

Michael Kobel, 24.09.2026

Mit Schall auf die Reise in die Wissenschaft

1. Was Musikorchester mit der Masse von Neutrinos zu tun haben
(Schwebungen und Pendel: Auszug eines Online-Vortrags für MINT-EC Schüler:innen)

2. Der Klang der kosmischen Hintergrundstrahlung
(Obertöne und das Universum als Musikinstrument: Auszug eines Pub-Vortrags bei Beerology)

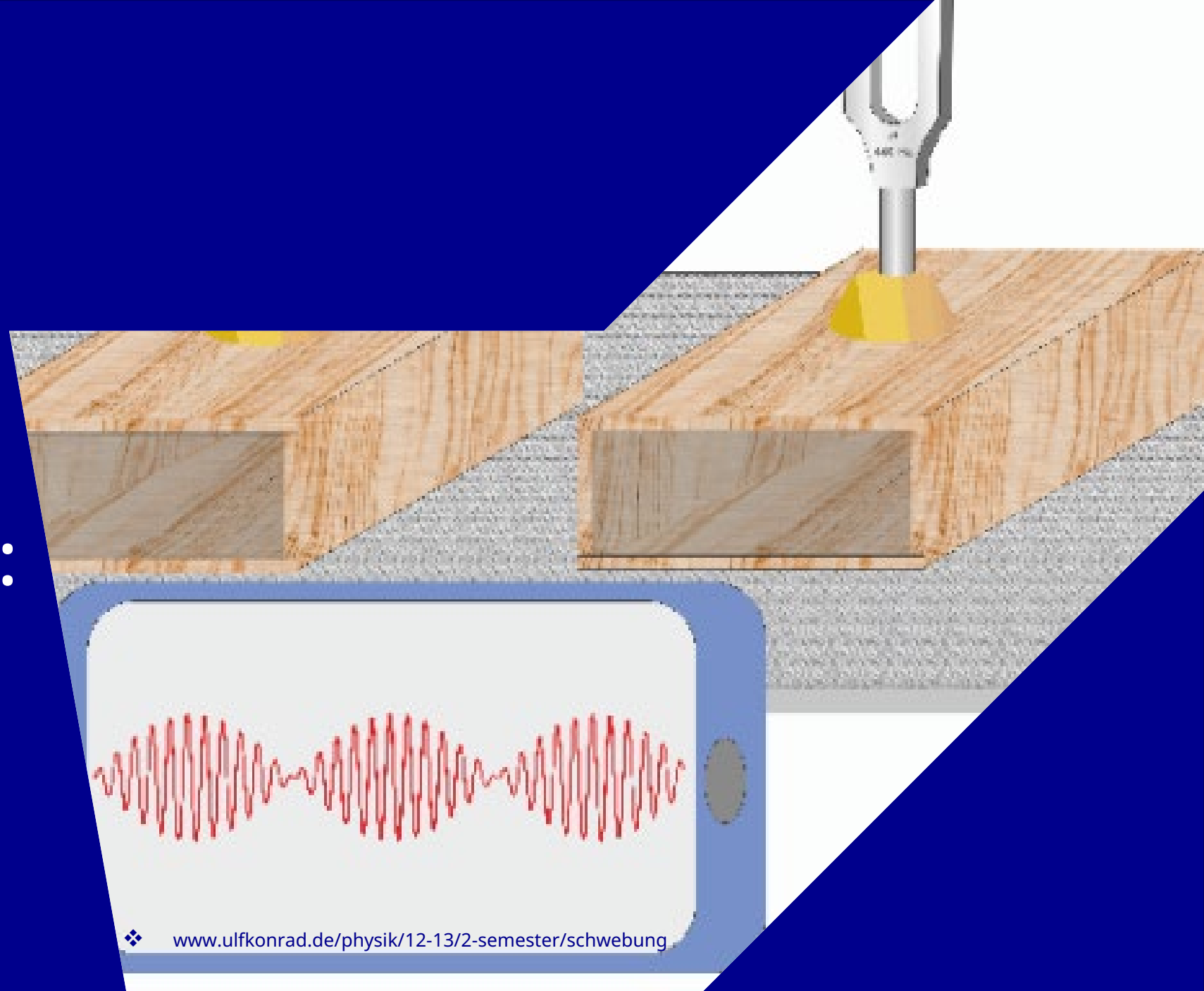
Warum Schall ?

1. Fachübergreifend
(Physik, Musik, Biologie)
2. Kontext-orientiert
(Schulorchester, Alltag)
3. Für alle Stufen
(Sek I, Sek II)
4. Moderne Forschung
(Quantenphysik, Kosmologie)



1. Was Musikorchester
mit der Masse von Neutrinos
zu tun haben

Schwebungen: Verschwinden und Erscheinen



Instrumente stimmen

- ❖ Egal ob Band oder Orchester:
 - Gleiche Töne von unterschiedlichen Instrumenten müssen gleich sein (die gleiche Frequenz haben)
 - Stimmung der Instrumente:
 - Kleiner Frequenzunterschied ergibt An- und Abschwellen der Tonstärke („Schwebung“)
 - Schwebung verschwindet, wenn die Töne gleich sind



❖ Knesebeck-Verlag

Einfache Versuche

❖ Analog:

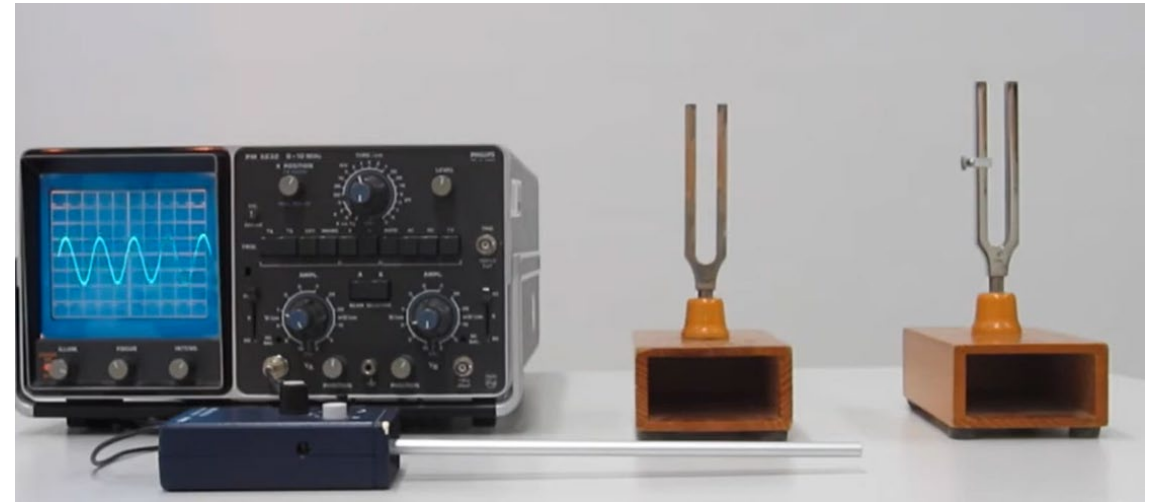
- zwei Stimmgabeln, eine leicht „verstimmt“

❖ Digital

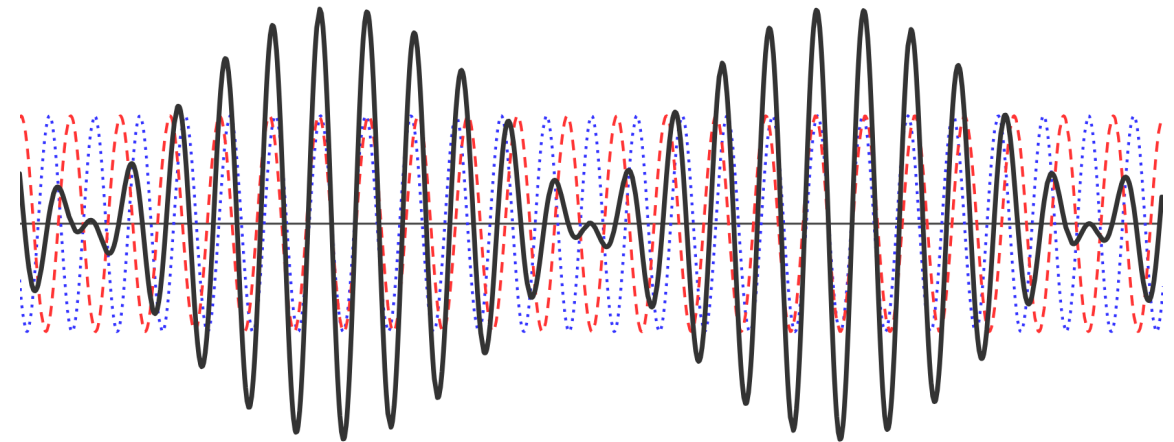
- Frequenzgenerator mit 2 Kanälen
- Handy: Frequenzgenerator-App

❖ Ergebnis

- Schwebung: Wellenberge und –täler verstärken sich oder löschen sich aus
- Schwebungsfrequenz $f_s = |f_1 - f_2|$ wird immer kleiner (langsamer) je näher sich die Töne kommen



❖ <https://www.youtube.com/@physikflohow7580/videos> (Schwebung)



❖ <https://physikbuch.schule/simple-superposition.html>

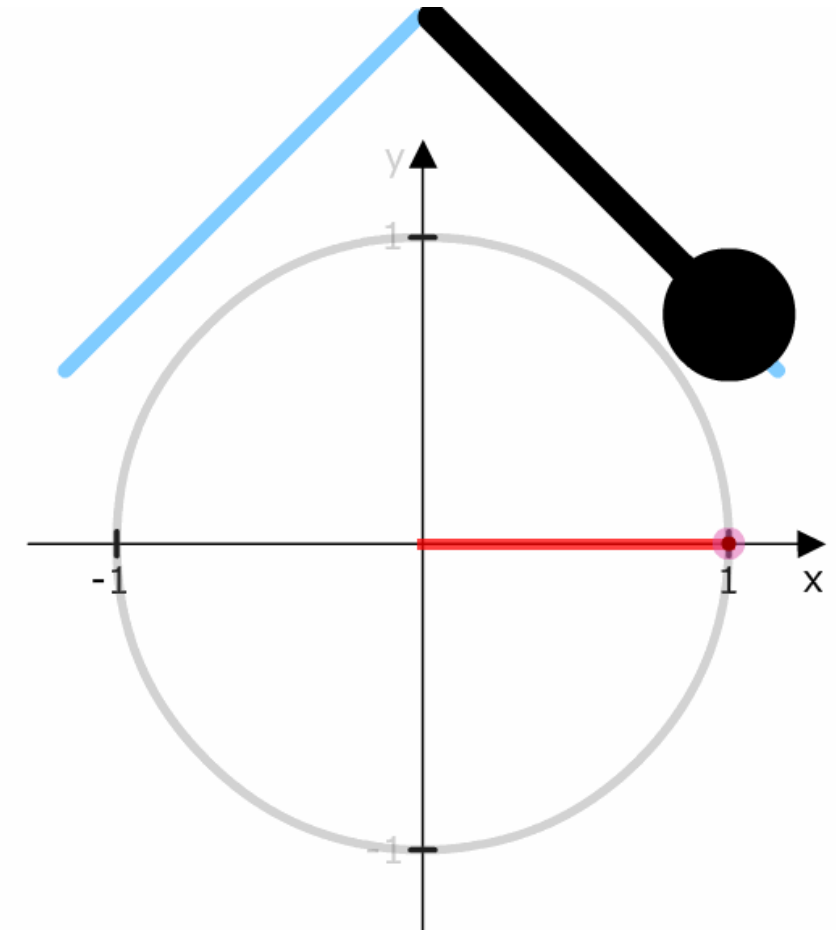
Mathematische Analogien

❖ Der sogenannte Teilchen-Welle „Dualismus“ für Quantenobjekte

- Ein **Quantenobjekt** hat klassische **Teilchen-Eigenschaften** wie Ladungen, Energie E , Impuls p , Masse m
- Mit welcher **Wahrscheinlichkeit** es sich zur Zeit t am Ort r befindet, beschreibt das Quadrat seiner **Wellenfunktion** $|\psi|^2$
 $\psi = \text{Amplitude} * \text{Phase}$
- Die **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** eines Teilchens hat den Charakter einer **Welle** (Nachweis aber immer als ganzes Teilchen)

❖ Mathematische Beschreibung gleich für

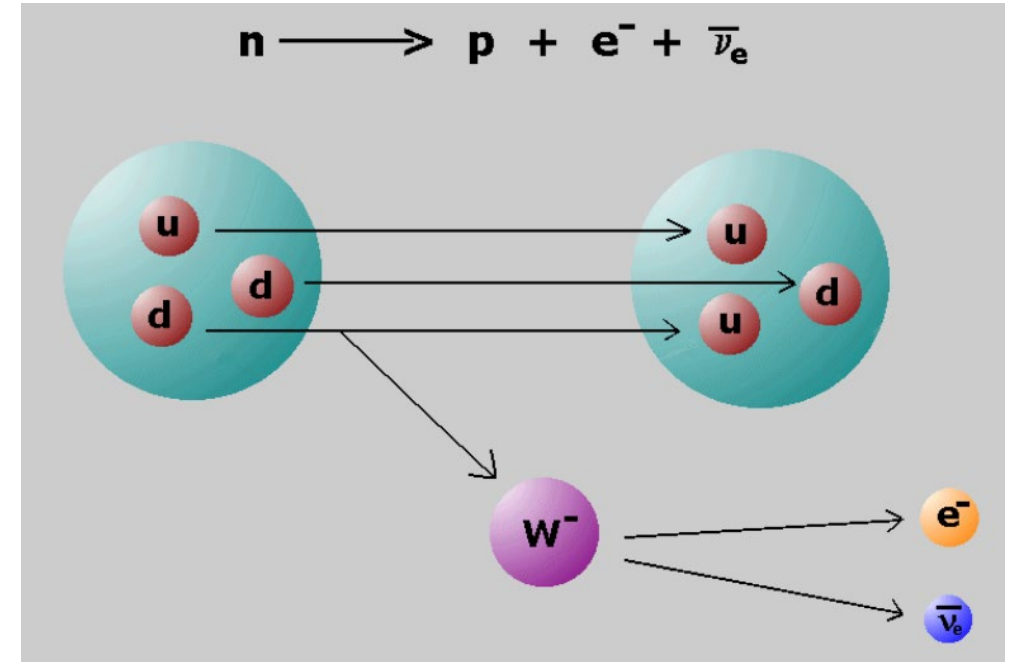
- Welle (Schall)
- Kreisbewegung (Phase bei Quanten)
- Schwingung (Pendel)



❖ <https://www.matheretter.de/wiki/kosinusschwingung-pendel>

Die Neutrino-„Geisterteilchen“ ν

- ❖ 1930: Postuliert von Wolfgang Pauli zur Erklärung der β -Umwandlung des Neutrons n (sichert Erhaltungssätze in der Umwandlung)
 - Elektrisch neutrale Geschwister des Elektrons
 - Viel leichter als das Elektron
(Masse unmessbar klein? Ganz masselos?)
 - $\rightarrow$ machen fast keine Wechselwirkungen (nur 1 von 10.000.000.000 bei Erddurchquerung)
- ❖ 1956: Nachweis aus Kernreaktor
- ❖ Später auch aus
 - Erdatmosphäre (sekundäre kosmische Strahlung)
 - Sonne (Kernfusion)
 - Galaxien (Supernovae, aktive Galaxienkerne)
 - Teilchenbeschleunigern



❖ https://physicsmasterclasses.org/exercises/bonn1/de/ww_schwach.htm

Neutrinos

- kommen von „überall her“ (auch aus menschl. Körpern)
- fliegen überall durch

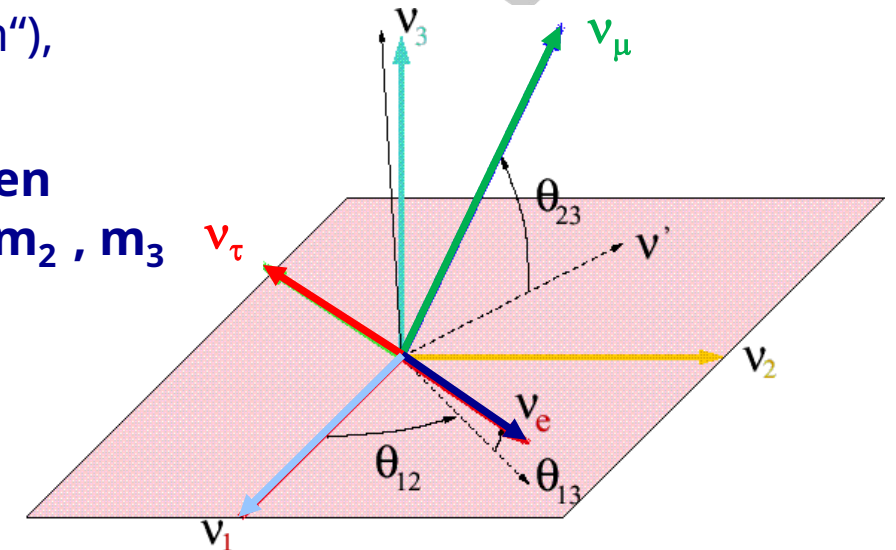
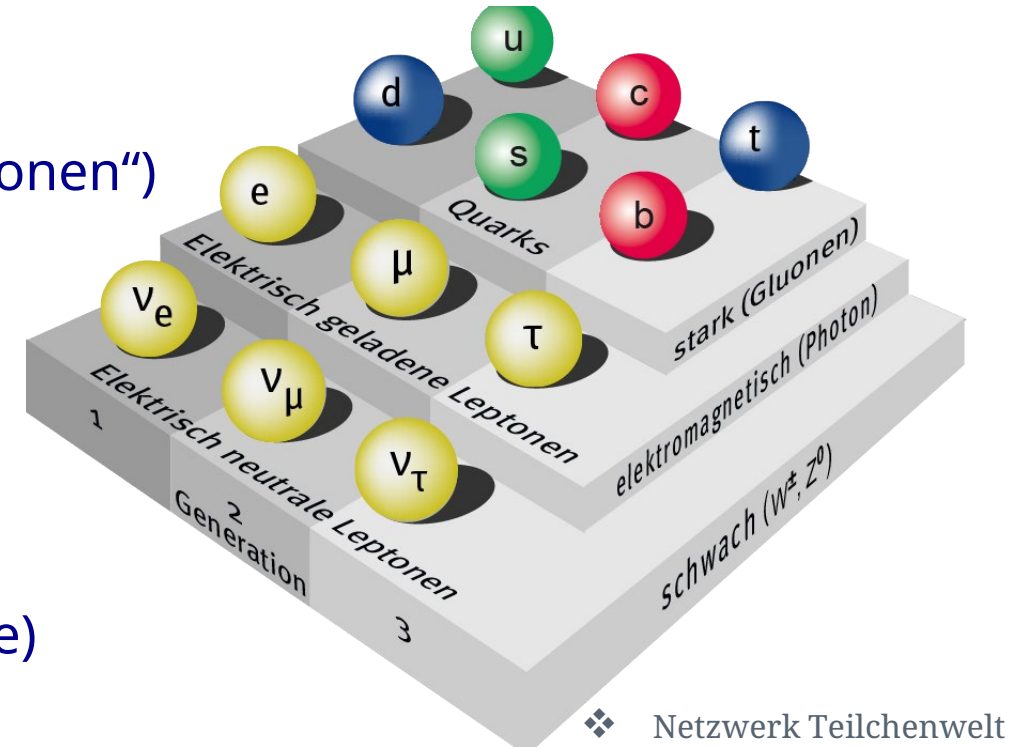
3 Familien und Mischung

❖ Elementarteilchen existieren in 3 Familien („Generationen“)

- Jeweils ähnliche Mitglieder, aber steigende Massen (analog zum Periodensystem der Elemente)
- **Zu jedem Mitglied der „Elektron-Gruppe“ gibt es ein zugehöriges „Flavor“-Neutrino: ν_e, ν_μ, ν_τ**
- Nur die 1. Familie (u,d,e) bildet stabile Materie (schwerere Elementarteilchen sind sehr kurzlebig)

❖ Besonderheit der Teilchenphysik (Quantenfeldtheorie)

- **Teilchen können** nicht nur
 - an mehreren Orten gleichzeitig sein („Wellenfunktion“),
 - sondern auch **mehrere Teilchen gleichzeitig sein!**
- Die „Flavor“-Neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ sind Überlagerungen von Neutrinos ν_1, ν_2, ν_3 jeweils anderer Masse: m_1, m_2, m_3
 - $\nu_e \approx (0,8\nu_1 + 0,6\nu_2 - 0,1\nu_3)$
 - $\nu_\mu \approx (-0,4\nu_1 + 0,6\nu_2 + 0,7\nu_3)$
 - $\nu_\tau \approx (0,4\nu_1 - 0,6\nu_2 + 0,7\nu_3)$



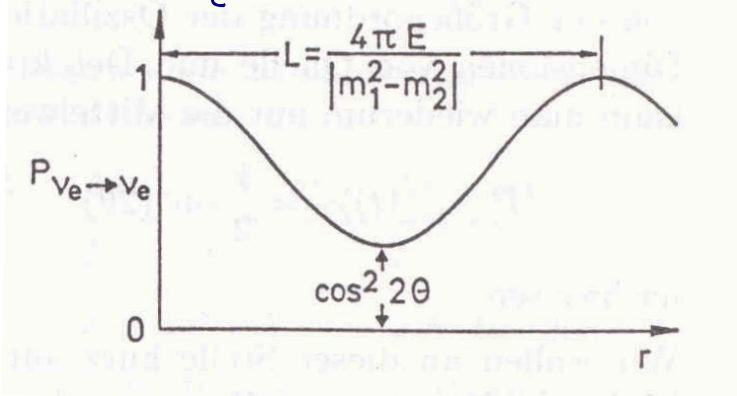
Massen beeinflussen Frequenzen

- ❖ Unterschiedliche **Massen** haben unterschiedliche quantenmechanische (Phasen)-**Frequenzen**
- ❖ Das ν_e entspricht also **zwei Tönen gleichzeitig** (und ganz wenig auch einem dritten Ton) mit zwei unterschiedlichen Frequenzen, in leicht unterschiedlicher Lautstärke
 - **Frequenz f_1** des ν_1 mit Masse m_1 mit dem „Lautstärke“-Anteil $0,8^2=64\%$
 - **Frequenz f_2** des ν_2 mit Masse m_2 mit dem „Lautstärke“-Anteil $0,6^2=36\%$

- ❖ Für gegenüber der Energie kleine Massen ergibt sich als Frequenz-Unterschied

$$f_s = f_2 - f_1 = \frac{1}{4\pi\hbar} \frac{(m_2 c^2)^2 - (m_1 c^2)^2}{E}$$

- ❖ Ein ν_e „-Klang“ oszilliert mit dieser Schwebungsfrequenz f_s ,
dh **das ν_e verschwindet und erscheint wieder** nach einer Strecke L (bei $v \sim c$)



$$L = 4\pi\hbar c \frac{E}{(m_2 c^2)^2 - (m_1 c^2)^2}$$

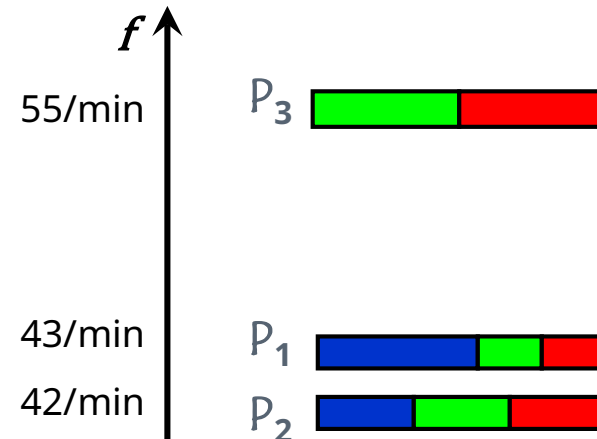
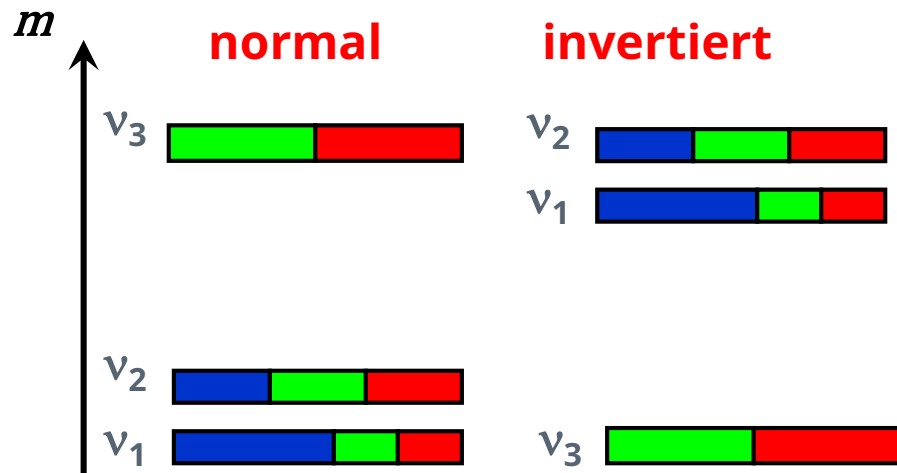
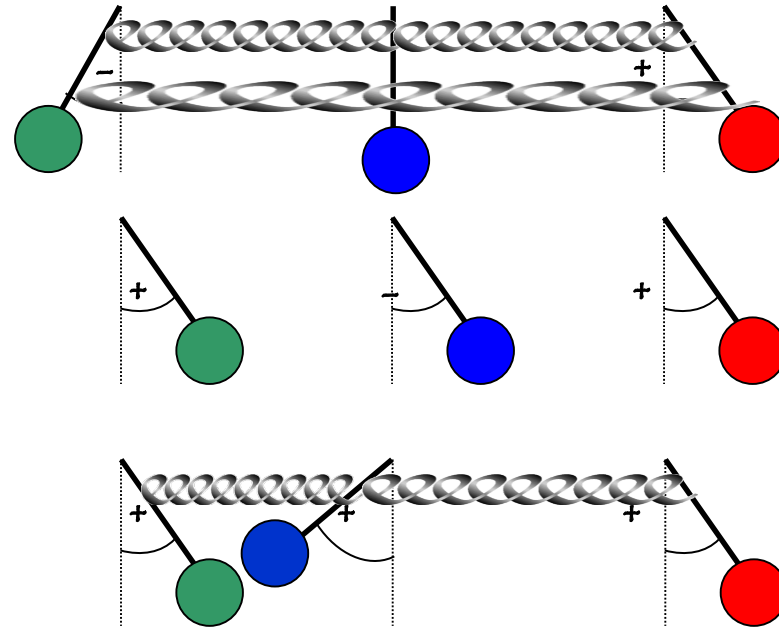
$$= 2,5 \text{ m} \frac{E (\text{MeV})}{\Delta(m c^2)^2 (\text{eV}^2)} = 2500 \text{ km} \frac{E (\text{MeV})}{\Delta(m c^2)^2 (\text{meV}^2)}$$

Darstellung durch gekoppelte Pendel

$$\diamond v_3 = (-v_\mu + v_\tau) / \sqrt{2}$$

$$\diamond v_2 = (-v_e + v_\mu + v_\tau) / \sqrt{3}$$

$$\diamond v_1 = (2v_e + v_\mu + v_\tau) / \sqrt{6}$$



Analogien Schall <-> Pendel <-> Neutrinos

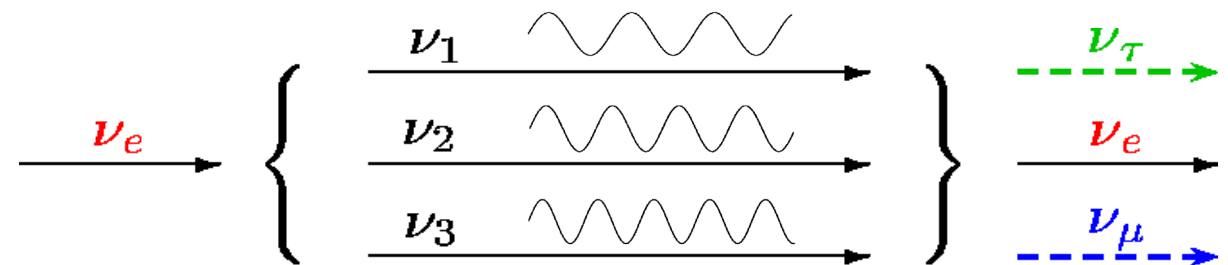
Akustik	Pendel	Neutrinos
Schallwelle	Räumliche Schwingung	Phase der Wellenfunktion
Tönhöhe (feste Frequenz)	Eigenmoden (→ Eigenfrequenz)	Massezustände (→ Phasenfrequenz)
Klang= Überlagerung der Töne	Ein Pendel = Überlagerung der Eigenmoden	Flavorzustand = QM-Mischung der Massenzustände
Lautstärke ~Schallamplitude ²	Energie des Pendels ~Schwingungsamplitude ²	QM-Nachweiswahrscheinlichkeit ~ Wellenfunktion ²
Schwebungsfrequenz ~ Δf der Töne	Schwebungsfrequenz ~ Δf der Eigenmoden	Flavor-Oszillation der Neutrinos ~ Δm^2 der Massezustände
Größenordnung: ~ 1000 Hz	Größenordnung: 0,01 Hz	~ 0,1 – 10 kHz (Beobachter) ~ 0,1 – 10 THz (ν -Eigenzeit)

Nicht
Messbar

Messbar

- ❖ Im Unterschied zur Akustik im Orchester wird aber nicht nur das ν_e „leiser“, sondern ν_μ und ν_τ übernehmen mit ihren „Klängen“:
→ **Neutrino-Flavor-Oszillationen**

- ❖ Genauso bei gekoppelten Pendeln



Messung für $\bar{\nu}_e$ aus Kernkraftwerken

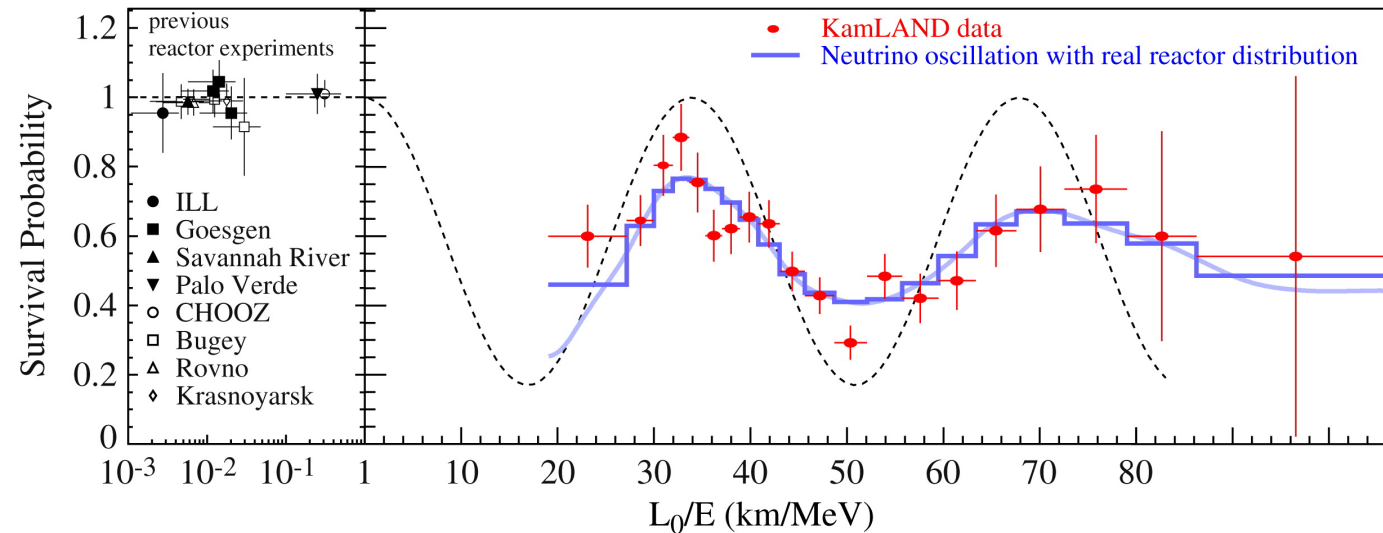
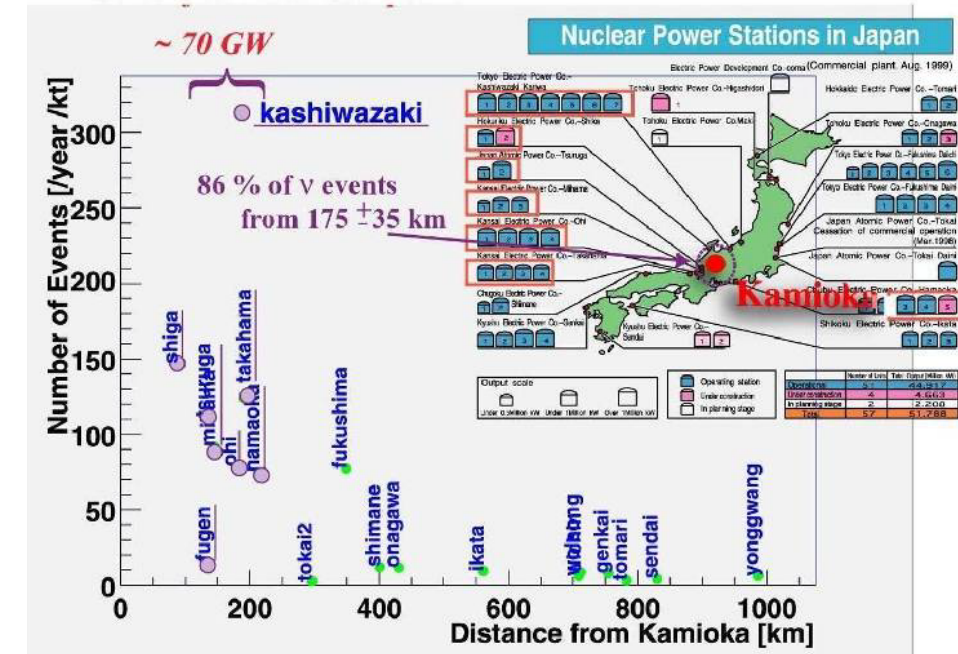
- ❖ Erste Versuche vor dem Jahr ~ 2000 in Abständen von einige Meter bis ~ 1km erfolglos:

- Es verschwinden keine $\bar{\nu}_e$

- ❖ 2002-2010 KamLAND 258 $\bar{\nu}_e$ aus 15 KKW in Japan

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

- $E \sim 1-5 \text{ MeV} \rightarrow$ Auftragung gegen L/E bringt die unterschiedlichen Frequenzen „in Phase“.
- Da KamLAND keine Richtung der Neutrinos messen kann, verwendet es eine mittlere (flußgew.) Distanz $L_0=180 \text{ km}$ so dass eine Verschmierung bleibt.
- **Oszillation eindeutig sichtbar**
- $\bar{\nu}_\mu$ und $\bar{\nu}_\tau$ reagieren nicht bei $E \sim \text{MeV}$, es verschwinden also $\bar{\nu}_e$ und erscheinen wieder, genau wie der Orchesterton



Atmosphärische Neutrinos

Primäre Kosmische Strahlen
(Protonen, He...)

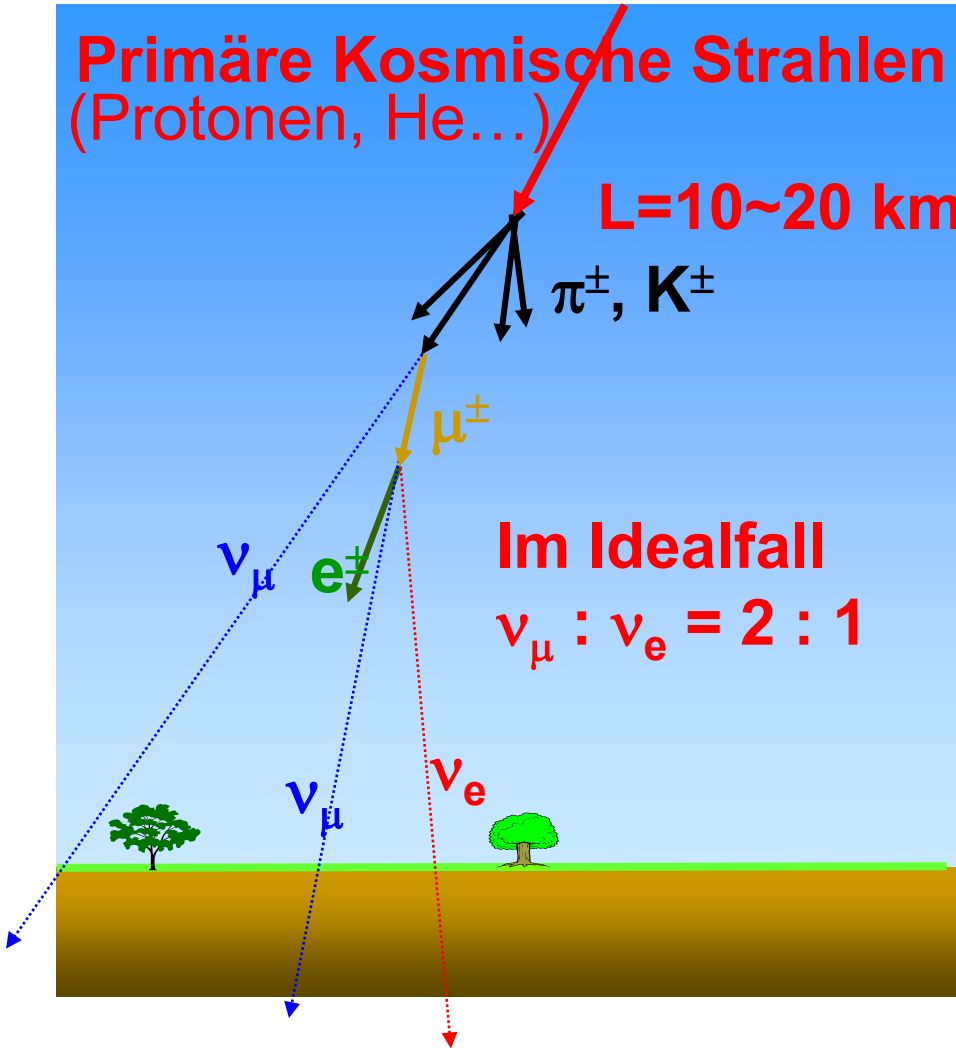
$L=10\sim 20$ km

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

$\mu^\pm$

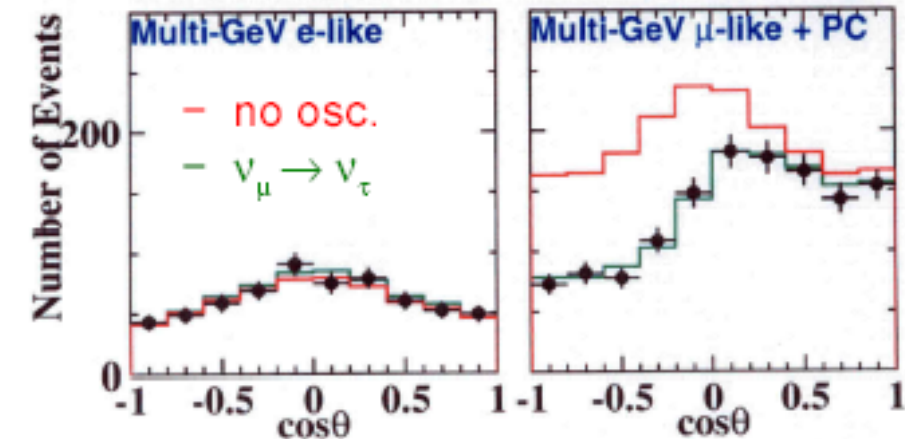
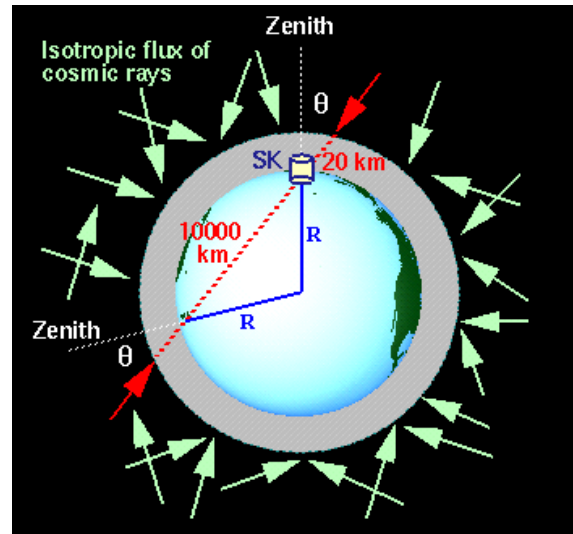
Im Idealfall

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



❖ ν_e und ν_μ aus Luftschauern

- Kommen aus allen Richtungen
- Energien mehrere Tausend Mal höher als aus KKW
- $\rightarrow$ Oszillationslängen mehrere 1000 km
 - keine Oszillation „von oben“
 - erst nach Erddurchquerung ν_μ Oszillationen sichtbar mit Untergrunddetektoren in Minen oder im Eis (Superkamiokande SK, IceCube am Südpol)

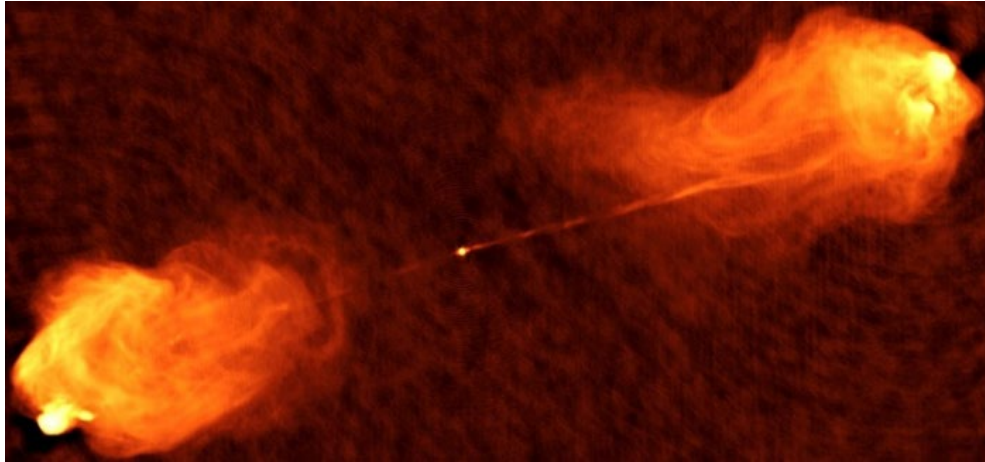


(C. Mc Grew, NOON 2000, Dez.2000)

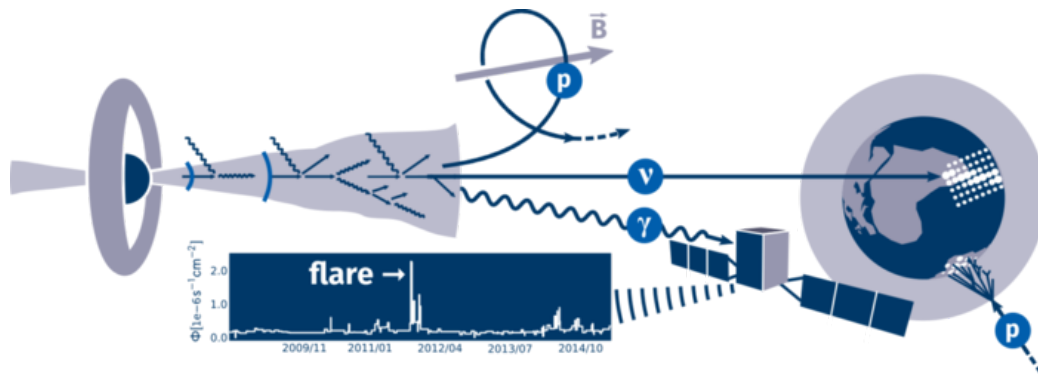
Neutrino-Astronomie mit IceCube am Südpol

❖ Neutrino.Nachweis aus aktiven Galaxienkernen insb „Blazaren“

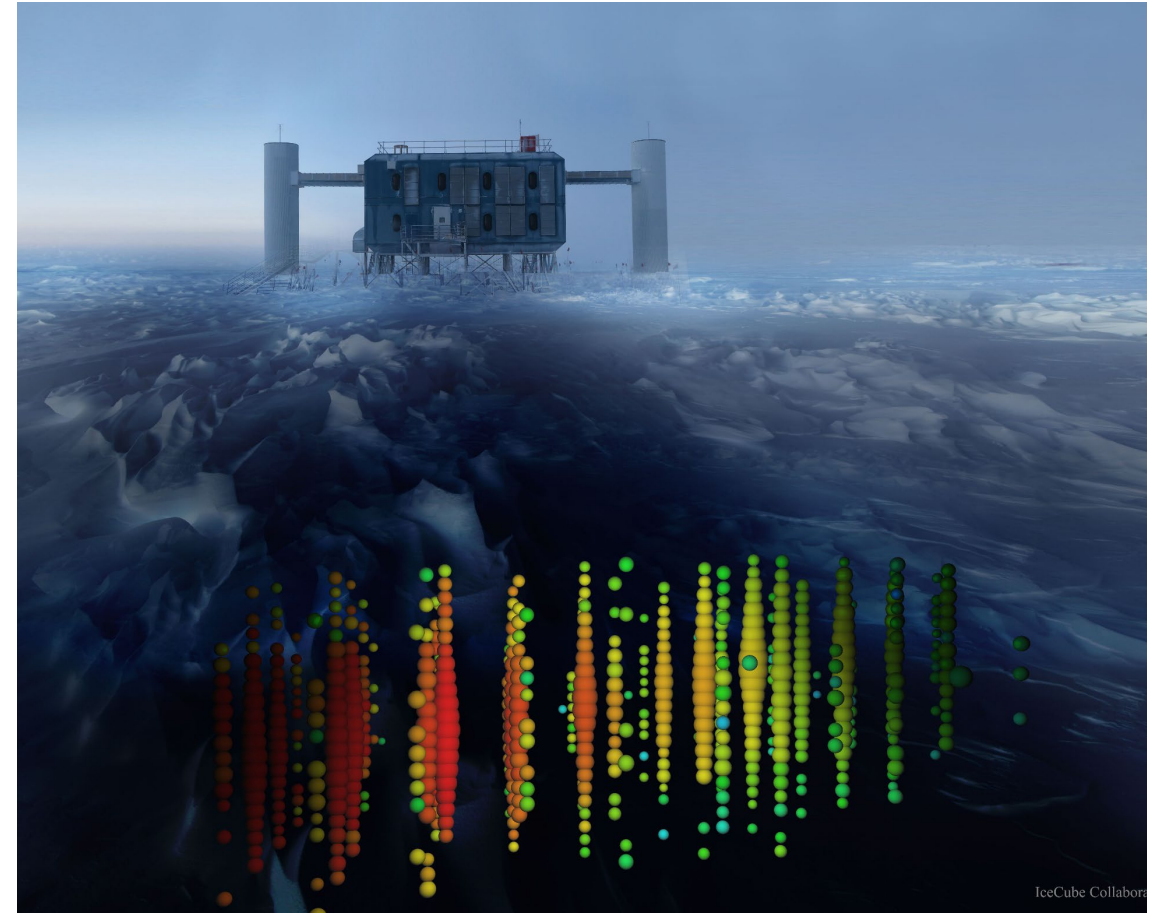
- Bspw Cygnus A



- mit Hilfe eines 1 km³ großen Eiskubels mit über 5000 optischen Sensoren



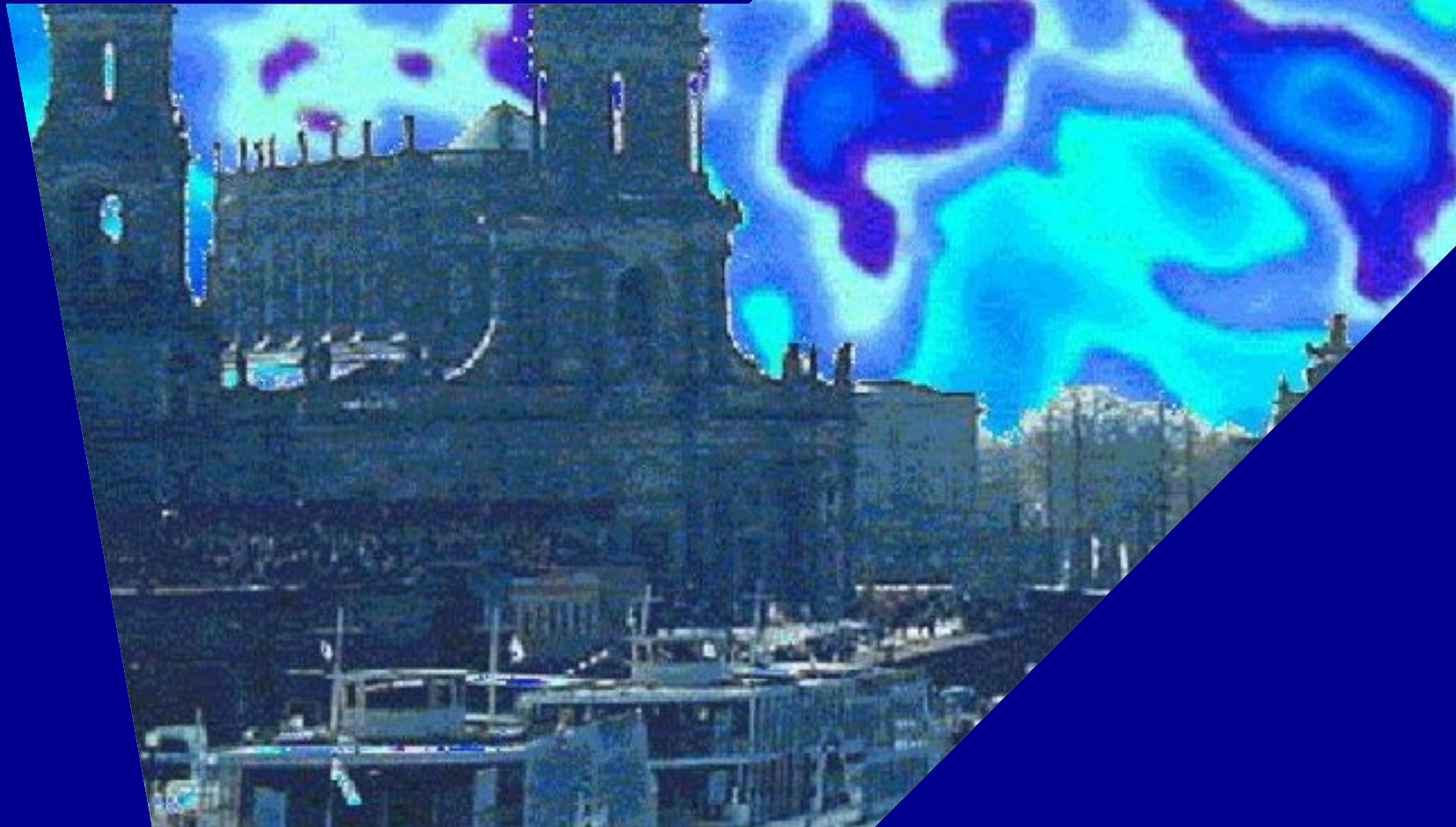
❖ <https://iihe.ac.be/icecube>



❖ <https://www.starobserver.org/tag/suedpol/page/3/>

2. Was die kosmische
Hintergrundstrahlung über
das Universum verrät

Klang: Obertöne des Instruments



Klang, Wellenlängen, Obertöne

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

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



268 Hz

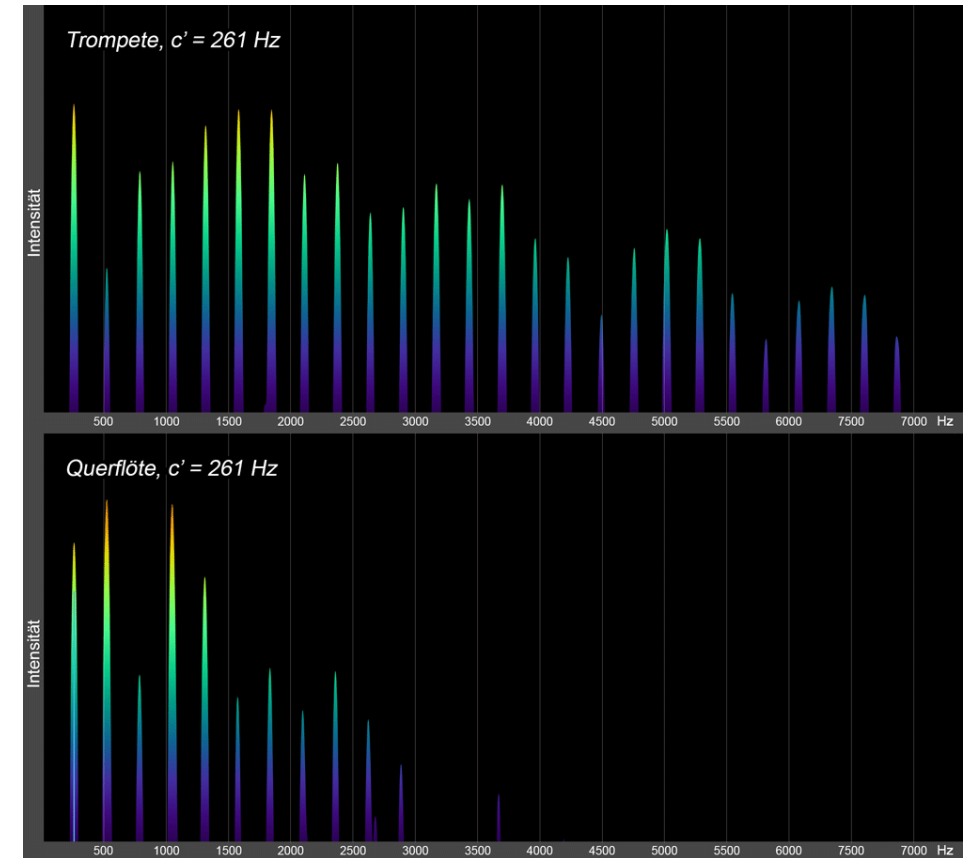


536 Hz

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

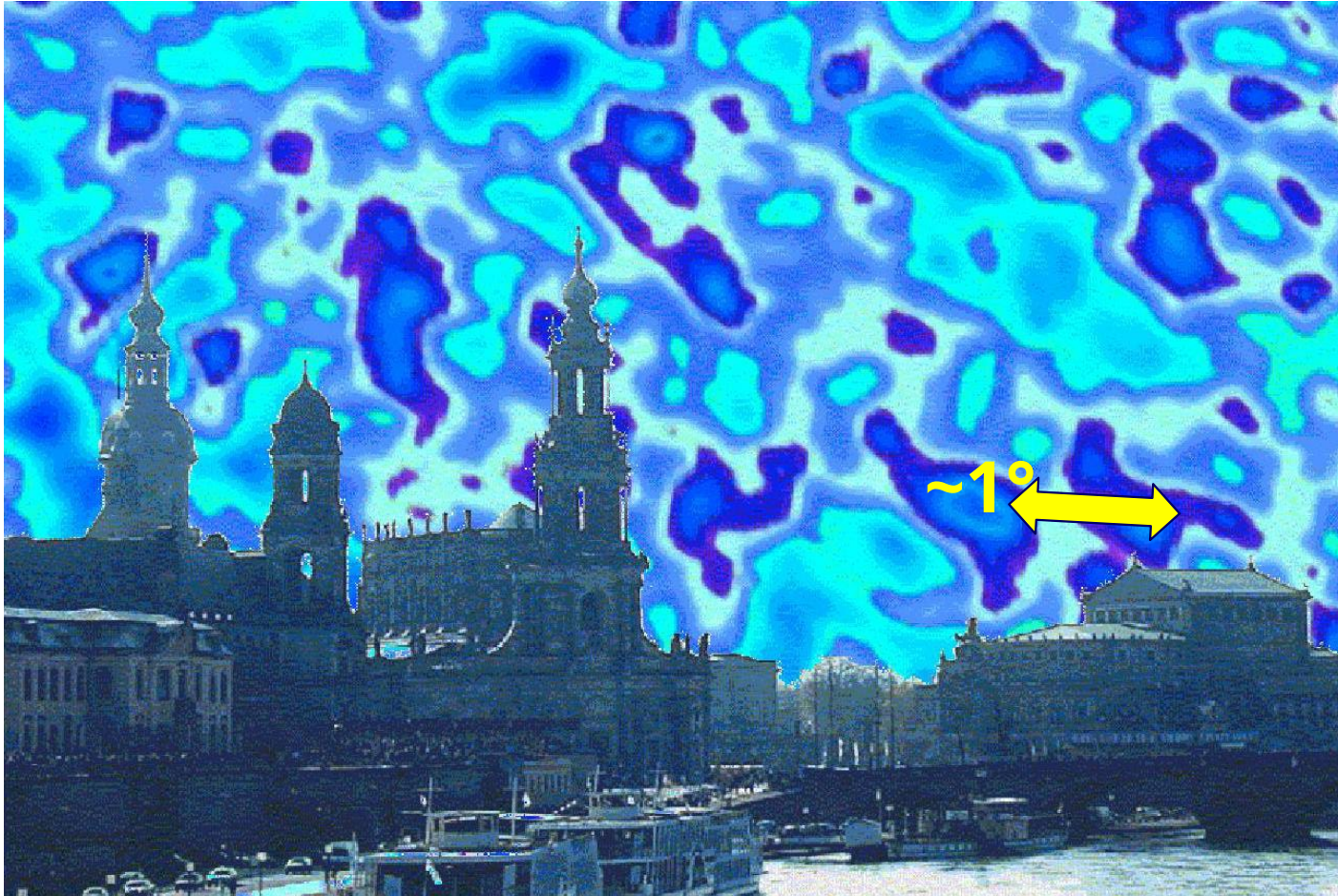
❖ Klang: Frequenzgemisch

- Charakteristisch
für Schallquelle (Instrument)
- Grundton + mehrere Obertöne



www.lehrklaenge.de/PHP/Akustik/Obertonspektrum1.php

Mikrowellen-“Klangmuster“ projiziert über Dresden



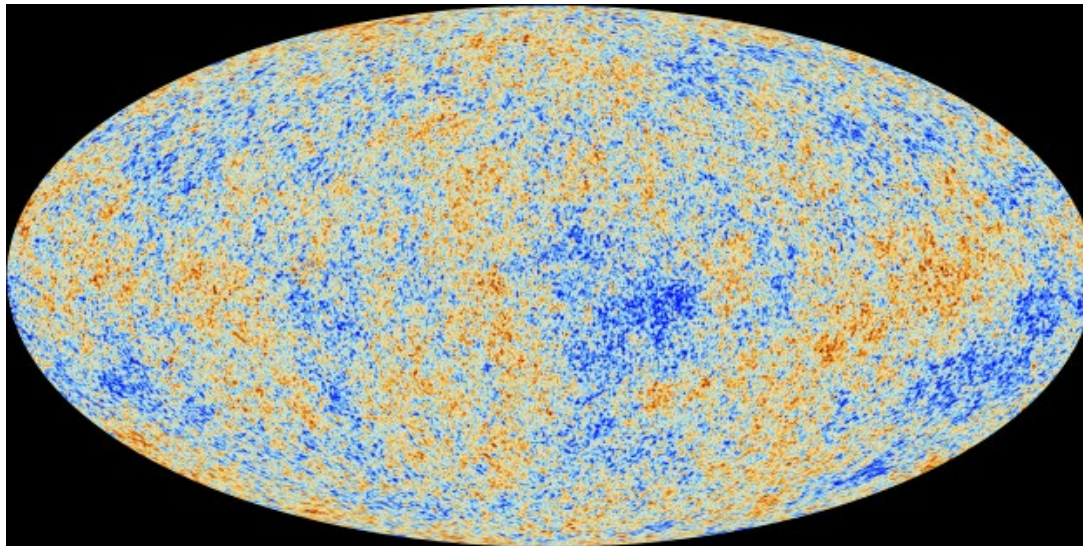
Klaus Schubert, Jens Brose, TU Dresden

- ❖ Schallwellenmuster
 - Gemessen über winzige Temperaturschwankungen in der thermischen Strahlung des Universums (Mikrowellen)
- ❖ Entstanden
 - 380.000 Jahre nach dem Urknall
 - Ausbreitung bis heute
- ❖ Distanz der Quelle
 - 13,8 Milliarden Lichtjahre
- ❖ Max Wellenlänge damals
 - 220.000 Lichtjahre
- ❖ Max Wellenlänge heute
 - 240 Mio Lichtjahre (wegen Ausdehnung des Universums um ~ Faktor 1000)

Das Muster des kosmischen Klangs

❖ Messung des Planck-Satelliten (2013)

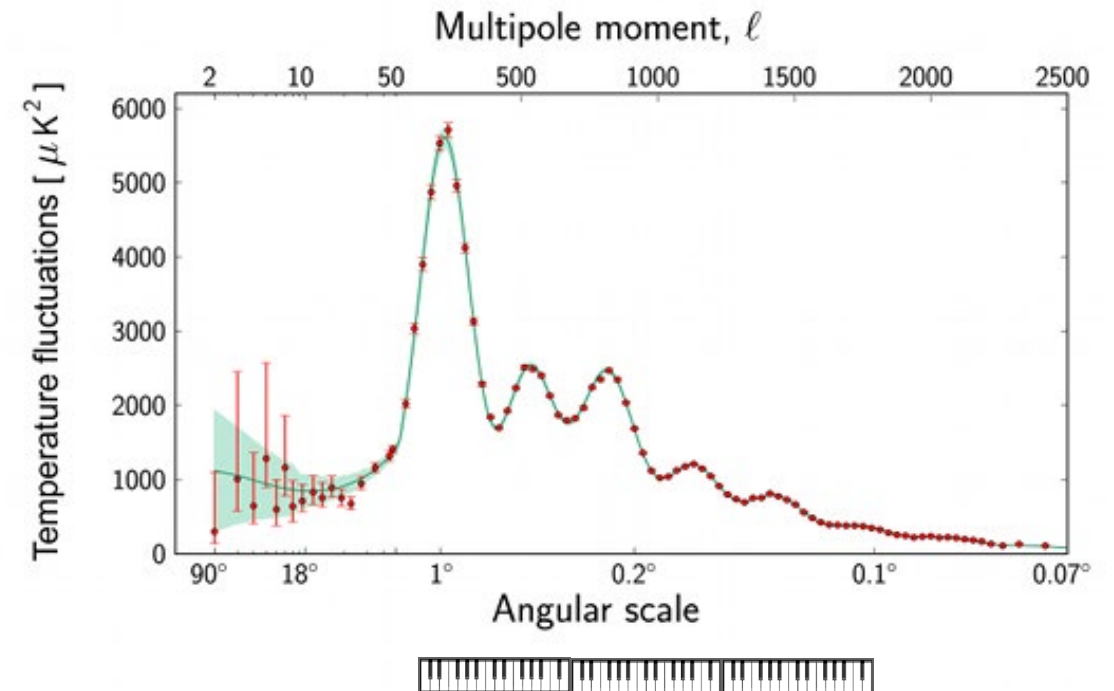
- Rot: 0,00002K wärmer als 2,73 K
- Blau: 0,00002K kälter als 2,73 K



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

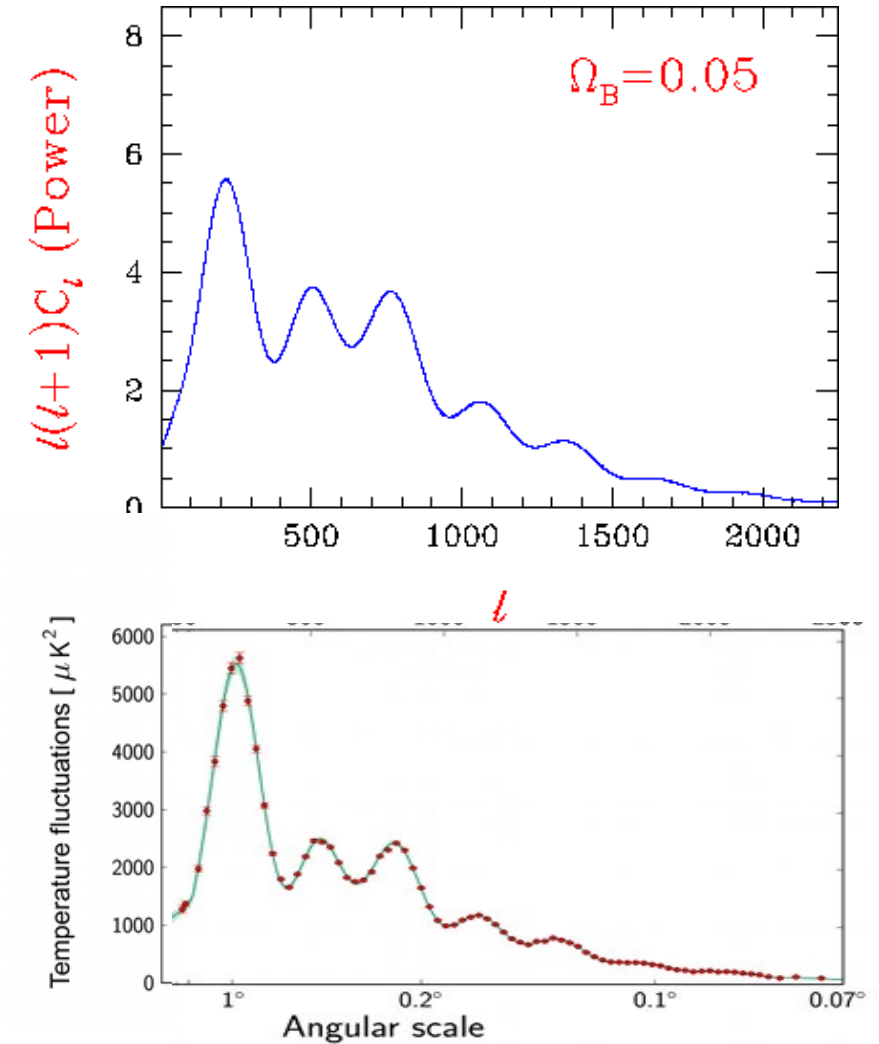
❖ Obertonspektrum

- Wellenlänge ~ 0,02-0,2 Mio Lichtjahre
- Frequenz ~ 1/(0,04-0,4 Mio Jahre)



Analyse des Klangs des dünnen Gases (380.000 Jahre n. Urknall)

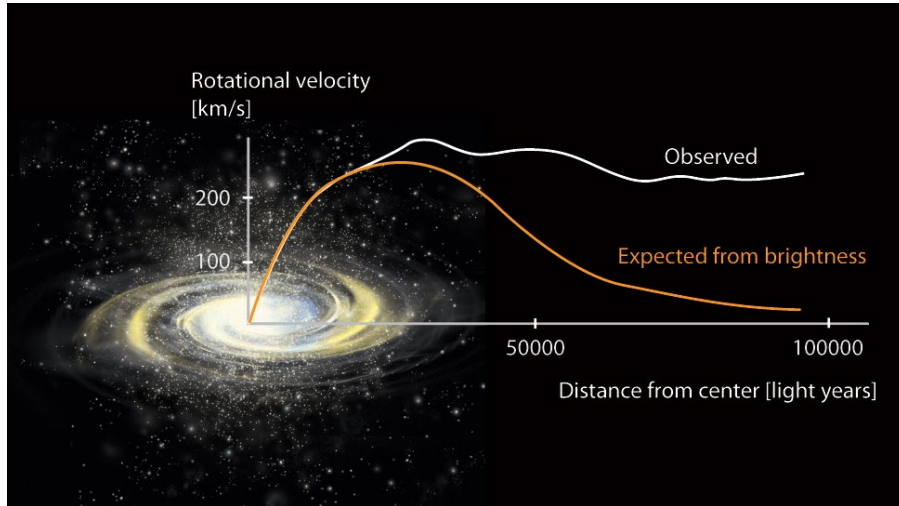
- ❖ Anteil $\Omega_B = 5\%$ elektrisch geladene „atomare“ Materie (Atomkerne (p, He), Elektronen)
 - kann Licht abstrahlen ($\rightarrow$ Strahlungsdruck)
 - Schallausbreitung über Strahlungsdruck und Gravitation
 - Erzeugt insb. „ungerade“ Obertöne (1.,3.,5...)
- ❖ Anteil $\Omega_{DM} = 26\%$ ungeladene „dunkle“ Materie (bspw. Neutrinos ...)
 - kann **kein** Licht abstrahlen („dunkle Materie“)
 - Schallausbreitung nur über Gravitation
 - Erhöht insb. „gerade“ Obertöne
- ❖ Wir „hören“ die Zusammensetzung des Universums!



Unabhängige Bestätigung für „Dunkle Materie“

❖ Rotationskurven Galaxien

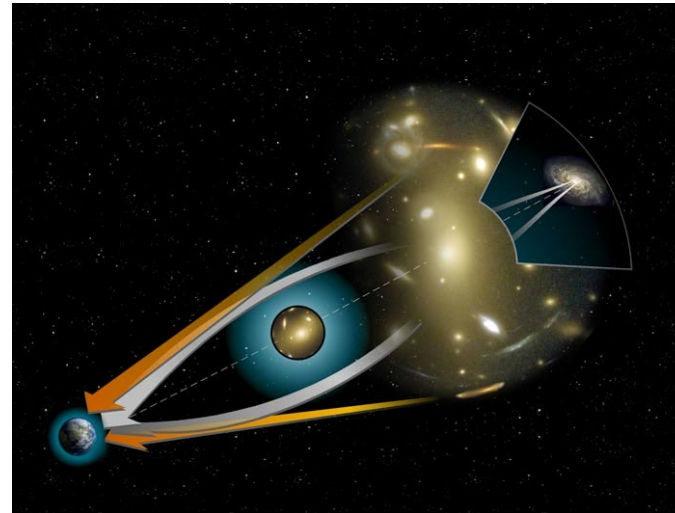
- Erreichen nie $1/\sqrt{r}$ Gesetz für Rotation um Zentralmasse



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

❖ Gravitationslinsen

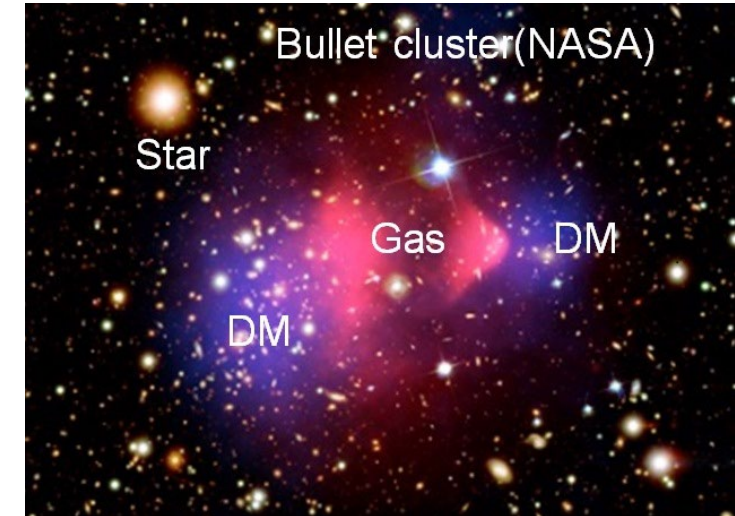
- 5x mehr Masse als Sterne + Gas



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

❖ Galaxienkollision

- Gas und DM unterschiedlich



NASA, Chandra

- Viel „dunkle“ Materie im Universum (Teilchen, die nur gravitativ oder schwach wechselwirken)
- Neutrinos haben genau passende Eigenschaften, hielt man daher in den 80ern + 90ern für DM
- Messung der ν -Massen durch Oszillation: **ca. 100x zu klein! Erklären nur ~ 1% der DM !**
- **99% der Dunklen Materie ist immernoch unerklärt → neue Teilchen?**

Zusammenfassung

❖ Schüler:innen mitnehmen auf die Reise in die Wissenschaft ist möglich!

❖ **Inner-schulisch, durch Lehrkraft**

- Andocken an vorhandene Lehrplaninhalte (Mechanik, Akustik, Elektromagnetismus)
 - konkrete Nutzung (Wurf mit Antimaterie, Ionenstrahlen zur Krebstherapie...)
 - Analogie (zB Schall, erzwungene Schwingungen, ...)
 - ...
- Sonderformate (Ganztagsangebote, Arbeitsgemeinschaften, Projektwochen)

❖ **Außer-schulisch, bspw. von TU Dresden**

- <https://tu-dresden.de/studium/vor-dem-studium/service-fuer-schulen>
(Schülerlabore, Workshops, Sommeruni, ...)

❖ **Gemeinsam von Schule und Wissenschaft**

- Bspw. Netzwerk Teilchenwelt www.teilchenwelt.de
- An der TU Dresden geleitet für 34 Standorte in Deutschland
- Wir gehen (überall !) in Schulen – und ins Freie

