

Dunkle Materie (und Dunkle Energie)

- Inventur des Universums
- das expandierende Universum
- Evidenz für die Existenz Dunkler Materie:
 - Rotationskurven von Spiralgalaxien
 - Beiträge zur kosmischen Materie-/Energie- Dichte
 - Galaxiencluster
- Kosmologische Randbedingungen
- DM: Teilchen/Kandidaten und Suche
- Beispiel: das CRESST Experiment

Inventur des Universums:

Alter: 13.798 \pm 0.037 Milliarden Jahre

Anteil Materie: 31.7% \pm 0.4% (gesamt)
4.9% \pm 0.1% (baryonische Materie)
0.5% \pm 0.1% (leuchtende Materie)



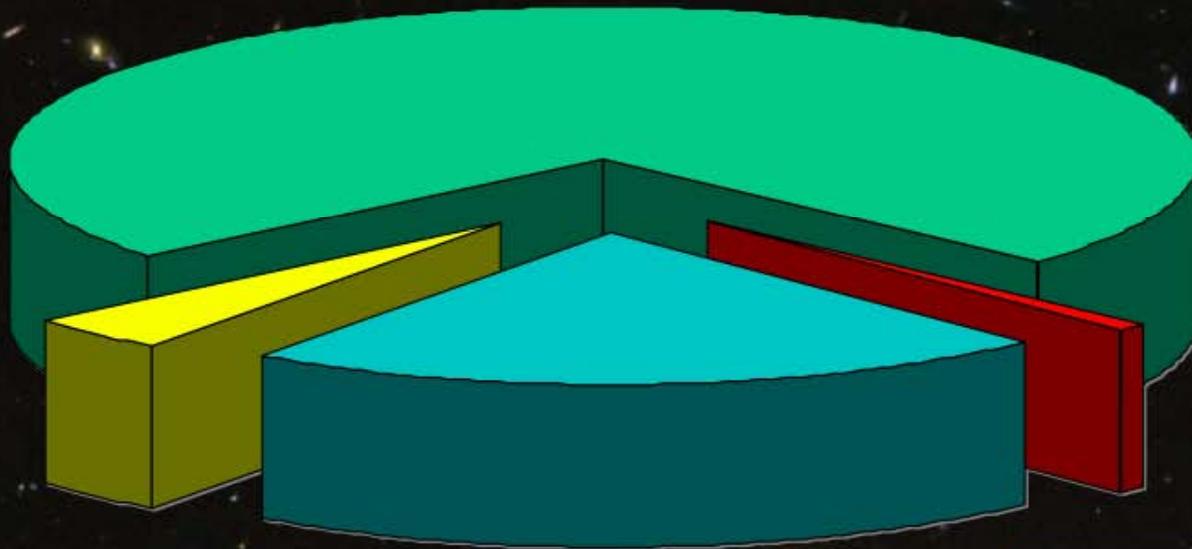
Dunkle Materie: 26.8% \pm 0.4% (unbekannt; nichtbaryonisch!)

Dunkle Energie: 68.3% \pm 1% (unbekannt!)

Kandidaten für Dunkle Materie: - HDM: massive Neutrinos
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs

Inventur des Universums:

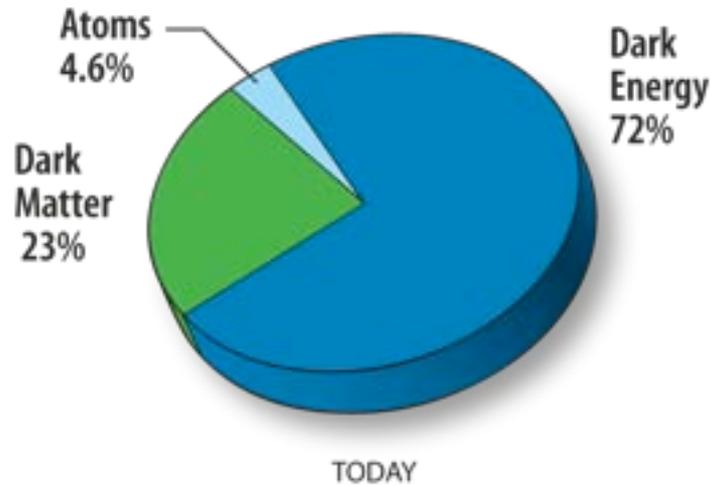
Dark Energy 73%
(Cosmological Constant)



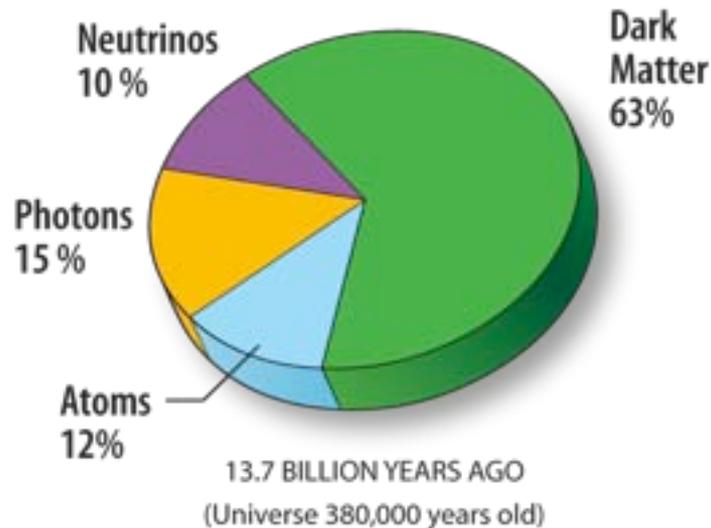
Ordinary Matter 4%
(of this only about 10% luminous)

Dark Matter 23%

Neutrinos 0.1–2%



today
 $t \sim 13.7 \cdot 10^9 \text{ y}$



$t \sim 380.000 \text{ y}$



if it's not
dark
it doesn't
matter

Das expandierende Universum

Hubble's Gesetz:

$$v_{\text{expansion}} = H_0 \cdot \text{distance}$$

Hubble Konstante:

$$H_0 = h \cdot 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

gemessener Wert:

$$h = 0.683 \pm 0.010$$

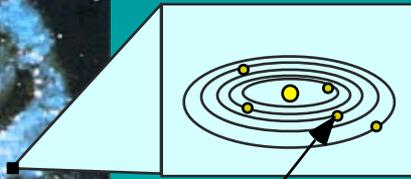
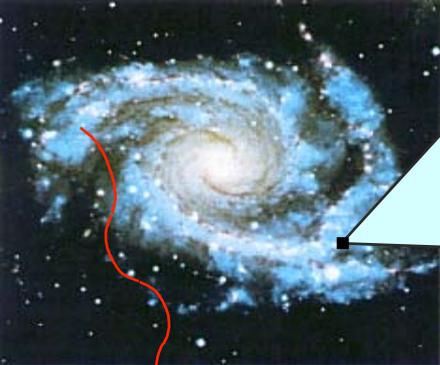
kosmische Entfernungen:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mpc} &= 3.26 \cdot 10^6 \text{ yr} \\ &= 3.08 \cdot 10^{22} \text{ m} \end{aligned}$$

Expansionsalter d. Universums:

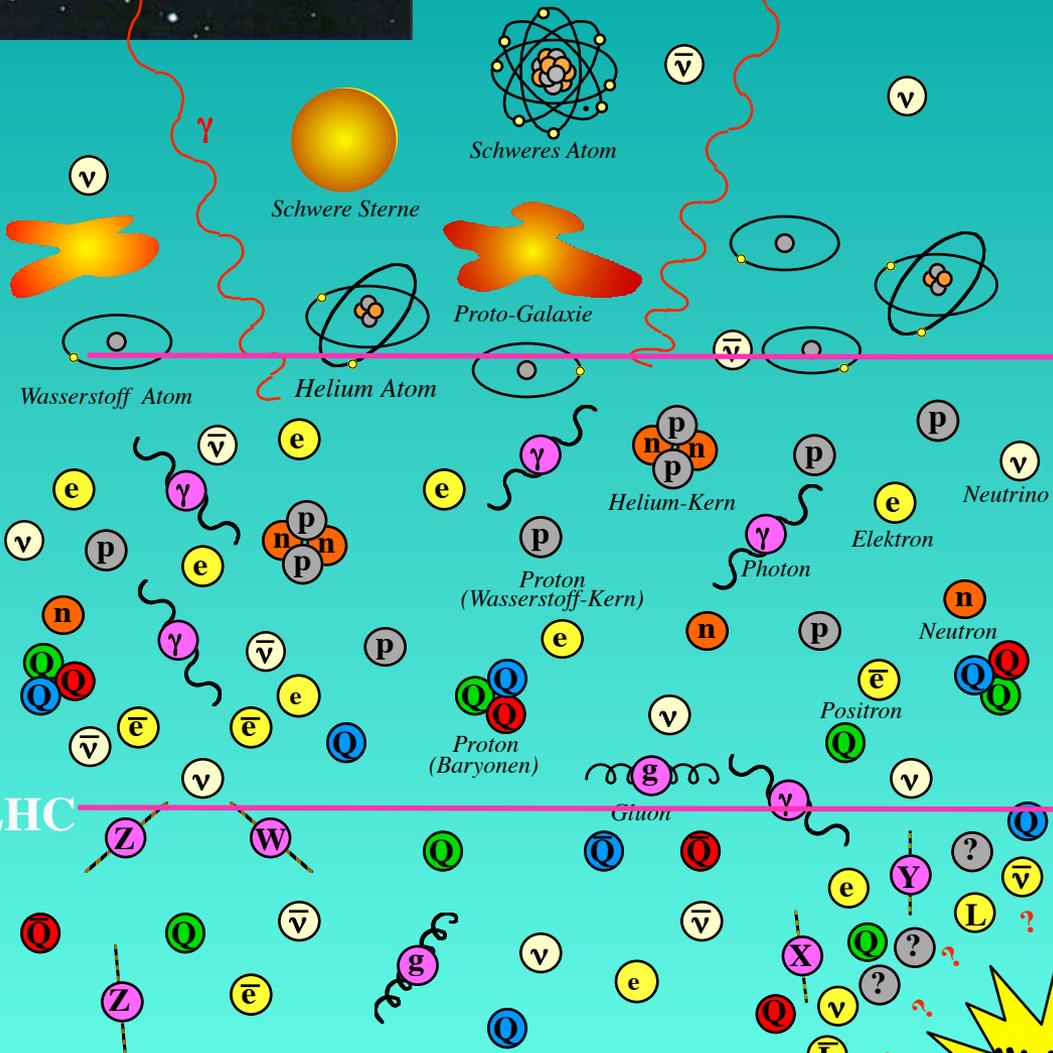
$$t_0 \sim H_0^{-1} = h^{-1} 9.78 \cdot 10^9 \text{ yr}$$

Das expandierende Universum



Wir sind hier

Zeit



GEGENWART

Temperatur	Alter
2.7 K	13.7 Milliarden Jahre

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien

11 K	1 Milliarde Jahre
------	-------------------

UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen.
Entkopplung von Strahlung und Materie.

1,000 K	300 000 Jahre
---------	---------------

Nukleosynthese von Helium

Positronen verschwinden

10^{10} K	1 sec.
-------------	--------

Formation von Protonen und Neutronen

Antiquarks verschwinden

10^{15} K	10^{-10} sec
-------------	----------------

Asymmetry Q-Q, L-L

Inflation

10^{16} K	10^{-15} sec
10^{27} K	10^{-34} sec

GROSSE VEREINHEITLICHUNG

QUANTEN-GRAVITATION

10^{31} K	10^{-43} sec
-------------	----------------

Astronomie

Teilchenbeschleuniger

LHC



Das expandierende Universum

Beiträge zur kosmischen Materie- und Energiedichte

Beitrag ρ einer Materiekomponente zur Gesamtdichte des Universums:

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

kritische Dichte

$$\begin{aligned}\rho_{\text{crit}} &= 3H_0^2 / (8\pi G_N) \\ &= h^2 1.88 \times 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}\end{aligned}$$

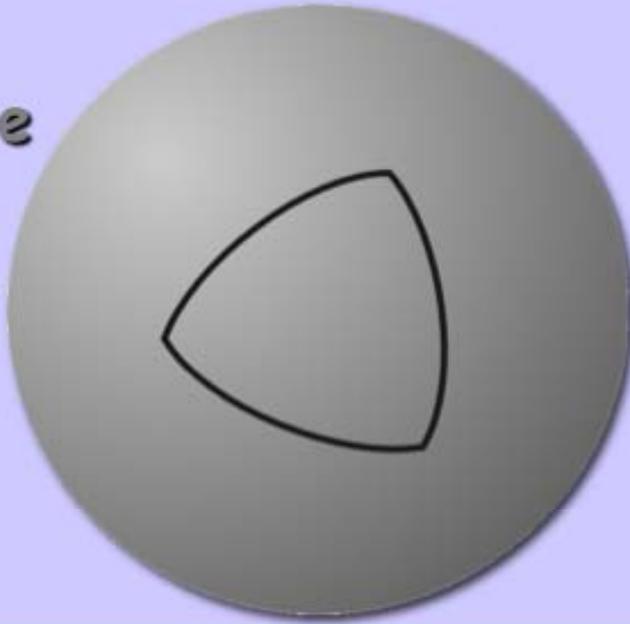
- $\Omega = 1$: euklidische Raumgeometrie („flat universe“)
- $\Omega < 1$: negative Raumkrümmung („open universe“)
- $\Omega > 1$: positive Raumkrümmung („closed universe“)

Global Cosmic Geometry

positive
curvature

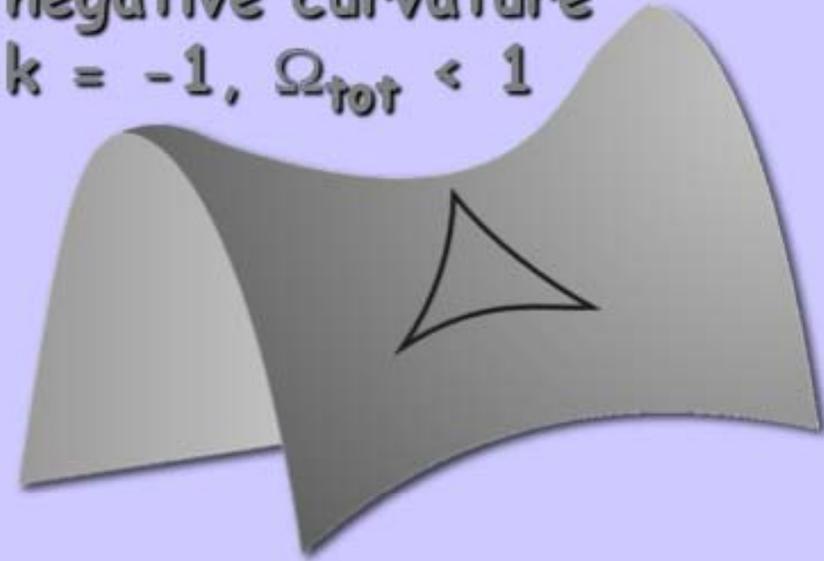
$$k = +1$$

$$\Omega_{\text{tot}} > 1$$



negative curvature

$$k = -1, \Omega_{\text{tot}} < 1$$



Euclidean
(flat)

$$k = 0$$

$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



Favored by

➔ **Inflationary cosmological models**

➔ **Recent cosmic microwave background measurements**

Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Kosmologische Argumente

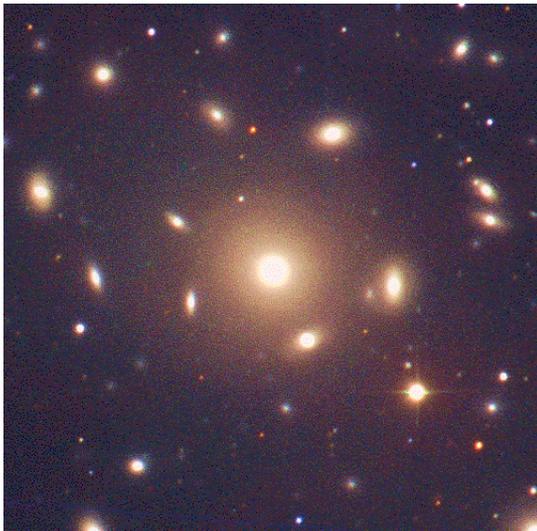
$\Omega_{\text{tot}} = 1$ da in einem
expandierenden Universum
 Ω_{tot} sich schnell von 1
wegbewegt, zu 0 oder unendlich.

Wenn heutzutage $\Omega_{\text{tot}} \sim 1$,
dann ist $\Omega_{\text{tot}} = 1$ als
exakte Lösung wahrscheinlich.

Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Zwicky 1933: Dunkle Materie in Galaxie Clustern

Ein gravitativ gebundenes System vieler Teilchen im Gleichgewicht gehorcht dem Virial Theorem.



Coma Galaxien Cluster

$$\text{Virial Theorem: } 2\langle E_{kin} \rangle = -\langle E_{grav} \rangle$$

$$E_{kin} = mv^2 / 2, \quad E_{grav} = G_N M_r m / r$$

$$\Rightarrow \langle v^2 \rangle \approx G_N M \langle r^{-1} \rangle$$

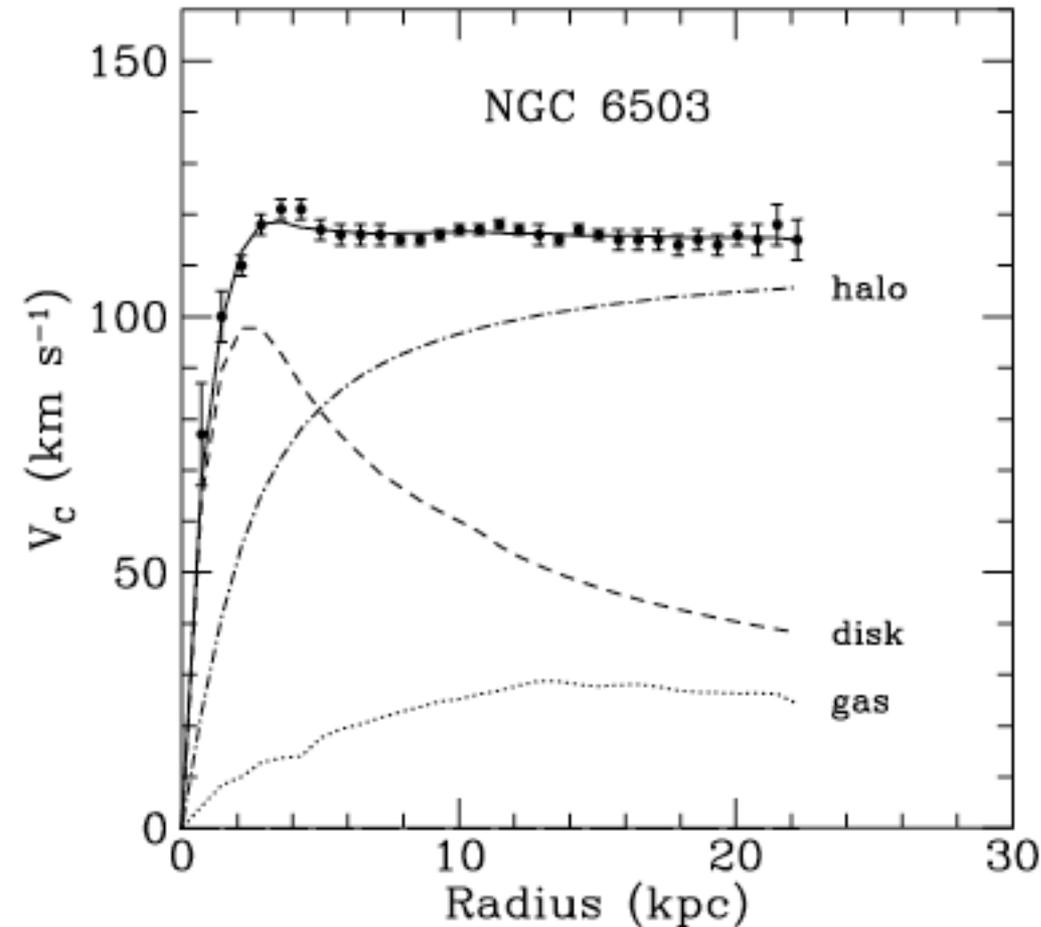
Messung der Geschwindigkeitsdispersion und der geom. Größe:
ergibt Abschätzung von M (totale Masse)

Ergebnis: $M \sim 400 \cdot$ sichtbare Masse!

(lange Zeit nicht geglaubt!)

Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Rotationskurven von Spiralgalaxien

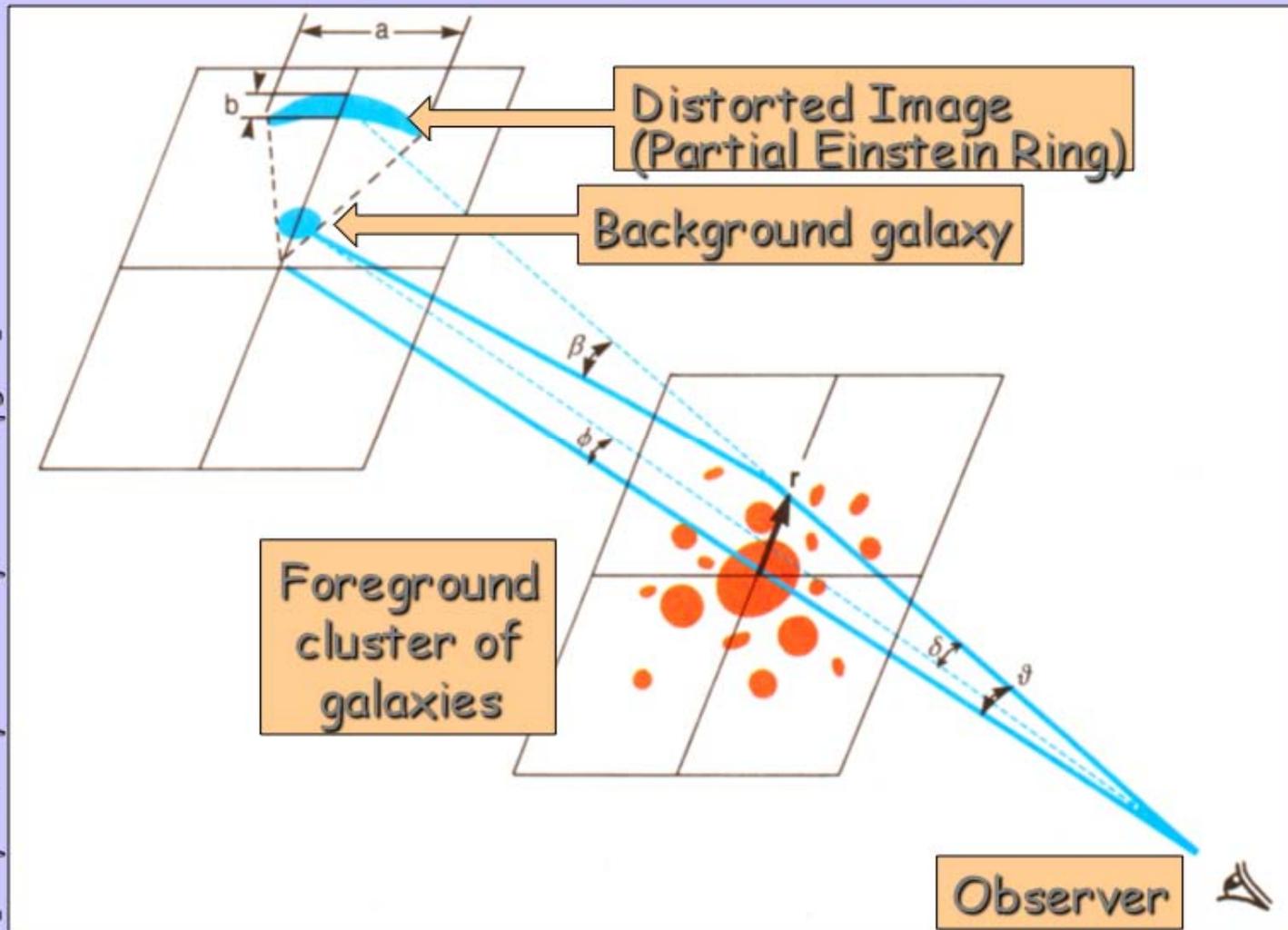


- Erwartung außerhalb des galakt. Zentrums (Kepler): $v_{\text{rot}} = \sqrt{G_N M / r}$
- Messungen: 21 cm Emissionslinie des neutralen Wasserstoff (bis zu weit höheren Radien möglich als mit (Stern-)Objekten)
- Befund: konstanter Verlauf bis zu den größten messbaren Abständen
—> „sphärischer Halo“ Dunkler Materie (nicht nur in disk !)
- in unserer Milchstrasse:
 v_{rot} (plateau) $\sim 220 \text{ km s}^{-1}$;
Halo mit $\sim 300 \text{ MeV cm}^{-3}$
(ca. 1 H-Atom pro 3 cm^3 !)

Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Galaxiencluster, gravitational lensing

Giant Arcs - Gravitationally Lensed Background Galaxies

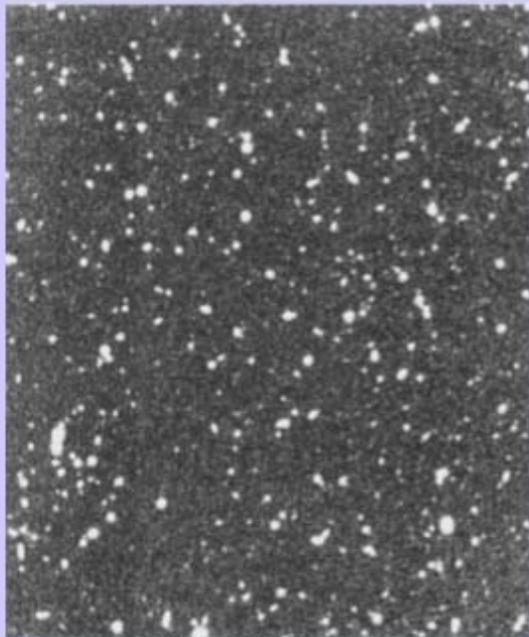


Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

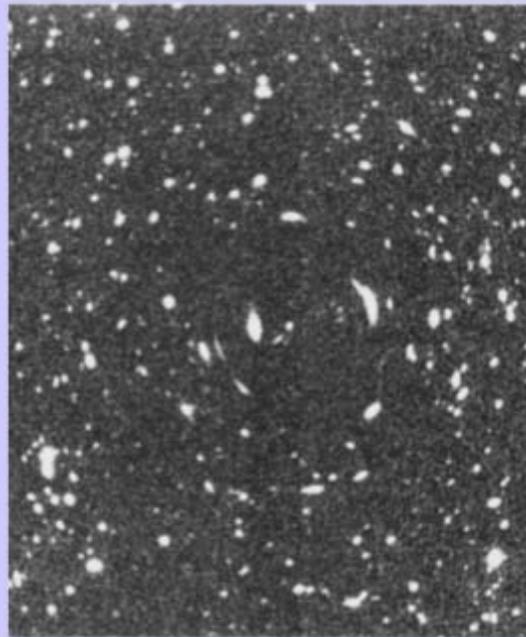
Galaxiencluster, gravitational lensing

Weak Lensing Effect - Computer Simulation

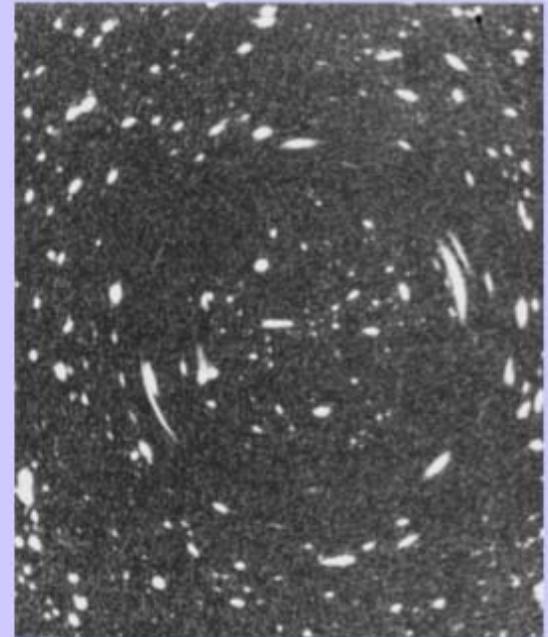
[A.Tyson, Physics Today, 1992:6, pg.24]



Field of distant background galaxies ...



... seen through a spherical, transparent mass distribution, representing a foreground galaxy cluster.



Same with twice the cluster mass.

Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Galaxiencluster, gravitational lensing



... bestätigt das grosse Masse/Licht Verhältnis,
das aus der Zwicky-Methode resultiert!

Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

Kosmologische Randbedingungen

Könnte die Dunkle Materie aus normaler hadronischer, nichtleuchtender Materie bestehen, z.B. Neutronensterne, kalte molekulare Wasserstoffwolken?

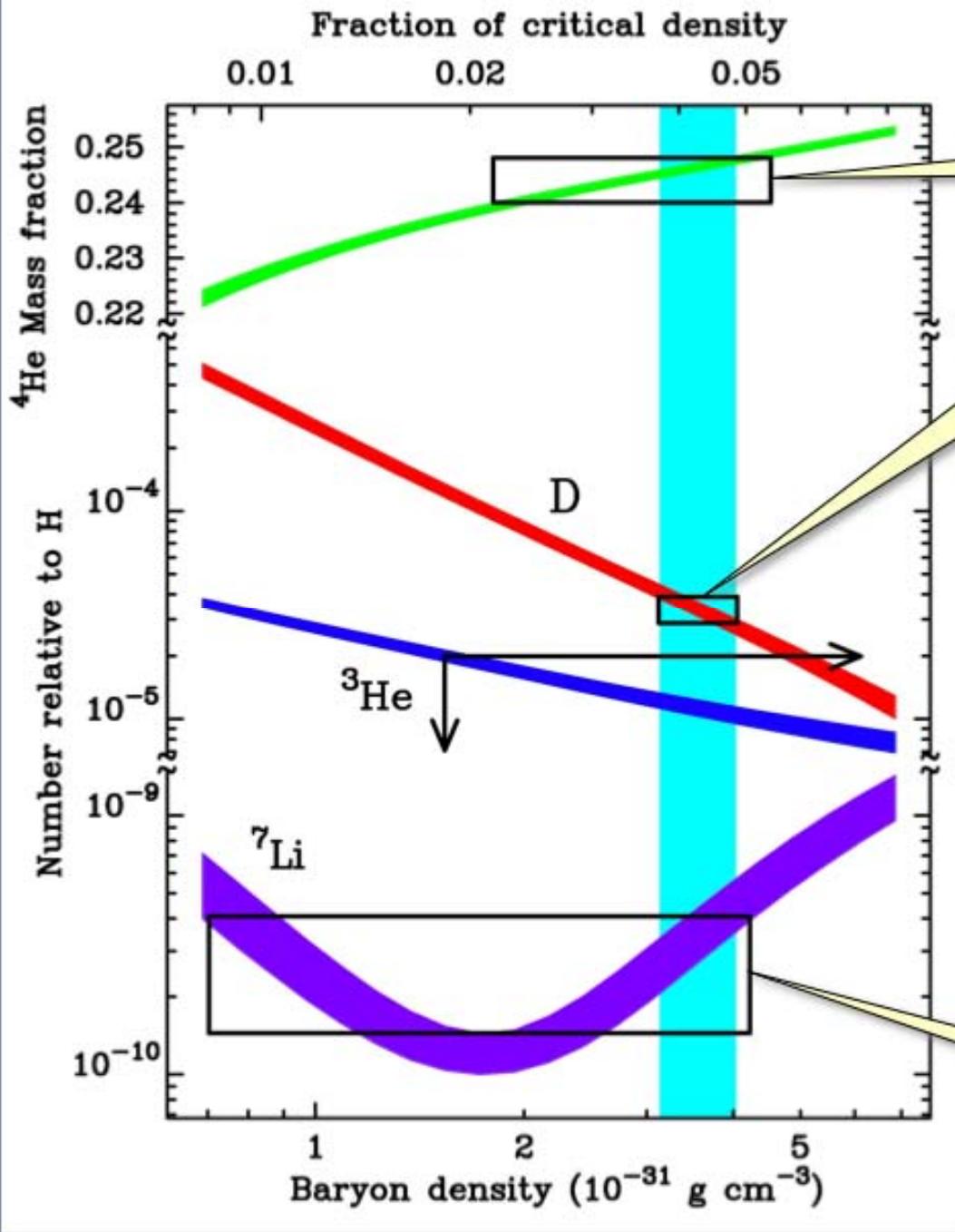
Nein!

Begründung: Baryon-Dichte im Universum ist eingeschränkt aus der sog. „Big Bang Nucleosynthesis:“

ca. 3 Minuten nach dem Big Bang wurde aus den Protonen und Neutronen Helium (22%-25% der Masse), sowie Spuren von D, He³ und Li⁷ erzeugt.

deren relative Anteile hängen nur von der kosmischen Baryon-Dichte ab!

BBN Concordance



Helium 4

Deuterium

Cosmic baryon density implied by deuterium abundance:

$$\Omega_B h^2 = 0.019 \pm 0.0024$$

Lithium

[astro-ph/9903300]

Kosmologische Randbedingungen

Strukturformation

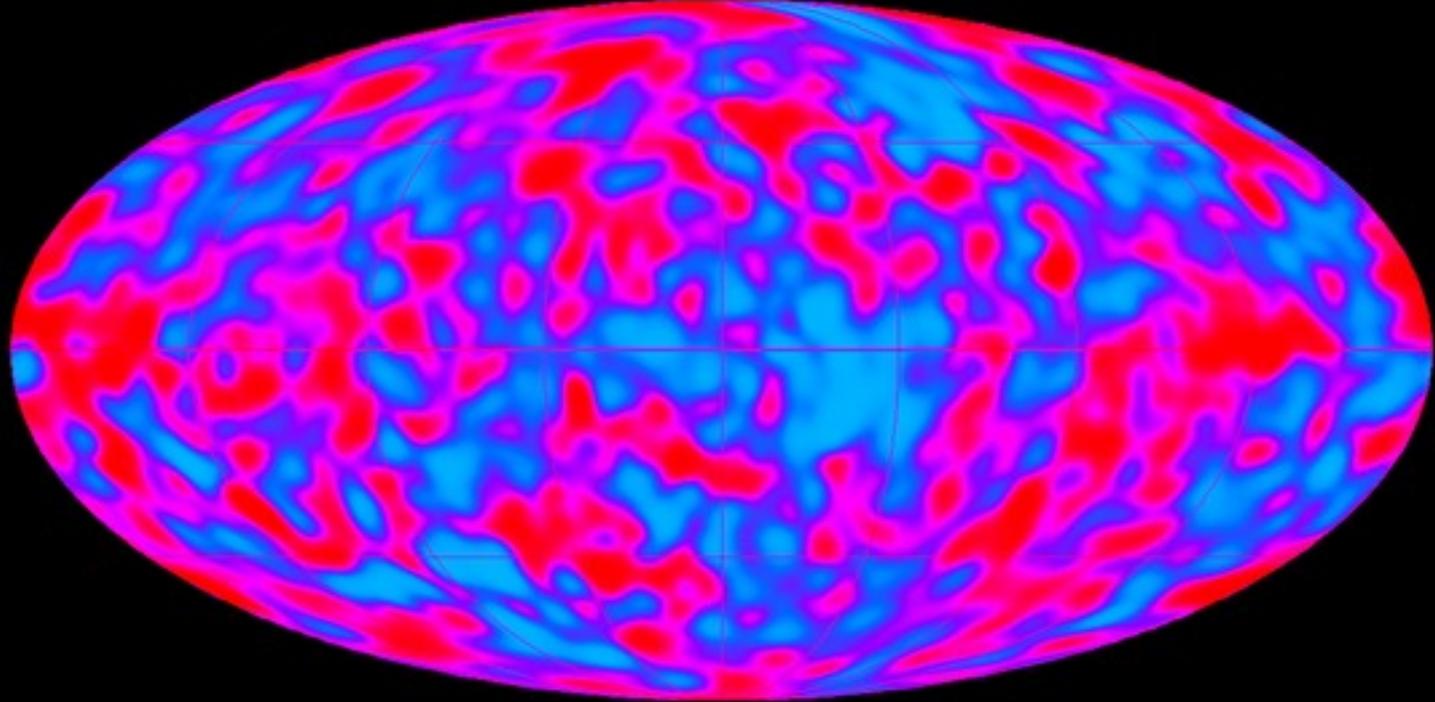
Standard Theorie der kosmischen Struktur Entwicklung:

- zu einem frühen Zeitpunkt war das Universum fast vollständig homogen...
- bis auf winzige Dichtemodulationen, die dann zur Bildung von Massenansammlungen (Gravitation) und Galaxien führte.
- Modulationen kamen vermutlich von Quantenfluktuationen, die während einer Phase der exponentiellen Expansion („inflationary universe“) zu makroskopischen Skalen aufblähten.

Kosmologische Randbedingungen

Strukturformation

- die Amplitude der Dichtefluktuationen zu einem frühen Zeitpunkt (z.b. bei der Entkopplung von Photonen, ca. 300.000 Jahre nach dem Big Bang) kann Aussagen machen über die Zusammensetzung der Materie/Energiedichte im Universum.
- Messungen der Granularität der kosmischen (2.7 K) Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (COBE; WMAP; Planck) zeigen: diese Amplituden sind zu klein um die heutige Struktur zu erzeugen, wenn man nur baryonische Materie und Photonen annimmt.
- schwach wechselwirkende Materie funktioniert besser, da sie nicht vom Photonendruck zurückgehalten wird.

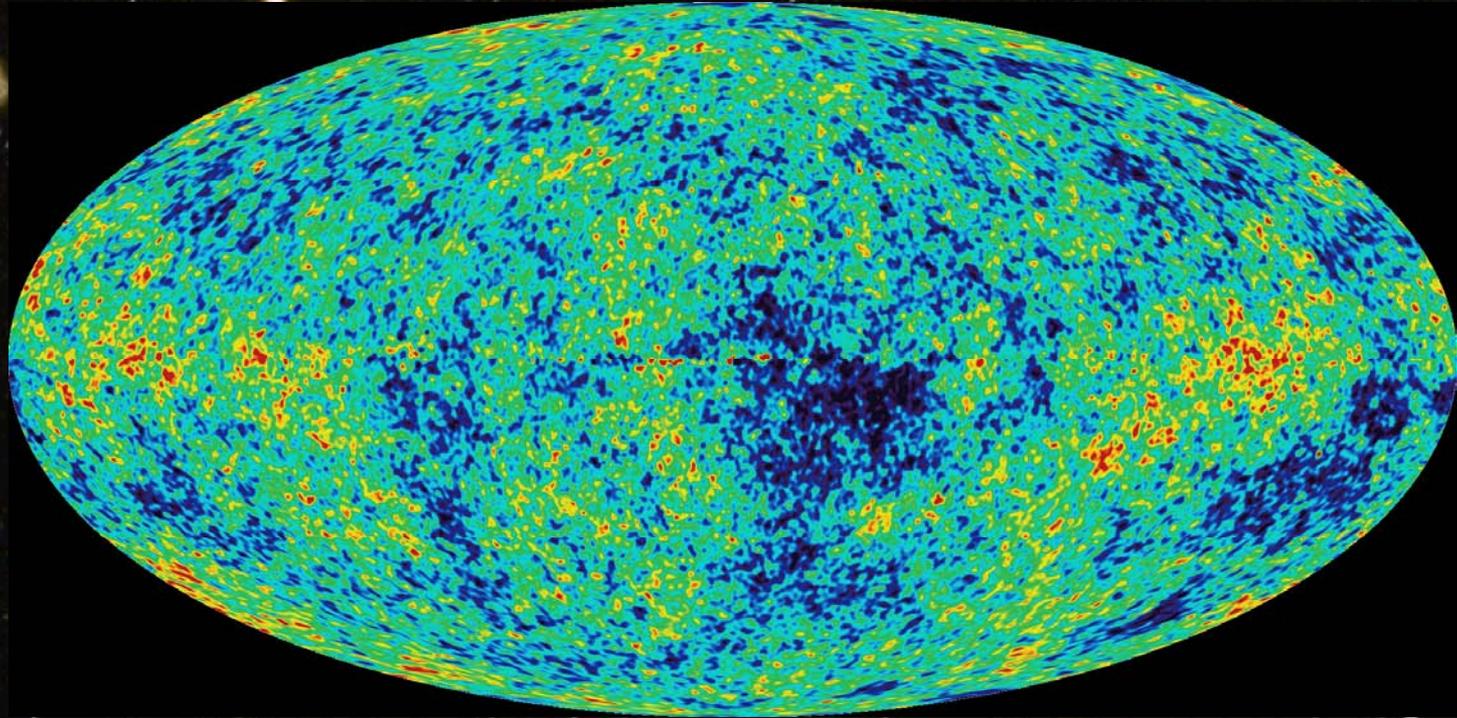


COBE Satellit

John Mather and George Smoot
Nobelpreis 2006

Messung der Anisotropie und der Granularität
der kosmischen 2.7 Kelvin Hintergrundstrahlung:

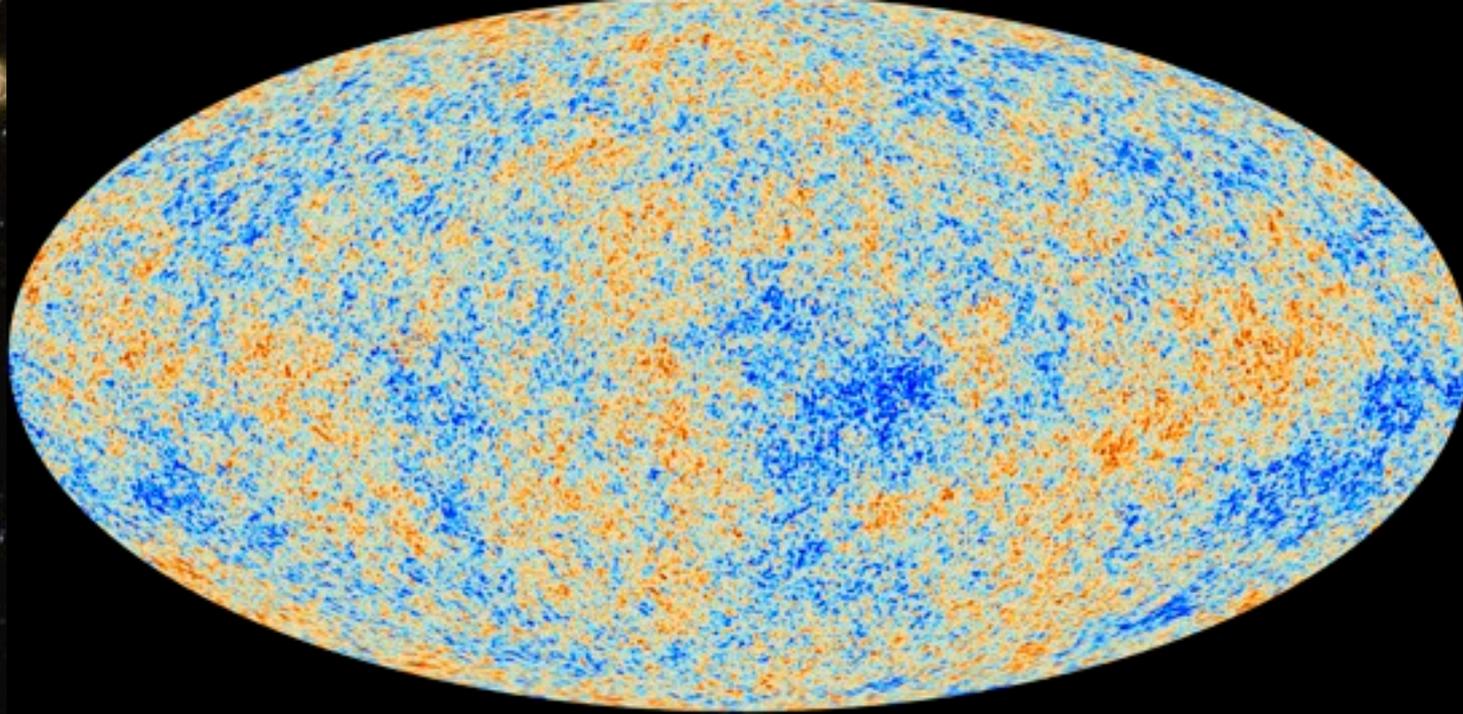
„Photographie“ der Dichtestruktur des Universums
als es transparent wurde (380.000 Jahre n.U.)



WMAP Satellit
(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

Messung der Anisotropie und der Granularität
der kosmischen 2.7 Kelvin Hintergrundstrahlung:

„Photographie“ der Dichtestruktur des Universums
als es transparent wurde (380.000 Jahre n.U.)



Planck Satellit (2013)

Messung der Anisotropie und der Granularität
der kosmischen 2.7 Kelvin Hintergrundstrahlung:

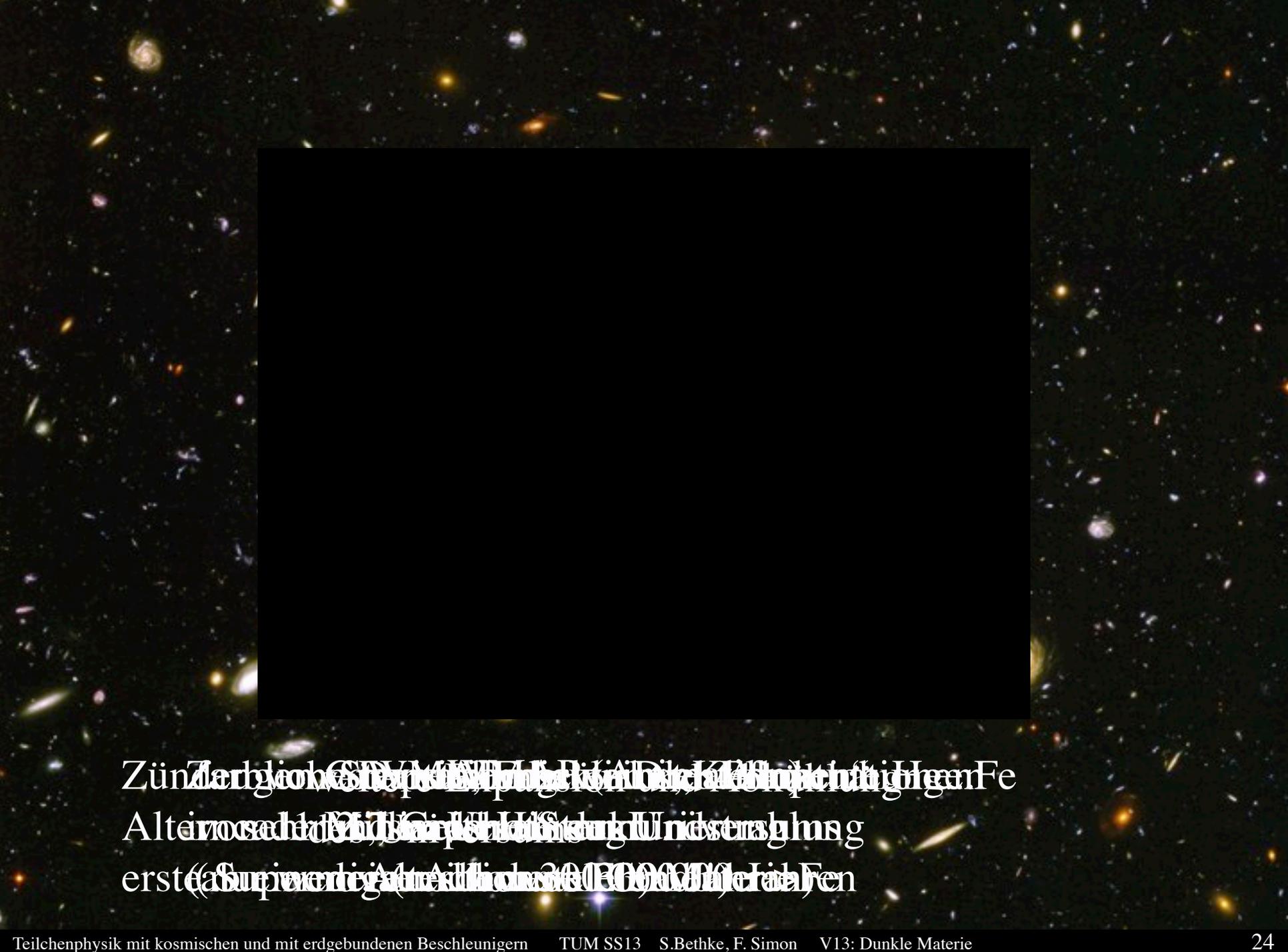
„Photographie“ der Dichtestruktur des Universums
als es transparent wurde (380.000 Jahre n.U.)

Planck Satellit

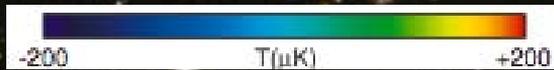
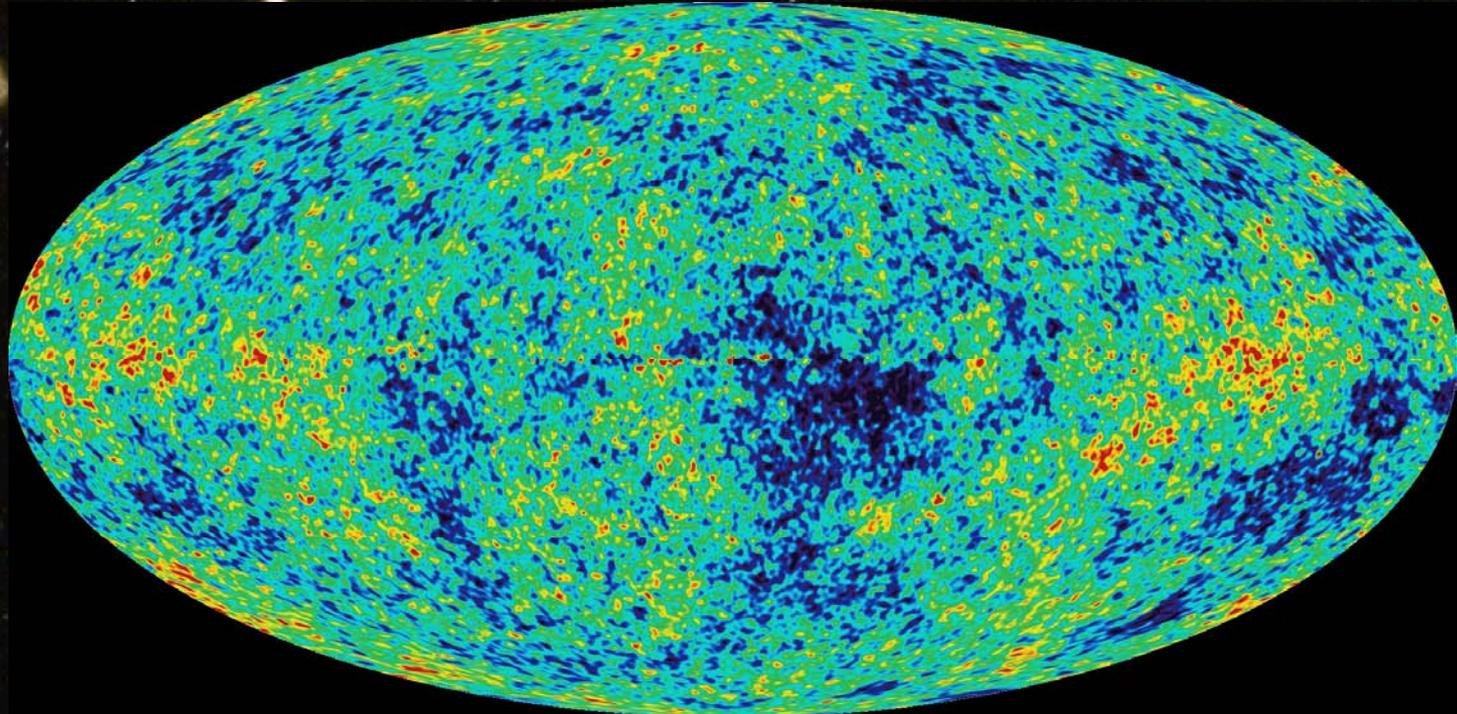
(gestartet 15.5.2009)



3-faches Auflösungsvermögen und 10-fache Lichtstärke (verglichen mit WMAP) → Messung bis $l \sim 2500$



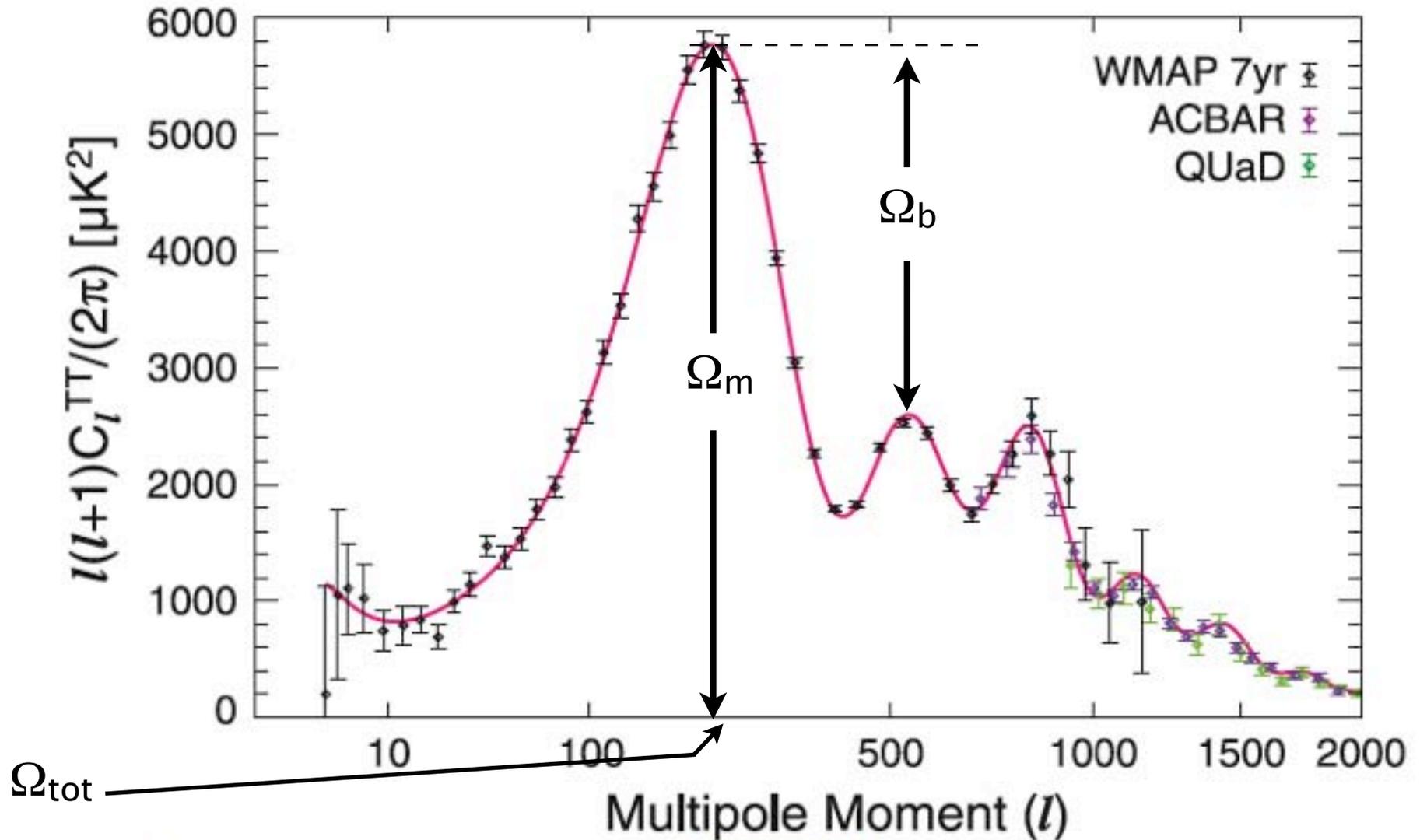
Zunächst die Teilchenphysik, die die Eigenschaften der Teilchen beschreibt, die in den Experimenten beobachtet werden.
Alte Modelle (z.B. GUTs) sind nicht mehr gültig.
erste Supersymmetrie (SUSY) Modelle (z.B. CMSSM) sind



Messung der Anisotropie und der Granularität der kosmischen 2.7 Kelvin Hintergrundstrahlung

(Effekte der Heimatgalaxie sowie Dipol aus Bewegung der Erde und des
Sonnensystems sind subtrahiert)

Analyse: Temperaturunterschied zweier Punkte auftragen gegen den
Winkelabstand; „Multipolanalyse“ (Dipol: min-max bei 180° , Quadrupol: 90° ,...)



The WMAP 7-year temperature power spectrum (Larson et al. 2010), along with the temperature power spectra from the ACBAR (Reichardt et al. 2009) and QUaD (Brown et al. 2009) experiments. We show the ACBAR and QUaD data only at $l \geq 690$, where the errors in the WMAP power spectrum are dominated by noise. We do not use the power spectrum at $l > 2000$ because of a potential contribution from the SZ effect and point sources. The solid line shows the best-fitting 6-parameter flat Λ CDM model to the WMAP data alone (see the 3rd column of Table 1 for the maximum likelihood parameters).

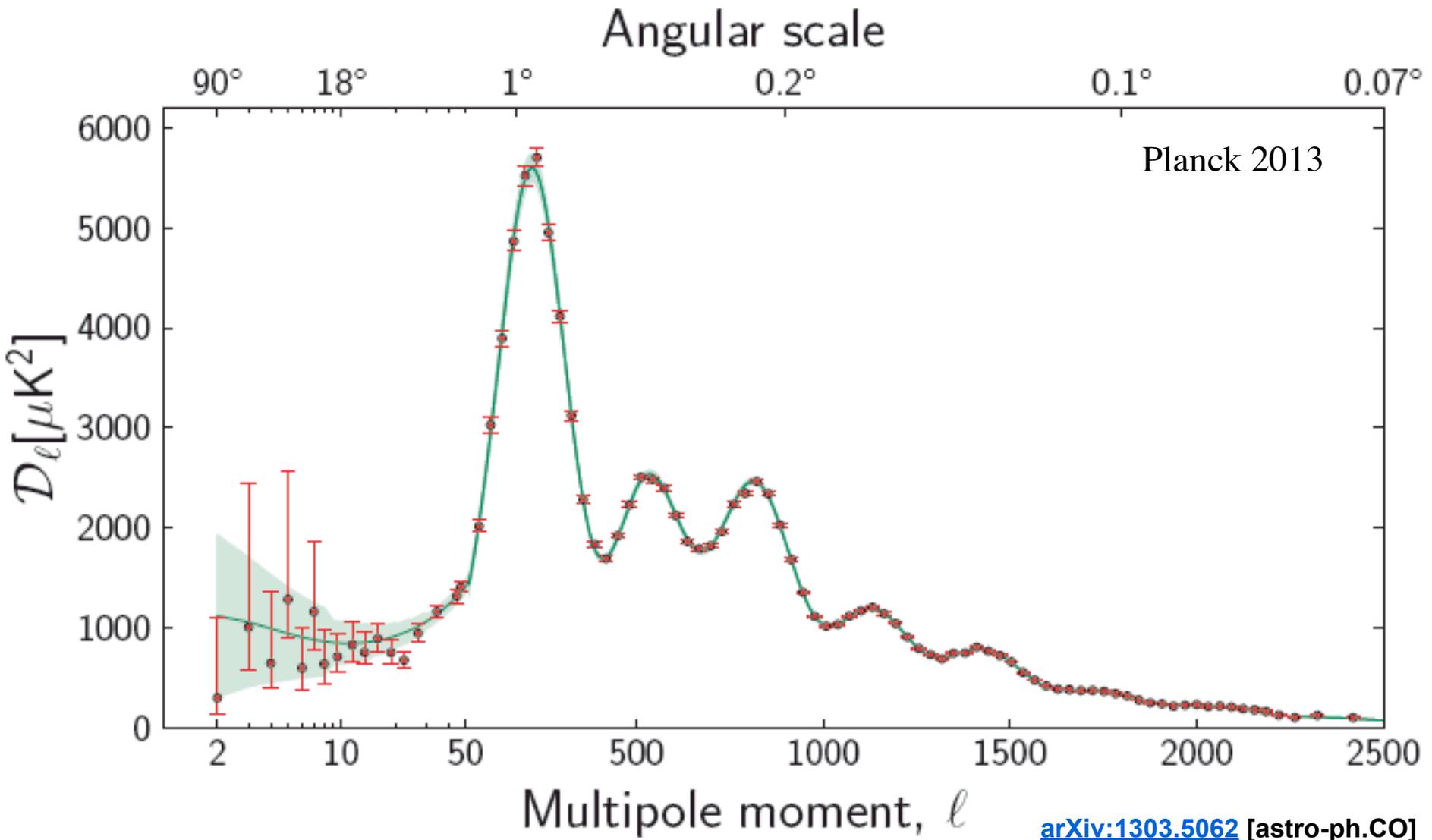


Fig. 19. The temperature angular power spectrum of the primary CMB from *Planck*, showing a precise measurement of seven acoustic peaks, that are well fit by a simple six-parameter Λ CDM theoretical model (the model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013)). The shaded area around the best-fit curve represents cosmic variance, including the sky cut used. The error bars on individual points also include cosmic variance. The horizontal axis is logarithmic up to $\ell = 50$, and linear beyond. The vertical scale is $\ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$. The measured spectrum shown here is exactly the same as the one shown in Fig. 1 of Planck Collaboration XVI (2013), but it has been rebinned to show better the low- ℓ region.

neueste Inventur des Universums (Planck):

[arXiv:1303.5062](https://arxiv.org/abs/1303.5062) [astro-ph.CO]

Alter: 13.798 ± 0.037 Milliarden Jahre

$\Omega_{\text{dark energy}}$ $68,3\% \pm 1.0\%$

$\Omega_{\text{cold dark matter}}$ $26.8\% \pm 0,4\%$

Ω_{baryons} $4.9\% \pm 0.1\%$

Ω_{m} $31,7\%$

H_0 $67,80 \pm 0,77 \text{ km / s / Mpc}$

Weitere kosmologische Messungen zum Anteil der dark energy:

– Supernovae Typ Ia als „Standardkerzen“

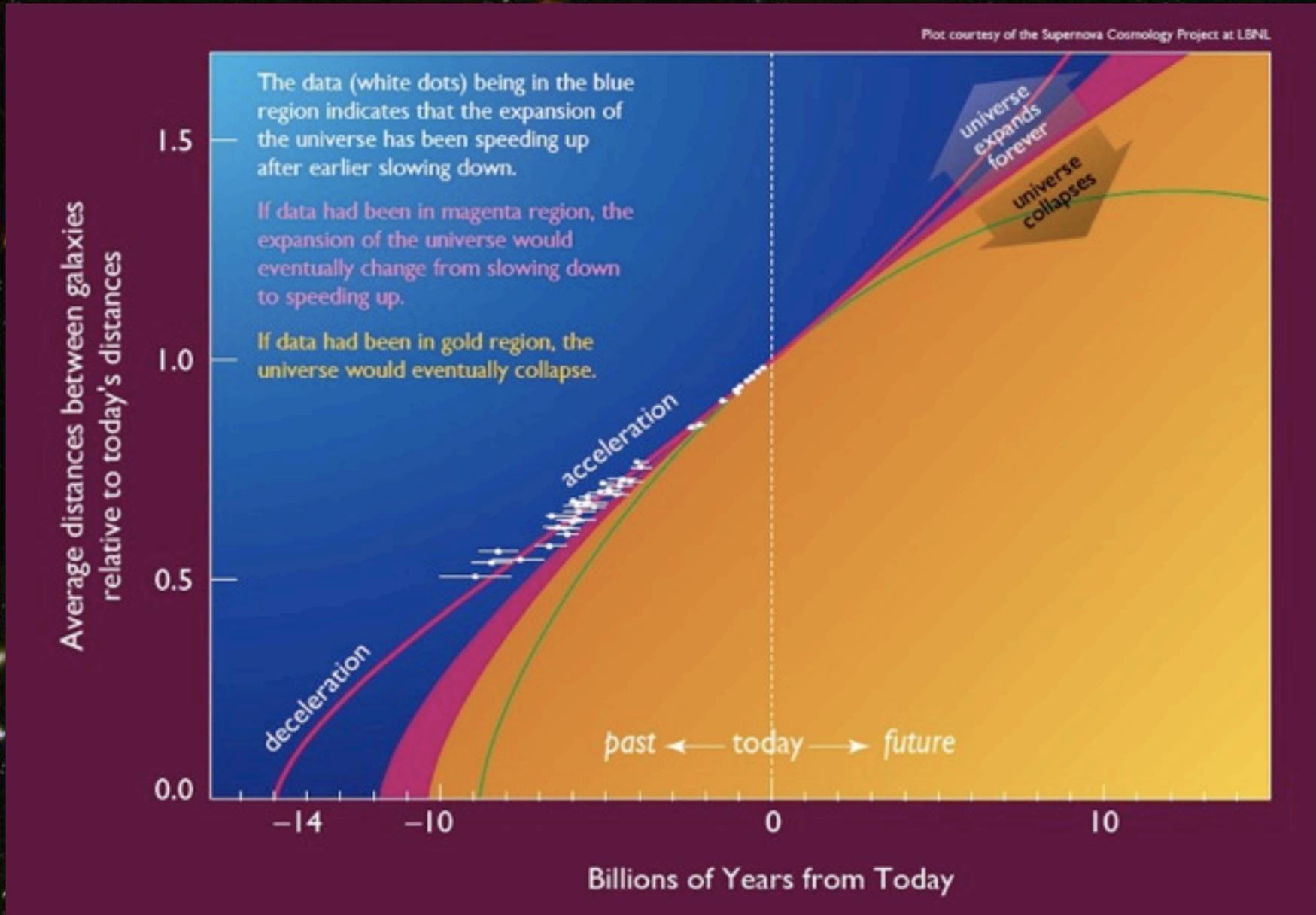
Messung der Geschichte der kosmischen Expansion:
Supernovae (Typ Ia) als kosmische Kerzen (Objekte
bekannter absoluter Helligkeit).

Typ I: keine Wasserstofflinien im Spektrum

Typ Ia: hat zus. Si-Absorptionslinie.

Weitere kosmologische Messungen zum Anteil der dark energy:

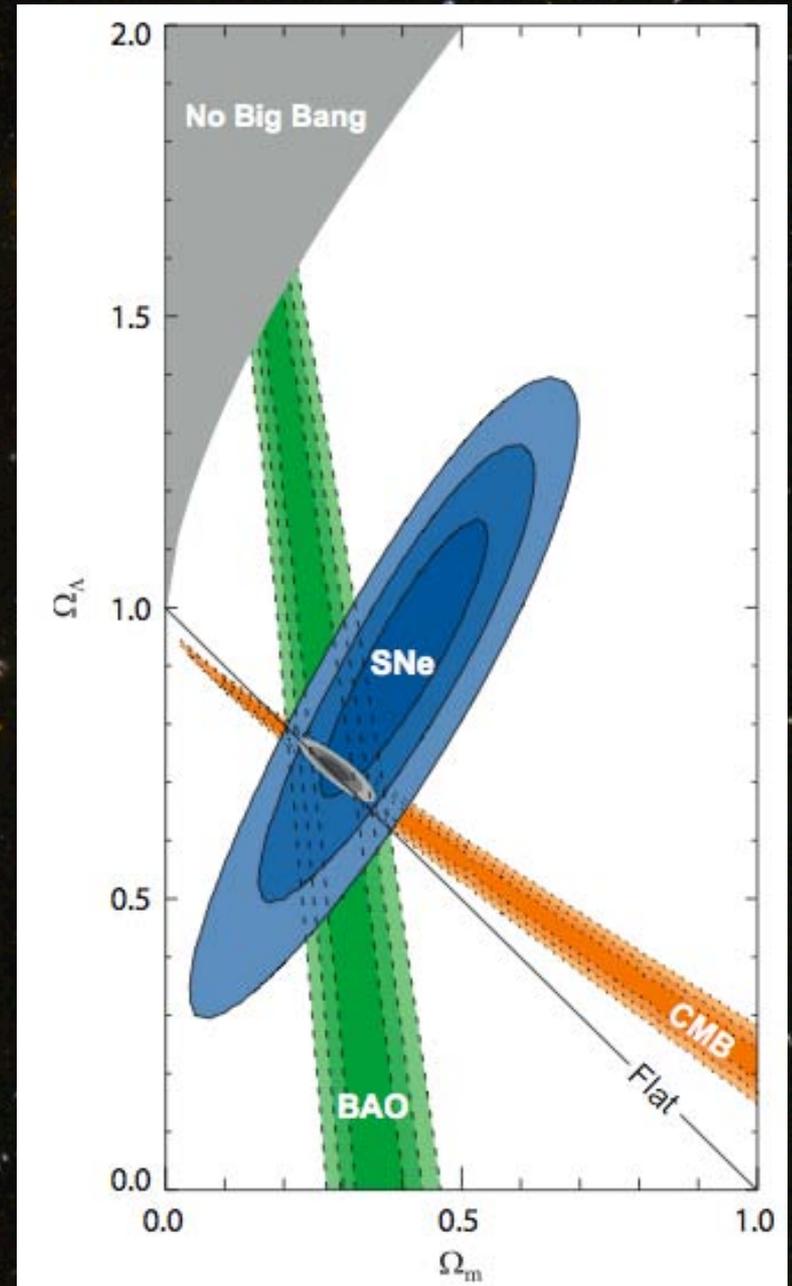
- Supernovae Typ Ia als „Standardkerzen“



CMB: Cosmic Microwave Background
(WMAP)

SNe: Supernovae Ia

BAO: Baryon Accoustic Oscillations
(aus Sloan Digital Sky Survey
der Galaxien)



generelle Kandidaten für Dunkle Materie (Teilchenphysik):

- HDM: massive Neutrinos
 - „hot“: relativistisch; würde primordiale Strukturen (zu) schnell auswaschen, um heutige Struktur erklären zu können
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs
 - „cold“: massiv und nicht-relativistisch; erhält primordiale Struktur.
- Dark Energy: ... **kein** Ansatzpunkt in (exp.) Teilchenphysik... !

Supersymmetry (SUSY)

- provides cancellation of divergent radiative corrections → solves hierarchy problem
- postulates symmetry between fermions and bosons:
new fermion- (boson-) partners for all known fundamental bosons (fermions)

particles	Spin	SUSY particles	Spin
Quark Q	1/2	Squark \tilde{Q}	0
Lepton l	1/2	Slepton \tilde{l}	0
Photon γ	1	Photino $\tilde{\gamma}$	1/2
Gluon g	1	Gluino \tilde{g}	1/2
W^\pm	1	Wino \tilde{W}^\pm	1/2
Z^0	1	Zino \tilde{Z}^0	1/2

- Higgs structure in Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM):
2 complex Higgs-doublets (8 free scalar parameters) → 5 physical Higgs fields:
 H^\pm, H_1^0, H_2^0, A^0 . consistency requirement: $M_{H_1^0} \leq 130 \text{ GeV}$
- gauginos ($\tilde{\gamma}, \tilde{W}^\pm, \tilde{Z}$) mix with higgsinos and therefore result in
4 charginos ($\chi_{1,2}^\pm$) und 4 neutralinos ($\chi_{1,2,3,4}^0$)

Supersymmetry (SUSY)

- **124 free parameters** (!!) to describe masses and couplings of all SUSY particles; out of these, one angle β , with $\tan(\beta) = v_1/v_2$. Only known constraint: $(v_1^2 + v_2^2) = 246 \text{ GeV}^2$
- new conserved quantity: “R-parity”: $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$ (B, L: Baryon-/Lepton-number; S: Spin); $R = +1$ for normal matter particles, $R = -1$ für supersymmetric sparticles
- if R-parity conserved:
 - SUSY particles are **produced in pairs**
 - SUSY sparticles all decay into “lightest Susy Particle”, **LSP**, which itself is **stable**.
 - cosmological arguments: LSP carries no electric and no colour charge \leftrightarrow only weak and gravitational interactions!
→ in particle reactions, leads to signature of **missing energy** (like neutrinos).
- Supersymmetry with masses of O(1 - 10 TeV) leads to change of energy dependence of coupling constants, such that “unification” occurs at $E \sim 10^{16} \text{ GeV}$
→ proton lifetime $\gg 10^{32}$ years (beyond current experimental sensitivity) within **SUSY-GUT**.
- **LSP** is main candidate for Cold Dark Matter (**CDM**).

Suche nach der Dunklen Materie

- direkt:
 - Large Hadron Collider ... (direkte Produktion und Vermessung der Eigenschaften)
 - Suche nach WIMP* Stößen in Cryo-Detektoren
- indirekt:
 - WIMP Paar-Vernichtung in Erde, Sonne, Galaxie-Zentrum (in 2 Photonen, oder Neutrino-Antineutrino; Neutrino-Teleskope wie ICECUBE, cosmic ray exps.)
- weiterhin auch noch:
 - Suche nach nichtleuchtender, baryonischer Materie (MACHOS, massive compact halo objects)
- primordial black holes ...?

* WIMP: Weakly Interacting Massive Particle



Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

The CRESST Dark Matter Search

Collaboration

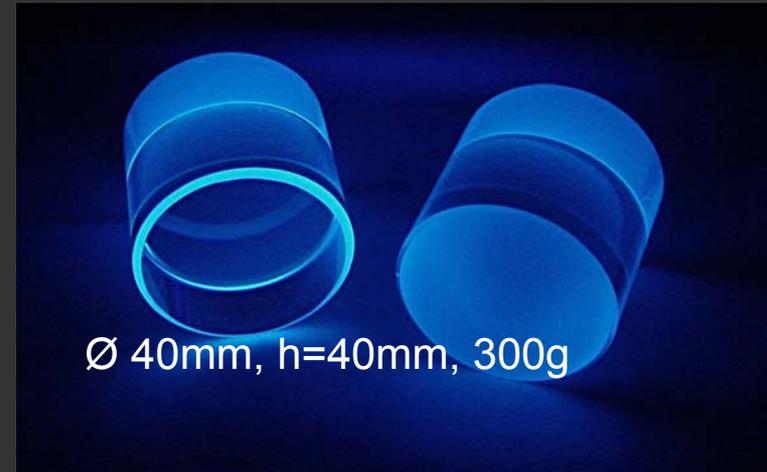
MPI für Physik, Oxford University,
TU München, Universität Tübingen
Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Cryogenic Dark Matter search

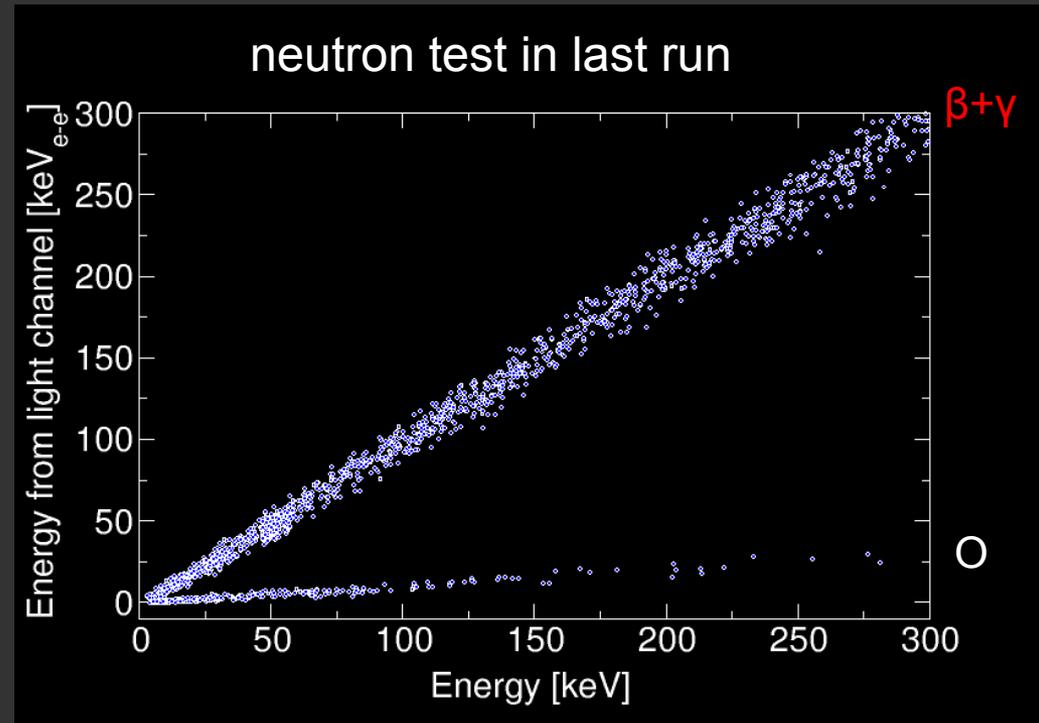
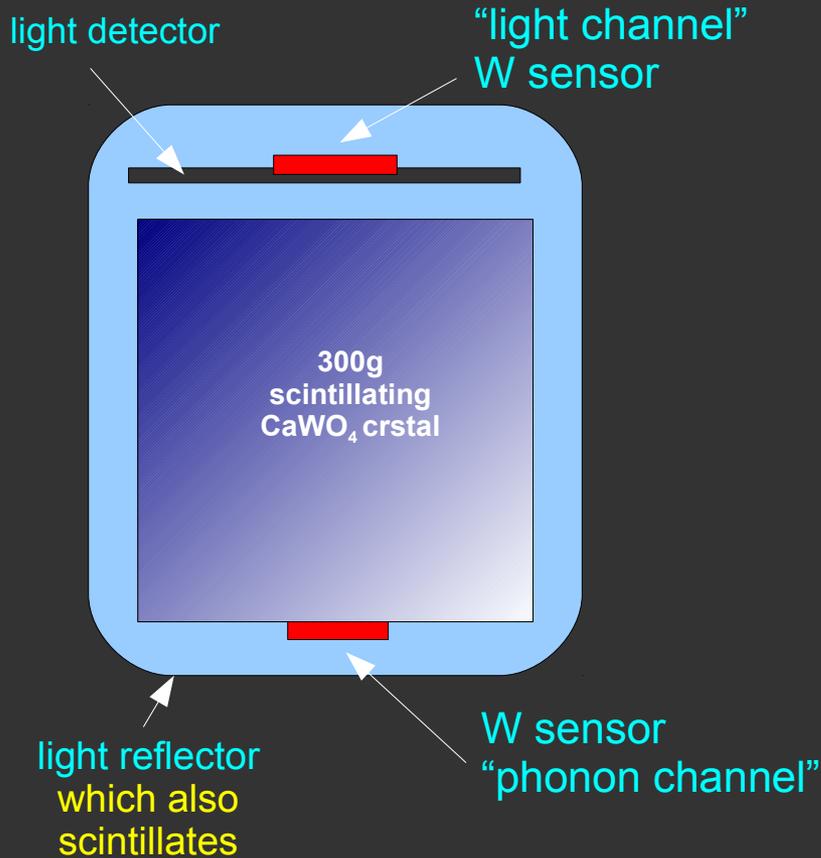
Located in hall A of LNGS

Scintillating CaWO_4 target crystals

Up to 33 crystals in modular
structure (10 kg target)



CRESST Detectors



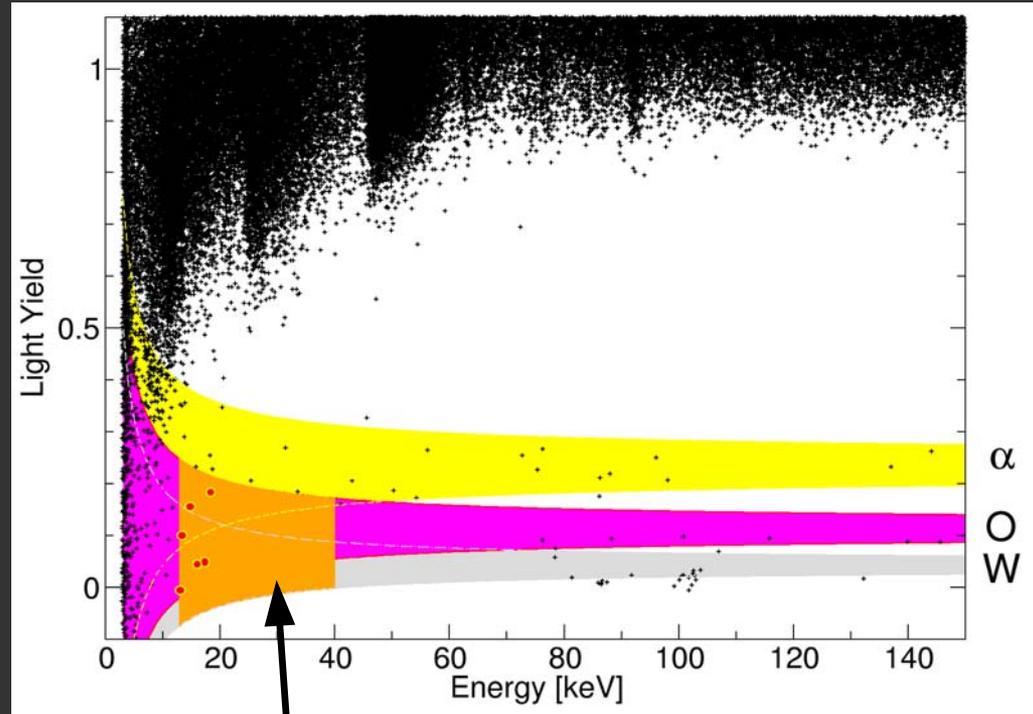
- Phonon channel measures deposited energy with sub keV resolution and accuracy
- Light channel serves to distinguish types of interaction
- Types of recoiling nuclei distinguished by different slopes in energy-light plane

Discrimination of Event Types

$$\text{Light Yield} = \frac{E_{\text{light}}}{E_{\text{phonon}}}$$

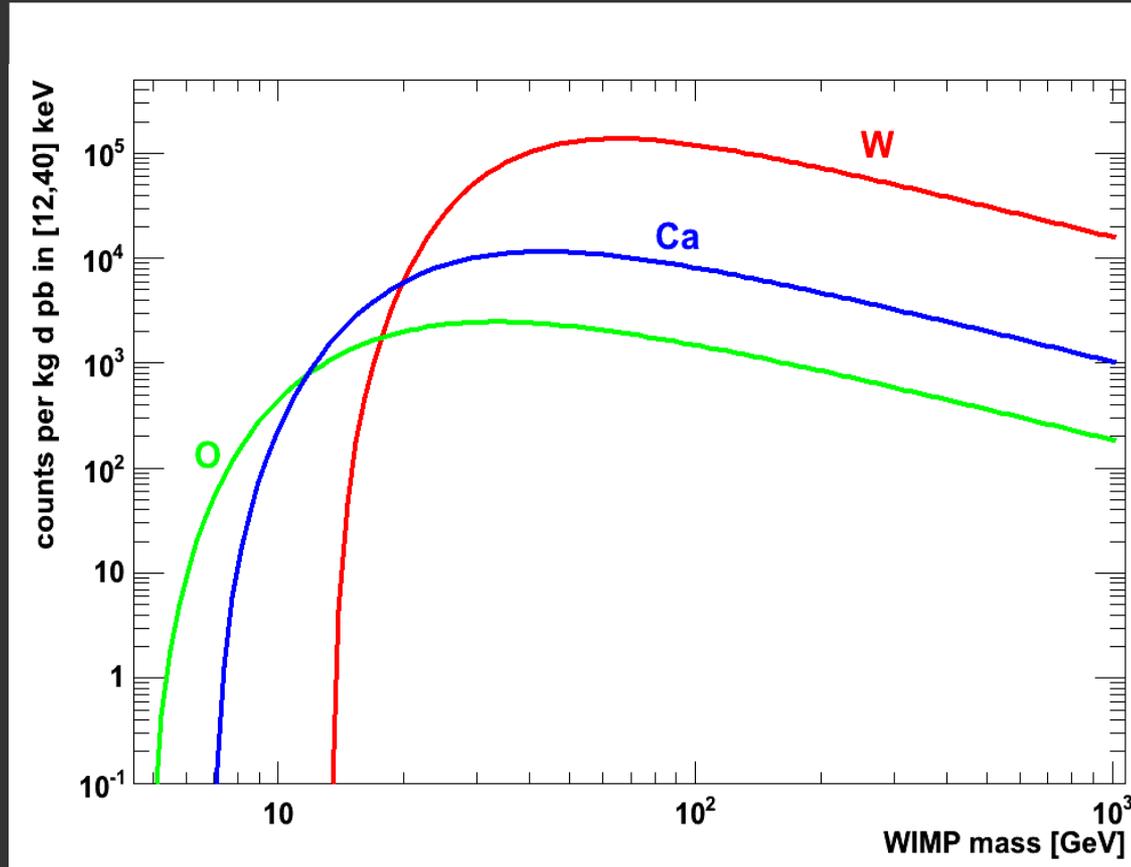
Event types characterized by different light yield

- efficient discrimination of nuclear recoils from β/γ -background
- WIMP signals expected in nuclear recoil bands



WIMP search region ROI includes O, Ca, and W bands

Types of Recoils in CaWO_4

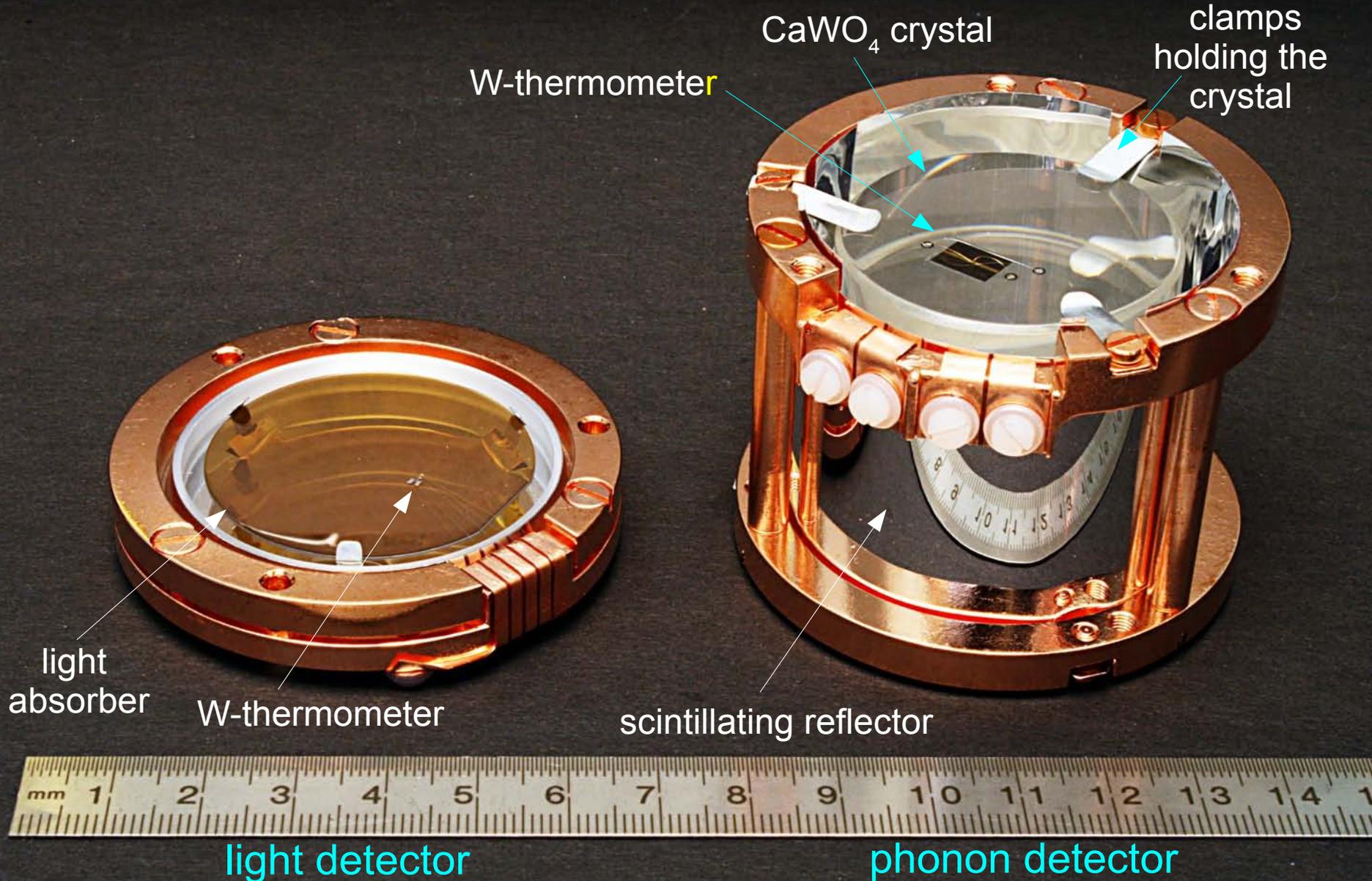


Assuming:

- $\sigma \propto A^2$
- detection in 12 to 40 keV range

- For $M < 10$ GeV only oxygen
 - Calcium important around 10 GeV
 - Tungsten dominates at larger WIMP masses due to $\sigma \propto A^2$
- type of recoils, together with the recoil energy spectrum, offers very detailed information on mass of possible WIMP

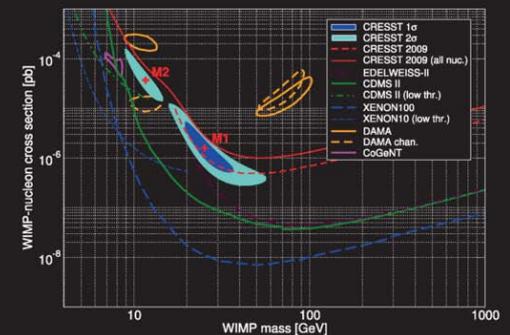
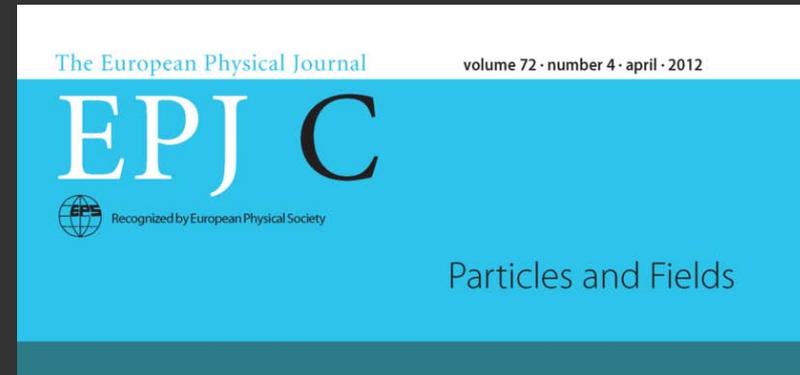
300 g Detector Module



The last CRESST run

- Extended physics run from June 2009 to April 2011
- 8 CaWO_4 modules used for Dark Matter analysis
- Net exposure after cuts: 730 kg days
- 67 events observed in WIMP search region
- Data analyzed with 2d likelihood fit of signal and background model
- Background only hypothesis rejected with high statistical significance ($>4\sigma$)
- Background contributions still relatively large
- Reduction is necessary for ultimate clarification

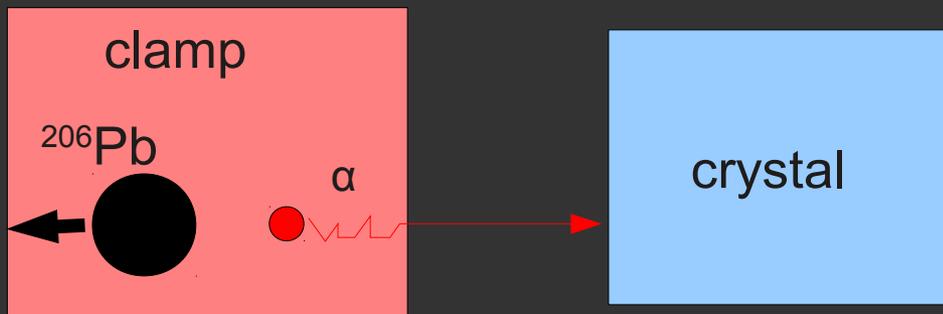
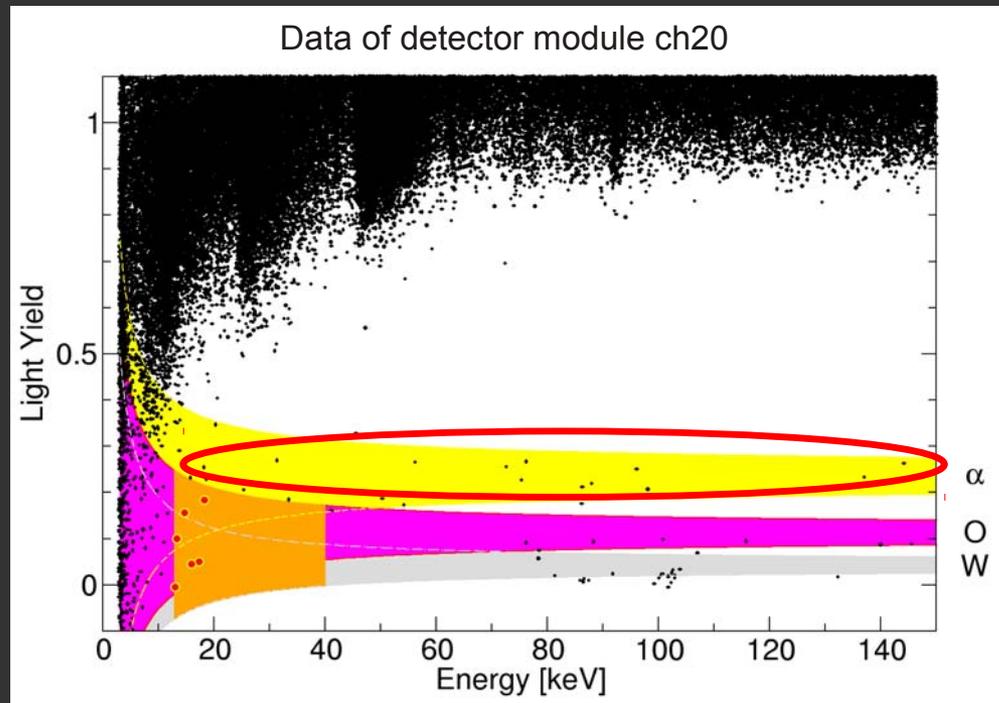
→ next run



The WIMP parameter space compatible with the presented CRESST results. Additionally shown are: the exclusion limits from CDMS-II, XENON100, the low-threshold analysis of XENON10, and EDELWEISS-II; the 90 % confidence regions favored by CoGeNT and DAMA-LIBRA; the CRESST limit obtained in an earlier run in 2009 and the result of a reanalysis of the 2009 data. From G. Angloher et al.: Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter search

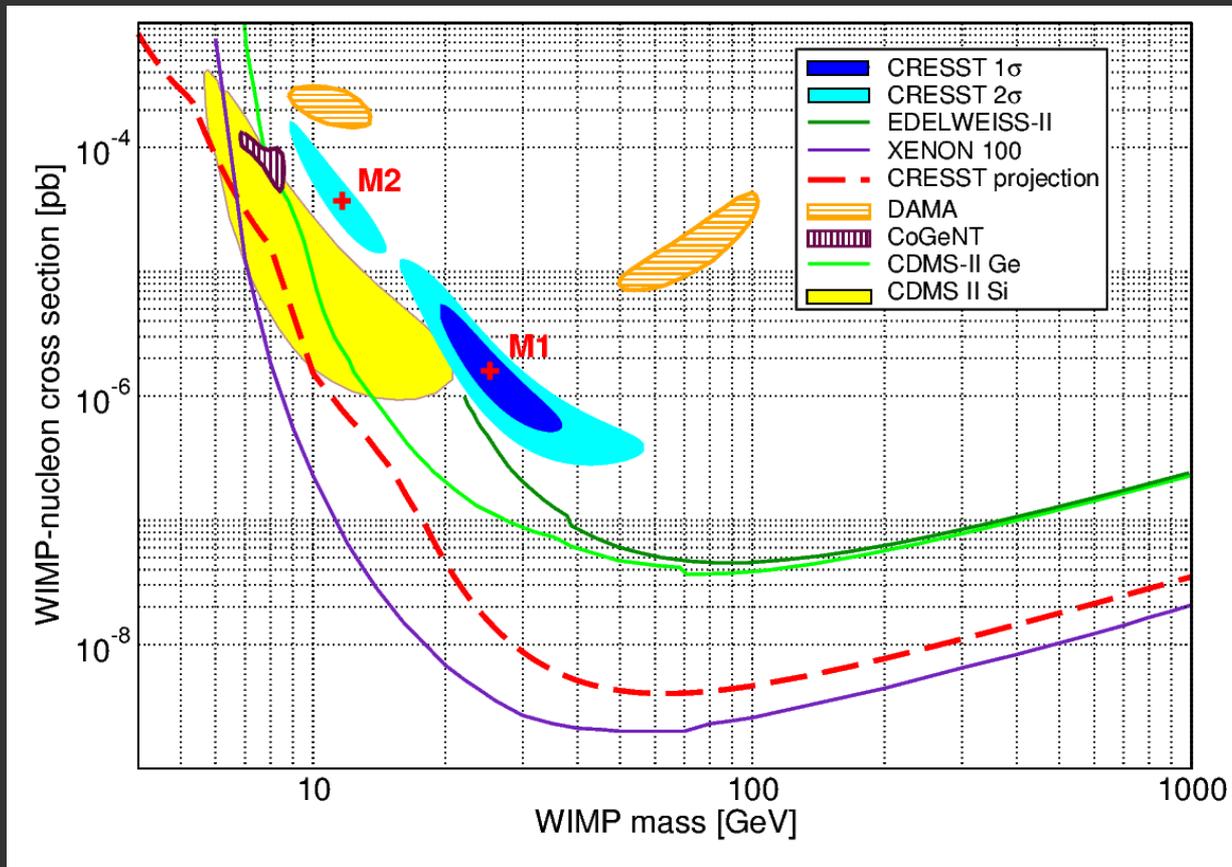
α -Background in Last Run

- α -events at low energies down to ROI from ^{210}Pb contamination of bronze material of clamps



Status and Perspectives of new Run

- Cooling to base temperature started ~two weeks ago, 14 modules already operational
- 2000 kg-days of data within 2 years
- Either confirm or reject low mass WIMP scenario with high confidence
- Competitive limit for higher mass WIMPs if low mass WIMP will be rejected



Zusammenfassung:

- nichtbaryonische Dunkle Materie (und Dunkle Energie) dominieren Masse-/Energiedichte des Universums ($\sim 95\%$)
- Evidenz für DM: von Galaxienrotation, Strukturbildung, Granularität der kosm. Hintergrundstrahlung,
- nur wenig Beitrag von hot dark matter (e.g. Neutrinos)
- Kandidaten für cold dark matter: (SUSY) WIMPs, Axions,....
- indirekte Suche: e.g. kosmische WIMP Annihilation;
direkte Suche: WIMP Stöße in Cryodetektoren; LHC;
- Natur der Dark Energy kann nur kosmologisch (astrophys.) untersucht werden.

weitere Literatur:

- G. Bertone, D. Hooper, J. Silk: *Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints*, hep-ph/0404157.
- John A. Peacock, *Cosmological Physics*, Cambridge University Press 1999.
- div. Kosmologie Artikel in: particle data group, pdg.lbl.gov
- M. Kowalski et al., *Improved Cosmological Constraints from New, Old and Combined Supernova Datasets*, arXiv:0804.4142v1
- D. Eisenstein et al., *Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*, arXiv:astro-ph/0501171v1
- Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results
Planck Collaboration (P.A.R. Ade (Cardiff U.) *et al.*). Mar 20,
arXiv:1303.5062 [astro-ph.CO]