

Der kosmische Klang

Wie man Dunkle Materie und andere Eigenschaften des Universums „hören“ kann

- 1. Mikrowellen vom Urknall*
- 2. Dunkle Materie*
- 3. Gekoppelte „Neutrino-Pendel“*

Michael Kobel
Physik am Samstag
TU Dresden
24.11.2018

Kosmologie und menschliche Neugier

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

- 1880: *Yes, indeed, if humankind — from humble farmers in the fields and toiling workers in the cities to teachers, people of independent means, those who have reached the pinnacle of fame or fortune, even the most frivolous of society women — If they knew what profound inner pleasure await those who gaze at the heavens, then France, nay, the whole of Europe, would be covered with telescopes instead of bayonets, thereby promoting universal happiness and peace.*

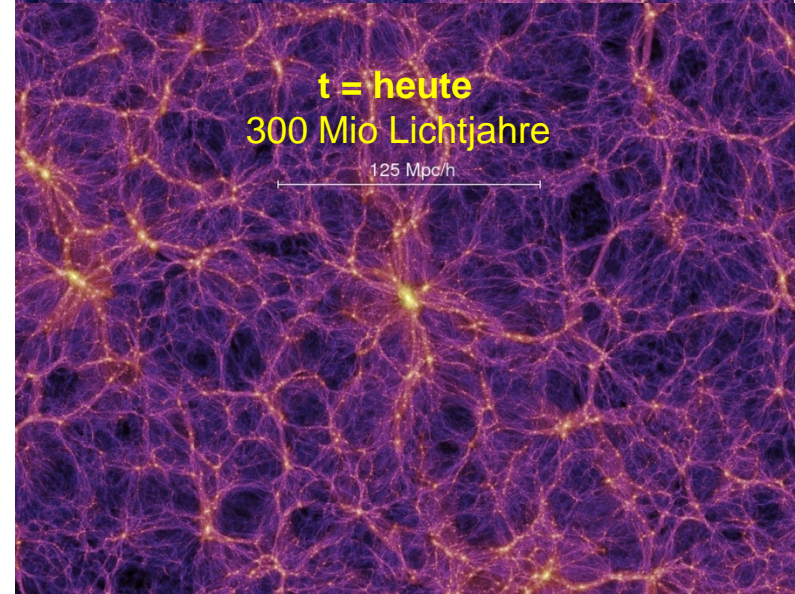
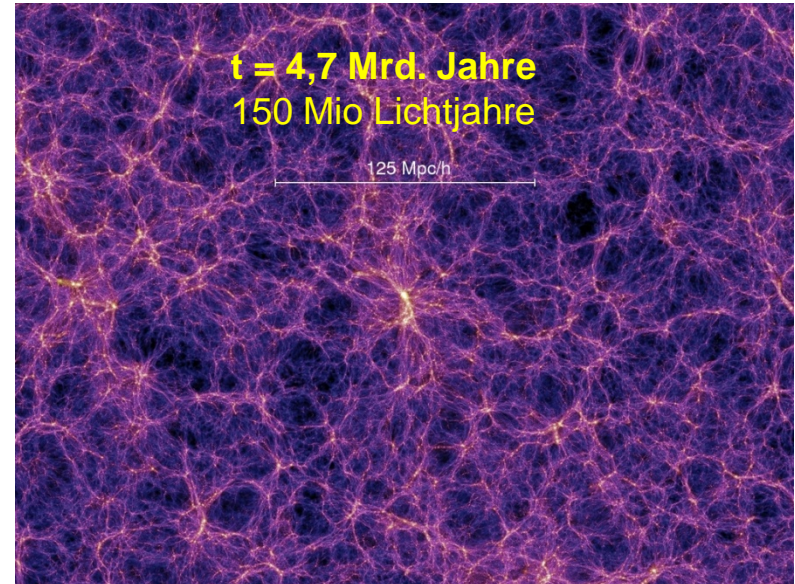
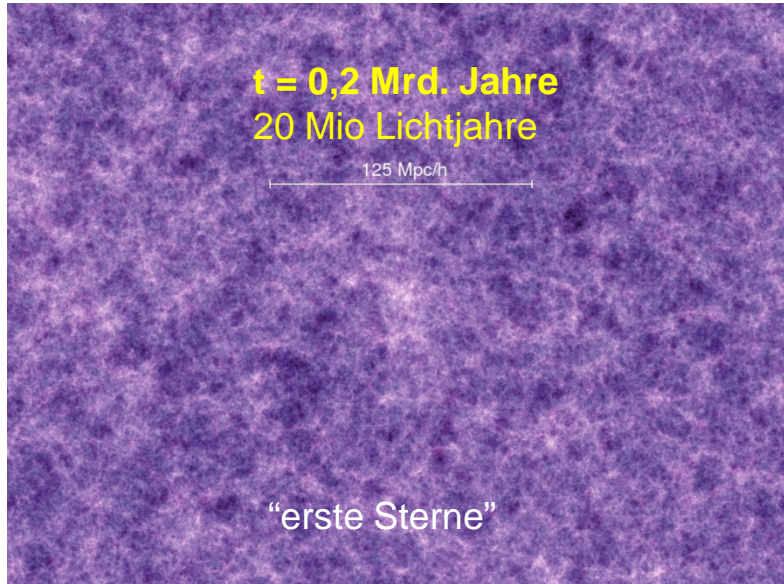


Illustration in „*L'Atmosphère. Météorologie populaire*“ (Paris, 1888):
„Un missionnaire du moyen âge raconte qu'il avait trouvé le point où le ciel et la terre se touchent ...“

Strukturbildung im Universum

● MPI für Astrophysik München, Millenium Simulation

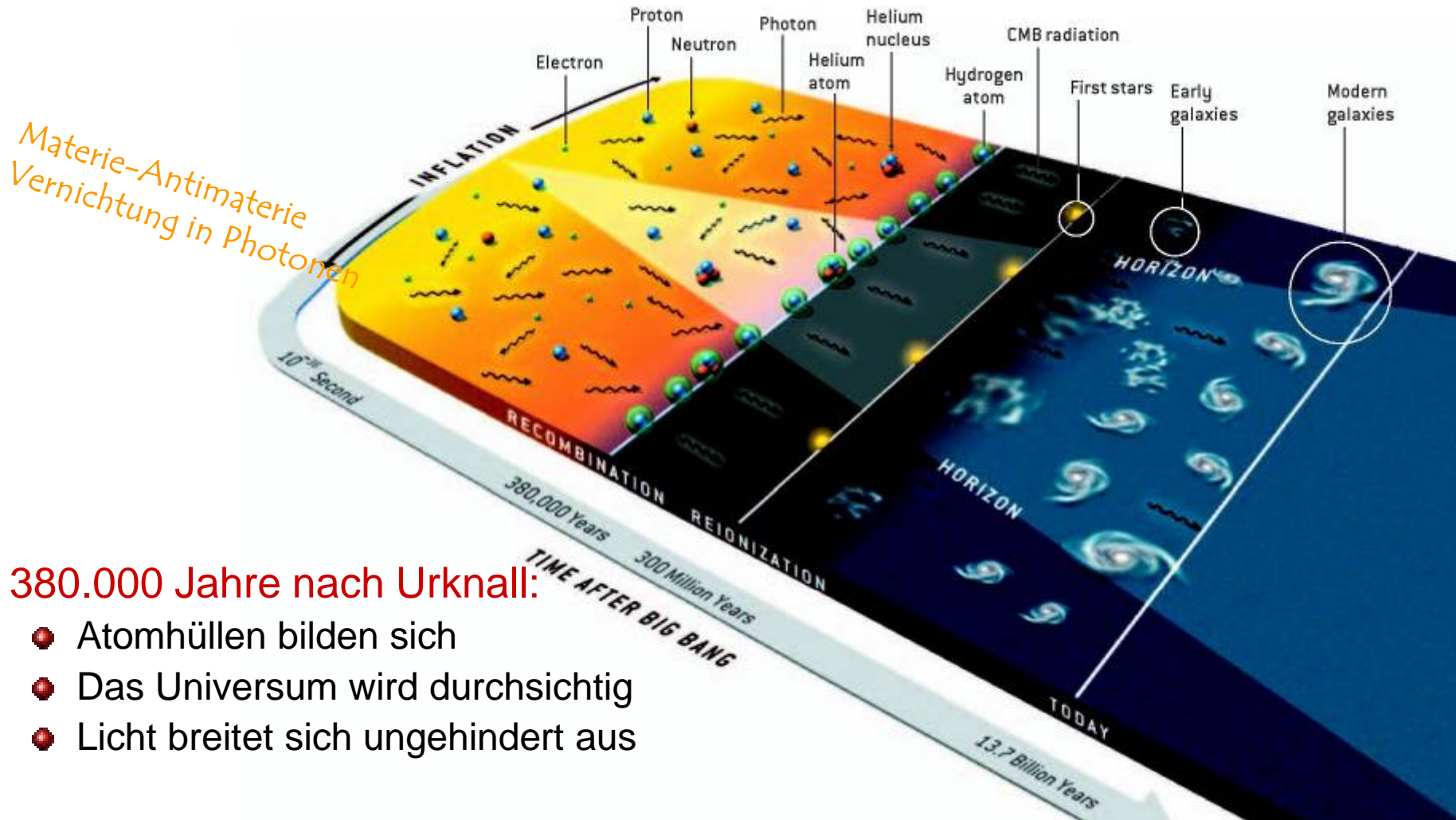
Video: <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>



Rückblick zum Urknall

● Bis 380.000 Jahre nach Urknall:

- Undurchsichtiges „Plasma“ aus Protonen, Heliumkernen, Elektronen, Photonen
1 : 0,06 : 1,12 : 2.000.000.000
- Strahlung (Photonen) und Materie in Wechselwirkung
- Temperatur $T > 5000 \text{ K}$ → Ionisation von H-Atomen durch Photonen

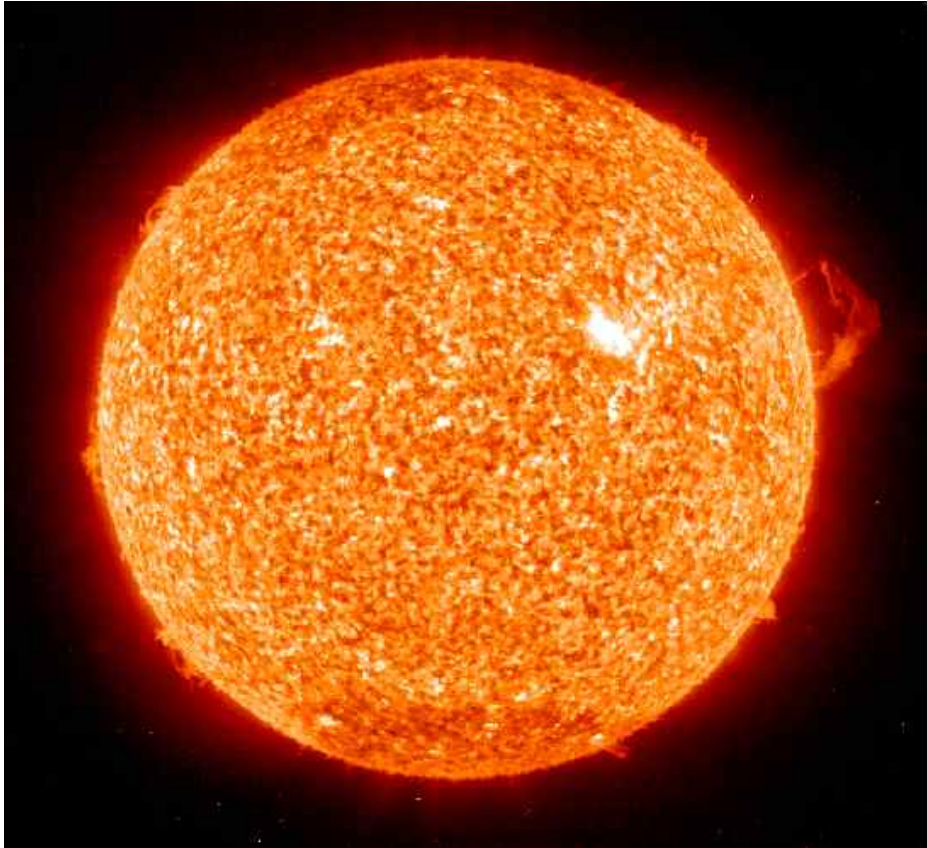


● 380.000 Jahre nach Urknall:

- Atomhüllen bilden sich
- Das Universum wird durchsichtig
- Licht breitet sich ungehindert aus

Analogie: Sonne

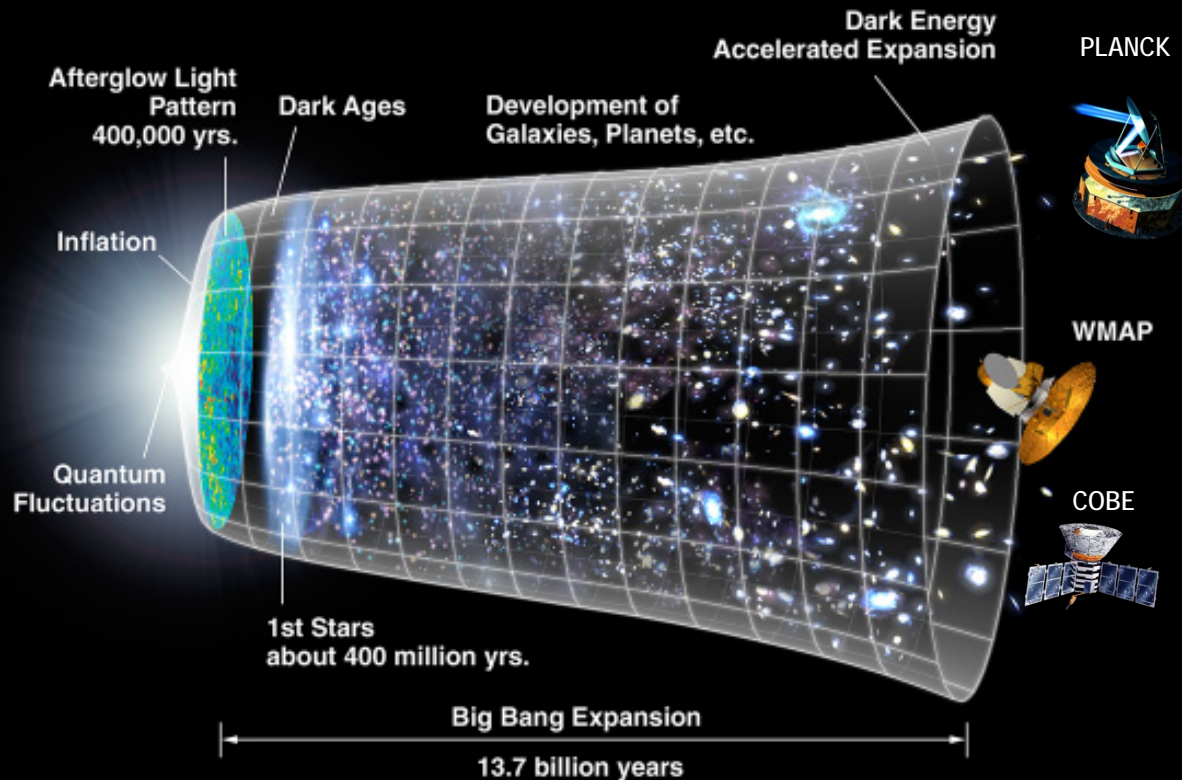
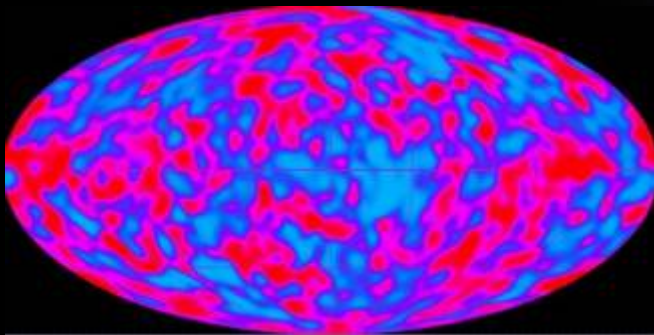
- Gasball aus H_2 und He, normalerweise durchsichtig



- Innen: $T > 10.000.000 \text{ K}$
 - Ionisation der Atome
 - *freie Elektronen können Licht jeder Energie absorbieren*
 - Photonen werden dauernd absorbiert und wieder emittiert
 - ***Erst nach ~100.000 Jahren***
Ankunft nahe der Oberfläche
- Oberfläche: $T = 5000 \text{ K}$
 - Elektronen an Atome gebunden
 - *Können nur wenige bestimmte Energien absorbieren*
 - Licht kann entweichen
 - **erreicht dann nach 8 min**
ungehindert die Erde

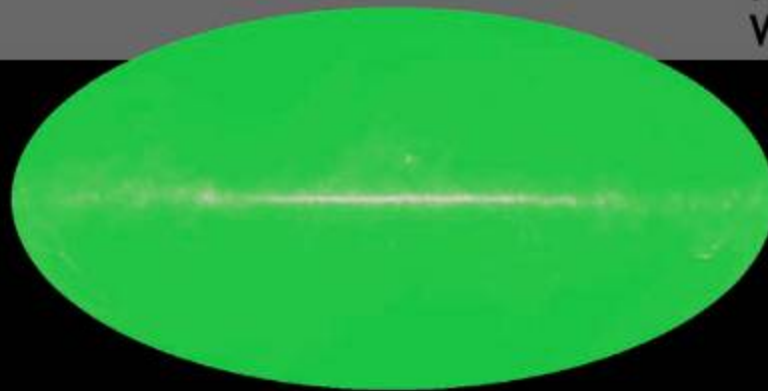
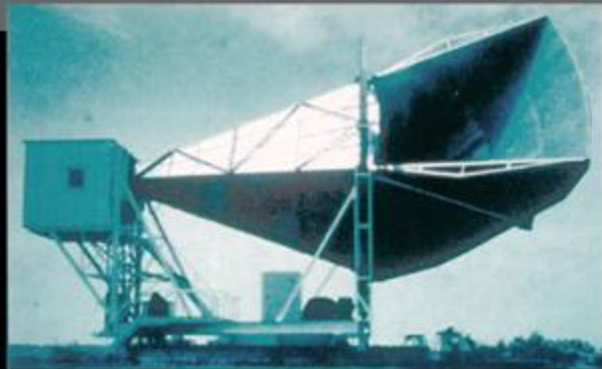
Der Nachhall des Urknalls

- Dichtere Regionen sind etwas wärmer als dünnere
- Hintergrundstrahlung von dort ist etwas energiereicher
 - Mittlere Temperatur heute: 2,73 K über absolut Null (-270,42 °C)
 - Typische Temperaturschwankungen: $\pm 0,0002$ K
- Physik Nobelpreis 2006: Entdeckung dieser Schwankungen
 - *John C. Mather und George Smoot (COBE Satellit)*



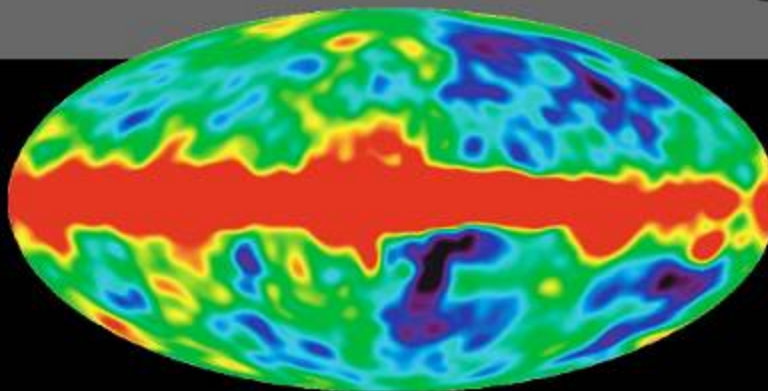
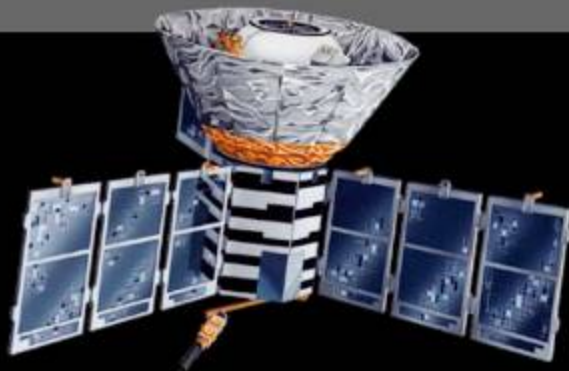
1965

Penzias and
Wilson



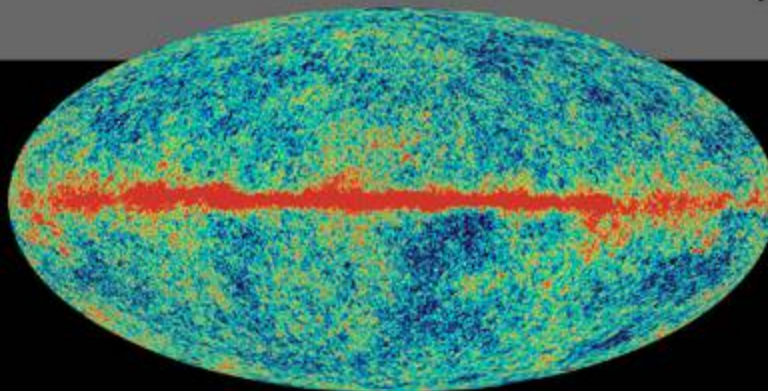
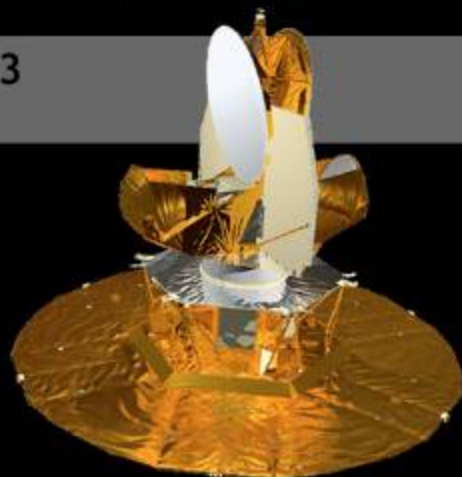
1992

COBE



2003

WMAP



Wenn das Universum heute 80 Jahre wäre...

(13.800.000.000 Jahre → 80 Jahre)



Ein Neugeborenes,
19 Stunden alt.



Erste Schritte
mit 13 Monaten



Schulanfang
mit 6 Jahren



Das Universum ist 80.
„Hat“ seit 5 Stunden
Homo Sapiens

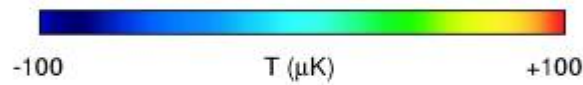
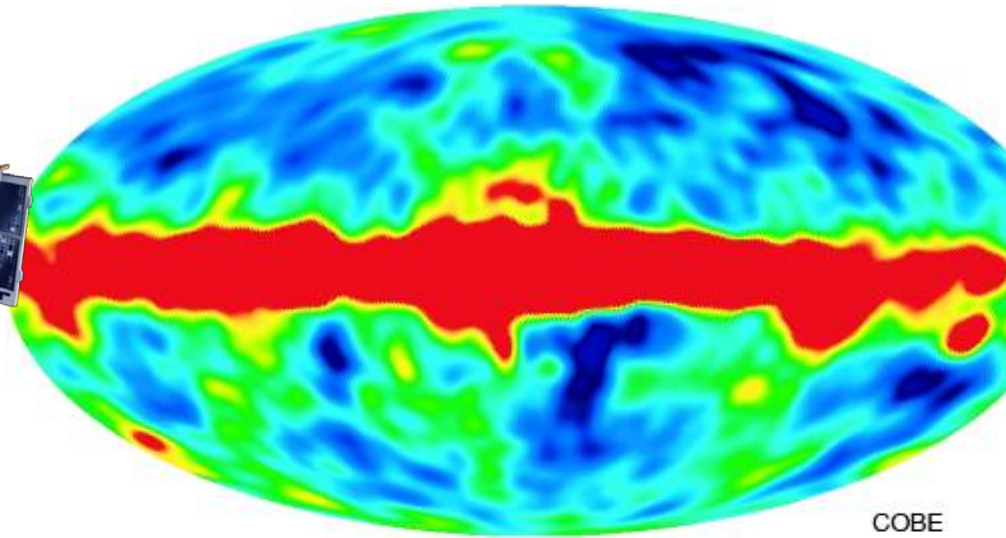
Time Since the Big Bang



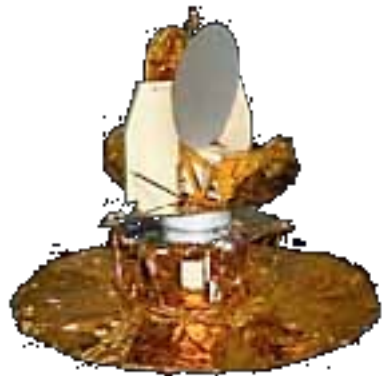
Mikrowellen als Babyfoto



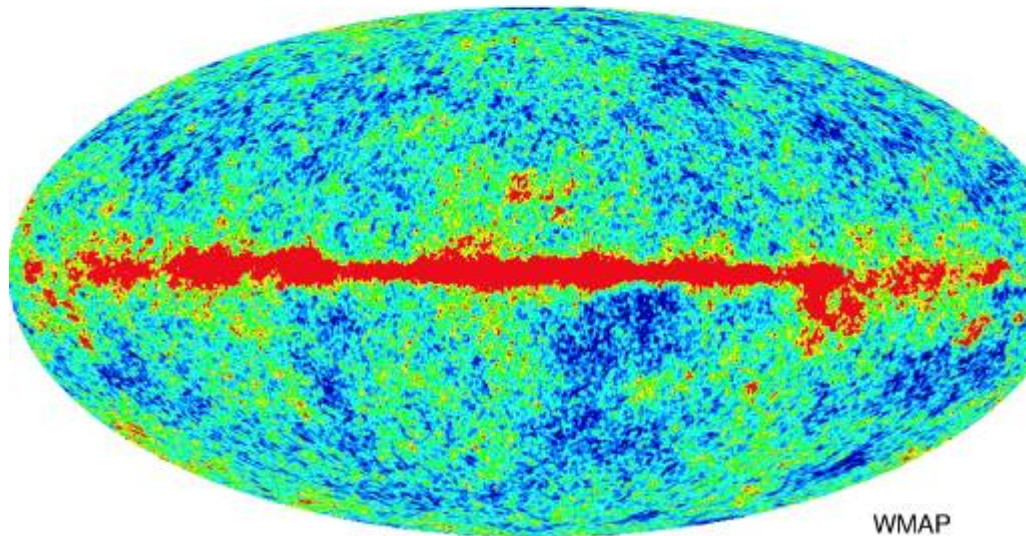
Cobe 1994



COBE



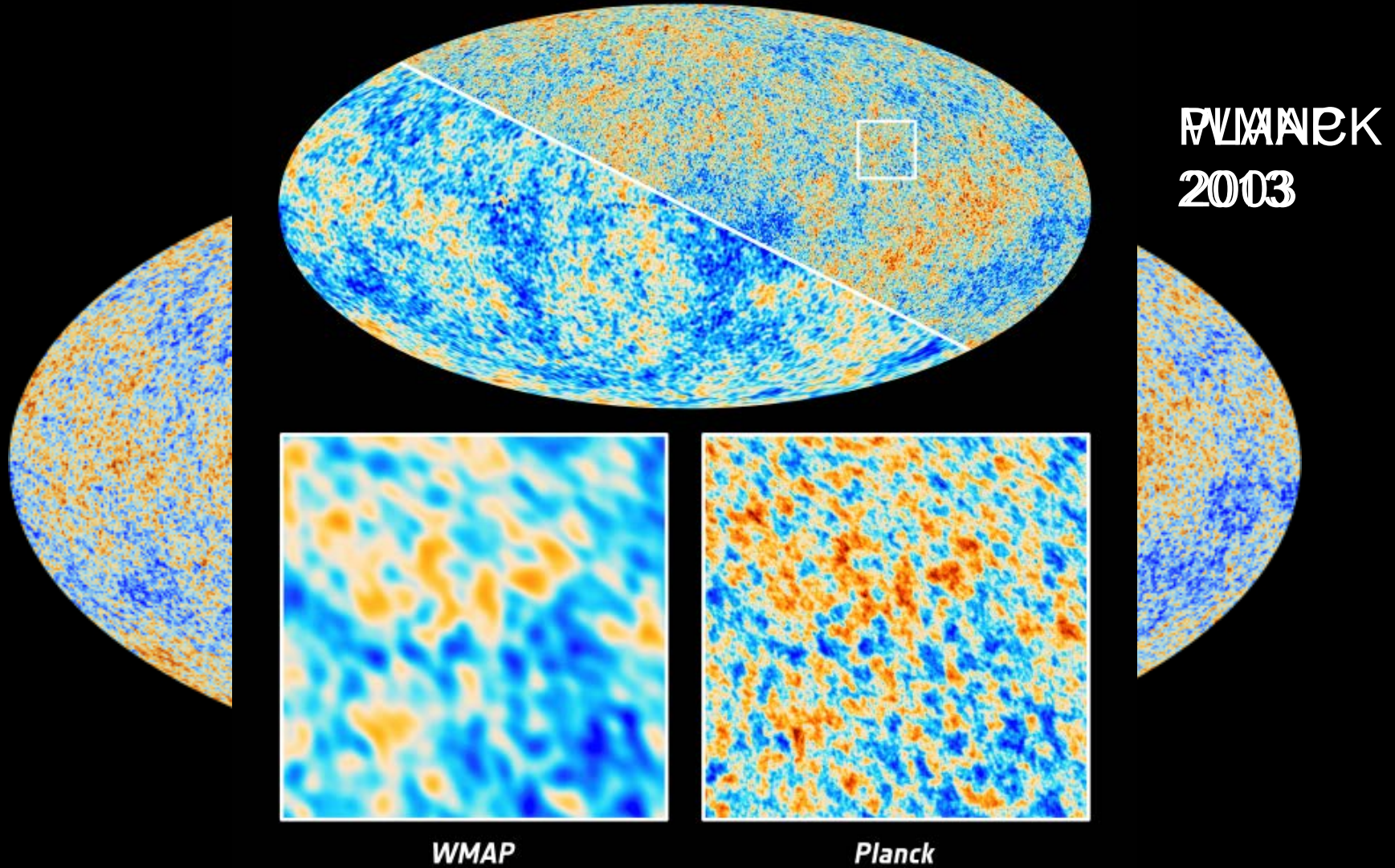
WMAP 2003



WMAP



Nach Abzug des Vordergrund unserer Milchstraße



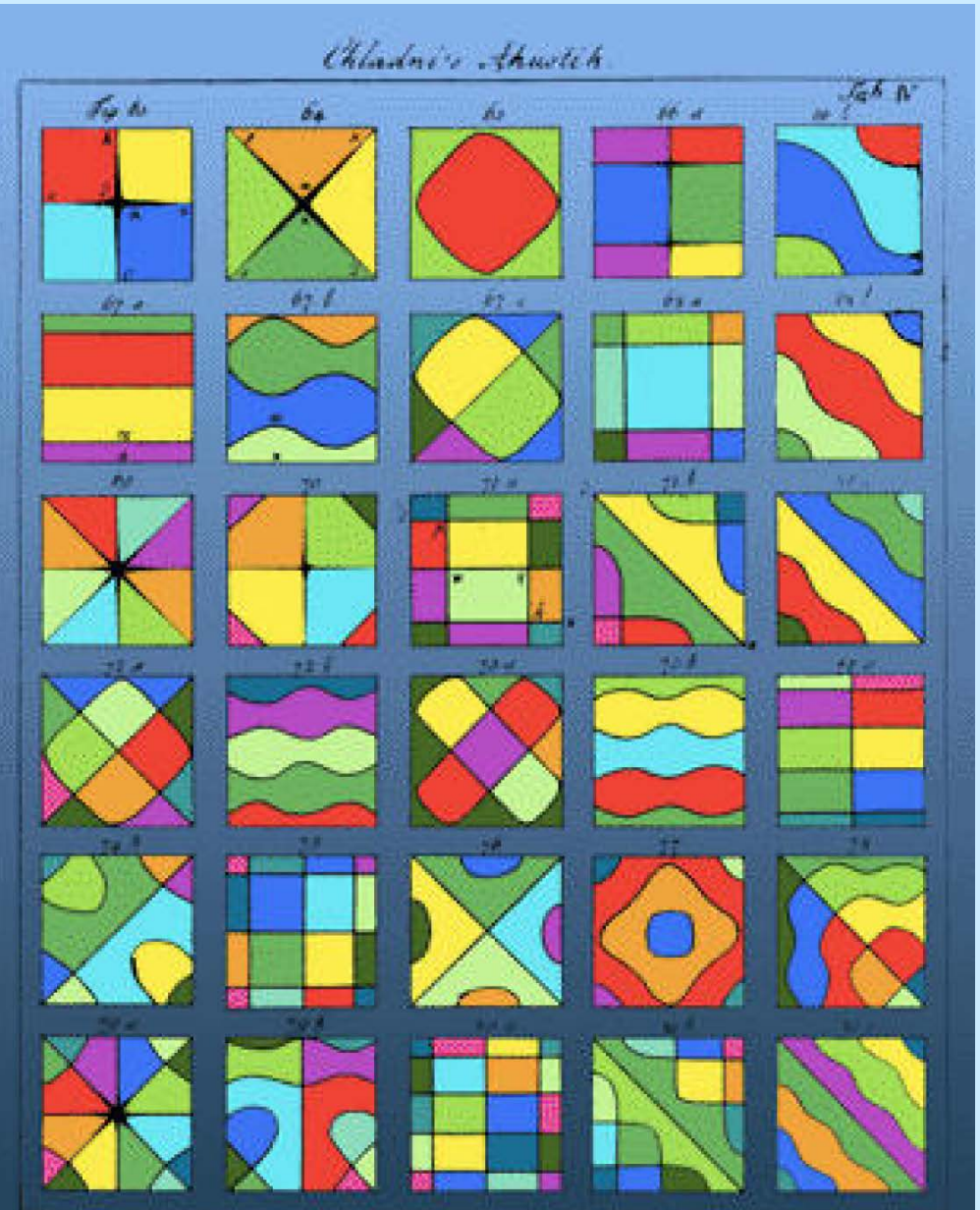
- Winzige Temperaturschwankungen: $T=2,73 \text{ K} \pm 0,0002 \text{ K}$
- “heiße” und “kalte” Flecken = “dichte” und “dünne” Gebiete
- genau wie bei Schall → **Klang des Universums**

Akustische Analogie I: Chladni-Figuren

Chladni sound patterns (coloured)

Ernst Florens Friedrich Chladni
(1756 – 1827)

Die Akustik (Leipzig, 1802)



Später: Ran an die Experimente #1!

Zum Selber Probieren: Chladni Klang Figuren

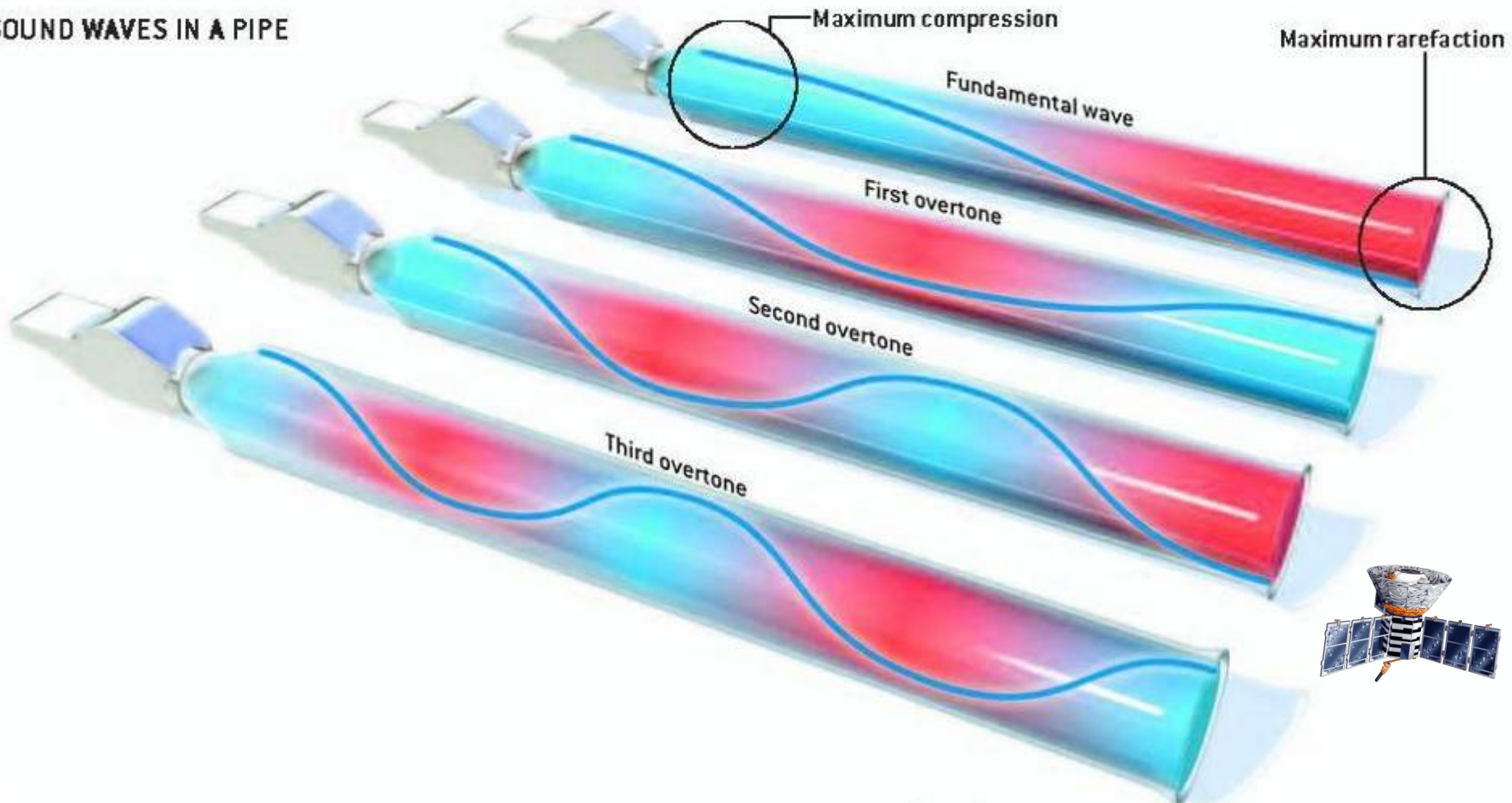


Akustische Analogie II: Musikinstrumente

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

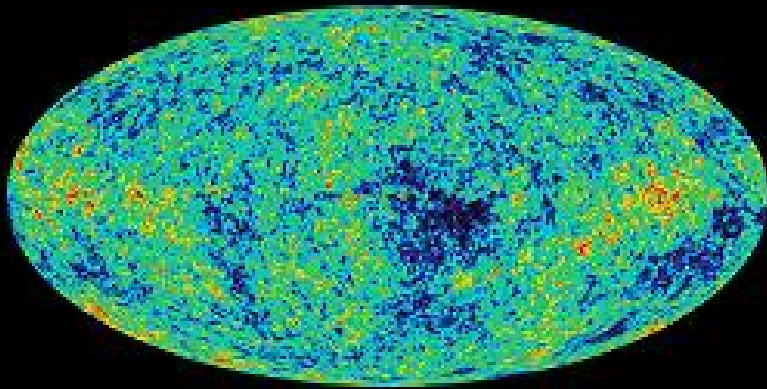
piece. But the sound also has a series of overtones with shorter wavelengths that are integer fractions of the fundamental wavelength. (The wavelengths of the first, second and third overtones are one half, one third and one fourth as long.)

SOUND WAVES IN A PIPE



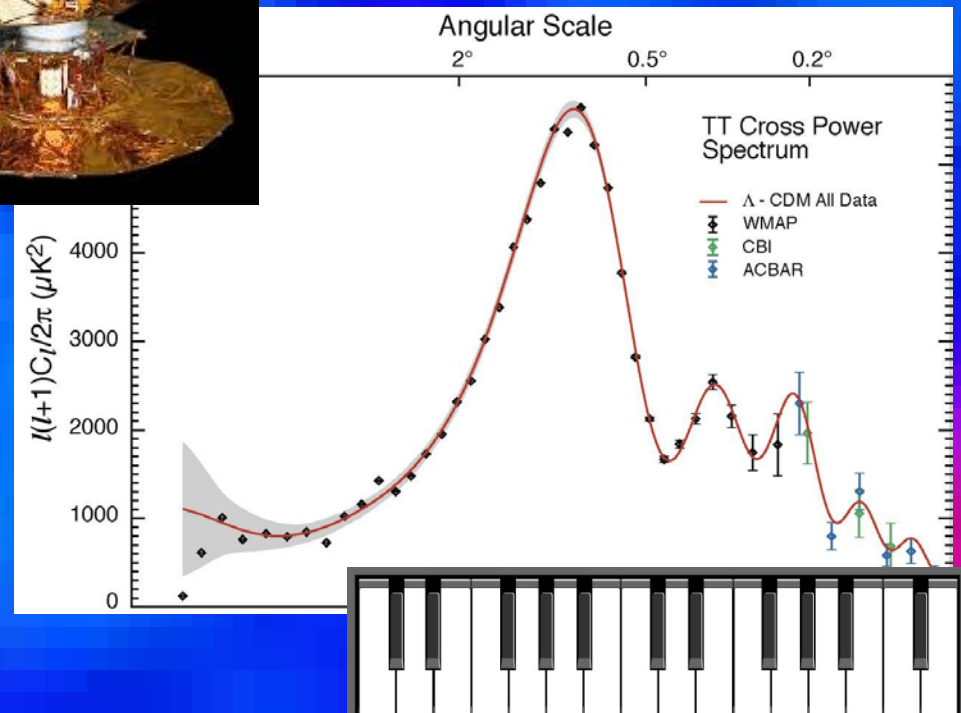
Die Obertöne des Kosmischen Klangs

- Das Ohr hört an Obertönen:
 - Art des Instruments
 - geübtes Ohr: Bauweise



Astrophysiker erkennen an den Obertönen:

- Zusammensetzung
- „Form“ des Universums



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 | 3×10^{19} Moleküle/cm ³ | 300 Protonen / cm ³ (t = 380.000 Jahre) | 10^{-17} |
| Schallgeschw. v | 340 m/s | $1,7 \times 10^8$ m/s = $c/\sqrt{3}$ | 500.000 |
| Wellenlänge λ | 20 m – 20 mm | 380.000 – 20.000 Lj (~ Milchstraße heute) | $10^{20} - 10^{22}$ |
| Frequenz f | 17 – 17.000 Hz | $10^{-12} - 4 \times 10^{-14}$ Hz (eine Schwingung pro 40.000 – 760.000 Jahre) | $10^{-14} - 10^{-16}$ |

Schallwellen vermessen Geometrie

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

- Geometrieänderung (Dichte=const.) ergibt Frequenzänderung
 - Saiten-Länge \rightarrow Tonhöhe
 - Form \rightarrow Klang (Frequenzzusammensetzung)
- Dichteänderung (Geometrie=const.) ergibt ebenfalls Frequenzänderung
 - Druck konst., Dichte kleiner (z.B. Helium) \rightarrow größeres $v \rightarrow$ höhere Frequenz

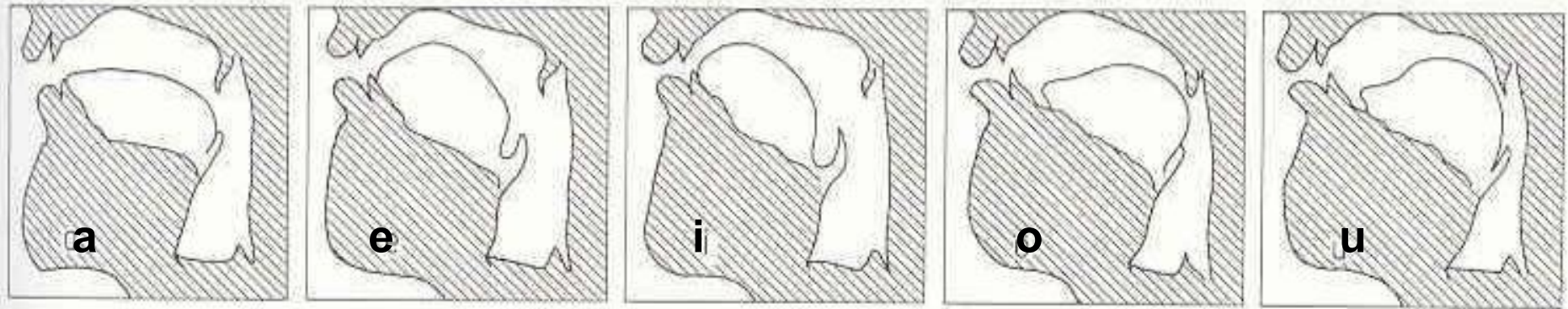


Abb. 25.13 Form der Mundhöhle bei den fünf einfachen Vokalen

Universum: Kenne v und $f \rightarrow$ bestimme λ (Maßstab)

Später: Ran an die Experimente #2!

Zum Selber Probieren: *wenig* Helium aus Ballon einatmen

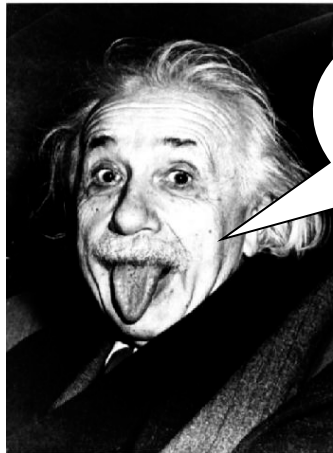
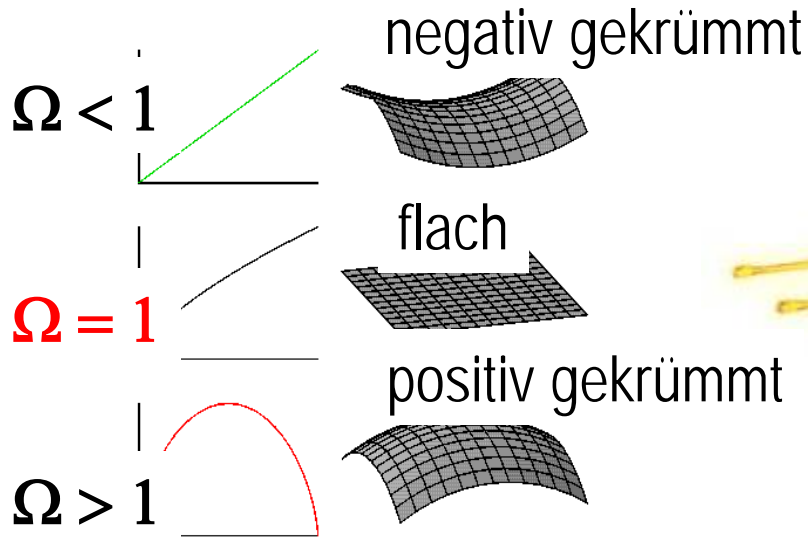
!! Niemals direkt aus der Flasche!!



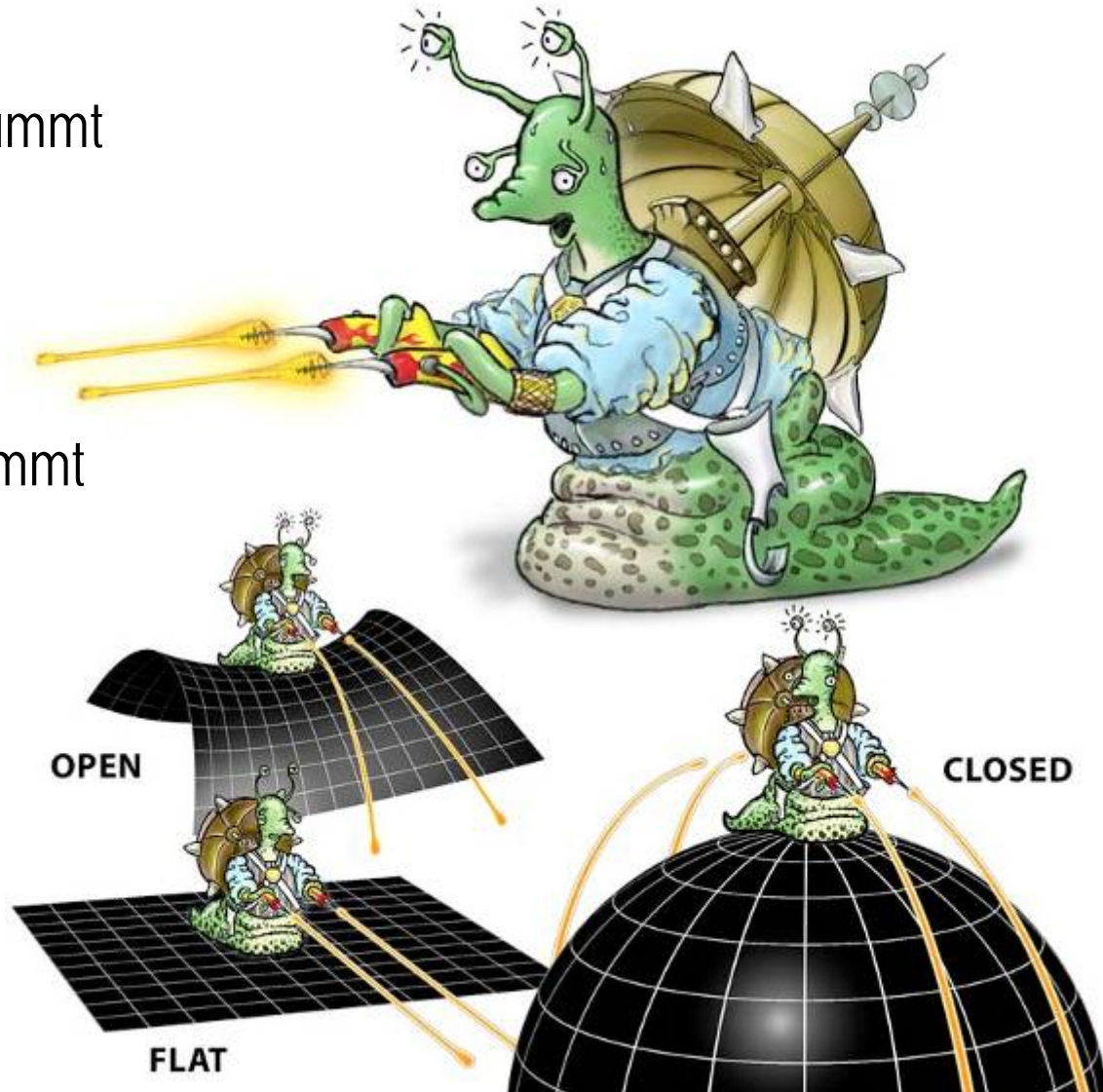
Geometrie der Raumkrümmung

erlaubt Rückschluss auf gesamten
Energieinhalt (Masseninhalt) Ω

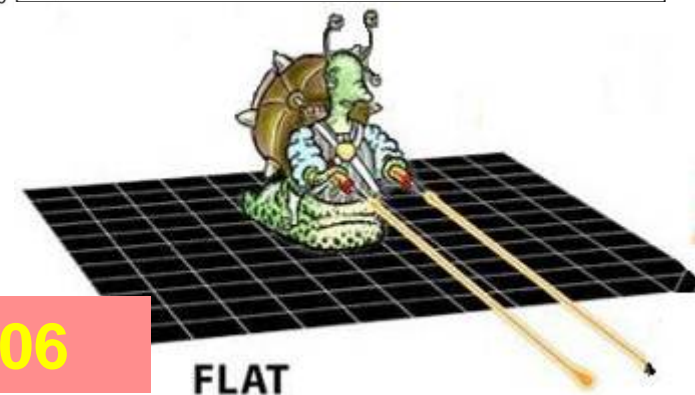
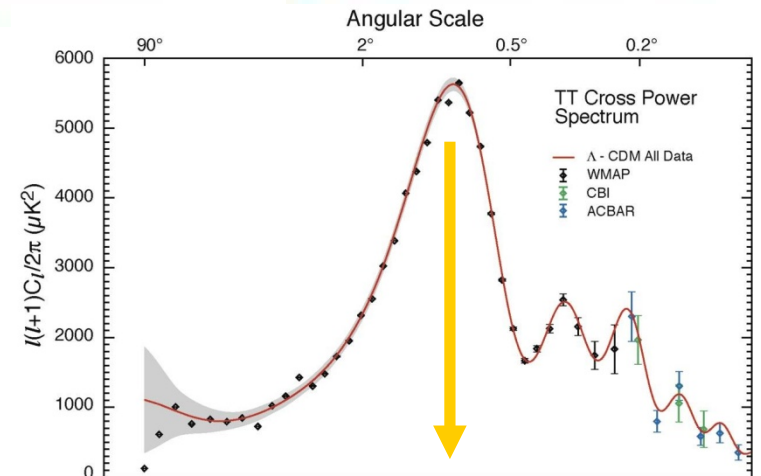
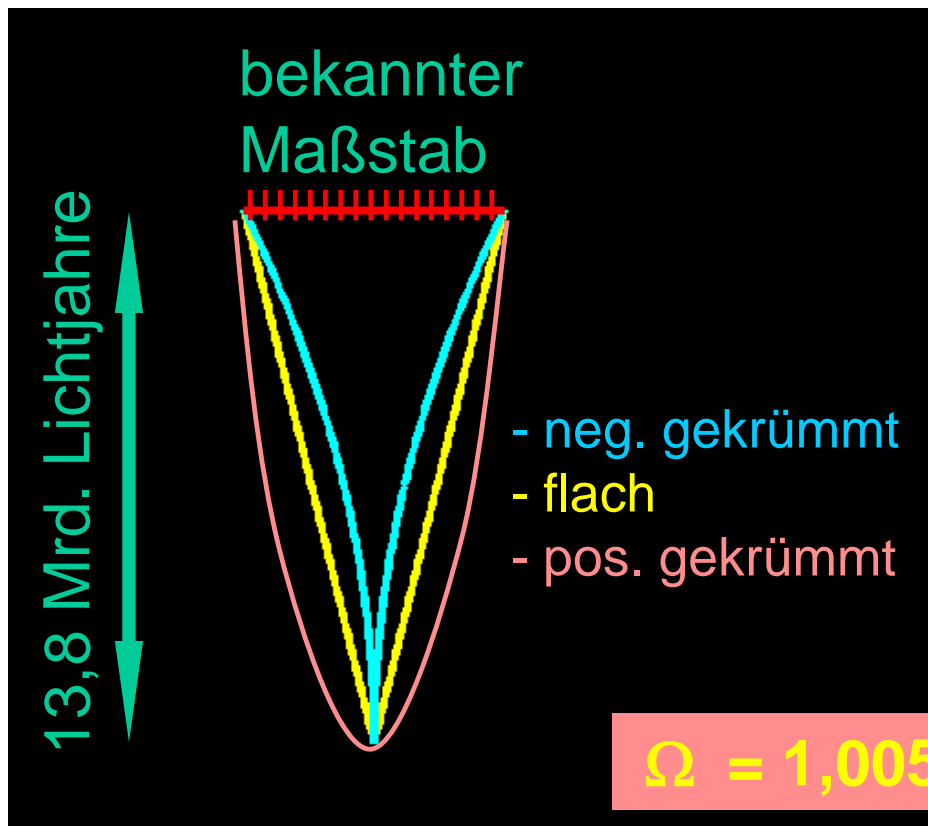
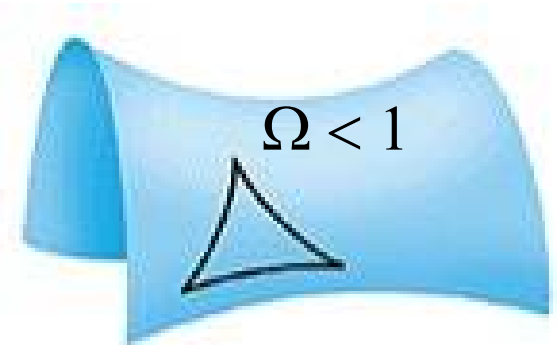
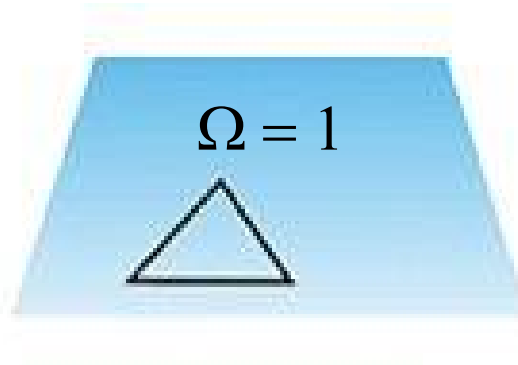
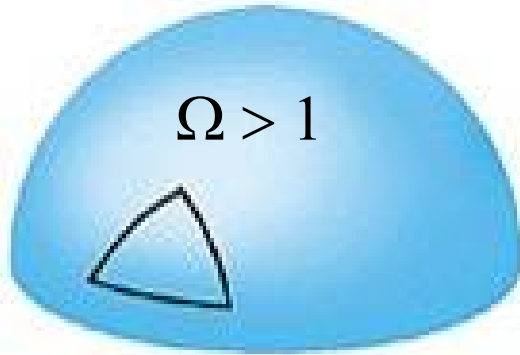
$$\Omega = M / M_{\text{flach}}$$



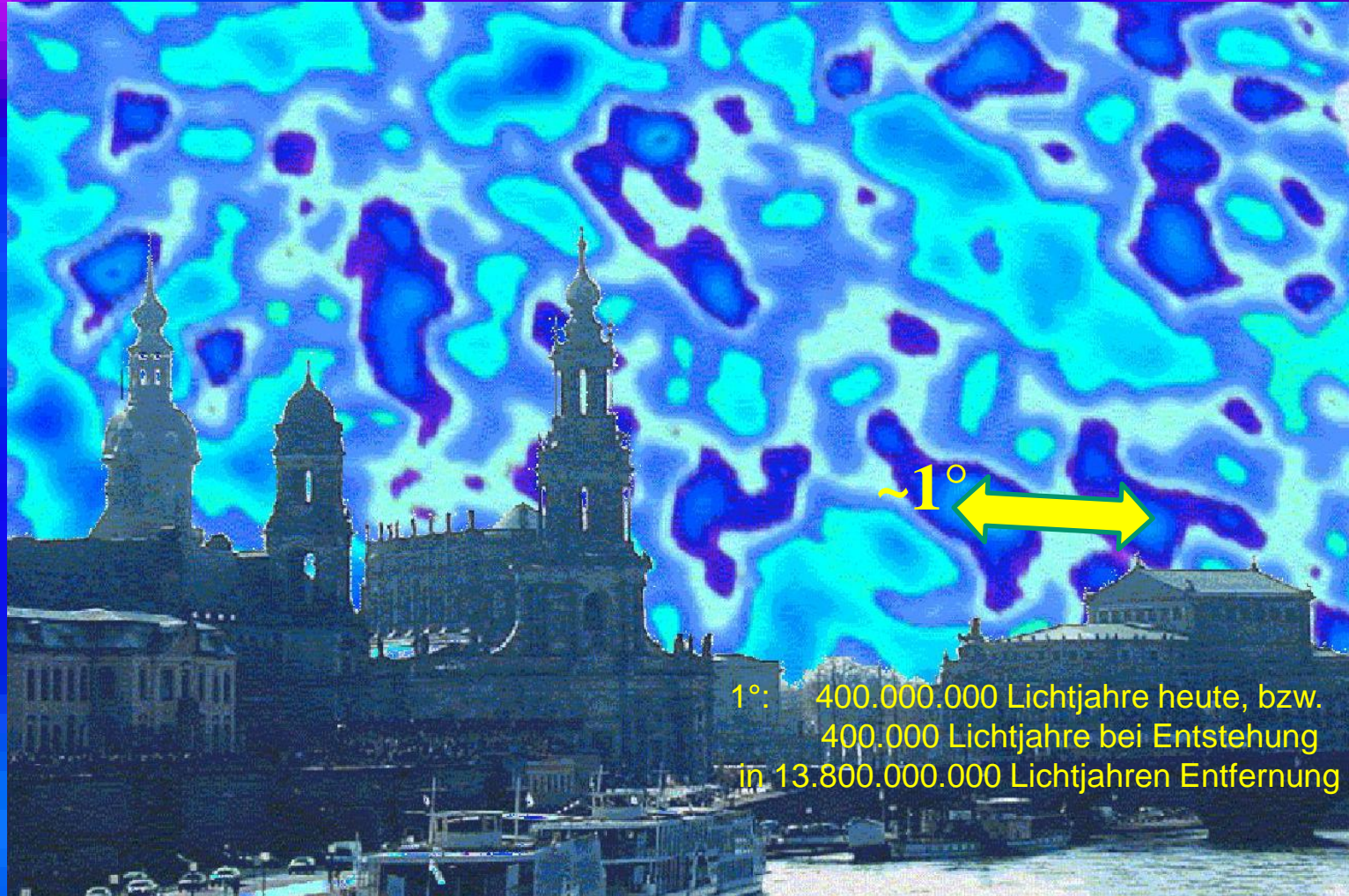
allgemeine
Relativitäts-
theorie




Geometrie = „Form“ des Universums



Der Grundton über Dresden

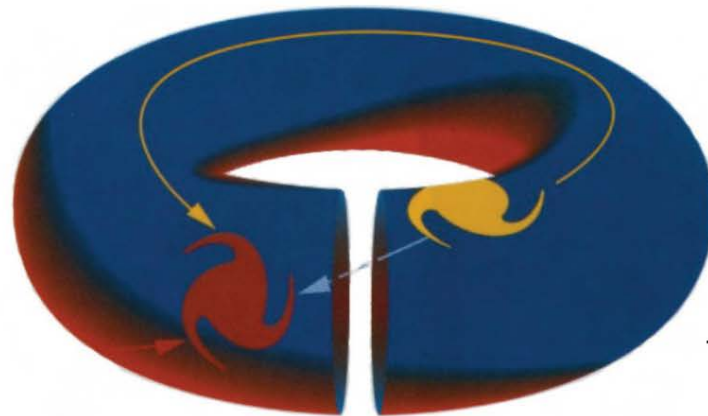
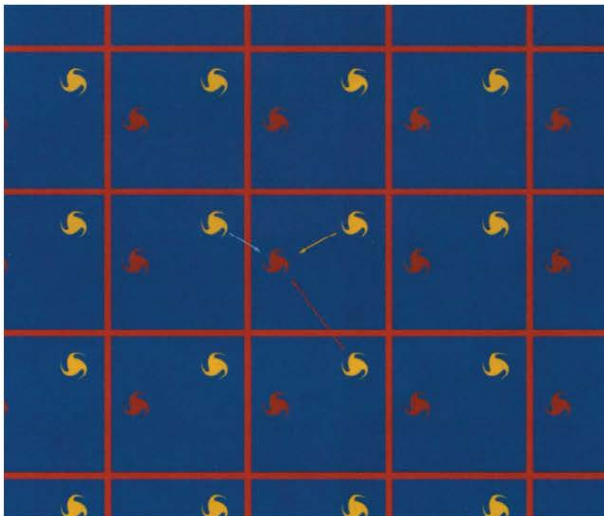
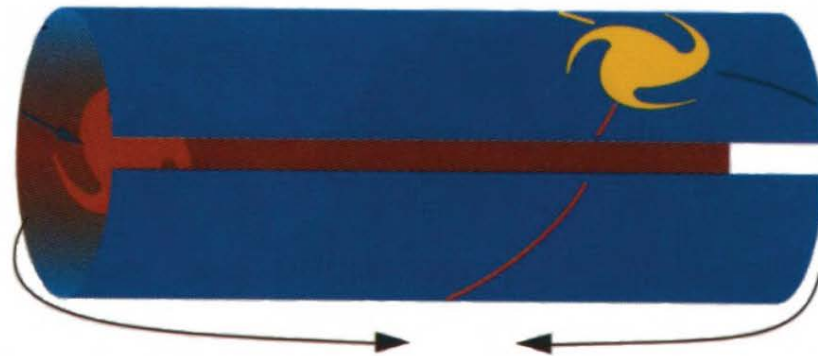
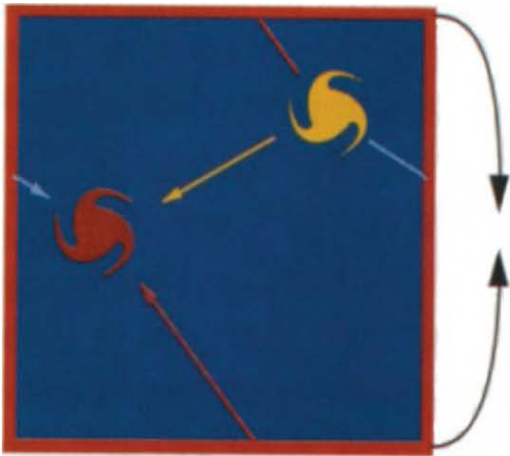


Live Übertragung des Klangs über „kosmischen Mikrowellen-Rundfunk“, hörbar gemacht durch Transposition um 50 Oktaven nach oben: 

www.astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/unit05/unit5.html

Das Universum als Spiegelsaal?

- Flach:= Parallele bleiben Parallel
- trotzdem endliches Volumen möglich!
 - einfachste Lösung: Torus (eingeschränkte 3D→2D Visualisierung)



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

Zusammensetzung des Universums

● Beiträge zur Gesamtenergie Ω

● **atomare Materie (p,n,e): Ω_B**

Sterne, Planeten, Gaswolken, Schwarze Löcher,...

-- dämpft den ersten „Oberton“

-- verstärkt den zweiten „Oberton“

● **nichtatomare „dunkle“ Materie (v, ...): Ω_{DM}**

Ungebundene Elementarteilchen, schwach wechselwirkend

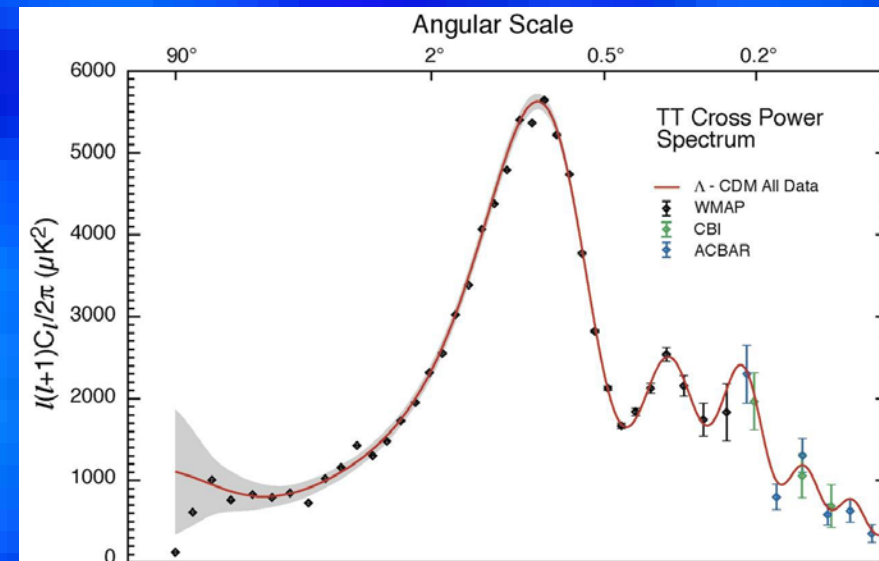
-- verstärken den zweiten „Oberton“

● **„dunkle“ Energie: Ω_V**

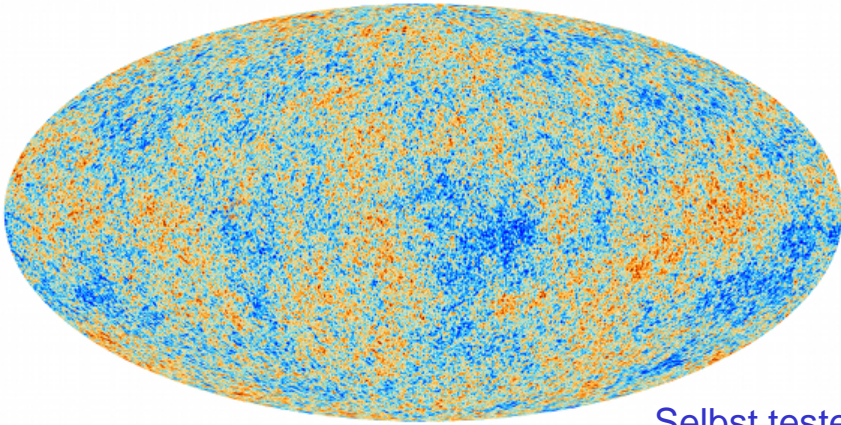
„kosmologische Konstante“

„Vakuumenergie“
unverdünnt

$$\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_V = 1$$



Ergebnis Planck

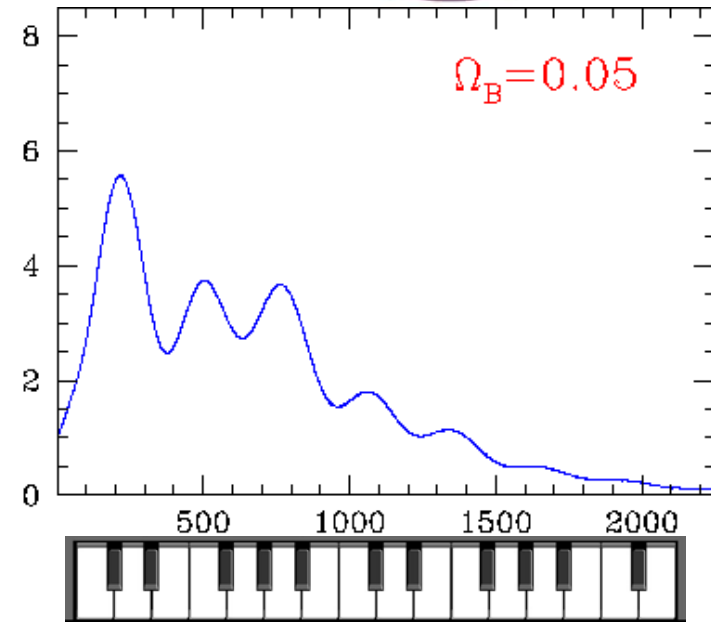
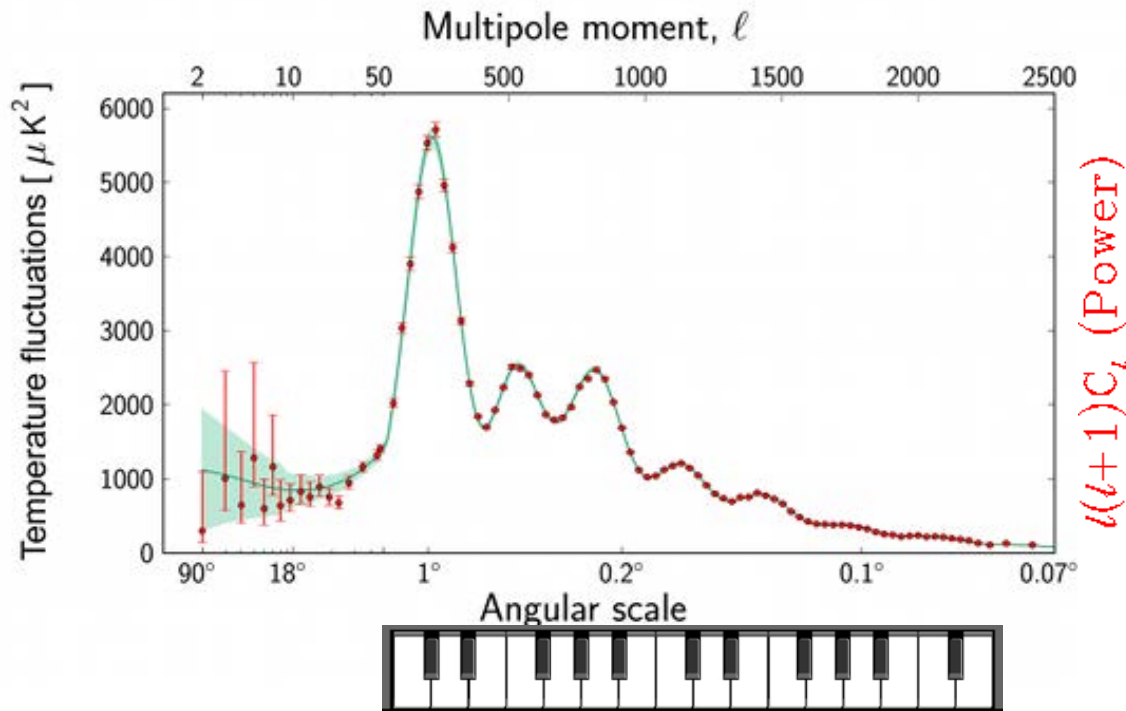
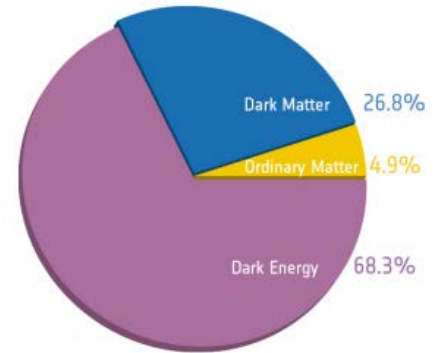


- 5% atomare Materie: $\Omega_B = 0,05$
- 27% nichtatom. Materie: $\Omega_{DM} = 0,27$
- 68% „dunkle Energie“: $\Omega_V = 0,68$
- insgesamt flach: $\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_V = 1,00$

Selbst testen wie sich der Klang ändern würde:

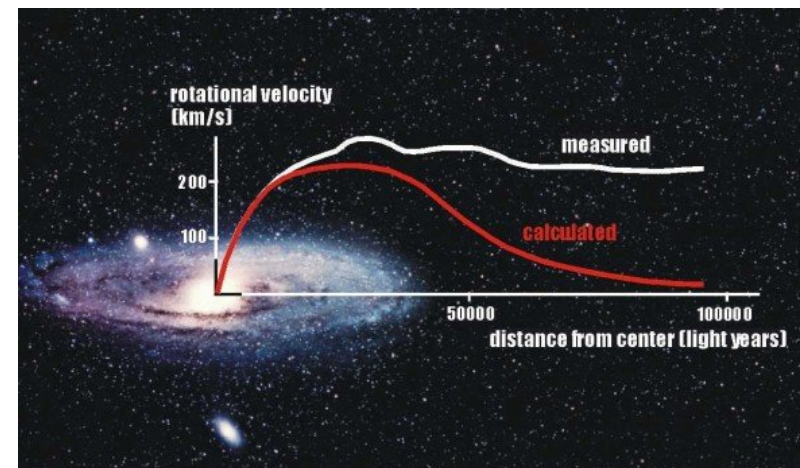
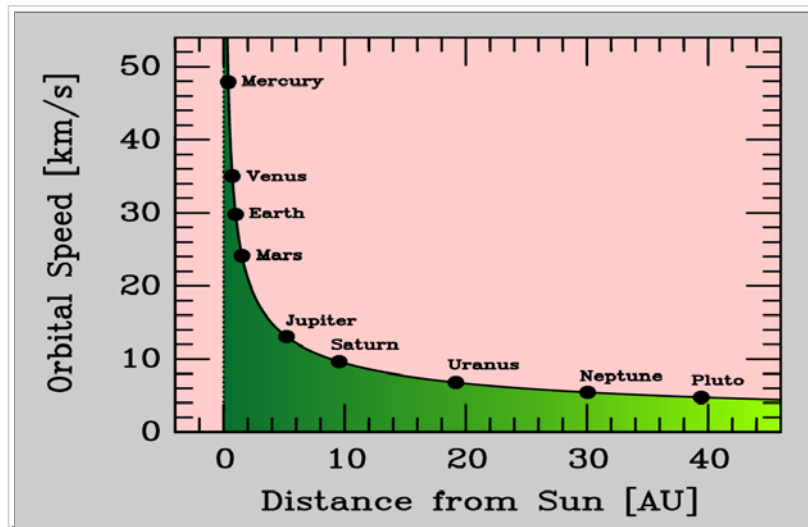
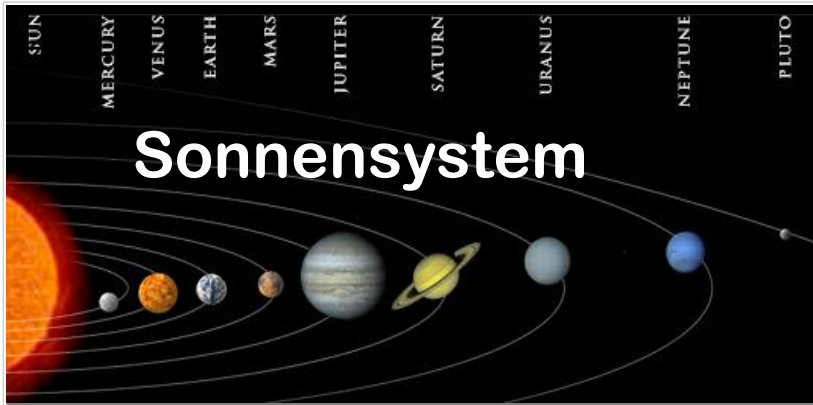
http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool

<http://map.gsfc.nasa.gov/resources/edresources1.html>



Dunkle Materie im Kosmos

< - > Rotationskurven von Galaxien

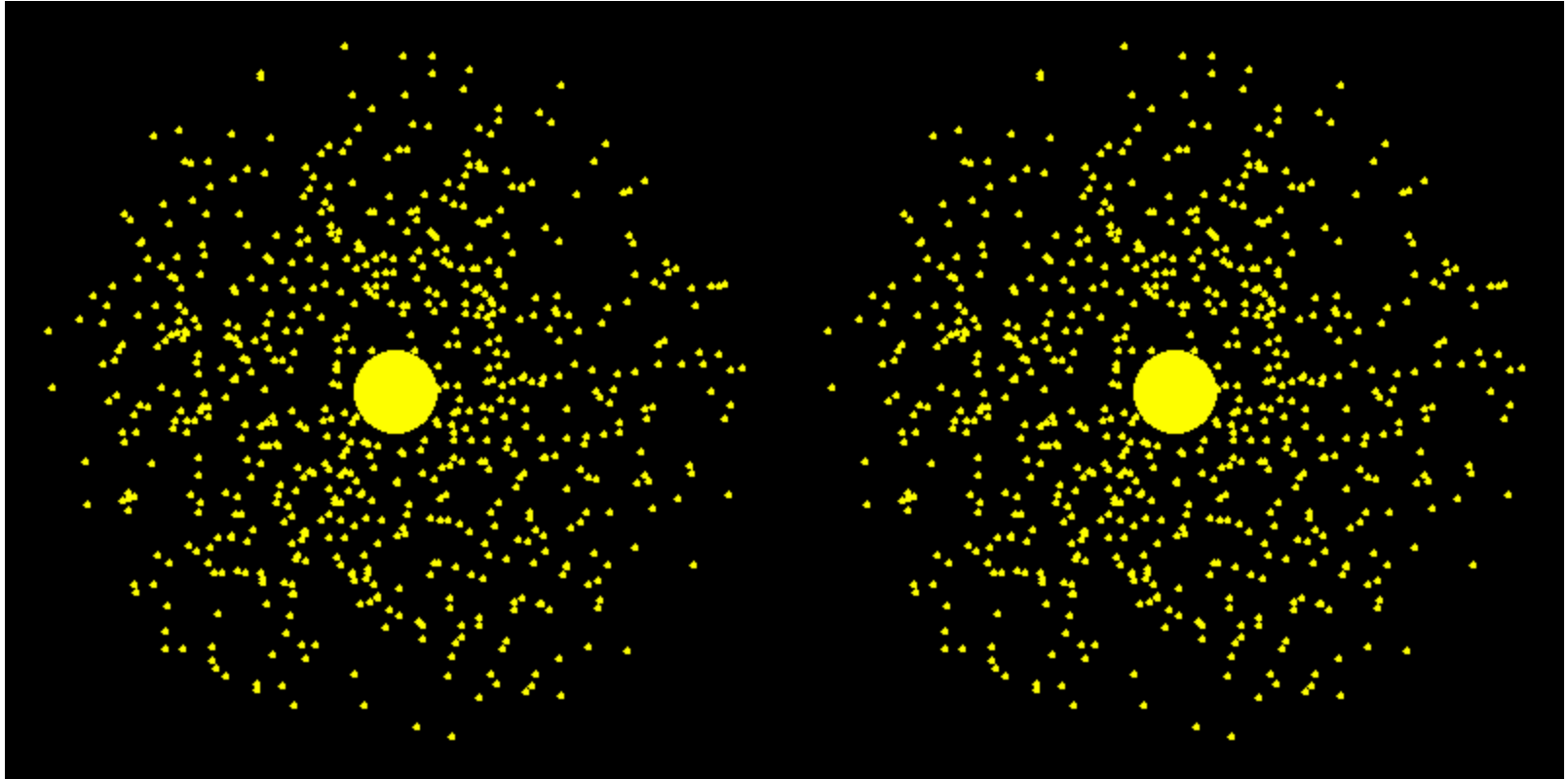


- Sonnensystem: $v \sim 1/\sqrt{r}$
-> Gesamtmasse (~Sonne)
(fast) vollständig im Zentrum

- Galaxien: $1/\sqrt{r}$ wird nie erreicht
-> großer Halo dunkler Materie

Links: ohne
dunkler Materie

Rechts: mit



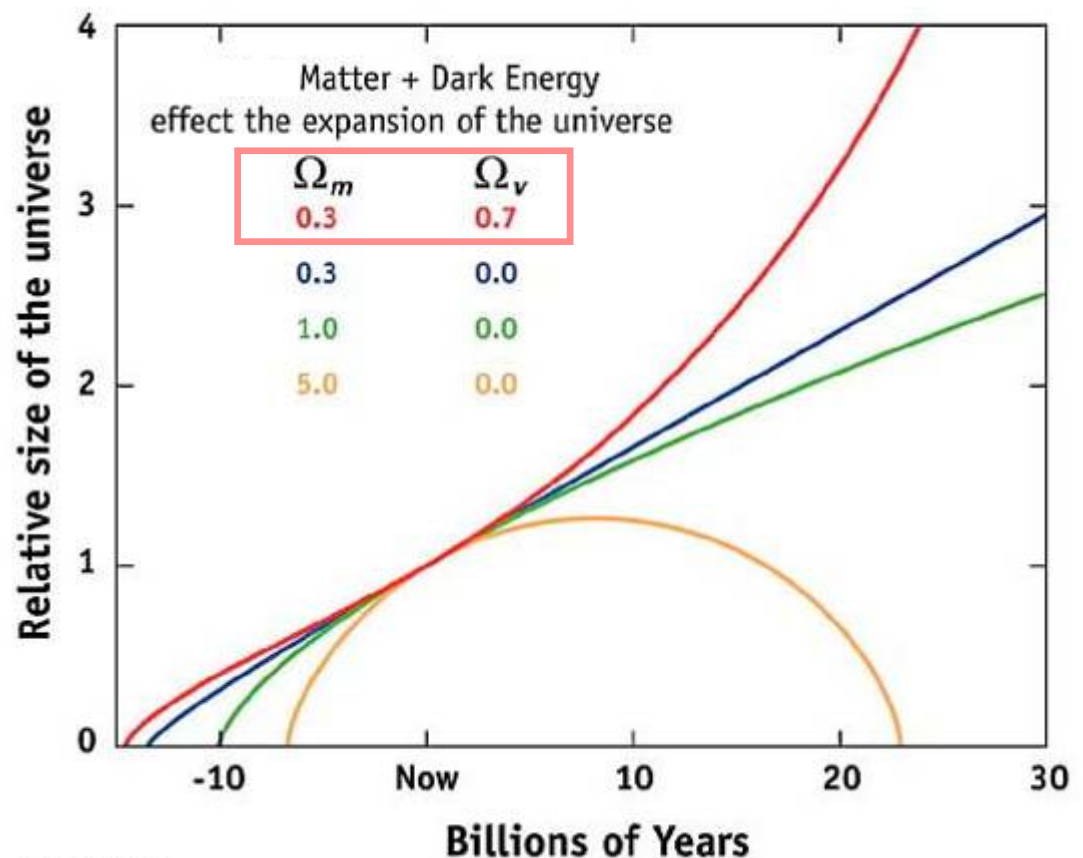
<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/darkmatter.htm>

Zwischenbilanz

- Nur 32% des Universums ist Materie
 $\Omega_m = \Omega_B + \Omega_{DM} = 0,32$
- 5/6 davon ist nichtatomare, „dunkle“, Materie
möglicherweise uns völlig unbekannt
- 68% ist keine Materie, sondern „dunkle Energie“
und treibt das Universum auseinander



- Weder die Erde noch die Sonne noch die Milchstraße ist Mittelpunkt des Kosmos
- Selbst der Stoff aus dem all das gemacht ist, ist eine Randerscheinung (< 5%)
- Die „dunkle Energie“ bestimmt die Zukunft



Später: Ran an die Experimente #3!

Der Cosmic Cocktail, woraus besteht er?



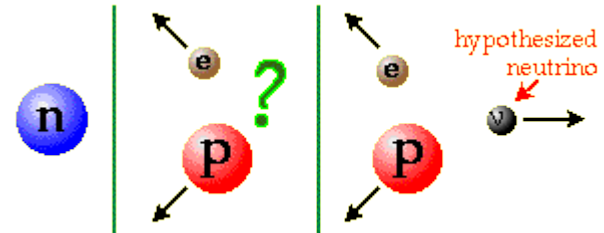
Quelle: <https://room.eu.com/article/cosmic-cocktails-and-galactic-moonshine>

Sind Neutrinos die „Dunkle Materie“?



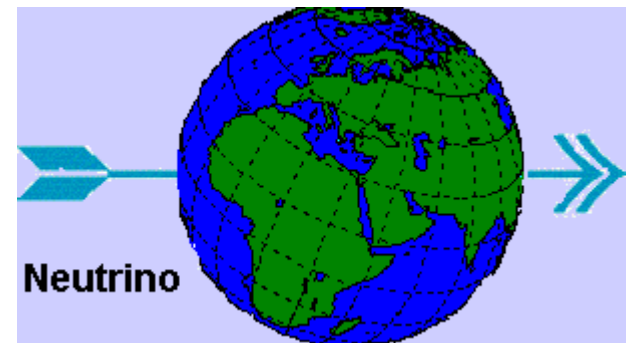
1930: theoretische Einführung
(Pauli)

1956: experimentelle
Entdeckung
(Cowan und Reines)



Neutrinos: “Singles“ des Universums

- schwach wechselwirkend:
**999.999.999 von 1.000.000.000
schaffen Erddurchquerung**
- ziemlich verbreitet:
**366.000.000 Neutrinos / m³
im Vergleich zu 0,2 Protonen / m³**
- ➔ wesentlicher Beitrag zu zu Dunkler Materie,
selbst wenn 1.000.000.000 Mal leichter als Protonen!!!



aber (bis vor kurzem): **Ruhemasse unbekannt**

Pendel als Waage für Neutrinos

Quantenphysik:

Es gibt 3 Sorten von Neutrinos: $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$
(„Pendel“)

gekoppelt zu 3 festen Moden $\nu_1 \nu_2 \nu_3$

- kleiner Energieunterschied ΔE^2 ,
abhängig von Kopplung

- Pendel: Frequenzunterschied Δf^2
- Neutrinos: Massenunterschied Δm^2

- Anregung nur eines Pendels:

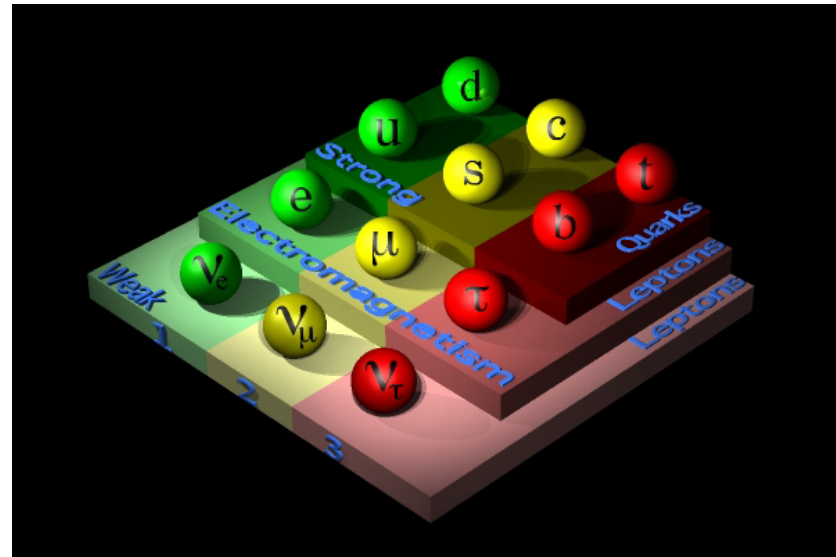
- Regelmäßige Oszillationen der Pendel, abhängig von Kopplung

- Bei Herstellung nur einer Neutrinoart:

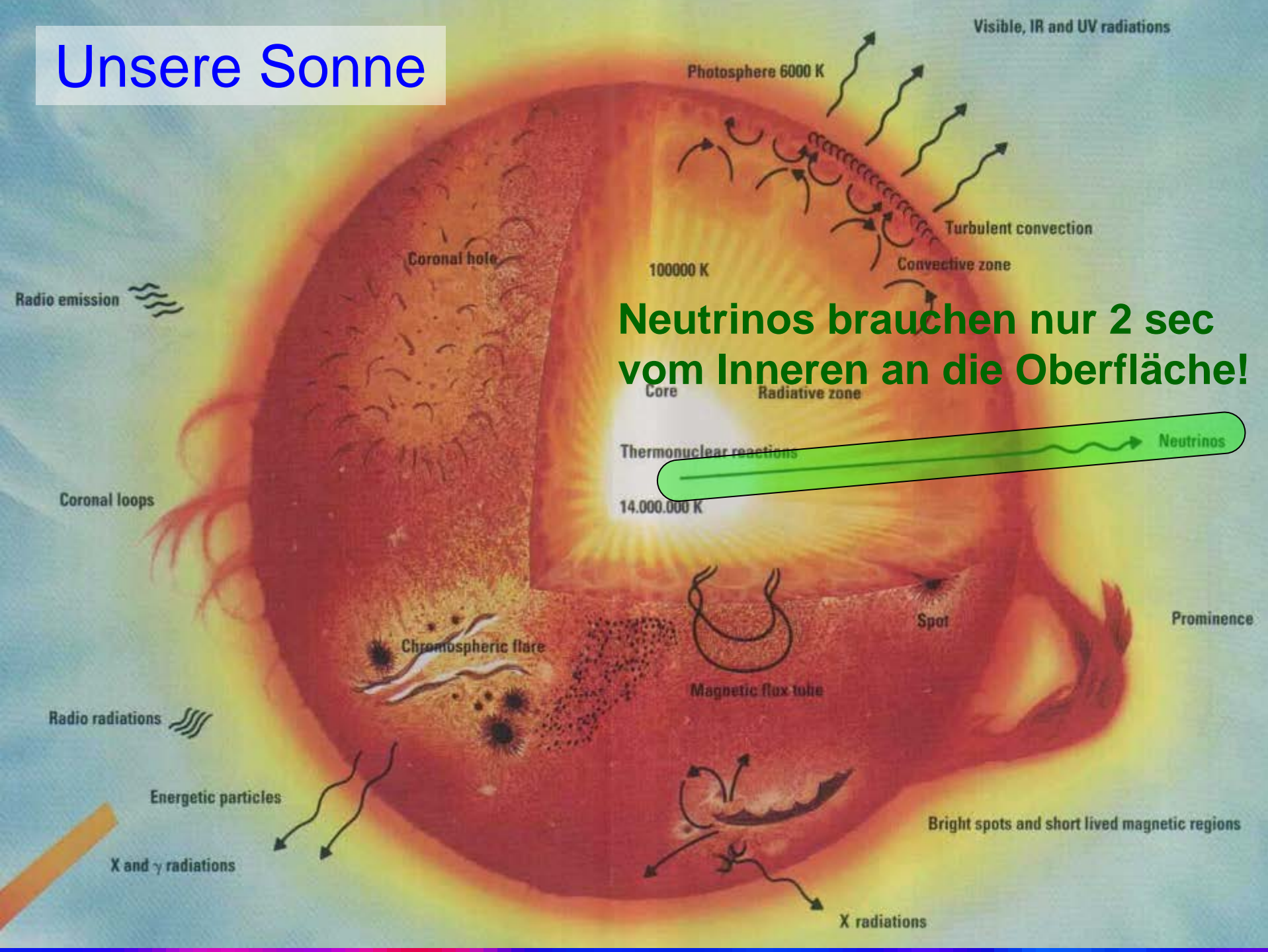
- Regelmäßige Umwandlungen in die andere(n) Art(en)

- Bei Nachweis nur einer Neutrinoart:

- Neutrinos scheinen zu „verschwinden“, abhängig von Δm^2
- **Analog zu akustischen Schwebungen bei kleinen Δf^2**



Unsere Sonne



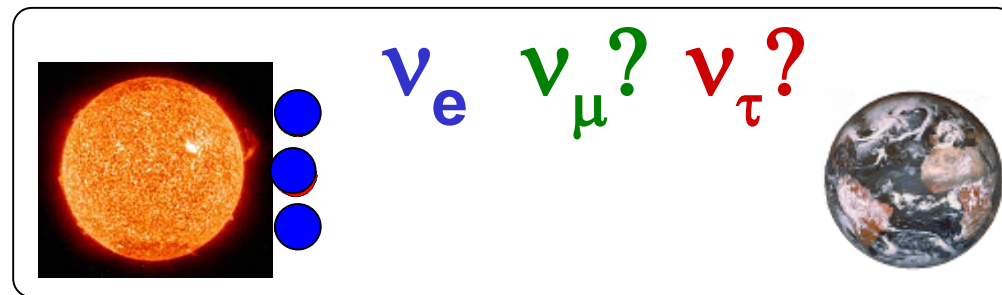
Neutrinos aus der Sonne

- Kernfusion in der Sonne:



auf der Erde: 10^{11} solare Neutrinos / cm^2 und Sekunde

- Produktion:
100% als
„ ν_e -Pendel“



- Davis (1970 -2000): ν_e Nachweis auf der Erde
Ergebnis: nur 30% der erwarteten ν_e

Ray Davis

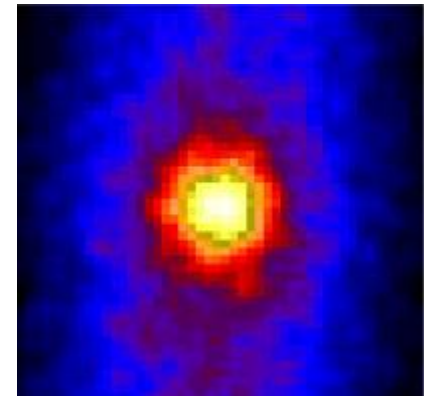
Nobelpreis 2002

380000 l
Perchlorethylen
in der Homestake- Mine

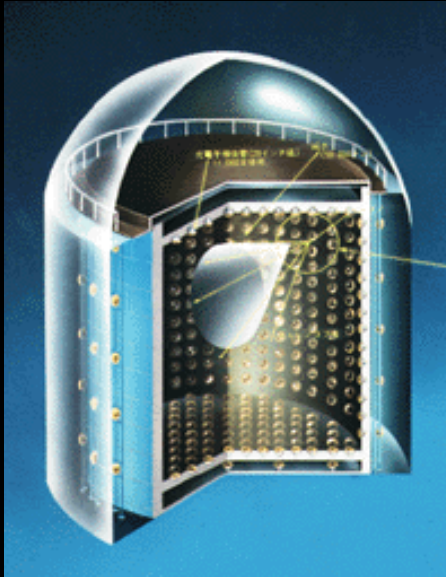


Ausspülen des ${}^{37}\text{Ar}$ (0.5 Atome/Tag)

- Bestätigung (1995)
Kamiokande
(Sonne *live!* im
„Neutrinolicht“)

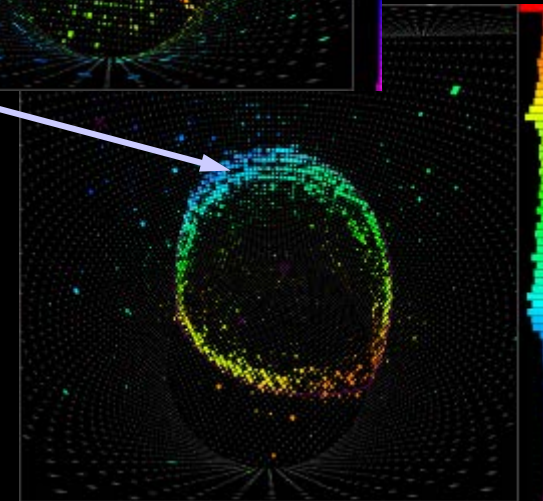
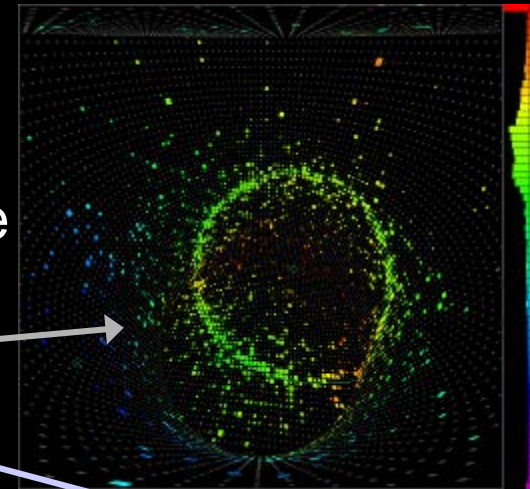
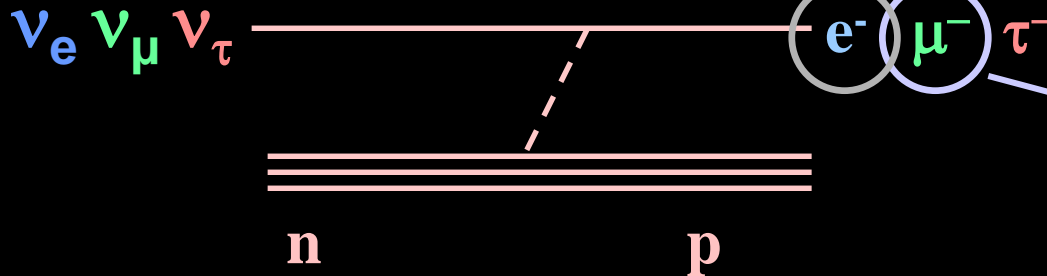
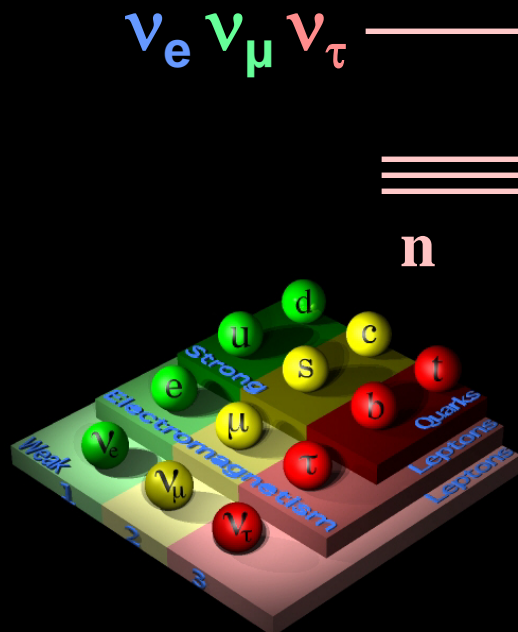


Der „Überlichtknall“ der Neutrinos



SuperKamiokande 2000
50,000 t Wassertank

40 m hoch, 40 m Ø
11146 Lichtdetektoren
1 km tief in Kamioka Mine
Japan



Jeder der drei
Neutrinoarten
reagiert anders!

Atmosphärische Neutrinos

Primäre Kosmische Strahlen
(Protonen, He...)

$L=10\sim 20$ km

π^\pm, K^\pm

μ^\pm

Im Idealfall
 $\nu_\mu : \nu_e = 2 : 1$

ν_μ

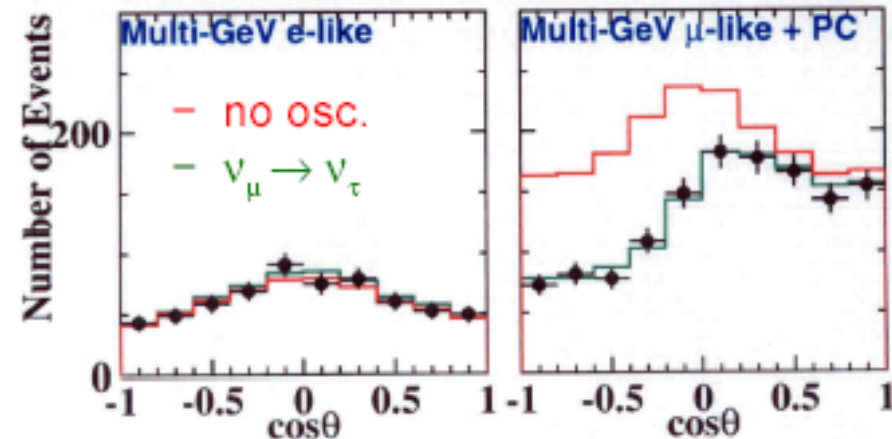
e^\pm

ν_μ

ν_e

ν_e und ν_μ aus Luftschauern:

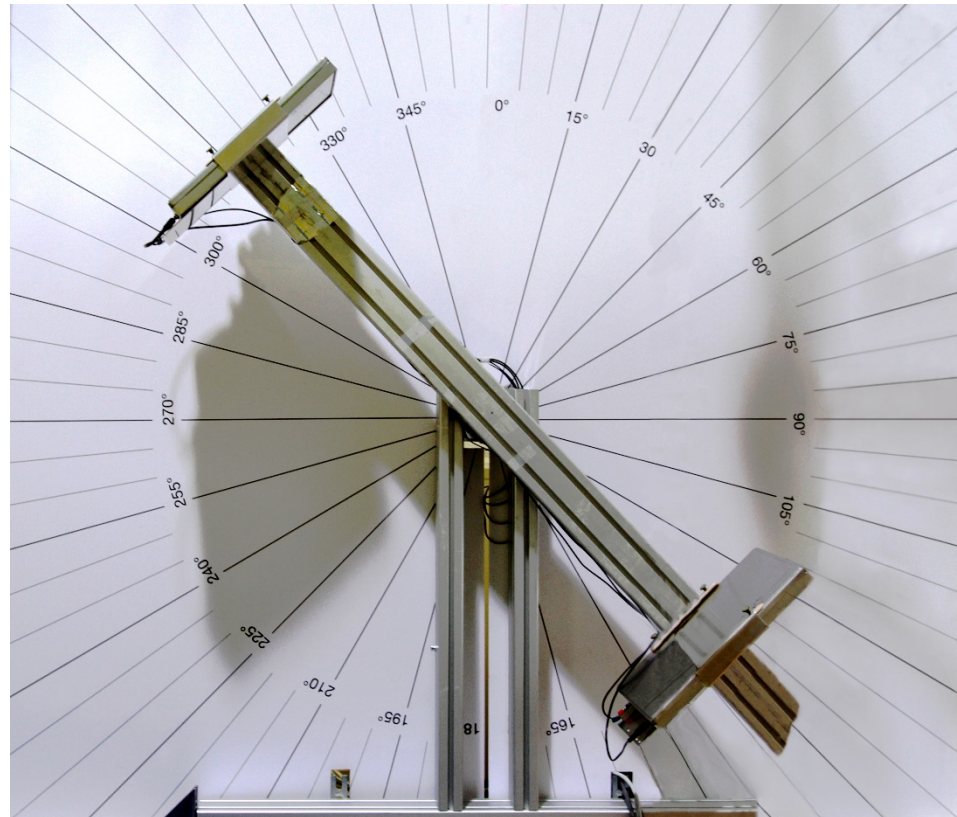
- Es fehlen keine ν_e
- Es fehlen ν_μ , umso mehr, je weiter der Weg war
- Erklärung: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



(C. Mc Grew, NOON 2000, Dez.2000)

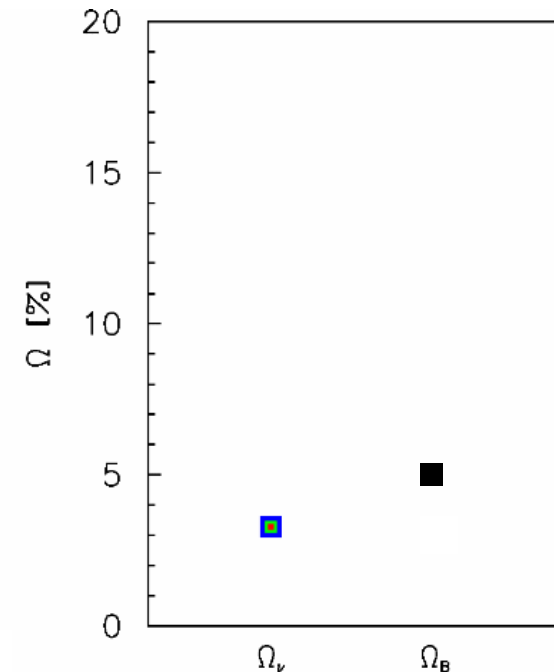
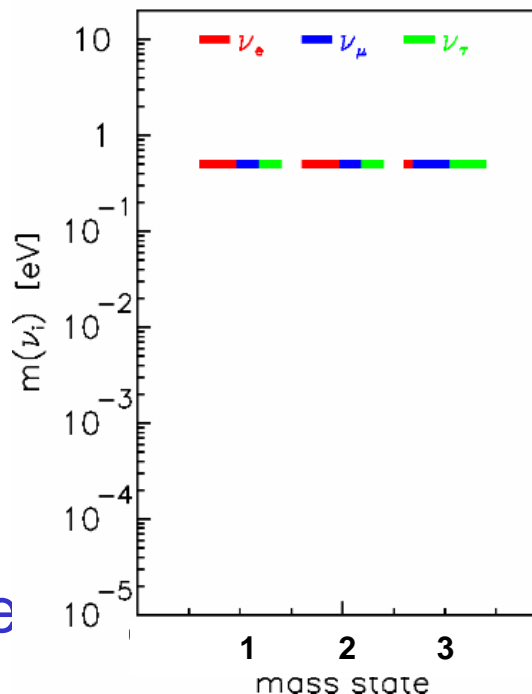
Später: Ran an die Experimente #4!

Messe die Kosmische Strahlung aus verschiedenen Winkeln



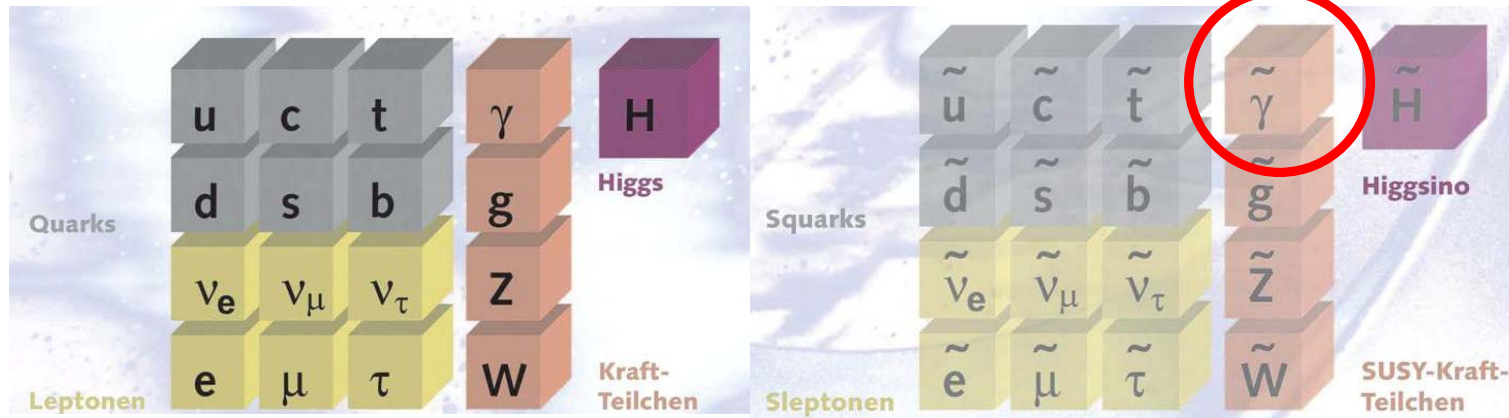
Oszillationen der Neutrinoarten

- Sonnenneutrinos: „Schwebungs“-Oszillation $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$
- Atmosphärische Neutrinos: „Schwebungs“-Oszillation $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau} \rightarrow \nu_e$
- möglich durch Frequenzunterschied (Quantenmechanik: Massendifferenz!) zwischen den festen Moden $\nu_1 \nu_2 \nu_3$
- **→ Neutrinooszillationen beweisen : Neutrinos haben Masse!!**
(Allerdings dabei nur Differenzen von m^2 messbar!)
- Beitrag zur Masse des Universums:
 $0.1\% < \Omega_\nu < 4\%$
- Ihre Masse erklärt nur kleinen Teil der 27% „dunklen“ Materie



Andere Kandidaten für Dunkle Materie?

■ Supersymmetrische Teilchen?

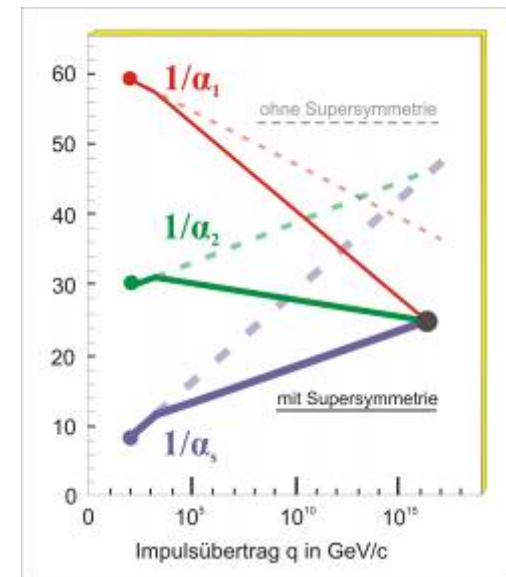


■ Würden helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen

- Vereinigung aller Kräfte incl Gravitation
- Verständnis großer Zahlenverhältnisse

■ Leichtestes SUSY Teilchen stabil = Dunkle Materie (ca 3000 /m³)?

- stabil, massiv (> 50 Protonmassen), schwache Wechselwirkung
- Direkte Entdeckung möglich bei: ATLAS & CMS am LHC des CERN



Später: Ran an die Experimente #5 !

Buttons für Teilchen Fans, einschließlich „Dark Matter“

Make your own
Quark !
Buttons für Teilchen-Fans

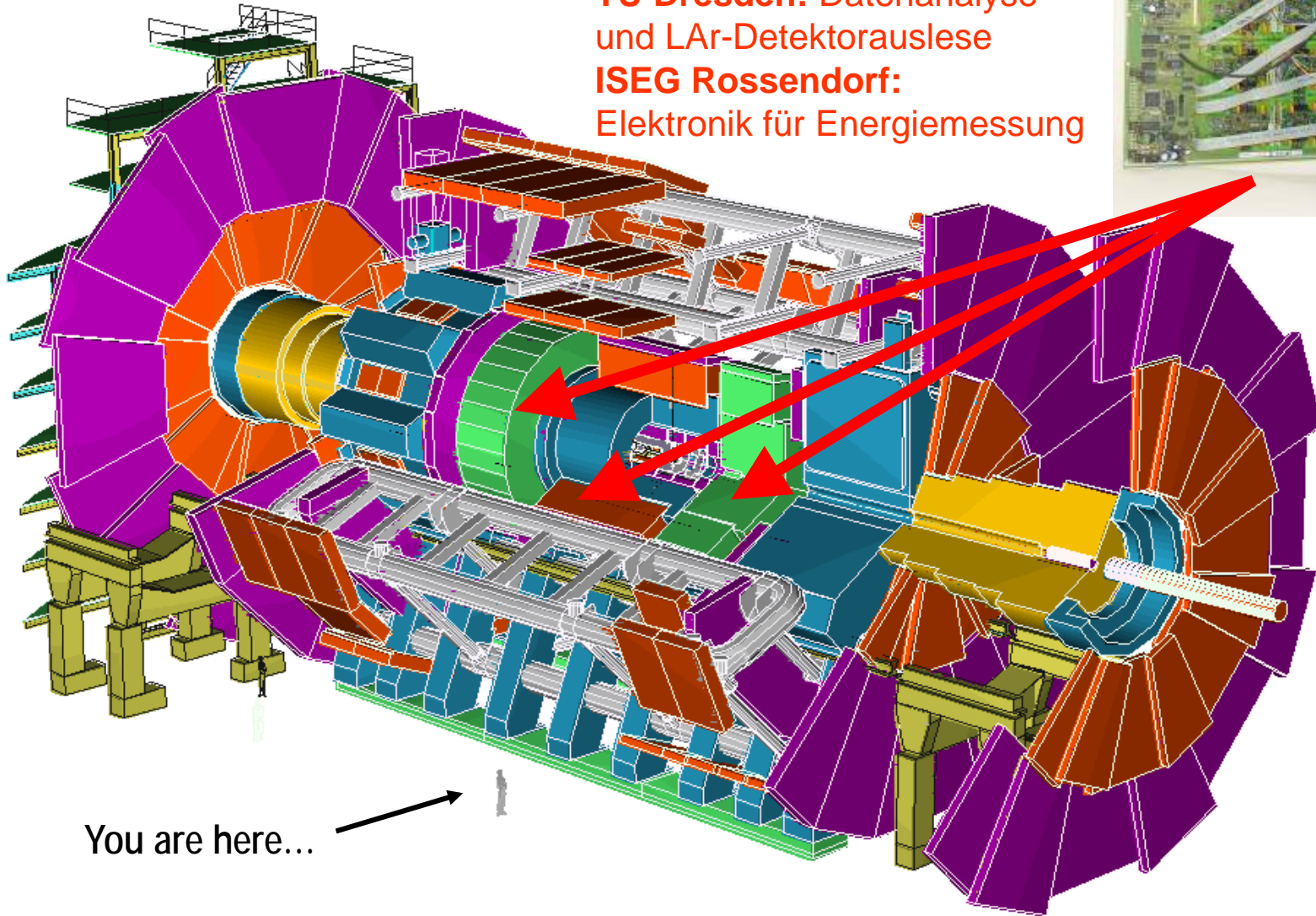


ATLAS Experiment am CERN, Genf

seit 2010 auch auf SUSY Suche

TU Dresden: Datenanalyse
und LAr-Detektorauslese

ISEG Rossendorf:
Elektronik für Energiemessung



Der Large Hadron Collider LHC am CERN

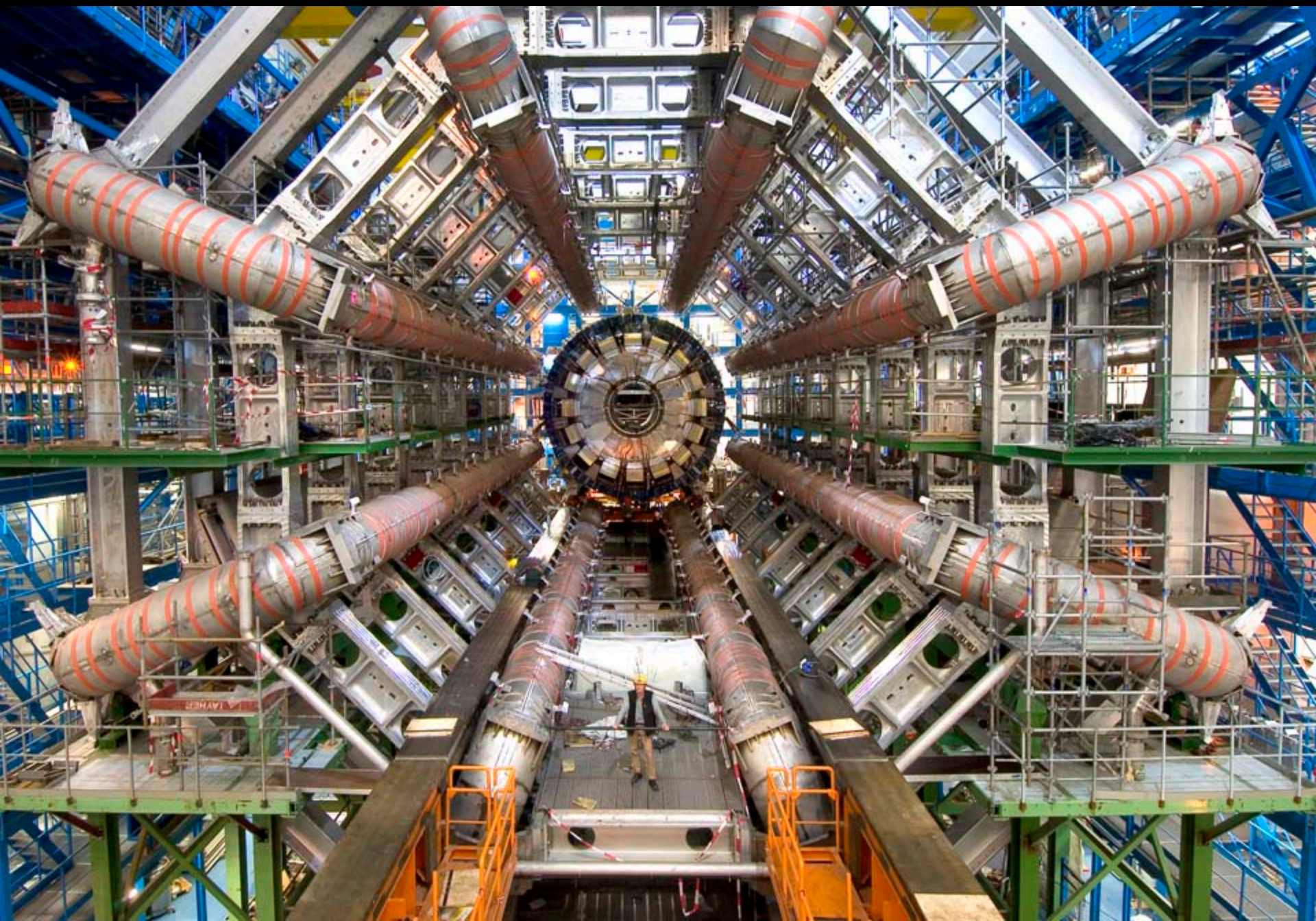
- ✱ pp-Kollisionen bei 14 TeV
- ✱ Collider Ring (vormals LEP) mit 27 km Umfang, 100m unterirdisch



Später: Ran an die Experimente #6!

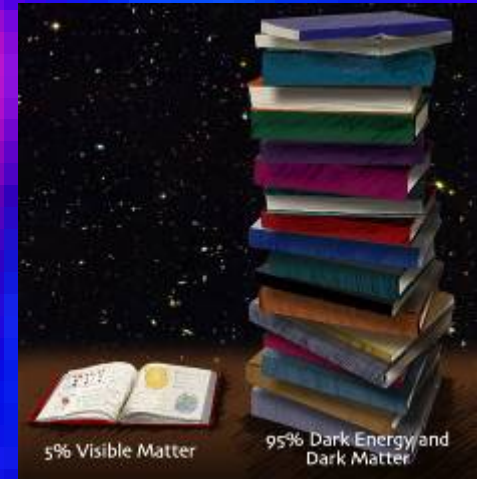
Beschleunige selber Teilchen zur Kollisionsenergie





Zusammenfassung

- Die „Kosmische Symphonie“ der Mikrowellenhintergrund Obertöne ergeben Form und Zusammensetzung des Universums
- Das Universum ist im Mittel flach
- Die Masse der uns bekannten atomaren Materie bildet weniger als 5% der Gesamtenergie des Universums
- Neutrinos erklären nur einen Bruchteil der 27% nichtatomaren „dunklen“ Materie im Weltall
- Es gibt Ideen, was der Rest ist
→ ATLAS / LHC Experiment suchen danach
- 68% der Gesamtenergie steckt in „dunkler Energie“, unverstanden, aber bestimmend für Zukunft des Weltalls
- *Kosmologie und Teilchenphysik, Quantenphysik und Mechanik sind eng verknüpft*



Literaturhinweise / Links

- 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/
 - 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/einsteins-kosmos/planck-mission-der-esa-neue-karte-der-hintergrundstrahlung/>
- The Cosmic Symphonie (Scientific American): <http://background.uchicago.edu/~whu/Papers/HuWhi04.pdf>
deutsch: Wayne Hu und Martin White: Der beschleunigte Kosmos,
Teil I: Die Symphonie der Schöpfung, Spektrum der Wissenschaft, Mai 2004
 - The Physics of Microwave Background Anisotropies, Wayne Hu, University of Chicago
<http://background.uchicago.edu/~whu/physics/physics.html>
- W. de Boer: Einführung in die Kosmologie (Hochschulniveau!)
www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/kosmo_bold.pdf
- WMAP Satellit: <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- PLANCK Satellit
 - www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck_overview
 - www.pro-physik.de/details/news/4515211/Planck-Ergebnisse_lassen_tief_blicken.html
 - www.sueddeutsche.de/wissen/daten-des-esa-satelliten-planck-babyfoto-des-kosmos-1.1630435
 - www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/esa-teleskop-planck-anomalien-geben-kosmologen-raetsel-auf-a-890224.html

Das Institut für Kern- und Teilchenphysik lädt ein zum

Schülerforschungstag in der Teilchenphysik

International Masterclass 2019

Wann?

Freitag, 7. April 2019, 9:00 - 17:00

Wo?

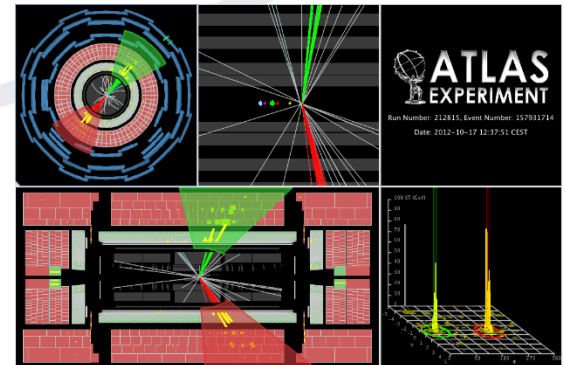
TU Dresden, Recknagel-Bau, Hörsaal C213

Was?

Selber mit echten Daten vom CERN forschen

Anmeldung und weitere Infos:

<https://indico.cern.ch/event/IMC19-TUD>



Netzwerk www.teilchenwelt.de

- Ein Netzwerk zwischen
 - WissenschaftlerInnen
 - Jugendlichen (15-19 Jahre)
 - Lehrkräften (an Schulen, Schülerlaboren, Schülerforschungszentren, Museen etc.)
 - In direktem Kontakt zum CERN
- Kommt auch an Eure Schule, egal wo!
- Messungen mit echten Daten der Teilchenphysik und Astroteilchenphysik
- Gelegenheit zu vertiefter Mitarbeit im Netzwerk bis hin zu CERN Aufenthalten
- Authentische Erfahrungen mit Forschung

