

Auf der Jagd nach Dunkler Materie

Max Camenzind Akademie HD 2015

Das ganze Universum besteht aus Atomen – glauben Sie ?



Motto fürs Folgende

Samuel Ting, Leiter AMS-02:

*„Es ist sehr schwer vorherzusagen, was wir finden werden. Aber wenn man schon weiß, wonach man sucht, und dann das findet, dann hat man nicht viel gelernt.
Viel wichtiger ist es, auf etwas zu stoßen, mit dem man nicht gerechnet hat. Nur so macht die Wissenschaft Fortschritte.“*

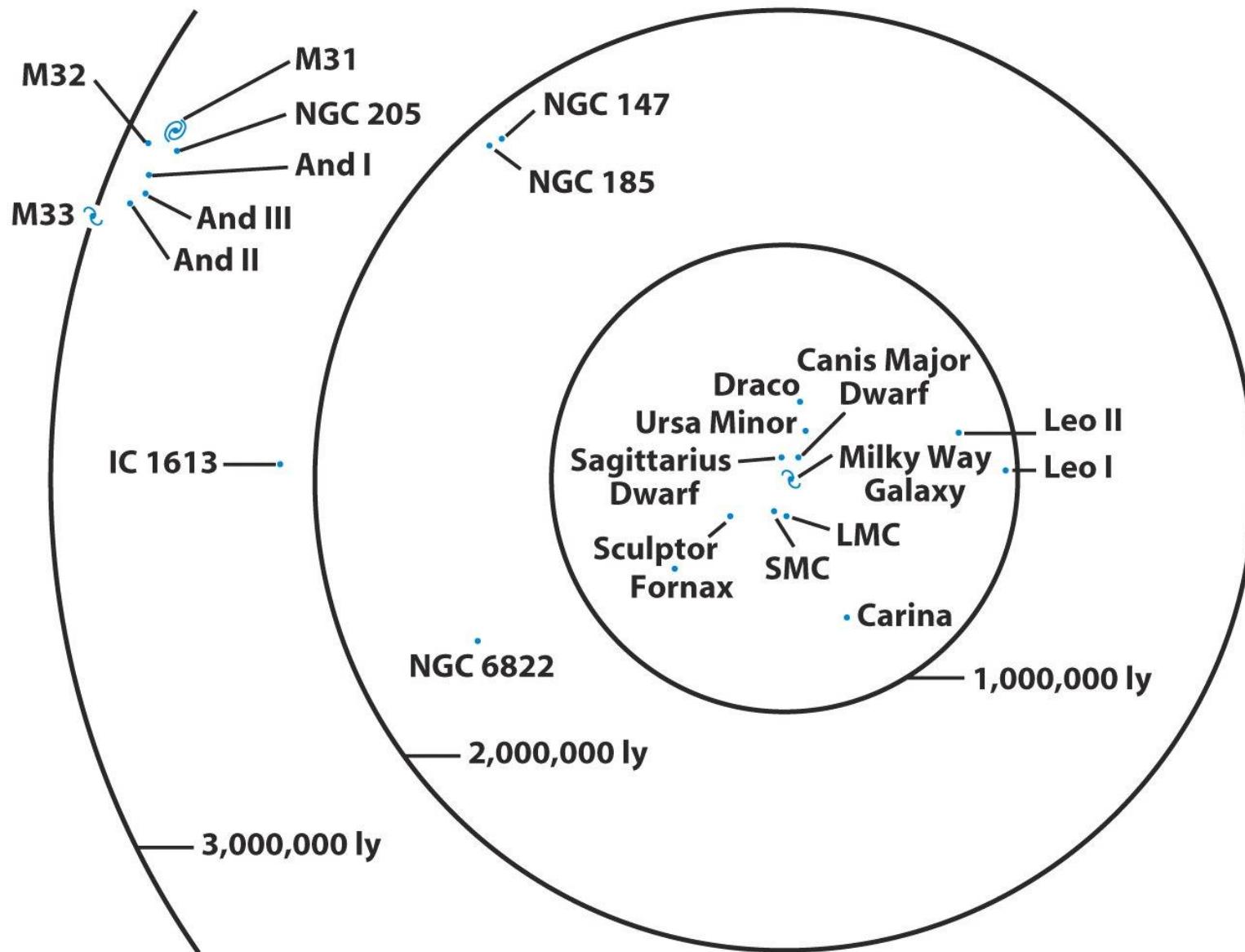
Unsere Themen

- **4 Fakten: Warum Dunkle Materie?**
 1. → Coma-Haufen: Fritz Zwicky 1933;
 2. → Rotationskurven von Galaxien: Vera Rubin;
 3. → Kosmische Hintergrundstrahlung CMB;
 4. → Wachstum von Strukturen im Universum kann ohne DM nicht erklärt werden.
- **Dunkle Materie Kandidaten:**
 - → WIMPs & andere Exoten;
 - → Supersymmetrie und das Neutralino.
- **Auf der Jagd nach der Dunklen Materie:**
 - → AMS-02, CDMS, DAMA, XENON, LUX, ...

Astronomische Evidenz überwältigend

1. Struktur von Galaxien
 1. Rotationskurven von Scheibengalaxien
 2. Gravitationslinsen
2. Galaxienhaufen
 1. Gravitationslinsen
 2. Kinematik (Fritz Zwicky 1933)
 3. Heißes Gas (Röntgenstrahlung)
3. Kosmische Hintergrundstrahlung CMB
4. Großräumige Struktur des Universums.

Galaxien leben im Verband - gesellig



Coma-Haufen enthält ca. 10000 Galaxien

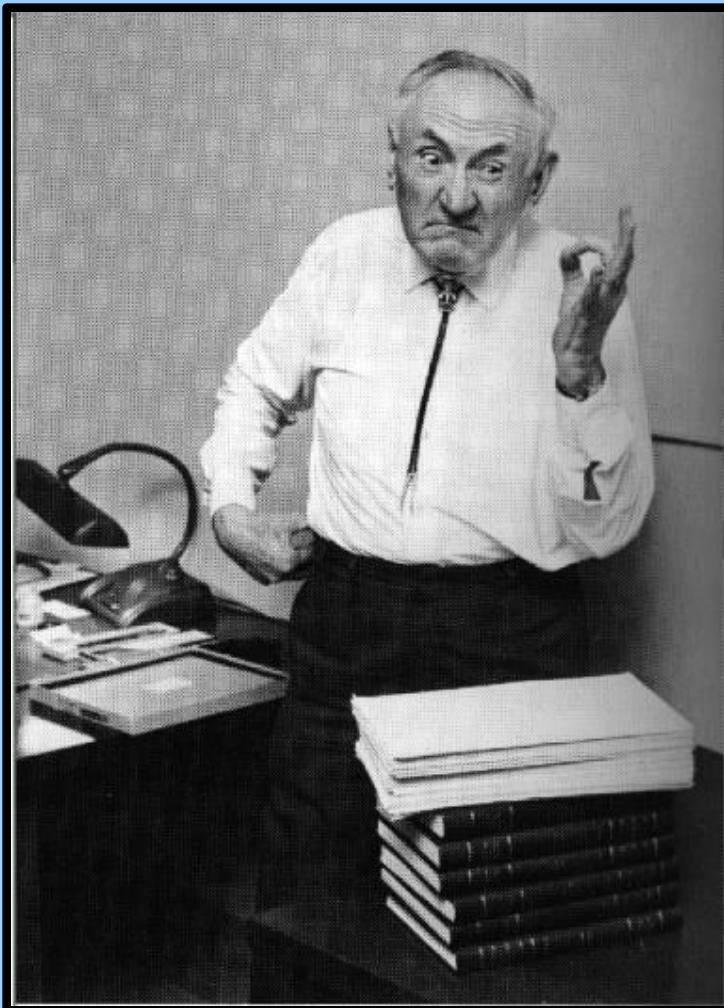


Fritz Zwicky – Vater der Dunklen Materie



- 1933 untersuchte Fritz Zwicky den Coma-Haufen (ca. 90 Mpc entfernt). Galaxien bewegen sich zu schnell (gemessen über Doppler Effekt) im Vergleich zu sichtbarer Masse → Zwicky postulierte “Dunkle Materie”.

Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Fritz Zwicky (1898 - 1974)

Messung der Masse von Sternsystemen durch relative Bewegung (viel Masse verursacht schnelle Bewegung):

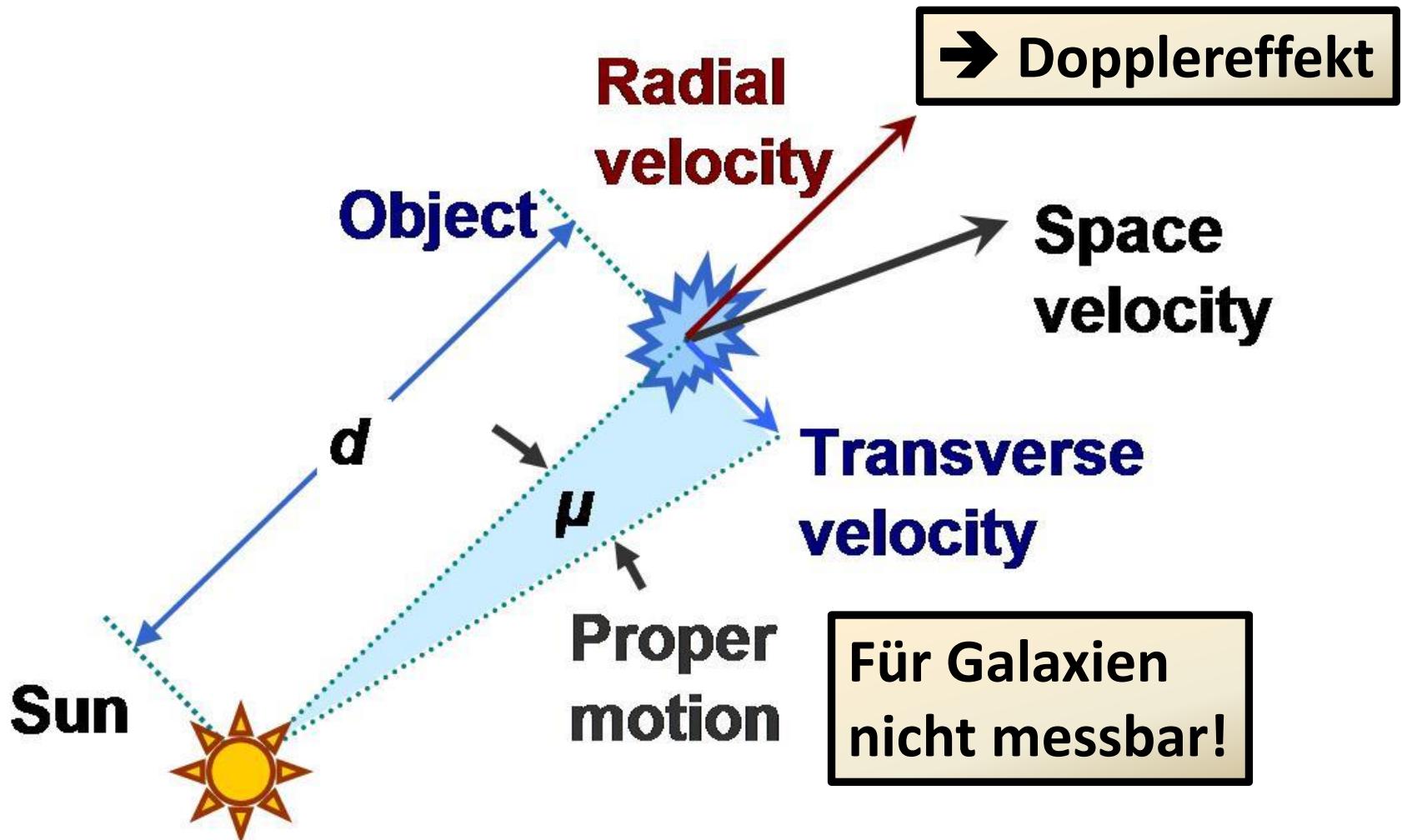
Paper von 1933:

“Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”

Messung von Radialgeschwindigkeiten in Galaxienhaufen von 700 km/s

Masse der DM mit einem Faktor 100 über der Leuchtkraft → $M/L = 250 M_S/L_S$

Was ist Radialgeschwindigkeit?



Das Virial-Theorem

- Für ein gravitativ gebundenes System gilt:

$$2\langle K \rangle + \langle U \rangle = 0$$

- K ist die kinetische Energie, U die potenzielle
- → Im Falle eines Planeten gilt:

$$U = -\frac{GMm}{r} \quad K = \frac{mv^2}{2} \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$2K + U = 2 \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r} = m \frac{GM}{r} - \frac{GMm}{r} = 0$$

Virial-Theorem für Galaxien-Haufen

- Kinetische Energie

$$K = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle$$

- wobei m_i, v_i Masse und Geschwindigk. Galaxien und $M, \langle v^2 \rangle$ totale Masse und mittlere Geschwindigkeit bedeuten.

- Wie bestimmt man $\langle v^2 \rangle$?
- → Messe Geschwindigkeit in Sichtlinie (Doppler)
- Beachte $\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rangle = 3 \langle v_z^2 \rangle = 3\sigma^2$ wobei σ die “Geschwindigkeits-Dispersion”.

Virial-Theorem für Galaxien-Haufen

- Kinetische Energie
- Potenzielle Energie

$$K = \frac{3}{2} M \sigma^2$$

$$U = -0,4 \frac{GM^2}{r_h}$$

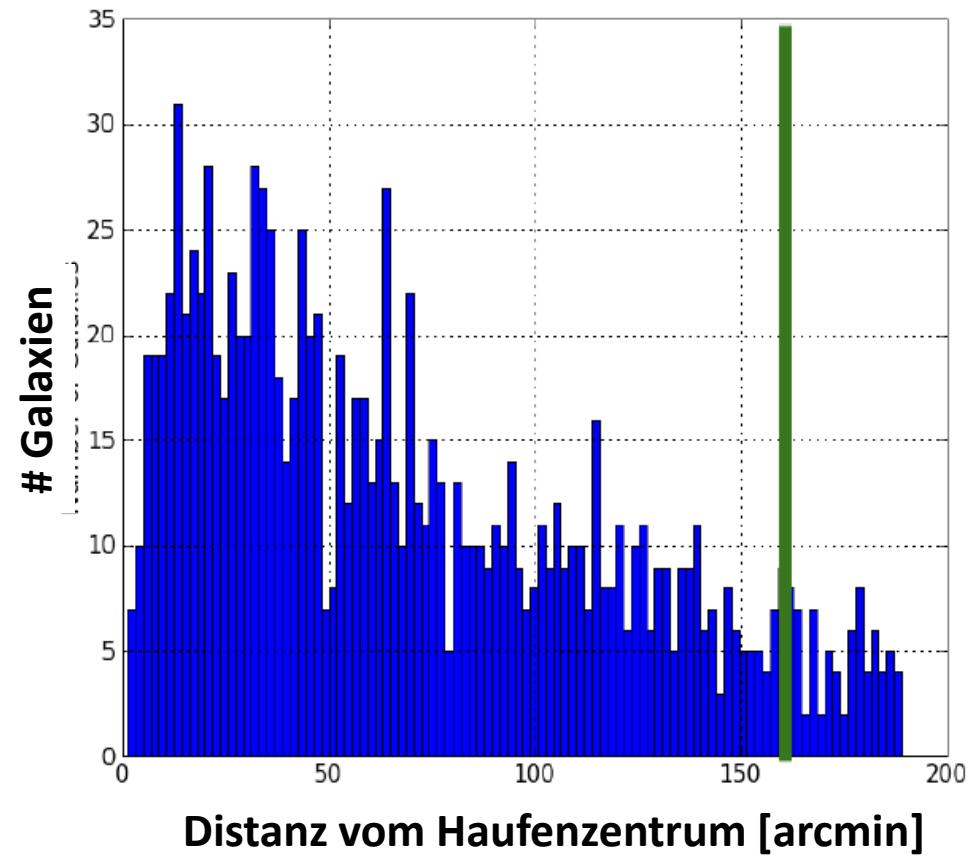
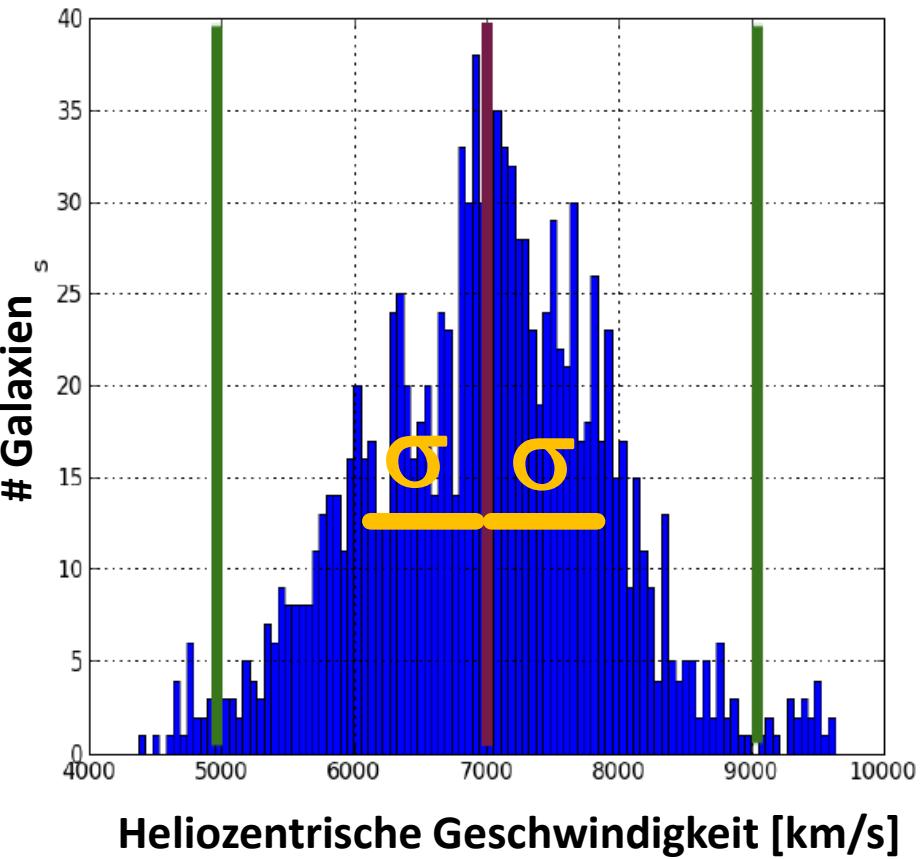
mit r_h = “Halblicht-Radius”

- Verwende das Virial-Theorem $2K+U = 0 \rightarrow$

$$2 \frac{3}{2} M \sigma^2 - 0,4 \frac{GM^2}{r_h} = 0$$

$$M = 7,5 \frac{\sigma^2 r_h}{G}$$

Moderne Messung für Coma-Haufen

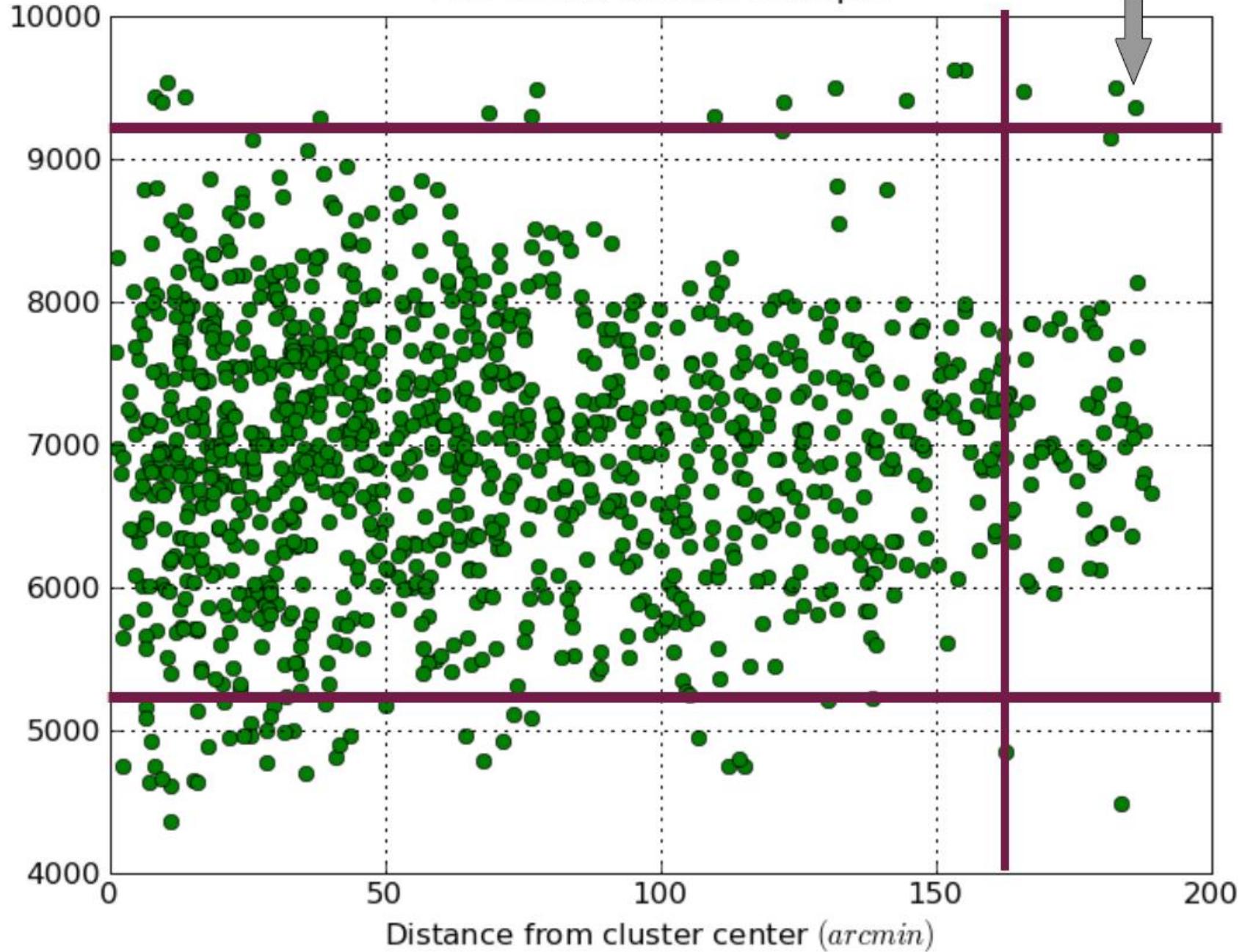


σ : die Breite der Gauß-Verteilung

Full Coma Cluster Sample

INTERLOPERS!!!

Heliocentric velocity (km/s)



Werte für den Coma-Haufen

- $r_h = 1,5 \text{ Mpc}$
- $\sigma = 880 \text{ km/s}$
- → Gesamtmasse $M = 2 \times 10^{15} M_\odot$
- Konsequenzen:
- → **Masse-Leuchtkraft-Verhältnis** ist jedoch
 $M/L = 250 M_\odot/L_\odot$, für die Sonne: $M/L = 1 M_\odot/L_\odot$,
für typische Sterne in Galaxie $M/L = 2,5 M_\odot/L_\odot$
- → Die gravitative Masse des Coma-Haufens
übersteigt die leuchtende Masse um einen Faktor
100 !!!!

Aktuelle Messung für Coma-Haufen

- Using four different methods, the Coma Cluster has a mass of:

$$M_{\text{VT}} = 2.1488 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$$

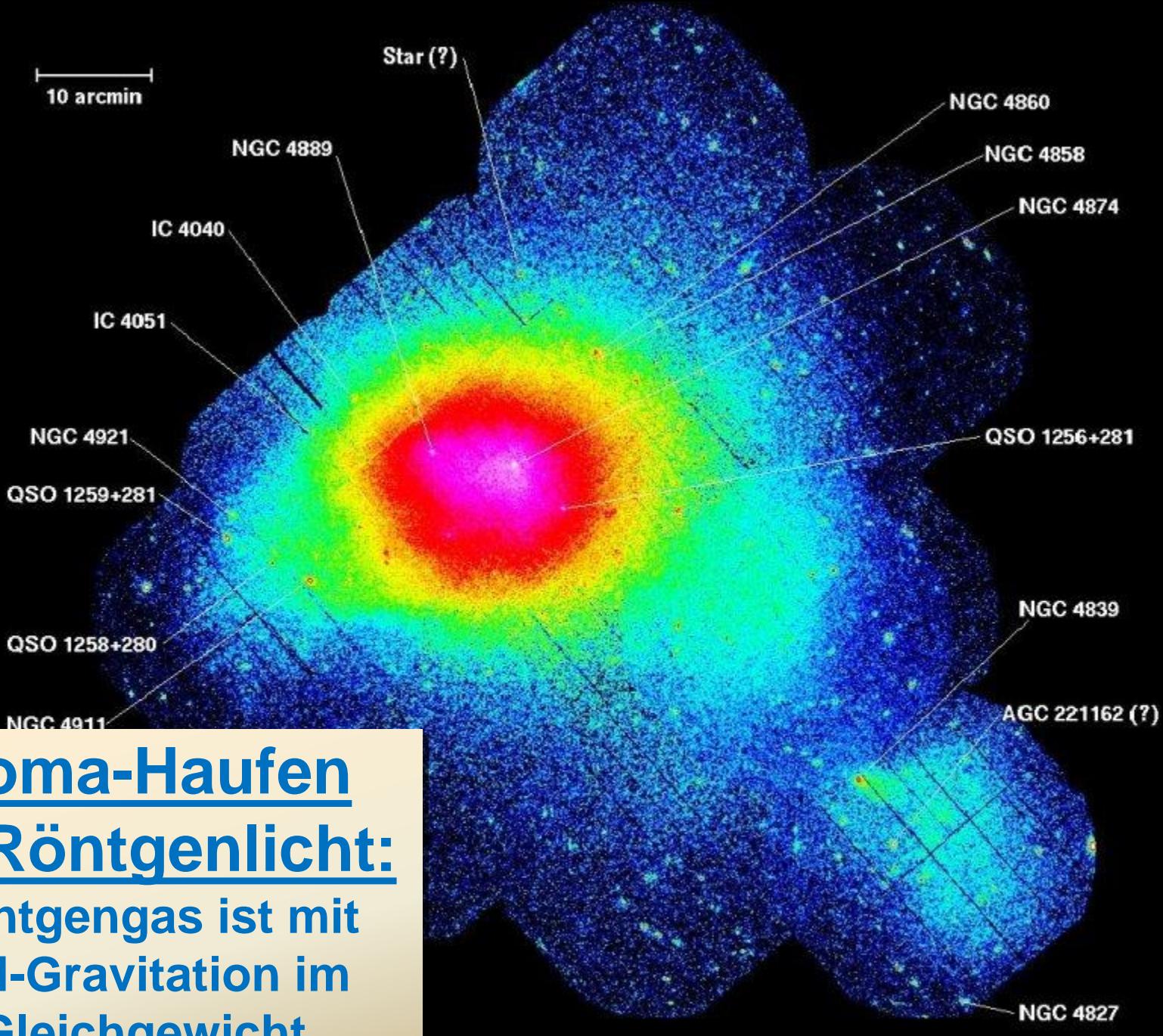
$$M_{\text{PM}} = 2.5902 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$$

$$M_{\text{Me}} = 2.0061 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$$

$$M_{\text{Av}} = 2.1937 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$$

- All four methods give a different mass.
- All four methods behave similarly to sample size and outliers.
 - Reliability depends heavily on sample size.
- For a large enough sample, $N > 100$, the amount of disagreement is significantly larger than the statistical uncertainties.





Coma-Haufen
im Röntgenlicht:
Röntgengas ist mit
DM-Gravitation im
Gleichgewicht



Dunkle Materie in Galaxienhaufen

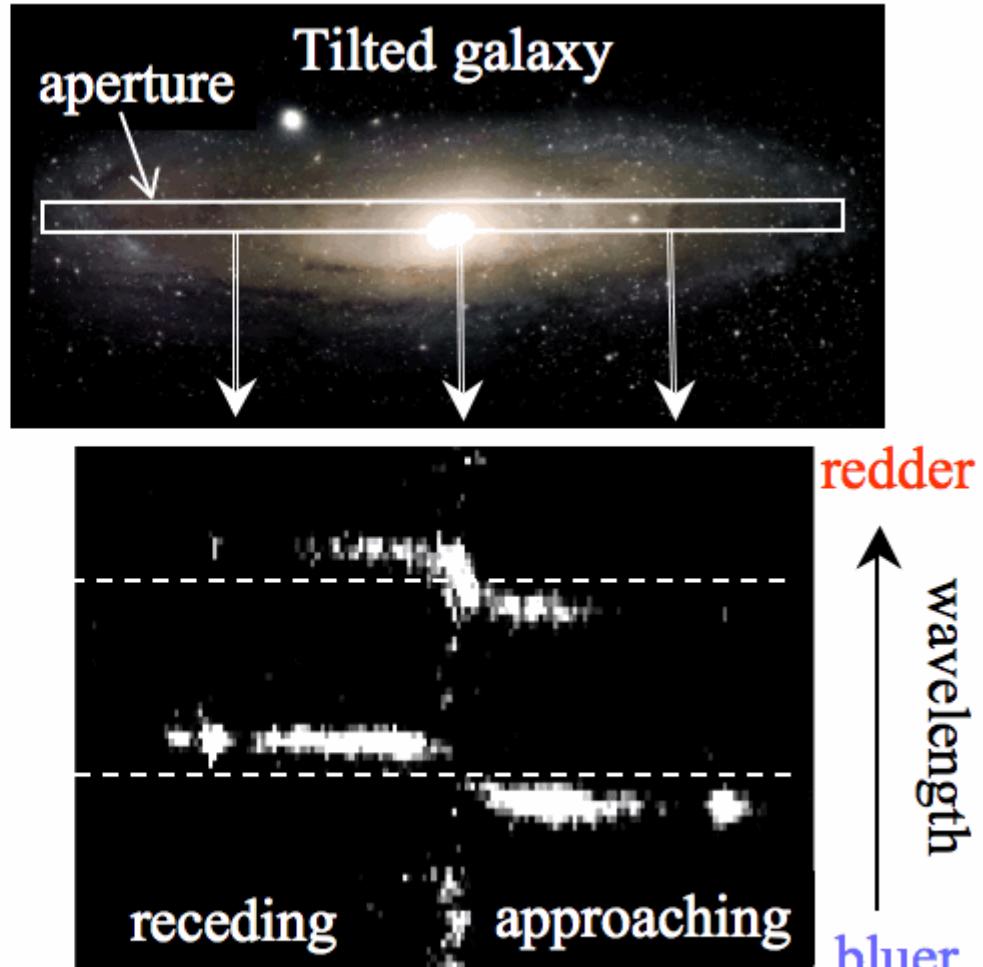
Röntgenstrahlung aus Coma-Haufen

- Röntgengas hat eine Temperatur von 100 Mio. Grad Kelvin.
- Die totale Röntgenleuchtkraft beträgt mehr als die Leuchtkraft von 100 Mrd. Sonnenleuchtkräften.
- Konsequenzen:
- → Daraus folgt die Masse des Röntgengases zu $M_{\text{Gas}} = 2 \times 10^{14} M_{\odot}$
- → Damit ist die Masse des Röntgengases größer als die Masse in allen sichtbaren Sternen in allen Galaxien des Haufens → **10% der totalen Masse.**

Die „Mutter“ der Dunklen Materie

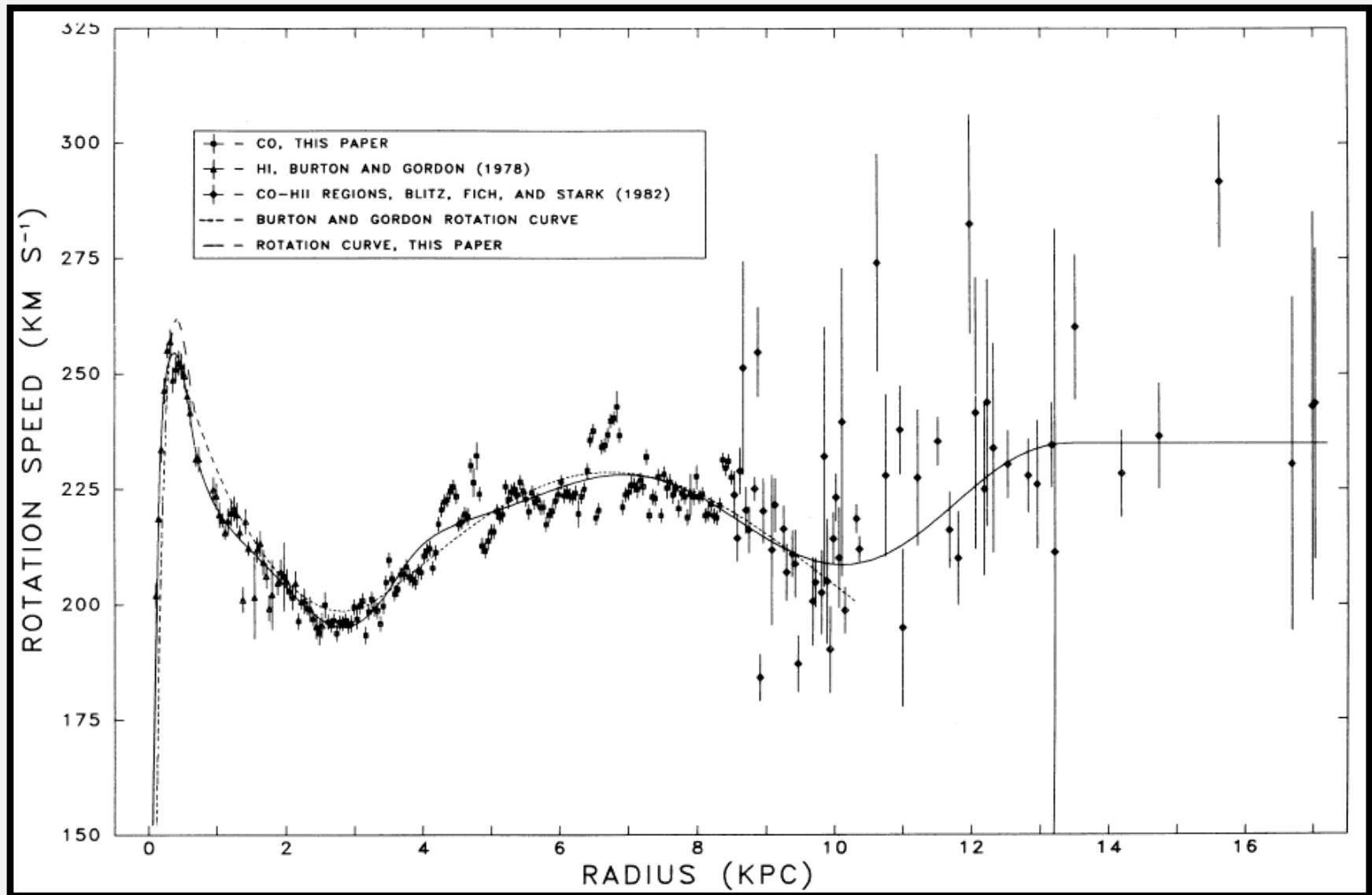


Vera Rubin 1970 vermisst
Rotationskurven



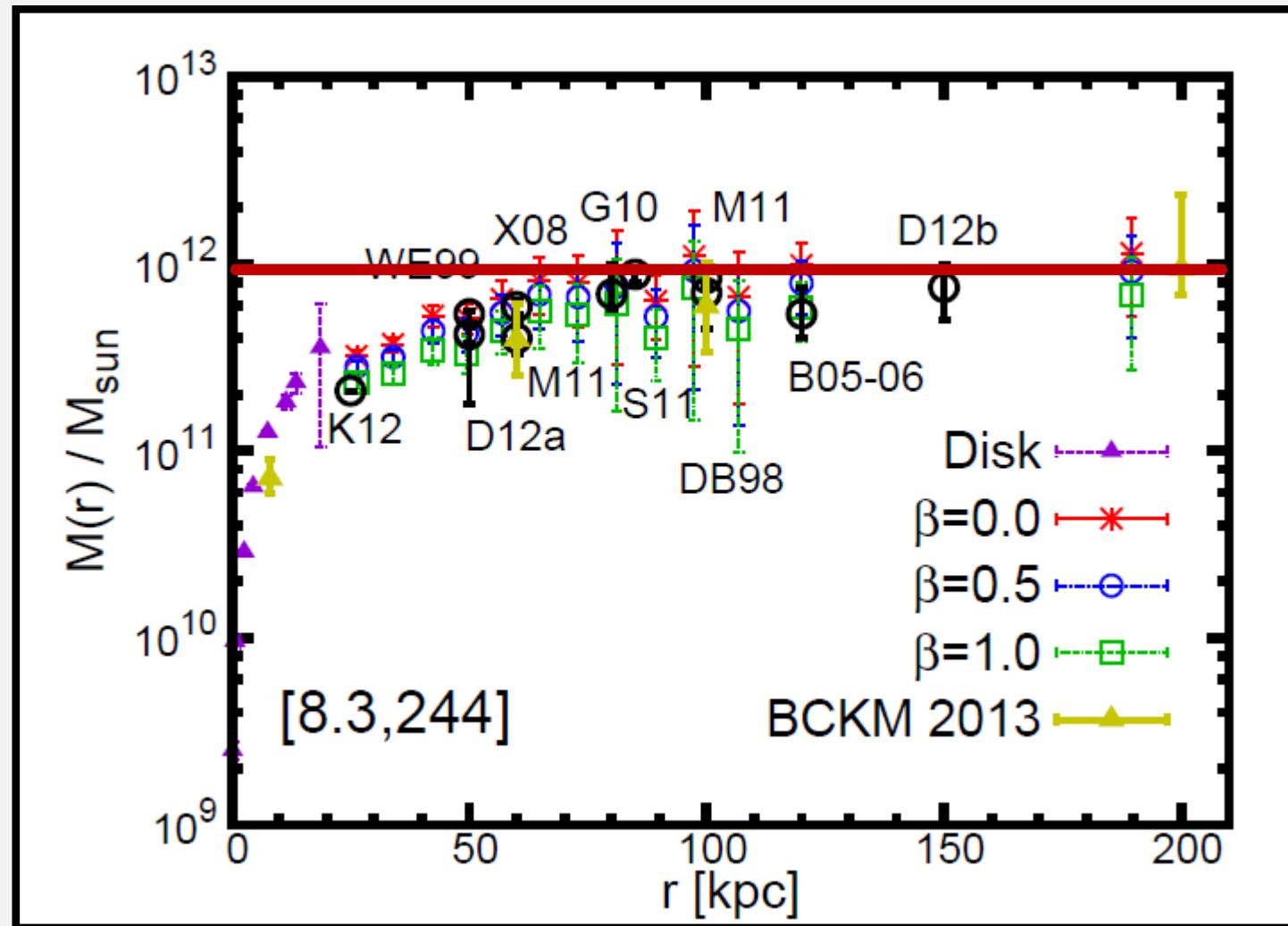
Aus Spektren ergeben sich
Dopplergeschwindigkeiten

Rotationskurve Milchstraße

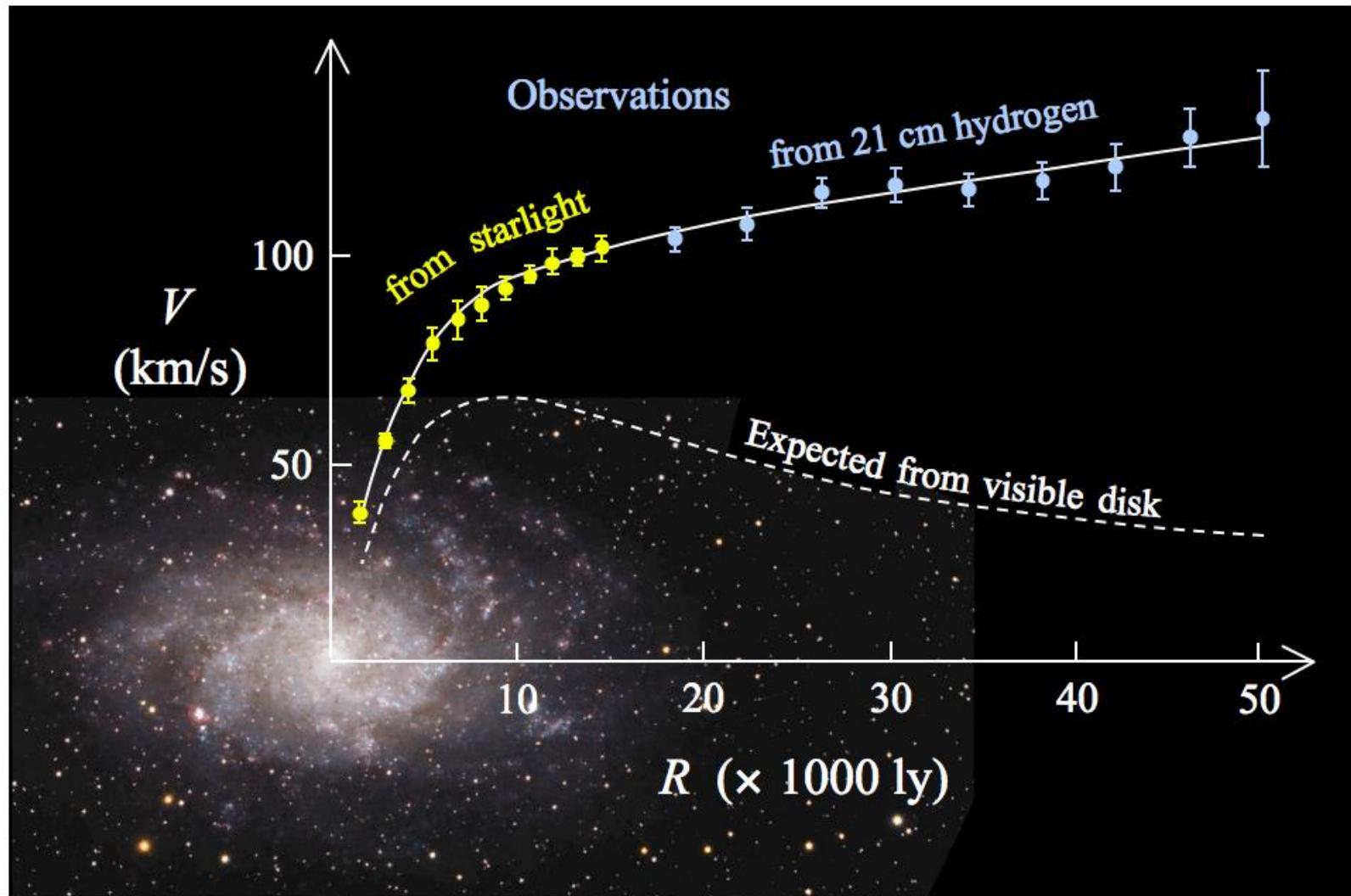


Masse der Milchstraße

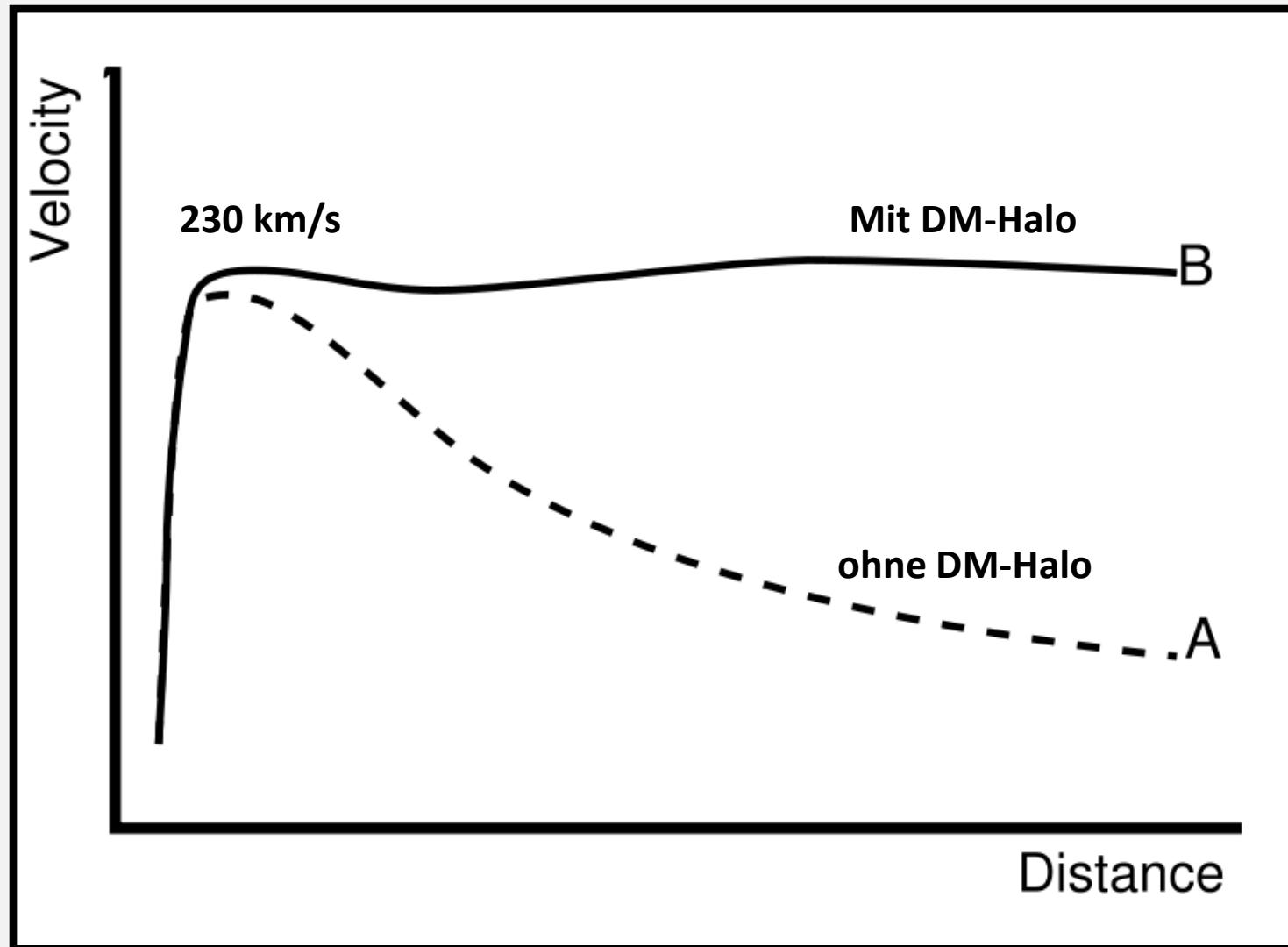
$$M = 1,0 \times 10^{12} M_{\odot}$$



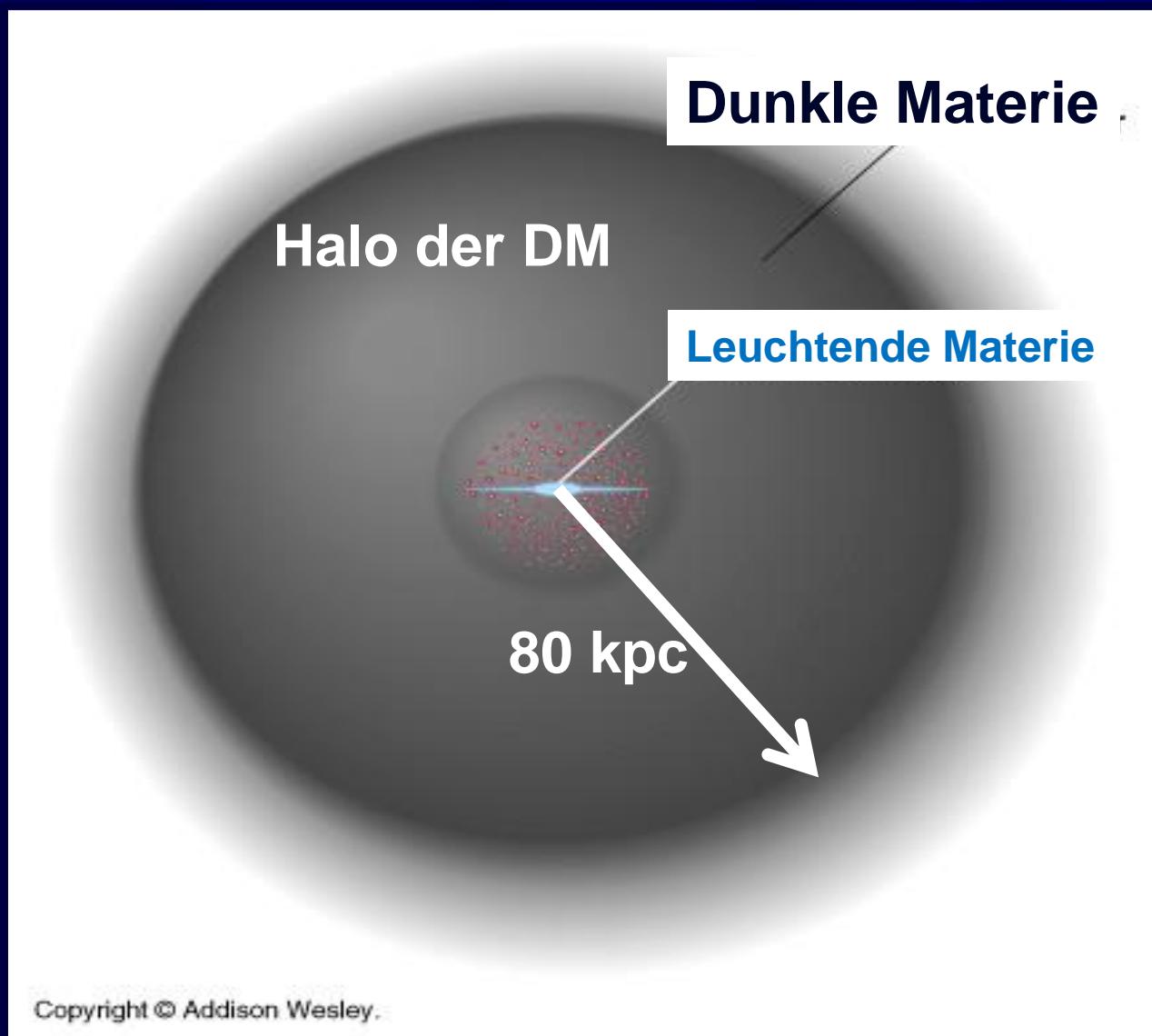
Die Rotationskurve der Dreiecksgalaxie



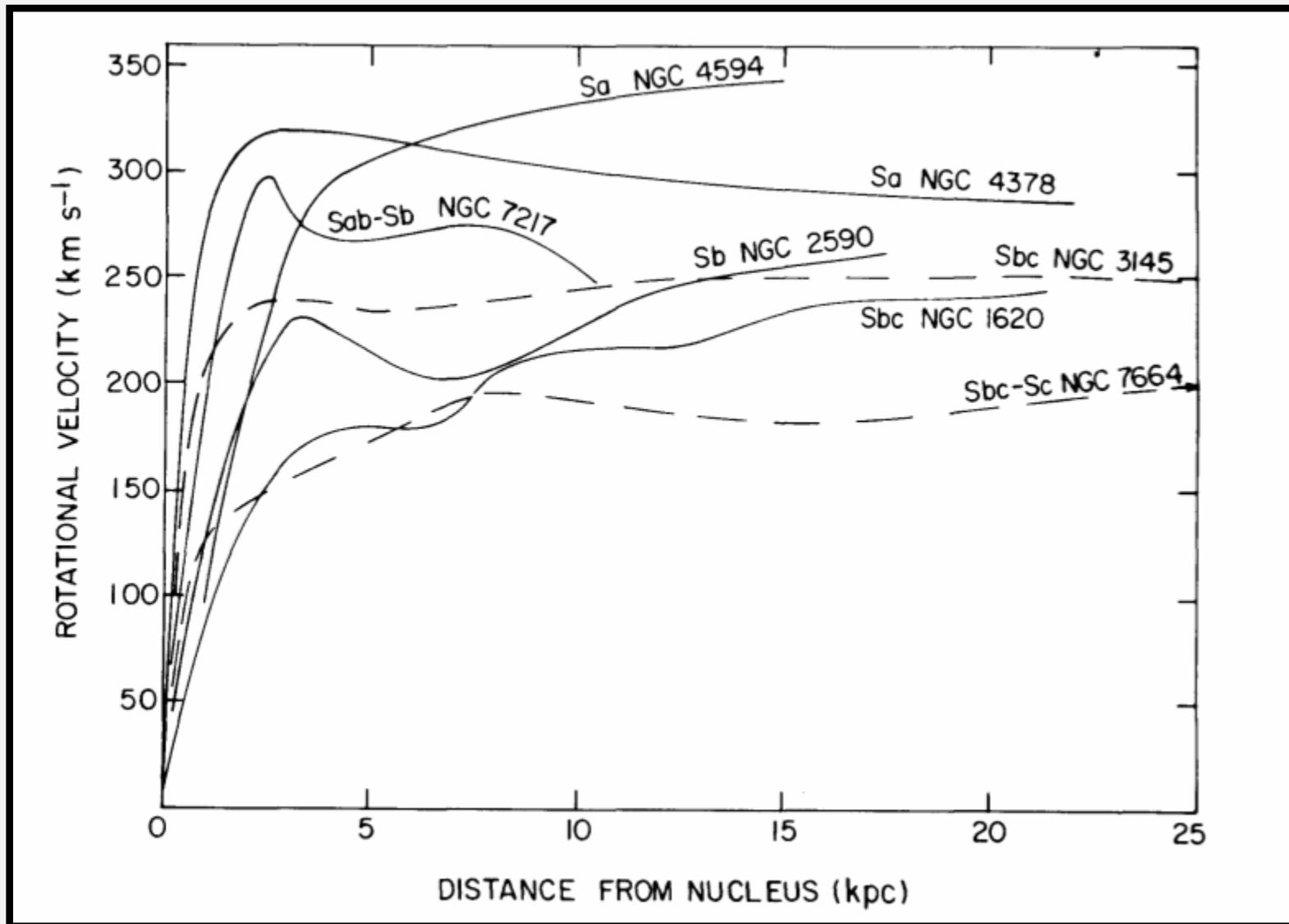
Galaxien-Rotationskurven



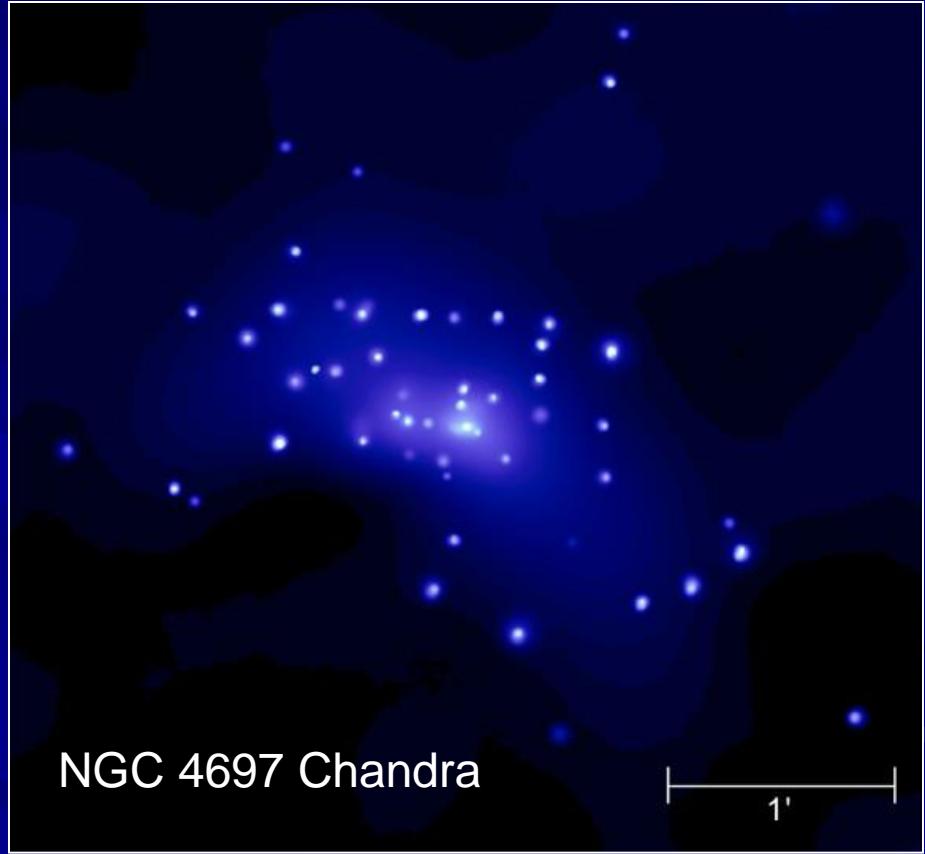
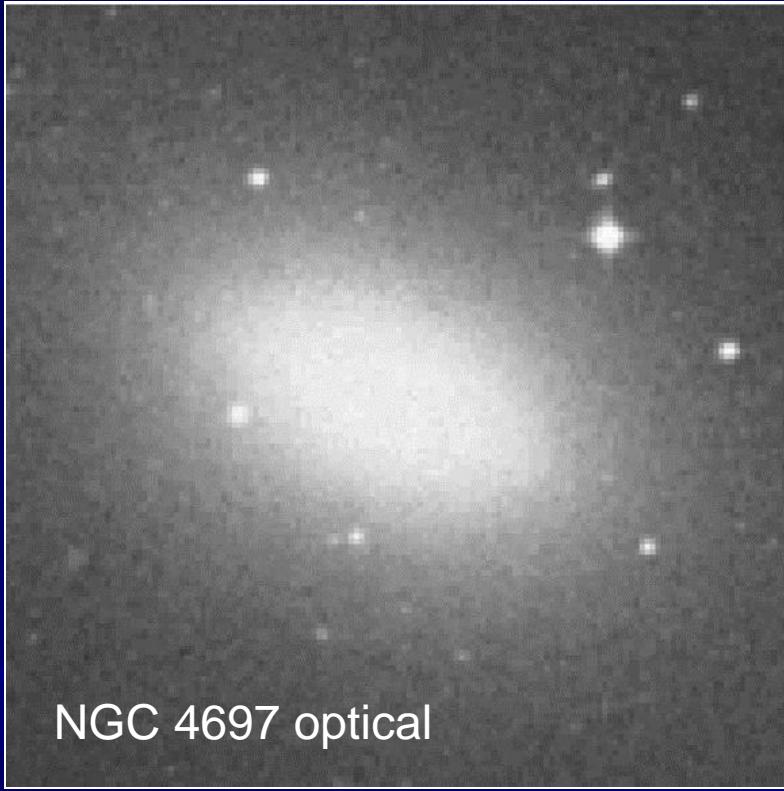
Moderne CDM-Vorstellung über unsere Milchstraße



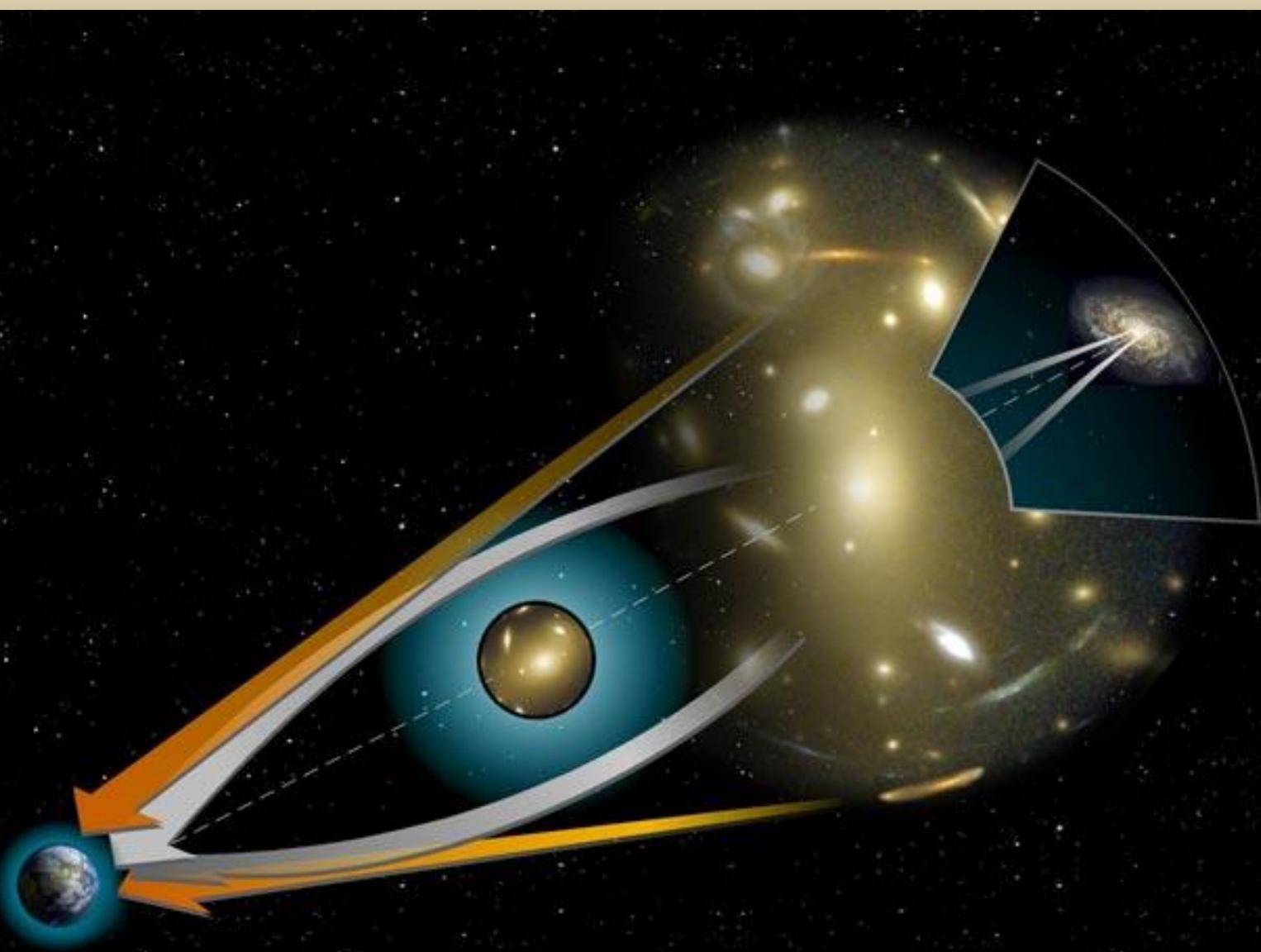
Rotationskurven von Spiralgalaxien sind generell flach !



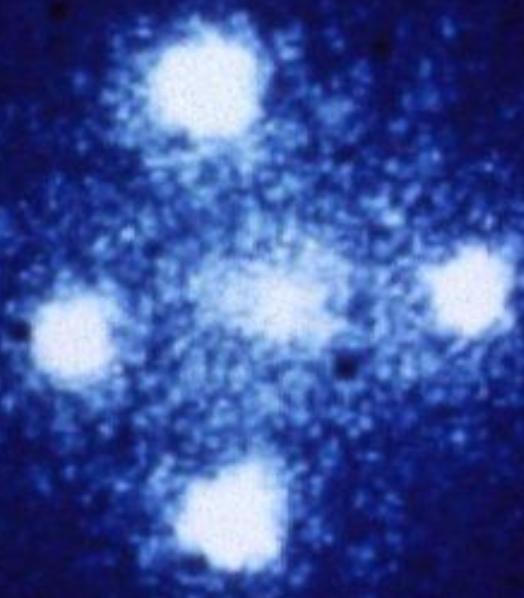
Dunkle Materie in Elliptischen Galaxien – Evidenz Röntgengas



Gravitations-Linsen → Dunkle Materie

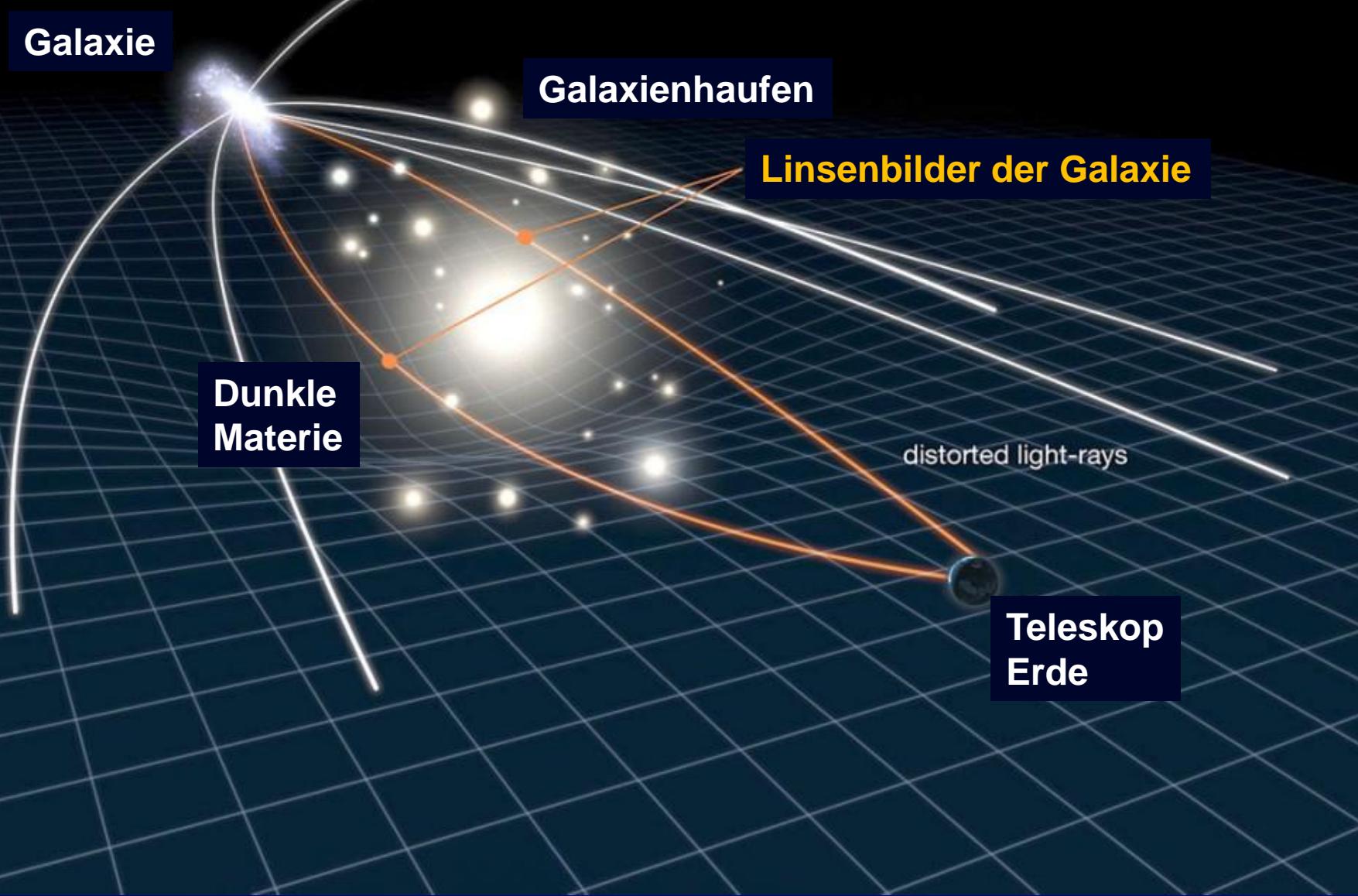


**„Einstein Kreuz“
Galaxien-
Gravitationslinse
G2237+0305**

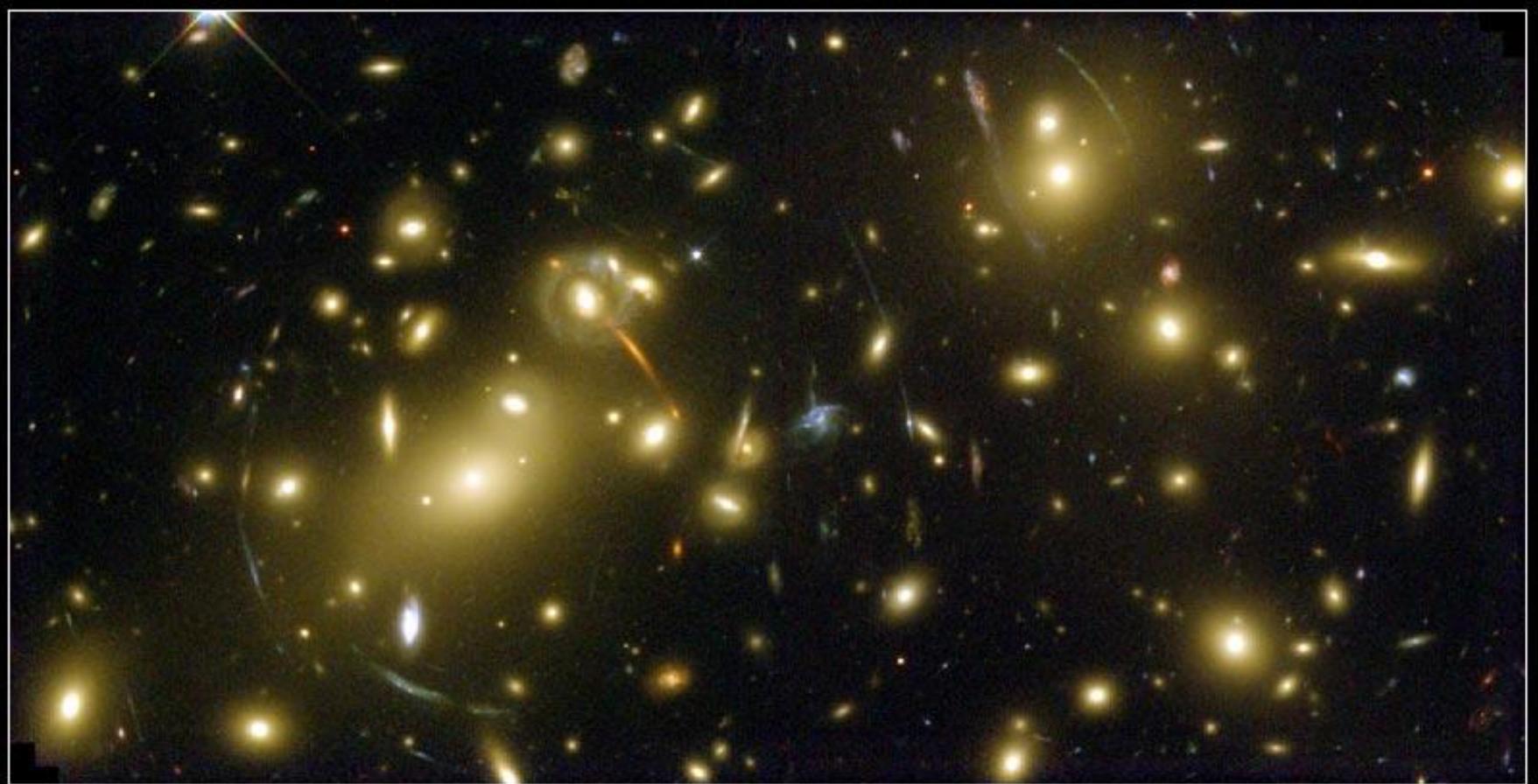


Dunkle Materie in Galaxien-Haufen

→ Lichtablenkung nach Einstein



Gravitations-Linse in Abell 2218



Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2

Gravitations-Linsen in 0024+1654



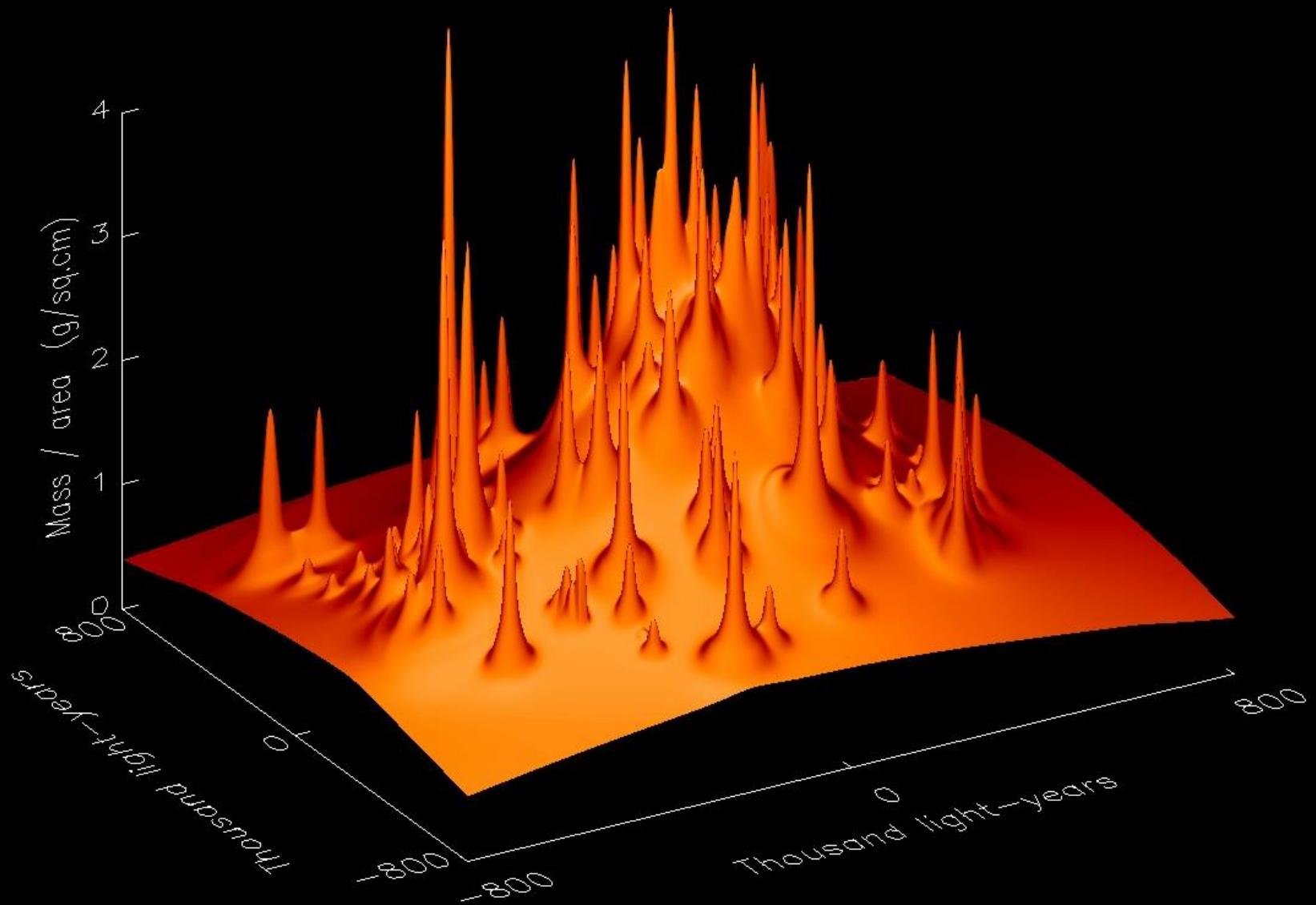
**Gravitational Lens
Galaxy Cluster 0024+1654**

HST • WFPC2

PRC96-10 · ST Scl OPO · April 24, 1996

W.N. Colley (Princeton University), E. Turner (Princeton University),
J.A. Tyson (AT&T Bell Labs) and NASA

Rekonstr. Materieverteilung CL0024+165

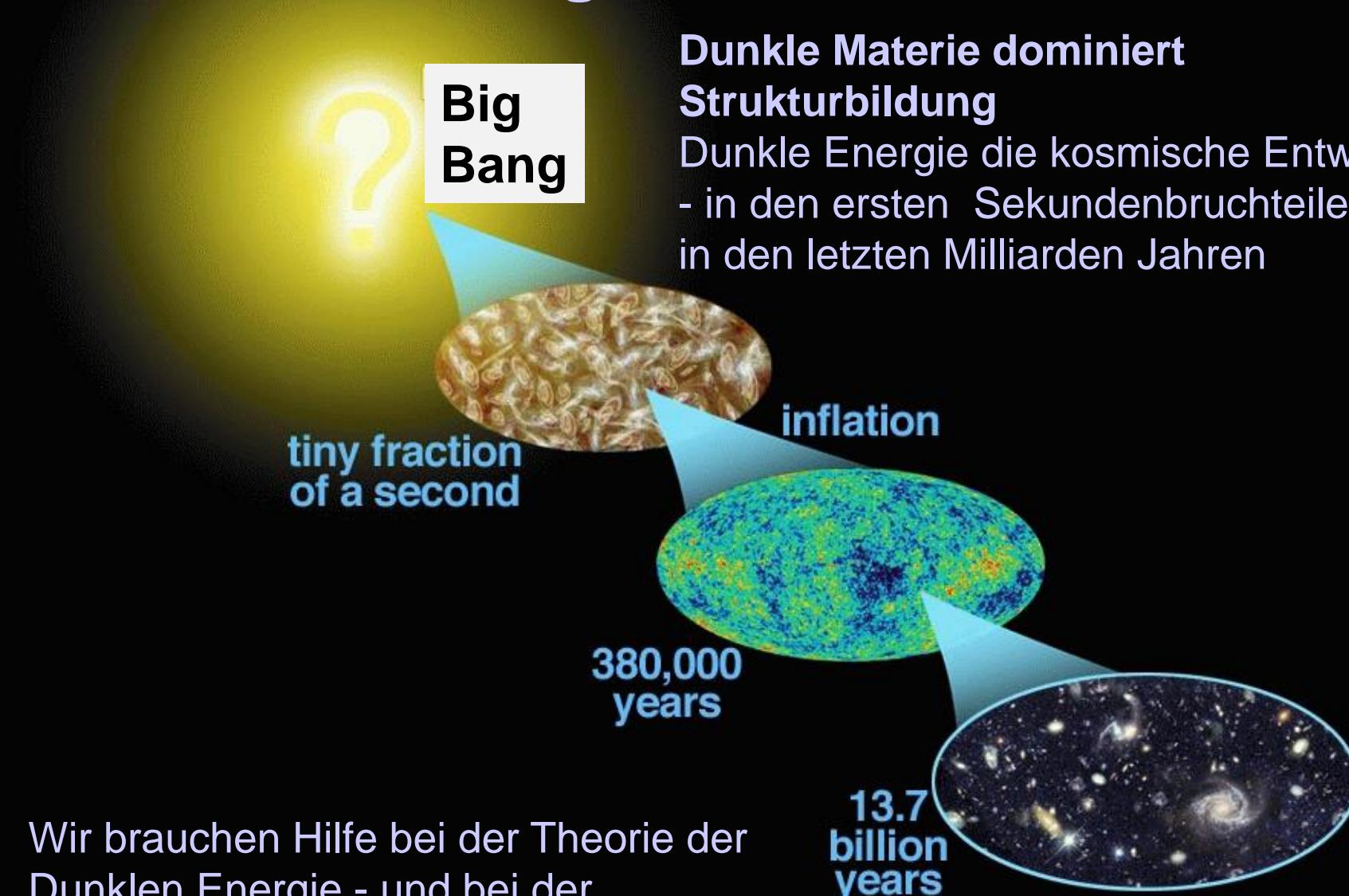


[Tyson et al., Ap. J. **498** L107-110, 1998]

Dunkle Materie → Cosmic Web

- Galaxien und Galaxienhaufen bilden irreguläre Filamente, die sog. Voids abgrenzen, die nur wenige Galaxien enthalten → diese Struktur nennt man **Cosmic Web**.
- Die Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung (CMB) gelten als die Saatfelder für die Bildung von Filamenten, Galaxienhaufen und Galaxien.
- Dieser Prozess kann ohne Kalte Dunkle Materie (CDM) nicht verstanden werden.

Strukturbildung mit DM und DE

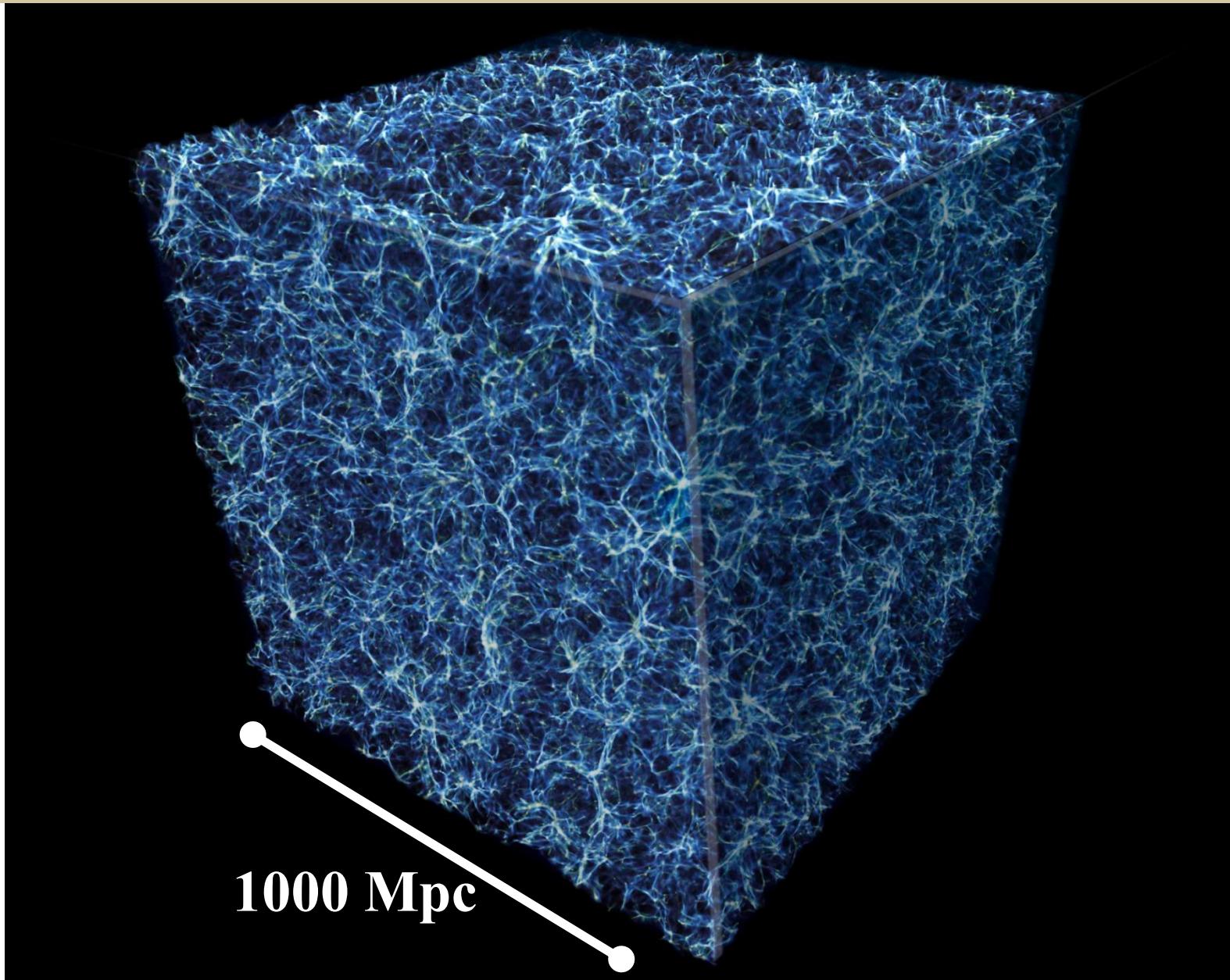


Dunkle Materie dominiert
Strukturbildung

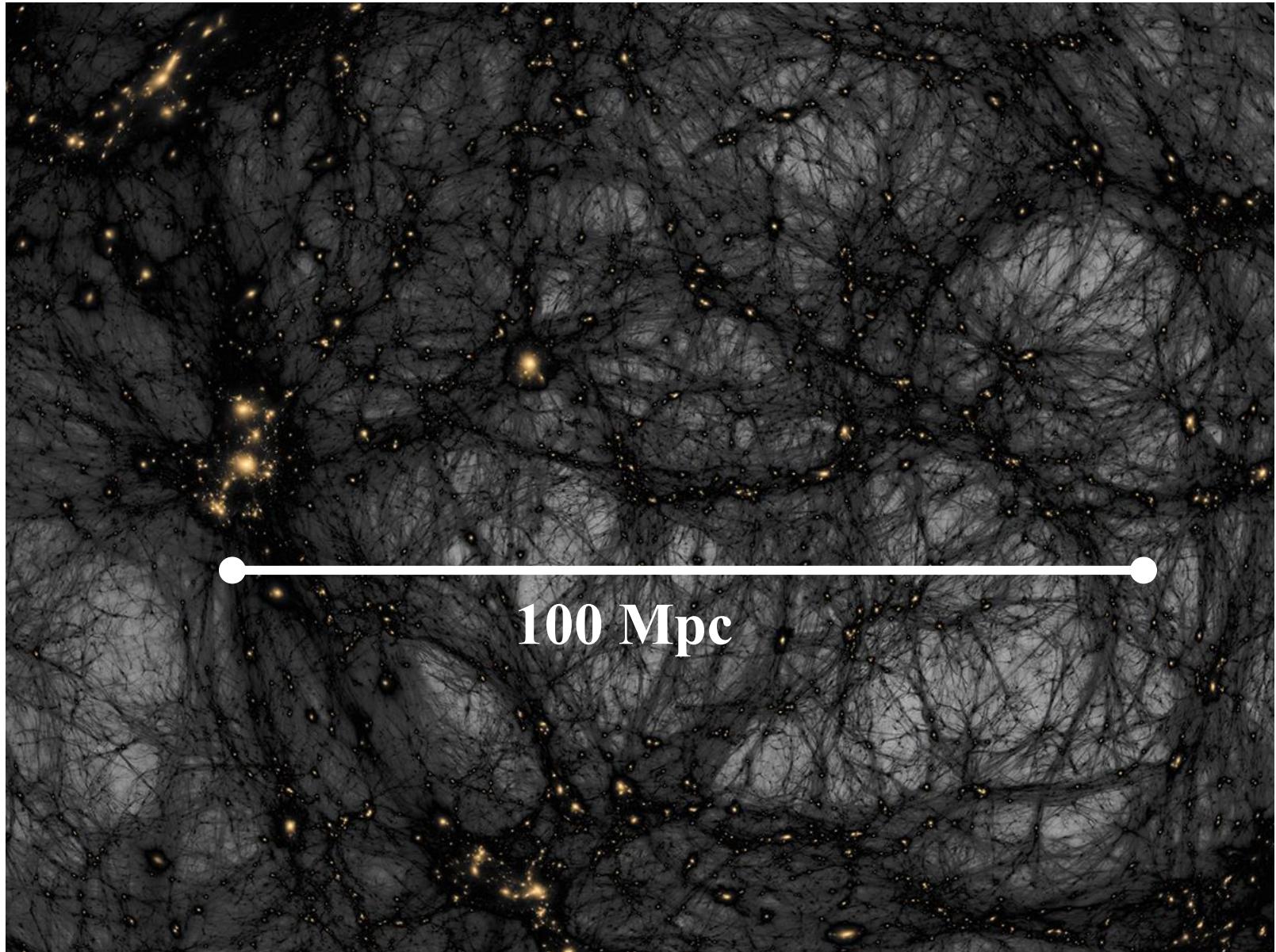
Dunkle Energie die kosmische Entwicklung
- in den ersten Sekundenbruchteilen und
in den letzten Milliarden Jahren

Wir brauchen Hilfe bei der Theorie der
Dunklen Energie - und bei der
Beobachtung von veränderlichen Quellen!

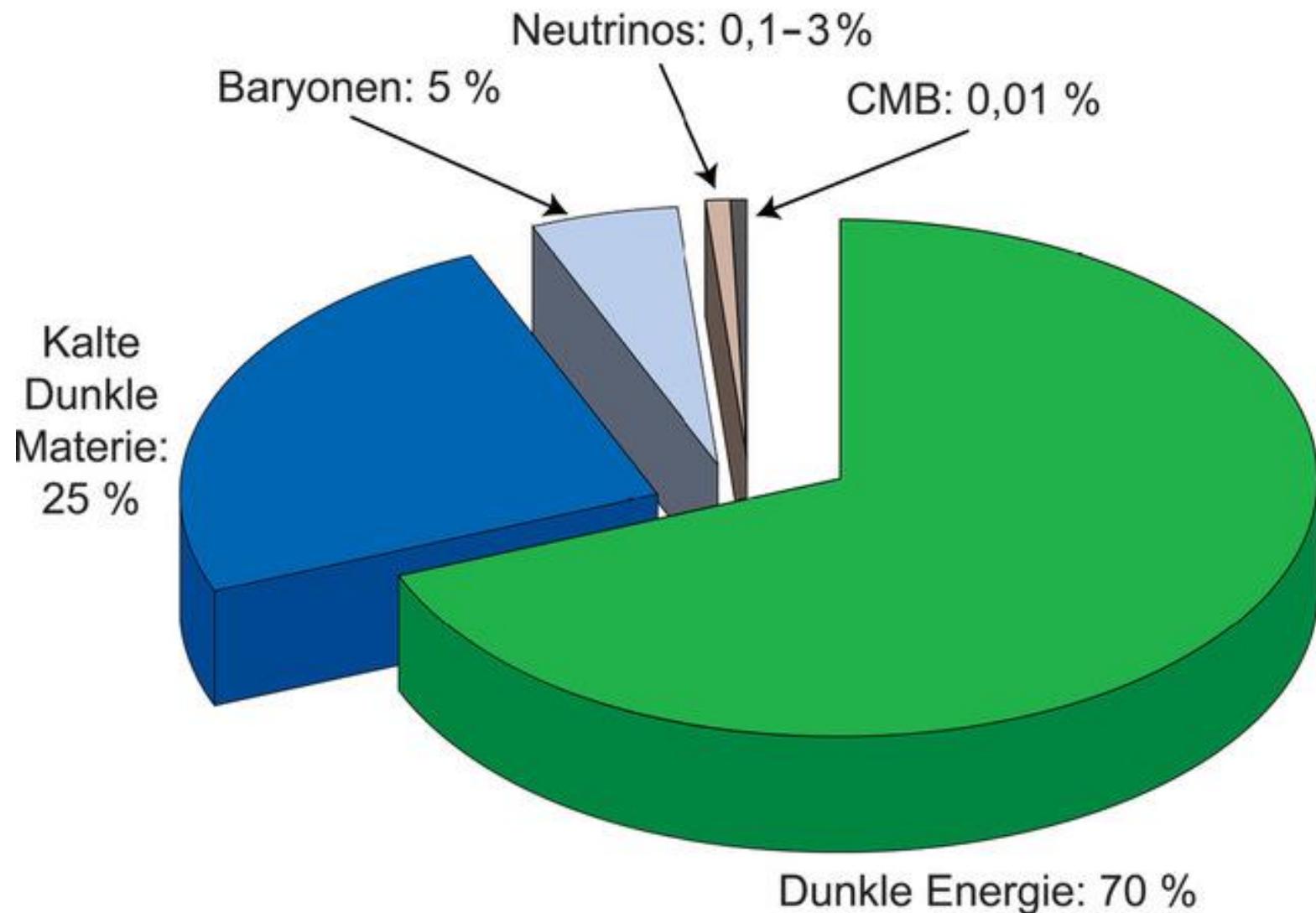
Dunkle Materie – “Cosmic Web”



Dunkle Materie – Cosmic Web



Dunkle Materie - CMB-Messungen



Wieviel Dunkle Materie im Universum?

Dunkle Materie kommt auf allen Skalen vor:

- Von der großskaligen Struktur
- über Galaxienhaufen und Filamente
- bis hin zu Galaxien, die in DM Halos entstehen.

- Galaxien bestehen aus 10 % sichtbarer Materie und 90 % Dunkler Materie.
- Galaxienhaufen bestehen ebenfalls aus 10 % sichtbarer Materie und 90 % Dunkler Materie.
- Auf Clusterskala sind nur etwa 10 Prozent der Materie überhaupt verstanden → DM muss global verteilt sein.

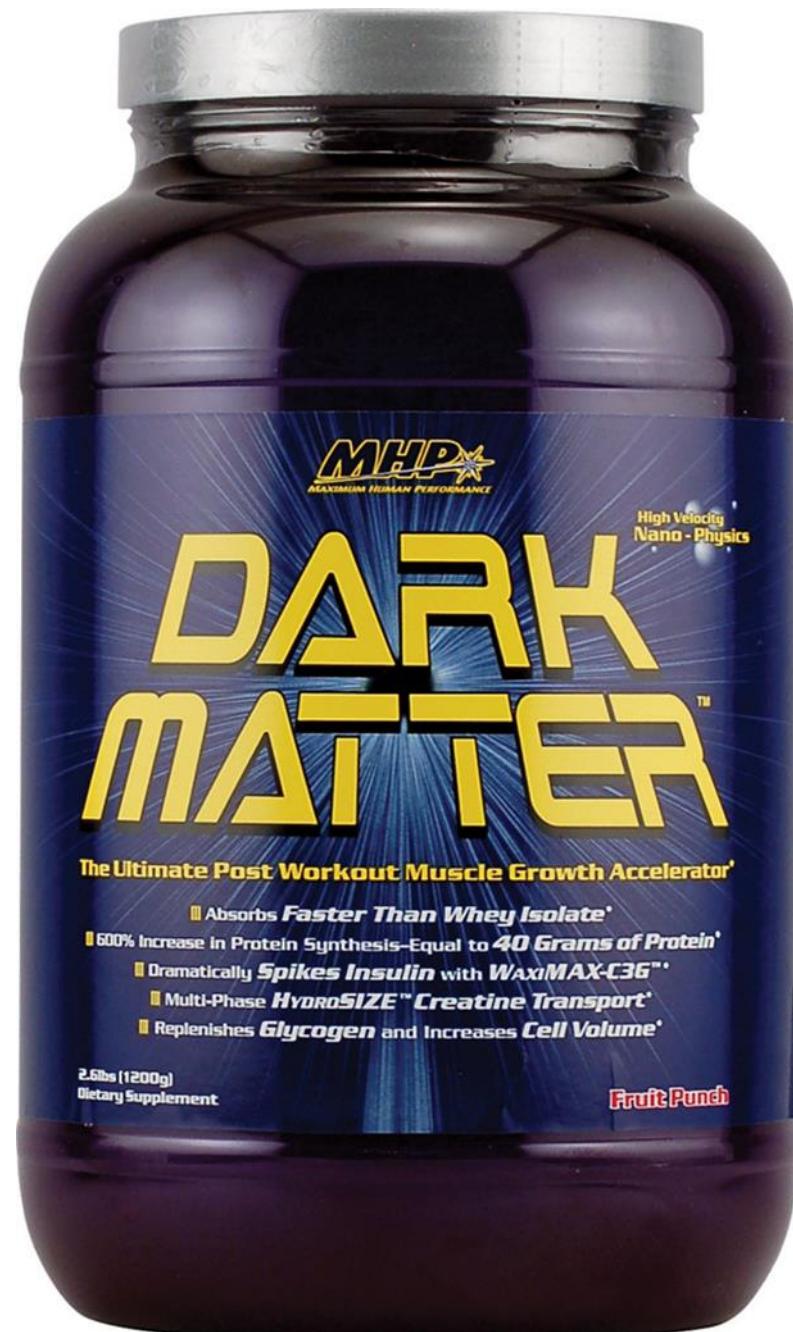
... Alternativ: Vorschlag, das Newtonsche Gesetz zu modifizieren (sog. MOND-Theorien) !!! ???

- Kann nicht funktionieren, da alle Argumente auf einmal erschlagen werden müssen!

**Wir wissen, was Dunkle Materie
nicht ist, aber wir wissen nicht, was ..**



Woraus besteht Dunkle Materie ?



Arten Dunkler Materie

Dunkle Materie

Baryonisch: WD, SL
ausgeschlossen

Nicht-
Baryonisch

HDM

WDM

CDM



Dunkle Materie-Teilchen ?

Neutrinos

- SM Neutrinos sind zu leicht
- Schwere rechtshändige Neutrinos?

WIMPs

- ~100 GeV Masse Teilchen mit Elektroschwacher WW

Axionen

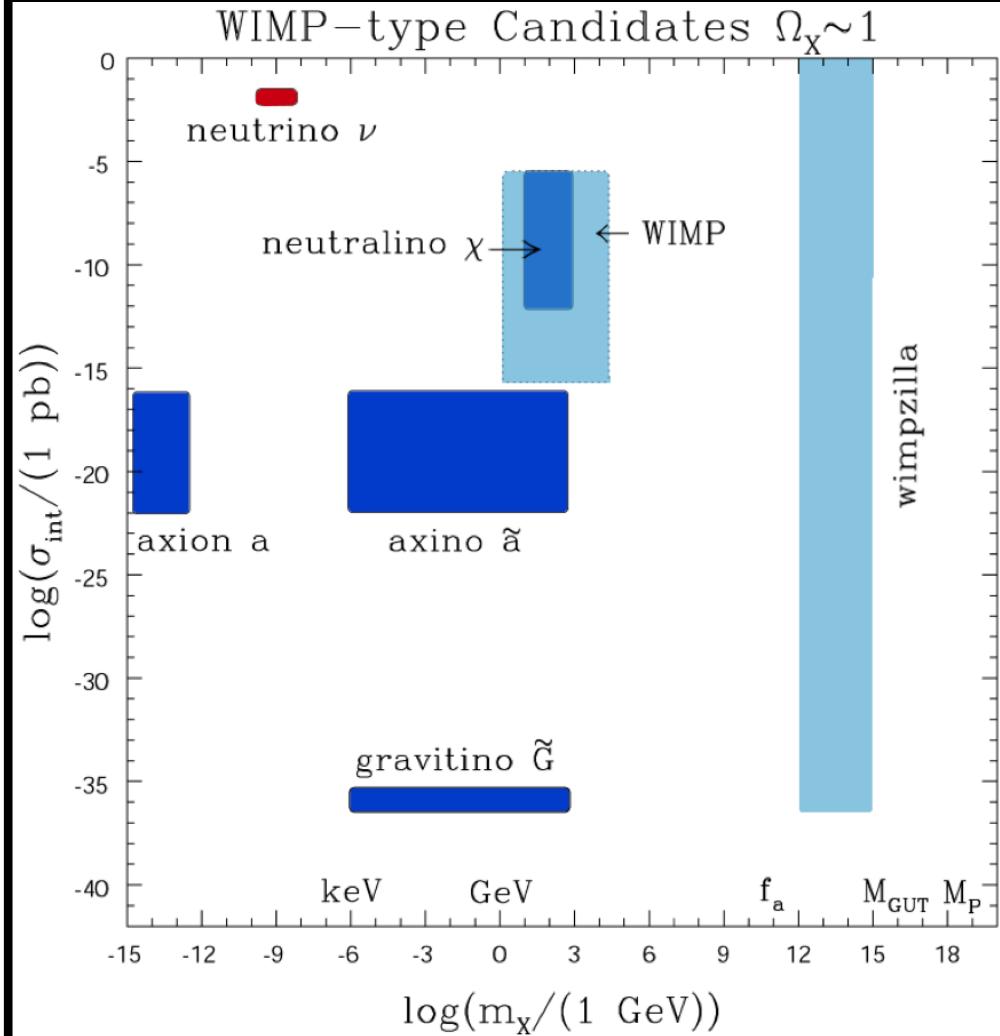
- Könnten sehr geringe Massen

SuperWIMPs

- Schwächer-als-EW WW
- Axino, Gravitino, Kaluza-Klein Gravitonen

Und noch vieles mehr ...

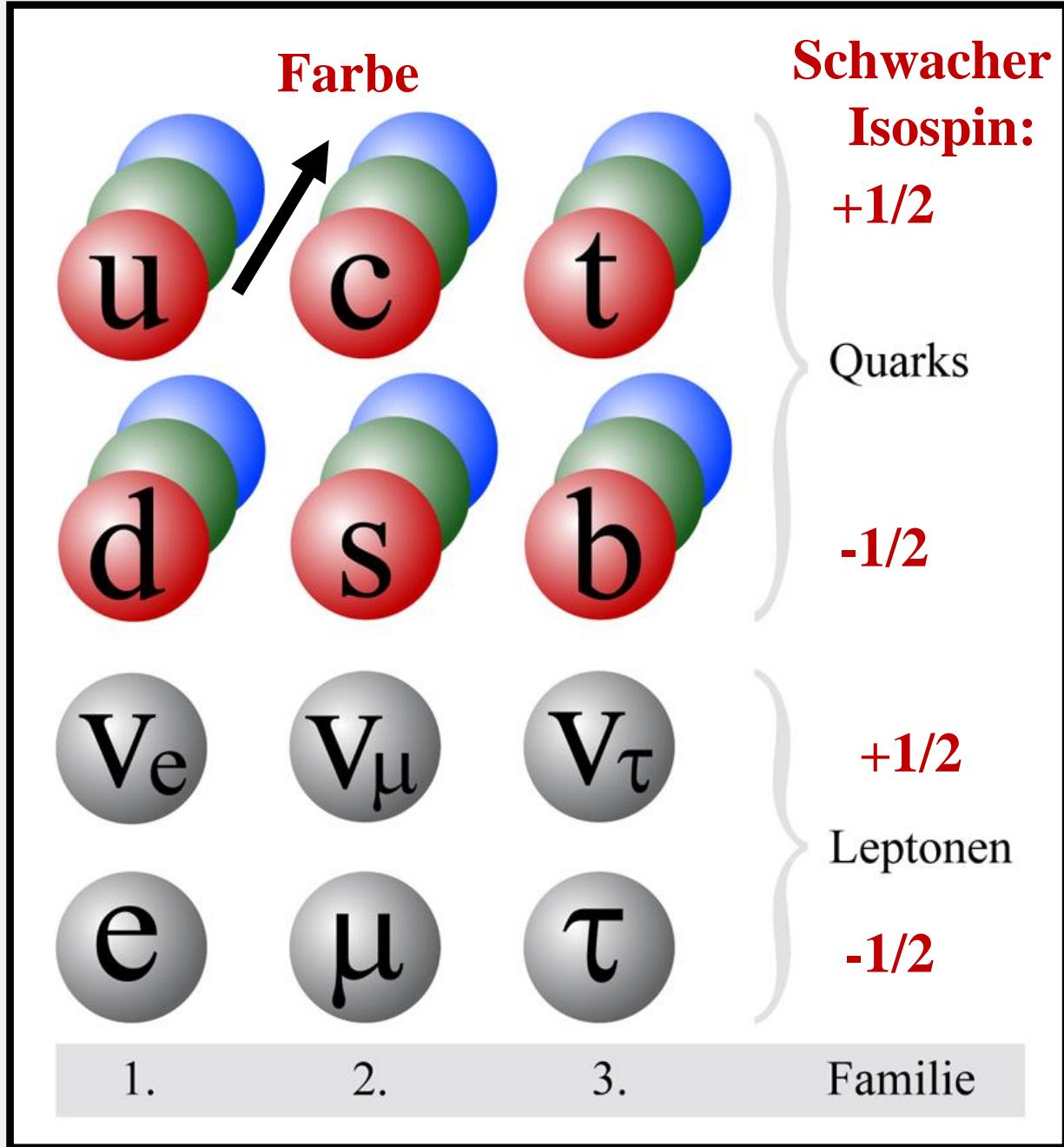
1 pb = 10^{-40} m^2 typisch für Neutrinos



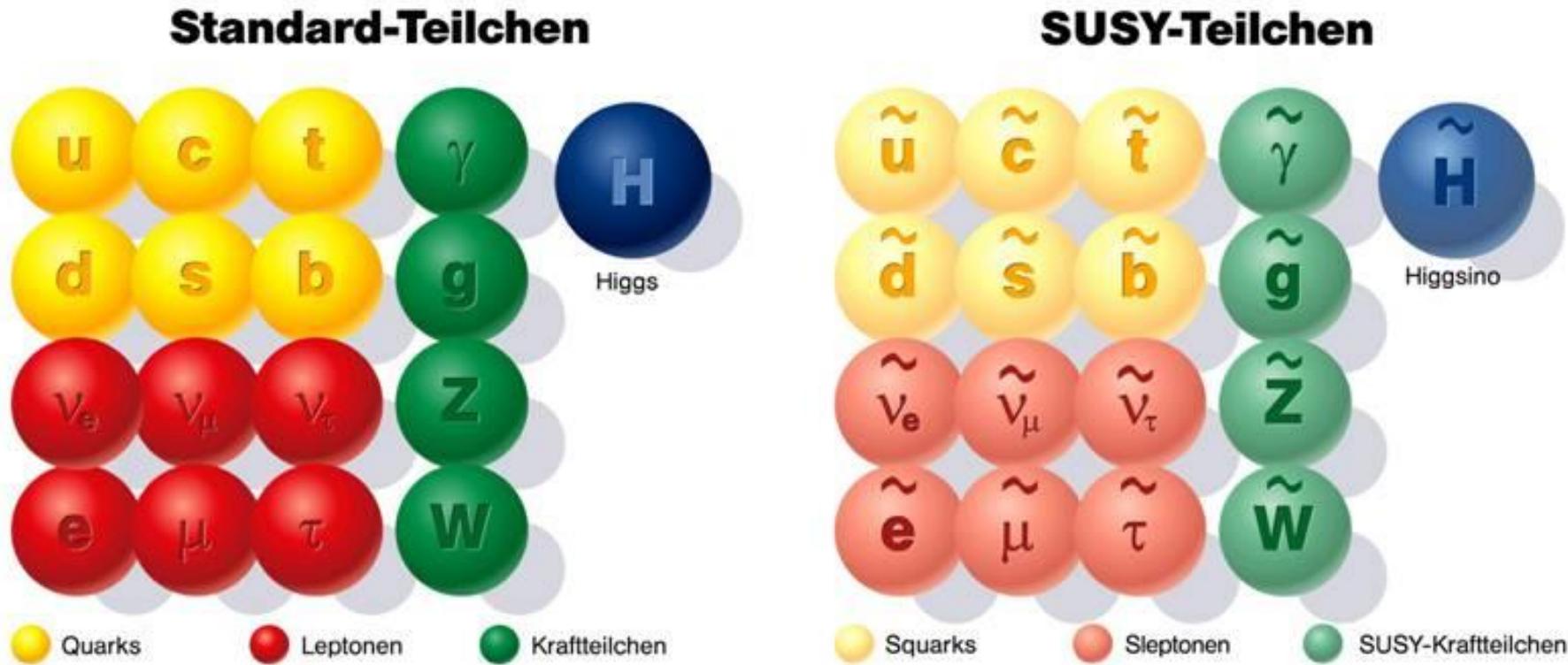
Roszkowski, hep-ph/0404052

3 Ladungs-Typen für Quarks und Leptonen

→ Isospin-Dubletten und Triplets
→ + Quarks als Farb-Triplets



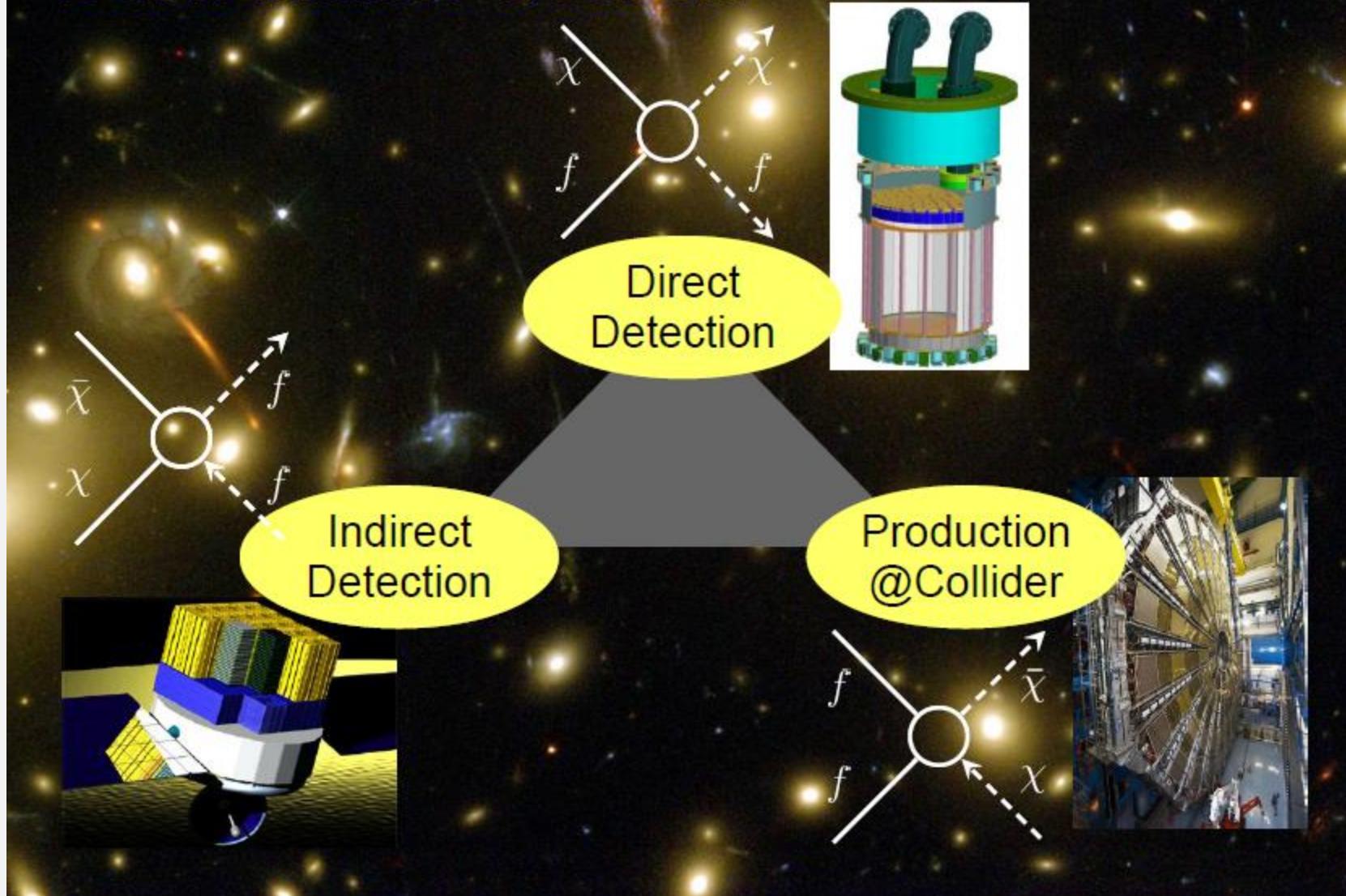
Minimales Supersymmetrisches Modell ($k_B T > \text{TeV}$)



Zu jedem Standardteilchen gibt es einen Superpartner:
Quarks \rightarrow s-Quarks (skalar), Photon \rightarrow Photino
Elektron \rightarrow s-Elektron (skalar), Gluon \rightarrow Gluino

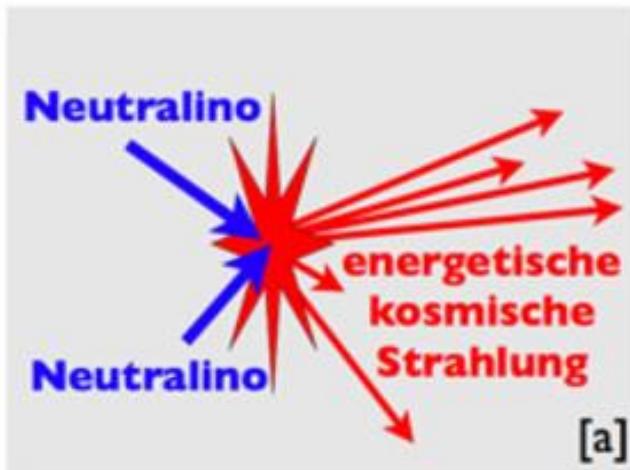
Die Suche nach Dunkler Materie

Dark Matter Search

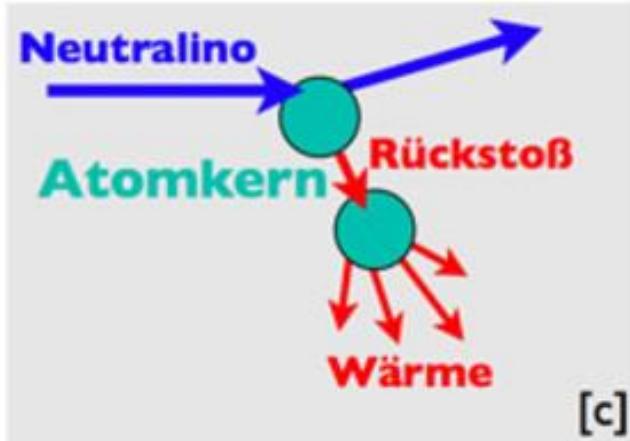


Die Suche nach WIMPs

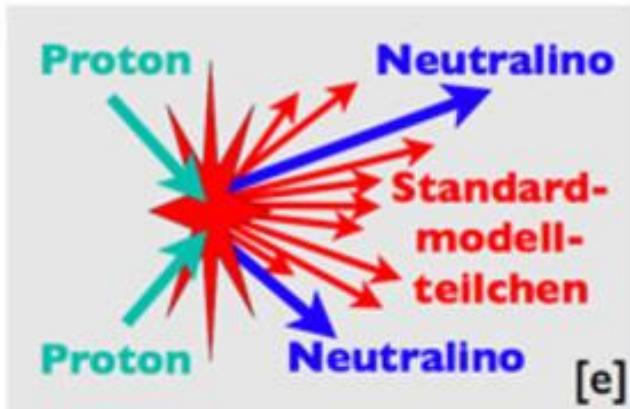
Neutralino χ ist leichteste stabile
SuSy-Teilchen, $m_\chi > 100 \text{ GeV}/c^2$



[a]



[c]



[e]



[b]

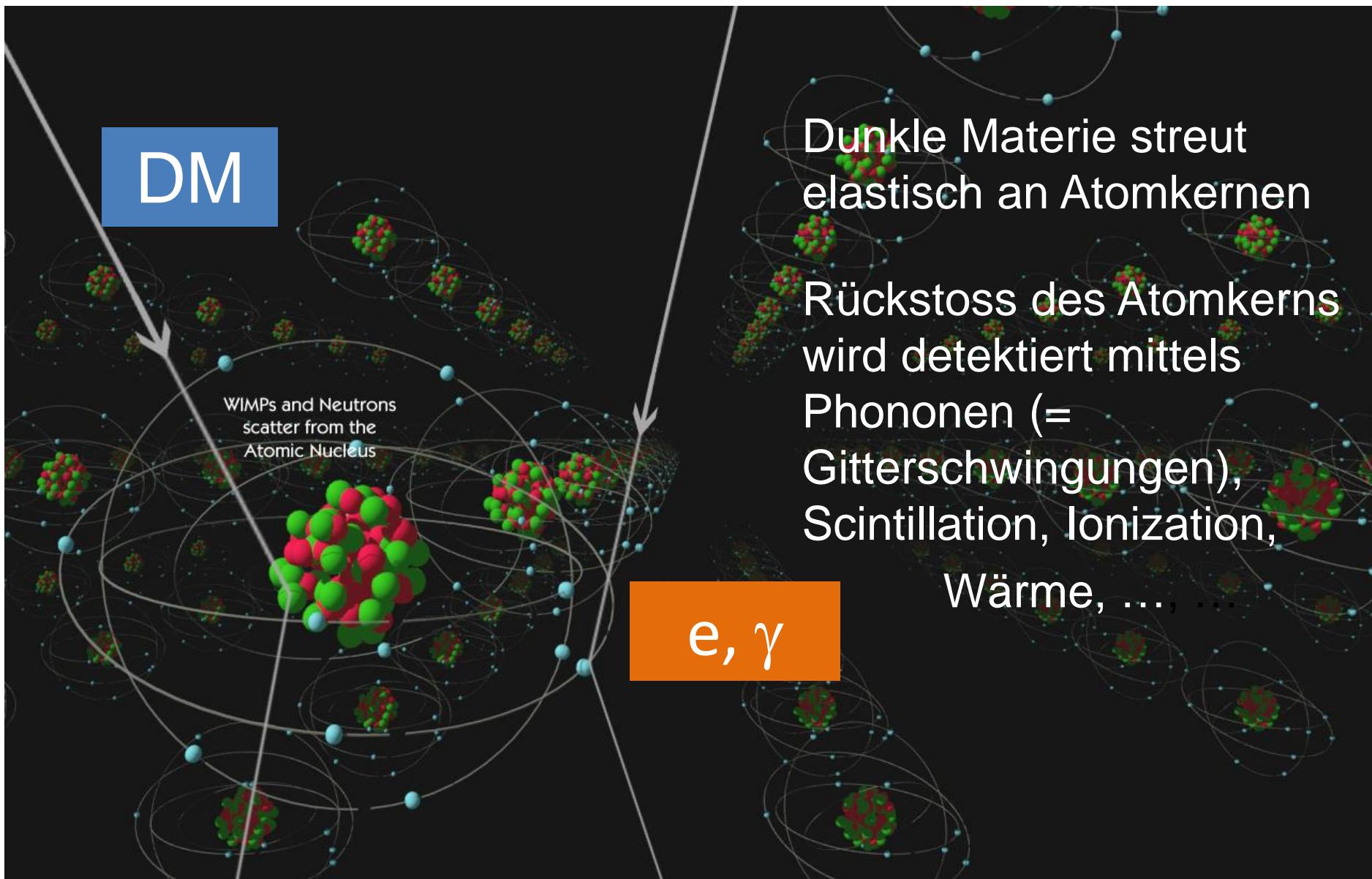


[d]

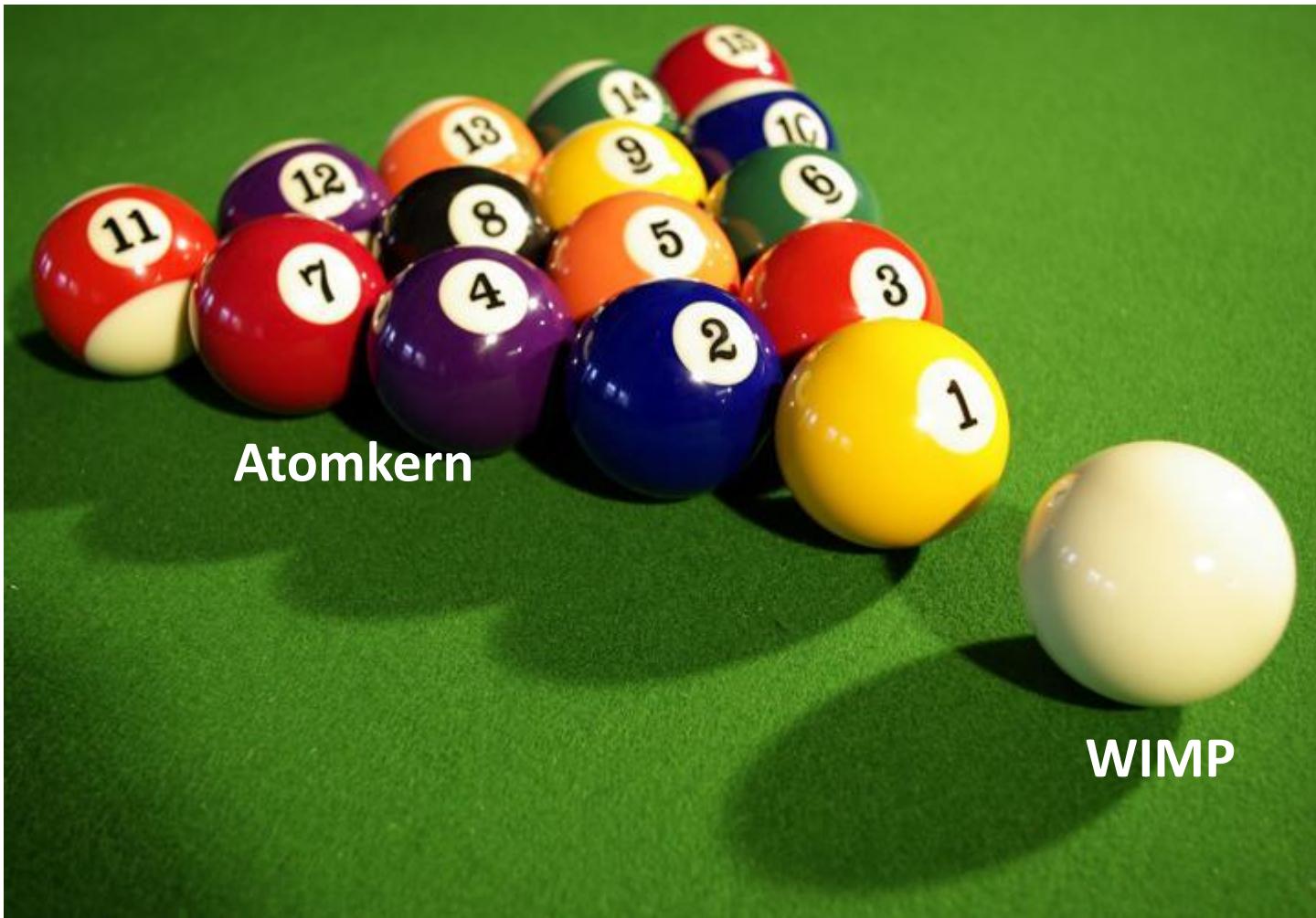


[f]

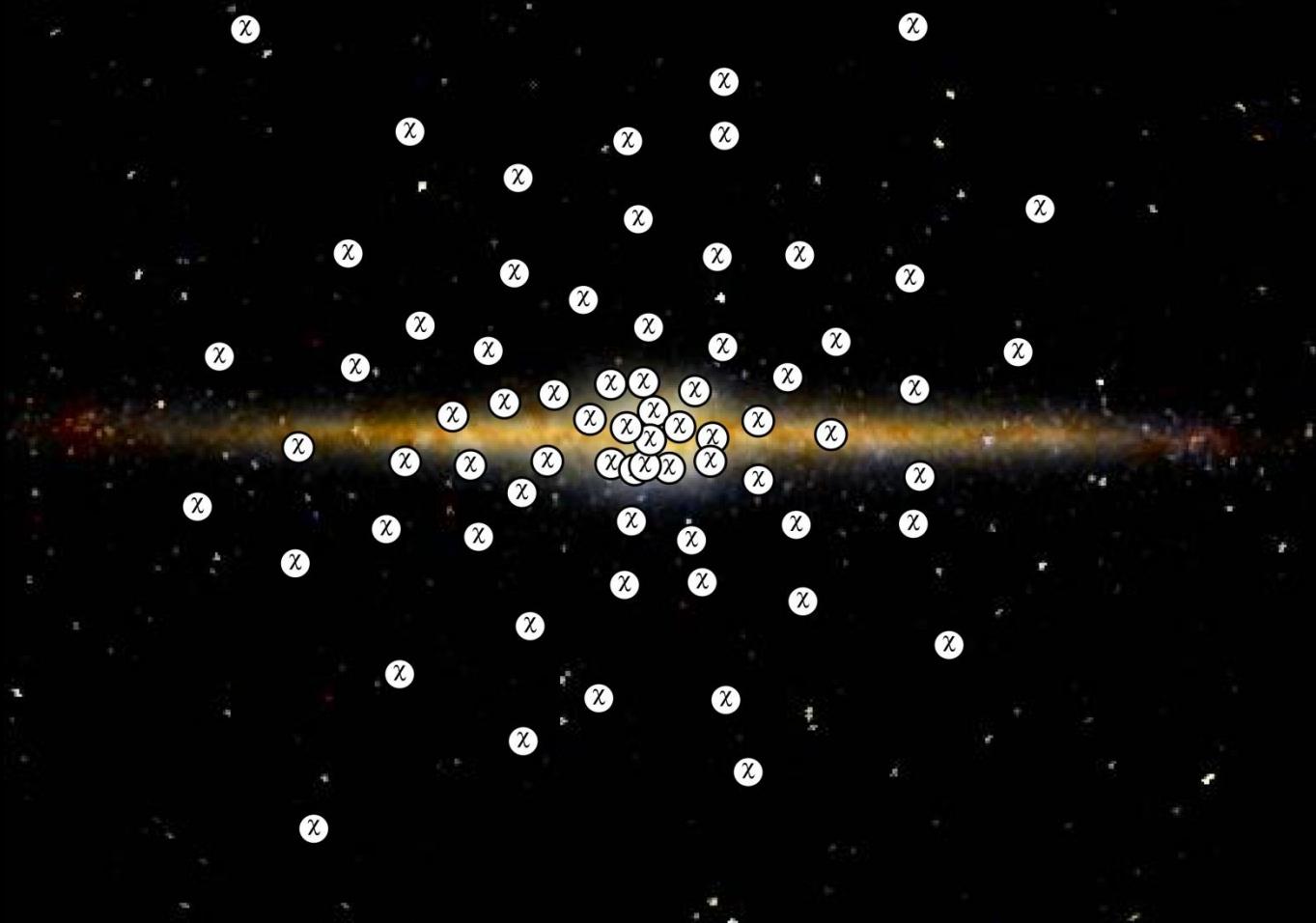
Direkte Detektion Dunkler Materie



Vergleich mit Billard-Spiel



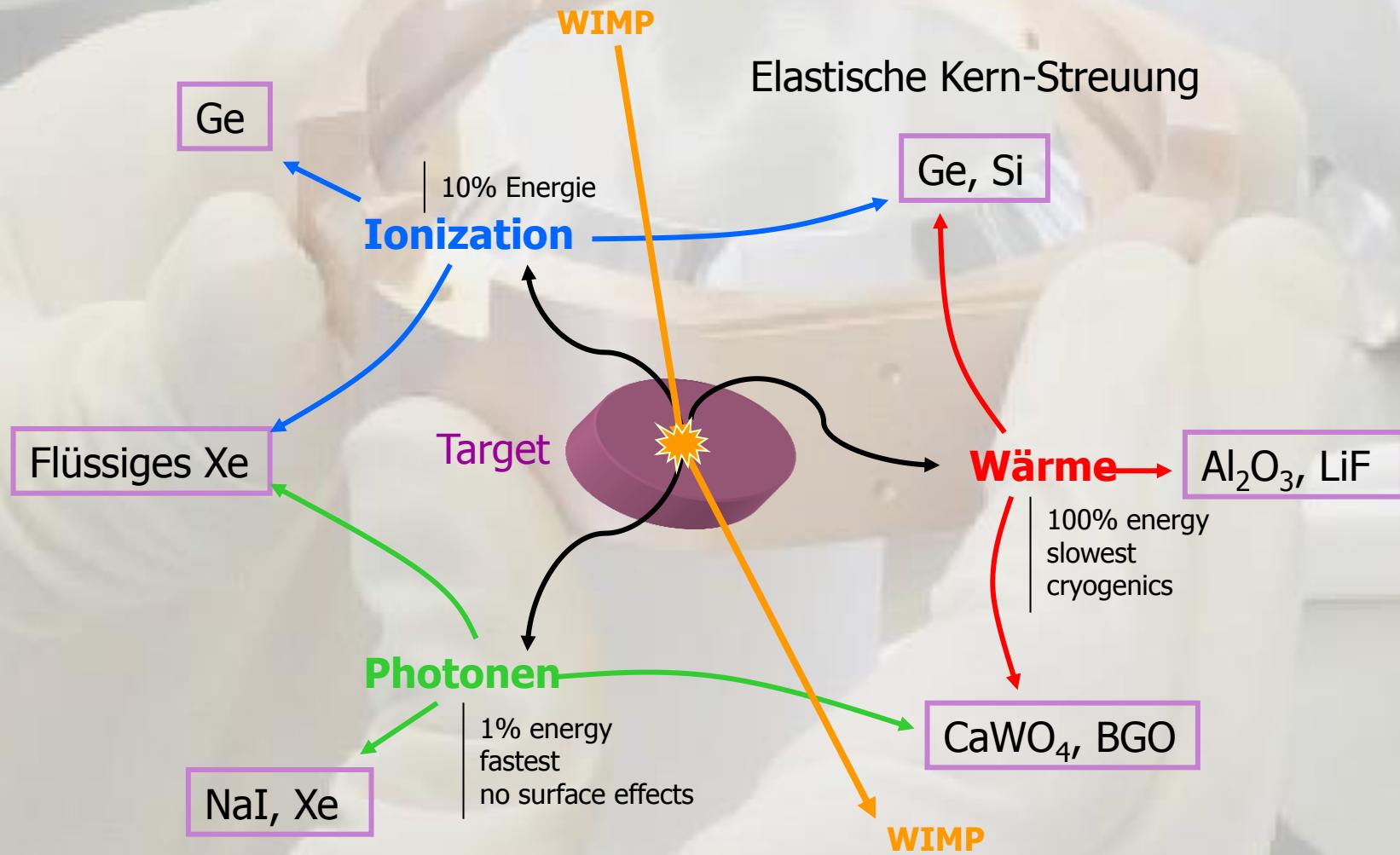
Neutralino Galaktischer Halo



$\rho_{\text{local}} \sim 0,3 \text{ GeV/cm}^3$, $v/c \sim 10^{-3}$, $m_\chi \sim 100 \text{ GeV/c}^2$

\Rightarrow Fluß: $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$!

Direkte Detektions-Methoden



DM direct detection: today and tomorrow

Data taking	Installation/Construction/R&D	Future
DAMA/LIBRA	DAMIC100	EURECA
Xenon100	CDEX-10kg	DARWIN
XMASS	SuperCDMS-Snolab	
LUX	LZ	
DarkSide50	XENONnT	
CRESST-II upgrade	PICO-500	
COUPP-60	SABRE	
PICO-2L	DM-Ice37	
CDEX-1kg	XMASS1.5	
DM-Ice17	EDELWEISS-III	
Commissioning	PandaX	
XENON1T	CDEX-10kg	
ArDM	All directional TPC	
DEAP-3600	...	
		Surely other. Sorry for not mentioning!

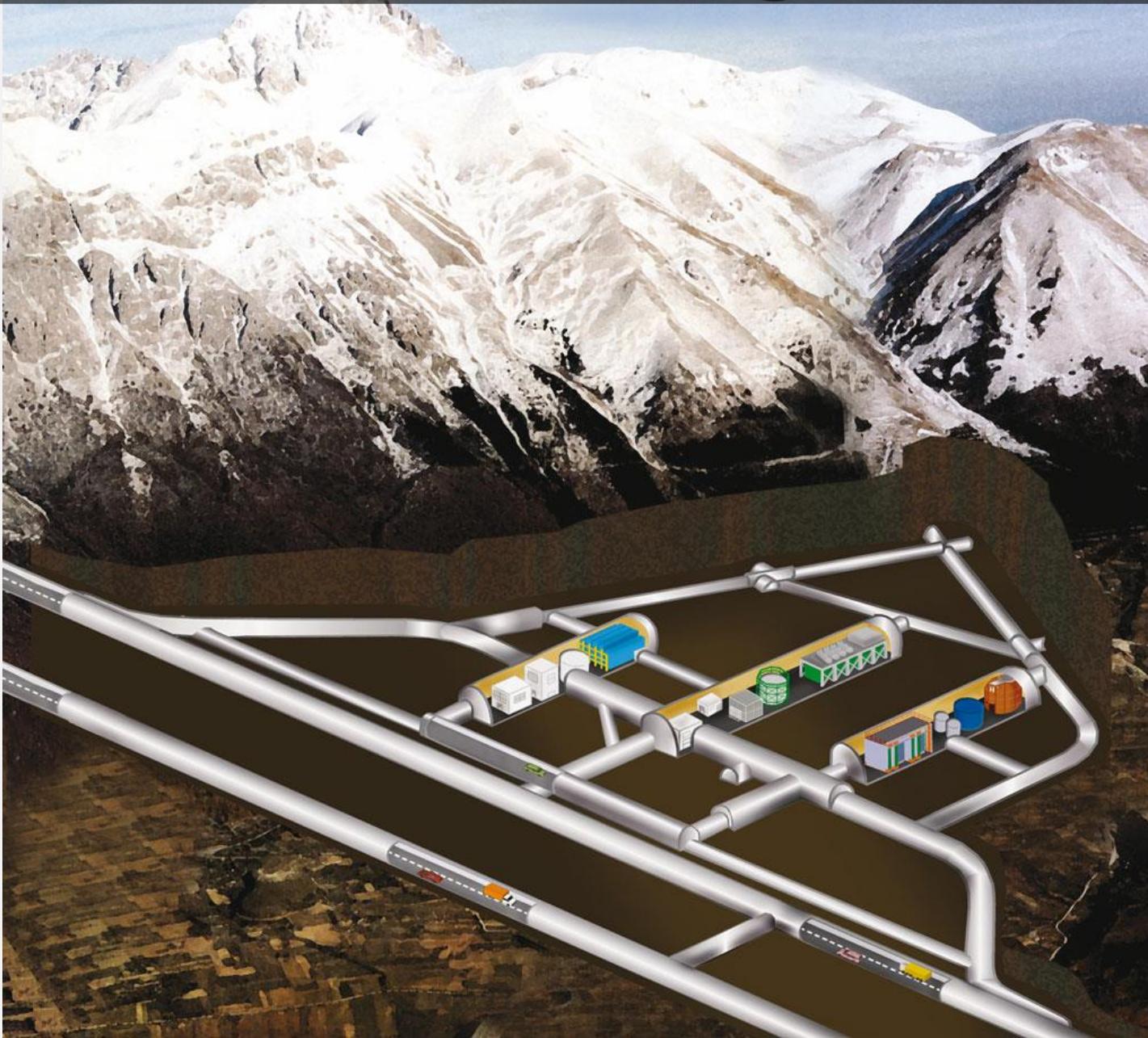
Suche nach WIMPs im Gran Sasso

WIMPs = weakly interacting massive particles



Eyevine

Gran Sasso Untergrund-Labor

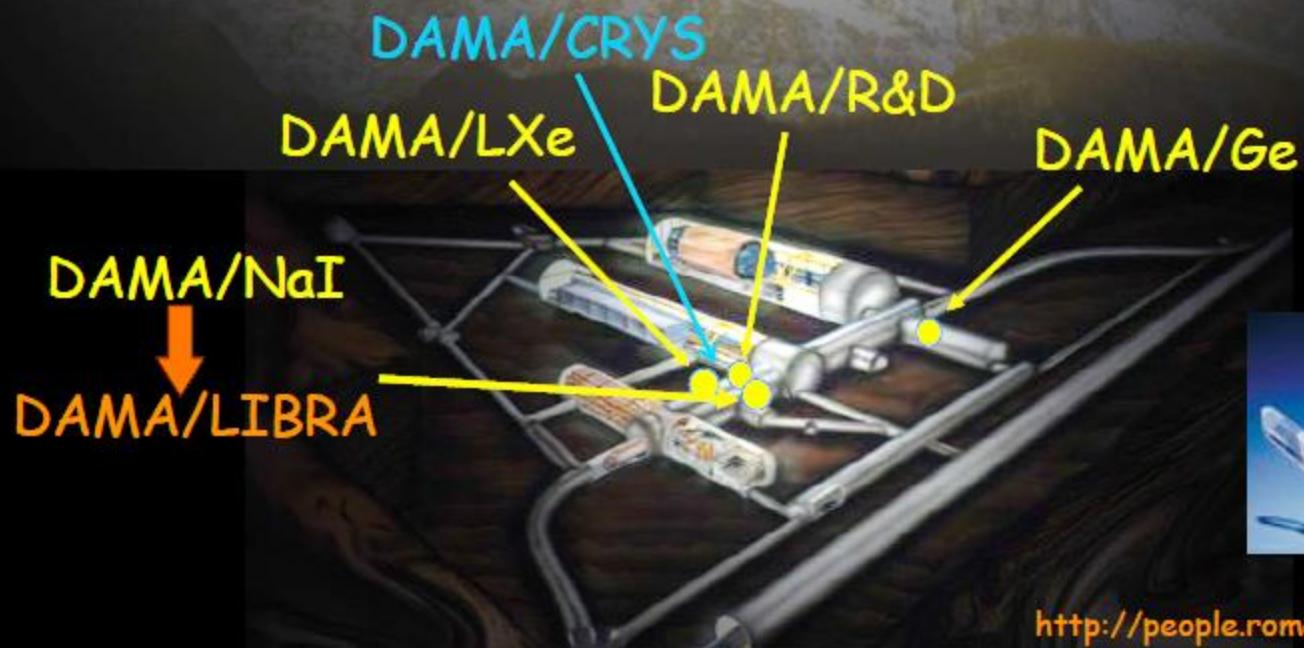


Roma2,Roma1,LNGS,IHEP/Beijing

- by-products and small scale expts. INR-Kiev
- neutron mass ENEA-Frascati
- In some studies on $\beta\beta$ decays (DST-MAE project) IIT Kharagpur, India



DAMA: an observatory for rare processes @LNGS

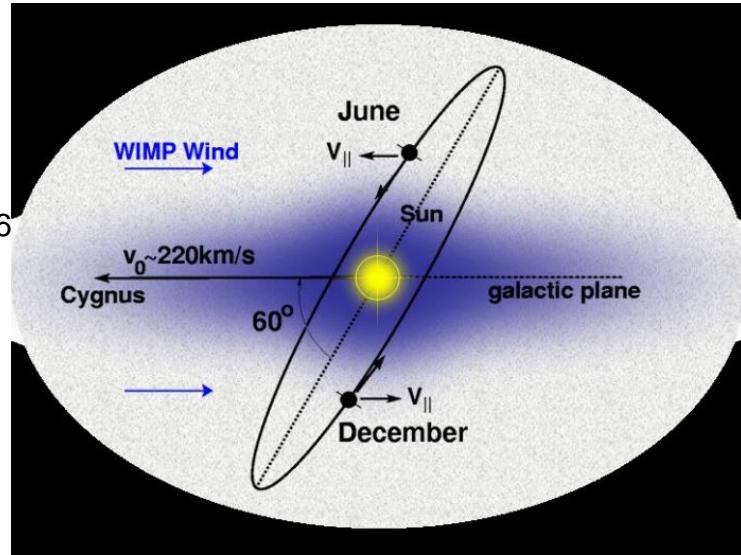


<http://people.roma2.infn.it/dama>

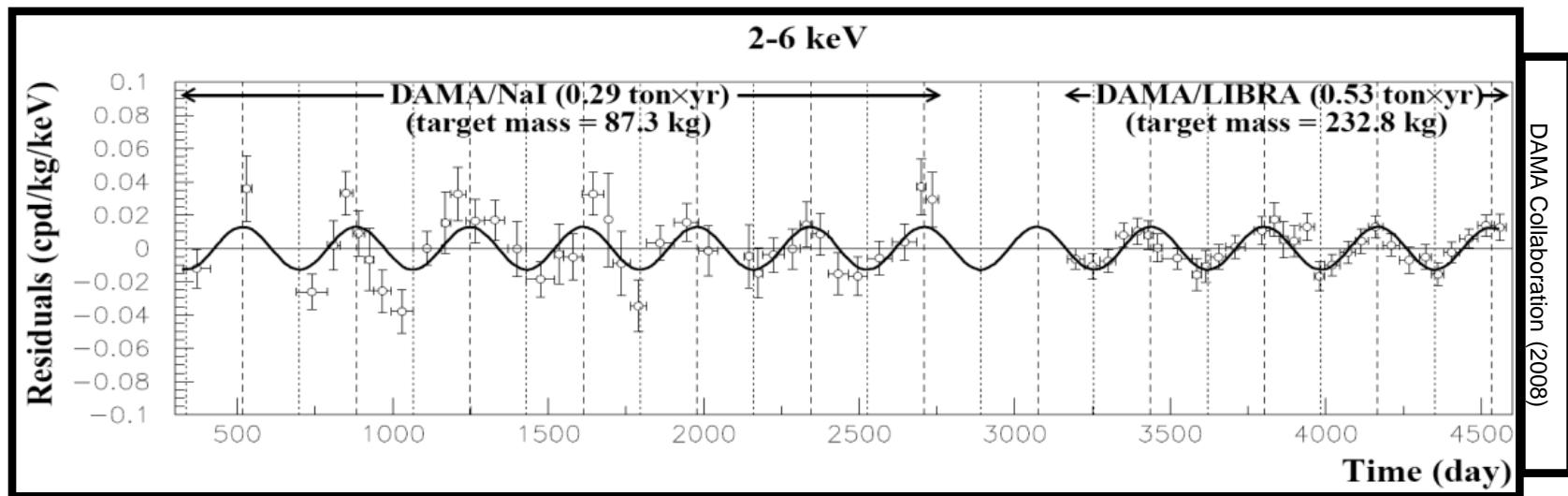
Reiner Szintillator: DAMA

- Jährliche Modulation erwartet

Drukier, Freese, Spergel (1986)



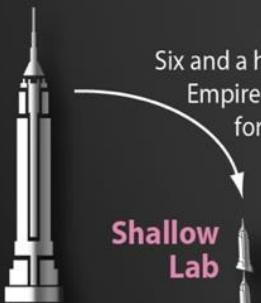
- **DAMA: 8.9σ Signal mit**
 - $T \sim 1 \text{ Jahr, max } \sim 2. \text{ Juni}$



DUSEL

Deep Underground Science
and Engineering Laboratory

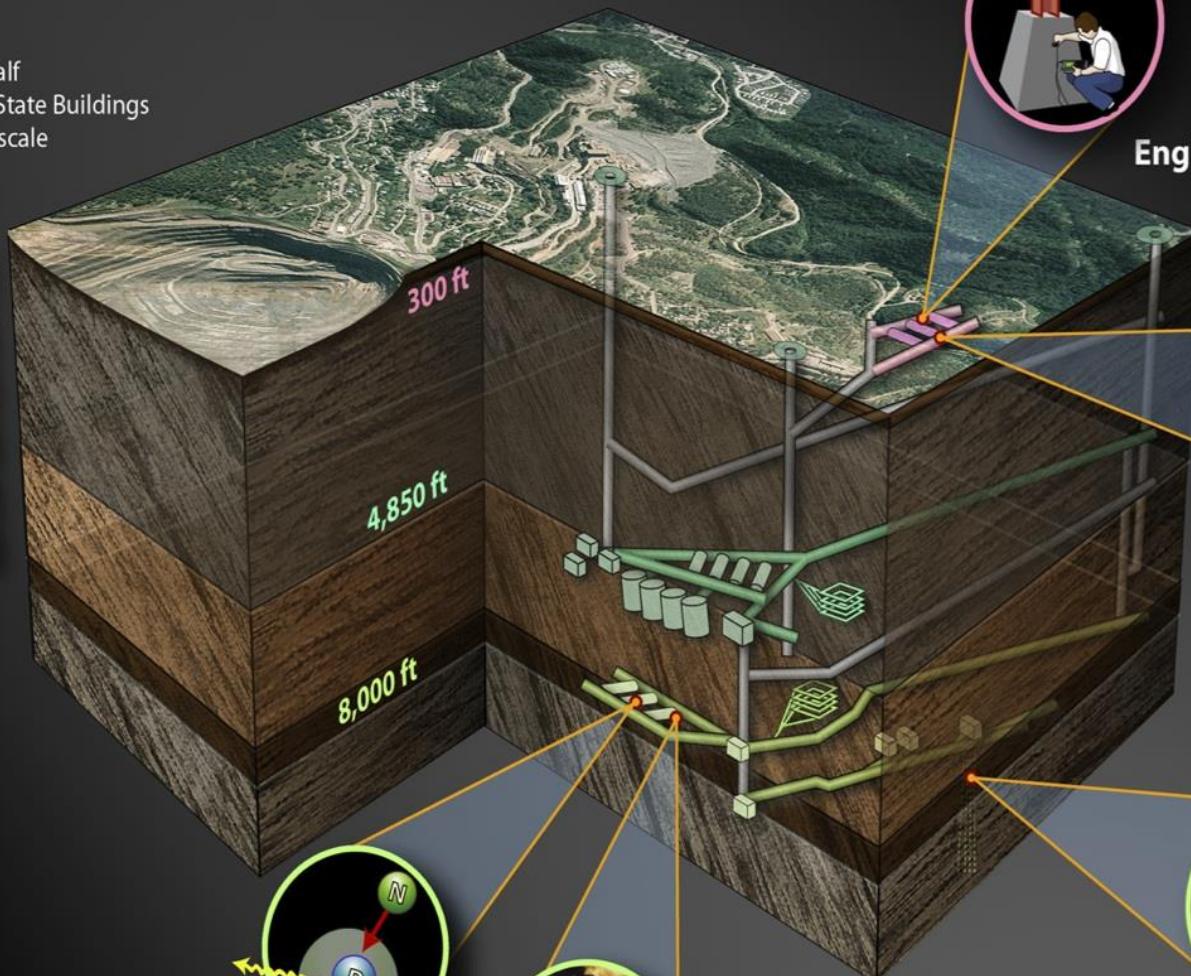
at Homestake, SD



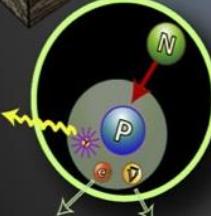
Shallow
Lab

Mid-level

Deep
Campus



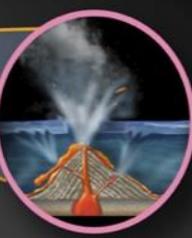
Physics



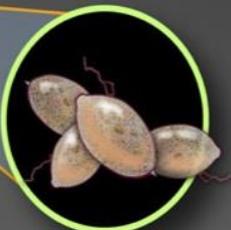
Astrophysics



Engineering



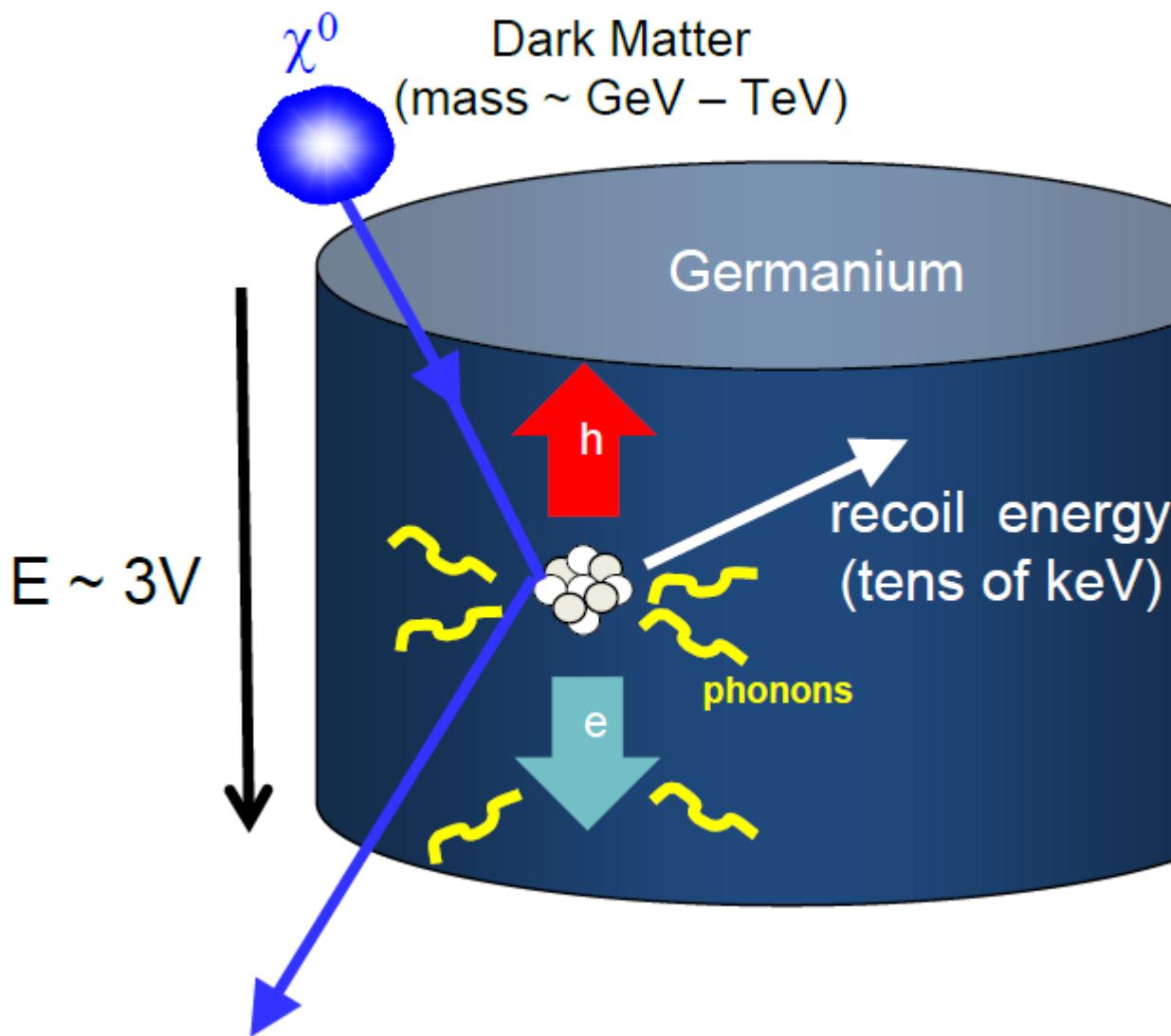
Geoscience



Biology

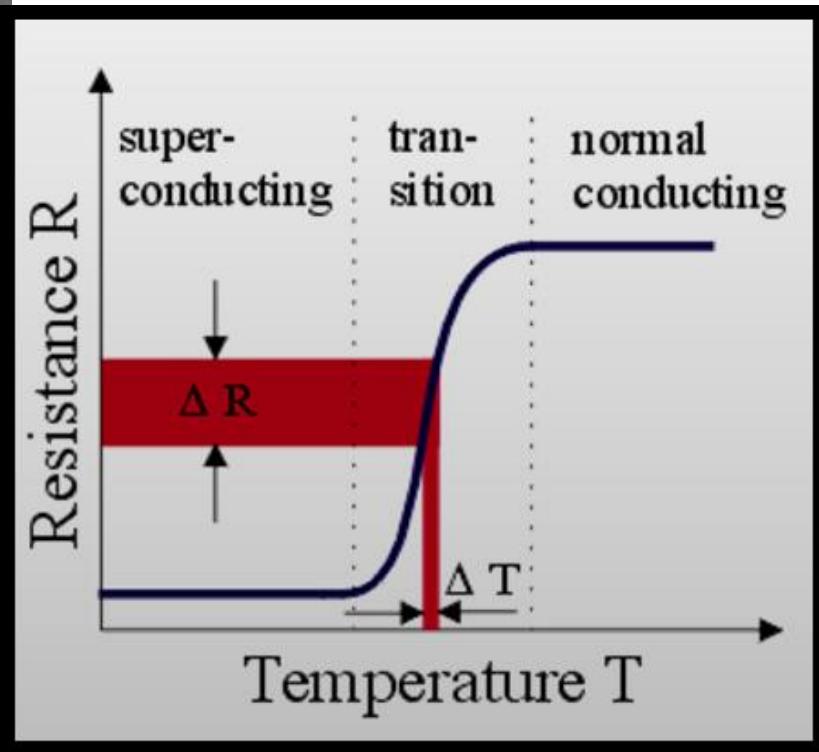
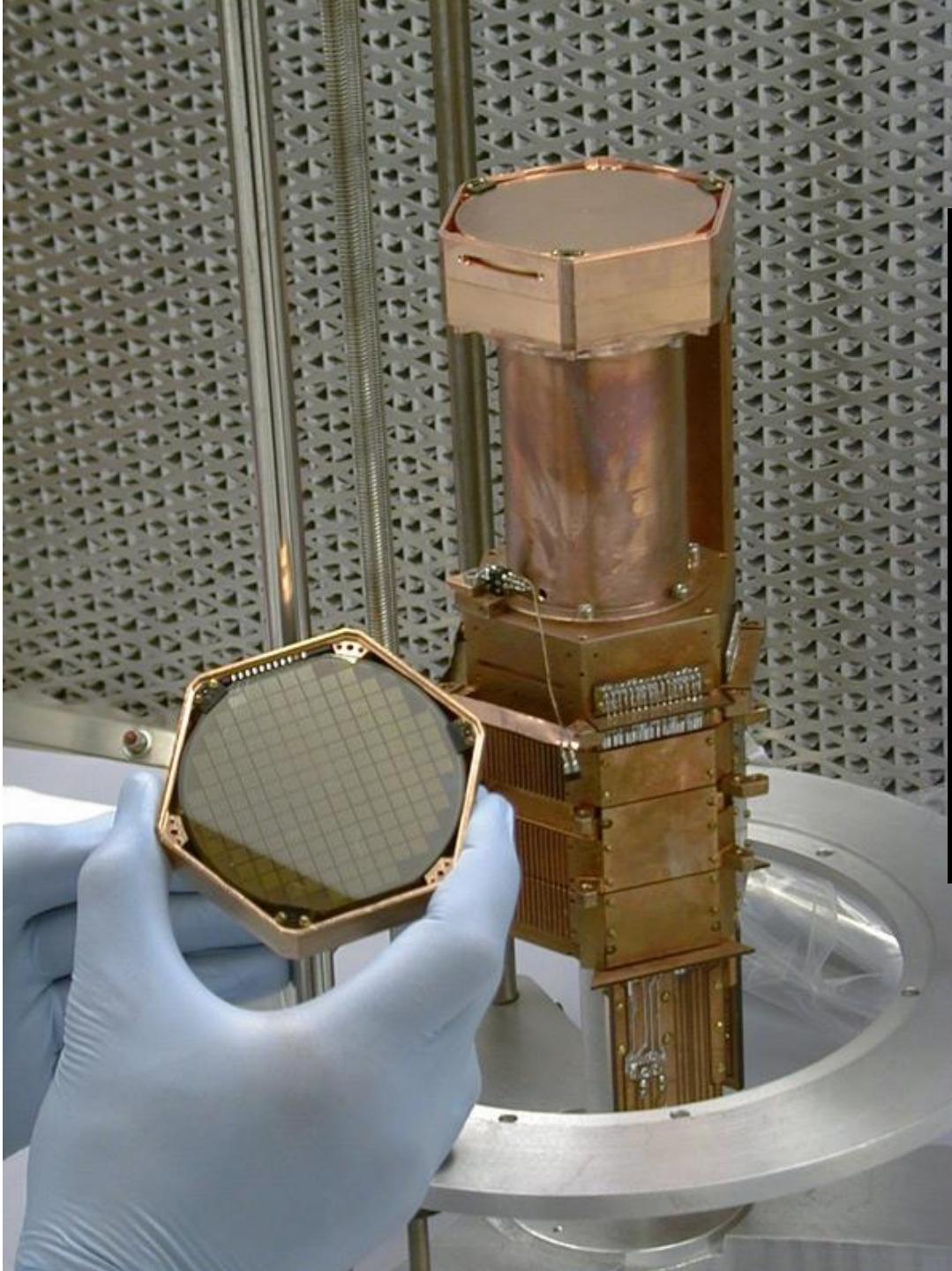


Mikro-Bolometer CDMS



CDMS

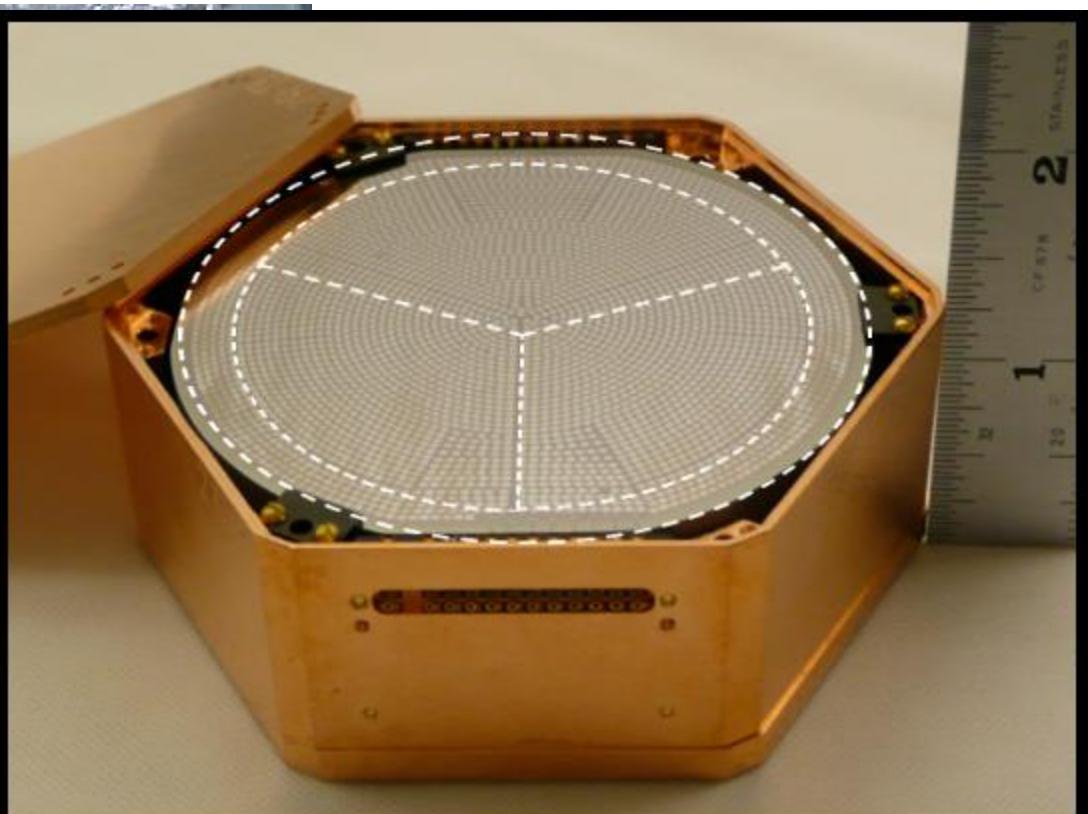
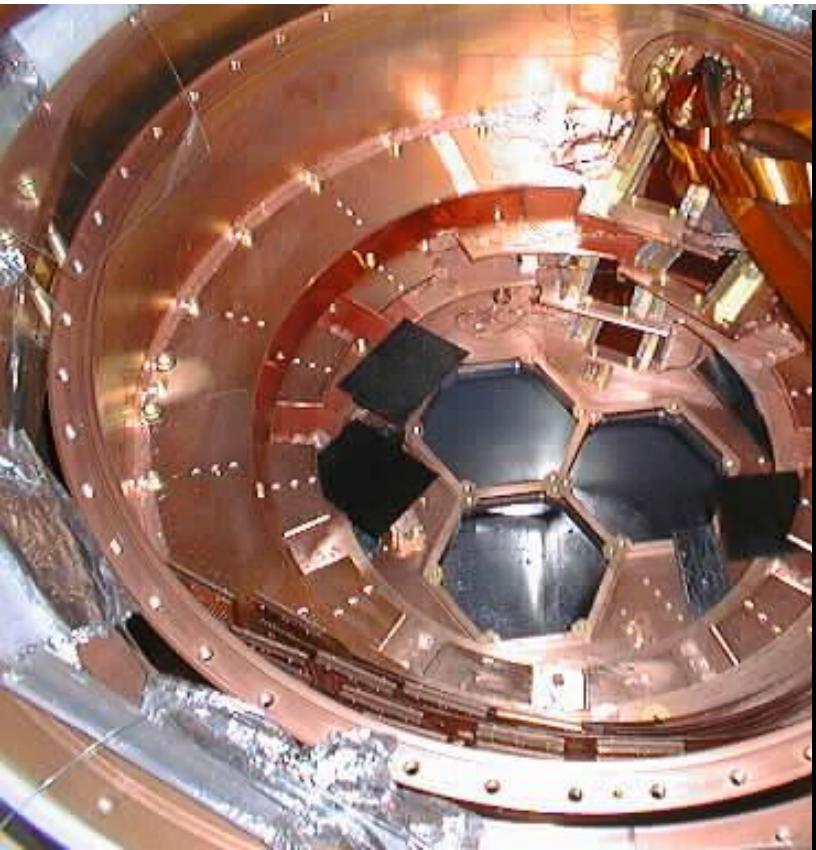
Cryogenic Dark Matter Search



→ 3 Dunkle-Materie-Partikel
mit einer Masse von etwa
8,6 Gigaelektronenvolt (GeV)
detektiert



SuperCDMS DUSEL



Edelgas-WIMP-Experimente

- ZEPLINI, II, III
- XENON100
- LUX
- X-MASS
- XENON1T
- PANDA-X
- LZ = LUX + ZEPLIN

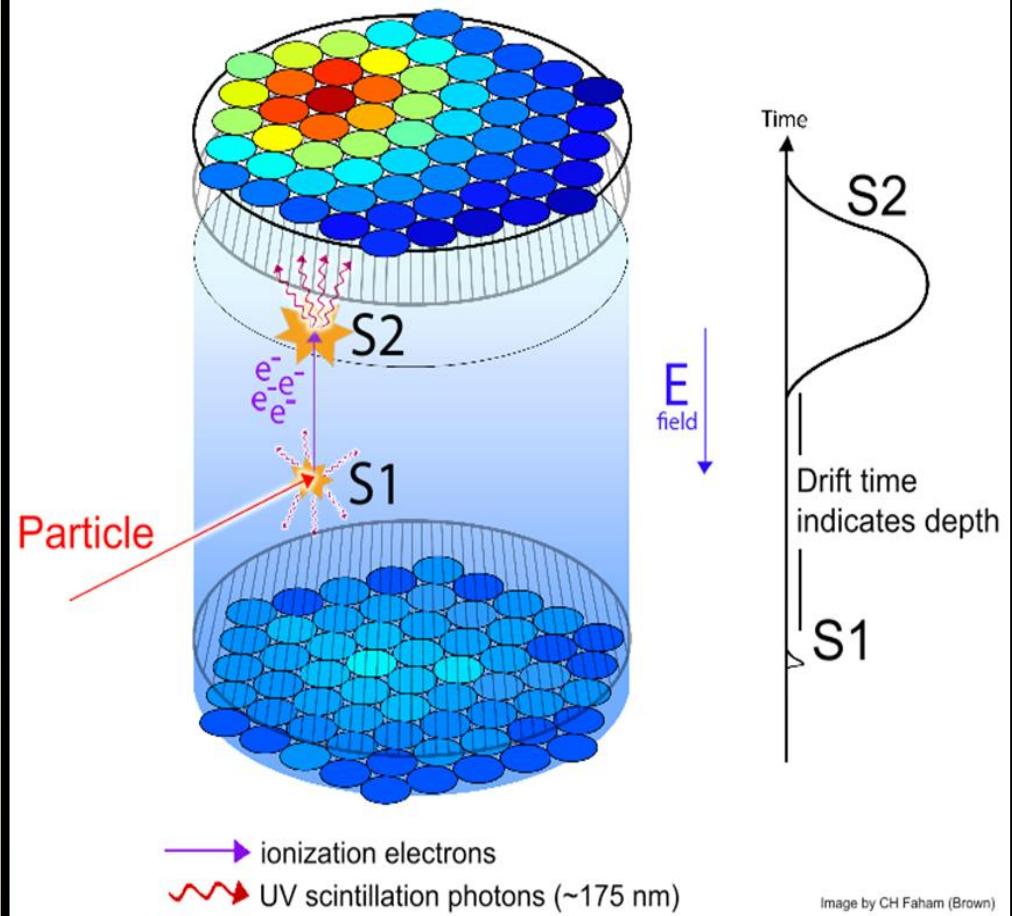
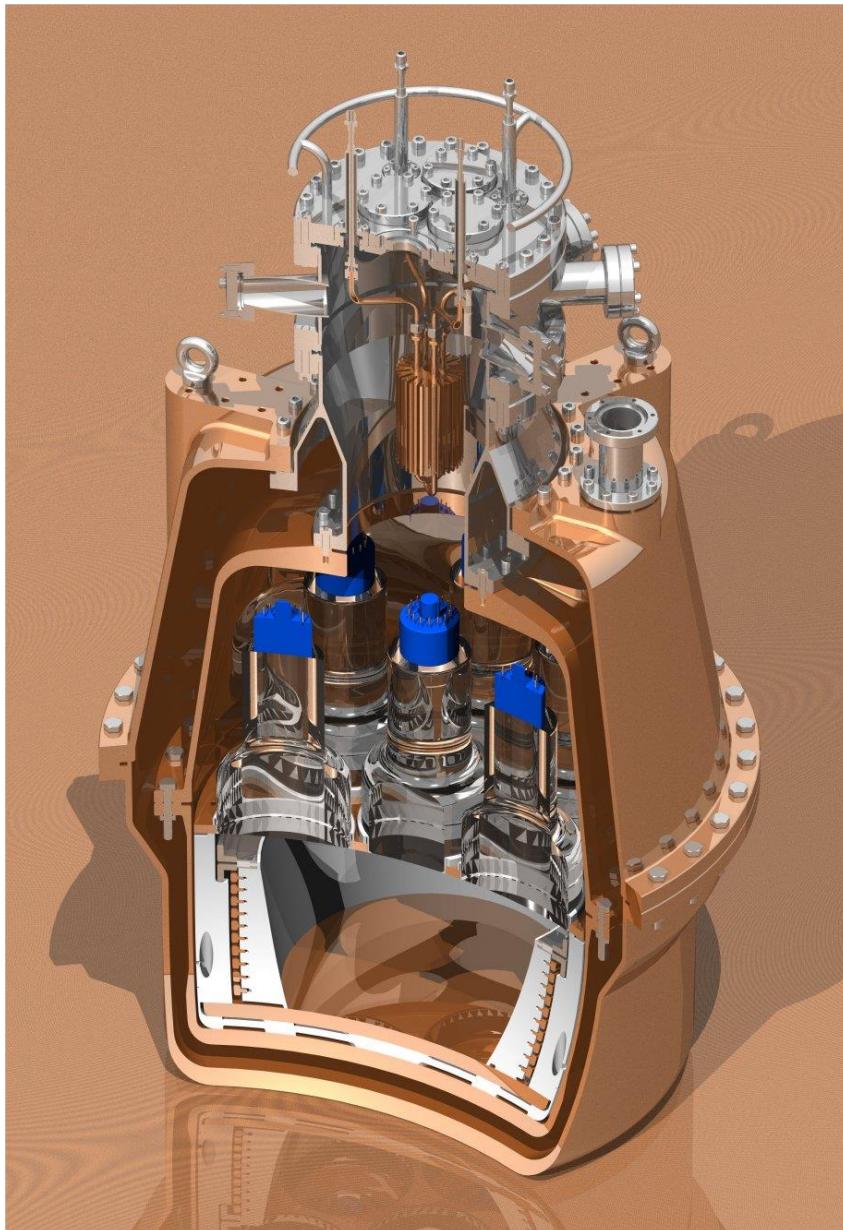


Image by CH Faham (Brown)

Zeplin II - A Scintillator Detector for WIMPs



Detector houses
35kg of Liquid Xenon,
which is a scintillator.

The signal is flashes
of 175nm (ultra violet)
light on de-excitation
of a Xenon molecular
excited state after a
WIMP collision.

7 Photomultiplier tubes
are used to collect the
scintillation light.

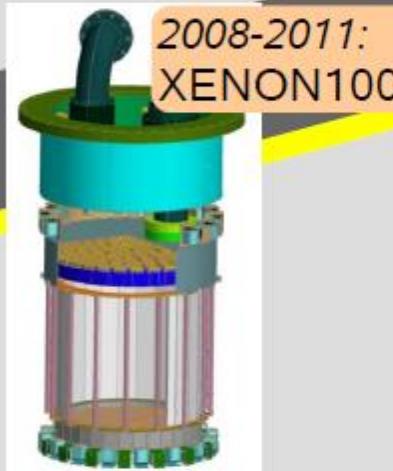
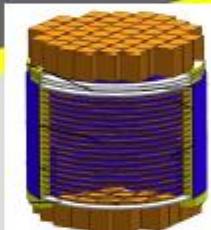
The XENON program

XENON: A phased WIMP search program

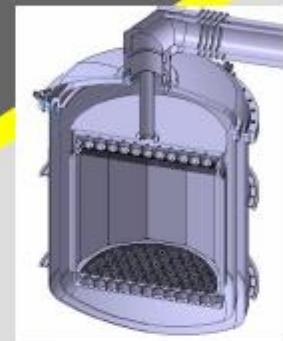


XENON
R&D

2005-2007:
XENON10



2010-2015:
XENON1T



Columbia



Rice



UCLA



U Zürich



Coimbra



LNGS



SJTU



Bologna



MPIK



NIKHEF



Mainz



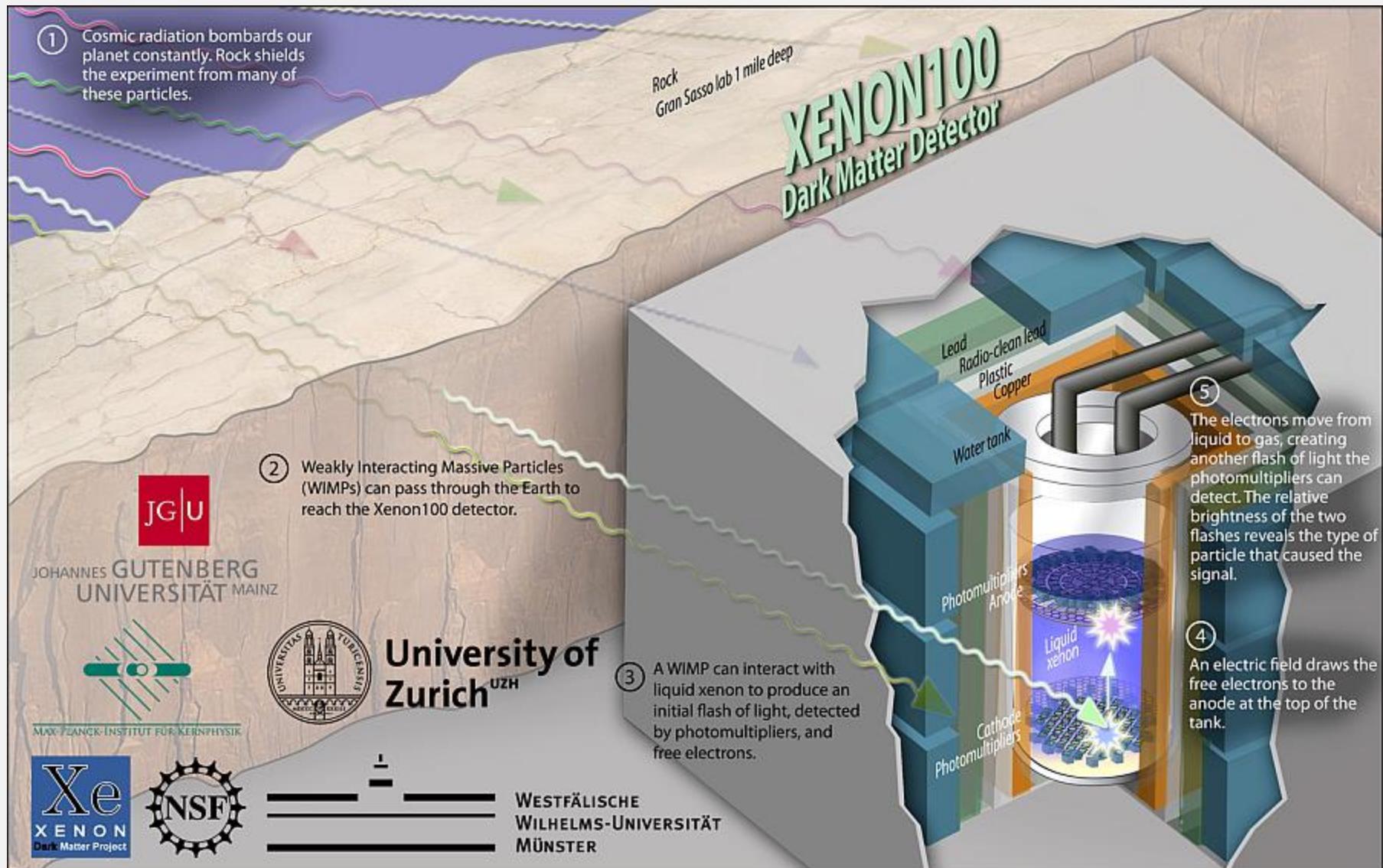
Subatech



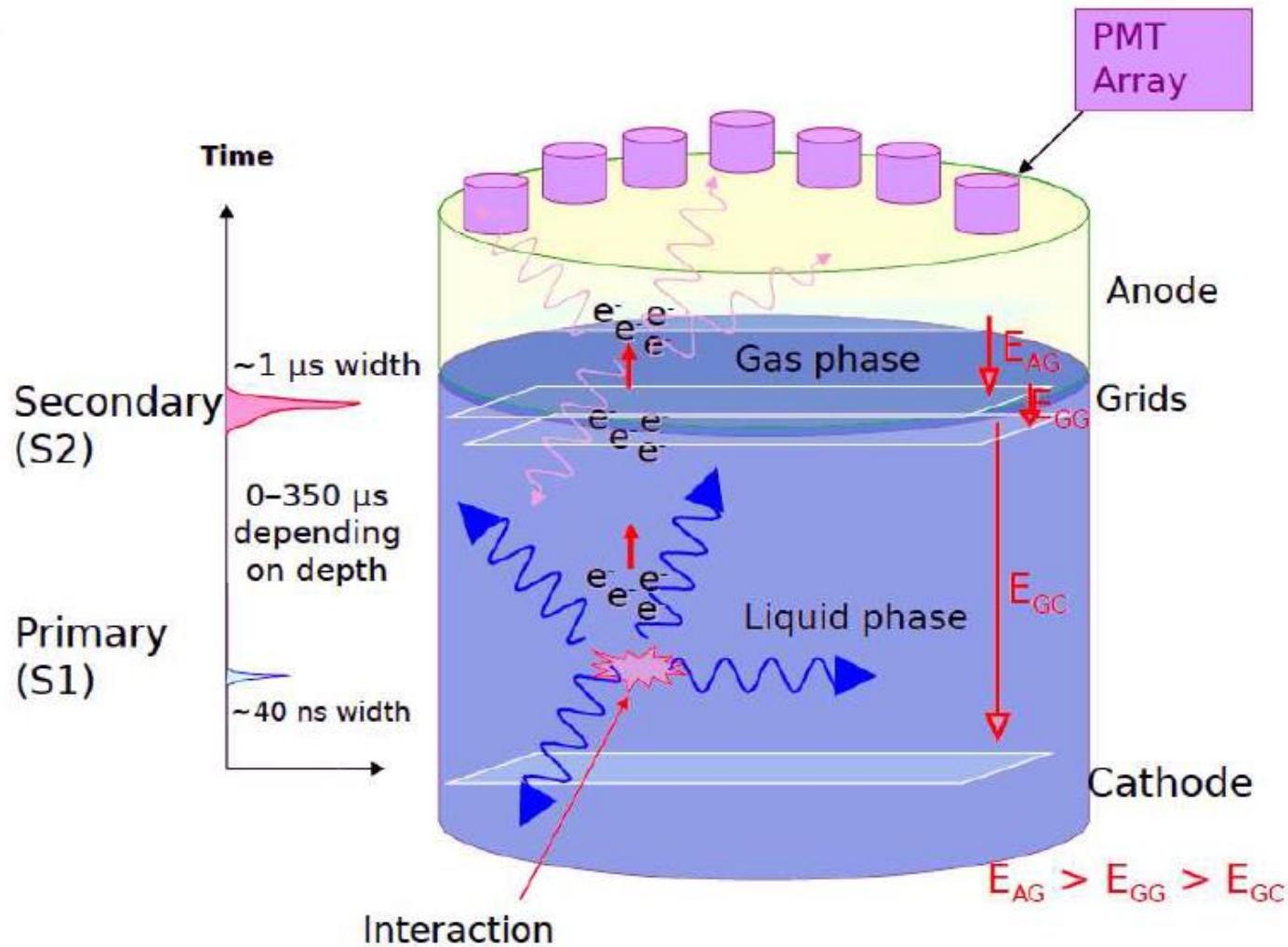
Münster



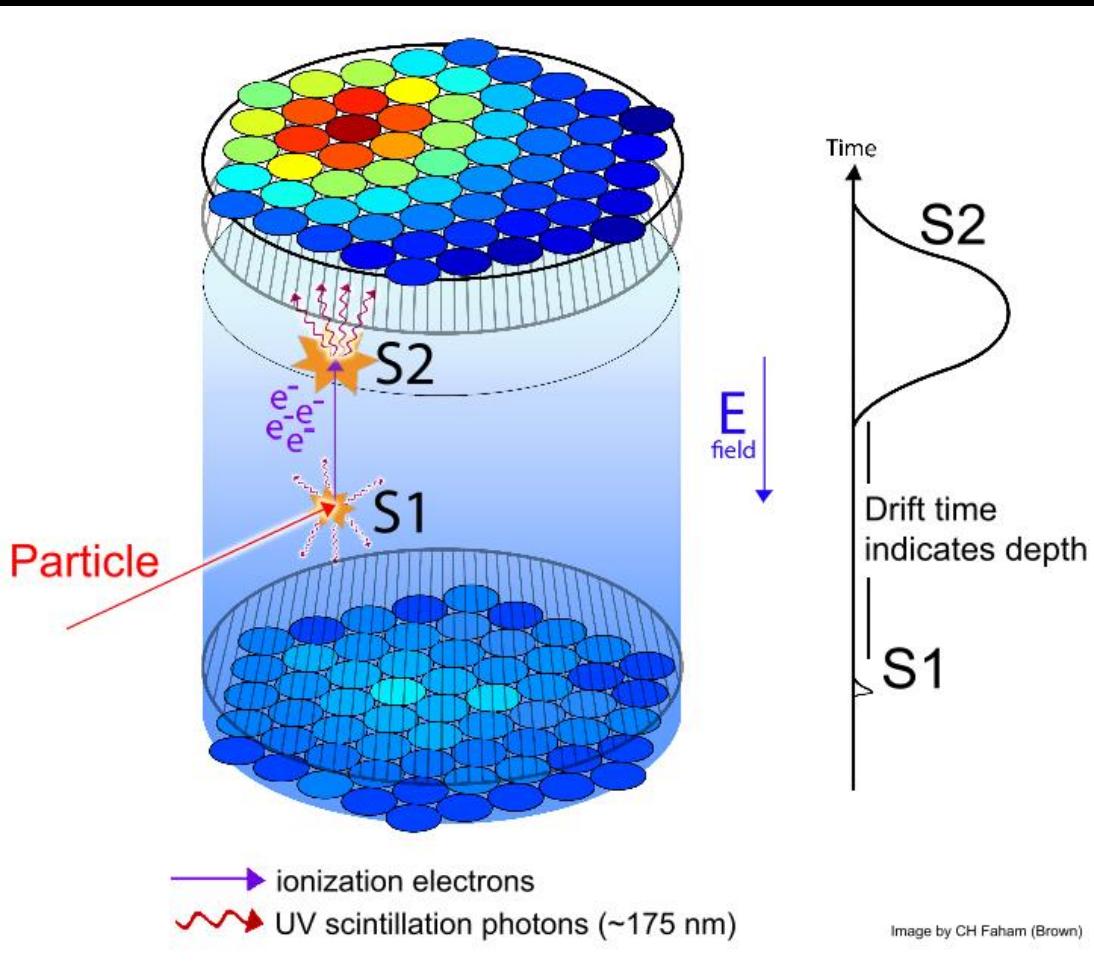
WIS



Detection Method



Two-Phase Xe Detector



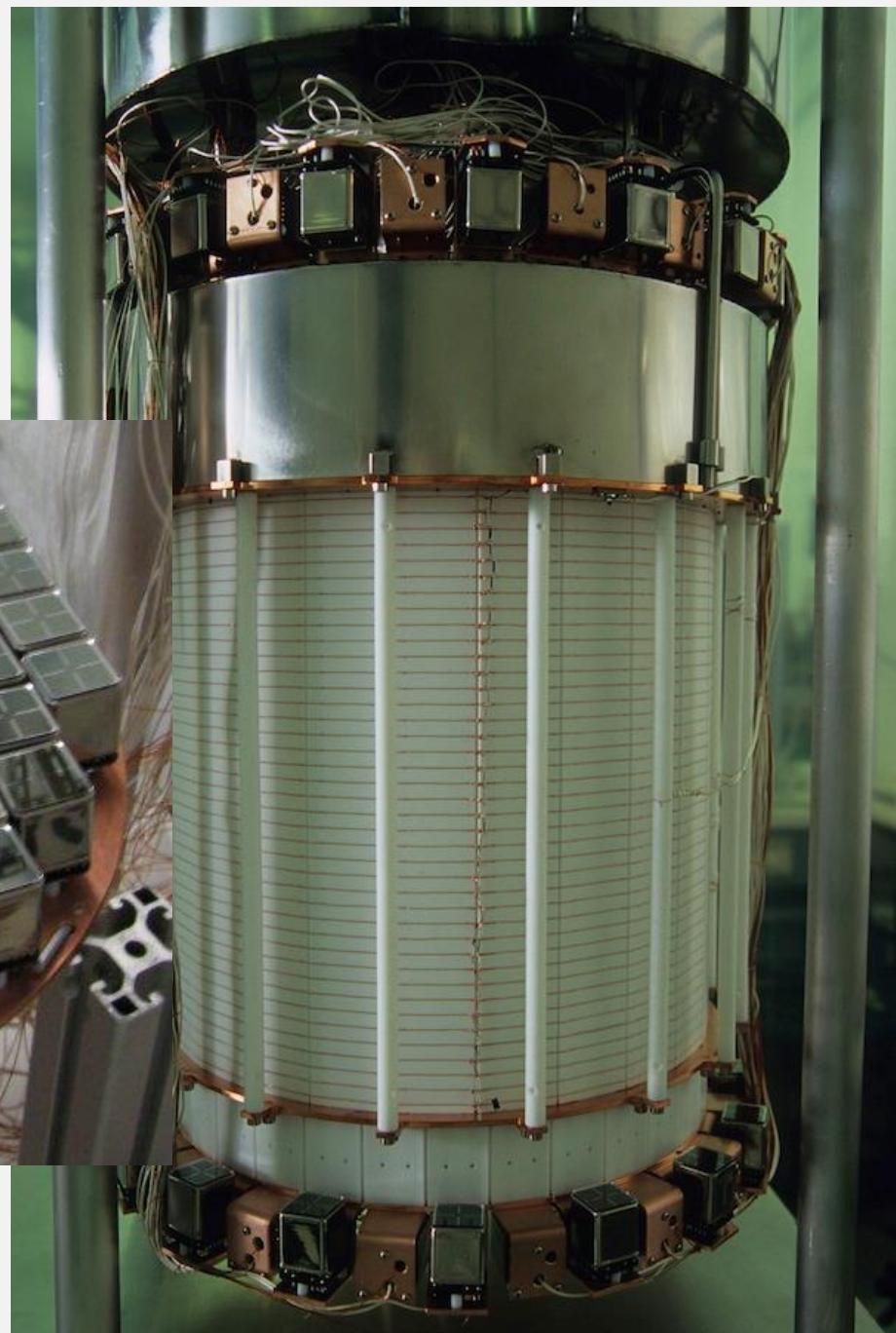
PMTs collect prompt (**S1**) and proportional (**S2**) light

- S1-S2 delay → Drift length
- S2 light pattern → Horizontal location

S2/S1 ratio differs markedly between electron and nuclear recoils

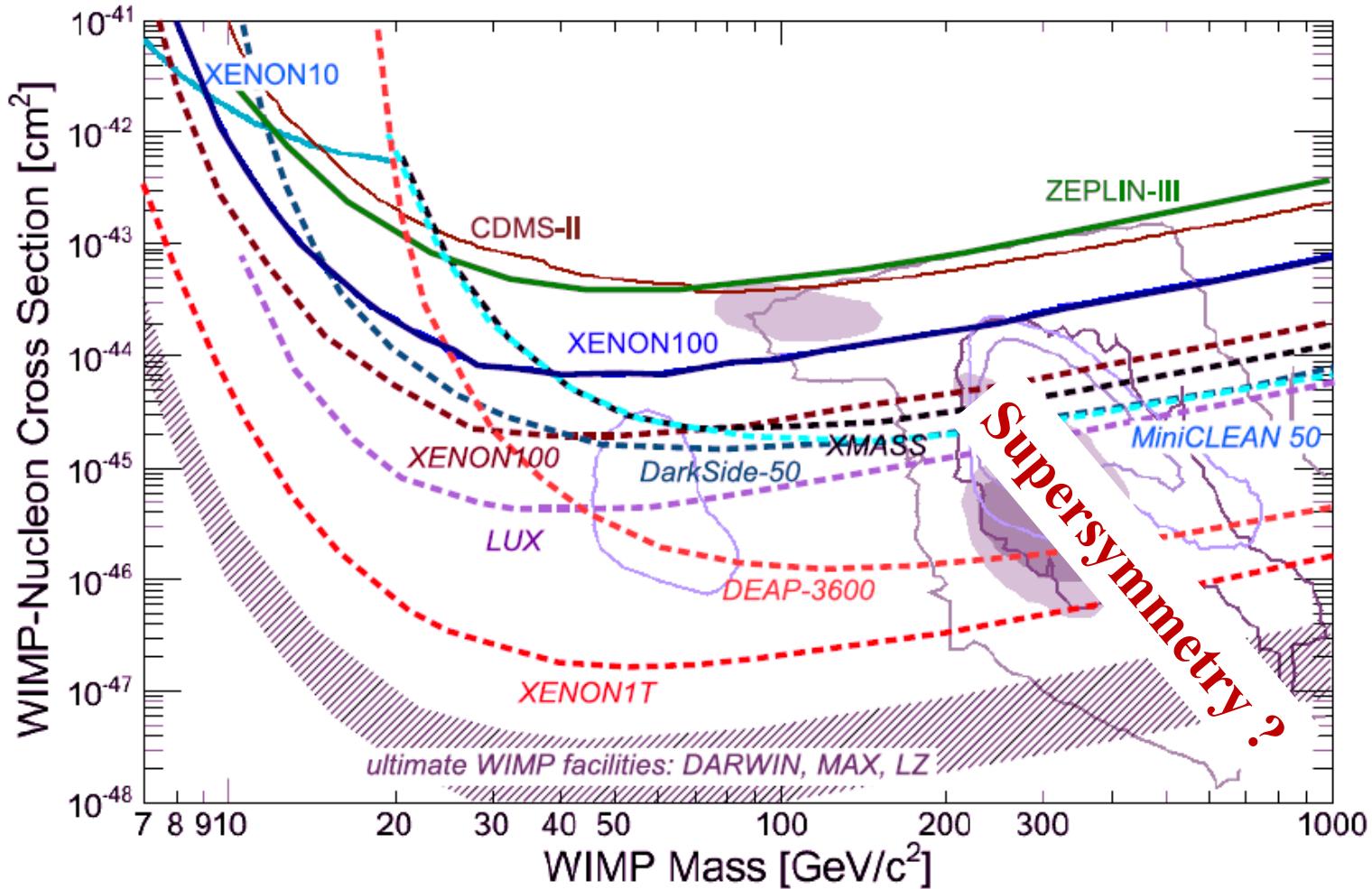
- Nuclear recoils have higher ionization density → higher recombination probability → higher S1 yield
- >98.5% rejection of EM backgrounds

One of the “6 most important experiments in the world”



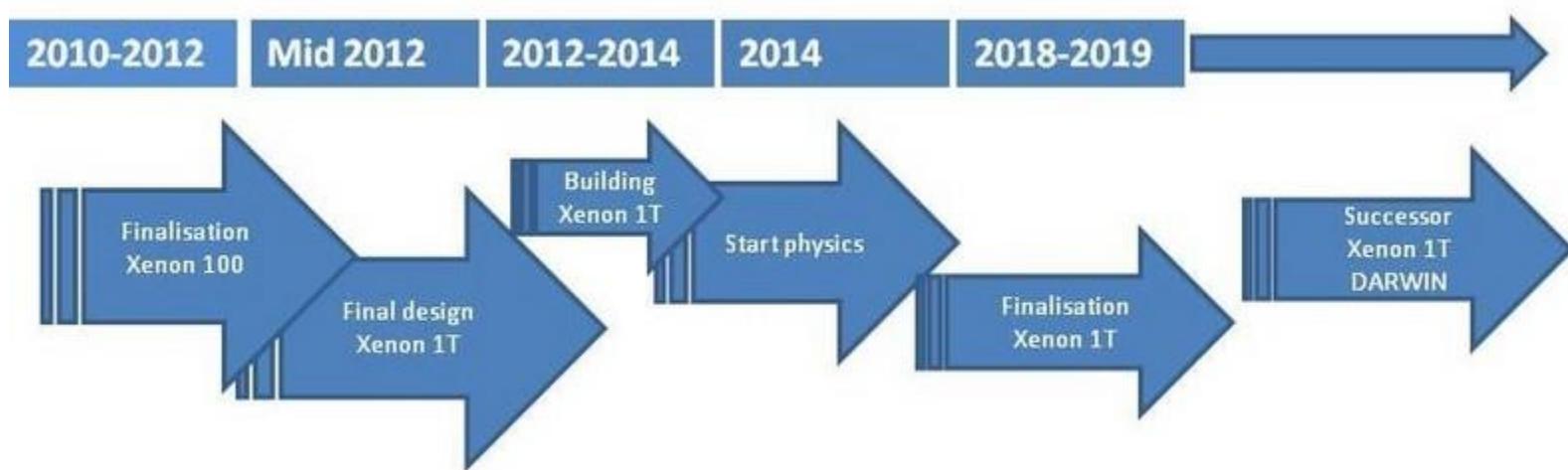
WIMP Edelgas-Experimente

→ Bisher noch keine positive Detektion!

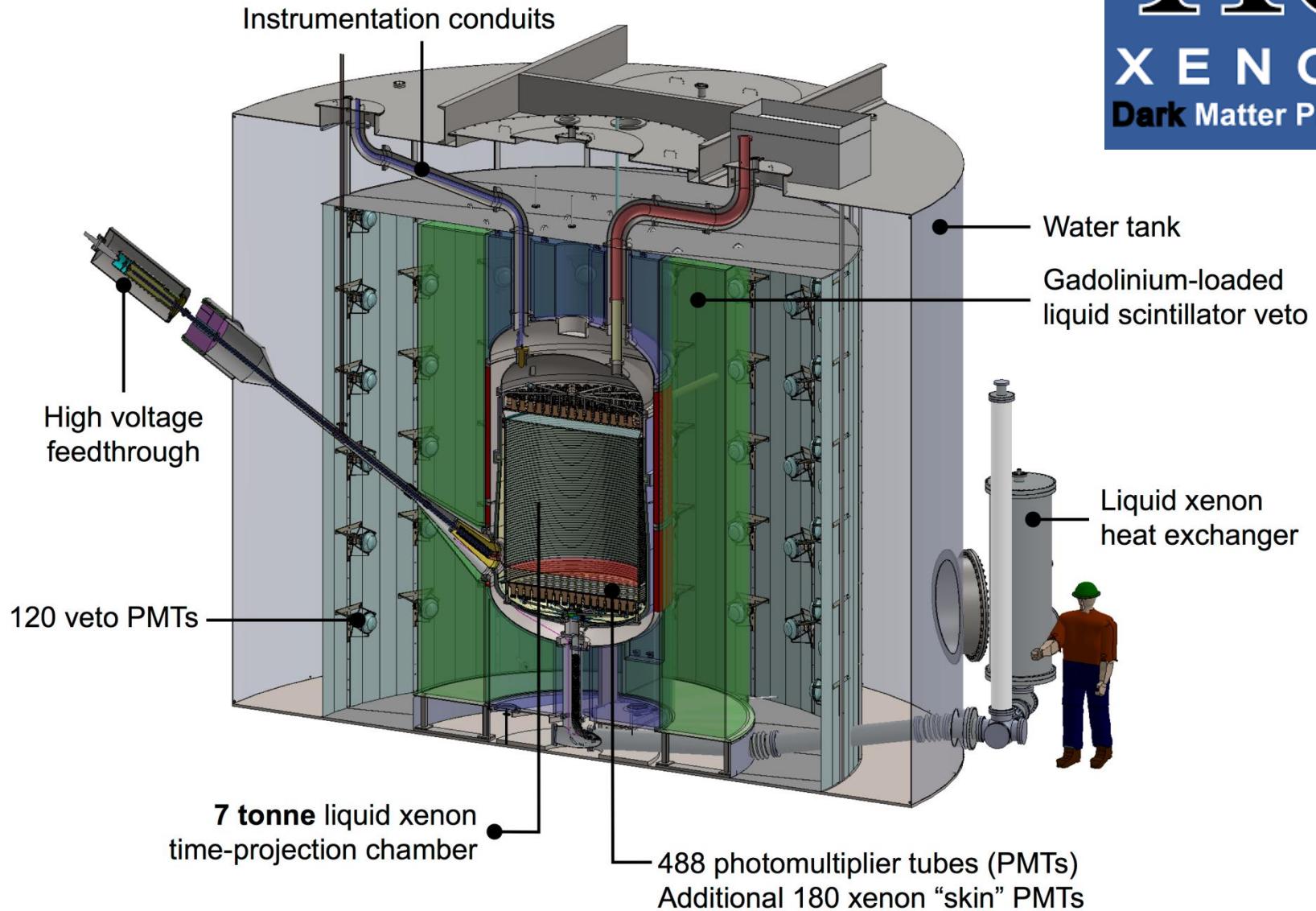


Zukunft Xenon-Experimente

→ Bisher noch keine Detektion

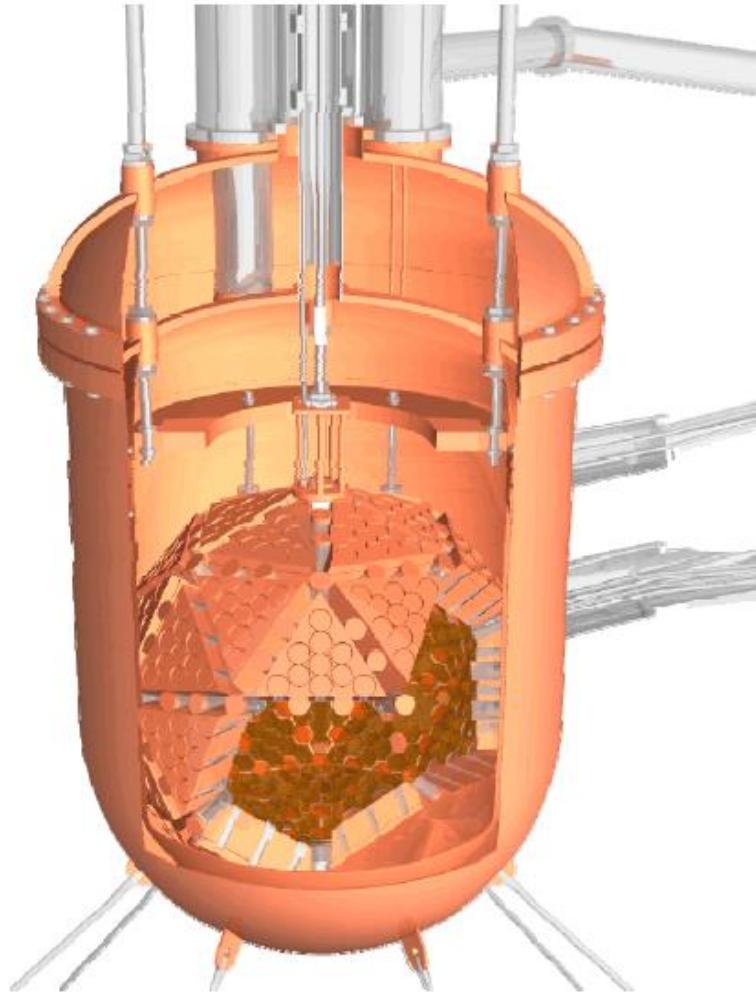


The LZ Dark Matter Experiment

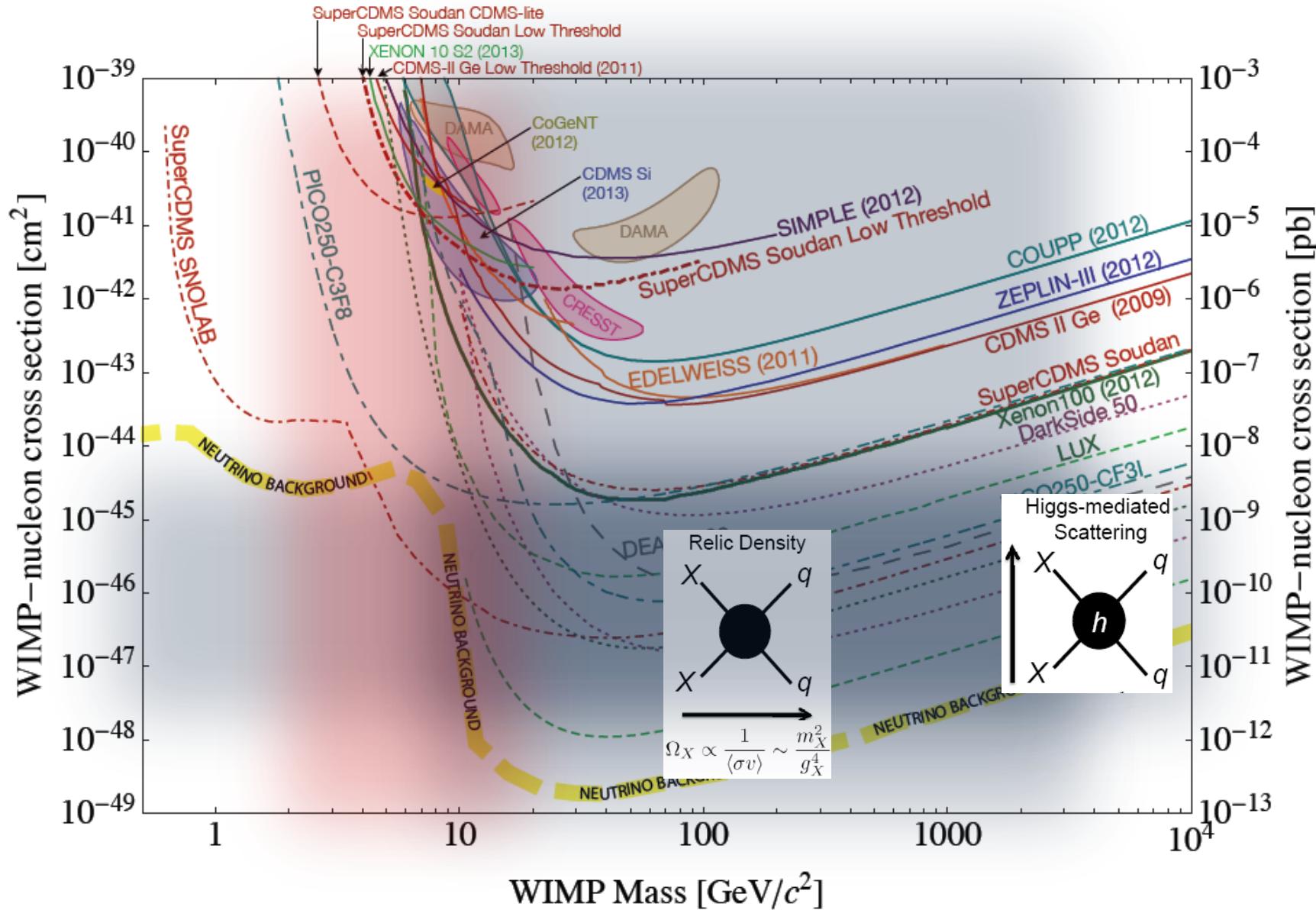


XMAS Detektor Kamioka 2012

Dodekaeder, 835 kg Xenon, 642 Photomultiplier

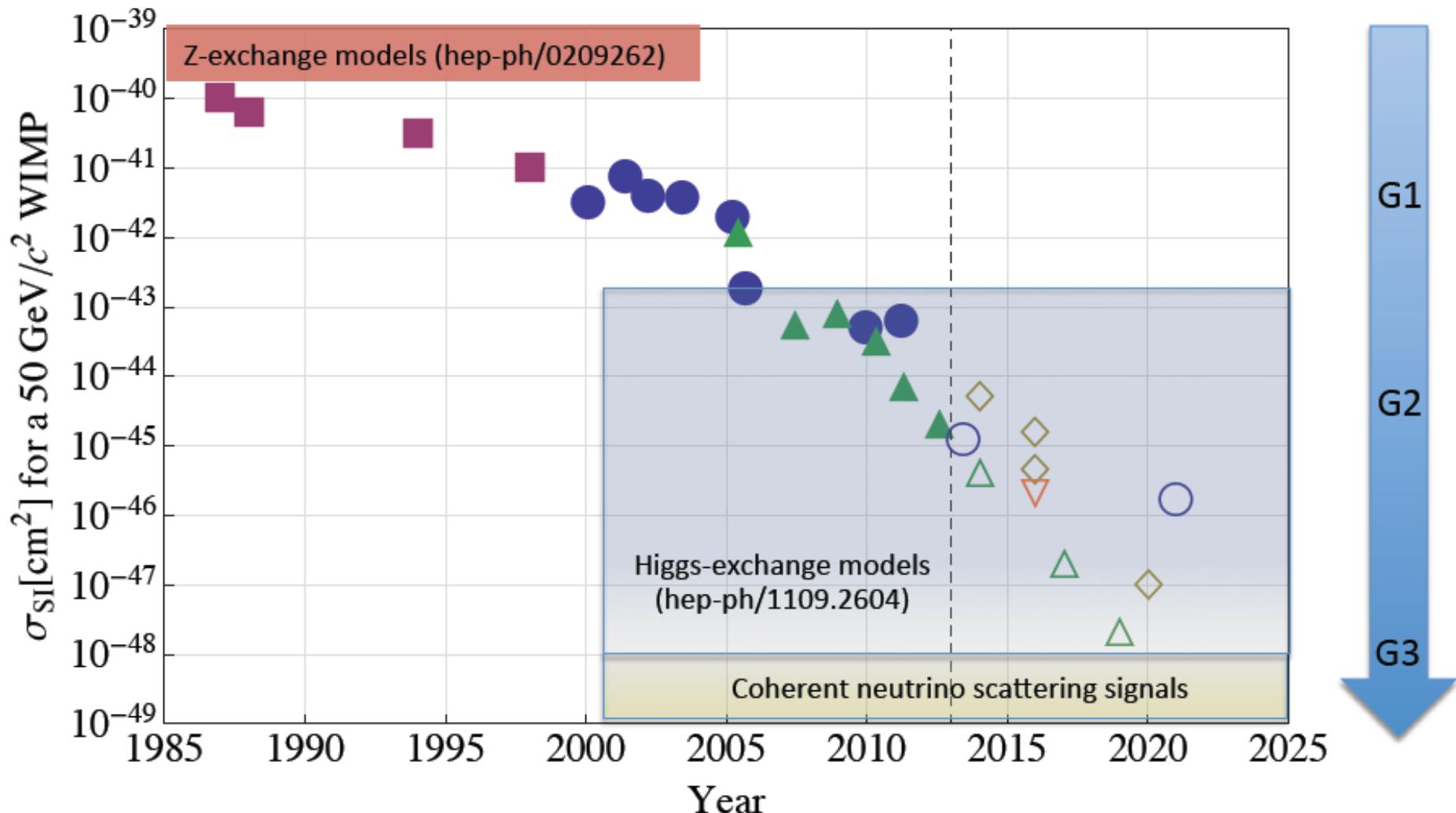


Status der Experimente



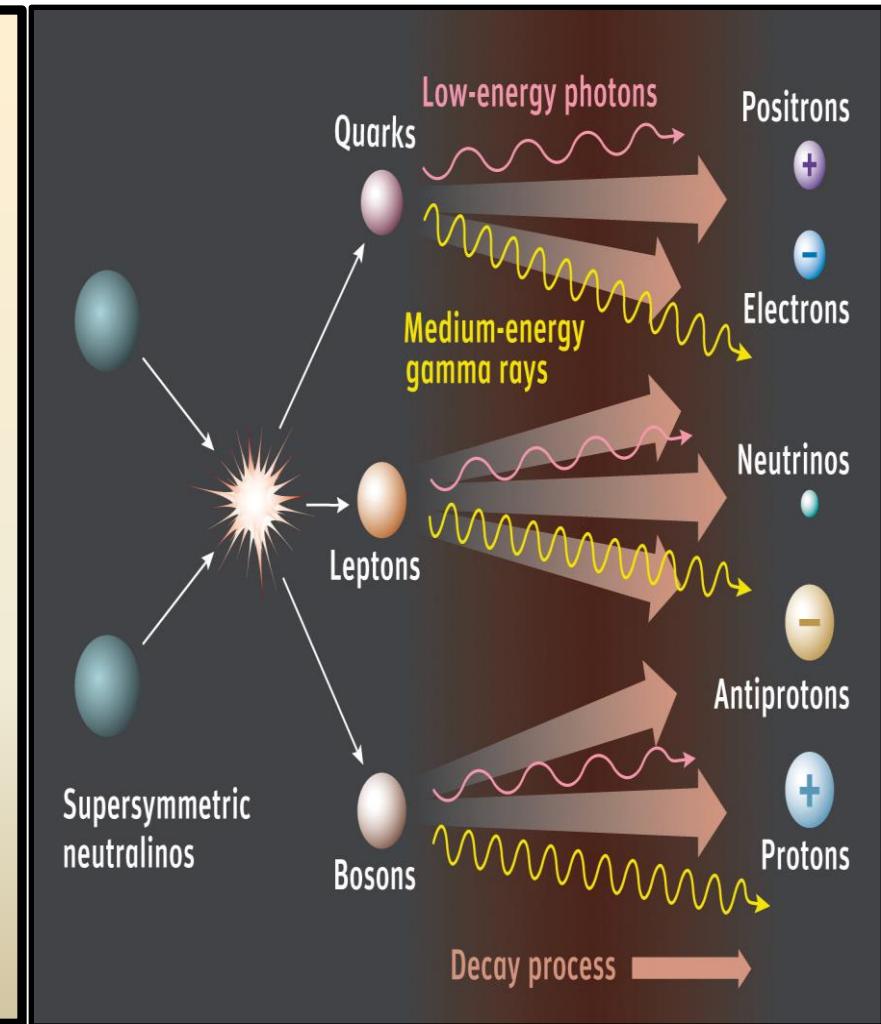
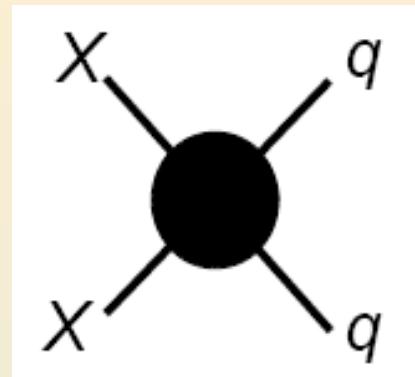
MOORE'S LAW FOR DARK MATTER

Evolution of the WIMP–Nucleon σ_{SI}

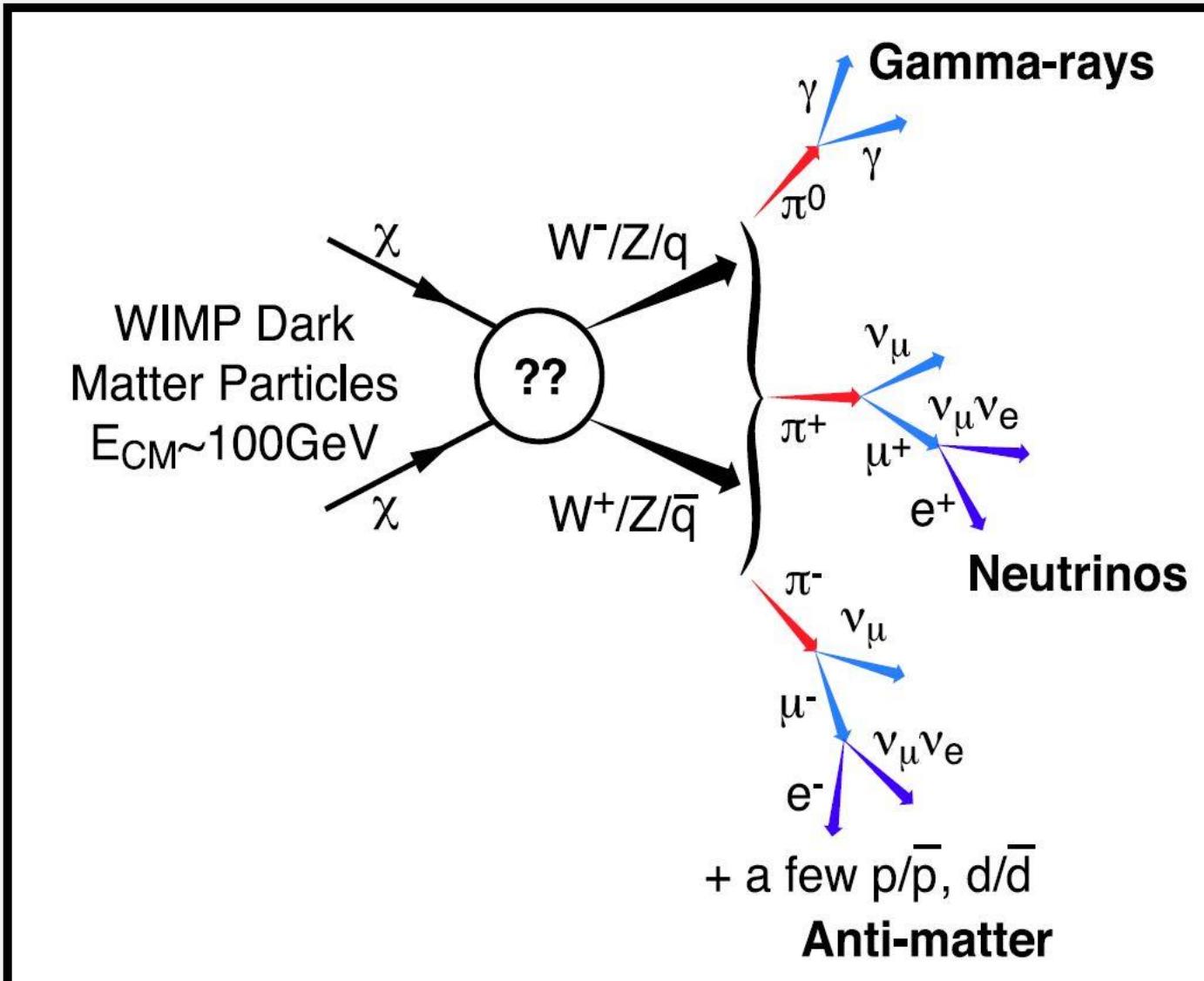


Indirekte Detektion aus Annihilation

- **Dunkle Materie** könnte annihielen in galaktischer Umgebung →
 - Photonen
 - Neutrinos
 - Positronen
 - Antiprotonen
 - Antideuteronen
- Die Relikt-Dichte entspricht Target Annihilation-W'Querschn $\langle \sigma_A v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$



Indirekte Detektion → Zerfallsprodukte

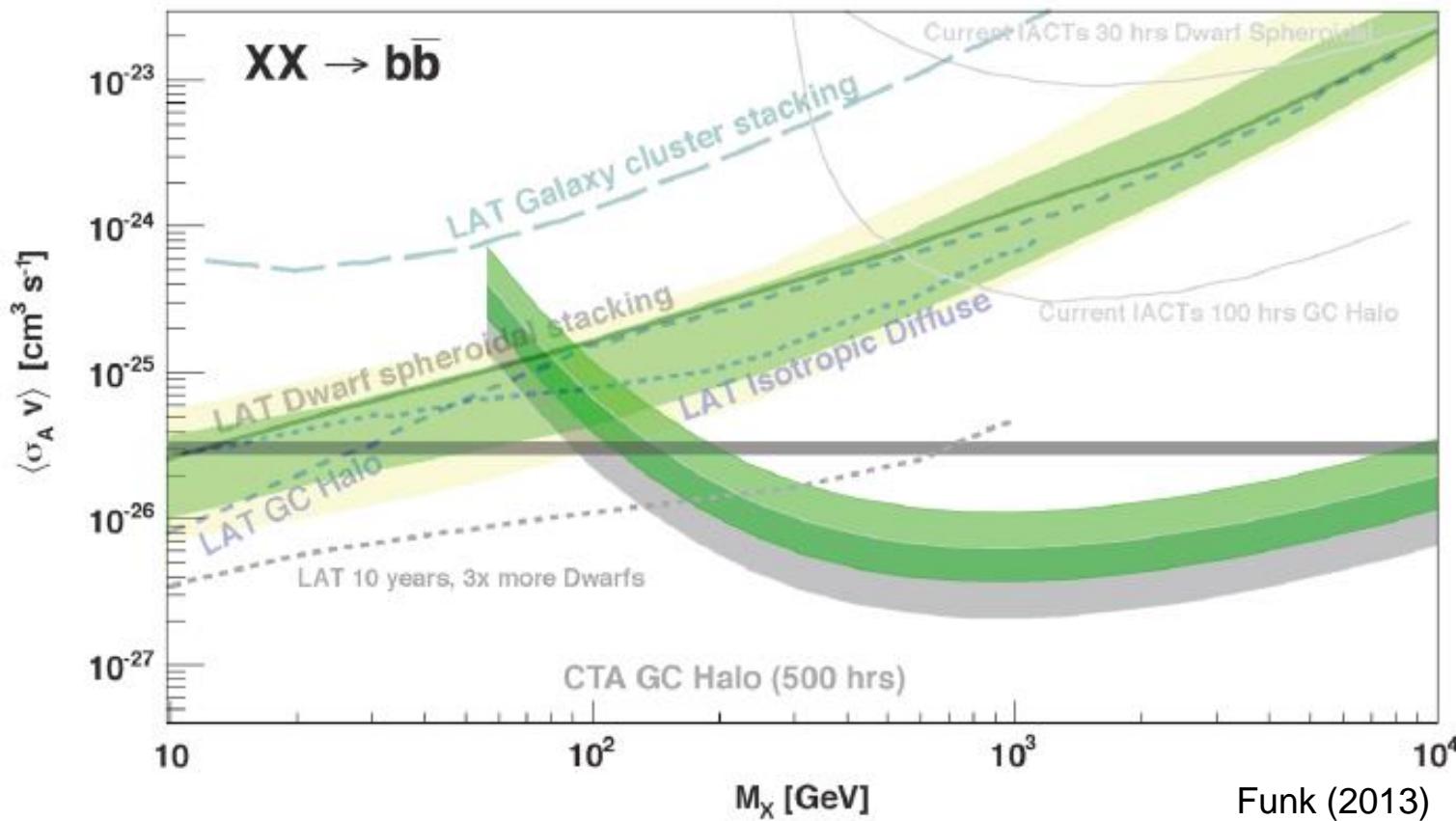


Indirekte Detektion → Photonen

In Betrieb: H.E.S.S., Veritas, Fermi-LAT, HAWC, ...



INDIRECT DETECTION: PHOTONS

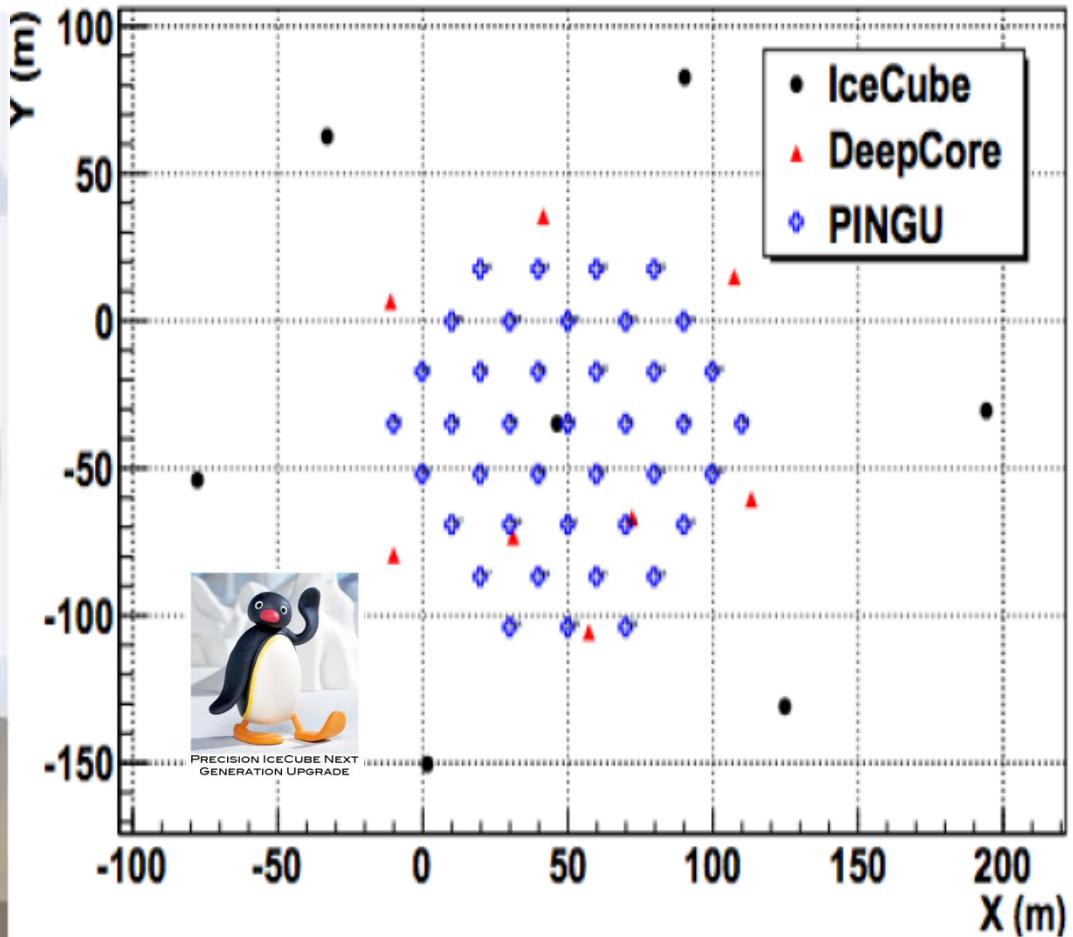
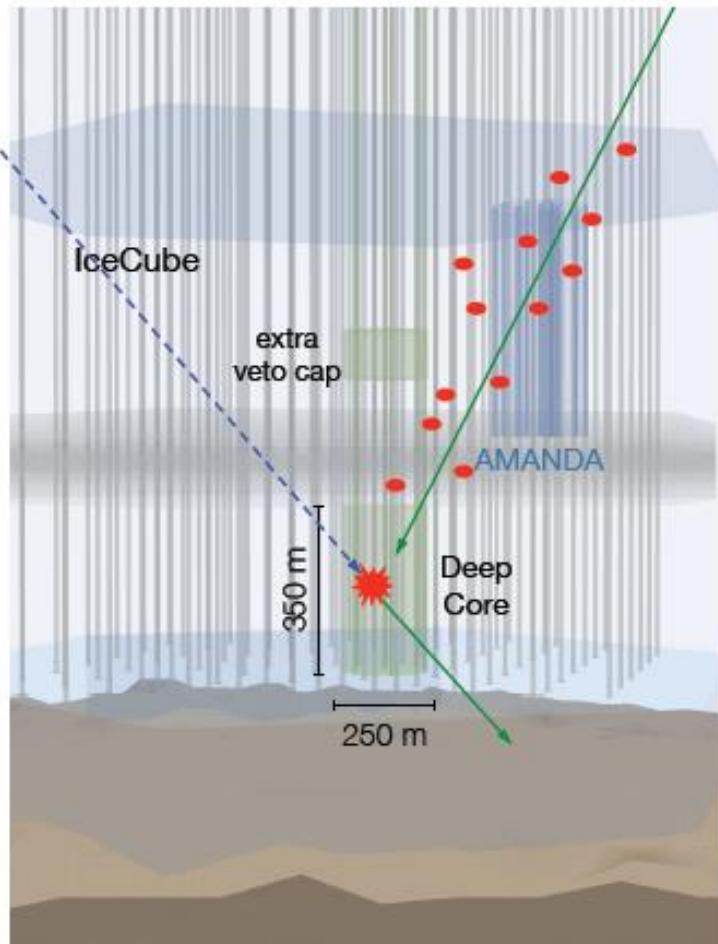


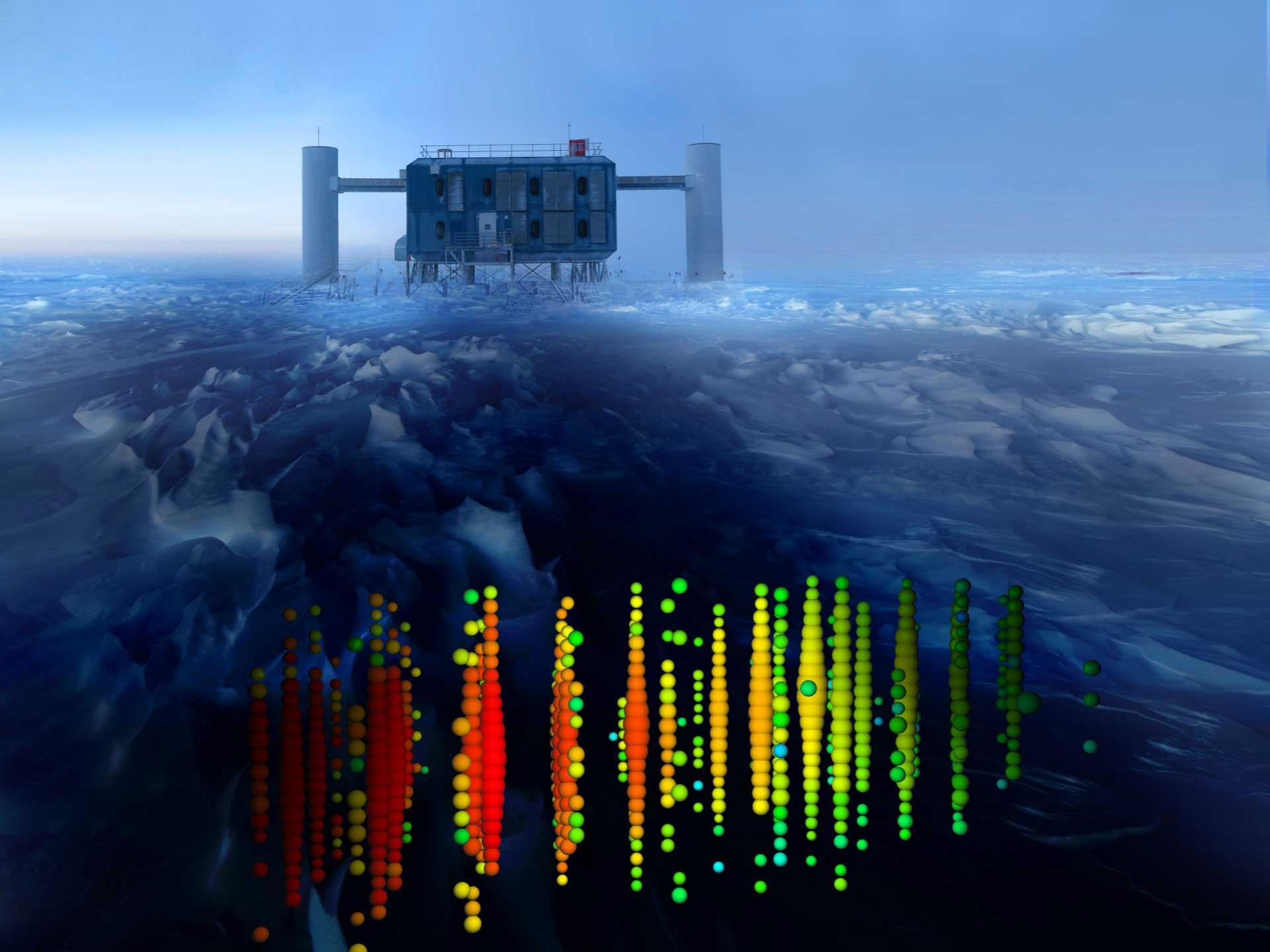
- Fermi-LAT has excluded a light WIMP with the target annihilation cross section for certain annihilation channels
- CTA extends the reach to WIMP masses ~ 10 TeV

Indirekte Detektion → Neutrinos

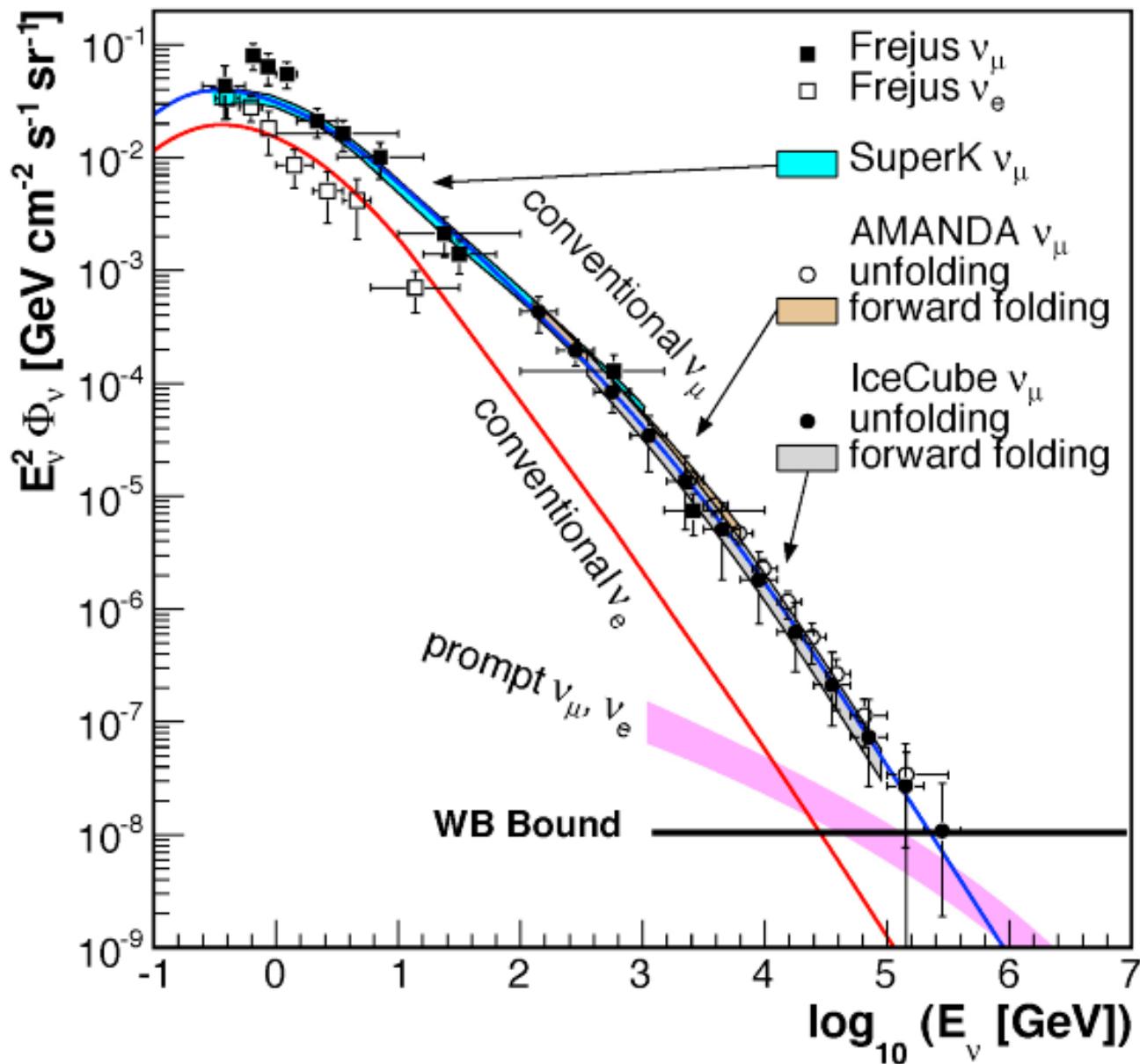
In Betrieb: IceCube/DeepCore,
ANTARES

Zukunft: PINGU

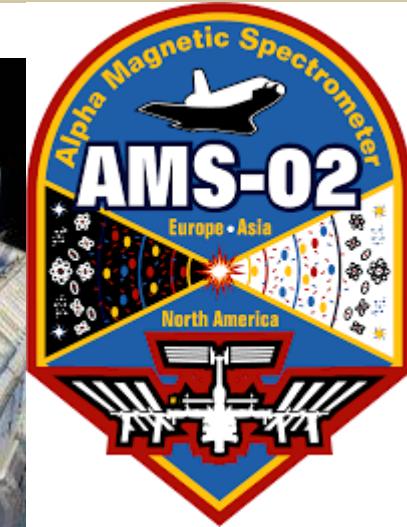




Atmosphärische Neutrinos



Indirekte Detektion → Anti-Materie



AMS-02 on the ISS

Indirekte Detektion → AMS-02 / ISS



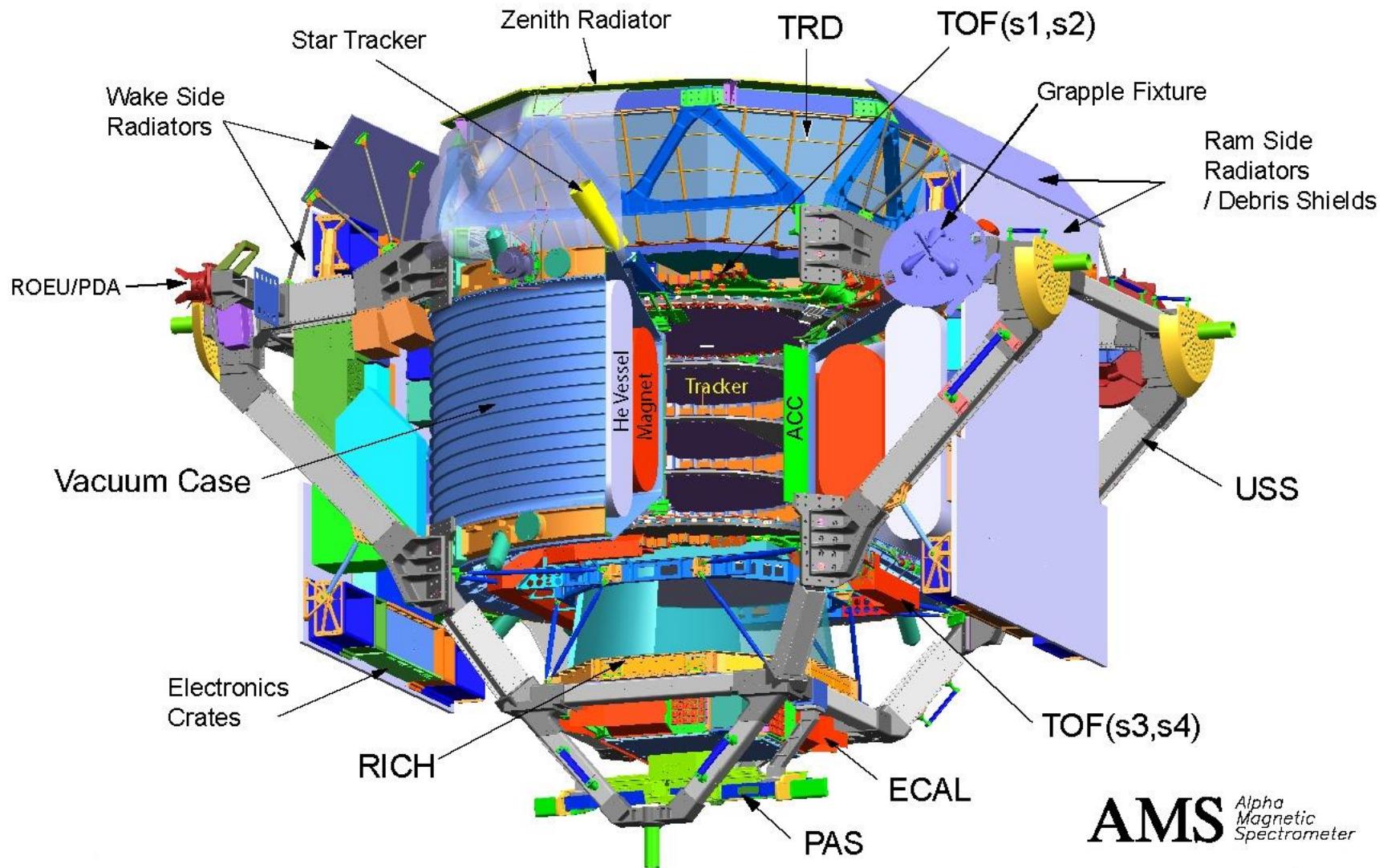
Teilchen Detektor → AMS-02 / ISS



Abmessungen: **3,1 m × 3,4 m × 4,5 m**

Gewicht: **8,5 Tonnen**

AMS 02



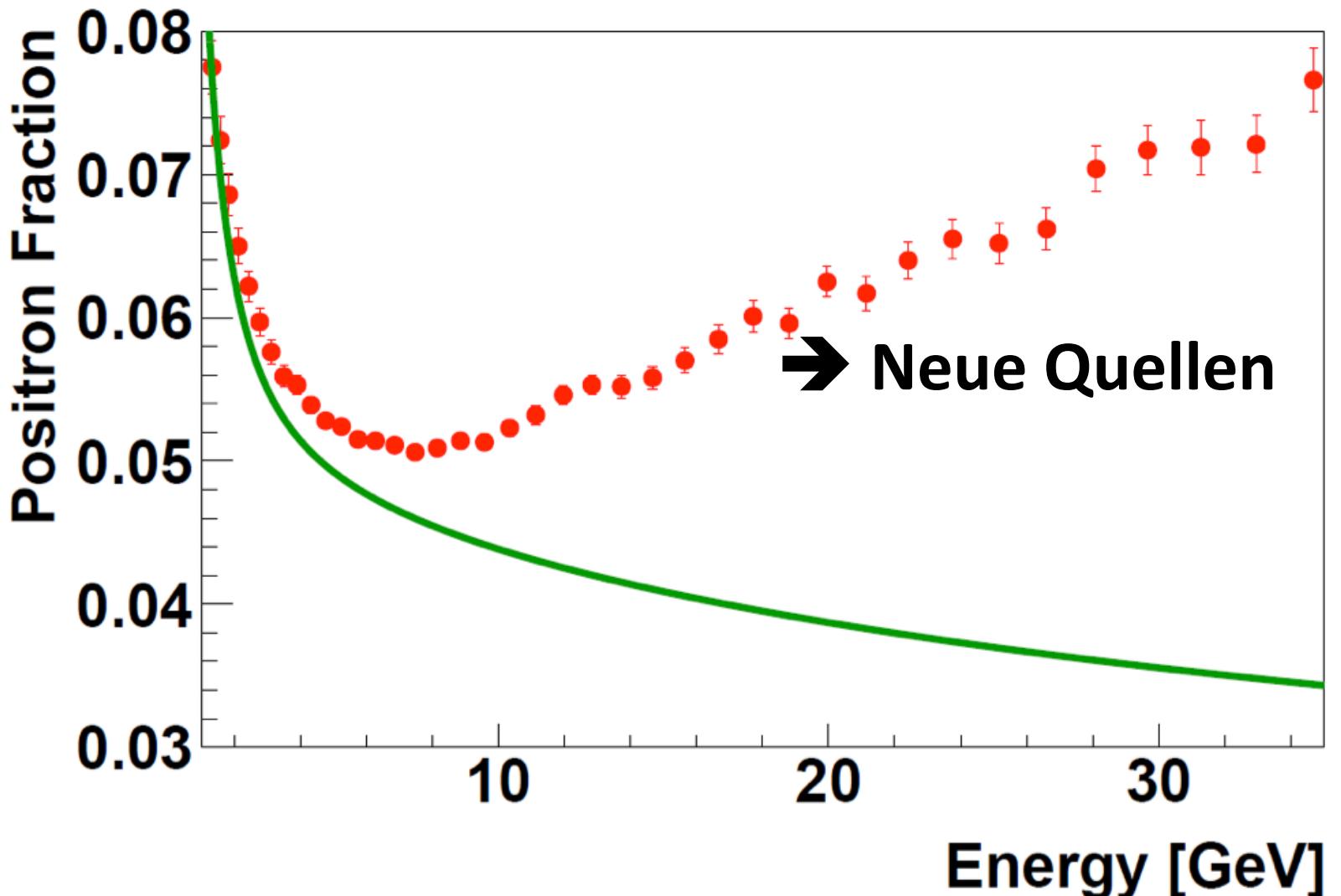
AMS Alpha
Magnetic
Spectrometer

AMS-02 hat eine **Masse von 8,5 Tonnen**, die Abmessungen sind **$3,1 \text{ m} \times 3,4 \text{ m} \times 4,5 \text{ m}$** und die geometrische Akzeptanz beträgt $0,5 \text{ m}^2\text{sr}$. Für die zentrale Komponente des Detektors war ursprünglich ein supraleitender Magnet mit maximaler Feldstärke 0,86 Tesla, der mit suprafluidem Helium auf 1,8 Kelvin gekühlt worden wäre, geplant. Dieser wurde zur Laufzeitverlängerung des AMS-02 durch den 1.200 kg schweren **Neodym-Permanentmagneten** von AMS-01 mit **0,15 Tesla** ersetzt. Im Innenraum des Magneten befindet sich **ein doppelseitig strukturierter Silizium-Streifendetektor** mit einer aktiven Fläche von $6,5 \text{ m}^2$. Damit wird der Durchgang von geladenen Teilchen auf acht Ebenen mit einer Einzelpunktauflösung von $10 \mu\text{m}$ vermessen. Die Flugbahnen von geladenen Teilchen werden in dem **Magnetfeld** dieses **Magnetspektrometers** gekrümmt. Anhand der Krümmung können der Impuls der geladenen Teilchen und das Ladungsvorzeichen bis zu **Teilchenenergien von 1000 GeV** bestimmt werden.

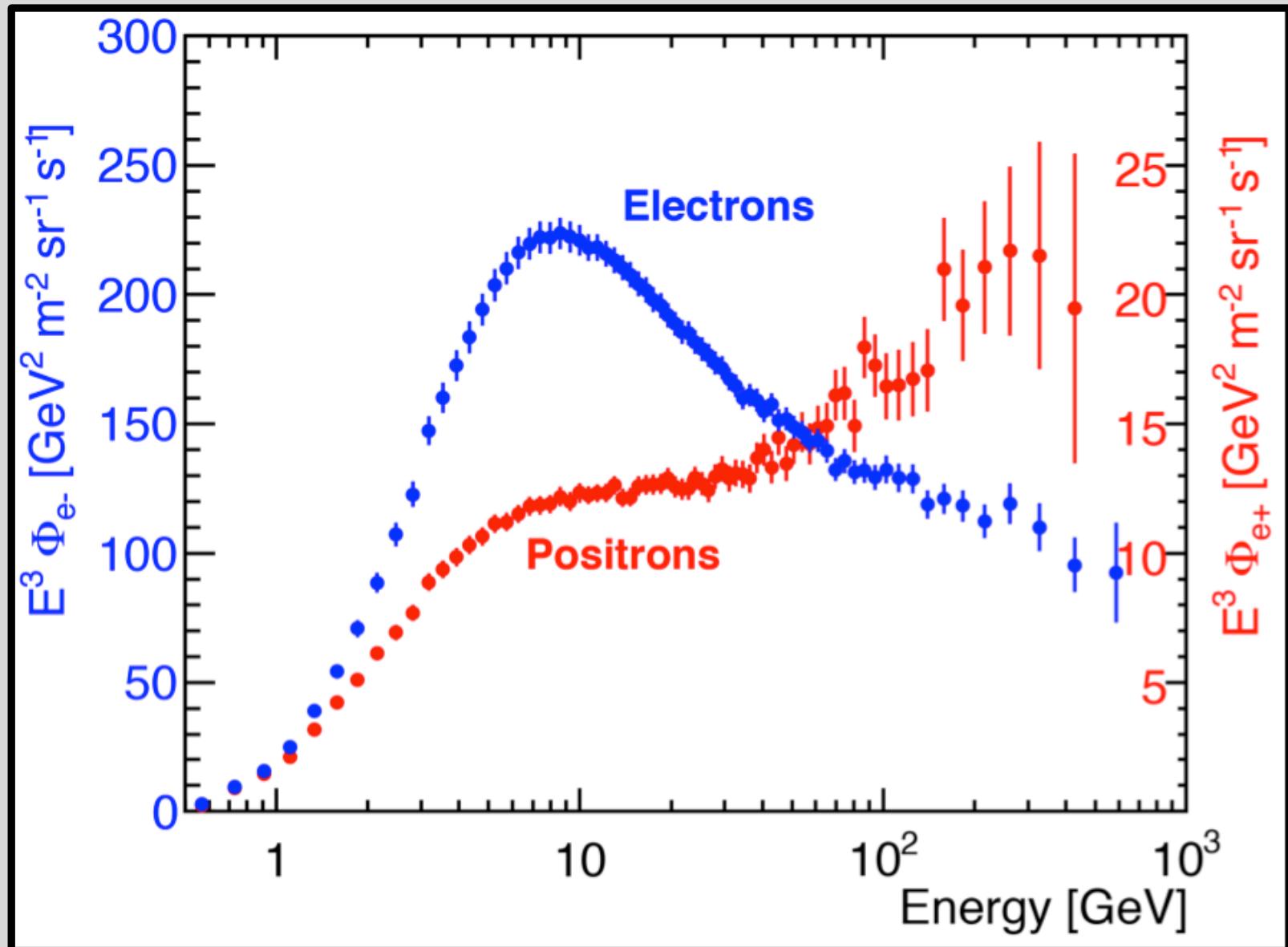
Um die Masse der geladenen Teilchen zu bestimmen, wird das Experiment nach oben durch einen **Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)** und nach unten durch einen **Ring-Image-Tscherenkow-Zähler (RICH)** und ein **elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)** komplettiert. Um die Flugzeiten und damit die Geschwindigkeiten der Teilchen zu messen und die Ausleseelektronik der anderen Detektorkomponenten auszulösen, befinden sich ober- und unterhalb des Siliziumspurdetektors ein **Flugzeitmassenspektrometer (ToF)** welches eine Zeitauflösung von 150 ps hat. Die von dem Experiment erzeugte Wärmeleistung von ca. 2000 Watt wird mit Hilfe von Radiatoren in den Weltraum abgestrahlt.

Das Experiment erzeugt eine Datenrate von ungefähr 7 GBit/s (Gigabit pro Sekunde). Durch Verarbeitung der Daten wird die Rate auf 2 MBit/s reduziert, und dann zum Boden übertragen.

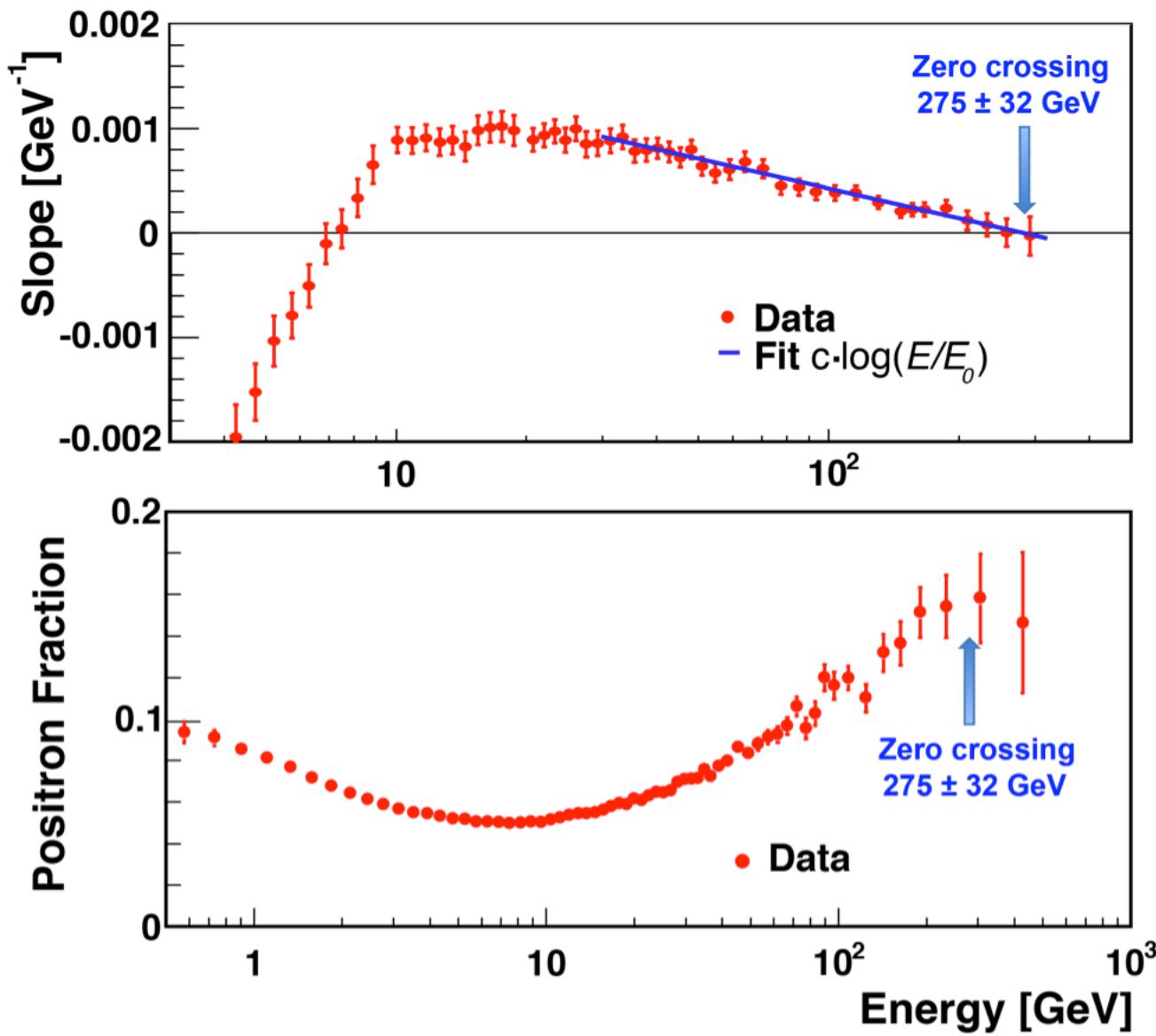
AMS-02 Positron-Anteil Messungen & Vergleich mit kosmischer Strahlung



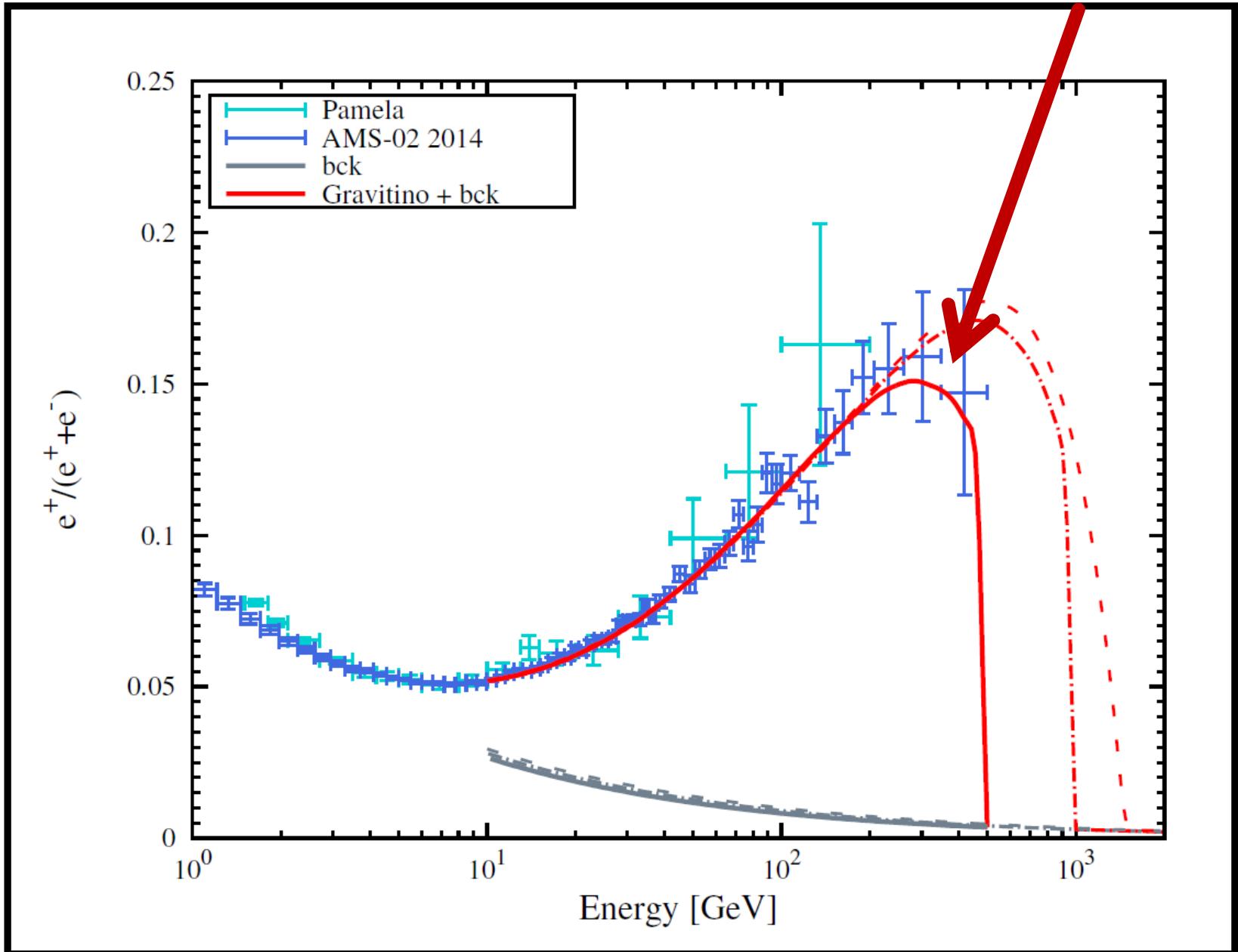
AMS-02 Elektron-Positron-Spektren



AMS-02 Positron-Anteil Messungen

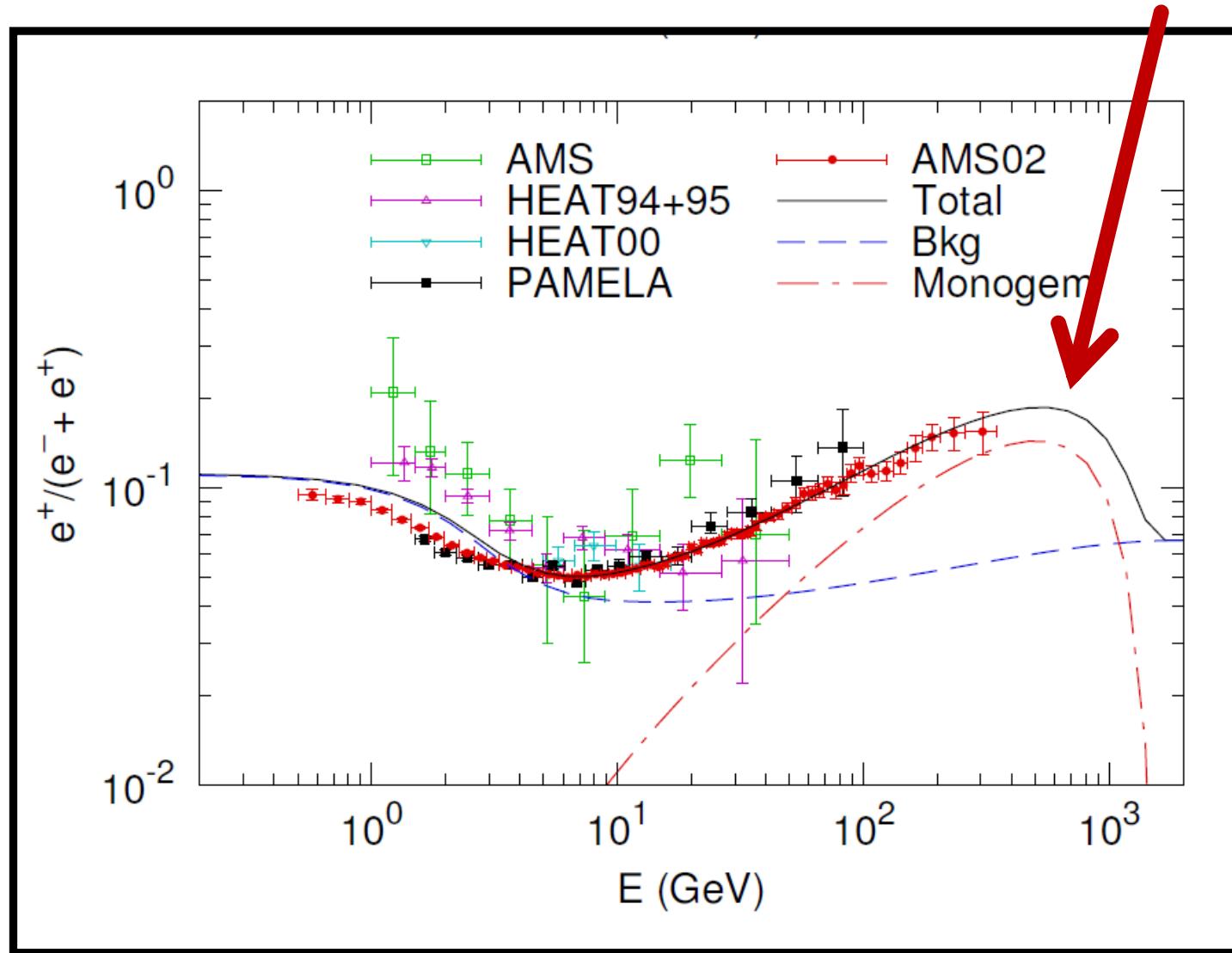


AMS-02 Positron-Anteil WIMP-Decay



AMS-02 Positron-Anteil → Pulsare

Krebspulsar → Elektron-Positron Paare E < 1 TeV



Zusammenfassung

- Die Existenz Dunkler Materie kann in der Astrophysik nicht wegdiskutiert werden – obschon das viele gerne möchten.
- Dunkle Materie kann nicht baryonischer Natur sein! Schwarze Löcher sind damit ausgeschlossen
- Das Standardmodell liefert keinen Kandidaten für Dunkle Materie.
- → Also muss es ein stabiles Teilchen jenseits des Standardmodells geben.
- → Schwere rechtshändige Neutrinos könnten gute Kandidaten sein, die bekannten linkshändigen Neutrinos sind eindeutig zu leicht!