

# Astroteilchenphysik - I

WS 2012/2013

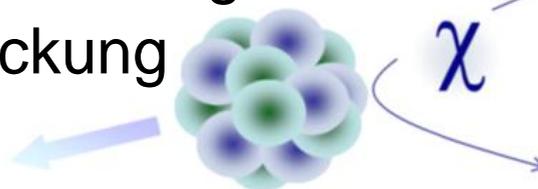
Vorlesung # 13, 31.01.2013



Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

## DM: direkte Nachweismethoden

- WIMP-Kern-Reaktionen: DM-Halo
- skalare & spinabhängige Streuung
- Kinematik des Kernrückstoßes
- WIMP Nachweis und Untergrund
- Untergrundunterdrückung
- Untergrundlabore



# Indirekte Suche nach DM: $e^+$ , $\bar{p}$ , $\nu$

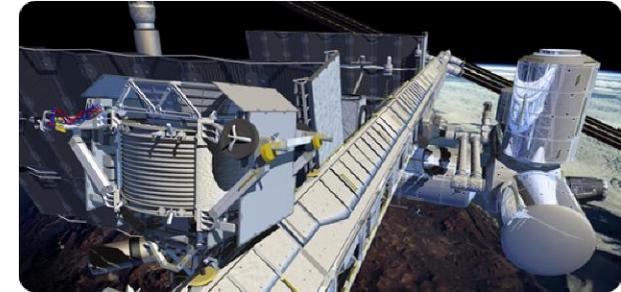


- geladene Teilchen aus DM-Annihilationen: **isotope Verteilungen**

Satelliten-Experimente PAMELA, AMS-02

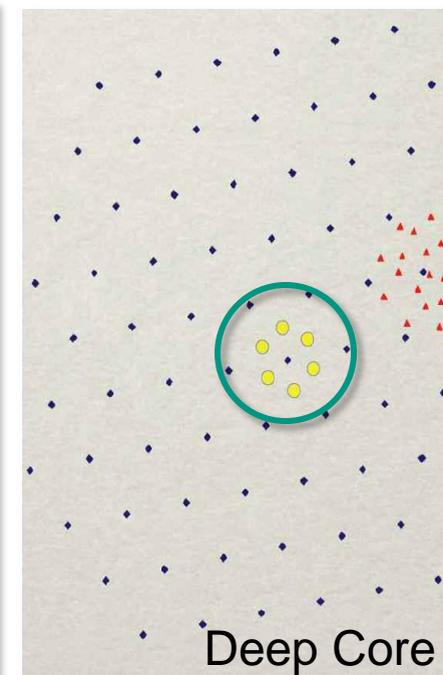
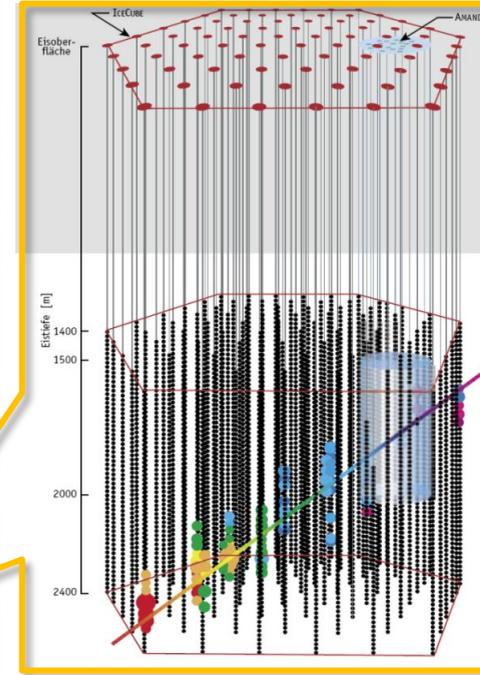
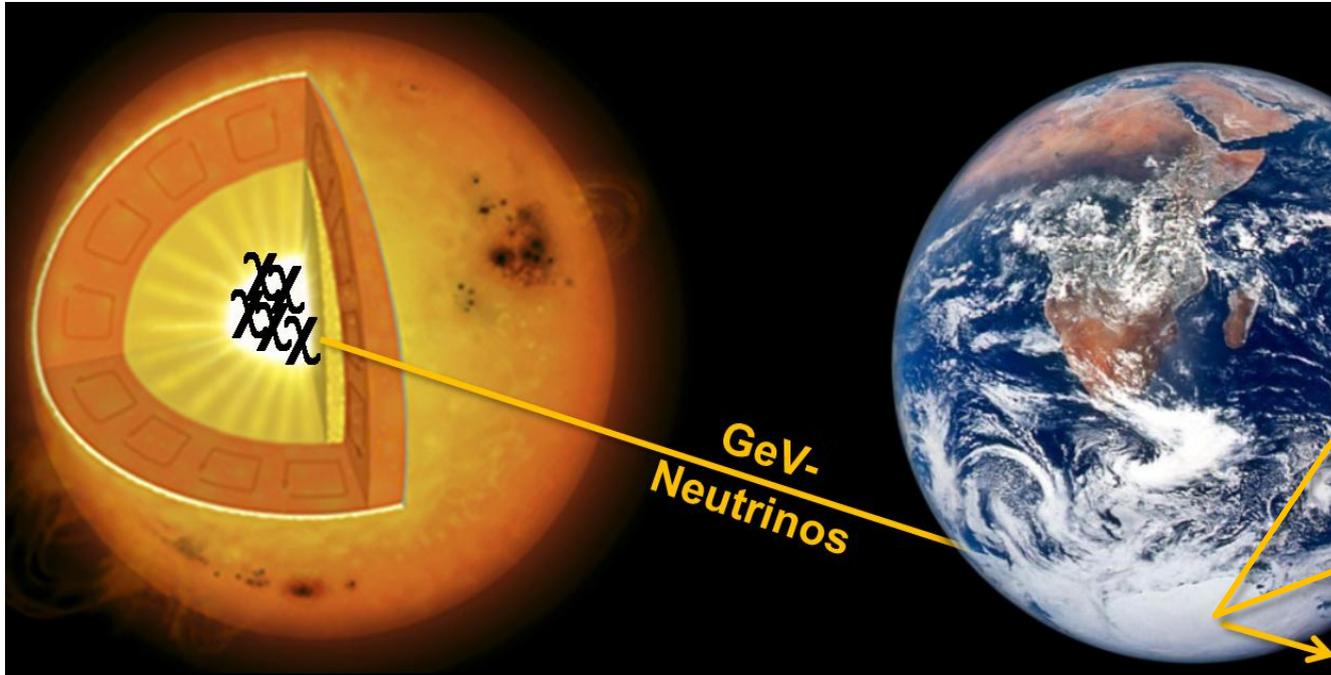
**Positronen**: beobachteter Überschuss im GeV-Bereich:  
DMA oder lokaler Gamma-Pulsar?

**Antiprotonen**: schwierige astrophysikal. Modellierung



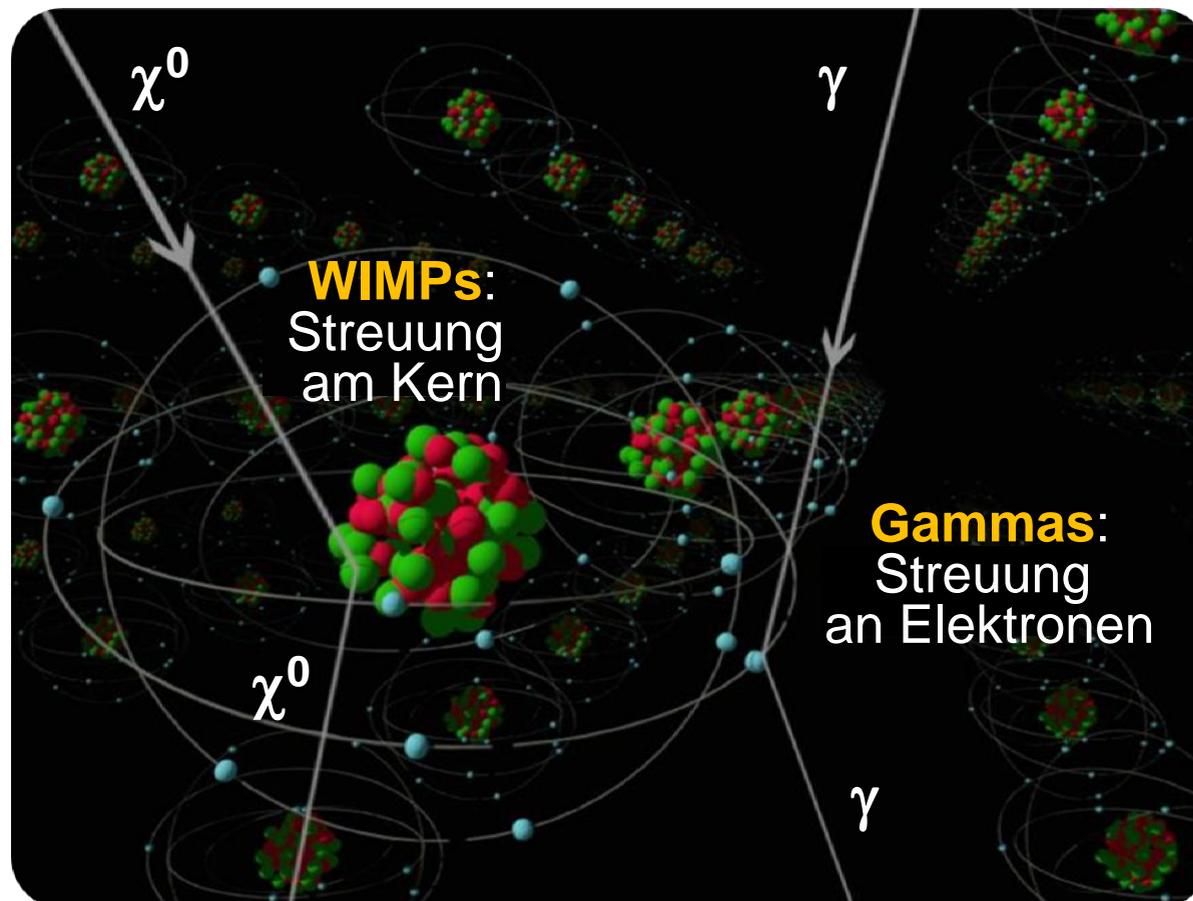
- Suche nach WIMP-Annihilationen im Sonneninnern mit  **$\nu$ -Teleskopen**

Signal in IceCube: hochenergetische GeV-Myonen aus  $\nu_\mu$  Wechselwirkungen



# 4.3 Direkte Nachweismethoden

- Experimente zum direkten Nachweis der CDM auf der Erde:
  - **Prozess: elastische Streuung des WIMPs am Kern**
  - **Signatur: Rückstoßkern mit typischen Energien im keV-Bereich**
  - $\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.2$ : WIMPs mit extrem kleine Streurrate mit Kern ( $< 10^{-7}$  pb)



## ■ Experimentelle Grundlagen:

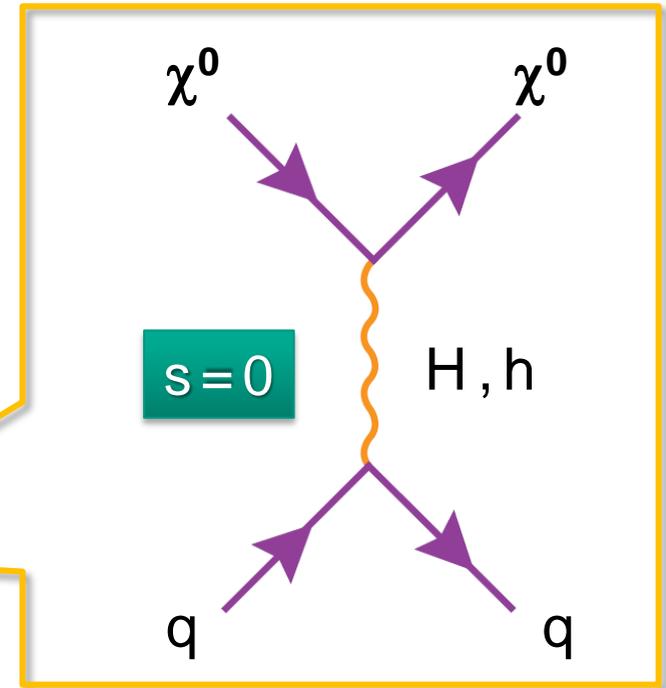
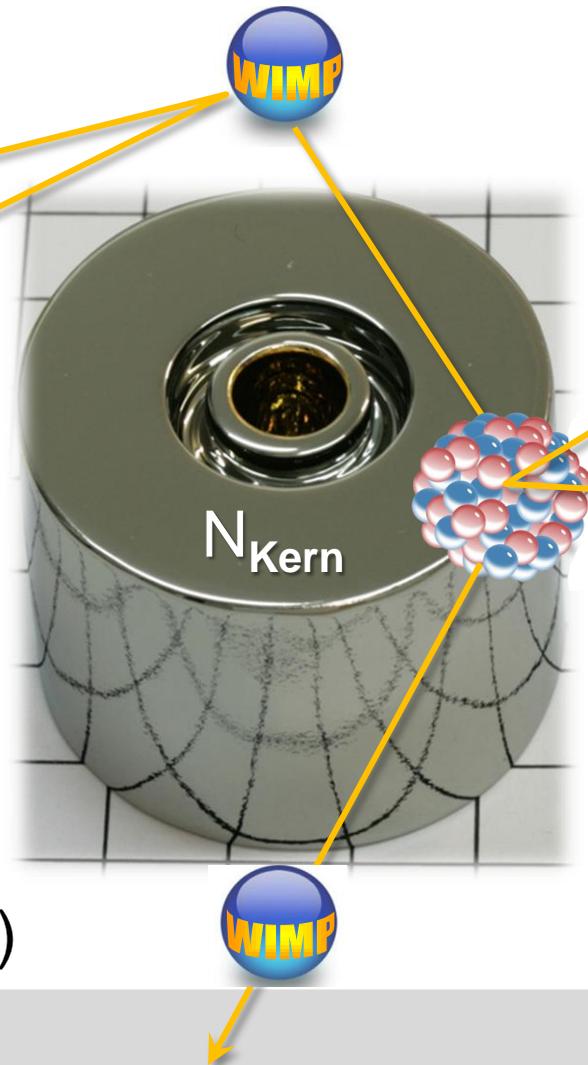
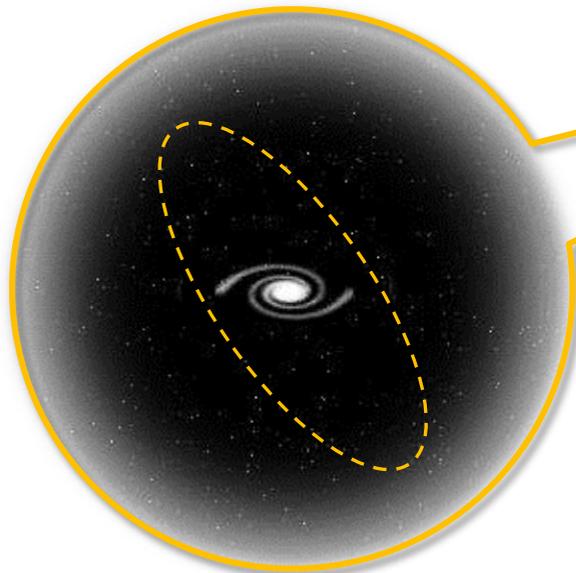
- nur **elastische** WIMP Streuung an Kern, da kinetische Energie von WIMP im Halo nur im keV-Bereich gilt:  $E_{\text{kin}}(\chi^0) \ll E_{\text{Kernanregung}}$  (& R-Paritätserhaltung)
- bei einem Streuprozess an leichte  $e^-$  wird kein Impuls übertragen, da  $m(\chi^0) \gg m(e^-)$  [100 GeV : 0.5 MeV]  
Analogie zur Rutherford-Streuung

## ■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

$$R = N_{Kern} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \rangle = N_{Kern} \cdot \frac{\rho_{DM, lokal}}{M(\chi^0)} \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \cdot v \rangle$$

SUSY

ASTRO



### WIMP-Eigenschaften:

- kinetische Energie ( $v$ )
- lokale Dichte  $\rho_{DM, lokal}$
- Fluss  $\Phi$  (aus  $v$  &  $\rho_{DM, lokal}$ )

### WIMP-Eigenschaften:

- Streuquerschnitte skalar  $\sigma_{SI}$  / axial  $\sigma_{SD}$
- Masse  $M(\chi^0)$

# WIMP Geschwindigkeitsprofil

## ■ Isothermales WIMP Geschwindigkeitsprofil $f(v)$

$$R = N_{Kern} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \rangle = N_{Kern} \cdot \frac{\rho_{DM, lokal}}{M(\chi^0)} \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \cdot v \rangle$$

- 'thermalisierte' WIMPs im Halo:

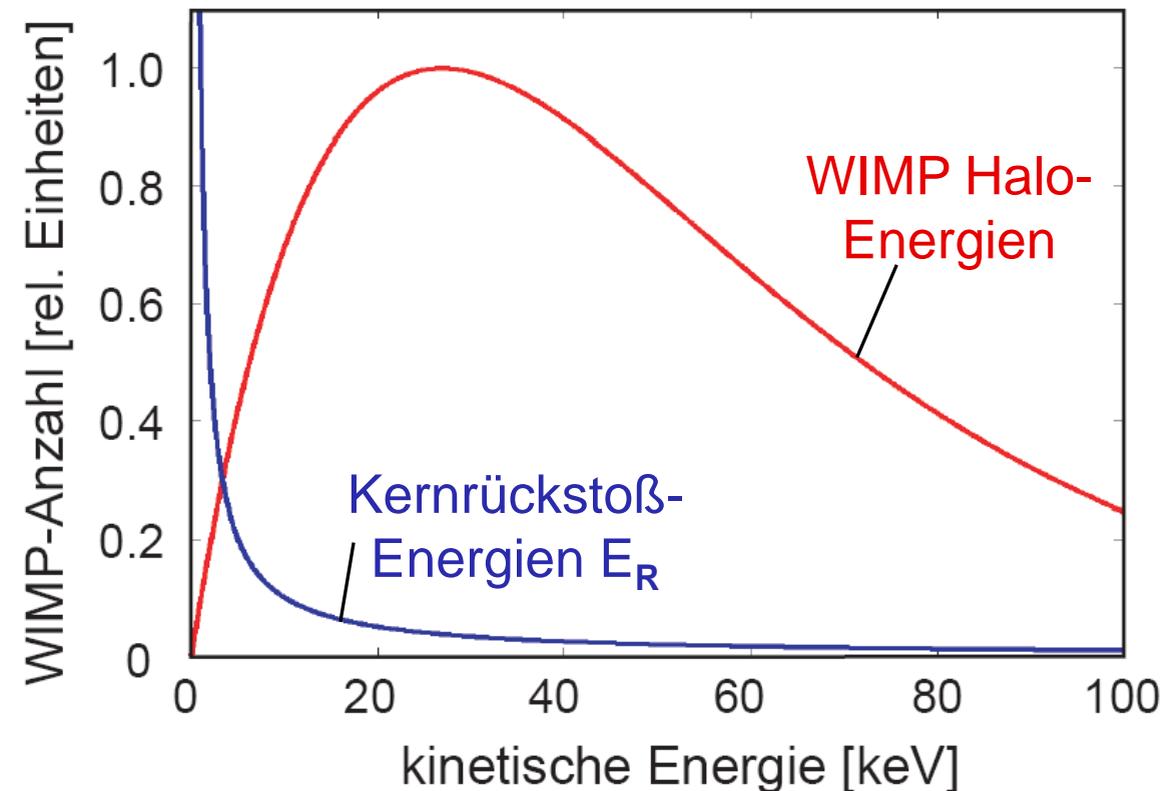


### Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeits-Verteilung

$$f(v) dv = \frac{4v^2}{v_0^3 \sqrt{\pi}} e^{(-v^2/v_0^2)} d^3v$$

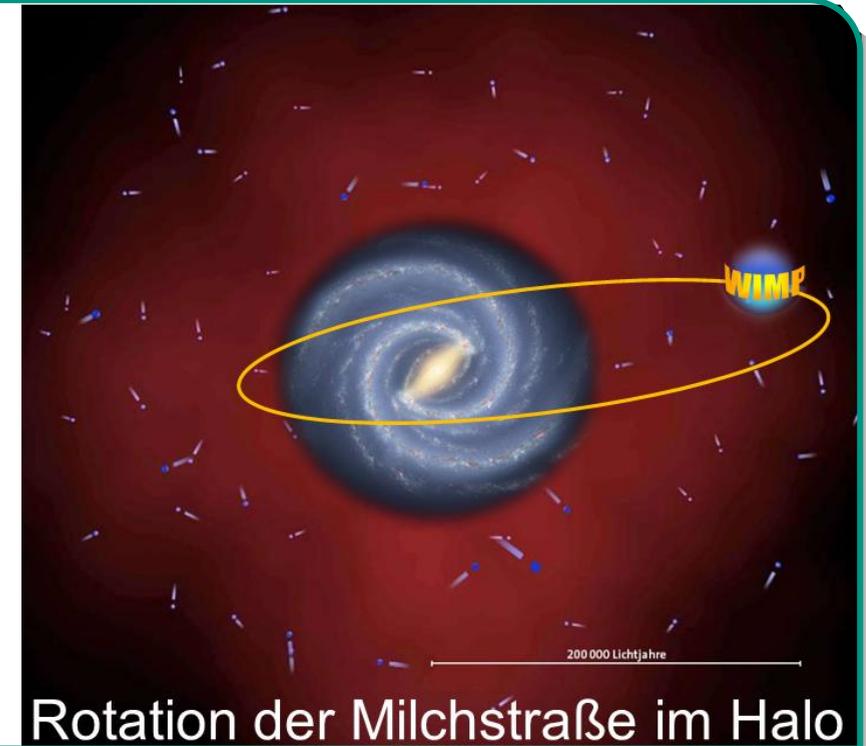
$v_0$ : wahrscheinlichste WIMP Geschwindigkeit im Halo (~270 km km/s)

$$v_0 = \sqrt{\frac{2k_B T}{M_\chi}}$$



## ■ WIMP-Energien aus DM Halo

- isothermaler Halo:  $\langle v \rangle \sim 10^{-3} c \sim 270 \text{ km/s}$
- kinetische Energie  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} M_{\chi} \cdot v^2$
- $M_{\chi} = 100 \text{ GeV} \Rightarrow E_{\text{kin}} < 100 \text{ keV}$
- $E_{\text{kin}} \ll M_{\chi}$
- Konsequenz:  
nichtrelativistische Streukinematik



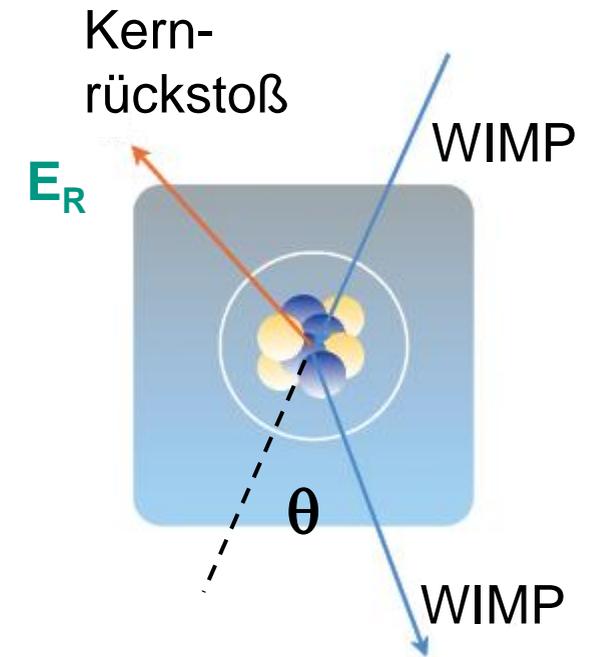
## ■ Modifikationen zu reiner Maxwell-Boltzmann-Verteilung

- WIMPs mit  $v > 500\text{-}600 \text{ km/s}$  entweichen aus der Galaxis:  
Abschneide-Parameter für  $f(v)$ 
  - ↪ maximale Rückstoßenergie  $E_R$  für Target-Kern  
da durch Reaktionskinematik Relation  $E_R \sim E_{\text{kin}} (1 - \cos\theta)$

## ■ nichtrelativistische Streu-Kinematik

- Kinematik einer rein elastische Streuung eines WIMPs (Masse  $M_\chi$ ) an Targetkern (Masse  $M_N$ )
- Rückstoß-Energie des Kerns  $E_R$ :

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



- wichtige kinematische Parameter:

a) reduzierte Masse  $\mu = M_\chi \cdot M_N / (M_N + M_\chi)$

für Fall  $M_\chi = M_N$  gilt  $\mu = M_N/2$

für Fall  $M_\chi \gg M_N$  gilt  $\mu = M_N$

b) Streuwinkel  $\theta$

## ■ maximale Rückstreuenergie $E_{R,\max}$ des Kerns

$E_{R,\max}$  bei WIMP Rückstreuung mit  $\theta = 180^\circ$

$$E_{R,\max} = 2 \cdot \frac{\mu}{(M_\chi + M_N)} \cdot 2E_{\text{kin}}$$

$$E_{R,\max} = 2 \cdot \frac{\mu}{M_\chi + M_N} \cdot M_\chi v^2 = 2 \cdot \frac{\mu^2 \cdot v^2}{M_N}$$



$$2 E_{\text{kin}} = 2 \cdot \frac{1}{2} M_\chi v^2$$

## ■ Abhängigkeit der maximale Rückstreuenergie $E_{R,\max}$ von $M_\chi$ :

$$M_\chi = M_N: \mu = M_N/2 \quad \Rightarrow \quad E_{R,\max} = \frac{1}{2} \cdot M_N \cdot v^2$$

‘optimaler’ Impulstransfer, Kern erhält gesamte  $E_{\text{kin}}$  des WIMP

$$M_\chi \gg M_N: \mu = M_N \quad \Rightarrow \quad E_{R,\max} = 2 \cdot M_N \cdot v^2$$

sehr schwere  $\chi^0$  auf TeV-Skala: nur geringfügig höheres  $E_R$

## ■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

$$R = N_{Kern} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \rangle = N_{Kern} \cdot \frac{\rho_{DM, lokal}}{M(\chi^0)} \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \cdot v \rangle$$

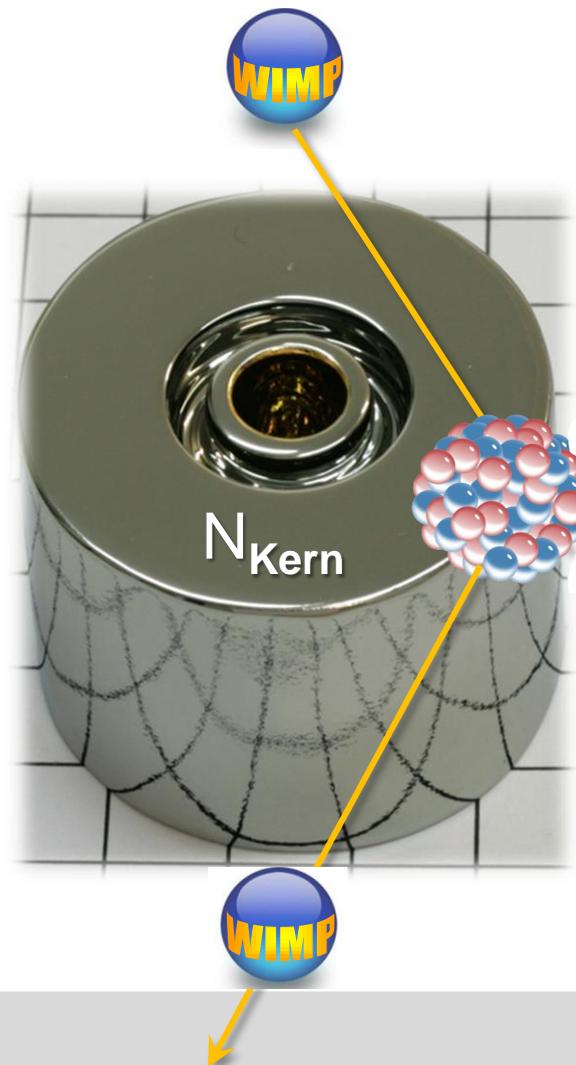
## ■ lokaler WIMP – Fluss $\Phi$

Berechnung für WIMP  
mit  $M(\chi^0) = 100 \text{ GeV}$

$$\langle \Phi \rangle = \frac{0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3}{100 \text{ GeV}} \cdot$$

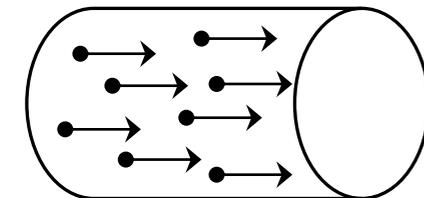
$$270 \times 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

⇒  $\langle \Phi \rangle \sim 80.000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



## ■ Definition Fluss $\Phi$

$$\langle \Phi \rangle = \frac{\rho_{DM, lokal}}{M(\chi^0)} \cdot \langle v \rangle$$



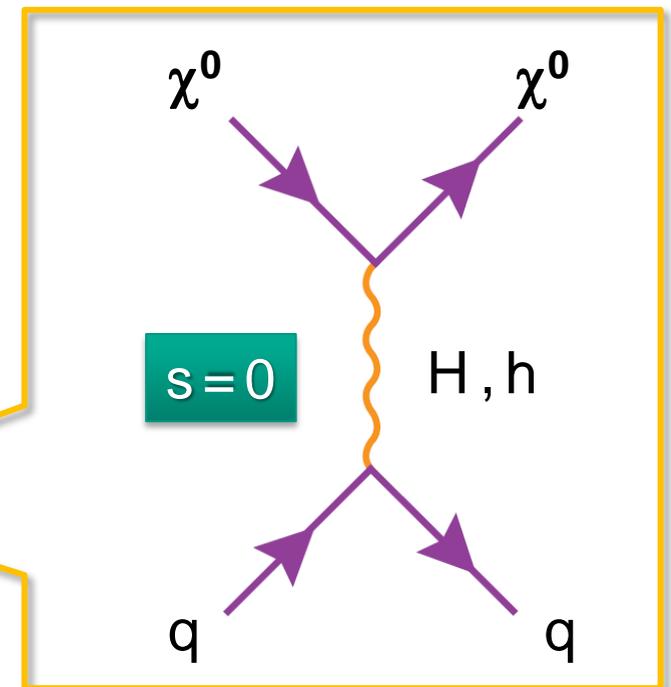
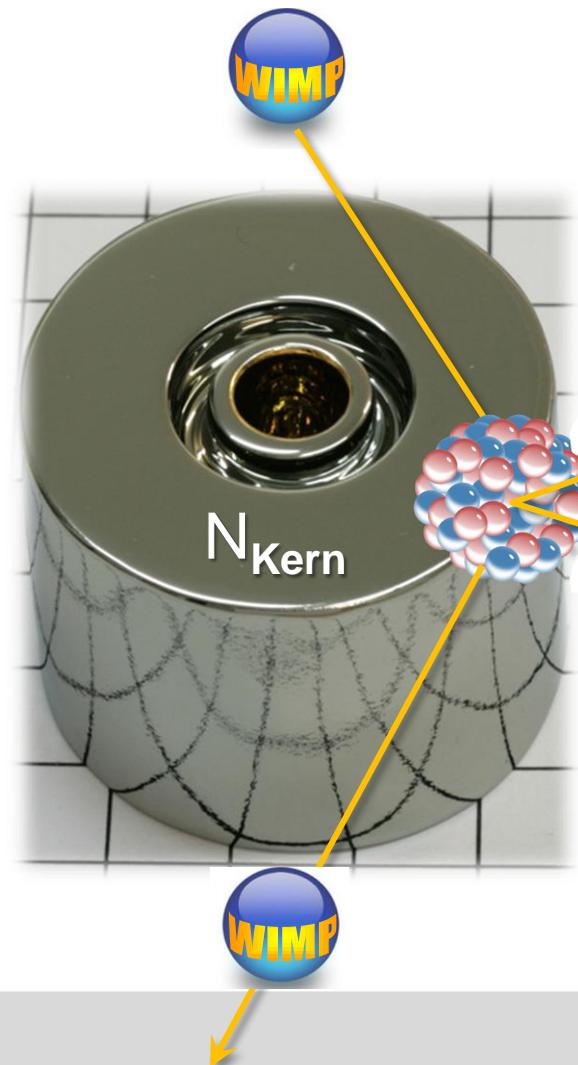
**Fluss [cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>]**

$$\Phi = n_{\text{Strahl}} \cdot v_i$$

## ■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

$$R = N_{Kern} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \rangle = N_{Kern} \cdot \frac{\rho_{DM, lokal}}{M(\chi^0)} \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \cdot v \rangle$$

SUSY



### WIMP-Eigenschaften:

- Streuquerschnitte skalar  $\sigma_{SI}$  / axial  $\sigma_{SD}$

# Neutralino-Streuprozesse: Überblick

■ **skalare** ( $\sigma_{SI}$ ) / **spinabhängig** ( $\sigma_{SD}$ ) Wechselwirkung

1 – Ebene der Partonen: q, g

$\chi^0$  - Wechselwirkung mit **Quarks, Gluonen**

$\chi^0$  - Kopplungsstärke aus **SUSY-Modell**

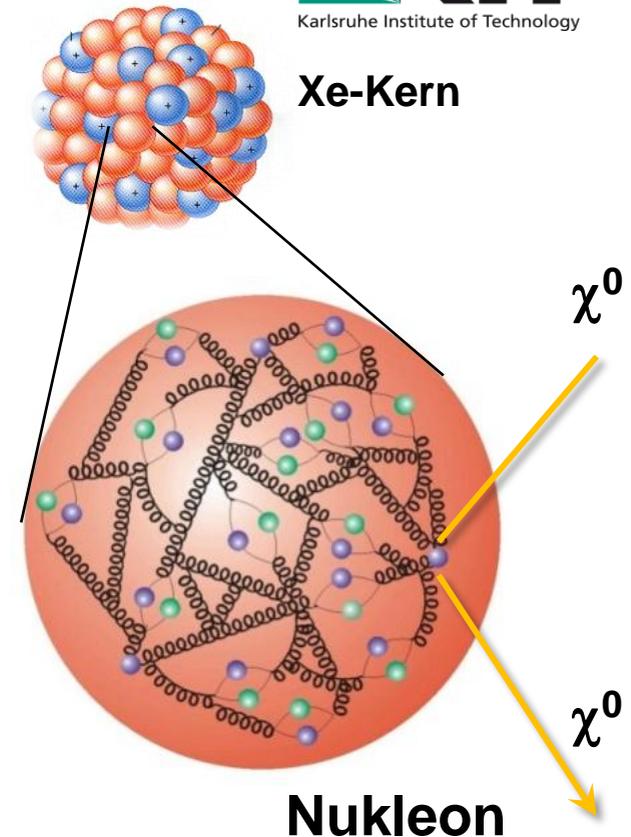
2 – Ebene der Nukleonen: p, n

q, g Kinematik innerhalb eines **Nukleons** bestimmt durch Parton-Verteilungen (Valenz- & Seaquarks)

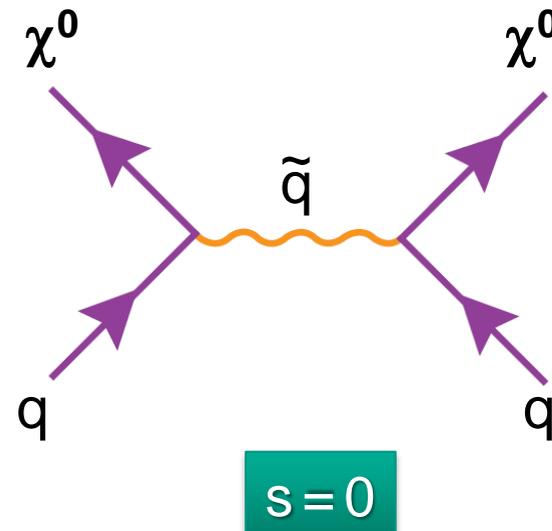
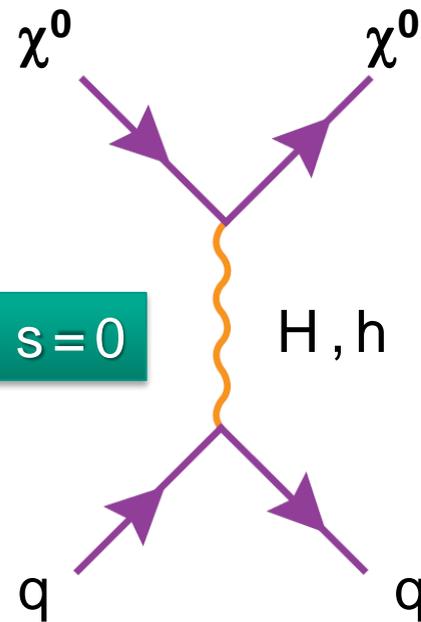
3 – Ebene der Kernstruktur: Ar, Xe,...

$\chi^0$  - Wechselwirkung auf der Ebene des **Kerns** (Kernwellenfunktion)

- kohärente Addition der skalaren/Spin Komponenten der Nukleonen
- Formfaktoren für Massenverteilung im Kern, Spinfaktoren
- Reaktionskinematik – **kohärenter Kernrückstoß**



## skalare Wechselwirkung: Neutralino koppelt an Massenverteilung des Kerns



### ■ Mechanismus:

- Austausch eines leichten oder schweren Higgs  $H, h$
- Annihilation in Squark ( $\tilde{q}$ -Mischung)
- auch Loopdiagramme mit (masselosen!) Gluonen

### ■ skalare $\chi^0$ – Wechselwirkung mit einem Quark ( $\sigma_{SI}$ : spin independent)

- Quark- & Gluon-Funktionen im Nukleon: auch schwere Quarks tragen bei
- **kohärente Wechselwirkung  $\sim A^2$**
- $\sigma_{SI}$  dominiert in vielen SUSY-Modellen den elastischen  $\chi^0$  Streuquerschnitt

# Skalare WIMP Streuung

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

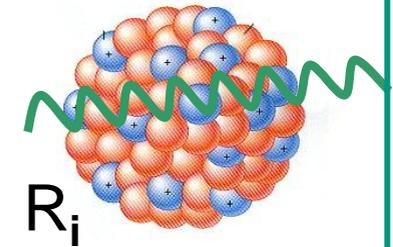
alle  $A$  Nukleonen des Kerns tragen **kohärent** zur Streuung bei

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

$$\lambda = h / q$$



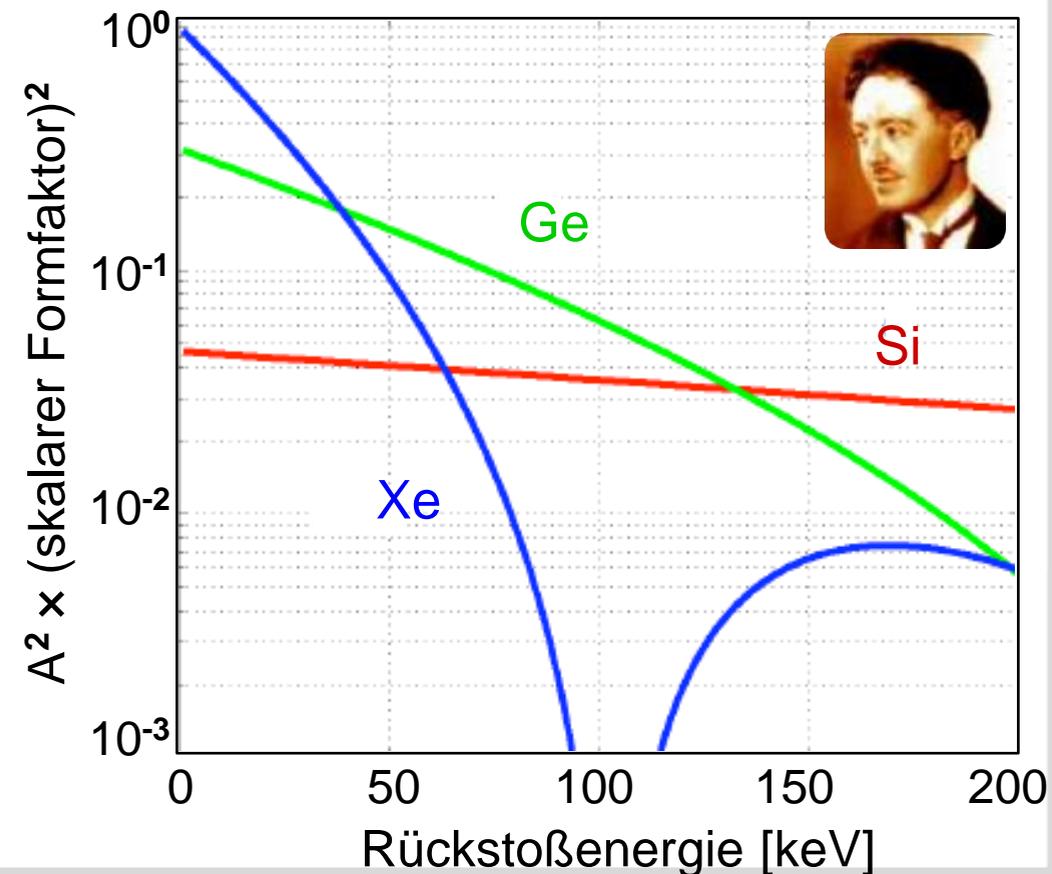
## ■ Verlust der Kohärenz:

falls der Impulstransfer  $q$  zu hoch ist:

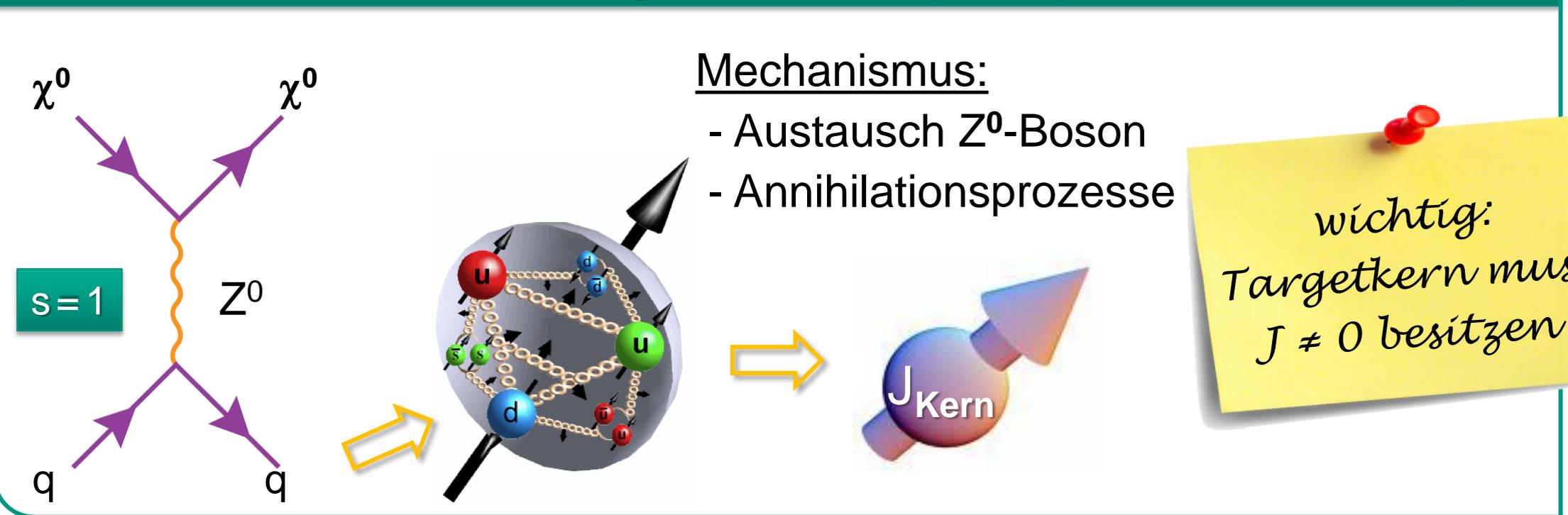
- die de Broglie-Wellenlänge  $\lambda = h / q$  wird kleiner als der Kern-Radius  $R_i$
- das WIMP 'sieht' Kernsubstruktur

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

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



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



### ■ spin-abhängige $\chi^0$ -Wechselwirkungen ( $\sigma_{SD}$ : spin dependent)

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

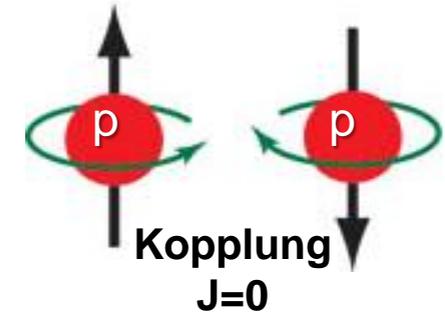
# Spinabhängige WIMP Streuung

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

$a_{p,n}$ : 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  $\sigma_{SD}$  (sensitiv auf  $a_p$  oder  $a_n$ ):

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

# WIMP Streuraten – Beispiel für $^{73}\text{Ge}$

## ■ 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:  $\mu = 72.6 \text{ g/mol}$ )  
 $N = 8.3 \cdot 10^{24}$  Targetatome

dazu: 8% Isotopenanteil  $^{73}\text{Ge}$  (Isotop mit Kernspin  $\neq 0$ )  
-  $\langle \sigma_{SD} \rangle = 10^{-42} \text{ cm}^2$  (spinabhängiger Wirkungsquerschnitt)

$$R = N_{^{73}\text{Ge}} \cdot \langle \Phi \cdot \sigma_{SD} \rangle$$

$$\Rightarrow R \sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$$

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

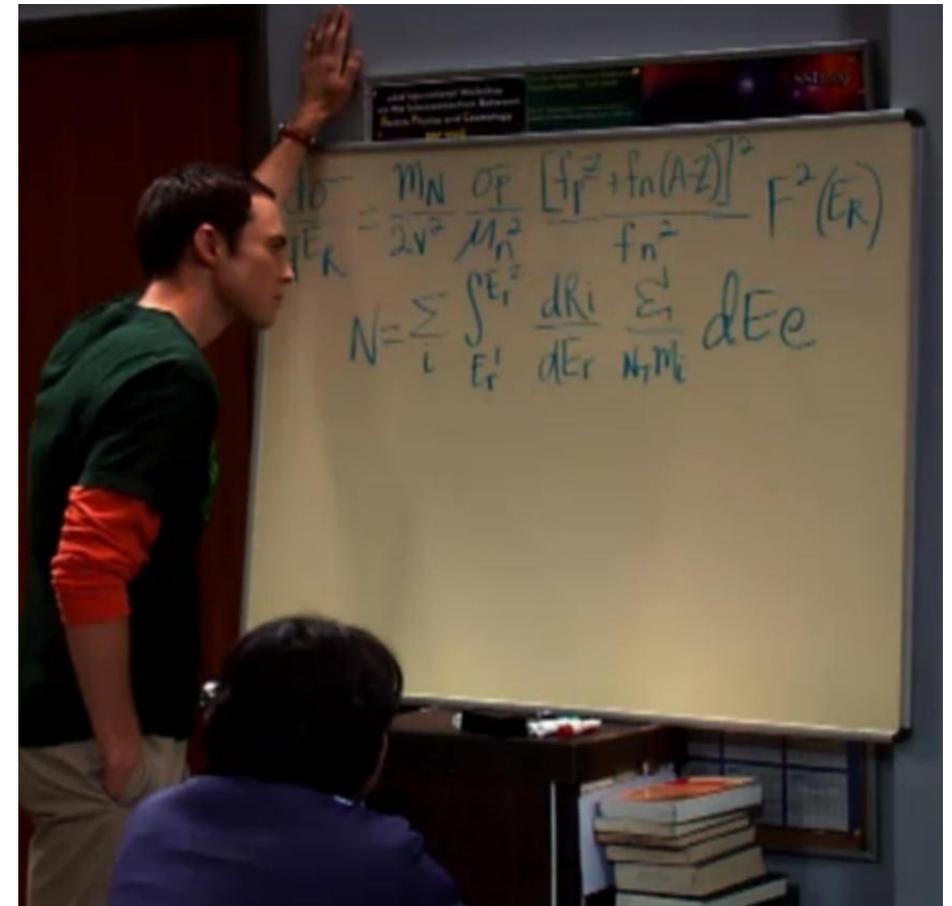
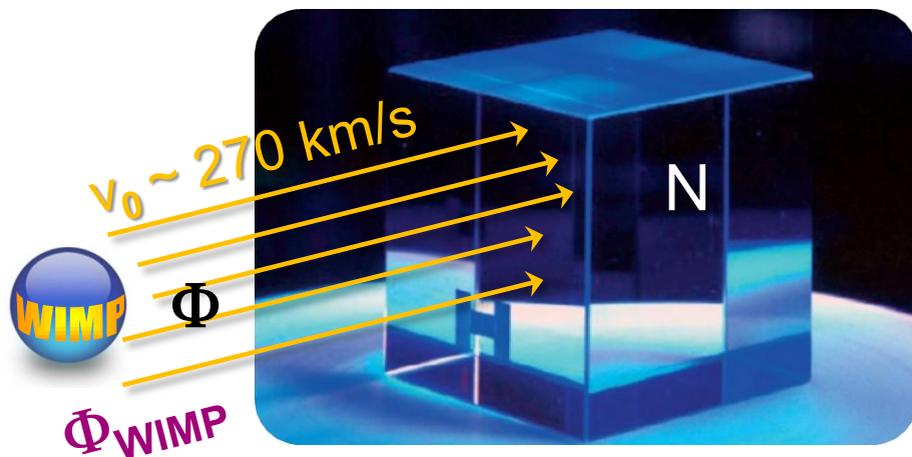


## ■ Genaue Berechnung von Raten/Spektren: energieabhängige Werte

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

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

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

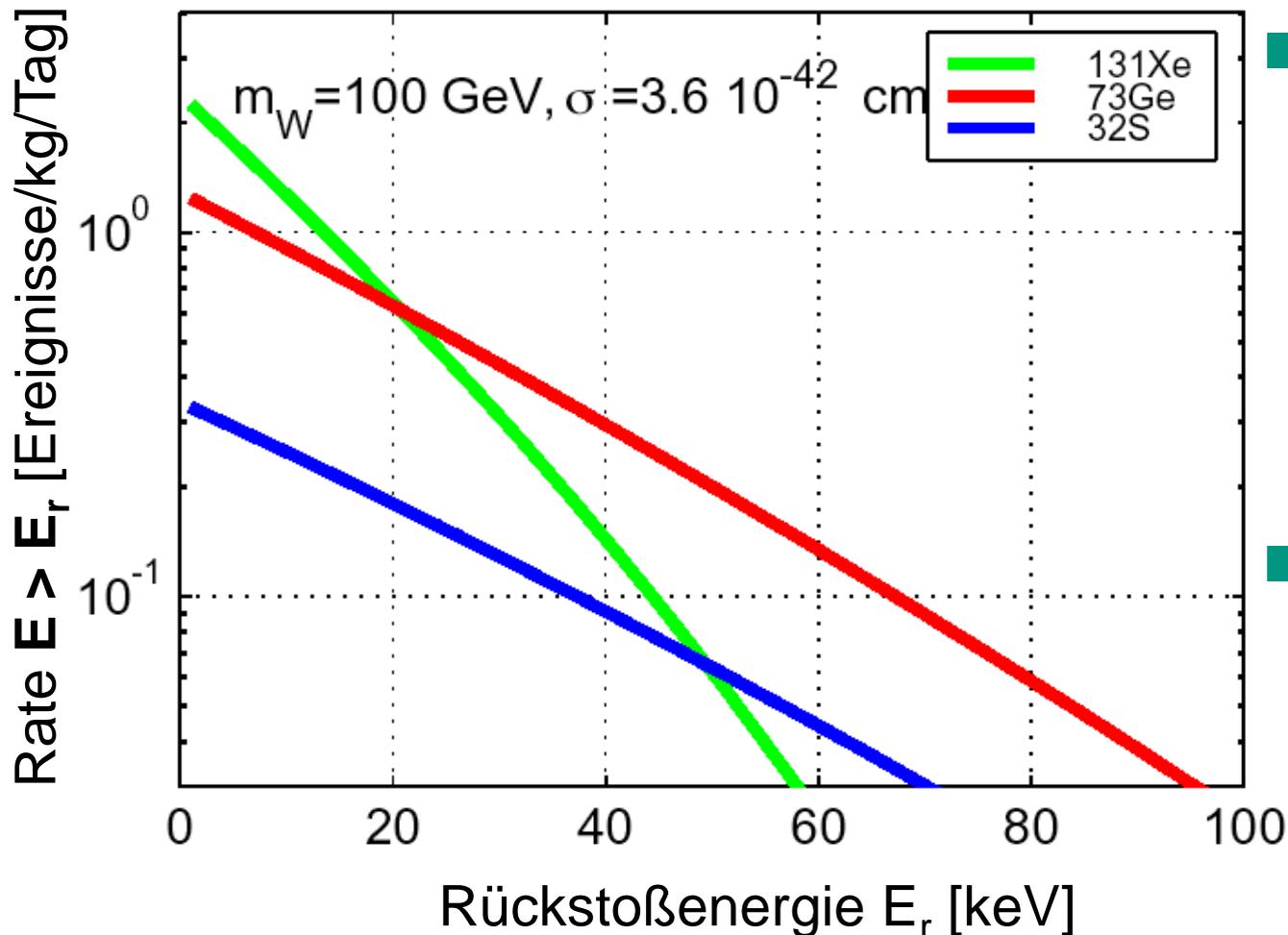


# WIMP - Rückstoßspektren

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

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

Kernrückstoßenergien liegen im keV-Bereich



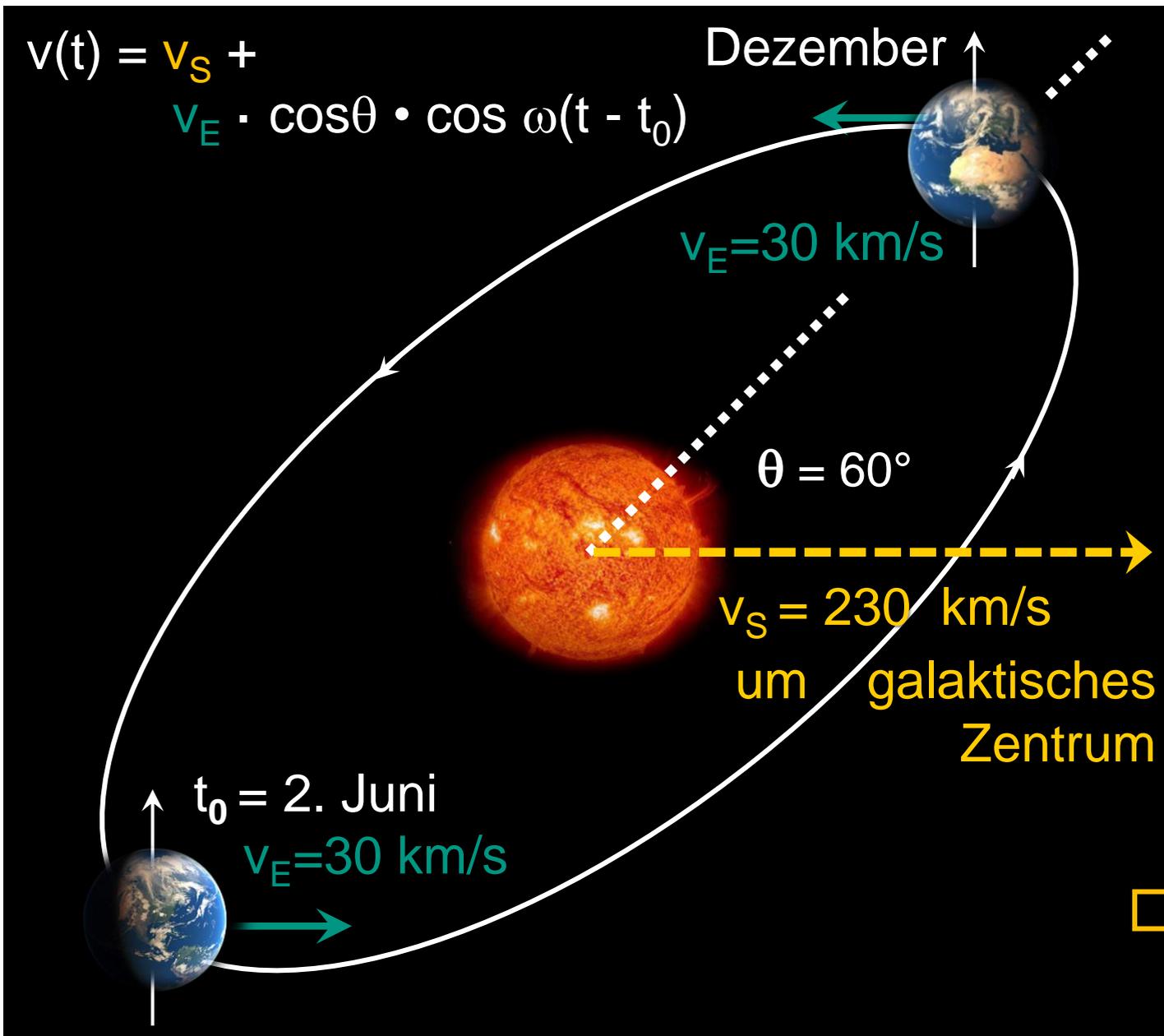
## ■ Rückstoßspektrum abhängig von

- WIMP-Halomodell ( $\rho_{\text{CDM}}$ ,  $v_0$ ):  
je größer  $v_0$ , je höher die Rate
- Neutralinomasse  $M_\chi$
- Targetkernmasse  $M_N$
- Kernstruktur (Formfaktor  $F$ )

## ■ Detektor-Energieschwelle

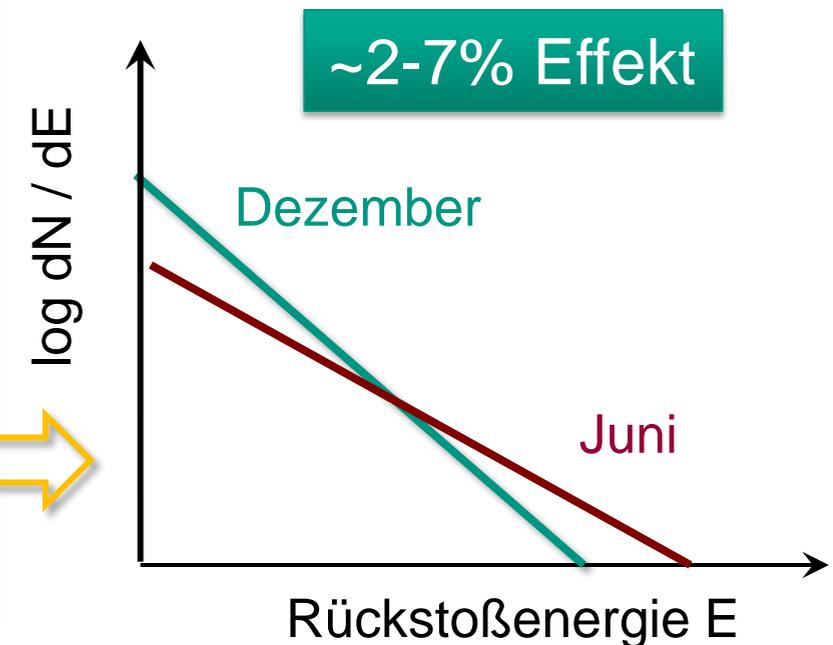
- wichtig: **niedrige Schwelle**  
im Bereich von 10 - 20 keV,  
gilt insbesondere für schwere  
Targetkerne Xenon, Jod

# WIMP Streuung – jährliche Modulation



## ■ Modulation des WIMP-Rückstoßspektrums

- Überlagerung der beiden Geschwindigkeitsvektoren  $v_S$  (Sonne) &  $v_E$  (Erde)  $\Rightarrow$  Periode  $T = 1.00 \text{ Jahr}$   
Phase  $\varphi_0 = 2. \text{ Juni}$



# WIMP Plots – Experiment & Theorie

- **WIMP Plot:** Darstellung der Ergebnisse als Funktion der beiden Parameter WIMP Masse  $M_\chi$  &  $\sigma_{\text{Streu}}$  (umgerechneter WIMP-Nukleon Streuquerschnitt)

- **leichte WIMPs:**

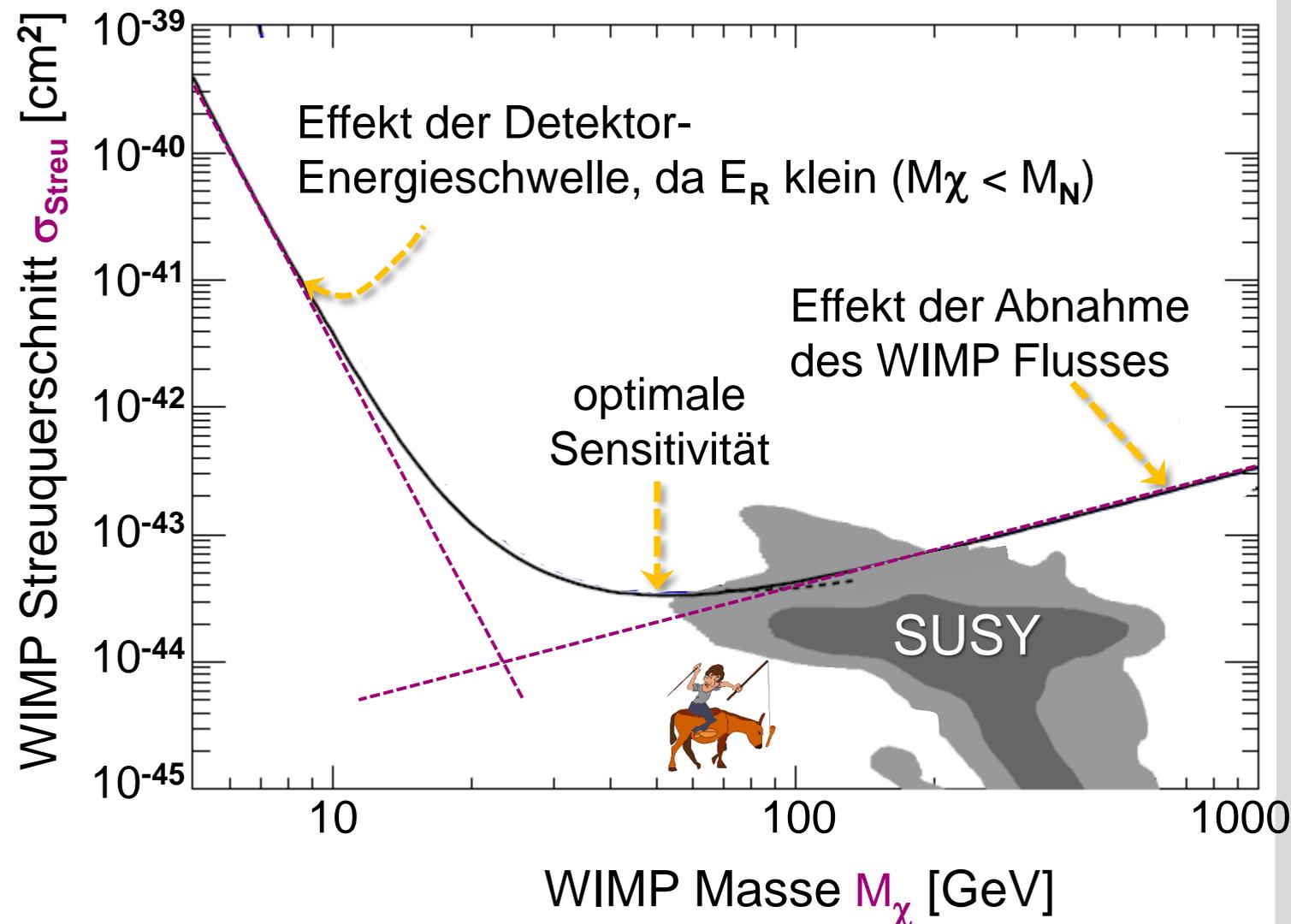
Rückstoßenergie des Kerns unter Schwelle

- **schwere WIMPs:**

$\Omega_{\text{CDM}} = 0.22$  ist fest: mit steigendem  $M_\chi$  nimmt WIMP Fluss  $\Phi$  linear ab, weniger Signalerwartung

- **Vergleich mit SUSY:**

verbesserte Sensitivität durch größere Masse & geringerer Untergrund



# WIMP Nachweis und Untergrund

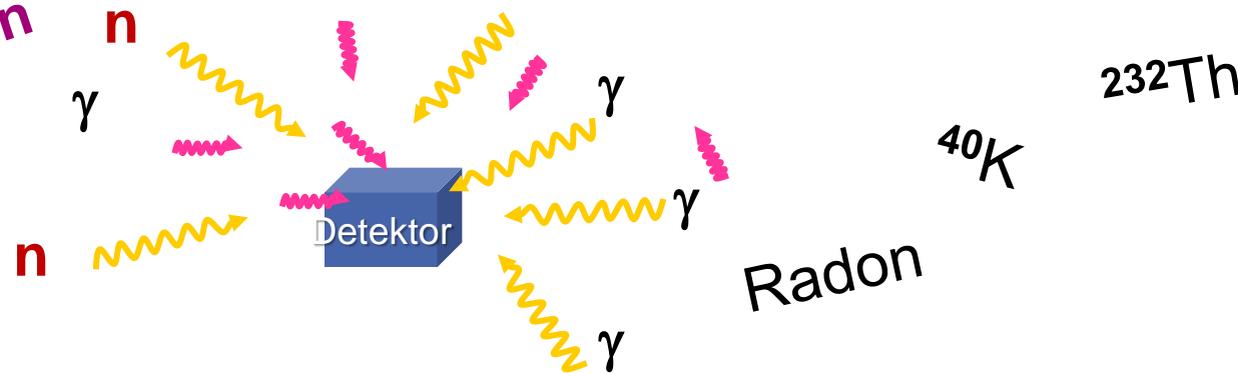
■ erforderliche WIMP Sensitivität: **~ 1 Ereignis / kg / Woche**

zukünftig: Faktor 100 weniger

natürliche Radioaktivität:

**$^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$**  Zerfälle erzeugen  $\gamma$ 's & n

Neutronen erzeugen  
Kernrückstoß



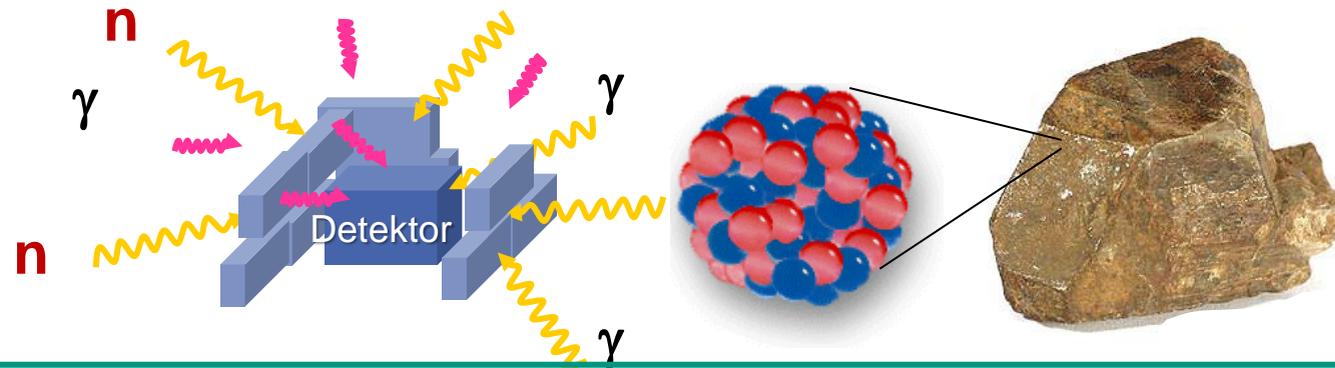
- wie groß ist die Radioaktivität (Bq) des menschlichen Körpers?
  - ~ 4000 Bq durch  $^{14}\text{C}$ , ~ 4000 Bq durch  $^{40}\text{K}$  (Elektronen + 400  $\gamma$ 's 1.4 MeV)
- wie viele Radon-Atome entweichen pro s aus 1 m<sup>2</sup> Erdboden?
  - ~ 7000 Atome / m<sup>2</sup> s
- wie viele Plutonium-Atome enthält 1 m<sup>3</sup> Erde?
  - ~ 10 Millionen Atome durch Transmutation von  $^{238}\text{U}$  durch CR Neutronen

# WIMP Nachweis und Untergrund

## ■ Gamma-Raumuntergrund:

höchstenergetische  $\gamma$ 's (2.6 MeV von  $^{208}\text{Tl}$ ) aus der  $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$  Zerfallskette:  
mit  $t_{1/2}(^{232}\text{Th}) = 1.4 \times 10^{10}$  a erzeugt 1 g Th  $\Rightarrow 4 \cdot 10^{10}$  Gammas / Jahr  
 $\Rightarrow 1300$  Gammas / Sekunde

Gestein:  
 $10^{-6}$  g(Th) / g  
Stahl:  
 $10^{-9}$  g(Th) / g

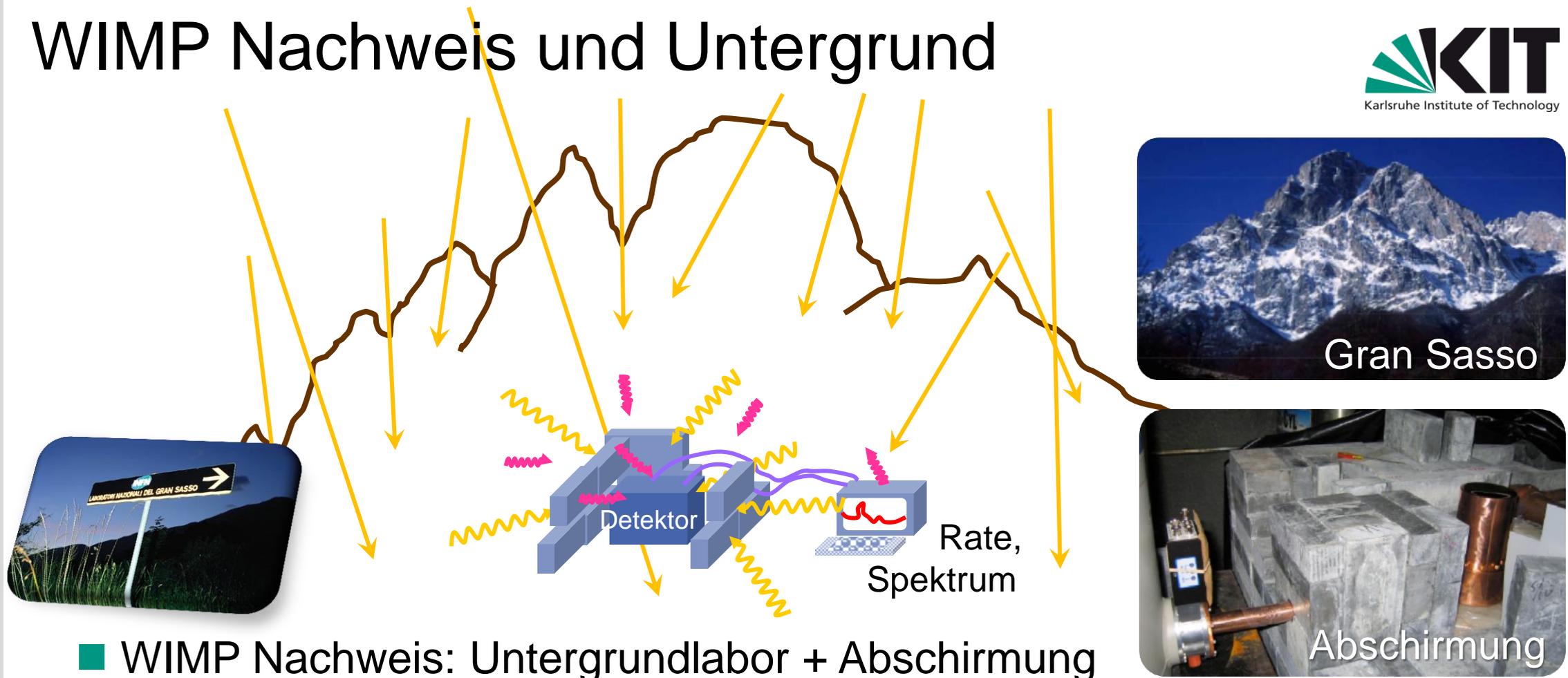


## ■ Gamma-Abschirmung eines DM Experiments durch Pb

- Bsp: Labor mit  $600 \text{ m}^2$  Oberfläche:  $\gamma$ 's aus den ersten 5cm der Wände  $\hookrightarrow 30 \text{ m}^3$  Gestein trägt zum  $\gamma$ -Untergrund bei mit  $10^{-6}$  g(Th)/g = 100 g Th  $\hookrightarrow \sim 10^{11}$  Ereignisse / Jahr
- benötigter Abschirmfaktor  $\sim 10^9 = 20 X_0$  ( $X_0$ : Strahlungslänge) entspricht  $\sim 40 \text{ cm Pb}$ , Blei enthält das instabile Isotop  $^{210}\text{Pb}$  daher Nutzung von 'historischem' Pb vom Meeresgrund ohne  $^{210}\text{Pb}$

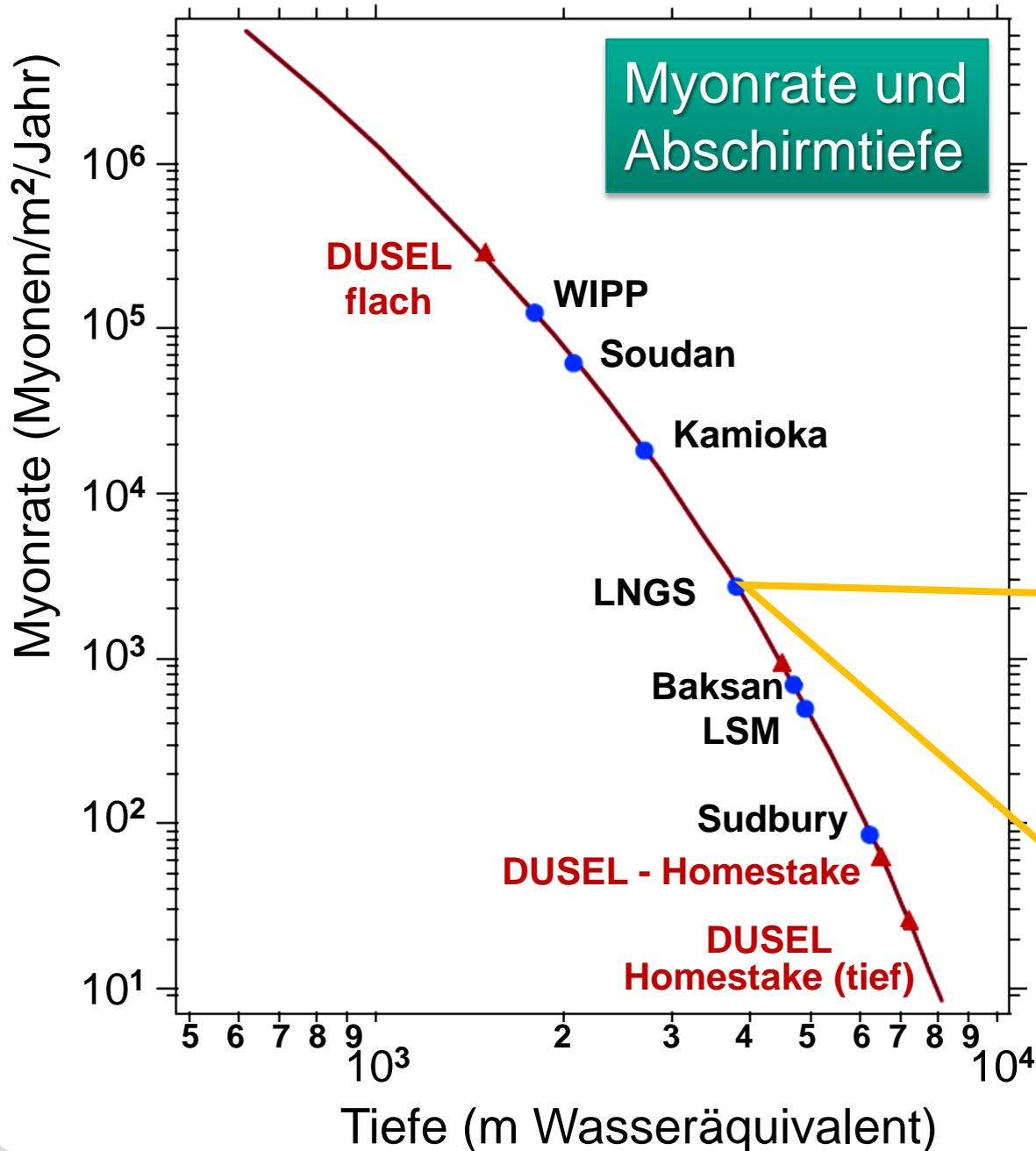


# WIMP Nachweis und Untergrund



Quelle und Abschirmung	Ereignisse/kg/s	Ereignisse/kg/Tag
natürlicher Raumuntergrund	100	$10^7$
innerhalb einer Bleiabschirmung		$10^2$
kosmische Myonen an Erdoberfläche	0.1	$10^4$
CDM Detektoren		$10^{-2}$

# Untergrundlabore – Myonrate & Tiefe



# Experimente zum direkten CMD-Nachweis

