

Michael Kobel, TU Dresden
Netzwerk Teilchenwelt

Kosmologie – Der Klang der kosmischen Hintergrundstrahlung

German Teacher Program, CERN
20. Juni 2025

Der Blick hinaus

- **Camille Flammarion (1842-1925), Astronom**
 - Schrieb 50 populäre Bücher und Manuskripte
 - beginnend als 16-jähriger mit der 500-seitigen „*Cosmologie Universelle*“

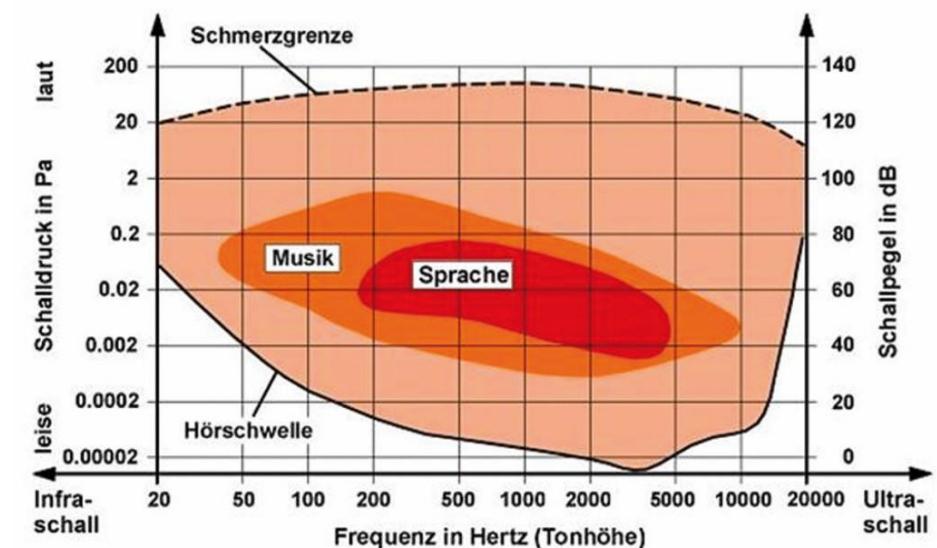
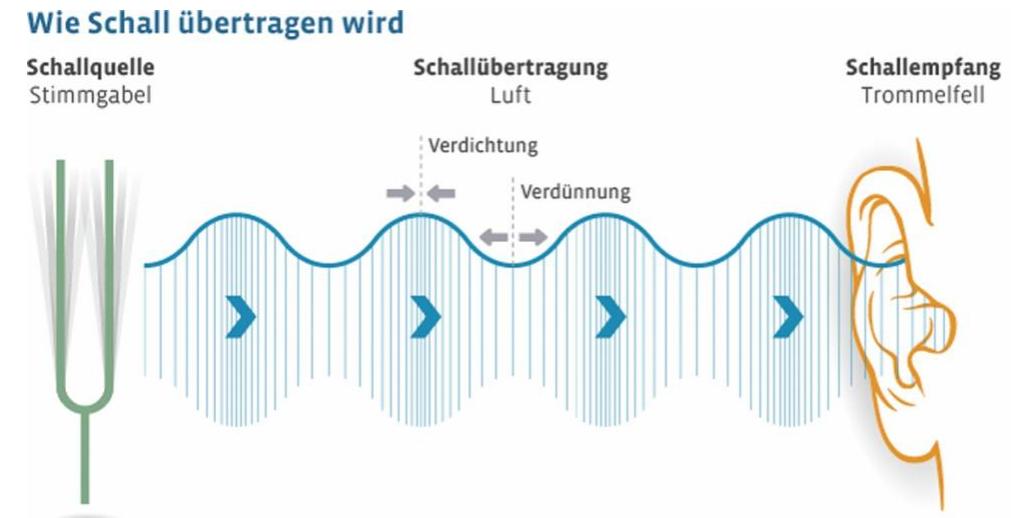
Können wir auch hinaus hören?



Illustration in „*L'Atmosphère. Météorologie populaire*“ (Paris, 1888)

Was heißt „ hören“?

- **Schall = (periodische) Dichteänderung im Medium**
verbunden mit
 - (Periodischer) Druckänderung
 - (Periodischer) Temperaturänderung
- **Ohr nimmt Druckänderung wahr**
 - Empfindlichkeitsgrenze
~ 1 Millardstel des Luftdrucks
 - Schmerzgrenze
~ 1 Tausendstel des Luftdrucks
 - Wie ist das möglich?
Druckausgleich: Außendruck als Offset



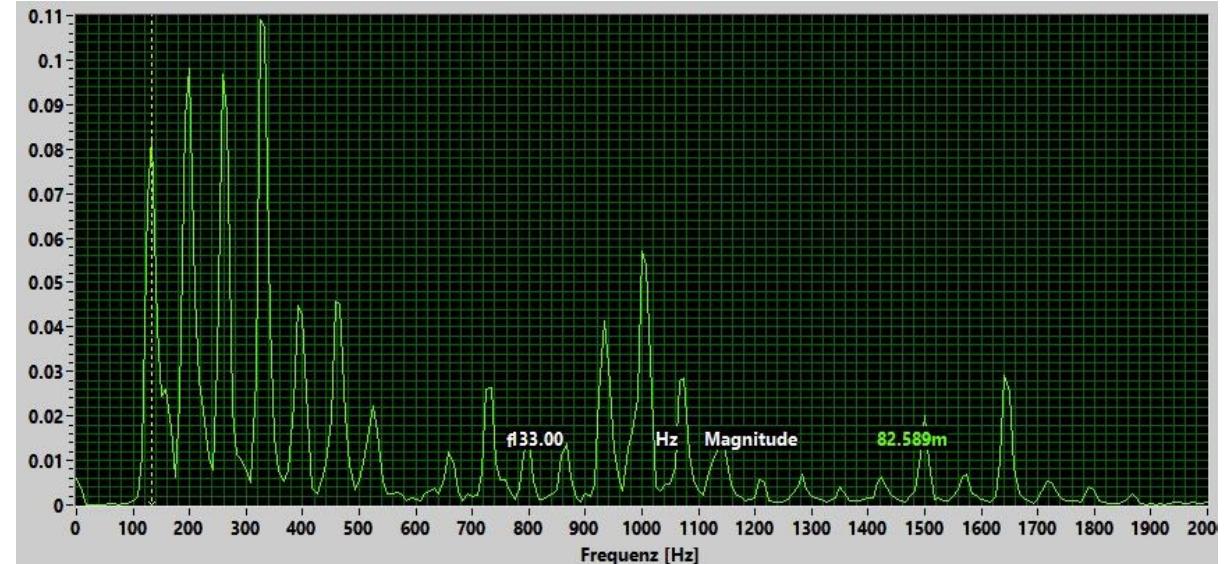
www.ingenieur.de/fachmedien/laermbehaempfung/arbeitschutz/

Schall: Ton und Klang

- **Ton**
 - Eine Frequenz (Tonhöhe)
 - bzw. eine Wellenlänge
 - verbunden durch Schallgeschwindigkeit
- **Klang: Frequenzgemisch**
 - Charakteristisch für Schallquelle
 - Grundton
 - Obertöne

$$\lambda \text{ (Wellenlänge)} = \frac{v \text{ (Geschwindigkeit)}}{f \text{ (Frequenz)}}$$

- **Klavier**



Wellenlängen -> Klangmuster

$$\lambda \text{ (Wellenlänge)} = \frac{v \text{ (Geschwindigkeit)}}{f \text{ (Frequenz)}}$$

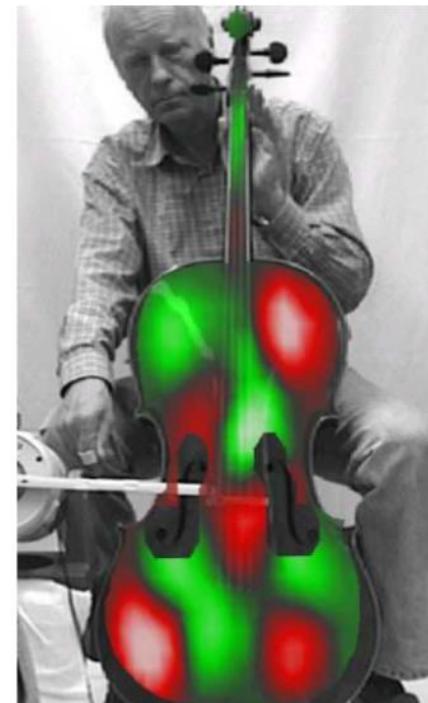
- $v = 340 \text{ m/s}$ Schallgeschwindigkeit in Luft
- Für $f = 340 \text{ Hz}$ ergibt sich $\lambda = 1\text{m}$



268 Hz



536 Hz



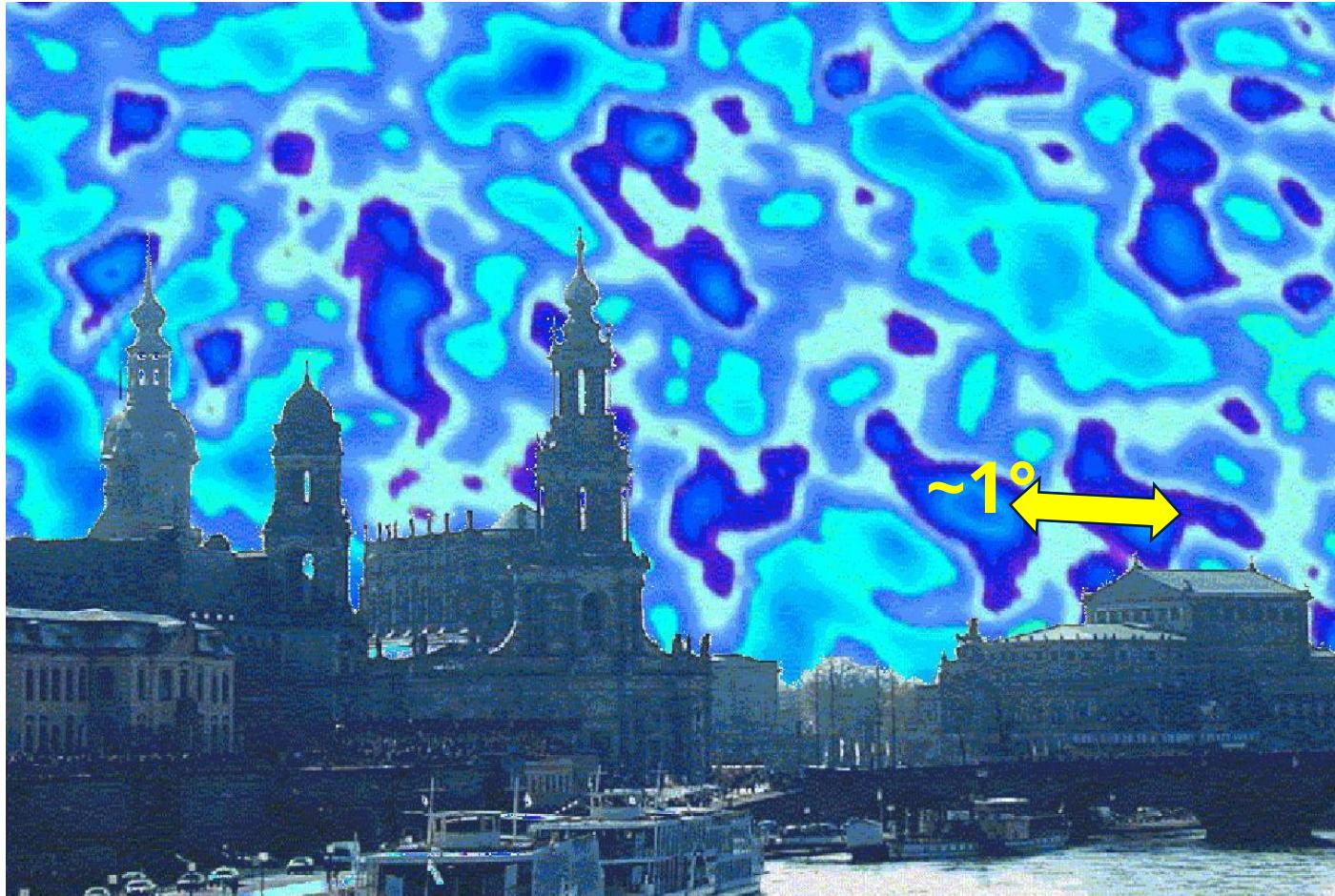
608 Hz



716 Hz

Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München

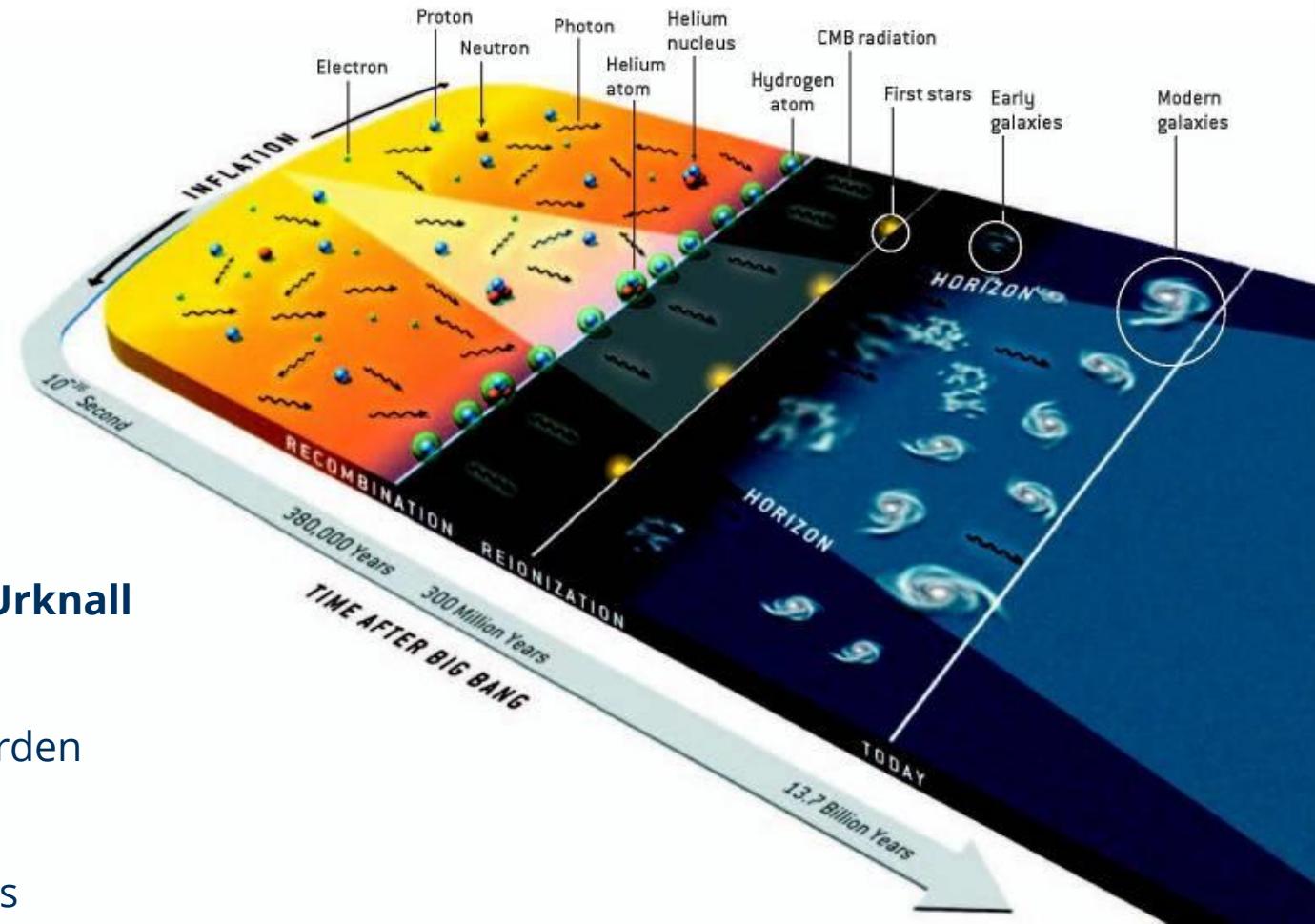
Kosmisches Klangmuster am Himmel (projiziert über Dresden)



- **Entstanden**
 - 380.000 Jahre nach dem Urknall
- **Distanz der Quelle**
 - 13,8 Milliarden Lichtjahre
- **Max Wellenlänge damals**
 - 220.000 Lichtjahre
- **Max Wellenlänge heute**
 - 240 Mio Lichtjahre (wegen Ausdehnung des Universums)

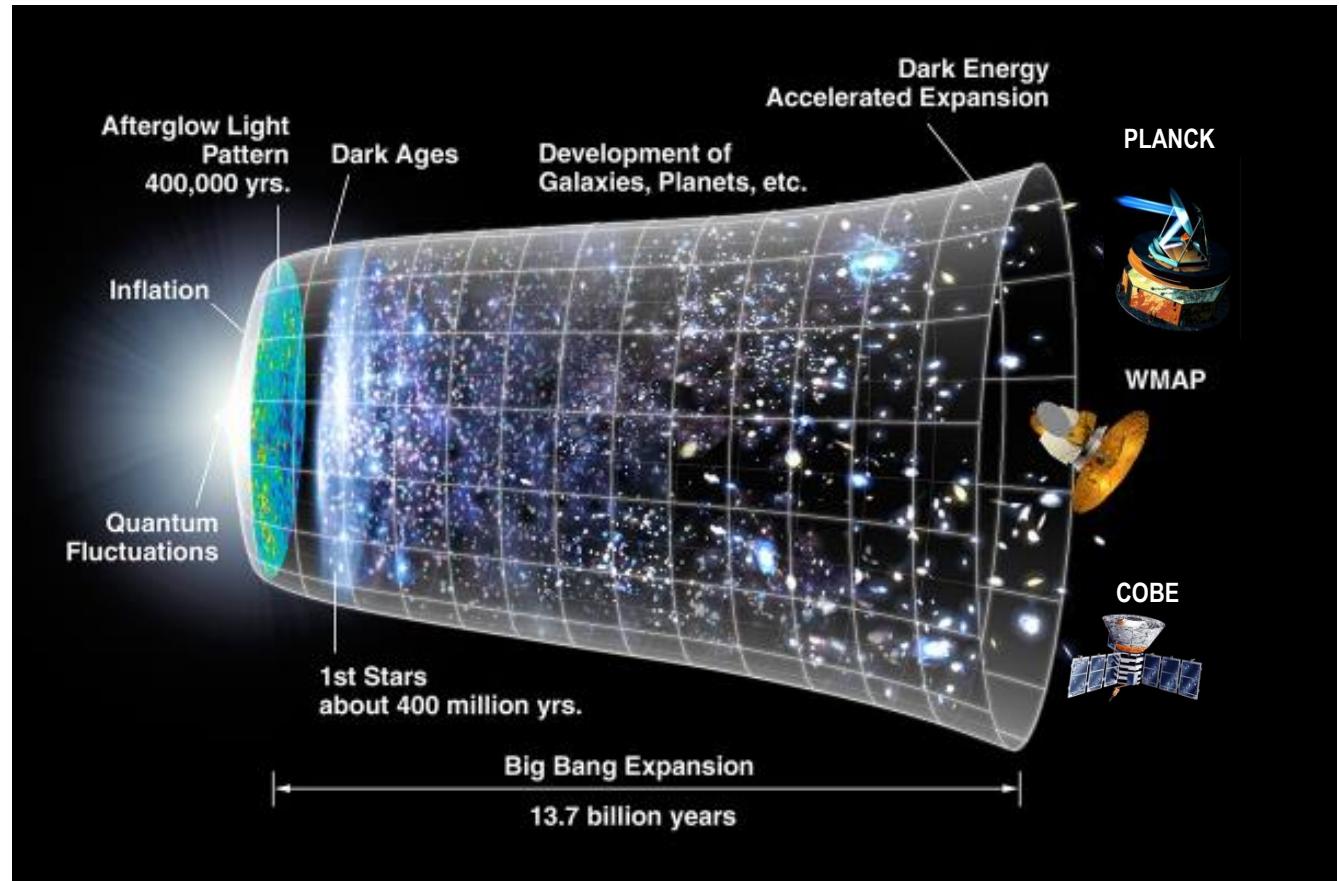
Quelle des „Kosmischen Klangs“

- Bis 380.000 Jahre nach Urknall Plasma aus
 - Protonen
 - Heliumkernen
 - Freien Elektronen
 - Neutrinos
- **10^{17} mal dünner als Luft**
 - 300 Protonen / cm³
- **Glühend mit T > 3000 K und undurchsichtig**
 - Photonen aller Energien absorbiert <-> emittiert
- **Ausdehnung -> Abkühlung: 380.000 Jahre nach Urknall**
 - Photonenergie reicht nicht mehr zur Ionisation
 - Elektronen können in Atomhüllen gebunden werden
 - Plasma wird durchsichtig
 - Photonen entweichen -> ewiges Bild des Plasmas



Dichtefluktuationen: Ursache und Wirkung

- **Ursache:**
 - Quantenfluktuationen
- **Ausbreitung:**
 - nicht wie in Luft (Stöße), sondern
 - **Strahlungsdruck** durch Photonen
(für elektrisch geladene Teilchen)
 - **Gravitation**
(gemäß Masse der Teilchen)
- **Wirkung:**
 - Strukturbildung im Universum
(Galaxien und –Cluster)



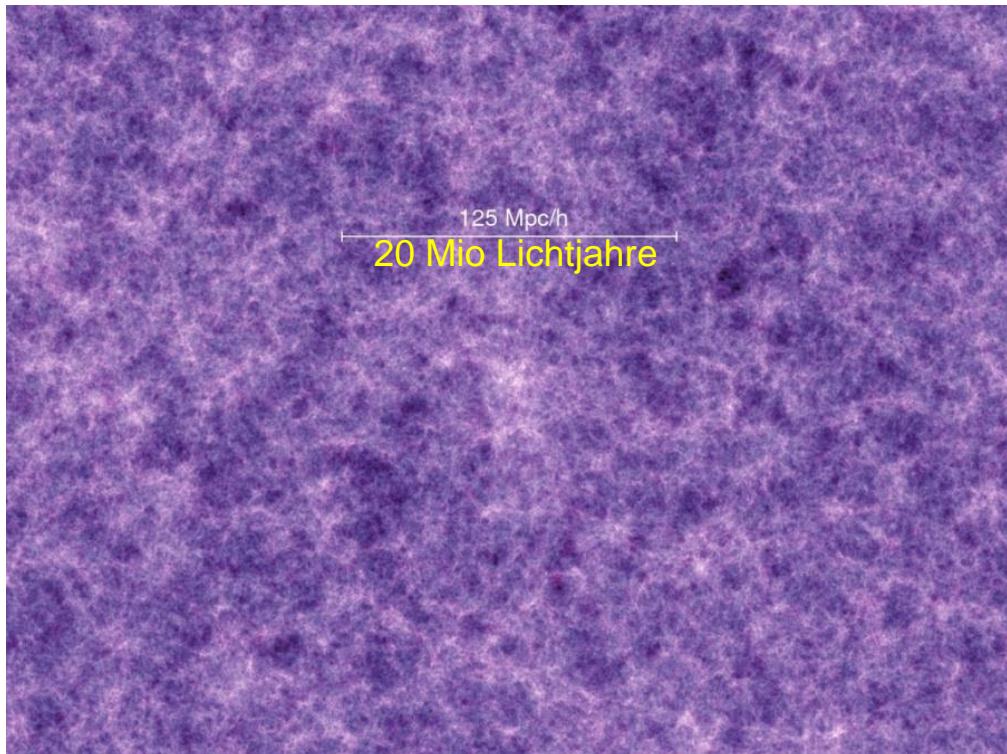
NASA, WMAP

Dichtefluktuationen als Galaxienkeime

Von $t_0 = 0,0004$ Mrd. Jahre

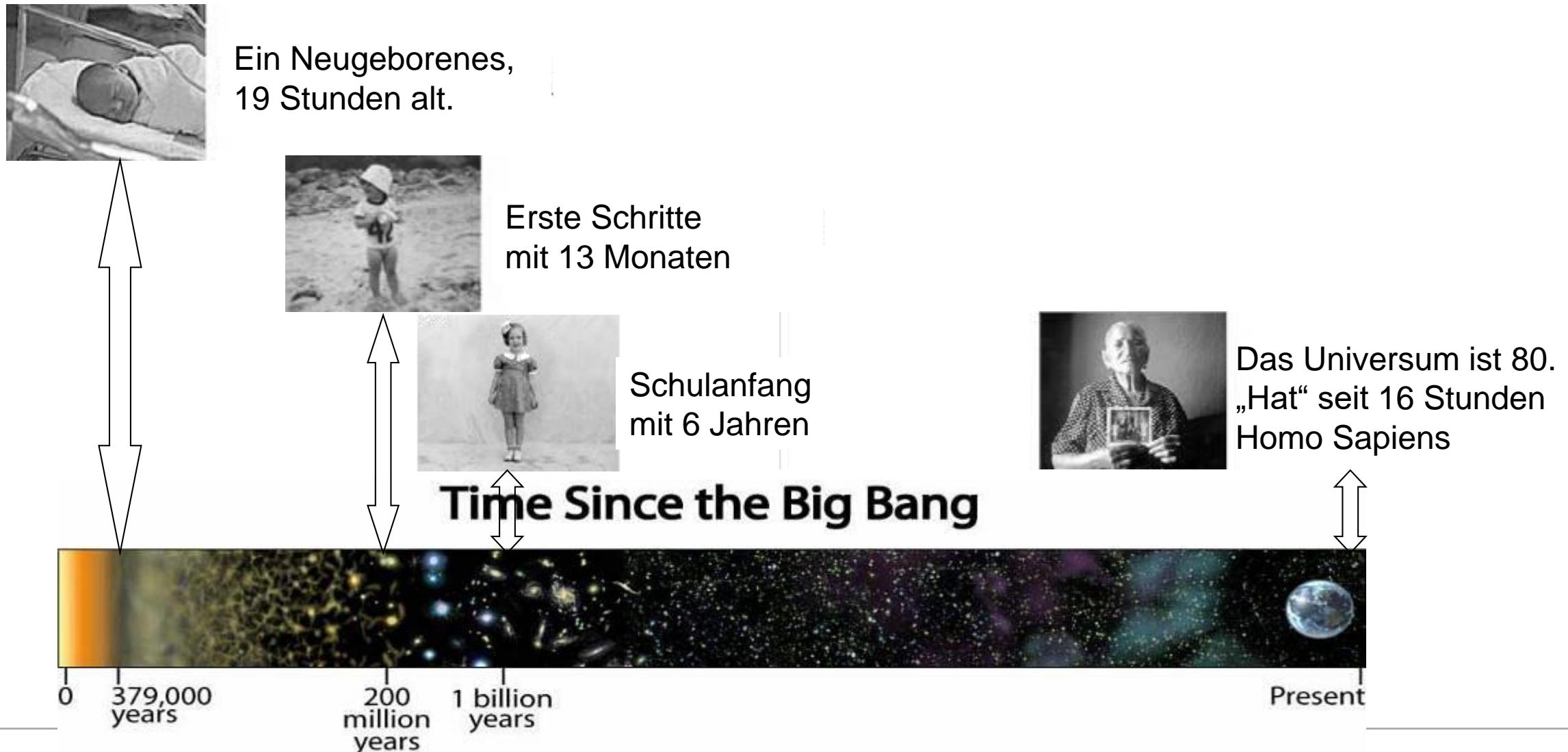
-> $t = 0,2$ Mrd. Jahre (Erste Sterne)

-> $t = 13,8$ Mrd. Jahre (Galaxien, heute)



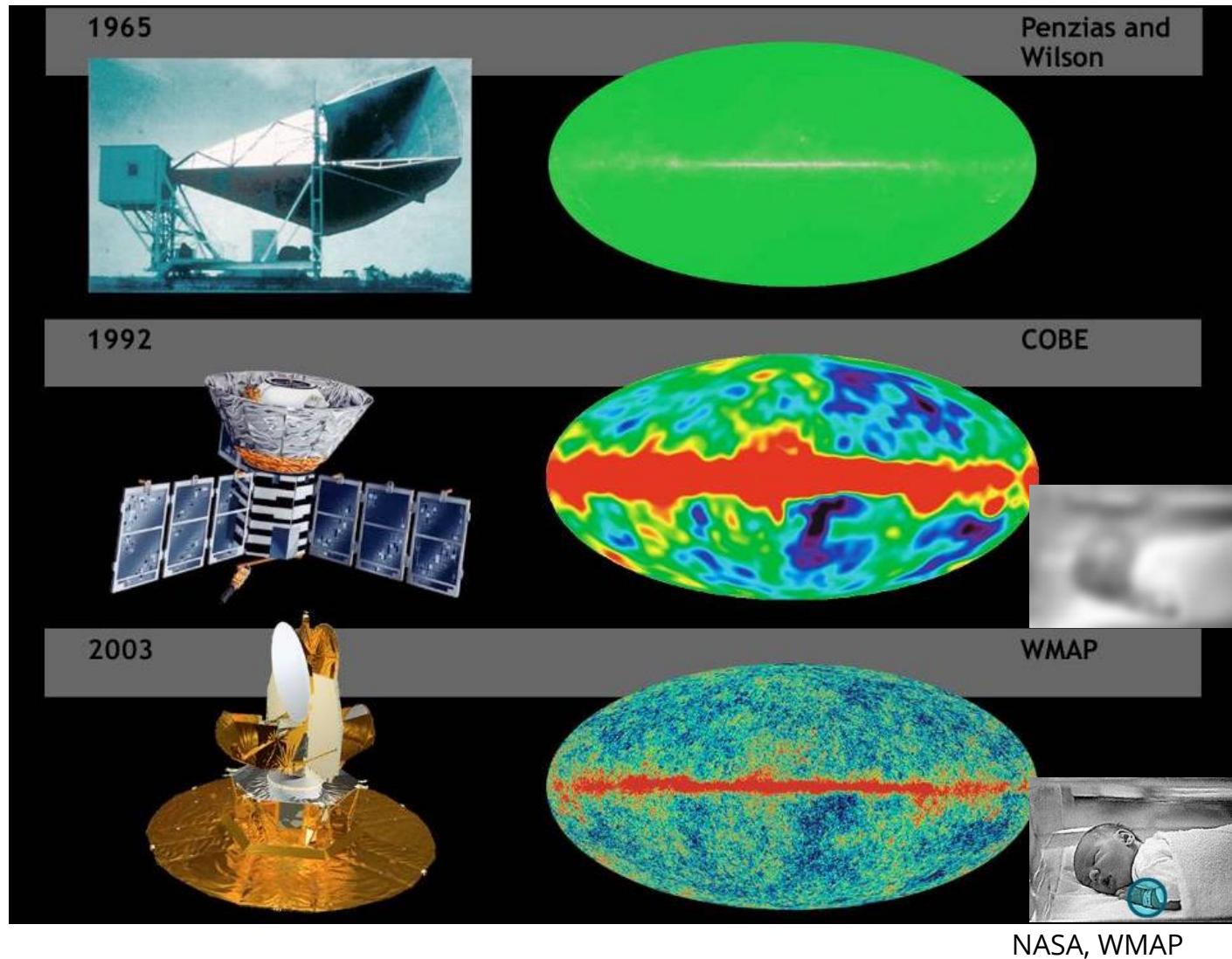
wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/

Wenn das Universum heute 80 Jahre wäre... (13.800.000.000 Jahre → 80 Jahre)

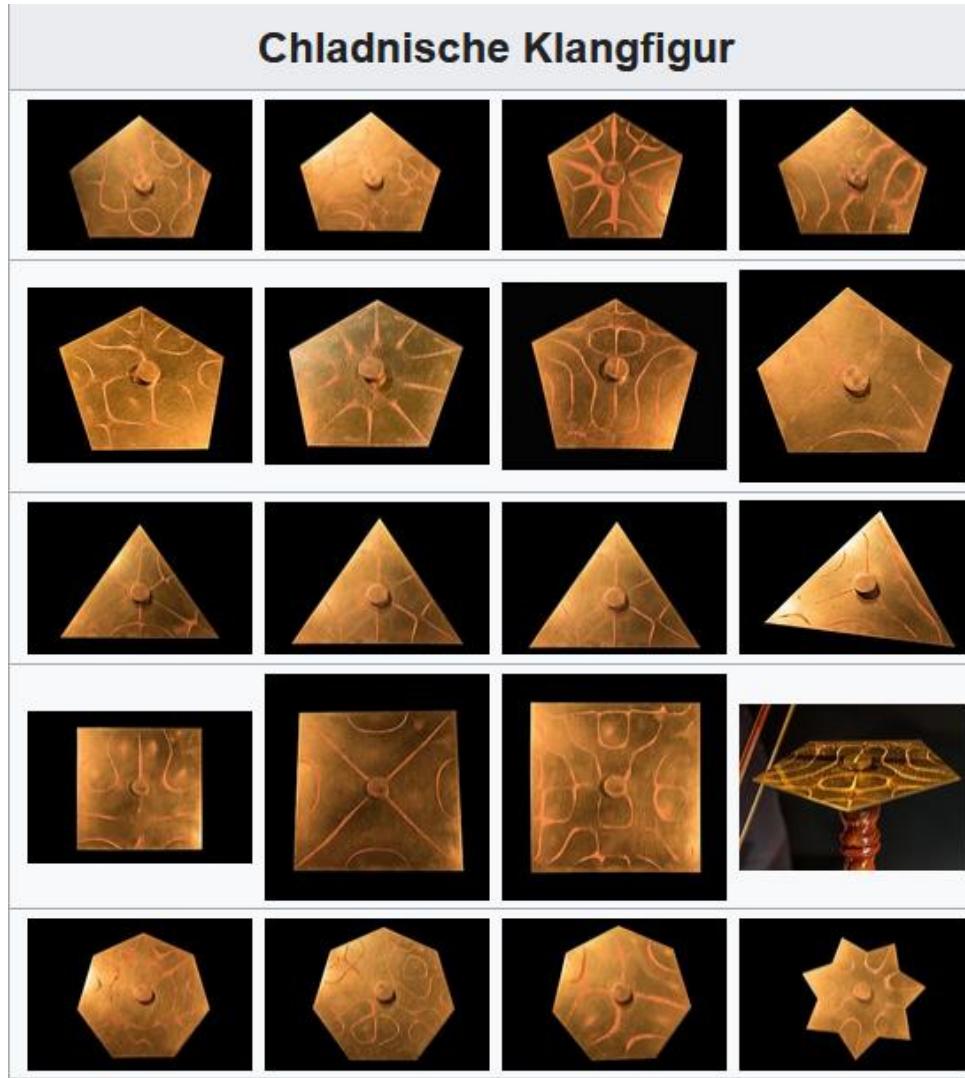


Messung „Kosmischer Mikrowellen-Hintergrund“ (CMB)

- **Schall:**
- Ohr misst winzige Druckunterschiede (~ Dichte-, ~Temperaturunterschiede)
- Druckausgleich nötig (Abzug des Offsets)
- **CMB-Klangmuster**
- Eingeprägt ins Universum
- Messung als Temperaturmuster des Strahlungsspektrums (WMAP, Planck)
- Nach Abzug des Offsets von 2,73 K winzige Temperaturschiede (0,00002 K) für verschiedene Richtungen
- „Lautstärke“ ~ 90 dB



Akustische Analogien



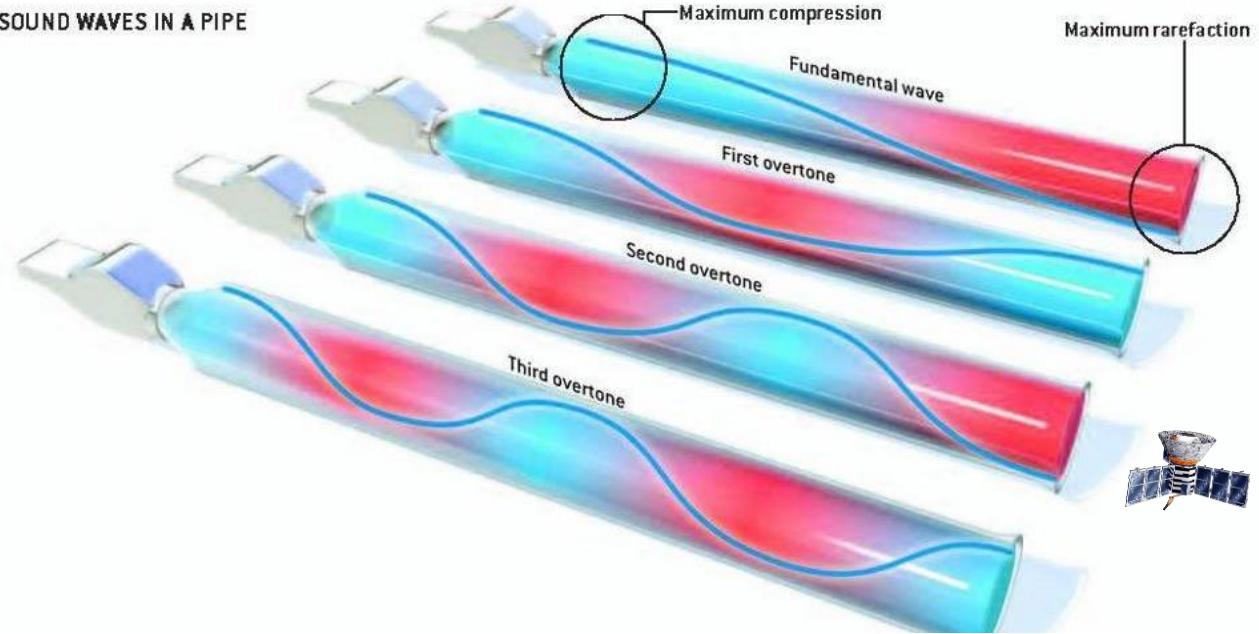
https://de.wikipedia.org/wiki/Chladnische_Klangfigur

COSMIC HARMONICS

THE SOUND SPECTRUM of the early universe had overtones much like a musical instrument's. If you blow into a pipe, the sound corresponds to a wave with maximum air compression [blue] at the mouthpiece and maximum rarefaction [red] at the end

piece. But the sound also has a series of overtones with shorter wavelengths that are integer fractions of the fundamental wavelength. [The wavelengths of the first, second and third overtones are one half, one third and one fourth as long.]

SOUND WAVES IN A PIPE



Wayne Hu, University of Chicago, Scientific American

Vergleich der Akustischen Wellen

$$\text{Frequenz } f = \frac{v}{\lambda}$$

	Schall in Luft	im frühen Universum	Verhältnis
Wellenbildung	Druck durch Stöße	Druck d. Strahlung + Gravitation	
Dichte	$3 \times 10^{19} \text{ Moleküle/cm}^3$	$300 \text{ Protonen / cm}^3$ (t = 380.000 Jahre)	10^{-17}
Schallgeschw. v	340 m/s	$1,7 \times 10^8 \text{ m/s} = c/\sqrt{3}$	500.000
Wellenlänge λ	$20 \text{ m} - 20 \text{ mm}$	$380.000 - 20.000 \text{ Lj}$ (~ Milchstraße heute)	$10^{20} - 10^{22}$
Frequenz f	$17 - 17.000 \text{ Hz}$	$10^{-12} - 4 \times 10^{-14} \text{ Hz}$ (eine Schwingung pro 40.000 – 760.000 Jahre)	$10^{-14}-10^{-16}$

Schallwellen vermessen Geometrie

$$\lambda(\text{Geometrie}) = \frac{v(1/\text{Dichte})}{f(\text{Tonhöhe})}$$

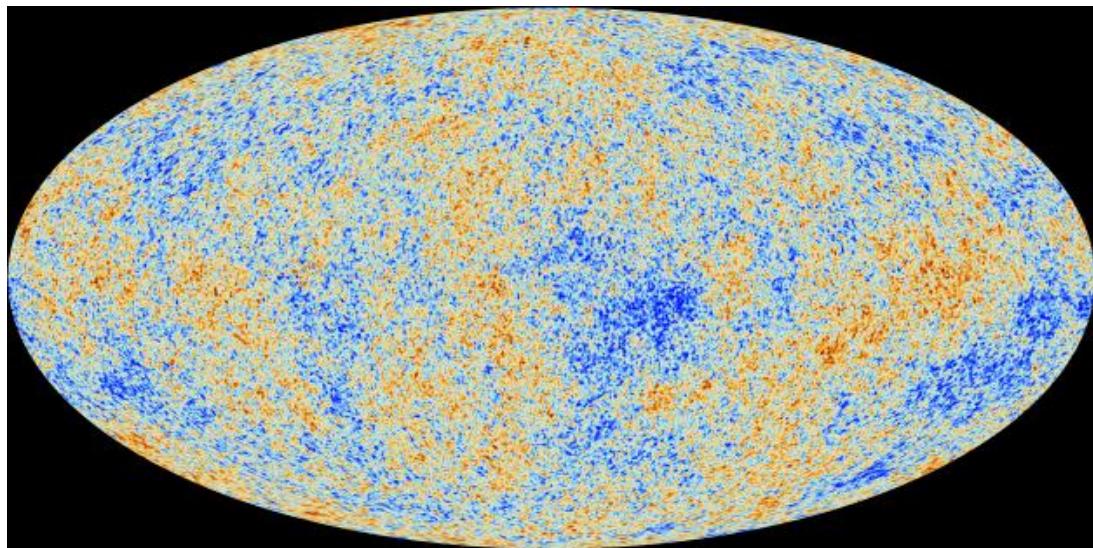


Abb. 25.13 Form der Mundhöhle bei den fünf einfachen Vokalen

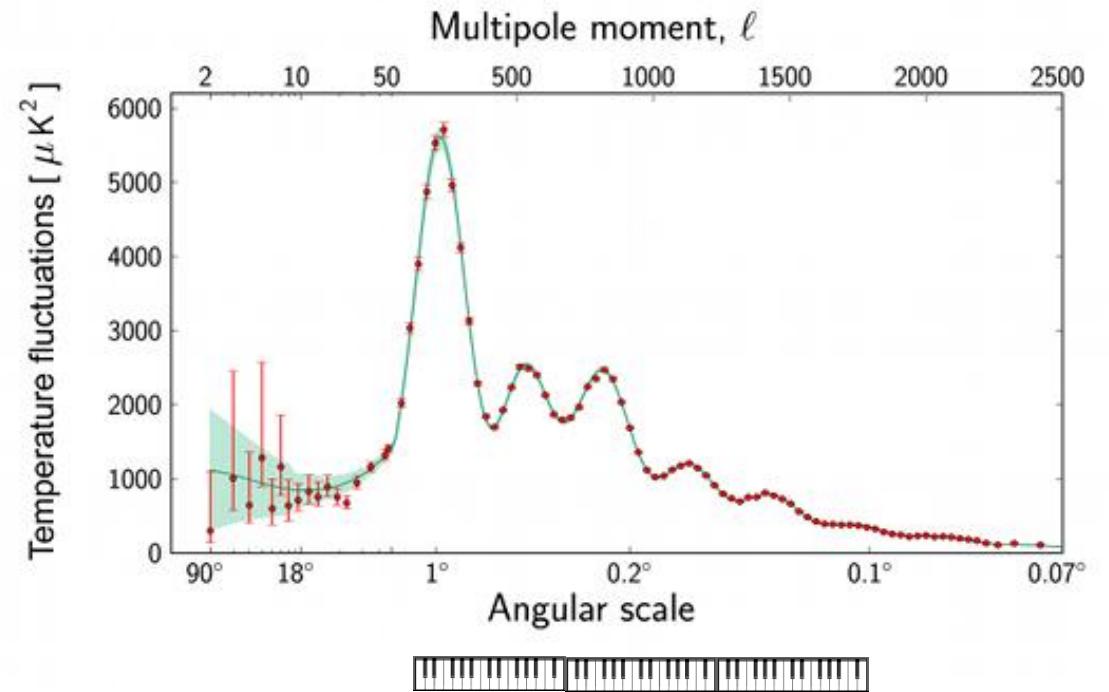
- Geometrieänderung (bei Dichte=const.) ergibt Frequenzänderung
 - Saiten-Länge → Tonhöhe
 - Formänderung → Klangänderung (Frequenzgemisch)
- Dichteänderung (bei Geometrie=const.) ergibt ebenfalls Frequenzänderung
 - Druck konst., Dichte kleiner (z.B. Helium einatmen) → größeres v → höhere Frequenz
- **Universum: Kenne v und f → bestimme λ (Maßstab)**

Das Muster des kosmischen Klangs

- **Messung von Planck 2013**
 - Rot: 0,00002K wärmer als 2,73 K
 - Blau: 0,00002K kälter als 2,73 K
- **Obertonspektrum**
 - Wellenlänge $\sim 0,02\text{-}0,2$ Mio Lichtjahre
 - Frequenz $\sim 1/(0,04\text{-}0,4$ Mio Jahre)

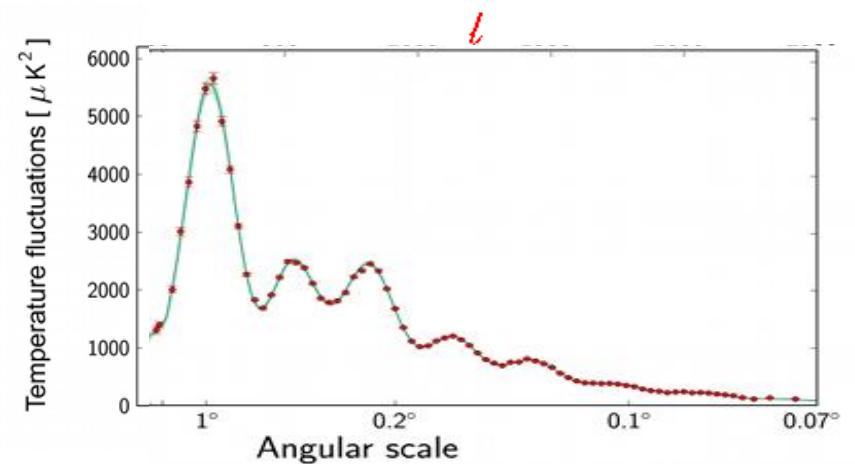
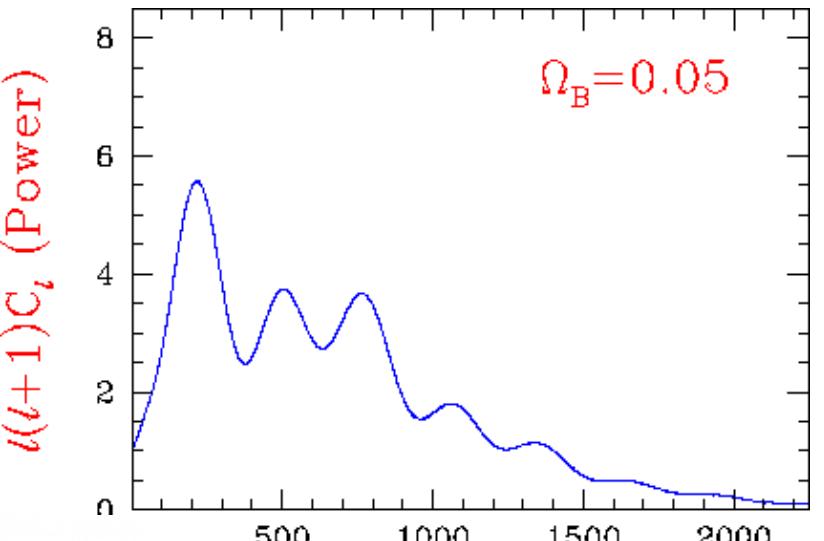


ESA, Planck,
www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_Power_Spectrum
Transponiert um 50 Oktaven:



Analyse des klingenden Mediums

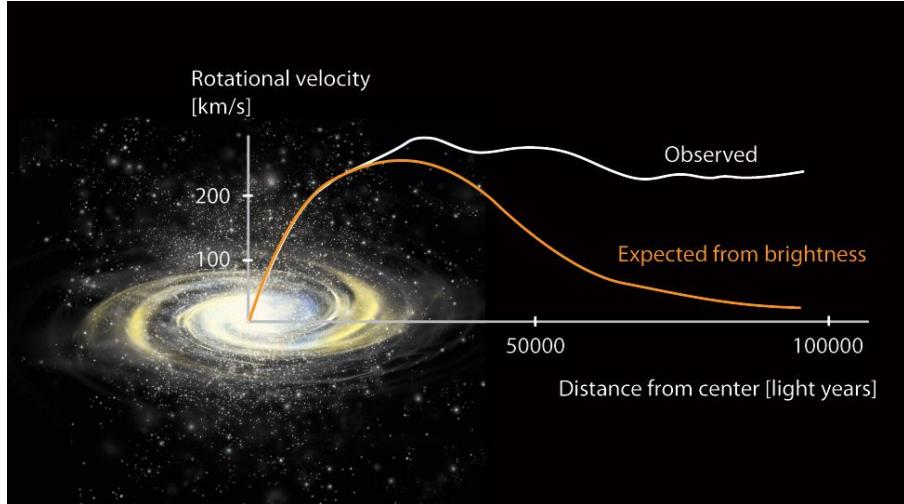
- Anteil $\Omega_B = 5\%$ geladene „atomare“ Materie
(Atomkerne (p, He), Elektronen)
 - Erzeugt insb. „ungerade“ Obertöne
 - spürt Strahlungsdruck und Gravitation
 - kann Licht abstrahlen
- Anteil $\Omega_{DM} = 26\%$ ungeladene „dunkle“ Materie
(Neutrinos (~1%), ... Rest unerklärt)
 - Erzeugt alle Obertöne
 - spürt nur Gravitation
 - kann **kein** Licht abstrahlen
„dunkle Materie“



Unabhängige Hinweise auf Dunkle Materie

Rotationskurven Galaxien

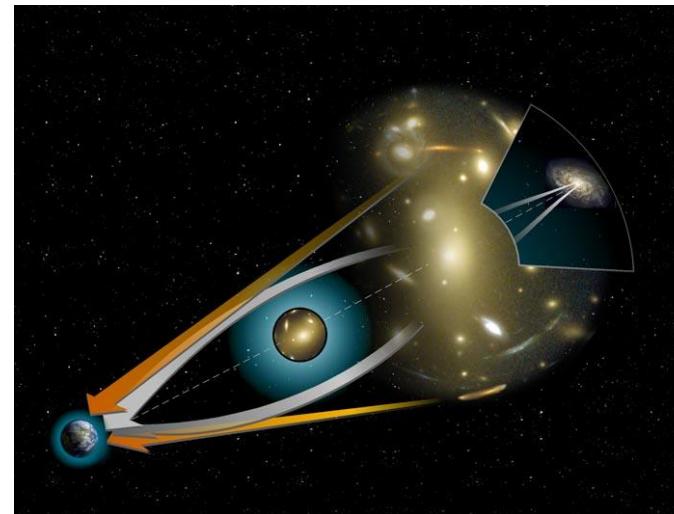
Erreichen nie $1/\sqrt{r}$ Gesetz
für Rotation um Zentralmasse



https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_Cosmology

Gravitationslinsen

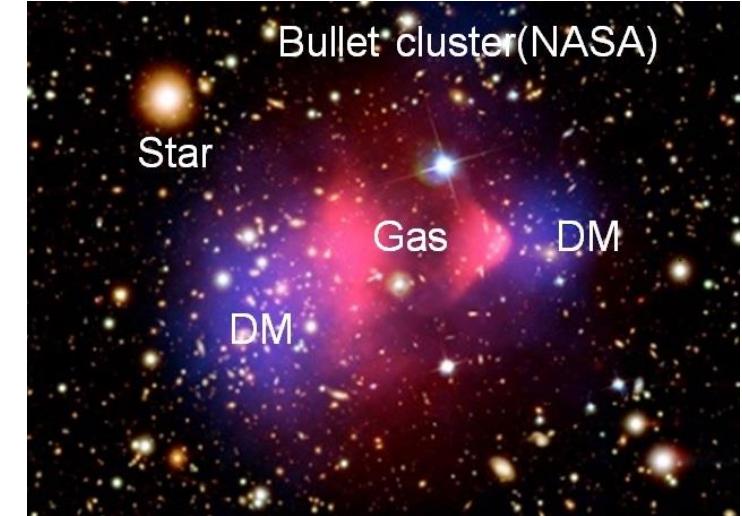
5x mehr Masse
als Sterne + Gas



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Gravitational_lens-full.jpg

Galaxienkollision

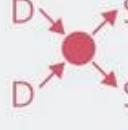
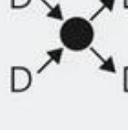
Gas und Dunkle Materie (DM)
unterschiedlich



NASA, Chandra

Suche nach Dunkler Materie

4 Möglichkeiten der Streuung / Produktion von Standard (S) und Dunkler (D) Materie

Methode	Experimente	Wechselwirkung
direkter Nachweis	LUX, CoGeNT, DAMA/LIBRA	
indirekter Nachweis	CTA*, H.E.S.S., AMS, PAMELA	
Teilchen-kollisionen	LHC, 100-TeV-Beschleuniger*	
astrophysikalische Beobachtungen	Stern- und Galaxien-durchmusterungen*, Helioseismologie* * in Planung	

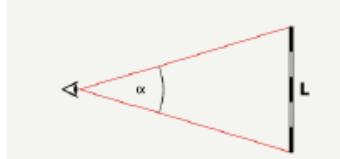
www.spektrum.de/news/woraus-bestehet-die-dunkle-materie/1295464

Unsere Forschung am CERN



Was sagt uns der Grundton?

- **Grundton am Himmel**
 - Maßstab von $L=240$ Mio Lichtjahre in 13,8 Mrd Lichtjahre Entfernung
 - Sichtbar unter Winkel $\alpha \sim 1^\circ$
- **Genauso wie für *flaches* Universum erwartet !**
- **100% - 26%(dunkel) - 5%(atomar)**
= 69% unerklärte „dunkle Energie“
- treibt das Universum auseinander



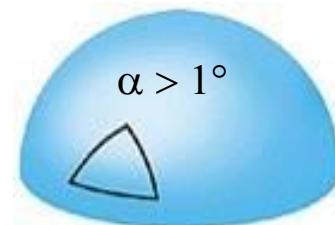
Flacher Raum



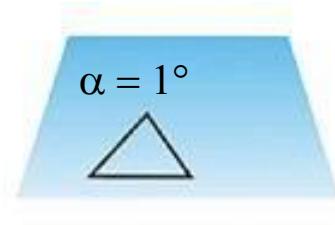
Positiv gekrümmter Raum



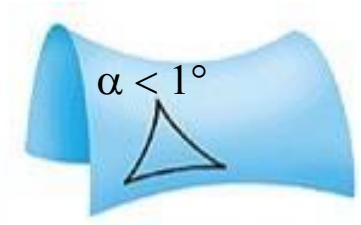
Negativ gekrümmter Raum



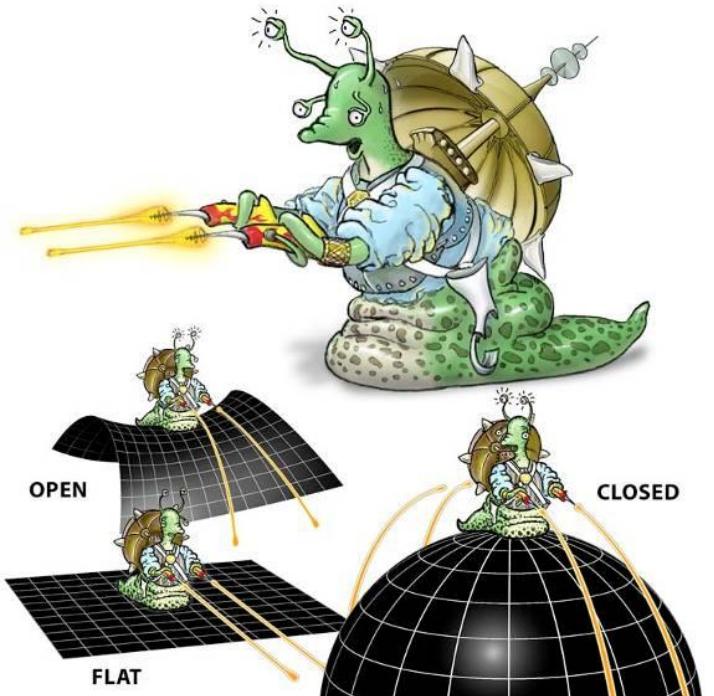
$\alpha > 1^\circ$



$\alpha = 1^\circ$



$\alpha < 1^\circ$



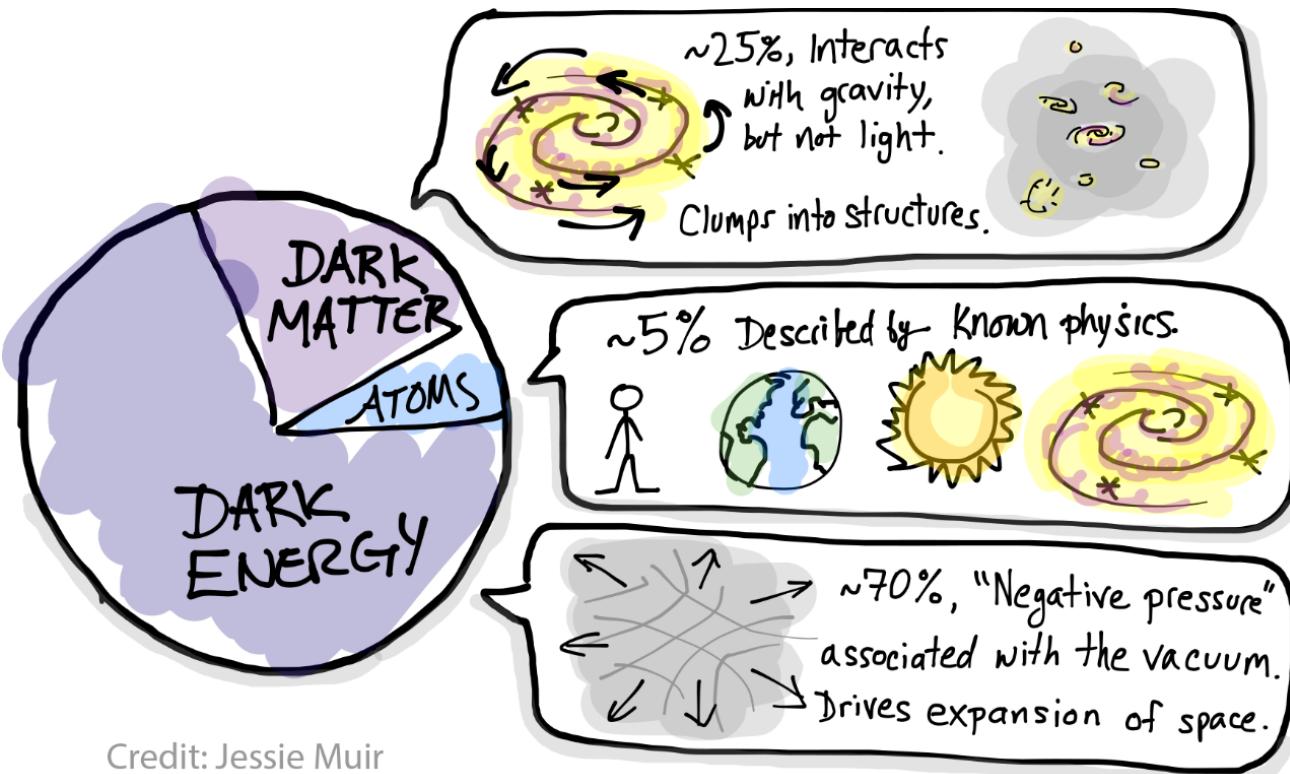
Das Universum als 4D-Torus?

- „Flach“ definiert als := Parallele bleiben Parallel
- Trotzdem ist endliches Volumen möglich!
 - einfachste Lösung: Torus (eingeschränkte 3D→2D Visualisierung)

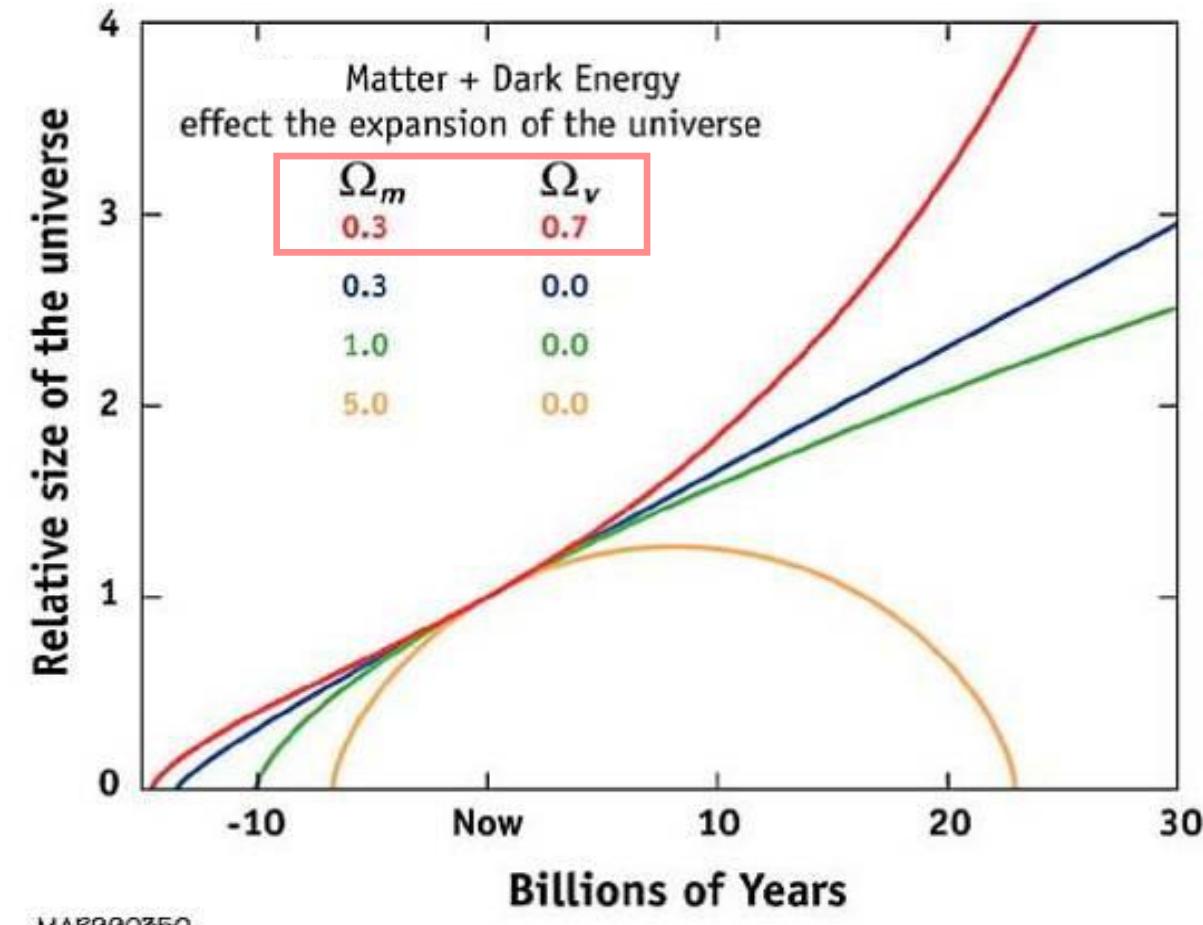


- kleines Problem:
2D-Visualisierung
-> nicht mehr flach

Zusammenfassung und Blick in die Zukunft



Credit: Jessie Muir



MAP990350

Literaturhinweise

Welt der Physik: Kosmologie und Hintergrundstrahlung

- www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmologie/
- www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/planck-und-die-mikrowellenhintergrundstrahlung/
- www.weltderphysik.de/fileadmin/podcasts/WeltDerPhysik178.mp3

Dunkle Materie

- www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/
- www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/dunkle-materie/
- www.spektrum.de/news/woraus-bestehet-die-dunkle-materie/1295464

Dunkle Energie

- www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/
- www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/dunkle-energie/

Scinexx Dossier: <https://www.scinexx.de/dossier/das-erste-licht/>

Scilogs: <https://scilogs.spektrum.de/einstiens-kosmos/planck-mission-der-esa-neue-karte-der-hintergrundstrahlung/>

The Cosmic Symphony (Scientific American): <http://background.uchicago.edu/~whu/Papers/HuWhi04.pdf>

The Physics of Microwave Background Anisotropies, Wayne Hu, University of Chicago

<http://background.uchicago.edu/~whu/physics/physics.html>

WMAP Satellit: <http://map.gsfc.nasa.gov/>

PLANCK Satellit

- www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck_overview
- www.sueddeutsche.de/wissen/daten-des-esa-satelliten-planck-babyfoto-des-kosmos-1.1630435

Mehr über (Astro)Teilchenphysik?

- **Netzwerk Teilchenwelt** www.teilchenwelt.de
- **Geleitet an der TU Dresden für 34 Standorte in Deutschland**
 - Masterclasses und Nebelkammerworkshops in Schulen, flächendeckend
 - Ausleihe von Detektoren für kosmische Myonen von den Standorten an Schulen
 - Angebote für vertieftes Engagement einzelner (Schülerforschungsarbeiten, Schools)
 - Angebote für die breite Öffentlichkeit (mobile Ausstellung „Urknall unterwegs“)

