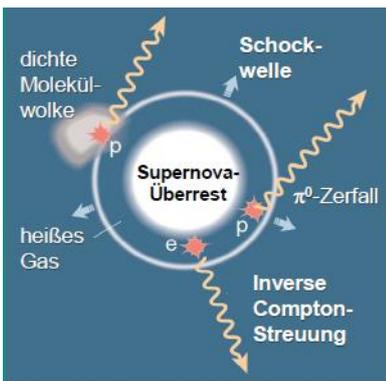
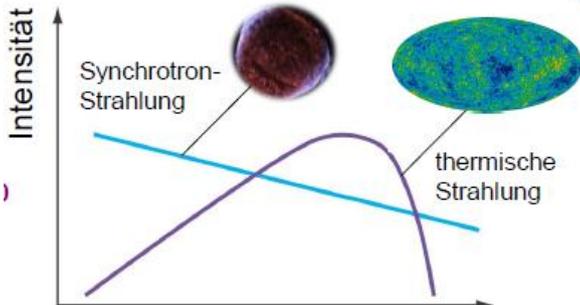


# ATP I

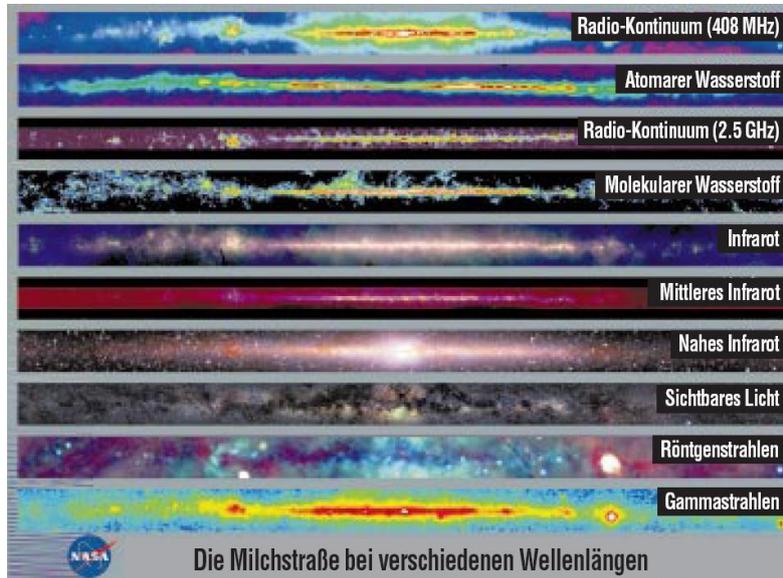
## Experimentelle Methoden/Multi-Messenger

- Thermisch: Nur abhängig von T -> Boltzmann
- Nicht thermisch: Kein therm. GG sondern abhängig von B, E und rho

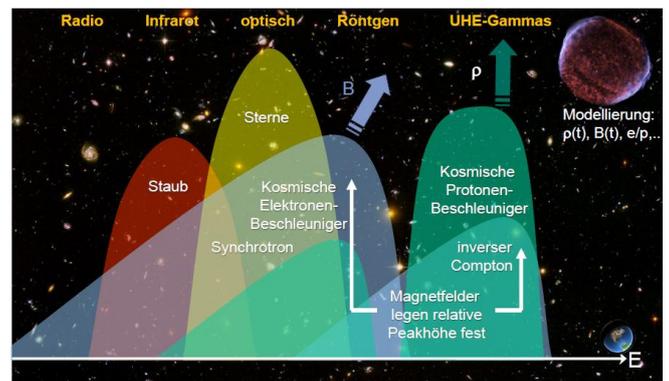
-> SNR, Teilchenzerfälle und WW



Frequenz



Die Milchstraße bei verschiedenen Wellenlängen



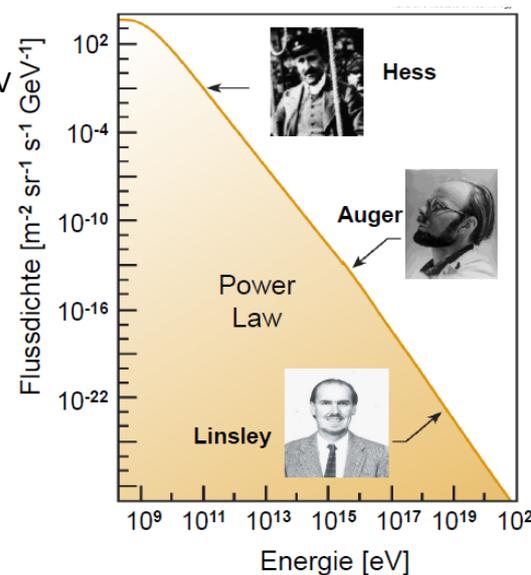
## Luftschauerexperimente

- Primärteilchen (Protonen, Leichte Kernen (He/alpha) Ionisiert!, e )
- Schauer (Myonen, Pionen → Elektromagnetischer + Hadronischer Schauer)
- Erste Beobachtung kosm. Strahlung 1912 durch Hess
- 1939 Auger: Messung von Schauer (Geigerzähler) → E>10<sup>15</sup> eV
- 1961: Volcano Ranch -> Hochenergetischstes Teilchen E=10<sup>20</sup> eV

Häufigkeit der Teilchenenergien -> Powerspektrum (Power-Law)

→ Definierter physikalischer Beschleunigungsprozess...??

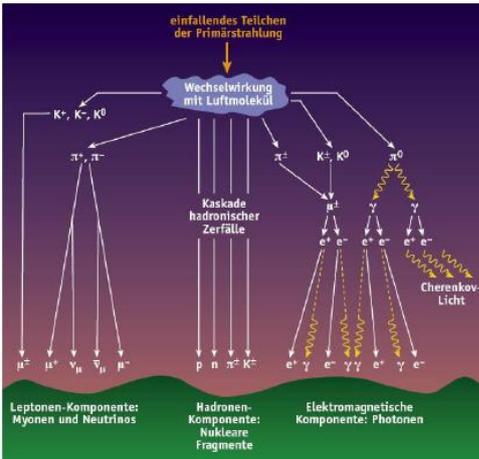
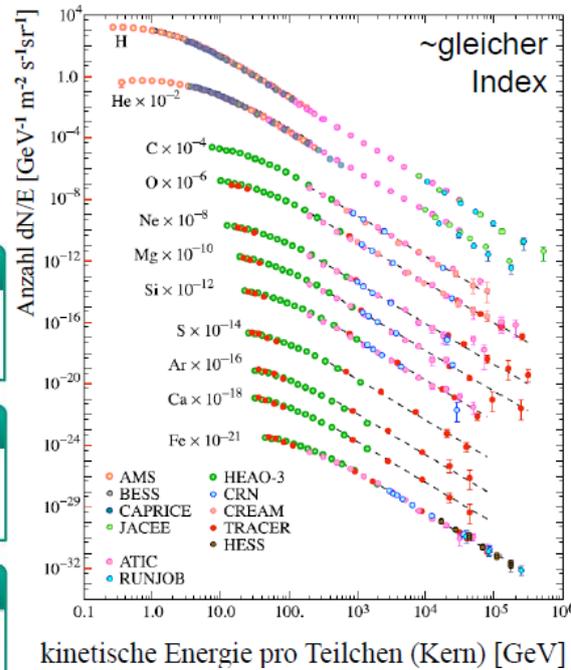
Satelliten- und Ballonexperimente = Direkte Messung



# Rigidität: $R = p \cdot c / Z \cdot e$

-> Bestimmung Elementzusammensetzung

Zur Unterscheidung von Isotopen



- elektromagnetische Komponente**
  - Elektronen, Positronen & Photonen
  - Kaskadenprozesse, „weich“
- myonische Komponente**
  - $\mu^+/\mu^-$  mit großer Durchdringungskraft
  - „harte“ Komponente
- hadronische Komponente**
  - Hadronen: p, n, Pionen  $\pi^\pm$ , Kaonen  $K^\pm$
  - hohe Ionisationsrate  $dE/dx$

■ Zusammensetzung der **primären kosmische Strahlung**:  
 -> - 86 % Protonen, 11% Alpha-Teilchen, 1% schwere Kerne, 2% Elektronen  
 - Elementhäufigkeit entspricht nahezu der solaren Verteilung

->Wichtig: Modellierung der WW mit der Atmosphäre -> Messung am Boden liefert Aussagen

- Kern\EM-WW Zerfälle und Reaktionsmechanismen

- Resultate aus Beschleunigern mit 4Pi Abdeckung (hier: enge Vorwärtsrichtung fixed Target)

## Elektromagnetische Komponente (~98%)

**Elektromagnetische Kaskadenprozesse:** primäre Teilchen - Elektronen (aus  $\pi^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e$ ) und Gammas (aus  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )  
 ~98% aller Teilchen einer Kaskade: Elektronen & Photonen

**Paarbildung:**  $E_{\gamma, \text{thresh}} \sim 2 m_e = 1.02 \text{ MeV}$   $\Lambda_{\text{paar}} \cong \frac{9}{7} \cdot X_0$

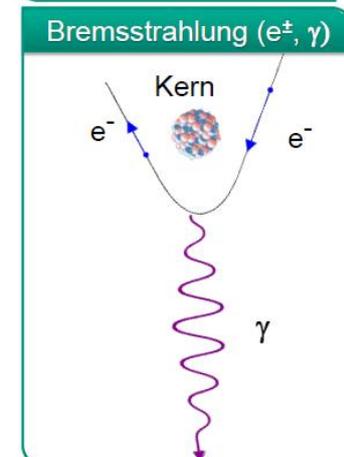
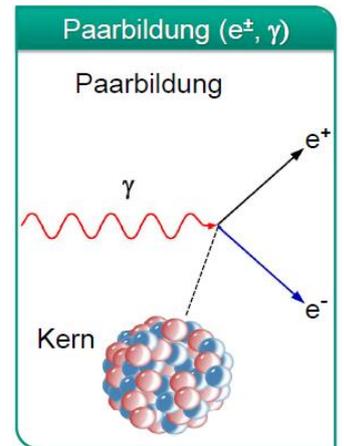
!Nur wegen dem benötigten Kernrückstoß ist Gamma-Astronomie möglich!  
 Da im Vakuum kaum Paarbildung möglich ist!

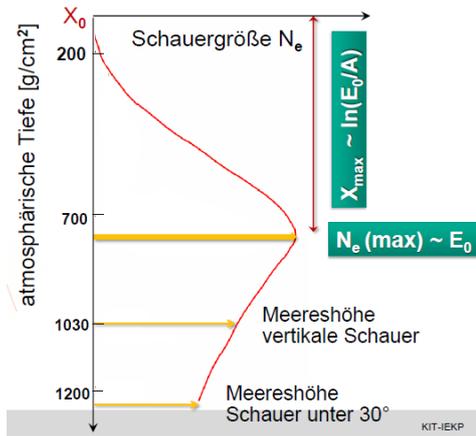
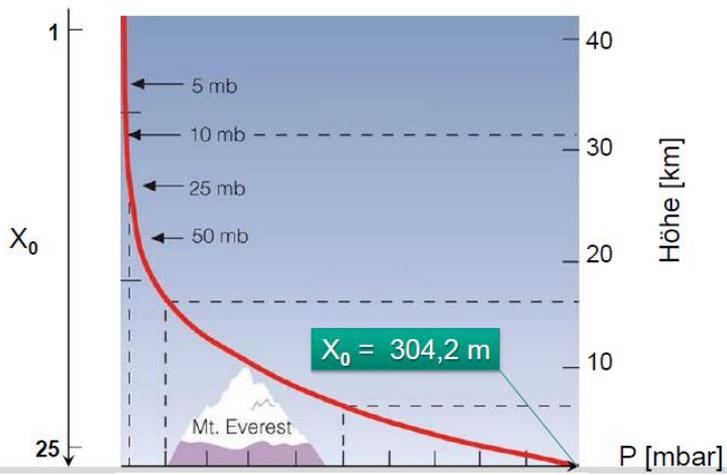
## Bremstrahlung

Nur leichte Teilchen (Elektronen) da abhängig von  $1/m^2$   $\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{brems}} = \frac{1}{X_0} \cdot E$

■ **Elektromagnetische Kaskadenprozesse:** Erdatmosphäre wirkt als massiver Absorber für elektromagnetische Komponente  
 ~80%+95% der Primärenergie wird in Ionisationsenergie umgewandelt

**Paarbildung**  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$   
**Bremstrahlung**  $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$





### Strahlungslänge $X_0$

- typische Längenskala, nach der bei

### hochenergetischen Elektronen

- ihre Energie auf 1/e abgefallen ist durch Emission von Bremsstrahlung

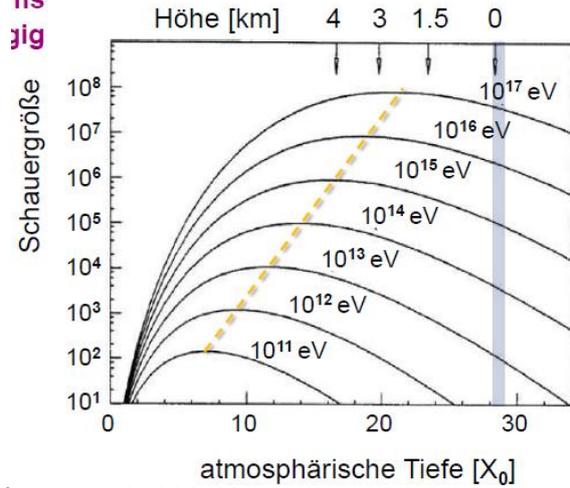
$$E(x) = E_0 \cdot e^{-x/X_0}$$

### hochenergetischen Photonen

- 7/9 der mittleren freien Weglänge für Paarbildung erreicht ist

$$X_0 = 7/9 \cdot \lambda_{paar}$$

ns  
jig



Erdatmosphäre als Absorber → Minimale Primärenergie die ankommt  $\sim 10^{13} \text{ eV}$

### Myonen (~1,7%)

Ladungsverhältnis  $\mu^+ / \mu^- = 1.2$

→ Wegen hohem Anteil an Protonen als Primärteilchen

### Myonen

- Lebensdauer  $\tau = \gamma \cdot 2.2 \mu\text{s}$
- Energieverlust  $dE/dx \sim 2 \text{ MeV/cm (H}_2\text{O)}$   
↳ minimal ionisierende Teilchen (**m.i.p.s**)
- durchdringende Komponente auch nach massiver Abschirmung

### Hadronen (~0,03%)

- **Hadronen:** Protonen, Neutronen, Pionen, Kaonen, ... (0.3% Anteil) lokalisiert im Schauerkern, Erdatmosphäre entspricht  $\sim 11$  hadronischen Wechselwirkungslängen  $\Lambda$

Atmosphäre:  $\Lambda = 1 \text{ km}$   
Eisen:  $\Lambda = 16.8 \text{ cm}$   
 $X_0 = 1.76 \text{ cm}$

### Hadronische Wechselwirkungen

- **hadronische Wechselwirkungslänge  $\Lambda$**  = mittlere Länge für inelastische Streuung

$$\Lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n}$$

in  $[\text{g cm}^{-2}]$  bzw.  $[\text{cm}]$

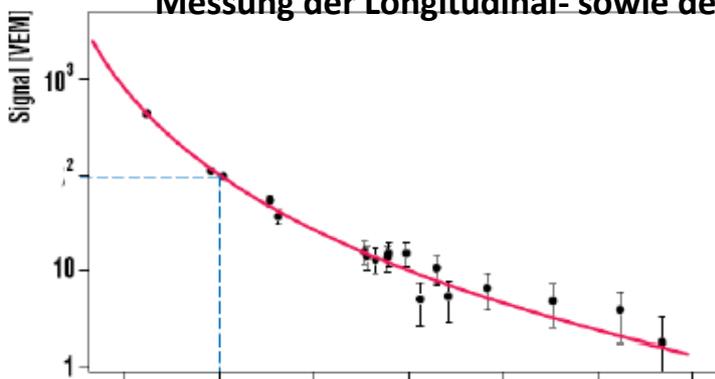
$\sigma$ : Kern-Wirkungsquerschnitt

$n$ : Anzahl der Streuzentren

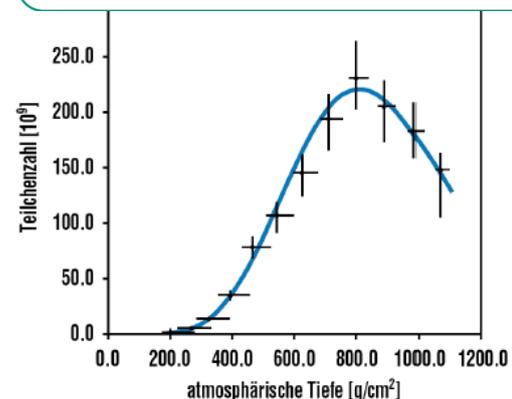
-  $\Lambda$  ist wesentlich größer als  $X_0$



### Messung der Longitudinal- sowie der Lateralverteilung



<-Lateral



**Teilchenkomposition auf Meeresniveau (nach 25 X<sub>0</sub>, 11 λ<sub>int</sub>)**

- ~ 80 % Photonen
- ~ 18 % Elektr. / Positr.
- ~ 1,7 % Myonen
- ~ 0,3 % Hadronen

~ 10<sup>6</sup> Sekundärteilchen von 10<sup>15</sup> eV Proton

Lateralverteilung aus Detektorfeld (e/mu) = Fußabdruck

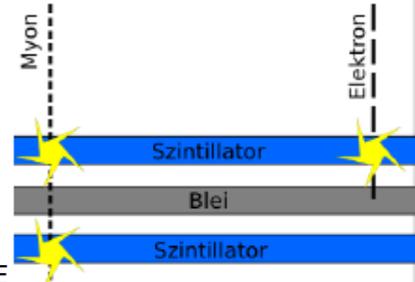
Anzahl der e/mu aus Integration über Lateralverteilung + NKG-Fit

→ Primärenergieindikator

**Masse abgeleitet aus Ort X der ersten Wechselwirkung**

- **schwerer Kern (<sup>56</sup>Fe):** wechselwirkt rasch in obersten Atmosphäreschichten ⇒ **kleines X**
- **leichter Kern (p):** dringt tiefer ein ⇒ **großes X**

Bestimmung e/mu – Verhältnis mit Cascade (KIT)



**Elektronenzahl N<sub>e</sub> – Myonenzahl N<sub>μ</sub>**

**Myonen:**

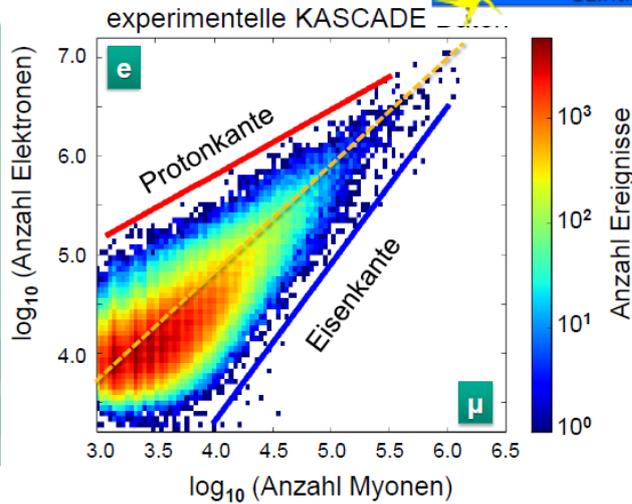
- es werden weniger μ als e erzeugt
- erreichen den Boden auch aus großen Höhen (d.h. **kleinem X**)

**Elektronen:**

- es werden mehr e als μ erzeugt
- erreichen den Boden bevorzugt aus kleinen Höhen (d.h. **großem X**)

**Protonen: großes X ⇒ N<sub>e</sub> / N<sub>μ</sub> groß**

**Kerne: kleines X ⇒ N<sub>e</sub> / N<sub>μ</sub> klein**



→ Keine schwereren Kerne als Fe!

**Chemische Zusammensetzung der kosm. Strahlung ändert sich**

- bei Energien von 3-4 · 10<sup>15</sup> eV werden die primären CRs „schwerer“

→ Teilchenquelle hat Limit erreicht?

→ Begrenzt Teilchenpropagation die Energie der Teilchen?

- Beeinflusst durch galaktische B-Felder (mu-Gaus)

- Energieverluste: Invers Compton ; Synchrotronstrahlung

■ Speicherzeiten der CR in Galaxis:

~ τ ~ 3-10 · 10<sup>6</sup> Jahre

■ Energiedichte der CR:

~ 1 eV / cm<sup>3</sup>

**Larmor-Radius R<sub>L</sub>:**

$$R_L \cong 1pc \cdot \left( \frac{E}{10^{15} eV} \right) \cdot \left( \frac{\mu G}{Z \cdot B} \right)$$

Dicke der Galaxie ~ 0.3 kpc

→ Bei Teilchentrajektorie mit r > R<sub>L</sub> verlässt Teilchen die Galaxie

$$W_{CR} = \rho_{CR} \cdot \pi R^2 d \cdot \tau^{-1} = 2 \times 10^{41} \text{ J/Jahr}$$

## lokale Energiedichten in der Milchstraße

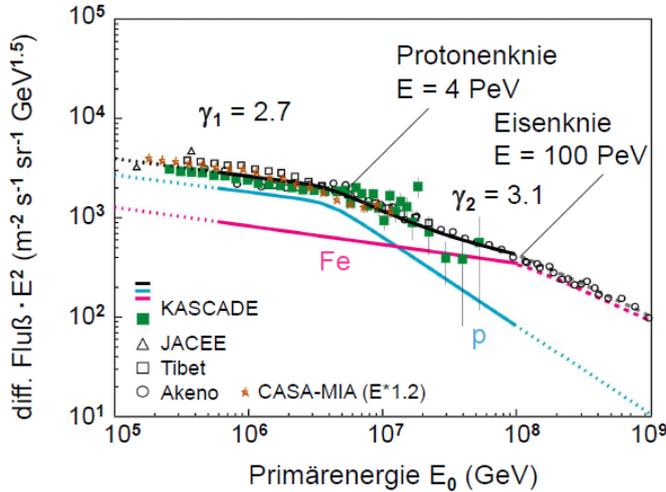
elektromagnetische Strahlung (Licht)	~0.6 eV/cm <sup>3</sup>
galaktisches Magnetfeld ~ B <sup>2</sup> / 2μ <sub>0</sub> (3μG)	~0.25 eV/cm <sup>3</sup>
kosmische Hintergrundstrahlung CMB	~0.26 eV/cm <sup>3</sup>
<b>kosmische Strahlung</b>	<b>~1 eV/cm<sup>3</sup></b>
lokale Materiedichte (WIMPs)	~0.3 GeV/cm <sup>3</sup>

## Die Quellen der kosmischen Strahlung

- SuperNova Schockfronten, Pulsare und Pulsarwindnebel

**Isotropie:** In erster Ordnung Isotrop!! – Keine nahen/ausgezeichneten Quellen für CR auch in Richtung des galaktischen Zentrums!(?) (Dipol-Anisotropie Hinweis Amplitude ~ 10<sup>-4</sup>)

## Das Energiespektrum



### ■ Änderungen im spektralen Verlauf (Knie, Knöchel) zeigen dass sich:

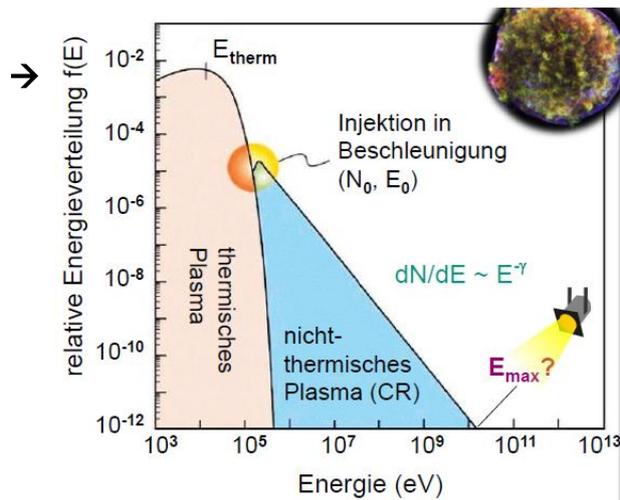
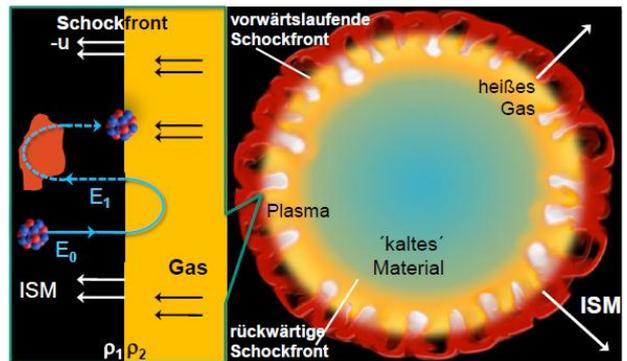
- die Massenzusammensetzung der CR ändert (**leicht** → **schwer**)
  - die Beschleunigungsquelle ändert: **galaktisch** ↔ **extragalaktisch**
  - bestimmte Beschleunigungsmechanismen erreichen ihre maximale Energie
- Beschleunigung in SN-Schocks**

## Fermi-Beschleunigung in SNRs

Energiegewinn pro Zyklus  $\frac{\Delta E}{E} = \frac{u}{c}$

Energie am Ende:  $E = E_0 \cdot (1 + \alpha)^n$

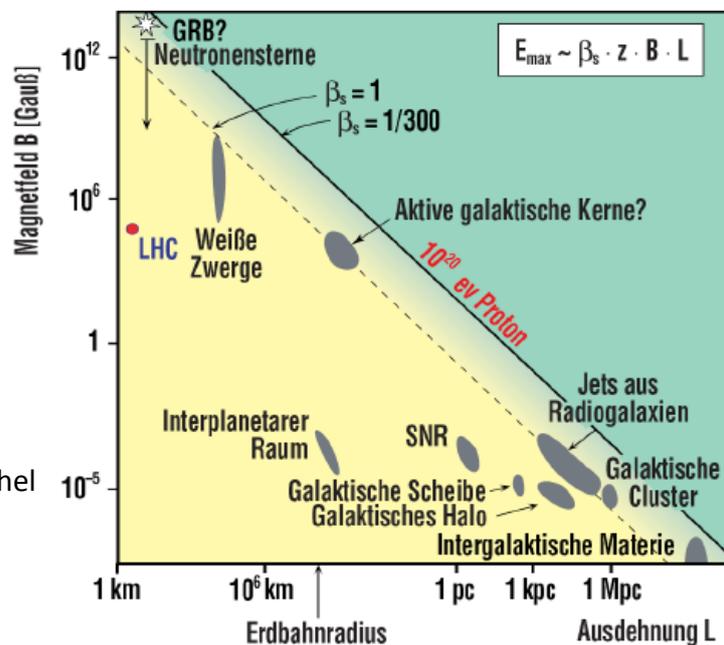
Wahrscheinlichkeit des Austritts:  $\frac{dN(E)}{dE} \sim E^{-\gamma}$



**Höchste Energien:** SMBH in AGN bis > 10<sup>20</sup> eV

→ Abnahme des Flusses der UHECR = Knöchel

$E_{max} \sim \beta_s \cdot z \cdot B \cdot L$



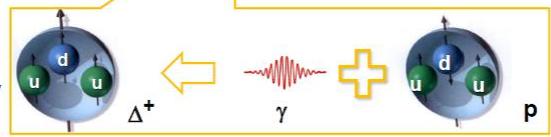
■ **Hillas-Plot:** in Schockfront via Fermi maximal erreichbare Energie  $E_{max}$   
**Teilchen:** ~ Ladung  $z$ , **Quelle:** ~ Feldstärke  $B$ , ~ Ausdehnung ~  $L$ , ~  $\beta_s$

# Die Propagation der kosmischen Strahlung

UHECR wechselwirkt über große Entfernungen (einige Mpc) mit dem CMBR!!

→ GZK-Cutoff:  $E_p(\text{GZK}) = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$

$S = 3/2$   
 $\Delta^+$  Resonanz  
 $m = 1232 \text{ MeV}$

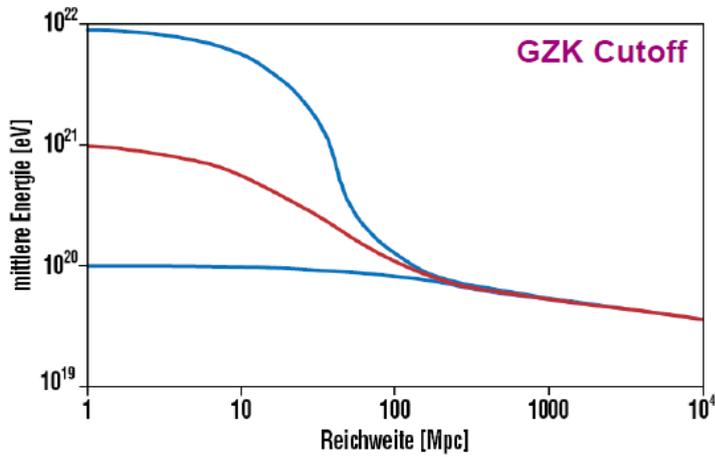


Zerfall:

$n + \pi^+$

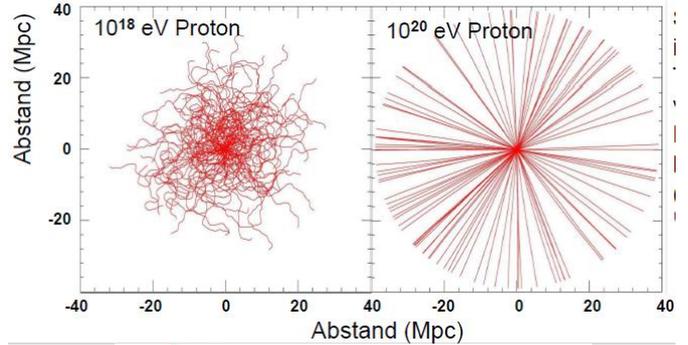
$p + \pi^0$

$S = 1/2$   
 Proton  
 $m = 938.27 \text{ MeV}$

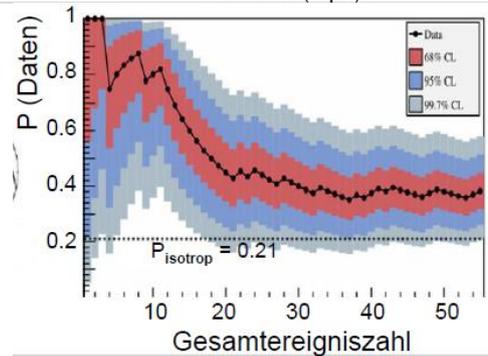
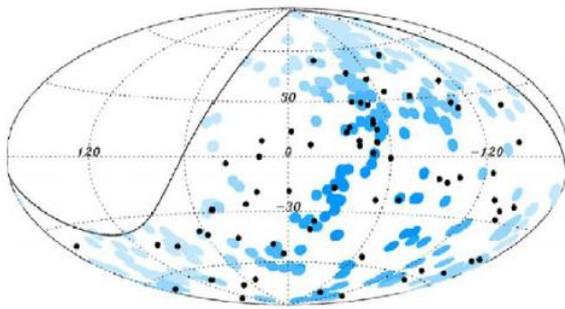


→ UHECR Astronomie? Nur sehr bedingt!

Quellen mit  $E > 10^{20} \text{ eV}$  gut aber leider GZK-Cutoff



Aber: Leichte Anisotropie feststellbar:



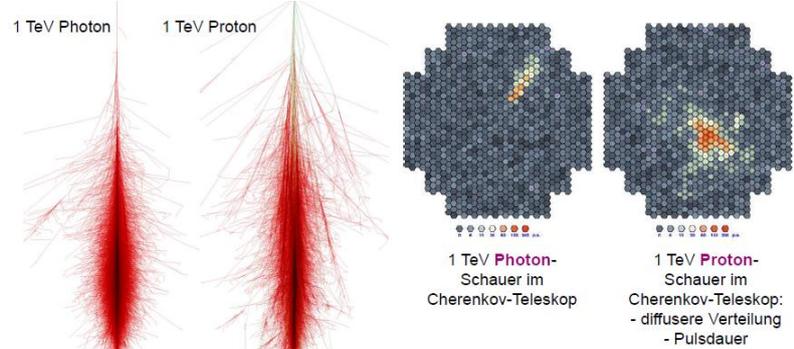
# Gammateleskope

## Cherenkov-Teleskope

Erzeugung in oberer Atmosphäre durch relativistische  $e^-/e^+$  mit  $E > 35 \text{ MeV}$

Cherenkov-Bedingung:  $\cos\theta = \frac{1}{\beta n} < 1 \rightarrow \beta > \frac{1}{n}$

Auftrefffläche  $\sim 10^5 \text{ m}^2$   
 1 TeV Gamme erzeugt etwa 100 Photonen/ $\text{m}^2$



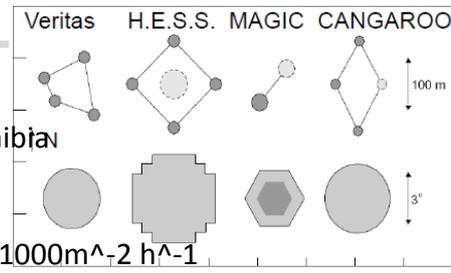
**Wieso sieht die Spur der Cherenkov-Strahlung, die sie in dem PMTs hinterlässt, gerade so aus? NANCY fragen!**

Große Cherenkov-Arrays

- MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) Teleskop auf La Palma
- H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) Observatorium in Namibia

➔ Bessere Sensitivität und Untergrundreduktion

Gammafluss oft verglichen mit Krebsnebel: Einheit 1 Crab = 1 Ereignis pro  $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$



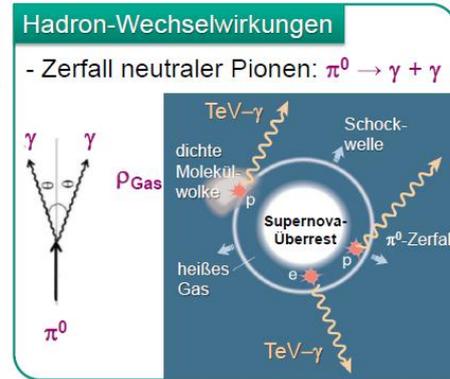
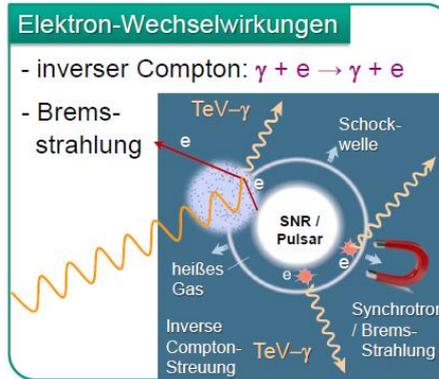
### experimentelle Herausforderungen

- geringe  $\gamma$ -Flüsse bei TeV-Energien
- **Trennung der Gammas von geladenen CR-Teilchen:** Lateralverteilung, Pulsdauer (p, He, Fe: diffusere Verteilungen)
- Observable in einem IACT:**
  - Bildintensität: Schauenergie
  - Bildorientierung: Schauerrichtung
  - Bildprofil: Primärteilchen

## Gamma Quellen

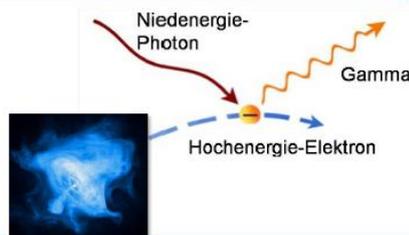
### astrophysikalische Quellen für $\gamma$ 's

- Entstehung bei Erzeugung und Reaktionen der geladenen kosmischen Strahlung
- zahlreiche galaktische Quellen:
  - SN-Schockwellen (Supernova-Remnants)
  - Pulsarwinde
  - Prozesse im interstellaren Medium (ISM)
- extragalaktisch
  - aktive galaktische Kerne



### Inverser Compton Effekt

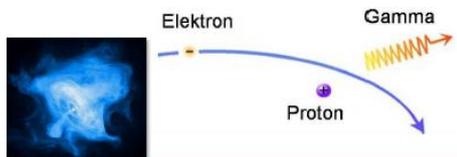
- niederenergetisches Photon wird durch hochenergetisches Elektron aus SNR/Pulsar auf TeV-Energien beschleunigt (effizienter Prozess)



### Bremsstrahlung

- hochenergetisches Elektron strahlt Gammas ab (GeV-TeV-Energien)

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{brems}} = \frac{4 \cdot \alpha^3 \cdot N_0}{m^2} \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \cdot E$$

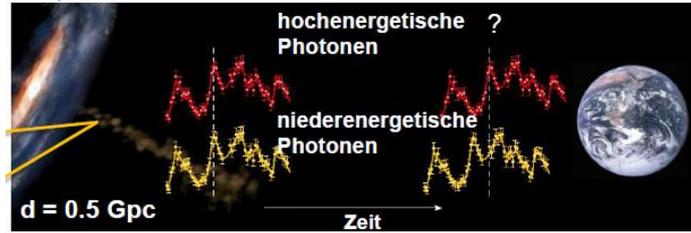


Anhand der Flussdichte aufgetragen über der Gamma-Energie lässt sich sehen, ob es sich um eine leptonic oder eine hadronische Beschleunigung handelt

Erfolge der Gamma-Astronomie:

- Pulsarwindnebel (Widerlegung des Polkappenmodells)
- 15 neue TEV-Gamma Quellen durch Galaxiendurchmusterung (HESS)
- Untersuchungsmöglichkeit weit entfernter Quasare
- AGNs können untersucht werden (zeitl Variabilität)

Reichweite von hochenergetischen gammas (TeV bis PeV) durch Stoß mit IR- bzw. CMB-Hintergrund beschränkt (Paarbildung)



Suche nach Verletzung der Lorentz-Invarianz

Zukunftsprojekt: CTA (~2020)

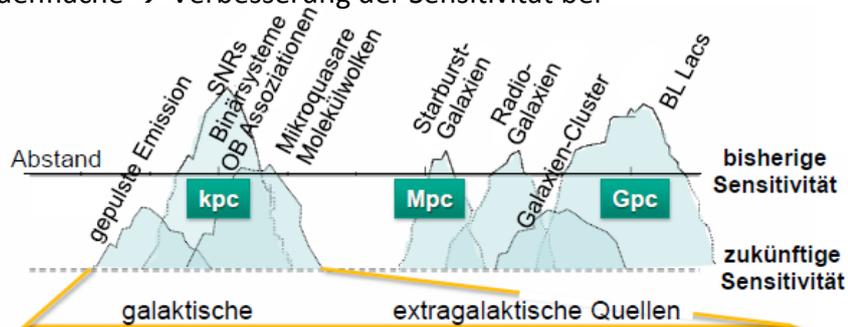
- mehr als 100 Cherenkov-Teleskope untersch. Größe (Südhalbkugel und Nordhalbkugel)
- 3-4 große Teleskope: große Sammelfläche → niedrige Energieschwelle
- mittlere Teleskope: größere Bodenfläche, verbesserte Schauerrekonstruktion, beste Gamma-Sensitivität
- kleine Teleskope: Abdeckung großer Bodenfläche → Verbesserung der Sensitivität bei hoher Gammaenergie

Milagro

- großes Gesichtsfeld
- Nachweis von 2 hot spots Nahe Orion

HAWK (Milagro-Nachfolge-Experiment)

- 300 große Wasser-Cherenkov-Tanks
- Ziel: Abdeckung eines großen Himmelsbereichs zur Beobachtung von AGN's GRB's und diffusen Quellen



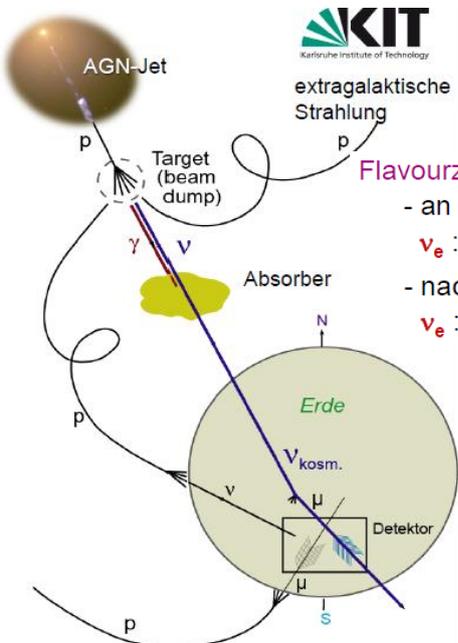
**Neutrino-Teleskope**

- Quellen:
- AGN-Jets
  - GRB's
  - μ-Quasare

Nachweis

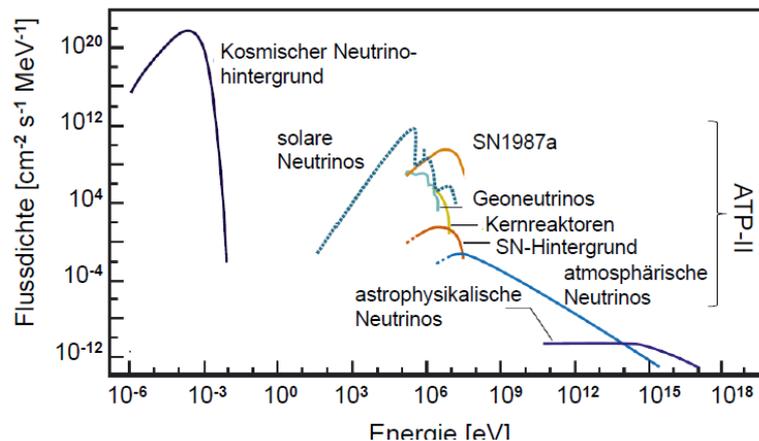
- CC und NC-Reaktionen
- hochenergetisches  $\nu_\mu$  erzeugt rel. Myon mit großer Reichweite, das Cherenkovlicht emittiert

astrophysikalische $\nu$ -Quellen	Energien
Urknall (thermisch, $T_\nu = 1.9$ K)	einige $\mu\text{eV}$
Sonne (Kernfusion, pp, ${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$ )	< 15 MeV
Supernova (thermisch, Protoneutronstern)	< 50 MeV
Atmosphäre (kosmische Strahlung)	< $10^4$ GeV
galaktische Beschleuniger ( $\mu$ -Quasare)	< $10^5$ GeV
extragalaktische Beschleuniger (AGN,...)	> $10^5$ GeV



Flavourzusammensetzung:

- an der Quelle  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$
- nach Propagation ( $\nu$ -Oszillation)  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$



Terrestrische $\nu$ -Quellen	$\nu$ -Energien
Geoneutrinos ( ${}^{238}\text{U}$ , ${}^{232}\text{Th}$ Zerfälle in Mantel, Kruste)	2 – 4 MeV
Kernreaktoren ( $\beta$ -Zerfall von Spaltprodukten)	1 – 5 MeV
Spallationsquellen ( $\pi^+$ - $\mu^+$ Zerfallskette in Ruhe)	bis 50 MeV
Beschleuniger ( $\pi^+$ -Zerfall im Fluge)	bis 200 GeV

Abschirmung von atmosphärischen Myonen durch Beschränkung der Beobachtungsrichtung nach unten (In Richtung Erdinneres)  $\rightarrow \cos\theta < 0$

Bei IceCube: Vetodetektor an Oberfläche, um atmosphärische Myonen zu finden.

Neutrinos können Erde ab gewisser Energie nicht mehr durchlaufen:

**■ Neutrinos und Erd-Opazität:**

- tiefinelastische Streuung  $\sigma_\nu \sim E_\nu$  ( $E_\nu = 100 \text{ TeV} \Leftrightarrow \sigma_\nu = 10^{-7} \text{ mbarn}$ )
- ab 100 TeV beginnt die Erde opaque für  $\nu$ 's zu werden



Atmosphärische Neutrinos  $E < \text{PeV}$ . Gesucht: Ereignisse mit  $E > \text{PeV} \rightarrow$  kosmische Neutrinos

Nachweis von UHE Neutrinos:

- Erzeugen in Eis/Wasser hochenergetische Myonen (CC Reaktion)
- Myonen haben große Reichweite in Wasser ( $1\text{PeV} - 1.7\text{km}$ ,  $10\text{PeV} - 7\text{km}$ )
- Myonen emittieren Cherenkovlicht ( $\Theta = 43^\circ$ )
- Spurrekonstruktion durch PMTs

Eis oder Wasser?

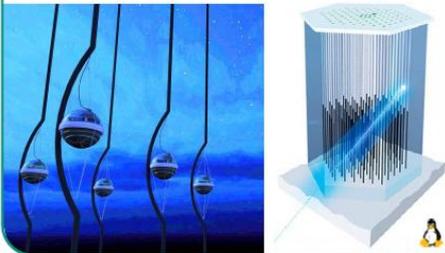
Parameter	Eis	Wasser
opt. Transparenz	Staub	variabel
Biolumineszenz	keine	ja
PMT Rauschrate	niedrig	kHz
Winkelauflösung	$0.5^\circ - 1^\circ$	$< 0.3^\circ$

Paper IceCube lesen: Welche

Energien können noch nachgewiesen werden?

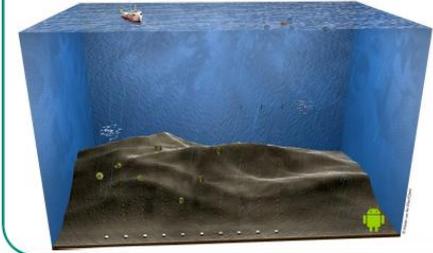
**Teleskop im antarktischen Eis**

- gute optische Transparenz ☺
- Streuung an Staubteilchen ☹
- PMTs niedrige Rauschrate ☺
- aufwändige Infrastruktur ☹
- Oberflächenveto ☺



**Tiefsee-Teleskop im Mittelmeer**

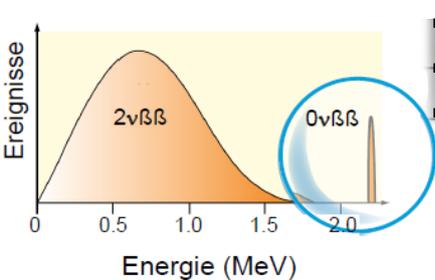
- optische Transparenz ☺
- Bewegung der PMT-Strings ☹
- PMTs hohe Untergrundrate ☹
- aufwändige Infrastruktur ☹
- Ozeanographische Studien ☺



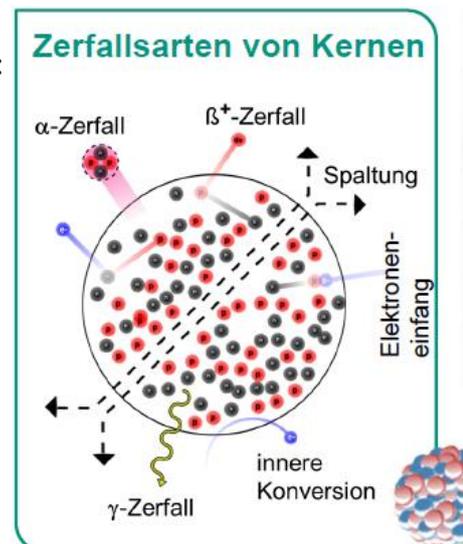
### Seltene Ereignisse

- Seltene Ereignisse: 1 Ereignis pro Jahr für eine Detektormasse von 10-100kg
- Untergrundrate sollte niedriger als Signal sein: schwierig!!!
- Beispiele für seltene Ereignisse: neutrinoloser doppelter Beta-Zerfall, WIMP-suche, DM-Suche,
- Untergrundquellen (stochastisch, dh Poisson-/Gaußverteilung):

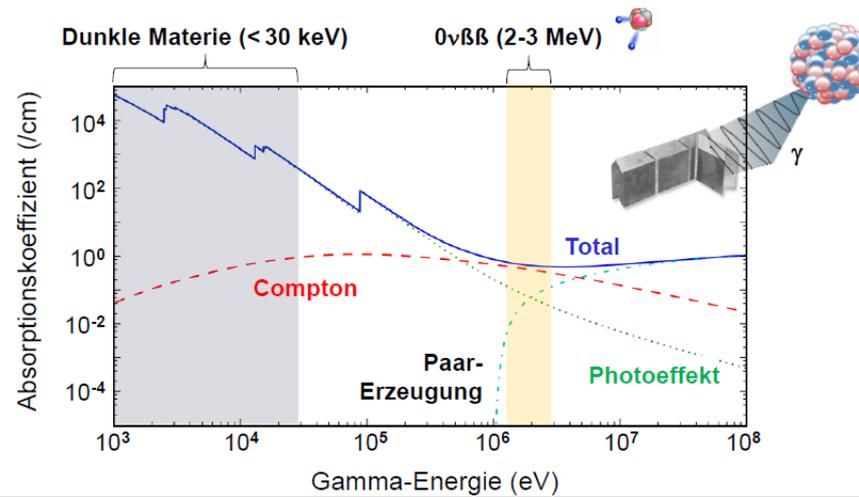
- Neutrinoloser doppelter Beta-Zerfall
  - Gamma-Photolinien
  - Compton-Kontinuum
- WIMP-Streuereignisse



- Röntgen-Photonen
- Compton-Elektronen
- Neutronen



- Beim Untergrund unterscheidet man zw kosmischer Strahlung und natürlicher Radioaktivität ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Zerfall, innere Konversion, Elektroneneinfang, Spaltung).
- $\alpha$ -Strahlung ( $\mu\text{m}$ ),  $\beta$ -Strahlung (mm),  $\gamma$ -Strahlung (cm, exp Abschwächung)
- Größenordnungen: natürlicher Raumuntergrund –  $10^7$  Ereignisse/kg/Tag, kosmischer Untergrund –  $10^4$  Ereignisse/kg/Tag **Ziel:  $10^{-2}$  bis  $10^{-4}$**
- Gamma-Zerfall für DM-Suche und neutrinolosem doppeltem Betazerfall unterschiedlich





mit der Relation  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

die Aktivität einer Quelle nimmt exponentiell ab

1 Bequerel = 1 Zerfall/s		1 Curie = $3.7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle/s	
1 Bq = $2.70 \cdot 10^{-11}$ Ci (nach Henri Becquerel)		1 Ci = Aktivität 1 g Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) (nach Pierre Curie)	

- Strahlung Mensch:  $10^4$  Bq (hpts durch K40 und C14)

- Maßnahmen zur Untergrundreduktion:

- o Reinraumbedingungen
- o Extrem reine Materialien
- o Detektor trennen von Elektronik, Kühlung, ...
- o Untergrundlabore
- o Passive Abschirmungen
- o Aktive Vetoähler
- o Eigenabschirmung (des Detektors, manchmal nur 20% des Detektors für Messung benutzt)

- Berechnung der Streueignisse

■ Rate  $W_r$  an Steuereignissen / s ~ totalem Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{\text{tot}}$

$$W_r = J \cdot N_{\text{Target}} \cdot \sigma_{\text{tot}} = I \cdot n_{\text{Target}} \cdot \ell \cdot \sigma_{\text{tot}}$$

Rate:  
[ s<sup>-1</sup> ]

↓

Strahl:  
Flussdichte  
(Stromdichte)  
[ cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ]

↓

Target:  
Kerne  
im Strahl  
[ # ]

↓

totaler Wirkungs-  
Querschnitt:  
[ cm<sup>2</sup> ]



Strahl:  
Intensität  
[ s<sup>-1</sup> ]

↓

Target:  
Kerne pro cm<sup>3</sup> [ cm ]  
[ cm<sup>-3</sup> ]

↓

totaler Wirkungs-  
Querschnitt:  
[ cm<sup>2</sup> ]

- Astrophysikalische WQs: 1 barn = 1 b =  $10^{(-24)}$  cm<sup>2</sup> und 1 pb =  $10^{(-36)}$  cm<sup>2</sup>

### Abschirmmethoden

natürliche Radioaktivität im Gestein erzeugt: **α-Teilchen** (3-7 MeV), **β-Elektronen** (0.02 – 2 MeV), **Gammas** (< 3.6 MeV) und **Neutronen** (MeV)  
 → α,β – Strahlung leicht abzuschirmen → **Problem γ-Strahlung**

(Bsp. Großraumlabor  $\sim 10^{11}$   $\gamma$  pro Jahr  $\sim 1300$  pro Sekunde, vor allem Thorium232 Th)  
 → Bleiabschirmung ( $d \sim 0,5\text{m}$ ) = 20  $X_0$ ; aber  $^{210}\text{Pb}$  aus  $^{238}\text{U}$ -Zerfallskette → Untergrund  
 → Römisches Blei aus dem Meer in dem  $^{210}\text{Pb}$  bereits zerfallen ist  
 → Innere Abschirmung aus hochreinem Kupfer aus Elektrolyse

**Myoninduzierte Myonen im Gestein/Abschirmung**

→ Polyethylen (viel H) bremst Neutronen effizient ab ( $m_n \sim m_p$ )

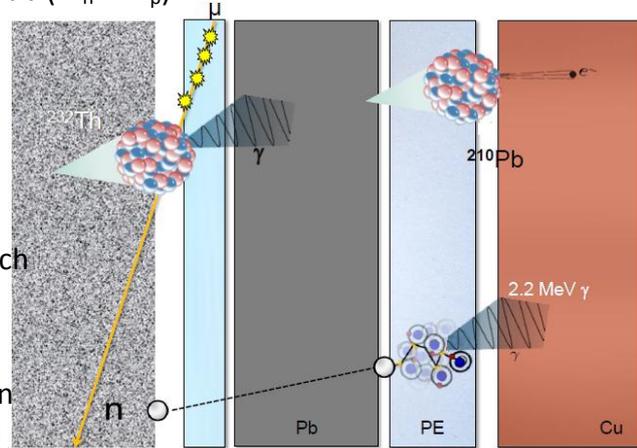
**Vetozähler**

→ Szintillator- oder Wasser-Cherenkov Detektor mit 4Pi Geometrie als aktives Myonveto!

(+ Diskriminierung von Untergründereignissen durch Datenanalyse siehe direkte DM-Suche)

Absolutes Limit für alle Experimente bei Erreichen des NeutrinoWQ, da diese nicht abschirmbar sind!

(erst ab  $\sim 10\text{t}$  Detektormasse!) (Pb-Abschirmung müsste 100pc haben)



**Zerfallsketten**

$^{232}\text{Th}$

Radioaktive Elemente aus in Kernkollaps-SN-Explosion

$^{235}\text{U}$

→ Anreicherung in der Erdkruste → Zerfallsketten mit Sekulärem GG!

$^{237}\text{Np}$

**Radon-Emanation** aus dem Boden trägt zu

$\sim 50\%$  zur natürlichen Strahlenexposition bei

**Radon-Emanation** aus 1  $\text{m}^2$  Boden

$^{238}\text{U}$

$\sim 7400$   $^{222}\text{Rn}$ -Atome/s = 0.5 pCi Rn-222/s

Radon →  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung!

→ Ventilation in Untergrundlaboren nötig, aber auch Radon aus Detektormaterial!

→ Radonbarriere aus Nylon oder passive Kryofalle

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

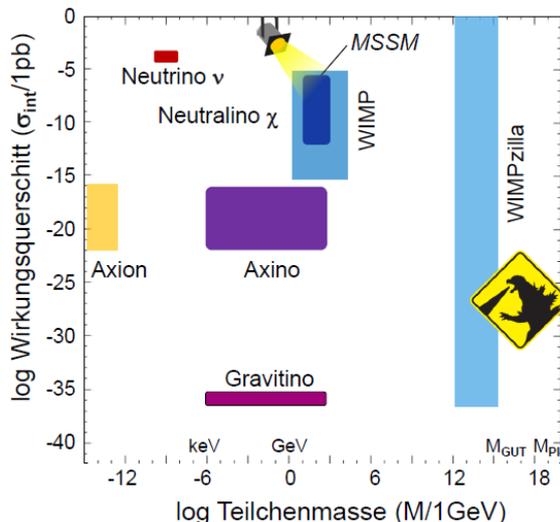
$$A_1 = A_2 = A_3 \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3$$

⋮ ⋮

**Dunkles Universum**

**Dunkle Materie: WIMPS** (weakly interacting massive particles)



■ **WIMP-Phasen:**

- 1 – Erzeugung & Vernichtung im thermodynam. Gleichgewicht
- 2 – Entkopplung („Ausfrieren“)
- 3 – WIMP Propagation (nicht-relativistische Geschwindigkeit)

■ **WIMP-Dichten:**

- im heutigen Universum (im Mittel)

$$\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.27 \Leftrightarrow \rho_{\text{WIMP}} \sim 1 \text{ GeV}/\text{m}^3$$

$$\rho_{\text{DM, lokal}} \sim 0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$$



Q |Boson> = |Fermion>  
 Q |Fermion> = |Boson>

**SUSY**

Massenunterschiede zwischen SM- und SUSY-Teilchen!

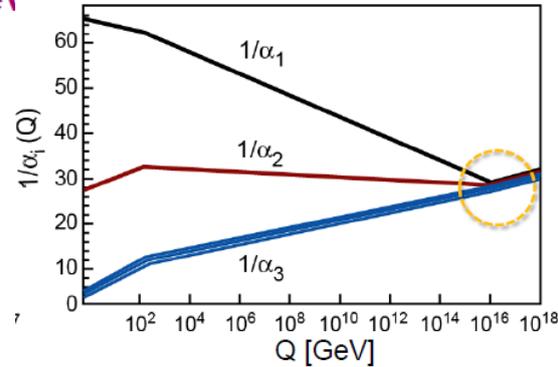
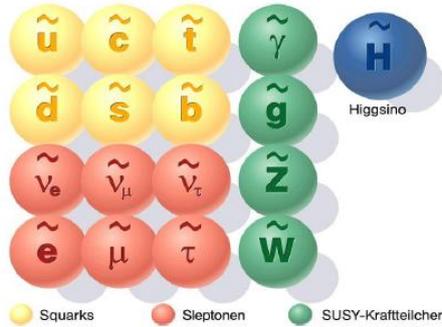
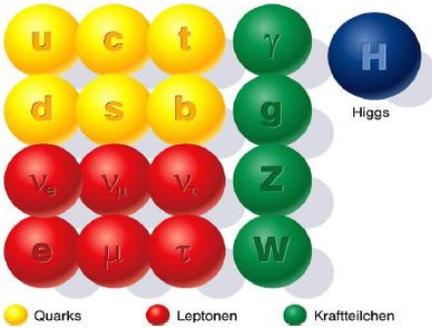
→ Hierarchieproblem

SM-Teilchenmassen  $\ll$  SUSY-Teilchenmassen (0.1-10 TeV)

→ 105 neue Parameter

■ **Minimales supersymmetrisches Standardmodell (MSSM):**

Eichkopplungen werden vereinigt bei  $M_{GUT} \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$



**cMSSM (constrained MSSM)**

Reduktion auf **5 physikalische Parameter**

↪ vereinheitlichte Teilchen-Massen bei GUT-Skala

$m_{1/2}$  = Masse aller Spin  $1/2$  SUSY-Teilchen

$m_0$  = Masse aller skalaren SUSY-Teilchen

SM-Teilchen:  $R_p = +1$  (gerade)  $\Leftrightarrow$  Superpartner:  $R_p = -1$  (ungerade)

↪ **Superpartner können nur in Superpartner zerfallen**

**2 Higgs-Multiplette:  $Y = +1/2, -1/2$**

$$H_u = (H_u^+, H_u^0, \tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0) \text{ für } Q = +2/3 e$$

$$H_d = (H_d^-, H_d^0, \tilde{H}_d^-, \tilde{H}_d^0) \text{ für } Q = -1/3 e, \ell^\pm$$

leichtestes SUSY Teilchen mit  $R_p = -1$  ist stabil:

**LSP (Lightest Supersymmetric Particle)**

↪ **stabiles LSP ist WIMP-Kandidat für CDM**

$$R_p = (-1)^{3B+L+2S}$$

**SUGRA Supergravitation:** unter Einbeziehung der Gravitation wird SUSY von einer globalen in eine **lokale Eichsymmetrie** erhoben  
 (Keine instantane WW)

**Eigenschaften des LSP:**

- keine elektromagnetische/starke Wechselwirkung
- neutral, da keine gebundenen Zustände mit Baryonen

**Gravitino  $\tilde{G}$**  ( $s = 3/2$ ) mit Masse  $m_{3/2}$   
 Superpartner von Graviton  $G$  ( $s = 2$ )

- **Sneutrinos** ( $s = 0$ , Skalare:  $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ )

- identische Wechselwirkungsstärke relativ zu  $\nu$ 's
- Sneutrinos mit  $M(\tilde{\nu}) > 100 \text{ GeV}$  sind nicht die dominante CDM-Komponente, da dann ihre Dichte im Universum durch rasche Anihilationsprozesse vor dem Ausfrieren zu gering ist
- **Massengrenze**  $M(\tilde{\nu}) > 0.5 - 1 \text{ TeV}$  (2011)

- **Gravitinos** ( $s = 3/2$ , Fermionen:  $\tilde{G}$ )

- **Gauginos** / neutrale Eichbosonen ( $s = 1/2$ , Fermionen)

Photino  $\tilde{\gamma}$ , Zino  $\tilde{Z}^0$  & 2 neutrale Higgsinos  $\tilde{H}^0$

■ **elektroschwache Gauginos (4) und Higgsinos (4) mischen zu:**

- **4 Neutralinos** (4 Massen-Eigenzustände)
- **4 Charginos** (2 Masseneigenzustände mit je 2 Ladungszuständen)



### Flavour-Eigenzustände

**Gauginos & Higgsinos** = Flavour-Eigenzustände  
 existieren nur zum Zeitpunkt ihrer Wechselwirkung  
 diese Zustände haben keine definierte Masse!



### Massen-Eigenzustände

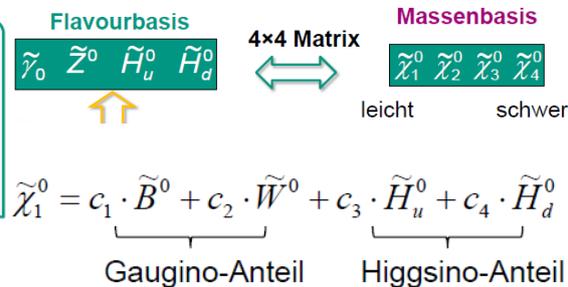
**Neutralinos & Charginos** = Massen-Eigenzustände  
 WIMPs während ihrer Propagation (Universum)  
 die Flavour-Anteile definieren die Wechselwirkungsstärke (z.B. bei Annihilation, Streuung)!

### Neutralinos:

die 2 neutralen supersymmetr. Eichbosonen (Gauginos) Bino  $\tilde{B}^0$  & Wino  $\tilde{W}^0$  (bzw. Photino  $\tilde{\gamma}$  & Zino  $\tilde{Z}^0$ ) & die 2 neutralen Higgsinos  $\tilde{H}^0$  haben identische Quantenzahlen & mischen zu den **4 Neutralinos**  $\chi^0$

### Charginos:

die 2 geladenen SUSY-Gauginos, d.h. die Wino-Eichbosonen  $\tilde{W}^+ \tilde{W}^-$  & die 2 geladenen Higgsinos  $\tilde{H}^+, \tilde{H}^-$  weisen identische Quantenzahlen auf:  
 Mischung zu 2 Fermion-Massenzuständen, den **Charginos**  $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$



### thermische Erzeugung:

LH Neutrinos  $\nu_i$  (HDM), LH Sneutrinos  $\tilde{\nu}_i$  Neutralinos  $\chi^0$  (CDM)

### nicht-thermische Erzeugung:

- Teilchen sind im heißen frühen Universum **nicht** im thermischen Gleichgewicht, ihre Wechselwirkungsprozesse sind zu schwach
- Häufigkeit  $\Omega_i$  daher festgelegt durch Zerfallsraten der Mutterteilchen, Oszillationsraten
- Beispiel: RH Neutrinos  $\nu_i$  (WDM), RH Sneutrinos  $\tilde{\nu}_i$  Axionen  $a$  (CDM)

**leichtestes supersymmetrisches Neutralino  $\chi_1^0$  ist als LSP ein idealer WIMP-Kandidat für CDM** (aber Massen  $m_{1/2} < 1.5$  TeV erforderlich!)



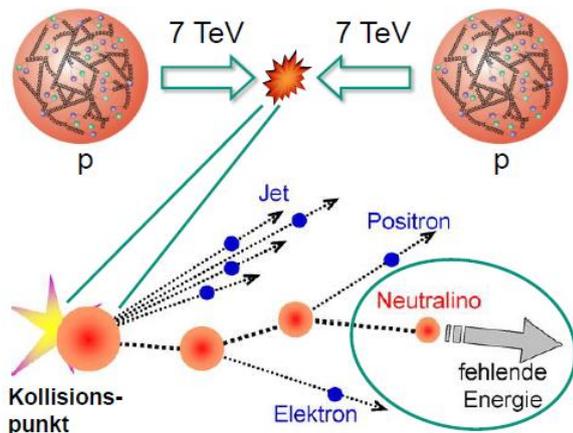
**Eigenschaften:** neutral, nur schwach wechselwirkend, Fermion mit  $s = 1/2$  kosmologisch stabil (da  $R_p$ -Erhaltung), Majorana-artig: Neutralino ist sein eigenes Antiteilchen schwer (TeV-Skala), daher nicht-relativistisch bei  $T_{fr}$

(ab  $m_{1/2} > 1.5$  TeV wird Chargino  $\chi^\pm$  zum LSP!)

### Nachweis

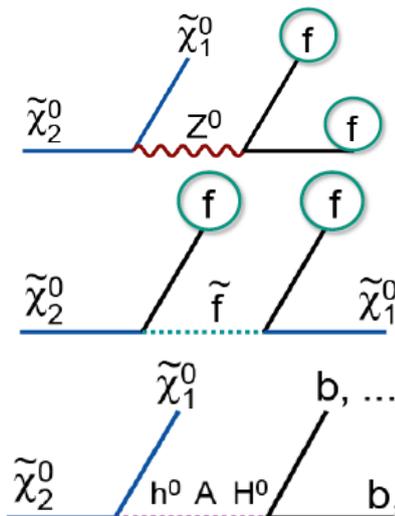
### LHC

- p-p Kollisionen bei  $\sqrt{s} = 14$  TeV Schwerpunktsenergie
- Datennahme seit Frühjahr 2010 bei  $E_p = 3.5$  (4.0) TeV
- SM-Higgs-Boson mit Masse  $M_H \sim 125$  GeV
- Suche nach Signaturen von SUSY: **Neutralinos  $\chi^0$**



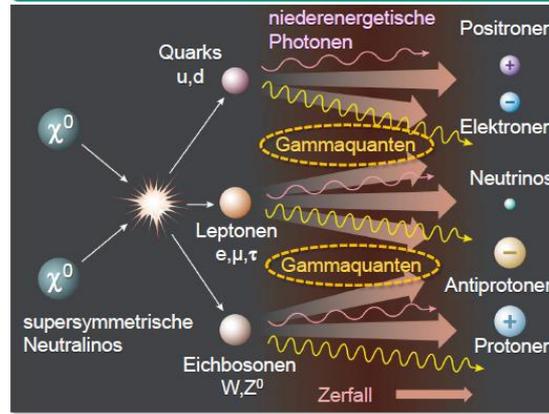
### Neutralino-Signatur am LHC:

- fehlende Energie
- fehlender Transversalimpuls
- geladene Leptonen aus Neutralino-Zerfällen



■ **indirekter CDM-Nachweis** durch Beobachtung sekundärer Teilchen aus **WIMP-Annihilationsprozessen** in der lokalen Gruppe (Galaxis)  
 - Gammas ( $\gamma$ ), Neutrinos ( $\nu$ ), Antiprotonen ( $\bar{p}$ ) & Positronen ( $e^+$ )

## Indirekter Nachweis



- Elektronen/Positronen:**
  - hadronischer Zerfall
  - Paarbildung
  - direkte Erzeugung
- Neutrinos:**
  - hadron./lepton. Zerfall
- Gammas:**
  - hadronischer Zerfall
  - Bremsstrahlung
- Protonen/Antiprotonen:**
  - Hadronisierung & Jets
  - Eichboson-Zerfälle

■ **Nachweis der WIMP-Annihilation** erfordert präzise Modellierung von

- a)  $\chi^0$ -Signal: Teilchenphysik (**Zerfallsmoden**) & Astrophysik (**Halomodell**)
- b) astrophysikalischem Untergrund (**Quellen, Untergrundmechanismus**)
- c) Propagation (p &  $e^+$ : **B-Felder**) und d) Nachweis-Effizienz (**GeV-TeV Skala**)

→ Problem: Unsicherheit bei – WIMPs – Halo – Untergrundquellen – Propagation

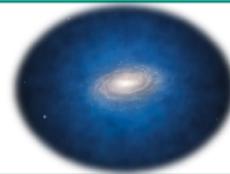
## Annihilation

Neutralino Annihilation: Stark modellabhängig → q, l,  $\gamma$ , W, Z, H, h,  $\nu$  ...

■ WIMP-Annihilationsrate in DM-Halos:  $\Gamma_{Ann} \sim \rho_{CDM}^2$

Suche in **Bereichen mit DM-Überdichten**

- galaktisches Zentrum
- sub-Halo-Zentren: Zwerggalaxien, ...



$$N_{Ann} \sim \langle \sigma_{Ann} \cdot v \rangle \cdot n_{CDM}^2$$

$$\sim \langle \sigma_{Ann} \cdot v \rangle \cdot \frac{\rho_{CDM}^2}{m_{CDM}^2}$$

→ **Dominante Quelle:** Galaktisches Zentrum

**aber:** Viele verschiedene Quellen: SNR, Pulsare...

■ **Fluss  $\Phi_{Ann}$**  von WIMP-Annihilationsprodukten durch **Integration entlang der Sichtlinie:**

$$\Phi_{Ann} \sim \langle \sigma_{Ann} \cdot v \rangle \cdot \frac{1}{m_{CDM}^2} \cdot \int_{Sichtlinie} \rho_{CDM}^2 \cdot ds$$

■ man erwartet sehr **kleine Teilchenflüsse** aus WIMP Annihilation:

$$\Phi_{Ann}(\Delta\Omega) \approx 5.6 \times 10^{-12} \cdot \frac{\langle \sigma_{Ann} \cdot v \rangle}{1 pb} \cdot \left( \frac{1 TeV}{m_{CDM}} \right)^2 \Delta\Omega \quad cm^{-2} s^{-1} \quad \Delta\Omega: \text{Raumwinkel}$$

## Nachweis über Gammas

■ **Neutralino-Annihilation**  $\tilde{\chi}^0 \tilde{\chi}^0 \rightarrow q\bar{q}$ : im Rahmen der Quark-Fragmentierung entstehen **~30-40 Gammas** (GeV-Energien)  
**Gammapektrum ist abhängig vom Annihilationskanal** (→ bb, ZZ)

-  $\chi^0$ -Zerfälle in leichte Quarks u,d,...  
 (und masselose  $\gamma$ 's) sind generell  
 (helizitäts-) unterdrückt

## Gammaquanten:

- zeigen zurück zur Quelle
- kein Energieverlust
- keine Ablenkung im B-Feld
- Energieverteilung bis  $m(\chi)$
- Erdatmosphäre schirmt  $\gamma$ 's ab:

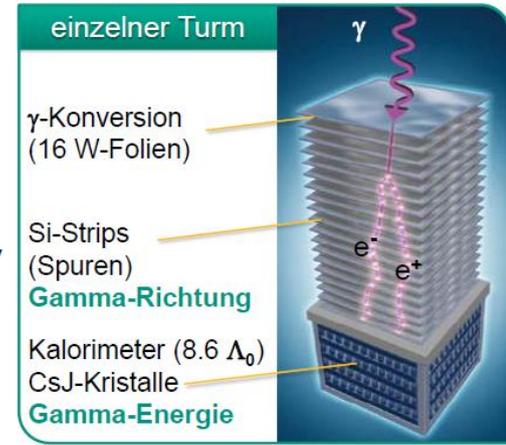
Satelliten (GeV) & Cerenkov-Teleskope (TeV)

■ das **'goldene WIMP Signal'**

↳ monoenergetisches  $\gamma$ -Liniensignal bei  $E_\gamma = M(\chi^0)$   
 aus seltenem Zerfallsprozess  $\chi^0 \chi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

## Fermi -Satellit

Datennahme von 8/2008 – 4/2012: Himmelskarte 2.6 – 541 GeV  
 - keine signifikante  $\gamma$ -Linie in den Gesamtdaten ☹



## HESS Cherenkov Teleskop

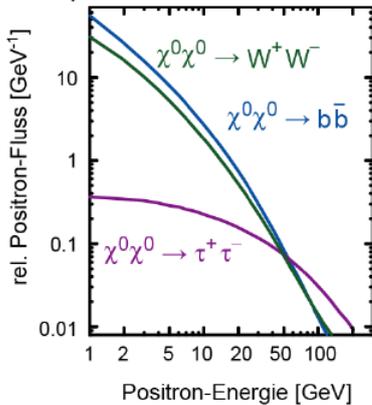
Suche nach monoenergetischer DMA-Linie von 0.5 – 25 TeV im zentralen  $1^\circ$  um galaktisches Zentrum (ohne galaktische Ebene) über  $t = 112$  h

→ Kein Ergebnis

## Nachweis über Positronen\Antiprotonen

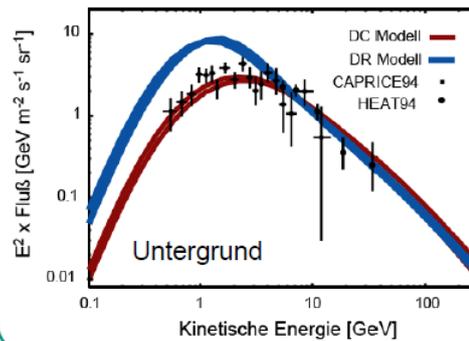
### Positronen: DMA-Signalerwartung

**Signal:** Spektrum abhängig vom spezifischen SUSY-Modell



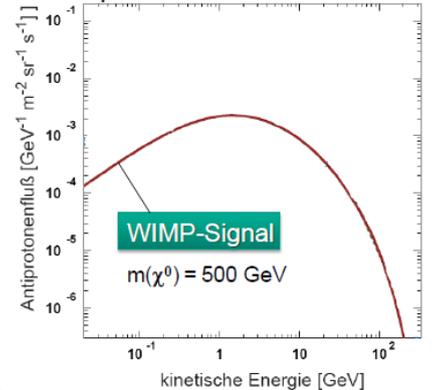
### Positronen: Untergrunderwartung

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



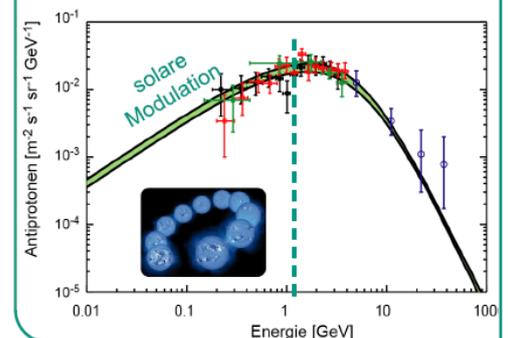
### Antiprotonen: DMA-Signalerwartung

**Signal:** Spektrum abhängig vom spezifischen SUSY-Modell



### Antiprotonen: Untergrunderwartung

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



### Antiprotonen, Positronen:

- Ablenkung im galaktischen B-Feld
- Energieverluste ( $e^+$ : lokale Umgebung)
- wenig Untergrund (Antiprotonen) & klares Signal ( $e/m$ )
- Erdatmosphäre schirmt p und  $e^+$  ab:  
**Satelliten mit B-Feld (GeV)**

## Pamela

### ■ PAMELA Resultate: starker Positronenüberschuss

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

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

- 'konventionelles' Szenarium:

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

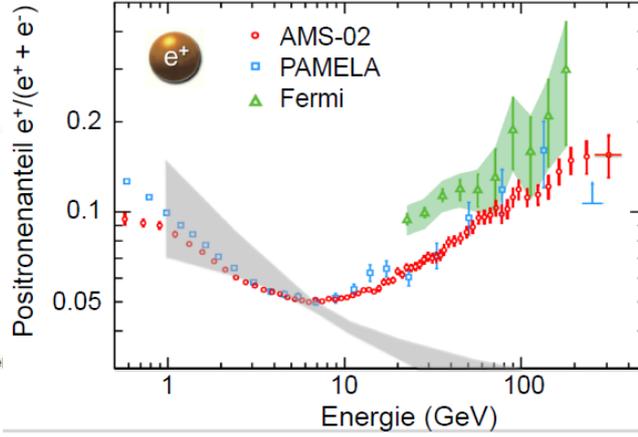
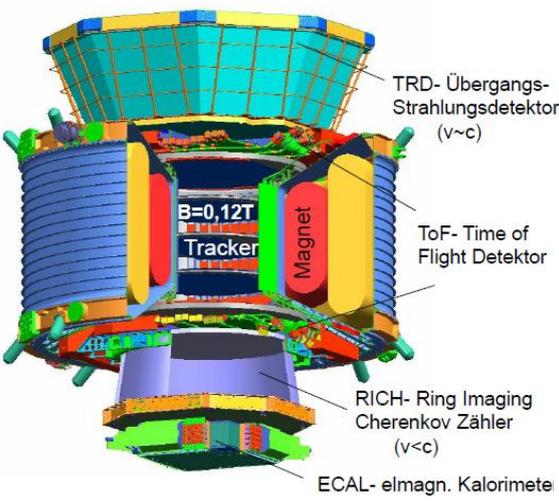
## AMS02

### ■ AMS-02: wesentlich verbesserte Sensitivität bei hohen Energien

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

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

- **WIMP-Signal:**  
 Positron-Überschuss sollte abnehmen nahe bei Neutralino-Masse



- Teilchenimpuls p, sign(Q)**
- Krümmung Teilchenspur  $B = 0,12 T$  im Siliziumstreifen-Tracker
- Teilchenidentifikation PID**
- Lorentz-Faktor  $\gamma$  (TRD)
- Geschwindigkeit  $v$  (ToF, RICH)
- Teilchenenergie E**
- Kalorimetrie (ECAL) elektromagnetisches Kalorimeter
- Teilchenladung |Q|**
- Ionisationsverluste (Tracker, RICH)

**Nachweis über Neutrinos**

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

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

Aufbau eines Gleichgewichts zwischen Einfangrate  $R_C$  und Annihilationsrate  $R_A$

$v_{WIMP} < v_{Entweichen}$

- **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

- **GeV-Neutrinos verlieren beim Verlassen der Sonne Energie!** Wahrscheinlichkeit  $P$ , die Sonne ohne Wechselwirkung zu verlassen

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

■ **Fazit indirekter DM-Nachweis:**

- bisher kein eindeutiger Nachweis
- hoher astrophysikalischer Untergrund
- **Gammas:** Fermi & Cherenkov-Teleskope
- **geladene Teilchen:** AMS-02 & Pamela
- zukünftig: multi-messenger Studien ( $\gamma + \bar{p} + e^+$ )

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

$M(\chi^0) [TeV]$

- zukünftig: bessere Modellierung mit GALPROP
- **Astrophysik:** Kosmische Strahlung (Quellen, Transport, lokale Phänomene) – Modellierung!
- **Teilchenphysik:** SUSY-Parameterbereich für Neutralinos wird durch LHC (stark) eingegrenzt

**Direkter Nachweis**

- 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**
  - $\Omega_{CDM} \sim 0.27$ : WIMPs mit extrem kleiner Streurrate mit Kernen ( $< 10^{-7} pb$ )

- nur **elastische** Kern-Streuung, da kinetische Energie von WIMPs im Halo nur im keV-Bereich
- es gilt:  $E_{kin}(\chi^0) \ll E_{Kernanregung}$  (& 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

**CDM-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  $M(\chi^0)$

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

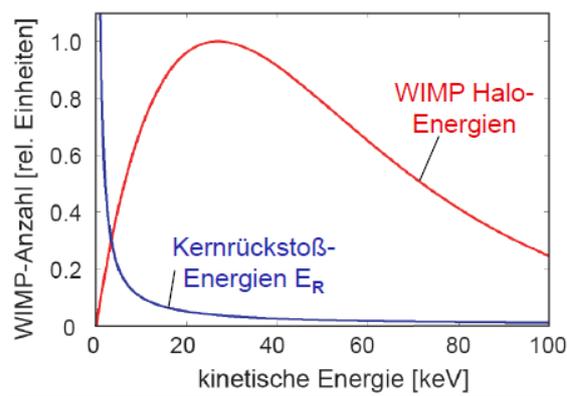
'thermalisierte' WIMPs im Halo (analog zu einem idealen Gas):

### Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeits-Verteilung

$$f(v)dv = \frac{4v^2}{v_0^3 \sqrt{\pi}} \cdot e^{-(v^2/v_0^2)} d^3v \quad v_0 = \sqrt{\frac{2k_B T}{M(\chi^0)}}$$

- WIMPs mit  $v > 500-600$  km/s entweichen aus der Galaxis:  
Abschneide-Parameter für  $f(v)$

↳ maximale Rückstoßenergie  $E_R$  für Target-Kern



### nichtrelativistische Streu-Kinematik

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

für  $180^\circ$   $E_{R,max} = 2 \cdot \frac{\mu}{M_\chi + M_N} \cdot M_\chi v^2$

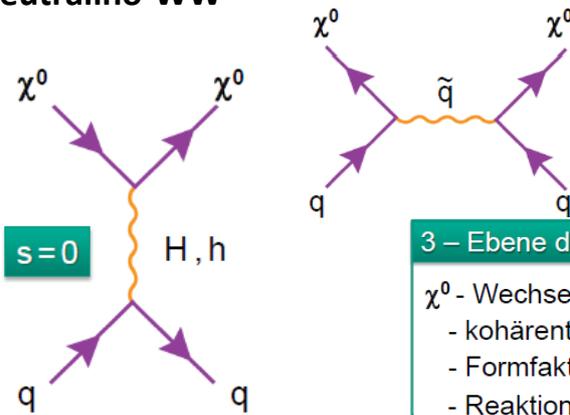
Je schwerer der Kern desto besser (falls  $M_{WIMP} > M_N$ !)

### WIMP-Energien aus DM Halo

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

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

### Neutralino-WW



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- & Seequarks)

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 $\chi^0$ – 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

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

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

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

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

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

### Spinabhängige WW

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

### 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

### 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

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

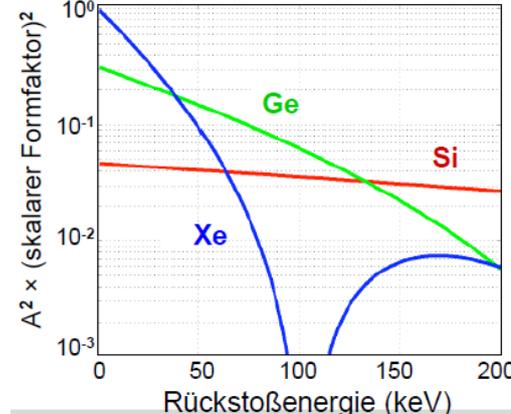
**Mechanismus:**  
- Austausch  $Z^0$ -Boson  
- Annihilationsprozesse

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

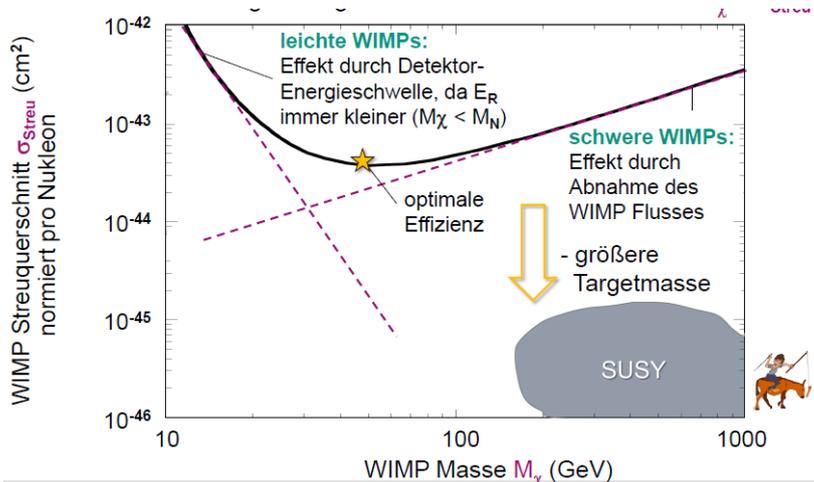
**nur Targets mit J ≠ 0 sind auf spinabhängige WIMP-Streuung sensitiv**

Targetkern-Beispiele für  $\sigma_{SD}$  (sensitiv auf  $a_p$  oder  $a_n$ ):

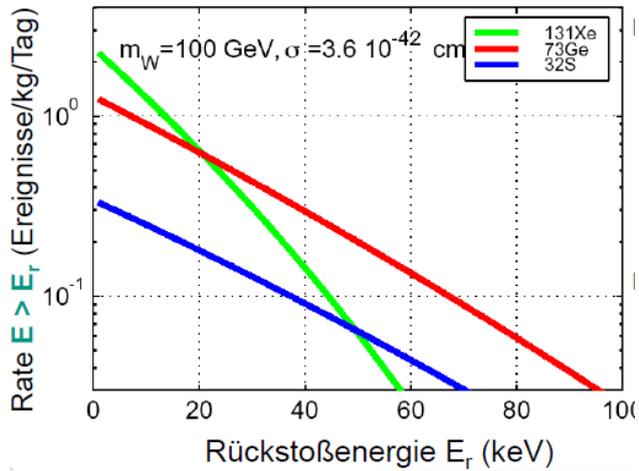
Detektortyp	Isotop	Anteil	Protonen	Neutronen	Kernspin J	Kopplung
NaJ	$^{23}\text{Na}$		11	12	3/2	$a_p$
(Szintillator)	$^{127}\text{I}$		53	74	5/2	$a_p$
LXe	$^{131}\text{Xe}$	21.2 %	54	77	3/2	$a_n$
(TPC/Szintillator)	$^{129}\text{Xe}$	26.4 %	54	75	1/2	$a_n$
Ge (Bolometer)	$^{73}\text{Ge}$	7.8 %	32	41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



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

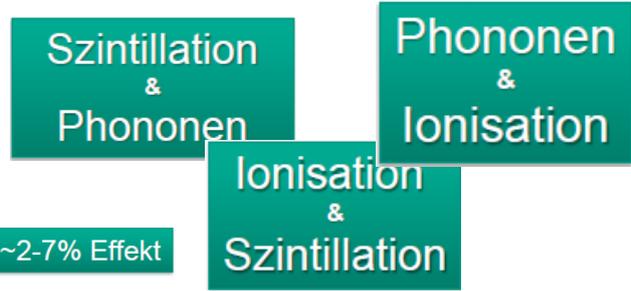


$$\frac{dR}{dE_R} \sim \int \frac{d\sigma}{dE_R} v \cdot f(v) dv$$



**Nachweismethoden**

- Szintillator:** - bekannte Technologie, hohe Reinheit möglich  
 (zB NaI) - hohe Masse lange\stabile Messdauer  
 - schlechte Diskriminierung von Untergrund

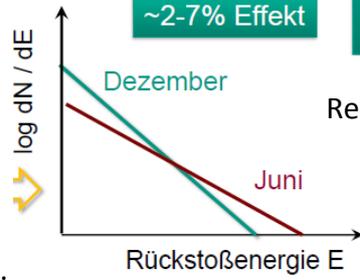


DAMA\LIBRA – Jährliche Modulation – WIMP?

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

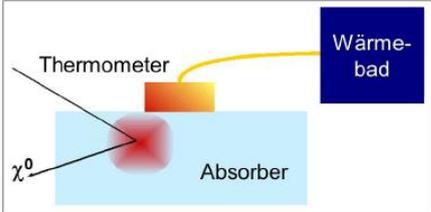
durch andere Experimente ausgeschlossen!

Sonnensystem bewegt sich mit 220km\s +\ - 30 durch WIMP-Wind.



Resultate aber

**Kryogene Bolometer:** - Schwierigkeit mK-Temperaturen → Kleines Detektorvolumen



- Niedrige Schwelle gute Auflösung
- modularer Aufbau → sequentiell erweiterbar aber große 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  $T_0$

$$\Delta T = \frac{E_R}{V \cdot C_V}$$

wichtig: **kleine spezifische Wärmekapazität  $C_V$**  des Absorbers  
 ↳ begrenzt die Masse M eines kryogenen Bolometers ( $\sim 1 \text{ kg}$ )

# 250 g CaWO<sub>4</sub> Kristall: Wärmekapazität

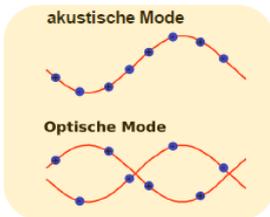
T = 1 K      C = 130 MeV /  $\mu$ K

T = 25 mK      C = 2 keV /  $\mu$ K

■ Beispiel: 100 g Ge-Detektor bei 10 mK,  
E<sub>R</sub> = 1 keV →  $\Delta T = 1 \mu$ K

## ■ Phonon-Signal:

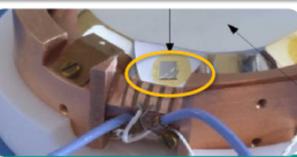
- WIMP-Rückstoßkern wird nach  $d < 1 \mu$ m gestoppt:
- Ausbreitung einer sphärischen Phononenwelle
- Phononen: elementare Gitterschwingungen  
Moden: akustisch / optisch  
Phononen sind **Quasiteilchen**



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

**Thermistor:** misst  $\mu$ K Temperaturanstieg des Absorbers (Phononen aus Absorber koppeln in Thermistor ein), Ziel: **kleines  $\Delta T$  → 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** (Transition **E**dge **S**ensor),  
dünner supraleitender Film (Aufbruch Cooper-Paare)  
Übergang supraleitend-normalleitend,  $T_0 = 10 - 50$  mK  
supraleitend. Phasenübergangs-Thermometer SPT  
**niederohmig**:  $R \sim m\Omega$   
- TES-Auslese erfolgt durch SQUIDs

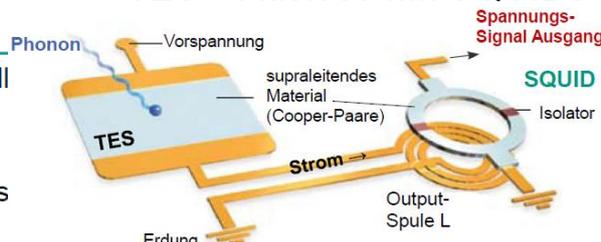
## ■ Bolometerbetrieb im mK Bereich:

Minimierung der spezifischen Wärme  $C_V$   
bei  $T \ll T_C$ : **Debye'sches Gesetz** für  $C_V$

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

$T_\Theta$  = materialspezifische Debye-Temperatur  
(Ge: 374 K, Si: 645 K)

## TES – Auslese mit SQUIDS



## Prinzip:

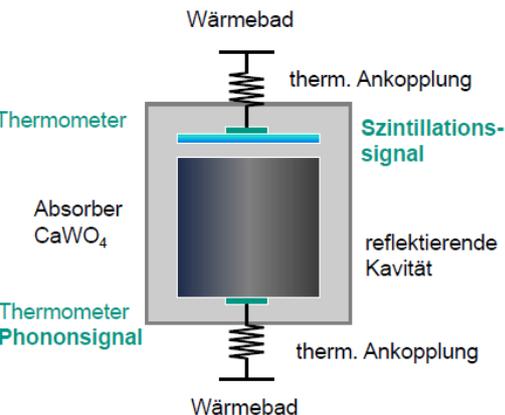
magnetischer Fluss  $F$  durch SQUID-Ring ist gequantelt

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

- Änderung externes Feld
- ↳ Stromänderung im Ring, am SQUID beobachtet man  $\Delta U$  (sinusförmig)

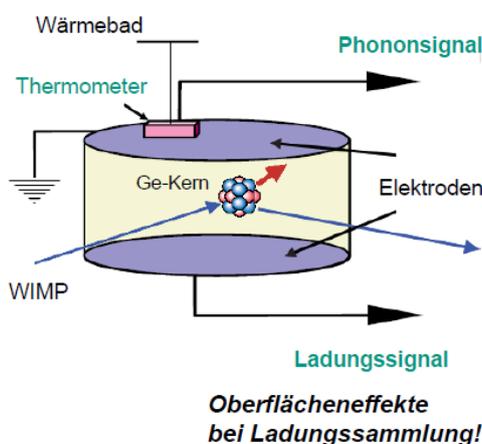
## Szintillation und Phononen: CRESST

~1% der Energie als Licht detektiert



## Ionisation und Phononen: CDMS, EW

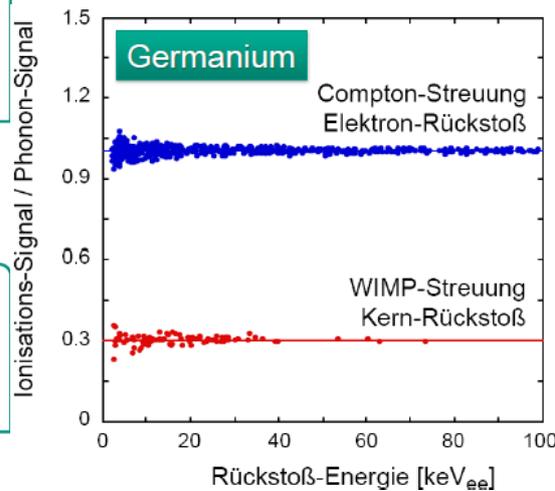
~10-20% der Energie als Ionisation



## WIMP-Streuung Teilchendifferenzierung

## ■ 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**



# 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  $dE/dX$**

„Die Sensitivität eines Dark Matter Experiments skaliert mit seiner **Masse**“

„Die Systematik und Untergrundrate eines Dark Matter Experiments skalieren mit seiner **Oberfläche**“

## ■ Quenching

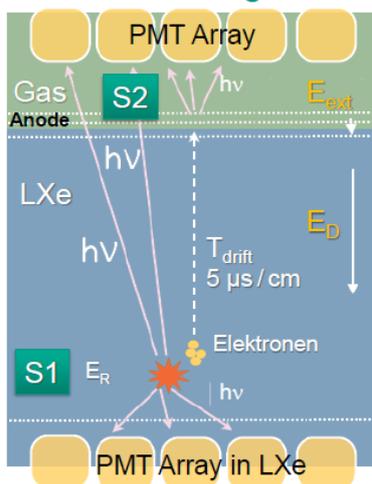
### Ionisationssignal des Kernrückstoßes

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

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

## ■ 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 oberen PMT

### ■ Koinzidenz von S1 und S2:

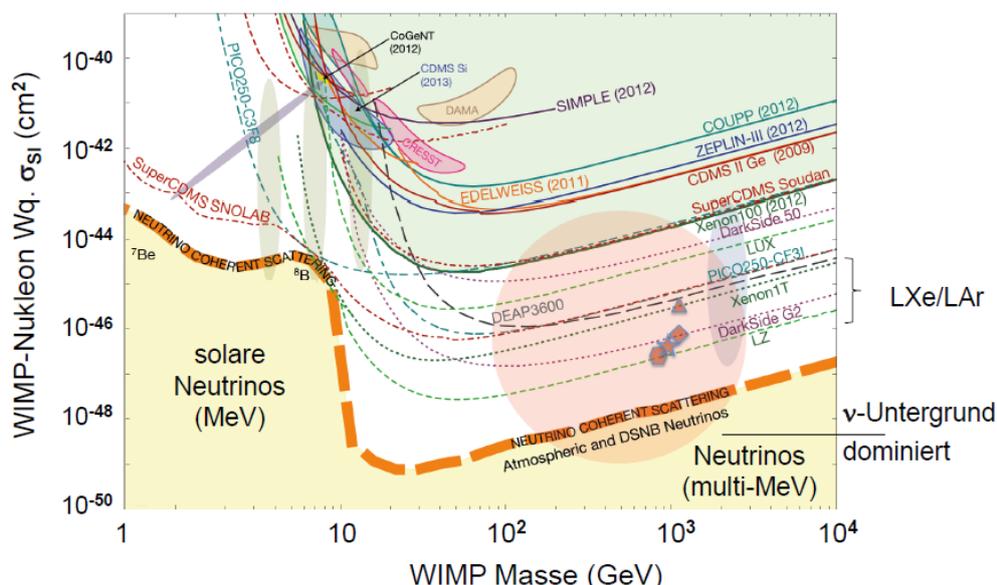
- **S1 + S2: Teilchenart & Ort der Streuung**



**Teilchenidentifikation:** Elektron: S2/S1 ist groß (kein Quenching)  
WIMP: S2/S1 ist klein (weniger Ionisation)

**Kernrückstoßenergie:** Intensität S1 (primäre Anregung)

**Ortsrekonstruktion:** PMTs (x,y), Driftzeit (z)



# Halo

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

- Rückstoßspektrum abhängig von
  - WIMP-Halomodell ( $\rho_{\text{CDM}}, v_0$ ):
  - je größer  $v_0$ , je höher die Rate

