

Die Suche nach der dunklen Materie

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of dark matter filaments and clusters. The filaments are depicted as thin, pinkish-purple strands that form a web-like structure. At the intersections and along the filaments, there are numerous galaxy clusters and individual galaxies, appearing as bright, multi-colored points of light. The background is a deep black space filled with a sparse distribution of stars and distant galaxies.

Sebastian Arrenberg
Universität Zürich
Particle Physics Masterclass 2009
23.03.2009

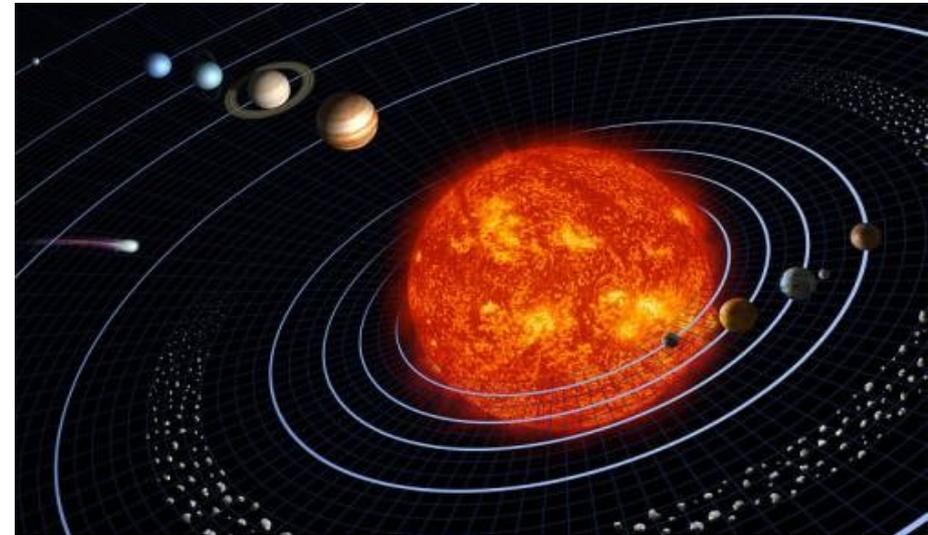
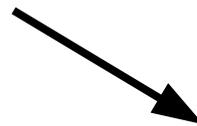
hypothetische Form von Materie

nur messbar durch gravitative
Wechselwirkung mit Materie

nicht direkt beobachtbar

Astronomische Beobachtungen:
Uranus folgt nicht der vorhergesagten Bahn!

Vorhersage der Existenz und
Position des Neptun durch
Le Verrier (1854)



1. Entdeckung von
„Dunkler Materie“

Auch Merkur folgt nicht seiner vorausberechneten Bahn.

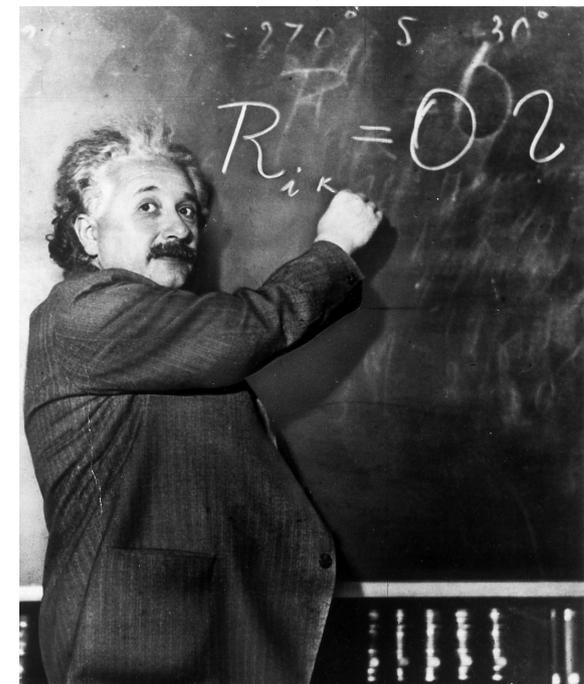
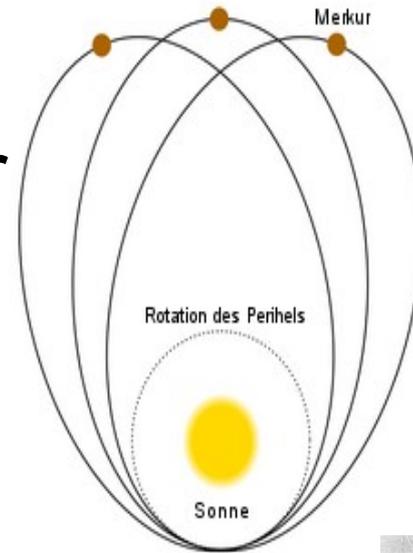
Wieder postulierte Le Verrier neuen Planeten. (1859)

Diesmal lag er falsch!

Lösung:

Newton'sches Gravitationsgesetz

Allgemeine Relativitätstheorie



Auch Merkur folgt nicht seiner vorausberechneten Bahn.

Wieder postulierte Le Verrier neuen Planeten. (1859)

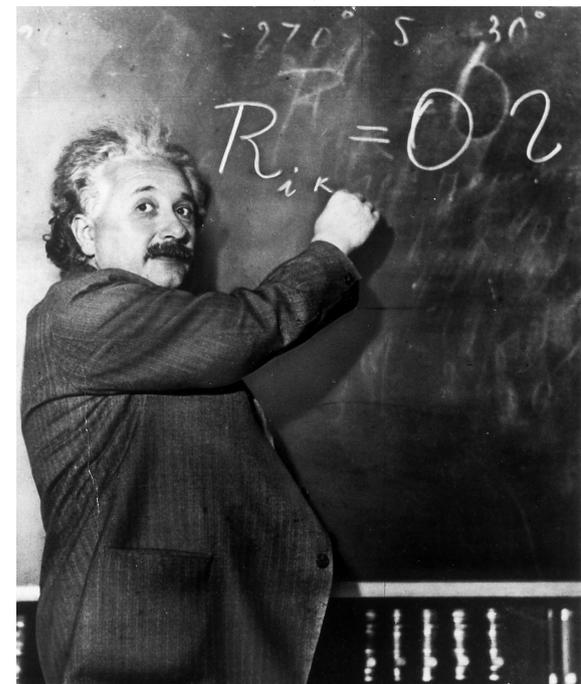
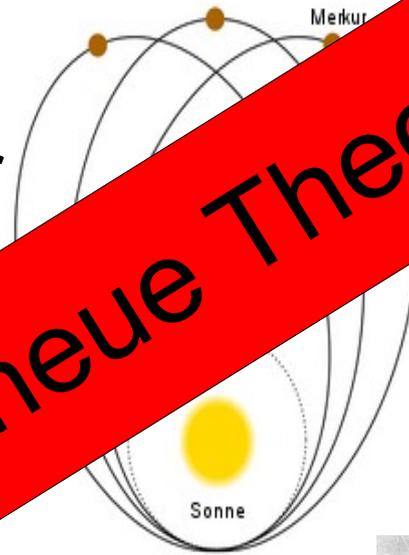
Diesmal lag er falsch

Lösung:

Einsteinsches
Relativitätsgesetz

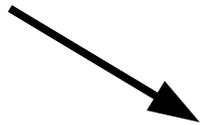
Allgemeine
Relativitätstheorie

„Neue Materie“ vs. „neue Theorie“!

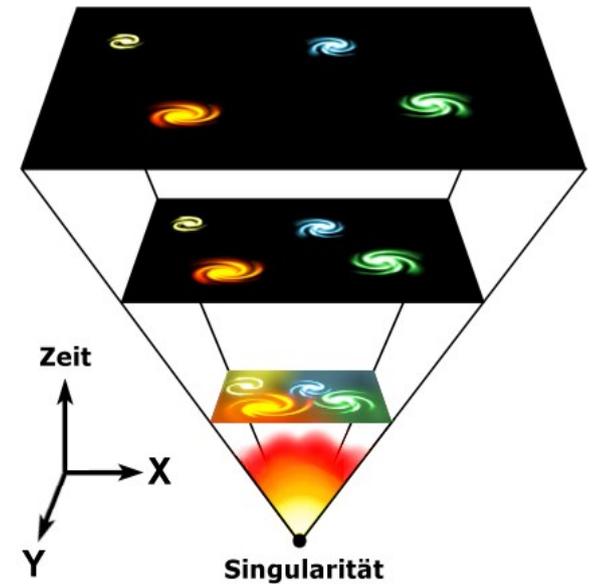


Edwin Hubble:
Universum dehnt sich aus! (1929)

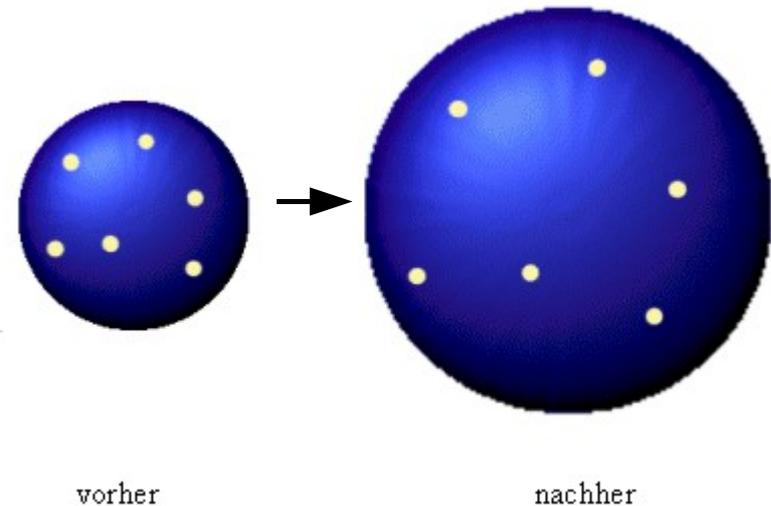
Weit entfernten Galaxien haben
höhere Geschwindigkeiten.



Urknallmodell



Expansion beschleunigt
sich mit der Zeit.

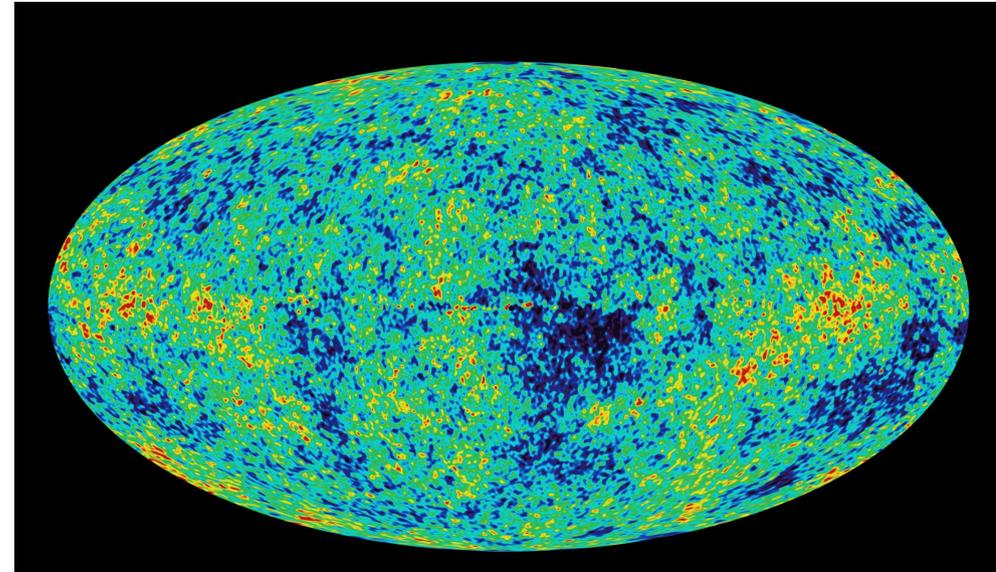
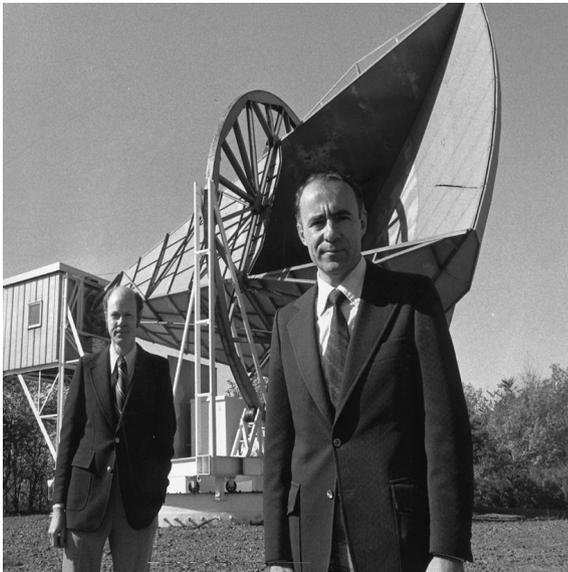


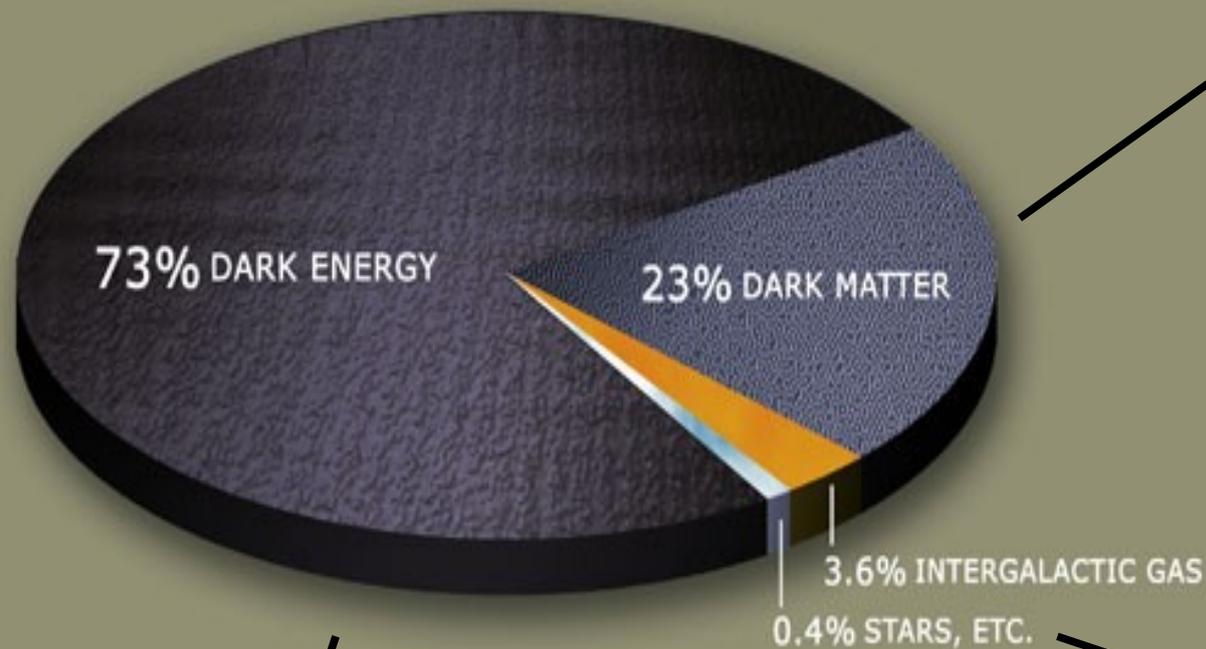
Elektromagnetische Strahlung nahezu gleicher Stärke aus allen Himmelsrichtungen ($\sim 0.1\%$ Variation)

Entdeckung durch Penzias & Wilson (1965)

Die genauesten Informationen über das Universum stammen von der Untersuchung des CMB.

Abbild des Universums ~ 400000 Jahre nach dem Urknall.





Unsichtbare
Materie

Sichtbare
Materie
(Sterne, Gas,
Plasma, Staub)

Emission von
Strahlung

Wirkt abstossend!
Beschleunigt die Expansion
des Universums!?

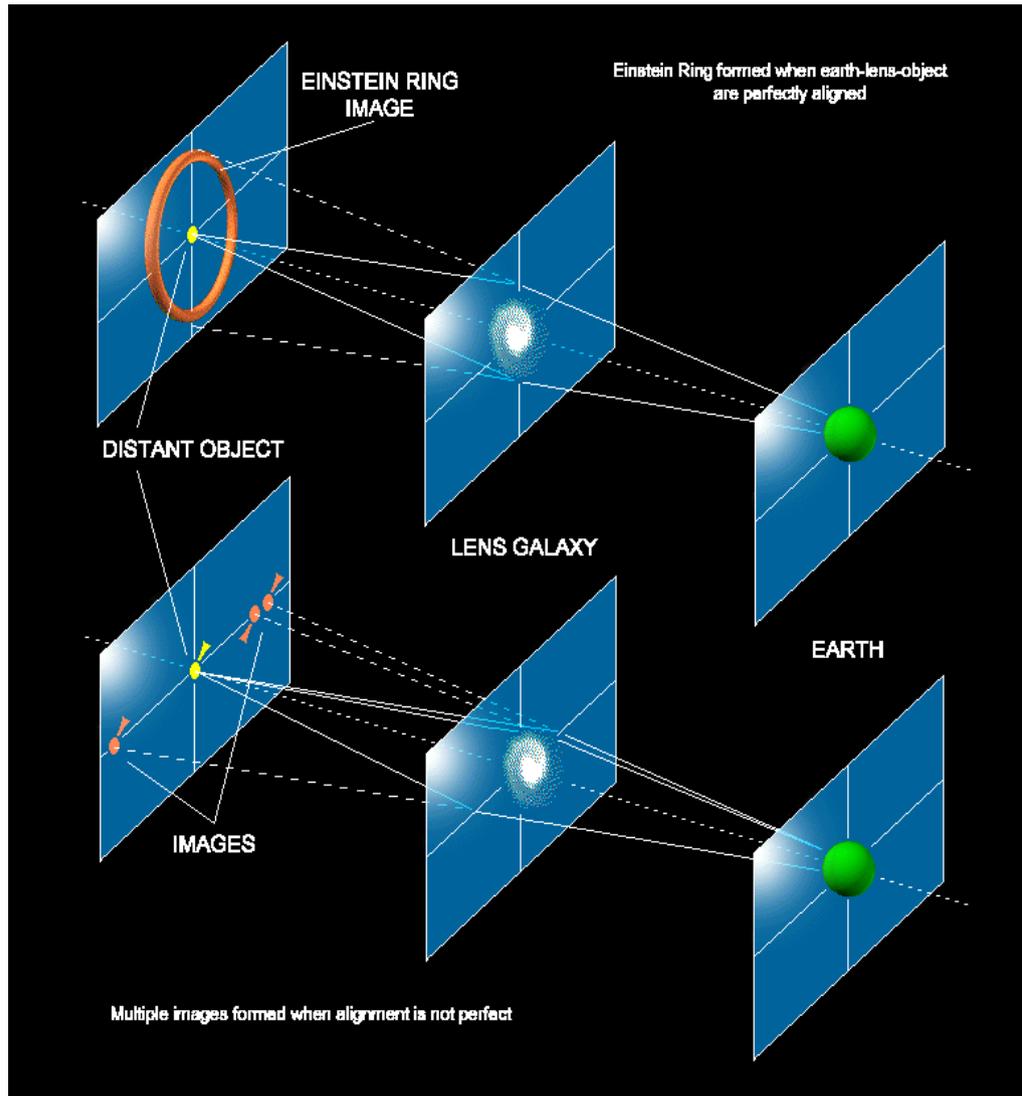
Messung der Geschwindigkeiten einzelner Galaxien im COMA Cluster durch Fritz Zwicky (1933)

Indirekte Information über Gravitationsfelder

Gesamtmasse des Clusters ist 10 mal höher als die sichtbare Masse.



Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt Lichtablenkung durch massive Objekte voraus.

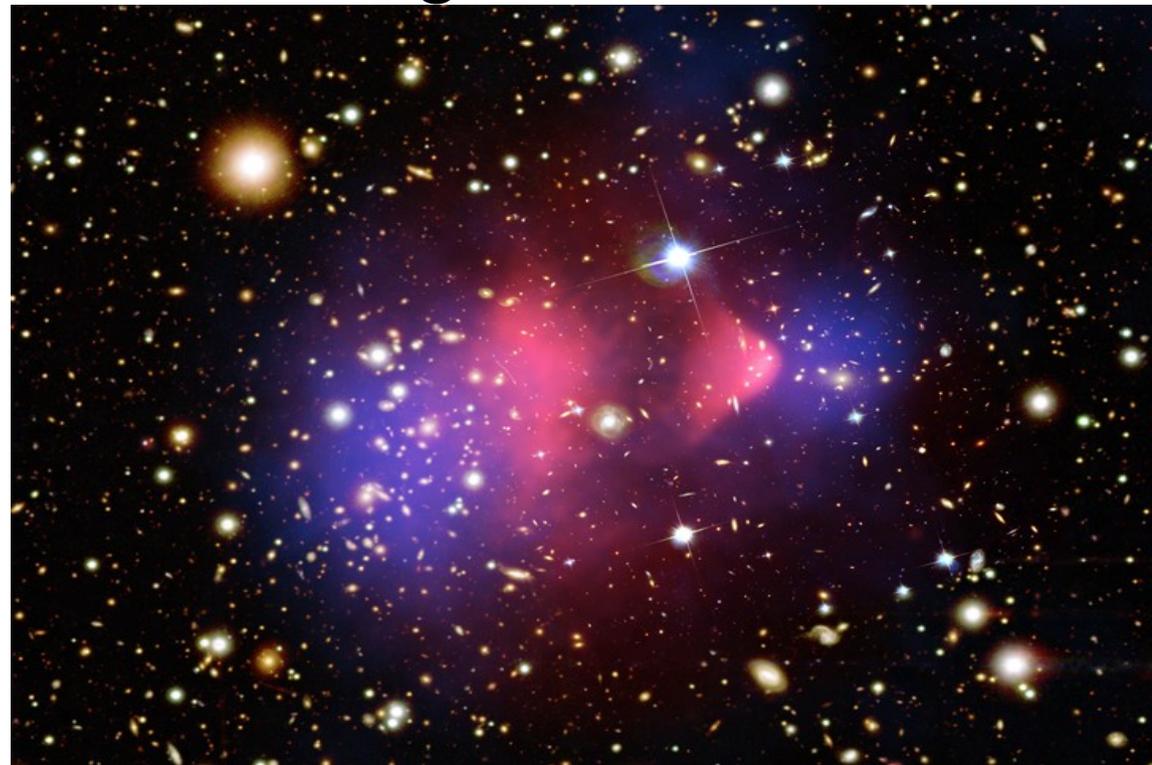


Zusammenstoß zweier Galaxien im Bullet-Cluster vor etwa 100 Millionen Jahren

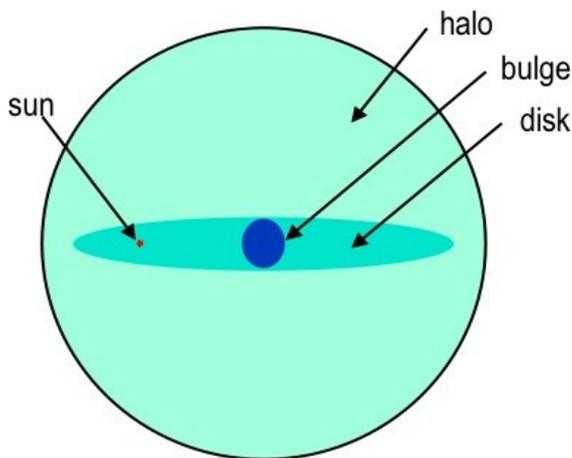
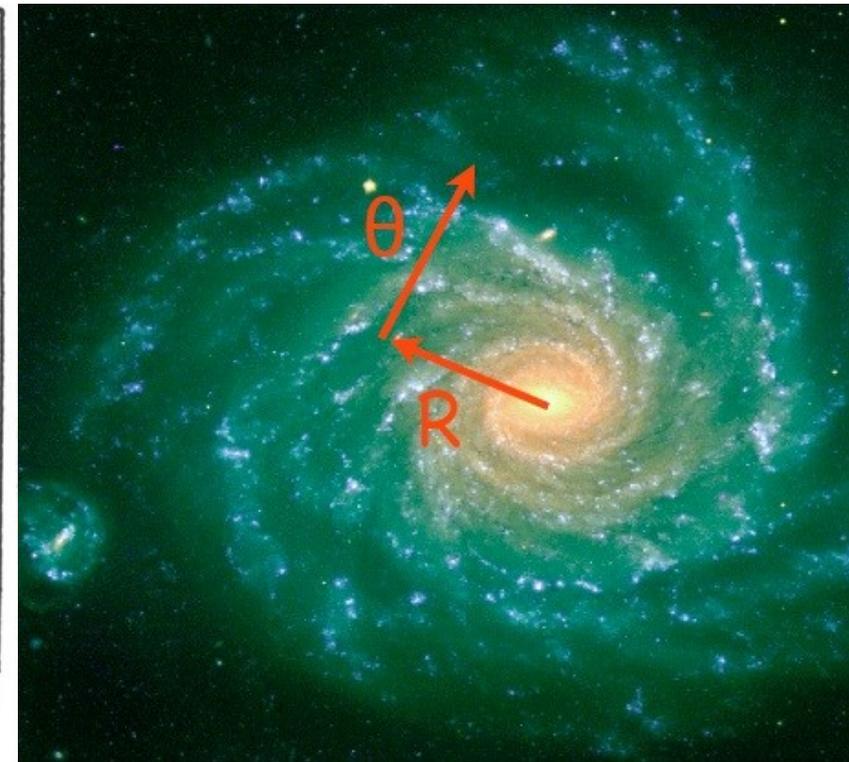
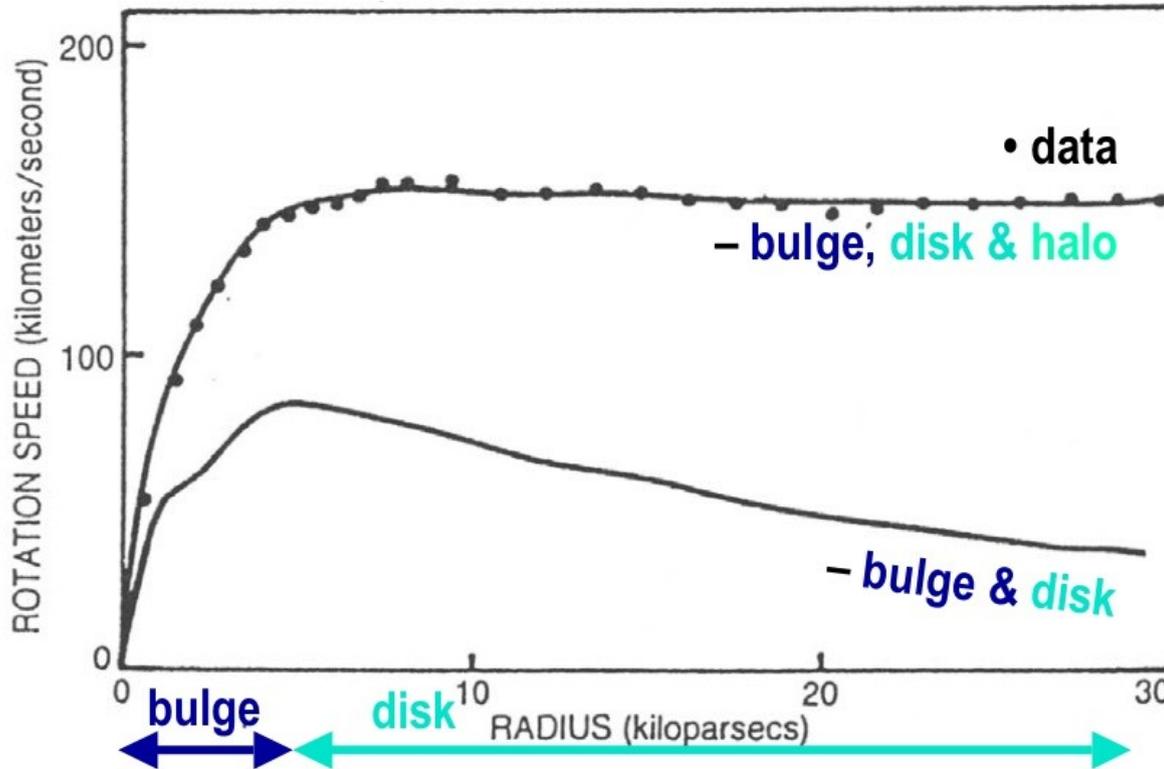
Untersuchung der Verteilung sichtbarer Materie durch Strahlungsuntersuchung

Untersuchung der Massenverteilung durch Gravitationslinseneffekt

Beide Verteilungen sind getrennt!



Rotationskurven der Galaxien sind flach!



10 mal mehr Masse als man direkt sehen kann.

Dunkle Materie Halo

„Neue Theorie“

„Neue Materie“

„Neue Theorie“

„Neue Materie“

MOND

(MOdified Newtonian Dynamics)



Erklärung für
Rotationskurven
der Galaxien

„Neue Theorie“

MOND

(MOdified Newtonian Dynamics)



Erklärung für
Rotationskurven
der Galaxien

„Neue Materie“

„Unsichtbare“
gewöhnliche
Materie

MACHOs

(MAssive Compact Halo Objects)



„Neue Theorie“

MOND

(MOdified Newtonian Dynamics)



Erklärung für
Rotationskurven
der Galaxien

„Neue Materie“

„Unsichtbare“
gewöhnliche
Materie



MACHOs

(MASSive Compact Halo Objects)

Neue Art von
Elementarteilchen

WIMPs

(Weakly Interacting Massive Particles)



...

„Neue Theorie“

MOND

(Modified Newtonian Dynamics)



Bullet Cluster

Erklärung für
Rotationskurven
der Galaxien

„Neue Materie“

„Unsichtbare“
gewöhnliche
Materie



MACHOs

(MASSive Compact Halo Objects)

Neue Art von
Elementarteilchen

WIMPs

(Weakly Interacting Massive Particles)

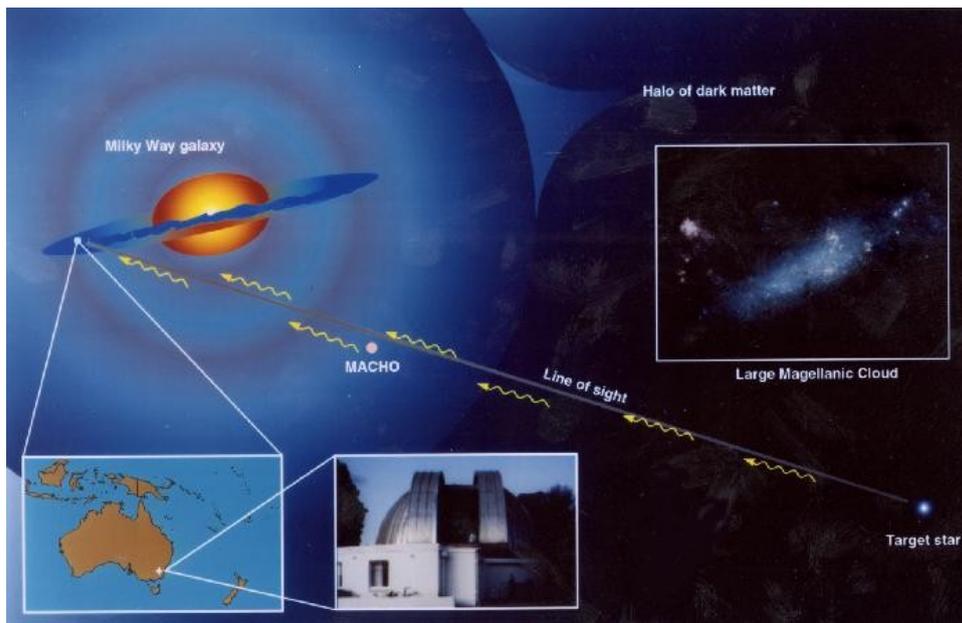
...



MACHOs

braune Zwergsterne
 Planeten
 bereits erloschene Sterne

Beobachtung der
 Lichtverstärkung durch
 Gravitationslinseneffekt



WIMPs

sehr schwach
 wechselwirkend

hohe Masse:
 10-1000 mal
 schwerer als
 Protonen

100-10000 pro m^3

„geringe“
 Geschwindigkeiten
 ~100 km/s

MACHOs

braune Zwergsterne
Planeten
berest erloschene Sterne

max. 20% der
dunklen Materie in
der Milchstrasse



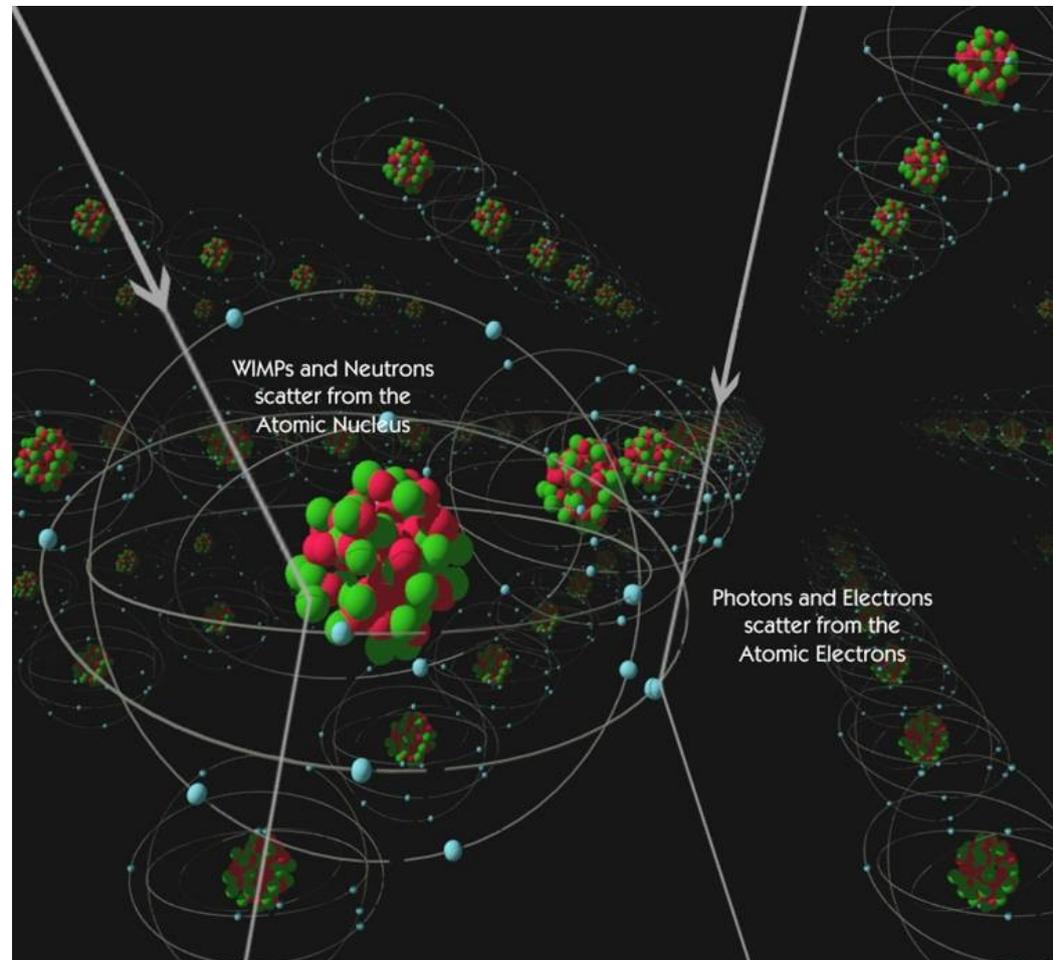
WIMPs

sehr schwach
wechselwirkend

hohe Masse:
10-1000 mal
schwerer als
Protonen

100-10000 pro m^3

„geringe“
Geschwindigkeiten
 ~ 100 km/s



Detektion von WIMPs durch Kollision mit Atomkernen

Elektron & Photonen (Untergrund) streuen an Atomelektronen

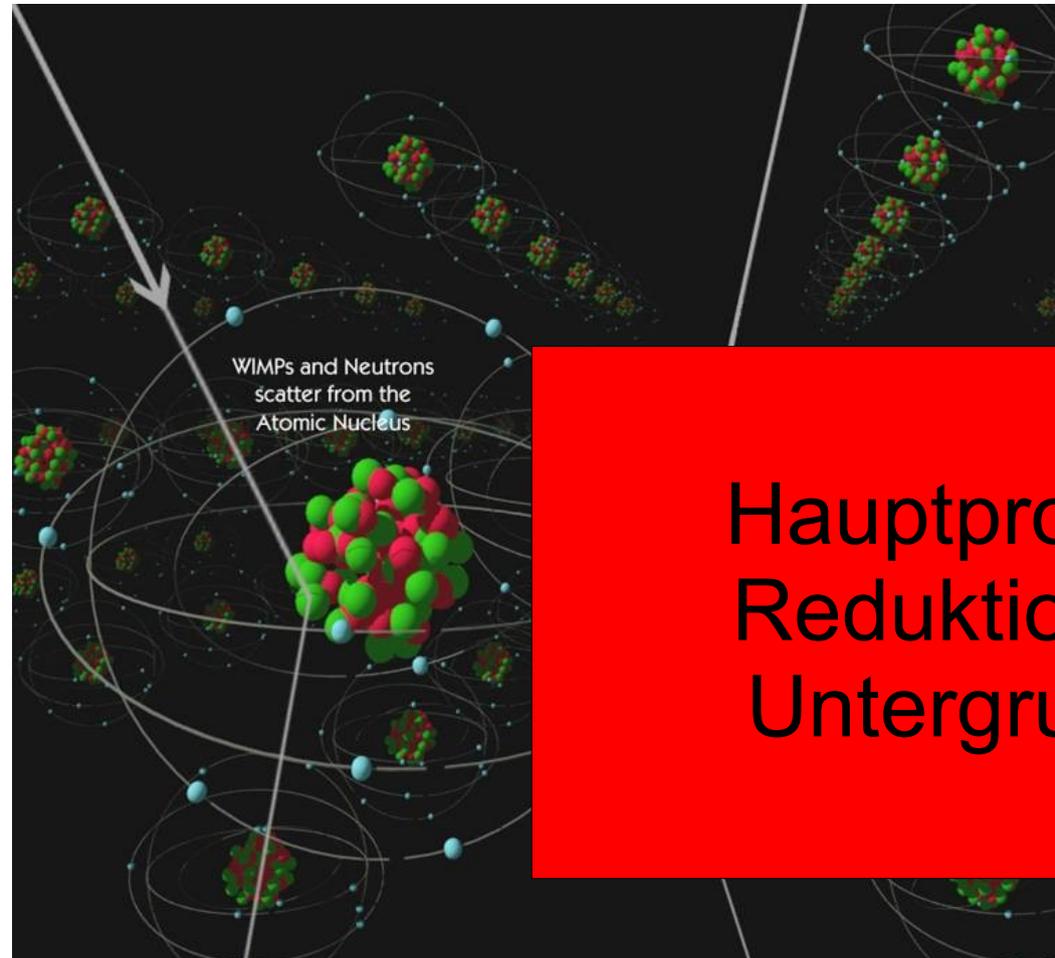
Hochempfindliche Detektoren mit hoher Masse

WIMP-Streuung

- Sehr seltene Ereignisse (1 pro Tag bis 1 pro Jahrhundert)
- niedrige Rückstossenergie der Kerne



Detektion von WIMPs durch Kollision mit Atomkernen



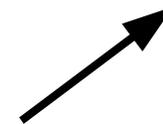
Hauptproblem:
Reduktion des
Untergrundes

& Photonen
(und) streuen
Elektronen

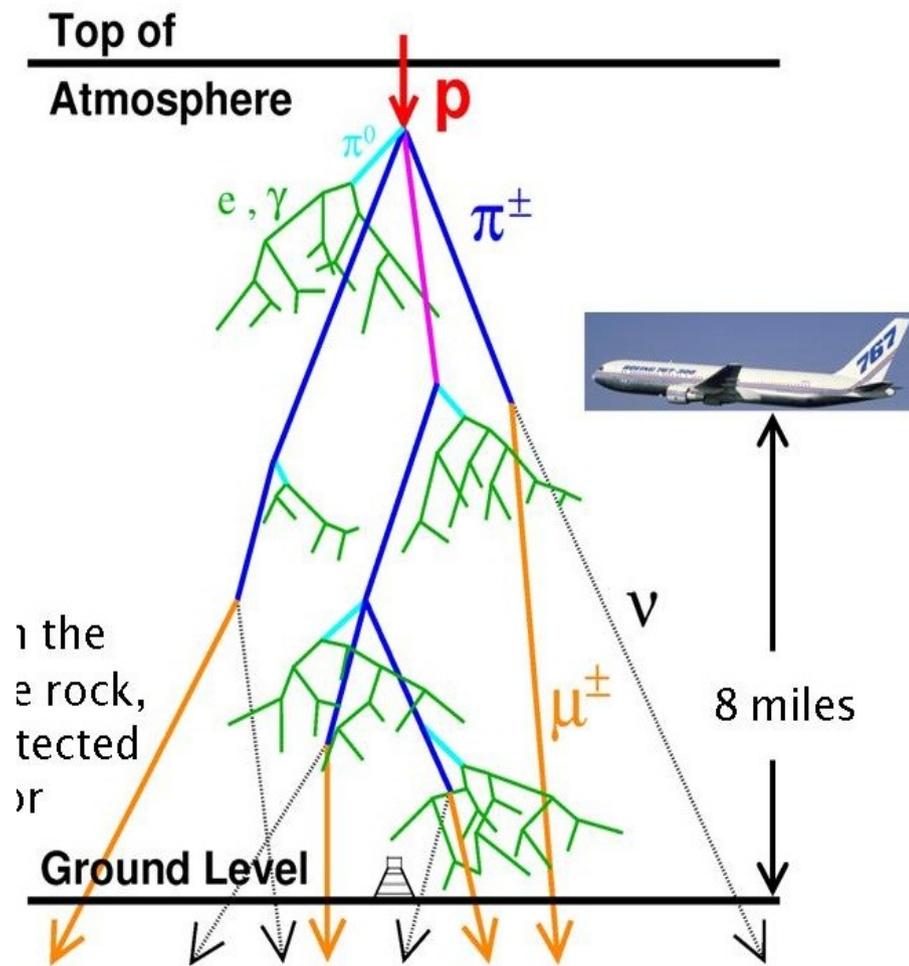
chempfindliche
Detektoren
mit hoher Masse

WIMP-Streuung

- Sehr seltene Ereignisse (1 pro Tag bis 1 pro Jahrhundert)
- niedrige Rückstossenergie der Kerne

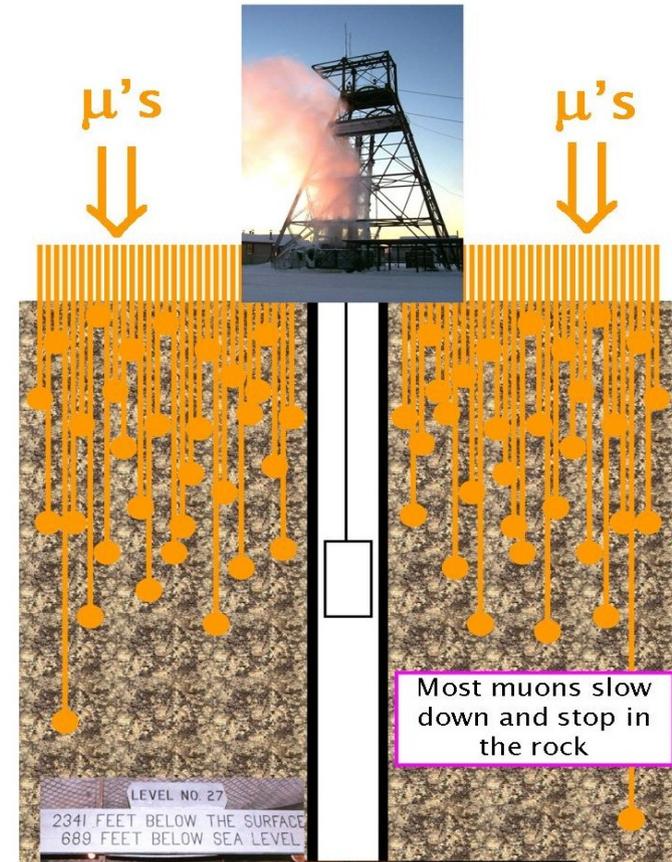


Kosmische Strahlung erzeugt Teilchenschauer in der Atmosphäre



Am wichtigsten: Muonen

Erdoberfläche:
2 Muonen fliegen pro Sekunde durch ihre Hand



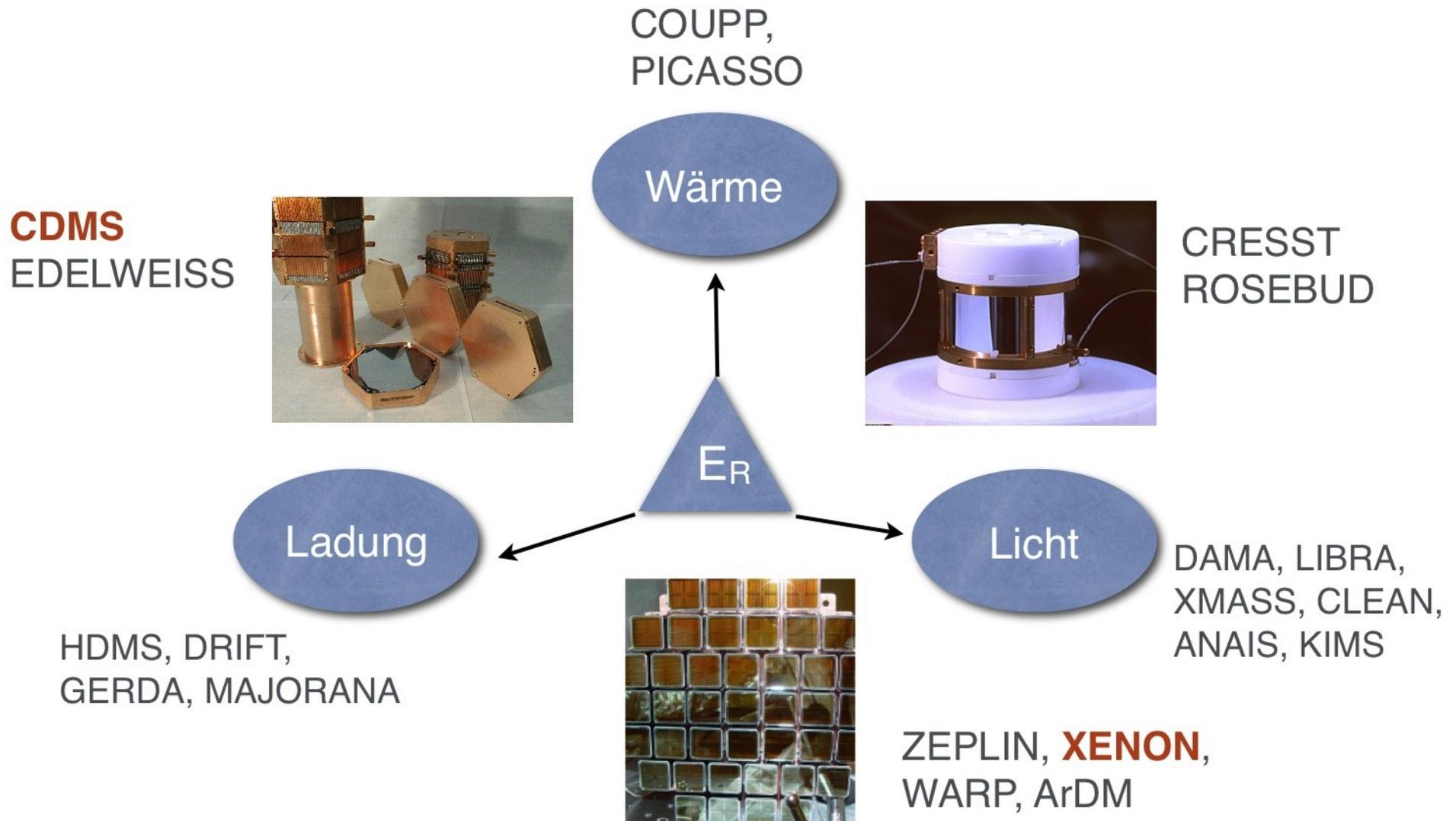
~800 m unter der
Erdoberfläche: nur noch
1 pro Tag

Verwendung von Materialien
mit geringer Radioaktivität

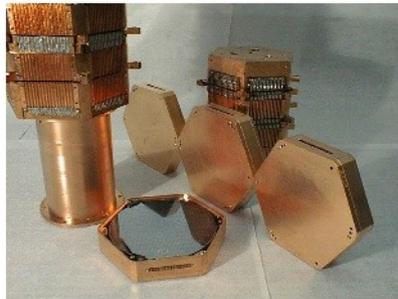
Abschirmung gegen
Strahlung von außen
Benutze z.B. „antikes“ Blei

Muon-Veto

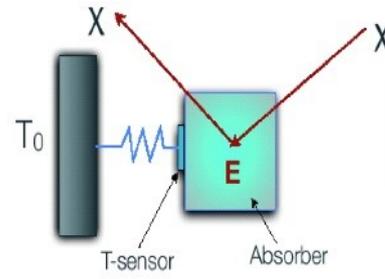




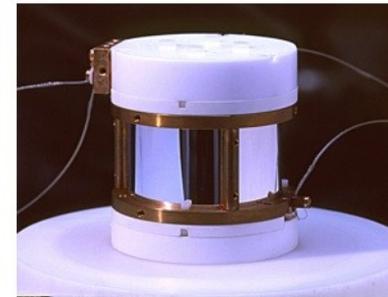
CDMS
EDELWEISS



COUPP,
PICASSO



Wärme



CRESST
ROSEBUD

E_R

Ladung

HDMS, DRIFT,
GERDA, MAJORANA

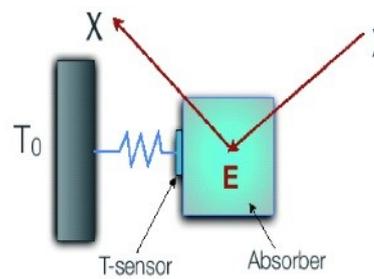


Licht

DAMA, LIBRA,
XMASS, CLEAN,
ANAIS, KIMS

ZEPLIN, **XENON**,
WARP, ArDM

COUPP,
PICASSO

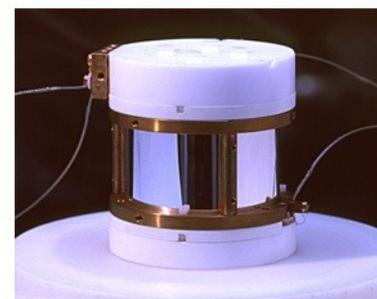


Wärme

E_R



CDMS
EDELWEISS



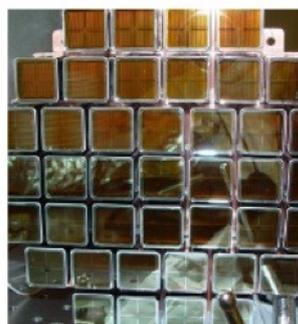
CRESST
ROSEBUD

Ladung

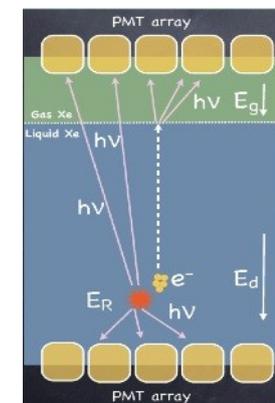
Licht

DAMA, LIBRA,
XMASS, CLEAN,
ANAIS, KIMS

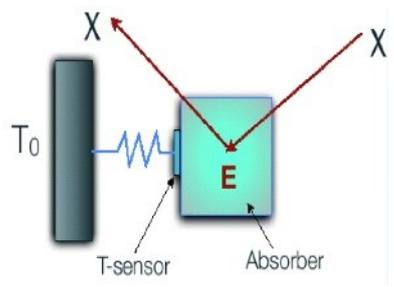
HDMS, DRIFT,
GERDA, MAJORANA



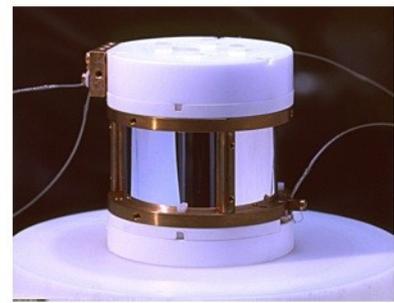
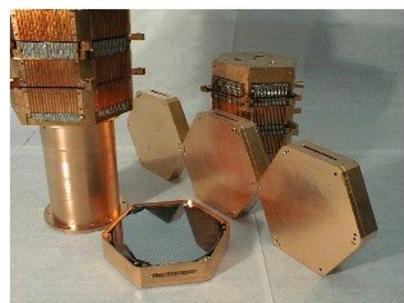
ZEPLIN, **XENON**,
WARP, ArDM



COUPP,
PICASSO



CDMS
EDELWEISS



CRESST
ROSEBUD

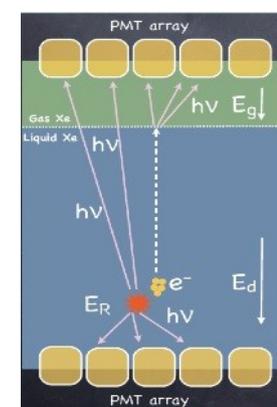
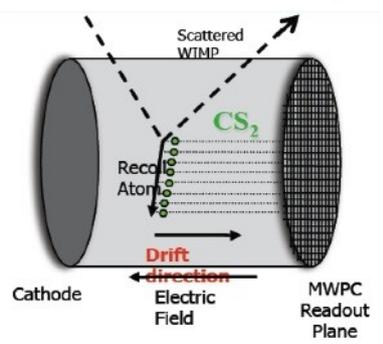


DAMA, LIBRA,
XMASS, CLEAN,
ANAIS, KIMS



ZEPLIN, **XENON**,
WARP, ArDM

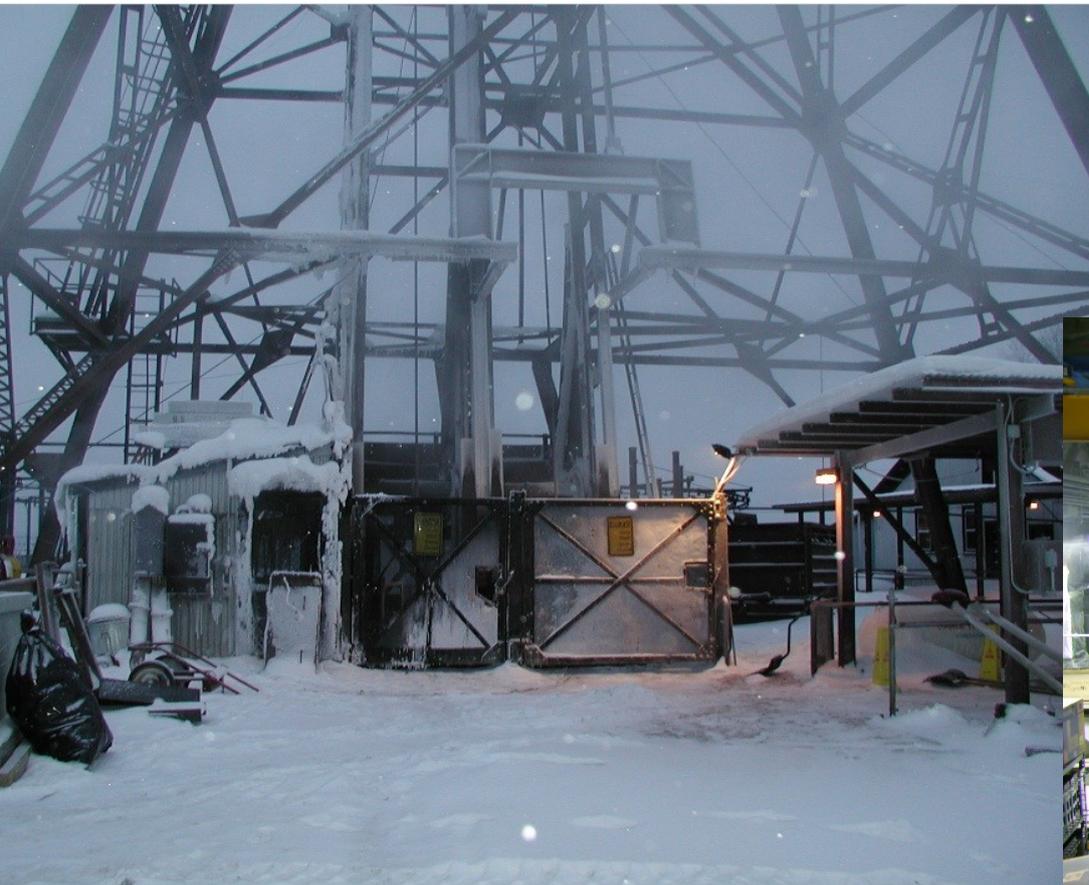
HDMS, DRIFT,
GERDA, MAJORANA



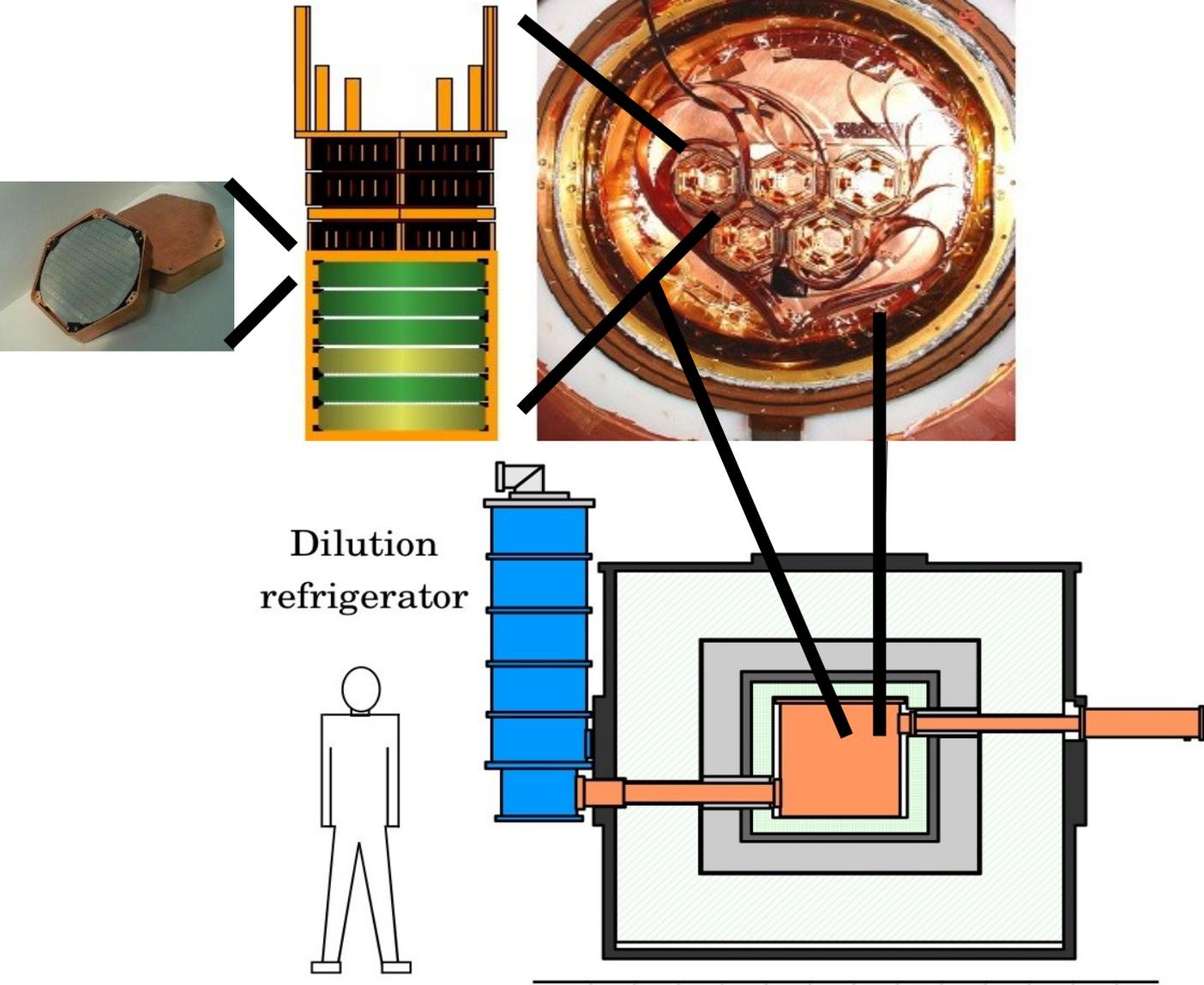
Cryogenic Dark Matter Search Soudan Mine, Minnesota, USA



713 m unter der
Erdoberfläche



■ = Ge (250g)
■ = Si (100g)

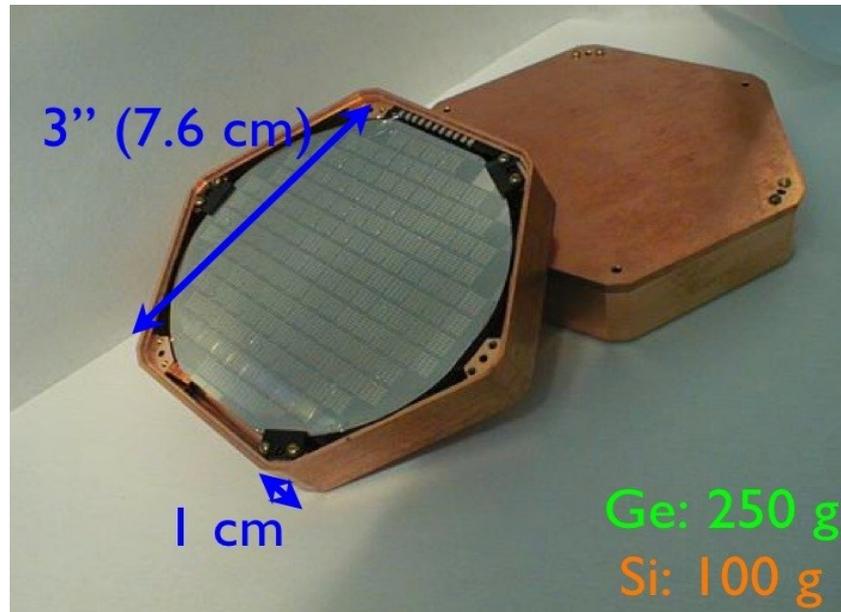


5 Tower mit je 6 Detektoren



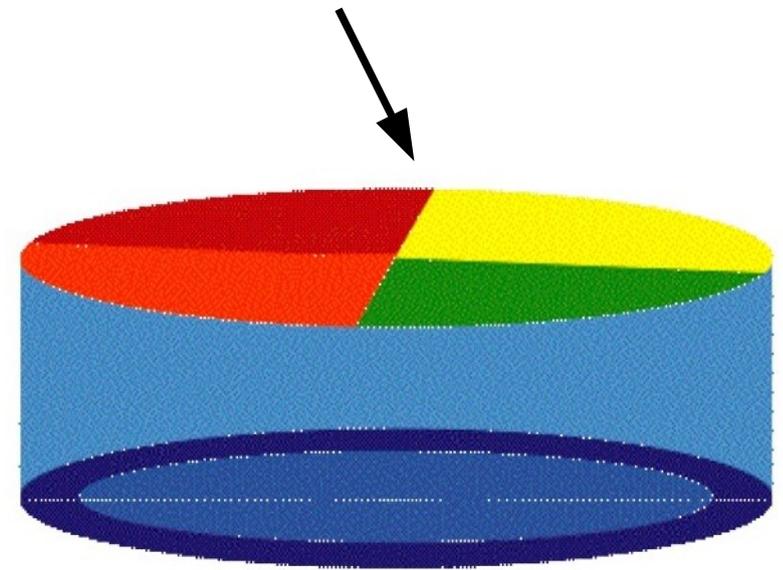
- Ancient lead
- Lead
- Outer poly
- Muon veto
- Copper
- Inner poly

19 Germanium und 11 Silizium Halbleiterdetektoren



2 Signale (Wärme & Ladung) zur Unterscheidung von Stößen an Atomkernen und Atomelektronen

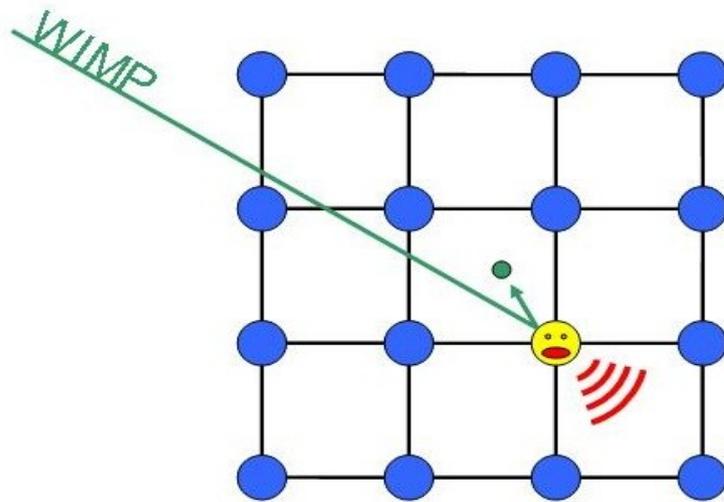
Phonon-Seite:
4 Quadranten mit „Wärme-Sensoren“



Ladungs-Seite:
2 konzentrische Elektroden

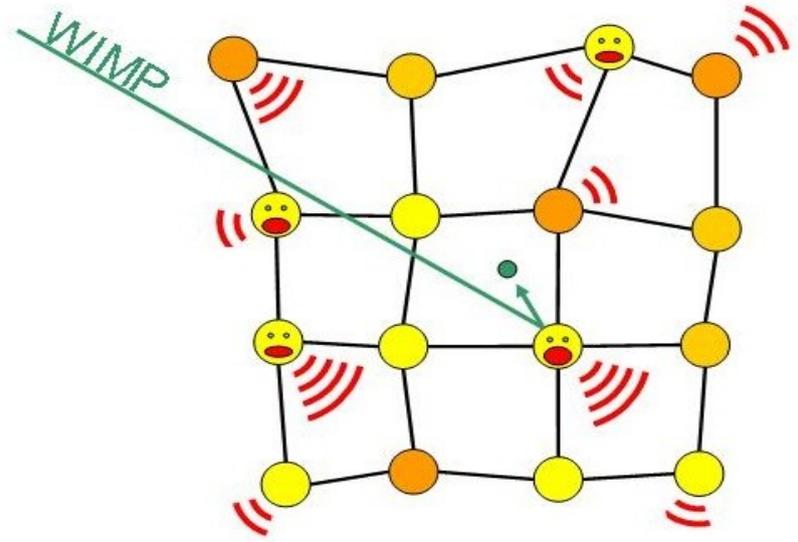
Bei Raumtemperatur würden kleinste Signale eines WIMP-Stoß durch thermische Schwingungen im Detektor überlagert!

Detektoren werden auf ~ 40 mK abgekühlt.



COLD
DETECTOR

$$v \approx 10 \frac{\text{miles}}{\text{hour}}$$



WARM
DETECTOR

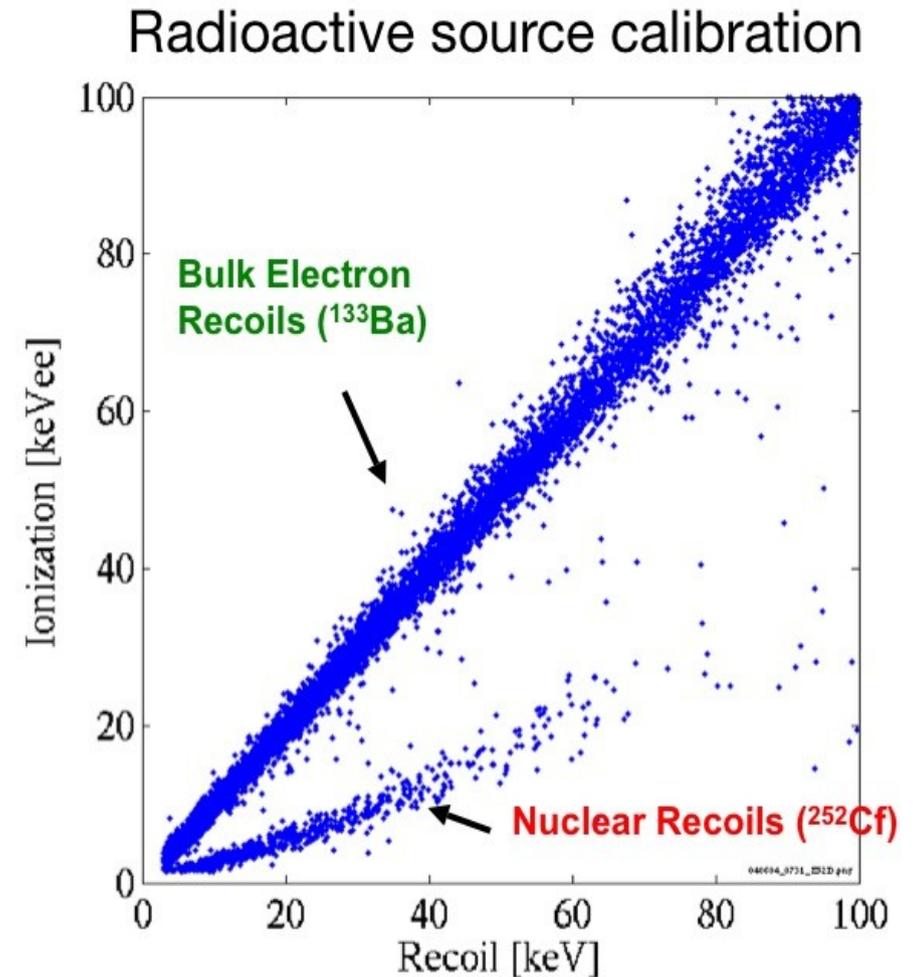
$$v \approx 1000 \frac{\text{miles}}{\text{hour}}$$

Stöße an Atomkernen:
Ladungs-Signal ist
unterdrückt

Exzellentes Kriterium zur
Unterscheidung von
Stößen an Atomkernen
und Atomelektronen

Sonstiges:
Einfache Stöße vs. Mehrfach-Stöße
Zeitdifferenz zwischen Ladungs- und Wärme-Signalen

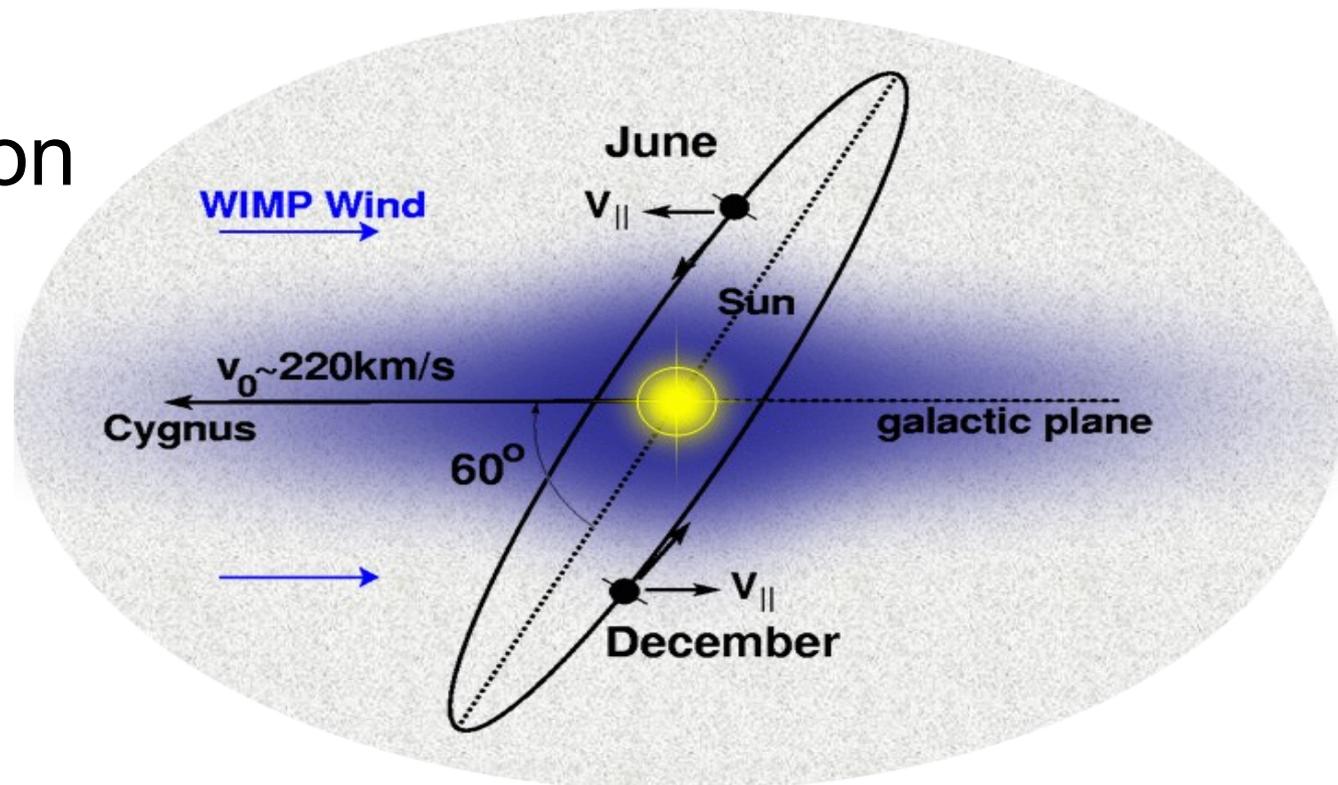
...



Rotation der Erde um die Sonne

Änderung der Bewegungsrichtung der Erde/des Detektors relativ zum Halo im Verlauf des Jahres

jährliche Modulation
des WIMP-
Signales



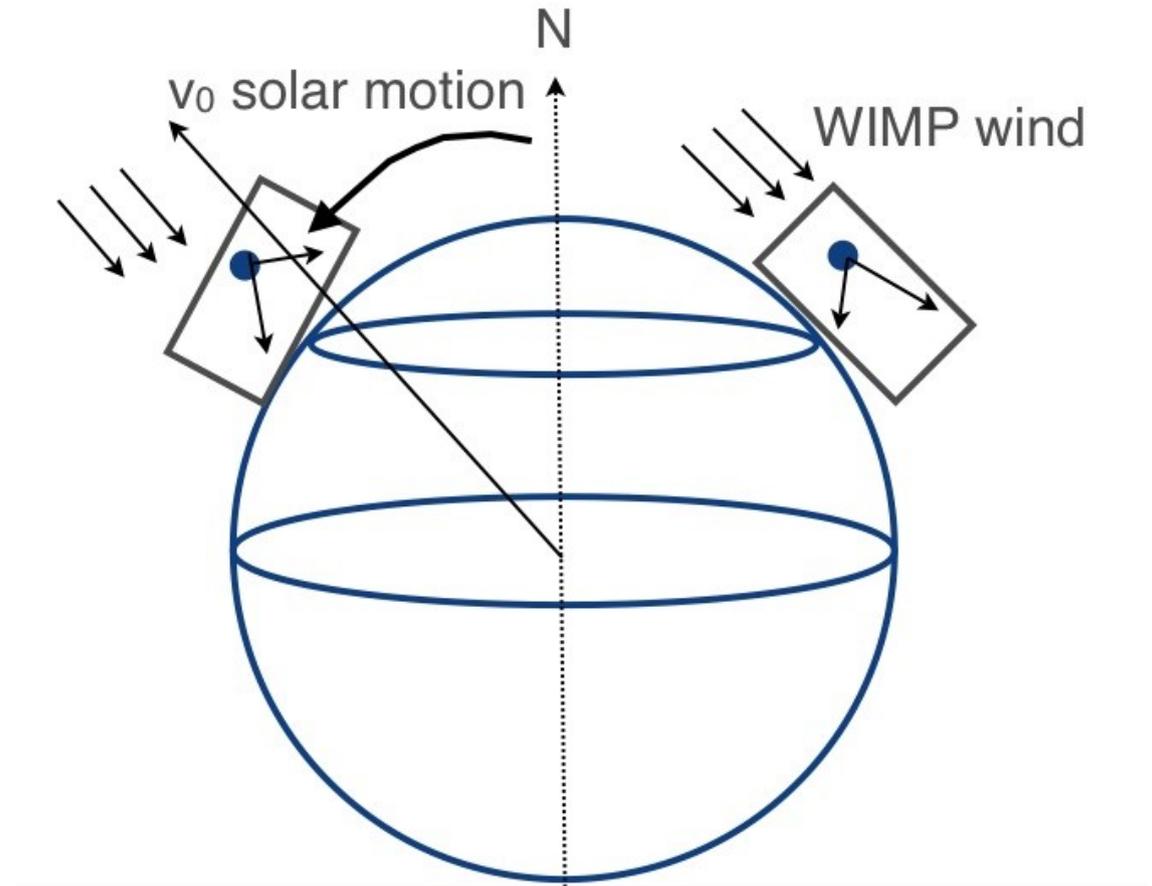
DAMA
(DARK MATTER)

Entdeckung dunkler
Materie ????

Widerspruch zu allen
anderen Experimenten!

Rotation der Erde um sich selbst

Tägliche Modulation des WIMP-Signals

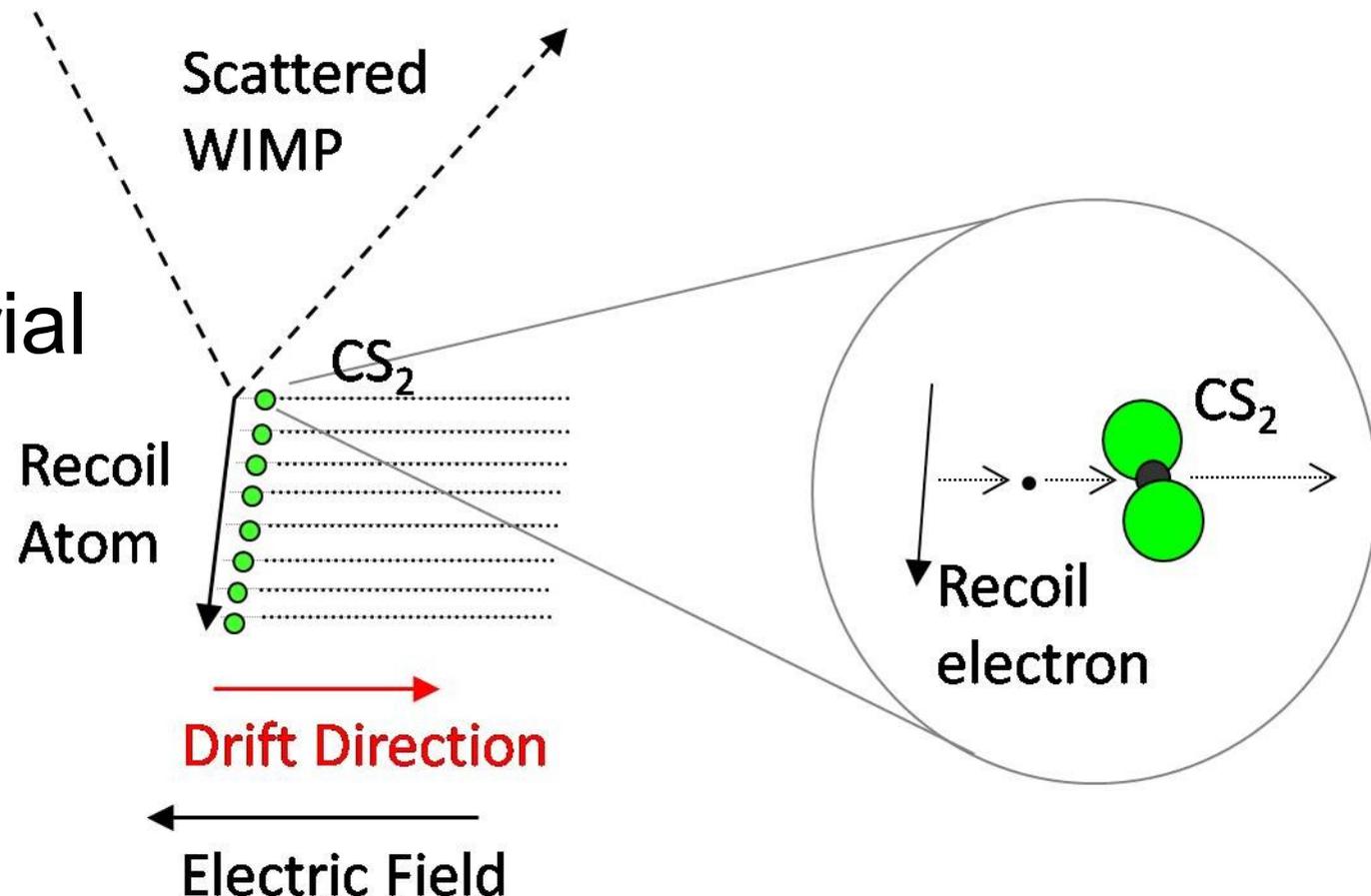


„Spur“ des angestossenen Atomkerns soll rekonstruiert werden

Informationen über Richtung aus der die WIMPs kommen

Nachteil:
Detektionsmaterial ist Gas

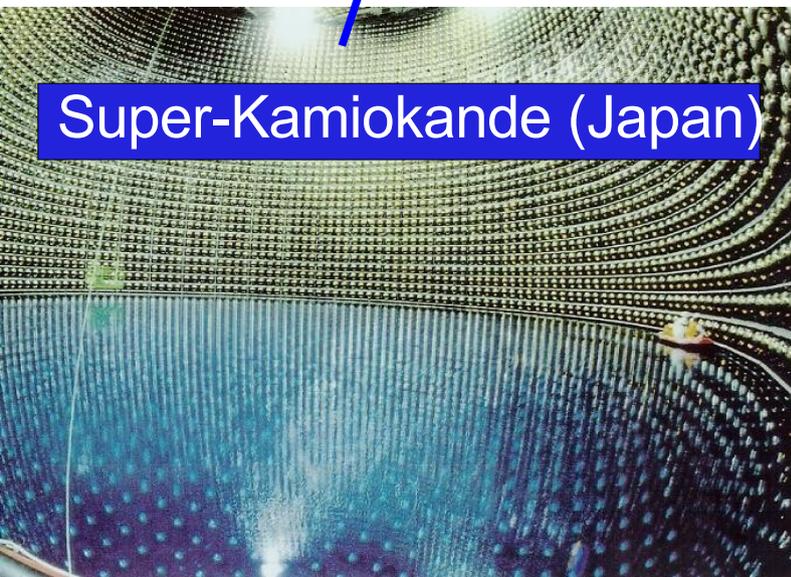
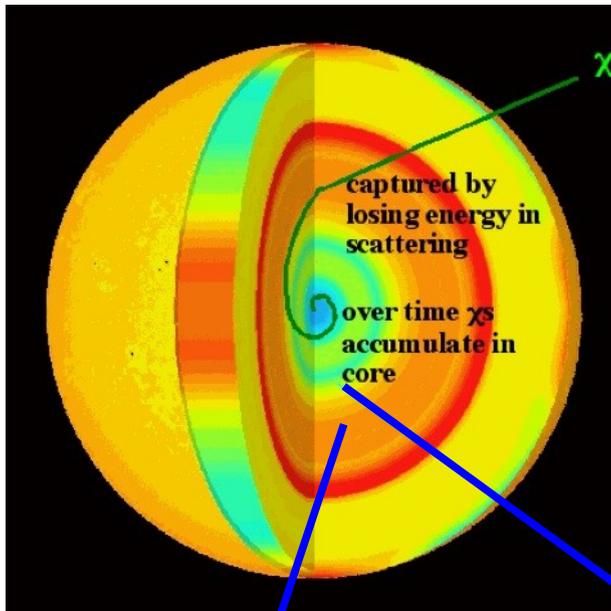
DRIFT
(Directional Recoil Identification From Tracks)



WIMPs werden durch die Gravitationskraft der Sonne „eingefangen“

WIMPs annihilieren → Neutrinos

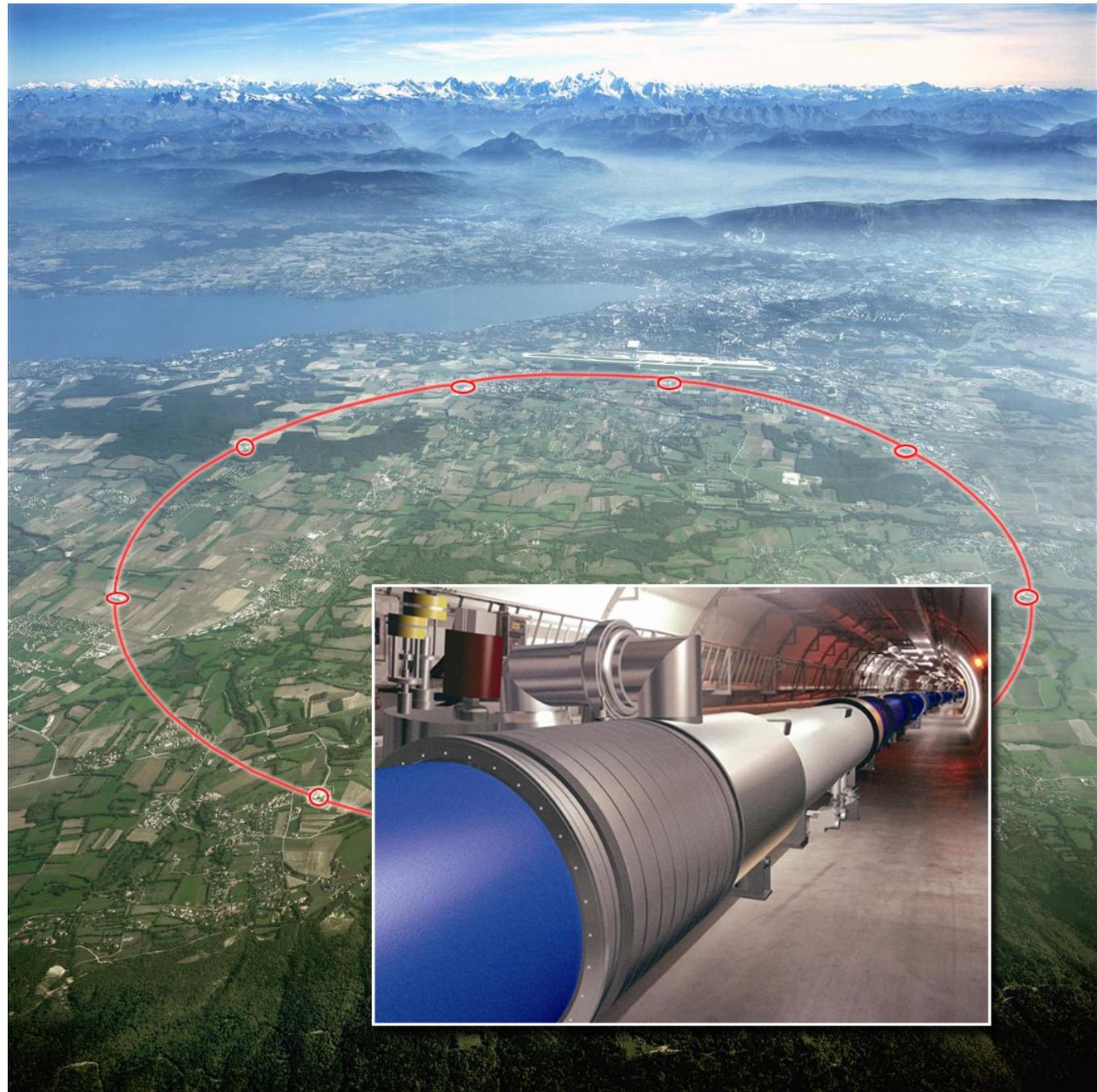
Messung der Neutrinos auf der Erde



Erzeugung neuer
Teilchen durch
hochenergetische
Teilchenstöße

potentielle
Kandidaten
für Dunkle
Materie

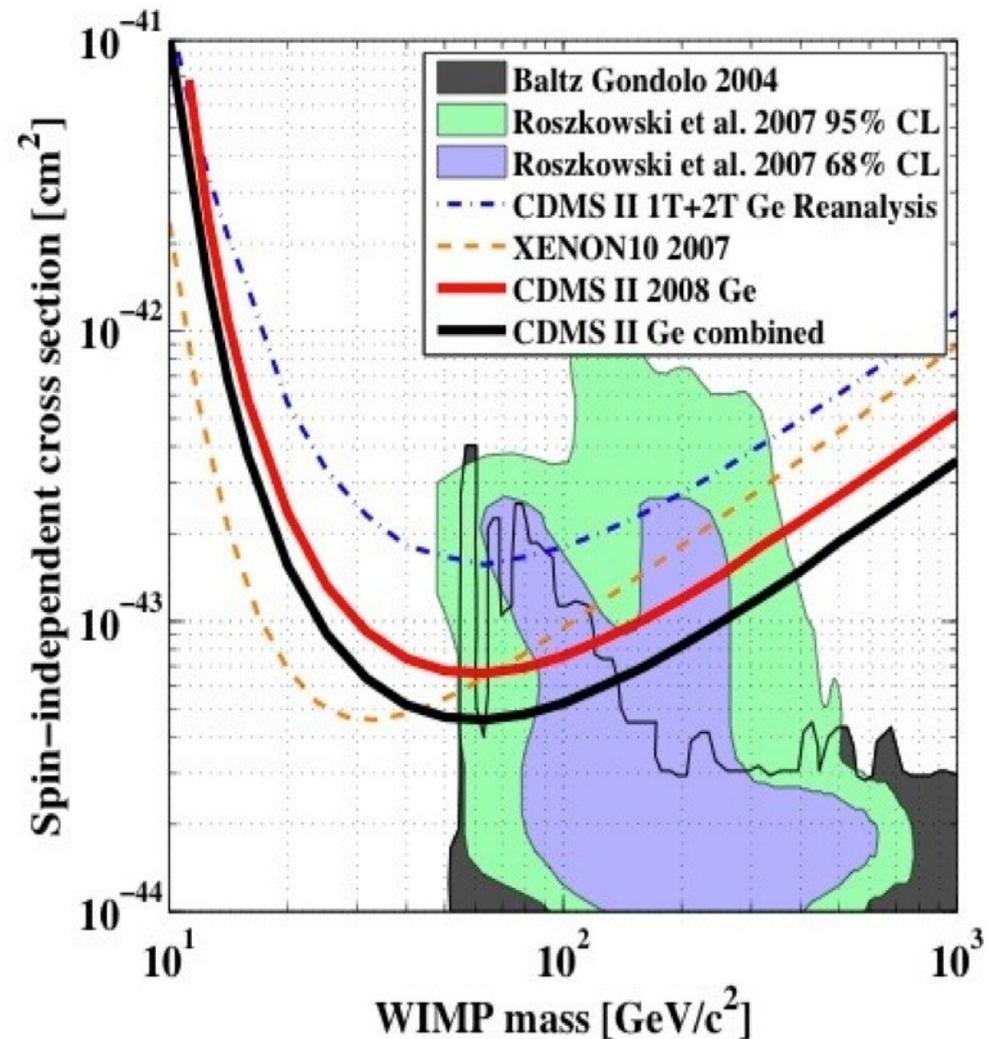
LHC
(Large Hadron
Collider)



Bisher konnte noch kein zweifelsfreies Dunkle Materie Signal entdeckt werden!

Daher bisher:
Ausschluss bestehender Modelle

Aber es werden bereits signifikante Parameterbereiche theoretischer Modelle getestet.



CDMS und XENON können wesentlich zur Lösung beitragen.

