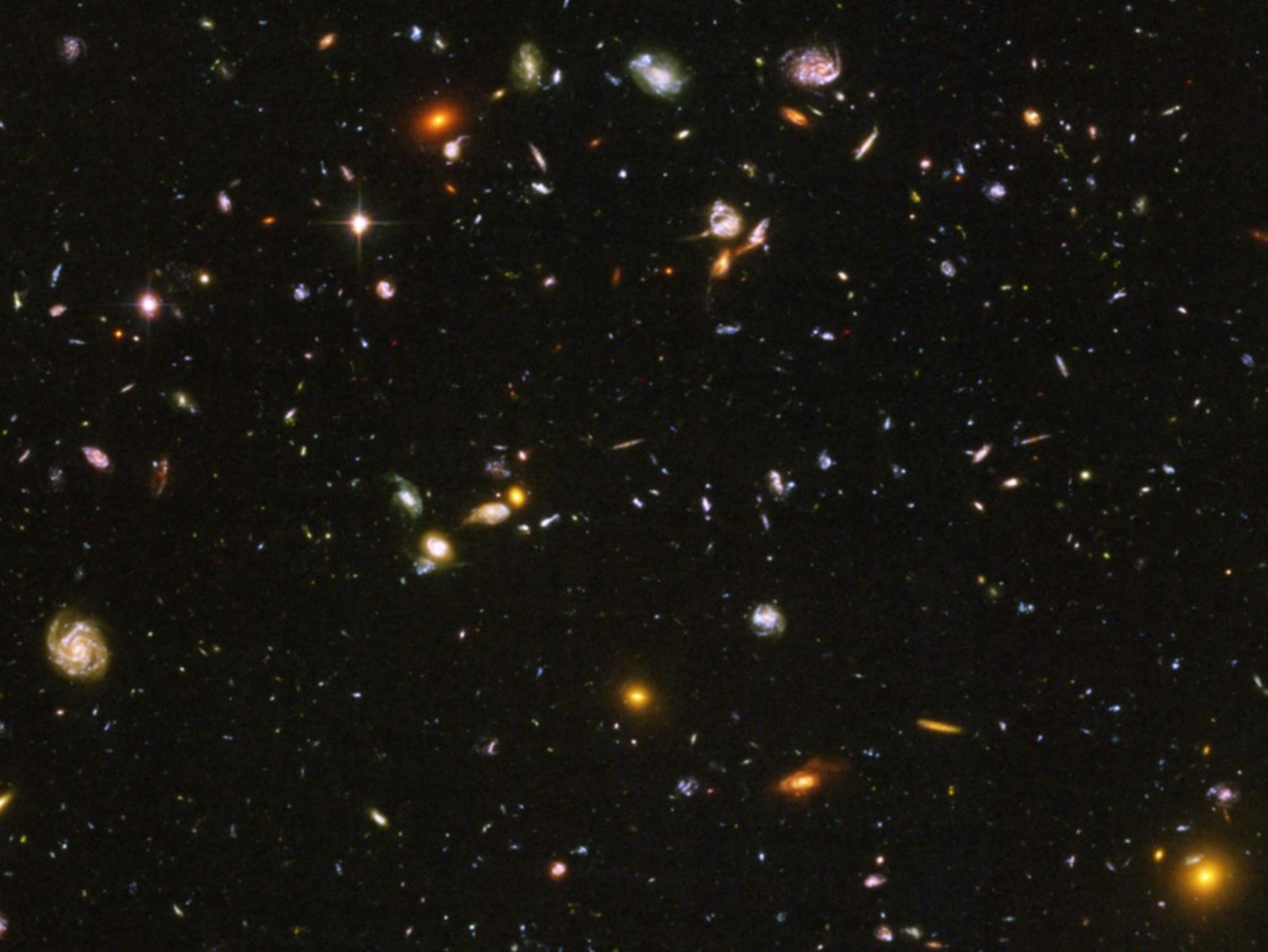
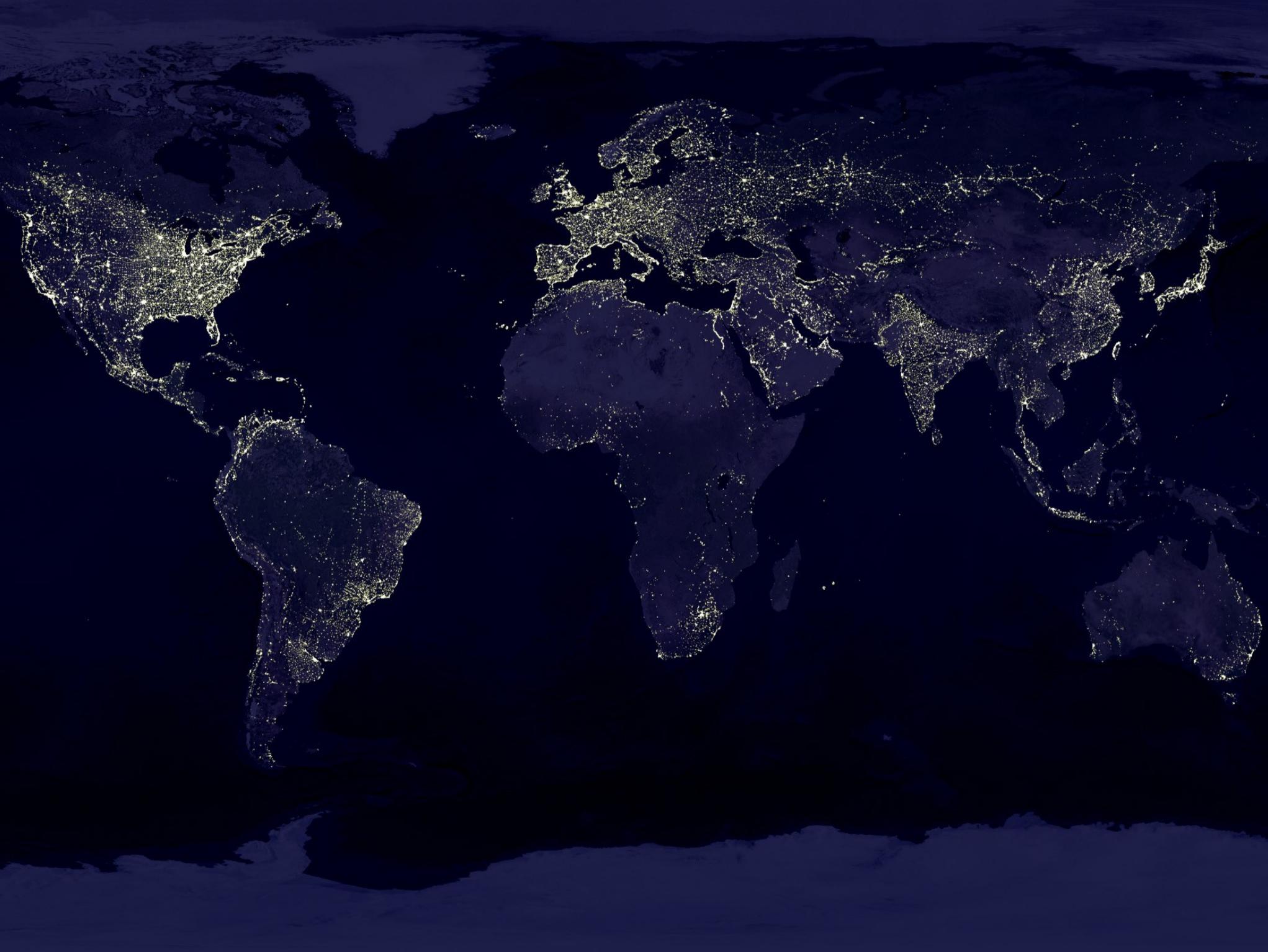


Das Geheimnis der
Dunklen Materie
Woraus besteht das Universum?

Öffentlicher Vortrag im Rahmen des
Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs
5.-9. Juli 2010, Zürich







Struktur von Spiralgalaxien

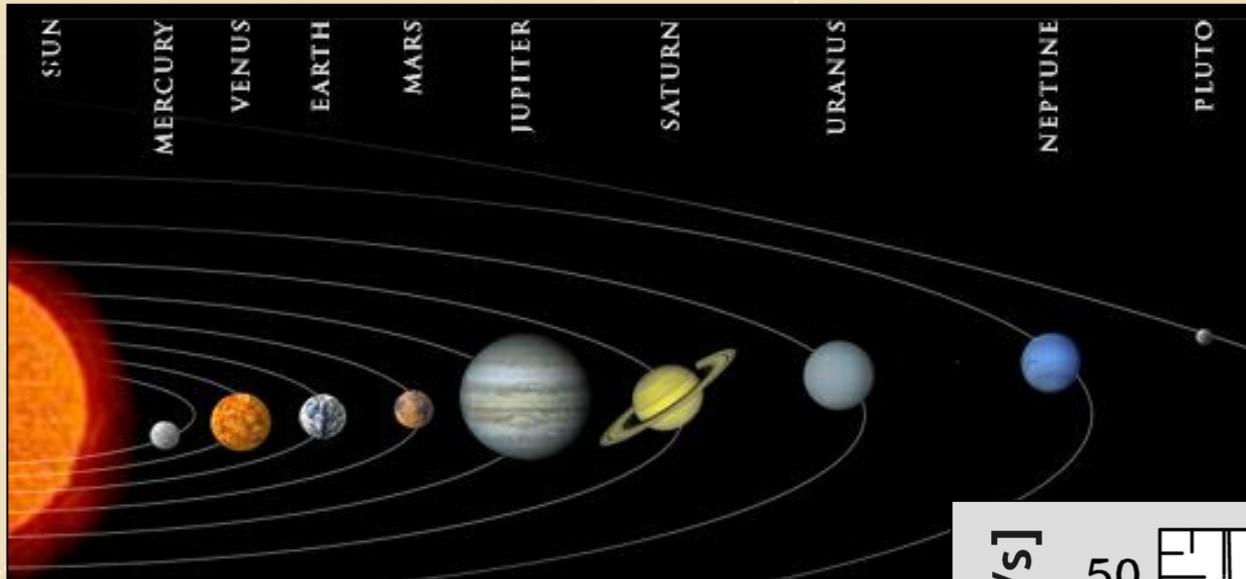


Spiralgalaxie NGC 2997



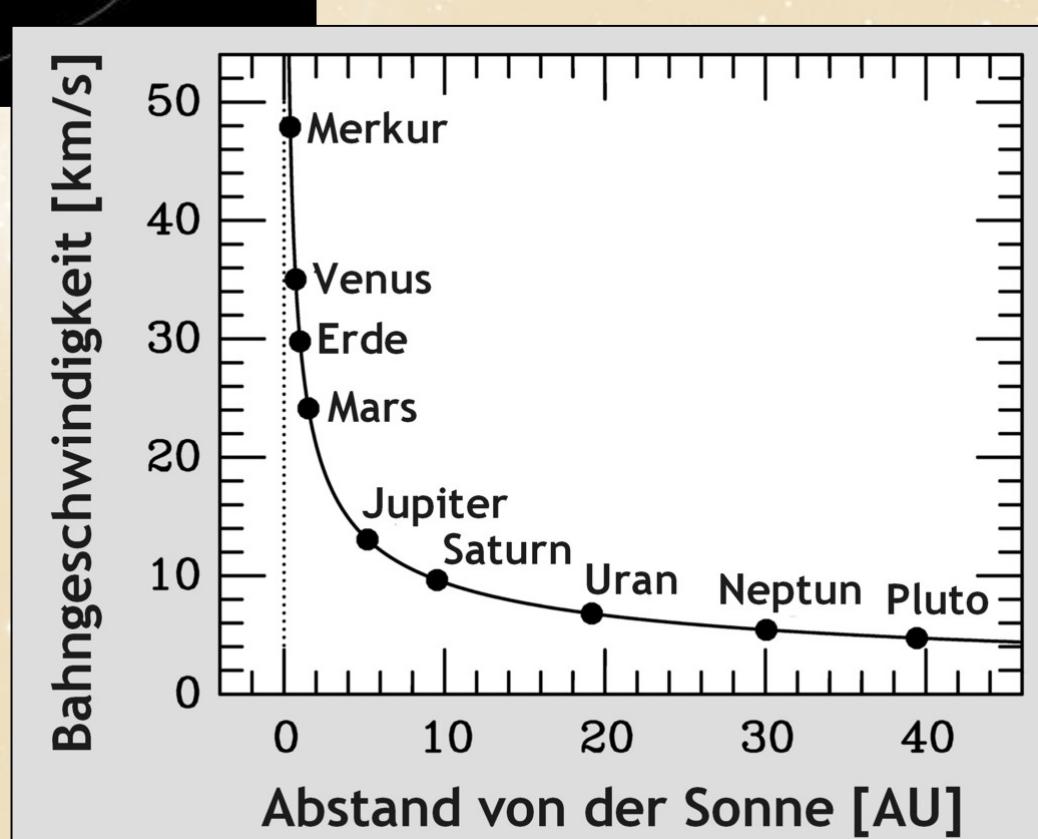
Spiralgalaxie NGC 891

„Rotationskurve“ des Sonnensystems

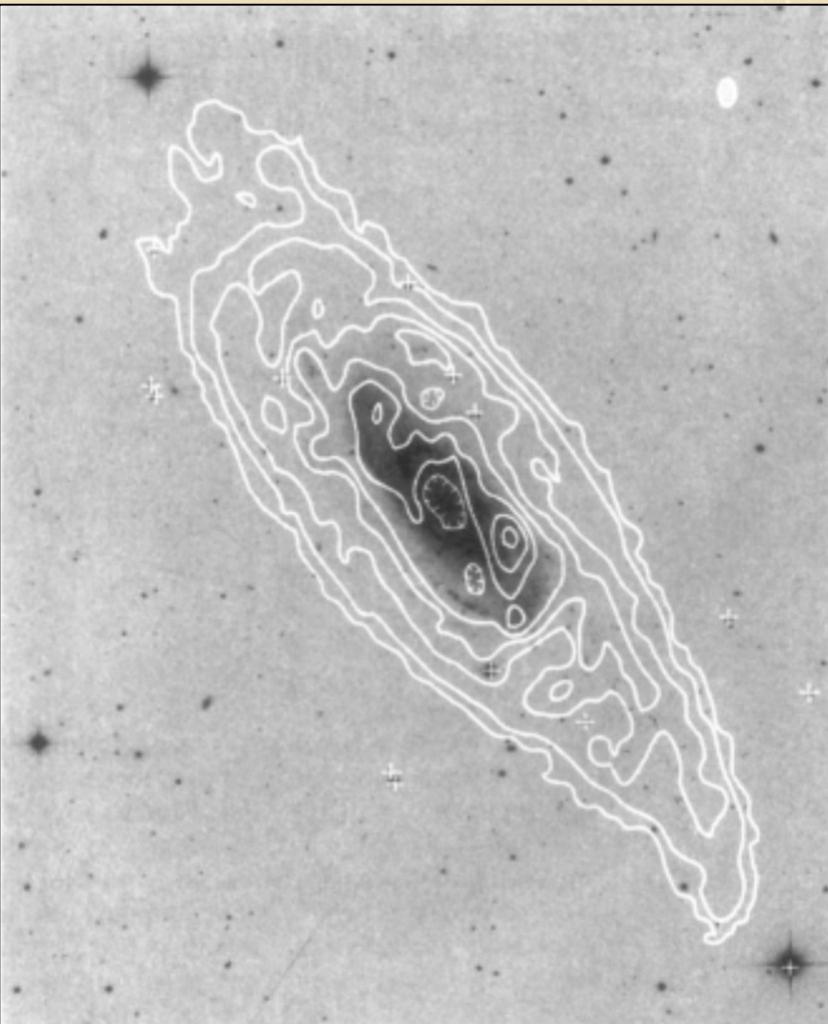


Kepler'sches Gesetz

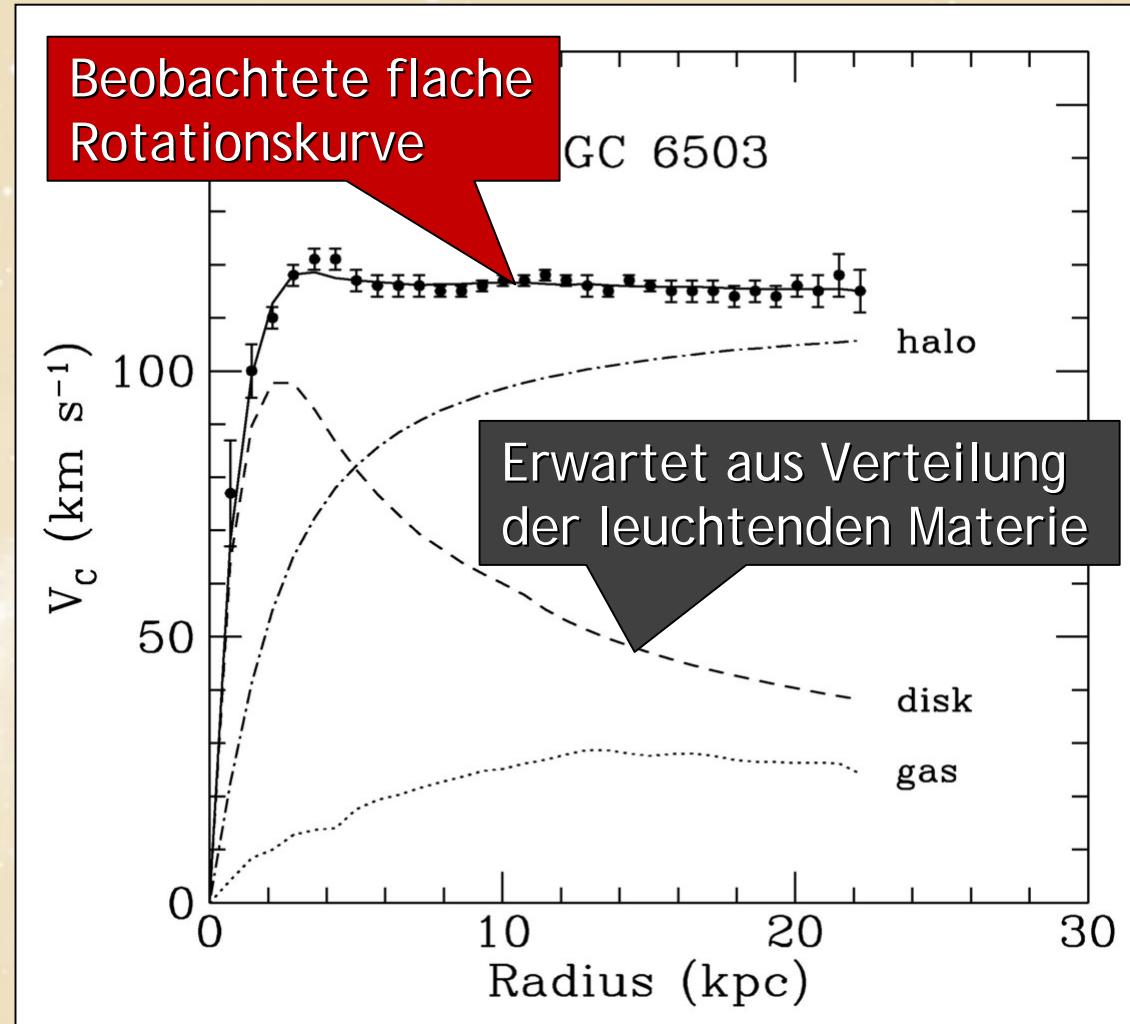
$$v_{\text{Bahn}} = \sqrt{\frac{G_{\text{Newton}} M_{\text{Zentral}}}{\text{Abstand}}}$$



Galaktische Rotationskurven aus Radiobeobachtungen



Spiralgalaxie NGC 3198 mit
überlagerten Konturen der
Wasserstoff-Säulendichte
[ApJ 295 (1985) 305]



Rotationskurve der Galaxie NGC 6503
durch Radiobeobachtungen
der Wasserstoffbewegung
[MNRAS 249 (1991) 523]

Struktur einer Spiralgalaxie



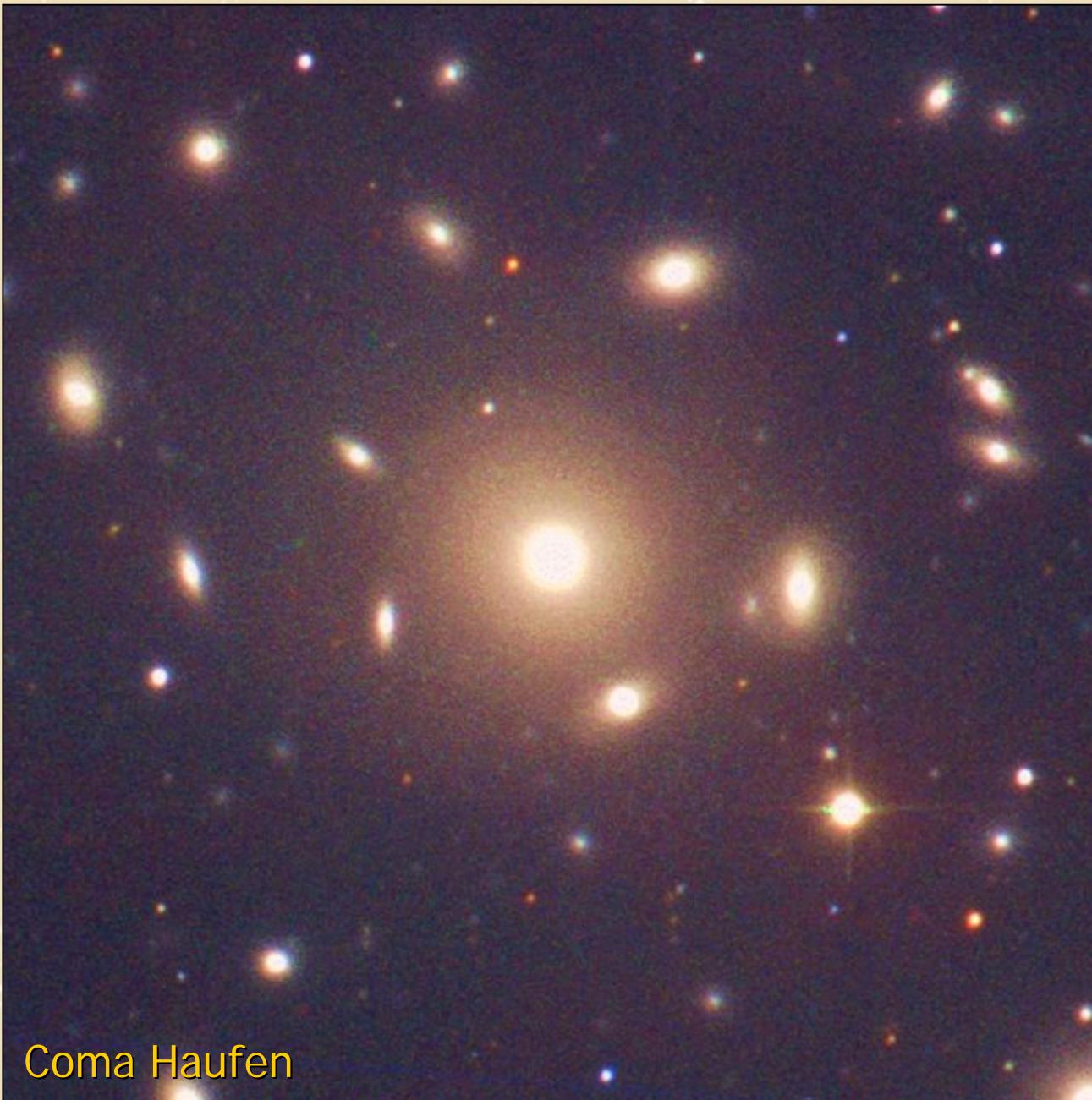
Struktur einer Spiralgalaxie



A diagram illustrating the structure of a spiral galaxy. A large black circle represents the dark matter halo, which is the outermost boundary of the galaxy. Inside this is a smaller, luminous spiral structure representing the stellar disk and bulge. The center of the galaxy is a bright, white and yellow point representing the central black hole and the densest part of the galaxy's mass.

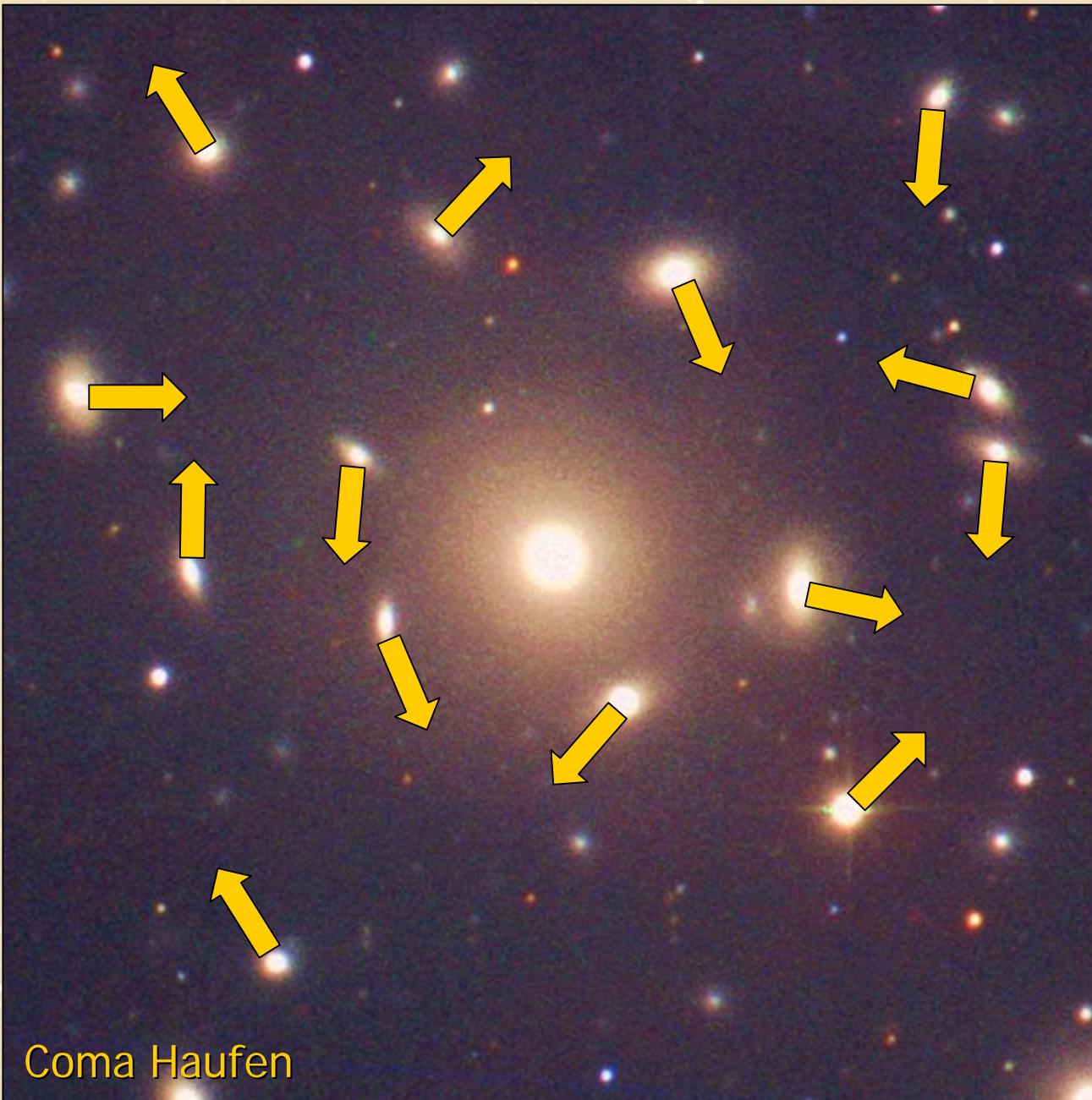
Dunkler Halo

Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Coma Haufen

Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Ein gravitativ gebundenes System vieler „Teilchen“ gehorcht dem Virialsatz

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

$$2\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{G_N M_r m}{r} \right\rangle$$

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

Geschwindigkeitsmessung
durch Dopplereffekt von
Spektrallinien



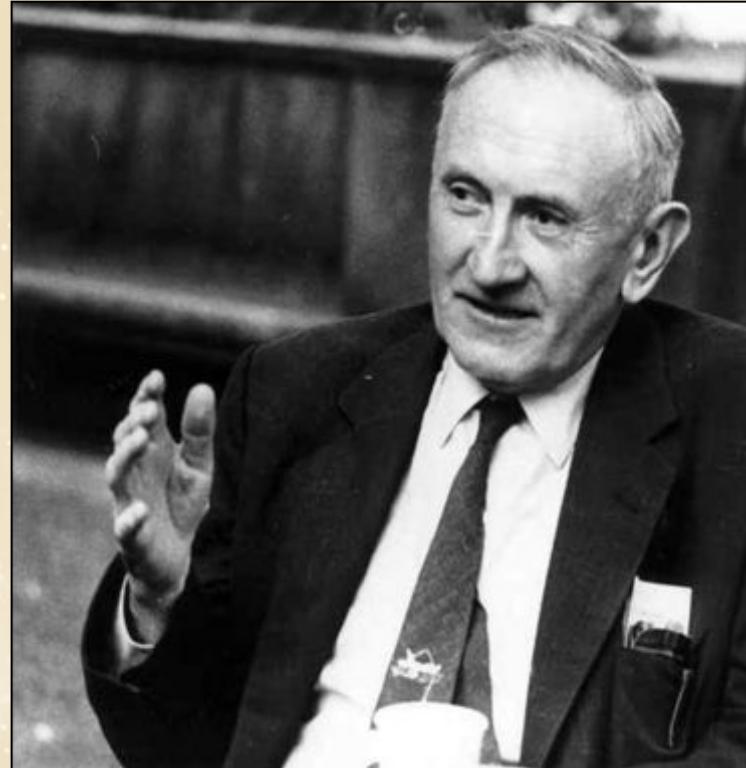
Massenabschätzung

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Fritz Zwicky (1898-1974)

Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln

Helvetica Physica Acta 6 (1933) 110

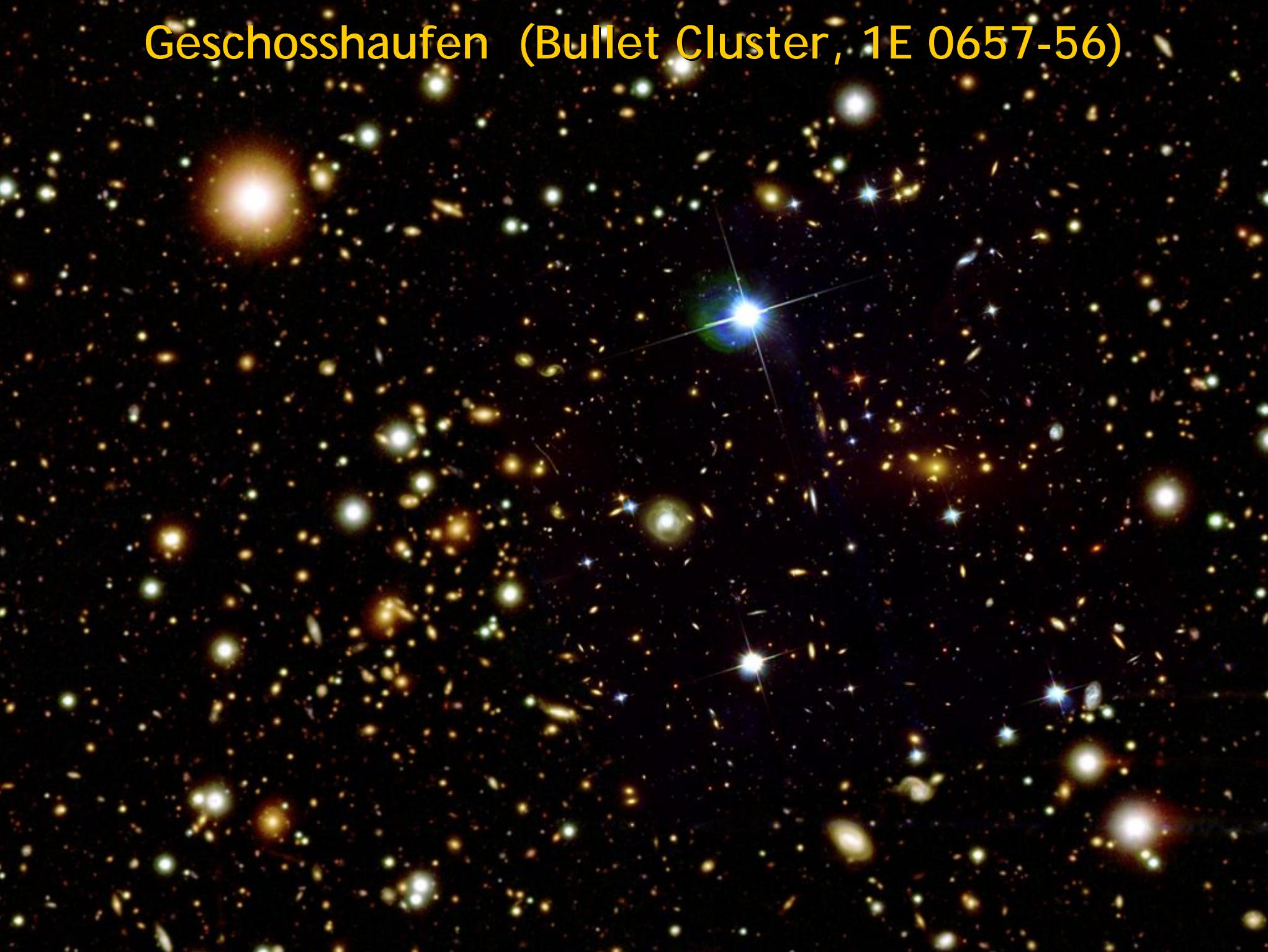


Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete¹). Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass **dunkle Materie** in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

Galaxienhaufen Abell 2029 (Optisch & Röntgen)



Geschosshaufen (Bullet Cluster, 1E 0657-56)



Geschosshaufen (Bullet Cluster, 1E 0657-56)



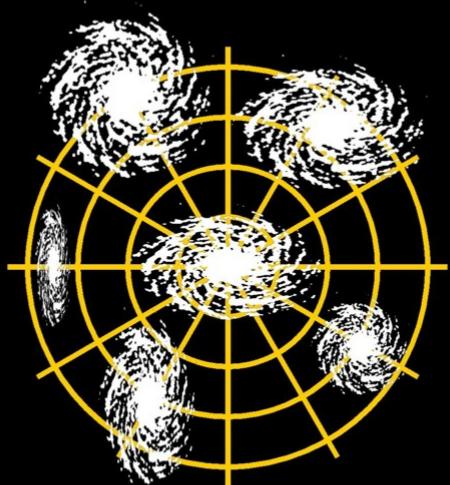
Geschosshaufen (Bullet Cluster, 1E 0657-56)



Geschosshaufen (Bullet Cluster, 1E 0657-56)



Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$\text{VExpansion} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \text{ Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \text{ cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \text{ Milliarden Jahre}$$

Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$\text{VExpansion} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \text{ Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \text{ cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \text{ Milliarden Jahre}$$

Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$\text{VExpansion} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

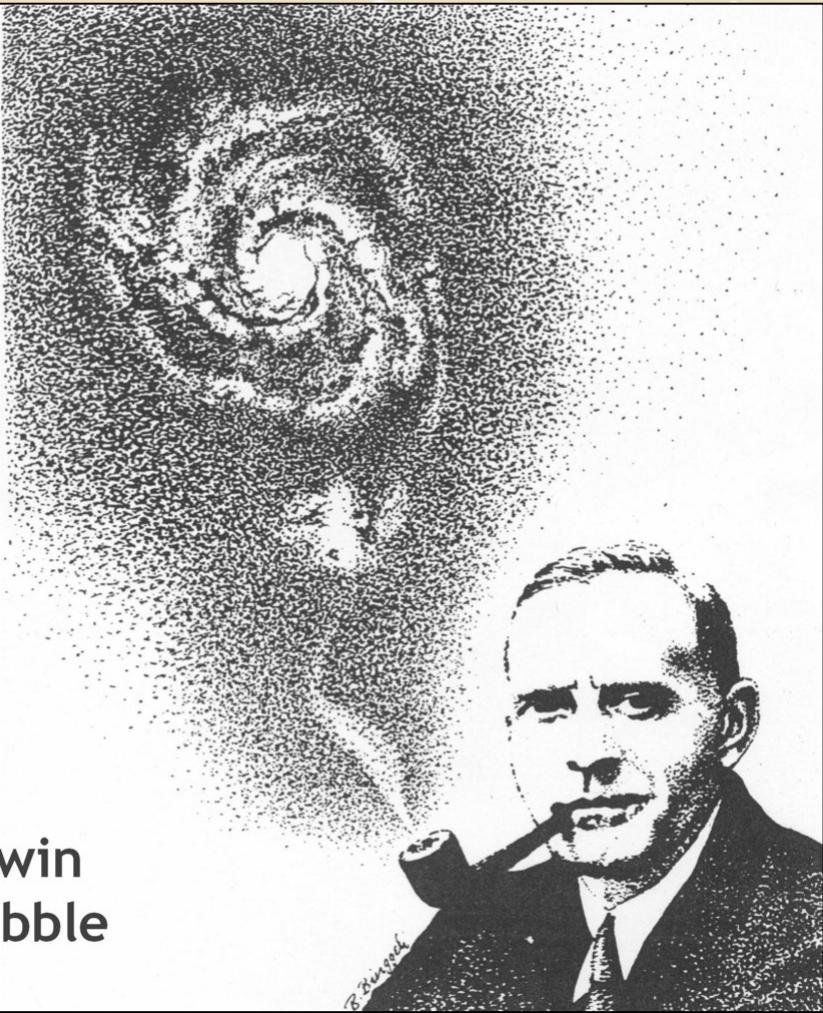
$$h = 0.72 \pm 0.04$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \text{ Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \text{ cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \text{ Milliarden Jahre}$$

Expandierendes Universum und Urknall



Edwin
Hubble

Hubble'sches Gesetz

$$\text{VExpansion} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

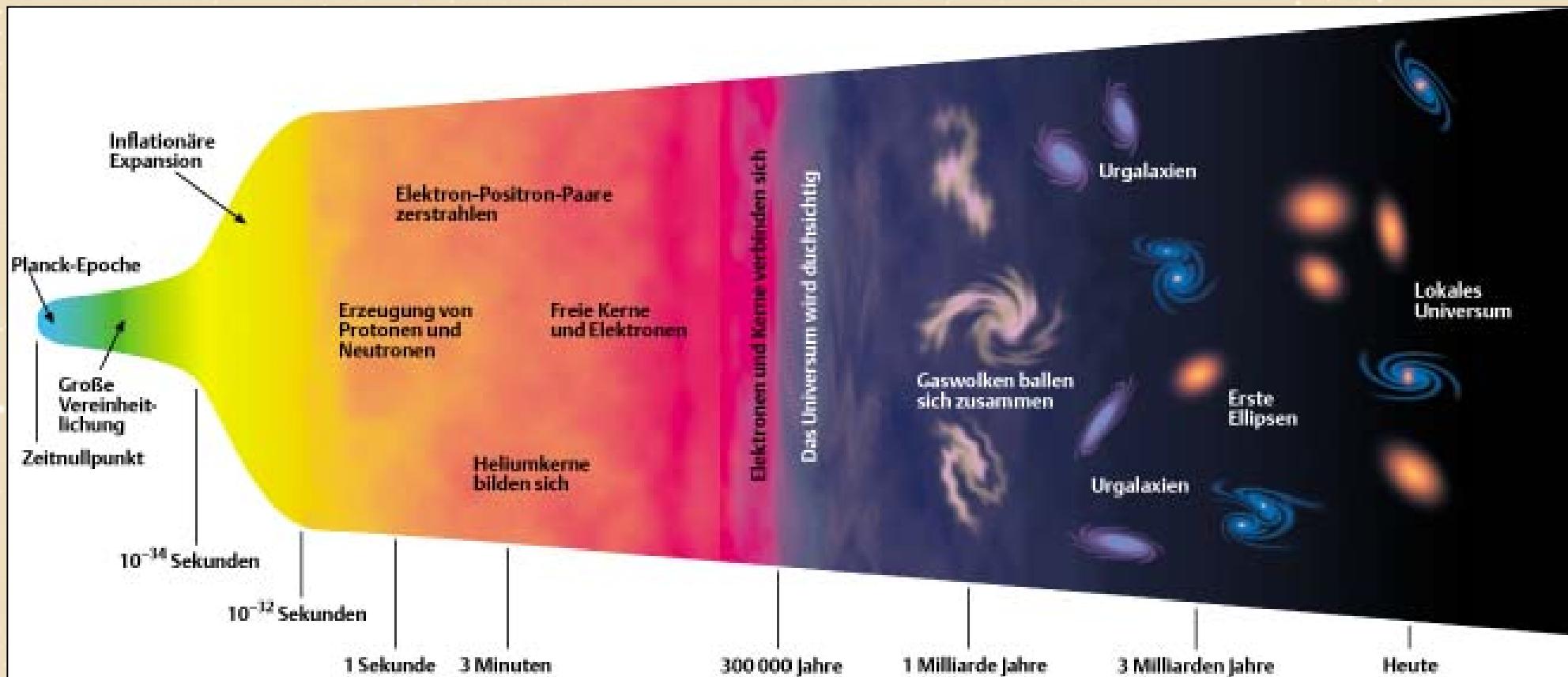
$$h = 0.72 \pm 0.04$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \text{ Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \text{ cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

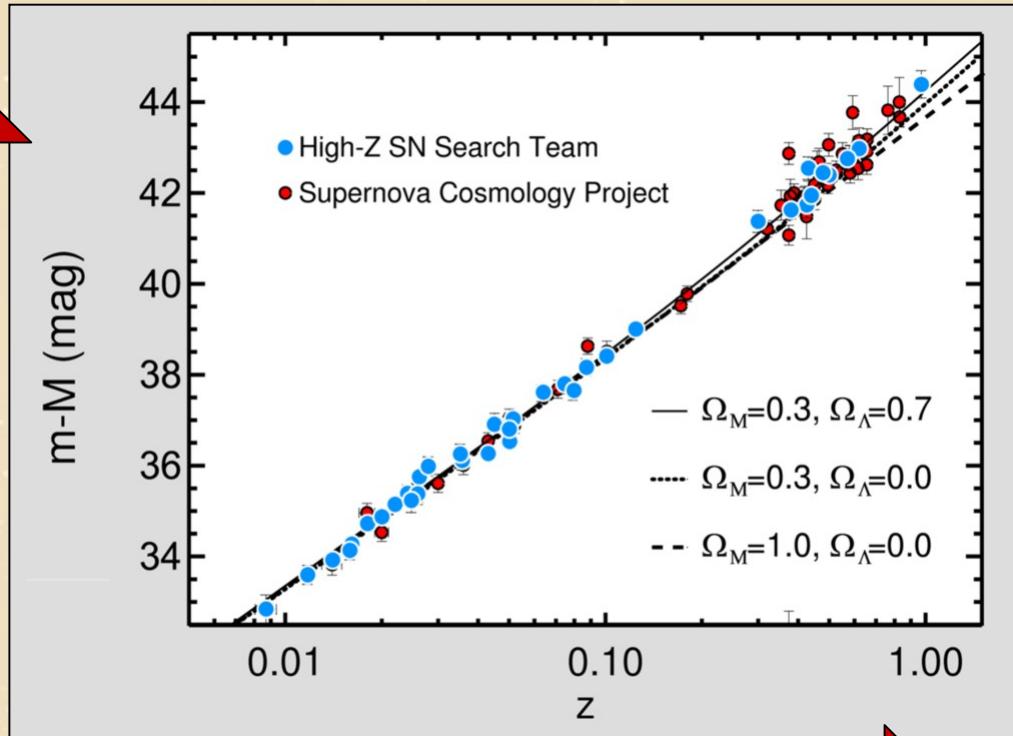
$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \text{ Milliarden Jahre}$$

Urknall und Expansion des Universums



Hubble Diagramm

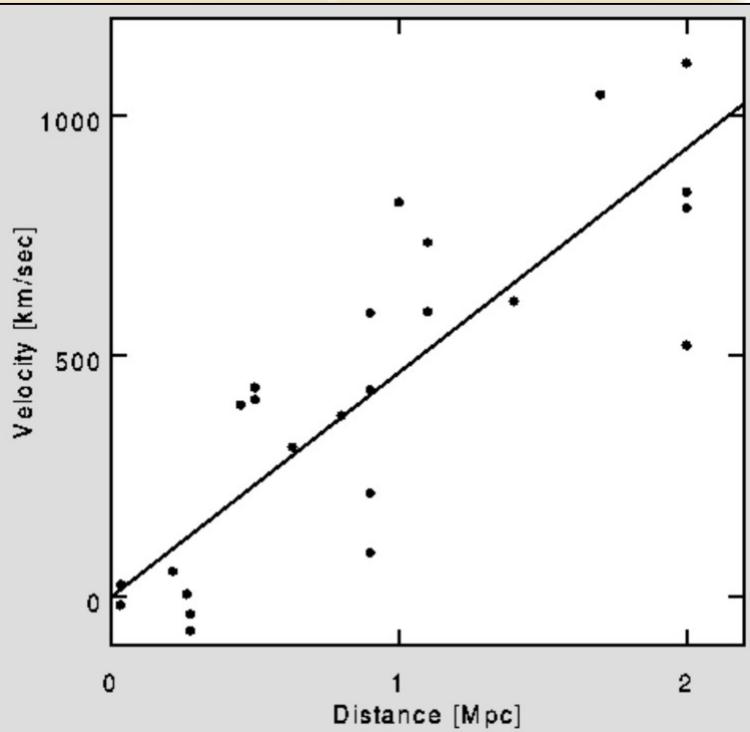
Scheinbare Helligkeit
(Entfernung)



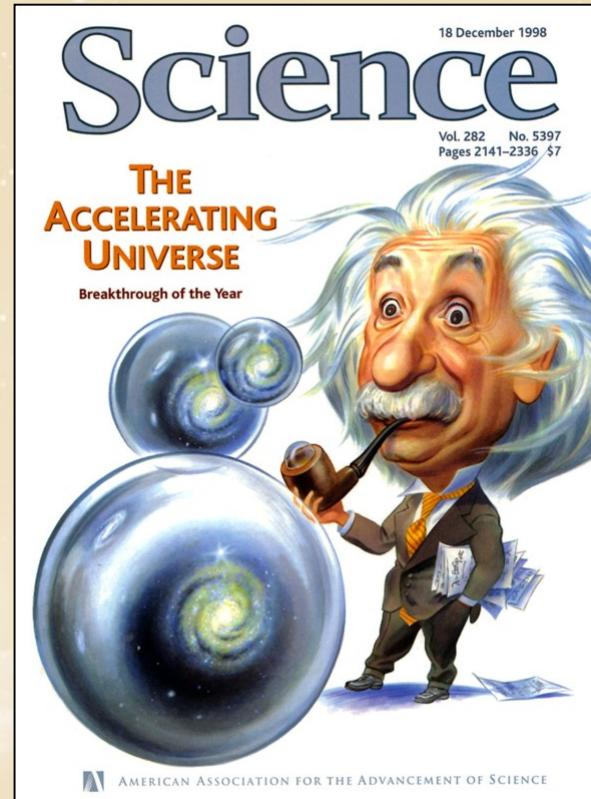
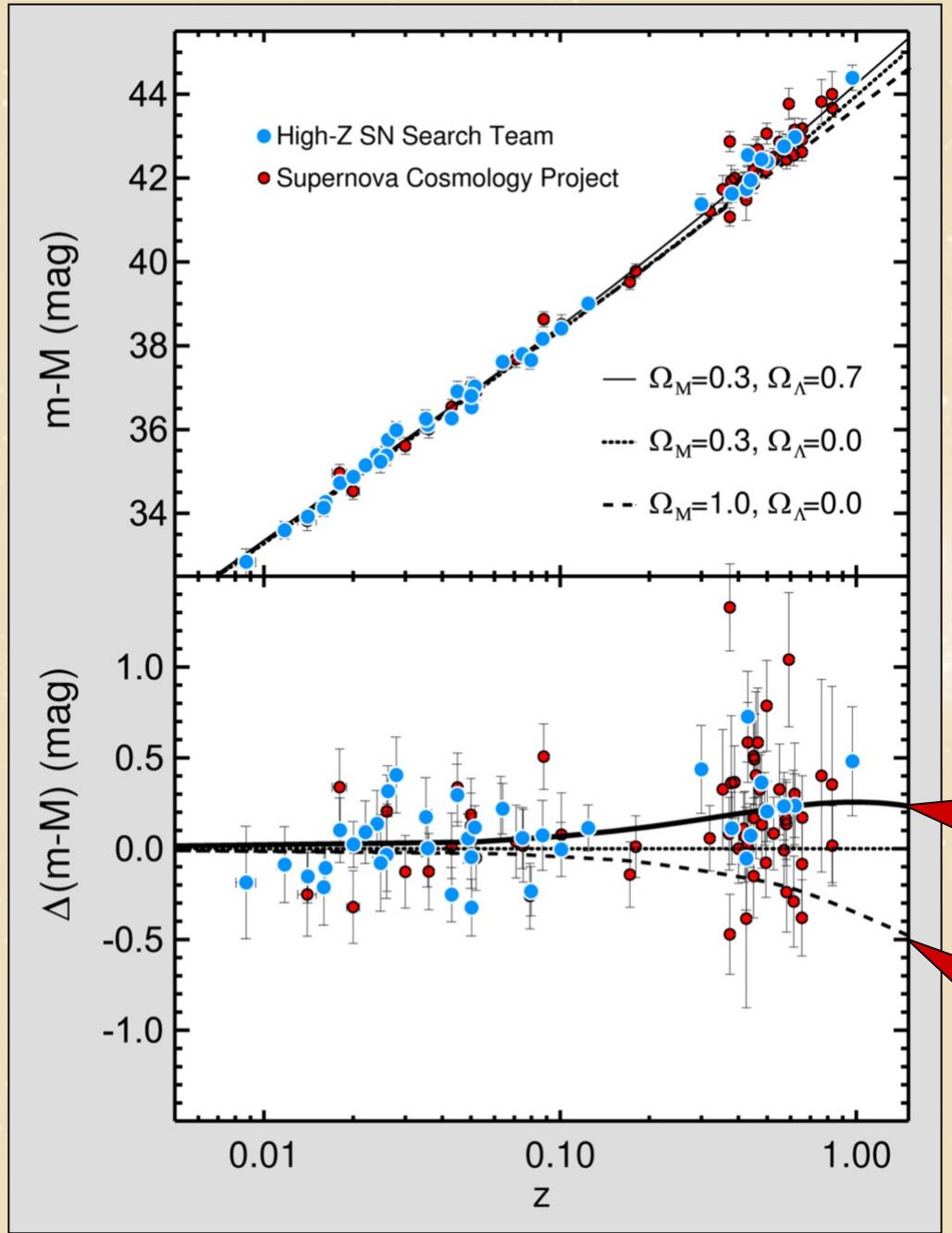
Rotverschiebung
(Fluchtgeschwindigkeit)

Supernovae vom Typ Ia als
kosmologische Standardkerzen

Hubbles Originaldaten (1929)



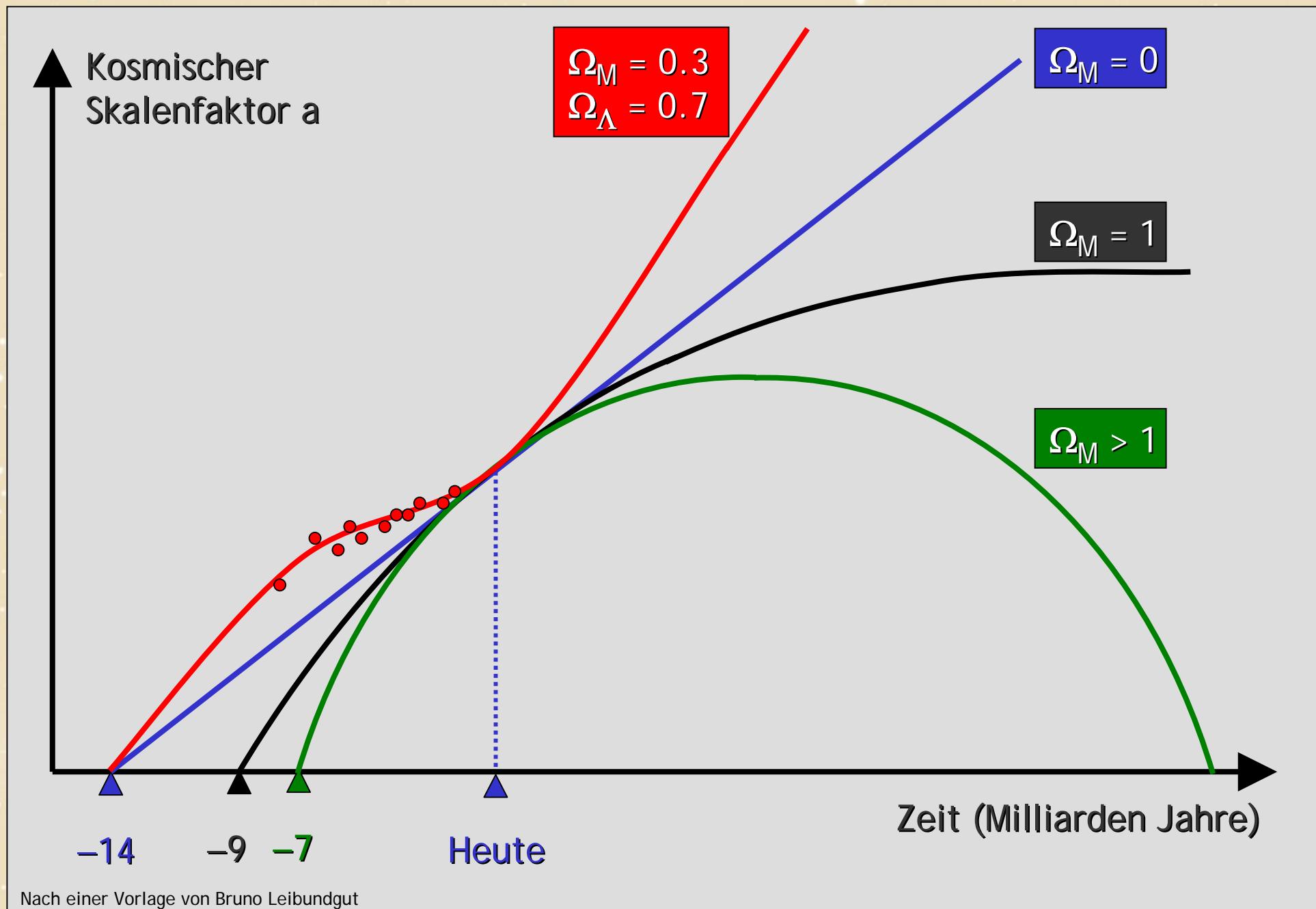
Hubble Diagramm – Beschleunigte Expansion



Beschleunigte
Expansion

Abgebremste Expansion
(Normale Materie)

Expansion verschiedener kosmologischer Modelle



Einstiens „Größte Eselei“

Dichte gravitierender Masse & Energie

Newton'sche Konstante

Krümmungsterm
ist sehr klein oder Null
(Euklidische Raumgeometrie)

Friedmann Gleichung für
Hubbles Expansionsrate

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

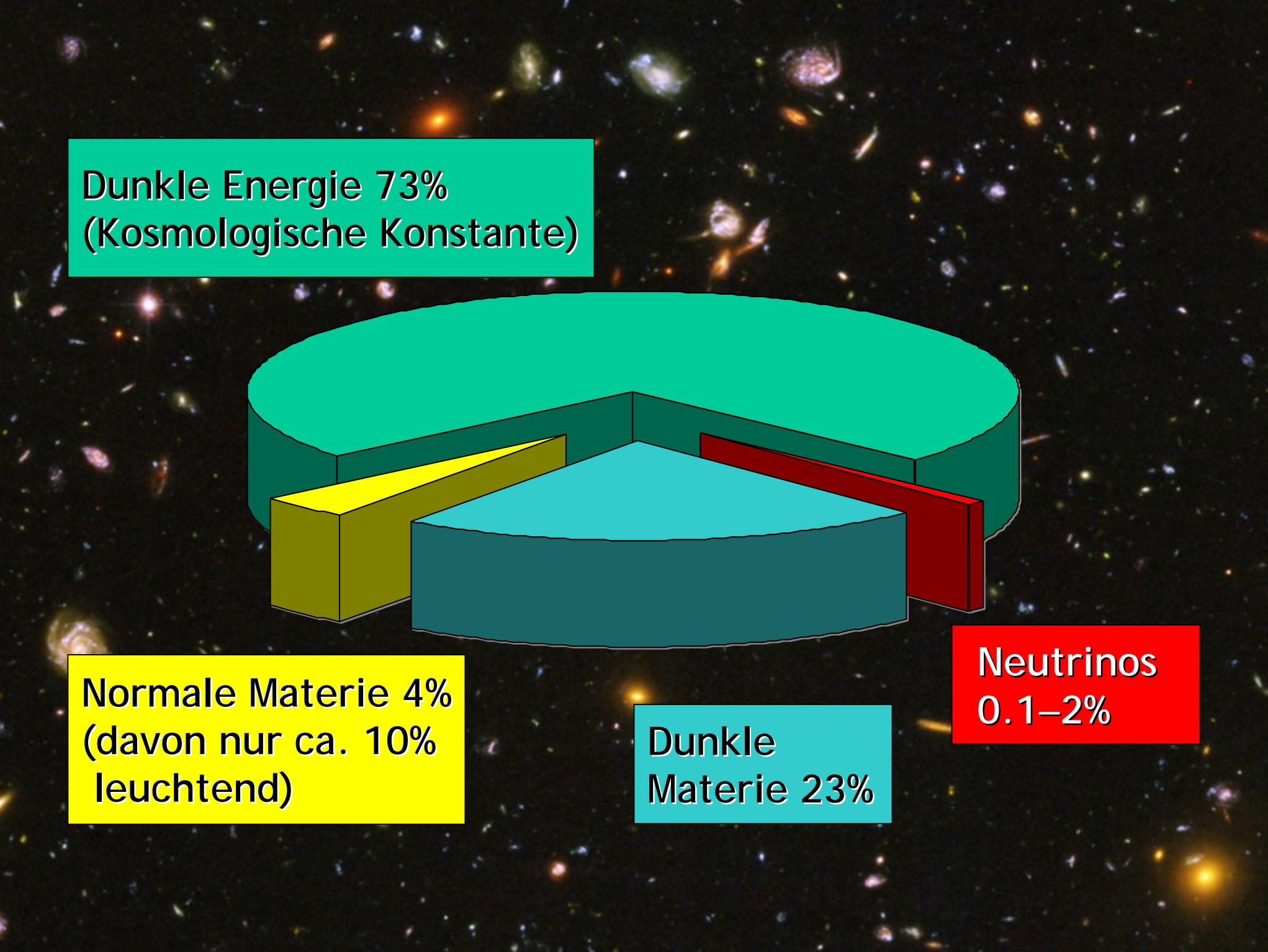


**Yakov
Borisovich
Zeldovich**
1914-1987



Kosmologische Konstante Λ
(neue Naturkonstante)
erlaubt statisches Universum
durch „globale Antigravitation“

- Quantenfeldtheorie der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen impliziert unausweichlich Vakuumfluktuationen
- Grundzustand (Vakuum) besitzt gravitierende Energie
- Vakuumenergie ρ_{vac} äquivalent zu Λ



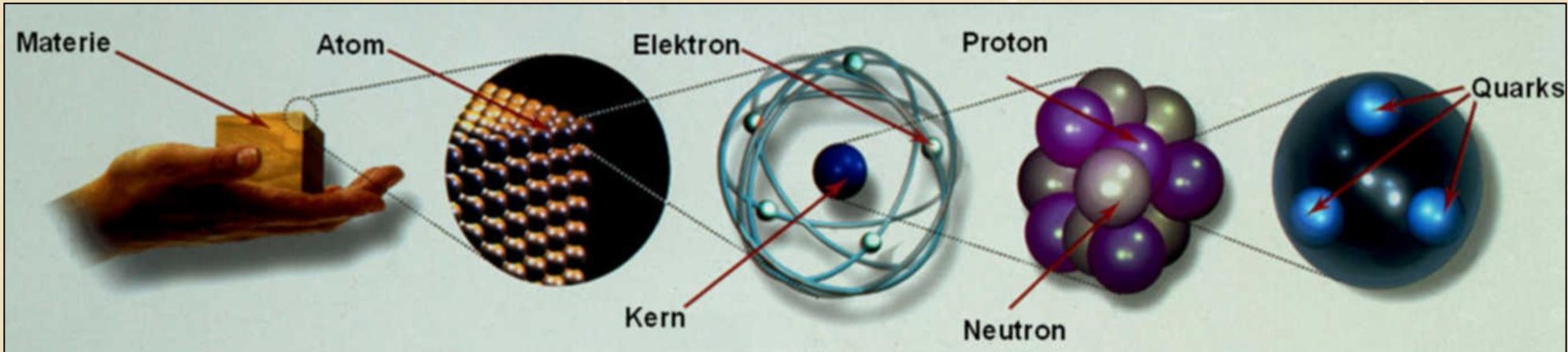
Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)

Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

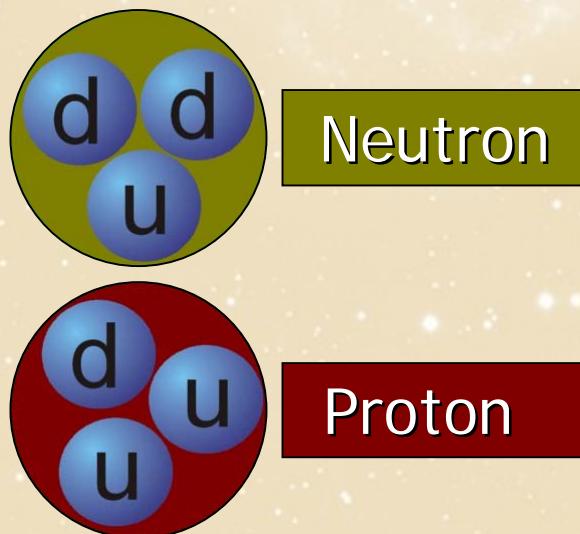
Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%

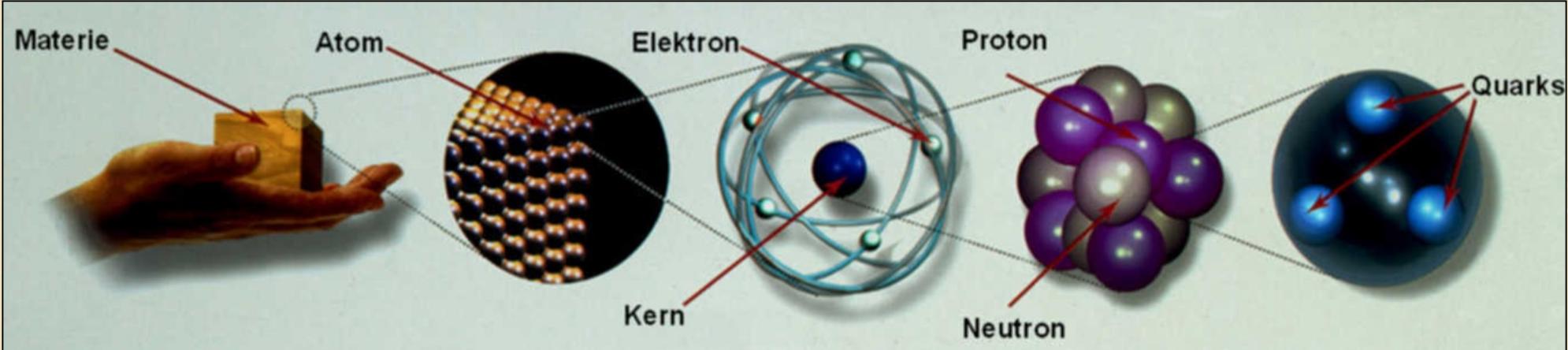
Periodensystem der Elementarteilchen



Quarks		Leptonen	
Ladung	+2/3	Ladung	-1/3
Up	u	Down	d
Elektron	e	e-Neutrino	ν_e

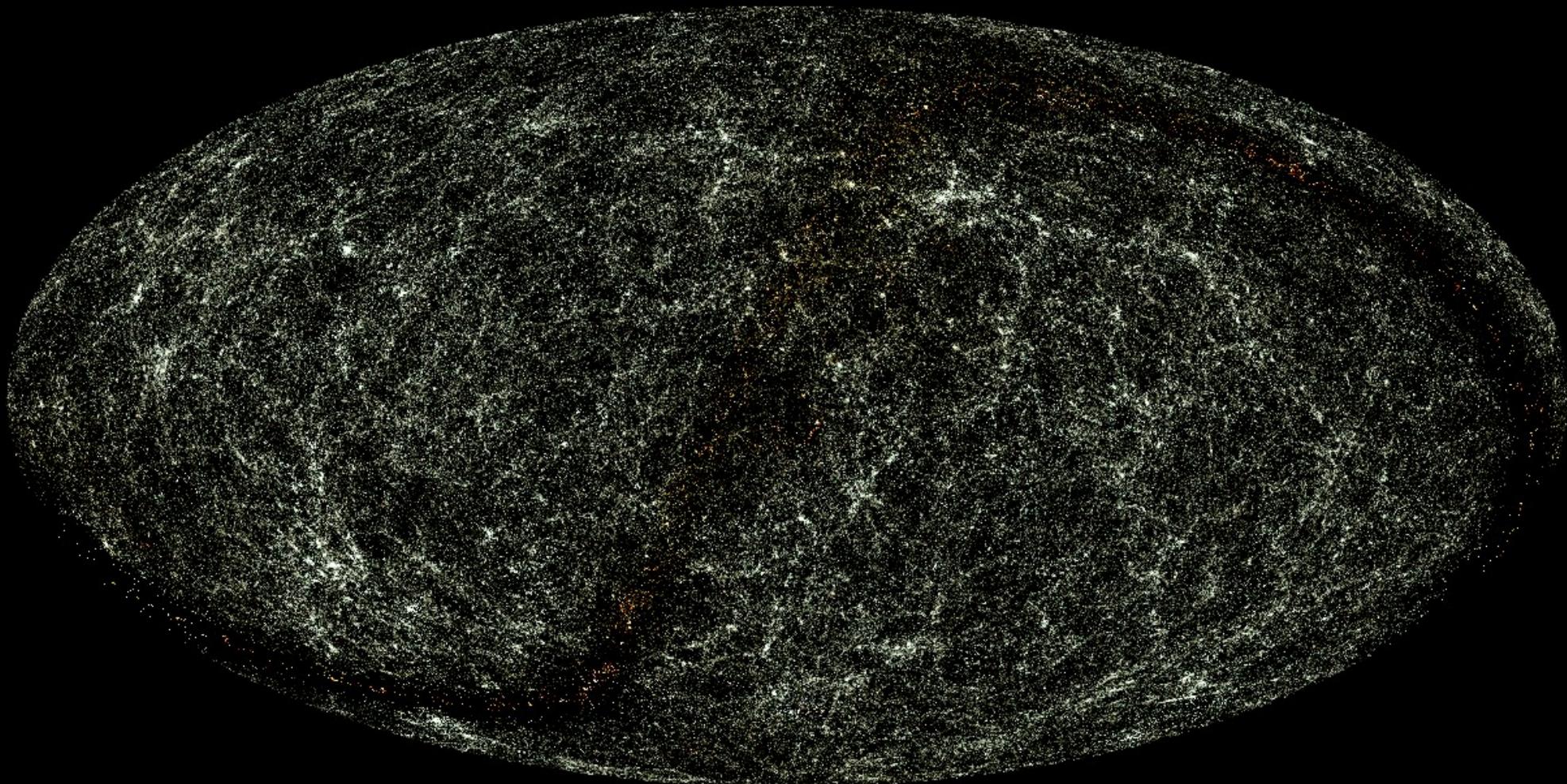


Periodensystem der Elementarteilchen



Quarks		Leptonen					
Ladung	+2/3	Ladung	-1/3	Ladung	-1	Ladung	0
1. Familie	Up u	Down d	Elektron e	e-Neutrino	ν_e		
2. Familie	Charm c	Strange s	Myon μ	μ -Neutrino	ν_μ		
3. Familie	Top t	Bottom b	Tauon τ	τ -Neutrino	ν_τ		
Gravitation							
Schwache Wechselwirkung							
Elektromagnetische Wechselwirkung							
Starke Wechselwirkung							

Himmelsverteilung der Galaxien (XMASS XSC)

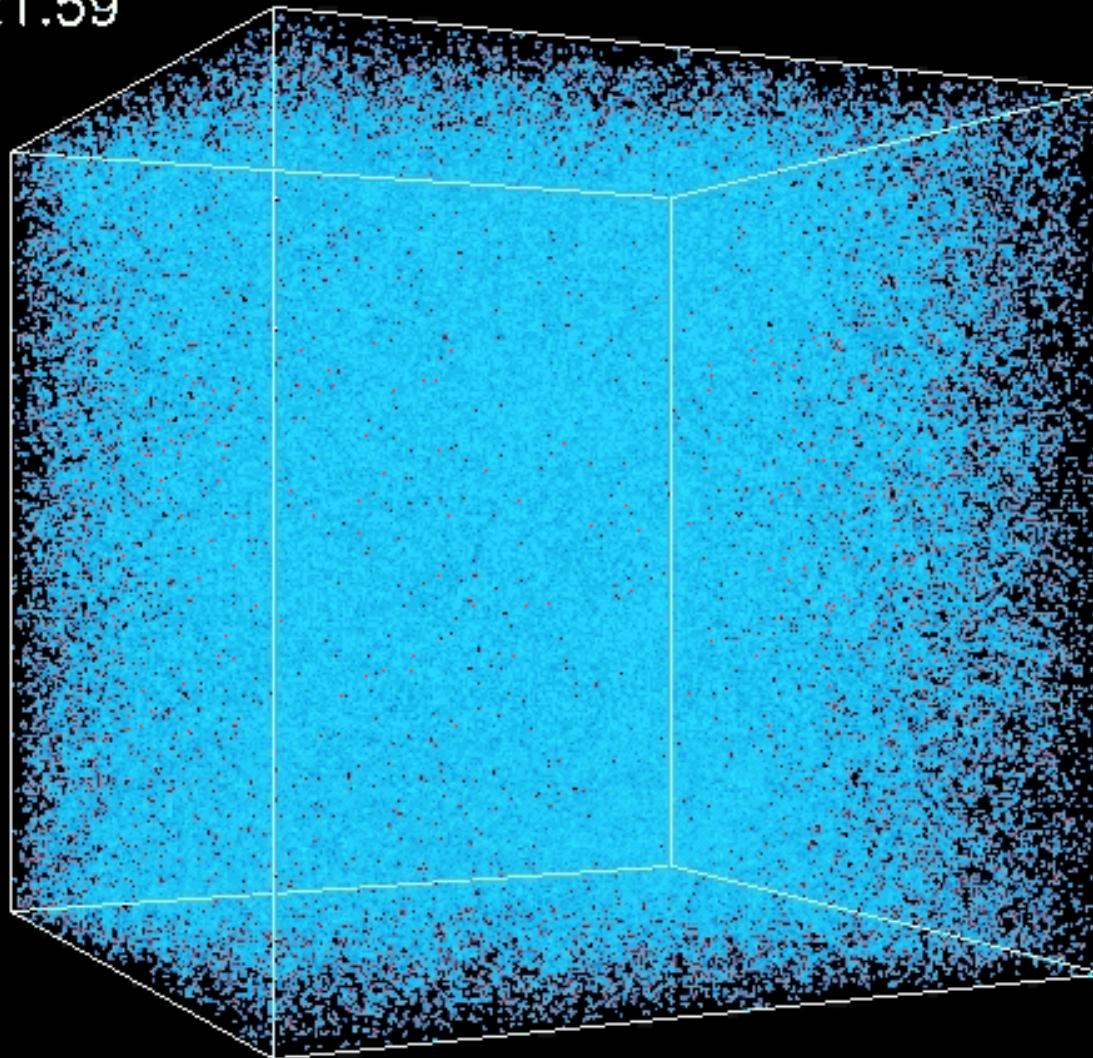


http://spider.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/2mass/XSC/jarrett_allsky.html



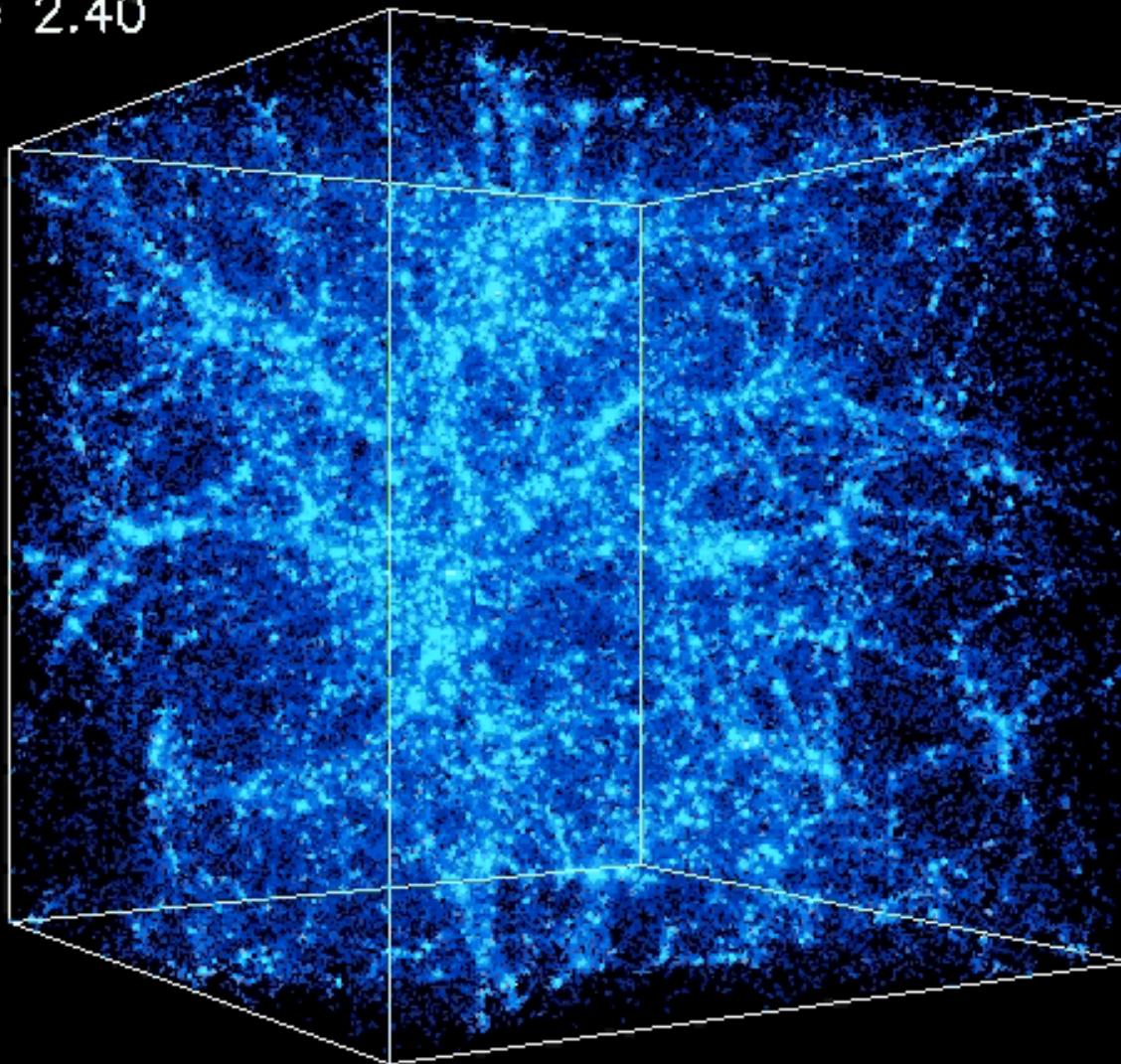
Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

$Z=21.59$



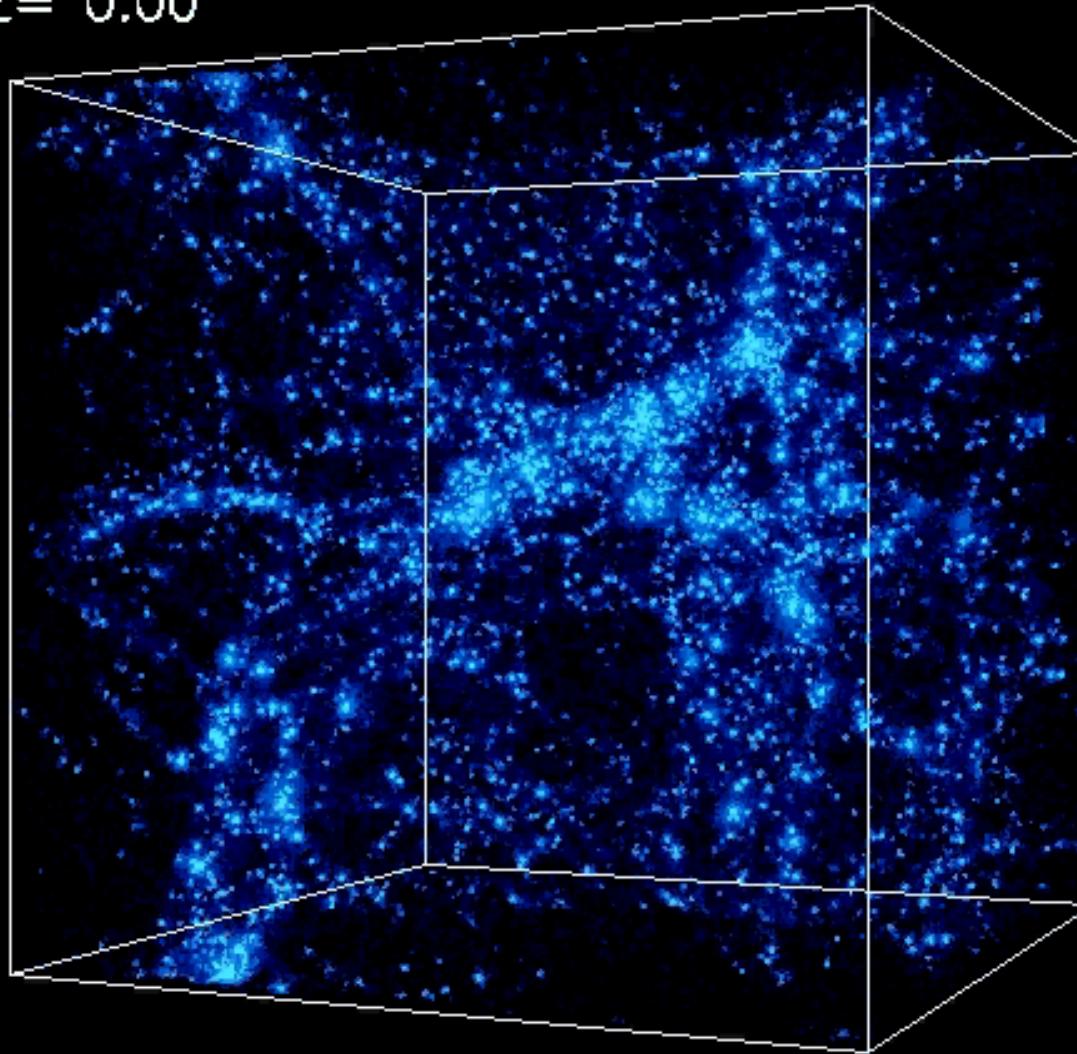
Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

$Z = 2.40$



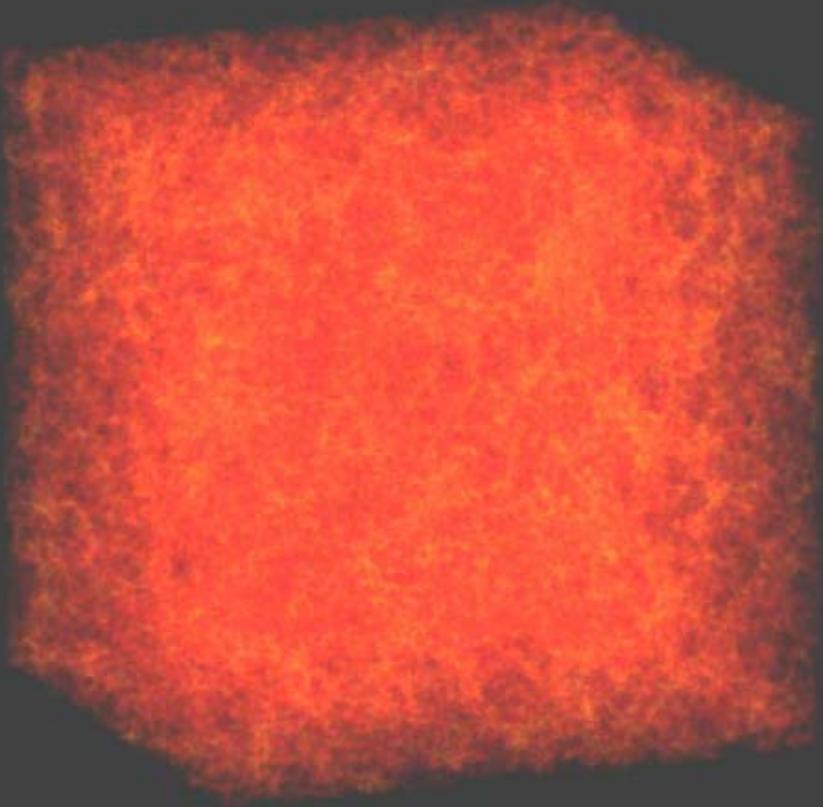
Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

$Z = 0.00$

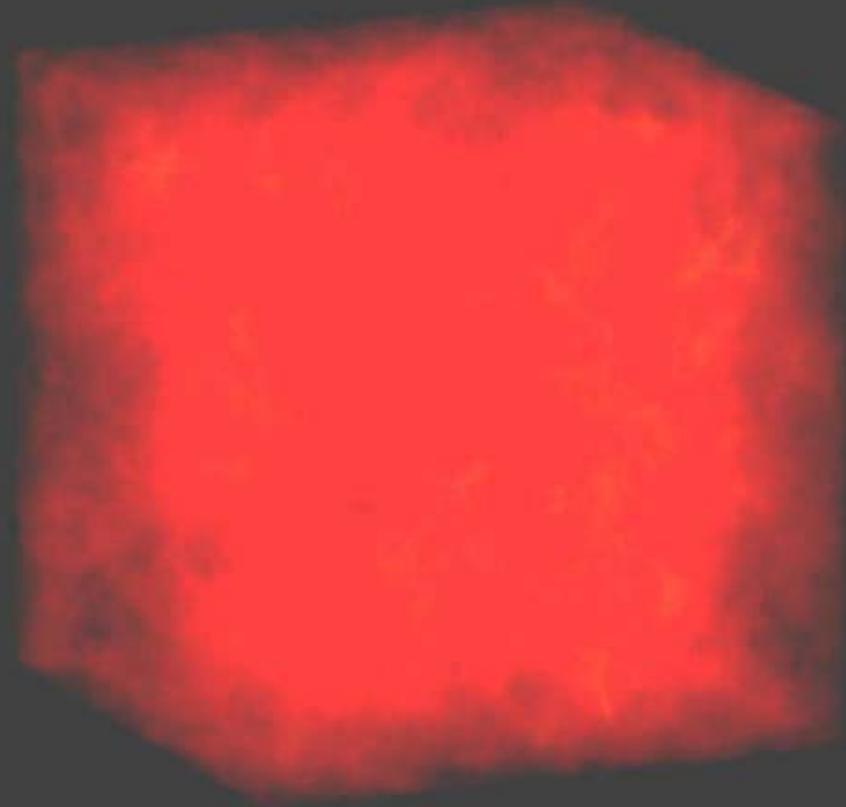


Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 6.98$



Standard Λ CDM Model



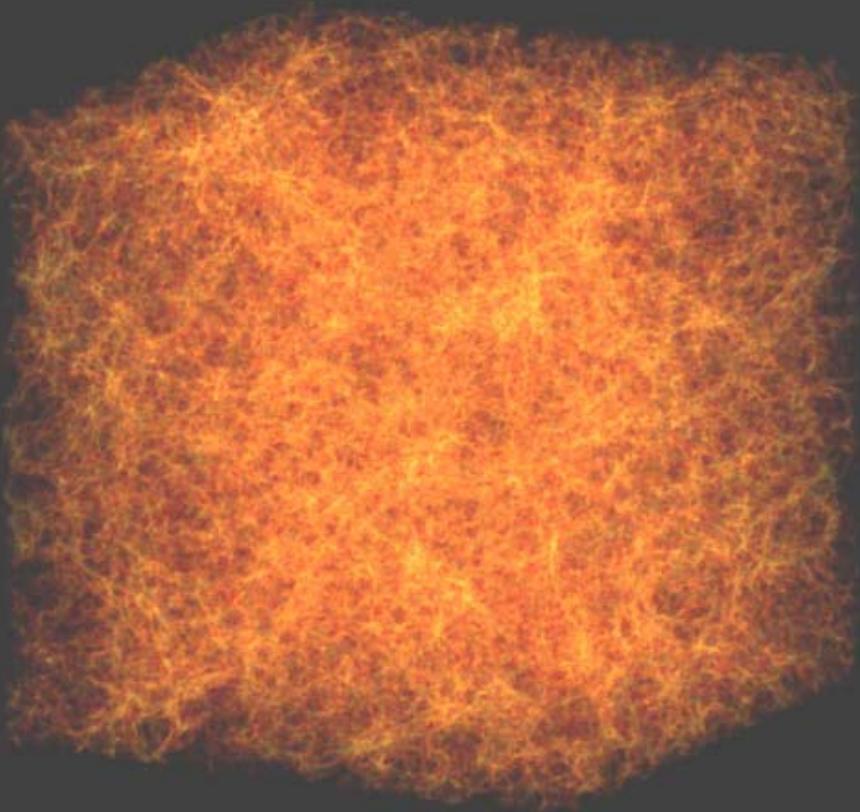
Neutrinos mit $\sum m_\nu = 6.9$ eV
Experimentelle Schranke

Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm
Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

Troels Haugbølle, <http://whome.phys.au.dk/~haugboel>

Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 1.80$



Standard Λ CDM Model



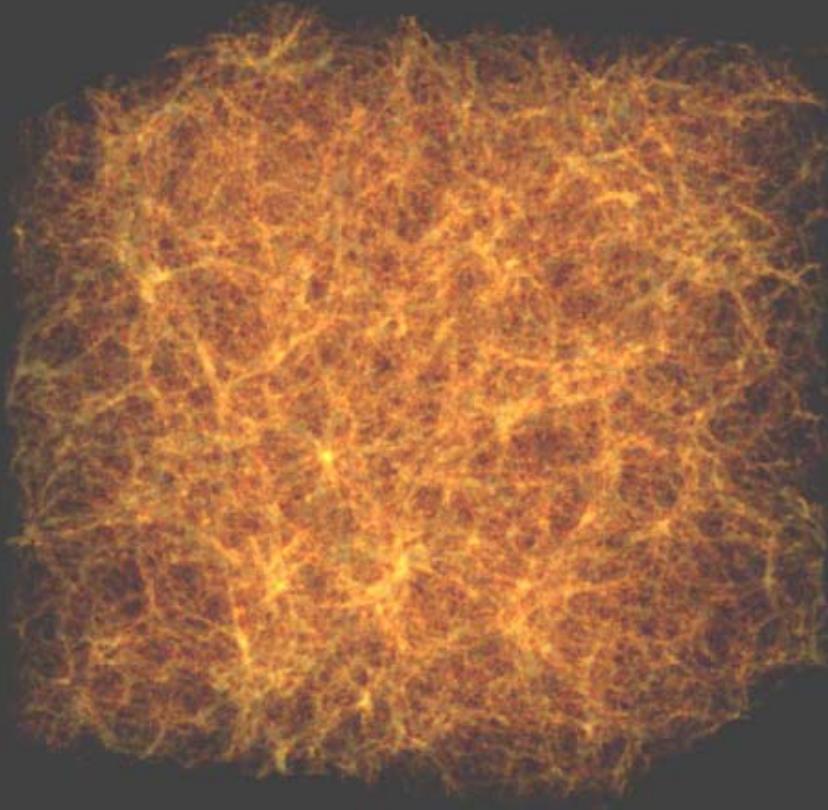
Neutrinos mit $\sum m_\nu = 6.9$ eV
Experimentelle Schranke

Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm
Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

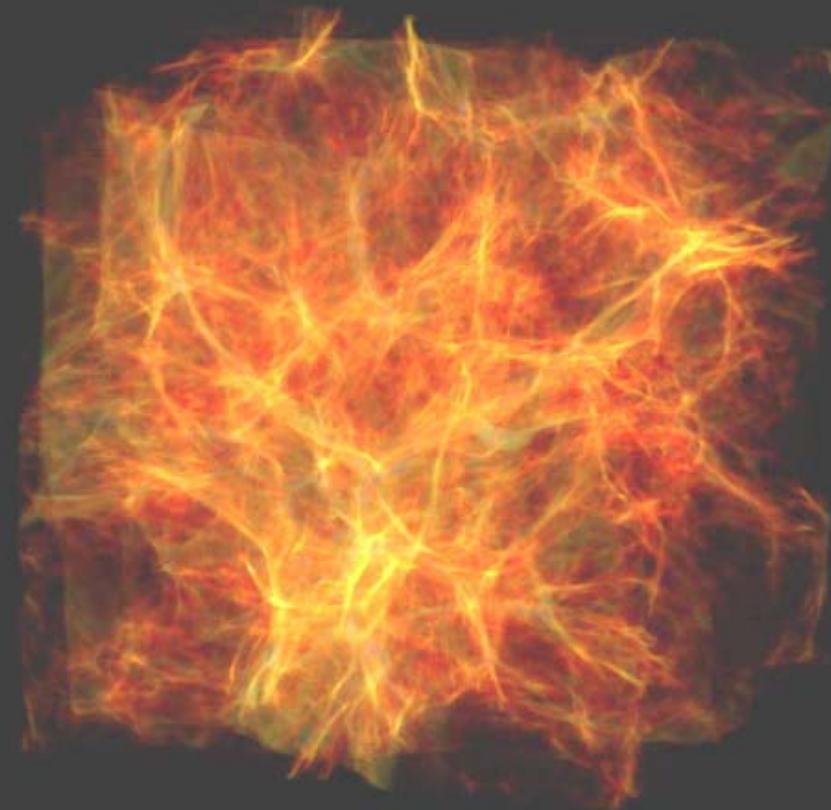
Troels Haugbølle, <http://whome.phys.au.dk/~haugboel>

Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 0.00$



Standard Λ CDM Model



Neutrinos mit $\sum m_\nu = 6.9$ eV
Experimentelle Schranke

Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm
Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

Troels Haugbølle, <http://whome.phys.au.dk/~haugboel>

The Standard Model of Elementary Particles

leptons quarks



force carriers

Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)

Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle Materie 23%

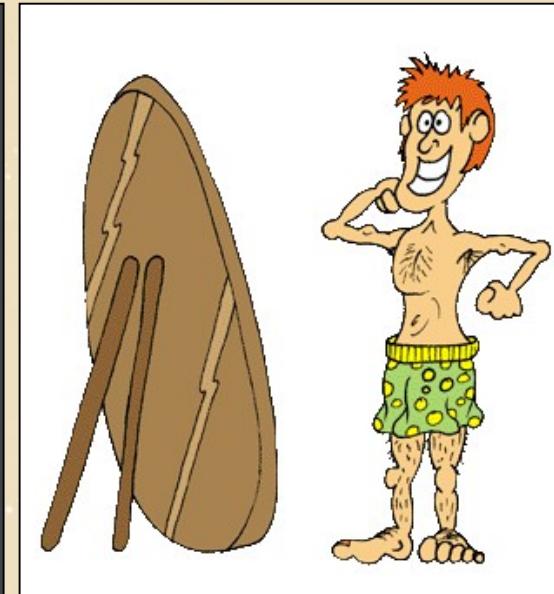
Neutrinos
0.1–2%

Schwach wechselwirkende Teilchen als Dunkle Materie

Eigenschaften für Teilchen der dunklen Materie:

- Schwach wechselwirkend („unsichtbar“) wie Neutrinos
- Grosse Masse („kalte dunkle Materie“) im Gegensatz zu Neutrinos

WIMPs (Weakly interacting massive particles)
(engl. „Schwächlinge“)



Thermisches Gleichgewicht im heißen frühen Universum:

$\text{WIMP} + \text{WIMP} \rightleftharpoons \text{Teilchen} + \text{Antiteilchen}$

- WIMPs überleben dank schwacher Wechselwirkung!
(„Survival of the Weakest“)
- Dominieren im heutigen Universum



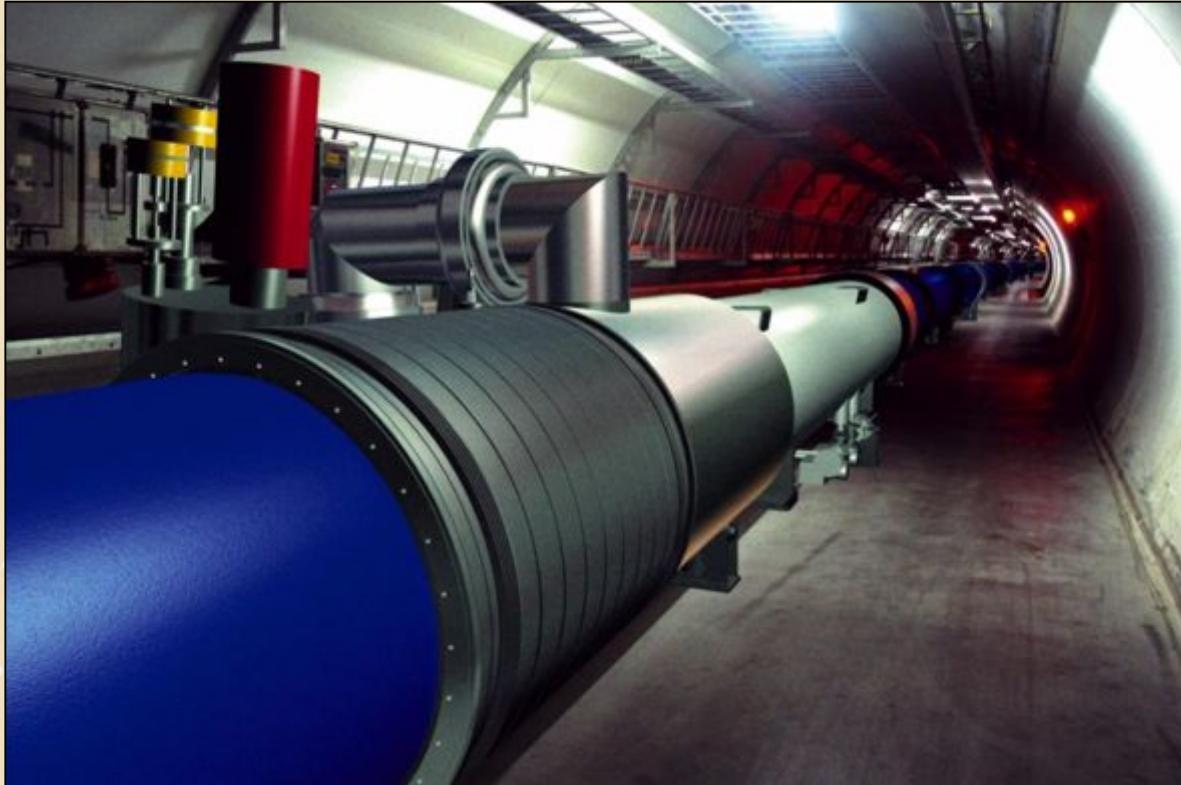
Alternative zu schweren Neutrinos: Neutralinos

Symmetrie zwischen „Teilchen“ und „Kräften“
Bosonischer Partner zu jedem Fermion und umgekehrt

Spin	Standardteilchen	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, ν_e, \dots) Quarks (u, d, \dots)	Sleptons ($\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$) Squarks ($\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$)	0
1	Gluons W^\pm Z^0 Photon (γ)	Gluinos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

Ein Kandidat für die dunkle Materie ist das „Neutralino“,
eine Kombination aus Photino, Zino und Higgsino

Suche nach SUSY mit dem Large Hadron Collider (LHC)



LHC am CERN (Genf)

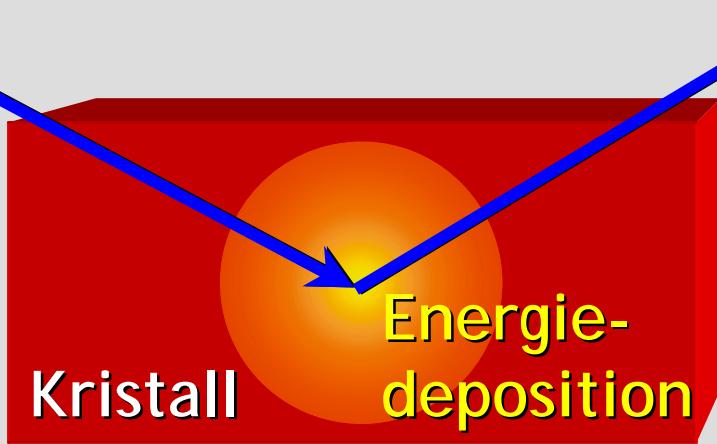


- Protonen werden mit den bisher höchsten Energien zur Kollision gebracht
- Entdeckung neuer Teilchen wird erwartet, z.B. Higgs-Teilchen und die supersymmetrischer Partner der normalen Materie



Direkte Suche nach Neutralinos als Dunkler Materie

Galaktisches
Teilchen der
dunklen Materie
(z.B. Neutralino)



Gemessen wird
Rückstoss-Energie
(einige keV) durch

- **Ionisation**
- **Szintillation**
- **Kryogenisch**

Sehr selten: Weniger als 1 Ereignis pro Woche und Kilogramm

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 31, NUMBER 12

15 JUNE 1985

Detectability of certain dark-matter candidates

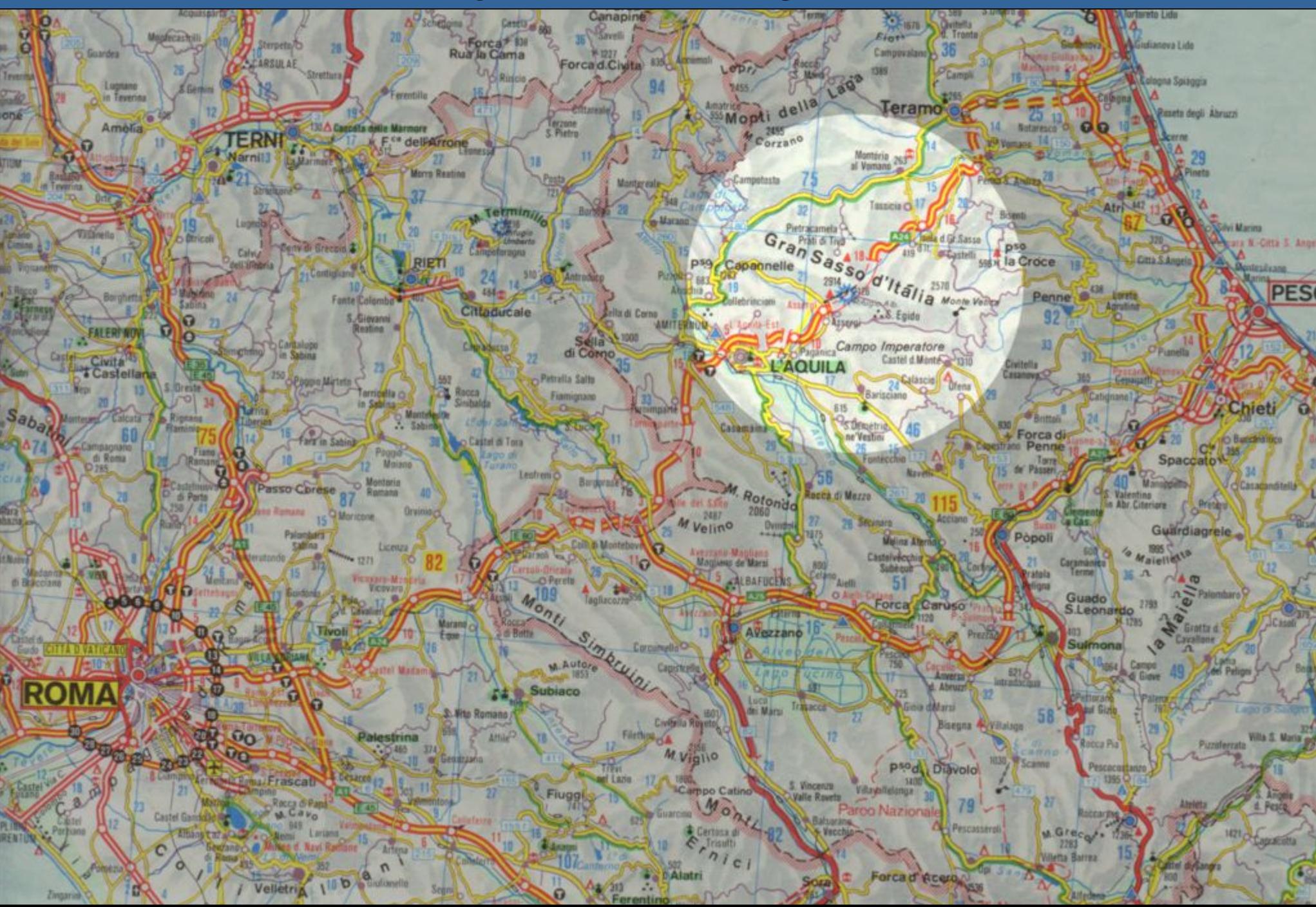
Mark W. Goodman and Edward Witten

Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

(Received 7 January 1985)

We consider the possibility that the neutral-current neutrino detector recently proposed by Drukier and Stodolsky could be used to detect some possible candidates for the dark matter in galactic halos. This may be feasible if the galactic halos are made of particles with coherent weak interactions and masses $1-10^6$ GeV; particles with spin-dependent interactions of typical weak strength and masses $1-10^2$ GeV; or strongly interacting particles of masses $1-10^{13}$ GeV.

Physik im Untergrund

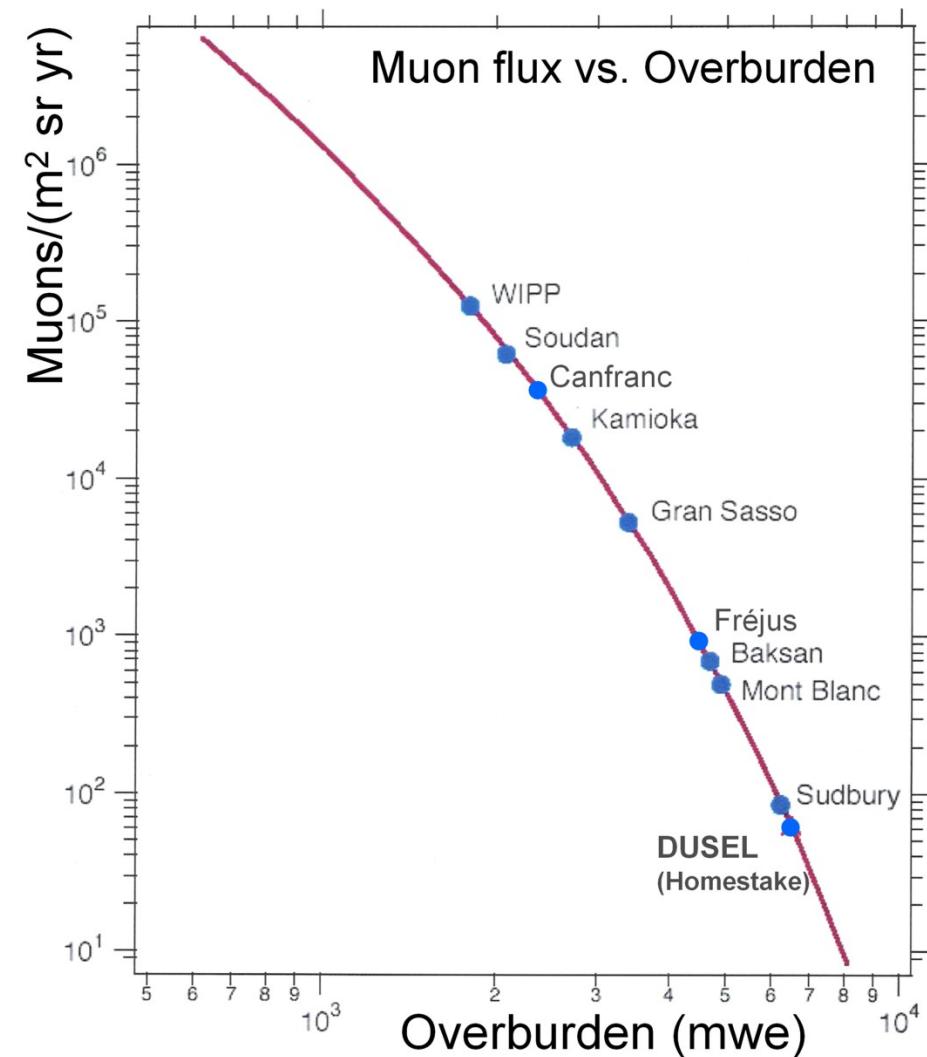


Physik im Untergrund

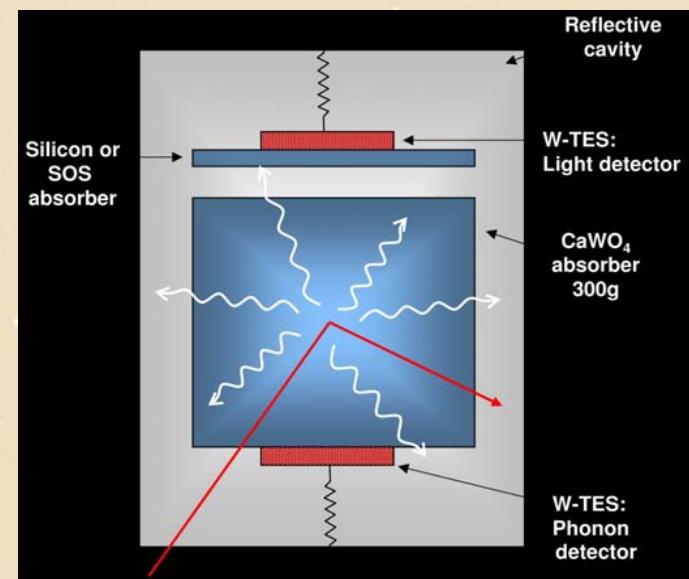
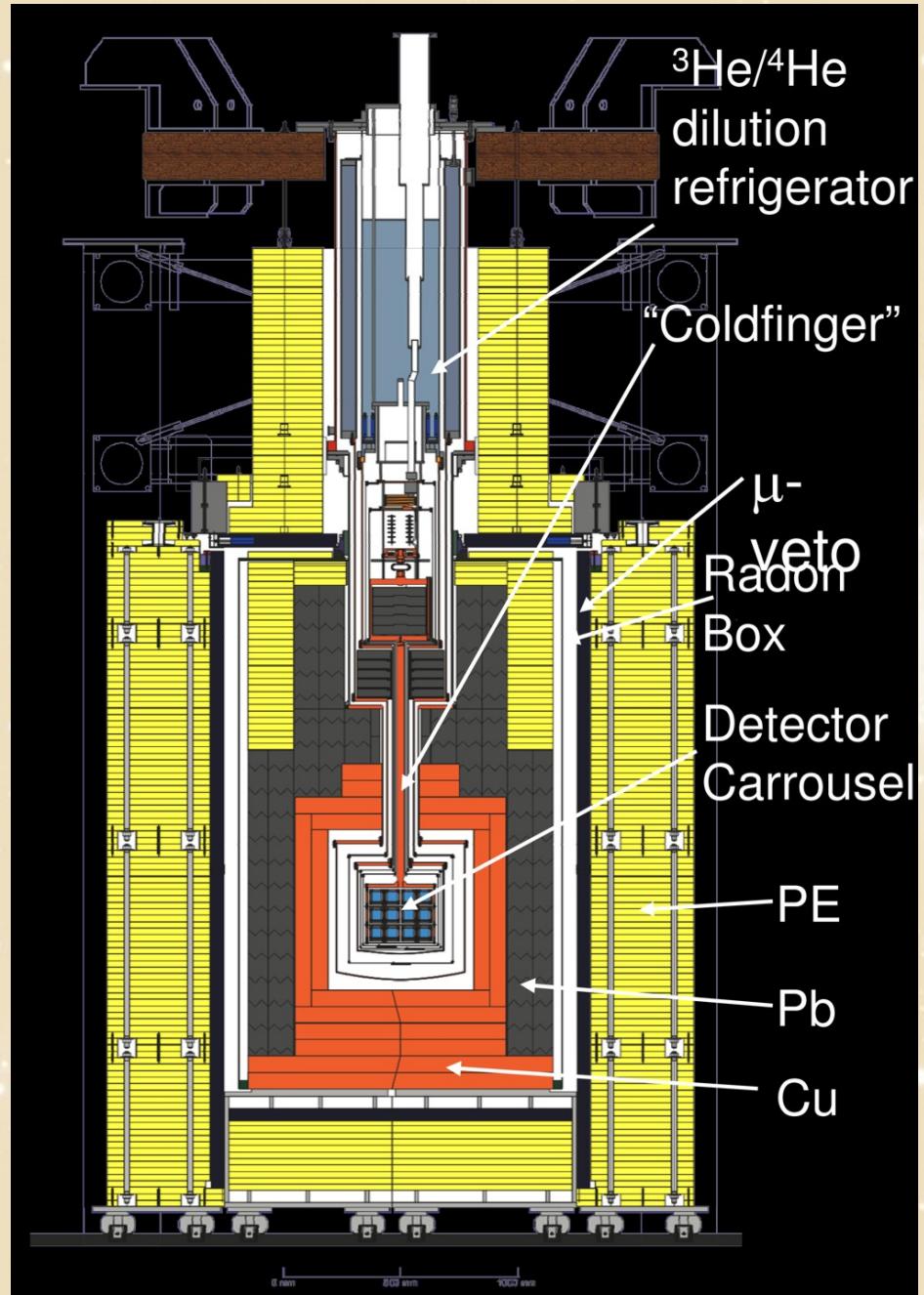


Gran Sasso Untergrundlabor (Italien)

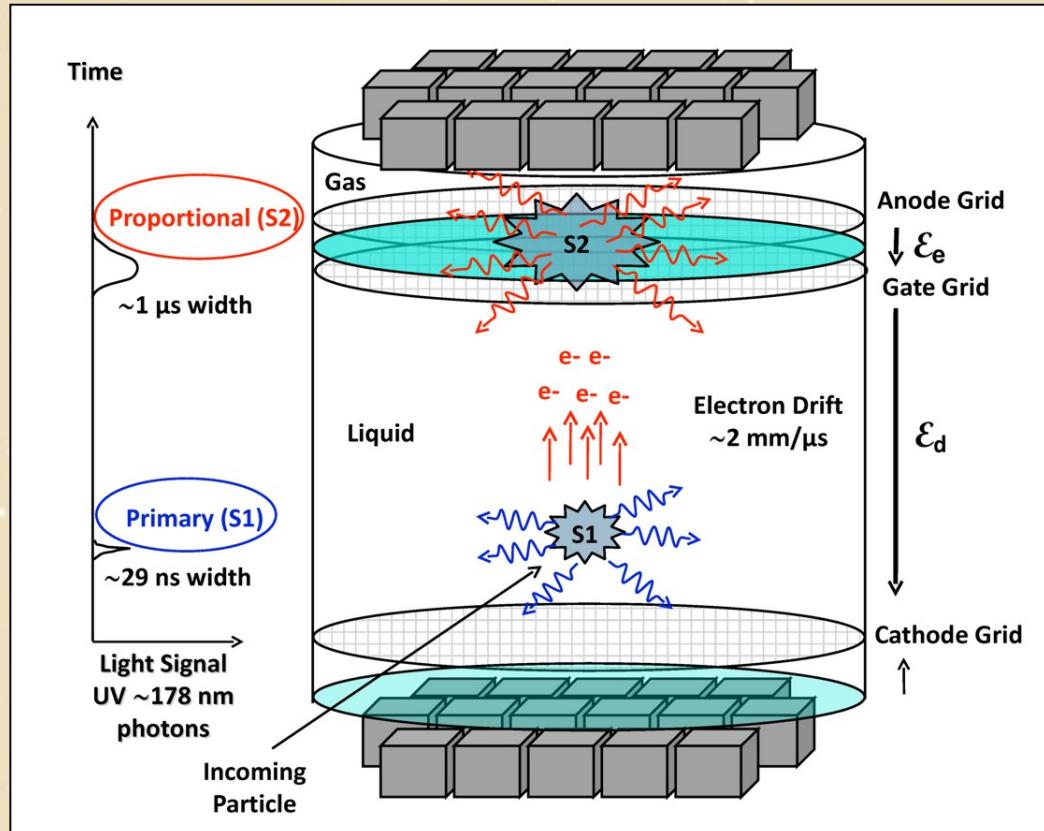
- Unterdrückung von Störsignalen grundlegend für WIMP-Suche
- Abschirmung kosmischer Strahlung in Untergrundlabor



CRESST Experiment zur Suche nach der Dunklen Materie



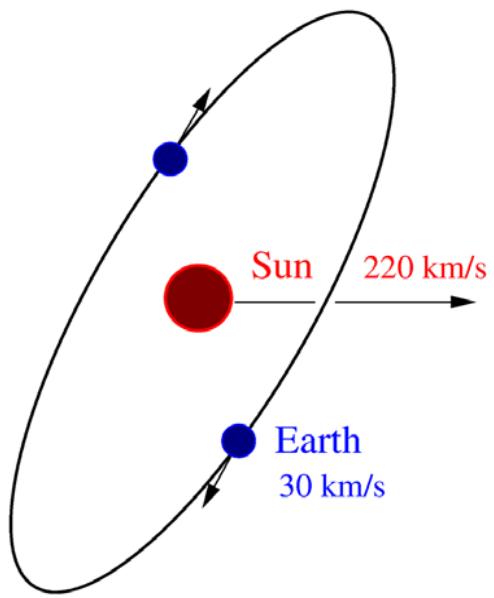
Xenon-100 Detektor (Gran Sasso)



Flüssiges Xenon (ca -100°C)

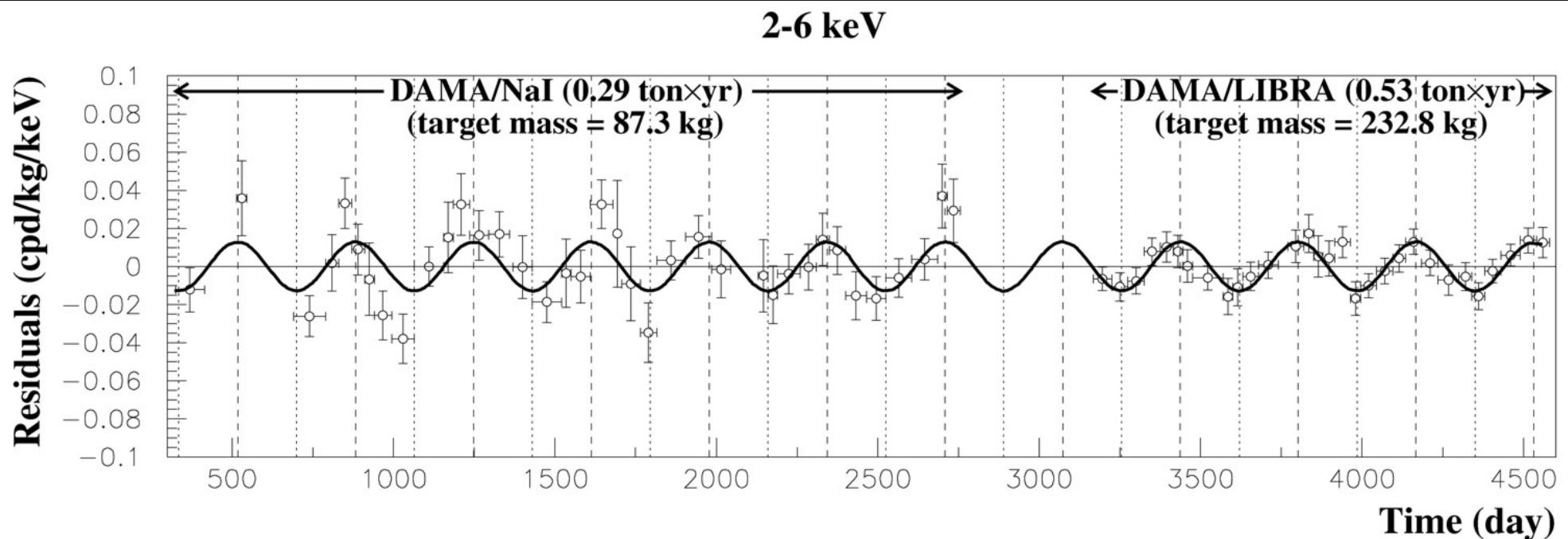
- Geringe Verunreinigung
- Relativ einfache Handhabung
- Skalierbar bis zu 1 Tonne?
- Empfindlichkeit dann bis zu 1 Ereignis / Tonne / Jahr

DAMA/LIBRA – Evidenz für WIMPs?

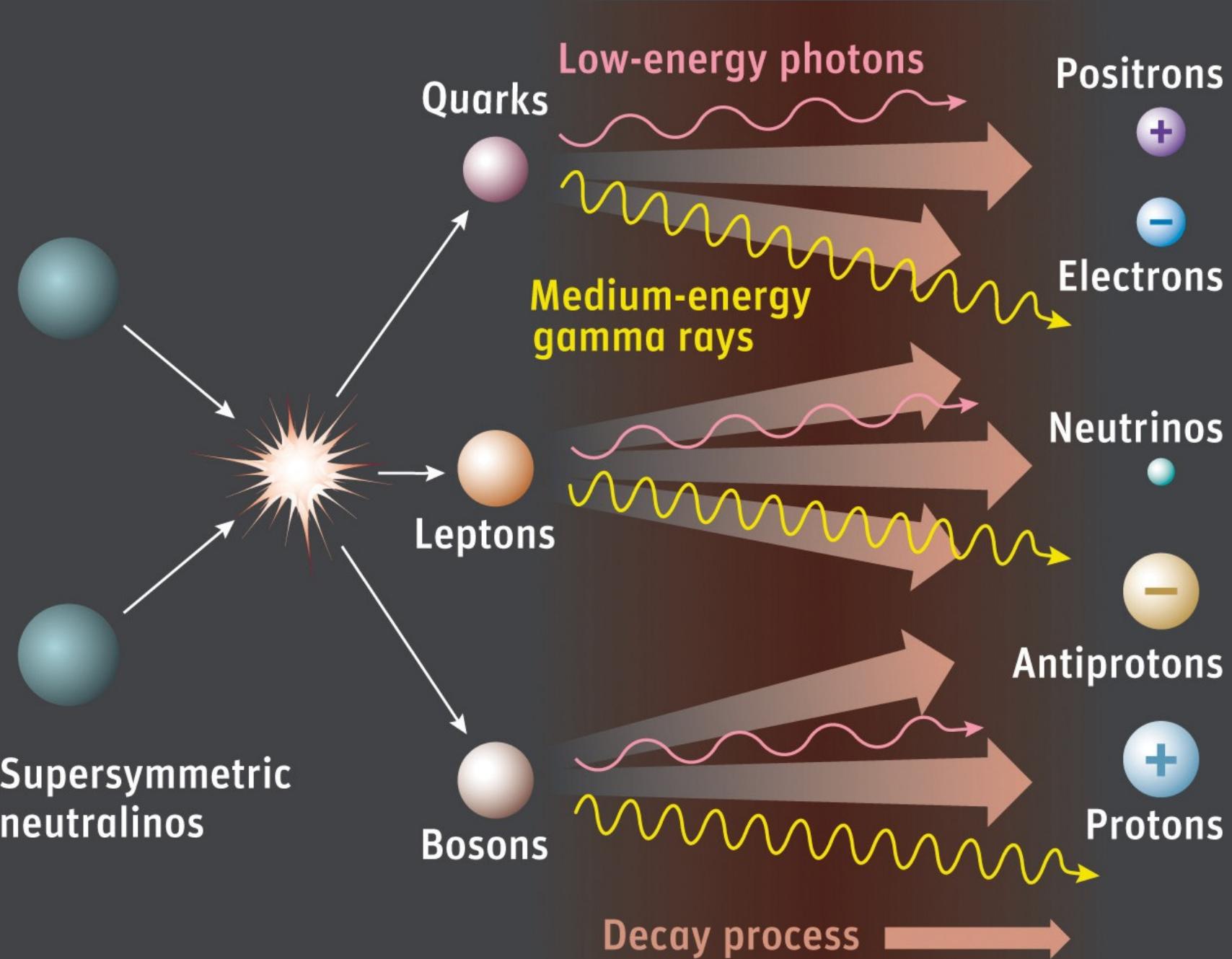


Das DAMA/LIBRA Experiment im Gran Sasso (NaI Detektor) beobachtet eine jährliche Modulation ihres Signals mit hoher statistische Signifikanz
[Riv. N. Cim. 26 (2003) 1–73, arXiv:0804.2741 (2008)]

- Detektor Stabilität ?
- „Hintergrund Stabilität“ ?

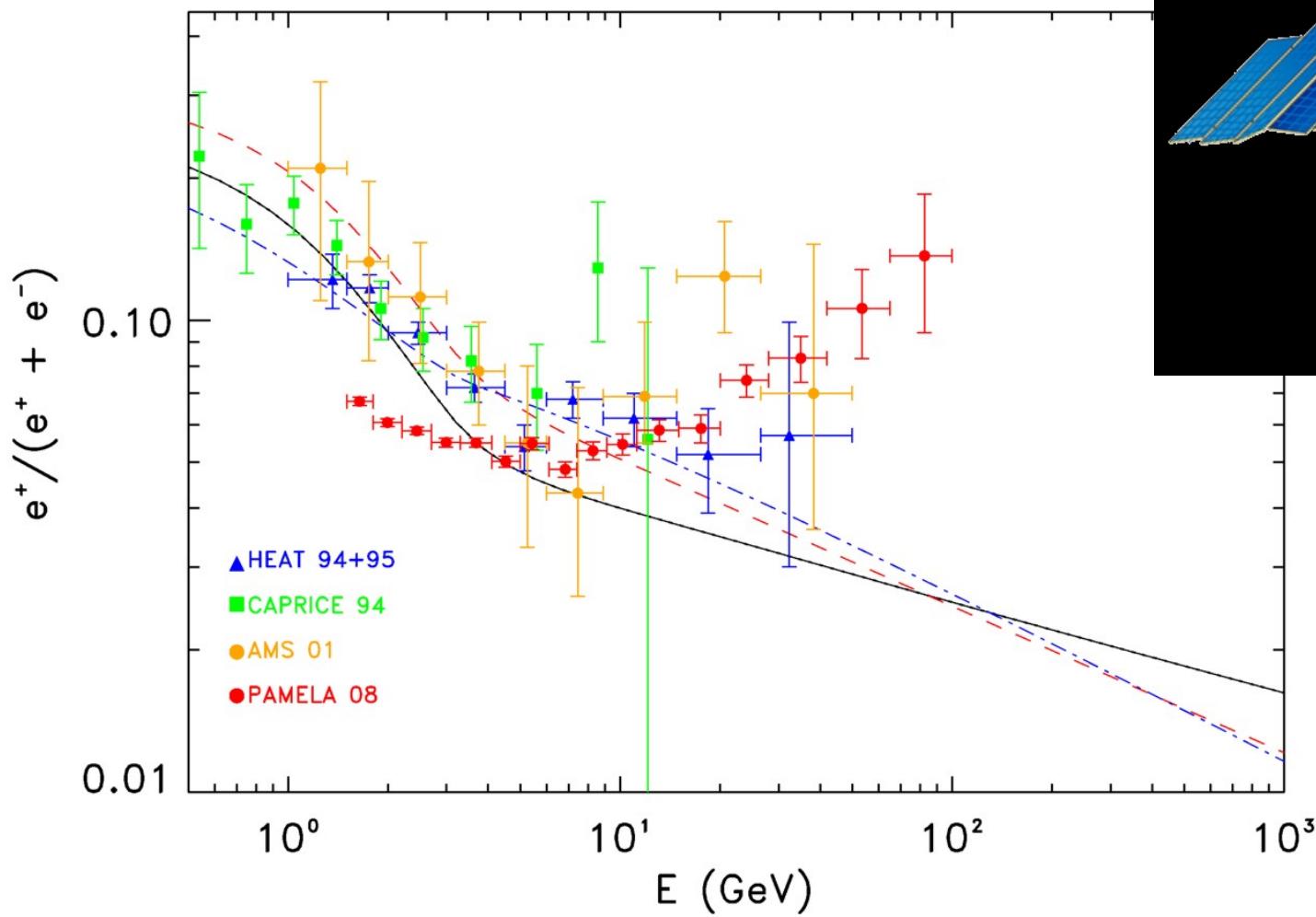


Selbst-Annihilation dunkler Materienteilchen

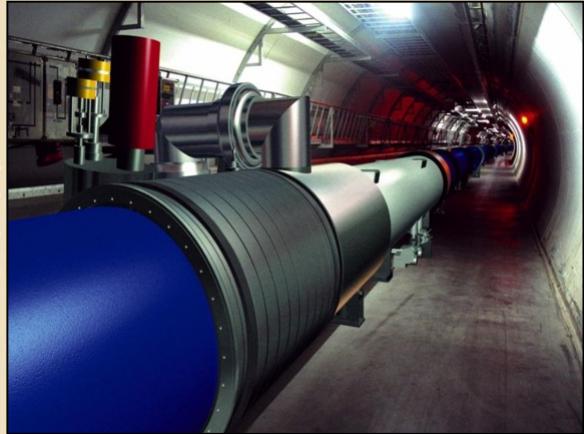


Positron Signal im Pamela Satellit

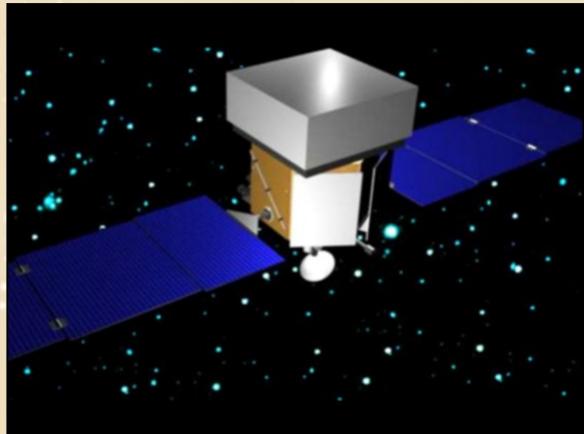
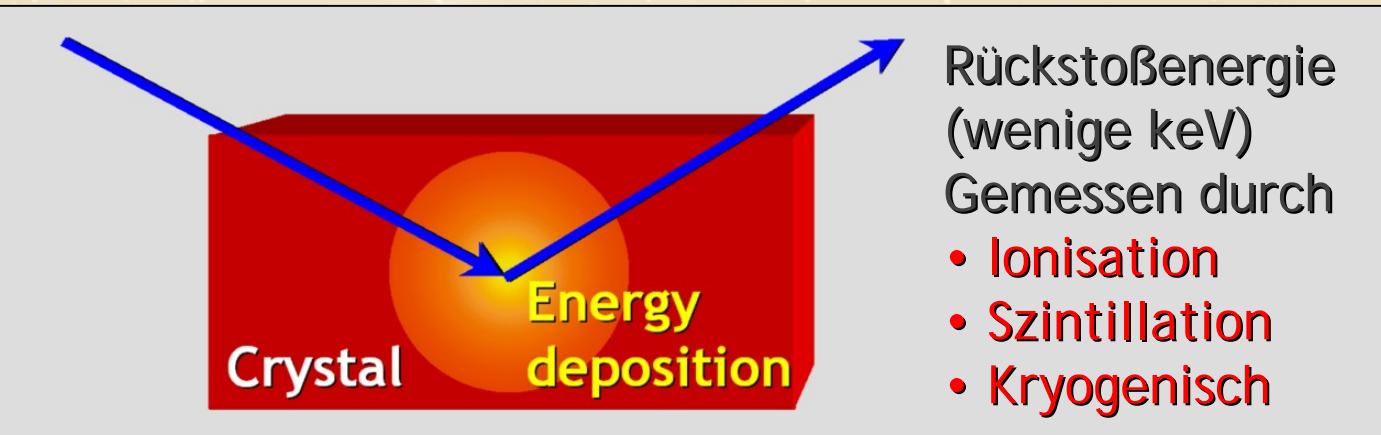
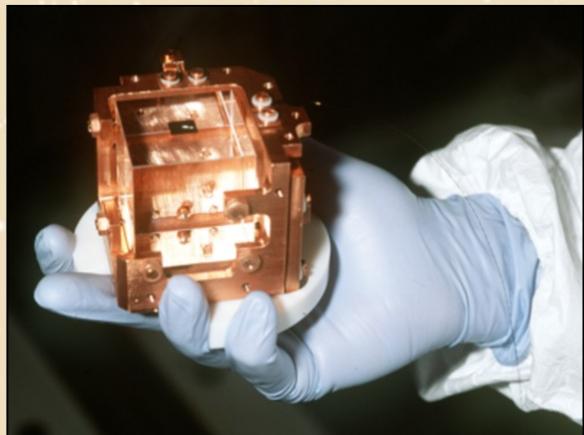
- Überzählige Positronen Hinweis auf Annihilation oder Zerfall dunkler Materie?
- Astrophysikalische Quellen (Pulsare) möglich



Die Jagd nach den Teilchen der dunklen Materie



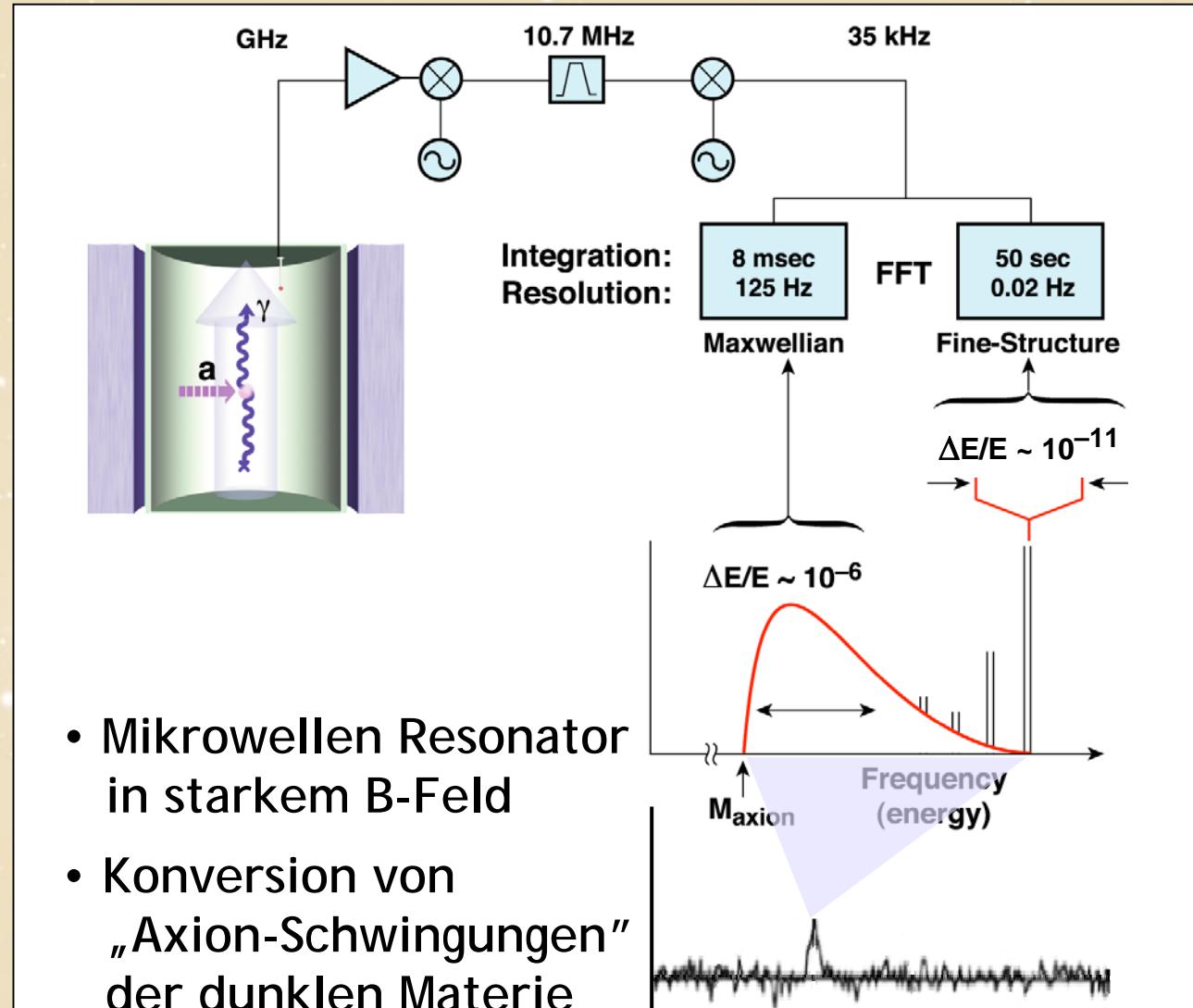
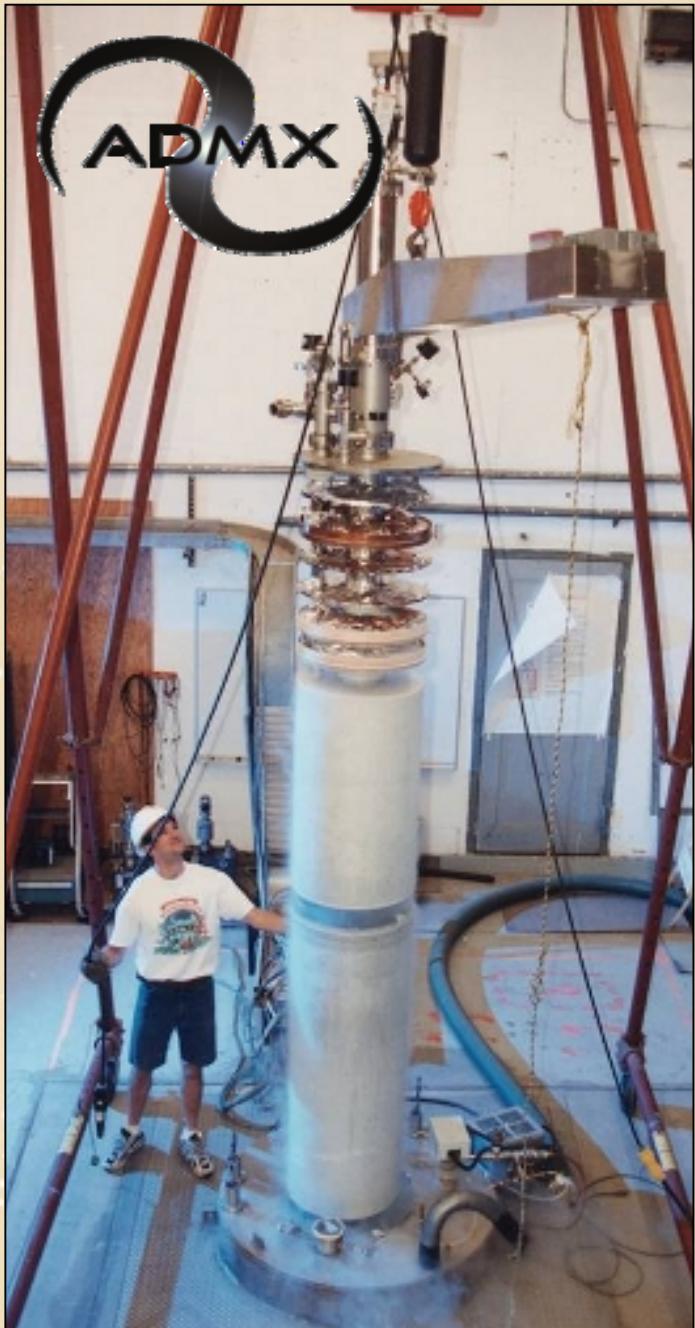
Suche nach neuen Teilchen an Beschleunigern,
vor allem am Large Hadron Collider (LHC)
am CERN in Genf (ab 2009)



Suche nach Annihilationsprodukten in der Galaxie

- Gamma Strahlung (z.B. EGRET, HESS, MAGIC, GLAST)
- Anti-Protonen (AMS, Pamela)
- Positronen (AMS, Pamela)
- Hochenergetische Neutrinos von der Sonne oder Erde
(z.B. Super-Kamikande, IceCube, Antares, ...)

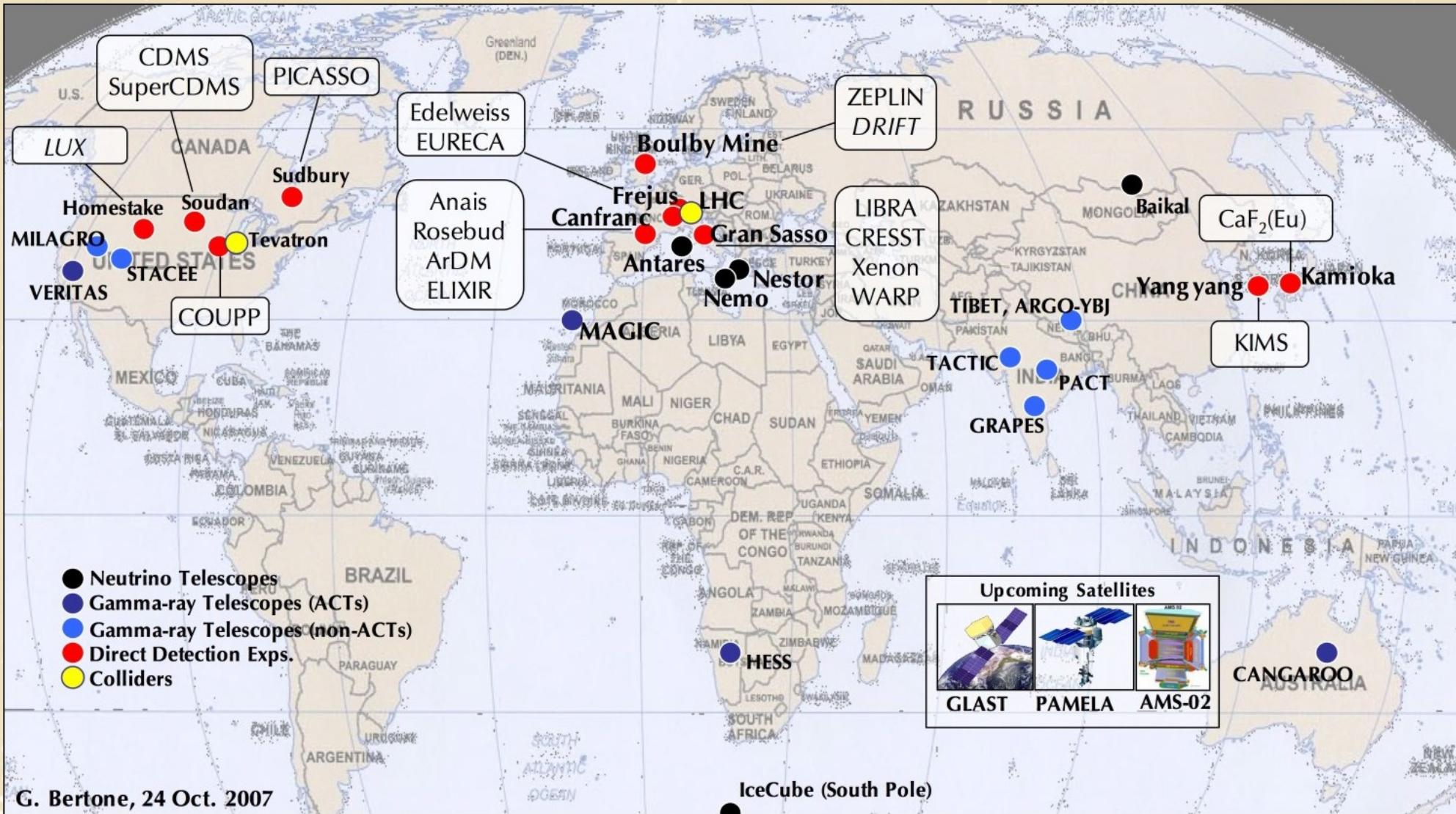
Das Axion Radio

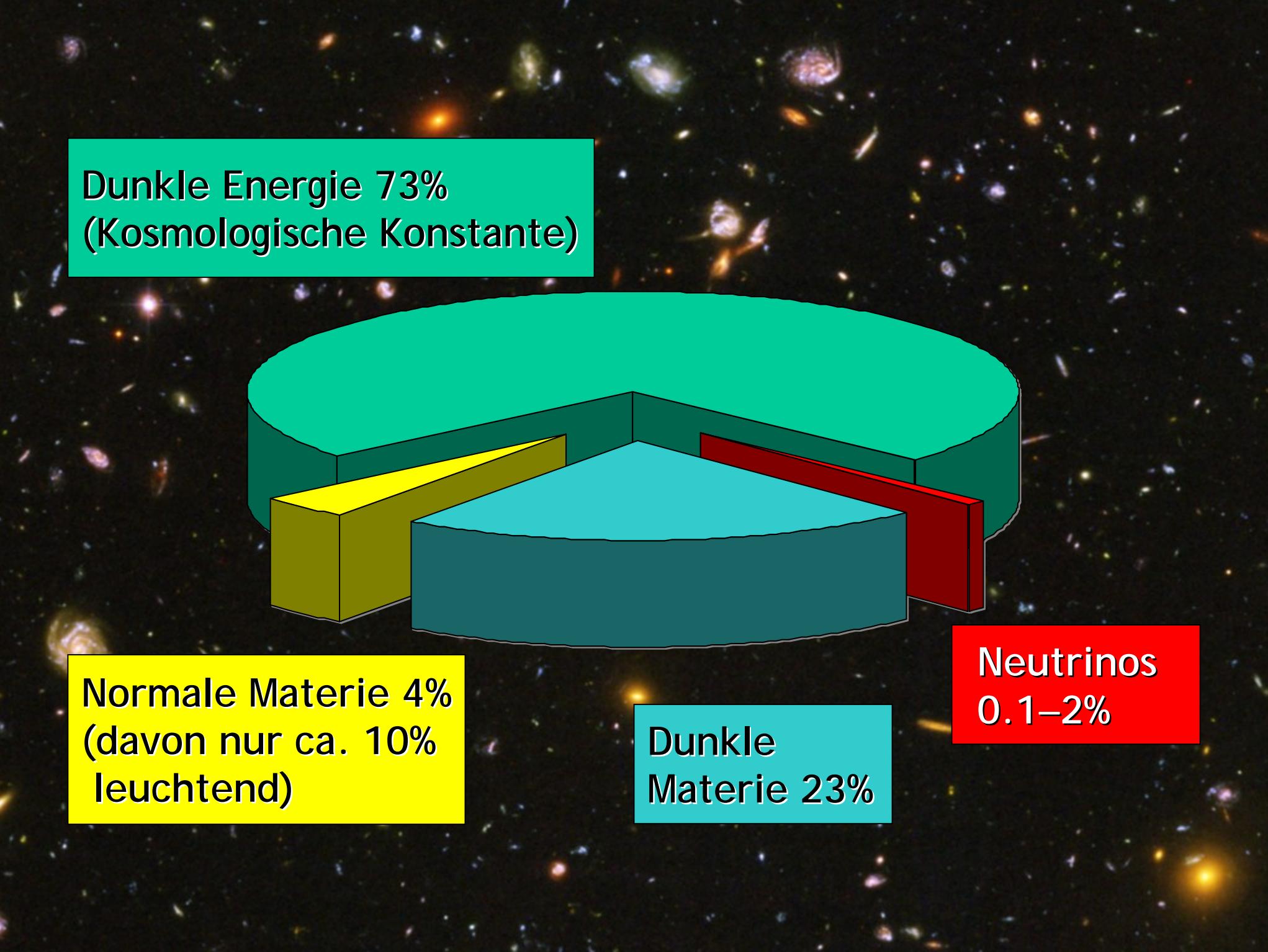


- Mikrowellen Resonator in starkem B-Feld
- Konversion von „Axion-Schwingungen“ der dunklen Materie

ADMX – Axion Dark Matter Experiment
Univ. Washington, Seattle

Weltweite Suche nach dunkler Materie



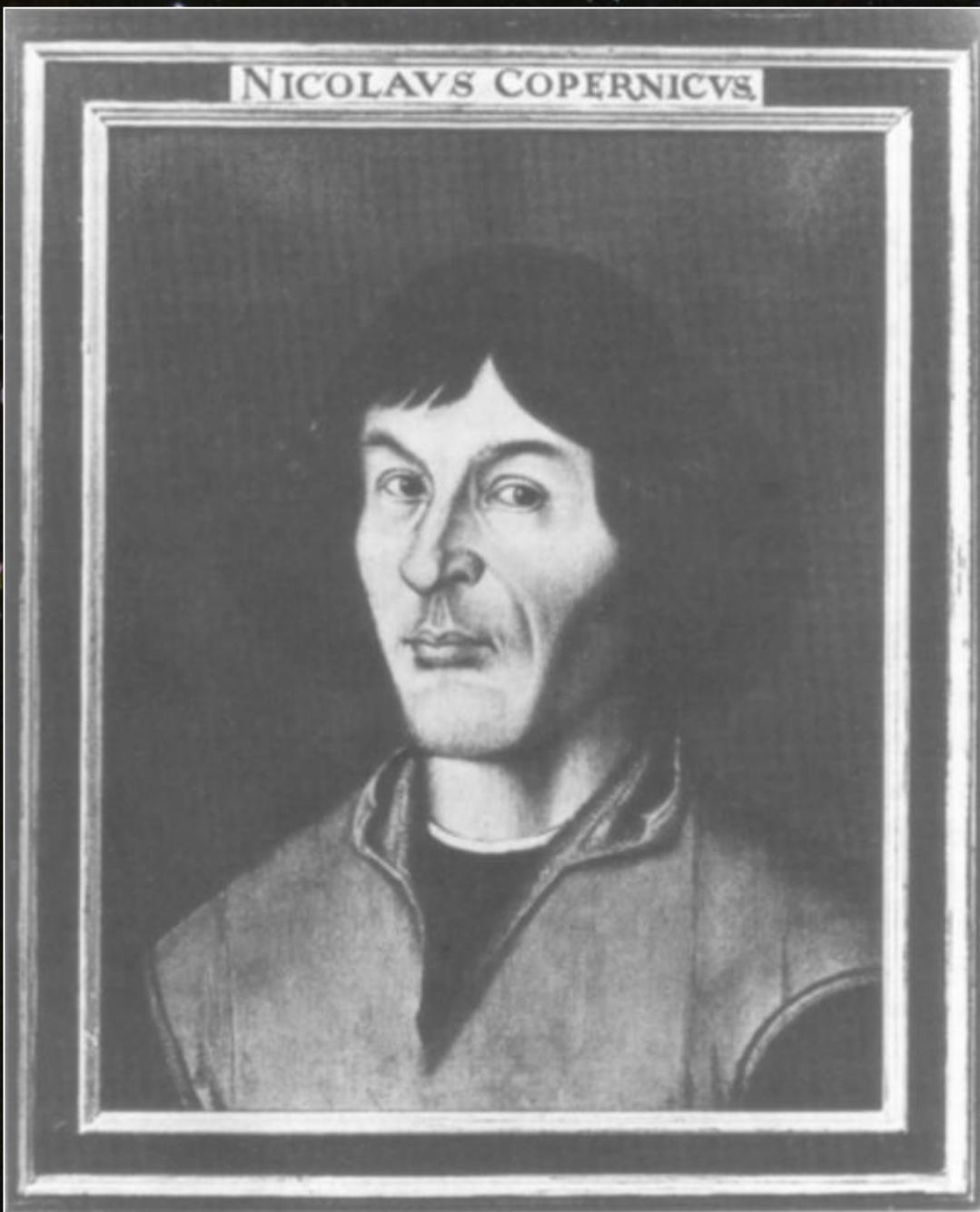


Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)

Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%



Nicolaus Copernicus (1473–1543)

6th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs

5-9 July 2010
Zurich University

Programme

- The physics case for WIMPs, Axions, WISPs
- Review of collider experiments
- Signals from astrophysical sources
- Direct searches for Dark Matter
- Indirect laboratory searches for Axions, WISPs
- Direct laboratory searches for Axions, WISPs
- New theoretical developments

Organizing committee:

Laura Baudis (University of Zurich)
Joerg Jaeckel (IPPP/Durham University)
Axel Lindner (DESY)
Andreas Ringwald (DESY)
Marc Schumann (University of Zurich)
Konstantin Zioutas (University of Patras)

<http://axion-wimp.desy.de>