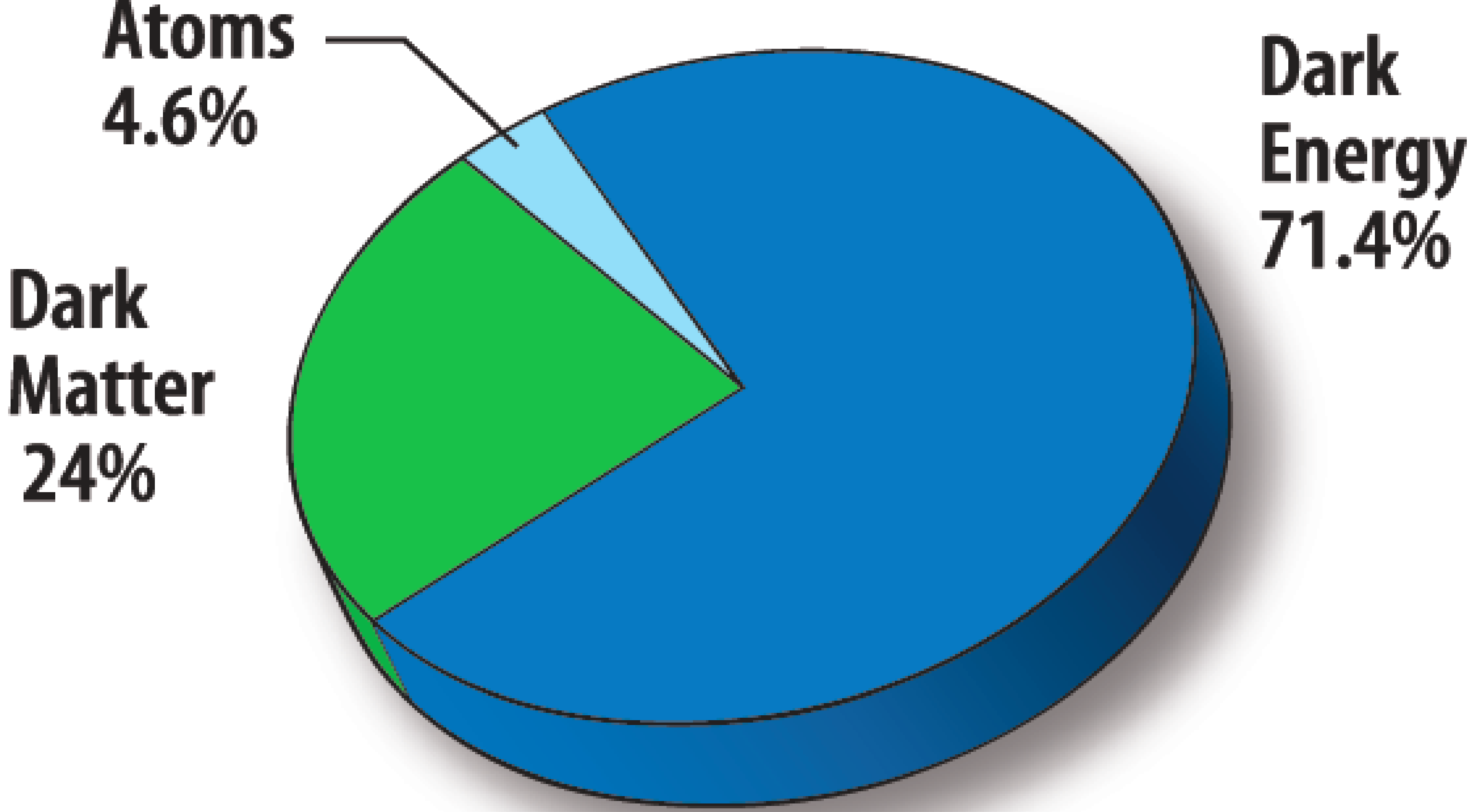
THE PRIMORDIAL FIREBALL

Joe Silk (IAP, CEA, JHU)



CONTENTS OF THE UNIVERSE

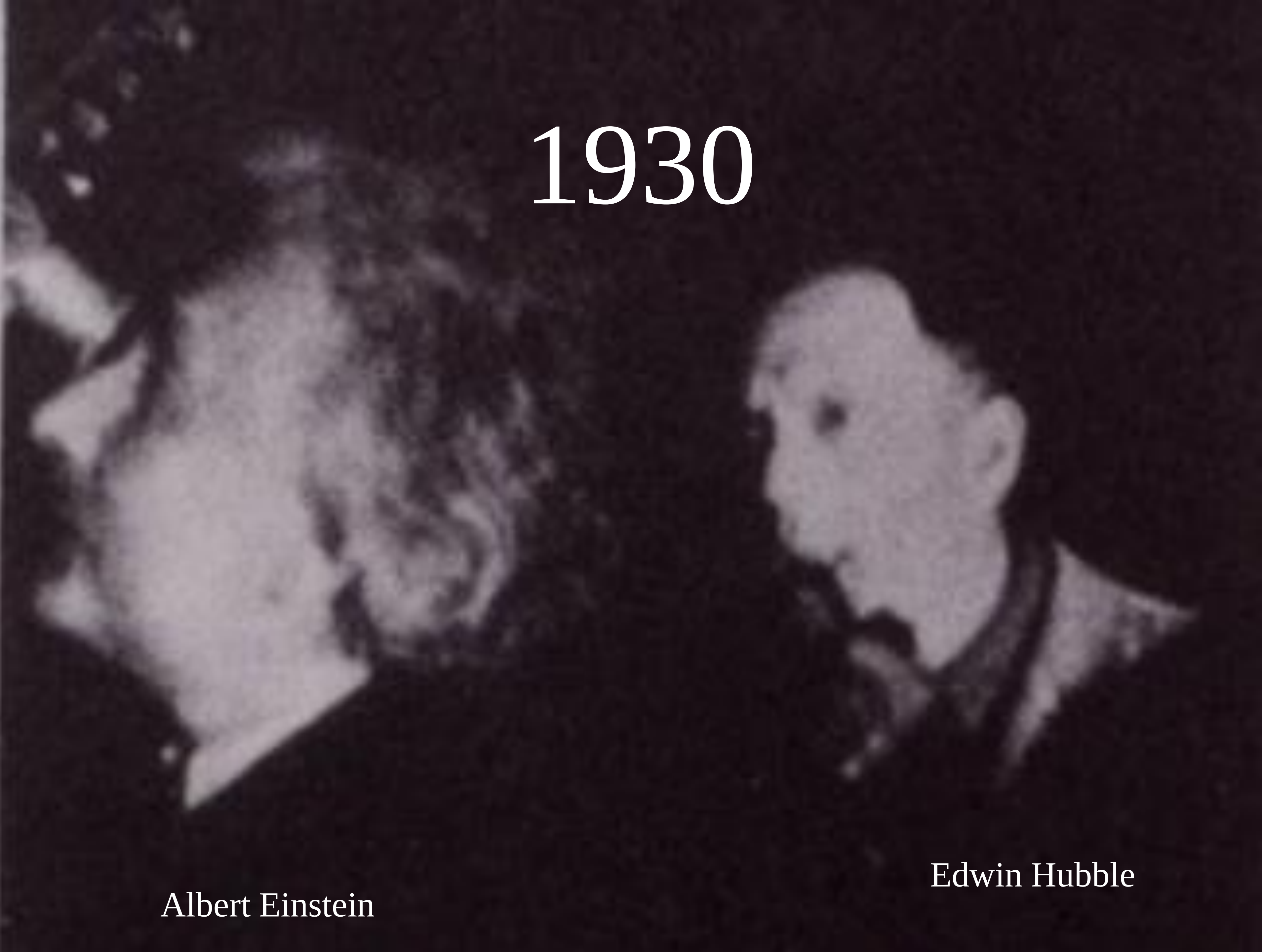
Albert Einstein

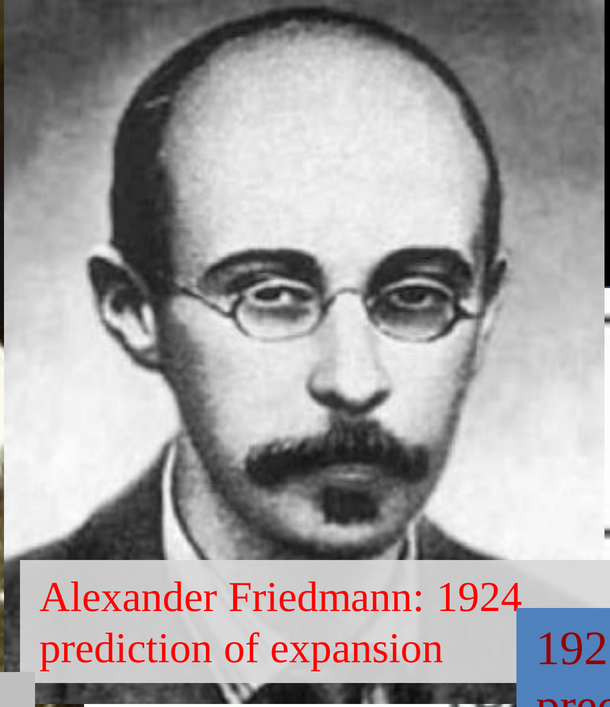
Georges Lemaitre

Alexander Friedmann

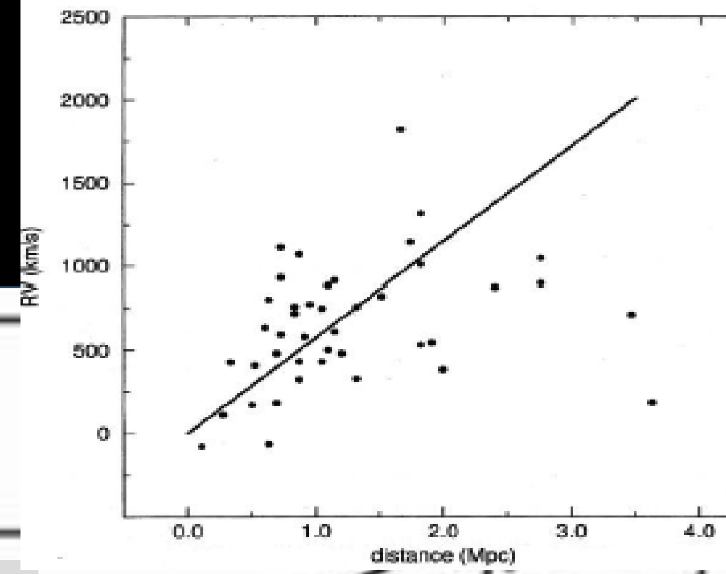
George Gamow

Fred Hoyle


1930
Edwin Hubble
Albert Einstein

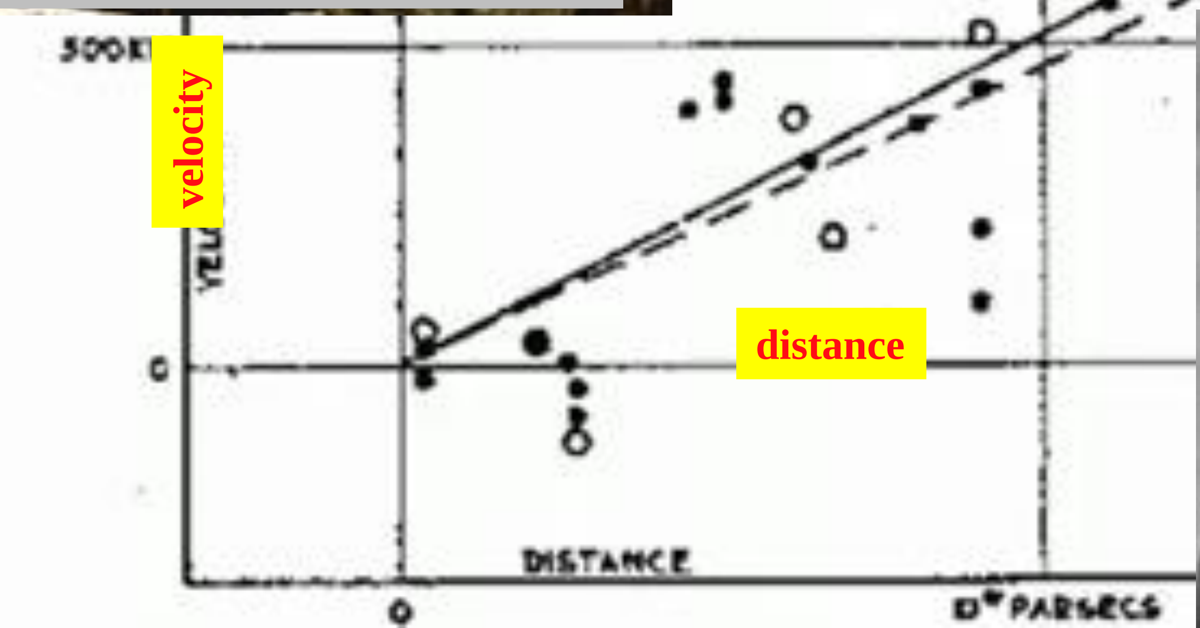


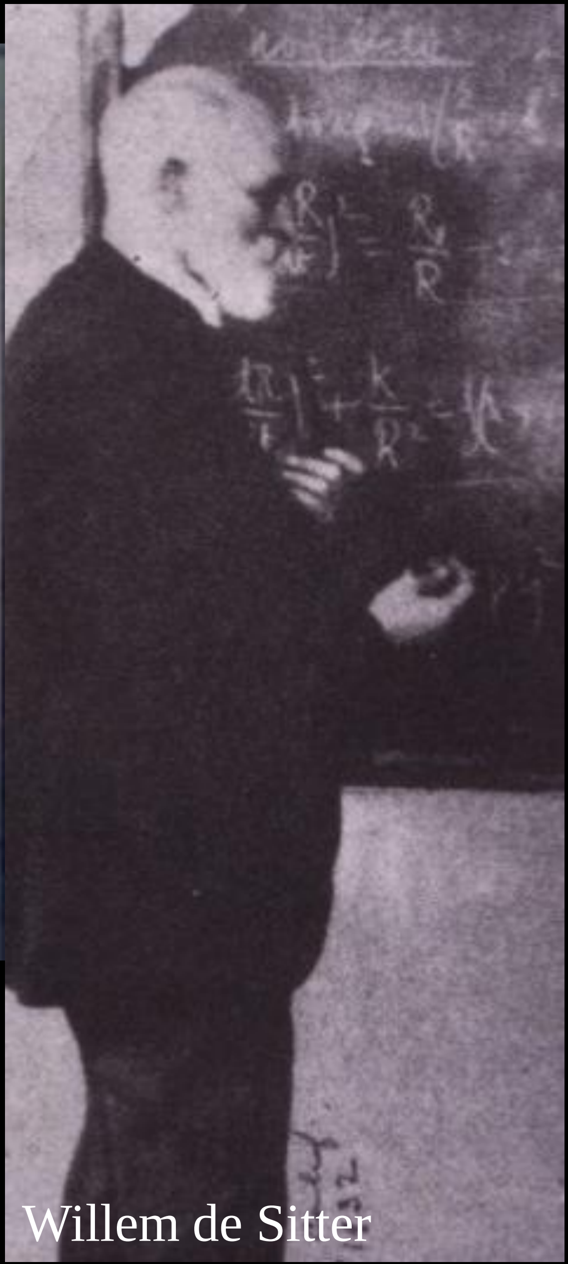
Alexander Friedmann: 1924 prediction of expansion



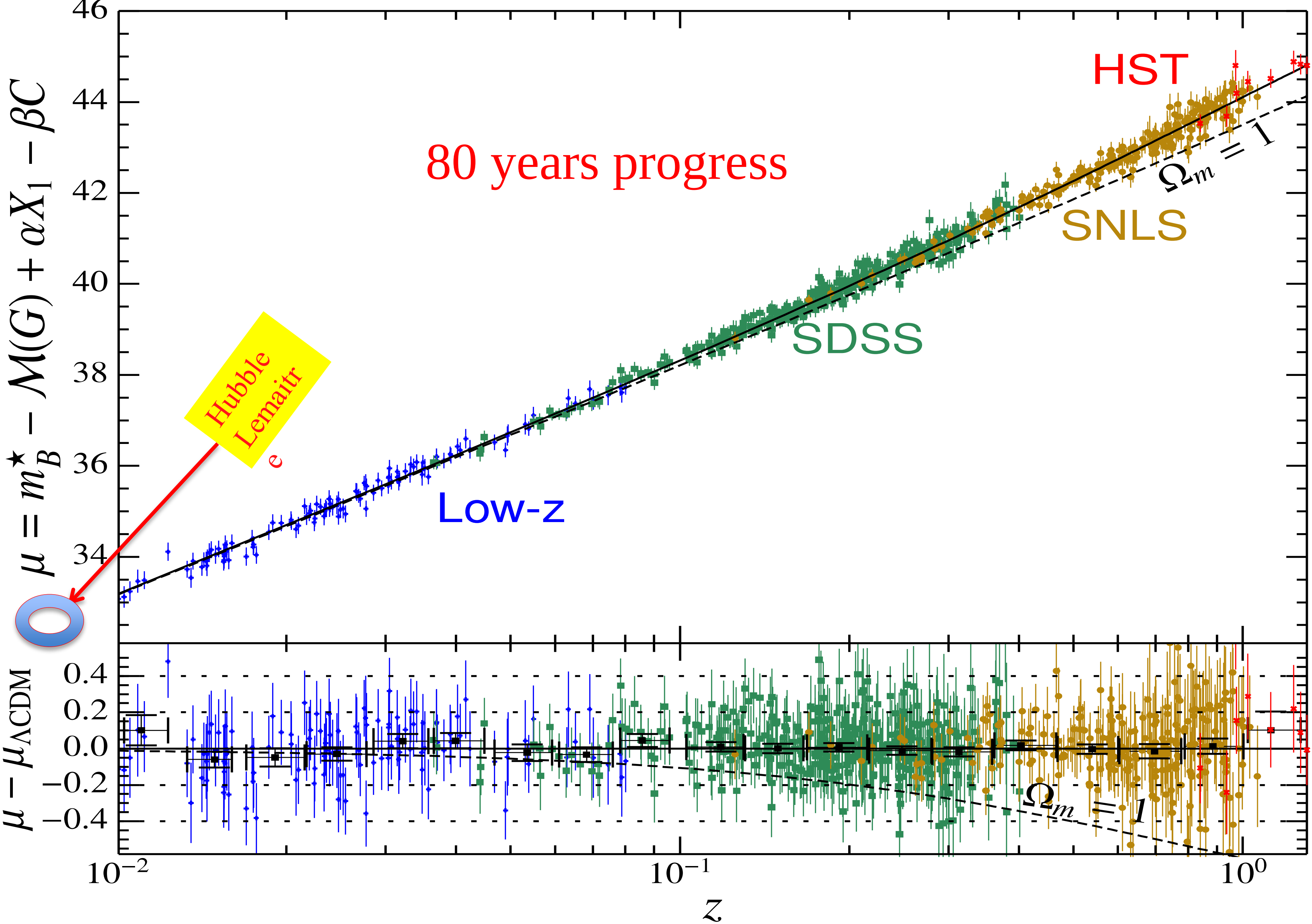
1927: Georges Lemaitre independently predicted expansion, obtained H=625 km/sec/Mpc but published in French

1929: Hubble obtained slope H=530 km/sec/Mpc





Willem de Sitter

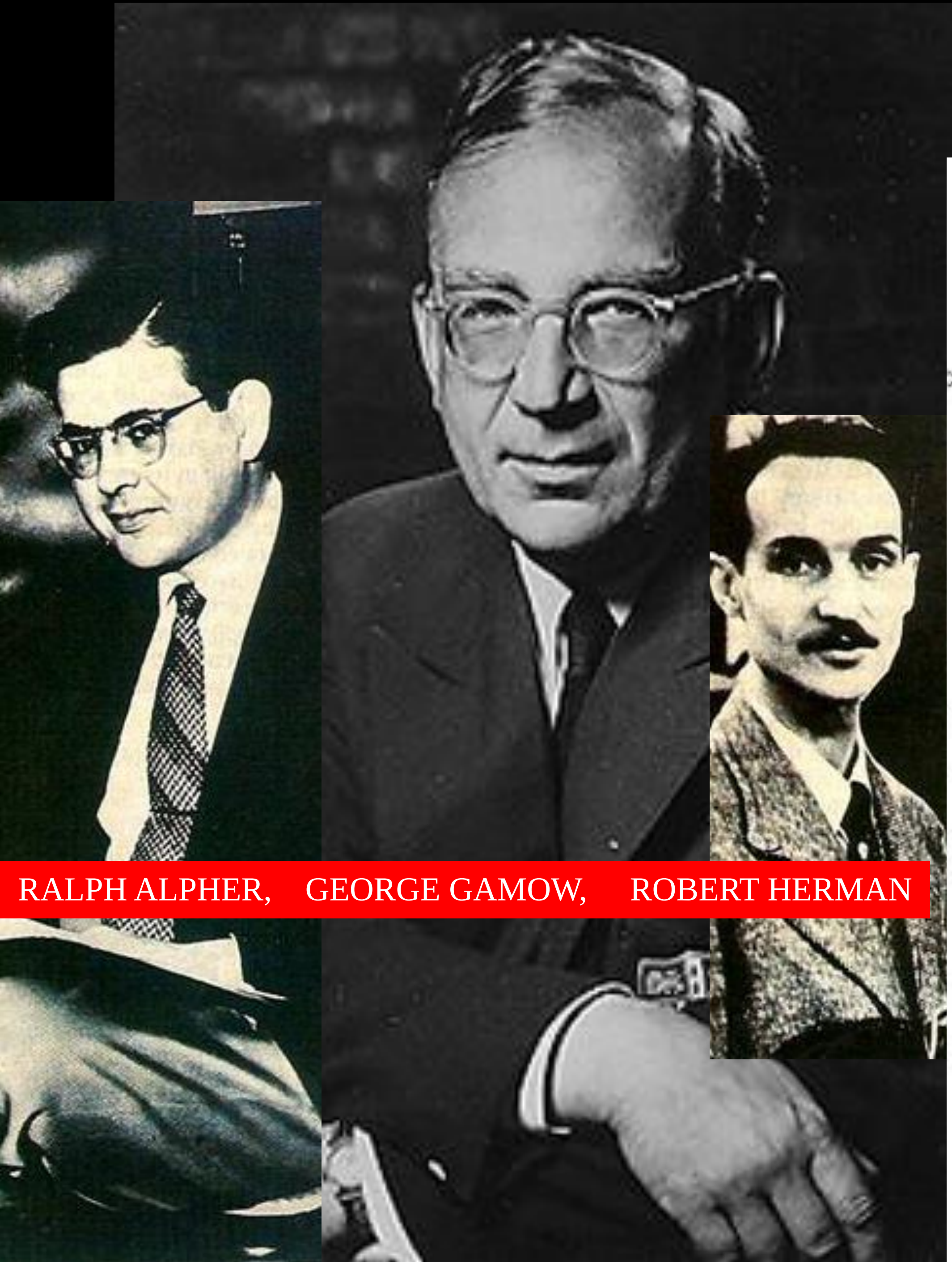


Betoule + 2014

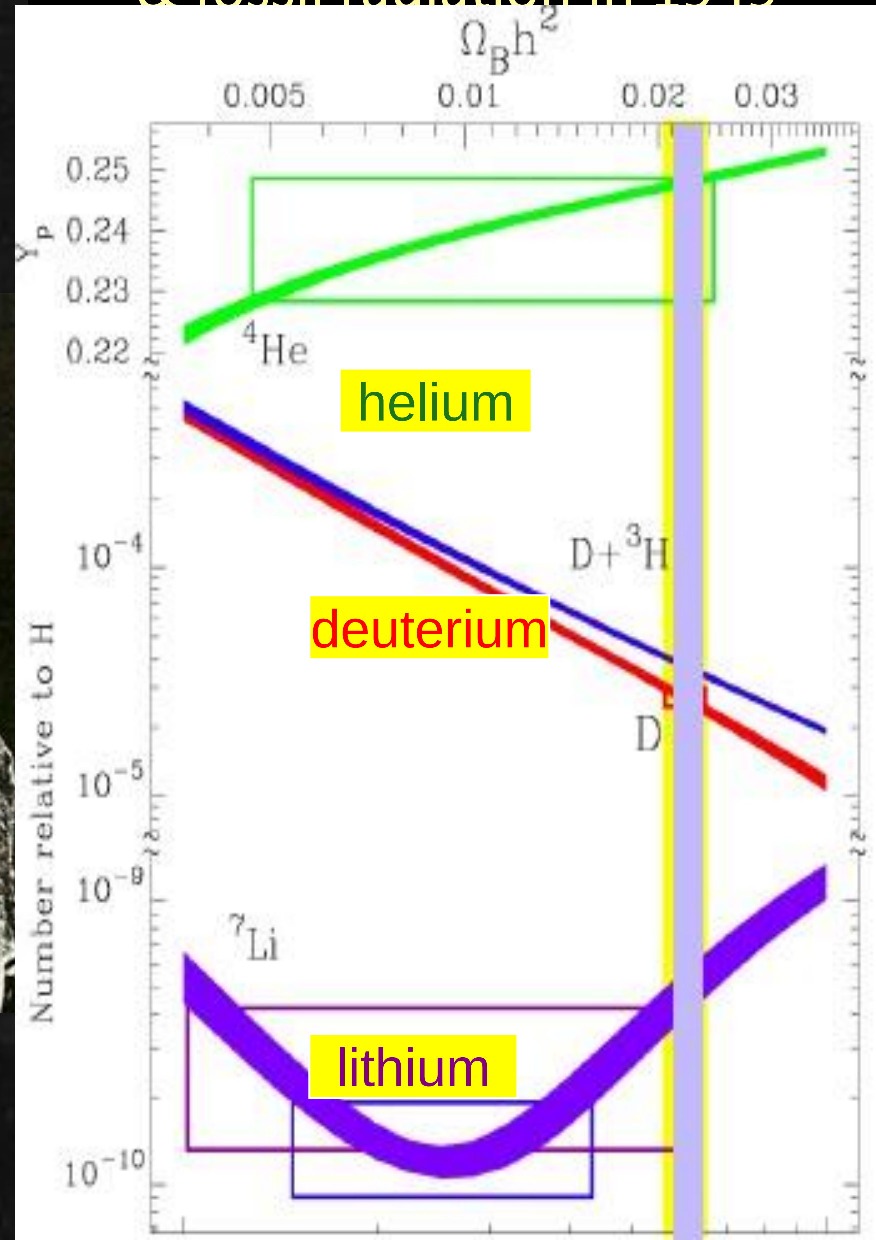
1949

nuclear physicists plunge in

predicted origin of light elements
& fossil radiation in 1949



RALPH ALPHER, GEORGE GAMOW, ROBERT HERMAN



PHYSICAL REVIEW VOLUME 75, NUMBER 7 APRIL 1, 1949

Since we have $\rho_{r'} \gg \rho_{m'}$ at early time the energy relation given in Eq. (6) may be integrated in a simpler form, with the result

$$T = [(32\pi Ga)/(3c^2)]^{-\frac{1}{4}} t^{-\frac{1}{2}} {}^\circ\mathrm{K} = 1.52 \times 10^{10} t^{-\frac{1}{2}} {}^\circ\mathrm{K}. \quad (13a)$$

The density of radiation, ρ_r, may be found from

In accordance with Eq. (4), the specification of $\rho_{m''}$, $\rho_{m'}$, and $\rho_{r'}$ fixes the present density of radiation, $\rho_{r''}$. In fact, we find that the value of $\rho_{r''}$ consistent with Eq. (4) is

$$\rho \text{ [illegible] } \mathrm{m}^3, \quad (12d)$$

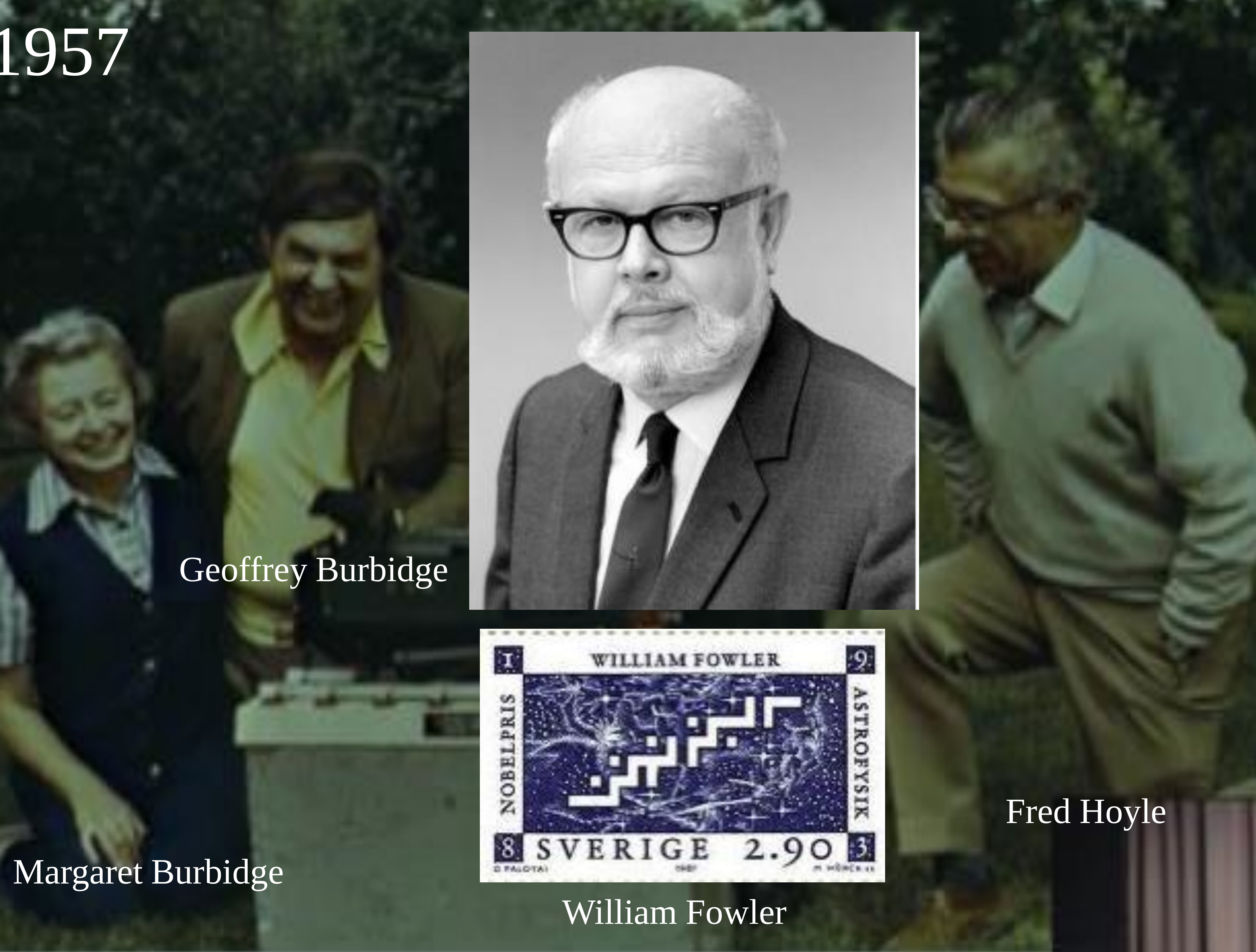
which [illegible] pon[illegible] to a temp[illegible]ture now of the orde[illegible] of 5°K. This [illegible]perature for the universe [illegible] interpreted as the background temperature which would result from the universal

Universe*,†

Spring, Maryland

terconverting matter and
e physical conditions that
nsion, is used to determine
tter and radiation. These
d mass when formed as
tions are computed to be

1957

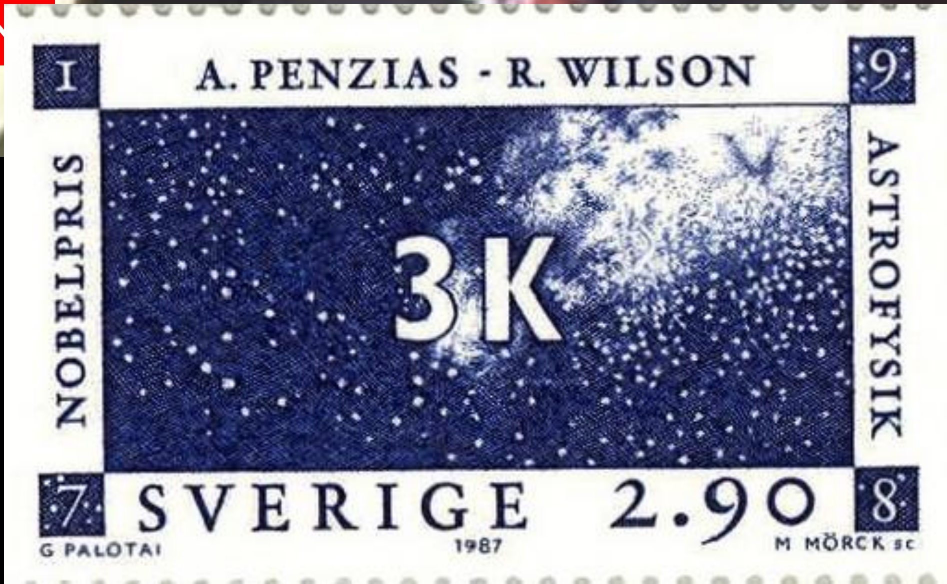


William Fowler

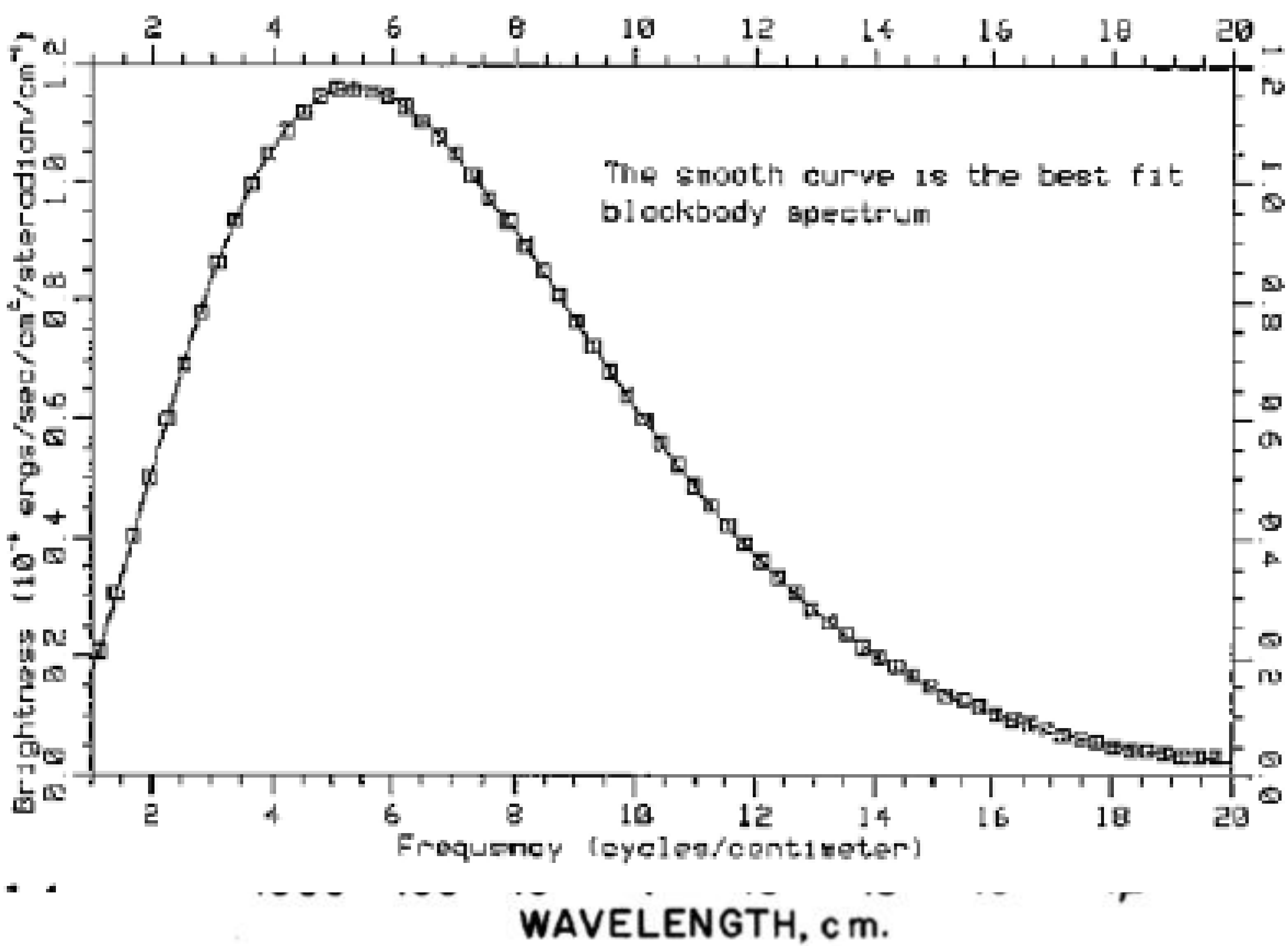
ARNO PENZIAS AND ROBERT WILSON

1964

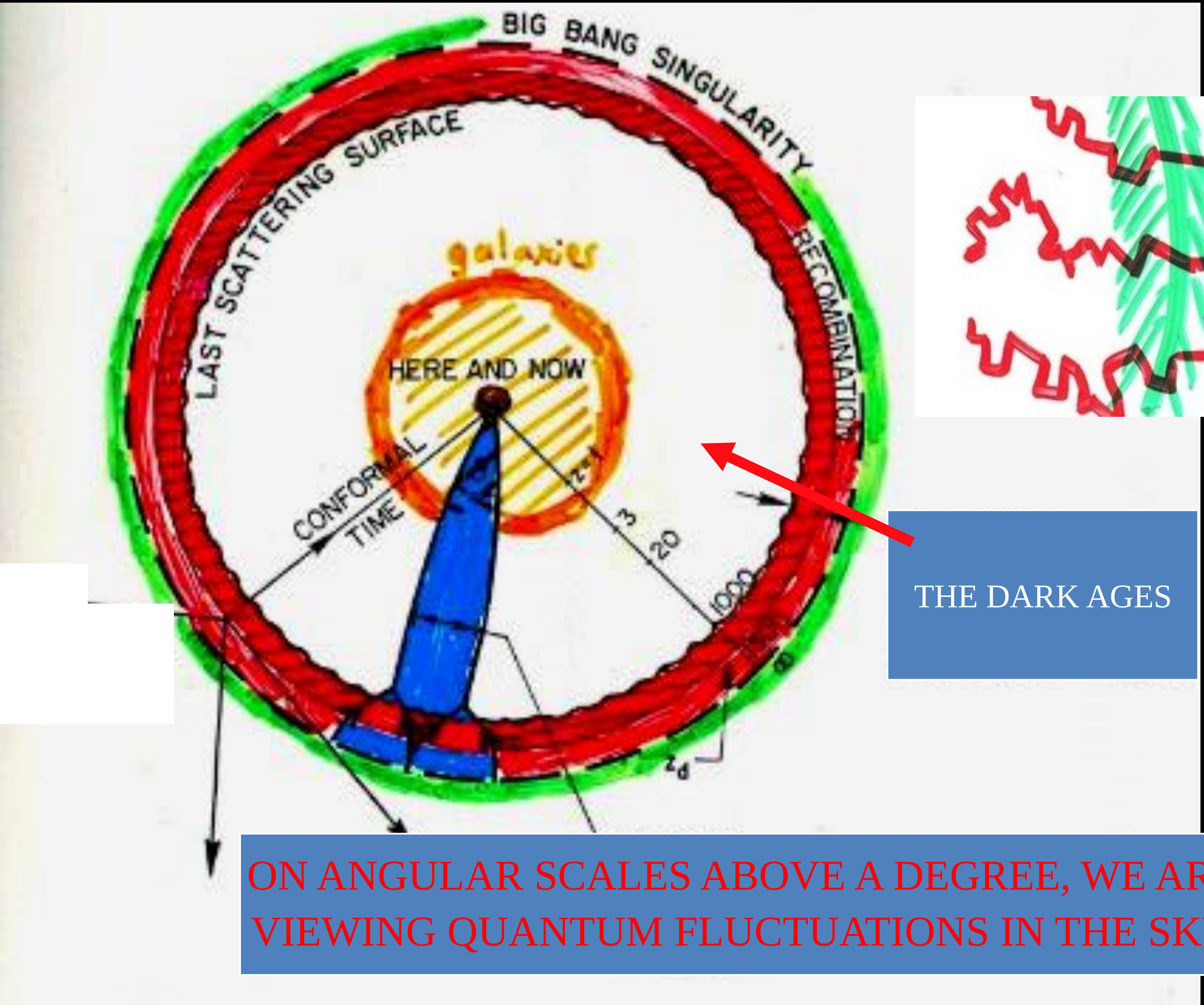
RELIC RADIATION DISCOVERED

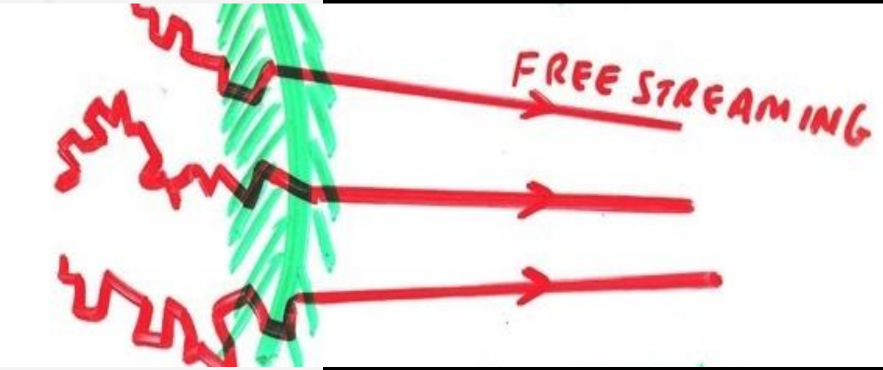


1964 1970 1990



A SPACE-TIME DIAGRAM OF THE UNIVERSE





THE DARK AGES

ON ANGULAR SCALES ABOVE A DEGREE, WE ARE VIEWING QUANTUM FLUCTUATIONS IN THE SKY!

NATURE, VOL. 215, SEPTEMBER 9, 1967

LETTERS TO THE EDITOR

Fluctuations in the Primordial Fireball

ONE of the overwhelming difficulties of realistic cosmological models is the inadequacy of Einstein's gravitational theory to explain the process of galaxy formation[1–6]. A means of evading this problem has been to postulate an initial spectrum of primordial fluctuations[7]. The interpretation of the recently discovered 3° K microwave background as being of cosmological origin[8,9] implies that fluctuations may not condense out of the expanding universe until an epoch when matter and radiation have decoupled[4], at a temperature T_D of the order of 4,000° K. The question may then be posed: would fluctuations in the primordial fireball survive to an epoch when galaxy formation is possible?

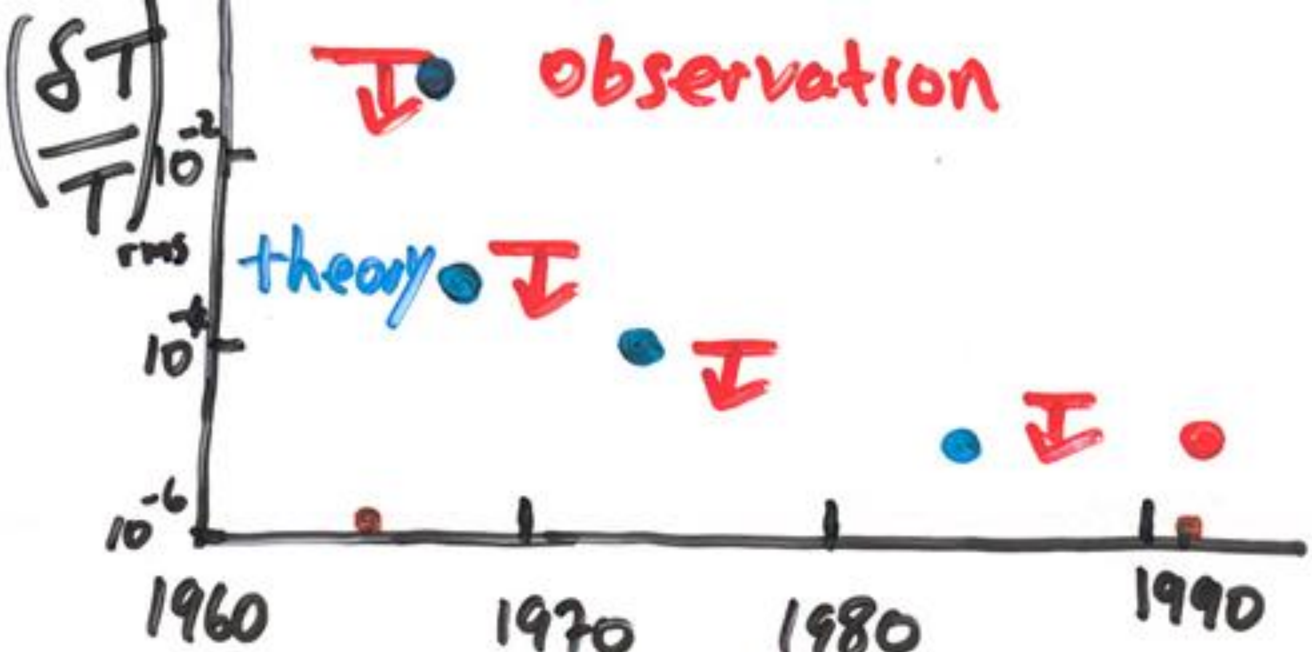
JOSEPH SILK

Harvard College Observatory,
Cambridge, Massachusetts.

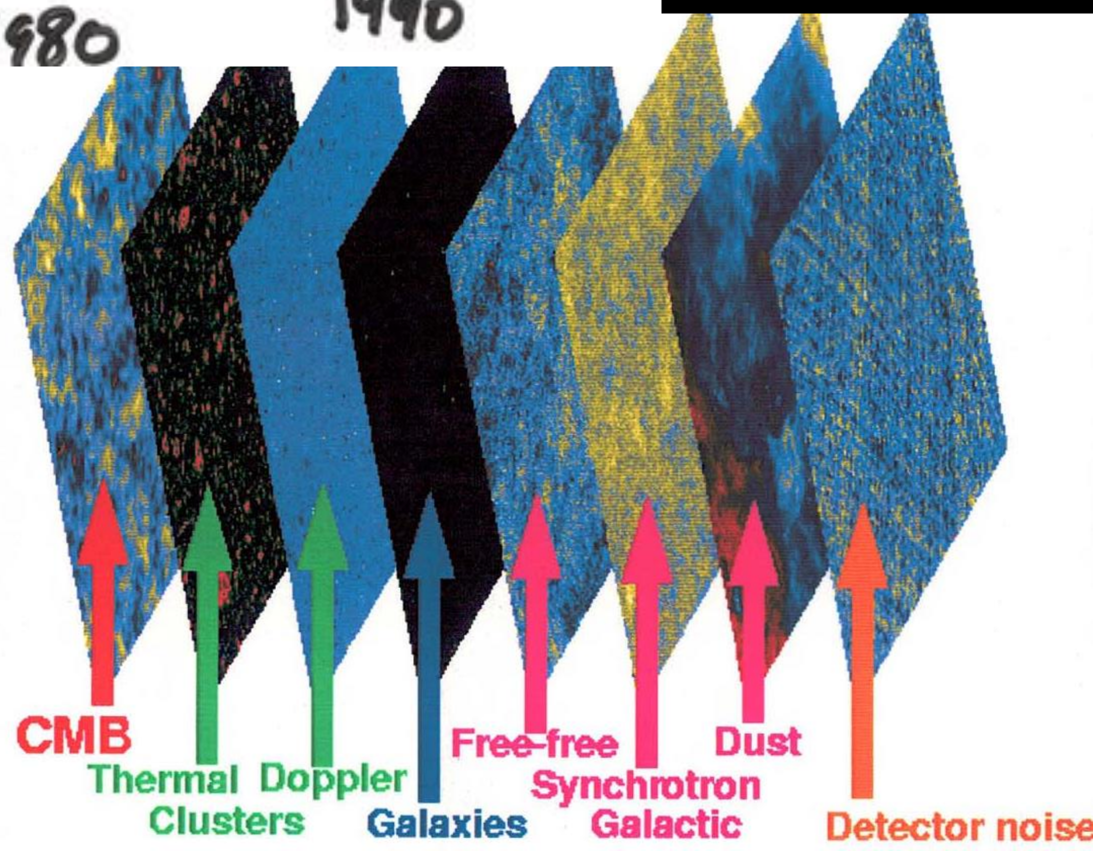
Received July 20, 1967.

1966

FROM PRIMORDIAL FLUCTUATIONS TO GALAXY FORMATION



observation
$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_{rms}$
10^{-2}
theory
10^{-4}
10^{-6}
1960
1970
1980
1990



CMB
Thermal Clusters
Doppler
Galaxies
Free-free
Synchrotron Galactic
Dust
Detector noise

Les grumeaux de la « soupe » co…

La découverte par le satellite américain Cobe de filaments de matiè… de l'Univers apporte une pièce essentielle au puzzle de la genèse …

par Jean-François Augereau et Jean-Paul Dufour

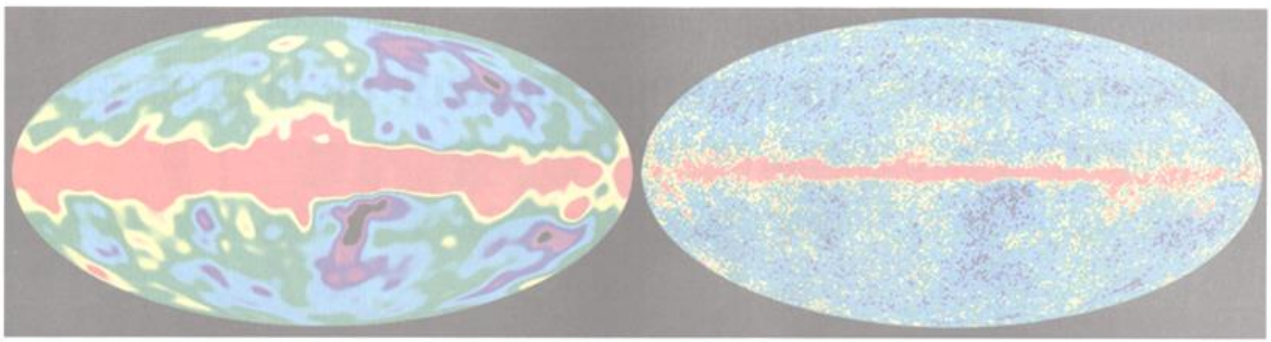
Les cosmologistes étaient heu-… Au fil des an… Bang, leur belle expli… genèse du monde, r… bien que mal à tous … Certes, quand une nou… verte survenait, quel… retouches étaient pa… aires, mais l'ensembl… remis en cause.

Un point faible sub… ant. Pour que les gal… nent et s'organisent … peut l'observer actuelle… ait que l'Univers a… dans sa prime jeunes… aine hétérogénéité. Or … ions les plus récentes … rouver le contraire. … où certains envisa… revoir leur copie », … Cobe (Cosmic Backgro… er), de la NASA, vien… un terme à leurs dout…

A l'issue d'une ca… plus de 300 millions … réparties sur trois an… Cobe a enfin détecté, … le l'Univers, ces inf… ions de densité de r… pourraien… reli… germes. … pour …

d'étoiles que sont les galaxies (le Monde du 25 avril). Des galaxies dont la distribution dans l'Univers est tout sauf homogène. Plus les instruments d'observation progres-… … l'orée du lac Mohoun.

mène unique ? … autres ont depu… Mieux, d'autres … sous le nom d… raïs », ont mon… … large de 200 millions d'AL et épaisse de …



Le rayonnement fossile vu par le satellite COBE en 1992 (à gauche) et par la sonde WMAP en 2003. En dix ans, l'image des « grumeaux » s'est énormément affinée. NASA/COBE SCIENCE WORKING GROUP/WMAP SCIENCE TEAM

Nobel de physique pour les grumeaux de la soupe cosmique

Les observations des Américains John Mather et George Smoot soutiennent la théorie du Big Bang

Le vrai destinataire du Nobel de physique 2006, attribué, mardi 3 octobre, aux Américains John C. Mather et George F. Smoot, est, pour la première fois, un instrument d'observation spatiale. En trois années d'activité, de 1989 à 1992, le satellite COBE (Cosmic Background Explorer) de la NASA n'a pas seulement apporté un soutien majeur à la théorie du Big Bang dans sa description des origines de l'Univers. Il a ouvert une fenêtre sur un paysage si éloigné de la Terre, dans le temps et l'espace, et pourtant si net que l'on peut y distinguer les infimes graines qui ont donné les … court depuis le début des temps. Deux Américains, Arno Penzias et Robert Wilson, l'ont entendu par hasard, en 1965, et l'ont d'abord pris pour un parasitage capté par l'antenne qu'ils calibraient.

Réflexion faite, ils ont compris qu'ils venaient de découvrir le rayonnement cosmologique de fond (RCF) prédit dix-sept ans plus tôt, ce qui leur a valu le Nobel de physique en 1978. Ce RCF est l'empreinte laissée dans l'Univers par la chaleur et la densité extrêmes de sa prime jeunesse. Des photons, particules de lumière, se sont libérés 380 000 ans après le Big Bang, lorsque le cosmos est devenu transparent grâce à la capture, par les noyaux d'hélium ou d'hydrogène, des électrons qui créaient jusque-là l'opacité en remuant en tous sens.

Depuis, ces photons voyagent, en quantités égales dans toutes les directions de l'Univers. L'expansion de ce dernier a … d'onde s'est aussi décalée vers les micro-ondes. Malgré ces changements, le RCF devait avoir conservé une propriété cruciale s'il portait bien le témoignage des premiers âges d'après le Big Bang. La forme de son spectre, soit la distribution de sa puissance énergétique selon différentes longueurs d'onde, devait épouser la courbe d'un rayonnement dit de « corps noir ». C'est-à-dire celle, très caractéristique, d'un corps qui a atteint l'équilibre thermique, ou dont toutes les parties présentent une température rigoureusement identique.

A sa mise en service, l'instrument Firas de COBE – dont John Mather, responsable scientifique de la mission, avait aussi la charge – n'a pas mis plus de neuf minutes pour discerner ce trait dis-… re d'applaudissements lors de sa présentation aux astronomes américains, en janvier 1990. Le RCF venait de démontrer qu'il portait bien la trace d'un état primordial de l'Univers, si dense que la température y était égale en tous points.

> Le satellite COBE a ouvert une fenêtre sur un paysage lointain et pourtant net dans lequel on distingue les germes des galaxies

Mais cette homogénéité, rassurante quant à la nature de l'objet observé, est vite devenue angoissante pour les astrophysiciens. Le Big Bang venait de remporter une victoire qui menaçait de tourner au désastre.

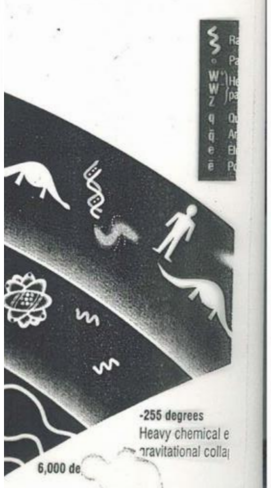
Trop uniforme, l'Univers des origines risquait la stérilité si l'on n'y décelait pas la moindre trace d'un désordre qui permettrait de comprendre l'apparition des galaxies. Il a fallu deux ans à l'instrument dont John Smoot avait la charge pour … ment fossile, ont été interprétées comme les « grumeaux » autour desquels la matière pourrait commencer à s'agréger pour finir par former, sous l'action de la gravité, les premières galaxies. Certes, ces variations d'intensité, nommées « anisotropies », semblent trop faibles pour justifier la totalité des corps massifs de l'Univers. Elles n'en ont pas moins été saluées, dès 1992, comme une découverte majeure du siècle, promettant le Nobel aux concepteurs de COBE.

Ce prix est arrivé d'autant plus rapidement qu'une série d'observations ont confirmé et amplifié, au tournant des années 2000, les découvertes de l'engin. Après les expériences en ballons stratosphériques, le satellite américain WMAP a largement affiné les cartes des anisotropies. A partir de 2008, son successeur, Planck, de l'Agence spatiale européenne, doit profiter d'une précision dix fois supé-…

… discovery about the fo…

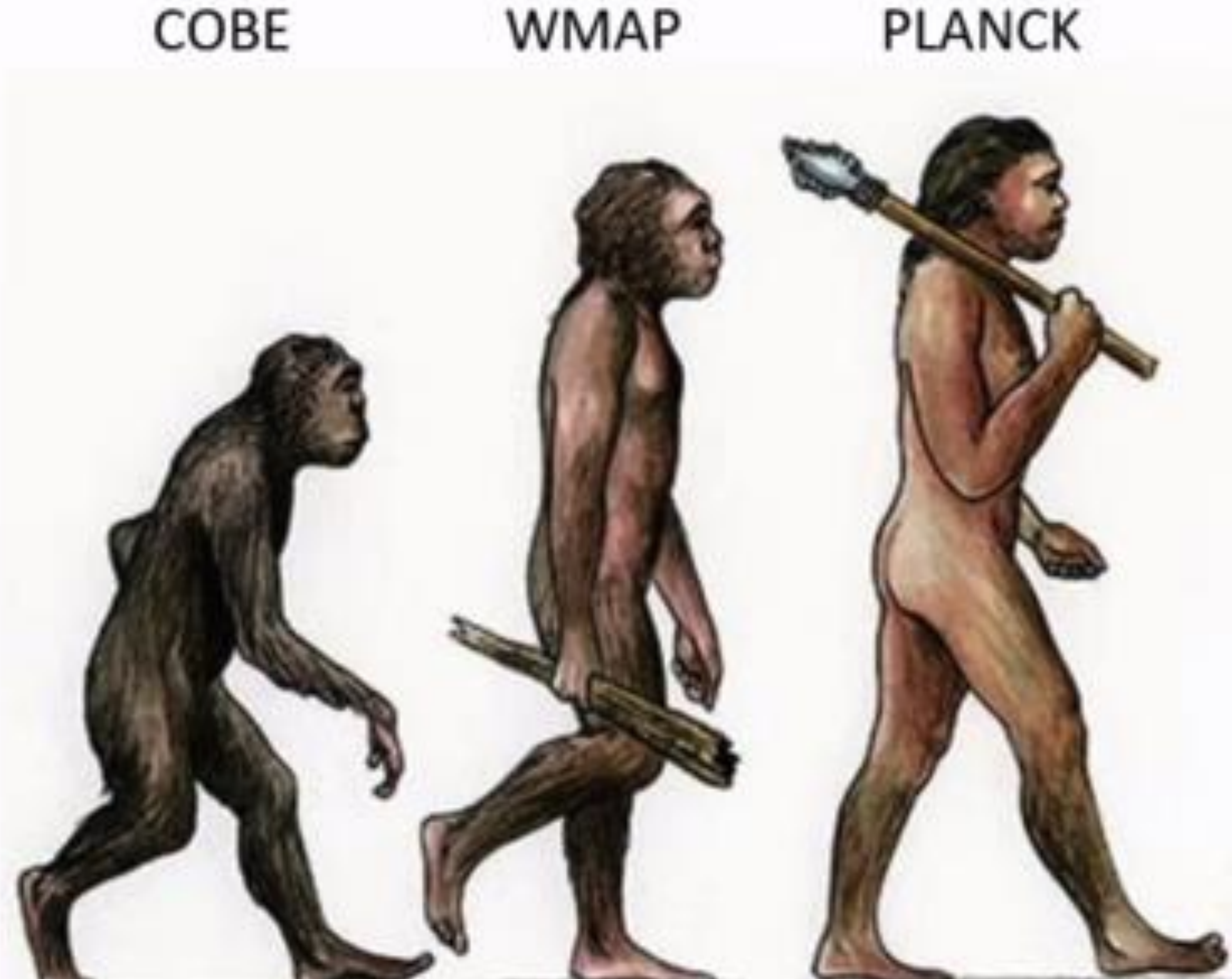
…n Watts and Tom Wi…

…egan

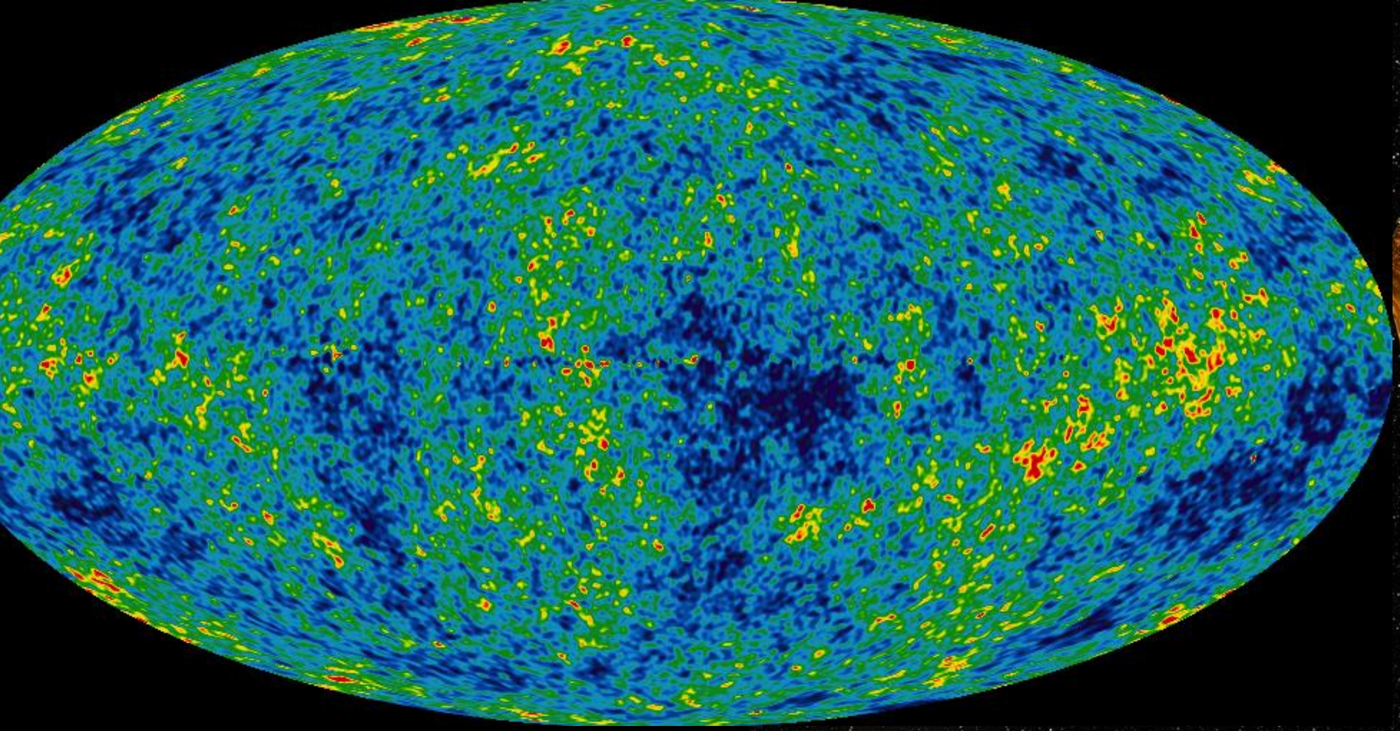


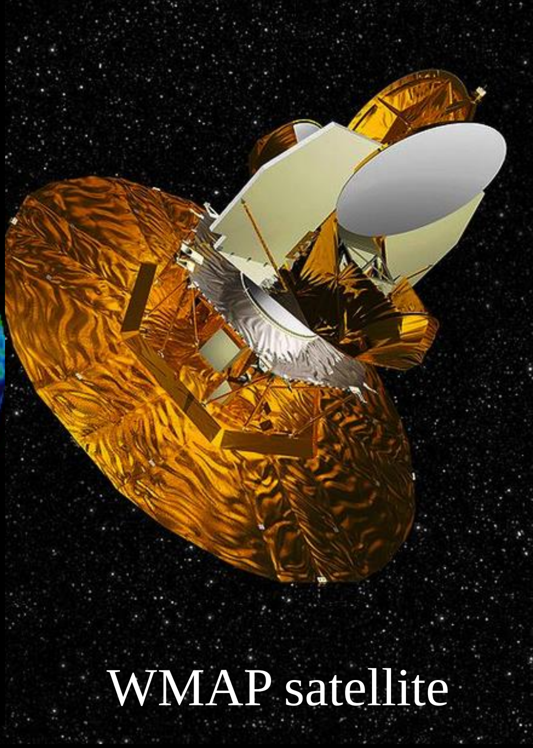
…n years ago … matter. … e discovered … Background

The White House, ho… make the military goo… tially computers and se… manufacturing and de…



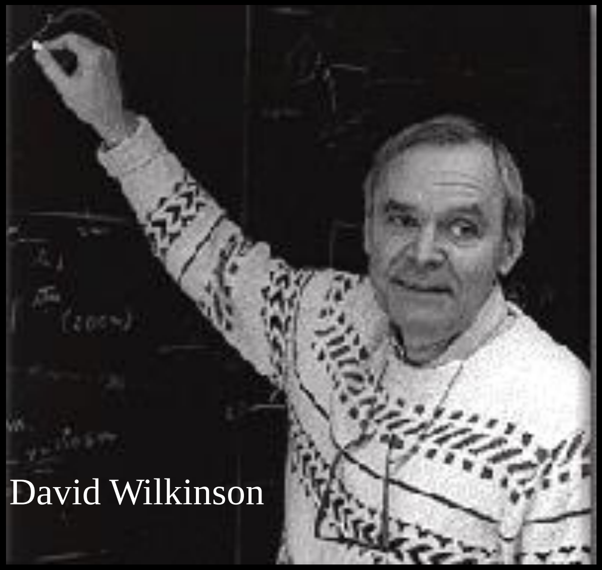
Courtesy G. Efstathiou





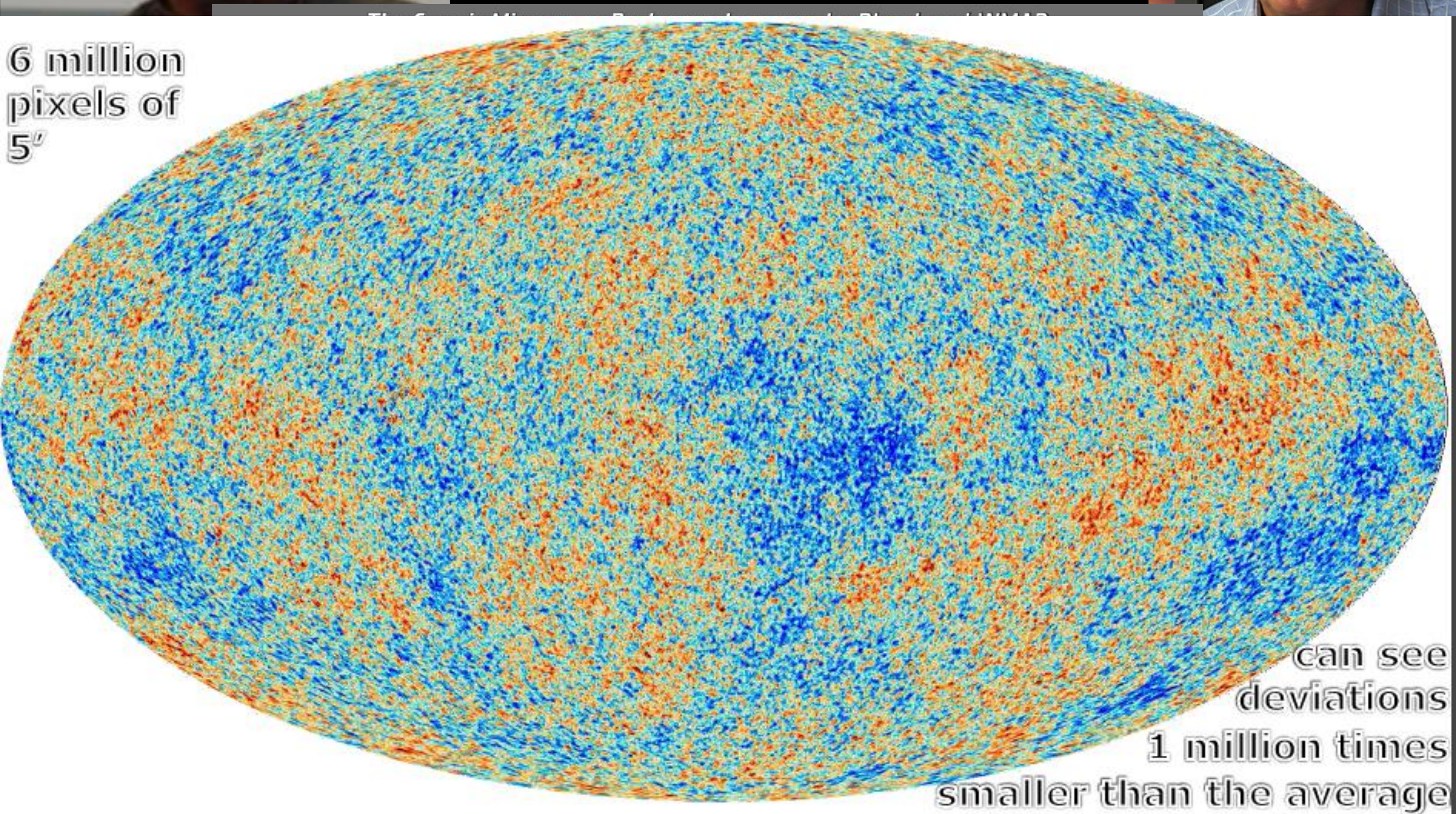
Wilkinson Microowave Anisotropy Probe

9 years of data (2010)

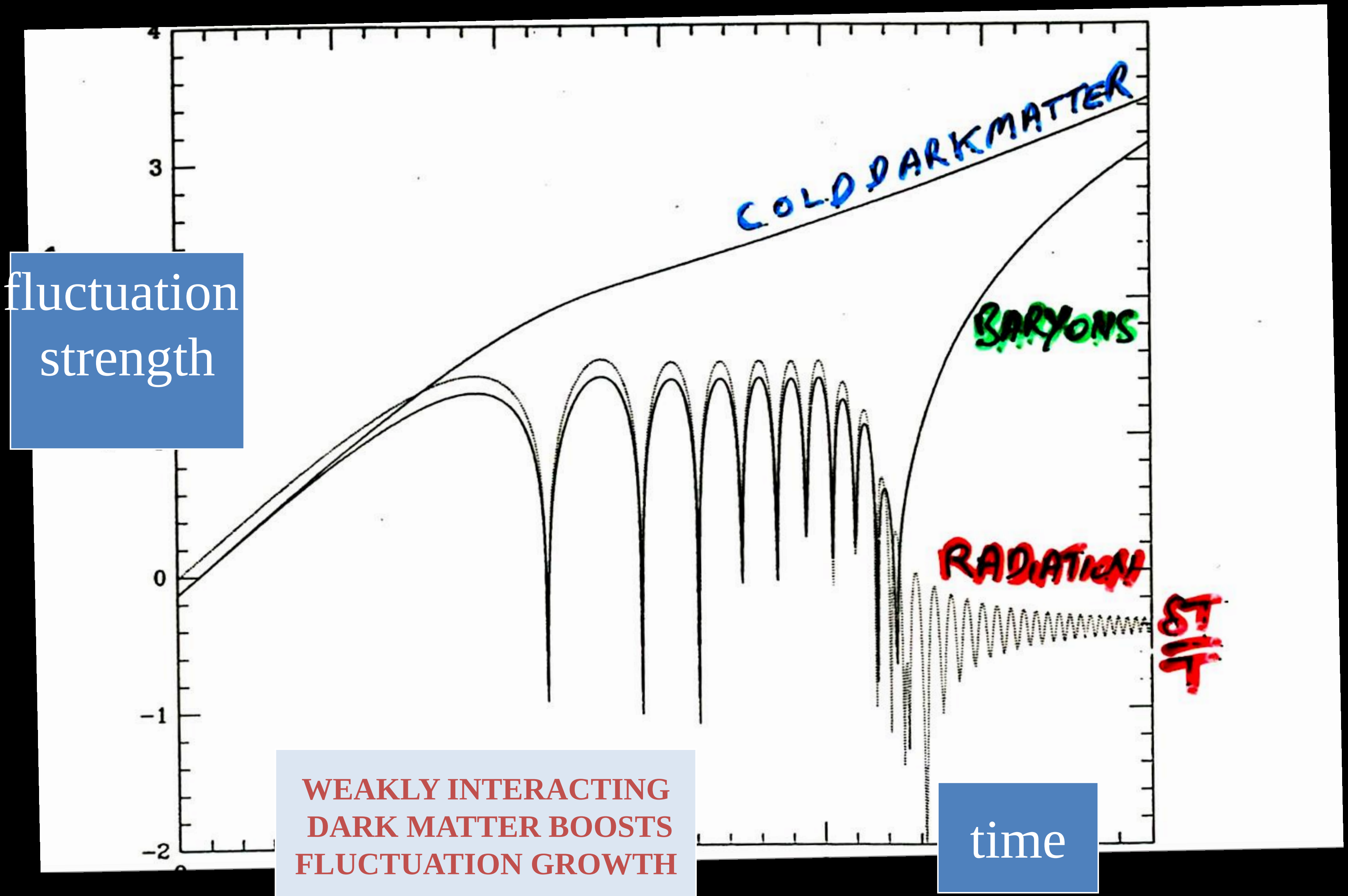


2013

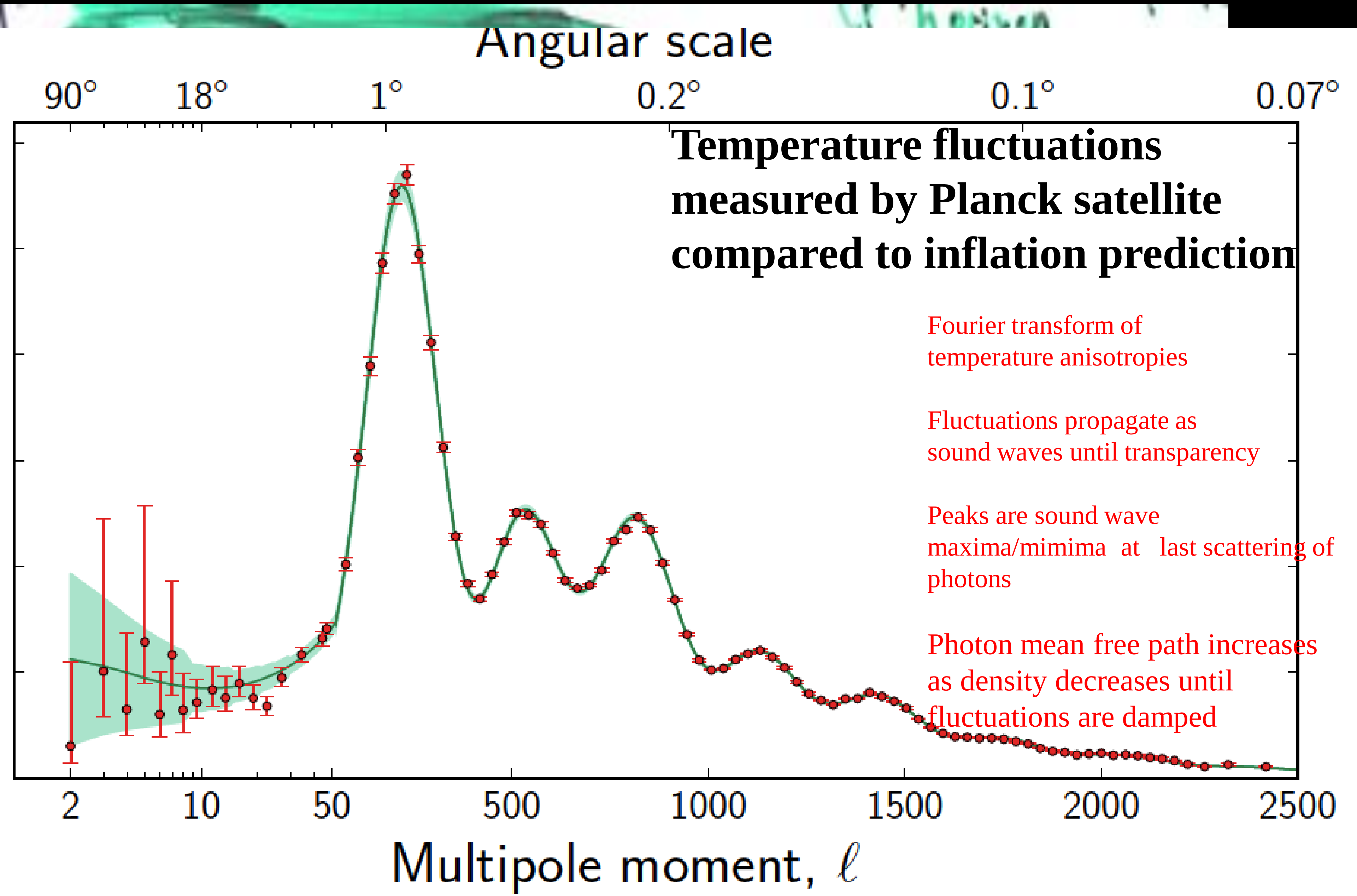
Planck satellite



PRIMORDIAL SOUND WAVES IN THE PHOTON-BARYON PLASMA BECOME DENSITY FLUCTUATIONS IN DARK MATTER-DOMINATED ERA



FROM DENSITY FLUCTUATIONS TO GALAXIES



Temperature fluctuations measured by Planck satellite compared to inflation prediction

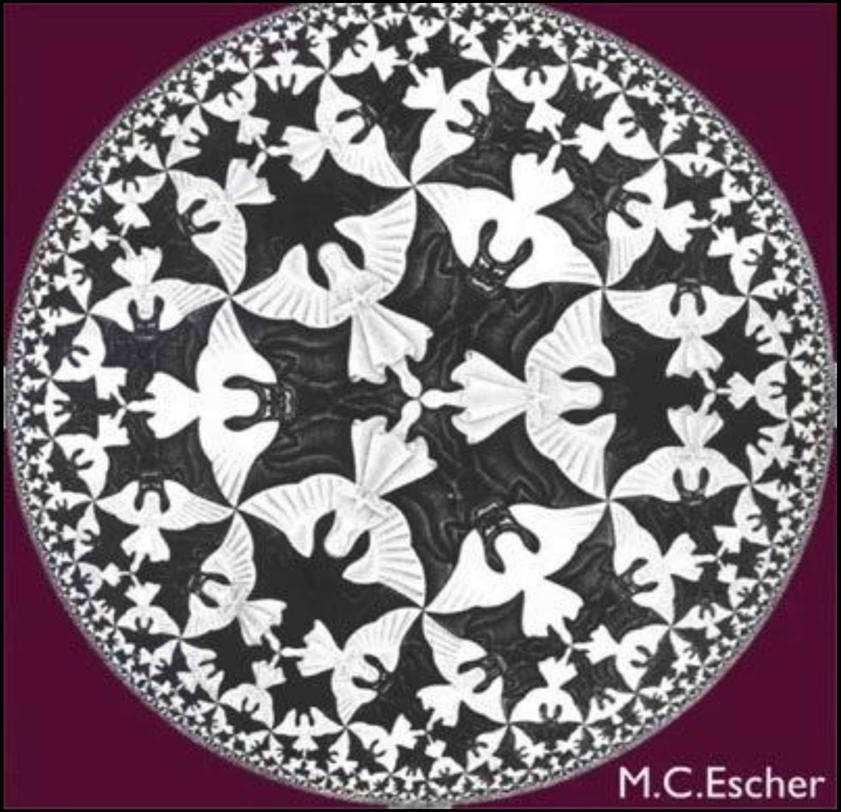
Fourier transform of temperature anisotropies

Fluctuations propagate as sound waves until transparency

Peaks are sound wave maxima/mimima at last scattering of photons

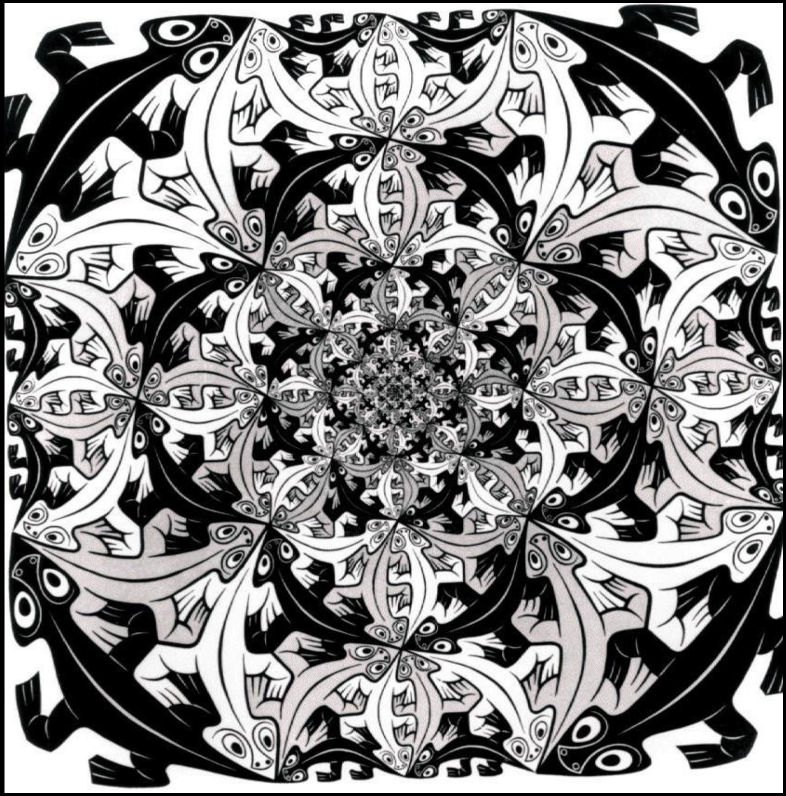
Photon mean free path increases as density decreases until fluctuations are damped

Angels and demons



The implications of a curved space as seen by M.C Esher

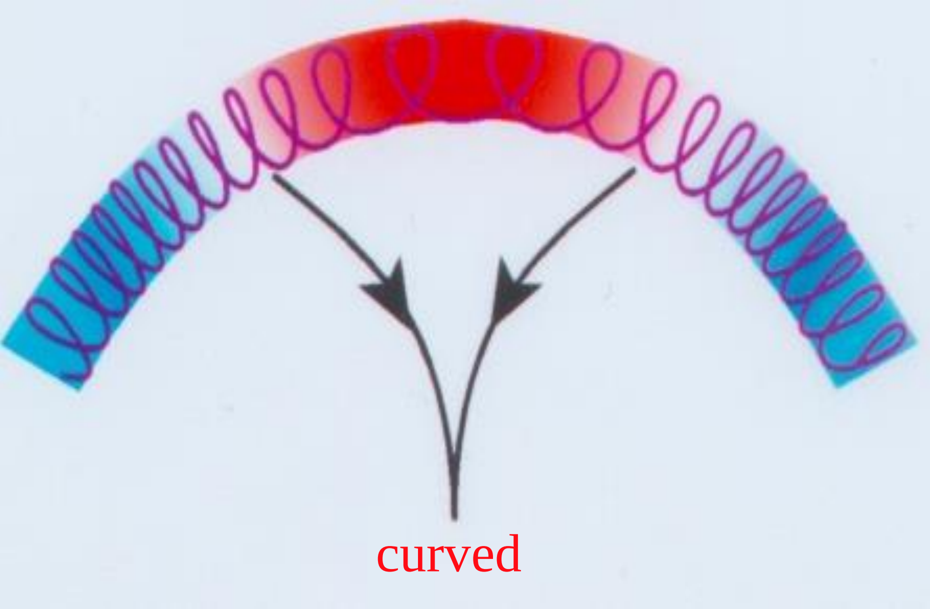
hyperbolic geometry

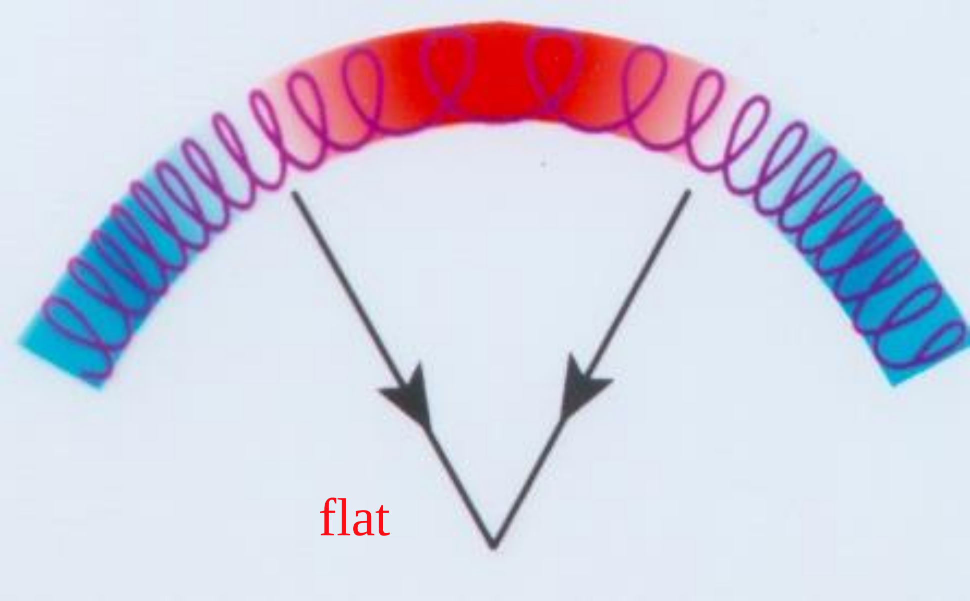


spherical geometry

$\Omega = 8\pi G\rho / 3H_0^2$

$H_0 = 68 +- 1$ km s^{-1} Mpc $^{-1}$





$\Omega_\Lambda = 0.697 +- 0.011$

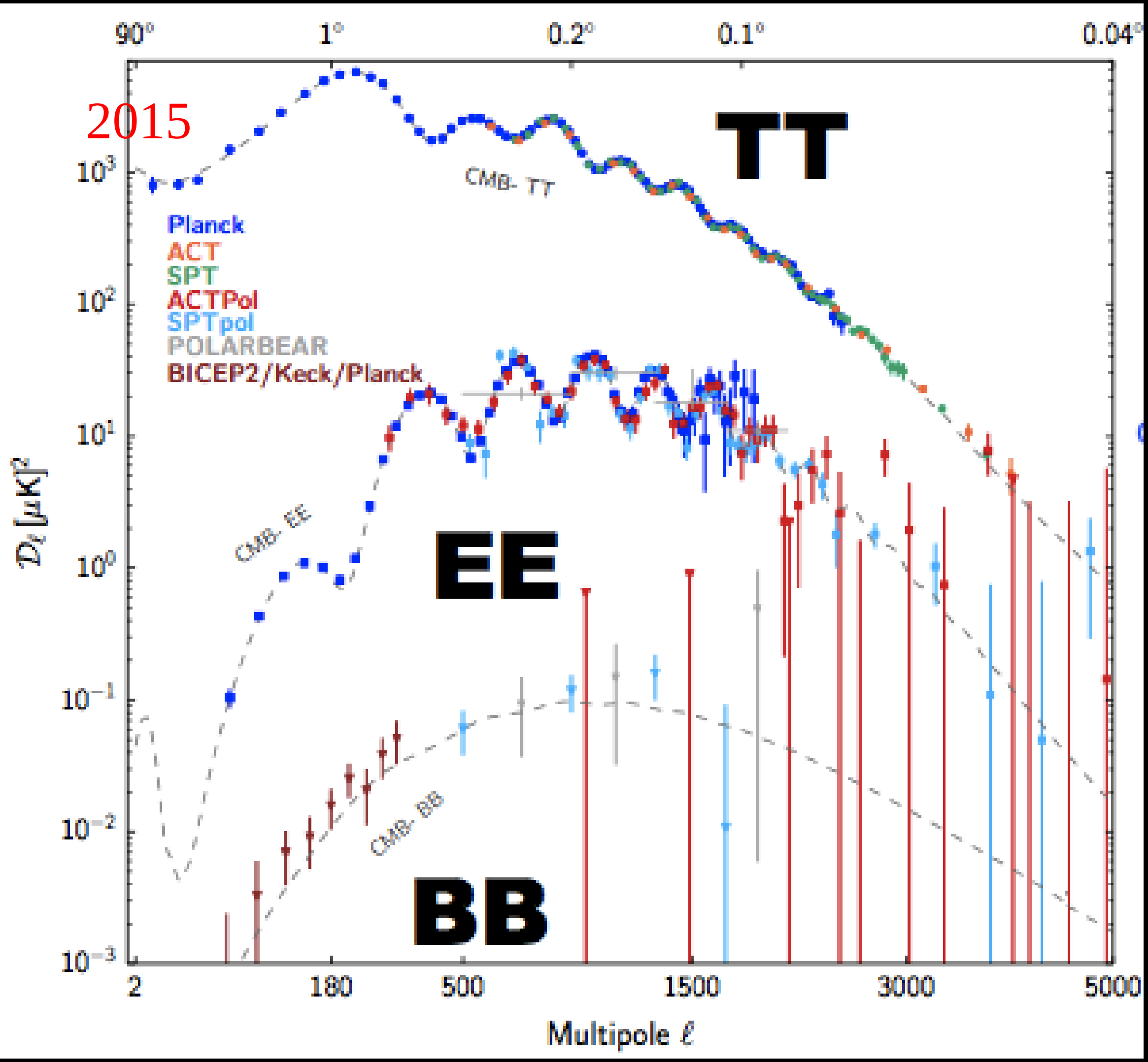
$\Omega_m = 0.303 +- 0.011$

$\Omega_B = 0.0484 +- 0.0007$

The geometry of the universe is Euclidean!

$t_0 = 13.804 +- 0.058$ Gyr

The next challenge: POLARIZATION



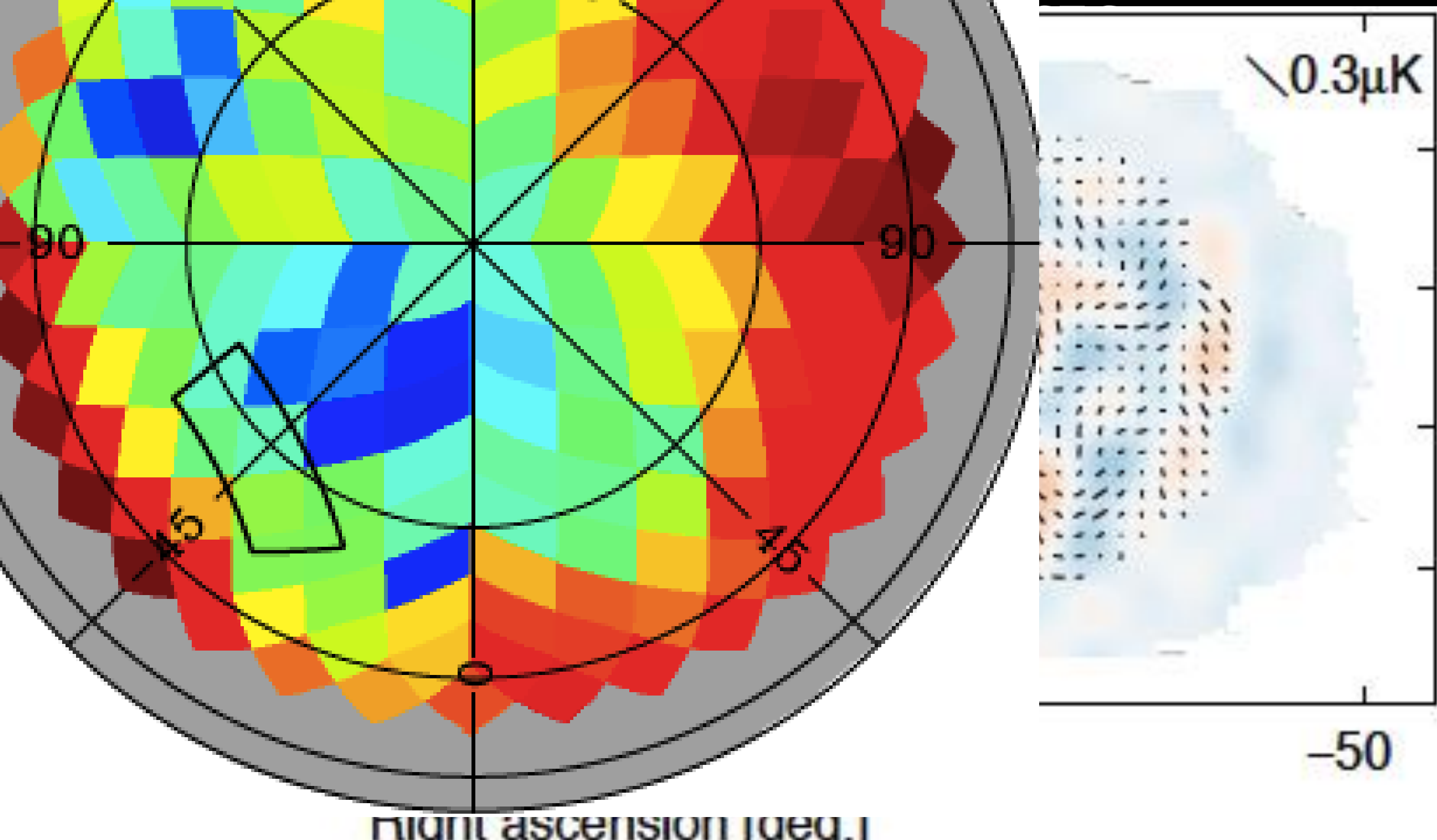
"Twisting" of the CMB by gravity waves from the epoch of inflation at 10^{-36} sec

Dust and gravitational lensing are foregrounds to be removed

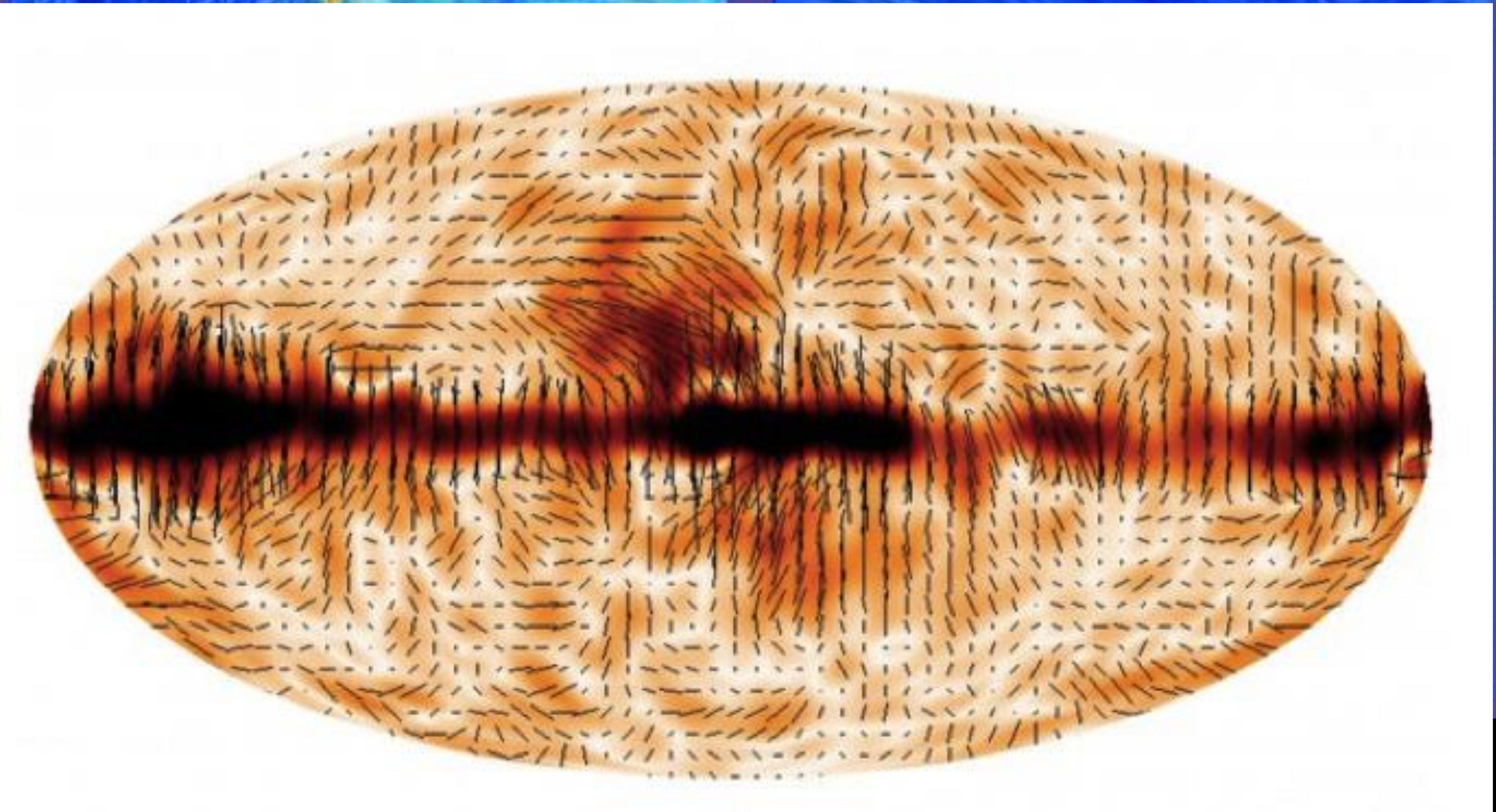
The holy grail!

2014

UNIQUE IMPRINT

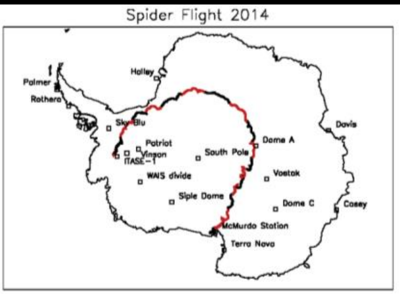


T/S< 0.1



Planck at 30 GHz: dust is everywhere

Sub-orbital by 2017



SPIDER

Limit T/S~0.01

Advanced ACTpol, SPT-3G

Polar Bear, Simons Array, BICEP3/KECK array, CLASS….

Space by 2022

LITEBIRD JAXA/NASA phase A 2015.5

2029/30

ESA M5 ?

Limit T/S~0.001

low *l* cosmology is cosmic variance and theory limited

FUNDAMENTAL PHYSICS CHALLENGES FOR A FUTURE SPACE CMB EXPERIMENT

- Damping tail and m_ν
- Primordial B modes ?
- Beyond the standard LCDM model ?
- Recombination epoch

What is the choice for a future space mission?

To B or not to B?

the polarization by primordial gravity waves
Is divergence free, only stretching, like a magnetic field

1. Thermalization

$(\gamma, e\text{-})$ by double Compton scattering occurs at

create photons before 1 yr

$z > z_\mu = 2x10^6 (0.0224/\Omega_B h^2)^{2/5}$

$e^- + \gamma$ --- $e + \gamma + \gamma$ (also bremsstrahlung: $e^- + X$ --- $e^- + X + \gamma$)

$t_\mu = 4.10^6 (\Omega_B h^2/0.0224)^{-1} (2.10^6/z)^{9/2}$ s

2. conserve photons

before 10^4 yr

Equilibration (γ, e^-) to Bose-Einstein by Compton scattering $(e^- + \gamma$ --- $e + \gamma)$

results in μ distortion

occurs at $z_\mu < z < z_y = 2.15x10^4 (1/\Omega_B h^2)^{1/2}$

3. Heating of photons

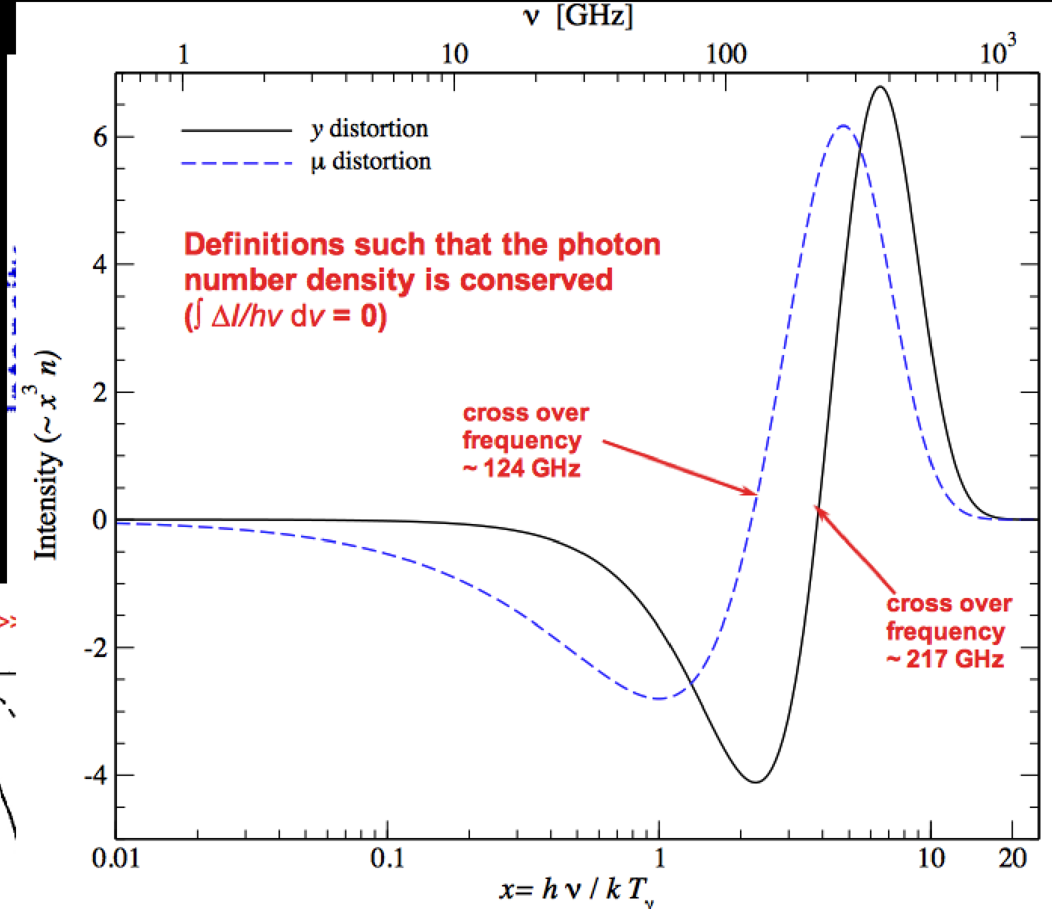
$z < z_y$: Compton scattering produces y distortion

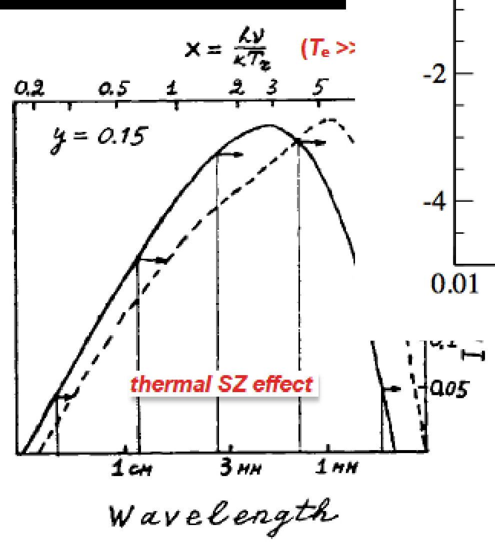
4. Recombination

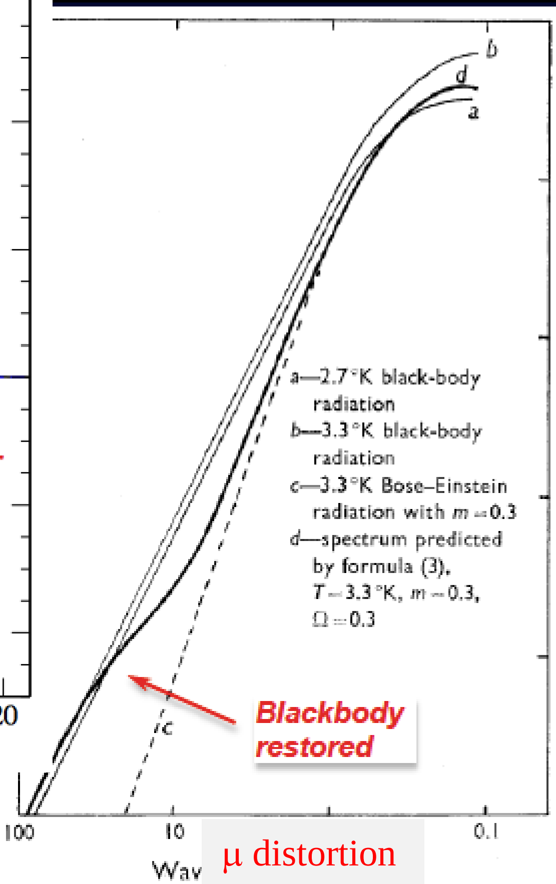
at $z_{LSS} = 1060$

5. Reionization

at z~ 9







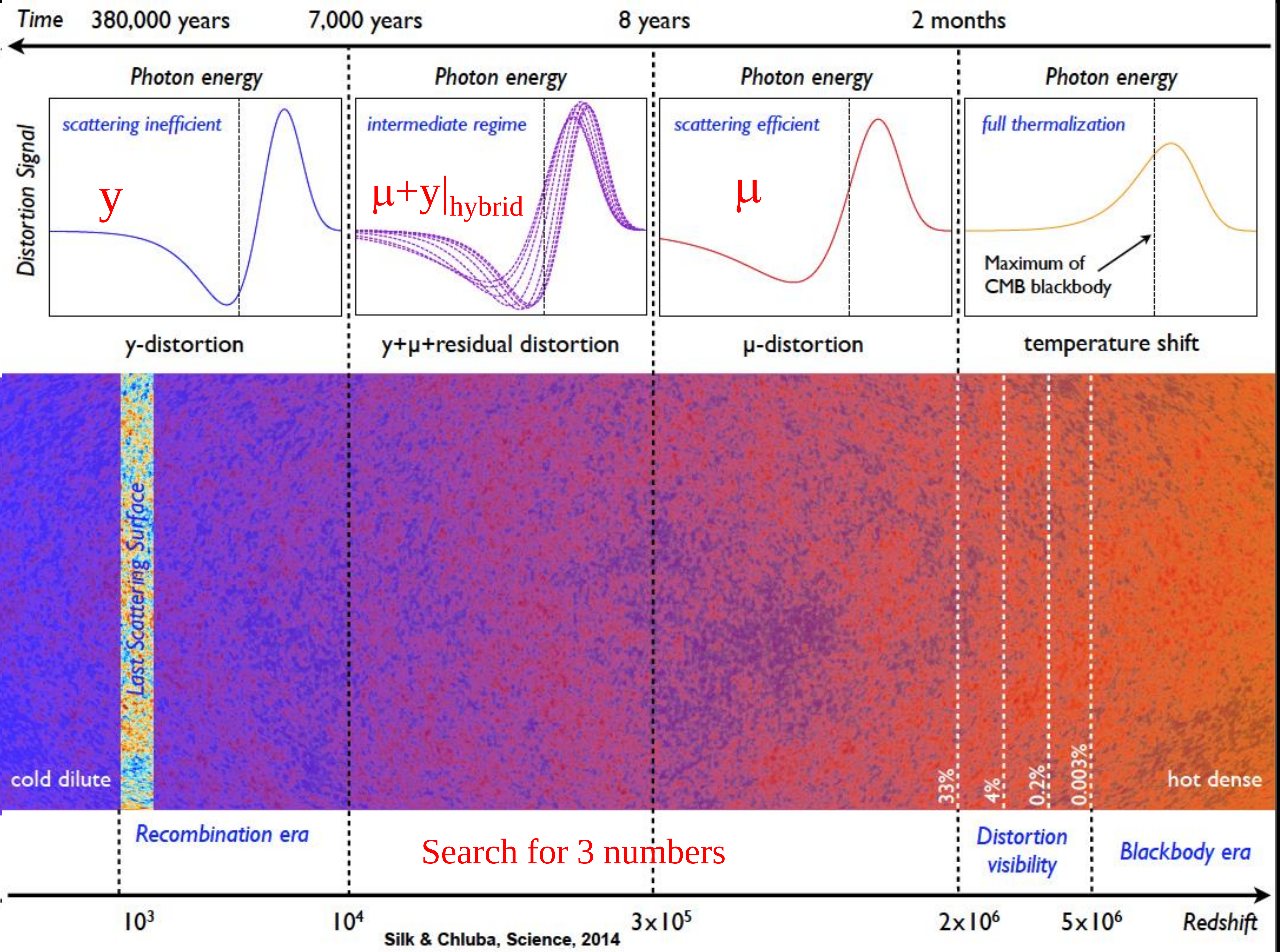
Sunyaev & Zeldovich, 1970, ApSS, 2, 66

$$|y| \le 1.5\times10^{-5}$$

$$|\mu| \le 9\times10^{-5}$$

Spectral distortions are the next frontier

> 3 order of magnitude improvement is feasible!

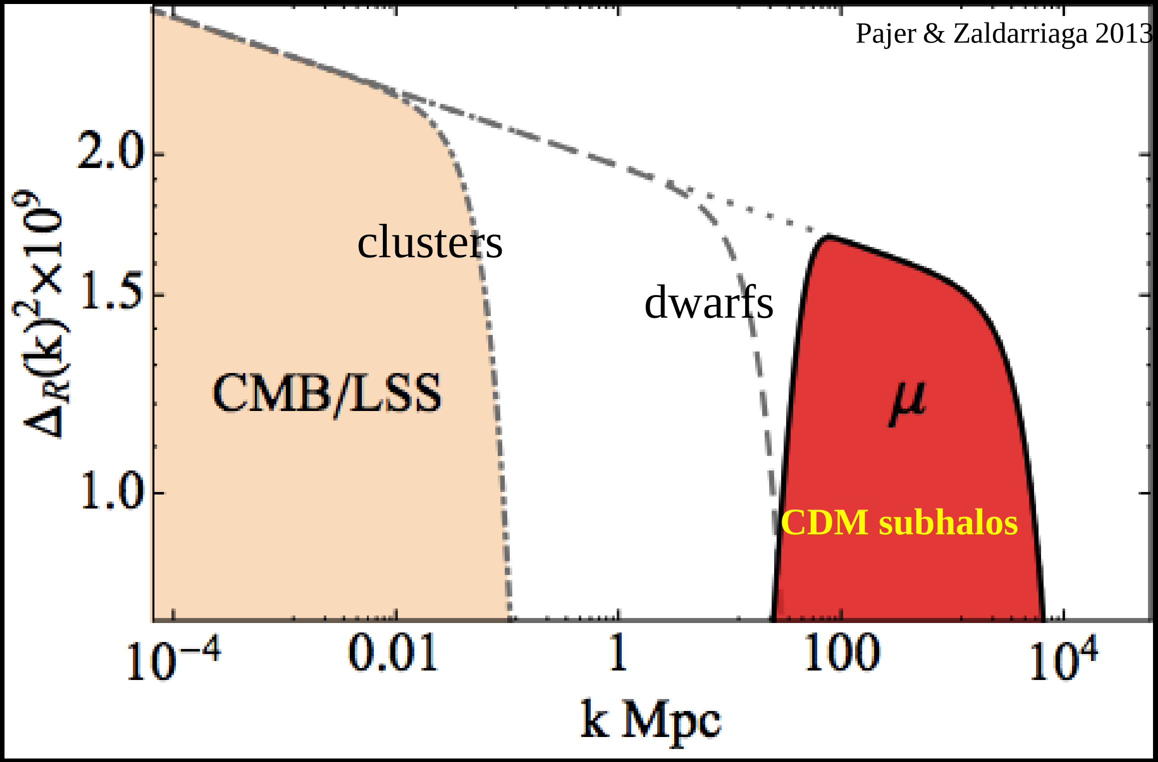


Time
380,000 years
7,000 years
8 years
2 months
Photon energy
Photon energy
Photon energy
Photon energy
Distortion Signal
scattering inefficient
intermediate regime
scattering efficient
full thermalization
y
μ+y|hybrid
μ
Maximum of CMB blackbody
y-distortion
y+μ+residual distortion
μ-distortion
temperature shift
Last Scattering Surface
cold dilute
hot dense
33%
4%
0.2%
0.003%
Recombination era
Search for 3 numbers
Distortion visibility
Blackbody era
10³
10⁴
3x10⁵
2x10⁶
5x10⁶
Redshift
Silk & Chluba, Science, 2014

A search for spectral distortions

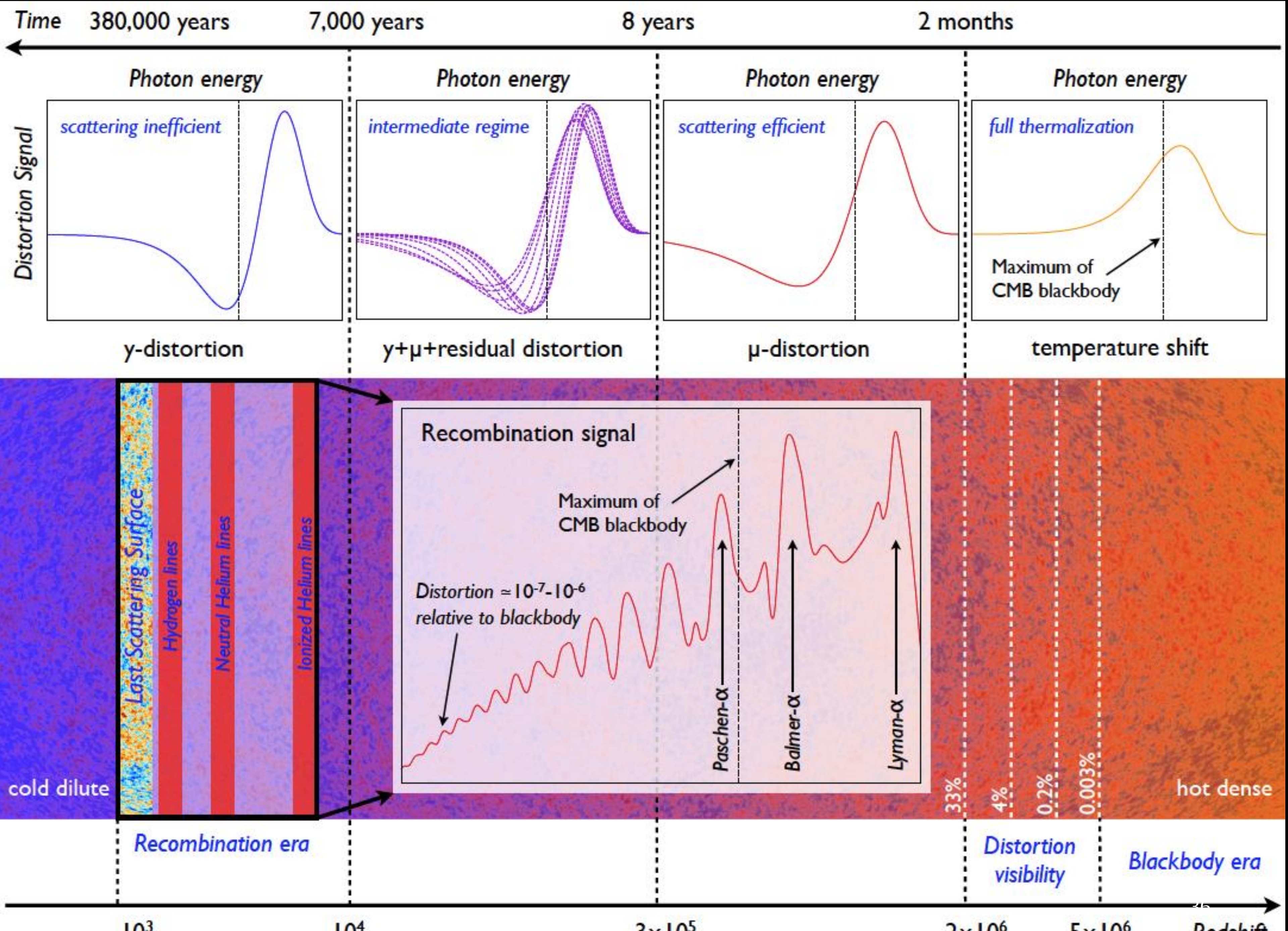
Guaranteed signal

Density fluctuation damping gives $\mu=10^{-8}$
complements CMB acoustic peaks



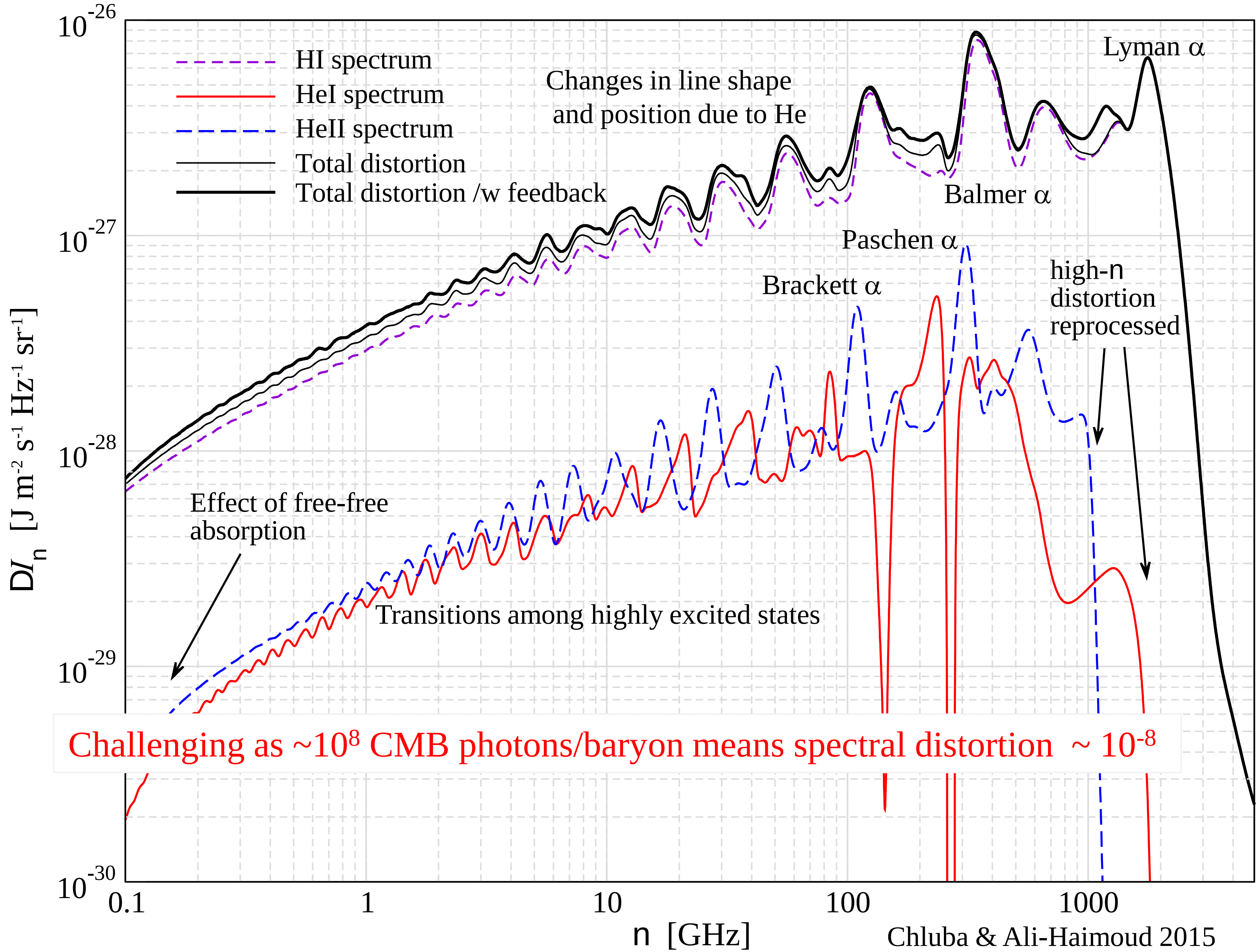
These numbers are integrated over z

Can we do better?



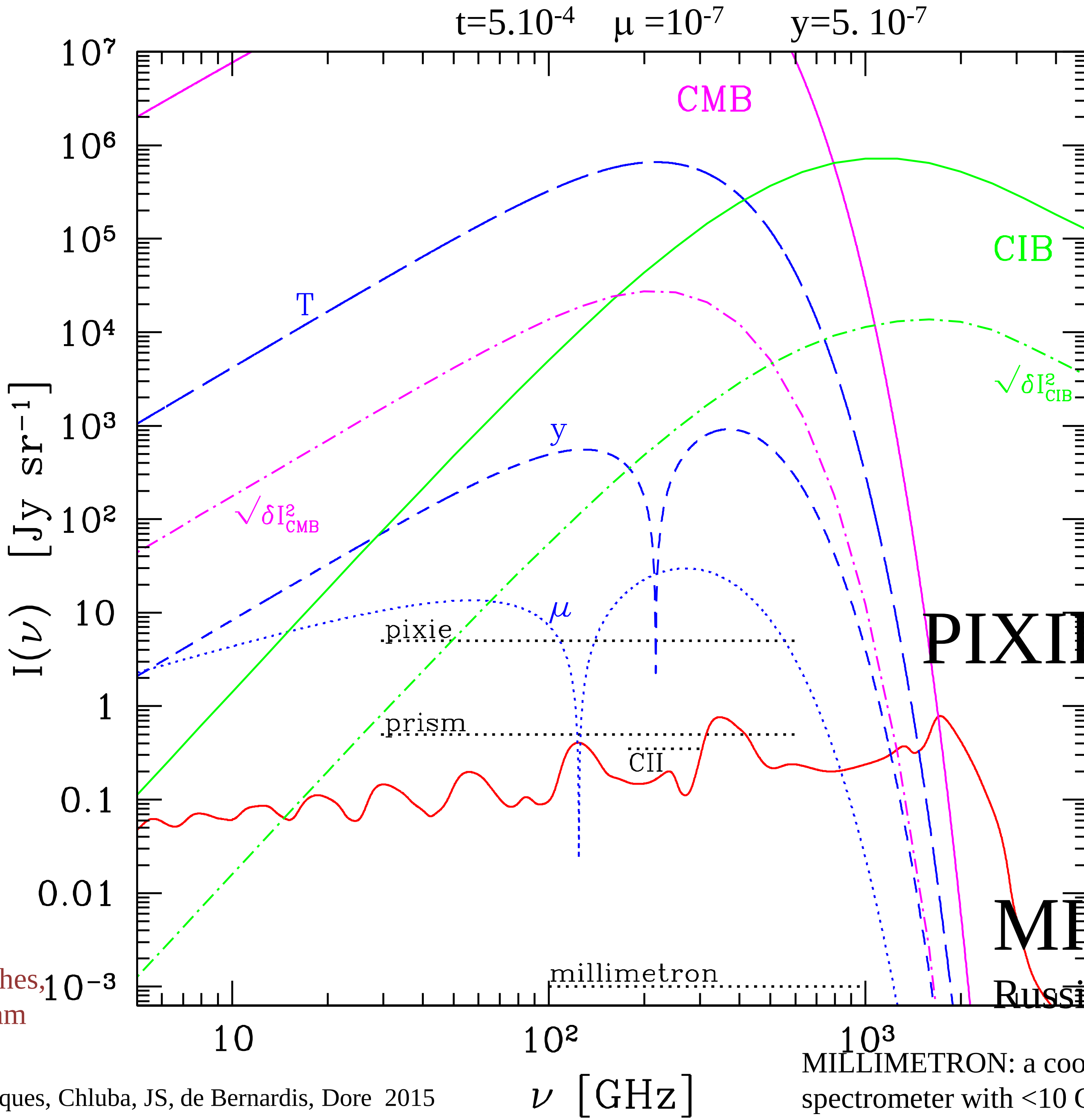
Silk & Chluba, Science, 2014

Cosmological recombination spectrum



Challenging as ~10^8 CMB photons/baryon means spectral distortion ~ 10^{-8}

What i



PIXIE NASA prop

MILLIMET

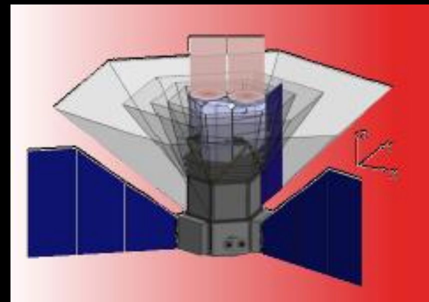
Russian 12 m telesc

16 sq deg patches,
0.5 arcmin beam

Desjacques, Chluba, JS, de Bernardis, Dore 2015

MILLIMETRON: a cooled 12m telescope +
spectrometer with <10 GHz resolution

FUTURE SPACE MISSIONS WITH SPECTRAL CAPABILITY



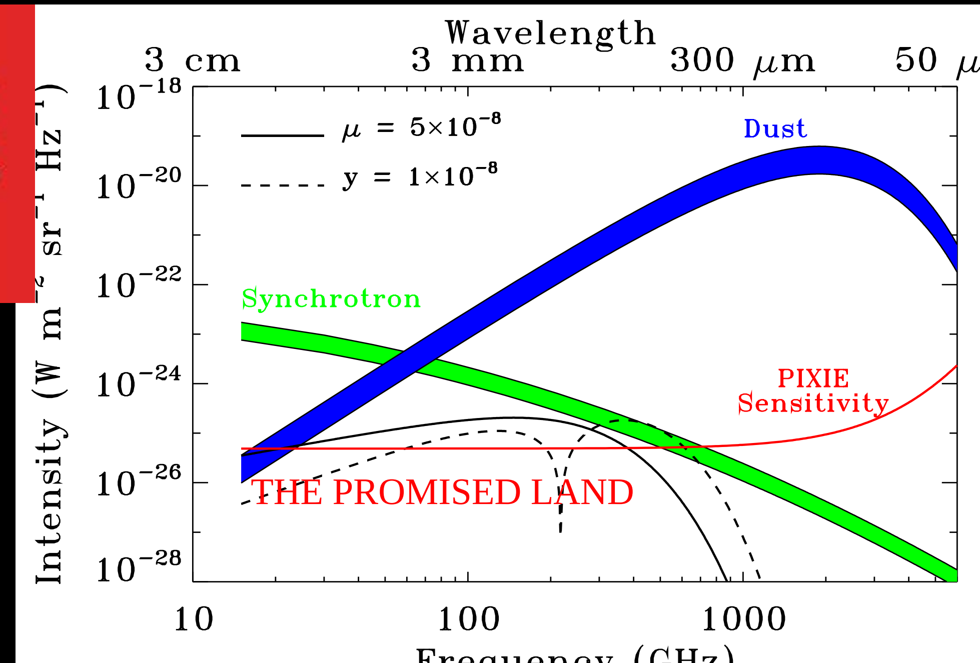
PIXIE for 2022 launch?

T/S ~2.10^{-4} (1σ)

+ possibility of finding

μ at $z \sim 10^6$ and y at $z \sim 10^3$

cf: LiteBIRD's design goal is ~few x 10^{-4} for 2022 launch



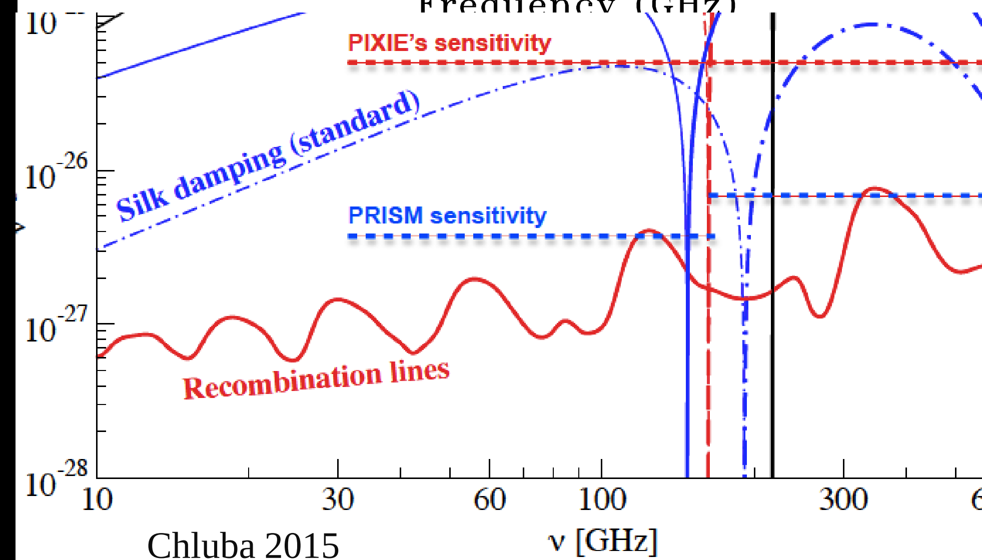
PIXIE+

With modest increase (x 3) in sensitivity, a significant detection of μ is guaranteed

HYPERPIXIE: Theorist's dream:

Revelatory for recombination at z = 1080

& for primordial He



BUT need 30x PIXIE sensitivity!

a billion $ mission…