

Georg Raffelt, Max-Planck-Institut für Physik, München

# 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

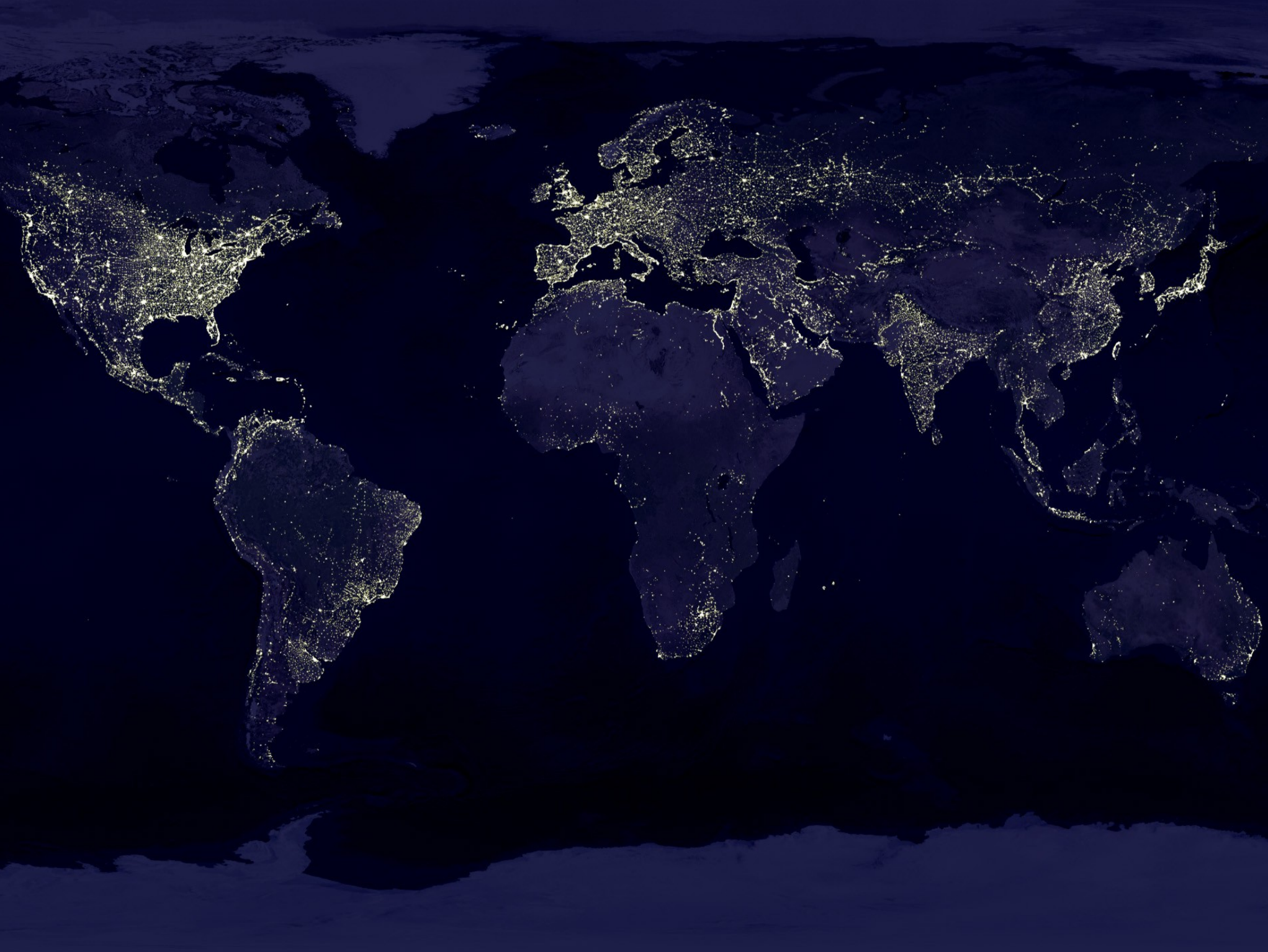














# Struktur von Spiralgalaxien



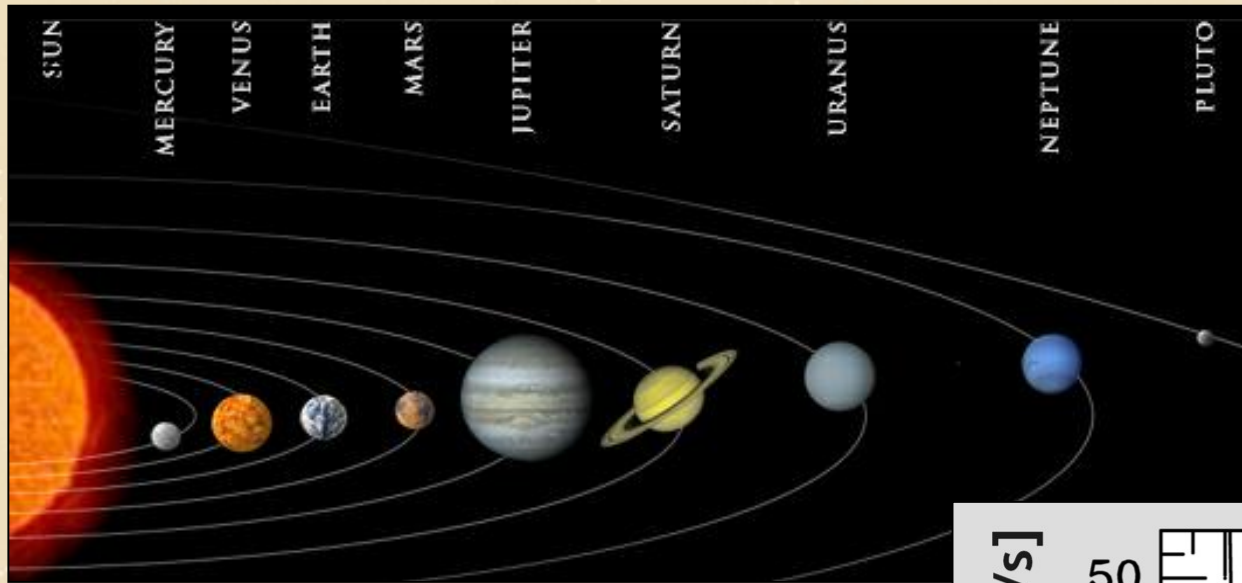
Spiralgalaxie NGC 2997



Spiralgalaxie NGC 891

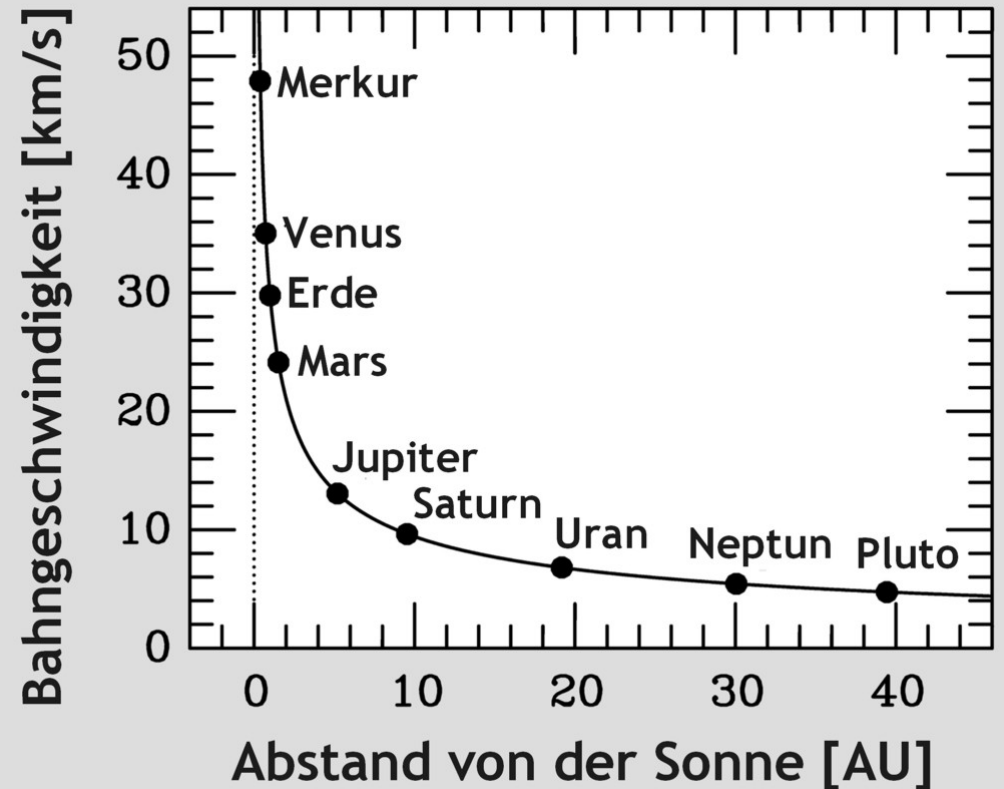


# „Rotationskurve“ des Sonnensystems



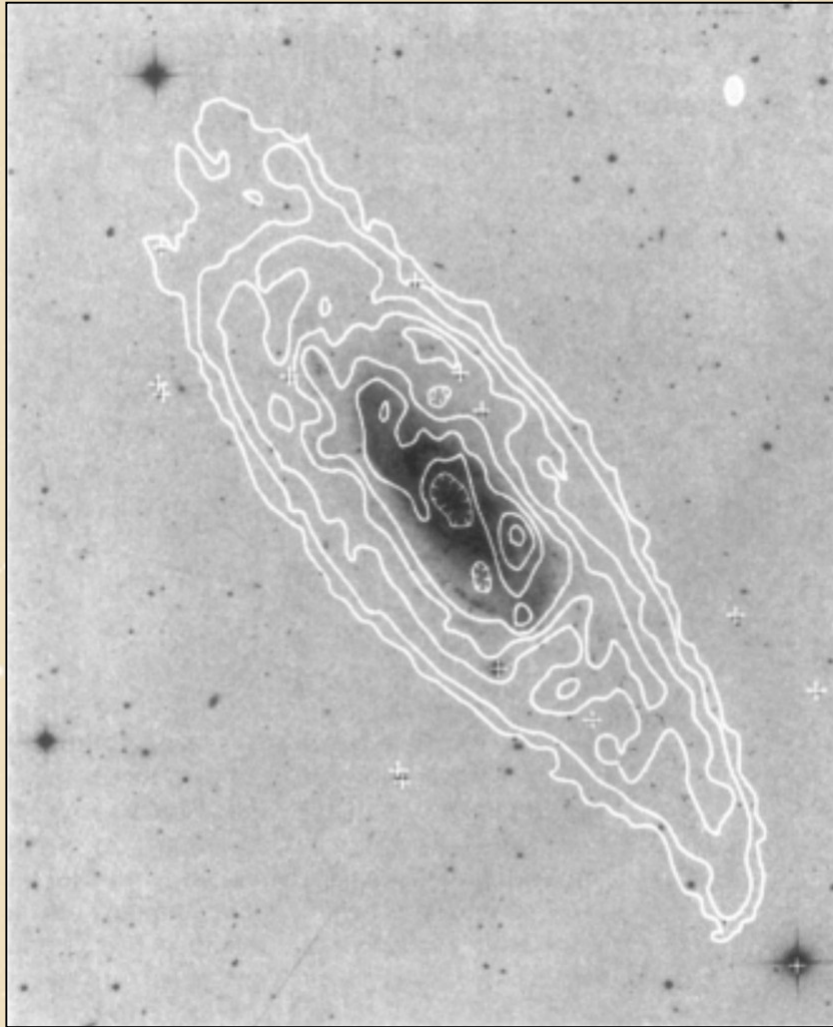
## Kepler'sches Gesetz

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

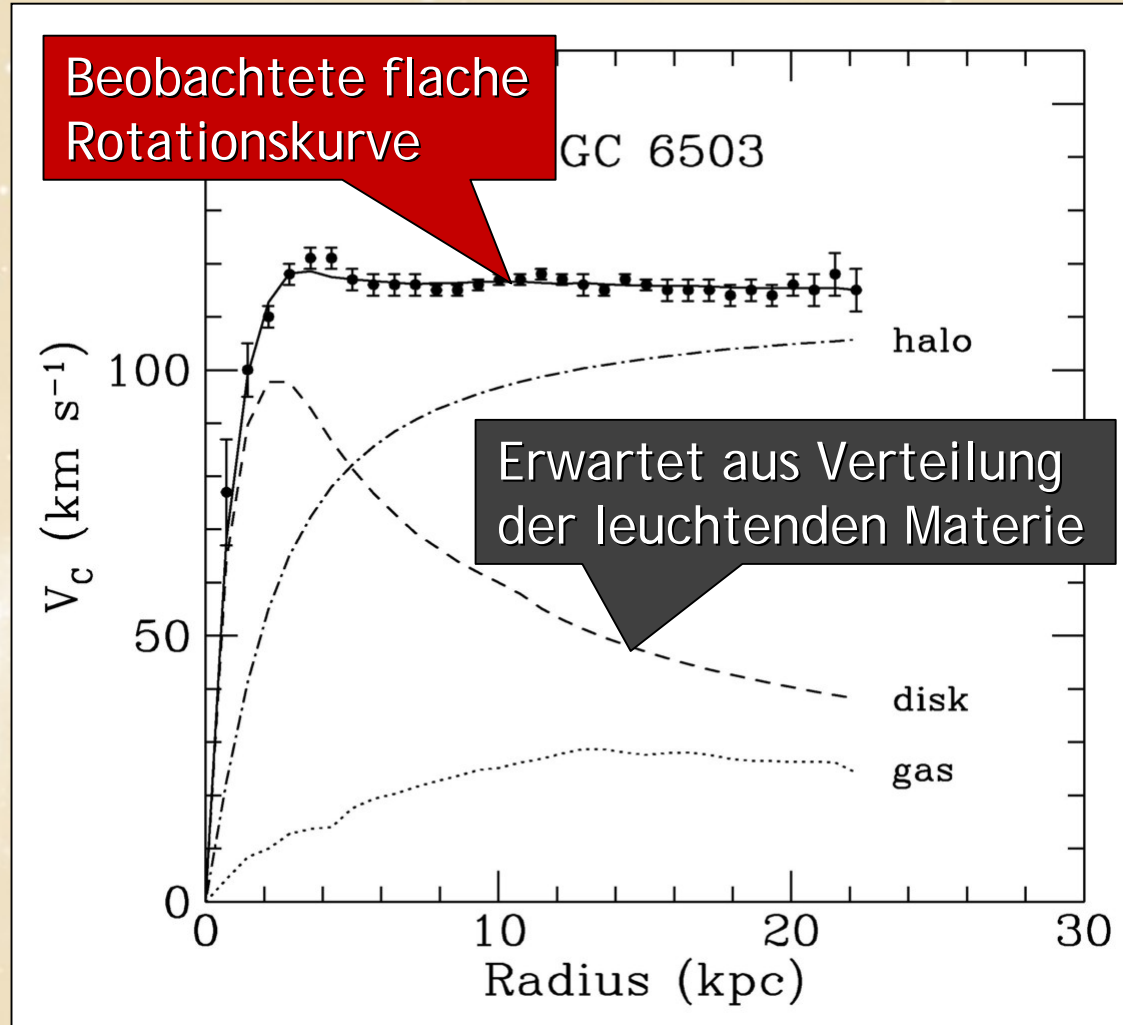




# Galaktische Rotationskurven aus Radiobeobachtungen



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





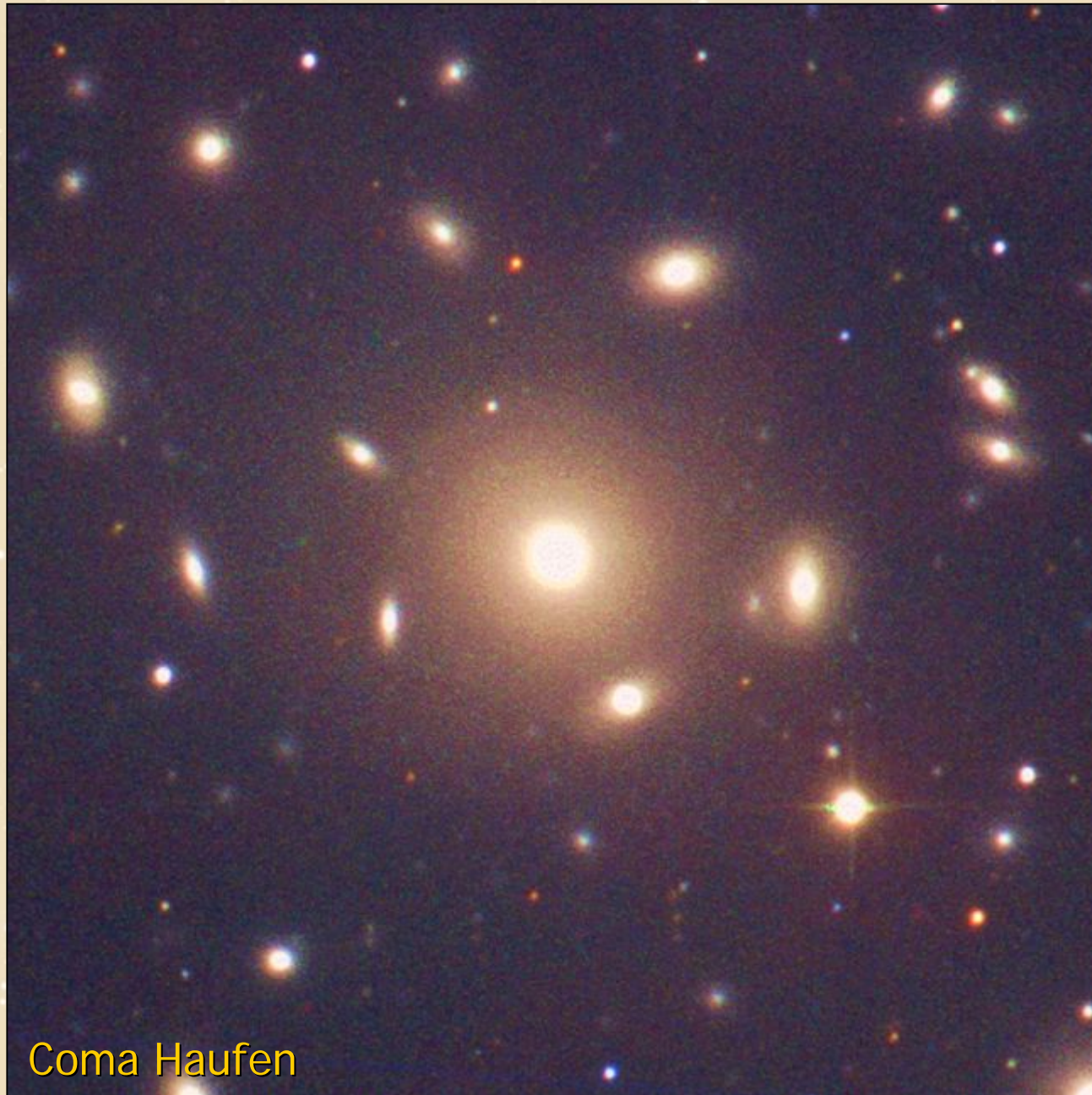
# Struktur einer Spiralgalaxie



**Dunkler Halo**

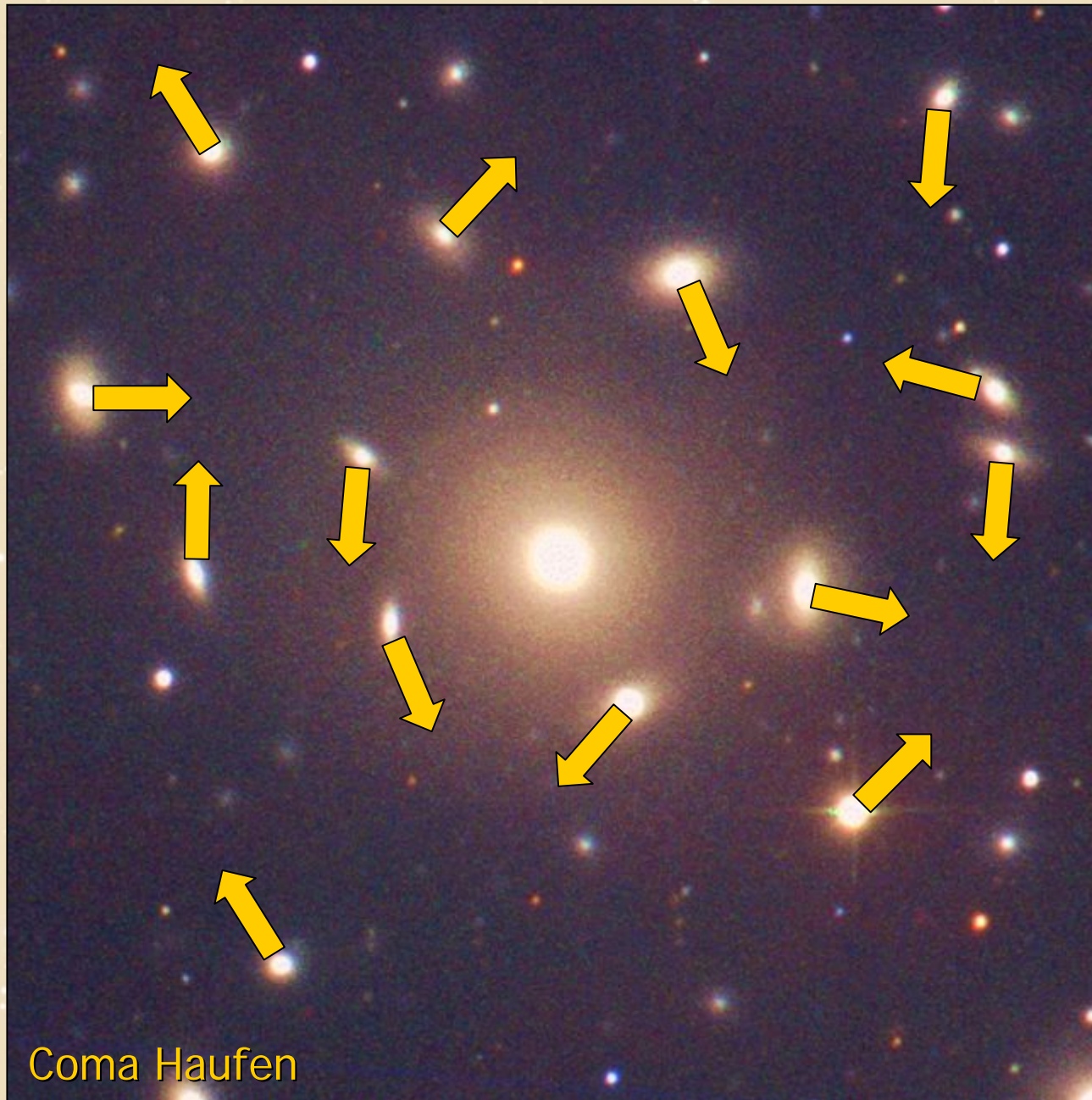


# Dunkle Materie in Galaxienhaufen





# Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Ein gravitativ gebundenes System vieler „Teilchen“ gehorcht dem Virialsatz

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

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

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

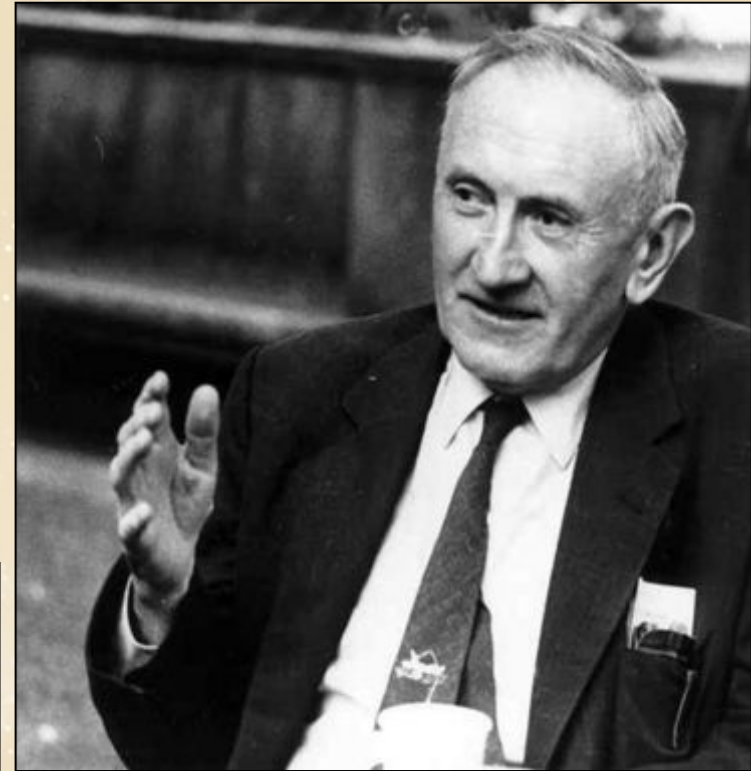
Geschwindigkeitsmessung  
durch Dopplereffekt von  
Spektrallinien



Massenabschätzung



# Dunkle Materie in Galaxienhaufen



**Fritz Zwicky (1898-1974)**

**Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln  
Helvetica Physica Acta 6 (1933) 110**

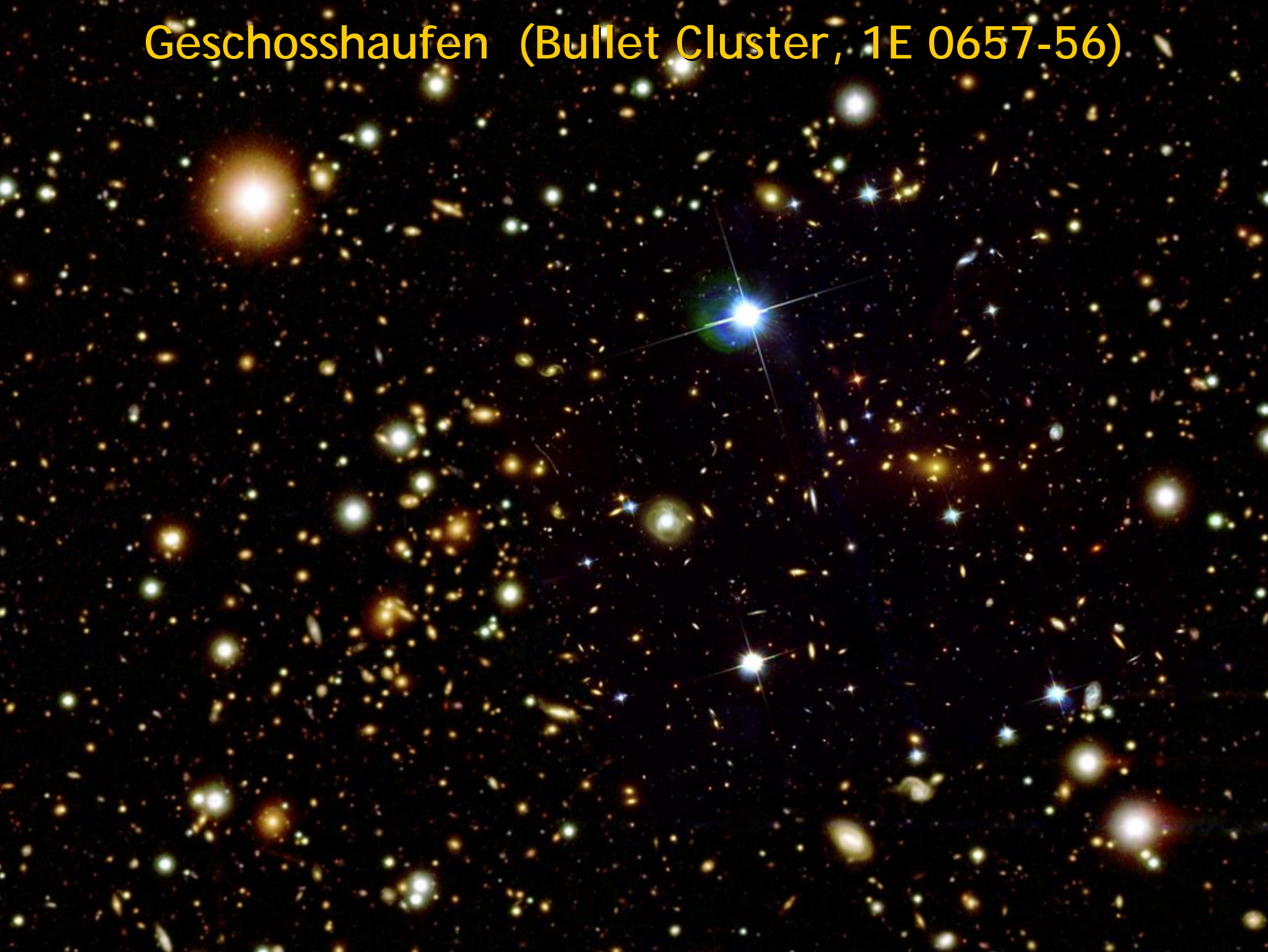
Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete<sup>1</sup>). Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also 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)

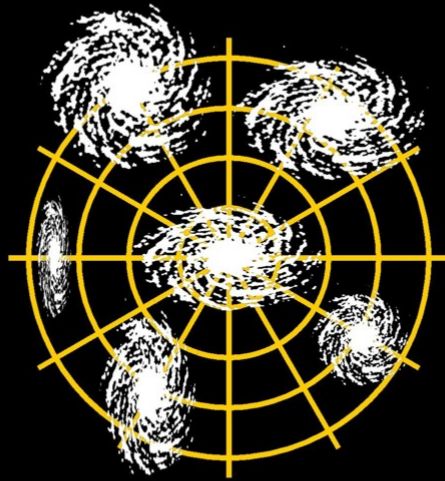




# Geschosshaufen (Bullet Cluster, 1E 0657-56)



# Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$v_{\text{Expansion}} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

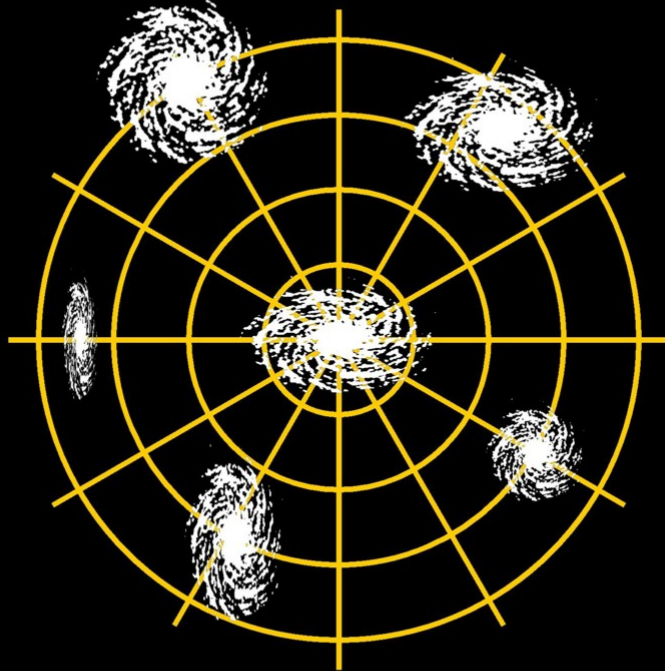
$$\begin{aligned} 1 \, \text{Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \, \text{Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \, \text{cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

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



# Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$v_{\text{Expansion}} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

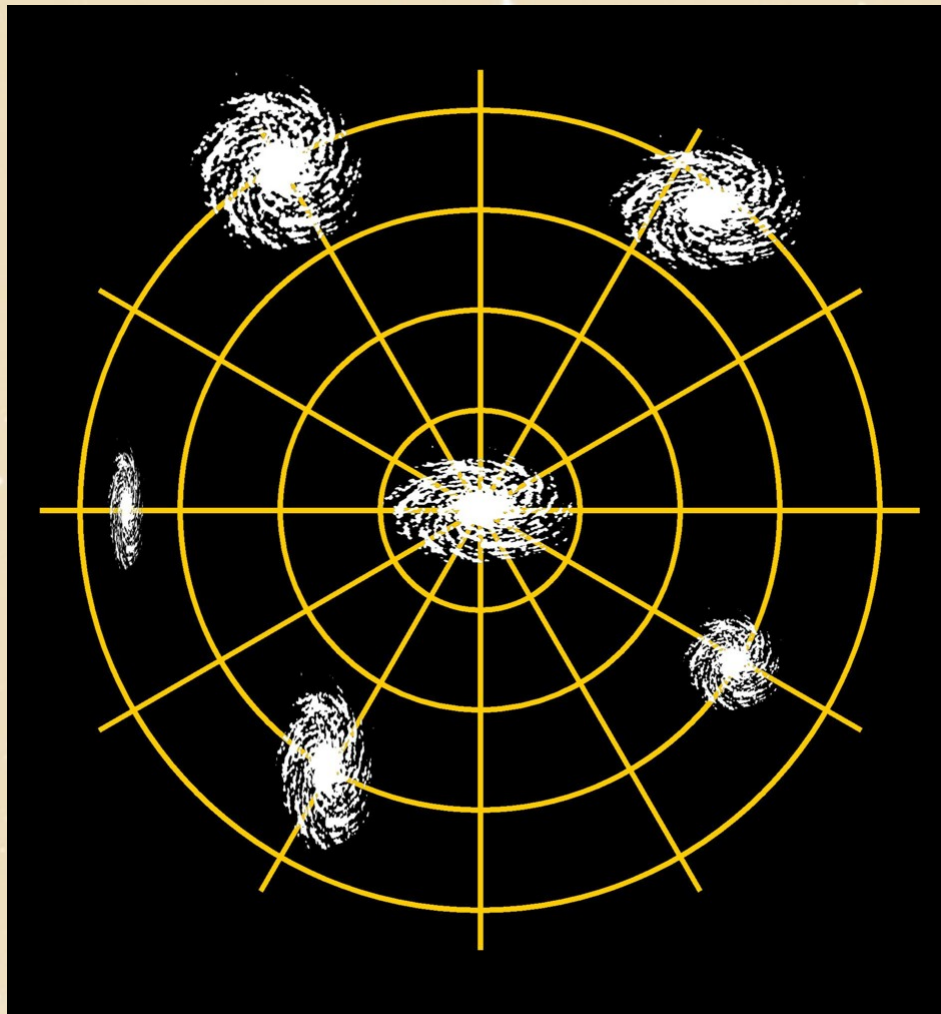
$$h = 0.72 \pm 0.04$$

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

Expansionsalter des Universums

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

# Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$v_{\text{Expansion}} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

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

Messwert

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

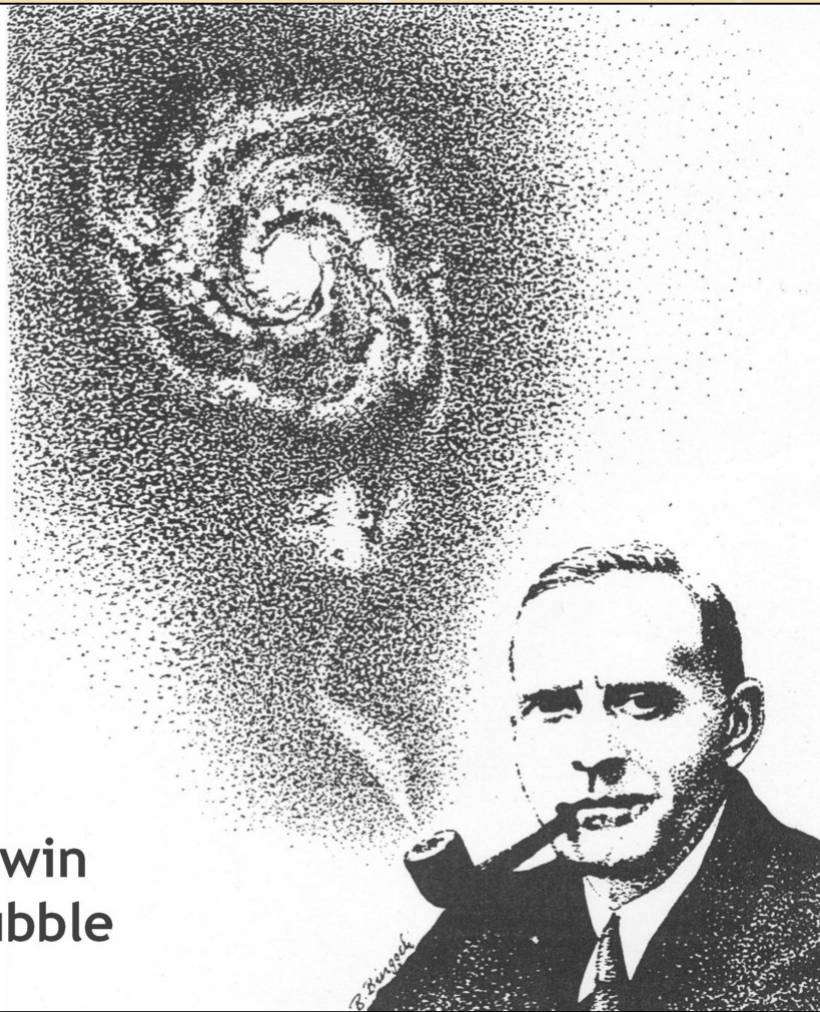
$$\begin{aligned} 1 \, \text{Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \, \text{Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \, \text{cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

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



# Expandierendes Universum und Urknall



Edwin  
Hubble

## Hubble'sches Gesetz

$$v_{\text{Expansion}} = H_0 \times \text{Abstand}$$

## Hubble-Konstante

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

## Messwert

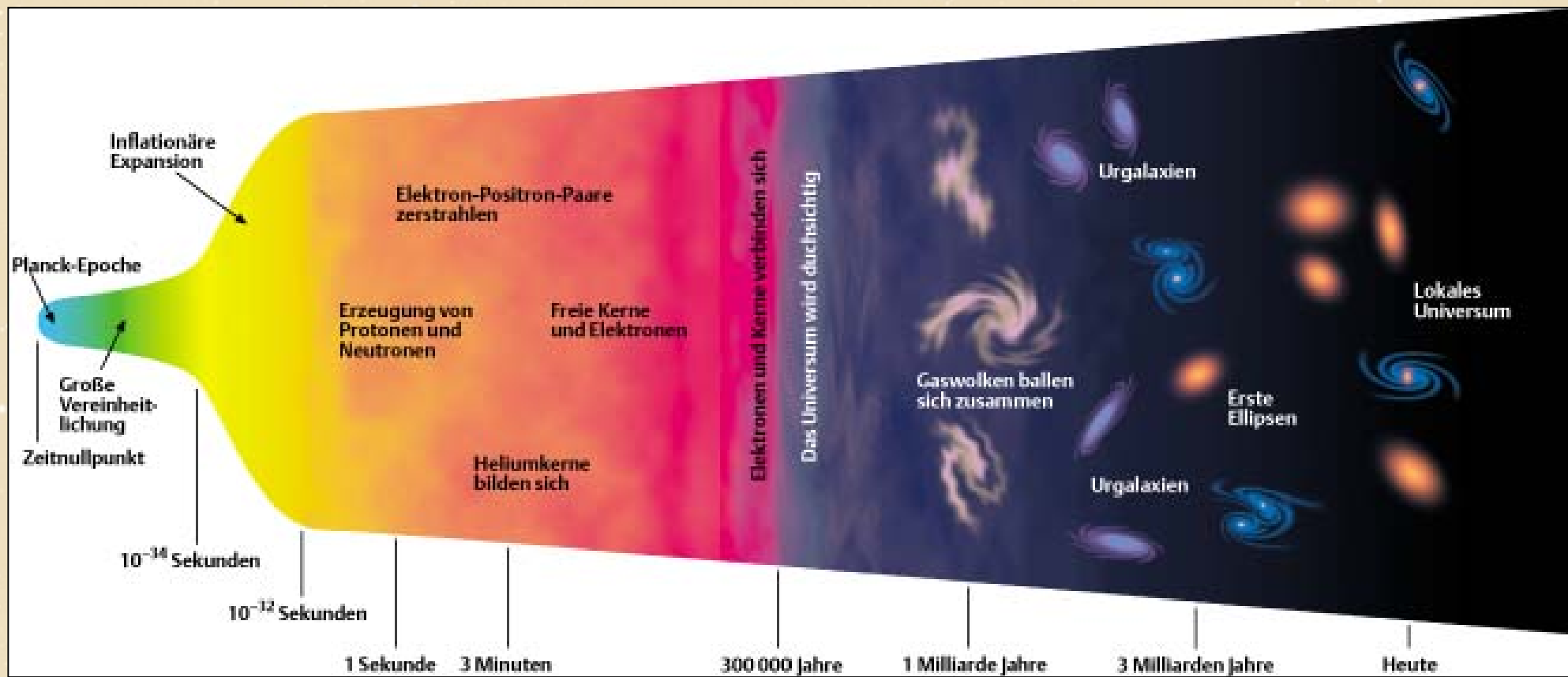
$$h = 0.72 \pm 0.04$$

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

## Expansionsalter des Universums

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

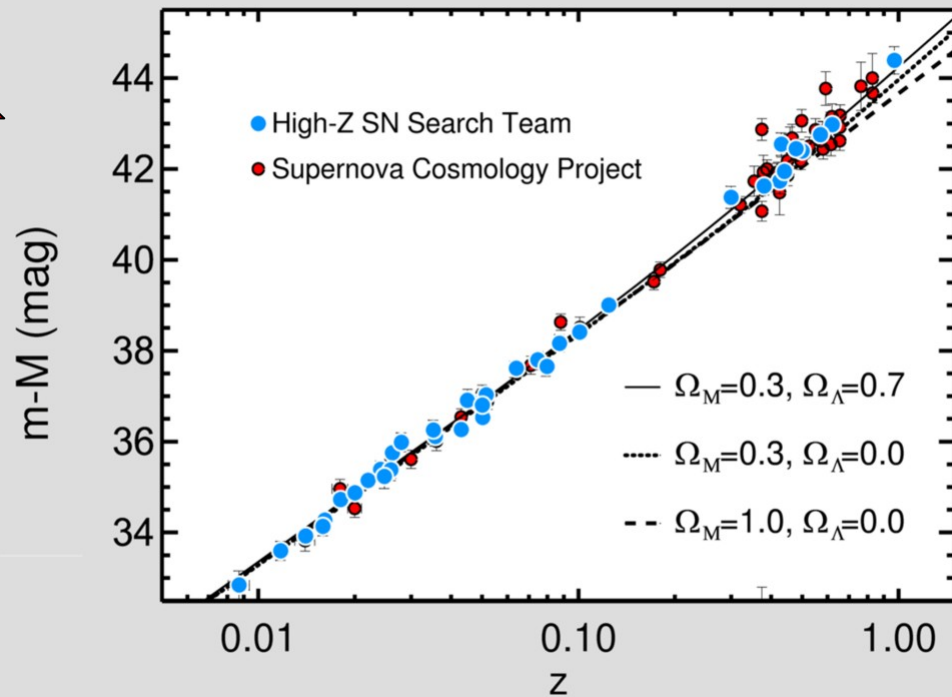
# Urknall und Expansion des Universums





# Hubble Diagramm

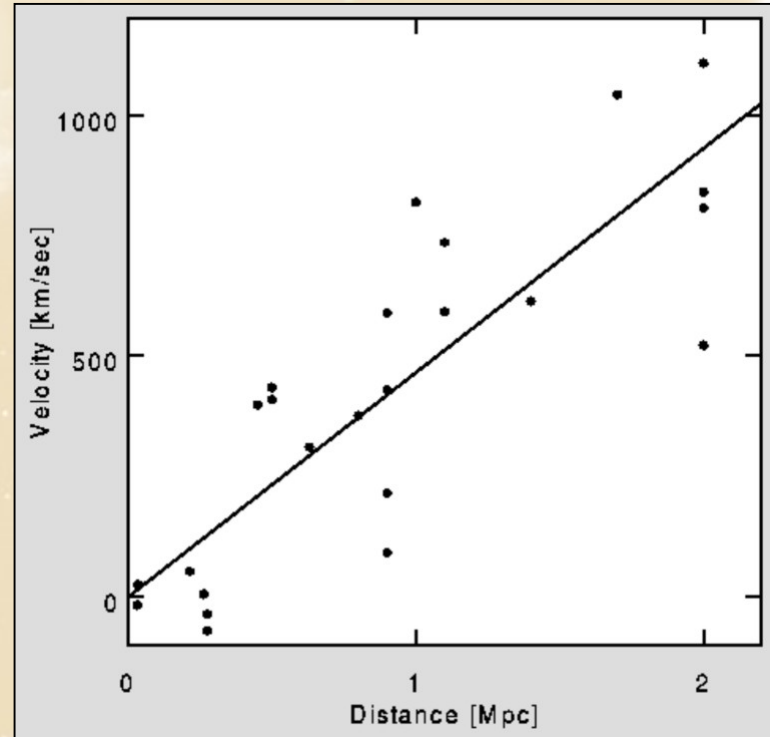
Scheinbare Helligkeit  
(Entfernung)



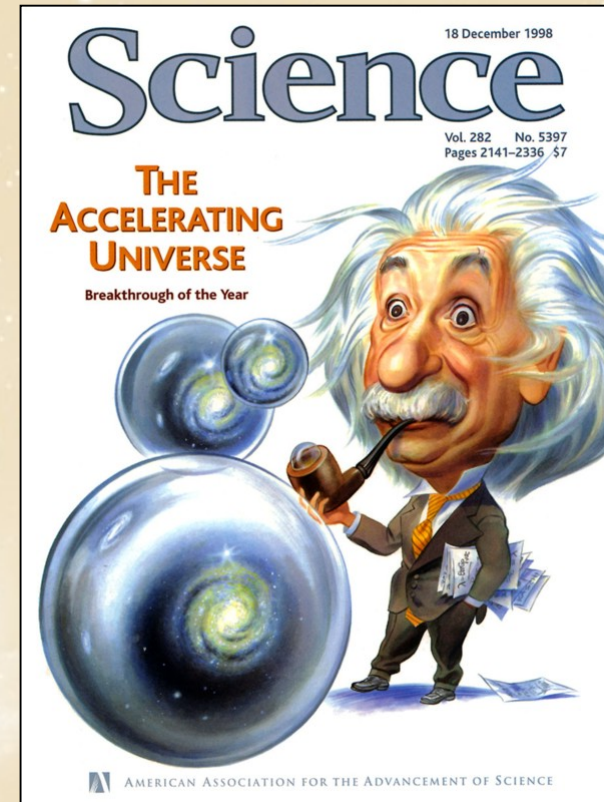
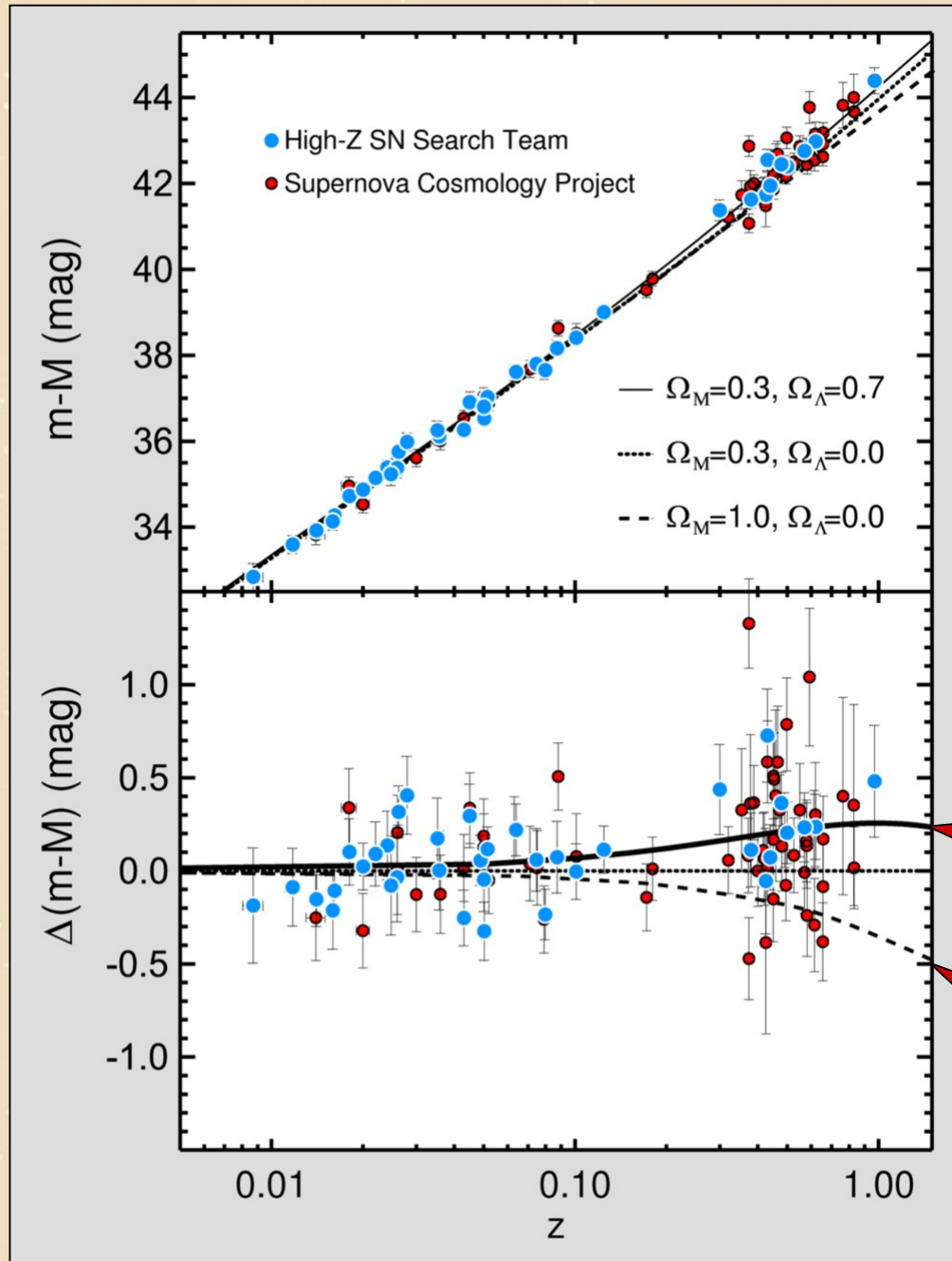
Rotverschiebung  
(Fluchtgeschwindigkeit)

Supernovae vom Typ Ia als  
kosmologische Standardkerzen

Hubbles Originaldaten (1929)



# Hubble Diagramm – Beschleunigte Expansion

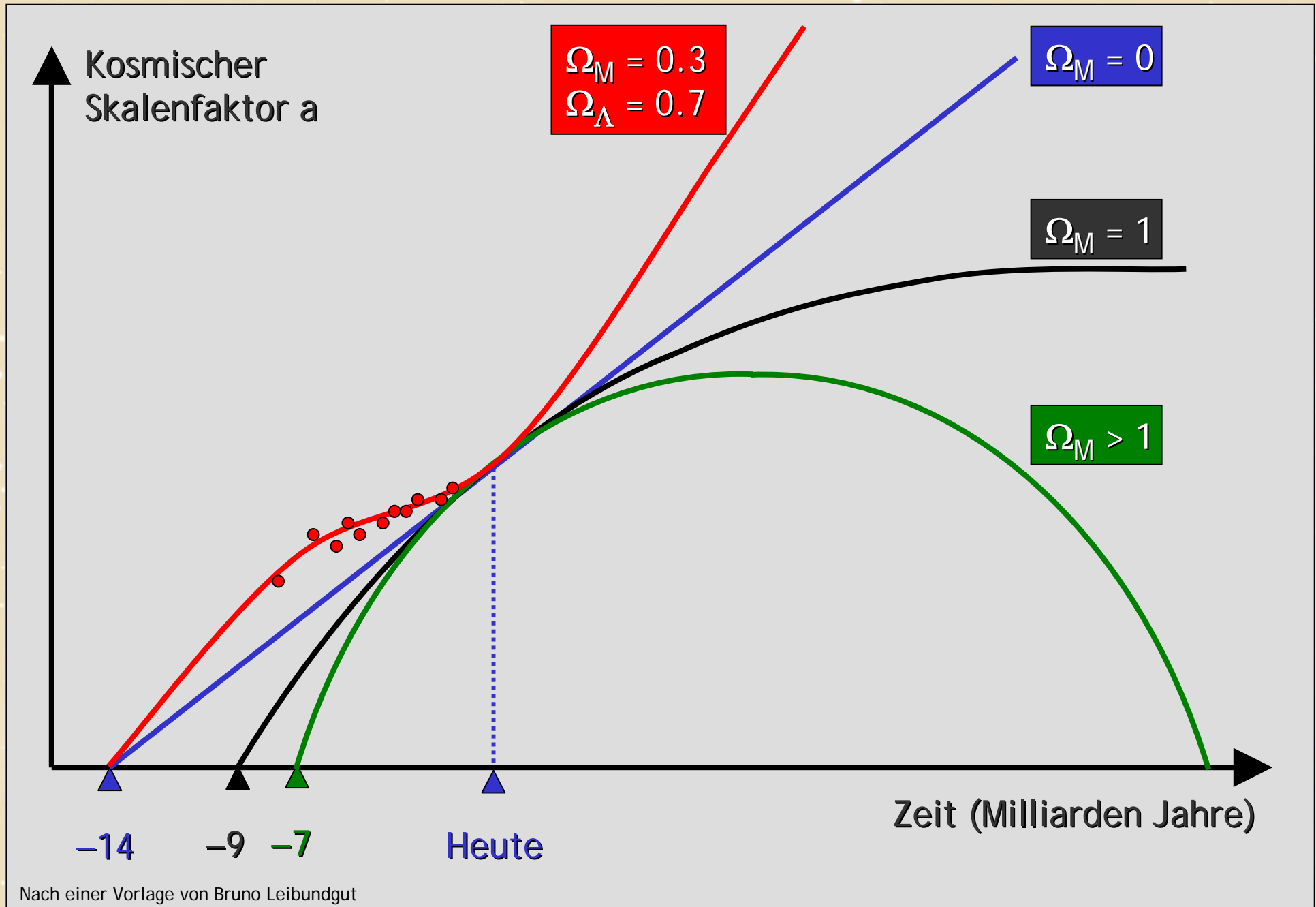


Beschleunigte  
Expansion

Abgebremste Expansion  
(Normale Materie)



# Expansion verschiedener kosmologischer Modelle



# Einsteins „Größte Eselei“

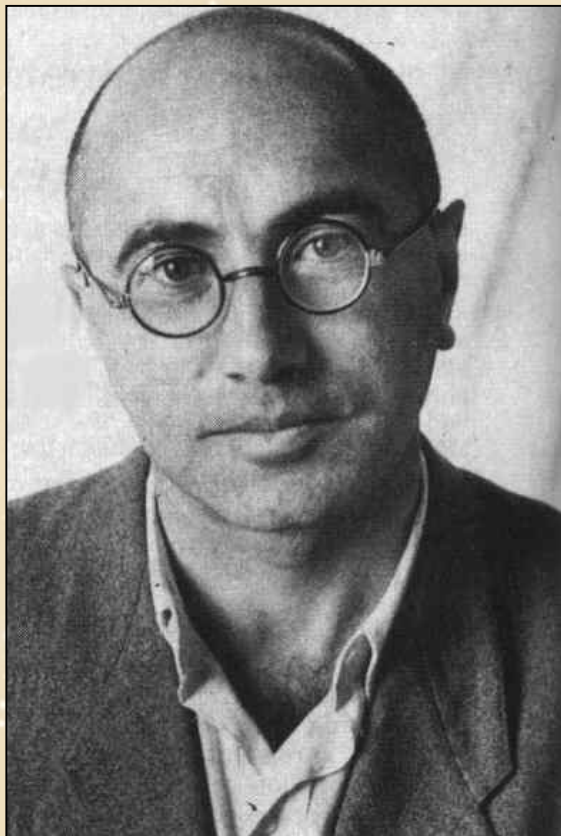
Dichte gravitierender Masse & Energie

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

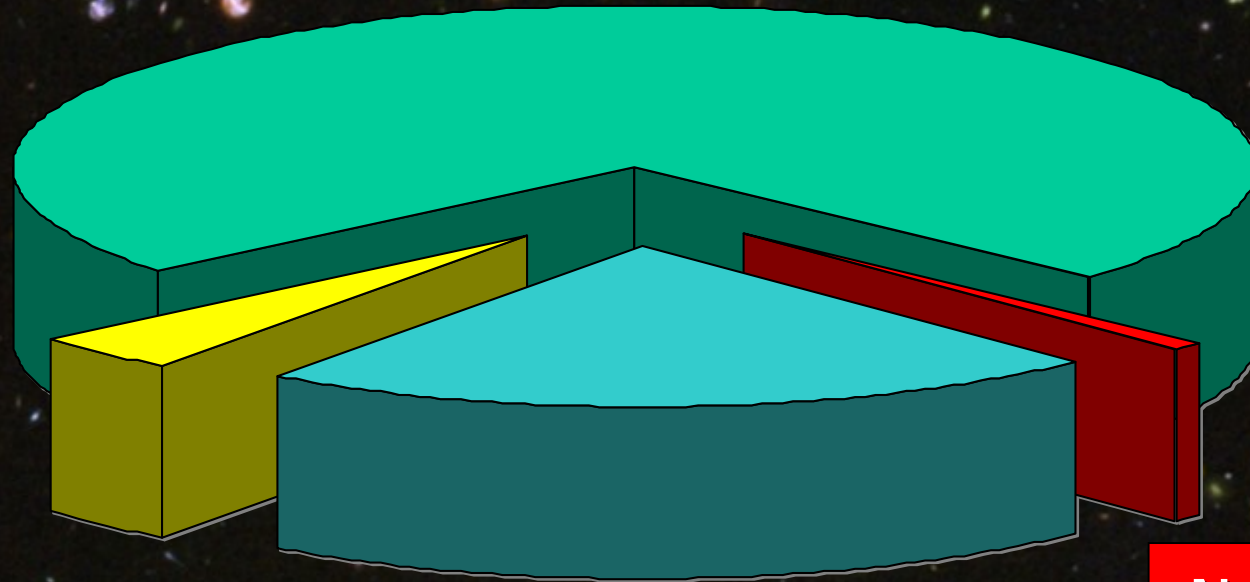


Kosmologische Konstante  $\Lambda$   
(neue Naturkonstante)  
erlaubt statisches Universum  
durch „globale Antigravitation“

- Quantenfeldtheorie der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen impliziert unausweichlich Vakuumfluktuationen
- Grundzustand (Vakuum) besitzt gravitierende Energie
- Vakuumenergie  $\rho_{\text{vac}}$  äquivalent zu  $\Lambda$



Dunkle Energie 73%  
(Kosmologische Konstante)

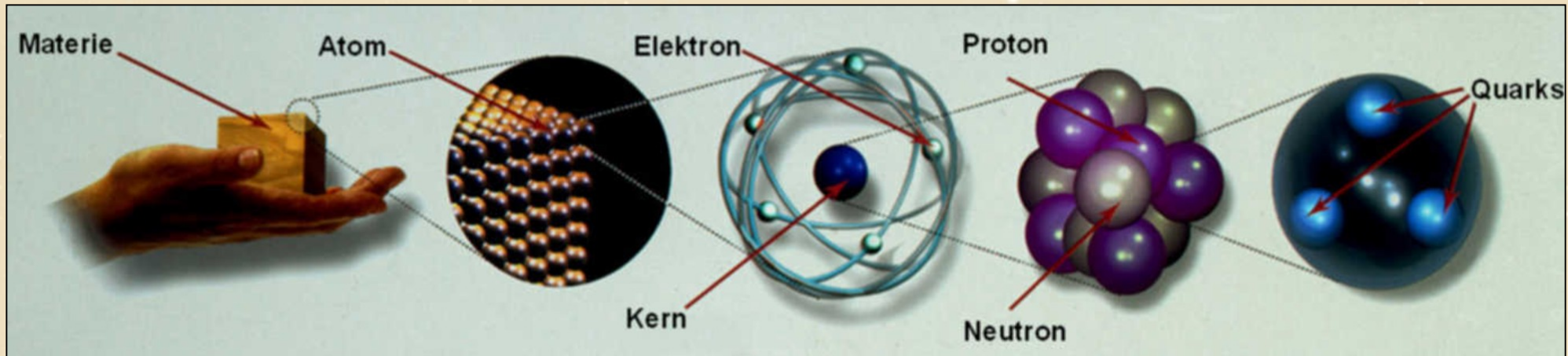


Normale Materie 4%  
(davon nur ca. 10%  
leuchtend)

Dunkle  
Materie 23%

Neutrinos  
0.1–2%

# Periodensystem der Elementarteilchen



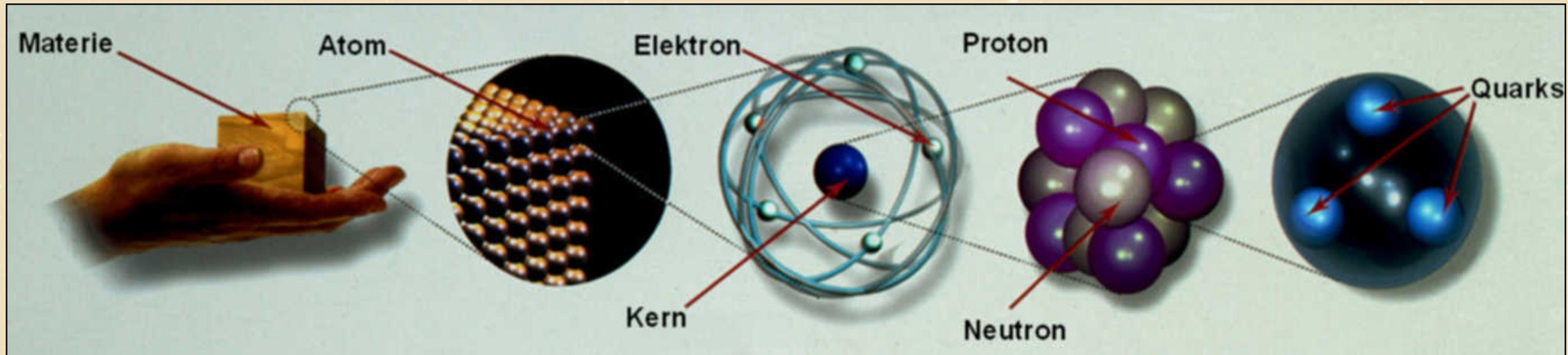
Quarks			
Ladung	$+2/3$	Ladung	$-1/3$
Up	u	Down	d

Leptonen			
Ladung	$-1$	Ladung	$0$
Elektron	e	e-Neutrino	$\nu_e$





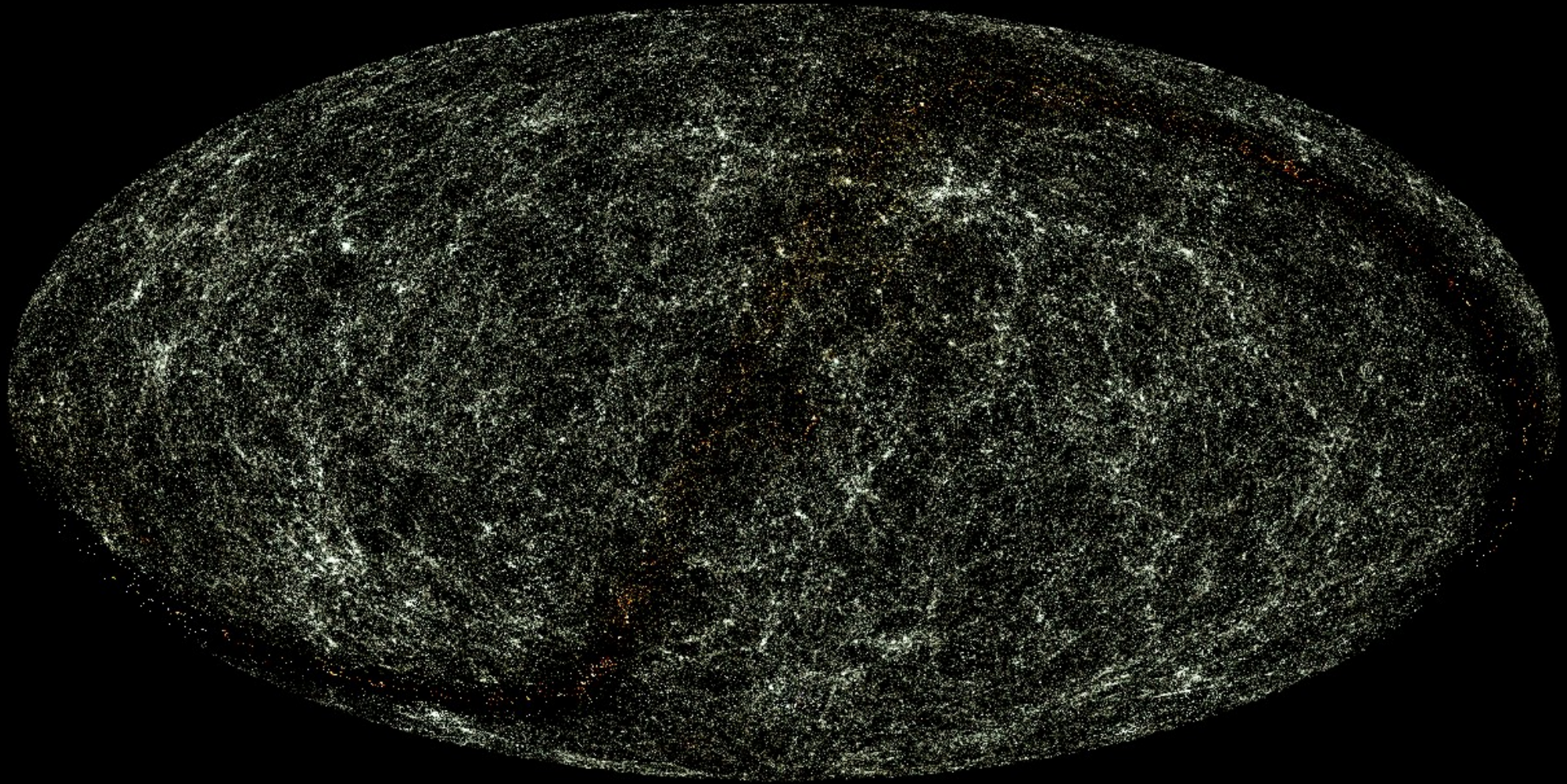
# Periodensystem der Elementarteilchen



	Quarks				Leptonen			
	Ladung +2/3		Ladung -1/3		Ladung -1		Ladung 0	
1. Familie	Up	u	Down	d	Elektron	e	e-Neutrino	$\nu_e$
2. Familie	Charm	c	Strange	s	Myon	$\mu$	$\mu$ -Neutrino	$\nu_\mu$
3. Familie	Top	t	Bottom	b	Tauon	$\tau$	$\tau$ -Neutrino	$\nu_\tau$
	Gravitation							
	Schwache Wechselwirkung							
	Elektromagnetische Wechselwirkung							
	Starke Wechselwirkung							



# Himmelsverteilung der Galaxien (XMASS XSC)



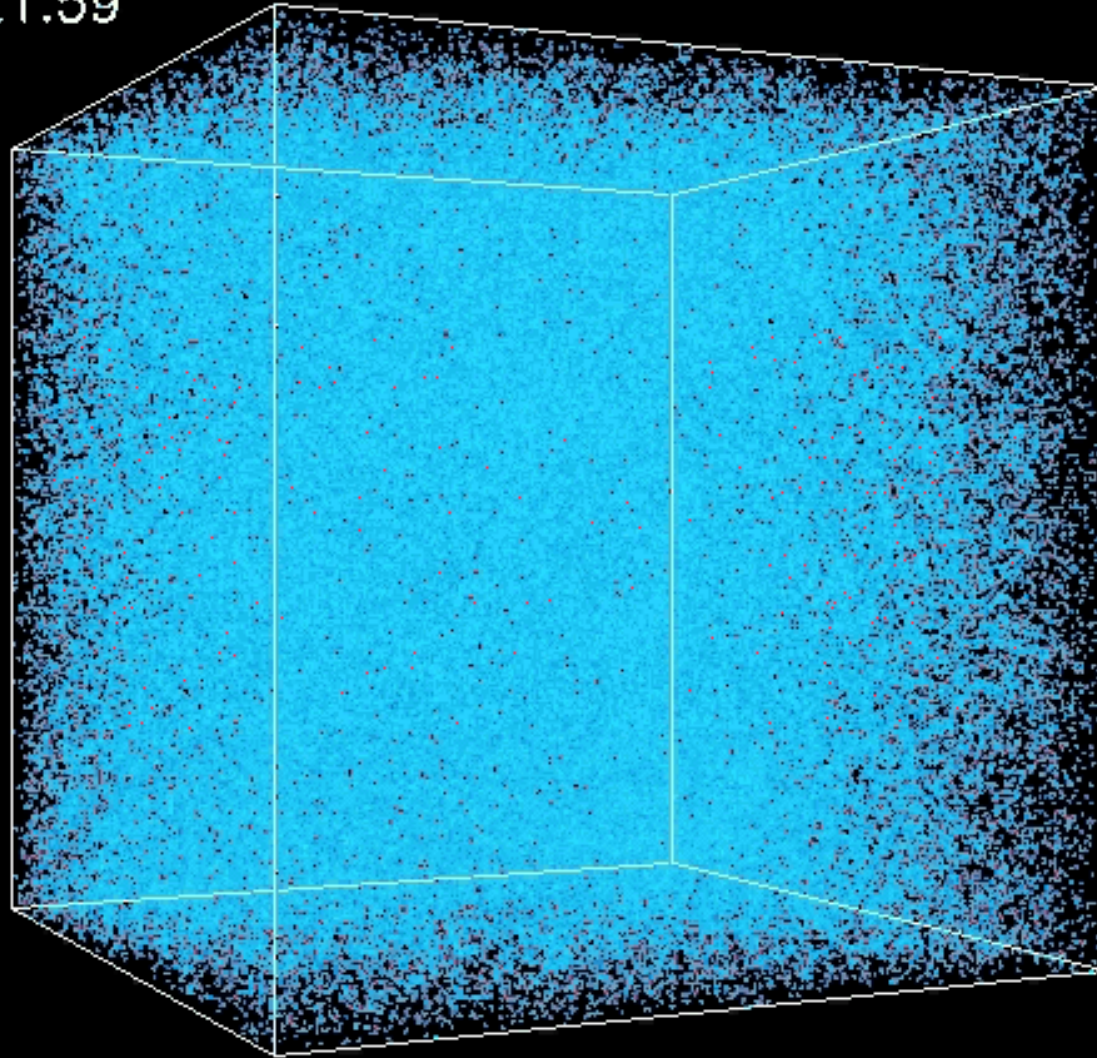






# Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

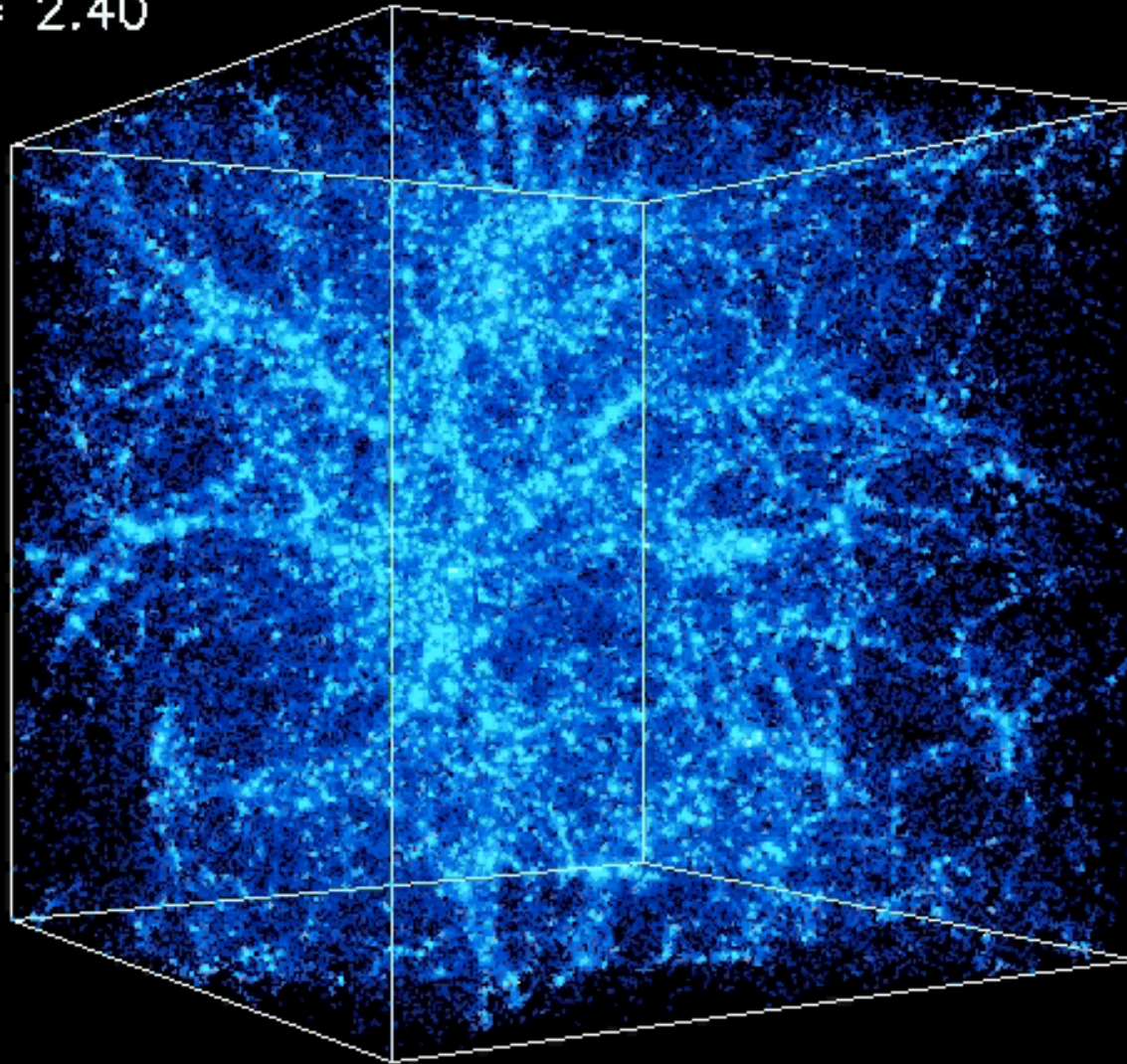
$z=21.59$





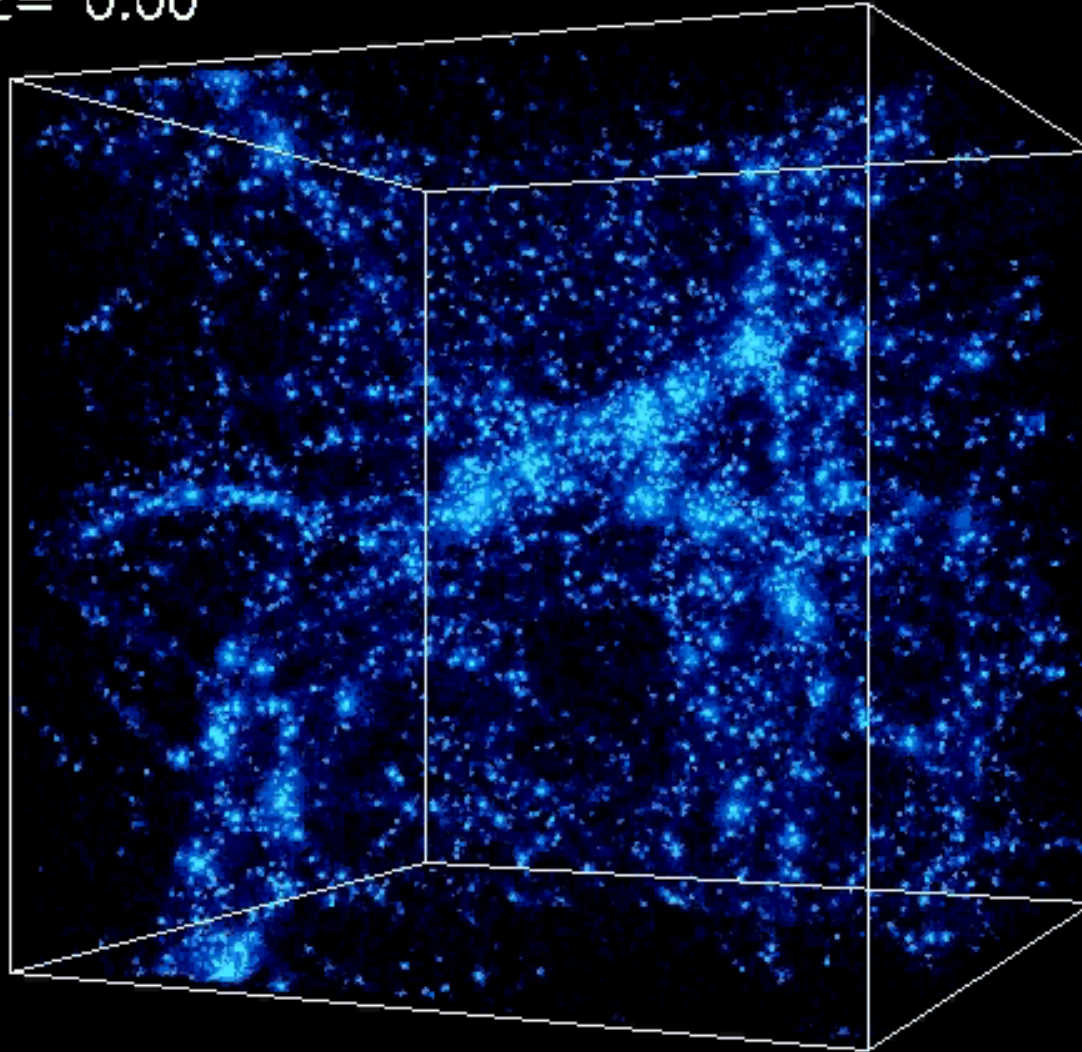
# Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

$z = 2.40$



# Strukturbildung durch Gravitationsinstabilität

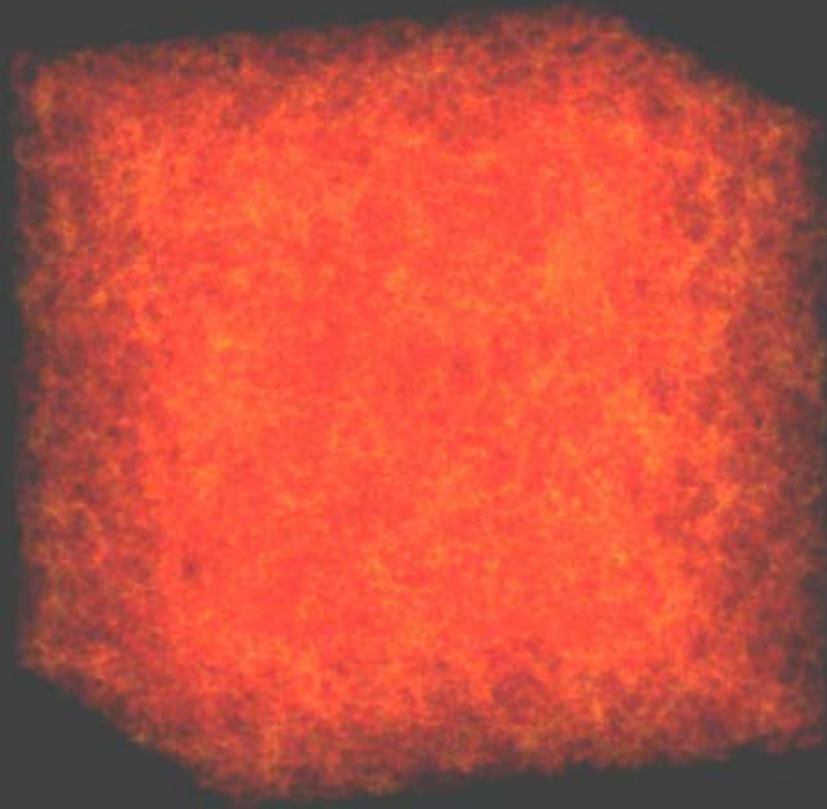
$Z = 0.00$



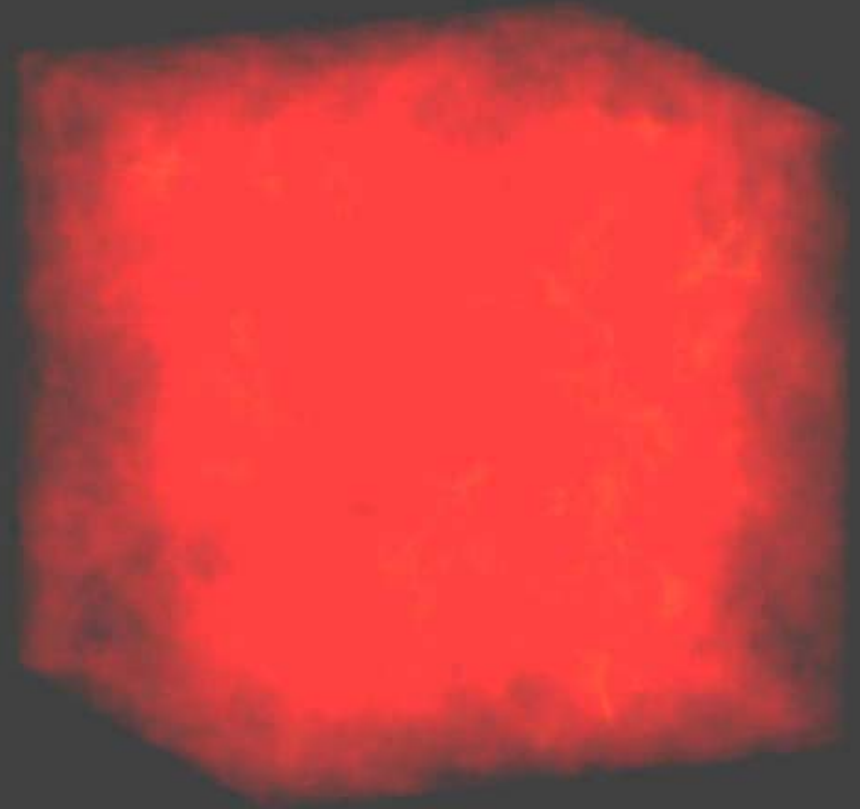


# Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 6.98$



Standard  $\Lambda$ CDM Model



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

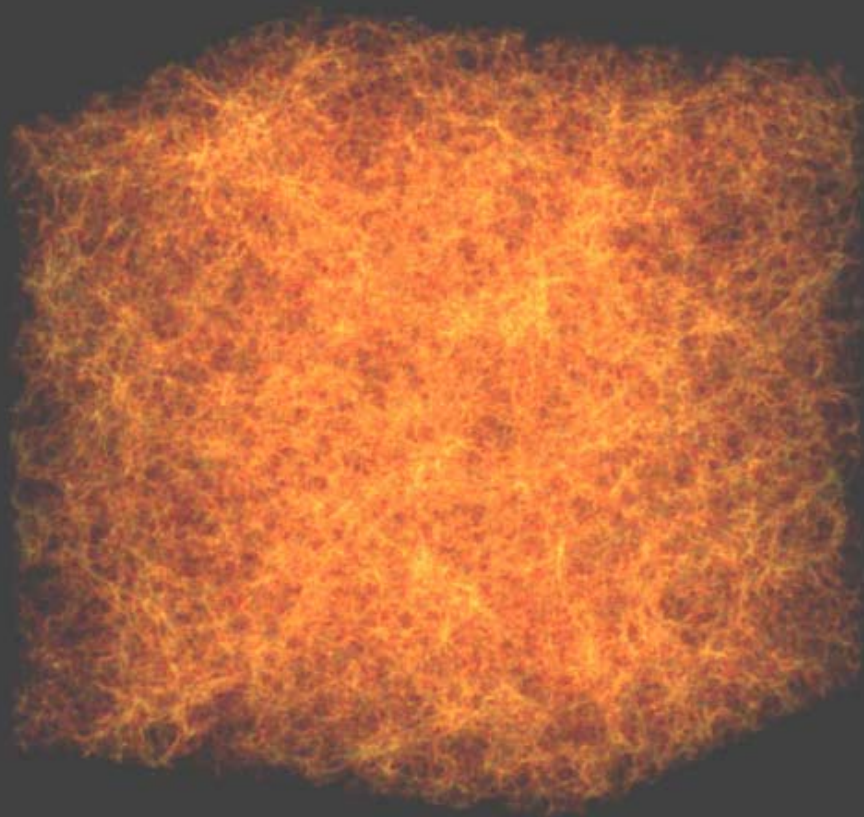
Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm

Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

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

# Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 1.80$



Standard  $\Lambda$ CDM Model



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

Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm

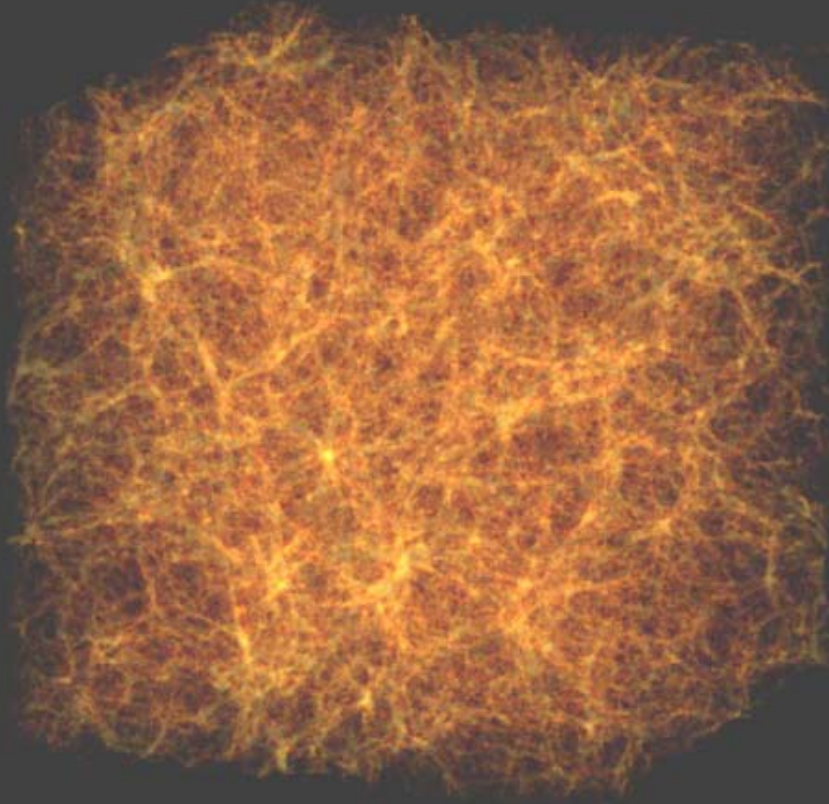
Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

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



# Strukturbildung mit Neutrinos als Dunkler Materie

$Z = 0.00$



Standard  $\Lambda$ CDM Model



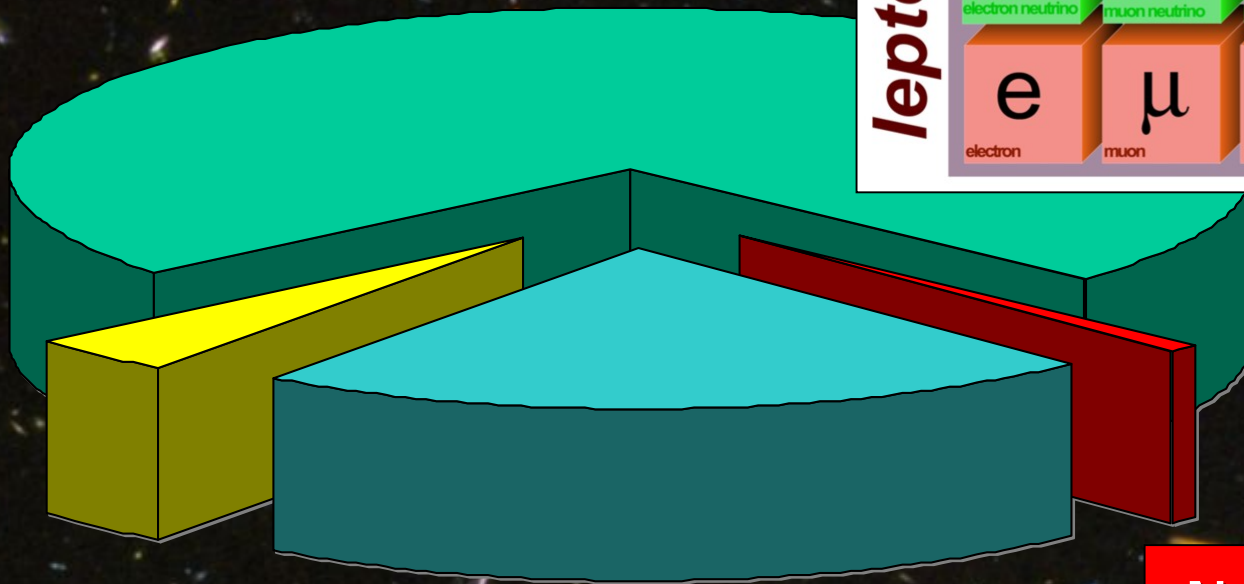
Neutrinos mit  $\Sigma m_\nu = 6.9$  eV  
Experimentelle Schranke

Strukturbildung simuliert mit Gadget-Programm

Würfelgröße 256 Mpc (heutige Skalen)

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

Dunkle Energie 73%  
(Kosmologische Konstante)



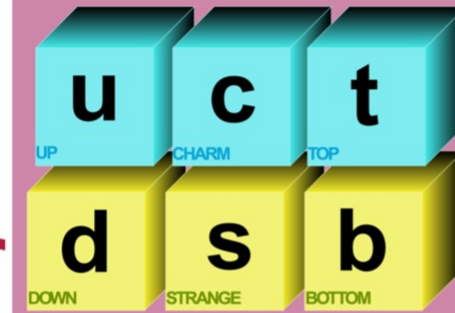
Normale Materie 4%  
(davon nur ca. 10%  
leuchtend)

Dunkle  
Materie 23%

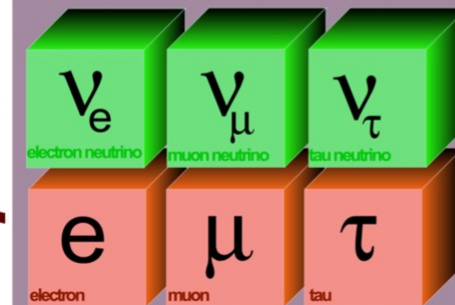
Neutrinos  
0.1–2%

## The Standard Model of Elementary Particles

*quarks*



*leptons*



*force carriers*





# 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

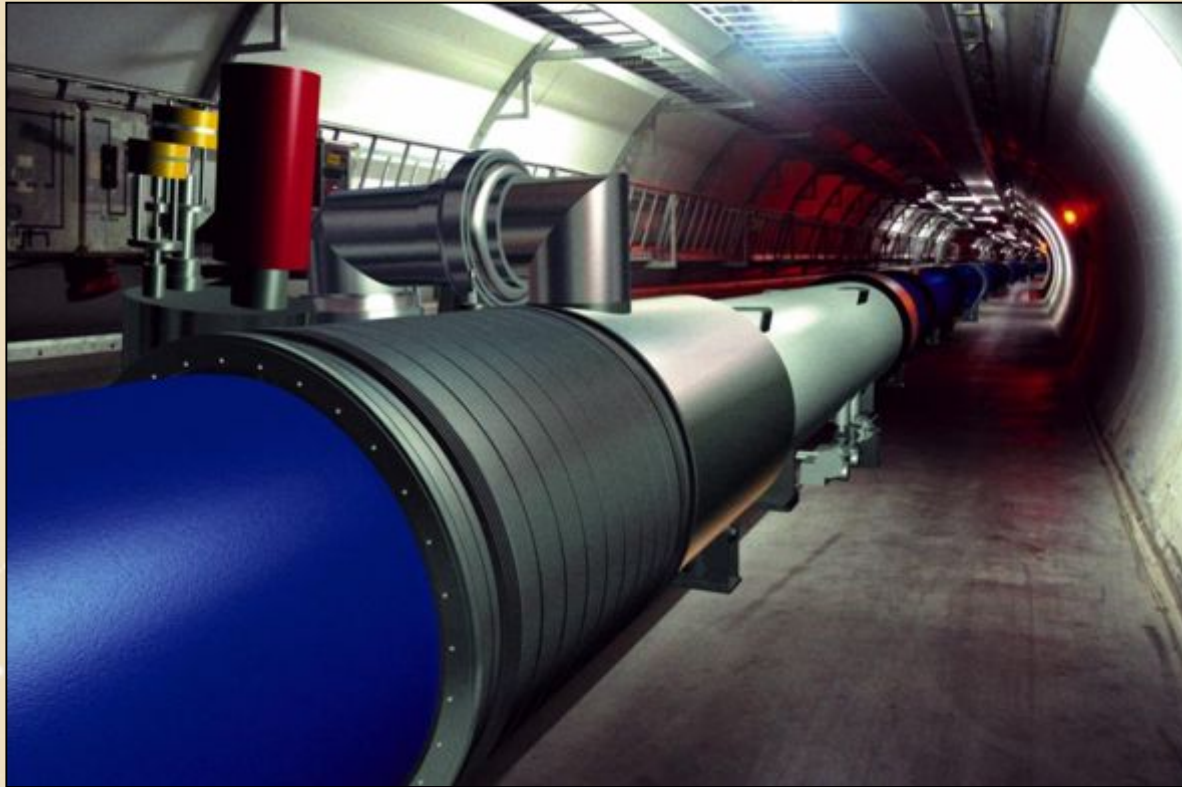
Symmetrie zwischen „Teilchen“ und „Kräften“  
Bosonischer Partner zu jedem Fermion und umgekehrt

Spin	Standardteilchen	Superpartner	Spin
1/2	Leptons ( $e, \nu_e, \dots$ ) 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 ( $\gamma$ )	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

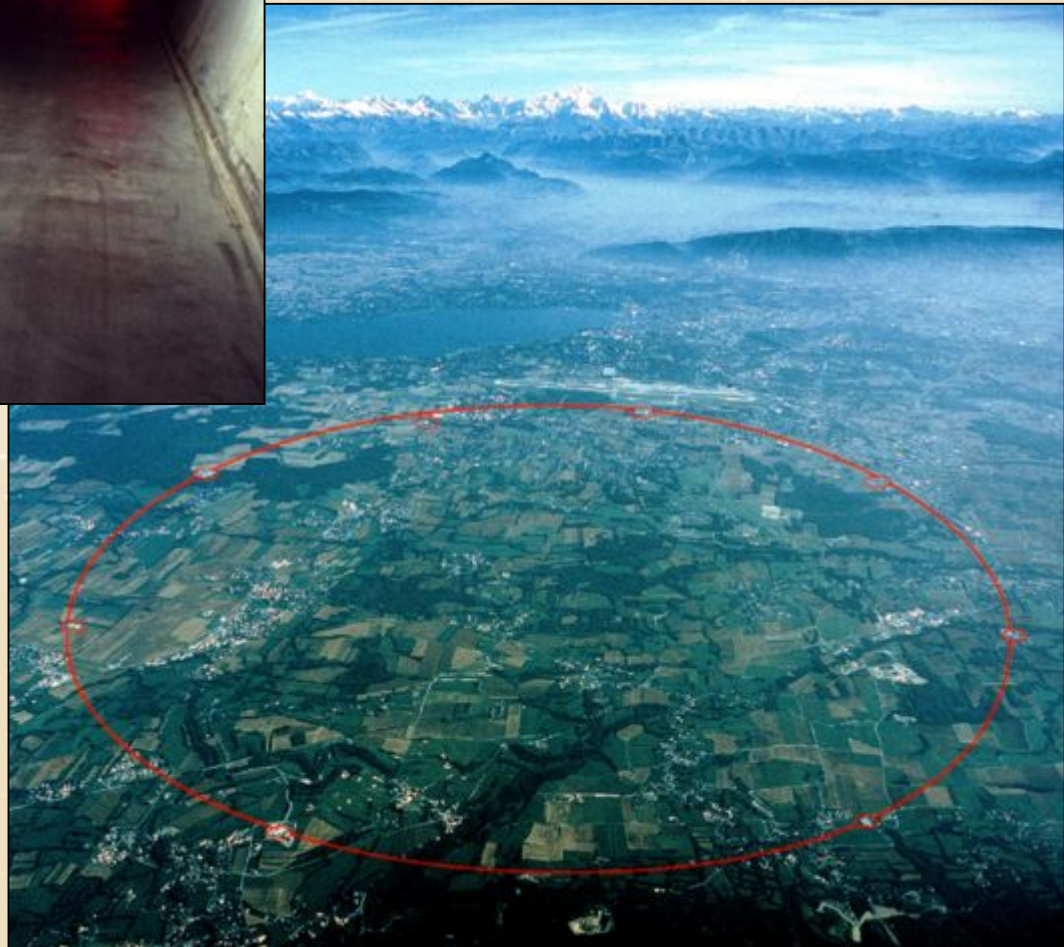


# Suche nach SUSY mit dem Large Hadron Collider (LHC)



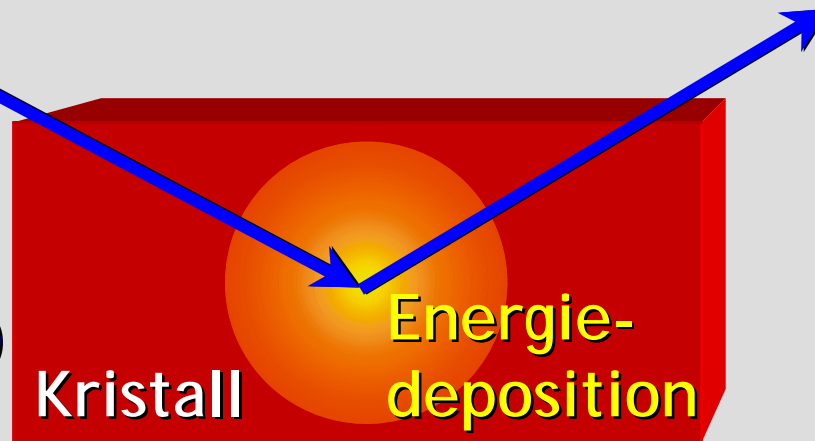
LHC am CERN (Genf)

- 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

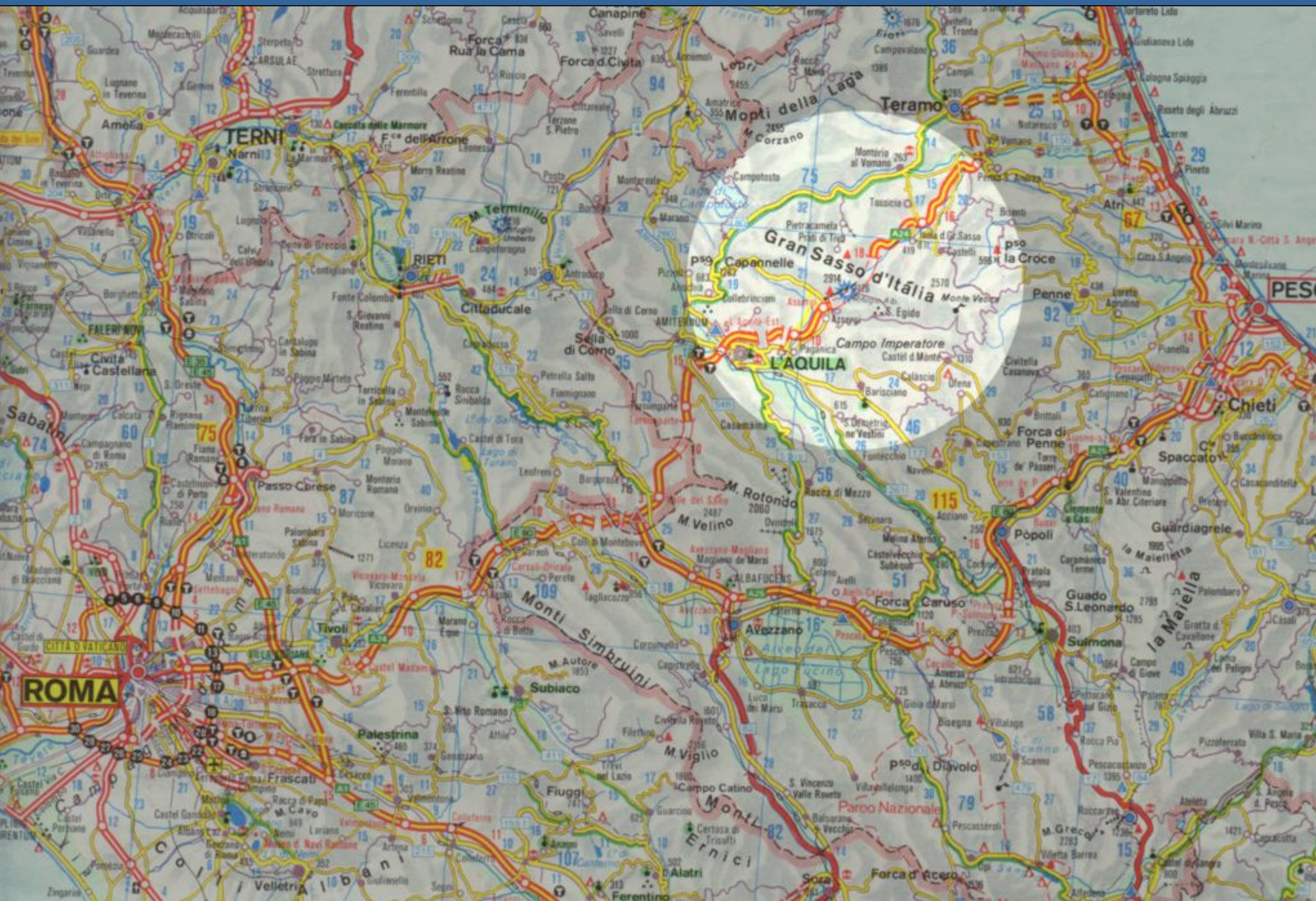
*Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544*

(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



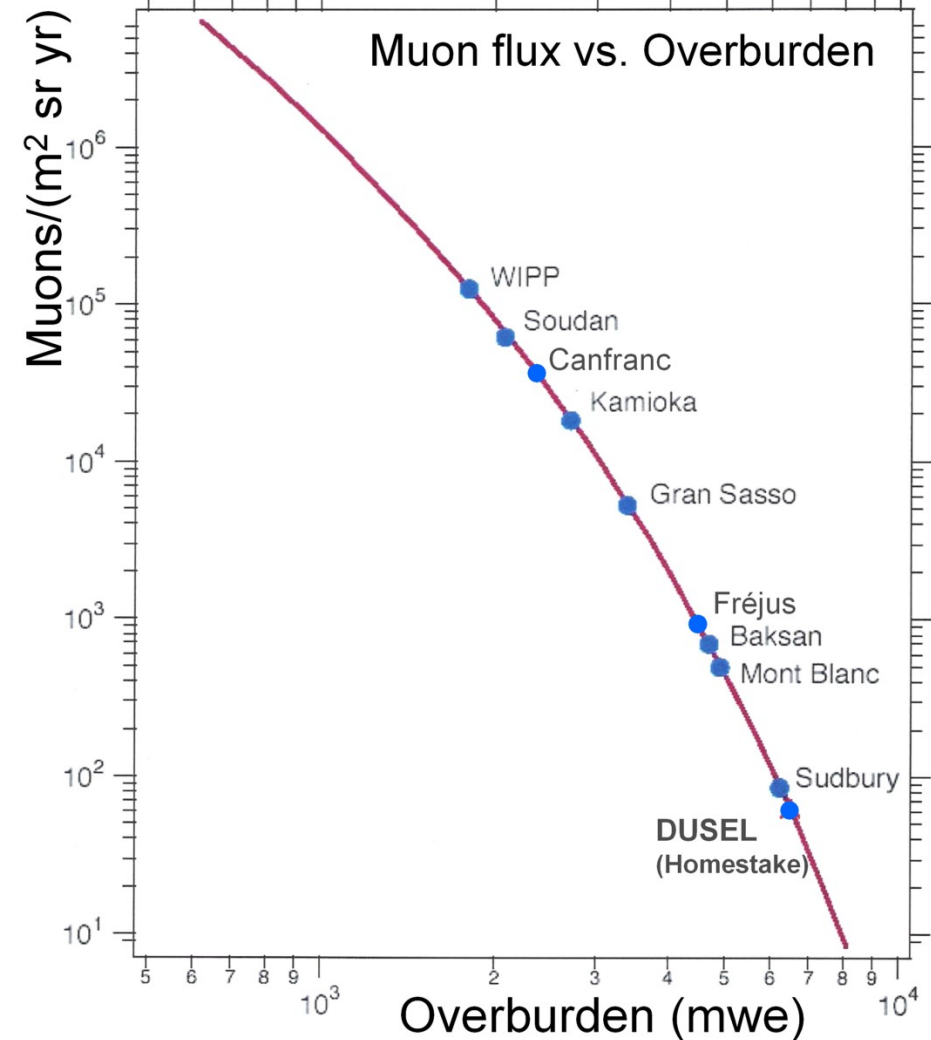


# Physik im Untergrund



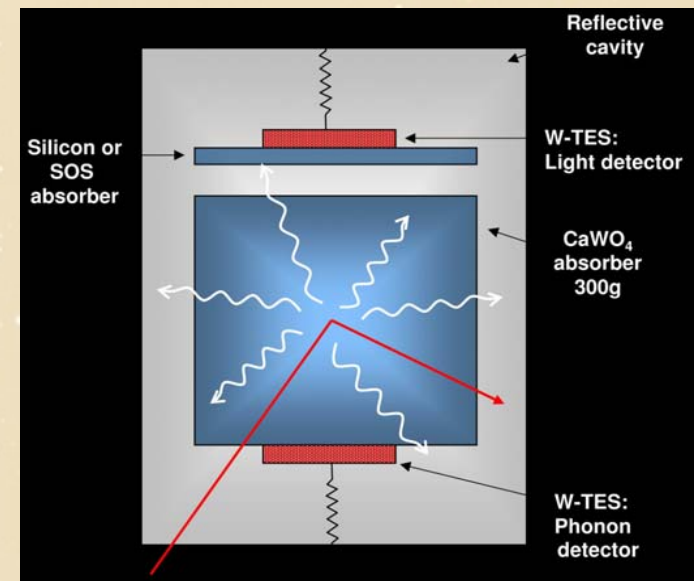
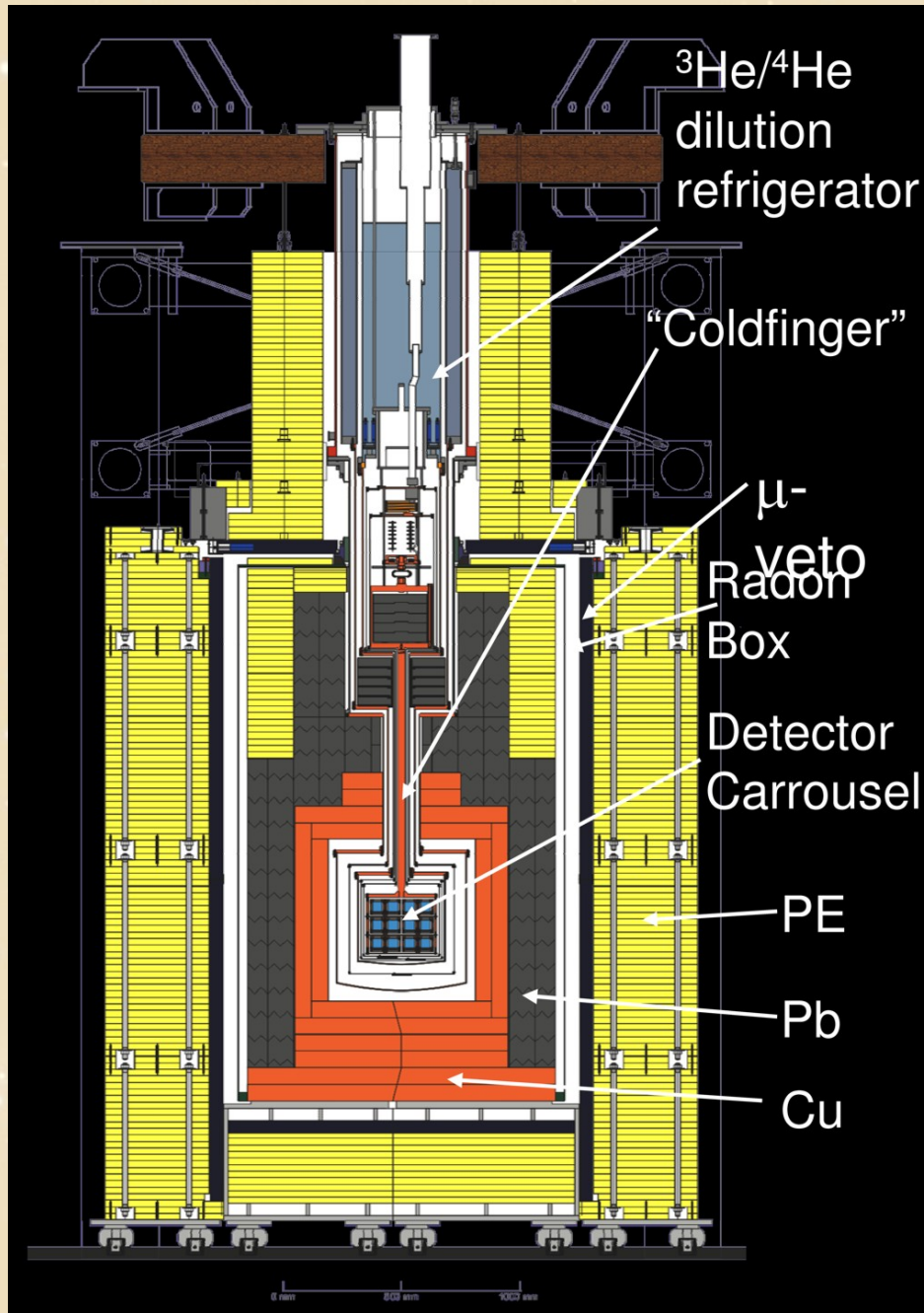
Gran Sasso Untergrundlabor (Italien)

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

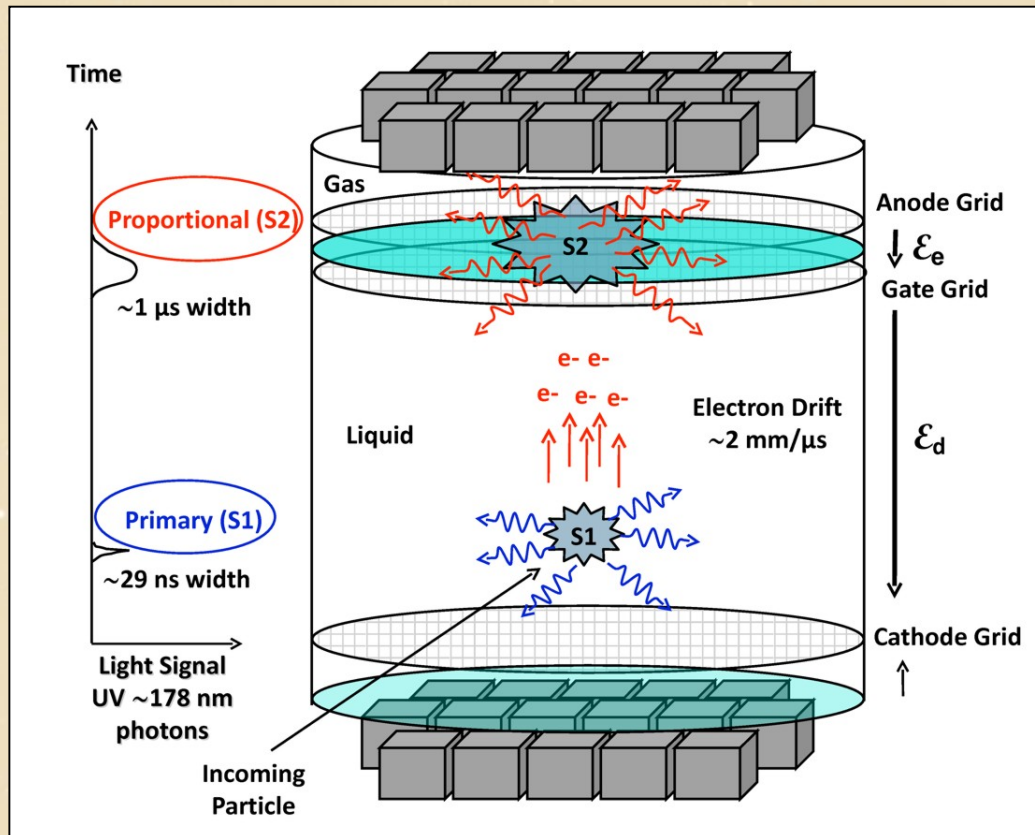




# CRESST Experiment zur Suche nach der Dunklen Materie



# Xenon-100 Detektor (Gran Sasso)

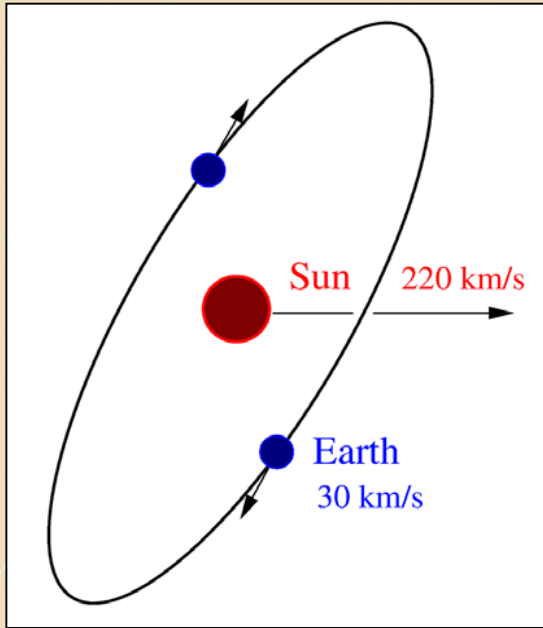


Flüssiges Xenon (ca  $-100^\circ\text{C}$ )

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

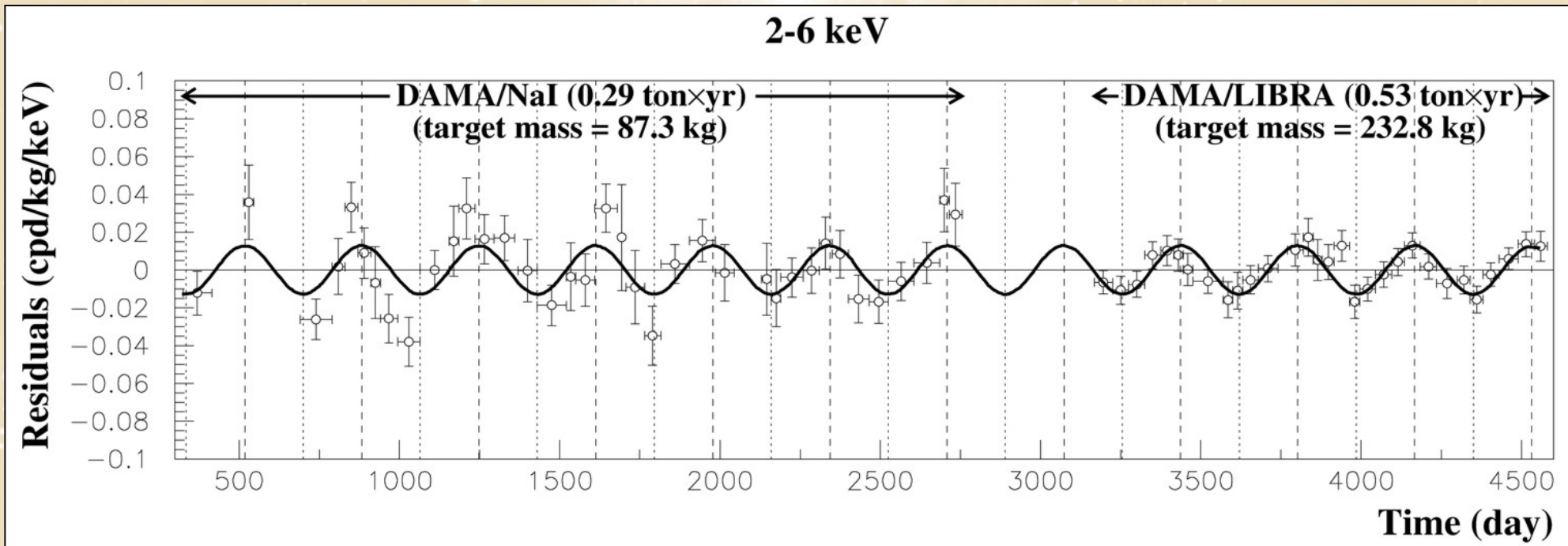


# DAMA/LIBRA – Evidenz für WIMPs?

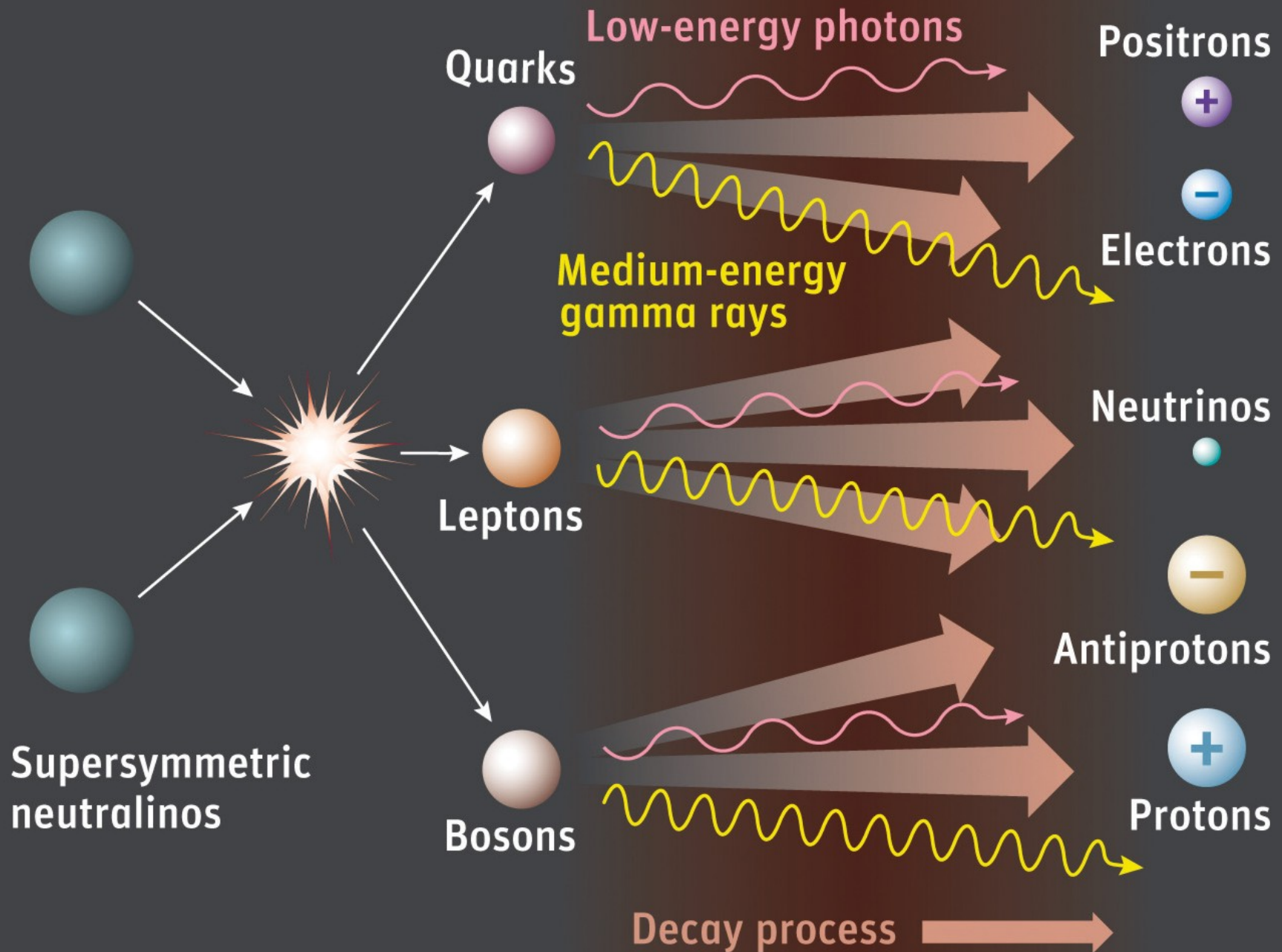


Das DAMA/LIBRA Experiment im Gran Sasso (NaI Detektor) beobachtet eine jährliche Modulation ihres Signals mit hoher statistische Signifikanz  
[Riv. N. Cim. 26 (2003) 1–73, arXiv:0804.2741 (2008)]

- Detektor Stabilität ?
- „Hintergrund Stabilität“ ?



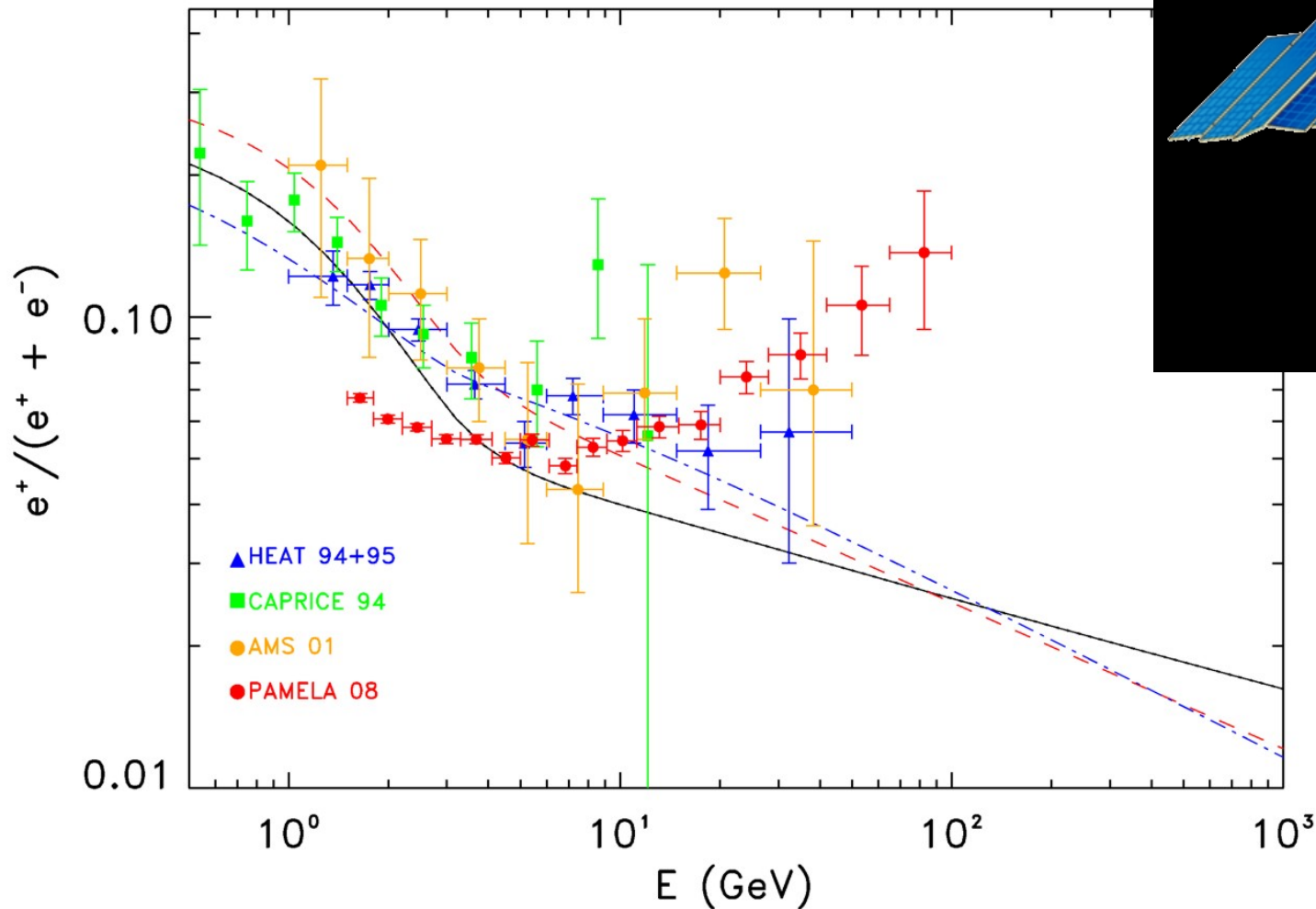
# Selbst-Annihilation dunkler Materieteilchen



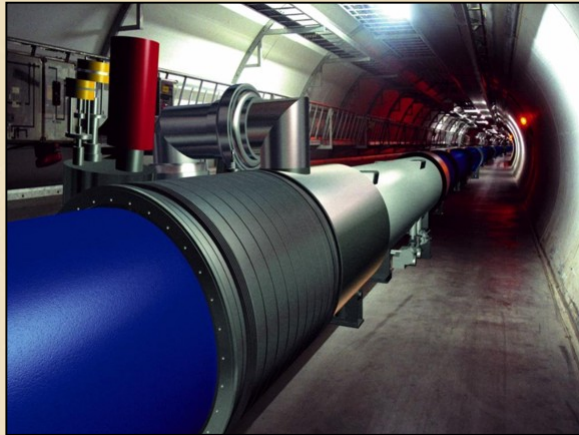


# Positron Signal im Pamela Satellit

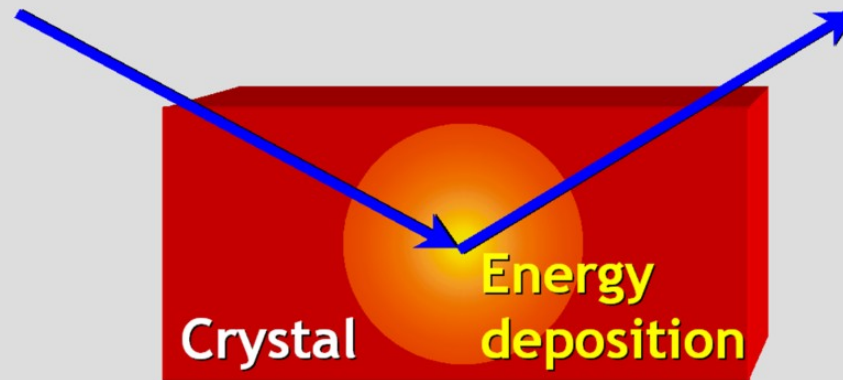
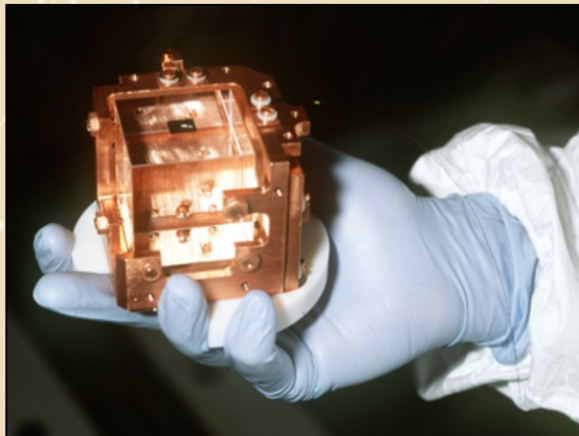
- Überzählige Positronen Hinweis auf Annihilation oder Zerfall dunkler Materie?
- Astrophysikalische Quellen (Pulsare) möglich



# Die Jagd nach den Teilchen der dunklen Materie

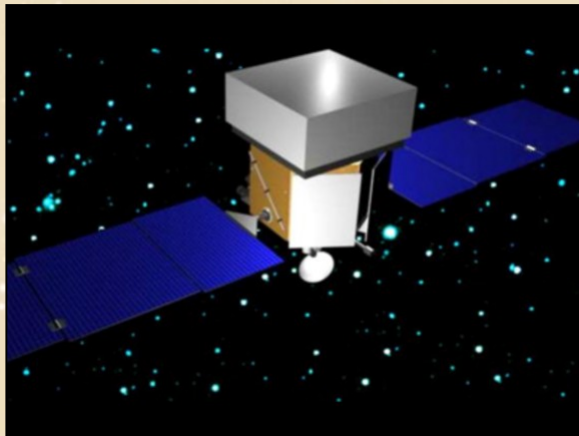


Suche nach neuen Teilchen an Beschleunigern, vor allem am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf (ab 2009)



Rückstoßenergie  
(wenige keV)  
Gemessen durch

- Ionisation
- Szintillation
- Kryogenisch

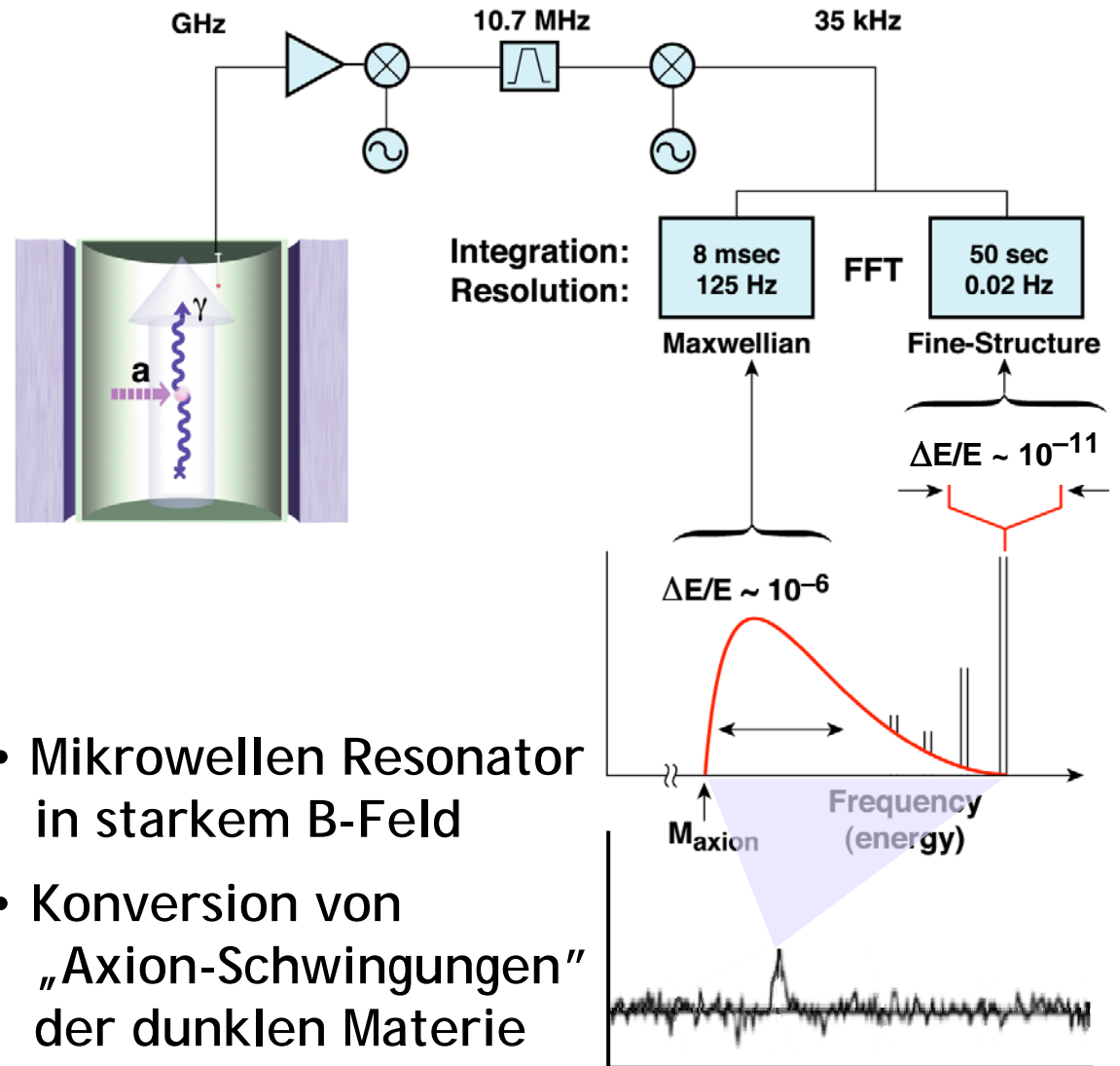
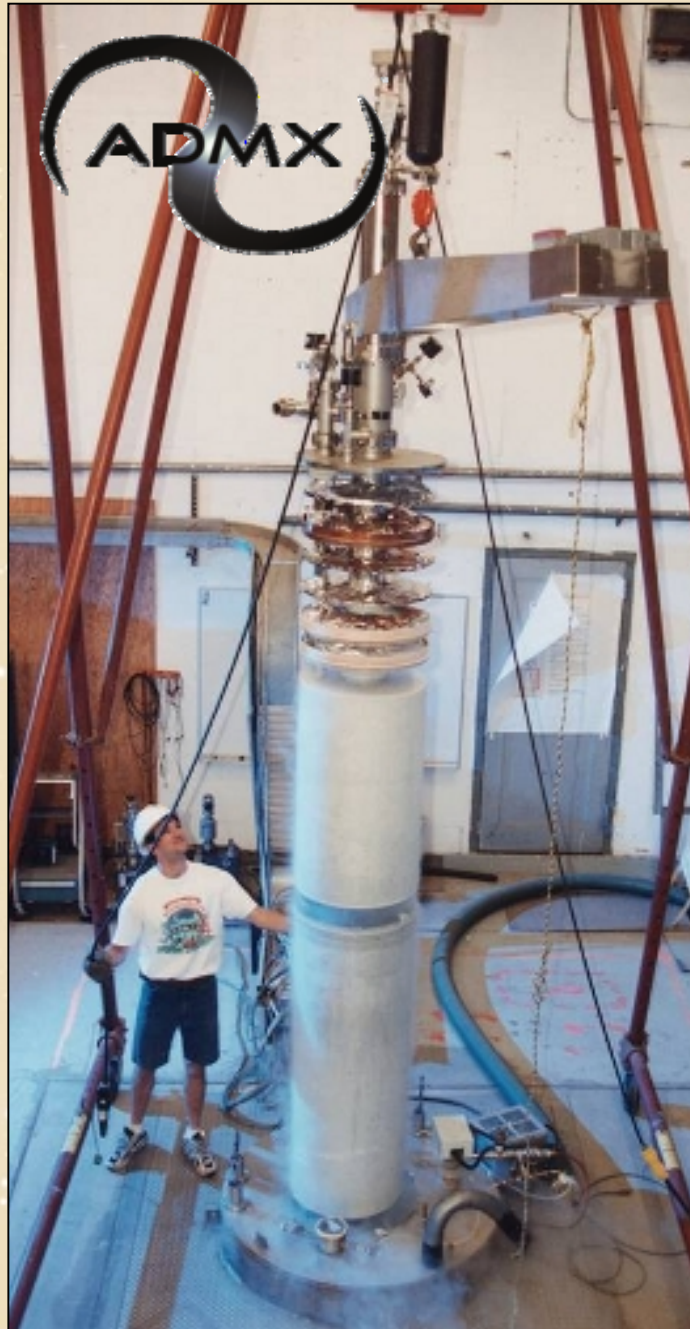


Suche nach Annihilationsprodukten in der Galaxie

- 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, ...)

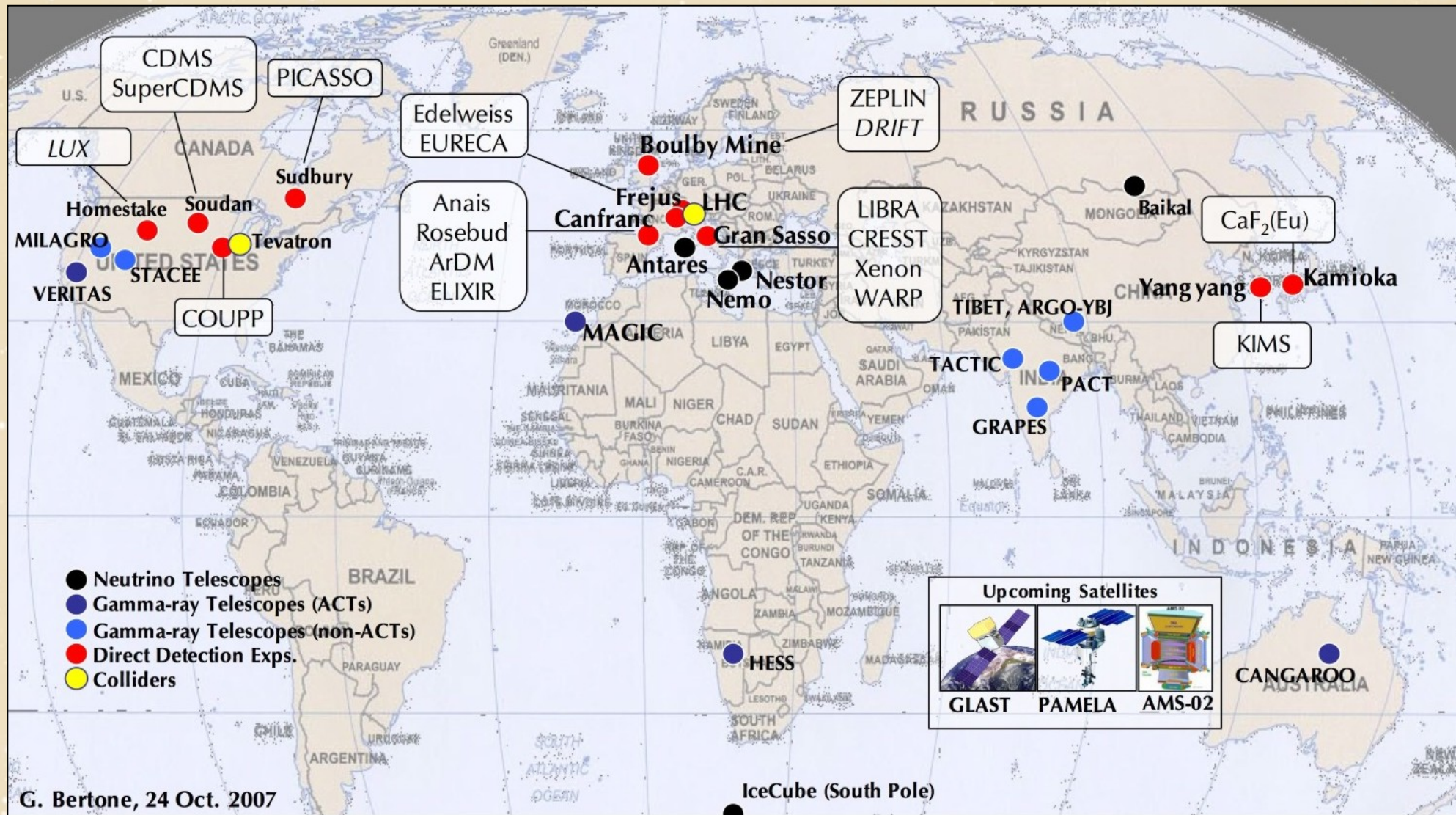


# Das Axion Radio



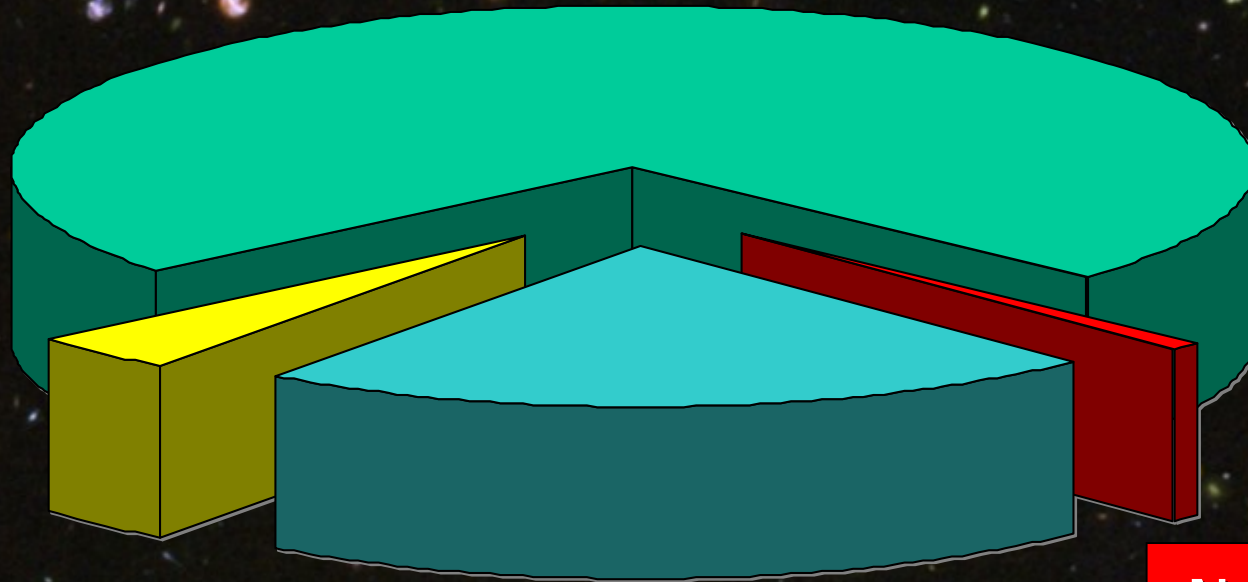
ADMX — Axion Dark Matter Experiment  
Univ. Washington, Seattle

# Weltweite Suche nach dunkler Materie





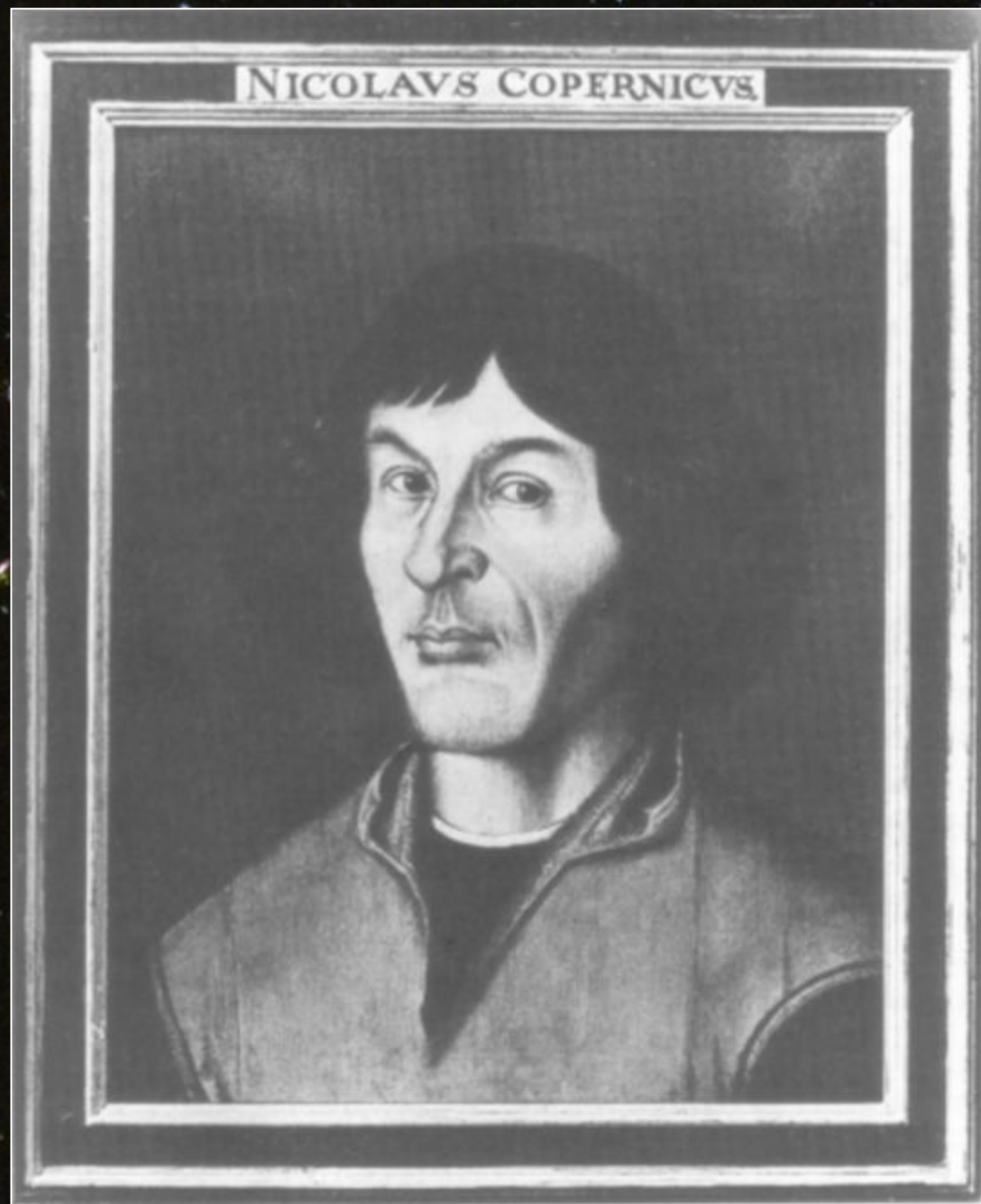
Dunkle Energie 73%  
(Kosmologische Konstante)



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>**