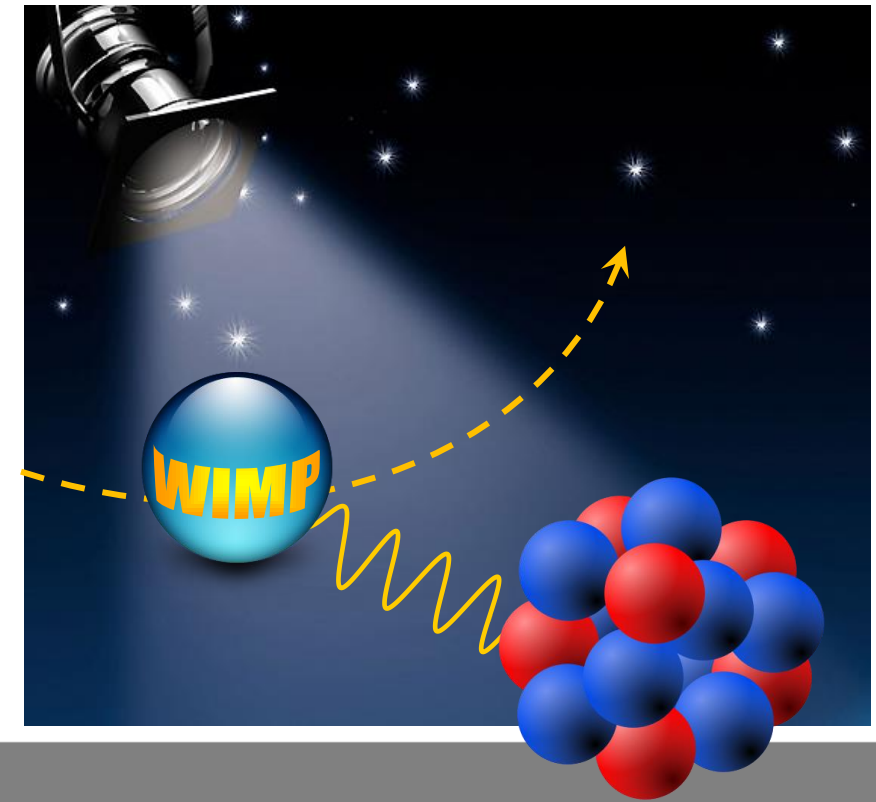


Astroteilchenphysik – I

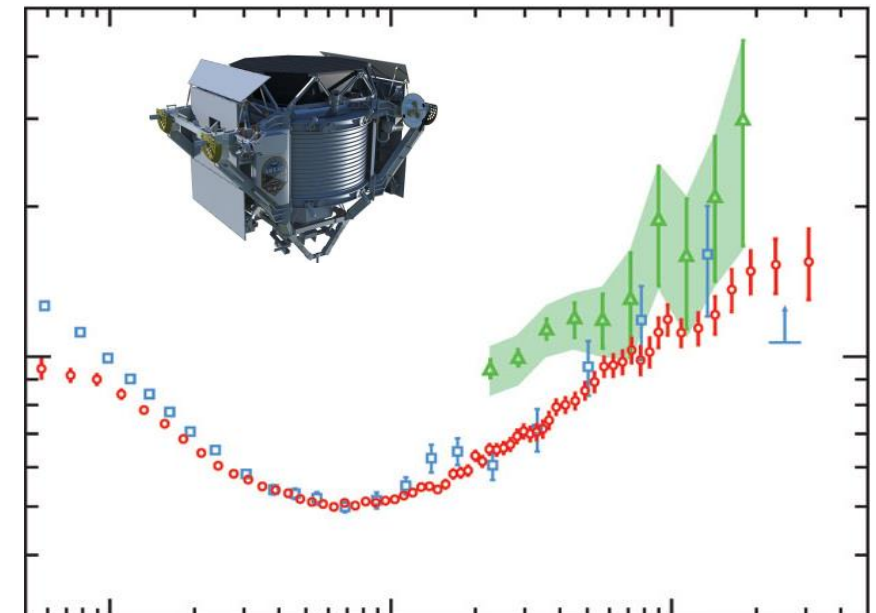
Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 13, 30.01.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Dunkles Universum

- DMA-Suche:
Positronen, Antiprotonen
GeV-Neutrinos aus der Sonne
- direkter CDM-Nachweis:
Reaktionskinematik
Wechselwirkungsprozesse

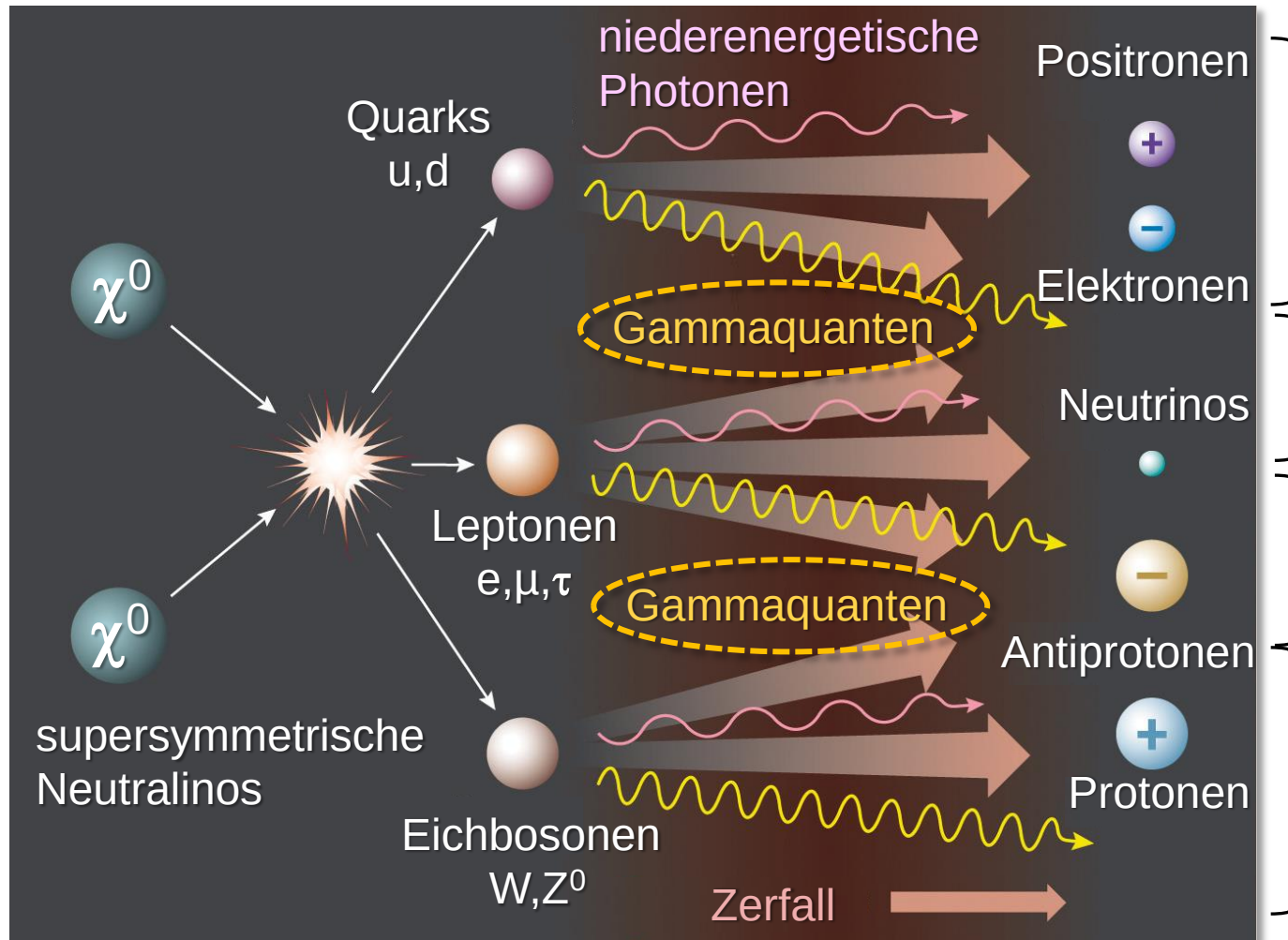


Indirekter WIMP Nachweis



■ Suche nach Annihilationsprodukten aus lokalen Überdichten

- neutrale Messenger: Gammas mit GeV...TeV Energien
- geladene Messenger: Positronen & Antiprotonen mit GeV Energien



Elektronen/Positronen:

- hadronischer Zerfall
- Paarbildung
- direkte Erzeugung

Neutrinos:

- hadron./lepton. Zerfall

Gammas:

- hadronischer Zerfall
- Bremsstrahlung

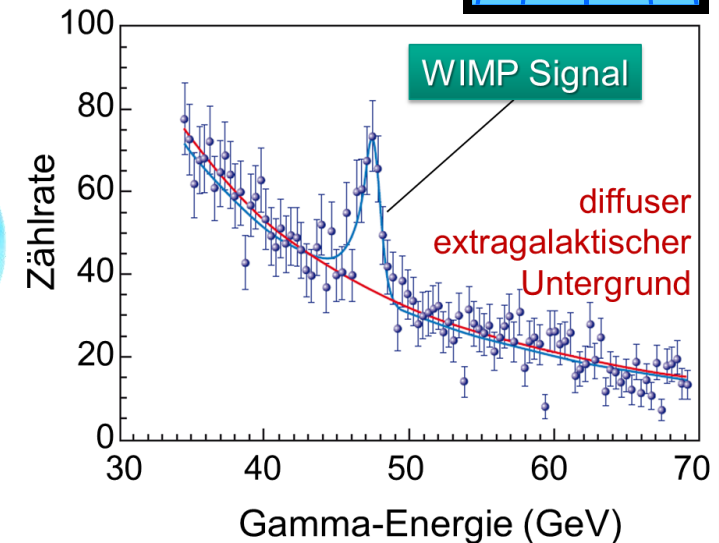
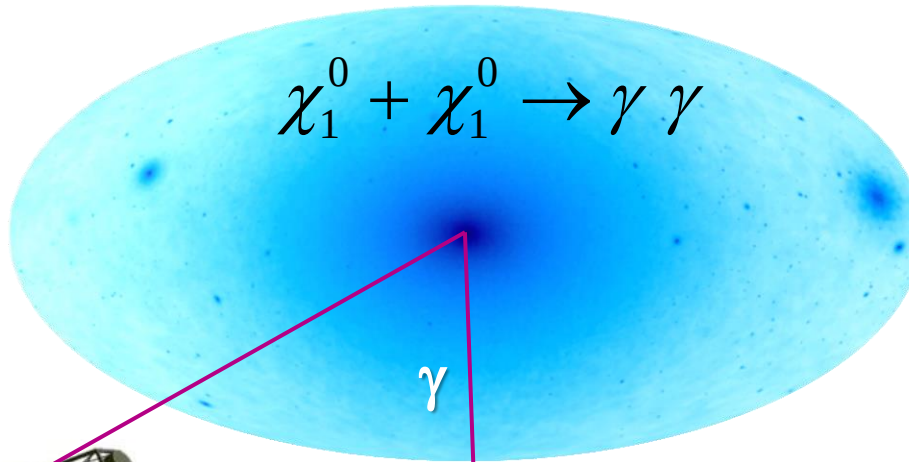
Protonen/Antiprotonen:

- Hadronisierung & Jets
- Eichboson-Zerfälle

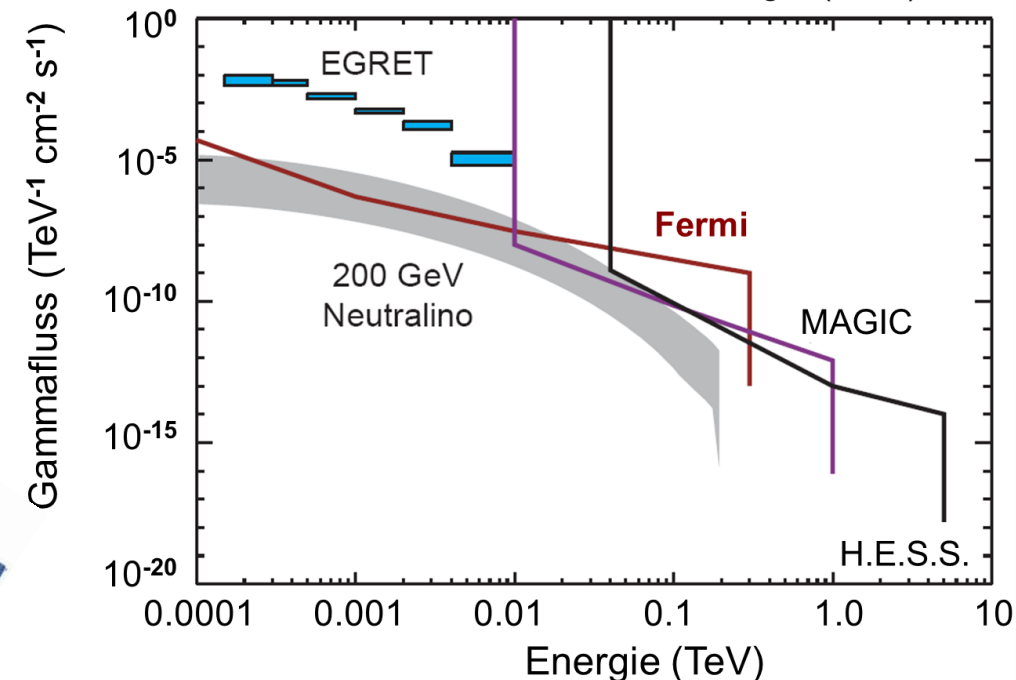
Indirekter WIMP Nachweis - Gammas

■ Suche nach Gammas aus WIMP Annihilation

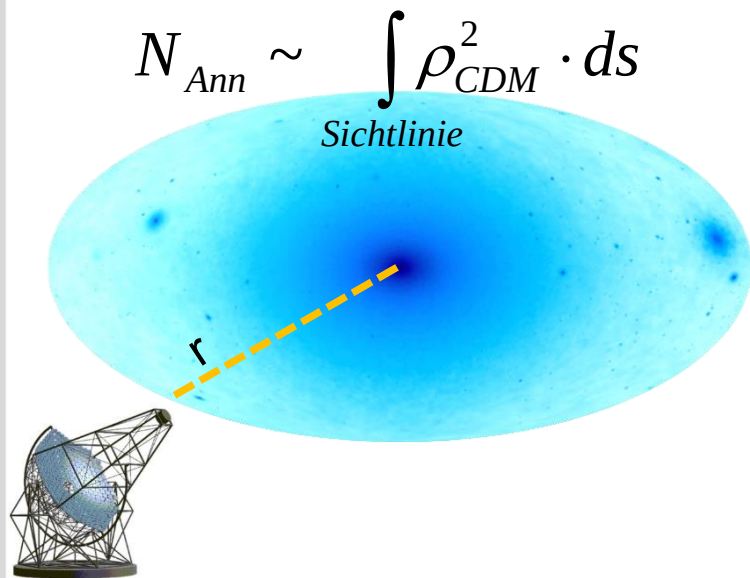
- **FERMI-Satellit:**
Suche in Kreisen
um galakt. Zentrum:
keine Evidenz



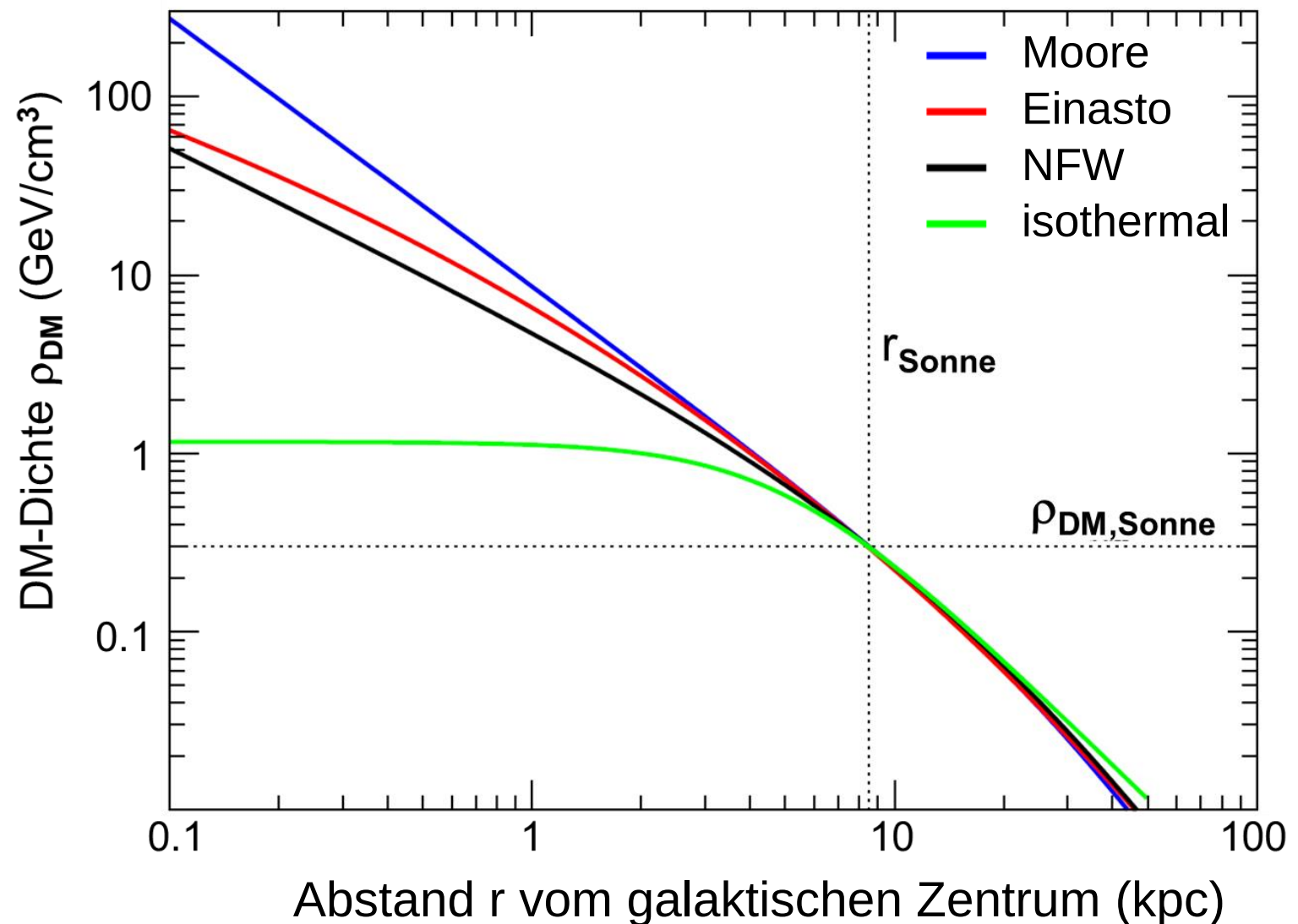
- **H.E.S.S.-Teleskop:**
Suche in Kreisen
um galakt. Zentrum:
keine Evidenz

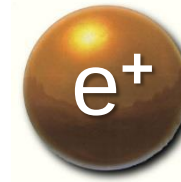


- **WIMP-Dichteprofil** ist im inneren Halo-Bereich stark modellabhängig!



- **DMA-Signalerwartung ist modellabhängig:** unterschiedliche Parametrisierung des radialen Verlaufs des WIMP-Haloprofils

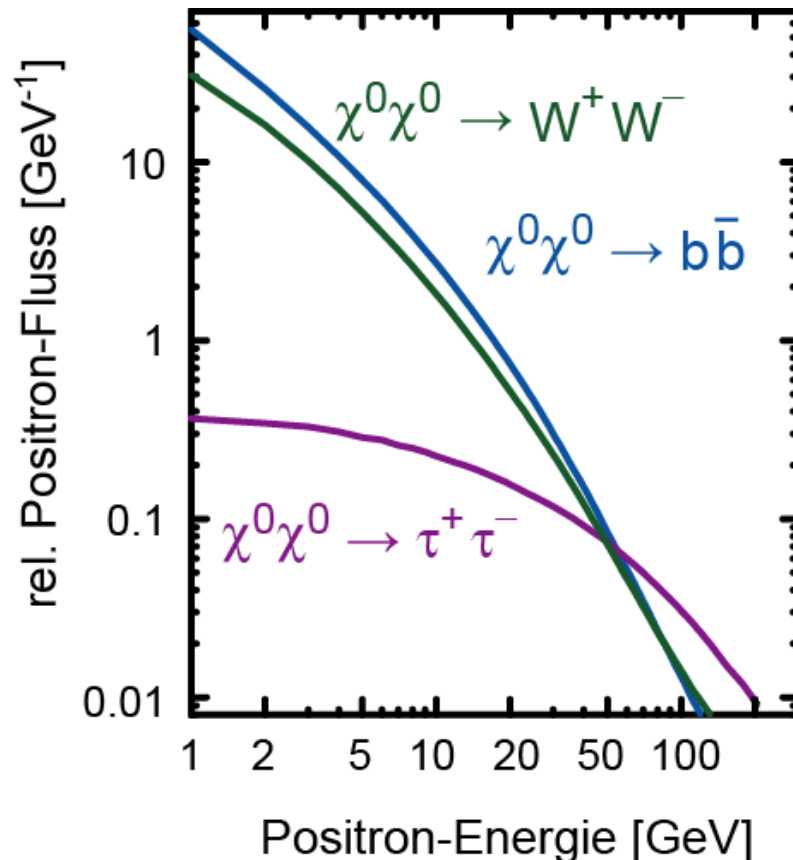




- Positronen – Signal & Untergrund, Messung: **Positronenanteil $e^+/(e^+ + e^-)$**

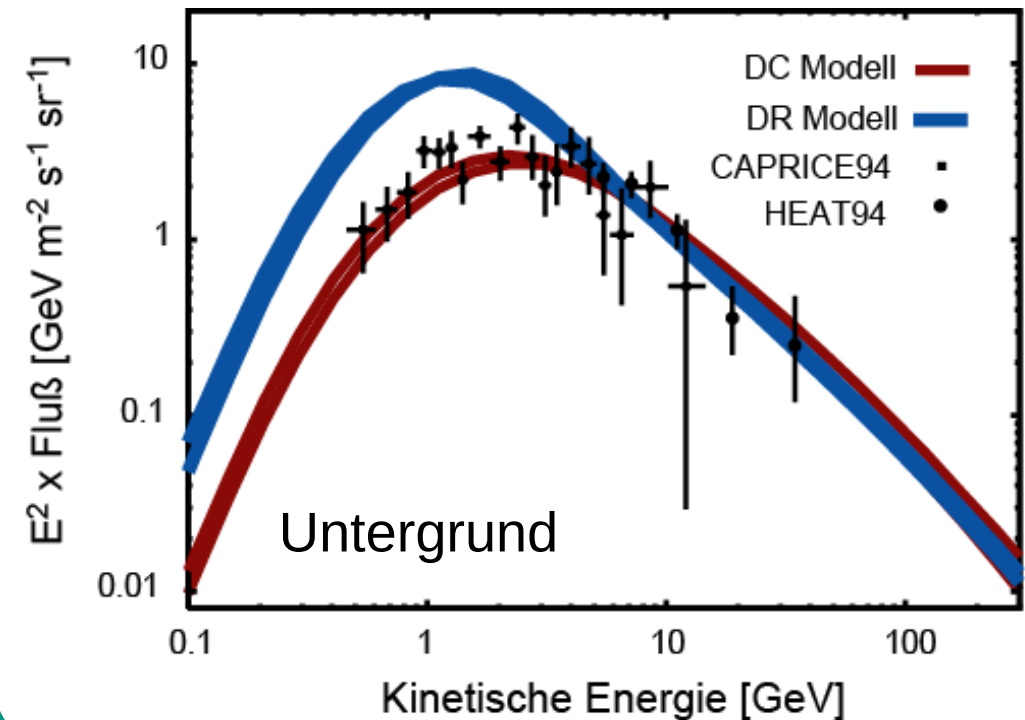
Positronen: DMA-Signalerwartung

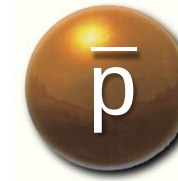
Signal: Spektrum abhängig vom spezifischen SUSY-Modell



Positronen: Untergrunderwartung

Untergrund: Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung am ISM (interstellaren Medium)

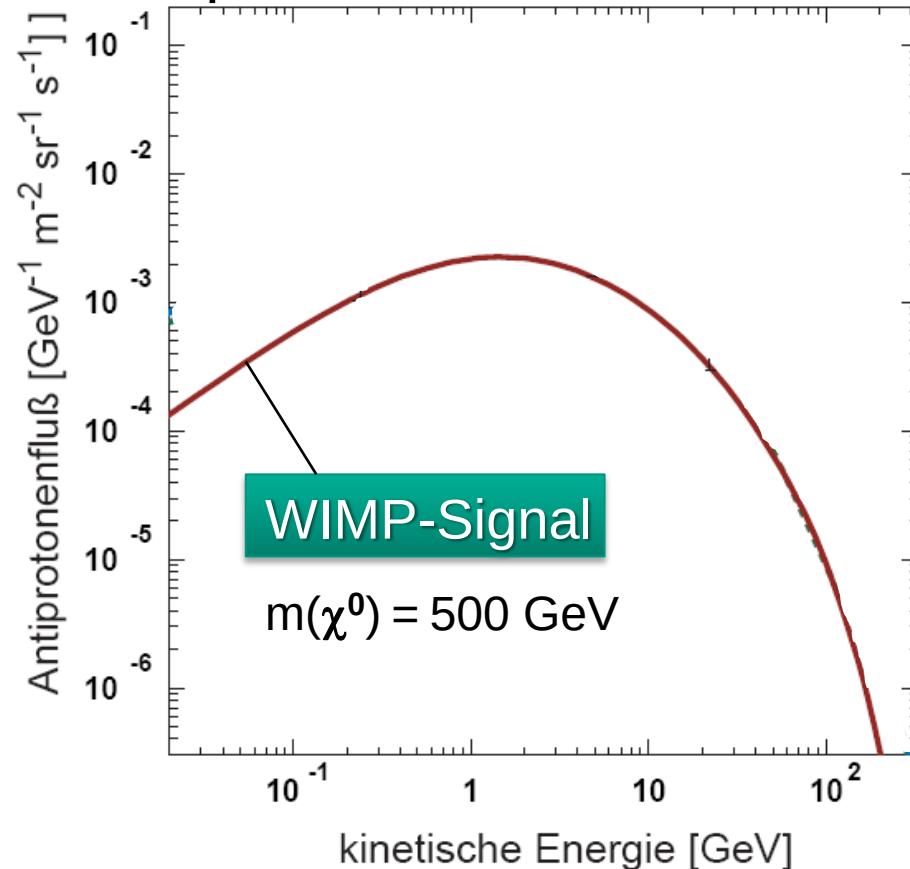




- Antiprotonen – Signal & Untergrund, Messung: spektrale Form > 10 GeV

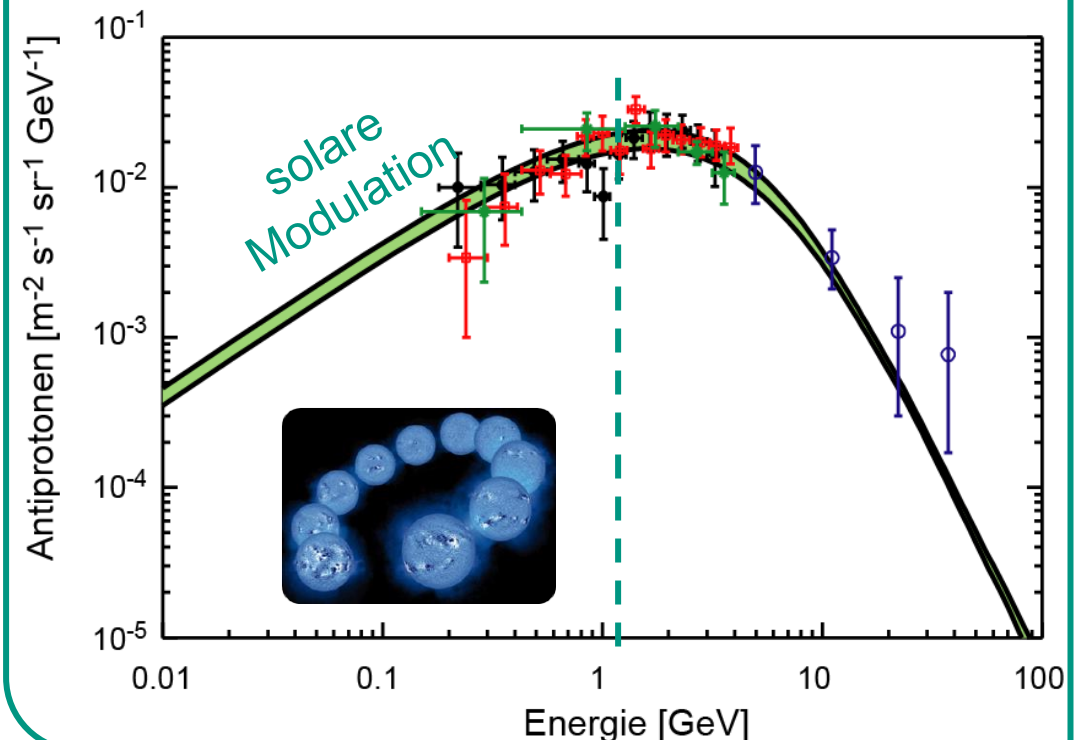
Antiprotonen: DMA-Signalerwartung

Signal: Spektrum abhängig vom spezifischen SUSY-Modell



Antiprotonen: Untergrunderwartung

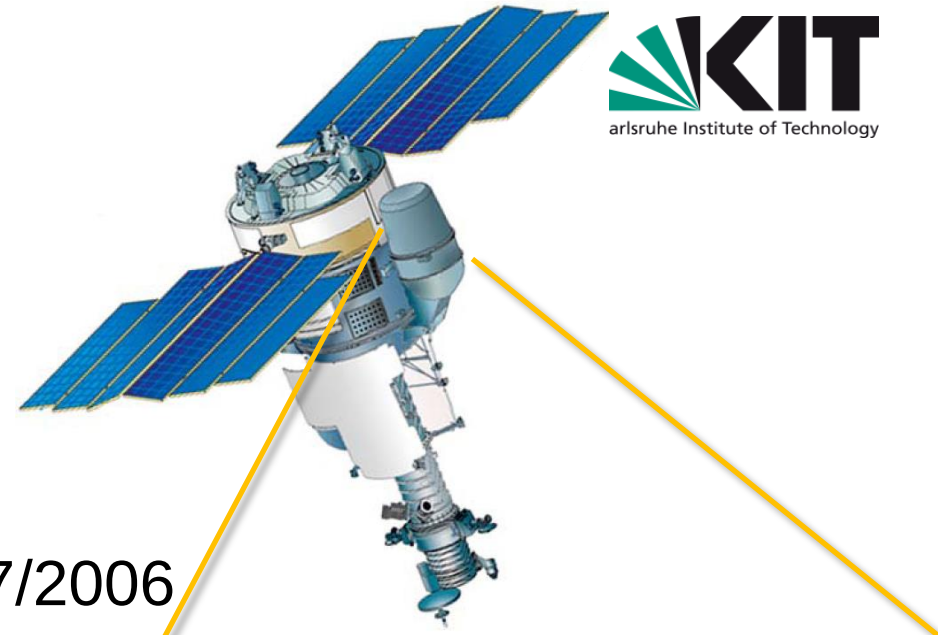
Untergrund: Streuprozesse von Protonen $pp \rightarrow ppp\bar{p}$ (Baryonzahl-erhaltung), Spallationsreaktionen



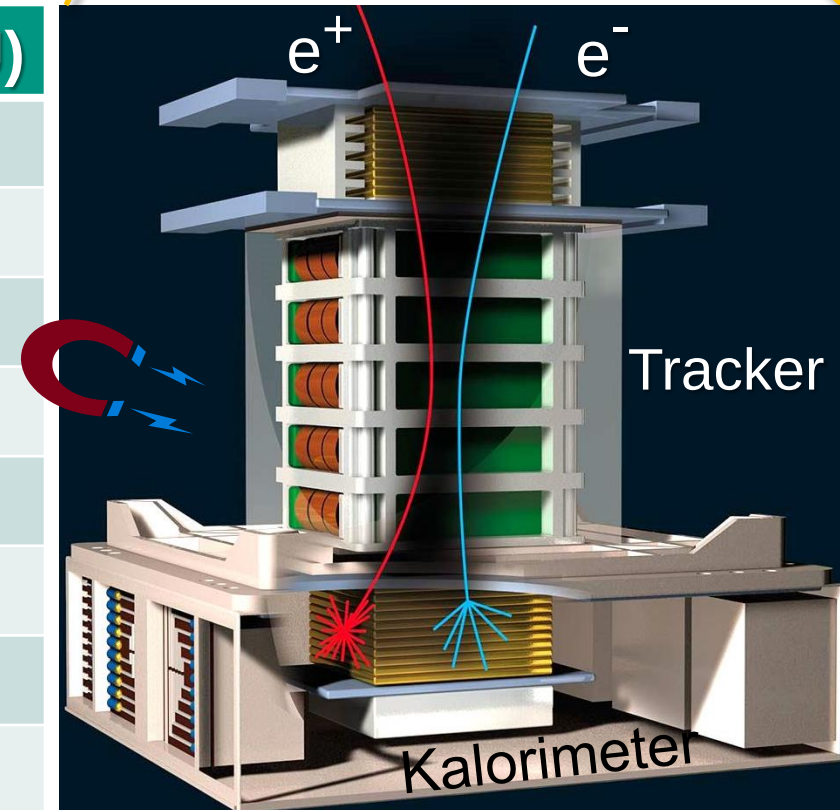
PAMELA Experiment

a Payload for Antimatter Matter Exploration
and Light-nuclei Astrophysics

- Satelliten-Experiment (I, D, RU, S) zur
- Messung der Energiespektren von
Positronen & Antiprotonen, Messungen seit 7/2006



Teilchen	Energiebereich	Events (3J)
Antiprotonen	80 MeV - 190 GeV	$\sim 10^4$
Positronen	50 MeV - 270 GeV	$\sim 10^5$
Elektronen	< 400 GeV	$\sim 10^6$
Protonen	< 700 GeV	$\sim 10^8$
e^+/e^- Verhältnis	< 2 TeV	
Kerne (bis $Z = 6$)	< 200 GeV/Nukleon	$10^4 - 10^7$
Isotope (D, ^3He)	< 1 GeV/Nukleon	
Antikerne	$\sim 3 \times 10^{-8}$ Anti-He/He	



PAMELA – Positronenüberschuss



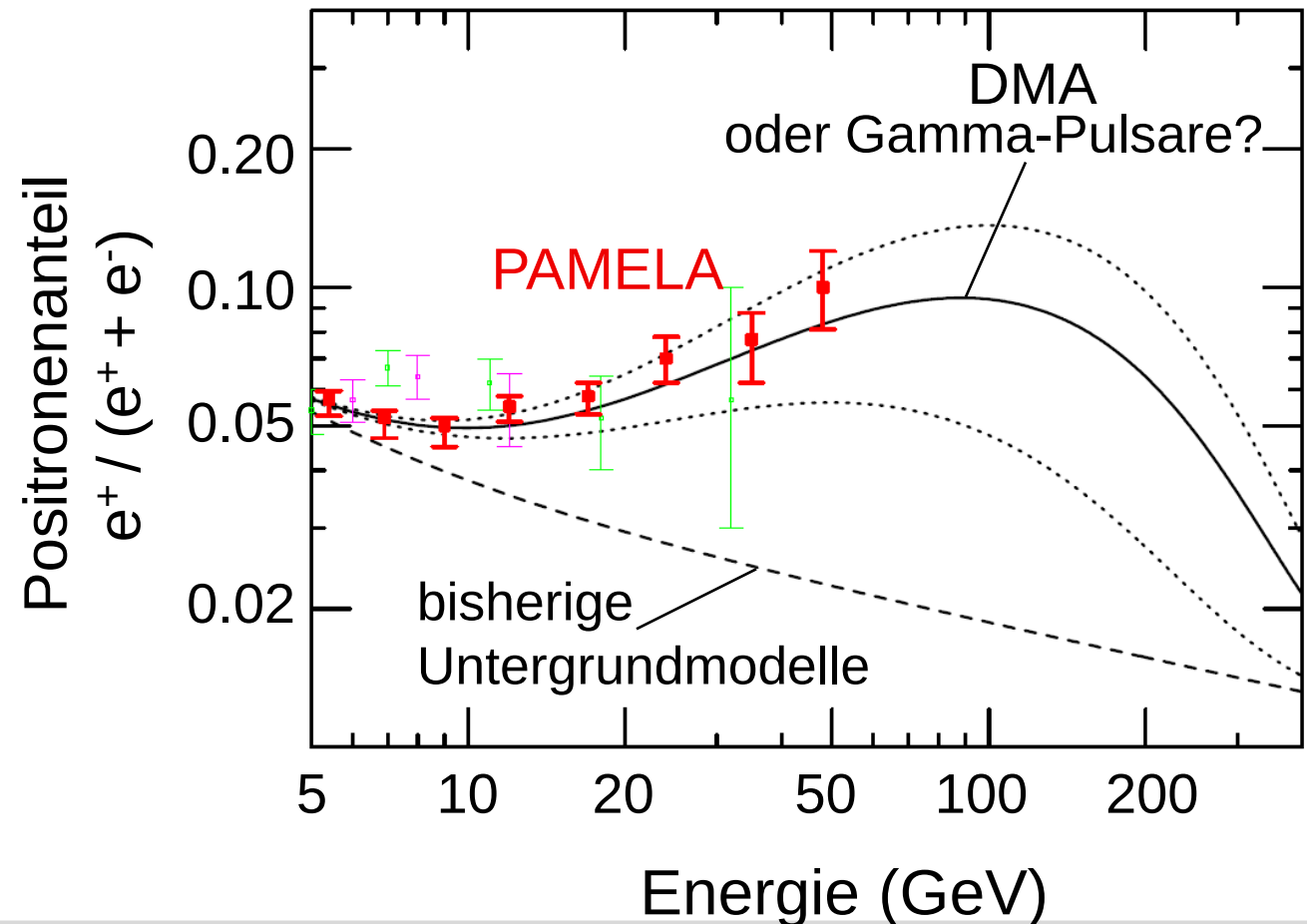
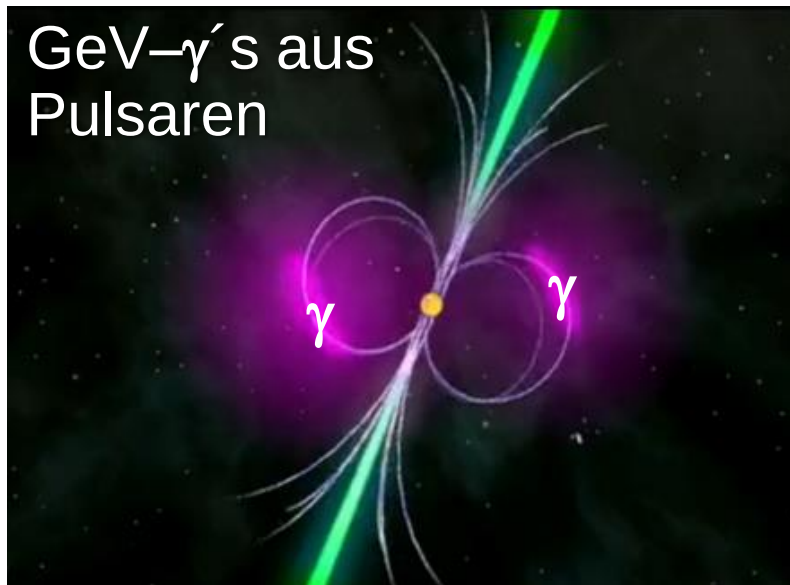
■ PAMELA Resultate: starker **Positronenüberschuss**

- mögliche Interpretation: **Evidenz für DMA??**

Rate impliziert großes $\sigma_{\text{Ann}} \cdot v > 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ (10^2 zu hoch für $\Omega_{\text{DM}} \sim 0.2$)
kein analoger Überschuss bei $\bar{p}$!

- 'konventionelles' Szenarium:

- e^+e^- - Paar-Erzeugung
aus Pulsarwinden,

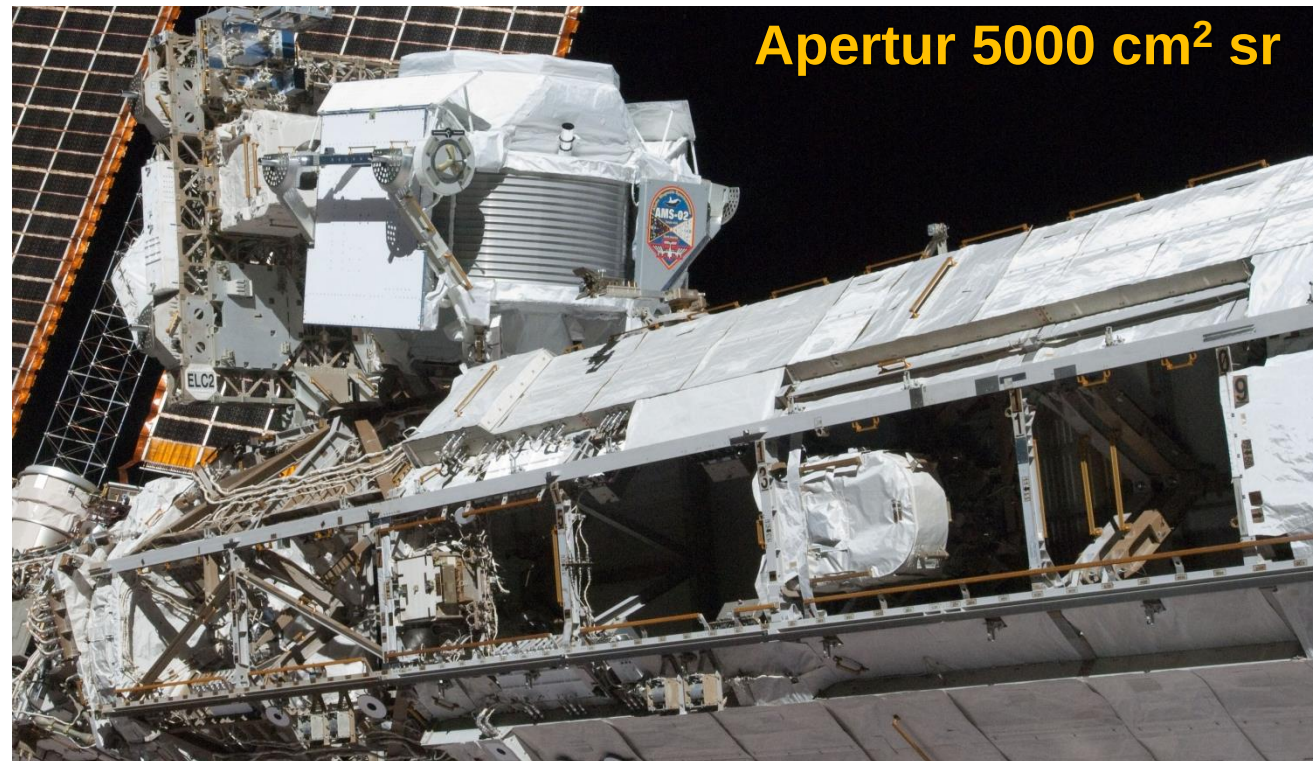


AMS-02: Alpha Magnetic Spectrometer

- **AMS02: Suche nach WIMP-Annihilation:** Antiprotonen, e^+ , γ
 - Suche nach Antimaterie (Anti-Deuteronen, Anti-Helium,...)
 - Messung der kosmischen Strahlung:
 - Energieverteilung & chem. Zusammensetzung bis 1 TeV
 - absoluter Fluss (z.B. wichtig für atmosphärische Neutrinos, Propagation und Einschluss der CR, interstellares Medium)

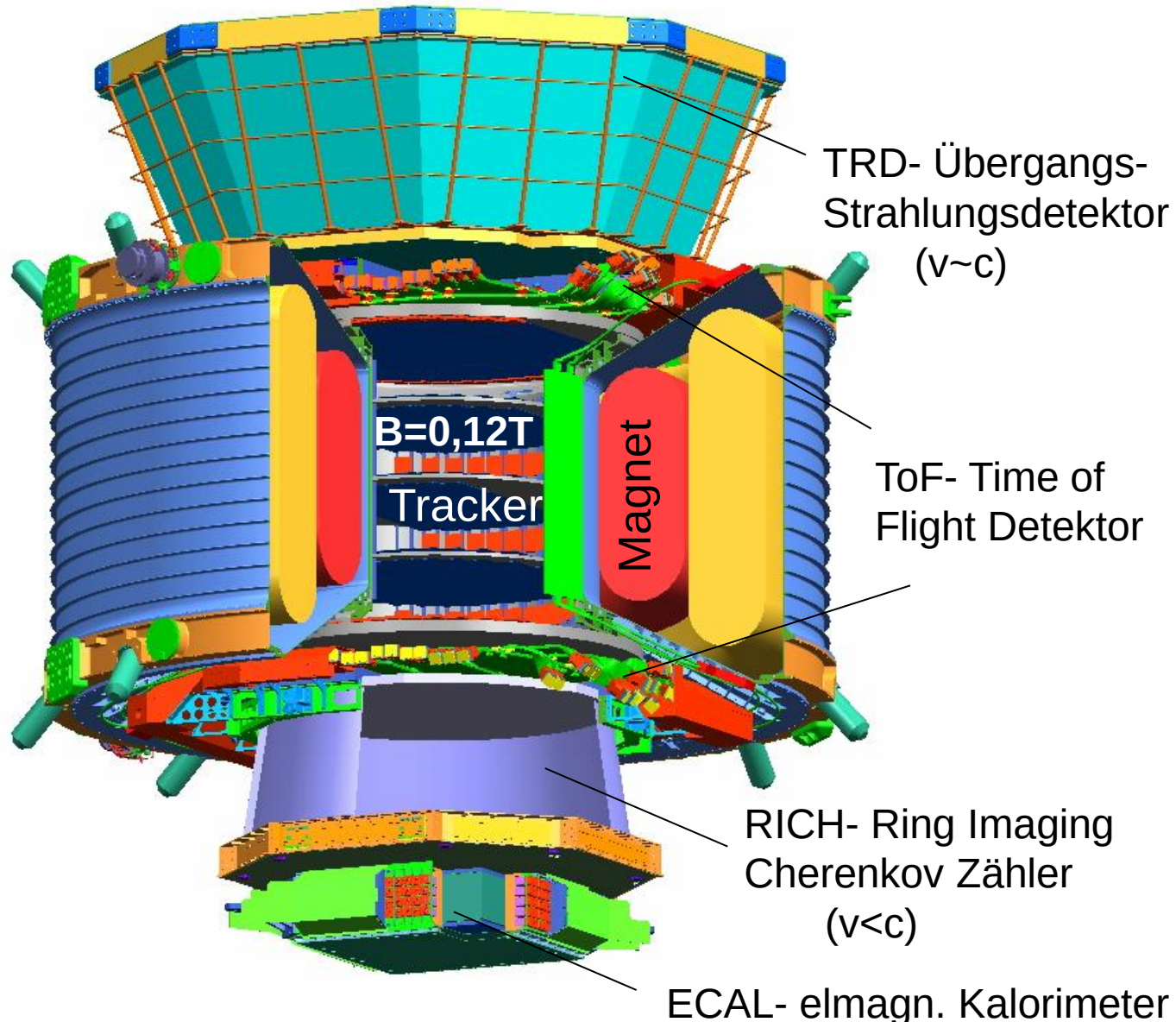


Start: 16.5.2011 mit STS134



AMS-02: Experimentaufbau

- Bestimmung von Impuls p , Energie E , Ladung Q , Lorentz- γ , v_{rel}



Teilchenimpuls p , $\text{sign}(Q)$

Krümmung Teilchenspur $B = 0,12 \text{ T}$
im Siliziumstreifen-Tracker

Teilchenidentifikation PID

- Lorentz-Faktor γ (TRD)
- Geschwindigkeit v (ToF, RICH)

Teilchenenergie E

- Kalorimetrie (ECAL)
elektromagnetisches Kalorimeter

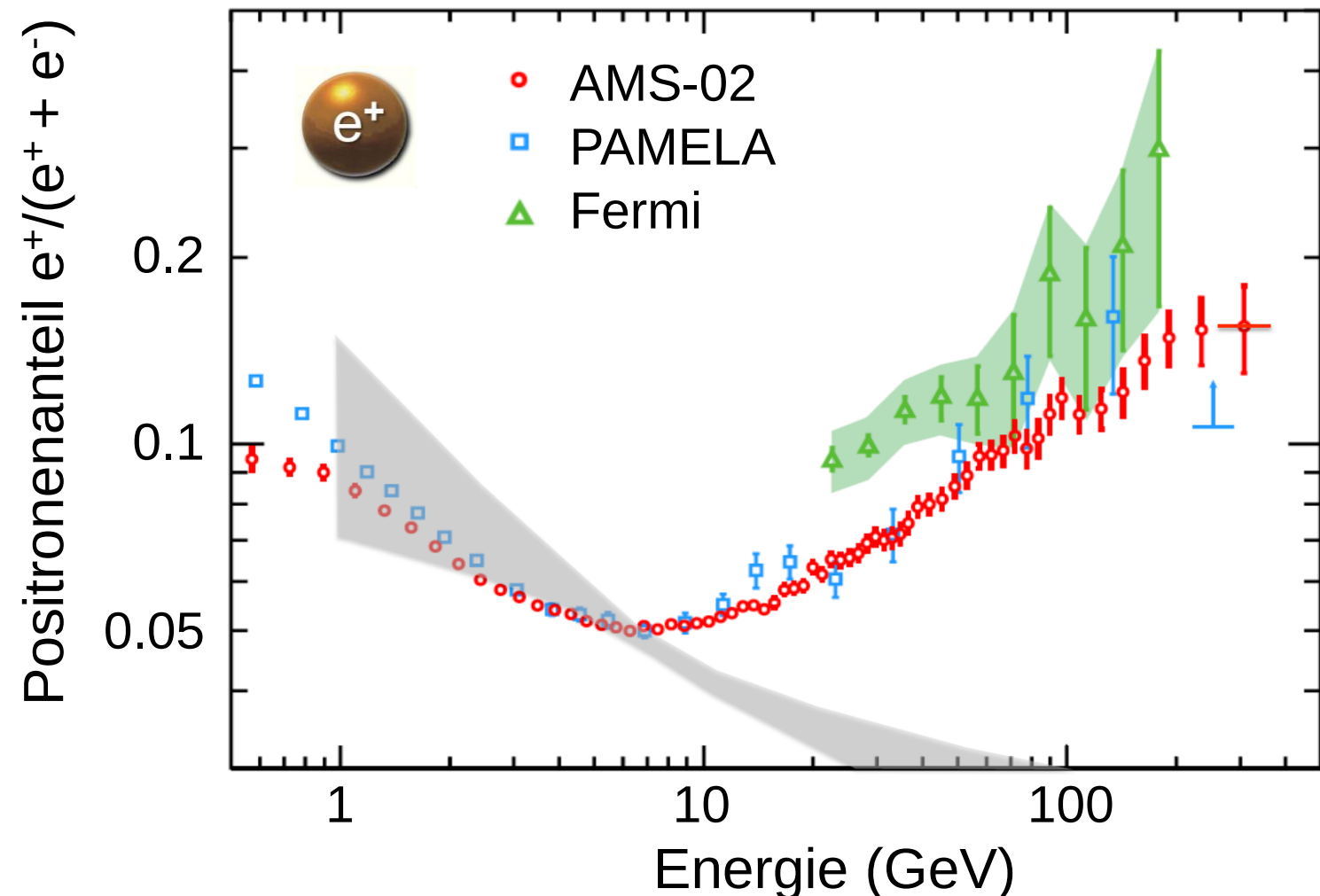
Teilchenladung $|Q|$

- Ionisationsverluste
(Tracker, RICH)

■ AMS-02: wesentlich verbesserte Sensitivität bei hohen Energien

- Bestätigung des Positron-Überschusses von PAMELA
- zukünftige Messungen: bessere Statistik bei hohen Energien

- **WIMP-Signal:**
Positron-Überschuss sollte abnehmen
- **Pulsar-Signal:**
Positron-Überschuss sollte weiter sichtbar bleiben



■ AMS-02: wesentlich verbesserte Sensitivität bei hohen Energien

- Bestätigung des Positron-Überschusses von PAMELA
- zukünftige Messungen: bessere Statistik bei hohen Energien

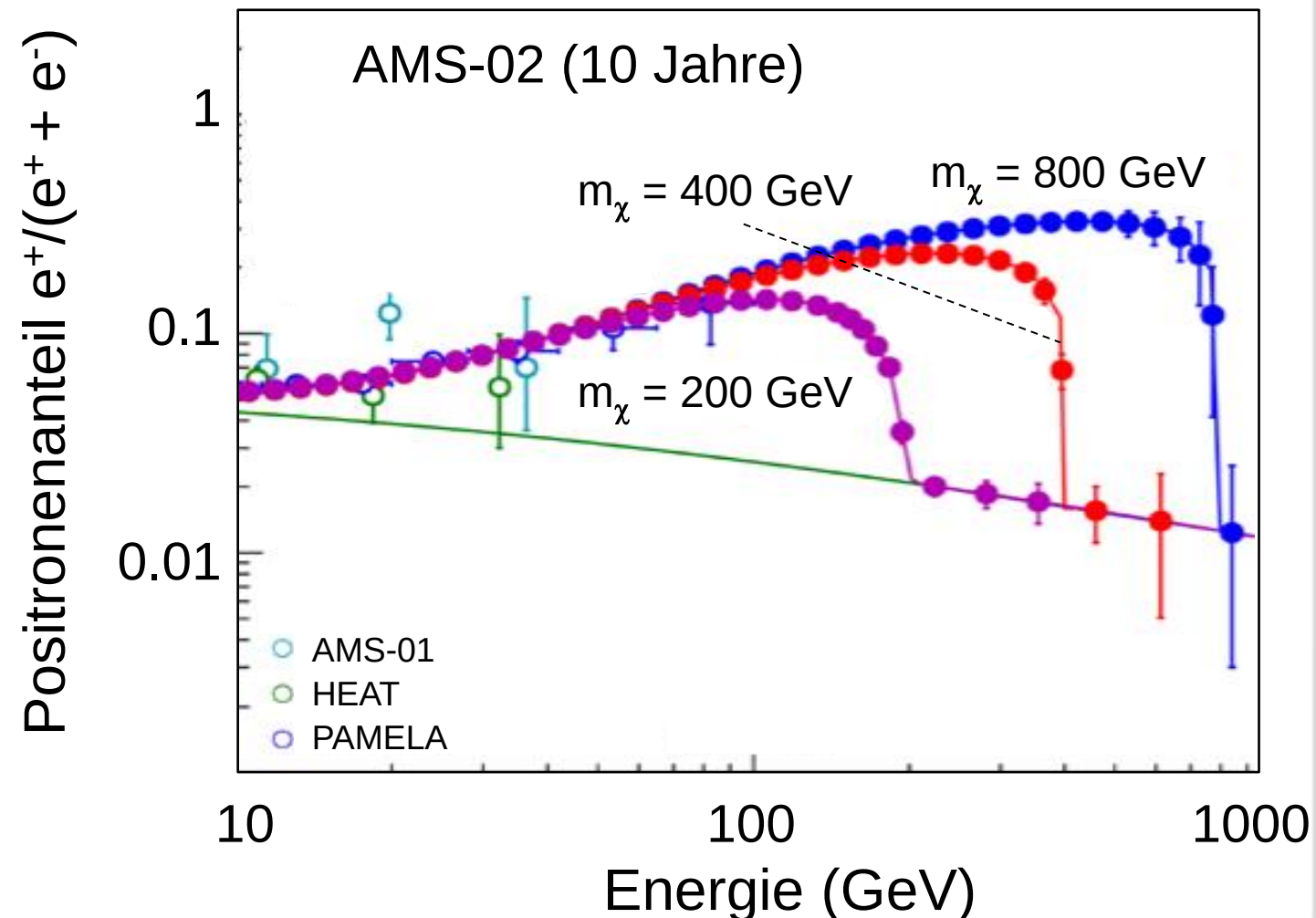
- WIMP-Signal:

Positron-Überschuss
sollte abnehmen nahe
bei Neutralino-Masse

- sehr hoher Annihilations-
querschnitt:

Astrophysik?

Teilchenphysik?



3.4.2 Neutrinos

- **WIMP-Einfang in der Sonne:** χ^0 verlieren durch Streuprozesse an H-Atomen kinetische Energie $\hookrightarrow$ **Einfang im solaren Gravitationspotenzial mit Rate R_C**

$$R_C \cong 3.35 \times 10^{20} \text{ s}^{-1} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{lokal}}}{0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3} \right) \cdot \left(\frac{270 \text{ km} / \text{s}}{v_{\text{lokal}}} \right)^3 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{Spin}}}{10^{-6} \text{ pb}} \right) \cdot \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_\chi} \right)^2$$

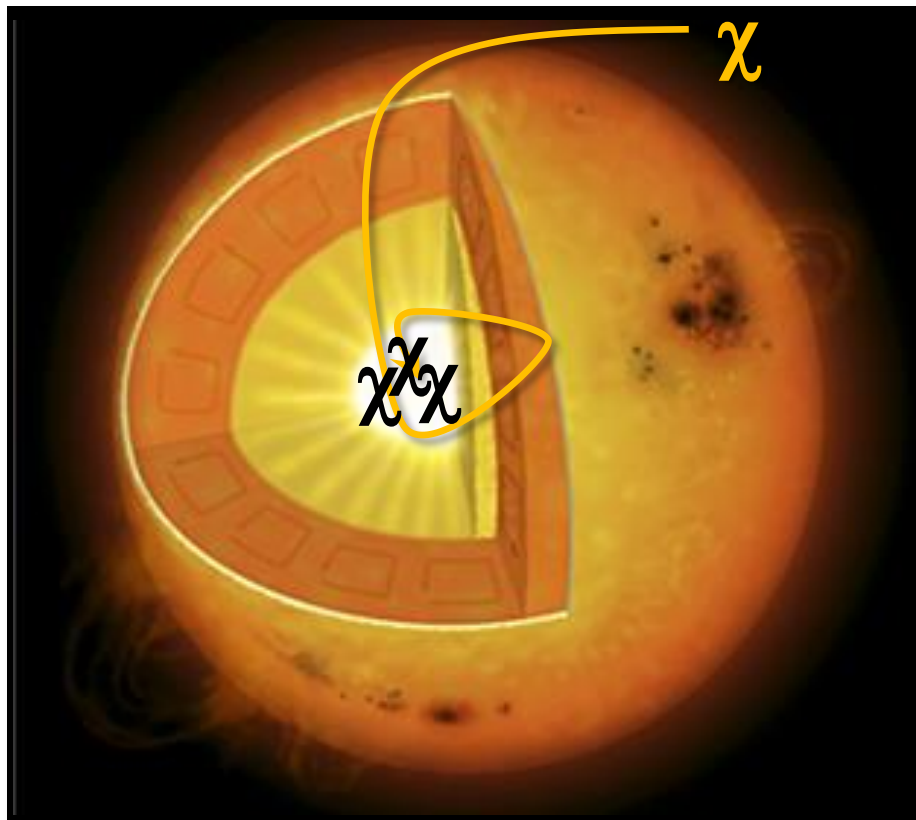


spinabhängige Wechselwirkung:
WIMP Streuung an H-Atomen

- durch Streuung: $v_{\text{WIMP}} < v_{\text{Entweichen}}$
 $\hookrightarrow$ WIMPS sinken ins Zentrum der Sonne

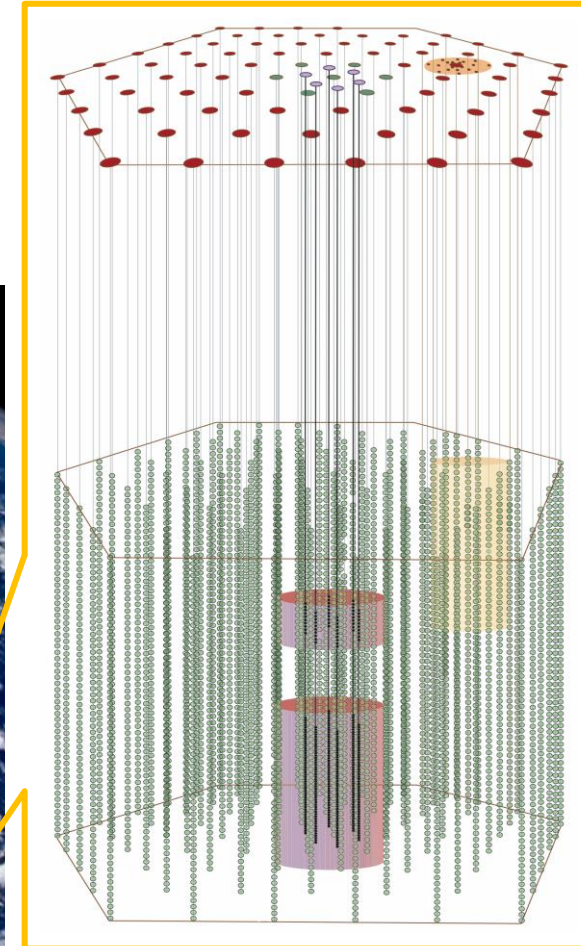
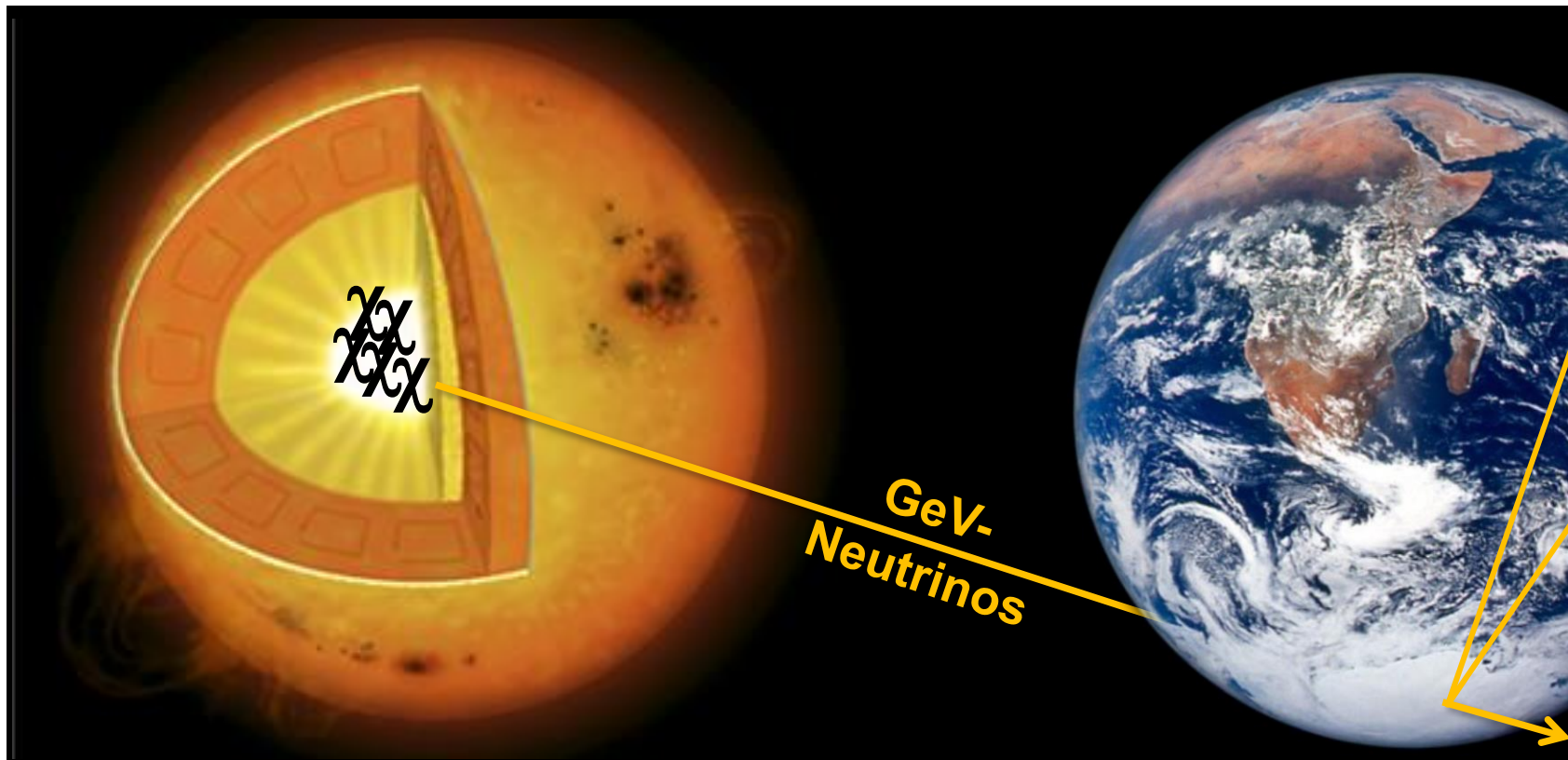
WIMP-Annihilation im Sonneninnern

Aufbau eines Gleichgewichts zwischen
Einfangrate R_C und Annihilationsrate R_A



WIMP Annihilation - Neutrinos

- **Signatur der WIMP Annihilation** im Sonneninnern:
Erzeugung **hochenergetischer Neutrinos** mit Energien im GeV-Bereich (pp-Fusion: Neutrinos im MeV-Bereich!)
- Nachweis von **GeV Neutrinos** mit Icecube: spezielle Erweiterung (Deep Core) im zentralen Bereich

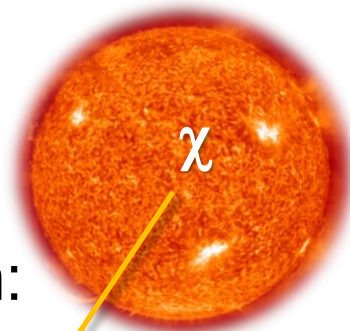


WIMP Annihilation & Neutrinooteleskope

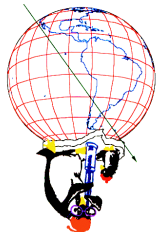
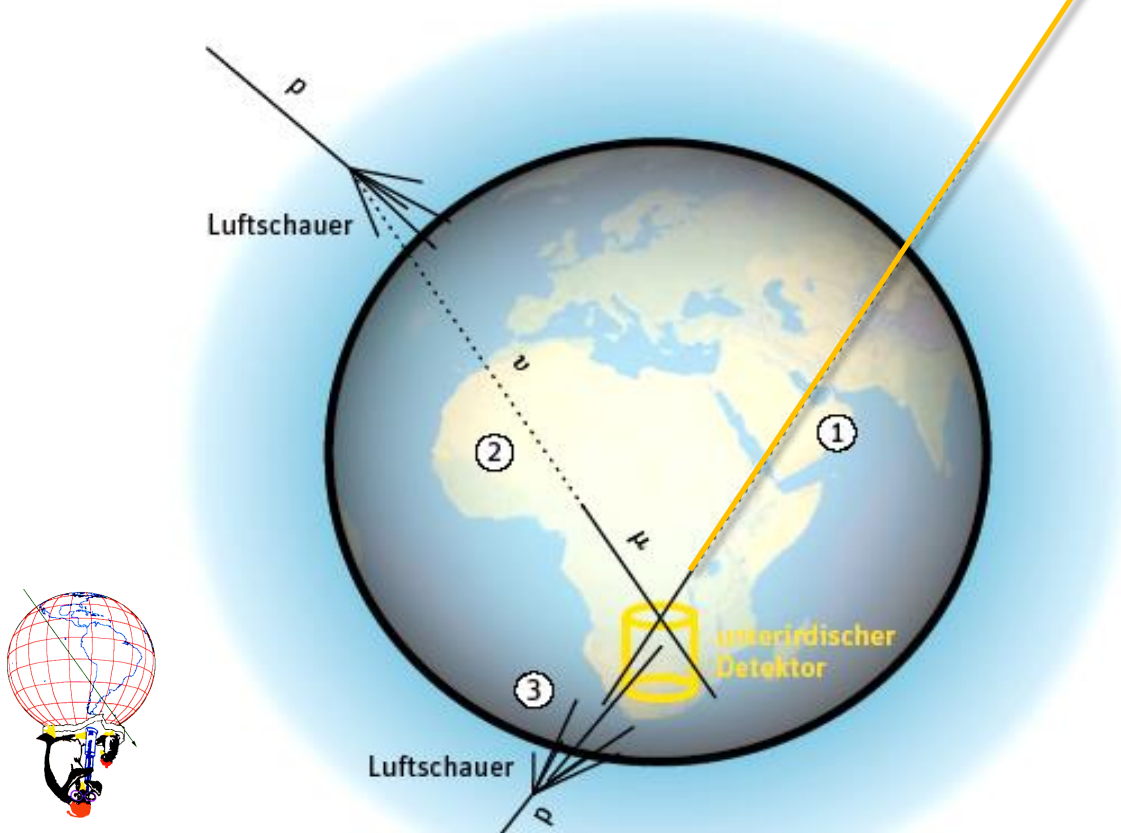
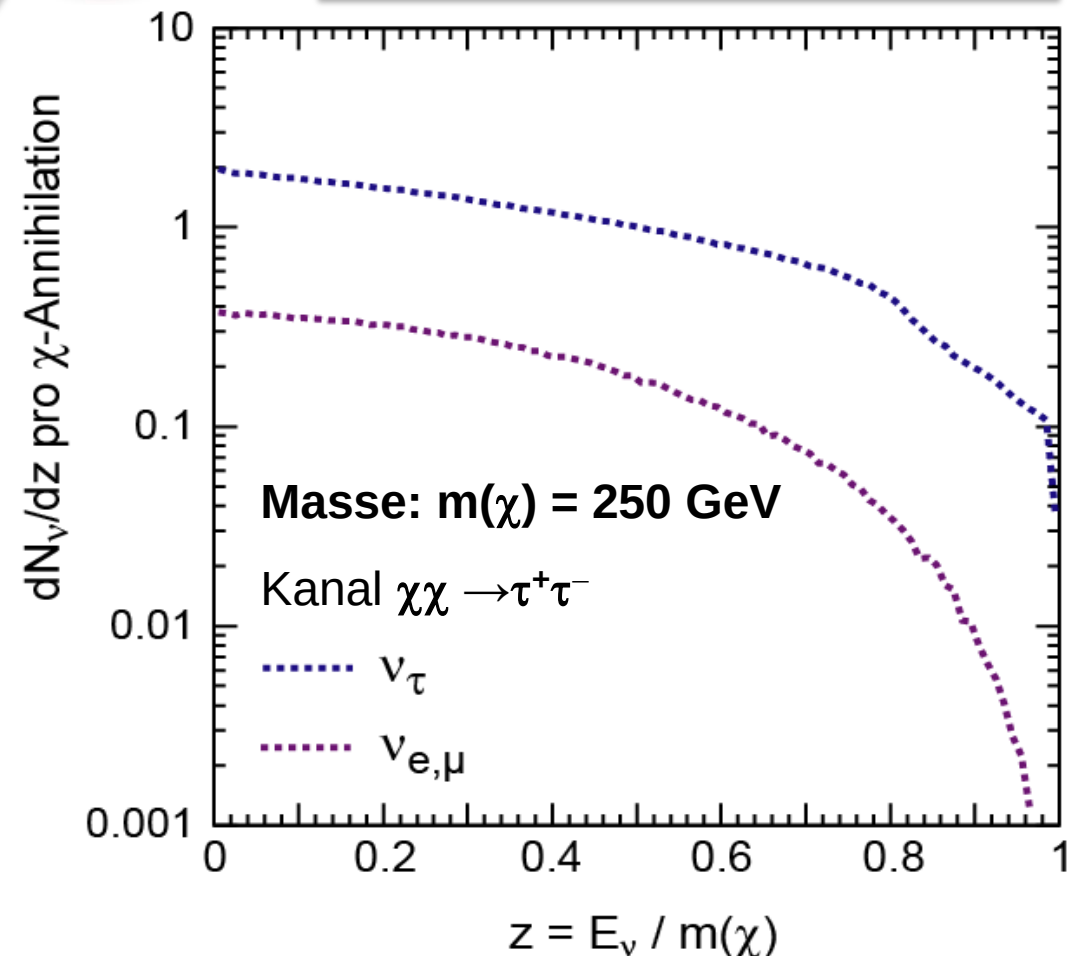
- GeV-Neutrinos verlieren beim Verlassen der Sonne Energie!

Wahrscheinlichkeit P , die Sonne ohne Wechselwirkung zu verlassen:

$$P = e^{-E_\nu / E_k} \quad \nu_\mu: E_k \sim 130 \text{ GeV}$$

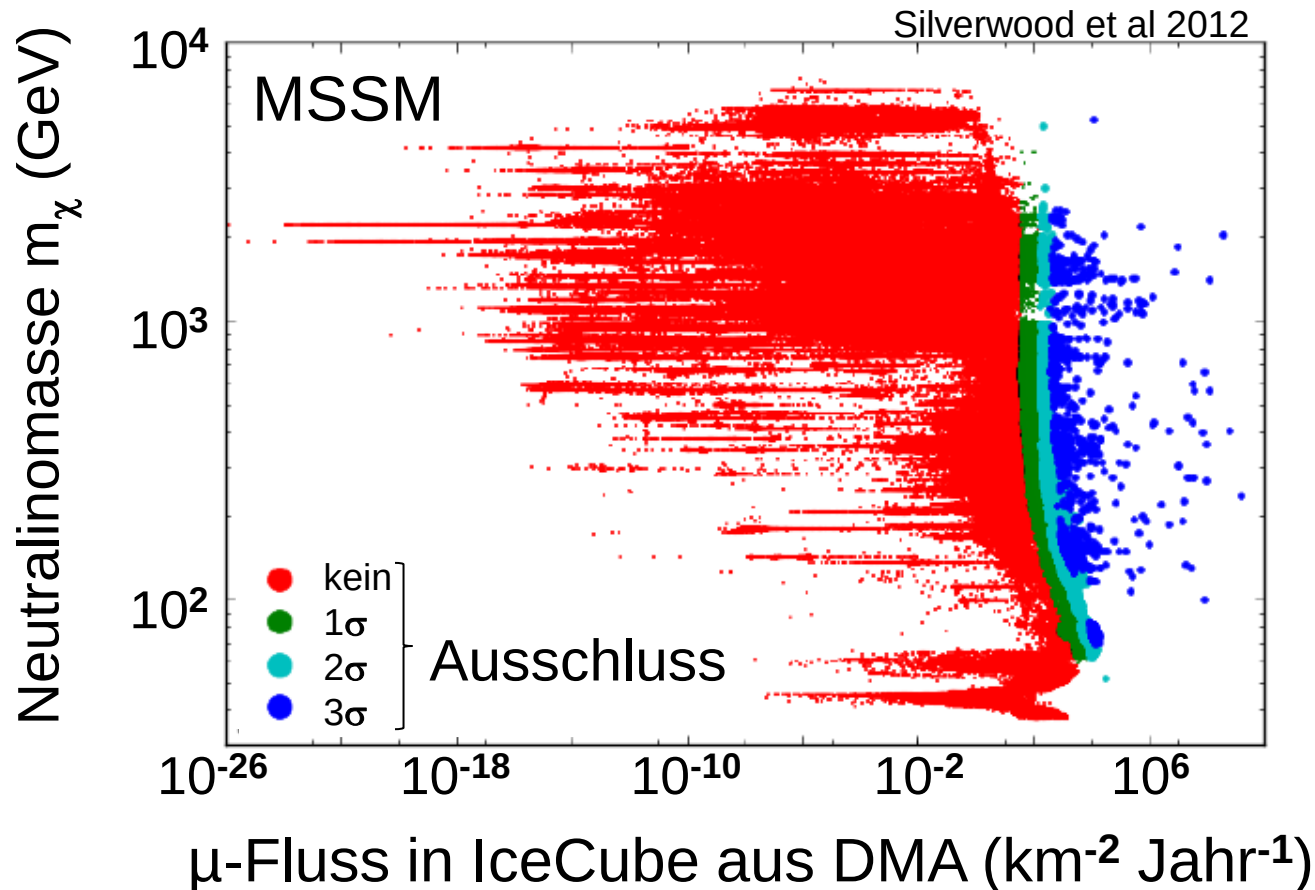


Neutrinos: Startenergien

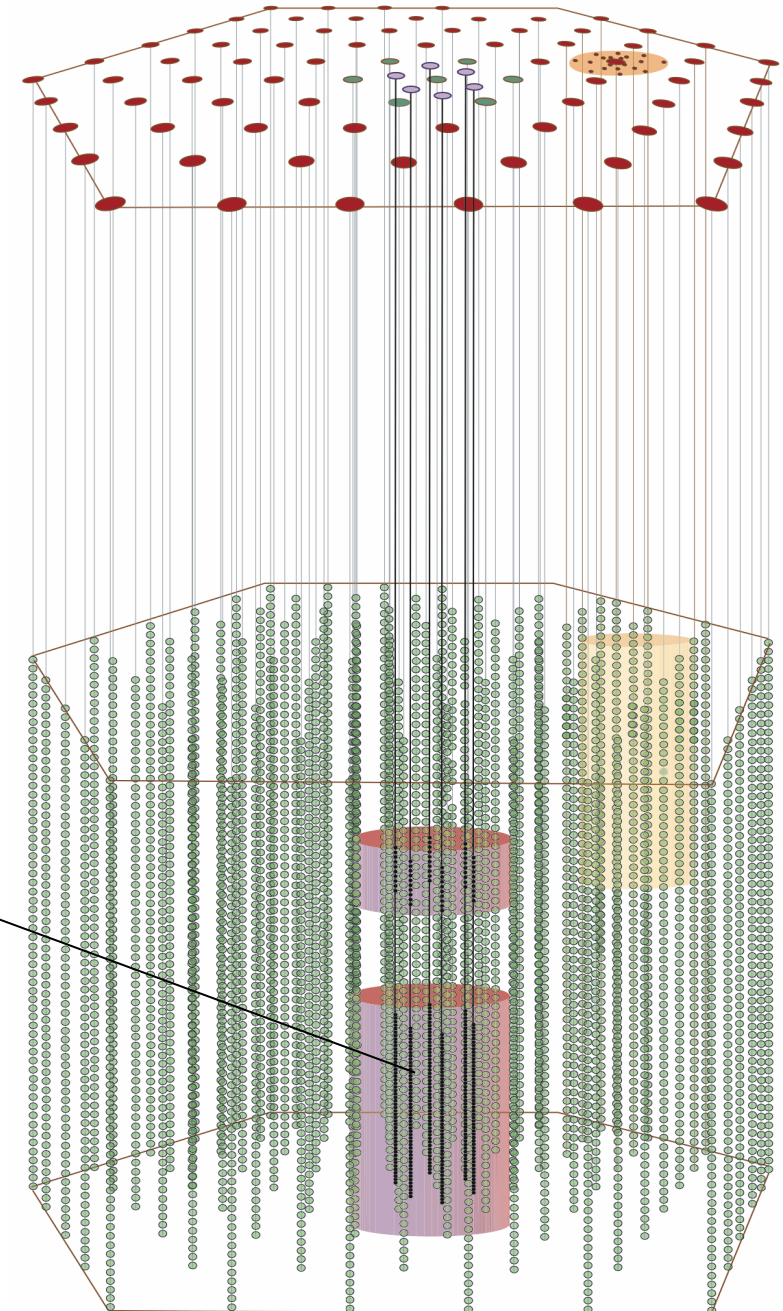


IceCube – Deep Core Erweiterung

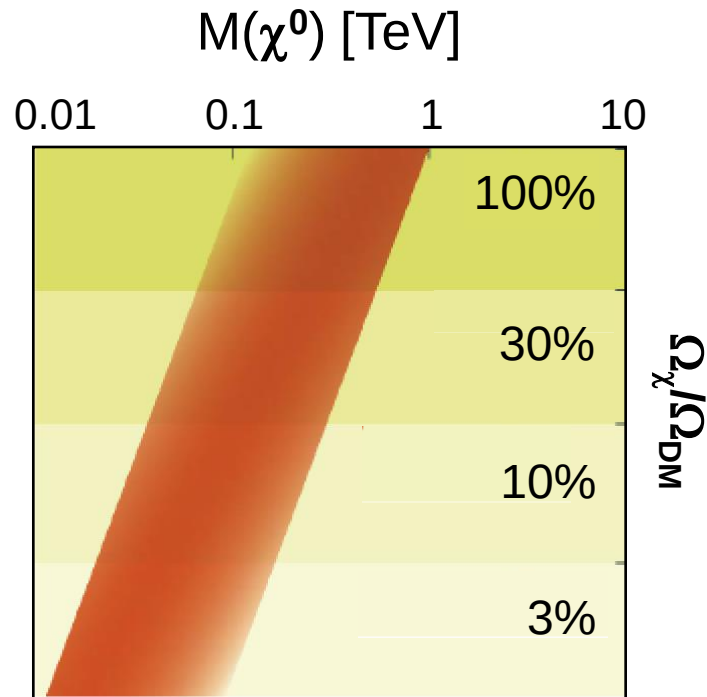
- **Deep Core:** IceCube-Erweiterung für verbesserte Suche nach DMA aus Sonne ν_μ im Energiebereich 10 GeV – 1 TeV
- 6 neue Strings mit je 40 PMTs



Deep
Core



$$\Omega_\chi \sim \langle \sigma_A v \rangle^{-1} \sim m_\chi^2 / (k\alpha^2)$$



■ Fazit indirekter DM-Nachweis:

- bisher kein eindeutiger Nachweis
- hoher astrophysikalischer Untergrund
- **Gammas**: Fermi & Cherenkov-Teleskope
- **geladene Teilchen**: AMS-02 & Pamela
- zukünftig: multi-messenger Studien ($\gamma + \bar{p} + e^+$)
- zukünftig: bessere Modellierung mit GALPROP
- **Astrophysik**: Kosmische Strahlung (Quellen, Transport, lokale Phänomene) – Modellierung!
- **Teilchenphysik**: SUSY-Parameterbereich für Neutralinos wird durch LHC (stark) eingegrenzt

NASA
ESA



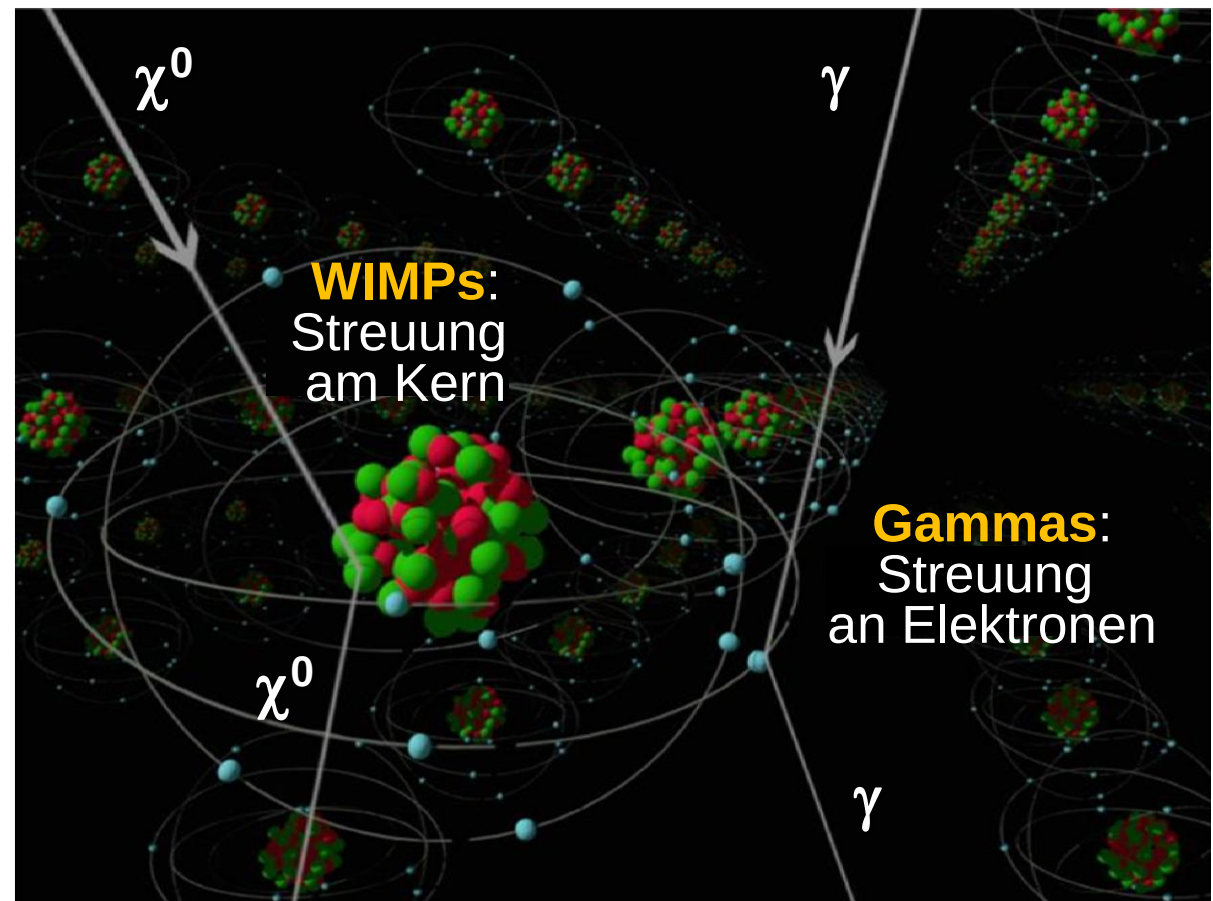
COSMIC VISION 2015 - 2025

3.5 Direkte Nachweismethoden

- Experimente zum direkten Nachweis von SUSY-WIMPs auf der Erde:
 - **Prozess: elastische Streuung des WIMPs am Kern**
 - **Signatur: Rückstoßkern mit typischen Energien im keV-Bereich**
 - $\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.27$: WIMPs mit extrem kleiner Streurate mit Kernen ($< 10^{-7}$ pb)

■ Experimentelle Grundlagen:

- nur **elastische** Kern-Streuung, da kinetische Energie von WIMPs im Halo nur im keV-Bereich
- es 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

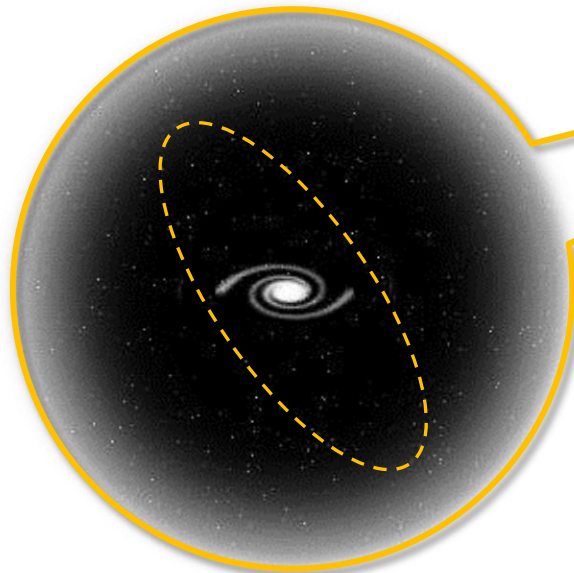


3.5.1 Reaktionskinematik

■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

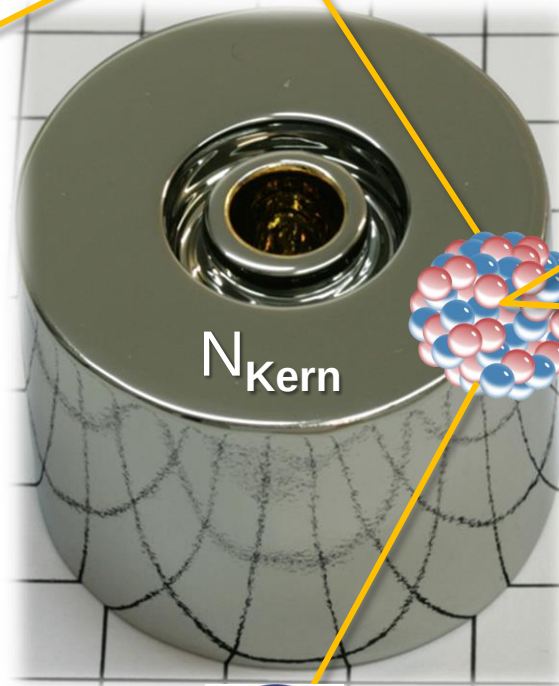
$$R = N_{Kern} \cdot \langle \Phi \rangle \cdot \langle \sigma_{SI/SD} \rangle$$

ASTRO

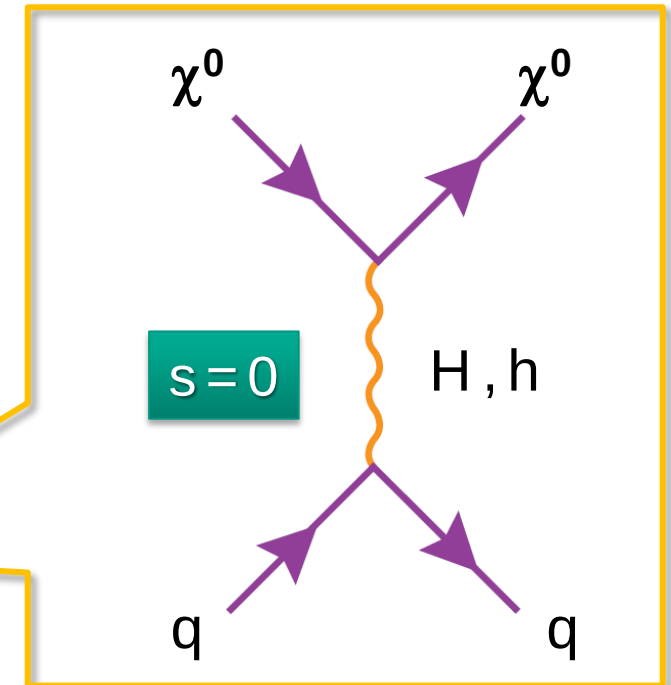


CDM-Eigenschaften:

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



SUSY



WIMP-Eigenschaften:

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

■ Isothermales WIMP Geschwindigkeitsprofil $f(v)$

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

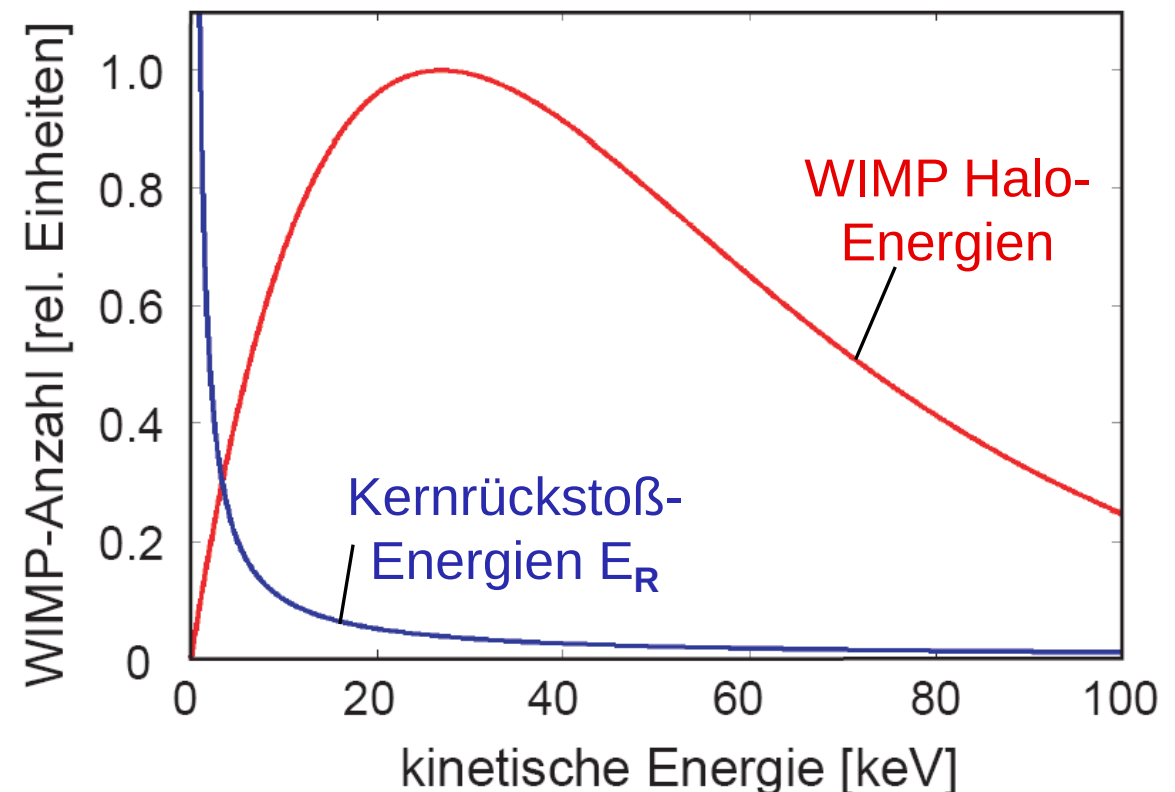
- 'thermalisierte' WIMPs im Halo (analog zu einem idealen Gas):

Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeits-Verteilung

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

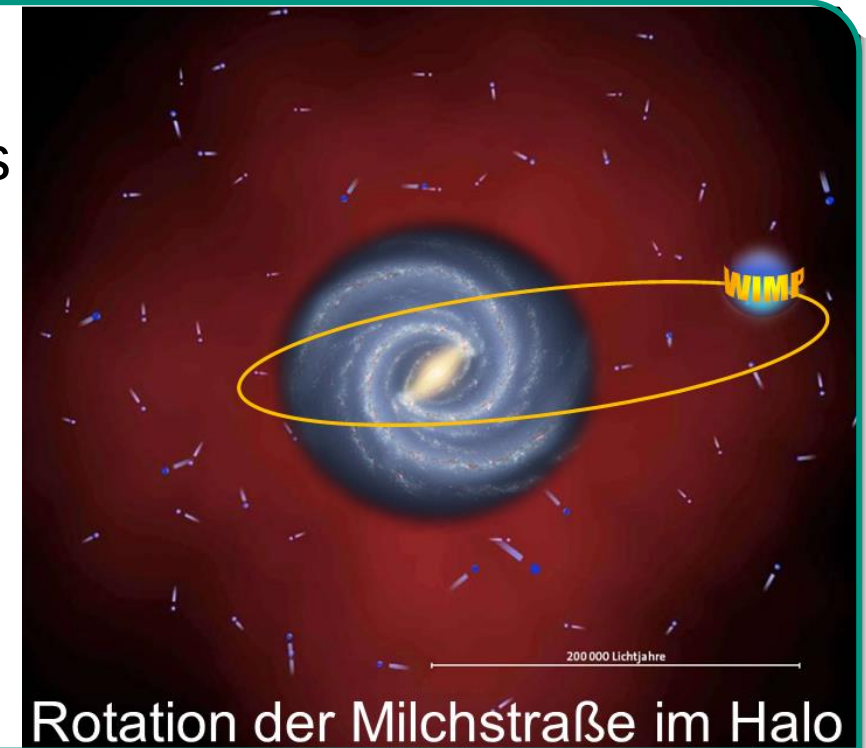
v_0 : wahrscheinlichste WIMP
Geschwindigkeit im Halo
(~270 km/s)

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 k_B T}{M(\chi^0)}}$$



■ 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 ☒



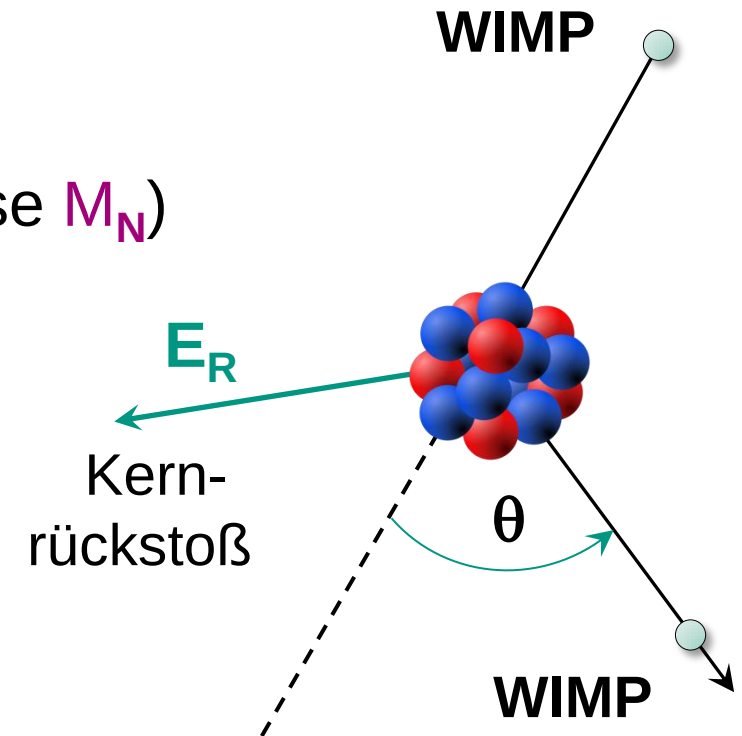
■ Modifikationen zu reiner Maxwell-Boltzmann-Verteilung

- 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_χ) 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 μ

- Fall $M_\chi = M_N$

$$\Rightarrow \mu = M_N / 2$$

- Fall $M_\chi \gg M_N$

$$\Rightarrow \mu = M_N$$

b) Streuwinkel θ

$$\mu = \frac{M_\chi \cdot M_N}{M_\chi + M_N}$$

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

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

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

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


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

■ Abhängigkeit der maximale Rückstreuenergie $E_{R,\max}$ von M_χ :

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

‘optimaler’ Impulstransfer, Kern erhält gesamte E_{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 χ^0 auf TeV-Skala: nur geringfügig höheres E_R

WIMP Nachweis: lokaler Fluss

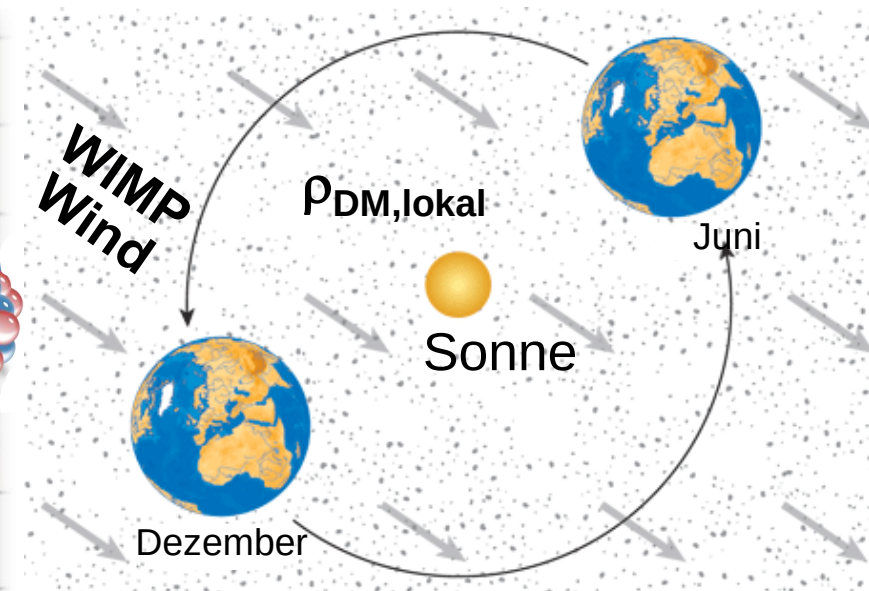
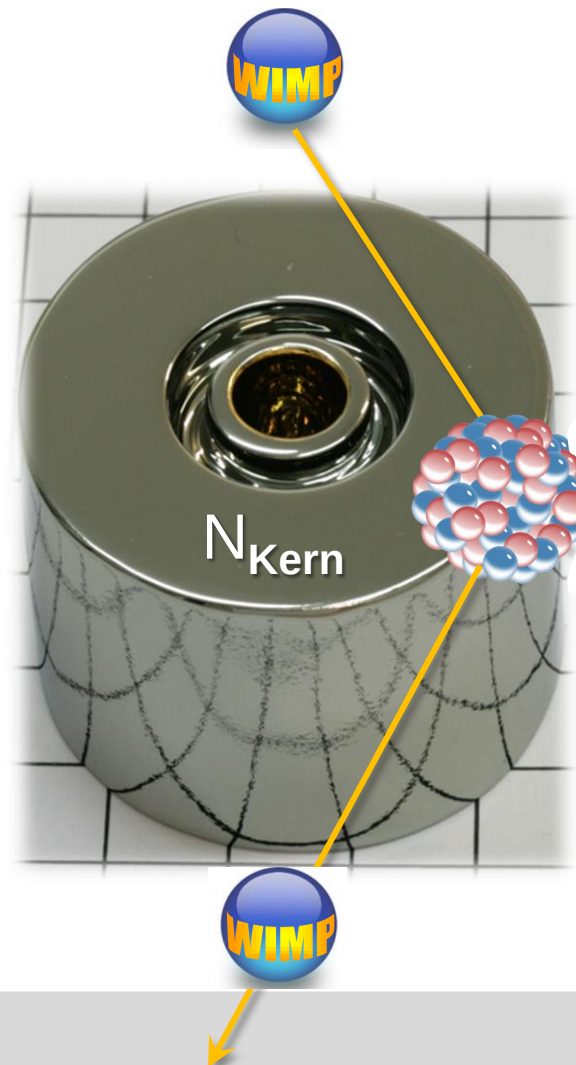
■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

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

■ lokaler WIMP – Fluss Φ

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

$$\langle \Phi \rangle = \frac{0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3}{100 \text{ GeV}} \cdot 270 \times 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

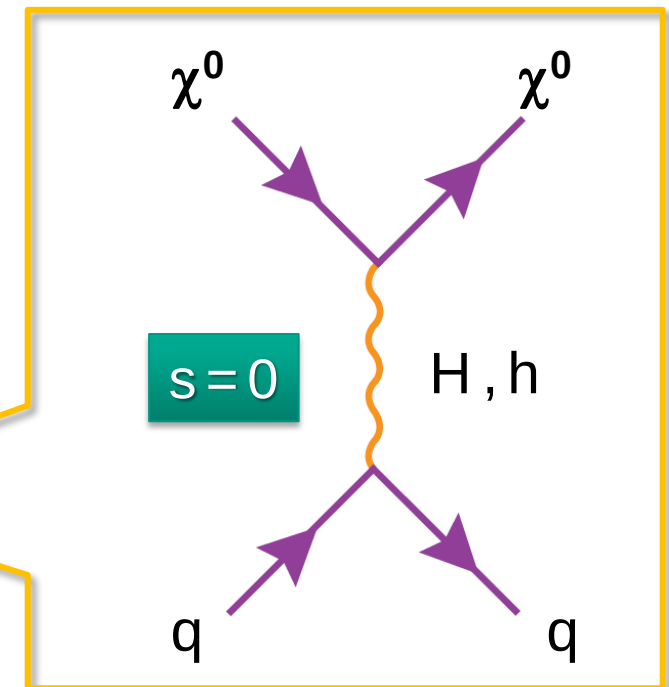
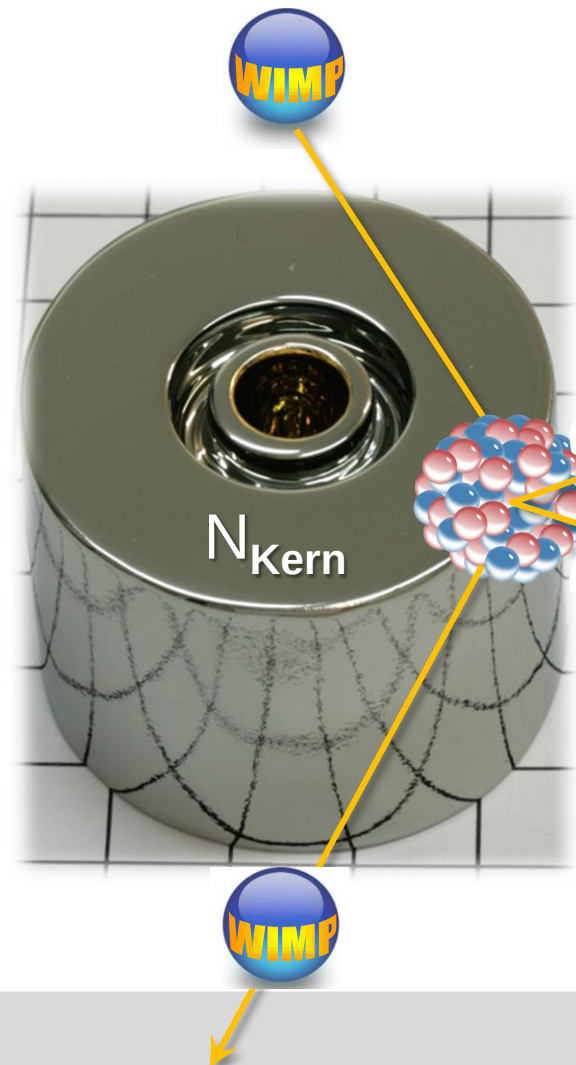


$$\langle \Phi \rangle \sim 80.000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

■ Reaktionskinematik direkter Nachweis: Astrophysik- & SUSY-Input

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

SUSY



WIMP-Eigenschaften:

- Streuquerschnitte
skalar σ_{SI} / axial σ_{SD}

wichtig:
SUSY Wirkungs-
Querschnitte
sind
unbekannt

Neutralino-Streuprozesse: Überblick

■ skalare (σ_{SI}) / spinabhängig (σ_{SD}) Wechselwirkung

1 – Ebene der Partonen: q, g

χ^0 - Wechselwirkung mit **Quarks, Gluonen**

χ^0 - Kopplungsstärke aus SUSY-Modell

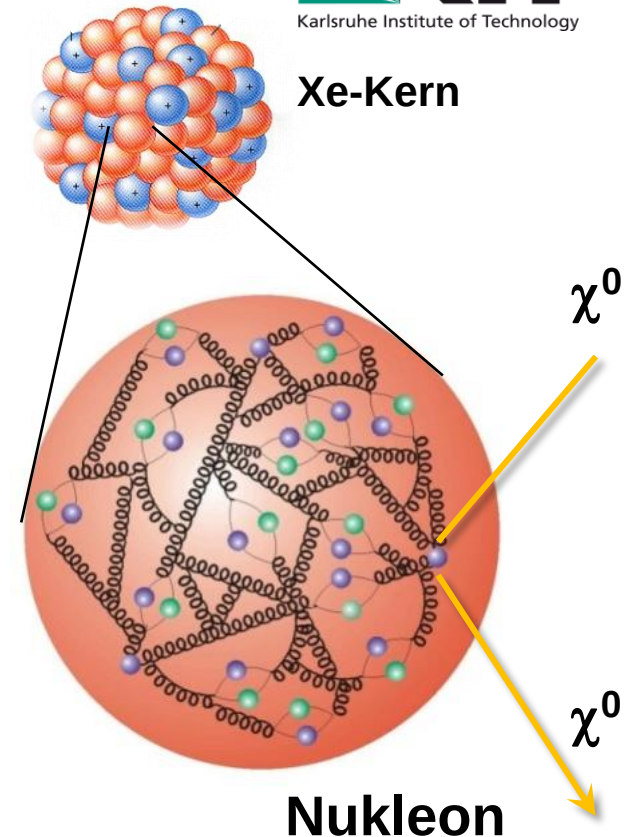
2 – Ebene der Nukleonen: p, n

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

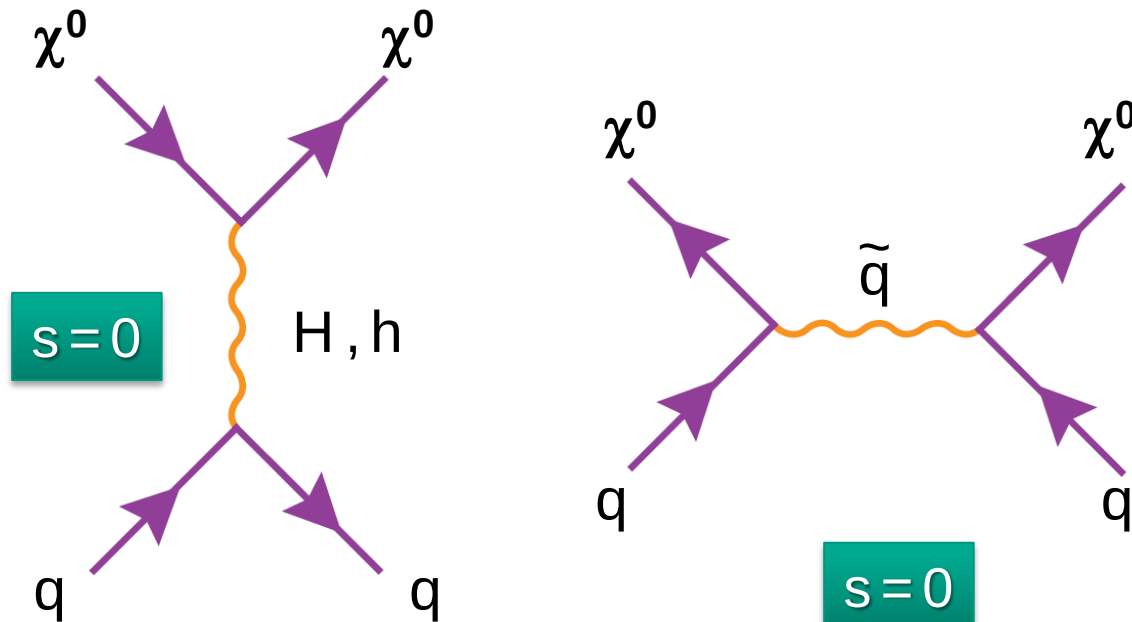
3 – Ebene der Kernstruktur: Ar, Xe,...

χ^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 χ^0 – Wechselwirkung mit einem Quark (σ_{SI} : spin independent)

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