

# 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.**"

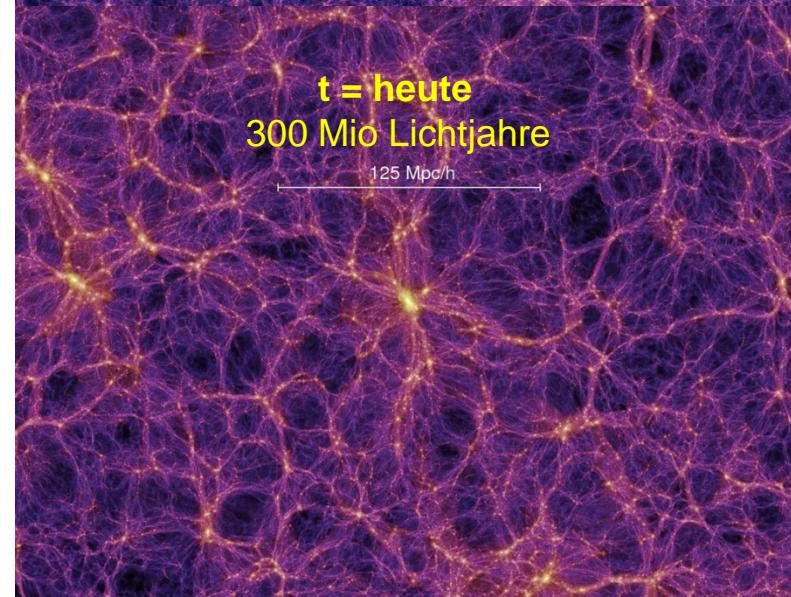
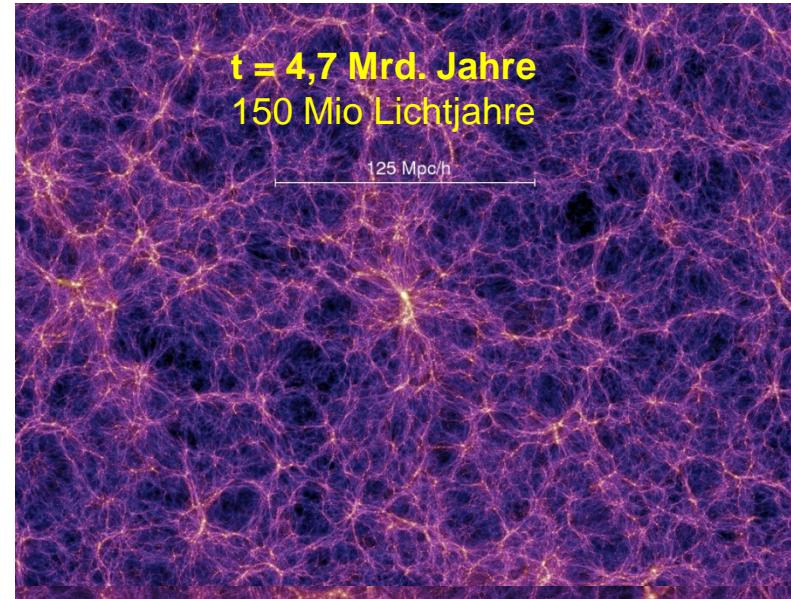


Illustration in „*L'Atmosphère. Météorologie populaire*“ (Paris, 1888):  
„Un missionnaire du moyen âge raconte qu'il avait trouvé le point où le ciel et la terre se touchent ...“

# Strukturbildung im Universum

- MPI für Astrophysik München, Millennium Simulation

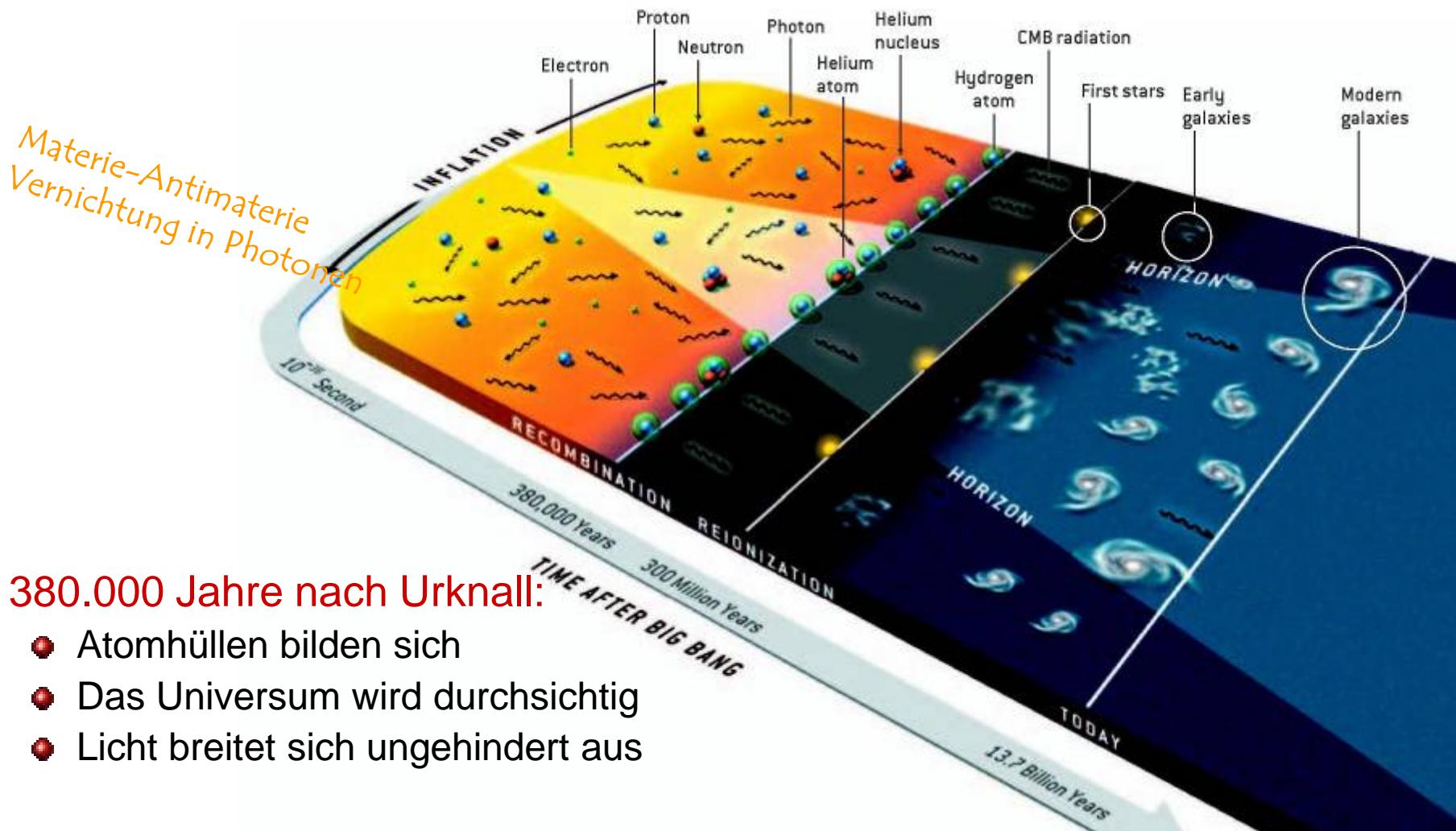
Video: <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>



# 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  $T > 5000 \text{ K} \rightarrow$  Ionisation von H-Atomen durch Photonen

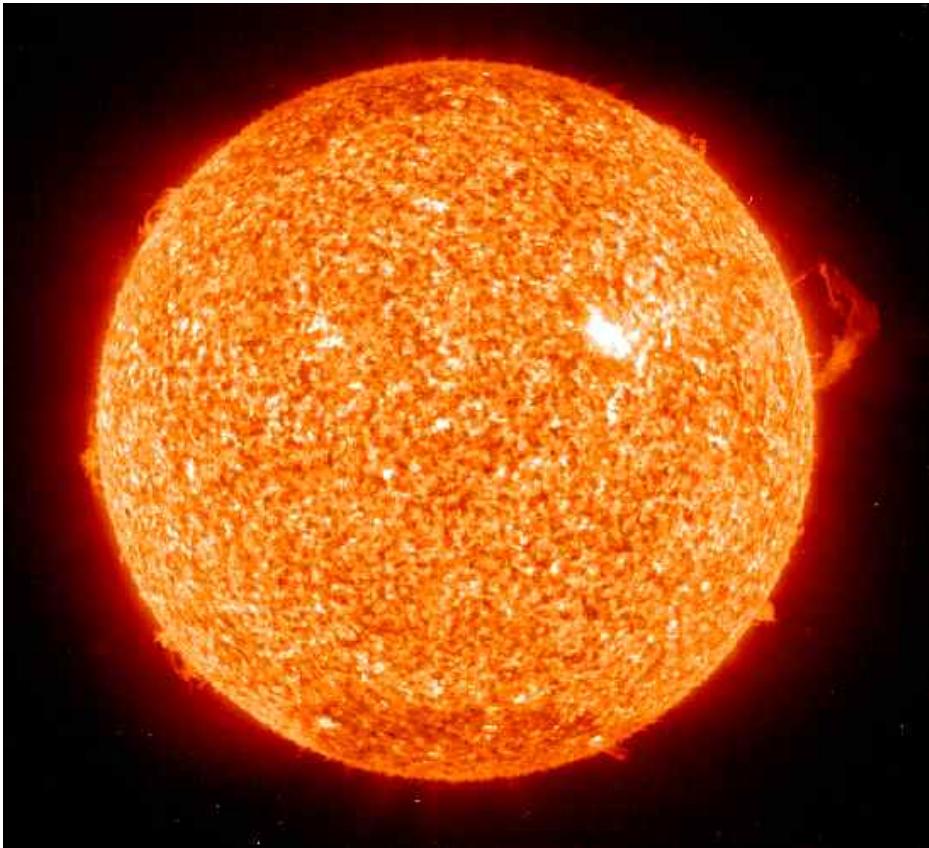


## ● 380.000 Jahre nach Urknall:

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

# Analogie: Sonne

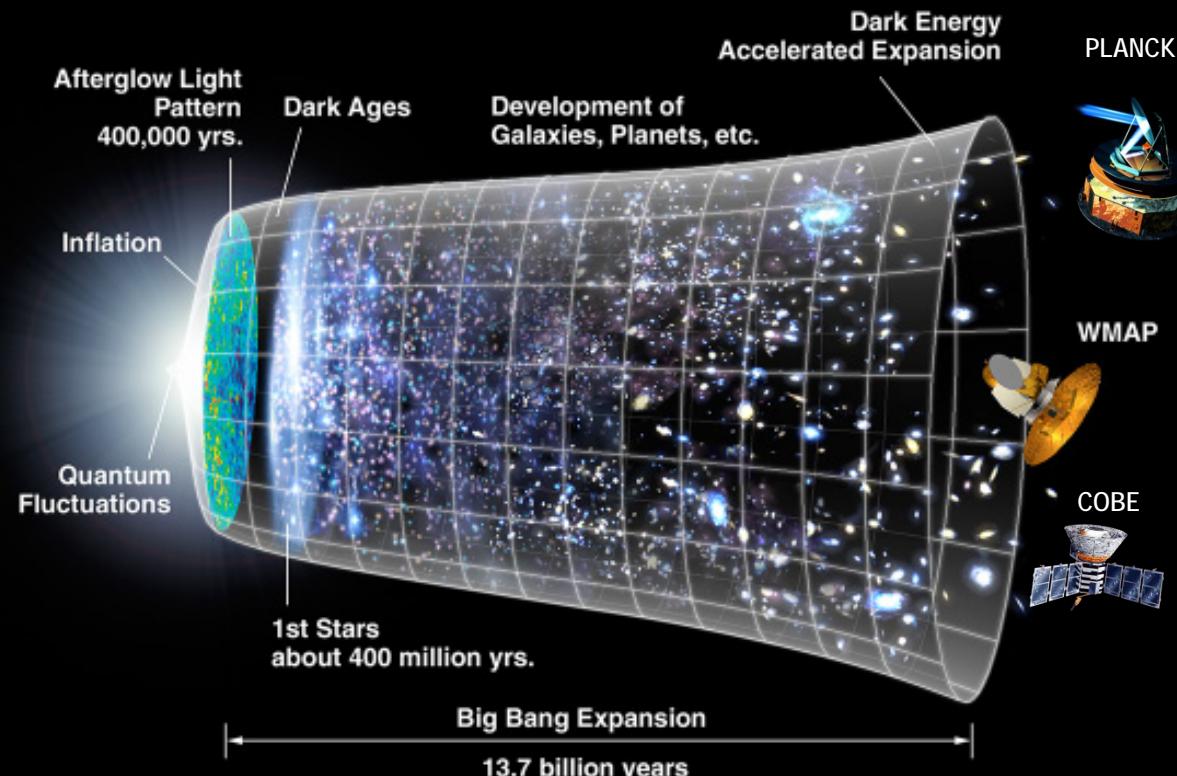
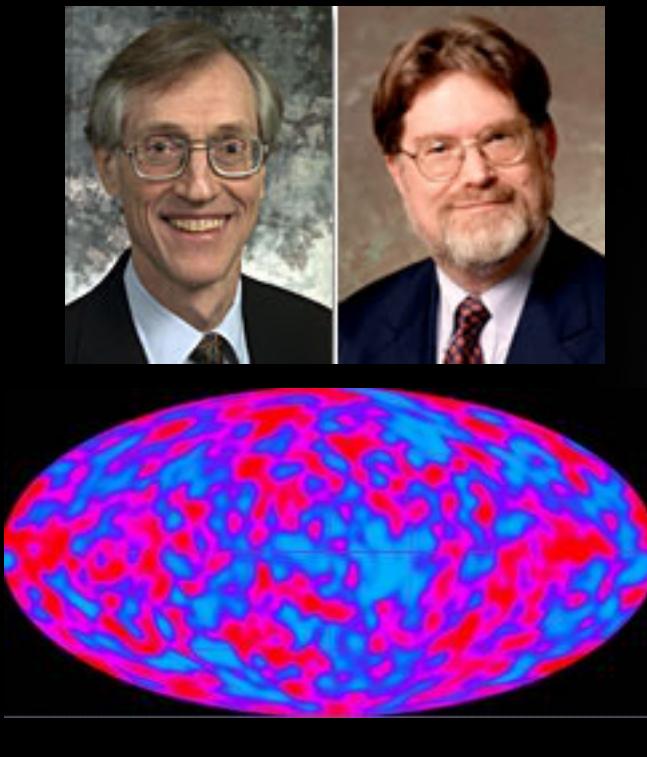
- Gasball aus H<sub>2</sub> und He, normalerweise durchsichtig



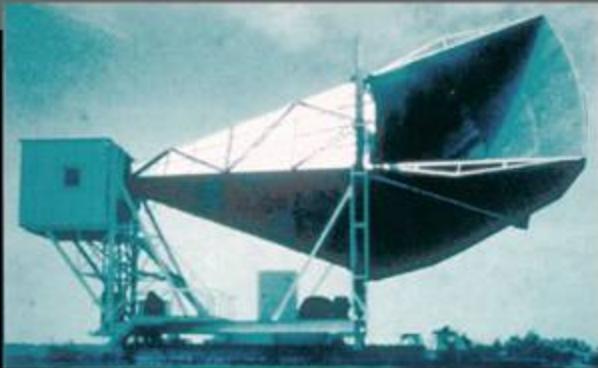
- Innen: T > 10.000.000 K
  - Ionisation der Atome
  - freie Elektronen können Licht jeder Energie absorbieren*
  - Photonen werden dauernd absorbiert und wieder emittiert
  - Erst nach ~100.000 Jahren*** Ankunft nahe der Oberfläche
- Oberfläche: T = 5000 K
  - Elektronen an Atome gebunden
  - Können 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: +- 0,0002 K
- Physik Nobelpreis 2006: Entdeckung dieser Schwankungen
  - *John C. Mather und George Smoot (COBE Satellit)*

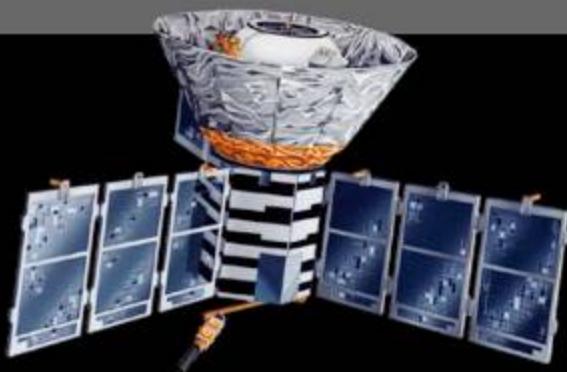


1965

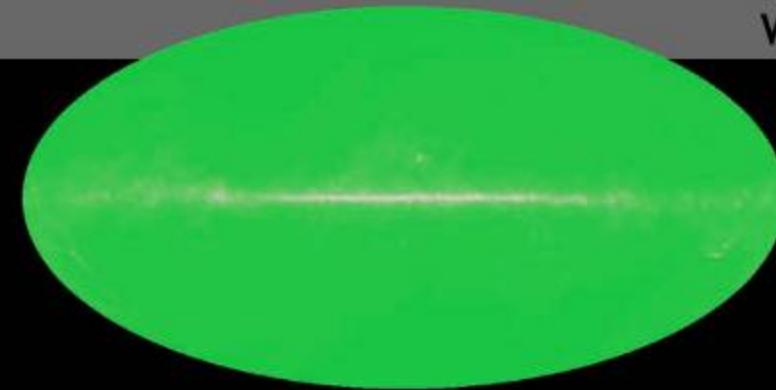


Penzias and  
Wilson

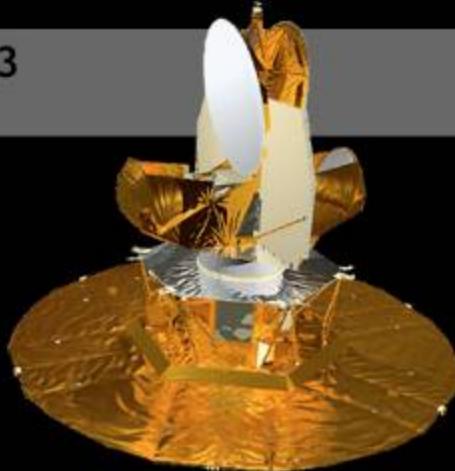
1992



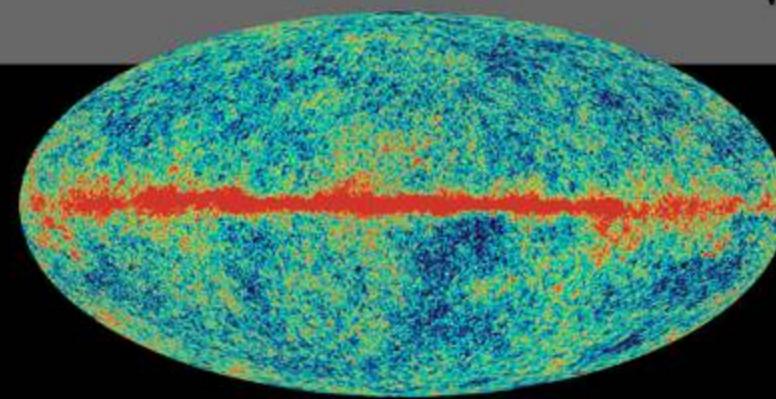
COBE



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

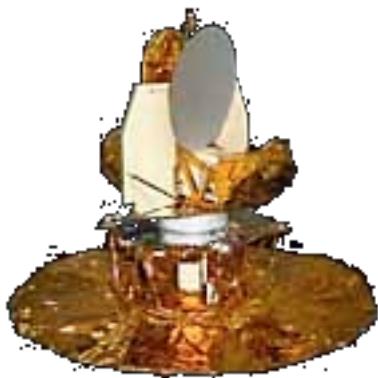
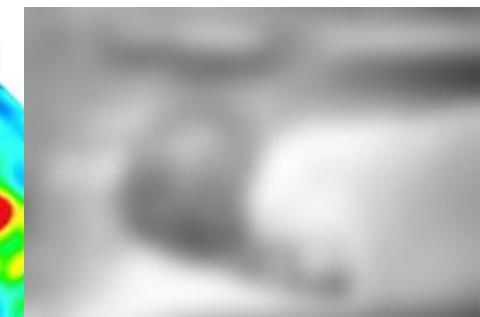
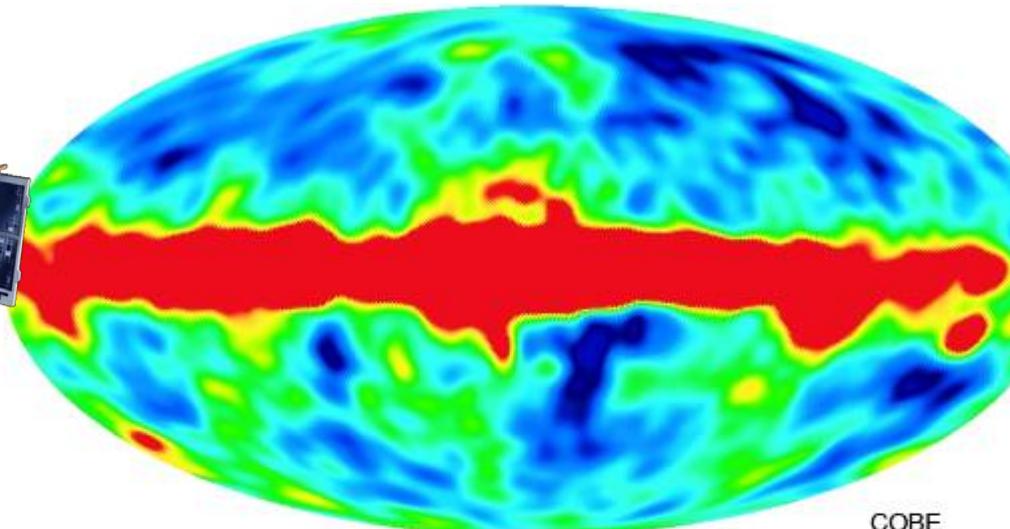
**Time Since the Big Bang**



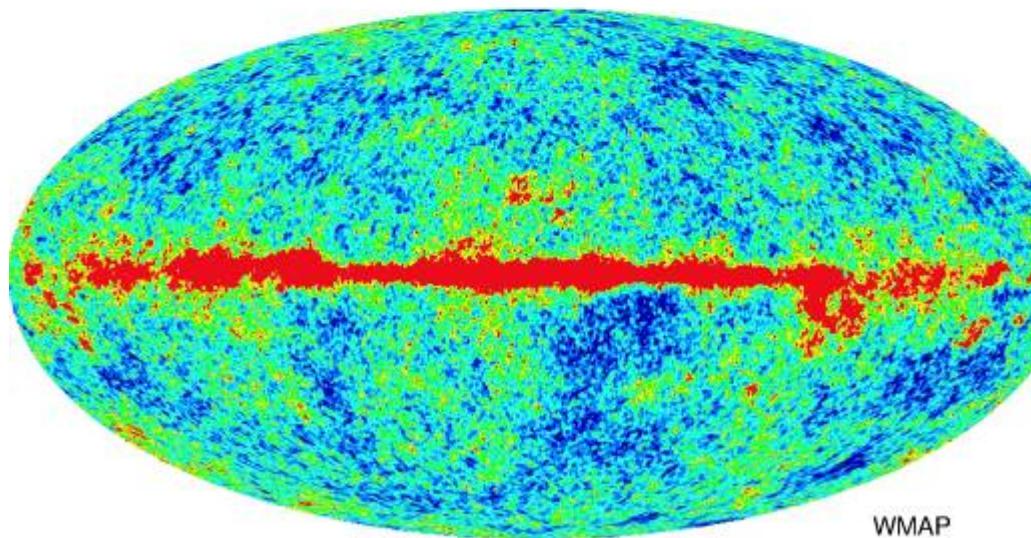
# Mikrowellen als Babyfoto



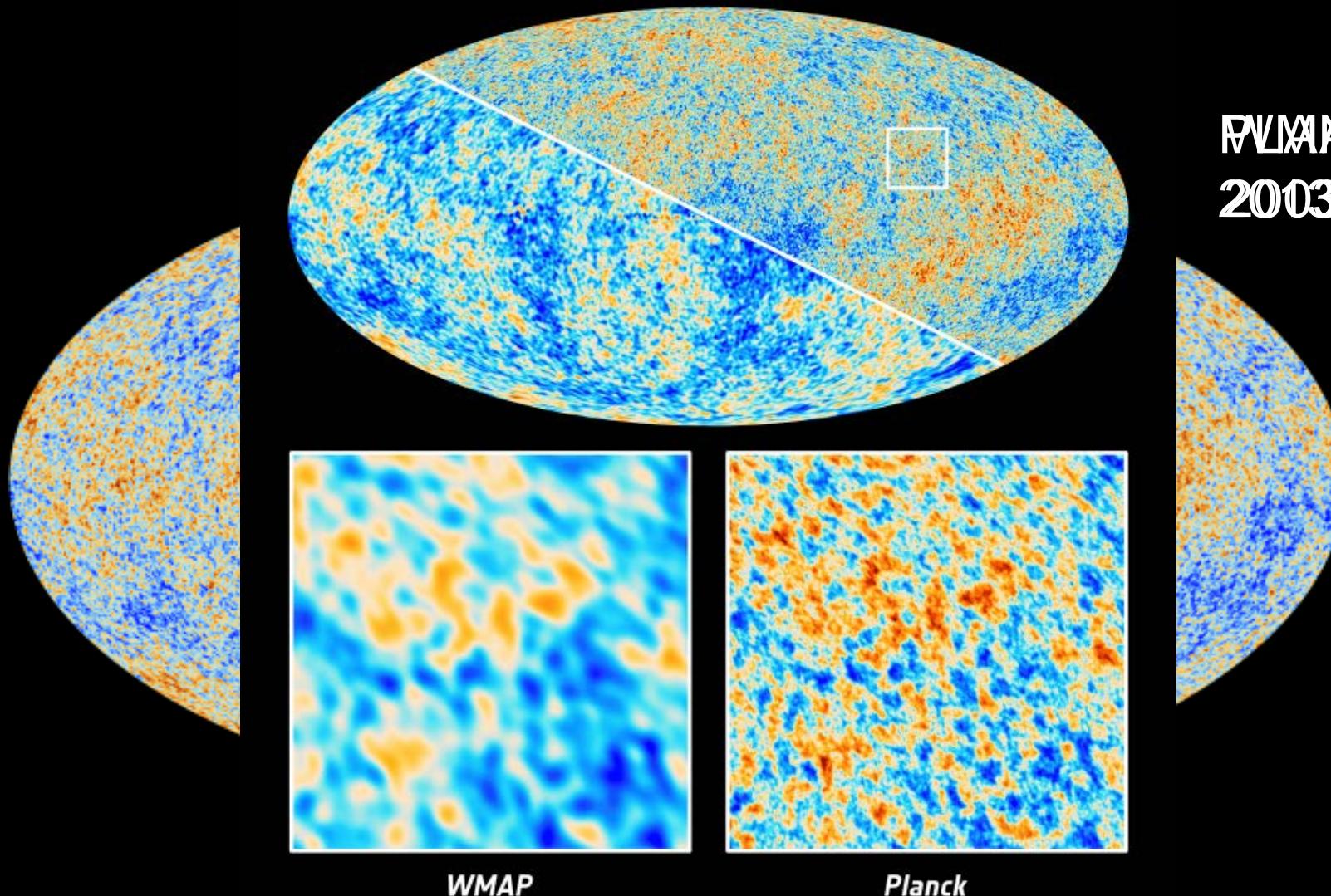
Cobe 1994



WMAP 2003



# Nach Abzug des Vordergrunds unserer Milchstraße

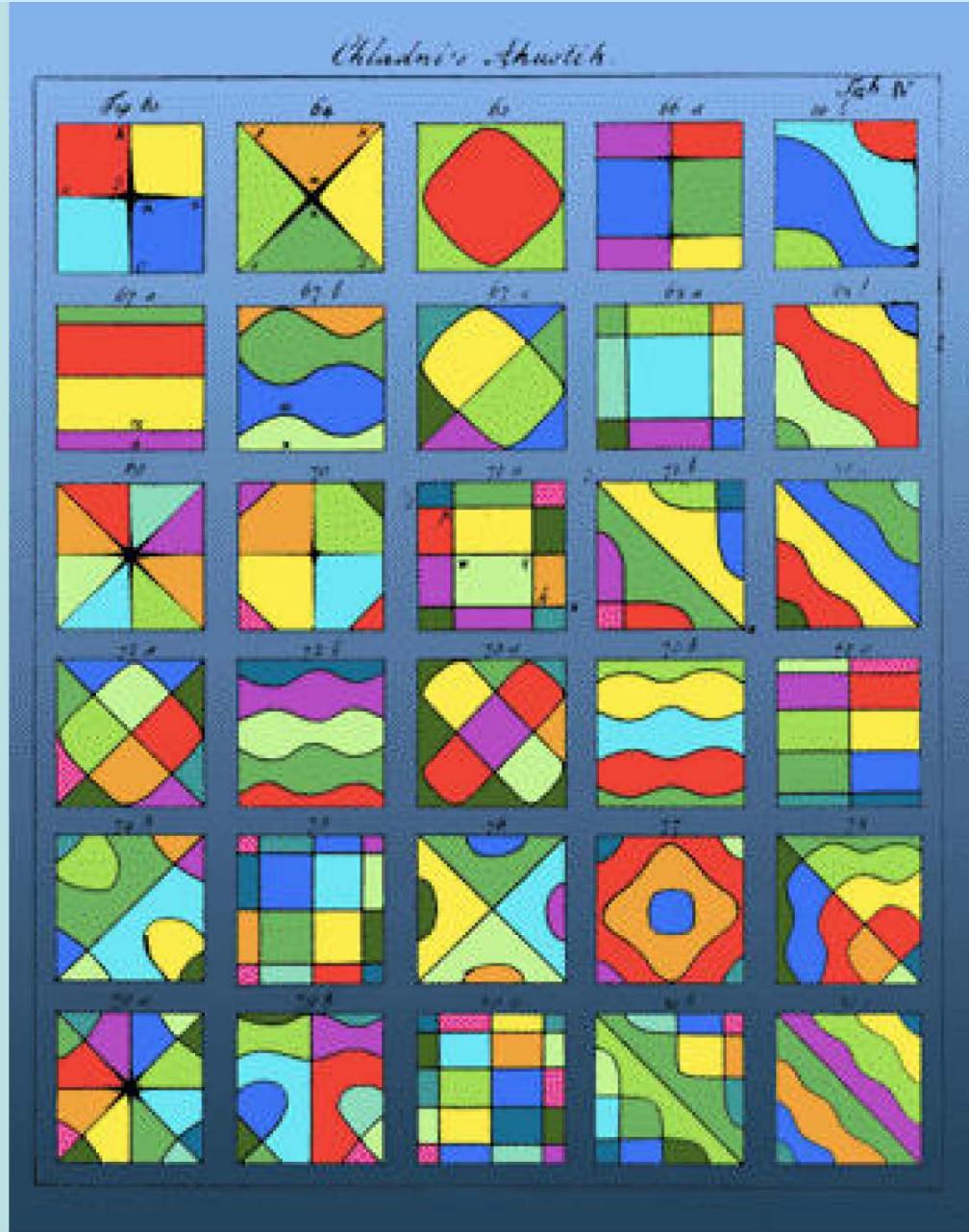


PLANCK  
2013

- 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**

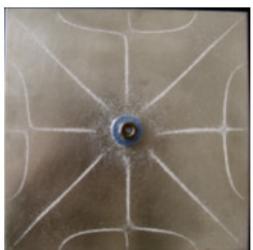
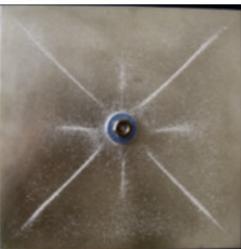
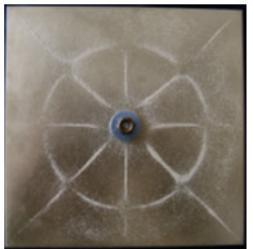
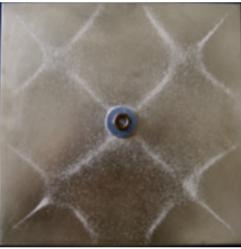
# Akustische Analogie I: Chladni-Figuren

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

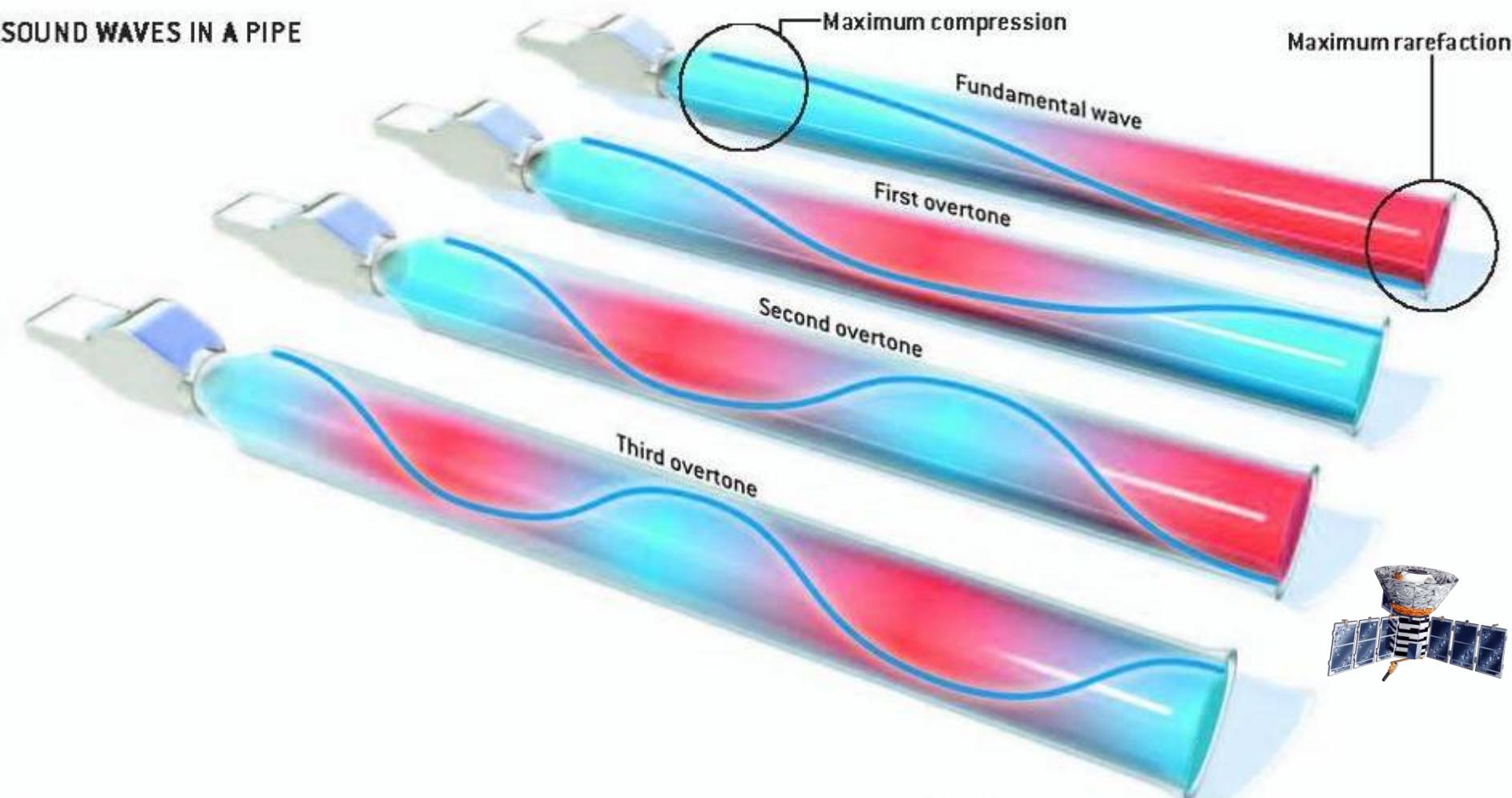


# Akustische Analogie II: Musikinstrumente

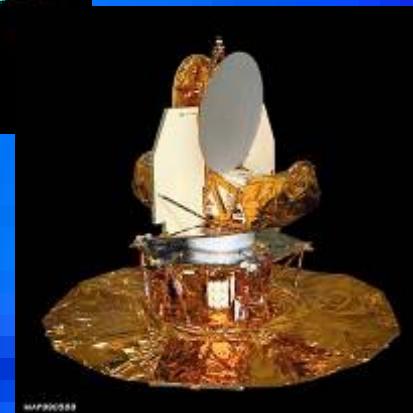
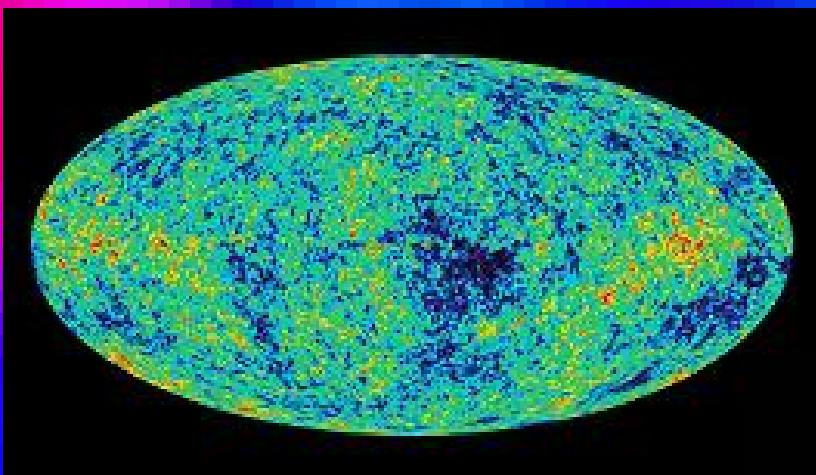
THE SOUND SPECTRUM of the early universe had overtones much like a musical instrument's. If you blow into a pipe, the sound corresponds to a wave with maximum air compression (*blue*) at the mouthpiece and maximum rarefaction (*red*) at the end

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



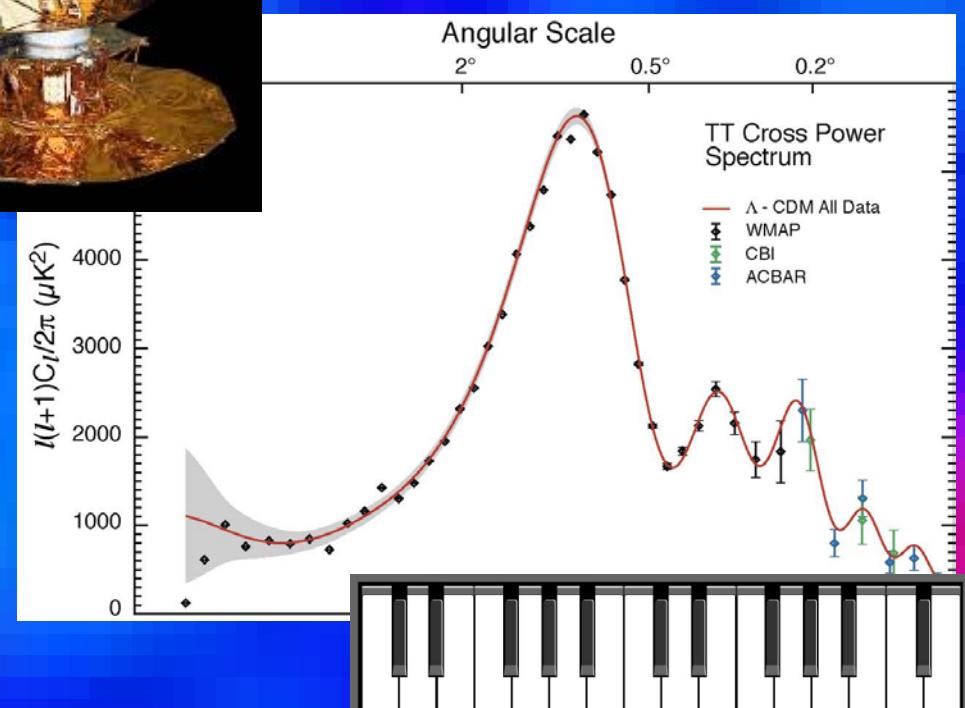
# Die Obertöne des Kosmischen Klangs



# Astrophysiker erkennen an den Obertönen:

- Zusammensetzung
  - „Form“ des Universums

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



# Vergleich der Akustischen Wellen

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

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

# Schallwellen vermessen Geometrie

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

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

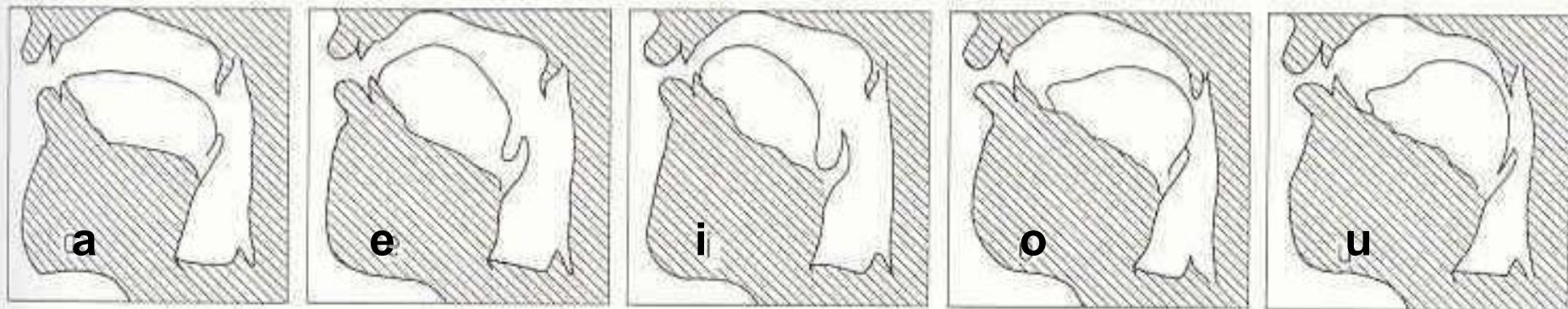


Abb. 25.13 Form der Mundhöhle bei den fünf einfachen Vokalen

Universum: Kenne  $v$  und  $f$  → bestimme  $\lambda$  (Maßstab)

# Später: Ran an die Experimente #2!

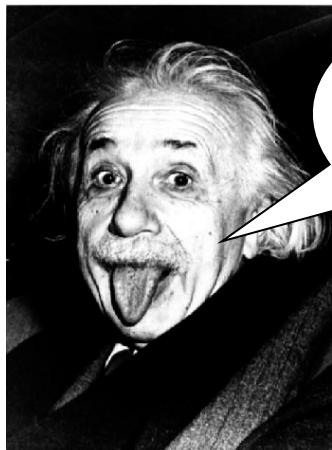
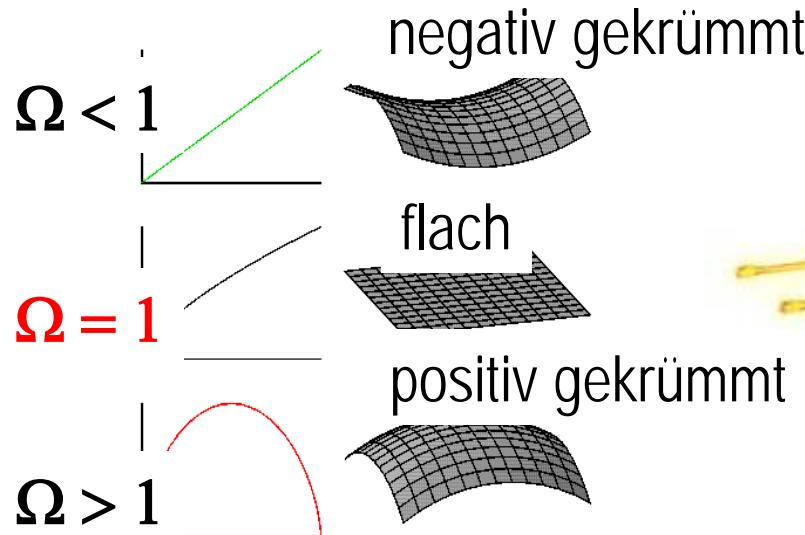
Zum Selber Probieren: \*wenig\* Helium aus Ballon einatmen  
!! Niemals direkt aus der Flasche!!



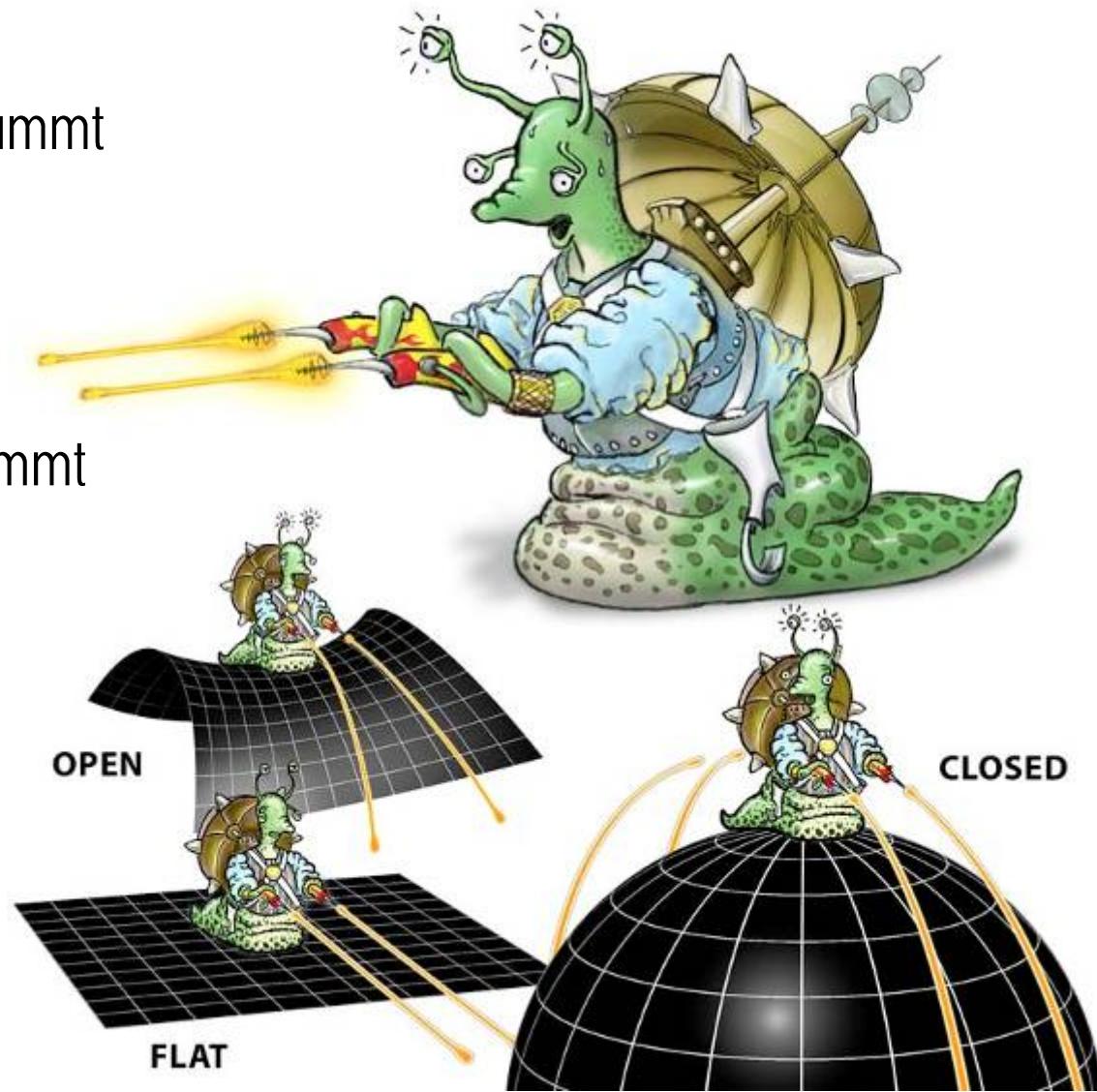
# Geometrie der Raumkrümmung

erlaubt Rückschluss auf gesamten Energieinhalt ( Masseninhalt)  $\Omega$

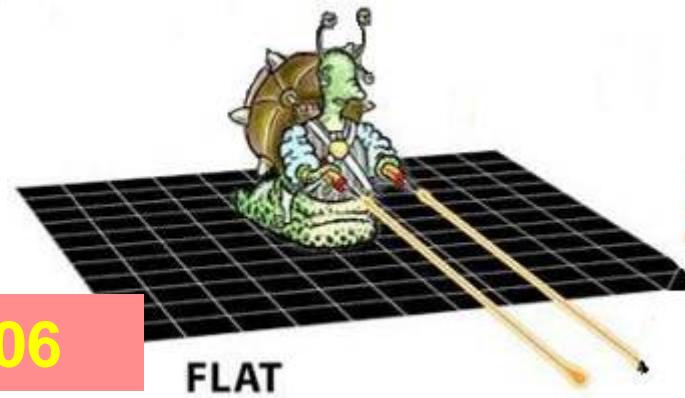
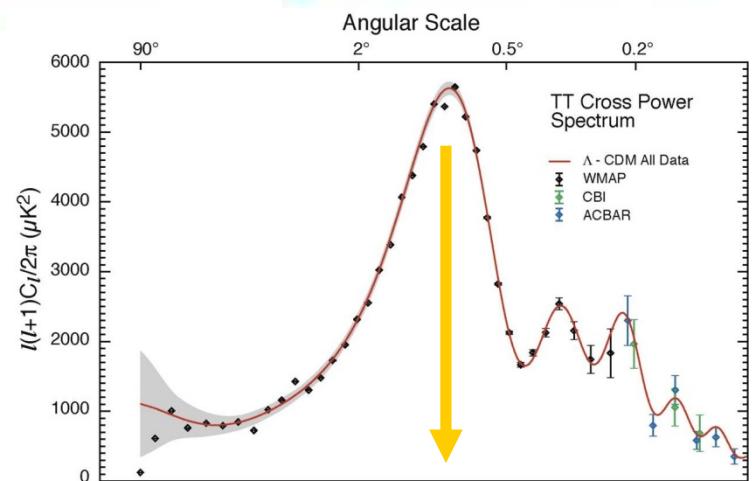
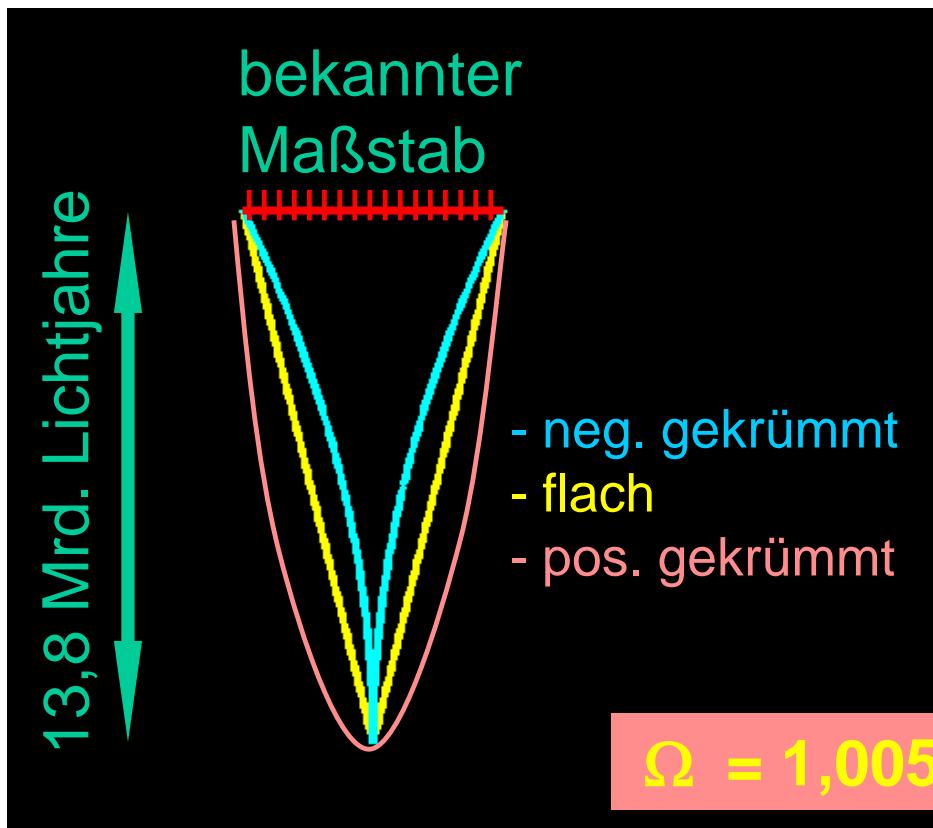
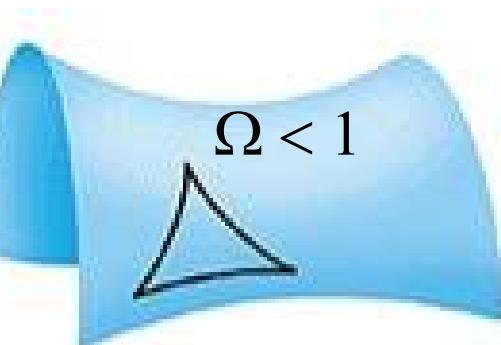
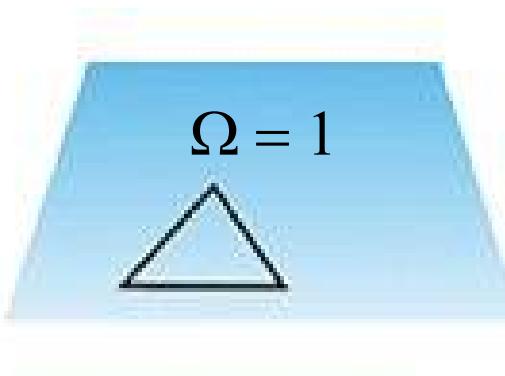
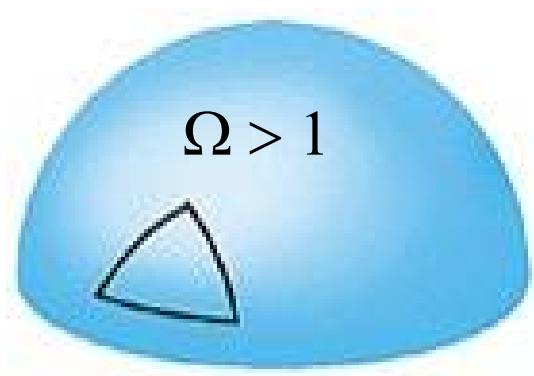
$$\Omega = M / M_{\text{flach}}$$



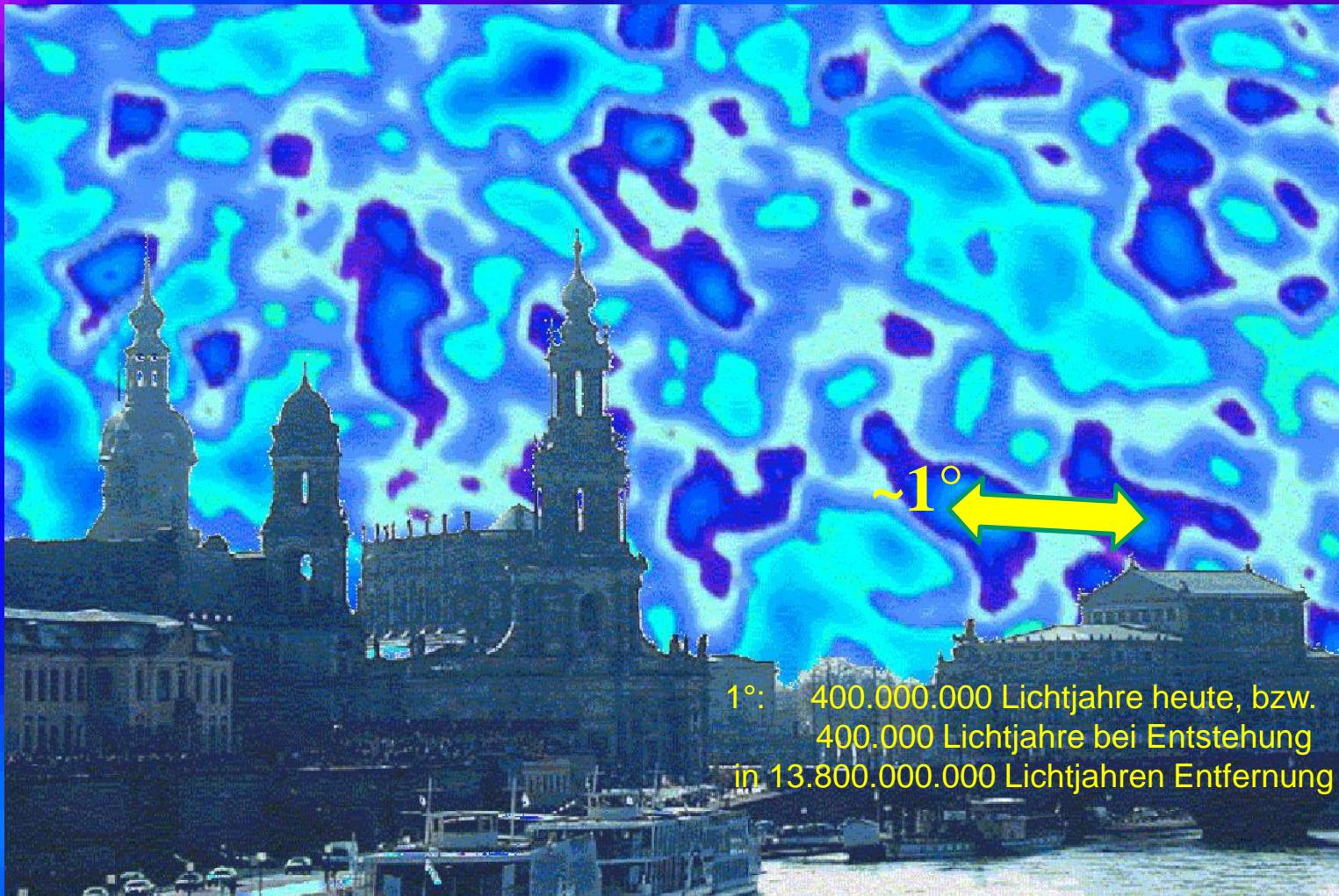
allgemeine Relativitätstheorie



# Geometrie = „Form“ des Universums



# Der Grundton über Dresden



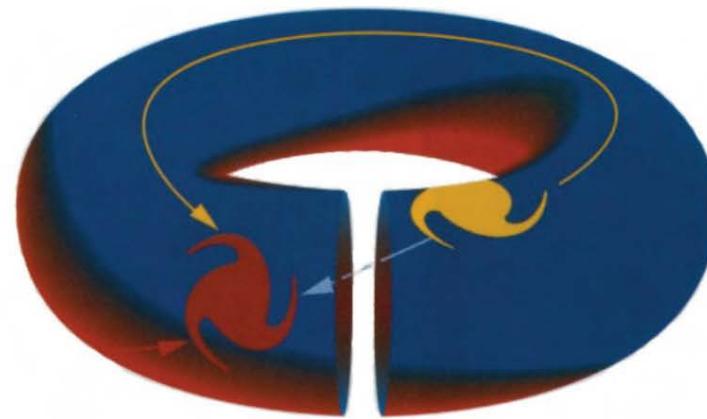
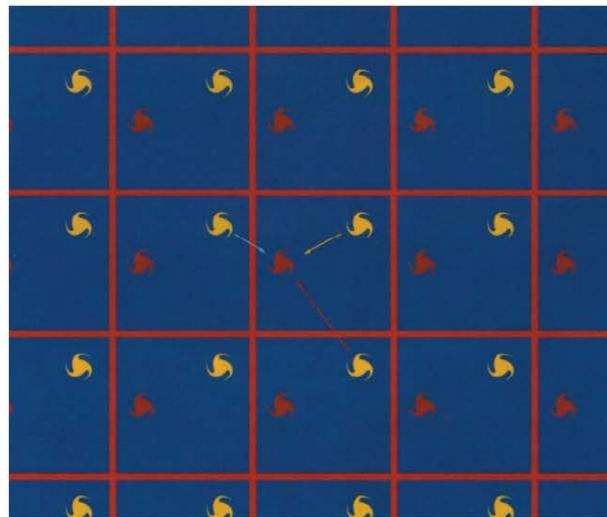
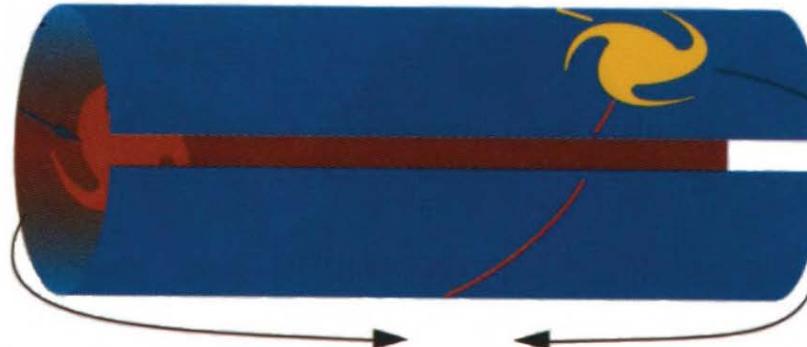
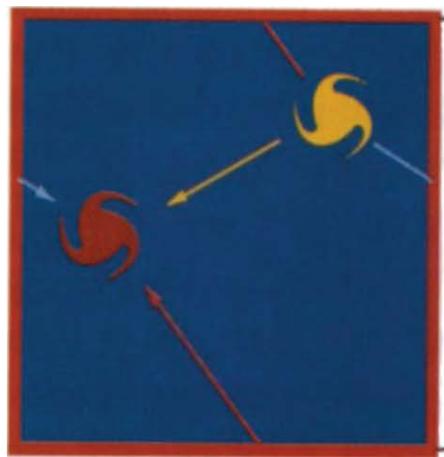
Live Übertragung des Klangs über „kosmischen Mikrowellen-Rundfunk“,  
hörbar gemacht durch Transposition um 50 Oktaven nach oben:



[www.astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA\\_web/unit05/unit5.html](http://www.astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/unit05/unit5.html)

# *Das Universum als Spiegelsaal?*

- Flach:= Parallelle 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 $\Omega$

### • atomare Materie ( $p, n, e$ ): $\Omega_B$

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

-- dämpft den ersten „Oberton“

-- verstärkt den zweiten „Oberton“

### • nichtatomare „dunkle“ Materie ( $\nu, \dots$ ): $\Omega_{DM}$

Ungebundene Elementarteilchen, schwach wechselwirkend

-- verstärkten den zweiten „Oberton“

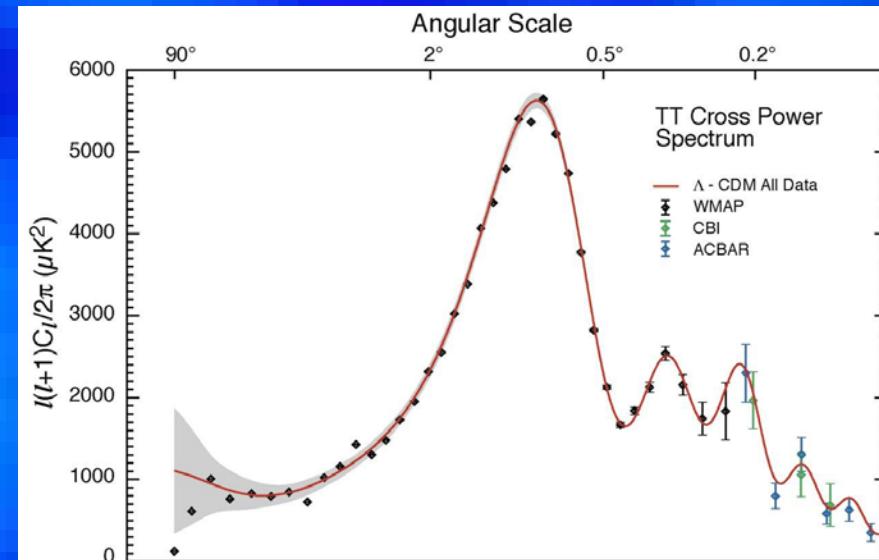
### • „dunkle“ Energie: $\Omega_V$

„kosmologische Konstante“

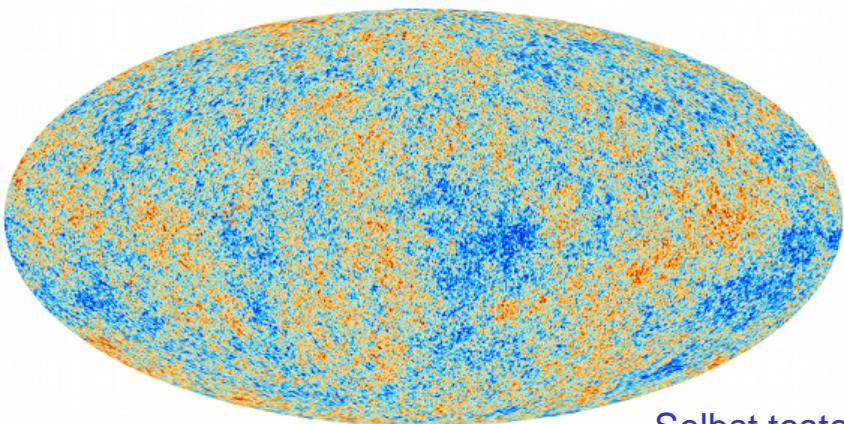
„Vakuumenergie“

unverdünbar

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

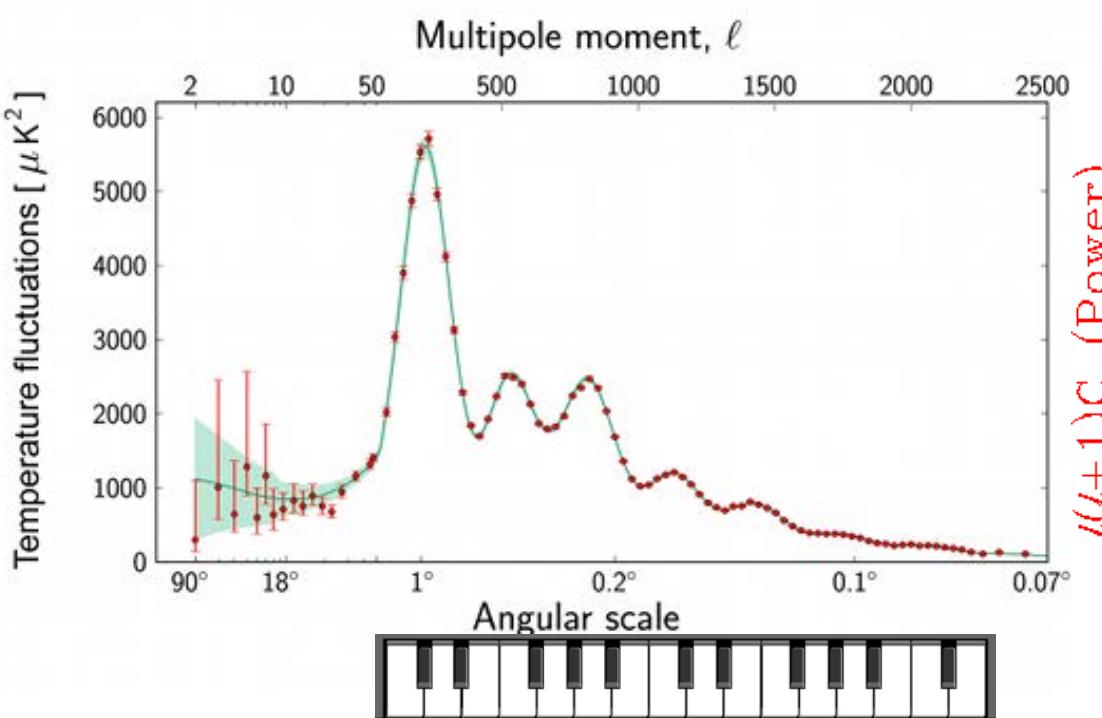


# Ergebnis Planck

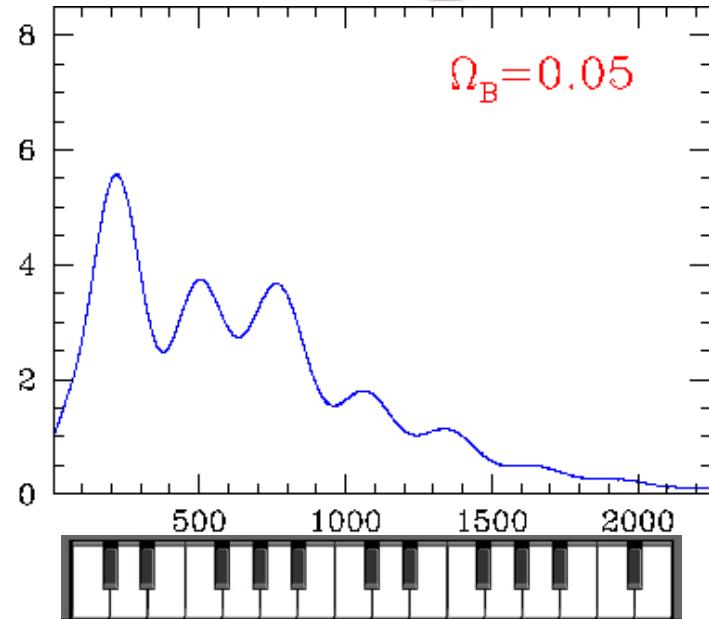


- 5% atomare Materie:  $\Omega_B = 0,05$
- 27% nichtatom. Materie:  $\Omega_{DM} = 0,27$
- 68% „dunkle Energie“:  $\Omega_V = 0,68$
- insgesamt flach:  $\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_V = 1,00$

Selbst testen wie sich der Klang ändern würde:  
[http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool](http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool)  
<http://map.gsfc.nasa.gov/resources/edresources1.html>

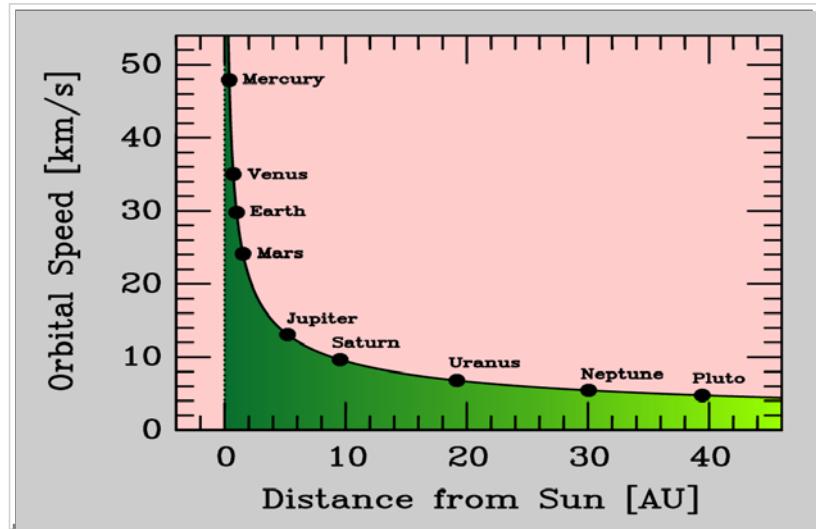
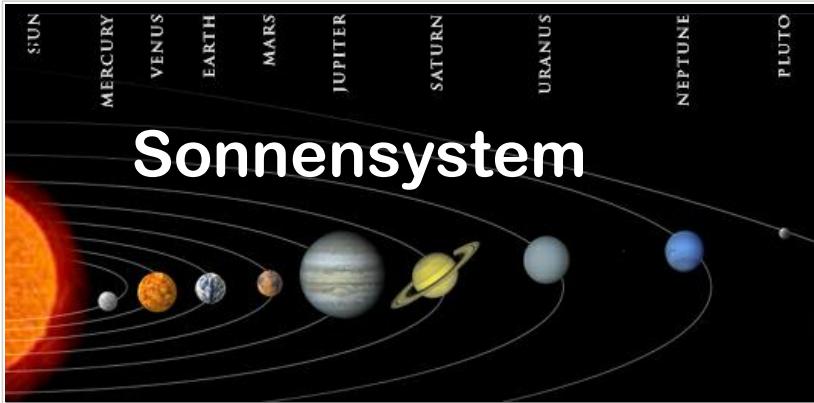


$$\ell(\ell+1)C_\ell \text{ (Power)}$$

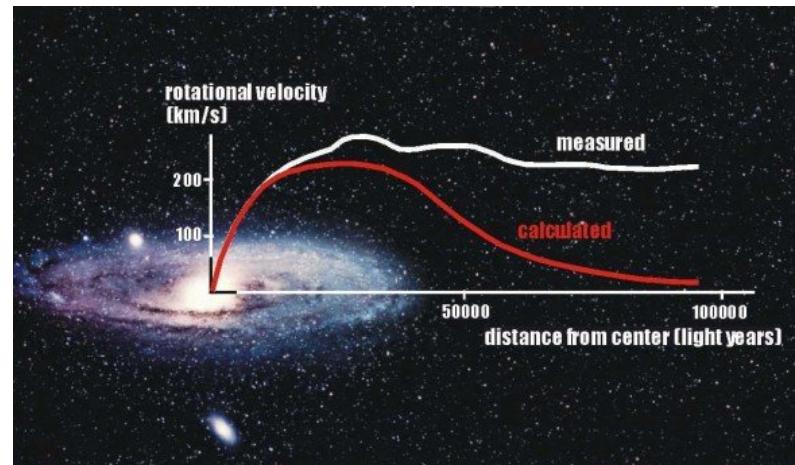


# Dunkle Materie im Kosmos

< - > Rotationskurven von Galaxien



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

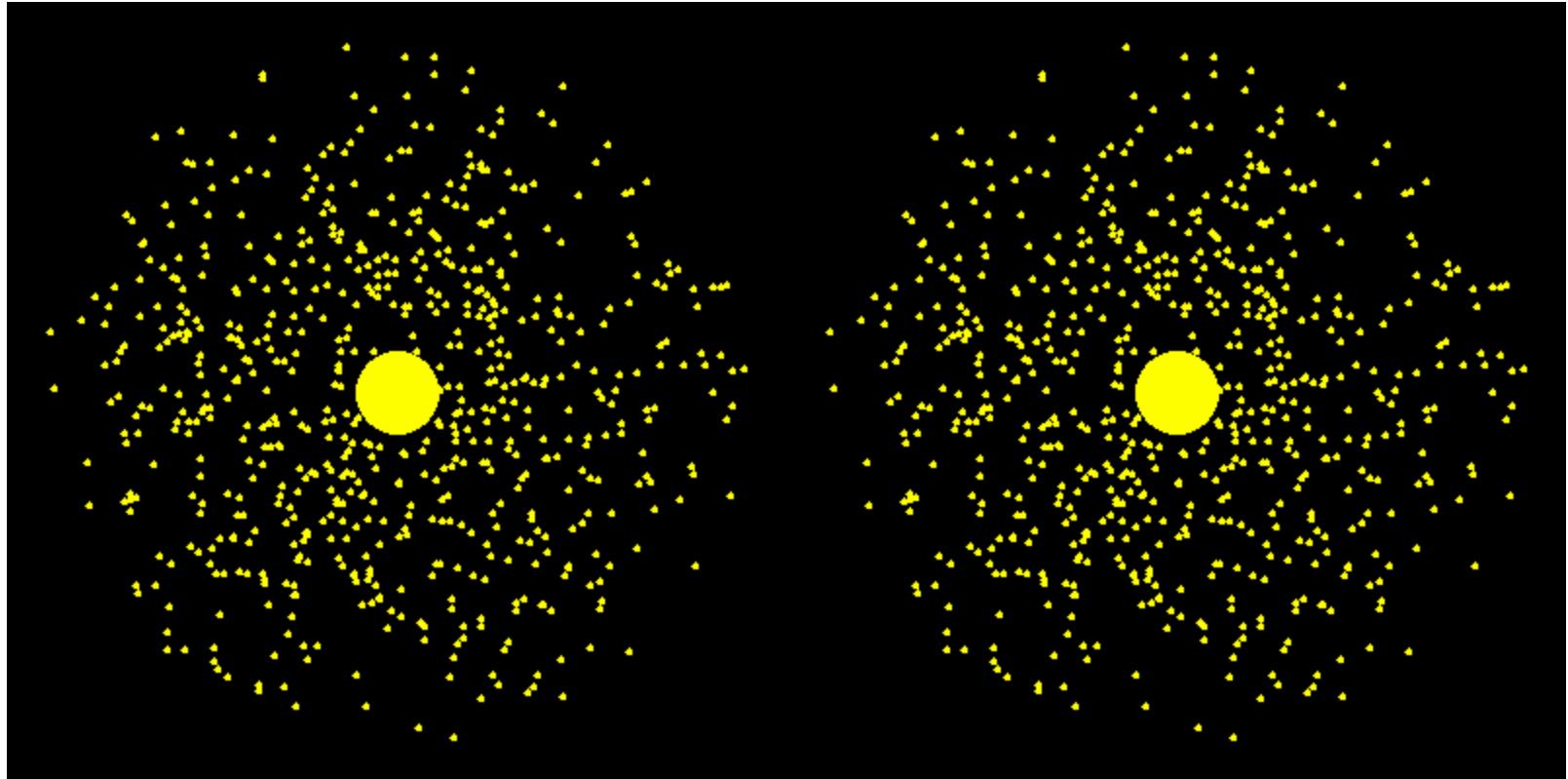


- Galaxien:  $1/\sqrt{r}$  wird nie erreicht  
-> großer Halo dunkler Materie

Links: ohne

dunkler Materie

Rechts: mit

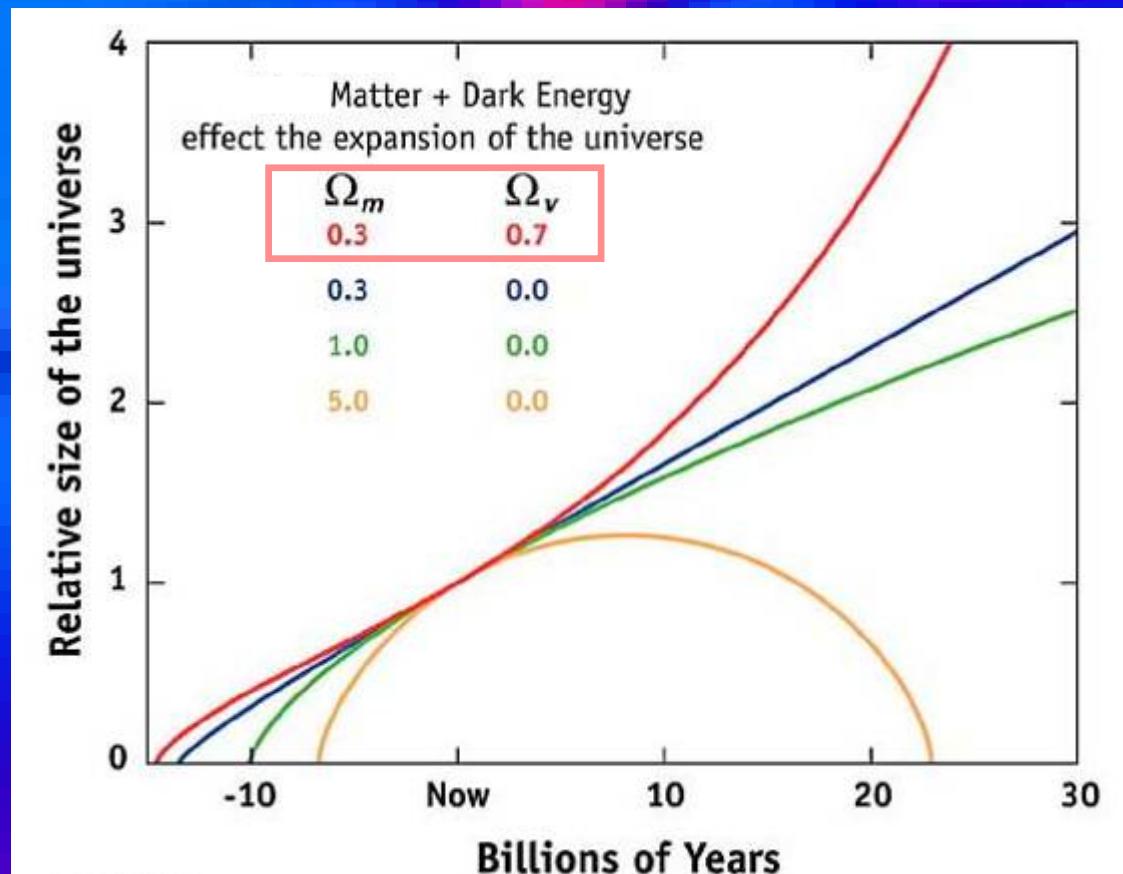


<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/darkmatter.htm>

# Zwischenbilanz

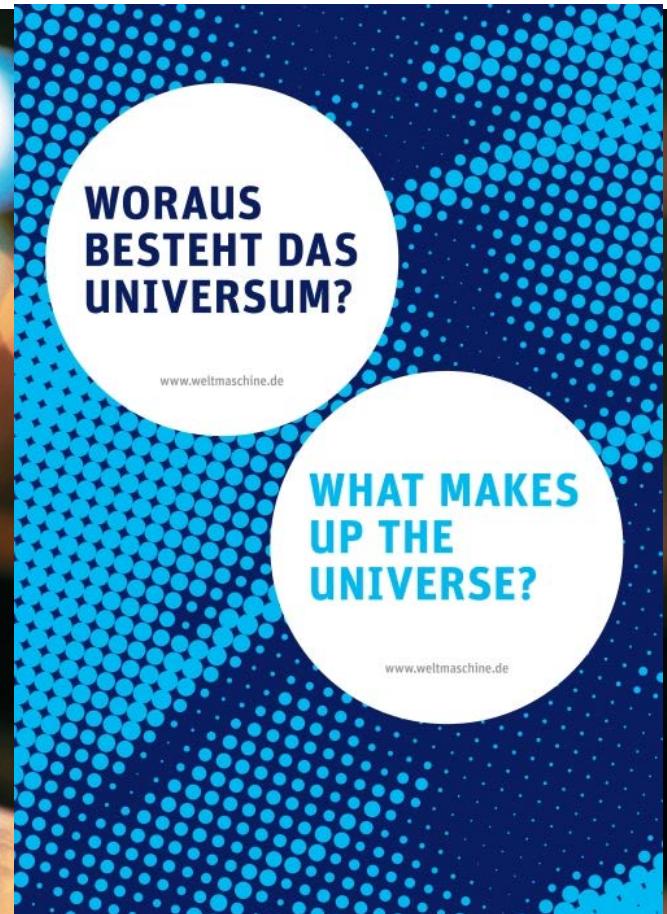
- Nur 32% des Universums ist Materie  
 $\Omega_m = \Omega_B + \Omega_{DM} = 0,32$
- 5/6 davon ist nichtatomare, „dunkle“, Materie möglicherweise uns völlig unbekannt
- 68% ist keine Materie, sondern „dunkle Energie“ und treibt das Universum auseinander

- 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?



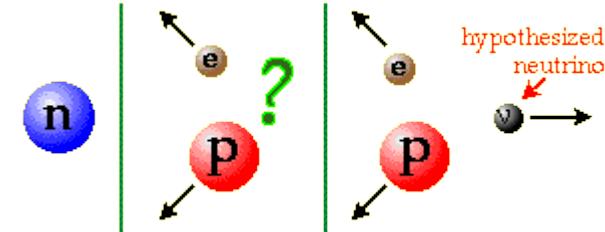
Quelle: <https://room.eu.com/article/cosmic-cocktails-and-galactic-moonshine>

# Sind Neutrinos die „Dunkle Materie“?



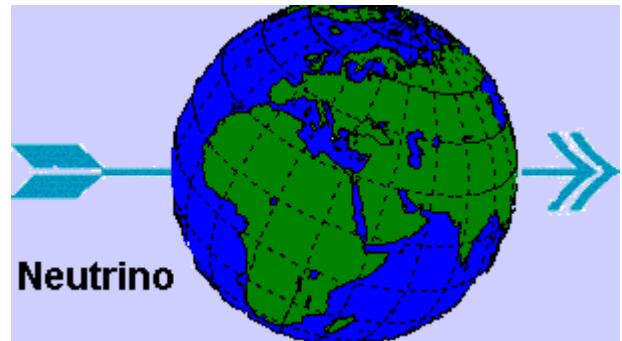
1930: theoretische Einführung  
(Pauli)

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 / m<sup>3</sup> im Vergleich zu 0,2 Protonen / m<sup>3</sup>**
- → wesentlicher Beitrag zu zu Dunkler Materie,  
selbst wenn 1.000.000.000 Mal leichter als Protonen!!!



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

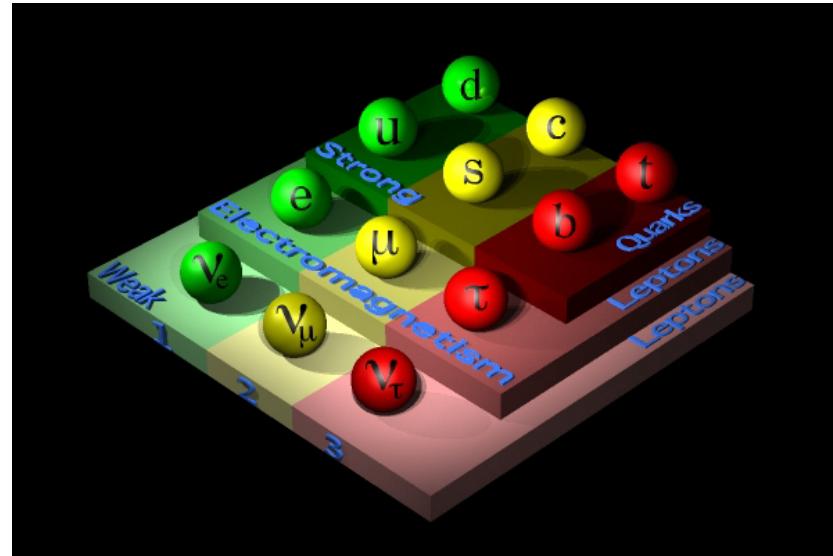
# Pendel als Waage für Neutrinos

## Quantenphysik:

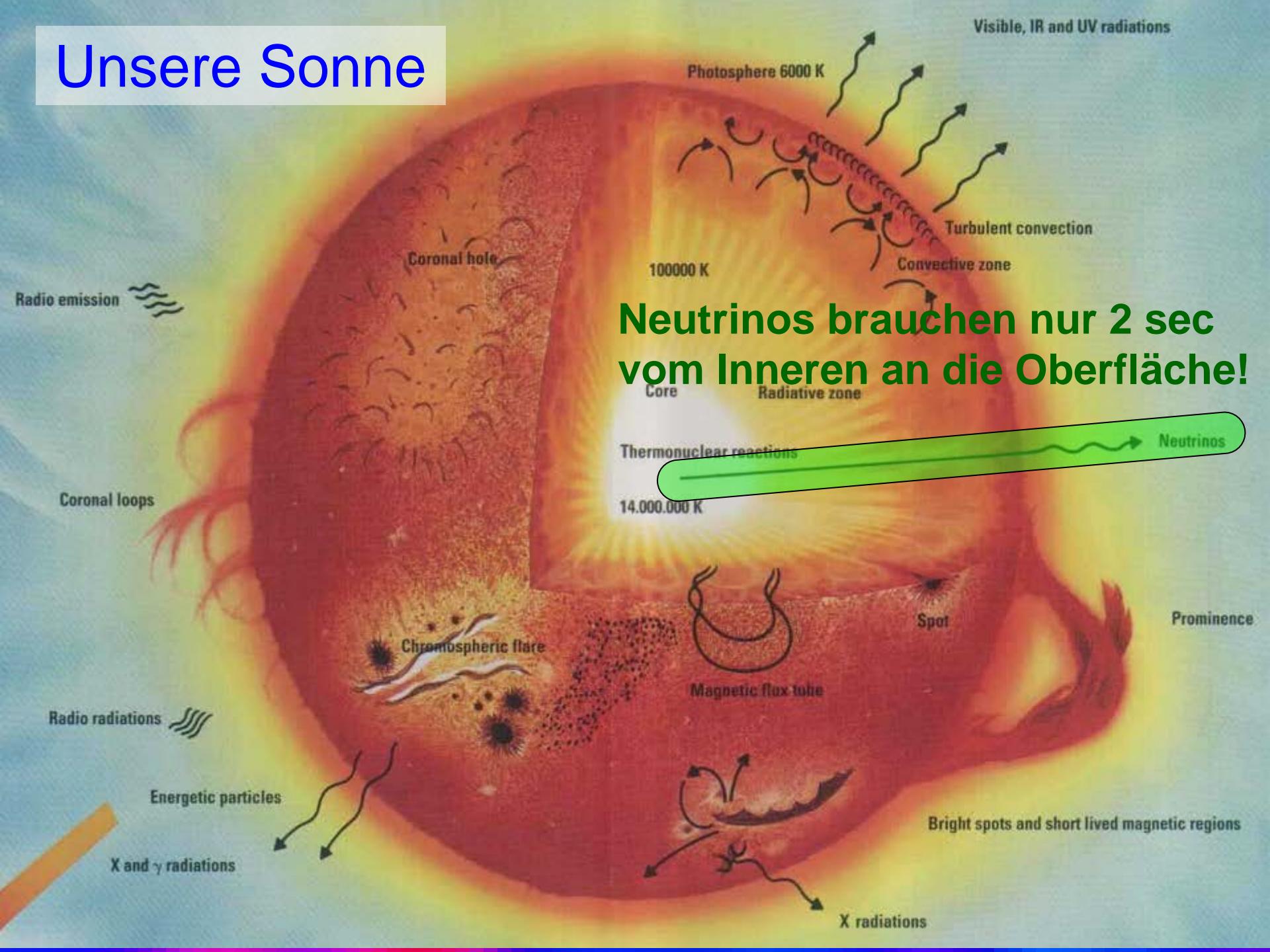
Es gibt 3 Sorten von Neutrinos:  $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$   
„Pendel“)

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

- kleiner Energieunterschied  $\Delta E^2$ ,  
abhängig von Kopplung
  - Pendel: Frequenzunterschied  $\Delta f^2$
  - Neutrinos: Massenunterschied  $\Delta m^2$
- 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  $\Delta m^2$
  - Analog zu akustischen Schwebungen bei kleinen  $\Delta f^2$



# Unsere Sonne



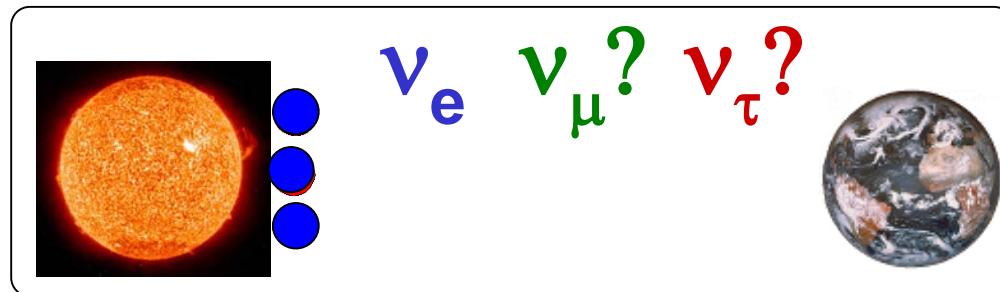
**Neutrinos brauchen nur 2 sec vom Inneren an die Oberfläche!**

# Neutrinos aus der Sonne

- Kernfusion in der Sonne:

$4p \rightarrow ^4He + 2e^+ + 2\nu_e + 27 \text{ MeV Energie}$   
auf der Erde:  $10^{11}$  solare Neutrinos /  $\text{cm}^2$  und Sekunde

- Produktion:  
100% als  
„ $\nu_e$ -Pendel“

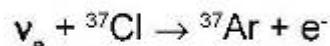


- Davis (1970 -2000):  $\nu_e$  Nachweis auf der Erde  
Ergebnis: nur 30% der erwarteten  $\nu_e$

Ray Davis

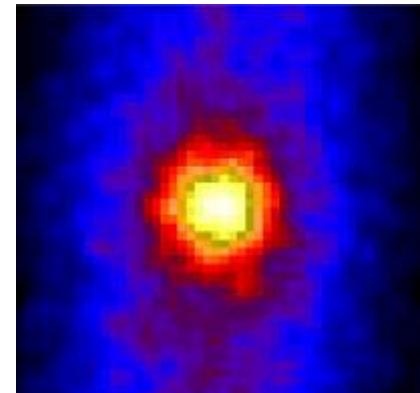
Nobelpreis 2002

380000 l  
Perchlorethylen  
in der Homestake- Mine

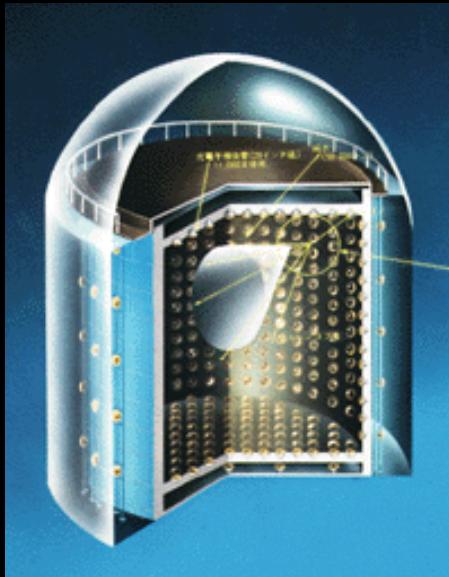


Ausspülen des  ${}^{37}\text{Ar}$  (0.5 Atome/Tag)

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

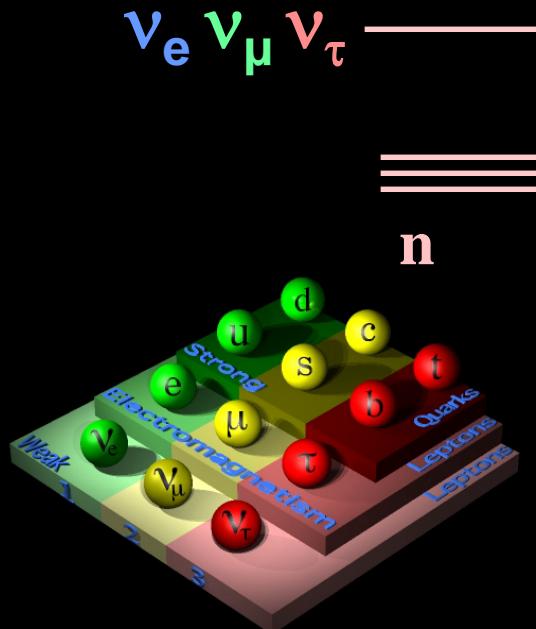


# Der „Überlichtknall“ der Neutrinos

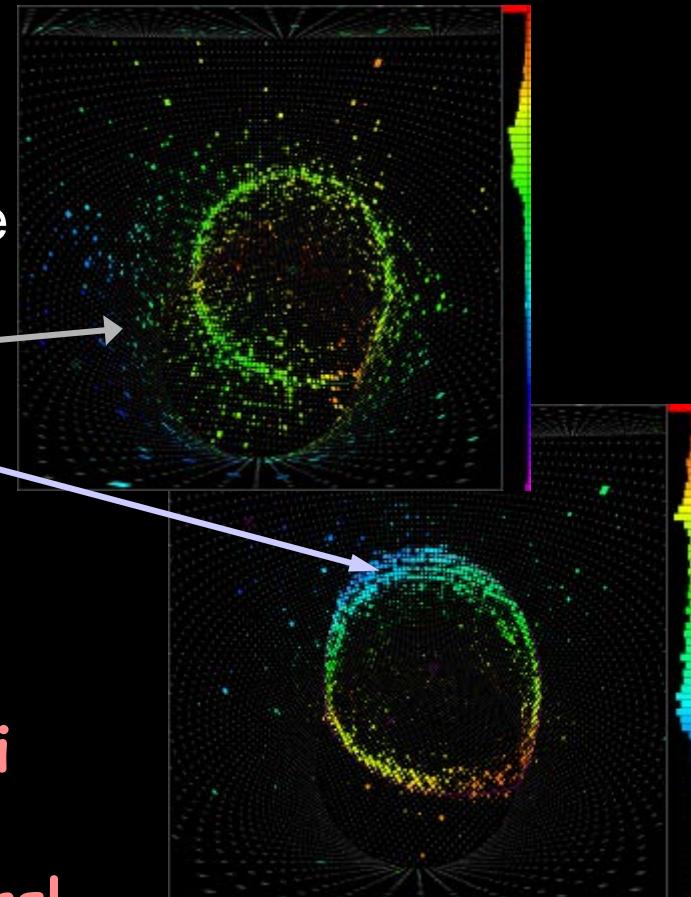


SuperKamiokande 2000  
50,000 t Wassertank

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...)

$L=10\sim 20 \text{ km}$

$\pi^\pm, K^\pm$

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

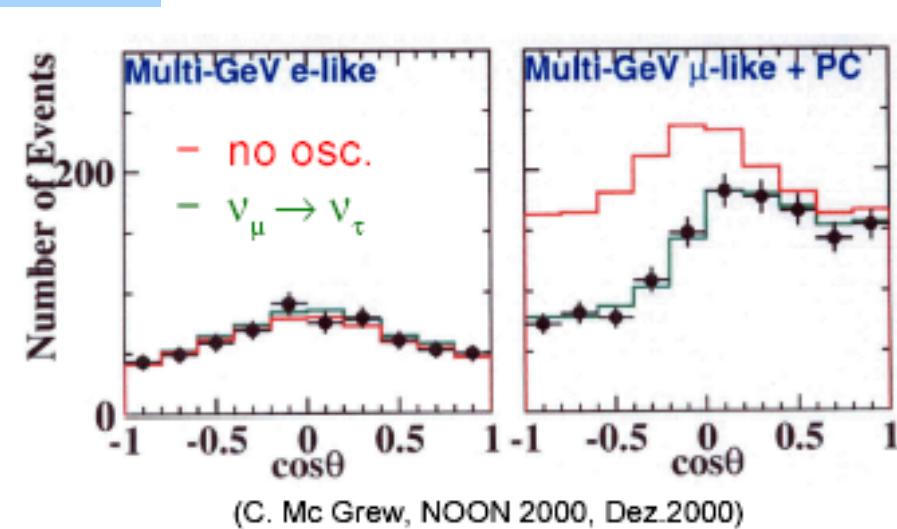
$\nu_\mu$   
 $e^\pm$

$\nu_e$

$\mu^\pm$

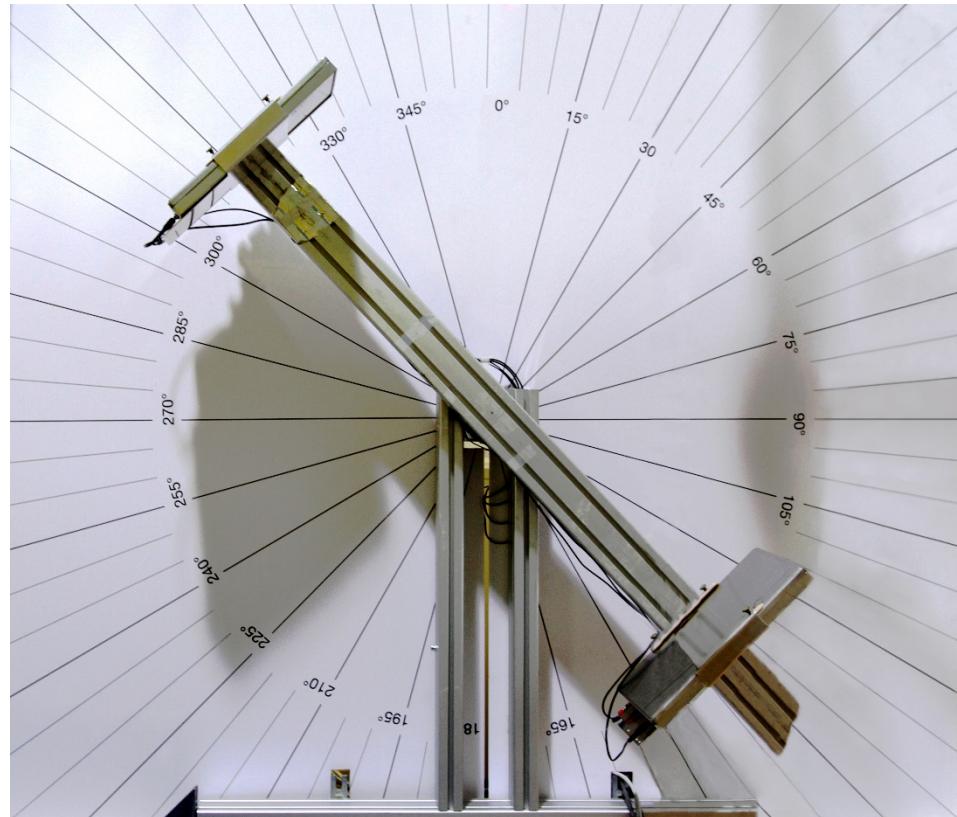
$\nu_e$  und  $\nu_\mu$  aus Luftschaubern:

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



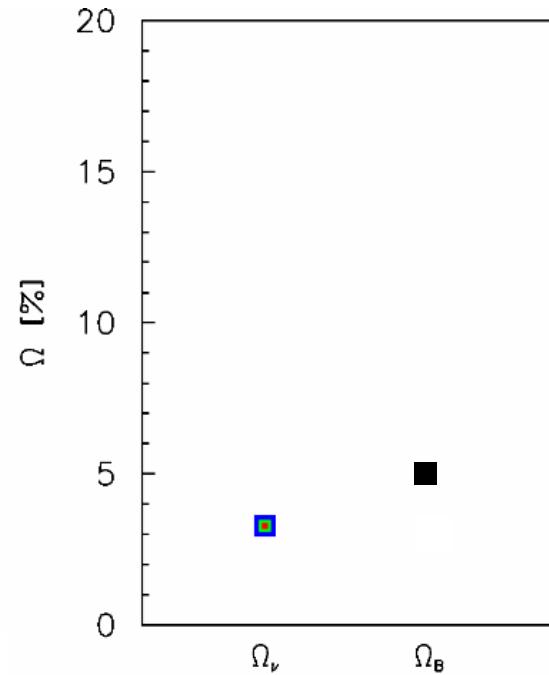
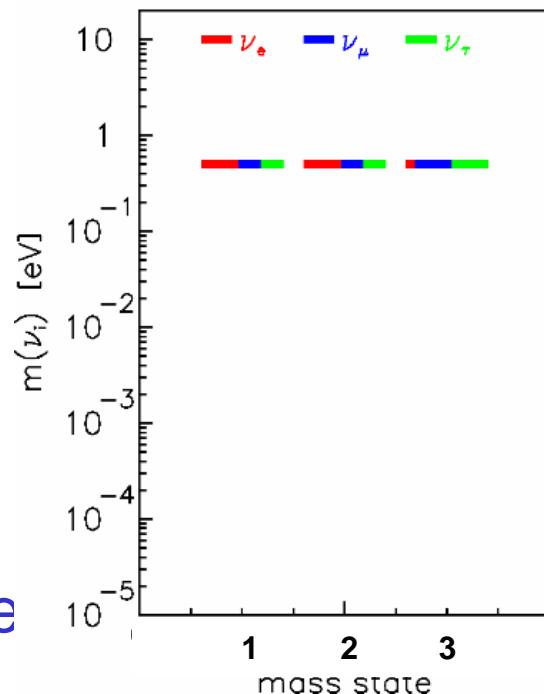
# Später: Ran an die Experimente #4!

Messe die Kosmische Strahlung aus verschiedenen Winkeln



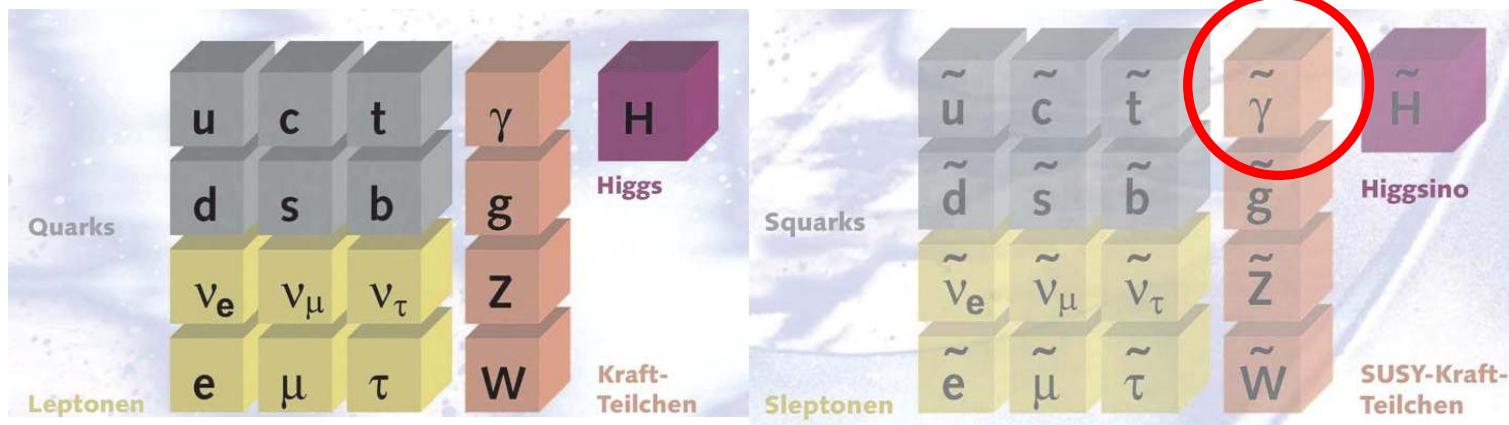
# Oszillationen der Neutrinoarten

- 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?

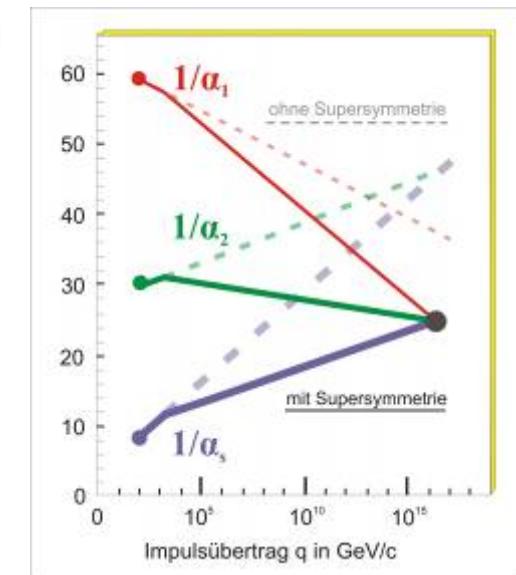


- Würden helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen

- Vereinigung aller Kräfte incl Gravitation
- Verständnis großer Zahlenverhältnisse

- Leichtestes SUSY Teilchen stabil  
= Dunkle Materie (ca  $3000 \text{ /m}^3$ )?

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

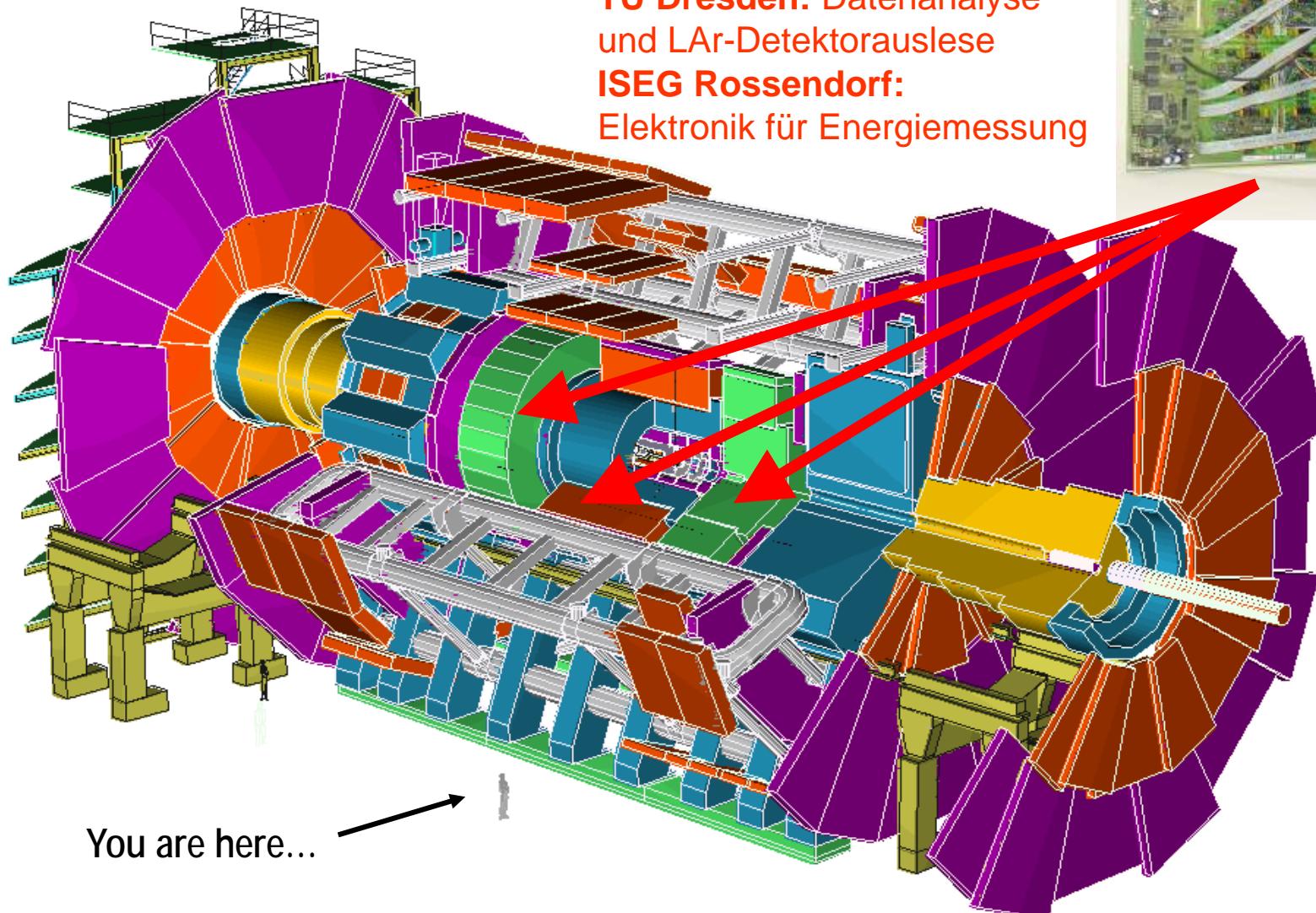


# Später: Ran an die Experimente #5 !

Buttons für Teilchen Fans, einschließlich „Dark Matter“



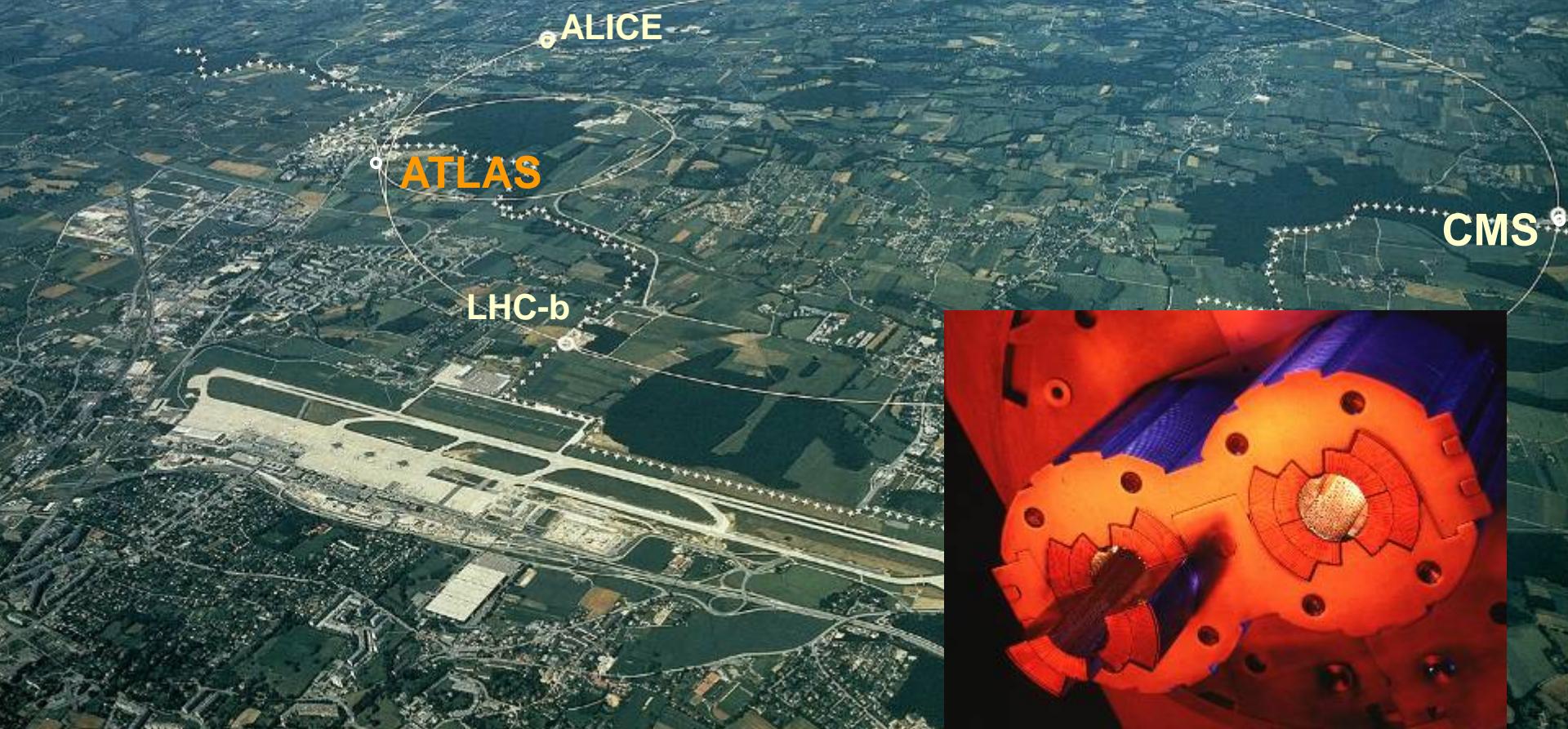
# ATLAS Experiment am CERN, Genf seit 2010 auch auf SUSY Suche



Insgesamt 3200 Wissenschaftler aus 180 Instituten aus 42 Ländern

# Der Large Hadron Collider LHC am CERN

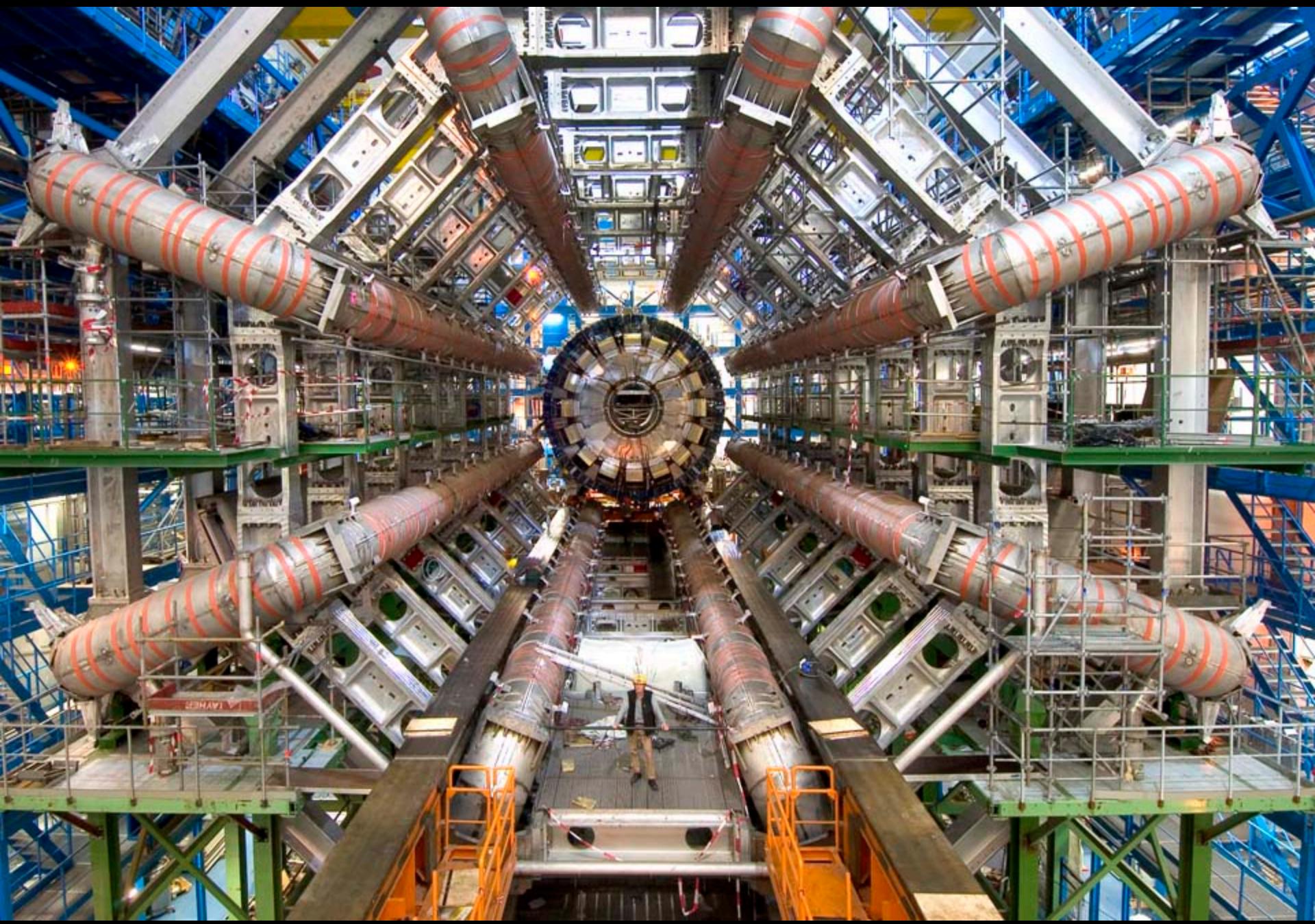
- pp-Kollisionen bei 14 TeV
- Collider Ring (vormals LEP) mit 27 km Umfang, 100m unterirdisch



# 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 bestimmt 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/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmologie/)
    - [www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/planck-und-die-mikrowellenhintergrundstrahlung/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/planck-und-die-mikrowellenhintergrundstrahlung/)
    - [www.weltderphysik.de/fileadmin/podcasts/WeltDerPhysik178.mp3](http://www.weltderphysik.de/fileadmin/podcasts/WeltDerPhysik178.mp3)
  - Dunkle Materie
    - [www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/)
    - [www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/dunkle-materie/](http://www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/dunkle-materie/)
  - Dunkle Energie
    - [www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/)
    - [www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/dunkle-energie/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/dunkle-energie/dunkle-energie/)
- Scinexx Dossier: <https://www.scinexx.de/dossier/das-erste-licht/>
- Scilog: <https://scilog.spektrum.de/einstiens-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](http://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](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck_overview)
  - [www.pro-physik.de/details/news/4515211/Planck-Ergebnisse\\_lassen\\_tief\\_blicken.html](http://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](http://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](http://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?

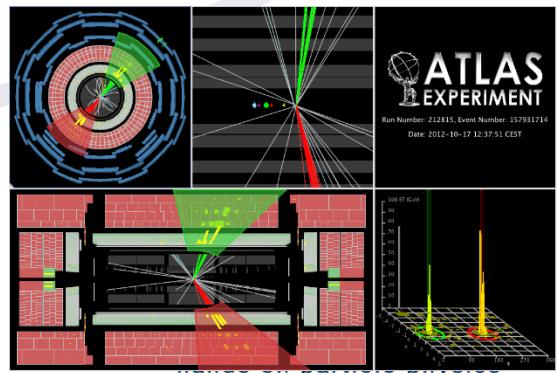
TU Dresden, Recknagel-Bau, Hörsaal C213

### Was?

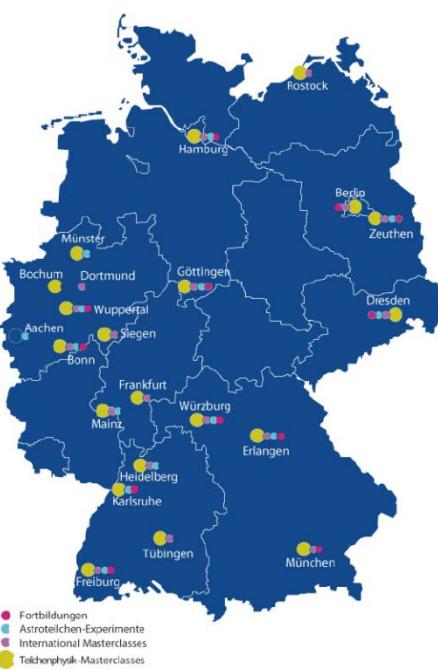
Selber mit echten Daten vom CERN forschen

### Anmeldung und weitere Infos:

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



# Netzwerk [www.teilchenwelt.de](http://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 Aufenthalt
- Authentische Erfahrungen mit Forschung

