

Suche nach Dunkler Materie in kryogenischen Experimenten

Achim Schilling

Physikalisches Seminar Astro- und Teilchenphysik

4. Juli 2011



Inhaltsverzeichnis

- 1 Existenz und Form der Dunklen Materie
- 2 Kryogenische Verfahren
- 3 Aktuelle Experimente
 - CDMS II
 - CRESST II
 - EDELWEISS
 - Weitere Experimente
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Vergleich der Ergebnisse der Experimente
 - Literaturverzeichnis
 - Anhang

Argumente für die Existenz von Dunkler Materie

- Rotationskurven von Galaxien (Geschwindigkeitsverteilung der Sterne in Abhängigkeit vom galaktischen Zentrum) Newton: Für Objekte außerhalb der optischen Disk müsste gelten
$$v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

- Bewegung der Galaxien in Galaxienhaufen (Massenberechnung über Virialsatz)
- Gravitationslinseneffekt an elliptischen Galaxie und Galaxienhaufen

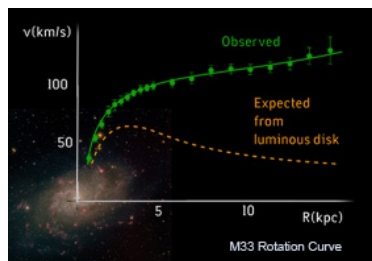


Abbildung: Rotationskurve von M33 (Lokale Gruppe)
Quelle: <http://www.learner.org>

Argumente für die Existenz von Dunkler Materie

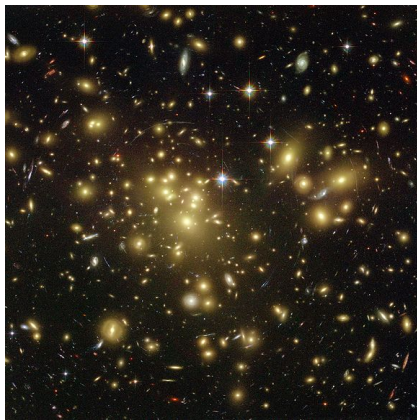


Abbildung: Galaxienhaufen Abell 1689 (fungiert als 2 Millionen Lichtjahre große Linse)

Quelle: <http://hubblesite.org>

Heutige Zusammensetzung des Universums

- 72 % Dunkle Energie
- 23 % Dunkle Materie
- 4,6 % Baryonische Materie
- <1 % Neutrinos

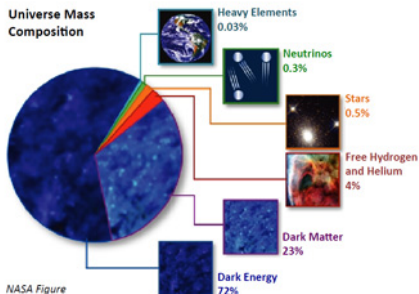


Abbildung: Zusammensetzung des Universums

Quelle: <http://cogent.pnnl.gov>

Modelle für Dunkle Materie

1 Baryonische Dunkle Materie

- Kaltes Gas \rightarrow zu geringe Masse
- Staubwolken \rightarrow durch Reflektion von Sternenlicht im Infrarotbereich sichtbar
- Braune Zwerge (MACHOs) \rightarrow durch Gravitationslinseneffekt sichtbar \rightarrow zu geringe Masse

2 Heiße Dunkle Materie (Leichte schnelle Teilchen) z.B. Neutrinos

- $m_\nu < 2 \text{ eV} \Rightarrow \Omega_\nu h^2 \leq 0.07$
- Top-Down Szenario (Strukturbildung)

3 Kalte Dunkle Materie

WIMPs (nur gravitative und schwache Wechselwirkung)

Kandidaten für WIMPs

- 1 SUSY-System: Zu jedem Fermion gibt es einen supersymmetrischen bosonischen Partner (Supersymmetrischer Partner von Bosonen mit ino-Endung, Susy-Partner von Fermionen mit s davor)
 - Neutralino: Supersymmetrische Partner zu Photon, Higgs-Boson und Z-Boson → Gute Kandidatn für DM
 - Sneutrino → zu großer Streuquerschnitt mit Atomkernen
 - Gravitinos → Problematisch für kosmologisches Modell
 - Axion → sehr leichte Teilchen ≤ 0.01 eV
 - Axino → ähnliche Eigenschaften wie Gravitinos, sehr schwer zu detektieren
- 2 Kaluza-Klein-Modell (1921, 1926): Zusätzliche Dimension Bosonen breiten sich in fünfte Raumrichtung aus, was für uns wie eine zusätzliche Masse erscheint

Allgemeine Prinzipien Kryogenischer Nachweismethoden

- Direkte Suche: Suche nach WIMPs über elastische Stöße mit Atomkernen
- Differentielles Rückstoßenergiespektrum

$$\frac{dR}{dQ} = \frac{\sigma_0 \rho_0}{2m_\chi m_r^2} F^2(Q) T(Q)$$
 (m_χ : WIMP-Masse, m_N : Kernmasse, ρ_0 : WIMP-Dichte, $F(Q)$: Nuklearer Formfaktor, $T(Q)$: Energieabhängige Geschwindigkeitsverteilung der WIMPs, m_r Reduzierte Masse)
- Spinunabhängige Streuung: $\sigma_0 = A^2 \cdot \sigma_{\chi-p}$
 ($\sigma_{\chi-p}$: Proton-WIMP-Streuquerschnitt)

Allgemeine Prinzipien Kryogener Nachweismethoden

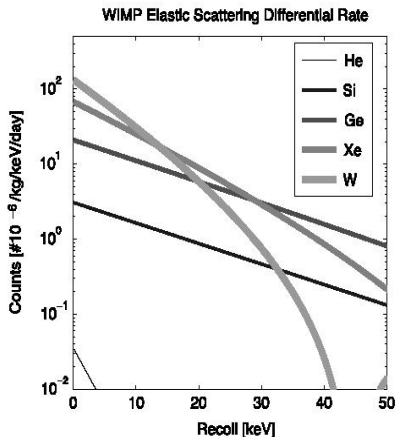


Abbildung: Quelle: Hot on the Tail of the Elusive WIMP, Tarek Saab, Low Temp Phys (2008)

- Rückstoßenergiespektrum der verschiedenen Atomkerne für WIMPs mit einer Masse von 100 GeV,
 $\sigma_{\chi-p} = 10^{-45} \text{ cm}^2$
- Exponentiell abfallendes Spektrum
- Mehr Ereignisse bei schweren Kernen \Rightarrow werden bei Experimenten bevorzugt

Allgemeine Prinzipien Kryogener Nachweismethoden

- Im Durchschnitt $10^{-4} - 10^{-5} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Tag}}$
- Problem: Hintergrund $\approx 1 \frac{\text{Ereignisse}}{\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{Tag}}$
- Trennung von Hintergrund und WIMP-Ereignissen ist essentiell
 - 1 Rückstoßenergie von etwa 10 keV entweder aus WIMP-Kern-Stößen oder aus elektromagnetischen Wechselwirkungen mit Atomhüllenelektronen
 - 2 Für einen bestimmten übertragenen Energiebetrag wandern Kerne viel weniger weit als Elektronen \Rightarrow bei WIMP-Stößen ist die lokale Energiedichte höher

Allgemeine Prinzipien Kryogener Nachweismethoden

Kryogenische Techniken: bei sehr tiefen Temperaturen (unter 4 K)
Nachweis elastischer WIMP-Stöße über folgende Messungen:

- Möglichkeit des Nachweises der WIMP-Stöße über Messung von Phononen (thermisch oder athermisch)
- Ladungsträger können mit sehr geringen E-Feldern bewegt werden (wenige $\frac{V}{cm} \Rightarrow$ Ionisationsmessungen ohne andere Messkanäle zu beeinflussen, Suprafluidität und Supraleitung erleichtern Messungen)
- Messung von Szintillationslicht

CDMS (Cryogenic Dark Matter Search)

- (1995-1999) Start des CDMS-Experiments in einem Tunnel unterhalb der Stanford Universität
- (ab 1999) Nachfolgerexperiment CDMS II in der Soudan-Mine in Minnesota wegen guter Abschirmung des Experiments

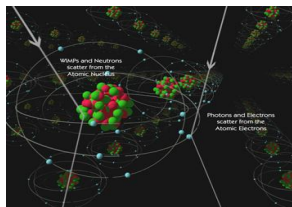


Abbildung: Streuung: Neutronen und WIMPs an Atomkernen, Photonen an Elektronen

Quelle:

<http://scienceatcal.berkeley.edu>

Gründe für die Wahl der Mine:

- Neutronenuntergrund ist um den Faktor $5 \cdot 10^4$ vermindert
- Schutz vor kosmischen Myonen

Grundbauplan des Experiments

- Aufwändige Abschirmung
- Detektor umgeben von 6 zylindrischen Gefäßen aus Kupfer; zusammen mit dem Kryostat bilden sie die Kältemaschine
- Innerster Behälter 30 cm·30 cm wird auf 20 mK gehalten mit Platz für 7 Türme
- Türme bestehend aus 6 ZIPs (Zone sensitive Ionization and Phonon Detectors)
- Datenauslese über Squids (Phononenkanäle) und Fets (Ionisationskanäle)
- ZIP: zylindrische Si und Ge Kristalle (Durchmesser 7,5 cm, Höhe 1 cm)
- Ereignis für Ereignis Untertrennung

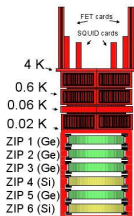


Abbildung: Quelle:
www.int.washington.edu

Grundbauplan des Experiments

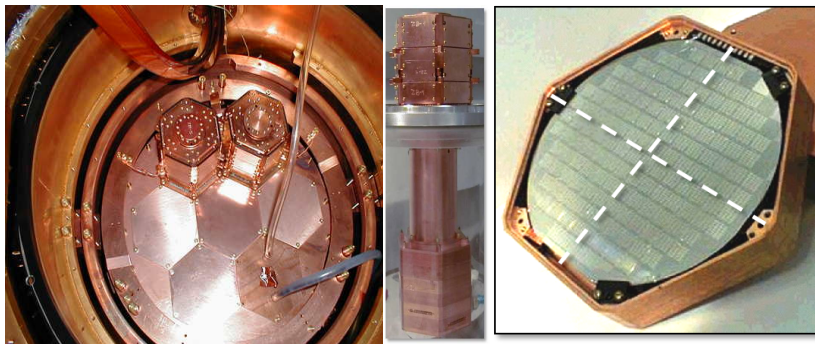


Abbildung: Eisbox, Tower aus 6 ZIPs, ZIP;Quelle: <http://cdms.phy.queensu.ca>

Abschirmung des Detektors

- Äußerste Schicht aus 5 cm dicken aktiven „Myon-Vetosystem“ (Plastikszintillationszähler) → fast 100% der Myonen werden detektiert
- 40 cm dicke Polyethylenschicht zur Abschirmung von niederenergetischen Neutronen aus Kernzerfällen
- 22,5 cm Blei gegen γ und β
- nochmal 10 cm Polyethylen
- Zylindrische Gefäße bilden ein 3 cm dicke Kupferschicht

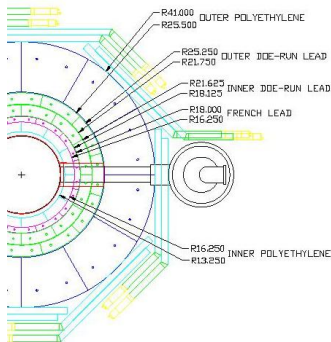


Abbildung: Draufsicht auf den Abschirmmechanismus

Quelle:

<http://neutron.physics.ucsb.edu>

Event-by-Event-Trennung

- Erstes Experiment mit Event-by-Event-Trennung
- Messung der athermischen Phononen über TES (Transition-Edge-Sensors) aus einer dünnen Wolframschicht (Transition-Edge-Sensors) aus einer dünnen Wolframschicht
- Phononen-Signal charakteristisch für Wechselwirkung
- Messung entstehender Elektronen-Loch-Paare über Al-Elektroden, Spannung 3 V
- Ionisationssignal unterscheidet sich je nach Wechselwirkung
→ Photonen treffen auf Hüllenelektronen → starke Ionisation

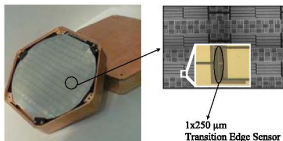


Abbildung: Aufbau des gesamten TES (Oberseite des ZIPs)

Quelle: Tarek Saab, Hot on the Tail of the Elusive WIMP, J Low Temp Phys (2008)

Ergebnisse des Experiments

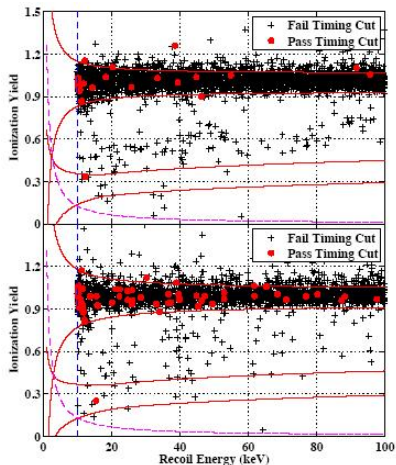


Abbildung: 2 mögliche WIMP-Ereignisse

Quelle: Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment, Z. Ahmed et al. (2009), arXiv:0912.3592

Ergebnisse des Experiments

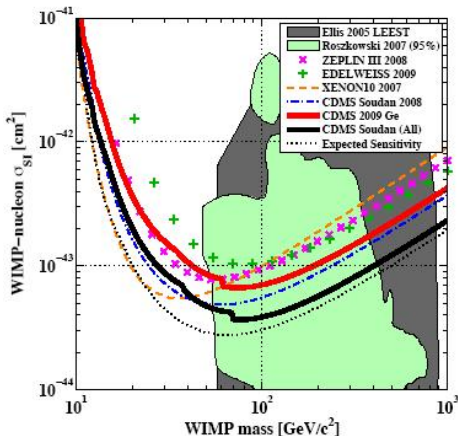


Abbildung: Oberes Limit für den Kern-WIMP-Wirkungsquerschnitt

Quelle: Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment, Z. Ahmed et al (2009), arXiv:0912.3592

Erweiterung zu Super CDMS

- Neue Zips mit einer Höhe von 2,54 cm
- Detektormasse wird drei mal so groß \rightarrow 15 kg
- Bessere Sensoren
- Ziel: Detektormasse von 100-200 kg
- Untergrund soll durch einen Umzug ins noch tiefer unter der Erde gelegene SNOLAB in Kanada minimiert werden

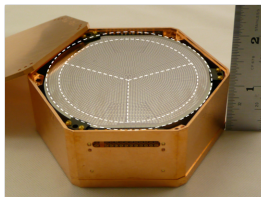


Abbildung: Neuer ZIP für Super CDMS Quelle: <http://cdms.phy.queensu.ca>

CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers)

1 CRESST I

- Start 1999 im Laboratori Nazionali del Gran Sasso (1400 m tief)
- CRESST I mit Saphirkristallen (Al_2O_3) als Absorbermaterial
- Messung der Rückstoßenergie über sehr sensitive Thermometer (Schichten aus supraleitendem Wolfram)

2 CRESST II

- CaWO_4 Kristalle als Absorbermaterial
- Messung von zwei Messgrößen: Temperatur und Szintillationslicht (Event-by-Event-Trennung)
- Derzeitig eine Detektormasse von ca. 5 kg (17 Module), Baldige Erweiterung auf 10 kg (33 M.)

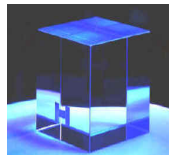


Abbildung:
Saphirwürfel
mit 4 cm
Kantenlänge
als Absorber

Quelle:

<http://www.astroteilchenphysik.de>

Aufbau des Experiments

1 Gemeinsamkeiten mit CDMS

- Abschirmung (Polyethylen, Myon-Veto-Schild, Kupferschicht...)
- Kühlung auf 20 mK mit einem Entmischungskryostat

2 Unterschiede

- Messung von thermischen Phononen über ein supraleitendes Wolframthermometer
- Messung des entstehenden Szintillationslichts über ein weiteres Kalorimeter (Saphir Wafer, 0,4 mm)

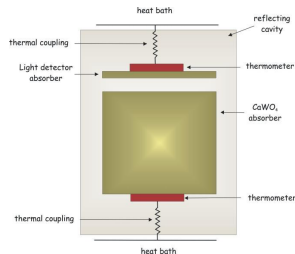


Abbildung: Aufbau eines Moduls des CRESST II Experiments

Quelle: <http://www.cresst.de>

Aufbau des Experiments

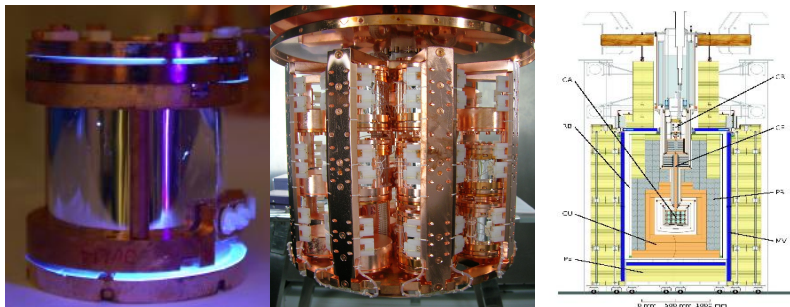


Abbildung: Modul, Modulkarussell, Gesamtaufbau

Quelle: <http://www.cresst.de/> Commissioning Run of the CRESST-II Dark Matter Search, G. Angloher et al (2009), arXiv:0809.1829

Ergebnisse (Commissioning Run)

- 2007, Ziel: Verbesserungen am Detektor, Nur 2 Module
- Drei Ereignisse im Erwartungsbereich von WIMP-Stößen (Rückstoßenergie: 10 keV-40 keV; Lichtfaktor: $\approx \frac{1}{40}$; Faktor aus Energie im Saphirkalorimeter/Phononenenergie für 122 keV γ -Teilchen auf 1 normiert)

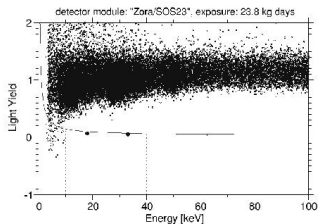
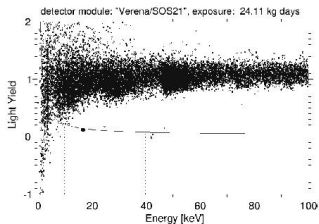


Abbildung: Gemessene Ereignisse beim Commissioning Run

Quelle: Status of the CRESST Dark Matter Search, J. Schmalzer et al (2009),
stabiArXiv: 0912.3689v1

Run von August bis Dezember 2008 (9 Module)

- Viele Ereignisse im WIMP-Bereich, unerwarteten Aussehen der Messkurven → werden aussortiert
- Übriggebliebene Ereignisse, unerwartete Verteilung in der Messzeit, große Unterschiede in den Modulen mit unterschiedlichen Sensoralterungen → keine WIMPs

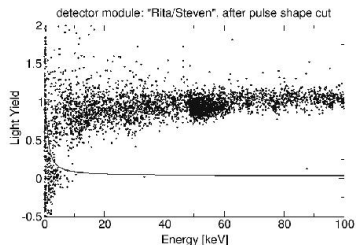
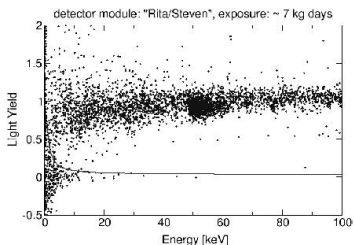


Abbildung: Quelle: Status of the CRESST Dark Matter Search, J. Schmalzer et al (2009),

Quelle: stabiArXiv: 0912.3689v1

EDELWEISS (Experience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain)

- Deutsch-Französische Kollaboration, Start: 1996
- Im Fréjus-Tunnel in den französischen Alpen (1780 m im Untergrund)
- Aufbau sehr ähnlich zu CRESST und CDMS, anderes Detektormaterial: Ge
- Messung von thermischen Phononen und Ionisationssignalen
→ Event-by-Event-Untergrundtrennung
- EDELWEISS I: Messung mit drei Ge-Kristallen a 320 g
- Edelweiss II: ab 2005 bis zu 110 Ge-Detektoren

Ergebnisse des Experiments

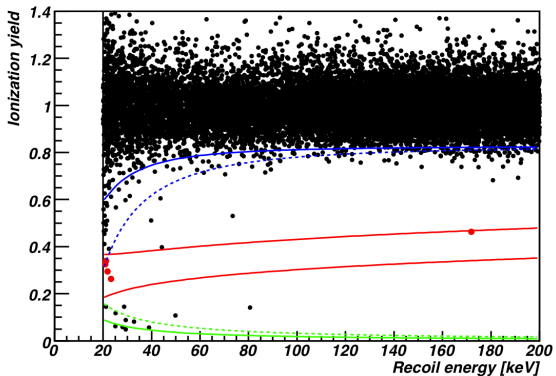


Abbildung: 5 Ereignisse im WIMP-Bereich (erwarteter Hintergrund 3 Ereignisse)

Quellen: <http://www.hep.shef.ac.uk>

CoGeNT (Coherent Germanium Neutrino Technology)

- Kryogenisches Experiment mit einem 440 g Ge-Kristall
- Start der Datenaufnahme im Dezember 2009 in der Soudanmine

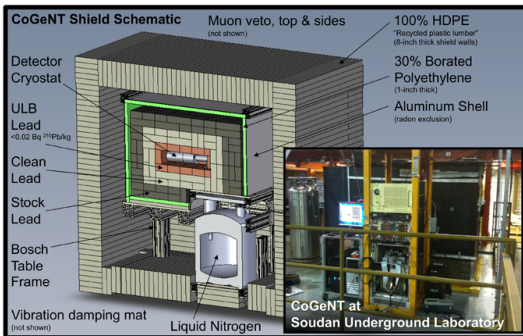


Abbildung: Aufbau von CoGeNT, Quelle: <http://cogent.pnnl.gov>

Ergebnisse von CoGeNT (Coherent Germanium Neutrino Technology)

- Experiment zeigt periodisches Signal (jährlich)
- Bewegung der Erde um die Sonne → Dunkle Materie relativ zu Detektor unterschiedlich schnell

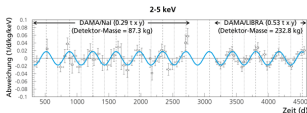


Abbildung: DAMA

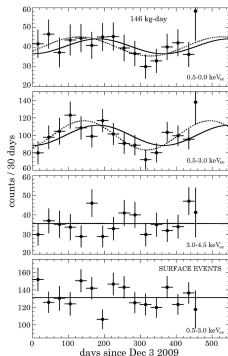
Quelle: <http://blogs.discovermagazine.com>

Abbildung: CoGeNT

Quelle: arXiv:1106.0650v2

Experimente mit flüssigem Edelgas

XENON10:

- Flüssiges Xenon-Gas
- Sehr dichtes Detektormaterial → guter Selbstschutz vor Störungsquellen
- Hintergrundtrennung: Ionisations- und Szintillationsmessung

ULTIMA: (Ultra Low Temperature Instrumentation for Measurements in Astrophysics)

- Flüssiges ^3He bei einer Temperatur von $100 \mu\text{K}$
- Nicht verschwindender Kernspin → Betrachtung spinabhängiger Wechselwirkungen
- Messung der Temperaturveränderung durch WIMP-Stöße
- Keine extra Hintergrundtrennung aber: (1) ^3He -Gase bei μK -Temperaturen → keine radioaktive Kontamination (2) Sehr geringer Compton-Streuquerschnitt

Gemessene Limits für den normalisierten WIMP-Kern-Wirkungsquerschnitt

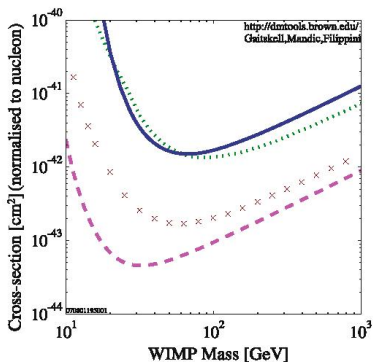


Abbildung: (1) CRESST II: blaue Linie, (2) EDELWEISS: grüne gepunktete Linie, (3) CDMS II: Kreuze, (4) XENON: gestrichelte Linie
Quelle: Hot on the Tail of the Elusive WIMP, Tarek Saab(2008)

Eureca (European Underground Rare Event Calorimeter Array)

- Nachfolger von CRESST und EDELWEISS (Fréjus-Tunnel)
- Riesige Detektormasse (100 kg-1 t)
- Viele verschiedene Absorbermaterialien CaWO_4 , ZnWO_4 usw.

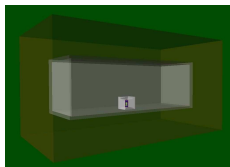


Abbildung: Abschirmung des Experiments

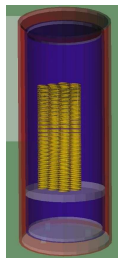


Abbildung:
Kryostat mit
Detektoren

Quelle:

www.hep.shef.ac.uk

Zusammenfassung und Zukunftsaussichten

- Messung von Licht, Wärme, Ladung zur Untergrundtrennung
- Steigerung der Messgenauigkeit über bessere Abschirmung und Erhöhung der Masse des Absorbermaterials
- Baldiges Erreichen des physikalisch relevanten Bereichs (SUSY) bei ca. 10^{-45} cm^2

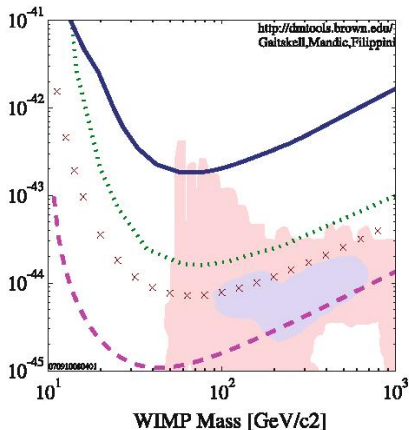


Abbildung: Quelle: Hot on the Tail of the Elusive WIMP: Cryogenic Dark Matter Searches in the 21st Century, Tarek Saab (2008), J Low Temp Phys

Internetquellen

- <http://www.astronews.com>
- <http://vibhanshu.files.wordpress.com>
- <http://cogent.pnnl.gov>
- www.int.washington.edu
- <http://neutron.physics.ucsb.edu>
- <http://cdms.phy.queensu.ca>
- <http://cdms.phy.queensu.ca>
- <http://www.astroteilchenphysik.de>
- <http://www.cresst.de>
- <http://www.weltderphysik.de>
- <http://edelweiss.in2p3.fr>
- <http://www.hep.shef.ac.uk>
- www.sheffield.ac.uk
- www.wikipedia.org

Internetquellen

- www.hep.shef.ac.uk - <http://www.eureca.ox.ac.uk>
- <http://www.nature.com>
- <http://cogent.pnnl.gov>
- <http://blogs.discovermagazine.com>

Paper

- Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment, Z. Ahmed et al, arXiv:0912.3592v1 [astro-ph.CO] 18 Dec 2009
- Hot on the Tail of the ElusiveWIMP: Cryogenic Dark Matter Searches in the 21st Century, Tarek Saab, J Low Temp Phys (2008) 151: 790-799
- Dark Matter Search Experiments, Wolfgang Rau, arXiv:1103.5267v1 [astro-ph.CO] 28 Mar 2011
- Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints, Gianfranco Bertone et al, arXiv:hep-ph/0404175v2 13 Aug 2004
- Commissioning Run of the CRESST-II Dark Matter Search, G. Angloher et al, arXiv:0809.1829v2 [astro-ph] 16 Feb 2009
- Status of the CRESST Dark Matter Search, J. Schmalzer et al, stabi arXiv:0912.3689v1 [astro-ph.IM] 18 Dec 2009

Paper

- Status and future of the CDMS experiment: CDMS-II to SuperCDMS, T. Bruch, 2007 American Institute of Physics 978-0-7354-0471-7/07
- First Results from the Cryogenic Dark Matter Search in the Soudan Underground Lab, E.S. Akerib et al, CDMS May 2, 2004
- Search for an Annual Modulation in a P-type Point Contact Germanium Dark Matter Detector, C.E. Aalseth, arXiv:1106.0650v2 [astro-ph.CO] 10 Jun 2011

Aufbau des EDELWEISS-Experiments

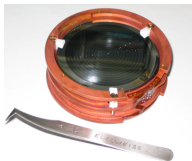
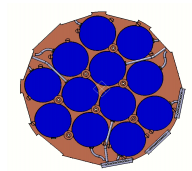
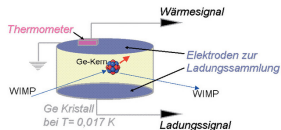


Abbildung: Quellen:
<http://www.weltderphysik.de>,
<http://edelweiss.in2p3.fr>



Abbildung: Quellen:
<http://edelweiss.in2p3.fr>,
www.sheffield.ac.uk

Aufbau des EDELWEISS-Experiments

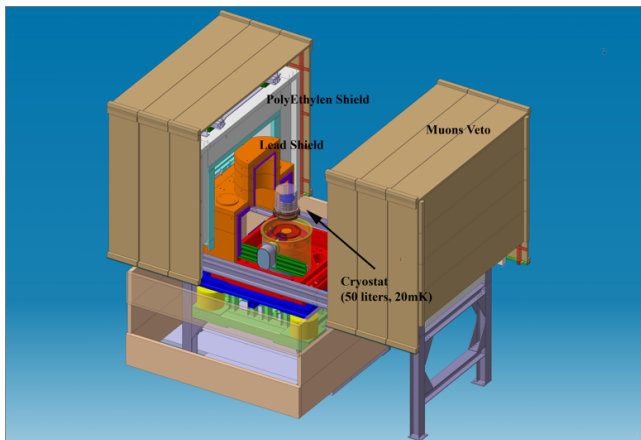


Abbildung: Quellen: <http://edelweiss.in2p3.fr>