

# Astroteilchenphysik - I

WS 2012/2013

Vorlesung # 14, 07.02.2013

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

## direkte Nachweismethoden

- Experimentelle Nachweismethoden:  
1-Parameter & 2-Parameter Detektoren
- Szintillatoren: DAMA/Libra, XMASS
- Kryobolometer: CDMS, Edelweiss
- Edelgasdetektoren: Messprinzip,  
XENON, DARWIN



# Direkter Nachweis der dunklen Materie

## ■ Kinematik: Rückstoßenergie $< 100$ keV

- Modulation durch Erdbahnbewegung  $\sim 5\%$

**kohärente skalare Streuung:** WIMP-Halo Modell

- $\sigma_{SI} \sim A^2 \cdot F^2(E_R)$ , Formfaktor  $F$  für großen Impulstransfer  $q$  / Kernradius  $R_i$

wichtig: sehr kleine Schwelle für  $E_R \sim$  wenige keV

**spinabhängige Streuung:**  $\sim J$ , ungepaartes Nukleon

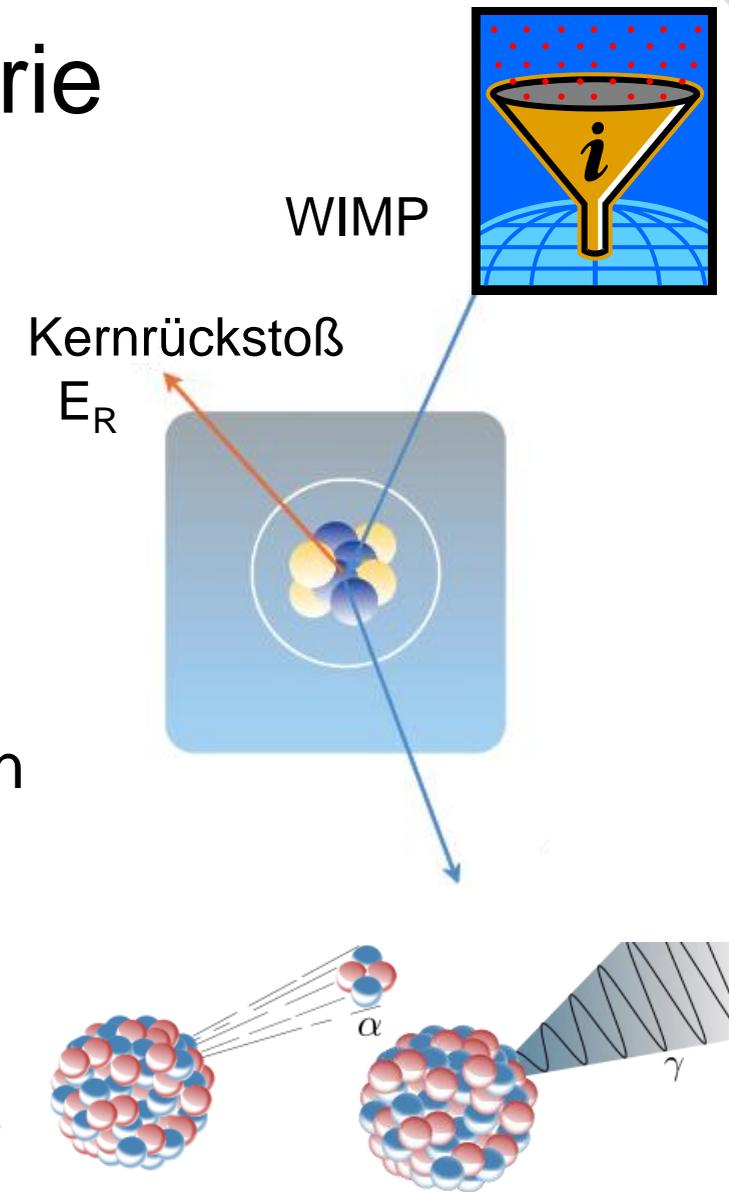
## ■ Untergrundreduktion – I

- **Pb/Cu-Abschirmung** gegen natürlichen Untergrund  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ , Radon
- Gammas & Elektronen, Neutronen & Kernrückstoß

## ■ Untergrundreduktion – II

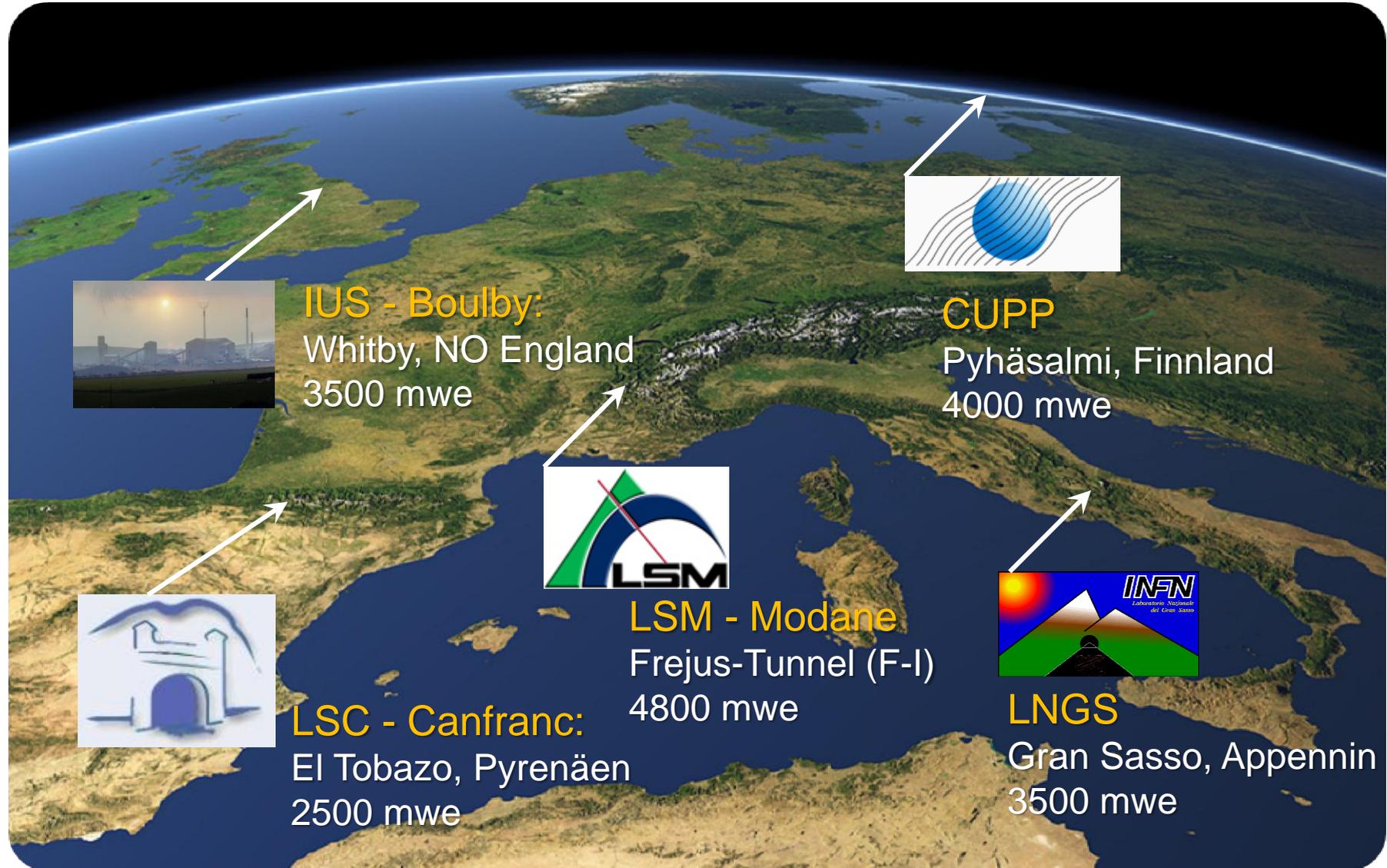
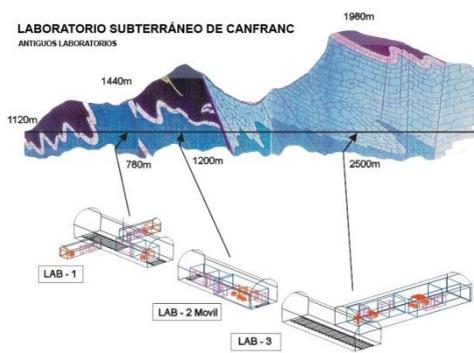
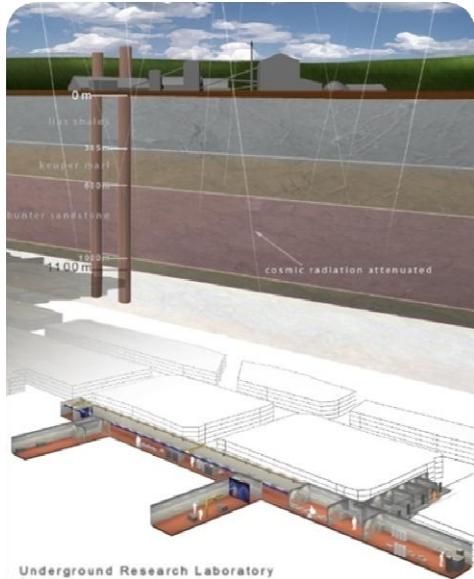
- Abschirmung gegen Myonen in **Untergrundlabor**  
Tiefe: 2500 m.w.e.  $\rightarrow$  6000 m.w.e.

**LNGS**, LSM, SNOlab, DUSEL, Kamioka,...



# Europäische Untergrundlabore

## ■ Vergleich von Untergrundlaboren in Europa (ILIAS Studie der EU): Abschirmung gegen kosmische Myonen

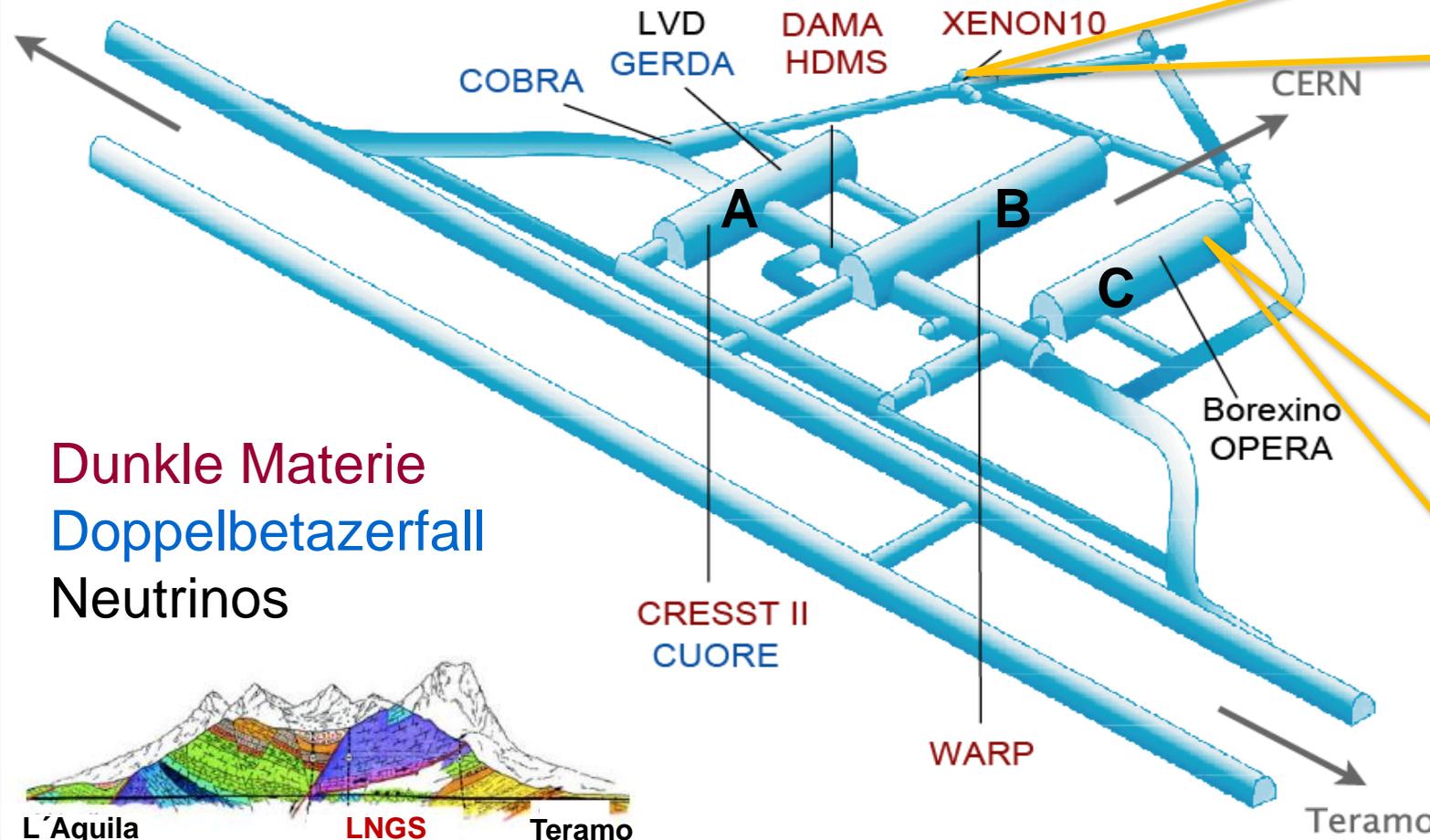


# Gran Sasso Untergrundlabor LNGS

■ **LNGS:** größtes Untergrundlabor weltweit mit einer Fläche  $A = 17.300 \text{ m}^2$  unterteilt in 3 große Experimentierhallen (A,B,C), Myonrate:  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



L'Aquila



Dunkle Materie  
Doppelbetazerfall  
Neutrinos



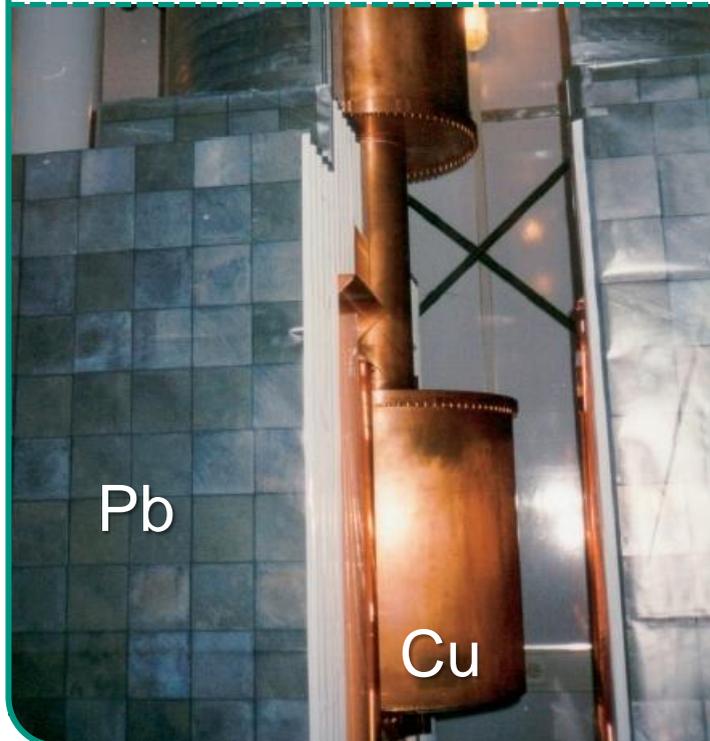
vgl. ATP-II

# Untergrundreduktion

## ■ Separation der WIMP-Kern Streuung im keV-Bereich vom Untergrund durch:

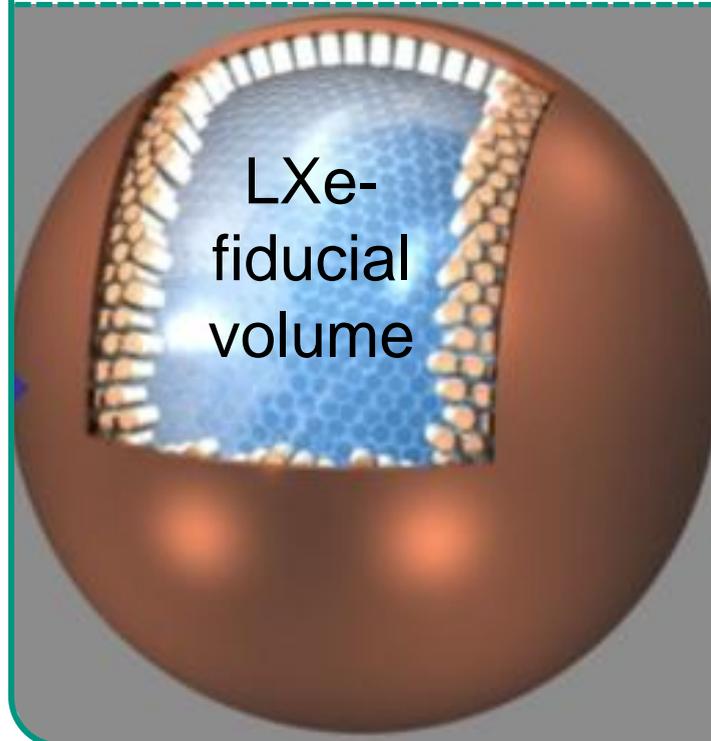
### äußere Abschirmung

**passiv:** Cu, Pb gegen  $\gamma$ 's  
PE gegen Neutronen  
**aktiv:** äußerer  $\mu$ -Veto



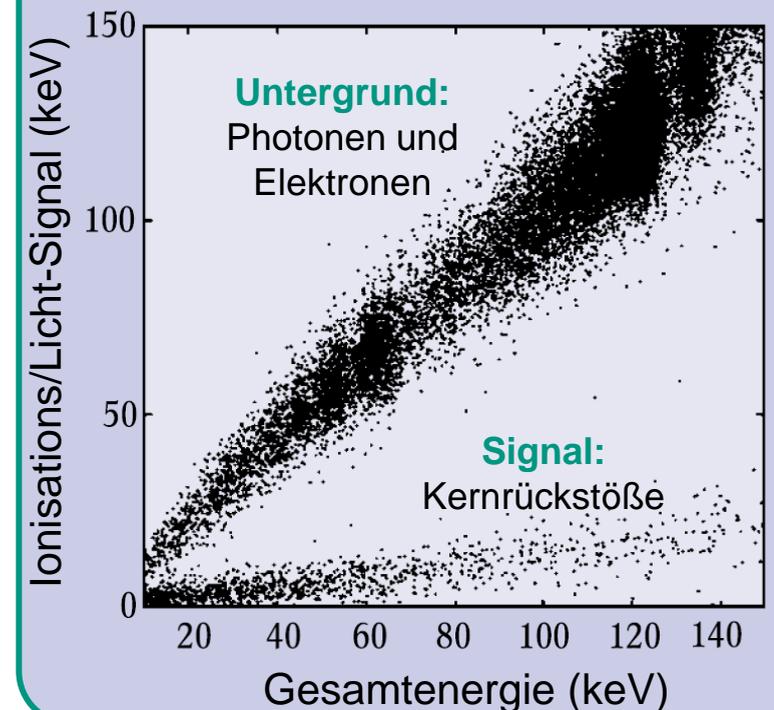
### Selbst-Abschirmung

Beschränkung auf den  
**innersten Bereich**,  
keine Oberflächeneffekte  
⇒ **fiducial volume**

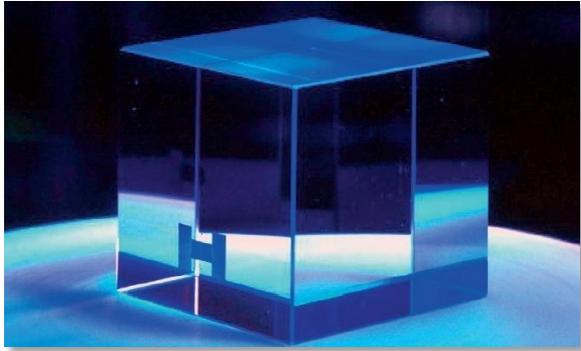


### Teilchendifferenzierung

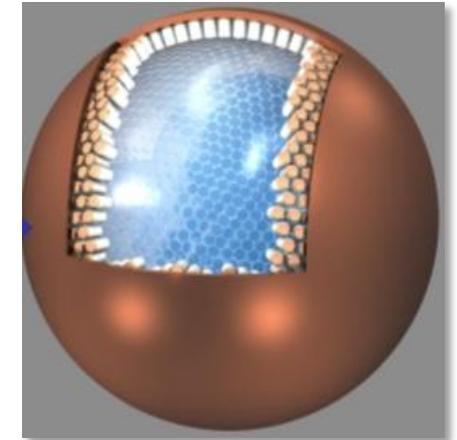
Ereignistopologie (Hits,  
Zeitverhalten, Energie):  
**Licht-Wärme-Ionisation**



# Nachweismethoden – 1 Messparameter



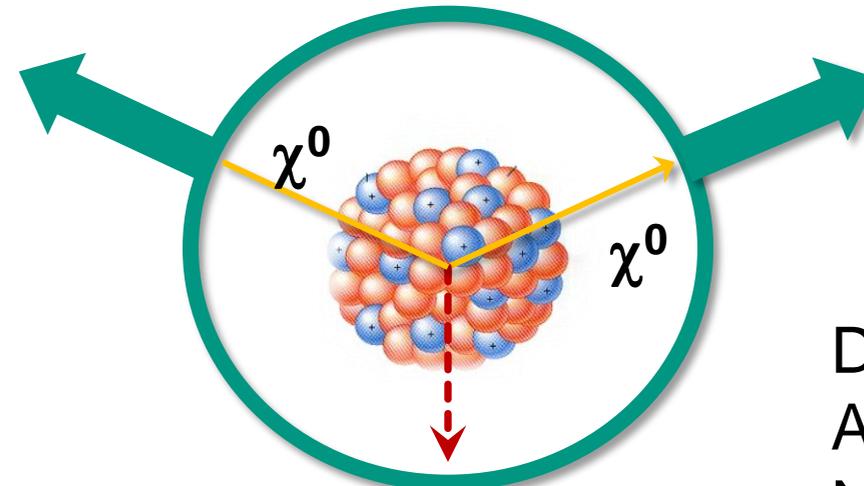
CRESST-I



XMASS  
CLEAN  
Zeplin I

Phononen

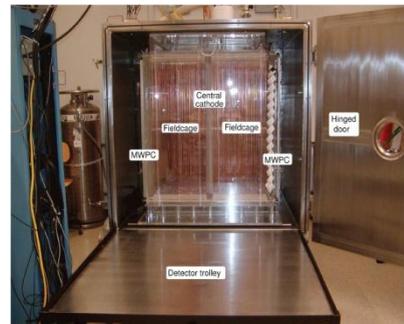
Szintillation



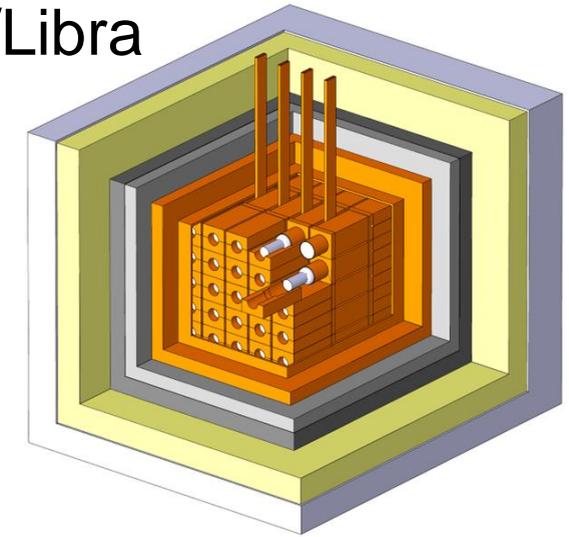
Ionisation



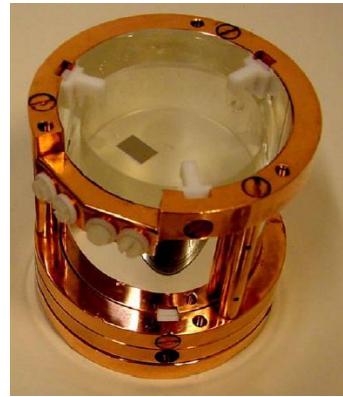
HDMS, DRIFT



DAMA/Libra  
ANAIS  
NAIAD  
KIMS

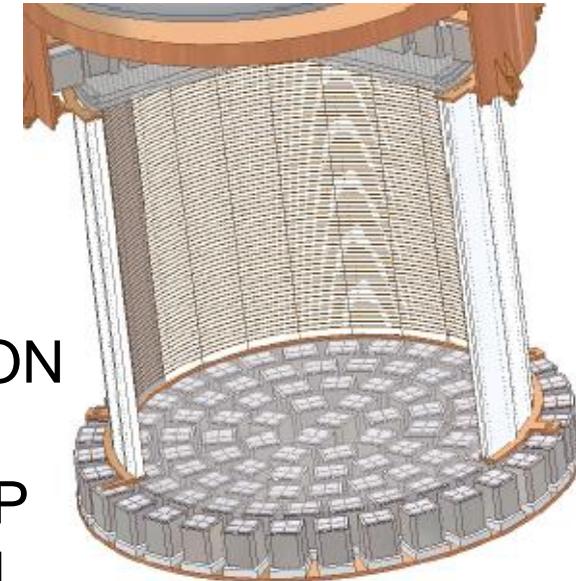


# Nachweismethoden – 2 Messparameter



CRESST-II  
ROSEBUD

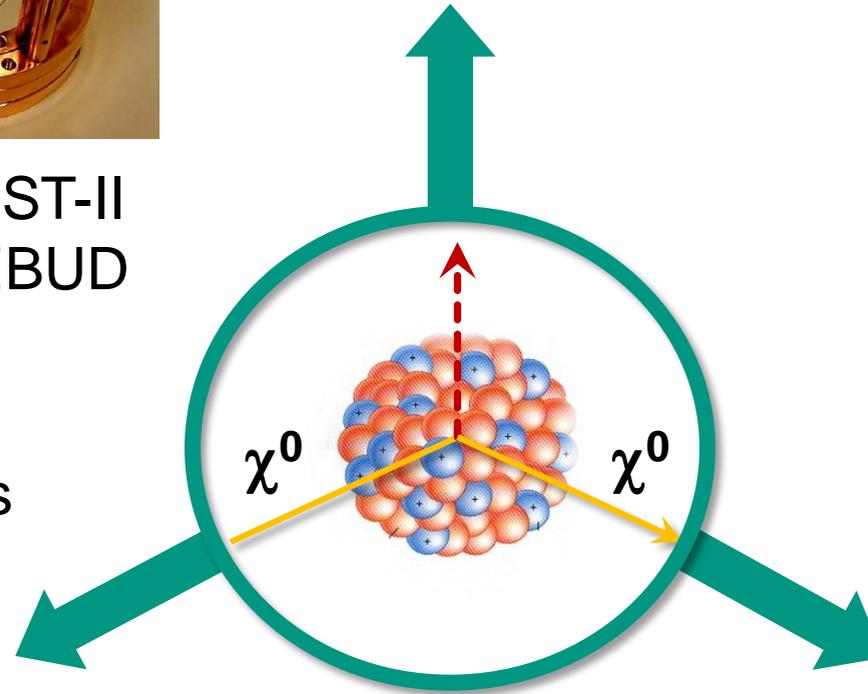
Szintillation  
&  
Phononen



XENON  
LUX  
WARP  
ArDM  
ZEPLIN II,III



CDMS  
Edelweiss



Phononen  
&  
Ionisation

Ionisation  
&  
Szintillation



# Szintillatoren für Kernrückstoß

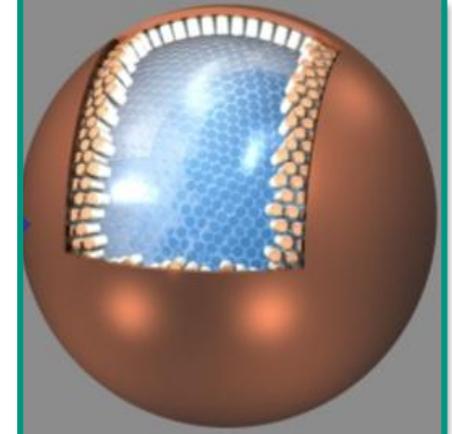
## ■ Vorteile:

- **große Target-Masse:  $M = 100 \text{ kg} - 1 \text{ Tonne}$** 
  - ↳ Suche nach Modulation mit  $T = 1 \text{ Jahr}$
  - ↳ Selbstabsorption des externen Untergrunds
- bekannte Detektor-Technologie:  
anorganisch (NaJ, CsJ), flüssige Edelgase (LXe)
- gute intrinsische Reinheit & hohe Lichtausbeute
- sensitiv auf spin-abhängige Wechselwirkung:  
 $^{23}\text{Na}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{131}\text{Xe}$
- lange, kontinuierliche Messzeiten möglich (viele Jahre)

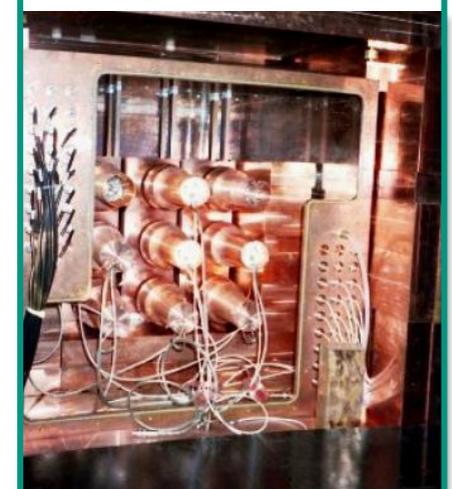
## ■ Nachteile:

- **nur moderate Untergrund-Diskriminierung**  
d.h. Separation von Kernrückstößen & Elektronen
- begrenzte Ortsauflösung (Segmentierung)

LXe



Szintillation



NaJ, CsJ

# Szintillation – DAMA/LIBRA

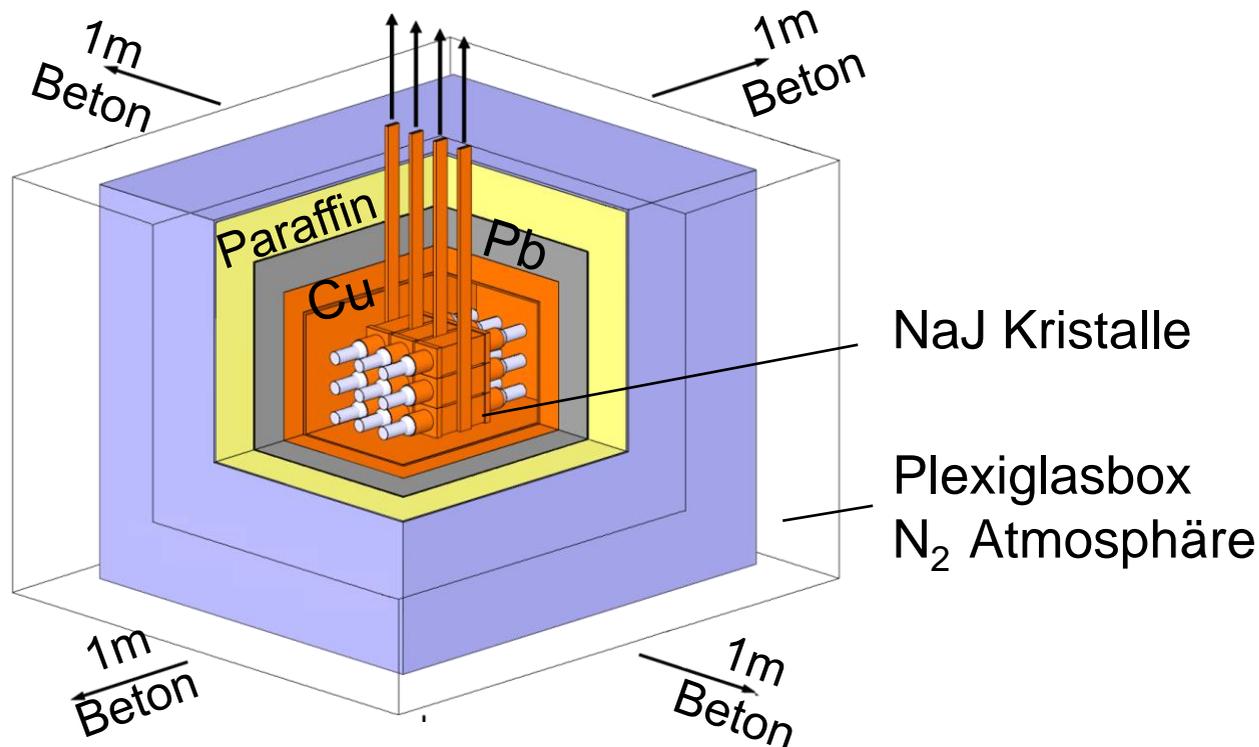
## ■ **DA**rk **MA**tter Experiment: **NaJ Szintillationsdetektor-Array**

Target: **9 × 9.7 kg** hochreine NaJ Kristalle (Szintillatoren)

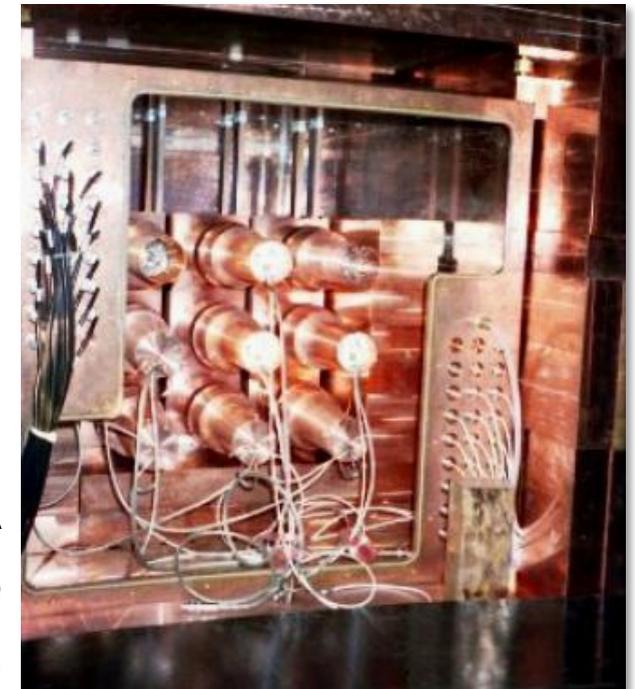
Schwelle  $E_{\text{thres}} = 2 \text{ keV}_{ee}$  ( $\equiv 20 \text{ keV}$  Rückstoßenergie  $^{23}\text{Na}$ )

Auslese: 2 PMT's/Kristall, Lichtausbeute 5-7 p.e./keV

Untergrund: sehr geringe NaJ Eigenaktivität, Abschirmung : Beton, Paraffin, 15 cm Boliden-Pb, 10 cm Cu,  $\rightarrow$  1-2 Ereignisse/keV/kg/Tag

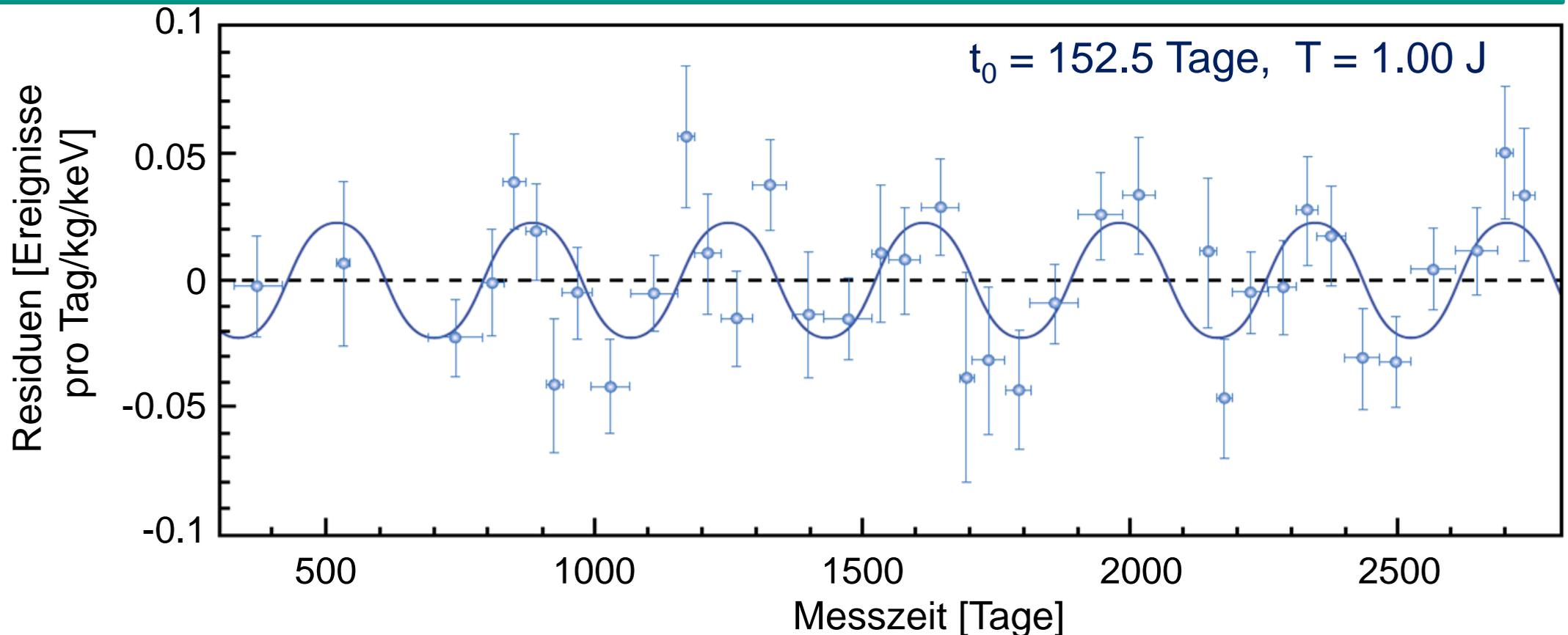


DAMA  
Set-up  
am LNGS

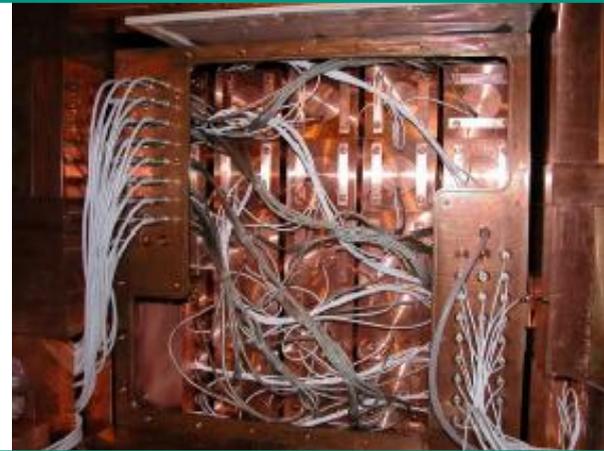


# DAMA – jährliche Modulation

- **7 Jahre Datennahme** (107 731 kg-Tage) von Januar 1995 – Juli 2002
- Modulation der Ereignisrate** mit  $T = 1a$  & erwarteter Phase ( $t_0 = 2.$  Juni)
- Signal nur knapp oberhalb der 'hardware' Schwelle bei  $E = 2 - 6$  keV
- keine Modulation bei  $E = 6-14$  keV, statistische Signifikanz (CL) =  $6.3 \sigma$
- Interpretation von DAMA als **Evidenz für direkten WIMP-Nachweis** (??)



- **LIBRA** - Large Sodium Iodide Bulk for Rare processes  
Nachfolge-Experiment von DAMA
  - **250 kg NaJ** (TI) aus 25 Kristallen (5 × 5 Matrix)

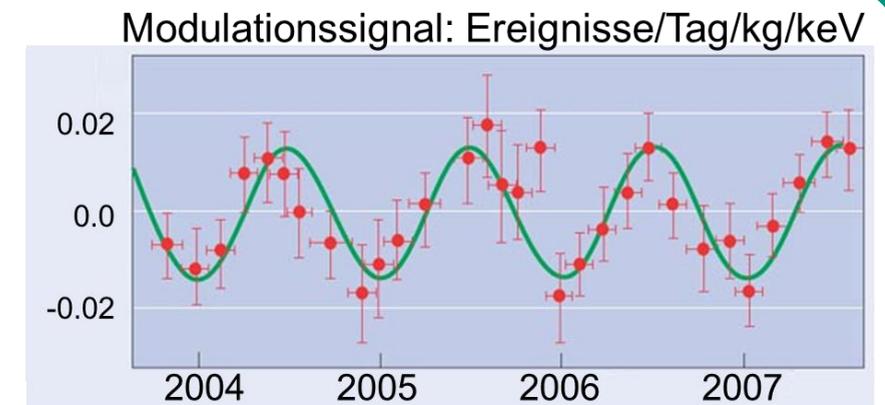


## ■ Messungen DAMA/Libra

- Datennahme seit 9/2003

## ■ Resultate

- Bestätigung des DAMA Modulationssignals: gleiche Amplitude & Phasenrelation
- Gesamtexposition (2008) **Masse · Jahre = 0.82 t Jahre**  
statistische **Signifikanz 8.2  $\sigma$**  für **Signal mit jährlicher Modulation**
- favorisierter WIMP Parameterbereich ( $M_\chi, \sigma$ ) wird aber vom XENON Experiment ausgeschlossen (auch für sehr leichte WIMPs!)



# Szintillation – XMASS

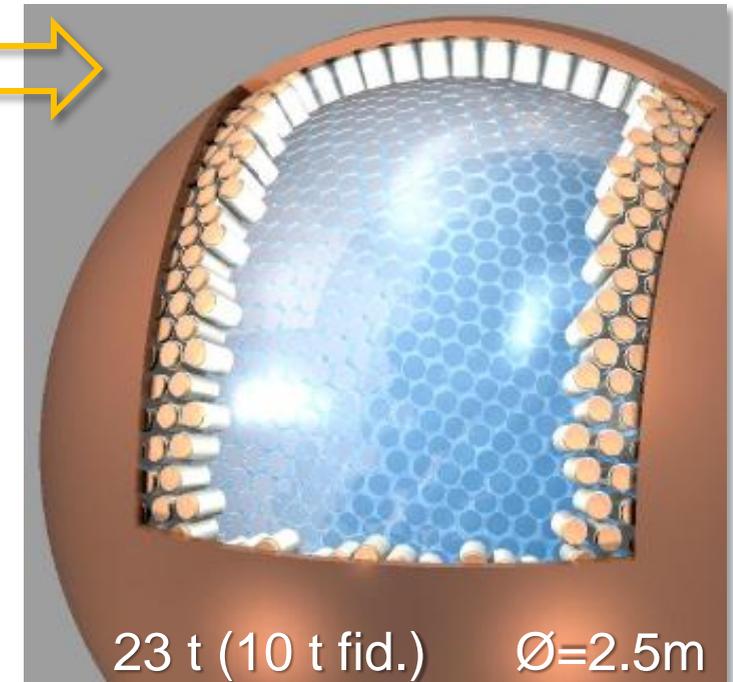
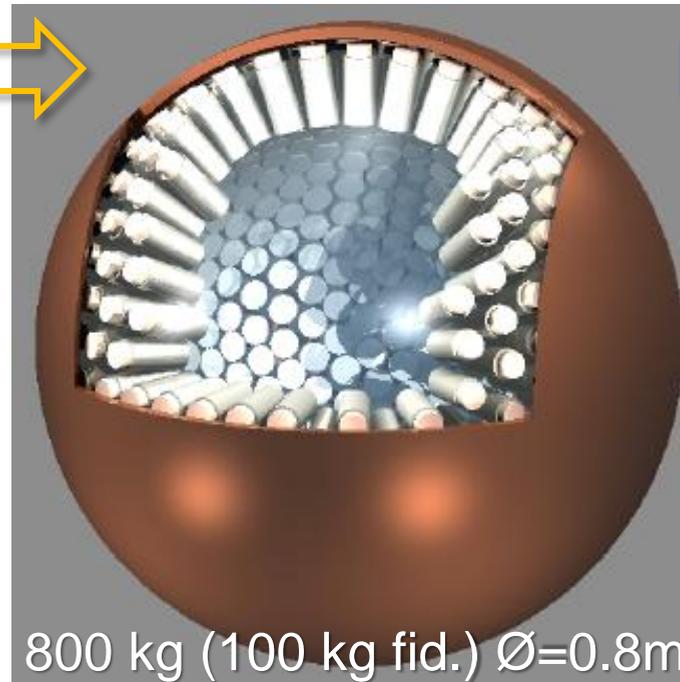
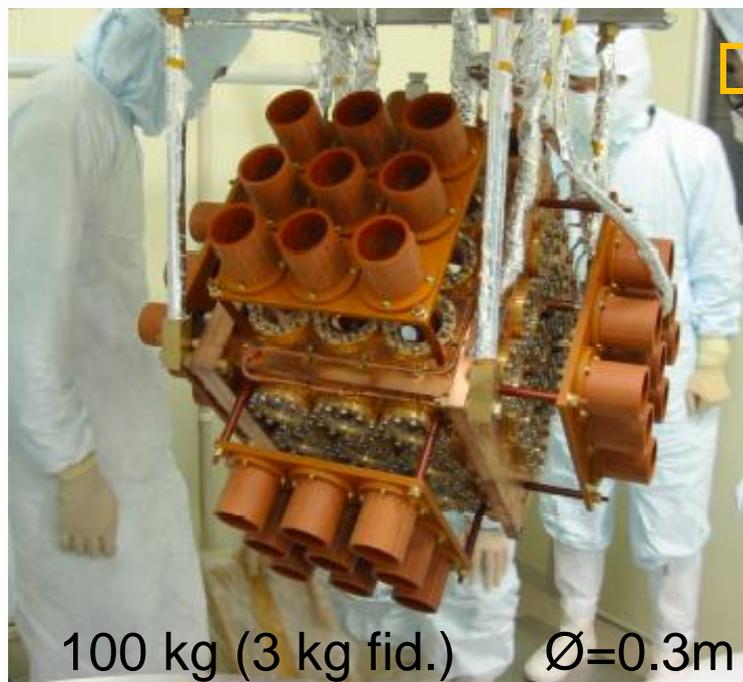
## ■ XMASS: Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles

Experiment in der Kamioka Mine in den japanischen Alpen

**Ziel:** schrittweise Vergrößerung der Xenon-Targetmasse, damit verbesserte Selbstabsorption des Untergrunds durch LXe ( $10^{-4}$  Ereignisse/kg/keV/Tag)

**Technik:** UV-Szintillationslicht in **flüssig-Xenon (LXe)** ( $T = 165$  K)  
bei  $\lambda = 175$  nm, Rayleigh-Streuung limitiert Ortsauflösung

**Status:** Vorbereitung der Messungen mit 800 kg Detektor

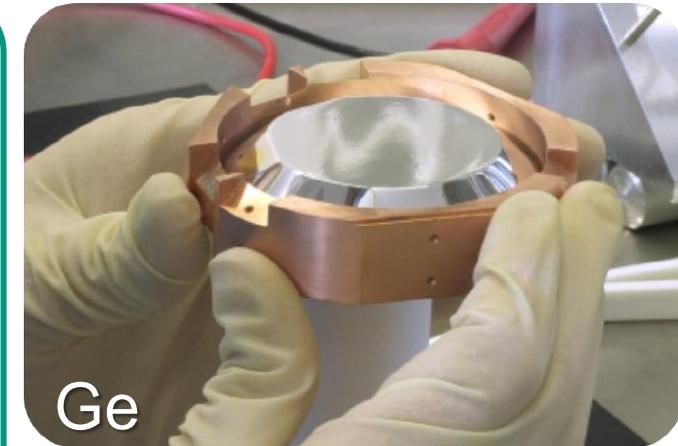


# Kryogene Experimente - Überblick

## ■ kryogene Tieftemperatur-Bolometer im mK Bereich (CRESST, CDMS,...)

### Vorteile:

- gute Kernrückstoß-Sensitivität (Phononen)
- relativ niedrige Energieschwelle
- gute Energieauflösung ( $\sim 150$  eV @ 6 keV)
- **verschiedene Targetmaterialien** (Ge, Si,  $\text{CaWO}_4$ )
- Kombination Photonen mit Ionisation & Szintillation:  
gute Abtrennung von Gammas & Elektronen
- modularer Aufbau ( $\rightarrow$  skalierbar & sequentiell erweiterbar, ggfs. Austausch von Einzeldetektoren)



### Nachteile:

- aufwändige mK-Kryotechnik (Aufbau, Messen)
- sehr beschränkte Targetmasse (**< 30 kg bisher**)
- **modularer Aufbau** ( $\rightarrow$  große innere Oberfläche)

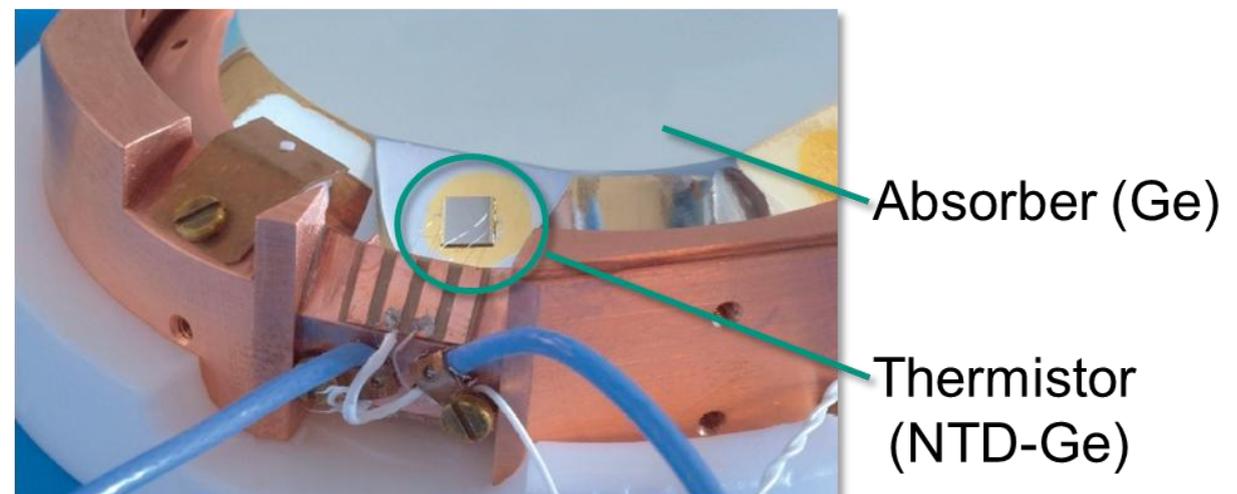
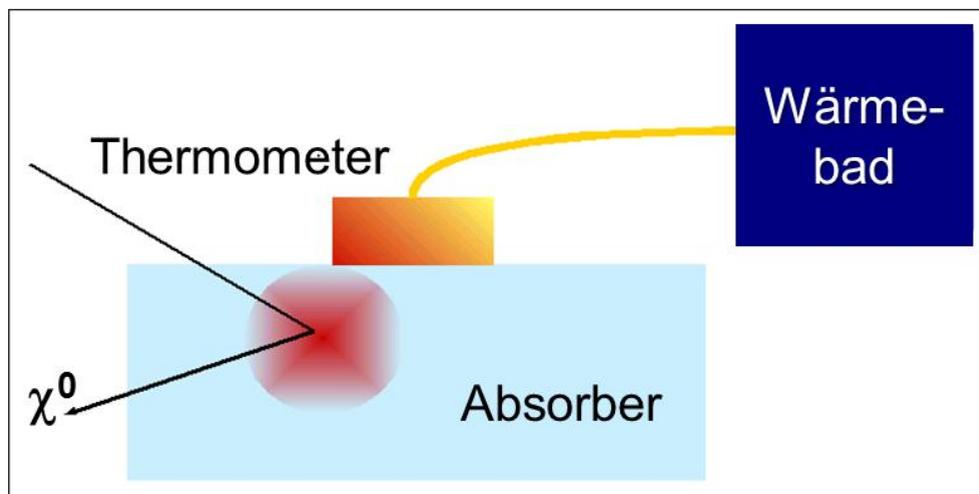


## ■ Meßprinzip eines kryogenen Bolometers (Kalorimeters):

- Energiedeposition  $E_R$  des Rückstoßkerns aus der  $\chi^0$ -Streuung führt zu kleiner, aber messbarer Temperaturerhöhung  $\Delta T$  im Absorber
- **Absorber** (Ge, Si,  $\text{CaWO}_4$ ) mit Masse  $M \sim 300 \text{ g}$  bei  $T_0 = 10\text{-}20 \text{ mK}$
- **Thermometer** zur Messung des Temperaturanstiegs  $\Delta T$  im Absorber
- Wärmebad (schwache Ankopplung) zur Rückführung des Absorbers auf  $T_0$

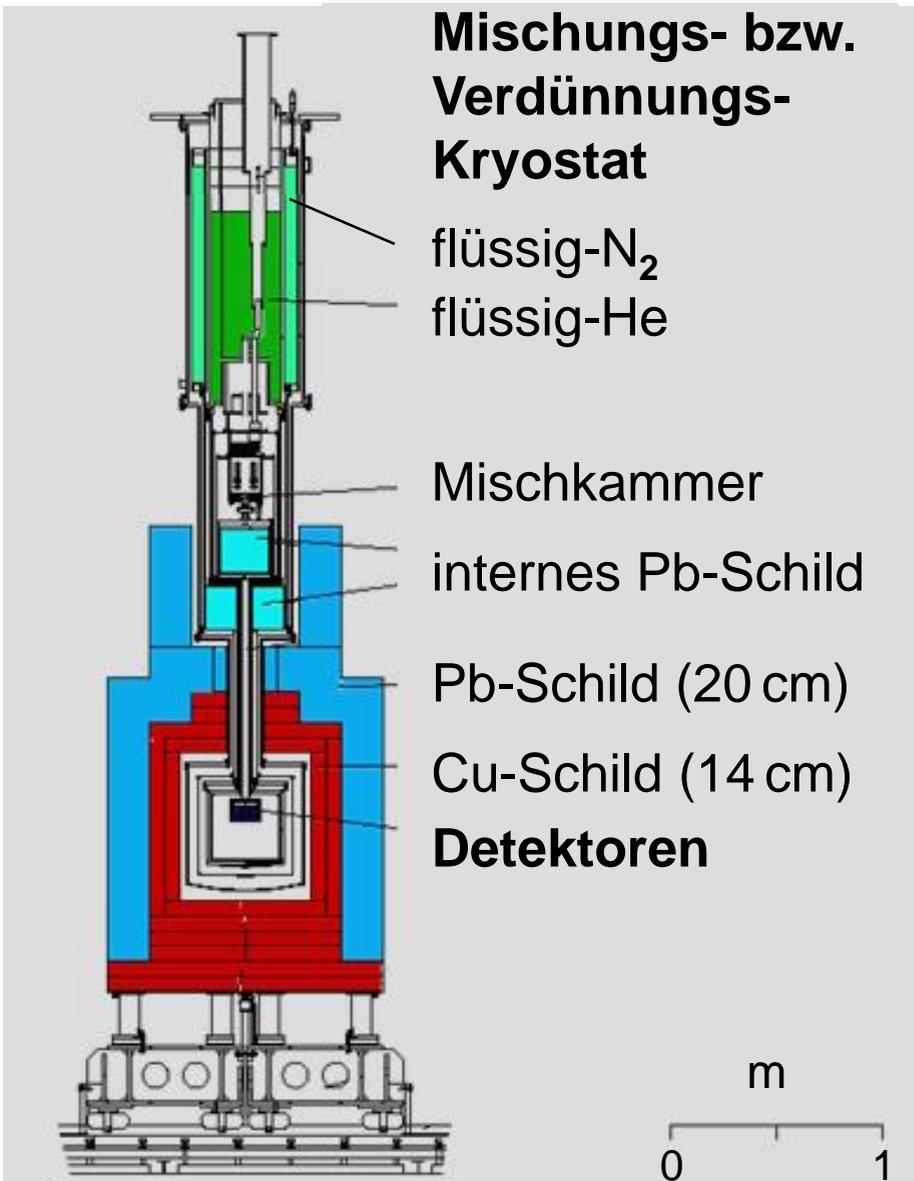
$$\Delta T = \frac{E_R}{V \cdot C_V} \quad \text{wichtig: kleine spezifische Wärmekapazität } C_V \text{ des Absorbers}$$

↳ begrenzt die Masse  $M$  eines kryogenen Bolometers ( $\sim 1 \text{ kg}$ )



# Bolometer bei mK Temperaturen

- Betriebstemperaturen im mK Bereich erfordern  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Mischungs-Kryostate



- **Bolometerbetrieb im mK Bereich:**  
Minimierung der spezifischen Wärme  $C_V$   
bei  $T \ll T_D$ : **Debye'sches Gesetz** für  $C_V$

$$C_V \approx 1 \cdot 10^{18} \frac{\text{keV}}{\text{cm}^3 \text{K}} \left( \frac{T}{T_D} \right)^3$$

$T_D$  = materialspezifische Debye-Temperatur  
(Ge: 374 K, Si: 645 K)

## 250 g $\text{CaWO}_4$ Kristall: Wärmekapazität

$T = 1 \text{ K}$        $C = 130 \text{ MeV} / \mu\text{K}$

$T = 25 \text{ mK}$        **$C = 2 \text{ keV} / \mu\text{K}$**

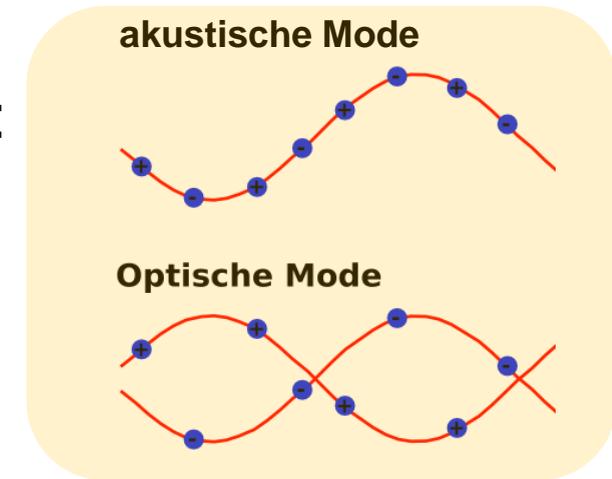
- Beispiel: 100 g Ge-Detektor bei 10 mK,  
 $E_R = 1 \text{ keV} \rightarrow \Delta T = 1 \mu\text{K}$

## ■ Phonon-Signal:

- WIMP-Rückstoßkern wird nach  $d < 1 \mu\text{m}$  gestoppt:
- Ausbreitung einer sphärischen Phononenwelle
- Phononen: elementare Gitterschwingungen

Moden: akustisch / optisch

Phononen sind **Quasiteilchen**



Phonon-Art	Energie	Thermodynamik	
quasi-ballistisch	1 – 10 meV	$E_{\text{ph}} \gg k_{\text{B}}T$ ( $\equiv T > 10 \text{ K}$ )	nicht im Gleichgewicht
thermisch	< 0.1 meV	$E_{\text{ph}} \sim k_{\text{B}}T$ ( $\equiv T < 1 \text{ K}$ )	im Gleichgewicht

(Umrechnungsfaktor  $1\text{K} \sim 0.1 \text{ meV}$ ):

## ■ Quasi-ballistische Phononen 'zerfallen' in thermische Phononen

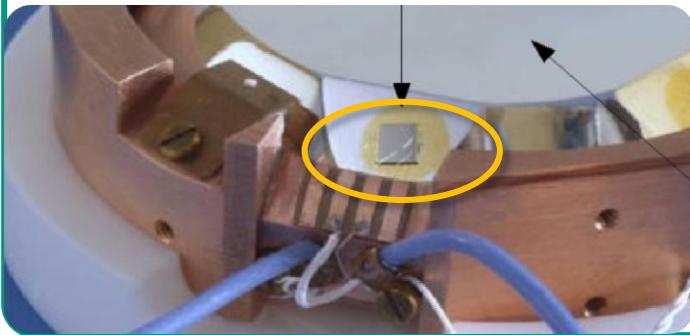
Vergleich Phononen – Ionisation in Germanium:

- 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

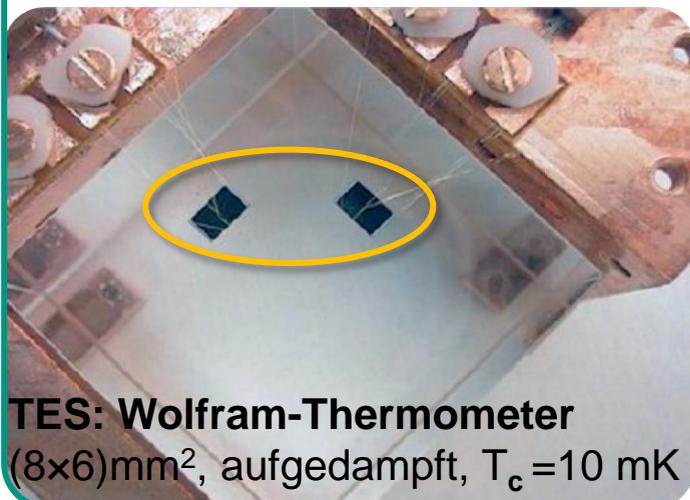
- **Thermistor:** misst  $\mu\text{K}$  Temperaturanstieg des Absorbers (Phononen aus Absorber koppeln in Thermistor ein), Ziel: **kleines  $\Delta T \rightarrow$  großes  $\Delta R$**

## thermische Phononen



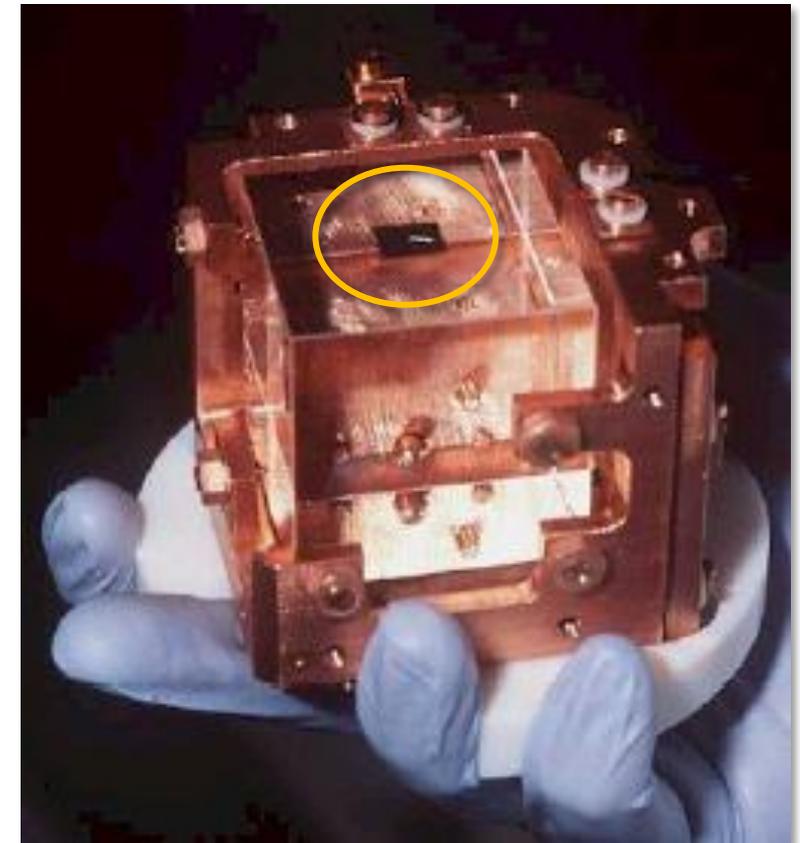
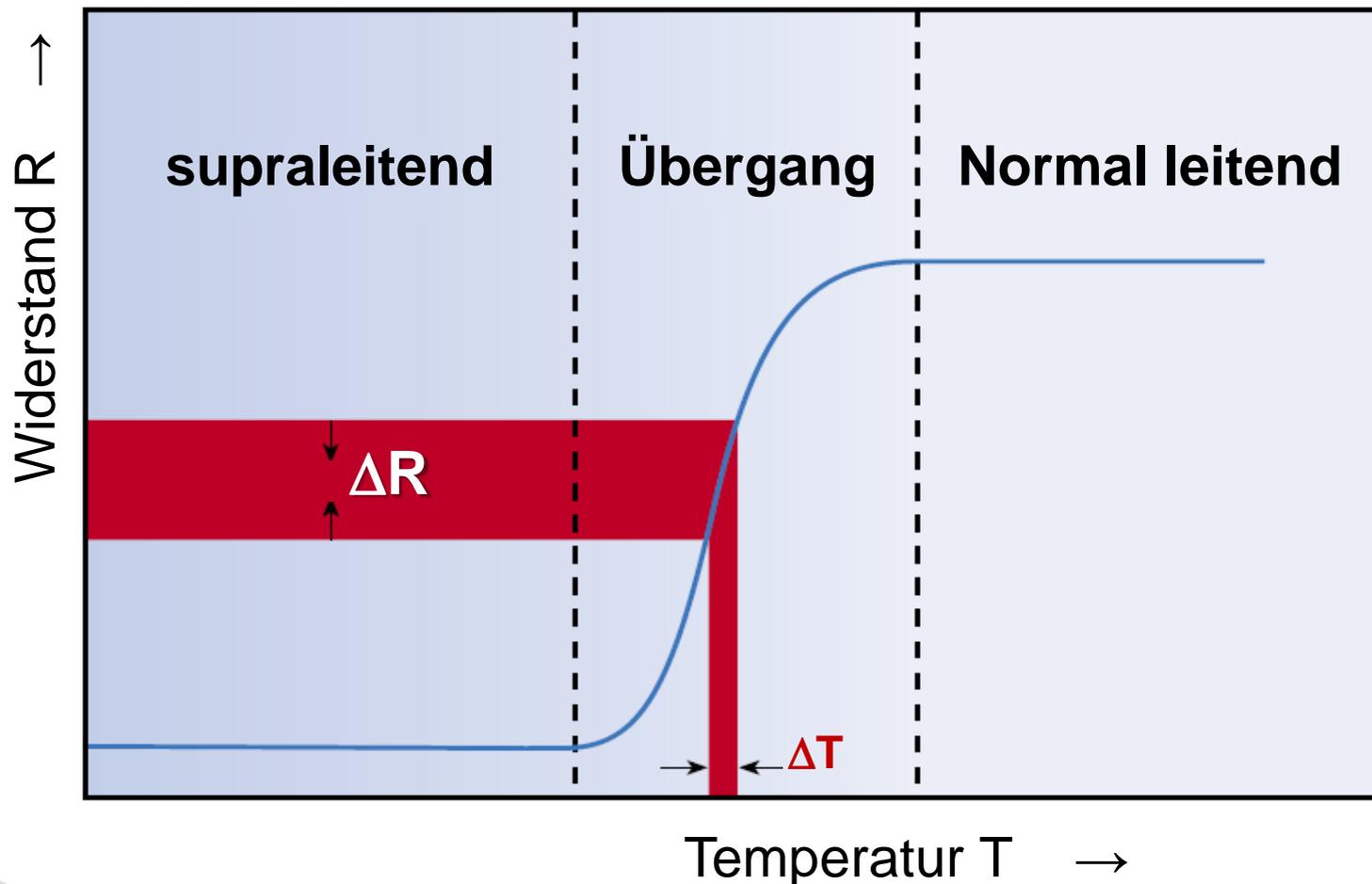
langsameres Signal, Auslese durch hochreine, speziell dotierte **Halbleitersensoren**:  $\log R(T) \sim T^{-1/2}$   
NTD-Germanium (**N**eutron **T**ransmutation **D**oped)  
temperaturabhängiger Widerstand  $R(T)$  des Sensors,  
**hochohmig**: NTD-Ge bei 30 mK:  $R \sim 10^6 \Omega$

## ballistische Phononen



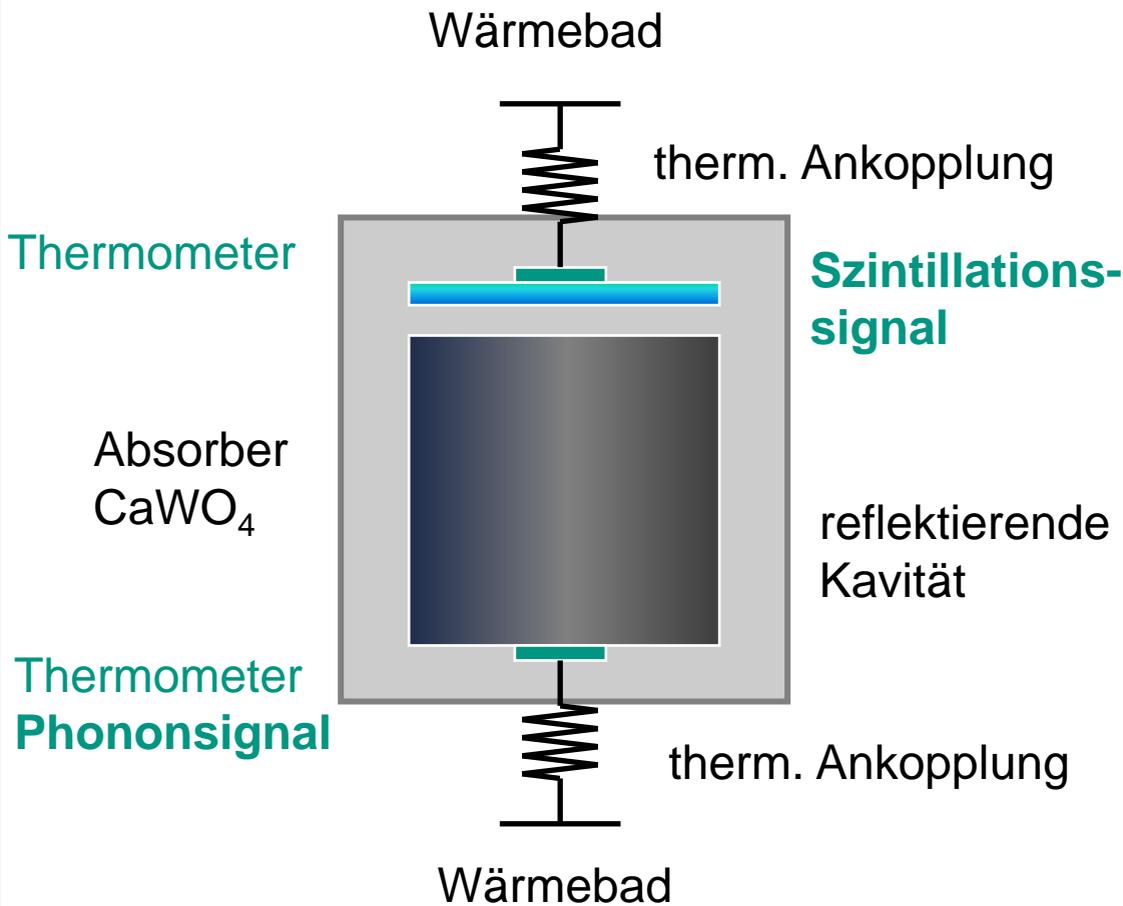
schnelles Signal, Auslese durch **supraleitende Sensoren: TES** (**T**ransition **E**dge **S**ensor),  
dünner supraleitender Film (Aufbruch Cooper-Paare)  
Übergang supraleitend-normalleitend,  $T_0 = 10 - 50 \text{ mK}$   
supraleitend. Phasenübergangs-Thermometer SPT  
**niederohmig**:  $R \sim \text{m}\Omega$   
- TES-Auslese erfolgt durch SQUIDs

- **TES-Thermistoren** zur Auslese ballistischer Phononen: Betrieb in der Mitte des engen, nur wenige mK breiten Temperaturbereichs des Übergangs zwischen dem supra- und dem normalleitendem Zustand betrieben damit: **kleine Temperaturänderung  $\Delta T$**   $\rightarrow$  **große Widerstands-Änderung  $\Delta R$**



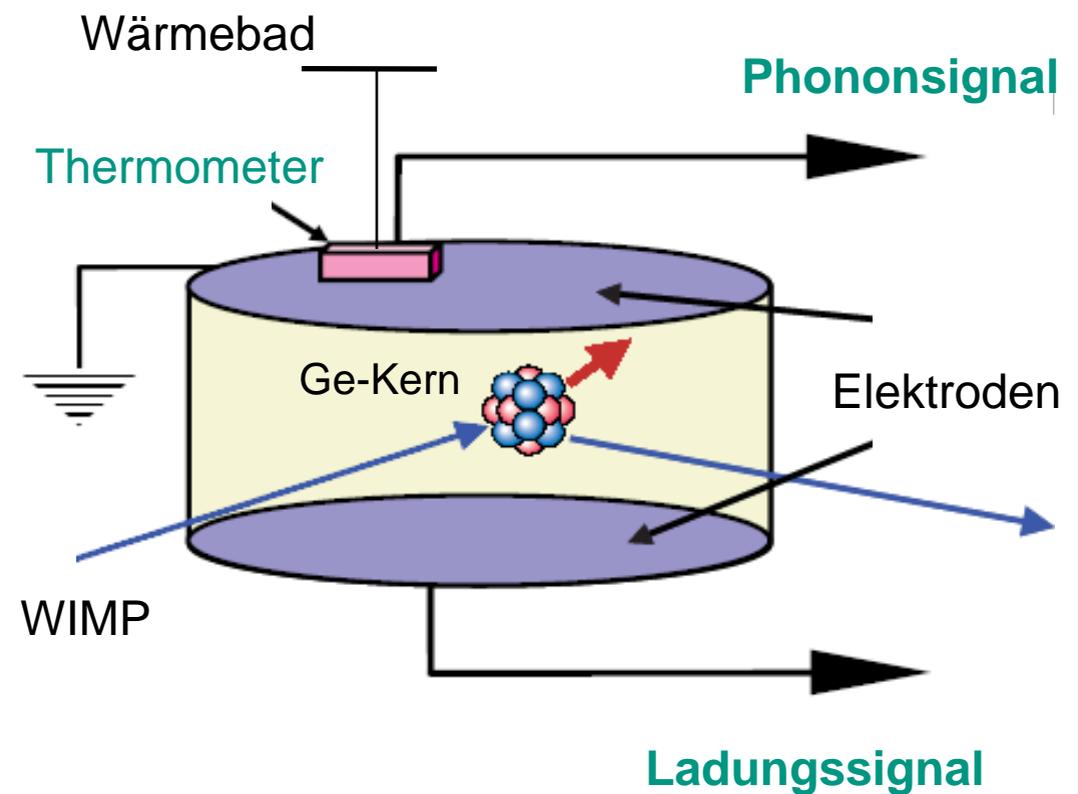
## Szintillation und Phononen: CRESST

~1% der Energie als Licht detektiert



## Ionisation und Phononen: CDMS, EW

~10-20% der Energie als Ionisation

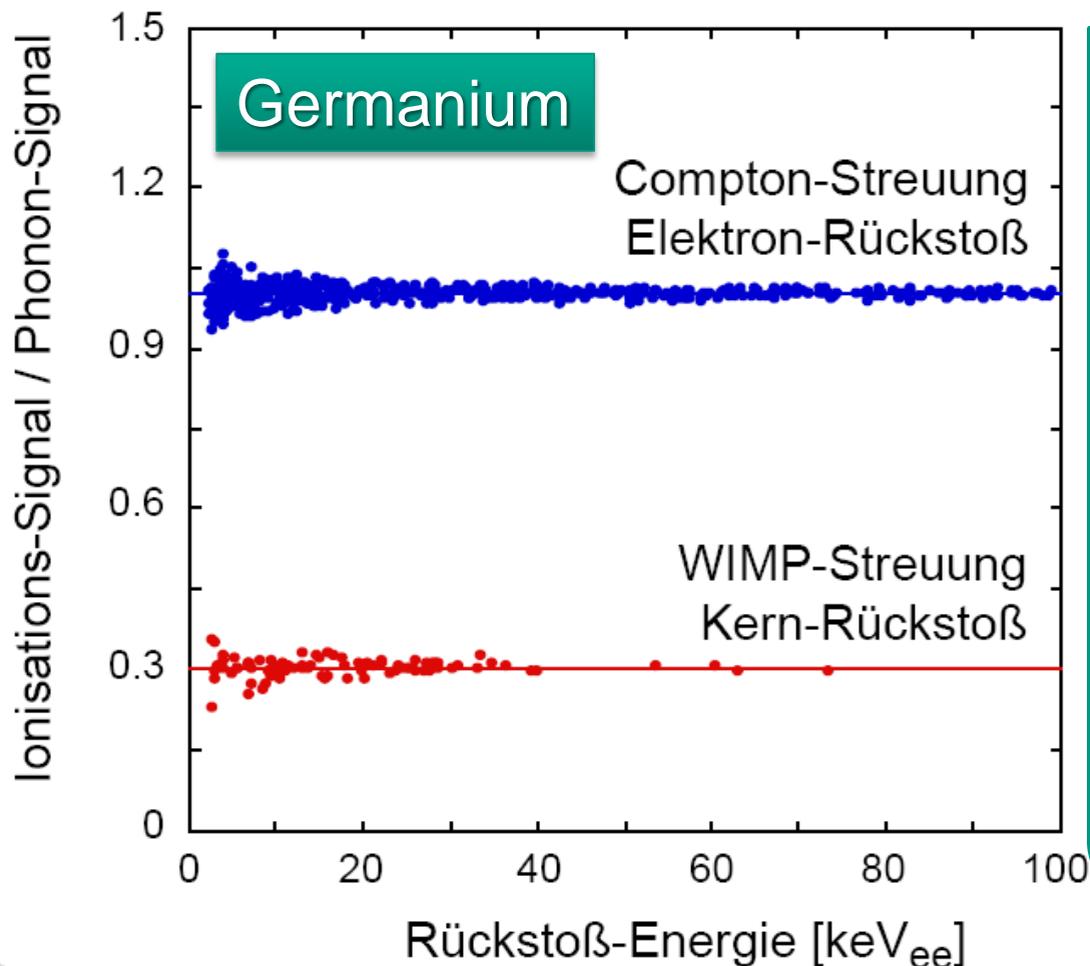


**Oberflächeneffekte  
bei Ladungssammlung!**

## ■ Diskrimination (Trennung) von Signal und Untergrund

- **WIMPs**: Rückstoß des schweren Target-Kerns nach Streuung
- **Gammas** (Elektronen): Rückstoß eines leichten atomaren Elektrons

↪ **Verhältnis des Ladungs- (Licht-) Signals zum Phononsignal**



## ■ Quenching

### Ionisationssignal des Kernrückstoßes

- schwere Kerne erzeugen eine hohe spezifische Ionisationsdichte
- durch Rekombination von Ionen & Sekundärelektronen wird das Ladungssignal reduziert (**gequencht**)
- bei Ge-Detektoren gilt:

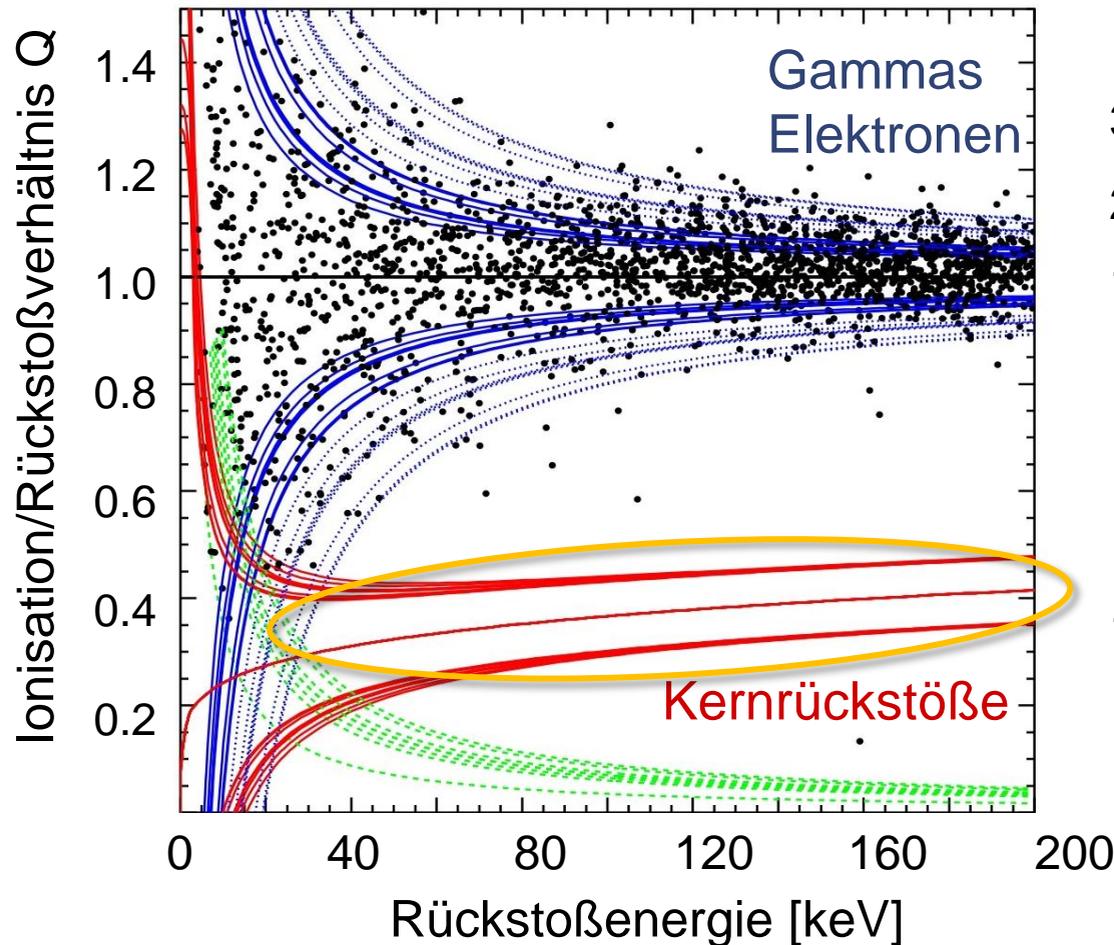
$$E_{\text{vis}} (\text{Ionisation}) \sim \frac{1}{3} \cdot E_R (\text{Phonon})$$

# Kryobolometer - Teilchendiskrimination

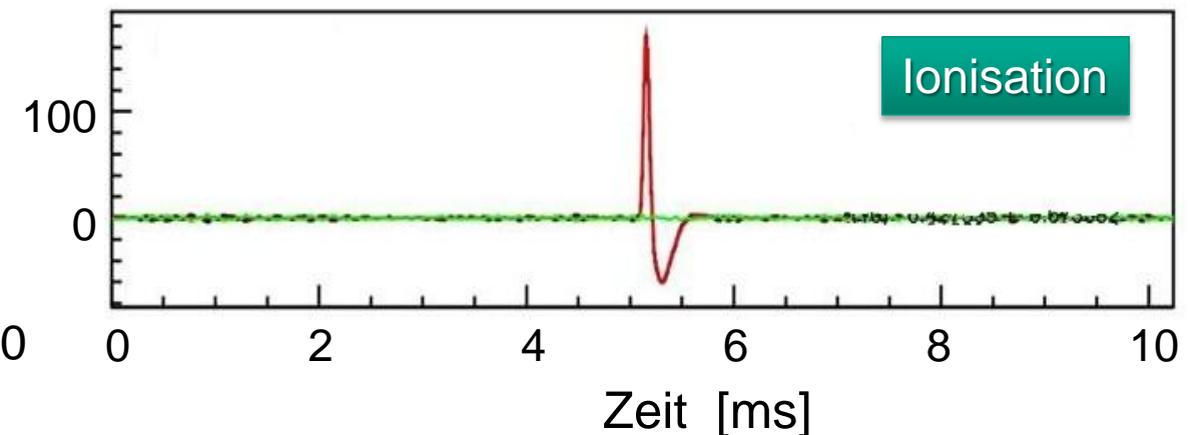
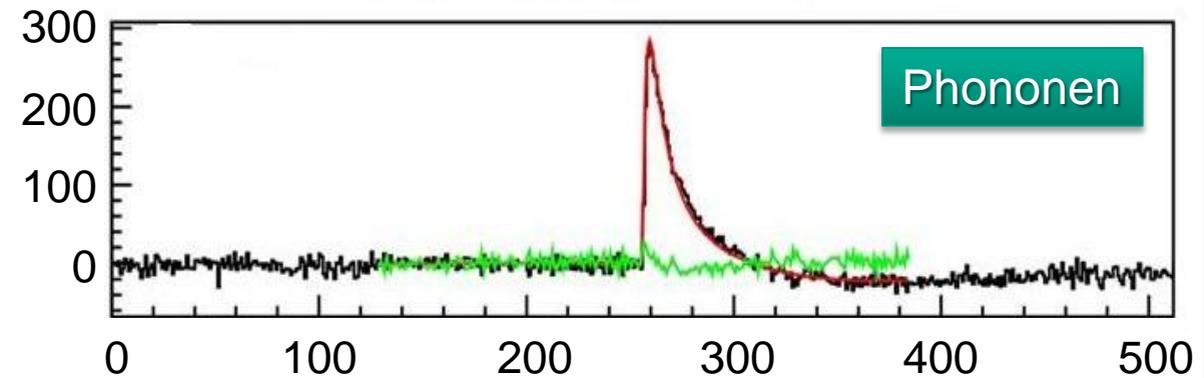
## ■ Ge-Bolometer mit Ladungs- und Phonon-Signal

- gute Abtrennung des Kern-Rückstoßes von  $e^-$ ,  $\gamma$ 's bzw.  $\alpha$ 's

**Ionisations-Quenching:** Ladungssignal des Ge-Kerns ist auf  $\sim 1/3$  reduziert durch **hohe spezifische Ionisationsdichte  $dE/dX$**



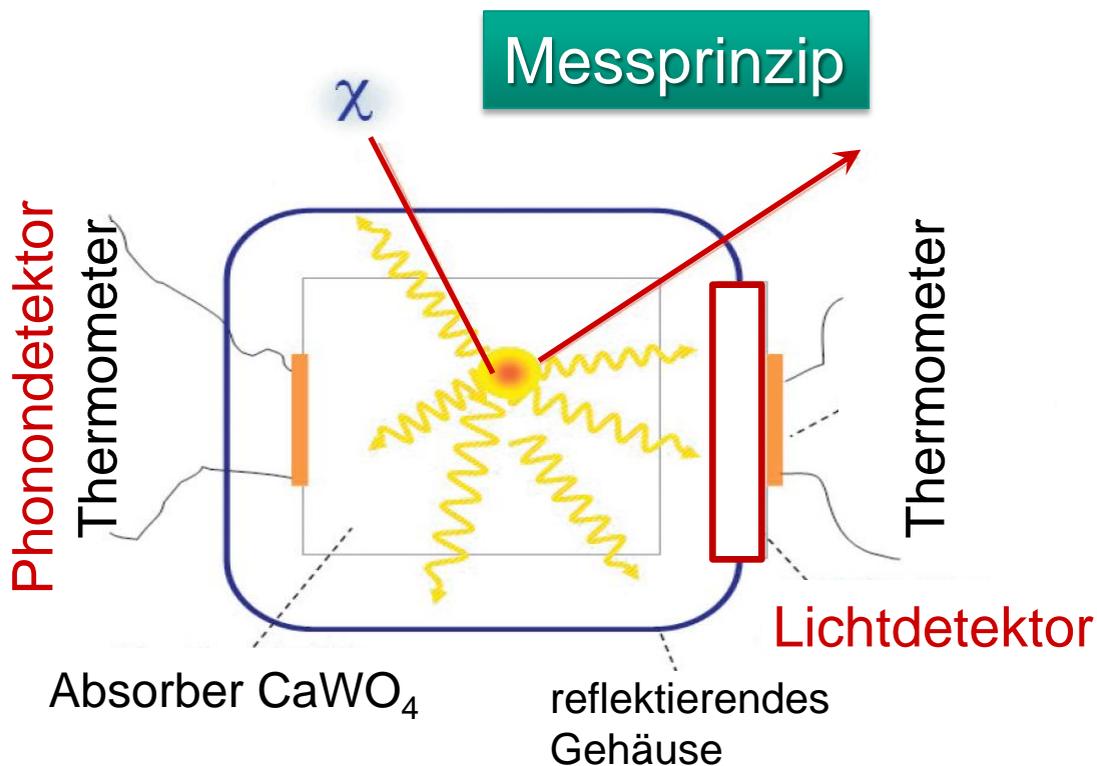
## Koinzidenz: Phononsignal & Ionisation



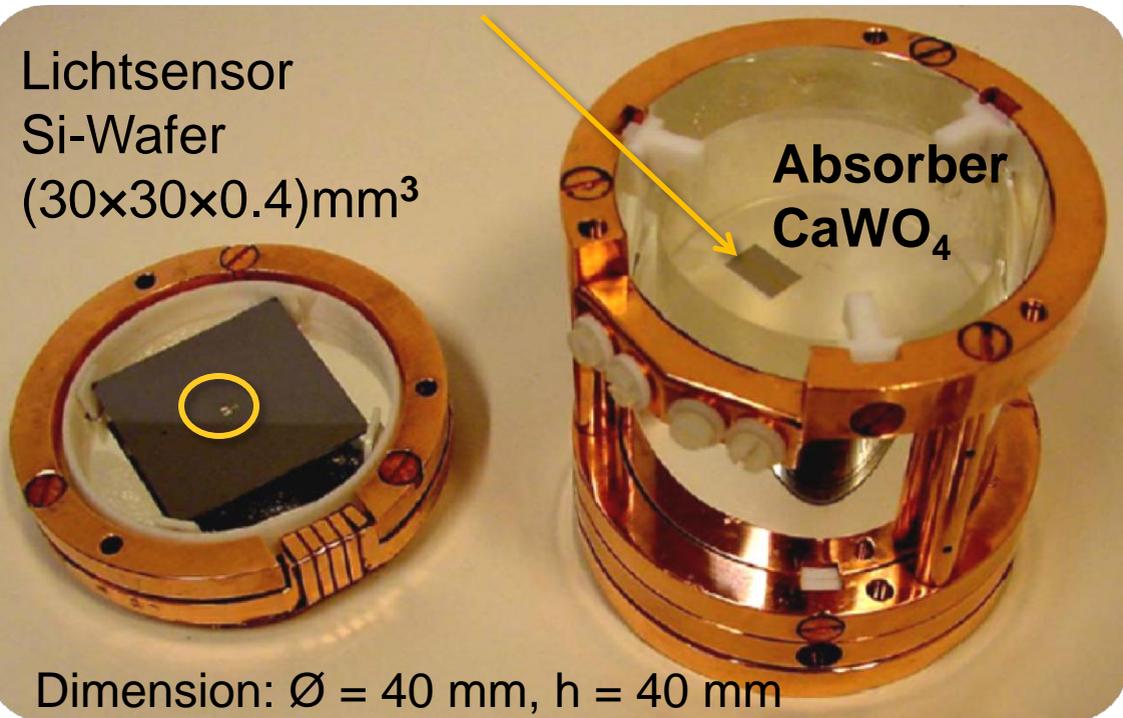
# CRESST-II Experiment

## ■ CRESST: Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

- Ort: Halle A im LNGS (Gran Sasso Labor),
- **Prinzip: Szintillation und Phononen (Teilchendifferenzierung)**
- einzelne  $\text{CaWO}_4$  – Kristalle (Kalzium-Wolframat) mit Masse  $M = 300 \text{ g}$
- WIMP-Streuung: Kernrückstöße an  $^{184}\text{W}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{16}\text{O}$



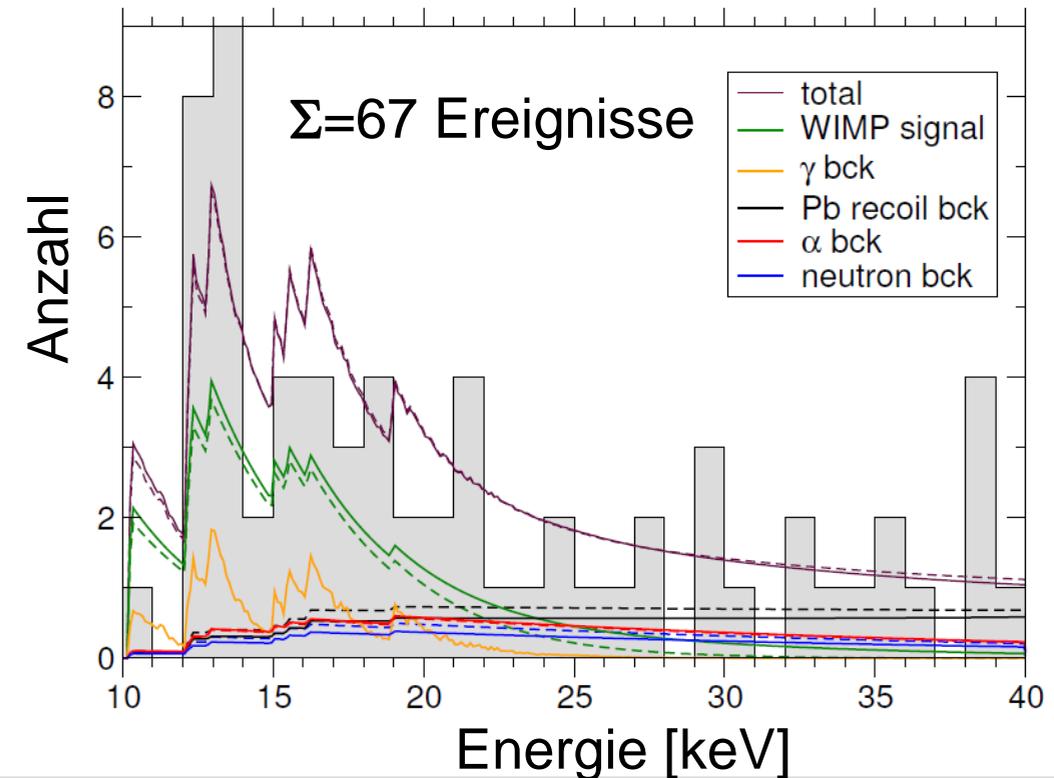
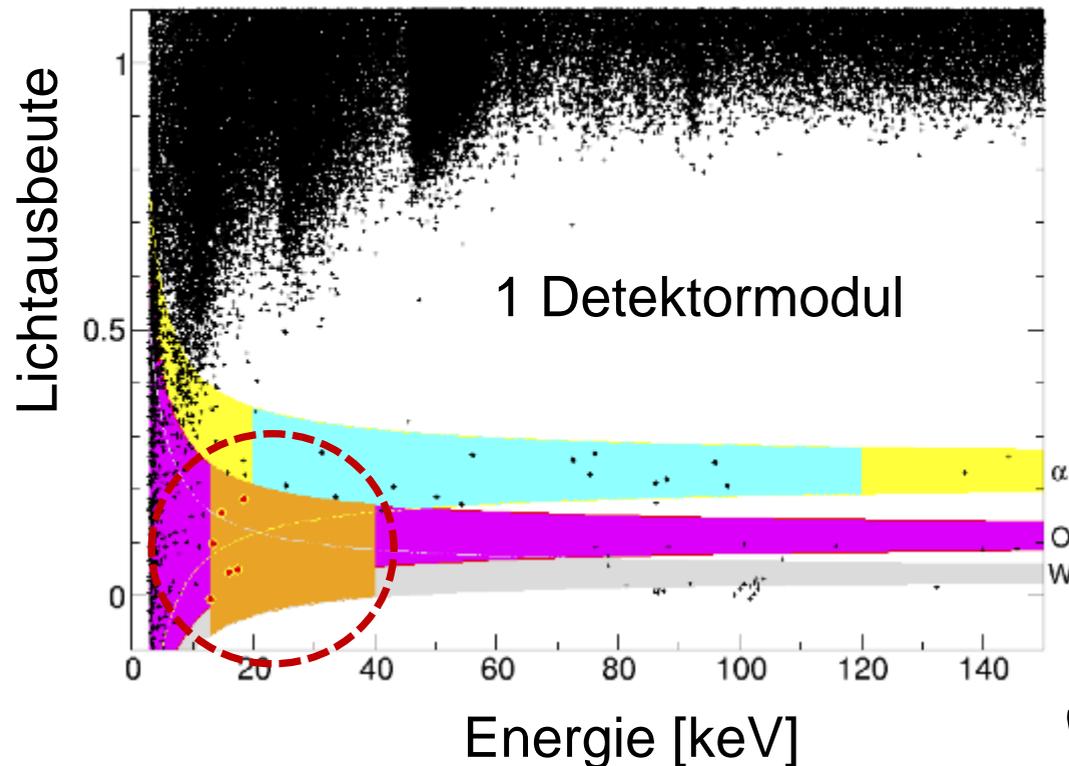
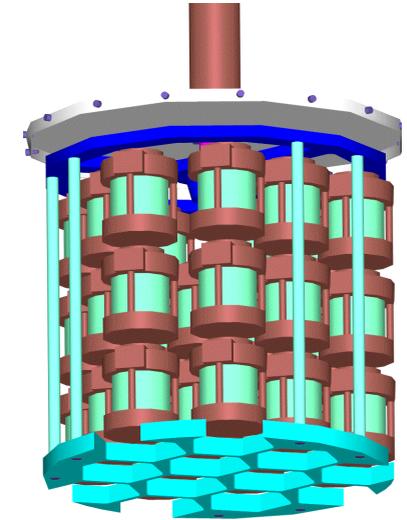
Wolfram-Thermometer ( $8 \times 6$ )mm<sup>2</sup>, aufgedampft



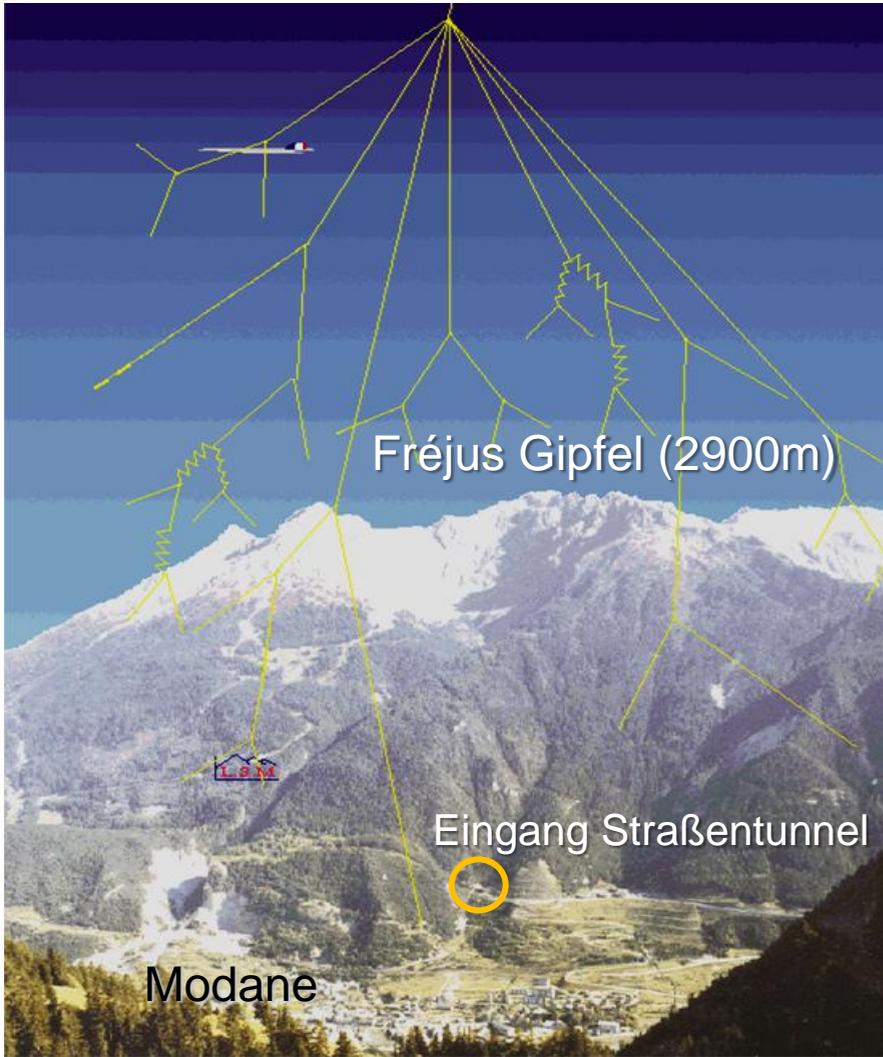
# CRESST – II : Ausbau auf 10 kg Masse

## ■ CRESST-II Resultate

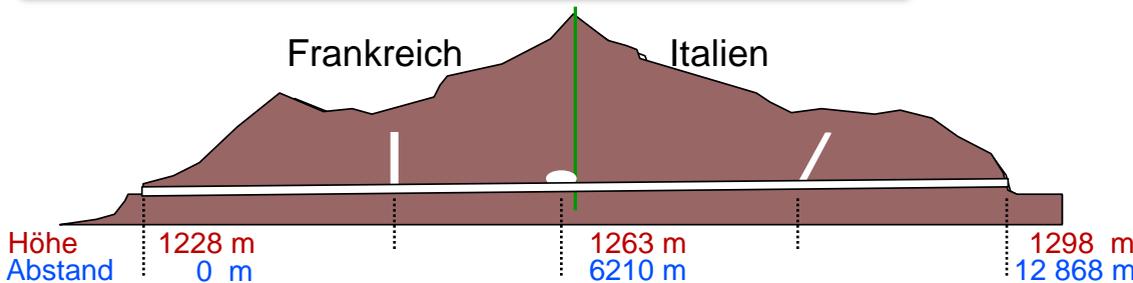
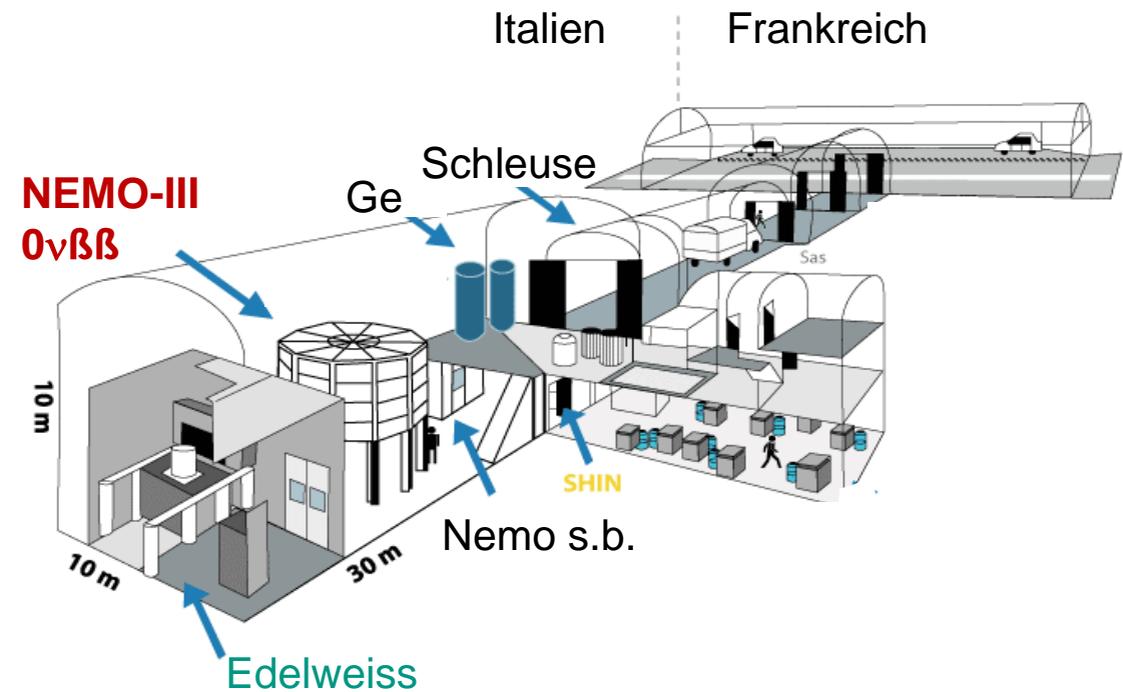
- 17 Module, verbesserte Abschirmung mit  $\mu$ -Veto
- Resultate 2011: Analyse von 8 Detektoren (730 kg Tage)  
67 Ereignisse verbleiben in Signalregion ( $^{184}\text{W}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{16}\text{O}$ )  
~50% der Ereignisse nicht durch Untergrund erklärbar  
**systematische Effekte** (Signatur von 10-20 GeV WIMPs?)



# LSM – Laboratoire Souterrain de Modane

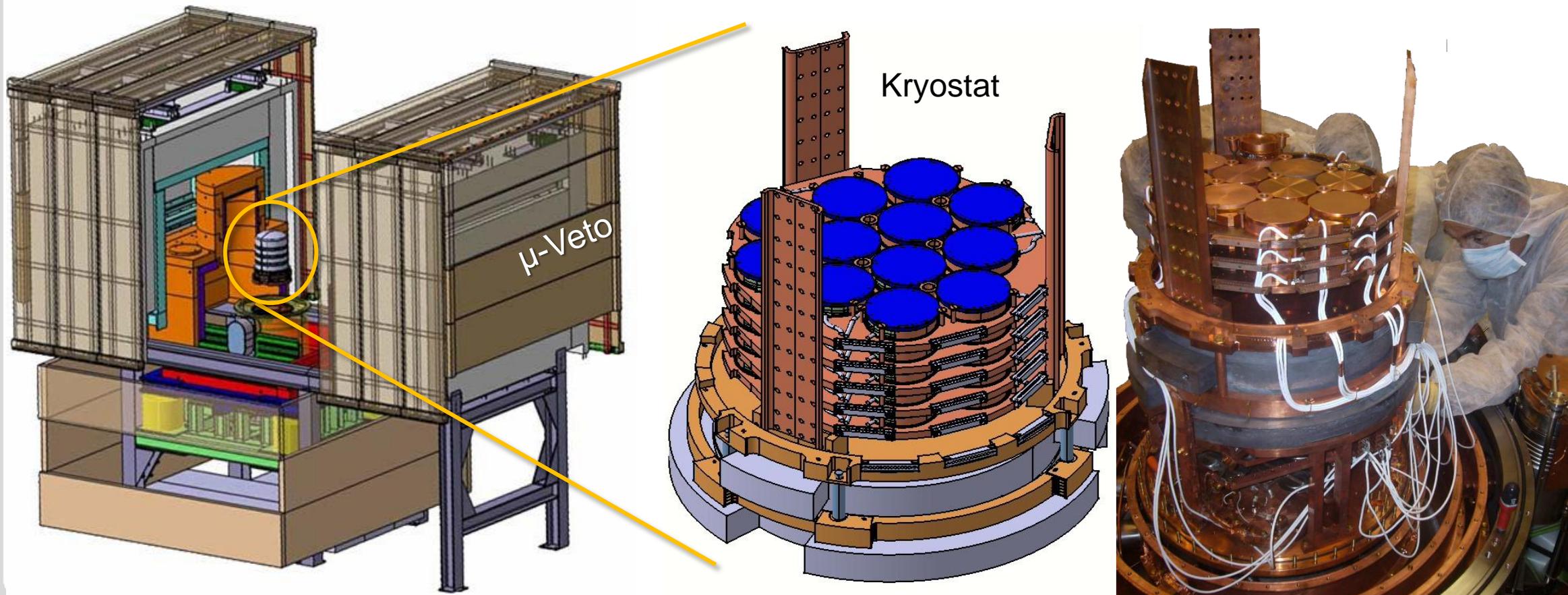


4800 m.w.e.  
4 Myonen/m<sup>2</sup>/Tag



# EDELWEISS – Experiment

- Expérience pour **détecter les WIMPs** en **Site Souterrain**  
français-allemandes Experiment im LSM mit Ge-/Si-Bolometern
  - 2000-2003: **Edelweiss-I** mit  $M = 1 \text{ kg}$  ( 3 Detektoren)
  - 2008-2010: **Edelweiss-II** mit  $M = 4 \text{ kg}$  (10 Detektoren, je 400 g)
  - 2011-2014: **Edelweiss-III** mit  $M = 32 \text{ kg}$  (40 Detektoren, je 800 g)

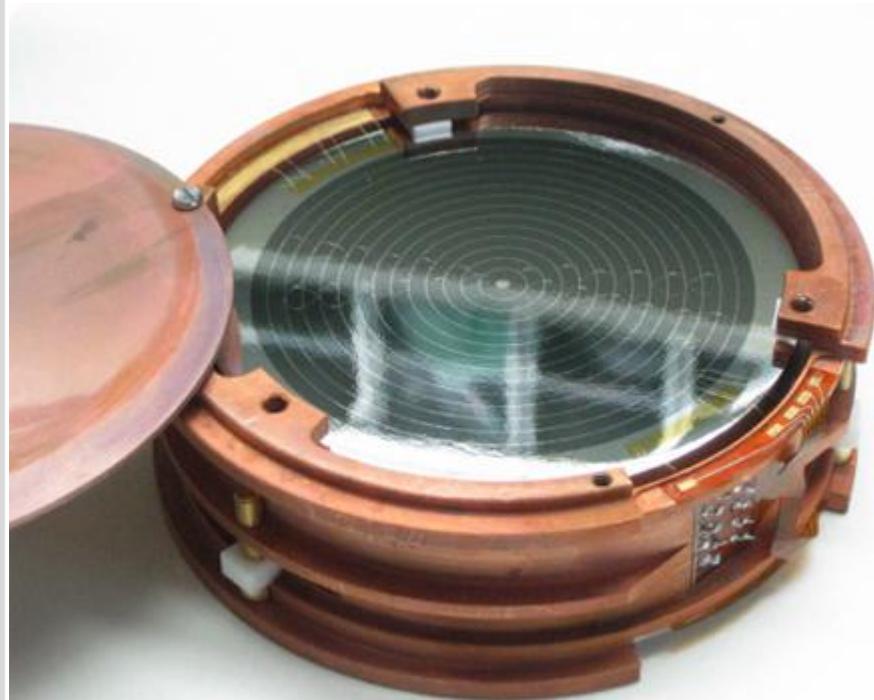


# EDELWEISS - Detektoren

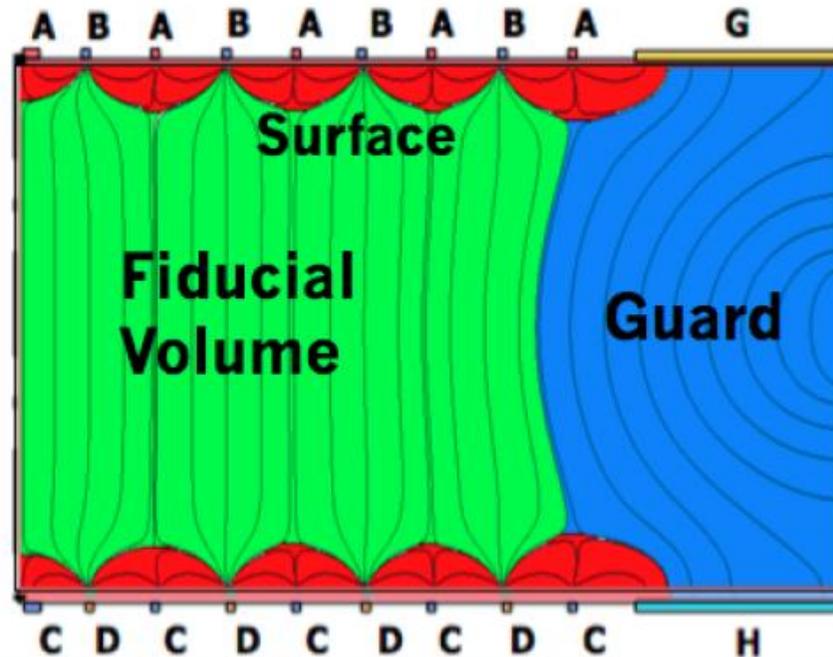
- Ge – Bolometer Phase-II ( $m = 320 \text{ g}$ ,  $\varnothing = 70 \text{ mm}$ ,  $h = 20 \text{ mm}$ )

## Nachweis: Phonon-Signal + Ionisation

- **Phononsignal:** NTD-Thermistor mit  $T_0 = 17 \text{ mK}$   
Nb/Si-Thermistor (z-Auflösung)
- **Ionisation:** Aluminium-Elektroden ( $\Delta V = 3 - 7 \text{ V}$ )  
2 Bereiche: Zentrum & Schutzring



Detektoren mit Ringelektroden



Phase-III Detektor



800g Detektor

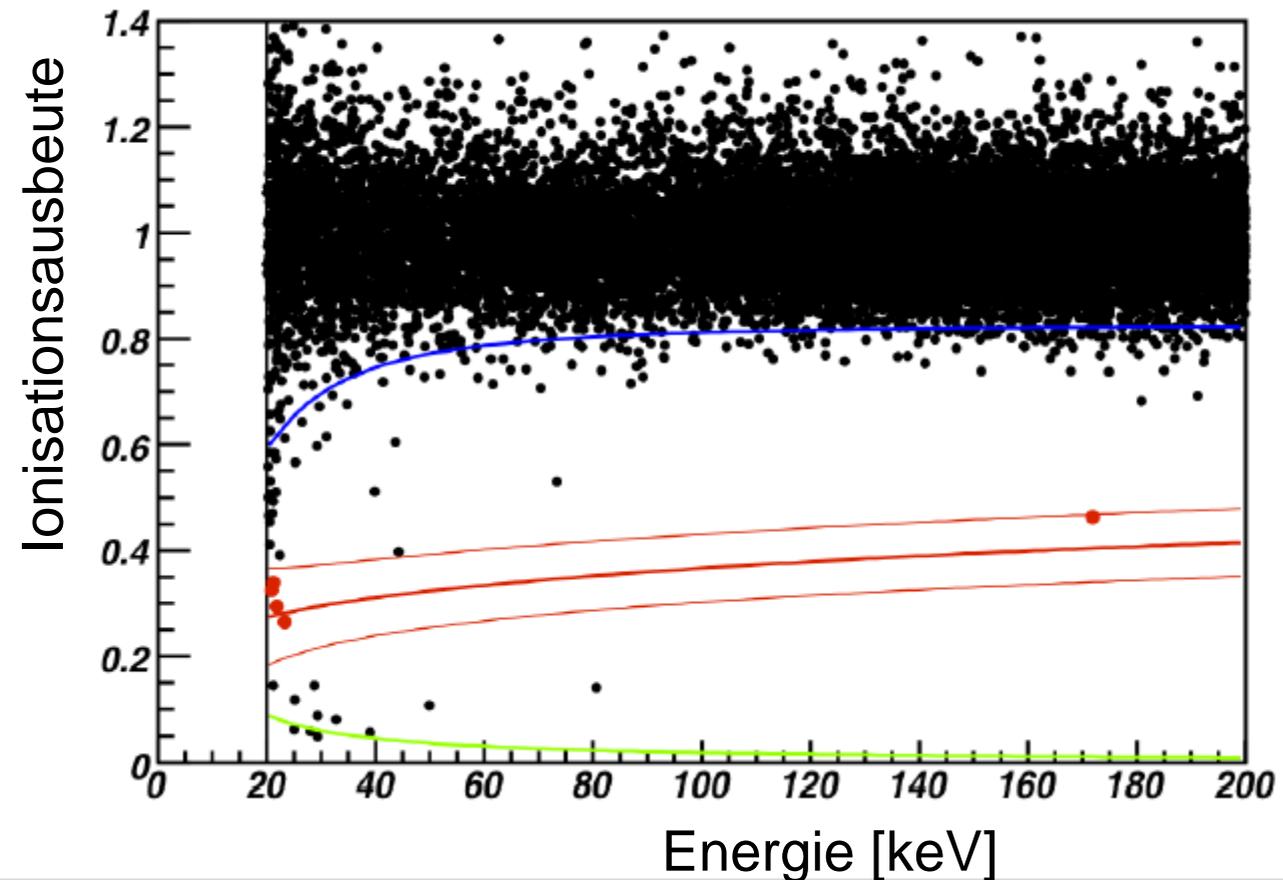
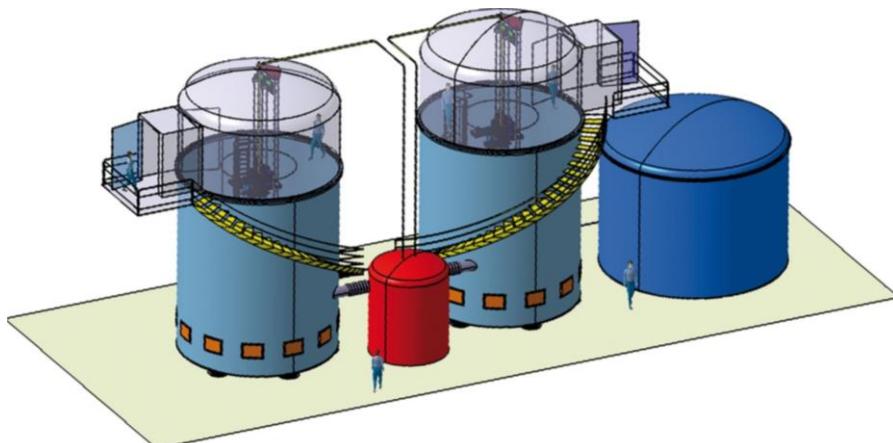
## ■ Resultate von EDELWEISS-II:

- 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**

$$\sigma_{SI} < 4.4 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad (90\% \text{ CL.})$$

bei WIMP Masse  $M_\chi = 85$  GeV

geplantes Kryo-DM-Experiment:  
EURECA (seit 3/2005)



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

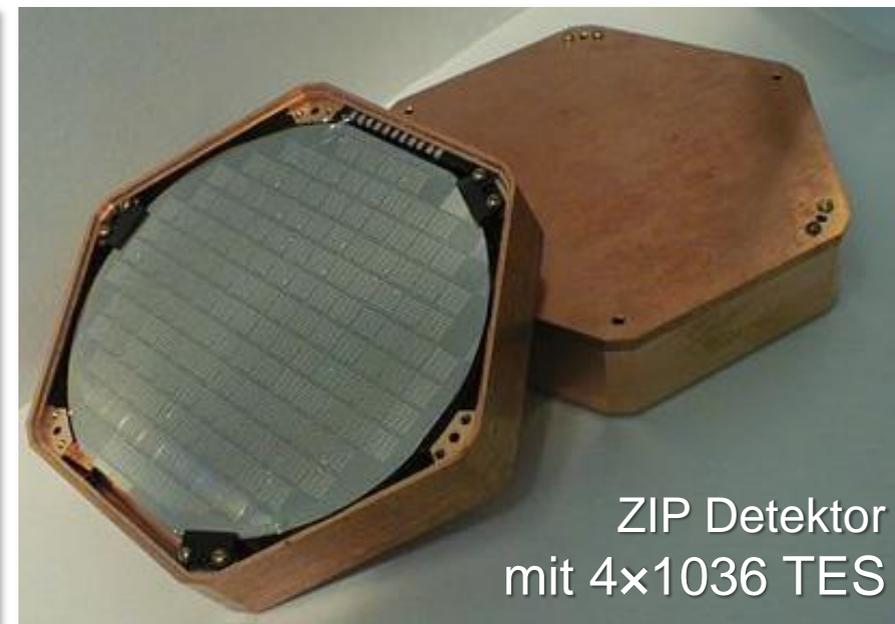
## ZIP-Detektortechnik:

**Z**-sensitive Ionisation and **P**honon mediated detector

Signale: nur 'ballistische' Phononen ( $4 \times 1036$  TES: Al und W)

Phonon-Timing zur Diskrimination gegen Oberflächenereignisse

Resultate: **kein statistisch signifikanter Überschuss**



- **LXe & LAr Detektoren** auf Basis verflüssigter Edelgase
  - Betrieb als **2-Phasen Detektor: flüssige & gasförmige Phase**

## Vorteile:

- große Detektorvolumina (10 kg → 100 kg → 1000 kg ... )
- Teilchenidentifikation: **Ladung & Szintillation**, Pulse-Shape



## Herausforderungen:

- niedrige Schwelle, weitere Reduktion der Untergrundrate

**Experimente:** **Argon** – ArDM, WARP      **Xenon** – **XENON100**, LUX

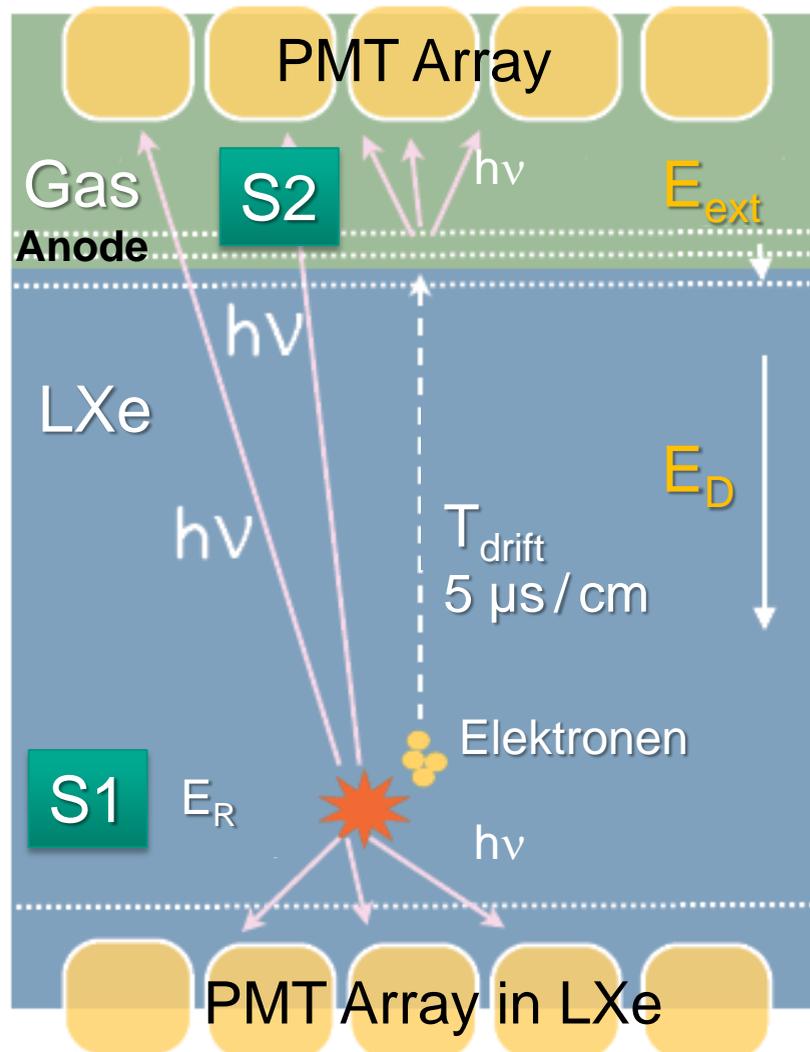
## Eigenschaften von flüssigen Edelgasen als DM-Detektoren

	Z (A)	Siedepunkt $T_s$ [K] bei $p = 1 \text{ bar}$	fl. Dichte bei $T_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Ionisation [e-/keV]	Szintillation [Photonen/ keV]	Szintillations- licht [ $\lambda$ in nm] $\lambda$ -Schieber	Preis [\$/kg]
<b>Neon</b>	10 (20)	27.1	1.21	46	7	85 (WLS)	60
<b>Argon</b>	18 (40)	87.3	1.40	42	40	128 (WLS)	2
<b>Xenon</b>	54 (129/131)	<b>165.0</b>	<b>3.06</b>	64	46	175	<b>&gt;1.000</b>

# 2-Phasen LXe-Experimente: Grundlagen

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

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



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

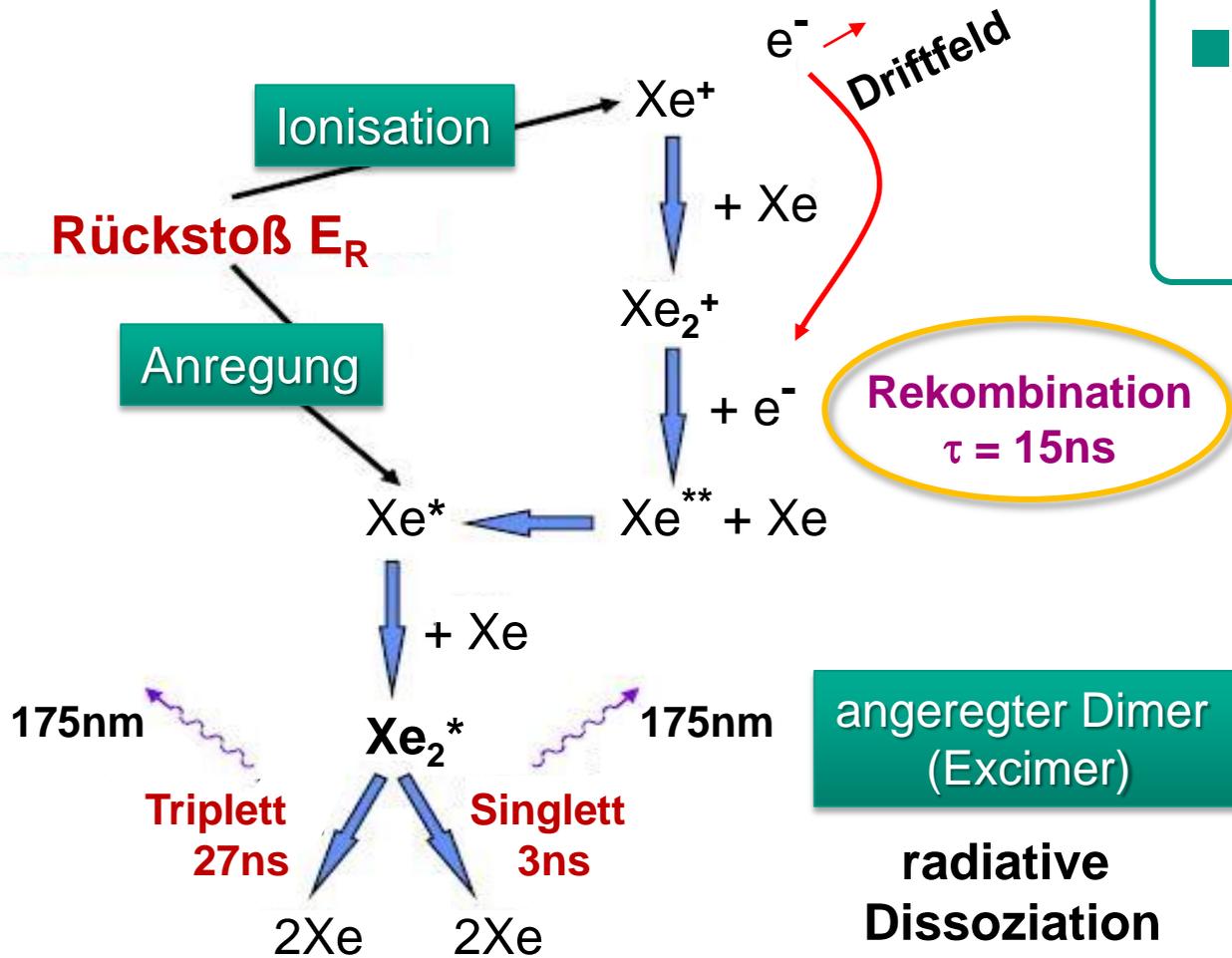
- **S1:** primäre Xe-Anregung durch Rückstoß-Kern (**promptes Szintillationslicht**)
- **S2:** Nachweis der gedrifteten Elektronen durch Extraktion in die Gasphase, dort Beschleunigung der  $e^-$  mit starkem Feld  $E_{ext}$ ; im Gas durch Kollisionen Entstehung von **Elektrolumineszenz**  
↳ Nachweis des Lichts mit oberem PMT

## ■ Koinzidenz von S1 und S2:

- **S1 + S2: Teilchenart & Ort der Streuung**

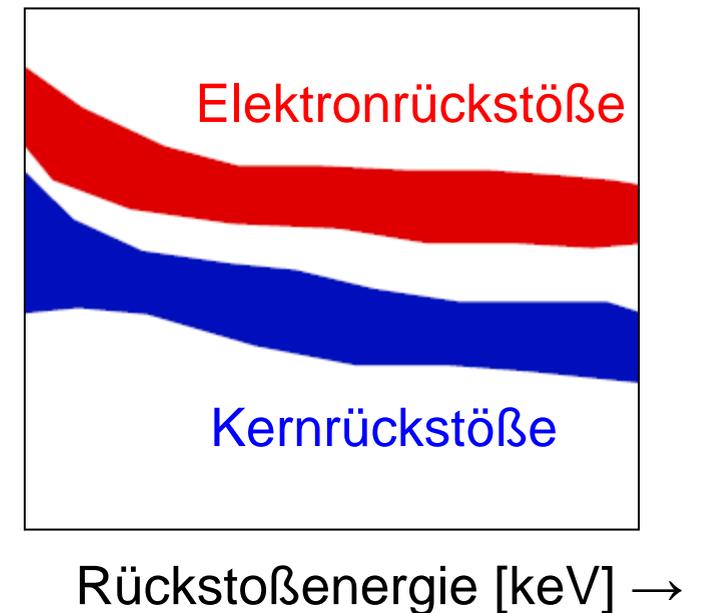
# LXe: Ionisation und Anregung

- Teilchendiskriminierung: **Verhältnis Anregung/Ionisation** abhängig von  $dE/dx$ 
  - Kernrückstoß: **hohe Rekombination**, Gammas: **geringere Rekombination**



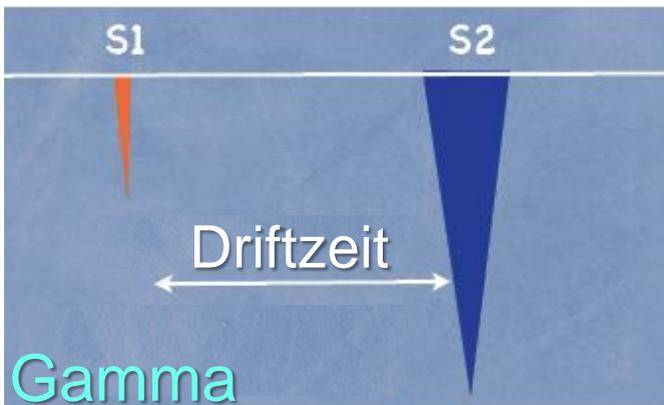
- **Rekombination** wandelt Ladung in Licht um, d.h. das Ionisationssignal für Kernrückstöße ist kleiner!

logarithm. Verhältnis  
Ladung/Szintillation



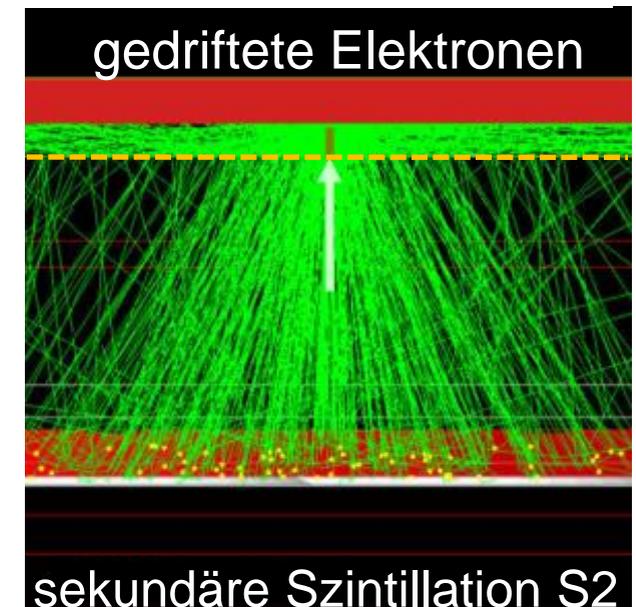
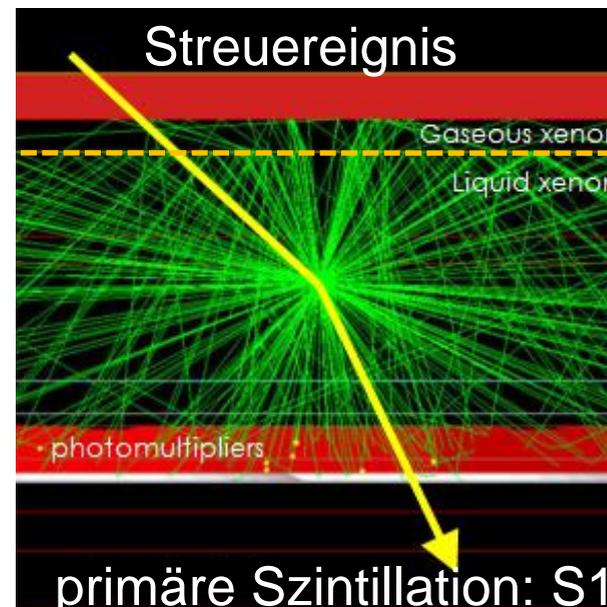
## ■ Diskrimination zwischen WIMP-Kernrückstößen und Elektronen

<b>Teilchenidentifikation:</b>	Elektron:	S2/S1 ist groß (kein Quenching)
	WIMP:	S2/S1 ist klein (weniger Ionisation)
<b>Kernrückstoßenergie:</b>	Intensität S1 (primäre Anregung)	
<b>Ortsrekonstruktion:</b>	PMTs (x,y), Driftzeit (z)	



## ■ Verhältnis S2/S1 zur Teilchendiskrimination

Schema & MC-Simulation von Lichtsignalen

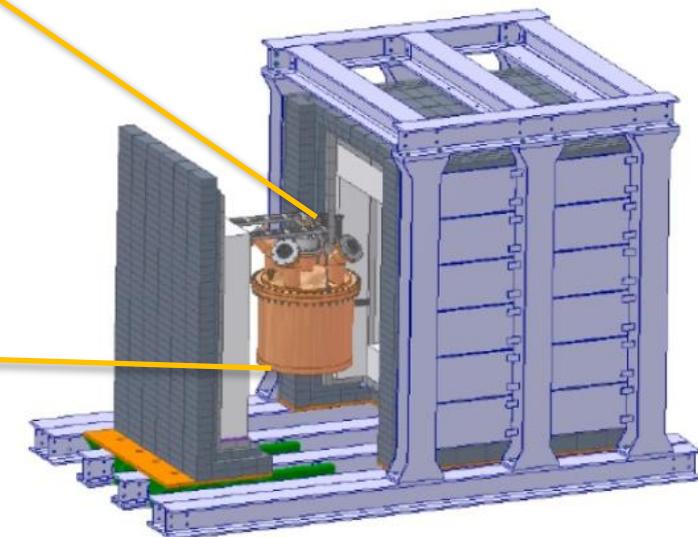
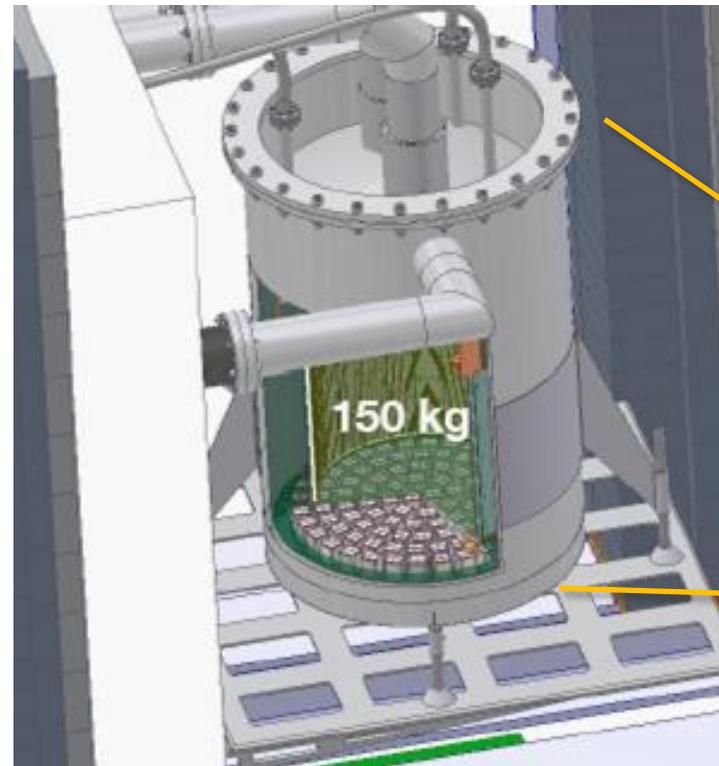
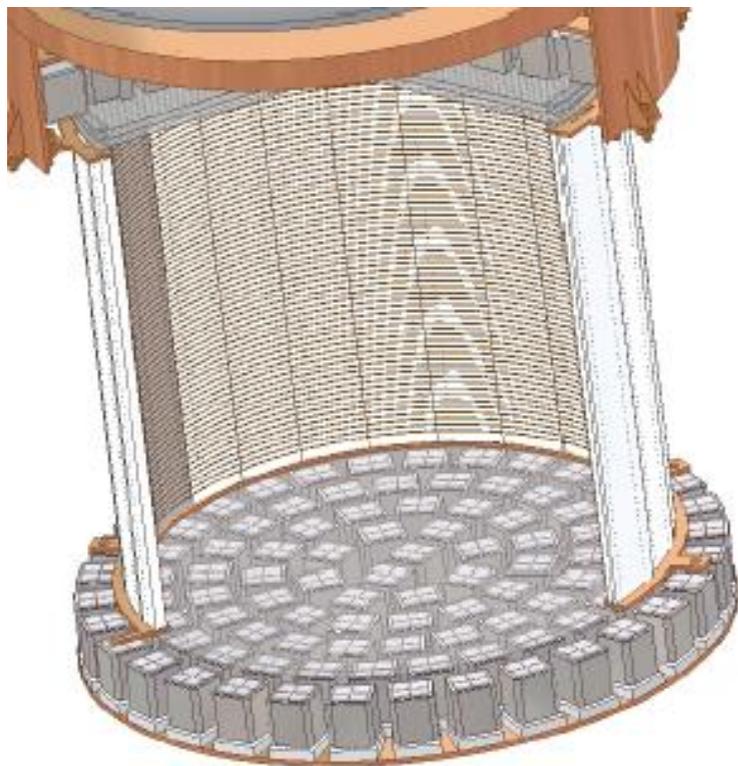


# XENON100 Experiment

## XENON-100: im LNGS

LXe-Detektor mit **161 kg Masse** (~99 kg als Veto, **62 kg als Target**)

- Detektor:  $\varnothing = 30$  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



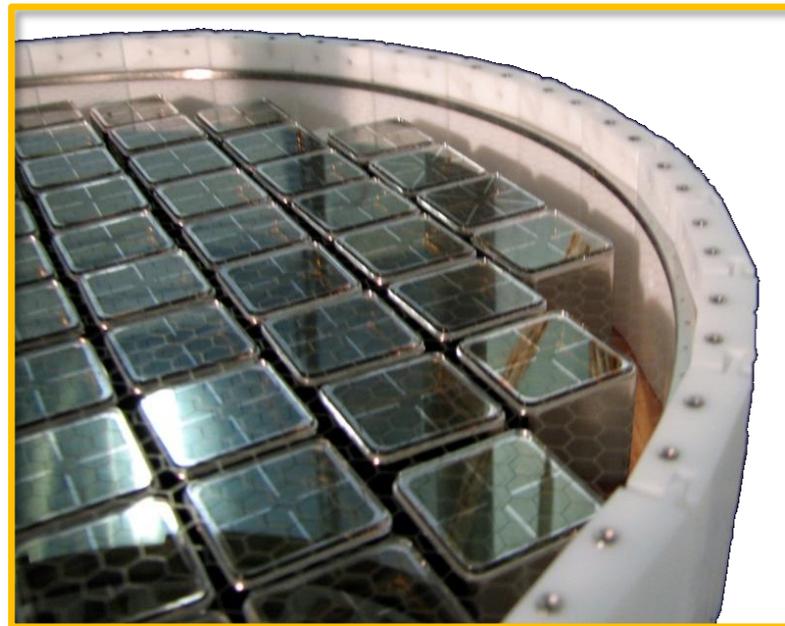
# XENON100 Experiment

XENON-100:

Messungen  
am LNGS



oberes  
PMT  
array



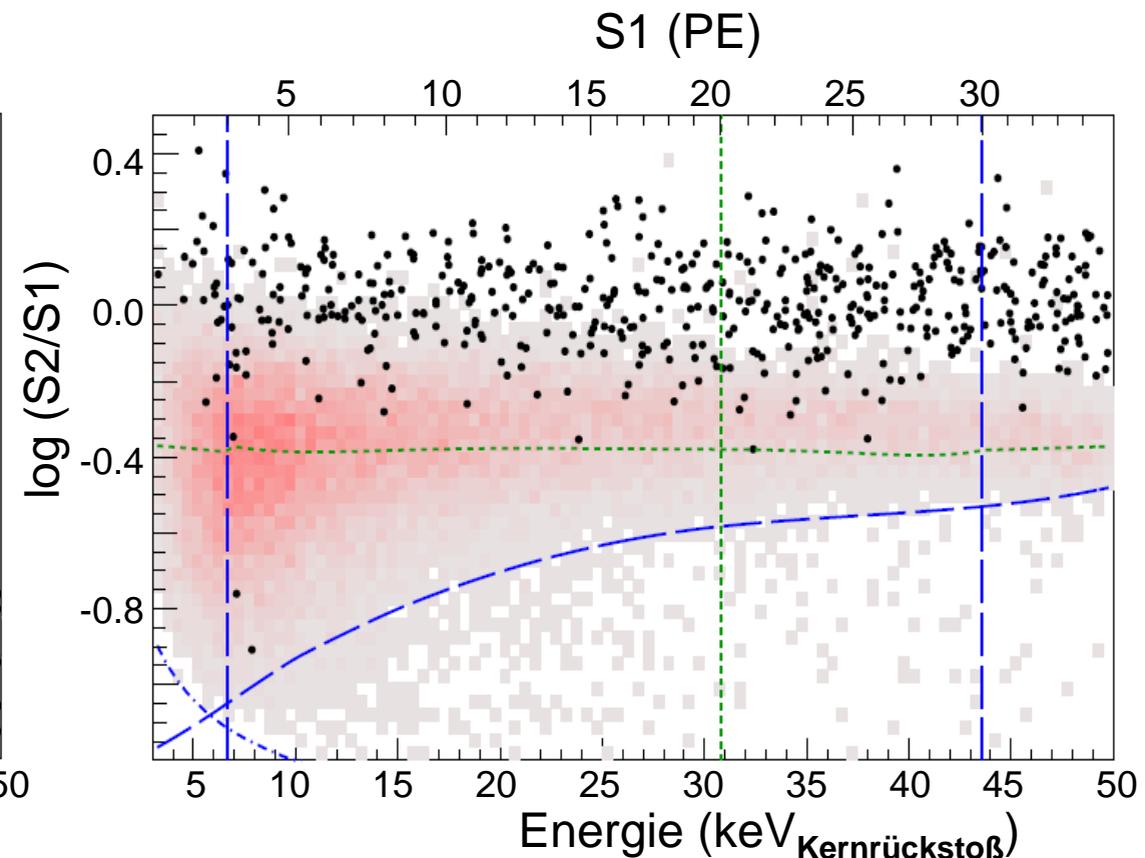
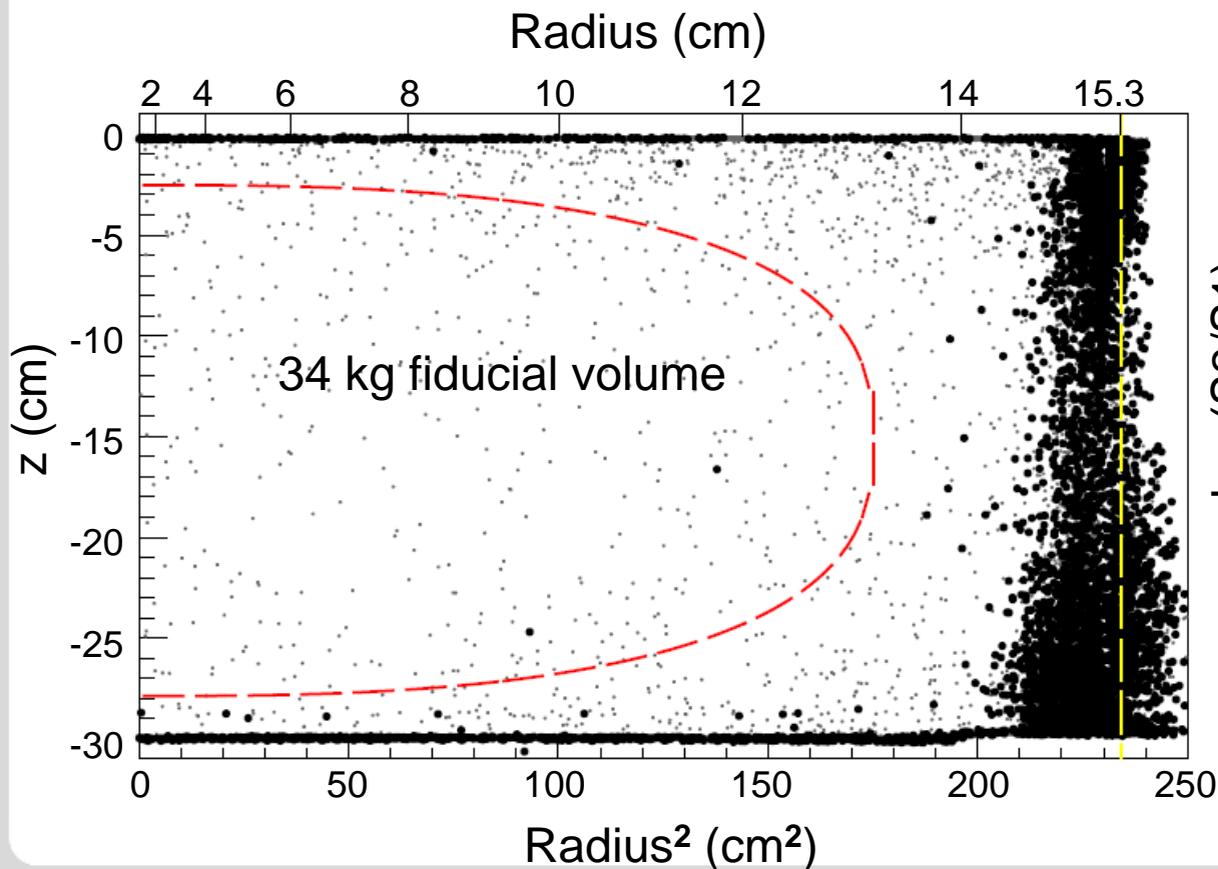
unteres PMT array



# XENON100 Experiment: Resultate

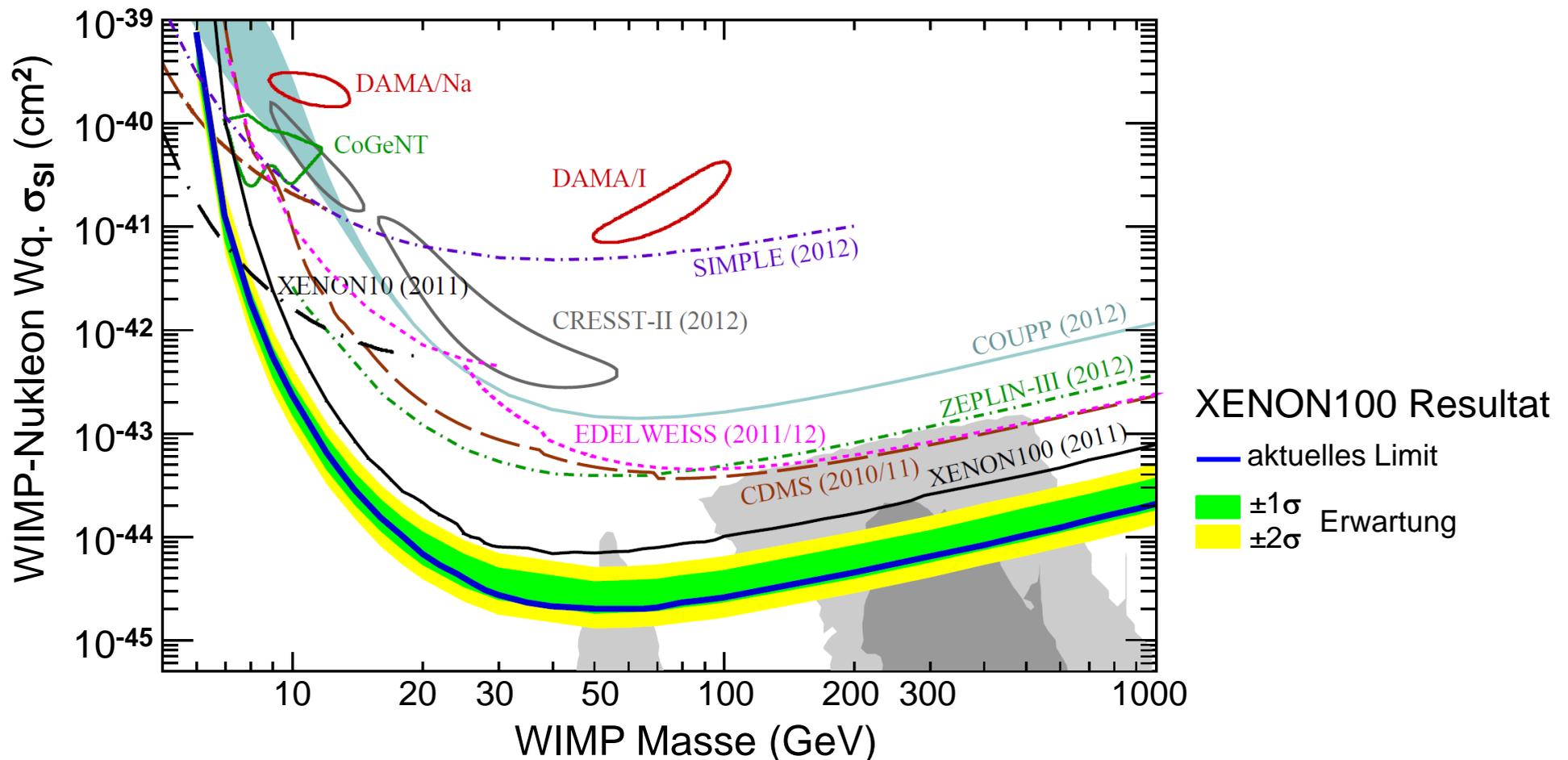
## ■ neueste Resultate von XENON100:

- 224.6 Tage Datennahme (13 Monate in 2011/12): 2323.7 kg · Tage
- Energiefenster für WIMP-Suche: **6.6 – 43.3 keV** (Kernrückstoßenergie)
- **2 Ereignisse**, bei Untergrunderwartung  $N_{bg} = (1.0 \pm 0.2)$  Ereignisse
- $\sigma_{SI} < 2.0 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  bei WIMP-Masse  $M_\chi = 55 \text{ GeV}$  (**weltbestes Limit!**)



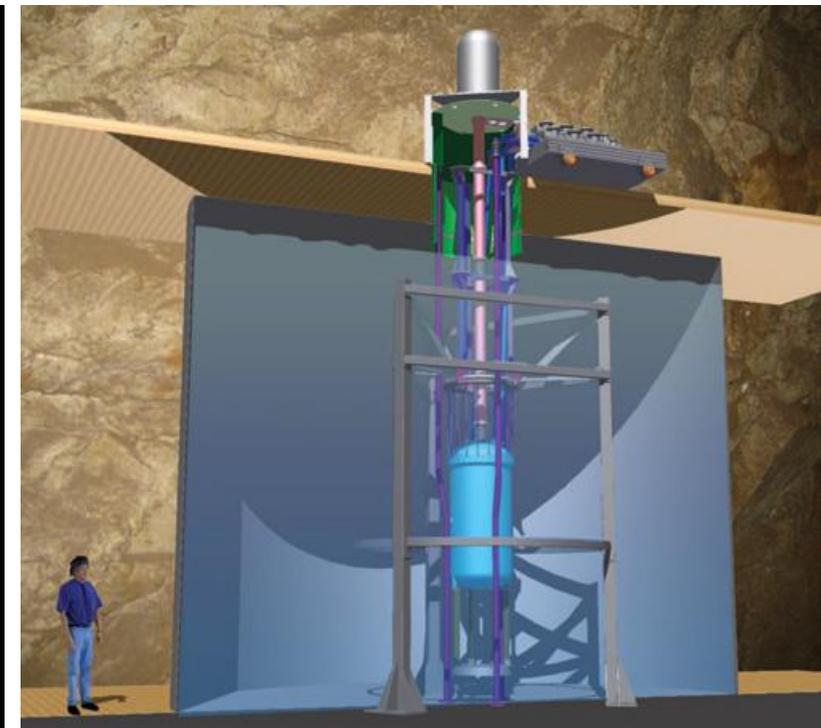
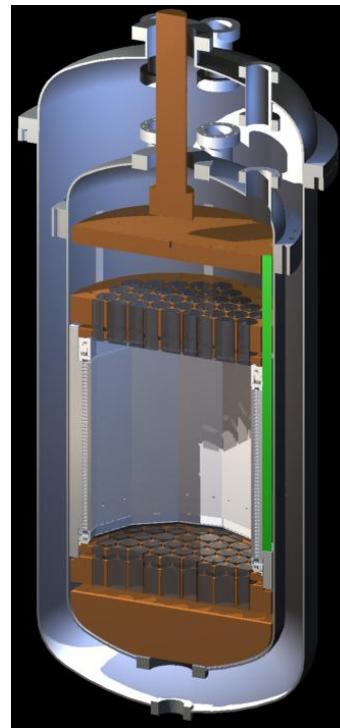
# WIMP Resultate: aktueller Status

- **WIMP Resultate & Interpretationen** fallen in **zwei Kategorien**:
  - Experimente mit **Überschuss-Ereignissen** (CRESST2) bzw. mit **jahreszeitlicher Modulation** (DAMA-Libra, CoGeNT) ↪ systemat. Effekte?
  - klare **Ausschluss-Grenzen** durch XENON100 (CDMS-II, Zeplin-III,...)



## ■ Neues US 2-Phasen-Xenon-Experiment im Sanford Lab:

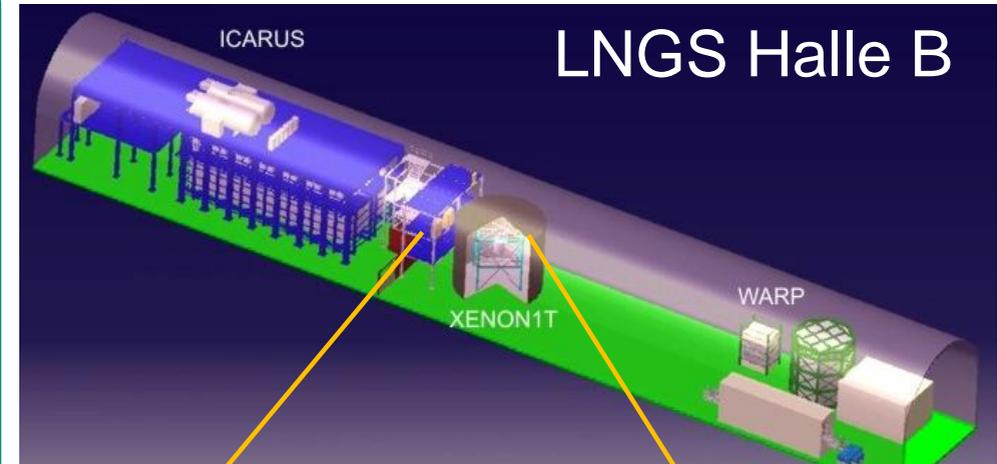
- ähnliche Technologie wie XENON (S1-S2), H<sub>2</sub>O Abschirmung
- 2-Phasen LXe Detektor mit 370 kg Masse (**100 kg fiducial vol.**)
- 2012: Aufbau (Juli) und Test des Experiment in der Davis Cavern
- 2/2013: erstes Abkühlen und Beginn der Datennahme (Kalibration,...)
- erwartete Sensitivität nach 300 Tagen  $\sigma_{SI} \sim 2 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$  (< 1 bg-event)



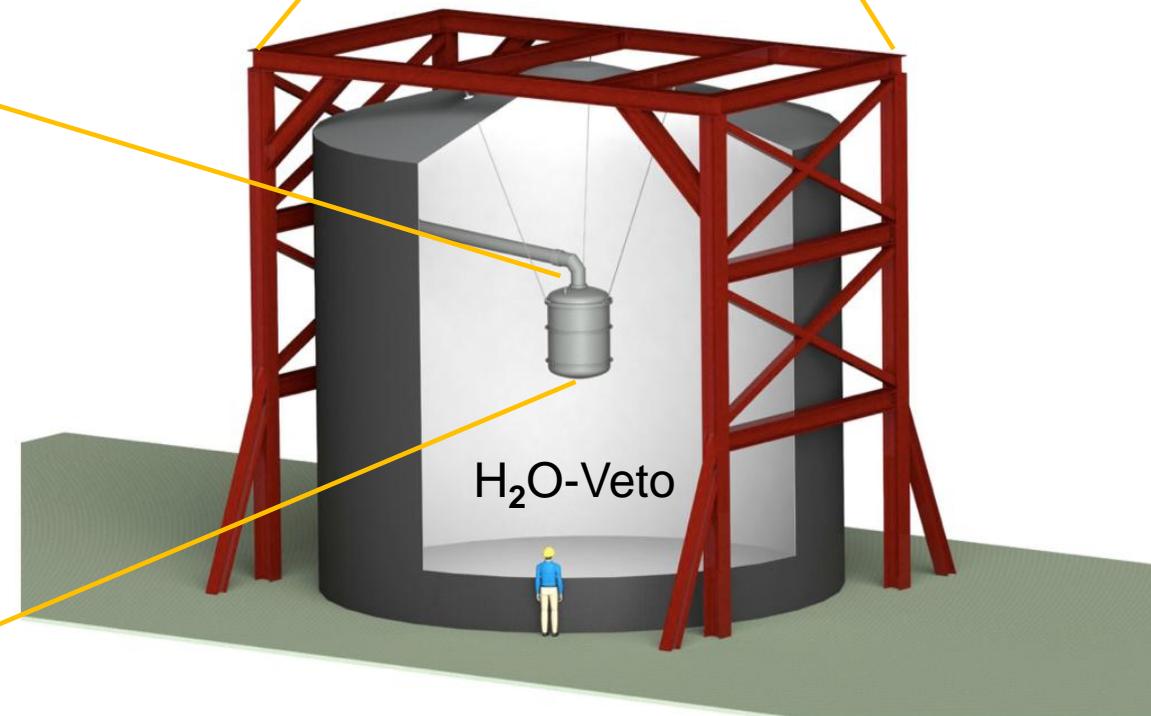
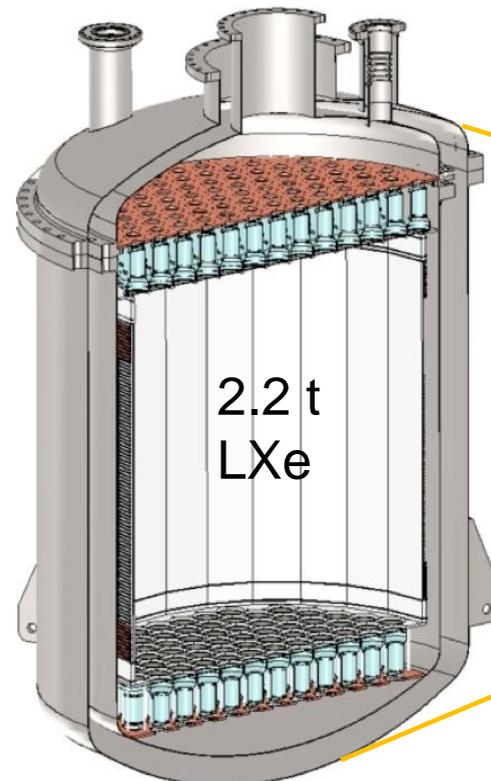
# XENON1T

## ■ XENON Nachfolge-Experiment:

- 2-Phasen TPC mit 2.2 t LXe Masse
- Lichtauslese: 250 PMTs (3-inch)
- Wasser-Cherenkov-Vetodetektor
- Sensitivität:  $\sigma_{SI} < 2 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$  (90% CL)

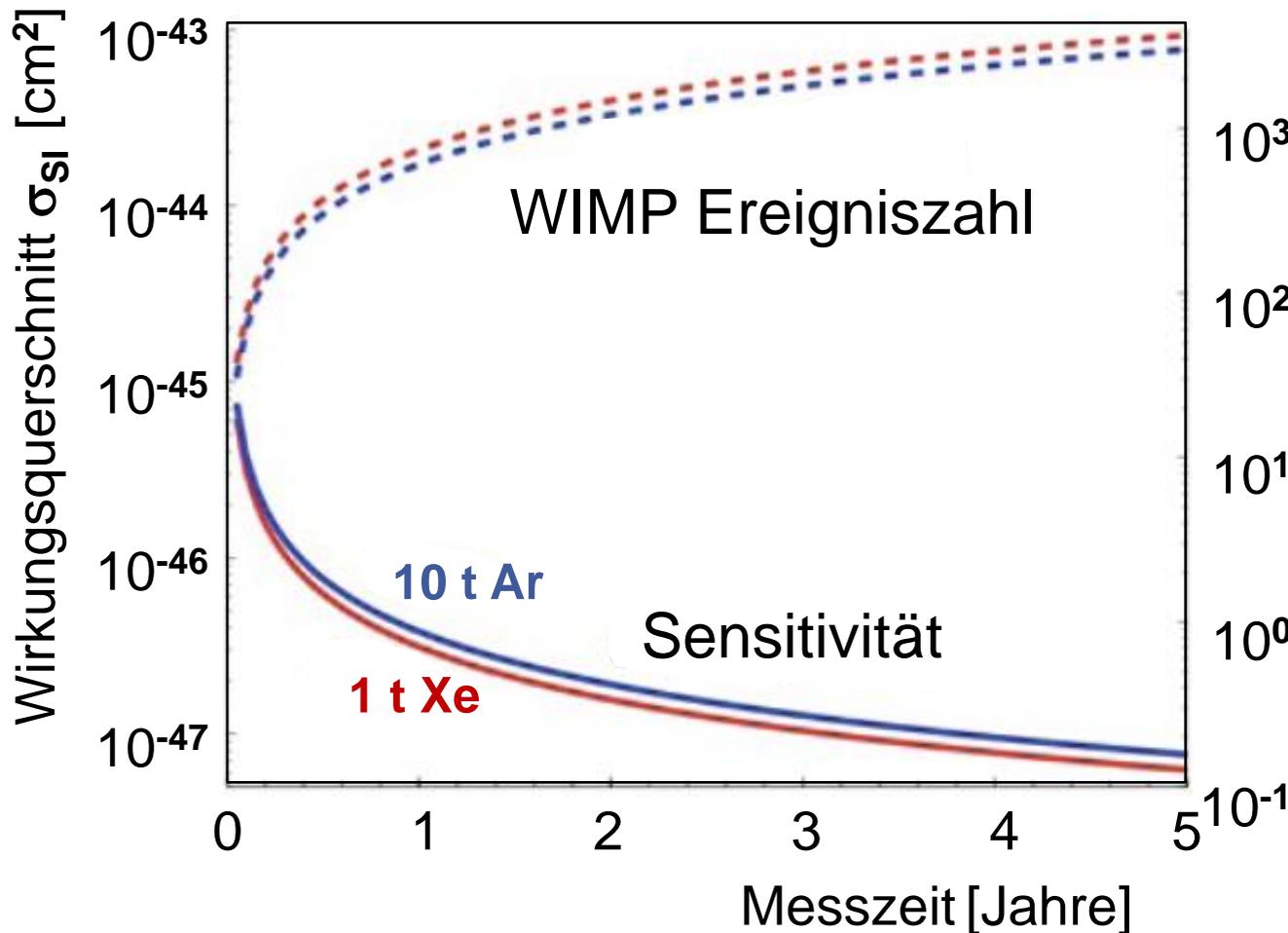


fiducial volume  
m ~ 1.1 t



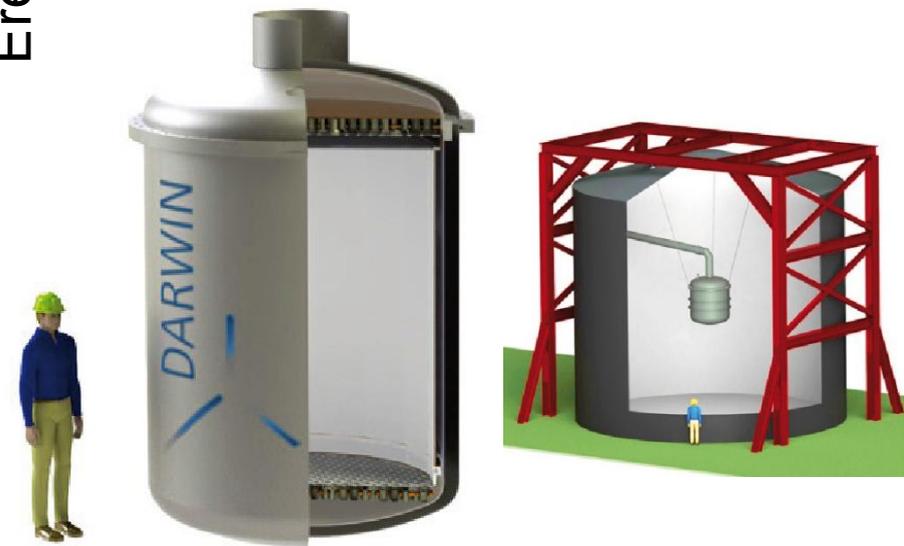
# DARWIN Projektstudie

- **DARWIN: Dark matter Wimp search in Noble liquids**
  - Zielsetzung: 'ultimatives' europäisches DM-Experiment
  - Detektor-Technologie: **multi-T LXe Target**



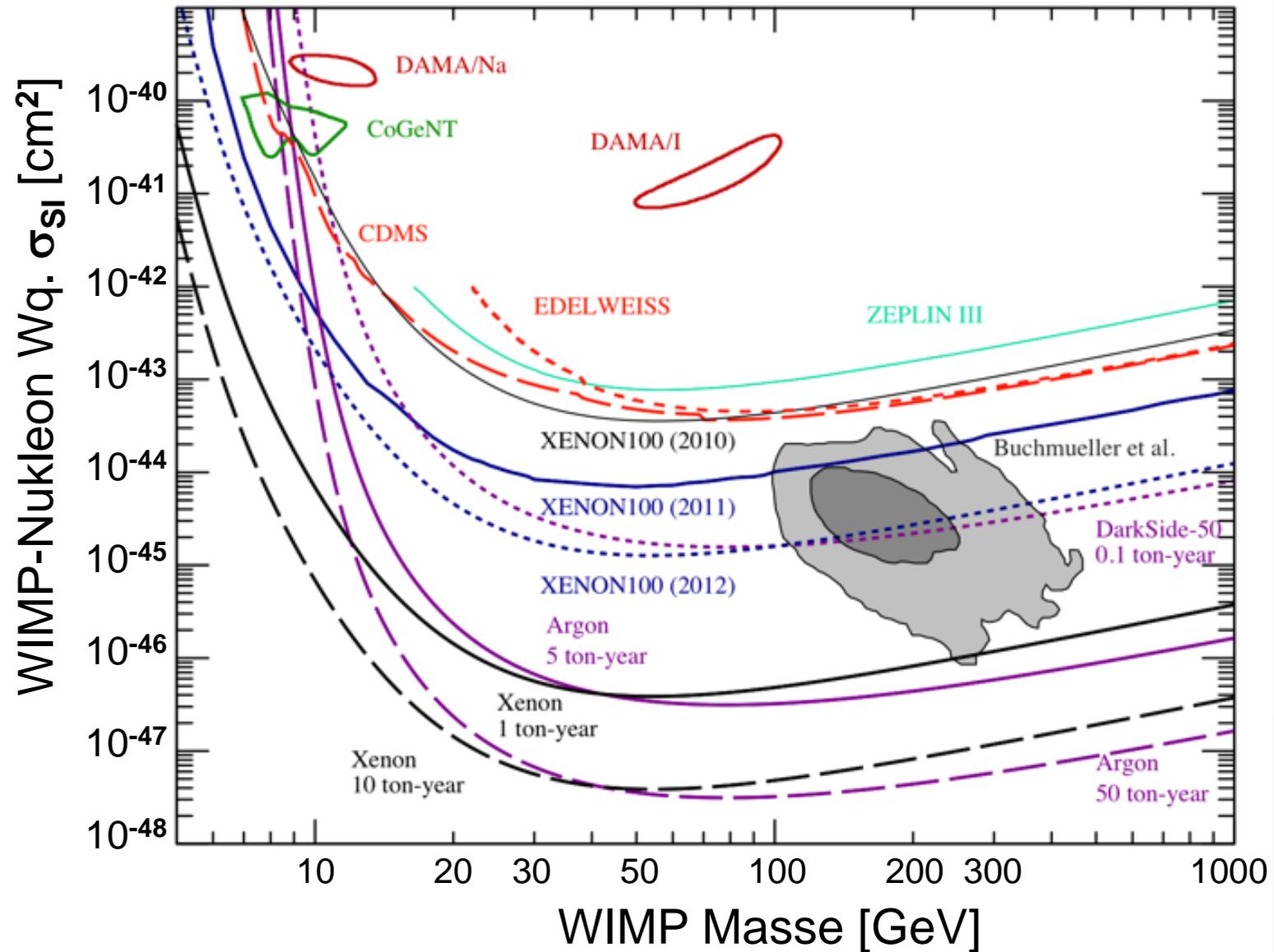
$\sigma_{SI} \sim 10^{-48} \text{ cm}^2$

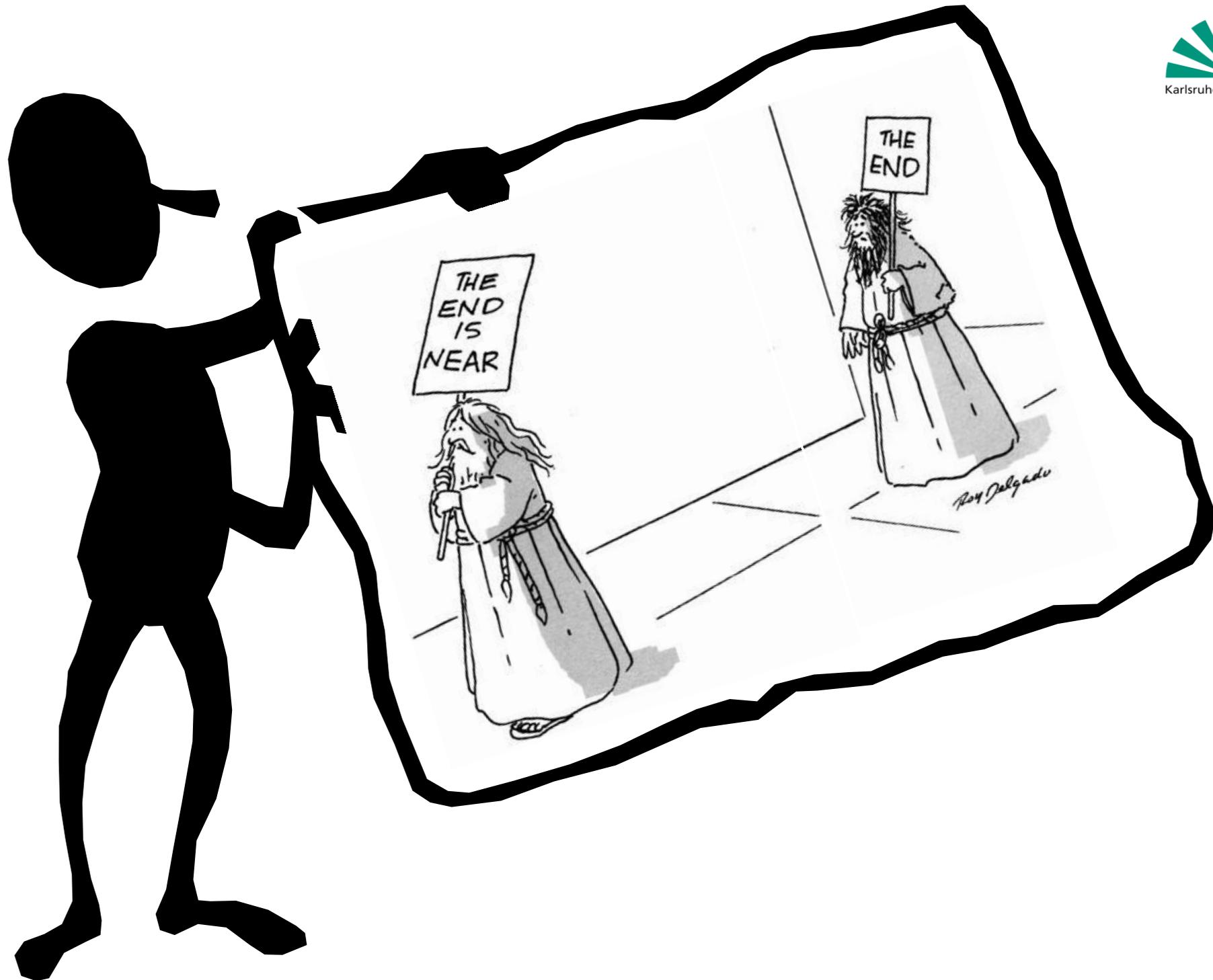
Ereigniszahl } für  $M_W = 100 \text{ GeV}$   
 $\sigma_{SI} = 10^{-44} \text{ cm}^2$



# Zukünftige WIMP Sensitivitäten

weitere Entwicklung der Sensitivität von LXe-Detektoren





# Astroteilchenphysik II: Teilchen & Sterne

