

A visualization of the cosmic web, showing a vast network of dark matter filaments and galaxy clusters. The filaments are represented by dense streams of blue and purple points, with bright yellow and white spots indicating galaxy clusters. The overall structure is a complex, interconnected web that fills the entire frame.

Frontiers of Extragalactic Astrophysics

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- 24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie
- 07.11.08: Urknall
- 21.11.08: ausgefallen
- **05.12.08: Inflation**
- 19.12.08: Multiversen (& Inflations-Experimente)

Weihnachtsferien

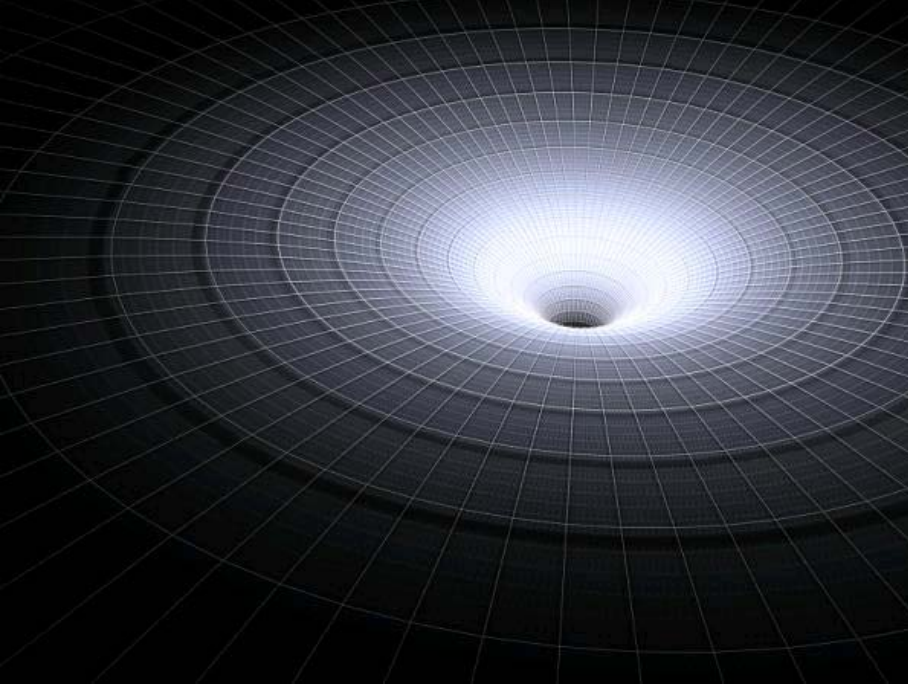
- 09.01.09: Wurmlöcher und Schwarze Löcher
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen
- GLAST

- Programm:
 - Aktuelles
 - Planeten, Extra-Dimensionen
 - etc.
 - Urknall-Theorie
 - Was war der Anfang unseres Universums?
 - Woher wissen wir, daß der Urknall stattgefunden hat?
 - Planck
 - Wie lief der Urknall ab?
 - Schönheitsfehler der Urknall-Theorie
 - Supernova-Beobachtungen
 - Inflation
 - Warum ist eine inflationäre Phase erforderlich?
 - Wie kann die Inflation erzeugt/erklärt werden? Welche Modelle gibt es? Welche Rolle spielt die Stringtheorie?
 - Experimentelle Überprüfung der Inflation
 - (Zusammenfassung – am 19.12.)



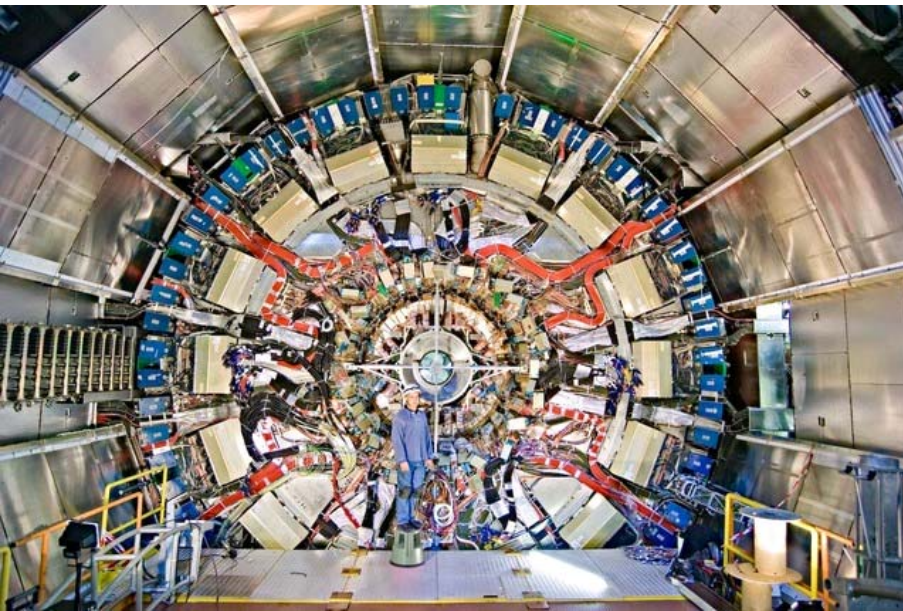
AKTUELLES

Suche nach Extradimensionen im Universum

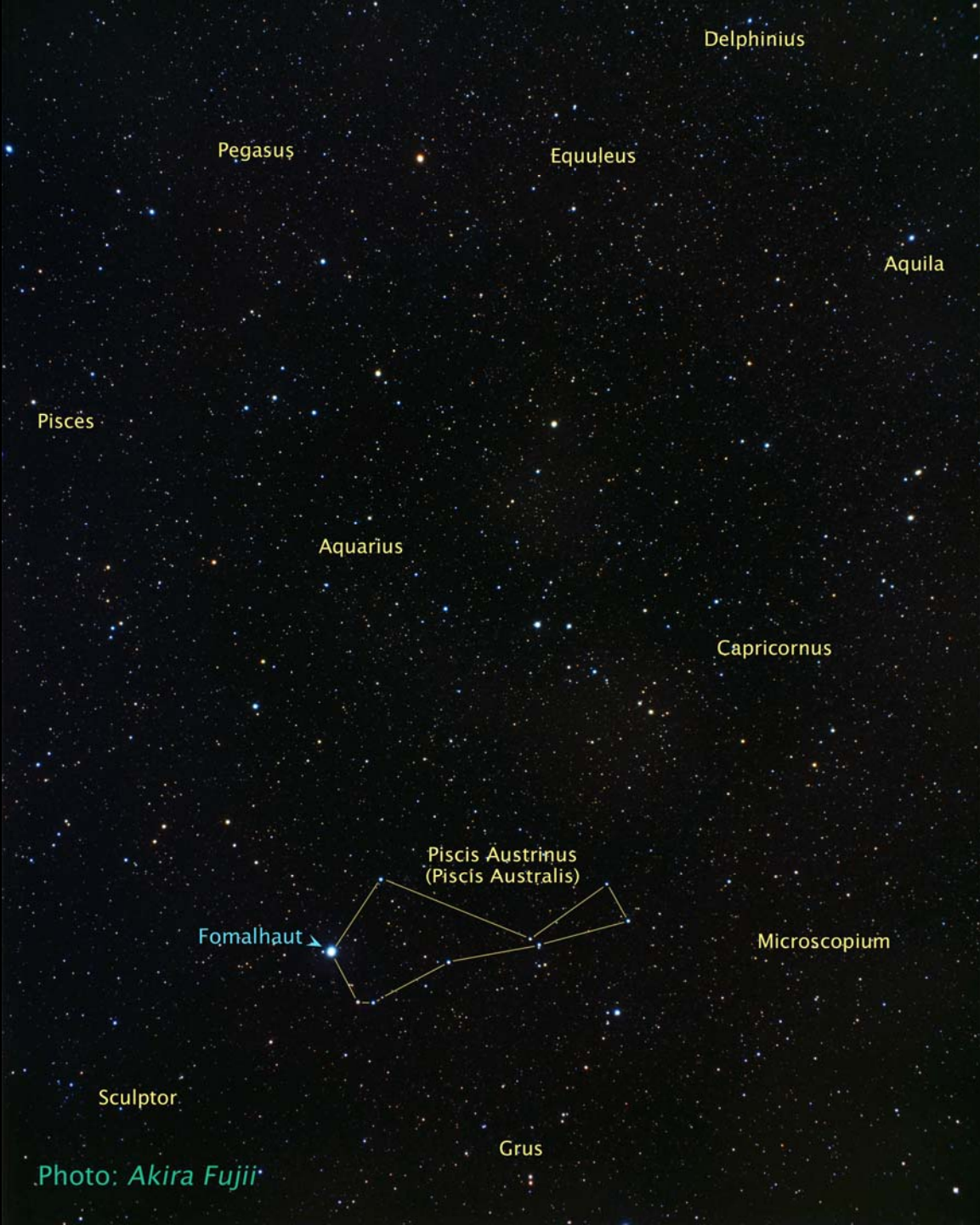


- BlackMax: ein Simulator für Schwarze Löcher, soll bei der Suche nach Extradimensionen helfen
- Computerprogramm simuliert und hilft Theorien zu testen, berücksichtigt Effekte, die am LHC möglich sind (Experiment ATLAS)

<http://www-pnp.physics.ox.ac.uk/~issever/BlackMax/blackmax.html>



- Die Zerfälle von schwarzen Löchern sollten mehr Teilchen als normalerweise (andere Experimente) erzeugen, Gravitonen könnten ebenfalls erzeugt werden
- Sollten sie erzeugt werden, bliebe ihnen nicht mehr Zeit, als ein menschliches Haar zu passieren – geschweige denn, den Detektor zu verlassen



Delphinus

Pegasus

Equuleus

Aquila

Piscis

Aquarius

Capricornus

Piscis Austrinus
(Piscis Australis)

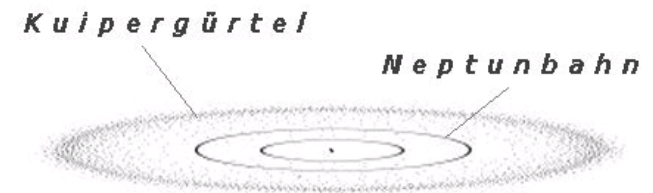
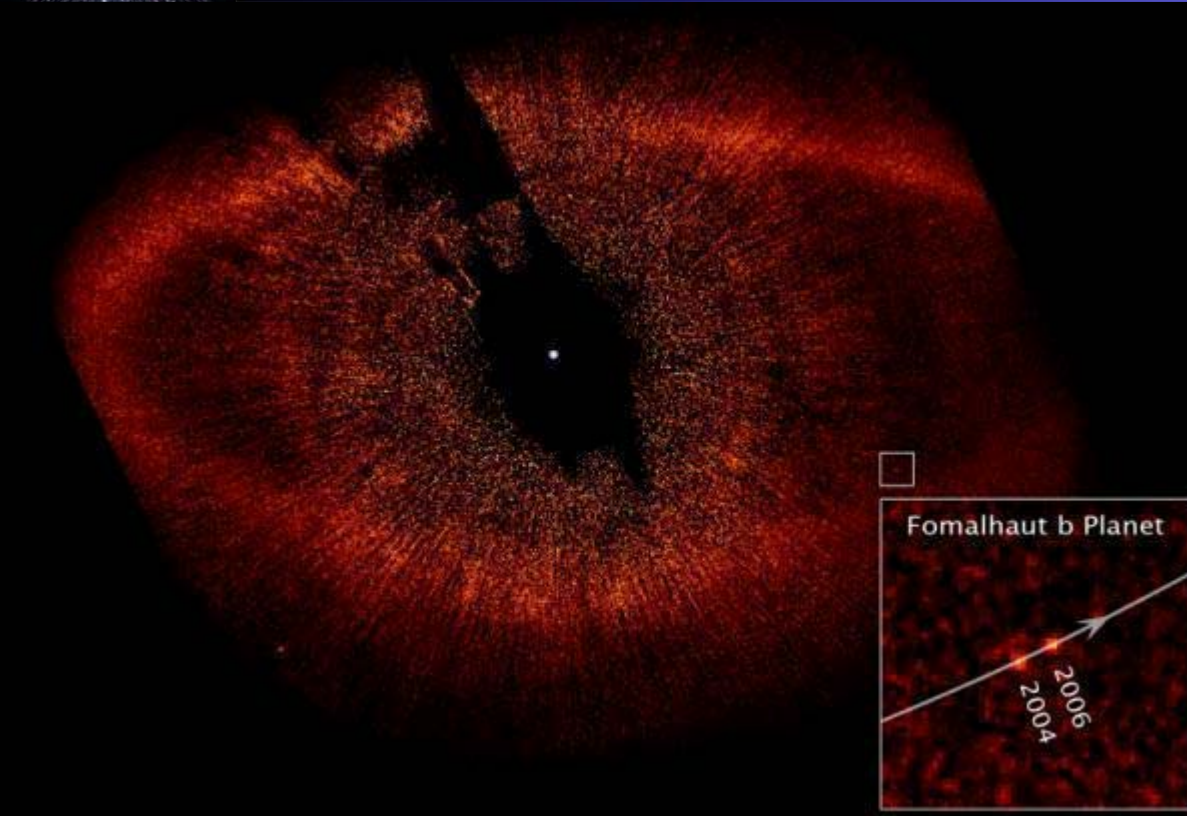
Fomalhaut

Microscopium

Sculptor

Grus

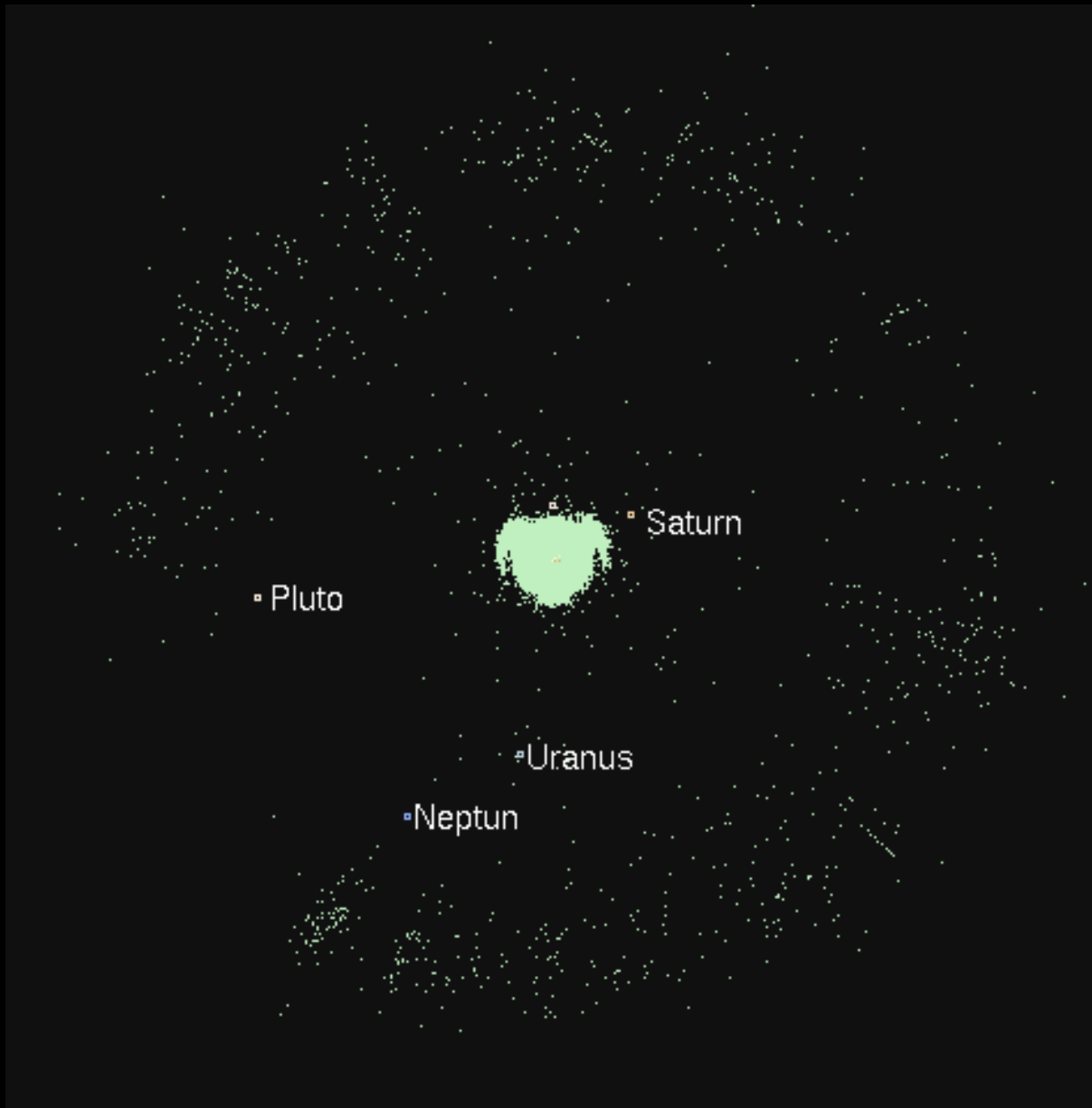
Photo: Akira Fujii



- 13.11.08; Hubble macht erstes Bild eines Planeten, der sich um einen Stern bewegt im Optischen
- 3fache Jupitermasse, in 25 Lichtjahren im „südlichen Fisch“
- War Kandidat seitdem in den frühen 80iger Jahren viel Staub um den Stern mit IRAS gefunden worden war
- Staubgürtel 2004 entdeckt, protoplanetare Materie mit scharfer inneren Kante, vergleichbar Kuipergürtel im Sonnensystem



Kuipergürtel



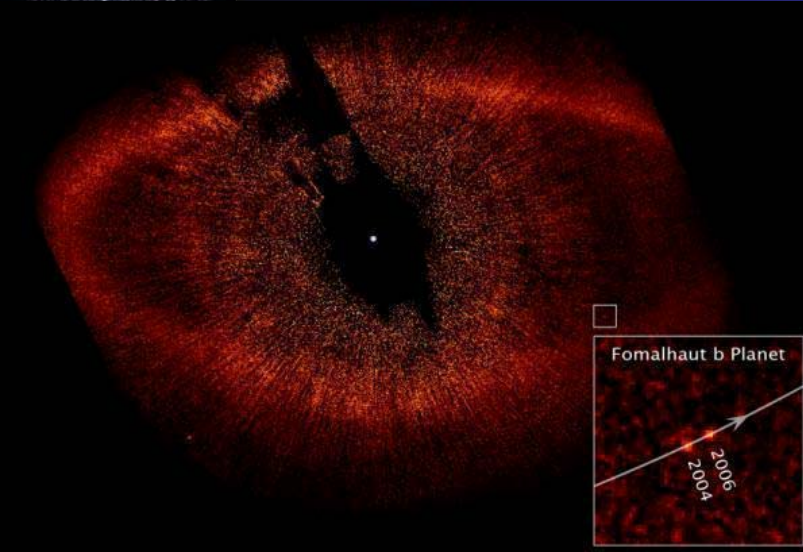
Scheibenförmige Region

befindet sich im Sonnen-System außerhalb der Neptunbahn in einer Entfernung von 30-50 AE

Beherbergt vermutlich mehr als 70 000 Objekte (800 detektiert), die je einen Durchmesser von mehr als 100 km haben

Auch Edgeworth-Kuiper-Belt genannt

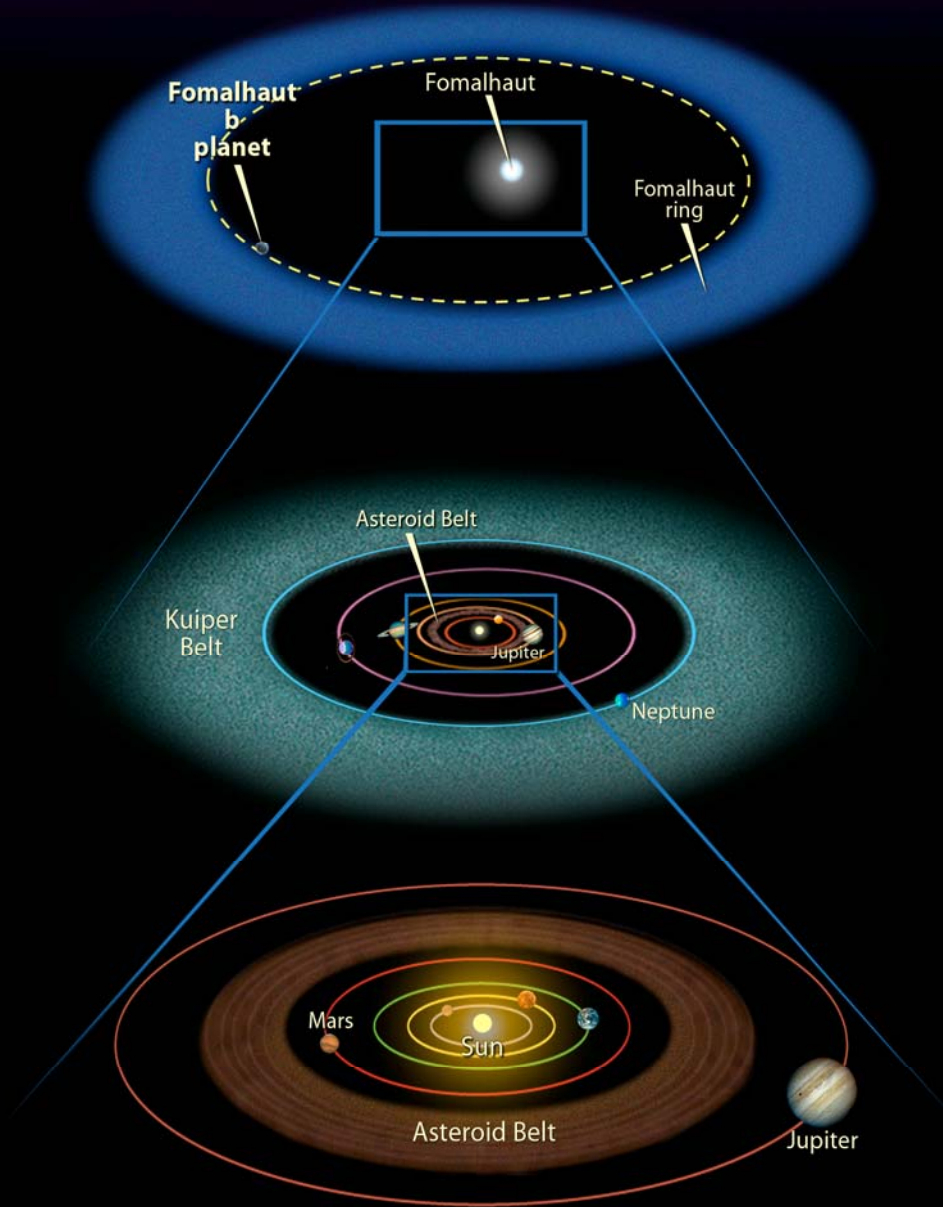
Planeten



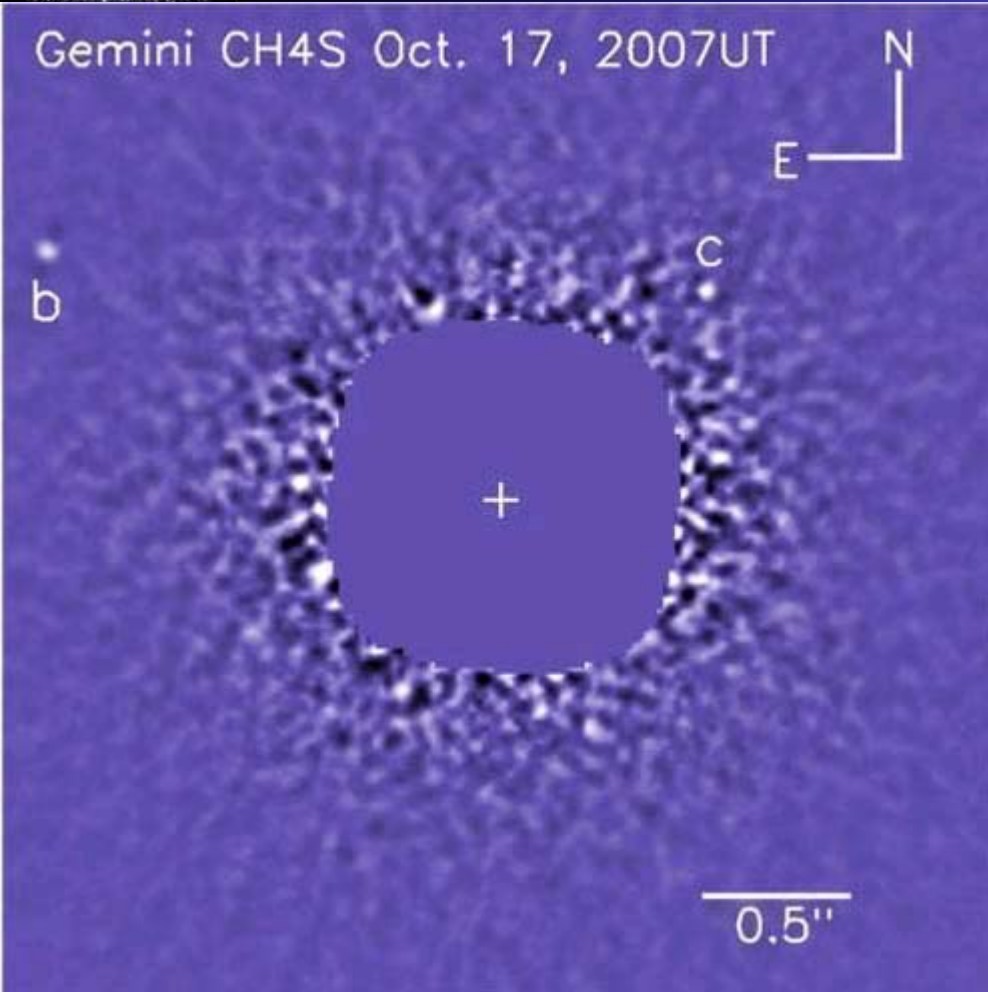
- Kuipergürtel enthält eisige Körper von Staubteilchen zu Objekten der Größe von Zwergplaneten, z.B. Pluto
- Hubble hat jetzt eine Punktquelle 1.8 Milliarden Meilen innerhalb der inneren Ringkante detektiert, 1 Milliarde mal schwächer als der Stern, Programm startete in 2001
- Beobachtungen vor 21 Monaten zeigen, daß das Objekt sich um den Stern bewegt und gravitationell an ihn gebunden ist. Der Planet befindet sich 10.7 Milliarden Meilen entfernt von dem Stern oder 10mal die Distanz des Saturns von der Sonne



Comparison of Fomalhaut System and Solar System



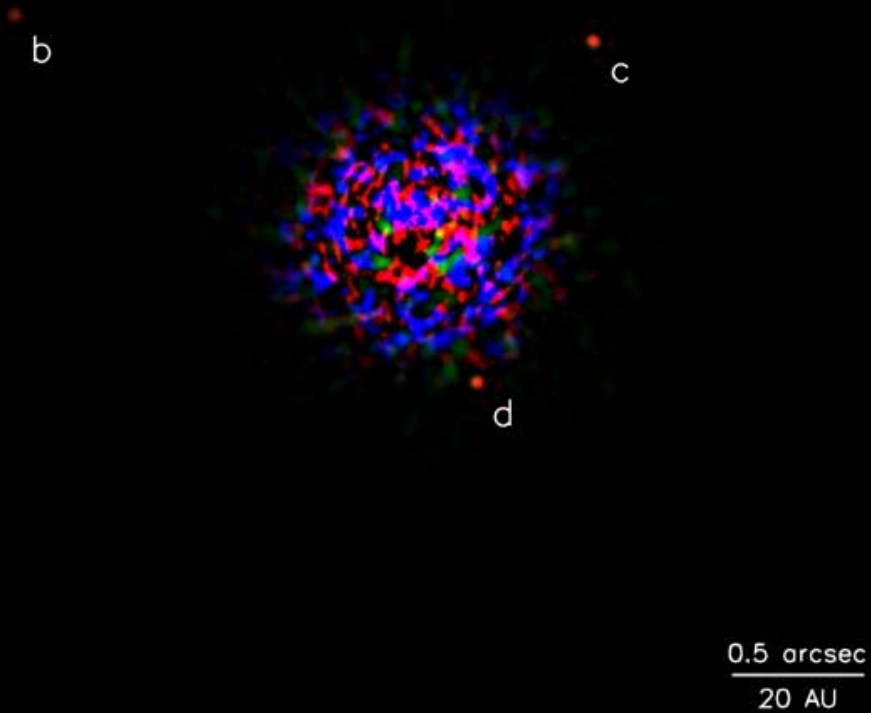
Planeten



- 13.11.08; Gemini North und Keck detektieren ein Multi-Planeten System um einen normalen Stern HR8799
- b & c:
 - b hat 7fache Jupitermasse in Entfernung von 70 AU
 - c: 10fache Jupitermasse in 40 AU
- Stern in der Mitte aus Bild ausgeblendet
- 130 Lichtjahre von der Erde entfernt
- 3 Planeten bewegen sich um den Stern; entstanden von 60 Mio Jahren, noch heiß genug von der Kontraktionsphase
- Stern hat 1.5 fache Sonnenmasse, 5fach so leuchtkräftig und deutlich jünger als die Sonne

Planeten

HR 8799 Planetary System
(Sept. 2008)

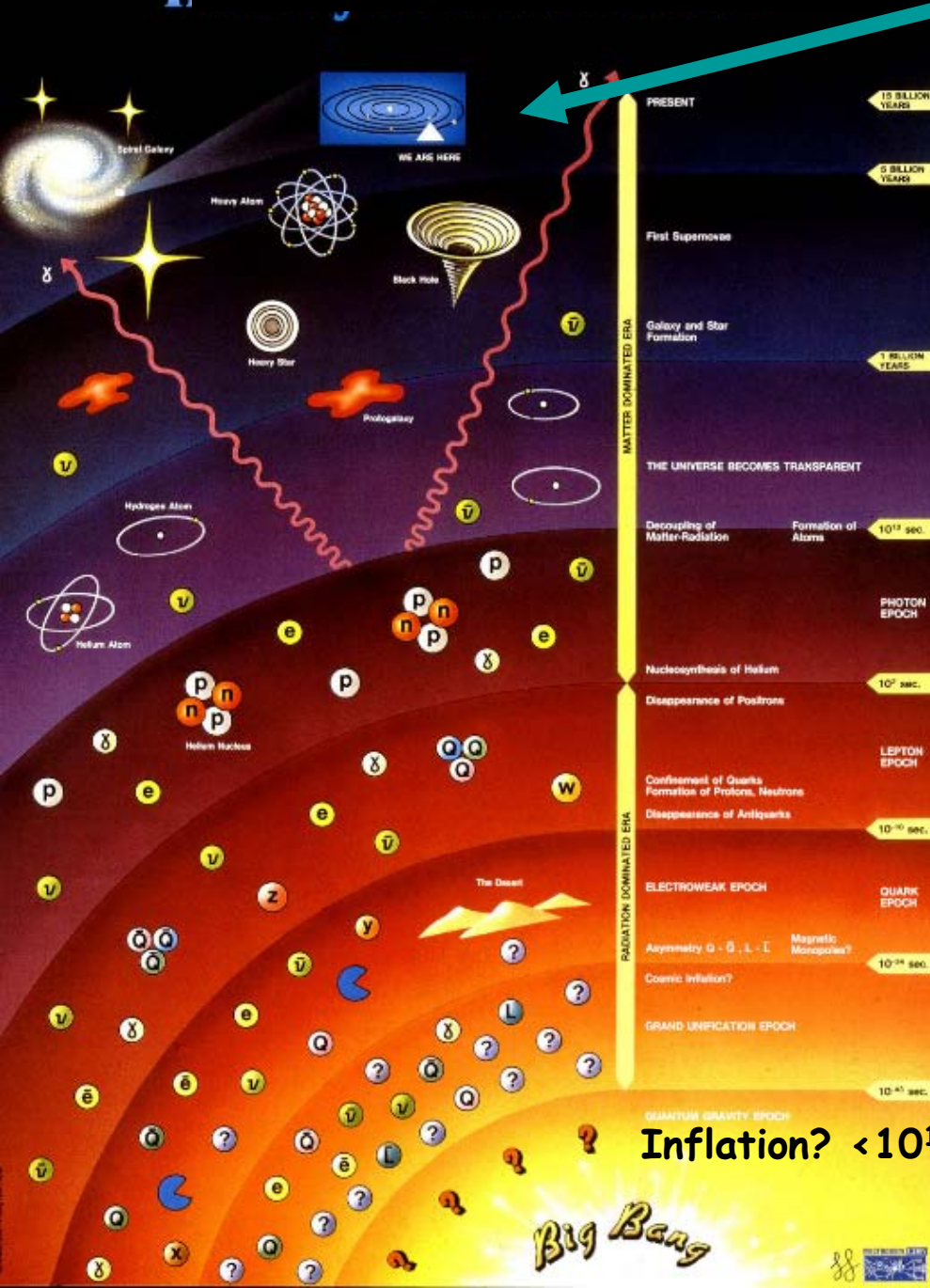




Schönheitsfehler des
„Urknall-Modells“

History of the universe

You are here



← NOW (15 Billion years)

← Stars form (1 Billion years)

CMB & B mode polarization

← Atoms Form (300 000 years)

← Nuclei Form (180 seconds)

← Protons and Neutrons Form (10^{-10} sec)

← Quarks Differentiate (10^{-34} sec ?)

Inflation? $< 10^{16}$ GeV

LHC probes physics relevant to the universe at age 10^{-14} sec.

- Inflationary Universe by Alan Guth (Perseus)
- A Short History of the Universe by Joseph Silk (Scientific American Library)
- Before the Beginning by Martin Rees (Perseus)
- Inflation for Beginners (John Gribbin)
http://www.biols.susx.ac.uk/Home/John_Gribbin/cosmo.htm
- Ned Wright's Cosmology Tutorial
<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

News of the Universe!!

Cosmology and Religion

- James Schombert Lectures
http://zebu.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec24.html

- Bell Labs Cosmology Archives

<http://www.bell-labs.com/project/feature/archives/cosmology/>

Vorwiegend Penzias & Wilson, Nobelpreis-Rede

- Big Bang Cosmology Primer

http://cosmology.berkeley.edu/Education/IUP/Big_Bang_Primer.html

- Martin White's Cosmology Pages

<http://astron.berkeley.edu/~mwhite/darkmatter/bbn.html>

WMAP mission <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

SNAP mission <http://snap.lbl.gov/>

- Brian Schmidt's Supernova Pages

<http://msowww.anu.edu.au/~brian/PUBLIC/public.html>

Alles zu den Supernova-Messungen und deren Konsequenzen

- WMAP Teacher's Guide by Lindsay Clark

<http://www.astro.princeton.edu/~clark/teachersguide.html>

- George Smoot's group pages <http://aether.lbl.gov/>

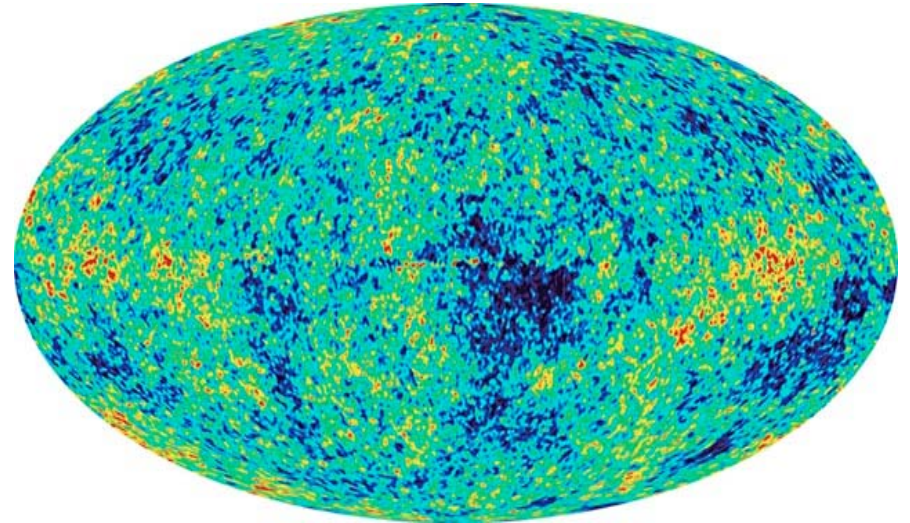
George F. Smoot and John Mather share the 2006 Nobel prize "for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation."

- Universe Adventure: <http://universeadventure.org/>



- Hubble-Expansion
- Elementverteilung im Universum

- Kosmischer Mikrowellenhintergrund



Probleme der Standard Urknall-Theorie:

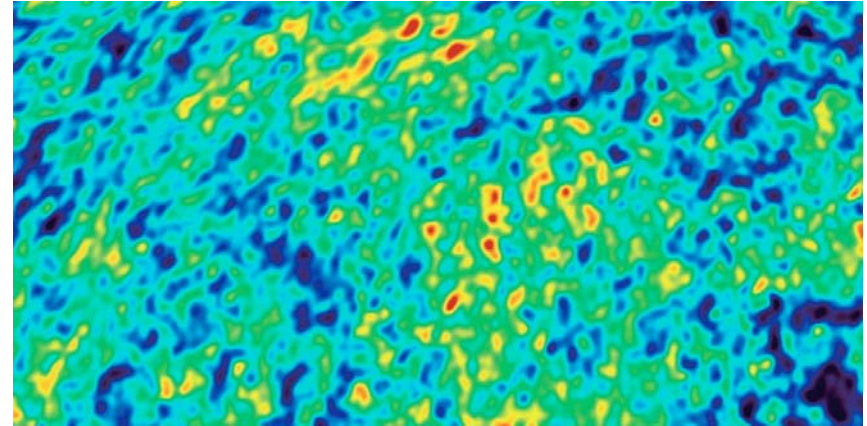
- Was war vor dem Big Bang?
- Warum ist unser Universum so **homogen** (besser als 1 in 10000) ?
- Warum ist es **isotrop** (gleich in allen Richtungen)?
- Warum haben alle Teile gleichzeitig mit der Expansion begonnen ?
- Warum ist es **flach**? Warum schneiden sich parallele Linien nicht?
Warum enthält es so viele Teilchen ?

- Alles, was nach dem Urknall geschah, läßt sich mit der Allgemeinen Relativitätstheorie erklären, aber die UrExplosion selbst ist den Formeln von Einstein nicht zugänglich – herkömmlichen physikalischen Gesetze verlieren ihre Gültigkeit in der Singularität
- Homogenitätsproblem
- Flachheitsproblem
- Horizontproblem
- Fehlen magnetischer Monopole
- Supernova-Beobachtungen – Dunkle Energie

The image shows a cosmic background radiation map, likely from the COBE satellite. It features a central bright spot where four lines intersect, forming a cross-like pattern. The background is a dense field of stars and galaxies, with a color gradient from blue to red. The text "Homogenitätstproblem" is centered over the bright spot.

Homogenitätstproblem

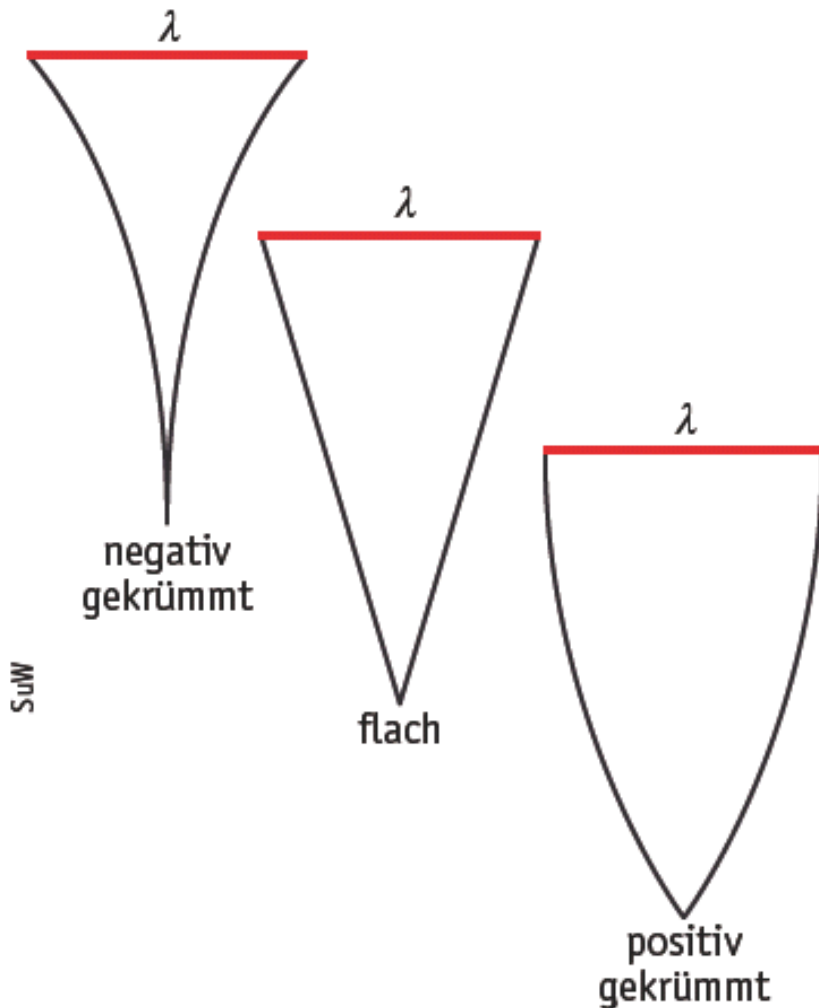
- Die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am Himmel ist extrem gleichförmig
- Uniformität wurde bereits auf der mikroskopischen Skala durch einfache, thermische Gleichgewichtsprozesse erzeugt



Das Problem besteht aber darin, daß sich nach dem Standardmodell thermische Fluktuationen zur Plankzeit oder aber auch zur Zeit des GUT-Phasenübergangs schneller entwickeln sollten, als sie es getan haben, da in der Hintergrundstrahlung, den COBE-Messungen zufolge, nur Fluktuationen mit $\frac{\delta\rho}{\rho} < 10^{-4}$ auftreten. Abschätzungen für die Entwicklung von thermischen Schwankungen zur Plankzeit nach dem Standardmodell führen zu größeren Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung.¹



Flachheitsproblem

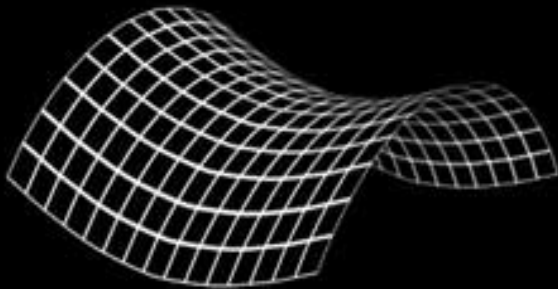
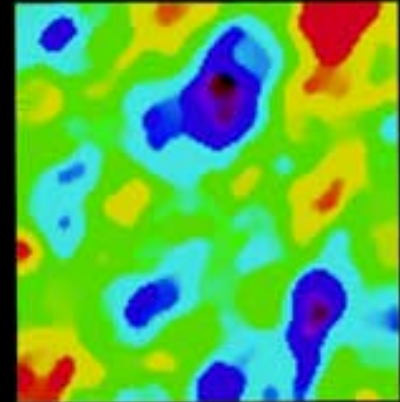
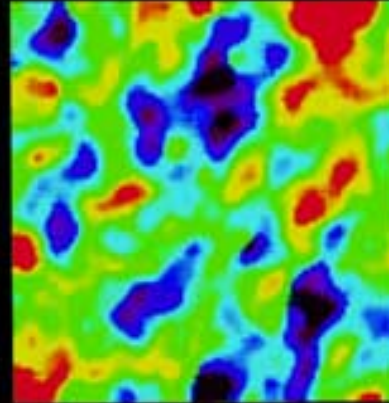
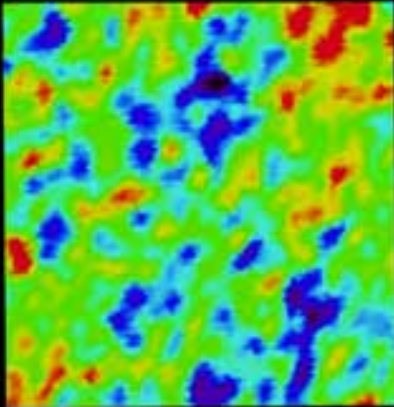


Eigentlich – ohne Inflation – sollte die Krümmung mit der Zeit immer mehr zunehmen und die Dichte gegen 0 oder unendlich gehen



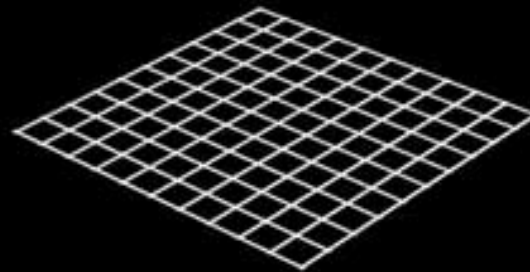
Abb. 6: Der Winkel, unter dem uns eine gegebene Länge in einer gegebenen Entfernung erscheint, hängt von der Art der Raumkrümmung ab.

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



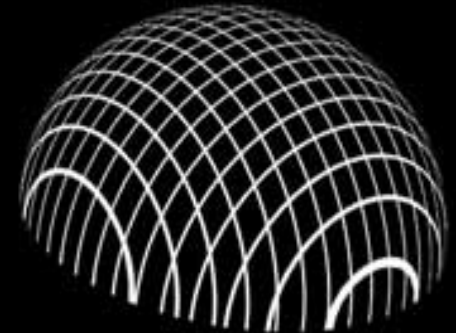
OPEN

Fluctuations largest on half-degree scale



FLAT

Fluctuations largest on
1-degree scale

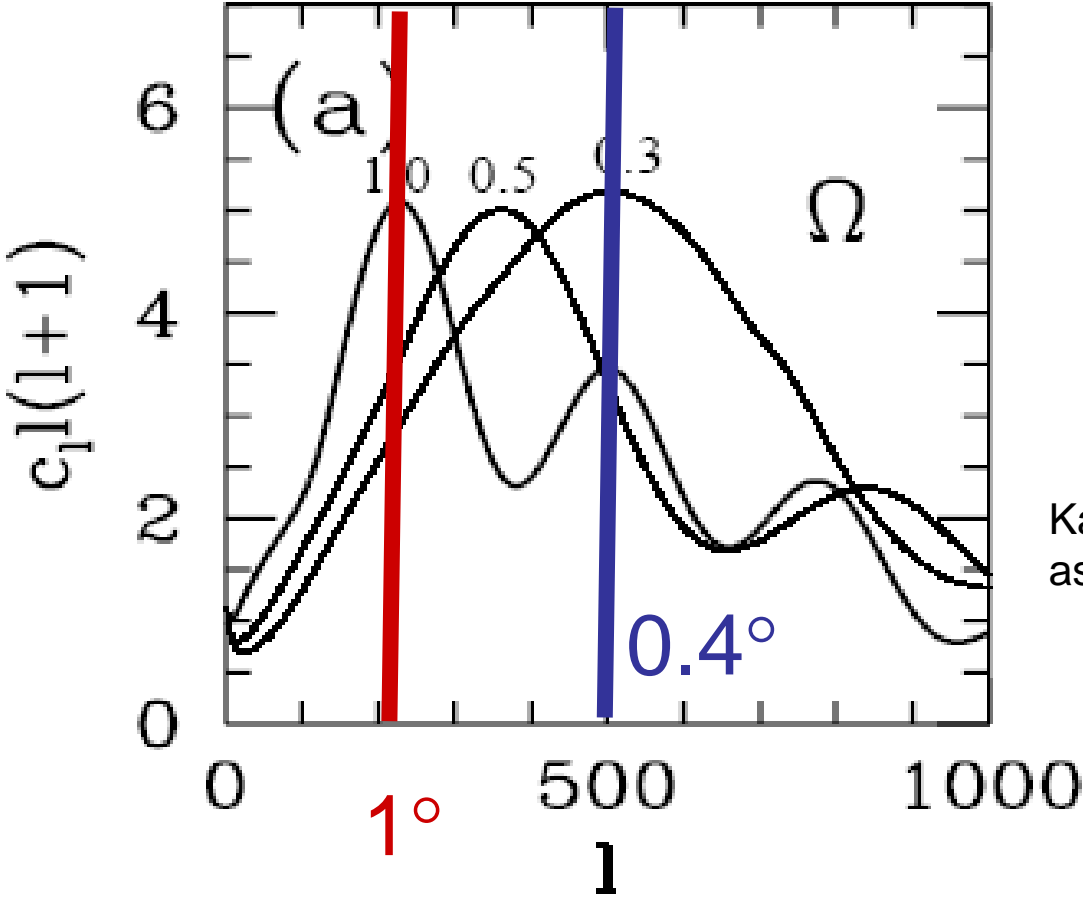


CLOSED

Fluctuations largest on
greater than 1-degree scale

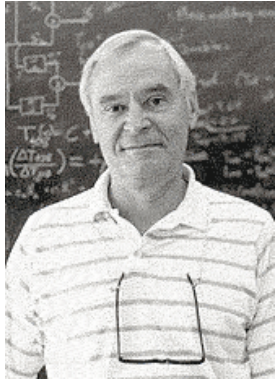
From the WMAP website

Vorhersagen von 1998

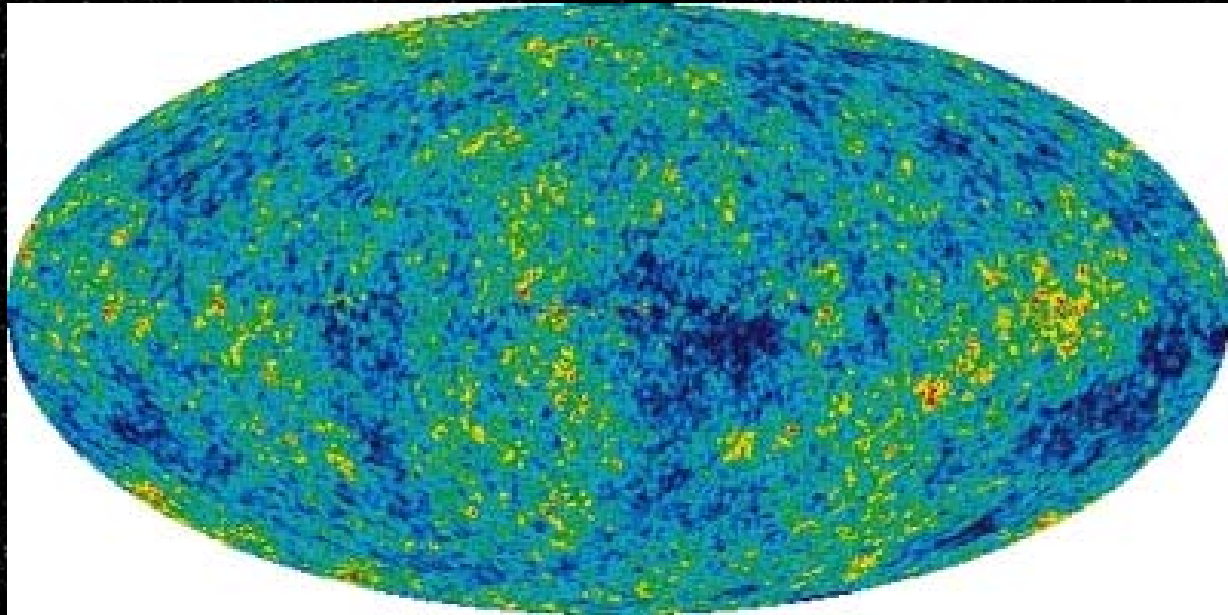


Kamionkowski: 1998
astro-ph/9712215

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

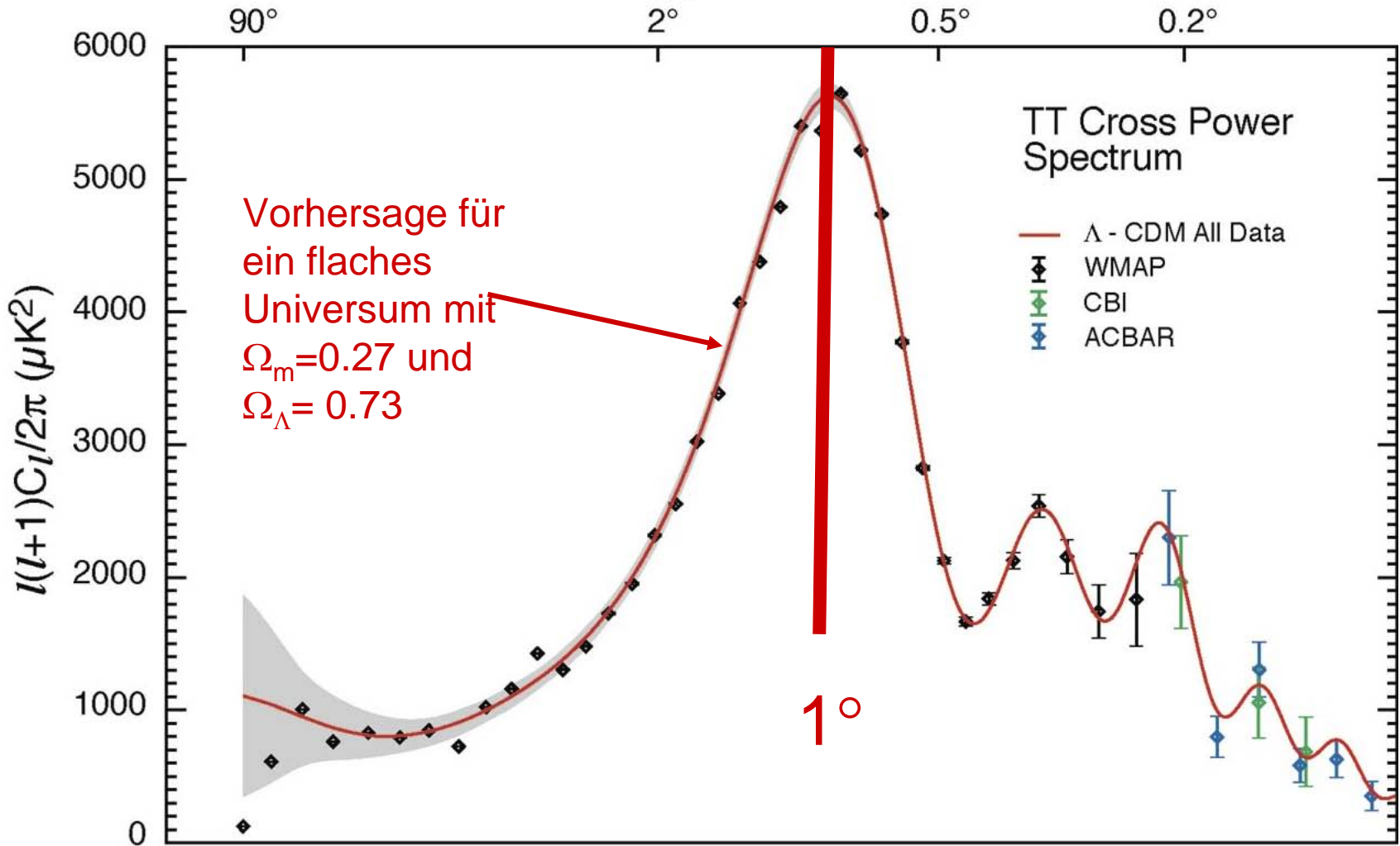


David Wilkinson
University of
Michigan Alum



Messungen 2003

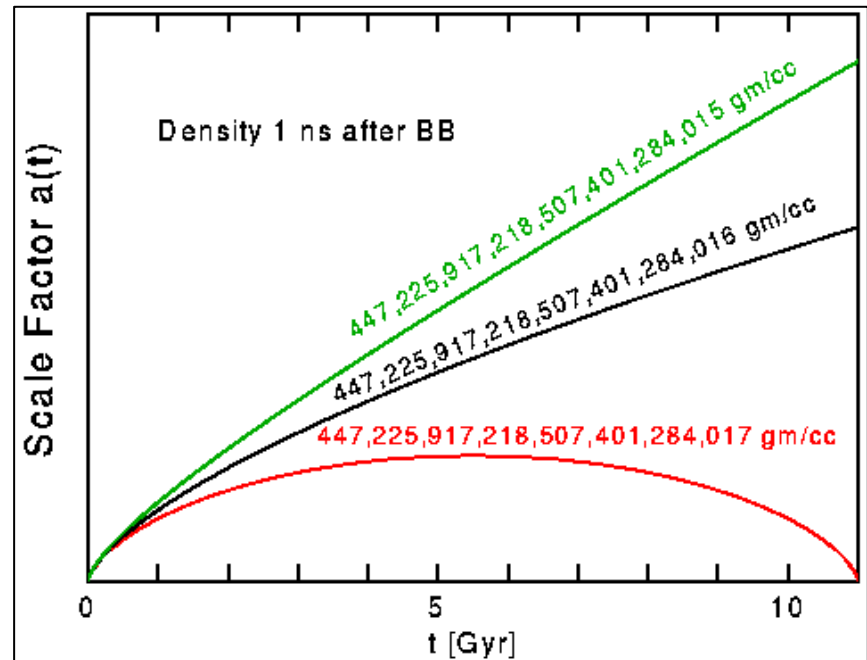
Angular Scale



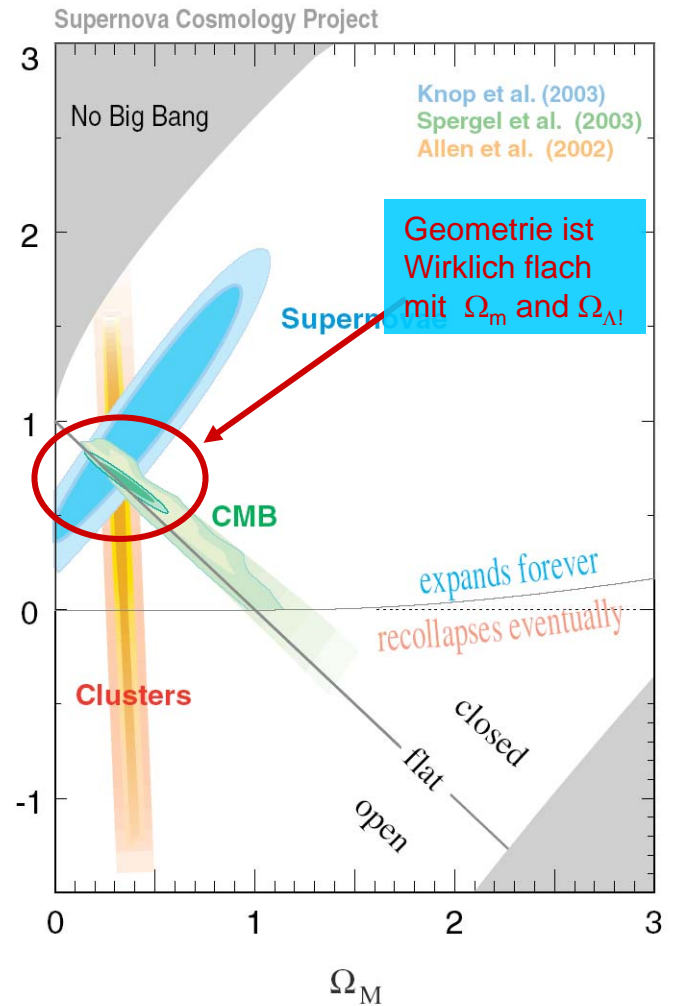
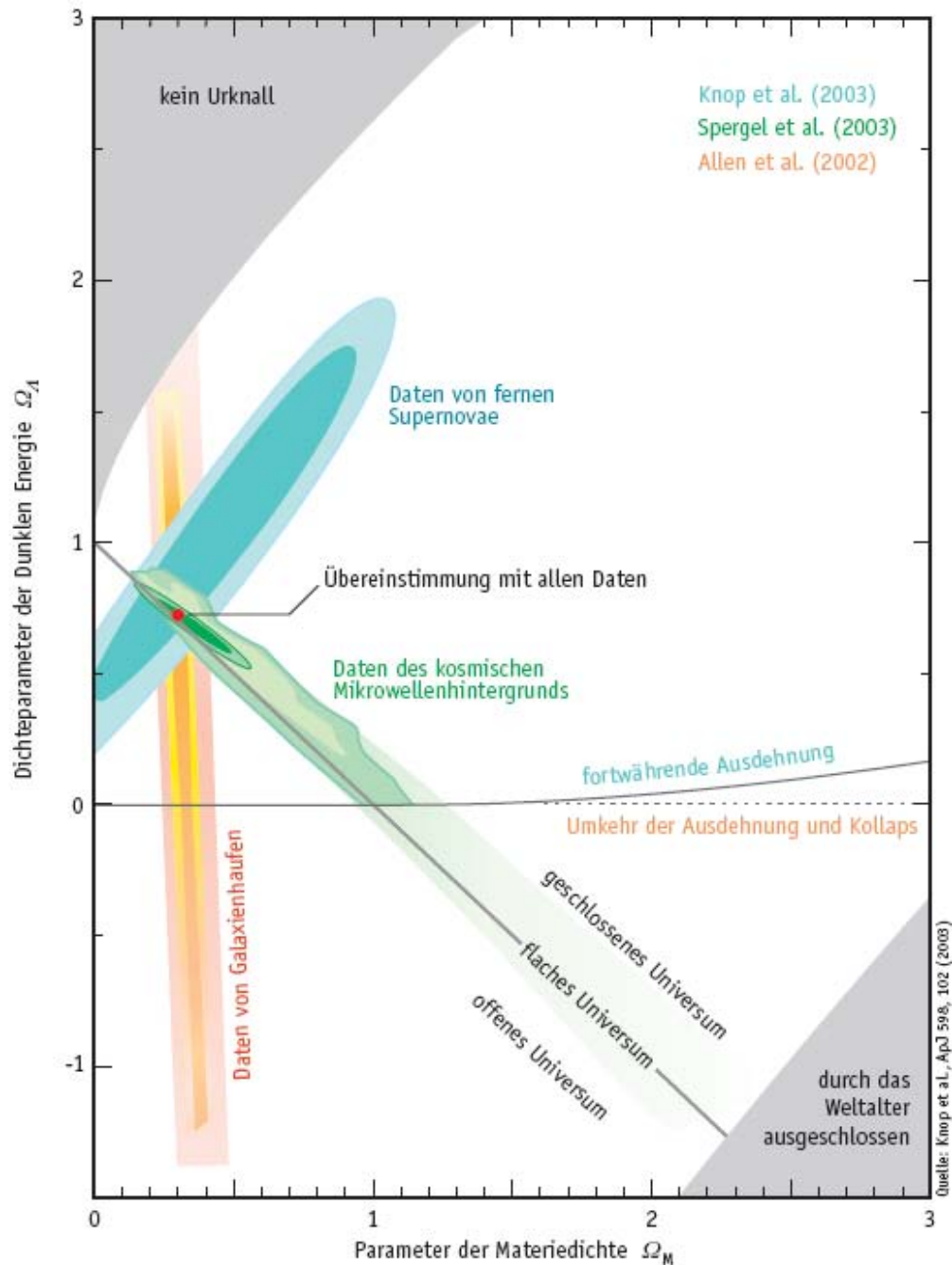
WMAP team: Hinshaw et al. 2003

Flachheitsproblem

- Warum erscheint das Universum ausgerechnet nahe der kritischen Linie die ein offenes von einem geschlossenen Universum unterscheidet?
- Dichte des frühen Universums muß genau stimmen zu $1 \text{ in } 10^{60}$ um die Balance zu erzeugen, die wir sehen



Flachheitsproblem



A diagram illustrating the horizon problem in cosmology. It features a central bright white point from which four purple lines radiate outwards, forming a large 'X' shape. The background is a dense field of blue and purple stars and galaxies, with a prominent horizontal band of light across the center, representing the cosmic microwave background. The overall scene is set against a dark, starry space.

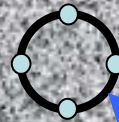
Horizontproblem



Horizontproblem

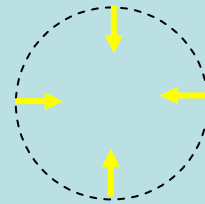
- Das Universum sieht in allen Richtungen am Himmel gleich aus – obwohl es seit dem Urknall nicht genug Zeit gegeben hat, damit das Licht sich zwischen zwei entgegengesetzten Punkten am Horizont hätte bewegen können.
- Wie konnten dann die sich gegenüberliegenden Horizonte gleich entwickeln? (CMB Temperatur)?
- Temperatur des Mikrowellenhintergrundes ist bis auf 10^{-5} K homogen
- Wechselwirkung (Gleichgewicht) zwischen sichtbaren Teilen des Universums aber nicht möglich!

Das frühe Universum ist ein heißes,
dichtes, opakes Plasma, was expandiert

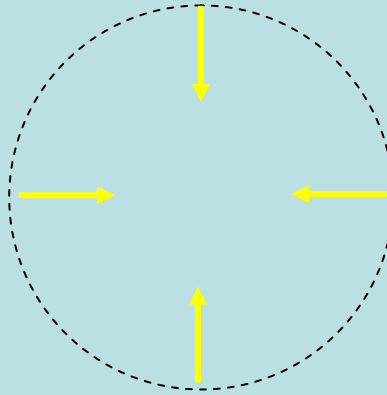


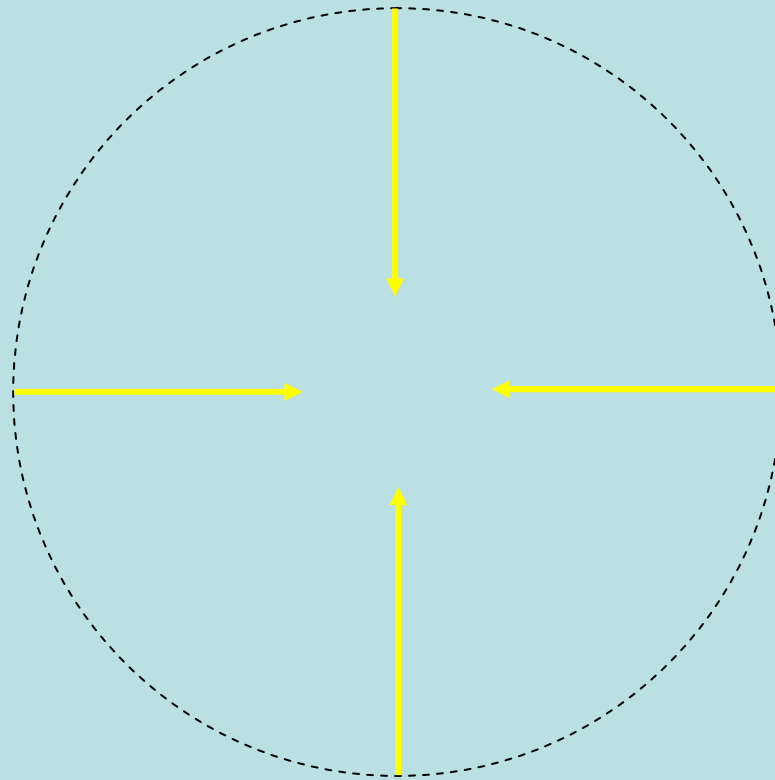
Innerhalb dieses Kreises ist alles, was wir
heute im Universum sehen können

Nach der Expansion und Abkühlung wird es
neutral und Licht bewegt sich durch den Raum



Das Universum expandiert, Licht bewegt sich zu uns von den Punkten des momentanen Horizonts





Expansion bremst ab aufgrund der Expansion
und das Licht kommt näher zu uns

Das Licht von jeder Seite
hatte *gerade genug* Zeit,
uns zu erreichen. Kein
Licht von einer Seite
kann jemals die andere
Seite erreicht haben...

Wie können dann aber
zwei Seiten so *präzise*
dieselbe Temperatur
aufweisen, wenn kein
Signal jemals von einer
Seite zur anderen gelangt
ist?



Genau das ist das
Horizontproblem

Und endlich erreicht uns
heutzutage das Licht



Monopolproblem

- Bei der Abkühlung des Kosmos sollten topologische Quasiteilchen entstanden sein, die die GUT und Symmetriebrechung voraussagen, speziell die magnetischen Monopole
- Monopole sollten in solcher Zahl entstanden sein, daß ihre Massendichte das heutige Universum bestimmen müßte
- ABER: noch kein einziger Monopol gefunden!! Warum??
- Nur mit Mühe lassen sich Modelle entwickeln, in denen die Entstehungsrate so verringert und der Zerstrahlungsquerschnitt so vergrößert ist, daß die heutige Dichte nicht überwiegt.
- Ausweg:
 - Universum war nie so heiß
 - Monopole entstanden später und damit verdünnter
 - In der Phase der Inflation ausgedünnt

Monopolproblem

Monopole sind sehr schwere Teilchen ($m_M \approx 10^{16}$ GeV) die zudem Quelle magnetischer Felder sind. Nach den GUT-Theorien, sollen sie beim Phasenübergang von der symmetrischen $SU(5)$ Phase in die gebrochene Phase ($SU(3) \times SU(2) \times U(1)$) entstehen können. Die anschließenden Annihilationsprozesse der so entstandenen Monopole und Antimonopole laufen so ab, daß pro kohärentem Higgsfeldvolumen (Kohärenzlänge ξ) ein Monopol im Mittel übrigbleiben sollte. Zur Abschätzung der Monopoldichte, ist also eine Abschätzung der Größe der kohärenten Volumina nötig. Abschätzung der Monopoldichte im Universum:

Vergleicht man diese Energiedichte mit der kritischen Energiedichte: $\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c} \geq 3 \cdot 10^{11}$, sieht man, daß die sich aus dem Standardmodell ergebende Energiedichte der Monopole viel zu groß ist, um unser heutiges Universum zu beschreiben. Ein Universum mit einer solchen Energiedichte, hätte zum Erreichen des Expansionszustandes wie er heute beobachtet wird, lediglich 30000 Jahre Zeit gehabt, was aber offensichtlich jeglicher Beobachtung widerspricht. Eine Lösung dieses Problems ist demnach mit einem Mechanismus verknüpft, der die Monopole vernichtet oder aber stark verdünnt.



Supernova-Beobachtungen

Supernovae

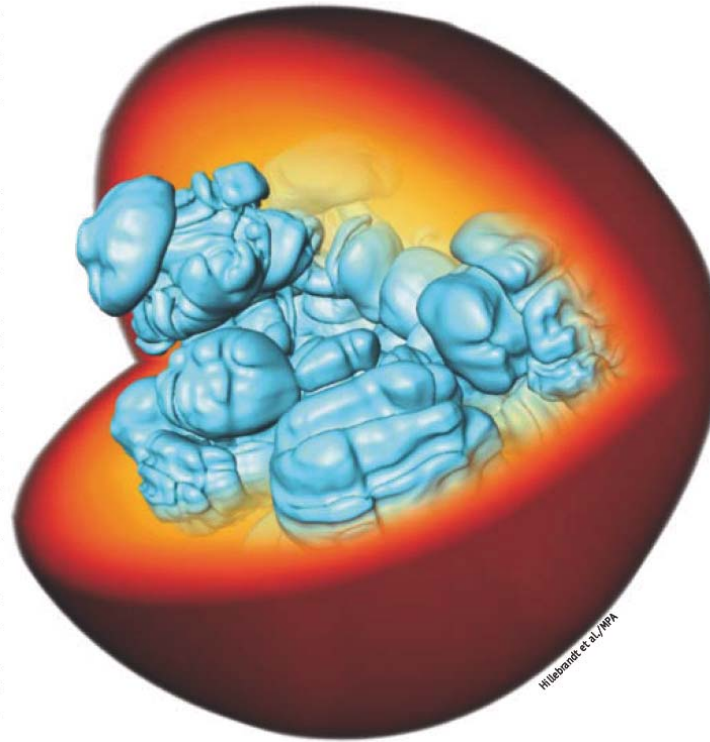
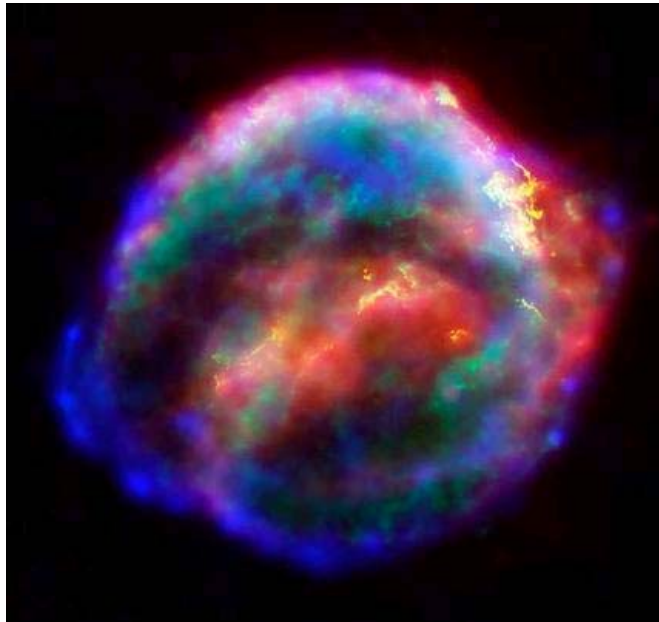
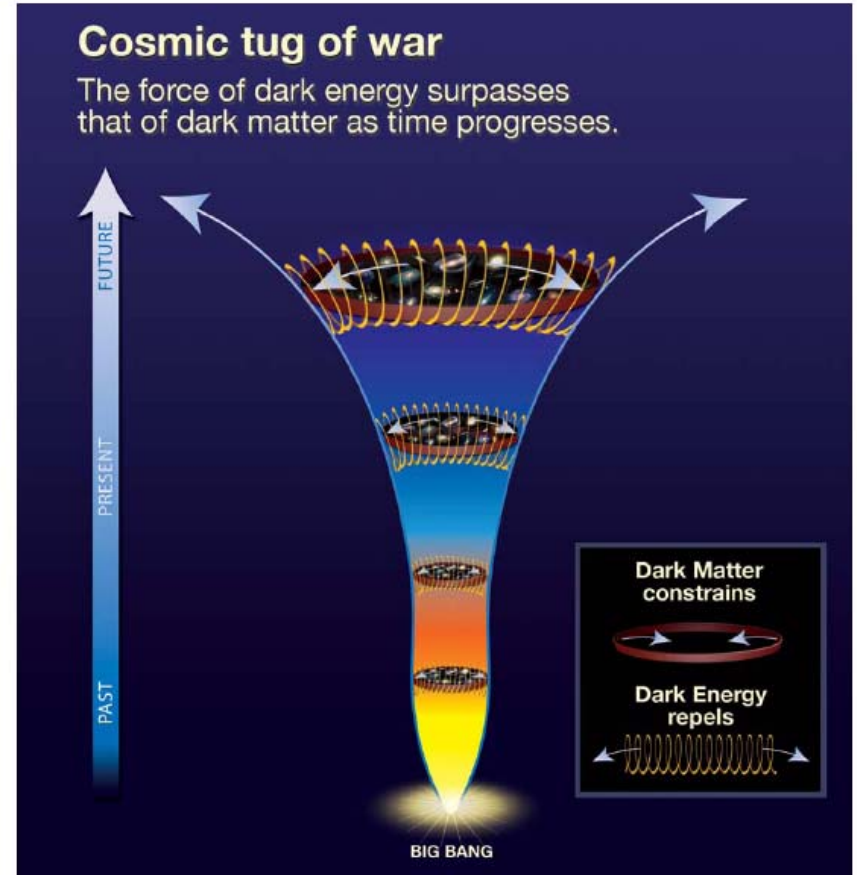
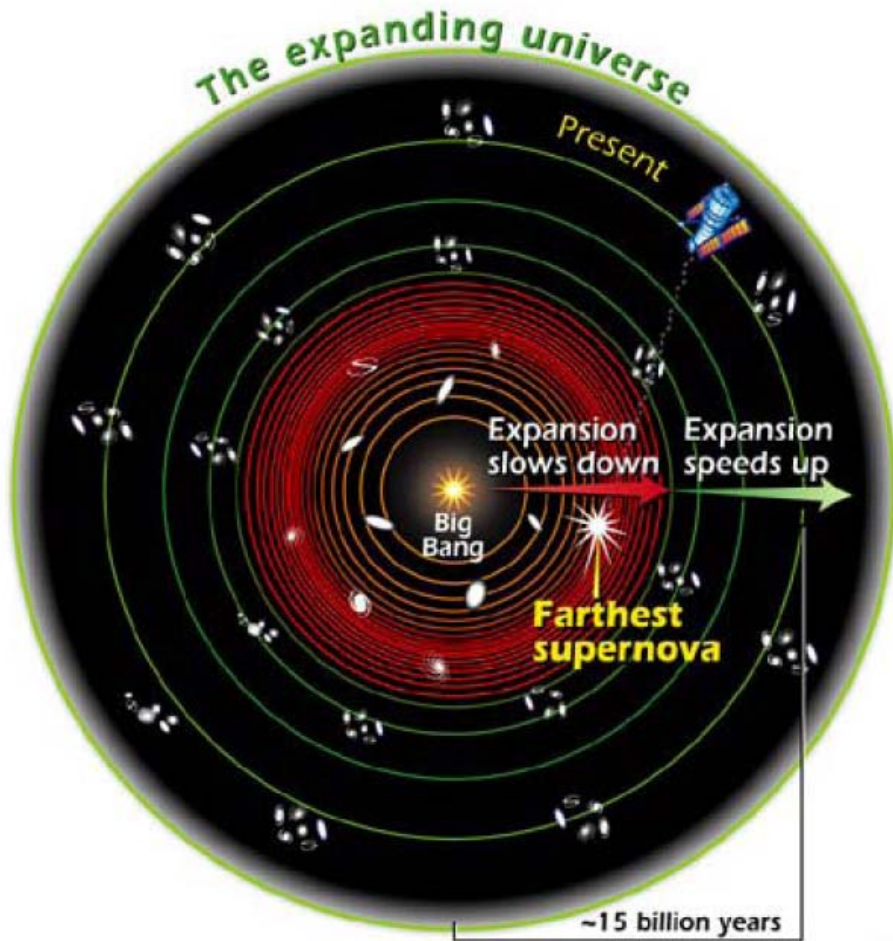


Abb. 8: Die Explosion einer Supernova vom Typ Ia verläuft im Detail sehr kompliziert. Erst kürzlich gelang es Wolfgang Hillebrandt und seinen Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, die turbulente Ausbreitung der nuklearen Brennfront im Kern einer solchen Supernova realistisch zu simulieren.

Äußerst
überraschendes
Resultat von 1998: die
Expansion des
Universums
beschleunigt sich!!

Dunkle Materie gegen Dunkle Energie



Supernovae

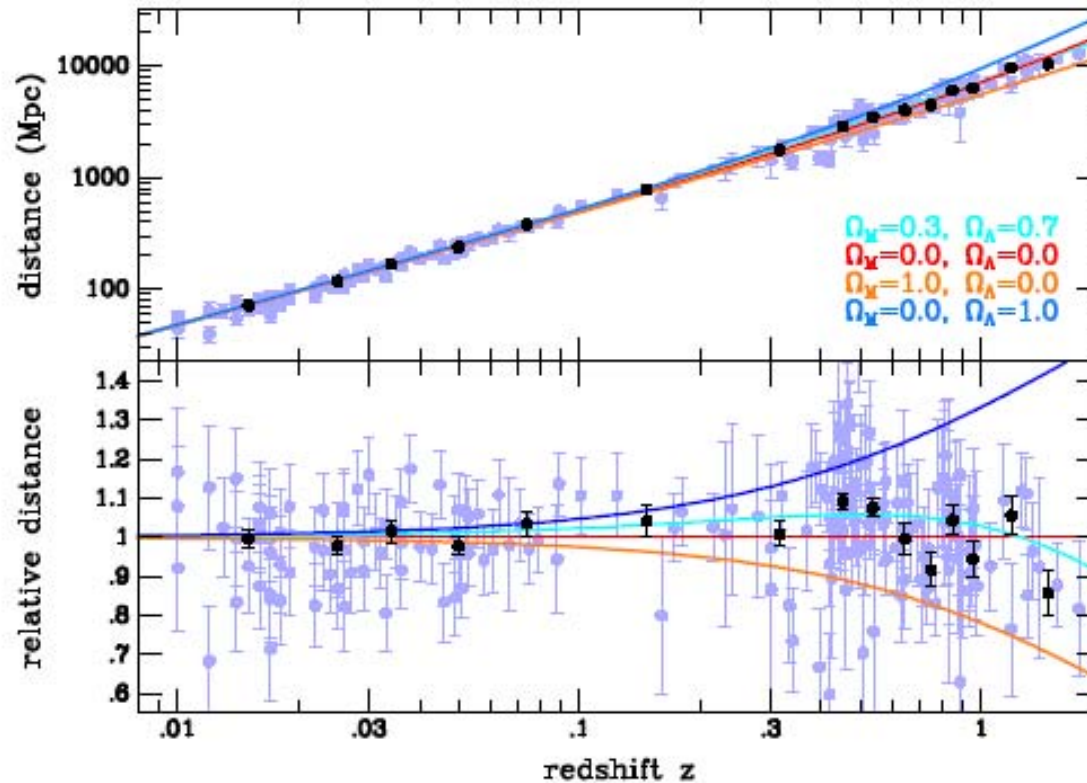
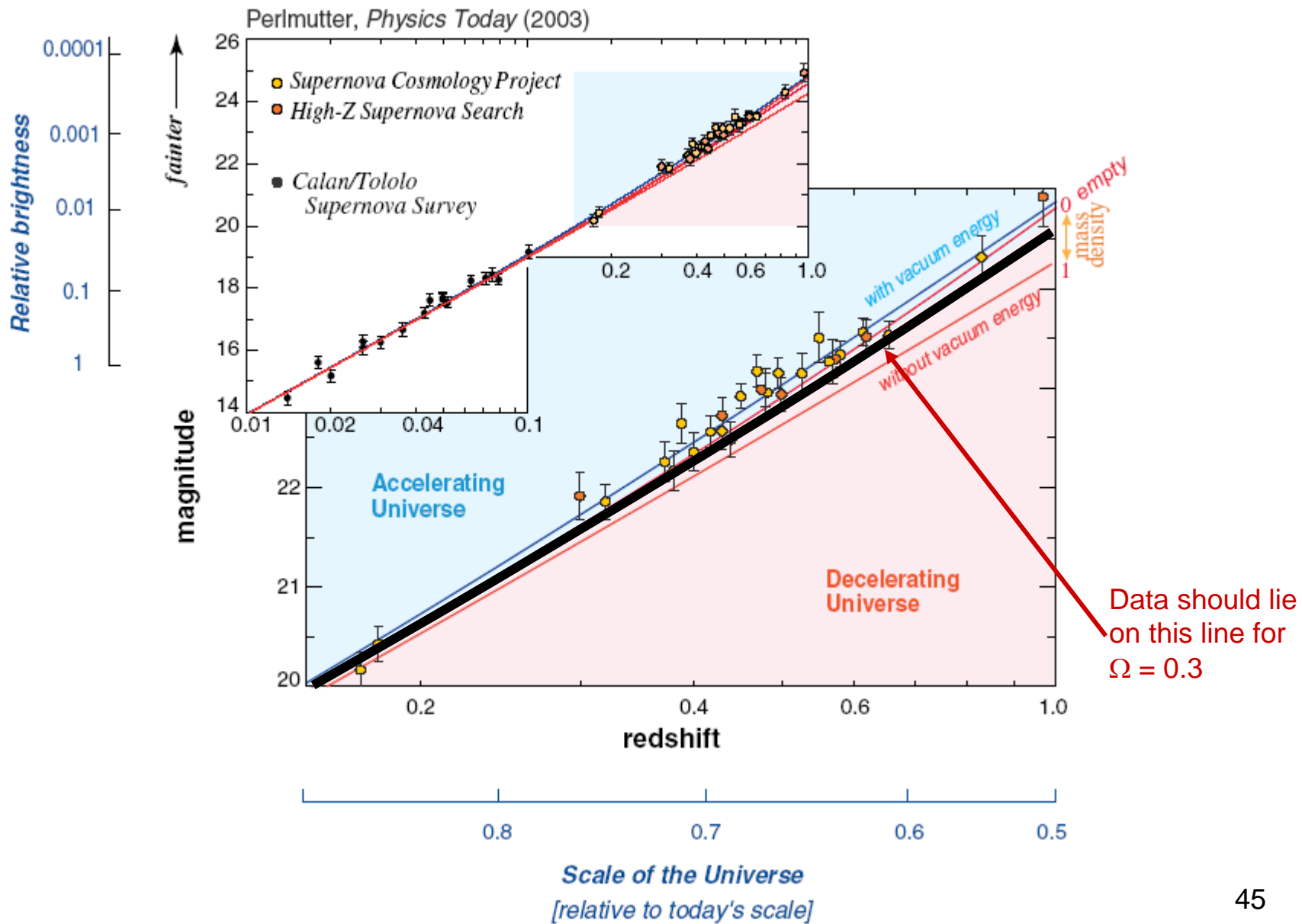


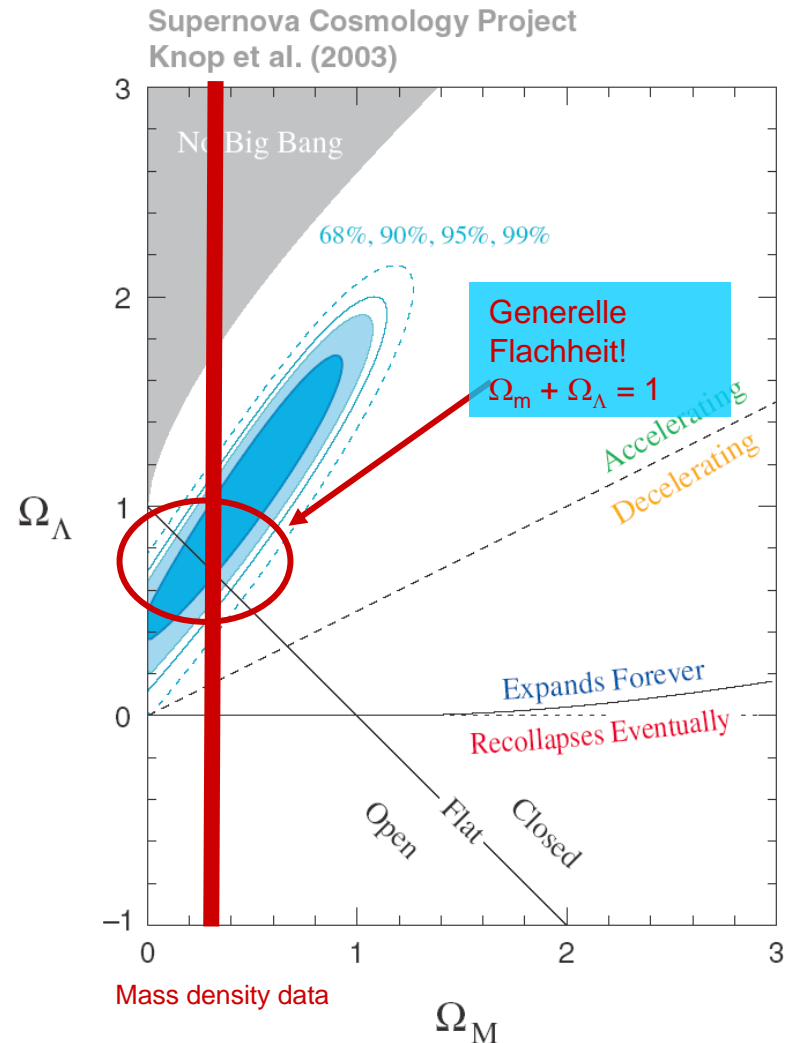
Figure 22: Type Ia supernovae Hubble diagram. The relative faintness of the distant supernovae relative to their nearby counterparts is apparent. A comparison with various cosmological models is made. Data from Riess et al. (2004).

Type Ia Supernovae



Supernovae-Messungen

- Zusätzlich zur Materie muß es etwas geben mit einer Dichte Ω_Λ
- Ist es die 'Vakuum Energie' ?
- Diese Energie beschleunigt die Expansion des Universums (vergleichbar mit der Inflationsphase??)



- Interview mit Saul Perlmutter, einem der Teamleader des Supernova-Projektes:

<http://www.sciam.com/article.cfm?id=discovering-a-dark-universe>

Table 7: Current and planned cosmological Supernova surveys.

Survey	Telescope/ Instrument	Sky coverage	Filters	# SNe	Spectroscopy	Period	Main goals
--------	--------------------------	-----------------	---------	-------	--------------	--------	------------

Low-z searches; $z < 0.1$

LOTOSS	KAIT (70cm)	Northern Hemisphere	BVRI	>200	Lick/Keck	1992-	discover and follow nearby SNe
European Supernova Collaboration	2m and 4m	-	UBVRIZJHK	~20	various 4m	2002-2006	SN Ia physics, early epochs
Supernova Factory	NEAT (1.2m)	Northern Hemisphere	BVRI	300	SNIFS	2002-	establish local Hubble diagram, study systematics

Intermediate-z searches; $0.1 < z < 0.5$

Carnegie Supernova Project	1m,2.5m,6.5m	-	UBVRIYJH	~250	Dupont/Magellan	2004-2009	all SN types, I Hubble diagram
SDSS II	Sloan 2.4m	250 deg ²	u'g'r'i'z'	>500	various 4m	2005-2008	fill in redshift gap $0.1 < z < 0.3$

High-z searches; $z > 0.5$

Supernova Cosmology Project	CTIO 4m	-	RI	~100	Keck/Gemini/VLT	1990-2000	established acceleration
High-z Supernova Search Team	CTIO 4m	-	RI	~100	Keck/Gemini/VLT	1995-2001	established acceleration
Higher-z Supernova Search	HST	GOODS Fields	RIz	17	Keck/Gemini/VLT/Magellan	2002-2004	$z > 1$ SNe
ESSENCE	CTIO 4m	36×0.36 deg ²	RI	~200	Keck/Gemini/VLT/Magellan	2001-2007	w to 10%
SNLS (within the CFHT Legacy Survey)	CFHT	4×1 deg ²	ugriz	~700	Keck/Gemini/VLT/Magellan	2003-2008	w to 7%
Accelerating and dustfree	HST	-	griz	~20	Keck/Gemini	2005-	distant SNe in elliptical galaxies
PAENS/SHOES	HST	-	JHK	~15	???	2006-	distant SNe
PanSTARRS-4	4×1.5m	~10,000 deg ²	BVrlz	thousands	????	2011?	
Dark Energy Survey	CTIO 4m	10,000 deg ²	griz	thousands	????	2010-2015	
LSST	7.5m	>20000 deg ²	ugriz	thousands	-	>2014	
JDEM/SNAP/DUNE	space	>10,000 deg ²	optical/IR	~2000	onboard	>2015	space missions
JEDI/DESTINY							

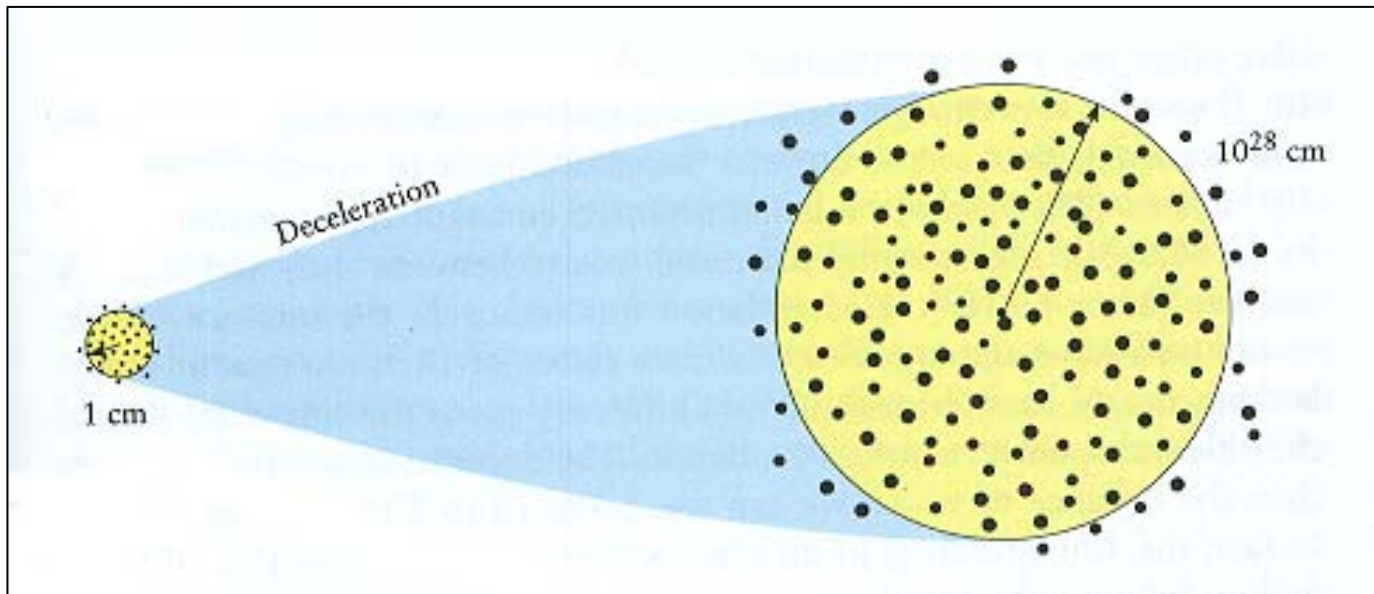


Zwei wichtige kosmologische Entdeckungen

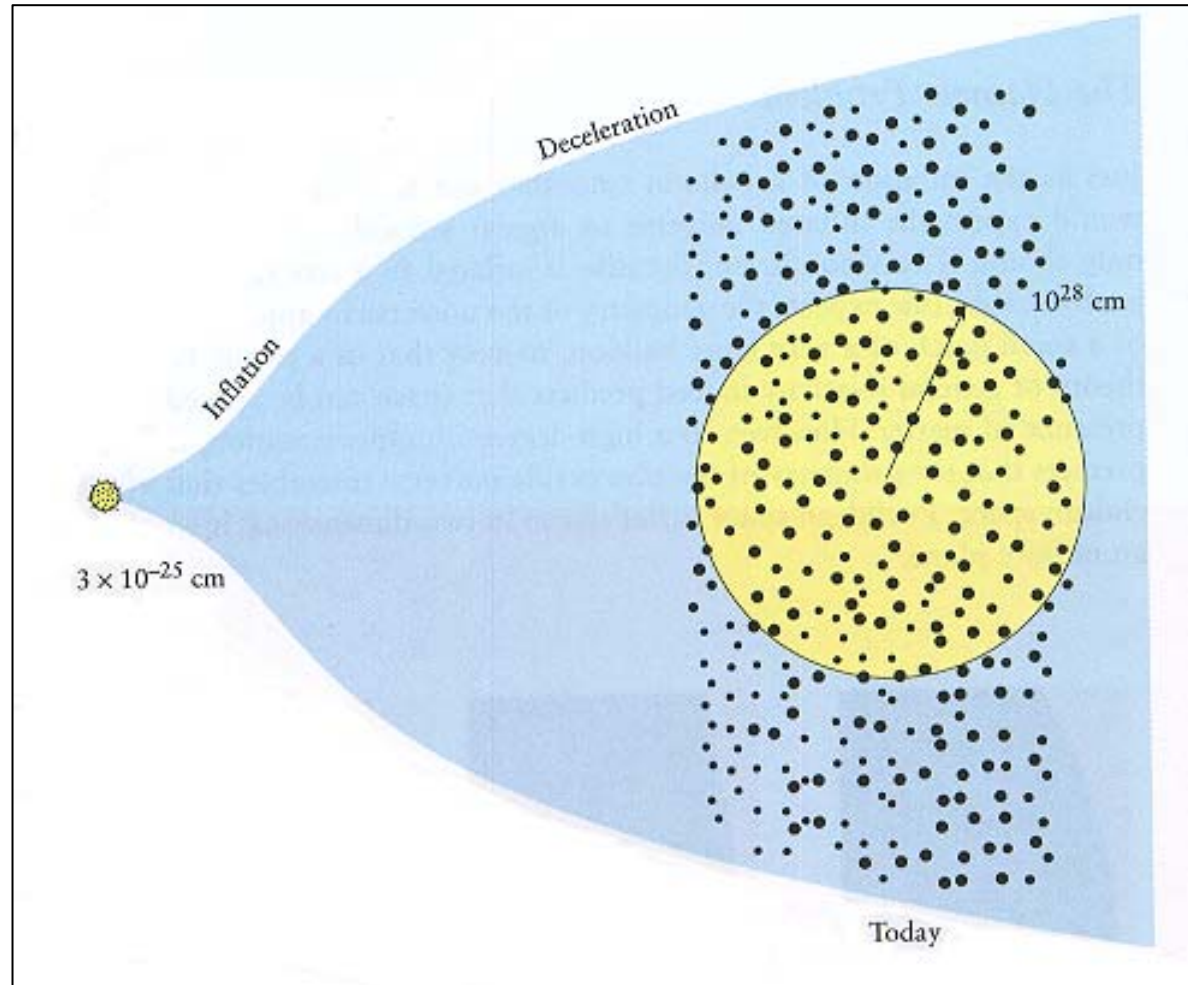
- Das neue Universum wurde **rapide beschleunigt (Inflation)** – Probleme der Urknall-Theorie werden bereinigt
- Eine neue (langsame) Phase der Beschleunigung begann vor 5 Milliarden Jahren (**Dunkle Energie**) – aus den Supernovae-Beobachtungen
- und ganz viele Fragen:
- Wie hat das Universum begonnen, was war davor, welches Modell erklärt die Beobachtungen am besten, wie sehen die Alternativen aus, welche Probleme sind nicht geklärt, was ist das einfachste Modell, ist das einfachste Modell immer das richtige Modell, wie geht es weiter, wie wird es enden, aufgrund welcher Beobachtungen können wir auf das richtige Modell schließen, wie groß sind die Unsicherheiten?

Ohne Inflation

- Zur Zeit $t=10^{-35}$ s, das Universum expandiert von ca. 1 cm Größe aus zu dem, was wir heute sehen
- 1 cm ist viel größer als der Horizont, der damals 3×10^{-25} cm betrug



- Der Raum expandiert von 3×10^{-25} cm zu einem viel größeren Universum als wir heute sehen



The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation pattern, showing a complex, grainy texture of blue and purple hues with numerous bright spots and streaks. A prominent feature is a large, bright, white, diamond-shaped region in the center, which is the 'cold spot' or a region of low temperature. The overall appearance is that of a vast, deep space filled with light and energy.

Lösung der Urknallprobleme
mittels
Inflation?

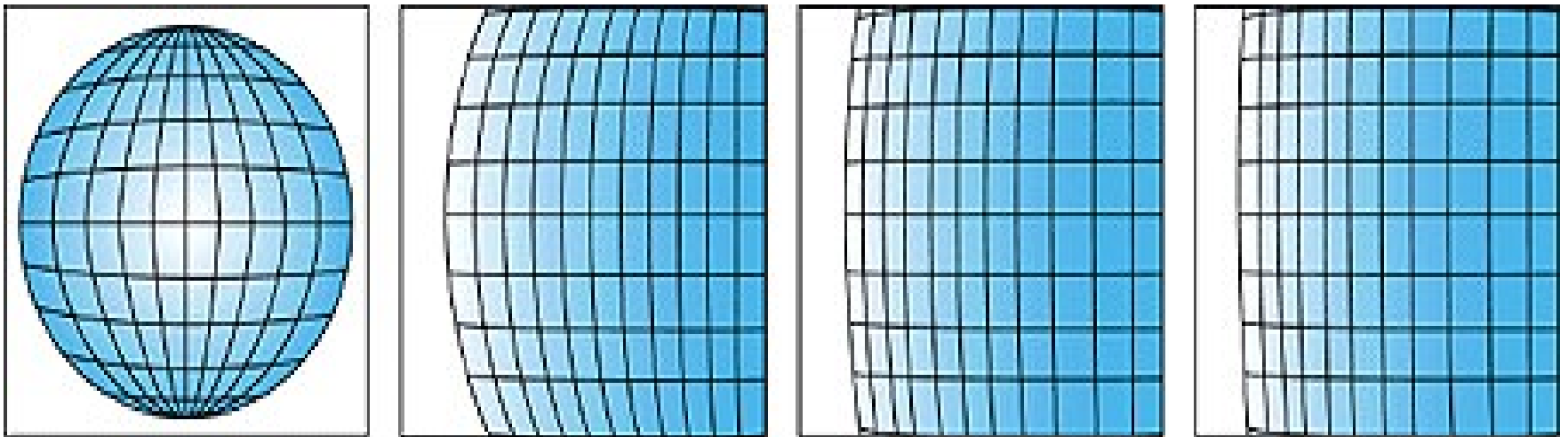


Homogenitätsproblem

- Ursprüngliches Inflationsmodell: Zu große Inhomogenitäten durch die Blasen
- Neue Inflation: Entwicklung ist gleichmäßiger
- Inhomogenitäten stimmen etwa mit Wirklichkeit überein
- Homogenitätsproblem gelöst

Lösung des Flachheitsproblems

- Während der Inflation nähert sich Ω dem Wert 1 an
- Veranschaulichung durch sich ausdehnende Kugel (Krümmung verschwindet!)
- Universum ist wesentlich größer als wir sehen können, der Teil, den wir sehen, sieht flach aus



- Annäherung um etwa Faktor 10^{100}
- Flachheitsproblem gelöst



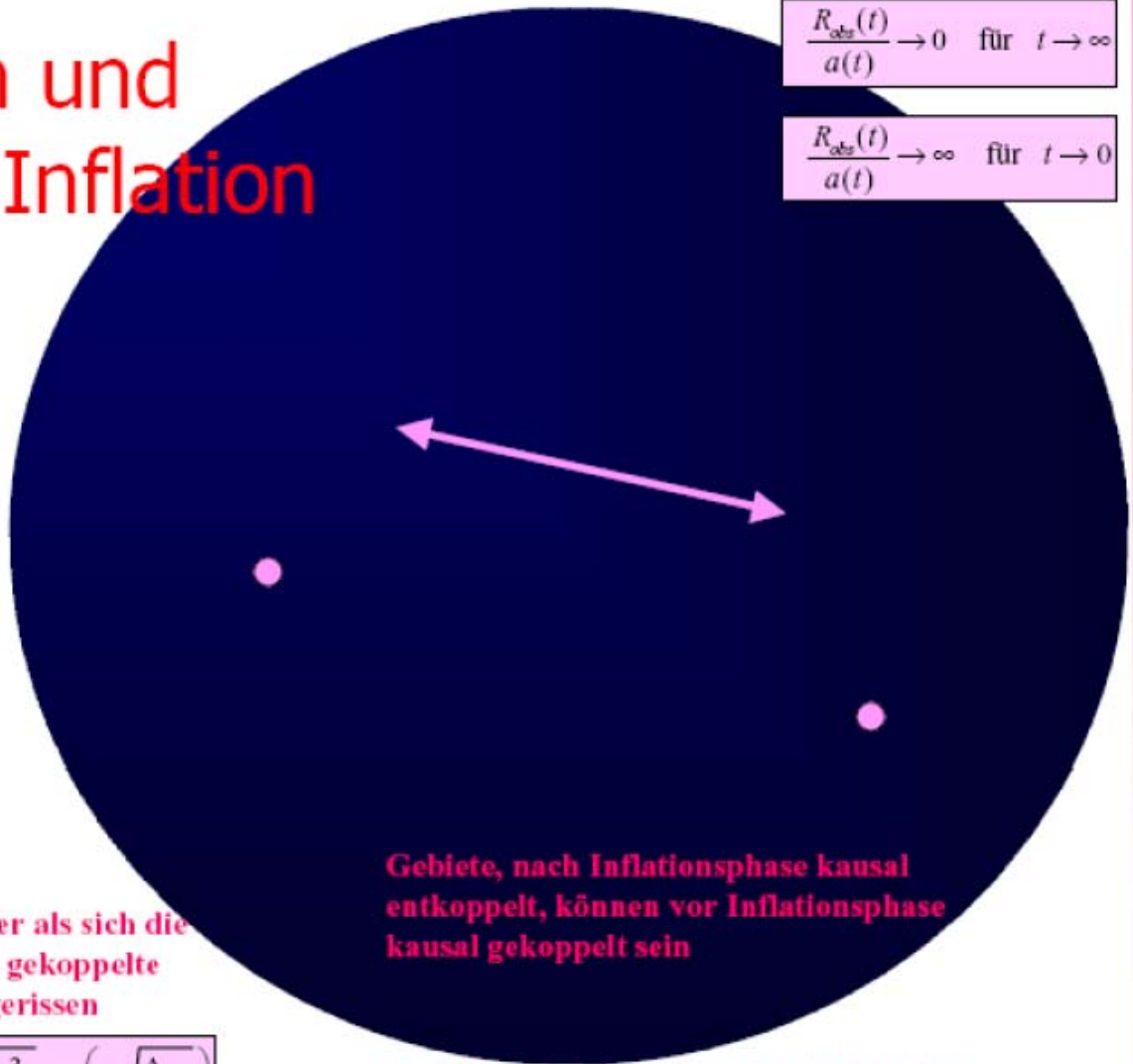
Lösung des Horizontproblems

- Größe des sichtbaren Universums „von heute“, Wechselwirkungsbereich aber „vom Urknall her“ bestimmt
- Während der Inflation wächst Größe des Universums stark an
- Dadurch kann der Horizontabstand zu allen Zeiten größer sein als das sichtbare Universum
- Thermisches Gleichgewicht möglich
- Horizontproblem gelöst

Expansion und Horizont: Inflation



Universum expandiert schneller als sich die Horizonte vergrößern. Kausal gekoppelte Gebiete werden auseinander gerissen



Gebiete, nach Inflationsphase kausal entkoppelt, können vor Inflationsphase kausal gekoppelt sein


Geht man zu $t \rightarrow 0$ waren alle Gebiete des Universums kausal gekoppelt!

$$\frac{R_{\text{obs}}(t)}{a(t)} \rightarrow 0 \quad \text{für } t \rightarrow \infty$$

$$\frac{R_{\text{obs}}(t)}{a(t)} \rightarrow \infty \quad \text{für } t \rightarrow 0$$

$$\frac{R_{\text{obs}}(t)}{a(t)} = c \sqrt{\frac{3}{\Lambda_0}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\Lambda_0}{3}} t\right)$$

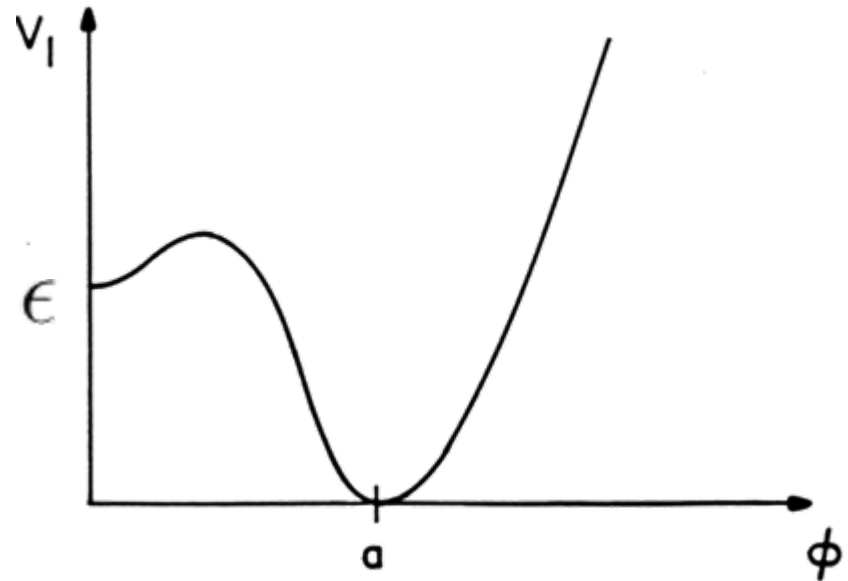
- Vor der Inflation liegen Monopole vor
- Werden durch die extreme Expansion sehr stark ausgedünnt
- Und sind daher nicht mehr beobachtbar
- Monopolproblem gelöst

A visualization of cosmic inflation, showing a central bright point from which numerous lines radiate outwards, representing the expansion of space. The background is a dense field of blue and purple particles, with some larger, glowing structures scattered throughout. The overall effect is one of rapid expansion and energy.

Inflations-Modelle

Inflation -Modelle

- Ursprüngliches Modell: Alan H Guth 1981: falsches Vakuum



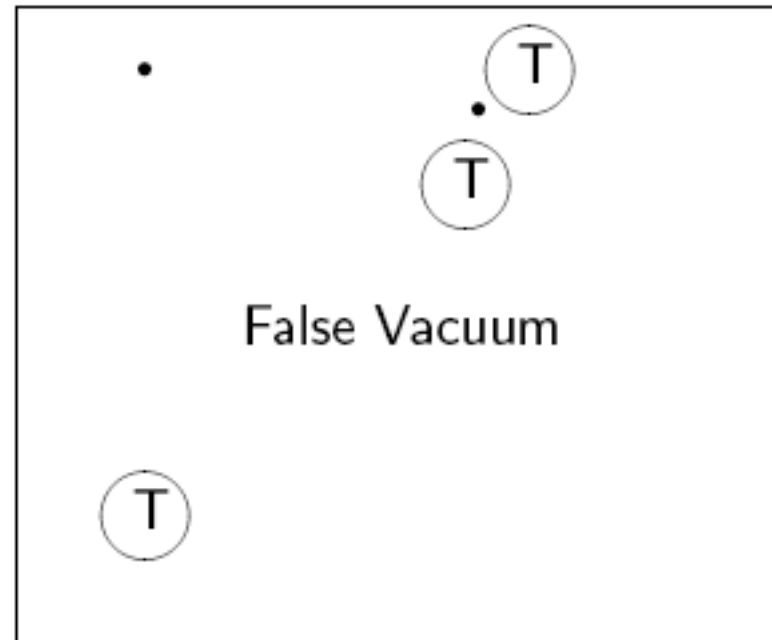
Alan Guth describing how big the universe got during inflation!

1981, das Original: Das Universum geht von einem Zustand des falschen Vakuums in den eines wahren Vakuums über.

Blasen des wahren Vakuums verdampfen in einem See des falschen Vakuums.

Blasen eines wahren
Vakuums in einem
See aus falschem
Vakuum. Falsches
Vakuum ist metastabiler
Zustand.

Druck des falschen Vakuums
ist antigravitativ – exponentielle Expansion – Inflation



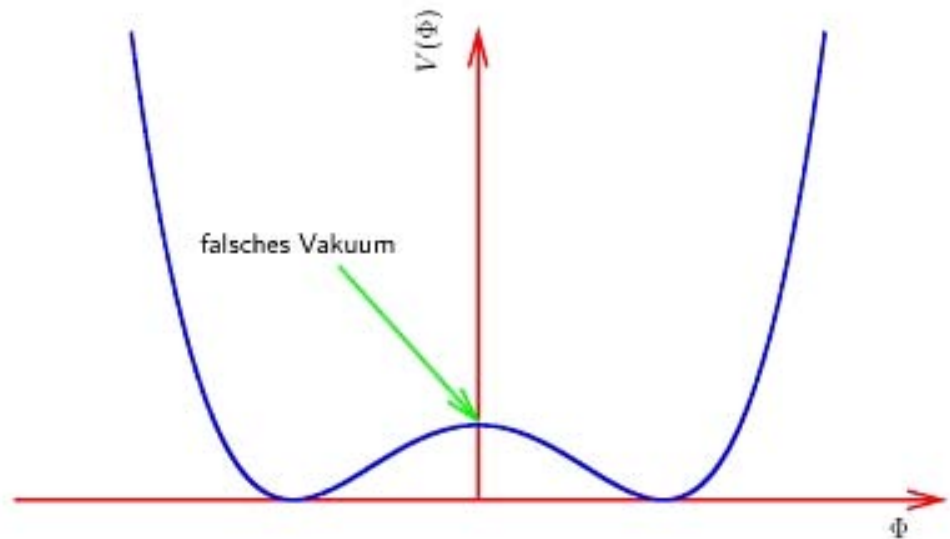
Modell ist nicht effektiv genug – viele der schnell expandierenden
Vakuumbblasen müssen erst miteinander verschmelzen. Produziert zu
große Inhomogenitäten, die sich nicht mit den astronomischen
Beobachtungen vereinbaren lassen.

- Linde, Albrecht, Steinhardt: neue Inflation
 - Falsches Vakuum kann mit einem Skalarfeld assoziiert werden (**Inflaton**)
 - Neue Potentialform
 - Echtes Vakuum in den Mulden
 - Das lokale Maximum entspricht dem falschen Vakuum.

Das falsche Vakuum zerfällt - anschaulich ‚rollt‘ das Inflatonfeld vom lokalen Minimum des falschen Vakuums hinunter in das echte Vakuum – in die linke oder rechte Mulde – damit endet die inflationäre Phase – die im Inflaton gespeicherte Energie wird freigesetzt:

Thermalisierung: hier treffen sich Inflation und Standard-Urknallmodell

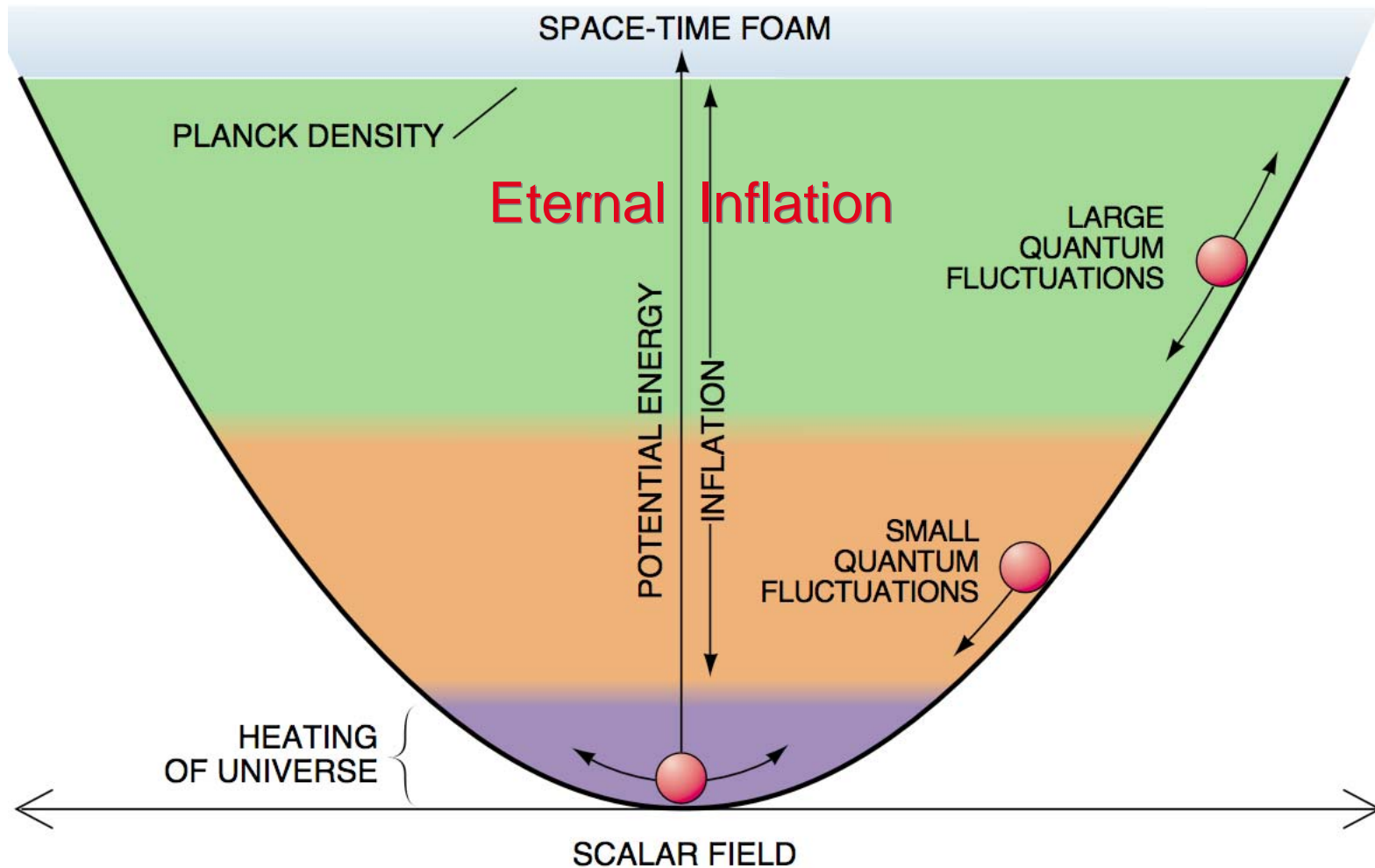
Energie für die Inflation stammt aus der Gravitation



- Linde 1983 publiziert neues Inflationsmodell: Chaotische Inflation
- Potential hat wieder Parabelform
- Es gibt kein falsches Vakuum, sondern das Inflaton startet bei einem Zustand definierter Energie ‚auf der Parabel‘. Wie beim W -Potential beginnt die Inflation, wenn das Inflaton ‚in die Mulde herabrollt‘
- Begriff ‚chaotisch‘ nicht treffend, meint nur, daß diese Form frei ist von speziellen Anfangsbedingungen

Inflation in der Theorie des harmonischen Oszillators

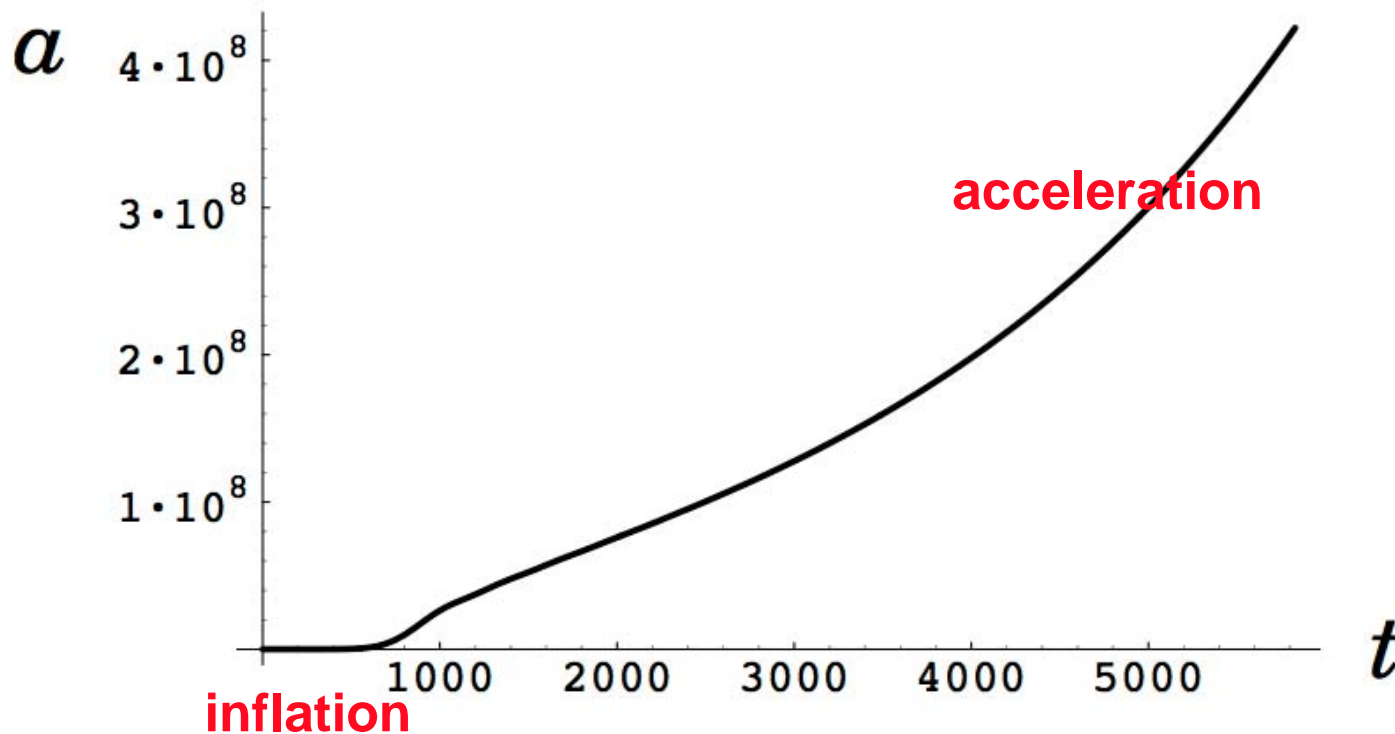
$$V(\phi) = \frac{m^2}{2} \phi^2$$



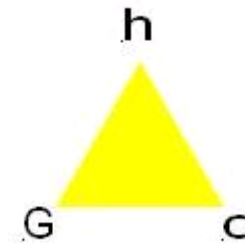
Inflation in der Theorie des harmonischen Oszillators

Eine Konstante zum inflationären Potential hinzufügen - man erhält **Inflation** und **Beschleunigung**

$$V = \frac{m^2}{2} \phi^2 + \Lambda$$



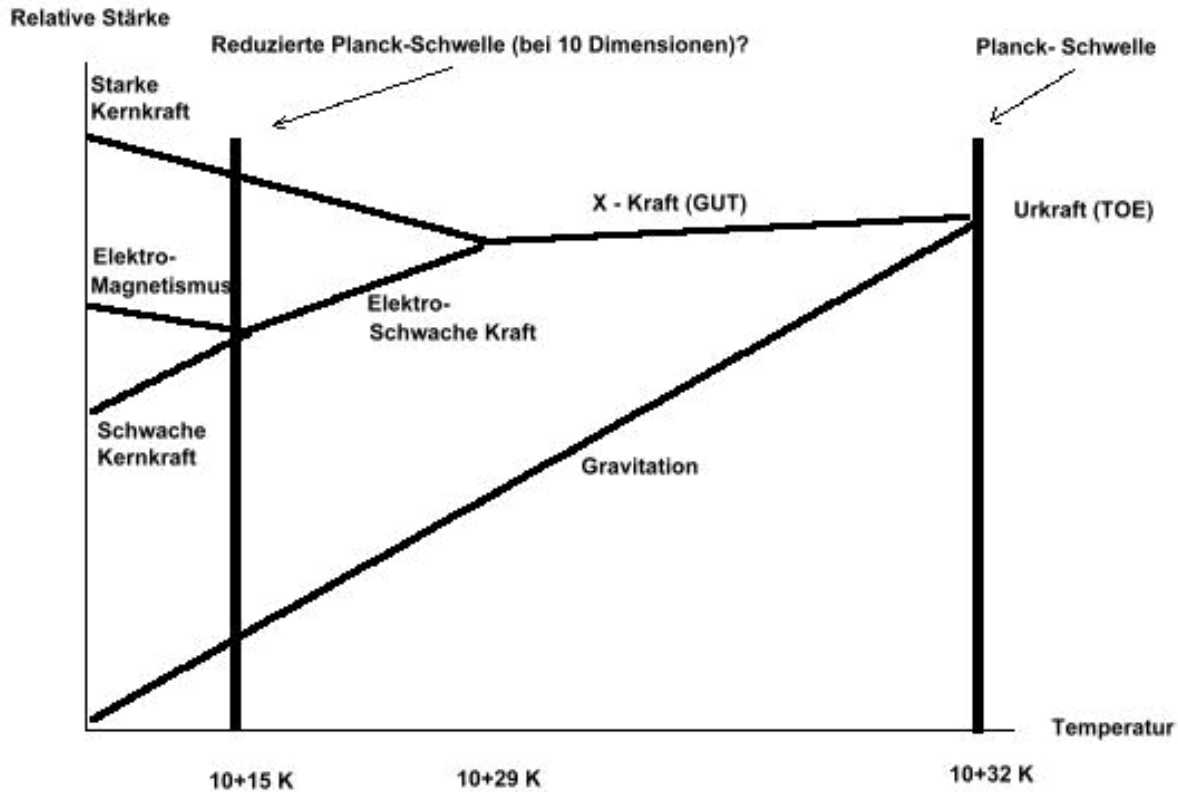
- Inflation, Lindes neue Inflation und die chaotische Inflation sind Modelle mit einem Inflaton-Skalarfeld – alle involvieren eine Super-Planck-Physik, weil die Energiedichte des Feldes die Planck-Masse übersteigt
- Super-Planck-Physik:
- Mit der *Planck-Schwelle* ist der Gültigkeitsbereich von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie begrenzt. Die Gravitationskonstante G , die Lichtgeschwindigkeit c und das Plancksche Wirkumsquantum h bildet das System der primordialen natürlichen Massgrößen - die Planck-Skala. Eine vollständige Beschreibung der Vorgänge auf dieser Skala wird von einer zukünftigen Theorie der Quantengravitation erwartet



Die Gravitationskonstante G , das plancksche Wirkumsquantum h und die Lichtgeschwindigkeit c bilden die *Planck-Skala*.

- Die Planck Schwelle bildet die Grenze experimentell überprüfbarer Naturerkenntnis und beschreibt den Zustand des Universums im Urknall, dem Beginn der kosmischen Entwicklung.
- Sie ist prinzipieller Natur und keine Folge von Messungenauigkeiten oder technischen Unmöglichkeiten.
- Die physikalische Welt wird dadurch in eine rein mathematische **Sub-Planck-Physik** und eine physikalisch wirkliche **Super-Planck-Physik** eingeteilt.
- Planck'sches Wirkungsquantum: $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$

Vereinigungstemperaturen und die Planck-Schwelle



- **Hybrid-Inflation**: involviert keine Super-Planck-Physik, aber: mehrere Inflatonfelder sind notwendig (Linde 1993), auch Wasserfall-Modelle im Gegensatz zu Modellen mit „langsamem Rollen“
- **Übernatürliche Inflation**: erfordert ebenfalls zwei Inflatonfelder (Randall, Soljatic & Guth 1995), wird durch die Supersymmetrie motiviert. Vorteil: kommt ohne kleine Parameter aus – herkömmliche Inflationsmodelle benötigen kleine Parameter, die dafür sorgen, daß der Potentialverlauf flach genug ist, um Inflation zu betreiben.
- **Zyklisches Universum** (Steinhardt): konkurrierende Theorie zur Inflation – anderes Skalarfeld. Entscheidung über das richtige Modell wird erhofft anhand der Detektion der Gravitationswellen oder Neutrinos – Ekpyrotisches Szenario: keine Gravitationswellensignatur
- **Loop-Quantengravitation**: kein zusätzliches Skalarfeld –kann auf das Inflaton verzichten – Inflation ist in diesem Szenario zwingende Folge quantisierter Raumzeit; Hoffnung von Guth: die Kosmologen müssen sich einer Quantengravitation stellen, um die Inflationsphysik zu verstehen

The image features a central, bright white point from which several thin, glowing lines radiate outwards, creating a starburst or lens flare effect. The background is a dense, textured field of small, colorful particles in shades of blue, purple, and green, giving it a cosmic or particle-like appearance. The overall color palette is dominated by cool tones, with the central point providing a stark white contrast.

Higgs

Der Weg zur allumfassenden Theorie?

Symmetrien spielen in der modernen Physik (*wie in der Kunst*) eine zentrale Rolle, da sich in ihnen die Grundprinzipien der Natur manifestieren.



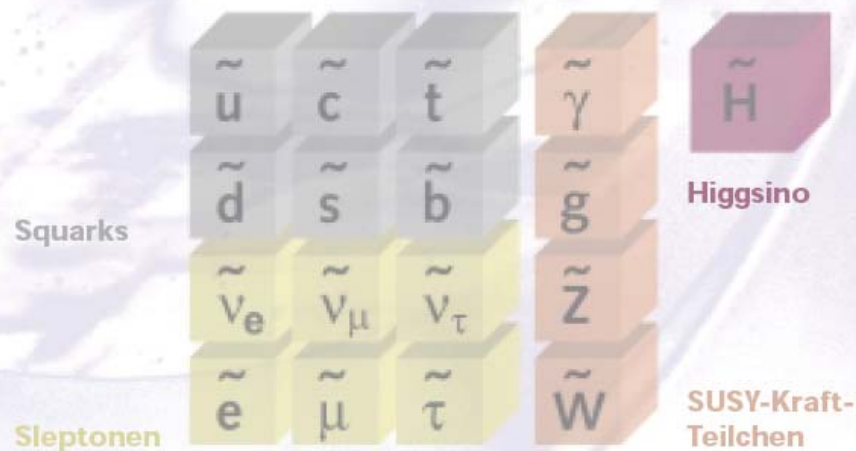
Die größte mögliche Symmetrie der Naturgesetze wird **SUPERSYMMETRIE** - kurz **SUSY** - genannt. Sie ist eine Symmetrie zwischen Materieteilchen (Fermionen) und Kräfteteilchen (Bosonen) und bietet eine Möglichkeit, unser heutiges Wissen über die Grundstruktur der Materie (das sog. Standardmodell) in eine größere, umfassendere Theorie einzubetten.

Standardmodell



Die Supersymmetrie verlangt, dass es zu jeder „normalen“ Teilchenart einen SUSY-Partner gibt.


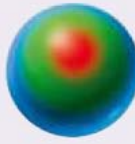



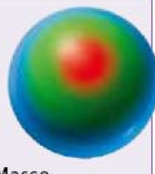
SUSY-Teilchen



Standardmodell

QUARKS

Aus ihnen bestehen Protonen, Neutronen und ein regelrechter Zoo von weniger bekannten Teilchen. Sie tragen eine so genannte Farbladung und wurden nie einzeln beobachtet.

<p>up u </p> <p>elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 2 MeV Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei up-Quarks und ein down-Quark ergeben ein Proton.</p>	<p>charm c </p> <p>elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 1,25 GeV Instabiler Verwandter des up-Quarks mit größerer Masse. Bestandteil des J/ψ-Teilchens, das bei der Konzeption des Standardmodells eine Rolle spielte</p>	<p>top t </p> <p>elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 171 GeV Schwerstes bekanntes Teilchen. Seine Masse entspricht etwa derjenigen eines Osmium-Atoms.</p>
<p>down d </p> <p>elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 5 MeV Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei down-Quarks und ein up-Quark ergeben ein Neutron.</p>	<p>strange s </p> <p>elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 95 MeV Instabiler Verwandter des down-Quarks mit größerer Masse. Baustein des Kaons, eines sehr gründlich untersuchten Teilchens</p>	<p>bottom b </p> <p>elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 4,2 GeV Instabiler Verwandter des down- und des strange-Quarks mit noch höherer Masse. Bestandteil des intensiv untersuchten B-Mesons</p>

LEPTONEN

Diese Teilchen sind immun gegen die starke Kraft und lassen sich einzeln beobachten. Die hier gezeigten Neutrinos treten in Wahrheit als Mischungen voneinander auf. Ihre genauen Massen sind unklar, betragen aber maximal einige wenige Elektronvolt.

Elektron-Neutrino ν_e

elektrische Ladung: 0
 Immun gegen die elektromagnetische und die starke Kraft. Es tritt deshalb kaum mit Materie in Wechselwirkung, spielt jedoch eine Rolle beim radioaktiven Zerfall

Myon-Neutrino ν_μ

elektrische Ladung: 0
 Taucht bei Reaktionen auf, die in Zusammenhang mit der schwachen Wechselwirkung stehen und an denen Myonen beteiligt sind

Tau-Neutrino ν_τ

elektrische Ladung: 0
 Eine weitere Variante des Neutrinos, die bei Reaktionen mit Tau-Leptonen eine Rolle spielt

Elektron **e**

elektrische Ladung: -1
 Masse: 0,511 MeV
 Das leichteste geladene Teilchen, bekannt als Träger elektrischer Ströme. Aus ihm besteht die Hülle von Atomen.

Myon **μ**

elektrische Ladung: -1
 Masse: 106 MeV
 Schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden. Wurde in der kosmischen Strahlung entdeckt


Tau **τ**


elektrische Ladung: -1
 Masse: 1,78 GeV
 Weitere instabile und noch schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 0,3 Pikooskunden


Standardmodell: Leptonen, Quarks, Bosonen


BOSONEN

Laut Standardmodell gibt es für jede Kraft ein eigenes Teilchen oder eine Gruppe davon als Überträger dieser Wechselwirkung.

Photon γ 
elektrische Ladung: 0
Masse: 0
Überträger der elektromagnetischen Kraft. Lichtquanten wirken über unbegrenzte Entfernungen hinweg auf elektrisch geladene Teilchen.

Z-Boson **Z** 
elektrische Ladung: 0
Masse: 91 GeV
Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, welche die Identität der Teilchen nicht ändert. Seine Reichweite beträgt nur etwa 10^{-18} Meter.

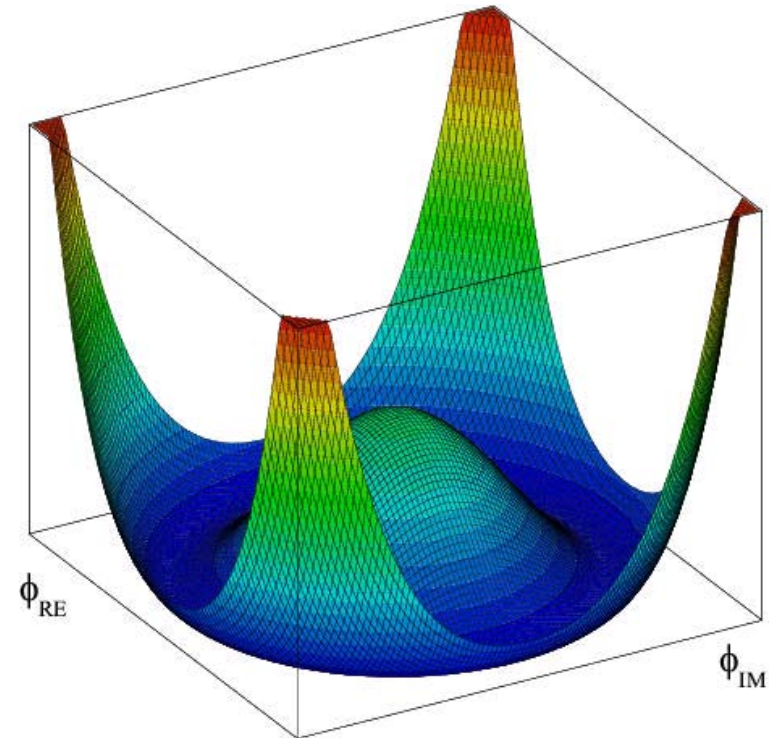
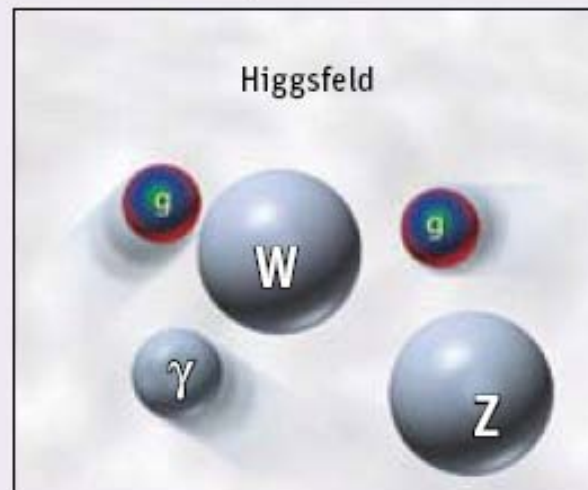
W⁺/W⁻ Bosonen **W** 
elektrische Ladung: +1 oder -1
Masse: 80,4 GeV
Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, bei denen sich der »Geschmack« (Flavor) und die Ladung der Teilchen ändern. Auch ihre Reichweite beträgt nur 10^{-18} Meter.

Gluonen **g** 
elektrische Ladung: 0
Masse: 0
Insgesamt acht verschiedene Gluonen übertragen die starke Wechselwirkung, wobei sie auf Quarks und andere Gluonen wirken. Sie sind immun gegen die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung.

Higgs **H** 
(noch nicht beobachtet)
elektrische Ladung: 0
Masse: ziemlich sicher weniger als 1 TeV, höchstwahrscheinlich zwischen 114 und 192 GeV.
Soll die Quarks und Leptonen sowie die Z- und W-Bosonen mit Masse ausstatten.

HIGGS-WECHSELWIRKUNG

Laut Standardmodell erfüllt das Higgs-Feld den Raum wie ein Sirup, der die W- und Z-Bosonen bremst und so die Reichweite der schwachen Kraft herabsetzt. Quarks und Leptonen erhalten durch Wechselwirkung mit ihm eine Masse.



<http://www2.uni-wuppertal.de/FB8/groups/Teilchenphysik/oeffentlichkeit/Animationen/Higgs.html>

MAGNETISCHE RAUMSYMMETRIE

Eine einfache Analogie zu dem hier betrachteten Problem ist eine unendliche gitterförmige Anordnung von winzigen Stabmagneten. Unter Symmetrie versteht man in diesem Fall die Äquivalenz aller Raumrichtungen.

Bei hohen Temperaturen herrscht Symmetrie, weil die Hitze die Magnete herumschubst, so dass sie in alle Richtungen zeigen.

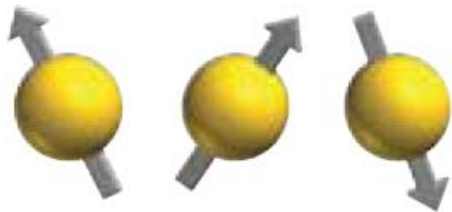


Unterhalb einer bestimmten Temperatur richten sich die Magnete parallel zueinander aus. Obwohl diese Anordnung regelmäßiger erscheint, ist sie weniger symmetrisch; denn eine bestimmte Orientierung wird nun bevorzugt.

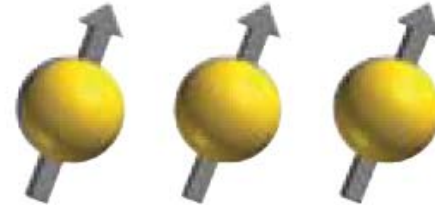


ELEKTROSCHWACHE SYMMETRIE

Sie ist abstrakter als die magnetische Raumsymmetrie. Man versteht darunter die Freiheit, festzulegen, welche Leptonen Elektronen und welche Neutrinos sind, oder zu entscheiden, was ein up- und was ein down-Quark ist.



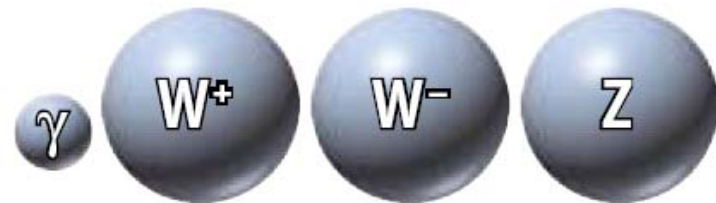
Im symmetrischen Fall kann man die Konvention zur Benennung von Leptonen (Pfeil) an jedem Raumpunkt unabhängig festlegen: Was an einer Stelle als Elektron gilt, ist anderswo vielleicht ein Neutrino. Die Wirkung der schwachen Kraft bleibt dennoch überall gleich.



Bei gebrochener Symmetrie gilt an allen Raumpunkten dieselbe Konvention. Was also an einer Stelle ein Elektron ist, ist es auch an allen anderen. Den Grund für diesen Symmetriebruch sehen Physiker im Higgs-Feld.



Wegen der Symmetrie der elektroschwachen Wechselwirkung sollten all ihre Überträgerpartikel masselos sein.



Durch den Symmetriebruch erhalten die W^- und Z -Bosonen eine Masse, was zugleich ihre Reichweite beschränkt.

Spontane Symmetriebrechung – Nobelpreis 2008



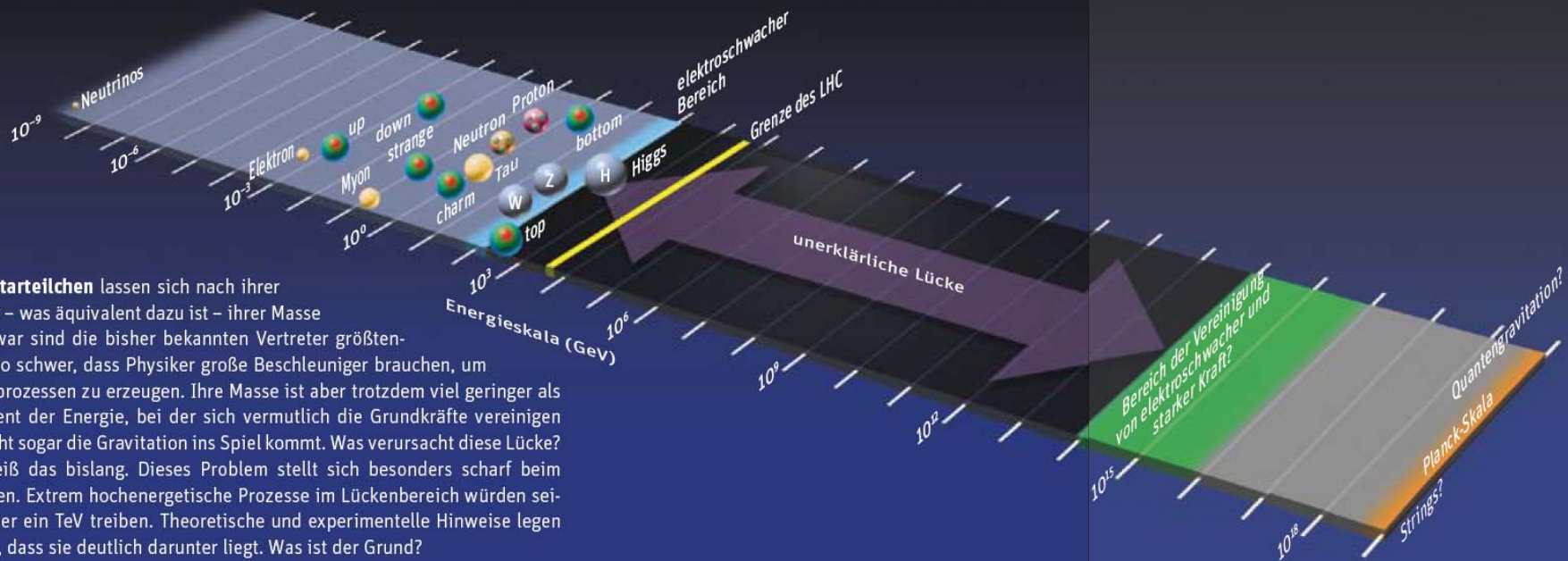
Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa
Physik Nobelpreis 2008

▪

Symmetriebrechung - Inflation - Urknall - Stringtheorie - SUSY

Higgs

DAS HIERARCHIEPROBLEM



Alle Elementarteilchen lassen sich nach ihrer Energie oder – was äquivalent dazu ist – ihrer Masse sortieren. Zwar sind die bisher bekannten Vertreter größtenteils schon so schwer, dass Physiker große Beschleuniger brauchen, um sie bei Stoßprozessen zu erzeugen. Ihre Masse ist aber trotzdem viel geringer als das Äquivalent der Energie, bei der sich vermutlich die Grundkräfte vereinigen oder vielleicht sogar die Gravitation ins Spiel kommt. Was verursacht diese Lücke? Niemand weiß das bislang. Dieses Problem stellt sich besonders scharf beim Higgs-Teilchen. Extrem hochenergetische Prozesse im Lückenbereich würden seine Masse über ein TeV treiben. Theoretische und experimentelle Hinweise legen jedoch nahe, dass sie deutlich darunter liegt. Was ist der Grund?

Also ... am Anfang war das Universum von einer mit sehr viel Energie aufgeladenen „Flüssigkeit aus Higgs-Teilchen“ beherrscht. So wie ein Ball in eine Mulde, rollt das Higgs-Feld in ein Energieminimum. Die Dabei abgegebene Energie war das Treibgas für ein explosionsartiges Aufblähen, die Inflation des Universums.

Nur wenn es Higgs-Teilchen gibt, können wir verstehen, weshalb unser Universum so groß und alt geworden ist. Ohne Higgs-Teilchen wären im frühen Universum zwar schon einige leichte Atomkerne entstanden und Erhalten geblieben, aber sie hätten keine Atome gebildet, wie wir sie kennen. Deren Radius ist umgekehrt Proportional zur Masse des Elektrons. Wäre dies gleich null, würden die Atome unendlich groß.

Gibt es die Higgs-Teilchen ??



Higgs

onen bestent.
ht ganz
ich-
en

nennenswert
nismu:
sch



pf
eies
ton,
ark-
leu-
Die

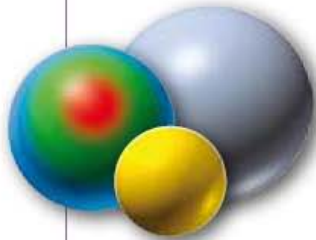
**Ohne das Higgs-Boson hätten
die Atome Durchmesser
von Billardkugeln oder mehr.**

)
ar
ve
pi
m
St

- Wie bekommen die Teilchen eine **Masse**?
(durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Teilchen?)
- Warum sind diese **Massen** so **unterschiedlich**?
- Gibt es eine allumfassende (verborgene) **Symmetrie** wie **Supersymmetrie**
(SUSY) \Rightarrow 'Spiegelwelt' zu den bekannten Teilchen.
- Gibt es eine **Vereinigung aller Kräfte** ('Grand Unification'),
einschließlich der Gravitation?

- Welcher Natur sind die 'Dunkle Materie' und 'Dunkle Energie' des Universums?
- Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- Warum haben Neutrinos eine so kleine Masse?
- Gibt es noch weitere Dimensionen, $D > 4$?
(\Rightarrow Stringtheorie, ...)

FÜNF ZIELE FÜR DEN LHC



Das Standardmodell ausloten

Das erste Ziel ist nicht die Entdeckung von etwas Neuem, sondern die Bestätigung des Alten: Die Maschine wird vertraute Teilchen in enormer Zahl erzeugen – beispielsweise mehrere Top-Quarks pro Sekunde – und sie mit wachsender Genauigkeit charakterisieren. Das dient nicht nur als Test für die Maschine und ihre Instrumente, sondern liefert auch Orientierungspunkte für die Beurteilung, was wirklich neue Phänomene sind.

Den Grund für die Aufspaltung der elektroschwachen Kraft finden

Als Nächstes auf der Agenda steht der Nachweis des Higgs-Bosons – oder eines Stellvertreters – und die Bestimmung seiner Eigenschaften. Eine wichtige Frage dabei ist, ob dieses Teilchen nicht nur den W- und Z-Bosonen, sondern auch den Quarks und Leptonen zu ihrer Masse verhilft.



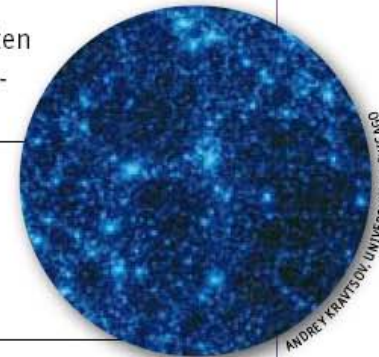
Nach neuen Grundkräften suchen

Neue fundamentale Wechselwirkungen würden auf weitere Symmetrien in der Natur hindeuten und könnten den Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte weisen. Ihre Überträger sollten in bekannte Teilchen zerfallen – wie Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen.



Kandidaten für die Dunkle Materie finden

Stabile neutrale Teilchen, die eventuell bei hochenergetischen Kollisionen entstehen, könnten sich als Grundbausteine der Dunklen Materie entpuppen. Damit wäre eines der größten Rätsel der Astronomie gelöst. Zugleich würde sich erweisen, ob die gängigen Vorstellungen über die Geschichte des Universums stimmen.



ANDREY KRATYSOV, UNIVERSITY OF CHICAGO

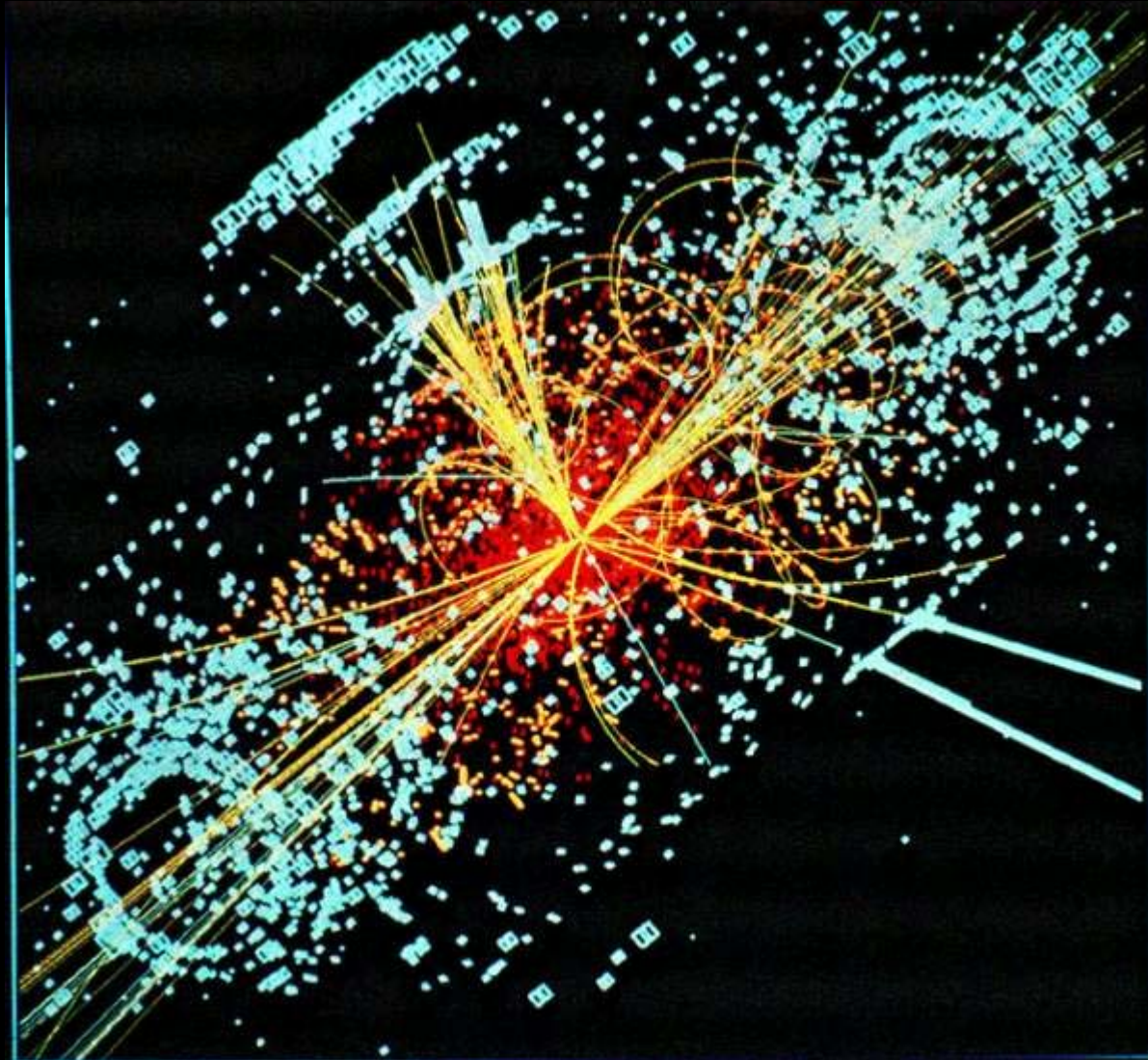


So viel wie möglich erkunden

Durch den Vorstoß in einen riesigen, bisher unzugänglichen Energiebereich bietet der LHC die Möglichkeit, nach Hinweisen auf versteckte Dimensionen der Raumzeit, neuen starken Wechselwirkungen, der Supersymmetrie oder dem völlig Unerwarteten zu fahnden. Die Physiker müssen dabei auf Beziehungen zwischen den heutigen großen Fragen achten – und auf neue Fragen gefasst sein, die der Beschleuniger aufwirft.



Hypothetischer Higgs-Zerfall



- 1993 gab der Britische Minister für Wissenschaft den Teilchenphysikern die Aufgabe:
 - Auf einer Seite zu erklären, was das Higgs-Boson ist
 - Warum sie es so unbedingt finden wollen
- Einige Flaschen Champagner konnten von den besten 5 Teams gewonnen werden
- Jahrestagung der British Association for the Advancement of Science
- „And the winner is“ Wurden in *Physics of the World* vorgestellt und sind online nachlesbar

- Internet-Seiten mit den Gewinnern:

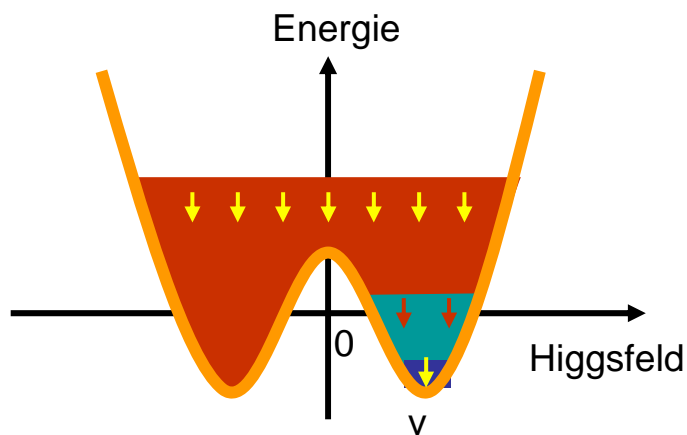
<http://www.phy.uct.ac.za/courses/phy400w/particle/higgs.htm>

- Standardmodell „funktioniert“ nur mit ursprünglich **masselosen** Teilchen!
- Masse entsteht erst durch die Wechselwirkung mit einem (hypothetischen) **Higgs-Feld**
- Durch **spontane Symmetriebrechung** ist das gesamte Universum von diesem Higgs-Feld durchdrungen
- „Schwingungen“ in diesem Higgs-Feld erscheinen als **Higgs-Teilchen**, deren Nachweis am LHC / CERN gelingen soll



Higgs Cartoon

(inspired by Prof. Miller / University College London)



Spontane Symmetriebrechung

heißes Universum
(kurz nach Urknall)

Teilchen sind masselos

kaltes Universum
(kondensiert in einen
asymmetrischen Zustand
mit Higgsfeld)

**Teilchen haben
nun Masse**

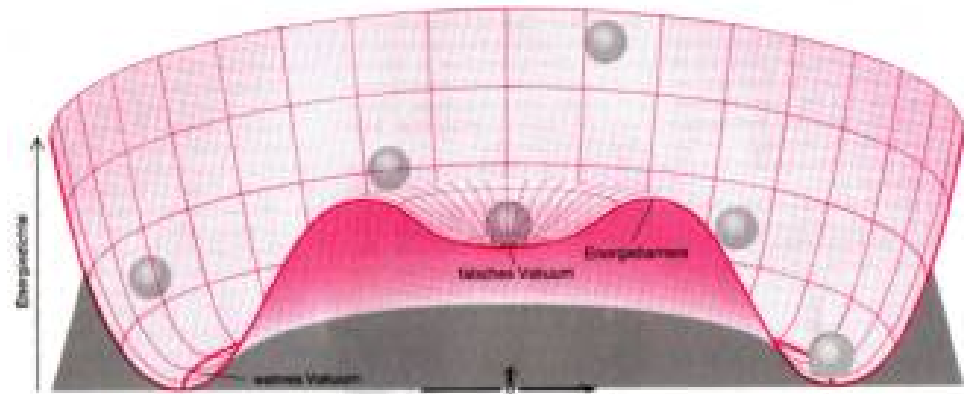
The image features a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of temperature variations across the sky. Overlaid on this map are several bright, intersecting lines that form a star-like pattern, representing the Higgs field. The text "Higgs & Inflation" is centered in the middle of the image.

Higgs & Inflation

Symmetriebrechung und Urknall

- Entscheidend im frühen Universum (und in der Teilchenphysik): Higgsfeld

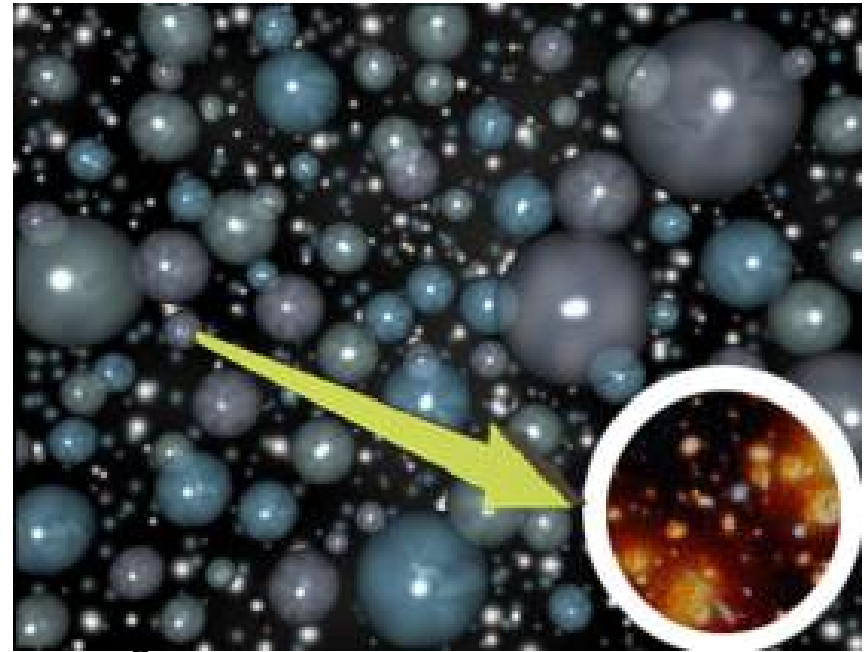
- Zeigt gebrochene Symmetrie an
- Energetisch tiefster Zustand: Nichtverschwindender Wert der Higgsfelder („Wahres Vakuum“)
- Im wahren Vakuum gebrochene Symmetrie



- Beim Abkühlen geht das Universum vom symmetrischen Zustand in den Zustand gebrochener Symmetrie über
- Zunächst alle Energie in den Higgsfeldern: falsches Vakuum wird angenommen
- Phasenübergang muss „langsam“ vor sich gegangen sein
- Dies ist wegen Energiebarriere gewährleistet

Ablauf der Inflation

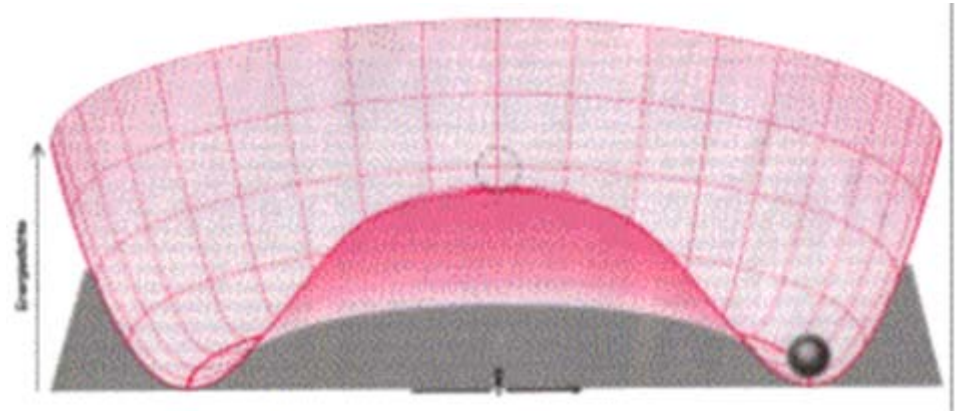
- Zunächst Unterkühlung (Lokales Energieminimum in symmetrischer Phase!)
- Ausbildung von „Blasen“ des „gebrochenen Zustandes“ (Higgsfeld kann „tunneln“)
- Wahres Vakuum kann sich dann gegen das falsche ausdehnen



- Falsches Vakuum hat negativen Druck, da das wahre Vakuum (Druck 0) das Bestreben hat, sich dagegen auszudehnen
- Hinreichend negativer Druck führt zu exponentiellem Wachstum („negative Gravitationswirkung“)
- Kann Ausdehnung um Faktor 10^{50} erklären
- Verhindert Perkolation der Blasen

Die neue Inflation

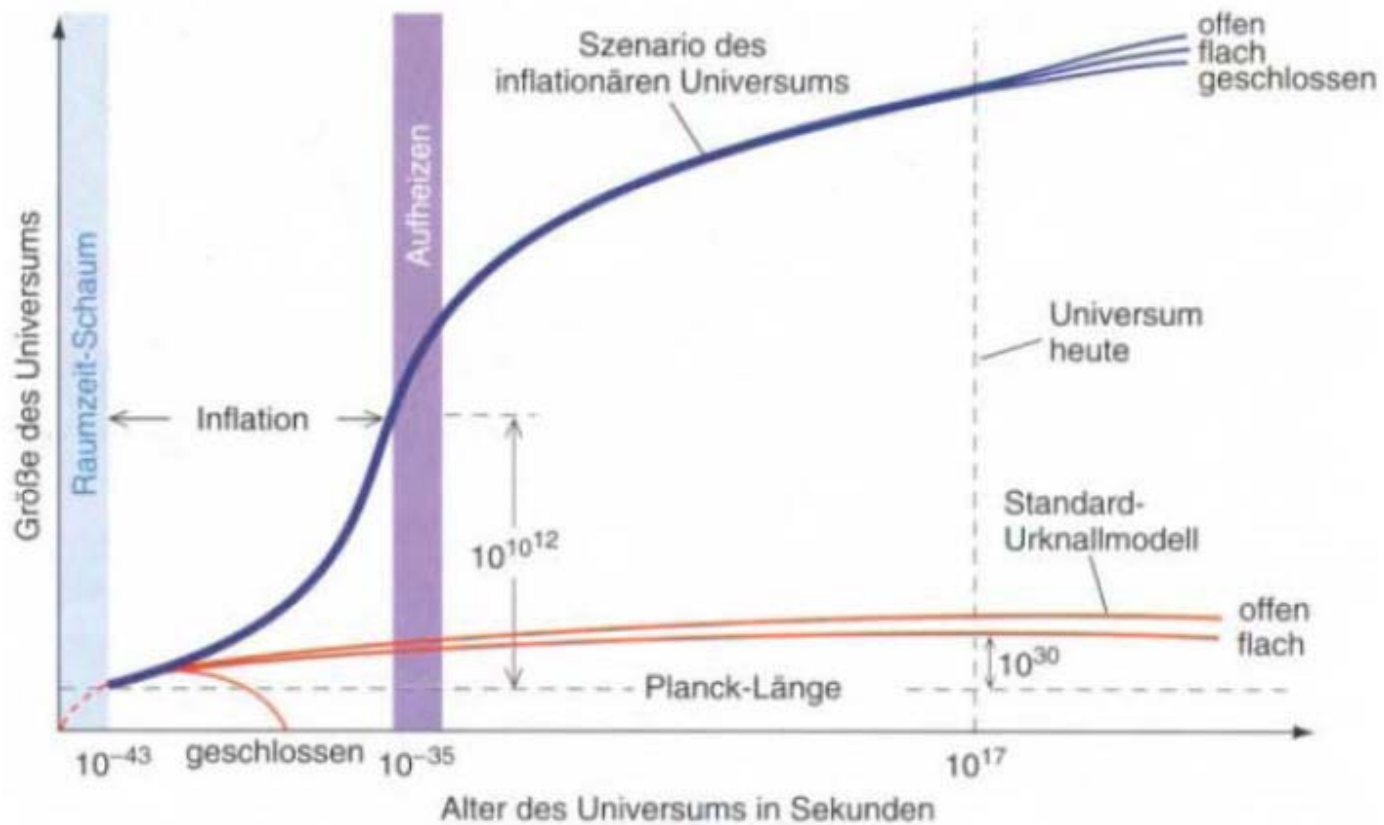
- Ursprüngliches Inflationsmodell hat leider ebenfalls einige Widersprüche
- Lösung: Verändertes Potential
- Kein Lokales Minimum mehr im symmetrischen Zustand
- Kein Tunneln mehr
- Langsamer Ablauf wegen flachem Potential



- Leider Fine-Tuning-Problem der Flachheit des Higgs-potentials im Ursprung
- Neue Inflation kann Details der CMB-Schwankungen sehr gut erklären
- Weitere Variationen des Inflationsprozesses werden diskutiert
- Viele Details trotzdem noch unklar: versagt bei der Erklärung des heutigen Werts der kosmologischen Konstante, 120 Größenordnungen!!! – vielleicht doch nicht zeitlich konstant?? Quintessenz-Modelle ...
- Auftreten der Inflation aber inzwischen stark vermutet

- Inflation wird modelliert als verursacht durch ein skalares Feld, was langsam ein Potential runterrollt mit einer kinetischen Energie, die sich wie eine „kosmologische Konstante“ verhält und die eine exponentielle Expansion erzeugt. Die Dynamik des Feldes beendet die Inflation und liefert eine Voraussage für das Spektrum der Fluktuationen

Inflation und Entwicklung



- Guth: **HiggsFeld** ist die einzige in der Natur vorkommende Kraft, die auch im leeren Raum wirken kann
- Wenn es das Higgs-Teilchen schon weniger als eine Billiardstel Sekunde nach dem BigBang gab – hat das HiggsFeld möglicherweise schon vor dem Urknall gewirkt??
- HiggsFeld hat die Kraft, aus dem Nichts Energie zu schöpfen
- BigBang ist eine Übergangsphase zwischen zwei Zuständen des Universums, nicht sein Anfang
- Statt: von nichts kommt nichts – in der subatomaren Welt gilt stattdessen: hier bekommt man gleichsam ein „free lunch“
- Guth:“ Wie Linde die Probleme der Kosmologie löste, während ich selbst schlief“, Vortrag Harvard
- Idee vom **Multiversum**: zweite kopernikanische Revolution

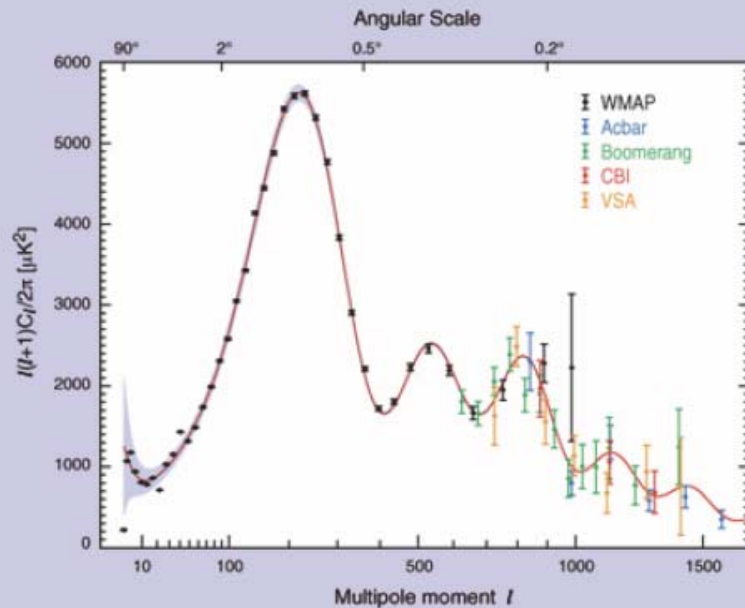
The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map. It shows a complex pattern of small-scale temperature variations across the sky, with a prominent bright spot at the center. Four thin, intersecting lines (two purple and two blue) form an 'X' shape that passes through the central bright spot. The overall color palette is dominated by blues and purples, with the central region being significantly brighter and whiter.

Experimenteller Nachweis der Inflation

Six Tests of Inflation (after Steinhardt)

- The following are “generic” predictions of inflation, phenomena for which we had little evidence when inflation was introduced in 1980:
 - **nearly-scale-invariant fluctuations**
 - spectral index - measured with ~20% precision by COBE
 - **flat universe**
 - position of 1st acoustic (BAO) peak - measured by TOCO, Boomerang, WMAP1
 - **adiabatic fluctuations**
 - coherence of acoustic (BAO) peaks - measured by Boomerang, ..., WMAP1
 - **gaussian fluctuations**
 - limits on f_{NL} , measured by WMAP1
 - **super-horizon fluctuations**
 - TE anti-correlation on $>2^\circ$ scales, measured by WMAP1
 - **spectral tilt, $n_s < 1$**
 - favored by WMAP3
 - **gravity waves (a.k.a. tensor fluctuations)**
 - measured by the Inflation Probe...

2006: Precision Measurements of the CMB

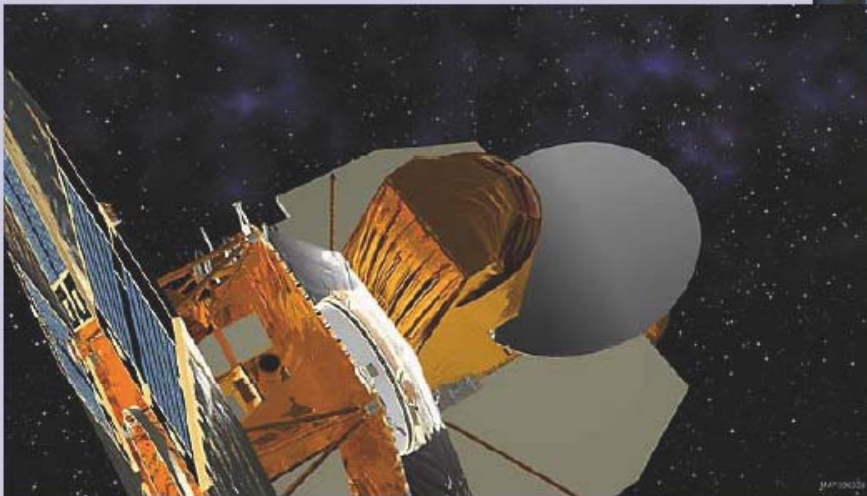


Tremendous progress has been made!

$\Delta T \sim 0.1$ K in 1965

$\Delta T \sim 0.1$ μ K in 2005

Advances in space - largely based on experience gained in numerous balloon and ground-based campaigns.



- Das Ende der Inflationären Phase – 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall – erzeugt Gravitationswellen: Voraussage der Inflationstheorie – **cosmic gravitational wave background CGWB** – noch nicht nachgewiesen – wichtig für Kosmologie und die fundamentale Physik
- B-Mode der Gravitationswellen (inflationary era seed fluctuations) beeinflusst indirekt die Struktur des CMB - sichtbar in den Polarisations-Anisotropien im Mikrowellenhintergrund
 - Problem: Signal ist höchstens 100 nano-Kelvin
 - Andere Polarisations- und Temperaturanisotropien sind wesentlich größer
 - Astrophysikalische und lokale Vordergrundquellen sind groß und die Eigenschaften wenig bekannt, schwierig sie „rauszurechnen“
- Je nach Modell der Inflation, sind die Erwartungen unterschiedlich – wichtiger Parameter: r : Tensor zu Skalar Verhältnis, charakteristisch für Inflationsmodell
- Wichtig auch die Energieskala: 2×10^{16} GeV – wäre die Energieskala entsprechend einer Inflation der Grand Unified Theories (GUT)
- => Anstrengungen bei Polarisationsmessungen des CMB und Gravitationswellen dringend erforderlich!!



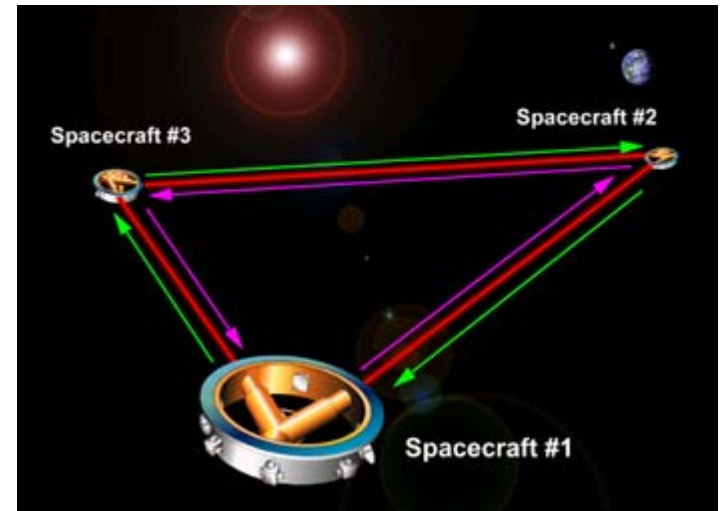
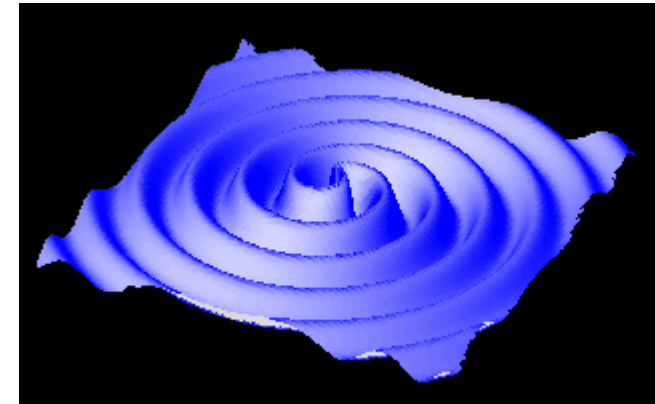
Inflation experimentell nachweisen

- Vermessung von Gravitationswellen aus dem Urknall
- Untersuchung der Polarisierung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes
- Präzise Vermessung der Dichtefluktuationen im Universum auf sehr großen und sehr kleinen Skalen

Inflation experimentell



European Organization for Nuclear Research



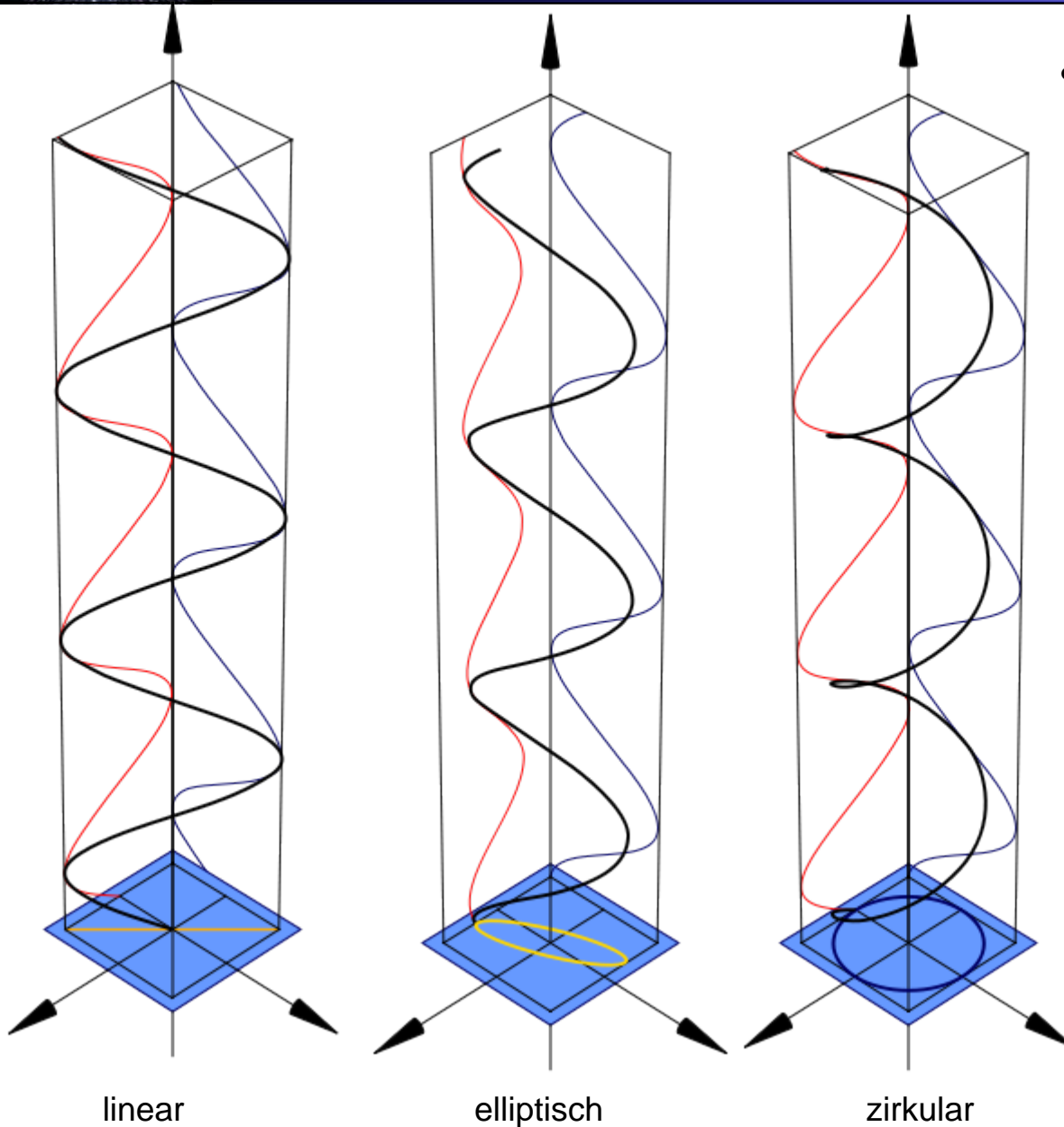
Inflation am LHC testen



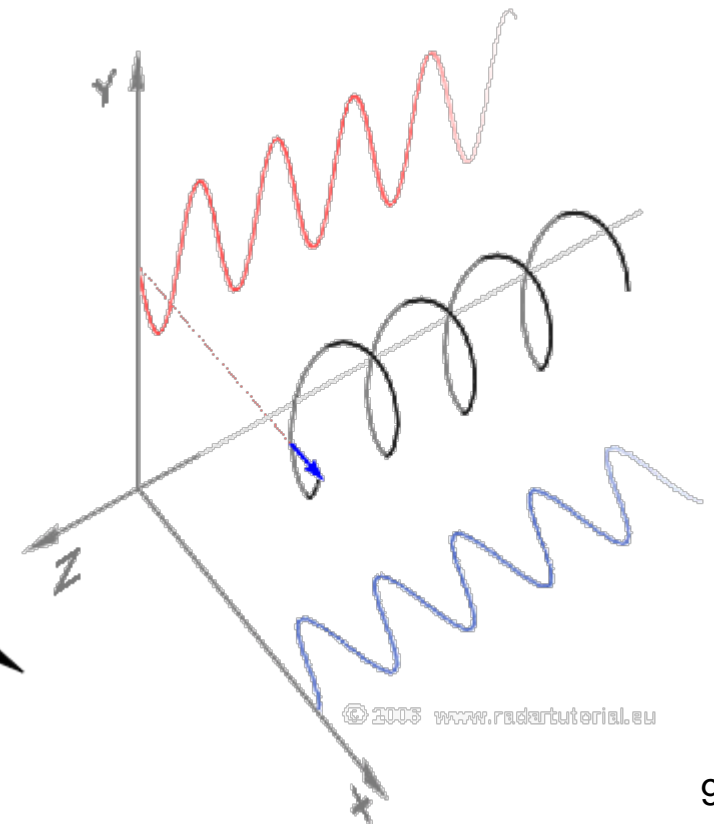
European Organization for Nuclear Research

- Detektion des Higgs Bosons am LHC könnte einen Hinweis auf die Natur der Dunklen Energie oder der treibenden Kraft der Inflation geben!!

Polarisation

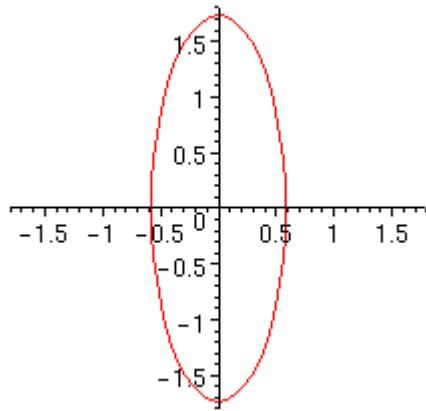


- Polarisation ist eine Eigenschaft optischer Wellen, welche die Richtung des Feldvektors des elektrischen Feldes beschreibt und zwar im Vakuum oder in optisch-isotropen Medien in Bezug auf den Wellenvektor.

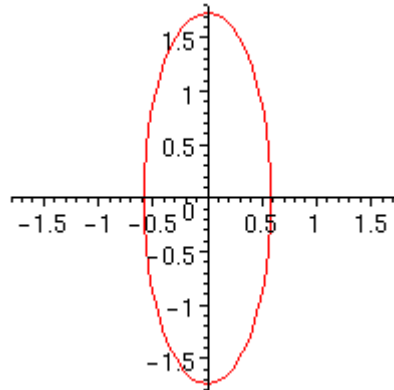


Gravitationswellen - Polarisation

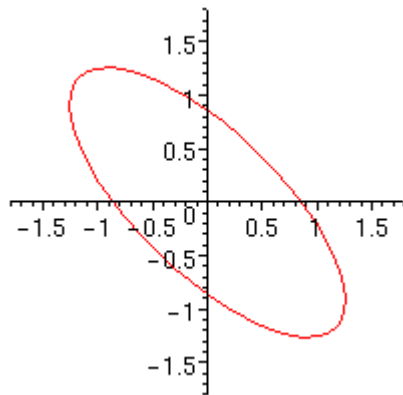
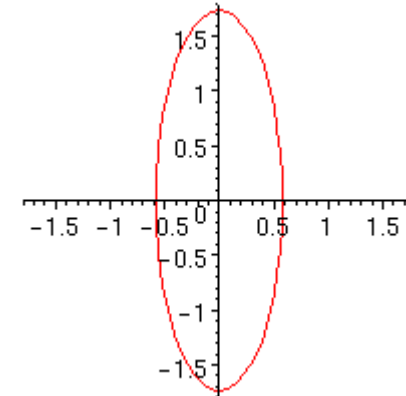
linear



elliptisch



zirkular



Physikalische Bedeutung der E- und B-Mode

- Die Schallwellen im Universum führen nur zu E-Moden
- Gravitationswellen dagegen würden auch zu B-Moden führen



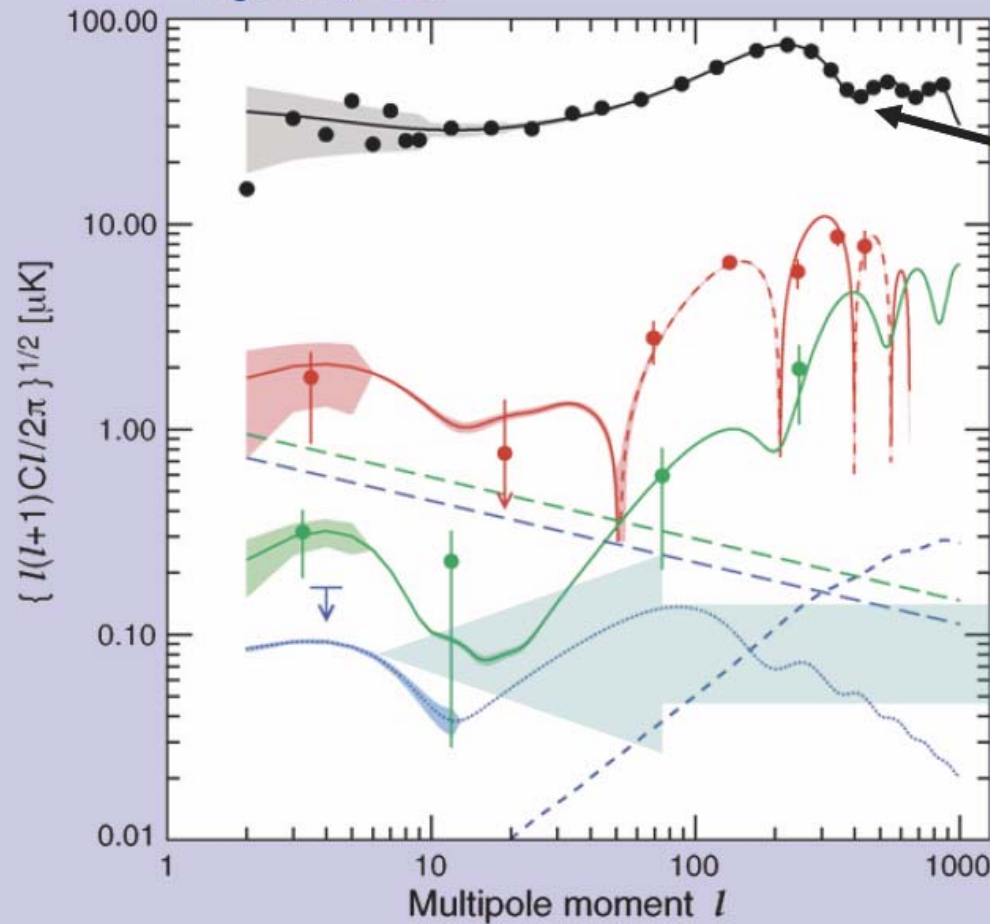
Über die B-Mode könnten somit Gravitationswellen gemessen werden, die vom Inflationsmodell vorhergesagt werden.

Gravitationswellen sind [Transversalwellen](#). Aus Sicht eines lokalen Beobachters scheinen sie die Raumzeit quer (d. h. senkrecht) zu ihrer Ausbreitungsrichtung zu stauchen und zu strecken. Ferner verfügen Gravitationswellen über zwei [Polarisationszustände](#), analog zu elektromagnetischen Wellen.

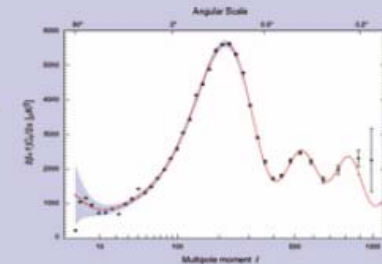


Current Polarization Data - WMAP3

Page et al., 2006



TT – temperature anisotropy



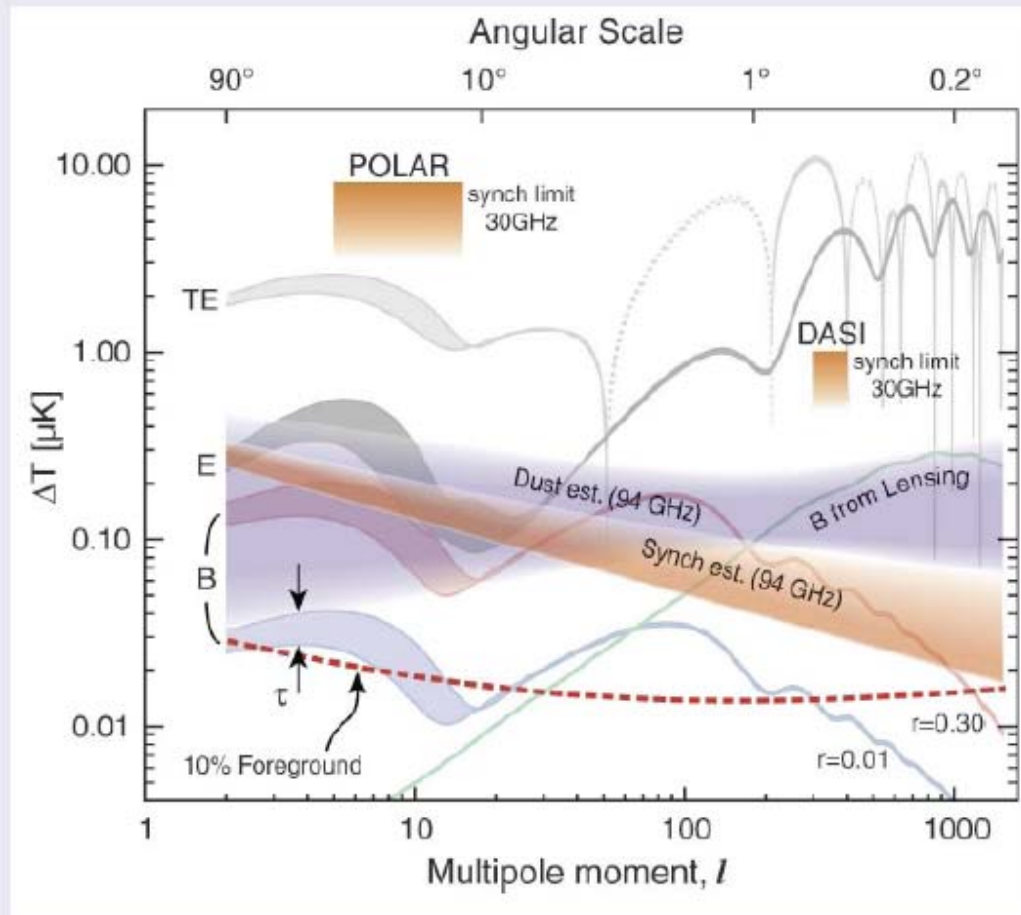
TE – temperature –
polarization correlation,
(measured in 1st year data)

E-mode polarization,
(measured in 3-year data)

B-mode polarization

(data upper limit from 3-year data,
model upper limit from TT data)

Theoretische Vorhersage des Polarisationspektrum



Test der Inflation: WMAP

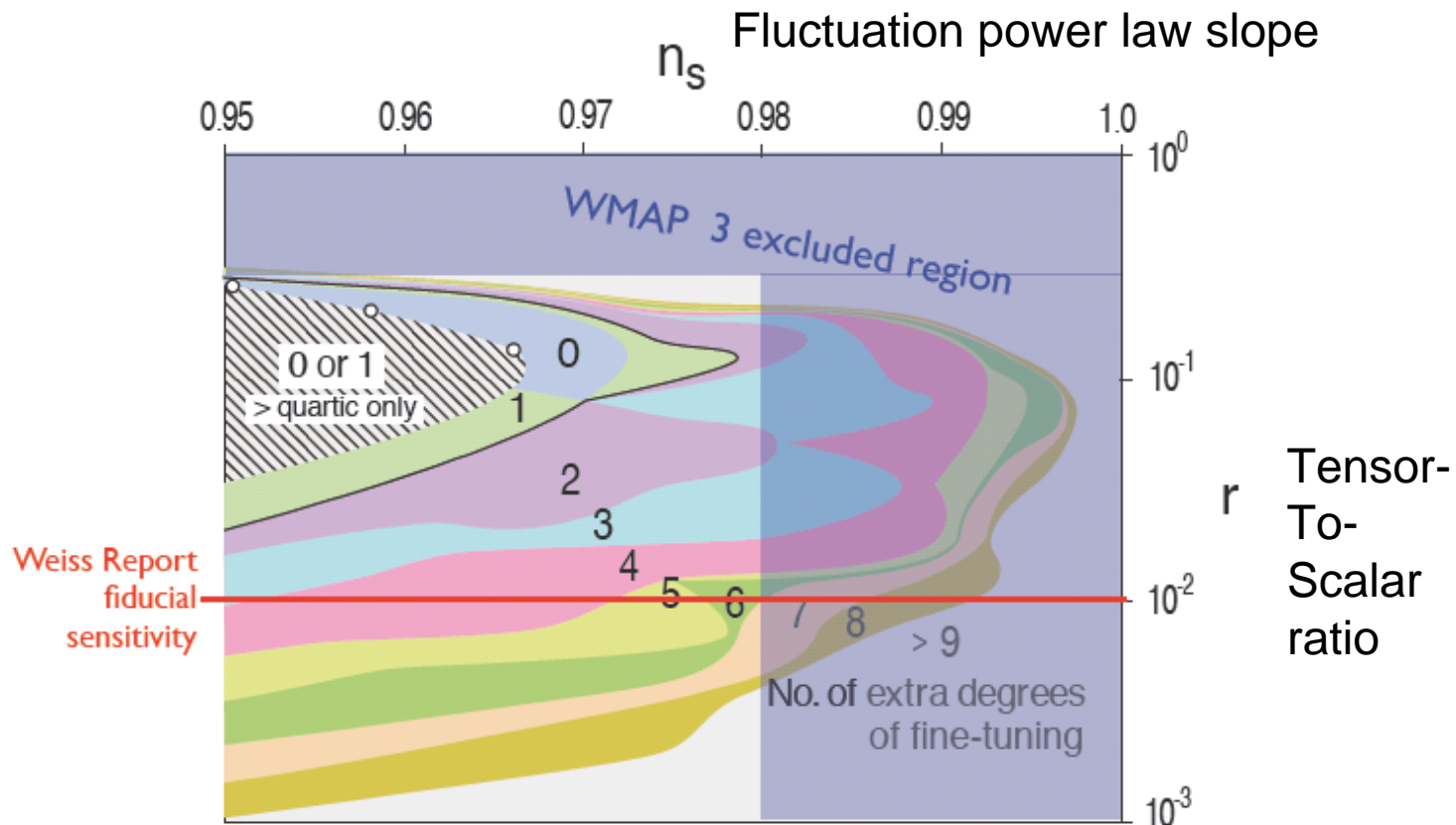
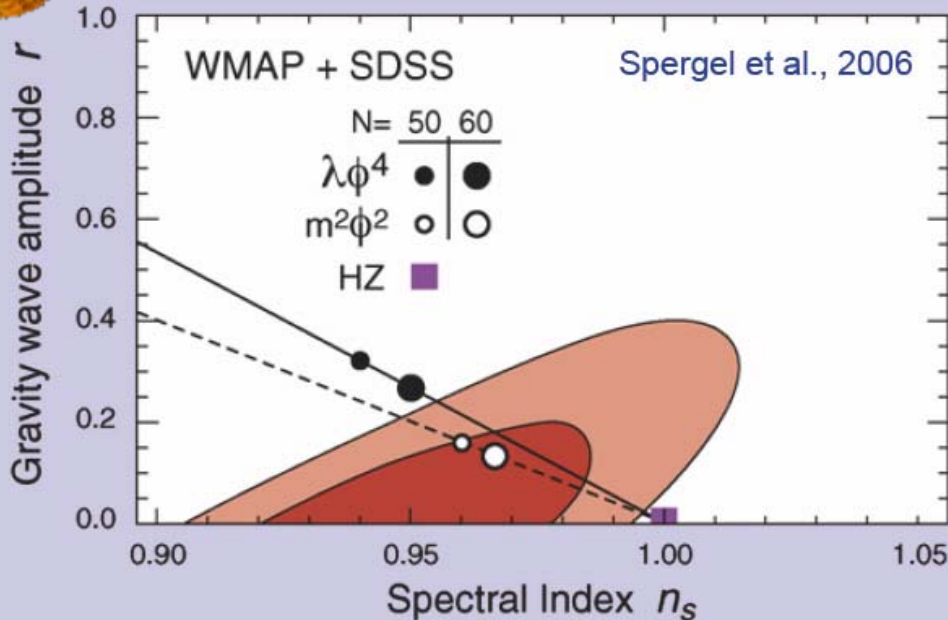


Figure 2: Predictions for the fluctuation power law slope, n_s , and tensor-to-scalar ratio, r , for minimally tuned inflation models. Over plotted are the excluded regions from WMAP three year data in purple (Spergel et al., 2007), and the red sensitivity line for the fiducial Weiss Report mission at $r = 0.01$. Figure is modified from Boyle et al. (2006).



Inflation Parameter Measurements c.2006



$$n_s = 0.960 \pm 0.016$$

$$r < 0.3$$

$$E_{\text{infl}} < 2.6 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

- “Generic” HZ model:

$$(n_s, r) = (1, 0)$$

- disfavored at $\sim 95\%$ CL.

- Slow roll inflation models relate n_s and r , as shown.

- $n_s < 1$ suggests r should be observable.

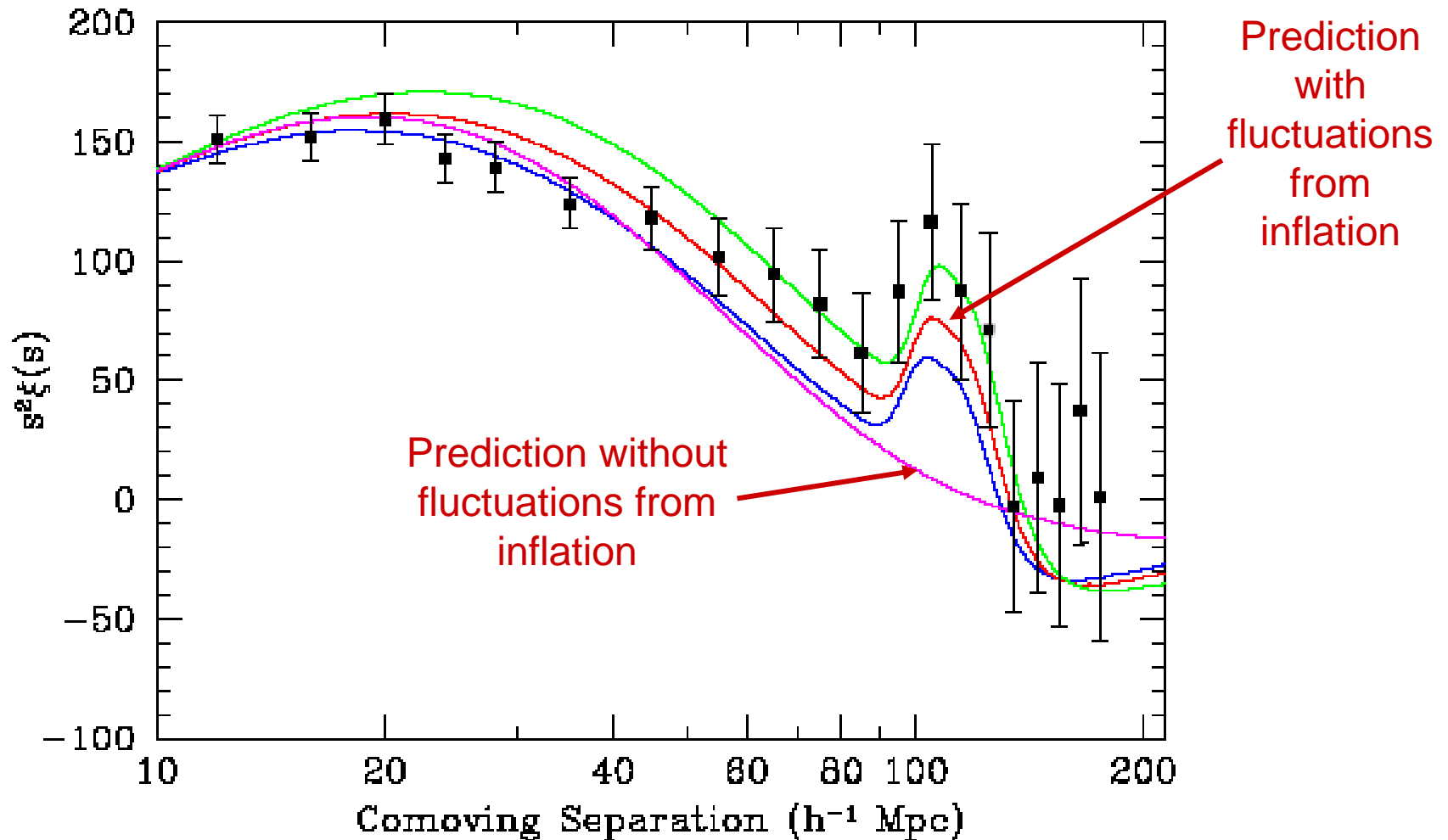
- Knox et al. estimate $r \sim 0.13$ is the lowest amplitude detectable with temperature data.

- **Further progress requires polarization.**

“We find that, except for (inflation models) with numerous unnecessary degrees of fine-tuning, $n_s < 0.98$, measurably different from exact HZ. Furthermore, if $n_s > \sim 0.95$, in accord with current measurements, the tensor/scalar ratio satisfies $r > \sim 10^{-2}$, a range that should be detectable in proposed CMB polarization experiments.”

Boyle, Steinhardt, Turok (2005)

SDSS measurements from Eisenstein et al. 2004



- Planck:
 - ESA-Satellit
 - geplanter Start: 2009, April
 - Messung der Anisotropien für Winkel größer 5-10 arcmin, mit einer Genauigkeit von 2×10^{-6}

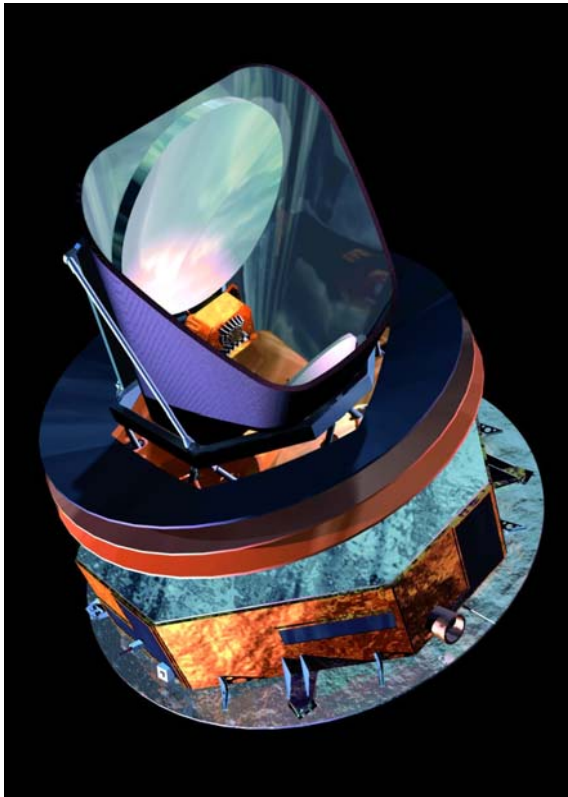


FIG 1.11.— *Planck* and *Herschel* ready for launch under the Ariane 5 fairing. The two satellites separate just after launch and proceed independently to their final orbits. View courtesy of Alcatel Space (Cannes).

Polarisation des Mikrowellenhintergrundes

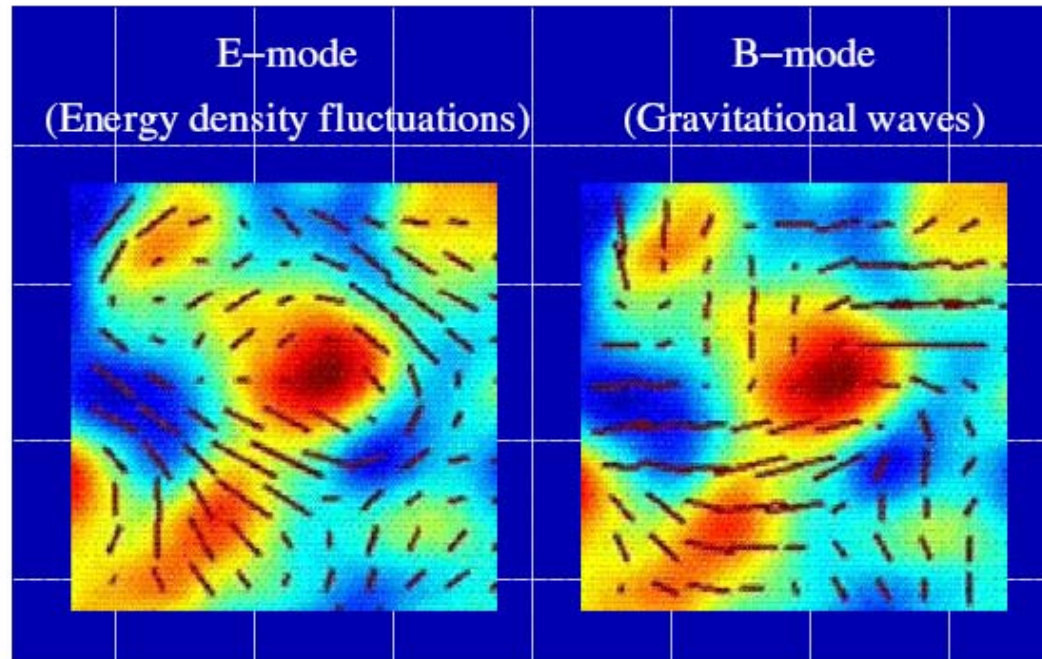


Figure 6: An illustration of the two modes of CMB polarization, and how they might be expected to correlate with total intensity. The B-mode pattern resembles the E-mode pattern but with all polars (indicated by the sticks) rotated by 45° . Scalar perturbation modes generate E-mode polarization only, whereas tensor perturbations generate both modes. The B-mode signal is thus a unique signature of the presence of primordial gravitational waves. An analogous decomposition exists for the image shear field induced in gravitational lensing. Adapted from Seljak & Zaldarriaga (1998).

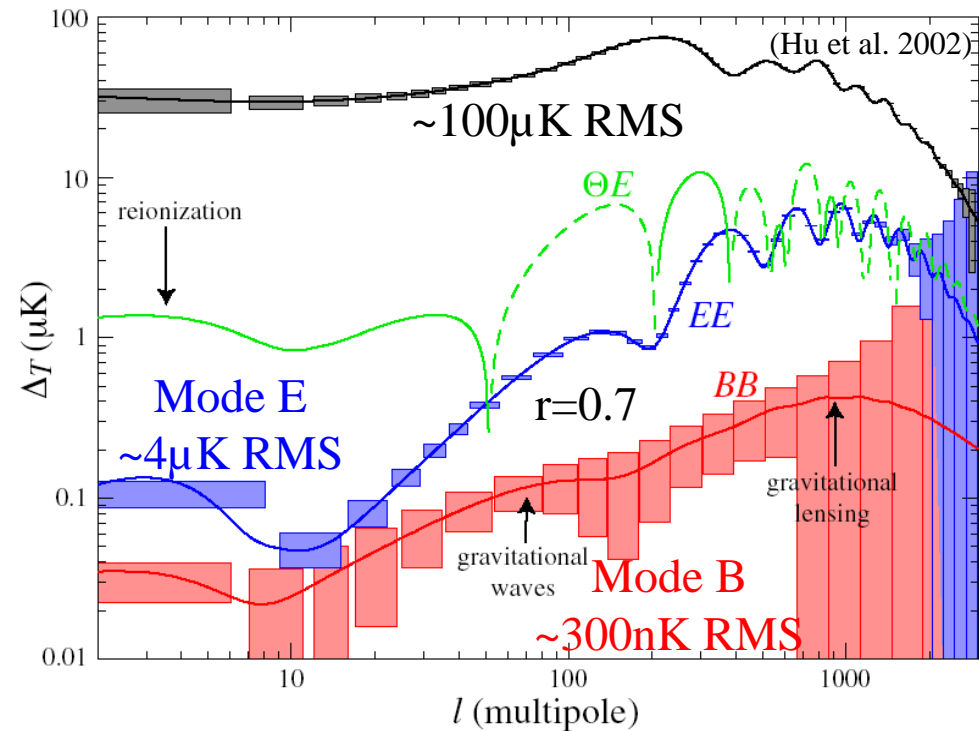


Planck



- Full sky survey
 - CMB anisotropies
 - Temperature and polarization
 - Resolution: 5'
 - Sensitivity: $\Delta T/T = 2 \cdot 10^{-6}$
 - Foregrounds
- 15 times more sensitive than WMAP
- Planck will be the ultimate experiment
 - for T up to $l \approx 2000$,
 - for E up to $l \approx 1000$...
- ... but will be able to detect B mode only if r is closed to its actual upper limit.

Planck, for a 14 months survey:

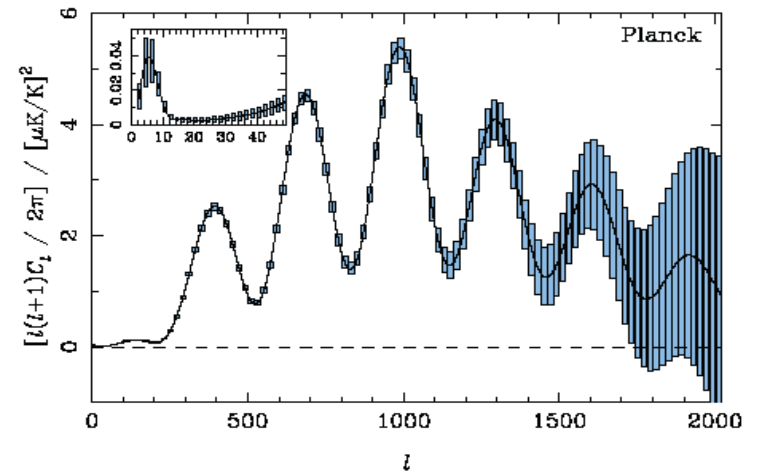
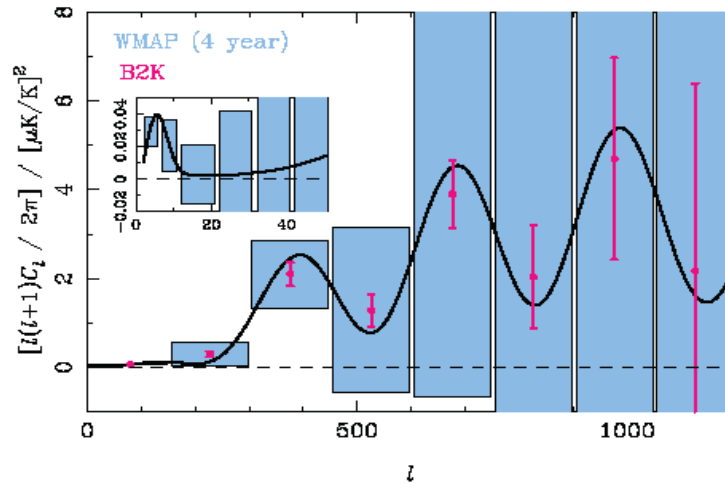


Planck Polarization

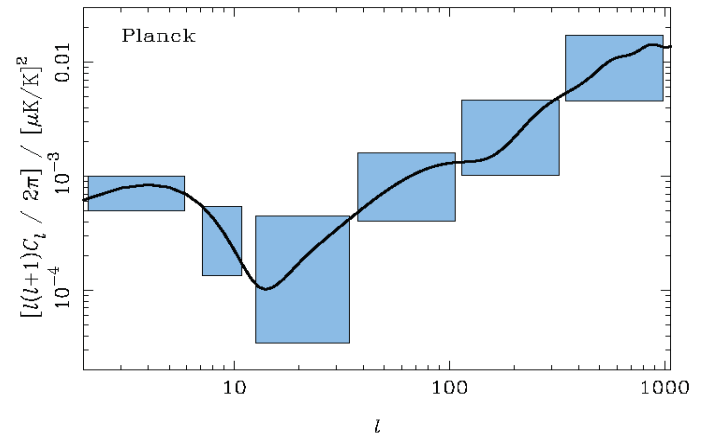
(Planck Blue Book)



E spectra

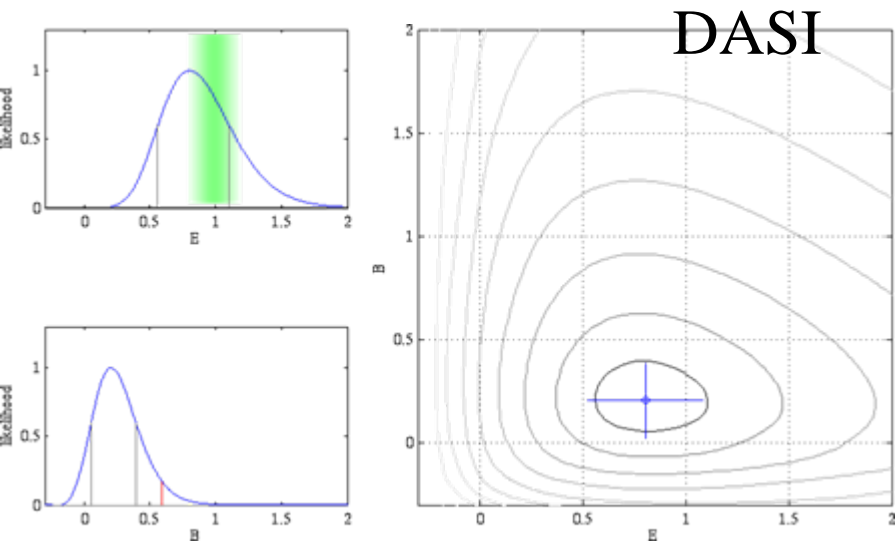
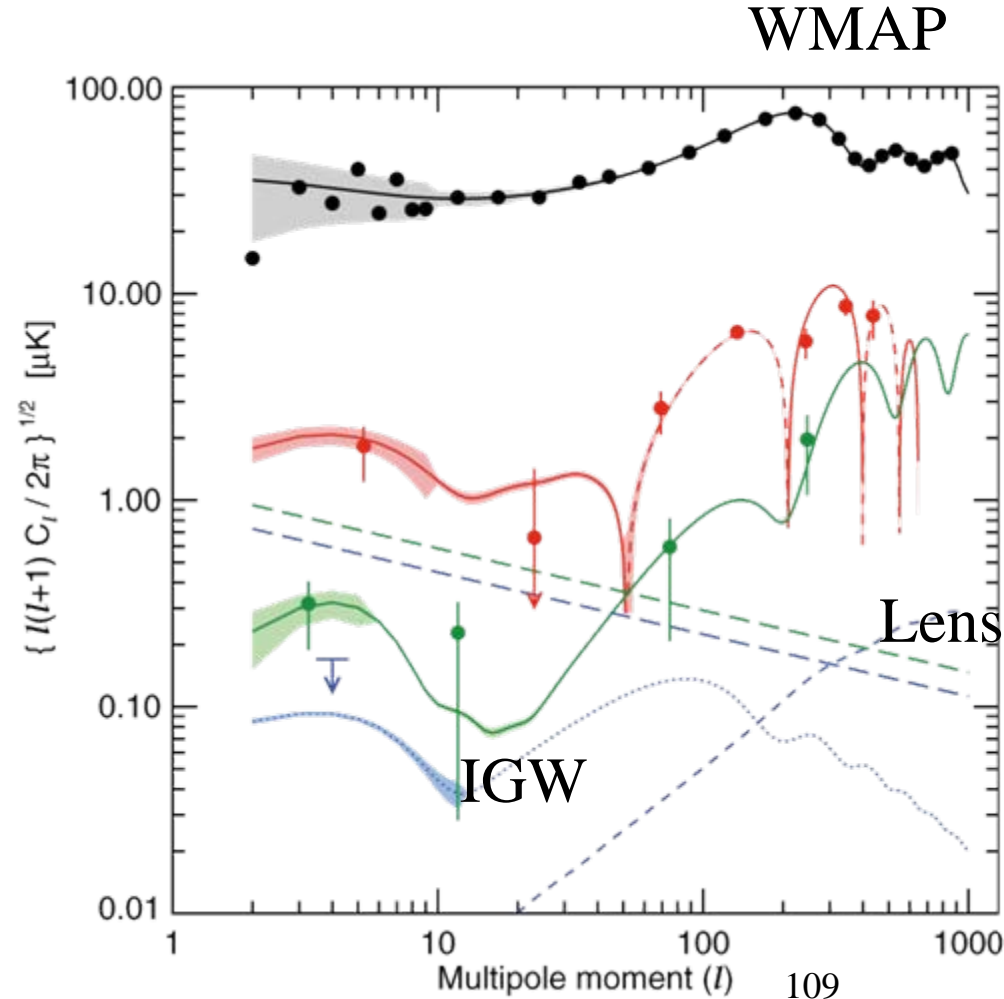
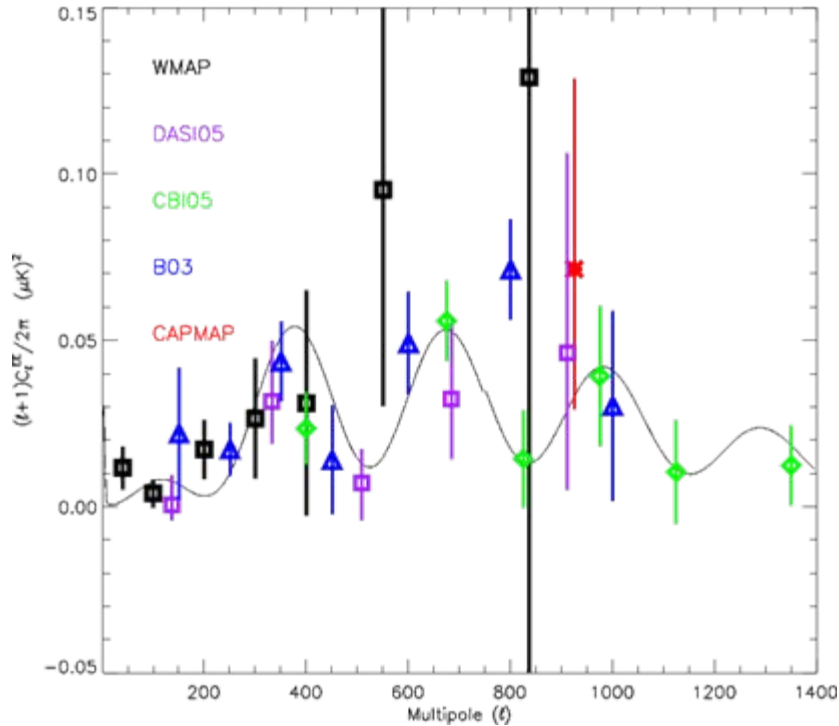


B spectra



Polarization has been measured

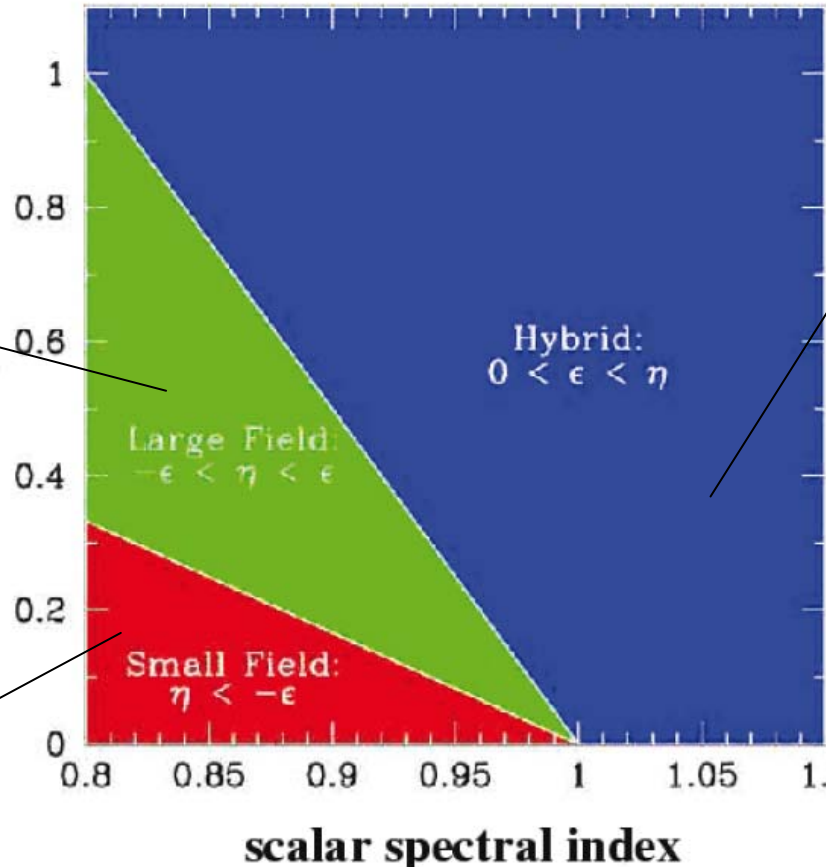
DASI, CBI, BOOMERanG and CAPMAP have all published polarization detections.



Chaotische inflationäre Modelle von Linde

scalar/tensor ratio

Neues inflationäres Modell von Linde
Sehr geringe Kopplungskonstanten



Branenwechselwirkungen

FIG 2.10.—The three classes of inflationary models discussed in the text, delineated in the plane of the tensor-to-scalar ratio r (Eq. 2.14) versus scalar spectral index n_S (adapted from Kinney, Melchiorri and Riotto, 2001)

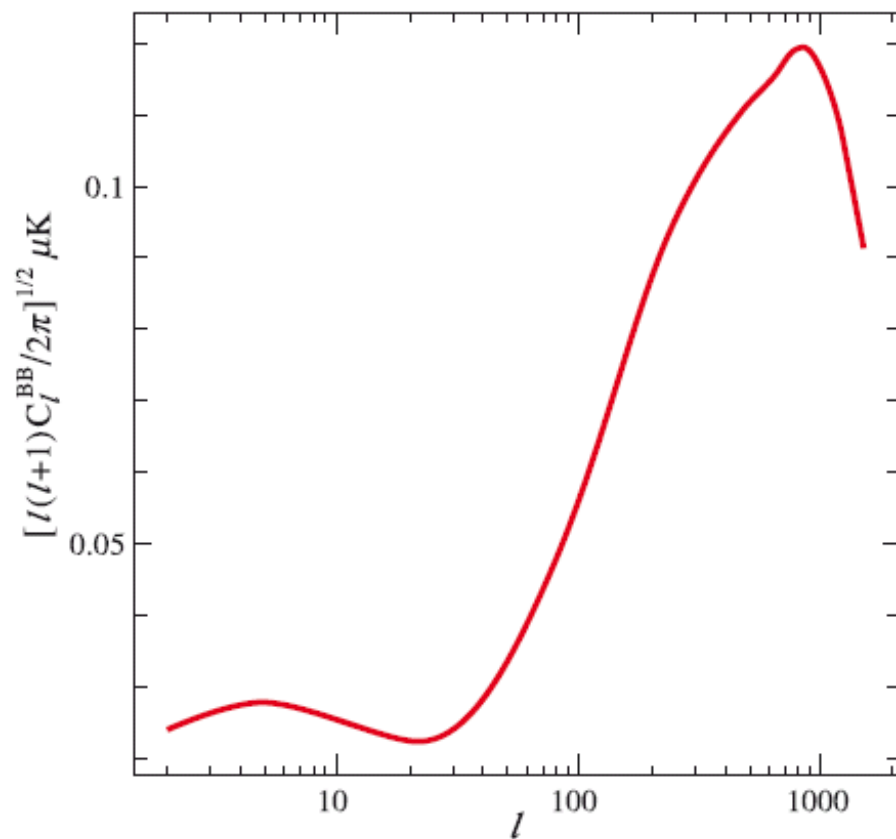
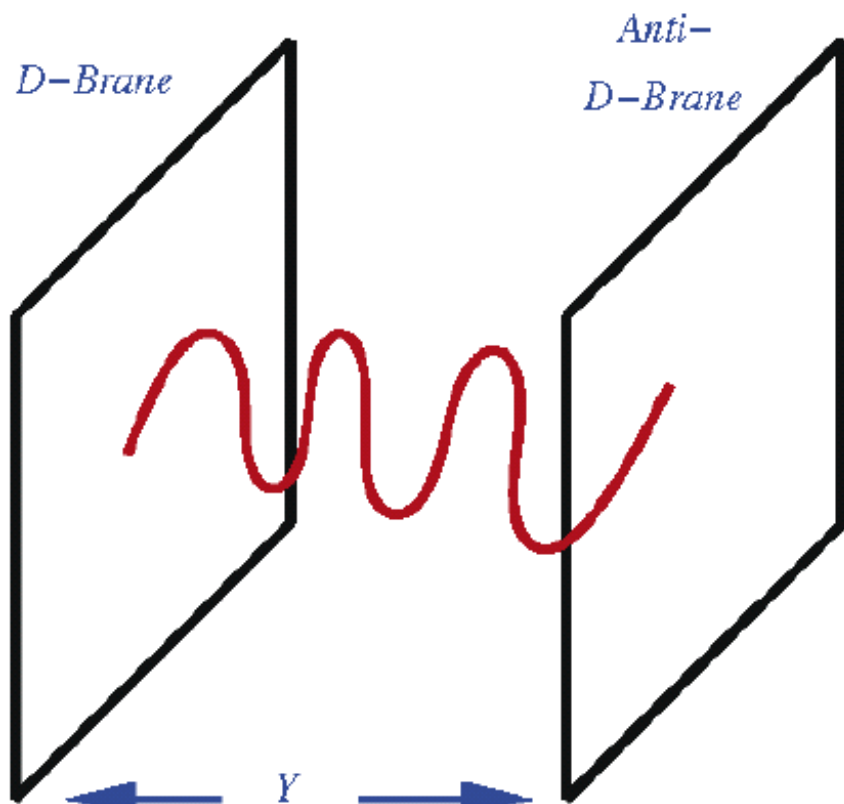
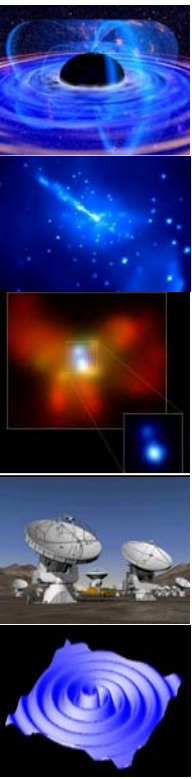
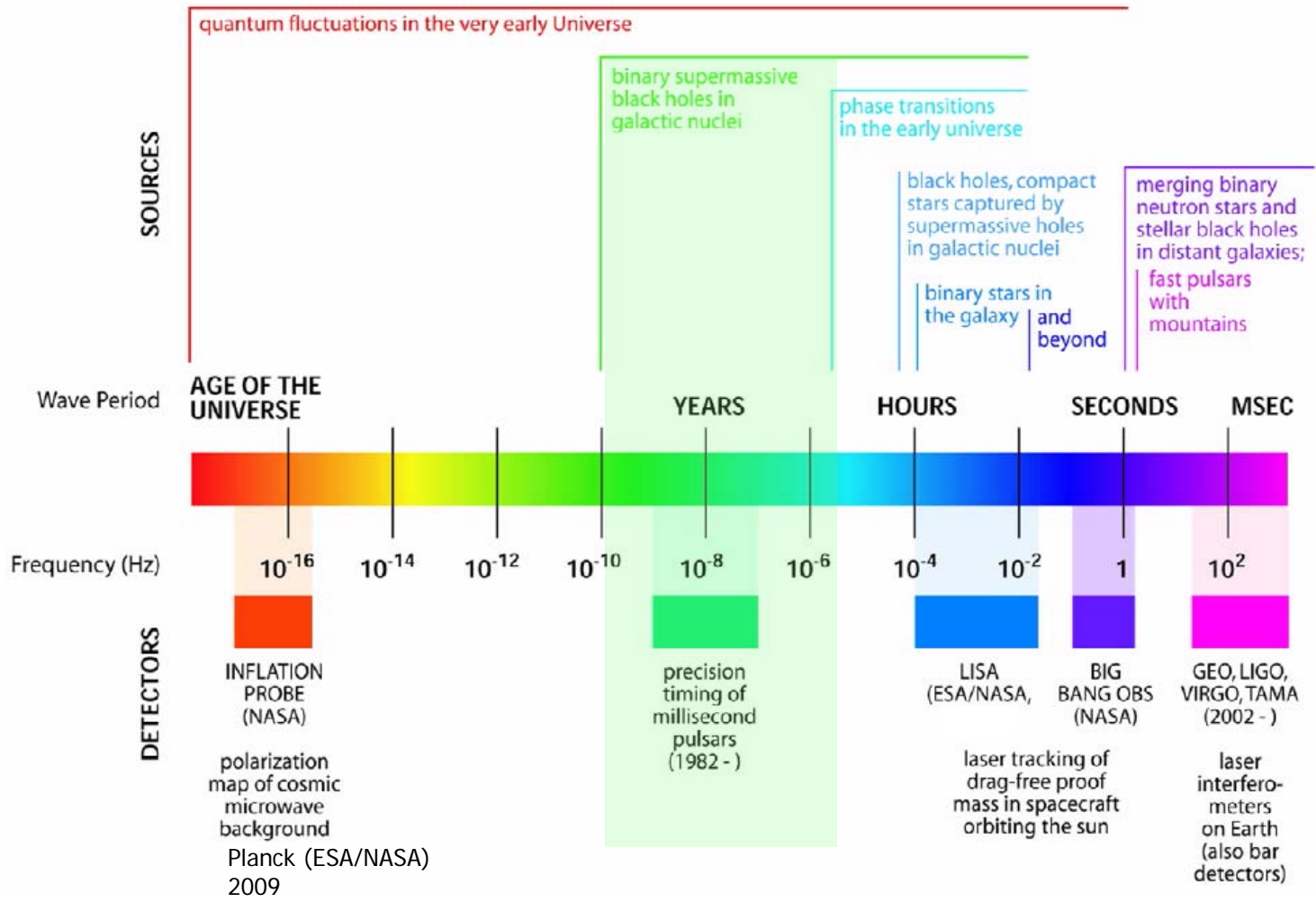
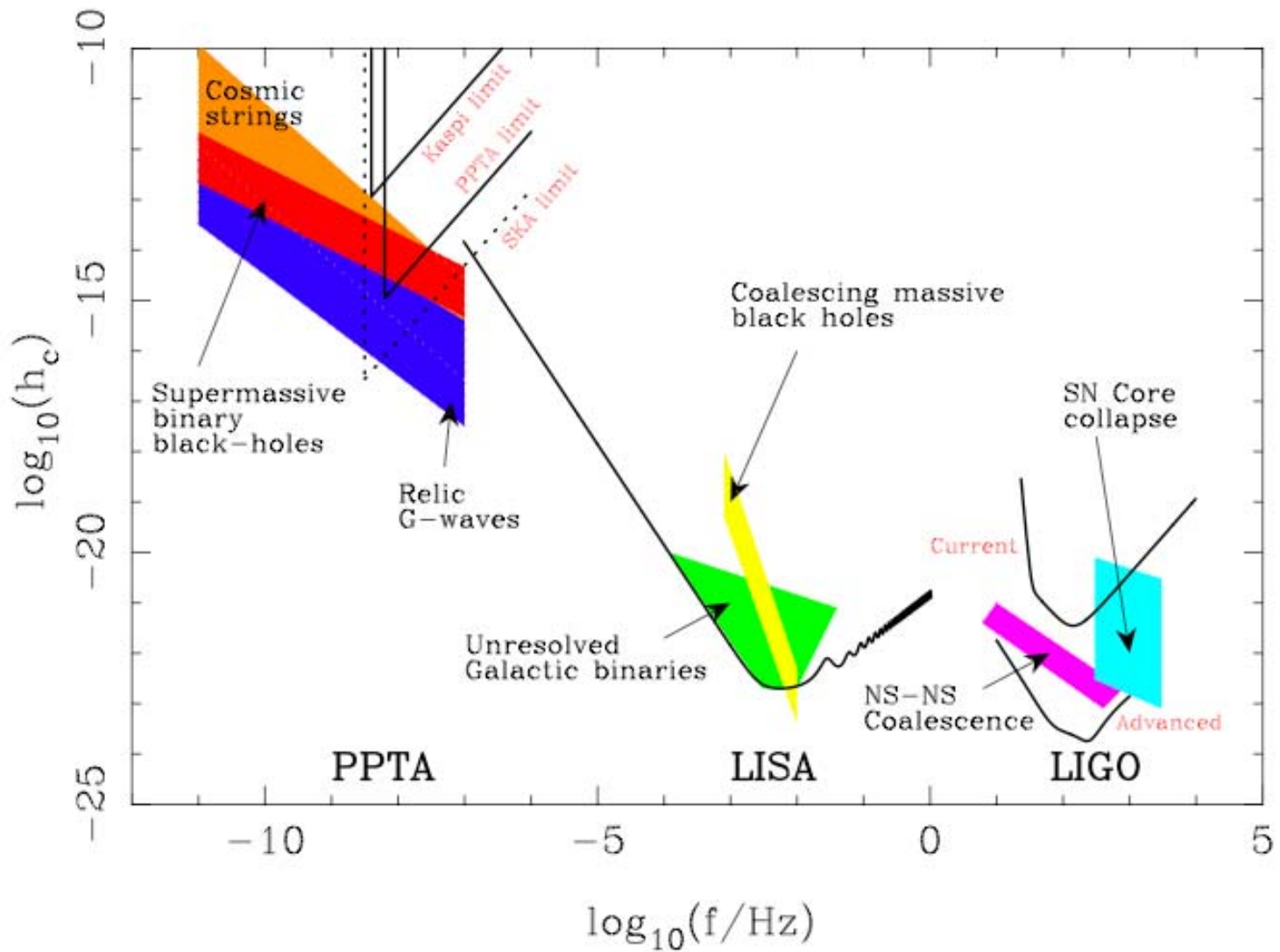


FIG 2.24.— The left panel shows an open string state with end points fixed on a brane and antibrane. At some critical separation the string state becomes massless and at smaller separations becomes tachyonic. At this critical point inflation ends, as in hybrid models of inflation (from Quevedo 2003). The right panel shows the B-mode polarization CMB power spectrum expected from cosmic strings (adapted from Pogosian et al. 2003)

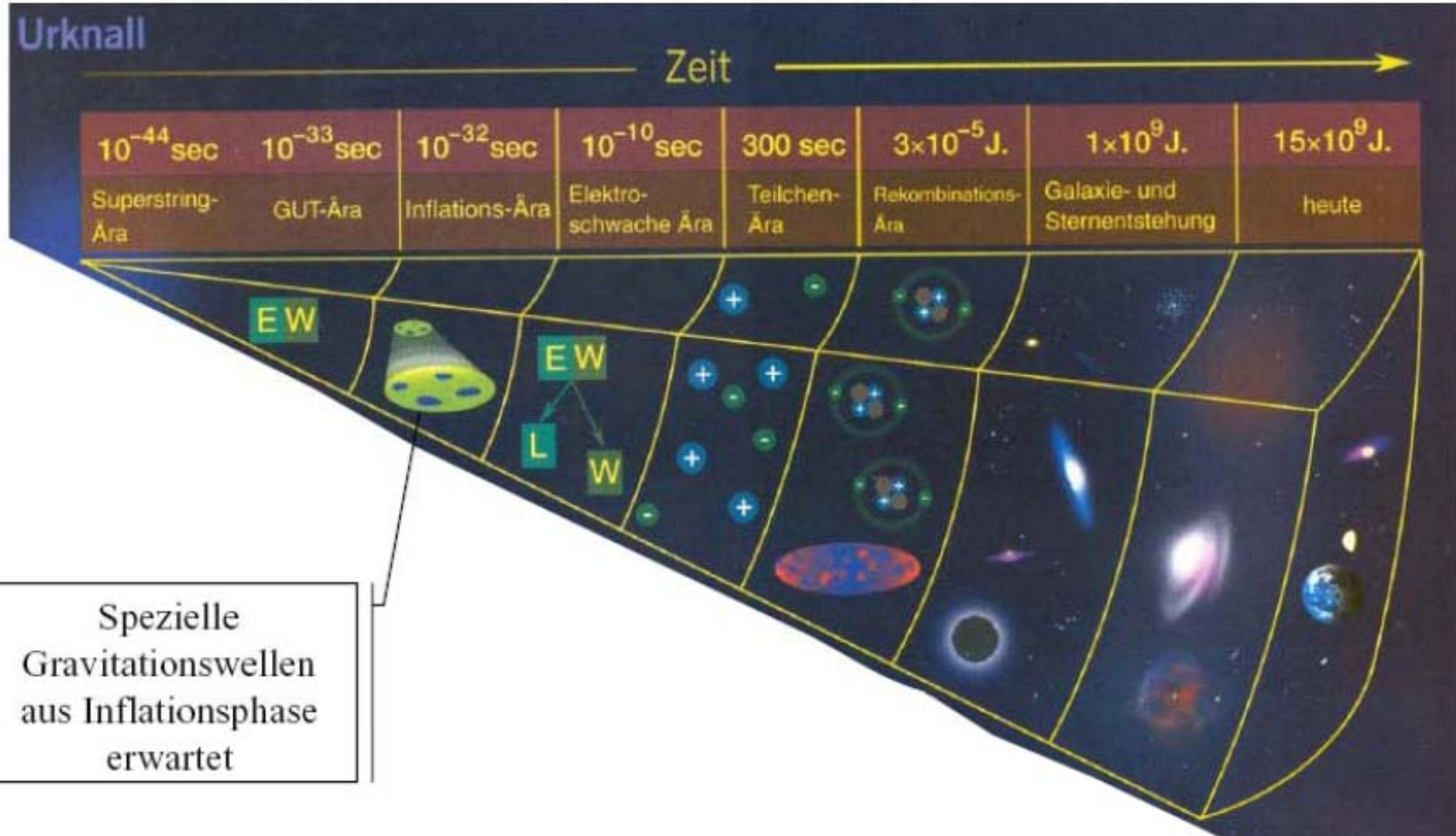
THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM



LISA



Test der Inflation: LISA



- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- 24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie
- 07.11.08: Urknall
- 05.12.08: Inflation
- **19.12.08: Multiversen & Inflations-Experimente**

Weihnachtsferien

- 09.01.09: Wurm Löcher und Schwarze Löcher
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen

