

1. Einführung

- 1.1 Teilchenstrahlung aus dem Universum
- 1.2 Teilchenstrahlung aus dem Labor

2. Experimentelle Methoden

- 2.1 Multi-Messenger-Methoden
 - 2.1.1 Luftschauder-Experimente
 - 2.1.2 Gamma-Teleskope
 - 2.1.3 Neutrino-Teleskope
- 2.2 Suche nach seltenen Ereignissen
 - 2.2.1 Untergrundprozesse
 - 2.2.2 Abschirm-Methoden
 - 2.2.3 Zerfallsketten

3. Dunkles Universum

- 3.1 Einführung
- 3.2 WIMP-Kandidaten
- 3.3 Neutralino-Suche am LHC
- 3.4 indirekte Nachweismethoden
 - 3.4.1 Gammas und Positronen
 - 3.4.2 Neutrinos
- 3.5 direkte Nachweismethoden
 - 3.5.1 Reaktionskinematik
 - 3.5.2 kryogene Bolometer
 - 3.5.3 Flüssig-Edelgas-Detektoren
- 3.6 Axionen
- 3.7 Dunkle Energie – experimentelle Ansätze

4. Neutrinos

- 4.1 Einführung: Historie & Grundlagen, ν -Quellen
- 4.2 ν -Oszillationen: Übersicht
- 4.3 solare & atmosphärische Neutrinos
- 4.4 Beschleuniger- und Reaktor-Neutrinos
- 4.5 Neutrinomassen: β -Zerfallskinetik & Suche nach dem $0\nu\beta\beta$

5. Stellare Evolution

- 5.1 Entstehung & Entwicklung von Sternen
- 5.2 Weiße Zwerge & SNIae
- 5.3 SNIiae: Mechanismus, Neutronensterne & Pulsare
- 5.4 Supernova-Neutrinos

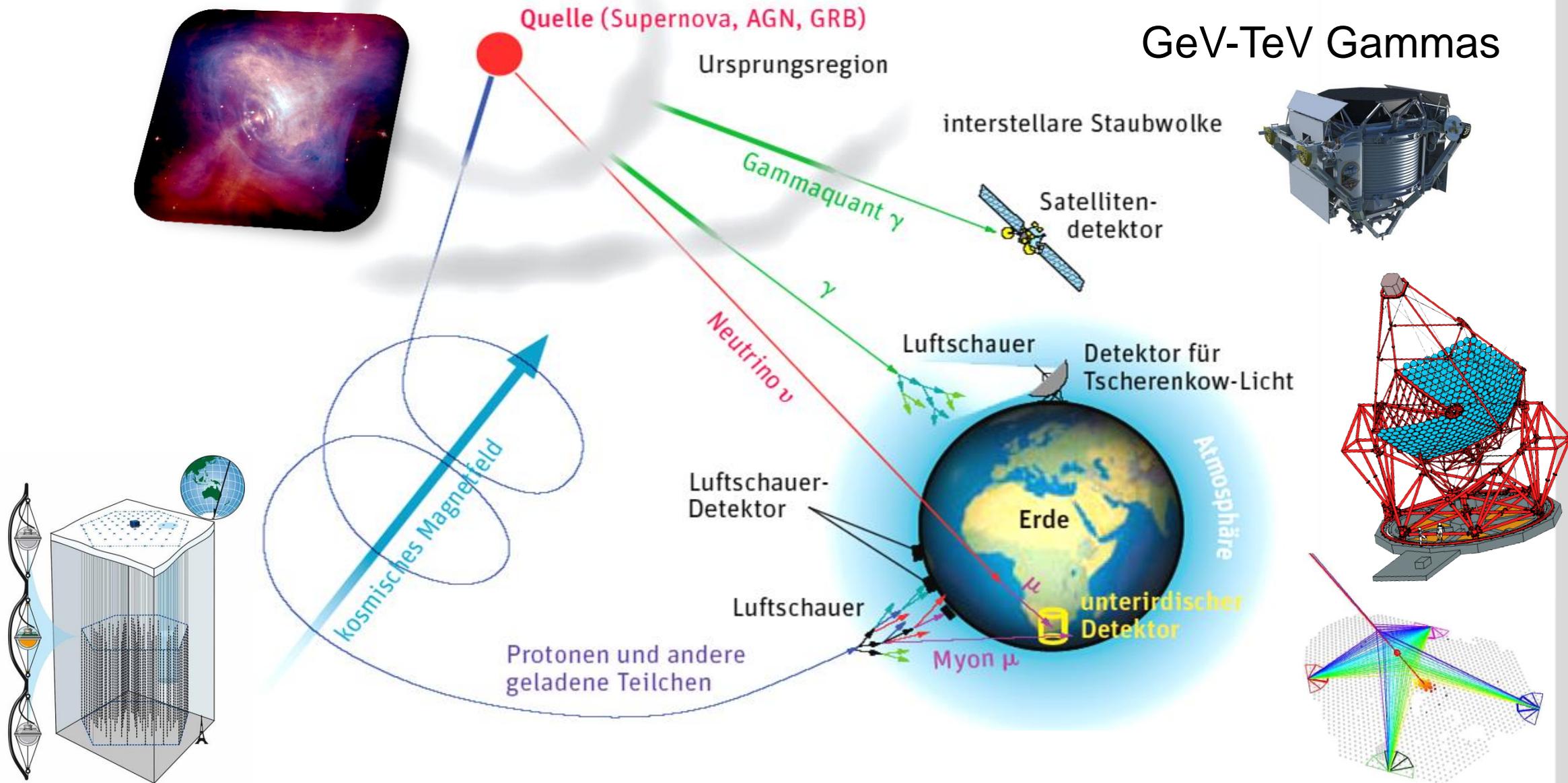
6. Gravitationswellen

- 6.1 astrophysikalische Quellen
- 6.2 Nachweis von Gravitationswellen: Laser-Interferometer

Multimessenger-Methoden



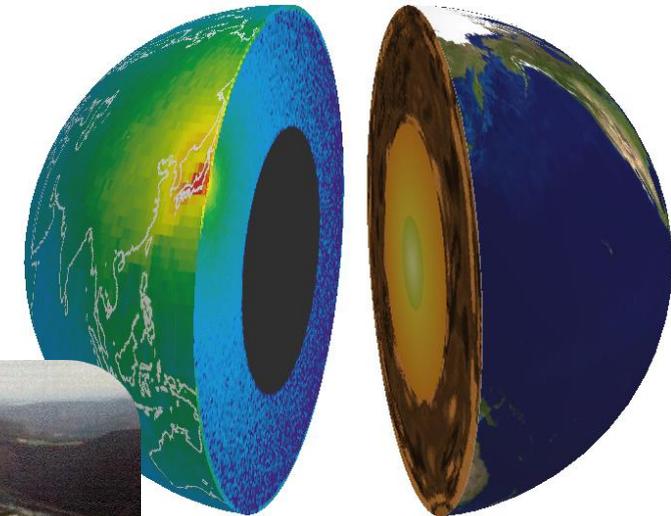
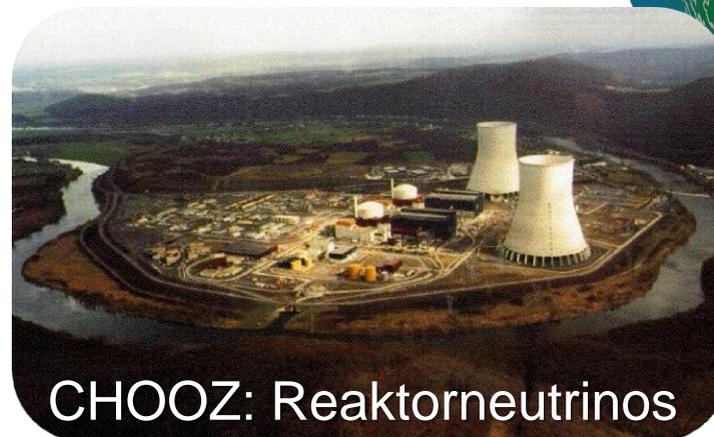
■ Teilchenstrahlung aus dem (nicht-thermischen) Universum



Terrestrische Teilchenstrahlen – Neutrinos

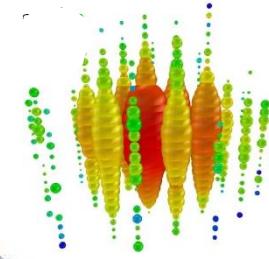
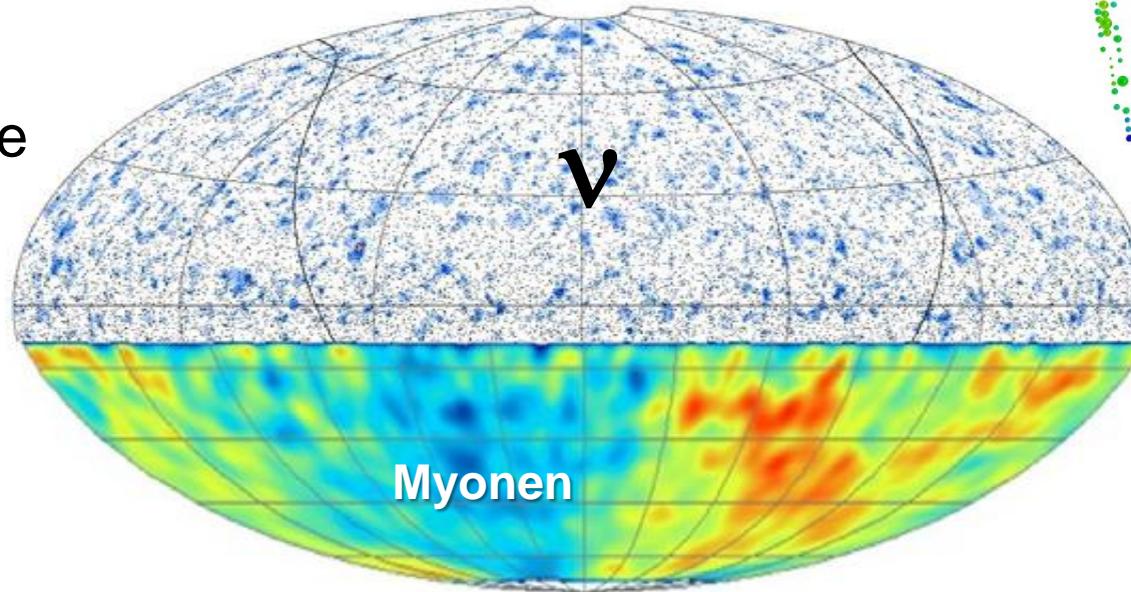


Terrestrische ν -Quellen	ν -Energien
Geoneutrinos (^{238}U , ^{232}Th Zerfälle in Mantel, Kruste)	2 – 4 MeV
Kernreaktoren (β -Zerfall von Spaltprodukten)	1 – 5 MeV
Spallationsquellen (π^+ - μ^+ Zerfallskette in Ruhe)	bis 50 MeV
Beschleuniger (π^+ -Zerfall im Fluge)	bis 200 GeV

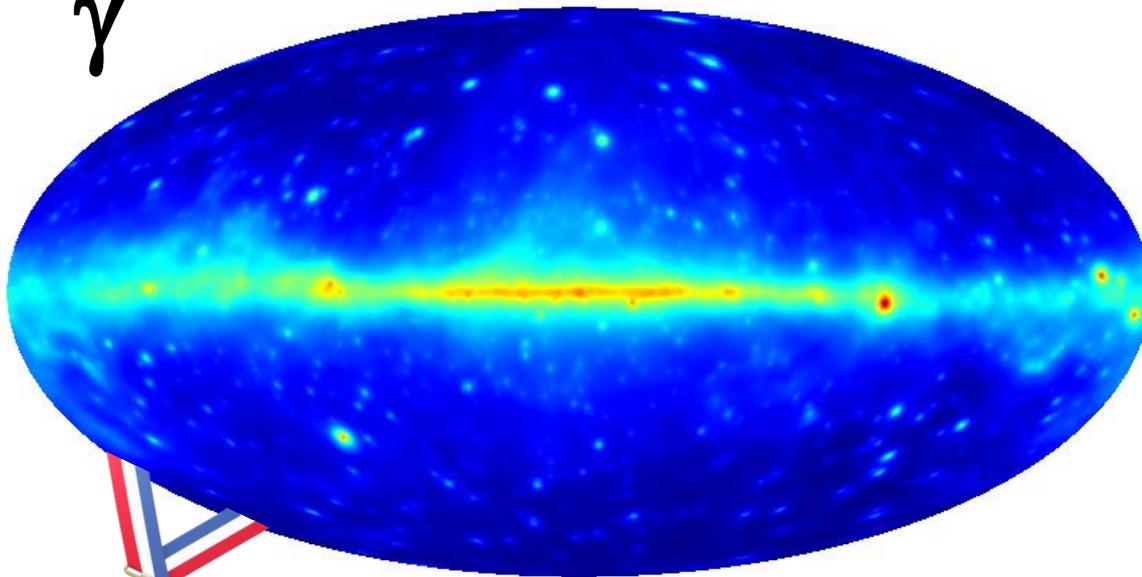


Multimessenger-Methoden

20000
hochenergetische
Neutrinos
(Atmosphäre)

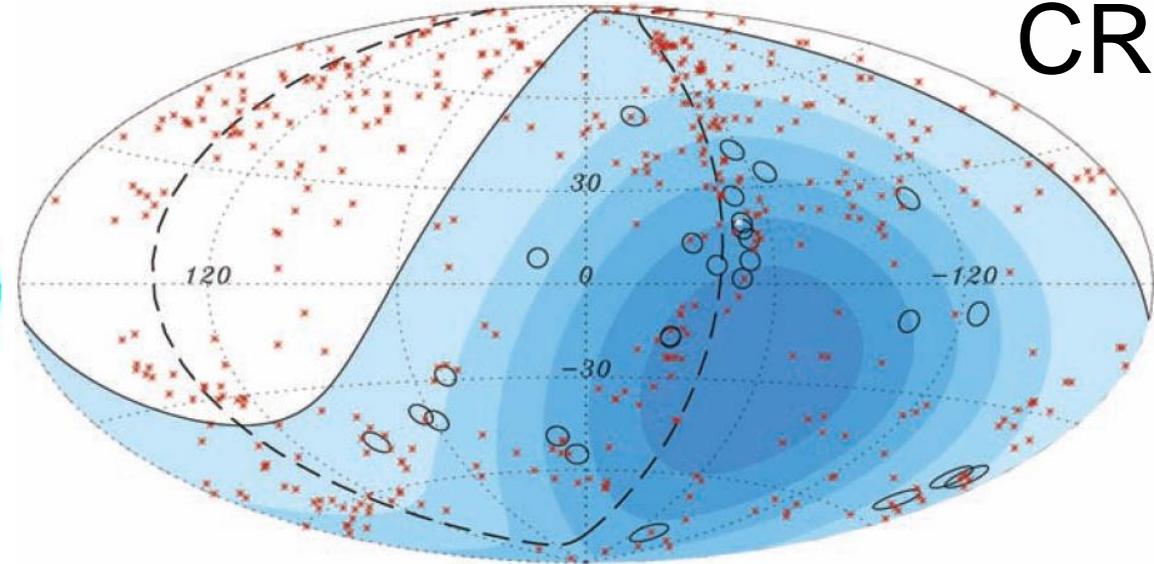


γ



>500 Quellen > 10 GeV

CR



27 UHECRs > 60 EeV

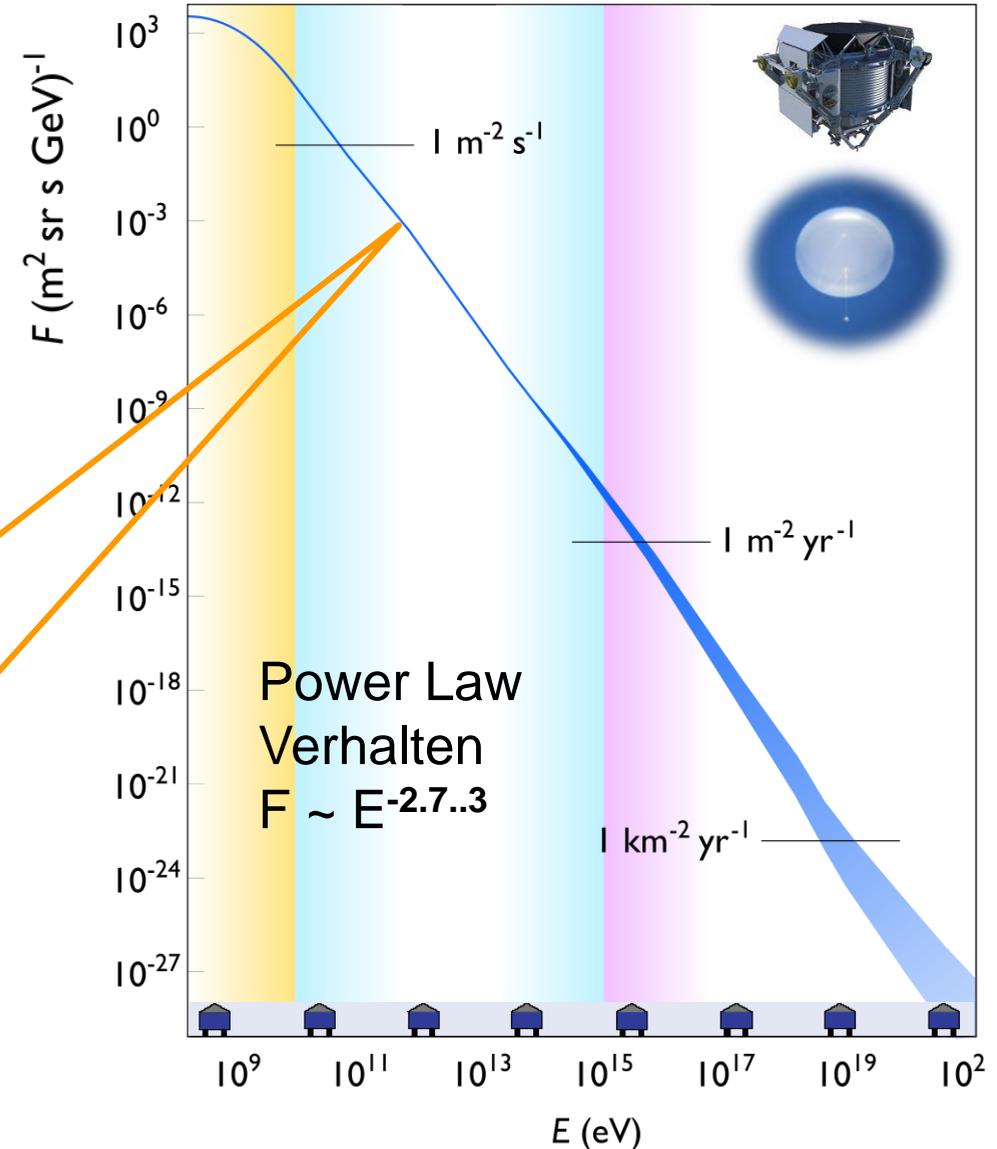
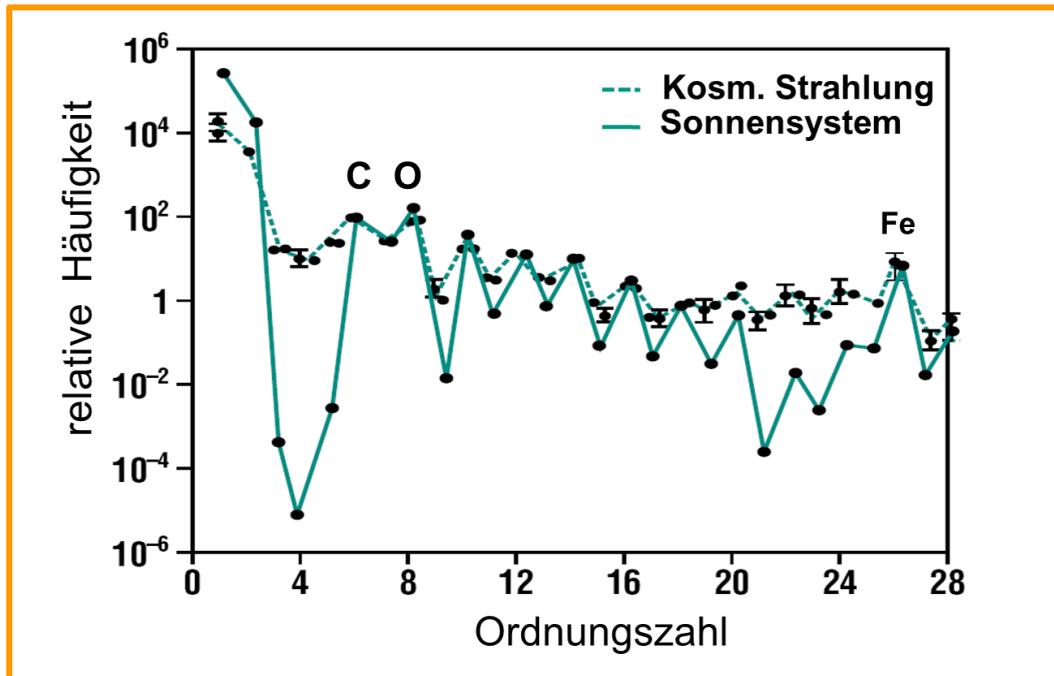
Kosmische Strahlung – Energiespektrum



Pioniere bei der Erforschung

- Viktor Hess – erster Nachweis (1912)
- Pierre Auger – erste Luftschauer (1939)
- John Linsley – Energien bis 10^{20} eV (1961)

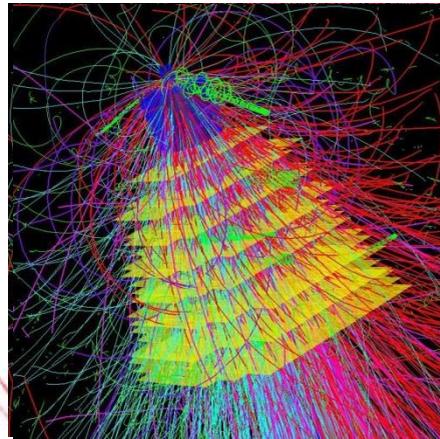
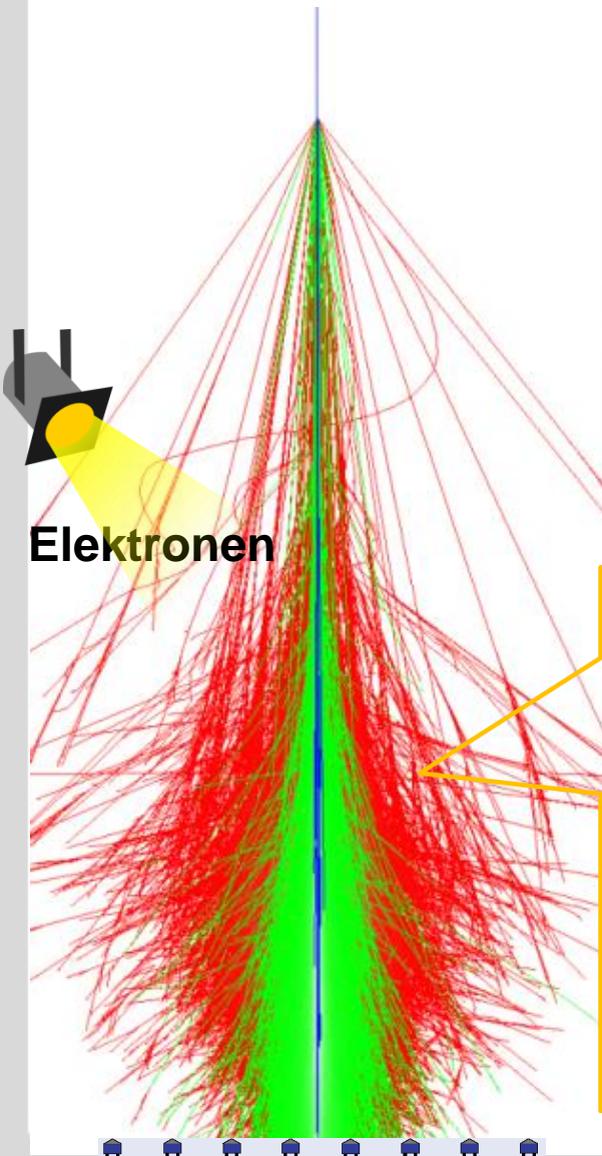
- direkte Messungen (Ballone, Satelliten):
Energiespektren von Kernen bis 10^{14} eV)



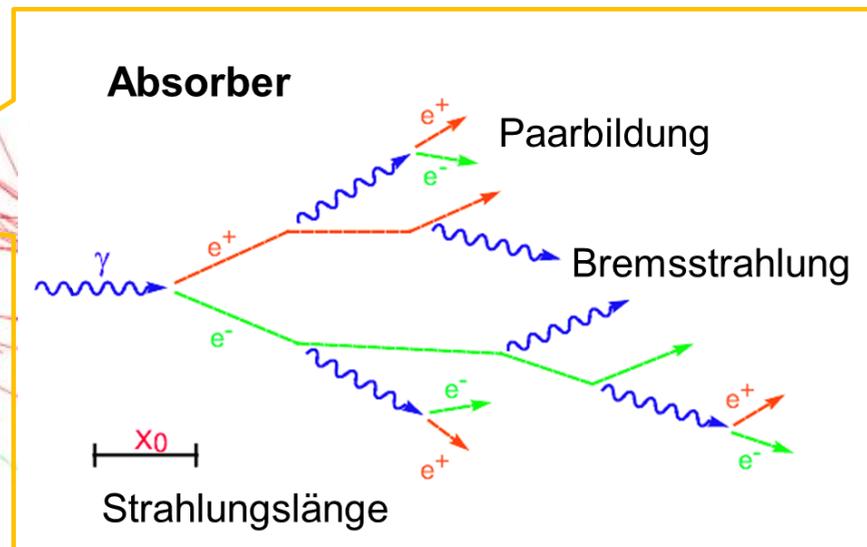
Wechselwirkungsprozesse in Schauern



- indirekte Messungen über **Luftschauerexperimente** am Boden:
Primärteilchen-Energien und Massen von 10^{13} eV - 10^{20} eV



- Teilchenprozesse in Schauern:
sehr enge Analogie zu Teilchenkaskaden
in der Hochenergiephysik (**fixed target**)
ECAL – HCAL – Myonkammern

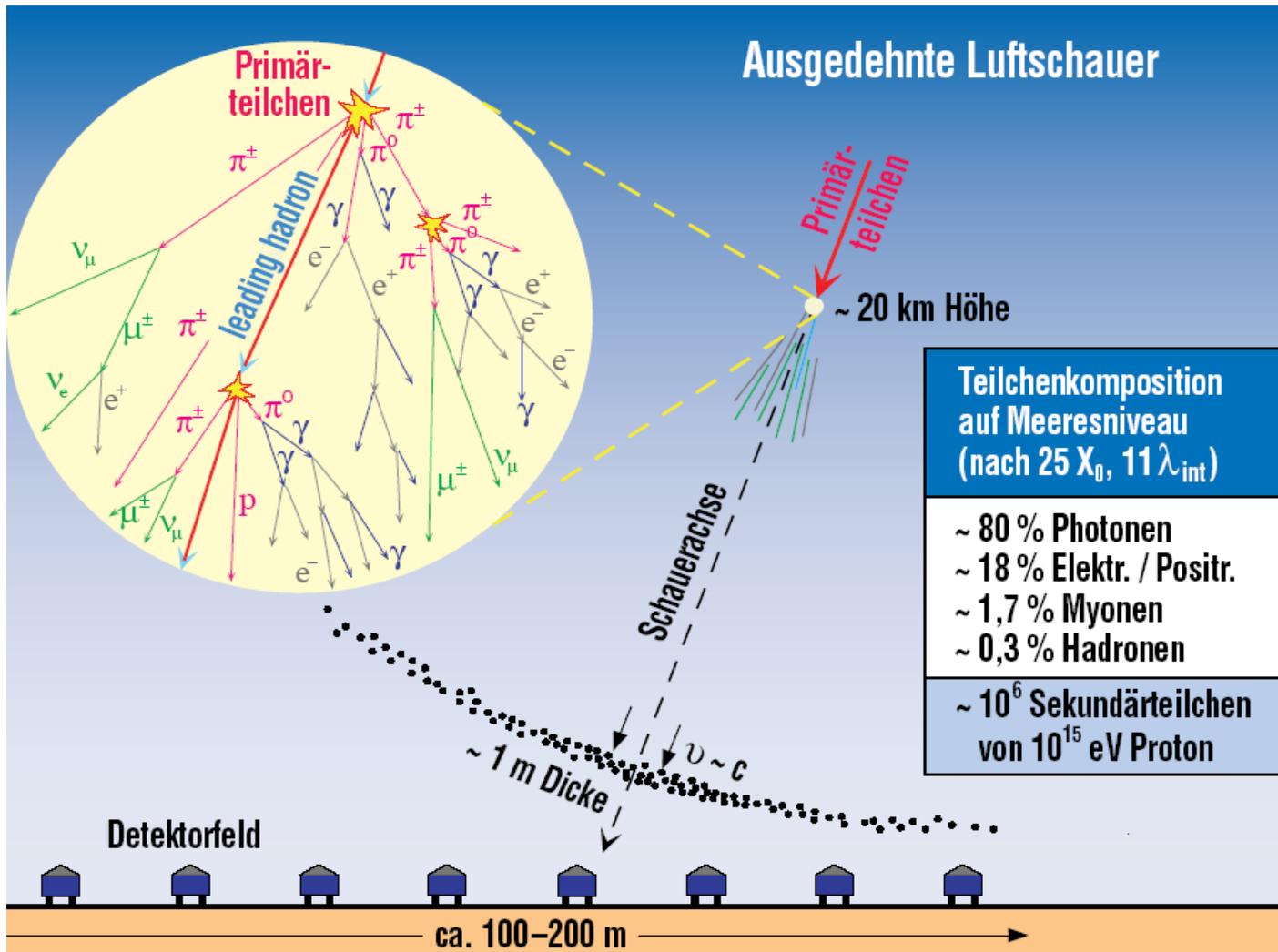


- **Elektromagnetische Kaskadenprozesse:**
Atmosphäre = ECAL
mit $\sim 25 X_0$
Schauerentwicklung
abhängig von Atmosphäre

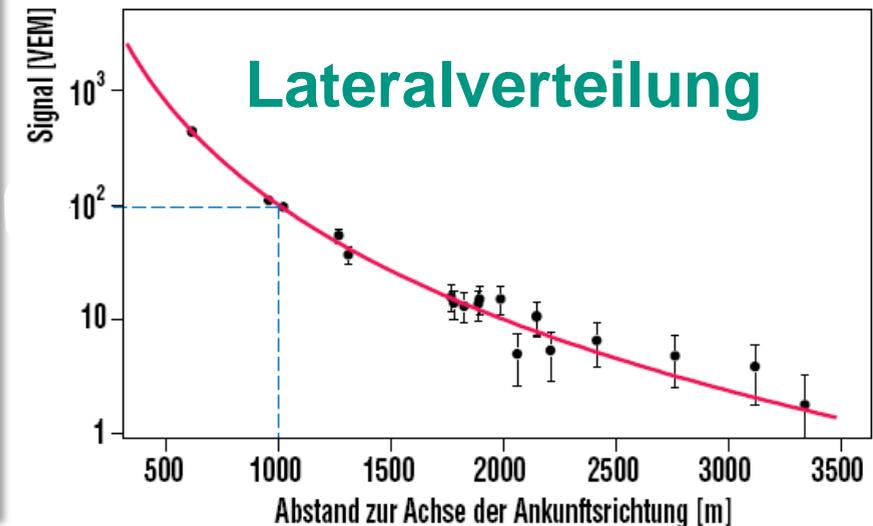
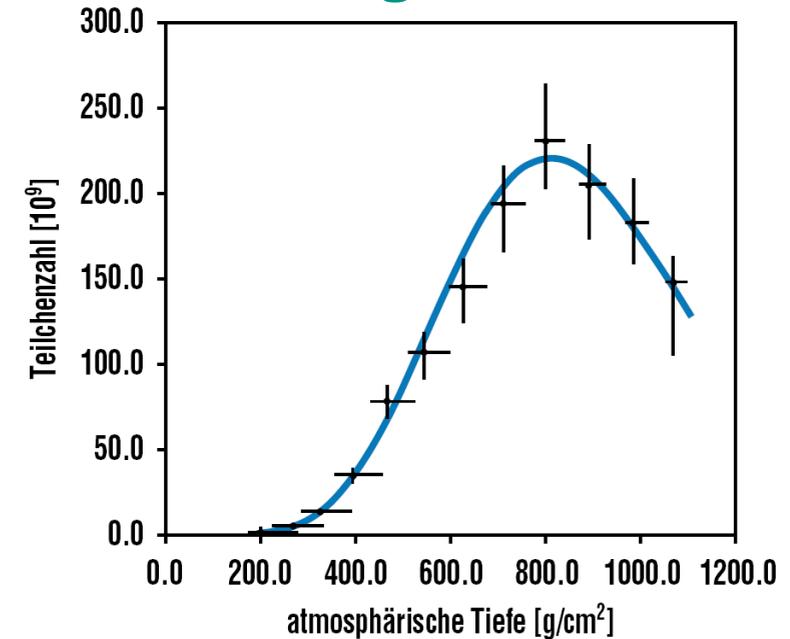
Luftschauer – Prozesse & Reaktionen



- Erdatmosphäre: **Kalorimeter** für Primärteilchen
Schauer bildet Pfannkuchen-artige Struktur

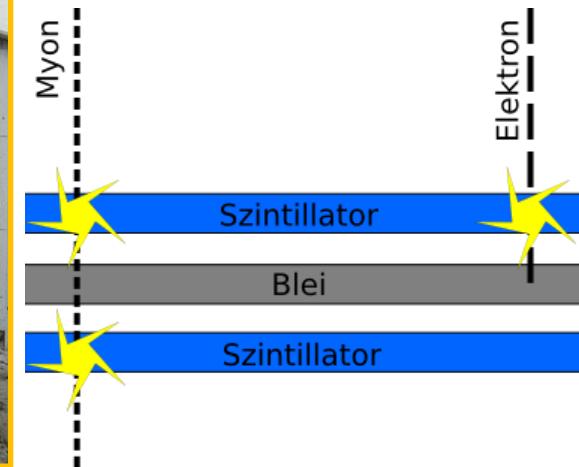


Longitudinalverteilung



Luftschauer – Nachweis

■ KASCADE - KARlsruhe Shower Core and Array DETector



■ Myonzahl N_μ und Elektronenzahl N_e : Messung über 2 Szintillatorschichten, getrennt durch Pb-Abschirmung

- ↳ **Energie**-Indikator, dazu Integration über Lateralverteilung
- ↳ Verhältnis N_e/N_μ : Schätzung der **Masse** des Primärteilchens

- leichte Kerne (**p**) wechselwirken tiefer in Atmosphäre ↳ N_e/N_μ groß

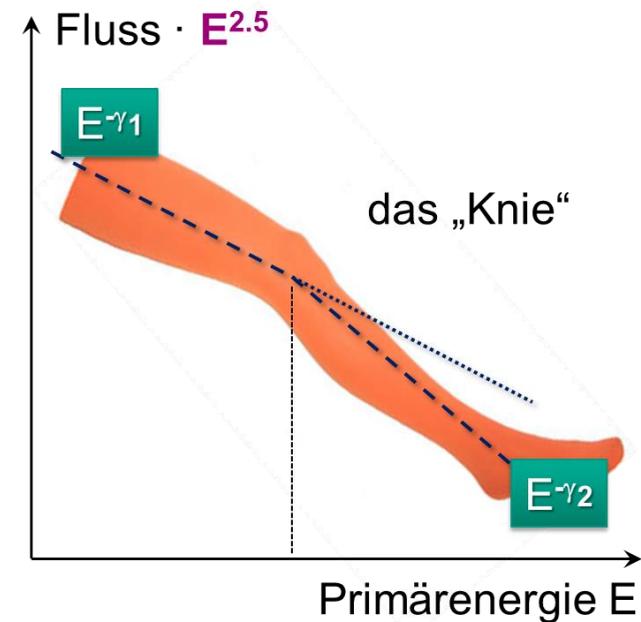
- schwere Kerne (**^{56}Fe**) wechselwirken früher ↳ N_e/N_μ klein

Energiespektrum & Hillas-Plot



■ Energiespektrum zeigt Variationen:

- Protonenknie bei $E \sim 4 \text{ PeV}$
- Eisenknie bei $E \sim 100 \text{ PeV}$
- Übergang galaktische zu extragalaktische Strahlung $\sim 10^{18} \text{ eV}$
- Propagationseffekte:
Diffusion im galaktischen B-Feld

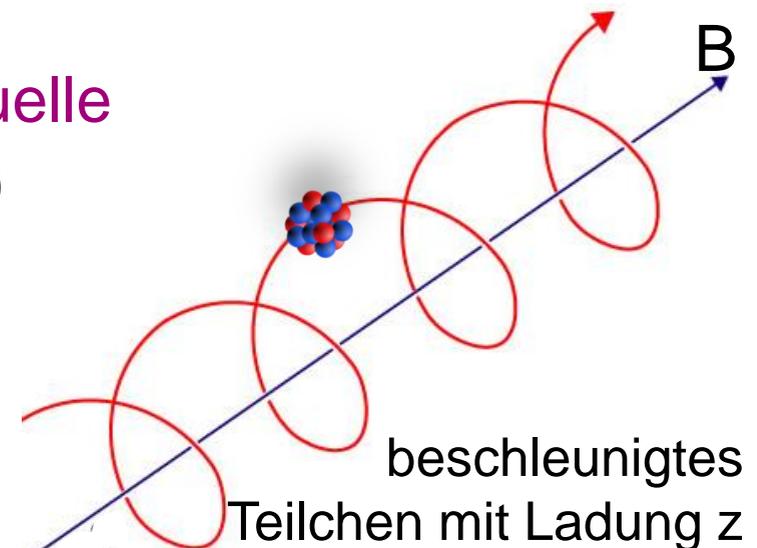


■ Hillas-Plot – Schockfront mit β_s

Larmor-Radius des Teilchens < Dimension der Quelle
(notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium)

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

- hohes B, kleines L: GRBs, Pulsare
- kleines B, großes L: AGN-Jets, ...



Fermi-Beschleunigung in SN-Schockfronten



■ **SN-Schockfronten** = effektive Teilchenbeschleuniger
(Effizienz: einige %)

- Passieren des Schocks:

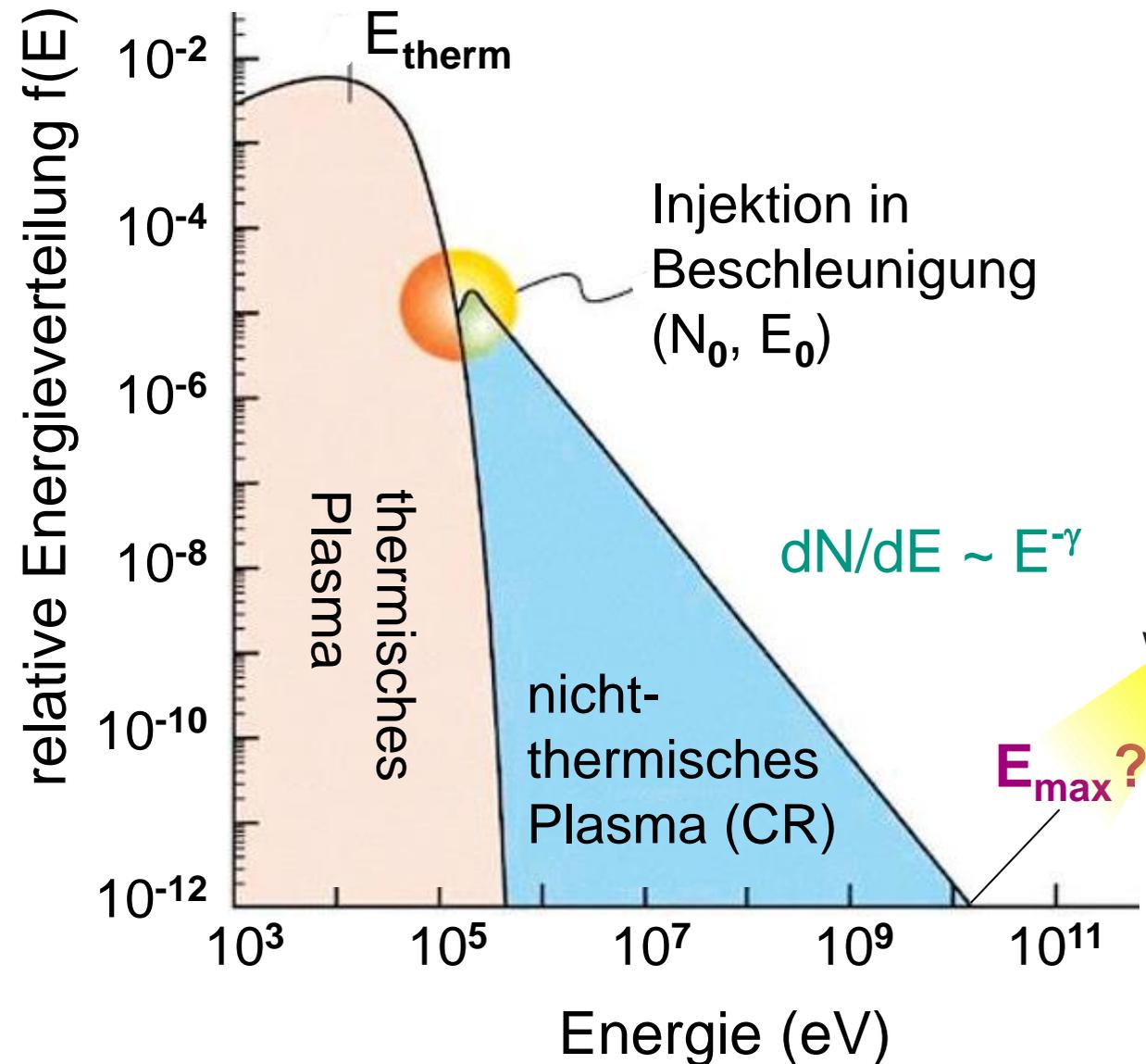
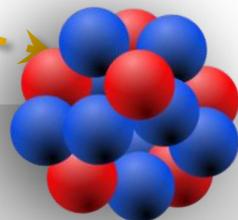
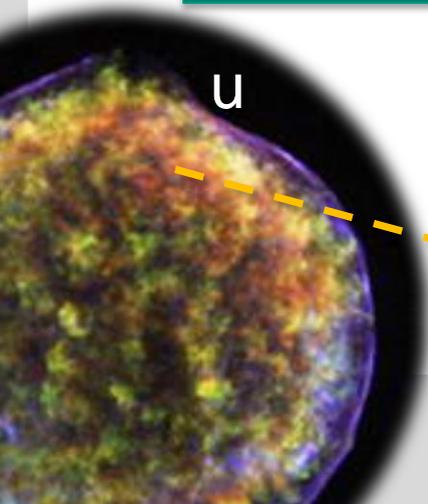
$$\Delta E = (u/c) \cdot E$$

■ Energie E nach n
Beschleunigungszyklen
mit Verlustrate $\sim P^n$

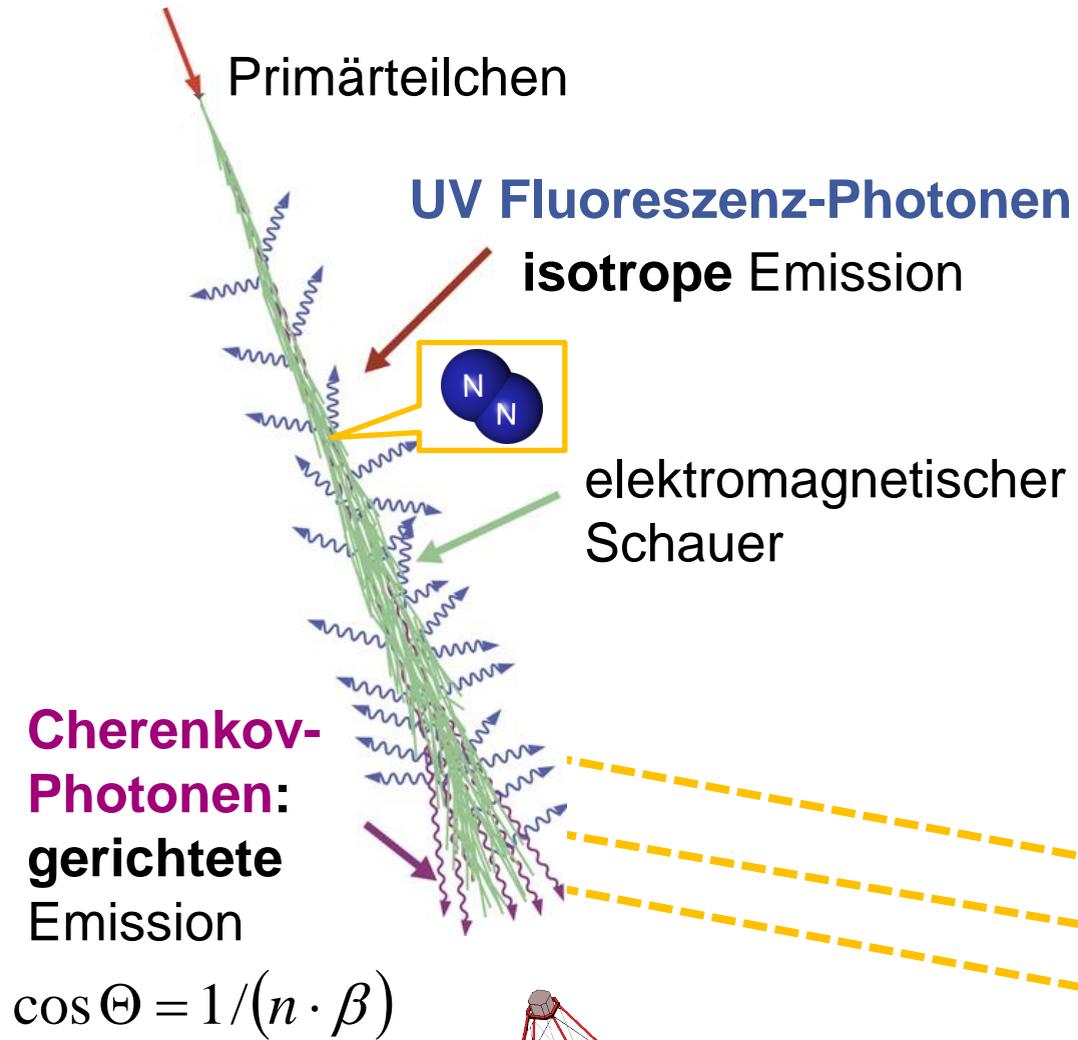


Power-Law Spektrum

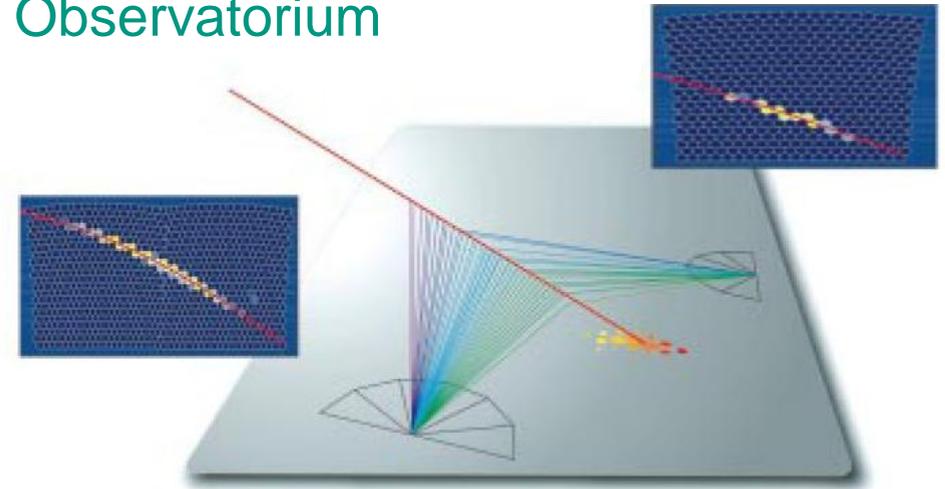
$$\frac{dN(E)}{dE} \sim E^{-\gamma}$$



Fluoreszenz & Cherenkov-Teleskope

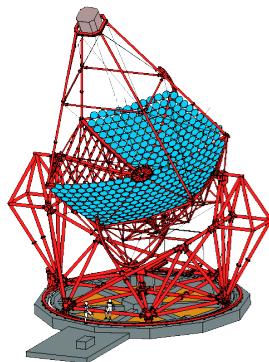


Pierre-Auger
Observatorium



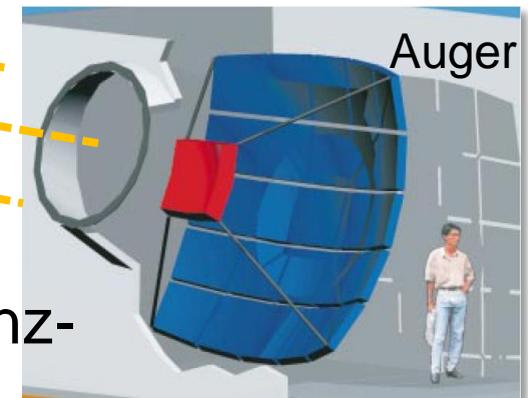
$d \sim 10-30 \text{ km}$

H.E.S.S.
MAGIC



Cherenkov-
Teleskop

Fluoreszenz-
Teleskop



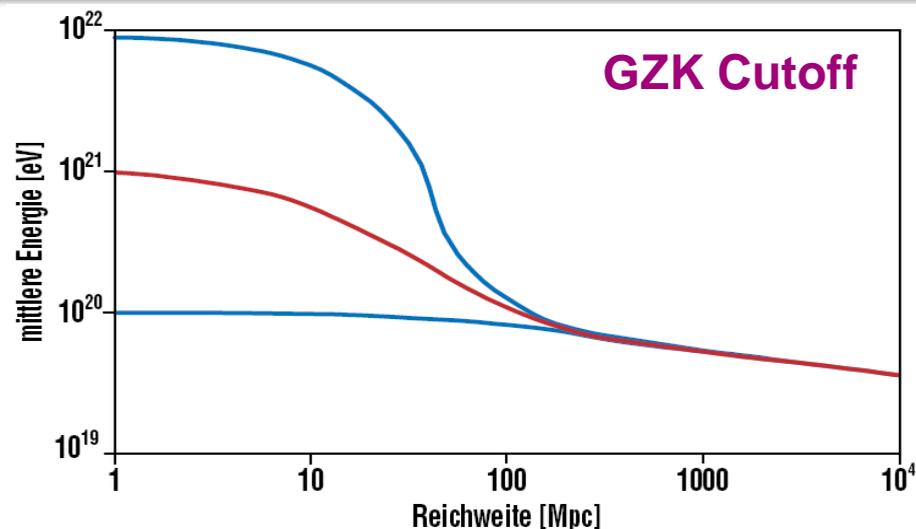
GZK-Cutoff & Gamma-Astronomie



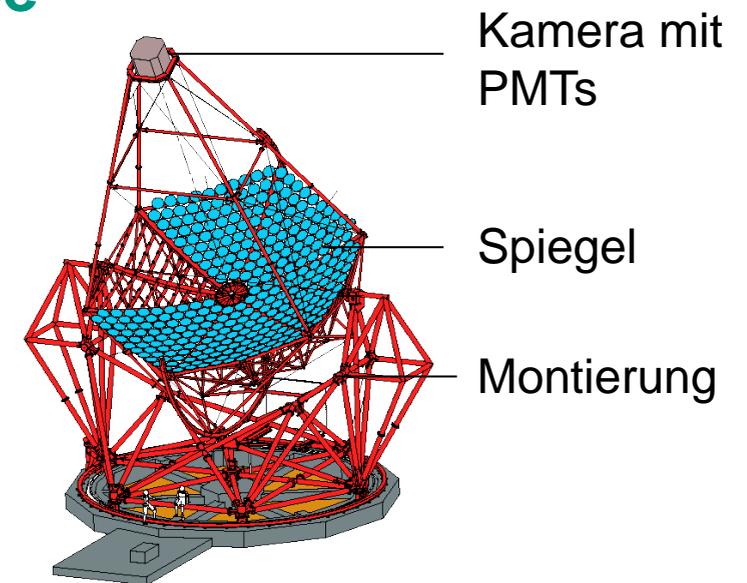
- **Höchste Energien (UHECR):** Auger beobachtet Unterdrückung des Flusses bei $E = 10^{19.5}$ eV (GZK-Cutoff oder E_{\max} der Quellen?)
- **TeV-Gamma-Astronomie:** viele neue Gammaquellen in der letzten Dekade

■ Resonante Streuung mit CMB

UHECR erzeugt Δ^+ Resonanz mit 3K Hintergrundphotonen der CMBR



■ Atmosphärische Cherenkov Teleskope



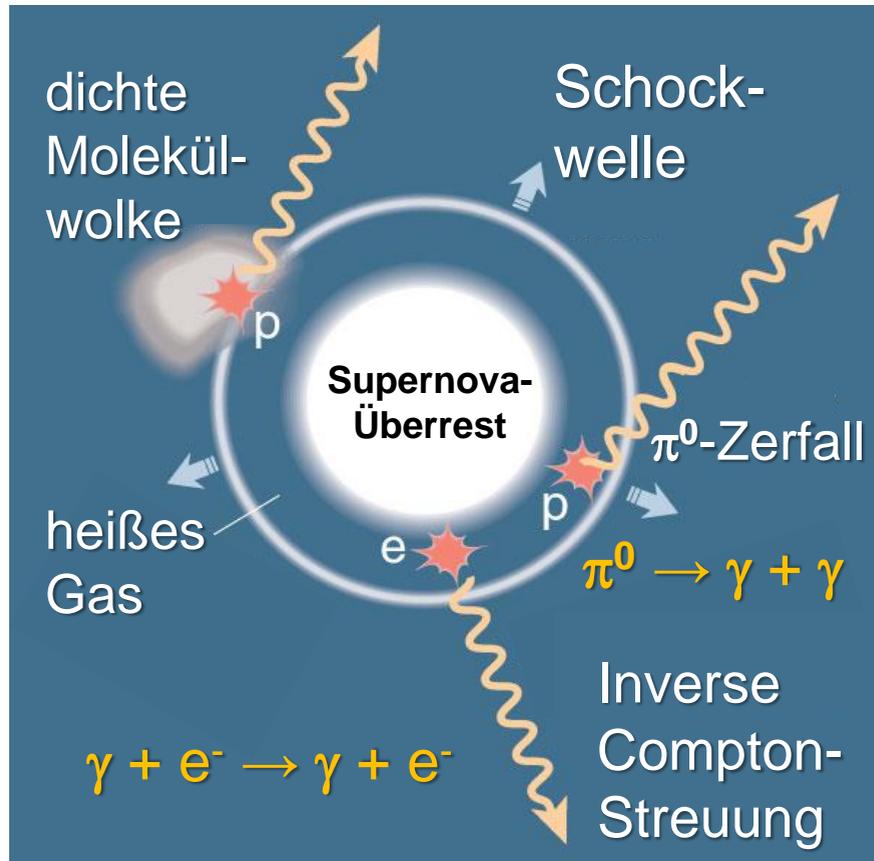
- **Fluss Einheit** für TeV- γ 's ($E_\gamma > 1$ TeV):
1 Crab = 1 Ereignis/10³ m² h

Gammaquellen & Erzeugungsmechanismen

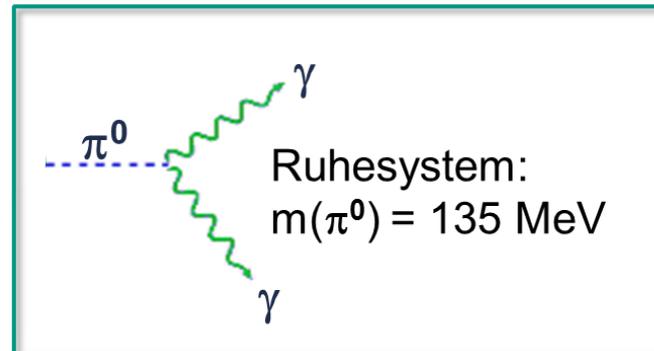


Erzeugung von hochenergetischen Gammas:

zwei grundlegende Erzeugungsmechanismen („LEP“ vs. „LHC“)



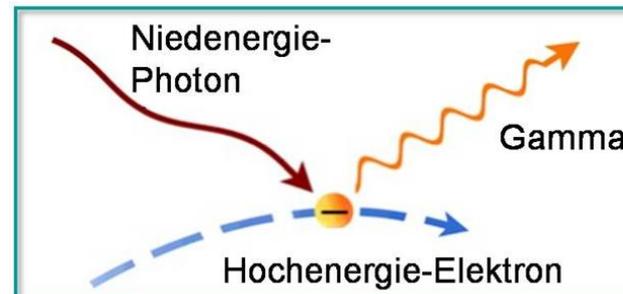
Pionzerfall



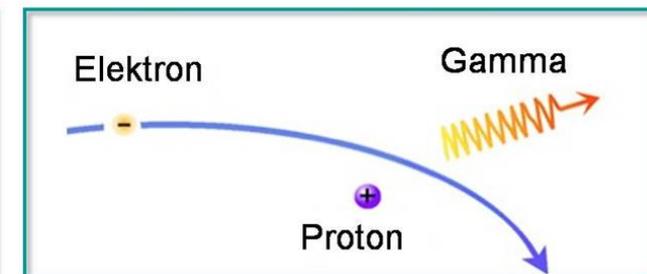
hadronisch

leptonisch

Inverser Compton Effekt



Bremsstrahlung



UHE-Gammaquellen:

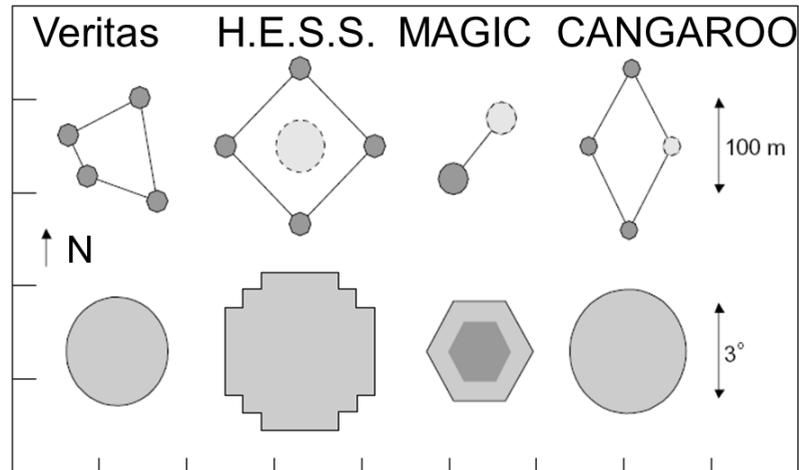
SN-Schocks, Pulsarwindnebel, diffuse Strahlung, AGNs (aktive Galaxien), ...

Gamma-Teleskope

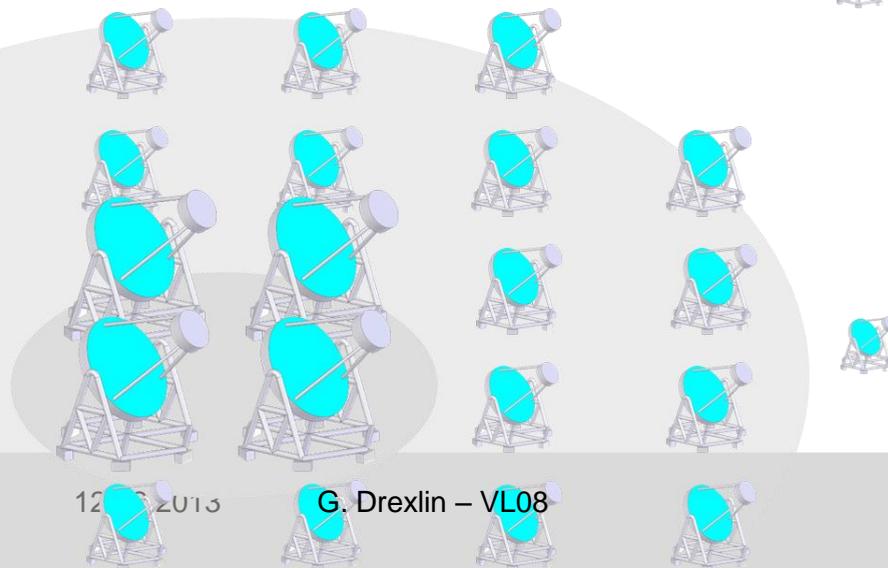


■ Aufbau großer Arrays von Cherenkov-Teleskopen:

- gute Untergrund-Diskriminierung
- Scan der galaktischen Ebene
- Individuelle Quellen:
 - ausgedehnte SN-Schocks
 - Pulsarwindnebel
 - aktive Galaxien (AGNs)



■ TeV-Gamma-Astronomie: neues Flaggschiffprojekt CTA



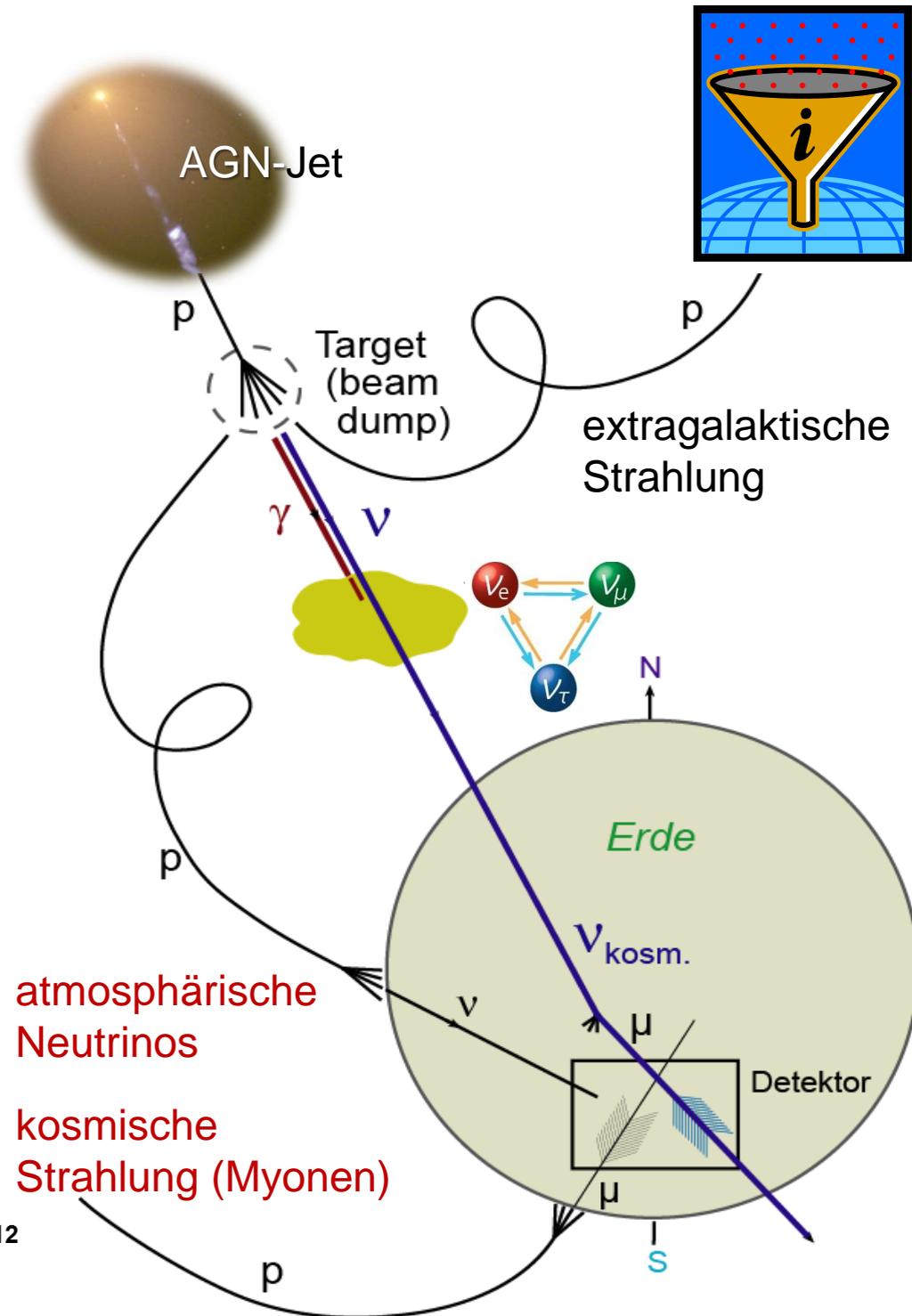
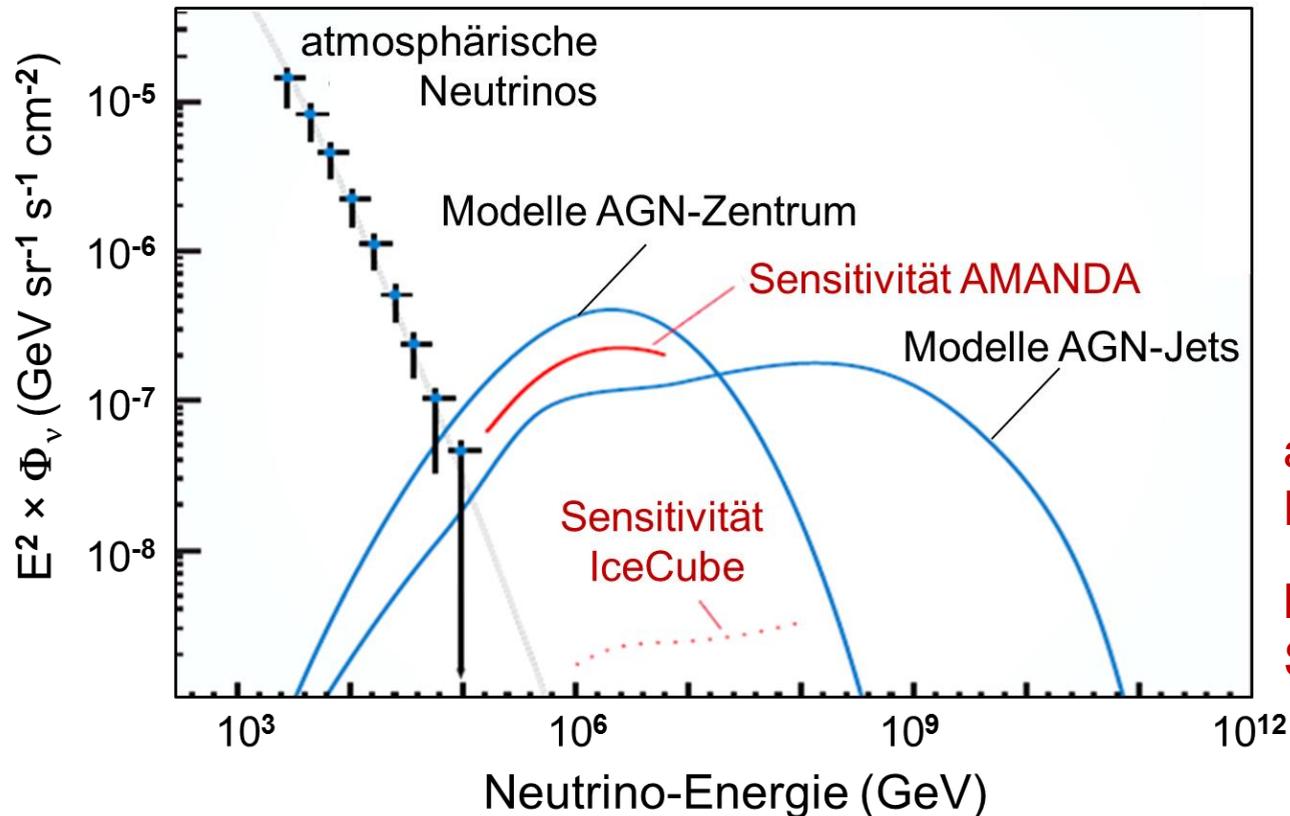
Nord-Süd Standortauswahl



Neutrino-Astronomie

■ Astrophysikalische Neutrinos:

- extragalaktisch: AGNs, GRBs
- Untergrund:
 - Myonen aus kosmischen Schauern
 - atmosphärische Neutrinos (isotrop)



Neutrino-Teleskope

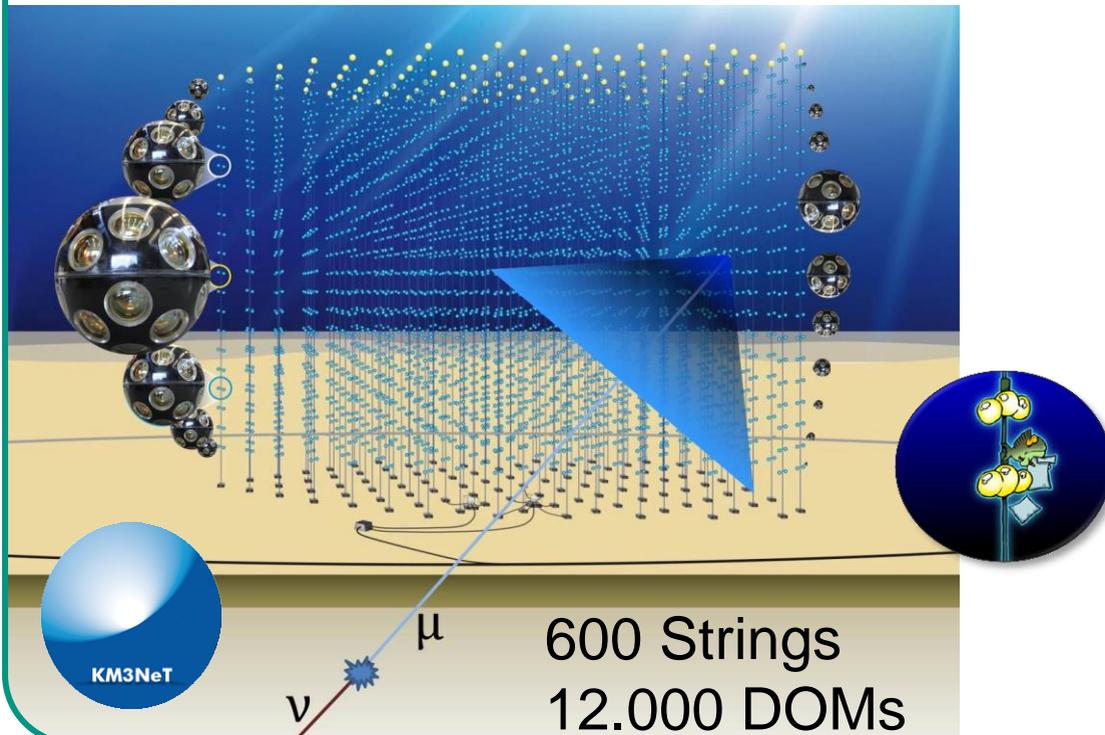


■ Neutrino-Nachweis unter Wasser & im Eis:

Detektion des Cherenkov-Lichts von Myonen aus CC-Reaktion von **hochenergetischen** ν_μ mit einem großvolumigen PMT Array (0.1-1 km³)

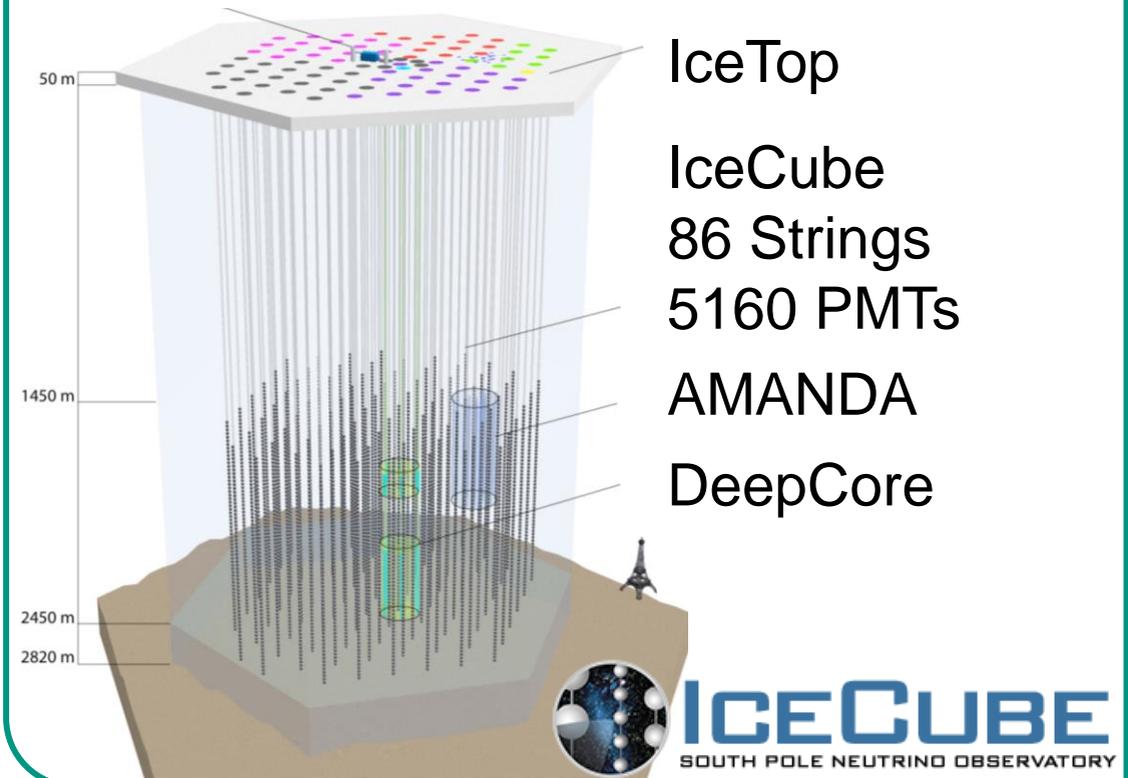
KM3NeT – Planungen im Mittelmeer

- hoher ⁴⁰K Untergrund, Strömungen



IceCube – Messungen am Südpol

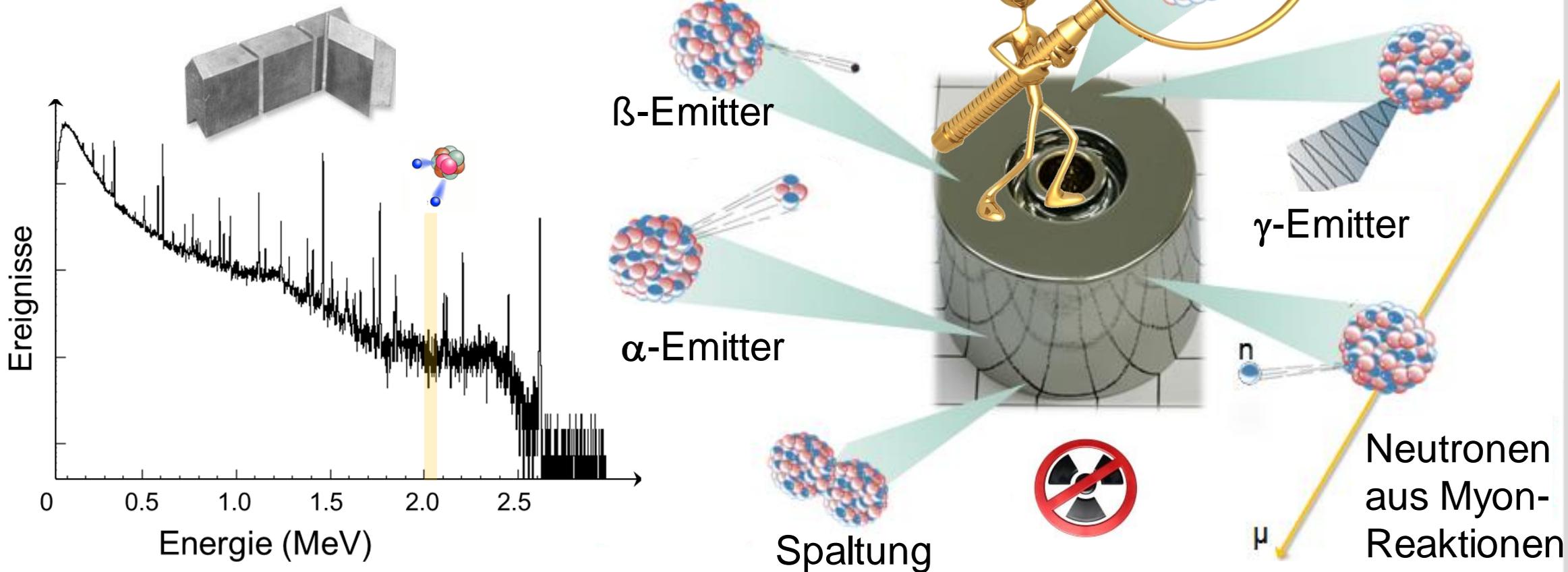
- niedriges PMT Rauschen, 4 π Sicht



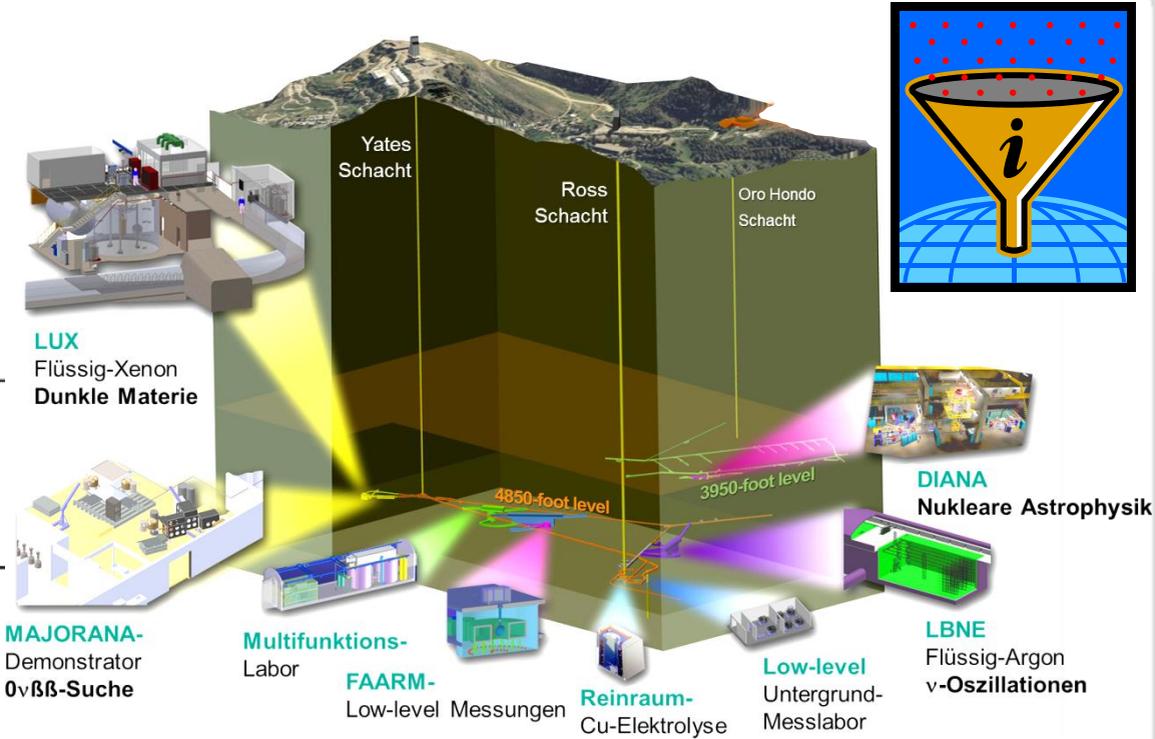
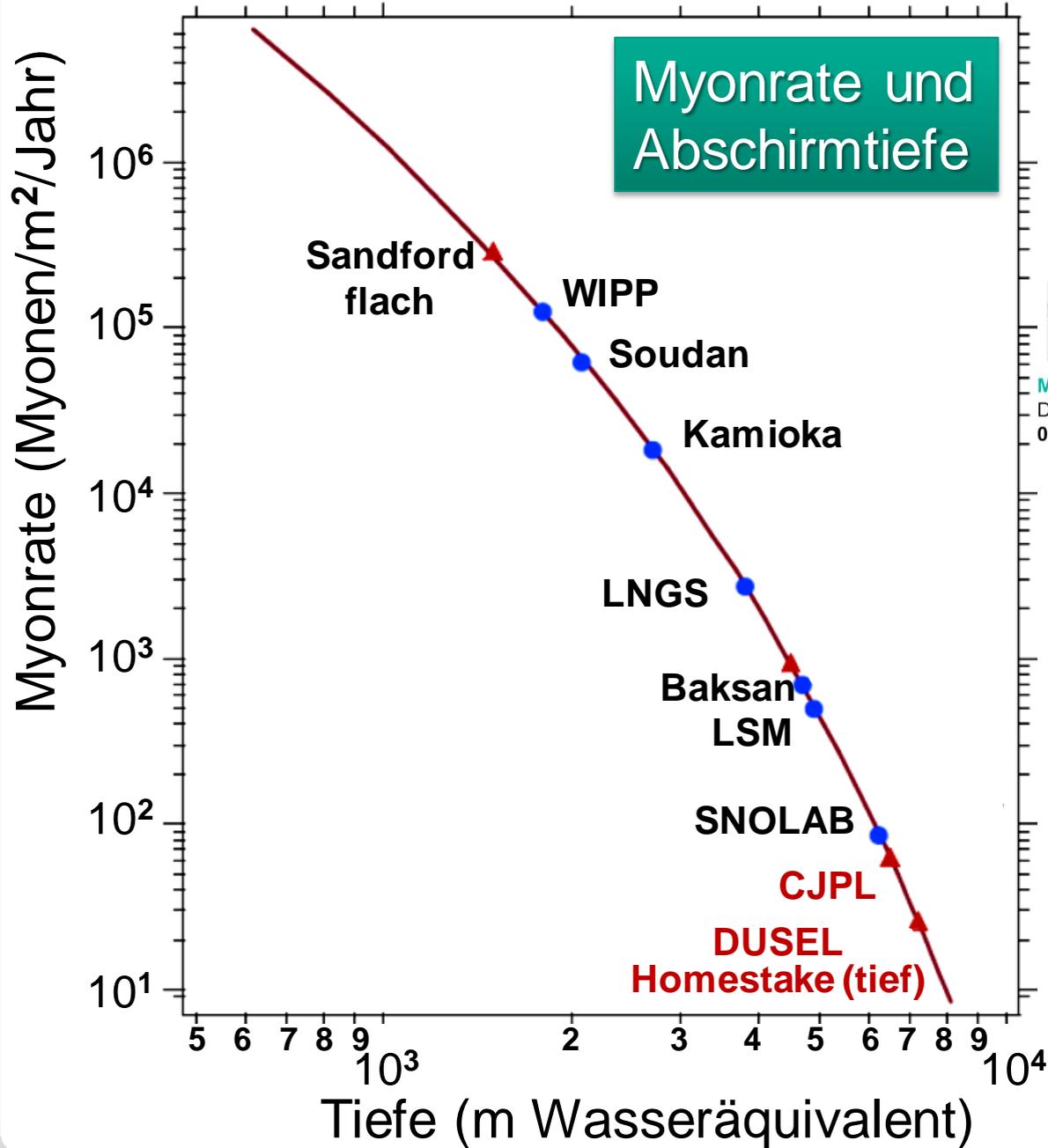
Signal & Untergrund



- Suche nach **seltenen Prozessen** ($0\nu\beta\beta$, solare ν 's, CDM) erfordert
 - Signalrate: < 1 Ereignis / 100 kg **pro Jahr**
 - stringente Materialselektion (keine α, β, γ -Emitter)
 - Reduktion von myon-induzierten Prozessen
 - Abschirmung



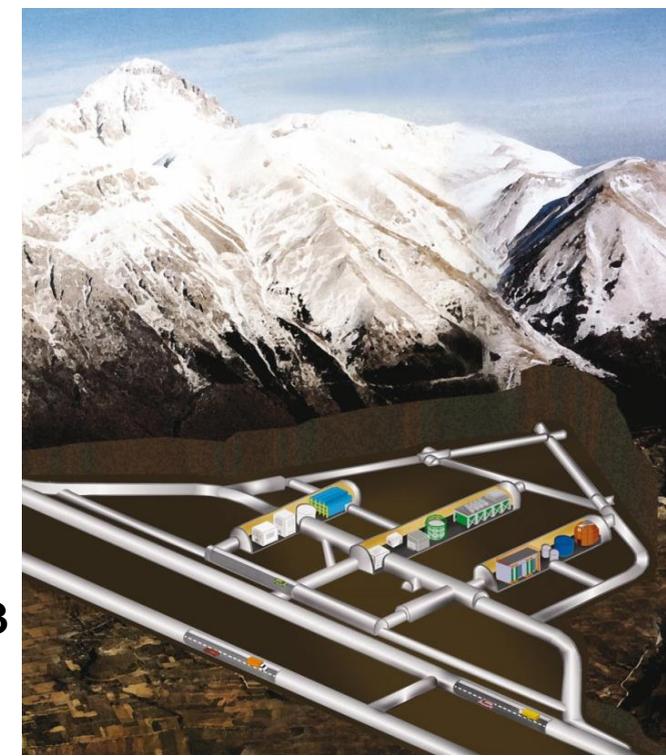
Untergrundlabore



- Myon-Abschirmung durch Fels



Standardfels
 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$



Abschirmmethoden



■ Passive Abschirmung gegen Gammas & Neutronen

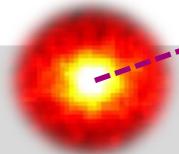
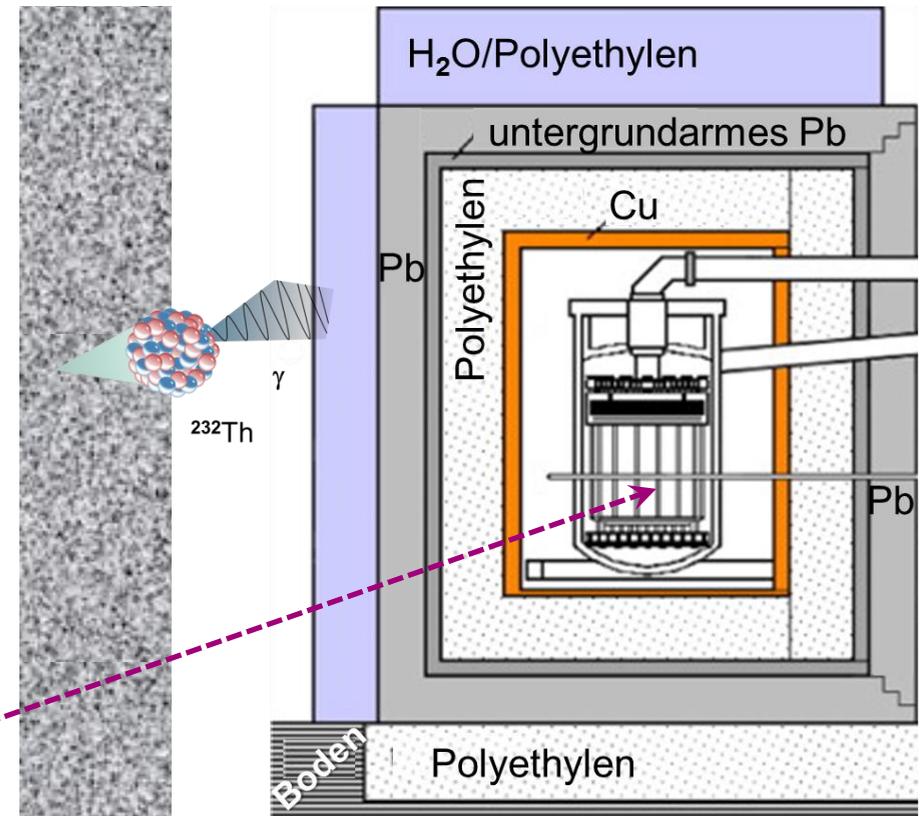
- **externer Veto** zur Identifikation von Myonen (Szintillator, Cherenkov)
 - ↳ Unterdrückung von Neutronen aus Myon-Reaktionen
- **massive Blei-Abschirmung**
 - ↳ Unterdrückung von Gammas
- **Polyethylen**
 - ↳ Moderierung von Neutronen
- **Reinst-Kupfer**
 - ↳ Unterdrückung der intrinsischen Gamma-Aktivität der Pb-Abschirmung



■ Ultimatives Abschirm-Limit

(bei Targetmassen von 10-100 to.):

- solare Neutrinos
- atmosphärische Neutrinos



Zerfallsketten

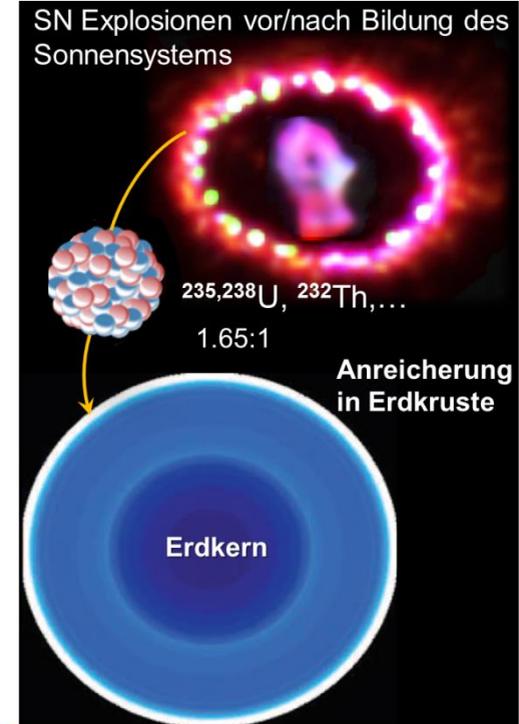
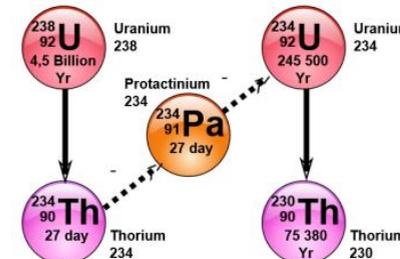
■ 4 primordiale Zerfallsketten:

Name	Anfang-Ende	$t_{1/2}$ [a]	Masse A
Thorium	$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot j$
Neptunium	$^{237}\text{Np} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$	$2.1 \cdot 10^6$	$4 \cdot j + 1$
Uran	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$4.5 \cdot 10^9$	$4 \cdot j + 2$
Aktinium	$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	$7.1 \cdot 10^8$	$4 \cdot j + 3$



$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2$$

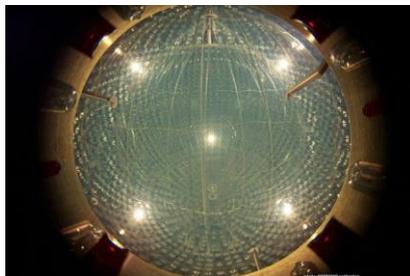
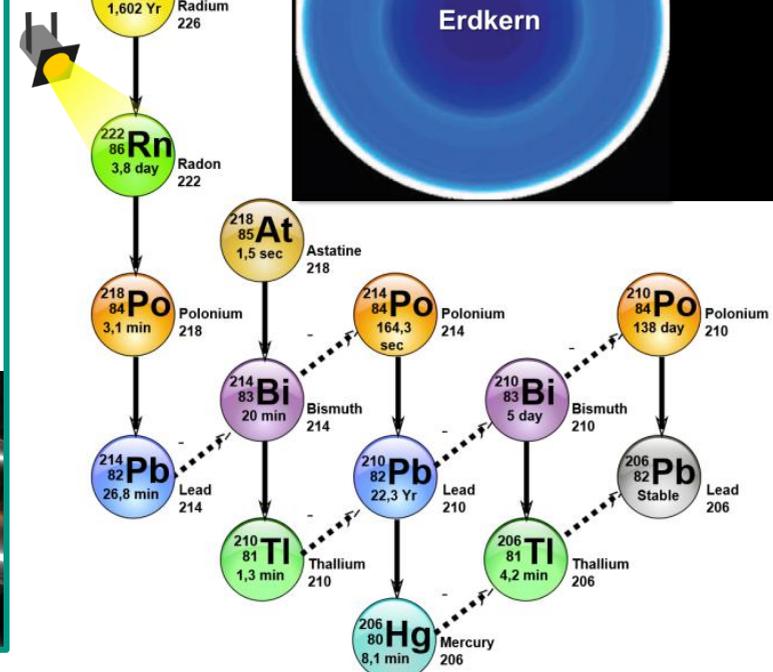
$$A_1 = A_2$$



■ Radon-Emanation

Erzeugung von Untergrund (α 's & Elektronen)

- **Radon-222**: Experimente zur Dunklen Materie, Sonnenneutrinos, $0\nu\beta\beta$ -Zerfall
- **Radon-219/220**: KATRIN



SUSY: Neutralino-Eigenschaften

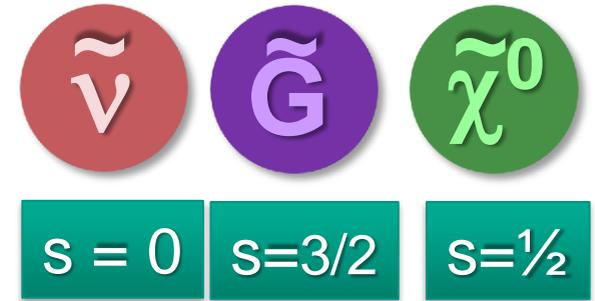


■ Supersymmetrie: Fermionen \leftrightarrow Bosonen

Superpartner: Squarks, Sleptonen, Gauginos, Higgsinos, Gravitino, ...

- **LSP** = Lightest Supersymmetric Particle wird stabilisiert durch R-Parität (kein schneller Protonzerfall)

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



Sneutrinos $\tilde{\nu}$: SUSY-Partner der ν ($\Omega_{\text{CDM}} < 10^{-3}$)

Gravitinos \tilde{G} : SUSY-Partner der Gravitonen

Neutralinos $\tilde{\chi}^0$: Masseneigenzustände der 4 neutralen Gauginos
Majorana-Fermionen ($s=1/2$)



leichtestes Neutralino = LSP – Kandidat

Masse? Mischungsparameter?

Annihilations- & Wechselwirkungsrate?

Lebensdauer (exakte Erhaltung von R_p)?

$\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0$ $\tilde{\chi}_3^0$ $\tilde{\chi}_4^0$



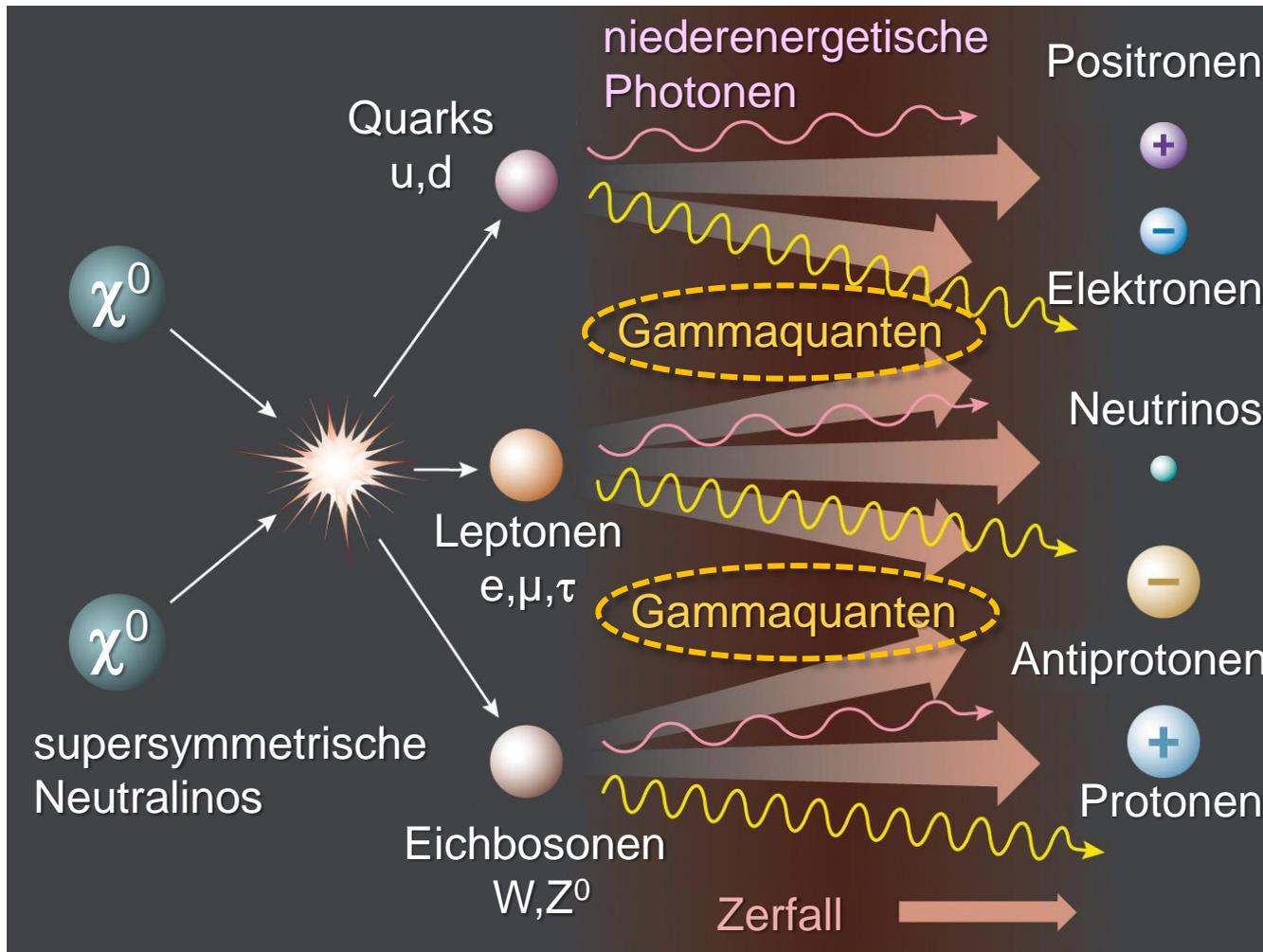
CDM?

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:

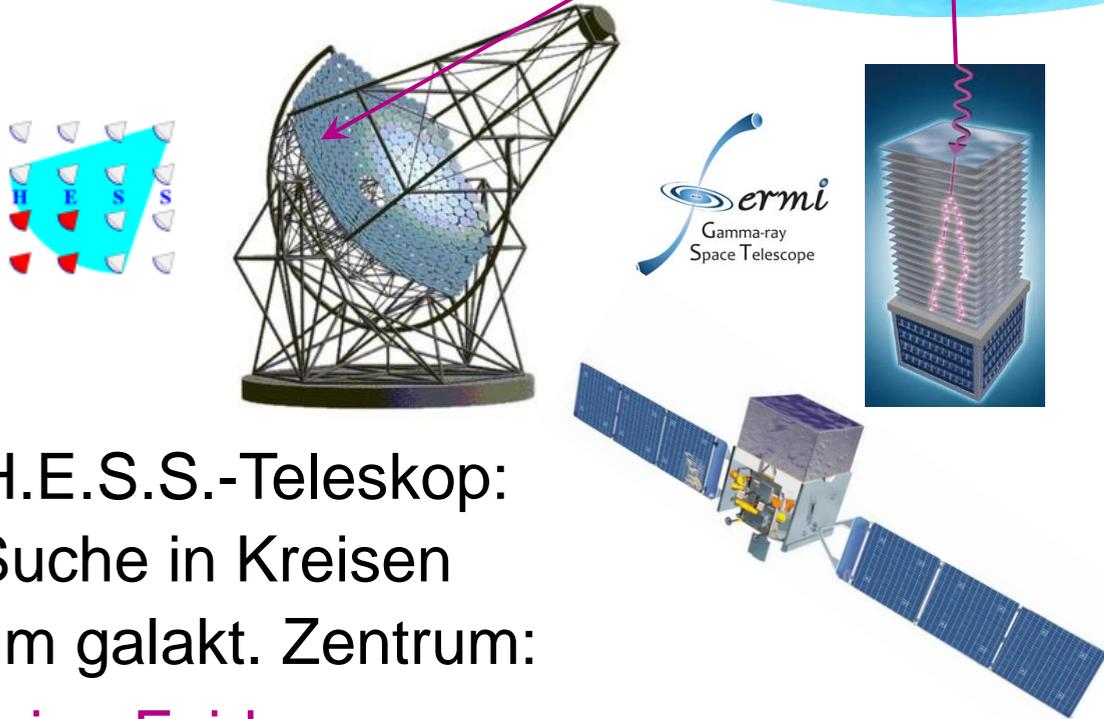
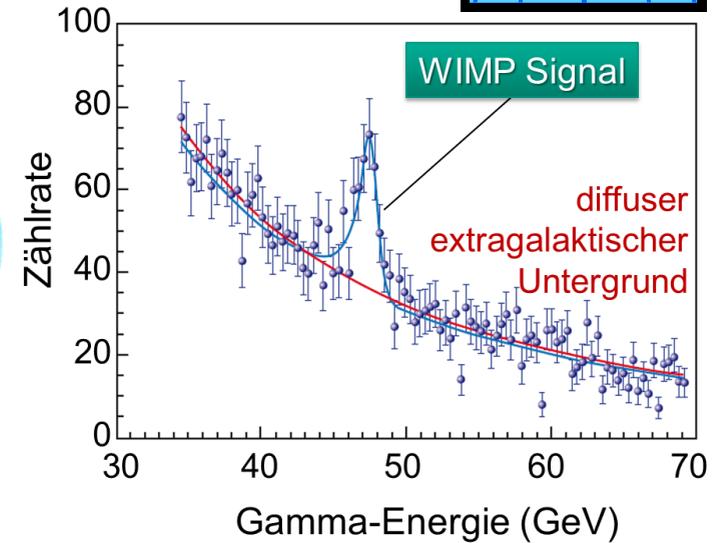
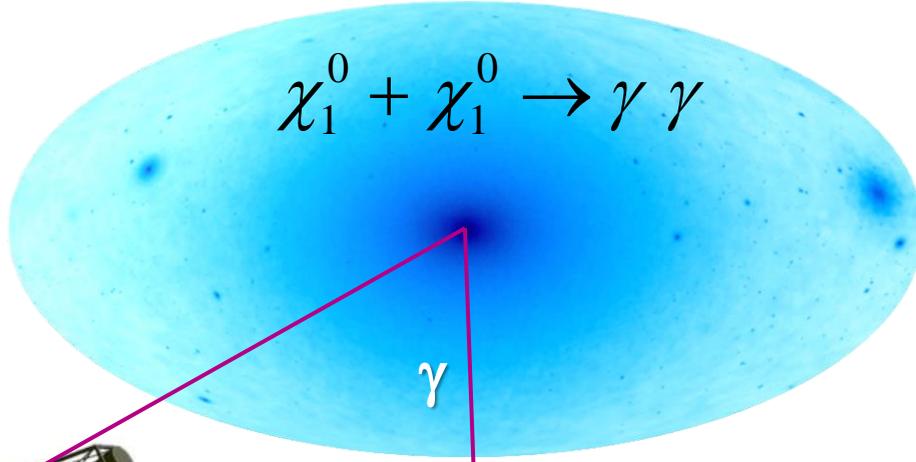
- Hadronisierung & Jets
- Eichboson-Zerfälle

Indirekter WIMP Nachweis - Gammas

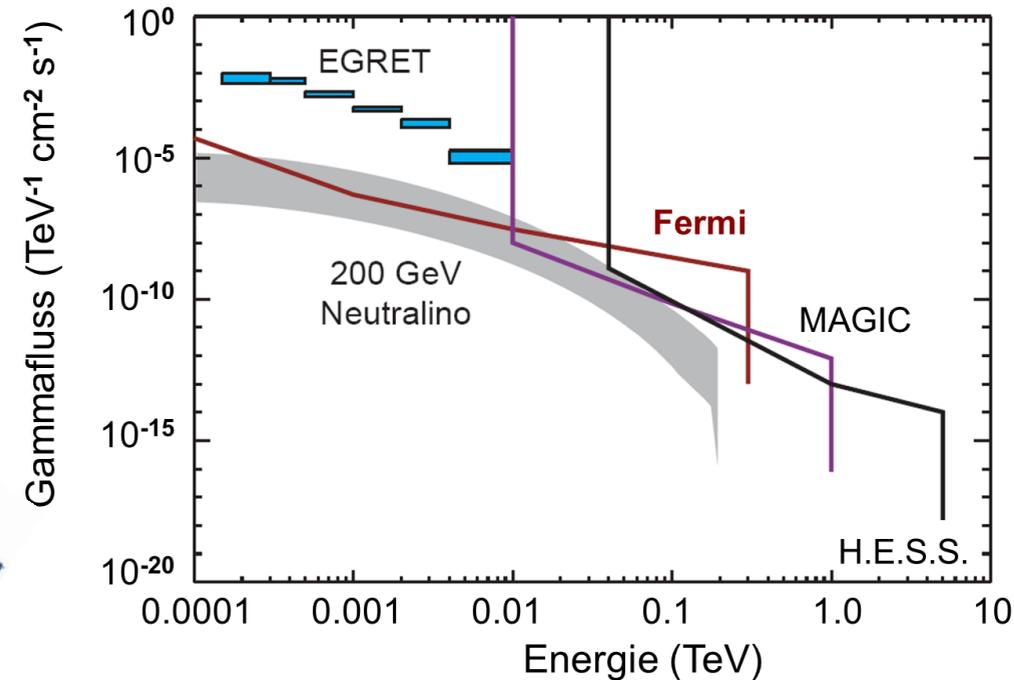


Suche nach Gammas aus WIMP Annihilation

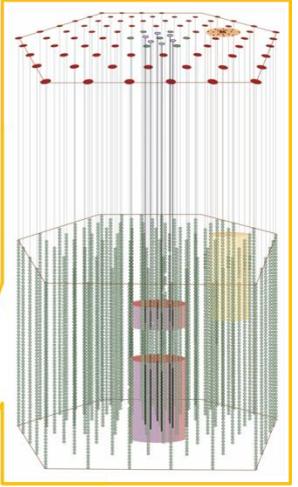
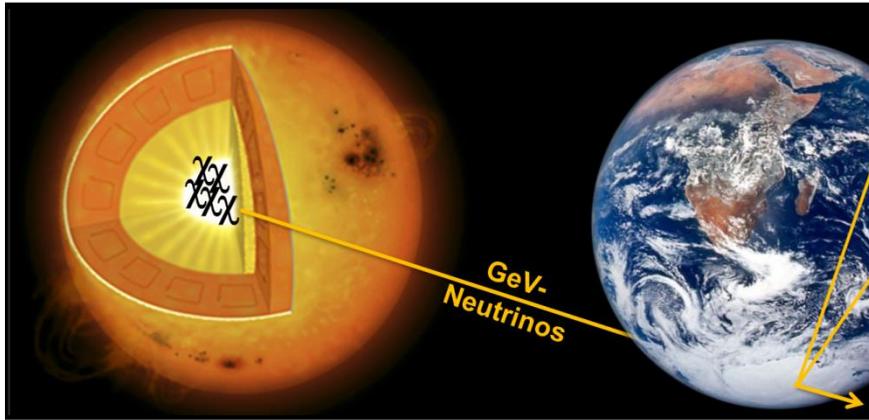
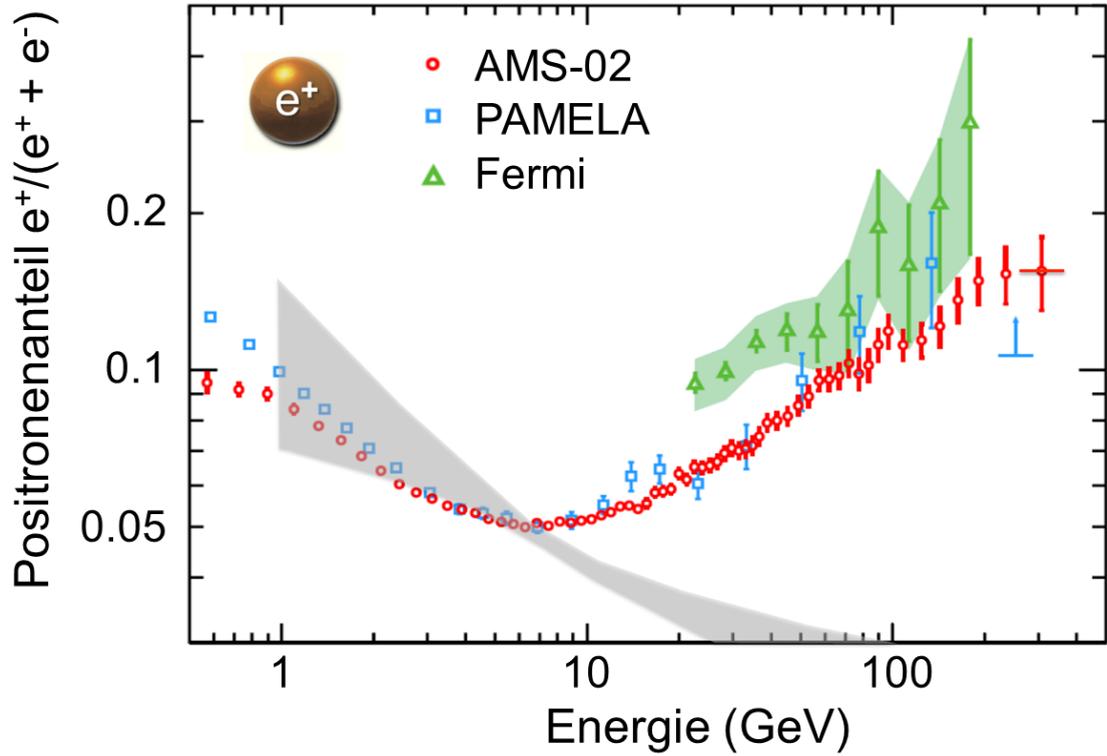
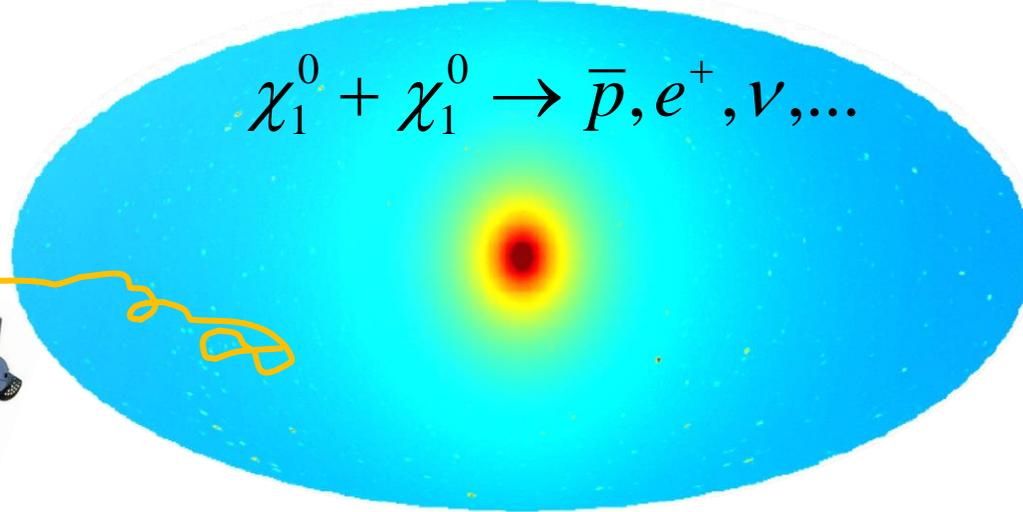
- FERMI-Satellit:
Suche in Kreisen
um galakt. Zentrum:
keine Evidenz



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



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



■ Resultate:

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

direkter WIMP Nachweis

■ Elastischer Kernrückstoß:

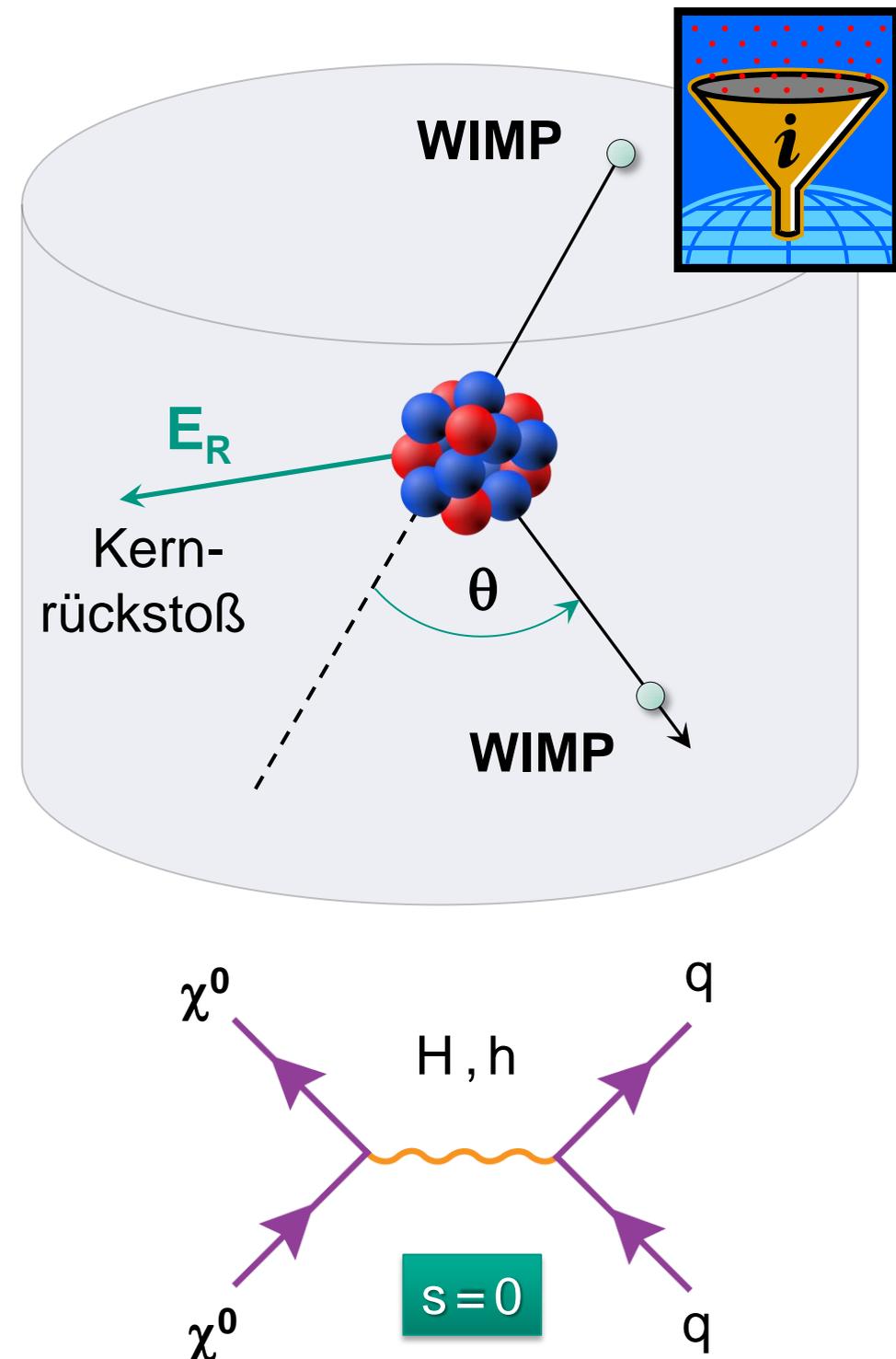
WIMP überträgt Energie an Gesamtkern,
Stoßkinematik abhängig von:

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

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

■ WIMP Wechselwirkung:

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



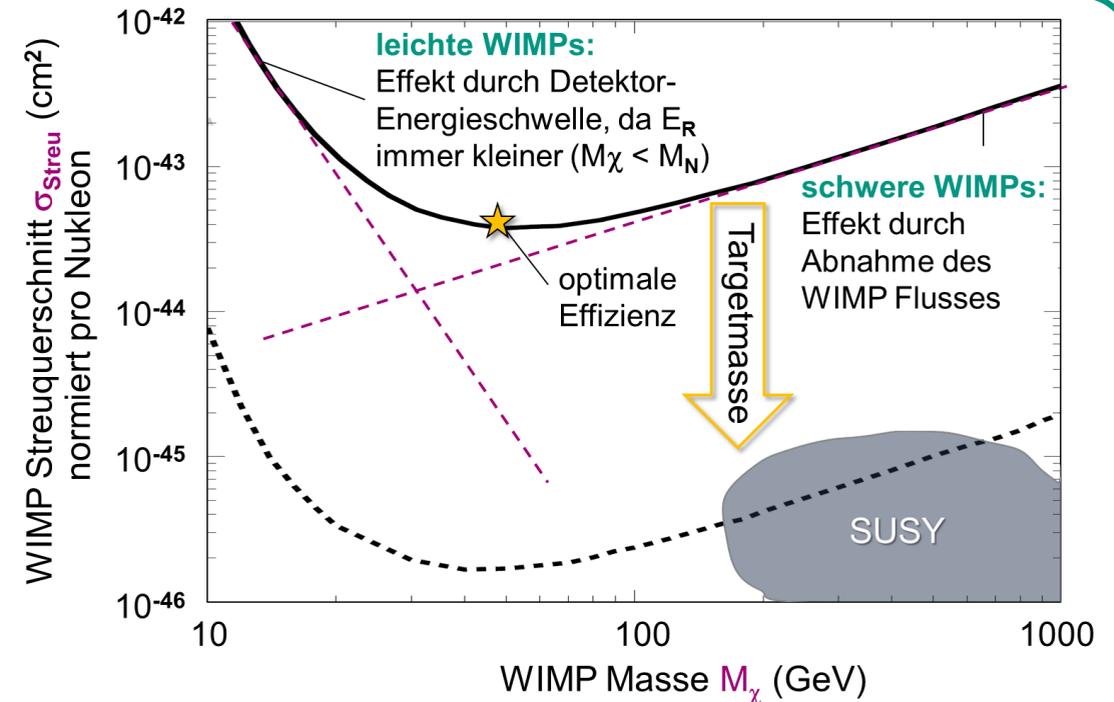
WIMP-Nachweis



■ Experimentelle Suche nach WIMP Streu-Ereignissen

WIMP Plot

- Darstellung & Vergleich der Ergebnisse als Funktion von WIMP Masse M_χ & SUSY-Wirkungsquerschnitt σ_{Streu}
- Ausschlusskurve: keine Evidenz
- Einschussregion: WIMP Evidenz

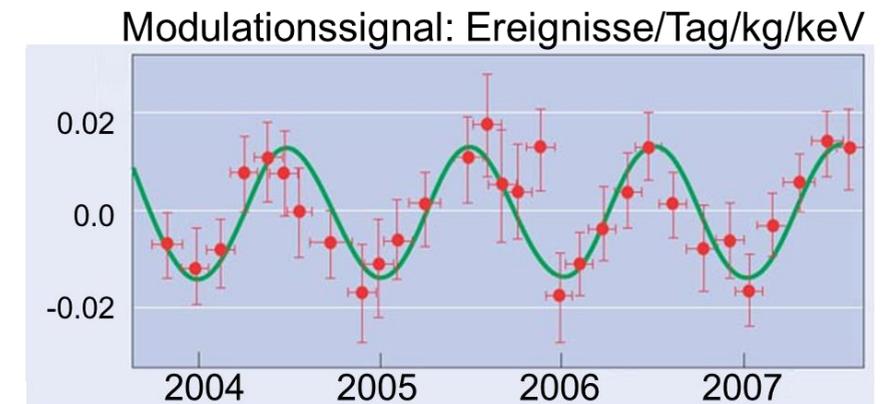


■ Jahreszeitliche Modulation des WIMP-

Signals durch Bewegung der Erde um Sonne

- DAMA-Libra (NaJ Szintillator) beobachtet seit langem Modulation der Rate

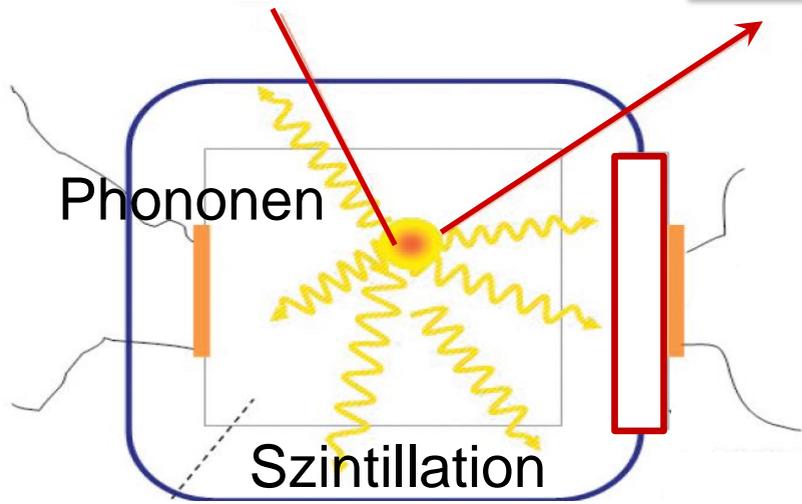
⇒ Signal oder systematischer Effekt?



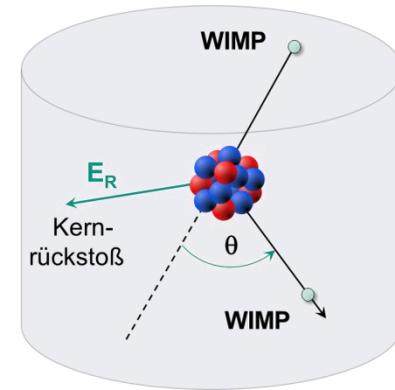
WIMP-Nachweismethoden: 2 Parameter



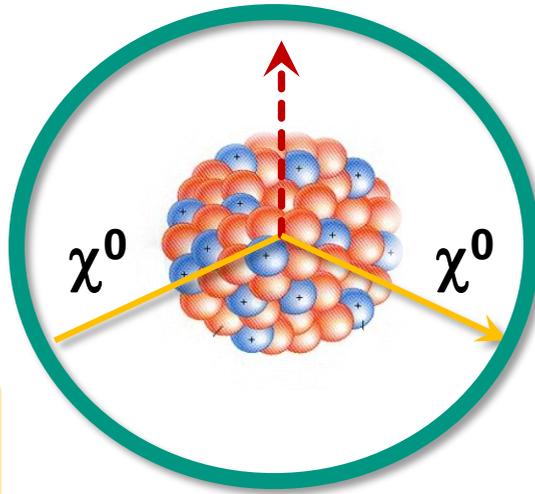
Szintillation & Phononen



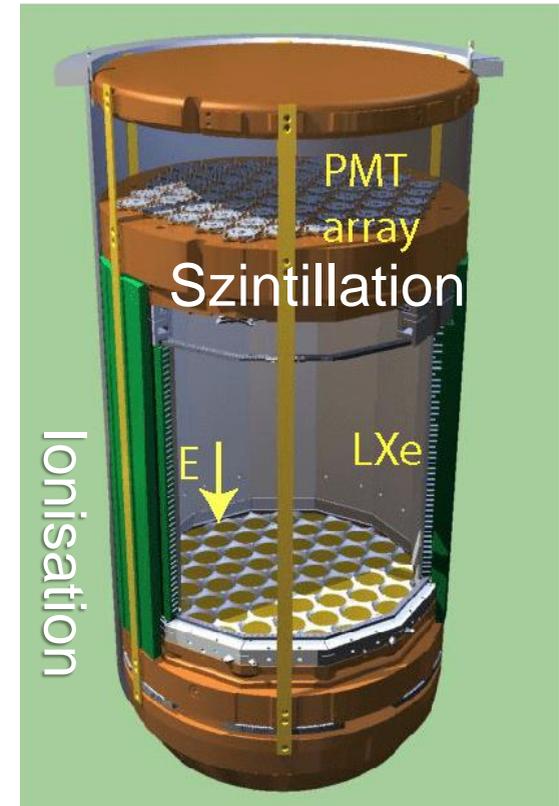
CRESST-II
ROSEBUD



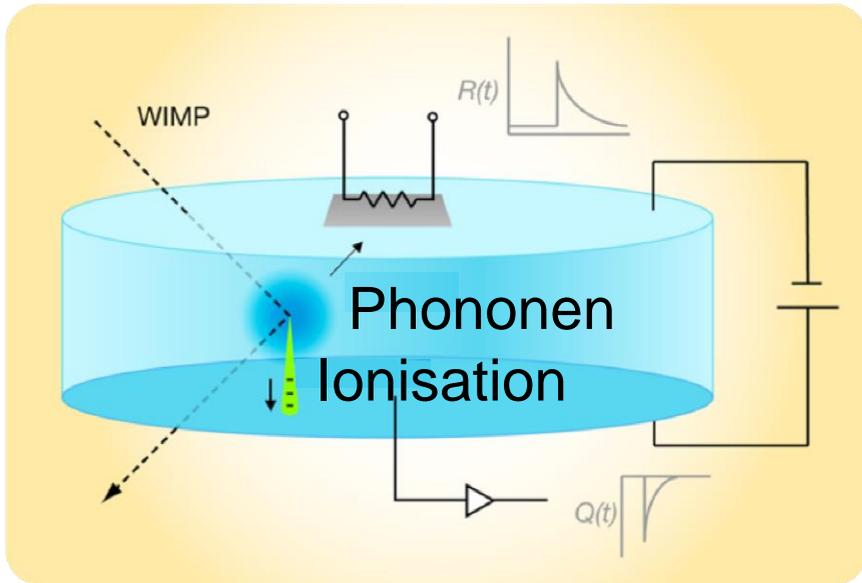
Szintillation & Ionisation



XENON
LUX
WARP
ArDM



Phononen & Ionisation



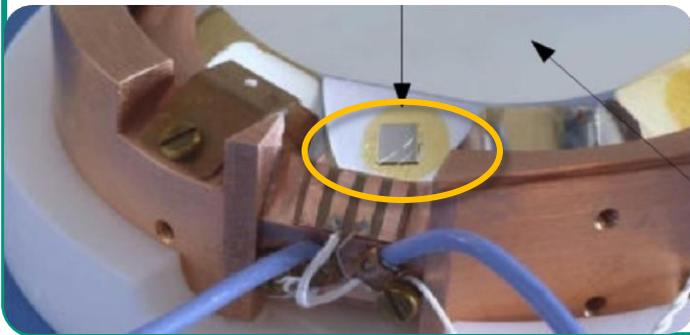
*it takes two ...
...to detect WIMPS*

CDMS
Edelweiss

Kryo-Bolometer: Thermistoren

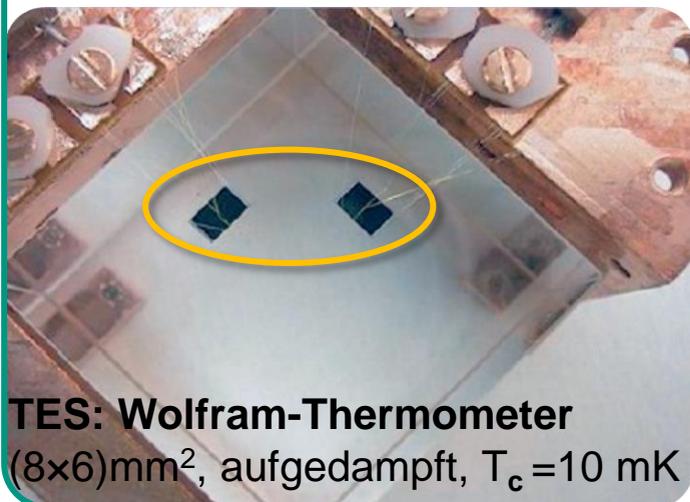
- **Thermistor:** misst μK Temperaturanstieg des Absorbers (Phononen aus Absorber koppeln in Thermistor ein), Ziel: **kleines $\Delta T \rightarrow$ großes ΔR**

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

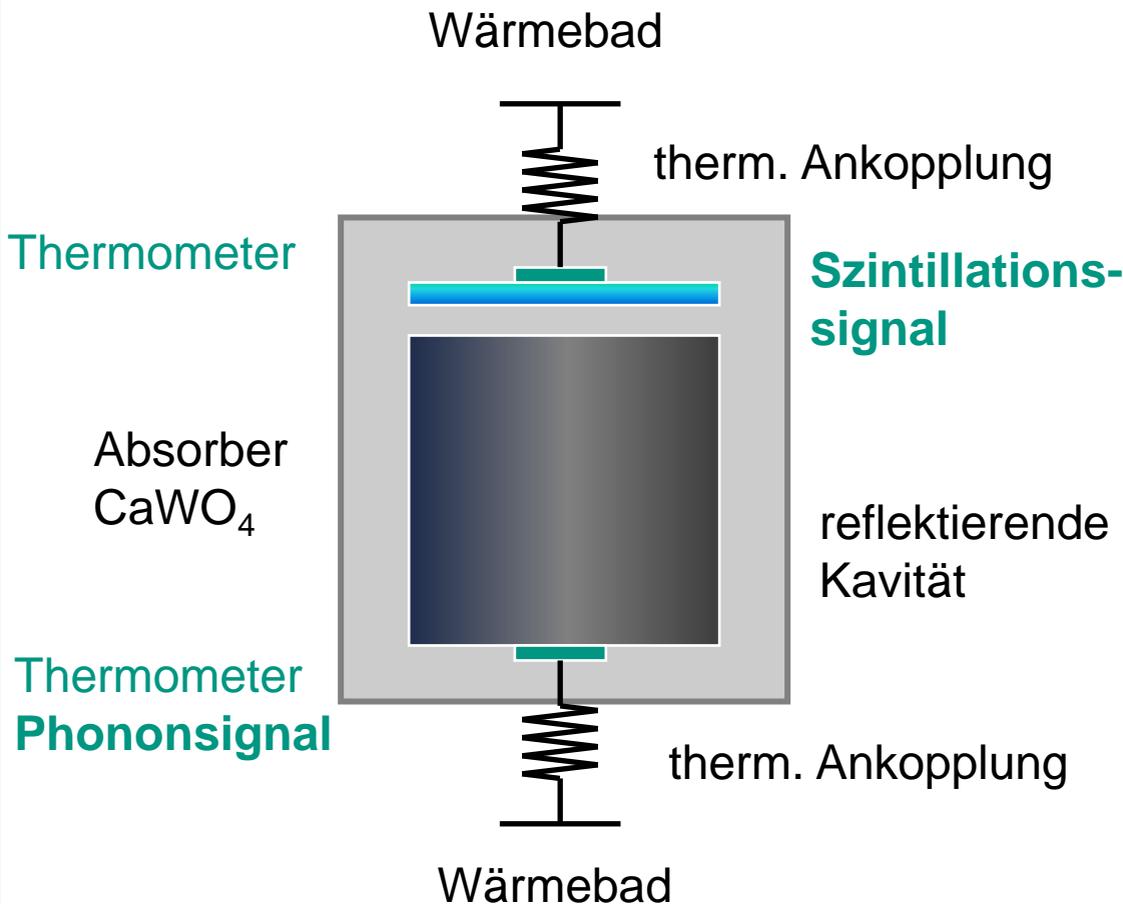


TES: Wolfram-Thermometer
(8x6)mm², aufgedampft, $T_c = 10 \text{ mK}$

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

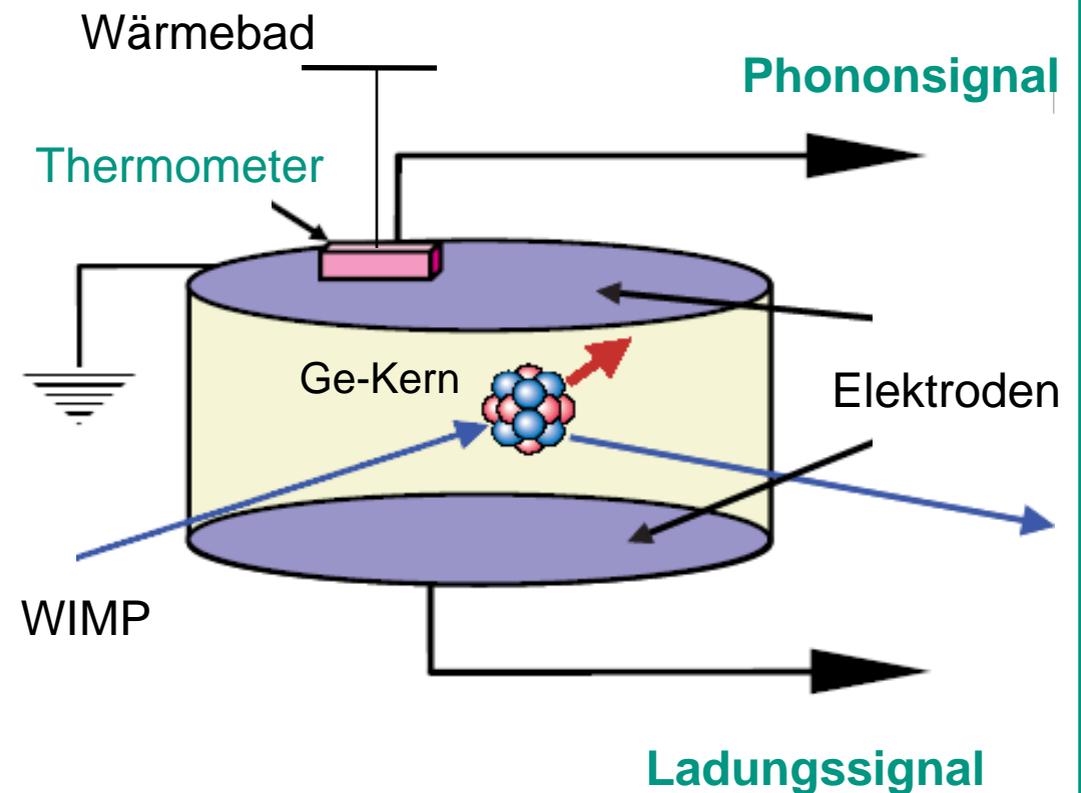
Szintillation und Phononen: CRESST

~1% der Energie als Licht detektiert



Ionisation und Phononen: CDMS, EW

~10-20% der Energie als Ionisation



**Oberflächeneffekte
bei Ladungssammlung!**

CDMS II Resultate

15.04.13: CDMS II veröffentlicht 'neue' Daten (2007/08)
140.2 kg Tage (8 Si-Detektoren je 106 g)
3 WIMP Kandidaten-Ereignisse ($\sim 3 \sigma$ Signal)
↪ **Spekulation um WIMPs mit ~ 10 GeV**

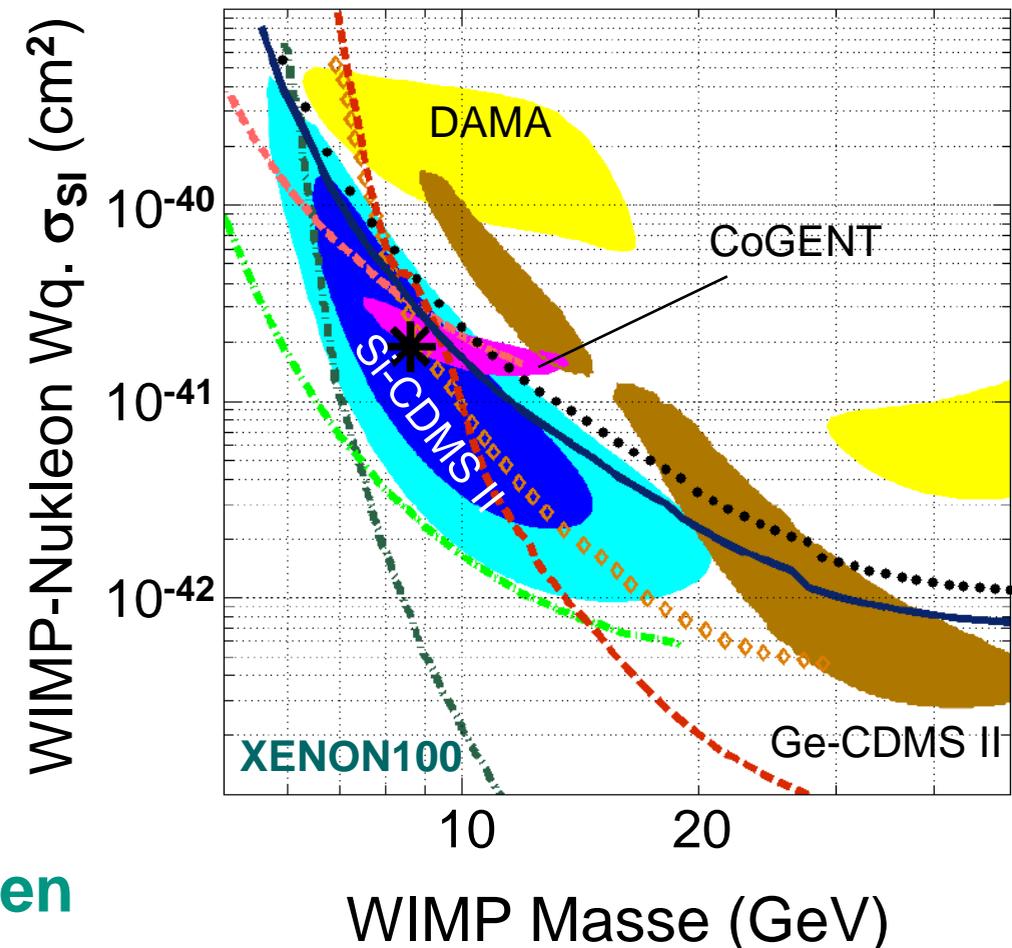


April 15, 2013

Underground experiment sees possible hints of dark matter

The Cryogenic Dark Matter Search experiment adds new intrigue to the hunt for dark matter.

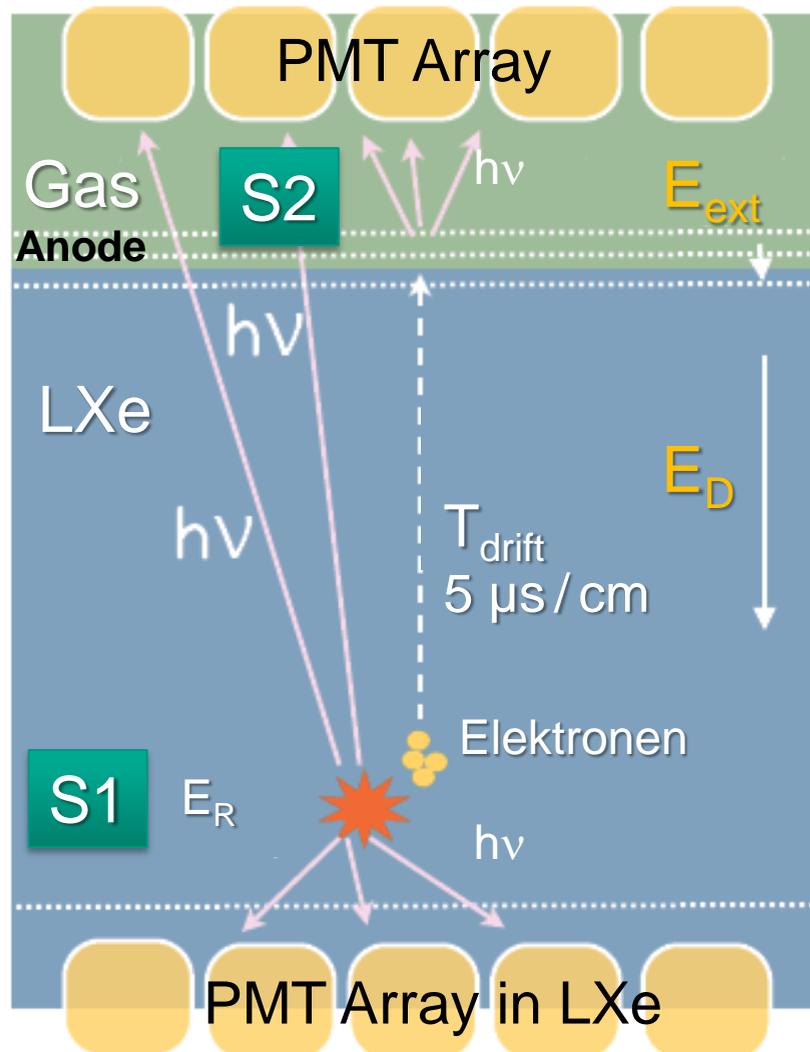
- WIMPs mit kleiner Masse (~ 10 GeV) in Theorien mit **dunklem Sektor**
 - frühere Hinweise von DAMA/Libra, CoGeNT & CRESST ✓
 - **Parameterregion von CDMS-II wird von XENON100 (& LUX) ausgeschlossen**



2-Phasen LXe-Experimente: Grundlagen

■ Prinzip von LXe 2-Phasen-Detektoren:

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



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

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

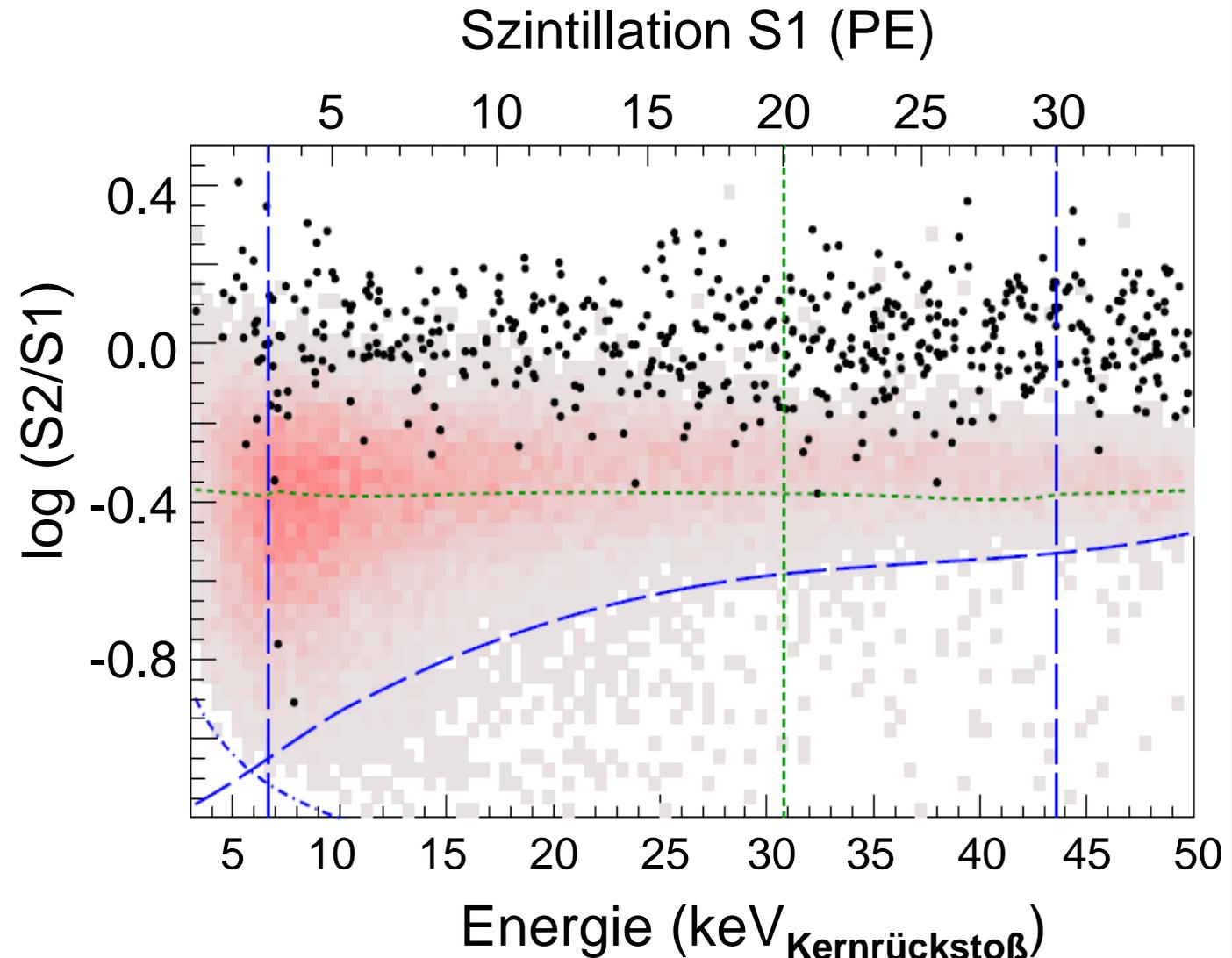
■ Koinzidenz von S1 und S2:

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

XENON100 Experiment: Resultate

■ Resultate von XENON100:

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



■ Resultate von LUX :

- 2/2013: erstes Abkühlen und Beginn der Datennahme (Kalibration,...)
- erste Meßphase in 2013 über 85 Tage (April-August 2013)
- Ereignisse mit $0.9-5.3 \text{ keV}_{ee}$ im 100 kg fiducial volume:
 - Beobachtung: $(3.1 \pm 0.2_{\text{stat}})$ Ereignisse
 - Untergrunderwartung: $(2.6 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{syst}})$ Ereignisse
- WIMP-Limits: $\sigma_{SI} < 7.6 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$ (bei $M_\chi = 33 \text{ GeV}$)
aktuell bestes Limit weltweit



■ Zukünftige Messungen von LUX :

- geplant: 300 Messtage mit LUX in 2014/15
- Verbesserung der Sensitivität um Faktor 5
- Vorbereitung eines größeren **Nachfolgeexperiments LZ**:
Vergrößerung der Targetmasse um Faktor 20



WIMP Resultate: aktueller Status

