

## Astroteilchenphysik – I

### Wintersemester 2013/14 Vorlesung # 15, 13.02.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

### **Dunkles Universum**

- Bolometer & Thermistoren
- Teilchendiskriminierung bei Edelweiss und CDMS
- Flüssigedelgas-Experimente: Prinzip, XENON, LUX
- Ausblick: WIMP Sensitivitäten





www.kit.edu

## WIMP-Nachweis

### Experimentelle Suche nach WIMP Streu-Ereignissen

### WIMP Plot

- Darstellung & Vergleich der Ergebnisse als Funktion von WIMP Masse M<sub>χ</sub> & SUSY-Wirkungsquerschnitt σ<sub>Streu</sub>
- Ausschlusskurve: keine Evidenz Einschlussregion: WIMP Evidenz



## Jahreszeitliche Modulation des WIMP-Signals durch Bewegung der Erde um Sonne DAMA-Libra (NaJ Szintillator) beobachtet seit langem Modulation der Rate Signal oder systematischer Effekt?





## WIMP-Nachweismethoden: 2 Parameter

### Szintillation & Phononen



WIMP

## Bolometer bei mK Temperaturen



### Betriebstemperaturen im mK Bereich erfordern <sup>3</sup>He / <sup>4</sup>He Misch-Kryostaten



**Bolometerbetrieb** im mK Bereich: Minimierung der spezifischen Wärme C<sub>v</sub> bei T« T<sub>c</sub> : Debye sches Gesetz für C<sub>v</sub>  $C_V \approx 1 \cdot 10^{18} \frac{keV}{cm^3 K} \cdot \left(\frac{T}{T_{\Theta}}\right)^3$  $T_{\Theta}$  = materialspezifische Debye-Temperatur (Ge: 374 K, Si: 645 K) 250 g CaWO<sub>4</sub> Kristall: Wärmekapazität T = 1 KC = 130 MeV / µK

- T = 25 mK C = 2 keV / μK
- Beispiel: 100 g Ge-Detektor bei 10 mK,  $E_R = 1 \text{ keV} \rightarrow \Delta T = 1 \mu K$

## Kryo-Bolometer: Phononen





(Umrechnungsfaktor 1K ~ 0.1 meV):

Quasi-ballistische Phononen 'zerfallen' in thermische Phononen

Vergleich Phononen – Ionisation in Germanium:

- elementare Phononen-Anregung  $\Delta E < 1 \text{ meV}$
- Energie für 1 Elektron-Loch Paar  $\Delta E \sim 2.9 \text{ eV}$  (Ge-Bandlücke: 0.9 eV)

## Kryo-Bolometer: Thermistoren



**Thermistor:** misst  $\mu$ K Temperaturanstieg des Absorbers (Phononen aus Absorber koppeln in Thermistor ein), Ziel: kleines  $\Delta T \rightarrow$  großes  $\Delta R$ 

thermische Phononen



langsames Signal, Auslese durch hochreine, speziell dotierte Halbleitersensoren : log R(T) ~ T<sup>-1/2</sup> NTD-Germanium (Neutron Transmutation Doped) temperaturabhängiger Widerstand R(T) des Sensors, hochohmig: NTD-Ge bei 30 mK: R ~ 10<sup>6</sup>  $\Omega$ 

ballistische Phononen



**TES: Wolfram-Thermometer** ( $8\times6$ )mm<sup>2</sup>, aufgedampft, T<sub>c</sub> =10 mK schnelles Signal, Auslese durch **supraleitende Sensoren: TES** (Transition Edge Sensor), dünner supraleitender Film (Aufbruch Cooper-Paare) Übergang supraleitend-normalleitend,  $T_0 = 10-50$  mK supraleitend. Phasenübergangs-Thermometer SPT **niederohmig**: R ~ m $\Omega$ 

- TES-Auslese erfolgt durch SQUIDs

## Phononen-Auslese: TES



**TES-Thermistoren** zur Auslese ballistischer Phononen:

 Betrieb in der Mitte des nur wenige mK breiten Temperaturbereichs im Übergang zwischen dem supra- und dem normalleitendem Zustand
 Kleine Temperaturänderung ΔT S große Widerstands-Änderung ΔR



## Thermistoren: TES – Auslese mit SQUIDs



### SQUID: Superconducting Quantum Interference Device

- Aufgabe: Messung von minimalen Änderungen der magnetischen Feldstärke (bis einige 10<sup>-18</sup> T !)
- Aufbau: dünner Niob-Ring mit 2 Josephson-Kontakten Übergang supraleitend – normalleitend - supraleitend



## Thermistoren: TES – Auslese mit SQUIDs



### SQUID: Superconducting Quantum Interference Device

### Prinzip: magnetischer Fluss F durch SQUID-Ring ist gequantelt

 $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Vs}$ 



### **Betrieb:**

- Gleichstrom I > I<sub>krit</sub>
   Spannungsabfall
- Änderung externes Feld
  - Stromänderung im Ring,
     am SQUID beobachtet
     man ΔU (sinusförmig)



## Kryoexperimente – Szintillation & Ionisation





## WIMP Streuung – Teilchendiskrimination



### Diskrimination (Trennung) von Signal und Untergrund

- WIMPs: Rückstoß des schweren Target-Kerns nach Streuung
- Gammas (Elektronen): Rückstoß eines leichten atomaren Elektrons
  - Serhältnis des Ladungs- (Licht-) Signals zum Phononsignal



## Kryobolometer - Teilchendiskrimination



- Ge-Bolometer mit Ladungs- und Phonon-Signal
  - gute Abtrennung des Kern-Rückstoßes von e<sup>-</sup>,  $\gamma$ 's bzw.  $\alpha$ 's
  - **Ionisations-Quenching**: Ladungssignal des Ge-Kerns ist auf ~ <sup>1</sup>/<sub>3</sub> reduziert durch **hohe spezifische Ionisationsdichte dE/dX**



## **CRESST-II** Experiment



CRESST: Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers - Ort: Halle A im LNGS (Gran Sasso Labor),

- Prinzip: Szintillation und Phononen (Teilchendiskrimination)
- einzelne CaWO<sub>4</sub> Kristalle (Kalzium-Wolframat) mit Masse M = 300 g
- WIMP-Streuung: Kernrückstöße an <sup>184</sup>W, <sup>40</sup>Ca, <sup>16</sup>O



## LSM – Laboratoire Souterrain de Modane



## **EDELWEISS** – Experiment



Expérience pour détecter les WIMPs en Site Souterrain französisch-deutsches Experiment im LSM mit Ge-/Si-Bolometern

- 2000-2003: Edelweiss-I mit M = 1 kg ( 3 Detektoren)
- 2008-2010: Edelweiss-II mit M = 4 kg (10 Detektoren, je 400 g)
- 2011-2014: Edelweiss-III mit M = 32 kg (40 Detektoren, je 800 g)



### **EDELWEISS - Detektoren**







Detektoren mit Ringelektroden







800g Detektor

## EDELWEISS – II Resultate, EURECA



### Resultate von EDELWEISS-II:

- 10 Kryobolometer (5 · 360 g, 5 · 410 g), ´fiducial mass´ ~ 160 g je Detektor
- Exposition: 384 kg Tage (effektiv), Zeitraum: April 2009 Mai 2010
- WIMP-Suche ab  $E_R > 20$  keV, 5 WIMP Kandidaten, < 3 Ereignisse von

Untergrundquellen erwartet, kein statistisch signifikantes WIMP Signal



## CDMS – Cryogenic Dark Matter Search



Kryo-Bolometer in der Soudan-Mine in Nord-Minnesota (2000 m.w.e) Absorber: 250 g Germanium (Ø=7.5 cm, h=1 cm) bzw. 100 g Si-Kristalle

### **ZIP-Detektortechnik**:

Z-sensitive Ionisation and Phonon mediated detector Signale: nur 'ballistische' Phononen (4 × 1036 TES: Al und W) Phonon-Timing zur Diskrimination gegen Oberflächenereignisse



## CDMS II Resultate



15.04.13: CDMS II veröffentlicht ´neue´ Daten (2007/08) 140.2 kg Tage (8 Si-Detektoren je 106 g) 3 WIMP Kandidaten-Ereignisse (~3 σ Signal)
Spekulation um WIMPs mit ~ 10 GeV

April 15, 2013

## Underground experiment sees possible hints of dark matter

The Cryogenic Dark Matter Search experiment adds new intrigue to the hunt for dark matter.

- WIMPs mit kleiner Masse (~10 GeV) in Theorien mit dunklem Sektor
  - frühere Hinweise von DAMA/Libra, CoGeNT & CRESST ☑
  - Parameterregion von CDMS-II wird von XENON100 (& LUX) ausgeschlossen





## WIMP-Sensitivität: Masse & Oberfläche





"Die Sensitivität eines Dark Matter Experiments skaliert mit seiner Masse"

"Die Systematik und Untergrundrate eines Dark Matter Experiments skalieren mit seiner Oberfläche"



Flüssigedelgas

#### **Bolometer**

## 3.5.3 Flüssig-Edelgas-Detektoren



- **LXe & LAr Detektoren** auf Basis verflüssigter Edelgase
  - Betrieb als 2-Phasen Detektor: flüssige & gasförmige Phase
  - Vorteile:
  - große Detektorvolumina (10 kg  $\rightarrow$  100 kg  $\rightarrow$  1000 kg  $\dots$  )
  - Teilchenidentifikation: Ladung & Szintillation, Pulse-Shape

### Herausforderungen:

- niedrige Schwelle, weitere Reduktion der Untergrundrate



### Eigenschaften von flüssigen Edelgasen als DM-Detektoren

	Z (A)	Siedepunkt T <sub>s</sub> [K] bei p = 1 bar	Dichte bei T <sub>s</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	lonisation [e-/keV]	Szintillation [Photonen/ keV]	Szintillations- licht [λ in nm] λ-Schieber
Neon	10 (20)	27.1	1.21	46	7	85 (WLS)
Argon	18 (40)	87.3	1.40	42	40	128 (WLS)
Xenon	54(129/131)	165.0	3.06	64	46	175

## 2-Phasen LXe-Experimente: Grundlagen



### Prinzip von LXe 2-Phasen-Detektoren:

- Szintillationslicht:
- Ionisationssignal:



Nachweis über Photomultiplier (PMT in LXe) Drift der Elektronen über E-Feld zur Xe-Gasphase

### Signale S1 (prompt) & S2 (verzögert):

- S1: primäre Xe-Anregung durch Rückstoß-Kern (promptes Szintillationslicht)
- S2: Nachweis der gedrifteten Elektronen durch Extraktion in die Gasphase, dort Beschleunigung der e<sup>-</sup> mit starkem Feld E<sub>ext</sub>; im Gas durch Kollisionen Entstehung von Elektrolumineszenz
   Sachweis des Lichts mit oberen PMT

Koinzidenz von S1 und S2:

- S1 + S2: Teilchenart & Ort der Streuung

## Teilchenidentifikation



### Diskrimination zwischen WIMP-Kernrückstößen und Elektronen





### Verhältnis S2/S1 zur Teilchendiskrimination Schema & MC-Simulation von Lichtsignalen





## XENON100 Experiment



### XENON-100: im LNGS

- LXe-Detektor mit 161 kg Masse (~99 kg als Veto, 62 kg als Target)
  - Detektor:  $\emptyset = 30$  cm, h = 30 cm (maximale Driftstrecke für Elektronen)
  - 242 PMT zur Auslese des Szintillations- & Elektro-Lumineszenz-Lichts
  - Faktor 100 geringerer Untergrund (Selektion, Reinigung, Selbstabsorption) Faktor 10 mehr Masse als das Vorgängerexperiment XENON10



## **XENON100** Experiment



XENON-100:

Messungen am LNGS







## XENON100 Experiment: Resultate



### Resultate von XENON100:

- 224.6 Tage Datennahme (13 Monate in 2011/12): 2323.7 kg·Tage



## Large Underground Xenon (LUX) Experiment

- 2-Phasen-Xenon-Experiment im Sanford Lab:
  - ähnliche Technologie wie XENON (S1-S2) H<sub>2</sub>O Abschirmung: dient hier als Myonveto
  - Detektor mit 370 kg Masse (100 kg 'fiducial volume')
  - erwartete WIMP-Sensitivität:

 $\sigma_{sl} = 2 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$  (bei  $R_{bg} = 0.5$  Ereignisse/Monat/100 kg)





#### **28** 13.02.2014 G. Drexlin – VL15

## Resultate von LUX :

- 2/2013: erstes Abkühlen und Beginn der Datennahme (Kalibration,...)
- erste Meßphase in 2013 über 85 Tage (April-August 2013)
- Ereignisse mit 0.9-5.3 keV<sub>ee</sub> im 100 kg fiducial volume: Beobachtung:  $(3.1 \pm 0.2_{stat})$  Ereignisse Untergrunderwartung:  $(2.6 \pm 0.2_{stat} \pm 0.4_{syst})$  Ereignisse
- WIMP-Limits:  $\sigma_{SI} < 7.6 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$  (bei M<sub> $\chi$ </sub> = 33 GeV) aktuell bestes Limit weltweit

### Zukünftige Messungen von LUX :

- geplant: 300 Messtage mit LUX in 2014/15
- Verbesserung der Sensitivität um Faktor 5
- Vorbereitung eines größeren Nachfolgeexperiments LZ: Vergrößerung der Targetmasse um Faktor 20







### WIMP Resultate: aktueller Status





## XENON1T



### XENON Nachfolge-Experiment:

- 2-Phasen TPC mit 2.2 t LXe Masse
- Lichtauslese: 250 PMTs (3-inch)
- Wasser-Cherenkov-Vetodetektor
- Sensitivität: σ<sub>SI</sub> < 2·10<sup>-47</sup> cm<sup>2</sup> (90% CL)





fiducial volume m ~ 1.1 t

## **DARWIN** Projektstudie



DARWIN: Dark matter Wimp search in Noble liquids

- Zielsetzung: ´ultimatives´ europäisches DM-Experiment
- Detektor-Technologie: multi-T LXe Target



## aktuelle & zukünftige WIMP Sensitivitäten







stay tuned!



# Astroteilchenphysik – II Teilchen & Sterne

Sommersemester 2014



Supernovae

#### Neutrinos

Gravitationswellen