

# Dark Matter (and Dark Energy)

- Inventory of the Universe
- the expanding Universe
- Evidence for the Existence of Dark Matter:
  - rotational curves of spiral Galaxies
  - microwave background and cosmic energy density
  - galaxy clusters
- cosmological constraints
- DM: particle candidates and searches
- example: the CRESST experiment

# Inventory of the Universe:

Age:  $13.798 \pm 0.037$  Billion years

matter fraction:  $31.7\% \pm 0.4\%$  (total)

$4.9\% \pm 0.1\%$  (baryonic matter)

$0.5\% \pm 0.1\%$  (luminous matter)



Dark Matter:  $26.8\% \pm 0.4\%$  (unknown; non-baryonic!)

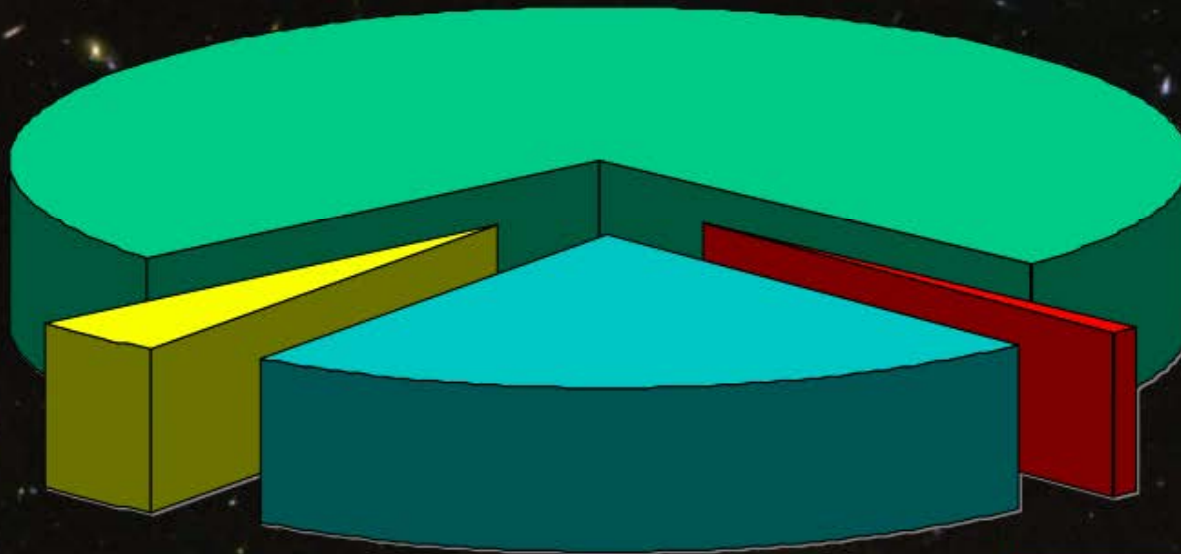
Dark Energy:  $68.3\% \pm 1\%$  (unknown!)

candidates for Dark Matter:

- HDM: massive Neutrinos
- CDM: Axions, SUSY-WIMPs

# Inventory of the Universe (WMAP):

**Dark Energy 73%**  
**(Cosmological Constant)**

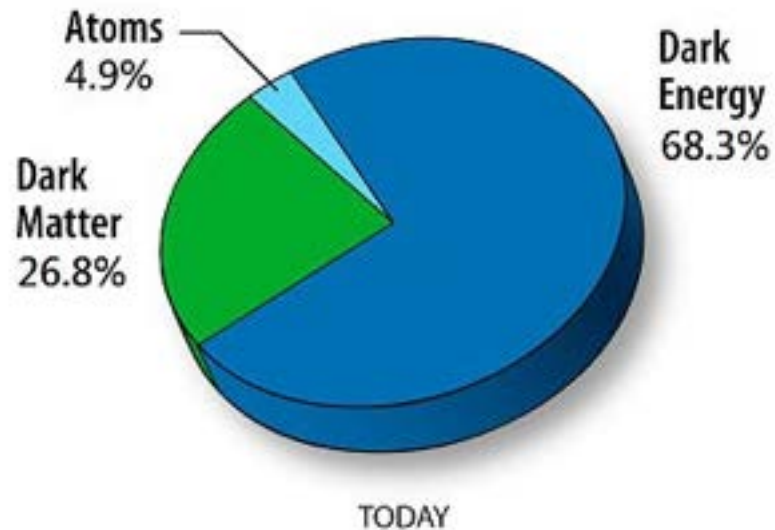


**Ordinary Matter 4%**  
**(of this only about 10% luminous)**

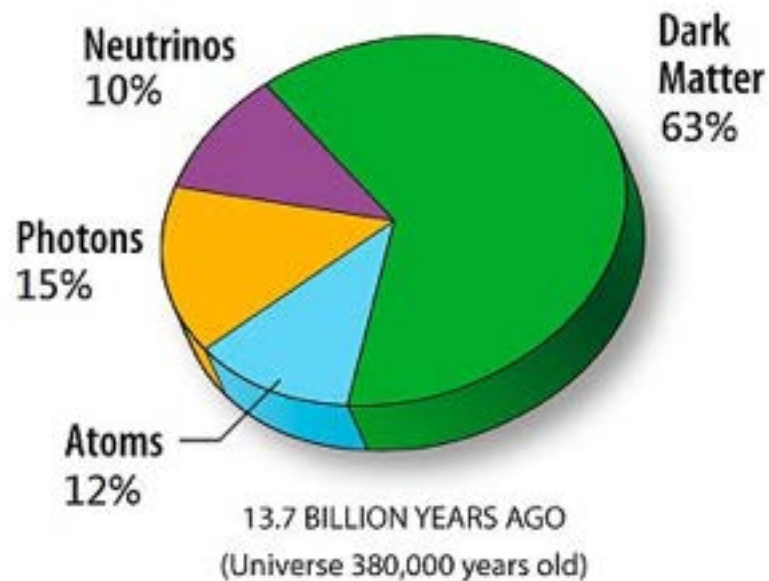
**Dark Matter 23%**

**Neutrinos 0.1–2%**

# Inventory of the Universe (PLANCK):



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

# The expanding Universe

Hubble's Law:

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

Hubble Constant:

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

experimental value:

$$h = 0.683 \pm 0.010$$

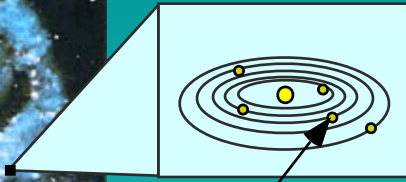
cosmic distances:

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

expansion age of the Universe:

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

# The expanding Universe



Wir sind hier

Zeit

Temperatur

Alter

GEGENWART

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  $Q - \bar{Q}$   $\bar{L} - L$

$10^{16}$  K

$10^{-15}$  sec

Inflation

$10^{27}$  K

$10^{-34}$  sec

GROSSE VEREINHEITLICHUNG

$10^{31}$  K

$10^{-43}$  sec

QUANTEN- GRAVITATION

"Urknall"

Astronomie

Teilchenbeschleuniger

materiedominierte Ära

Strahlungsdominierte Ära

Wasserstoff Atom

Helium Atom

Proto-Galaxie

Schwere Sterne

Schweres Atom

Helium-Kern

Proton (Wasserstoff-Kern)

Proton (Baryonen)

Neutrino

Elektron

Neutron

Positron

Glukon

LHC

# Das expandierende Universum

## Beiträge zur kosmischen Materie- und Energiedichte

Beitrag  $\rho$  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“)

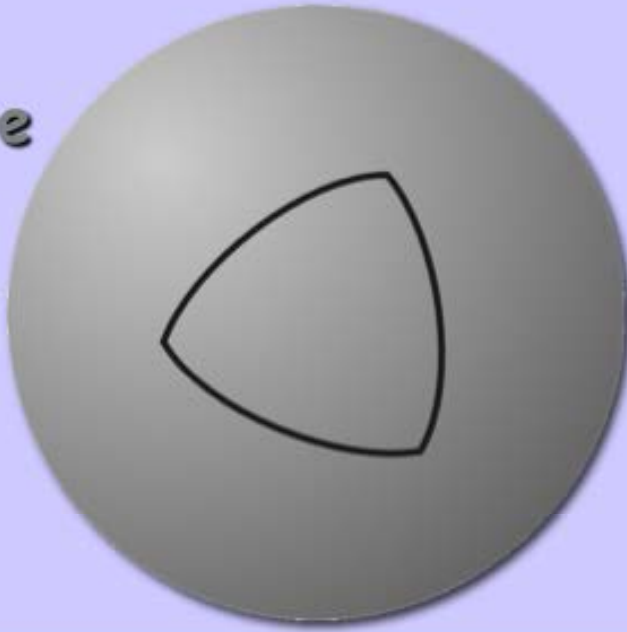


# Global Cosmic Geometry

positive  
curvature

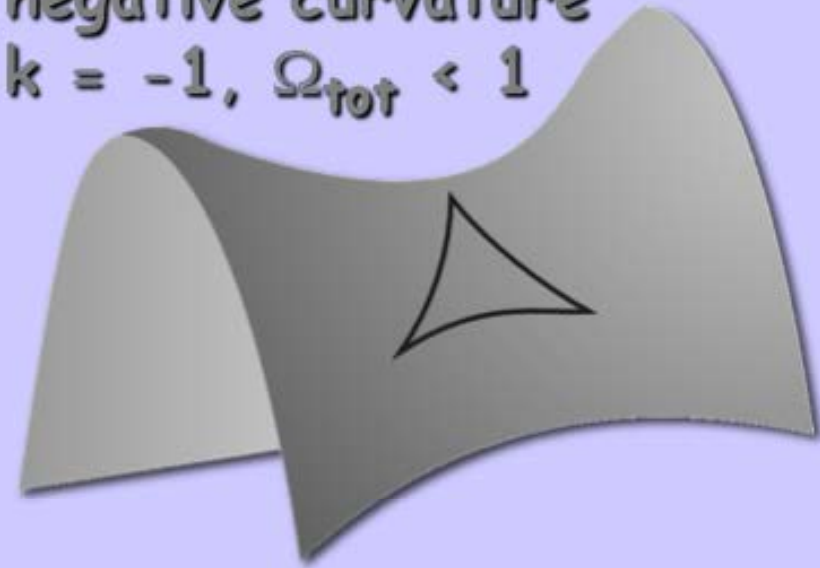
$$k = +1$$

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



negative curvature

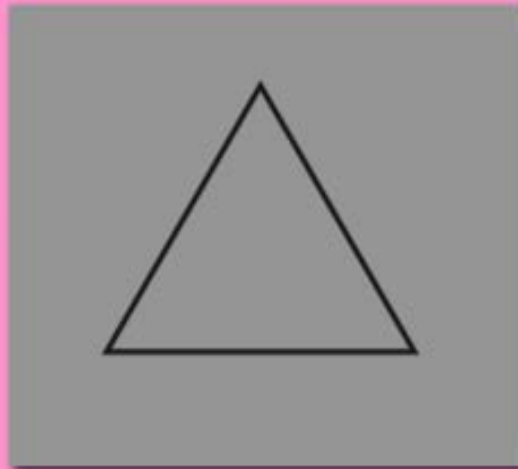
$$k = -1, \Omega_{\text{tot}} < 1$$



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

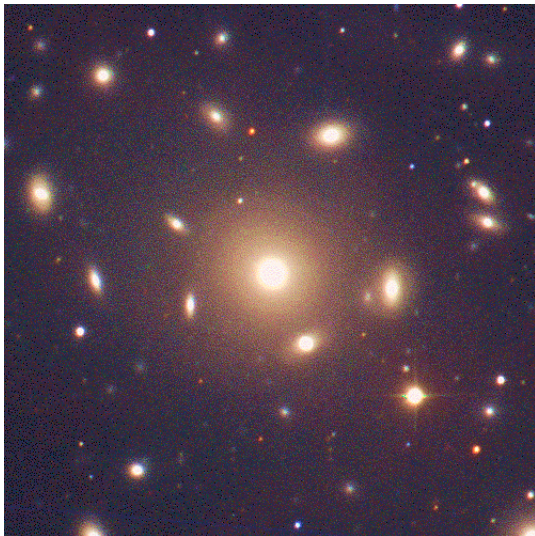
$\Omega_{\text{tot}} = 1$  da in einem  
expandierenden Universum  
 $\Omega_{\text{tot}}$  sich schnell von 1  
wegbewegt, zu 0 oder unendlich.

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

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

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

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

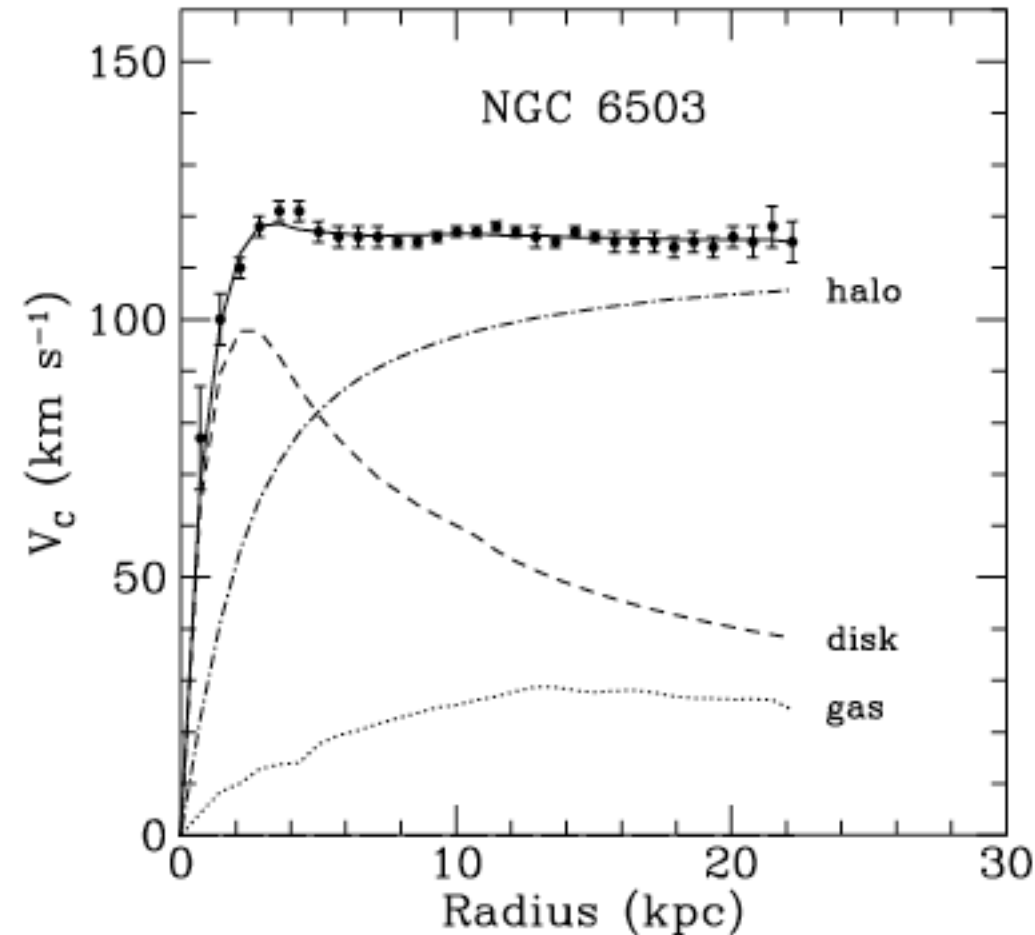
Messung der Geschwindigkeitsdispersion und der geom. Größe:  
ergibt Abschätzung von M (totale Masse)

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

(lange Zeit nicht geglaubt!)

# Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

## Rotationskurven von Spiralgalaxien

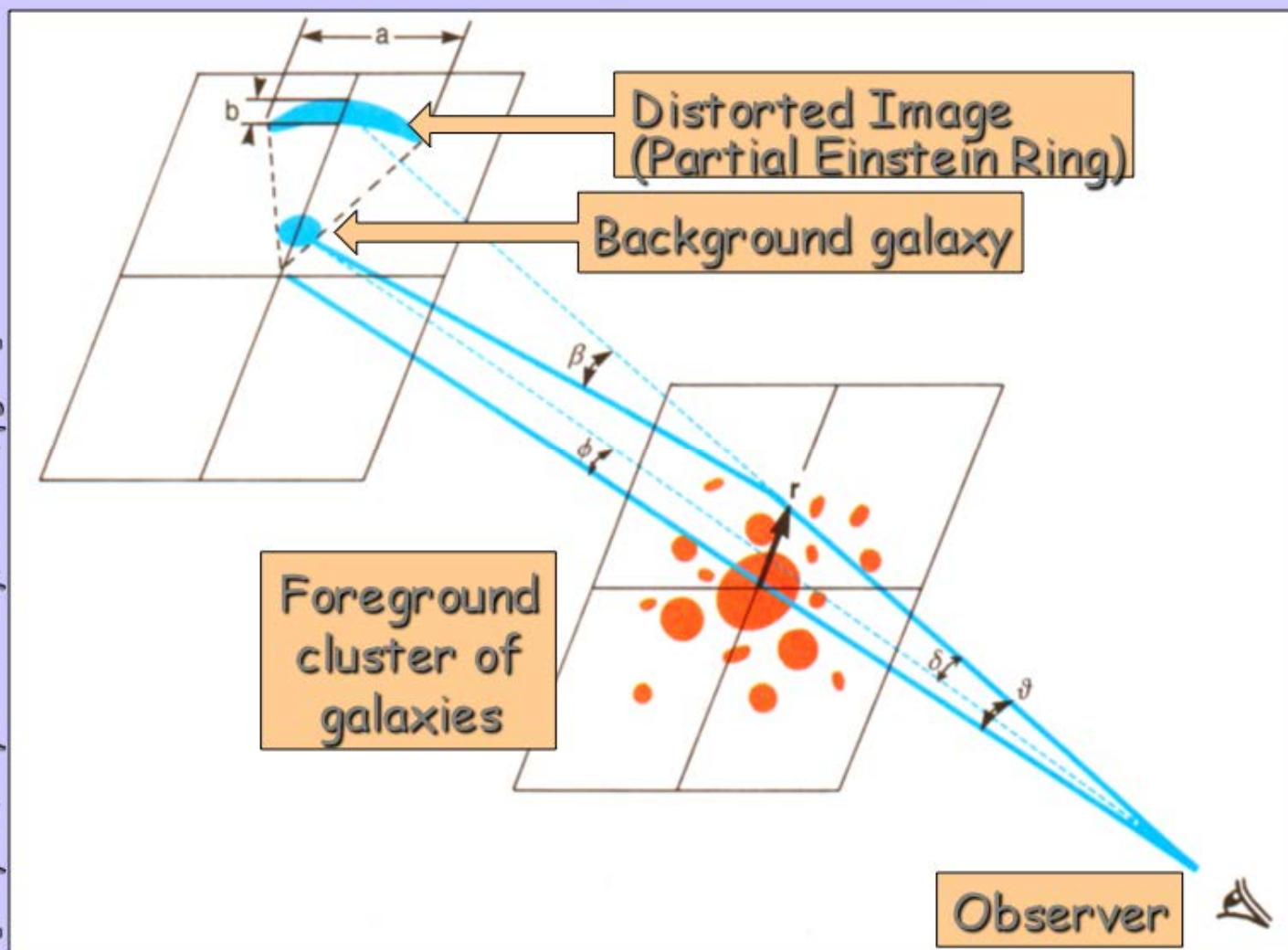


- Erwartung außerhalb des galakt. Zentrums (Kepler):  $v_{\text{rot}} = \sqrt{G_N M / r}$
- Messungen: 21 cm Emissionslinie des neutralen Wasserstoff (bis zu weit höheren Radien möglich als mit (Stern-)Objekten)
- Befund: konstanter Verlauf bis zu den größten messbaren Abständen  
—> „sphärischer Halo“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

# Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

Galaxiencluster, gravitational lensing

## Giant Arcs - Gravitationally Lensed Background Galaxies



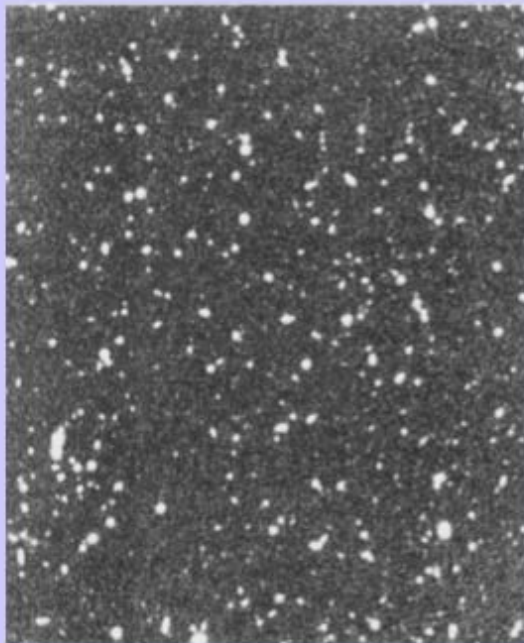
[A. Tyson, Physics Today, 1992:6, pg.24]

# Hinweise für die Existenz Dunkler Materie

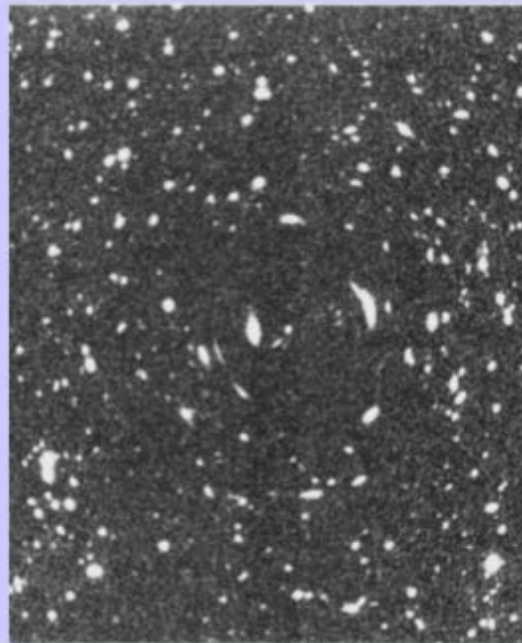
Galaxiencluster, gravitational lensing

## **Weak Lensing Effect - Computer Simulation**

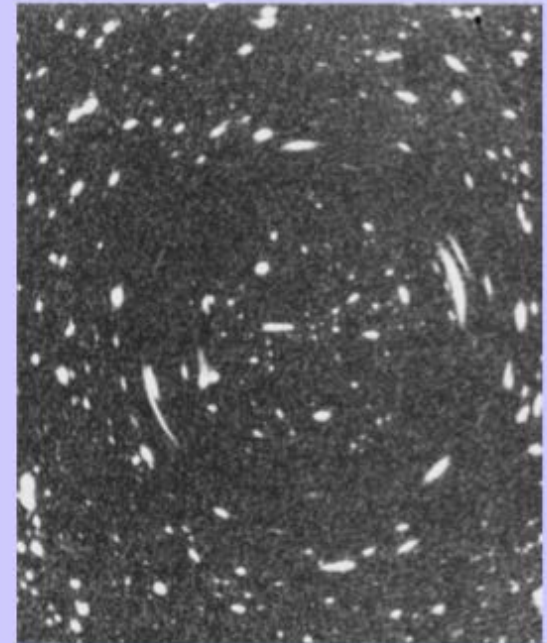
[A.Tyson, Physics Today, 1992:6, pg.24]



Field of distant  
background galaxies ...



... seen through a  
spherical, transparent  
mass distribution,  
representing a fore-  
ground 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!

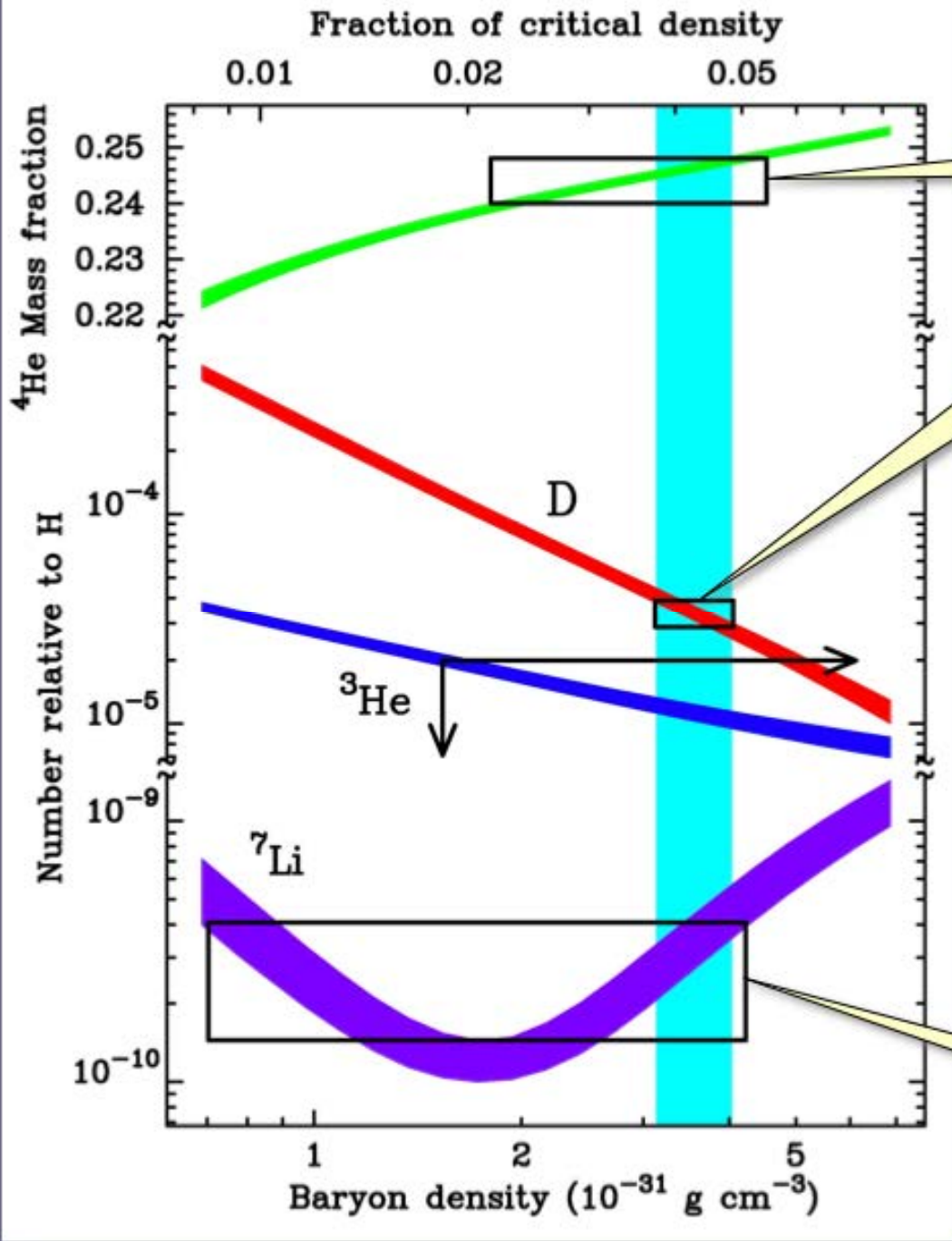
Begründung: Baryon-Dichte im Universum ist eingeschränkt aus der sog. „Big Bang Nucleosynthesis:“

ca. 3 Minuten nach dem Big Bang wurde aus den Protonen und Neutronen Helium (22%-25% der Masse), sowie Spuren von D, He<sup>3</sup> und Li<sup>7</sup> 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

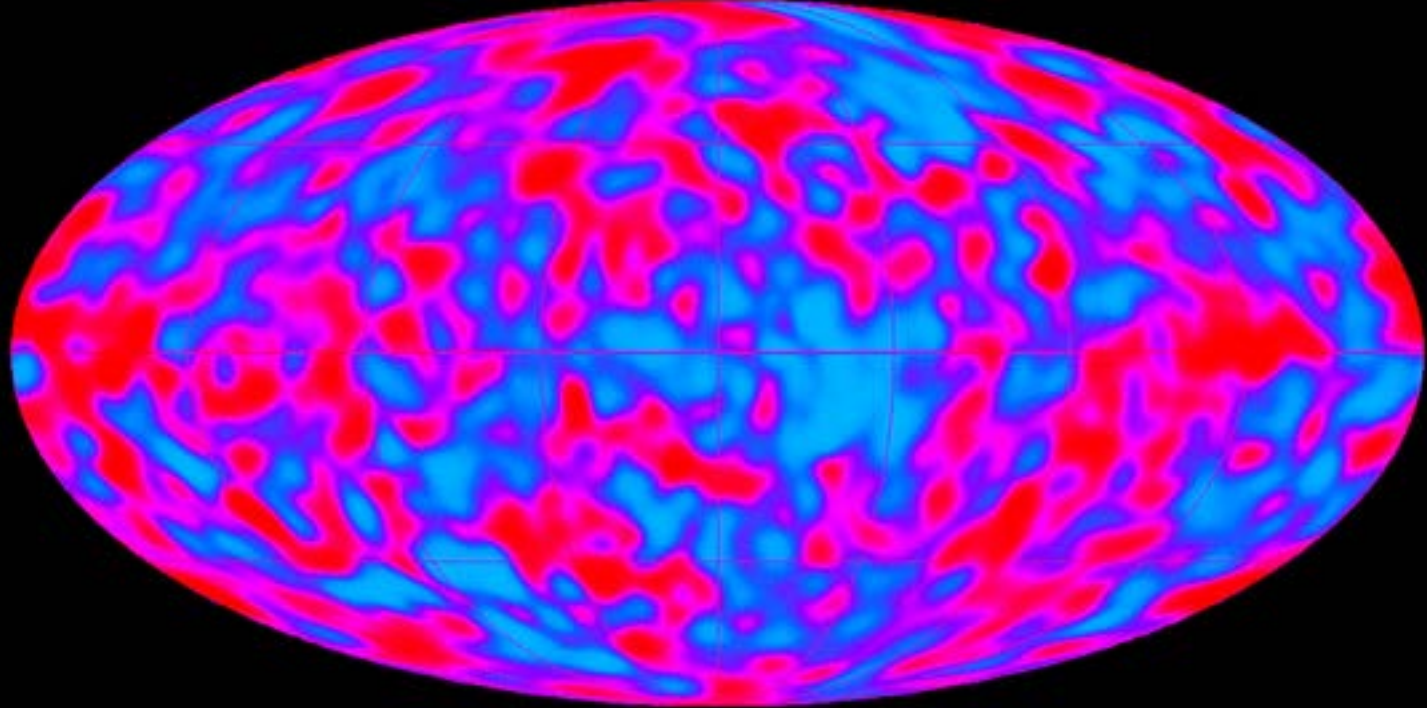
Standard Theorie der kosmischen Struktur Entwicklung:

- 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.

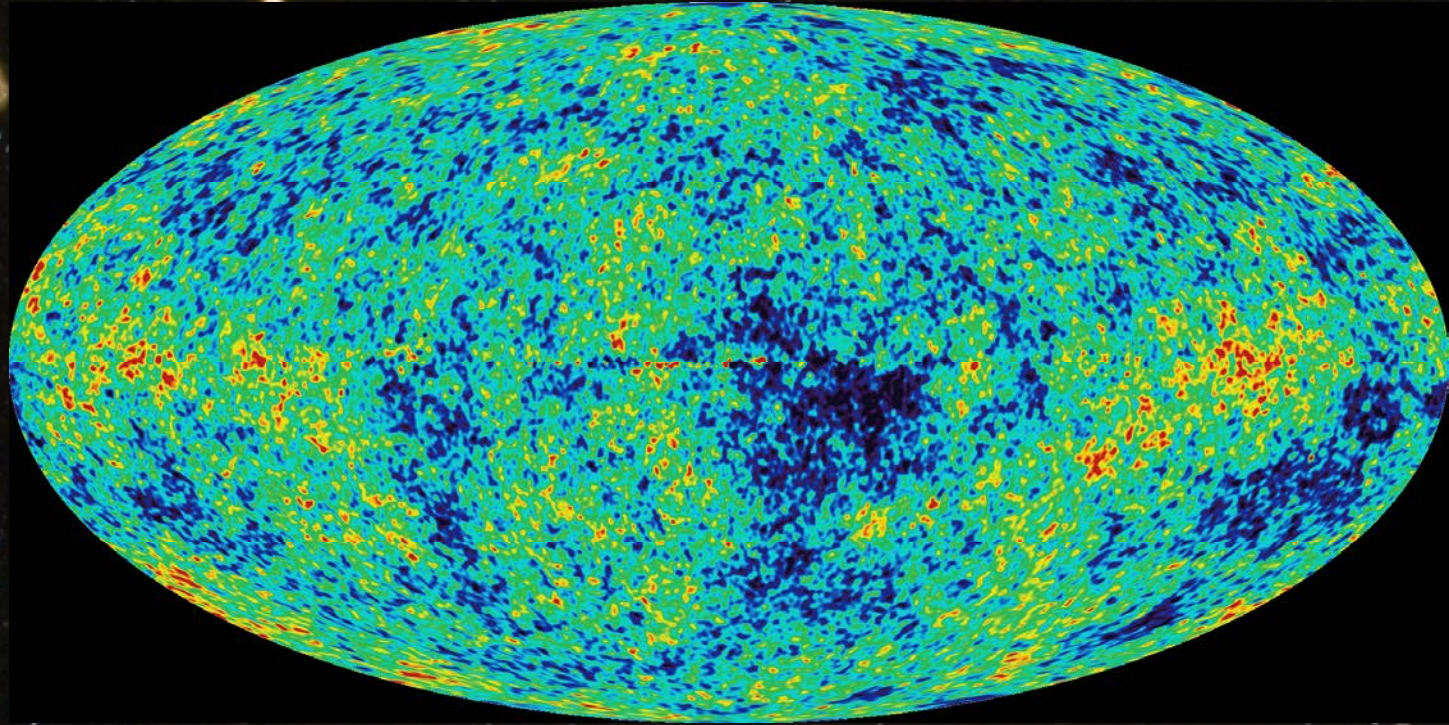


## COBE Satellit

John Mather and George Smoot  
Nobelpreis 2006

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

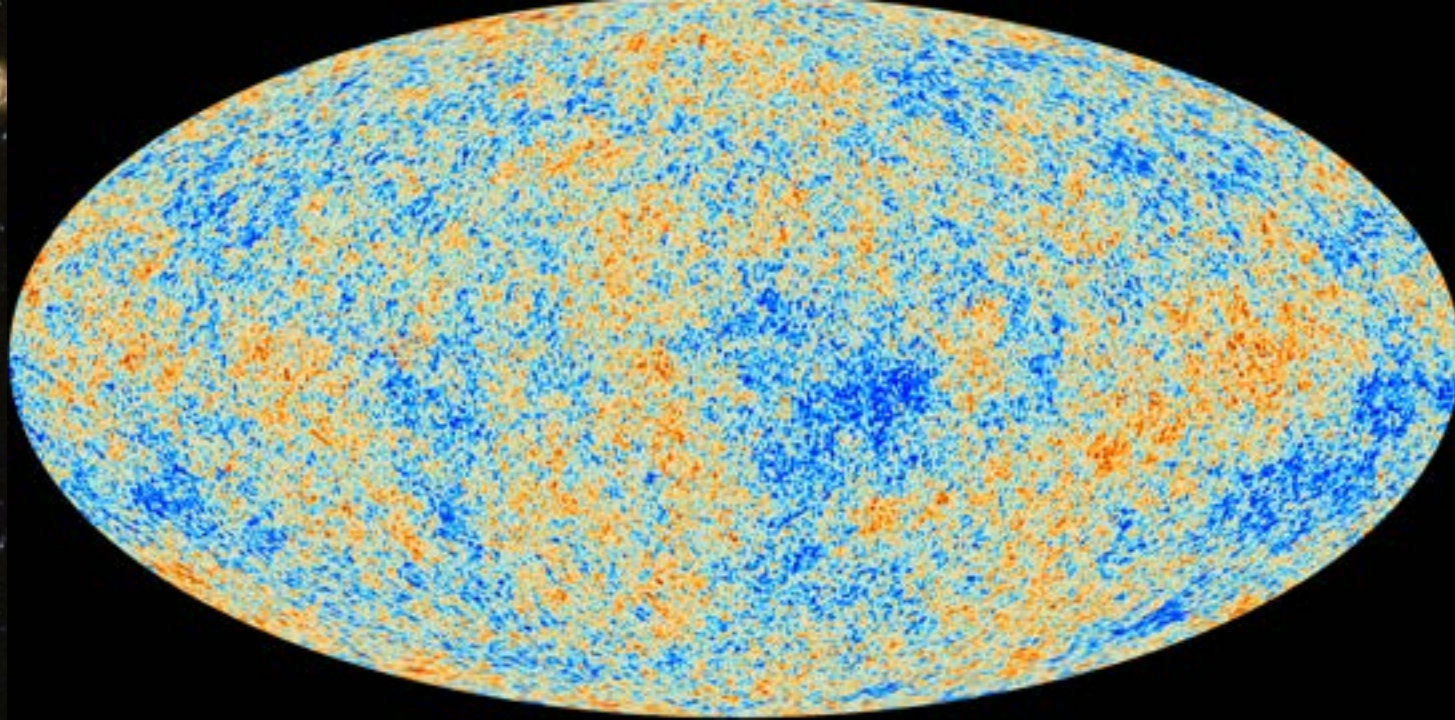
„Photographie“ der Dichtestruktur des Universums  
als es transparent wurde (380.000 Jahre n.U.)



**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:

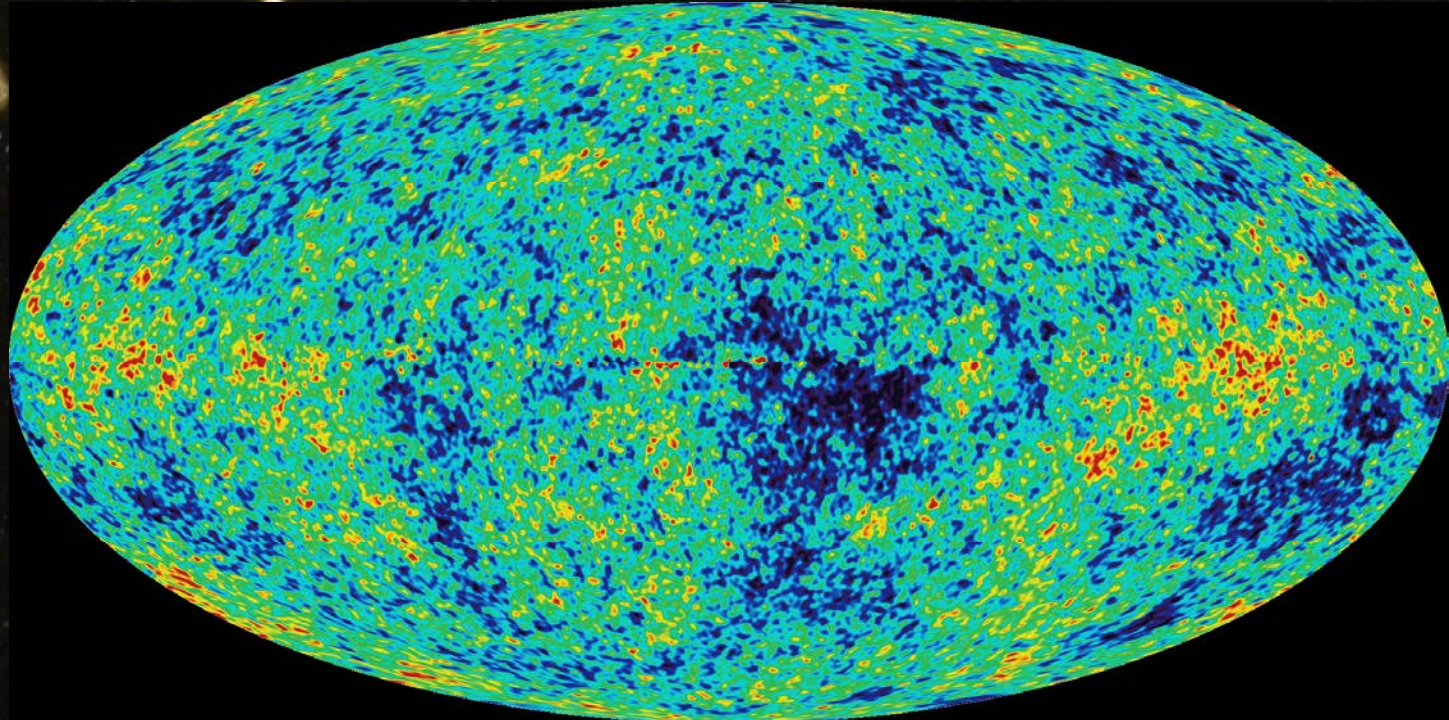
„Photographie“ der Dichtestruktur des Universums  
als es transparent wurde (380.000 Jahre n.U.)

# Planck Satellit

(gestartet 15.5.2009)



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

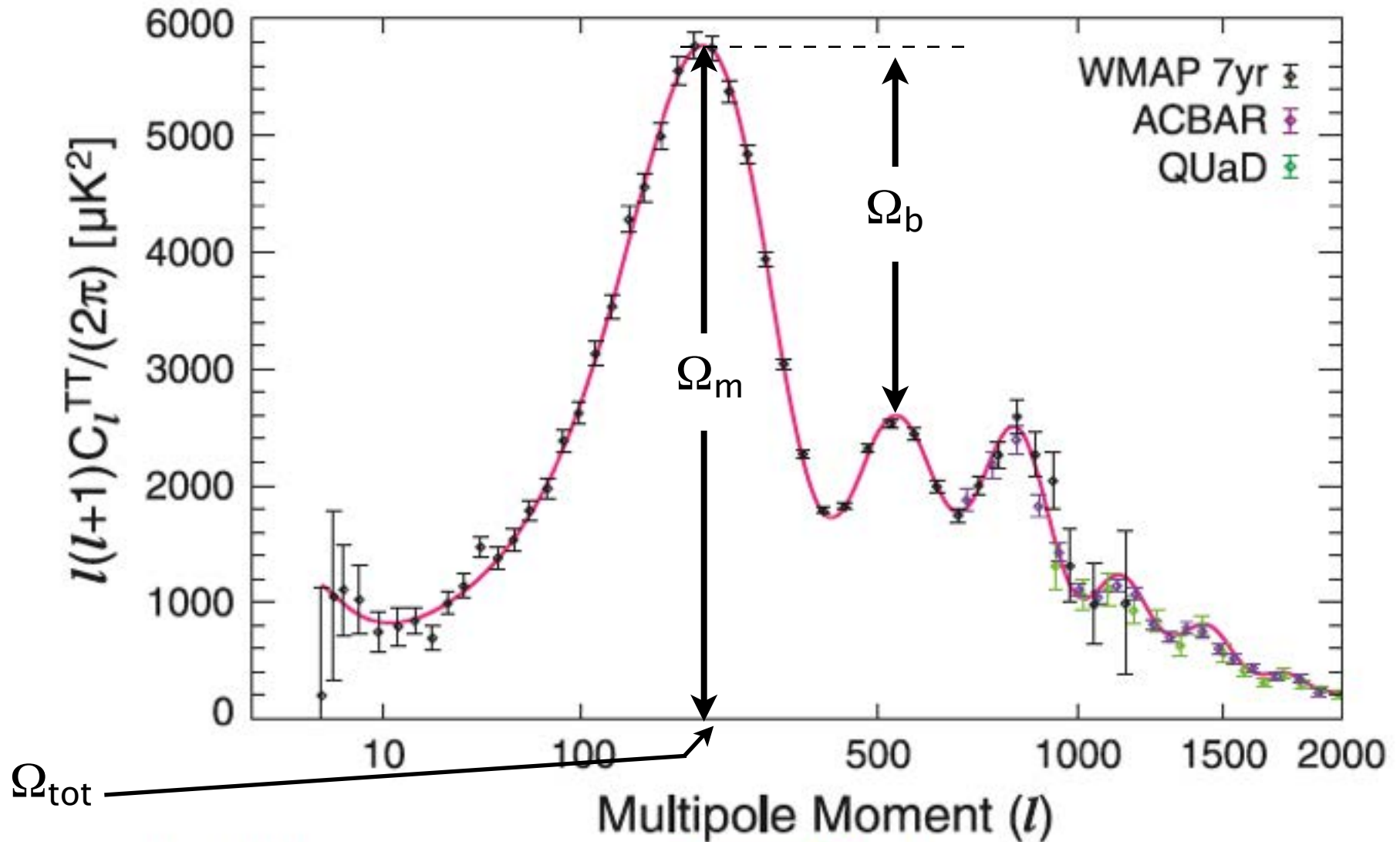


Messung der Anisotropie und der Granularität  
der kosmischen 2.7 Kelvin Hintergrundstrahlung

(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  $180^\circ$ , Quadrupol:  $90^\circ$ ,...)





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  $\Lambda$ CDM model to the WMAP data alone (see the 3rd column of Table 1 for the maximum likelihood parameters).

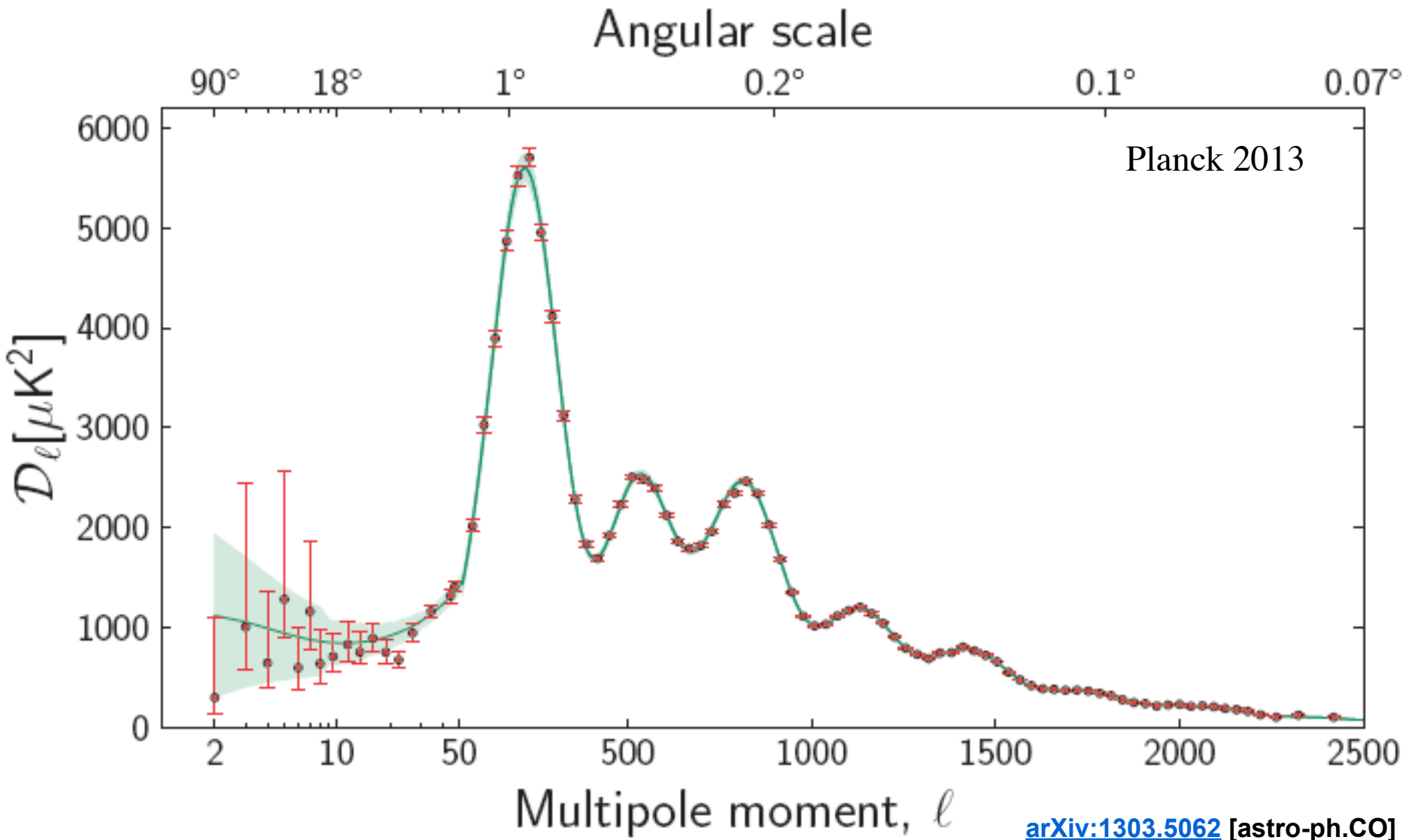
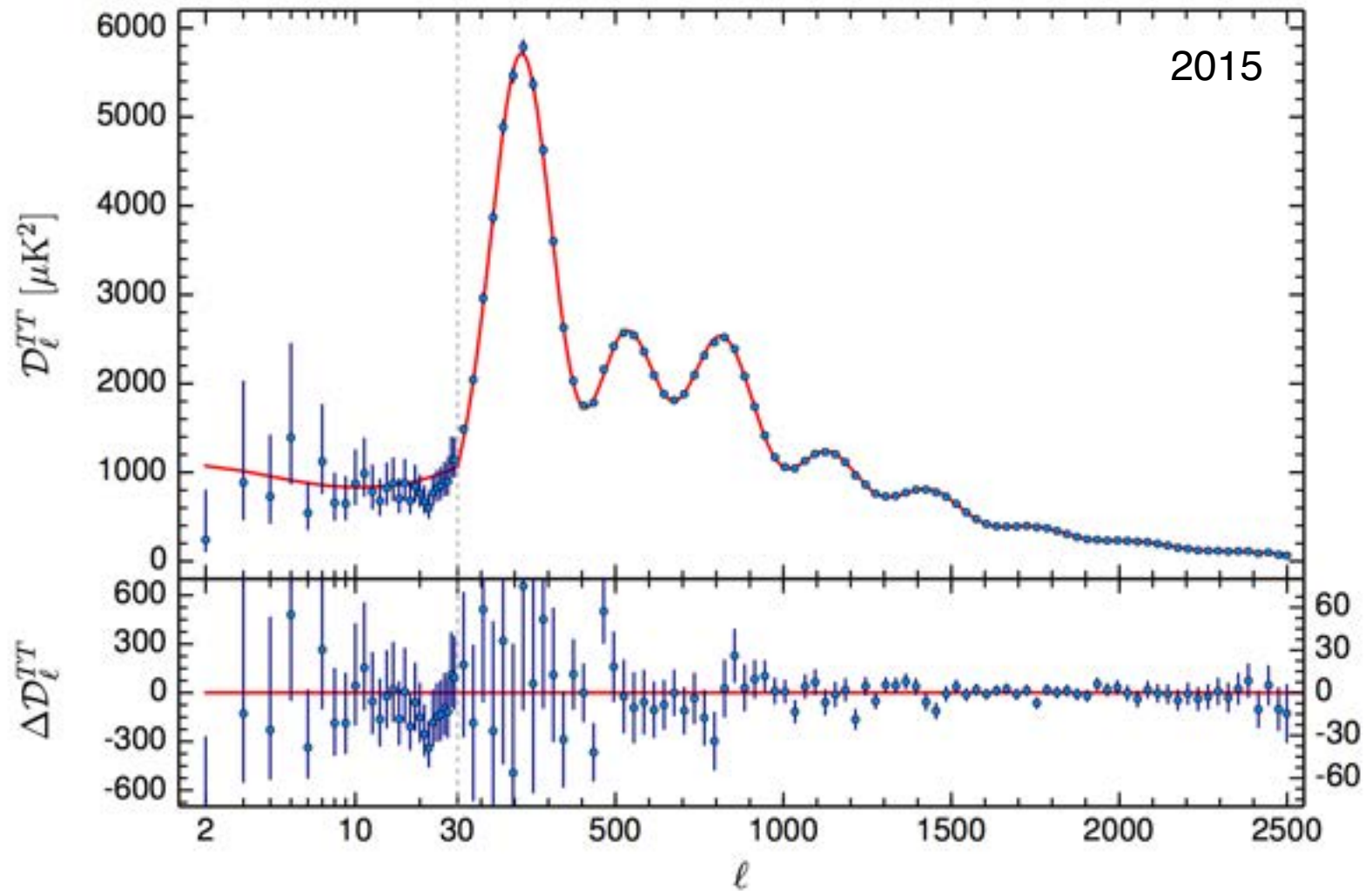


Fig. 19. The temperature angular power spectrum of the primary CMB from *Planck*, showing a precise measurement of seven acoustic peaks, that are well fit by a simple six-parameter  $\Lambda$ CDM theoretical model (the model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013)). 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- $\ell$  region.



**Fig. 1.** The *Planck* 2015 temperature power spectrum. At multipoles  $\ell \geq 30$  we show the maximum likelihood frequency averaged temperature spectrum computed from the *Planck* cross-half-mission likelihood with foreground and other nuisance parameters determined from the MCMC analysis of the base  $\Lambda$ CDM cosmology. In the multipole range  $2 \leq \ell \leq 29$ , we plot the power spectrum estimates from the *Commander* component-separation algorithm computed over 94% of the sky. The best-fit base  $\Lambda$ CDM theoretical spectrum fitted to the *Planck* TT+lowP likelihood is plotted in the upper panel. Residuals with respect to this model are shown in the lower panel. The error bars show  $\pm 1 \sigma$  uncertainties.

# neueste Inventur des Universums (Planck):

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

[arXiv:1502.15082](https://arxiv.org/abs/1502.15082) [astro-ph.CO]

Alter:  $13.799 \pm 0.038$  Milliarden Jahre

$\Omega_{\text{dark energy}}$   $69,2\% \pm 1,2\%$

$\Omega_{\text{cold dark matter}}$   $25,9\% \pm 1,2\%$

$\Omega_{\text{baryons}}$   $4,9\% \pm 0,1\%$

$\Omega_{\text{m}}$   $30,8\% \pm 1,2\%$

$H_0$   $67,8 \pm 0,9 \text{ km / s / Mpc}$

Weitere kosmologische Messungen zum Anteil der dark energy:  
– Supernovae Typ Ia als „Standardkerzen“

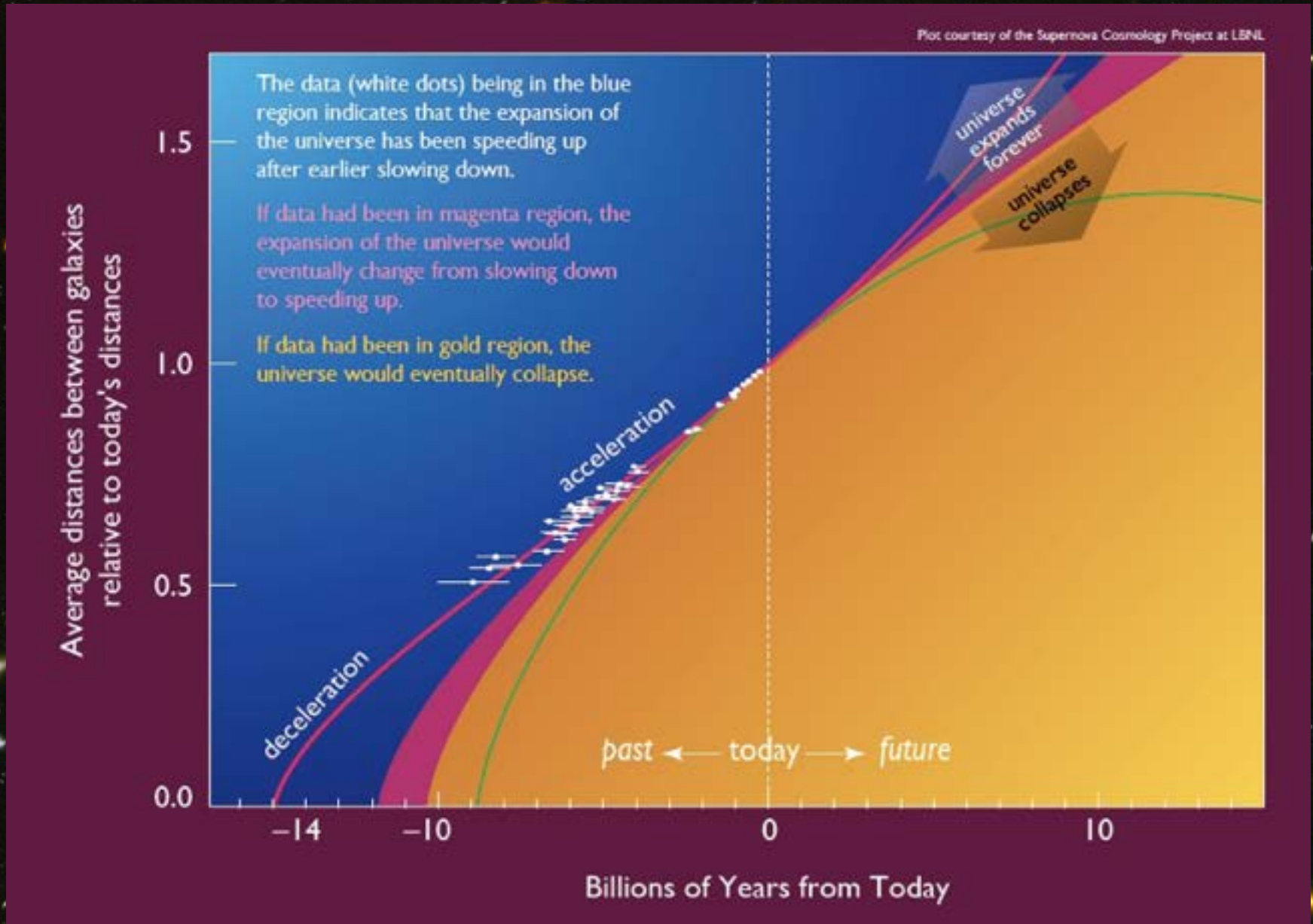
Messung der Geschichte der kosmischen Expansion:  
Supernovae (Typ Ia) als kosmische Kerzen (Objekte  
bekannter absoluter Helligkeit).

Typ I: keine Wasserstofflinien im Spektrum

Typ Ia: hat zus. Si-Absorptionslinie.

# Weitere kosmologische Messungen zum Anteil der dark energy:

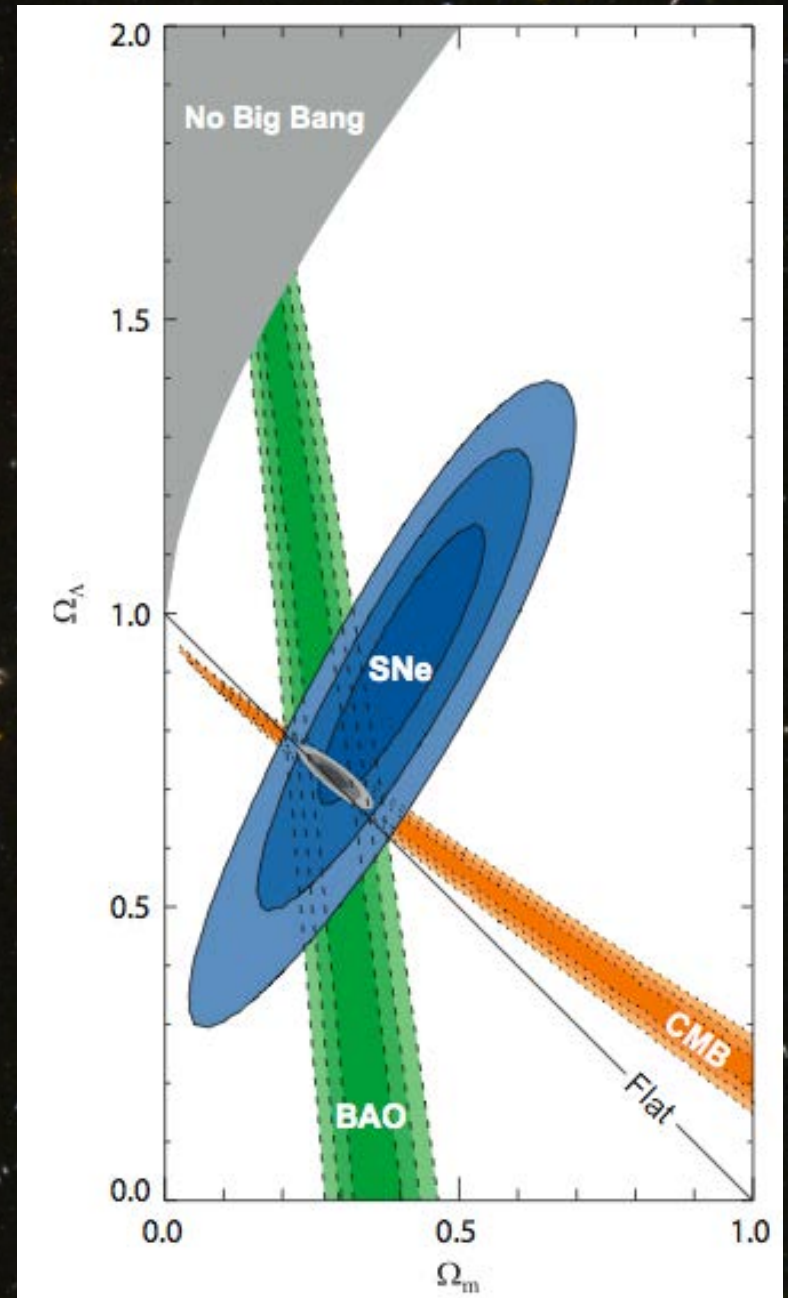
- Supernovae Typ Ia als „Standardkerzen“



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 und 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 $\gamma$	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; one of these: angle  $\beta$ , 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 gravitat. interactions!  
→ in particle reactions, leads to missing energy (like neutrinos).
- Supersymmetry with masses of  $O(1 - 10 \text{ TeV})$  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

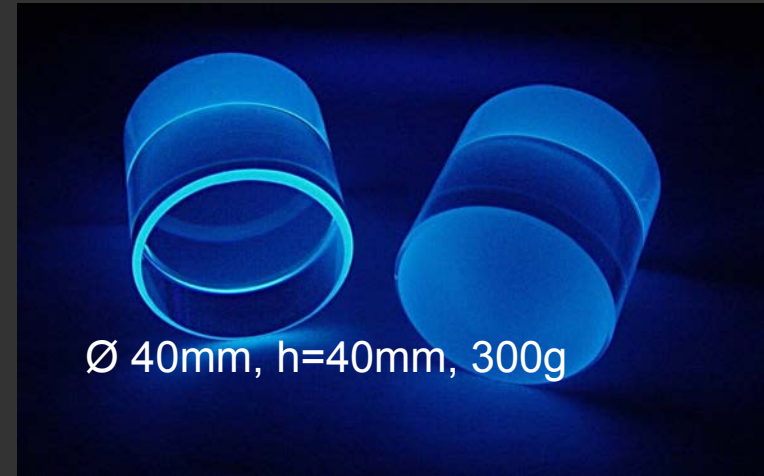
MPI für Physik, Oxford University,  
TU München, Universität Tübingen  
Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Cryogenic Dark Matter search

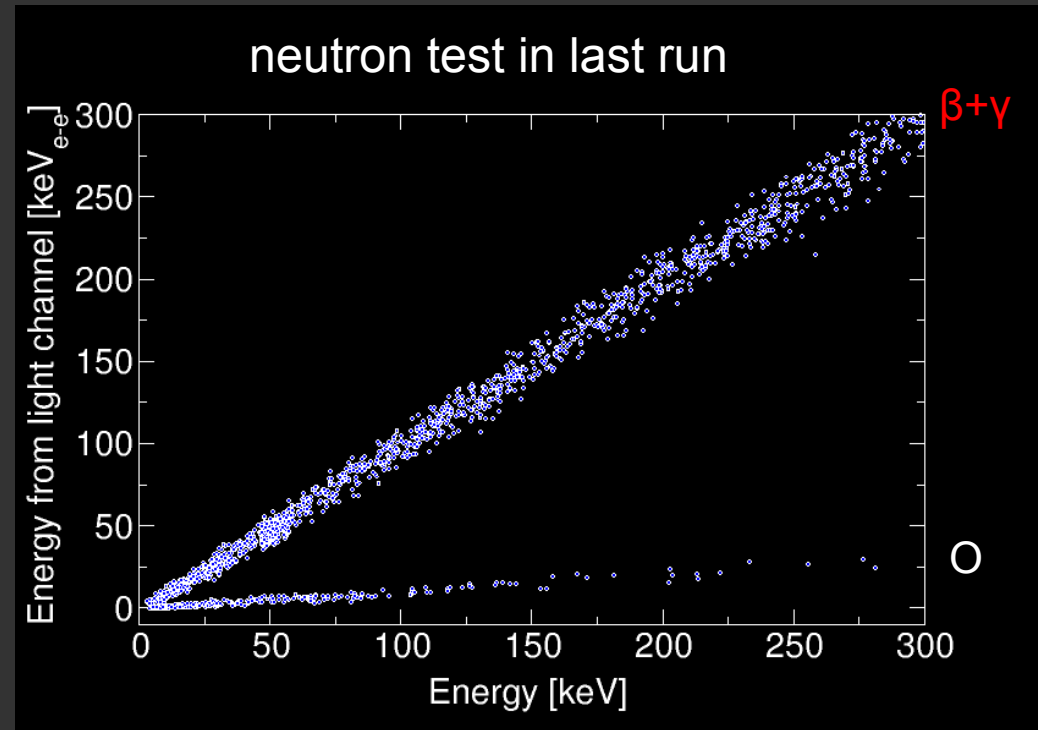
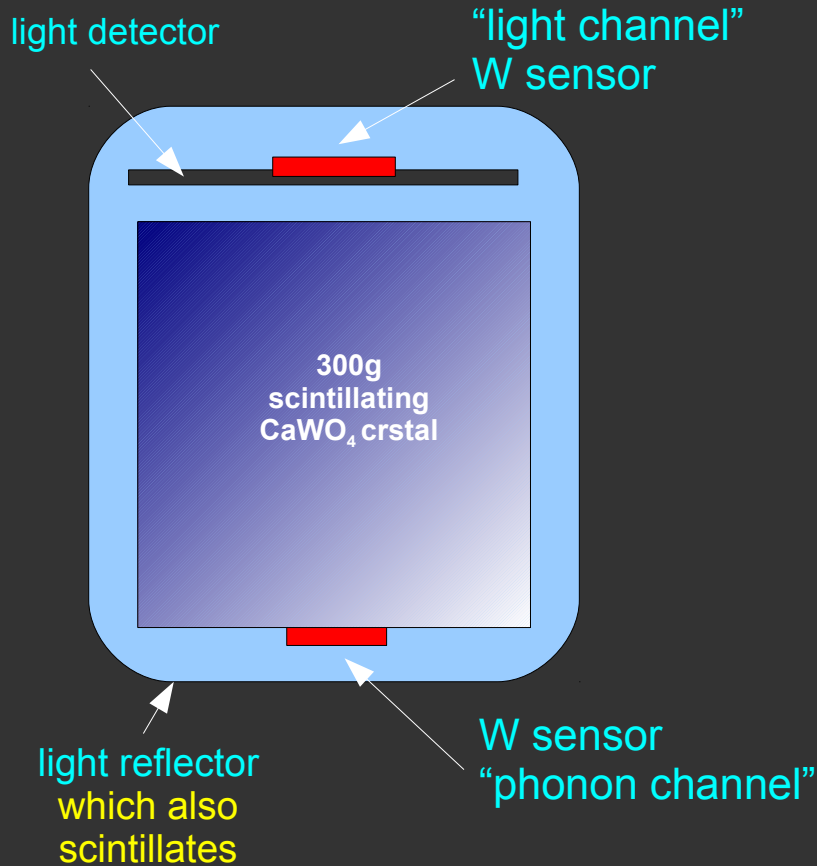
Located in hall A of LNGS

Scintillating  $\text{CaWO}_4$  target crystals

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



# CRESST Detectors



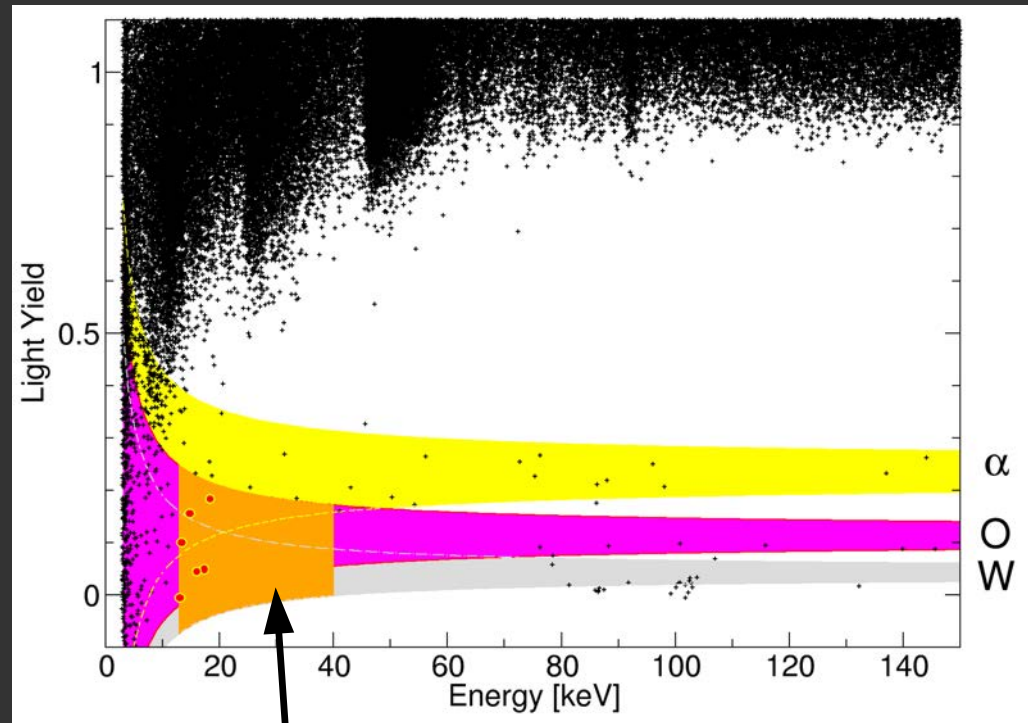
- Phonon channel measures deposited energy with sub keV resolution and accuracy
- Light channel serves to distinguish types of interaction
- Types of recoiling nuclei distinguished by different slopes in energy-light plane

# Discrimination of Event Types

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

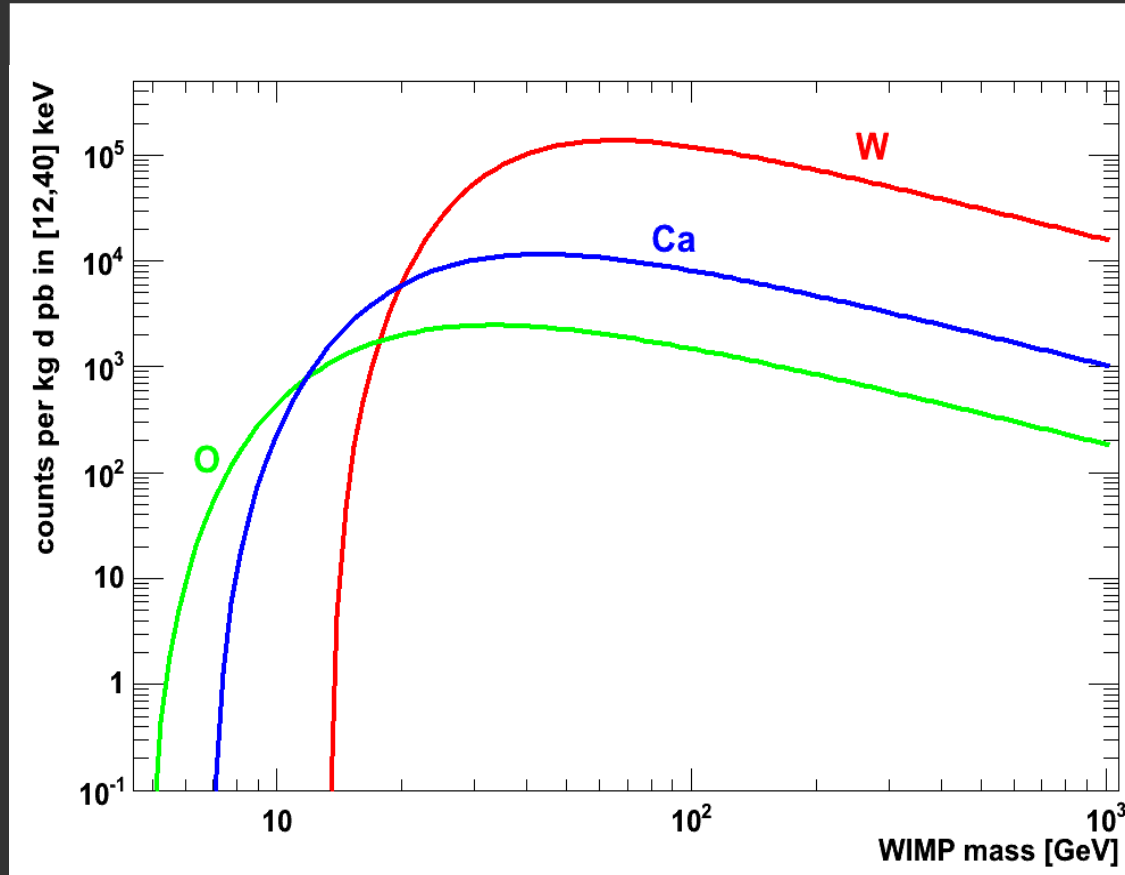
Event types characterized by different light yield

- efficient discrimination of nuclear recoils from  $\beta/\gamma$ -background
- WIMP signals expected in nuclear recoil bands



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

# Types of Recoils in $\text{CaWO}_4$

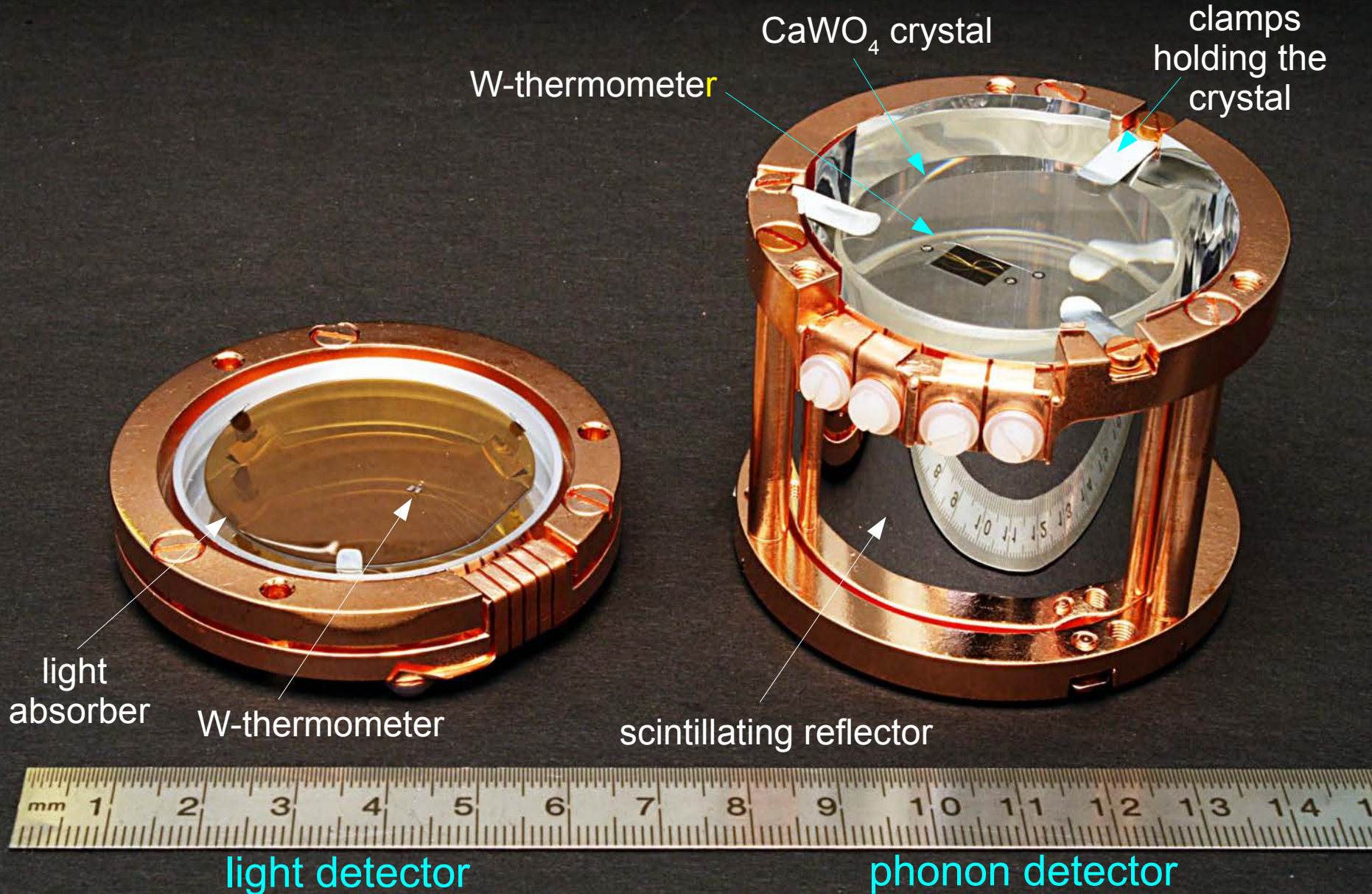


Assuming:

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

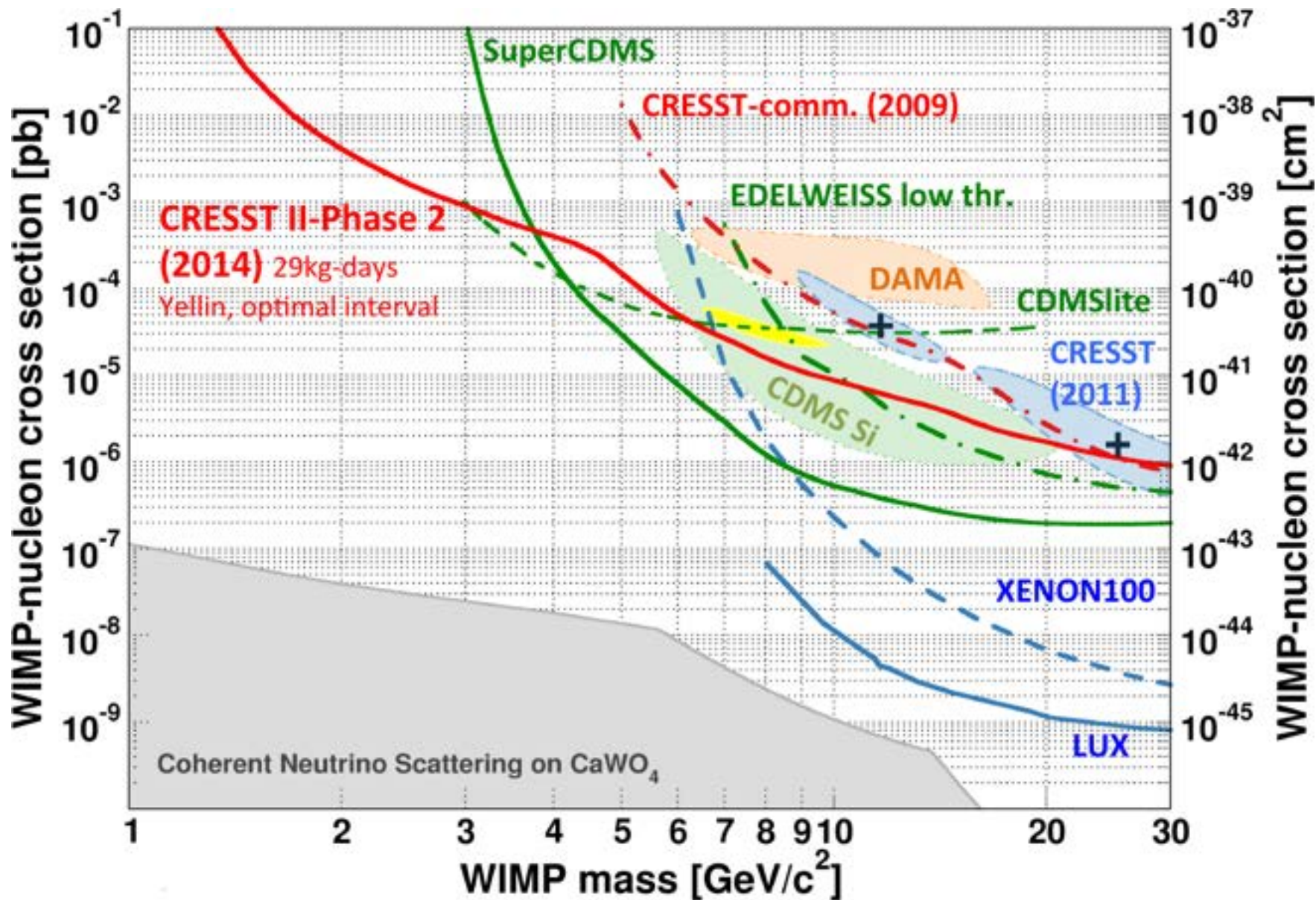
- For  $M < 10$  GeV only oxygen
  - Calcium important around 10 GeV
  - Tungsten dominates at larger WIMP masses due to  $\sigma \propto A^2$
- type of recoils, together with the recoil energy spectrum, offers very detailed information on mass of possible WIMP

# 300 g Detector Module





# Status of direct DM (WIMP) Searches



# 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]
- **Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters** Planck Collaboration (P.A.R. Ade (Cardiff U.) et al.). Feb 5, 2015. arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO]