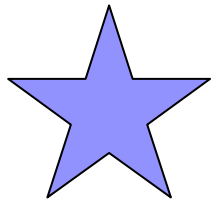




Frontiers of Extragalactic Astrophysics

- 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
- **HEUTE: Inflations-Experimente & Multiversen**



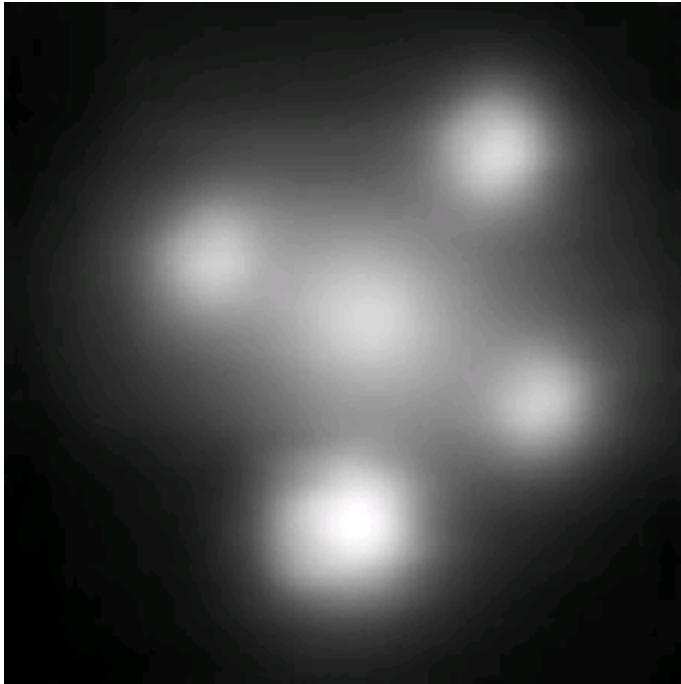
Weihnachtsferien

- 09.01.09: Multiversen & Wurm Löcher
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen



AKTUELLES

Auflösungsrekord !



- Einstein-Kreuz, SINFONI, VLT, adaptive Optik, Atmosphäreneffekte können weitgehend eliminiert werden
- Gravitationslinseneffekt
- Links: Zentrale Quelle: Kern der Linsengalaxie
- Links: 4 Bilder des entfernten Quasars
- Quasar 10 Milliarden Lichtjahre entfernt, Linsengalaxie 10x näher
- Makrolinsen-Effekt (Galaxie) + Mikrolinseneffekt (Sterne in der Galaxie) + VLT = Auflösung von ein Millionstel einer Bogensekunde
- Mehrere Jahre an Beobachtungen notwendig – Variabilitätsstudien – Messung der Temperaturverteilung um ein Schwarzes Loch; erste Messung der Größe einer Akkretionsscheibe um einen Quasar



Inflation – Quantenfluktuationen –
Gravitationswellen



Inflationsmodell

- **Vorteile:**

- Löst Problem Flachheit des Universums
- Löst Horizontproblem
- Löst Monopolproblem
- Quantenfeldtheorie

- **Probleme:**

- Szenario (ad hoc)
- Mechanismus nicht eindeutig
- Quantenfluktuationen
- Gravitationswellen

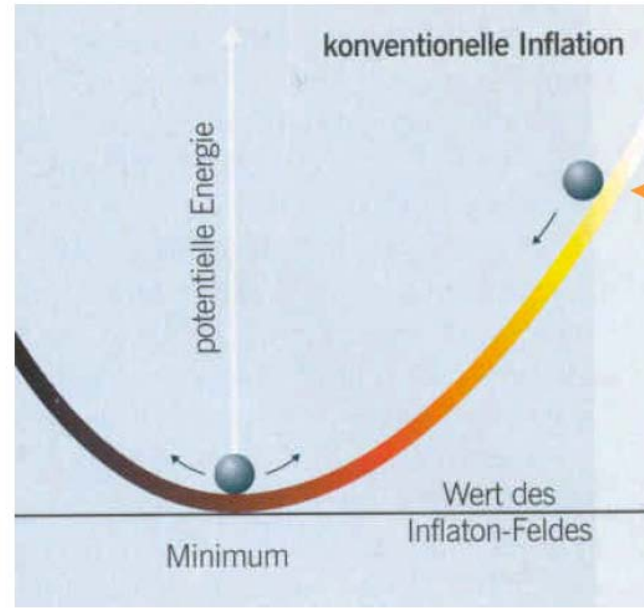
- **Aussichten:**

- Quantenfluktuationen
- Auswirkung auf Materieverteilung
- Auswirkung auf Mikrowellen Hintergrundstrahlung

- Inflation:
 - Unklar, welches Modell die Inflation am besten beschreibt

Inflaton-Feld

Kosmologische Konstante
 \Rightarrow Skalares Inflaton-Feld
 $\Lambda_0 \equiv \Phi(t)$

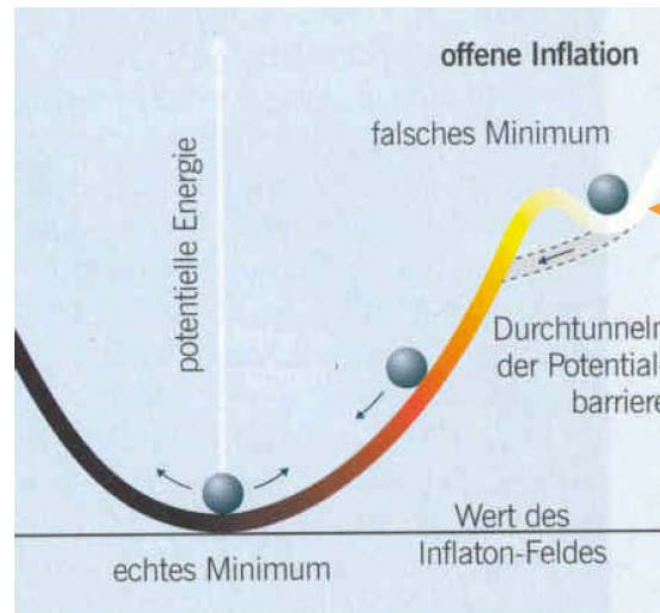


Reibung:
 Langsame
 Bewegung,
 „lange“
 Inflation

Je länger das
 Inflaton-Feld
 bei größeren
 Werten verharrt,
 umso stärker
 die Expansion

False Vacuum

Kosmologische Konstante
 \Rightarrow Skalares Inflaton-Feld
 $\Lambda_0 \equiv \Phi(t)$

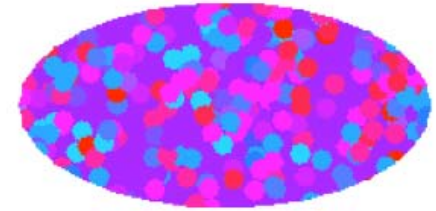


Aufenthalt
 im
 angeregten
 Vakuum,
 „lange“
 Inflation

Je länger das
 Inflaton-Feld
 bei größeren
 Werten verharrt,
 umso stärker
 die Expansion

Quantenfluktuationen und Inflation

Die Quantenfluktuationen „frieren“ bei der Expansion ein und wandern aus dem beobachtbaren Teil (Horizont) heraus



- Quantenfluktuationen des Inflaton-Feldes zu frühen Zeiten
- Werden durch Inflation extrem vergrößert in ihrer räumlichen Ausdehnung
- Am Ende der Inflationsphase: Ausfrieren
- Resultat: Schwankungen der Energiedichte im Universum

Fluktuationen

Inflationäre
Quanten
Fluktuationen

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{Energie}} \rightarrow \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{Materie}} \xrightarrow{\text{Entkopplung}} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{Materie}}$$

Die Dichtefluktuationen aufgrund der Quantenfluktuationen der Inflationsphase haben die heutige Verteilung der Materie zur Folge
Quantenfluktuationen als Kondensationskerne

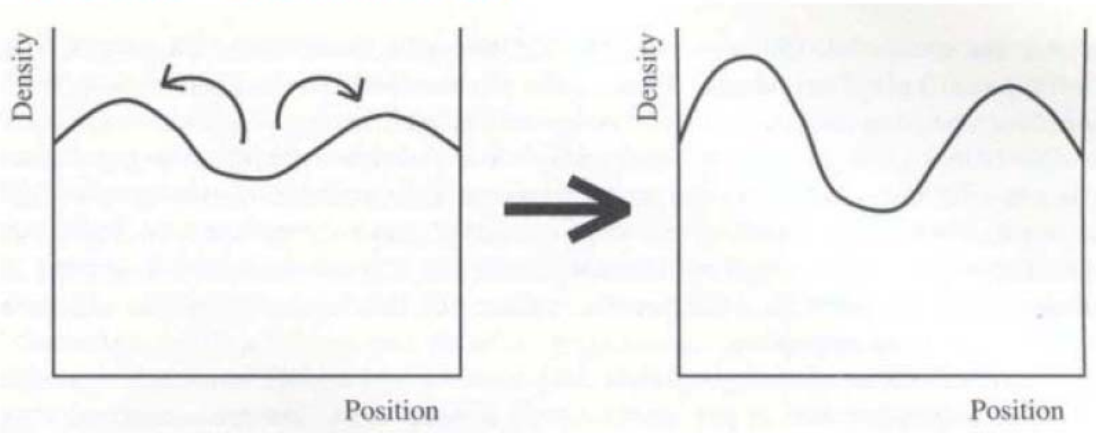
Bleibt direkt erhalten

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{\text{Photonen}} \rightarrow \left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{\text{Mikrowellen}}$$

$$\text{Gravitative Struktur bildung} \rightarrow \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{Galaxien}}$$

Ändert sich mit der Zeit

Dichte-Instabilität



Dichtefluktuationen vergrößern sich durch gravitative Anziehung.

Unterdichte Bereiche wachsen und werden dünner

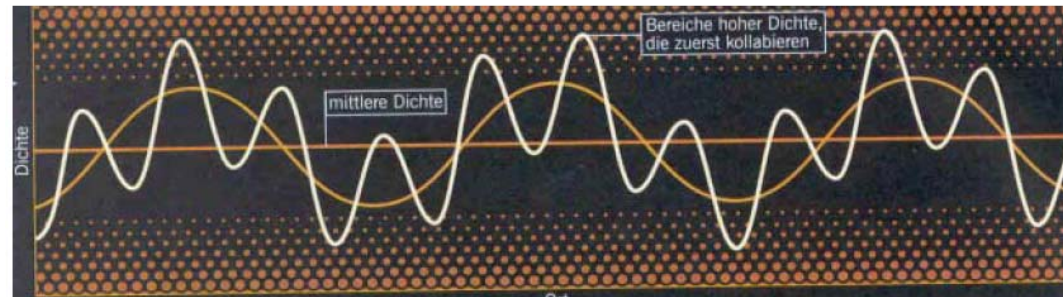
Überdichte Bereiche schrumpfen und werden dichter

Koppeln sich von der Expansion ab

Bilden stabile selbstgravitierende Bereiche

Zunächst auf kleinen
Skalen, dann auf größeren
selbstähnlich

Dichte und Kollaps

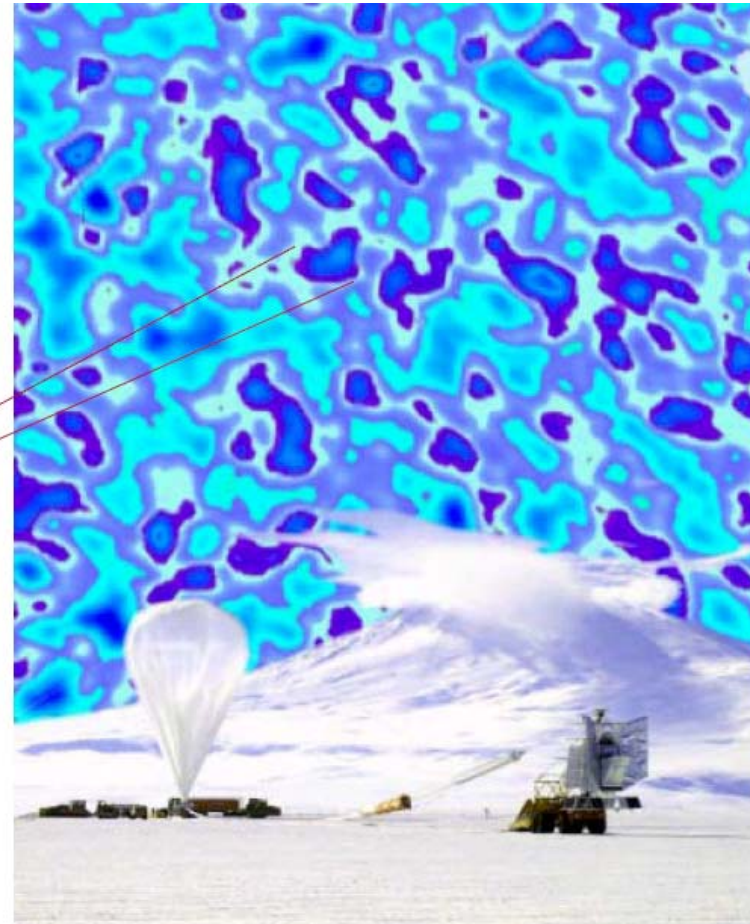


Bereiche kleiner Ausdehnung kollabieren zunächst: Sterne.

Winkel auflösung

Fluktuationen der
Hintergrundstrahlung sind
ein Abbild der Materieverteilung
bei der Entkopplung

Mittlere Größe der
Fluktuation: 1°



- Erhöhte Dichte baryonischer Materie → Erhöhte Temperatur in den Wolken
- Große Wolken (**Sachs-Wolfe-Effekt**): Emittierte Photonen müssen Gravitationsfeld überwinden
- Mittlere Wolken (**Akustische Schwingungen**): Erhöhte Temperatur in den Wolken → Ausdehnung → Dichteabnahme → Abkühlung → Schrumpfung → Dichtezunahme → Temperaturerhöhung. Größe jedoch begrenzt durch kausale Kopplung: Lichtgeschwindigkeit und Alter des Universums
- Kleine Wolken (**Silk-Dämpfung**): Die Photonen der Umgebung zerstören die kleine ΔT

Materiewolken – Power Spektrum

Power-Spektrum: Präzise Aussagen

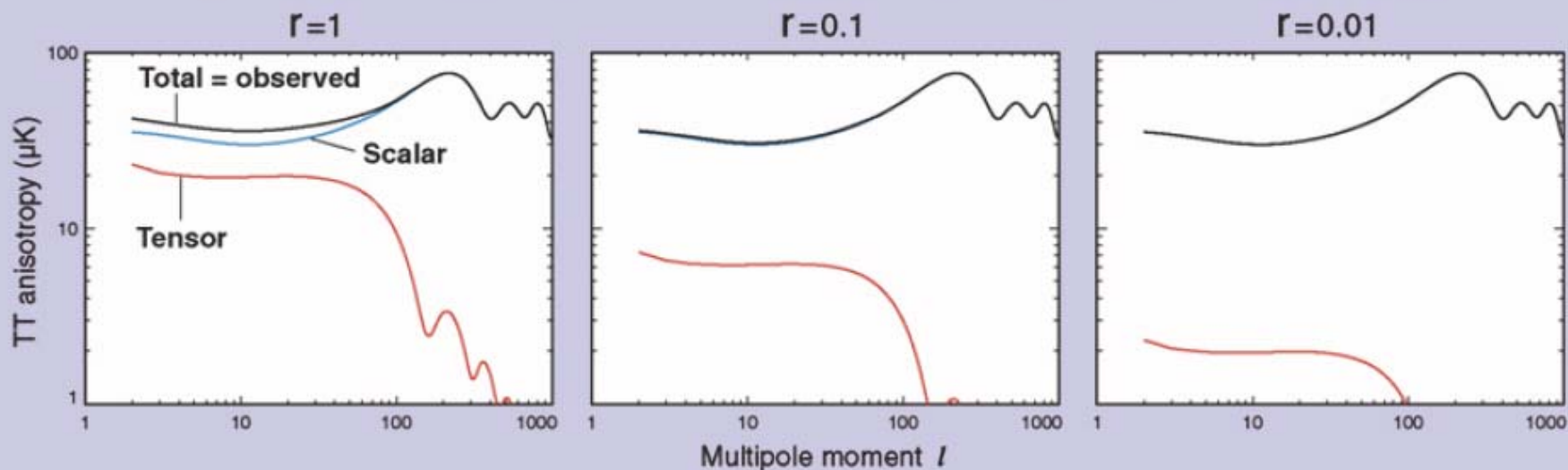
- Höhe, Position der Peaks und der Dips.
- Flachheit des Universums
- Alter des Universums (13.7 Mrd y)
- Omega-total
- Omega-Lambda (dunkle Energie) = 0.73
- Omega-Matter (Materie) = 0.27
- Omega-BM (baryonische Materie) = 0.04
- Hubble-Parameter 71 km/(sec Mpc)
- Zeitpunkt der ersten Sterne im Universum

Inflation and Gravity Waves - I

- Inflation predicts two forms of fluctuations:
 - Scalar modes (density perturbations) with slope n_s :
 - generate CMB anisotropy and lead to structure formation
 - Tensor modes (gravity waves) with slope n_t :
 - generate CMB anisotropy but do not contribute to structure formation
- Gravity wave amplitude, r , proportional to energy scale of inflation:

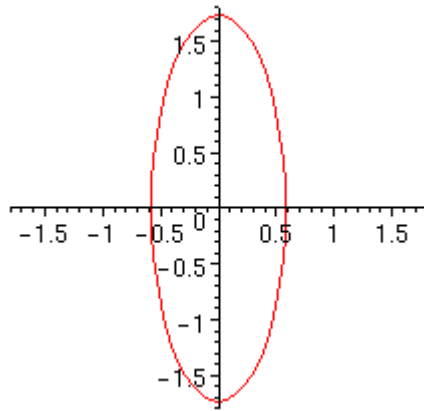
$$r^{1/4} \propto \frac{V_\phi^{1/4}}{m_{pl}} = \frac{E_{\text{infl}}}{3.3 \times 10^{16} \text{ GeV}} \quad \text{with} \quad r \equiv \frac{(\Delta T)_{\text{tensor}}^2}{(\Delta T)_{\text{scalar}}^2}$$

- Both types of fluctuations contribute to CMB temperature anisotropy:

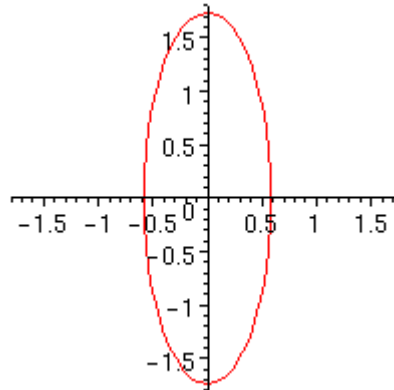


Gravitationswellen - Polarisation

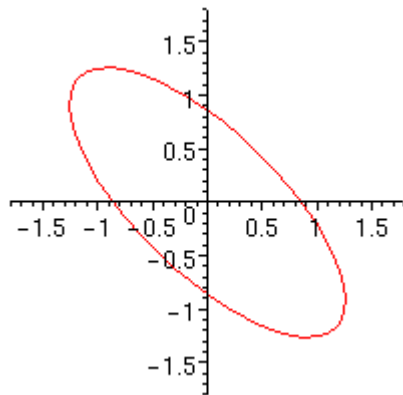
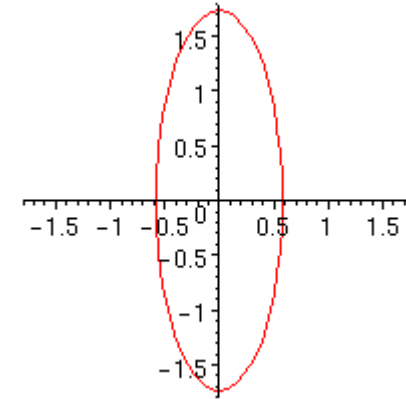
linear



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.

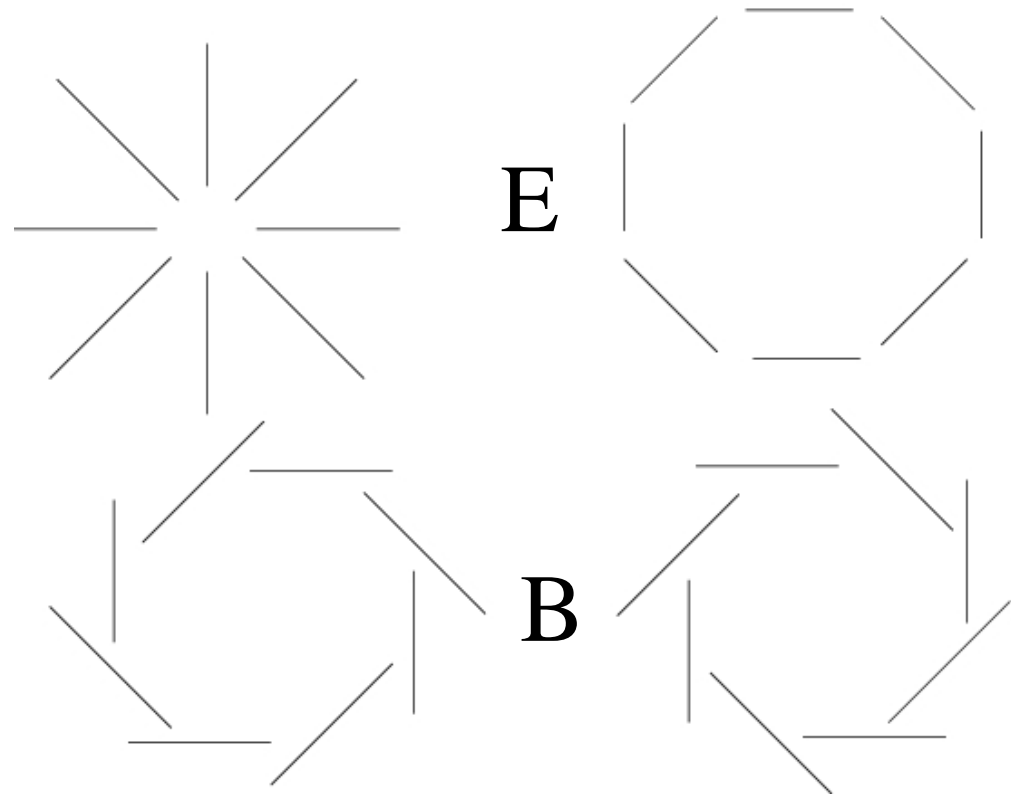
Polarization: E modes and B modes

E Modes:

- Gradient of the polarization
- Produced by both scalar and tensor modes
- Have been detected

B Modes:

- Curl of the polarization
- Produced only by tensor modes
 - ...or gravitational lensing
 - ...or foregrounds
 - ...or systematics
- Expected from inflation
- Have not been detected



A detection of primordial sourced B modes would provide important evidence for, and determine the energy scale of Inflation

Planck: Test der inflationären Modelle

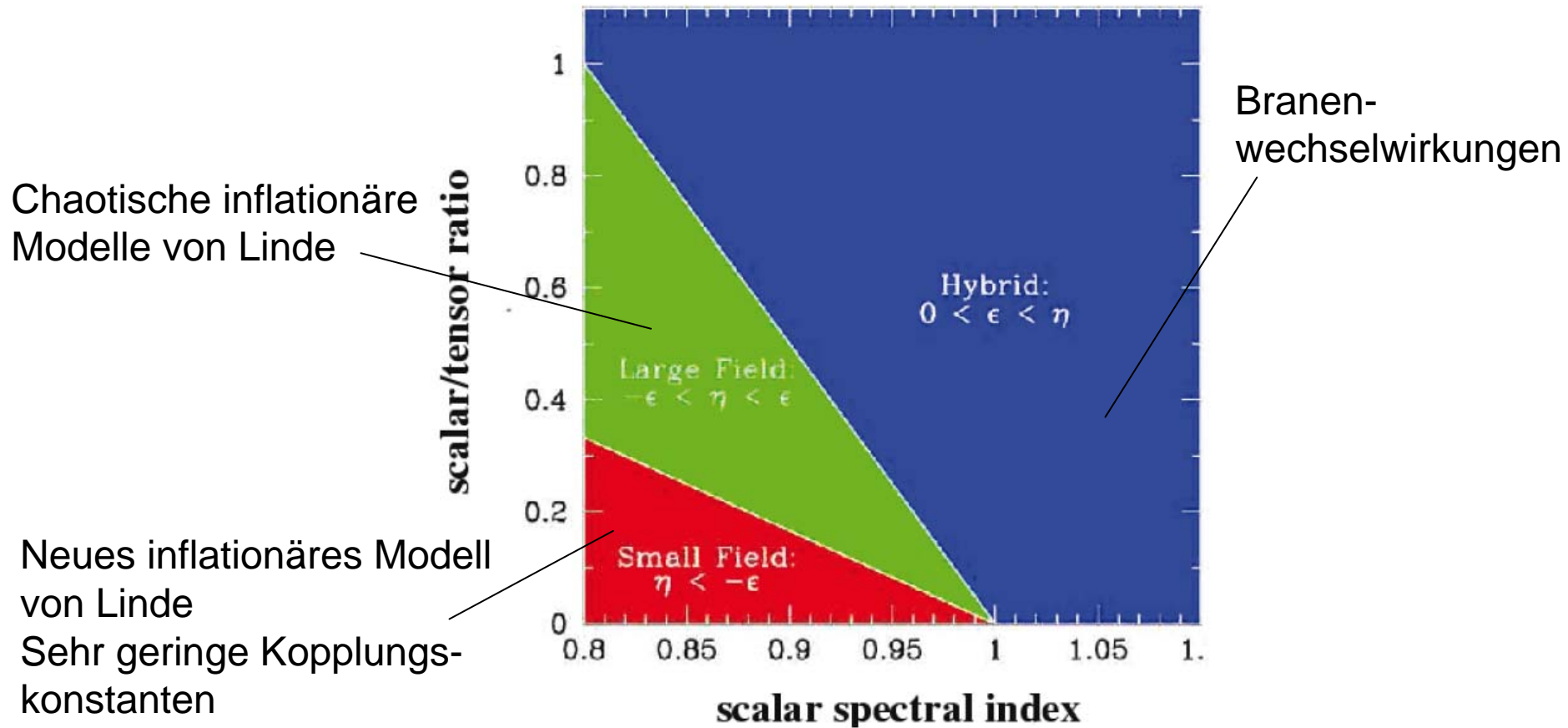


FIG 2.10.—The three classes of inflationary models discussed in the text, delineated in the plane of the tensor-to-scalar ratio r (Eq. 2.14) versus scalar spectral index n_s (adapted from Kinney, Melchiorri and Riotto, 2001)



1. Quellen von GW

Quellen und Frequenzen

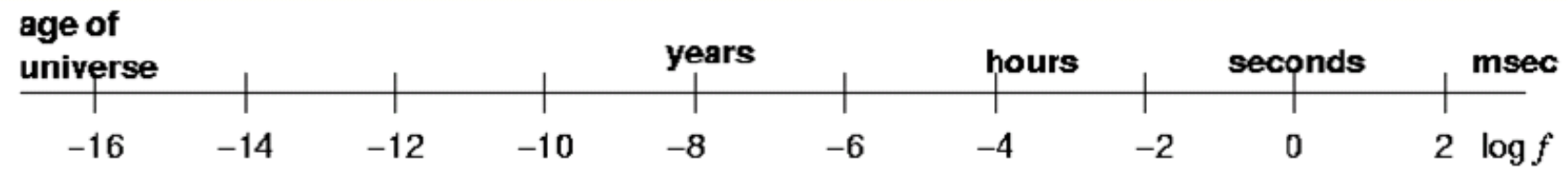
Phasenübergänge
im frühen Universum

Pulsare
Verschmelzende
Binärsysteme
NS – NS
BH – BH

Quantenfluktuationen
im frühen Universum

Kompakte Objekte
+ supermassive
Schwarze Löcher

Supernova
in der
Milchstraße



PLANCK
Polarisation
des CMB

Zeitmessung
an Pulsaren

LISA

Interferometer
Res.A.



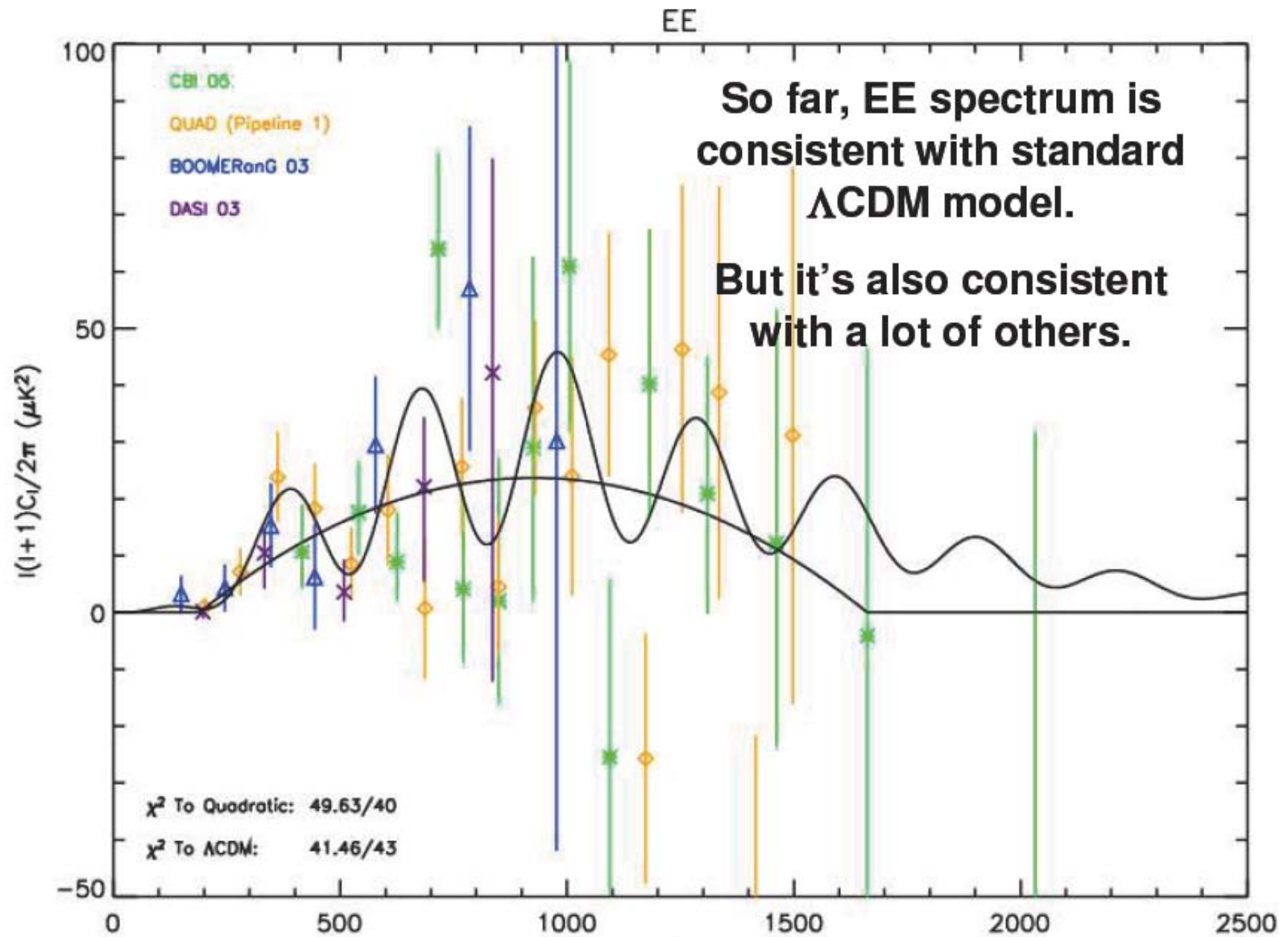
Inflation experimentell nachweisen

- Das Ende der Inflationären Phase – 10^{-38} Sekunden nach dem Urknall – erzeugt Gravitationswellen: Voraussage der Inflations-Theorie – **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!!

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map. It features a complex pattern of blue and purple tones, with numerous bright spots and streaks. A prominent feature is a bright, white, starburst-like shape in the center, from which several thin, purple lines radiate outwards, forming a star-like pattern. The overall appearance is that of a vast, textured field of data points representing the early universe's temperature variations.

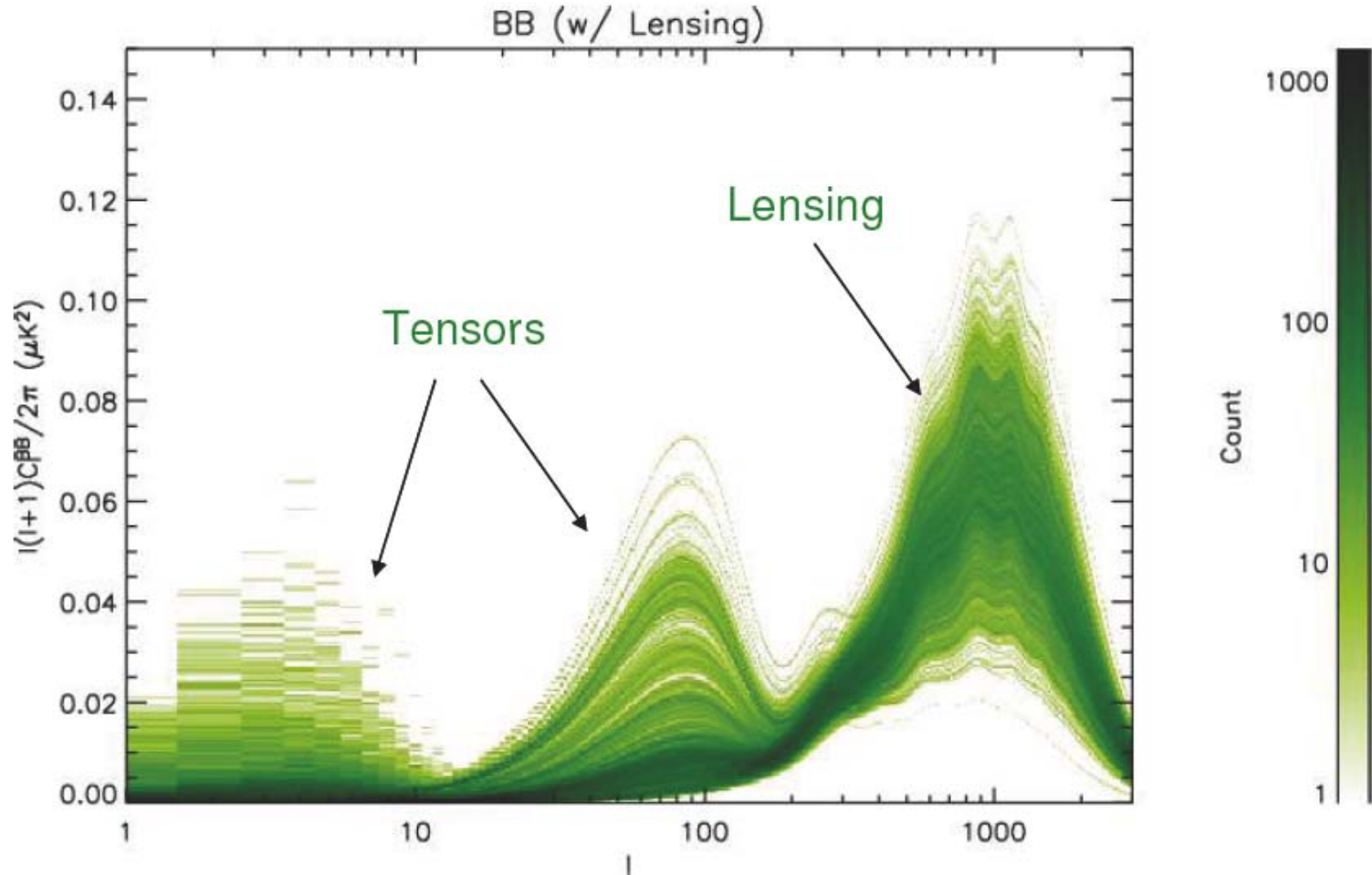
Inflations-Experimente Überblick

EE Power Spectrum Measurements



BB Power Spectrum Uncertainty

(from MCMC, K. Vanderlinde)

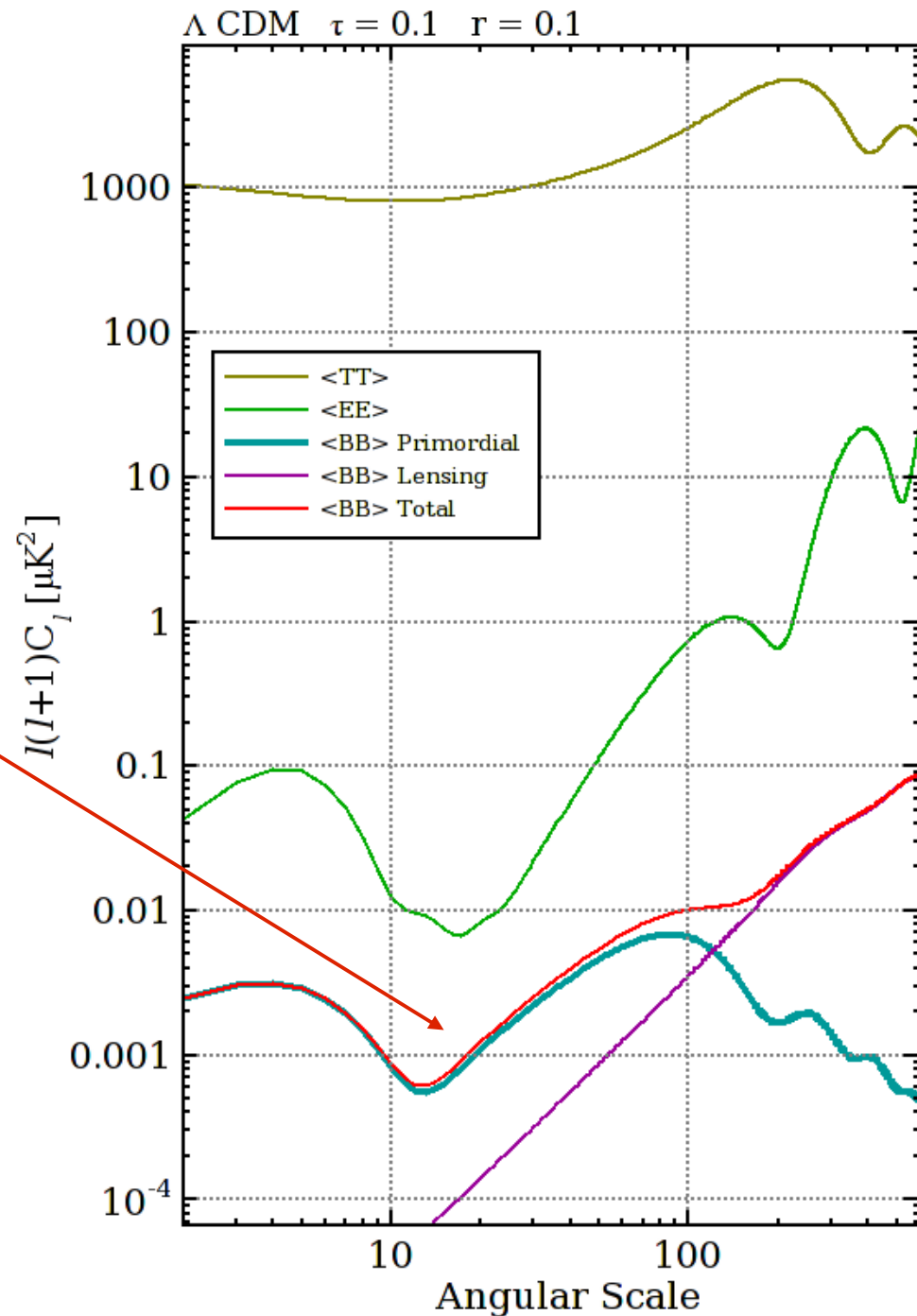


BB still very uncertain.
(Even if our model is correct & complete.)

Challenges

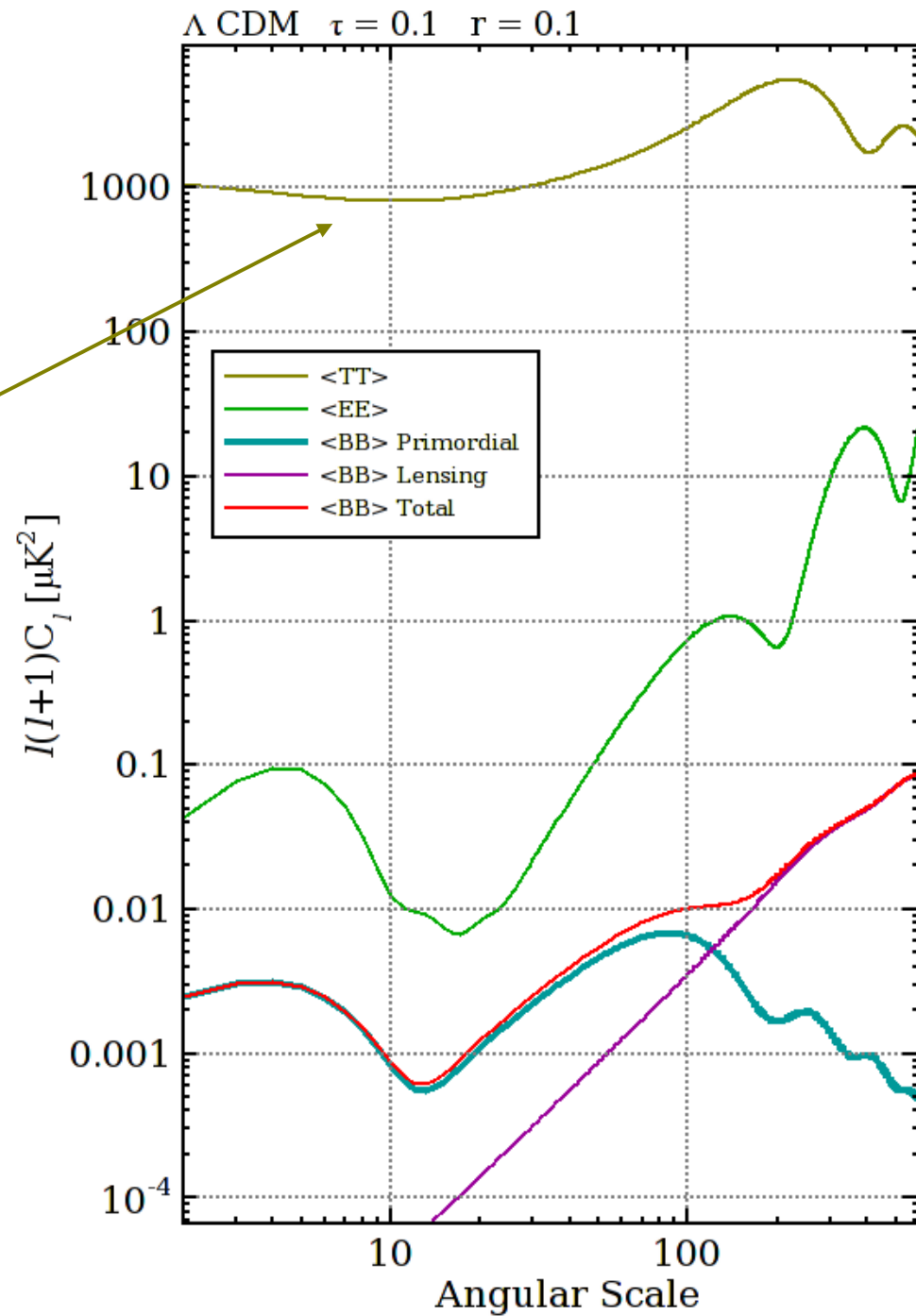
Signal is very small

Need unprecedented
sensitivity



Challenges

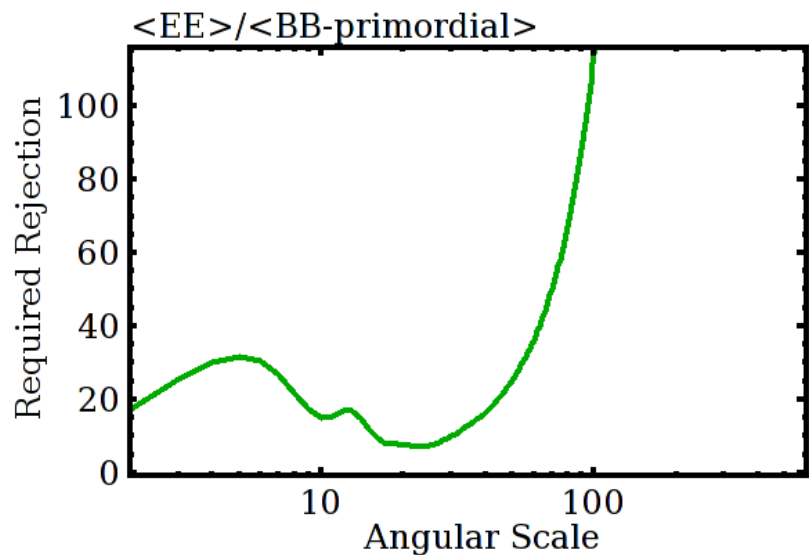
$\langle TT \rangle$ greater than $\langle BB \rangle$
Must minimize
I-QU Mixing



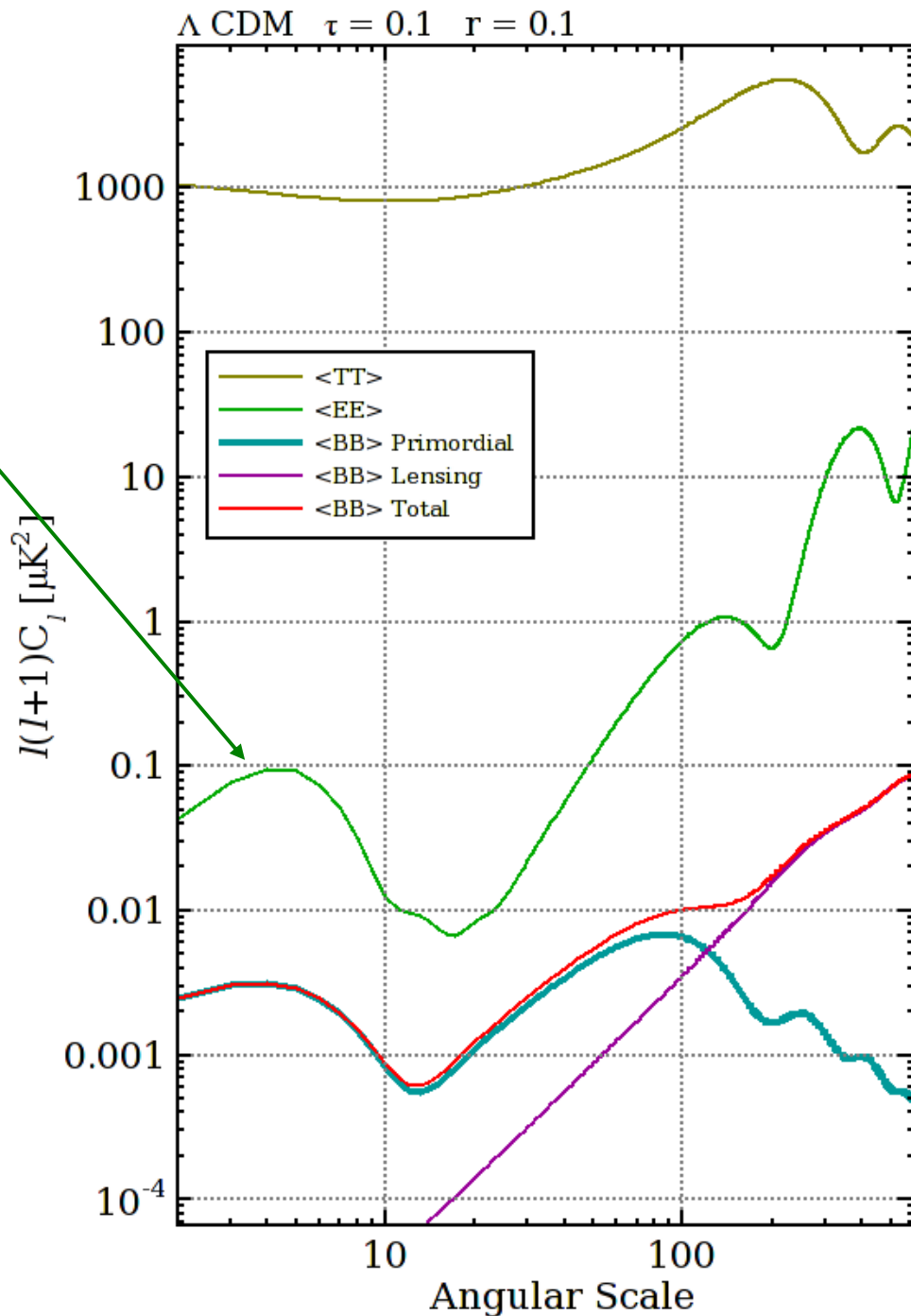
Challenges

$\langle EE \rangle$ greater than $\langle BB \rangle$

Must minimize
E-B Mixing



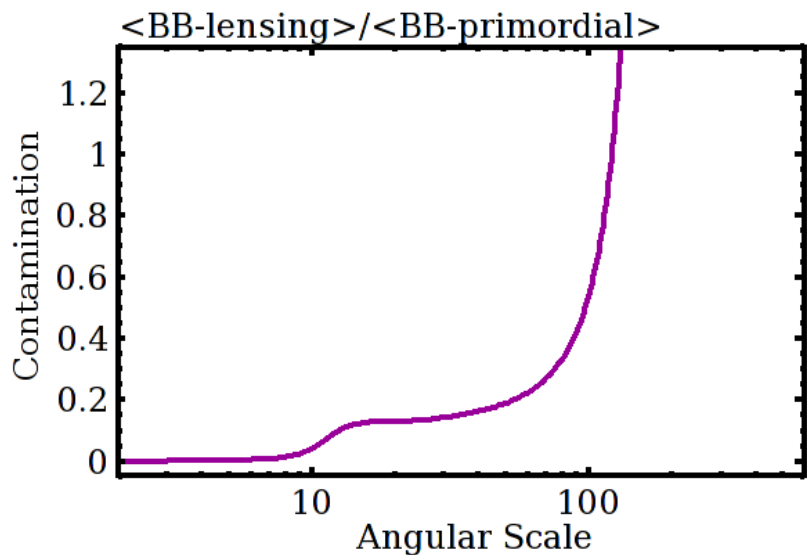
Becomes harder above $l \sim 100$



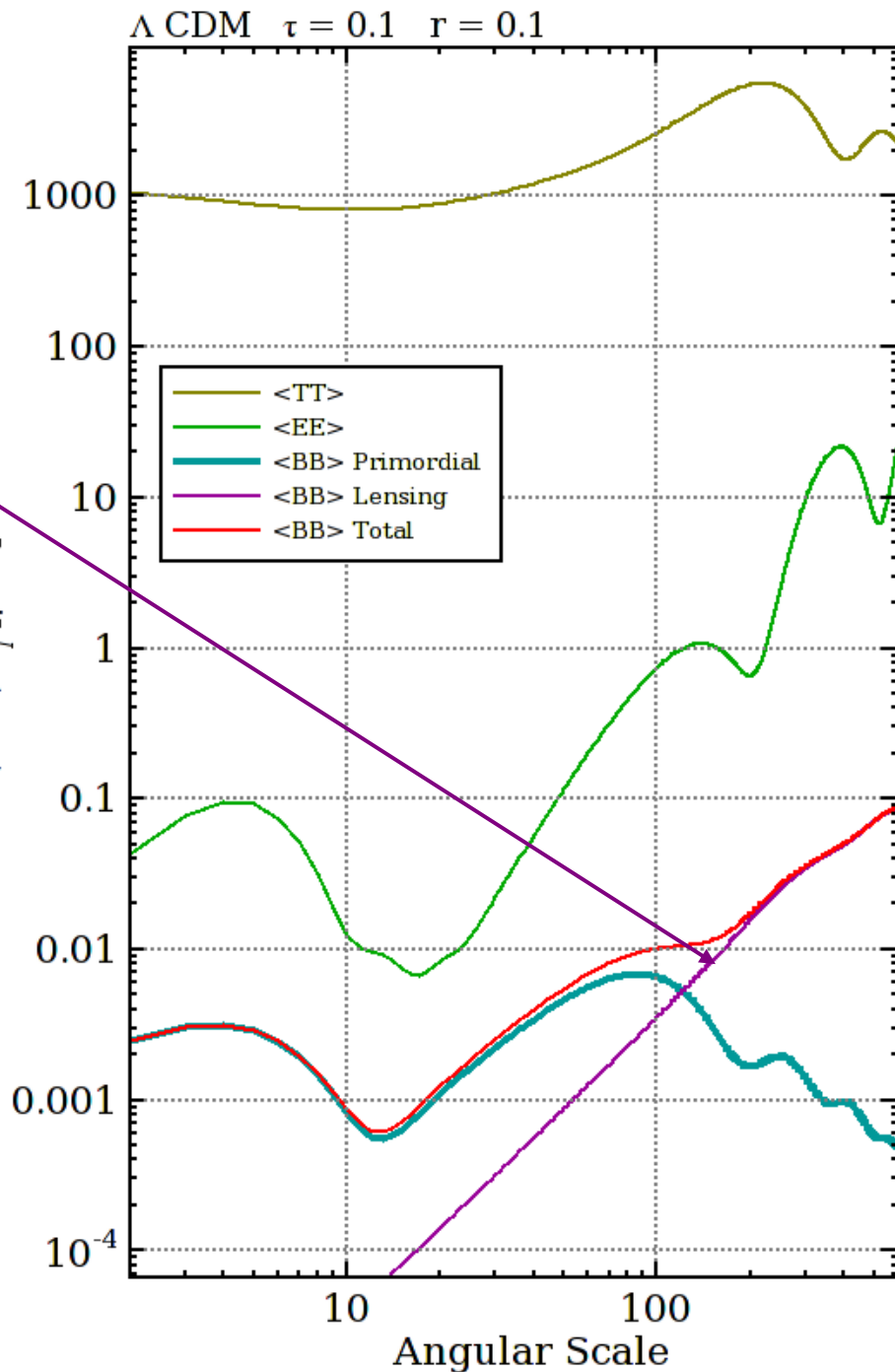
Challenges

Avoid Lensing $\langle BB \rangle$

Must observe
large angular scales



Minimum contamination $l < 10$
For $r \sim 0.1$, $l < 80$ OK



Challenges

Avoid Lensing $\langle BB \rangle$

Must observe
large angular scales

$\langle TT \rangle$ greater than $\langle BB \rangle$

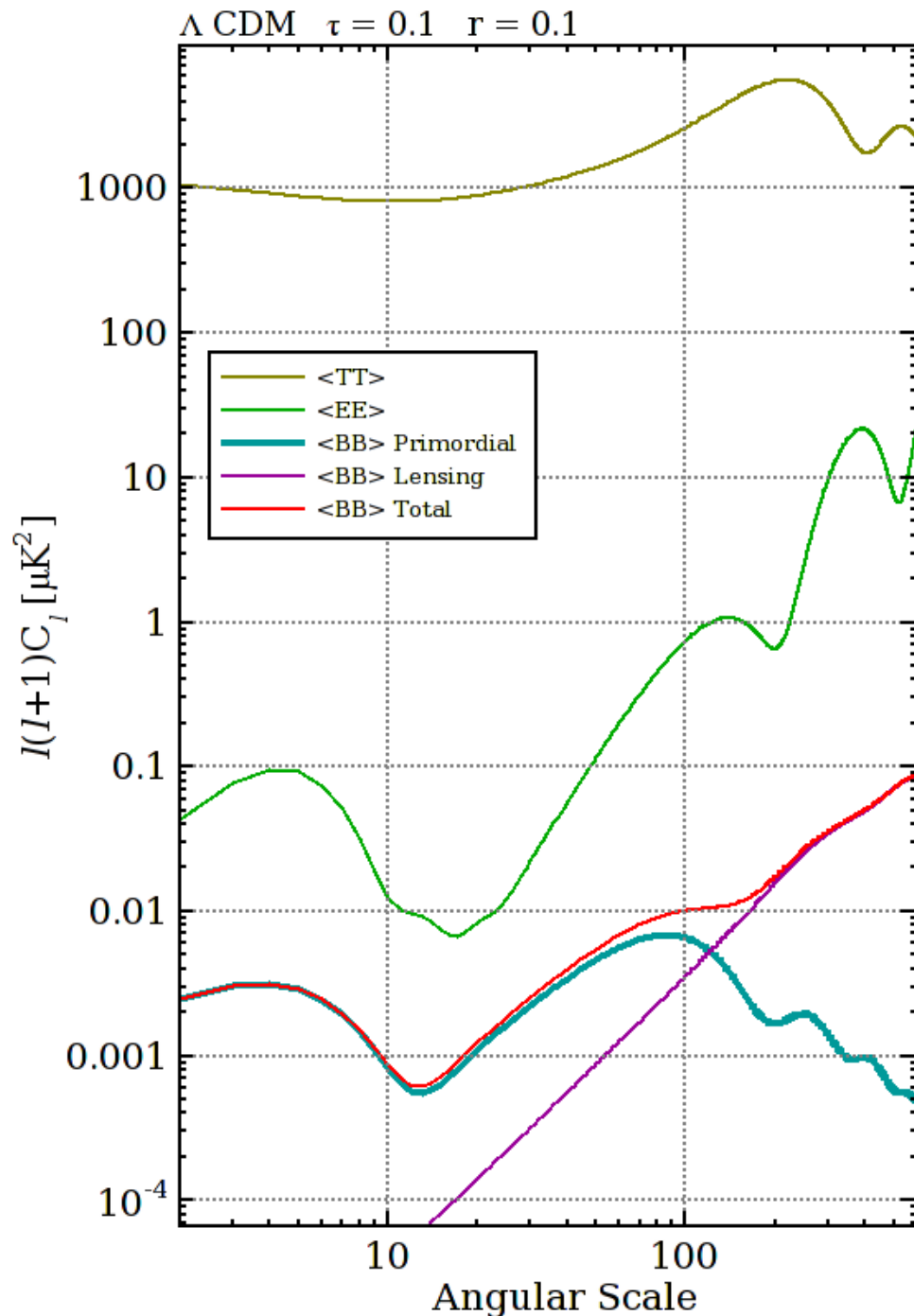
Must minimize
I to Q&U Mixing

$\langle EE \rangle$ greater than $\langle BB \rangle$

Must minimize
E to B mode mixing

Signal is very small

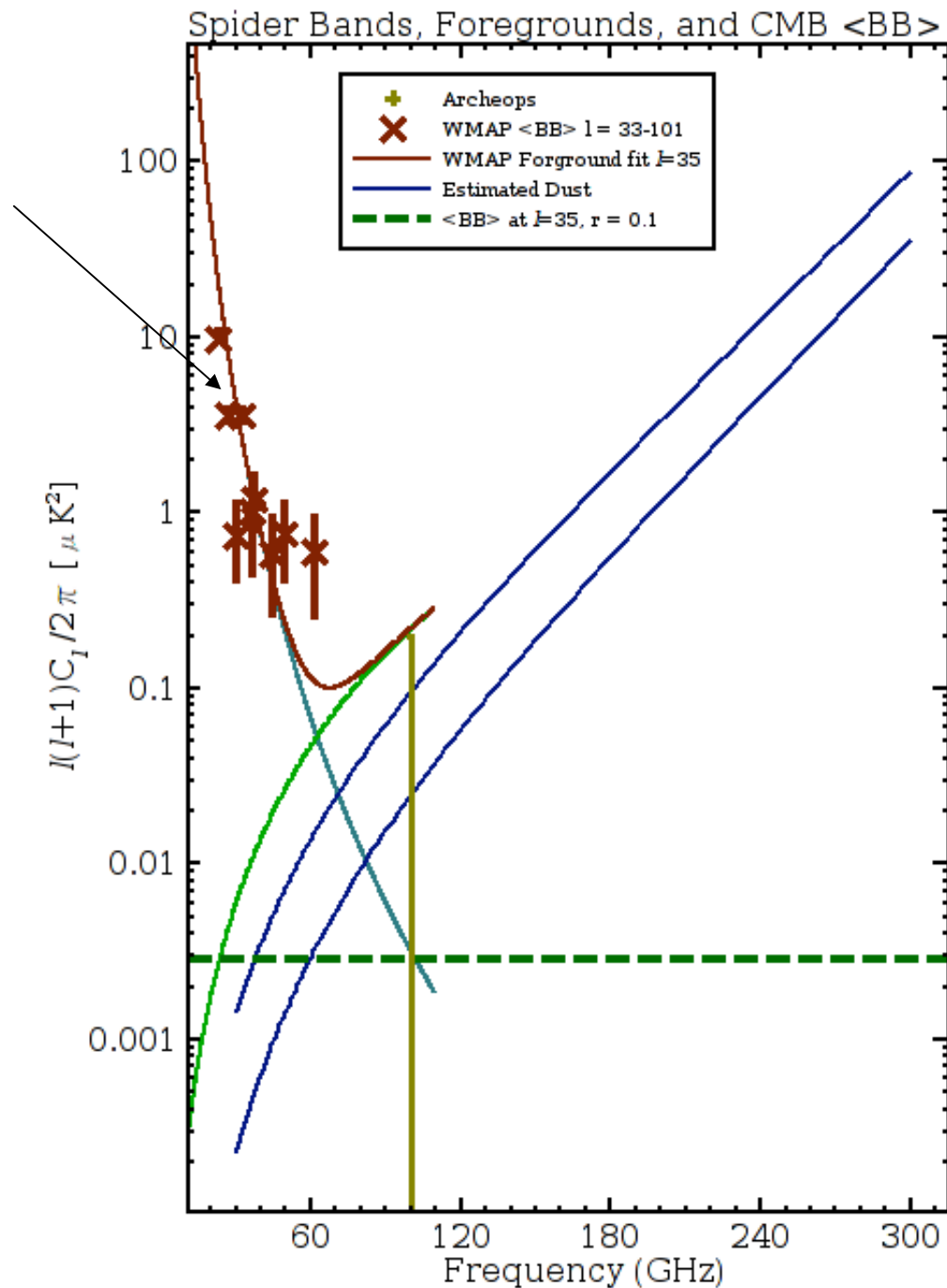
Need unprecedented
sensitivity



More Challenges

Polarized Synchrotron radiation
dominates at low frequencies

It must be removed



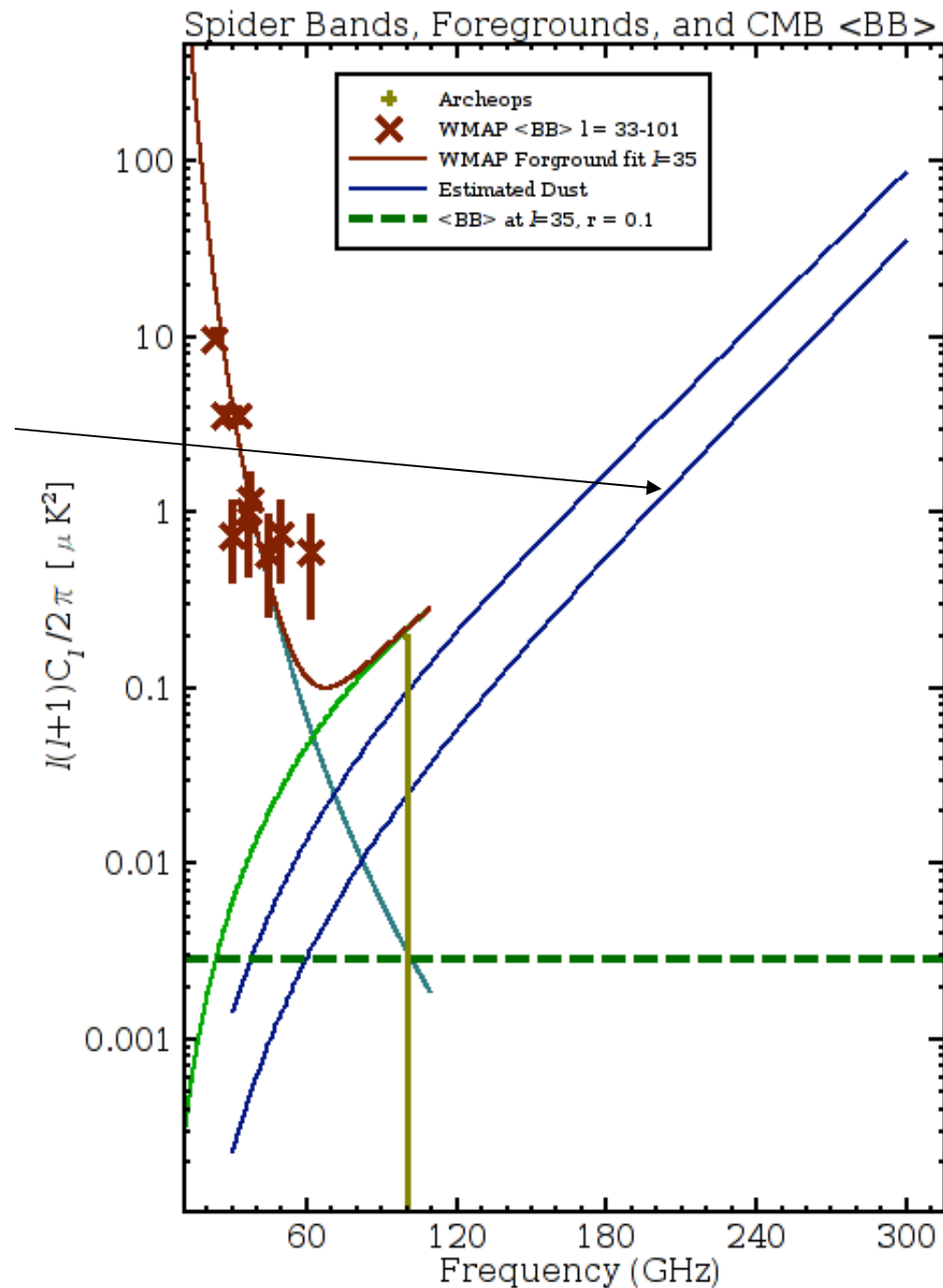
More Challenges

Polarized Synchrotron radiation
dominates at low frequencies

It must be removed

Polarized dust emission
dominates at high frequencies

It must be removed



More Challenges

Polarized Synchrotron radiation
dominates at low frequencies

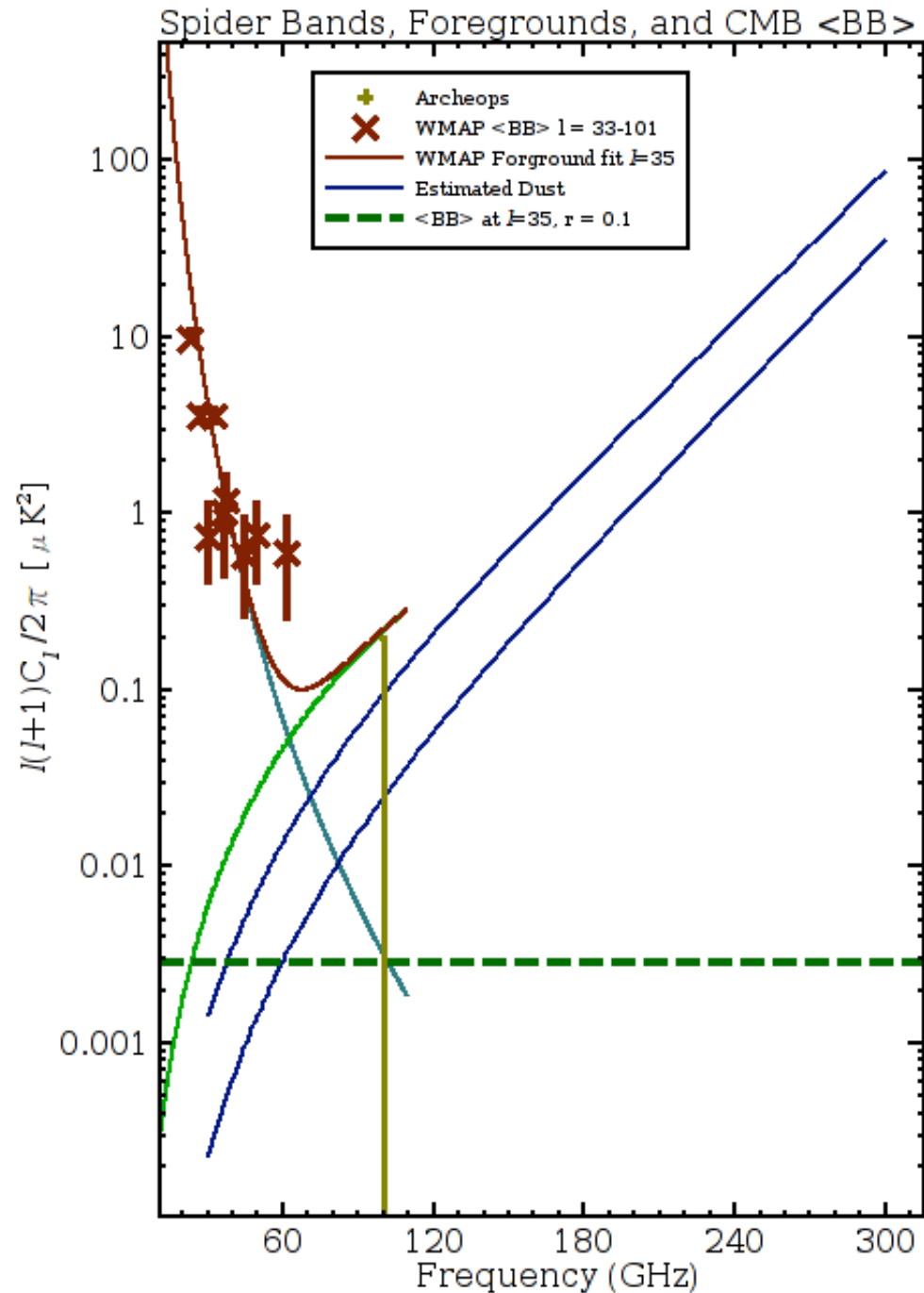
It must be removed

Polarized dust emission
dominates at high frequencies

It must be removed

Spectral indexes vary spatially

Removal must be pixel by
pixel



More Challenges

Polarized Synchrotron radiation
dominates at low frequencies

It must be removed

Polarized dust emission
dominates at high frequencies

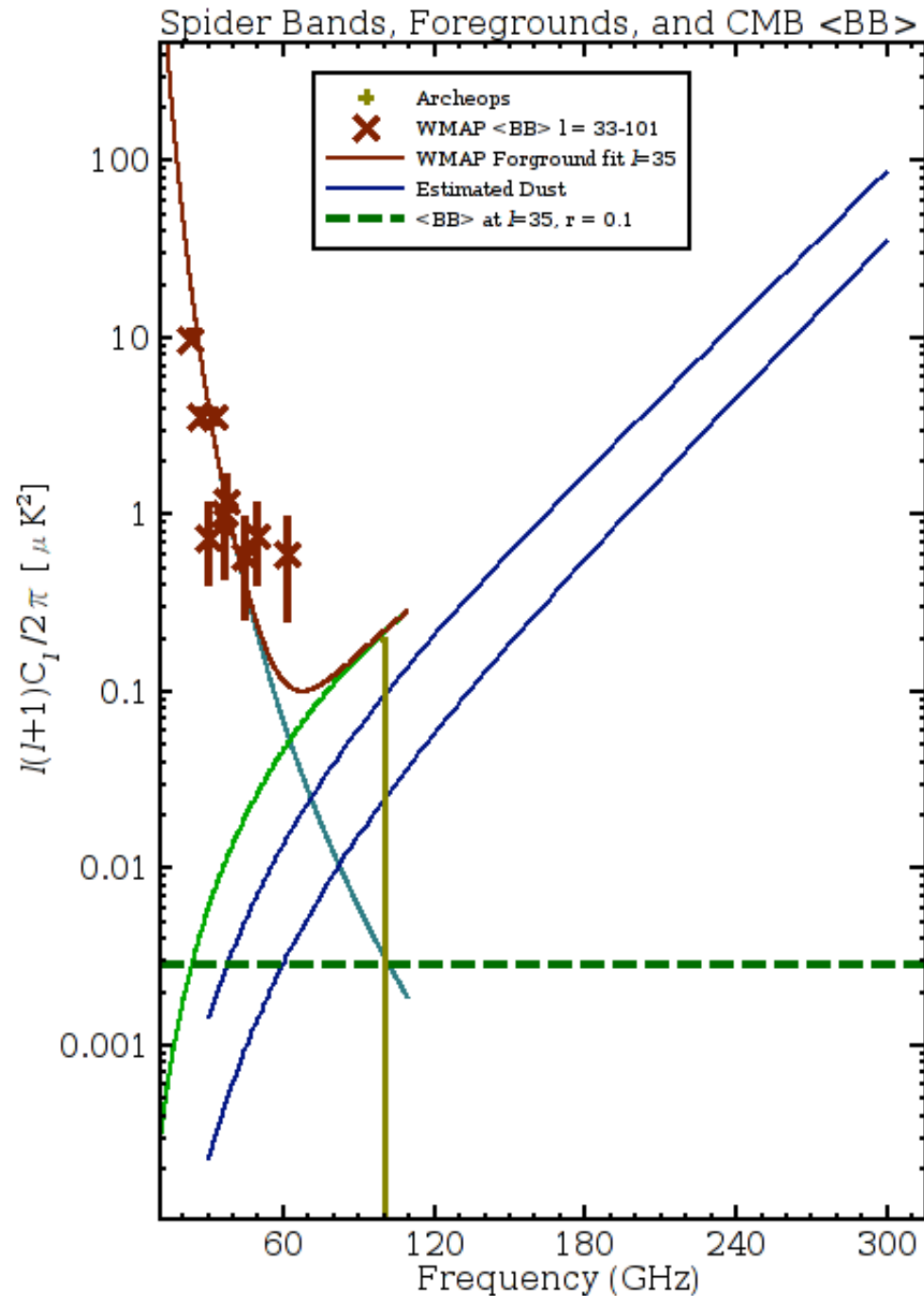
It must be removed

Spectral indexes vary spatially

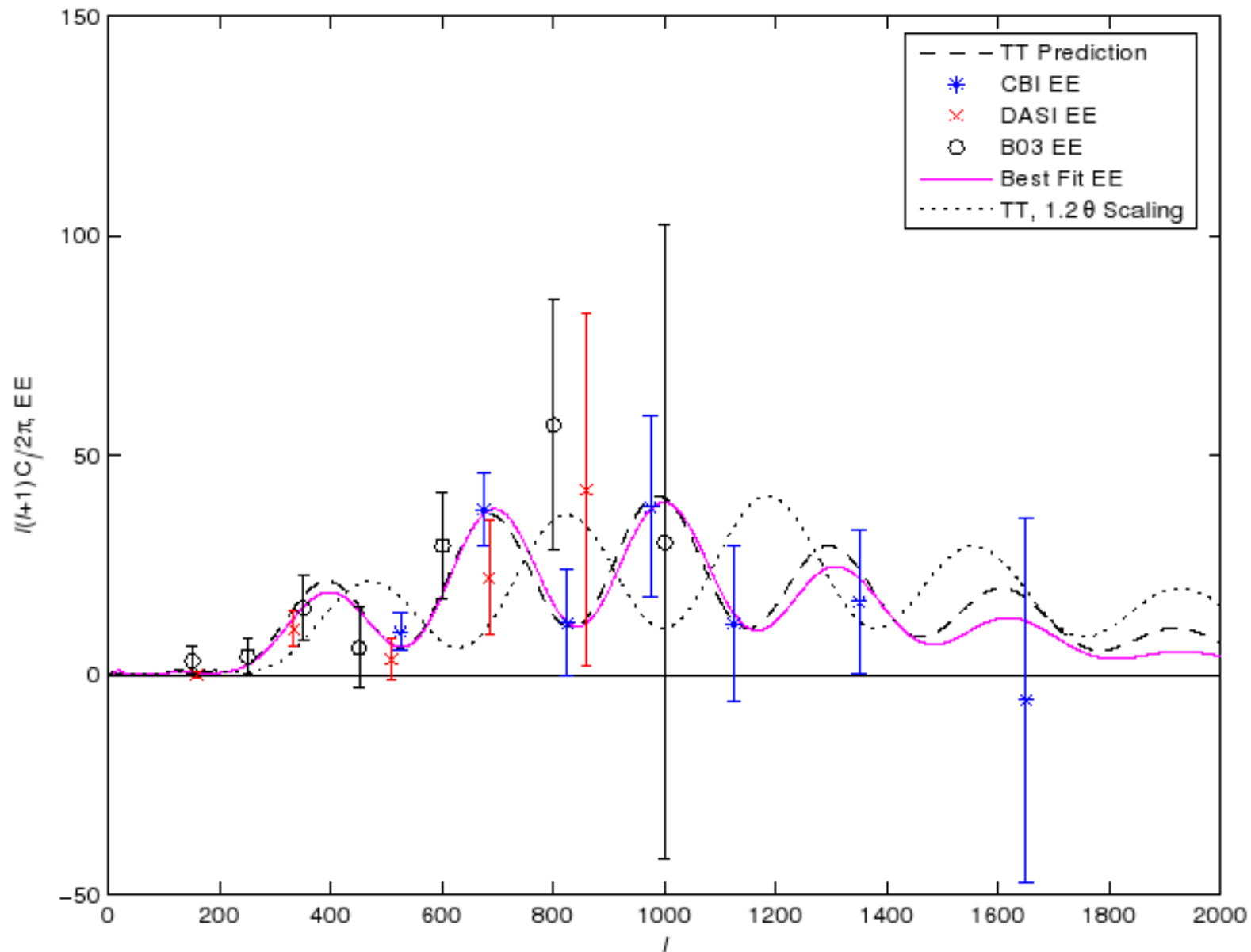
Removal must be pixel by
pixel

Spectra may not be perfect
power-laws

Long lever arms may not be
effective



Current Medium Scale EE Detections

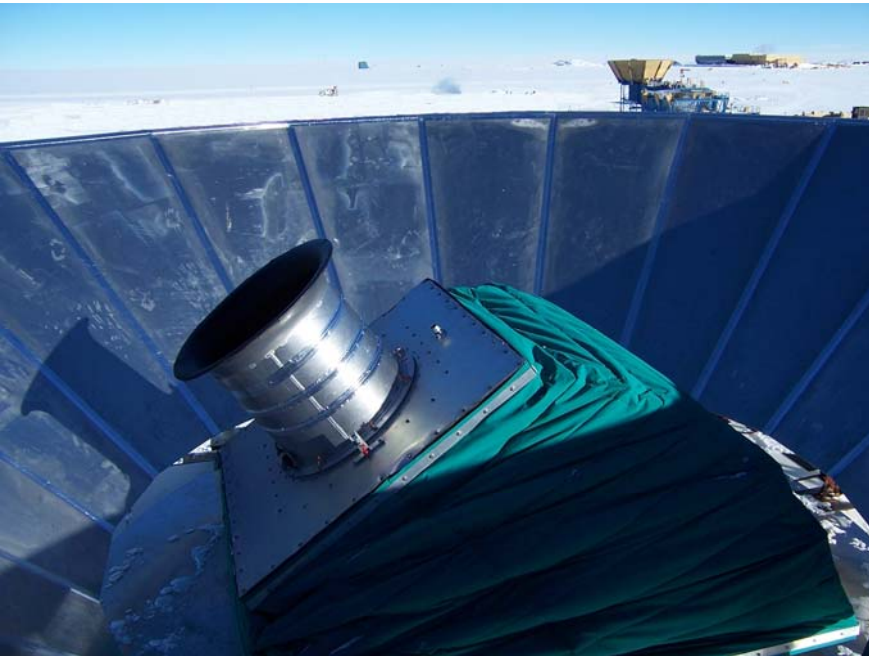


Experiments taking data now...

BICEP

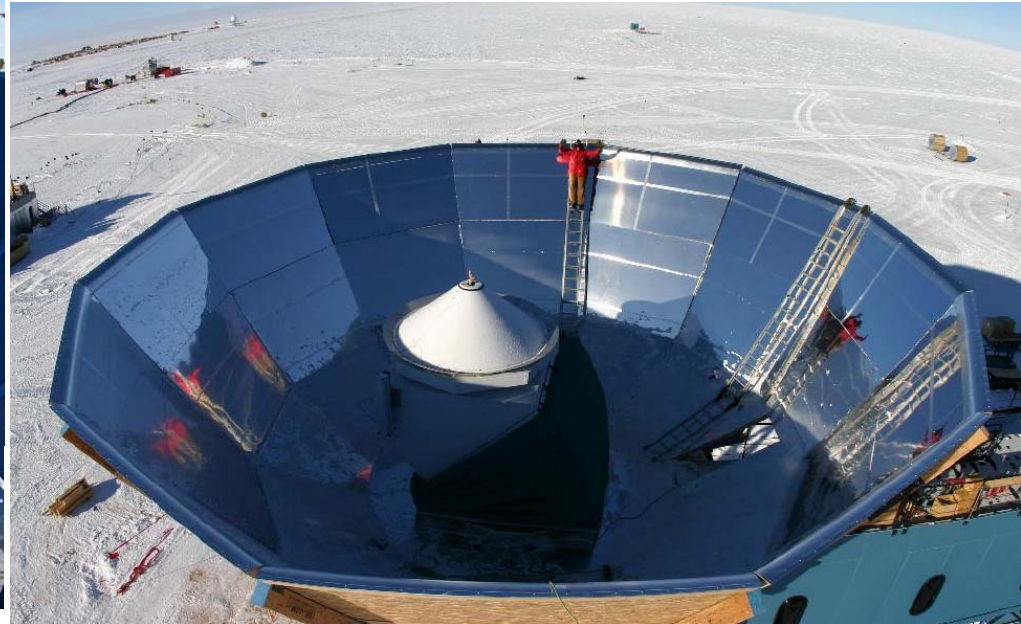
CalTech, JPL
UCSD, Berkeley
Cardiff, IAS

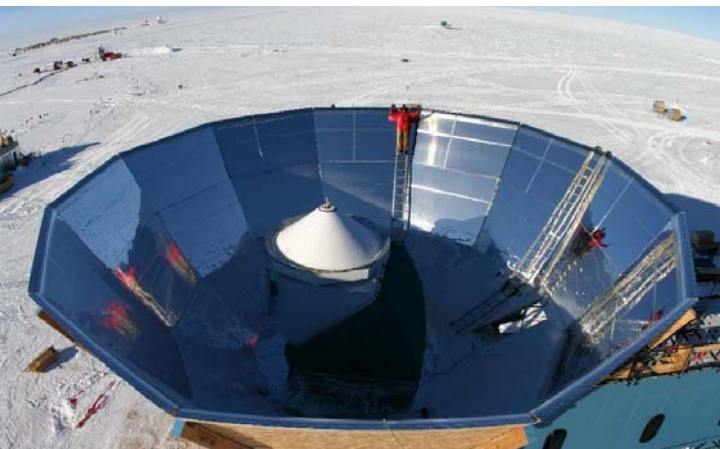
~40' beam
90 & 150 Ghz



QUAD

Stanford, CalTech
JPL, Cardiff, Chicago,
Edinburgh, Maynooth
~5' beam
90 & 150 Ghz
High Precision E Mode
determination





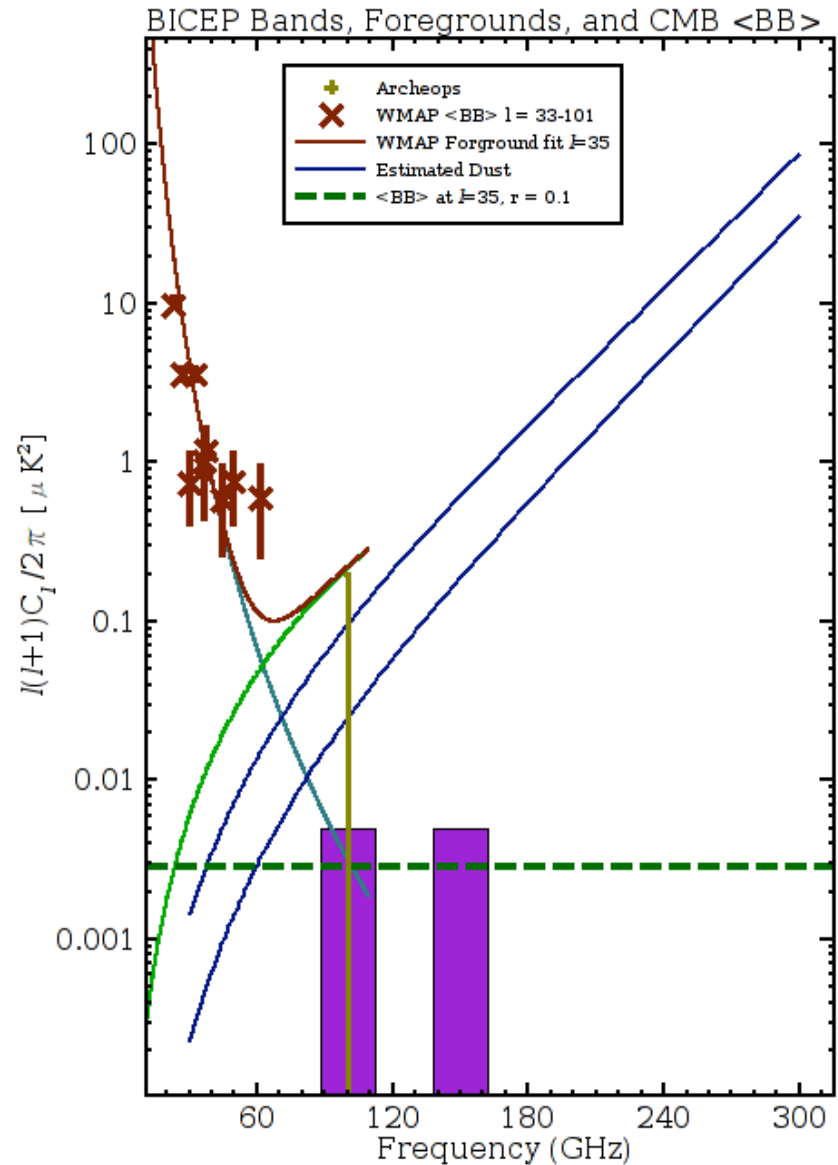
- QUaD: QUEST at DASI, CMB-Polarisations-Experiment auf der Erde am Südpol
- QUEST (Q and U Extragalactic Sub-mm Telescope) war der ursprüngliche Name; DASI wichtiges CMB Interferometrie-Experiment mit der Erstdetektion der CMB-Polarisation
- QUaB benutzt die die DASI-Infrastruktur aber ersetzt das Interferometer Array durch einen Bolometer-Detektor

BICEP and QUAD

Bands:

Have chosen field with very low dust emission.

Two channels will allow dust to be detected, but it will be hard to remove it.





Future ground-based/balloon CMB experiments

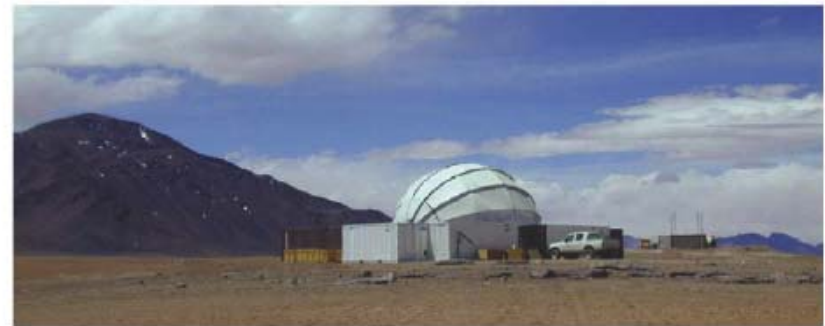
- Bolometric arrays
ACT, APEX, BICEP, CLOVER, EBEX, OLIMPO, PAPP, Polarbear, QUAD, Spider, SPT
- Pseudocorrelation receivers
QUIEt, Bar-Sport
- Interferometers
AMI, AMIBA, SZA, VSA
- Bolometric interferometers
MBI, BRAIN

Already taking data
Funded and under development
Funding pending
Italics: SZ

Future ground-based/balloon CMB experiments

- Bolometric arrays
ACT, APEX, BICEP, CIOVER, EBEX, OLIMPO, PAPP, Polarbear, QUAD, Spider, SPT
- Pseudocorrelation receiver
QUIEt, Bar-Sport
- Interferometers
AMI, AMIBA, SZA, VSA
- Bolometric interferometers
MBI, BRAIN

CBI site at Atacama Desert, 5000 m altitude

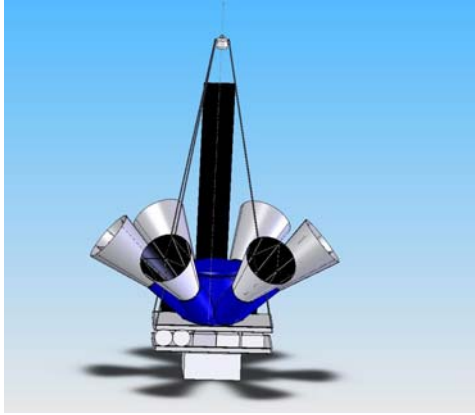


QUAD at South Pole

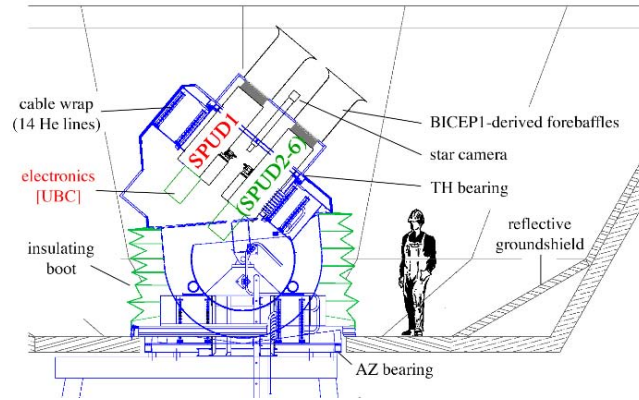


Atacama Desert Chile
South Pole/Dome C
Balloon

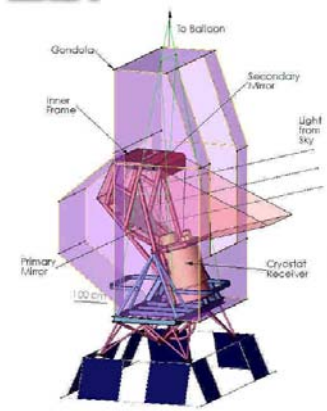
The Next Generation: 6+ Machines!



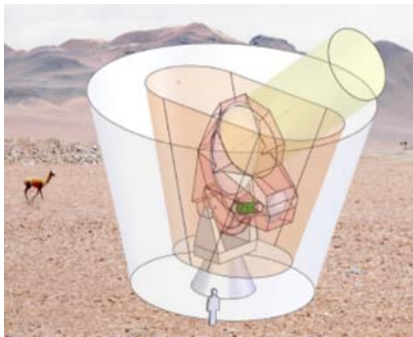
Spider: CalTech,
CWRU, ICL,
JPL, NIST, UBC,
U Toronto



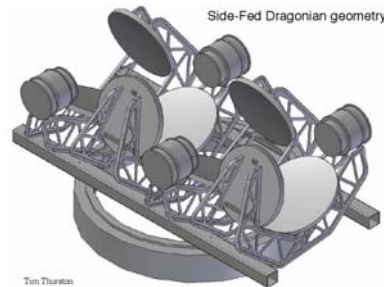
SPUD: CalTech, JPL,
UCSD, Berkeley, Cardiff,
IAS, Toronto



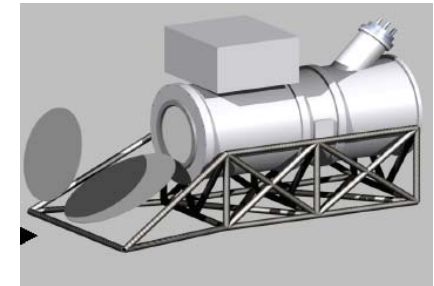
EBEX: Brown, Cardiff,
Columbia, APC, Harvard,
IAS, ISAS, McGill,
Oxford, UCB/LBNL,
UCSD, Minnesota,
Toronto, Weizmann



polarBear:
Berkeley, LBNL,
UCSD, McGill
Colorado

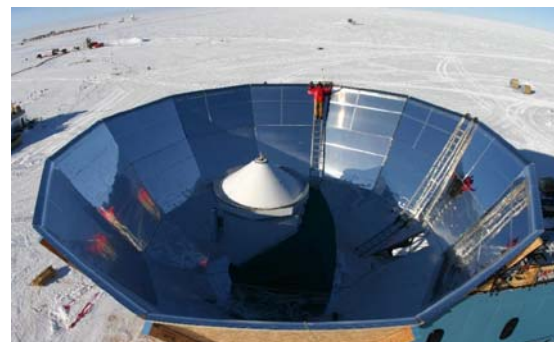
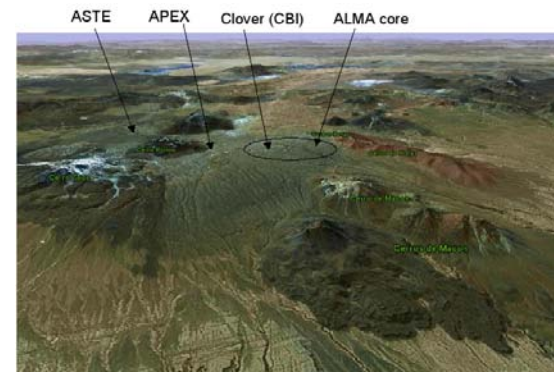
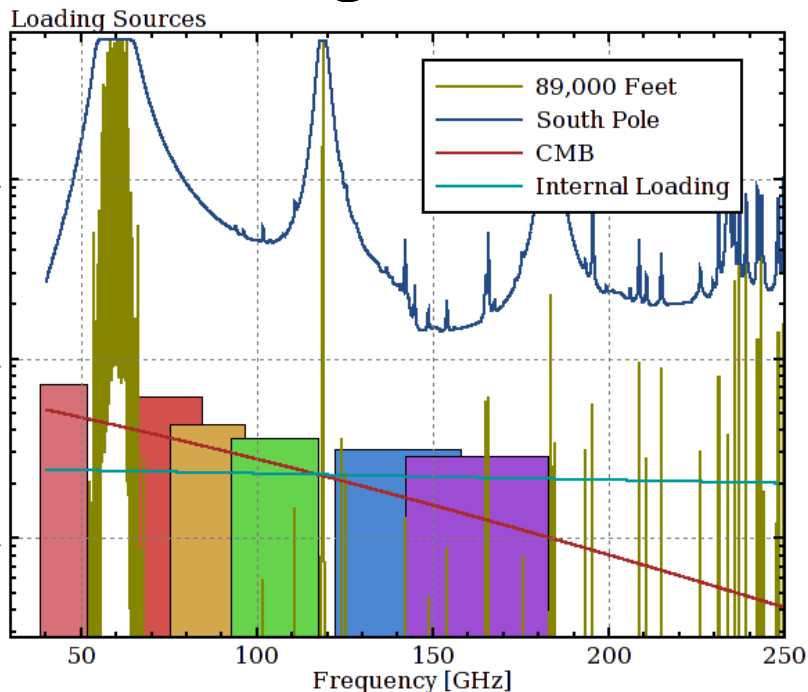


QUIET: Chicago,
JPL, Miami, Princeton,
CalTech, Columbia,
Stanford, Oxford, MPI



Clover: Cambridge,
Cardiff, Oxford, NIST,
CalTech, UBC

Decisions.... Observing Site



Balloon:

- + Much Less Loading
- + Can observe 50% sky
- + Test Satellite Strategy
- Less observing time

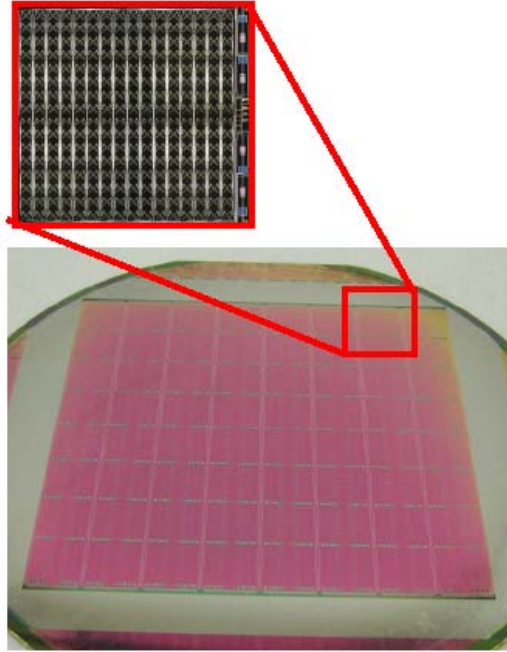
Spider
EBEX

Atacama Desert or South Pole:

- + Access to Instrument
- + Long integration time
- Higher noise

QUIET, Clover,
polarBEAR, SPUD

Decisions.... Detectors

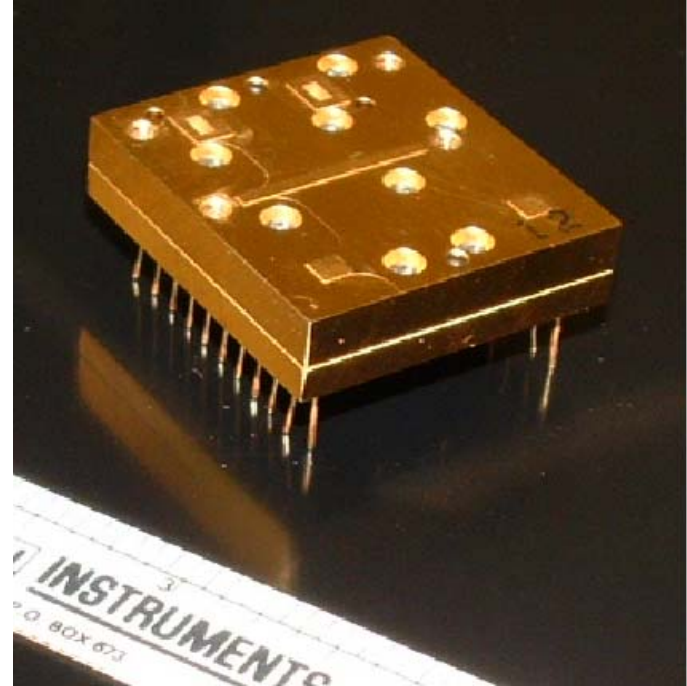


8 x 8 TES Polarimeter Array Prototype

Bolometer Arrays:

- + Greater sensitivity
- + Lower incremental cost
- + Can Go to High Frequencies

Spider, EBEX, Clover,
PolarBear, SPUD



HEMT Amplifiers:

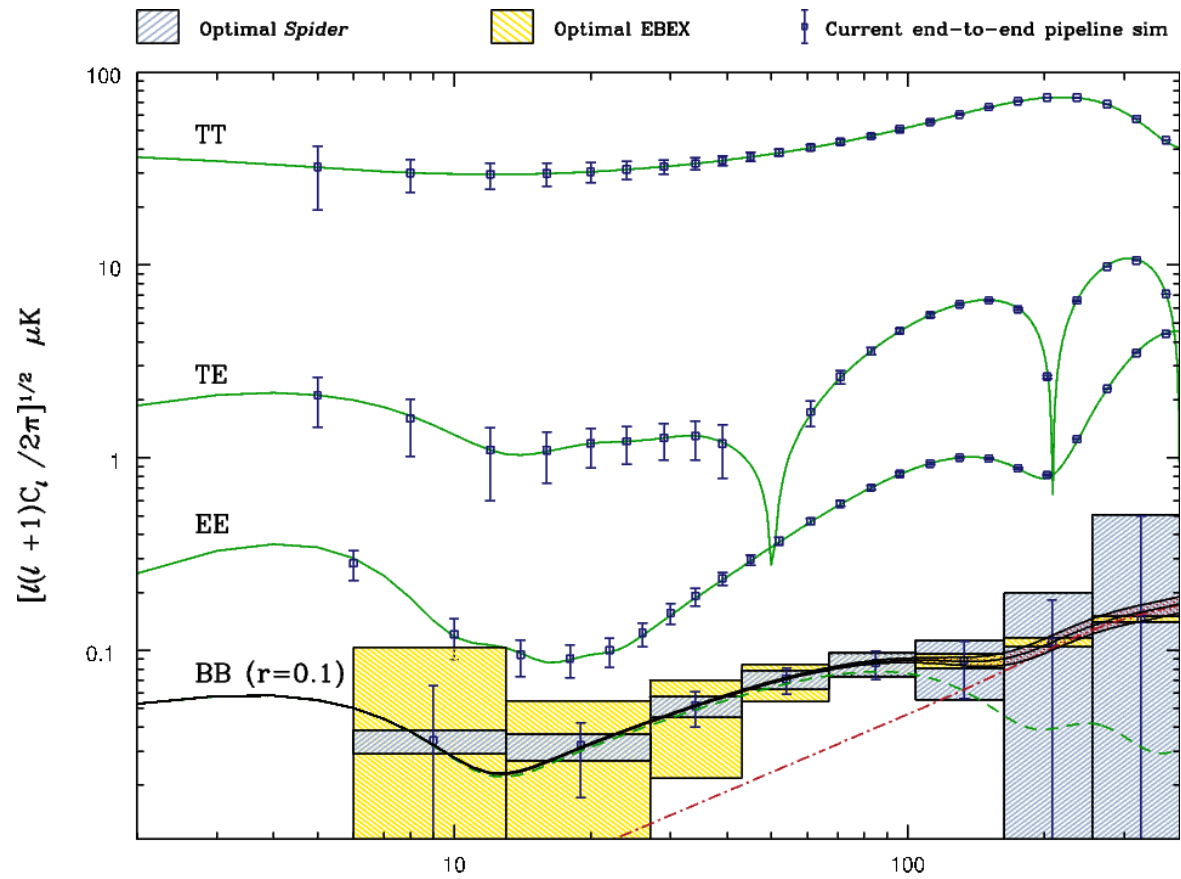
- + Optimized for low frequencies

QUIET

Decisions....

Sky Coverage

Forecast comparison of Spider (50% sky coverage) with EBEX (5% sky coverage)



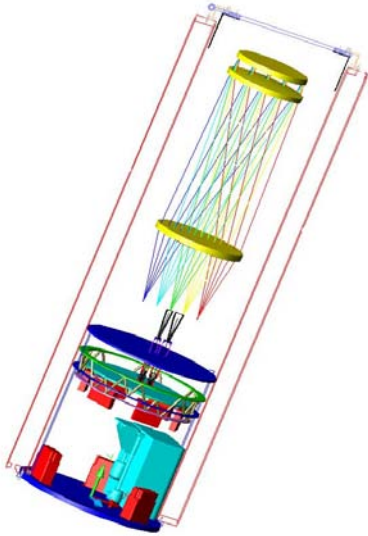
Large Sky Coverage:
 + Minimize EB Mixing
 + Characterize foregrounds
 + Constrain N_s and t
 - Can not choose low foreground sky

Spider

Small Sky Coverage:
 + Can spend all observing time in low background sky

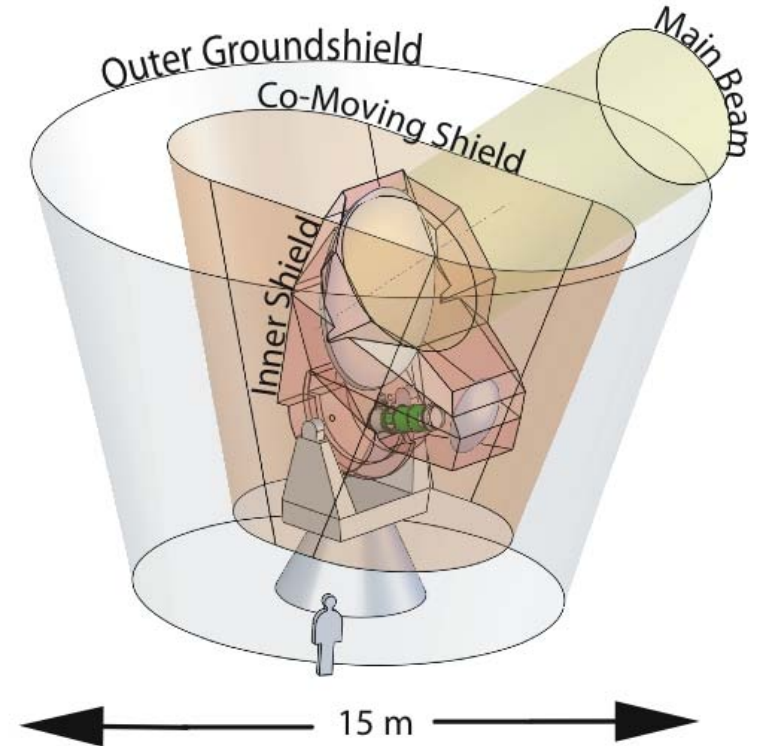
EBEX, Clover, QUIET
 PolarBear, SPUD

Decisions.... Aperture/Beam Size



- Small (30cm) Aperture
- + Can operate cryogenically (lower noise, more stable)
- + Can more easily characterize
- + Modulate post optics
- Large beam (large scales only)

Spider, SPUD



- Large Aperture
- + Medium scales (lensing B, EE)

polarBear, Clover, QUIET, EBEX

Decisions.... Frequency Coverage

Foreground removal requires multiple frequencies!

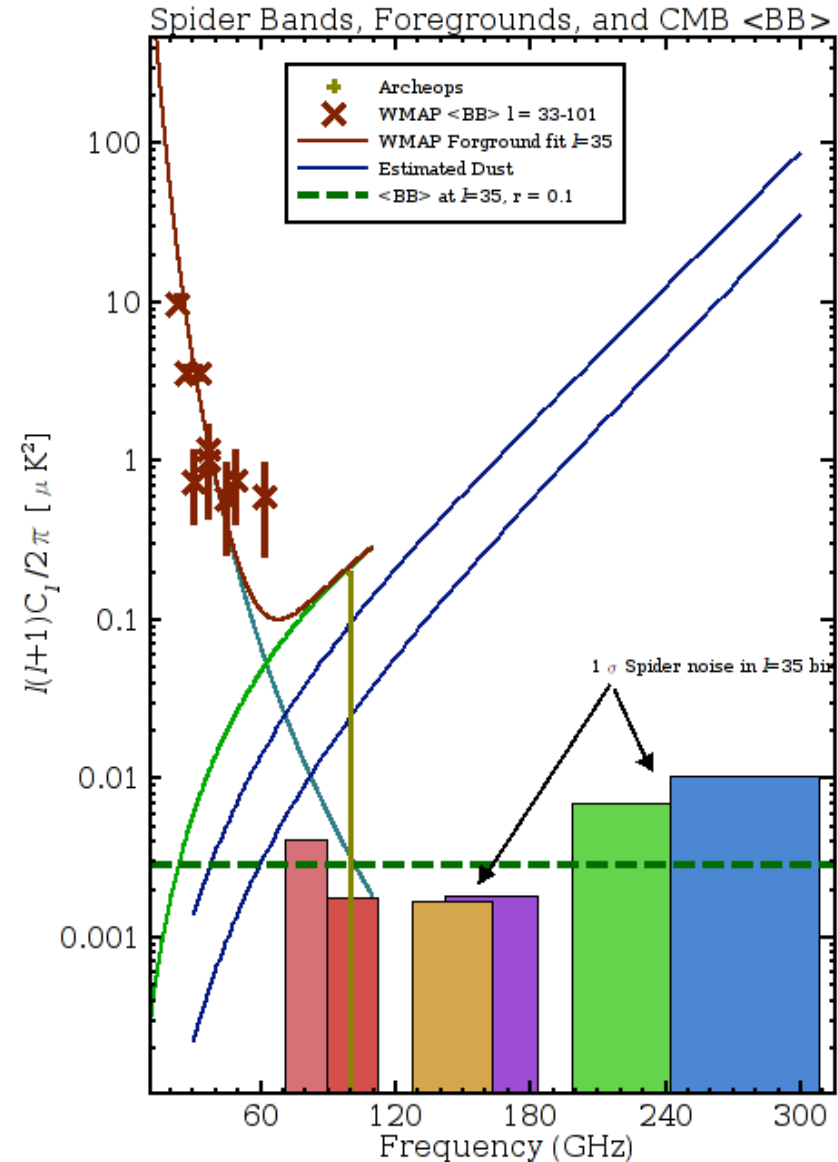
Spider & SPUD: 6 Bands from 70 to 310 GHz

Clover: 97 GHz, 150 GHz, 225 GHz

EBEX: 150 GHz, 250 GHz, 425 GHz

polarBEAR: 90 GHz, 150 GHz, 225 GHz

QUIET: 44 GHz, 97 GHz



Decisions.... Modulation

Modulation is required to diagonalize the IQU noise matrix on a pixel, to prevent I-Q-U mixing.

Half Wave Plate At
Telescope aperture:

- + minimizes sensitivity to beam size
- + minimizes effect of band pass differences
- + minimizes sensitivity to instrument thermal drifts
- Requires very large waveplate

Spider, SPUD

Half Wave Plate
before final
aperture

- + reduces beam size effects
- + minimizes effect of band pass differences
- + allows large aperture

EBEX, Clover,
polarBear

Modulation
at the detector

- Only helps with noise

QUIET

Status:

- All have begun construction
- All hope to detect $r < \sim 0.1$
- All plan to have results by 2011

What About Planck?

Planck has no polarization modulation!

The scan strategy provides minimal cross linking.

So there will be I-Q-U mixing...

According to an anonymous source, Planck will be limited to $r > 0.15$

(Note: this assertion, though based on a noise covariance calculation, is still very preliminary....)

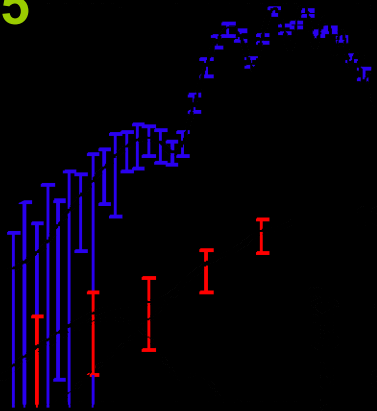


Long term effort

QUaD, BICEP (2005-2008)

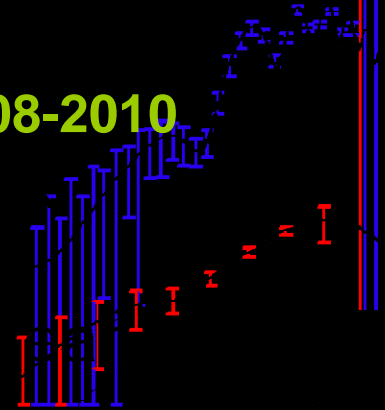


~2005



CLOVER, EBEX, POLARBEAR, BRAIN (2008-2011)

~2008-2010



SAMPAN, CMBPOL (> 2018)

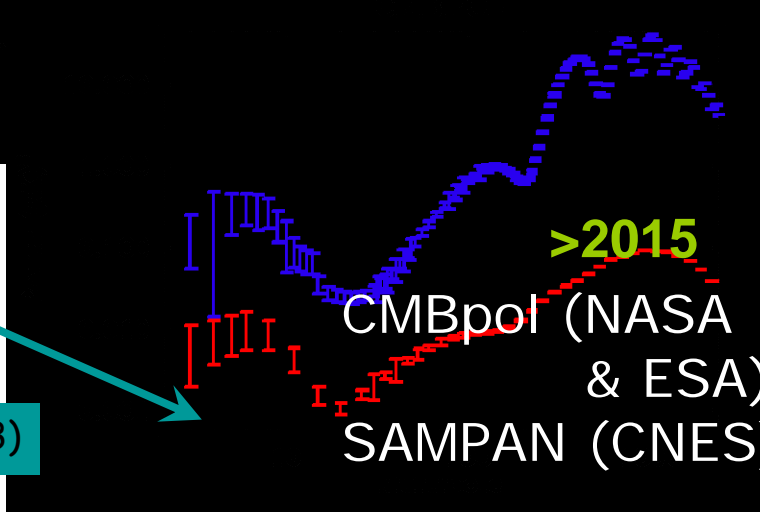
Gravitational waves

(Ken Ganga 2004)

$m_\nu = 0.03 \text{ eV}$
(Kaplighat et al. 2003)

>2015

CMBpol (NASA & ESA)
SAMPAN (CNES)





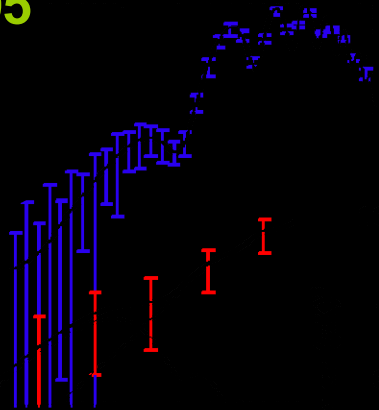
Inflations-Experimente
CLOVER

Long term effort

QUaD, BICEP (2005-2008)

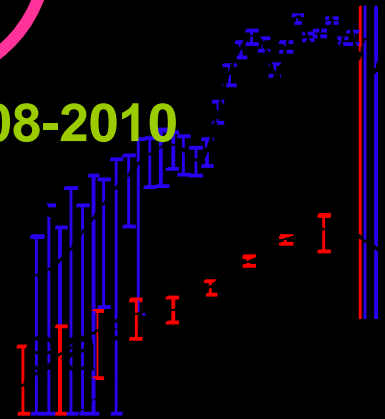


~2005



CLOVER, EBEX, POLARBEAR, BRAIN (2008-2011)

~2008-2010



SAMPAN, CMBPOL (> 2018)

>2015

CMBpol (NASA & ESA)
SAMPAN (CNES)

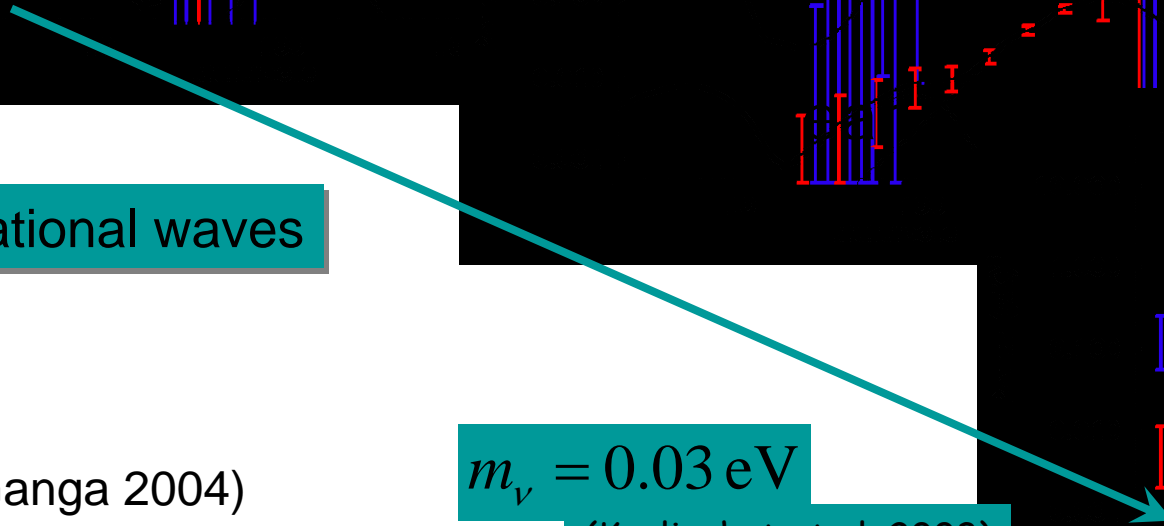


Gravitational waves

(Ken Ganga 2004)

$$m_\nu = 0.03 \text{ eV}$$

(Kaplighat et al. 2003)

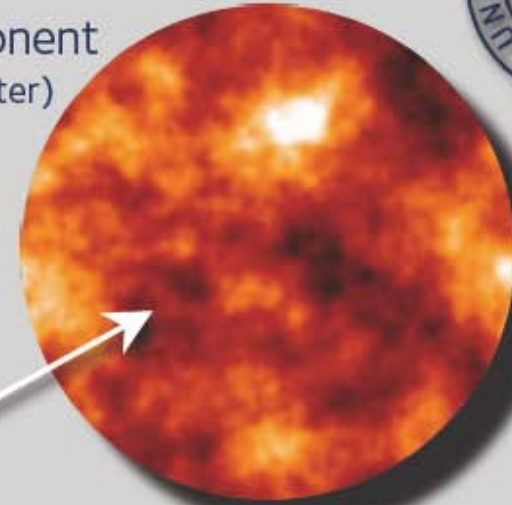


Primordial CMB Signals

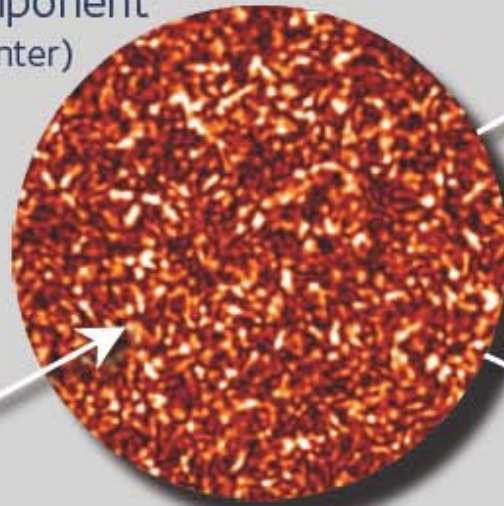


The goal of CLOVER:
characterize these
signals to $r = 0.03$

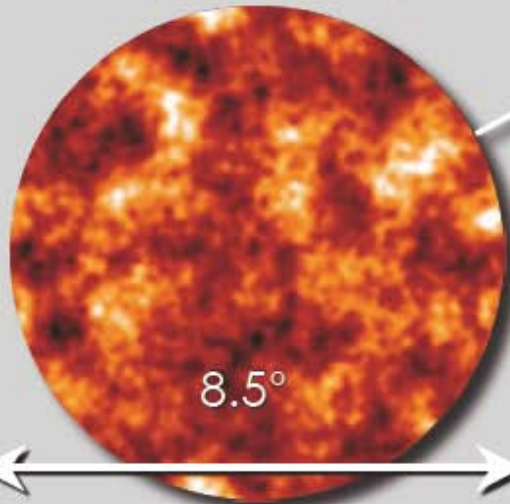
B-Mode Component
(1000 times fainter)



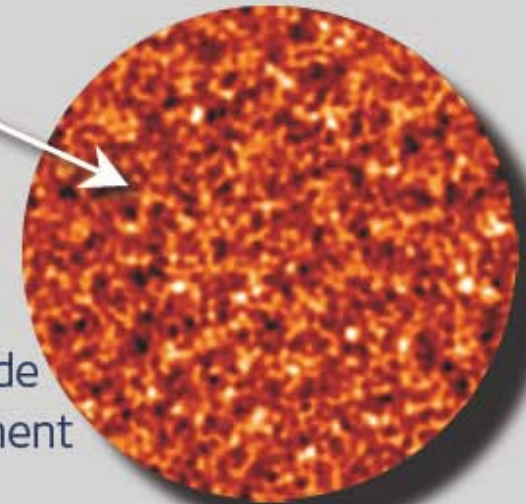
Polarized Component
(10 times fainter)



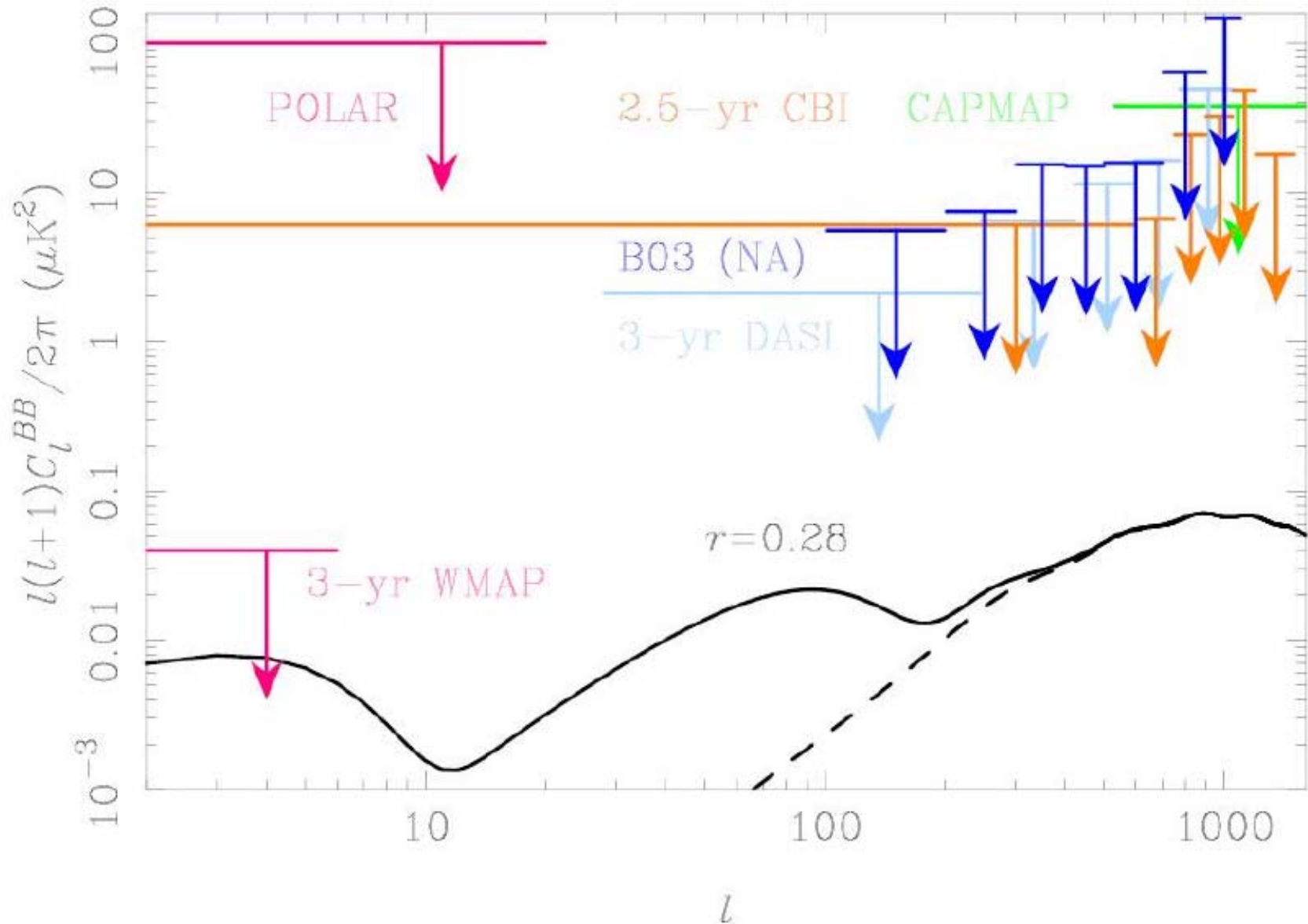
Temperature Signal



E-Mode
Component



Bis jetzt ...

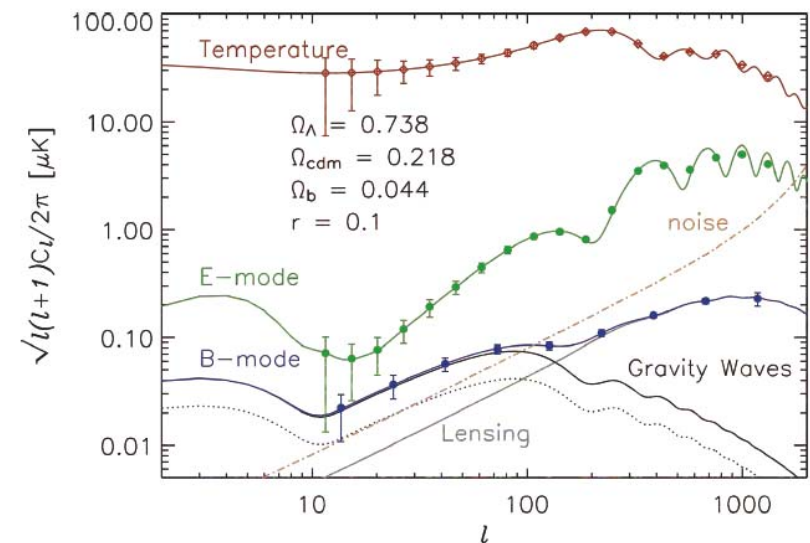




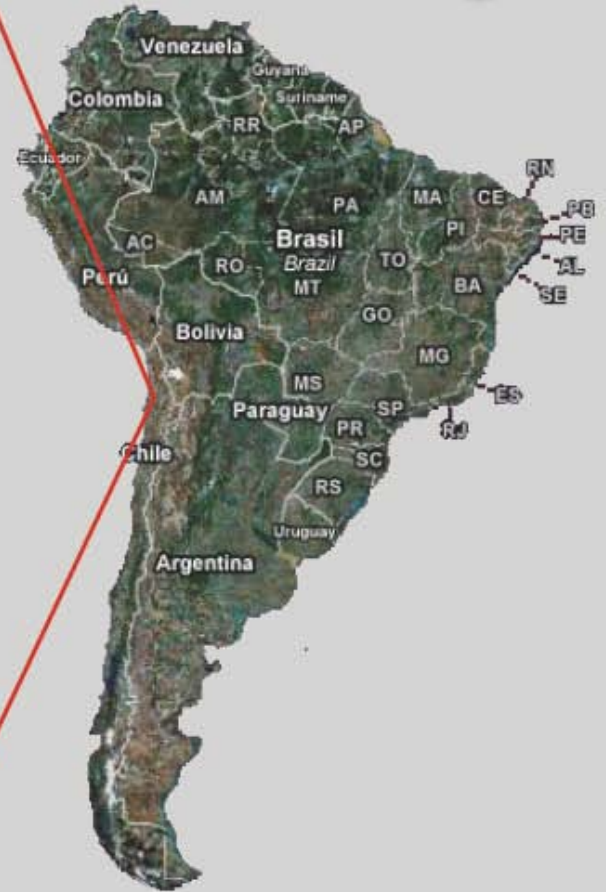
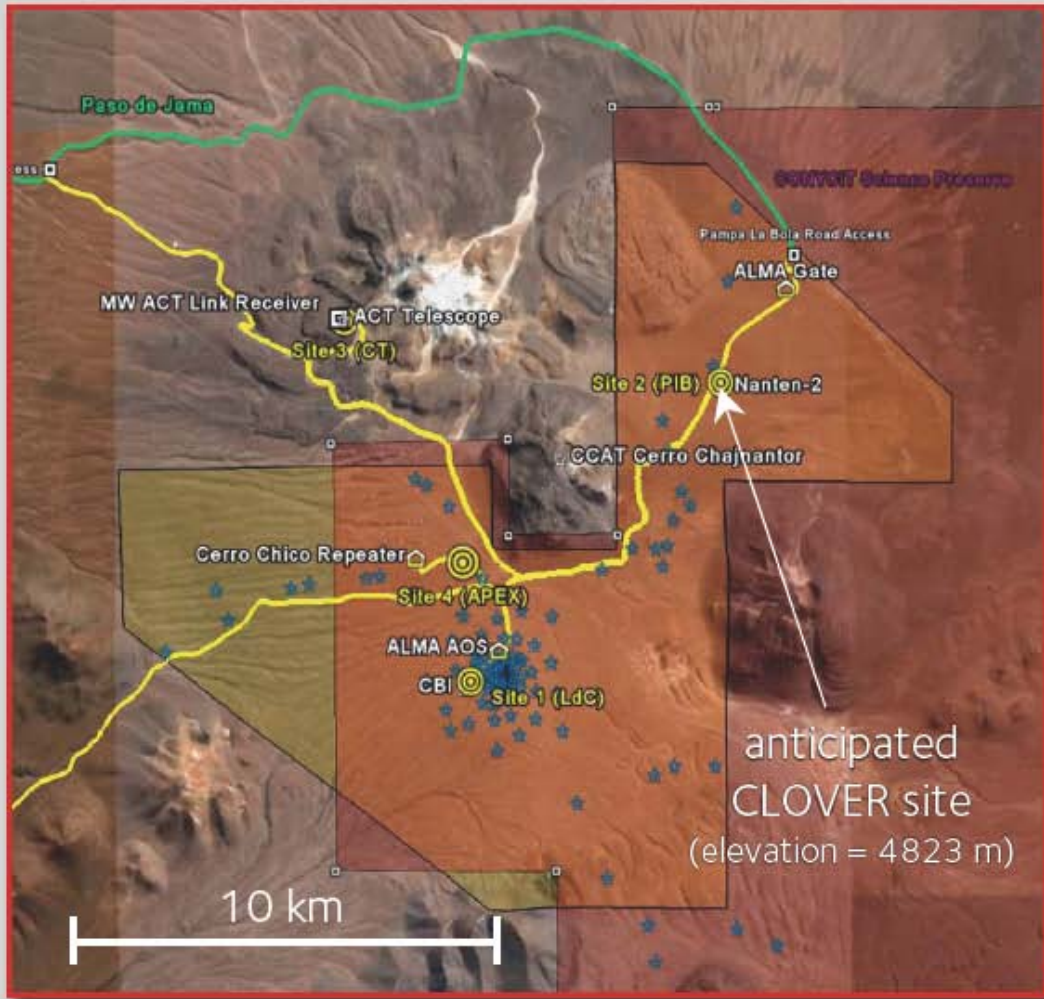
Science Goals of CLOVER

- 1) Detect primordial B-mode signal from inflationary gravity waves to the lensing confusion limit.
- 2) Measure the B-mode signal from gravitational lensing.
- 3) Fully characterize the T and E-mode signals.
- 4) Improve the accuracy of the values of a collection of cosmological parameters
- 5) Characterize the polarization of Galactic signals, such as synchrotron radiation and dust

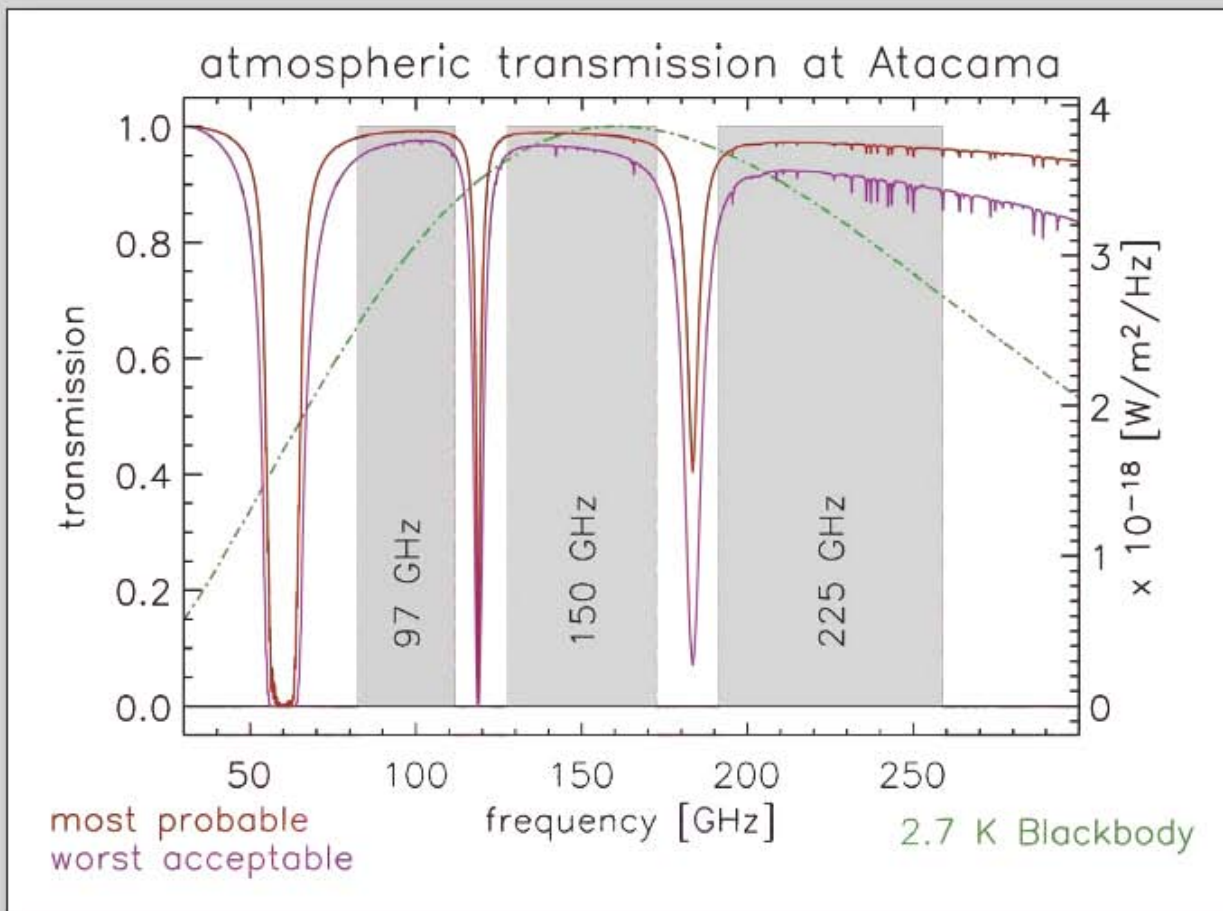
Ziel: 2009 fully operational !!



CLOVER Site: Atacama, Chile



Frequency Bands



Atmospheric windows allow three bands with 30% bandwidth.

These bands:
(1) are well matched to the CMB spectrum.
(2) should be sufficient for the removal of foreground signals.

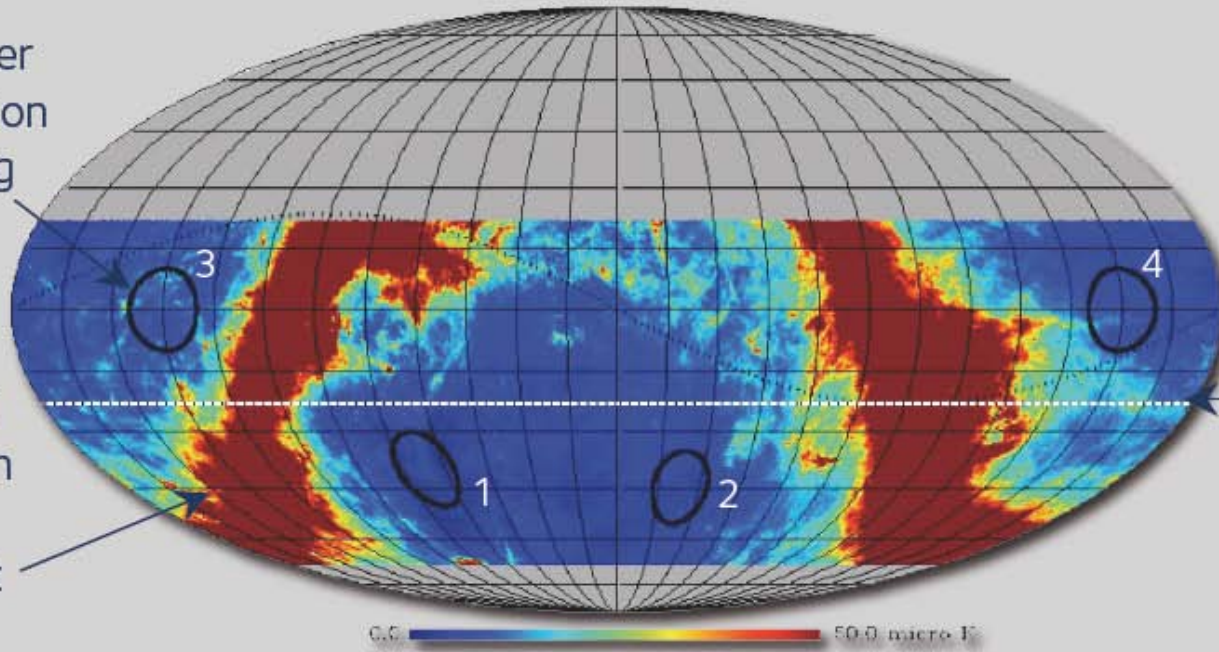
see ALMA memo #512 for optical depth information

CLOVER Observation Regions



the diameter
of each region
is ~10 deg

estimated
synchrotron
and dust
emission at
97 GHz



zenith
at the
observation
site

Region	1	2	3	4
RA [deg]	67.5	337.5	135.0	210.0
Dec [deg]	-40.0	-45.0	0.0	0.0
Dust/Synchrotron RMS [μ K]	0.91/0.21	0.77/0.55	2.16/0.41	1.59/0.60

four regions
together
give
1000 deg²
of coverage

CLOVER Experiment Characteristics



Band Centers [GHz]	97, 150, 225
Number of Single Polarization Detectors	192,192,192
NET [$\mu\text{K sec}$]	164, 254, 664
Beam FWHM [arcmin]	7.5, 5.5, 5.5
Sky Coverage [deg^2]	1000
l Range	20 to 1000
Operation Time [years]	2
Integration Time [years]	0.8
T Sensitivity per 8' pixel [μK]	0.8
Q Sensitivity per 8' pixel [μK]	1.1
Minimum r	0.03



Note: CLOVER is composed of two of these instruments.

Mirror Fabrication



back of 97 GHz Primary Mirror

Mirror fabrication
is underway.

surface accuracy: $< 50 \mu\text{m}$ ($\sim \lambda/40$ @ 259 GHz)

surface roughness: $< 1 \mu\text{m}$ RMS

self weight deflection: $20 \mu\text{m}$ maximum



polished
surface

Conclusions



- The CLOVER experiment is aiming to characterize the polarization of the CMB to $r = 0.03$
- CLOVER will also characterize the polarization of Galactic foreground signals.
- Observations will be made from Atacama, Chile.
- The required sensitivity is achieved with 576 photon-noise limited single polarization detectors.
- Instrument design as well as the observation and calibration strategy should deliver the required control of systematic error.
- Deployment scheduled to begin in 2009



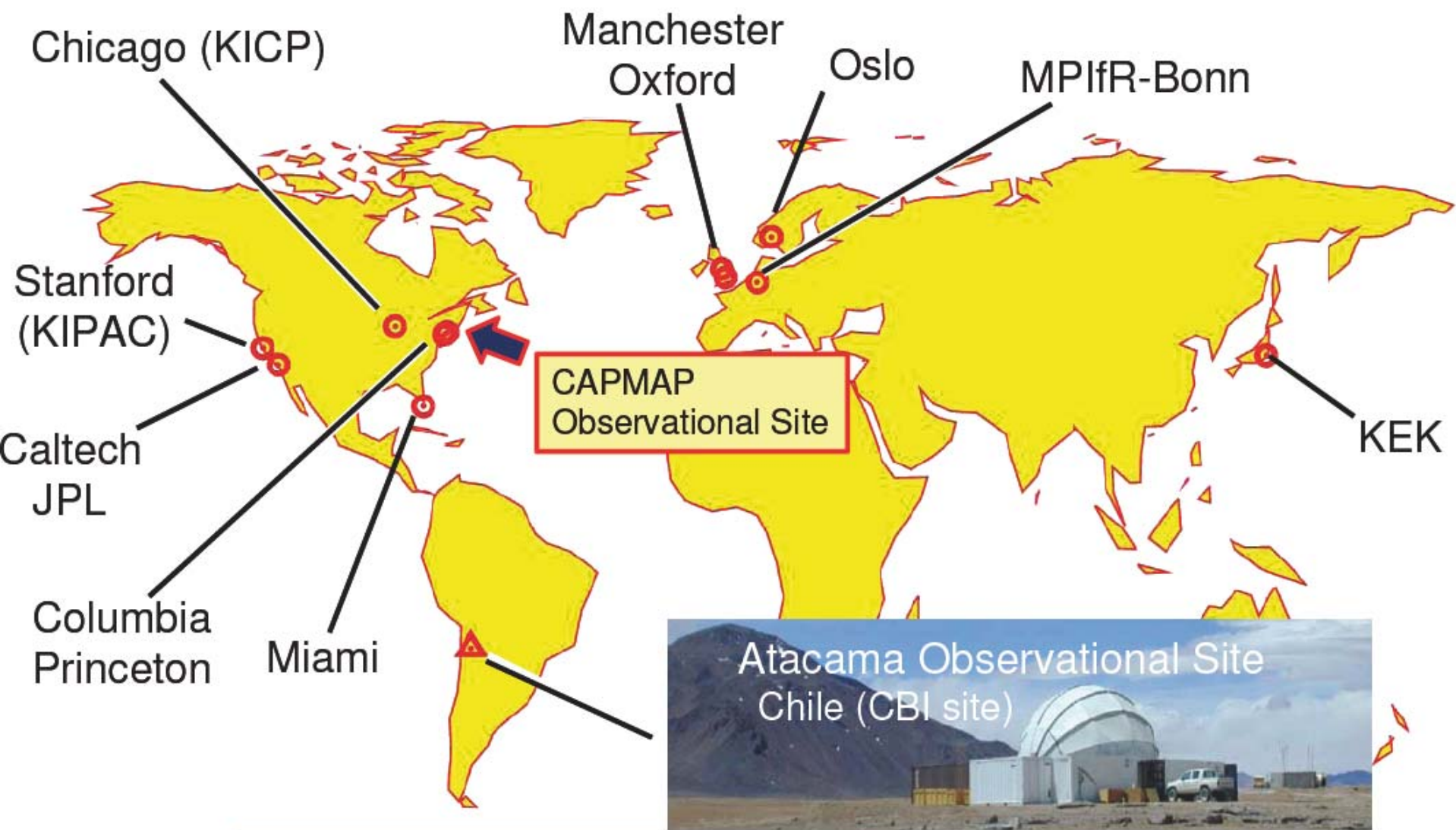
Inflations-Experimente
QUIET

QUIET

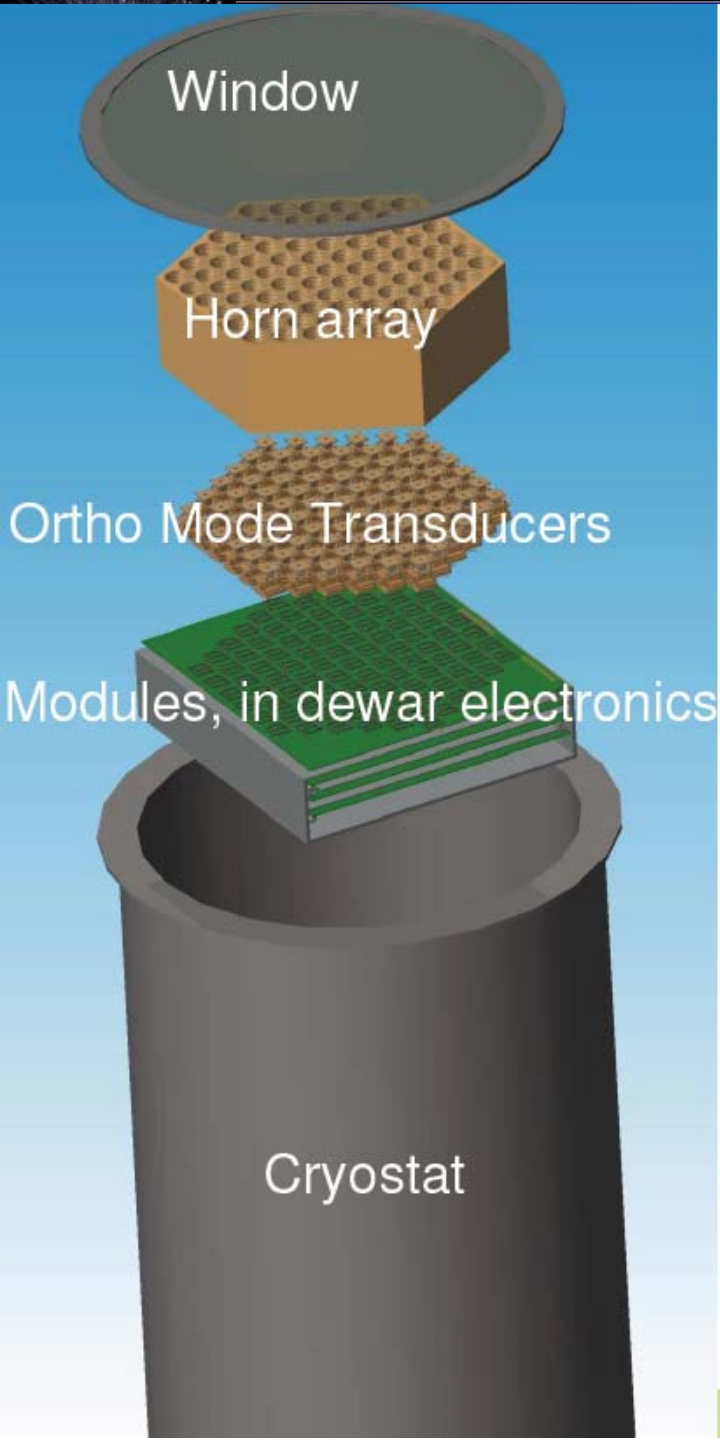


- Q/U Imaging Experiment
- Kann Q und U Stokes Parameter simultan messen
- Auf 5080m Llano de Chajnantor
- Soll ab 2008 beobachten
- Ursprung in CAPMAP, CBI und QUaD Kollaborationen

Q/U Imaging Experiment Collaboration



5 countries, 12 institutes, ~30 people



Plans for QUIET

- Install up to four new 1.4m telescopes on CBI platform in the Atacama Desert (5000m altitude)
- Move 7m telescope to Chile

91 W band elements
19 Q band elements

Phase I,
in Chile 2008

> 500 elements

Phase II
2009++

Observations at large and small scales!
(resolution 14'/5' for 90 GHz)



7m telescope at Crawford Hill, NJ



CBI platform, Atacama Desert, Chile

Observation regions

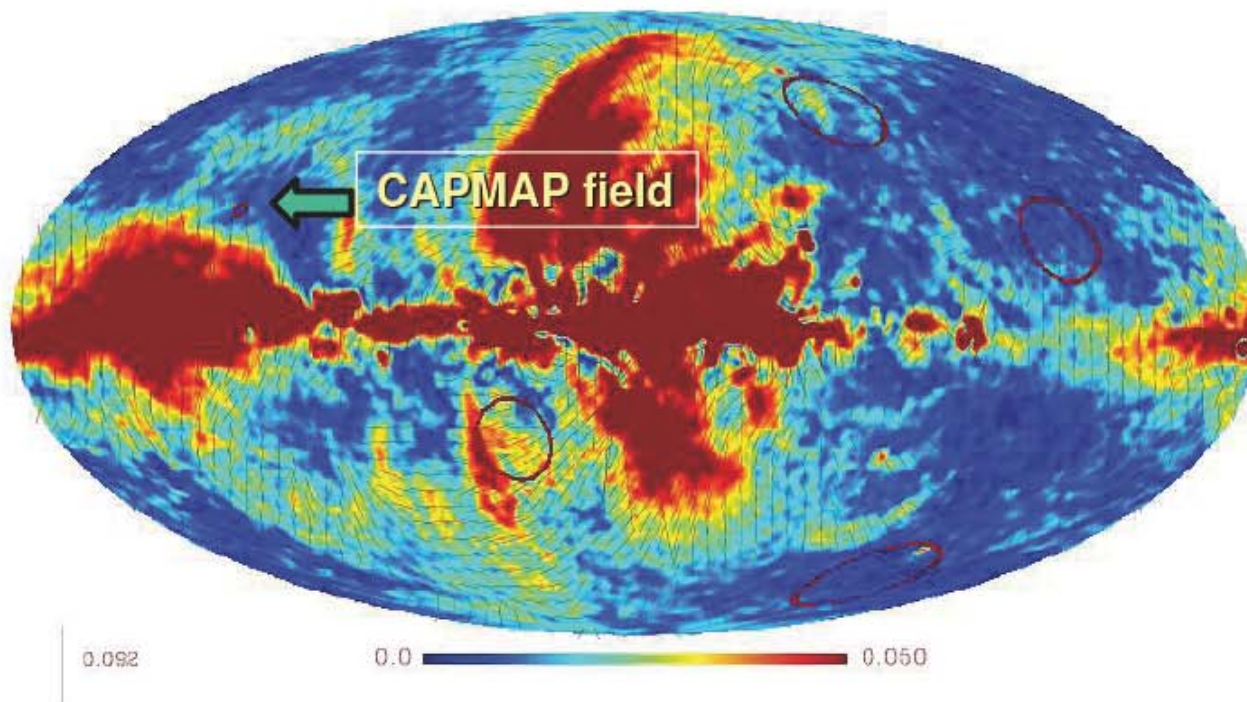
Preliminary choice of 4x400 square degree patches:

- low foreground regions
(overlap with Quad/EBEX/Polarbear planned)
- elevation above 40 degrees
- distribution to allow continuous scanning

K-band (23 GHz)
WMAP 5 years, polarization intensity

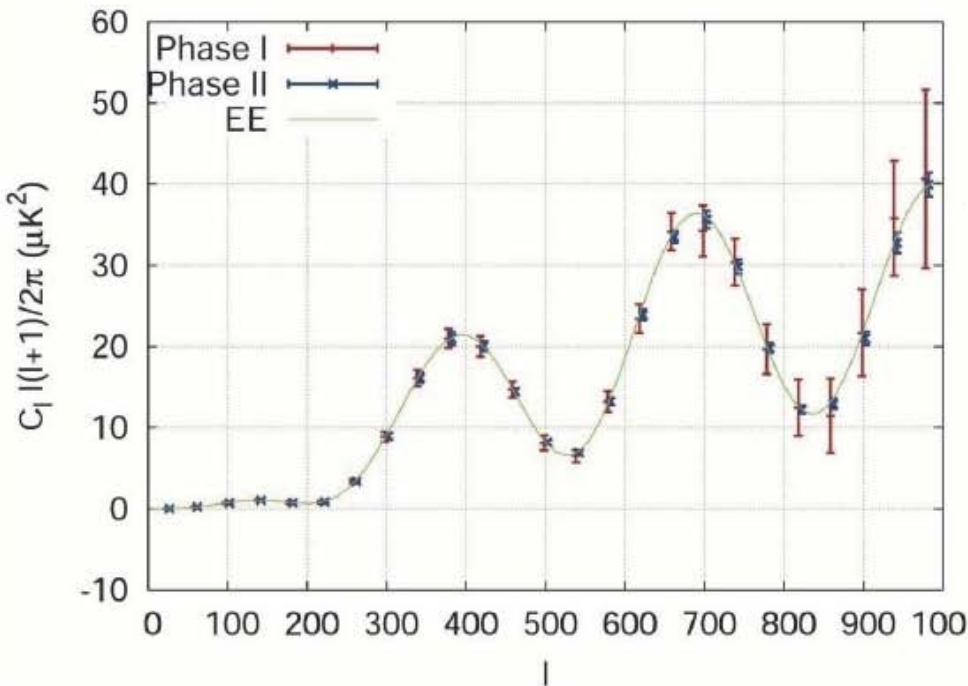
Map precision on 1x1 degree pixel:

Planck: 1 μK (100 GHz)
QUIET: 10^{-1} μK (90 GHz)

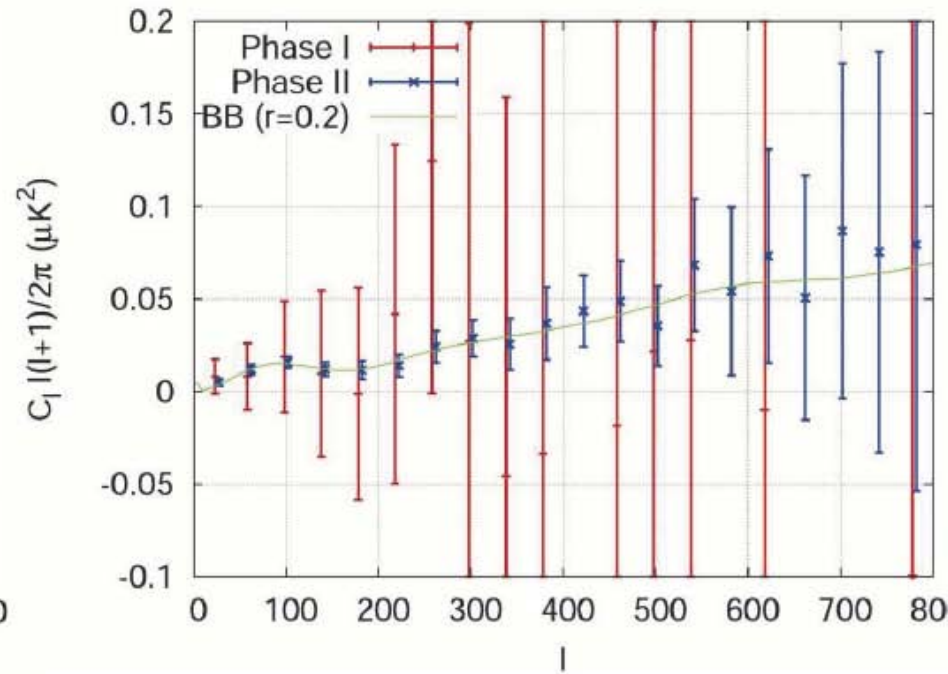


Expected results for phase I (phase II)

EE spectrum



BB spectrum ($r=0.2$)

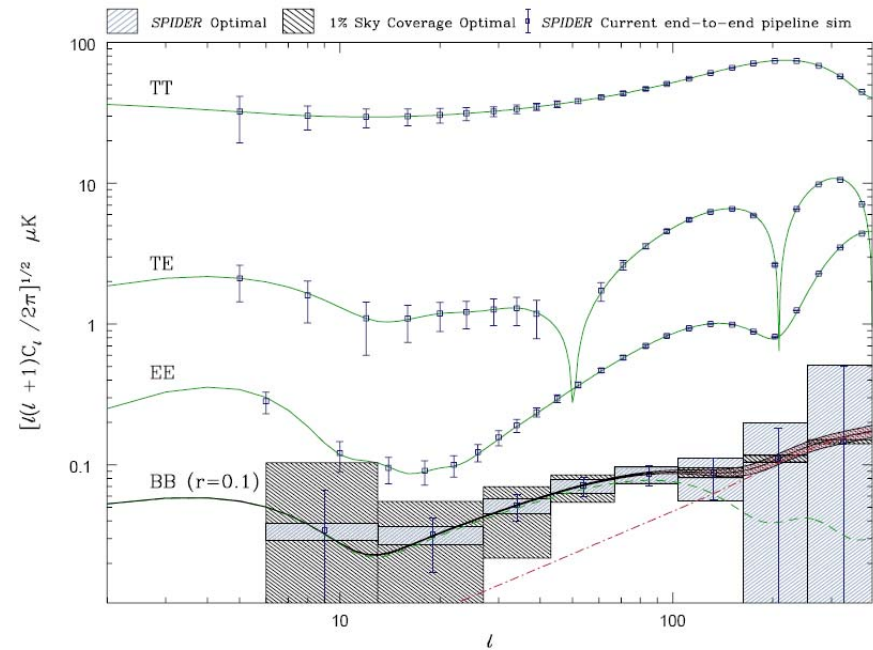
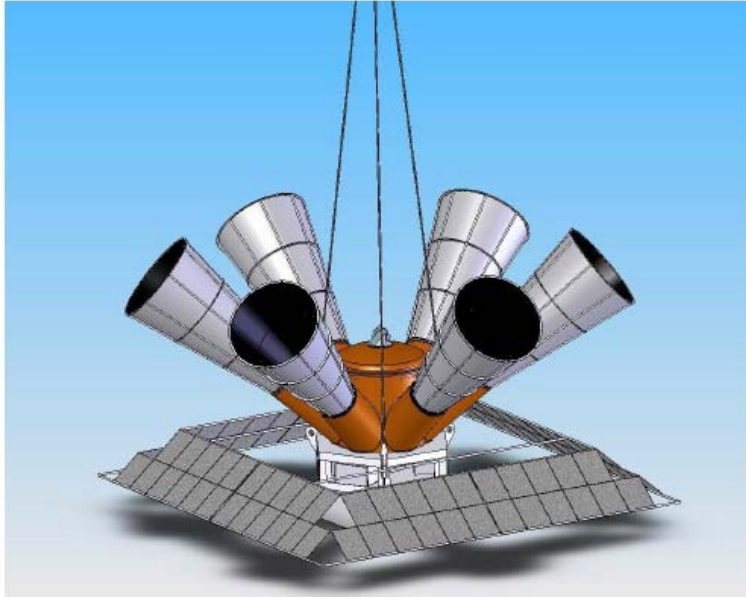


50 (500) W-band receivers with $\sim 340 \mu\text{K}$ sqrt(s) per element
10 (20) months observing with 50% efficiency

reaching $r \sim 10^{-2}$ in phase II

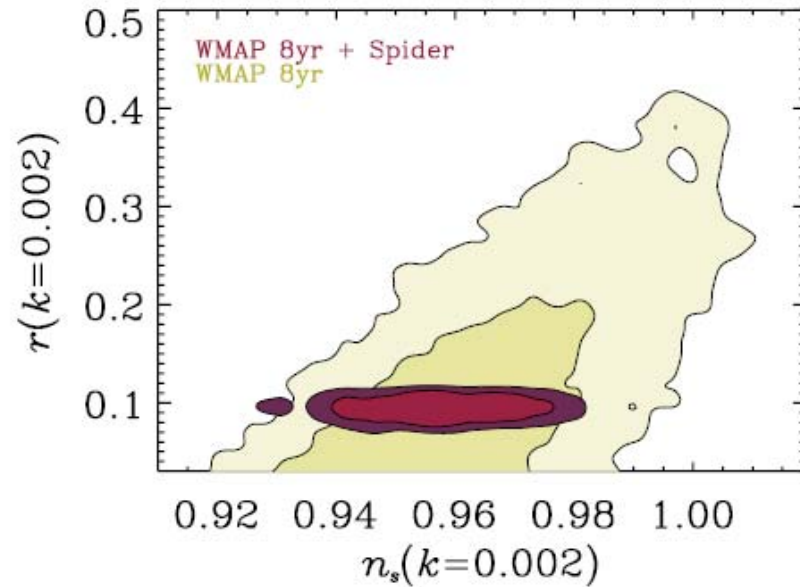
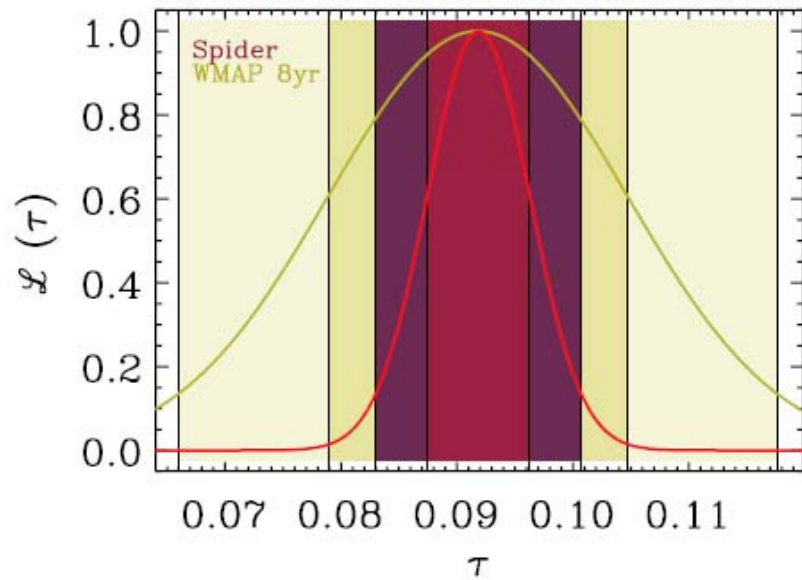
A visualization of cosmic inflation, showing a dense field of particles (represented by small blue and white dots) expanding outwards from a central point. The background is a deep blue, and the particles are arranged in a pattern that suggests a rapid expansion. The text "Inflations-Experimente Spider" is centered over the image.

Inflations-Experimente Spider

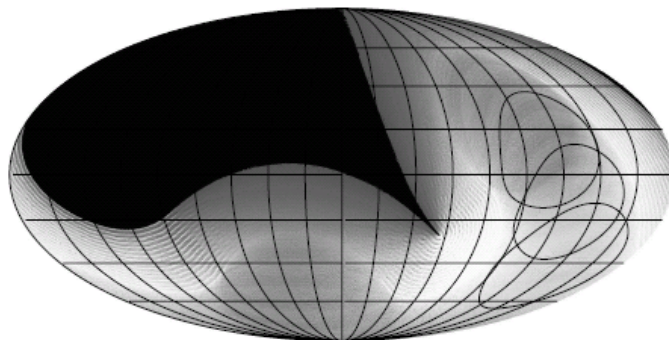


- Ballon-Experiment (96-300 GHz, 3-1mm) von 30-0.5 Grad
- Erster Flug für April 2010 von Alice Springs (Australien) aus geplant
- Ultra Long Duration Balloon flight in der nachfolgenden Saison

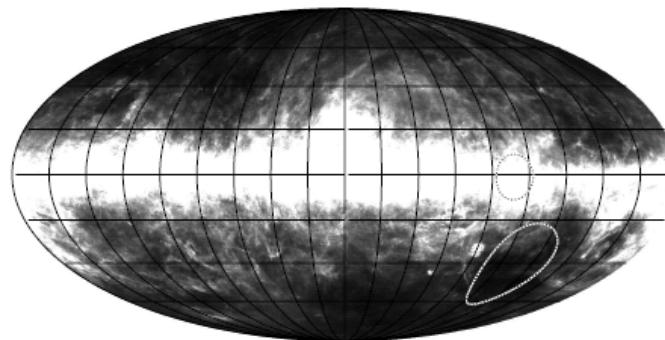
Spider



Daily Sky Coverage

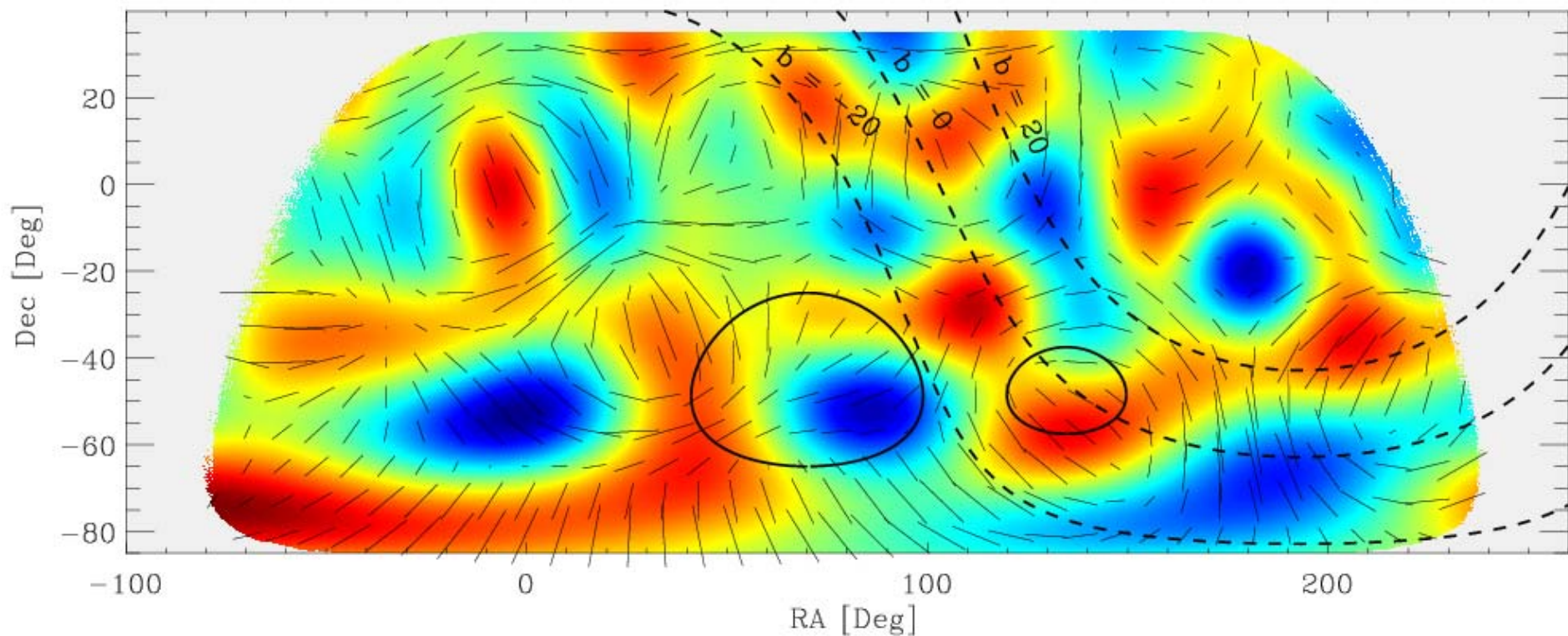


Galactic Dust Emission



Simulated Spider Polarization Map

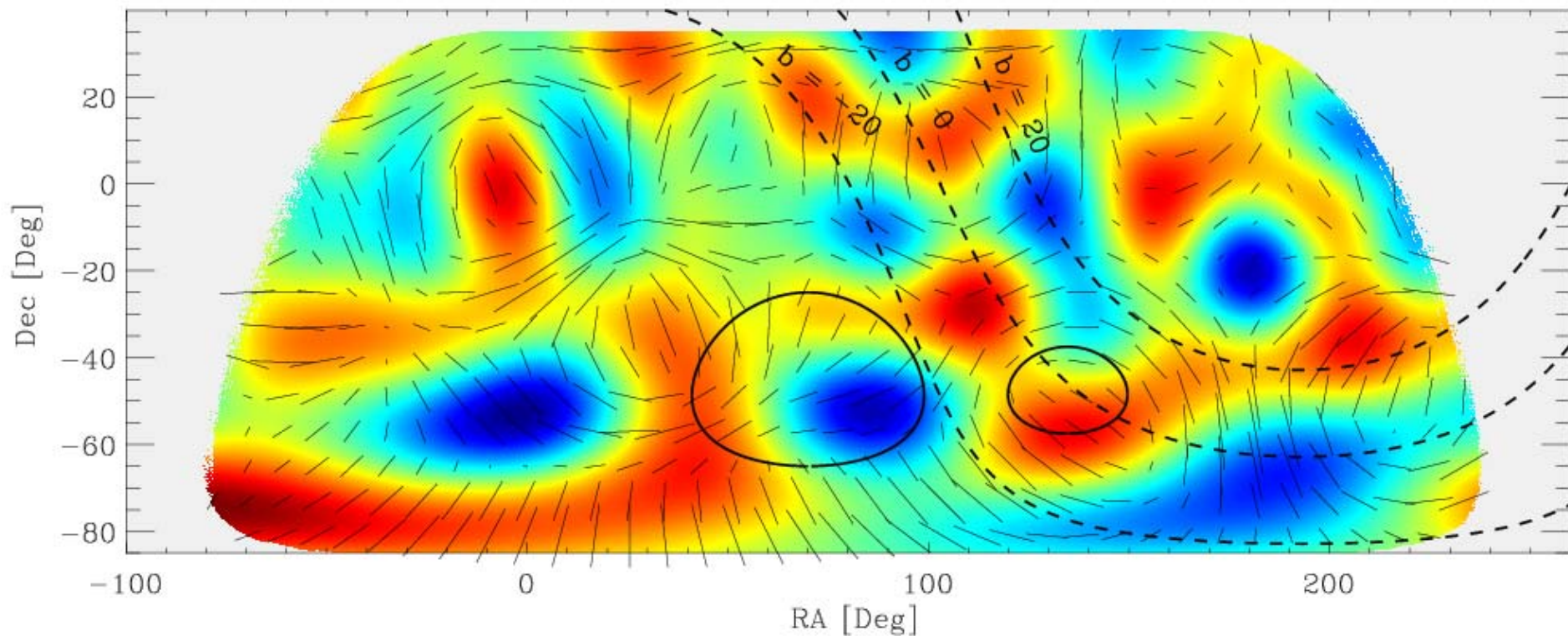
Without B-modes



[Contaldi]

Simulated Spider Polarization Map

With B-modes, $r=0.1$



[Contaldi]

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of blue and red spots representing temperature variations in the early universe. Overlaid on this map are several bright, multi-colored beams of light (purple, blue, and green) that converge towards the center of the image, creating a starburst effect. The text is centered in the middle of the image.

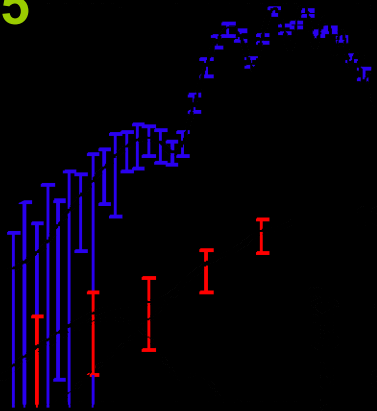
Inflations-Experimente
SAMPAN

Long term effort

QUaD, BICEP (2005-2008)

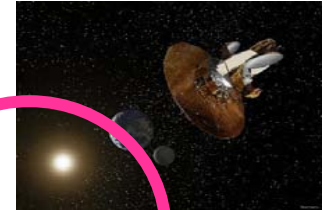
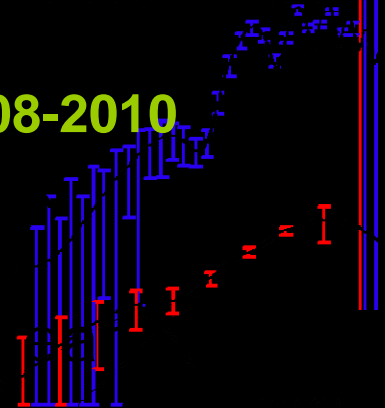


~2005



CLOVER, EBEX, POLARBEAR, BRAIN (2008-2011)

~2008-2010



SAMPAN, CMBPOL (> 2018)

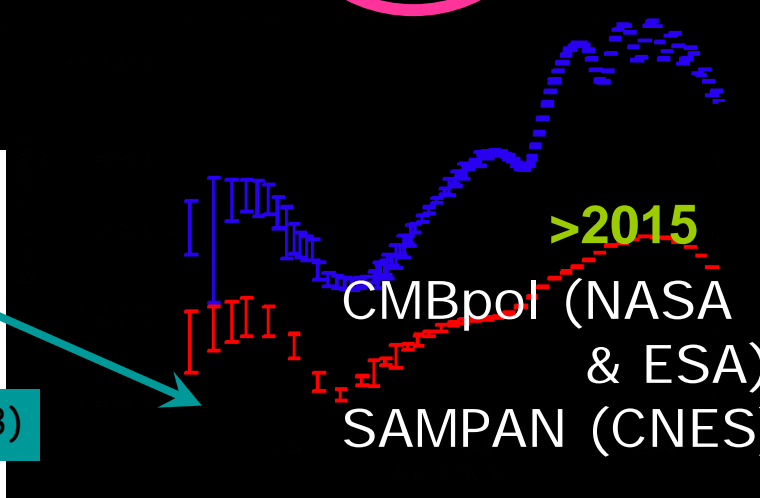
Gravitational waves

(Ken Ganga 2004)

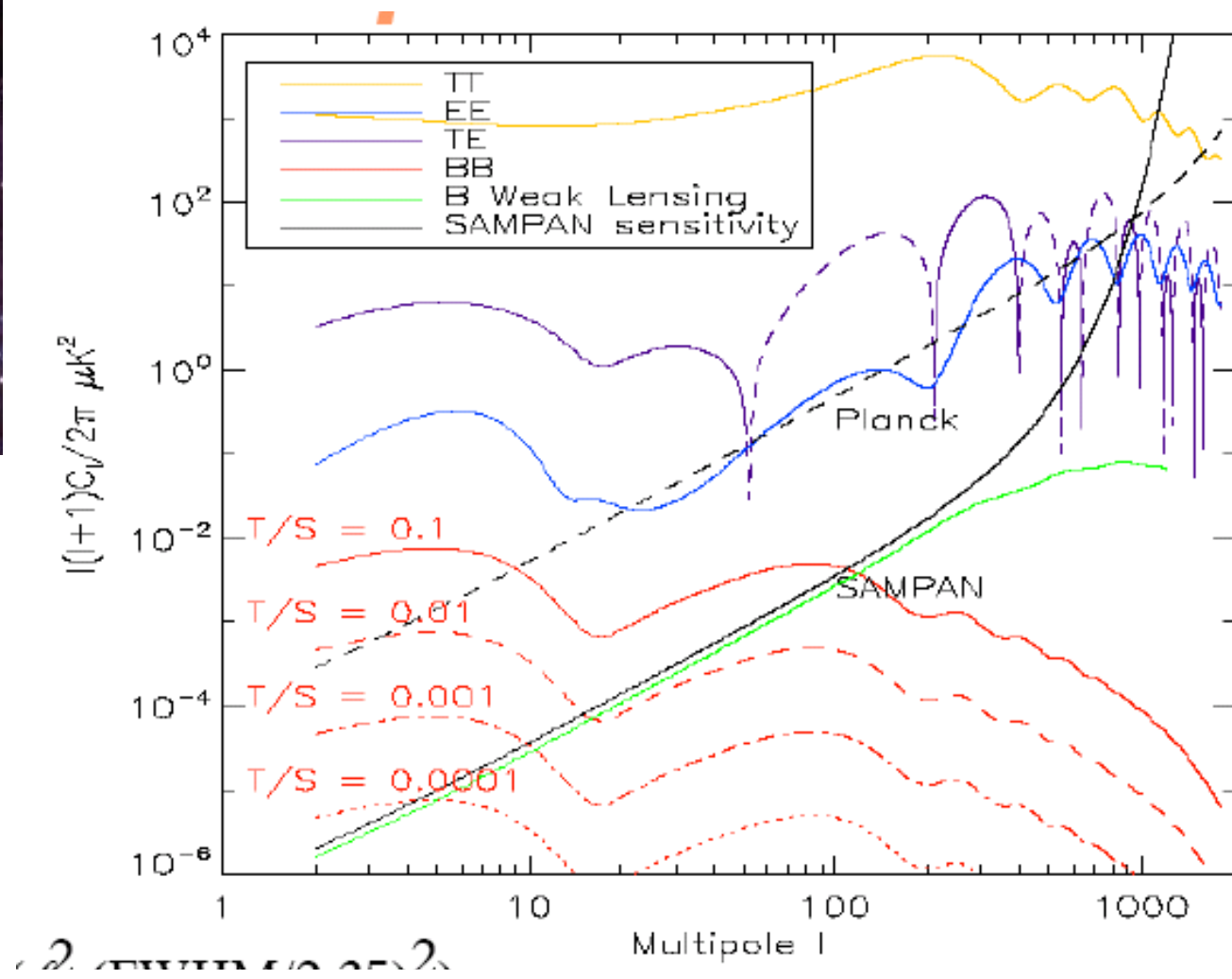
$m_\nu = 0.03 \text{ eV}$
(Kaplinghat et al. 2003)

>2015

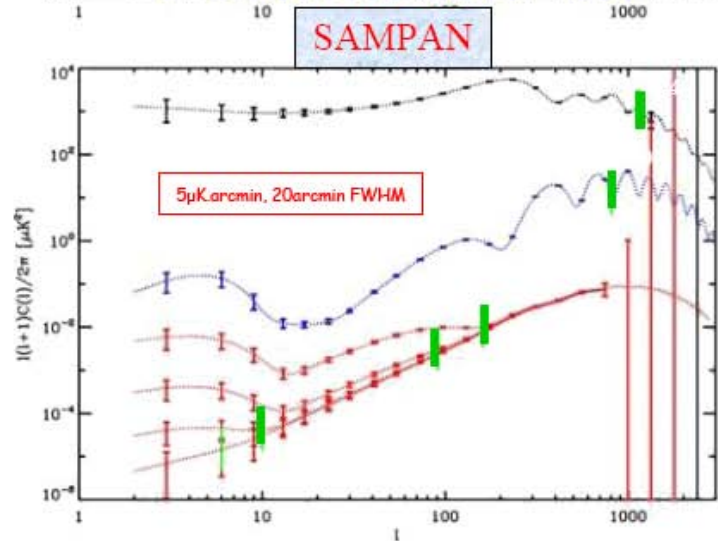
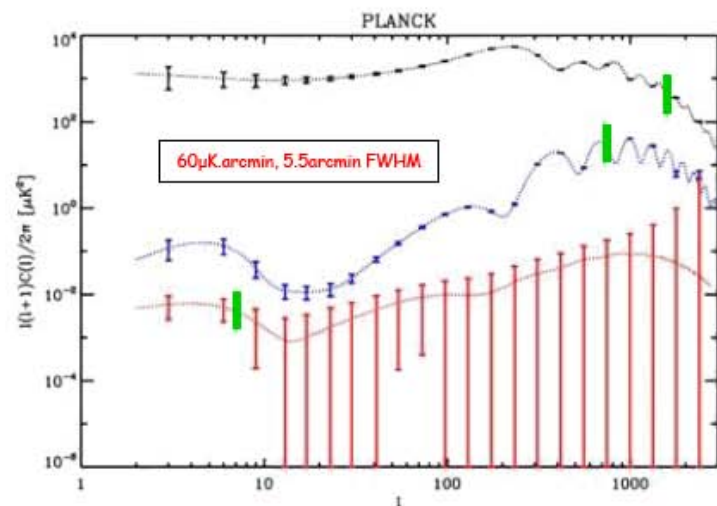
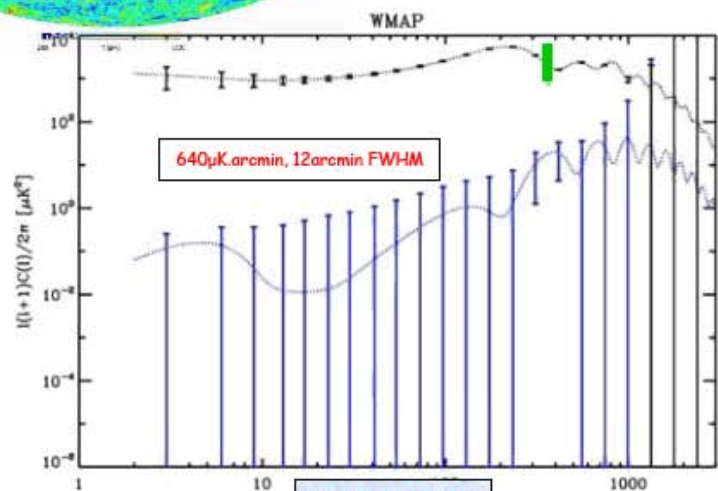
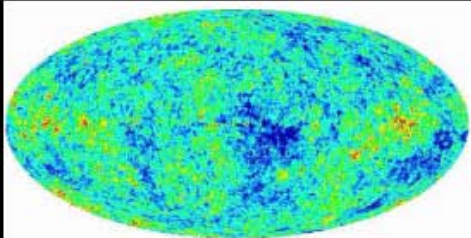
CMBpol (NASA & ESA)
SAMPAN (CNES)



SAMPAN



Measurements in perspective



	Fiducial model	SAMPAN 20' fwhm, (5μK·arcmin) ² (No reionization)					
		TT	TE	EE	BB	BB+EE	All
r	0.0	1.57×10^{-1}	7.19×10^{-2}	1.32×10^{-2}	1.58×10^{-3}	6.71×10^{-4}	6.60×10^{-4}
$\delta A_S/A_S$	1.00×10^0	3.14×10^{-1}	6.15×10^{-1}	3.81×10^{-1}	2.70×10^0	3.57×10^{-1}	1.27×10^{-1}
H	7.20×10^1	9.96×10^{-2}	6.62×10^{-2}	9.91×10^{-2}	5.94×10^0	8.06×10^{-2}	3.93×10^{-2}
Ω_b	5.00×10^{-2}	3.43×10^{-4}	2.68×10^{-4}	6.01×10^{-4}	3.91×10^{-2}	4.88×10^{-4}	1.39×10^{-4}
Ω_c	2.50×10^{-1}	3.73×10^{-5}	5.03×10^{-5}	1.34×10^{-4}	3.45×10^{-2}	1.28×10^{-4}	2.68×10^{-5}
n_s	1.00×10^0	3.47×10^{-1}	6.69×10^{-1}	3.98×10^{-3}	1.49×10^{-1}	3.74×10^{-1}	1.84×10^{-1}
Ω_k	0.0	5.53×10^{-4}	4.37×10^{-4}	3.08×10^{-4}	3.04×10^{-2}	3.01×10^{-4}	1.87×10^{-4}
τ	0.0	1.73×10^{-1}	8.00×10^{-4}	1.19×10^{-5}	1.60×10^0	5.96×10^{-3}	5.96×10^{-3}

Table 2: 1σ errors resulting from the fit of an eight parameter family of cosmological models for a detector white noise level of $5\mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$ and a resolution of 20 arc minute. (Note that $\delta A_S/A_S$ denotes the variation on the normalisation of the scalar power spectrum as compared to that inferred from COBE data.) This table confirms that a tensor to scalar ratio r greater than 2×10^{-3} could be detected at the 3σ level even without relying on the low- ℓ reionisation bump.

3σ for $r \sim 2 \times 10^{-3}$

Reionization bump not taken into account

1 bounds region (at left) with modes measured @ S/N > 1

The image displays a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, characterized by a complex pattern of blue and white pixels representing temperature variations. Overlaid on this map are several bright, multi-colored lines (red, green, and blue) that trace the paths of various CMB experiments, such as COBE, WMAP, and Planck, as they scan the sky. The text 'Inflations-Experimente' and 'CMBPol' is centered over the map.

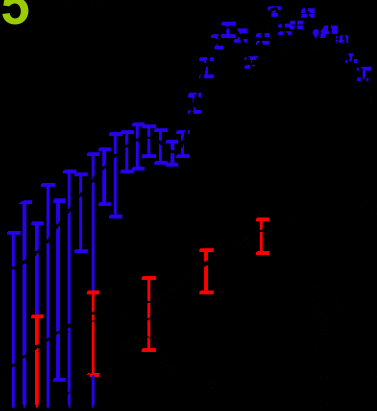
Inflations-Experimente
CMBPol

Long term effort

QUaD, BICEP (2005-2008)

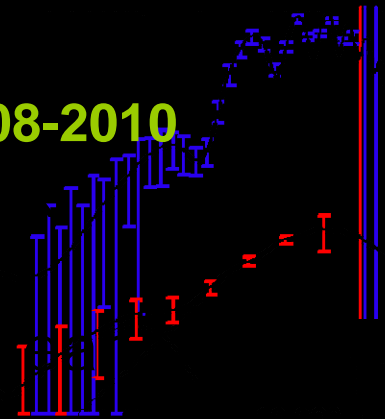


~2005



CLOVER, EBEX, POLARBEAR, BRAIN (2008-2011)

~2008-2010



SAMPAN, CMBPOL (> 2018)

Gravitational waves

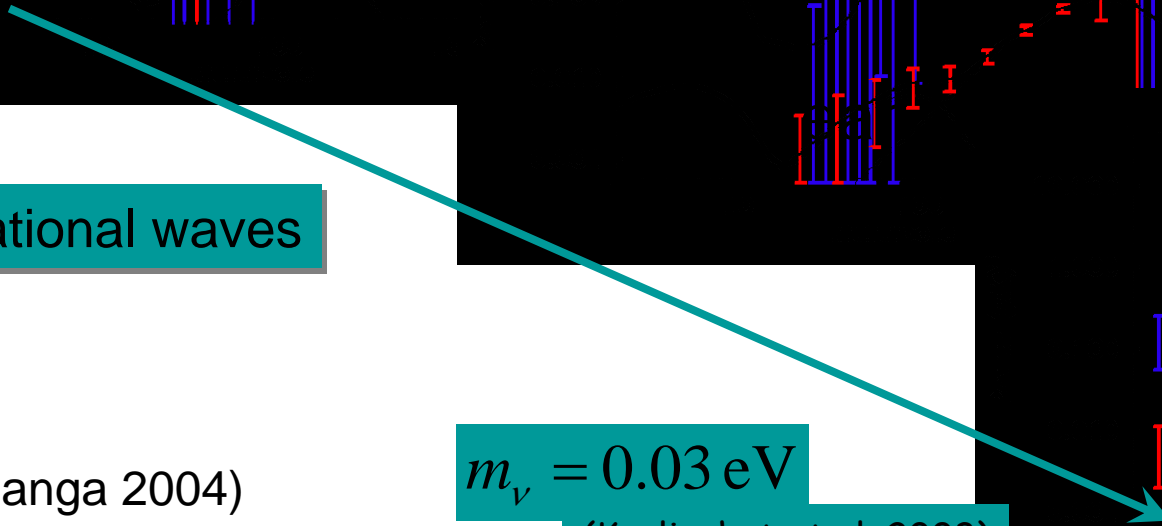
(Ken Ganga 2004)

$$m_\nu = 0.03 \text{ eV}$$

(Kaplinghat et al. 2003)

>2015

CMBpol (NASA & ESA)
SAMPAN (CNES)



What About cmbPol or B-Pol?

There is action afoot to attempt to build a CMB B-mode polarization experiment. To fully characterize the B-mode spectrum, this will probably be required.

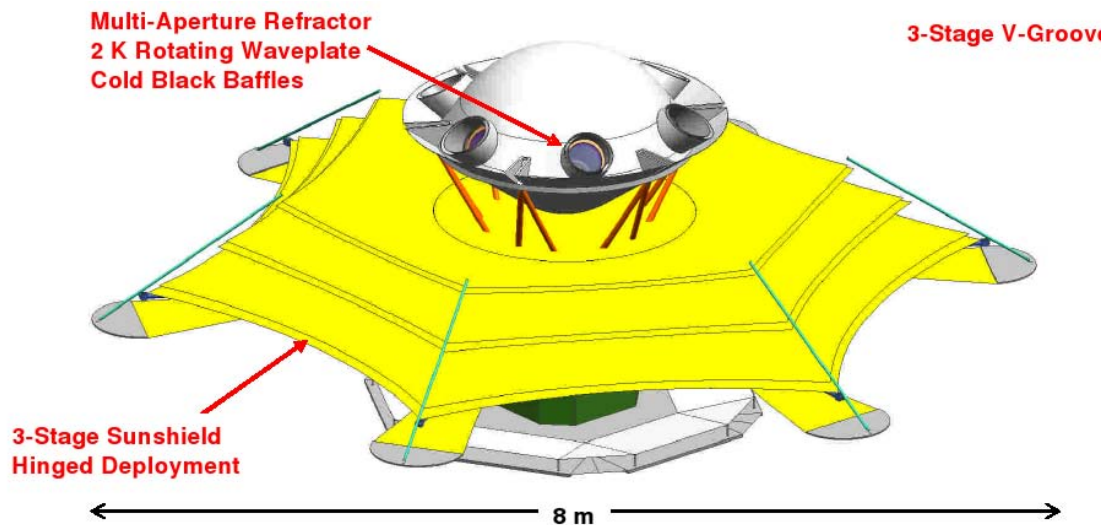
But:

- We don't know what the level of the signal is.
- We don't know the level of the foregrounds.

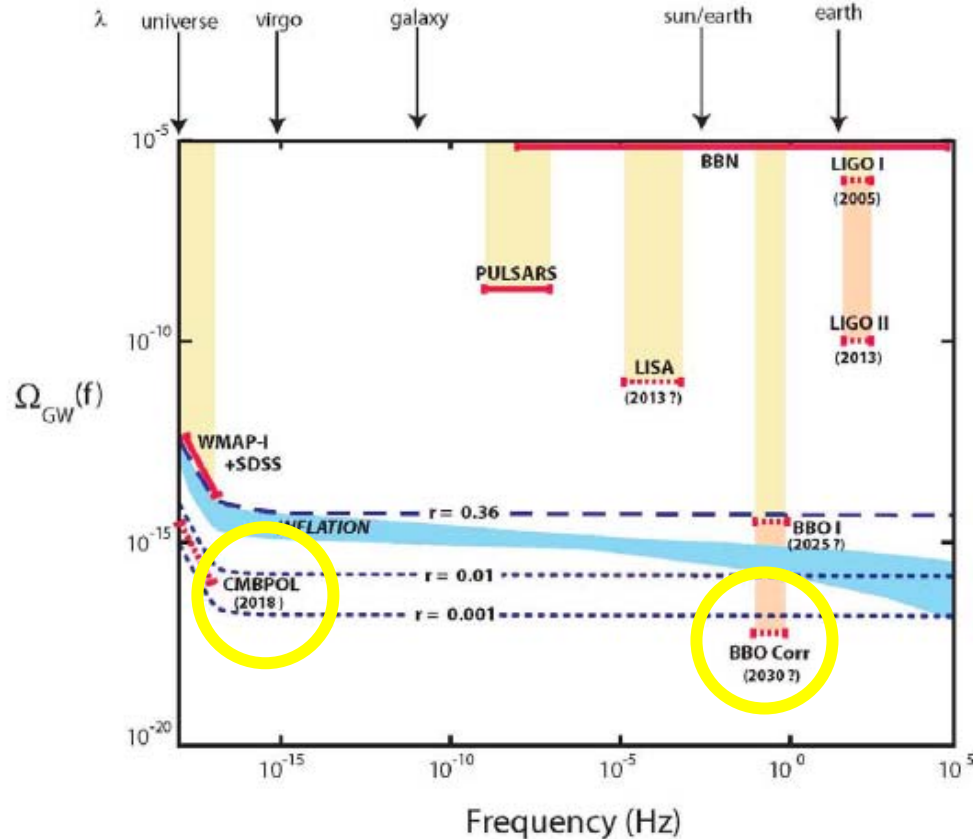
We don't have experience handling the systematics

But in just a few years we will:

So – lets be patient...



Test der Inflation: CMBPol

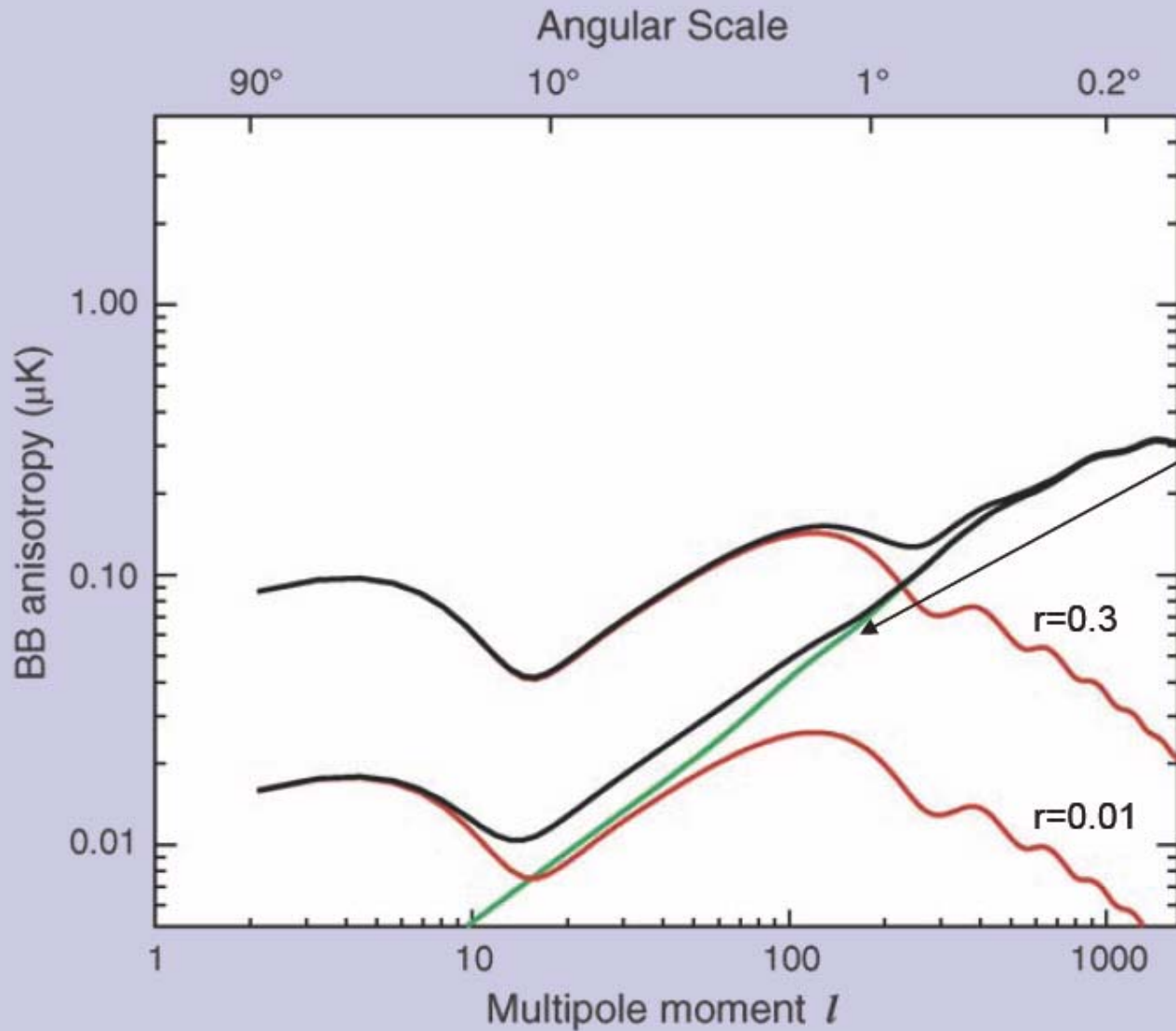


BBO: Big Bang Observer
Gravitational wave detector

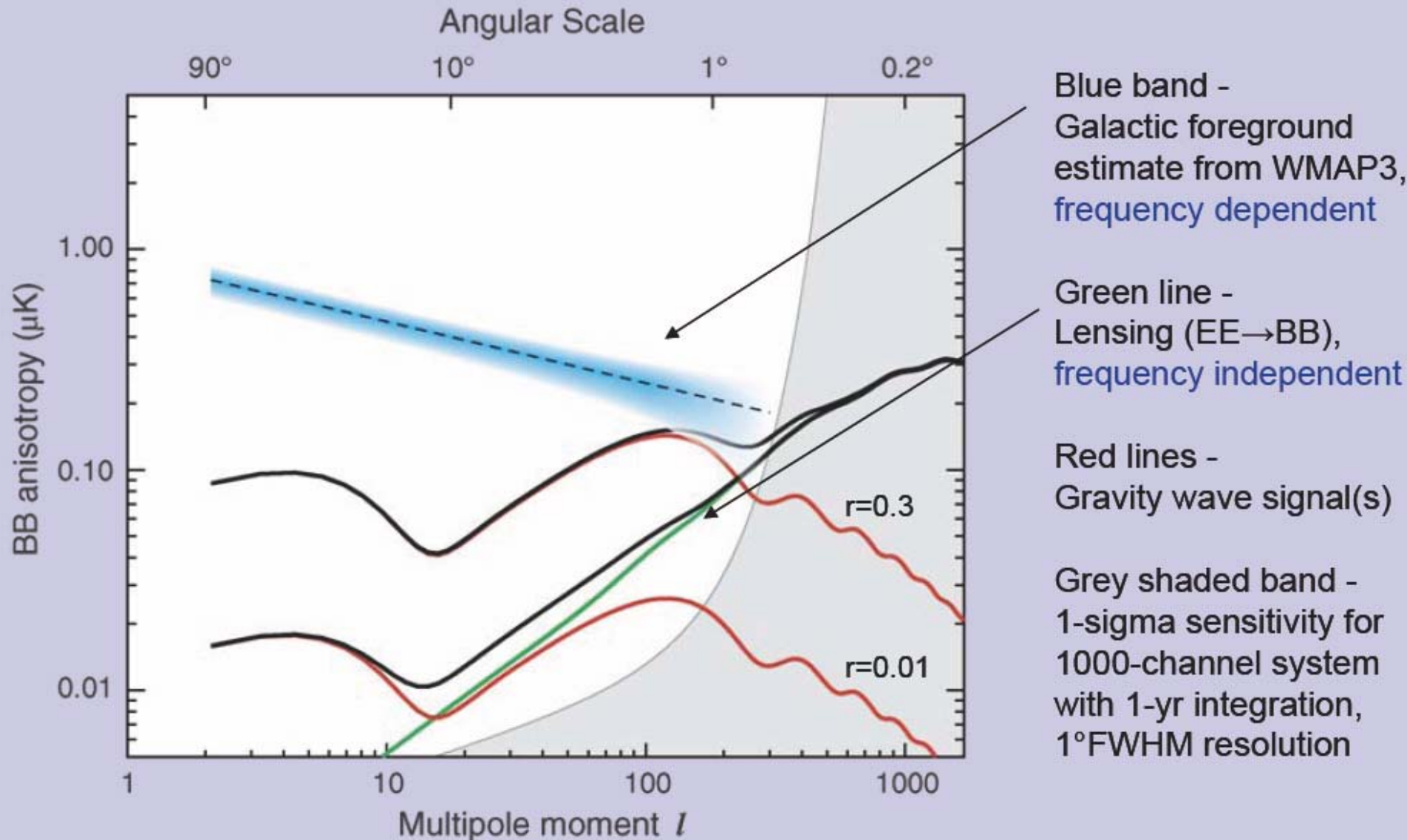
CMBPol: CMB Probe of
Inflation

Figure 1: The plot shows the expected amplitude of gravitational waves as a function of frequency for several values r , the tensor-to-scalar ratio. WMAP constrains $r < 0.36$. The CMBPol mission sensitivity is for the Weiss Report sensitivity of 10 times more sensitive than the Planck mission. Also shown are the sensitivities of other measurements and their expected completion data. Only the Big Bang Observer, a distant future direct gravitational wave detector, has the sensitivity to see primordial gravity waves at the same level as the CMBPol mission. (Figure taken from the Weiss Report)

BB Close-Up



Sensitivity & Foreground Estimates





Multiversen

„Many worlds or just many words ?“

There are infinite worlds both like and unlike this world of ours.

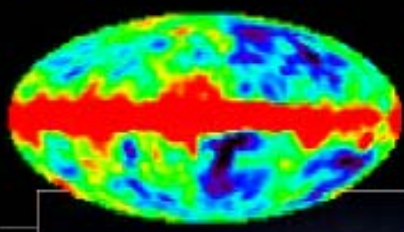
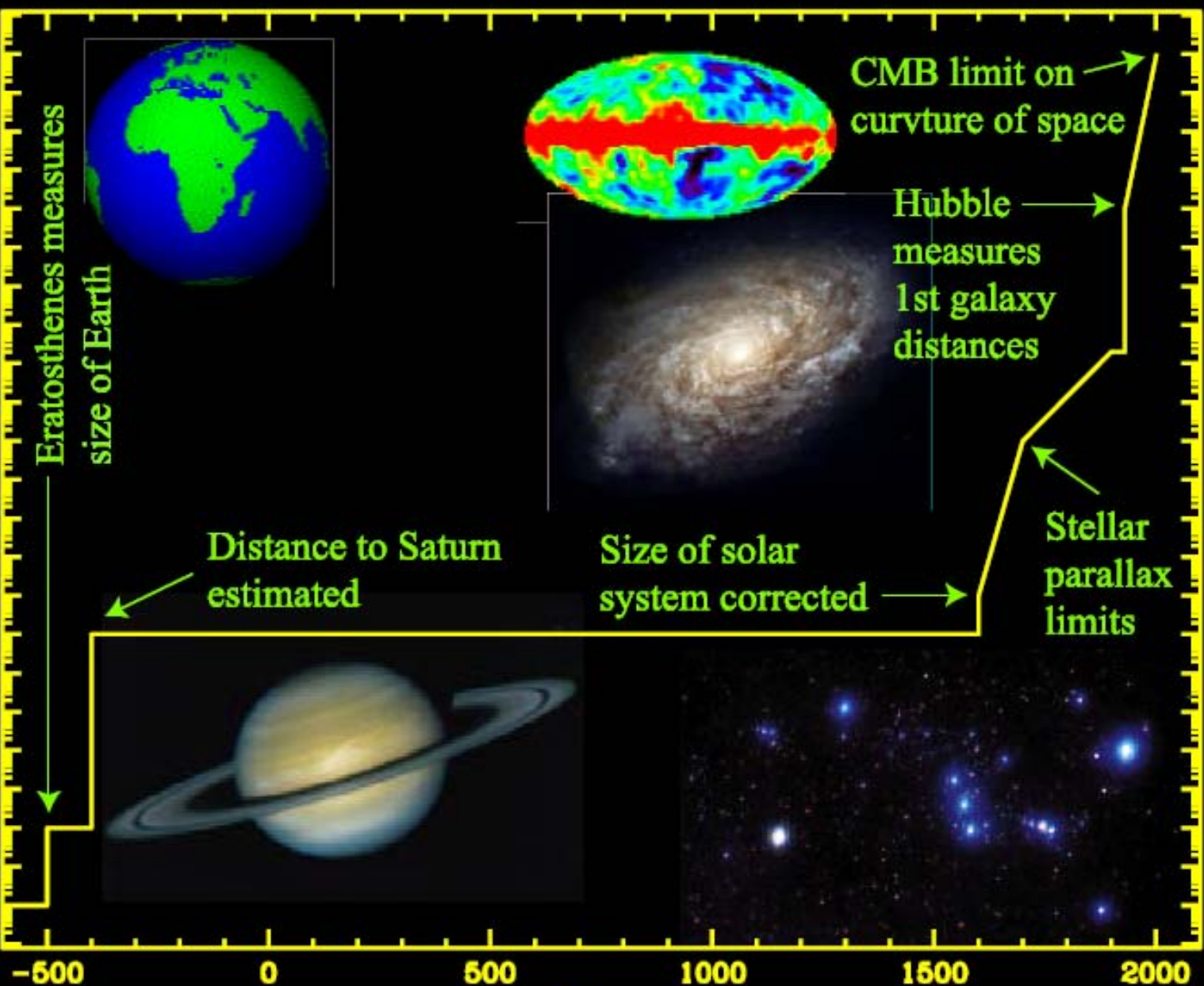
-Epicurus (341-270 BC)

There cannot be more worlds than one.

-Aristotle (384-322 BC)

Lower limit on size of Universe in meters

10⁰
10¹
10²
10³
10⁴
10⁵
10⁶
10⁷
10⁸
10⁹
10¹⁰
10¹¹
10¹²
10¹³
10¹⁴
10¹⁵
10¹⁶
10¹⁷
10¹⁸
10¹⁹
10²⁰
10²¹
10²²
10²³
10²⁴
10²⁵
10²⁶
10²⁷
10²⁸
10²⁹
10³⁰
10³¹
10³²
10³³
10³⁴
10³⁵
10³⁶
10³⁷
10³⁸
10³⁹
10⁴⁰
10⁴¹
10⁴²
10⁴³
10⁴⁴
10⁴⁵
10⁴⁶
10⁴⁷
10⁴⁸
10⁴⁹
10⁵⁰
10⁵¹
10⁵²
10⁵³
10⁵⁴
10⁵⁵
10⁵⁶
10⁵⁷
10⁵⁸
10⁵⁹
10⁶⁰
10⁶¹
10⁶²
10⁶³
10⁶⁴
10⁶⁵
10⁶⁶
10⁶⁷
10⁶⁸
10⁶⁹
10⁷⁰
10⁷¹
10⁷²
10⁷³
10⁷⁴
10⁷⁵
10⁷⁶
10⁷⁷
10⁷⁸
10⁷⁹
10⁸⁰
10⁸¹
10⁸²
10⁸³
10⁸⁴
10⁸⁵
10⁸⁶
10⁸⁷
10⁸⁸
10⁸⁹
10⁹⁰
10⁹¹
10⁹²
10⁹³
10⁹⁴
10⁹⁵
10⁹⁶
10⁹⁷
10⁹⁸
10⁹⁹
10¹⁰⁰



Scheiterhaufen !!



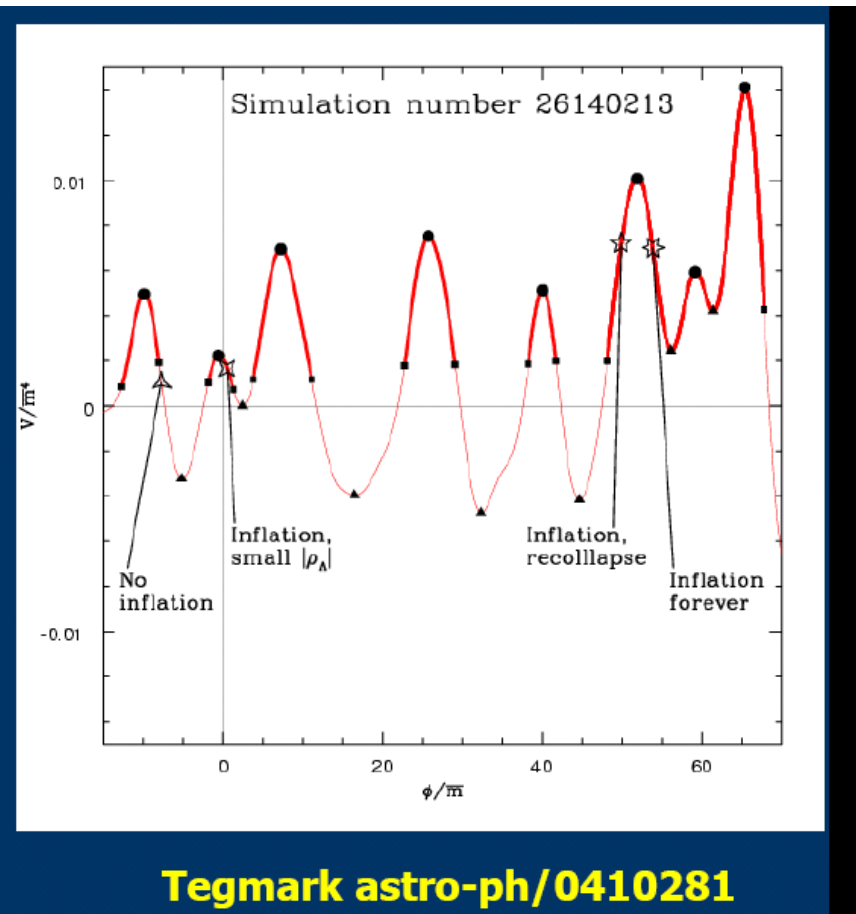
- Giordano Bruno (1548-1600)
- Dominikaner-Mönch, unterrichtet in Aristotelischer Philosophie
- Art of Memory – Rom
- Interessiert an neuen Geistesströmungen
- Inquisition wird 1576 auf ihn aufmerksam

- Flieht aus Neapel, Rom, Frankreich, London (De l'Infinito, Universo e Mondi; 1584): Universum ist unendlich, enthält eine unendliche Zahl von Welten, alle bewohnt von intelligenten Wesen
- Vertrat heliozentrische Theorie von Kopernikus

- Erzeugte überall Widerstand aufgrund leidenschaftlichen Auftretens
- Flieht nach Deutschland
- Akzeptiert 1591 eine Einladung nach Venedig und wird von der Inquisition gefangen genommen
- Unklar, warum – die Unterlagen der Inquisition fehlen
- Galileo und Kepler äußern sich nicht gerade positiv über ihn

Multiverse

Max Tegmark: Parallel Universes
in Scientific American, May 2003
and in astro-ph/0302131



<http://www.hep.upenn.edu/~max/multiverse.html>

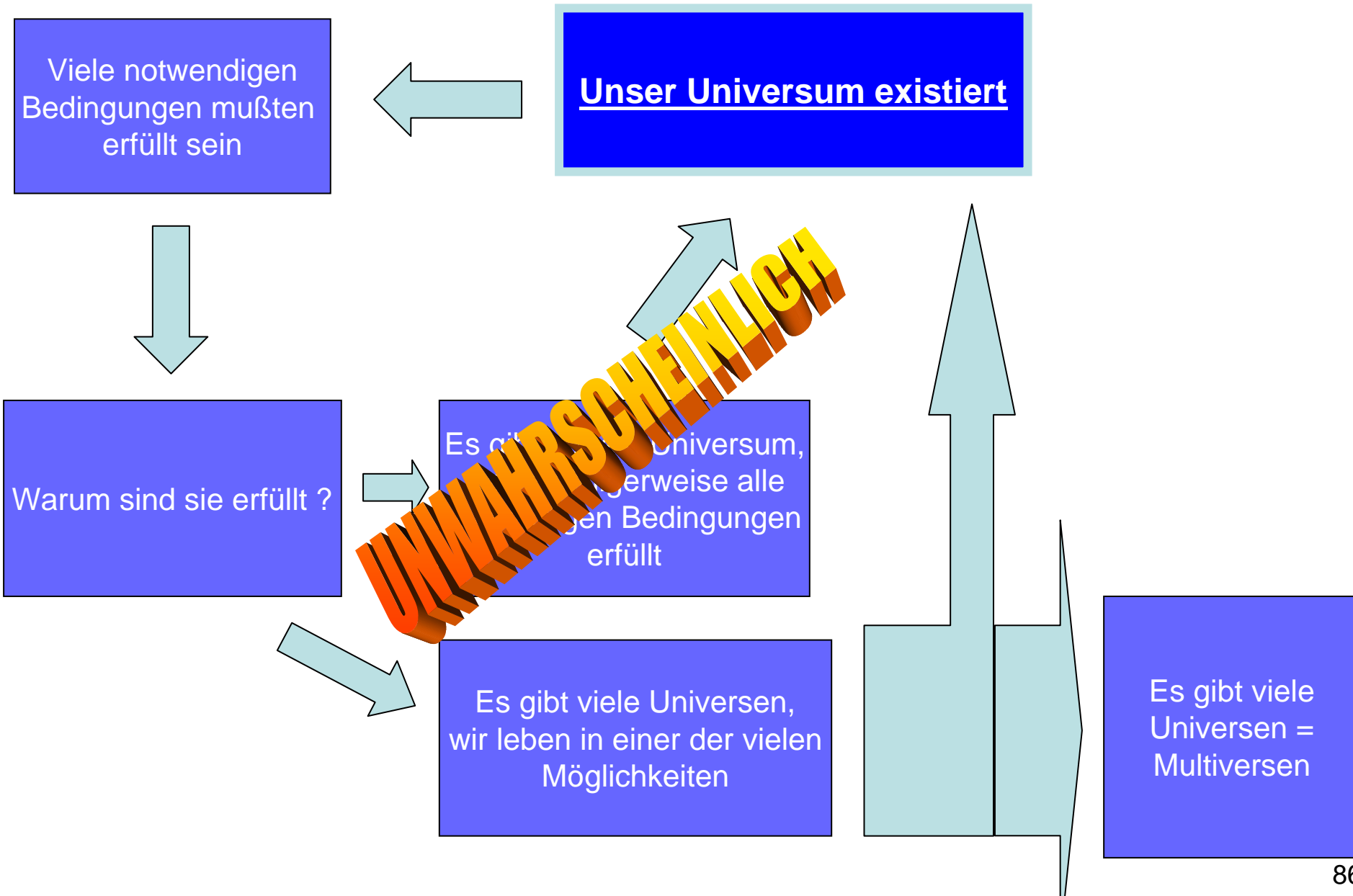
- Max Tegmark:
 - Many lives in many worlds (Nature, 2007)
 - Parallel Universes (2003)
- Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics
- (Nick Bostrom (2002)
 - Investigations into the Doomsday Argument)



Multiversen?

- Multiversen = Die Behauptung, daß es viele andere Universen gibt, möglicherweise mit unterschiedlichen physikalischen Gesetzen und Konstanten.
- Einige Forscher vermuten, daß die unwahrscheinliche und delikate Balance in unserem Universum Beweis für die Multiversen-Theorie ist: Vielleicht variieren einige oder alle der physikalischen Gesetze und Konstanten und unsere Existenz ist ein Auswahleffekt.
- Ist die Physik, die wir zu verstehen versuchen, vielleicht nur EINE mögliche Ausgabe aus einem Zufallsgenerator?
- Unterstützt die Idee des “fine-tunings” Multiversen? (gibt es EIN MultiverSUM ??)

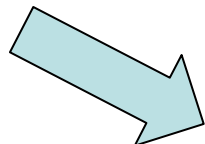
Warum Multiversen ? Teil I



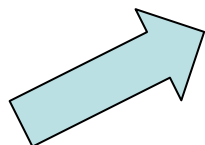
Warum Multiversen ? Teil II

Beobachtungen

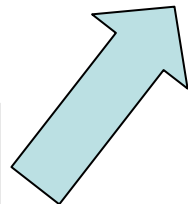
Beobachtung des
Mikrowellen-
Hintergrunds (CMB)
erklärt
Urknall



Hubble-Expansion

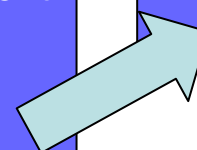


Elementhäufigkeit



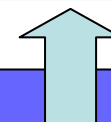
Urknall

Urknall alleine reicht nicht :
Horizontproblem
Monopolproblem
etc....

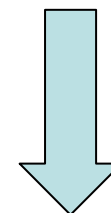


Urknall + Inflation

Theorie



Unser Universum existiert
und
muß entstanden sein



Inflation erzeugt
Multiversen

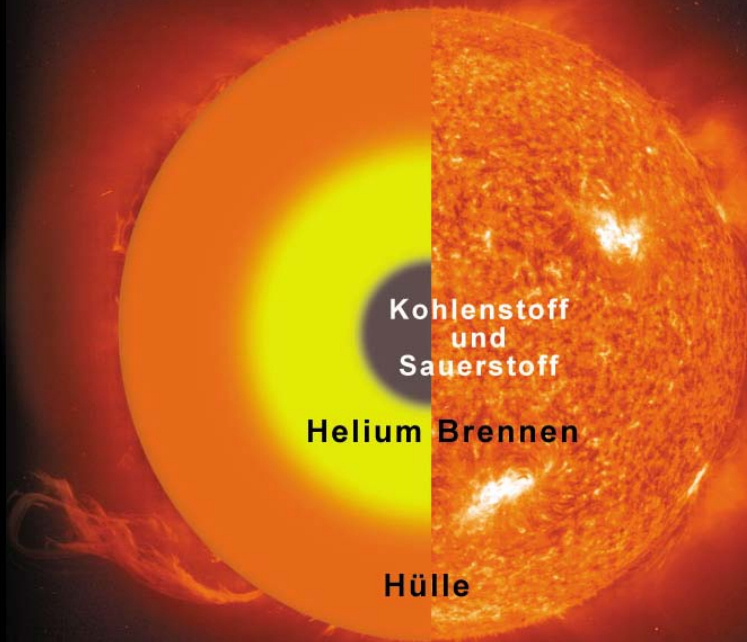


Multiversen

Ist unser Universum einzigartig ??
(und können wir die Frage beantworten ??)

- Warum ist unser Universum abgestimmt für Leben?
 - Was sind die möglichen Erklärungen?
- Es existieren mehrere Hinweise, dass unser Universum genau die Eigenschaften hat, dass auch Leben im Universum möglich ist.
 - Die Werte von physikalischen Parametern (z.B. Massen von Elementarteilchen oder Stärken von fundamentalen Kräften) in unserem Universum haben nämlich genau solche Werte, dass auch Leben existieren kann.
 - Diese Hinweise werden je nach Betrachtungsart als „Feinabstimmung“ (Physik), „anthropisches Prinzip“ (Philosophie), oder als „Intelligent Design“ (Theologie) bezeichnet.

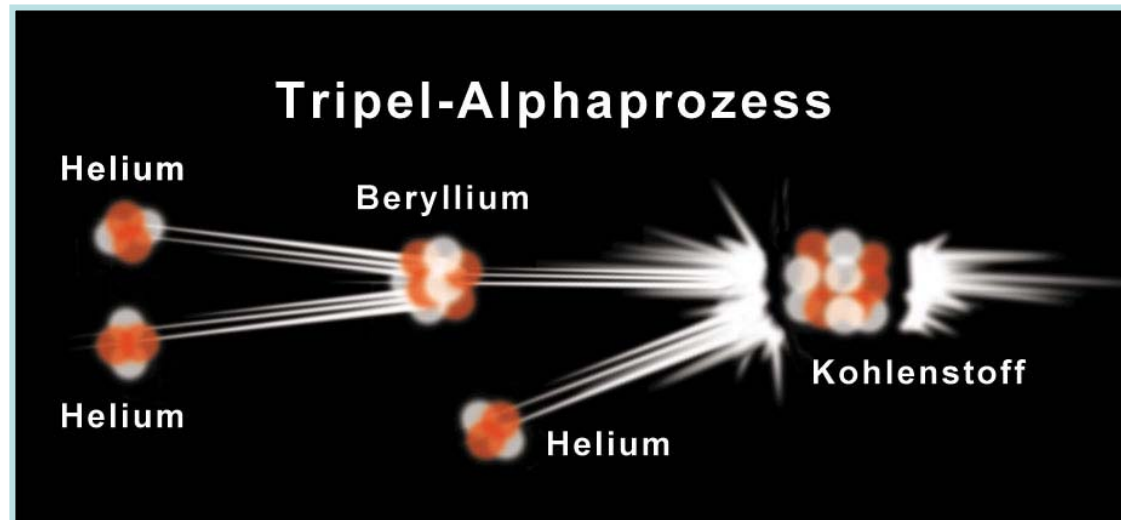
Roter Riesenstern



- Chemische Elemente werden in Sternen erzeugt
- Kohlen- und Sauerstoff entstehen in Roten Riesen
- **Kohlenstoff** bildet die komplexen Moleküle des Lebens
- **Sauerstoff** ist notwendig für Wasser (H_2O)

Der Tripel-Alpha Prozess

- Zwei Alpha-Teilchen (Heliumkerne) fusionieren zunächst zu Beryllium
- Einfang eines weiteren Alpha-Teilchens (Heliumkerns) führt zu Kohlenstoff



- Der Berylliumkern ist instabil und zerfällt nach 0.000 000 000 000 001 Sekunden wieder in zwei Alphateilchen
- In dieser kurzen Zeit muss ein drittes Alphateilchen eingefangen werden
- Die Entstehung einer nennenswerten Menge von Kohlenstoff ist nur durch das Vorhandensein einer **Resonanz im Kohlenstoffkern** möglich



Sir Fred Hoyle:
1915-2001

- Voraussage des englischen Astrophysiker Sir Fred Hoyle: Es muss eine Resonanz im Kohlenstoffkern existieren, da sonst nicht genug Kohlenstoff für das Leben in Roten Riesen erzeugt werden kann
- Diese Resonanz wurde im Labor tatsächlich nachgewiesen
- Einziger Fall, in dem ausgehend von unserer eigenen Existenz, der Ausgang eines Labor-Experiments richtig vorhergesagt wurde

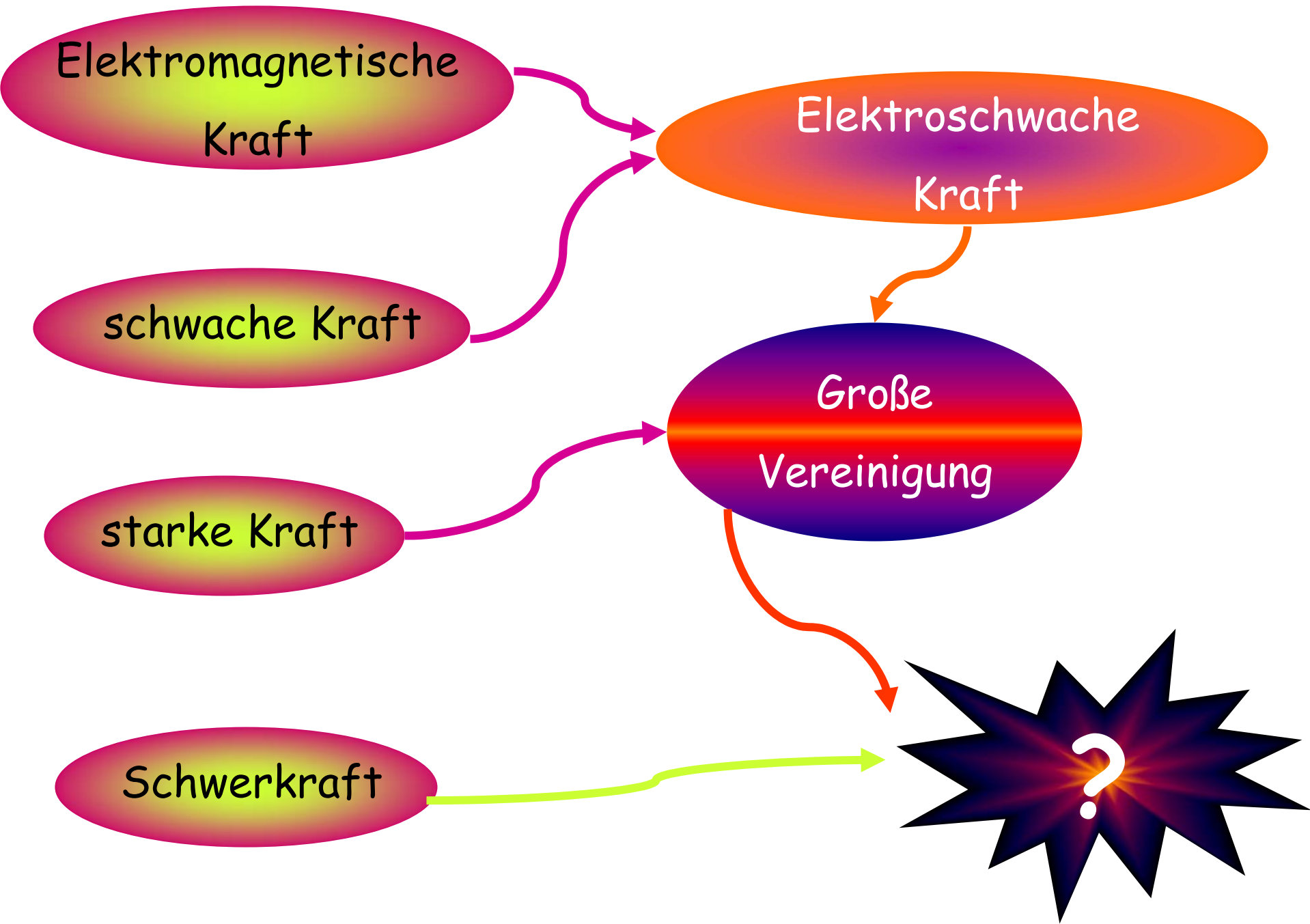
- Der Tripel-Alpha Prozess hängt von den fundamentalen Kräften im Universum ab
- Frage: Wie sehr kann man die Kernkräfte verändern, sodass immer noch der selbe für das Leben unbedingt notwendige Kohlen- und Sauerstoff gebildet wird?
- Ergebnis:
Eine Abweichung von nur einem **halben Prozent** für die Stärke der Kernkraft würde dazu führen, dass im Universum diese Elemente in Sternen nicht mehr erzeugt würden!

- Die Menge von Materie und Antimaterie kurz nach dem Urknall war **fast gleich**.
- Überschuss beim Urknall von nur **1 Milliardstel** an Materie gegenüber Antimaterie.
- Materie und Antimaterie zerstrahlen bereits kurz nach dem Urknall. Nur der **kleine Überschuss** an Materie bildete Sterne, Planeten und führte zu Leben im Universum.

Aber auch mit nur minimal mehr oder weniger Materie würde kein Leben möglich sein:

- **Mehr Materie:** Stärkere Gravitation - das Universum fällt nach kurzer Zeit wieder zusammen. Zeit für die Entstehung von Leben wäre zu kurz.
- **Weniger Materie:** Die Expansion wäre zu schnell – es könnten sich keine Sterne bilden.

- Jede Theorie unserer Welt, welche die Eigenschaften und Strukturen des Universum wie zum Beispiel das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt, enthält grundlegende Parameter.
- Eine endgültige „Theorie für Alles“ sollte auch die Werte der grundlegenden Parameter erklären.
- Der winzige Bereich der erlaubten Werte für die Existenz von Leben im Universum stellt eine große Herausforderung für das mathematisches „Design“ jeder Theorie dar.



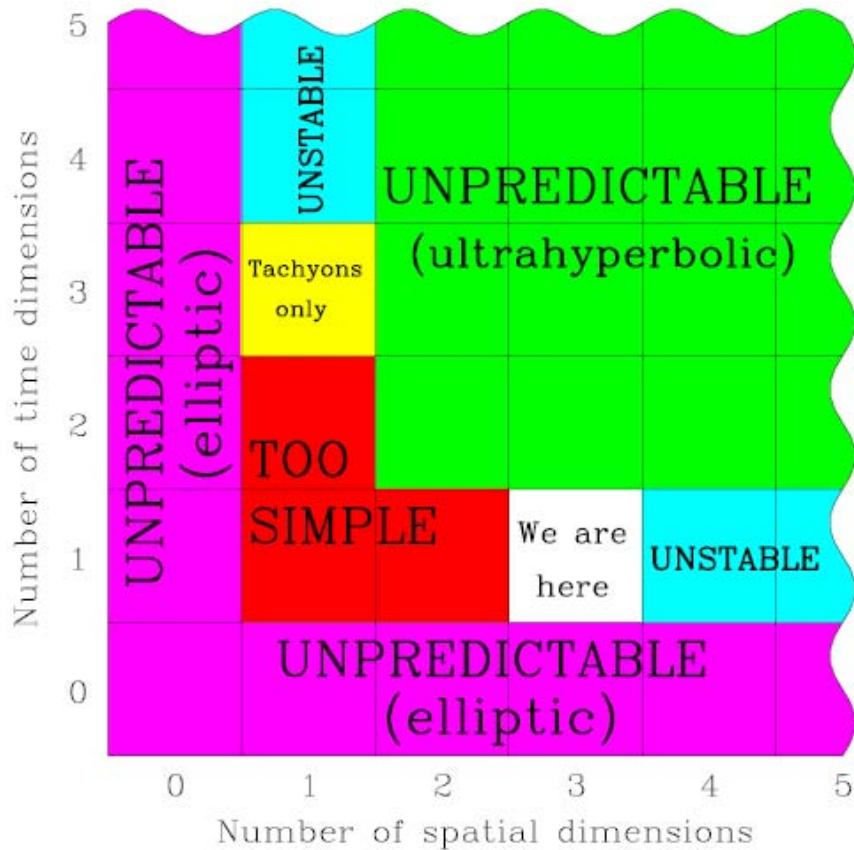


FIG. 3. Why we should not be surprised to find ourselves living in 3+1-dimensional spacetime. When the partial differential equations of nature are elliptic or ultrahyperbolic, physics has no predictive power for an observer. In the remaining (hyperbolic) cases, $n > 3$ admits no stable atoms and $n < 3$ may lack sufficient complexity for observers (no gravitational attraction, topological problems). From Tegmark (1997).

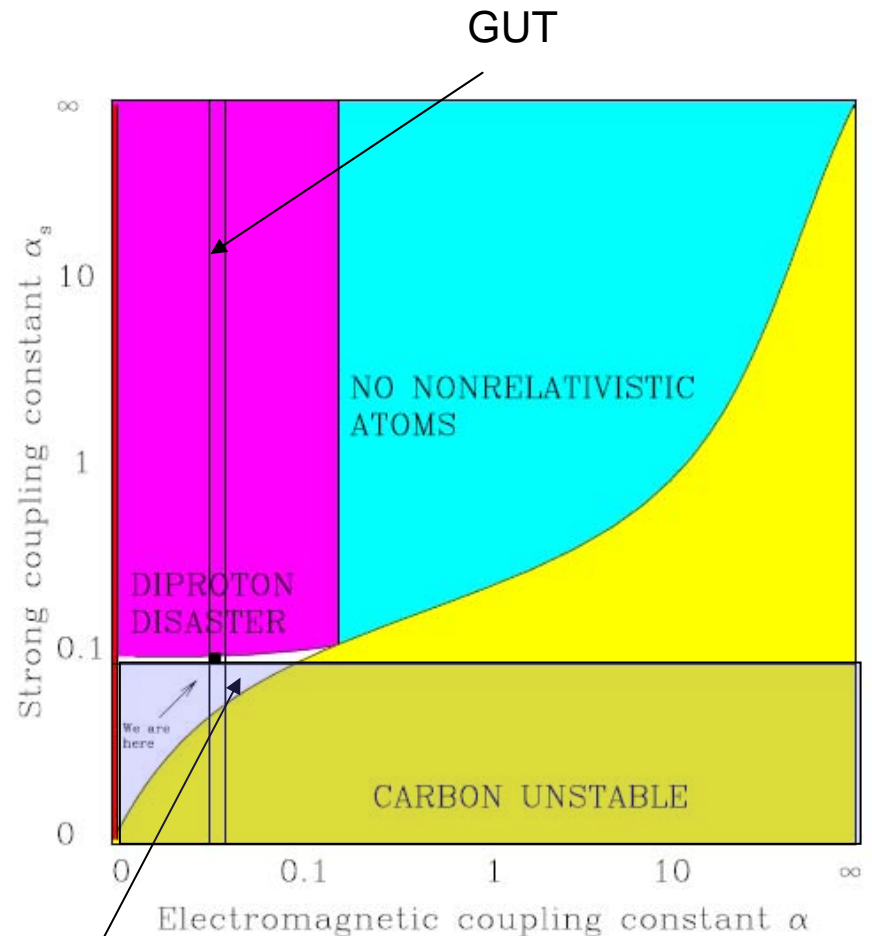


FIG. 4. Hints of fine-tuning for the parameters α and α_s , which determine the strengths of the electromagnetic force and the strong nuclear force, respectively (from Tegmark 1997). The observed values $(\alpha, \alpha_s) \approx (1/137, 0.1)$ are indicated with a filled square. Grand unified theories rule out everything except the narrow strip between the two vertical lines, and deuterium becomes unstable below the horizontal line. In the narrow shaded region to the very left, electromagnetism is weaker than gravity and therefore irrelevant.

Deuterium nicht stabil

1. Hypothese des Zufalls:

„Das Universum ist eben so und braucht keine weitere Erklärung.“

2. Hypothese des logischen Notwendigkeit:

„Es muss ja so gewesen ein, sonst würden wir nicht existieren.“

3. Hypothese der Maßarbeit:

„Es existiert eine endgültige fundamentale Theorie, welche die Feinabstimmung erklären kann. Wir kennen diese heute nur noch nicht.“

4. Multiversum-Theorie:

„Es gibt unendlich viele unterschiedliche Universen. Wir leben in einem Universum, das lebensfreundlich ist, während viele andere Universen steril sind.“

5. „Intelligent Design“:

„Es gibt einen Schöpfer.“



Verschiedene alternative Multiversen

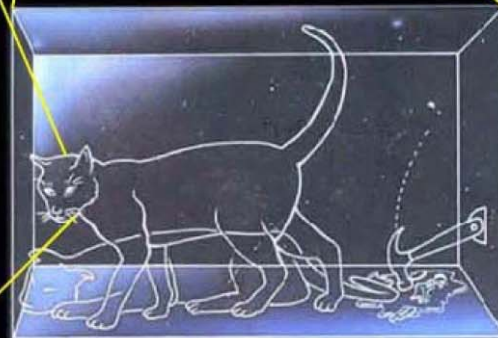
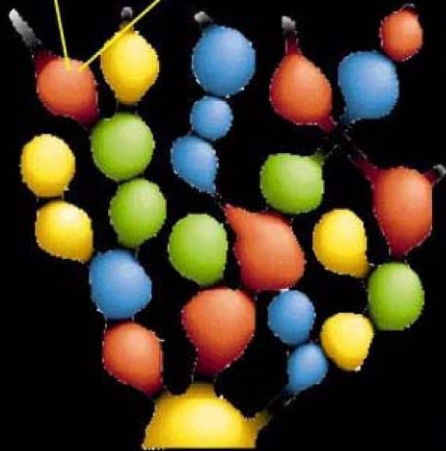
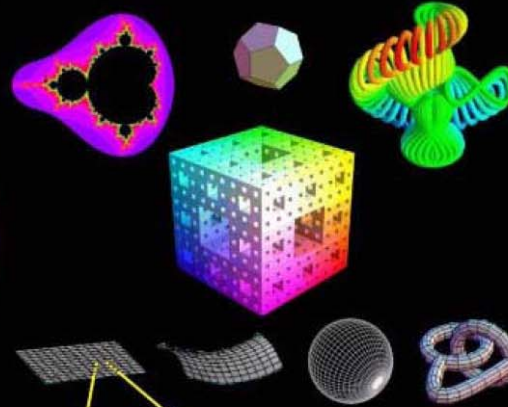
Multiversen

Level 1: Regions beyond our cosmic horizon

- Features:** Same laws of physics, different initial conditions
Assumptions: Infinite space, ergodic matter distribution
Evidence:
- Microwave background measurements point to flat, infinite space, large-scale smoothness
 - Simplest model

Level 4: Other mathematical structures

- Features:** Different fundamental equations of physics
Assumption: Mathematical existence = physical existence
Evidence:
- Unreasonable effectiveness of math in physics
 - Answers Wheeler/Hawking question: "why these equations, not others"



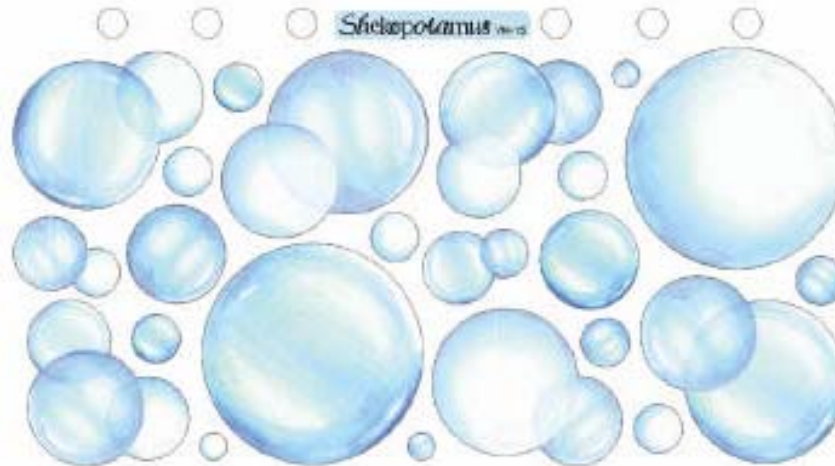
Level 2: Other post-inflation bubbles

- Features:** Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality
Assumption: Chaotic inflation occurred
Evidence:
- Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem and monopole problems and can naturally explain such bubbles
 - Explains fine-tuned parameters

Level 3: The Many Worlds of Quantum Physics

- Features:** Same as level 2
Assumption: Physics unitary
Evidence:
- Experimental support for unitary physics
 - AdS/CFT correspondence suggests that even quantum gravity is unitary
 - Decoherence experimentally verified
 - Mathematically simplest model

Die Entstehung des Multiversums



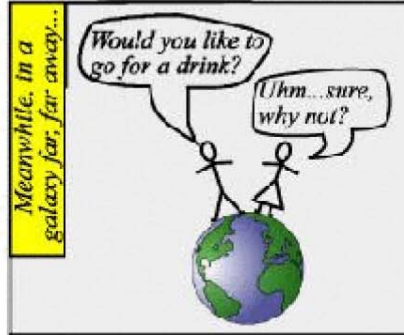
Die Entstehung des Multiversums durch die ewige Inflation. Unser Bereich des Universums entspricht einer einzigen Blase. Im Modell der chaotischen, selbstreproduzierenden ewigen Inflation von Andrei Linde entstehen gleich nach dem Urknall nicht nur verschiedene Universen, sondern solche Bereiche können auch in alle Ewigkeit immer wieder neu gebildet werden können (Multiversen).

In den inflationären Bereiche zwischen den Universen (Blasen) entstehen immer neue Universen (wie immer neue Luftblasen in einem sich ewig ausdehnenden Guglhupf entstehen können).

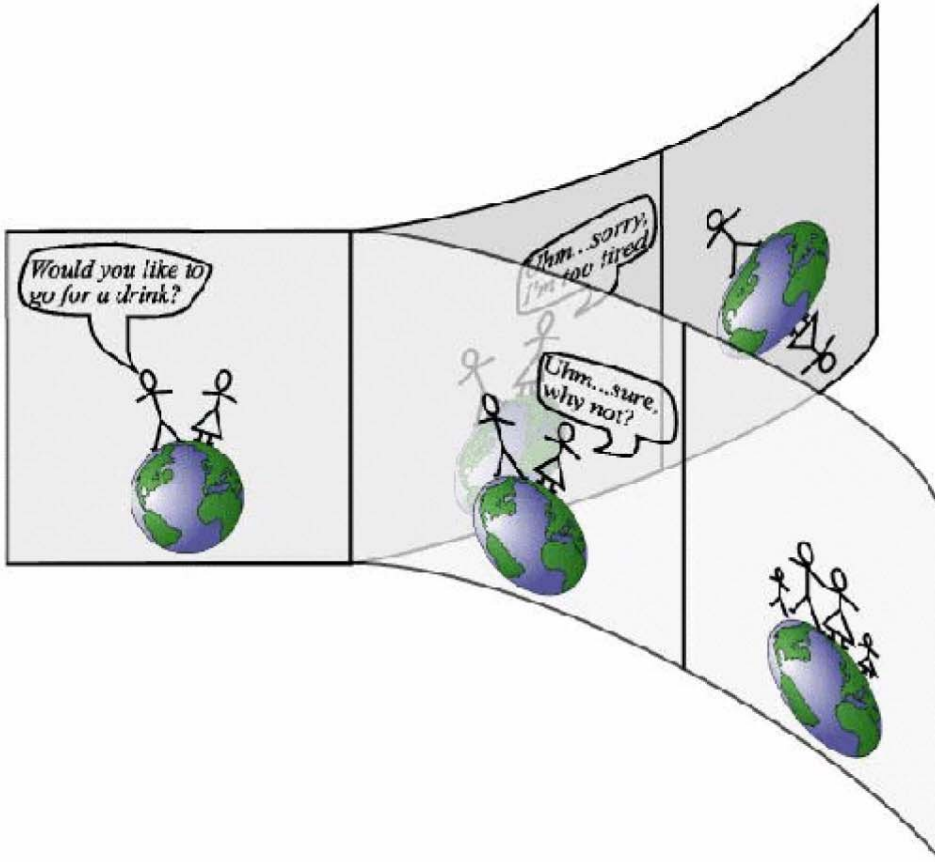
Diese neuen Universen können sich auch in verschiedenen Parametern unterscheiden. In diesem Modell bietet unser Universum also offensichtlich die Voraussetzung für Leben, während die meisten anderen Universen mit nur geringfügig veränderten Parameterwerten, höchstwahrscheinlich steril in Bezug auf alles Leben sind.


Level I und III - Unterschiede

LEVEL 1



LEVEL 3

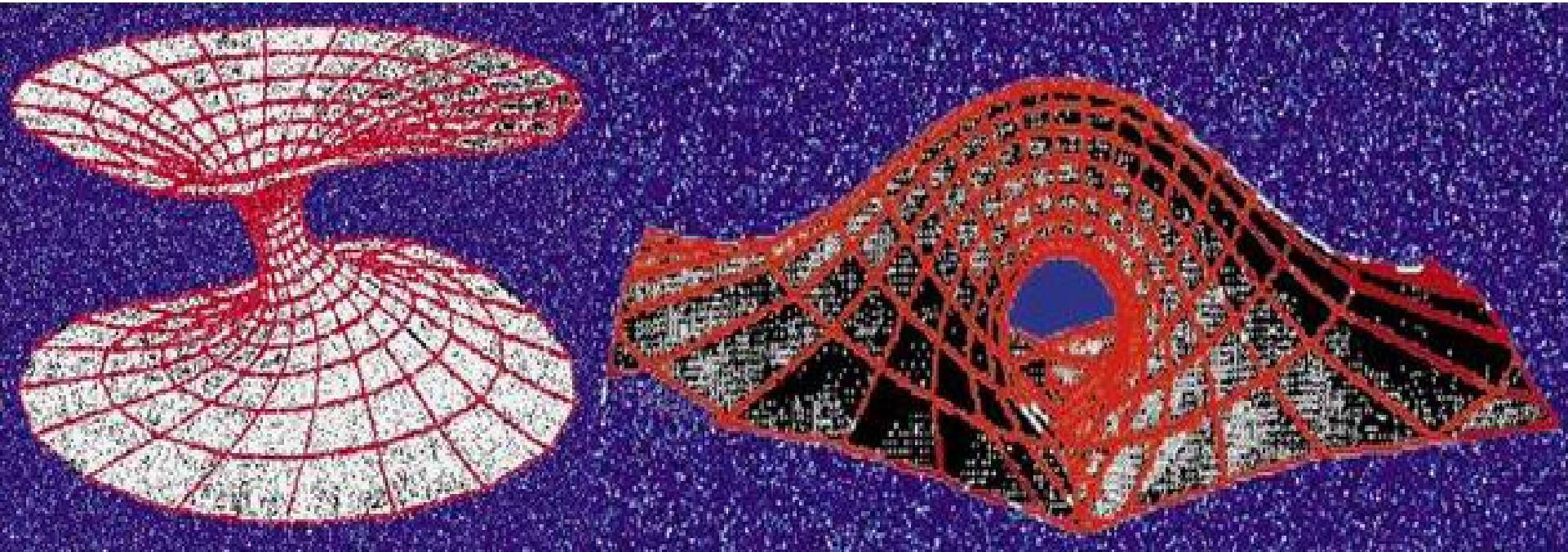




Verschiedene alternative
Multiversen:
Wurmlöcher



**Standard model, phantom matter, wormholes and the Multiverse.
I. Novikov, N. Kardashev, A. Shatskiy**



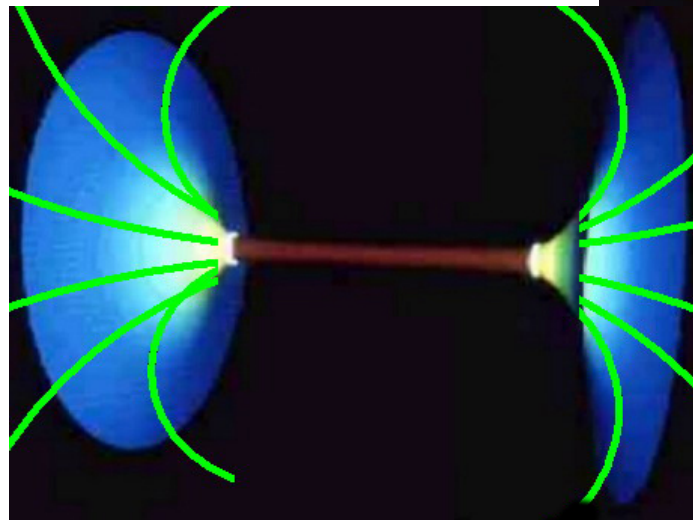
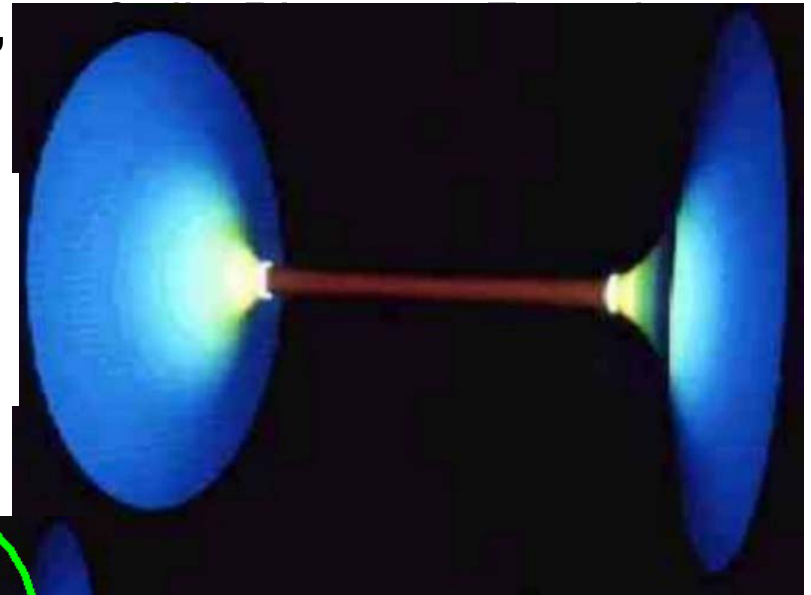
Wurmlöcher

- Wurmlöcher im Universum – kann einige Beobachtungsergebnisse erklären und sagt neue Effekte voraus
- Wurmlöcher könnten Relikte der Inflationsphase sein
- Damit Wurmlöcher existieren können, existieren

$$w_{\parallel} = p_{\parallel} / \varepsilon < -1$$

Radialer Druck

Energiedichte



Magnetische Wurmlöcher



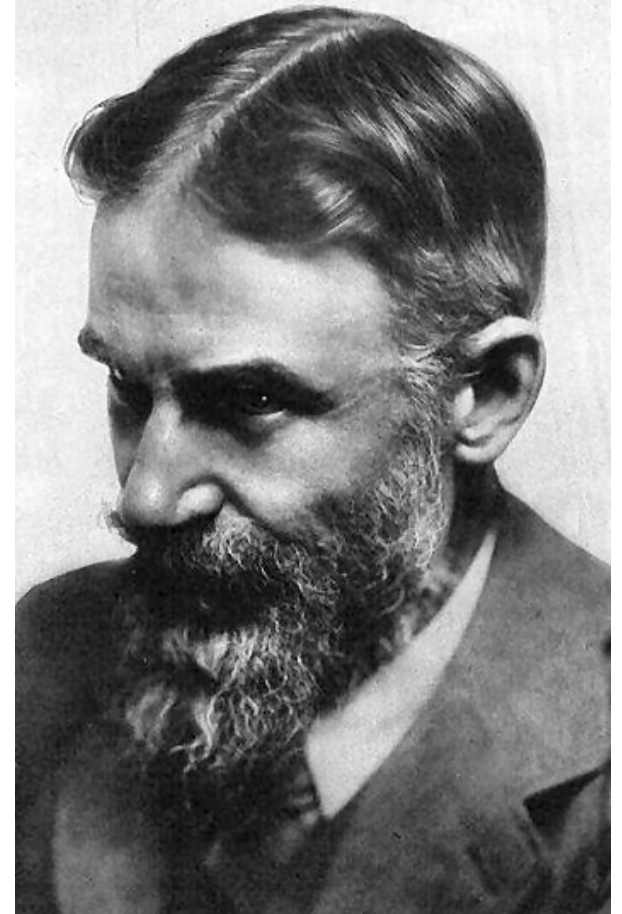
The future

Prediction is very difficult, especially if it's about the future.

Niels Bohr

Science is always wrong. It never solves
a problem without creating ten more.

George Bernard Shaw



WS 08/09: Programm

- 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: Multiversen & Wurmlöcher**
- 23.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen

