Hubblekonstanten og universts ekspansjon

Et eksempel på undervurdering av systematisk usikkerhet der ulike målemetoder gir resultater i konflikt med hverandre.

Øyvind Grøn

Trondheim Astronomiske Forening

27. September 2018

Lemaitre-Hubbles lov uttrykkes ofte på formen

$$v = H_0 s$$

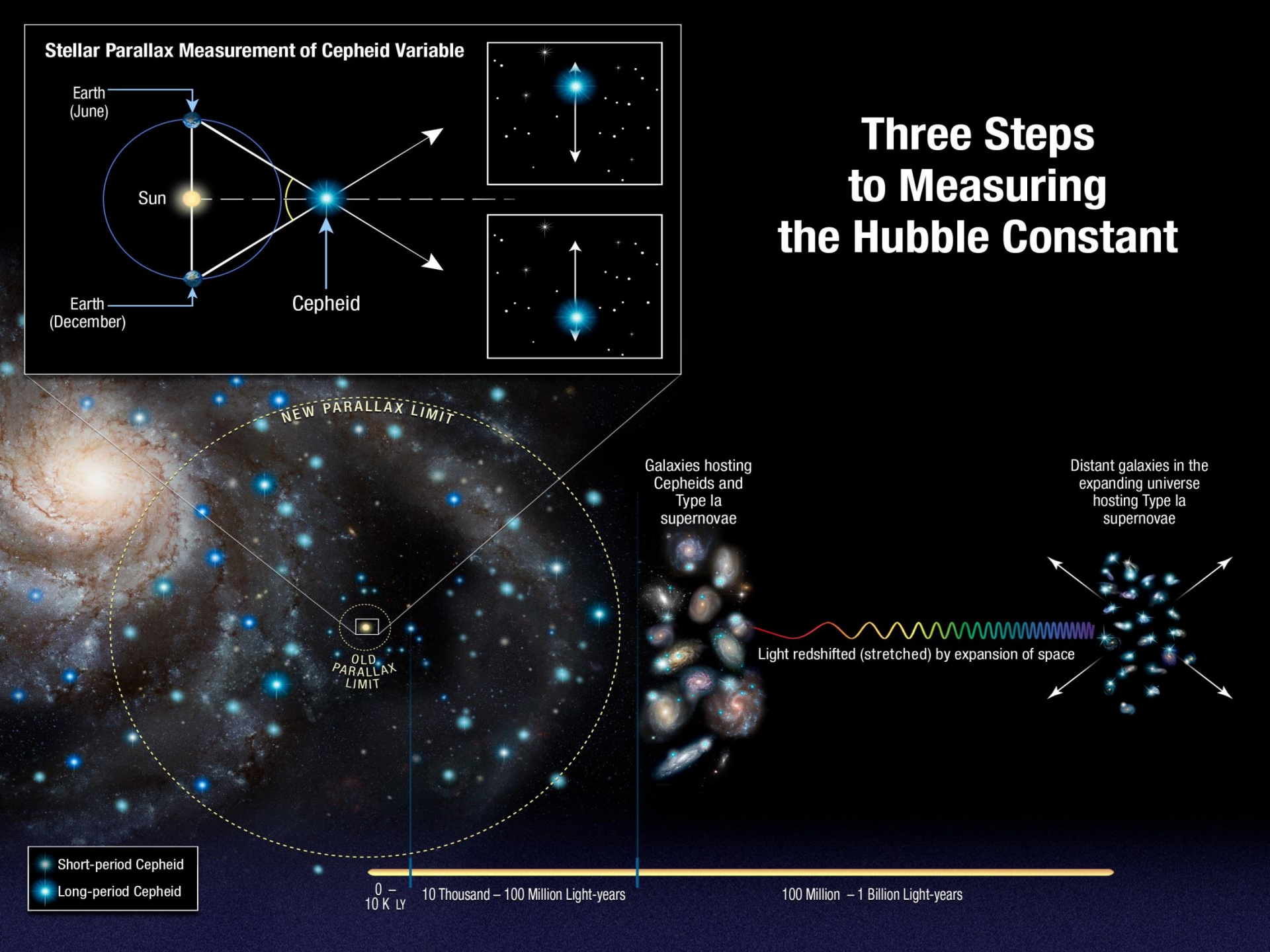
der v er hastigheten til en galakse i avstand s fra jorda på grunn av universets ekspansjon,

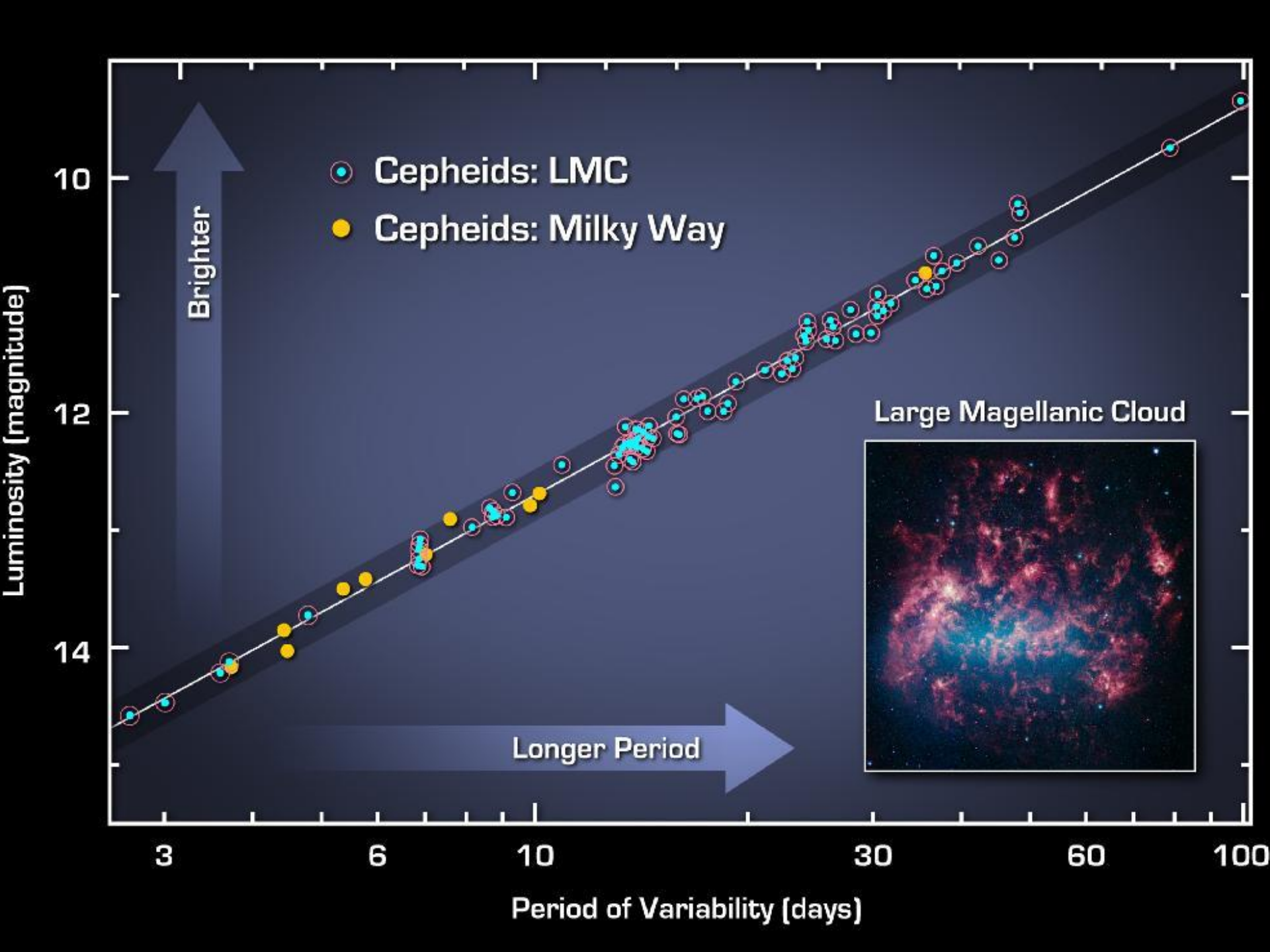
og Hubbles konstant H_0 er den nåværende verdien av Hubbleparameteren H.

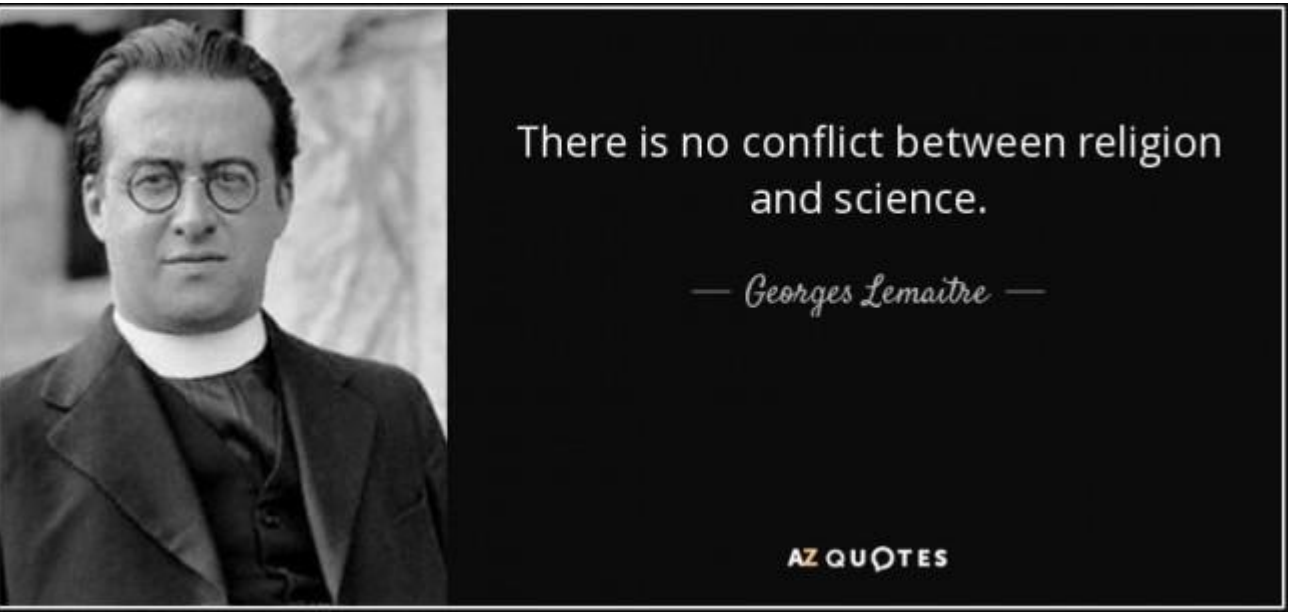
Dersom H_0 uttrykkes i enheten kilometer per sekund per million lysår og avstanden s i millioner lysår,

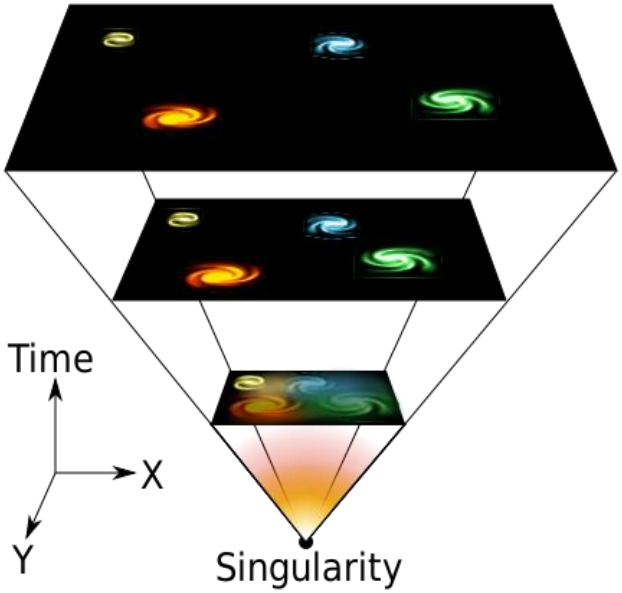
sier loven at for hver million lysår lenger ut i universet øker universets ekspansjonshastigheten med H_0 km/s.

Three Steps to Measuring the Hubble Constant




Cepheids: LMC
Cepheids: Milky Way
Brighter
Longer Period
Large Magellanic Cloud
Luminosity (magnitude)
10
12
14
3
6
10
30
60
100
Period of Variability (days)





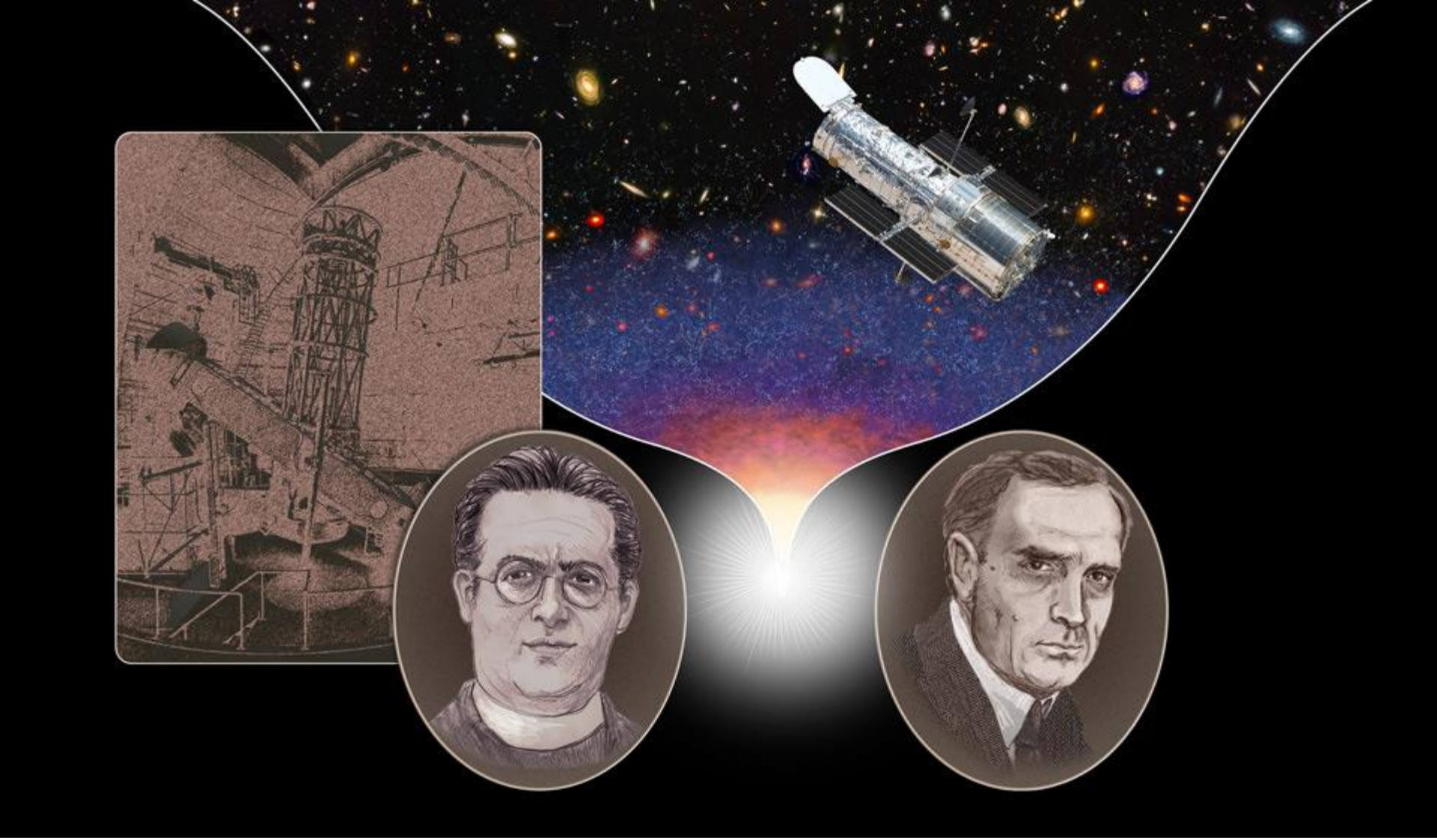
I 1927 publiserte den belgiske presten og kosmologen Georges Lemaître en artikkel på fransk i et belgisk tidsskrift en artikkel der han gjenoppdaget og generaliserte Friedmanns løsninger fra 1922 ved å inkludere både materie og kosmologisk konstant i sine universmodeller.

Lemaître fulgte opp med å utlede observerbare konsekvenser av universmodellene og sammenliknet disse med observasjoner. Det dreide seg om frekvensforskyvningen av lys fra fjerne strålingskilder. Lemaître viste at lyset fra en fjern kilde får en rødforskyvning proporsjonal med kildens avstand i slike universmodeller.

Han brukte generell relativitetsteori til å vise at rødforskyvningen kunne oppfattes som en ekspansjonseffekt, og ledet til forutsigelsen: hastigheten til et fjernt objekt på grunn av universets ekspansjon er proporsjonal med objektets avstand fra oss. Denne sammenhengen ble senere kalt Hubbles lov, men ble altså utledet av Lemaître i 1927.

Lemaître sjekket også om ekspansjonsloven stemte med observasjoner. Han brukte en liste som inneholdt 42 «tåker» (galakser) med målte hastigheter, v, i synsretningen. Lemaître estimerte avstanden, l, til tåkene med utgangspunkt i Hubbles antagelse om at de alle sendte ut stråling med samme intensitet. Avstandene kunne dermed beregnes ut fra hvor sterkt de lyste sett fra Jorda. Lemaître korrigerte så for Jordas bevegelse rundt Sola.

På denne måten fant han $v = H_0 s$, der $H_0 = 192$ km/s per million lysår. Universets alder dersom det har ekspandert med den nåværende farten så lenge det har eksistert, kalles universets Hubblealder. Denne verdien av H_0 innebærer at universets Hubblealder bare er omtrent 1,6 milliarder år.



Georges Lemaître 1894-1966 og Edwin Hubble 1889-1953

Beregnete verdier av Hubbles konstant ut fra observasjoner

1927: Georges Lemaître brukte observasjonsdata fra Strömberg og Hubble og fant at den relativistiske ekspansjonsloven var oppfylt med H_0 = 192 km/s per million lysår. Usikkerhet ble ikke diskutert.

1929: Edwin Hubble gjorde noe annet. Han brukte egne og andres observasjoner til å vise at observasjonene alene gir en proporsjonalitet mellom fjerne objekters hastighet vekk fra oss og deres avstand. Han avsto fra å relatere dette til noen teoretisk forutsigelse. Verdien han fant for Hubbles konstant var H_0 = 153 km/s per million lysår. Dette svarer til at universets Hubblealder er 2 milliarder år.

Hubble kalibrerte avstandene til galakser utenfor Melkeveien ved å bruk Kefeidevariable stjerner. De har en periode som er proporsjonal med luminositeten. Ved å måle perioden kunne dermed luminositeten beregnes, og fra luminositeten og den observerte lysstyrken kunne avstanden beregnes.

Systematisk usikkerhet ble ikke diskutert.

Hubbles hastighets-avstand plott fra 1929

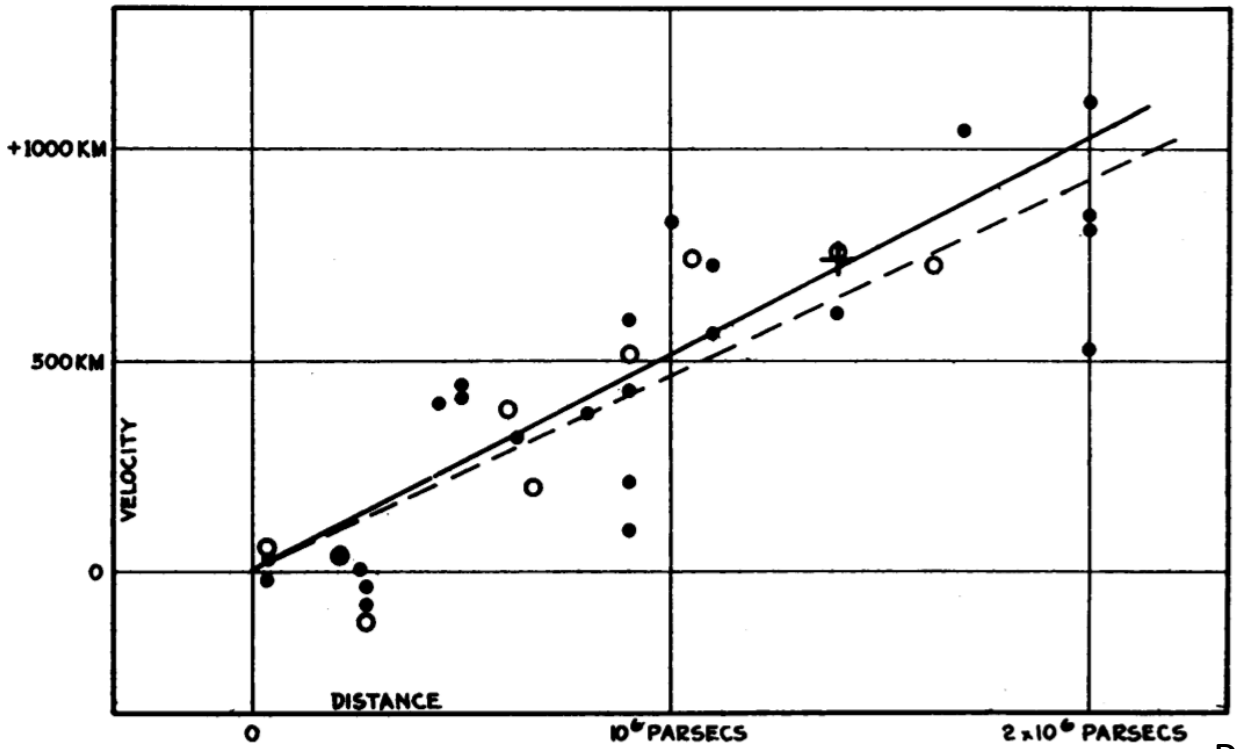


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Parsec=3,26 lysår

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

1952: Astronomen Walter Baade oppdaget at det eksisterer to typer Kefeidevariable stjerner, og at Hubbles avstandsberegninger var basert på feil bruk av de kefeidevariable stjernene. Han bestemte Hubbles konstant til H_0 = 61 km/s per million lysår. Den tilsvarende Hubblealderen er 5 milliarder år.

1958: Allan Sandage fant ut at flere av objektene Hubble trodde var de lyseste stjernene i galakser han bestemte avstanden til, i virkeligheten var skyer av varm gass. Da han korrigerte for dette fant han at H_0 = 23 km/s per million lysår. Den tilsvarende Hubblealderen er 13,3 milliarder lysår.

2001: Nøkkelprosjektet til Hubble romteleskopet var å bestemme Hubbles konstant med bare 10 % usikkerhet. Hubble romteleskopet ble sendt opp i 1990, og prosjektet ble fullført i 2001 med resultatet H_0 = 22±2,5 km/s per million lysår.

2005: I en oversiktartikkel fra 2005 av G. A. Tammann skriver han:

The conclusion is that $H_0 = 63.2 \pm 1.3$ *(random)* ± 5.3 *(systematic)* on all scales. *The expansion age becomes then (with* $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$*)* 15.1 *Gyr.*

Avstandsenheten er her kiloparsec, som svarer til 3260 lysår.
Overgangen til å oppgi H_0 i km/s per million lysår skjer
ved å dividere med 3,26.

Her er statistisk og systematisk usikkerhet oppgitt.
Statistisk usikkerhet er usikkerhet knyttet til
måleutstyret og observasjonene.
Systematisk usikkerhet kommer fra
manglende kunnskaper om objektet som måles.

Sunyaev-Zel'dovich effekten

Kollisjoner mellom fotoner i den kosmiske bakgrunnsstrålingen
og energirike elektroner i den intergalaktiske gassen mellom galaksene i
en galaksehop, endrer spekteret til strålingen.
Fotonene får dermed større energi
slik at intensitetsmaksimumet forskyves mot høyere frekvens.
Dette kalles Sunyaev-Zel'dovich effekten.
Endringen av spekteret på grunn av denne effekten er svært liten.
Man må måle strålingens temperaturen med
en nøyaktighet på en tusendels grad for å registrere effekten.
Men dette har man greid de siste årene.

Hubblekonstanten bestemt ved hjelp av Sunyaev-Zel'dovich effekten

Temperaturendringen på grunn av Sunyaev-Zel'dovich effekten er
proporsjonal med tettheten av gass i en galaksehop.
Det betyr at ved å måle denne temperaturendringen
kan tettheten bestemmes. Videre gir røntgenobservasjoner av en galaksehop
informasjon om hopens totale masse.
Fra kjennskapet til massen og tettheten kan hopens utstrekning beregnes.
Galaksehopene er så store at selv de fjerneste av dem
utspenner en romvinkel omtrent lik et bueminutt,
dvs. 1/30 av vinkelen som månen utspenner på himmelen.
Dette betyr at vinkelutstrekningen til galaksehopene enkelt kan måles.
Fra vinkelutstrekningen og hopens utstrekning bestemt fra
Sunyaev-Zel'dovich-forskyvningen av intensitetsmaksimumet,
kan hopens avstand beregnes.
Ved så å måle rødforskyvningen av lys fra stjerner i hopen
kan verdien av Hubblekonstanten bestemmes.
Denne metoden er uavhengig av den kosmiske avstandsstigen.

2006: Determination of the Cosmic Distance Scale from Sunyaev-Zel'dovich Effect and *Chandra* X-Ray Measurements of High-Redshift Galaxy Clusters

Massimiliano Bonamente[1,2], Marshall K. Joy[1], Samuel J. LaRoque[3], John E. Carlstrom[3,4], Erik D. Reese[5], and Kyle S. Dawson[6]

© 2006. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

The Astrophysical Journal, Volume 647, Number 1

We determine the distance to 38 clusters of galaxies in the redshift range $0.14 \leq z \leq 0.89$ using X-ray data from *Chandra* and Sunyaev-Zeldovich effect (SZE) data from the Owens Valley Radio Observatory and the Berkeley-Illinois-Maryland Association interferometric arrays. The cluster plasma and dark matter distributions are analyzed using a hydrostatic equilibrium model that accounts for radial variations in density, temperature, and abundance, and the statistical and systematic errors of this method are quantified. The analysis is performed via a Markov chain Monte Carlo technique that provides simultaneous estimation of all model parameters. We measure a Hubble constant of $H_0 = 76.9^{+3.9}_{-3.4}{}^{+10.0}_{-8.0}$ km s^{-1} Mpc^{-1} (statistical followed by systematic uncertainty at 68% confidence) for an $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ cosmology.

2012: NINE-YEAR *WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE* (*WMAP*) OBSERVATIONS: FINAL MAPS AND RESULTS

C. L. Bennett[1], D. Larson[1], J. L. Weiland[1], N. Jarosik[2], G. Hinshaw[3], N. Odegard[4], K. M. Smith[5,6], R. S. Hill[4], B. Gold[7], M. Halpern[3] + Show full author list

Published 2013 September 20 • © 2013. The American Astronomical Society. All rights reserved.

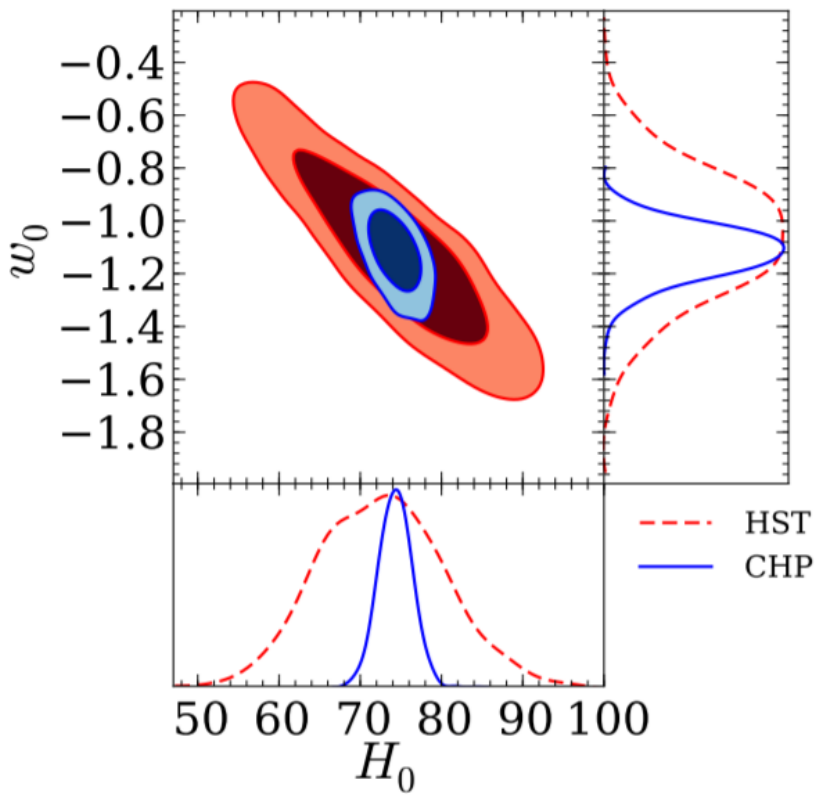
The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 208, Number 2

The model fit also implies that the age of the universe is $t_0 = 13.772 \pm 0.059$ Gyr, and the fit Hubble constant is $H_0 = 69.32 \pm 0.80$ km s^{-1} Mpc^{-1}.

2012:

Carnegie Hubble Program: A Mid-Infrared Calibration of the Hubble Constant

August 15, 2012



Universet er fylt av kosmiske medier med tilstandslikning $p = w_0 \rho$, der $p > 0$ står for trykk, $p < 0$ strekk og ρ for tetthet.
$p = 0$ er kald materie kalt støv,
$p = 1/3$ er elektromagnetisk stråling,
$p = -1$ er LIVE, Lorentz Invariant Vakuum Energi, energi man ikke kan måle farten i forhold til.
Det røde feltet og kurvene representerer resultater fra tidligere målinger med Hubble romteleskopet, og de blå de nye resultatene til CHP-prosjektet.

BAO: Baryoniske akustiske oscillasjoner

I de første fire hundre tusen årene etter Big Bang eksisterte den kosmiske materien i form av et plasma av ladde partikler.
Elektromagnetiske krefter dominerte over gravitasjon i denne perioden, slik at materien da ikke hadde noen tendens til å klumpe seg.
Det oppsto i stedet lydbølger i plasmaet,

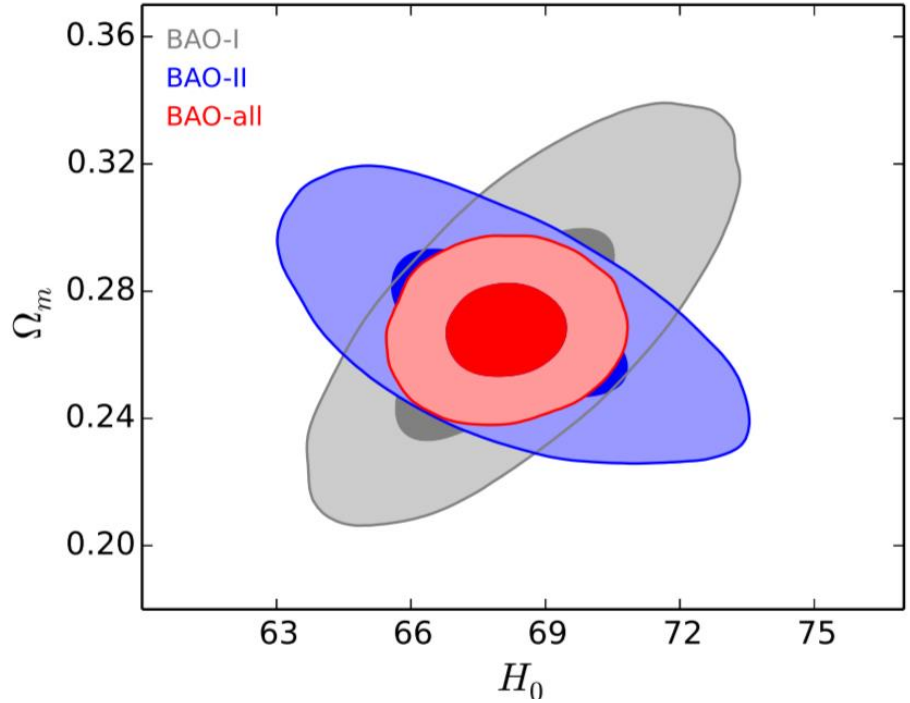
også kalt akustiske oscillasjoner.
Omtrent 400 000 år etter Big Bang sank temperaturen i plasmaet til rundt 3000 grader, og dermed greide protoner å fange frie elektroner og danne nøytrale hydrogenatomer.
Da gikk materien over fra plasmafasen til gassfasen,
og de elektromagnetiske kreftene ble neglisjerbare.
Dermed begynte gravitasjon å klumpe sammen materien.

Avstanden lydbølgene kunne ha beveget seg
På de 400 000 årene siden Big bang kalles radien til lydhorisonten.
Denne avstanden definerer en karakteristisk lengdeskala i universet.
Utstrekningen av de største opprinnelige områdene med litt større tetthet enn gjennomsnittstettheten var lik radien til lydhorisonten.
Dette gir opphav til et identifiserbart signal i spekteret av tetthetsfluktuasjoner i den kosmiske materien.
Signalet kan brukes som en «standard målestav» i universet.
Sammen med målinger av rødforskyvning av fjerne objekter,
og ved å bruke Hubbles lov,
kan man dermed bestemme Hubbles konstant.

2014:

An accurate determination of the Hubble constant from Baryon Acoustic Oscillation datasets

Cheng Cheng[1,2] and Qing-Guo Huang[1]



22. September 2014

	H_0 (km/s/Mpc)	Ω_m
BAO-I	$68.17^{+1.55}_{-1.56}$	$0.268^{+0.022}_{-0.021}$
BAO-II	68.11 ± 1.69	$0.269^{+0.015}_{-0.014}$
BAO-all	68.11 ± 0.86	$0.268^{+0.009}_{-0.010}$

Refsdals metode for å bestemme Hubbles konstant ved hjelp av gravitasjonslinser

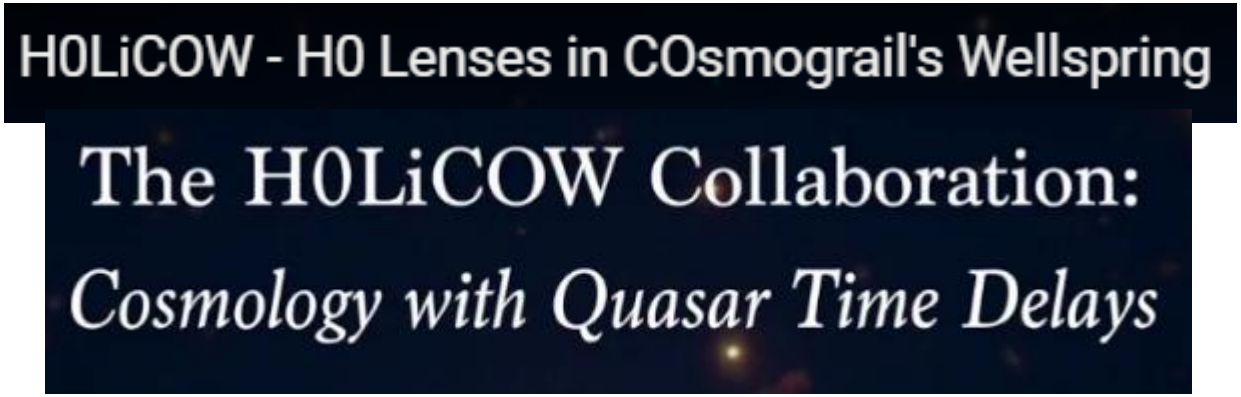
Allerede i 1964, dvs. 15 år det første gravitasjonslinsebildet var observert, presenterte Sjur Refsdal en metode for hvordan man kunne bruke gravitasjonslinser for å bestemme verdien av Hubbles konstant. En pedagogisk presentasjon av metoden finnes i artikkelen

Eur. J. Phys. 13 (1992) 178–183. Printed in the UK

Gravitational lenses and the age of the universe

Ø Grøn† and S Refsdal‡

Refsdals hovedpoeng er at når lys fra en fjern kvasar passerer gjennom en forgrunnsgalakse på vei til jorda, avbøyes det.
Forgrunnsgalaksen virker som en samlelinse.
Dermed kan det dannes flere bilder av kvasaren.
Reisetiden for lyset som danner de ulike bildene er forskjellig.
Refsdal utledet en formel som viste hvordan forskjellen i reisetid avhenger av Hubbles konstant.
I denne formelen inngår også flere egenskaper for gravitasjonslinsegalaksen, samt avstandene både til kvasaren og gravitasjonslinsen.
Dersom man greier å bestemme disse størrelsene,
kan man bestemme verdien av Hubbles konstant fra målinger av tidsforsinkelser i registreringer av signaler fra kvasaren
som gir opphav til karakteristiske endringer i gravitasjonslinsebildene.



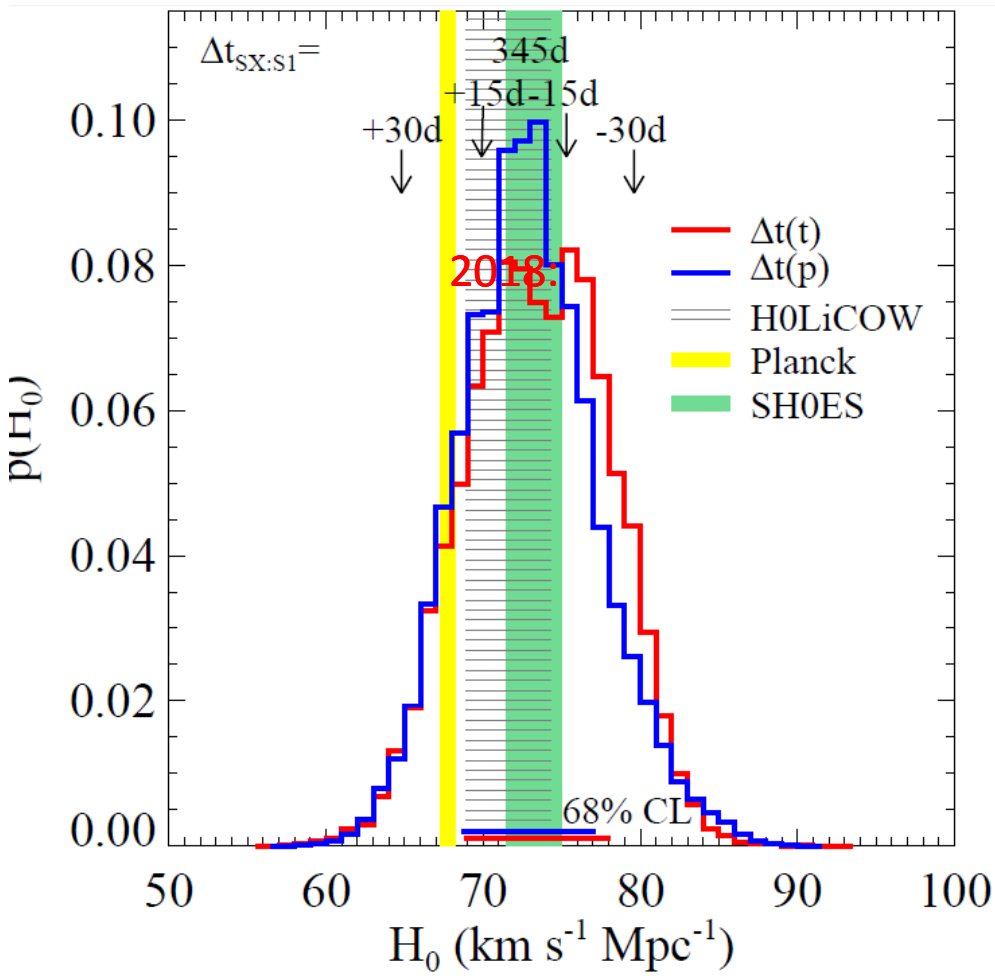
The H0LiCOW collaboration has revealed its measurement of the Hubble constant H_0 from its analysis of three multiply-imaged quasar systems through strong gravitational lensing: $H_0 = 71.9\ ^{+2.4}_{-3.0}$ km/s/Mpc, at 3.8% precision, in the standard flat-ΛCDM model.

Since the value measured from the SHOES project using Cepheids and supernovae is completely independent of the H0LiCOW value, both can be combined into a single measurement of the Hubble Constant in the local Universe.

This new value of $H_0 = 72.5 \pm 1.2$ km/s/Mpc is 3.9σ higher than the most recent measurement of Planck, where $H_0 = 67.8 \pm 0.9$ km/s/Mpc.

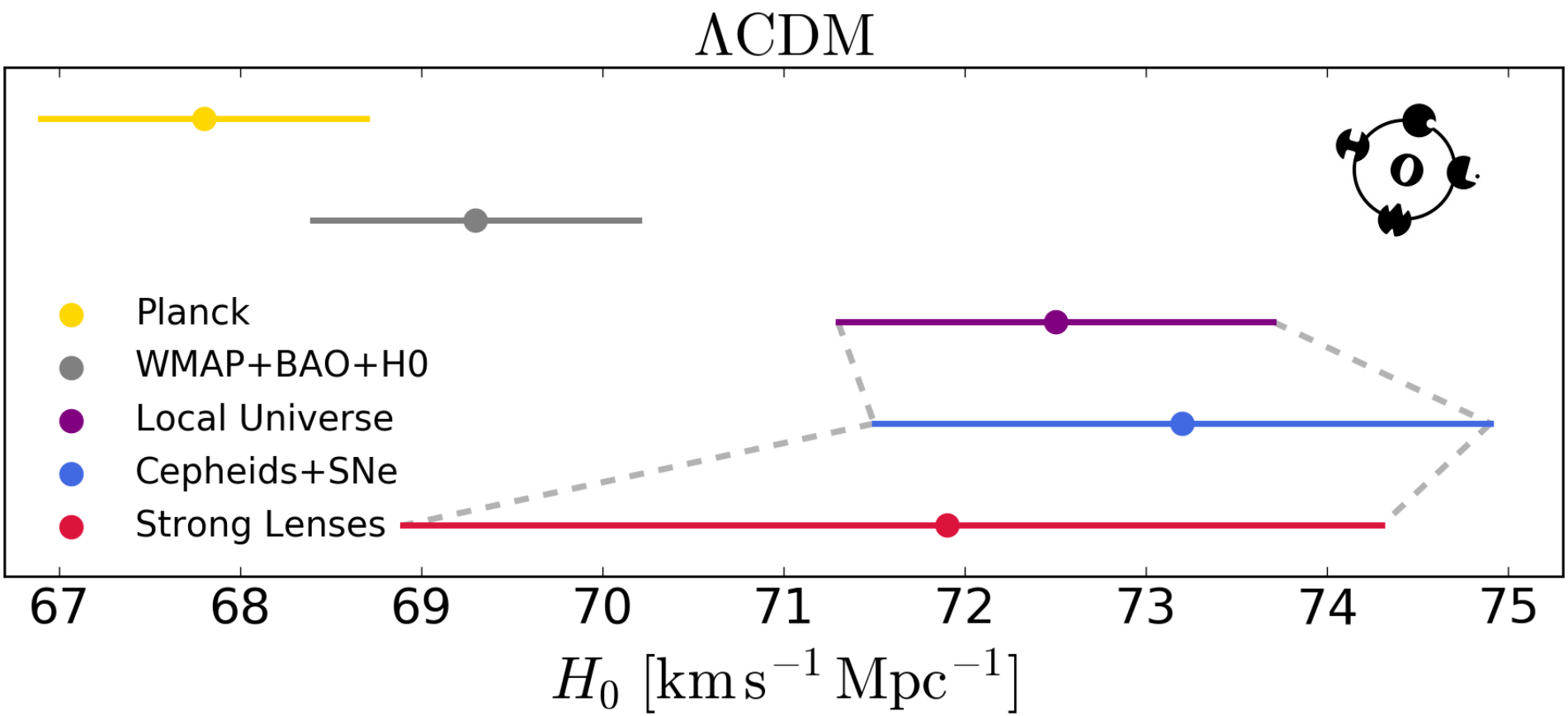
Draft version February 7, 2018
Typeset using LaTeX twocolumn style in AASTeX61

MEASURING THE VALUE OF THE HUBBLE CONSTANT "À LA REFSDAL"



2018:

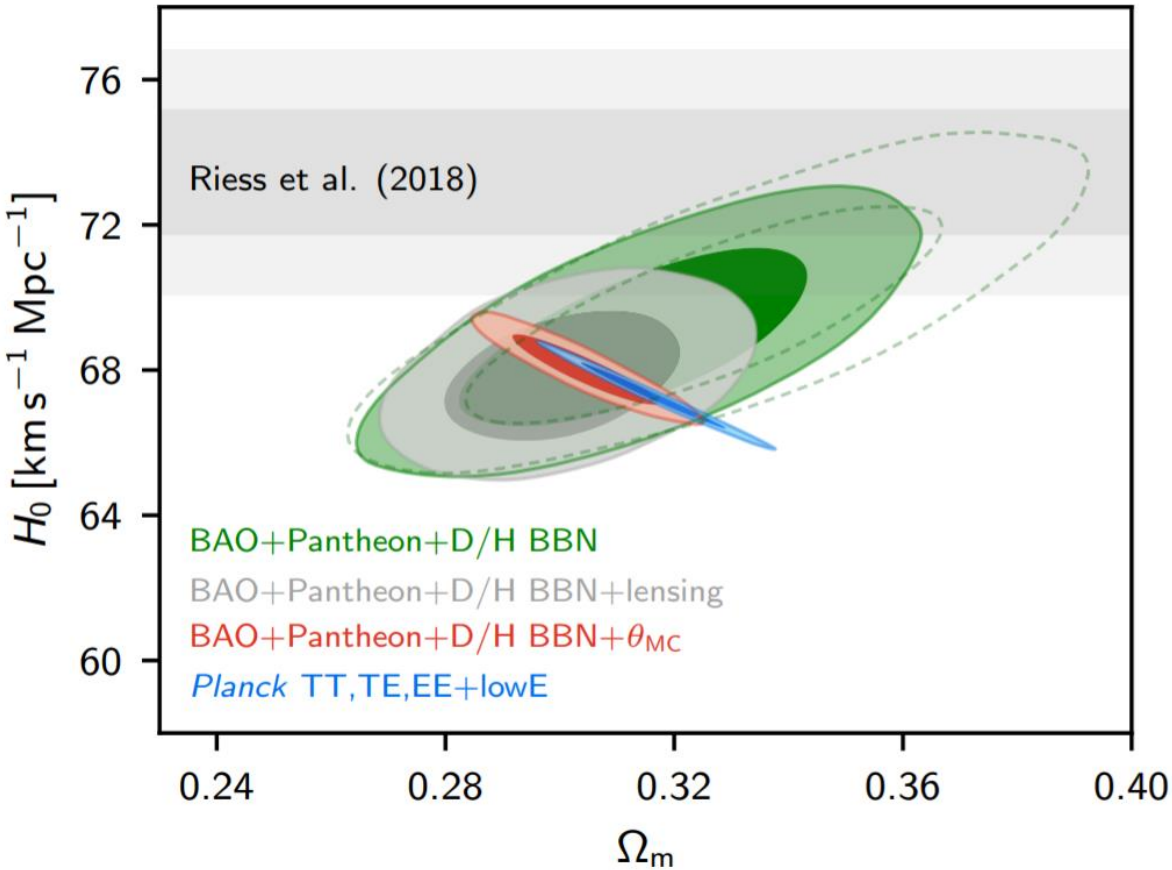
H0LiCOW - H0 Lenses in COsmograil's Wellspring



Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters

(Submitted on 17 Jul 2018)

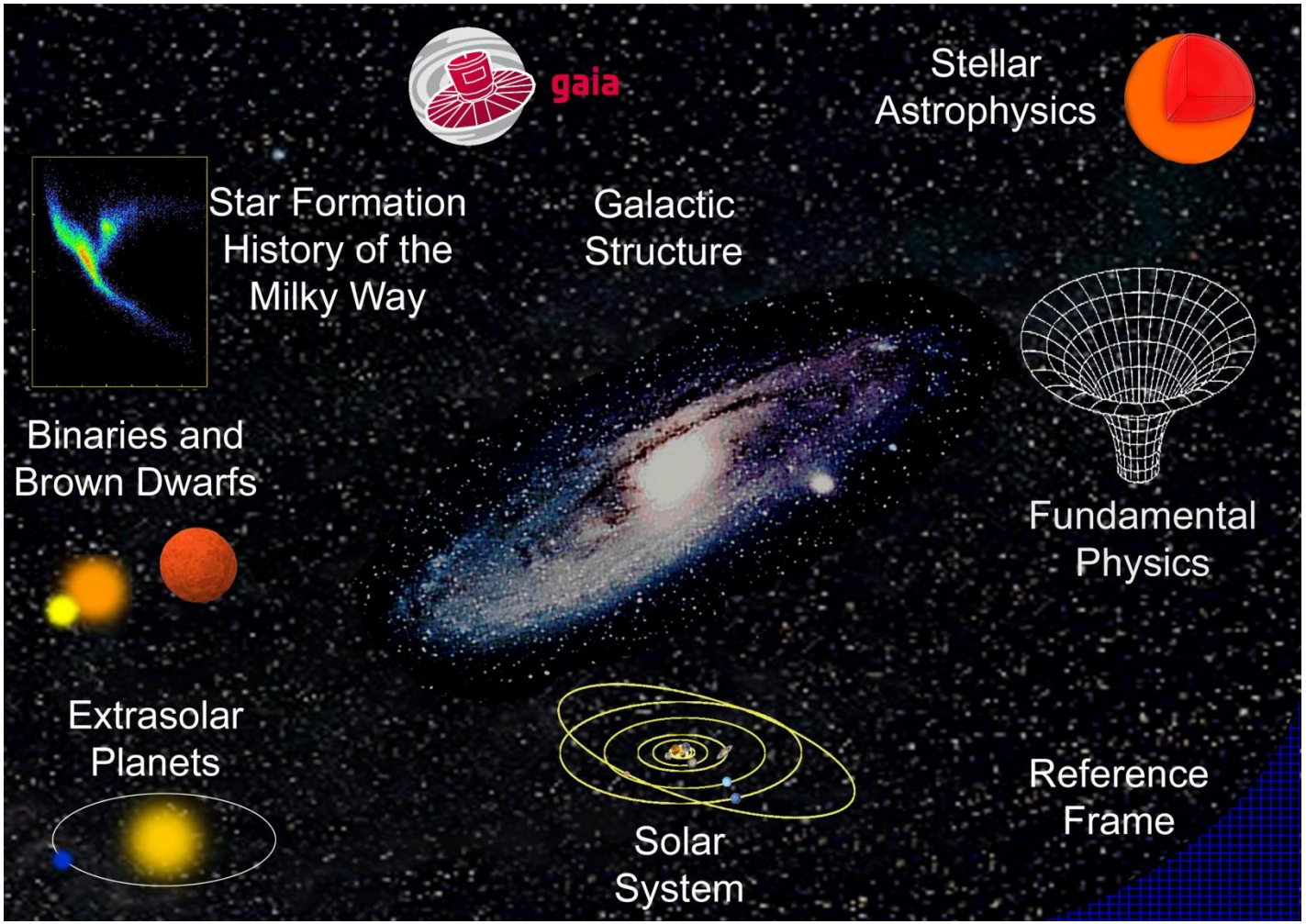
the inferred late-Universe parameters are: Hubble constant $H_0 = (67.4 \pm 0.5)$km/s/Mpc



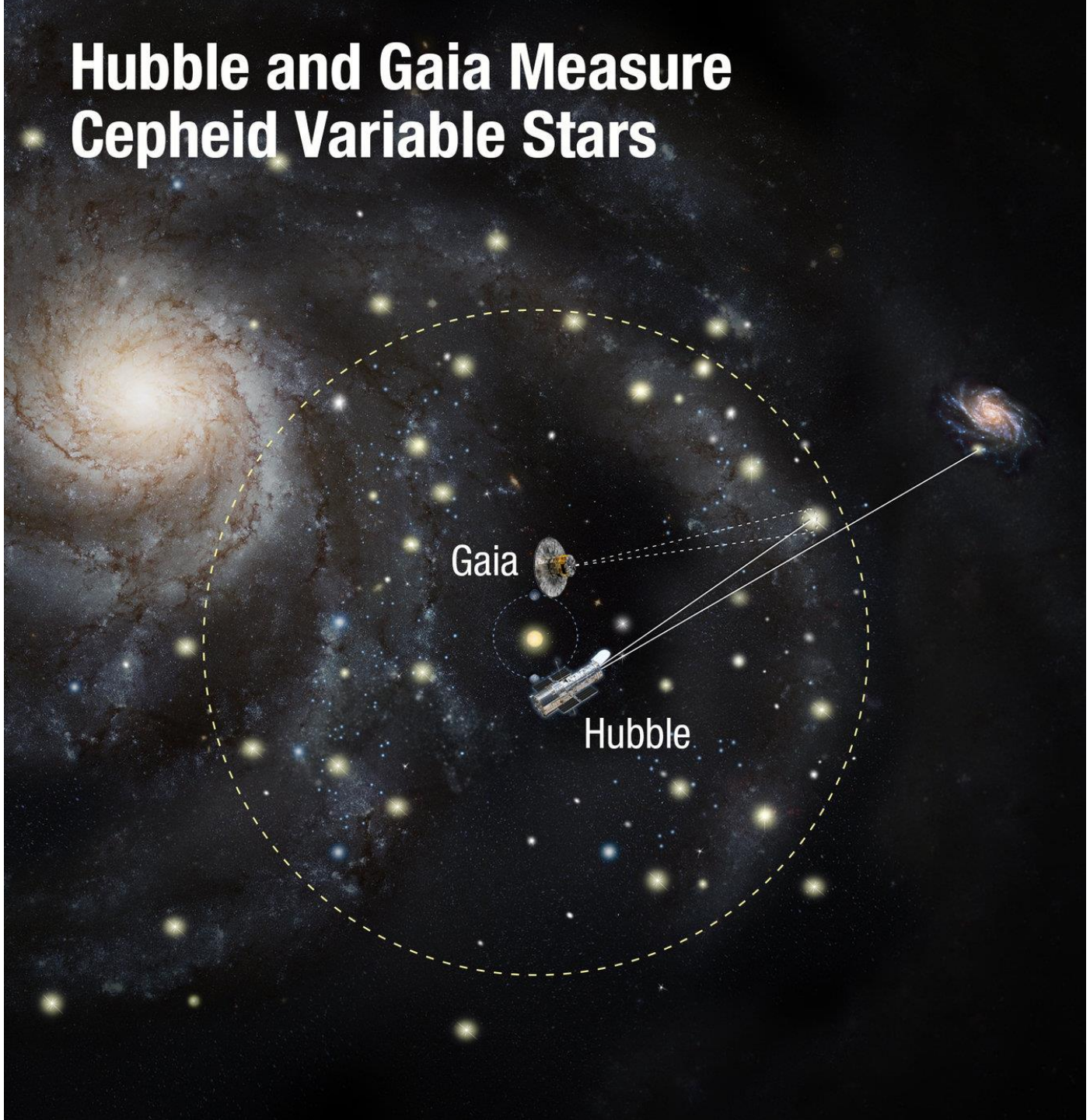
D/H BBN betyr at i beregningene av H_0 fra observasjonsdataene brukes verdien av forholdet mellom mengden av deuterium og helium i universet som følger fra Big Bang Nukleosyntesen. Lensing står for å bruke Sjur Refsdals metode til å bestemme H_0 fra gravitasjonsline-effekten. θ_{MC} er den gjennomsnittlige vinkelen mellom temperatur maks og min i bakgrunnsstrålingen.

Gaia-satellitten

Satellitten ble plassert i bane rundt jorda 25. juli 2014.



Hovedmål: Detaljerte observasjoner av objekter i Melkeveien, f.eks. kefeidevariable stjerner.
Gaia DR2 er Gaia Data Release 2 som skjedde 25. april 2018.


Hubble and Gaia Measure
Cepheid Variable Stars
Gaia
Hubble

2018:

Milky Way Cepheid Standards for Measuring Cosmic Distances and Application to *Gaia* DR2: Implications for the Hubble Constant

Adam G. Riess[1,2], Stefano Casertano[1,2], Wenlong Yuan[2,3], Lucas Macri[3], Beatrice Bucciarelli[4], Mario G. Lattanzi[4], John W. MacKenty[1], J. Bradley Bowers[2], WeiKang Zheng[5], Alexei V. Filippenko[5,6]

+ Show full author list

Published 2018 July 12 • © 2018. The American Astronomical Society.

The Astrophysical Journal, Volume 861, Number 2

By including the new MW parallaxes from *HST* and *Gaia* the value of H_0 changes slightly to 73.52 ± 1.62 (including systematics

NEW PARALLAXES OF GALACTIC CEPHEIDS FROM SPATIALLY SCANNING THE HUBBLE SPACE TELESCOPE: IMPLICATIONS FOR THE HUBBLE CONSTANT

Draft version January 3, 2018

Adam G. Riess,[1,2] Stefano Casertano,[1,2] Wenlong Yuan,[2,3] Lucas Macri,[4] Jay Anderson,[1] John W. MacKenty,[1] J. Bradley Bowers,[2] Kelsey I. Clubb,[5] Alexei V. Filippenko,[5,6] David O. Jones,[2] and Brad E. Tucker[5]

Including the new parallax measurements yields $H_0 = 73.45 \pm 1.66$ km s^{-1} Mpc^{-1}, a reduction in total error (including systematics) from 2.37% to 2.27%.

27. august 2018

The superluminal motion of the jet launched in GW170817, the Hubble constant, and critical tests of gamma ray bursts theory

Shlomo Dado and Arnon Dar
Physics Department, Technion, Haifa, Israel

The direction of the axis of the orbital motion of the merging binary neutron stars in the GW170817 event coincided with that of the apparent superluminal jet, which produced the short hard gamma ray burst (SHB) 170817A. It supports the local value of the Hubble constant provided by standard candle Type Ia supernovae, $H_0 = 73.24 \pm 1.74\,\mathrm{km/s\,Mpc}$, which differs by 3σ from the cosmic value $H_0 = 67.74 \pm 0.46\,\mathrm{km/s\ Mpc}$ obtained from the cosmic microwave background radiation by Planck assuming the standard ΛCDM cosmology.

MEASURING THE HUBBLE CONSTANT AND SPATIAL CURVATURE FROM SUPERNOVA APPARENT MAGNITUDE, BARYON ACOUSTIC OSCILLATION, AND HUBBLE PARAMETER DATA

CHAN-GYUNG PARK[1, 2] AND BHARAT RATRA[2]

(Dated: September 12, 2018)

Using the SN+BAO+$H(z)$ combination, H_0 is measured to be 69.0 ± 1.7 km s^{-1} Mpc^{-1}

these values are a little lower than the recent local expansion rate measurement of $H_0 = 73.48 \pm 1.66$ km s^{-1} Mpc^{-1} (Riess et al. 2018)[10] by between 1.9σ and 2.0σ

Preprint datert 25. september 2018

Derivation of the Hubble constant using Planck and XMM-Newton observations of galaxy clusters

Arpine Kozmanyan[1,2], Hervé Bourdin[1,2], Pasquale Mazzotta[1,2], Elena Rasia[3], and Mauro Sereno[4,5]

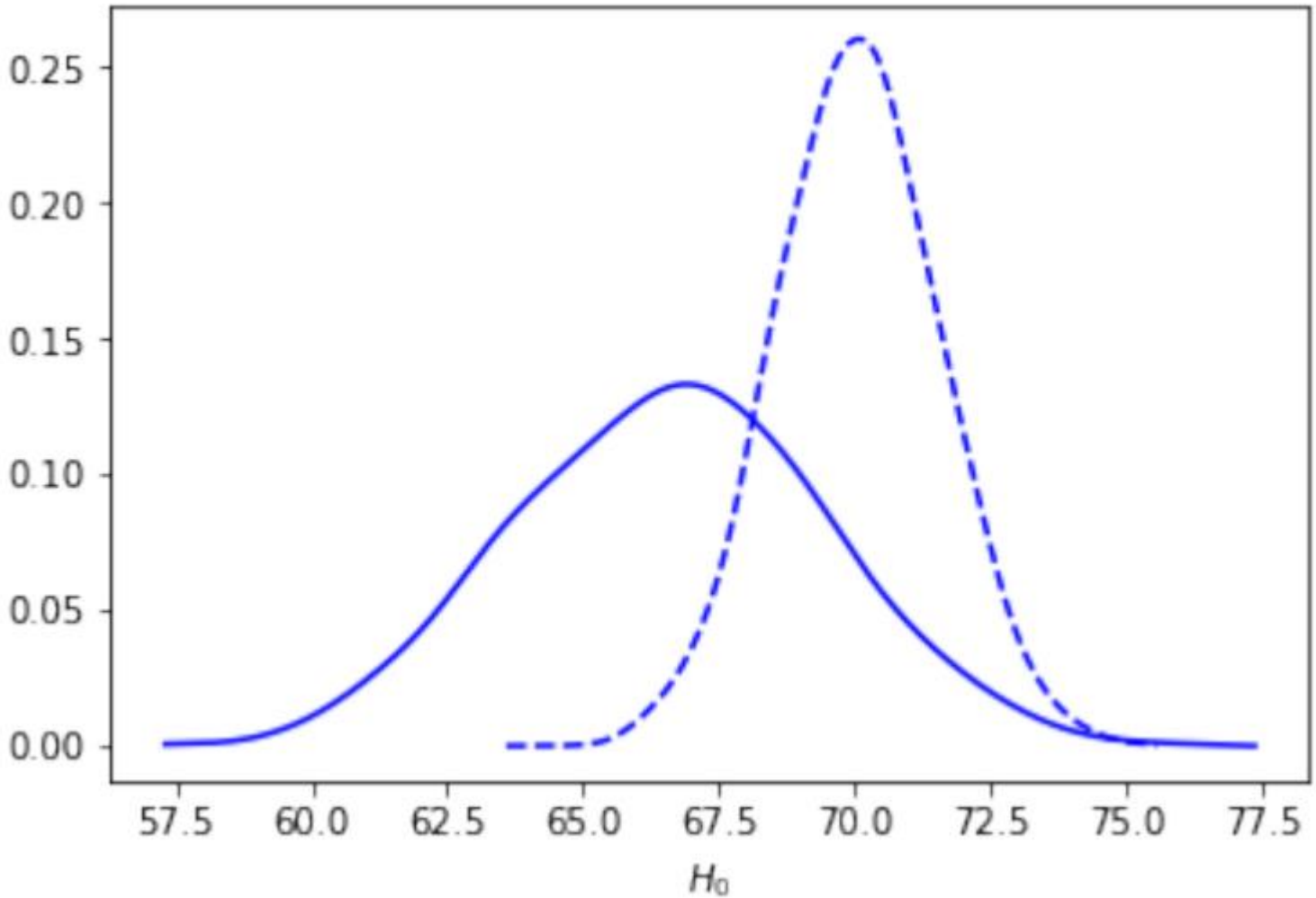
We apply our method to a sample of 61 galaxy clusters with redshifts up to $z < 0.5$ observed with *Planck* and *XMM-Newton* observations and find $H_0 = 67 \pm 3$km s^{-1} Mpc^{-1}.

Estimation and treatment of biases: As already mentioned, the currently improved data quality requires a more careful treatment of the biases of non-cosmological origin. In previous works these uncertainties have been estimated independently and added in quadrature, while, in this paper we account for correlations between the various sources. The main sources of these uncertainties are the clumpiness of the cluster gas, and the departure from spherical shape and from uniform radial thermal distribution

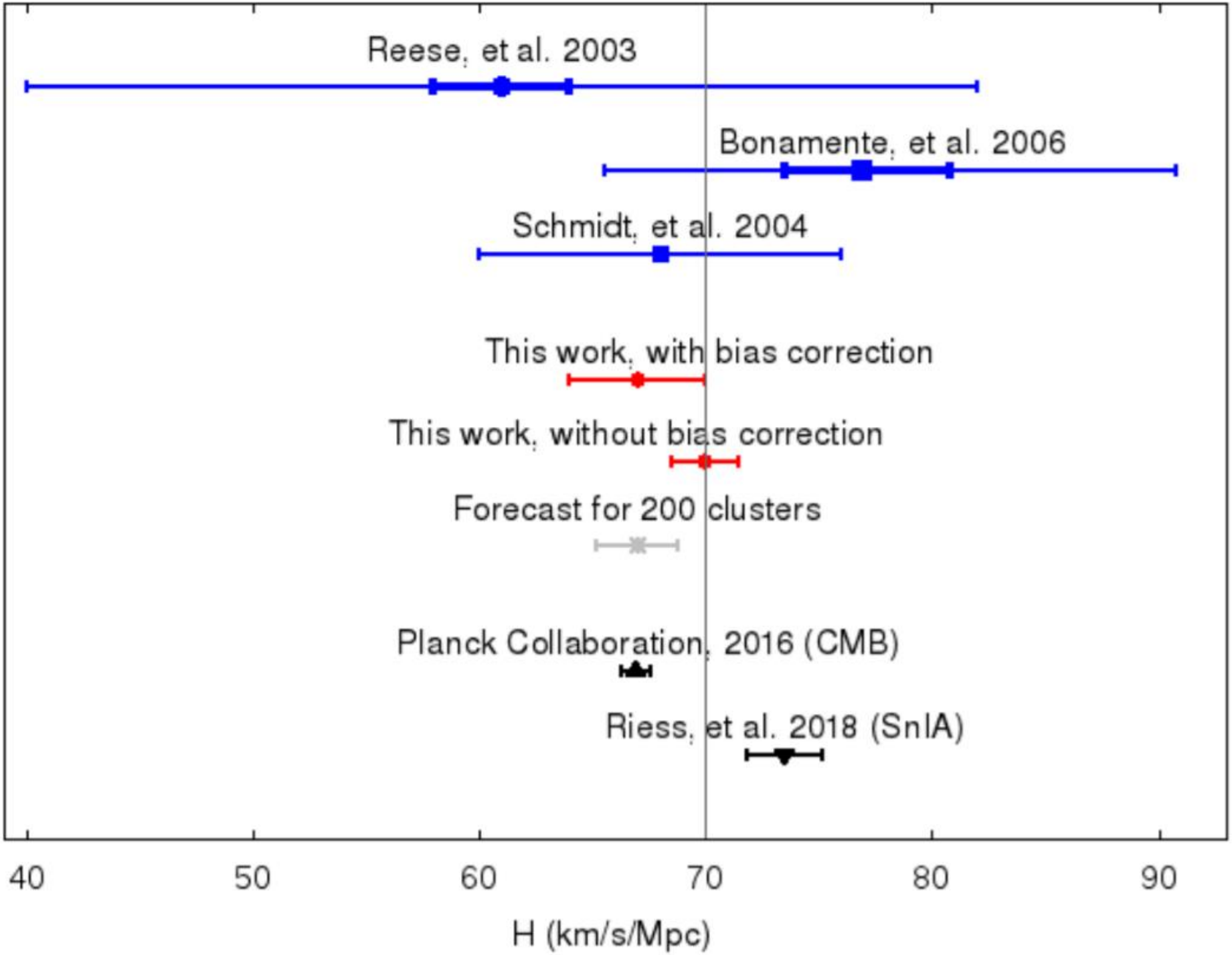
The estimates of the effect of the clumpiness in previous works has been controversial. While there is consensus that clumpiness biases high the estimate of H_0, the size of the effect is still debated.

The assumption of spherical symmetry, instead, may bias the H_0 estimate in both directions depending on the orientation of the cluster.

Finally, isothermality of the gas distribution has been usually assumed, leading to an underestimation of H_0 by at least 10%



The dashed line is the value of H_0 if the bias correction is not applied. The solid line represents the posterior for H_0 with the correction for the biases included.


Reese, et al. 2003
Bonamente, et al. 2006
Schmidt, et al. 2004
This work, with bias correction
This work, without bias correction
Forecast for 200 clusters
Planck Collaboration, 2016 (CMB)
Riess, et al. 2018 (SnIA)
40
50
60
70
80
90
H (km/s/Mpc)

Adam G. Riess og medarbeidere har de siste seks årene brukt Hubble romteleskopet til å gjøre parallakse-målinger av avstandene til 7 langperiodiske (periode på over 10 dager) Kefeidevariable stjerner i Melkeveien.
Disse stjernene er mellom 6000 og 12 000 lysår fra Jorda, dvs. de har opp til ti ganger større avstand fra oss enn andre Kefeider med parallakse-bestemte avstander.

Ved å kombinere kefeidemålingene med målinger av rødforskyvninger til supernovaer av type Ia (her kalt KS-målingene) ble Hubblekonstanten, H_0, bestemt til å ha en verdi $22{,}0<H_0<23{,}0$ km per sekund per millioner lysår.
Dette er i konflikt med verdien av Hubblekonstanten bestemt fra målinger ved hjelp av Planck-satellitten av temperaturvariasjoner i den kosmiske bakgrunns-strålingen (CMB: cosmic microwave background), som ga $20{,}5< H_0<21{,}1$ km per sekund per millioner lysår.
Dette betyr at ifølge KS-målingene ekspanderer universet raskere enn det gjør ifølge CMB-målingene, og universet er yngre – 12,9 milliarder år ifølge KS-målingene mot 13,9 milliarder år med CMB-målingene.

Adam Riess: “The gap between the Hubble-Gaia data and the Planck measurement is about four times the size of their combined uncertainty. That indicates “a full-blown incompatibility between our views of the early and late-time universe. Perhaps we should be pleased that we are only off by 9 percent, but since the margin of error is only 2.2 percent, 9 percent is a lot. It says we are missing something.”

The Planck-derived value of the Hubble constant is based on the spacecraft's precise observations of the cosmic background radiation dating back to within a few hundred thousand years of the Big Bang.

Those observations, plugged into the "standard model" of physics, allowed researchers to extrapolate the present expansion rate.

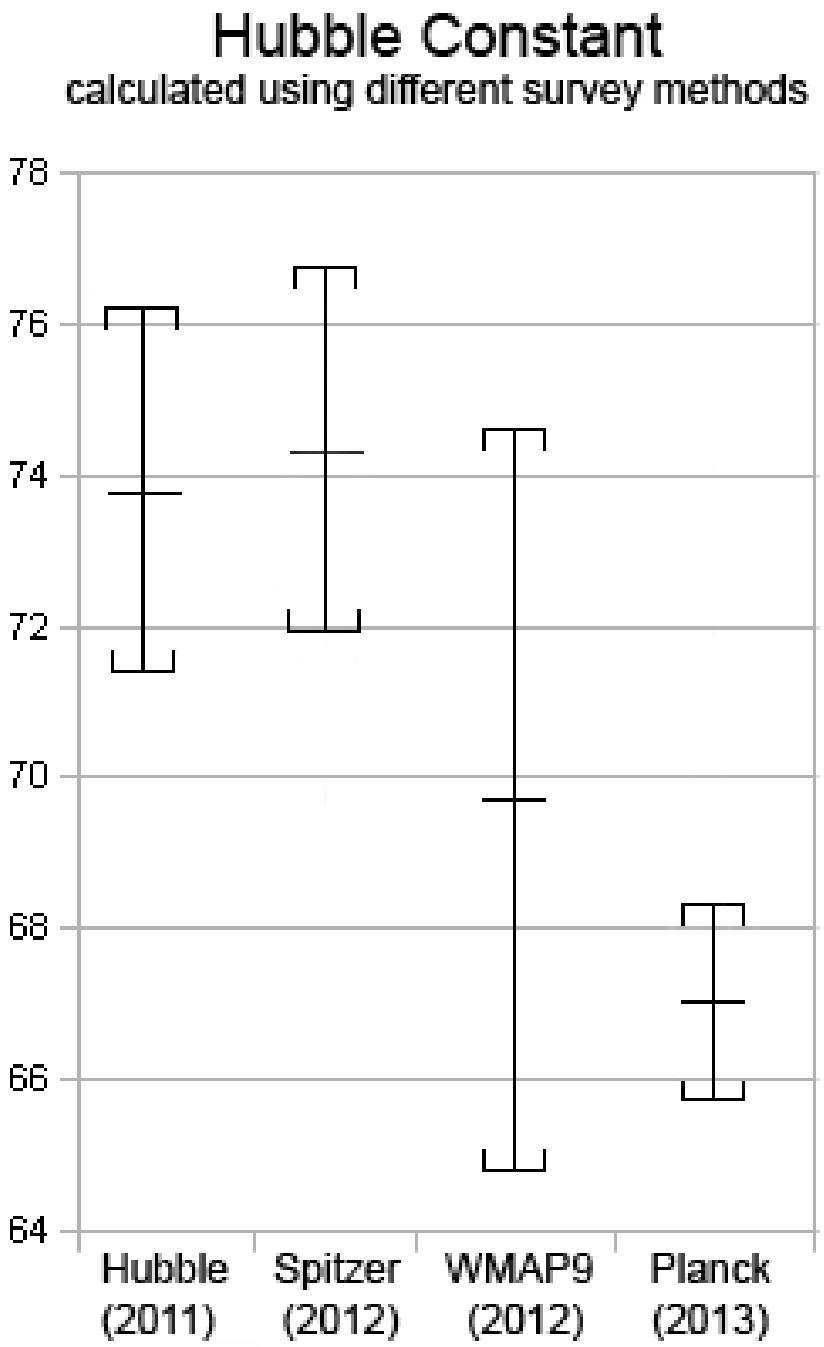
The Hubble-Gaia conclusions were based on a different technique, the direct observation of Cepheid variable stars close to home and in remote galaxies.

Cepheids pulsate in a predictable manner that indicates their true brightness.

By observing the apparent brightness of a Cepheid in a distant galaxy, astronomers can compute how far away the star must be.

Gaia provided the most accurate data yet on 50 Cepheids in the Milky Way. That allowed the Hubble astronomers to carefully calibrate their observations of extra-galactic Cepheids.

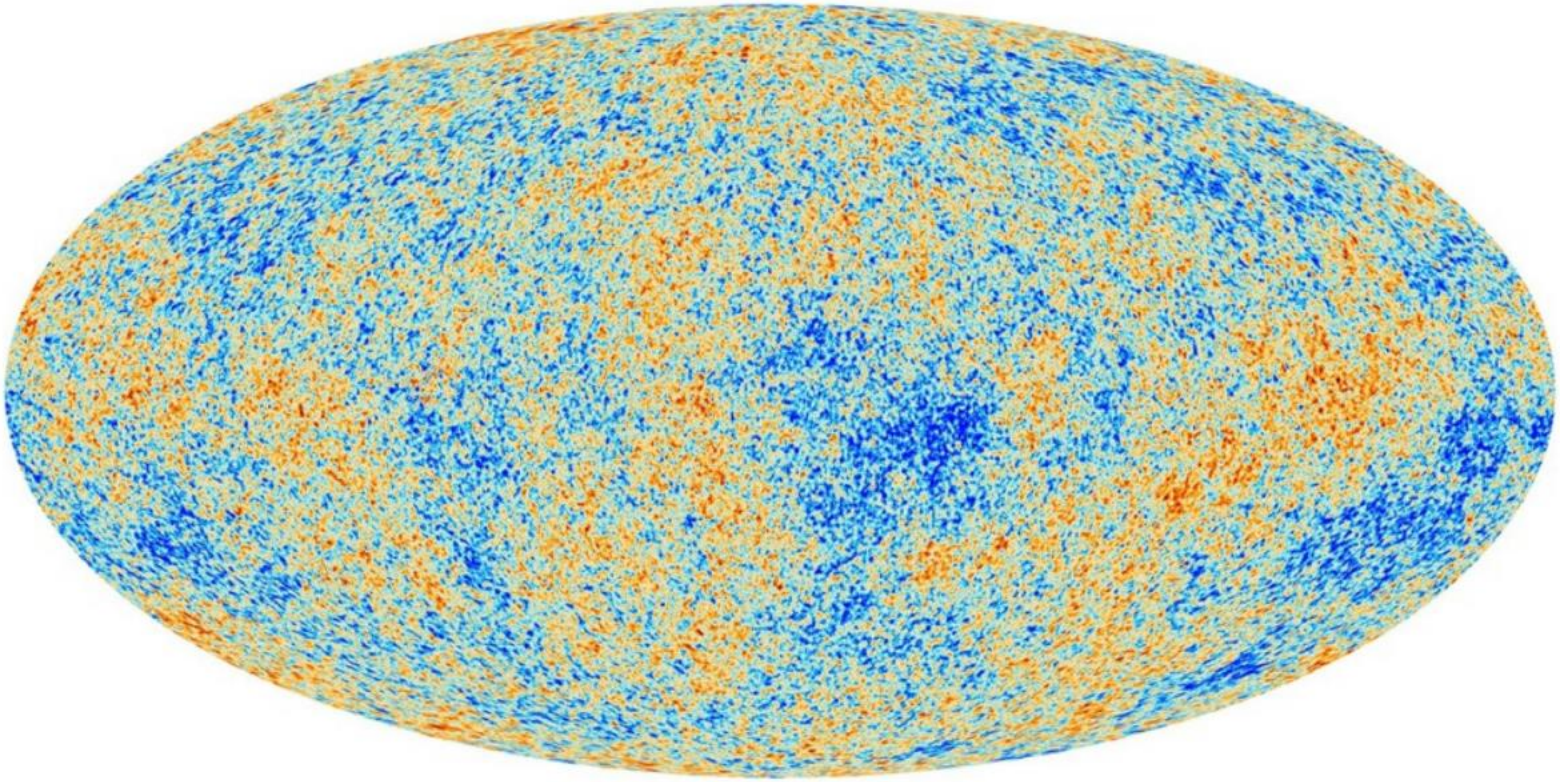
Comparing the positions of those stars and galaxies with the expansion of space as indicated by the red shifting of light from nearby galaxies, Riess' team was able to derive an outward velocity at different points and from that, the Hubble constant.


Hubble Constant
calculated using different survey methods
78
76
74
72
70
68
66
64
Hubble (2011)
Spitzer (2012)
WMAP9 (2012)
Planck (2013)

Presentasjon ved møte i American Physical Society

2013: Planck

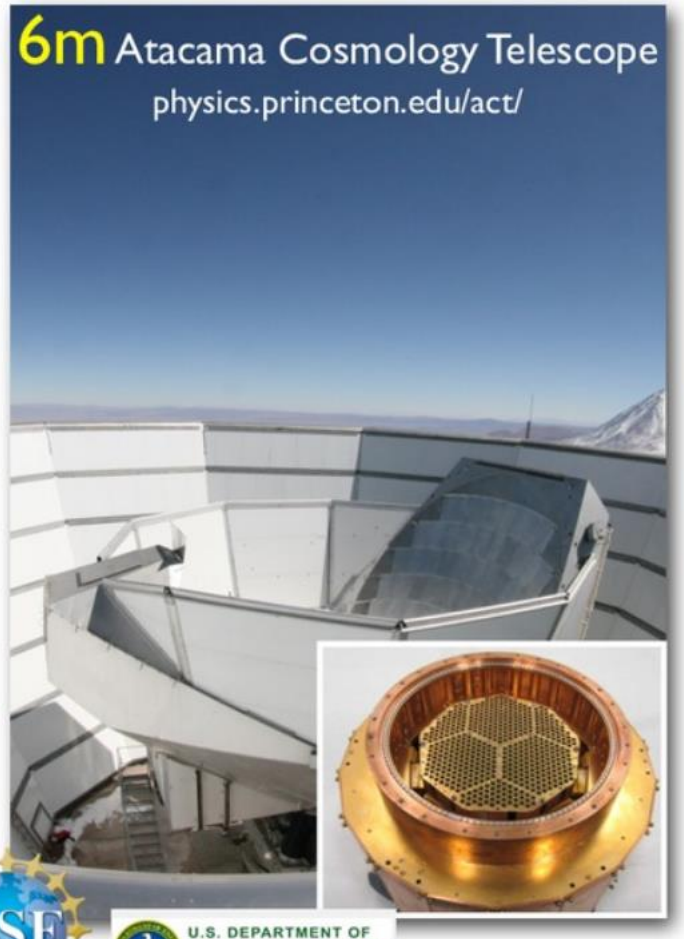
30μK RMS fluctuations on 3 K background

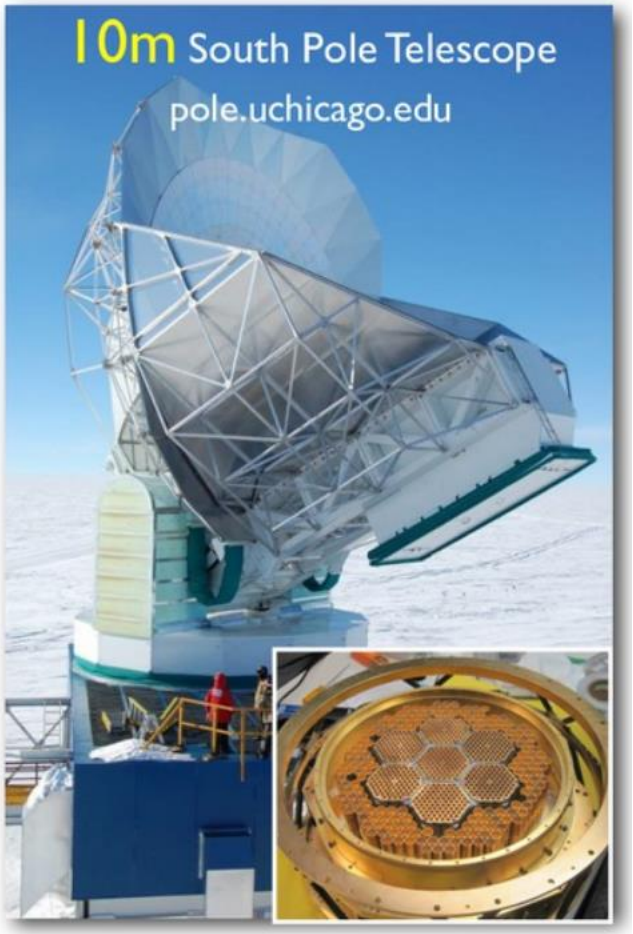


The Hubble Constant from the CMB

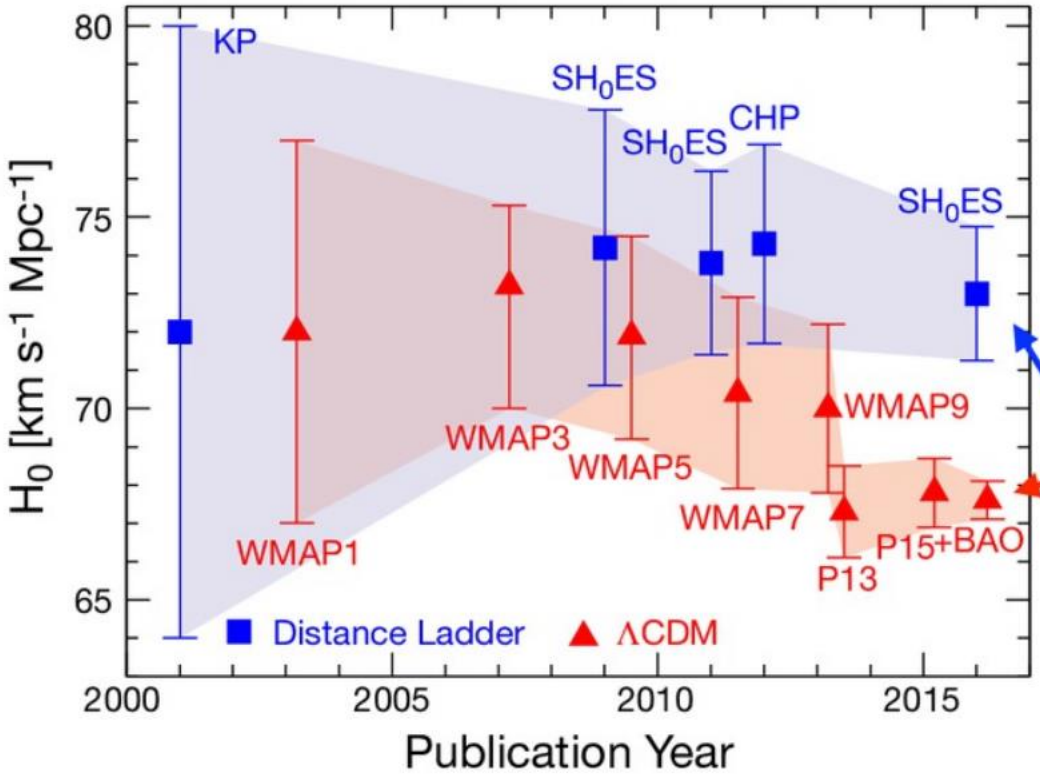
- CMB provides a high-redshift cornerstone to cosmology, which measures:
  - Distance to Recombination
  - Energy densities and expansion rate at $z \sim 1100$
- CMB predicts an H_0 given a cosmological model
- Therefore local probes of H_0 provide a strong consistency check and constrain cosmological models

Ground-Based CMB Measurements





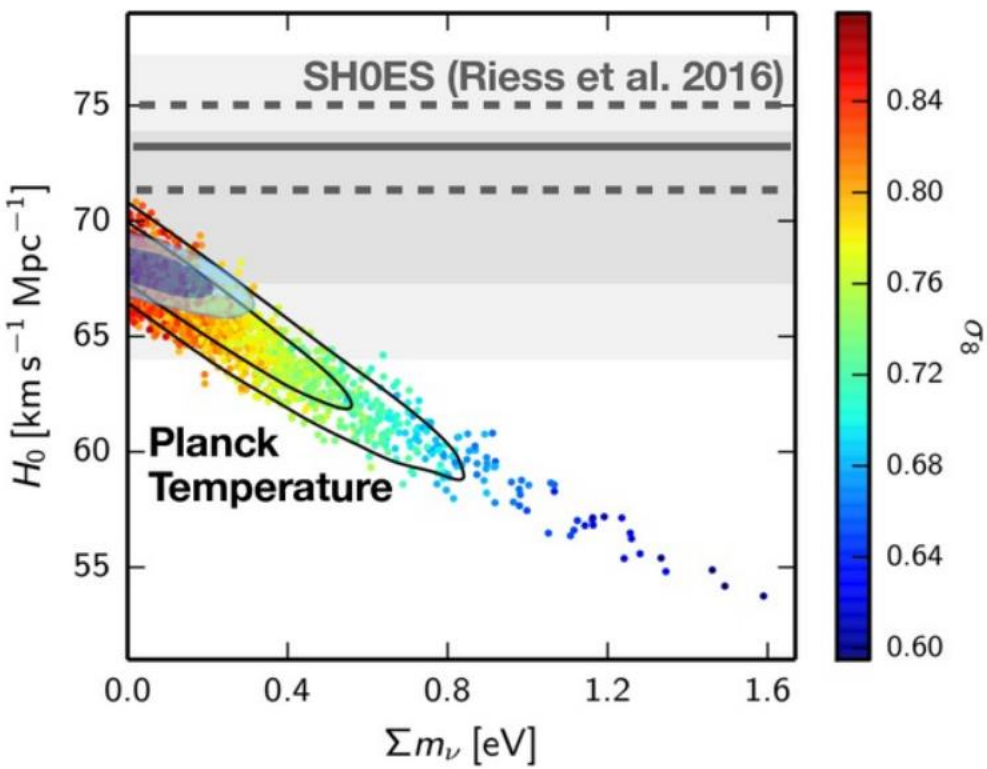
The Hubble Constant from the CMB



- Over past 20 years, Hubble constant measurements from ***local probes*** and ***CMB measurements*** have diverged.
- Offset at ~3σ level
- This is the so-called "***crisis in cosmology***", but whats really going on here?

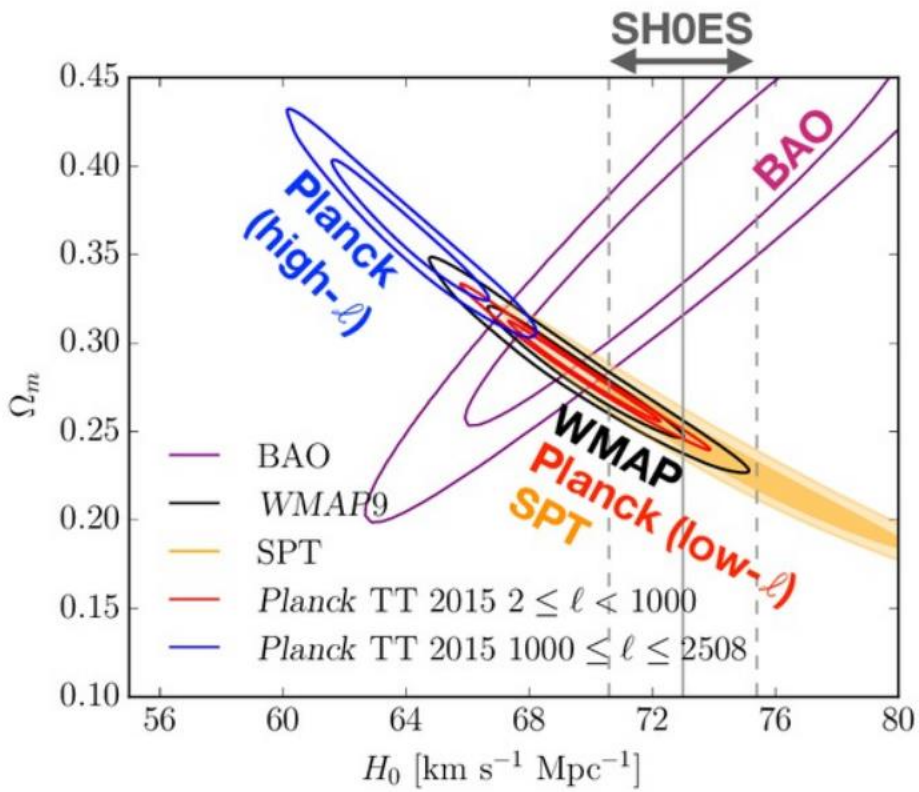
SH_0ES står for "Supernova H_0 for the Equation of State" .
Et prosjekt som startet i 2005 og er ledet av Adam Riess.
Det dreier seg om lokale målinger av H_0
oppnådd ved observasjoner av Kefeidevariable stjerner og supernovaer av type Ia.
BAO står for "Baryoniske Akustiske Oscillasjoner".
CHP står for "Carnegie Hubble Program" med Wendy Freedman som leder.

Signature of New Physics?



- Extend cosmological model to include new physics, anything fit?
- Many cosmological extensions have small effect or go the wrong direction (e.g., non-zero curvature or ***neutrino mass*** favor even lower H_0)

Difference in WMAP-Planck-SPT Data?



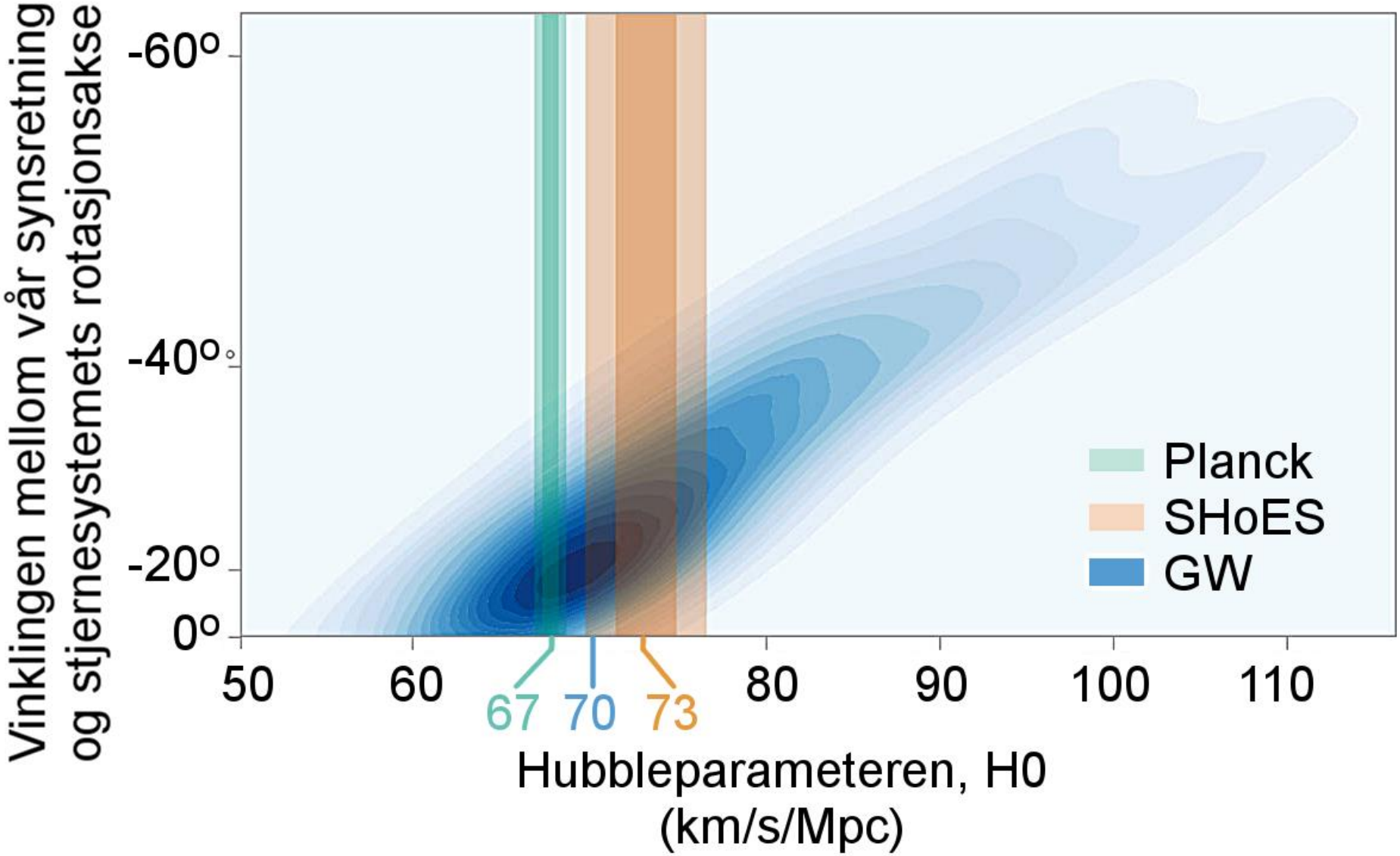
- Compare temperature power spectrum information from different experiments
- **Planck** and **WMAP** agree at $\ell < 1000$
- High-ℓ information from **SPT** shifts parameters in better agreement with **WMAP**
- **Planck $\ell > 1000$** data looks like an outlier

Summary of Results

Current best-CMB constraints give H_0 = 67.3 +/- 0.96 (Planck Collab. 2016), which is 3σ offset from best local constraint from SH0ES

Summary

- Current best constraints on H_0 from CMB are 3σ offset from local probes
- Low H_0 from CMB driven by Planck high-ℓ (>1000) data,
  - However, this data has weak tensions with other CMB data sets (e.g., CMB lensing, SPT high-ℓ and polarization)
- New CMB measurements will tell us more soon:
  - Planck Legacy (Summer 2018)
  - New ground-based experiments (SPT, ACT, CMB-S4)
- Current "Controversy" could still be resolved by "New Physics", and future CMB experiments will test this!


Vinklingen mellom vår synsretning og stjernesystemets rotasjonsakse
-60°
-40°
-20°
0°
50
60
80
90
100
110
67
70
73
Planck
SHoES
GW
Hubbleparameteren, H0
(km/s/Mpc)

Måleusikkerhet og systematisk usikkerhet

Den totale usikkerheten er summen av
en måleusikkerhet og en systematisk usikkerhet
som representerer det man ikke vet om måleobjektet.
Som regel er den totale usikkerheten
dominert av den systematiske usikkerheten.
Det er vanligvis vanskelig å anslå en korrekt verdi
for den systematiske usikkerheten.
Ofte undervurderes den.

Metoder og kilder til systematisk usikkerhet

For å bestemme verdien av Hubbles konstant, må en bestemme hastigheten og avstanden til objekter som er så langt unna jorda at ekspansjonsfarten til universet, v_H (Hubble flow), dominerer over farten på grunn av lokale gravitasjonsfelter, v_P (peculiar motion).

Typisk hastighet knyttet til peculiar motion er v_P = 400 km/s. Dersom H_0 = 20 km/s per million lysår, betyr dette at ekspansjonsfarten er like stor som de tilfeldige hastighetene i 20 millioner lysårs avstand fra jorda. Hvis v_H skal være for eksempel 10 ganger større enn v_P må en observere hastigheten (langs synslinjen) og avstanden til objekter som er over 200 millioner lysår fra jorda. Hastigheten kan bestemmes med god nøyaktighet fra målinger av rødforskyvningen av lyset fra det observerte objektet.

Avstanden er problemet. Det har vært mange feilaktige avstands-bestemmelser av fjerne objekter i universet.

De første galakseavstandene – frem til 1930

Den danske astronomen Hertzsprung prøvde i 1914 å bruke periode luminositet-relasjonen for Kefeidestjerner til å bestemme avstander til «tåker» som i vår tid er identifisert som galakser. Han gjorde flere feil som førte til av de publiserte avstandene var nesten 1/200 for små.
Hubble gjorde tilsvarende målinger med resultater som han publiserte i 1925 og 1926, fortsatt med alt for små avstander.
I 1929 plottet Hubble avstander han hadde målt til 31 galakser
mot deres radielle hastigheter
og fant at hastighetene var proporsjonale med avstandene.
Dette er Hubbles lov, som ble oppdaget to år tidligere av Lemaître.

Systematiske feil i avstandsmålingene rettes opp

Two problems exist for any class of standard candle. The principal one is calibration, that is the determination of exactly what the absolute magnitude of the candle is. This includes defining the class well enough that members can be recognized, and finding enough members of that class with well-known distances to allow their true absolute magnitude to be determined with enough accuracy. The second problem lies in recognizing members of the class, and not mistakenly using a standard candle calibration on an object which does not belong to the class.

A significant issue with standard candles is how standard they are. In particular, all observations seem to indicate that all Type Ia supernovae have the same brightness (corrected by the shape of the light curve). The use of Type Ia supernovae is crucial in determining the correct cosmological model. If the properties of Type Ia supernovae are different at large distances, i.e. if the extrapolation of their calibration to arbitrary distances is not valid, ignoring this variation can bias the reconstruction of the cosmological parameters.

Walter Baade oppdaget at det eksisterer to populasjoner av stjerner, gamle hydrogenrike *populasjon I* stjerner
Og yngre *populasjon II* stjerner med større innslag av metaller. For samme masse er poulasjon II stjerner adskillig mer lyssterke enn populasjon II stjerner.

En årsak til undervurdering av avstandene bestemt av Hubble var at mange av de Kefeidevariable stjernene han brukte var populasjons II stjerner, mens Hubble anslo deres luminositetet som populasjon I stjerner.

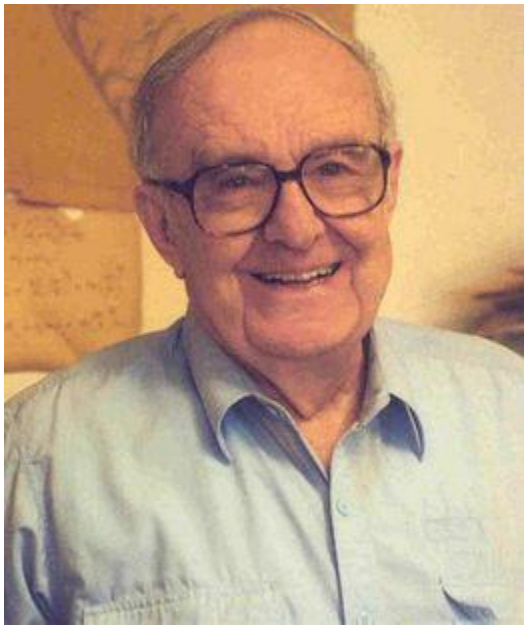
Da Baade korrigerte for dette fant han mye større avstander enn Hubble.
Baade annonserte sine resultater ved den internasjonale astronomiske unions møte i Roma i 1952.

Walter Baade 24.03.1893 – 15.06-1960

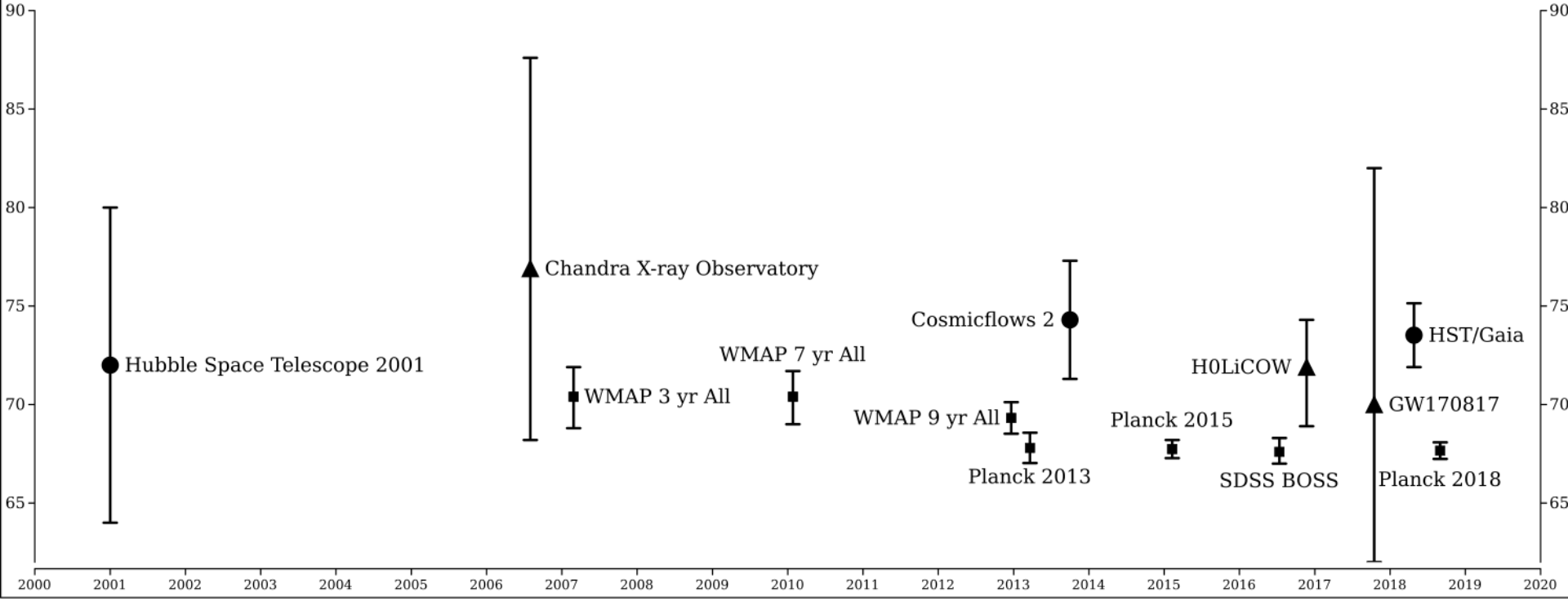
Allan Sandage fulgte opp arbeidene til Walter Baade.

I 1958 publiserte han det første realistiske estimatet av verdien til Hubblekonstanten,
23 km/s per million lysår.

Dette er svært nær dagens aksepterte verdi.

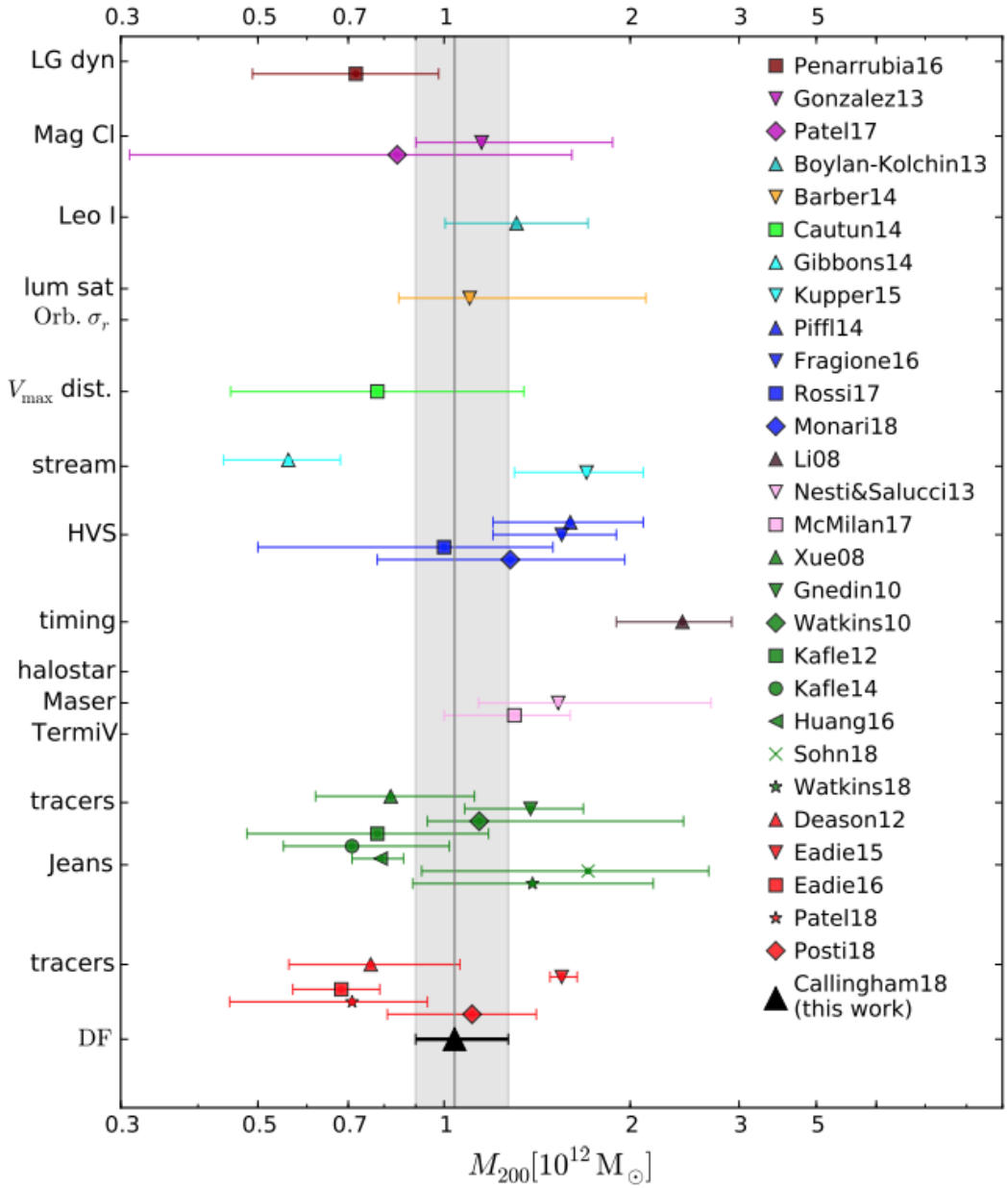


Allan Sandage 18.06-1926-13.11-2010



Estimated values of the Hubble constant, 2001–2018. Estimates with circles represent calibrated distance ladder measurements, squares represent early universe CMB measurements with ΛCDM parameters while triangles are independent measurements.

Various estimates for the Hubble constant exist. The HST Key H_0 Group fitted type Ia supernovae for redshifts between 0.01 and 0.1 to find that H_0 = 71 ± 2 (statistical) ± 6 (systematic) km $s^{-1}Mpc^{-1}$,while Sandage *et al.* find H_0 = 62.3 ± 1.3 (statistical) ± 5 (systematic) km $s^{-1}Mpc^{-1}$.

Melkeveiens masse

Resultater av ulike målinger av Melkeveiens masse. M_{200} står for massen innenfor et sfærisk område om Melkeveiens sentrum med en gjennomsnittlig tetthet 200 ganger større enn den gjennomsnittlige tettheten i universet, $M_{\odot}$ står for solas masse, og 10^{12} betyr tusen milliarder. De vannrette strekene markerer usikkerhetene i måleresultatene. Det grå feltet markerer de nye måleresultatene annonsert 5. september 2018.