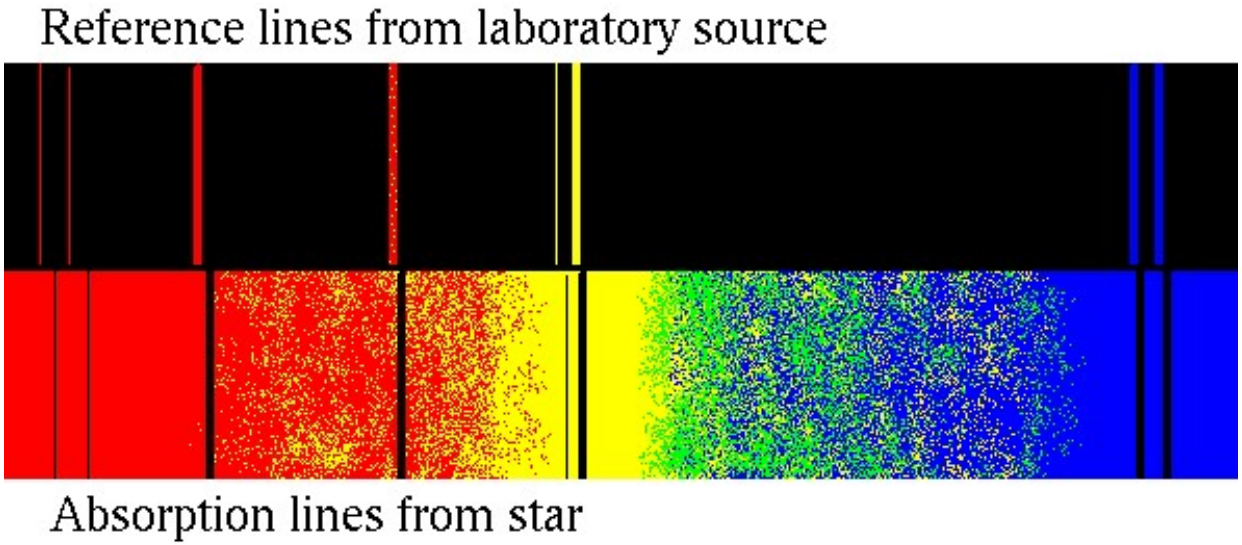
Rødforskyvningen er definert som økningen av strålingens bølgelengde på reisen fra kilde til observatør delt på bølgelengden til den utsendte strålingen.

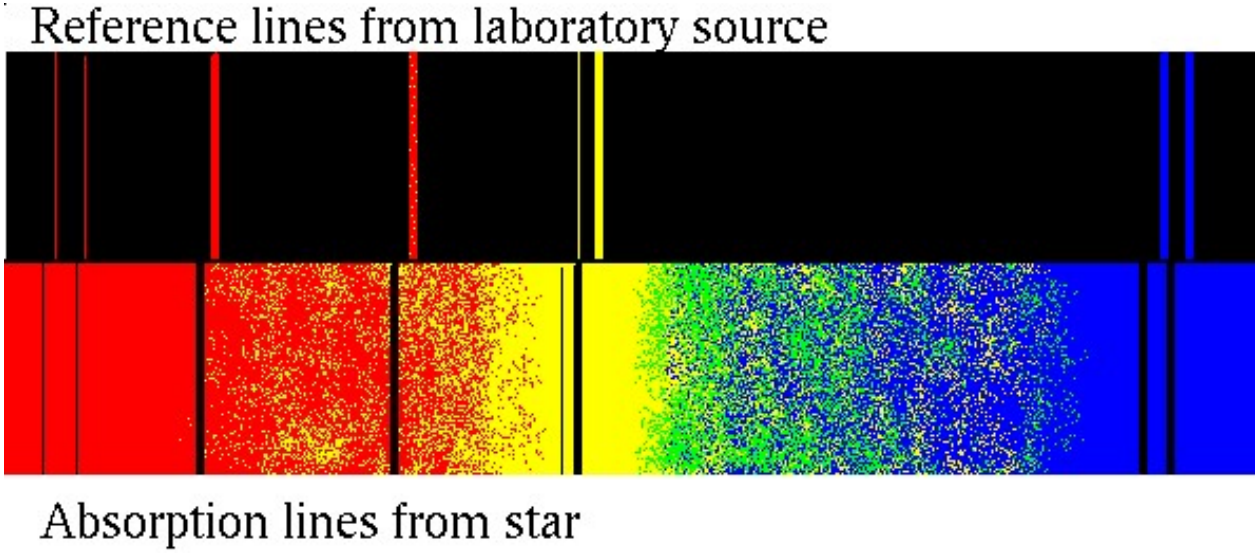
$$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obsv}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

Rødforskyvningen ble målt ved å måle forskyvningen av spektrallinjer fra blant annet hydrogen i spekteret til strålingen fra fjerne objekter.

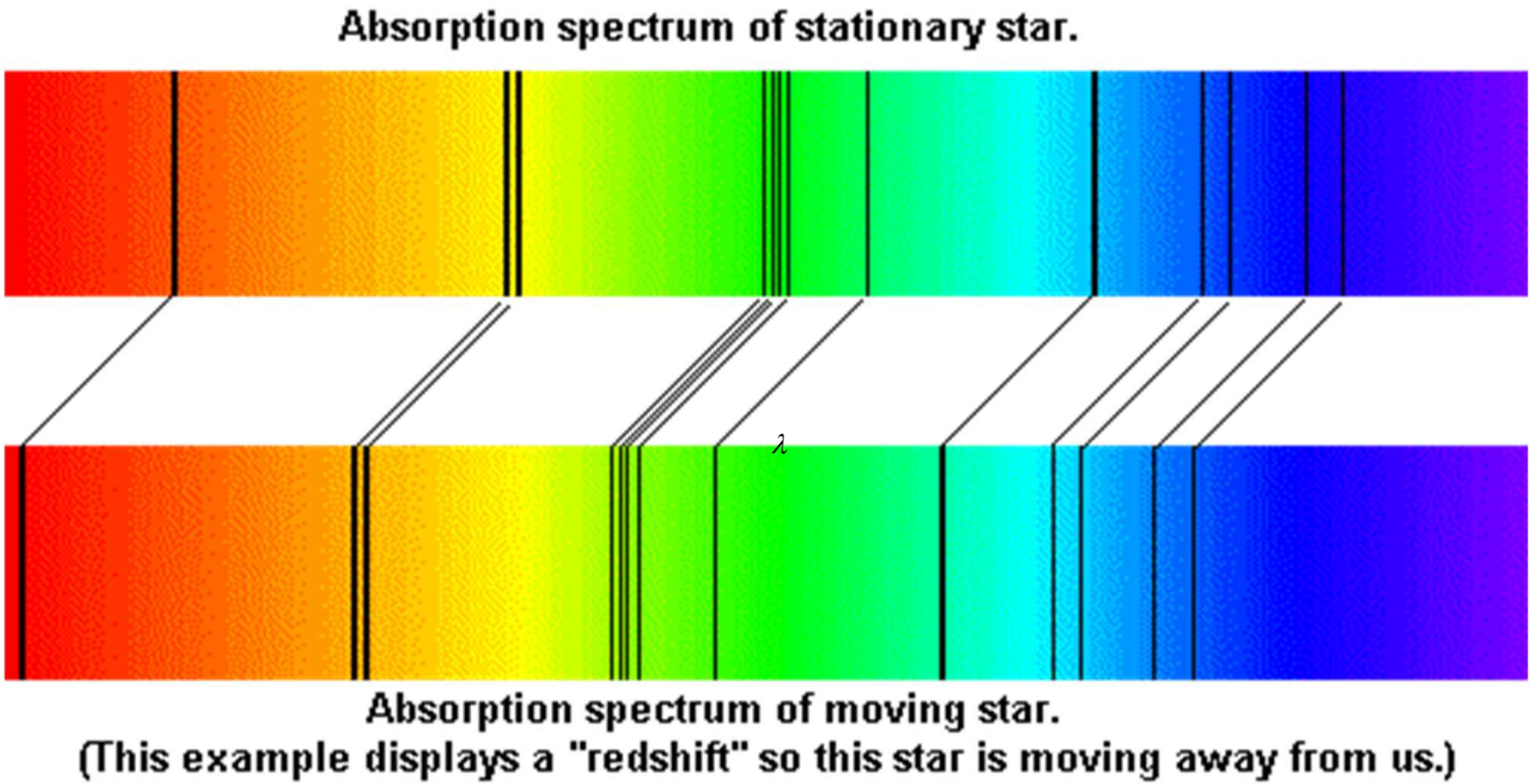
Spektrallinjene forskyves mot blått lys når kilden beveger seg mot observatøren





Spektrallinjene forskyves mot rødt når kilden beveger seg vekk fra observatøren.

Kosmisk rødforskyvning



$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$$, λ_0 = observert bølgelengde

λ = utsendt bølgelengde

Ikke-relativistisk tolkning av rødforskyvning

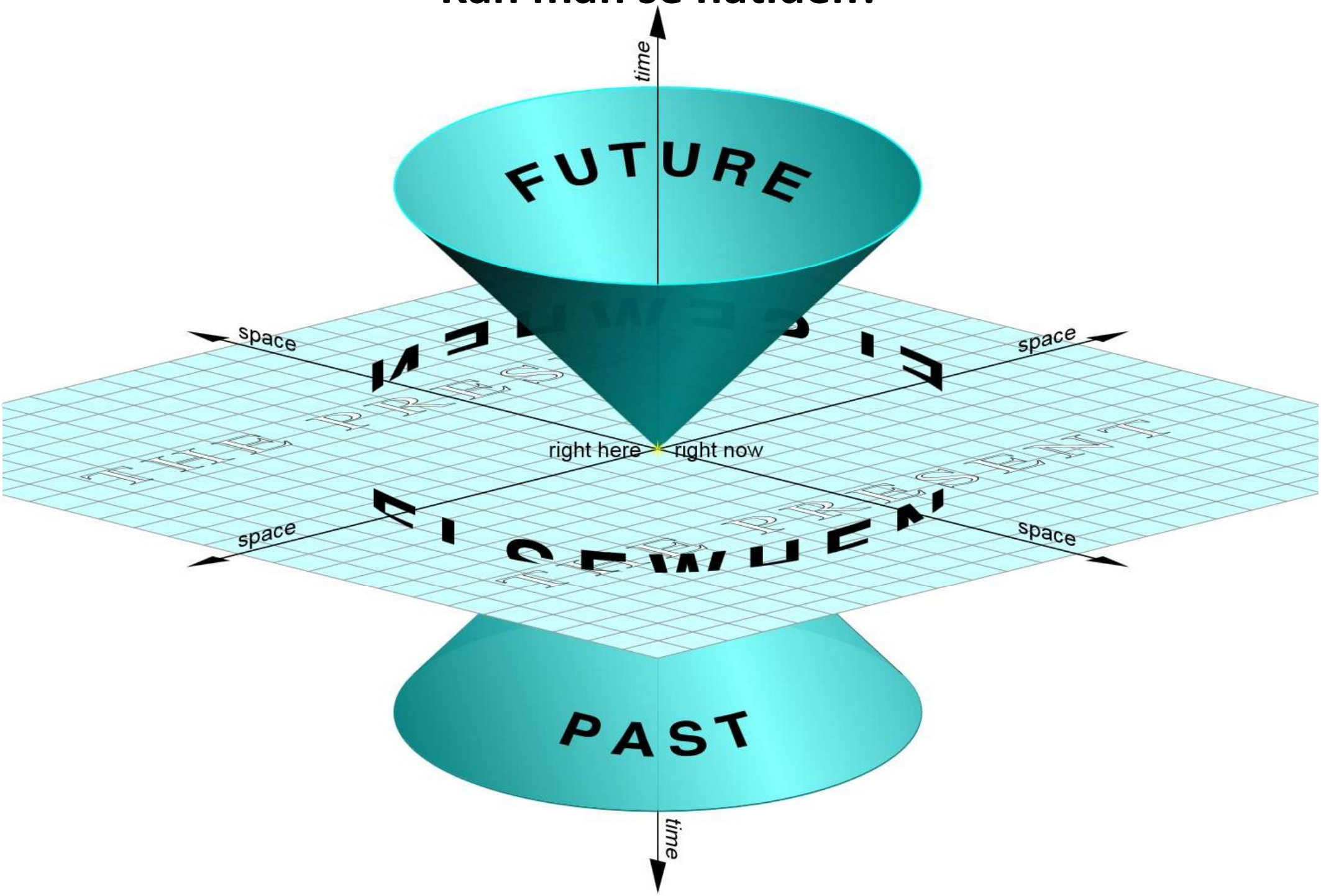
I ikke-relativistisk fysikk tolkes rødforskyvningen
av spektrallinjer i stråling sendt ut fra et objekt
som beveger seg vekk fra en observatør,
som en *dopplereffekt*:

Når en strålingskilde beveger seg vekk fra en observatør,
observeres en større avstand mellom de utsendte bølgetoppene
enn om kilden er i ro.

Følgelig observeres større bølgelengde
jo raskere kilden beveger seg vekk fra observatøren.

I den ikke-relativistiske tolkningen dreier Hubbles lov seg om
hvor fort fjerne objekter beveger seg *gjennom* rommet.

Kan man se nåtiden?



Hubbles prosjekt –
Å bestemme hvordan galaksenes hastighet langs synslinjen avhenger av deres avstand fra oss.

I 1920-årene var galakser blitt identifisert
som store ansamlinger av stjerner.

Hubble ønsket å vite om det var noen sammenheng mellom galaksenes hastighet langs synslinjen og deres avstand fra oss.

Han brukte rødforskyvningen tolket som en dopplereffekt
til å bestemme hastighetene.

Det var vanskeligere å måle avstandene til objektene.
Det ble opprettet en «kosmisk avstandsstige»
der blant annet kefeidestjerner ble brukt.
Usikkerhetene i avstandsmålingene var store,
og det var også systematiske feil knyttet til Kefeidestjernene.

Farten til fjerne objekter bestemt ved å måle rødforskyvning

Målinger av rødforskyvning og avstand til fjerne objekter
ble utført i 1920-årene av Hubble og Humason.
Målingene viste at rødforskyvningen økte med avstanden.

Rødforskyvningen ble tolket av Hubble som en dopplereffekt –
jo raskere en lyskilde beveger seg vekk fra observatøren,
desto større er rødforskyvningen.

Dermed kunne han bruke den målte rødforskyvningen til å regne ut
lyskildens fart langs synslinjen i senderøyeblikket.

Hubbles lov

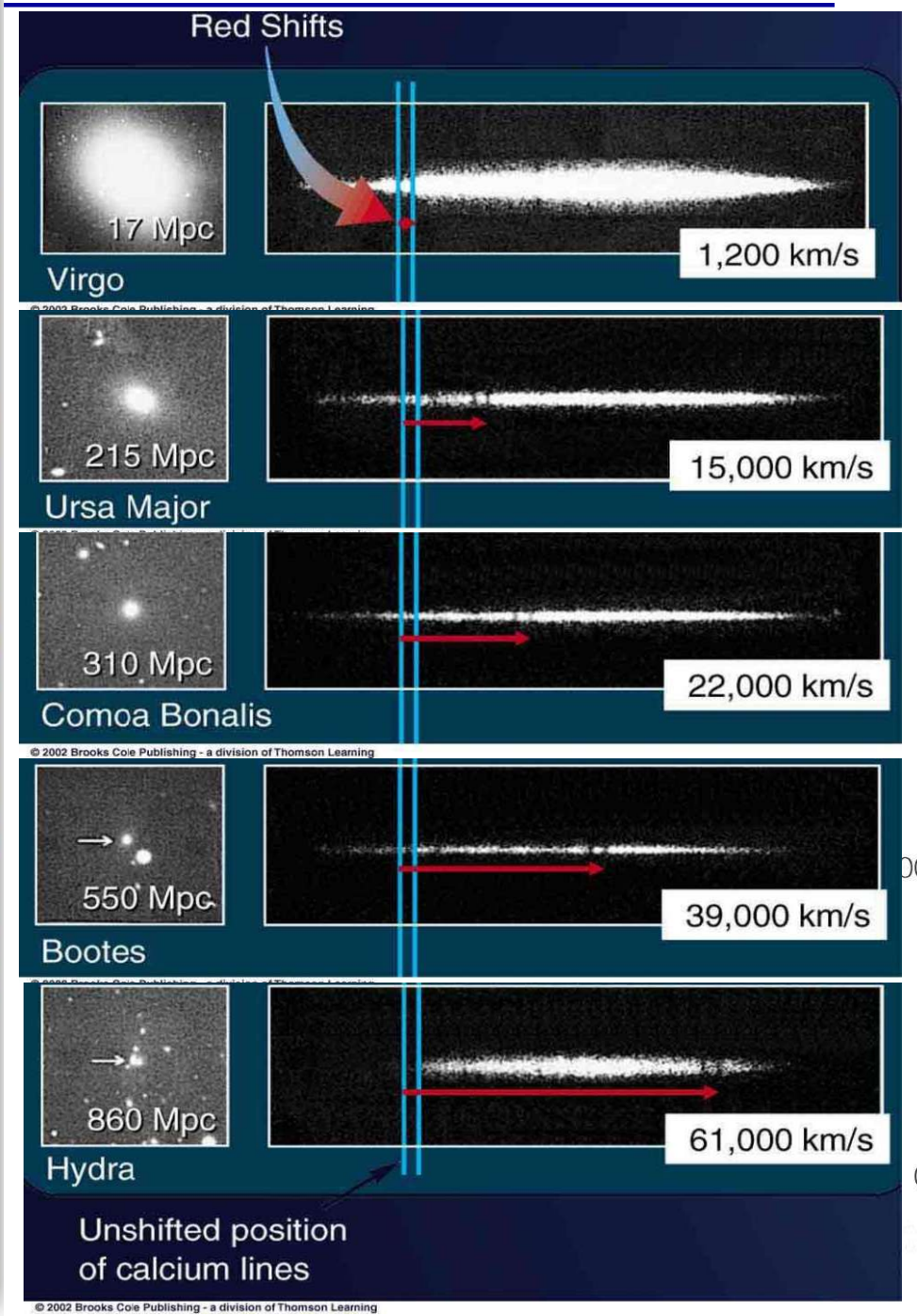
På denne måten fant Hubble og medarbeidere ut at farten, *v*, til et fjernt kosmisk objekt i forhold til en observatør, er proporsjonal med dets avstand, *D*, fra observatøren,

$$V = HD$$

der H kalles *Hubbleparameteren*.

Her er *v* hastigheten langs synslinjen til et kosmiske objekt ved det tidspunktet objektet sendte ut den observerte strålingen.

Hubble's Law

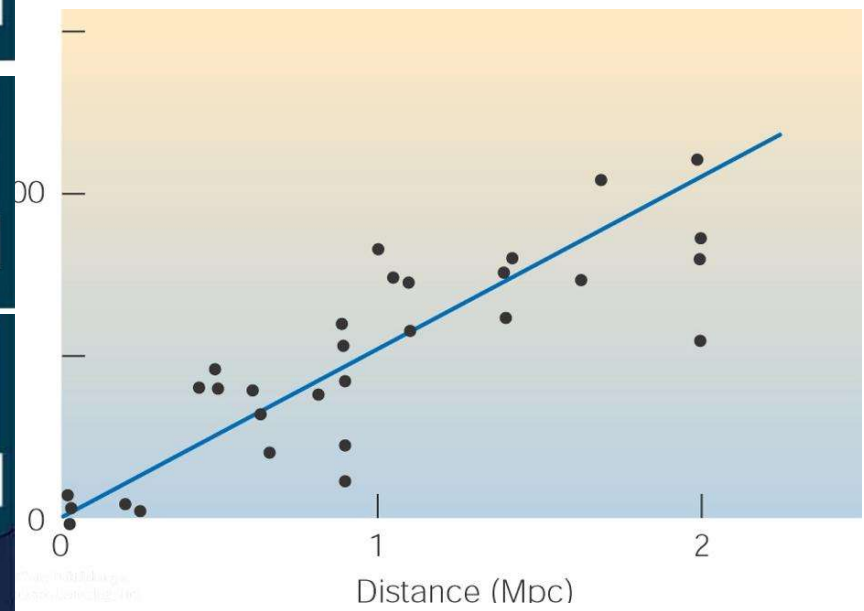


Galaksehopene fjerner seg fra oss med en hastighet, *v*, som er proporsjonal med deres avstand, *d*, fra oss,

$$v = Hd,$$

der *H* er Hubbleparameteren.

H forteller hvor raskt fjerne objekter beveger seg vekk fra en observatør ved det tidspunktet den observerte strålingen ble sendt ut.



Hubble–Lemaîtres lov

Ifølge den generelle relativitetsteorien ble loven

$$V = HD$$

tolket som et uttrykk for at det er selve rommet som ekspanderer – **Universet ekspanderer**.

Den belgiske presten og kosmologen Georges Lemaître var den første som argumenterte for dette.

Den internasjonale astronomiske union, IAU, vedtok derfor i 2018 at sammenhengen

$$V = HD$$

skulle kalles Hubble–Lemaîtres lov.

Astronomenes beskrivelse av universets ekspansjon

Universets ekspansjon omtales ofte som «**the Hubble flow**».
Dette beskriver astronomene matematisk
ved å innføre en *avstandsfaktor* a.
Den er definert som forholdet mellom avstanden, D,
mellom to objekter som følger the Hubble flow,
ved et vilkårlig tidspunkt,
og deres nåværende avstand, D_0 ;

Avstand da delt på avstand nå:

$$a = \frac{D}{D_0}$$

Den nåværende verdien av avstandsfaktoren er følgelig

$$a_0 = a\left(t_0\right) = 1$$

Relativistisk tolkning av den kosmiske rødforskyvningen

I den relativistiske beskrivelsen av universet
tolkes rødforskyvningen slik at ekspansjonen av rommet
når strålingen beveger seg fra sender til observatør,
strekker ut bølgene.
Med denne tolkningen fås

$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emit}} = \frac{a_0}{a} = \frac{1}{a} = 1 + z.$$

Ved å løse den siste likheten med hensyn på *z* fås:

$$z = \frac{1}{a} - 1\,.$$

Dette uttrykket for *z* sier at
den kosmiske rødforskyvningen er en ekspansjonseffekt

Hubbleparameteren

Fra Hubble–Lemaîtres lov følger at
Hubbleparameteren er lik hastigheten til et fjernt kosmisk objekt,
på grunn av universets ekspansjon, delt på dets avstand,

$$H = \frac{V}{D}.$$

Det betyr at i et univers med konstant ekspansjonshastighet
vil Hubbleparameteren avta siden avstanden øker med tiden.

Milnes univers – et tomt univers

La oss se på et enklest mulig univers – et tomt univers.

I et tomt univers er det ingen gravitasjon,
og ekspansjonsfarten er konstant.

Med null begynnelsesavstand er da avstand lik fart ganger tid,

$$D = V_0 t \ .$$

og Hubbleparameteren er

$$H = \frac{V_0}{D} = \frac{V_0}{V_0 t} = \frac{1}{t} \ .$$

Vi ser her hvordan Hubbleparameteren avtar med tiden
i et univers med konstant ekspansjonsfart.
Dette er vist grafisk på neste lysbilde.

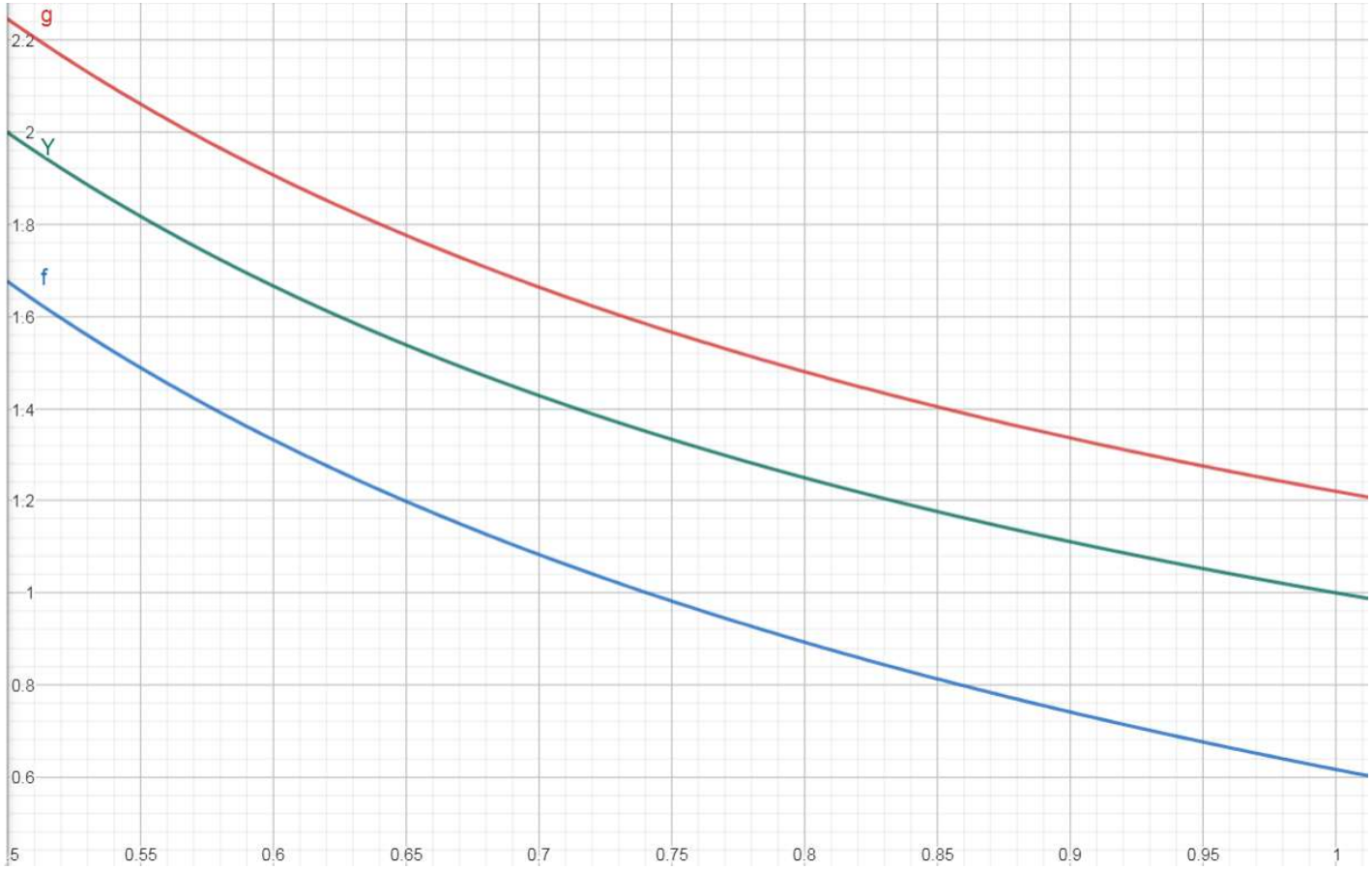
Hubbleparameteren som funksjon av tiden er plottet for de tre tilfellene retardert ekspansjon (blå), konstant ekspansjonshastighet (grønn) og akselerert ekspansjon (rød) i figuren nedenfor. Målingene av Hubbleparameterens tidsvariasjon viste at den røde kurven passet best med observasjonene.

Det viser at universet er i en tilstand av akselerert ekspansjon.

$$Y(x) = \frac{1}{x} \quad , x = \frac{t}{t_0}$$

$$f: y = \frac{1 - 0.55\,x}{1 - 0.27\,x} \cdot \frac{1}{x}$$

$$g: y = \frac{1 + 0.55\,x}{1 + 0.27\,x} \cdot \frac{1}{x}$$



Tallene på y-aksen representerer universets alder ganger Hubble-parameteren $t_0 H$.
Tallene på x-aksen representerer tid i forhold til universets alder.

Nye kosmiske avstandsmålinger

I målinger utført i 1990-årene
ble avstandene til de fjerneste objektene funnet ved å observere
lysstyrken til supernovaer av type Ia
som er eksploderende hvite dvergstjerner.

Alle slike supernovaer lyser omtrent like sterkt.
Deres luminositet ble bestemt ved å observere supernovaer
som befant seg i galakser med kjent avstand fra solsystemet.

Så ved å observere lysstyrken og bruke at
den observerte lysstyrken
avtar omvendt proporsjonalt med avstanden til objektet,
den blir en fjerdedel når avstanden dobles,
kunne astronomene bestemme
avstandene til de eksploderende stjernene.

Oppdagelsen av at universets ekspansjon øker farten

Oppdagelsen av at universets ekspansjon er akselerert ble gjort i 1998 av to grupper av astronomer som arbeidet uavhengig av hverandre:
En i USA under ledelse av Paul Saulmutter
med Adam Riess som viktig medarbeider,
og en i Australia under ledelse av Brian Schmidt.

Nobel Prize in Physics 2011

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

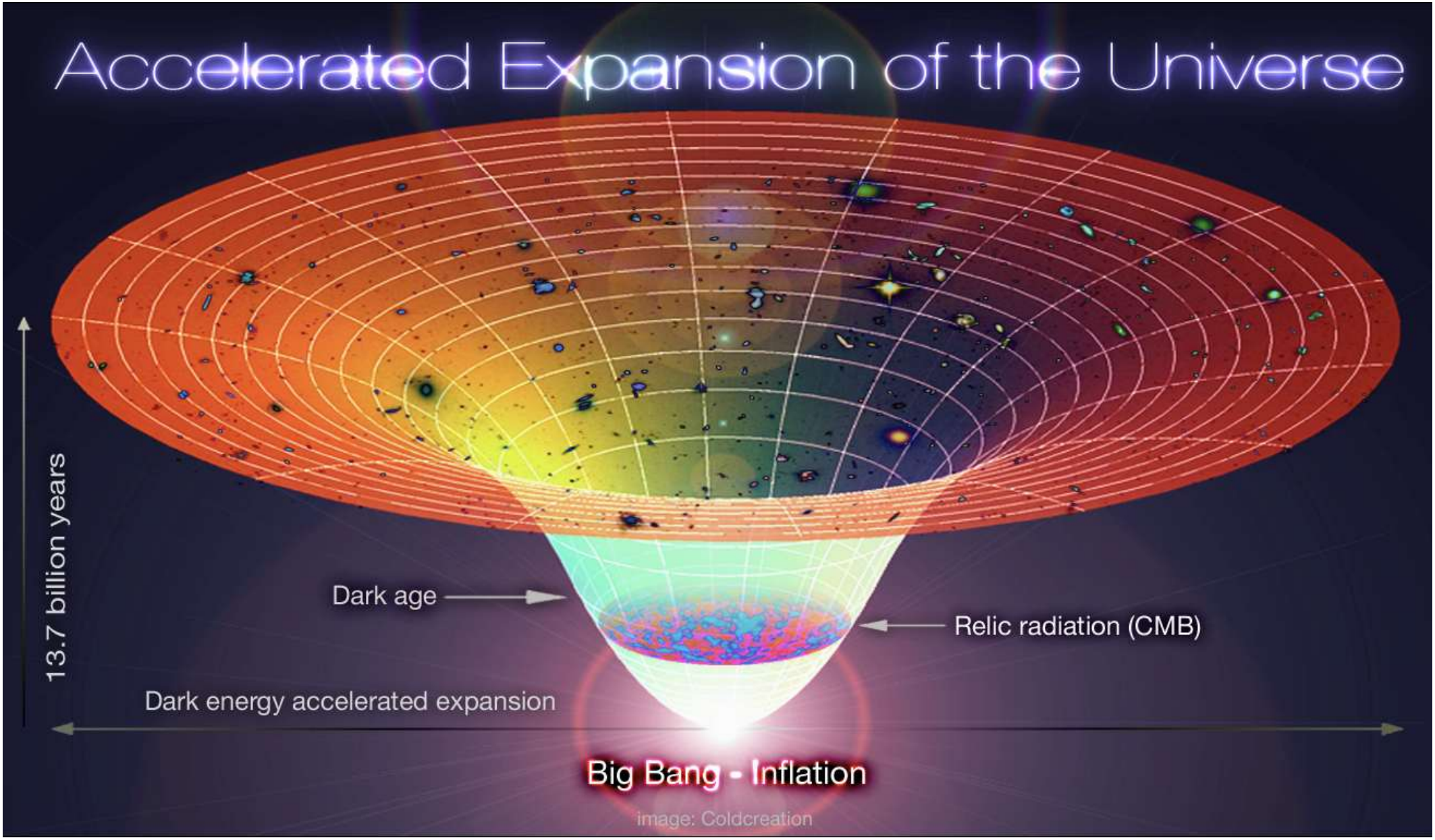
Saul Perlmutter

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

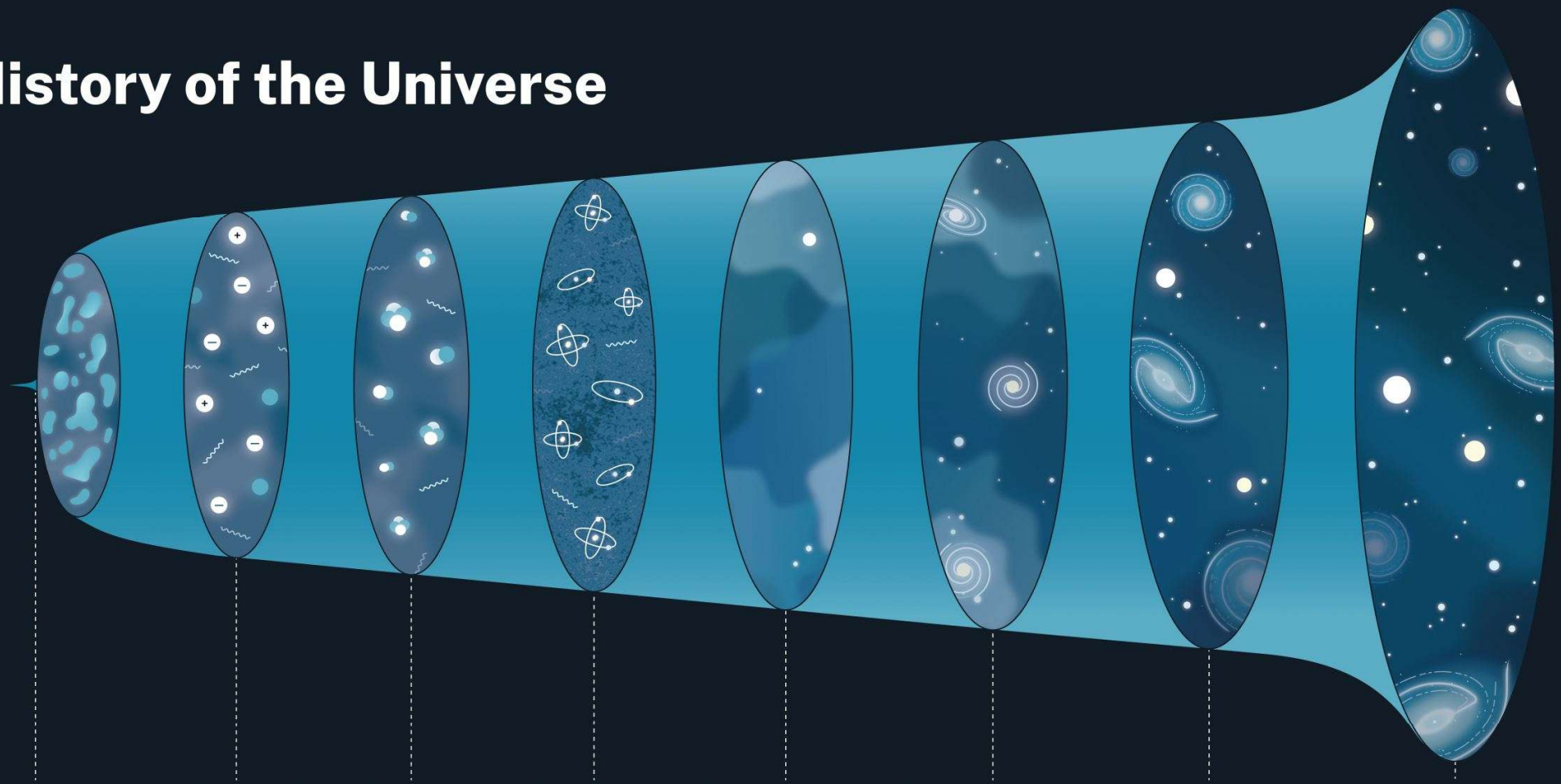
Brian P. Schmidt

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Adam G. Riess


Accelerated Expansion of the Universe
13.7 billion years
Dark age
Relic radiation (CMB)
Dark energy accelerated expansion
Big Bang - Inflation
image: Coldcreation

History of the Universe



10^{-32} seconds	1 microsecond	3 minutes	380,000 years	200 million years	400 million years	10 billion years	13.8 billion years
Inflation	**First Particles**	**First Nuclei**	**First Light**	**First Stars**	**Galaxies & Dark Matter**	**Dark Energy**	**Today**
Initial expansion	Neutrons, protons, and electrons form	Helium and hydrogen form	The first atoms form	Gas and dust condense into stars	Galaxies form in dark matter cradles	Expansion accelerates	Humans observe the universe

Argument 1 for at universet inneholder mørk energi

Materie og stråling forårsaker tiltrekkende gravitasjon som gjør at den kosmiske ekspansjonen bremses ned.

Så hvordan kan fartsøkningen til den kosmiske ekspansjonen forklares?

Kosmologene har kun en forklaring: frastøtende gravitasjon.
(Tittelen på min doktoravhandling fra 1988 var: Repulsive gravitation.)

Hva forårsaker frastøtende gravitasjon?

Svaret ble gitt av den belgiske presten og kosmologen
Georges Lemaitre i 1935.

I svaret inngår den kosmologiske konstanten, Λ,
Så vi må først gjøre oss kjent med Λ.

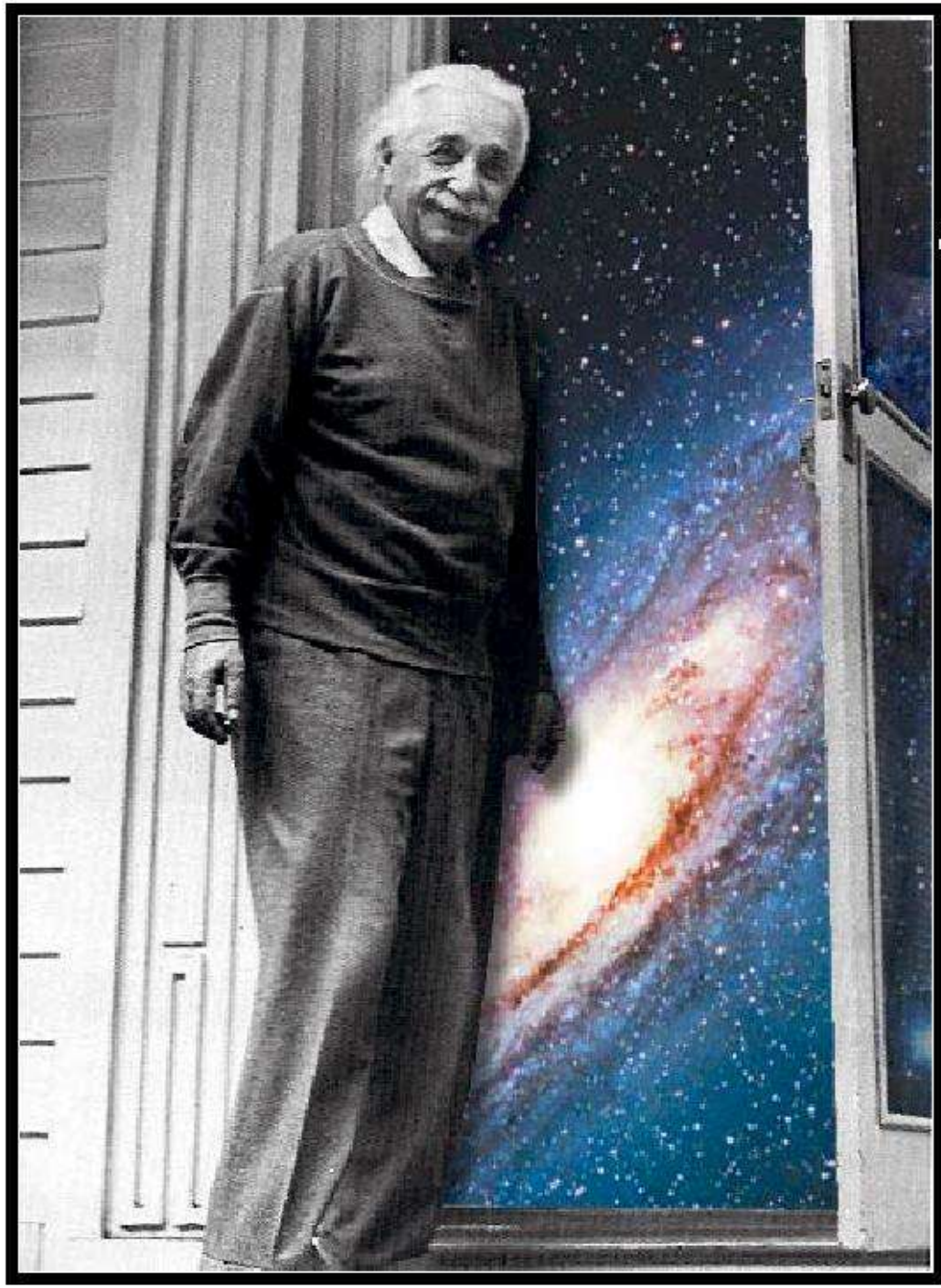
Den kosmologiske konstanten

I 1918 presenterte Einstein den første relativistiske universmodellen.

Han oppdaget at i utgangspunktet fantes det ikke noen statisk universmodell. Et univers som opprinnelig var statisk, ville falle sammen på grunn av tiltrekkende gravitasjon.
Da antok Einstein at rommet har en iboende tendens til å ekspandere, og beskrev dette matematisk ved å innføre en såkalt kosmologisk konstant, Λ, i gravitasjonslikningene.

Men omkring 1930 ble det oppdaget at universet ekspanderer, og den kosmologiske konstanten ble overflødig.

Einstein innså at han burde sagt:
Relativitetsteorien forutsier at universet ekspanderer,
i stedet for å innføre den kosmologiske konstanten.
Han omtalte denne innføringen som sitt livs største tabbe.



Einstein's Biggest Blunder?

1917 Einstein proposes cosmological constant

1929 Hubble discovers Expansion of the universe

1934 Einstein calls it "my biggest blunder"

1998 Astronomers find evidence for it

Vakuumenergi og kosmologisk konstant

I et arbeid publisert i 1935 presenterte den belgiske kosmologen
Georges Lemaître et interessant resonnement.
Han tok utgangspunkt i at kvanteteorien forutsier
eksistensen av en vakuumenergi som det ikke går an å fjerne.
Dersom denne vakuumenergien oppfattes som et medium i ro,
og det er mulig å måle farten gjennom vakuumenergien,
ville man kunne innføre en absolutt hastighet i fysikken,
farten gjennom vakuumenergien.
Ifølge Lemaître ville dette være i konflikt med relativitetsprinsippet.
Lemaître skrev derfor at siden universet ifølge kvanteteorien er fylt
av den kvantemekaniske vakuumenergien,
må egenskapene til denne energien være slik
at det ikke går an å måle hastighet i forhold til den;
det må være en såkalt Lorentz-Invariant VakuumEnergi (LIVE).

Fysisk tolkning av den kosmologiske konstanten

Lemaître viste mer:
Han viste at tettheten av LIVE holder seg kontant
under universets ekspansjon,
og at tettheten av LIVE derfor kan representeres
ved den kosmologiske konstanten i Einsteins gravitasjonslikninger.

Dette er fortsatt den allment aksepterte fysiske tolkningen av den kosmologiske konstanten:

Λ representerer den konstante tettheten av LIVE.

Vakuumenergi og frastøtende gravitasjon

Ifølge newtons gravitasjonsteori er gravitasjon alltid tiltrekkende.
Men Einsteins relativitetsteori åpner for noe nytt.

Relativitetsteorien sier at trykket for eksempel i en stjerne
bidrar til stjernens gravitasjon.

Dersom massetettheten er ρ og trykket er p, er den gravitasjonelle
massetettheten, det vil si den som forårsaker tyngdeakselerasjon,

$$\rho_G = \rho + 3p / c^2$$

Negativt trykk er det samme som strekk
og gir et frastøtende bidrag til gravitasjonen.

Lemaître viste at den kvantemekaniske vakuumenergien LIVE er i en er i en tilstand av ekstremt stort strekk,

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

Innsetting i likningen for den gravitasjonelle massetettheten gir

$$\rho_G = -2\rho$$

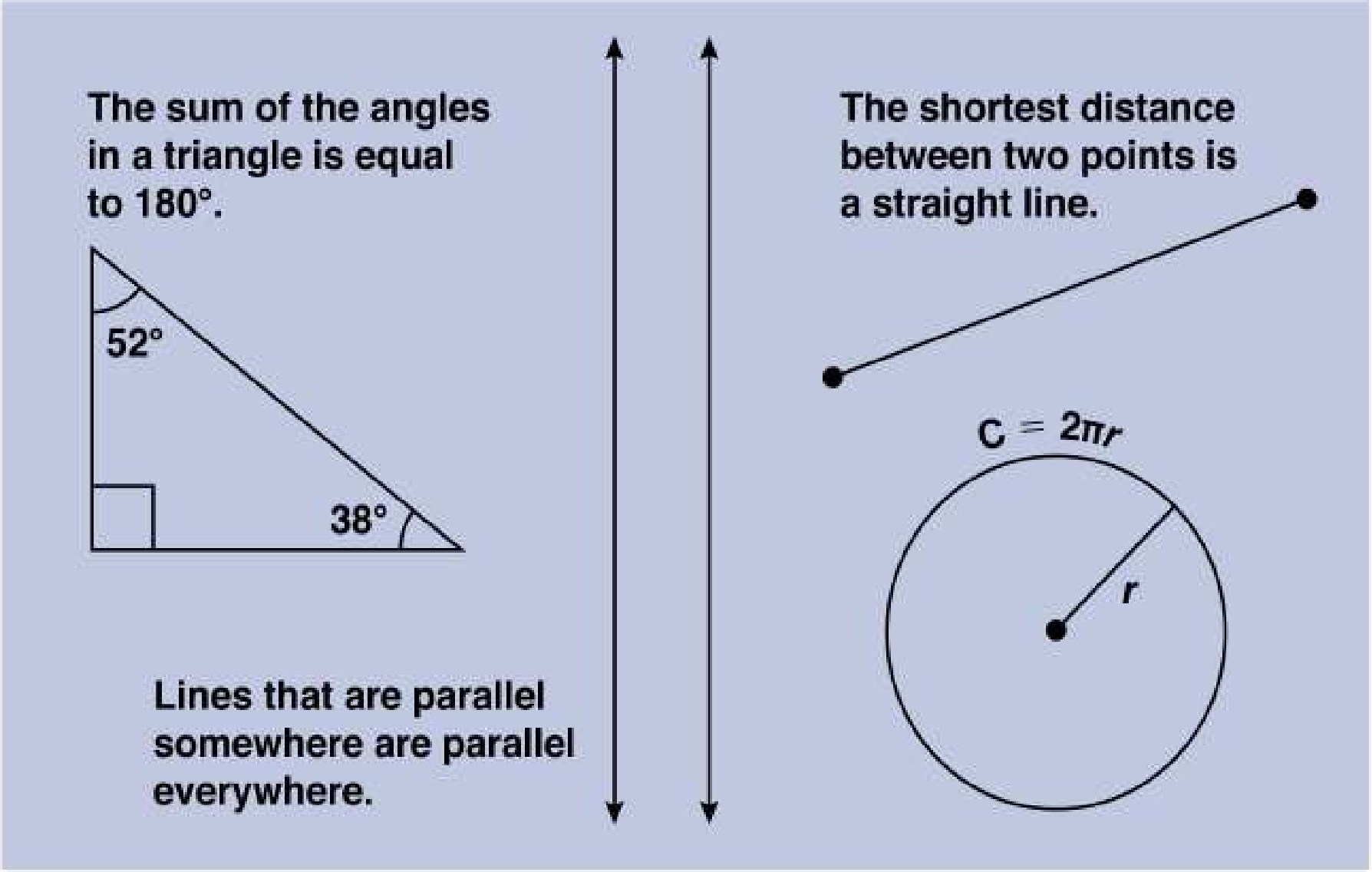
Siden den vanlige tettheten er positiv,
betyr dette at den kvantemekaniske vakuumenergien forårsaker frastøtende gravitasjon.

Hvis den mørke energien er av typen LIVE,
kan dette forklare universets akselererte ekspansjon.

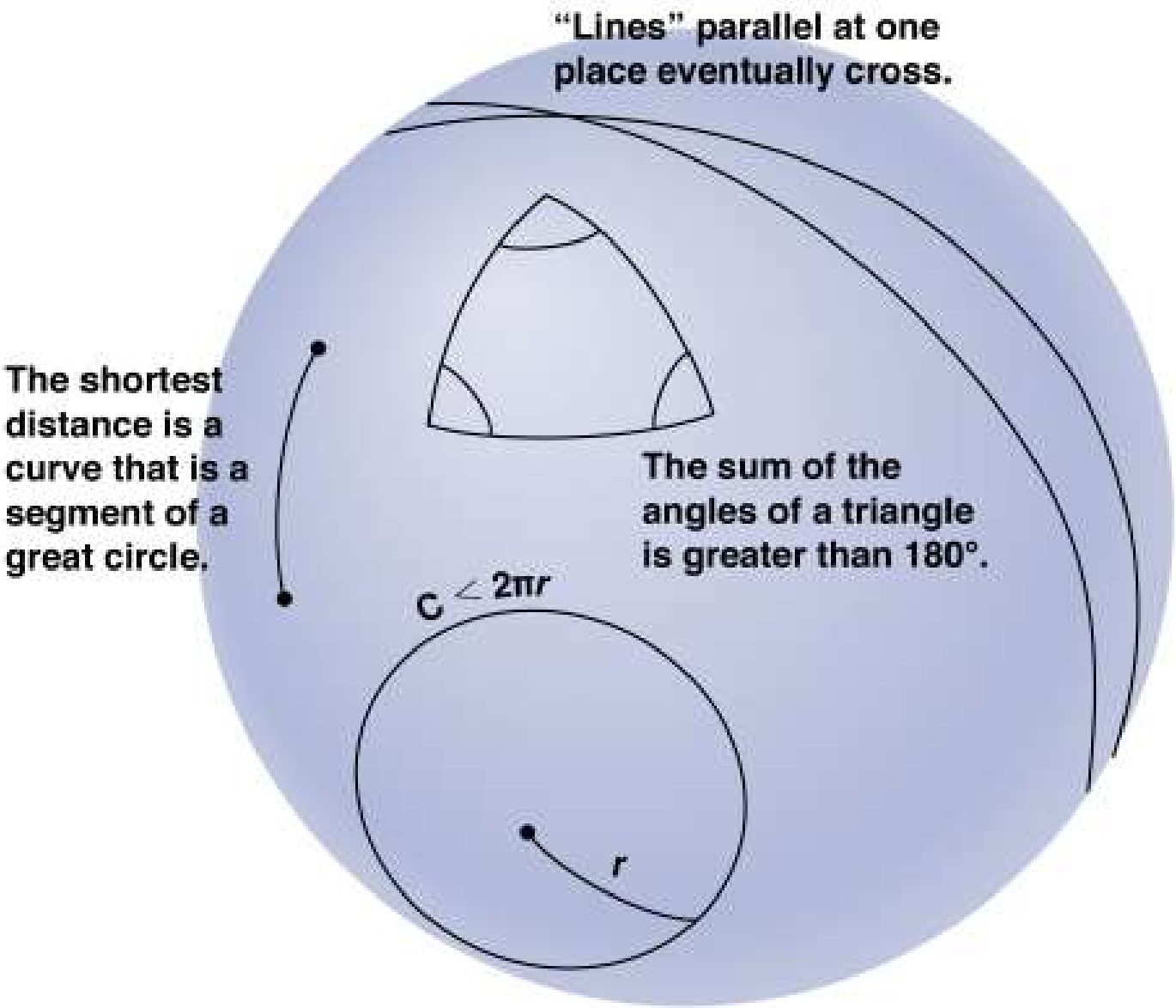
Dette er det første argumentet for at
det eksisterer store mengder mørk energi i universet.

Som en forberedelse til det andre argumentet for mørk energi skal vi først se på geometrien til krumme rom og flater.

Euklidsk geometri: geometri for plan og rom uten krumning

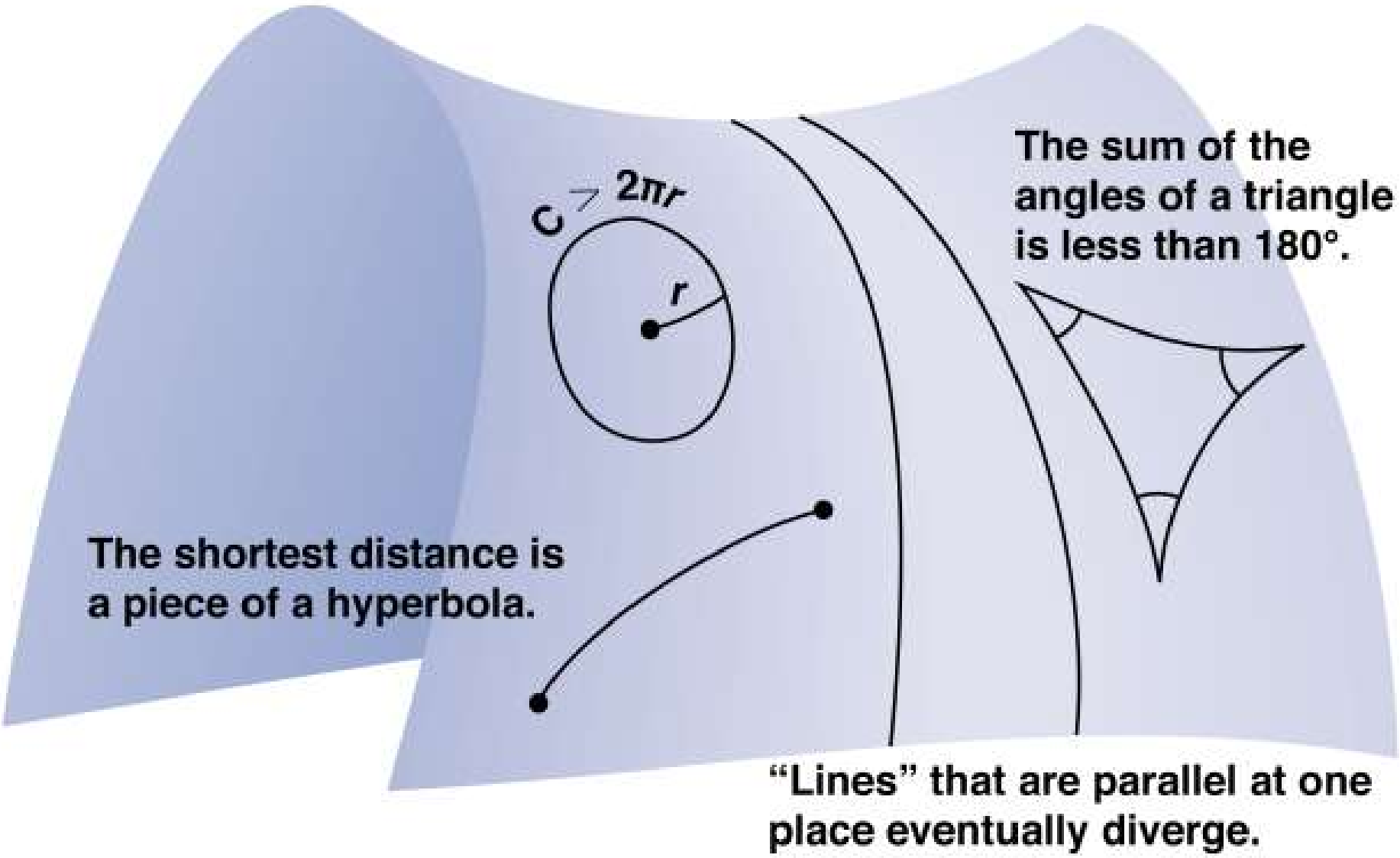


Riemannsk geometri: geometrien for krumme rom
Positiv krumning: sfærisk geometri



Copyright © Addison Wesley

Negativ krumning: hyperbolsk geometri



Copyright © Addison Wesley

Kritisk tetthet

Kritisk tetthet er tettheten i et univers med euklidsk romlig geometri.

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Innsetting for Hubbles konstant *H* og Newtons gravitasjonskonstant *G* gir

at universets kritiske tetthet er 10^{-26} kg/m^3.

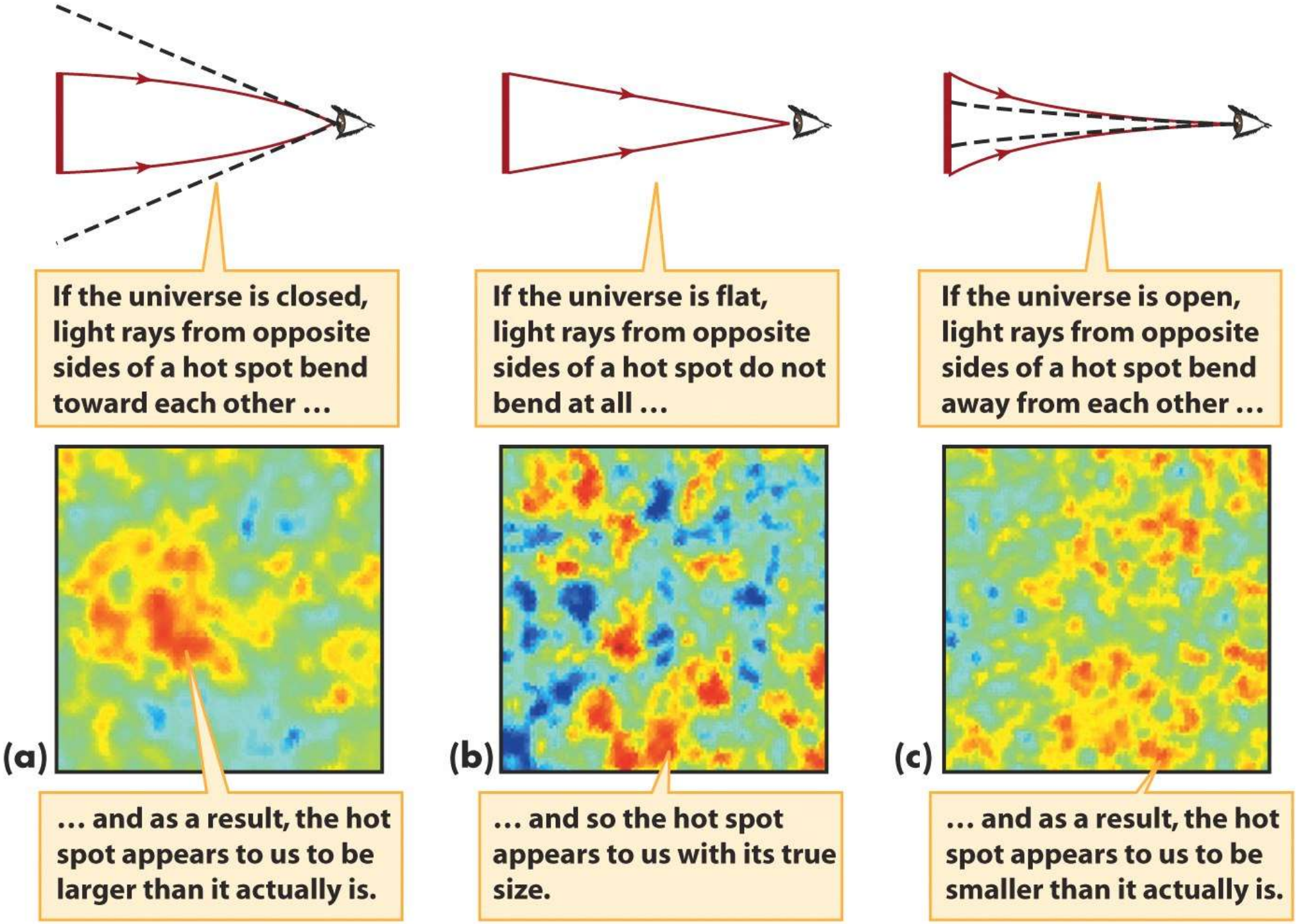
Det svarer til omtrent ti hydrogenatomer per kubikkmeter.

Sammenheng mellom universets innhold og den romlige geometrien

Hvis den gjennomsnittlige tettheten av alt universet inneholder av materie og energi er større enn den kritiske,
er den romlige geometrien sfærisk.
To-dimensjonalt svarer det til en kuleflate.
Krumningen er positiv. Dette universet er endelig.

Hvis tettheten er mindre enn den kritiske,
er den romlige geometrien hyperbolsk.
To-dimensjonalt svarer det til en sadelflate.
Krumningen er negativ. Et slikt univers er uendelig stort.

Hvis tettheten er lik den kritiske,
er den romlige geometrien euklidsk.
Null krumning.
Det svarer til et plan.
Det kalles et *flatt univers*.
Et flatt univers er uendelig stort.


If the universe is closed, light rays from opposite sides of a hot spot bend toward each other …
If the universe is flat, light rays from opposite sides of a hot spot do not bend at all …
If the universe is open, light rays from opposite sides of a hot spot bend away from each other …
(a)
(b)
(c)
… and as a result, the hot spot appears to us to be larger than it actually is.
… and so the hot spot appears to us with its true size.
… and as a result, the hot spot appears to us to be smaller than it actually is.

Argument 2 for at universet inneholder mørk energi

Målinger med Plancksatellitten av den gjennomsnittlige vinkelavstanden mellom temperaturmaksima og minima i temperaturfluktuasjonene til den kosmiske mikrobølge bakgrunnsstrålingen,
tyder på at den romlige geometrien i universet er euklidsk.
Tettheten er da kritisk.

Men den vanlige materien bare utgjør 5 % av den kritiske tettheten.

Og summen av vanlig og mørk materie utgjør bare 30 %.

Da gjenstår 70 %:

Kosmologene mener derfor at universet er fylt av mørk energi
som utgjør 70 % av innholdet i universet.

Mørk energi

Det finnes mange forslag til ulike typer mørk energi.
De fleste av dem har en ad hoc og spekulativ karakter.
Noen følger fra teorier som ennå ikke er bekreftet,
for eksempel supersymmetrisk strengteori.

Den best begrunnede er LIVE
som er en direkte konsekvens av kvanteteorien.

Men foreløpig har ingen greid å beregne tettheten av LIVE
ved å bruke kvanteteorien.
Det å beregne denne tettheten
fra fundamentale fysiske grunnprinsipper
er et av de største uløste problemene i fysikken.

Hvordan kan andre typer mørk energi skjelnes fra LIVE?

LIVE har konstant tetthet til tross for universets ekspansjon.
Til forskjell fra LIVE varierer tettheten av nesten alle typer mørk energi
med tiden i et ekspanderende univers.

Dette gjør at ulike modeller for mørk energi
gir ulik ekspansjonshistorie for universet,
og kan brukes til å skjelne univers med andre typer mørk energi
fra univers med LIVE.

De viktigste egenskapene til LIVE

Den kvantemekaniske vakuumenergien kalt LIVE
har noen ganske merkelige egenskaper.
Noen er nevnt ovenfor, men la oss oppsummere:

- Til tross for at universet ekspanderer, har LIVE konstant energitetthet.
- Det betyr at det blir mer og mer vakuumenergi i universet.
- LIVE har negativt trykk, det vil si at LIVE er i en tilstand av strekk.
- LIVE forårsaker frastøtende gravitasjon.
- LIVE kan derfor forklare universets akselererte ekspansjon.

Den mørke energiens tilstandsligning

Sammenhengen mellom den mørke energiens trykk, p,
og energitetthet, ρ, kalles for den mørke energiens tilstandslikning.
Den skrives på formen $p = w\,\rho$.

LIVE har negativt trykk $w_{\mathrm{LIVE}} = -1$.
Det betyr at LIVE er i en tilstand av strekk.

I analysen av observasjonsresultatene fra DESI
er forskerne opptatt av den mørke energiens tilstandsligning.
Dersom $w \neq -1$, er den mørke energien av en annen type enn LIVE.

Standardmodellen for universet

Standardmodellen for universet,
den som er enklest matematisk og samtidig passer best
med en lang rekke forskjellige typer observasjoner,
kalles ΛCDM-universet.
Her er Λ den kosmologiske konstanten
som representerer tettheten av LIVE.
Dette betyr at *ifølge standardmodellen for universet*
er universets mørke energi av typen LIVE.
CDM står for cold dark matter –
kald, mørk materie, det vil si materie
som ikke er i stand til å sende ut elektromagnetisk stråling.
Den mørke materien er nødvendig
for å forklare galaksenes rotasjonsbevegelser.

Universets ekspansjon

Universets ekspansjon kalles på engelsk ofte for *the Hubble flow*.

Som nevnt tidligere beskrives den matematisk ved å innføre
en avstandsfaktor, a,
som representerer forholdet mellom avstanden,
ved et vilkårlig tidspunkt,
mellom to objekter, for eksempel galaksehoper,
som følger the Hubble flow,
og deres nåværende avstand.

a er avstand da delt på avstand nå.

Det betyr at $a(t_0)=1$.

De kosmiske avstandenes endring som funksjon av tiden i standardmodellen for universet

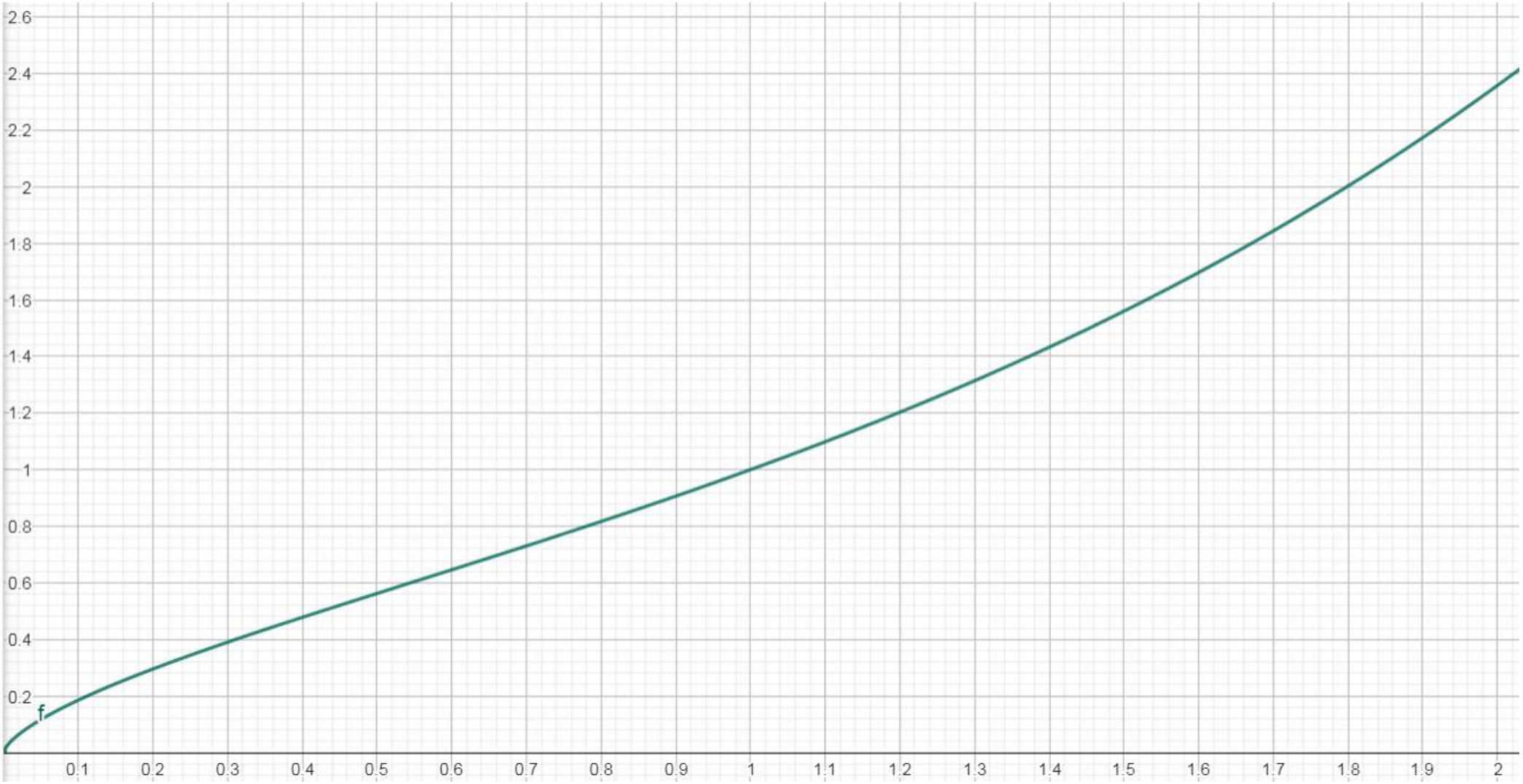
Einsteins relativitetsteori gir at
i standardmodellen for universet
er avstanden mellom to galaksehoper ved et vilkårlig tidspunkt
i forhold til deres nåværende avstand

$$a = 0.76\left[\sinh\left(1.2\frac{t}{t_0}\right)\right]^{2/3}$$

der tallet 1.2 kommer fra at 70% av innholdet i universet
består av mørk energi, og t_0 er universets alder.
Tallet 0.76 er valgt slik at $a(t_0) = 1$.

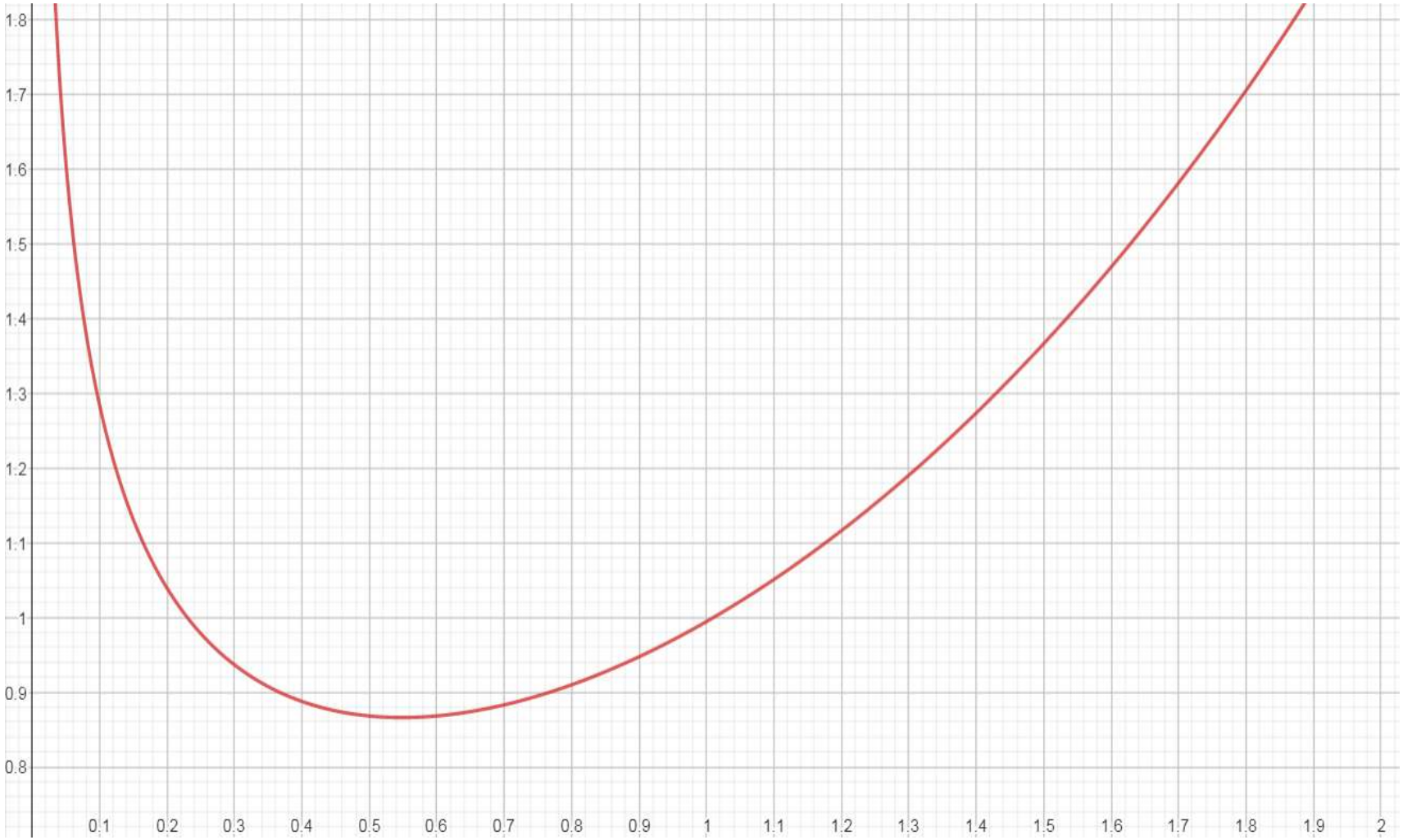
Dette er plottet på neste lysbilde.

Avstanden mellom to galaksehoper som funksjon av tiden ifølge standardmodellen for universet



Tallene på y-aksen angir forholdet mellom avstanden mellom to galaksehoper ved et vilkårlig tidspunkt og deres nåværende avstand. Tallene på x-aksen er forholdet mellom kosmisk tid og universets nåværende alder.

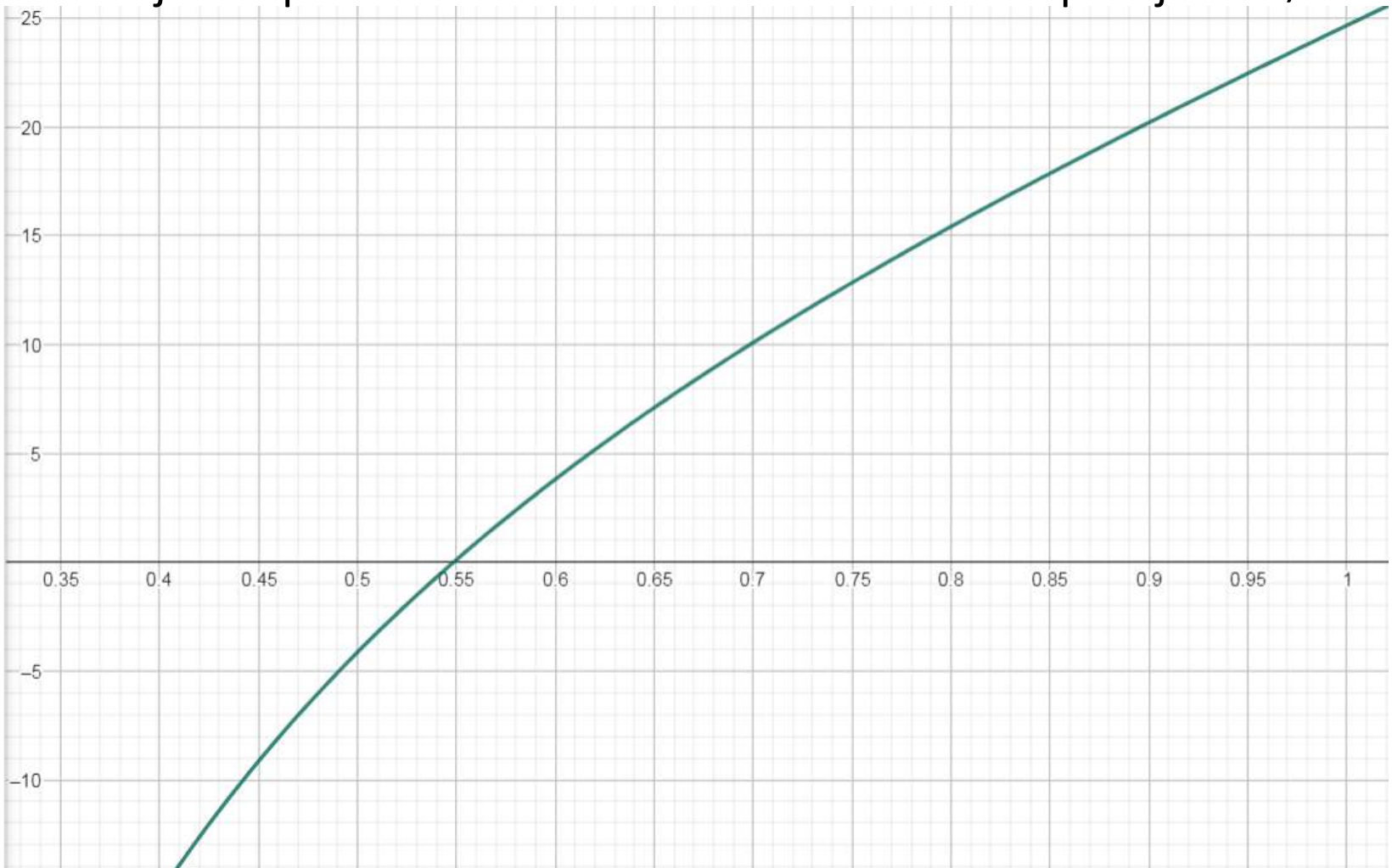
Tidsavhengigheten av den kosmiske ekspansjonshastigheten forutsagt fra ΛCDM universmodellen



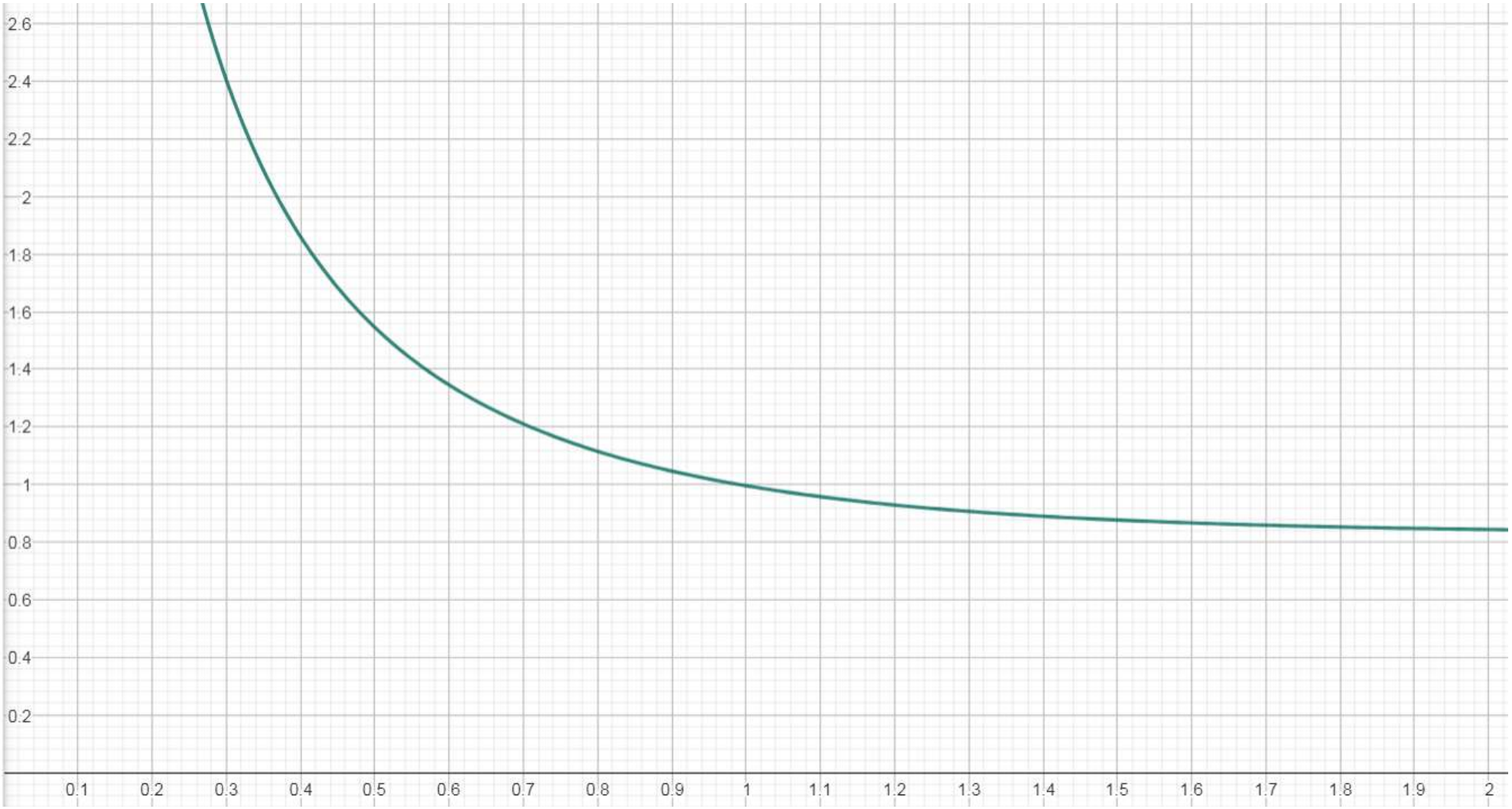
Forholdet mellom universts ekspansjonshastighet ved et vilkårlig tidspunkt og nå. Tallene på x-aksen angir antall år etter Big Bang delt på universets nåværende alder. Hastigheten hadde et minimum ved tidspunktet 0,55 *13,8=7.6 milliarder år etter Big Bang. Da var farten omtrent 86% av den nåværende ekspansjonsfarten. Før dette avtok ekspansjonshastigheten, og etter dette økte ekspansjonshastigheten.

Den kosmiske ekspansjonens akselerasjon ifølge standardmodellen for universet

Tallene på y-aksen angir hastighetsendring målt i km/år per år
for en galakse som er en milliard lysår fra solsystemet.
En slik galakse har nå en fart på 20 000 km/s på grunn av universets ekspansjon.
Tallene på x-aksen angir antall år etter Big Bang delt på universets nåværende alder, 13.8 milliarder år. Til å begynne med var akselerasjonen negativ: nedbremsing av ekspansjonsfarten. Ved tidspunktet 0,55 *13,8=7.6 milliarder år etter Big Bang ble akselerasjonen positiv. Fra da av har den kosmiske ekspansjonen økt farten.



Hubbleparameteren som funksjon av tid ifølge standardmodellen for universet



Tallene på y-aksen er forholdet mellom verdien av Hubbleparameteren ved et vilkårlig tidspunkt og dens nåværende verdi. Tallene på x-aksen er tid delt på universets alder.

Dersom man aksepterer at den mørke energien
ikke behøver å være av typen LIVE,
dukker det tredje av kosmologiens store ubesvarte spørsmål opp:
Hva består universets mørke energi av?
Dette spørsmålet har vært utforsket i noen tiår.
Det siste bidraget til å kaste lys over spørsmålet kom fra
Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI).

Dark Energy Spectroscopic Instrument DESI

Hensikten med DESI er å måle ekspansjonshistorien til universet, og bruke denne informasjonen til å kaste lys over den mørke energiens natur.

DESI in the dome of the Nicholas U. Mayall 4-meter Telescope at the Kitt Peak National Observatory.

Ved hjelp av DESI gjøres kosmiske avstandsmålinger der Baryoniske Akustiske Oscillasjoner – BAO utnyttes

Baryoner er elementærpartikler som består av tre kvarker slik som protoner og nøytroner.
Vanlig materie er bygget opp av baryoner og kalles derfor ofte for baryonisk materie.

Akustiske oscillasjoner er lydbølger, dvs. trykkbølger.
Ikke alle trykkbølger sender ut lyd, men i kosmologien er det vanlig å kalle trykkbølger for *akustiske oscillasjoner*.

Baryoniske kosmiske oscillasjoner i det tidlige univers

Mønsteret av baryoniske oscillasjoner er registrert av Planck-satellitten
som observerte temperatursvingninger
i den kosmiske bakgrunnsstrålingen 380 00 år etter big bang.

Der trykket var høyest var det også litt høyere temperatur.

Trykksvingningene oppsto i det kosmiske plasmaet
som eksisterte før 380 00 år etter big bang.

De oppsto som et resultat av gravitasjon
som trakk materie mot områder med større tett enn gjennomsnittet,
og trykk-krefter som virket i motsatt retning.

BAO brukt som kosmisk standard målestav

Fra starten av oppsto baryoniske akustiske oscillasjoner i den synlige delen av materien – i et varmt kosmisk plasma.
Ved tiden 380 000 år etter Big Bang var temperaturen sunket til omtrent 3000 K, og da kunne protonene fange elektroner og danne nøytrale hydrogenatomer. Dermed ble plasmaet omdannet til en gass av nøytrale atomer og nøytroner. Det førte til at trykkbølgene ble borte.

Den maksimale avstanden trykkbølgene kunne bevege seg før plasmaet forsvant kalles *lydhorisonten*
og har nå en radius på omtrent 490 millioner lysår.

Den opptrer som en *standard målestav* som bestemmer avstanden mellom kosmiske filamenter med økt tetthet av materie
der universets galaksehoper dannes.

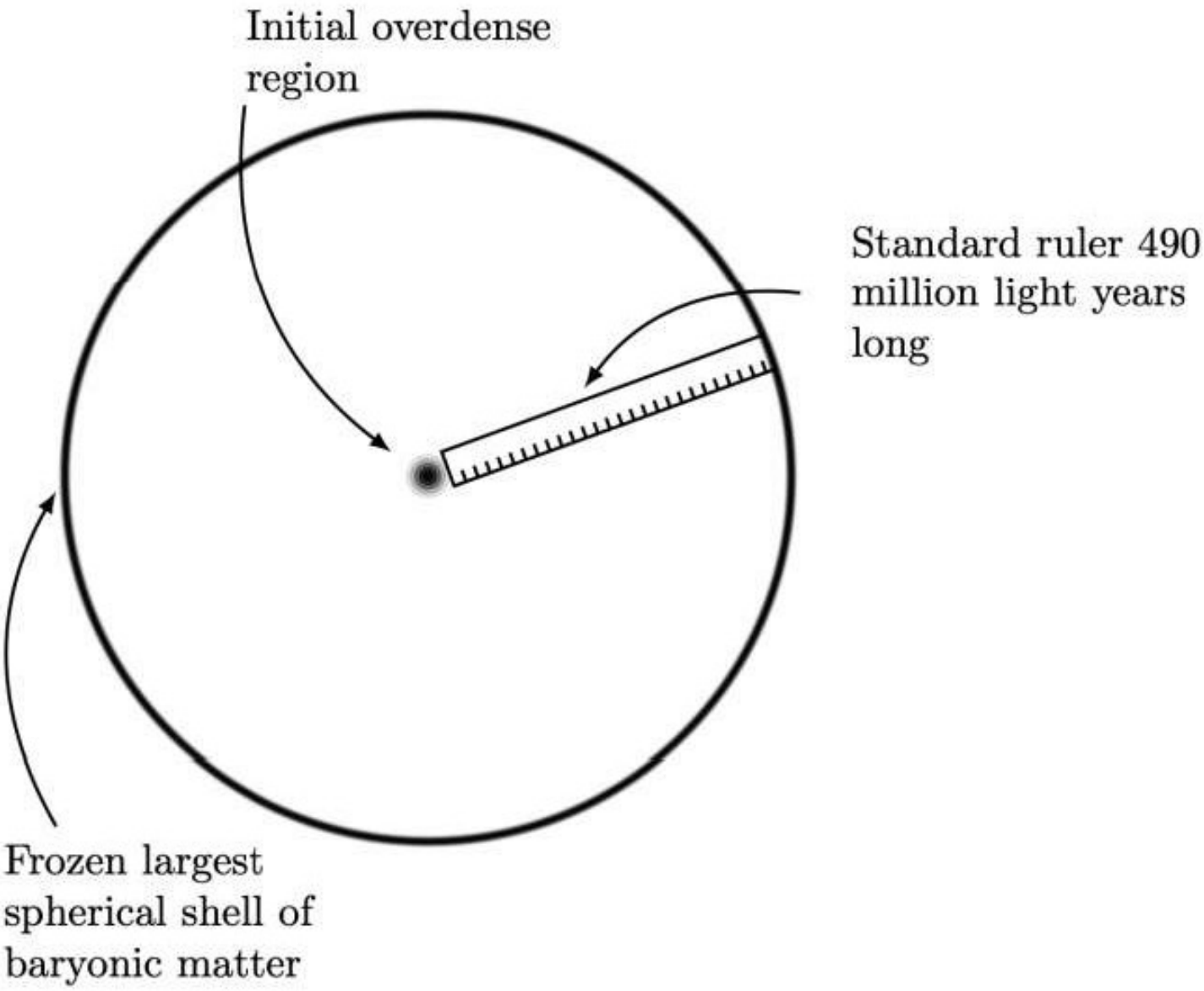
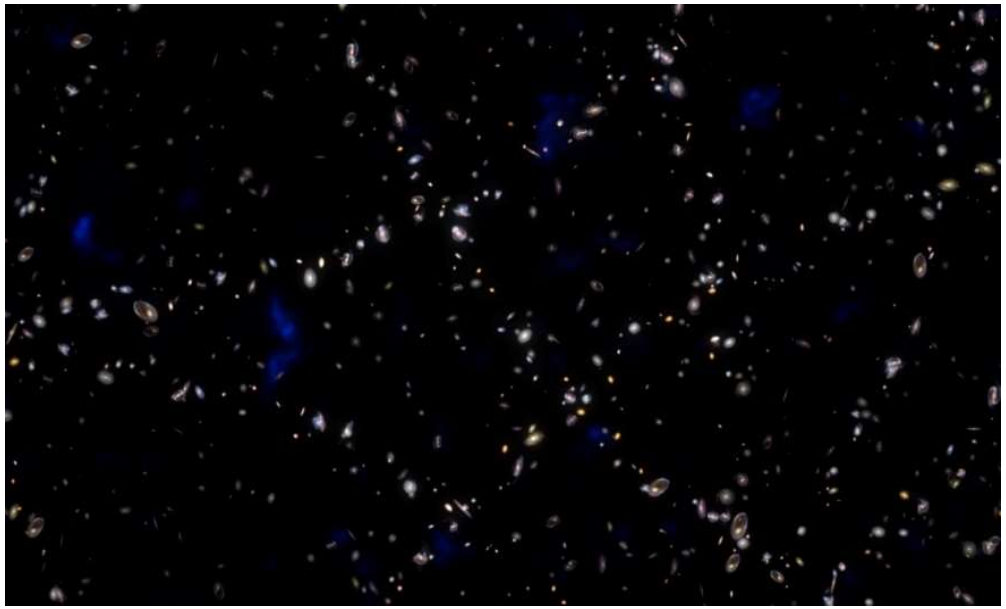


Fig. 1 Pictorial representation of an overdense region (centre of the disc) and the circle representing the farthest traveled frozen sound wave (sound horizon).

Fra artikkelen Dark energy av Sergio Luigi Cacciatori, Vittorio Gorini og Federico Re

BAO satte avtrykk på fordelingen av galaksehoper i universet

De akustiske oscillasjonene gikk over til å bli et svakt mønster av tetthetsfluktuasjoner i den etter hvert kalde kosmiske gassen. Noen hundre millioner år senere ble de første galaksene dannet i denne kalde kosmiske støvskyen som fylte hele universet. Mønsteret av tetthetsfluktuasjoner som kom fra BAO, utvidet seg på grunn av universets ekspansjon, og ga senere opphav til et mønster i fordelingen av galakser. Det ble litt flere galakser der tettheten var størst.



Avtrykk fra kosmiske akustiske oscillasjoner i fordelingen av galakser fremkommet i en simulering av kosmisk galaksedannelse.

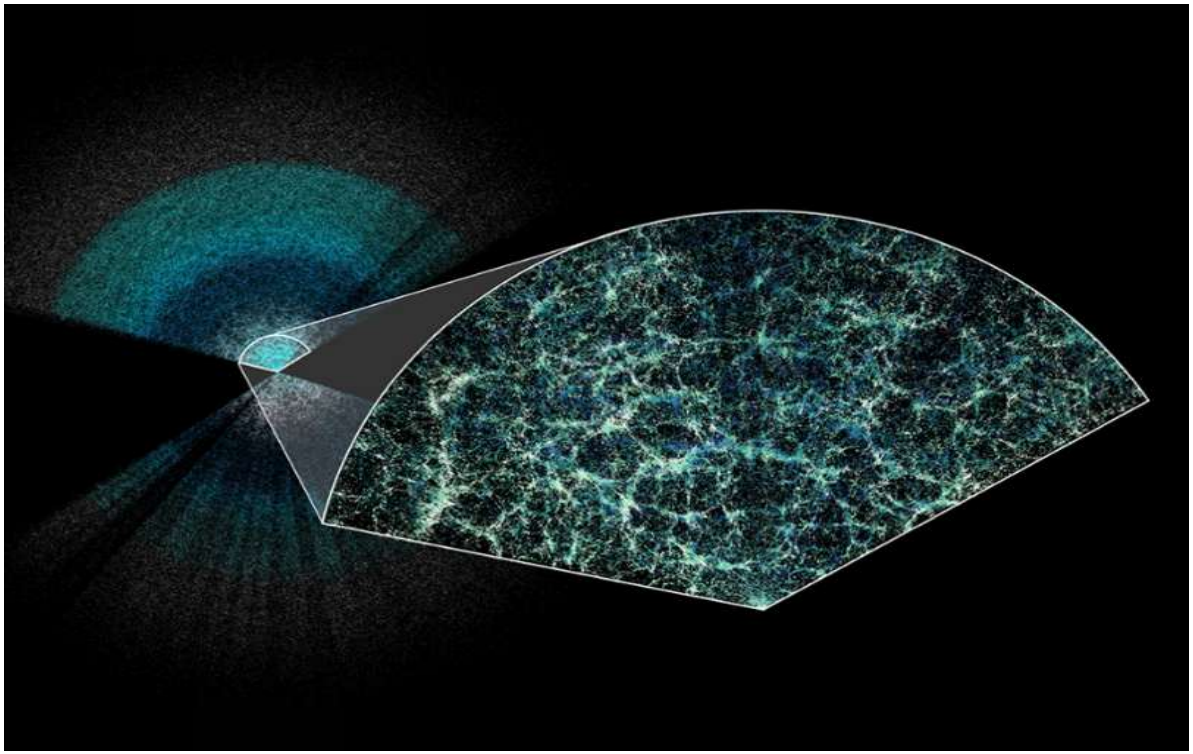
DESI observerer mønsteret i den kosmiske massefordelingen som BAO har gitt opphav til.

Nye resultater fra DESI

DESI kan observere 5000 galakser samtidig.
Dets hensikt er å måle virkningen av mørk energi på universets ekspansjon
for å kaste lys over den mørke energiens natur.

DESI skal registrere spektre for over tjue millioner galakser og kvasarer.

Det er laget dataprogrammer som skal bruke dette observasjonsmaterialet
til å konstruere tredimensjonale kart over universet
ut til en avstand på 11 milliarder lysår fra Melkeveien.



Den kosmiske massefordelingen viser spor av baryoniske akustiske oscillasjoner

De tre første årenes observasjoner med DESI

Den 18. mars 2025 publiserte DESI-teamet sammen med kolleger andre steder over et dusin artikler med analyser av de tre første årenes observasjoner med DESI.

Dette observasjonsmaterialet omfatter spektre fra
rundt 15 millioner galakser og kvasarer
med rødforskyvning opp til $z = 3$.

Den observerte strålingen har brukt opp til 11 milliarder år
på reisene fra kildene og frem til jorda.

Det betyr at observasjonsmaterialet gir informasjon om variasjoner av universets ekspansjon i de siste 11 milliarder årene.

Den kosmiske ekspansjonshastighetens endring med tiden

Fra DESI observasjonsdataene kunne man beregne universets ekspansjonshastighet ved tidspunktene da den observerte strålingen ble sendt ut.

Dermed kunne man også beregne hvordan hastigheten til den kosmiske ekspansjonen varierte de siste 11 milliarder årene av universets historie.

Resultatet ble sammenliknet med tidsavhengigheten til den kosmiske ekspansjonshastigheten forutsagt fra ΛCDM universmodellen.

Det ble et betydelig avvik.

Mulig konflikt med standardmodellen for universet

I en pressemelding fra Berkeley Lab
der mange av DESI-forskerne er ansatt,
står det at isolert sett er DESI-dataene i overensstemmelse med
forutsigelsene fra standardmodellen for universet, ΛCDM-modellen.

Men kombinert med andre typer målinger
er det voksende tegn til at virkningen av
den mørke energien på universets ekspansjon svekkes med tiden,
og at andre modeller enn ΛCDM-modellen
kan passe bedre med totalen av observasjonsdata.

Må ΛCDM-universmodellen revideres?

Foreløpig er det såpass stor usikkerhet i resultatene
at man ikke kan utelukke at standardmodellen er korrekt.

Selv om forskerne er kommet frem til at det bare er 0,3 % sjanse for at
avviket fra standardmodellen er en statistisk fluktuasjon,
har man vært i slike situasjoner før,
og ytterligere data og forbedrete analysemetoder
har fjernet avviket fra standardmodellen.

ΛCDM-modellen har hatt en tendens til å overleve perioder med nye
observasjonsdata som tyder på avvik fra modellen.

Men slik DESI-observasjonsdataene fremtrer nå,
må standardmodellen for universet revideres.
LIVE må erstattes av en dynamisk mørk energi.

Artikkel fra DESI publisert 8. september 2025

Pressemelding fra University of Chicago

UChicago astrophysicists' physics-based models suggest dark energy may be evolving

In a new paper published in Physical Review D 8. September 2025
the authors reported that by combining observational data from DESI
with those from several other observatories,
it is found that dynamical dark energy
with decreasing energy density during the expansion of the universe,
can explain the observational data better than LIVE.

The data suggest that over the last six billion years or so,
The density of the dark energy has decreased by about 10 %.

Ny type mørk energi

I artiklene som omtaler DESI-observasjonene,
påpekes at dataene favoriserer et univers
der tettheten av den mørke energien avtar med tiden.
Da er ikke lengre forholdet mellom trykk og tetthet lik – 1.

Observasjonene tyder på at forholdet mellom trykk og tetthet
avtar etter hvert som de kosmiske avstandene blir større,

$$w = w_0 + w_a(1 - a),$$

der a er avstandsfaktoren.
Den hadde verdien 0 da universet oppsto og har verdien 1 nå.

LIVE har $w_0 = -1$ og $w_a = 0$.

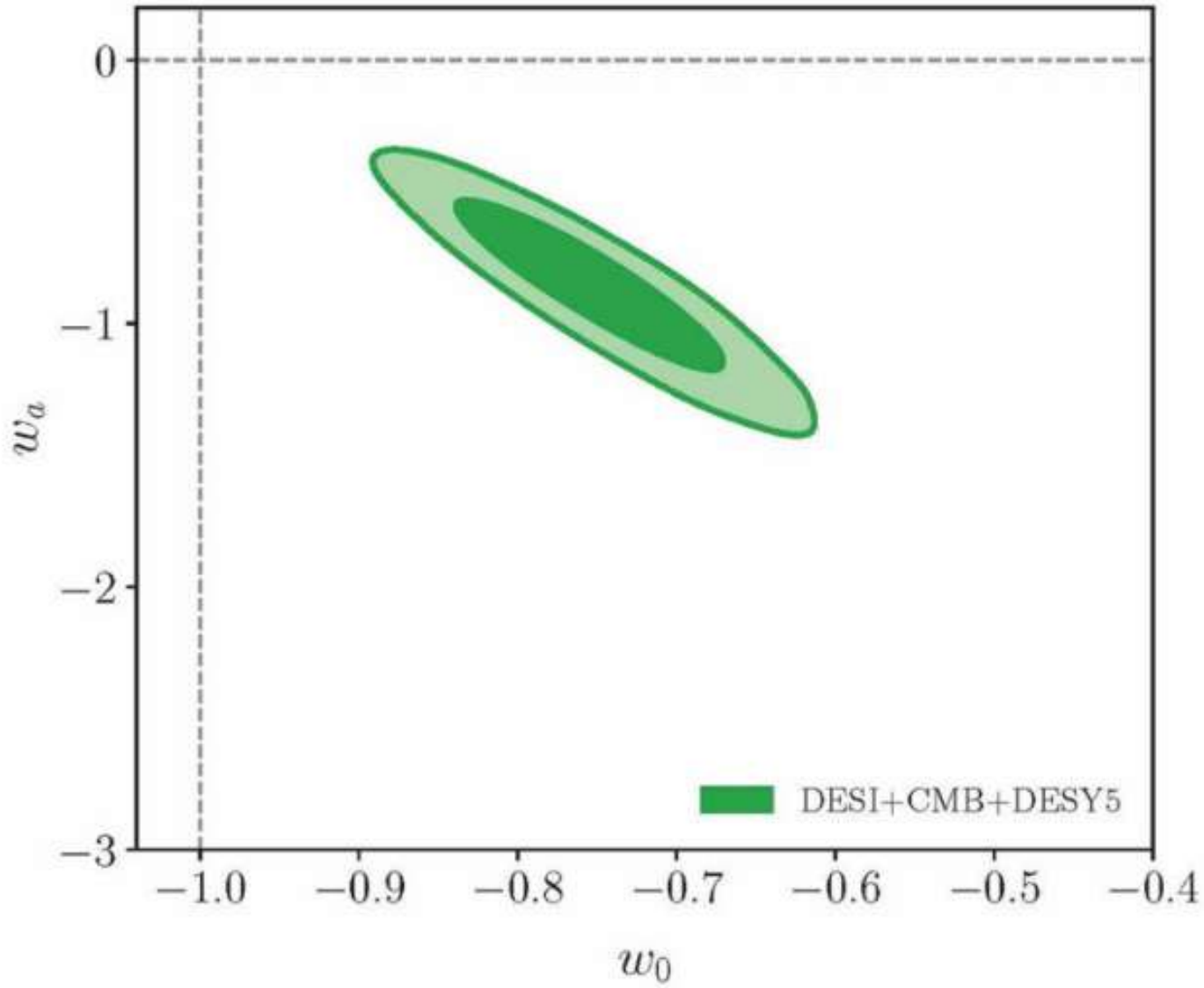
Ny universmodell

I standardmodellen for universet er den mørke energien av typen LIVE med konstant tetthet representert ved den kosmologiske konstanten Λ. Denne universmodellen kalles derfor ΛCDM-universmodellen.

Den nye typen mørk energi er karakterisert ved tilstandsligning-parametrene w_0 og w_a. Universet med denne typen mørk energi kalles derfor w_0w_aCDM-universmodellen.

Ny type mørk energi

Ifølge preprintene fra DESI-teamet etter 3-års observasjoner, publisert 8. september 2025, er de foretrukne verdiene av tilstandslikning-parametrene $w_0 = -0.7$ og $w_a = -1$.



Preprint publisert 16. september 2025

How Theory-Informed Priors Affect DESI Evidence for Evolving Dark Energy

Michael W. Toomey,[1,*] Gabriele Montefalcone,[2,†] Evan McDonough,[3,‡] and Katherine Freese[2,4,5,§]

Som nevnt ovenfor antok DESI-teamet at tilstandslikning-parameteren avhenger av avstandsfaktoren på følgende måte

$$w = w_0 + w_a(1 - a)$$

I preprintet publisert 16. september viste forfatterne at

det finnes andre sammenhenger mellom *w* og *a* som gjør at

avstandsmålingene til DESI passer bedre med ΛCDM-modellen.

Konflikten kunne reduseres fra 3,1 til 1,3 standardavvik.

Kvintessensenergi

Kvintessensenergi er en hypotetisk form for mørk energi som ble postulert i 1998 for å forklare at den kosmiske ekspansjonen øker farten.

Navnet kommer fra kvinta essentia – det femte element.
Det ble postulert av Aristoteles som
det den himmelske verden består av.

I motsetning til LIVE som har konstant tetthet til tross for at universet ekspanderer, avtar kvintessensens energitetthet med tiden.

Det er mange typer kvintessens, men alle forårsaker *frastøtende gravitasjon*. Det betyr at de har tilstandslikningparametre som oppfyller

$$-1 < \omega_0 < -1/3$$

Fantomenergi og Big Rip

Fantomenergi er en hypotetisk form av mørk energi
med tilstandslikningparameter $\omega_0 < -1$.

Den forårsaker en sterkere frastøtende gravitasjon enn LIVE.

Det gir en akselerert kosmisk ekspansjon som til slutt
blir så voldsom at den ødelegger
ikke bare galakser og stjerner,
men til og med elementærpartikler.
Alt blir revet i stykker.
Denne tilstanden kalles *The Big Rip*.

Kvintomscenariene

Kvintomscenariene ble foreslått i 2004 av Xin-Min Zhang og medarbeidere. Også det er en hypotetisk form av mørk energi.

Navnet kvintom er satt sammen av kvintessence og fantom.

I kvintom-A scenariet
ender universet ikke i et Big Rip.

I kvintom-B scenariet
ender universet i et Big Rip.

21. September 2025 publiserte H. Chaudhary og medarbeidere et preprint med overskriften

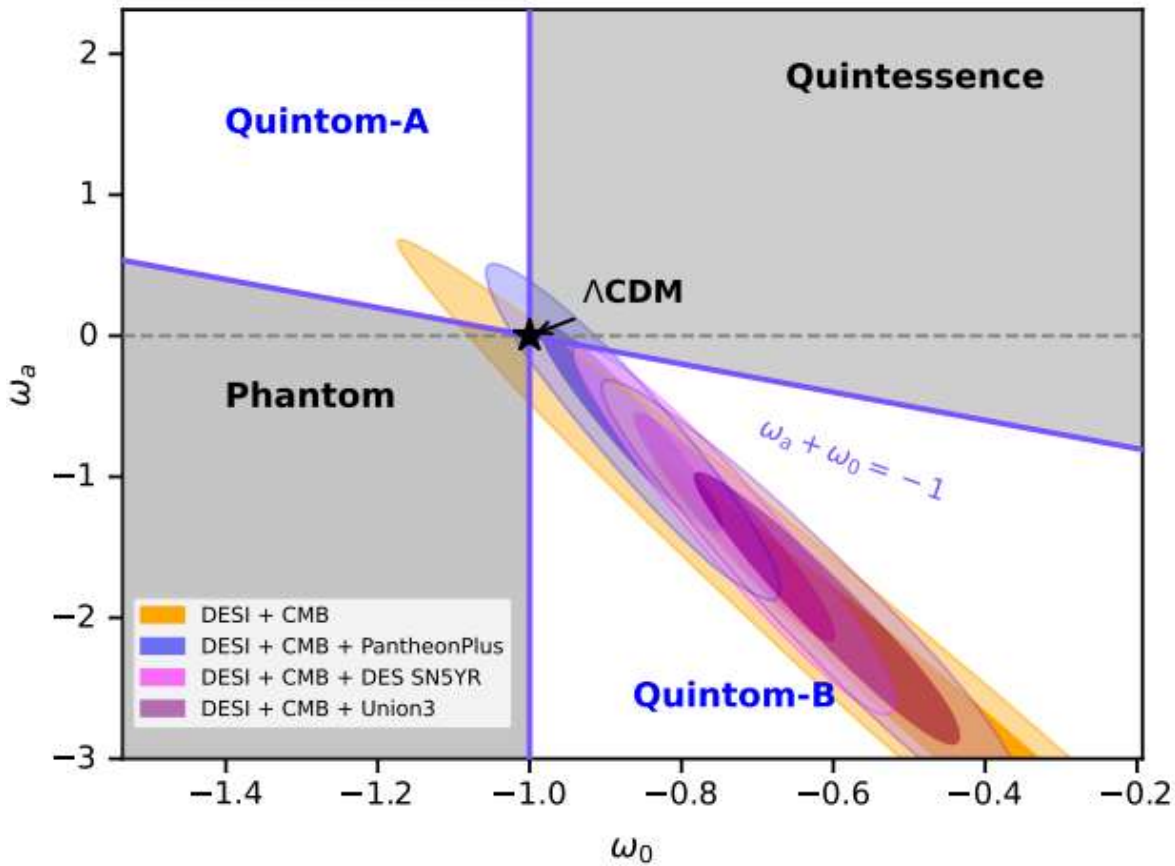
Is the ΛCDM Model in Crisis?

Her skriver de:

We present strong evidences for dynamical dark energy challenging the ΛCDM model.

We are starting to see the cracks in the cosmological constant Λ.

$\omega_0\omega_a$CDM



Preprint publisert 9. oktober 2025

Probing departures from ΛCDM by late-time datasets

Himanshu Chaudhary,[1,*] Vipin Kumar Sharma,[2,†] Salvatore Capozziello,[3,4,5,‡] and G. Mustafa[6,

We find consistent evidence for $\omega_0 > -1$ and $\omega_a < 0$ in all dark energy models, indicating that the cosmological constant faces a potential crisis and that dynamical dark energy models could provide a possible solution, characterized by a Quintom-B–type scenario.

Hva slags univers bor vi i?

Det begynner å se ut til at
den dominerende typen mørk energi i universet
ikke er av typen LIVE,
men av typen kvintom-B.

I så fall bor vi ikke i et ΛCDM-univers dominert av LIVE,
men i et BCDM-univers dominert av kvintomB-energi.

Hva denne energien egentlig er, vet vi foreløpig ikke.