



Allan Sandage ja maailmankaikkeuden laajeneminen

P. Teerikorpi
Tuorlan observatorio
Turun yliopisto



Allan Sandage
(1924 – 2010)

Mt. Palomar Observatory

Crafoord palkinto 1991

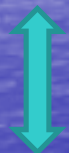


”hyvin tärkeistä tutkimuksista, joiden kohteina galaksit, niiden tähtisisällöt, tähtijoukot ja sumut ja niiden kehitys, sekä nopeus-etäisyys relaatio (Hubblen laki) ja sen kosminen kehitys”

Sandage oli Edwin Hubblen assistentti

→ Hubblen-Sandagen kosmologiaohjelma

Sandage 1961: The ability of the 200-inch telescope to discriminate between selected world models. (ApJ)



eri Friedmannin mallit
steady-state malli

Sandage 1961 osoitti, että kosmologiassa voidaan tehdä ennusteita ja testaamalla niitä havainnoilla valita empiirisesti uskottavimpia maailmanmalleja

Vielä 1952 Hermann Bondi kirjoitti kosmologian tilasta:

“The checking of a prediction, which usually forms such a vital link in the formulation of physical theories, does not occur in this field, and we have to rely on less objective and certain criteria, such as how satisfying and how simple a theory is”

Havaitsevan kosmologian keksintöjä

1910 - 1930

- galaksiavaruuden löytyminen
- kosmologinen punasiirtymä (Slipher)
- punasiirtymä-etäisyyslaki (Hubble)

1960 – 2000

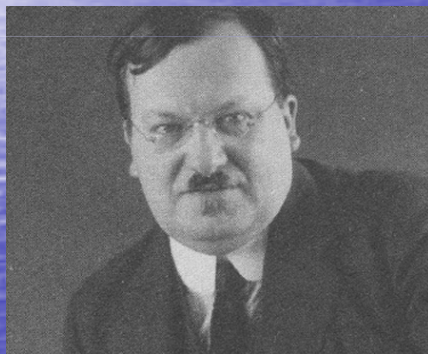
- kvasaarit (Sandage ym. 1960 –)
- terminen taustasäteily (1965)
- galaksiavaruuden kompleksinen rakenne
- ”pimeä sektori” ja kiihtyvä laajeneminen

Galaksiavaruus:

~ 1920 Andromedan sumun etäisyys etäisyys
kolmella eri metodilla

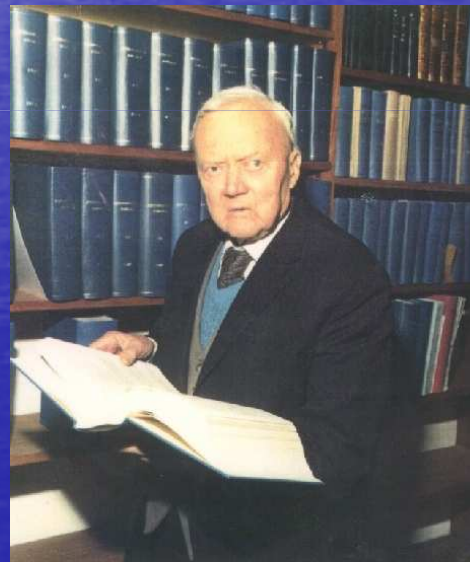
Knut Lundmark

Edwin Hubble



1889-1958

Ernst Öpik



1893-1958



1889-1953

M31

etäisyys 2.5 Mvv
"andrometri"



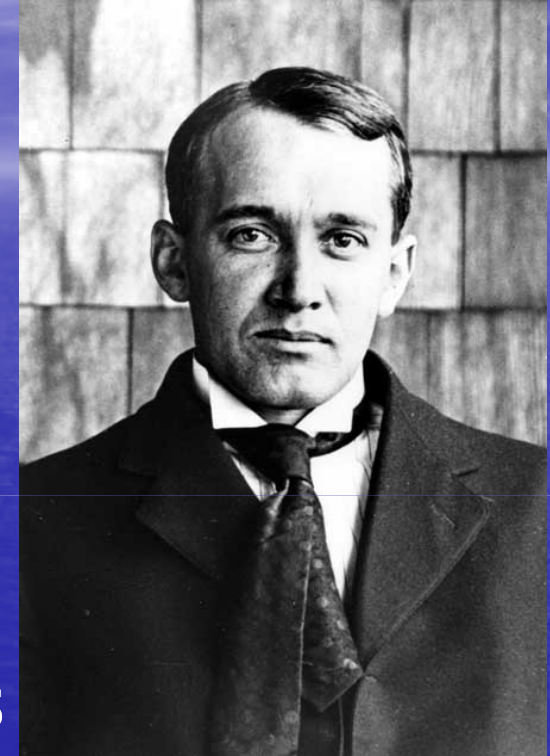
pituusyksikkö 1 Mvv = 1 miljoonaa valovuotta
= $0.95 \cdot 10^{22}$ m

Kosmologinen punasiirtymä

Vesto Slipher 1875 – 1969

1912 M31: spektri ja säteisnopeus
–300 km/s

1917 25 mitattua sumua:
21 punasiirtymää, max +1100 km/s

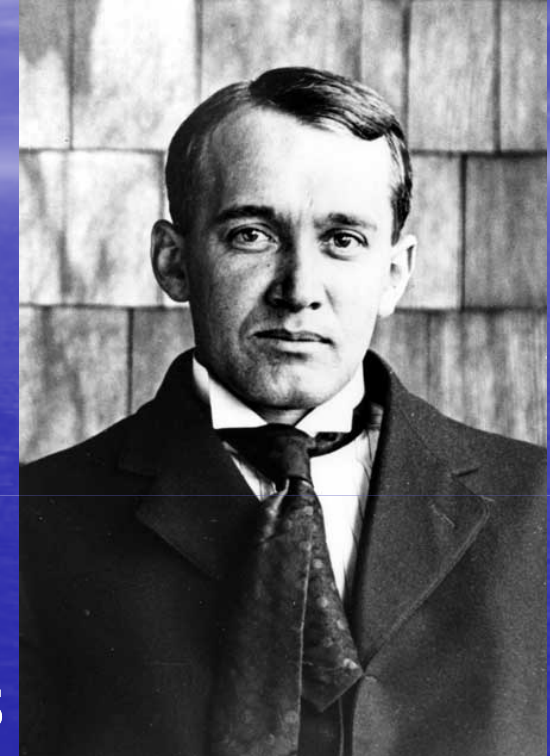


Kosmologinen punasiirtymä

Vesto Slipher 1875 – 1969

1912 M31: spektri ja säteisnopeus
–300 km/s

1917 25 mitattua sumua:
21 punasiirtymää, max +1100 km/s



Claude Bernard (1800-luku):

"metsämies oli yhden sortin riistan perässä, mutta saikin
pyydykseensä yllättäen tyystin muuta"

Allan Sandage kommentoi Slipheria:

”One of the most enigmatic astronomers ever”

”The best astronomer hardly known in those days”

”His desire for recognition approached zero”

Allan Sandage kommentoi Slipheria:

”One of the most enigmatic astronomers ever”

”The best astronomer hardly known in those days”

”His desire for recognition approached zero”

Scientific morality is worth an infinite sum compared with false priority.

Havaitsevan kosmologian keksintöjä

1910 - 1930

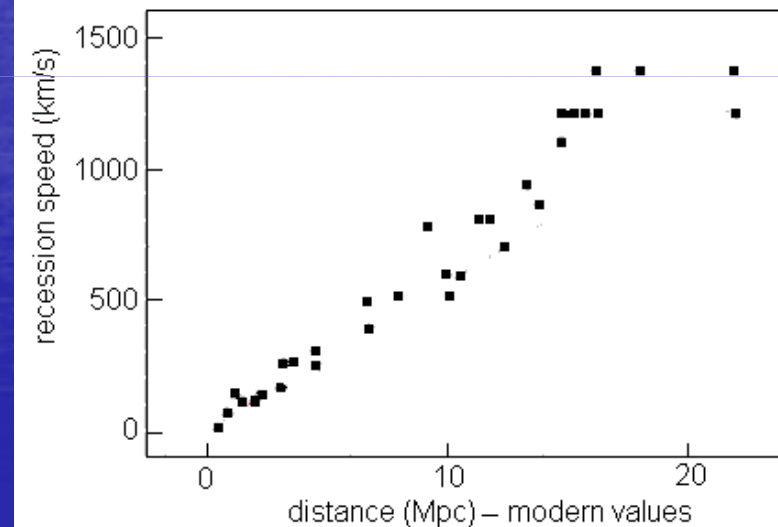
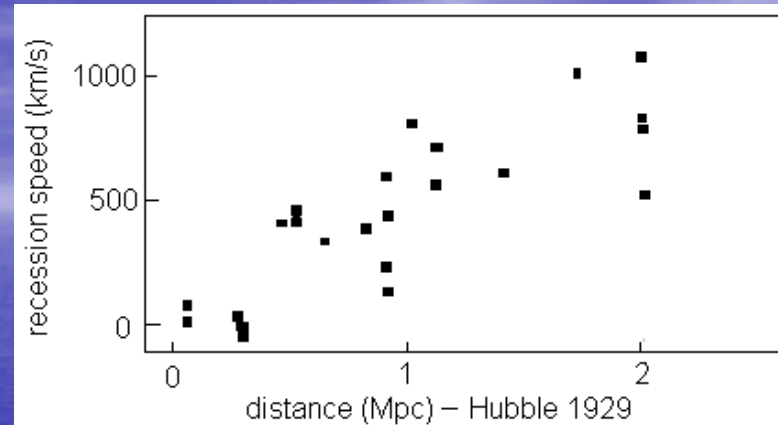
- galaksiavaruuden löytyminen
- kosmologinen punasiirtymä (Slipher)
- punasiirtymä-etäisyyslaki (Hubble)

1960 – 2000

- kvasaarit (Sandage ym. 1960 –)
- terminen taustasäteily (1965)
- galaksiavaruuden kompleksinen rakenne
- ”pimeä sektori” ja kiihtyvä laajeneminen

Hubblen laki

Slipherin punasiirtymät +
Hubblen etäisyysarviot
1929



“The Observational Approach to Cosmology” (1937): Hubble totesi, että

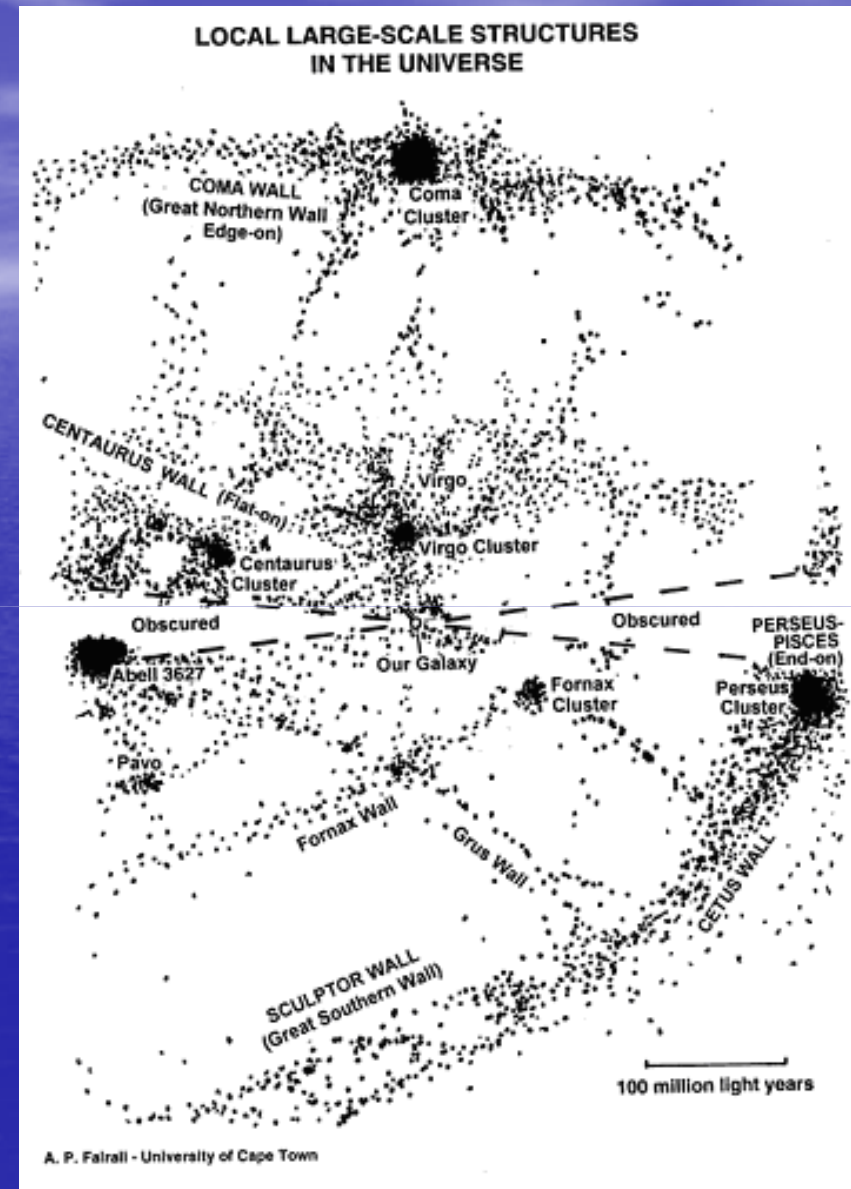
The observable region of space, the region that can be explored with existing instruments, is a sample of the universe. If the sample is fair, its observed characteristics should furnish important information concerning the universe at large.

“Our sample of the universe” on äärellinen otos maailmasta. Tärkeätä, että otos olisi edustava, “fair”. Tähän ajatukseen perustui Hubblen-Sandagen kosmologian ohjelma.

Edustavuus?

Hubble: 50 Mv syvyys
jo edustava?

Nyt tiedetään: on olemassa
1000 Mv rakenteita

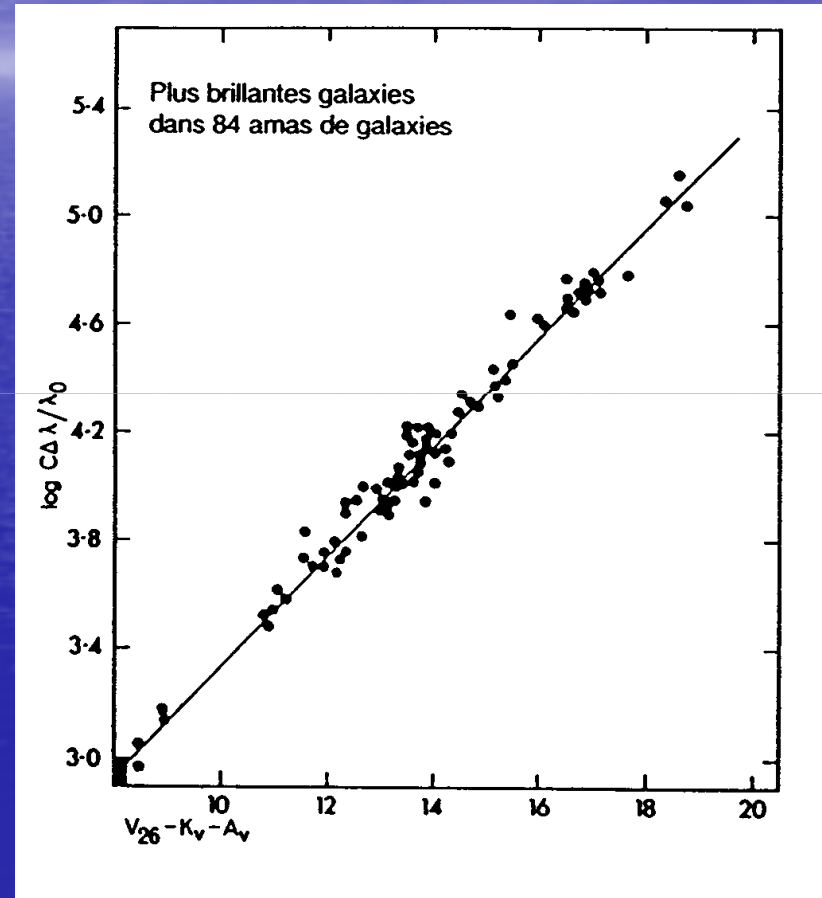


← 600 Mv →

Syvennälle avaruuteen...

Hubblen laki havaittu
3 – 15000 Mv:n
etäisyyksillä

”vakiokynttilöitä”



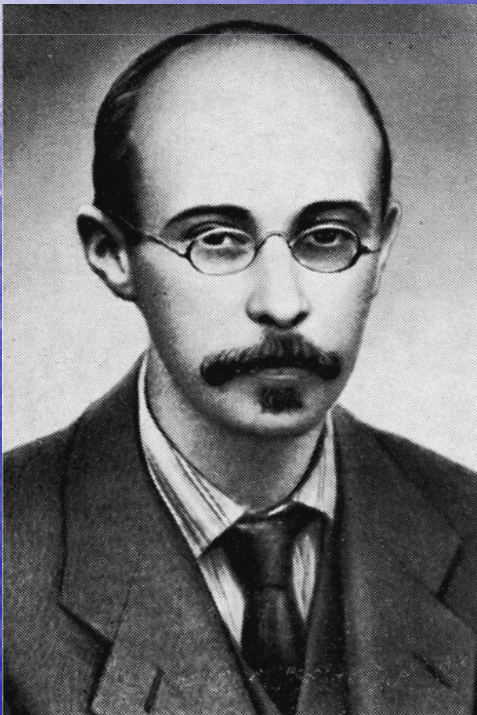
etäisyyden sijasta näennäinen kirkkaus

Teoreettinen puoli...

Albert Einstein
1879 - 1955



Alexander Friedmann
1888 – 1925

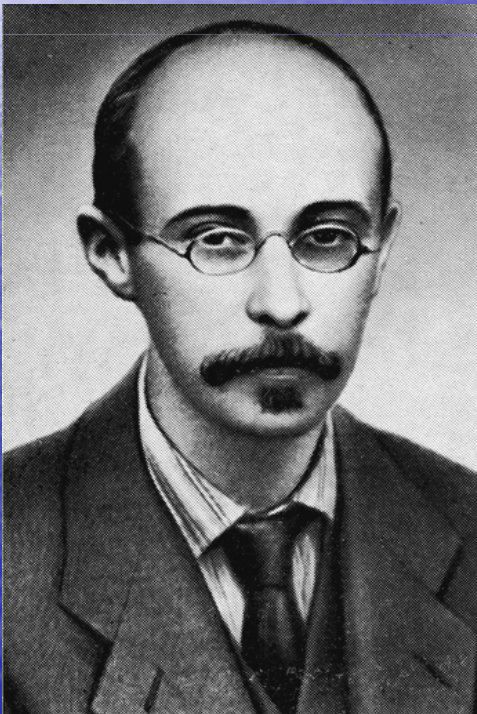


Georges Lemaître
1894 - 1966

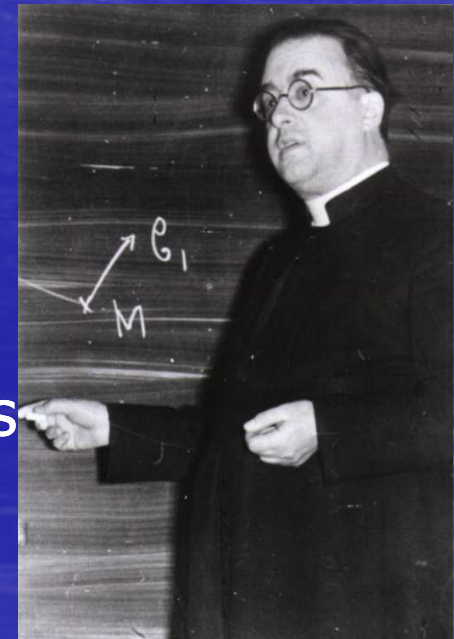


Friedmannin laajeneva tasa-aineinen malli

<u><i>malli</i></u>	<u><i>tilavuus</i></u>	<u><i>tiheys</i></u>	<u><i>geometria</i></u>
suljettu malli	äärellinen	yli-	palloavaruus
laakea	ääretön	kriittinen	euklidinen
avoin malli	ääretön	ali-	hyperbolinen



Lemaître ennusti 1927:
punasiirtymä $\sim$ etäisyys

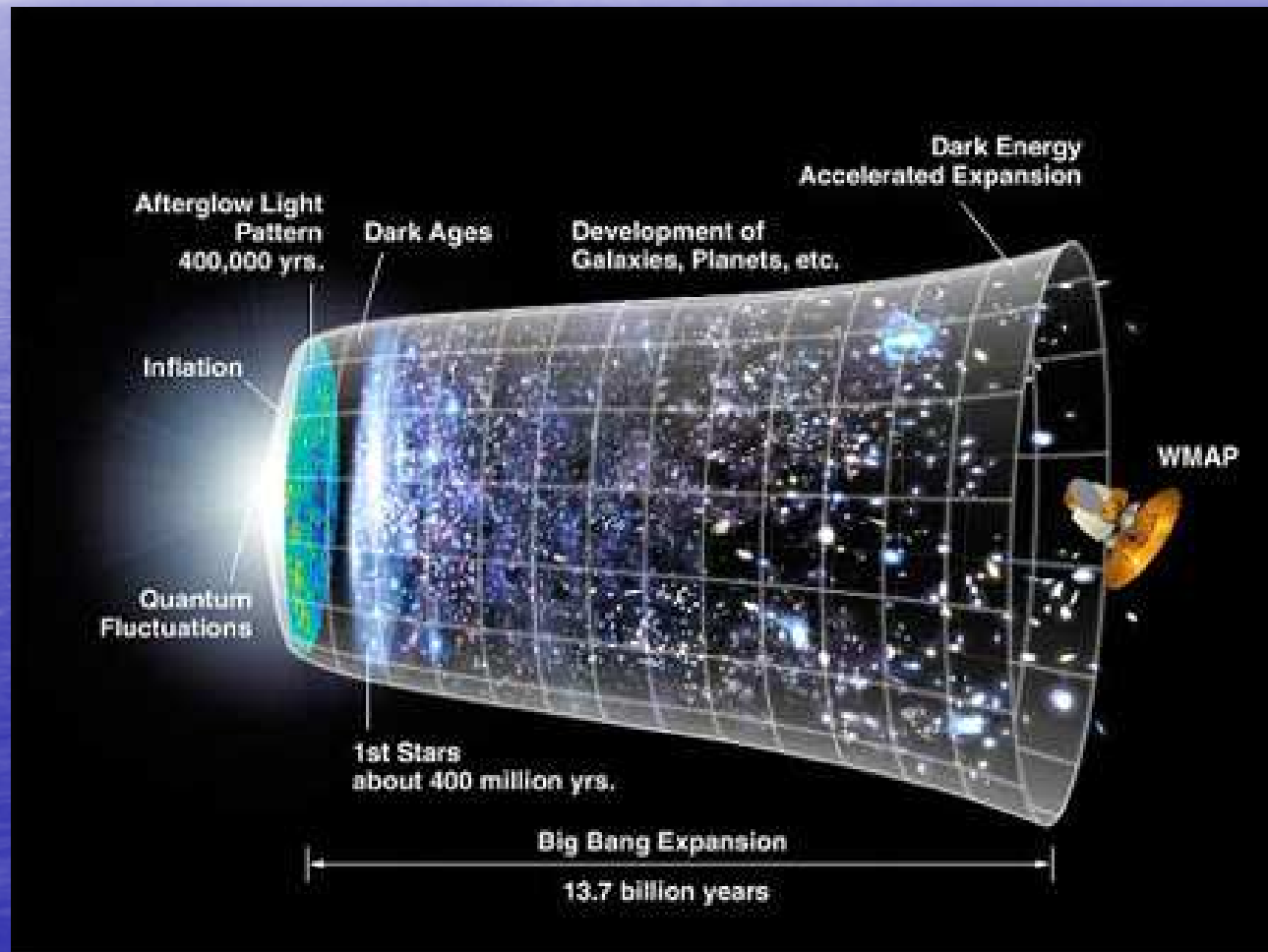


Sandagen tutkimusaiheita

- Linnunradan ikä (tähtien evoluutio)
- kosmiset etäisyysmittarit (kefeidit, ...)
- Hubblen vakion arvo ($V = H \times R$)
- kosmologiset testit
- ja paljon muuta (>500 julkaisua)

“Klassisen kosmologian” kysymyksiä
galaksiavaruudessa

Galaksiavaruus



Tähtiä alusta loppuun...

1953 (PhD) A Study of the Globular Cluster
Messier 3 (pallomainen tähtijoukko)

2010 Amplitude Fine Structure in the
Cepheid P-L Relation (kefeidi-tähtien
sykkeestä)

Sandagen tutkimusaiheita

- Linnunradan ikä (tähtien evoluutio)
- kosmiset etäisyysmittarit (kefeidit, ...)
- Hubblen vakion arvo ($V = H \times R$)
- kosmologiset testit
- ja paljon muuta (>500 julkaisua)

Kosmisen laboratorion erityisyys

- "katsoa saa, vaan ei koskea" (yksi piste)
- katsotaan kauas ja menneeseen
- rakennettava kosmiset etäisyystikkaat
- valintaefektit suuri ongelma
- kosmologinen malli sekä tavoite että työkalu

Sandage: "Practical cosmology"



Mutta toisaalta...

Yrjö Väisälä:

Luontoa ei voi pettää – eikä luonto kieroile
meitä vastaan...

Mutta toisaalta...

Yrjö Väisälä:

Luontoa ei voi pettää – eikä luonto kieroile
meitä vastaan...

Albert Einstein:

Jumala on mutkikas, vaan ei pahansuopa...

Etäisyystikkaat



Paul Hodge (1981) :
The determination of the extragalactic distance scale, like so many problems that occupy astronomers' attention, is essentially an impossible task.

Etäisyystikkaat



Paul Hodge (1981) :
The determination of the extragalactic distance scale, like so many problems that occupy astronomers' attention, is essentially an impossible task.

itärajan takana sanotaan:

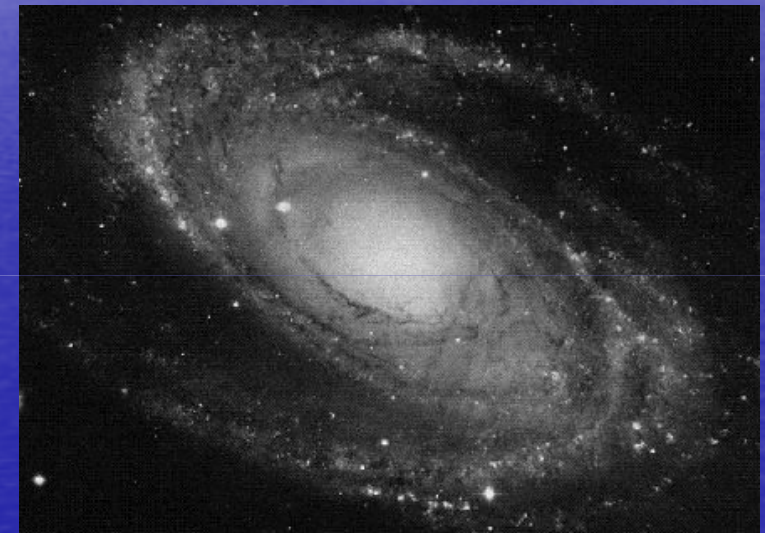
"silmä pelkää, mutta käsi tekee"

mahdottomia asioita, joita kuitenkin tehdään...

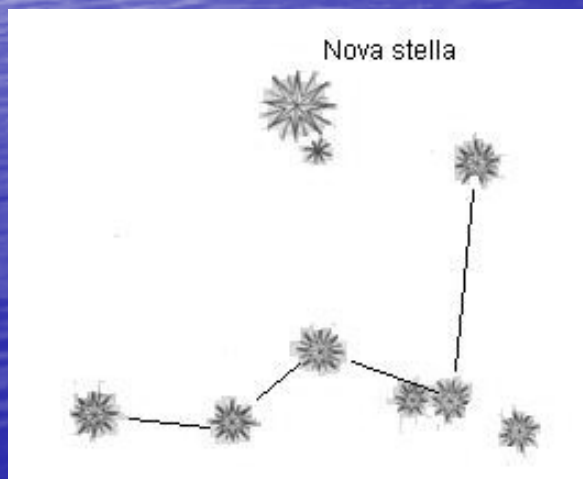
Etäisyystikkaat – mitä kaikkea luonnosta löytyy...



parallakseja



pyöriviä galakseja

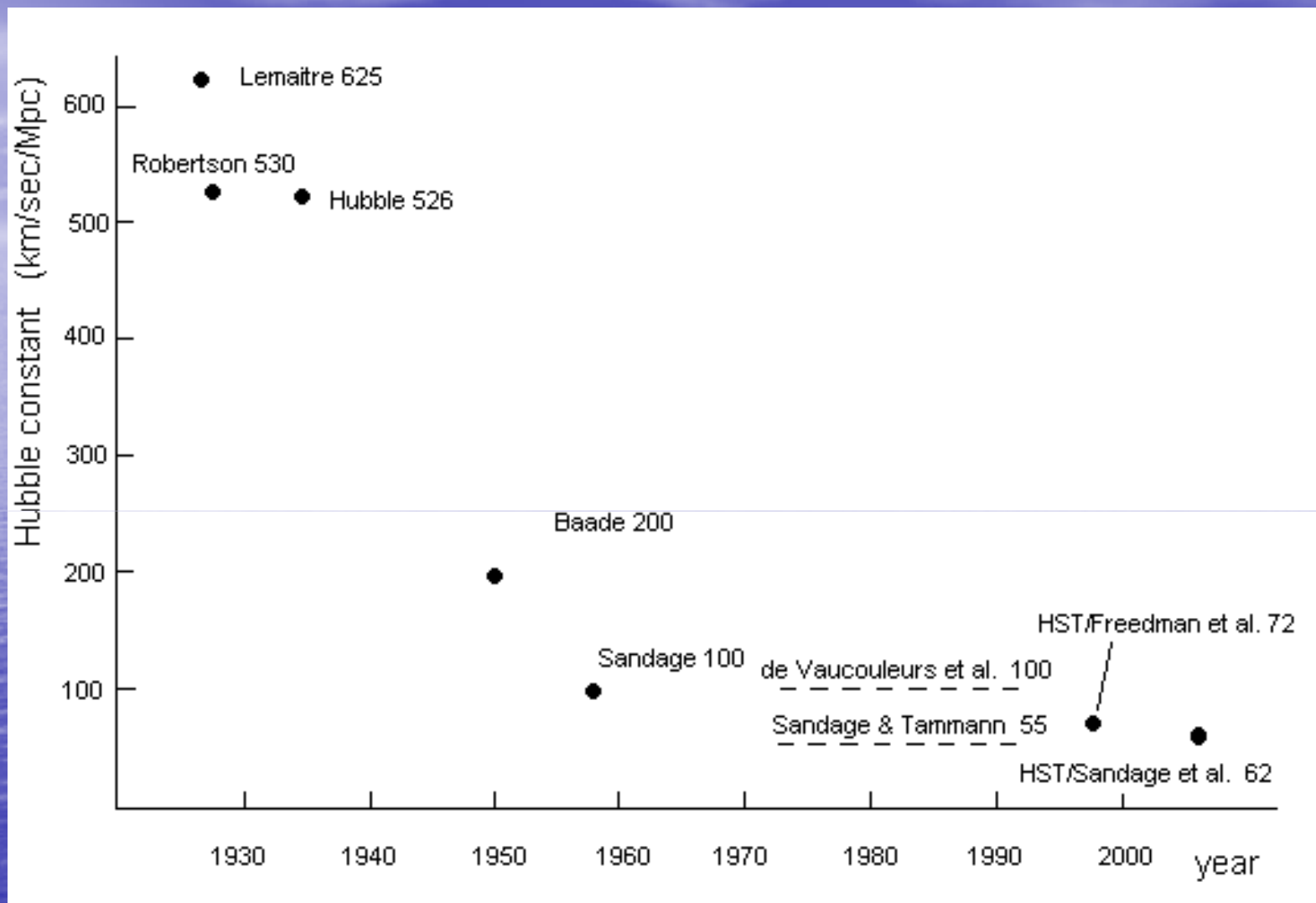


räjähtäviä tähtiä

ym. ym.

Kosmiset etäisyydet ja Hubblen vakio

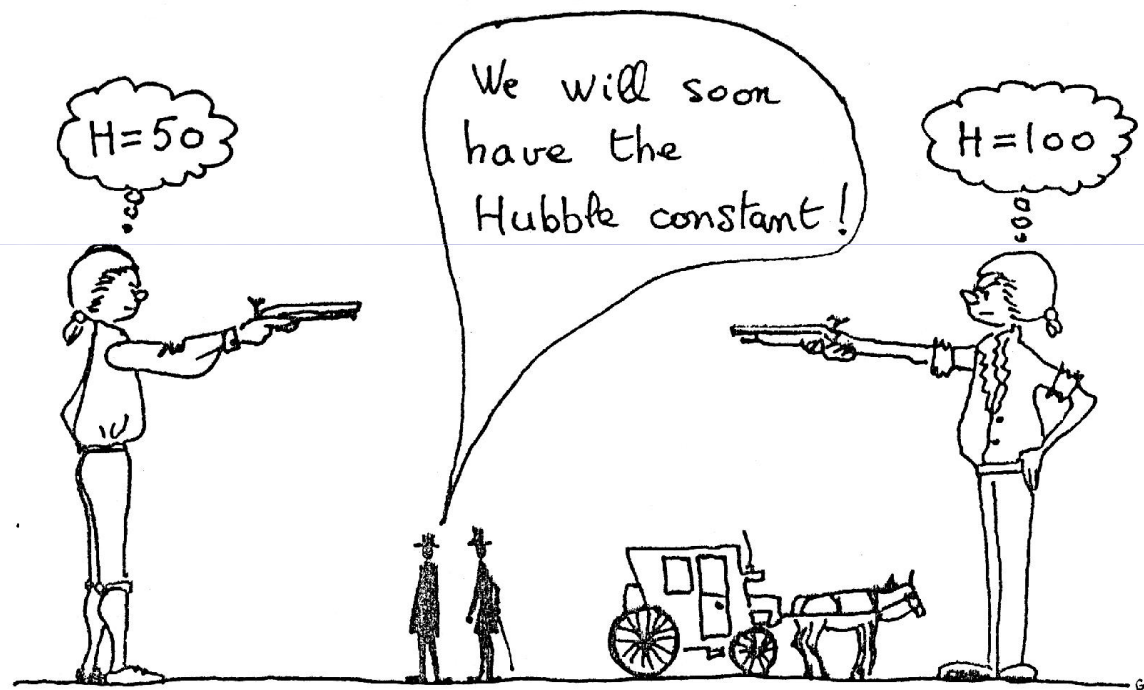
- Nopeus = $H \times \text{etäisyys}$ ($V = cz = H \times R$)
- H määrää etäisyys- ja aikaskaalan
- etäisyydet: ongelma systemaattiset virheet
→ Hubblen vakion alamäki "625 → 62.5"
aikaskaala kasvanut $\sim 1.5 \rightarrow 15$ miljardia v



Hubblen vakion mitatun arvon pienentyminen

G.Paturelin ajankuva 1980-luvulta...

An old way to derive the Hubble constant.



Sandage...

de Vaucouleurs...

Päivitetty versio...

An old way to derive the Hubble constant.



muutamat...

monet muut...

Hubblen vakio kertoo $\sim$ iän, muttei geometriaa

Sandage: "The search for two numbers"

laajenemisvauhti ja sen hidastuminen

→ lisätestejä

- aineen tiheys
- **vakiokynttilät**, mittakepit eri punasiirtymillä
- taustasäteily

Sandage eritoten: **kirkkausetäisyys vs. punasiirtymä**

Etäisyydet → kosmologisia testejä

Euklidinen:

"keppietäisyys" = kirkkausetäisyys = kulmakokoetäisyys

Epäeuklidinen, staattinen:

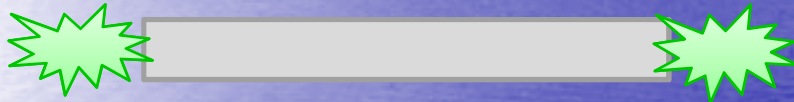
"keppietäisyys" $\neq$ kirkkausetäisyys = kulmakokoetäisyys

Laajeneva avaruus:

"keppietäisyys" $\neq$ kirkkausetäisyys $\neq$ kulmakokoetäisyys
 $\neq$ punasiirtymäetäisyys

Olisipa oiva testikappale, "kummastakin
päästä palava kynttilä"

Vakiotehot



vakiopituus

Kirkkaustesti:

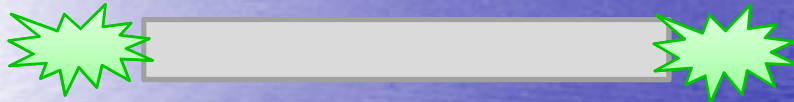
näennäinen kirkkaus vs.

punasiirtymä →

mikä Friedmannin malli?

Olisipa oiva testikappale, "kummastakin
päästä palava kynttilä"

Vakiotehot



vakiopituus

Kirkkaustesti:

näennäinen kirkkaus vs.
punasiirtymä →

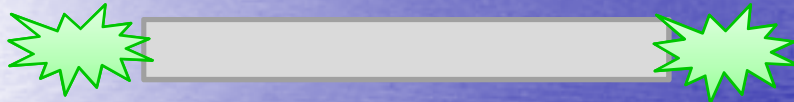
mikä Friedmannin malli?

Kulmakokotesti:

kulma θ vs. punasiirtymä

Olisipa oiva testikappale, "kummastakin päästä palava kynttilä"

Vakiotehot



vakiopituus

Kirkkaustesti:

näennäinen kirkkaus vs.
punasiirtymä →

mikä Friedmannin malli?

Yhdistelmätesti:

säteilyvuo f , kulma θ

→ $f / \theta^2 \propto (1+z)^{-4}$.

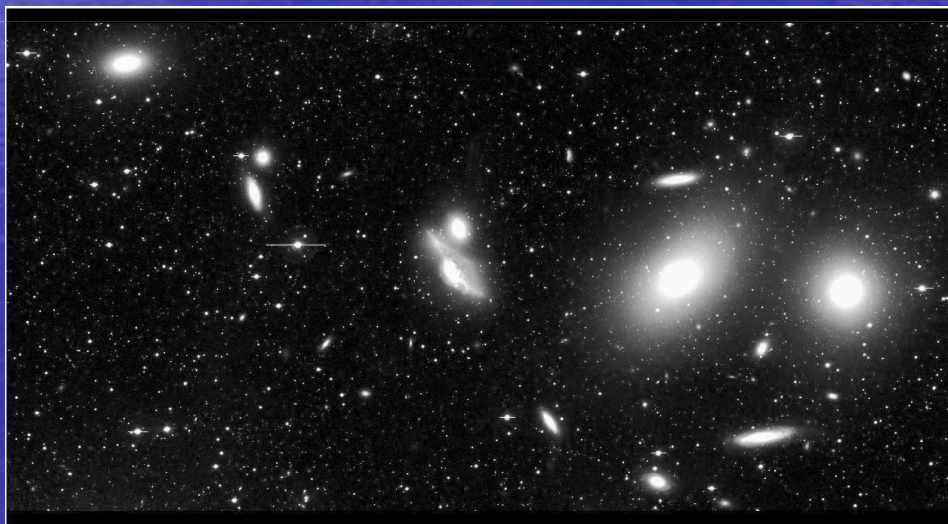
laajenemisen testi

Kulmakokotesti:

kulma θ vs. punasiirtymä

Galaksijoukkojen ykkösgalaksit kirkkaustestissä

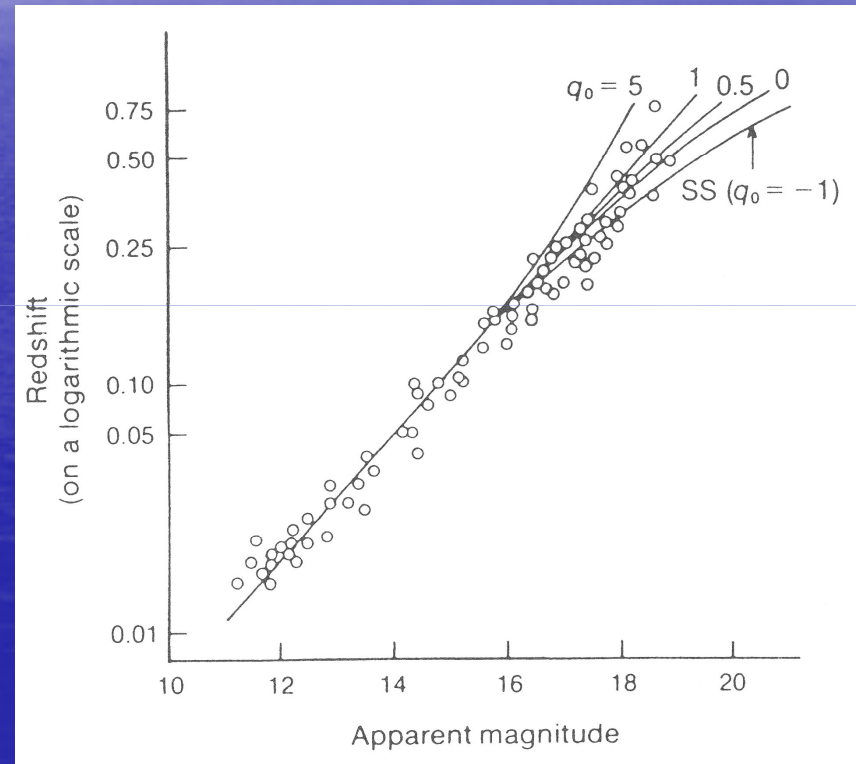
- Sandage tutki paljon 1950-70-luvuilla
- Hubblen laki näkyy kauniisti, MUTTA
- kirkkaus kehittyy miljardeissa vuosissa



Neitsyen joukko

Galaksijoukkojen ykkösgalaksit kirkkaustestissä

punasiirtymä

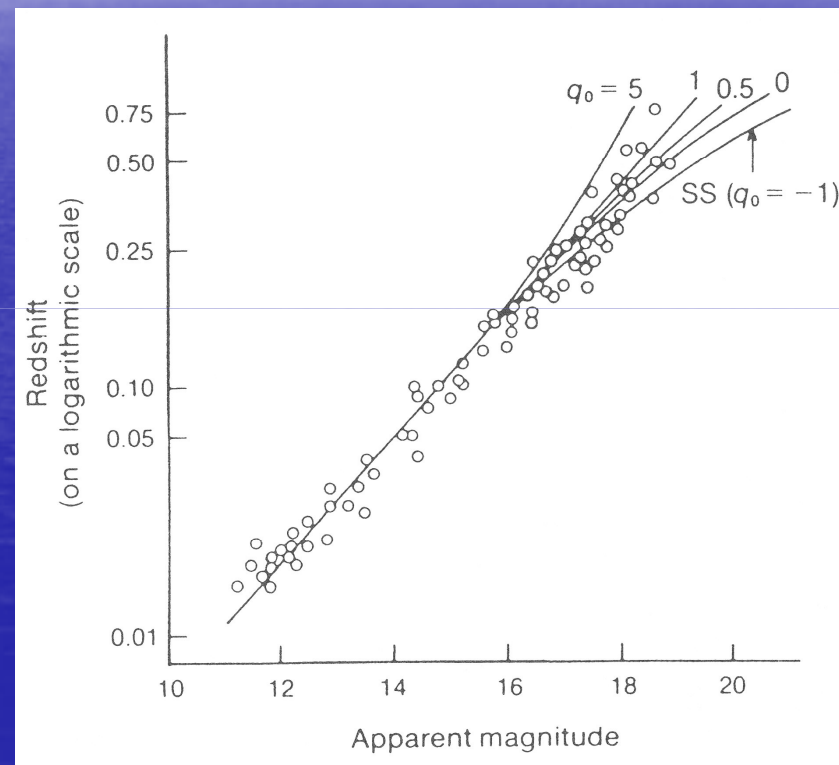


kirkkausetaisyys

Galaksijoukkojen ykkösgalaksit kirkkaustestissä

punasiirtymä

1956 Hoyle & Sandage
ennustivat mahdollisuuden
havaita kiihtyvästi laajeneva
kaikkeus m-z diagrammista!

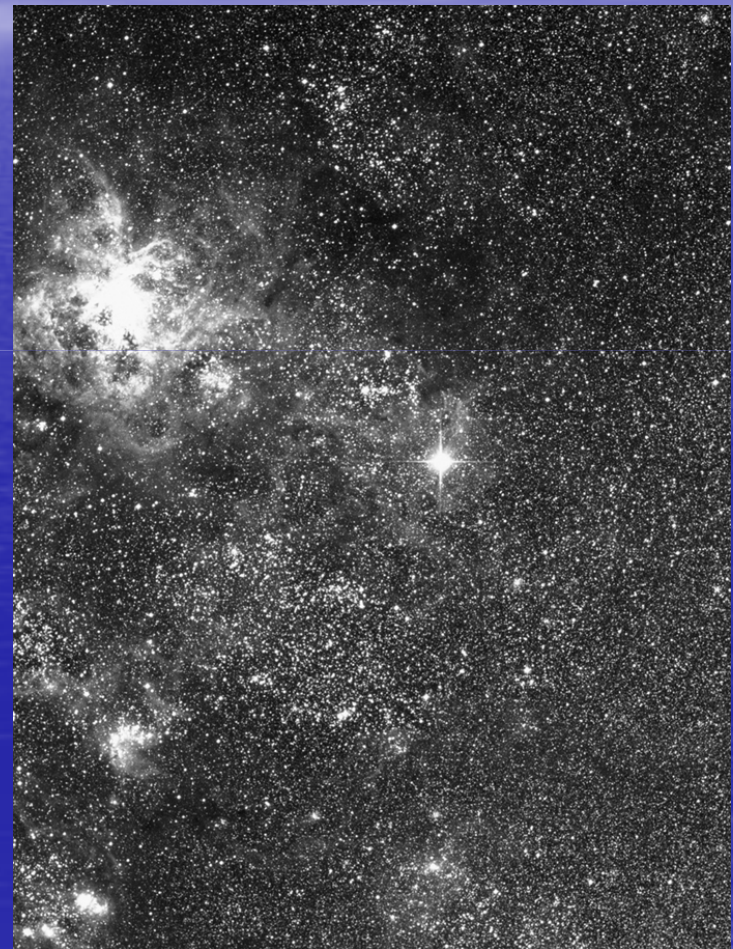


kirkkausetäisyys

Sandagen työtoveri Gustav Tammann 1979:
supernovia Ia voisi käyttää kirkkaustestissä ($\Lambda > 0$?)

1998-99 kaksi ryhmää
toteutti testin hyvin
etäisillä supernovilla

Λ = Einsteinin
kosmologinen vakio



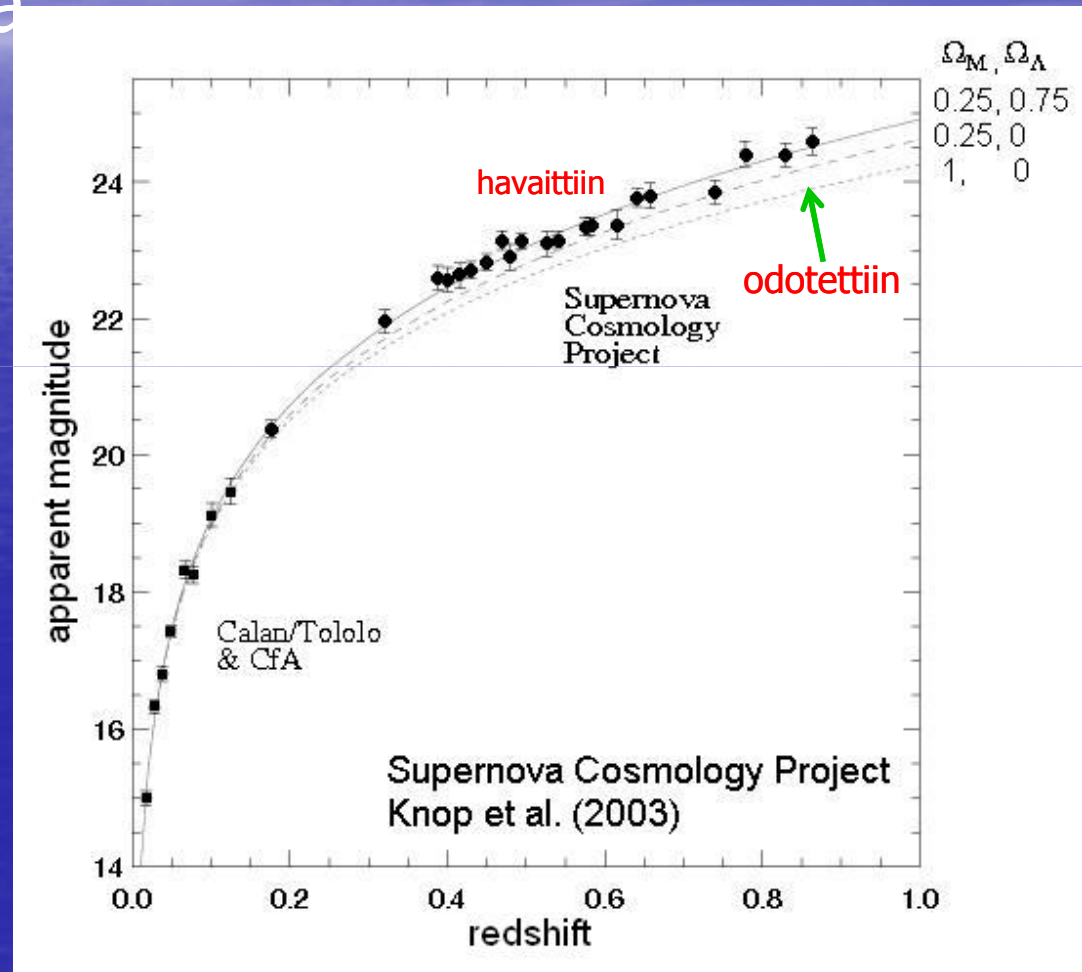
Sandagen työtoveri Gustav Tammann 1979:
supernovia Ia voisi käyttää kirkkaustestissä ($\Lambda > 0$?)

1998-99 kaksi ryhmää
toteutti testin

Riess et al.

Perlmutter et al.

Λ = Einsteinin
kosmologinen vakio

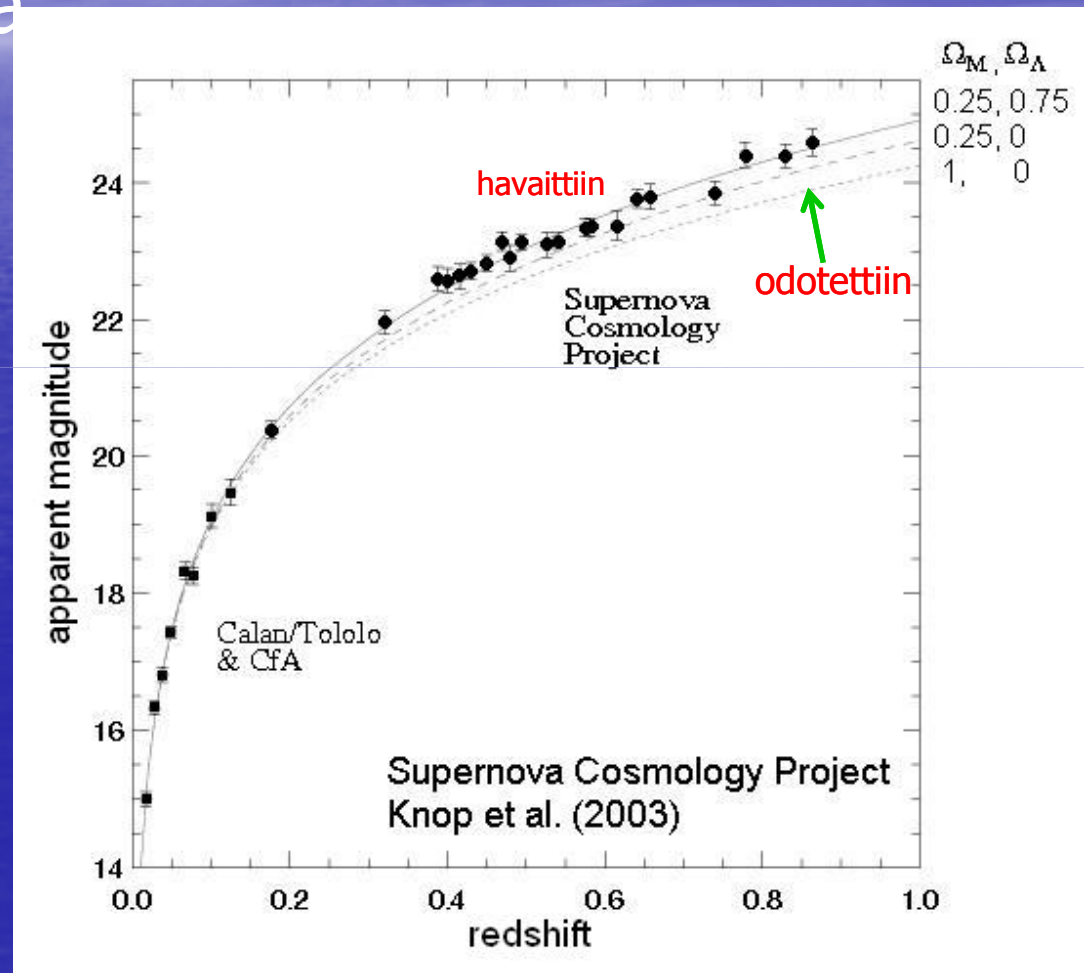


Sandagen työtoveri Gustav Tammann 1979:
supernovia Ia voisi käyttää kirkkaustestissä ($\Lambda > 0$?)

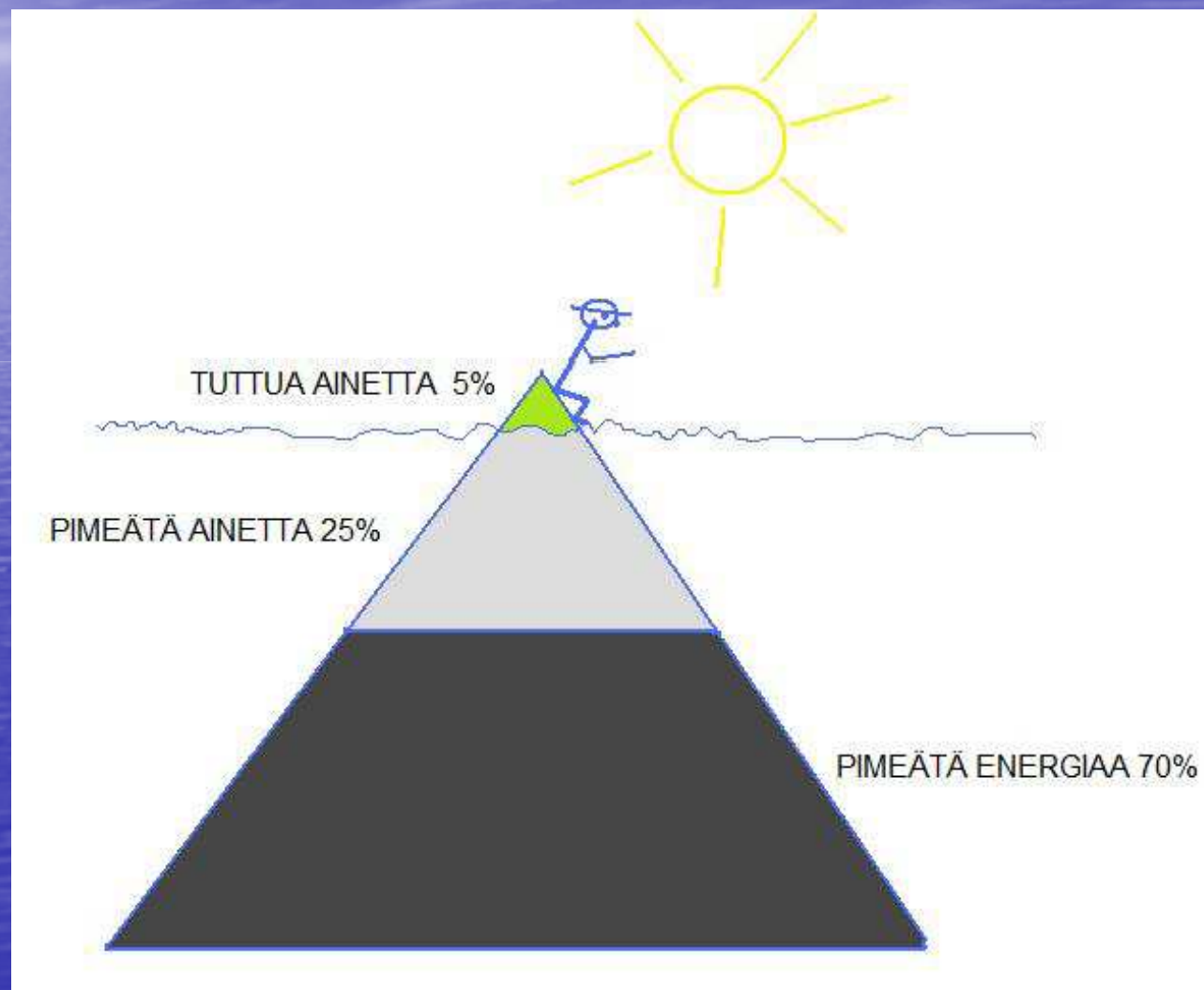
1998-99 kaksi ryhmää
toteutti testin

→ kiihtyvyys
→ "antigravitaatio",
pimeä energia, $\Lambda > 0$

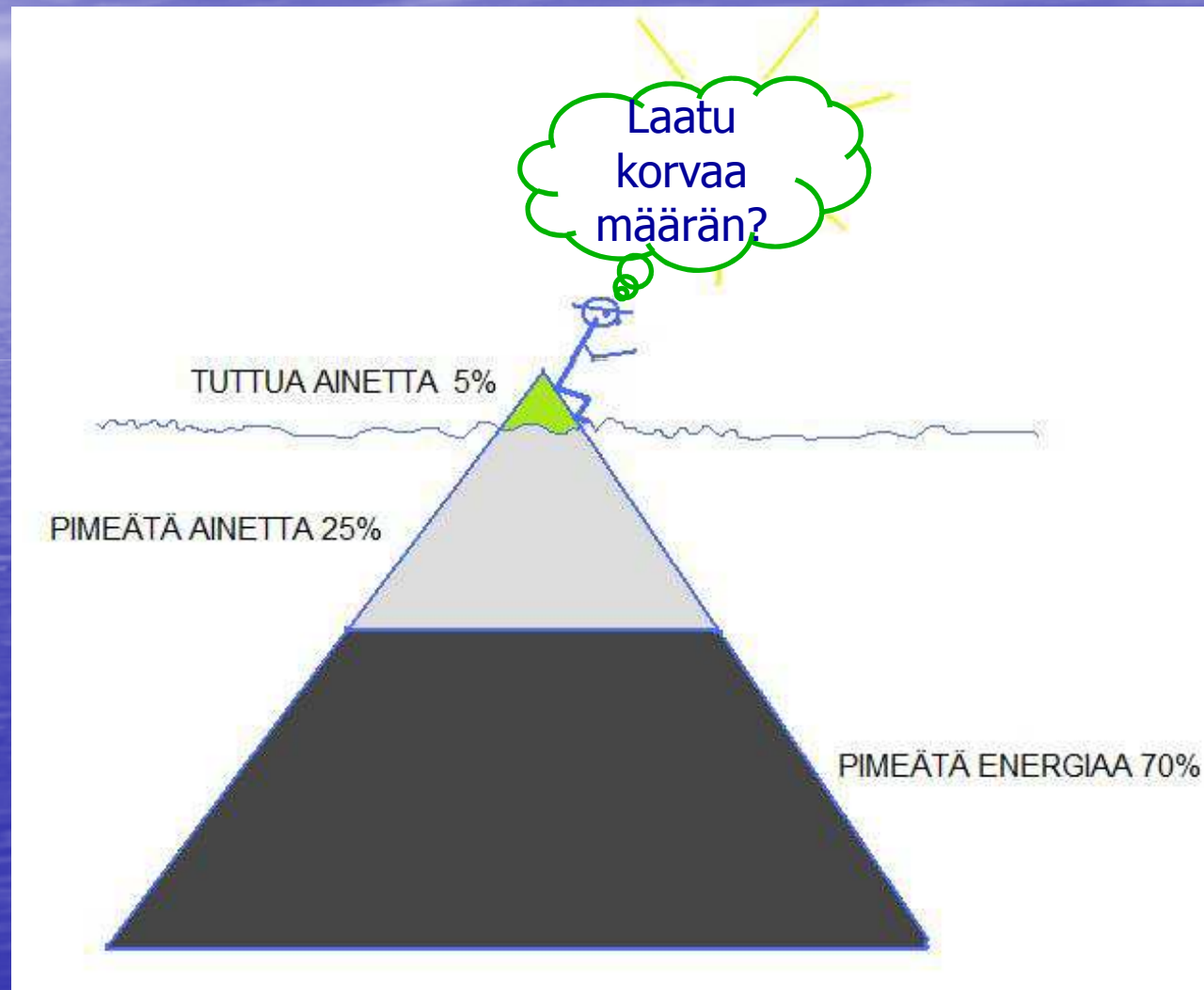
Λ = Einsteinin
kosmologinen vakio



Uusi kosmologia...



Uusi kosmologia...



Sandage (1995): 23 astronomical problems
for the next three decades*

Kosmologia-aiheisia mm.

Onko laajeneminen todellista?

Etäisyysskaala

Maailmankaikkeuden geometria

Pimeän aineen luonne ja määrä

* vrt. Hilbertin 23 matematiikan ongelmaa

Sandage (1995): 23 astronomical problems
for the next three decades

Kosmologia-aiheisia mm.

Onko laajeneminen todellista?

Etäisyysskaala

Maailmankaikkeuden geometria

Pimeän aineen luonne ja määrä

Toisinajattelijan työtoverina: Burbidge editor, Sandage co-editor Ann.Rev.A&A

Geoffrey Burbidge
(1925 – 2010)

alkuaineiden synty
tähdissä B²FH

kvasaarien
punasiirtymien luonne?

Big Bang?



Punasiirtymän luonne ja laajenemisen testit

staattinen
mekanismi tuntematon

laajeneva
laajeneva avaruus

(Sandage 1961)

- punasiirtymä ei muutu
- $\Delta z/\text{vuosi} \sim 1 \text{ cm/s/vuosi}$
ei testattu (42m E-ELT ?)
- kulma $\theta(z)$ laskeva
- $\theta(z)$:lla minimi!
ollut vaikea testata
- pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-1}$.
- pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-4}$.
Sandage: galaksi kalpenee, yes

+ pari muuta

Punasiirtymän luonne ja laajenemisen testit

staattinen
mekanismi tuntematon

laajeneva
laajeneva avaruus

(Sandage 1961)

- punasiirtymä ei muutu
- kulma $\theta(z)$ laskeva
- pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-1}$.
- $\Delta z/\text{vuosi} \sim 1 \text{ cm/s/vuosi}$
ei testattu (42m E-ELT ?)
- $\theta(z)$:lla minimi!
ollut vaikea testata
- pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-4}$.
Sandage: galaksi kalpenee, yes

Punasiirtymän luonne ja laajenemisen testit

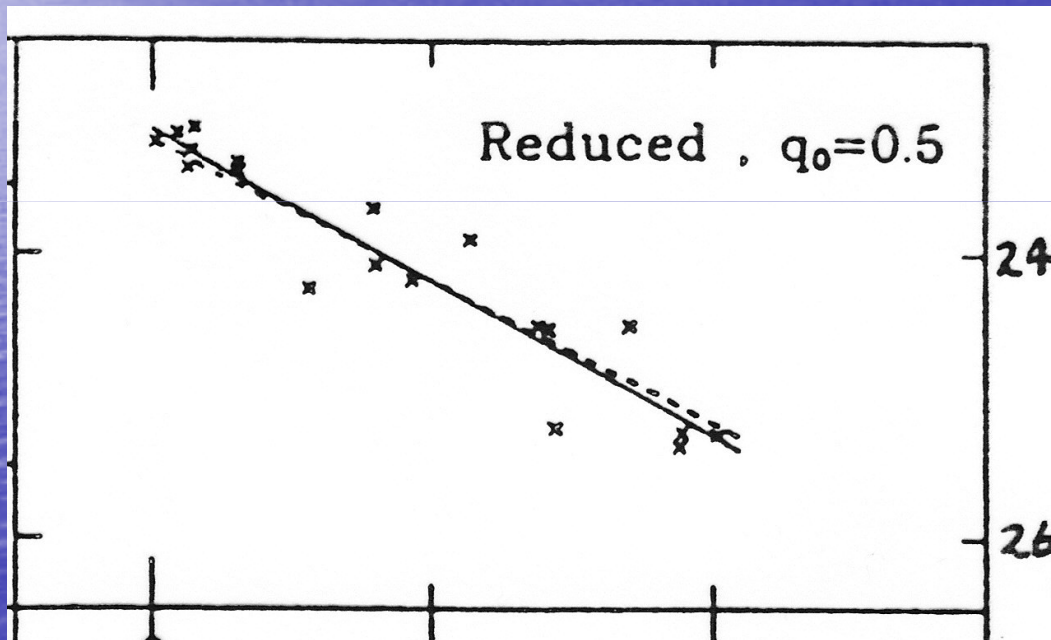
staattinen
mekanismi tuntematon

laajeneva
laajeneva avaruus

(Sandage 1961)

- punasiirtymä ei muutu
 - kulma $\theta(z)$ laskeva
 - pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-1}$.
- $\Delta z/\text{vuosi} \sim 1 \text{ cm/s/vuosi}$
ei testattu (42m E-ELT ?)
 - $\theta(z)$:lla minimi!
ollut vaikea testata
 - pintakirkkaus $\propto (1+z)^{-4}$.
Sandage: galaksi kalpenee, yes

**Sandage: galaksien pinnat himmenevät
suurin piirtein odotetusti
havaittu $(1+z)^{-3}$ + laskettu kehitys $\rightarrow (1+z)^{-4}$**

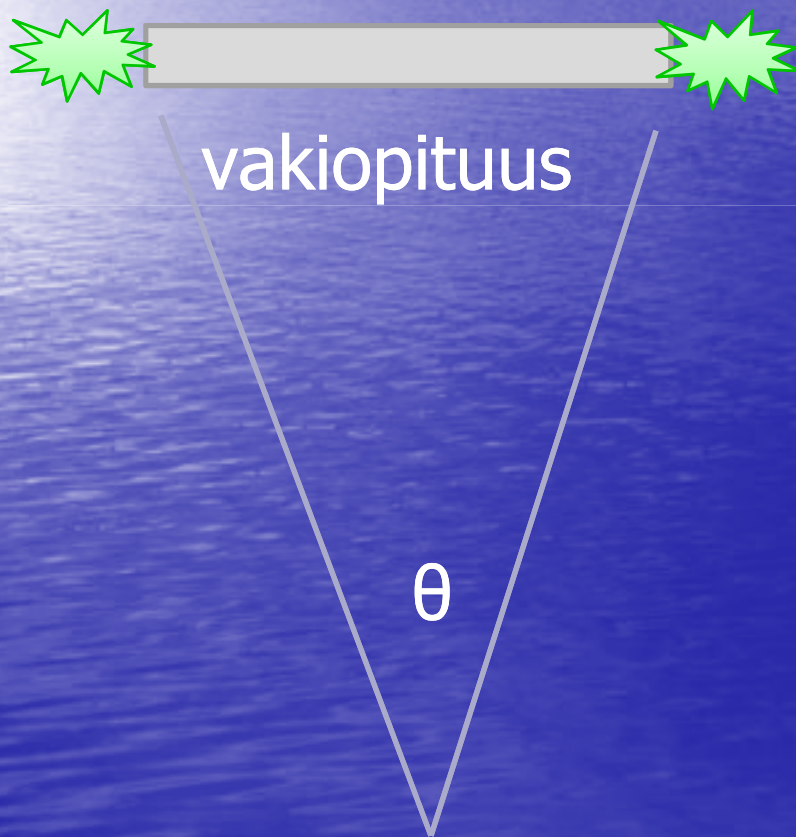


punasiirtymä

Vastaa "kaksoiskynttilän" yhdistelmätestiä

Entä kulmakokotesti?

Vakiotehot



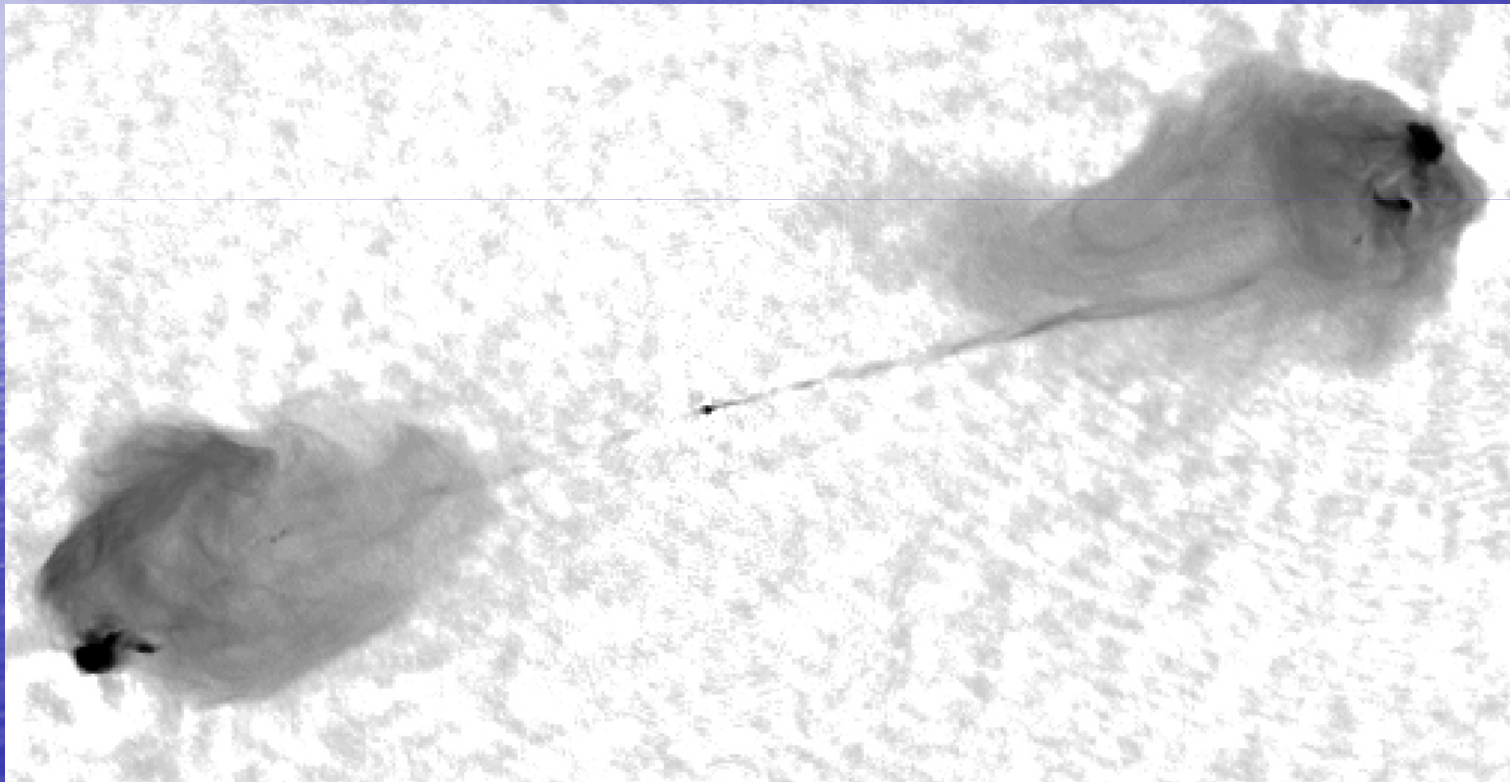
Kulmakokotesti:

(Fred Hoyle 1959)

Laajeneva avaruus →
kulmassa θ minimi,
punasiirtymä > 1

Kulmatestiä yritetty 2-radiolähteillä

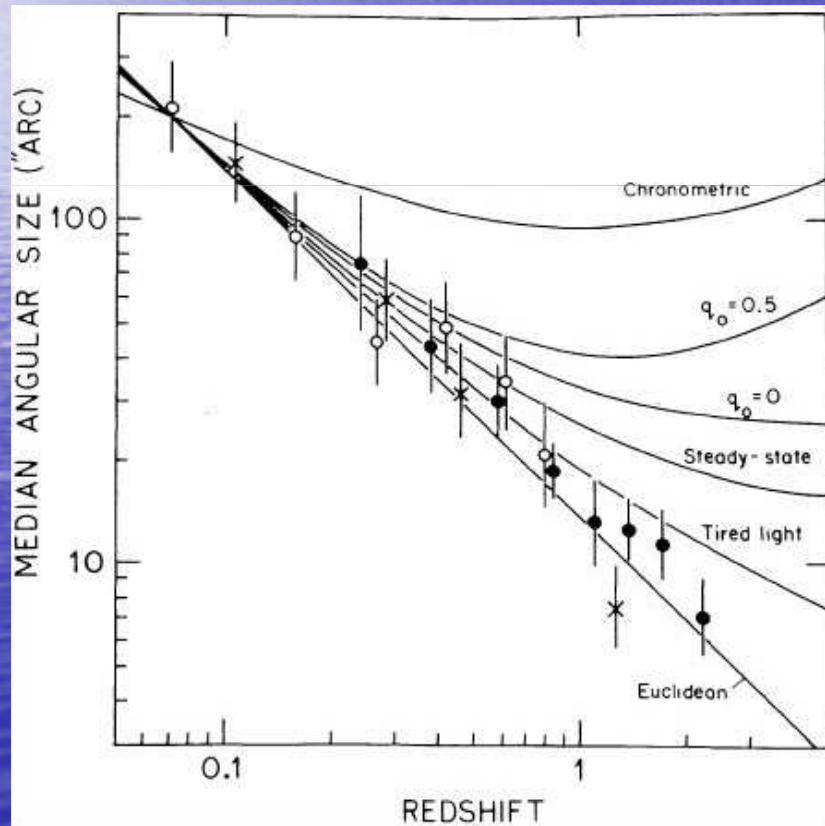
Joutsen A



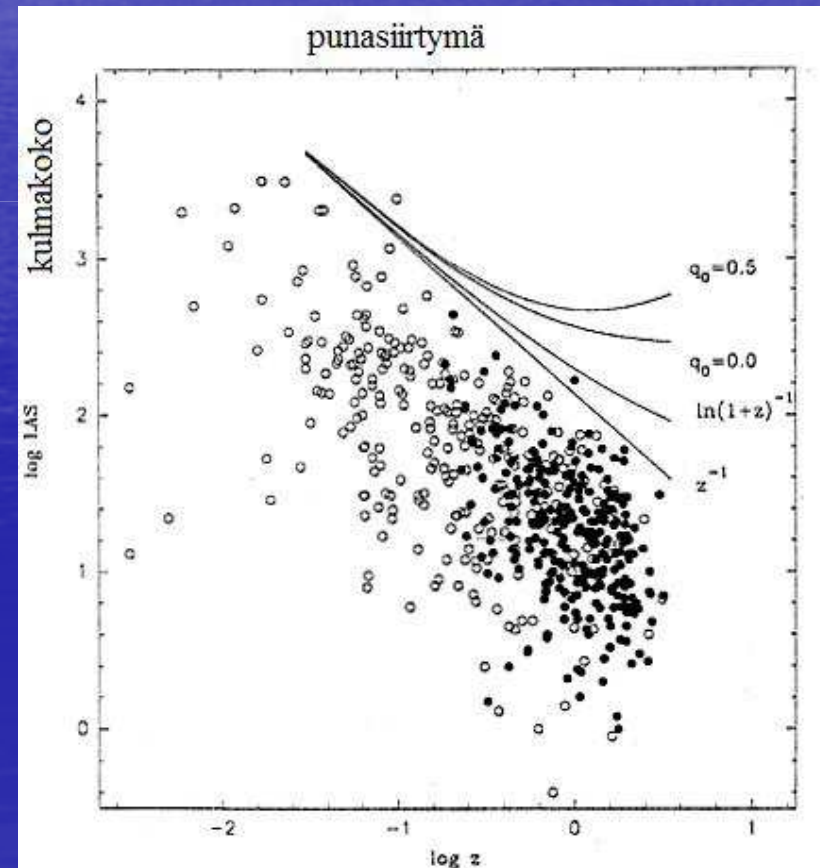
Kulmatestiä yritetty 2-radiolähteillä

minimiä ei ole saatu näkyviin
kehitys? valintaefekti?

Kapahi 1987



Nilsson 1993



Sopusoinnun periaate...

Friedmannin laajeneva malli selittää monia eri havaintoja, mikä puoltaa laajenemisen paradigmaa.

Sandage korostanut:

aikaskaalojen yhteensopivuus noin 14 miljardia v

- ikä Hubblen vakioista
- Linnunradan vanhimpien tähtijoukkojen ikä
- alkuaineiden ikä

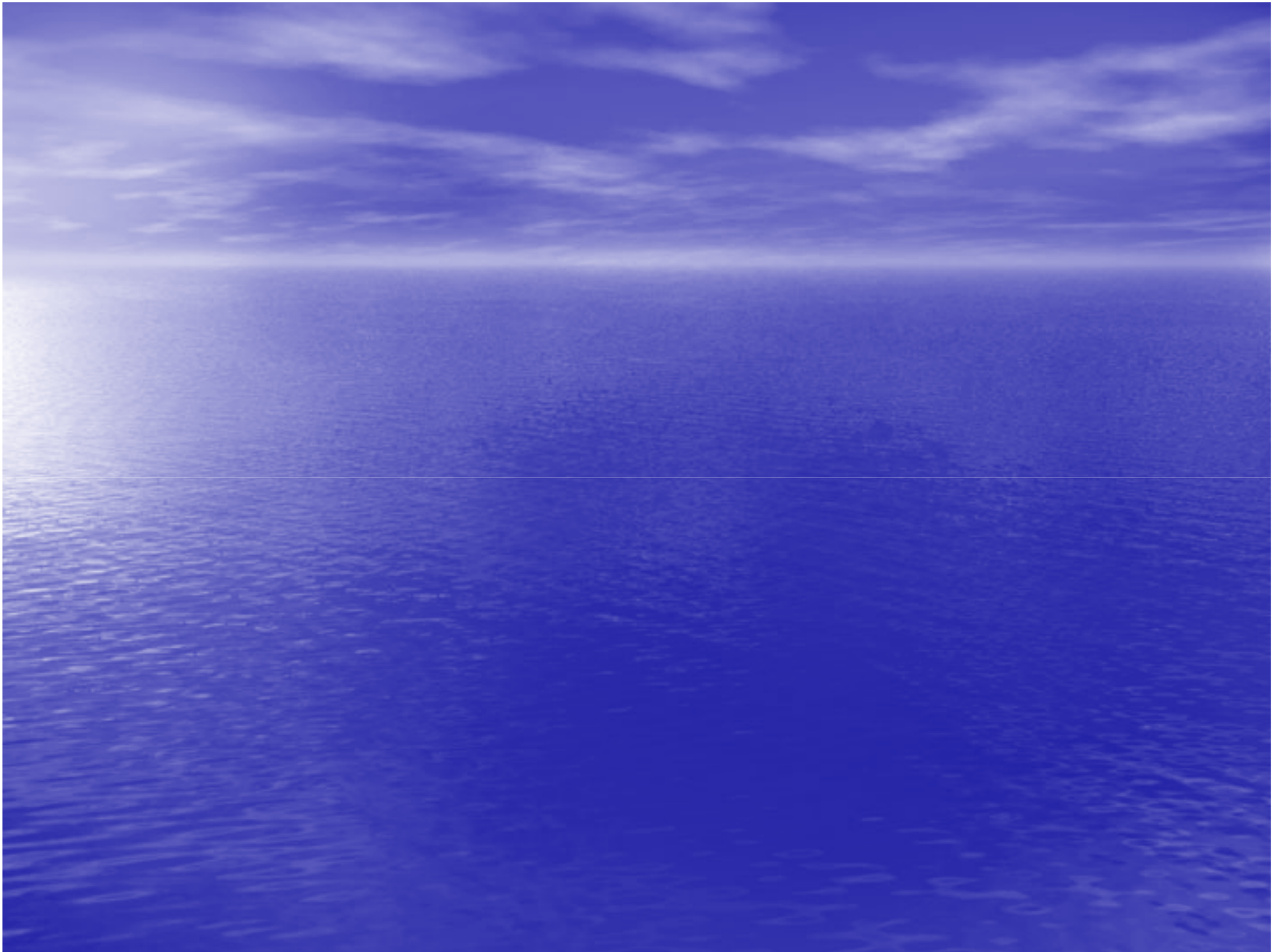
Suora mittaus, punasiirtymän muutos, vielä tekemättä → E pur si muove! (?)

“What seems so simple is often
complex in its dreadful detail”



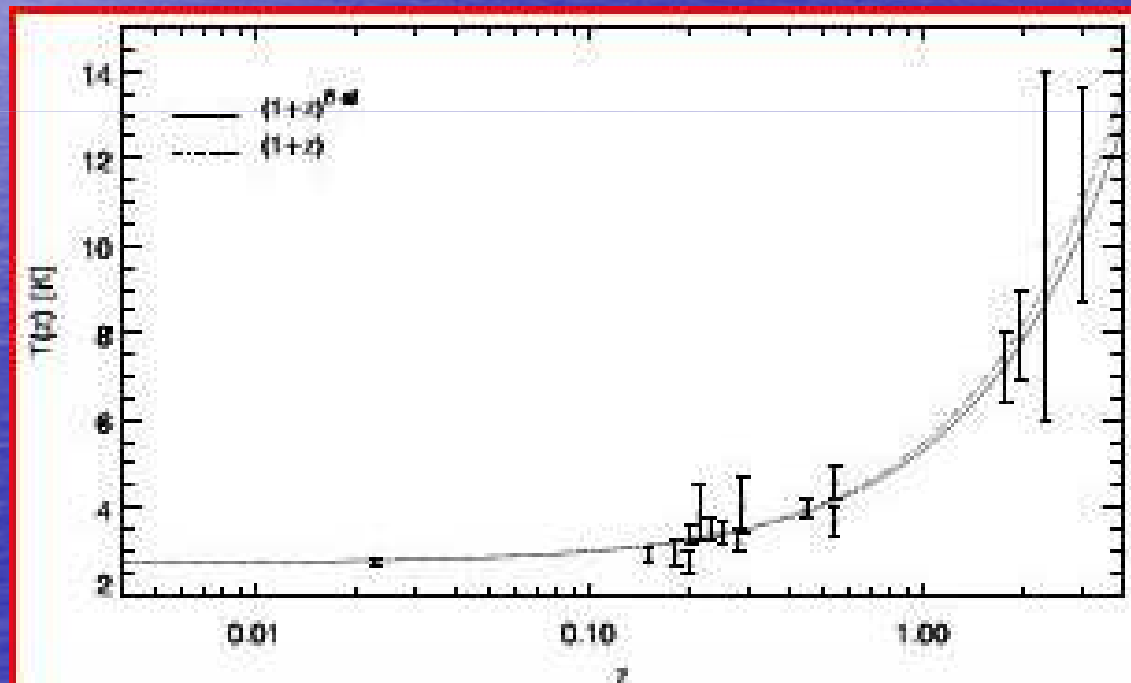
All's Well That Ends Well





lämpötila

$T(z) \approx 2.7 (1+z)$ Luzzi et al. 2009



Supernovien Ia valokäyrän venyminen punasiirtymän mukaan (Goldhaber et al. 2001)

