

Die dunkle Seite des Universums



Manfred Lindner

**Max-Planck-Institut
für Kernphysik, Heidelberg**



Physik am Samstagmorgen, 28. April 2012



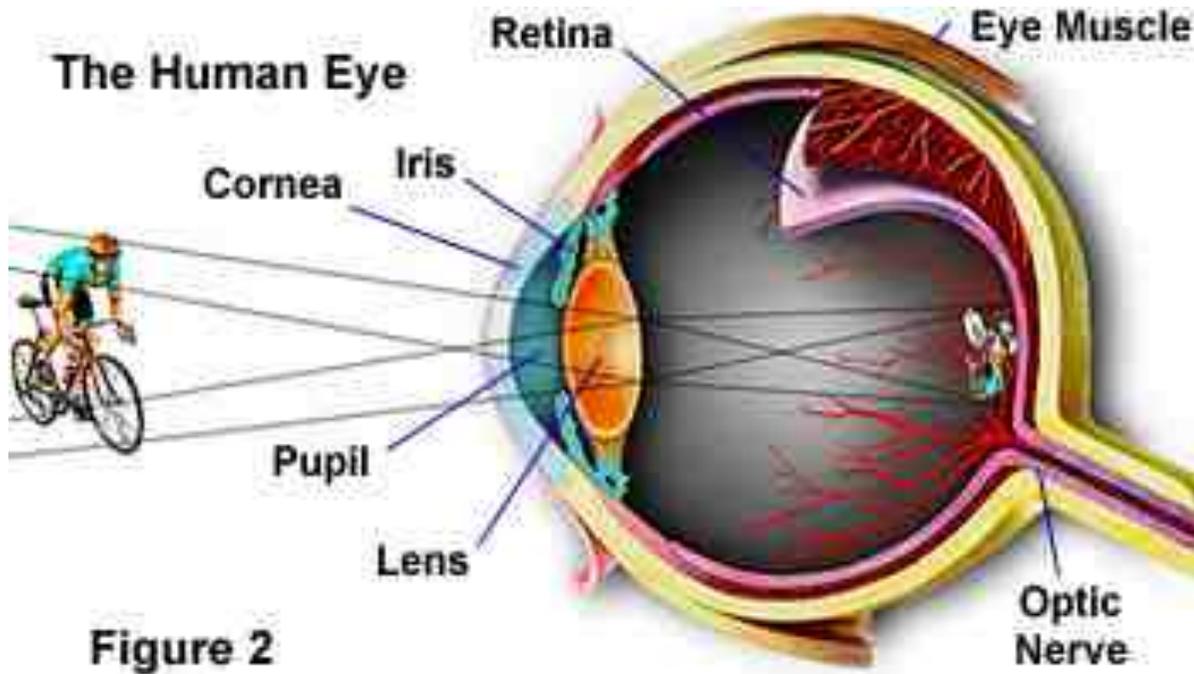
A cosmic background image featuring a dense field of galaxies and stars. The top half shows a dark field with numerous bright, multi-colored galaxies (yellow, orange, red, blue) and stars. The bottom half is dominated by a bright, glowing blue-purple nebula or galaxy cluster. The overall scene is a rich, multi-colored representation of the universe.

Sehen wir eigentlich alles?

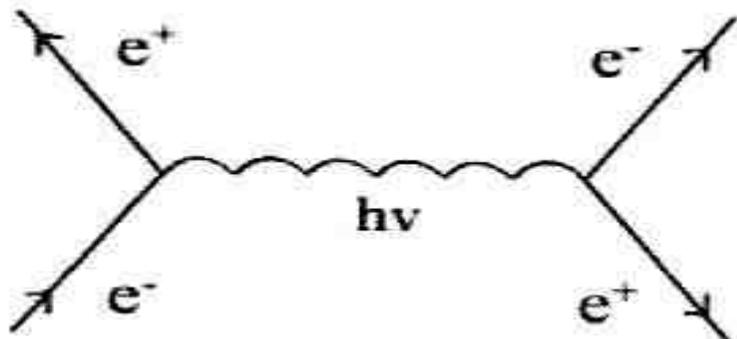
Versteckte Materie?

Prinzipiell unsichtbare Materie?

“Sehen” aus physikalischer Sicht



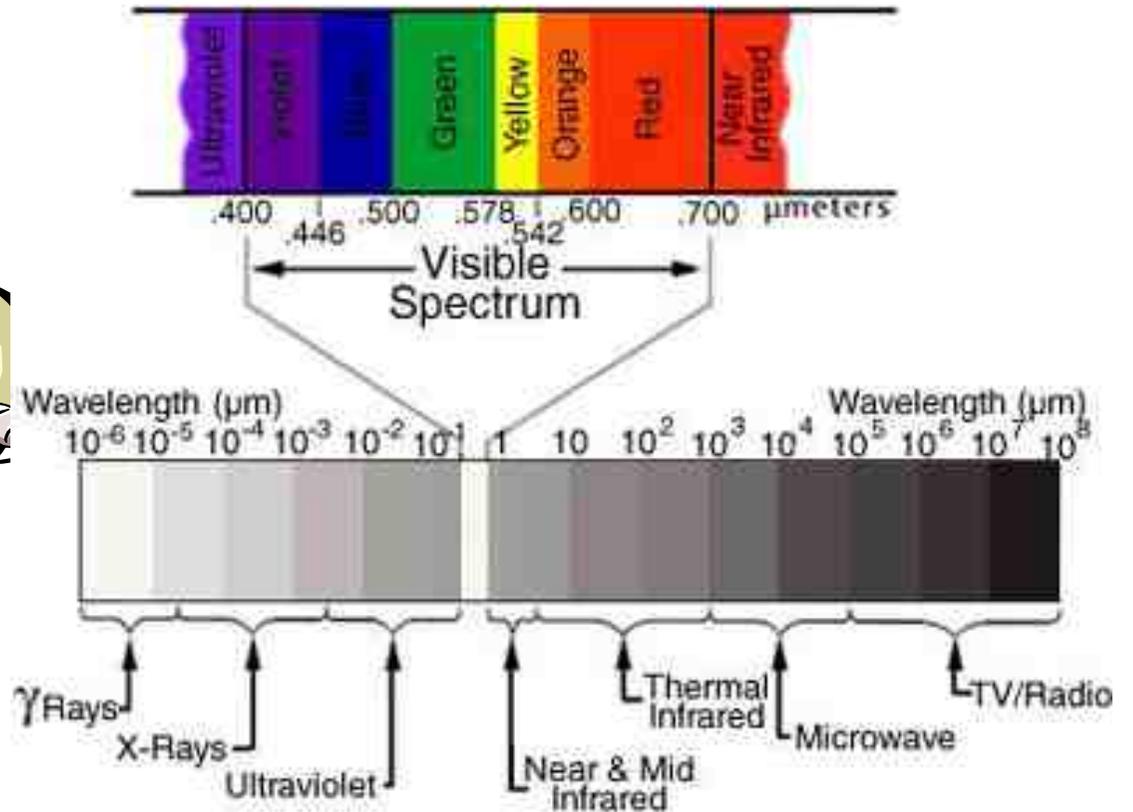
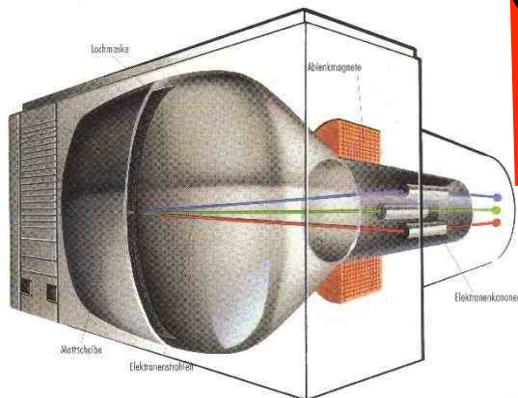
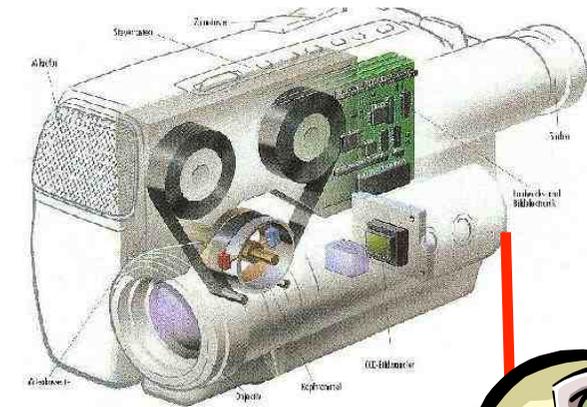
Abbild im Gehirn
↔ Realität

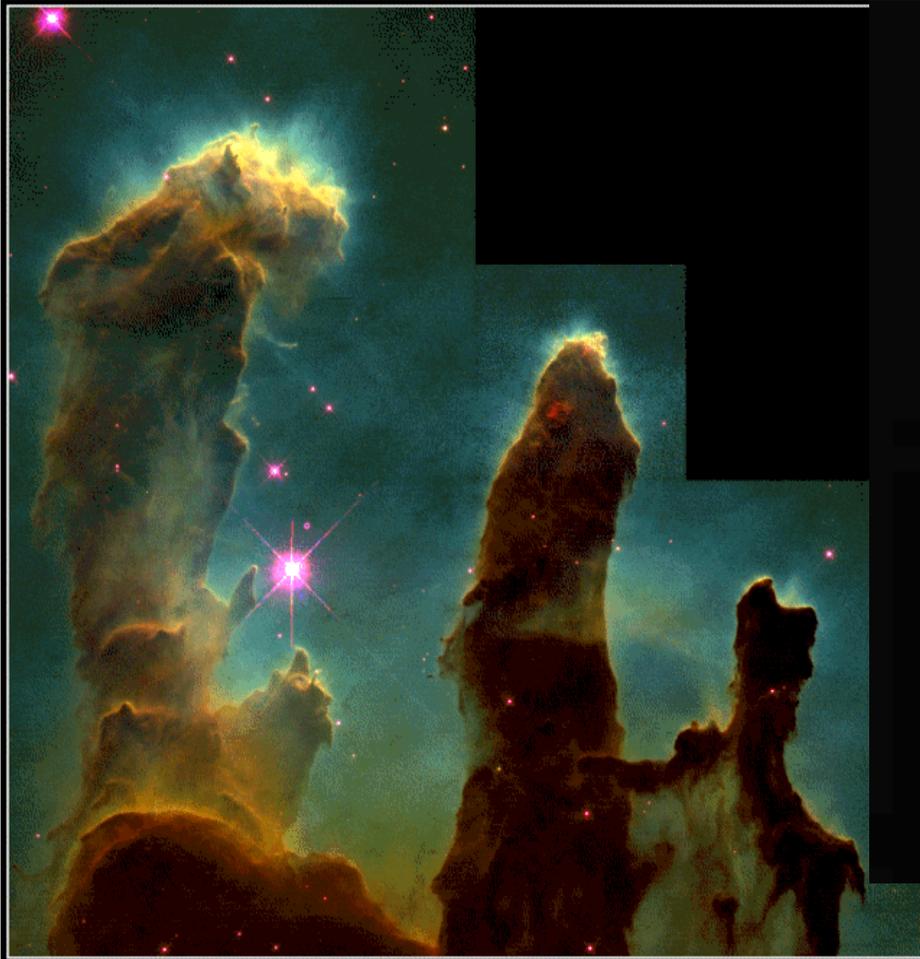


Austausch von Lichtteilchen
(Photonen) ↔
elektrisch geladene Teilchen

Sehhilfen

Optische Instrumente: Brillen, Teleskope, ...
Elektronische Geräte:

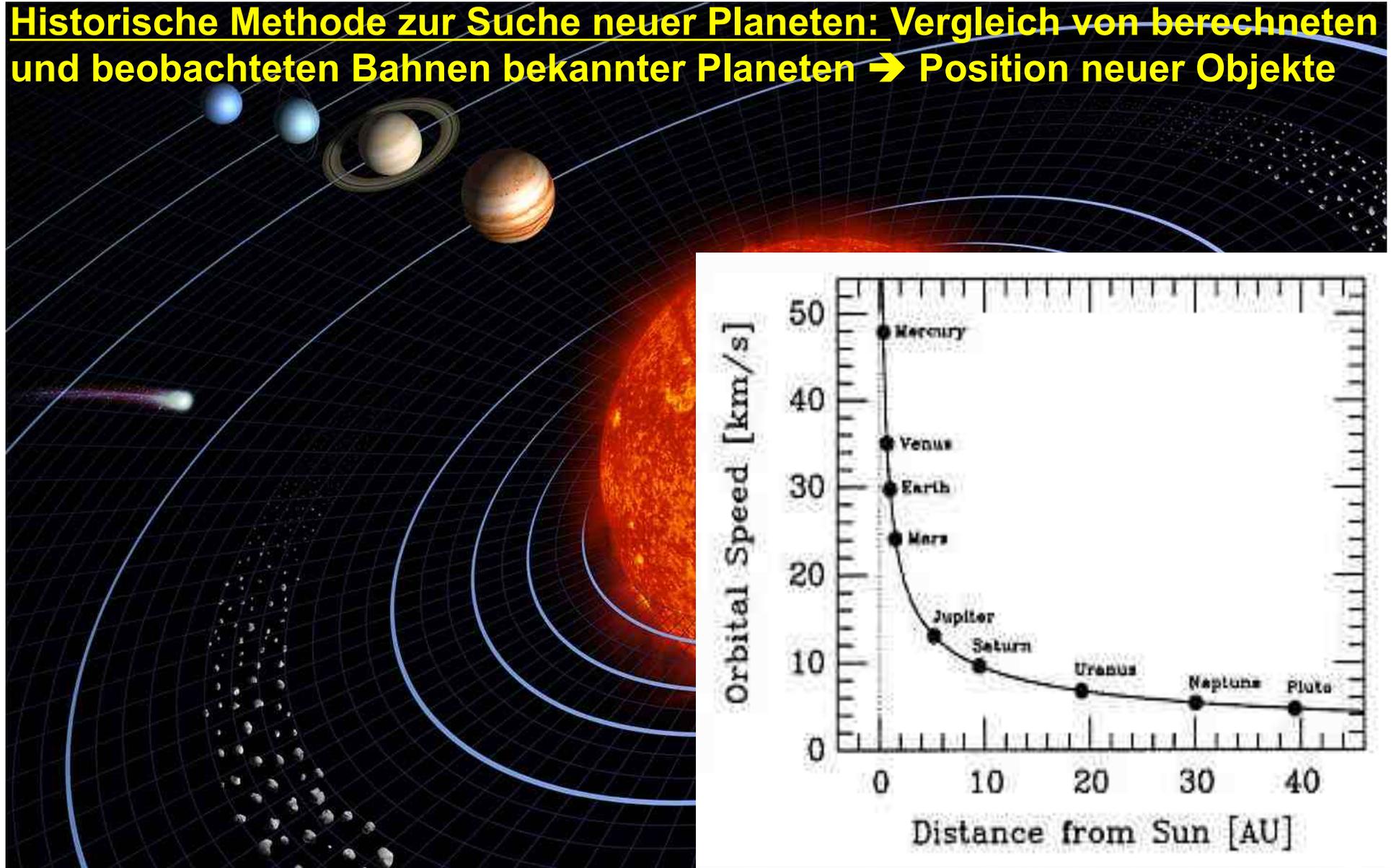




Computer-aufbereitete Bilder:
Verstärkung, Frequenzänderung
→ Austausch von Photonen
→ elektrisch geladenen Teilchen
→ gibt es ungeladene Teilchen?

Mit Hilfe der Gravitation sehen

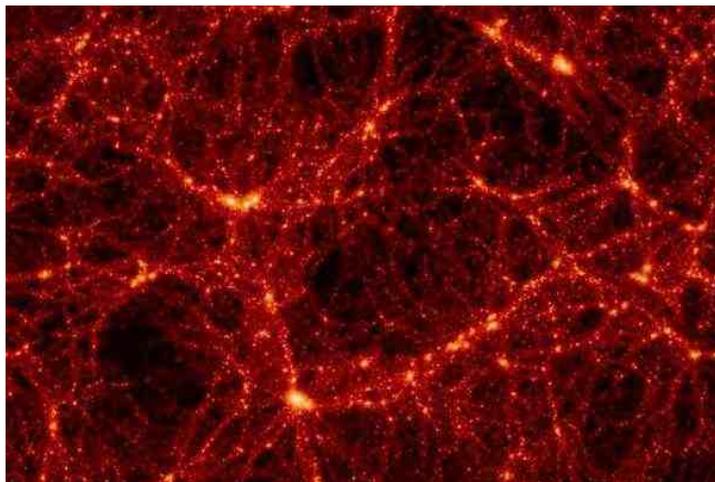
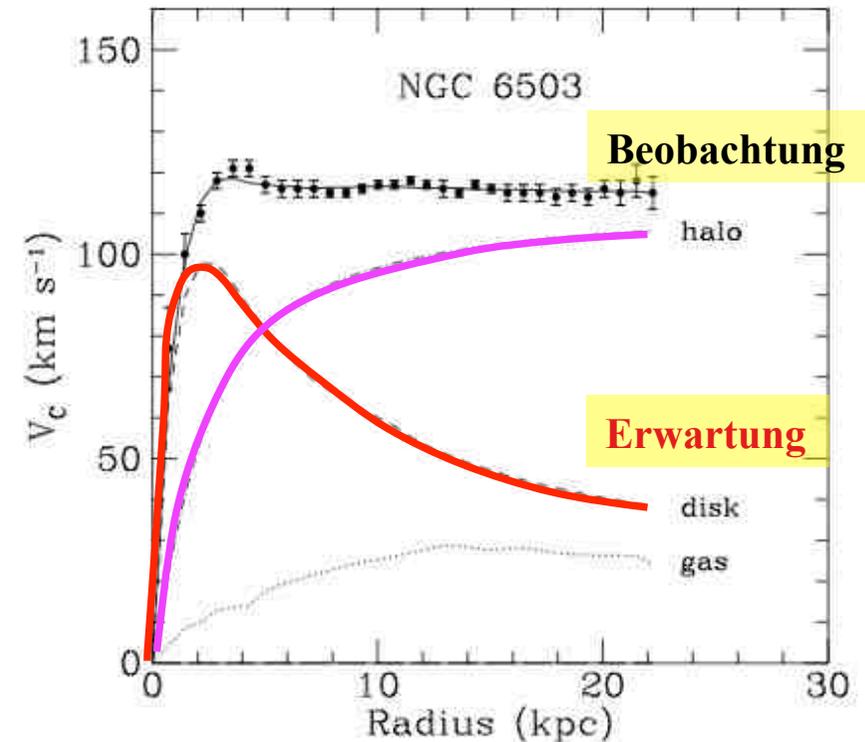
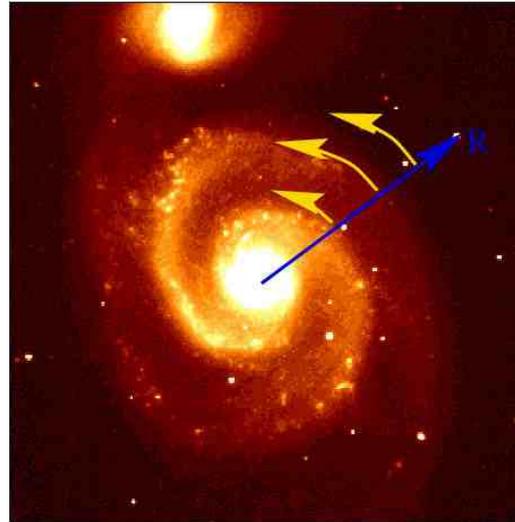
Historische Methode zur Suche neuer Planeten: Vergleich von berechneten und beobachteten Bahnen bekannter Planeten → Position neuer Objekte



Dynamische Evidenz für Dunkle Materie

F. Zwicky 1933
→ Probleme bei
Galaxienclustern

→ galaktische
Rotationskurven

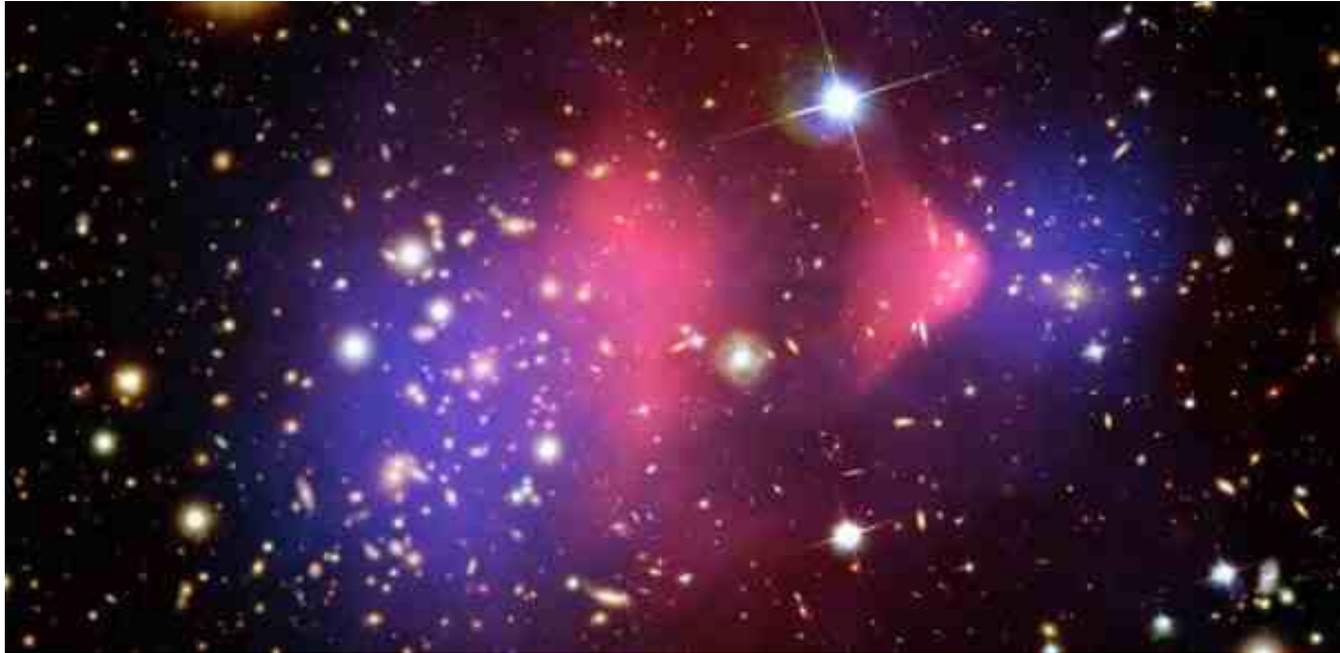


→ Galaxien haben ein großes DM-Halo

Analog: Vergleich von simulierten und
realen Strukturen zeigen das selbe
Problem auf größten Skalen

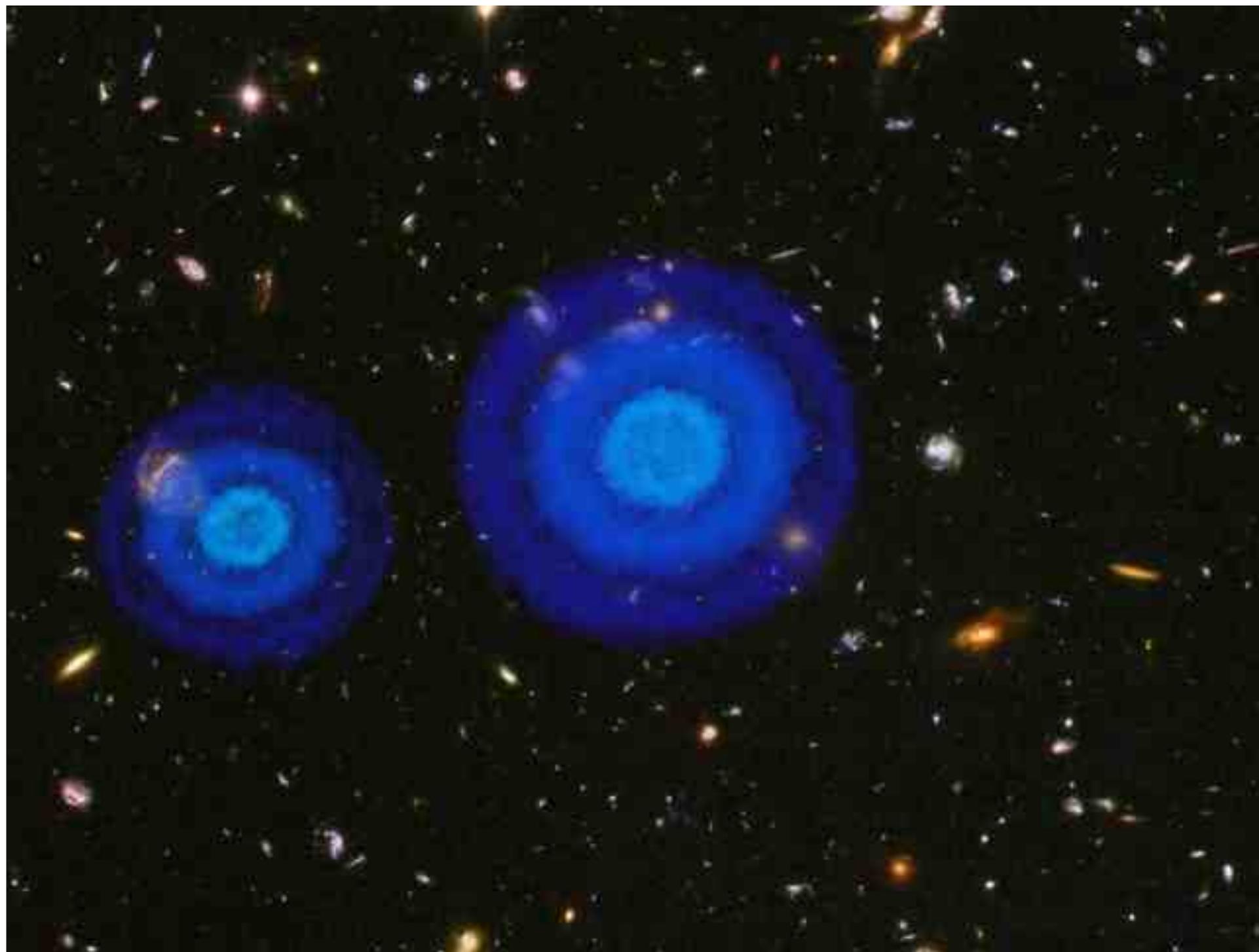
Das Bullet Cluster (1E 0657-56)

Kollidierende Galaxiencluster = Sterne, Gas, .., DM ; 10^6 km/h



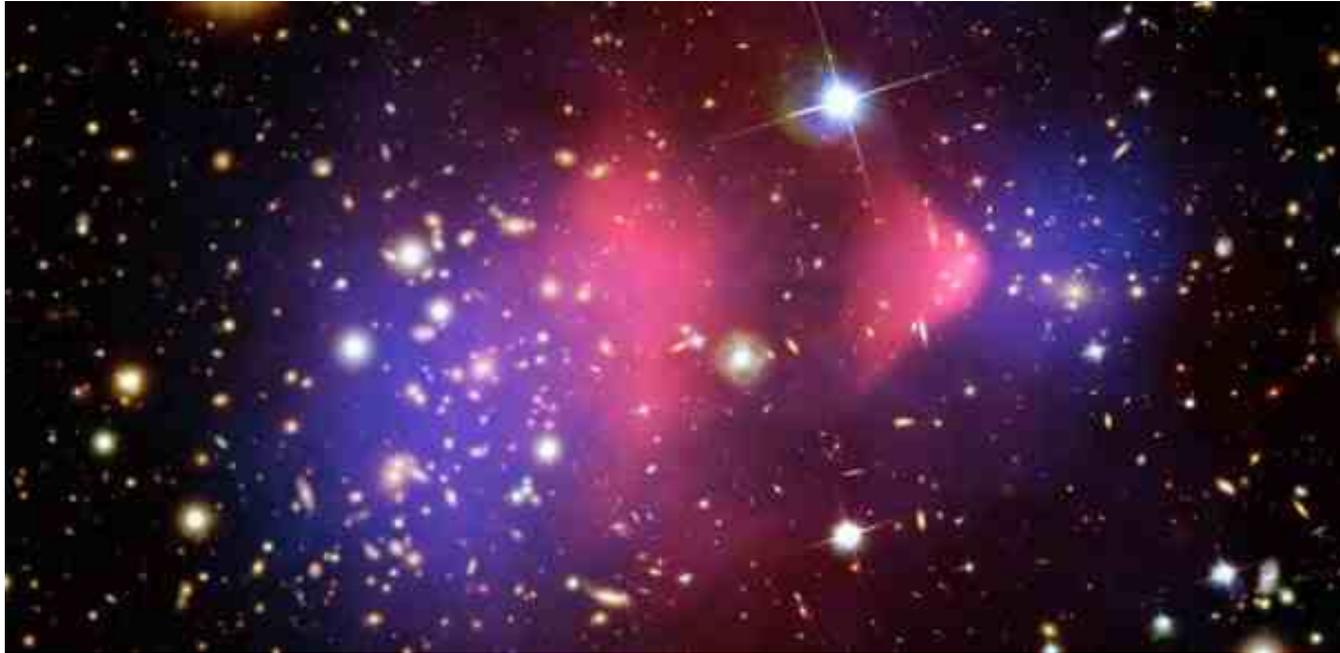
Unterschiedliche Streuung von

- **sichtbarer Materie** → **Röntgenstrahlung im Zentrum**
- **dunkler Materie** → **durchdringt ungebremst**



Das Bullet Cluster (1E 0657-56)

Kollidierende Galaxiencluster = Sterne, Gas, .., DM ; 10^6 km/h



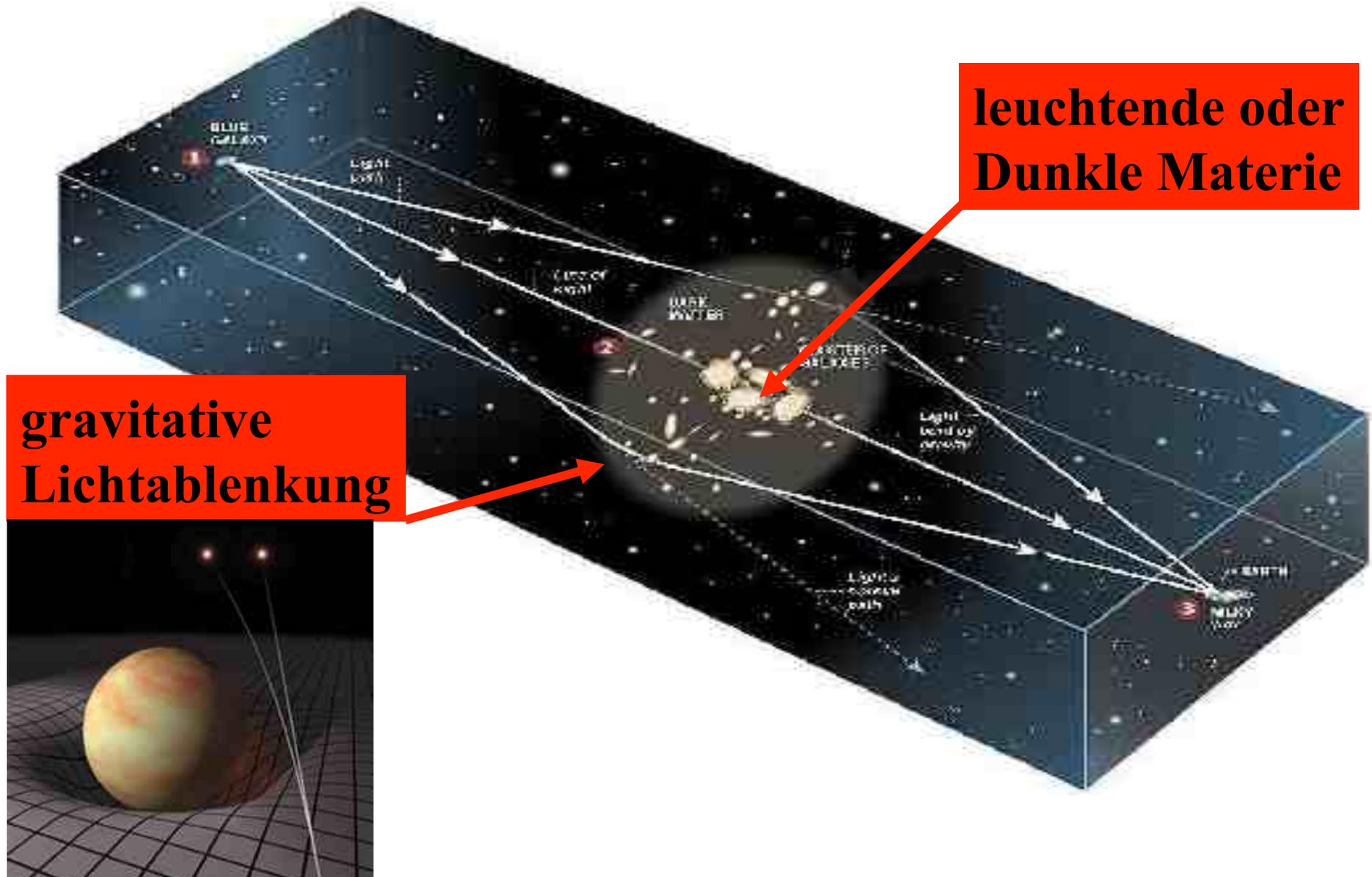
Unterschiedliche Streuung von

- **sichtbarer Materie** → **Röntgenstrahlung im Zentrum**

- **dunkler Materie** → **durchdringt ungebremst**

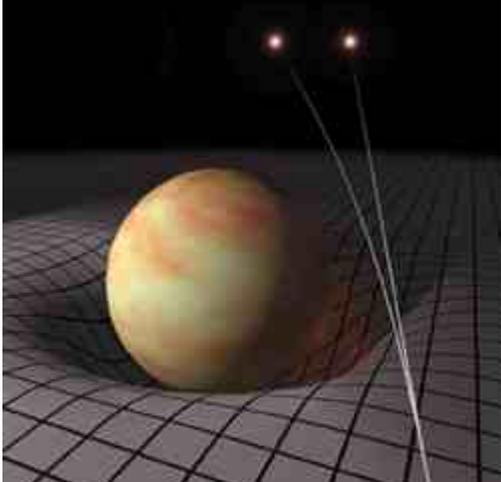
→ **Versatz zwischen sichtbarer (baryonischer) Materie (rot) und dem Gravitationszentren (blau)**

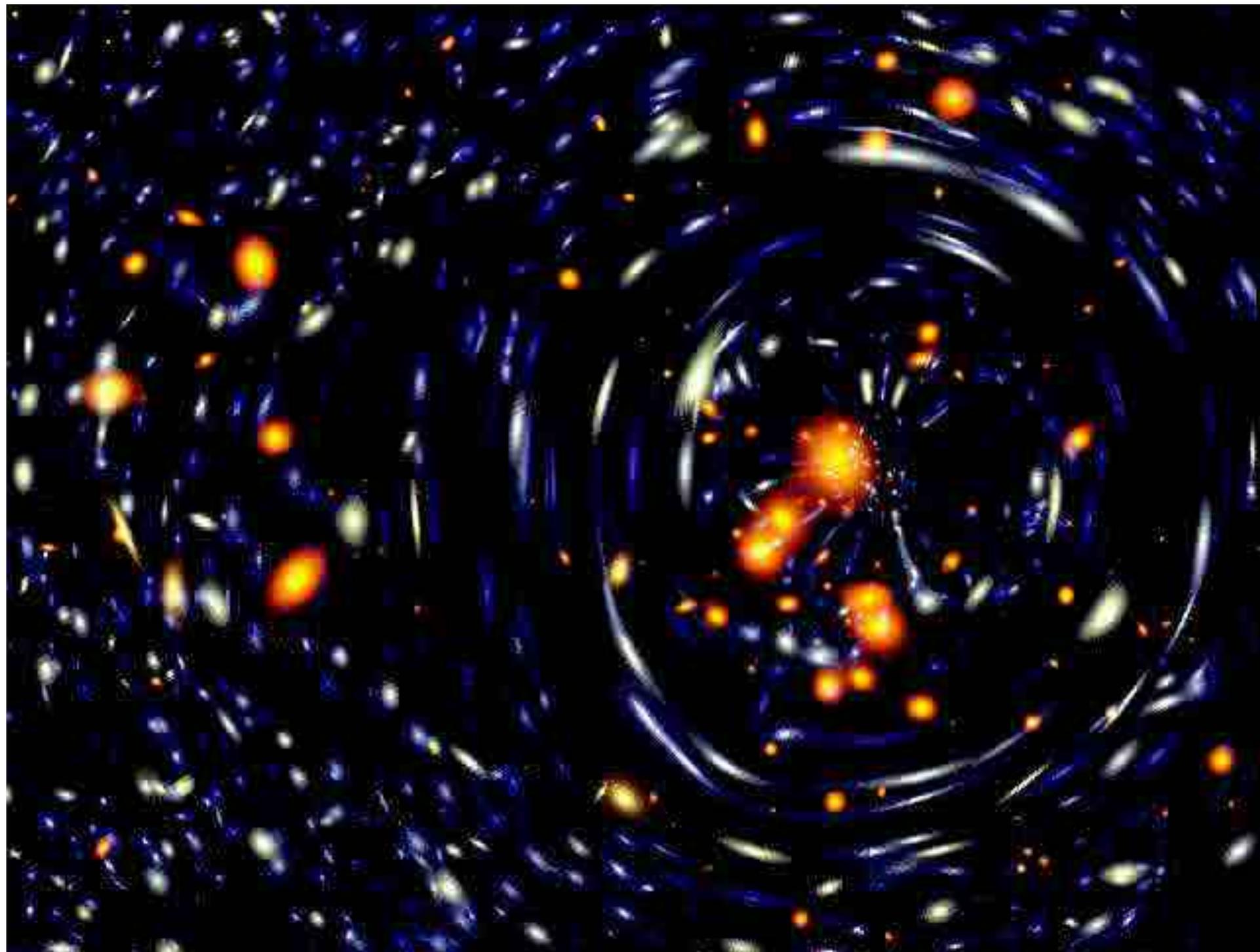
Eine weitere Methode: Gravitationslinsen



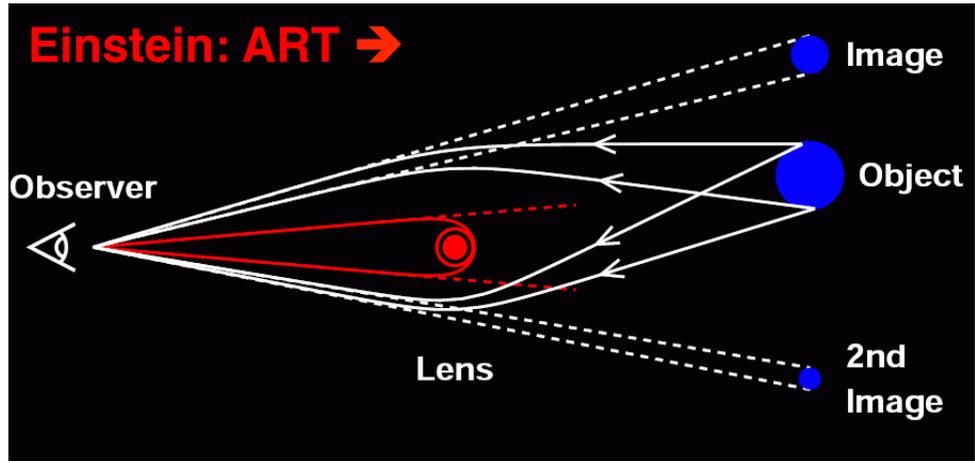
leuchtende oder
Dunkle Materie

gravitative
Lichtablenkung

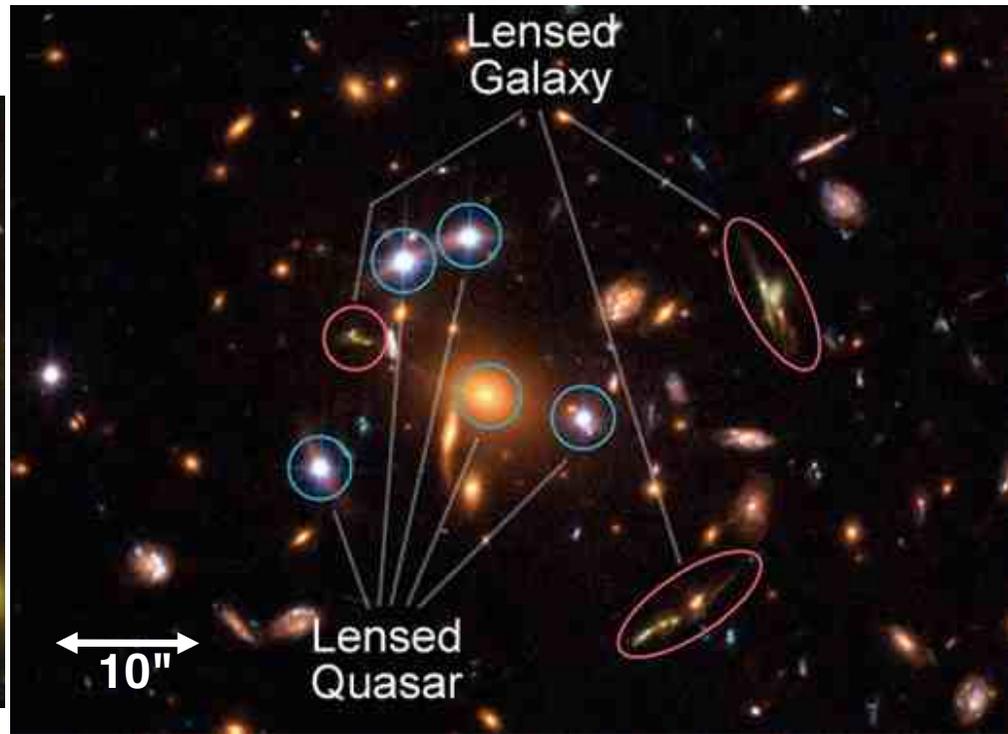
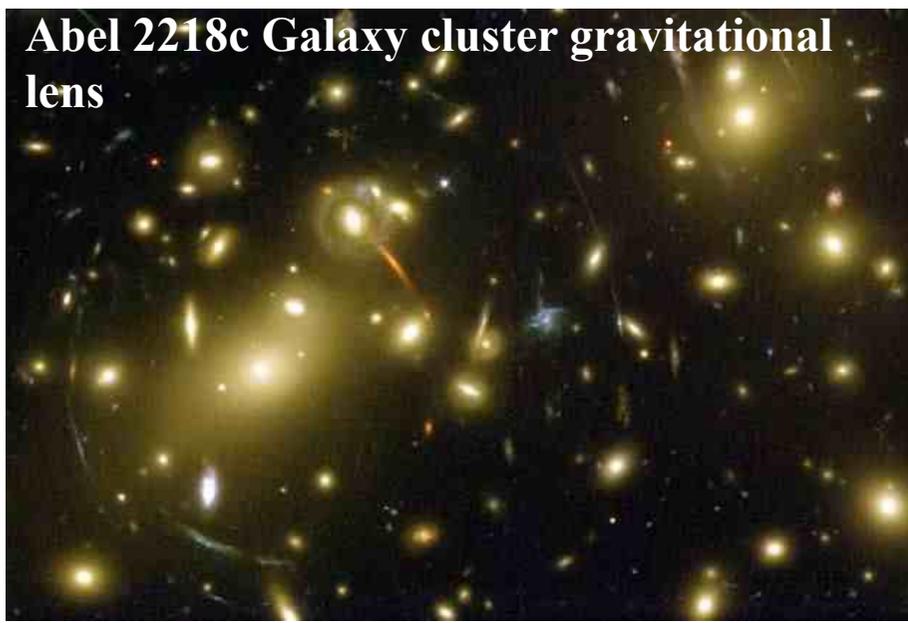




Gravitationslinsen \leftrightarrow Materieverteilung

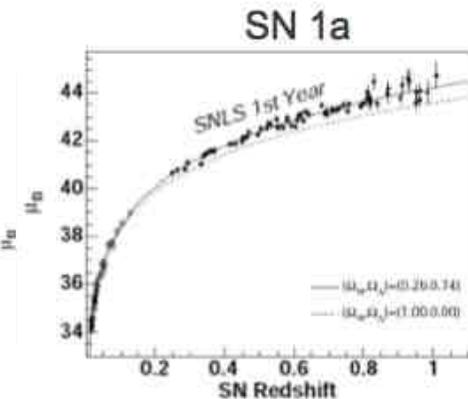
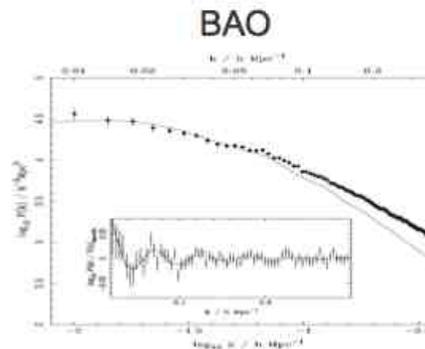
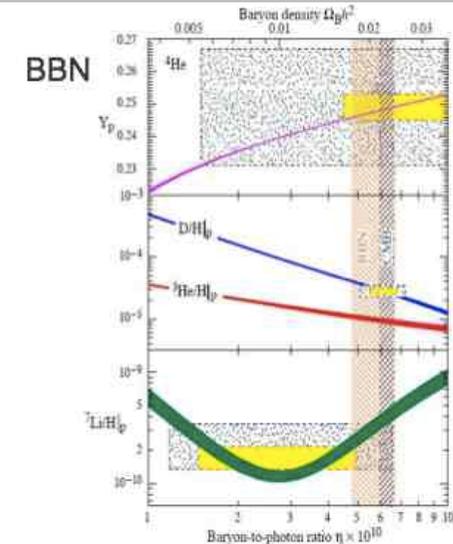
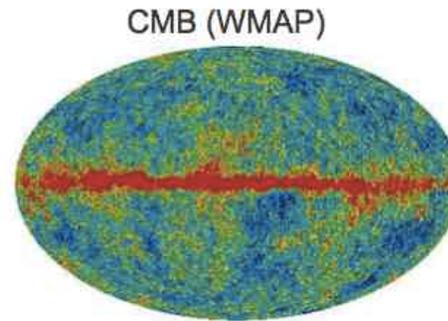


Galaxy cluster SDSS J1004+4112
HST AFT/WFC



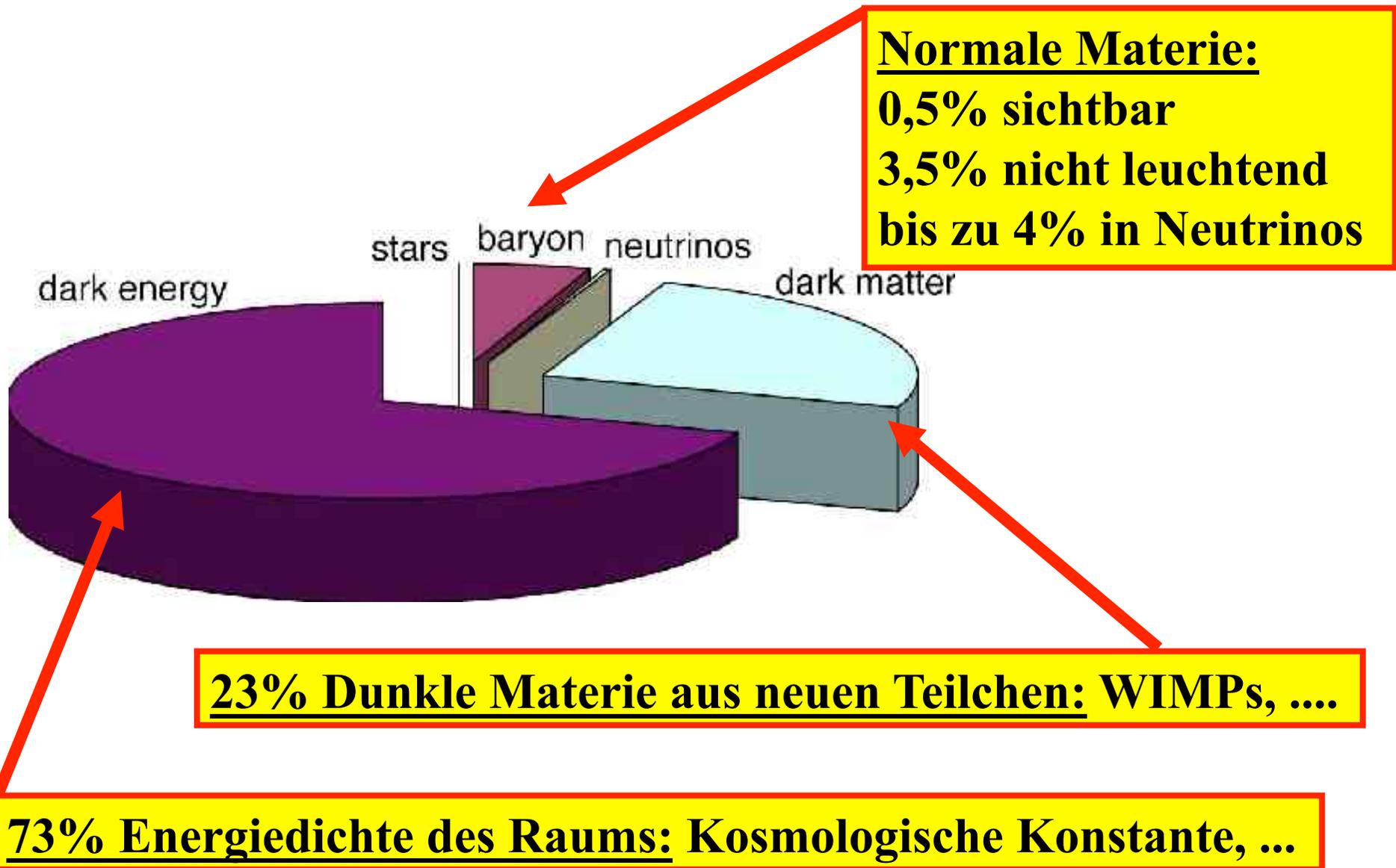
Weitere Hinweise für Dunkle Materie

- Galaktische Rotationskurven
- Galaxiencluster & GR lensing
- Bullet Cluster
- Geschwindigkeitsdispersion von Galaxien
- Kosmischer Mikrowellenhintergrund
- „Baryon Acoustic Oscillations“
- Typ Ia Supernovae Abstandsmessungen
- Big Bang Nukleosynthese (BBN)
- Lyman-alpha forest
- Kosmische Strukturbildung
- ...



➔ **Konsistentes Bild: Sehr viel dunkle Materie!**

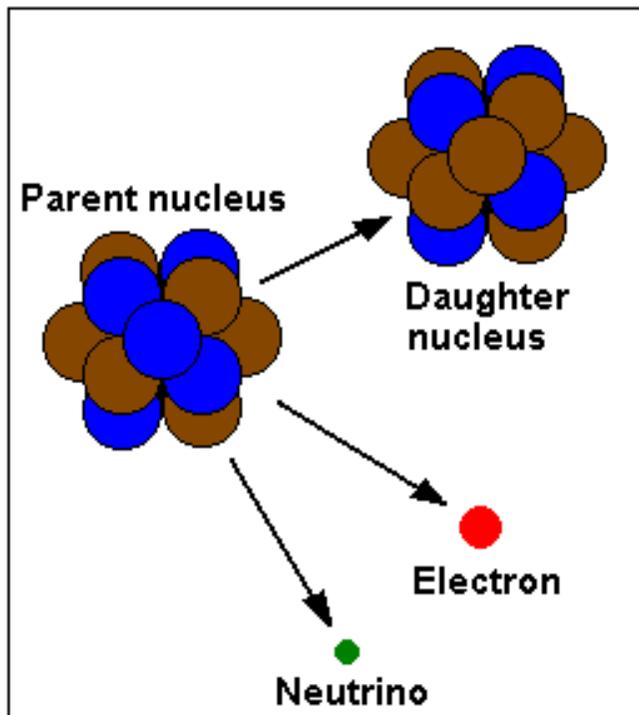
Kosmische Massenbilanz



Unsichtbares sichtbar gemacht: Neutrinos

Neutrinos: Elektrisch neutrale Teilchen

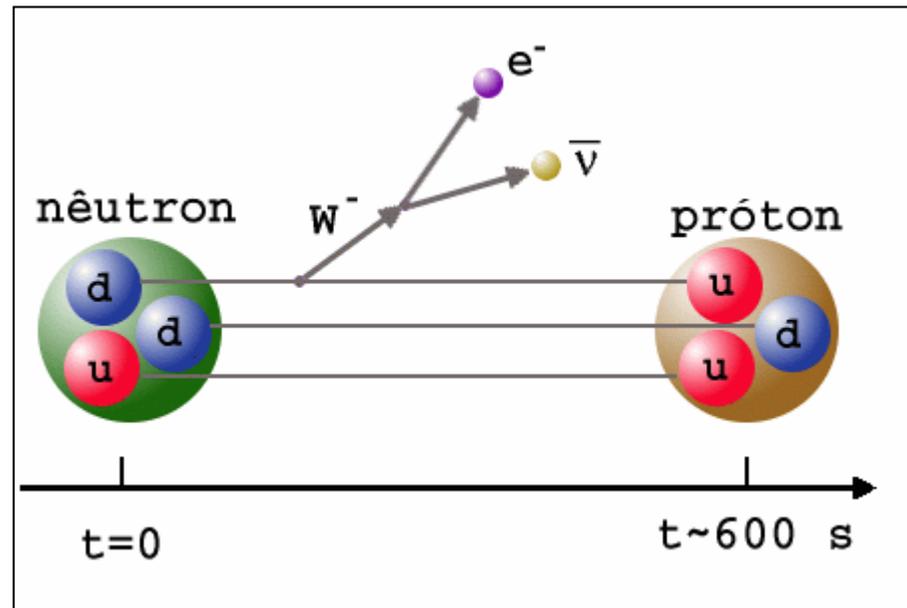
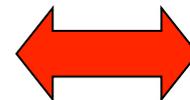
β -Zerfall (Radioaktivität)



W.Pauli:

Energie- & Impuls-Erhaltung
beim β -Zerfall:

- neues Teilchen = Neutrino
- unsichtbar, da $Q=0$

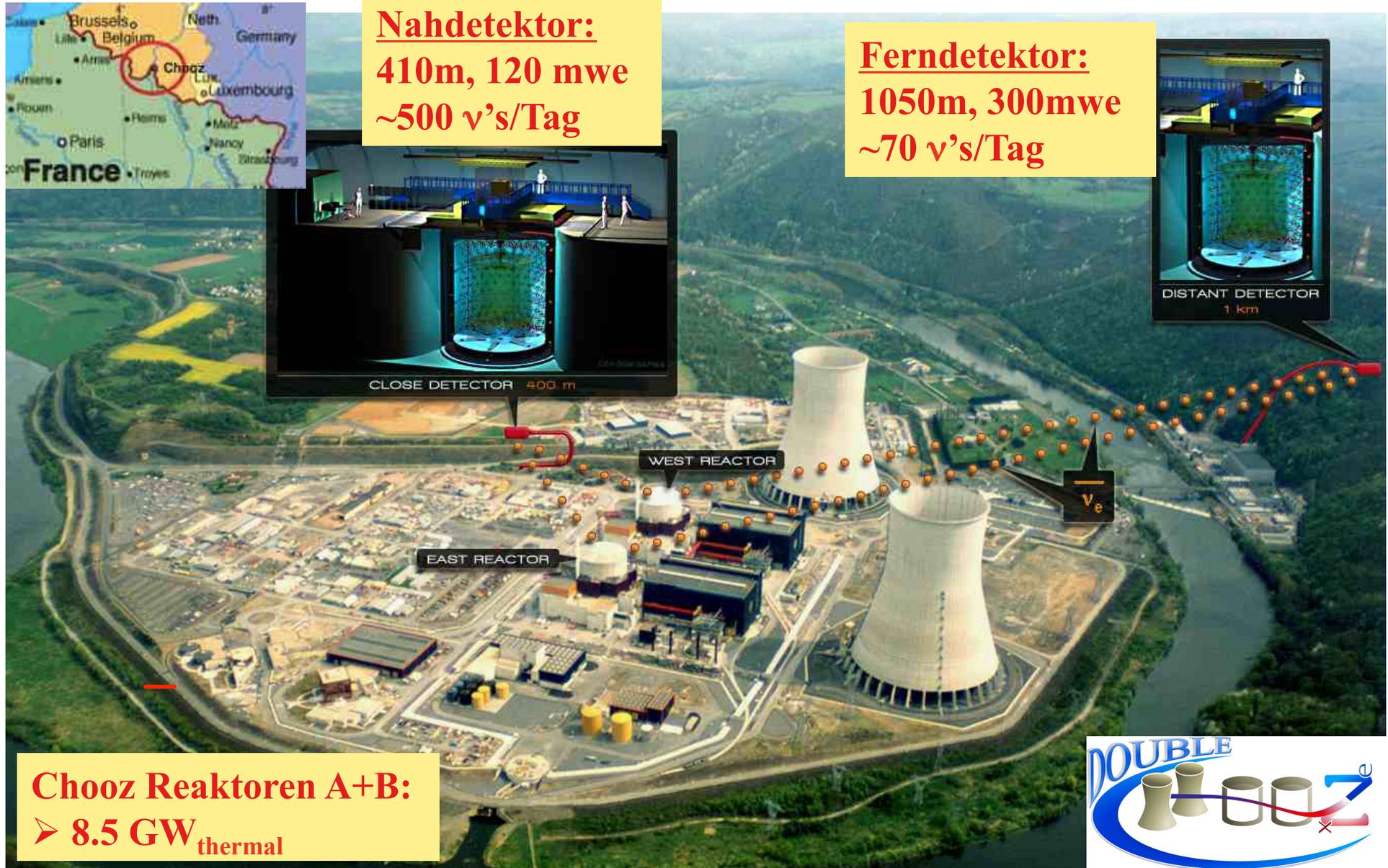
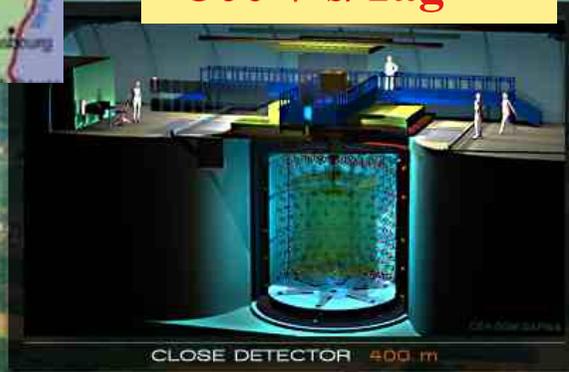


Das Double Chooz Experiment



Nahdetektor:
410m, 120 mwe
~500 ν 's/Tag

Ferndetektor:
1050m, 300mwe
~70 ν 's/Tag

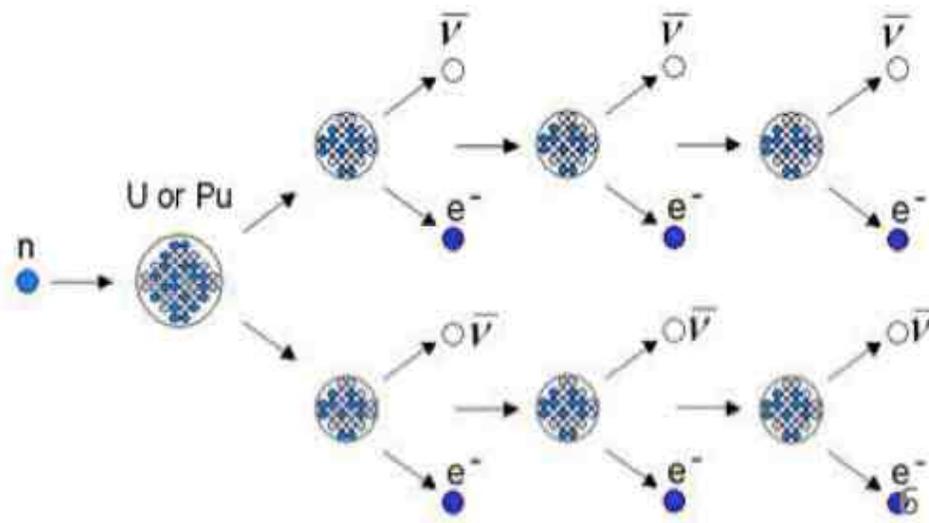


Chooz Reaktoren A+B:
➤ 8.5 GW_{thermal}

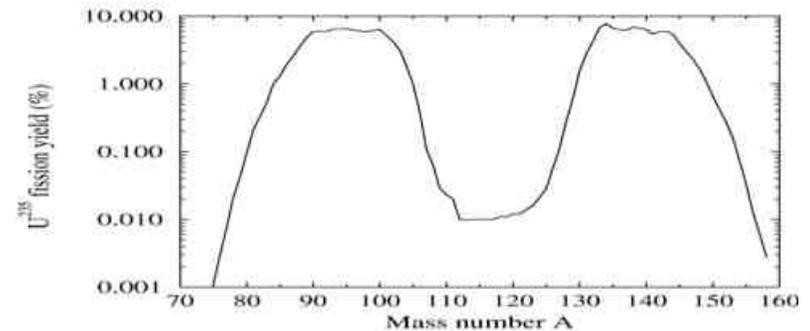


Kernreaktoren als Antineutrinoquelle

- Reaktoren haben einige Gigawatt (GW) thermische Leistung
- Einige Prozent davon
 - ➔ fliegen in Form von Antineutrinos weg
 - ➔ $2 \cdot 10^{21} \bar{\nu}/s \leftrightarrow O(1 \text{ kW/m}^2) @ \text{Zaun}$

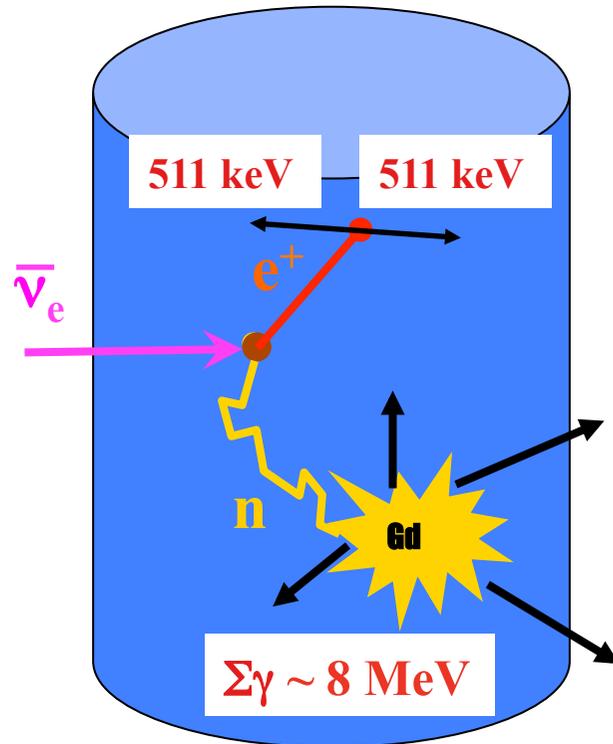


Beispiel: Spaltung von U^{235}



- Energiespektrum der Neutrinos berechenbar und messbar:
 - a) e^- -Spektrum von U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241}
 - b) Nahdetektor = Referenzmessung

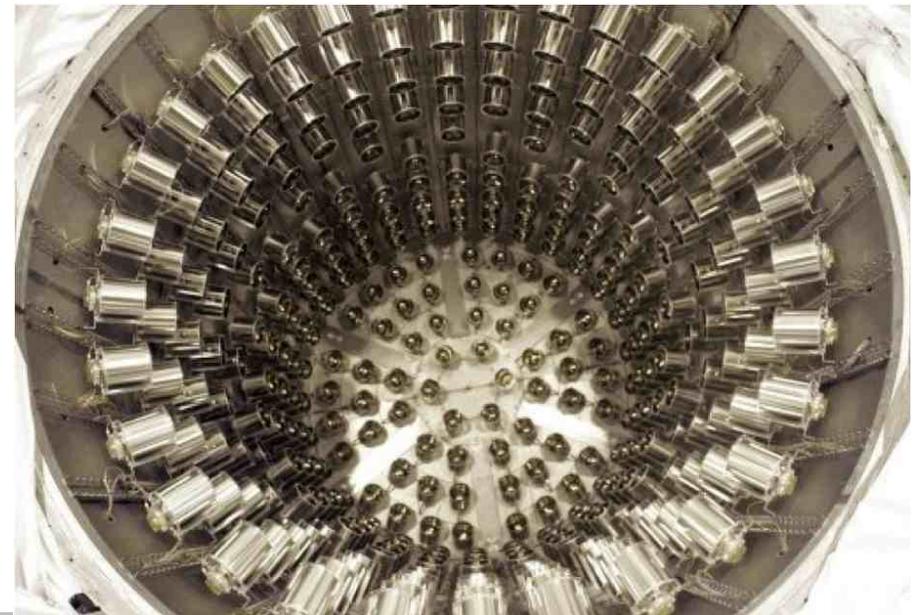
Anti-Neutrino-Nachweis: Inverser β -Zerfall



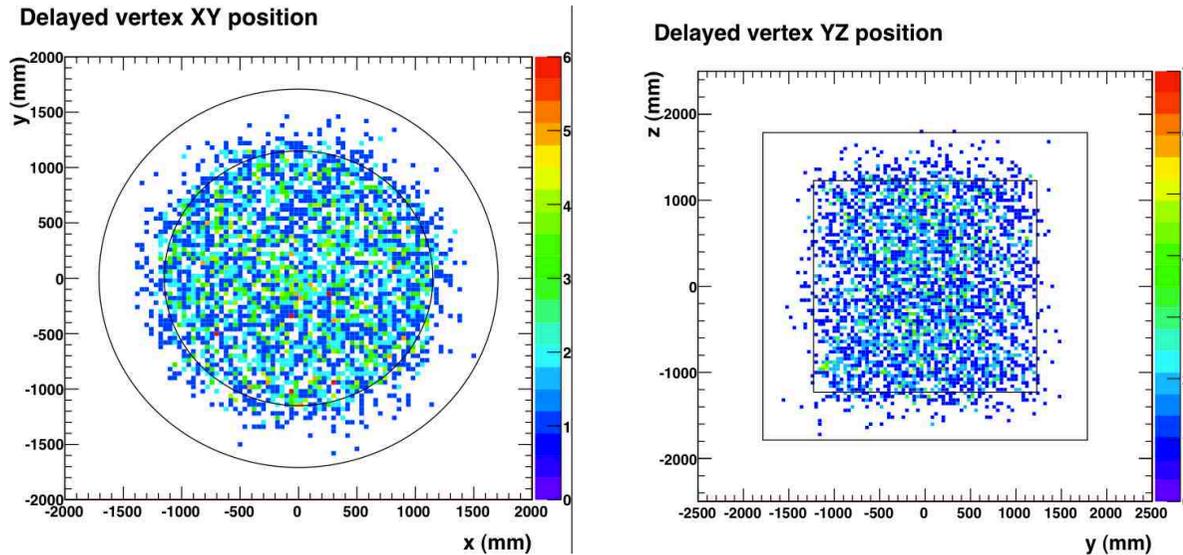
promptes e^+ -Signal

Verzögertes Photon
vom n-Einfang
→ Gadolinium doping

→ Beobachtung der charakteristischen
Signatur mit Photovervielfachern



Antineutrinos sichtbar gemacht



- Ereignisse in 4 Monaten → es gibt ‘unsichtbare Teilchen’
→ inverse Streuprozesse machen diese Teilchen sichtbar
- Es gibt 330 Neutrinos / cm³ im gesamten Universum!
→ kleiner Beitrag zur Dunklen Materie
- andere unsichtbare Teilchen ↔ Dunkle Materie

Woraus besteht Dunkle Materie?

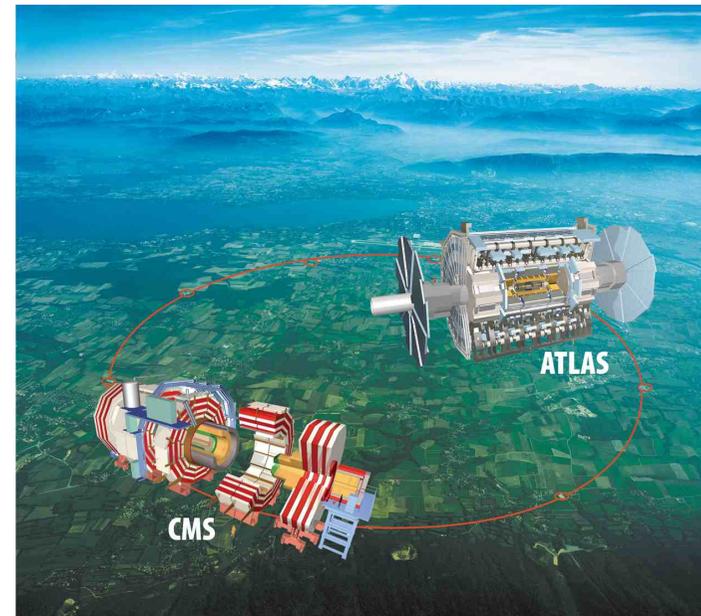
Teilchenphysik und Dunkle Materie

- Standard Model der Teilchenphysik ist nicht komplett
→ „Beyond the Standard Model” (BSM)
- Viele BSM-Szenarien sagen neue Teilchen vorher die perfekte Kandidaten für Dunkle Materie sind!
- Erlaubte Wechselwirkung für DM-Teilchen:
WIMP = **W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**article
GIMP = (only)**G**ravitationally **I**nteracting **M**assive **P**article

	WIMP	GIMP
Elektromagnetismus	-	-
Starke Wechselwirkung	-	-
Schwache Wechselwirkung	X	-
Gravitation	X	X

Das WIMP-Wunder

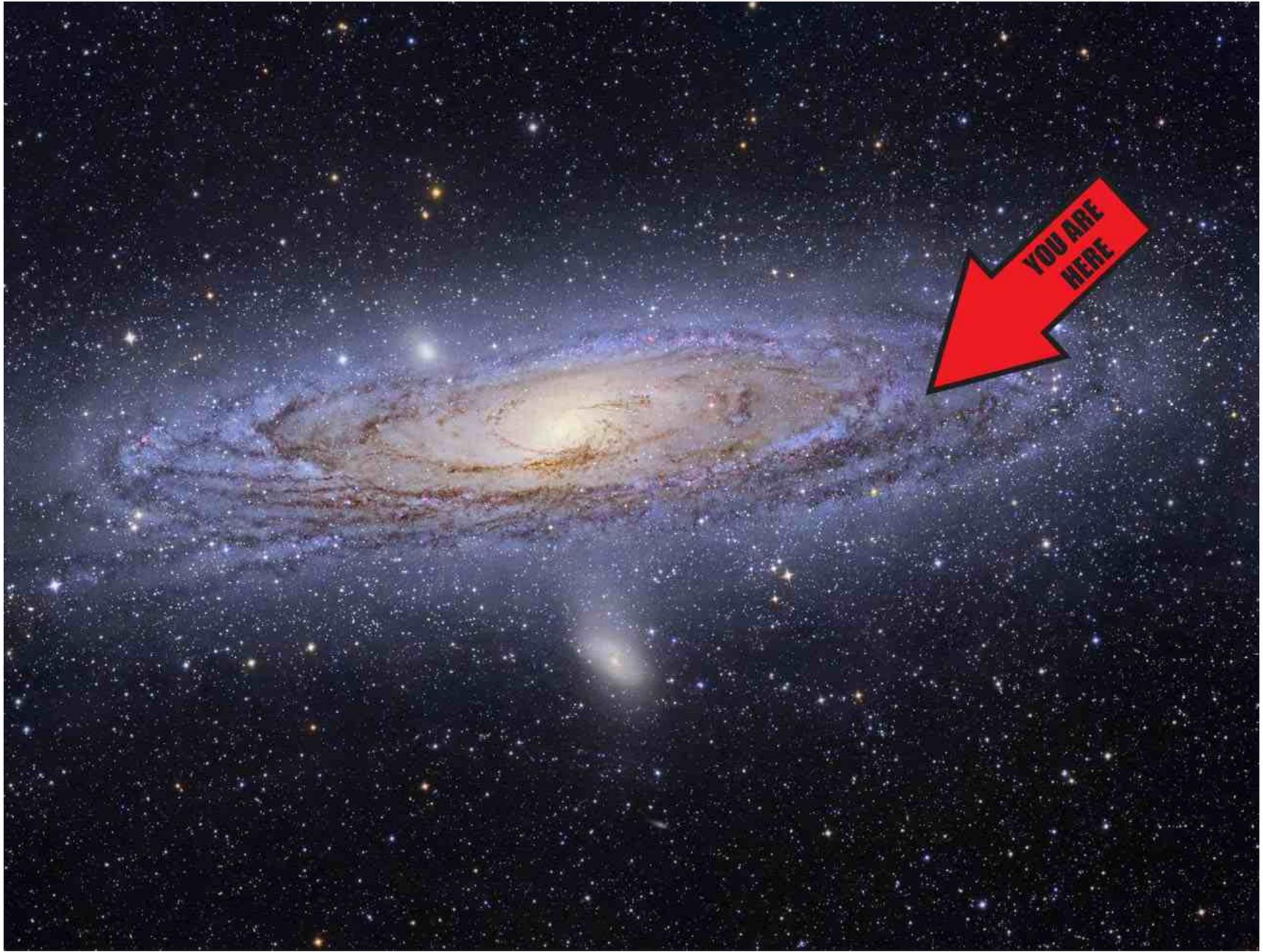
- **WIMPs motiviert durch BSM-Physik → Massen $O(100 \text{ GeV})$**
- **Produktion im Urknall**
Wunder: \approx korrekte Häufigkeit ergibt sich aus dem Urknall
- **Kandidaten müssen hinreichend langlebig sein ($\geq t_{\text{Universum}}$) → OK**
- **Synergien mit Beschleunigerphysik**



Der WIMP-Wind

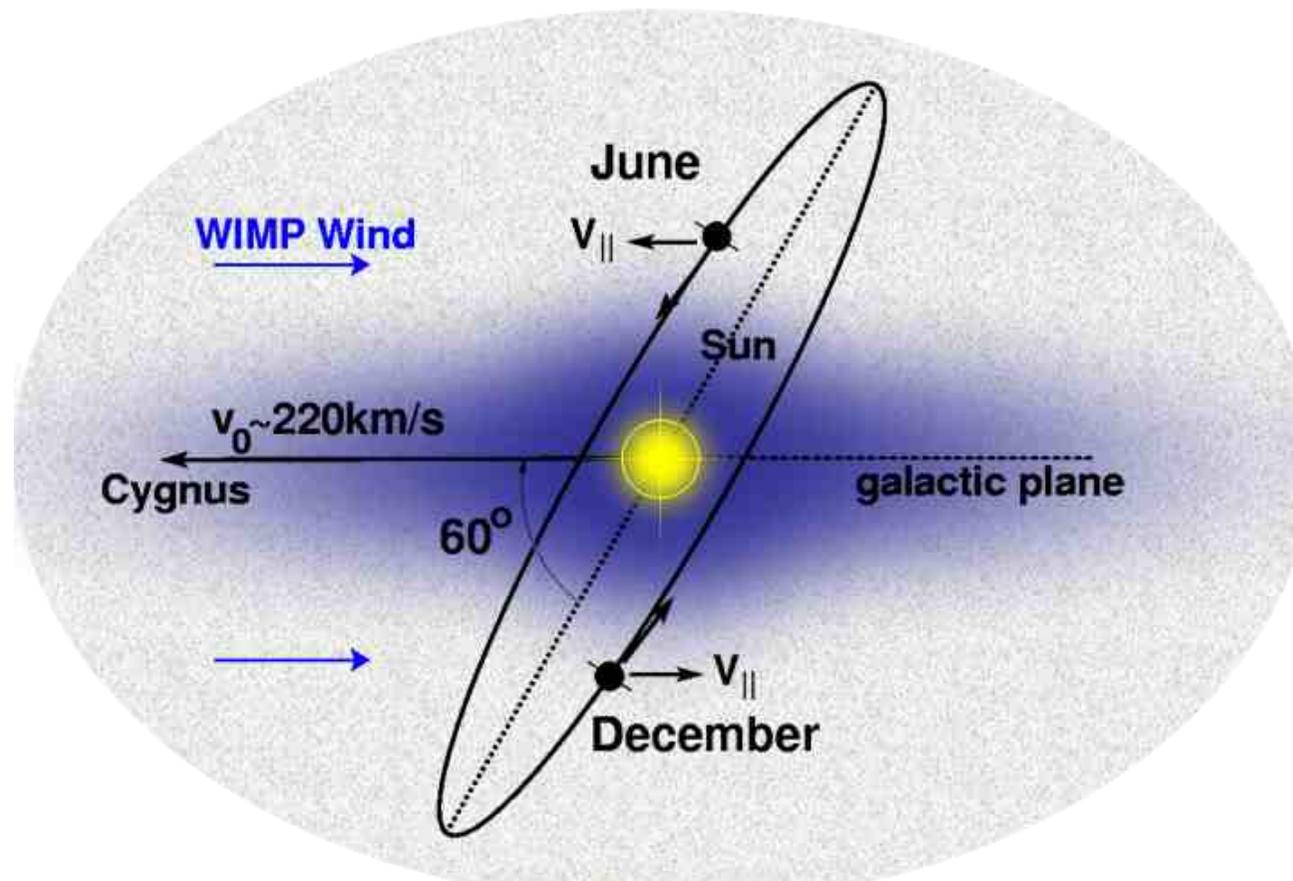
Dunkle Materie in unserer Galaxie





Der WIMP Wind

- Unser Sonnensystem ~ 8.5 kpc vom Zentrum der Galaxie
- ~ 220 km/s “Fallgeschwindigkeit” in Richtung von Cygnus \rightarrow **“WIMP-Wind” = Teilchenfluss (Masse, ...)**



Wie man Dunkle Materie sichtbar macht

Eine Option: Dirkter Nachweis durch Streuung

- WIMPs sind **wie unsichtbare Billardkugeln** die selten mit sichtbaren Kugeln (Atomen) wechselwirken
- **Maximaler Impulsübertrag:**
 - ➔ **Masse der sichtbaren Kugeln \simeq WIMP Masse**



Erschwernis: Umweltradioaktivität

- ➔ weitere quasi unsichtbare Kugeln die nichts mit DM zu tun haben
 - von der Bande (Detektormaterial)
 - Vom Tisch (Reinheit der Atome)

➔ **Untergrundunterdrückung:**

- **ultra-reine Materialien**
- **Unterdrückung der Höhenstrahlung**

Direkter Nachweis von Dunkler Materie

Suche nach extrem seltenen DM Streuereignissen vom WIMP-Wind über dem Untergrund

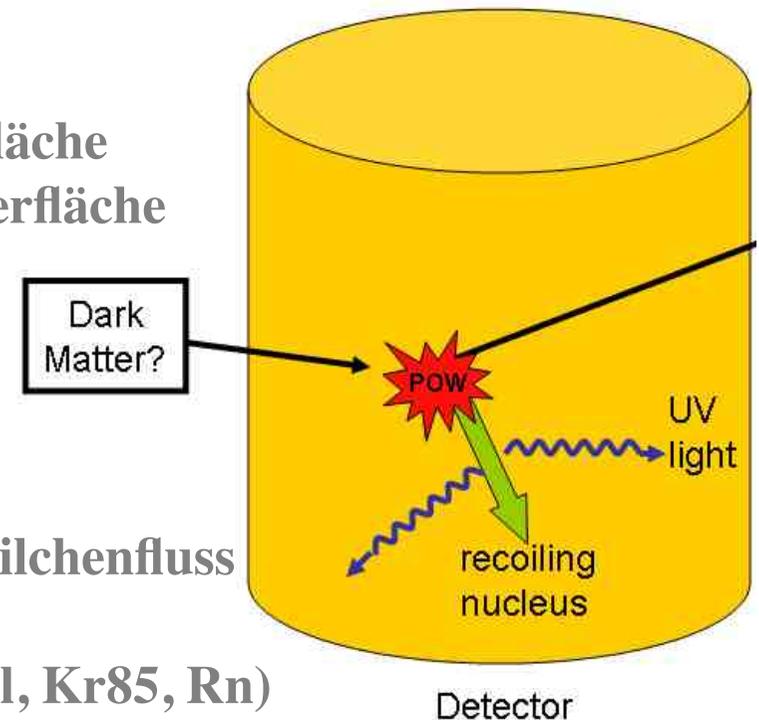


Signal: Genügend aktive Detektormasse

- Licht \rightarrow Szintillation \rightarrow Lichtsensoren @ Oberfläche
- Ionisation \rightarrow geladene Teilchen \rightarrow Drift zur Oberfläche
- Phononen \rightarrow Temperaturanstieg
- \rightarrow Kombination zur besseren Diskriminierung
- \rightarrow geeignete Flüssigkeit: Flüssiges Xenon

Niedriger Untergrund

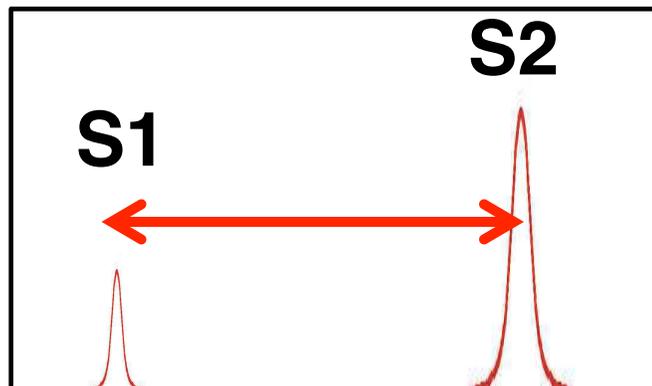
- Untergrundlabor \leftrightarrow vermeide kosmogenen Teilchenfluss
- Extrem saubere Detektorkomponenten
- \rightarrow vermeide minimale Radioaktivität (U, Th, K, Tl, Kr85, Rn)
 - Detektor und Target-Material
 - Aktive Untergrundunterdrückung (fiducialization \leftrightarrow TPC)



Zwei-Phasen Xenon TPC

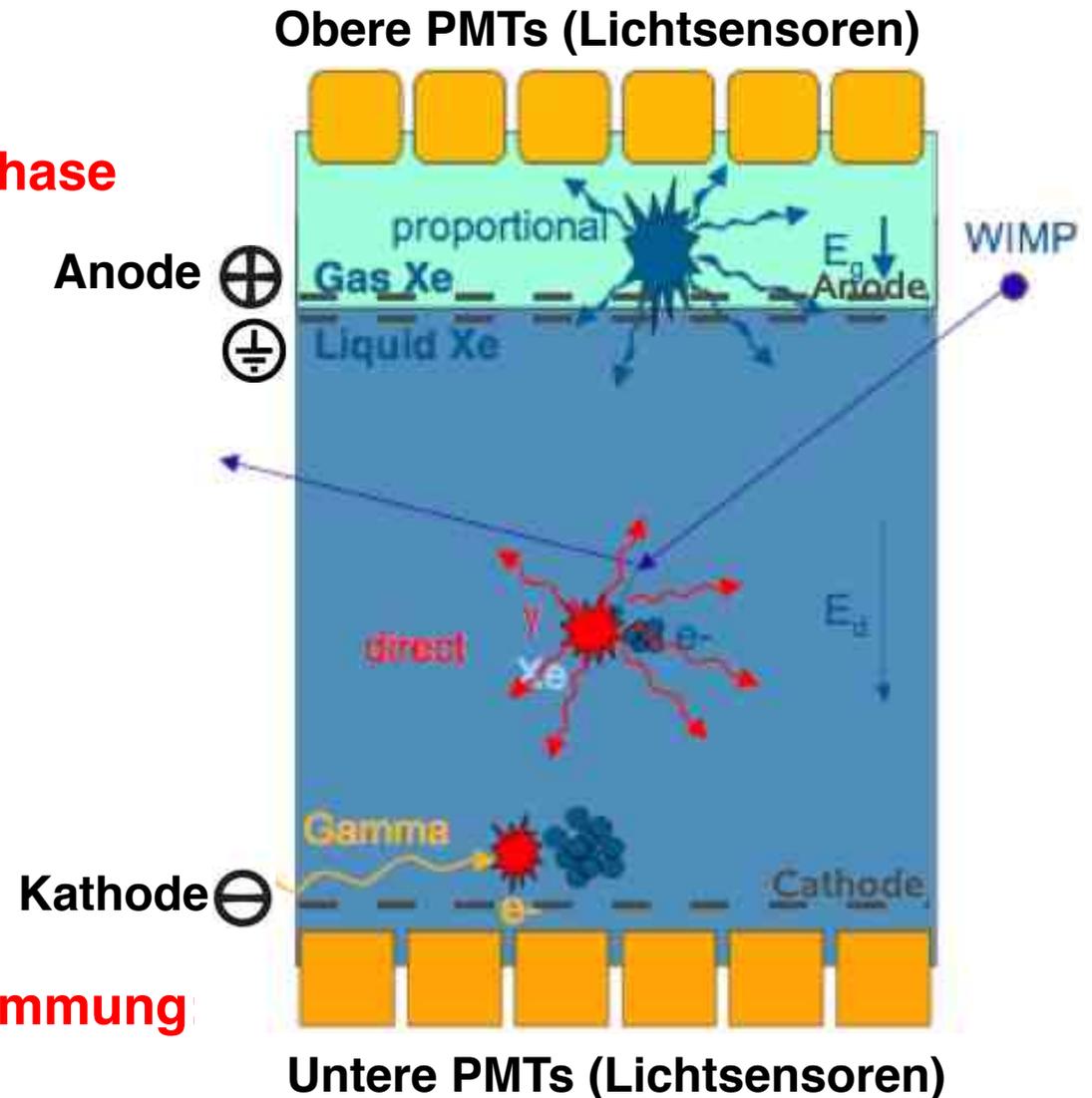
WIMP-Streuung:

- 1) direktes Lichtsignal \rightarrow S1
- 2) drift der Elektronen zu Gas-phase
 $1.74 \text{ mm}/\mu\text{s}$
- 3) Zweites Lichtsignal \rightarrow S2



- Drift-Zeit $\rightarrow z$
- PMT-Signalverteilung $\rightarrow x, y$
- Pulshöhe, Form, ...

\rightarrow Exzellente 3D Positionsbestimmung
S2 hit pattern $\delta r < 3 \text{ mm}$
Drift-Zeit $\delta z < 300 \mu\text{m}$



Die XENON Kollaboration



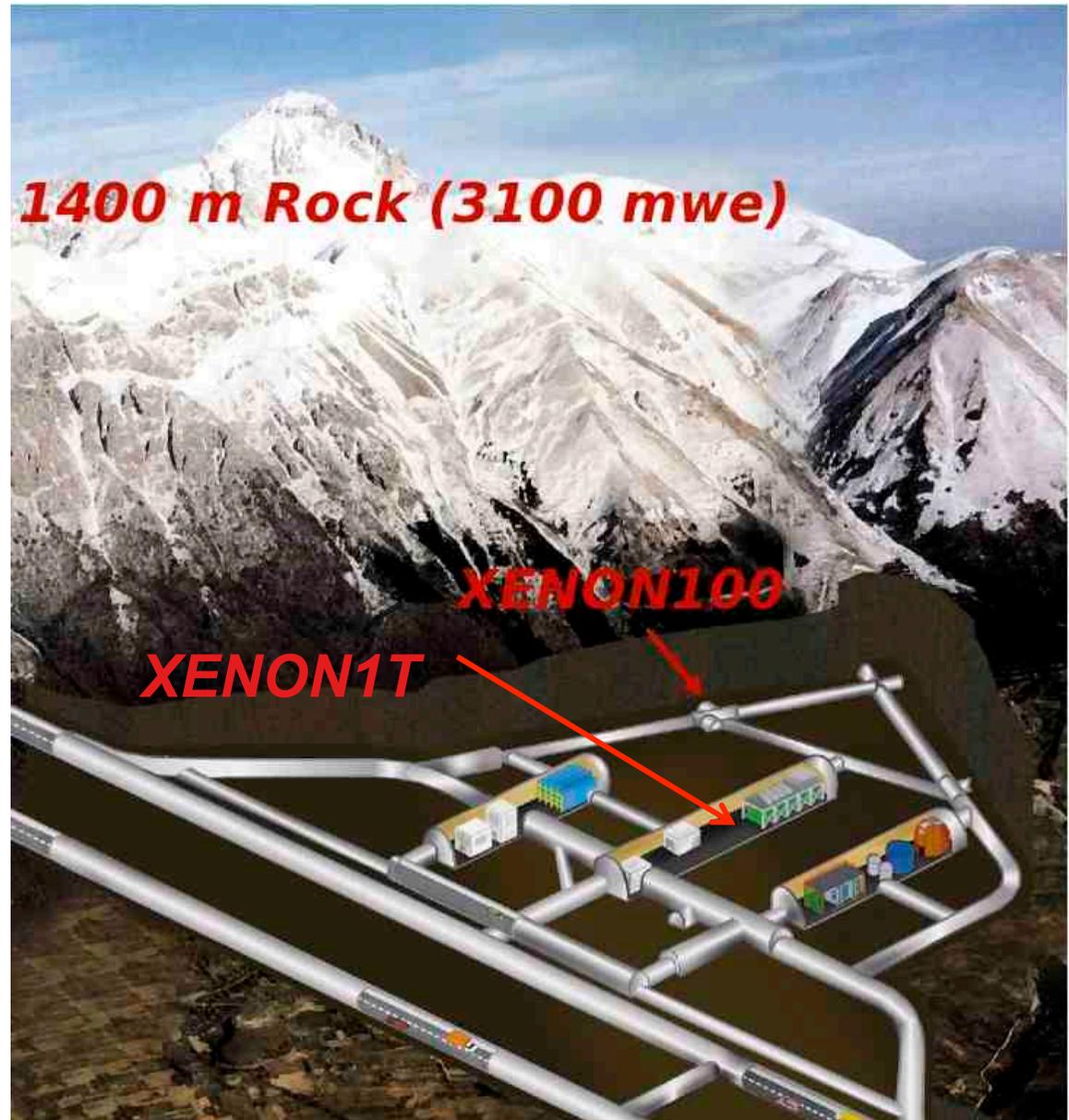
University of California Los Angeles
Rice University Houston
Purdue University
Columbia University New York
Universidade de Coimbra
Subatech Nantes
NIKHEF Amsterdam
Willhelms Universität Münster

J. Gutenberg-Universität Mainz
Max-Planck-Institut Heidelberg
Universität Zürich
Laboratori Nazionali del Gran Sasso
INFN e Università di Bologna
Weizman Institute Rehovot
Jiao Tong University Shanghai

XENON100 und XENON1T am LNGS

Abschirmung →

Gran Sasso
Untergrundlabor
in Italien



Bedeutung

- **Der direkte Nachweis von Dunkler Materie ist ein wichtiger Test der indirekten Hinweise**
- **Bedeutet, dass normale Materie nur ein geringer Teil des Kosmos ist**
- **Noch mehr Dunkle Energie...**
- **Ganz wichtige Konsequenzen für**
 - **Elementarteilchenphysik**
 - **Kosmologie**
 - **Selbstverständnis der Menschheit**

