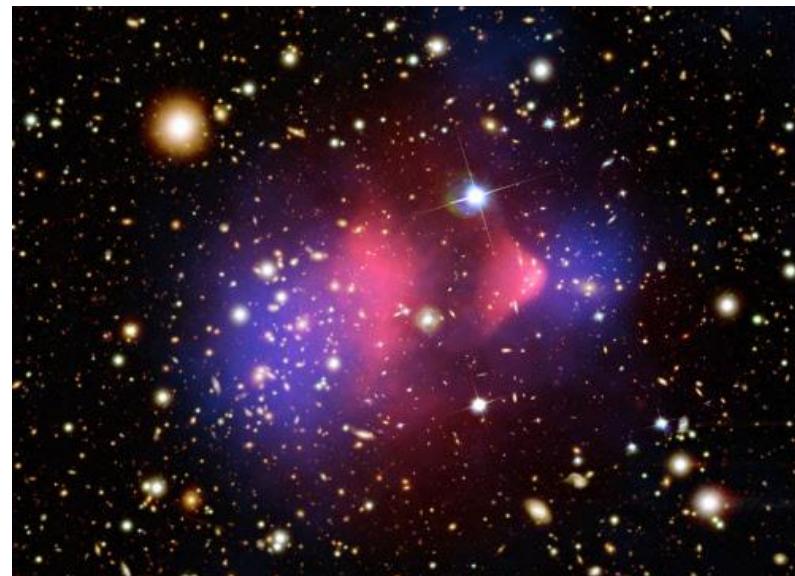


Dunkle Materie

Erhellendes aus Universum und Labor



A. Straessner

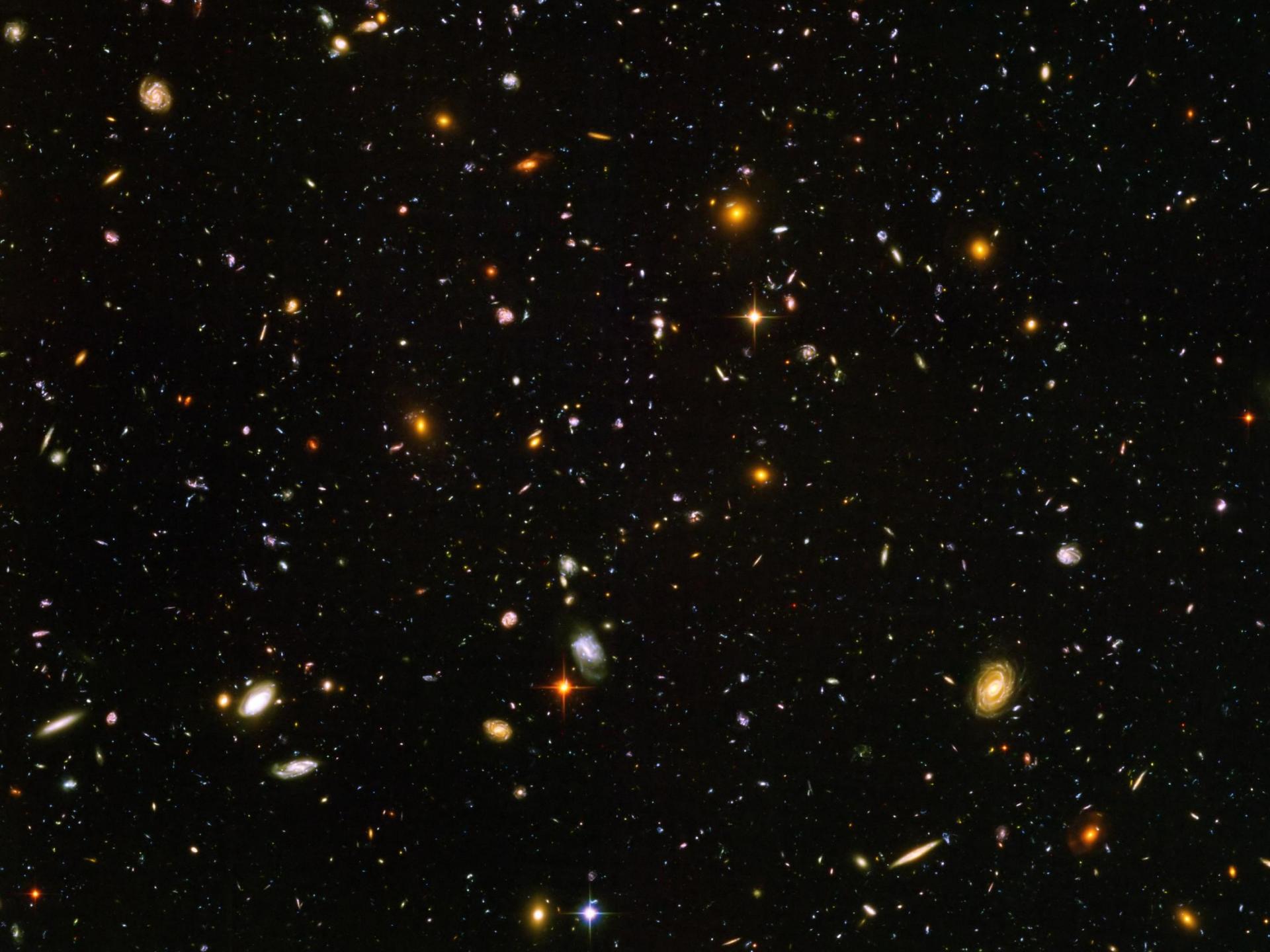


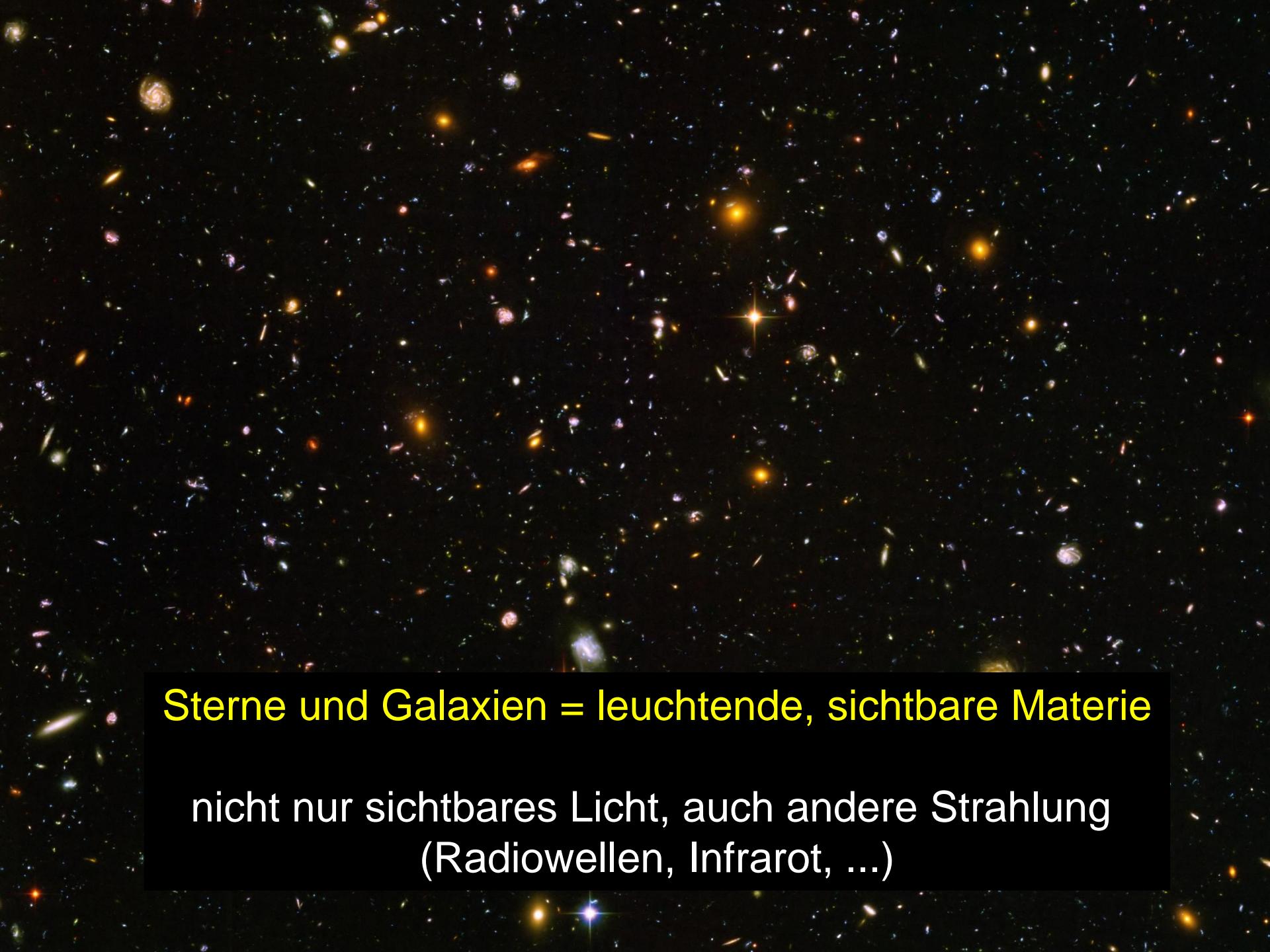
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

16. April 2015



- Was ist Dunkle Materie?
- Nachweis Dunkler Materie im Universum
- Suche nach Dunkler Materie “im Labor”



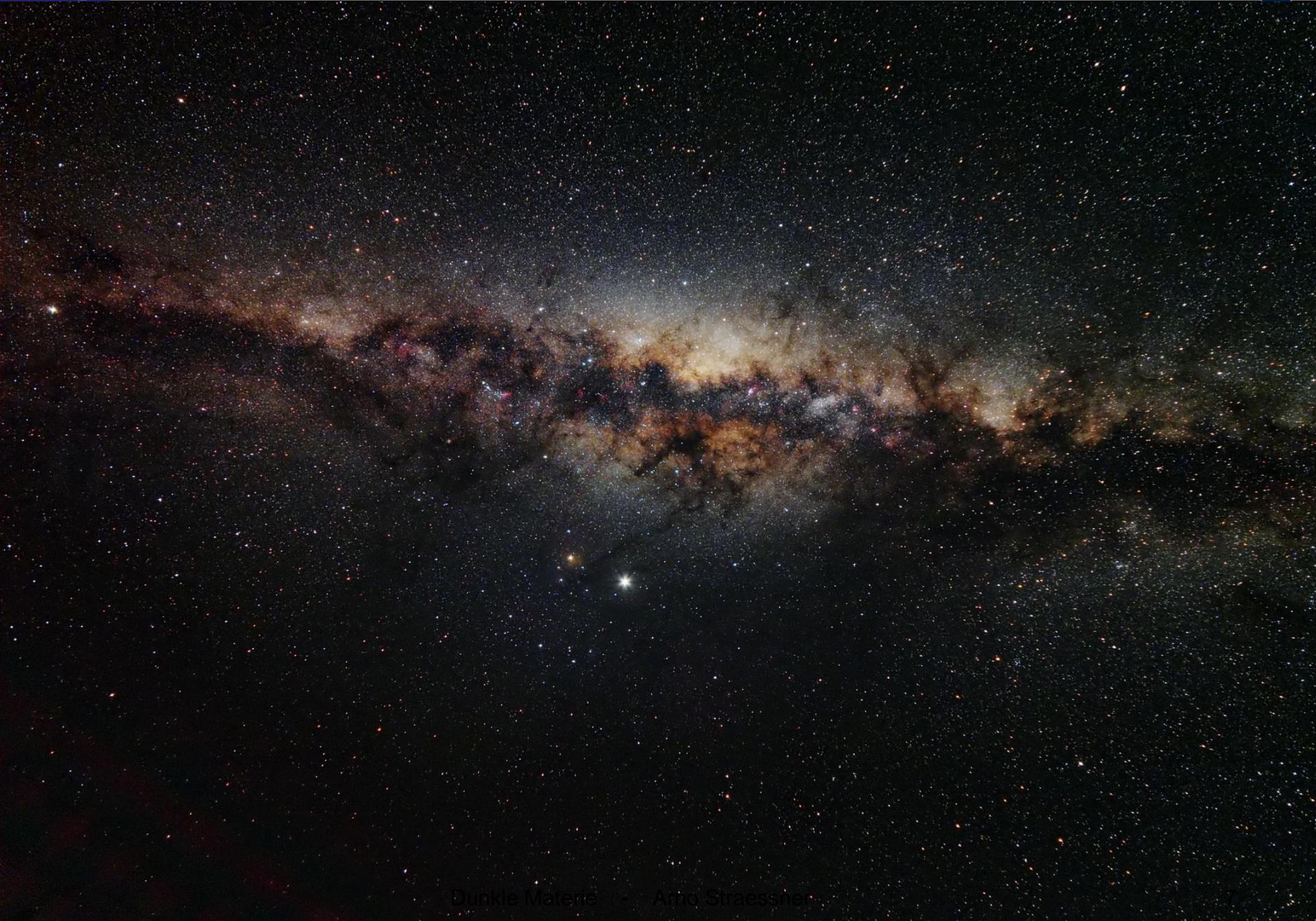


Sterne und Galaxien = leuchtende, sichtbare Materie
nicht nur sichtbares Licht, auch andere Strahlung
(Radiowellen, Infrarot, ...)

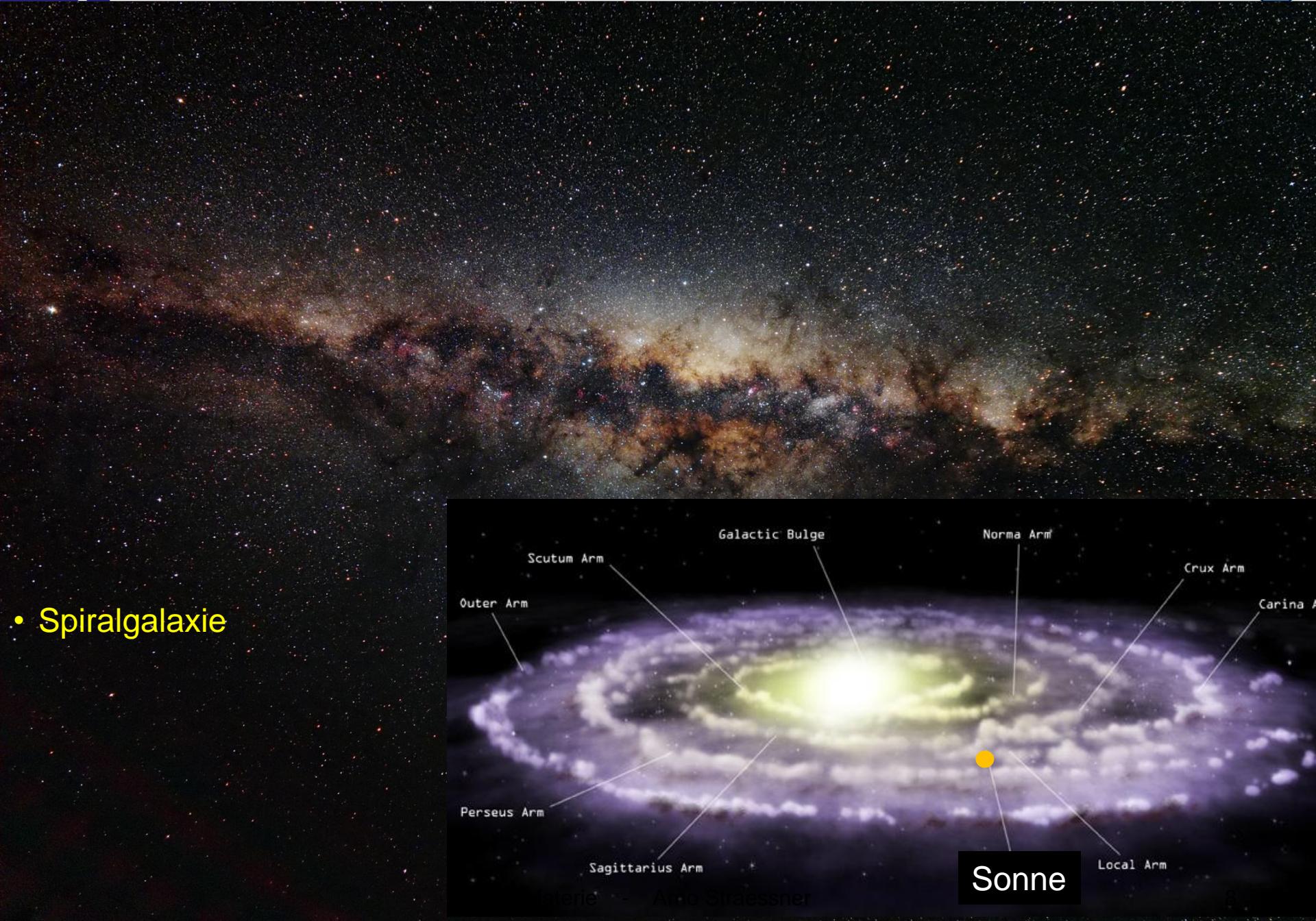
Dunkle Materie

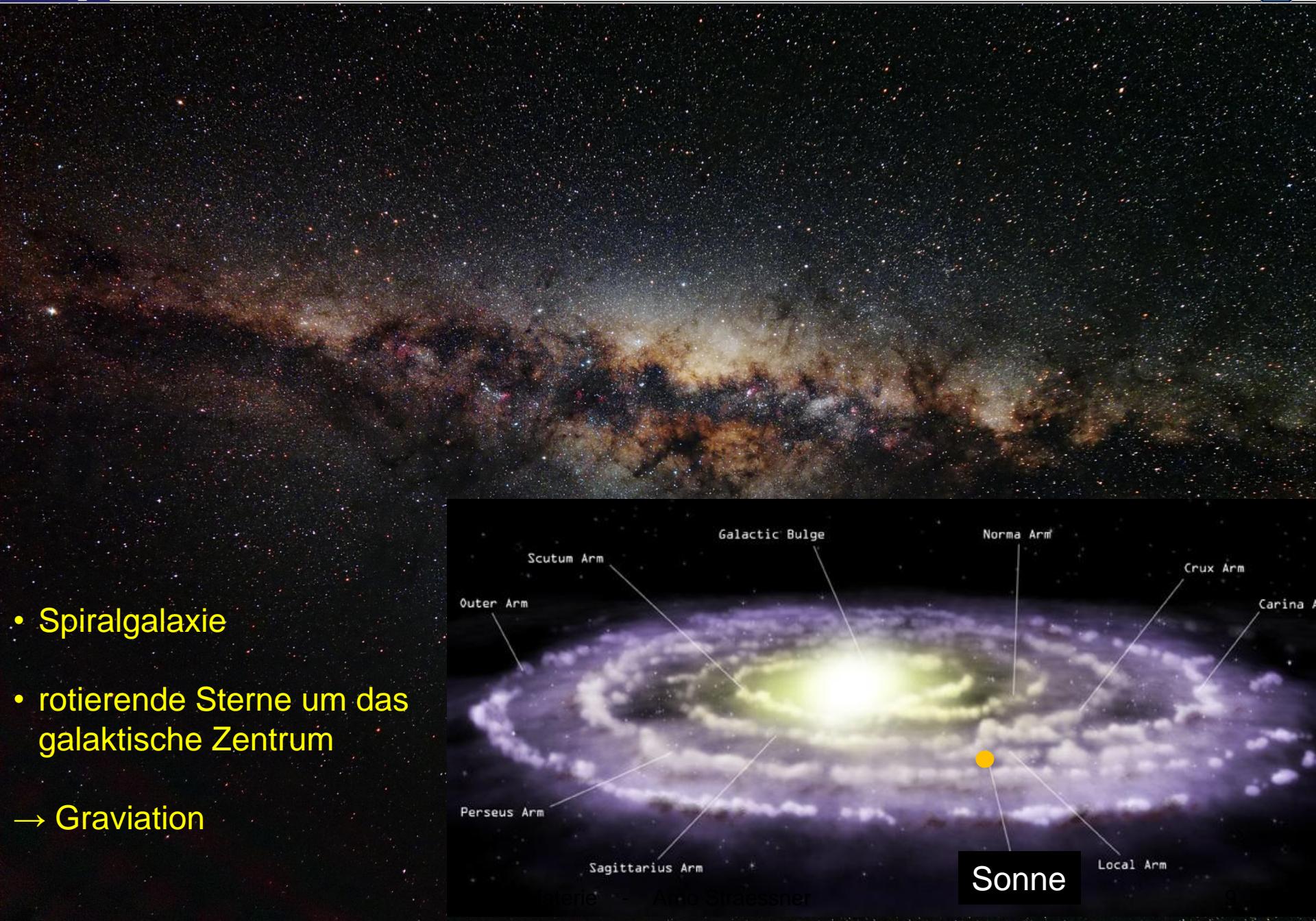
nicht durch Strahlungsemission nachweisbar

Wenn man sie nicht sieht,
woher weiß man, dass es Dunkle Materie gibt?



Unsere Galaxie – die Milchstrasse





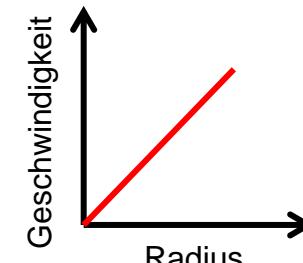
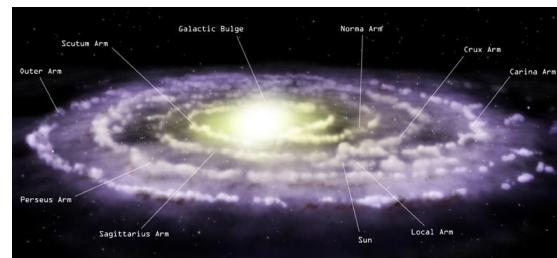
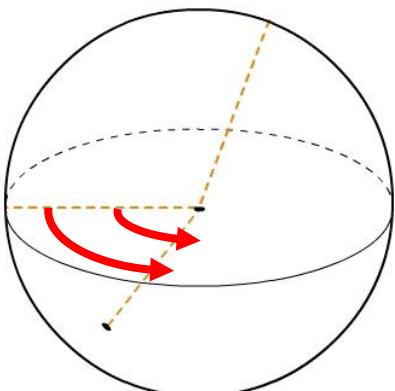
- Spiralgalaxie
- rotierende Sterne um das galaktische Zentrum

→ Gravitation

Sonne

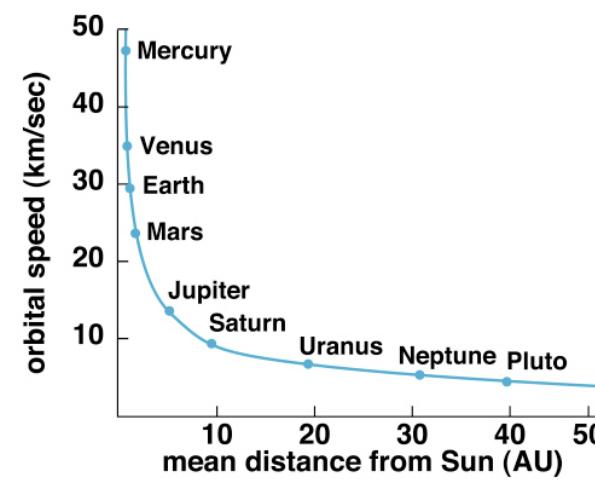
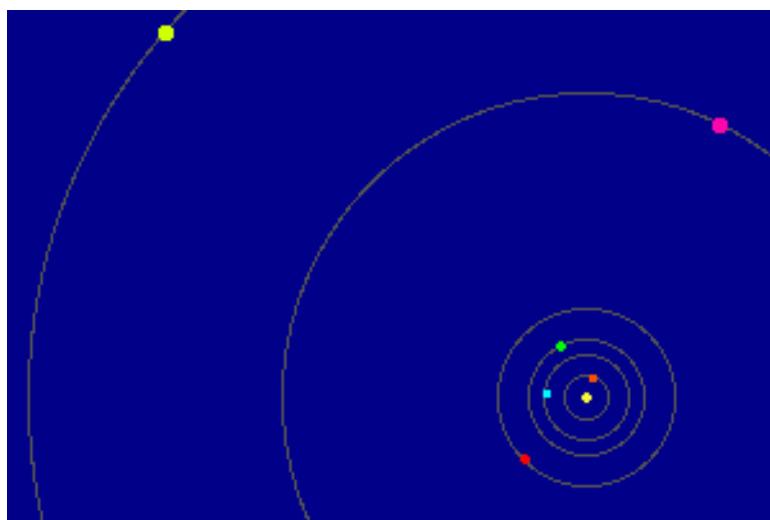
Erwartung

- Sterne im galaktischen Zentrum kreisen wie eine feste Kugel um Mittelpunkt



→ Geschwindigkeit nimmt linear zu mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt

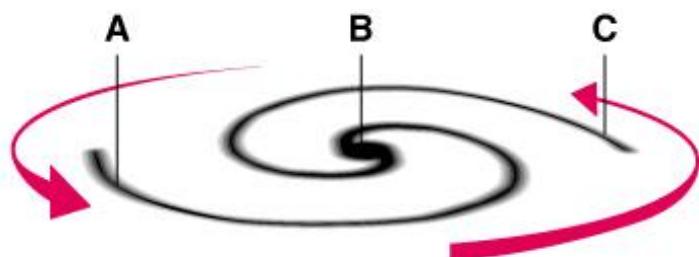
- Äußere Sterne kreisen um galaktisches Zentrum wie Planeten um die Sonne



(b)
Copyright © Addison Wesley

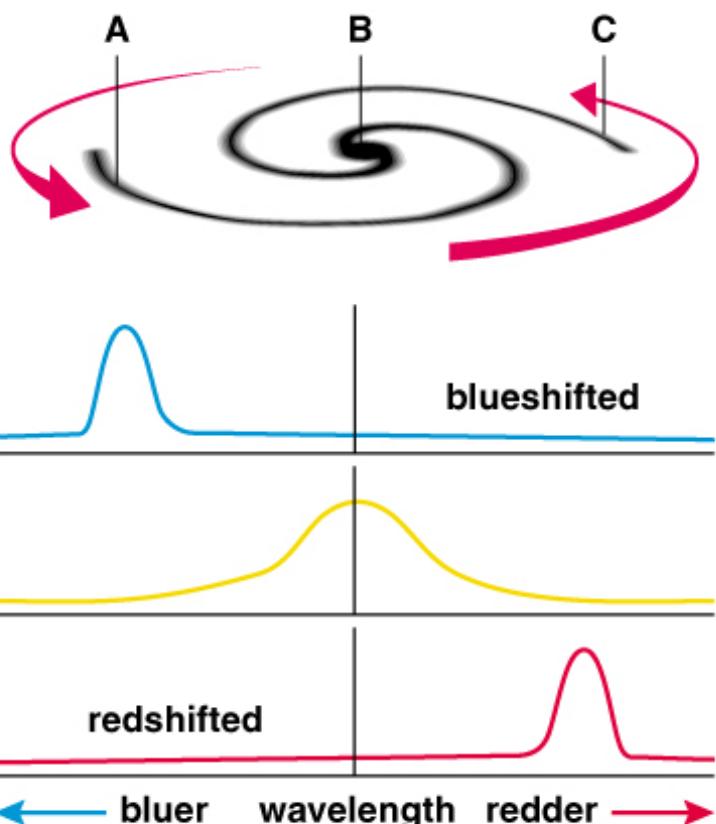
→ Geschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Abstand ab

- Bestimmung der Bewegungs-Geschwindigkeit anhand des Doppler-Effekts
- Beim Martinshorn: Verschiebung der Tonhöhe:



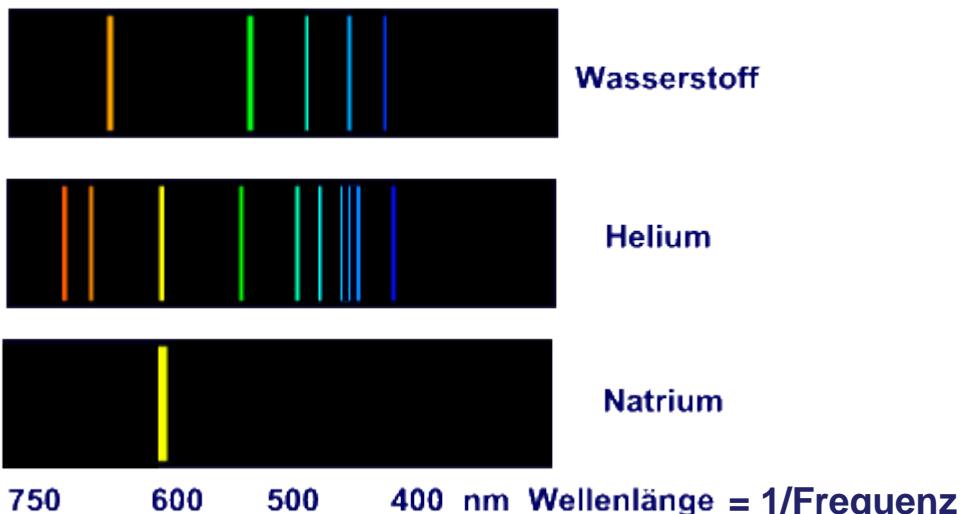
- A: Quelle bewegt sich auf Beobachter zu → höherer Ton = höhere Frequenz
- B: Quelle entfernt sich von Beobachter → niedrigerer Ton = niedrigere Frequenz

- Verschiebung bekannter Spektrallinien von Atomen und Molekülen



Copyright © Addison Wesley.

Emissionsspektren (ruhende Quelle)

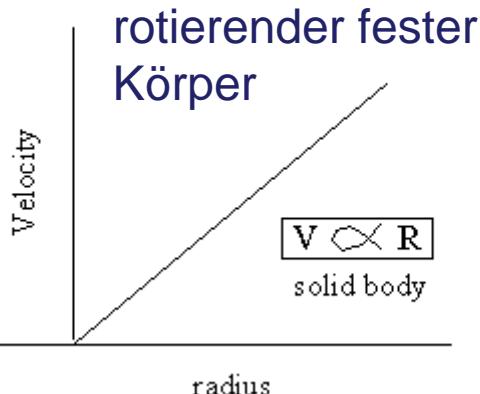
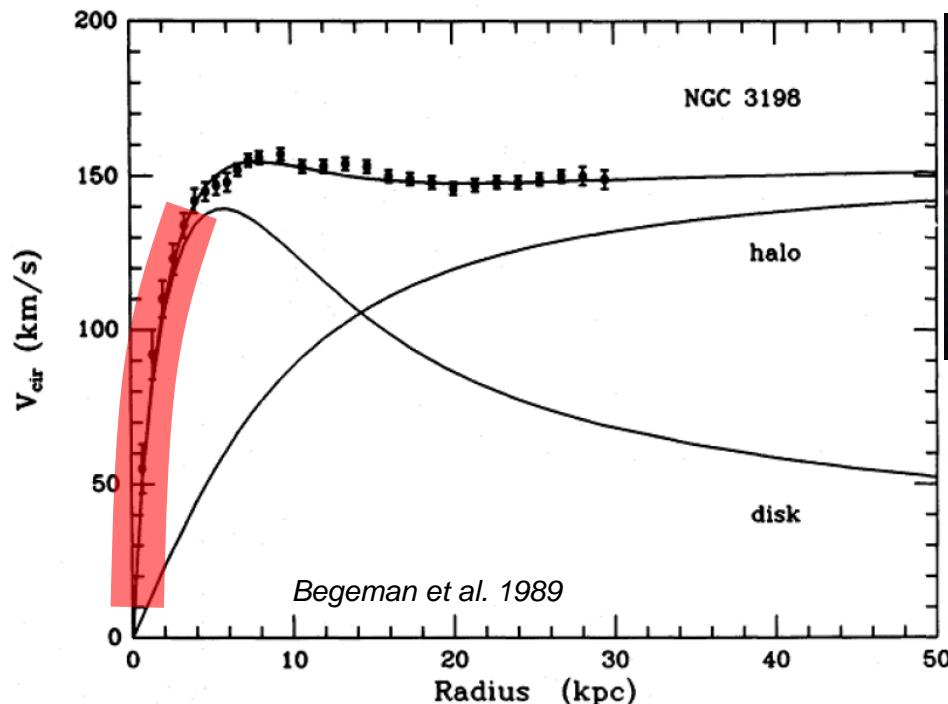


Galaxie NGC 3198
im Sternbild Grosser Bär

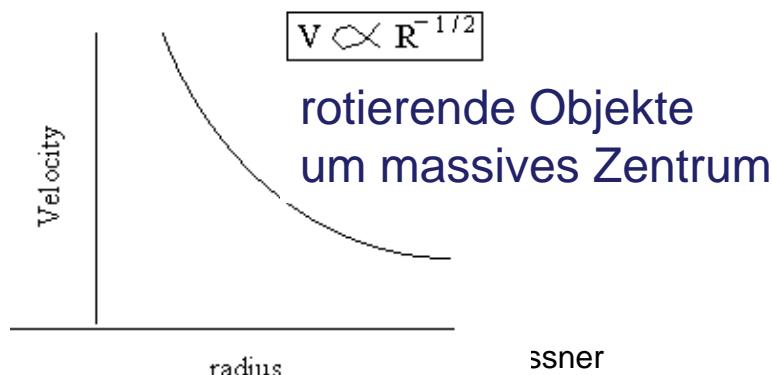
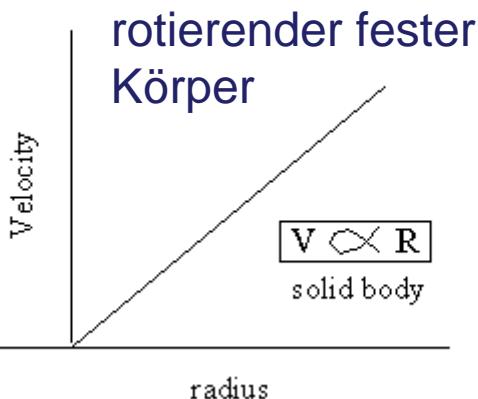
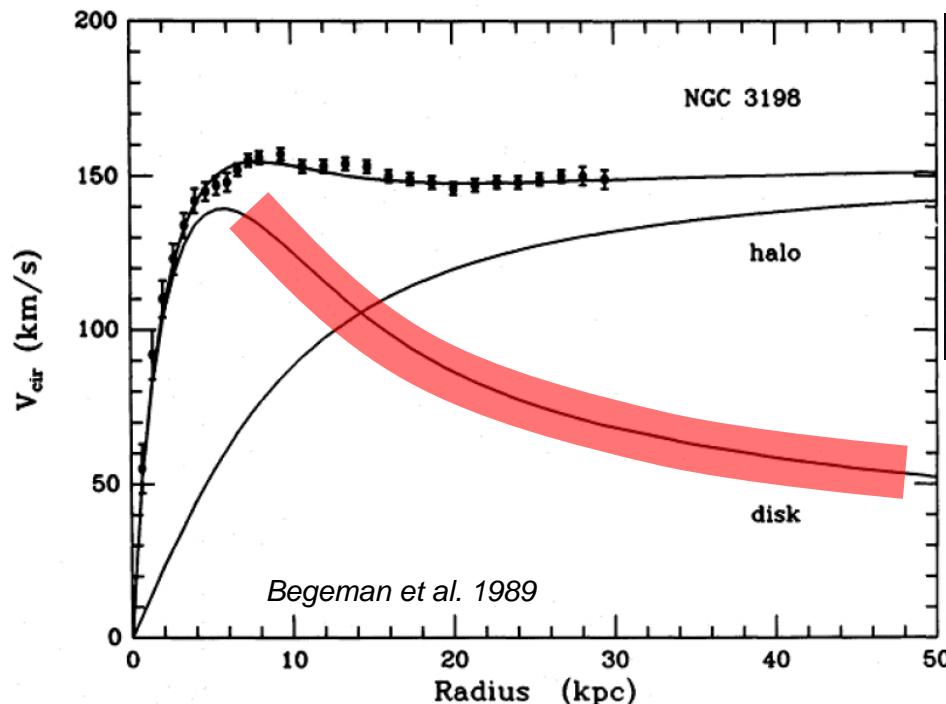


- A: höhere Frequenz: Licht wird nach “blau” verschoben
- B: niedrigere Frequenz: Licht wird “rot” verschoben

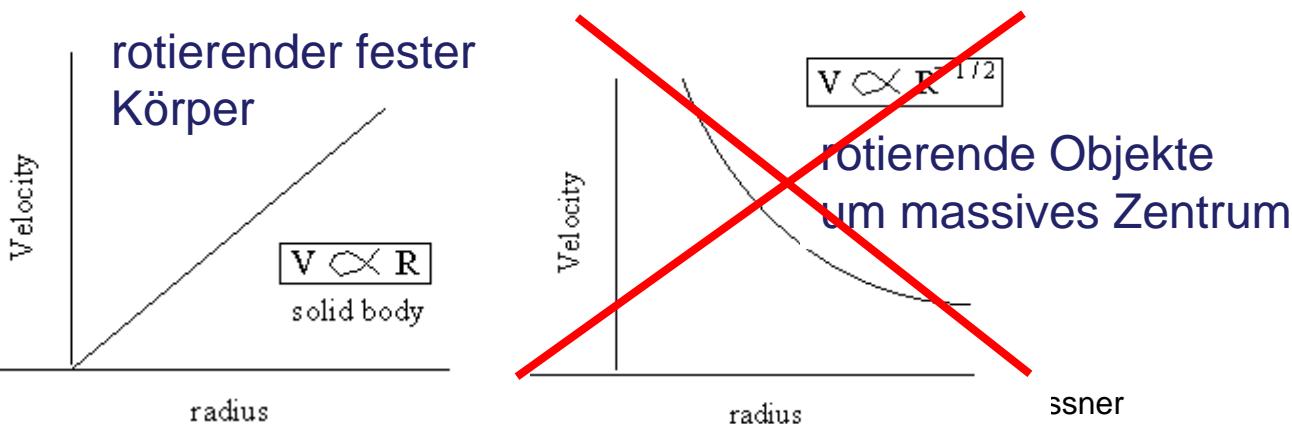
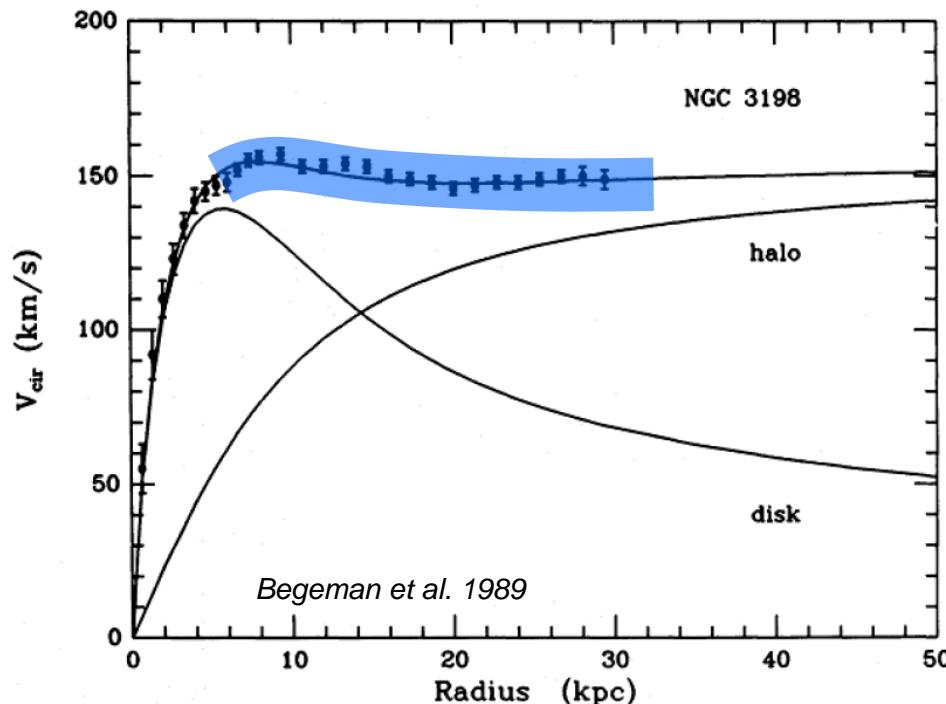
- Bestimmung der Bewegungs-Geschwindigkeit anhand des Doppler-Effekts und Verschiebung bekannter Spektrallinien von Atomen und Molekülen



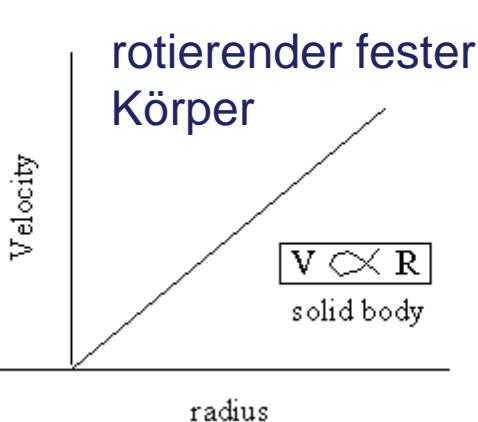
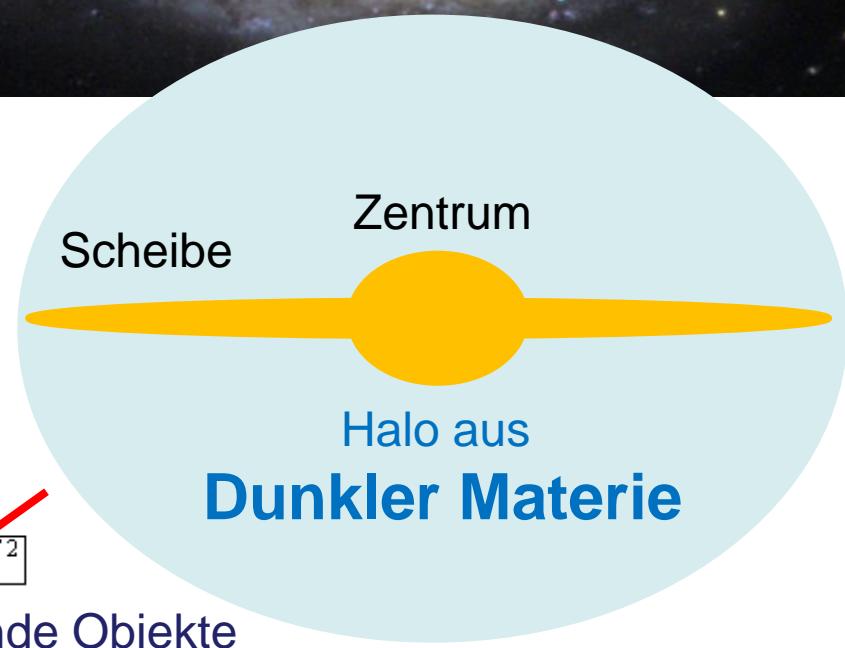
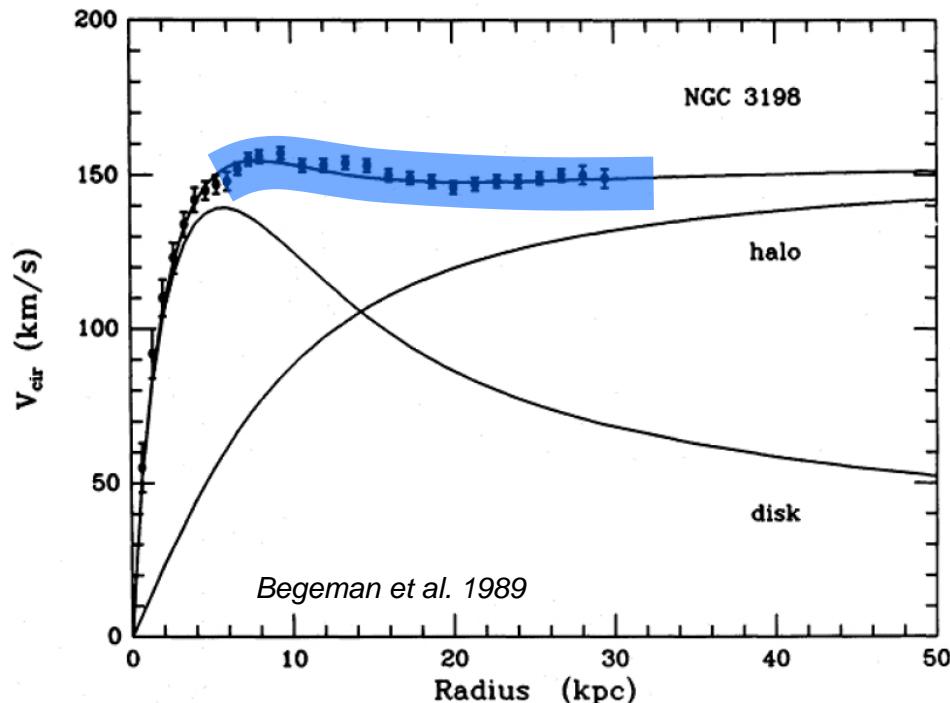
- Bestimmung der Bewegungs-Geschwindigkeit anhand des Doppler-Effekts und Verschiebung bekannter Spektrallinien von Atomen und Molekülen



- Bestimmung der Bewegungs-Geschwindigkeit anhand des Doppler-Effekts und Verschiebung bekannter Spektrallinien von Atomen und Molekülen



- Bestimmung der Bewegungs-Geschwindigkeit anhand des Doppler-Effekts und Verschiebung bekannter Spektrallinien von Atomen und Molekülen





1932 August 17

Volume VI.

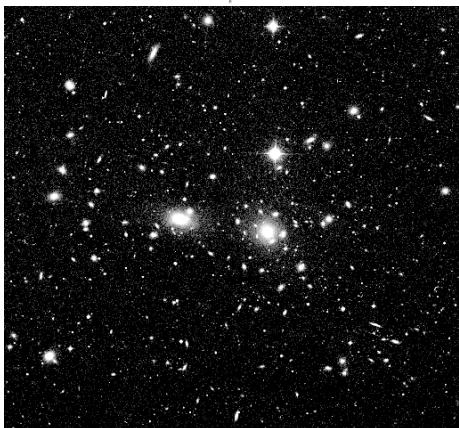
No. 238.

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN.

The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, by *J. H. Oort*.

There is an indication that the invisible mass is more strongly concentrated to the galactic plane than that of the visible stars (Table 33).

Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln
von F. Zwicky.
(16. II. 33.)



- Beobachtung von Geschwindigkeiten im Sternenhaufen Coma Berenices
- Bestimmung der Masse aller Objekte im **Coma Sternenhaufen** aus Bewegungsenergie und Energie der Schwerkraft
- für **sichtbare Sterne und Galaxien** gilt:

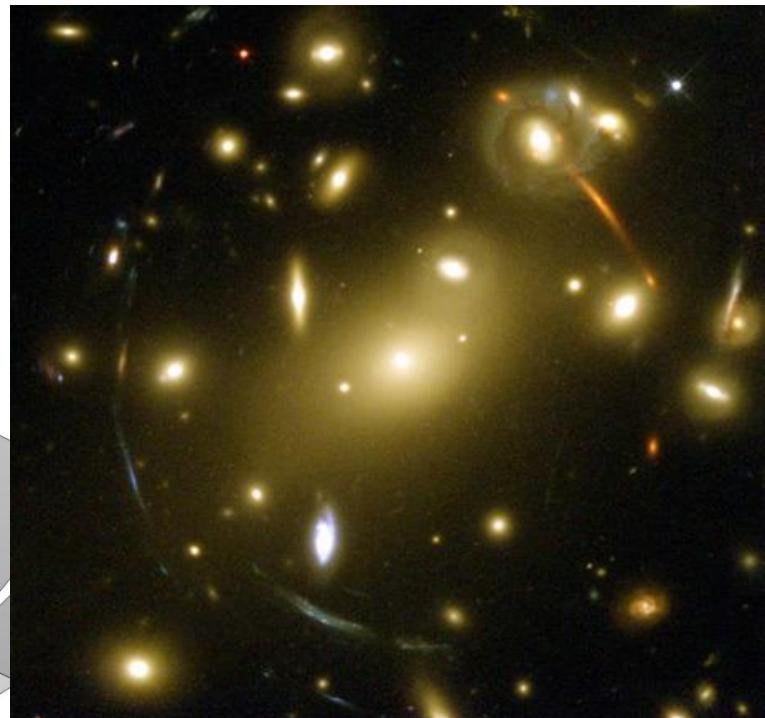
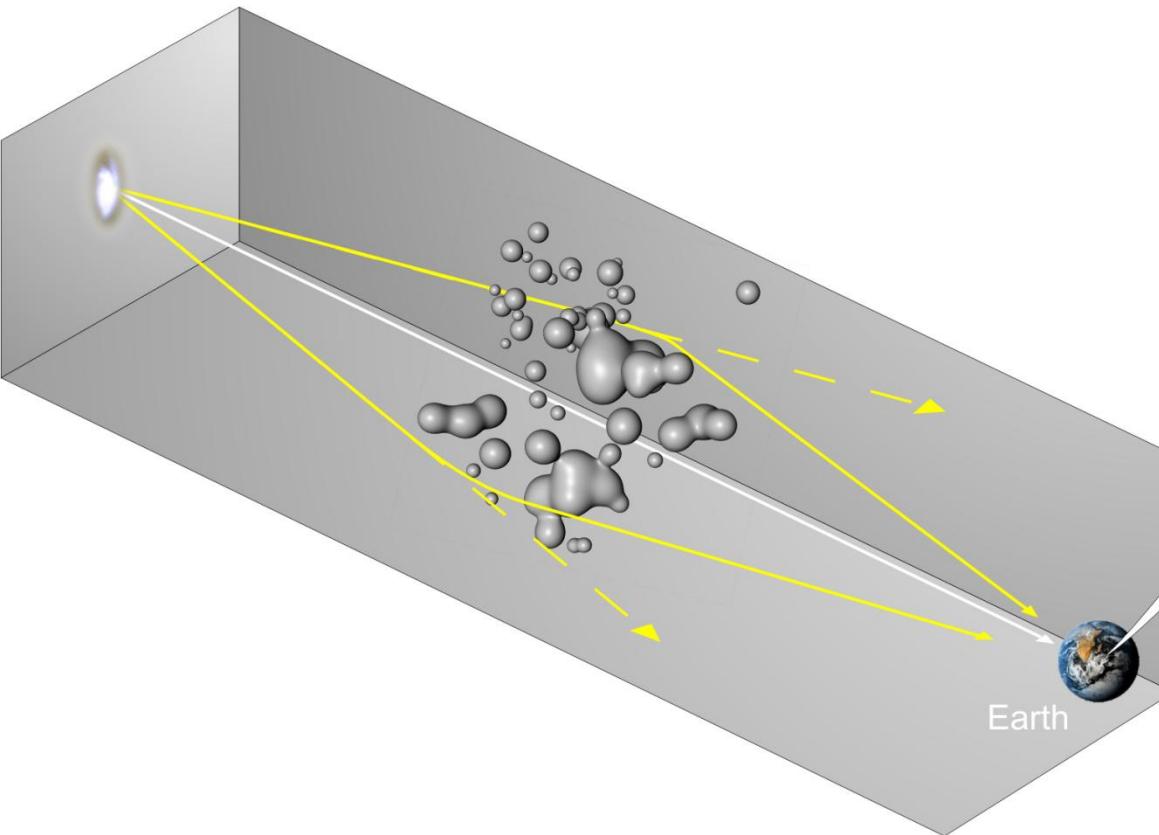
Masse \sim Leuchtkraft

Leuchtkraft ist 400-fach kleiner als erwartet!
→ **Dunkle Materie**

§ 5. Bemerkungen zur Streuung der Geschwindigkeiten im Coma-Nebelhaufen.

Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

- Das Licht weit entfernter Galaxien wird im Gravitationsfeld naher Galaxien und Massenverteilungen abgelenkt wie von einer optischen Linse



- Mit dem Hubble Space Teleskop wurden solche Gravitationslinsen genau vermessen
- Ergebnis: die Masse, die zur Ablenkung nötig ist, ist größer als von den leuchtenden Objekten erwartet

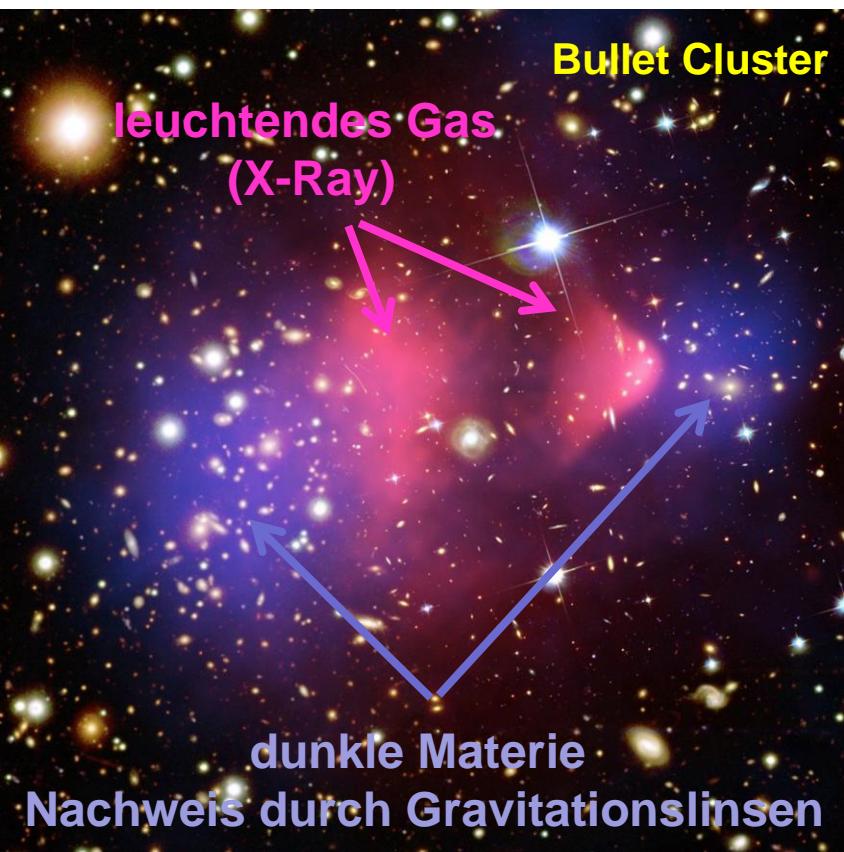
→ **Dunkle Materie**

A DIRECT EMPIRICAL PROOF OF THE EXISTENCE OF DARK MATTER *

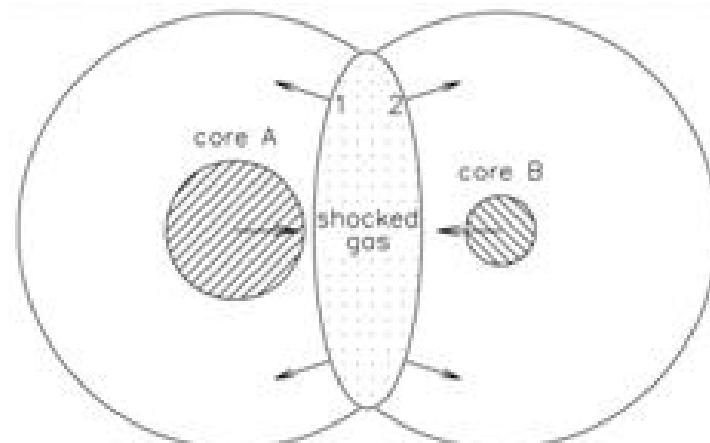
arXiv:astro-ph/0608407v1

DOUGLAS CLOWE¹, MARUŠA BRADAČ², ANTHONY H. GONZALEZ³, MAXIM MARKEVITCH^{4,5}, SCOTT W. RANDALL⁴,
CHRISTINE JONES⁴, AND DENNIS ZARITSKY¹

ApJ Letters in press



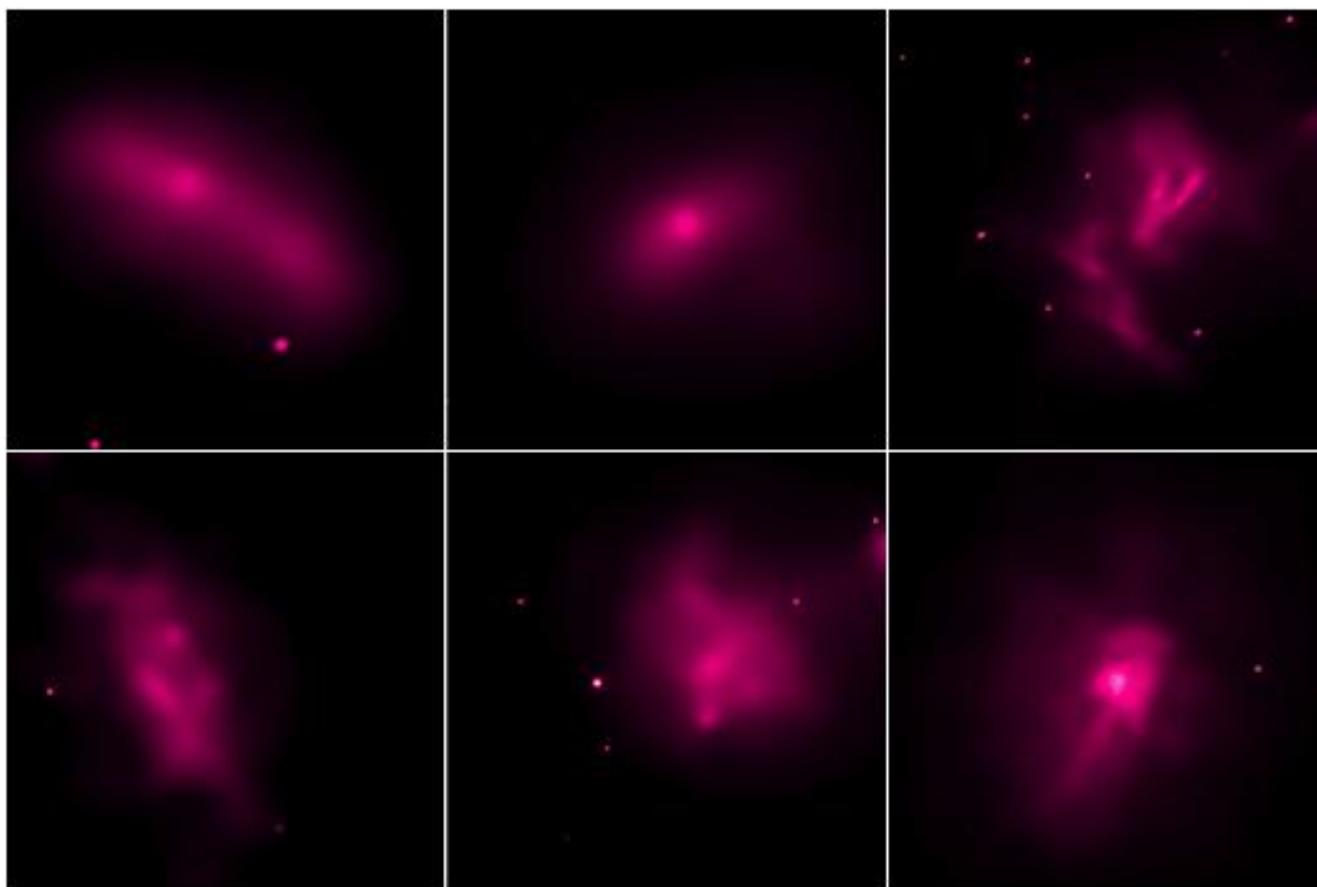
- Galaxien-Cluster: Sterne, Gas, Dunkle Materie
- Heiße Gas-Wolken kollidieren
→ Nachweis im Röntgenlicht-Bereich (X-Ray)
- Sterne und Dunkle Materie durchqueren die Kollisionszone nahezu ungestört



- Messung der Lichtemission der Gaswolken mit dem Chandra X-ray Observatory
- Auswertung der Gravitationslinsen mit dem Hubble Space Telescope

The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters

David Harvey,^{1,2*} Richard Massey,³ Thomas Kitching,⁴ Andy Taylor,² Eric Tittley²



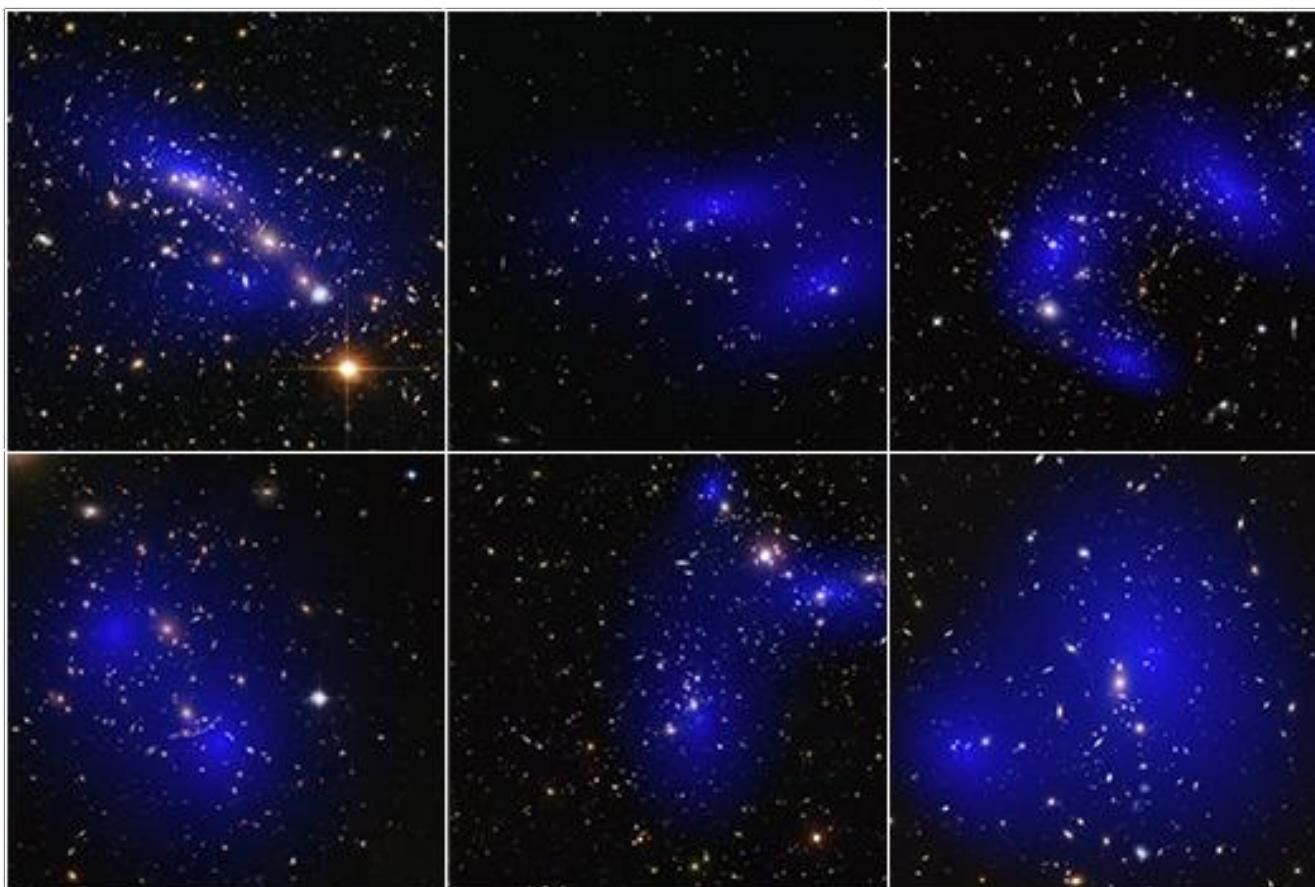
Dunkle Materie - Arno Straessner

- Auswertung weiterer 72 Cluster-Kollisionen
- Wirkt zwischen den Wolken Dunkler Materie nur Gravitation oder gibt es weitere Wechselwirkungen?

The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters

David Harvey,^{1,2*} Richard Massey,³ Thomas Kitching,⁴ Andy Taylor,² Eric Tittley²

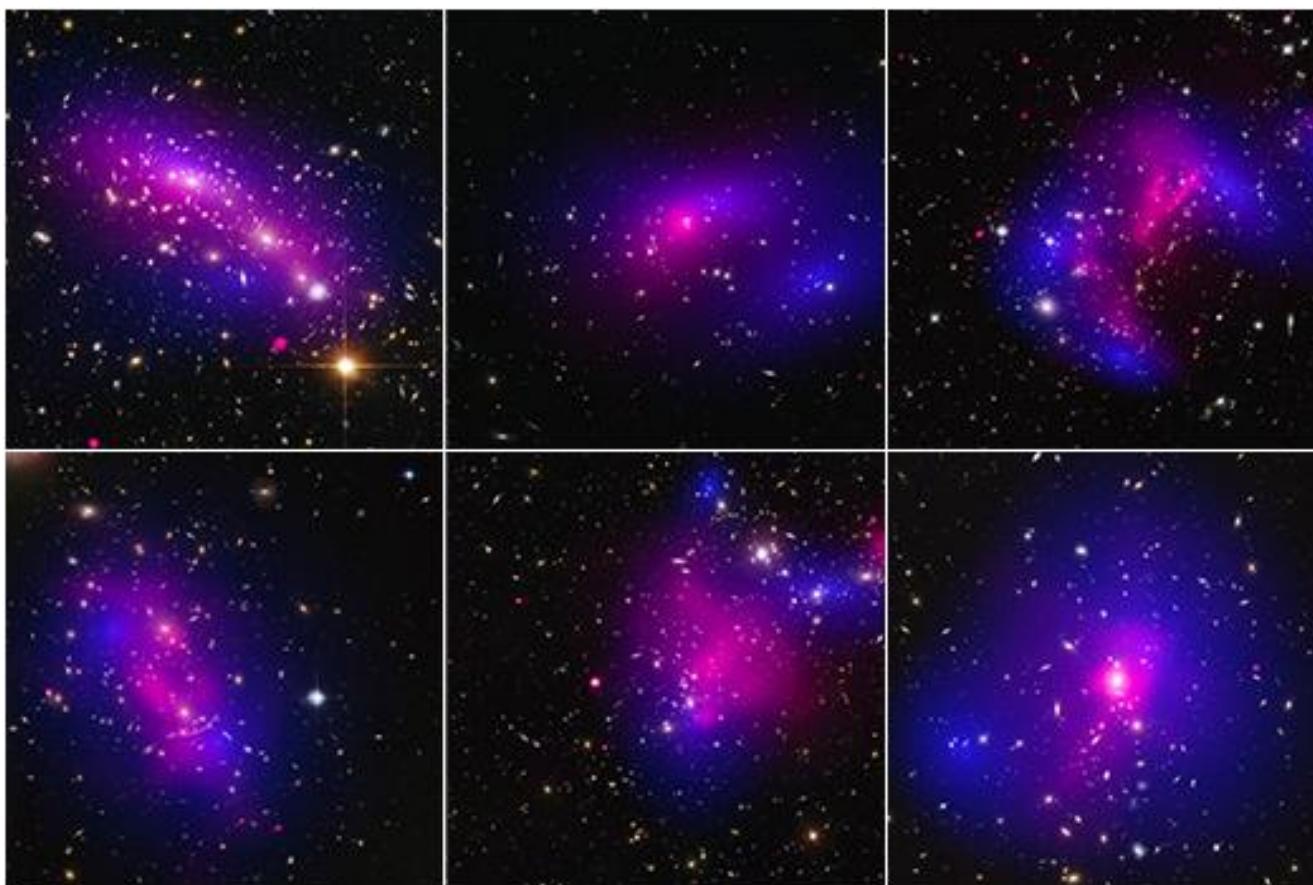
- Auswertung weiterer 72 Cluster-Kollisionen
- Wirkt zwischen den Wolken Dunkler Materie nur Gravitation oder gibt es weitere Wechselwirkungen?



The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters

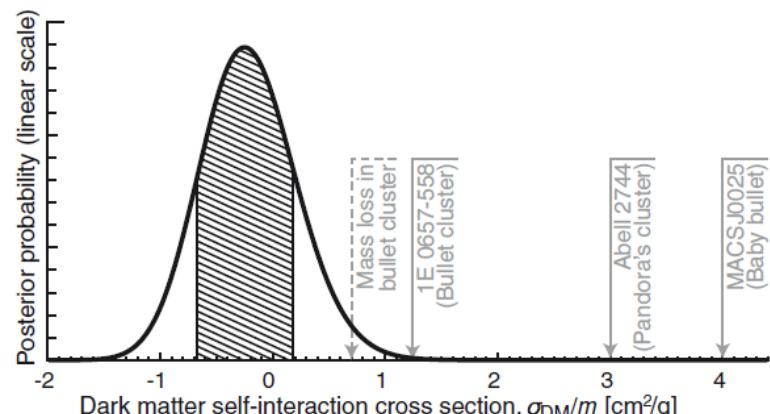
David Harvey,^{1,2*} Richard Massey,³ Thomas Kitching,⁴ Andy Taylor,² Eric Tittley²

- Auswertung weiterer 72 Cluster-Kollisionen
- Wirkt zwischen den Wolken Dunkler Materie nur Gravitation oder gibt es weitere Wechselwirkungen?



The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters

David Harvey,^{1,2*} Richard Massey,³ Thomas Kitching,⁴ Andy Taylor,² Eric Tittley²



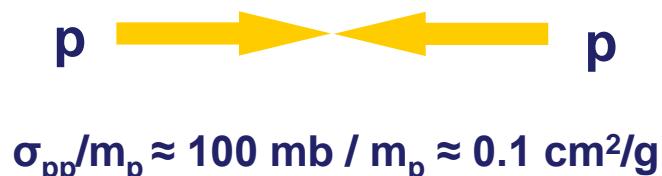
- Auswertung weiterer 72 Cluster-Kollisionen
- Wirkt zwischen den Wolken Dunkler Materie nur Gravitation oder gibt es weitere Wechselwirkungen?



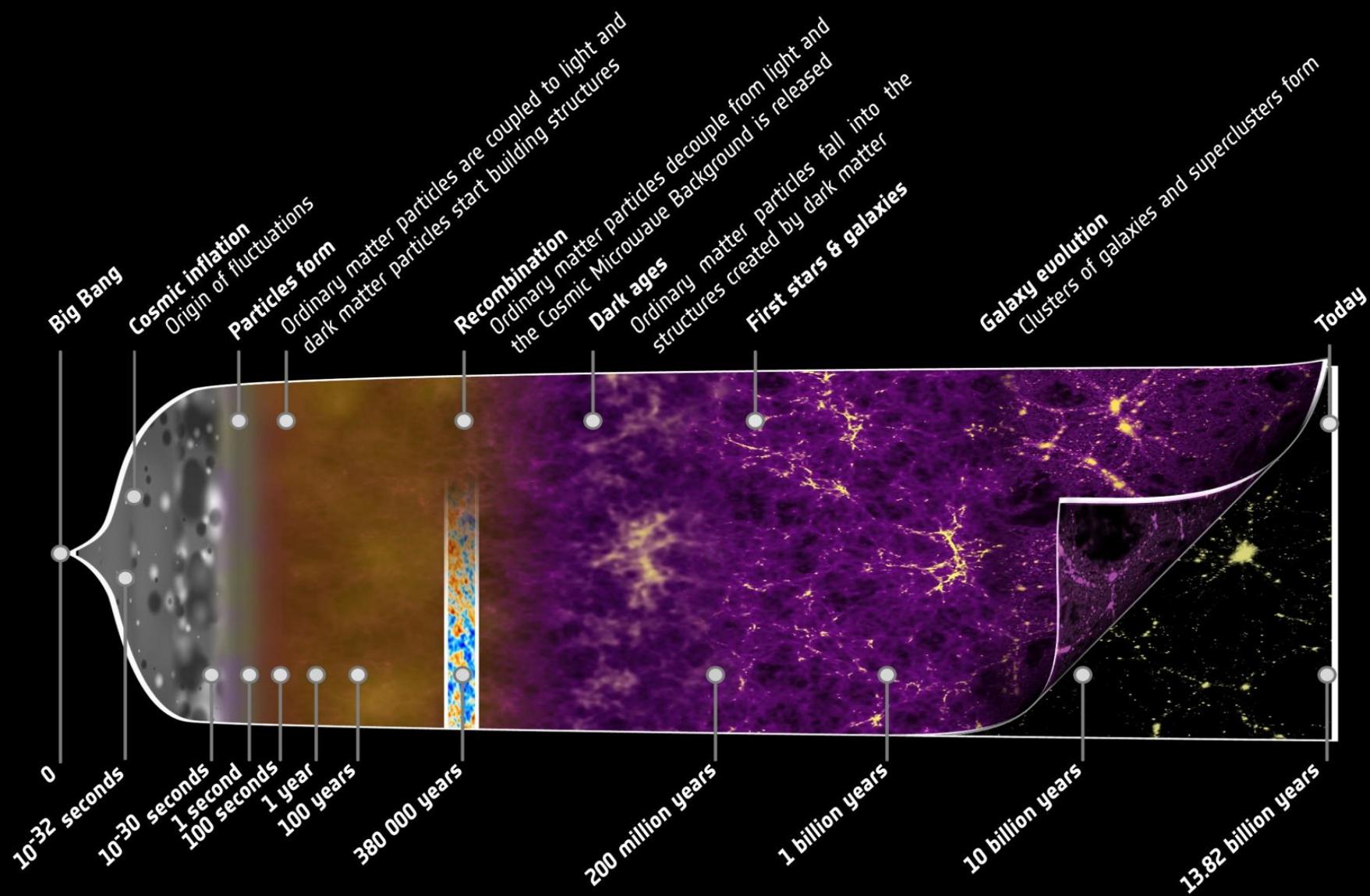
- Ergebnis:

$$\sigma_{\text{DM}}/m < 0.47 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ (95% CL, one-tailed)}$$

- Zusätzliche Wechselwirkung zwischen den Bausteinen der Dunklen Materie ist nicht stärker als diejenige zwischen 2 kollidierenden Protonen:



- pp-Wechselwirkung in der Teilchenphysik: “starke Wechselwirkung”



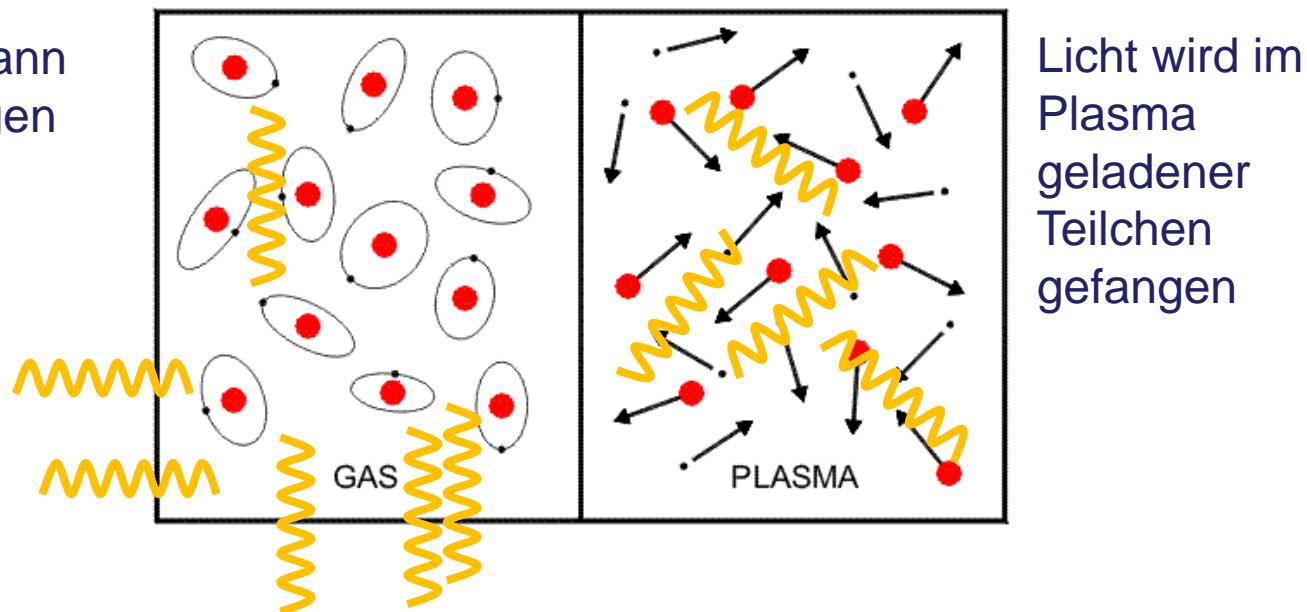
Kosmische Hintergrundstrahlung

Atome bilden sich: Licht kann das Universum durchdringen

Alter des Universums:
~380.000 Jahre

$T \approx 3000 \text{ K}$

$T > 3000 \text{ K}$



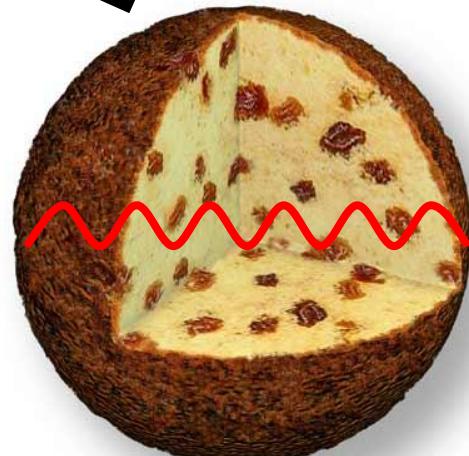
Atome bilden sich: Licht kann das Universum durchdringen

Alter des Universums:
~380.000 Jahre



Universum dehnt sich aus wie "Rosinenkuchen"

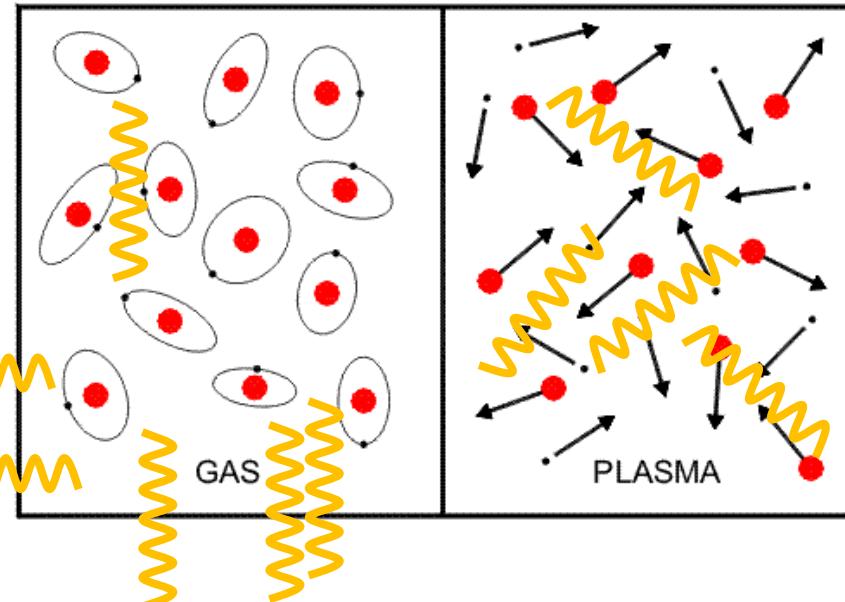
Heutiges Alter des Universums:
13.8 Milliarden Jahre



Dunkle Materie

© 2006 Weisch & Partner, Tübingen
scientific multimedia

$T \approx 3000 \text{ K}$



$T > 3000 \text{ K}$

Licht wird im Plasma geladener Teilchen gefangen

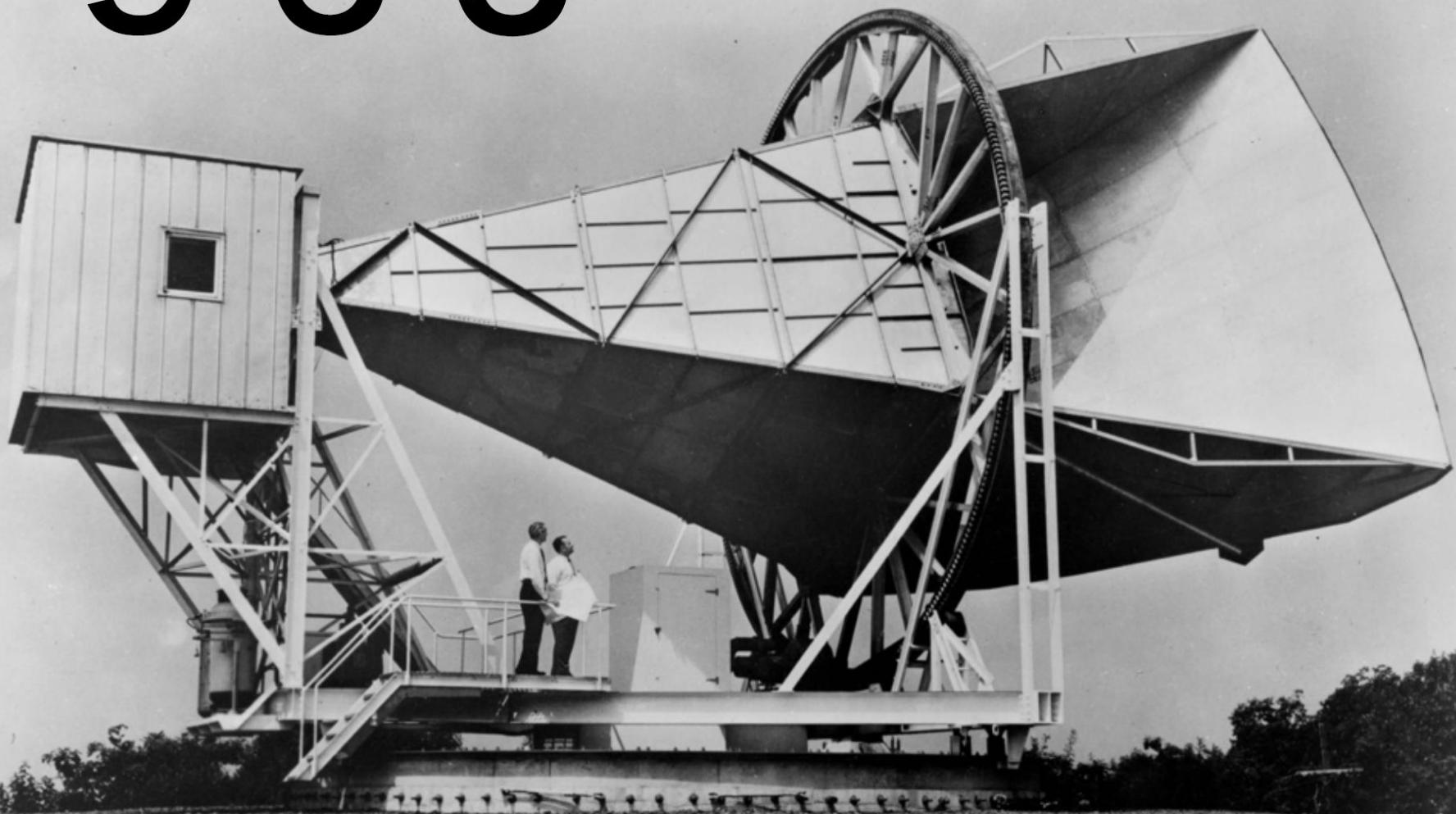
Temperaturstrahlung wird "rotverschoben" um etwa einen Faktor 1100

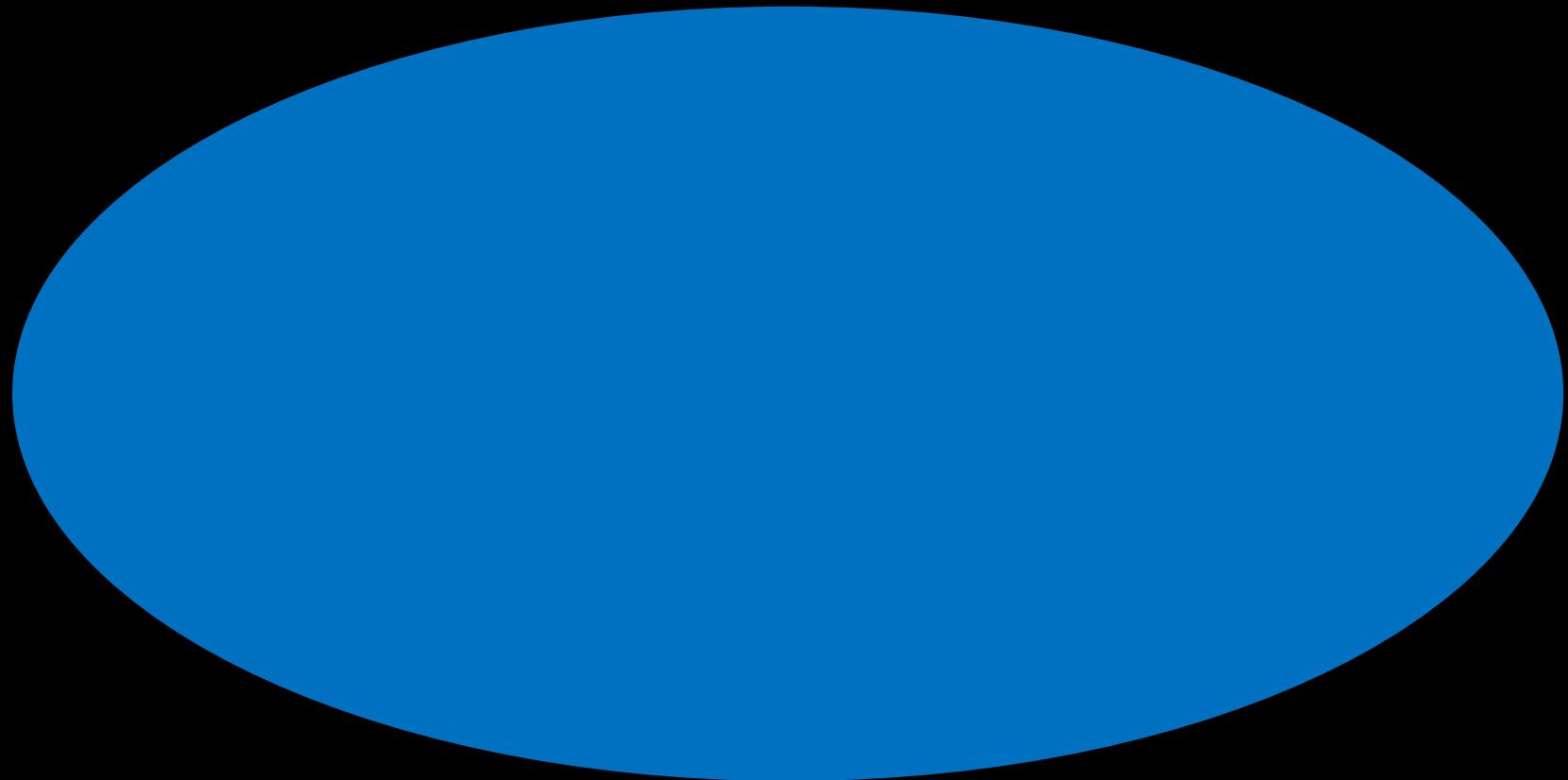
Temperaturstrahlung hat statt $T = 3000 \text{ K}$ nur noch $T = 2,7 \text{ K}$

→ **Kosmische Hintergrundstrahlung**

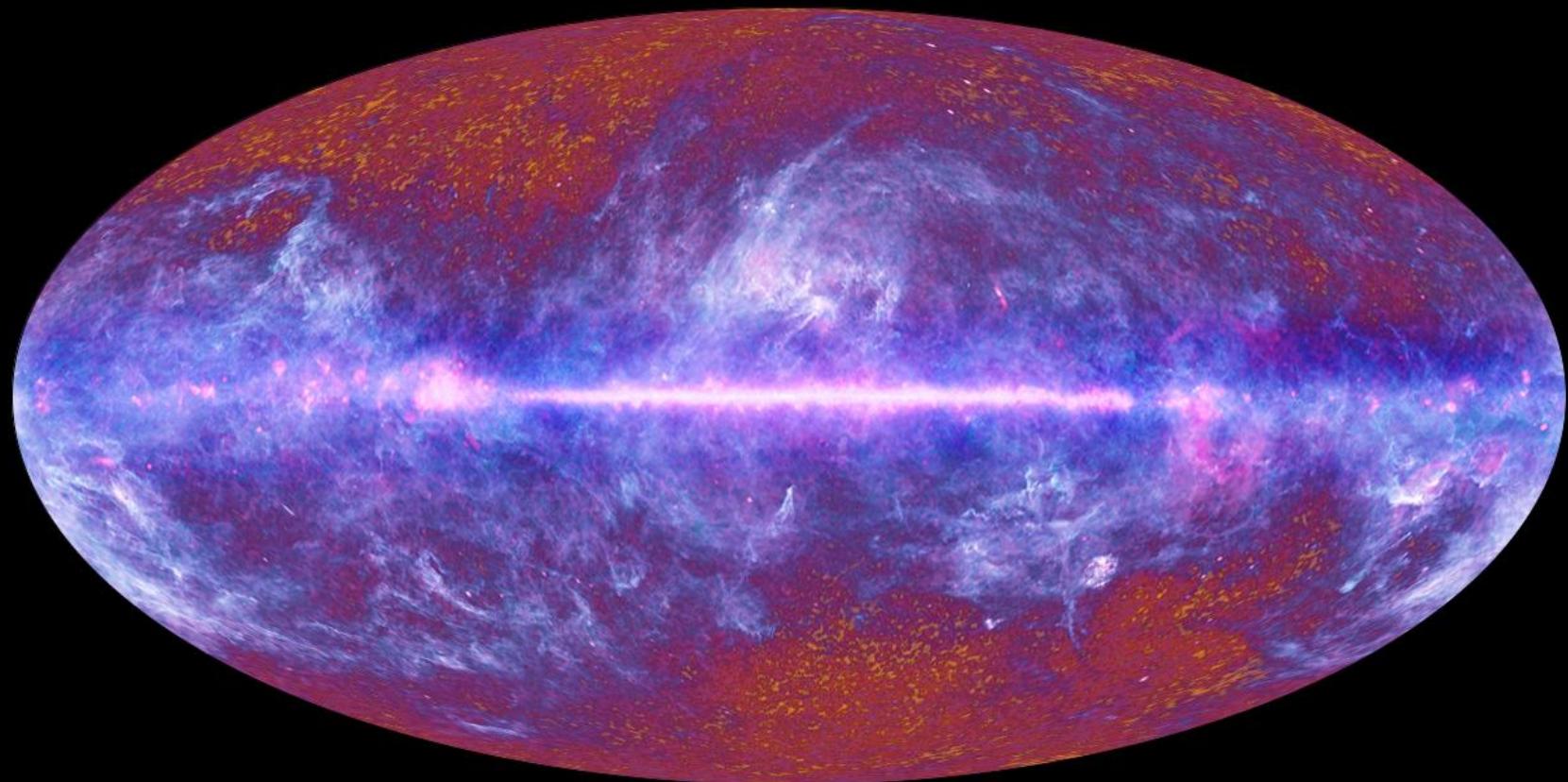
vorhergesagt 1933 (E. Regener)
erstmals gemessen 1964 (Penzias, Wilson)

1965





T = 2,7 K



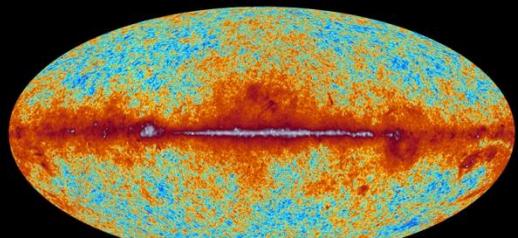
The Planck one-year all-sky survey



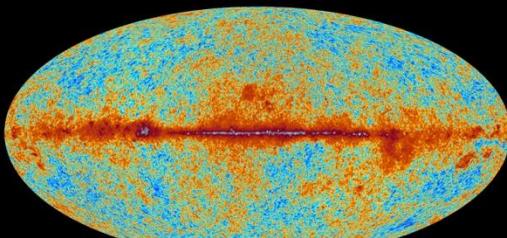


planck

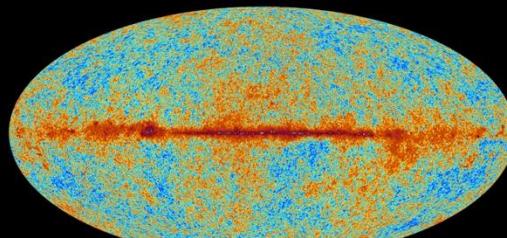
The sky as seen by Planck



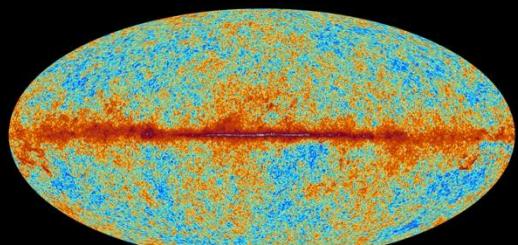
30 GHz



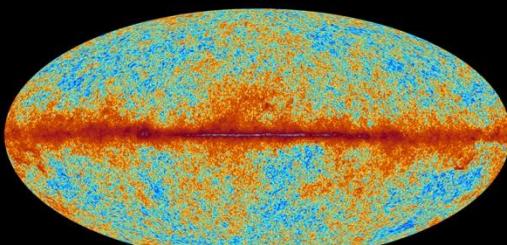
44 GHz



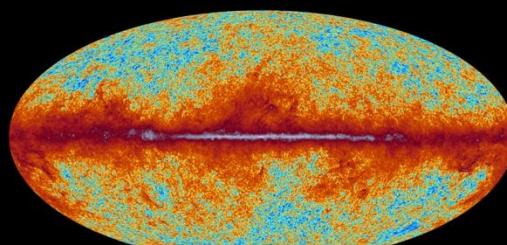
70 GHz



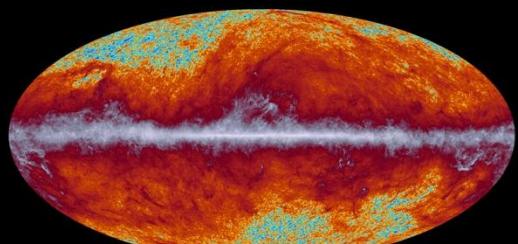
100 GHz



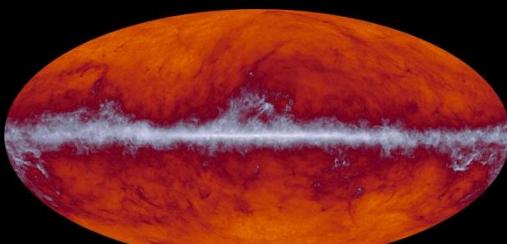
143 GHz



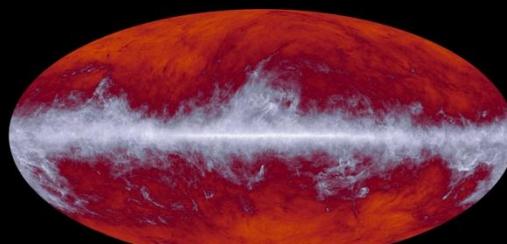
217 GHz



353 GHz

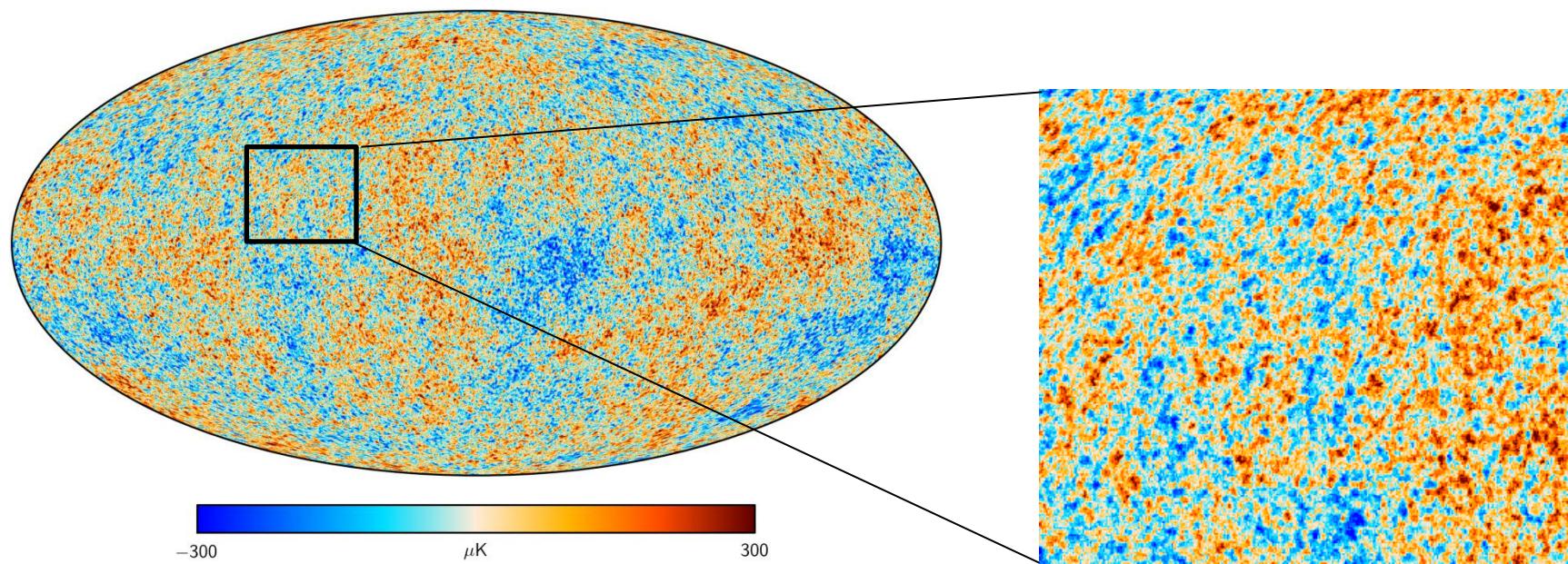


545 GHz



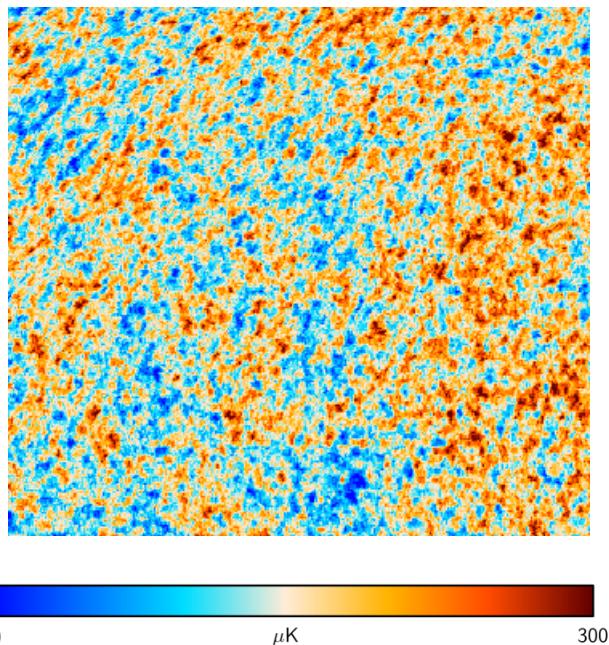
857 GHz

- Strahlung, welche vom "Urknall" bei der Expansion des Universum zurückgeblieben ist
- gemessen mit Planck Teleskop



- Mittlere Strahlung ist in alle Raumrichtungen gleich und entspricht einer Temperatur von $2,725 \pm 0,001$ Kelvin
- Zusätzliche Variationen mit Temperaturunterschieden von < 0.001 K

- Räumliche Struktur der Variationen entsprechen etwa 1° im Raumwinkel



- **heißere Bereiche = hohe Dichte**

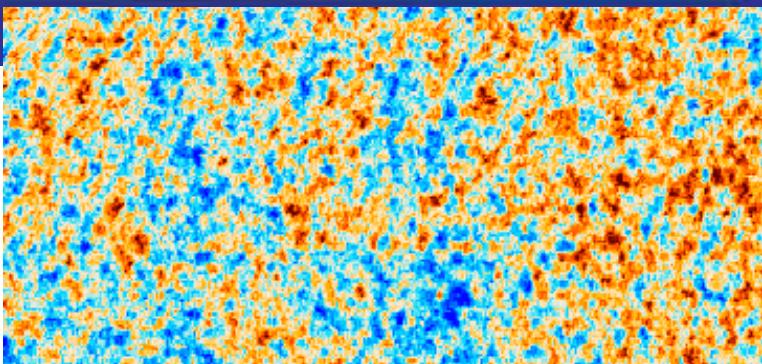
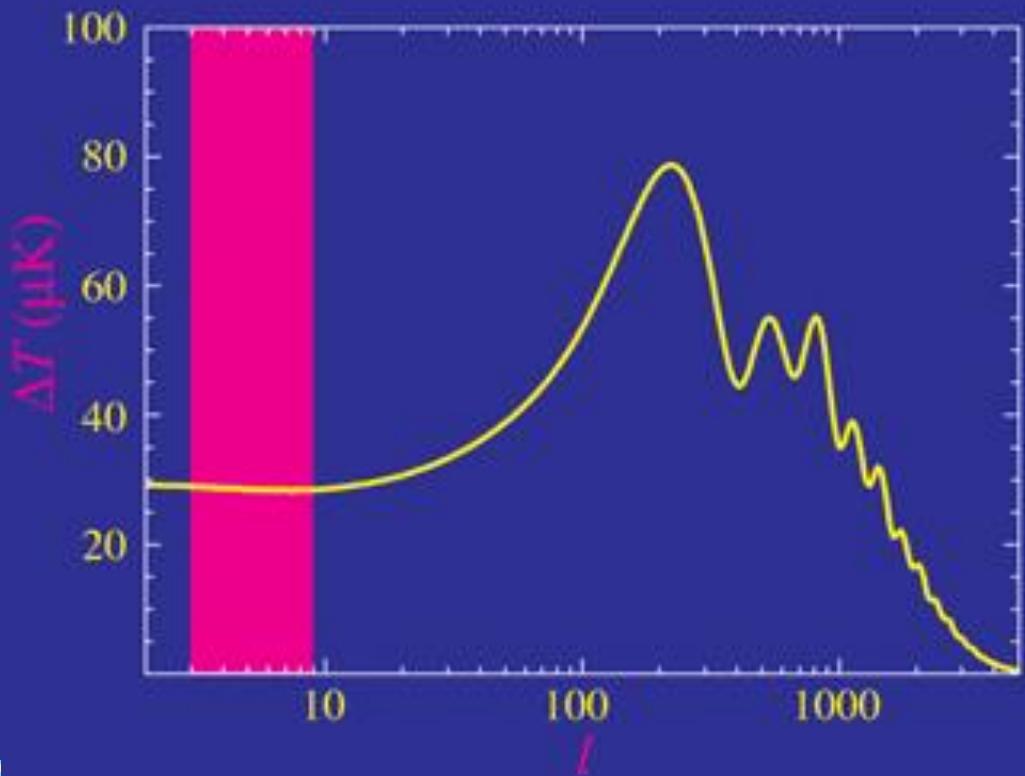
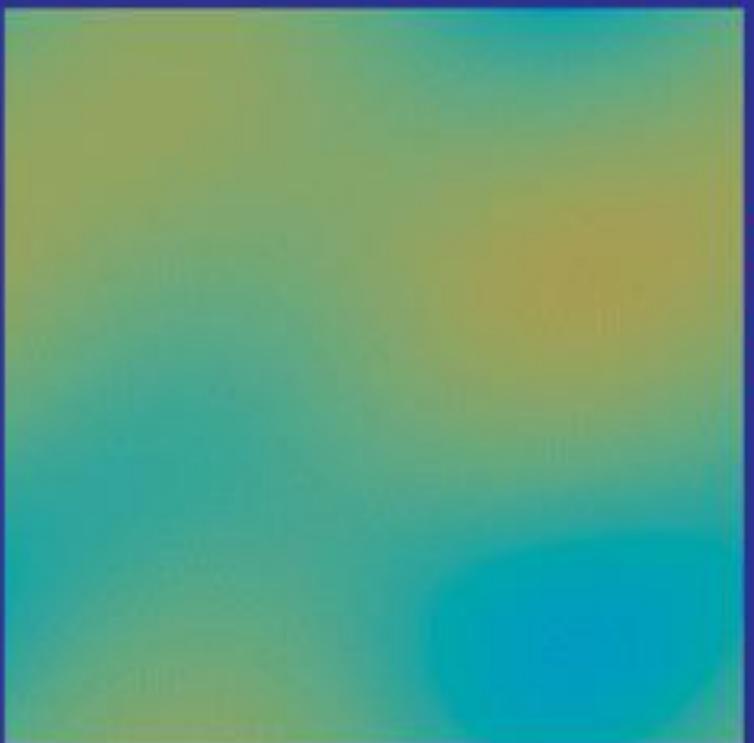
- **kühlere Bereiche = niedrige Dichte**

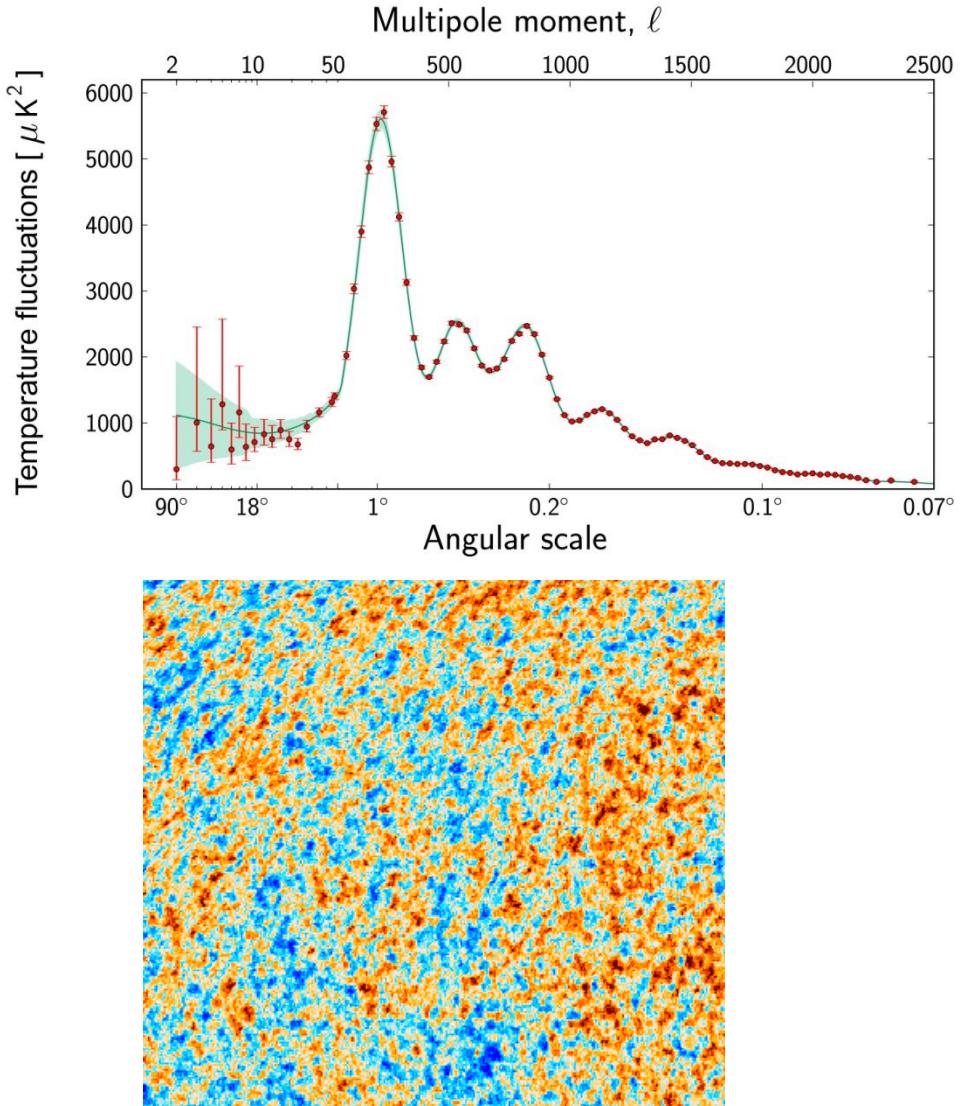
Dichteschwankungen \sim „stehende Schallwellen“



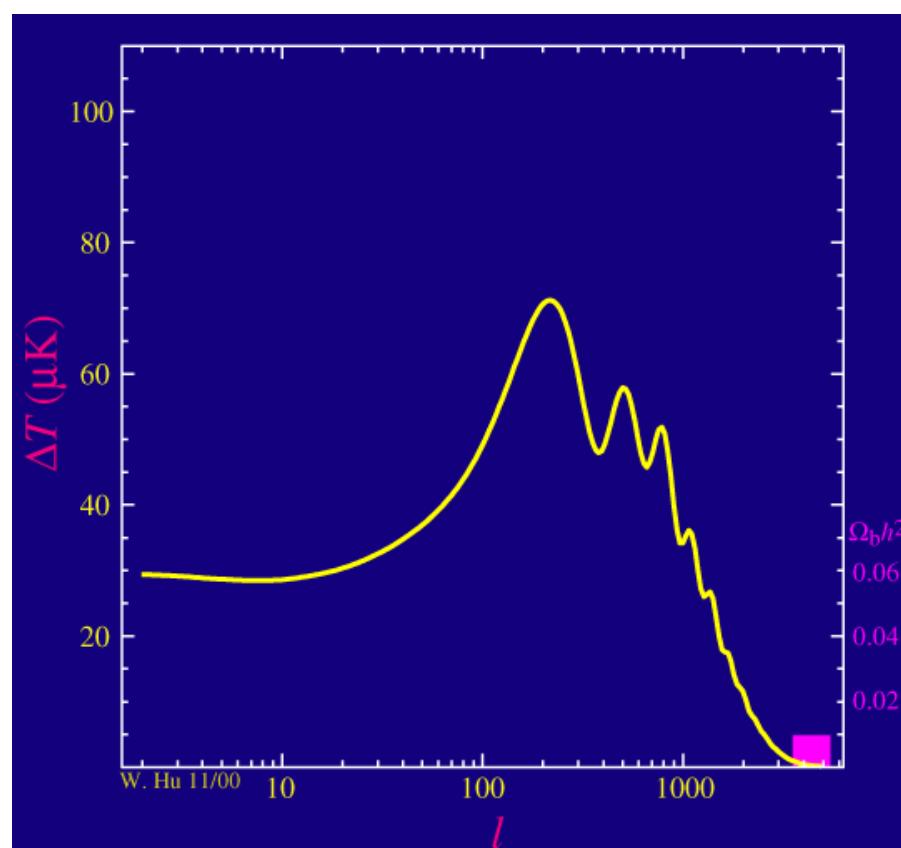
- Dichteschwankungen geben Aufschluss über Zusammensetzung der Materie- und Energiedichte

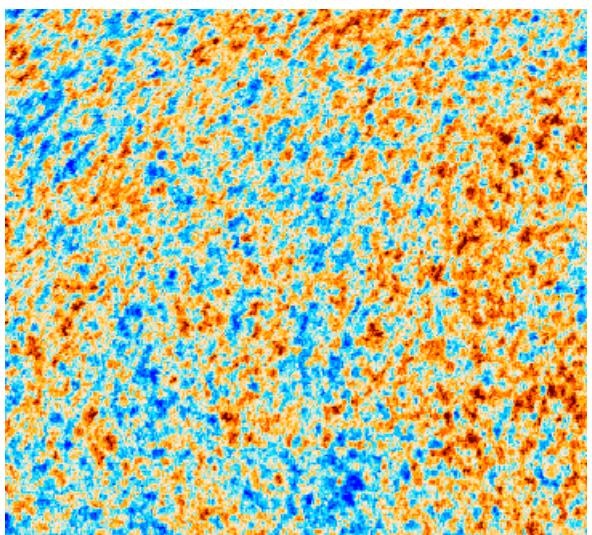
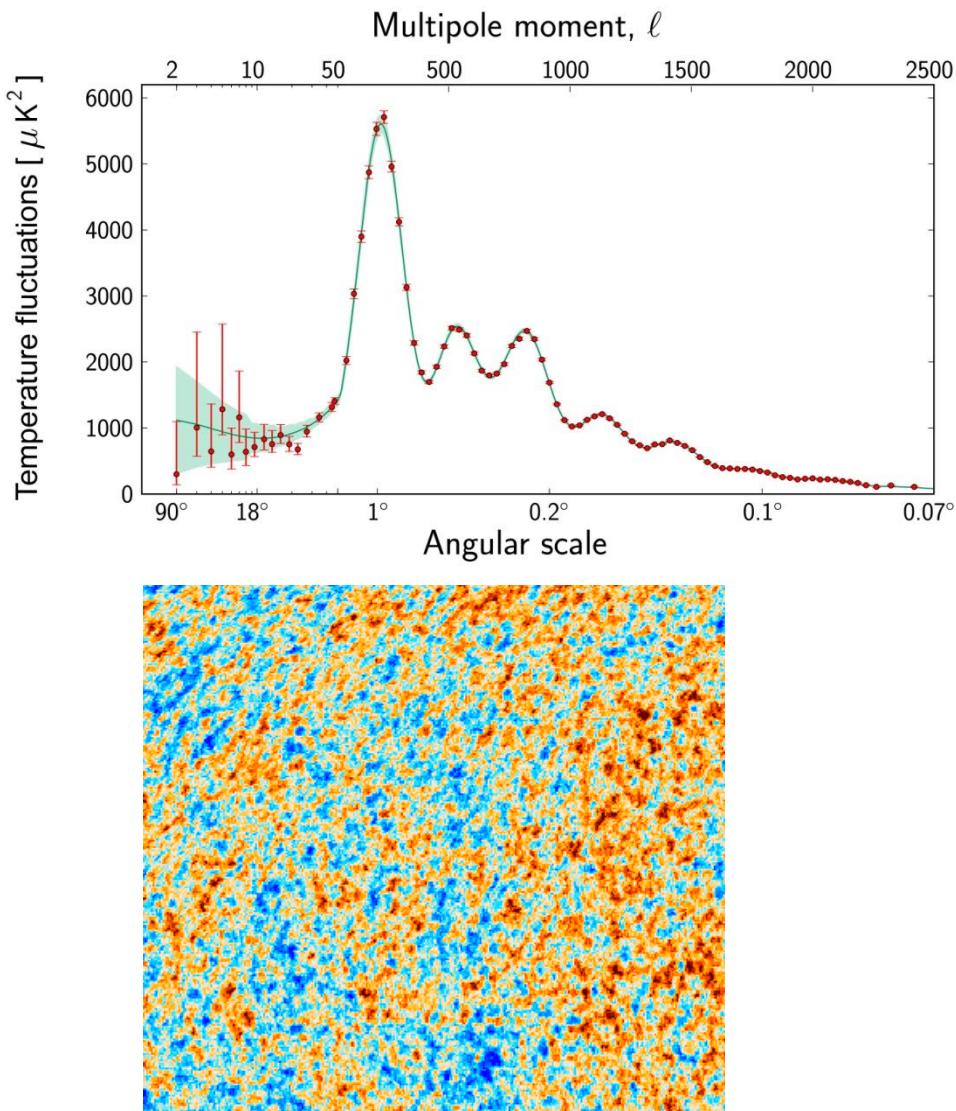
$$\Omega = \Omega_{LM} + \Omega_{DM} + \Omega_{\Lambda}$$



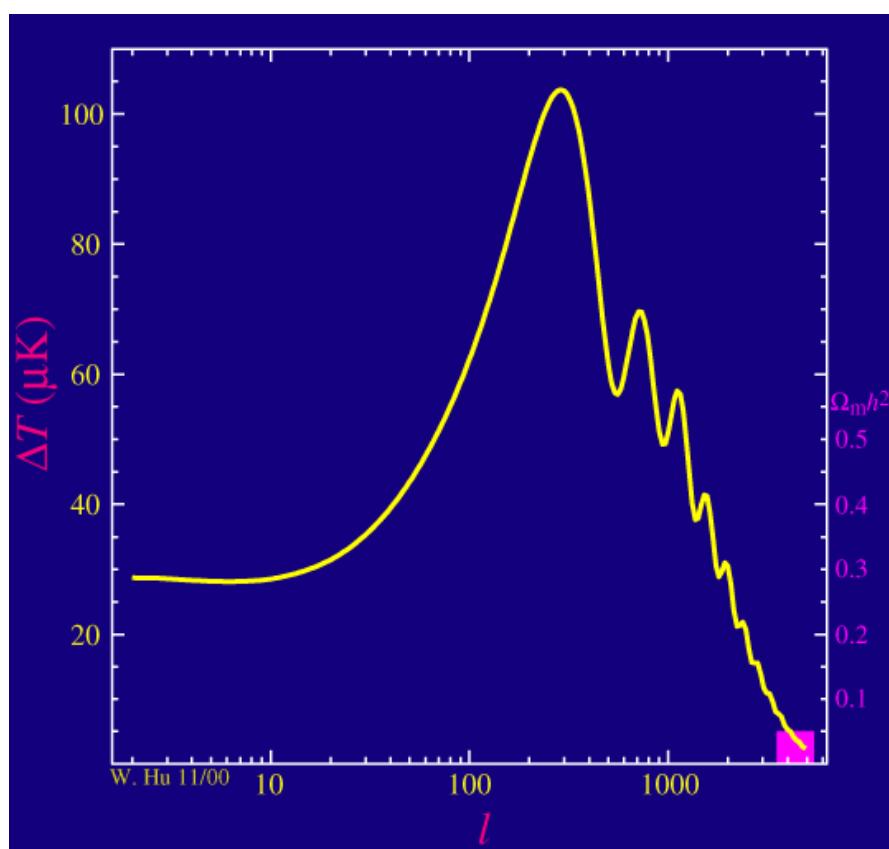


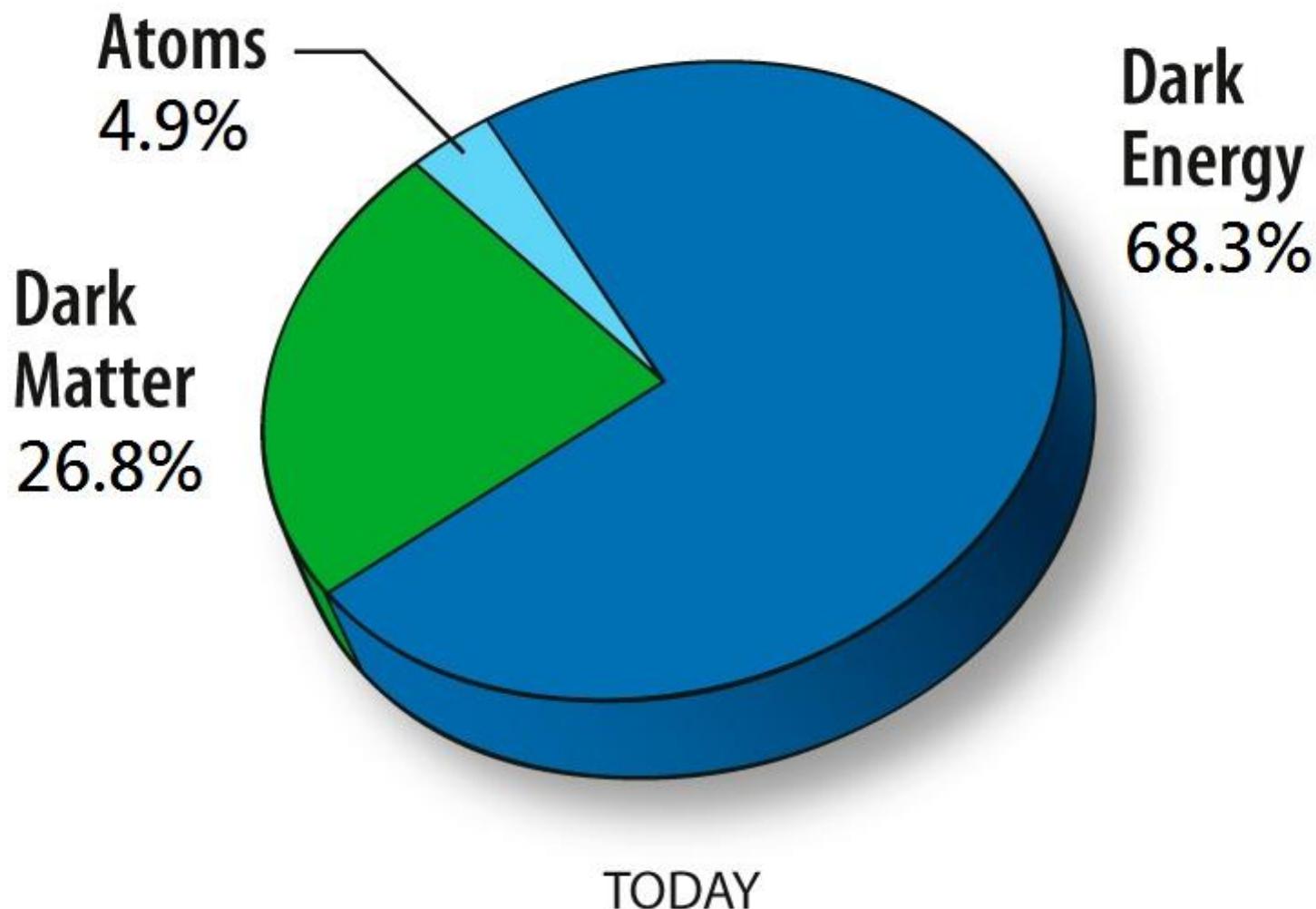
baryonische Materie \approx sichtbare Materie



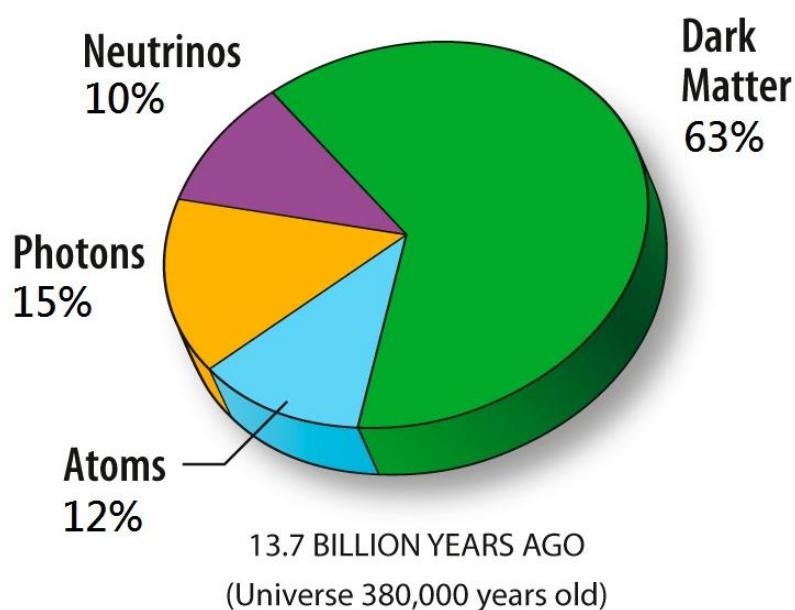


Materie = sichtbare Materie
+ Dunkle Materie

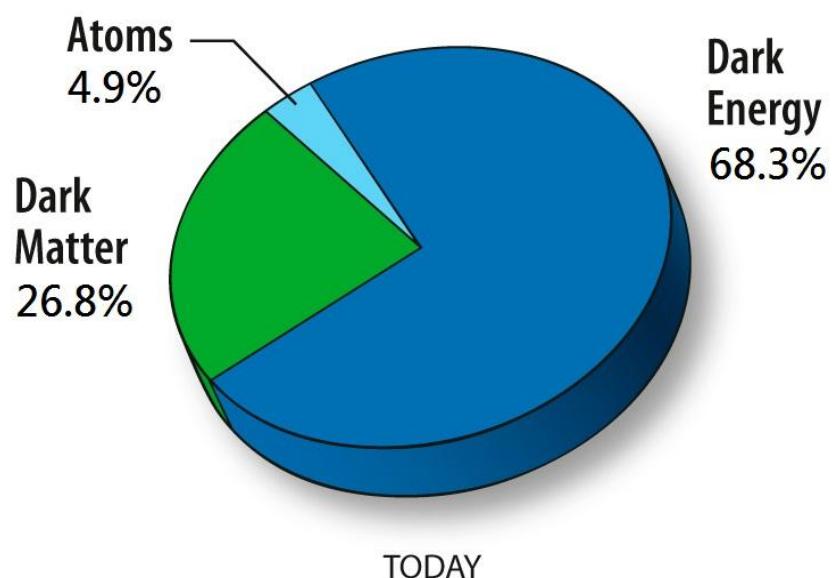




Zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung:

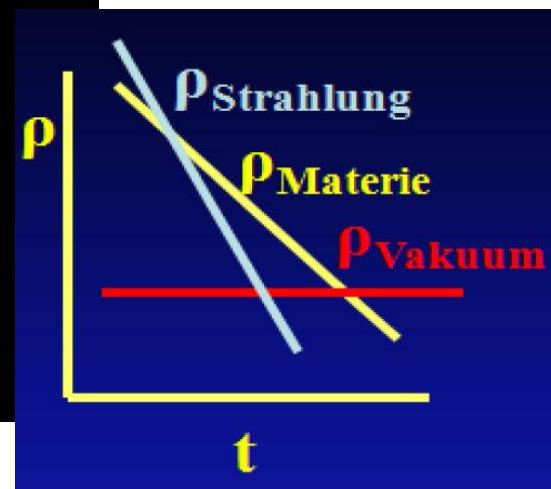
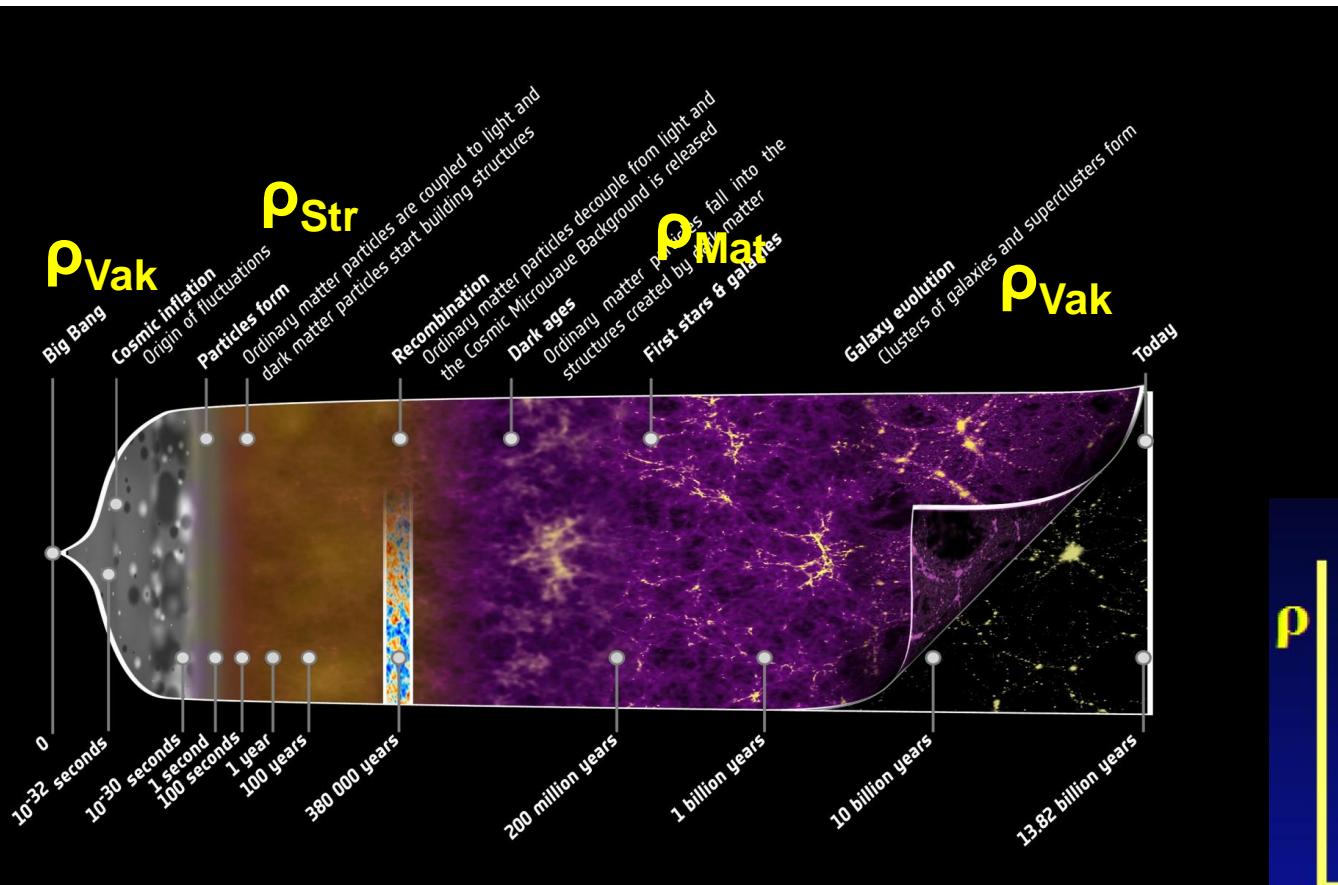


Heute:



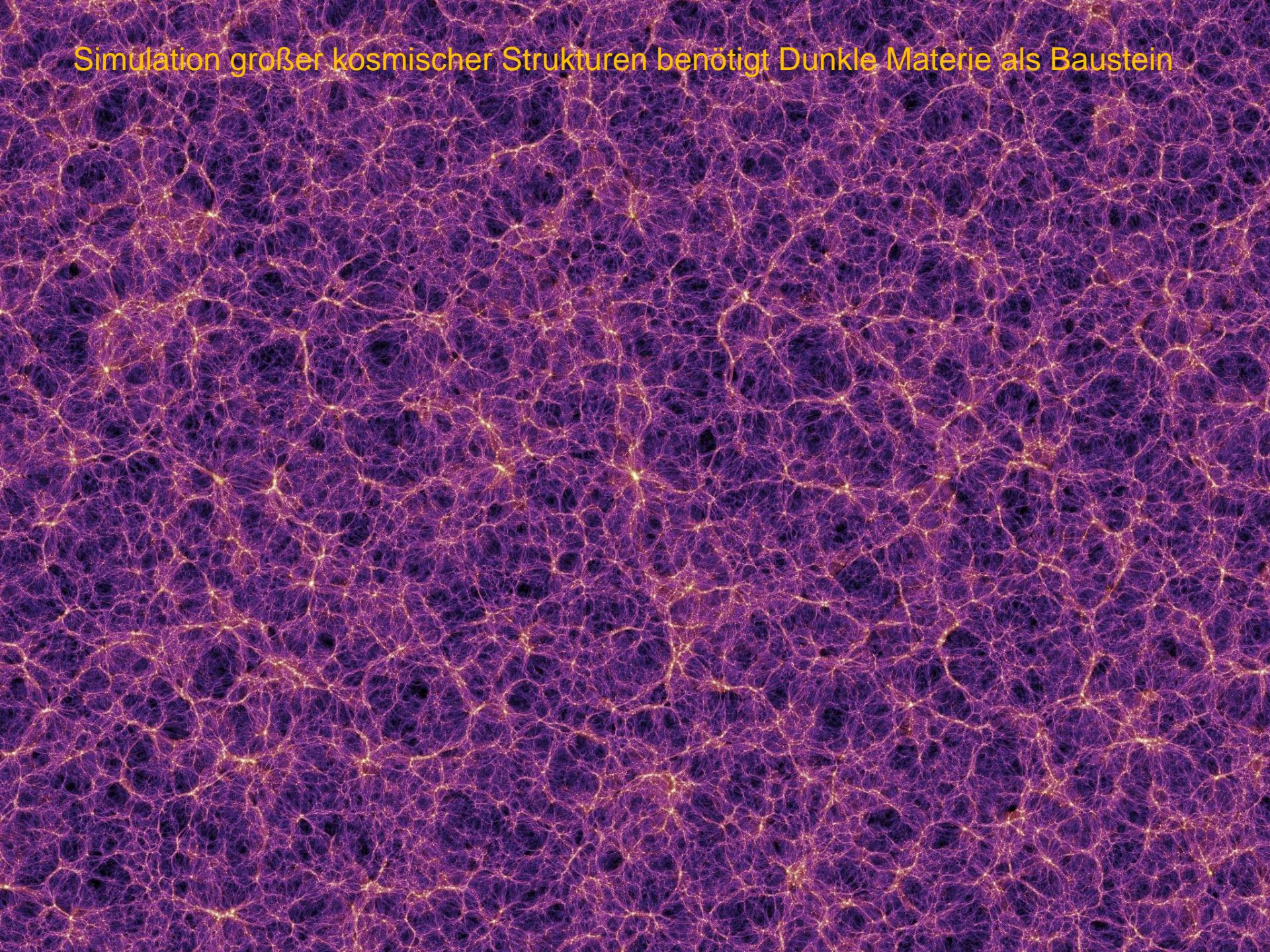
Expansions-Zeitskala
 10^{-30} s

Expansions-Zeitskala
13 Milliarden Jahre

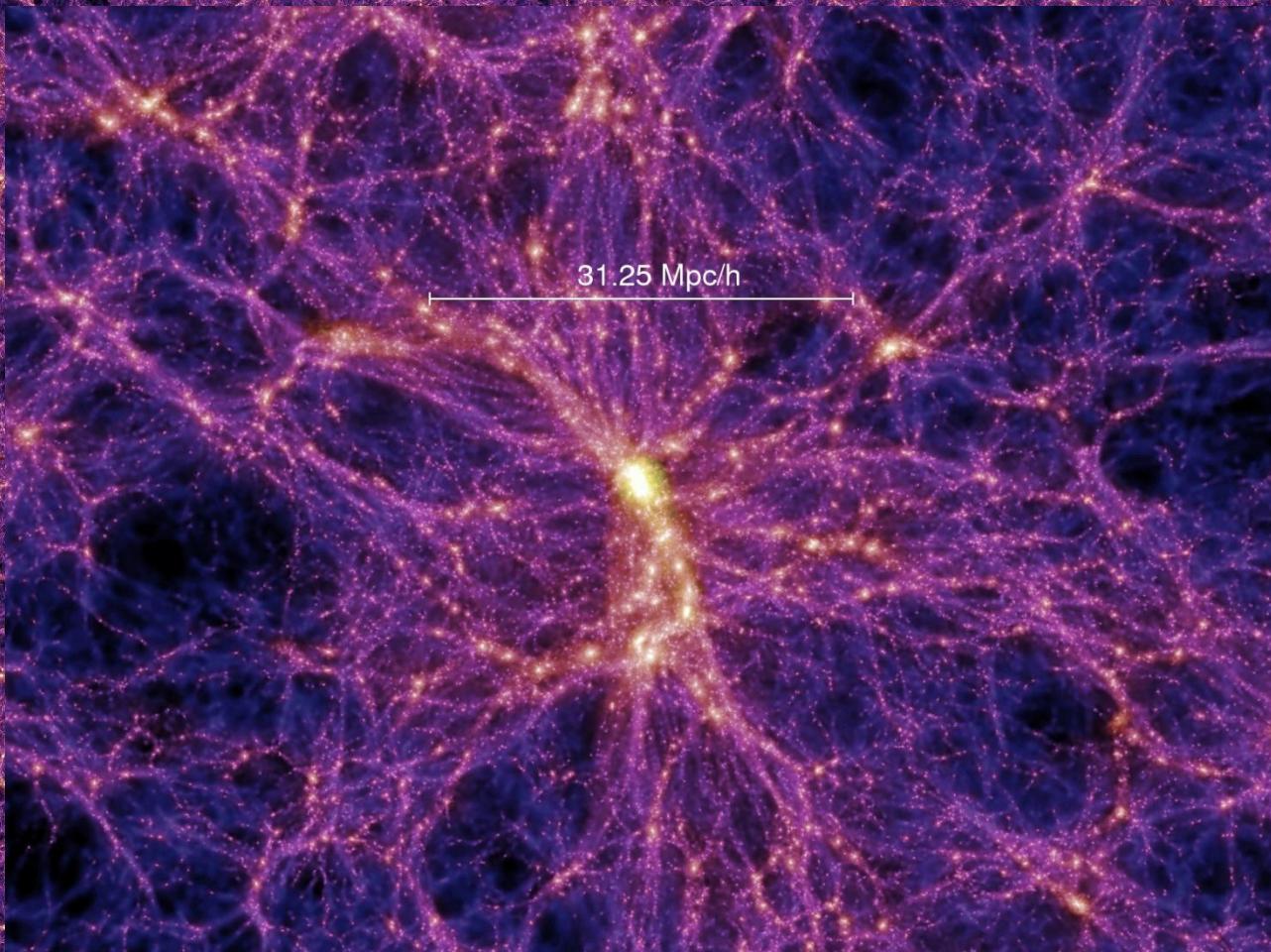


- Wenn ρ_{Vak} dominiert: exponentielle Ausdehnung
- Wenn ρ_{Str} dominiert: $a \sim t^{1/2}$
- Wenn ρ_{Mat} dominiert: $a \sim t^{3/2}$

Simulation großer kosmischer Strukturen benötigt Dunkle Materie als Baustein

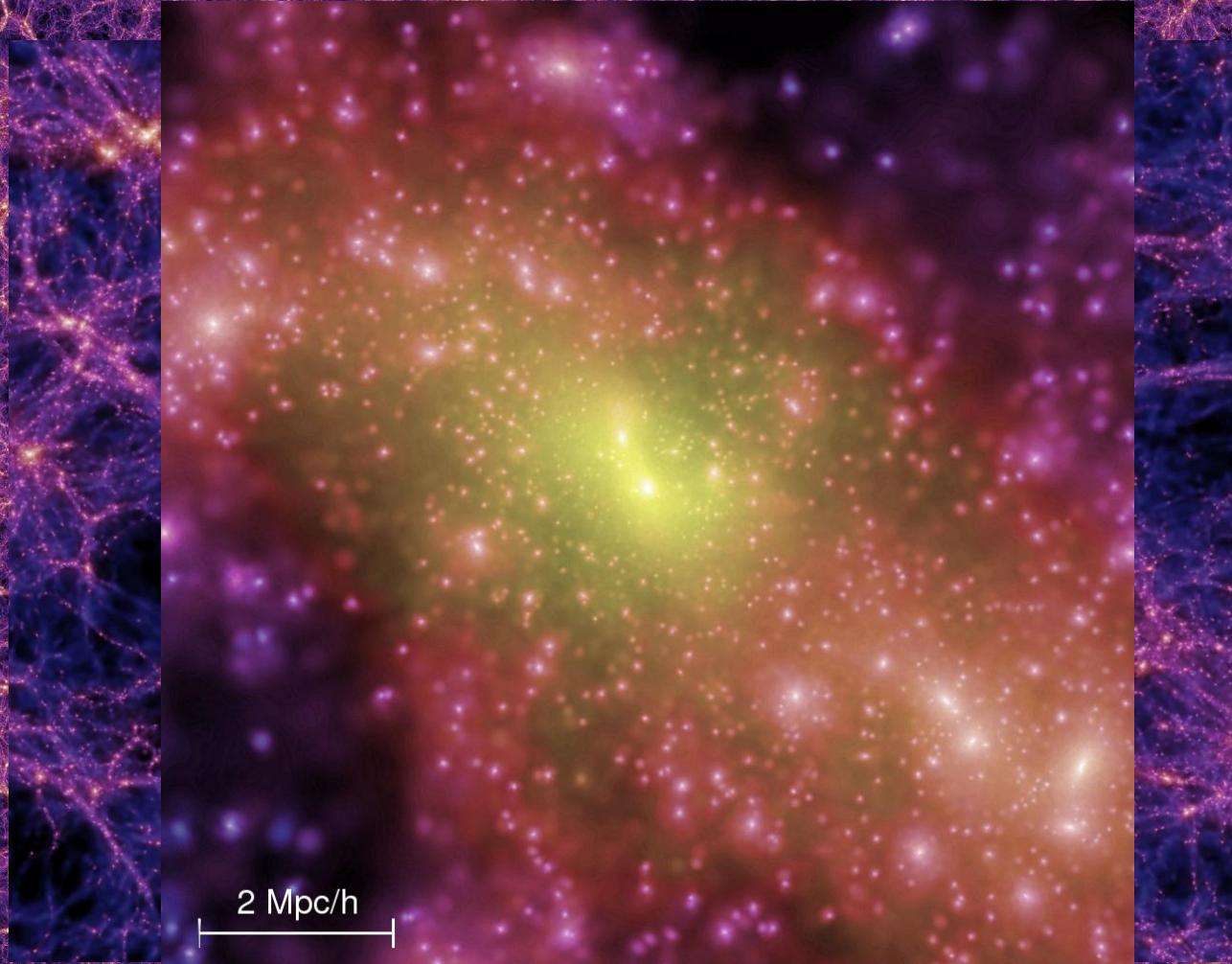


Simulation großer kosmischer Strukturen benötigt Dunkle Materie als Baustein



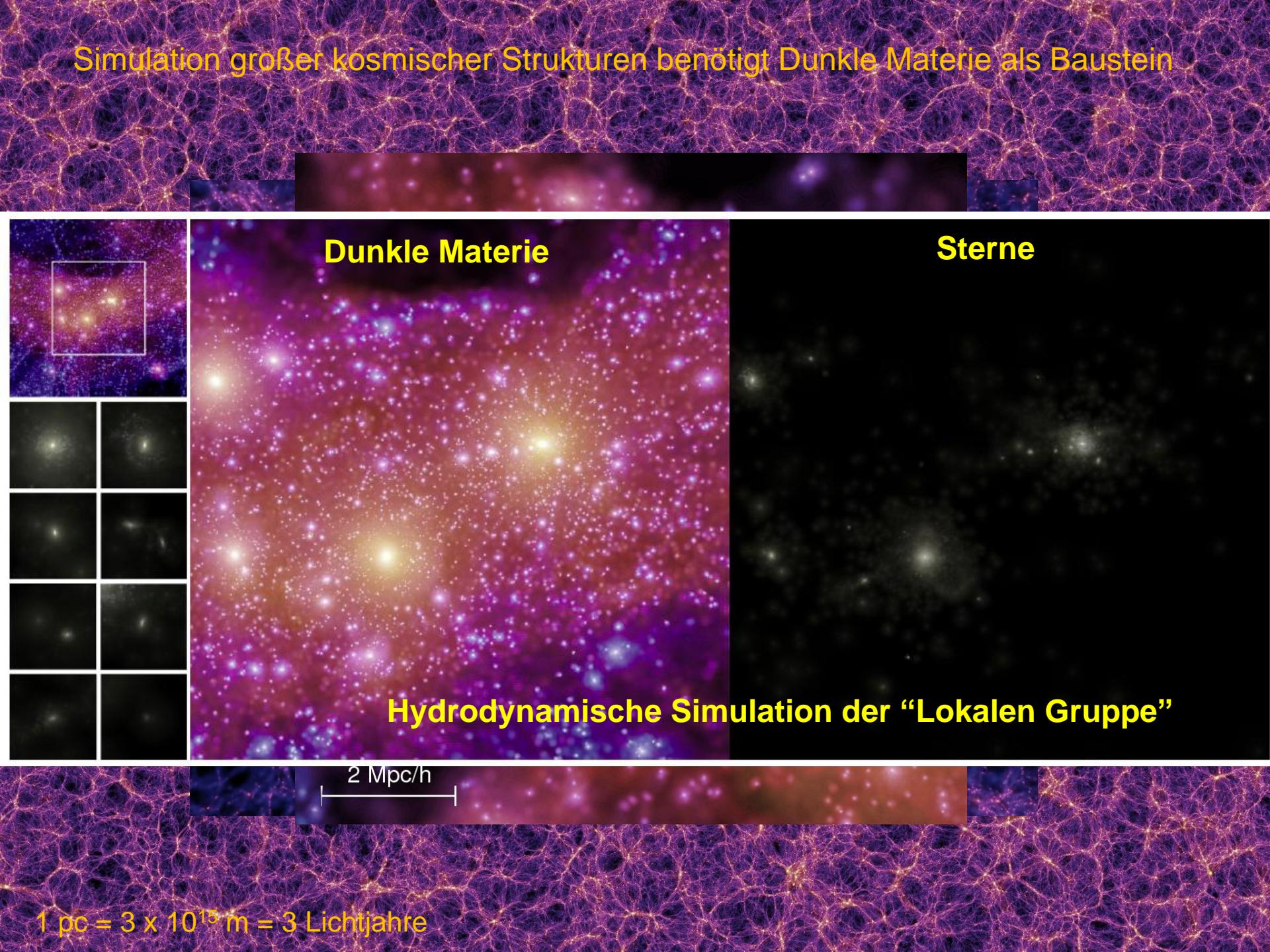
1 pc = 3×10^{15} m = 3 Lichtjahre

Simulation großer kosmischer Strukturen benötigt Dunkle Materie als Baustein

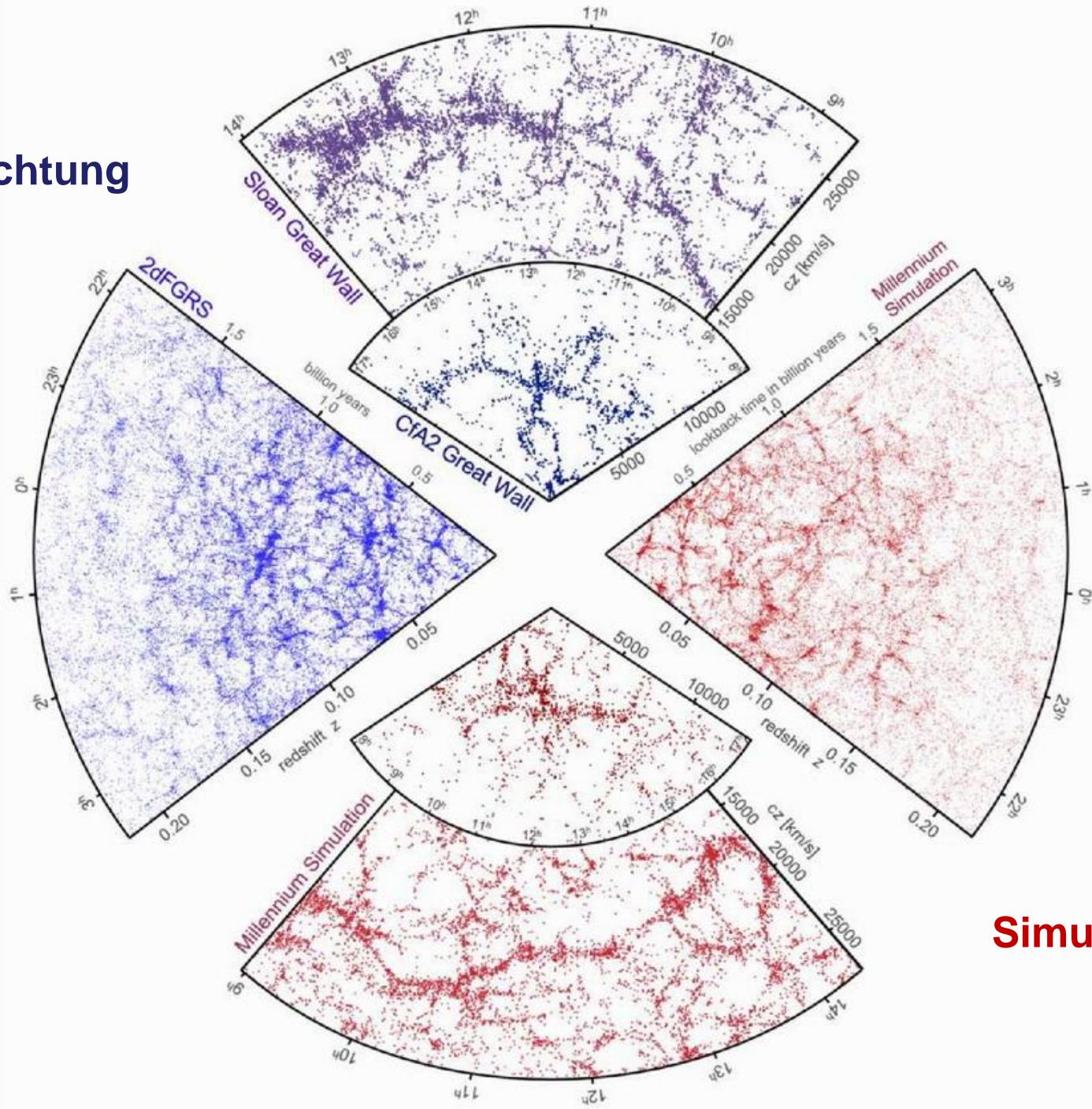


$1 \text{ pc} = 3 \times 10^{15} \text{ m} = 3 \text{ Lichtjahre}$

Simulation großer kosmischer Strukturen benötigt Dunkle Materie als Baustein

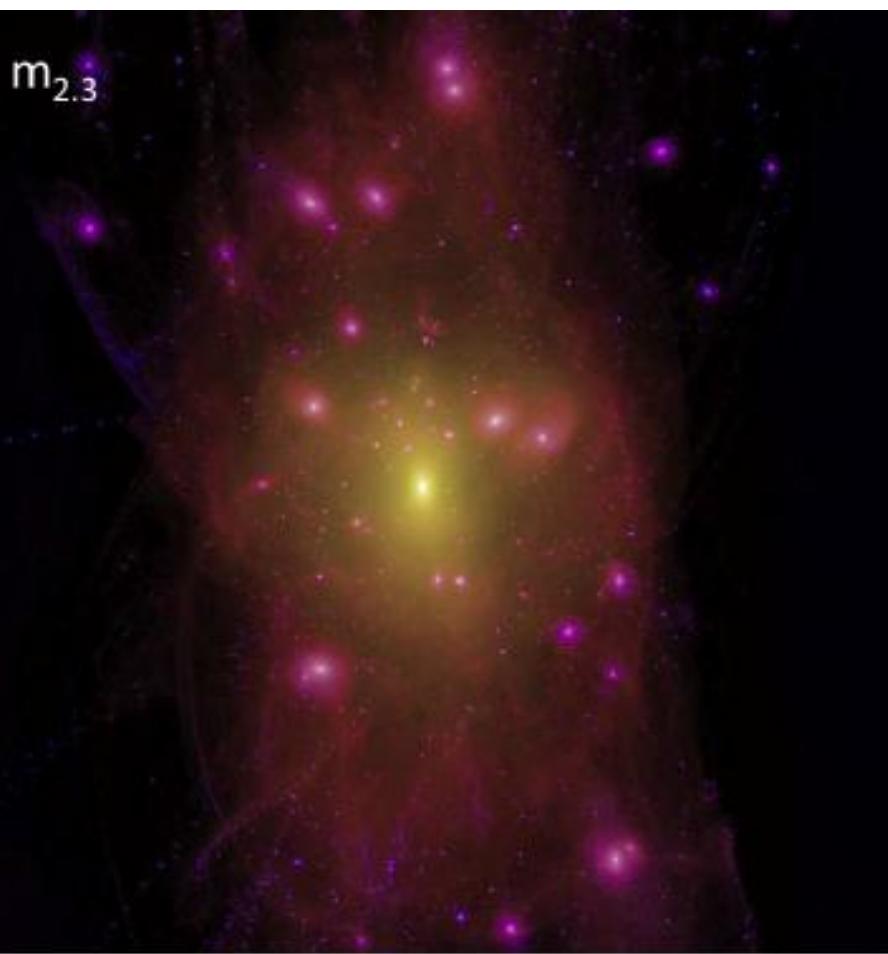


Beobachtung

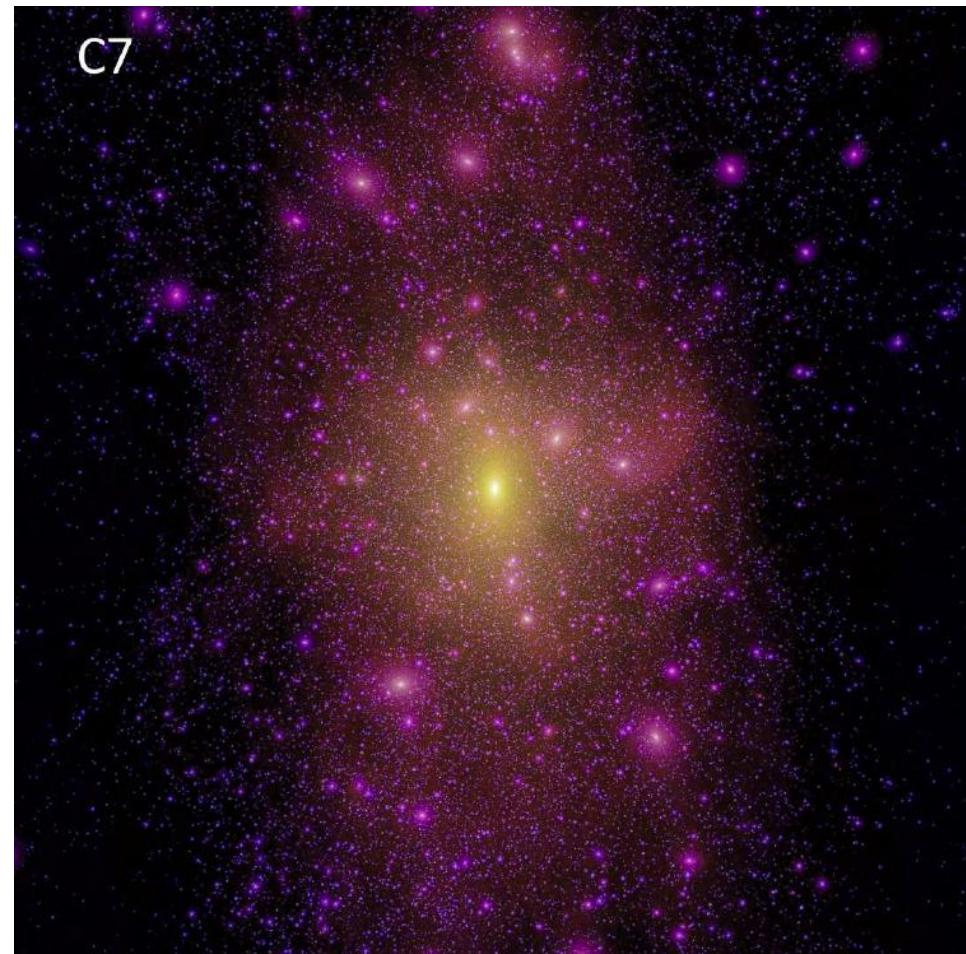


Simulation

“warme” Dunkle Materie

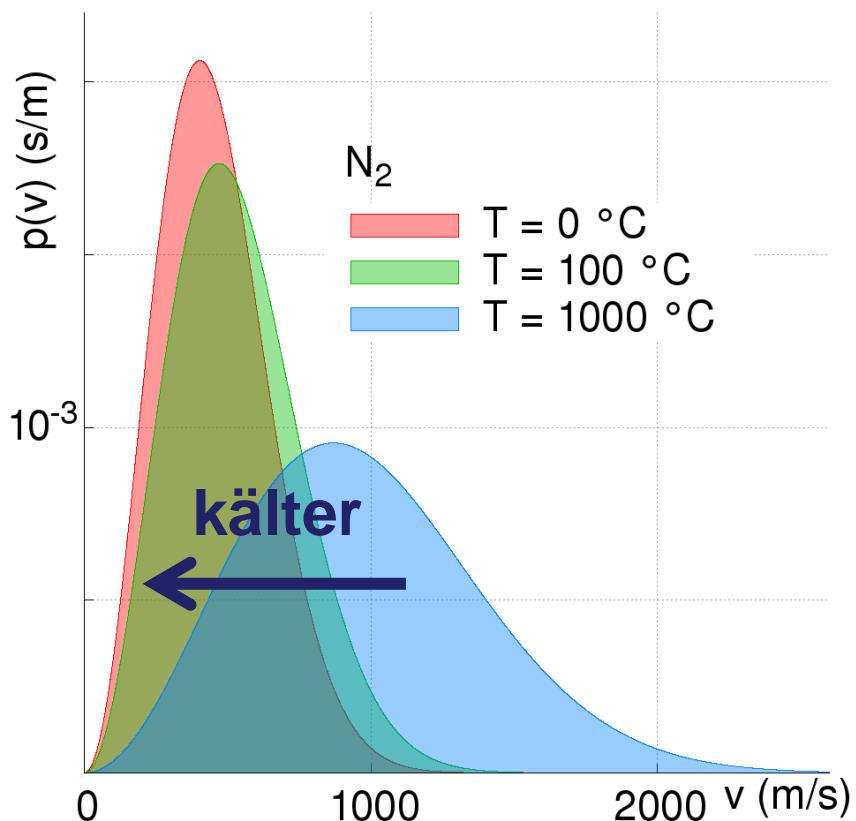
 $m_{2.3}$

“kalte” Dunkle Materie

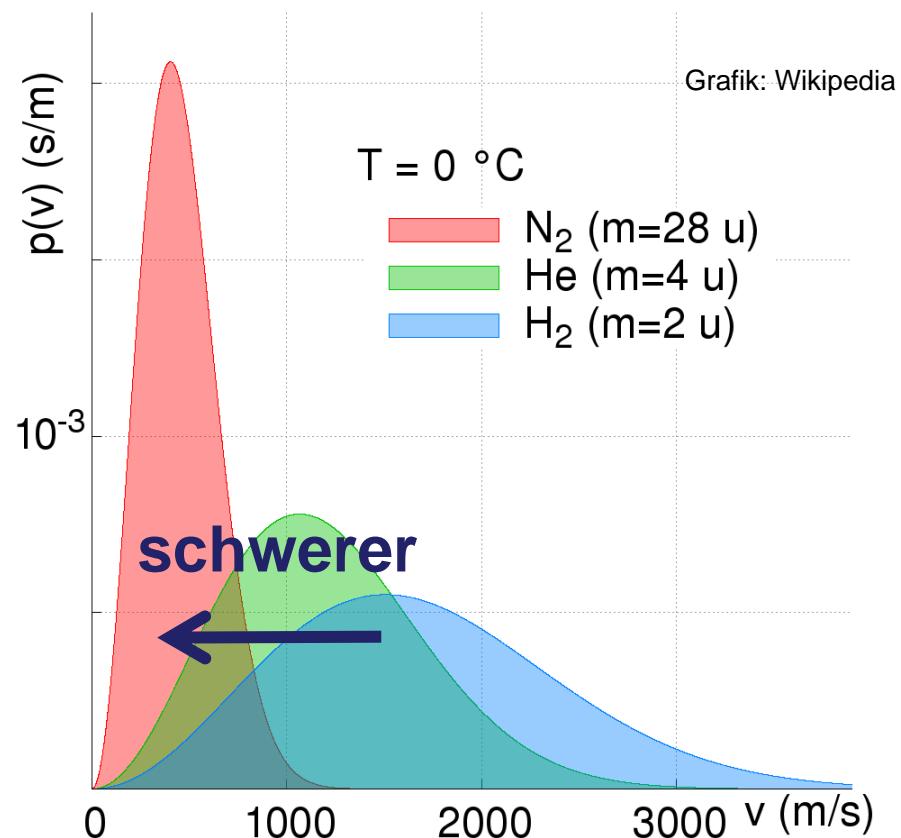


C7

verschiedene Temperaturen



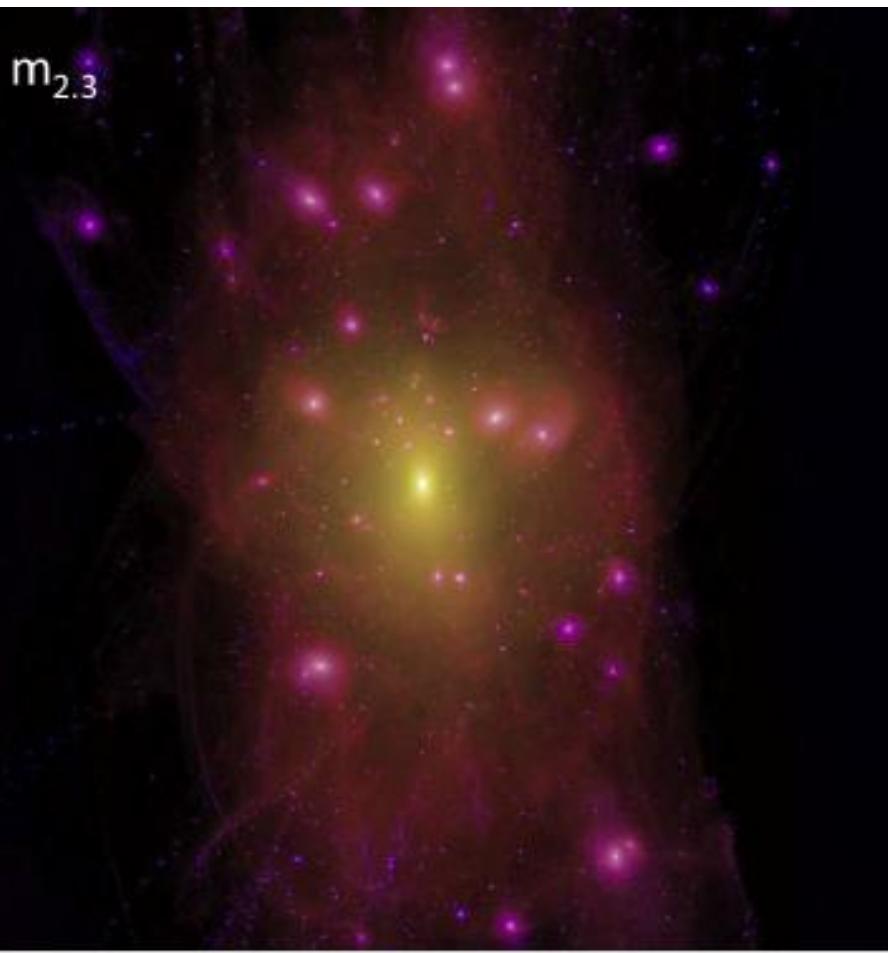
verschiedene Massen



Grafik: Wikipedia

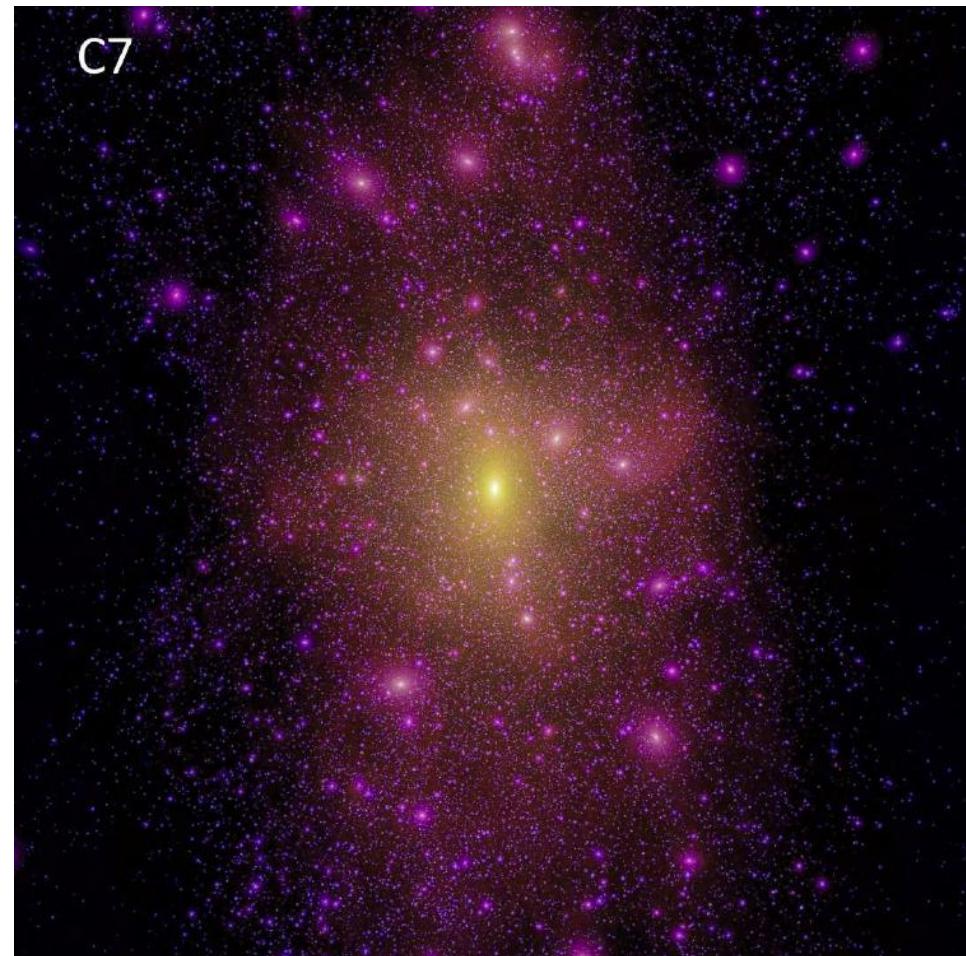
- kalt = Teilchen bewegen sich im Mittel langsamer
- äquivalent zu "kalt" = Teilchen müssen bei gegebener Energiedichte schwer sein

“warme” Dunkle Materie

 $m_{2.3}$ 

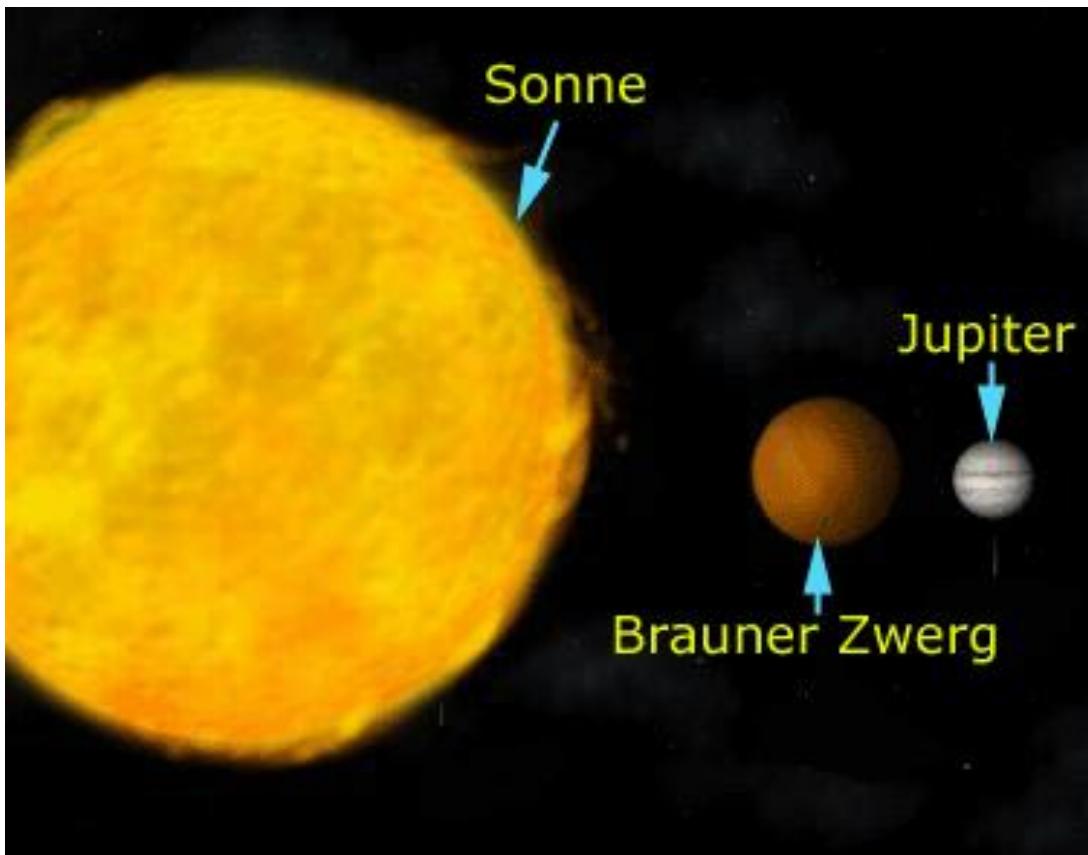
“kalte” Dunkle Materie

C7



- beobachtete kosmische Strukturen verlangen kalte Dunkle Materie

- MACHOs = Massive astrophysikalische kompakte Halo-Objekte
 - z.B. Braune Zwerge
 - nur ein kleiner Teil der dunklen Materie

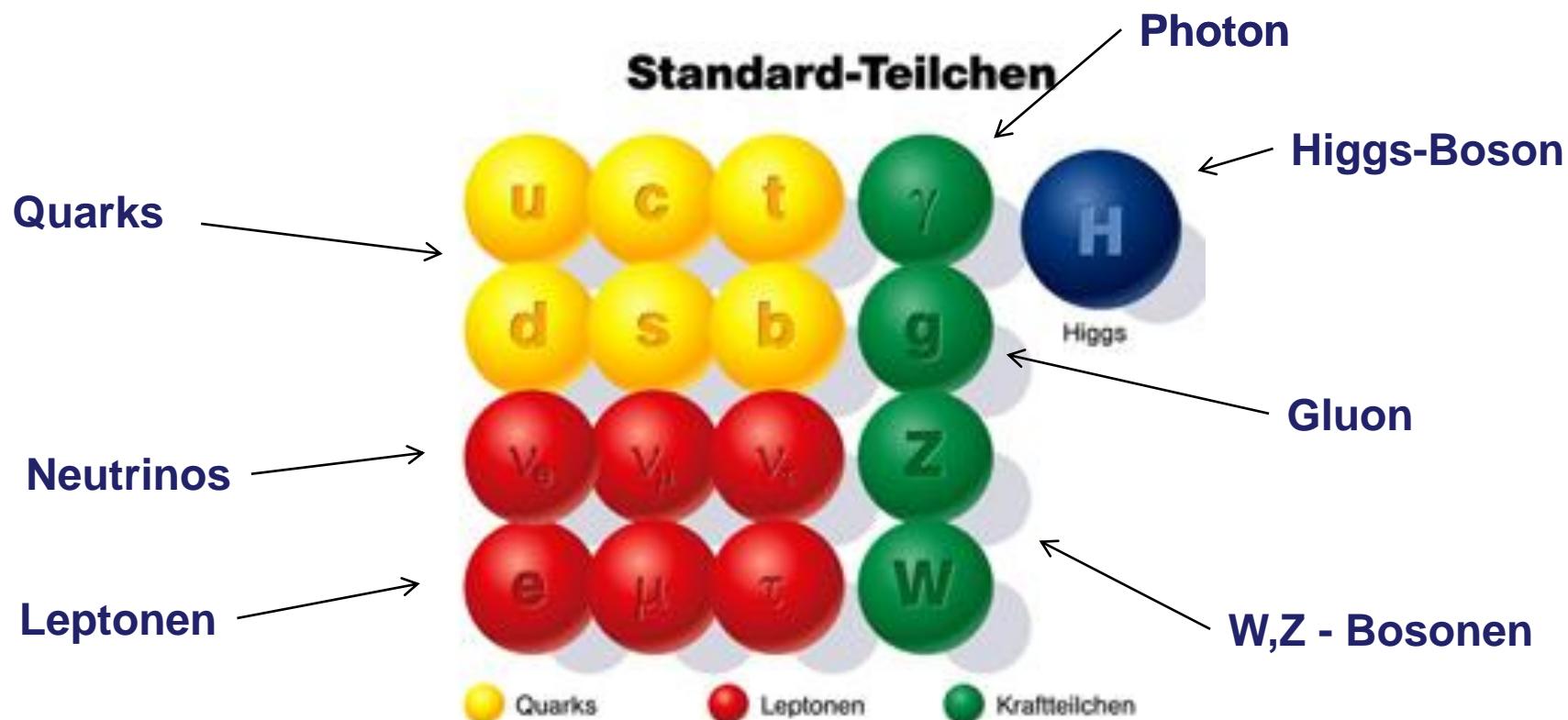


- Falls es Elementarteilchen sind:

- stabil
- elektrisch neutral
- nur schwach wechselwirkend
- massiv

“kalte” Dunkle Materie (Cold Dark Matter)

WIMPs = Weakly Interacting Massive Particles

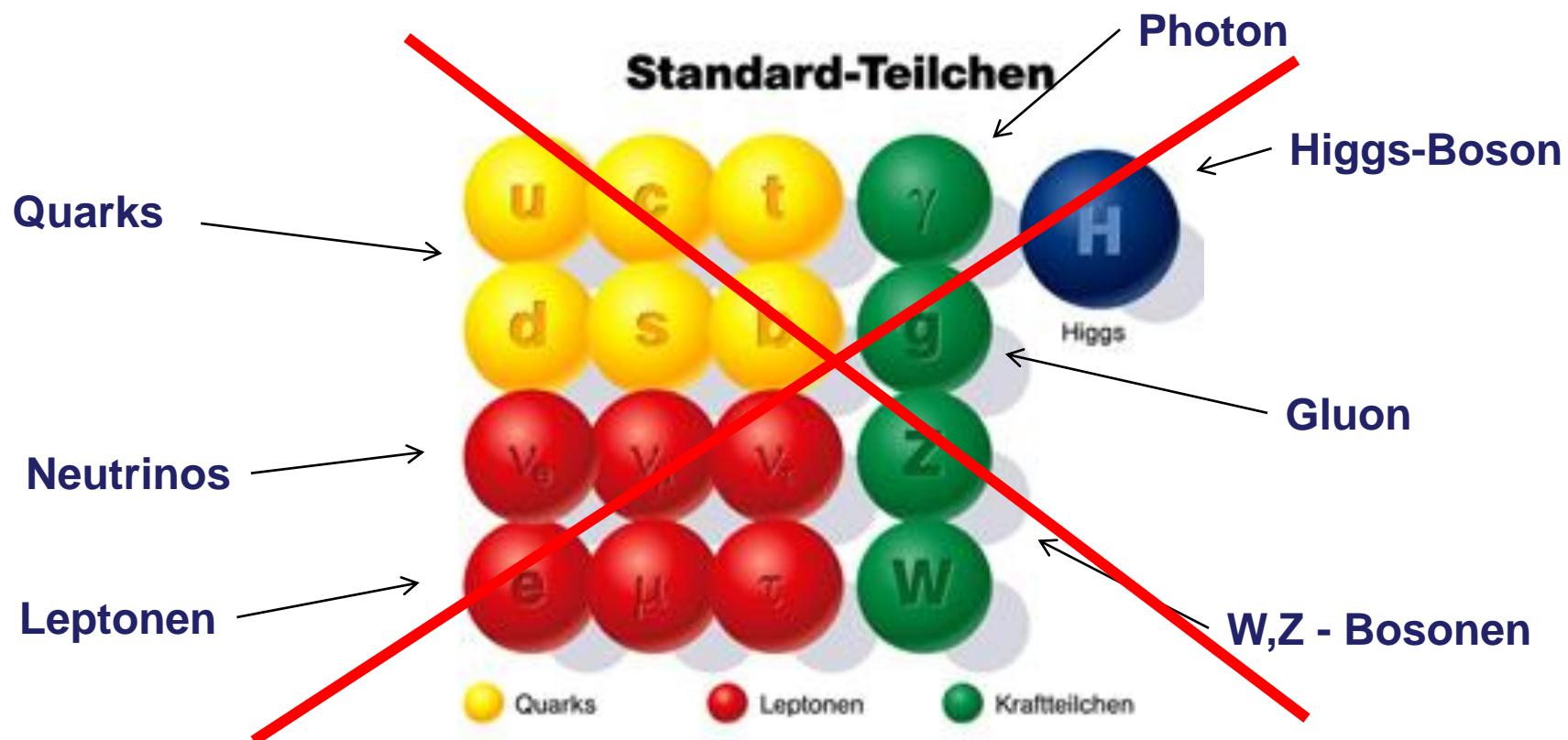


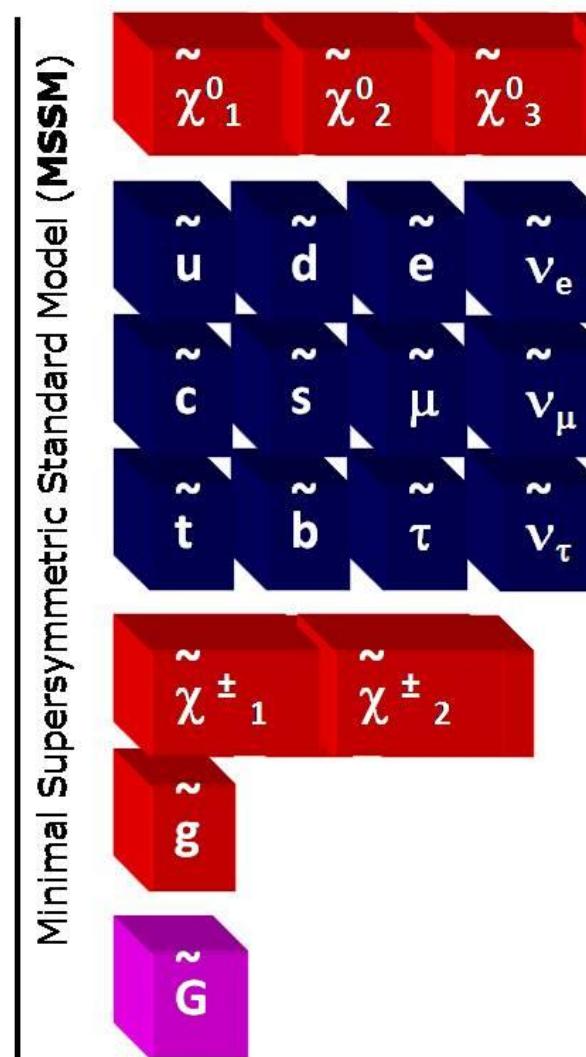
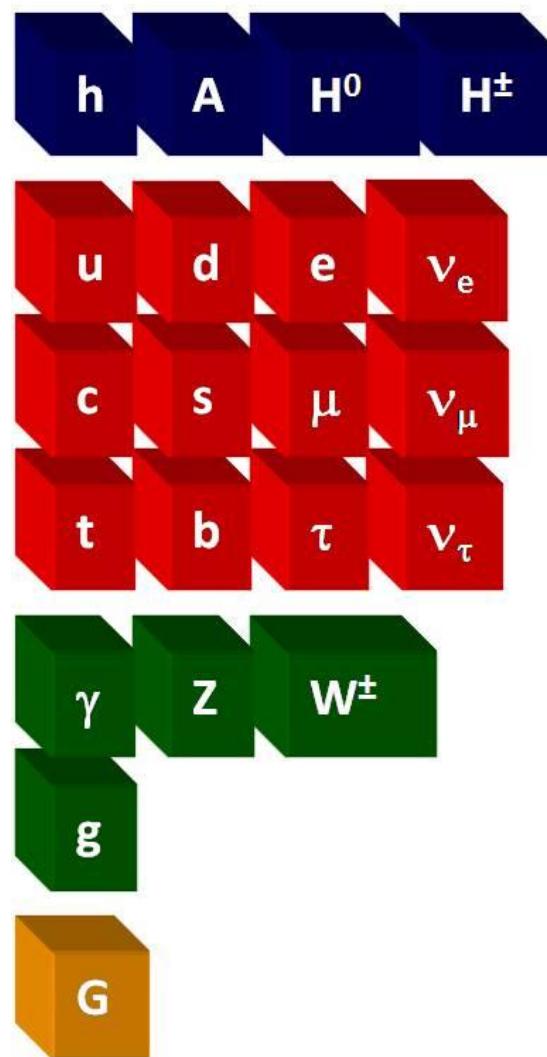
- Falls es Elementarteilchen sind:

- stabil
- elektrisch neutral
- nur schwach wechselwirkend
- massiv

“kalte” Dunkle Materie (Cold Dark Matter)

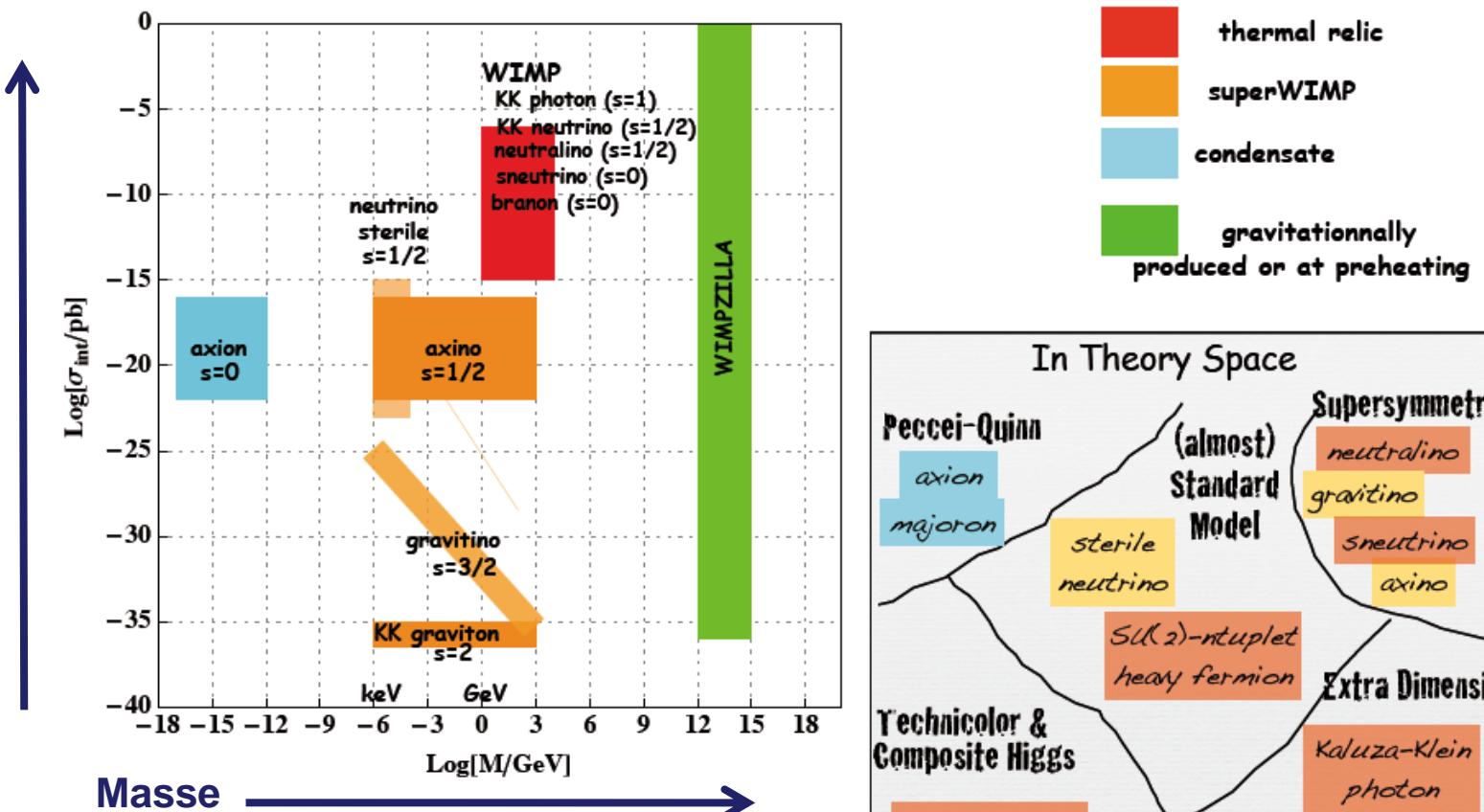
WIMPs = Weakly Interacting Massive Particles

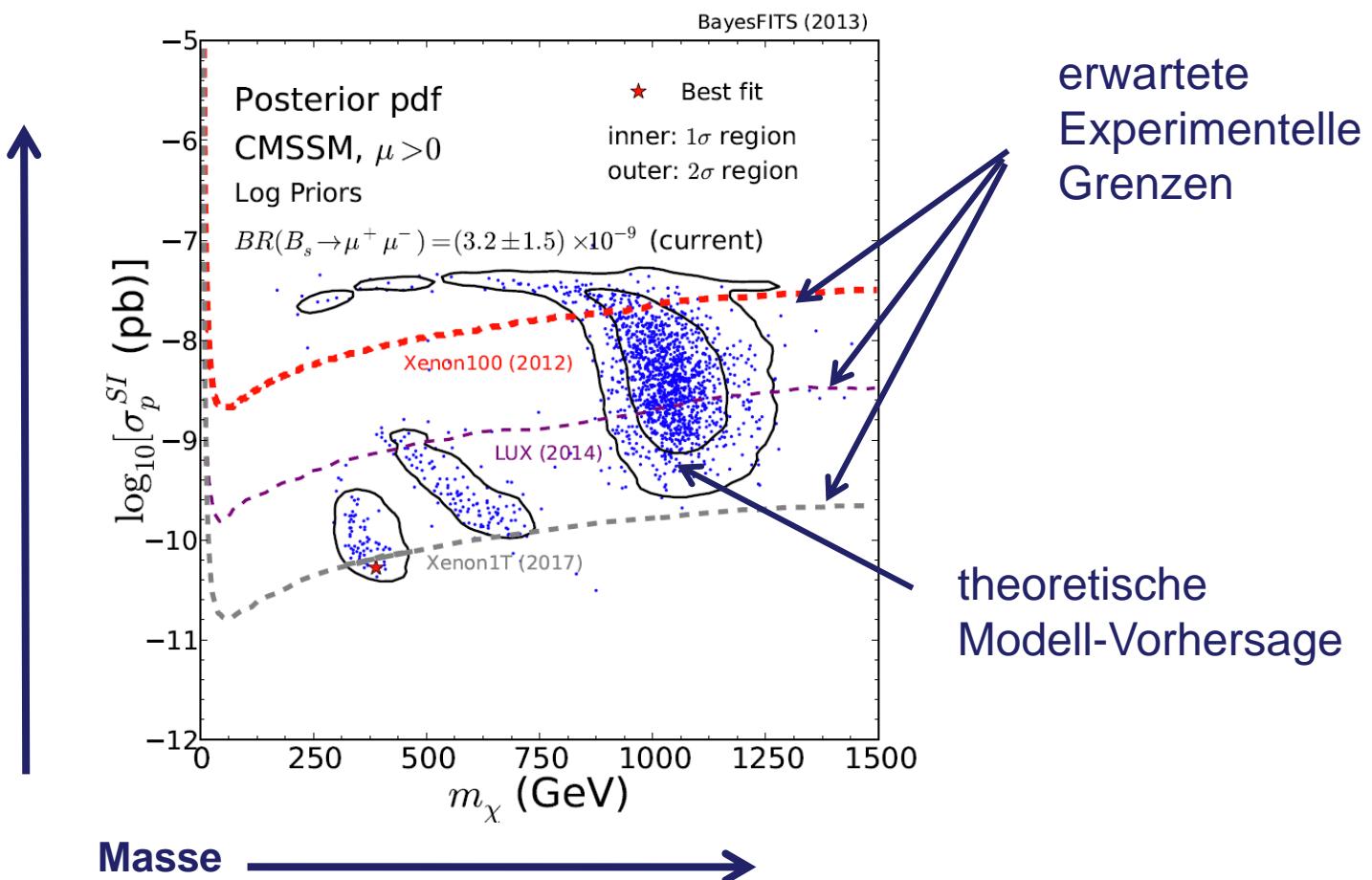


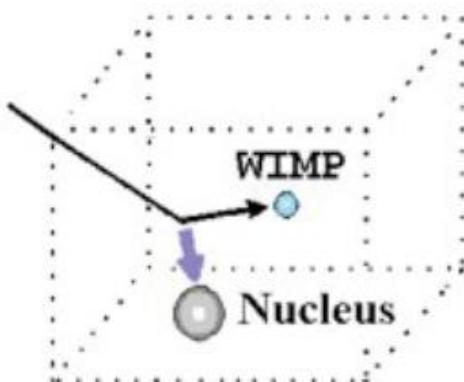
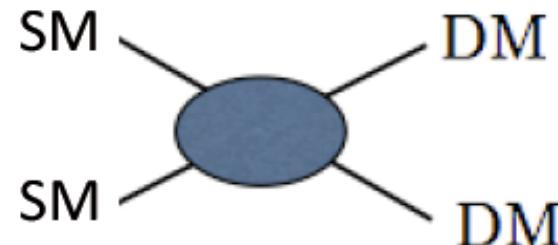
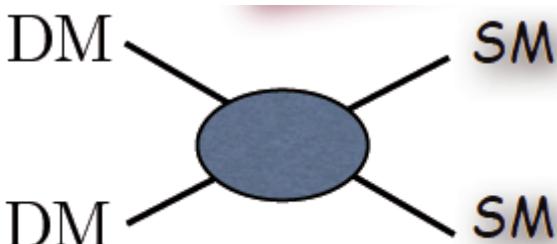
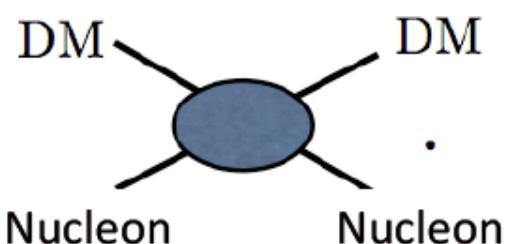


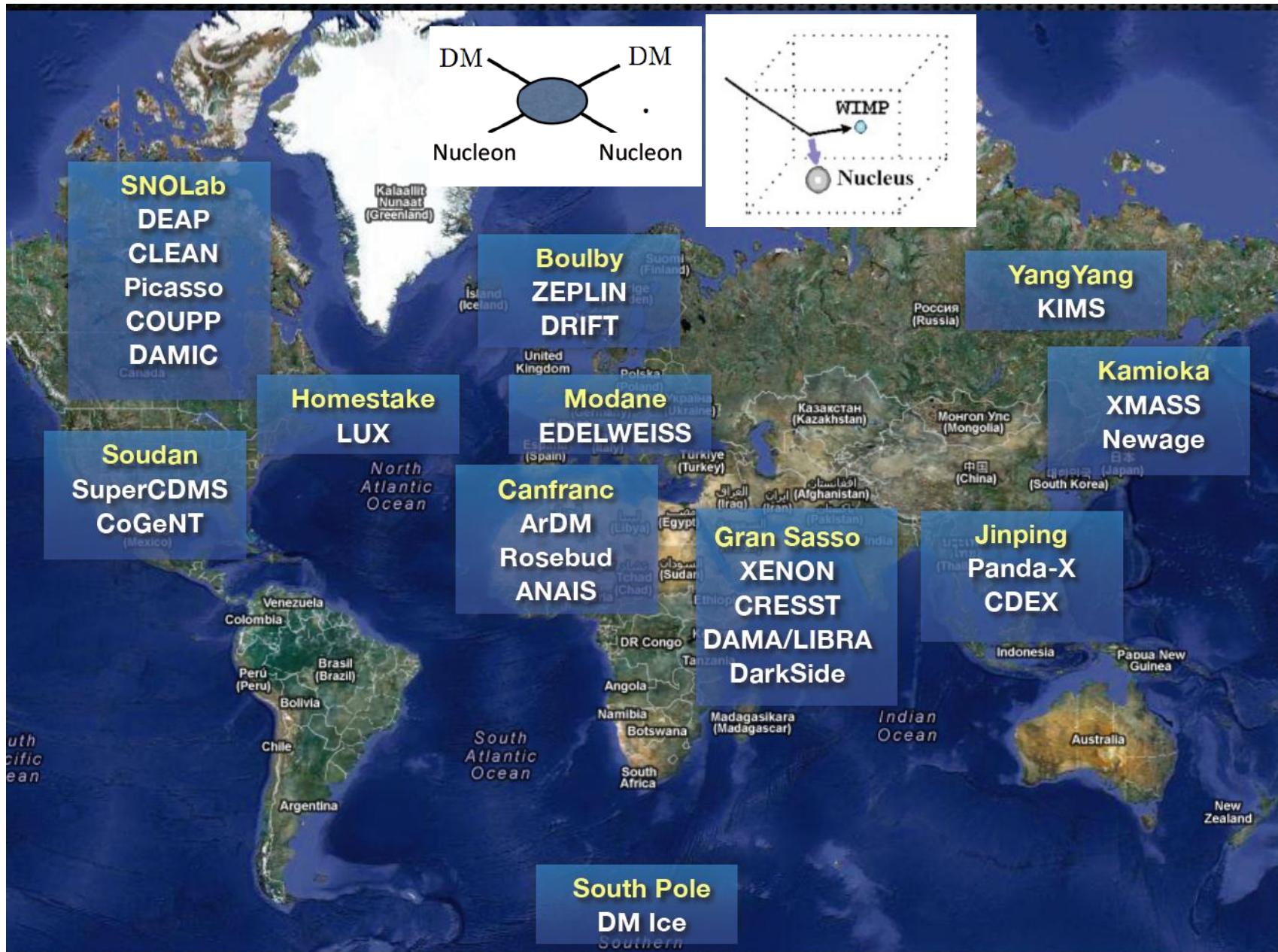
z.B. Neutralinos

das leichteste ist stabil
neutral
schwach wechselwirkend
schwer

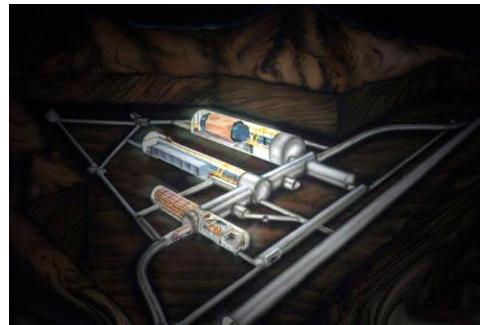
Dark Matter Candidates with $\Omega_{\text{DM}} \sim 1$ 



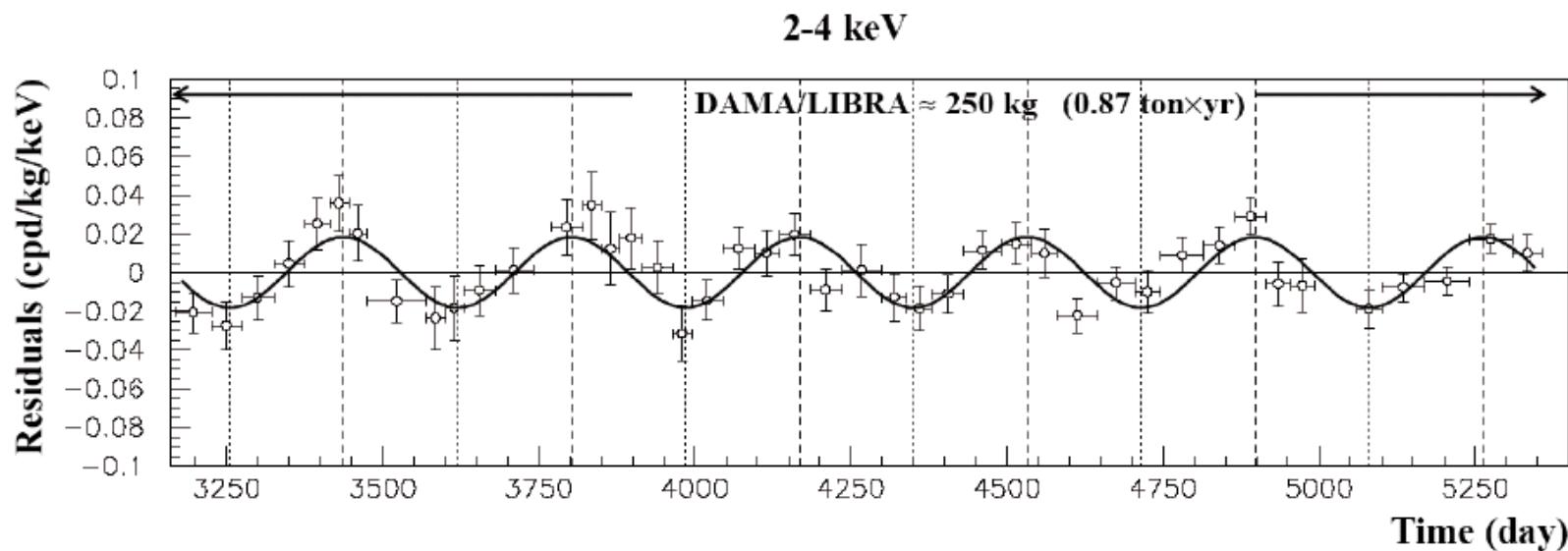




- Beispiel: DAMA/Libra-Detektor aus NaI-Kristallen im Untergrundlabor Gran Sasso (IT)



- Erde kreist um Sonne und fliegt gleichzeitig durch Hintergrund aus Dunkler Materie
- Jahreszeitliche Variation der Wechselwirkungen mit dem Teilchendetektor:



- Messung im Grenzbereich der Sensitivität des Detektors
- Ergebnisse noch nicht von anderen Experimenten bestätigt

- Beispiel: LUX-Detektor mit 120 kg flüssigem Xenon
Sanford Underground Lab South Dakota

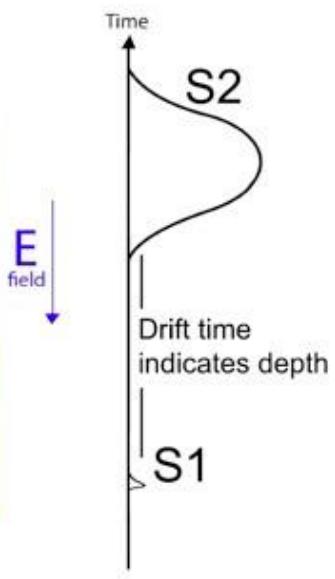
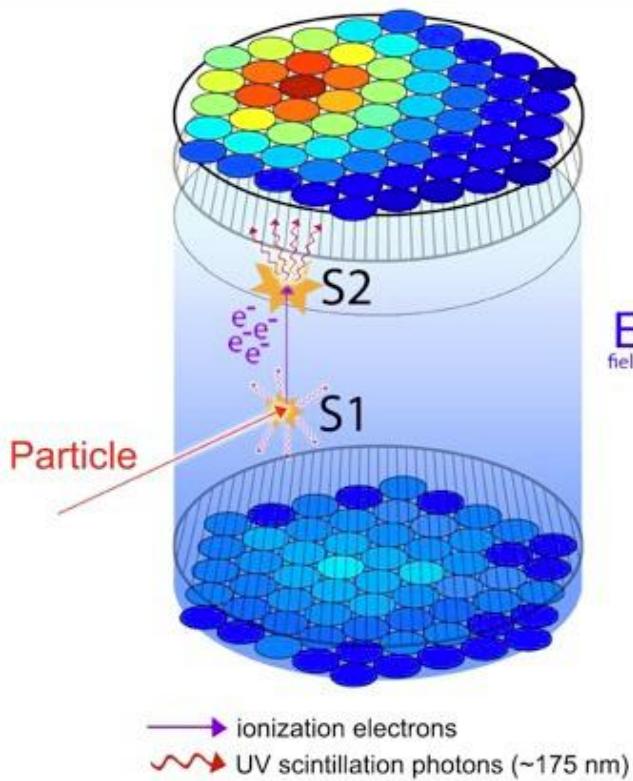
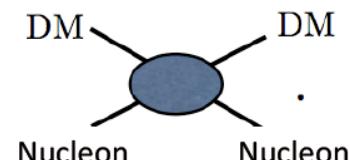
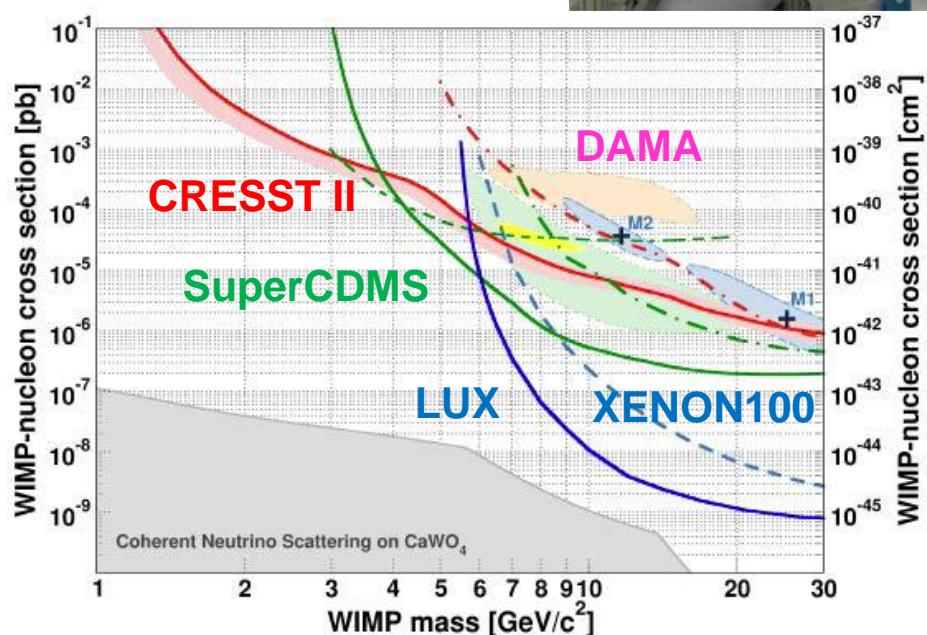


Image by CH Faham (Brown)

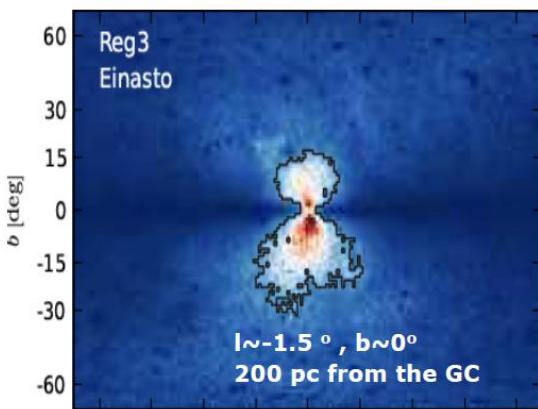
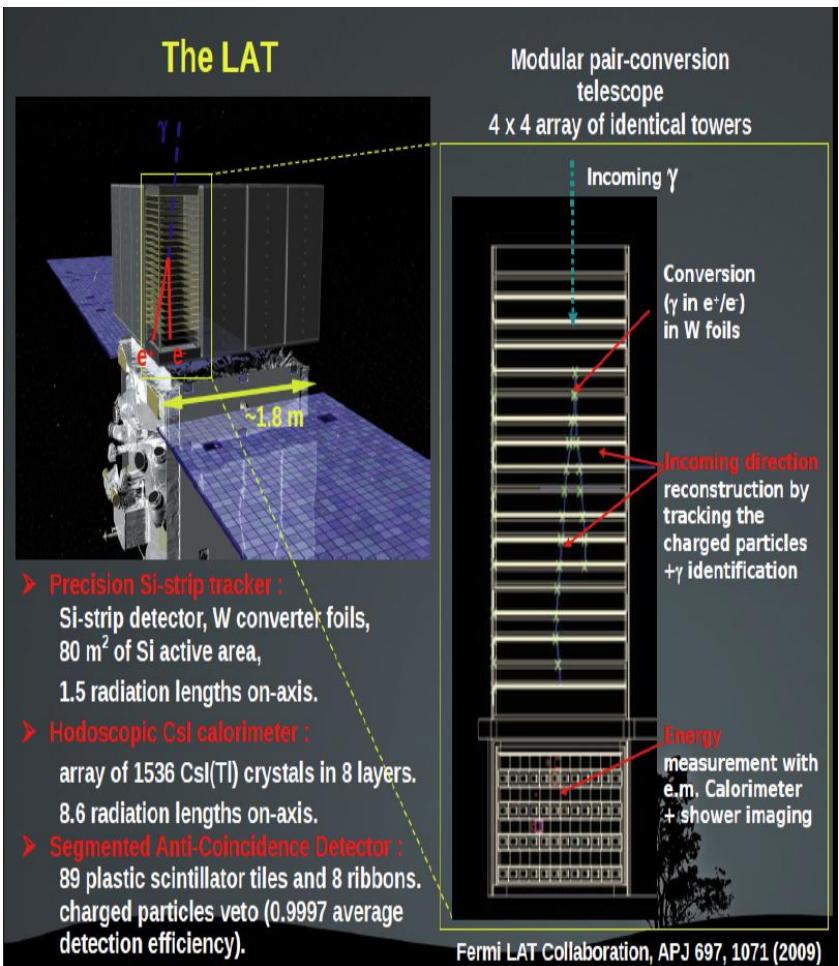


arXiv:1310.8214
arXiv:1407.3146v2

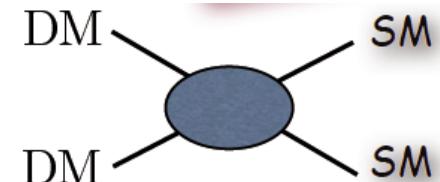


- 85 Tage Messzeit - kein Signal beobachtet
→ Dunkle Materie wechselwirkt nur sehr schwach
- Neue Ergebnisse werden 2015 erwartet, genauso von vielen anderen Experimenten in den nächsten Jahren, wobei Detektoren immer schwerer werden (1t, 2t, 5t, ...)

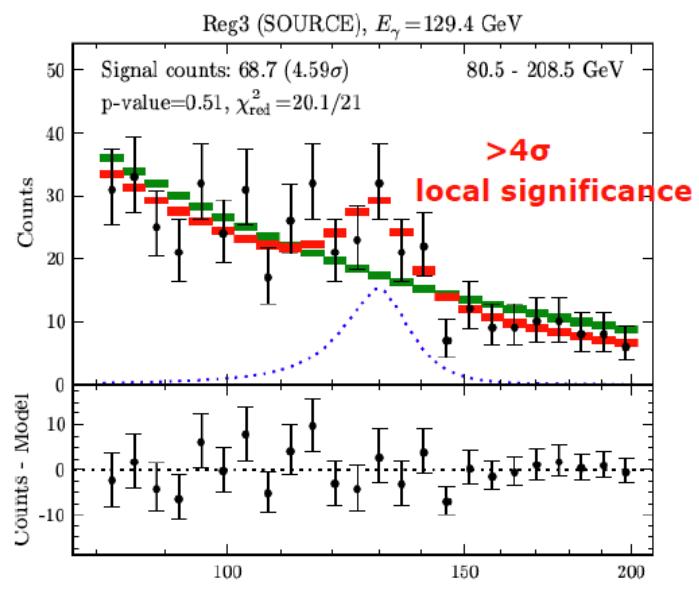
- Beispiel: Fermi/LAT Teleskop



Target region : reg3 surrounding the Galactic center



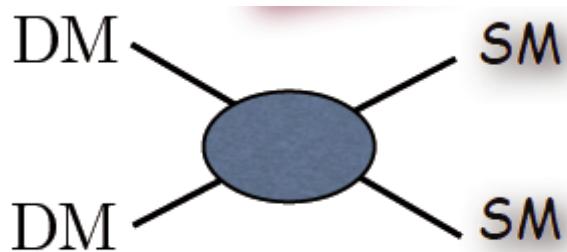
- Suche nach hochenergetischen Photonen aus dem galaktischen Zentrum



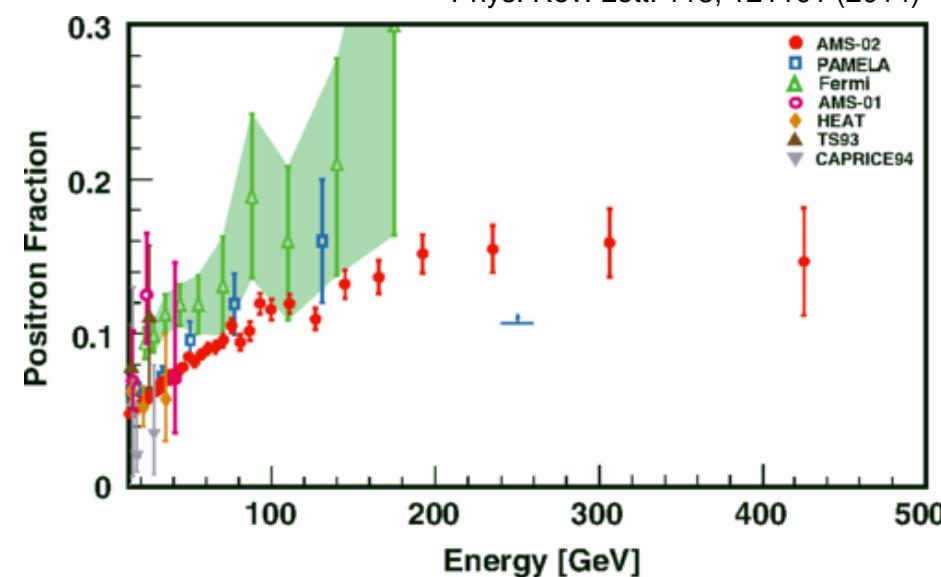
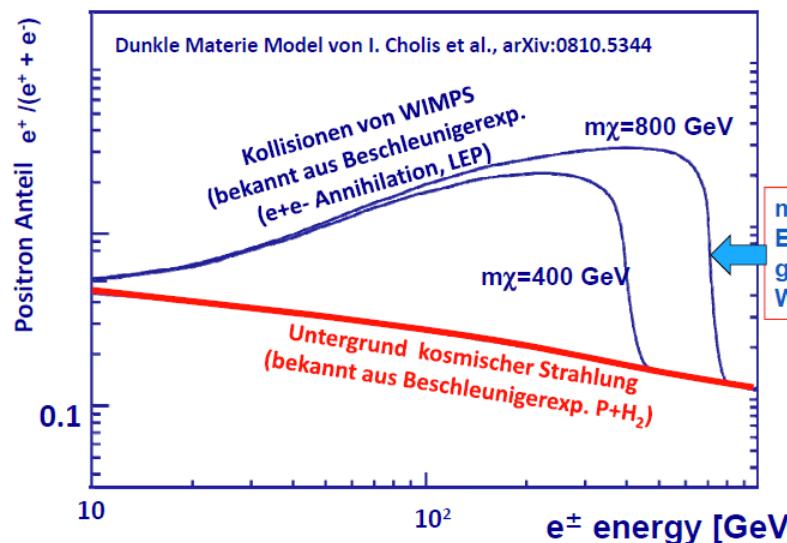
- Neue Analyse reduziert die Signifikanz auf 3.3 σ (global nur 1.6 σ)
- Astrophysikalische Quelle?

C. Weniger, JCAP 1208, 007 (2012).
Fermi-LAT Collab., M. Ackermann et al., arXiv:1305.5597.

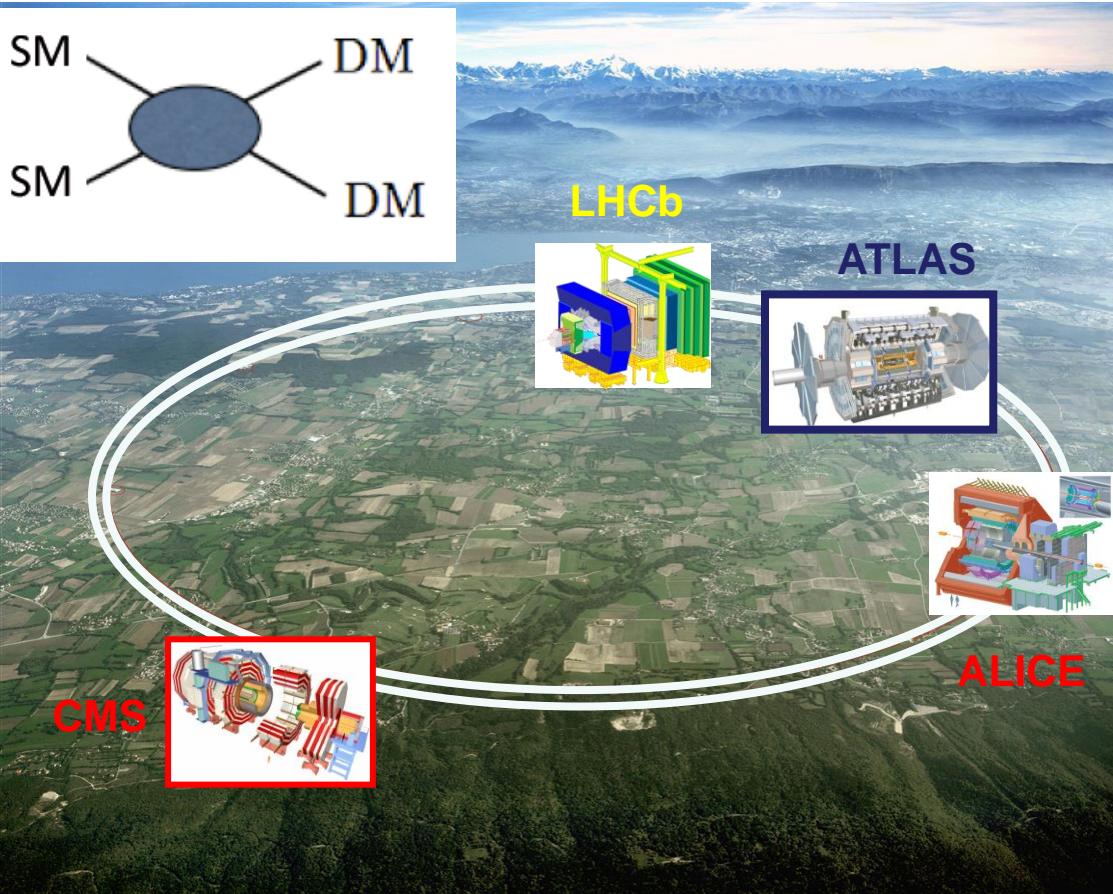
- AMS Detektor auf der ISS sieht Positronen hoher Energie – aus Annihilation von Dunkler Materie?



Phys. Rev. Lett. 113, 121101 (2014)



- Spektrum steigt an und flacht wieder ab → Dunkle Materie?
- Quelle kann auch astrophysikalischer Natur sein (Pulsar)



LHC:

26.7 km Umfang
Tunnel in 50-100 m Tiefe

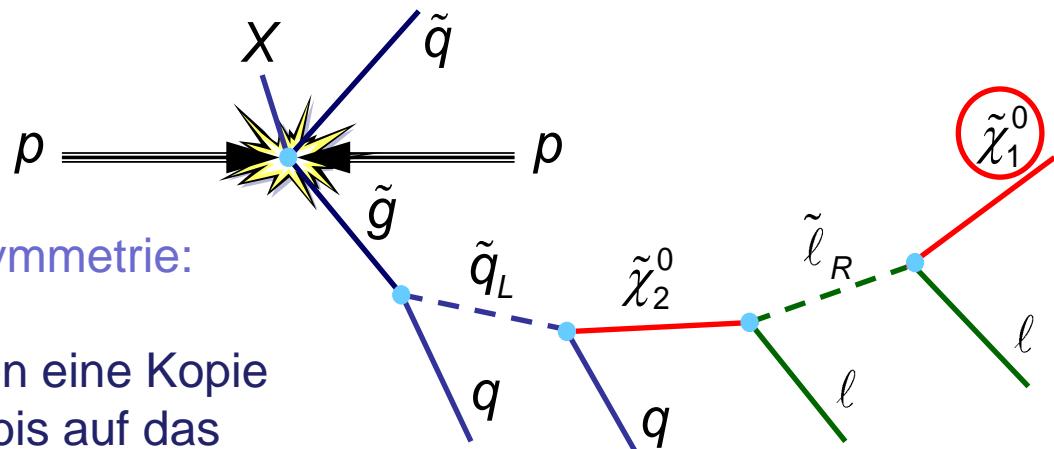
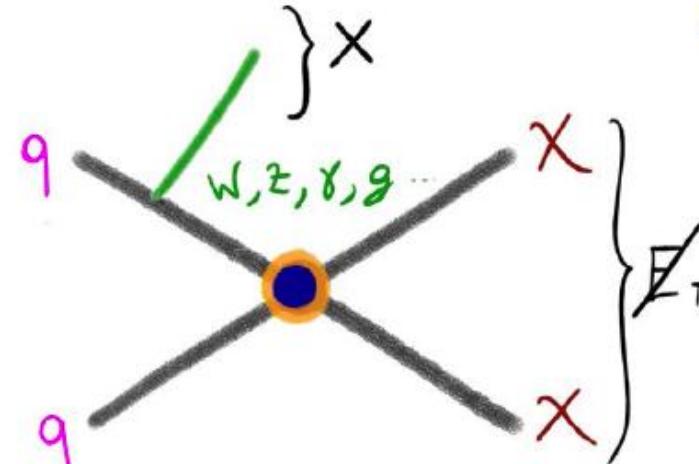
4 Teilchendetektoren

Protonen mit 99.999991%
der Lichtgeschwindigkeit
→ 11250 Umläufe pro Sekunde



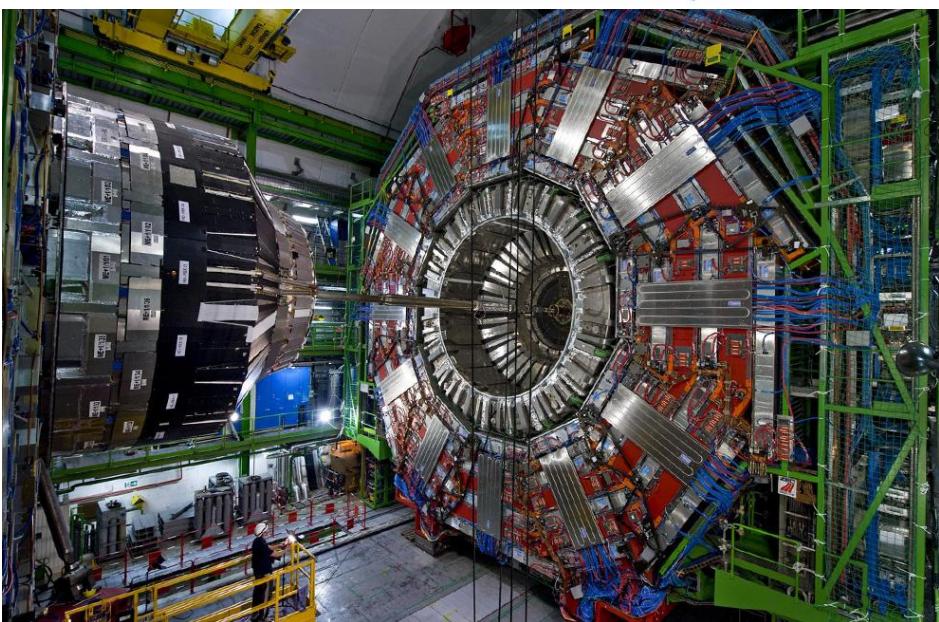
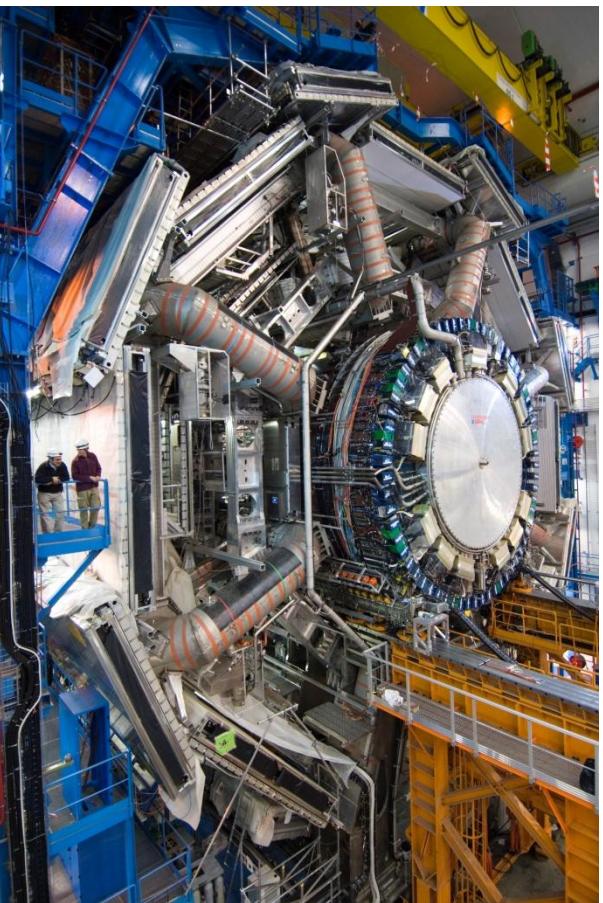
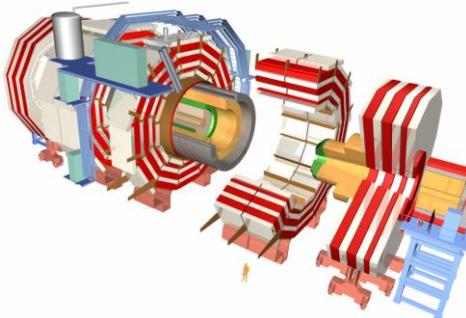
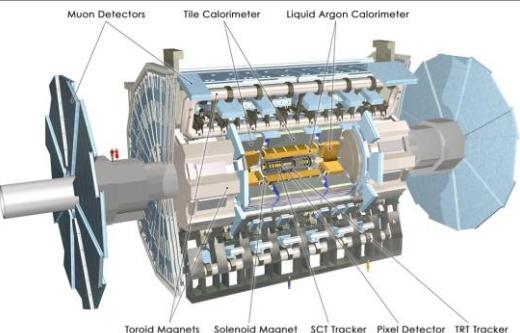
- 1100 Teilchen-Pakete mit je 10^{11} Protonen pro Strahl
- alle 50 ns eine Strahl-Kreuzung mit bis zu 40 Proton-Proton-Stößen
- Kollisionsenergie entspricht 8500 x Protonmasse

- Allgemeine Produktion Dunkler Materie zusammen mit bekannten Teilchen:

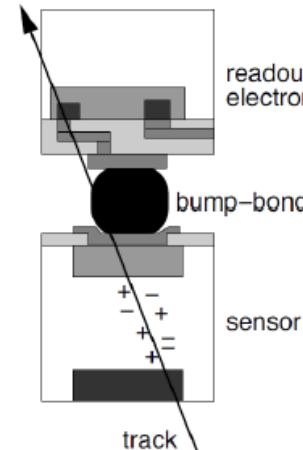
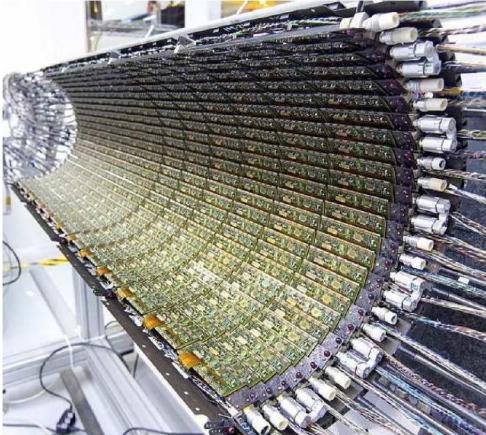


- Spezielle Modelle z.B. Supersymmetrie:

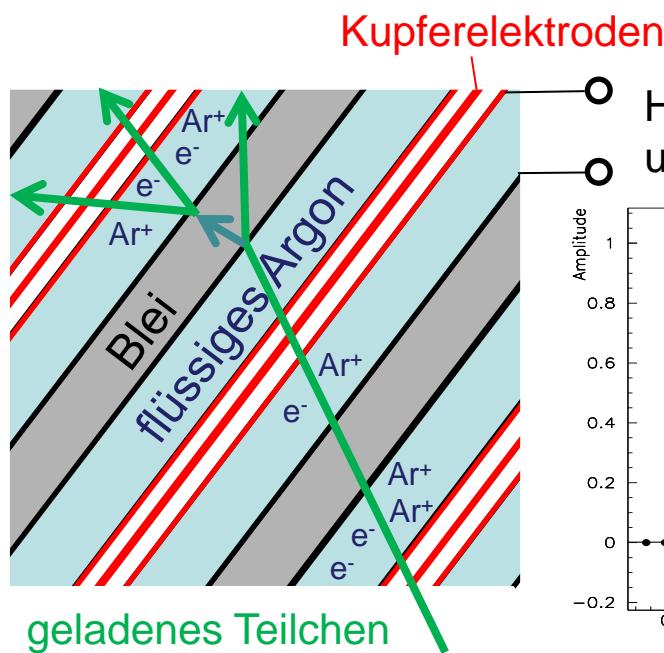
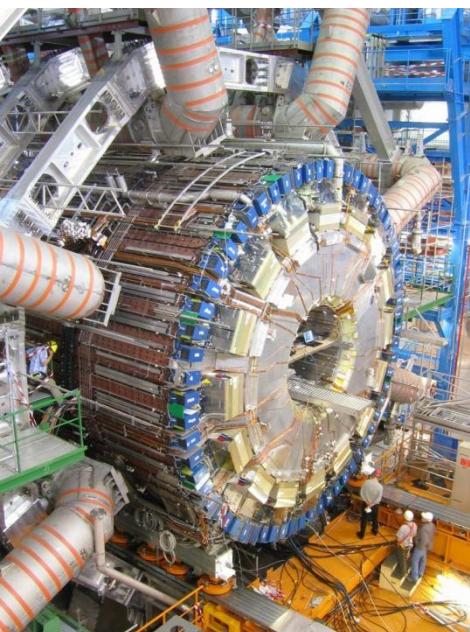
- alle bekannten Teilchen haben eine Kopie
- die neuen Teilchen zerfallen bis auf das leichteste supersymmetrische Teilchen
→ stabil, schwer, schwach wechselwirkend
- Kandidat für Dunkle Materie



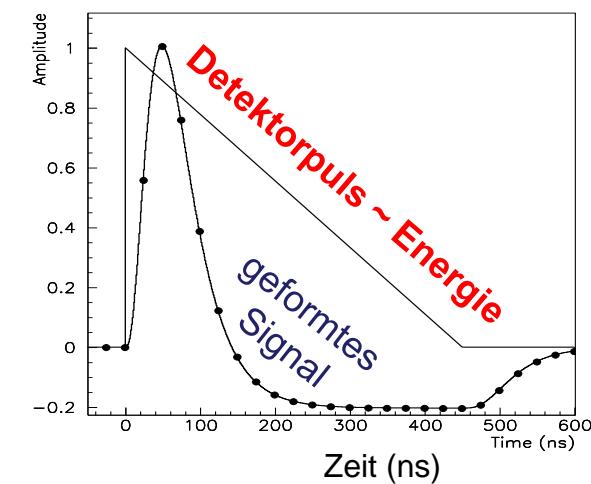
- weltweite Kollaborationen
- jeweils 3000 Physiker aus 170 Ländern
- 18 deutsche Universitäten und Forschungsinstitute sind beteiligt

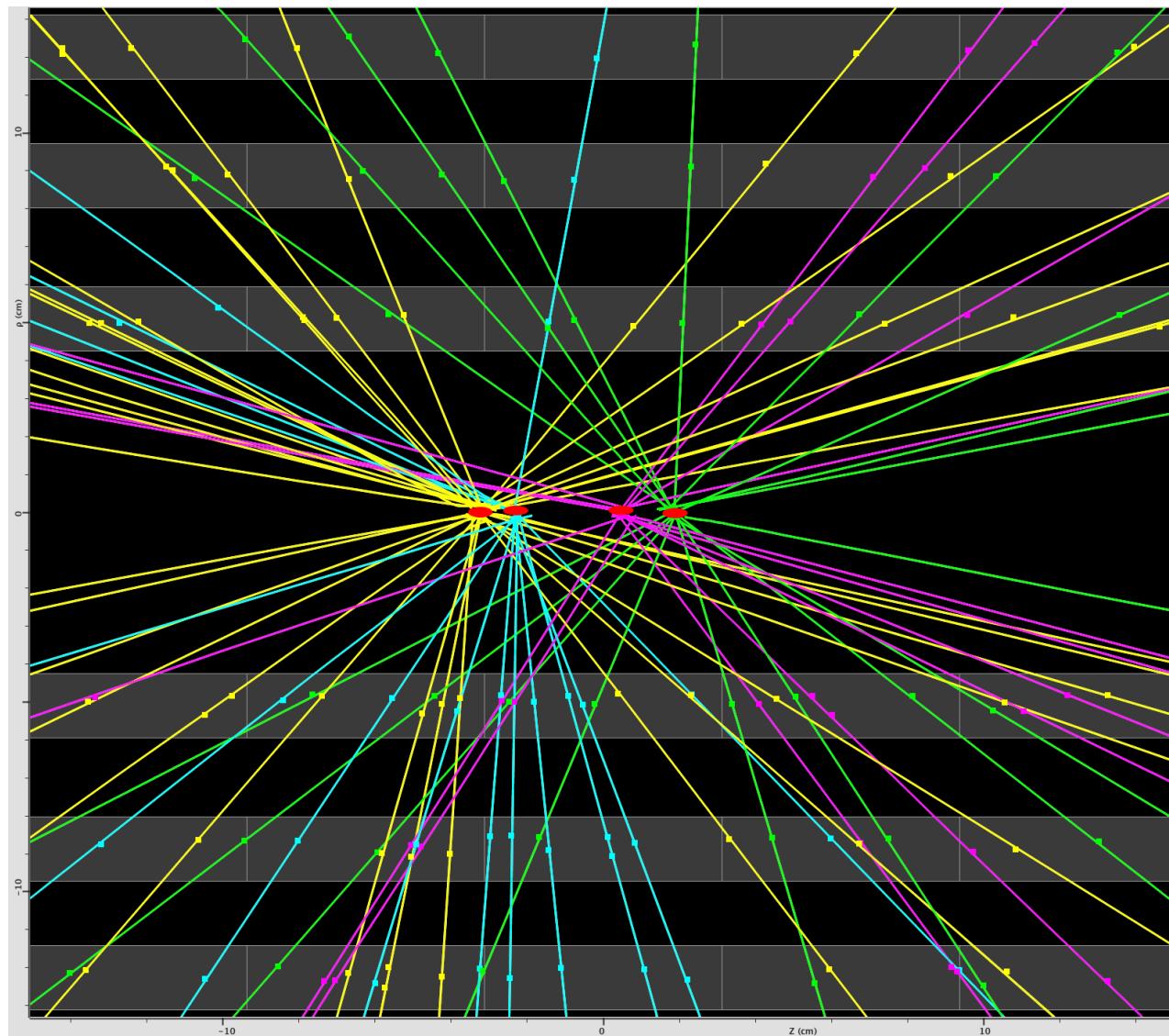


80 Millionen Pixel
 $50 \times 400 \mu\text{m}^2$



- Hochspannung und Signalauslese

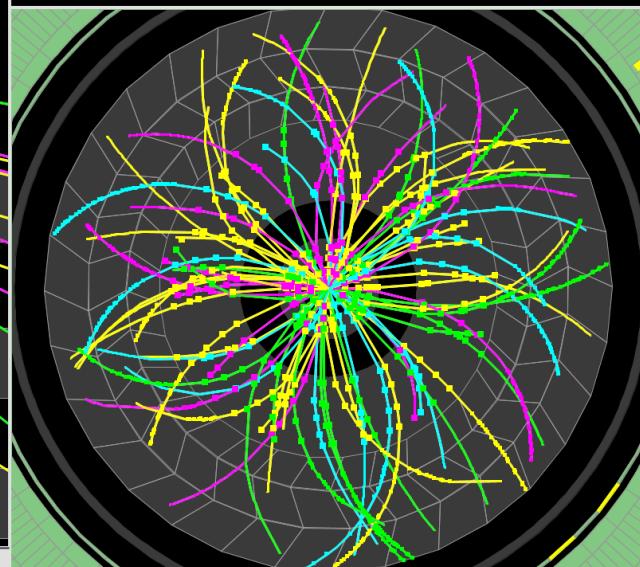




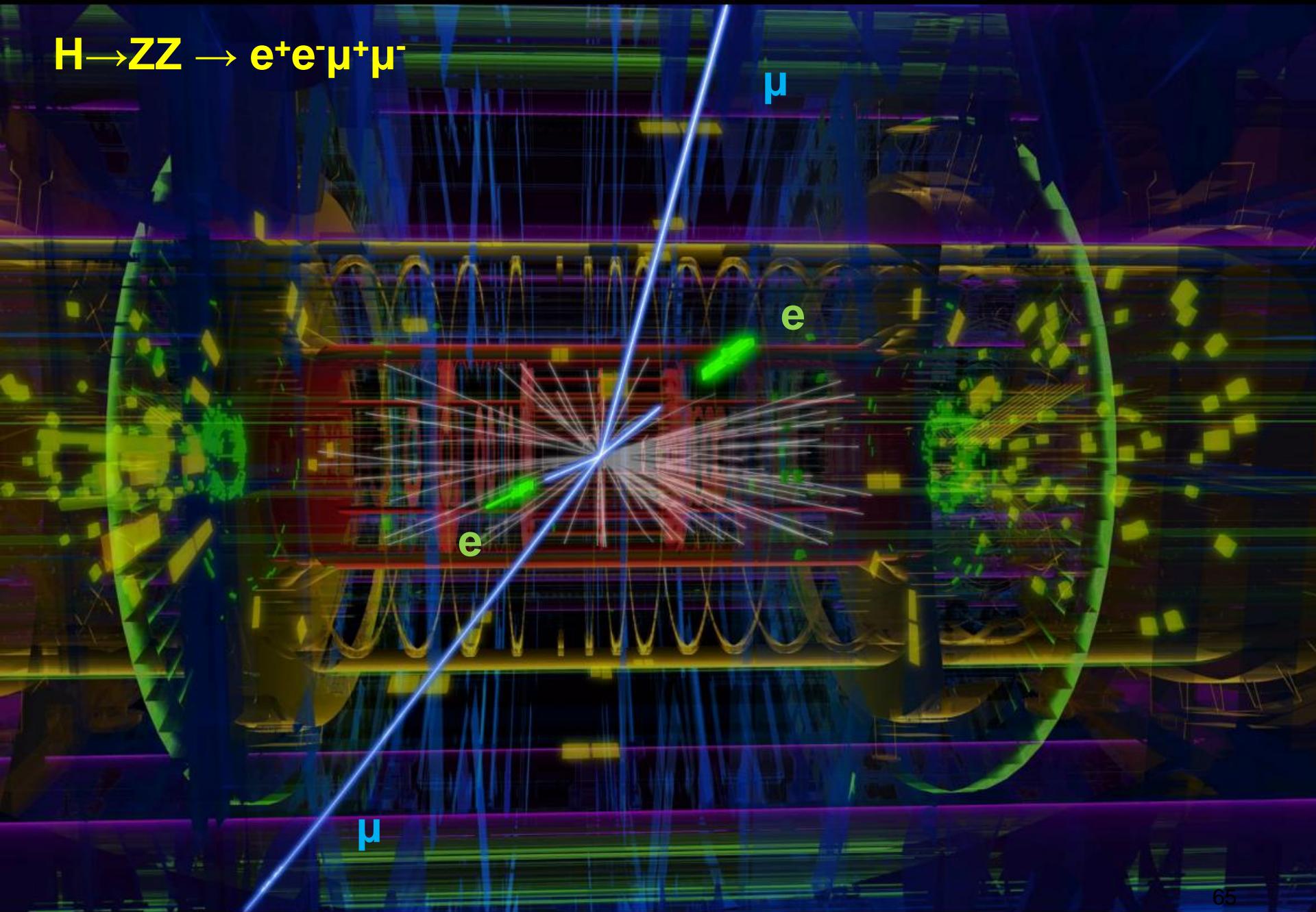
Run Number: 153565, Event Number: 4487360

Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

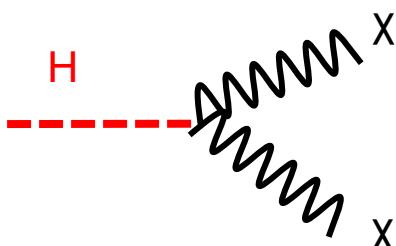
Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions



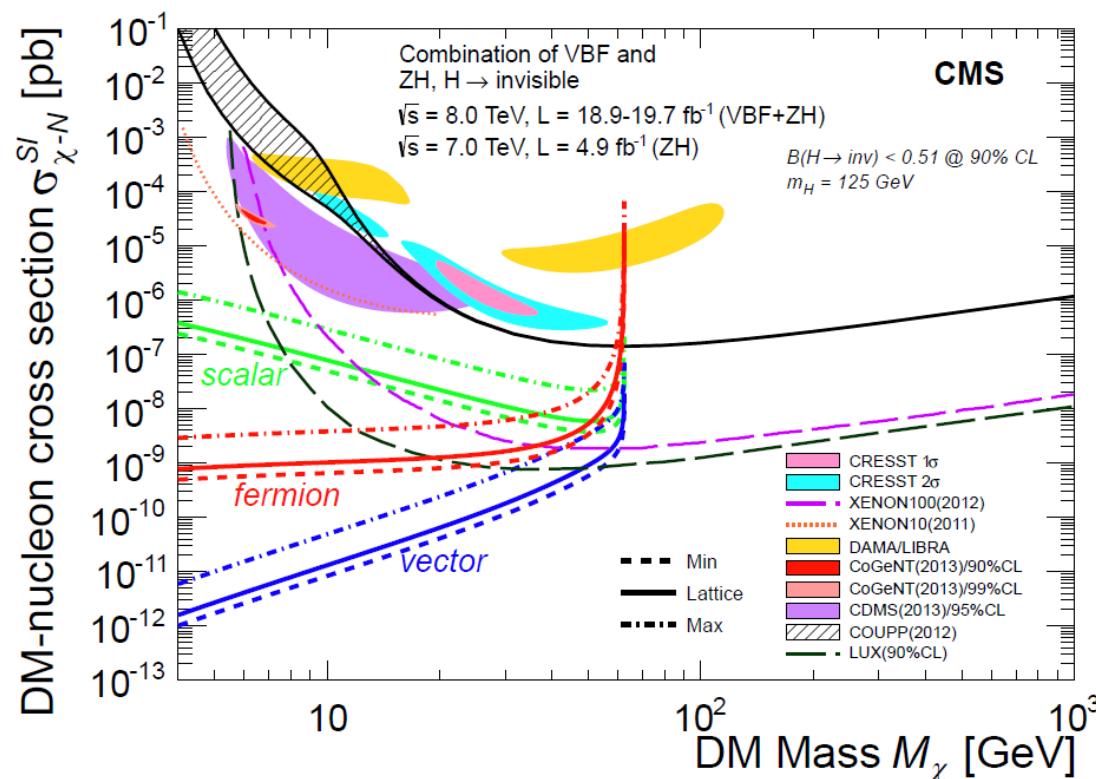
- aus der Spurkrümmung kann der Impuls der Teilchen bestimmt werden

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$ 

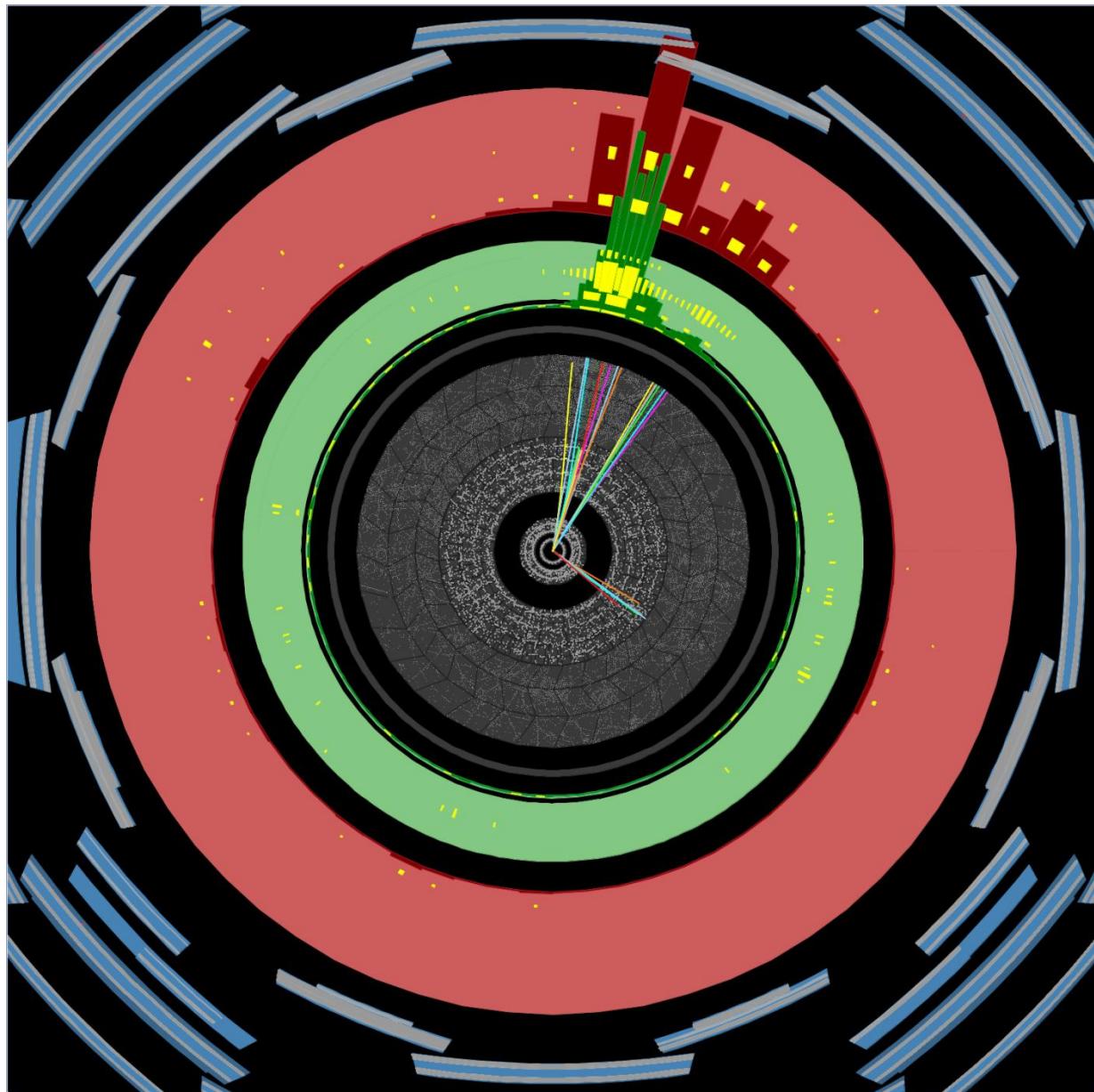
- Das Higgs-Teilchen wurde bereits sehr gut vermessen und viele Eigenschaften bestimmt
- Nahezu alle Zerfallsmoden wurden beobachtet
- Wie groß ist der Anteil “unsichtbarer” Zerfälle z.B. eventuell in Dunkle Materie-Teilchen?



Anteil unsichtbarer Zerfälle < 37% at 95% CL (ATLAS)
 Anteil unsichtbarer Zerfälle < 58% at 95% CL (CMS)



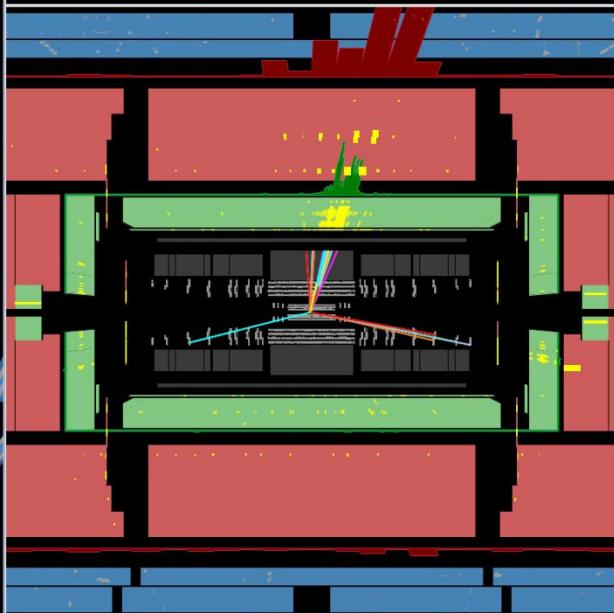
ATLAS-CONF-2014-010
 arXiv:1402.3244 (ATLAS)
 arXiv:1404.1344 (CMS)
 CMS-HIG-13-018
 CMS-HIG-13-028
 CMS-HIG-13-013

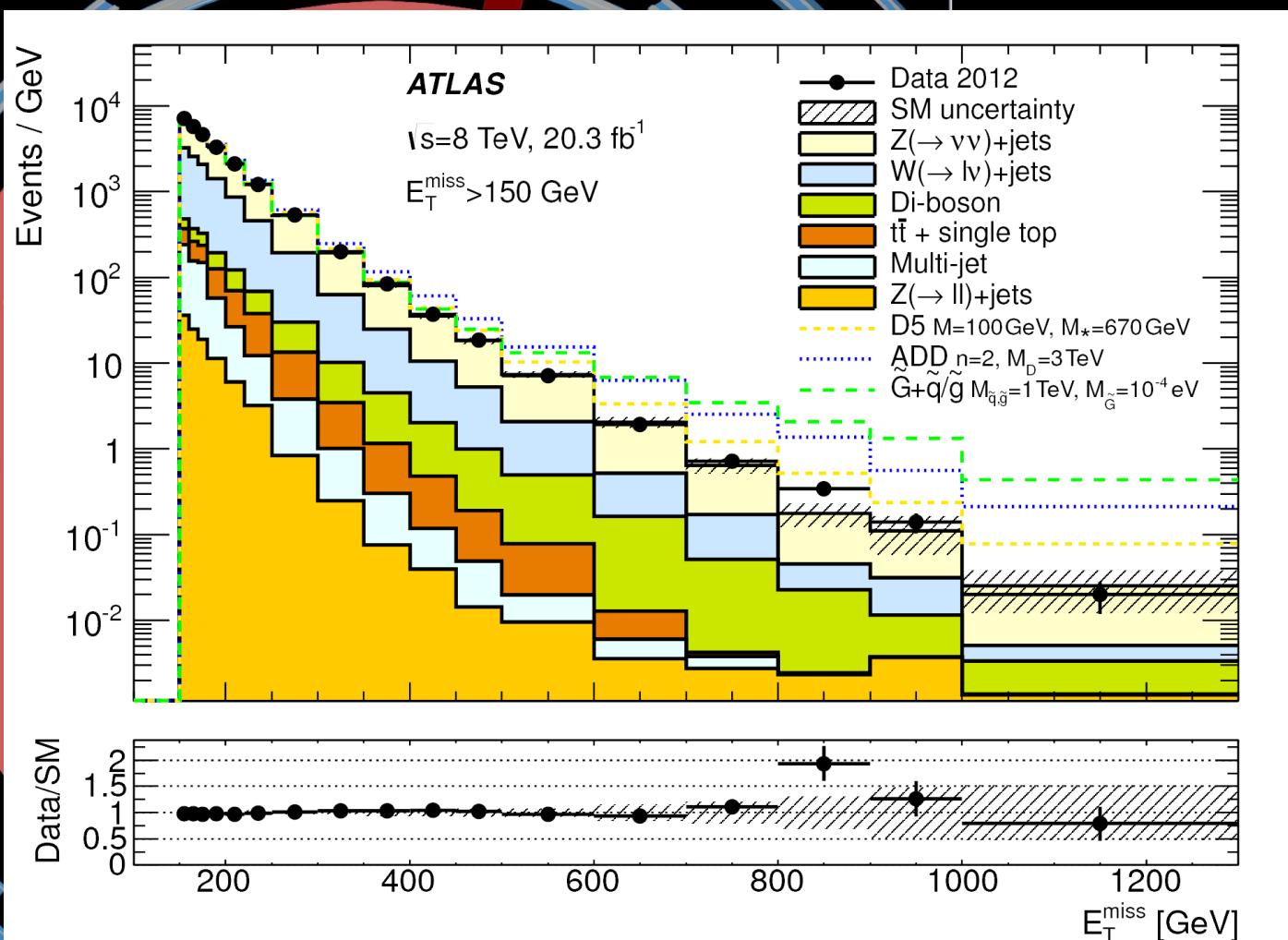


ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 206962, Event Number: 55091306

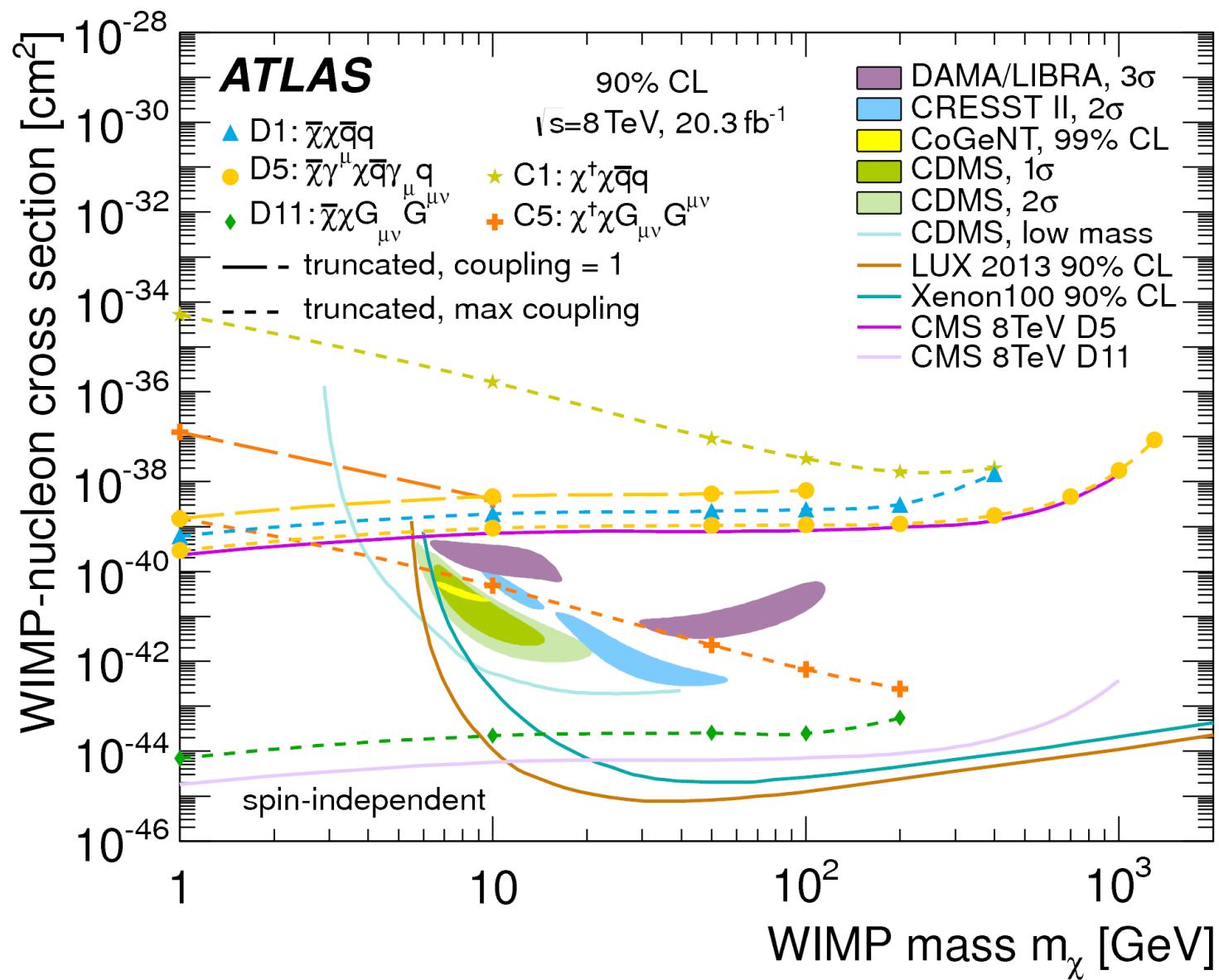
Date: 2012-07-14 10:42:26 CEST

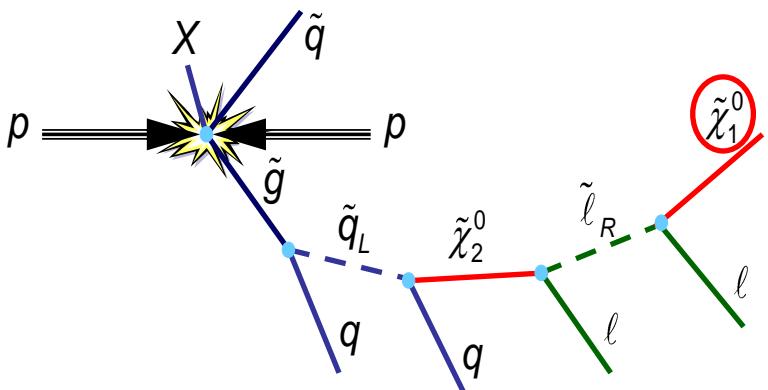


AS
MENT

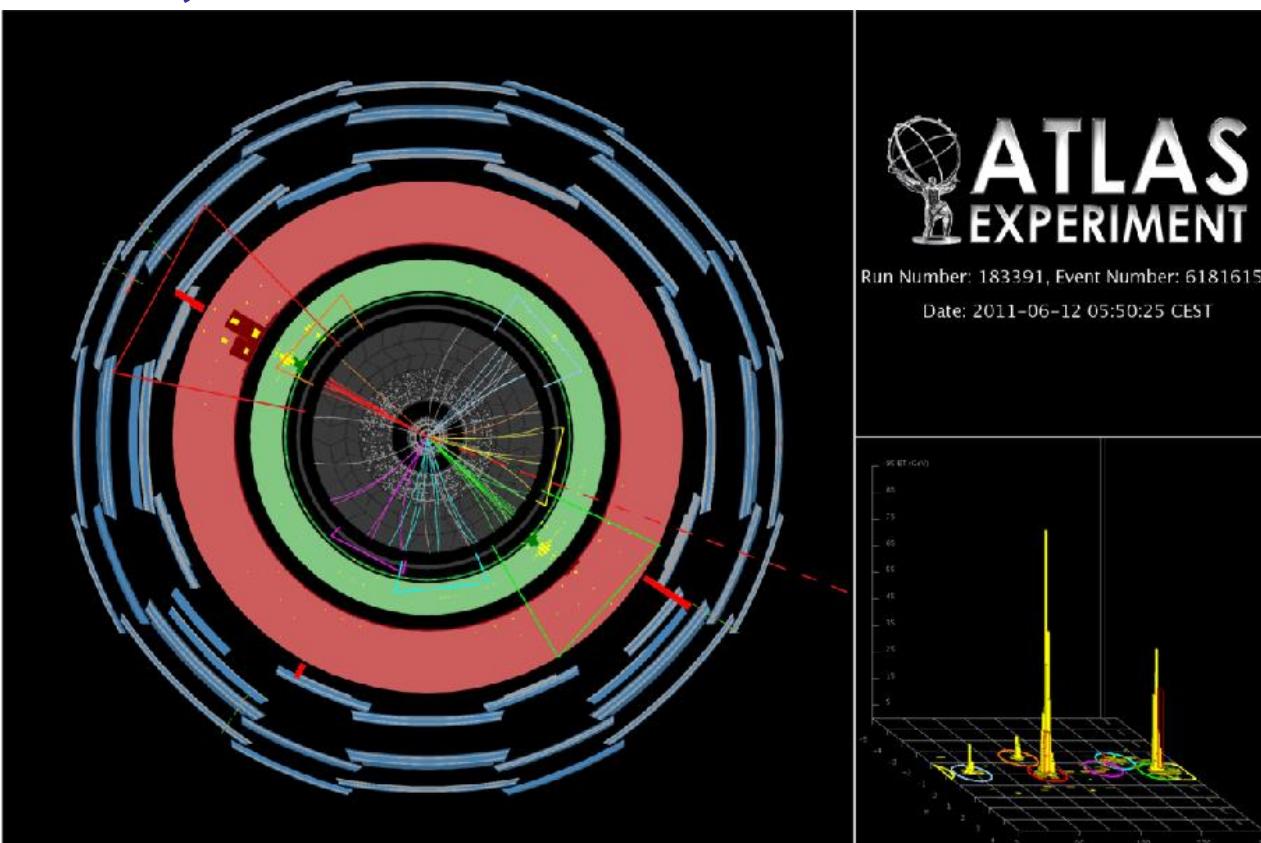
umber: 55091306

42:26 CEST

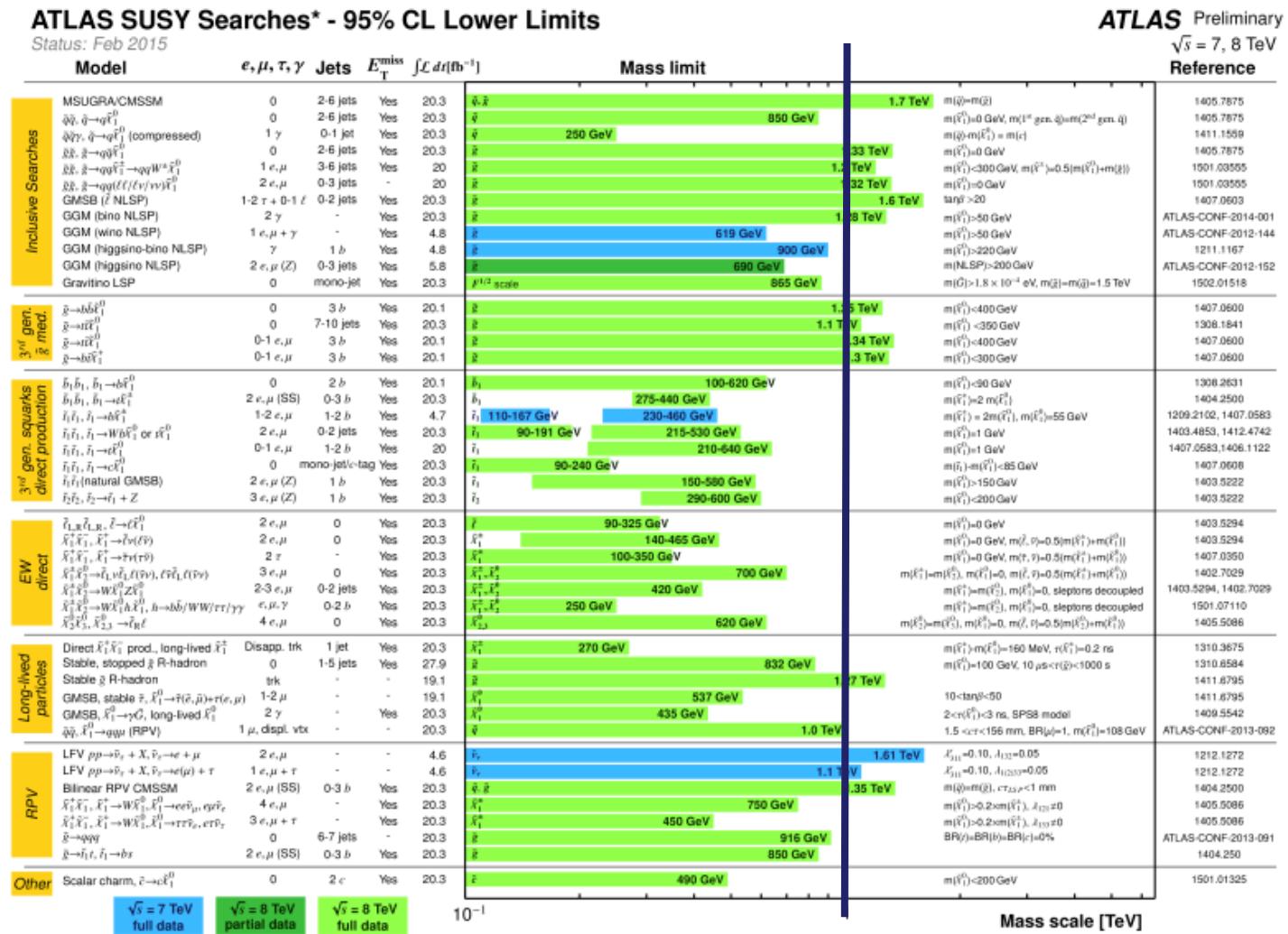




- Viele Zerfallskaskaden wurden untersucht
- Bisher wurde kein signifikantes Signal von Supersymmetrie gefunden

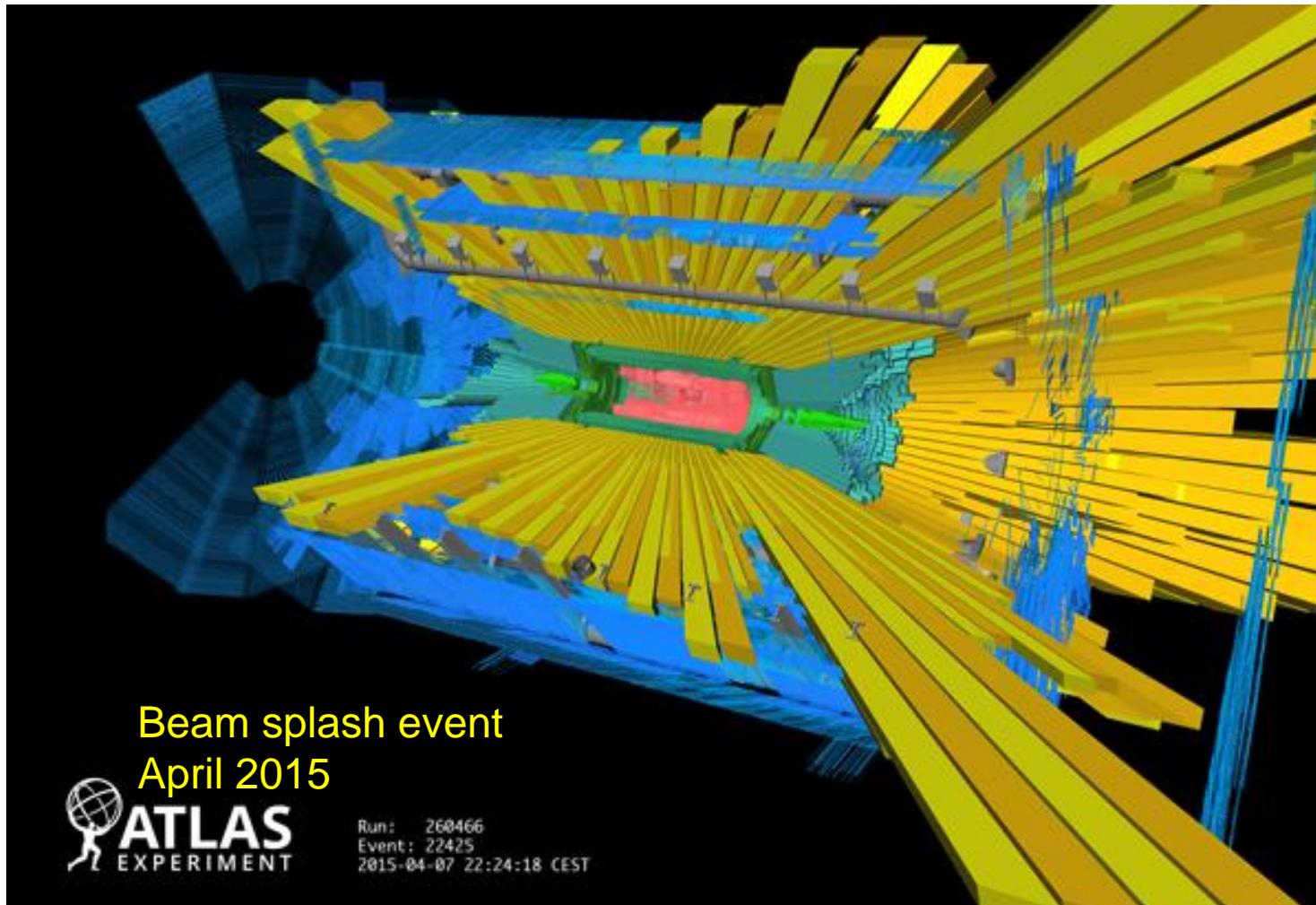


- Ergebnis: gesuchte Teilchen müssen schwerer als etwa 1000 Protonmassen sein



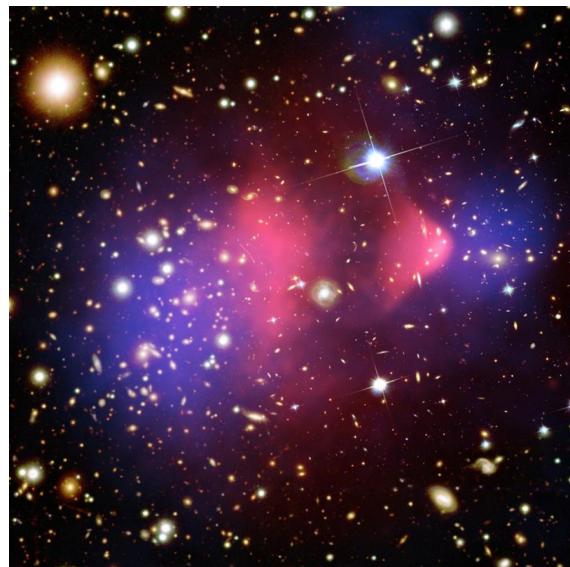
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 σ theoretical signal cross section uncertainty.

- LHC wurde vor 2 Wochen wieder gestartet mit doppelter Schwerpunktsenergie 13 TeV
- Teilchen mit größerer Masse können entdeckt werden

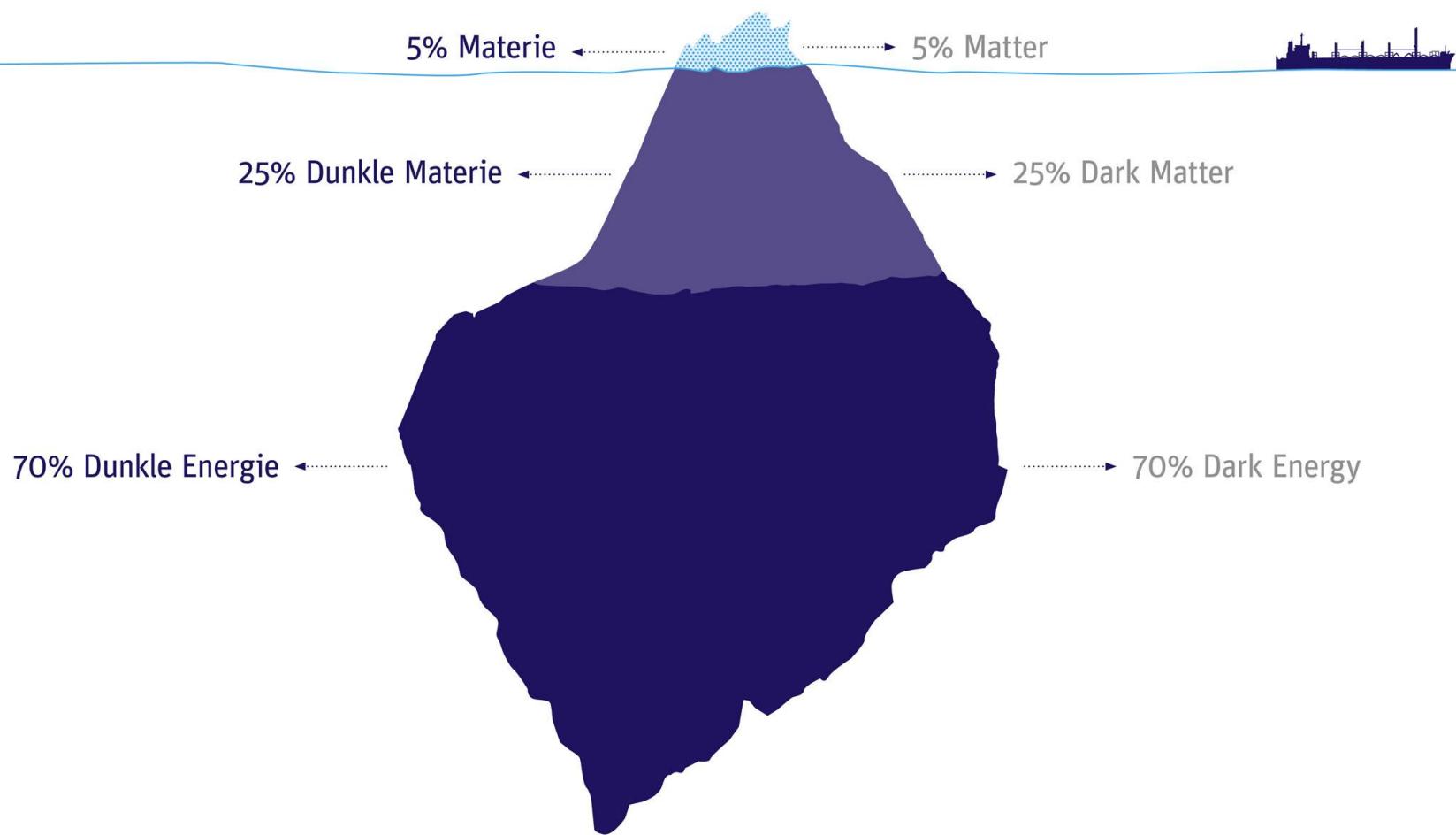


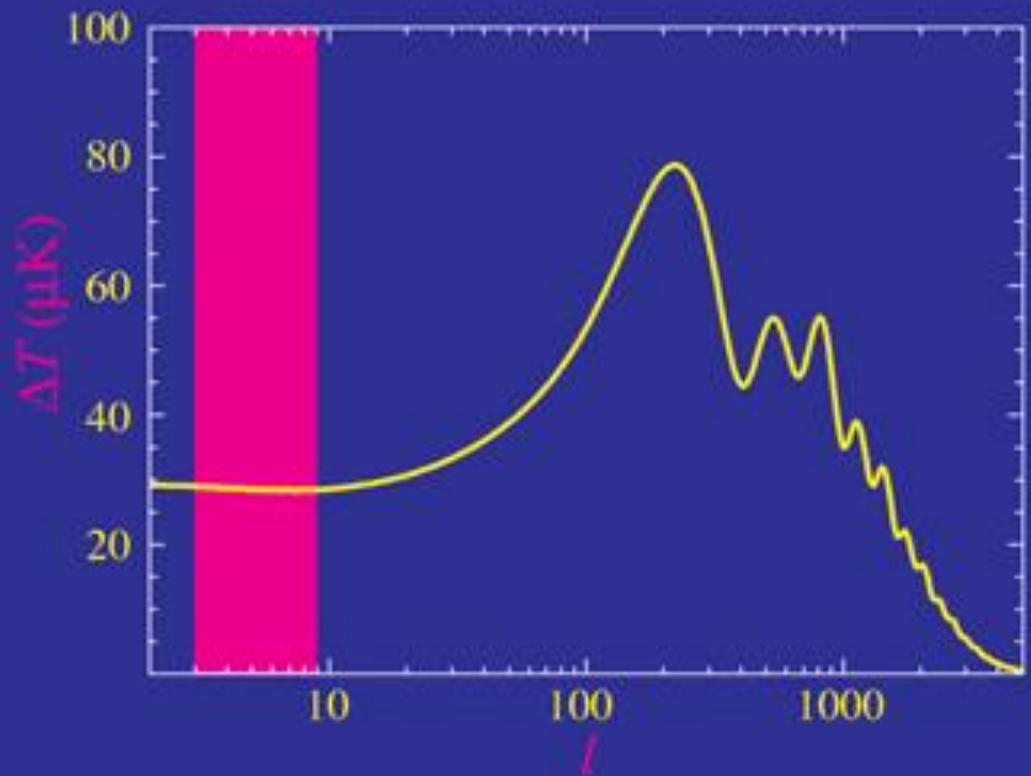
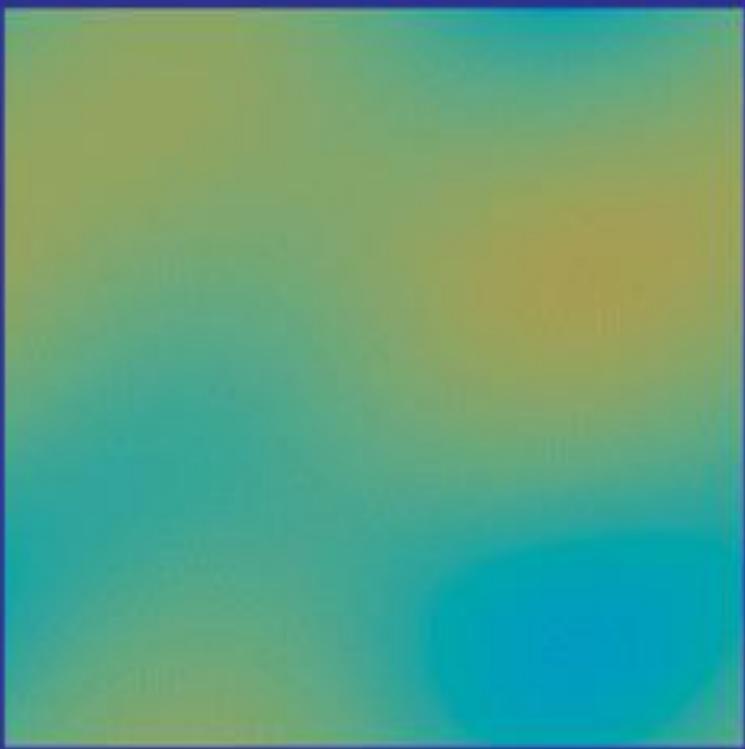
- Erste neue Ergebnisse werden in einigen Monaten erwartet

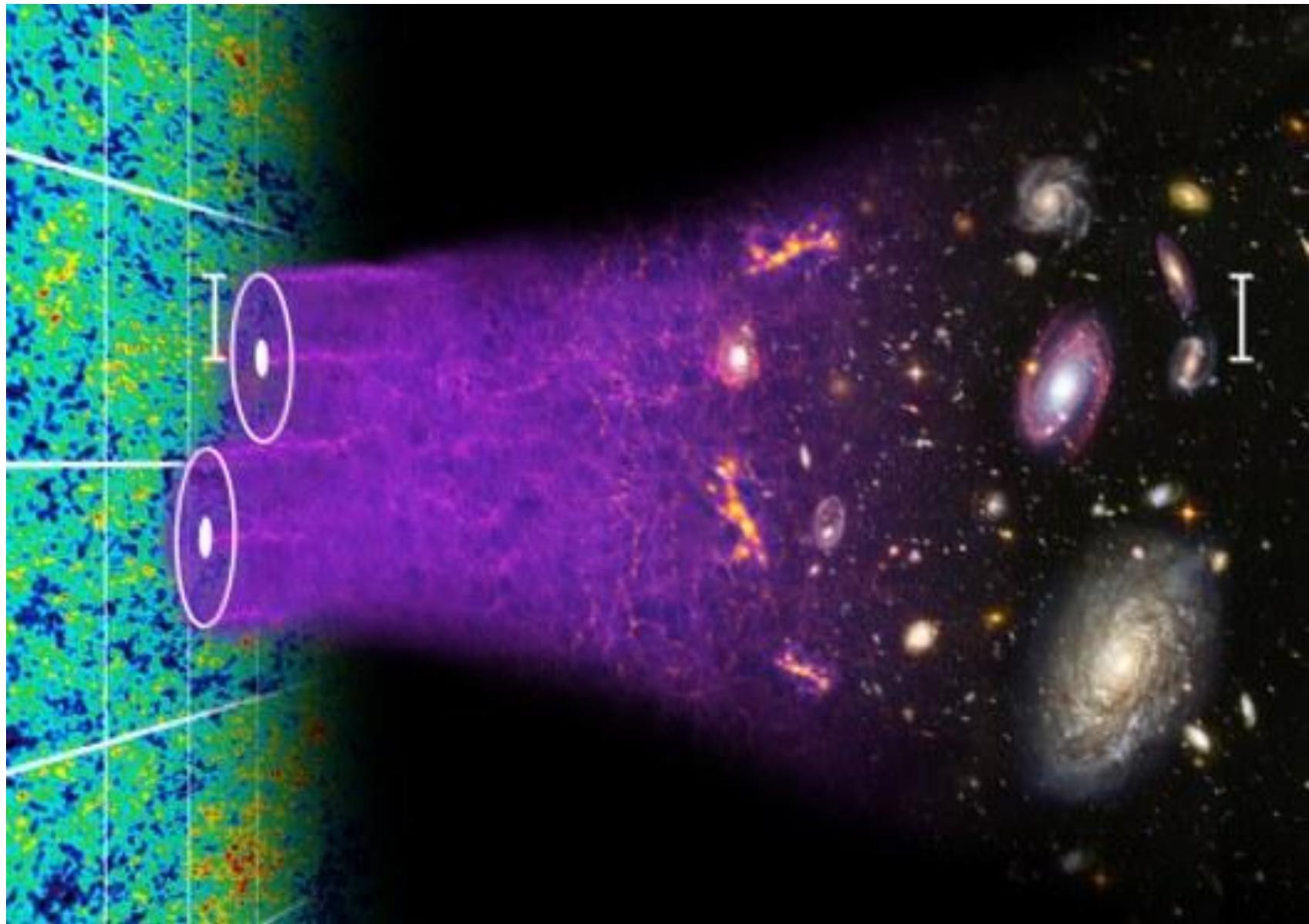
- Dunkle Materie wird im Universum mit vielen Methoden beobachtet



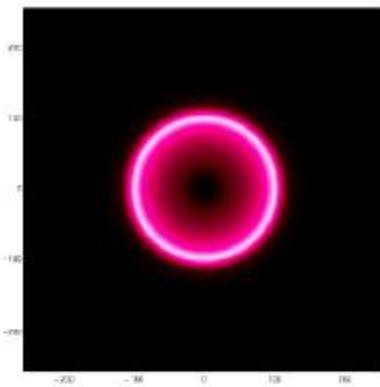
- Der Nachweis Dunkler Materie “im Labor” ist bisher nicht gelungen
- In den kommenden Jahren folgen viele weitere Experimente
 - mit massiveren Detektoren
 - mit besseren Teleskopen und satellitengestützten Beobachtungen
 - mit Beschleunigern bei höherer Energie



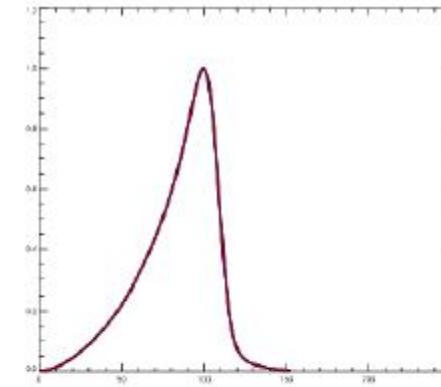
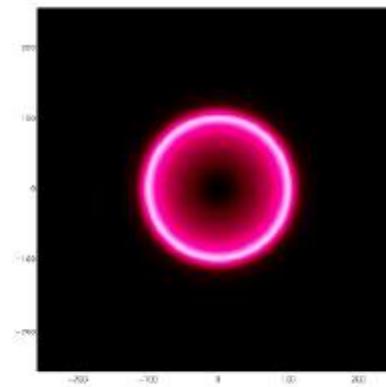




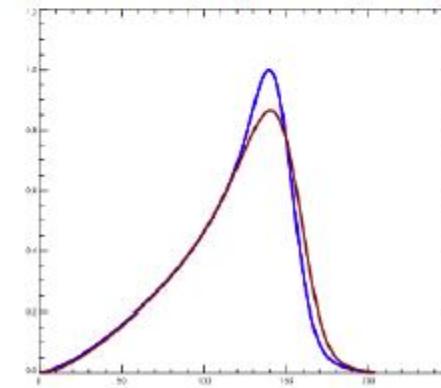
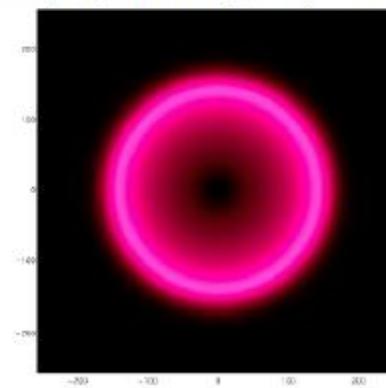
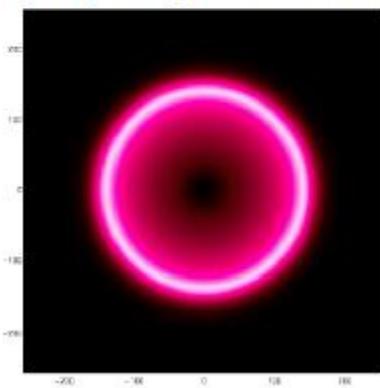
Baryondichte



Photondichte

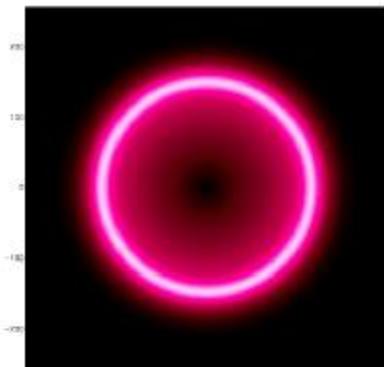


After 10^5 years the universe has cooled enough the protons capture the electrons to form neutral Hydrogen. This decouples the photons from the baryons. The former quickly stream away, leaving the baryon peak stalled.

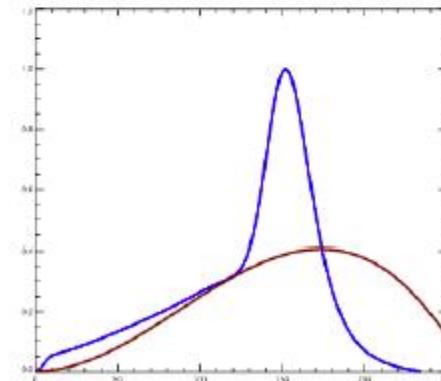
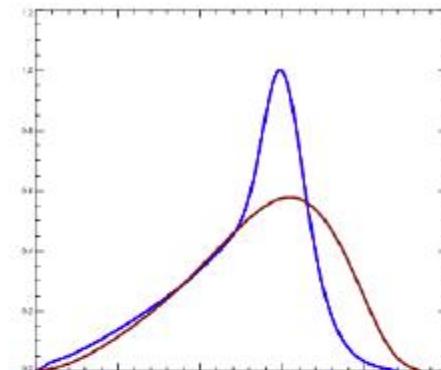
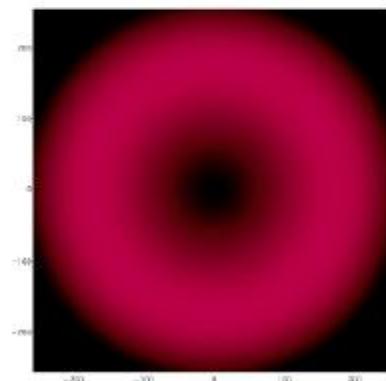
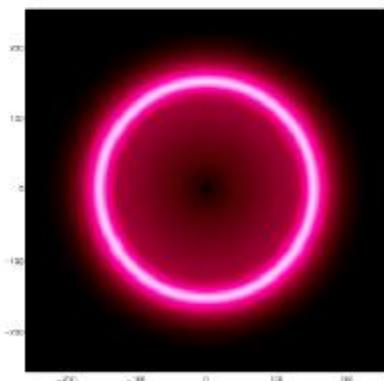
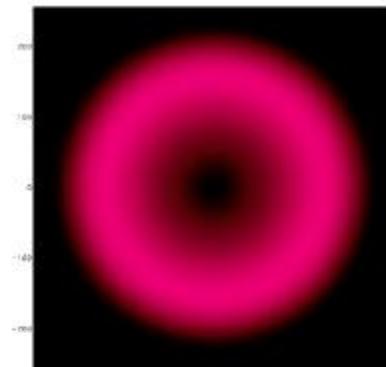


The photons continue to stream away while the baryons, having lost their motive pressure, remain in place.

Baryondichte



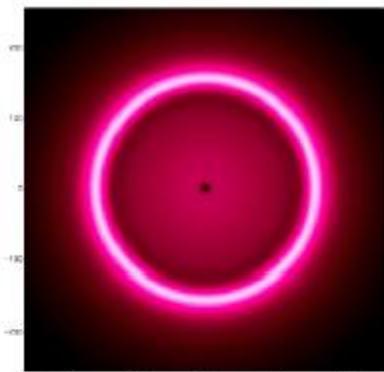
Photondichte



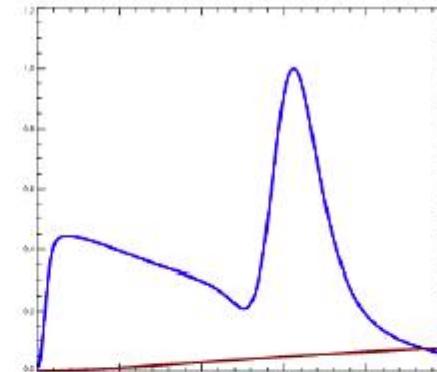
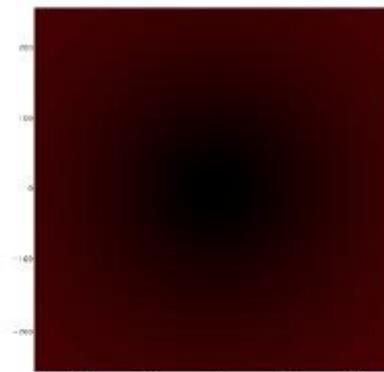
completely uniform, but the baryons remain overdense in a shell 100Mpc in radius. In addition, the large gravitational potential well which we started with starts to draw material back into it.

The photons have become almost

Baryondichte

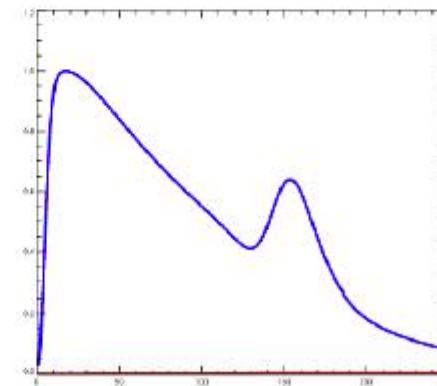
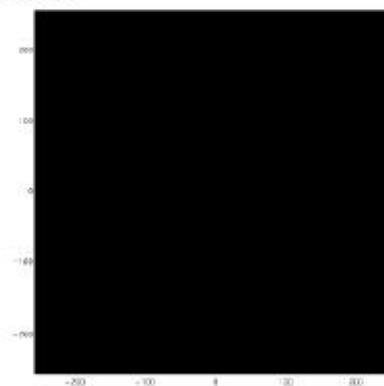
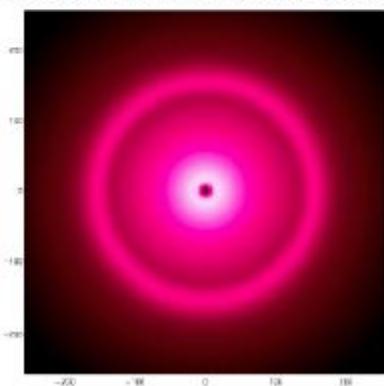


Photondichte



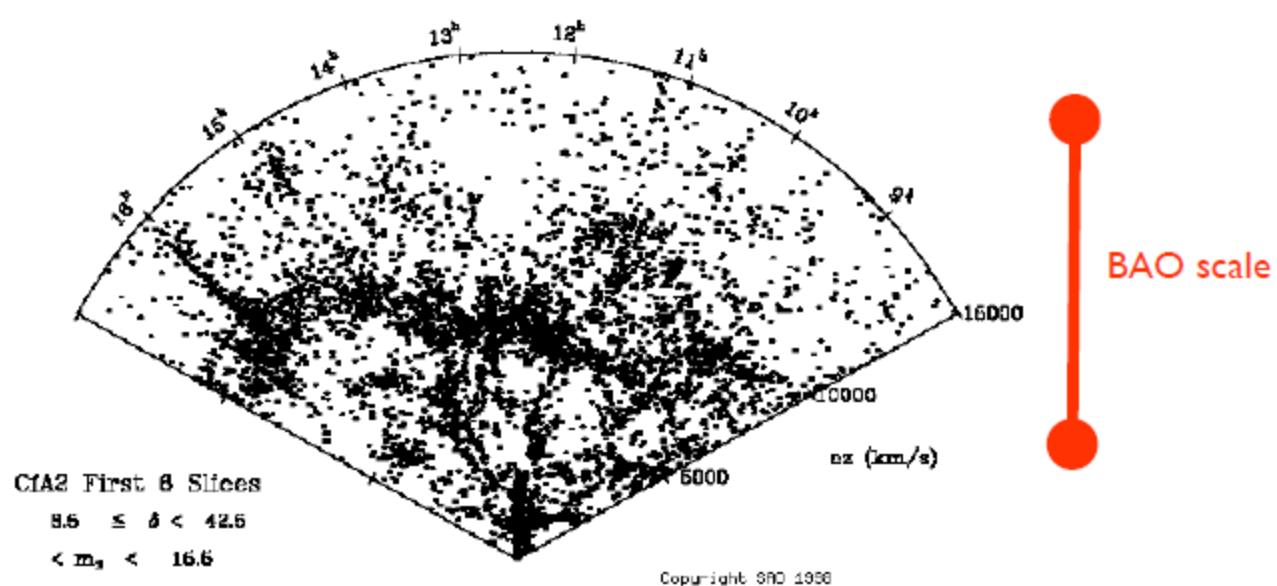
As the perturbation grows by $O(1000)$

the baryons and DM reach equilibrium densities in the ratio W_b/W_m . The final configuration is our original peak at the center (which we put in by hand) and an echo in a shell roughly 100Mpc in radius. The radius of this shell is known as the sound horizon.

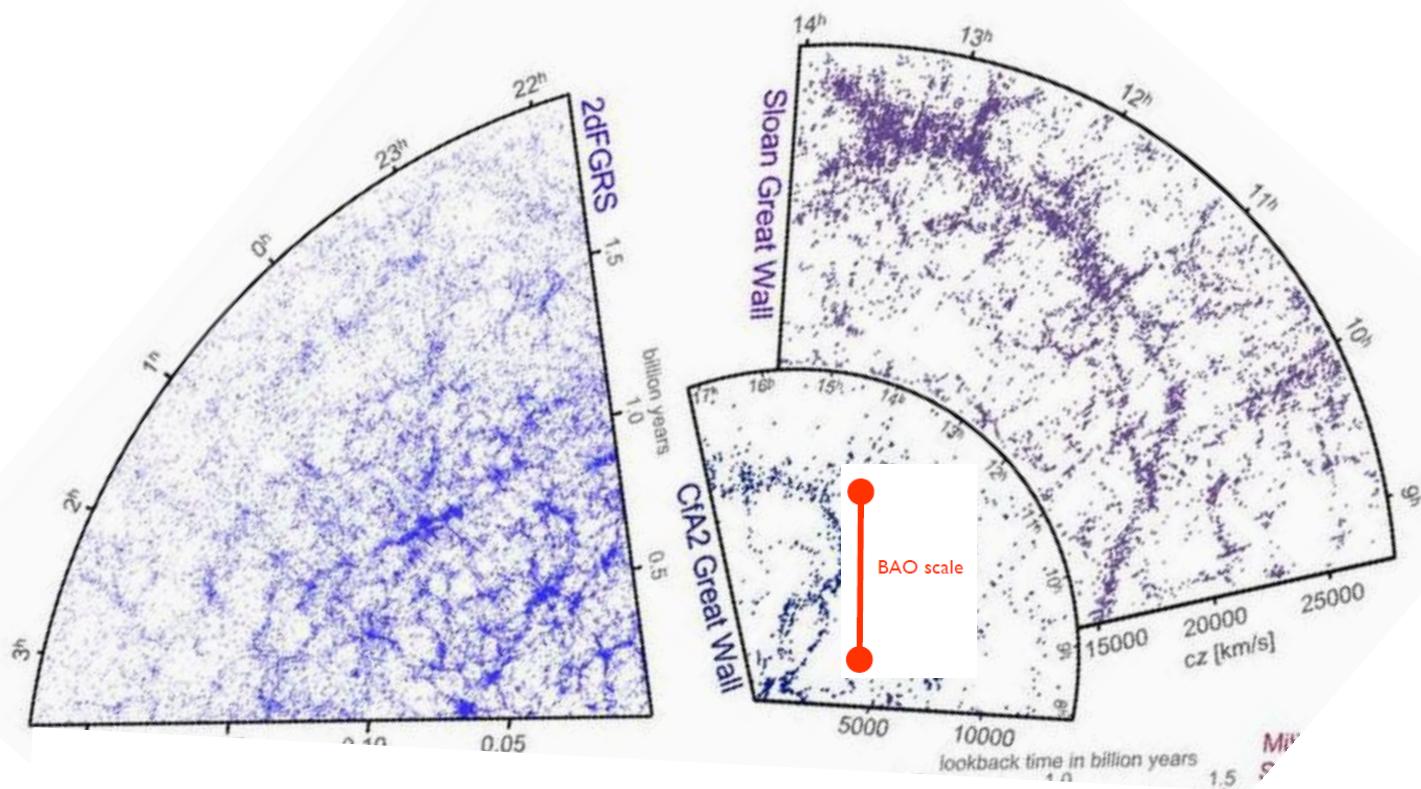


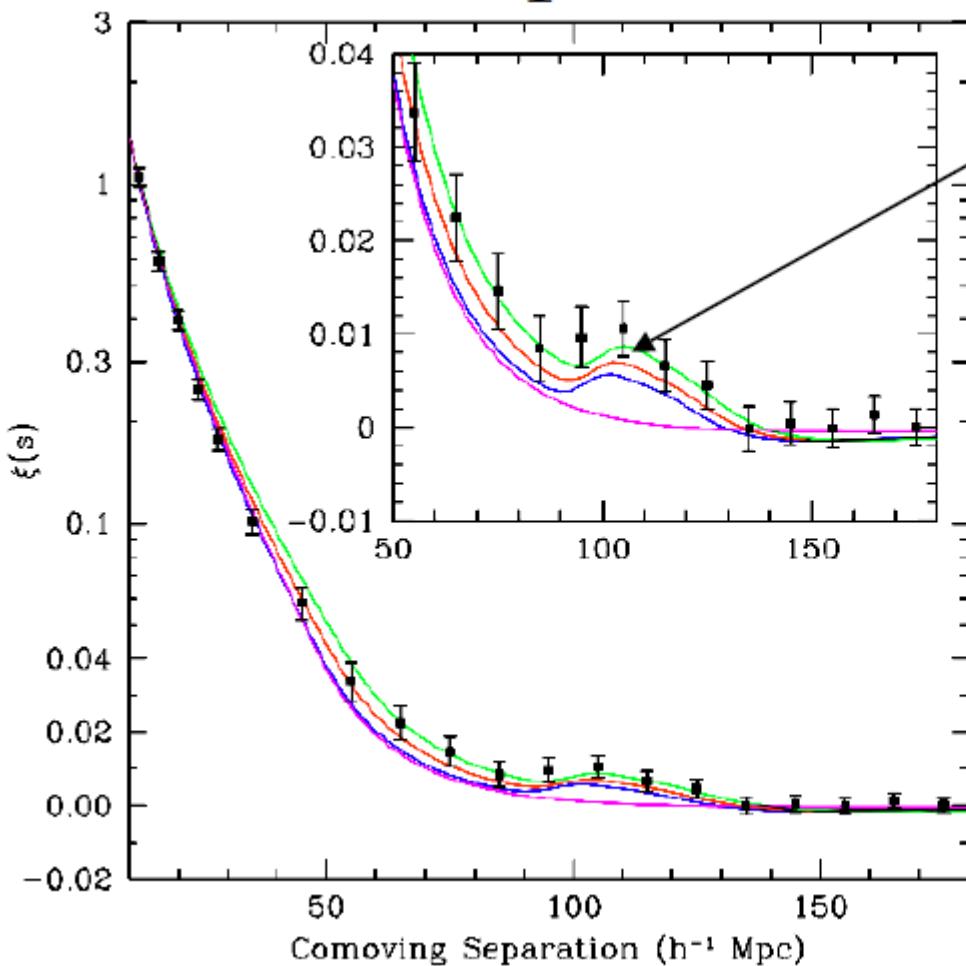
→ Baryon-Akustische Oszillationen

Early surveys too small



CfA2 redshift survey (Geller & Huchra 1989)
Formally, this could "measure" BAO with a $\sim 0.05\sigma$ detection

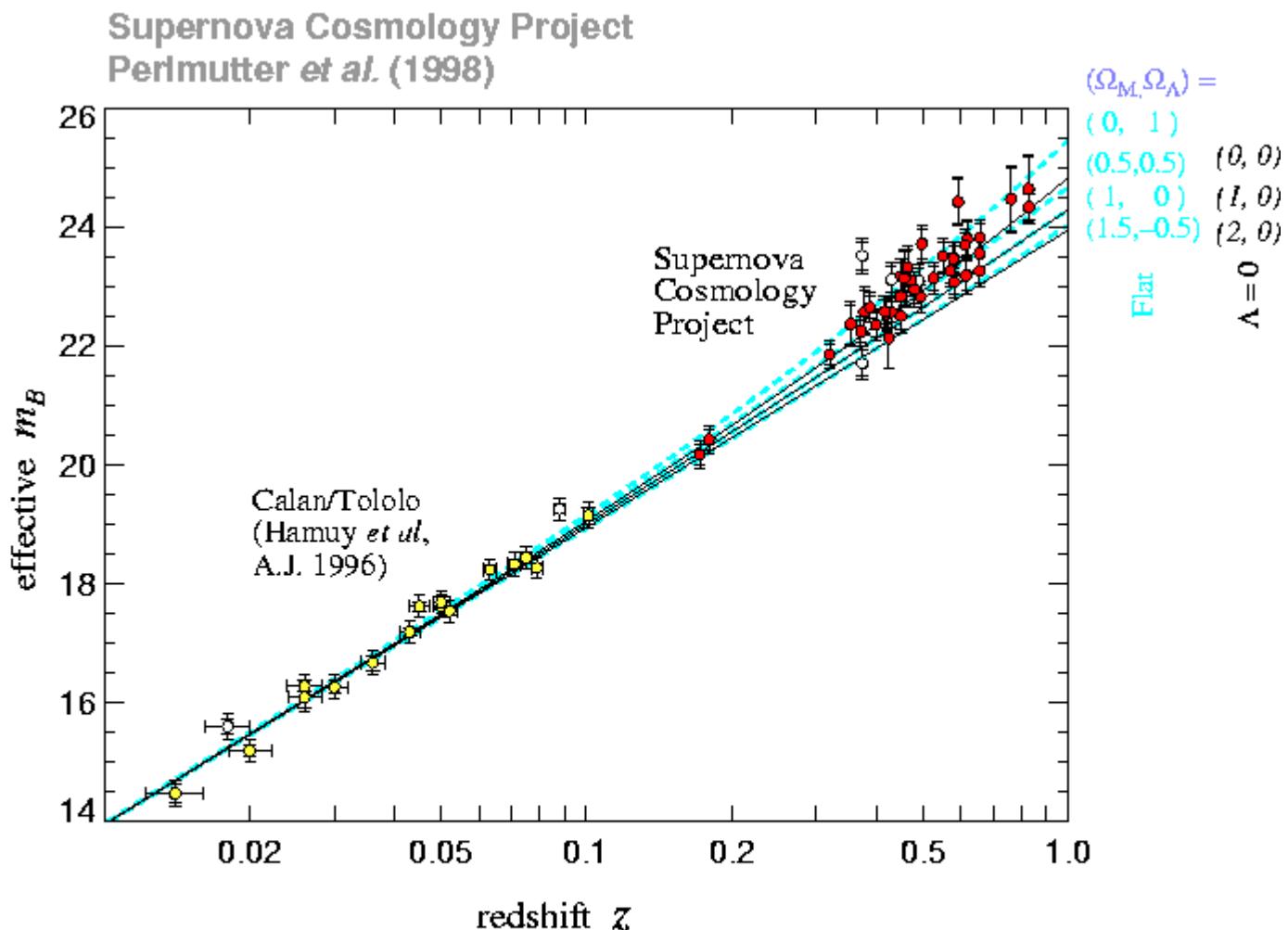




Eisenstein et al. (2005) detect oscillations in the SDSS LRG $\xi(r)$ at $z \sim 0.35$! Knowing s determines $D(z=0.35)$.

About 10% of the way to the surface of last scattering!

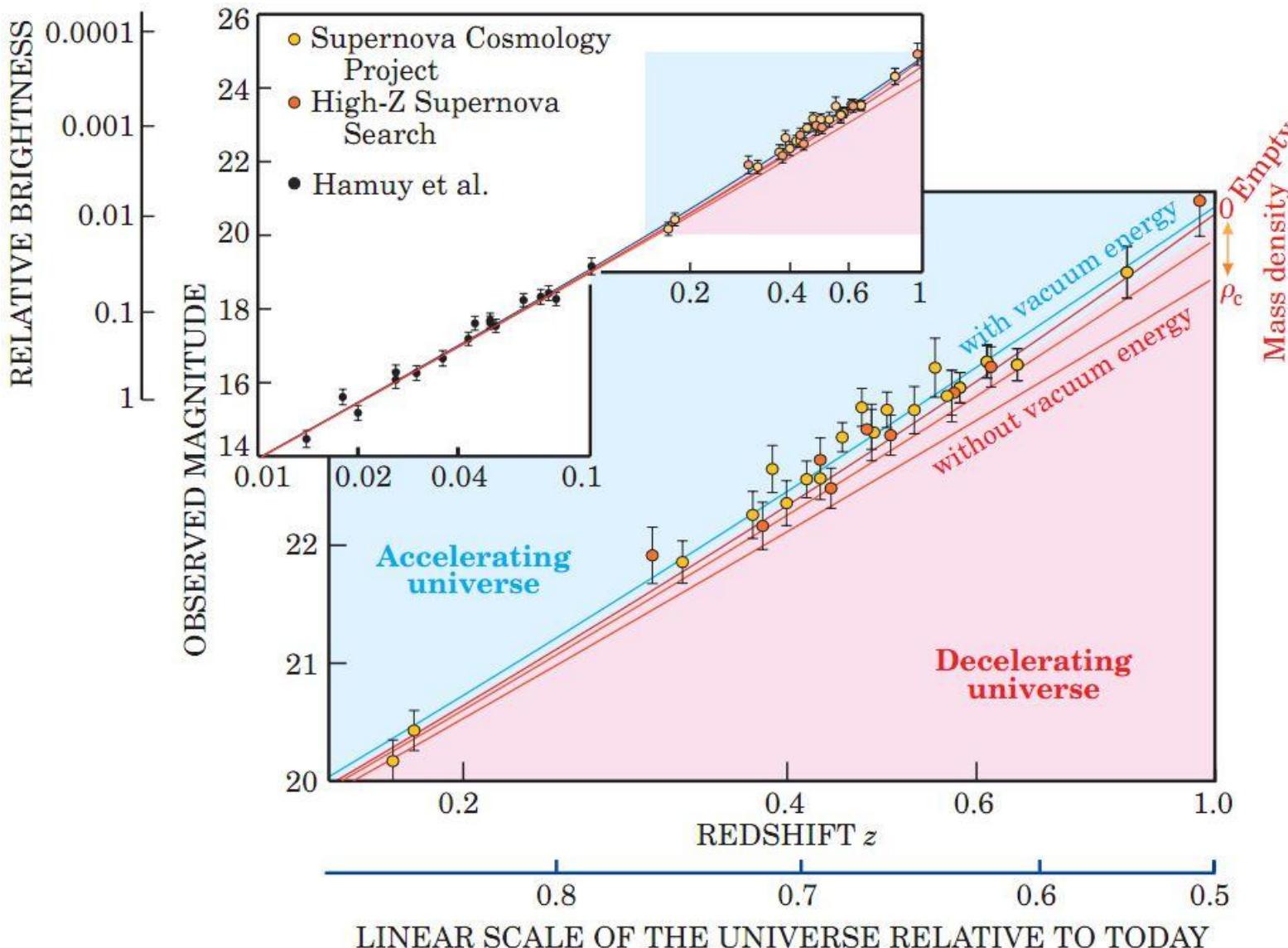
Constraints argue for the existence of DE, but do not strongly constrain its properties.

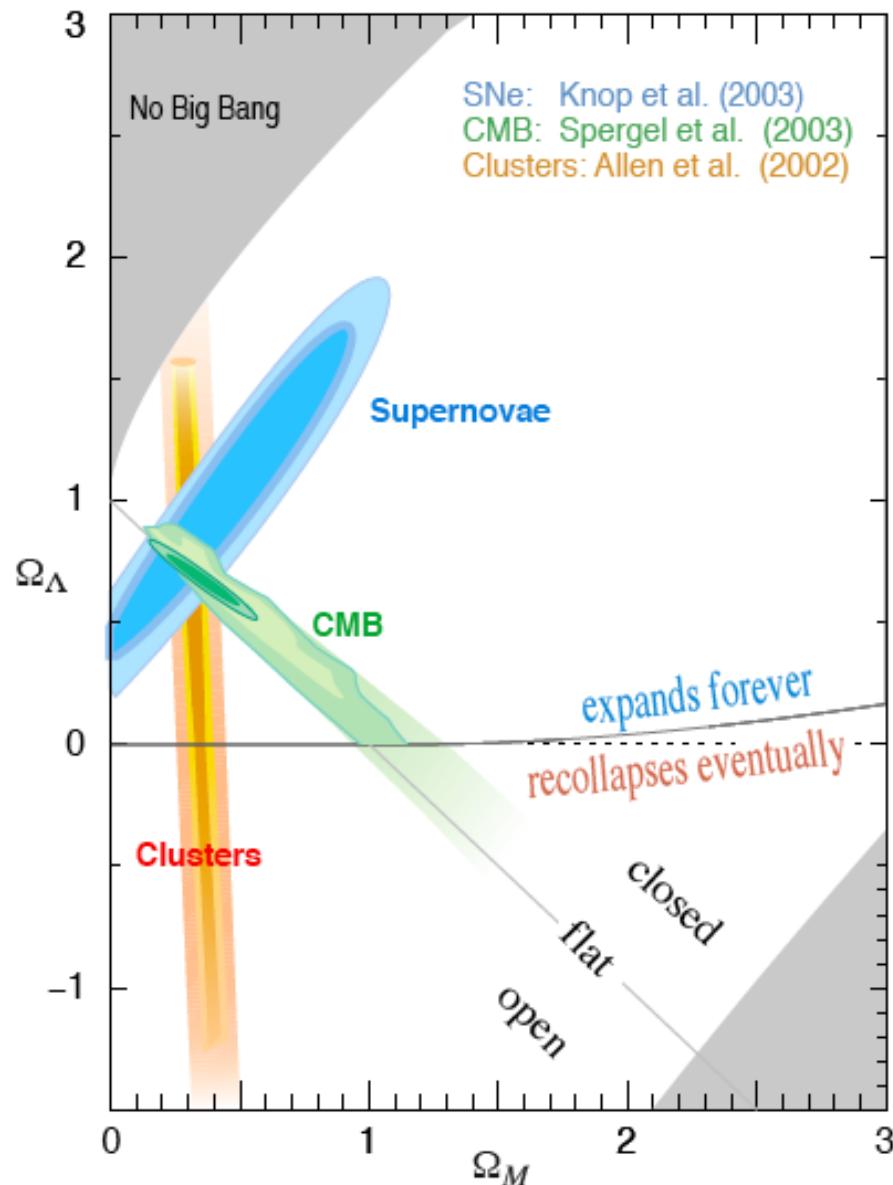


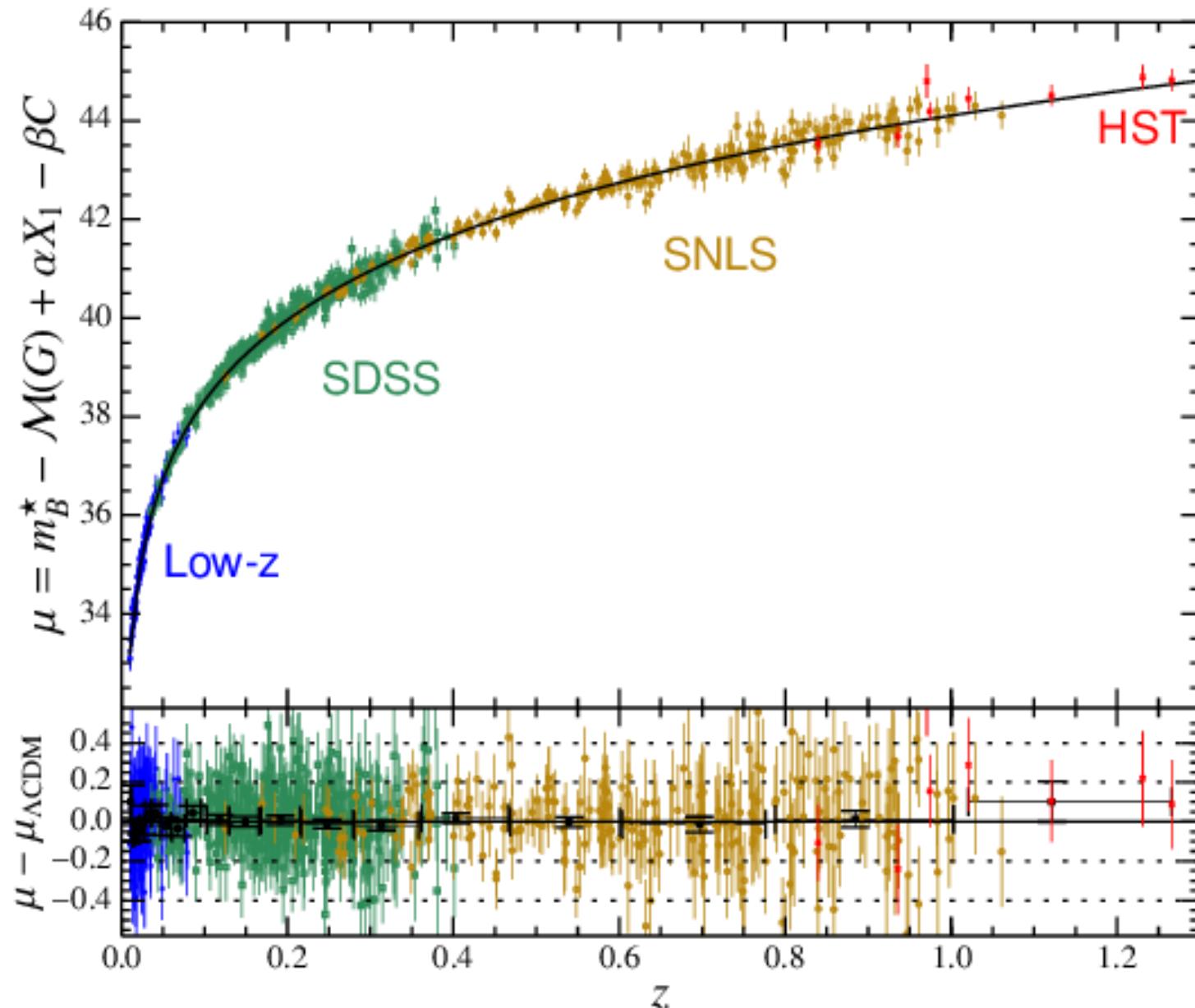
In flat universe: $\Omega_M = 0.28 [\pm 0.085 \text{ statistical}] [\pm 0.05 \text{ systematic}]$

Prob. of fit to $\Lambda = 0$ universe: 1%

Weitere Infos







arXiv:1108.2635v1

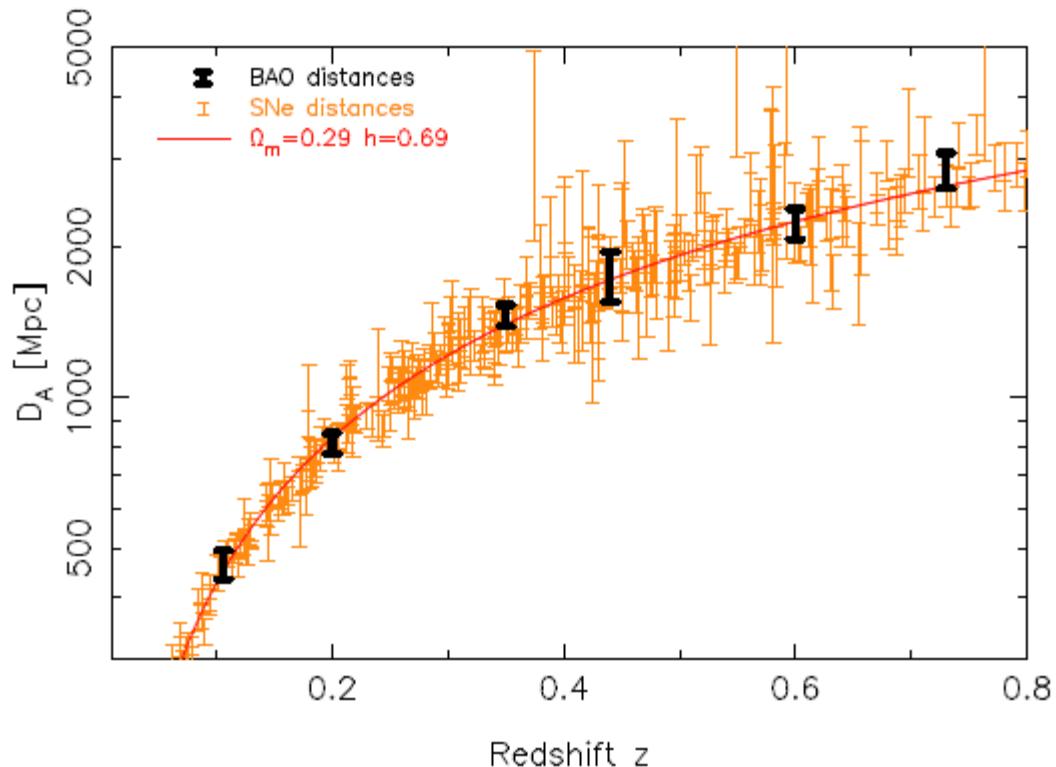
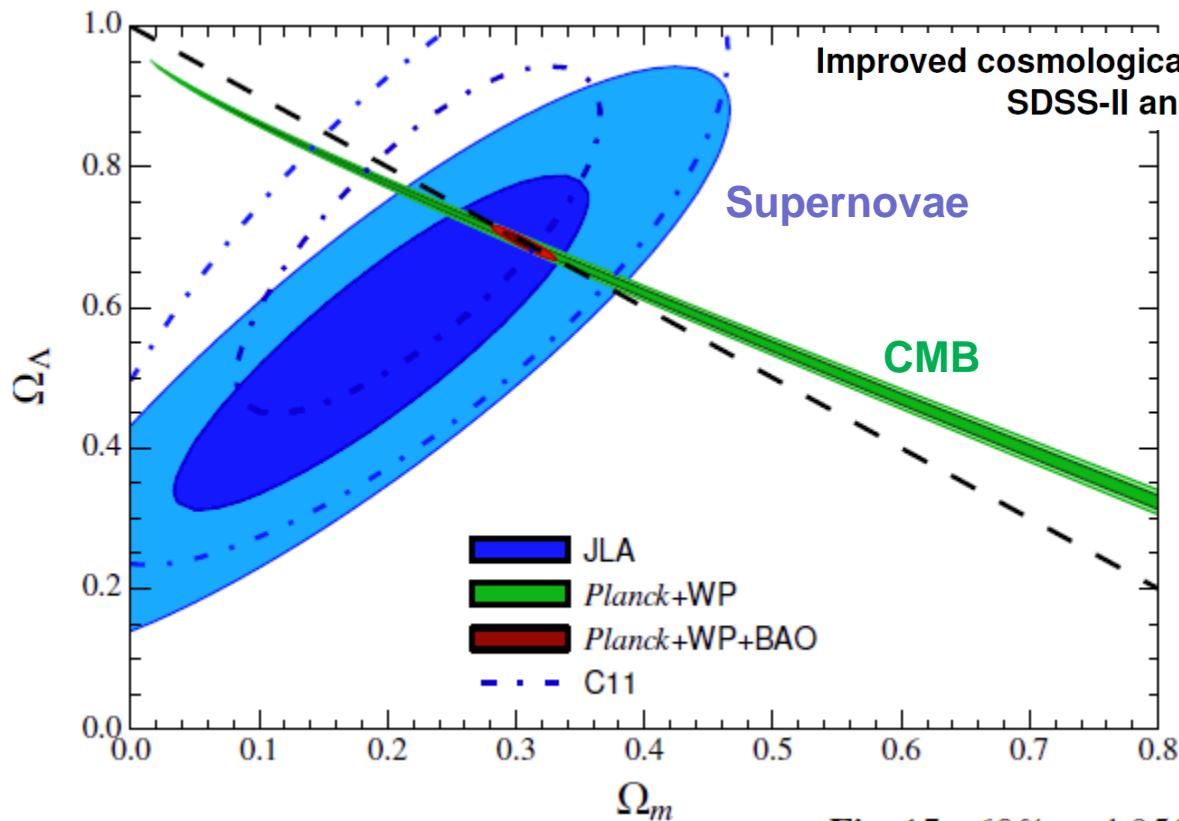
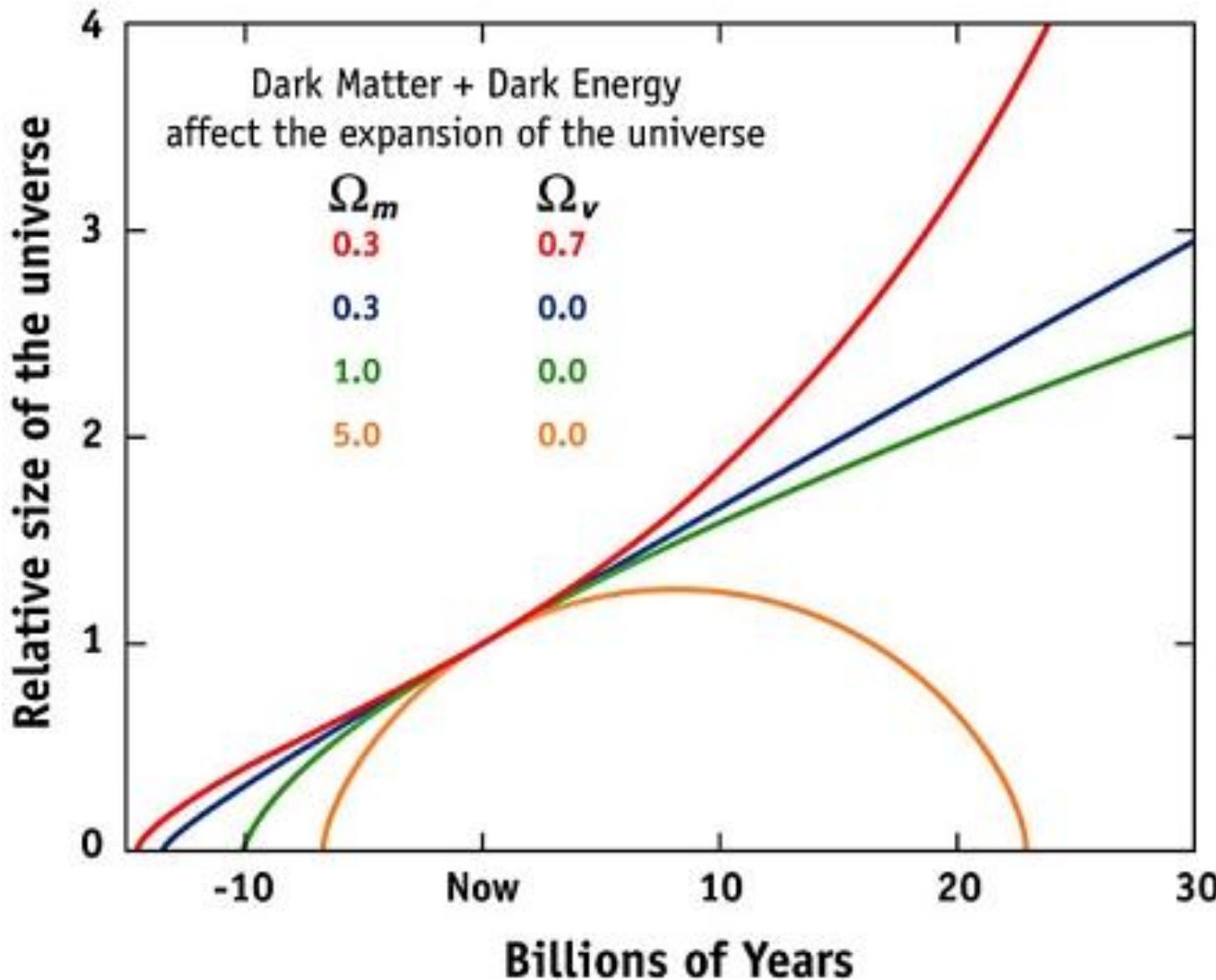


Figure 12. Comparison of the accuracy with which supernovae and baryon acoustic oscillations map out the cosmic distance scale at $z < 0.8$. For the purposes of this Figure, BAO measurements of $D_V(z)$ have been converted into $D_A(z)$ assuming a Hubble parameter $H(z)$ for a flat Λ CDM model with $\Omega_m = 0.29$ and $h = 0.69$, indicated by the solid line in the Figure, and SNe measurements of $D_L(z)$ have been plotted assuming $D_A(z) = D_L(z)/(1+z)^2$.

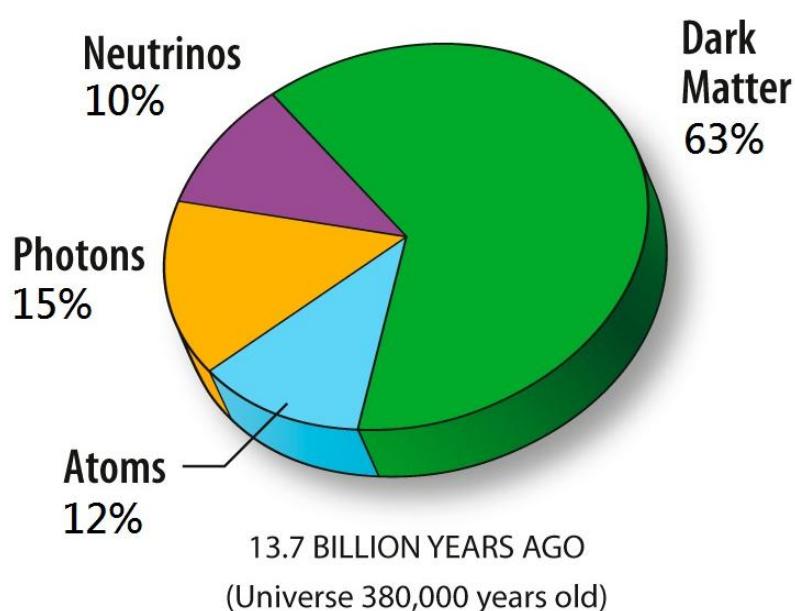


arXiv:1401.4064v2

Fig. 15. 68% and 95% confidence contours (including systematic uncertainty) for the Ω_m and Ω_Λ cosmological parameters for the Λ -CDM model. Labels for the various data sets correspond to the present SN Ia compilation (JLA), the Conley et al. (2011) SN Ia compilation (C11), the combination of *Planck* temperature and *WMAP* polarization measurements of the CMB fluctuation (*Planck+WP*), and a combination of measurements of the BAO scale (BAO). See Sect. 7.1 for details. The black dashed line corresponds to a flat universe.



Zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung:



Heute:

