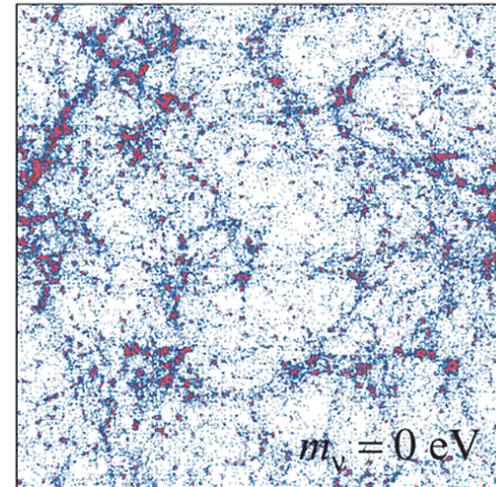
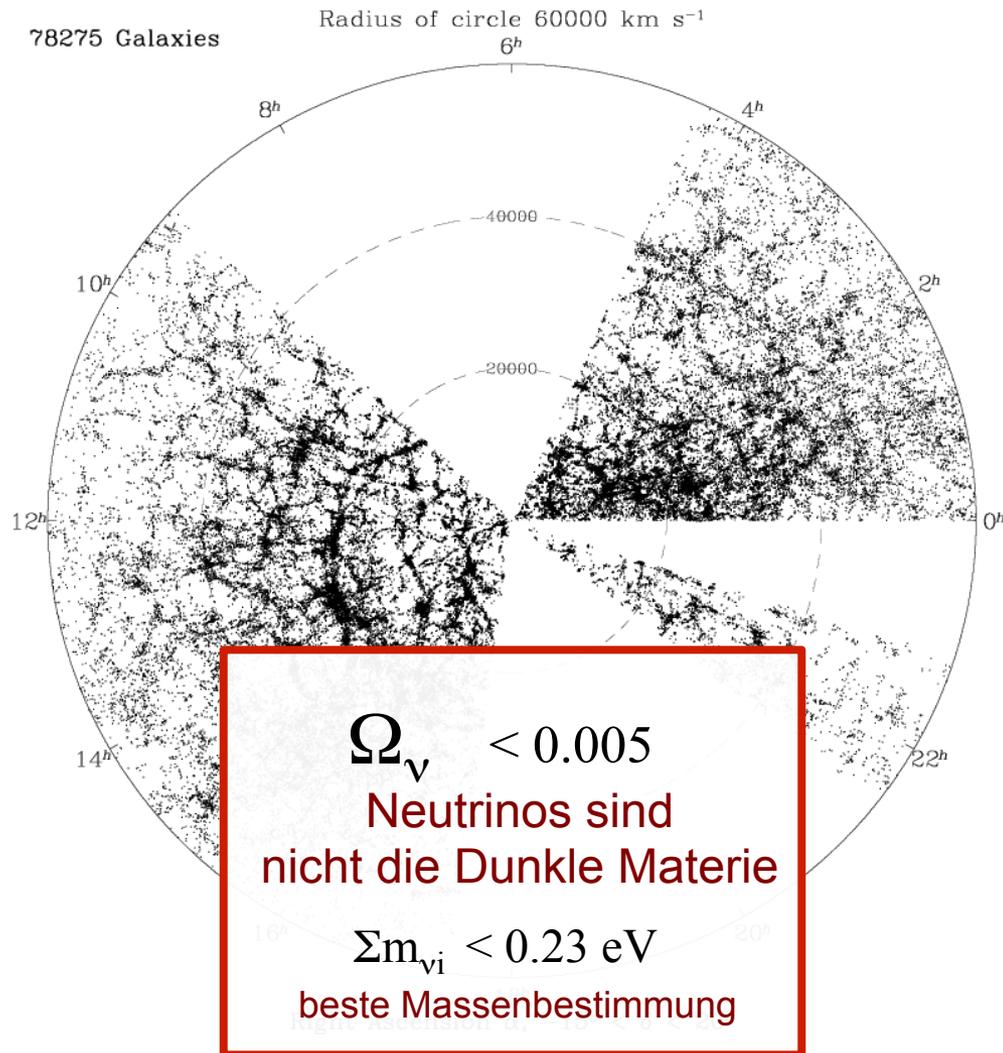


DUNKLE

MATERIE

Bildung der Strukturen im Universum

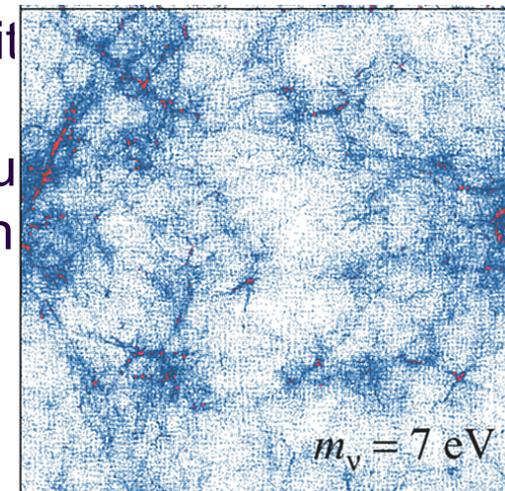


berechnete
 Strukturen
 mit niedrigem
 und hohem
 Neutrino-Anteil
 äumigen

Struktur
 $\Omega_{\nu} = 0$

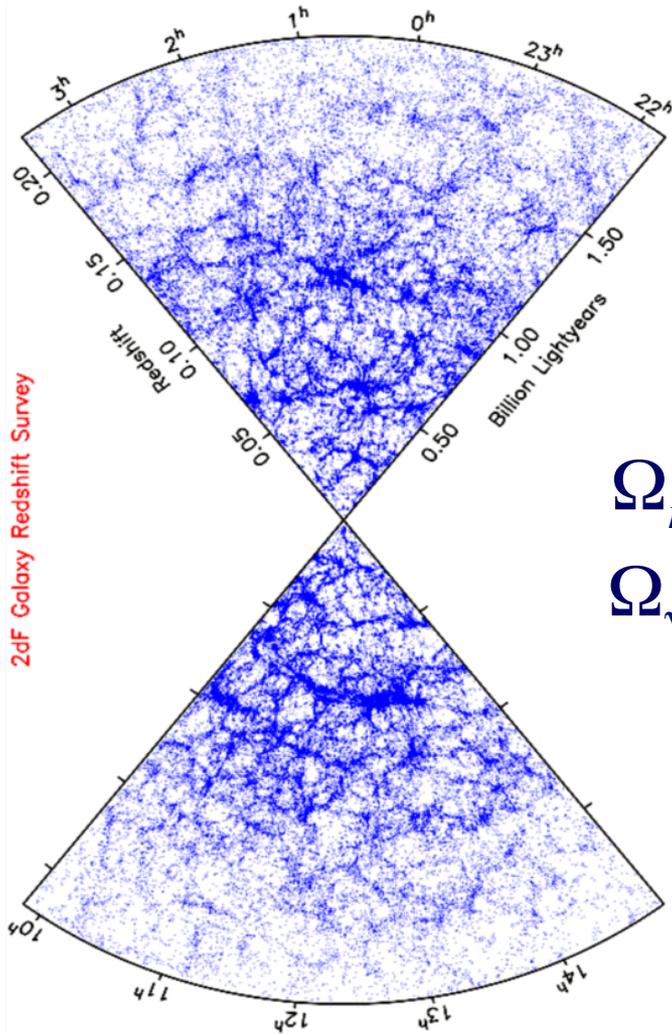
Sloan Digital

Richtung u
 von Million



$\Omega_{\nu} = 0,14$

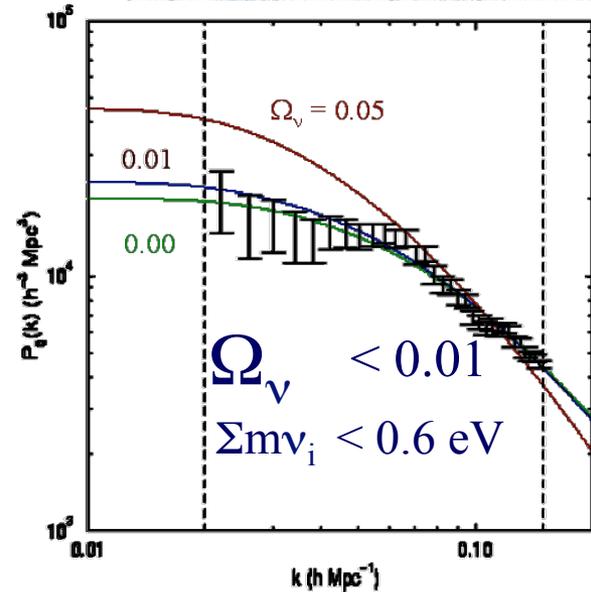
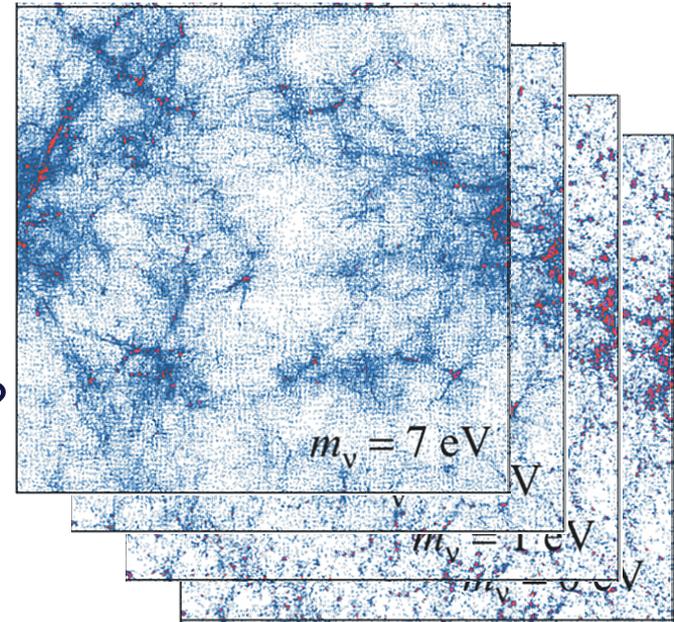
Dark Matter is (mostly) NOT Neutrinos



Why
not
Neutrinos ?

$$\Omega_{matter} \sim 0.30$$

$$\Omega_{\nu} < 0.02$$



Strahlung aus der
Frühzeit des Universums
zum Zeitpunkt als sich
Atome gebildet haben

Kosmischer Mikrowellen
Hintergrund
3K Strahlung

CMB



**Universum
nicht transparent**

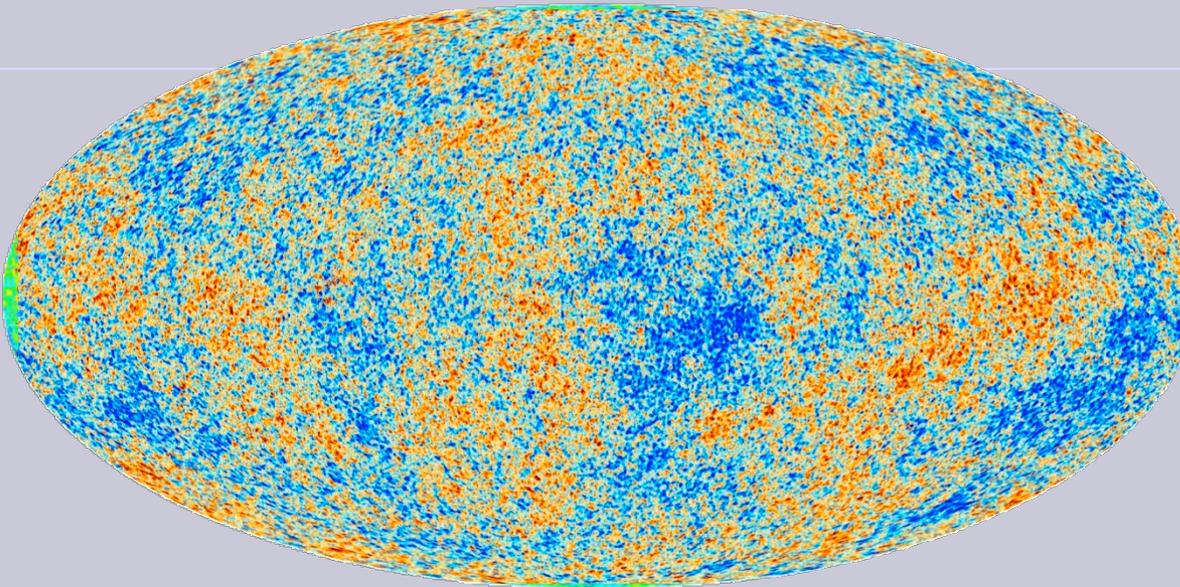
Universum transparent



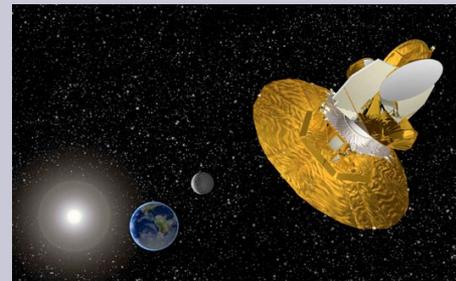
Messung des CMB mit den Satelliten WMAP und PLANCK

Anisotropie des kosmischen Mikrowellen-Hintergrundes

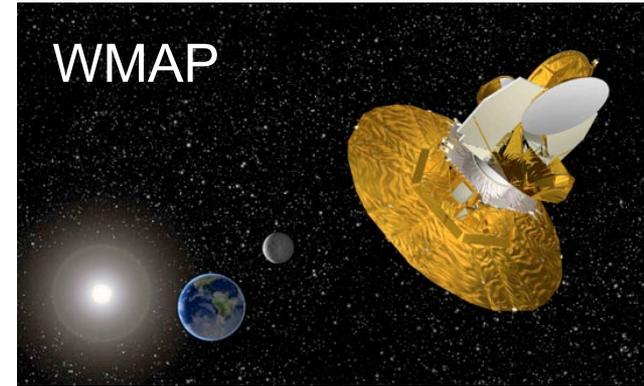
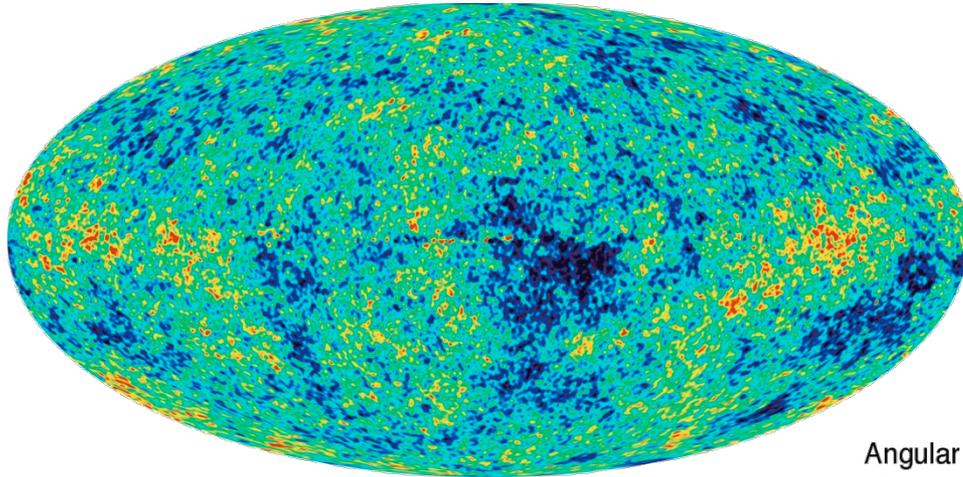
Dunkle Materie



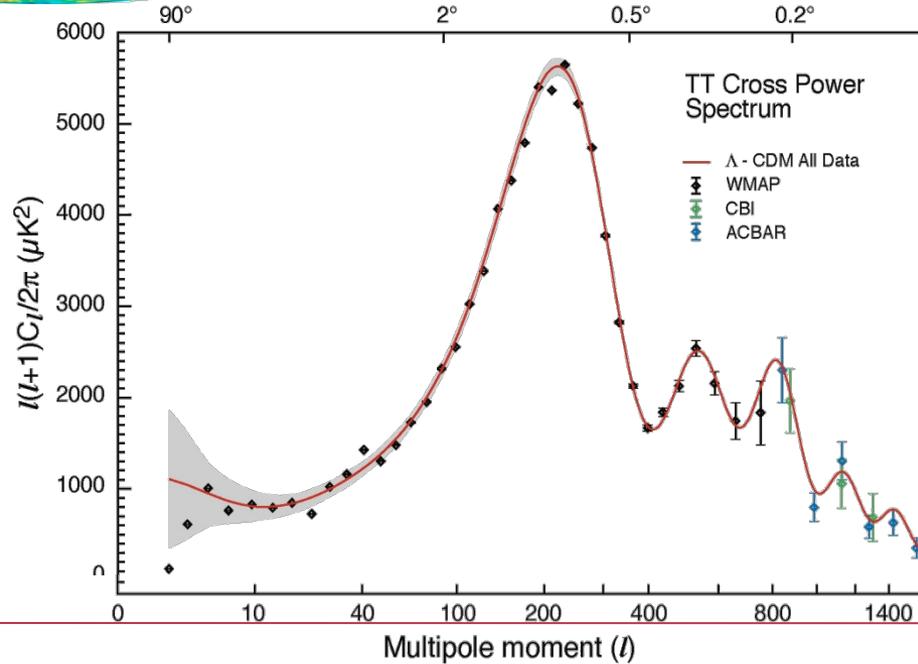
2009



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe



Angular Scale



wie groß ist

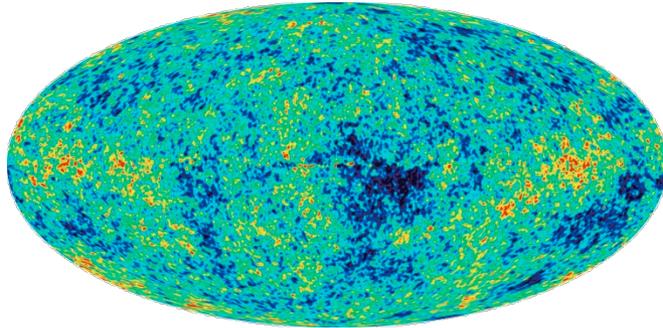
$$\Omega$$

wie ist die
Zusammensetzung
von

$$\Omega$$



Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}

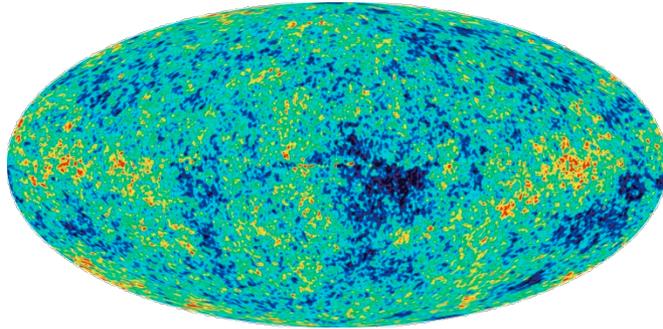


Anisotropie:

Größenskala
Intensitäten

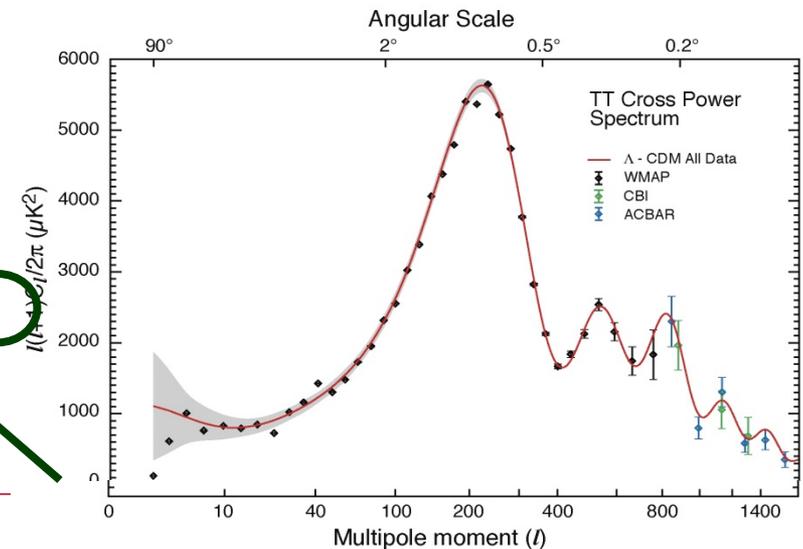
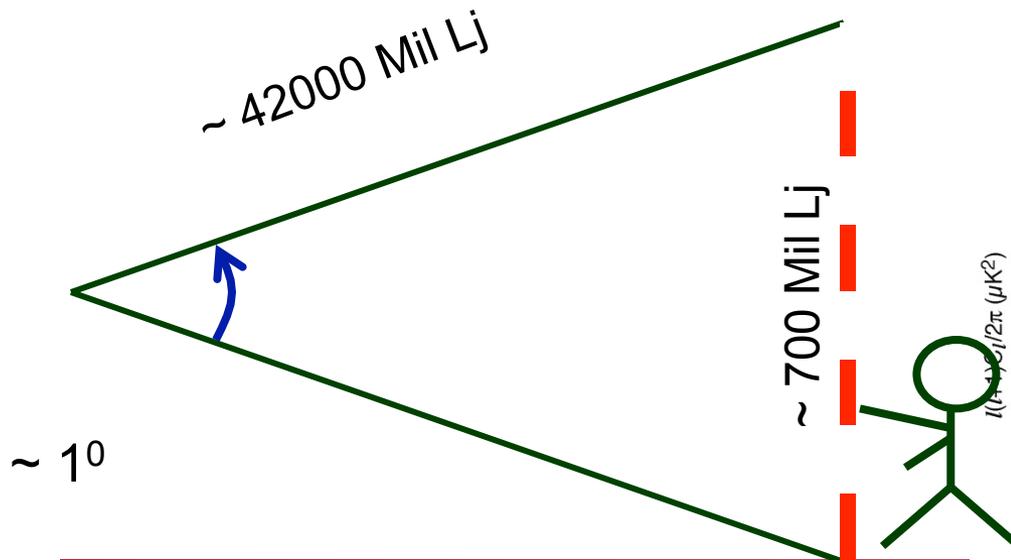
=> Geometrie Ω_{tot}
=> Gravitationspotentiale,
Materiedichten

Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



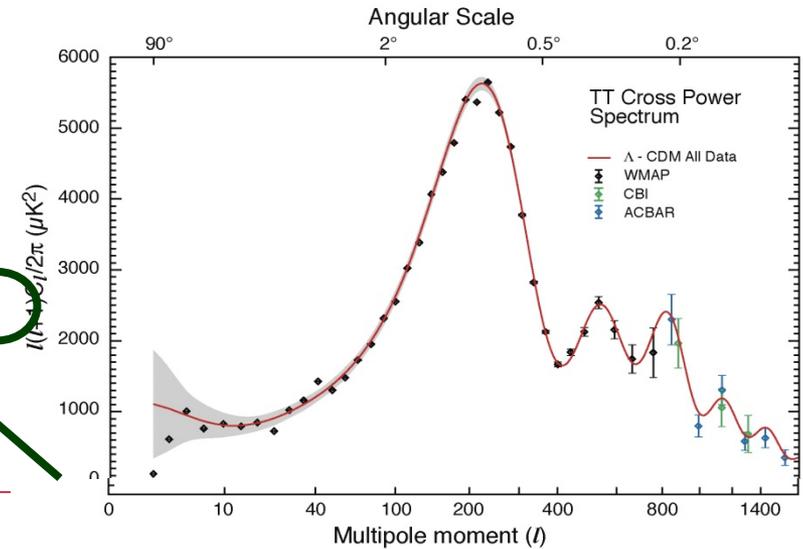
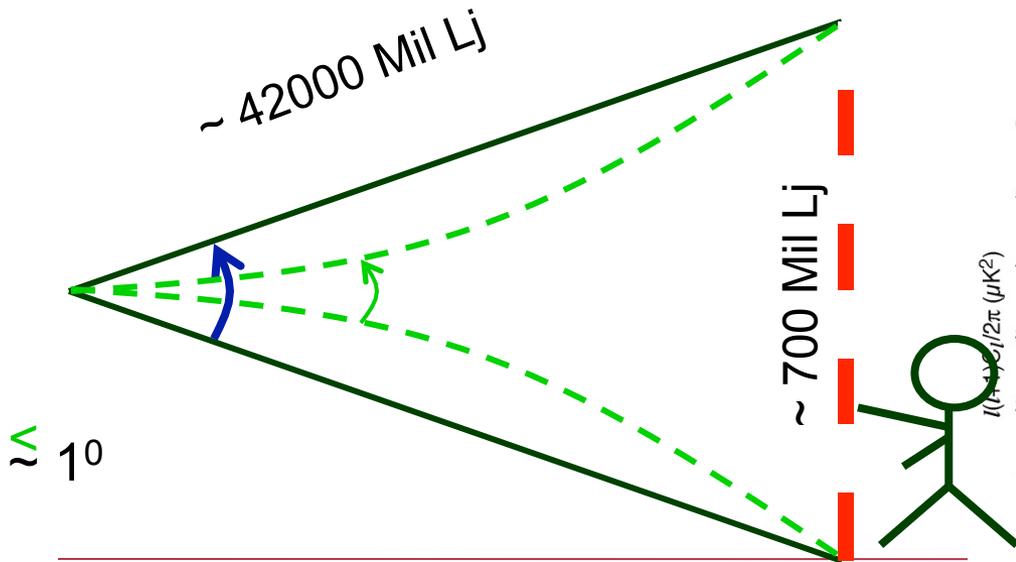
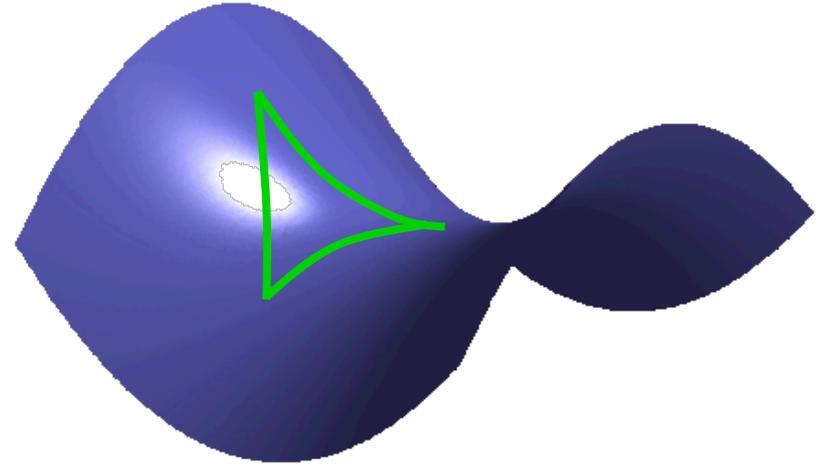
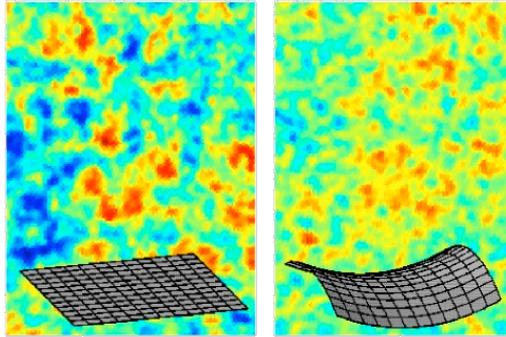
Anisotropie:

Größenskala \Rightarrow Geometrie Ω_{tot}



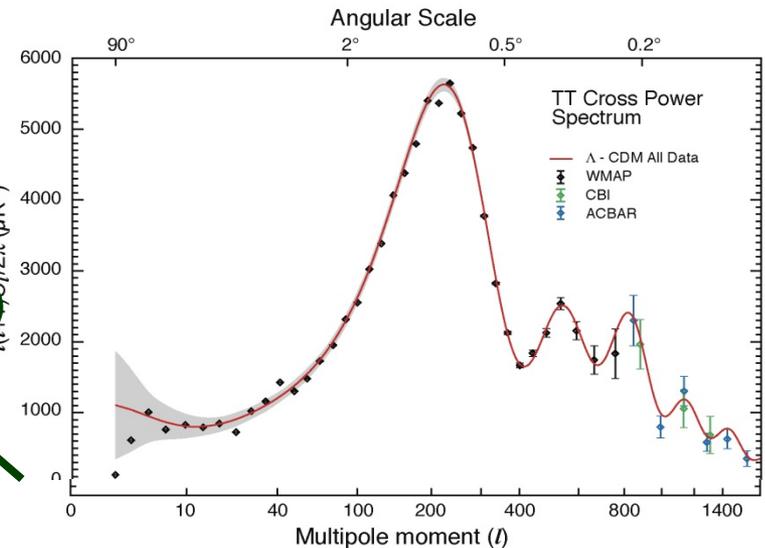
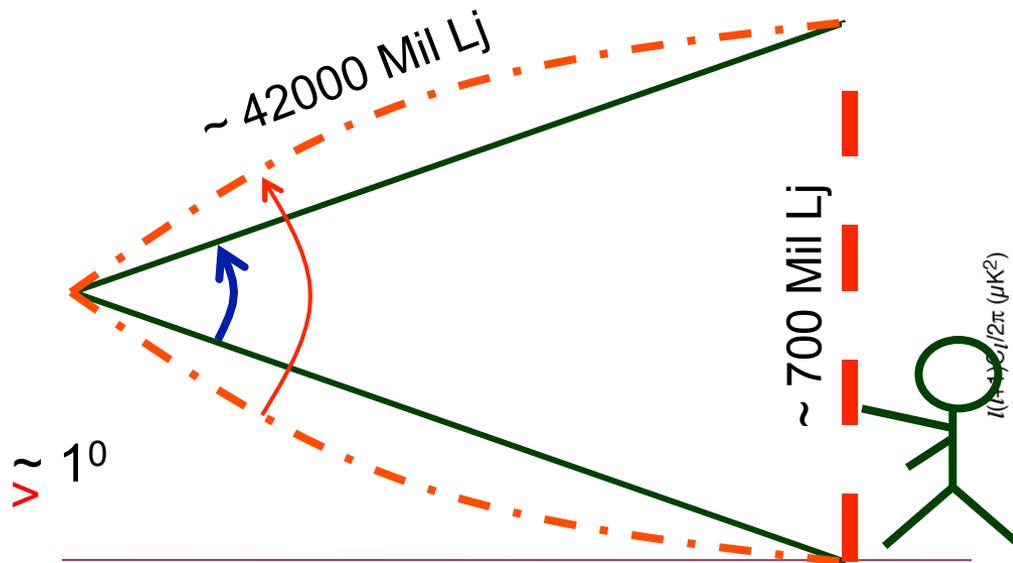
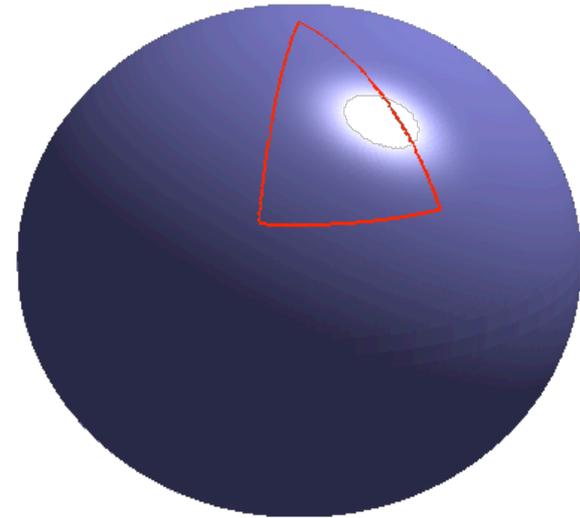
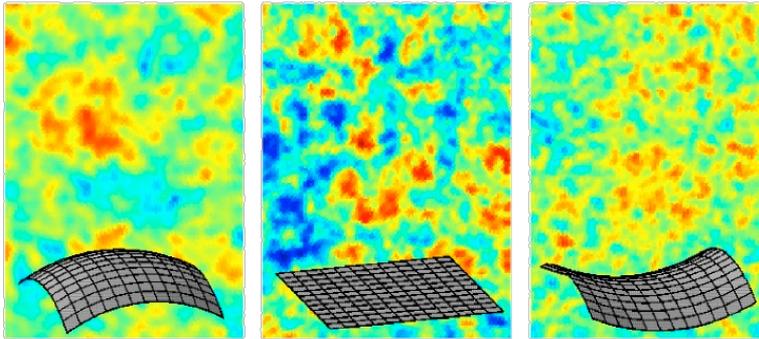


Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



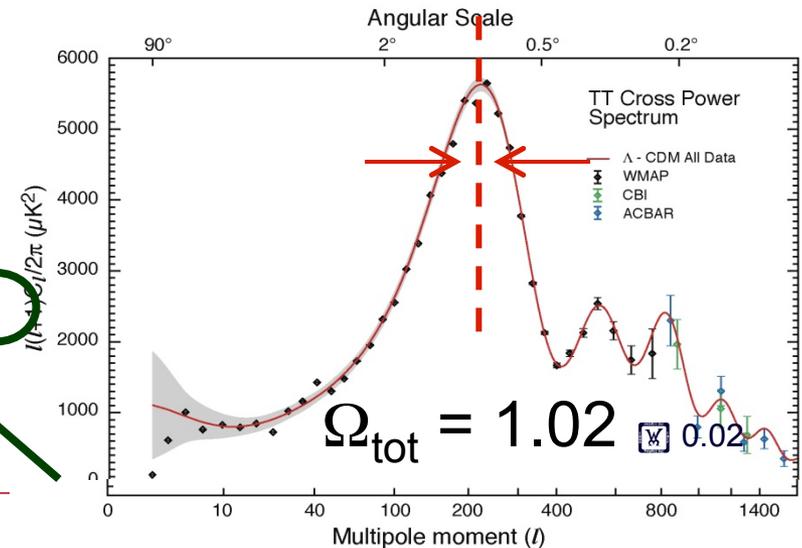
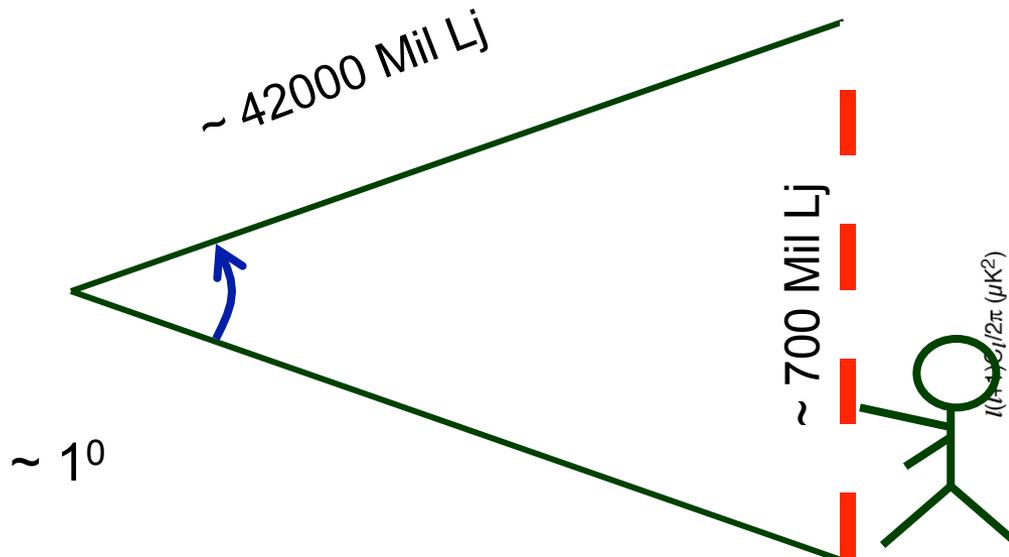
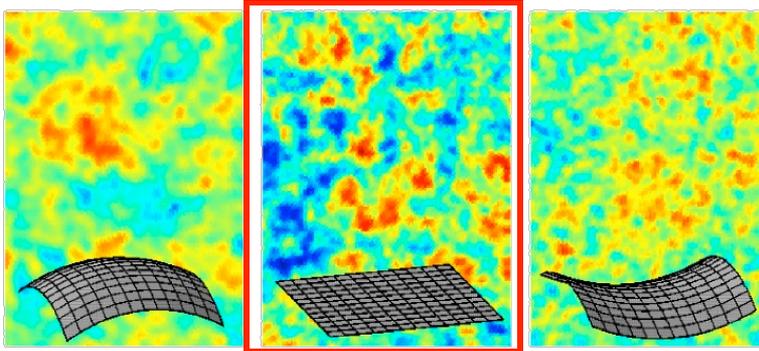


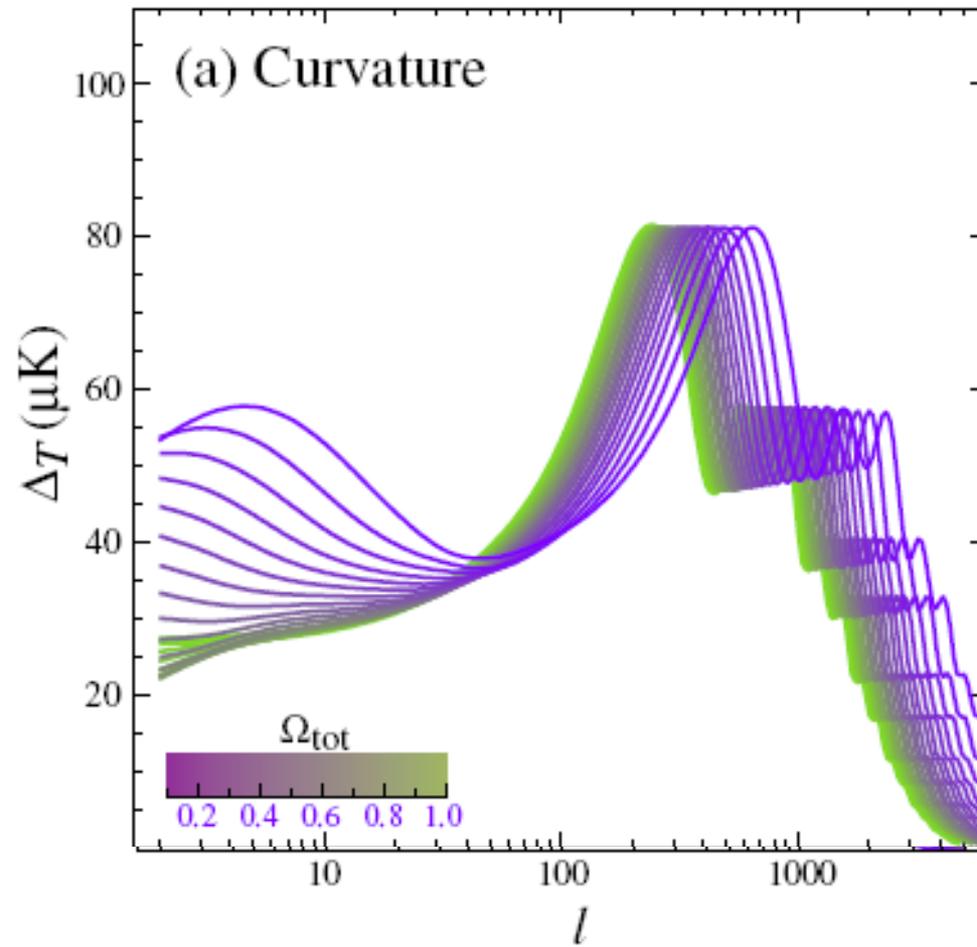
Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



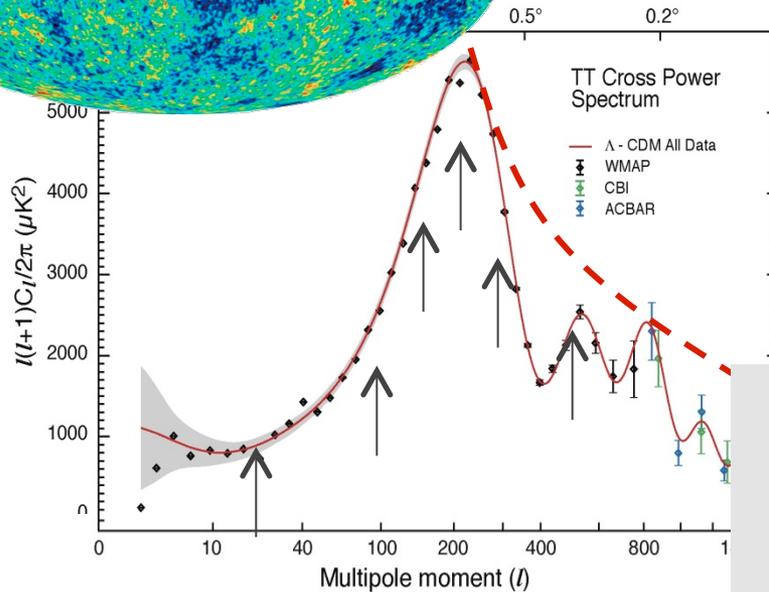
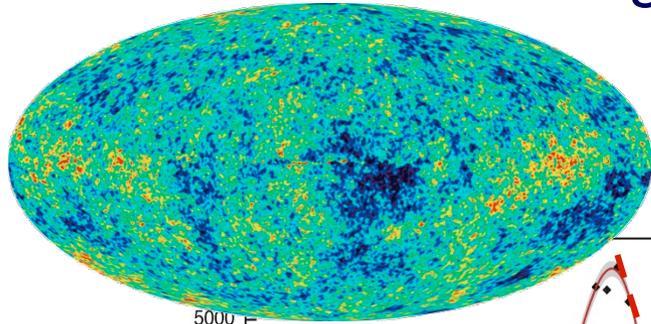


Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}





Kosmische Hintergrundstrahlung - Materiedichte Ω_{matter}



Anisotropie:

Intensitäten \Rightarrow Gravitationspotentiale,
Materiedichten

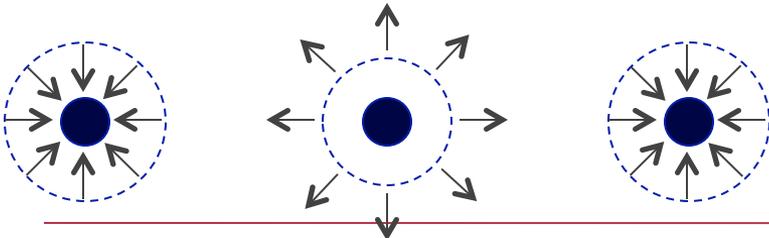
Schwingungsverhalten Zusammenspiel
von Strahlungsdruck und Gravitation

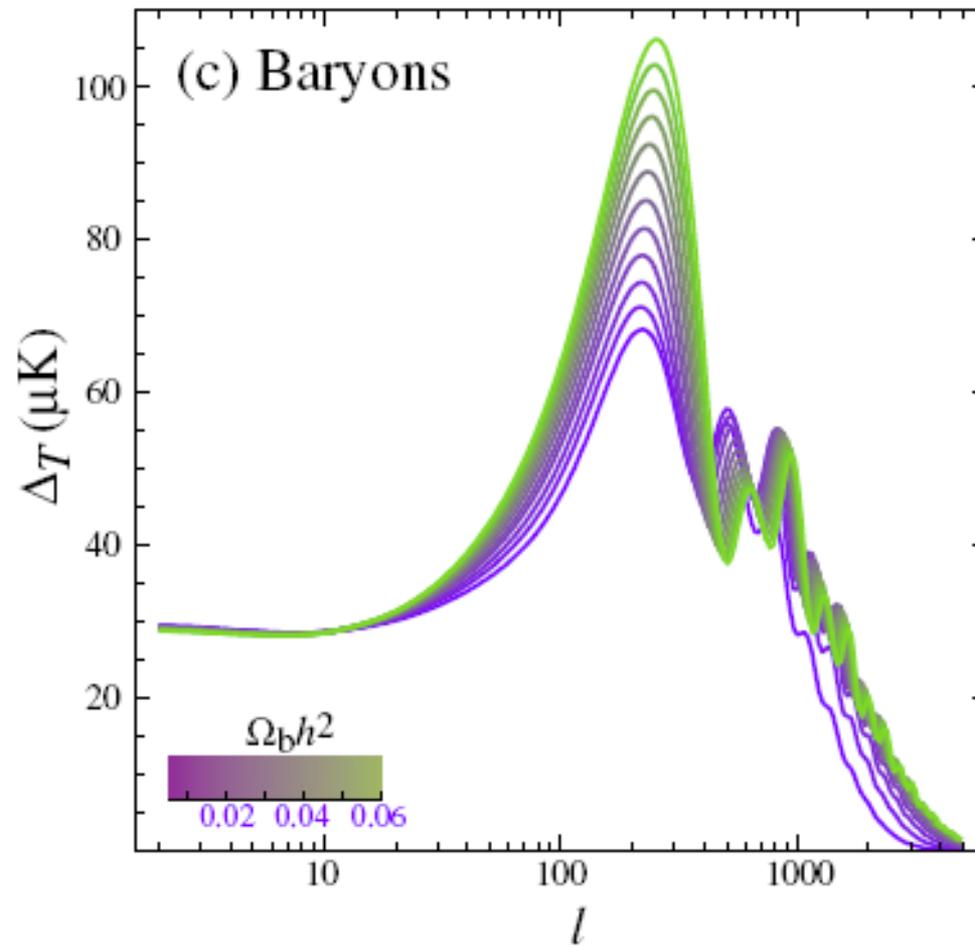
- Gravitation Ω_{matter}
- Kopplung an Strahlung Ω_{baryon}

$$\Omega_{matter} = 0.27$$

$0.27 = \Omega_{matter} \neq \Omega_{sichtbar} \approx 0.01$ ³
überwiegend Dunkle Materie³

$$\Omega_{baryon} = 0.044 \begin{matrix} u \\ e \\ d \end{matrix}$$

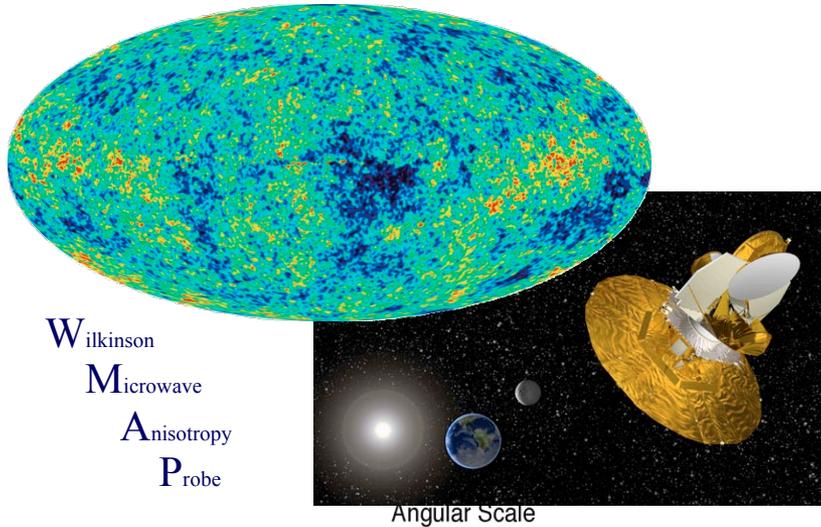






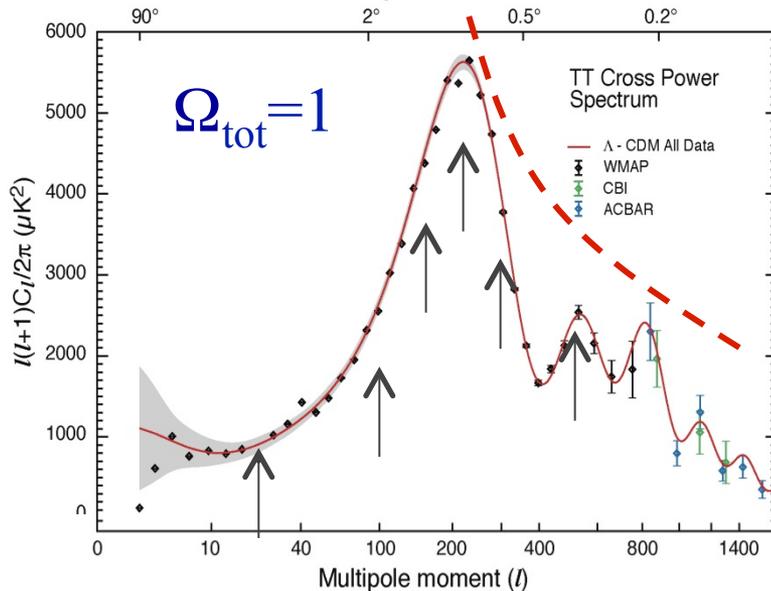
Cosmic Microwave Background

Matter-Density Ω_{matter}



Wilkinson
Microwave
Anisotropy
Probe

Angular Scale



Anisotropy:

Angular scale => geometry, Ω_{tot}

Intensities => gravitational potentials, matter densities

- gravitation Ω_{matter}

- coupling to radiation Ω_{baryon}

$$\Omega_{matter} = 0.27$$

$$\Rightarrow \Omega_{matter} > \Omega_{lum} \sim \sim 0.01$$

mostly Dark Matter

$$\Omega_{baryon} = 0.044$$



$$\Rightarrow \Omega_{matter} \gg \Omega_{baryon}$$

Dark Matter is (mostly) NOT Baryons

today's ratio between
neutron-and proton-density

= n/p-ratio at the time
nuclei formed

depends on baryon (p&n)-density

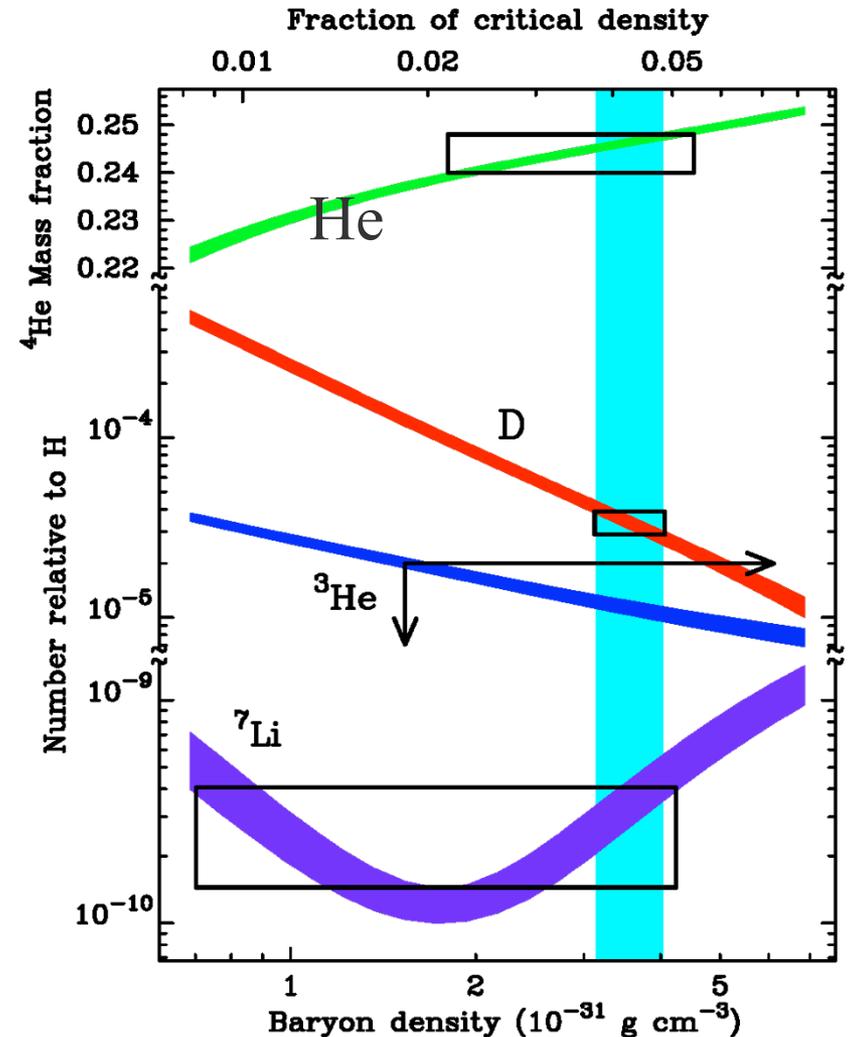
⇒ light element abundance
(He, D, ^3He) ⇒ n/p-ratio

light elements ⇒ baryon density

$$0.03 < \Omega_{Bar} < 0.05$$

$$\Omega_{Lum} < \Omega_{Bar} < \Omega_{Mat}$$

(0.01) (0.30)



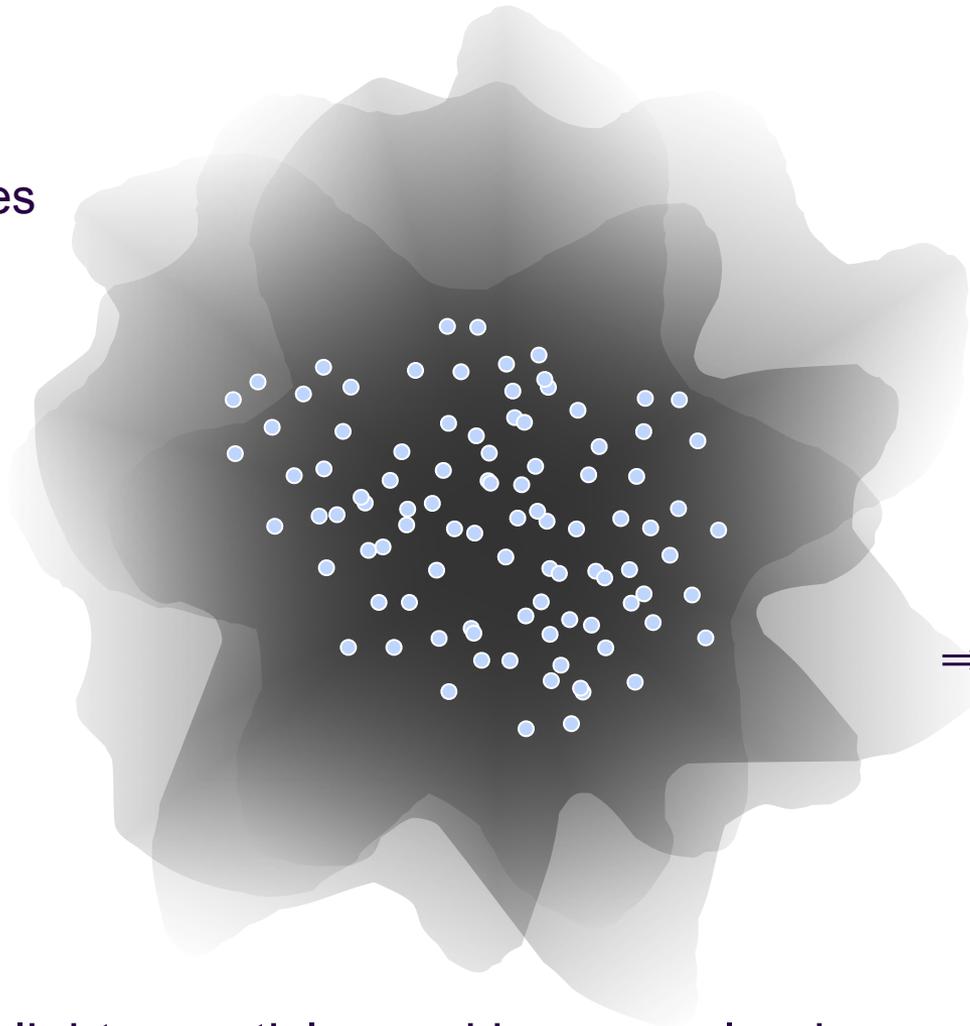


Formation of Structure in the Universe

an overdense
cloud collapses
by Gravity

time
Scale
for
collapse

free fall time



if sound travels
through cloud
faster
than collapse time

⇒ Oscillations,
but not collapse

⇒ structure formation
needs a minimum
cloud size

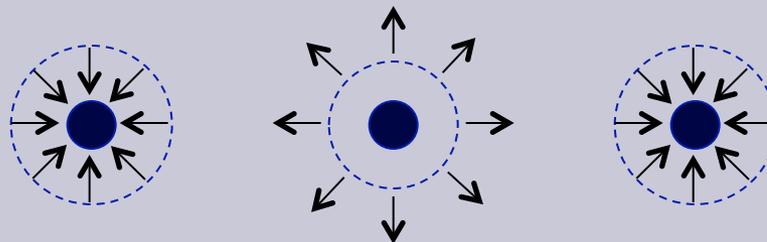
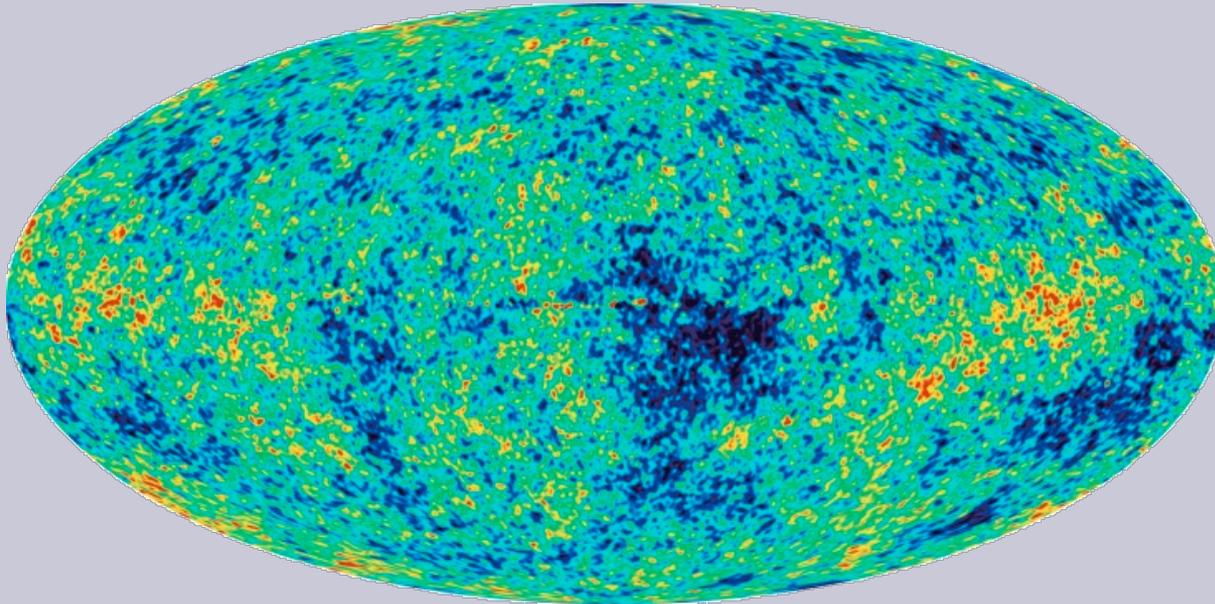
Jeans mass

as lighter particles making up a cloud,
as larger is Jeans mass, as more are small scales suppressed

Kosmischer Mikrowellenhintergrund - **CMB**

Dunkle Materie

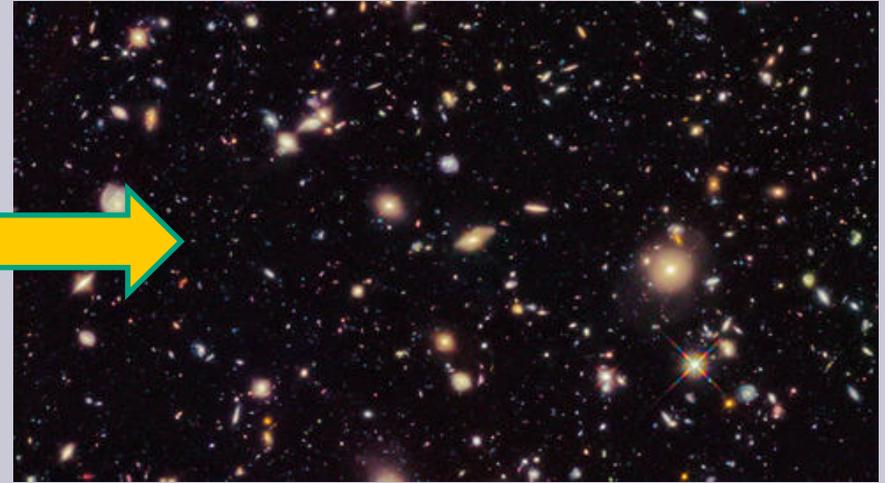
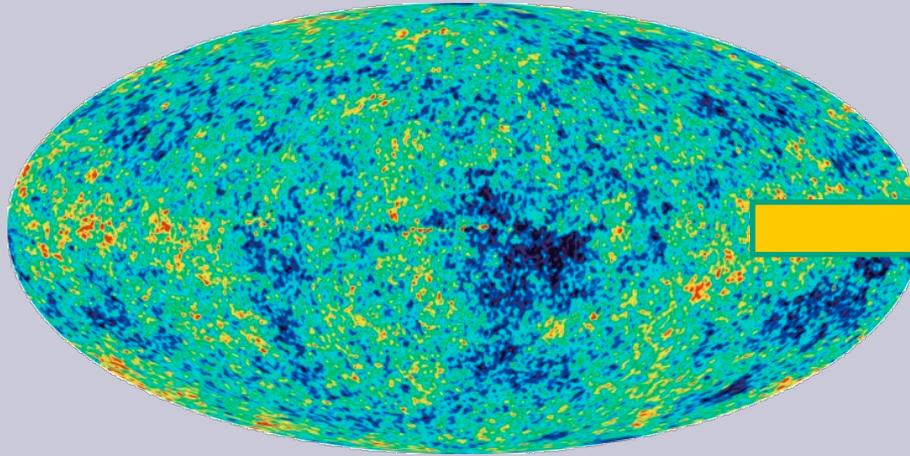
Schnappschuss der Dichteschwankung 380.000 Jahre nach Urknall



Schwankungen sind viel zu klein, nur 1/100.000-tel ?



($2,73 \pm 0,00001$) Kelvin



Dichtefluktuationen sind sehr klein
Schwankung nur 1/100.000-tel
um den Mittelwert

Aus diesen kleinen Schwankungen kann unmöglich
die heutige Struktur gewachsen sein.

Schwankungen müssten mindestens 100 x größer sein

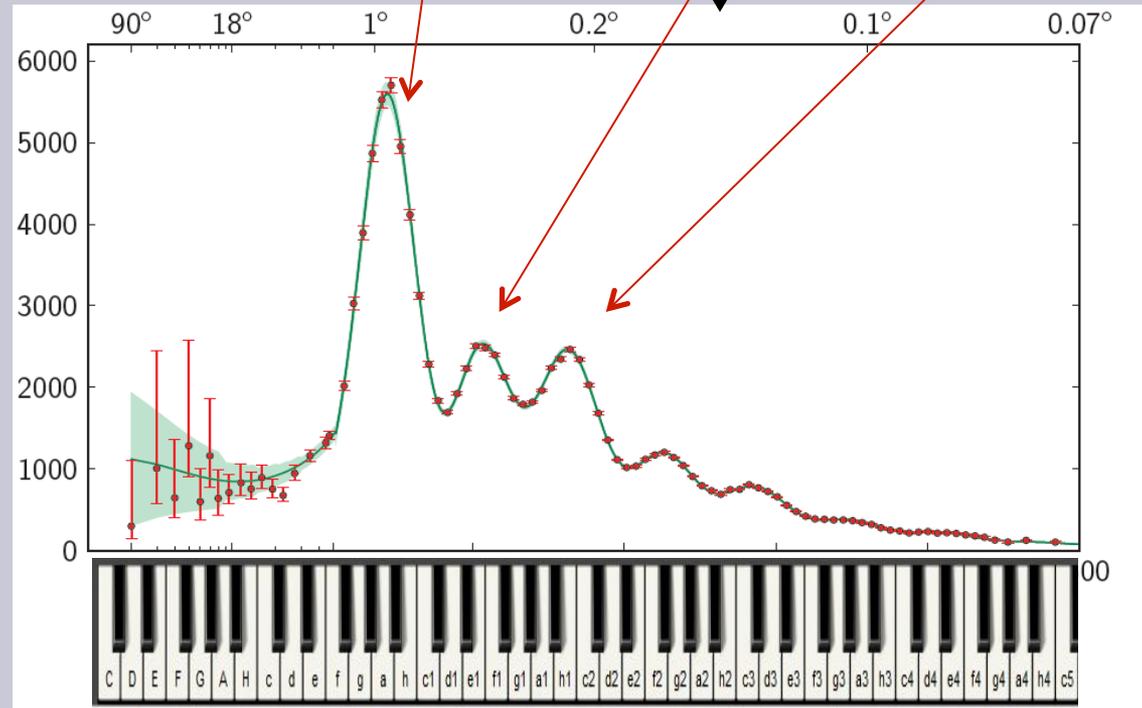
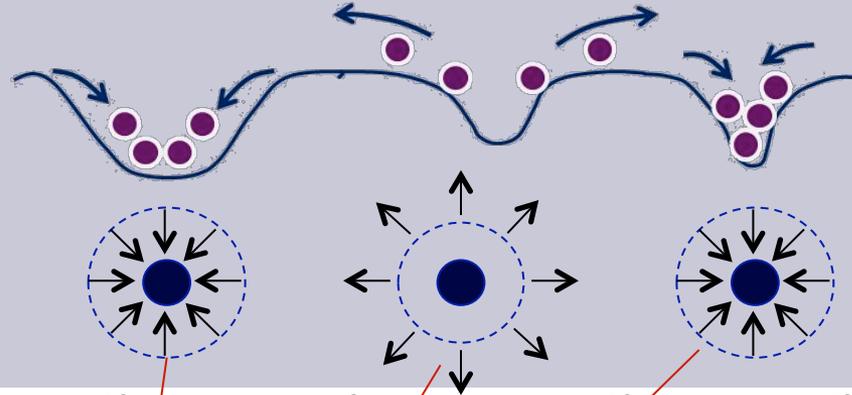
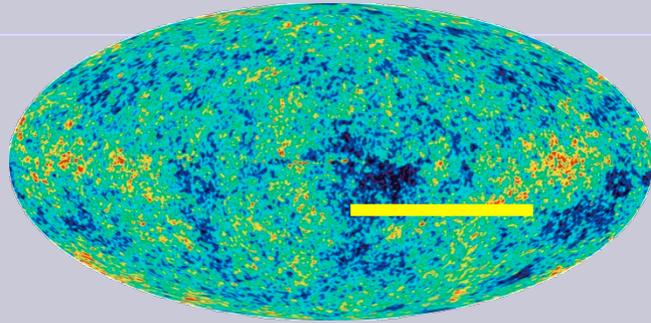
Gab es 100 x größere Schwankungen, die wir im CMB nicht sehen ?

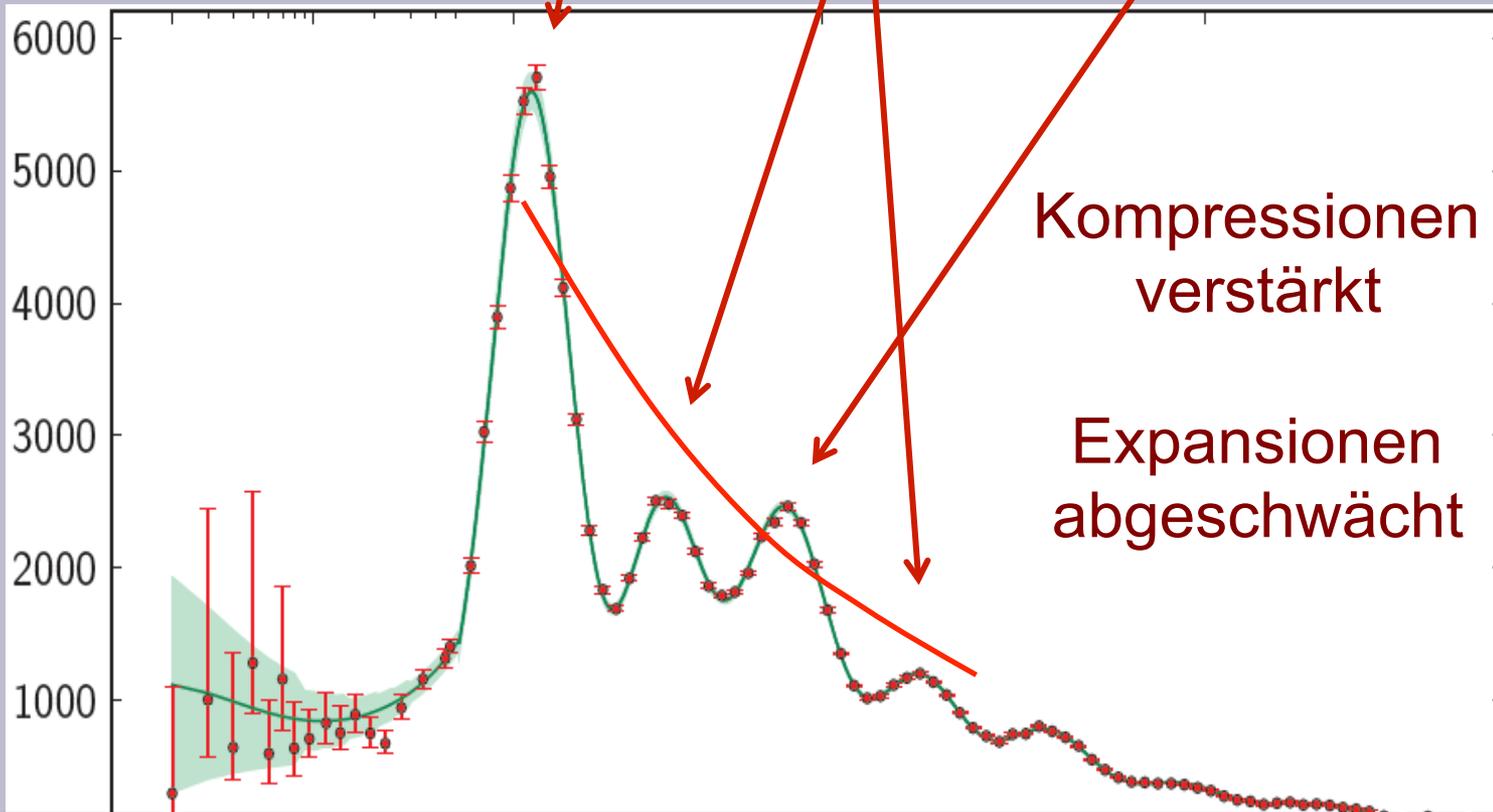
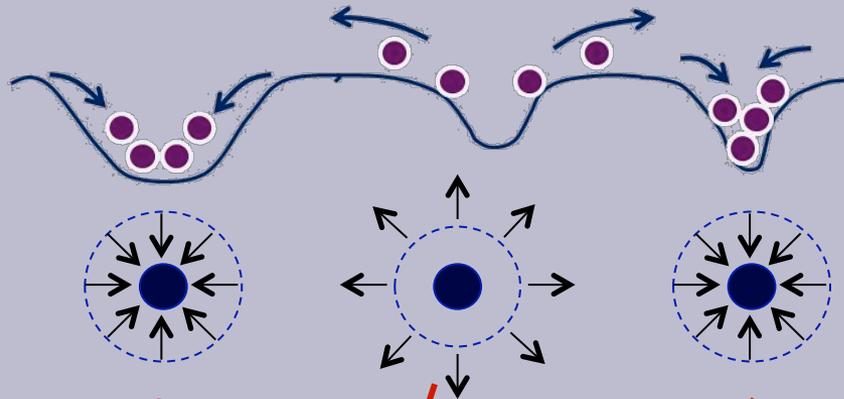
Wenn ja, sind diese aus Teilchen aufgebaut

die NICHT an Strahlung koppeln !

ungeladene Teilchen, nicht Atomkerne, nicht Elektronen

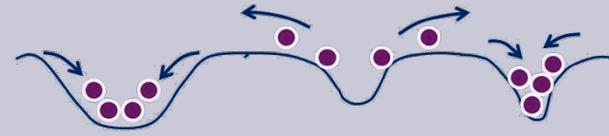
Kompressions- und Expansions-Phasen





zeigt, dass im Hintergrund tatsächlich statische Dichteschwankungen vorhanden waren

geladenen Teilchen (sichtbar im CMB)

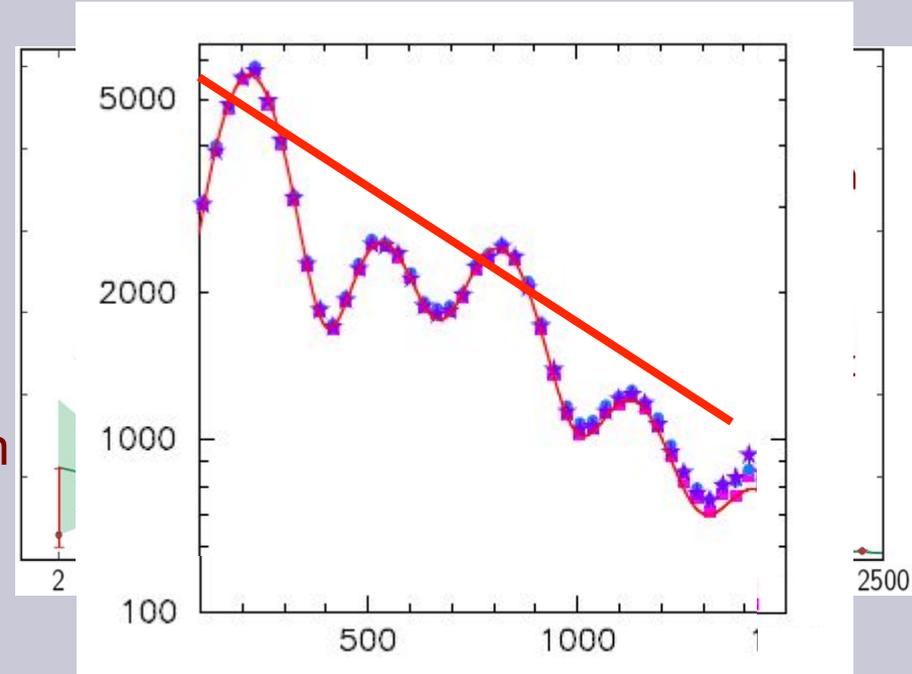


fallen in schon vorhandenen Verklumpungen hinein

⇒ Verstärkung der Kompression
Anziehungskraft 'hilft'

müssen beim Zurückschwingen aus den Verklumpungen herausklettern

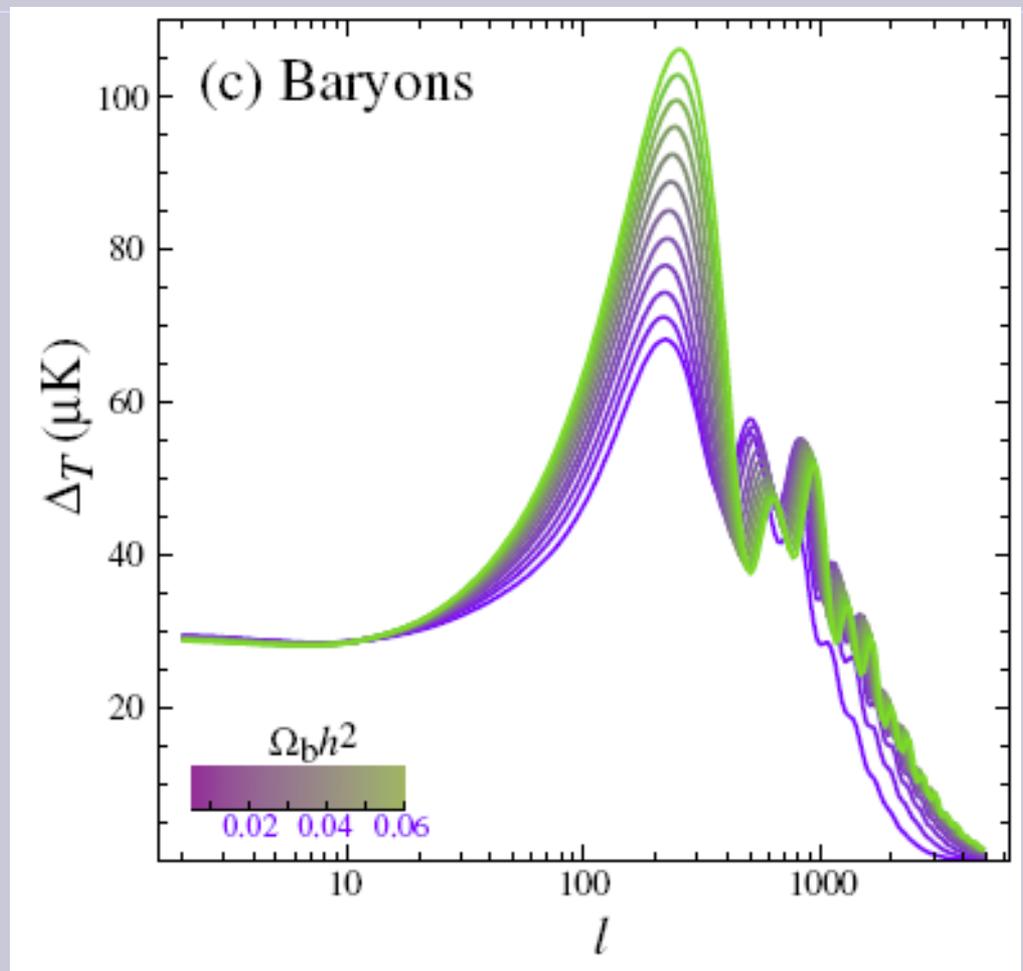
⇒ Abschwächung der Expansion
Anziehungskraft wirkt entgegen

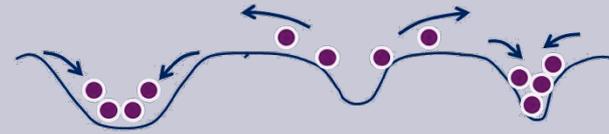


es gab schon Strukturen im Gravitationsfeld

gebildet durch Materie, die nicht mitschwingt

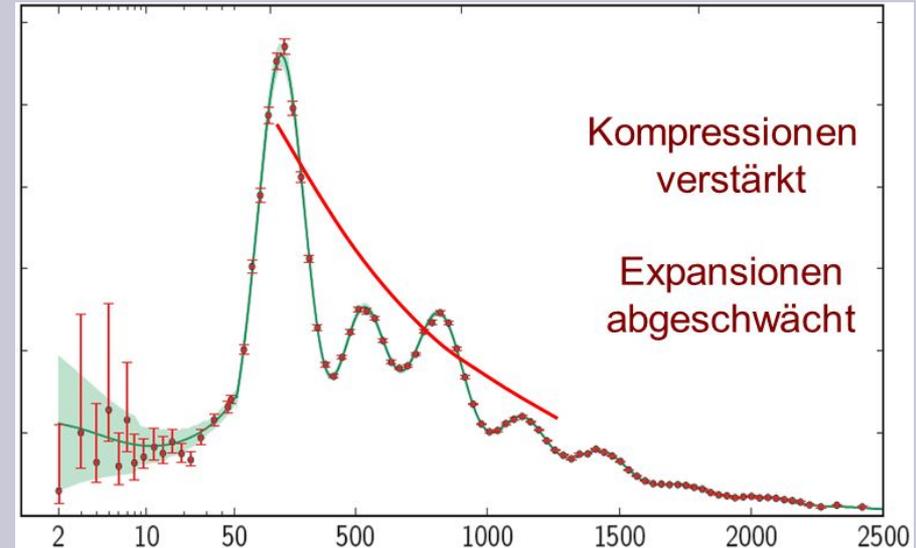
⇒ **aus NICHT geladenen Teilchen**





Dunkle Materie

Es gab schon Strukturen im Gravitationsfeld
gebildet durch Materie, die nicht mitschwingt
⇒ aus **NICHT** geladenen Teilchen



Es gibt ‚Dunkle Materie‘ die aus ungeladenen Teilchen besteht !!

Staub, Jupiter-ähnliche Objekte, Schwarze Löcher ...
entstehen aus Atomkernen (Wasserstoff, Helium, ...) die
zum Zeitpunkt der CMB-Entstehung mitschwingen

Dark Matter

Standardmodel is running out of Particles

Dark Matter

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27$$

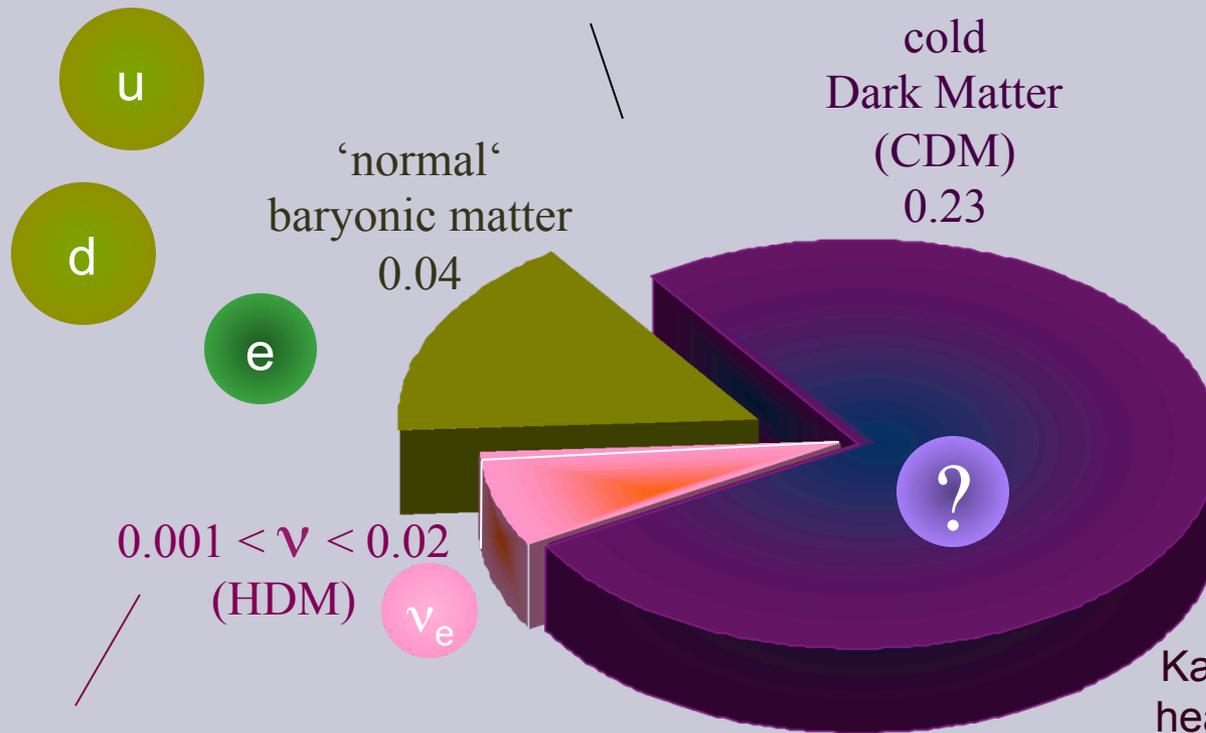
' ν too light' =>
most of the
Dark Matter
is cold

of so far unknown
weakly interacting,
massive particles
WIMPs

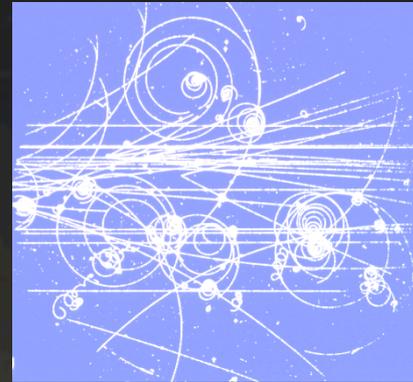
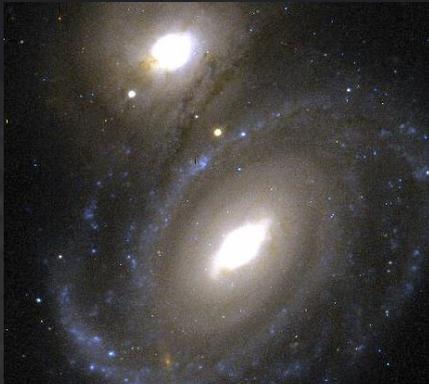
(50GeV~1000GeV
Neutralino?)

or

AXIONS,
Gravitinos,
Kaluza-Klein particles,
heavy sterile neutrinos



from ν -oscillations
=> $\Sigma m_\nu > 0.05\text{eV}$



‘Standardmodel’ of Cosmology

Standardmodel of Particle Physics

Dark Energy $\Omega_{\text{vac}} = 73 \%$

Dark Matter $\Omega_{\text{mat}} = 23 \%$

normal Matter $\Omega_{\text{mat}} = 4\%$

*expected from
Standardmodel*

*possible explanations
beyond the Standardmodel*

0 or 10^{120}

0 or 10^{55-120}

0 %

0.1 – 2 %

0 %

maybe 4 %

0 % or 10^{120}

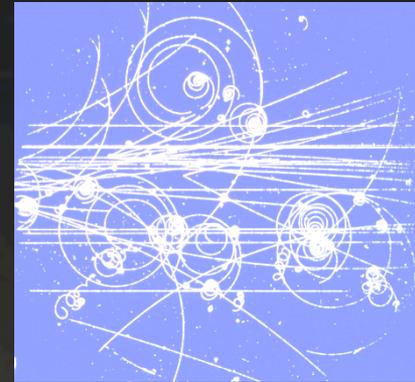
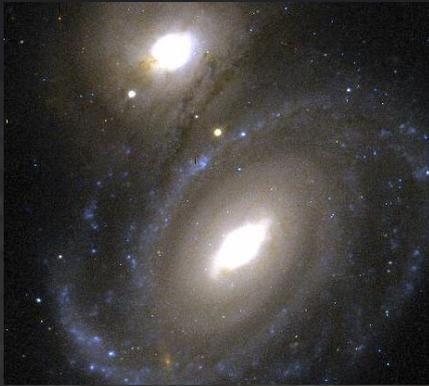
4-6 %

⇒ **Physics beyond the Standardmodel**

⇒ at least one of the ‘standards‘ has to be changed (most like

⇒ (direct) Dark Matter search is testing both

→ exciting times



‘Standardmodell’ der Kosmologie

Standardmodell der Teilchenphysik

Dunkle Energie $\Omega_{\text{vac}} = 73 \%$

Dunkle Materie $\Omega_{\text{mat}} = 23 \%$

Normale Materie $\Omega_{\text{mat}} = 4\%$

*im Standardmodell
erwartet*

0 oder 10^{120}

0 %

0 %

0 % oder 10^{120}

*Möglichkeiten jenseits
des Standardmodells*

0 oder 10^{55-120}

0.1 – 2 %

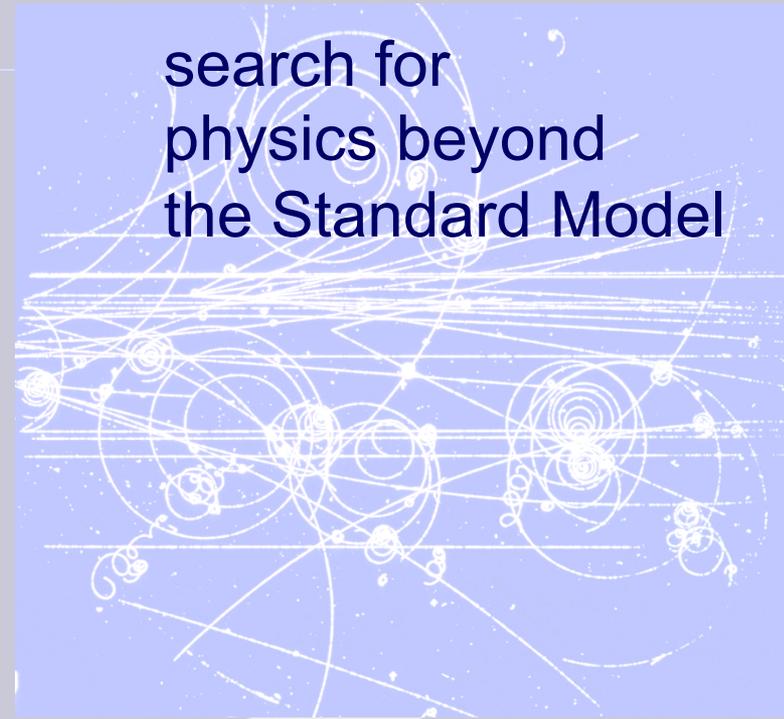
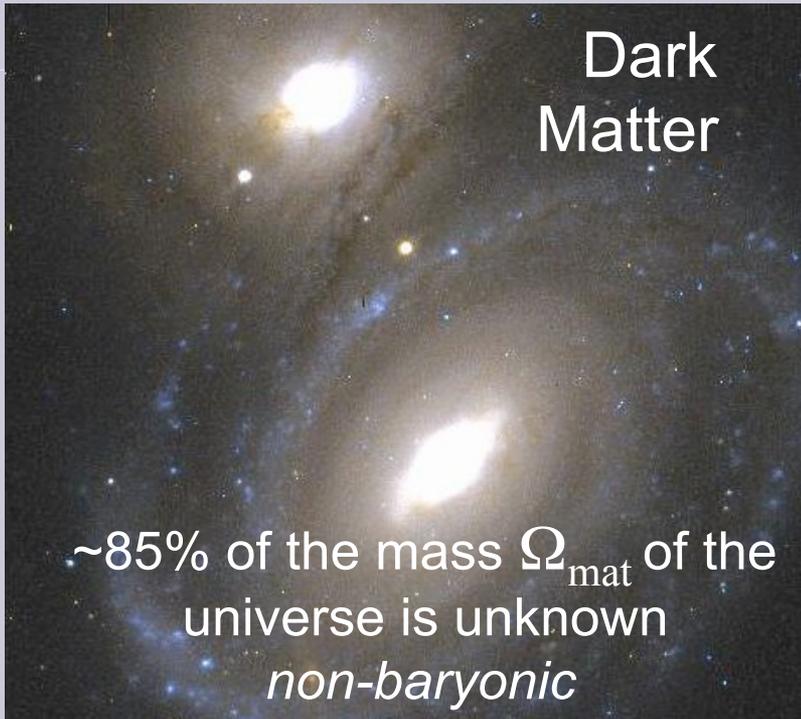
vielleicht 4 %

4-6 %

⇒ **Physik jenseits des Standardmodells**

⇒ mindestens einer der ‘Standards’ muss geändert werden (wahrscheinlich beide)

⇒ es gibt viele interessante Aufgaben



Dark Matter

observations in
Cosmology

new elementary particles

Particle Physics

QCD: Axions

supersymmetry: Neutralinos $\chi = a\tilde{\gamma} + b\tilde{Z}^0 + c\tilde{H}_1^0 + d\tilde{H}_2^0$
Gravitino

➡ perfect particle Dark Matter candidates (WIMP)

Elementary Particles in the early Universe

Thermal Relics

Dunkle Materie

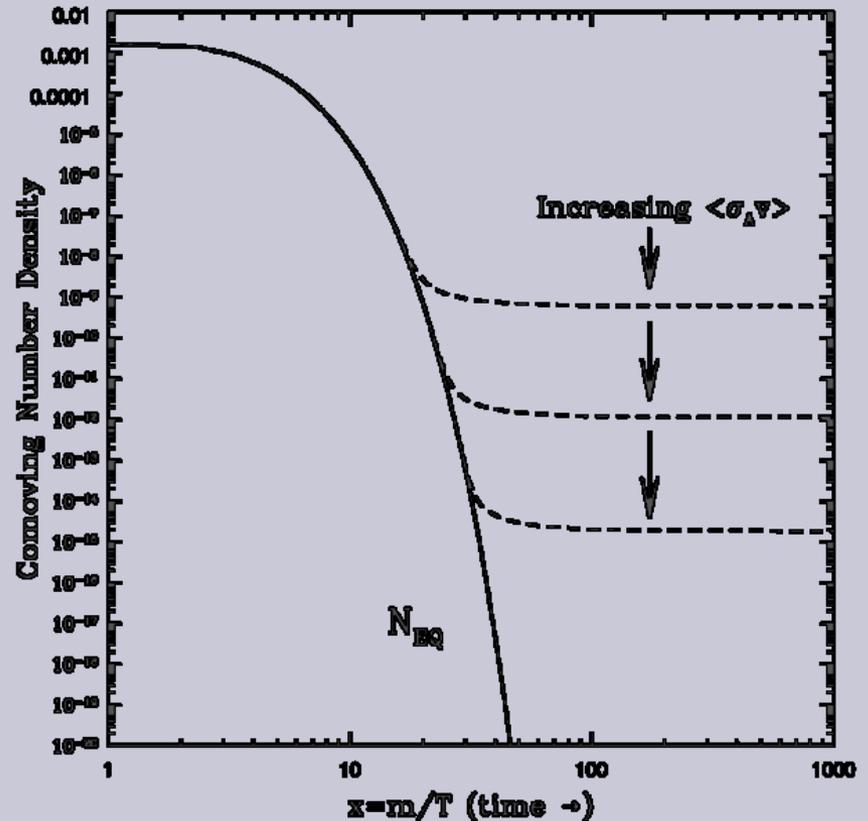
as long as $T \gg m_\chi$ $\chi\bar{\chi} \leftrightarrow \ell\bar{\ell}$
 density n_χ is constant

as soon as $T < m_\chi$ $\chi\bar{\chi} \rightarrow \ell\bar{\ell}$
 density n_χ falls exponentially

if expansion rate of the universe
 grows larger than
 annihilation rate

'Freeze Out' density $n_\chi \sim \frac{1}{\sigma_\chi}$

for $\Omega_\chi \approx 1 \Rightarrow \sigma_\chi$



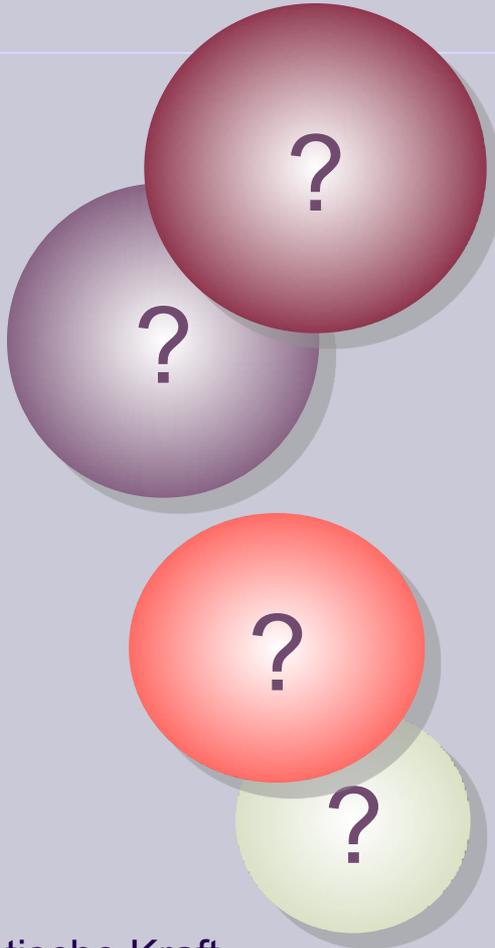
of the order of weak interaction
 and mass $\sim 10 \text{ GeV} - 1000 \text{ GeV}$

Neue Elementarteilchen ?



plus Kräfte:

Gravitation
elektromagnetische Kraft
schwache Kraft
starke Kraft



Dunkle Materie Teilchen:

- ungeladen, maximal schwache Wechselwirkung
unsichtbar
nicht oszillierender Hintergrund im CMB
- schwer ($\sim 100-1000$ x Proton)
Bildung der Strukturen

bisher sind keine solchen Teilchen bekannt
es wird heftig danach gesucht

bis wir die Teilchen kennen, nennen wir sie vorläufig

WIMP

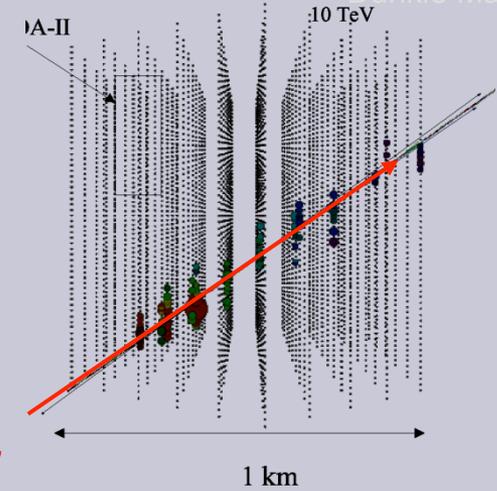
weakly interacting massive particle

im Eis

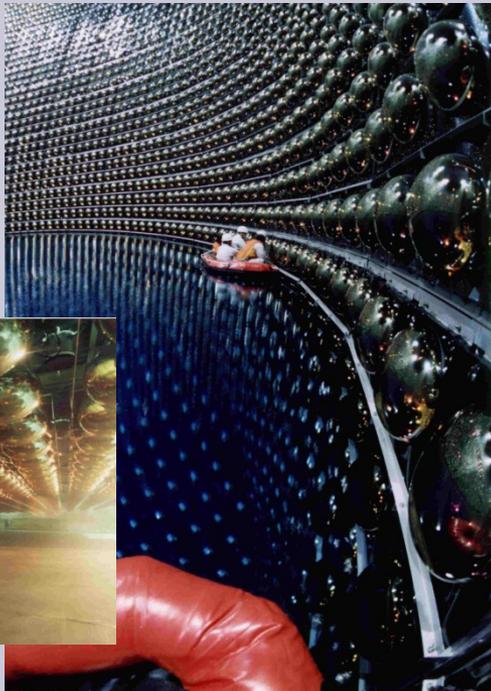
Site:
er, 2 km of Base,
Never Rains, and Lots of Non-stop Sunshine



WIMP Indirekter Suche - Neutrino Teleskope -



**SuperK
aufsteigende
Myonen**



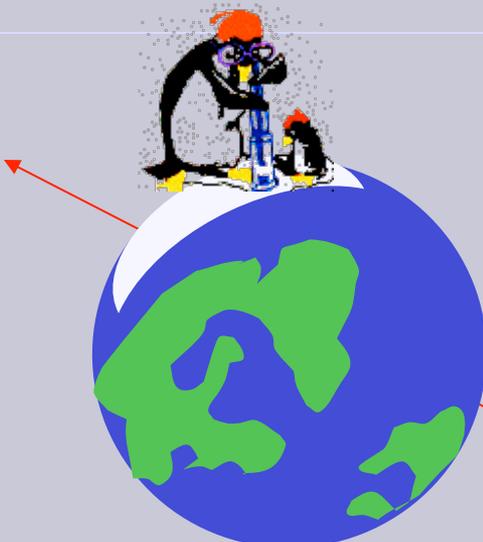
**ANTARES, KM3Net
im Mittelmeer**

im Wasser



ν_{μ}

WIMP Indirekter Suche - Neutrino Teleskope -

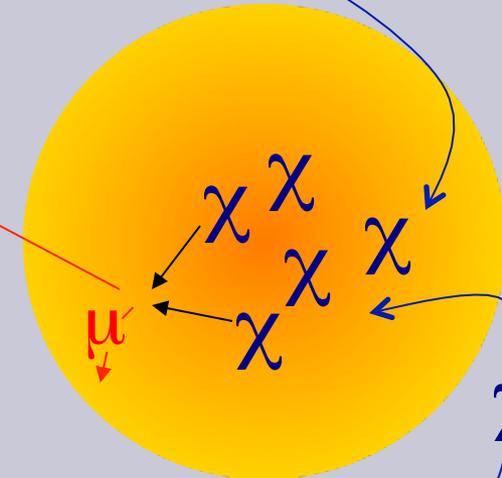


Suche nach hochenergetischen
Annihilationsprodukten

*z.B. sehr hochenergetische
Neutrinos aus der Sonne*

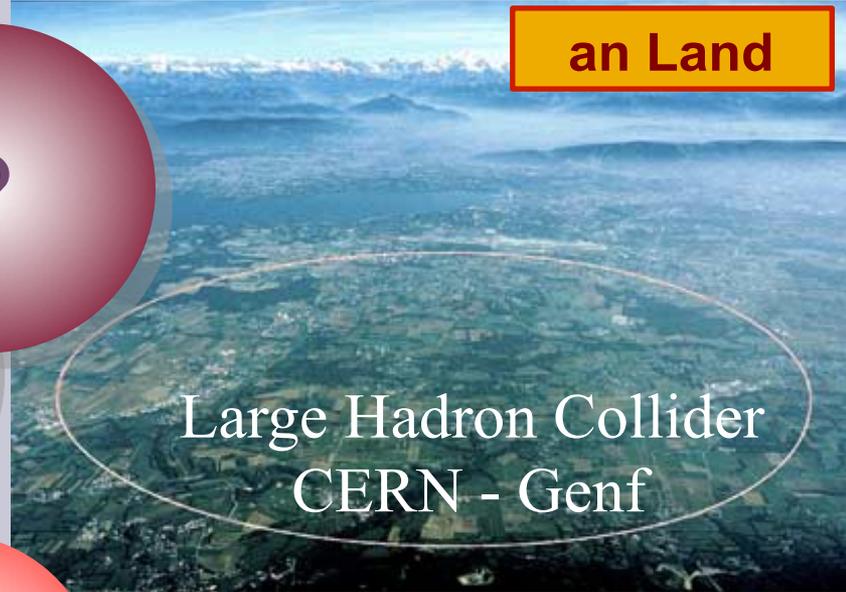
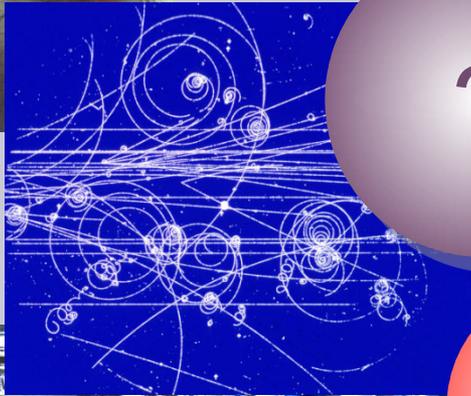
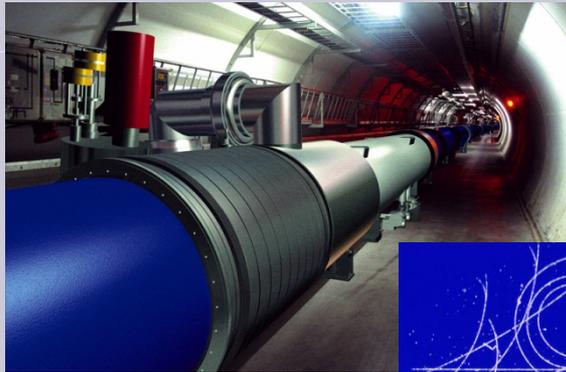
ν_{μ}

WIMP Überdichte in
Sonne, Erde, galaktischen Zentrum

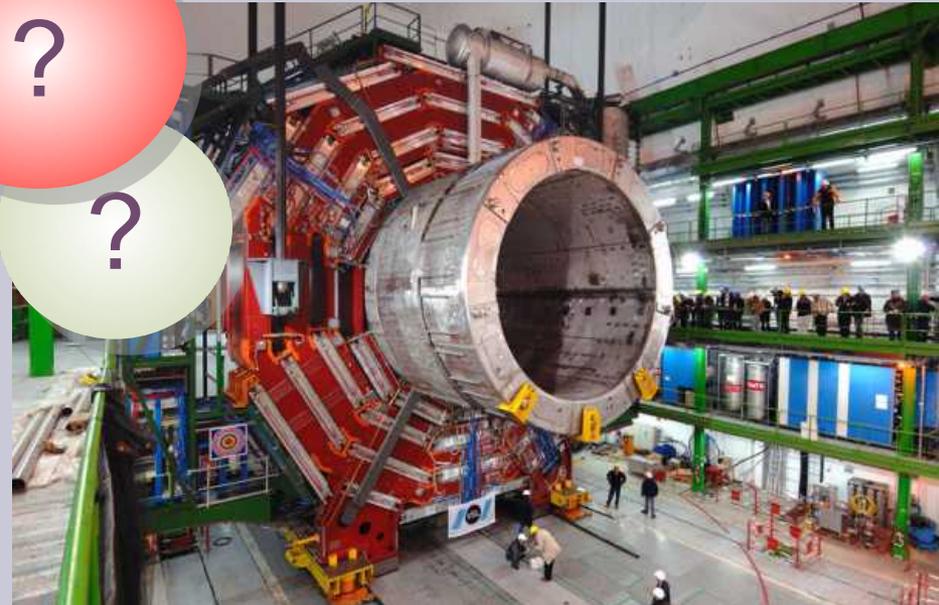
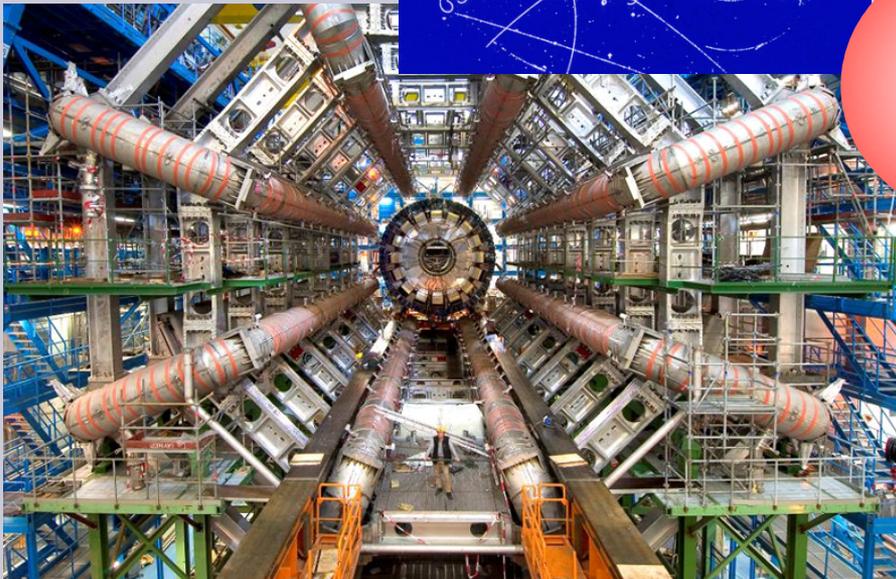


χ

WIMP direkte Produktion in hochenergetischen Teilchenkollisionen - LHC-



Large Hadron Collider
CERN - Genf



WIMP Indirekter Suche Gamma-Teleskope und Anti-Materie

Dunkle Materie

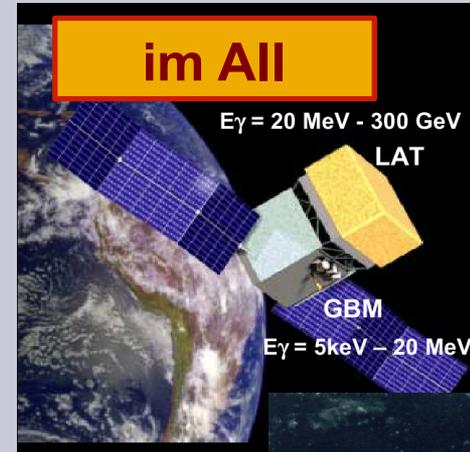
γ -ray telescopes: *HESS, MAGIC, ...*

γ -ray satellites: *EGRET, GLAST, ...*

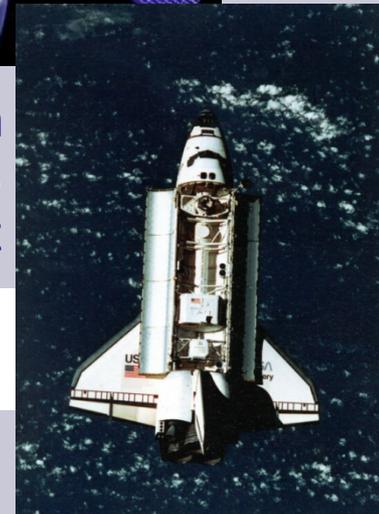
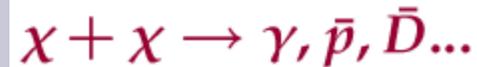


Suche nach
hochenergetischen
Annihilationsprodukten

*z.B. sehr hochenergetische
Gammas aus
dem galaktischen Zentrum*



Suche nach
Anti-Materie als
Annihilationsprodukt



*Antimatter (Anti-Deuteron)
Searches: AMS, PAMELA, ...*

WIMP - Direkter Nachweis durch Rückstöße an Atomkernen

Dunkle Materie

Können wir den seltenen Fall,
dass ein WIMP einen Atomkern
ganz schwach 'an schubst' sehen?

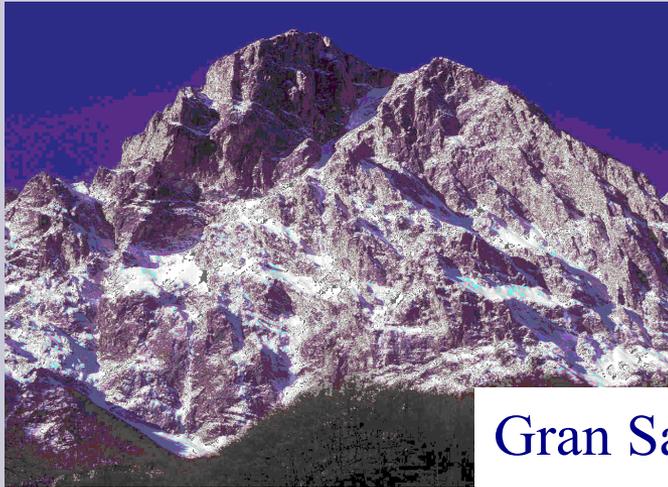
⇒ neue Nachweistechniken
⇒ gut abgeschirmt



Untergrund-Labore für die Suche nach seltenen Ereignissen

WIMP Suche **im Untergrund**

Dunkle Materie



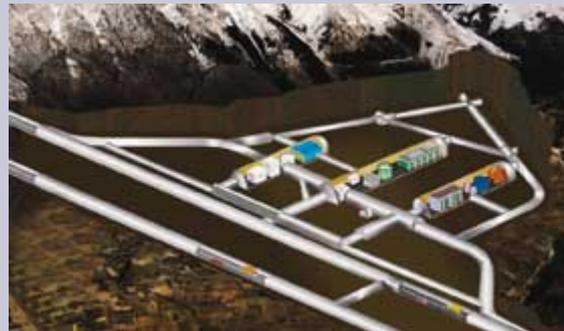
CRESST Experiment

TU München
Max Planck Physik München
Uni Tübingen



Gran Sasso Labor

*Abschirmung
1.5km Fels*



nach wie vor rätselhaft ?
sowohl für Kosmologie, als auch für Teilchenphysik

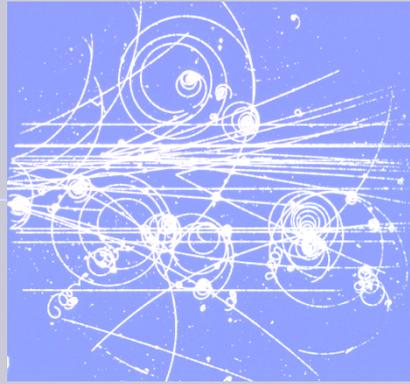
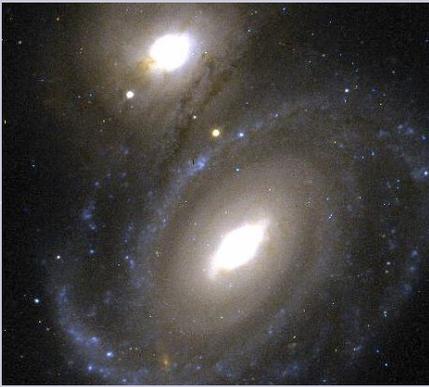
DUNKLE



MATERIE

gute Aussichten in den nächsten ~10 Jahren
viele unterschiedliche Projekte erreichen gerade die notwendige Empfindlichkeit

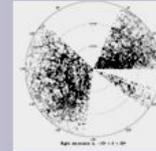
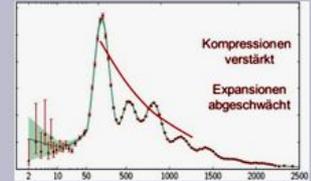
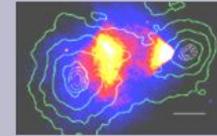




Dunkle Materie

Was ist die Natur der Dunklen Materie ???

- ~~falsch verstandenes Gravitationsgesetz~~
- ~~Staub, Jupiter-ähnliche Objekte, schwarze Löcher, ...~~
- ~~Neutrinos~~



- ? ! ? ! ? ! ? !
- bisher unbekannte ‚neue‘ Elementarteilchen
- ! ? ! ? ! ? ! ?



Das Ziel !

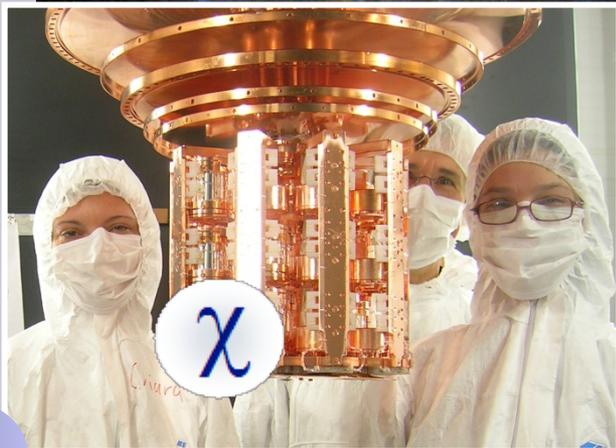
Dunkle Materie



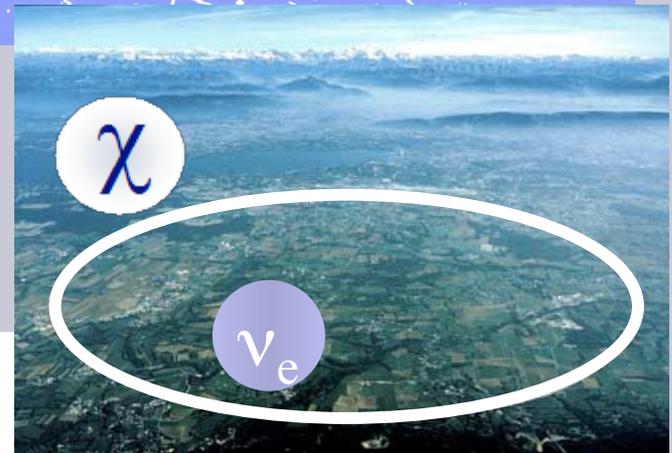
Teilchen identifiziert ?

Neue
Teilchenphysik

neue Teilchen erzeugt ?



enge
Verbindung



Astrophysik und Teilchenphysik



Elementarteilchen \Leftrightarrow *Struktur des Universums*



DUNKLE



MATERIE



Standardmodell - Ist das die ganze Wahrheit ?

Dunkle Materie



plus Kräfte:

Gravitation
elektromagnetische Kraft
schwache Kraft
starke Kraft

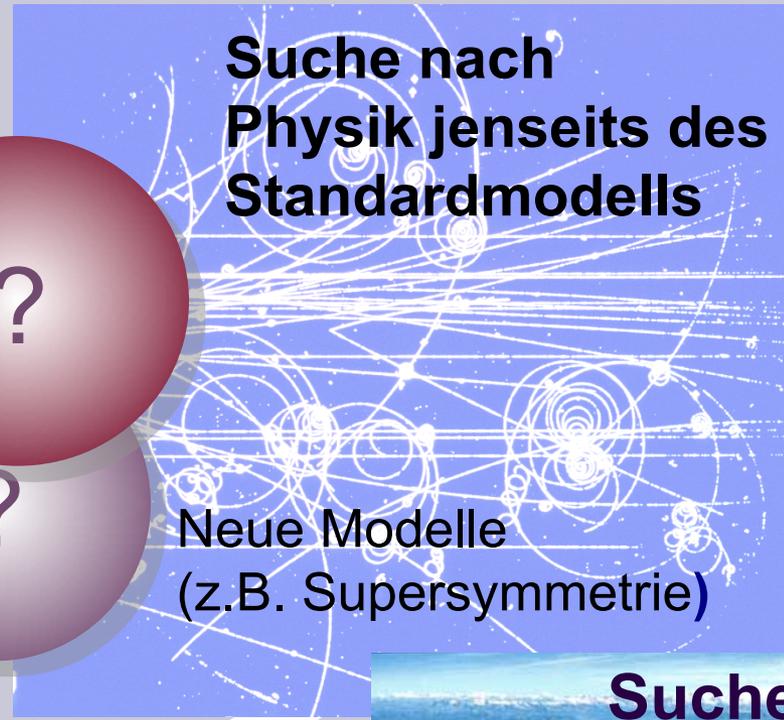
Fragen:

- Asymmetrie Materie-Antimaterie ?
- Wieso sind Neutrinos so leicht ?
- Sind die Kräfte verschiedene Formen einer 'Urkraft'?
- ...

keine Antworten mit den bisher
experimentell bewiesenen
Theorien und Modellen



größere Vielfalt an
Elementarteilchen ?



Kosmologische Beobachtungen

Teilchen-Physik

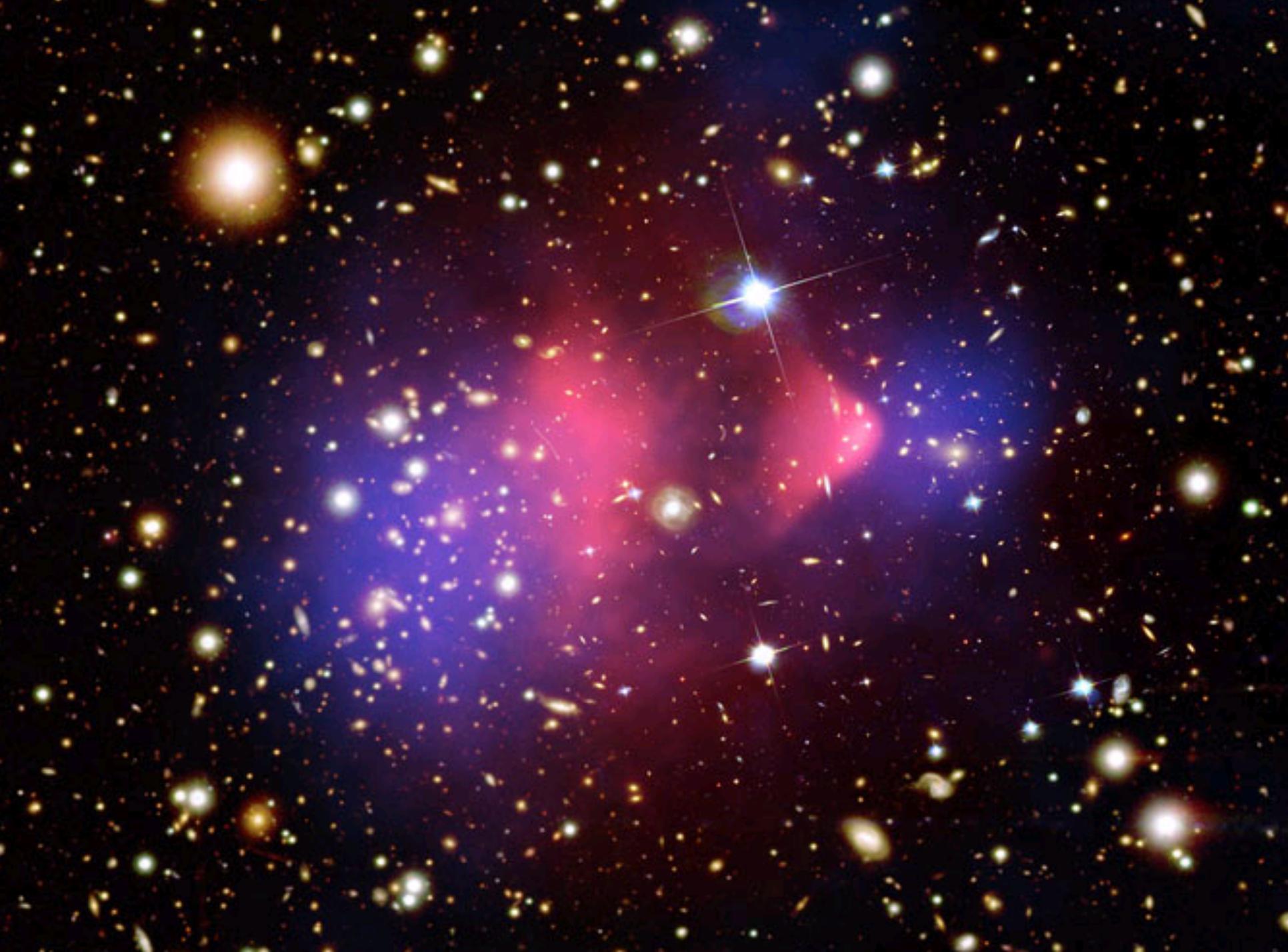


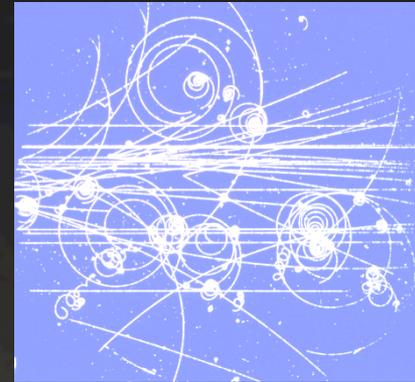
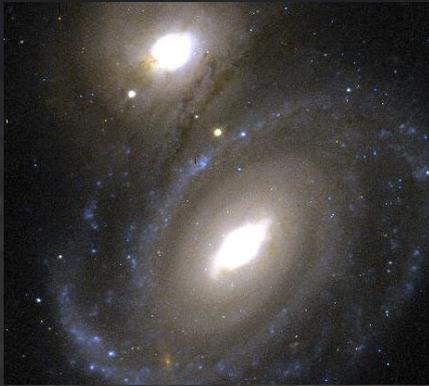
neue Elementarteilchen



spannend:

Modelle / Theorien zur Erweiterung der Teilchenphysik enthalten perfekte Kandidaten für kalte Dunkle Materie (WIMP)





‘Standardmodell’ der Kosmologie

Standardmodell der Teilchenphysik

		<i>im Standardmodell erwartet</i>	<i>Möglichkeiten jenseits des Standardmodells</i>
Dunkle Energie	$\Omega_{\text{vac}} = 73 \%$	0 oder 10^{120}	0 oder 10^{55-120}
Dunkle Materie	$\Omega_{\text{mat}} = 23 \%$	0 %	0.1 – 2 %
Normale Materie	$\Omega_{\text{mat}} = 4\%$	0 %	vielleicht 4 %
		0 % oder 10^{120}	4-6 %

⇒ **Physik jenseits des Standardmodells**

⇒ mindestens einer der ‘Standards’ muss geändert werden (wahrscheinlich beide)

⇒ es gibt viele interessante Aufgaben

Neuzugang: Das Higgs-Teilchen



Wechselwirkungen der Bausteine

Dunkle Materie

Gravitations - Kraft

Sonnensystem, Galaxien etc.

Masse



Elektromagnetische (Coulomb)- Kraft

Atomhülle,
Materie um uns herum

Ladung



Kern - Kraft

Atomkerne.

Baryon



Schwache - Kraft

Beta-Zerfall

alle

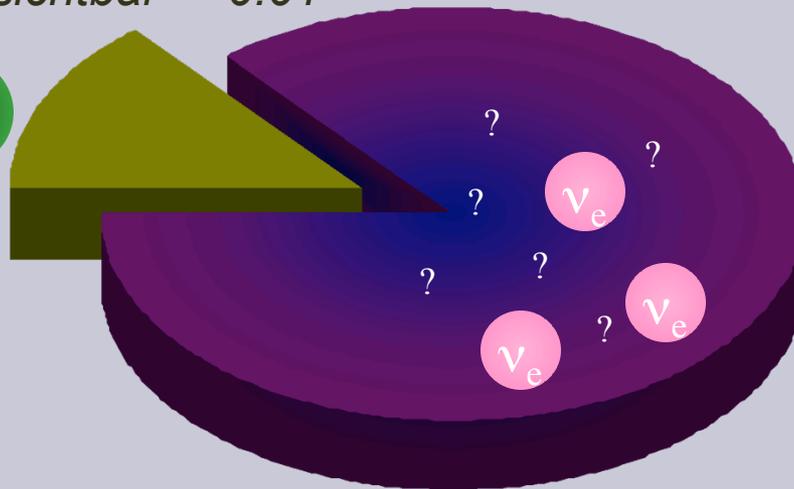


Materie im Universum

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27$$

woraus besteht die
dunkle nicht-baryonische
Materie ?

'normale'
baryonische Materie 0.04
davon sichtbar ~ 0.01



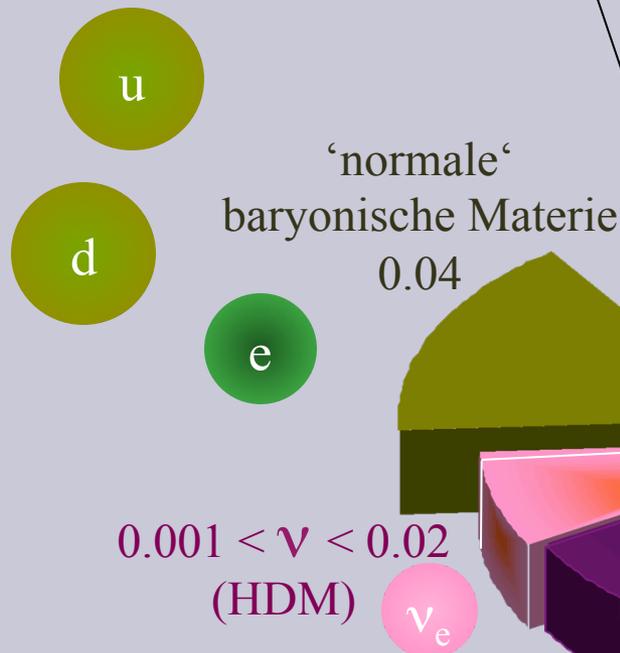
nicht-baryonische
dunkle Materie
0.23

Zusammensetzung der Materie im Universum

Dunkle Materie

‘ ν zu leicht‘

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27 \quad \text{W} \quad 0.04$$



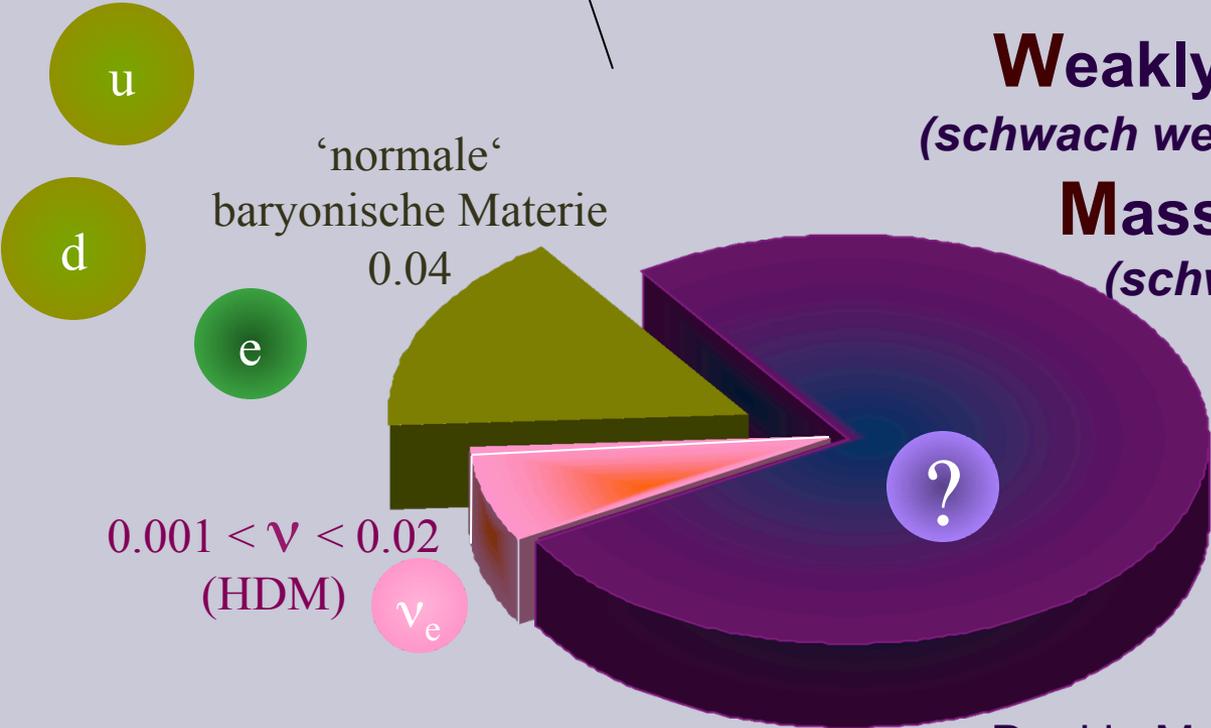
der
überwiegende Teil
der (kalten)
Dunklen Materie
besteht aus bisher
unbekannten
Elementarteilchen

Zusammensetzung der Materie im Universum

Dunkle Materie

ähnlich ν
nur sehr viel
schwerer

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27$$



Weakly Interacting
(*schwach wechselwirkendes*)

Massive Particle
(*schweres Teilchen*)

WIMP

kalte
Dunkle Materie
(CDM) 0.23

‘normale’
baryonische Materie
0.04

$0.001 < \nu < 0.02$
(HDM)

Tiefemperatur – Kalorimeter - Messung der Gesamtenergie

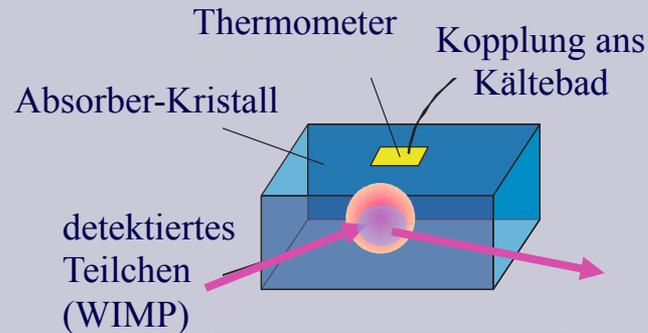
Dunkle Materie

sehr sensitiv auf Kernrückstöße
auch ohne Wechselwirkung mit Atomhülle

Teilchenstreuung

=> Temperaturanstieg

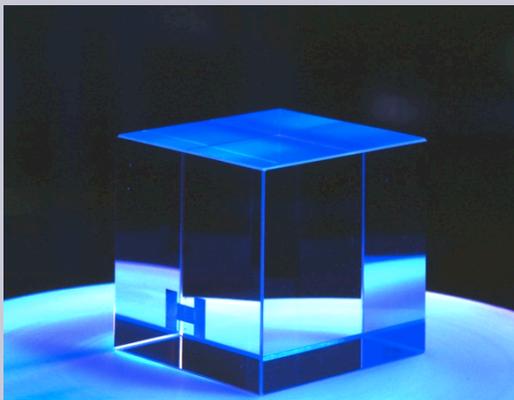
Tiefe Temperaturen (~20mK)
=> hohe Sensitivität, da C klein



niedrige
Energieschwelle

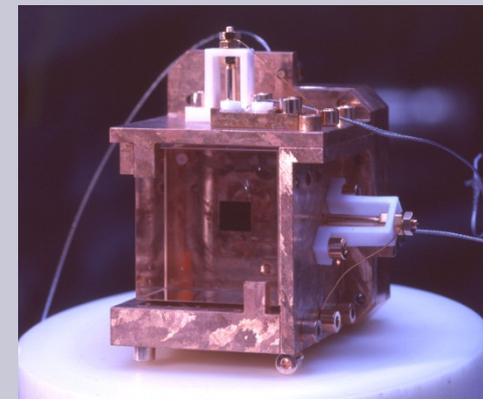
$$\Delta T \propto E/C$$

große Freiheit bei der
Wahl des Detektormaterials



Thermometer:

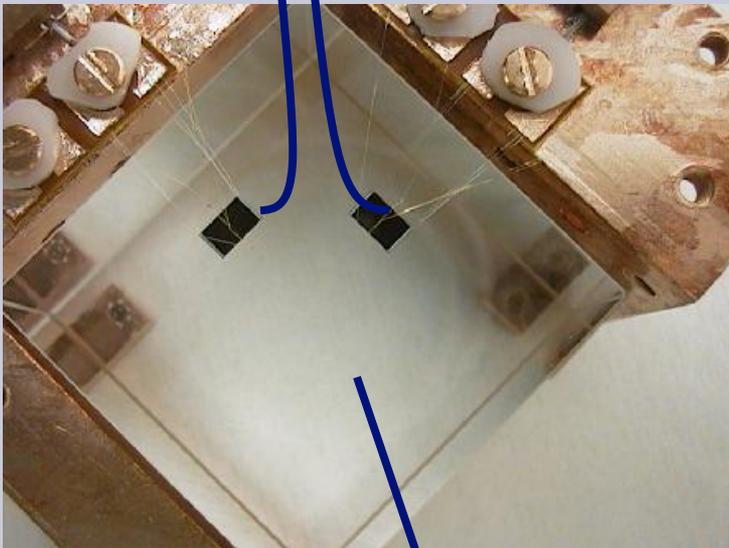
Supraleitende Phasen-
Übergangsthermometer



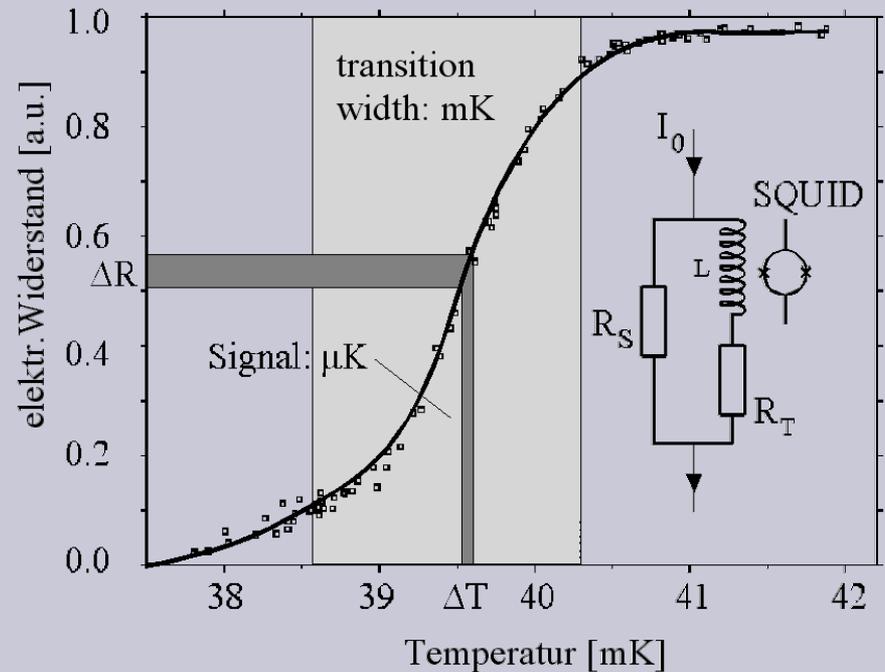
Tieftemperatur-Kalorimeter und supraleitendes Phasenübergangs-Thermometer

Supraleitendes Phasen-
Übergangs-Thermometer

Wolfram $T_c = 15\text{mK}$ oder Ir/Au $T_c = 30\text{-}80\text{ mK}$



Saphir- oder CaWO_4 -Absorber
250gr, 4cm x 4cm x 4cm



WIMP - Direkter Nachweis

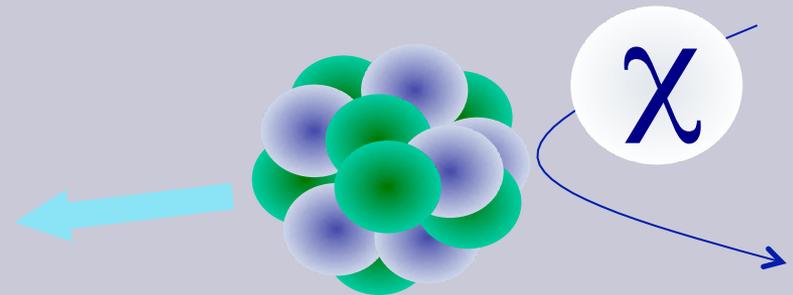
*Weakly Interacting Massive Particles = **WIMPs***

Dunkle Materie

Elastische Streuung an Atomkernen in einem Detektor

- Kernrückstöße: geringe Effizienz zur Erzeugung von Ladung und Licht

⇒ nur wenige keV Energie

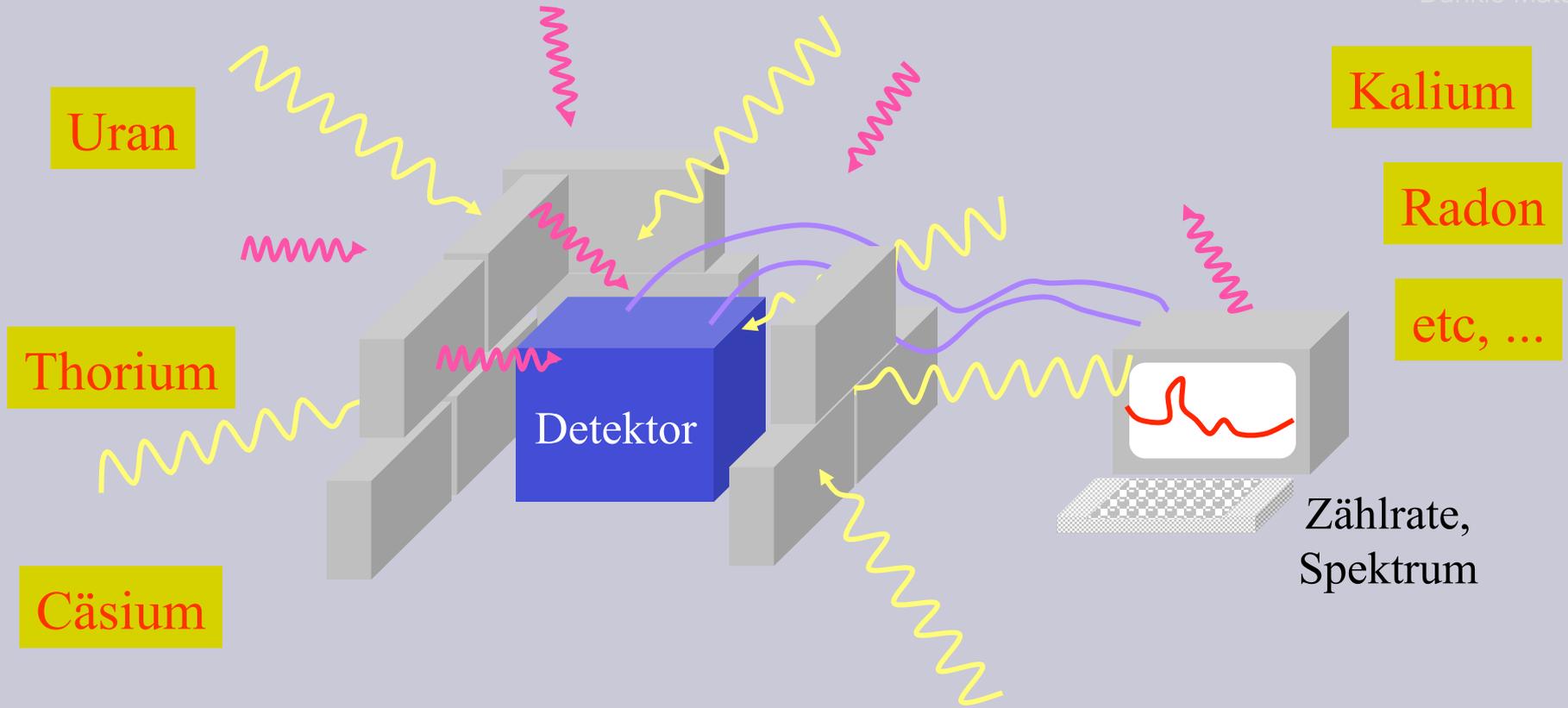


- Wirkungsquerschnitt $\sigma_\chi < 10^{-36} \text{ cm}^2$
- lokale WIMP-Dichte $\rho_\chi = 0.3 \text{ GeV} / \text{ cm}^3$ entspr. $3 \text{ WIMPs}_{(100\text{GeV})} / \text{ liter}$
- Geschwindigkeit $v \sim 270 \text{ km/s}$ $75000 / \text{ s} / \text{ cm}^2$

⇒ **sehr seltene Streuereignisse** ($< 0.1 / \text{ Tag} / \text{ kg}$)

Radioaktivität in der Umgebung

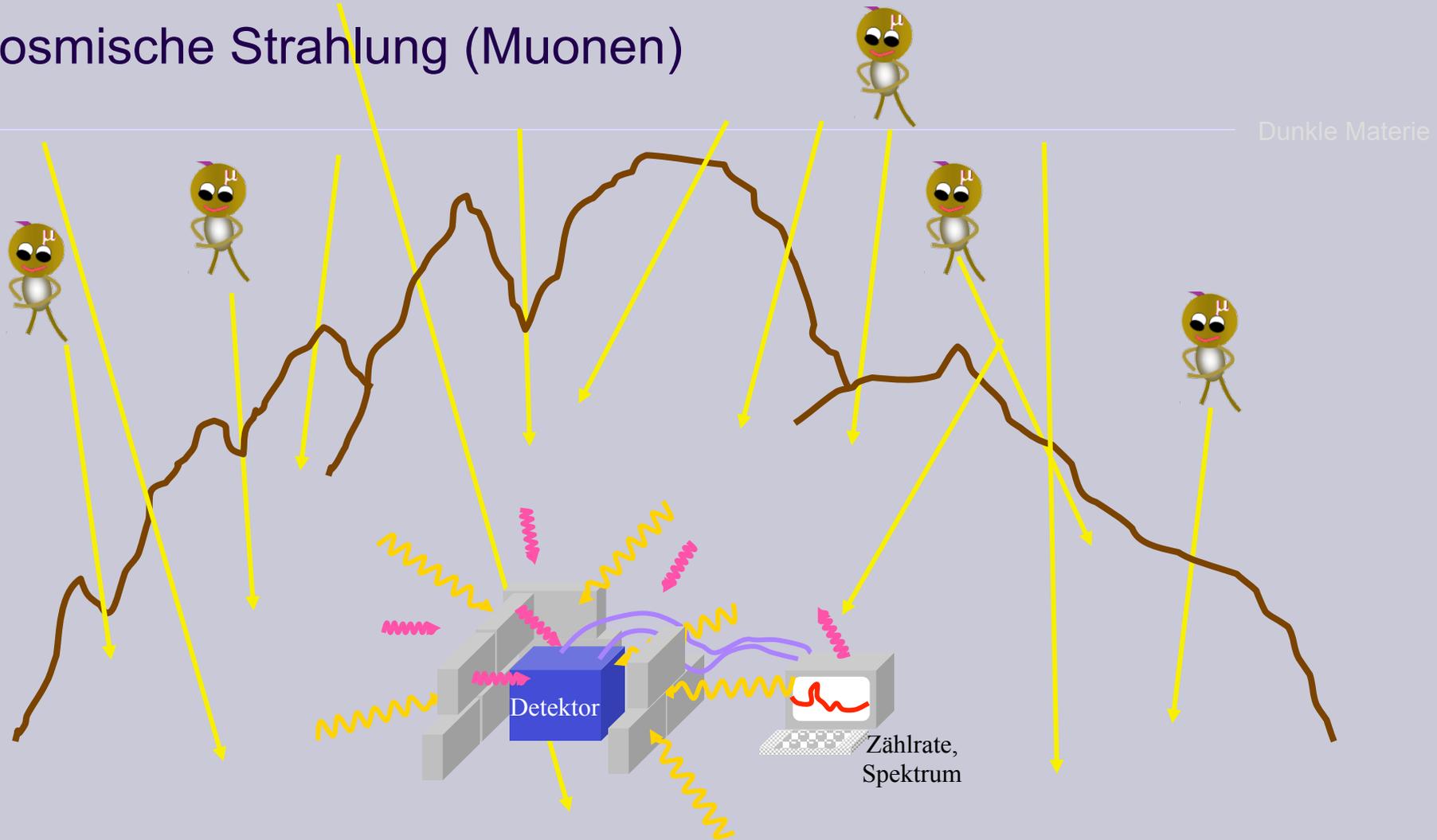
Dunkle Materie



erforderliche Sensitivität ~ 1 Ereignis / kg / Woche (in Zukunft noch 100 x weniger)

Umgebungs-Radioaktivität: $> 1\text{Hz/kg} \sim 10^7$ Ereignisse /kg /Woche
=> 'saubere' Abschirmung: (altes) Pb, Cu

Kosmische Strahlung (Muonen)



erforderliche Sensitivität ~ 1 Ereignis / kg / Woche (in Zukunft noch 100 x weniger)

Muonen $\sim 0.1\text{Hz/kg}$: $\sim 10^6$ Ereignisse /kg /Woche
 ~ 1.5 km Gestein erforderlich \Rightarrow **Untergrund-Labor**

Suche nach Dunkler Materie im Gran Sasso Untergrund Labor

Dunkle Materie

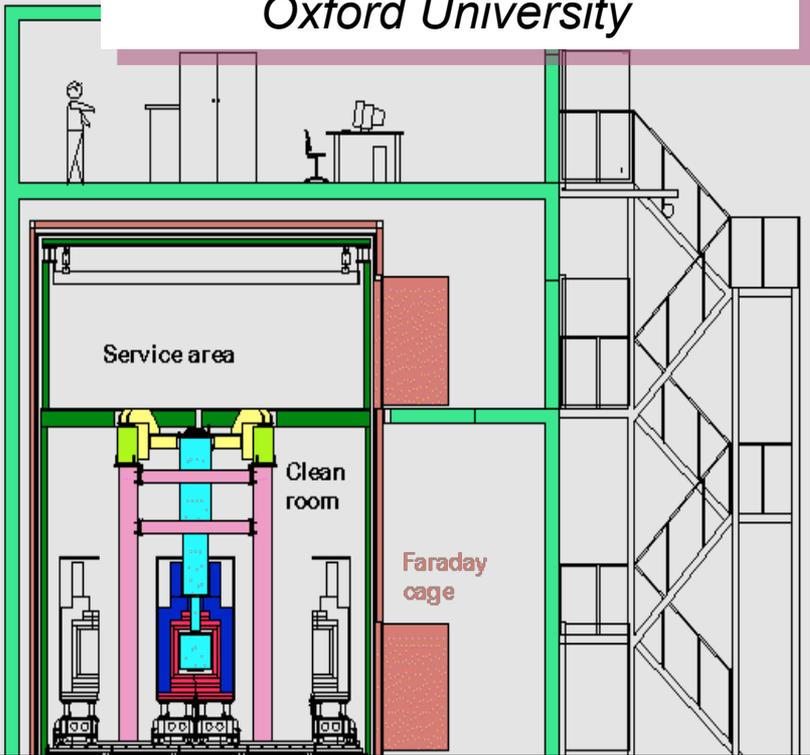
400.000 x weniger Muonen



Tübinger Wissenschaftler im Gran Sasso Untergrund Labor

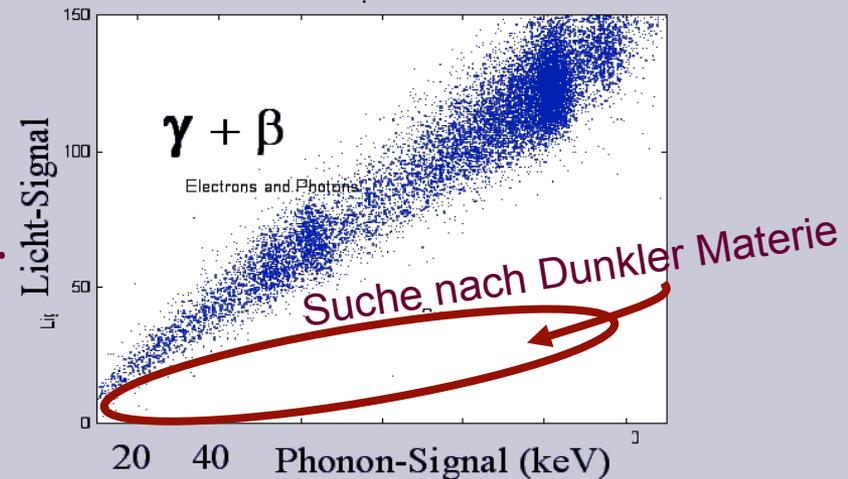
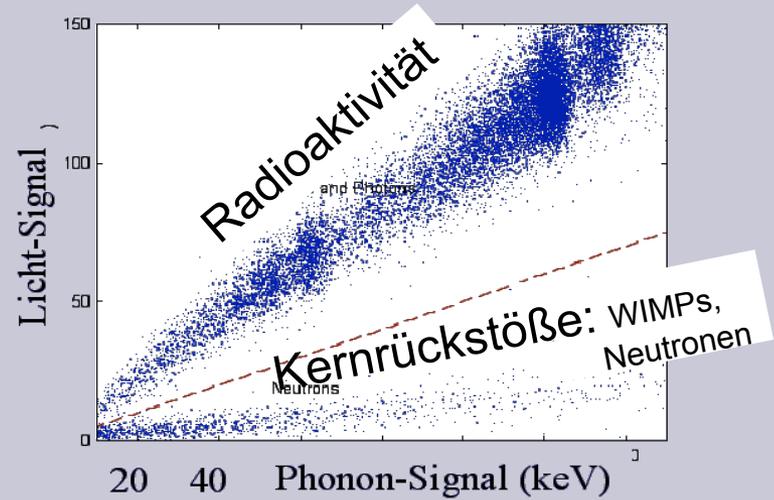
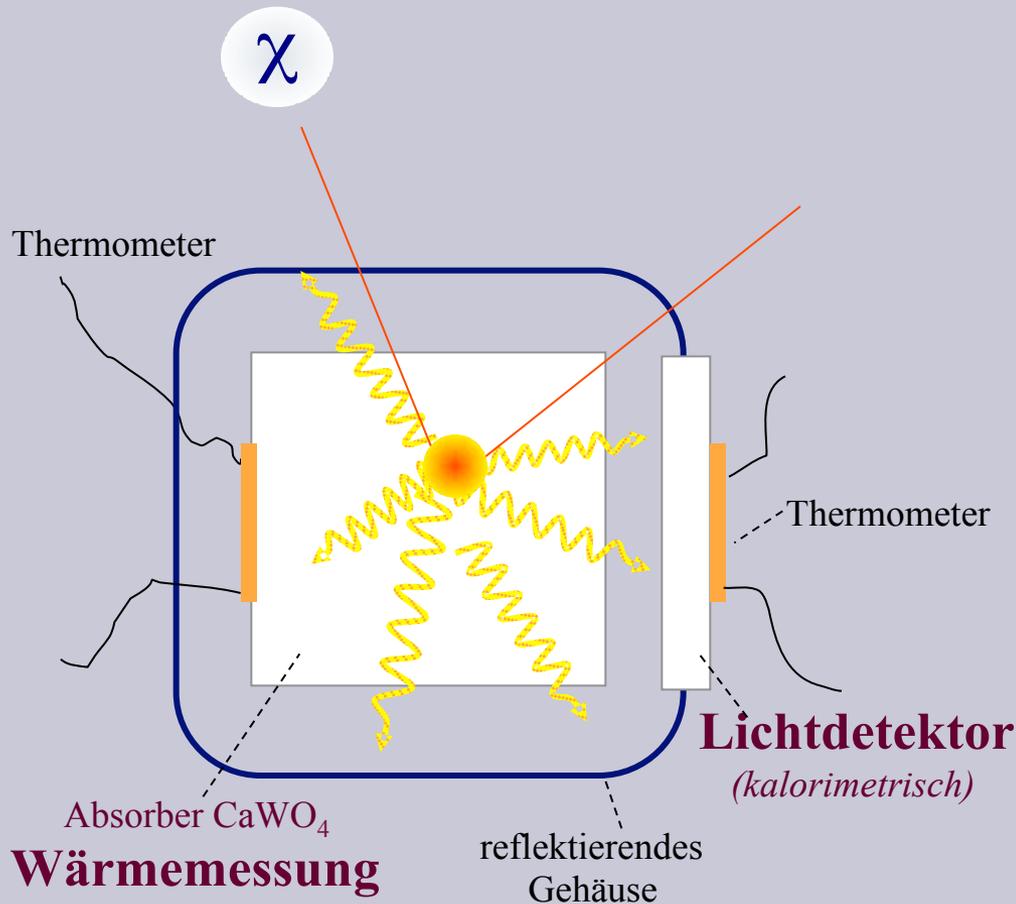
Dunkle Materie

CRESST – Experiment
TU München
Max Planck Physik München
Uni Tübingen
Oxford University



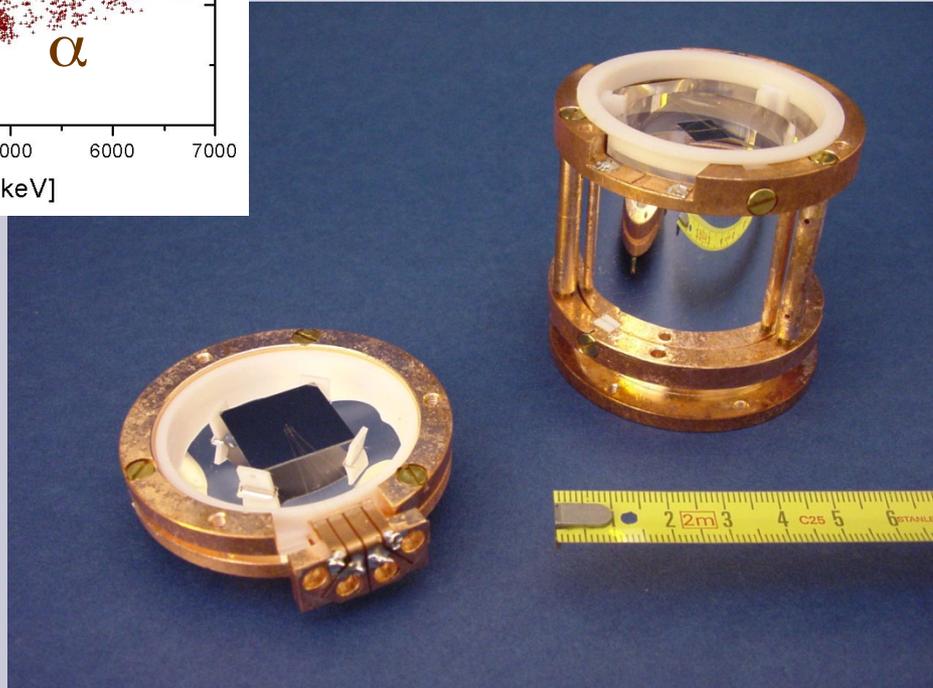
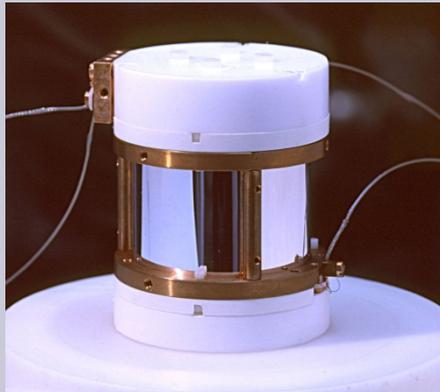
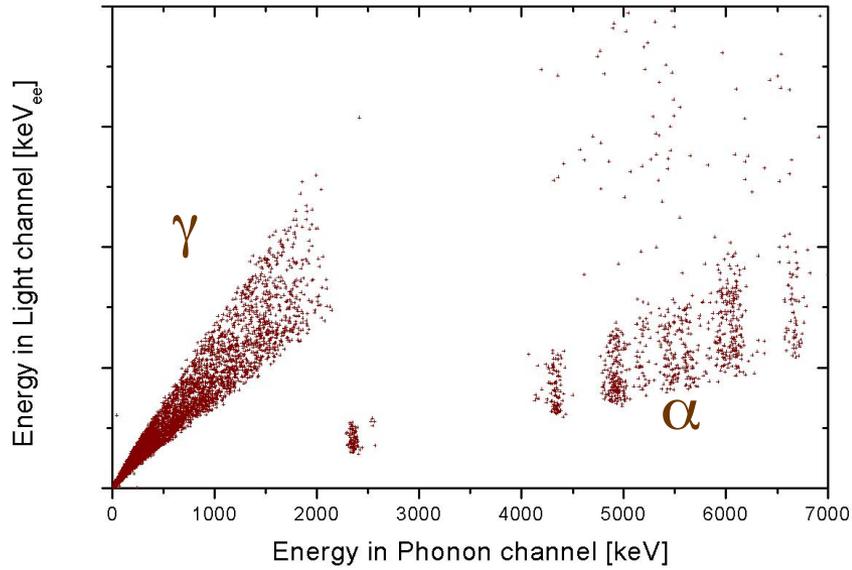
Erkennung von Störsignalen – Messung von Wärme und Licht (Ladung)

Dunkle Materie



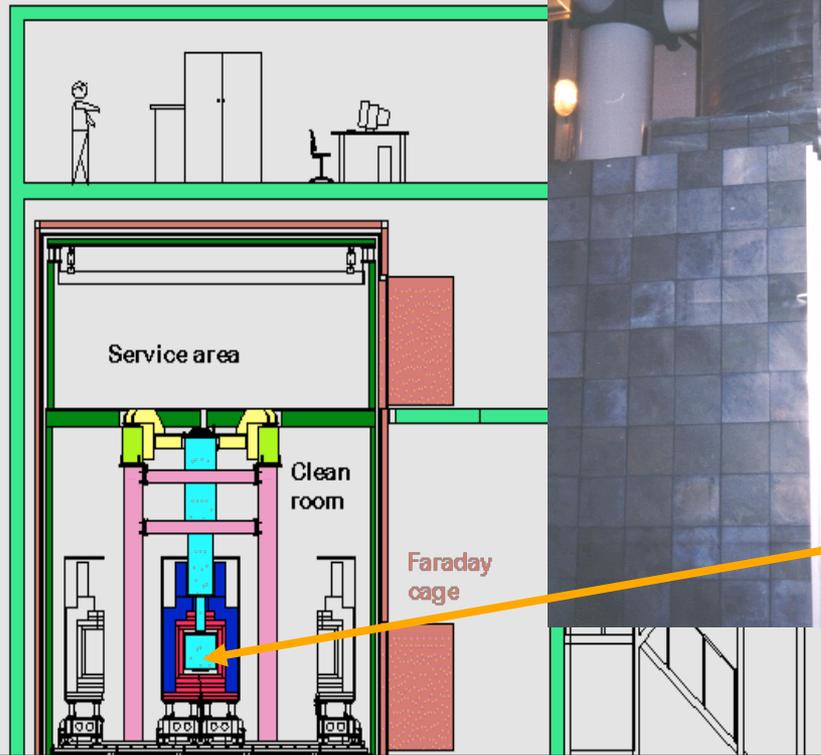
Licht-Wärme Detektoren - Teilchenerkennung

Dunkle Materie



Suche nach Dunkler Materie im Gran Sasso Untergrund Labor

Dunkle Materie



Experiment unter Reinraum-Bedingungen, um Staub (Radioaktivität) zu vermeiden

Dunkle Materie



Suche nach Dunkler Materie im Gran Sasso Untergrund Labor

Dunkle Materie

