

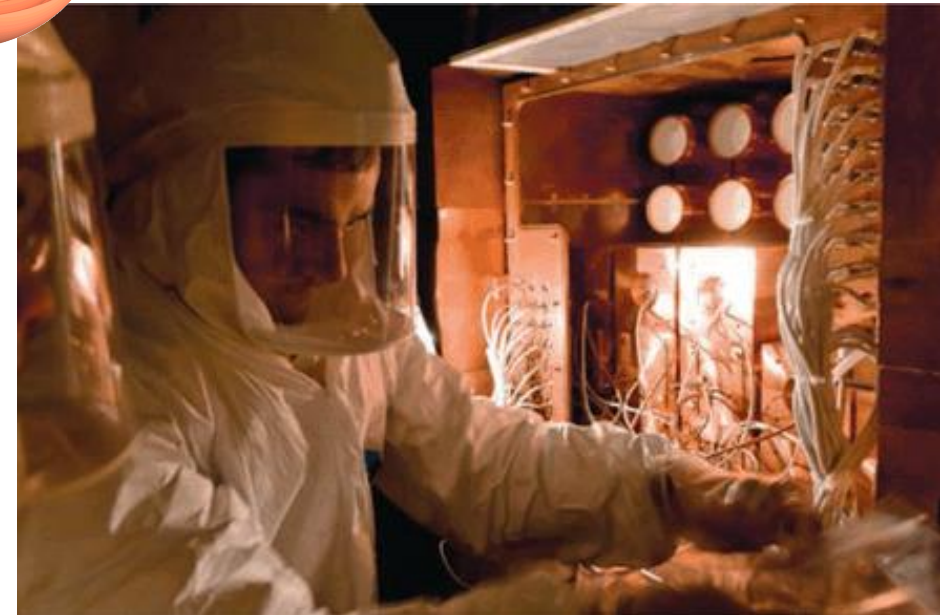
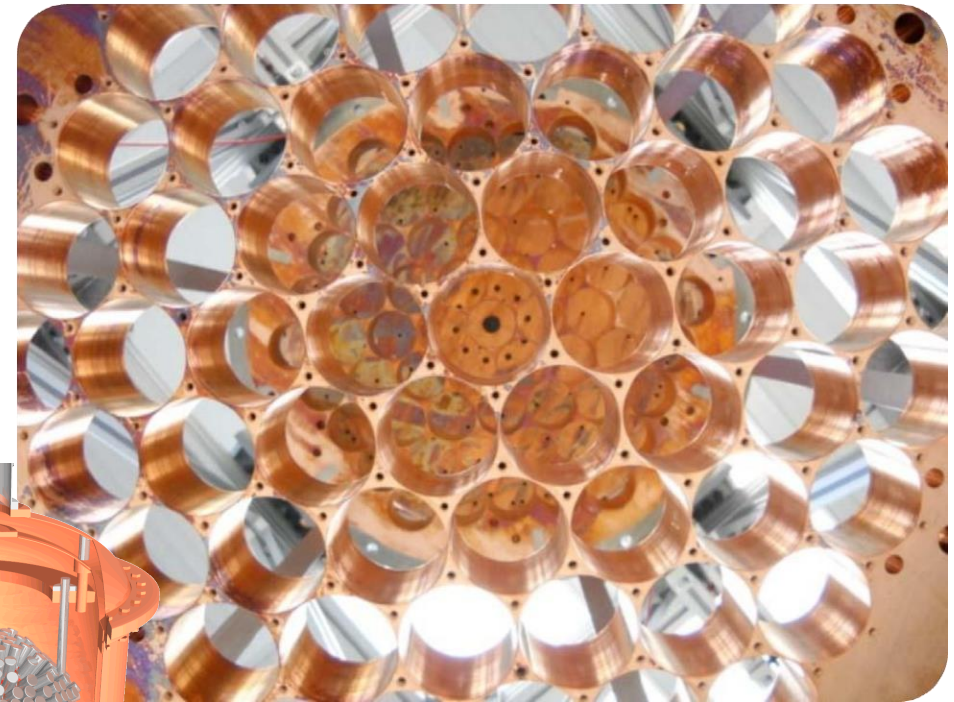
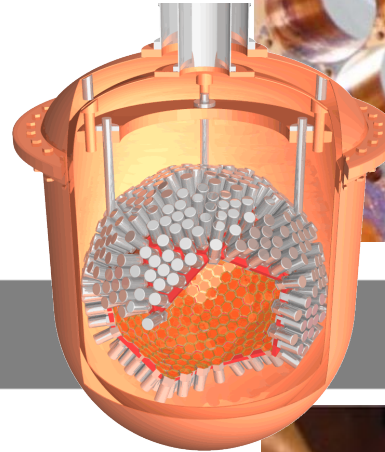
Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 14, 06.02.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Dunkles Universum

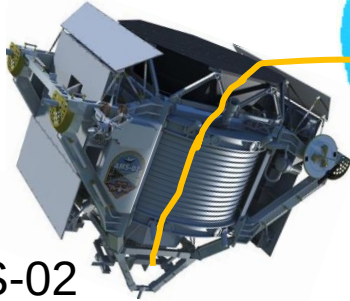
- direkter CDM-Nachweis:
Spin-abhängige Streuung
WIMP-Plot
- Nachweismethoden:
1- und 2-Parameter-Experimente
- Szintillatoren: DAMA, XMASS



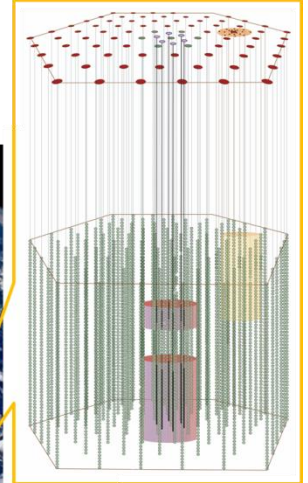
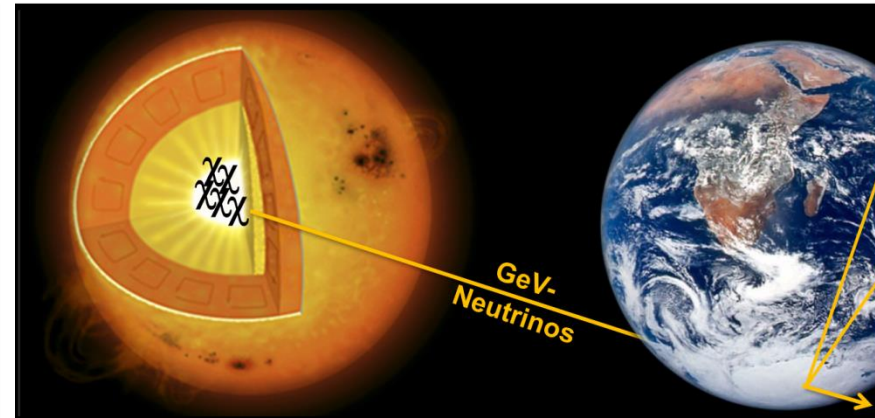
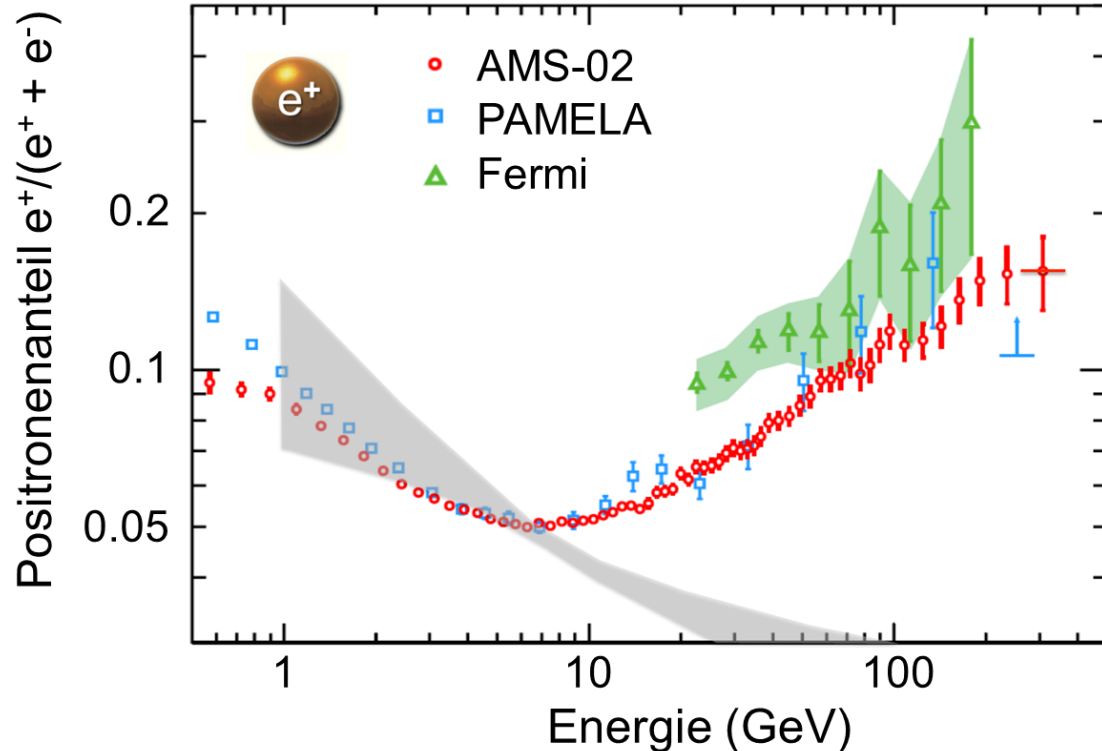
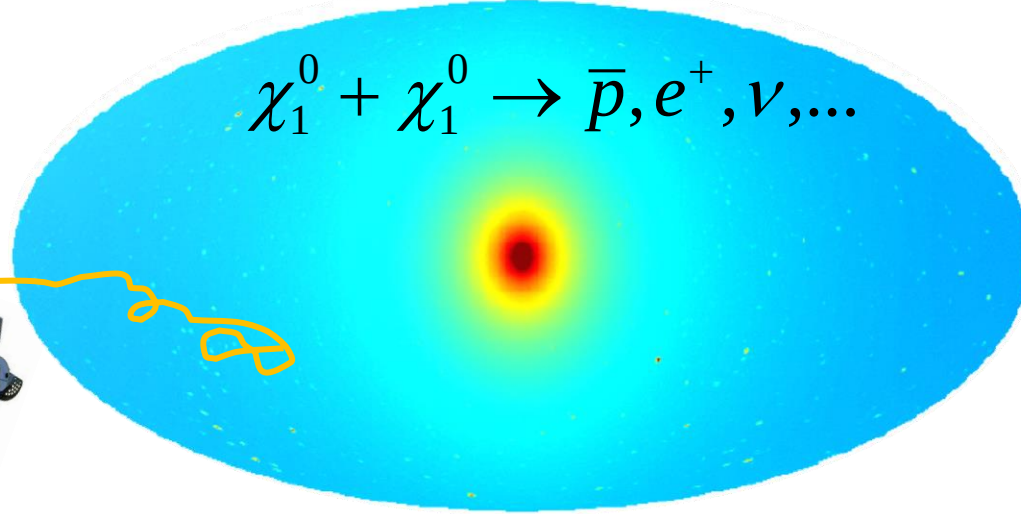
Indirekter WIMP Nachweis – e^+ , $\bar{p}$ & ν



PAMELA



AMS-02



■ Resultate:

- Positronenüberschuss: DMA oder Gamma-Pulsare
- solare WIMPs: GeV- ν 's

direkter WIMP Nachweis

■ Elastischer Kernrückstoß:

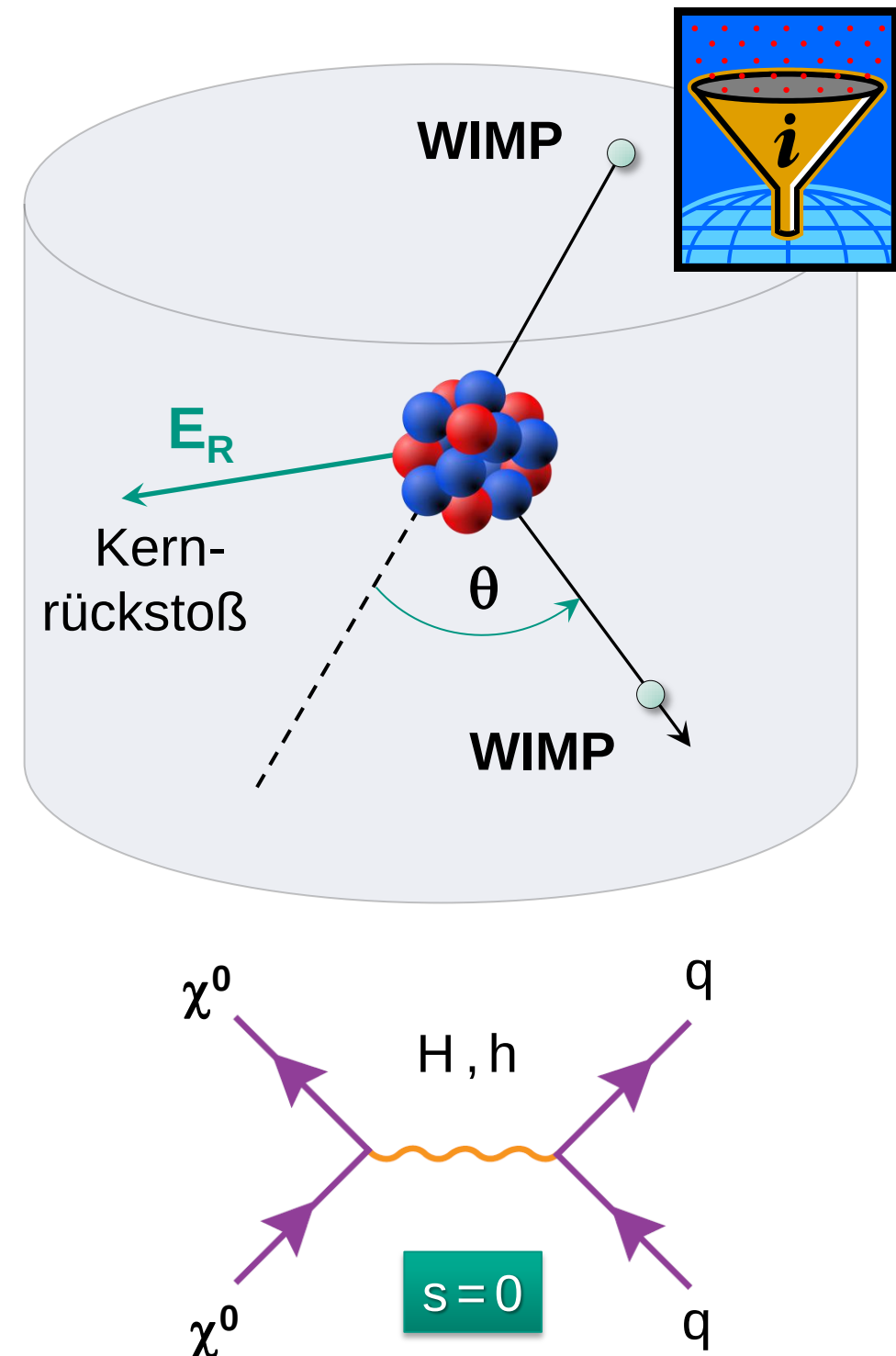
WIMP überträgt Energie an Gesamtkern, Stoßkinematik abhängig von:

- Targetkernmasse M_N (Si, Ge, Xe, ...)
- WIMP-Masse M_χ (GeV ... TeV)

$$E_R = 2 \cdot \frac{\mu}{M_\chi + M_N} \cdot E_{kin} \cdot (1 - \cos \theta)$$

■ WIMP Wechselwirkung:

- skalare Wechselwirkung mit σ_{SI}
dominiert in vielen SUSY Modellen:
Austausch von Higgs, skalarem Quark
- **kohärente Wechselwirkung** des WIMPs mit allen Nukleonen



Skalare WIMP Streuung

■ skalare WIMP Kernstreuung ist kohärent: $\sigma_{\text{Streu}} \sim A^2$

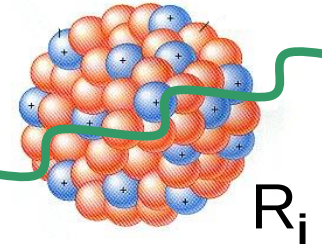
alle A Nukleonen des Kerns tragen **kohärent** zur Streuung bei

- Kohärenzbedingung $q \cdot R_i \ll 1$ (i.a. nur für $A < 50$)

q : Impulstransfer $q = \mu \cdot v = A \cdot 10^{-3} \text{ GeV}$

R_i : Kernradius $R_i \sim A^{1/3} \cdot 7 \text{ GeV}^{-1}$

$$\lambda = h / q$$



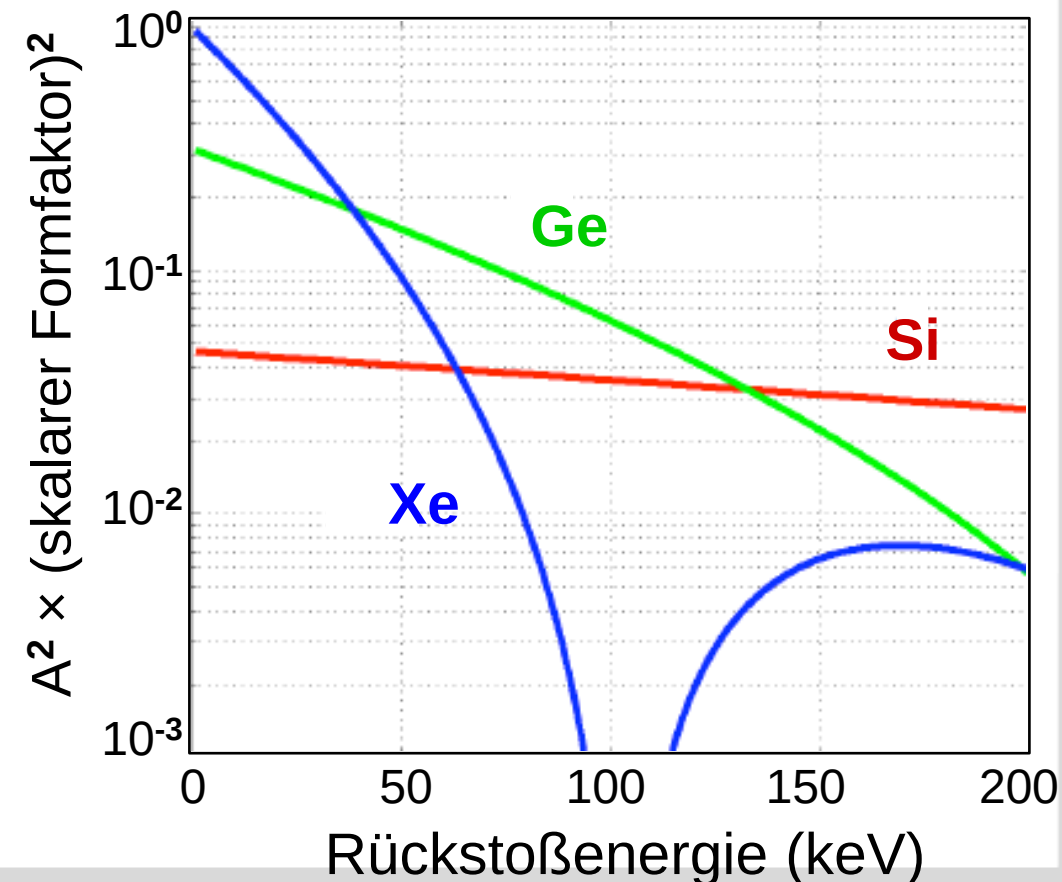
■ Verlust der Kohärenz:

falls der Impulstransfer q zu hoch ist:

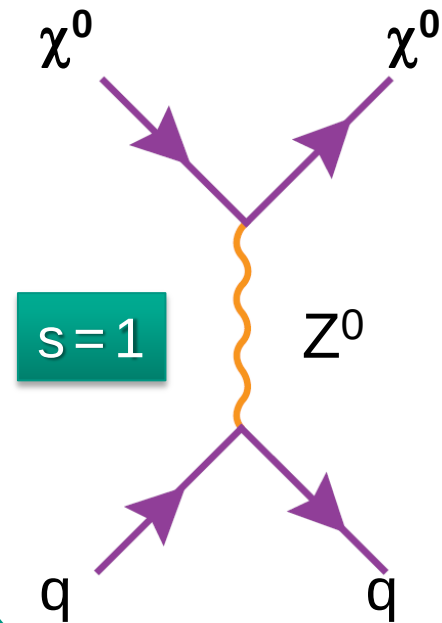
- die **de Broglie- Wellenlänge** $\lambda = h / q$ wird kleiner als der Kern-Radius R_i
↳ das WIMP 'sieht' Kernsubstruktur

- Kohärenzbedingung ist für große Impulstransfers q bzw. Kernradien R_i nicht mehr erfüllt, ↳ **Formfaktor F** mit:

$$\sigma_{\text{Streu}} \sim A^2 \cdot F^2(E_R)$$

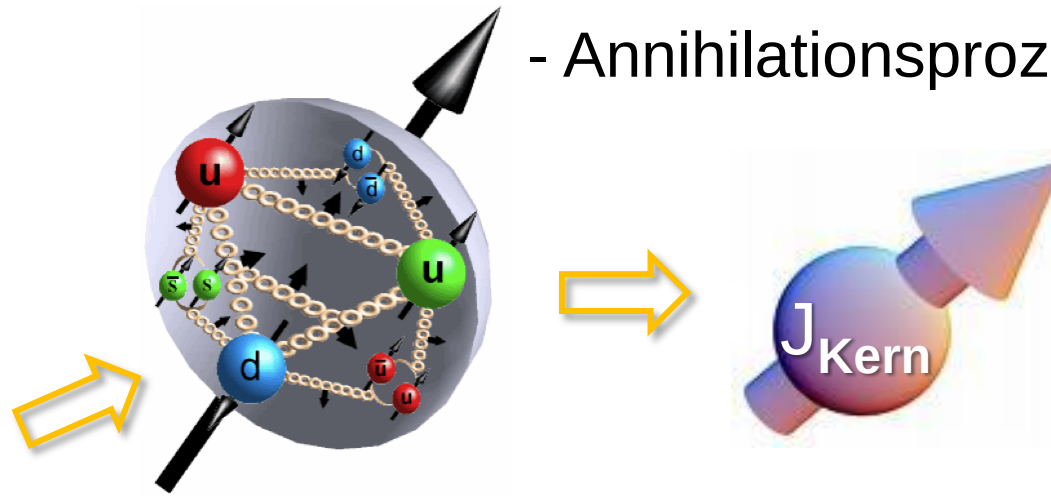


axialvektorielle Wechselwirkung: Neutralino-Spin koppelt an den Kern-Spin



Mechanismus:

- Austausch Z^0 -Boson
- Annihilationsprozesse



wichtig
für σ_{SD} :
Targetkern
muss $J \neq 0$
besitzen

■ spin-abhängige χ^0 -Wechselwirkungen (σ_{SD} : spin dependent)

- **Spinstrukturfunktionen:** Nukleonenspin (p,n) aus Partonen
- **Spinmatrixelemente:** Nukleonen im Kern (‘mittlerer’ p/n-Spin im Kern)
- **Schalenmodell:** Kernspin aus gekoppelten Nukleonen

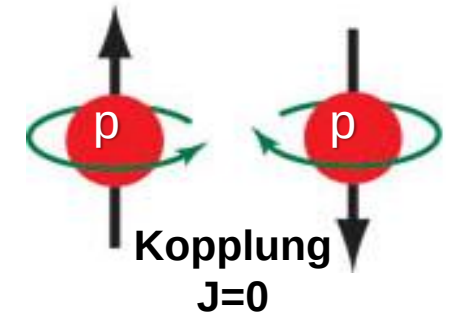
Spinabhängige WIMP Streuung

$$\sigma_{SD} \sim \sigma_0 \cdot \left(a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle \right)^2 \cdot \frac{J+1}{J}$$

$a_{p,n}$: WIMP-Proton/Neutron Kopplung (abhängig von SUSY)

J: Kernspin durch ungepaartes Nukleon (Proton / Neutron)
da Paarungsterm durch kurzreichweitige Kernkräfte

$\langle S_{p,n} \rangle$: Erwartungswert für Proton/Neutron (z.B. 5/2, 1/2)
berechnet mit dem Schalenmodell der Kerne



■ **nur Targets mit $J \neq 0$ sind auf spinabhängige WIMP-Streuung sensitiv**

Targetkern-Beispiele für σ_{SD} (sensitiv auf a_p oder a_n):

Detektortyp	Isotop	Anteil	Protonen	Neutronen	Kernspin J	Kopplung
NaJ	^{23}Na		11	12	3/2	a_p
(Szintillator)	^{127}I		53	74	5/2	a_p
LXe	^{131}Xe	21.2 %	54	77	3/2	a_n
(TPC/Szintillator)	^{129}Xe	26.4 %	54	75	1/2	a_n
Ge (Bolometer)	^{73}Ge	7.8 %	32	41	9/2	a_n

WIMP Streuraten – Beispiel für ^{73}Ge

■ Größenordnung von WIMP Streuraten

Beispiel: Rate der (spin-abhängigen) WIMP-Streuung in einem Germaniumdetektor

- Ge-Target mit $M = 1 \text{ kg}$
 $\equiv 13.8 \text{ mol}$
(Molmasse Ge: $\mu = 72.6 \text{ g/mol}$)

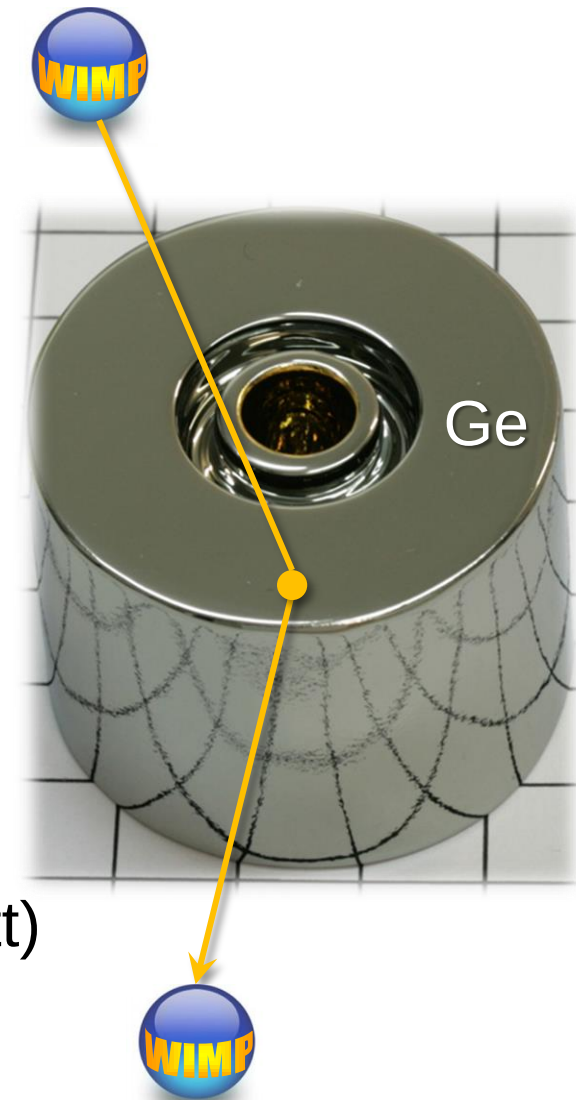
$$N = 8.3 \cdot 10^{24} \text{ Targetatome}$$

davon: 8% Isotopenanteil ^{73}Ge
(Isotop mit Kernspin $\neq 0$)

$\langle \sigma_{SD} \rangle = 10^{-42} \text{ cm}^2$ (spinabhängiger Wirkungsquerschnitt)

$$R = N_{^{73}\text{Ge}} \cdot \langle \Phi \cdot \sigma_{SD} \rangle \sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$$

WIMP Detektoren benötigen Targetmassen $> 100 \text{ kg}$

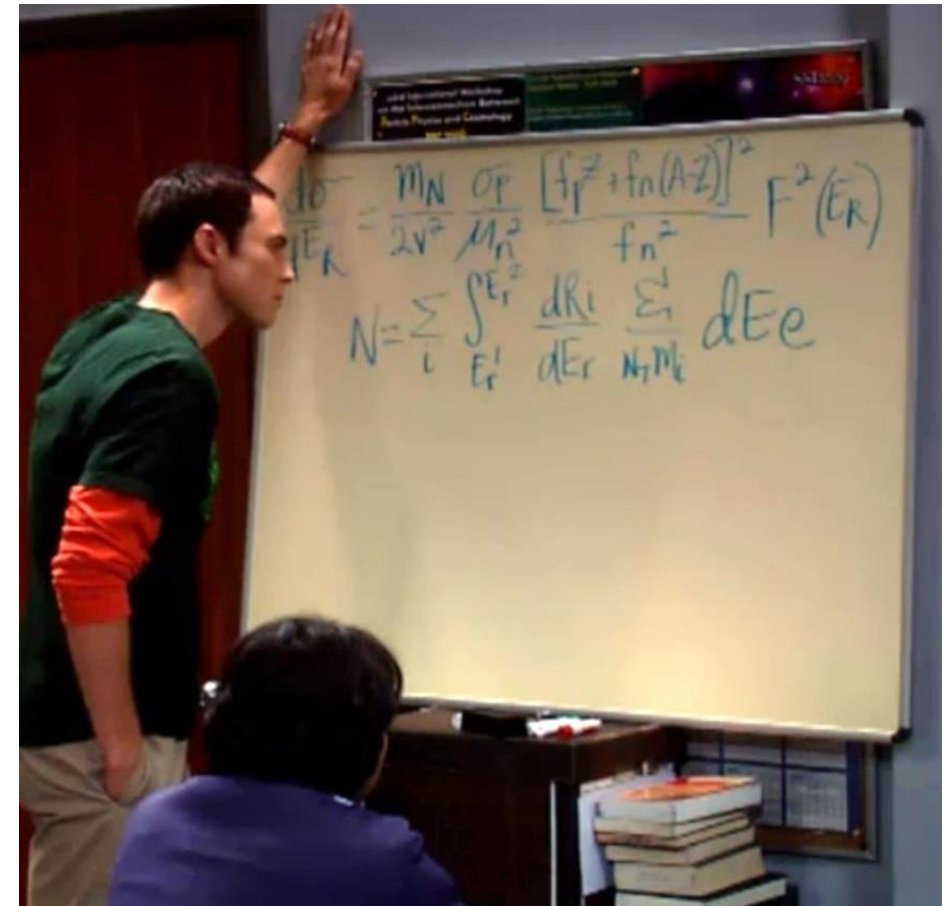
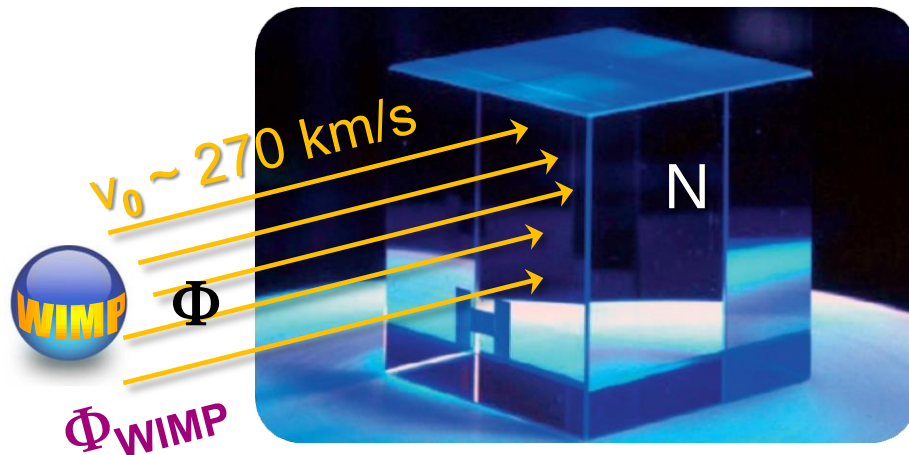


■ Genaue Berechnung von Raten/Spektren:

$$R = N_{\text{Kern}} \int_{E_{\text{kin},\text{min}}}^{E_{\text{kin},\text{max}}} \Phi(E) \cdot \sigma_{\text{SI}/\text{SD}}(E) dE \approx N_{\text{Kern}} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{\text{SI}/\text{SD}} \rangle$$

$\Phi(E)$ Energie- (Geschwindigkeits-) abhängiger WIMP-Fluss

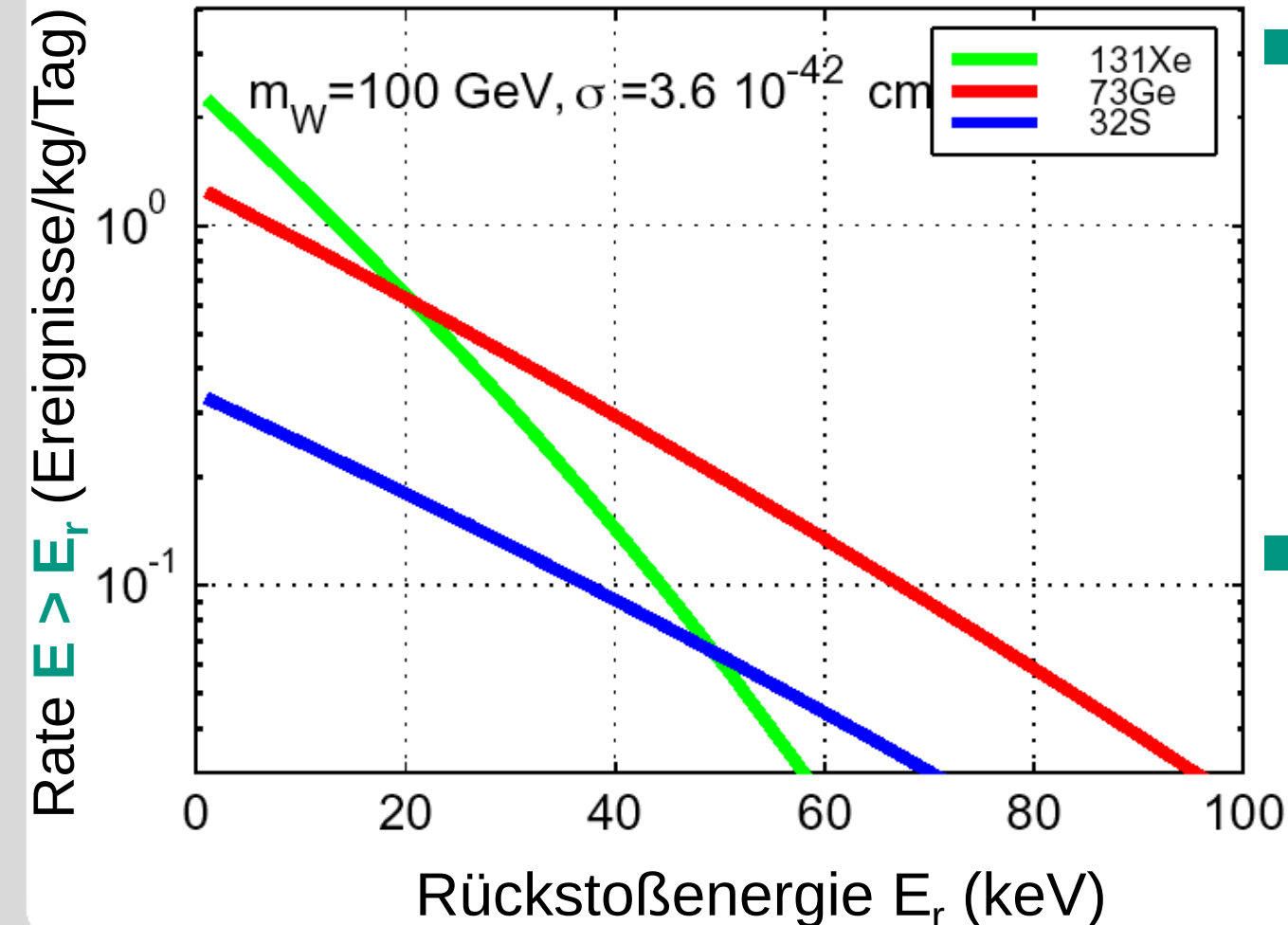
$\sigma(E)$ energieabhängiger elastischer Streuwirkungsquerschnitt (SUSY)



■ Rückstoß-Spektrum für skalare Wechselwirkung (kohärent, Formfaktor)

$$\frac{dR}{dE_R} \sim \int \frac{d\sigma}{dE_R} v \cdot f(v) dv$$

Kernrückstoßenergien im keV-Bereich



■ Rückstoßspektrum abhängig von

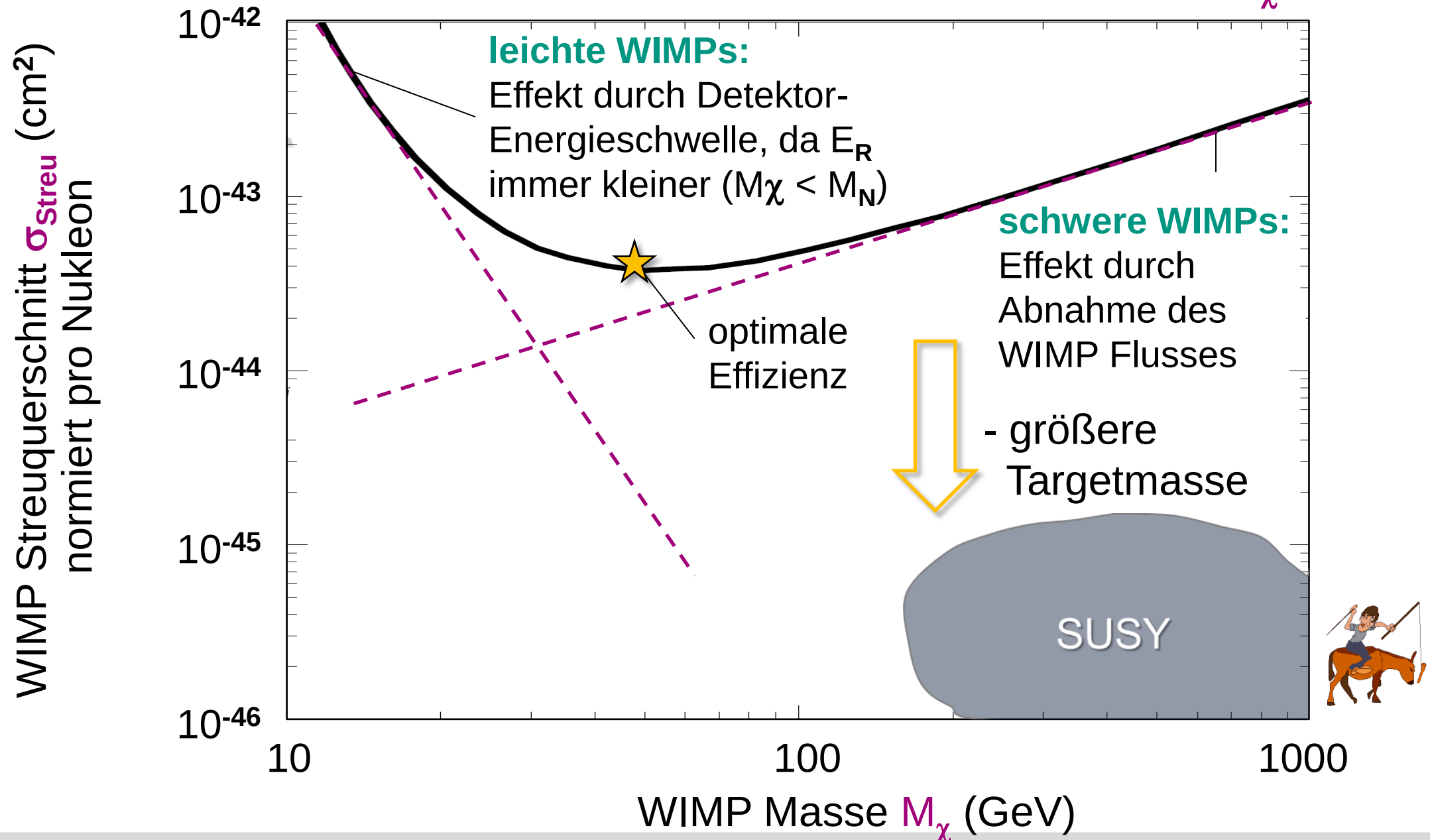
- WIMP-Halomodell (ρ_{CDM} , v_0) :
je größer v_0 , je höher die Rate
- Neutralinomasse M_χ
- Targetkernmasse M_N
- Kernstruktur (Formfaktor F)

■ Detektor-Energieschwelle

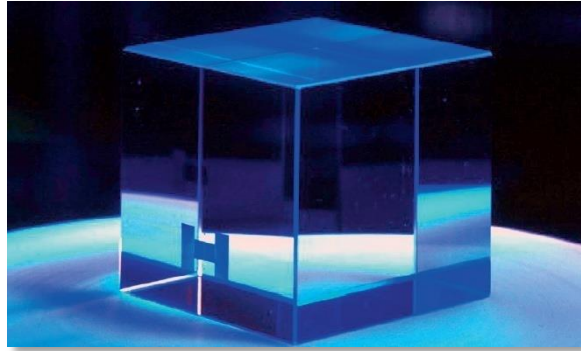
- wichtig: **niedrige Schwelle** im Bereich von 10 - 20 keV, gilt insbesondere für schwere Targetkerne Xenon, Jod

WIMP Plots – Experimentelle Resultate

■ **WIMP Plot:** Darstellung der Ergebnisse als Funktion von Masse M_χ & σ_{Streu}



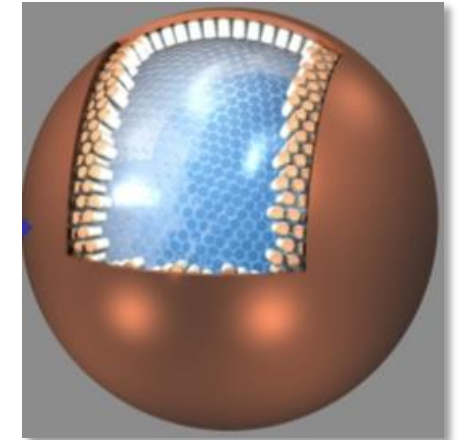
Nachweismethoden – 1 Messparameter



CRESST-I

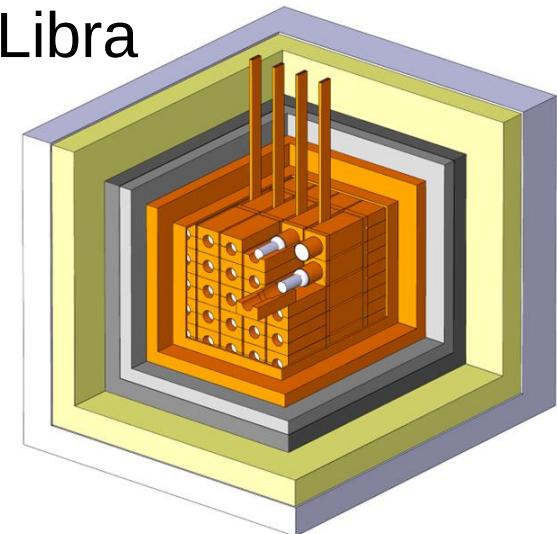
Phononen

XMASS
CLEAN
Zeplin I

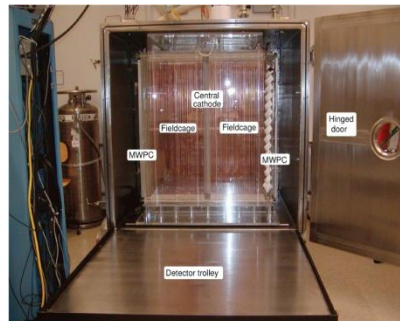


Szintillation

DAMA/Libra
ANAIS
NAIAD
KIMS

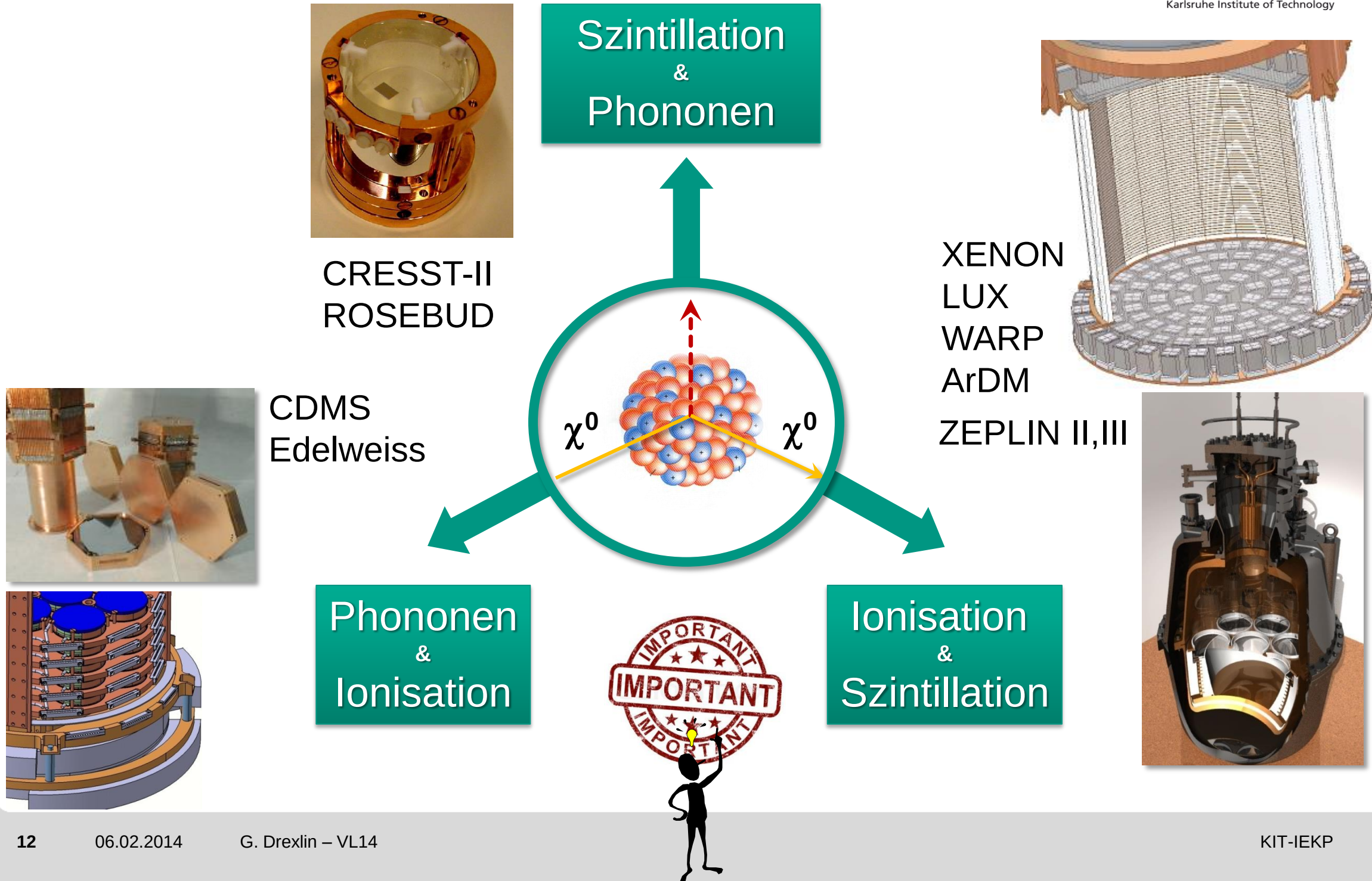


HDMS, DRIFT



Ionisation

Nachweismethoden – 2 Messparameter



Szintillatoren für Kernrückstoß

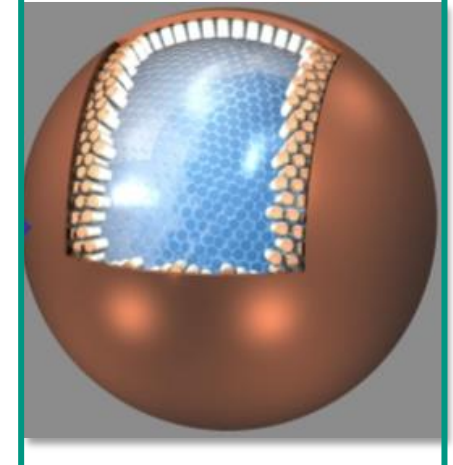
■ Vorteile:

- **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}Na , ^{127}I , ^{131}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

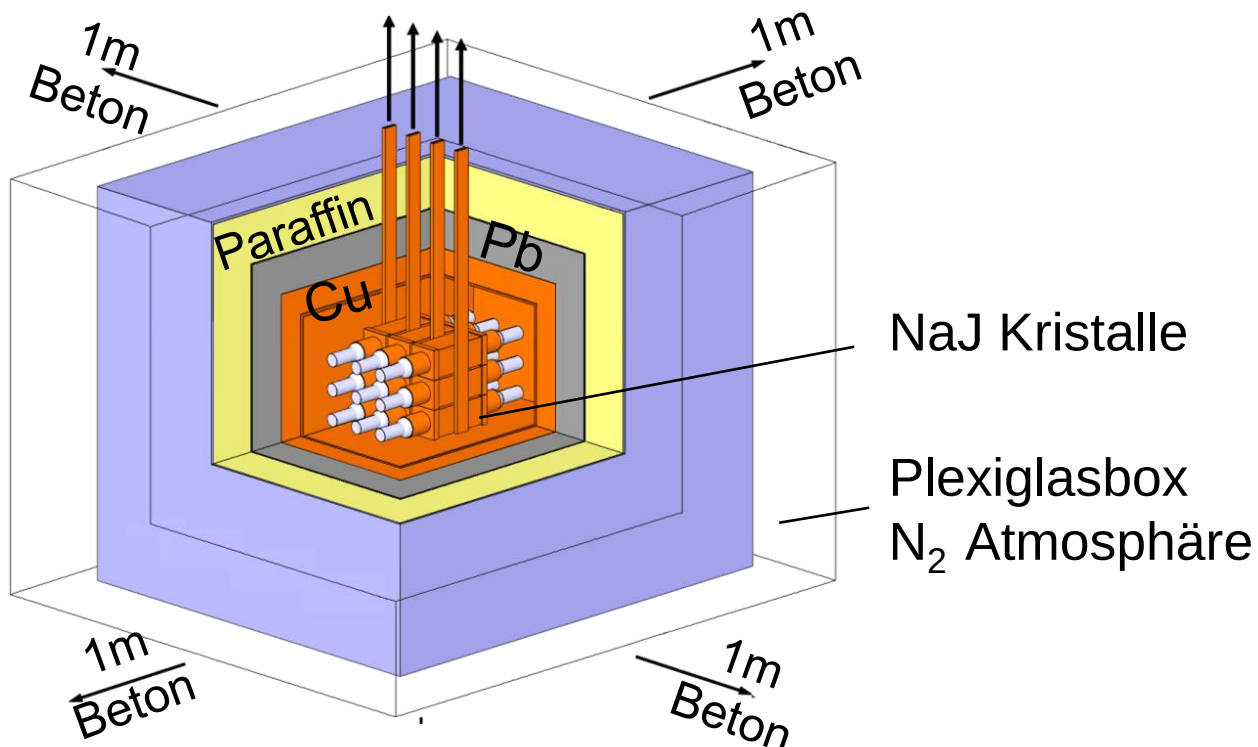
■ DArk MAtter Experiment: NaJ Szintillationsdetektor-Array

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

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

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

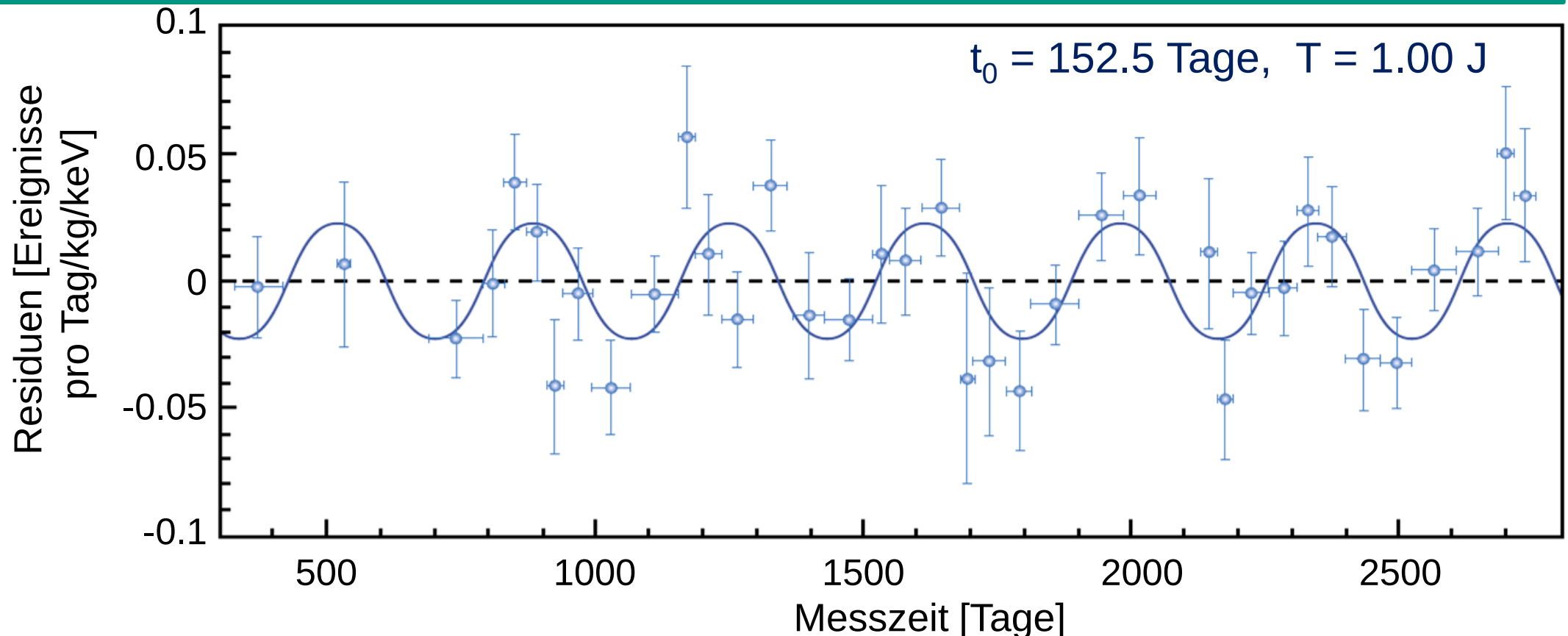
Untergrund: sehr geringe NaJ Eigenaktivität, Abschirmung : Beton, Paraffin, 15 cm Boliden-Pb, 10 cm Cu, $\rightarrow$ 1-2 Ereignisse/keV/kg/Tag



DAMA
Set-up
am LNGS



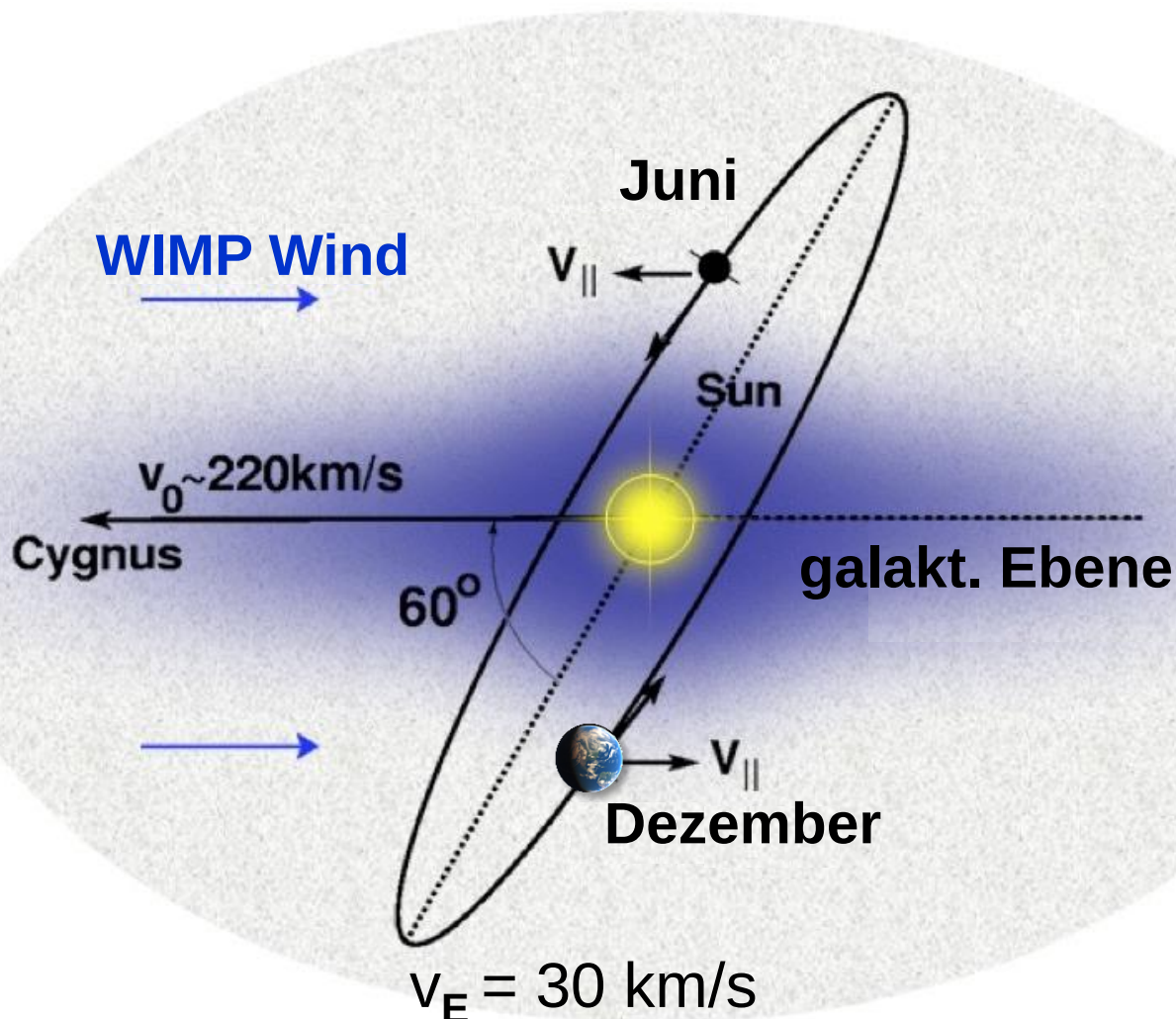
- **7 Jahre Datennahme** (107 731 kg-Tage) von Januar 1995 – Juli 2002
- Modulation der Ereignisrate** mit $T = 1a$ & erwarteter Phase ($t_0 = 2.$ Juni)
- Signal nur knapp oberhalb der 'hardware' Schwelle bei $E = 2 - 6$ keV
- keine Modulation bei $E = 6-14$ keV, statistische Signifikanz (CL) = 6.3σ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



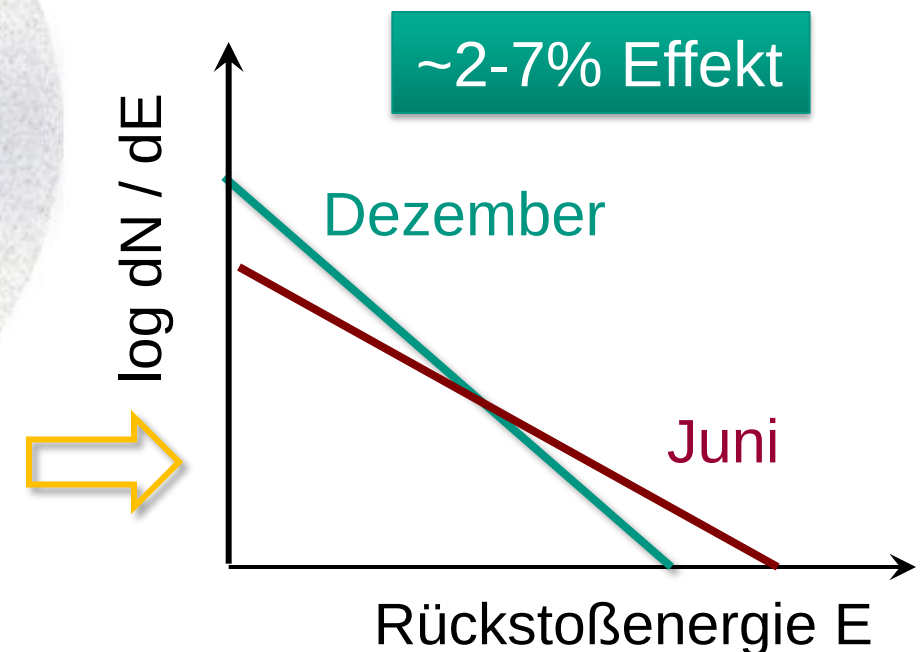
WIMP Streuung – jährliche Modulation

■ Modulation des WIMP- Rückstoßspektrums

- Überlagerung der Geschwindigkeitsvektoren v_S (Sonne) & v_E (Erde)
⇒ Periode $T = 1.00$ Jahr Phase $\varphi_0 = 2.$ Juni



$$v(t) = v_0 + v_E \cos(60^\circ) \cdot \cos \omega(t - t_0)$$



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

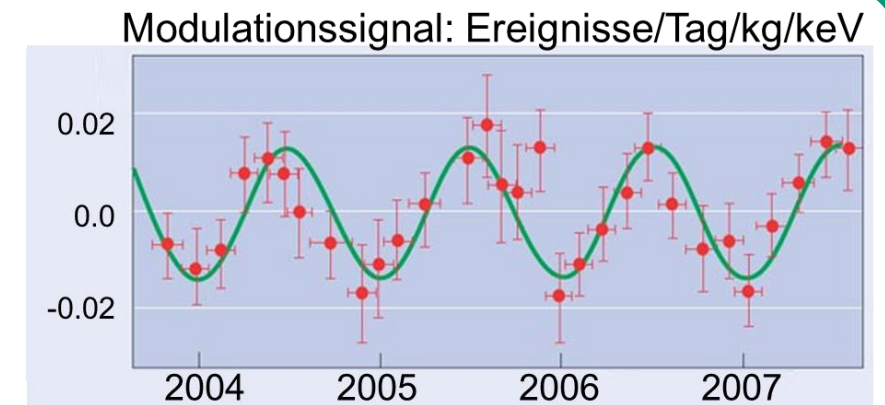


■ Messungen DAMA/Libra

- Datennahme seit 9/2003

■ Resultate

- Bestätigung des DAMA Modulationssignals: gleiche Amplitude & Phasenrelation
- Gesamtexposition (2008) **Masse $\cdot$ Jahre = 0.82 t Jahre**
statistische **Signifikanz 8.2σ für Signal mit jährlicher Modulation**
- favorisierter WIMP Parameterbereich (M_χ, σ) wird aber von Xenon-Experimenten ausgeschlossen (auch für sehr leichte WIMPs!)



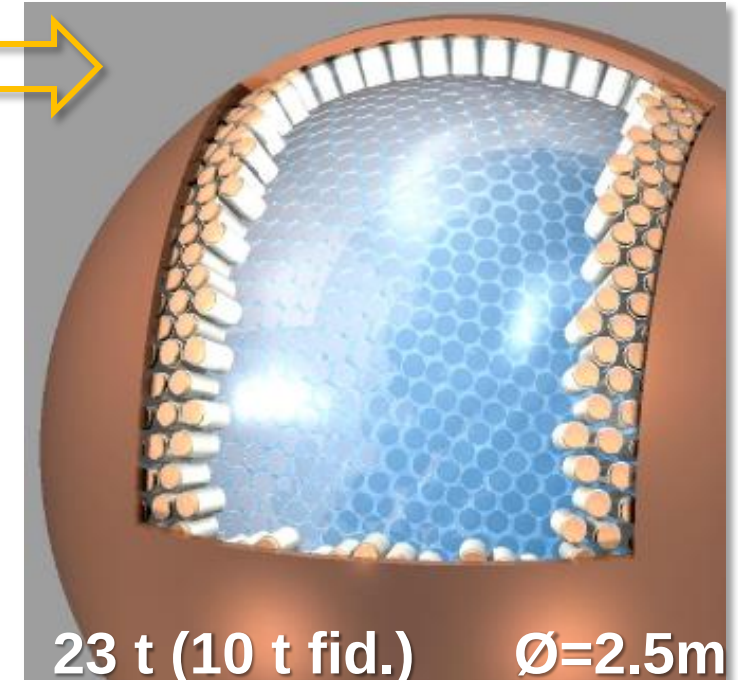
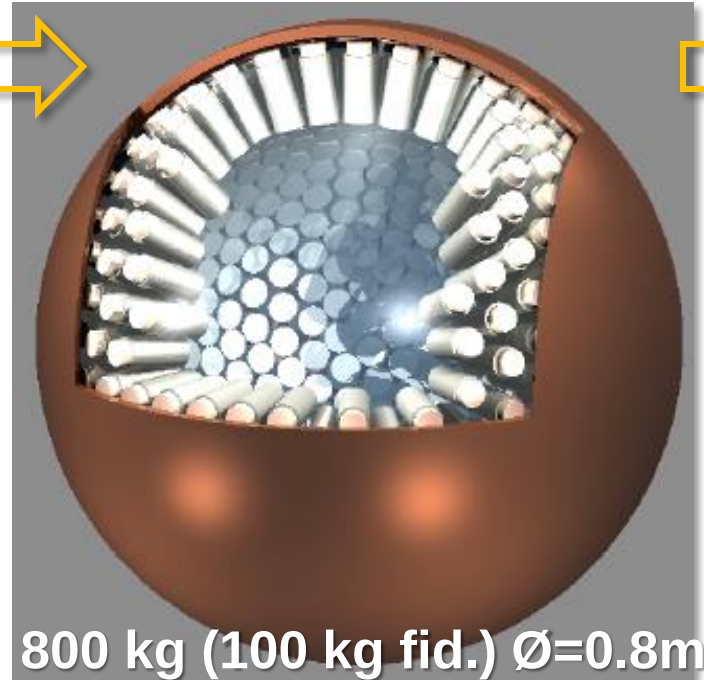
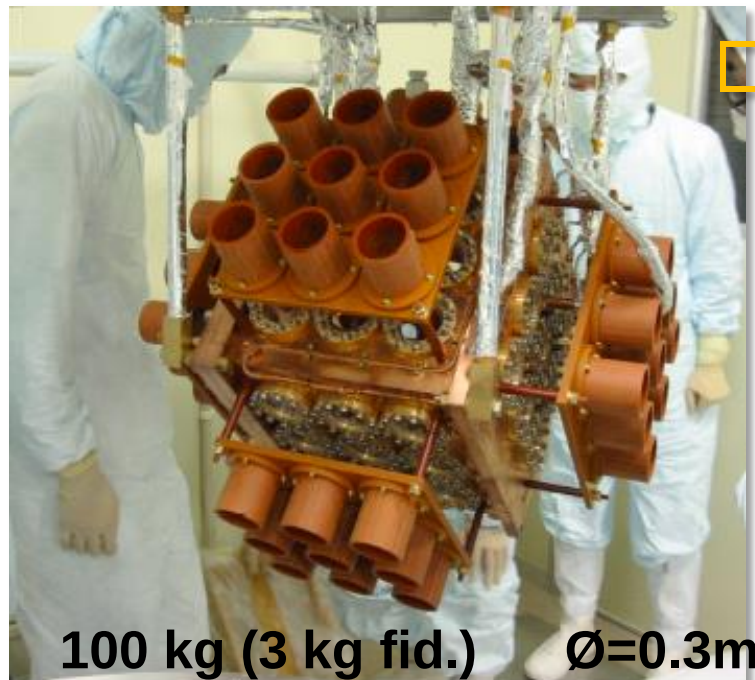
■ **XMASS:** Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles

Experiment in der Kamioka Mine in den japanischen Alpen

Ziel: schrittweise Vergrößerung der Xenon-Targetmasse, bessere 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: erste Messungen mit 800 kg (100 kg. fid.) Detektor

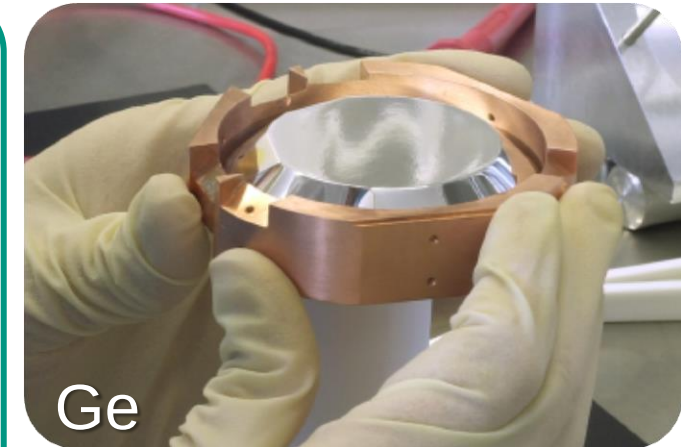


3.5.2 Kryogene Bolometer

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

Vorteile:

- gute Kernrückstoß-Sensitivität (Phononen)
- relativ niedrige Energieschwelle
- gute Energieauflösung (~ 150 eV @ 6 keV)
- **verschiedene Targetmaterialien** (Ge, Si, 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 χ^0 -Streuung führt zu kleiner, aber messbarer Temperaturerhöhung ΔT im Absorber
- **Absorber** (Ge, Si, CaWO_4) mit Masse $M \sim 300 \text{ g}$ bei $T_0 = 10\text{-}20 \text{ mK}$
- **Thermometer** zur Messung des Temperaturanstiegs ΔT 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 ($\sim 1 \text{ kg}$)

