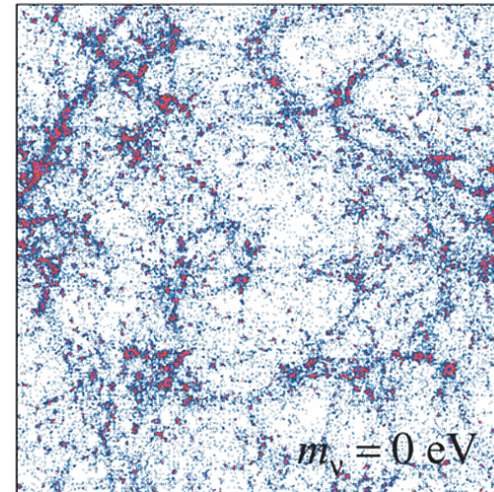
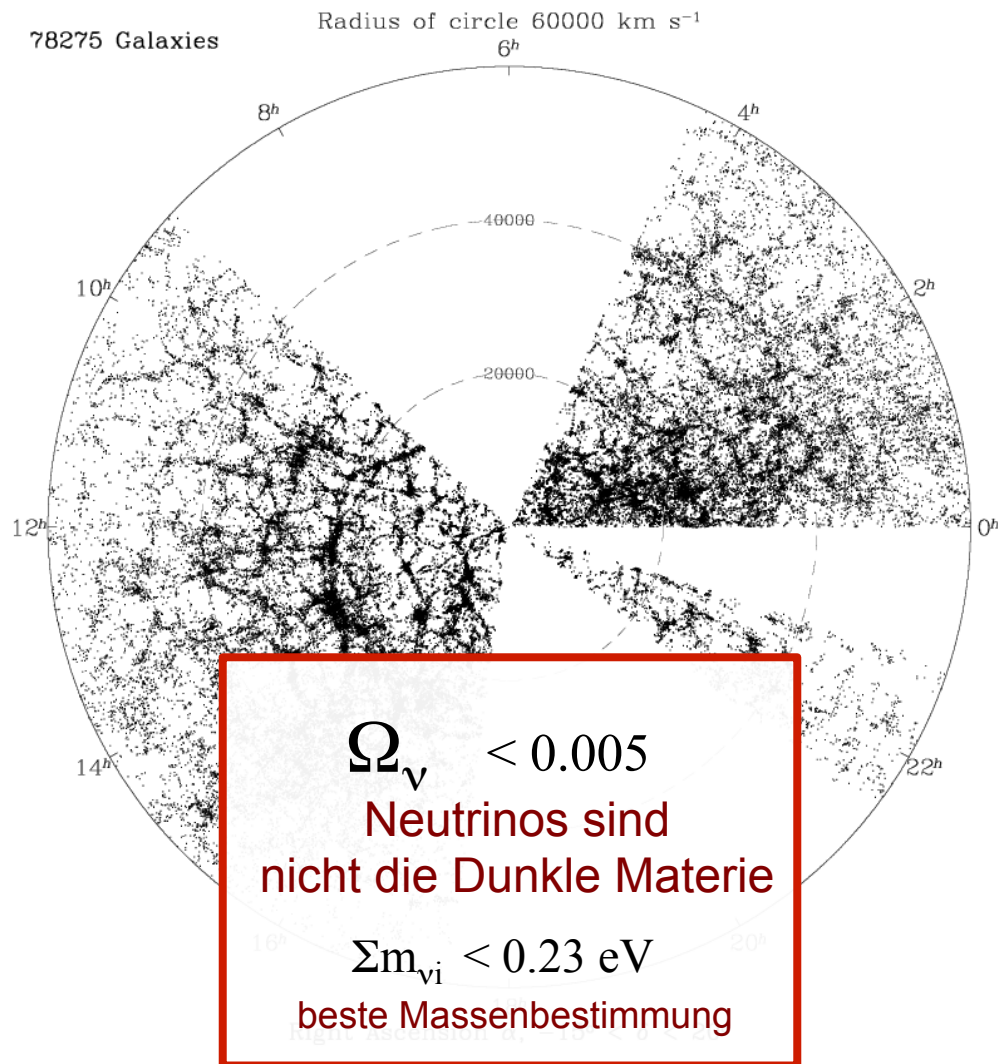


DUNKLE

MATERIE

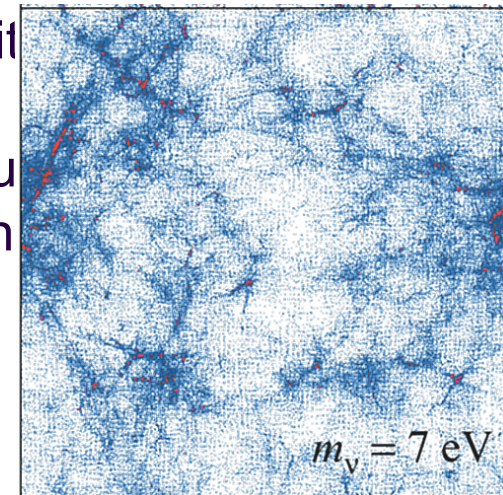
Bildung der Strukturen im Universum



Struktur $\Omega_{\nu} = 0$

Sloan Digital

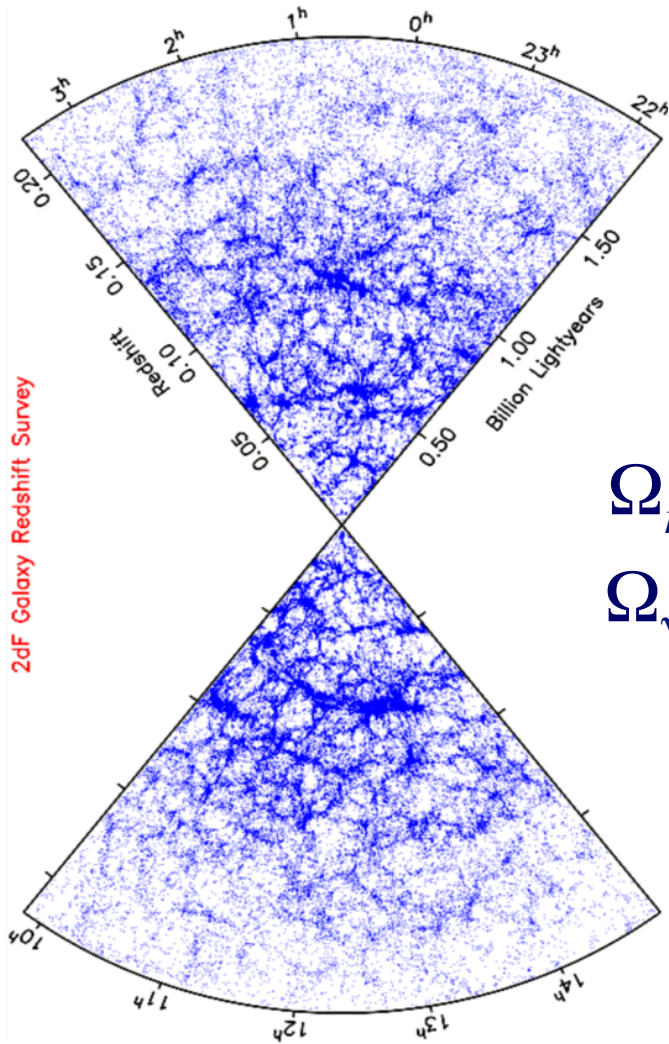
Richtung u
 von Million



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

berechnete
 Strukturen
 mit niedrigem
 und hohem
 Neutrino-Anteil
 äumigen

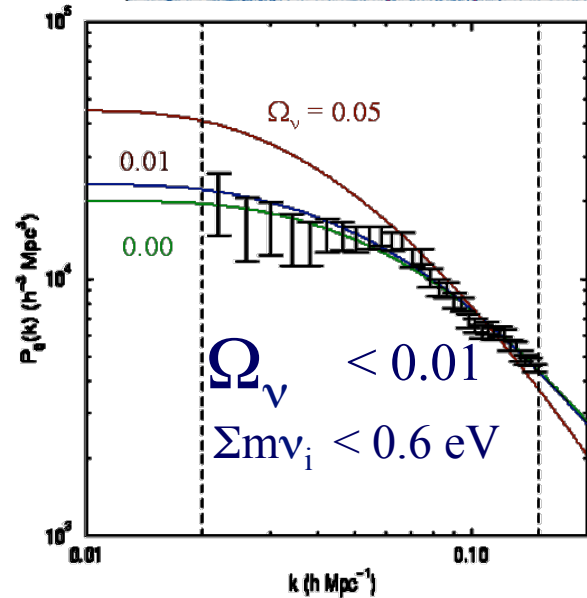
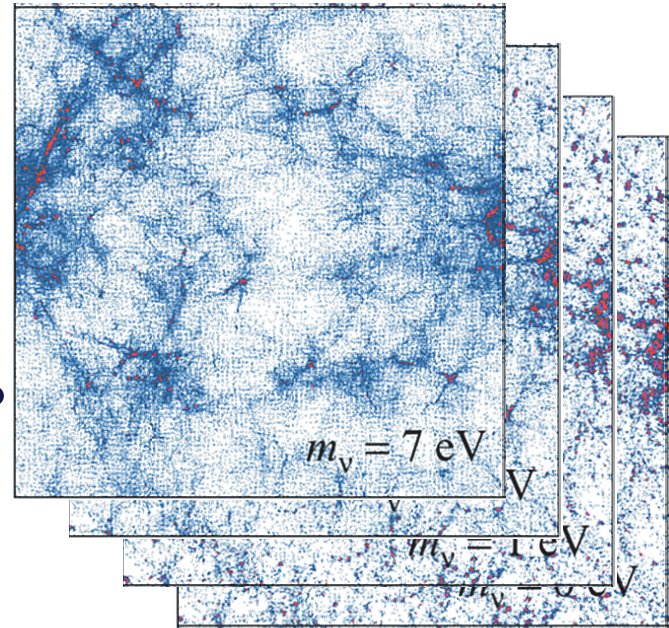
Dark Matter is (mostly) NOT Neutrinos



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**

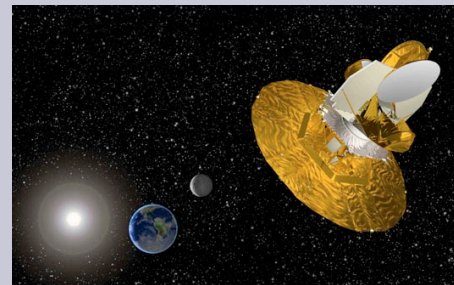
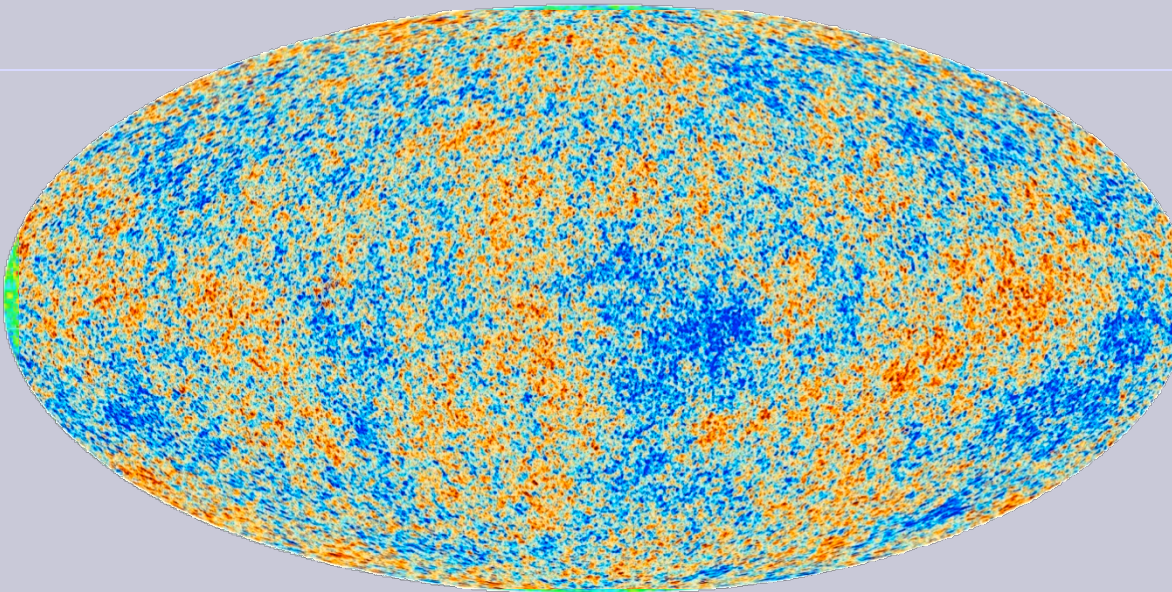
Universum transparent



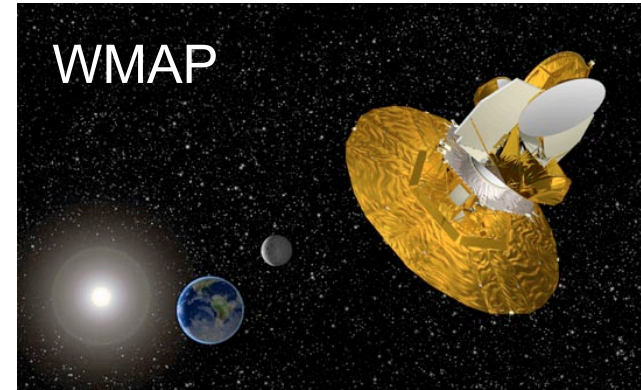
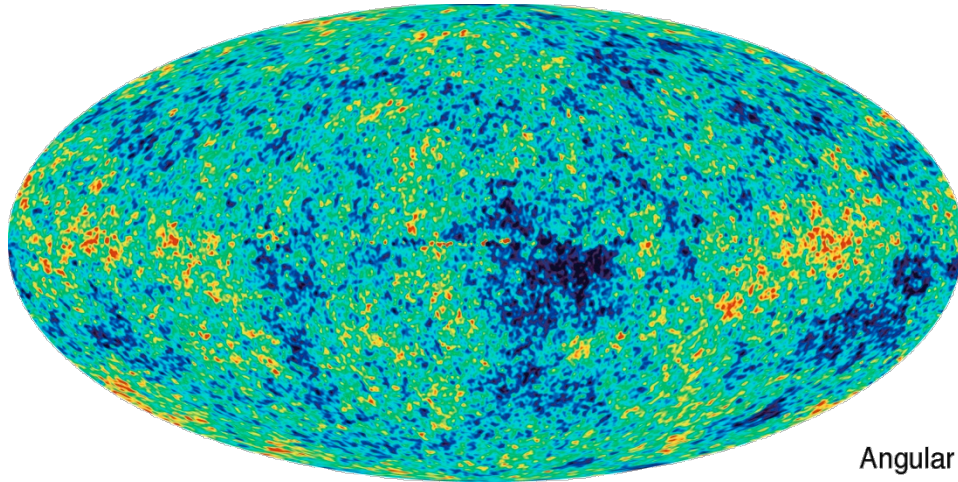
Messung des CMB mit den Satelliten WMAP und PLANCK

Anisotropie des kosmischen Mikrowellen-Hintergrundes

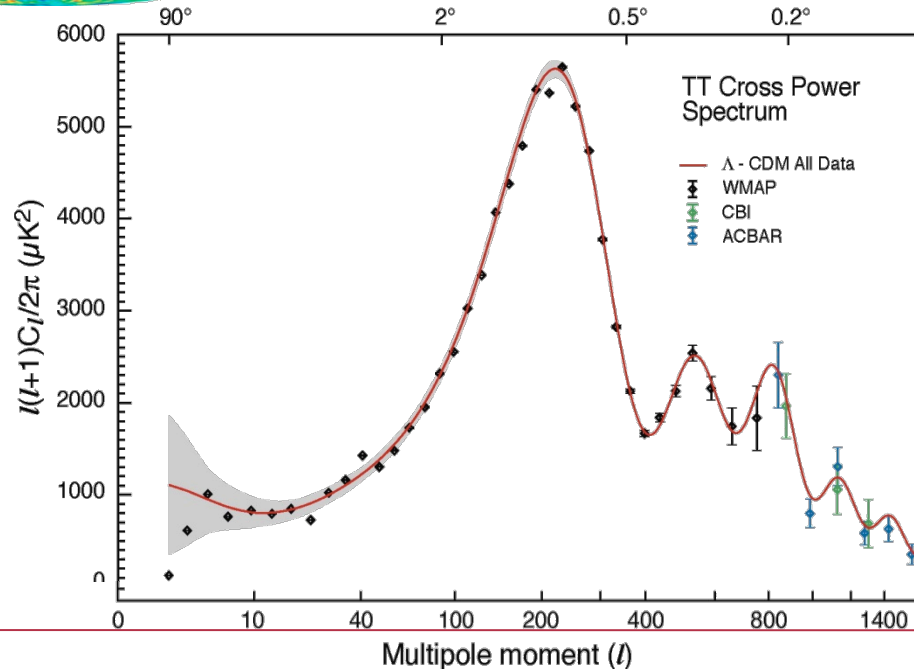
Dunkle Materie



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe



Angular Scale



wie groß ist

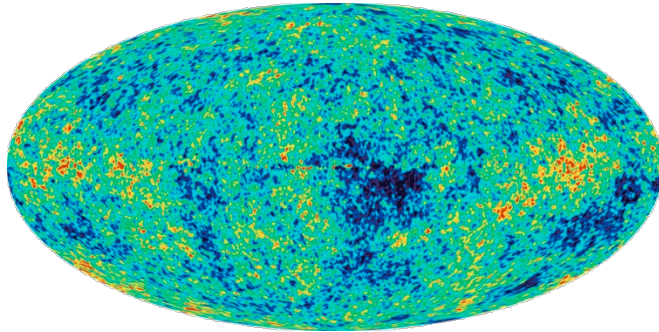
$$\Omega$$

wie ist die
Zusammensetzung
von

$$\Omega$$



Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}

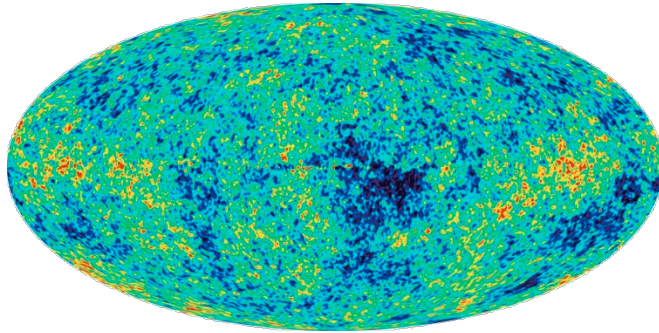


Anisotropie:

Größenskala
Intensitäten

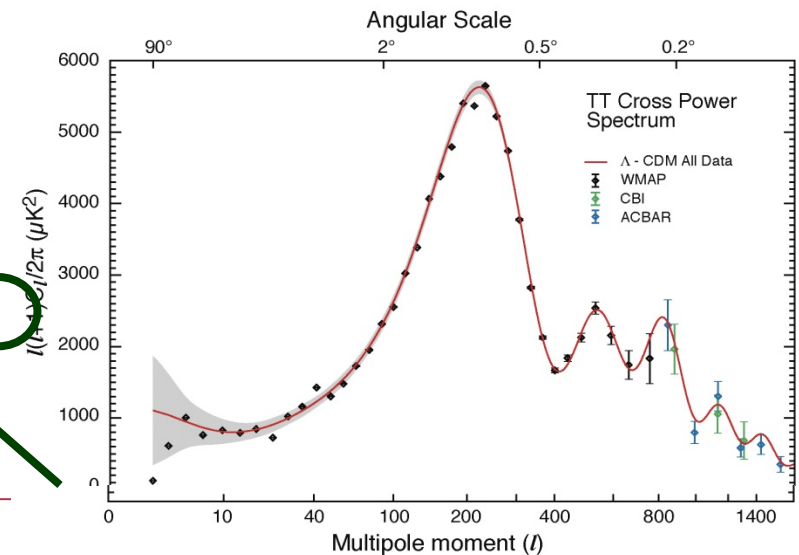
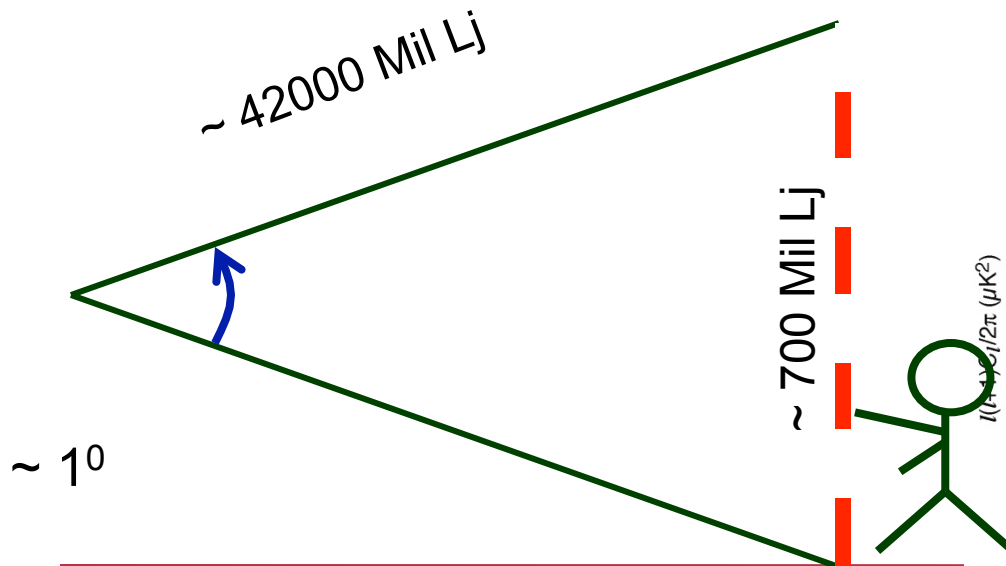
=> Geometrie Ω_{tot}
=> Gravitationspotentiale,
Materiedichten

Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



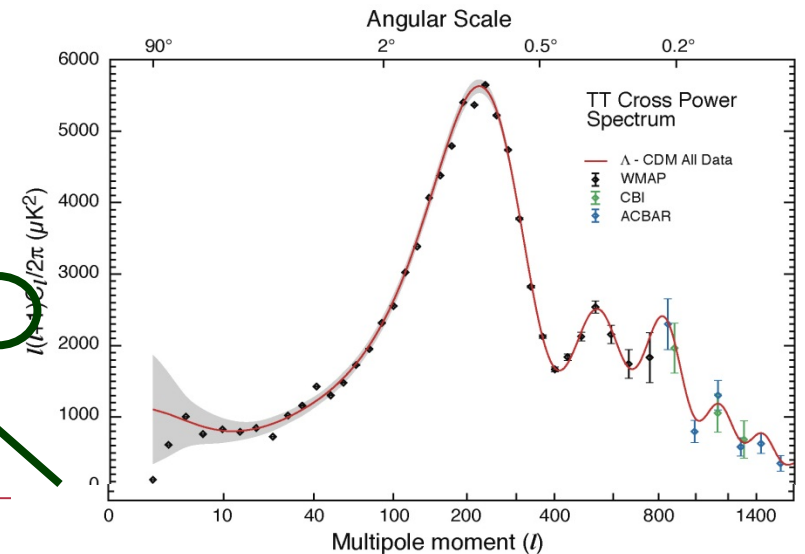
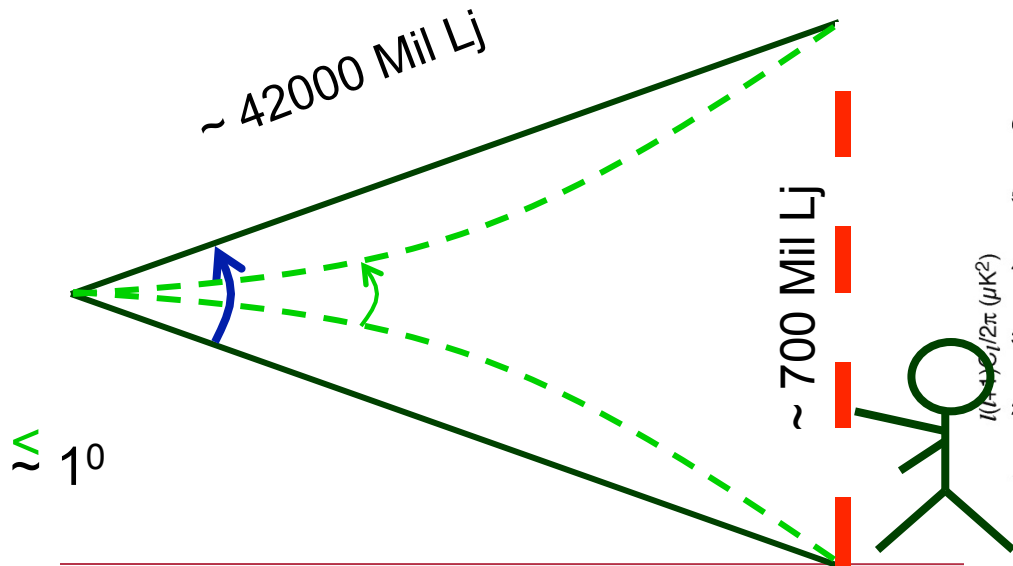
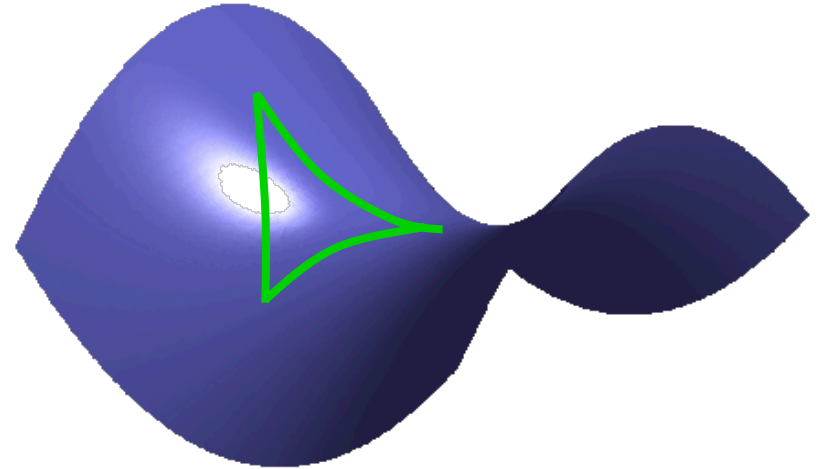
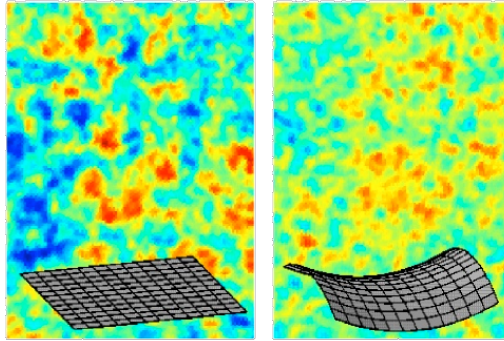
Anisotropie:

Größenskala \Rightarrow Geometrie Ω_{tot}



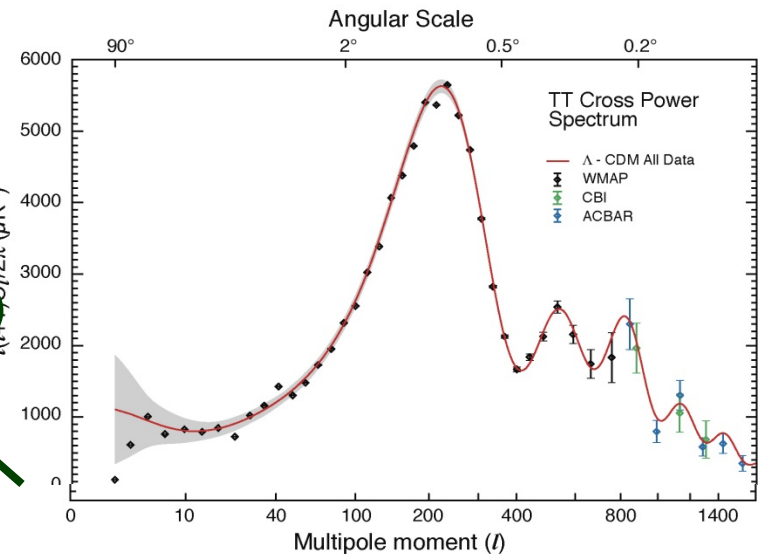
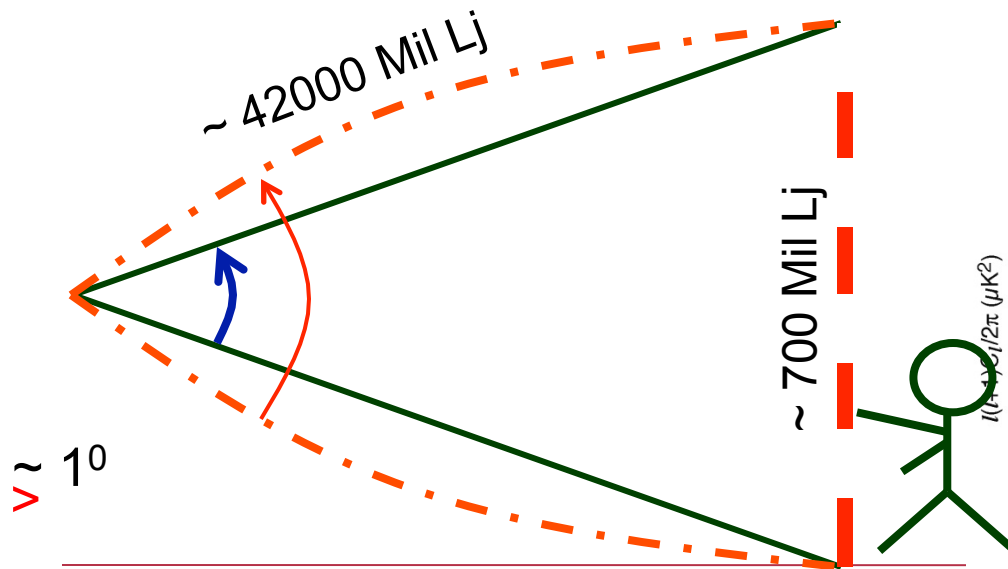
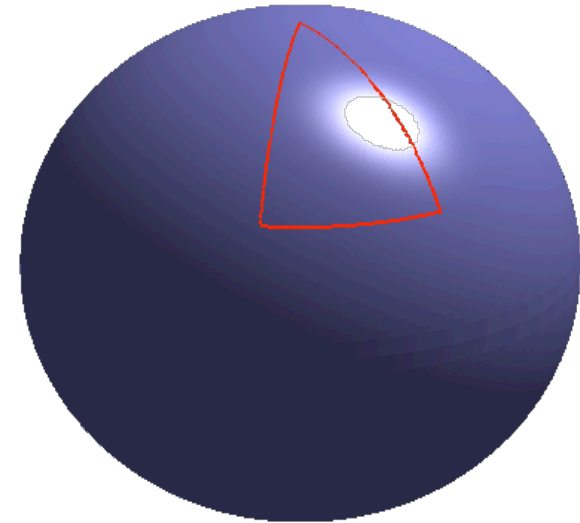
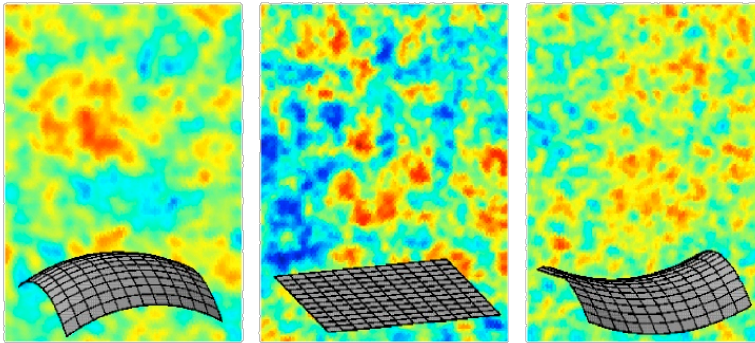


Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



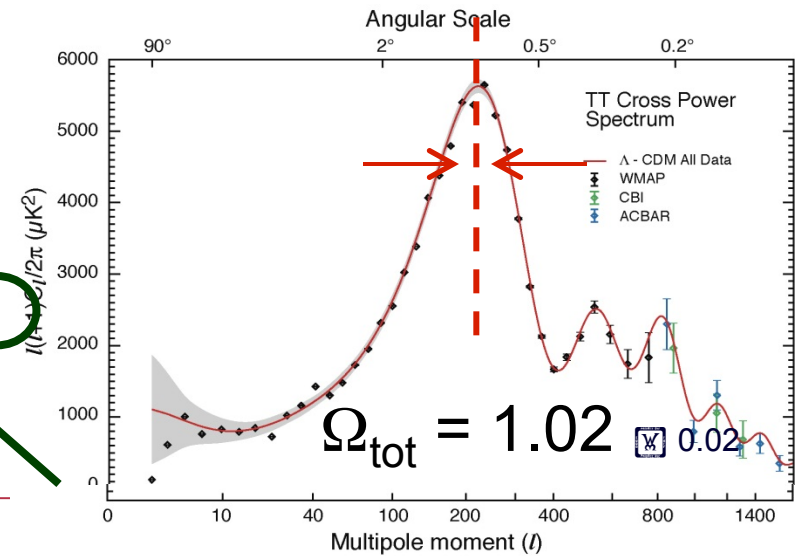
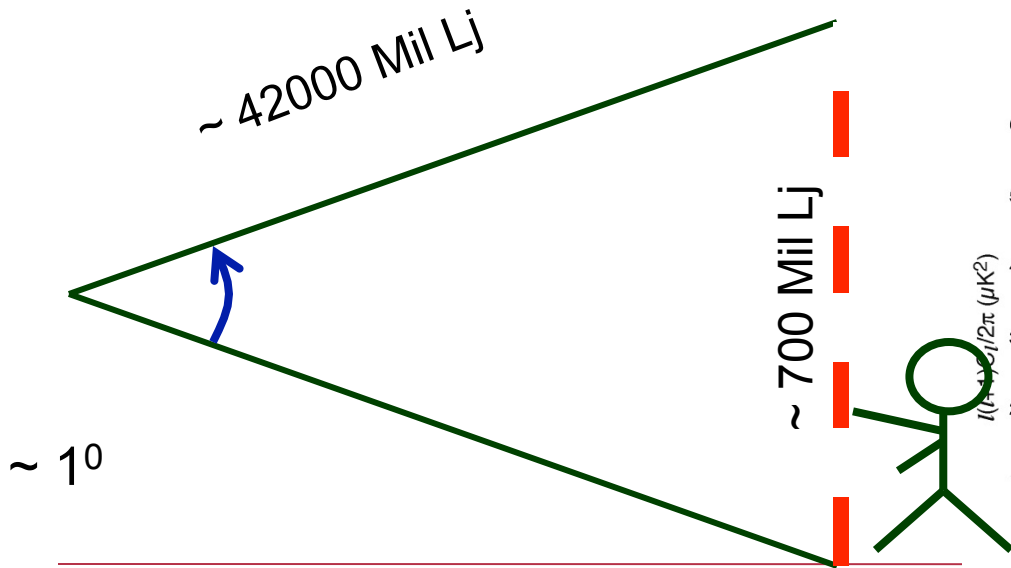
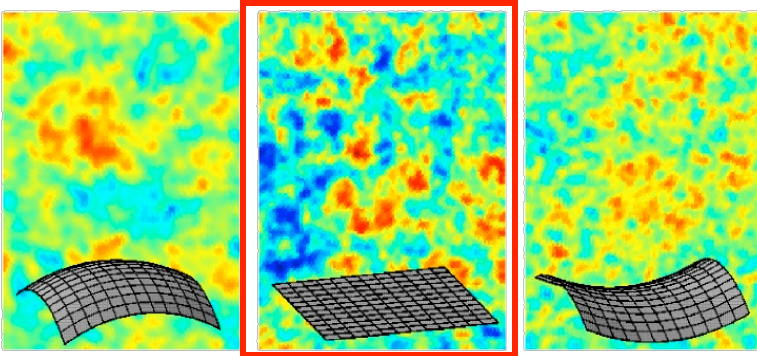


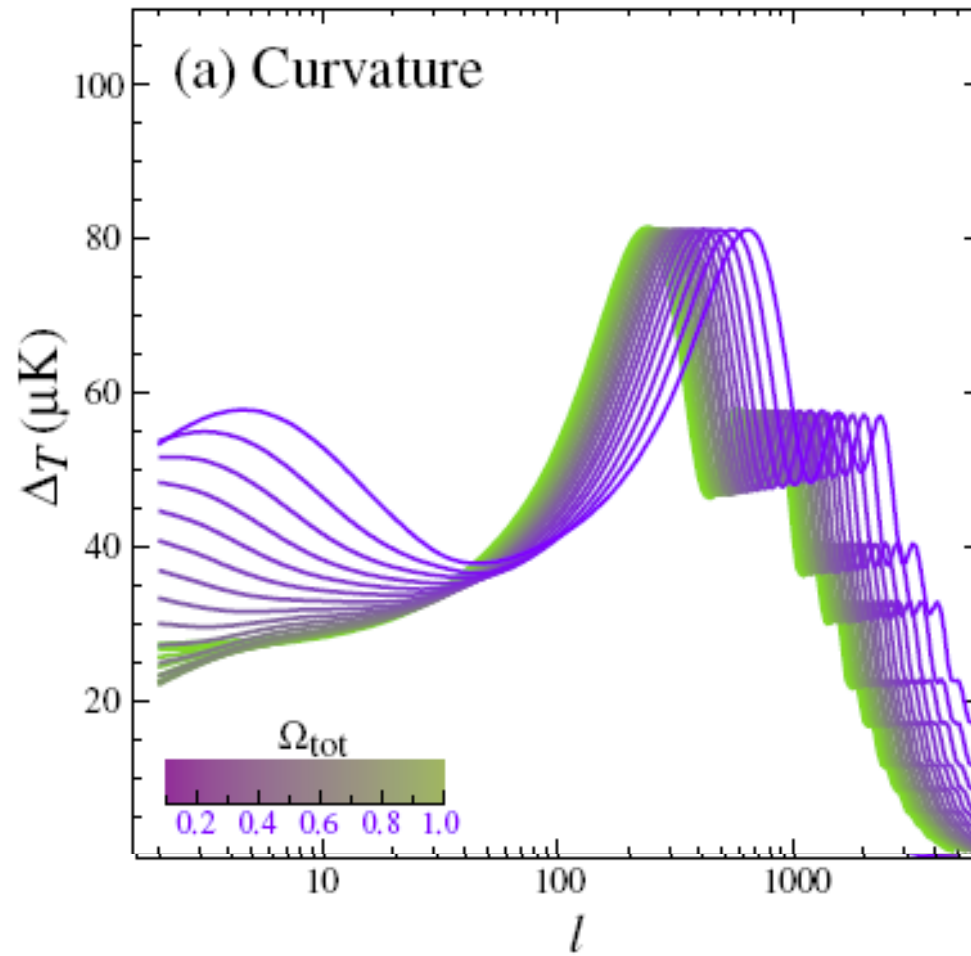
Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}



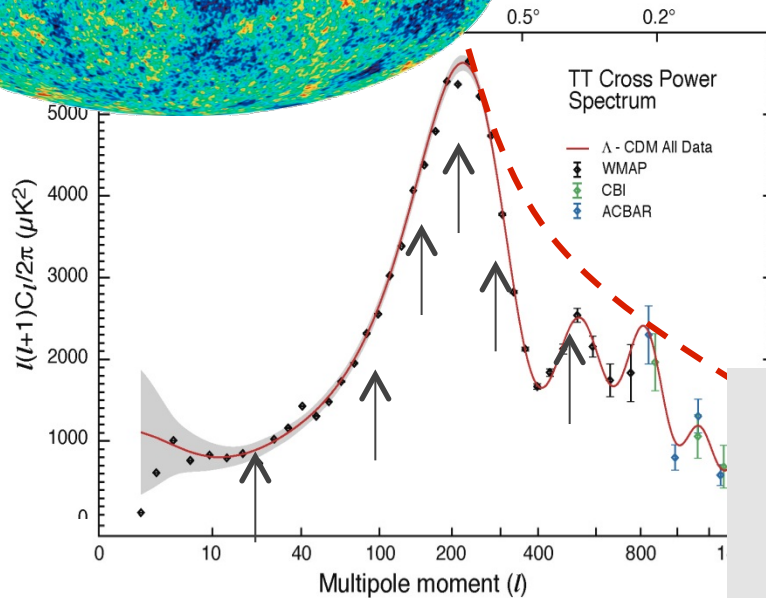
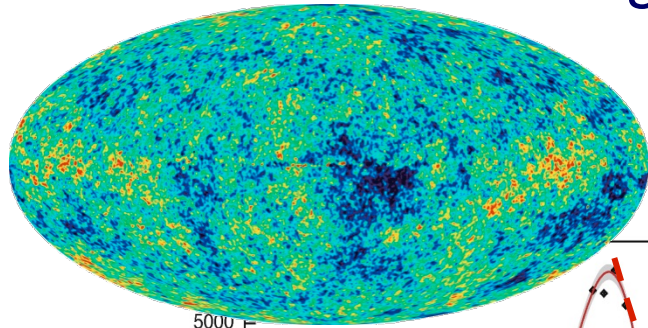


Kosmische Hintergrundstrahlung - Bestimmung von Ω_{tot}





Kosmische Hintergrundstrahlung - Materiedichte Ω_{matter}



Anisotropie:

Intensitäten \Rightarrow Gravitationspotentiale,
Materiedichten

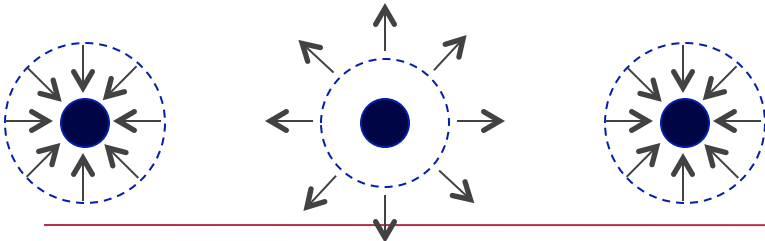
Schwingungsverhalten Zusammenspiel
von Strahlungsdruck und Gravitation

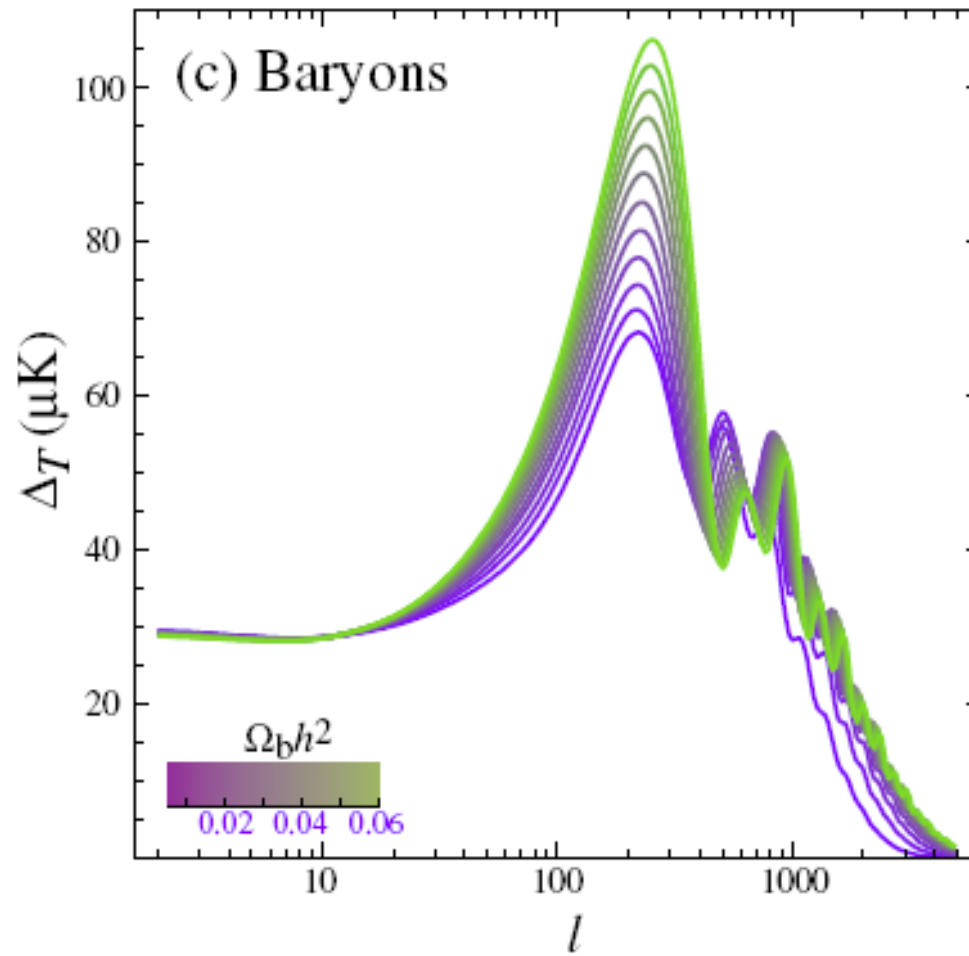
- Gravitation Ω_{matter}
- Kopplung an Strahlung Ω_{baryon}

$$\Omega_{matter} = 0.27$$

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

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

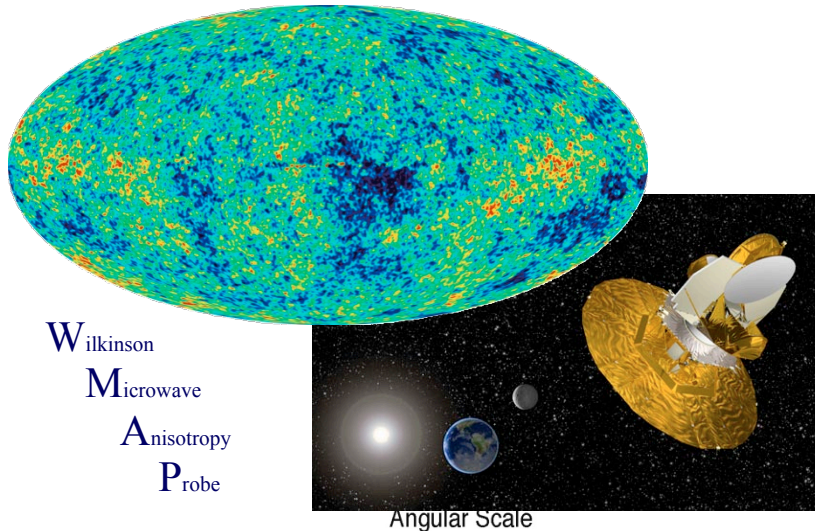






Cosmic Microwave Background

Matter-Density Ω_{matter}



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

$$\Omega_{baryon} = 0.044$$

u

+

d

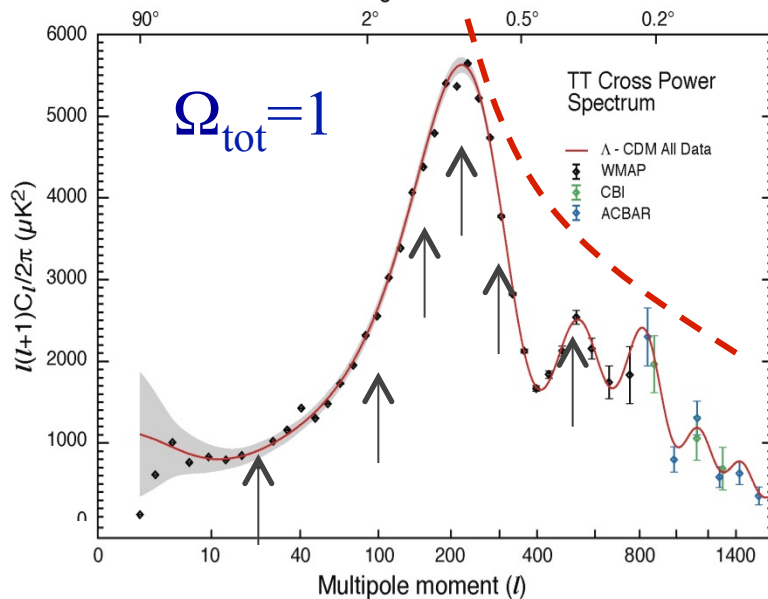
+

e

+

d

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



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

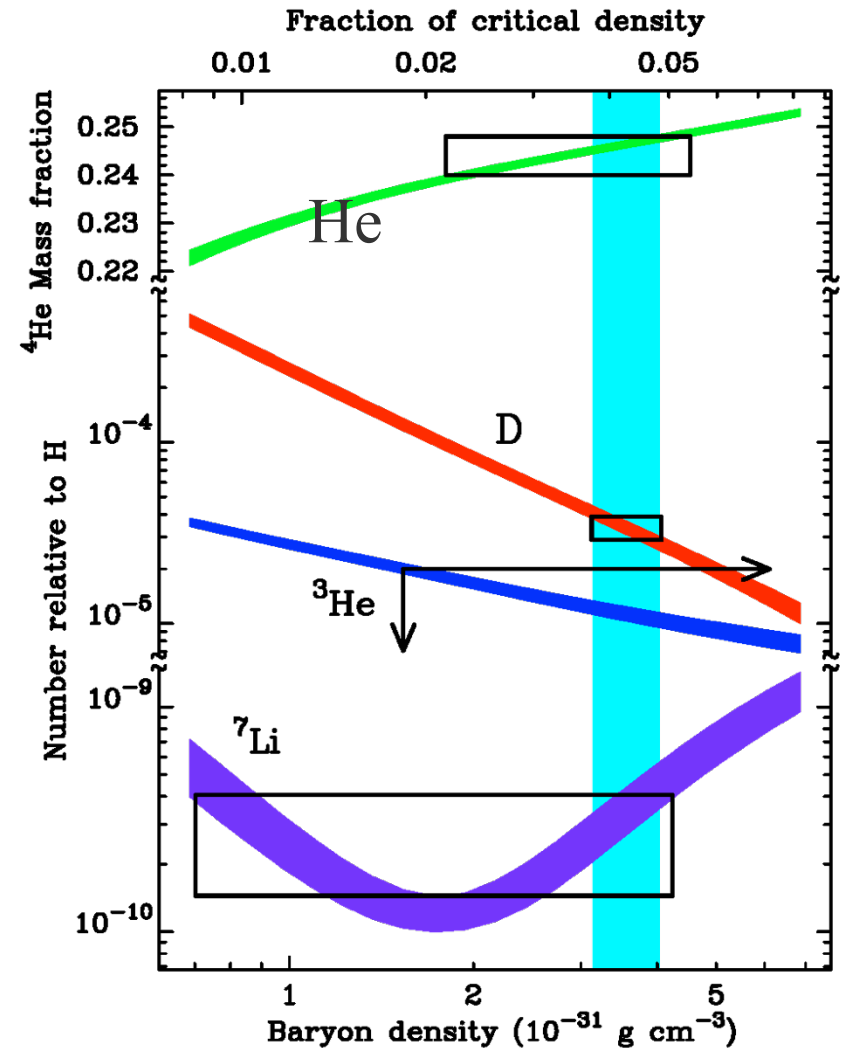
⇒ light element abundance
(He, D, ^3He) ⇒ n/p-ratio

light elements ⇒ baryon density

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

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

(0.01) (0.30)



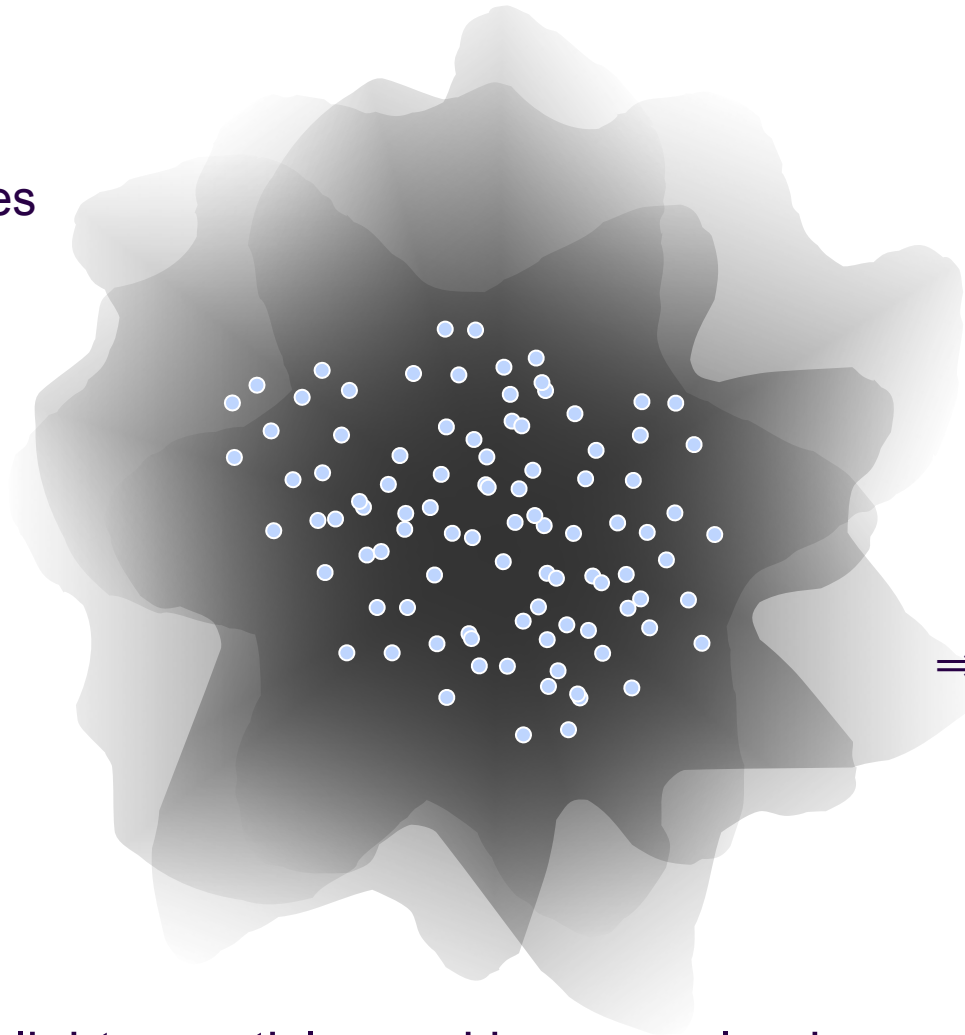


Formation of Structure in the Universe

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

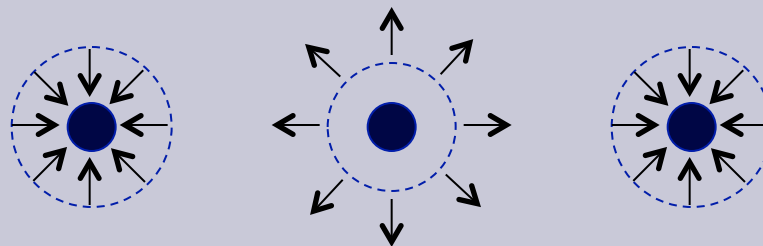
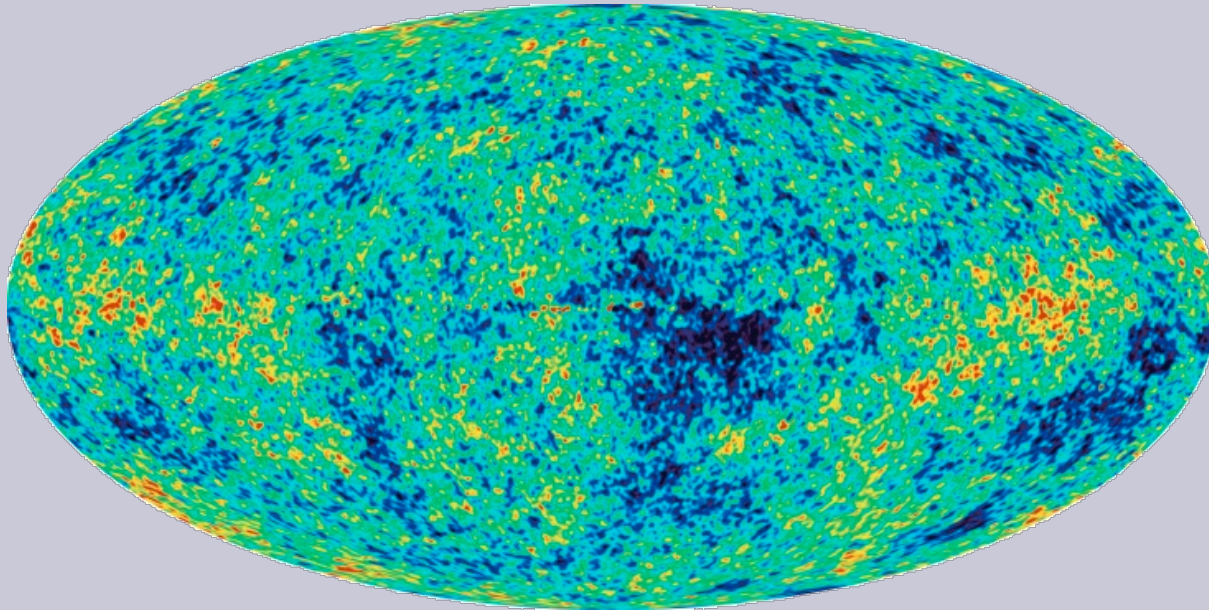
Jeans mass

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

Kosmischer Mikrowellenhintergrund - **CMB**

Dunkle Materie

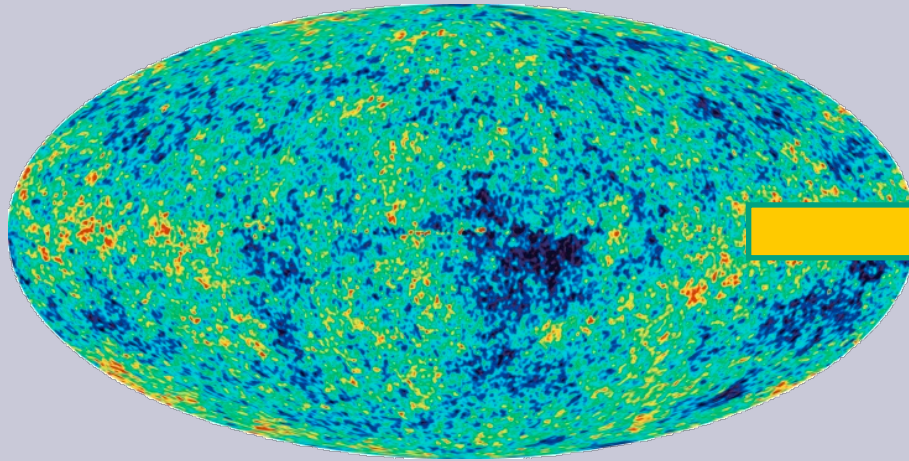
Schnappschuss der Dichteschwankung 380.000 Jahre nach Urknall



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

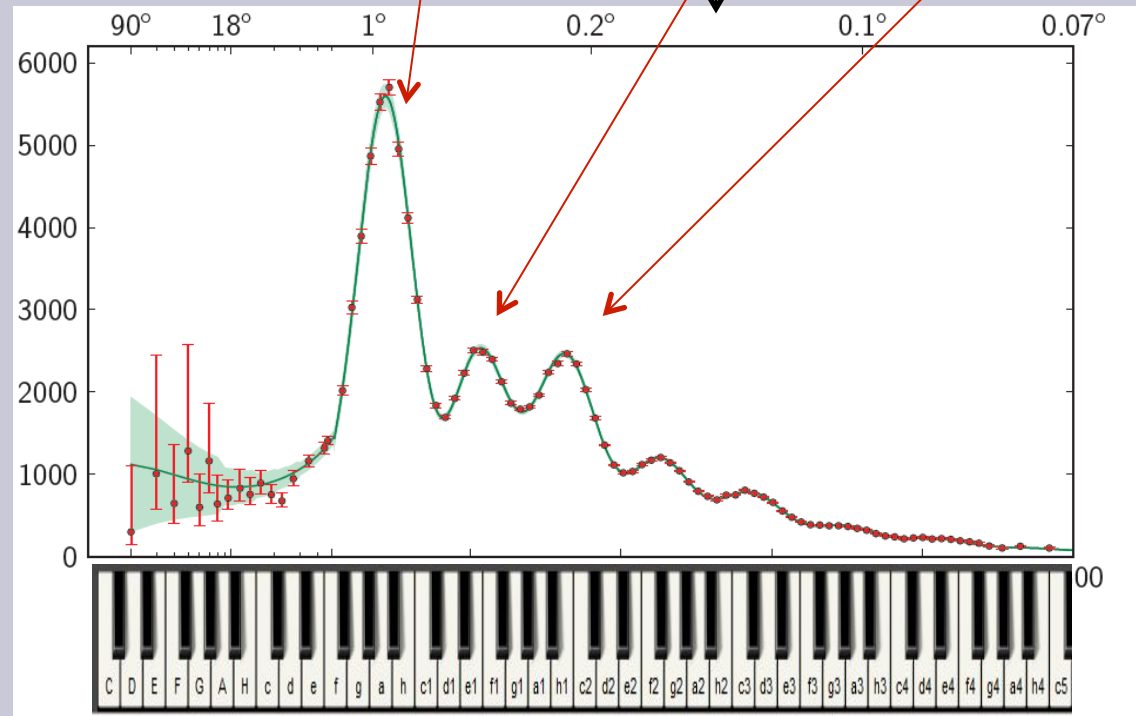
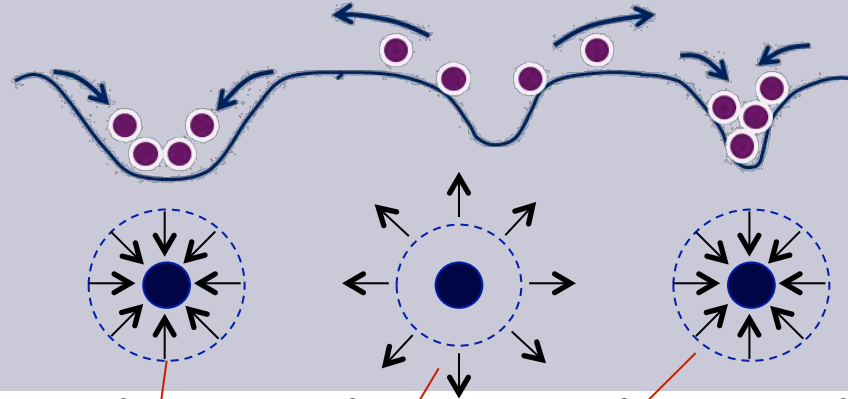
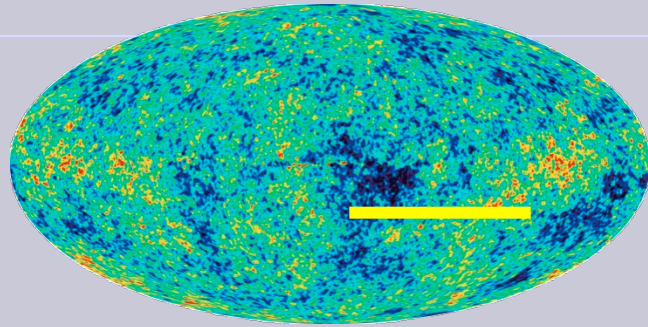
Gab es 100 x größere Schwankungen, die wir im CMB nicht sehen ?

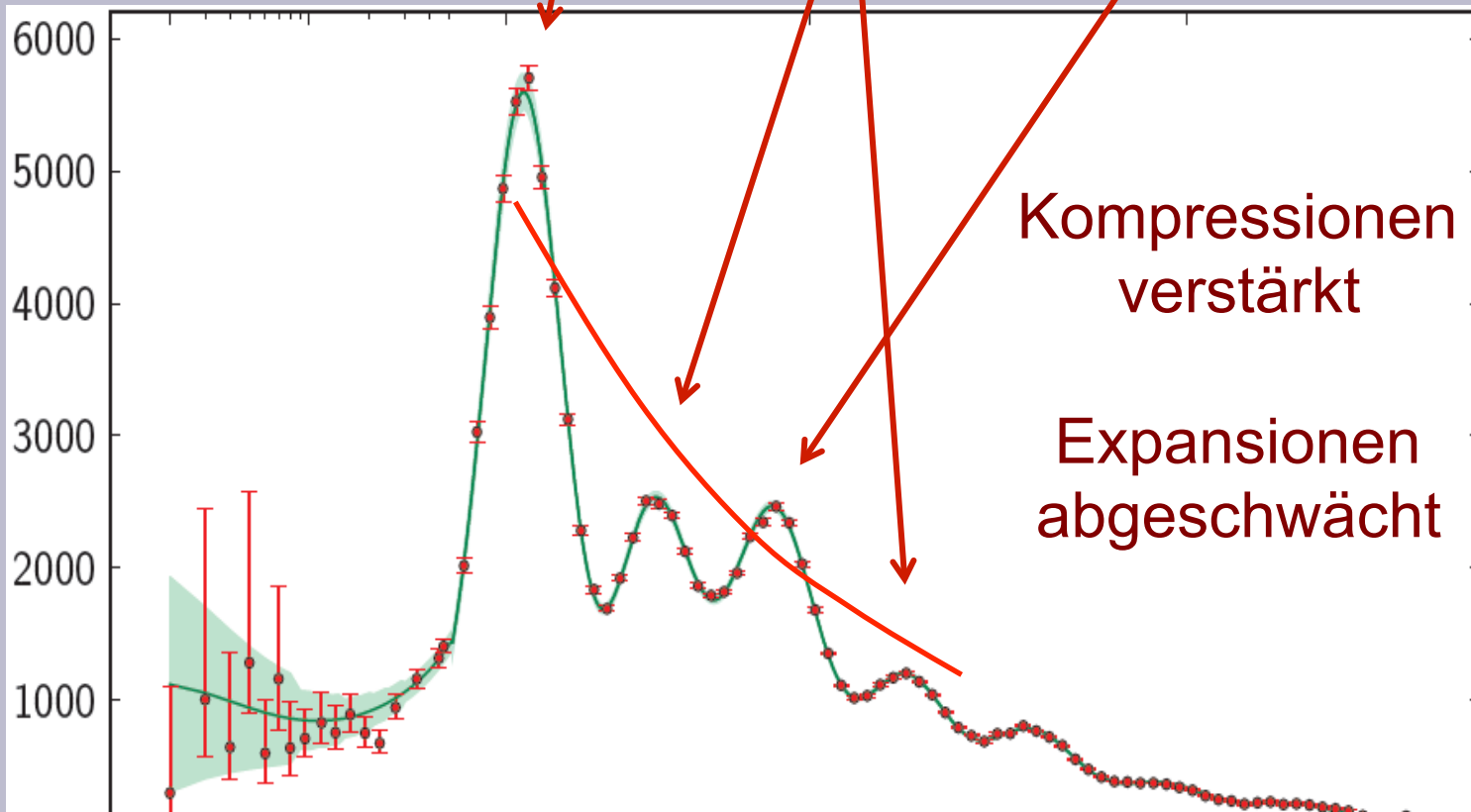
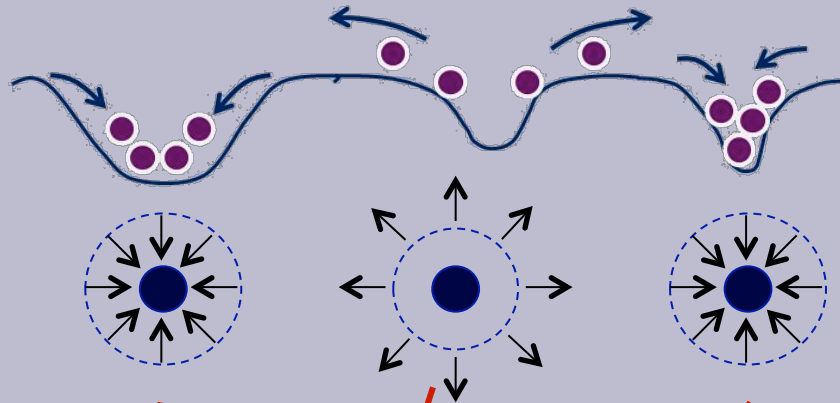
Wenn ja, sind diese aus Teilchen aufgebaut

die NICHT an Strahlung koppeln !

ungeladene Teilchen, nicht Atomkerne, nicht Elektronen

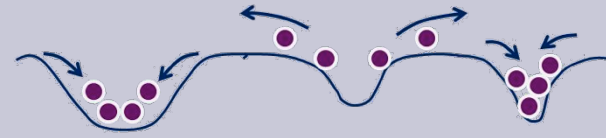
Kompressions- und Expansions-Phasen





zeigt, dass im Hintergrund tatsächlich statische Dichteschwankungen vorhanden waren

geladenen Teilchen (sichtbar im CMB)

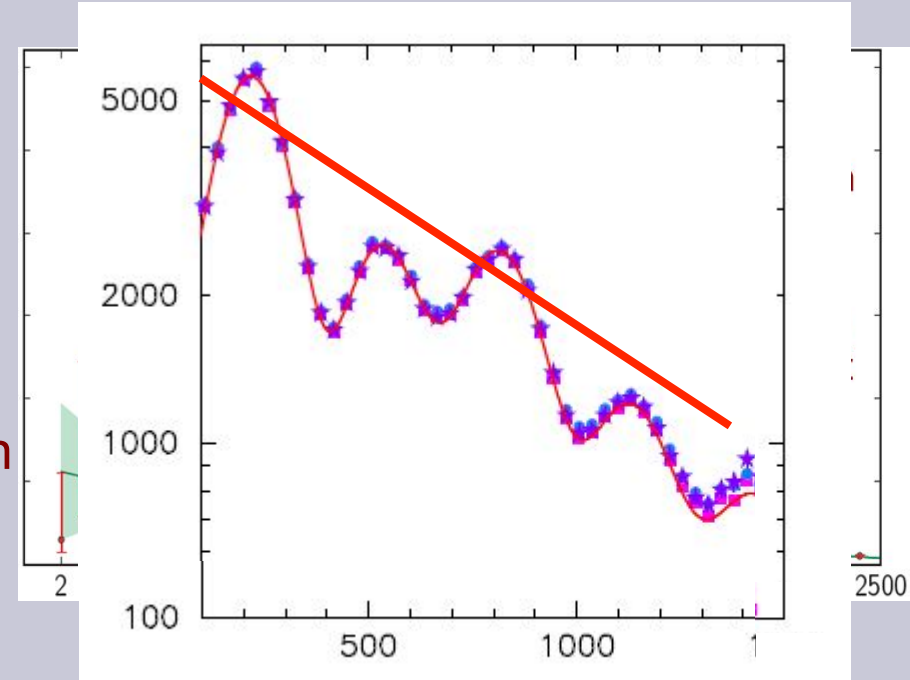


fallen in schon vorhandenen Verklumpungen hinein

⇒ Verstärkung der Kompression
Anziehungskraft 'hilft'

müssen beim Zurückschwingen aus den Verklumpungen herausklettern

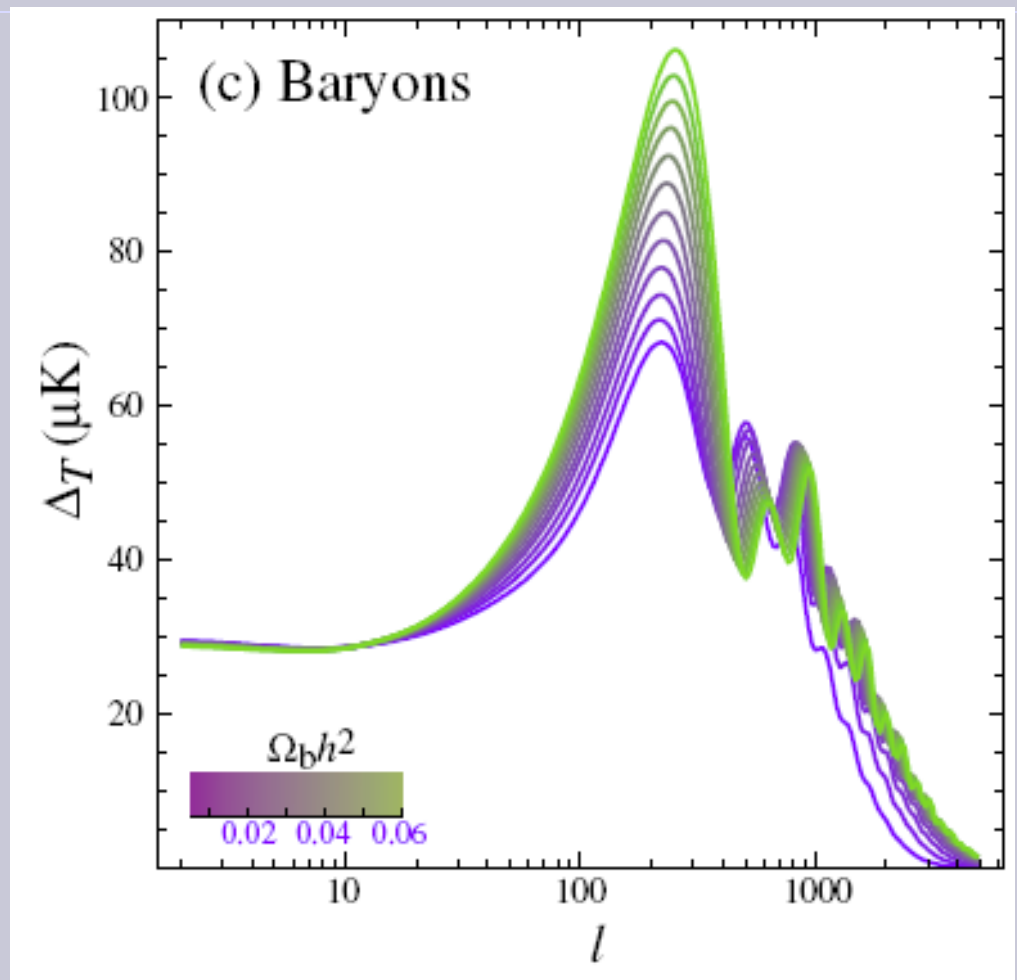
⇒ Abschwächung der Expansion
Anziehungskraft wirkt entgegen



es gab schon Strukturen im Gravitationsfeld

gebildet durch Materie, die nicht mitschwingt

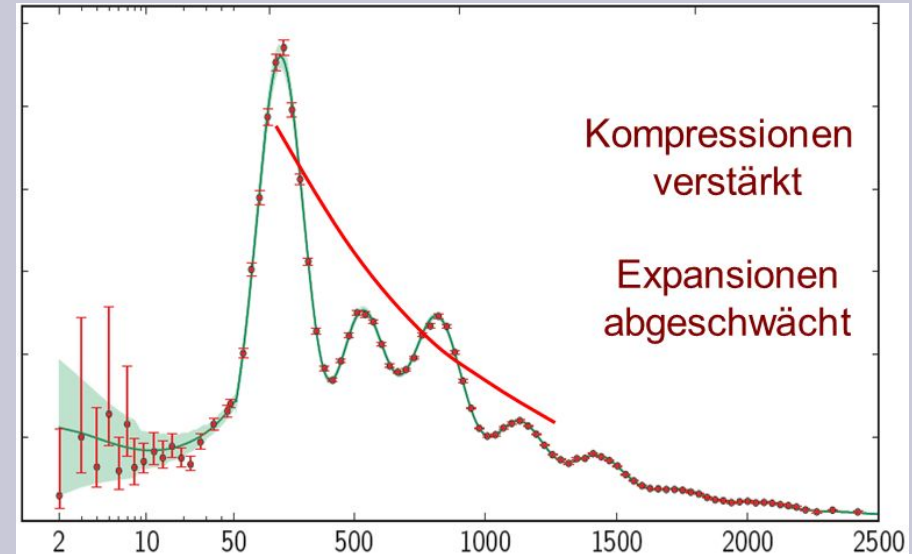
⇒ **aus NICHT geladenen Teilchen**





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

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

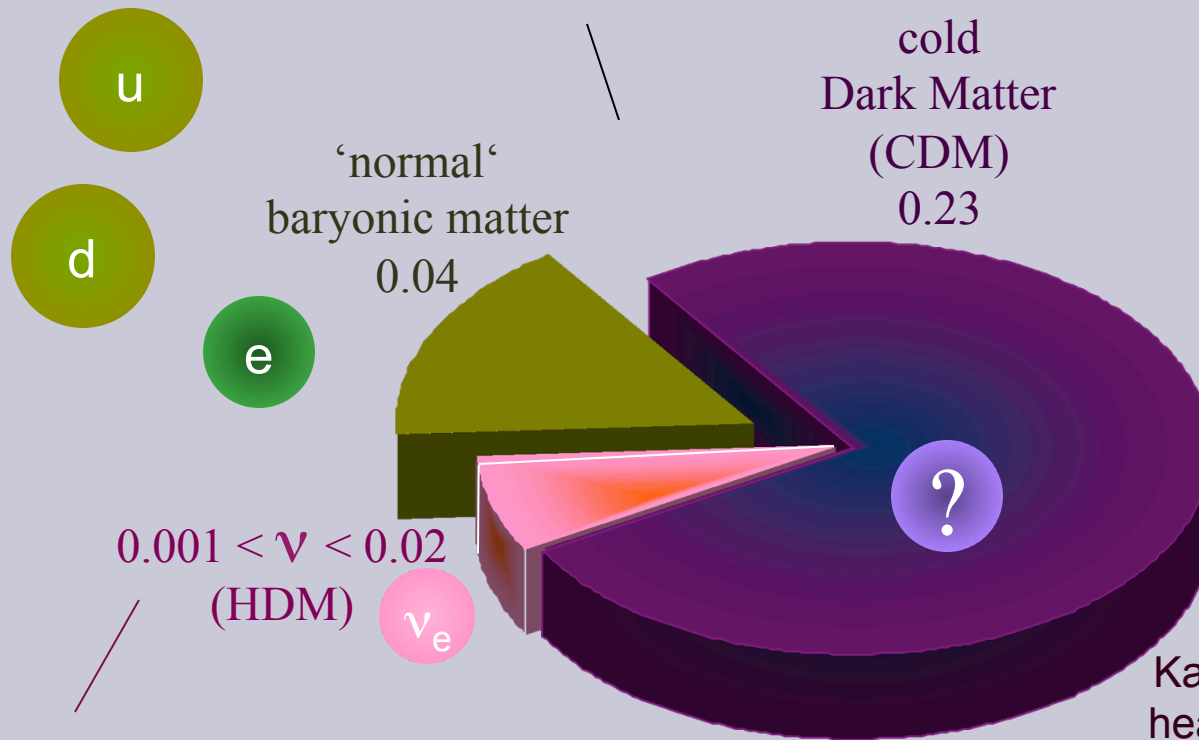
' ν too light' =>
most of the
Dark Matter
is cold

of so far unknown
weakly interacting,
massive particles
WIMPs

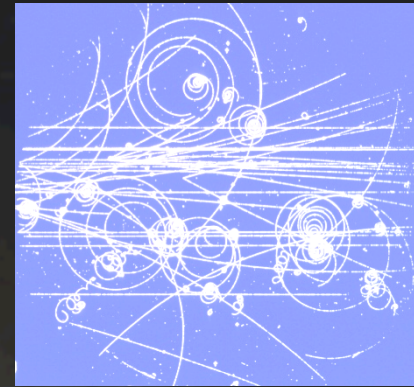
(50GeV~1000GeV
Neutralino?)

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}

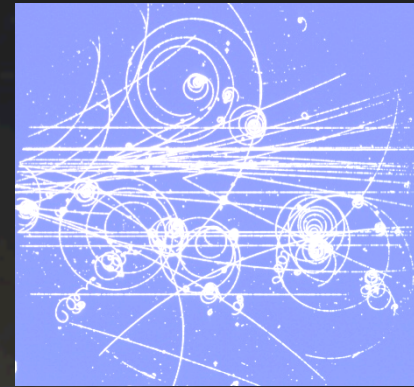
4-6 %

⇒ **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 %

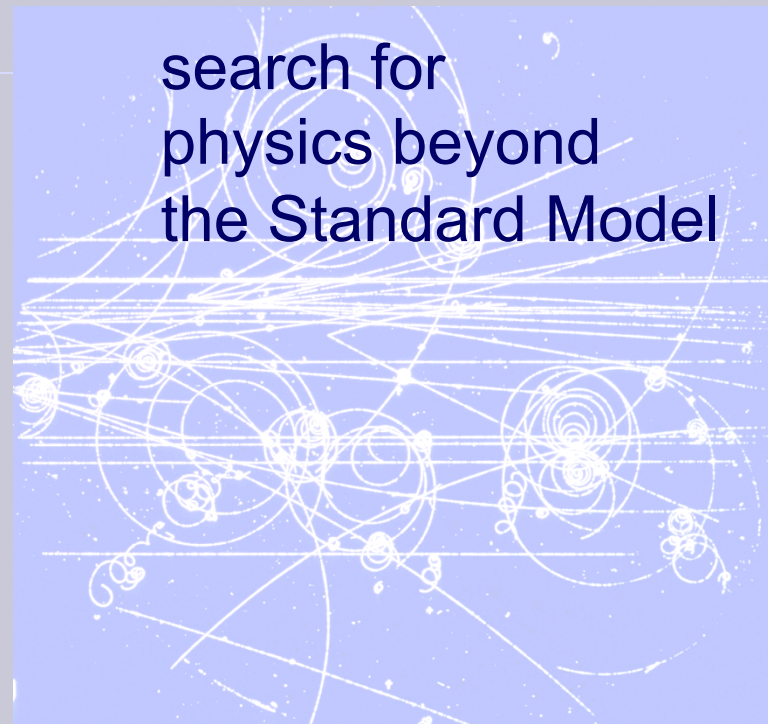
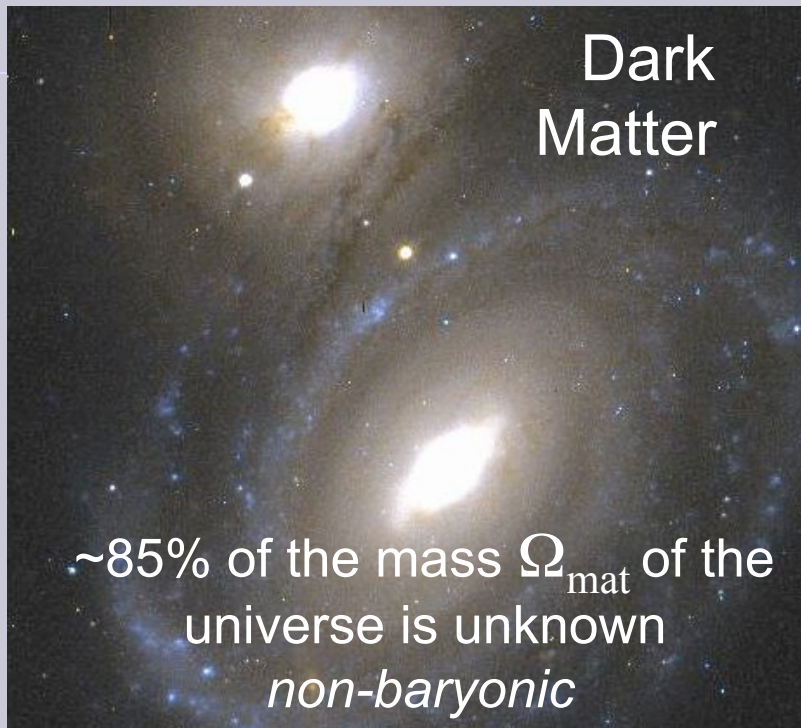
vielleicht 4 %

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

Particle Physics

new elementary particles

QCD: Axions

supersymmetry: Neutralinos
Gravitino

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

➡ perfect particle Dark Matter candidates (WIMP)

Elementary Particles in the early Universe Thermal Relics

Dunkle Materie

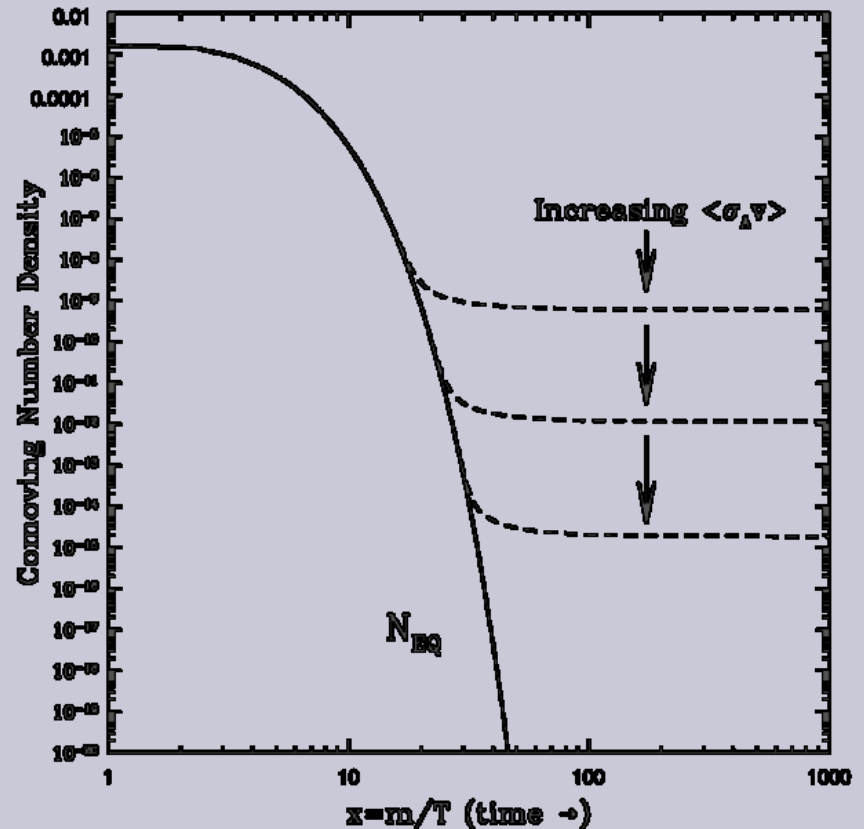
as long as $T \gg m_\chi$ $\chi\bar{\chi} \leftrightarrow \ell\bar{\ell}$
density n_χ is constant

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

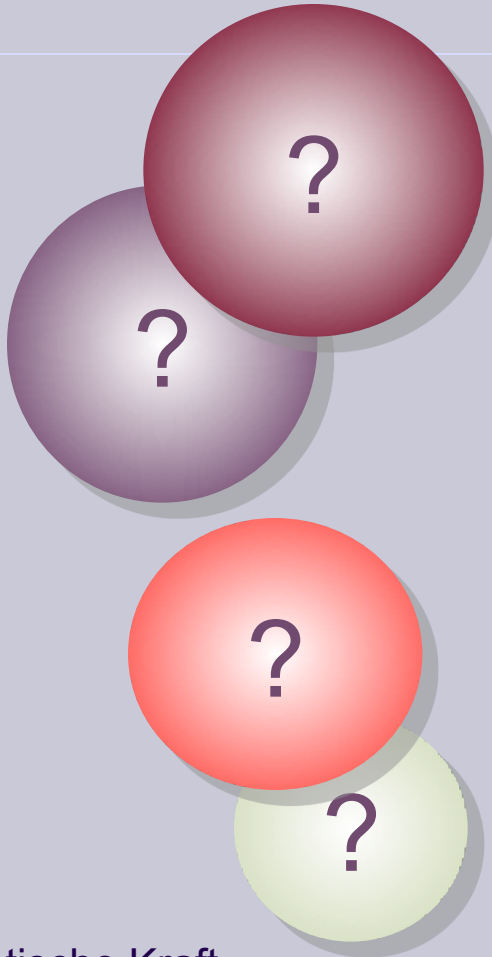
'Freeze Out'density $n_\chi \sim \frac{1}{\sigma_\chi}$

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



of the order of weak interaction
and mass ~ 10 GeV – 1000 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

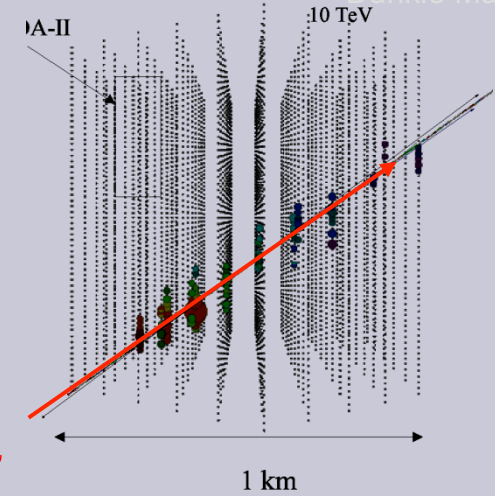
weakly interacting massive particle

im Eis

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

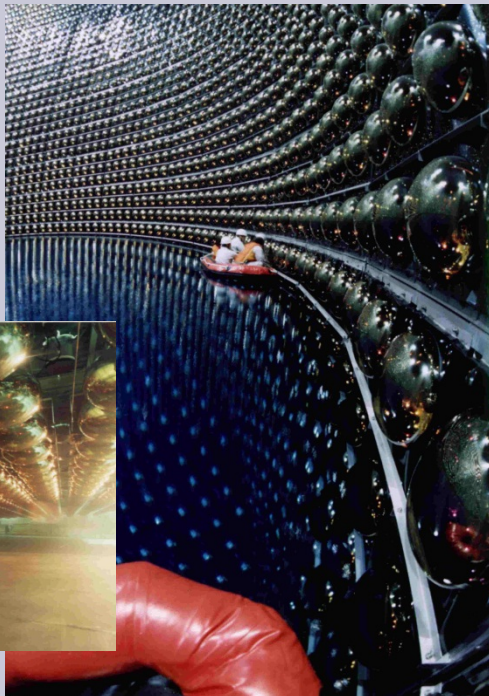


WIMP Indirekter Suche - Neutrino Teleskope -



ν_{μ}

**SuperK
aufsteigende
Myonen**



**ANTARES, KM3Net
im Mittelmeer**

im Wasser



WIMP Indirekter Suche - Neutrino Teleskope -

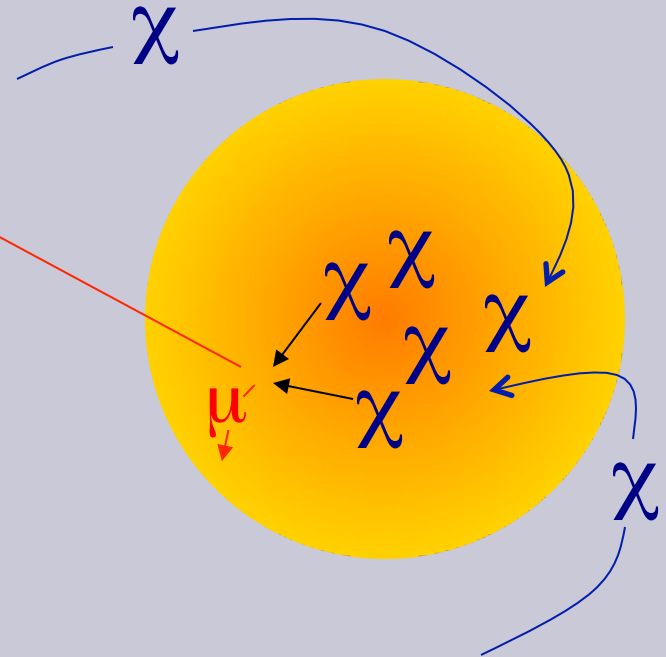


Suche nach hochenergetischen
Annihilationsprodukten

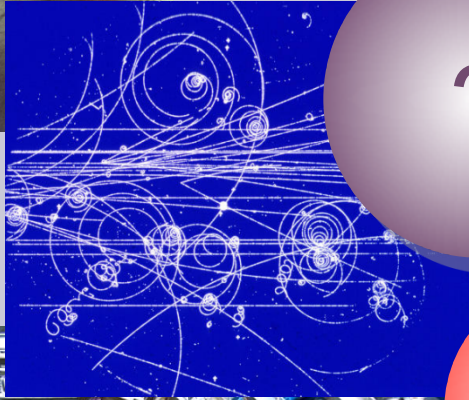
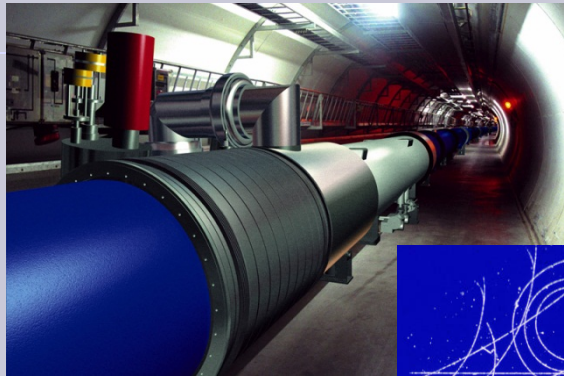
*z.B. sehr hochenergetische
Neutrinos aus der Sonne*

ν_μ

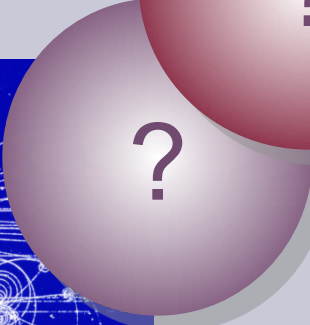
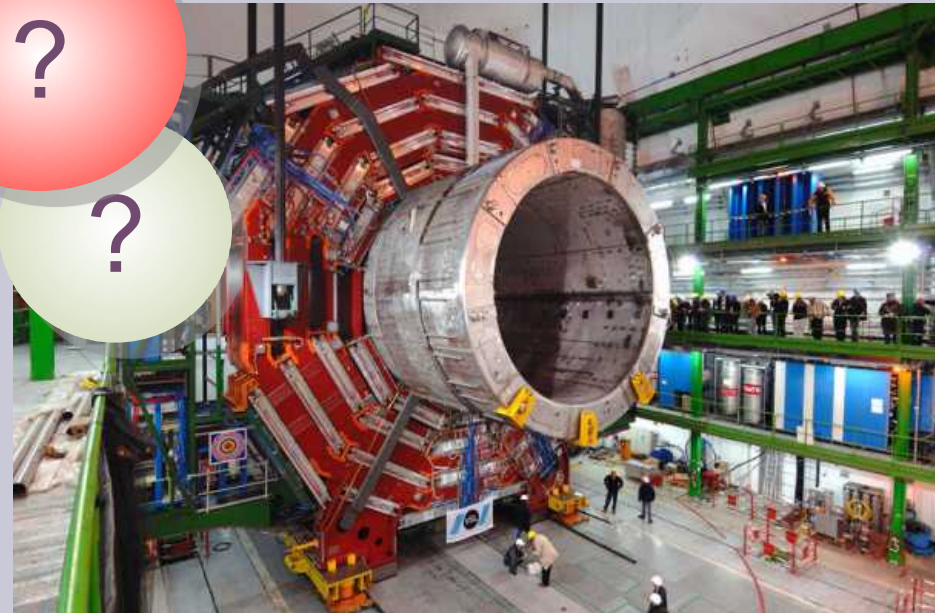
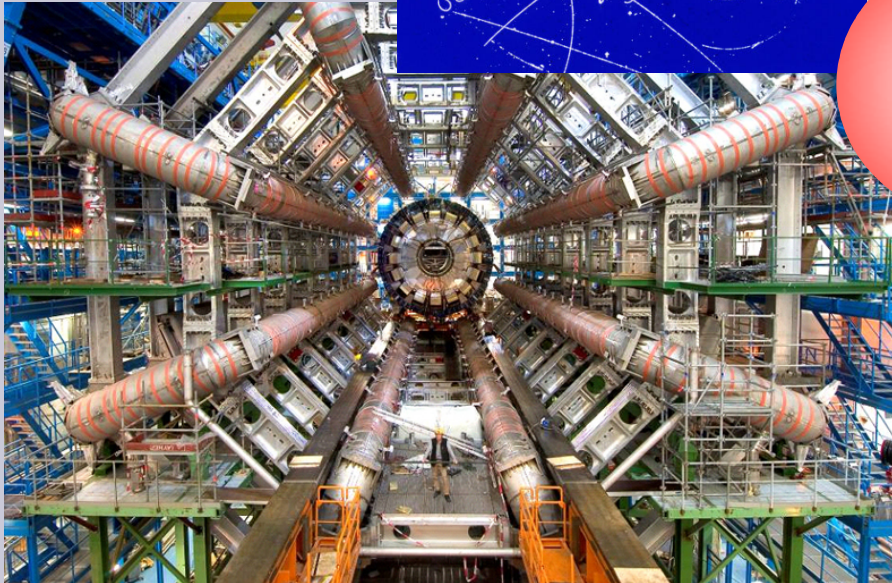
WIMP Überdichte in
Sonne, Erde, galaktischen Zentrum



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, ...*

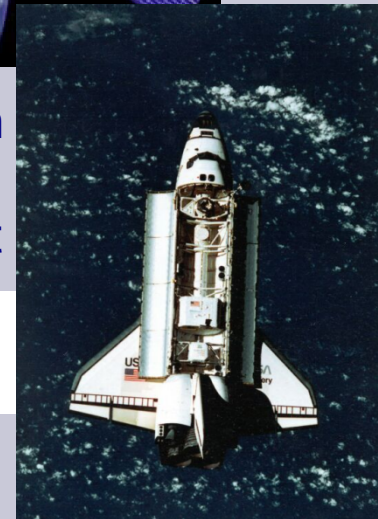
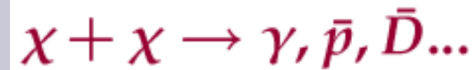


Suche nach
hochenergetischen
Annihilationsprodukten

*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

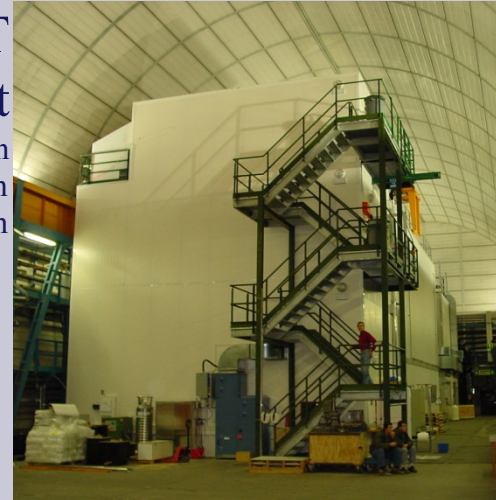
WIMP Suche **im Untergrund**

Dunkle Materie



Gran Sasso Labor

CRESST
Experiment
TU München
Max Planck Physik München
Uni Tübingen



*Abschirmung
1.5km Fels*



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

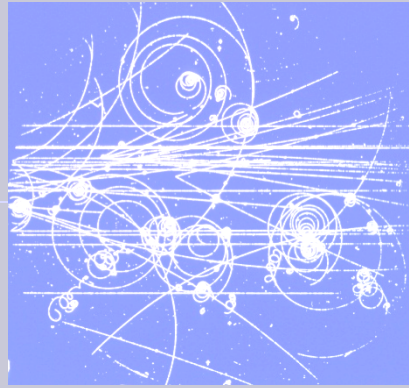
DUNKLE



MATERIE

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

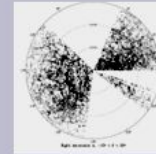
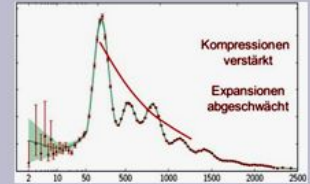
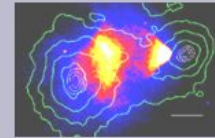




Dunkle Materie

Was ist die Natur der Dunklen Materie ???

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



- ? ! ? ! ? ! ? !
? ! ? ! ? ! ? !
! ? ! ? ! ? ! ?
! ? ! ? ! ? ! ?
- bisher unbekannte ,neue' Elementarteilchen



Das Ziel !

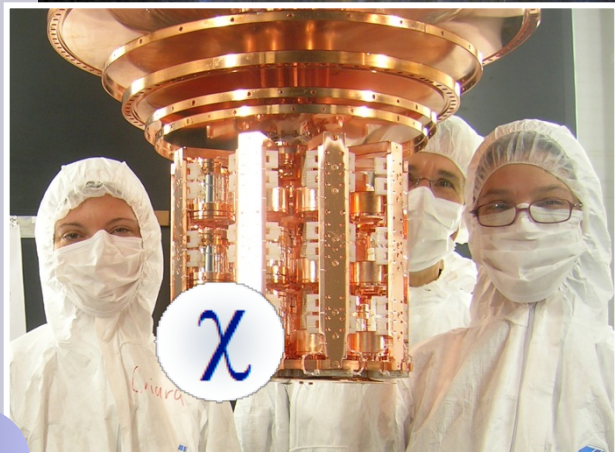
Dunkle
Materie



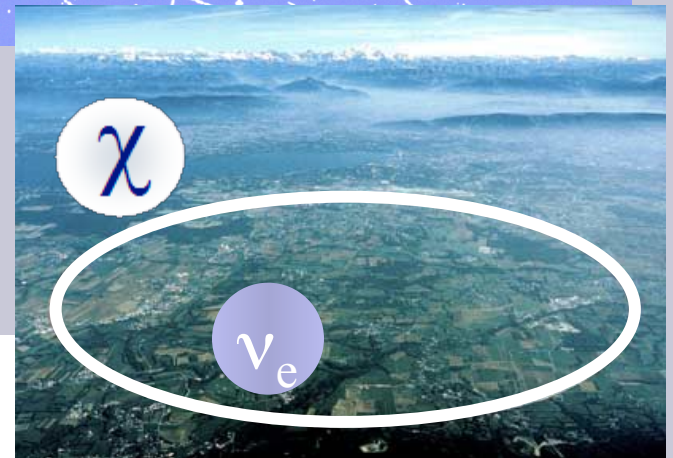
Teilchen identifiziert ?

Neue
Teilchenphysik

neue Teilchen erzeugt ?



enge
Verbindung



Astrophysik und Teilchenphysik



Elementarteilchen \Leftrightarrow *Struktur des Universums*

u

DUNKLE

e

ν_e

MATERIE

■

d

?

Standardmodell - Ist das die ganze Wahrheit ?

Dunkle Materie



plus Kräfte:

Gravitation
elektromagnetische Kraft
schwache Kraft
starke Kraft

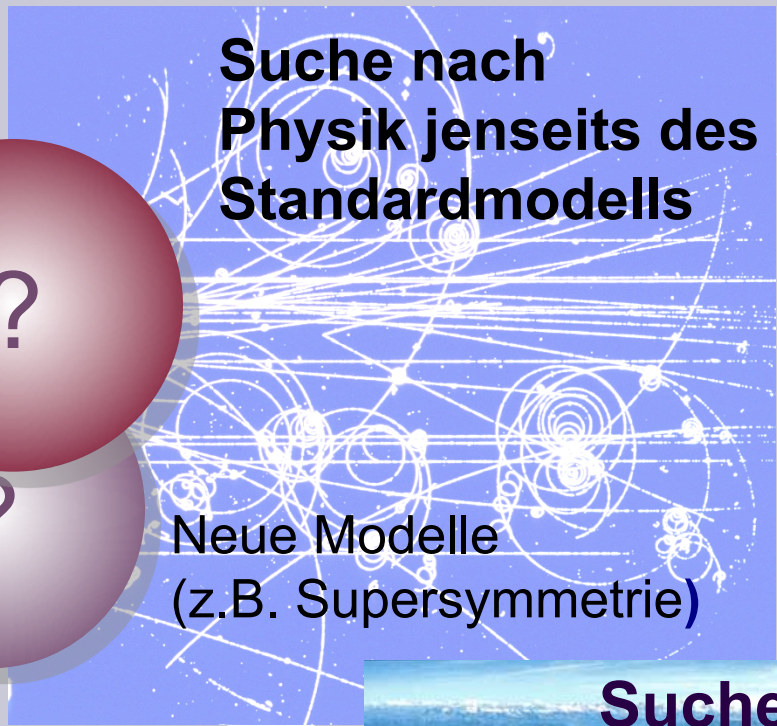
Fragen:

- 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

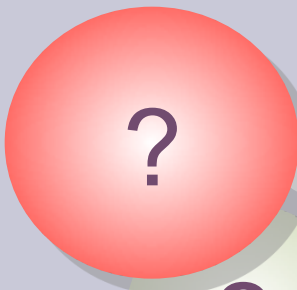


größere Vielfalt an
Elementarteilchen ?



Kosmologische Beobachtungen

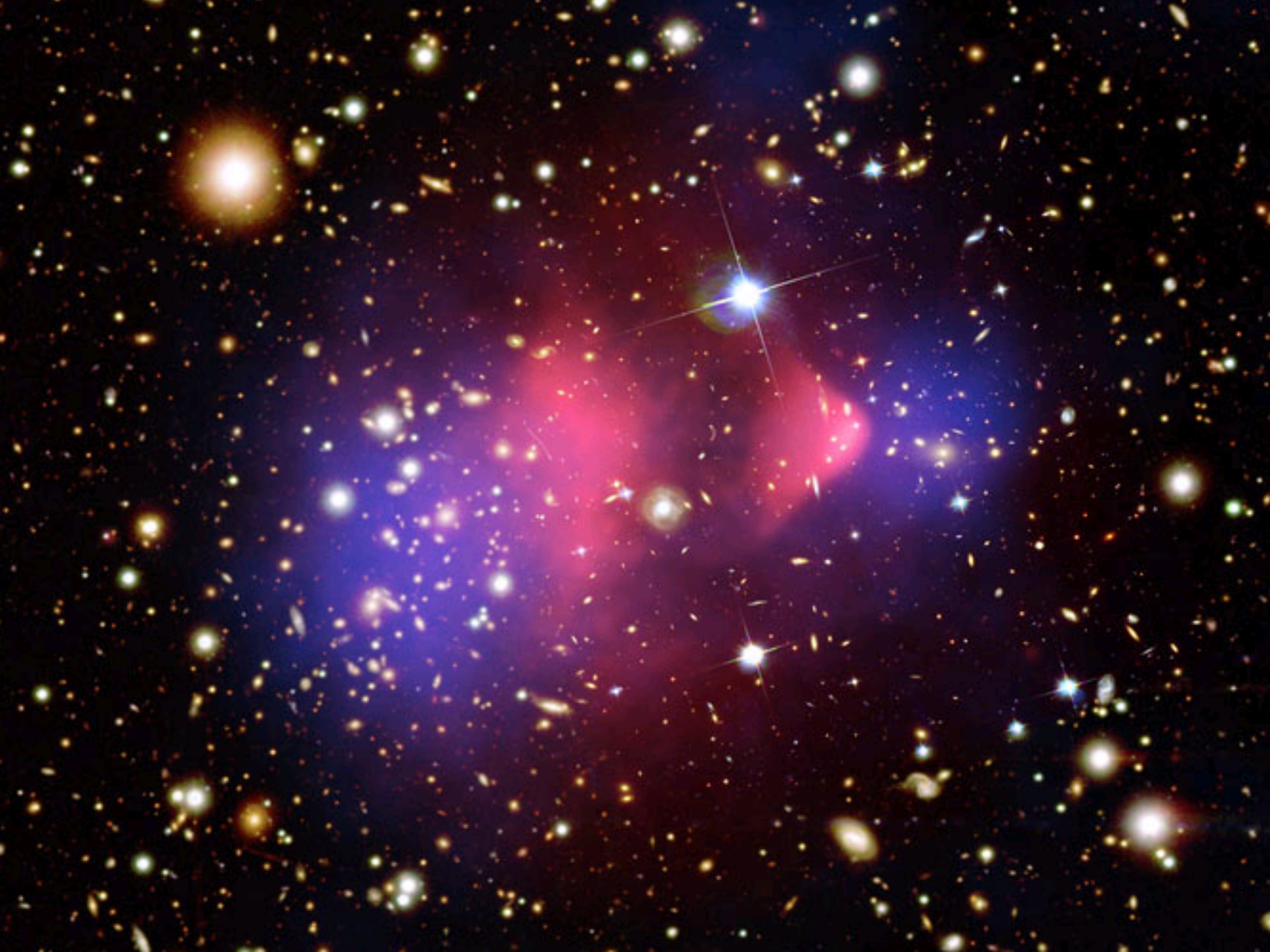
Teilchen-Physik

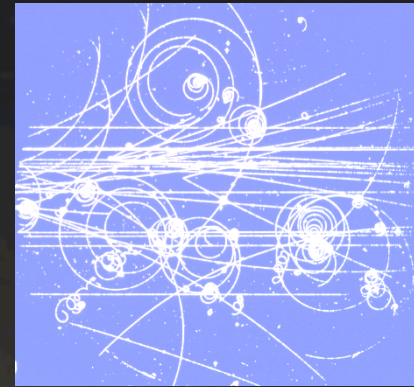


neue Elementarteilchen

spannend:

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





‘Standardmodell’ der Kosmologie

Standardmodell der Teilchenphysik

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 %

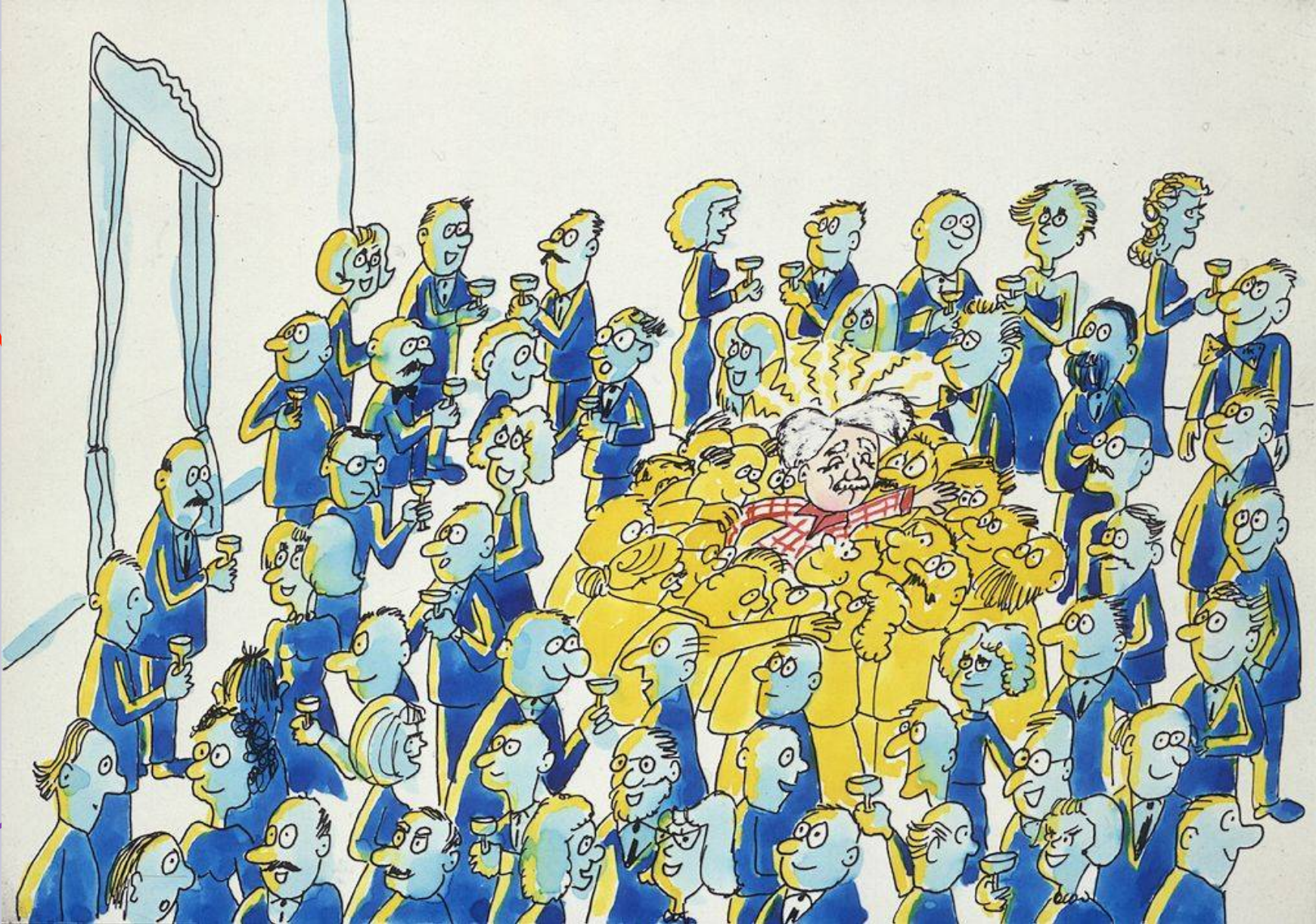
4-6 %

⇒ **Physik jenseits des Standardmodells**

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

⇒ es gibt viele interessante Aufgaben

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

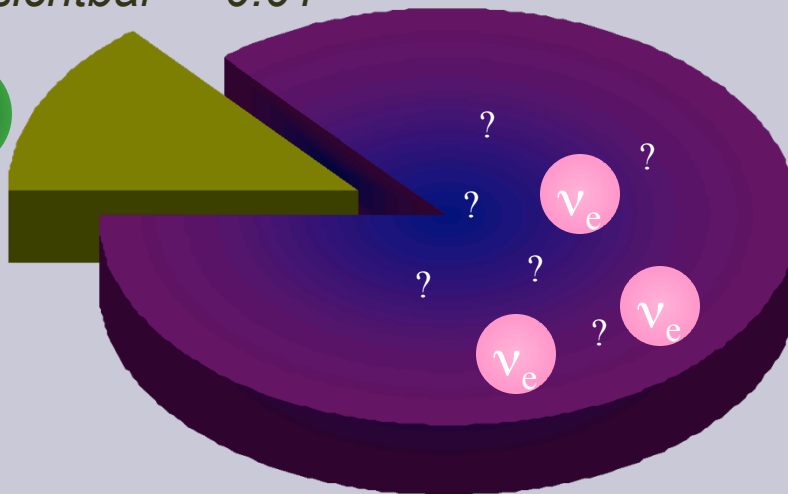


Materie im Universum

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

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‘

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

u

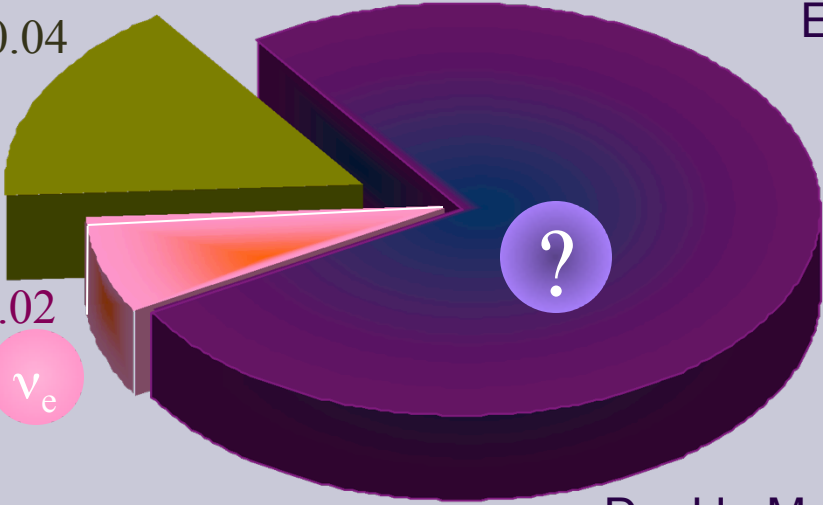
d

e

‘normale‘
baryonische Materie
0.04

$0.001 < \nu < 0.02$
(HDM)

ν_e



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

ähnlich ν
nur sehr viel
schwerer

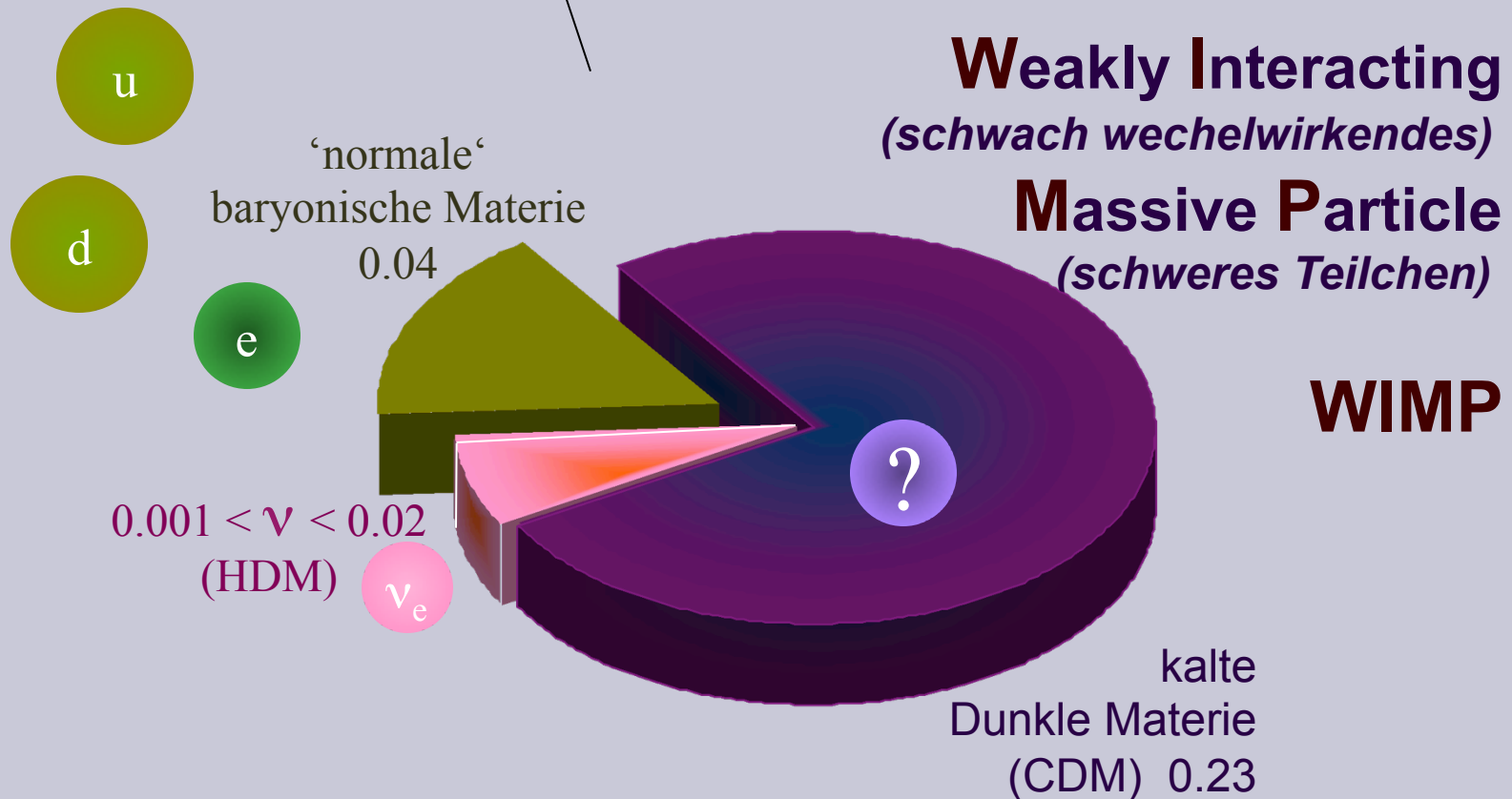
kalte
Dunkle Materie
(CDM) 0.23

Zusammensetzung der Materie im Universum

Dunkle Materie

ähnlich ν
nur sehr viel
schwerer

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



Tiefemperatur – Kalorimeter - Messung der Gesamtenergie

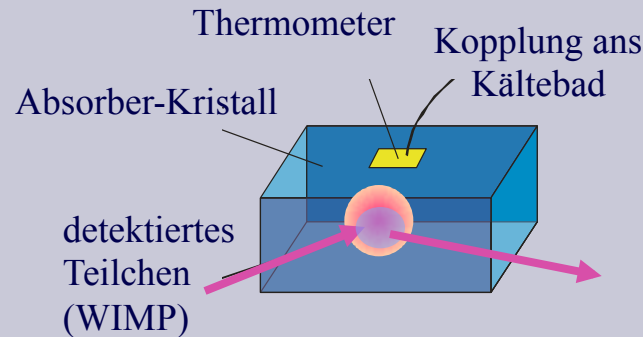
Dunkle Materie

sehr sensitiv auf Kernrückstöße
auch ohne Wechselwirkung mit Atomhülle

Teilchenstreuung

=> Temperaturanstieg

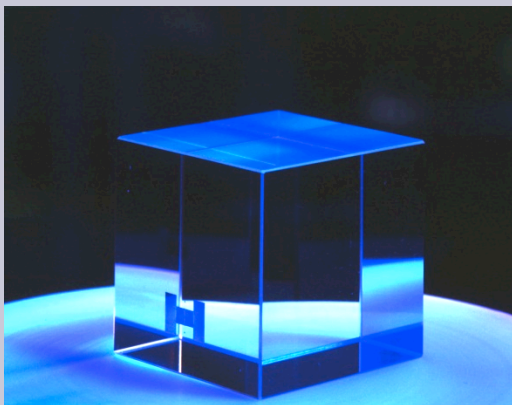
Tiefe Temperaturen (~20mK)
=> hohe Sensitivität, da C klein



niedrige
Energieschwelle

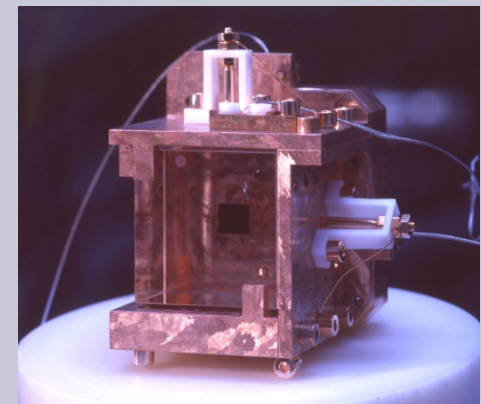
$$\Delta T \propto E/C$$

große Freiheit bei der
Wahl des Detektormaterials



Thermometer:

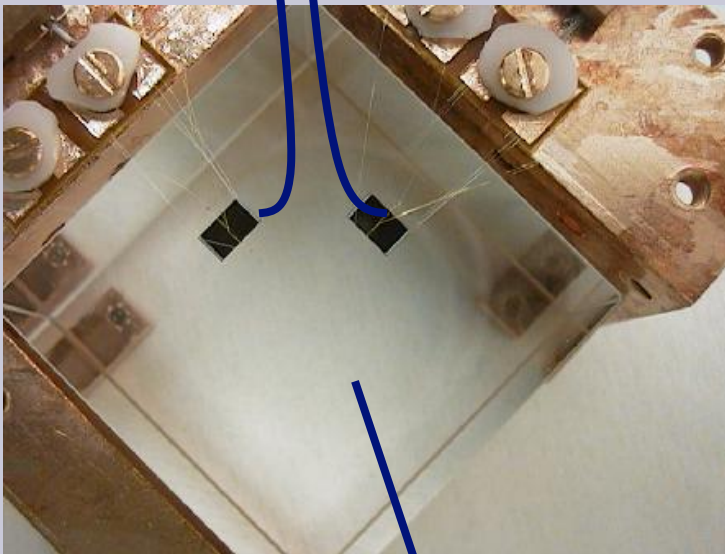
Supraleitende Phasen-
Übergangsthermometer



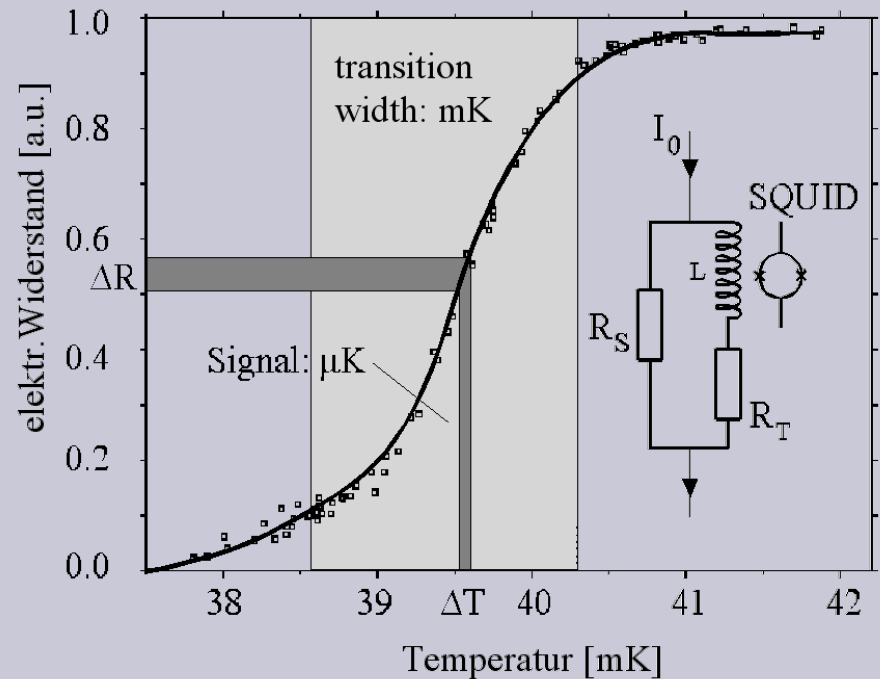
Tieftemperatur-Kalorimeter und supraleitendes Phasenübergangs-Thermometer

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

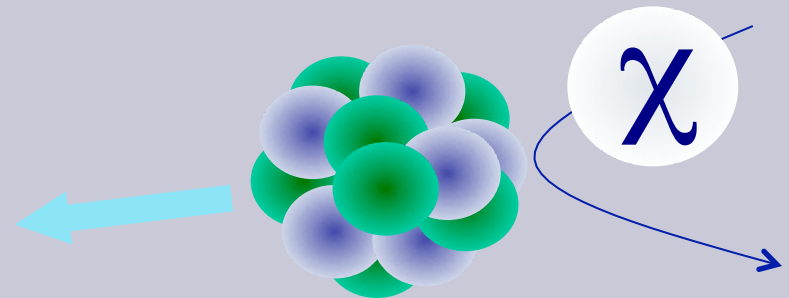
Weakly Interacting Massive Particles = WIMPs

Dunkle Materie

Elastische Streuung an Atomkernen in einem Detektor

- Kernrückstöße: geringe Effizienz zur Erzeugung von Ladung und Licht

⇒ nur wenige keV Energie

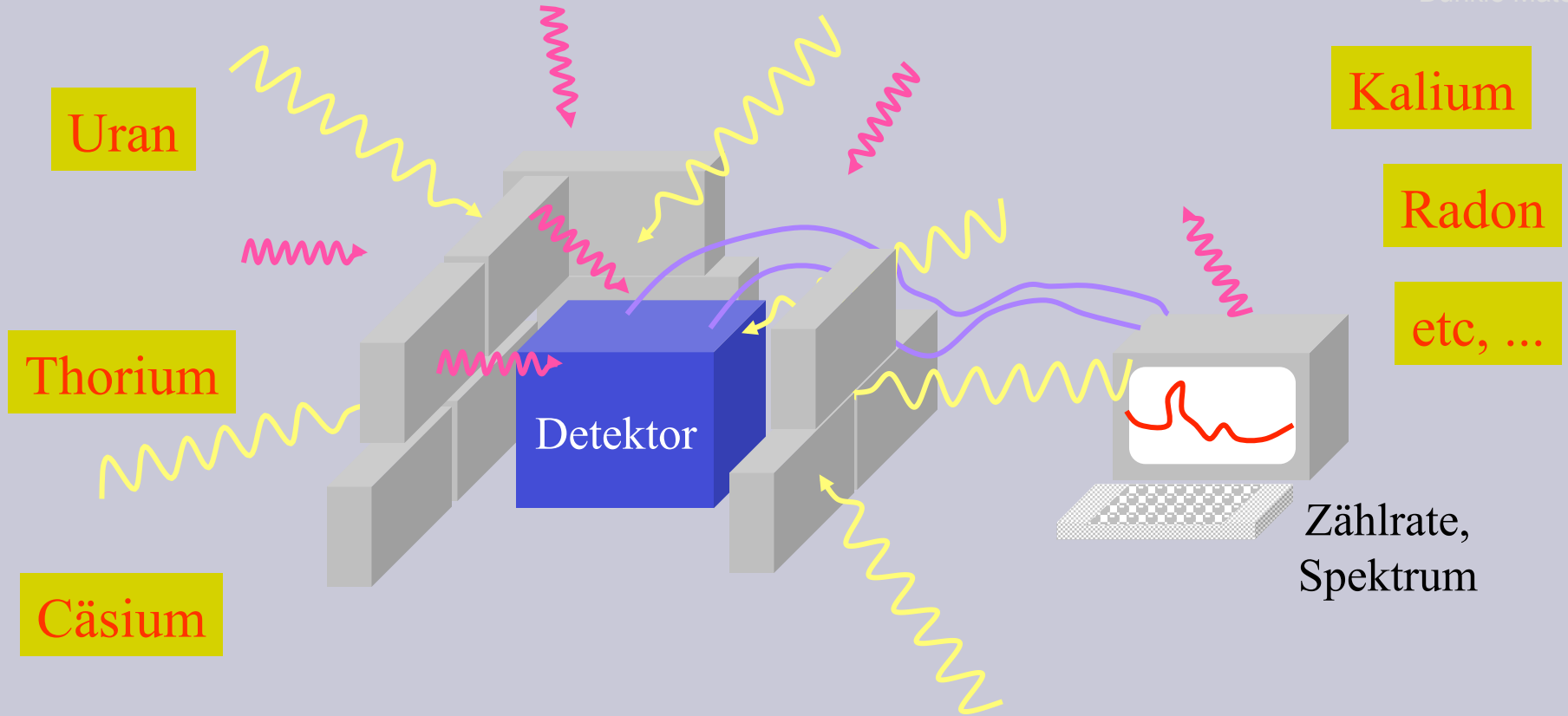


- Wirkungsquerschnitt $\sigma_\chi < 10^{-36} \text{ cm}^2$
- lokale WIMP-Dichte $\rho_\chi = 0.3 \text{ GeV} / \text{ cm}^3$ entspr. $3 \text{ WIMPs}_{(100\text{GeV})} / \text{ liter}$
- Geschwindigkeit $v \sim 270 \text{ km/s}$ $75000 / \text{ s} / \text{ cm}^2$

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

Radioaktivität in der Umgebung

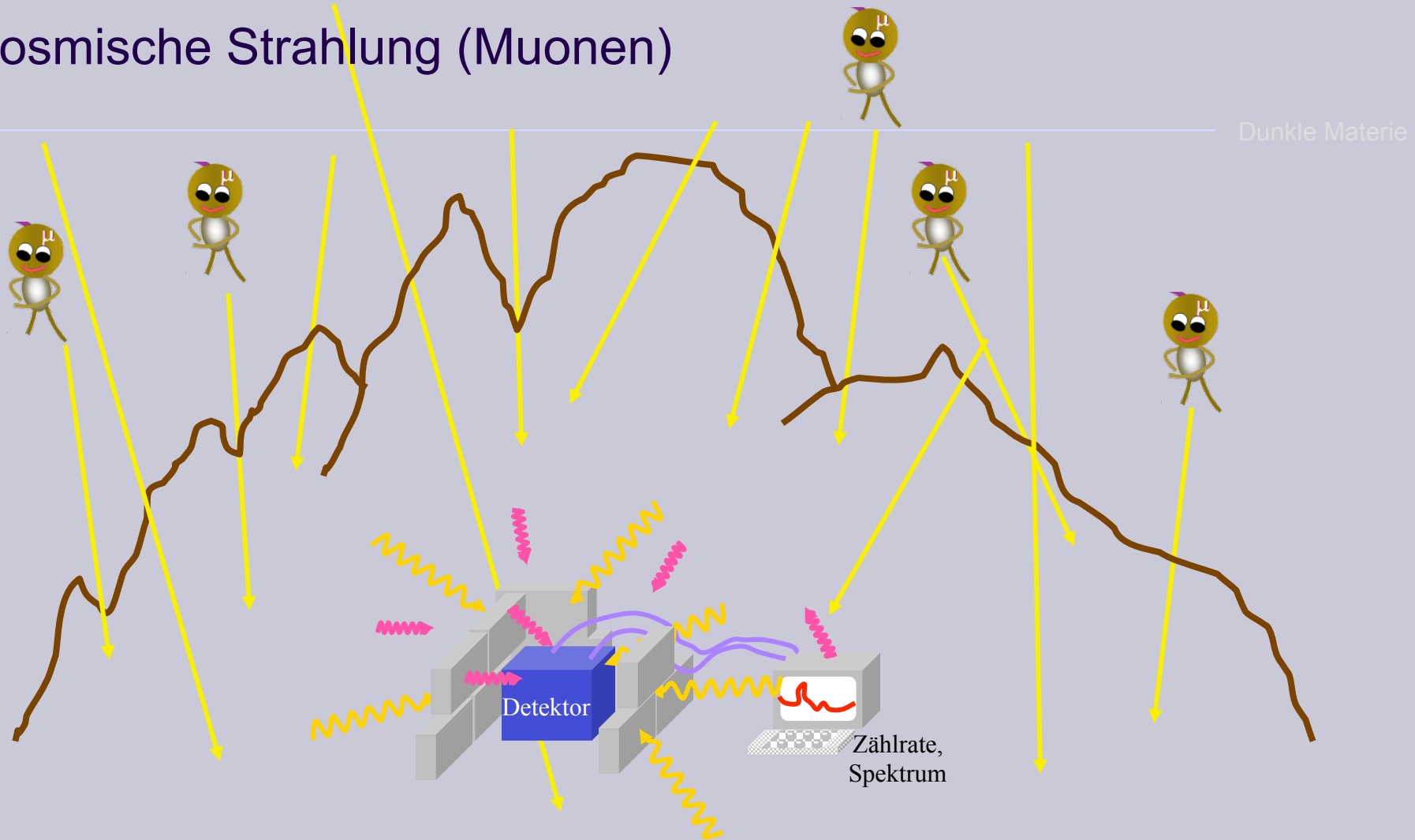
Dunkle Materie



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

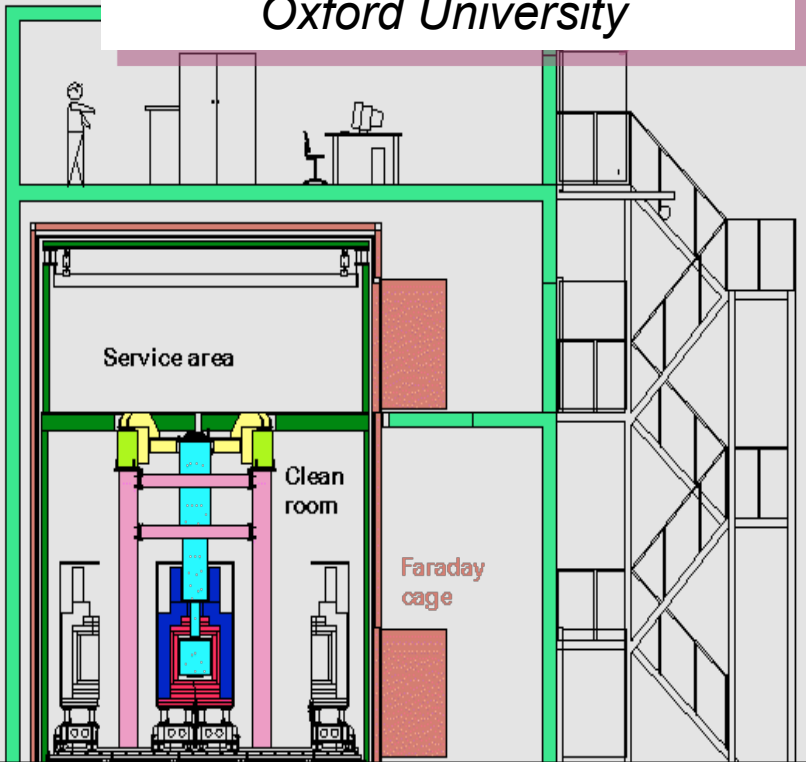
400.000 x weniger Muonen



Tübinger Wissenschaftler im Gran Sasso Untergrund Labor

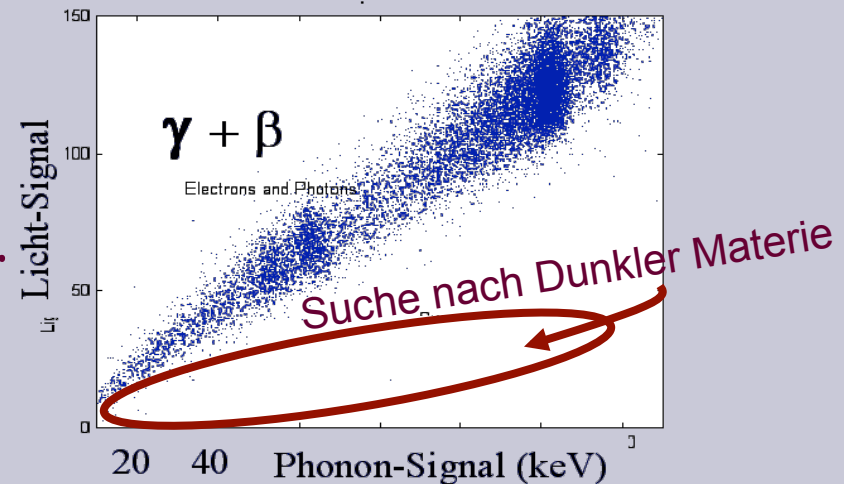
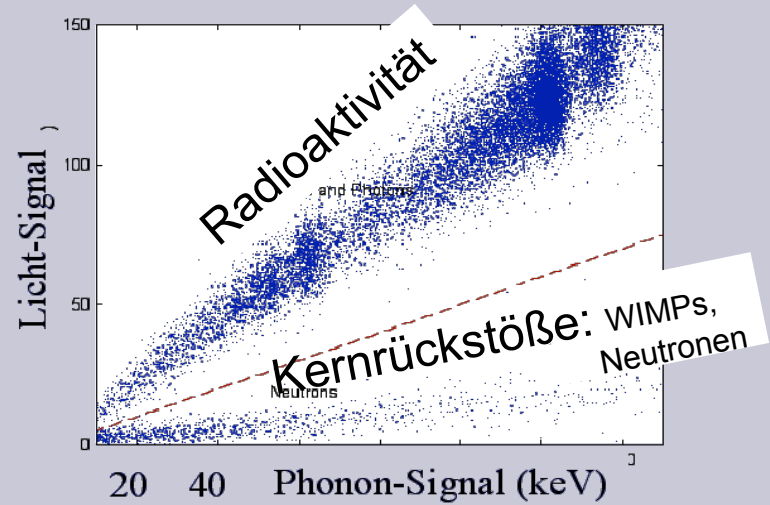
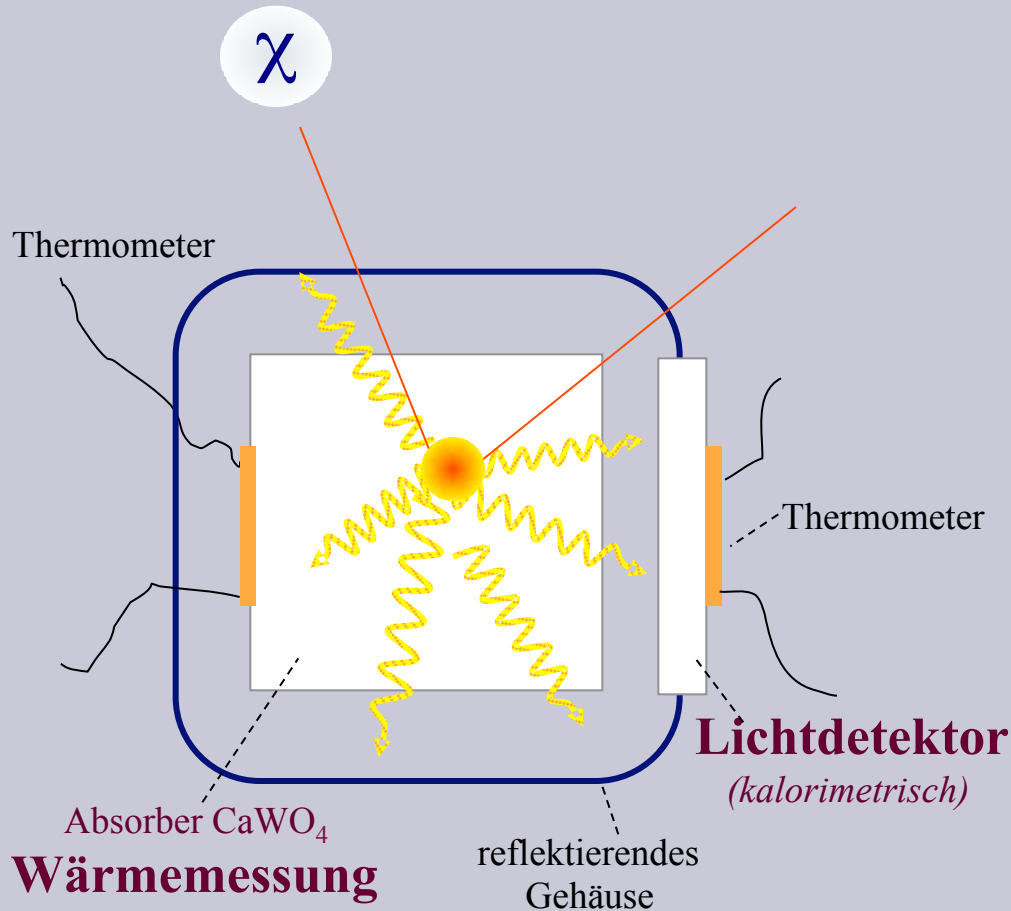
Dunkle Materie

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



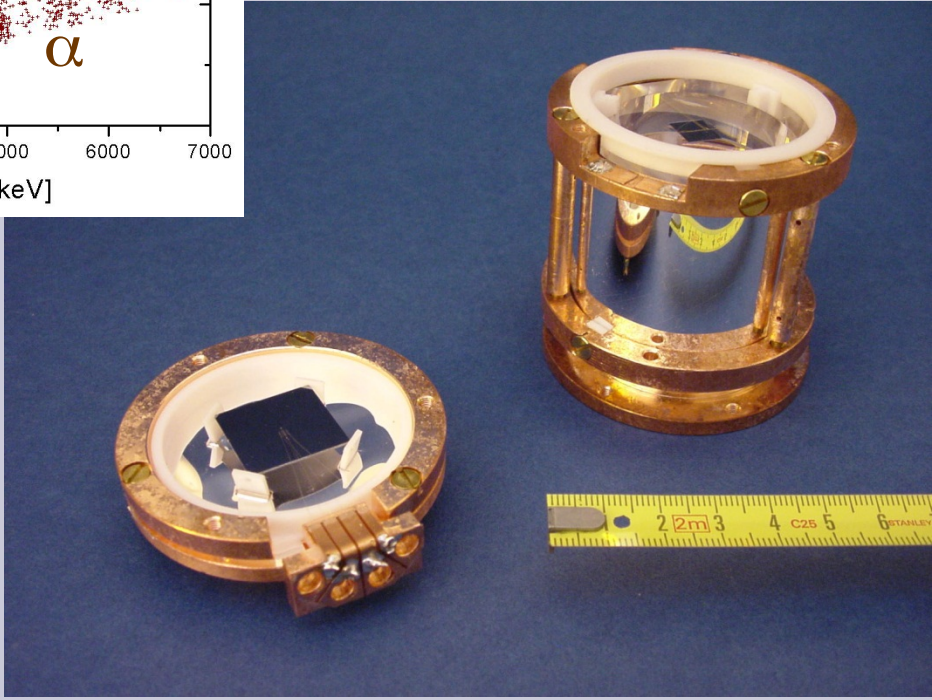
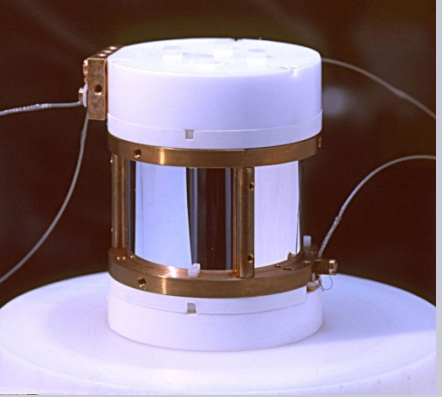
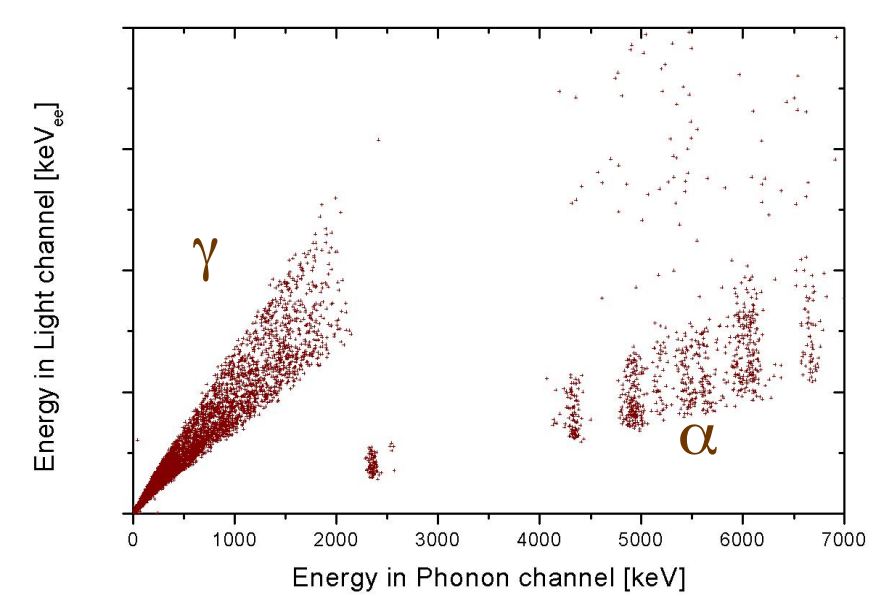
Erkennung von Störsignalen – Messung von Wärme und Licht (Ladung)

Dunkle Materie



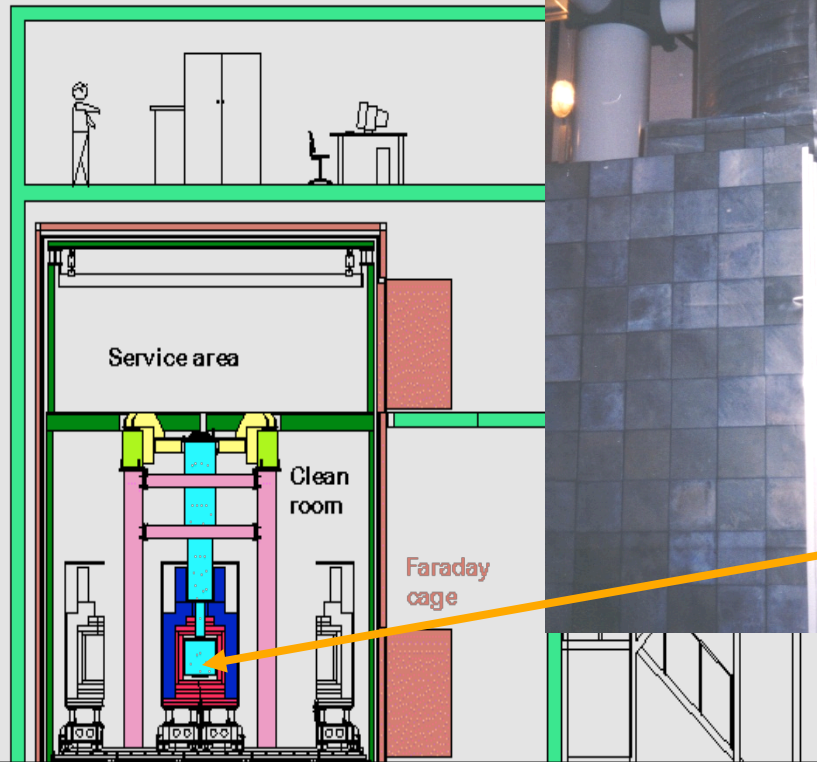
Licht-Wärme Detektoren - Teilchenerkennung

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

