

Astroteilchenphysik - I

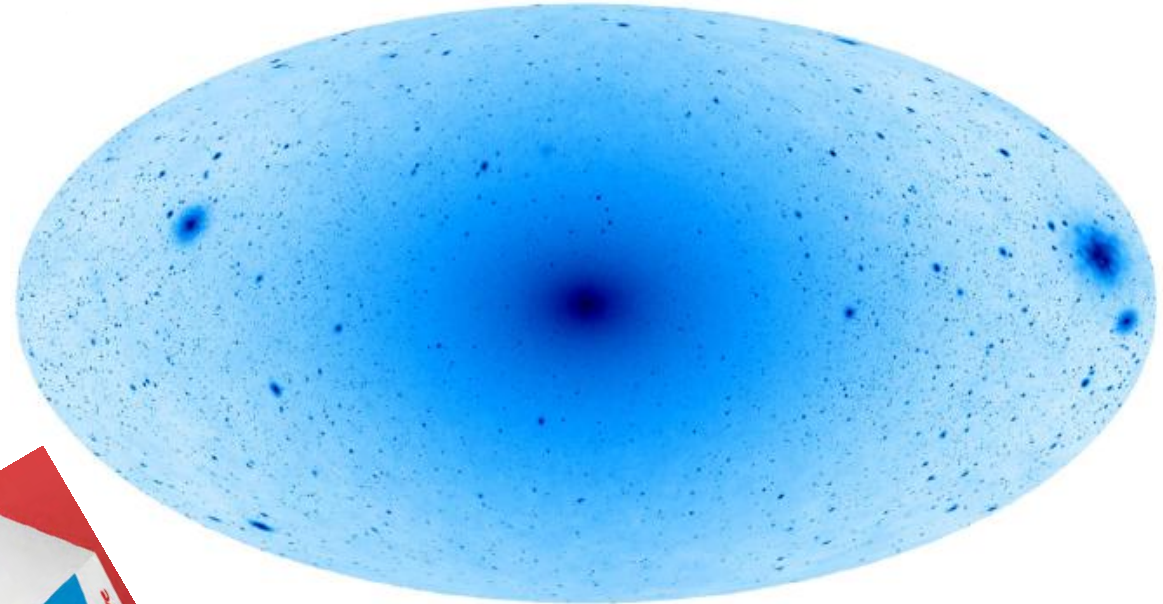
WS 2012/2013

Vorlesung # 11, 17.01.2013

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Dunkle Materie

- LHC Suche nach SUSY
- Neutralino-Annihilation: Kanäle
- astrophysikalische Orte für Suche nach Dark Matter Annihilation
- DMA 'messenger'-Teilchen: γ , e^+ , $\bar{p}$, ν
- γ -Astronomie: CGRO und FERMI



WIMP-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 ($s=1/2$)

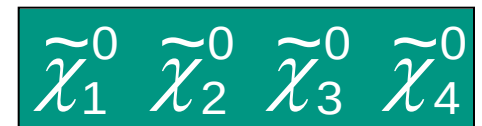


leichtestes Neutralino = LSP – Kandidat

Masse? Mischungsparameter?

Annihilations- & Wechselwirkungsrate?

Lebensdauer (exakte Erhaltung von R_p)?



CDM?

■ thermische Erzeugung:

- Teilchen sind im heißen frühen Universum im thermischen Gleichgewicht durch Wechselwirkungsprozesse
- bei Ausfrieretemperatur T_{fr} wird Häufigkeit Ω_i und free-streaming Länge λ_i (CDM/HDM) festgelegt
- Beispiel: LH Neutrinos ν_i (**HDM**), LH Sneutrinos $\tilde{\nu}_i$ Neutralinos $\tilde{\chi}^0$ (**CDM**)



■ nicht-thermische Erzeugung:

- Teilchen sind im heißen frühen Universum **nicht** im thermischen Gleichgewicht, die Wechselwirkungsprozesse sind zu schwach
- Häufigkeit Ω_i und free-streaming Länge λ_i (WDM/CDM) festgelegt z.B. durch Zerfallsraten der Mutterteilchen, Oszillationsraten
- Beispiel: RH Neutrinos ν_i (**WDM**), RH Sneutrinos $\tilde{\nu}_i$ Axionen a (**CDM**)



- **leichtestes Neutralino** $\tilde{\chi}_1^0$: Linearkombination aus Bino, Wino & Higgsinos



$$\tilde{\chi}_1^0 = c_1 \cdot \tilde{B}^0 + c_2 \cdot \tilde{W}^0 + c_3 \cdot \tilde{H}_u^0 + c_4 \cdot \tilde{H}_d^0$$

Gaugino-Anteil

Higgsino-Anteil

- Parameter c_i sind sehr stark modellabhängig:
 - MSSM: Erwartung $c_1 \gg c_2, c_3, c_4$ (LSP = Bino)
 - NLSP ist das Wino, Higgsinos sind i.a. sehr schwer
 - NUHM: $c_{3,4}$ dominant (Higgsino)

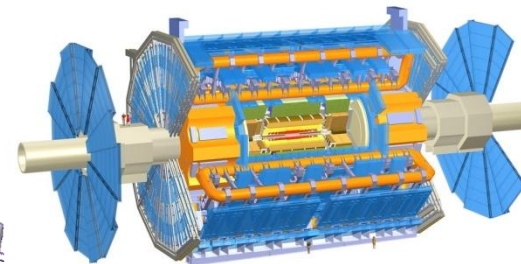
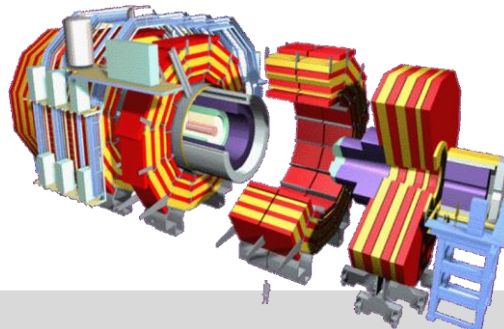
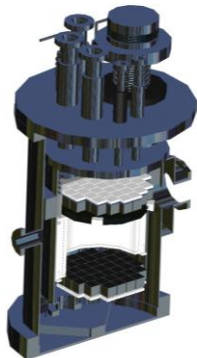
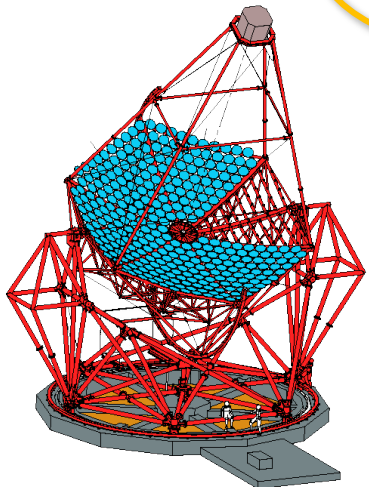
- **leichtestes supersymmetrisches Neutralino** χ_1^0 ist als LSP ein **idealer WIMP-Kandidat für CDM** (aber Massen $m_{1/2} < 1.5$ TeV erforderlich!)

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}

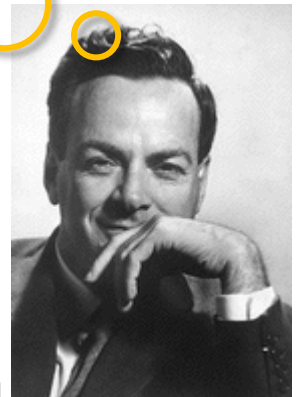
Supersymmetrie auf dem Teststand



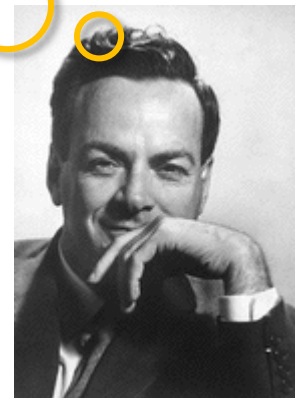
*It doesn't matter how
beautiful your theory is.
It doesn't matter
how smart you are.
If it doesn't agree with experiment,
it's wrong!*



Richard P. Feynman



SM ohne Supersymmetrie

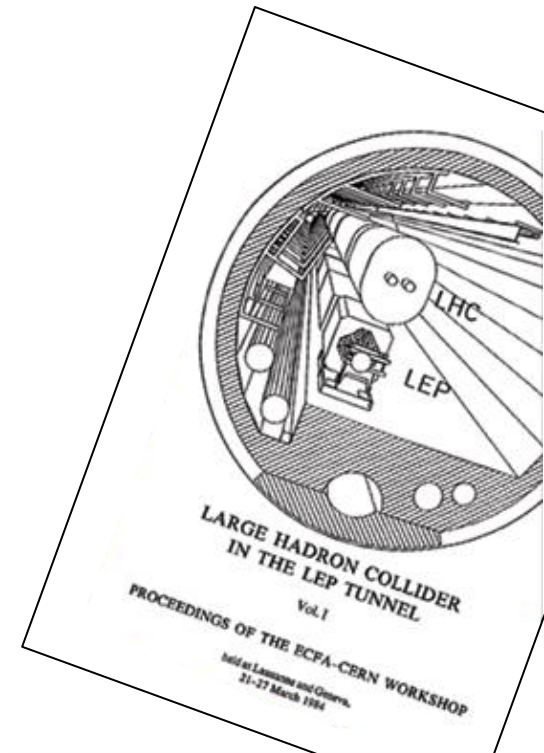
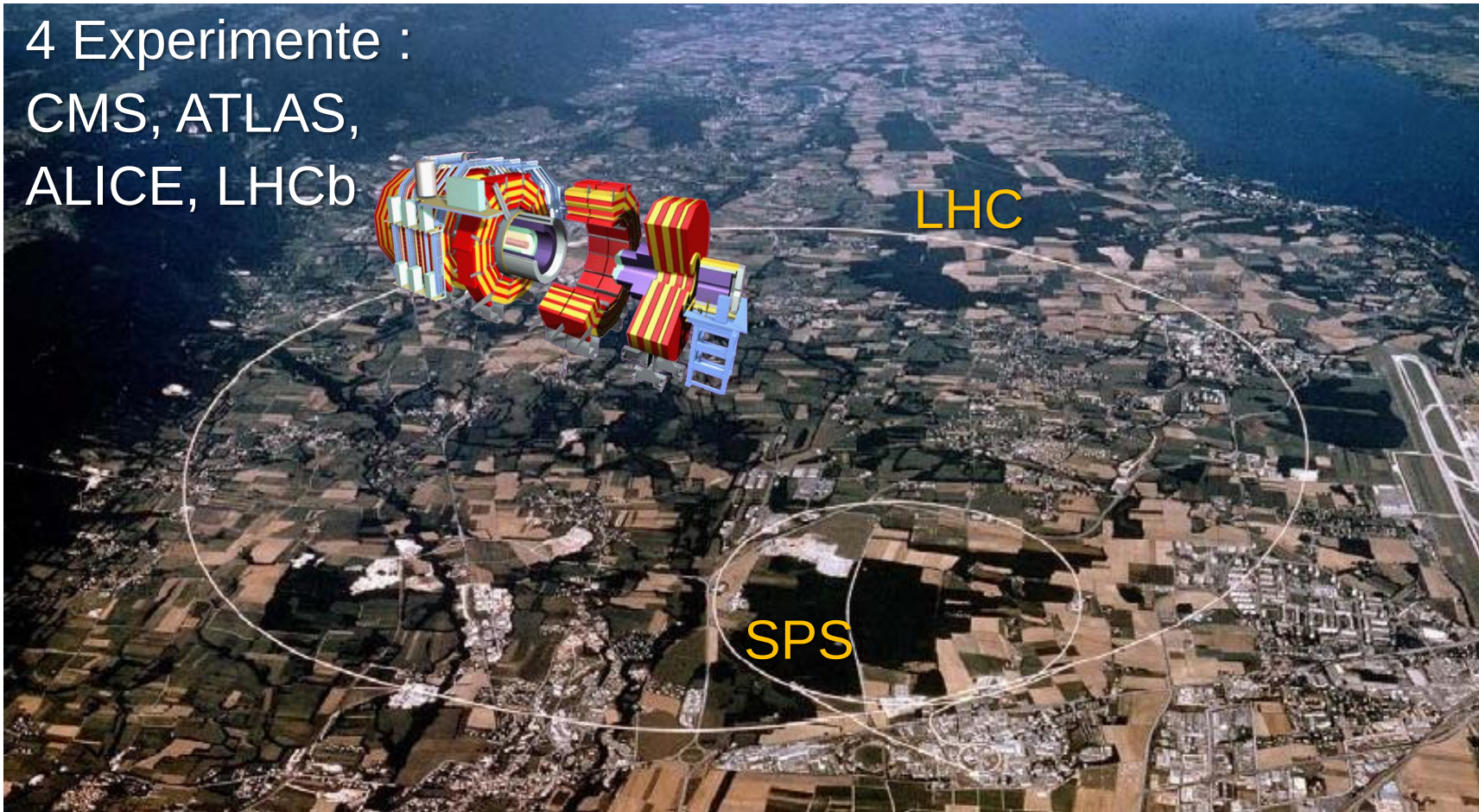


LHC - Large Hadron Collider

- p-p Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14$ TeV Schwerpunktsenergie
- Datennahme seit Frühjahr 2010 bei $E_p = 3.5$ (4.0) TeV
- Ziele: - Nachweis des Higgs-Bosons

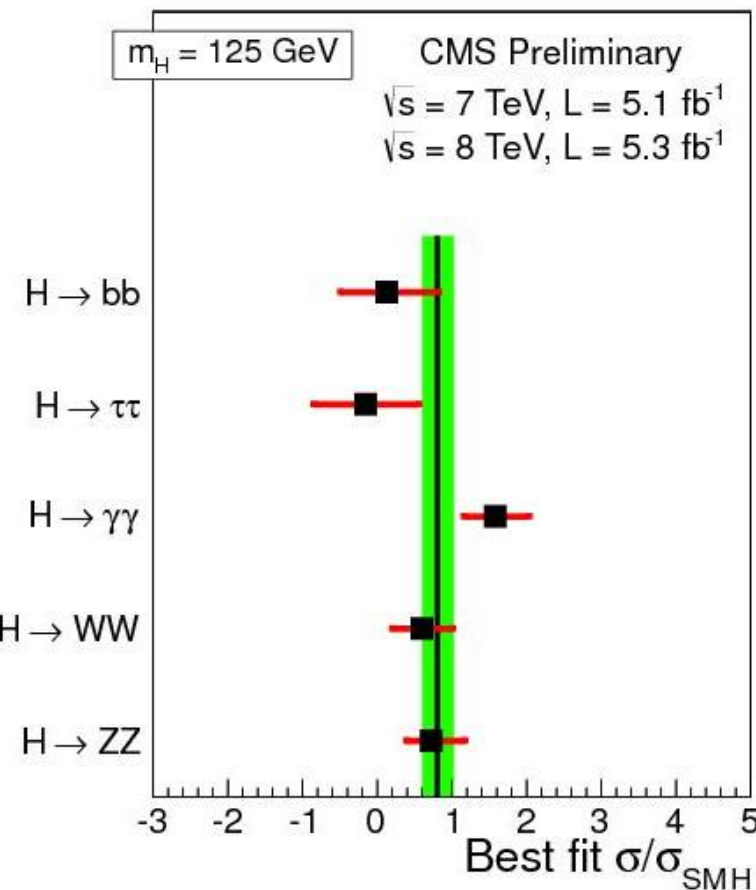
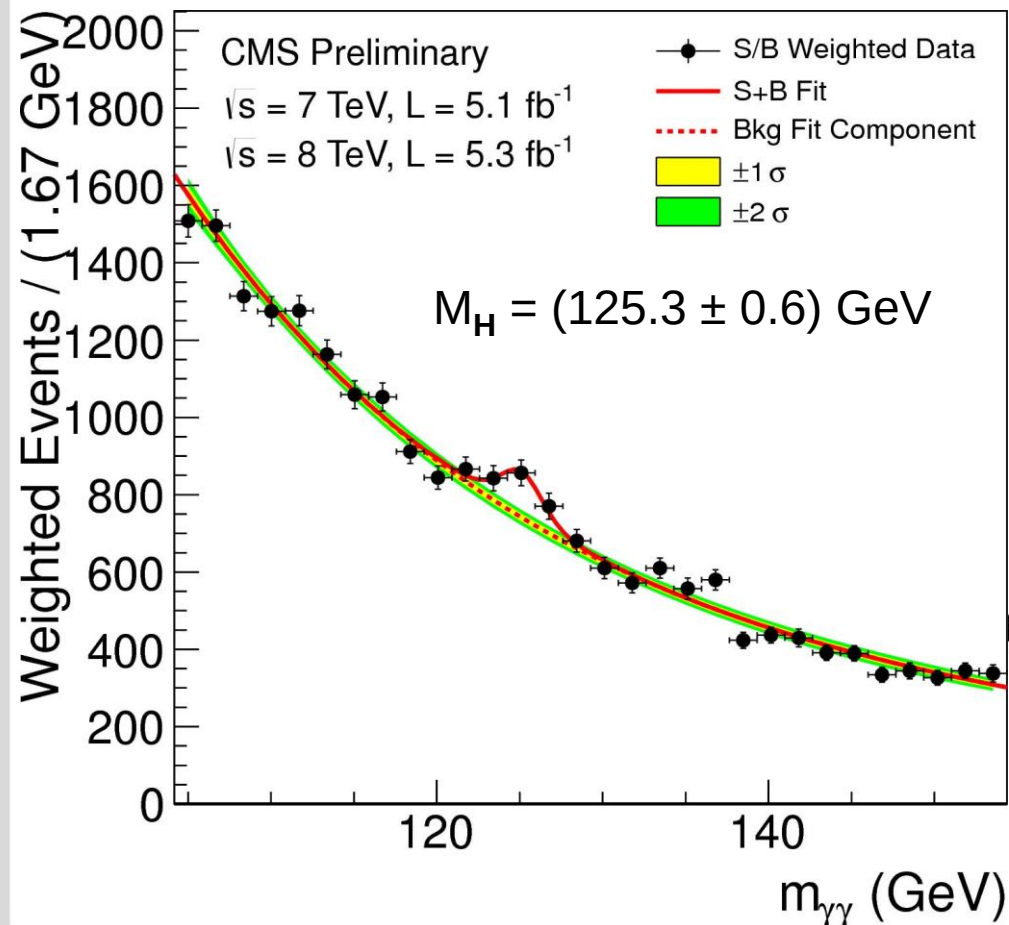
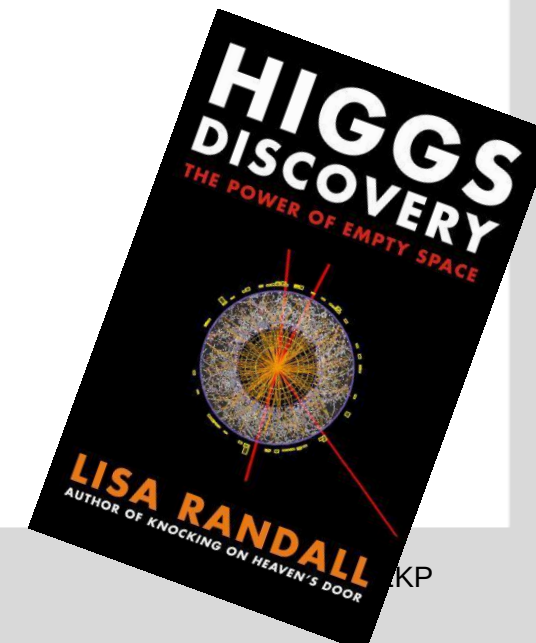
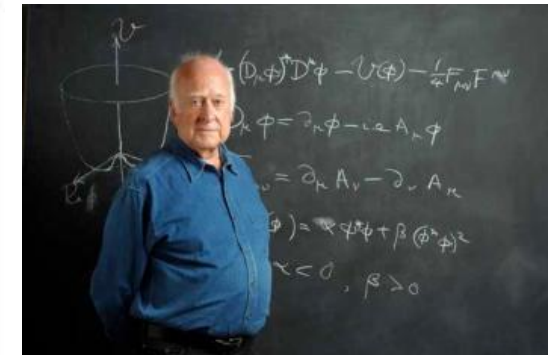
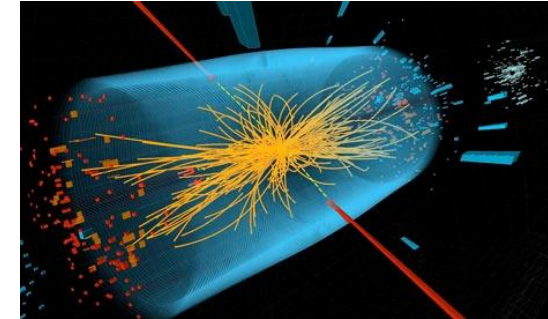


4 Experimente :
CMS, ATLAS,
ALICE, LHCb



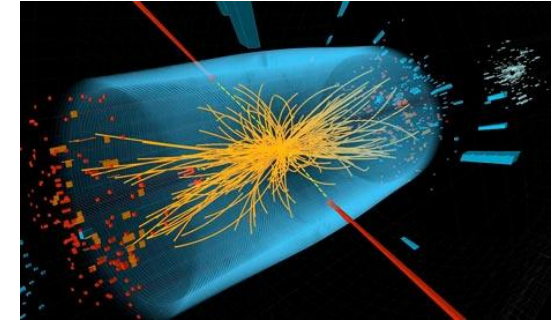
LHC - Large Hadron Collider

- 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 ✓
- $M_H \sim 125$ GeV erfordert starkes fine-tuning für SUSY!



LHC - Large Hadron Collider

- 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 ✓
- $M_H \sim 125$ GeV erfordert starkes fine-tuning für SUSY!



Runners-Up

This year's runners-up for Breakthrough of the Year underscore feats in engineering, genetics, and other fields that promise to change the course of science.



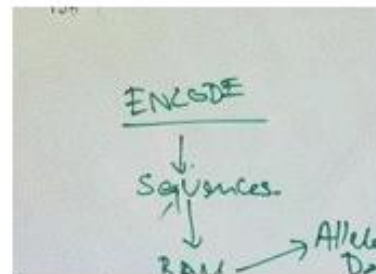
Denisovan Genome



Genome Engineering



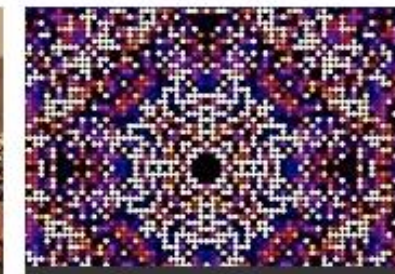
Neutrino Mixing Angle



ENCODE



Curiosity Landing



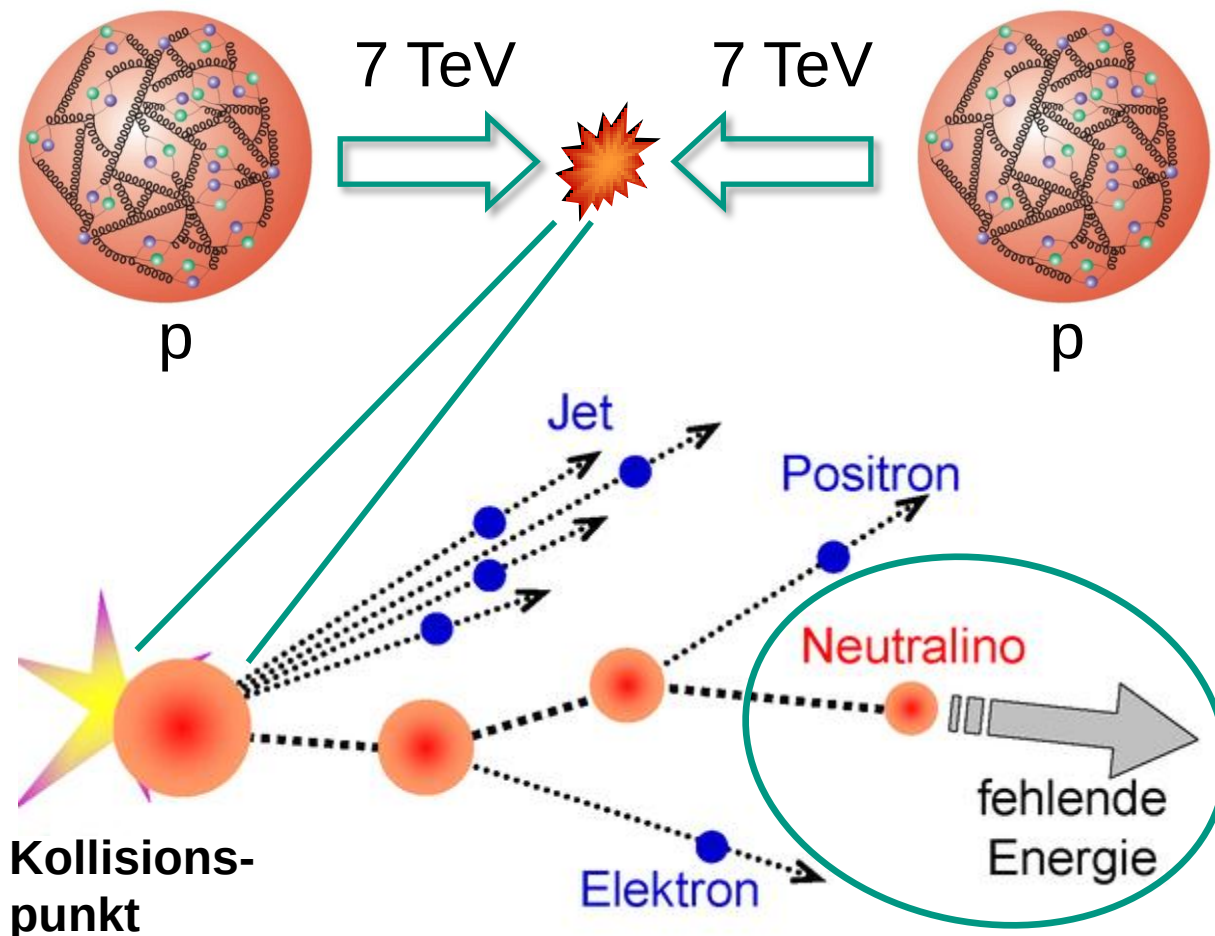
X-ray Laser Advances

vgl.
Kap. 5.4

■ 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** $\tilde{\chi}^0$

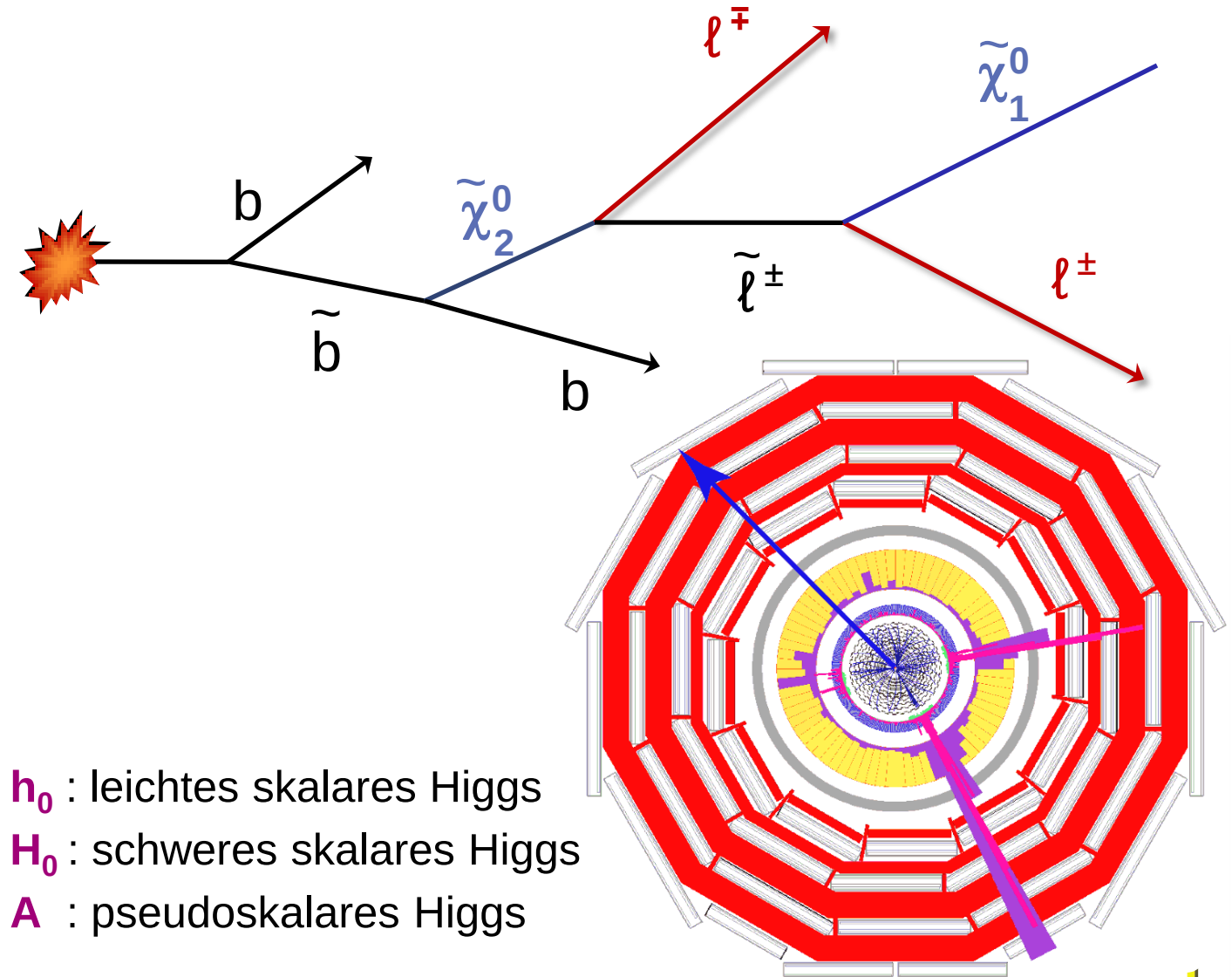
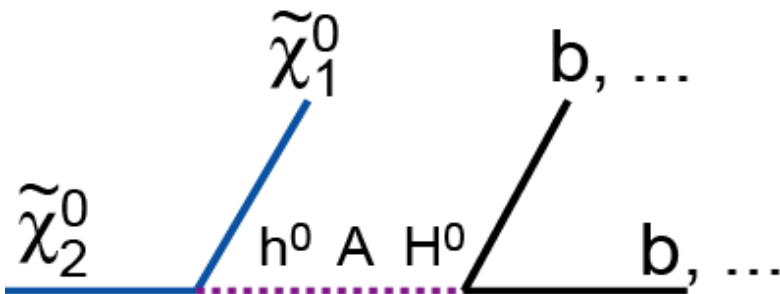
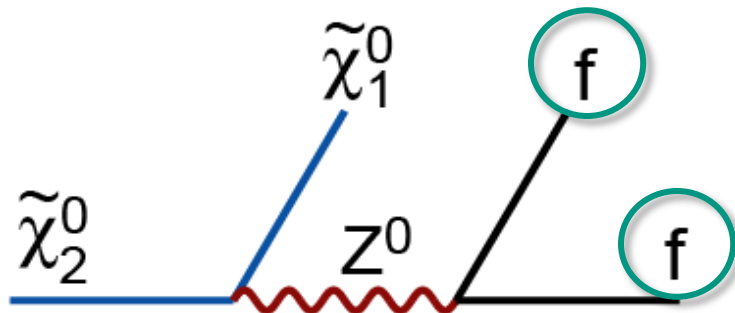
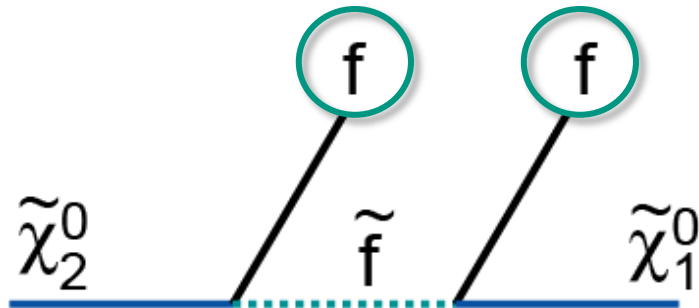


■ Neutralino-Signatur am LHC:

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

3-Körper Zerfälle von Neutralinos

- Zerfall des zweitleichtesten Neutralinos $\tilde{\chi}_2^0$ (NLSP) in das stabile leichteste Neutralino $\tilde{\chi}_1^0$ (LSP): $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \ell^\pm + \ell^\mp$

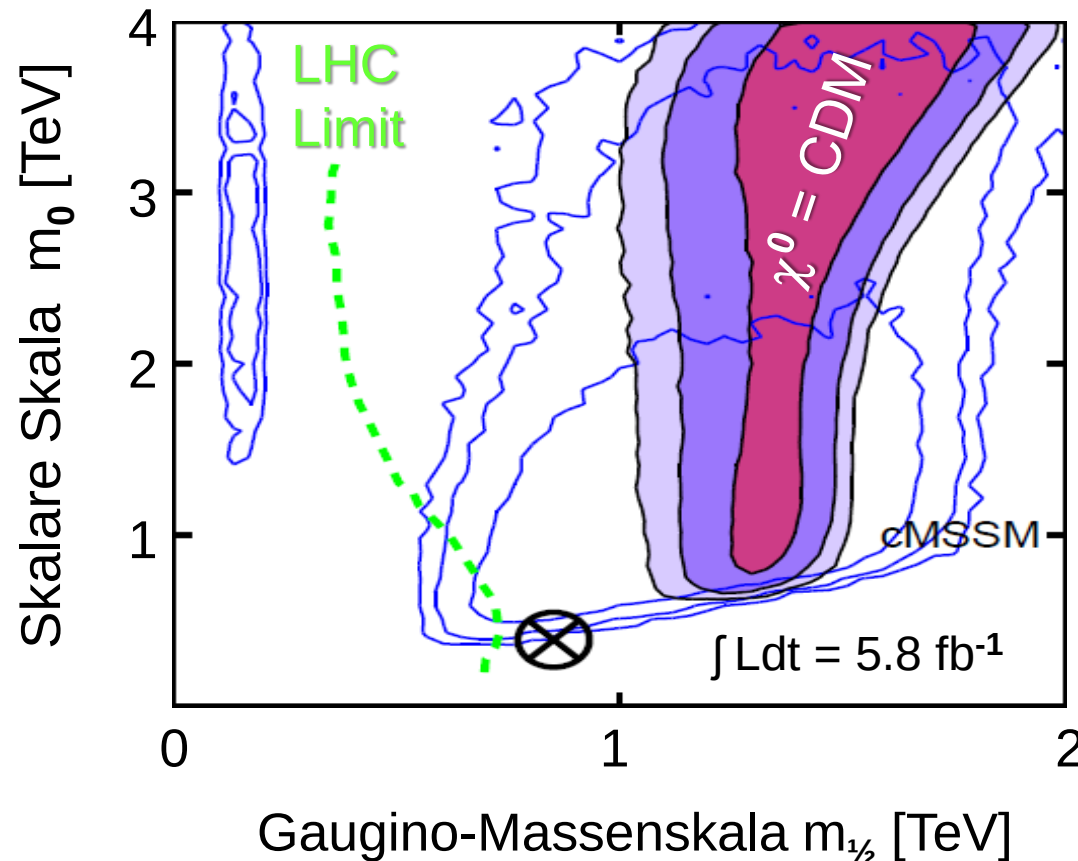


h_0 : leichtes skalares Higgs
 H_0 : schweres skalares Higgs
 A : pseudoskalares Higgs

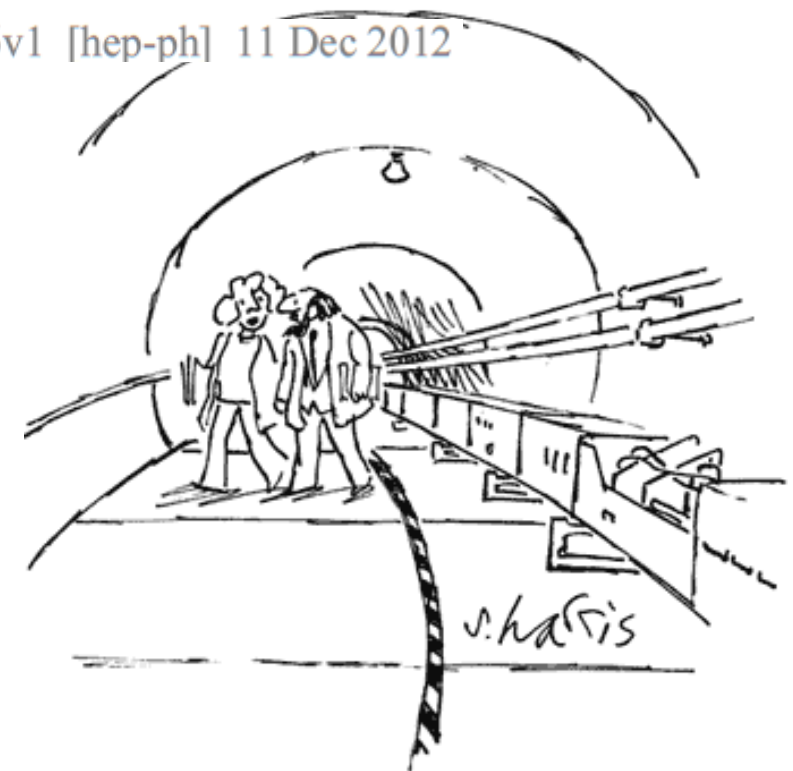
LHC – CMS Entdeckungspotenzial

■ Aktuelle SUSY Limits und cMSSM-Analysen:

- $\sqrt{s} = 7(8) \text{ TeV}$: **keine Evidenz für SUSY Teilchen**
- LHC-Limits: Gauginomasse $m_{1/2} > 0.5 \text{ TeV}$
(ab $m_{1/2} > 1.5 \text{ TeV}$ wird Chargino $\chi^\pm$ zum LSP!)
- verbessertes SUSY-Entdeckungspotenzial nach LHC Upgrade @ 14 TeV



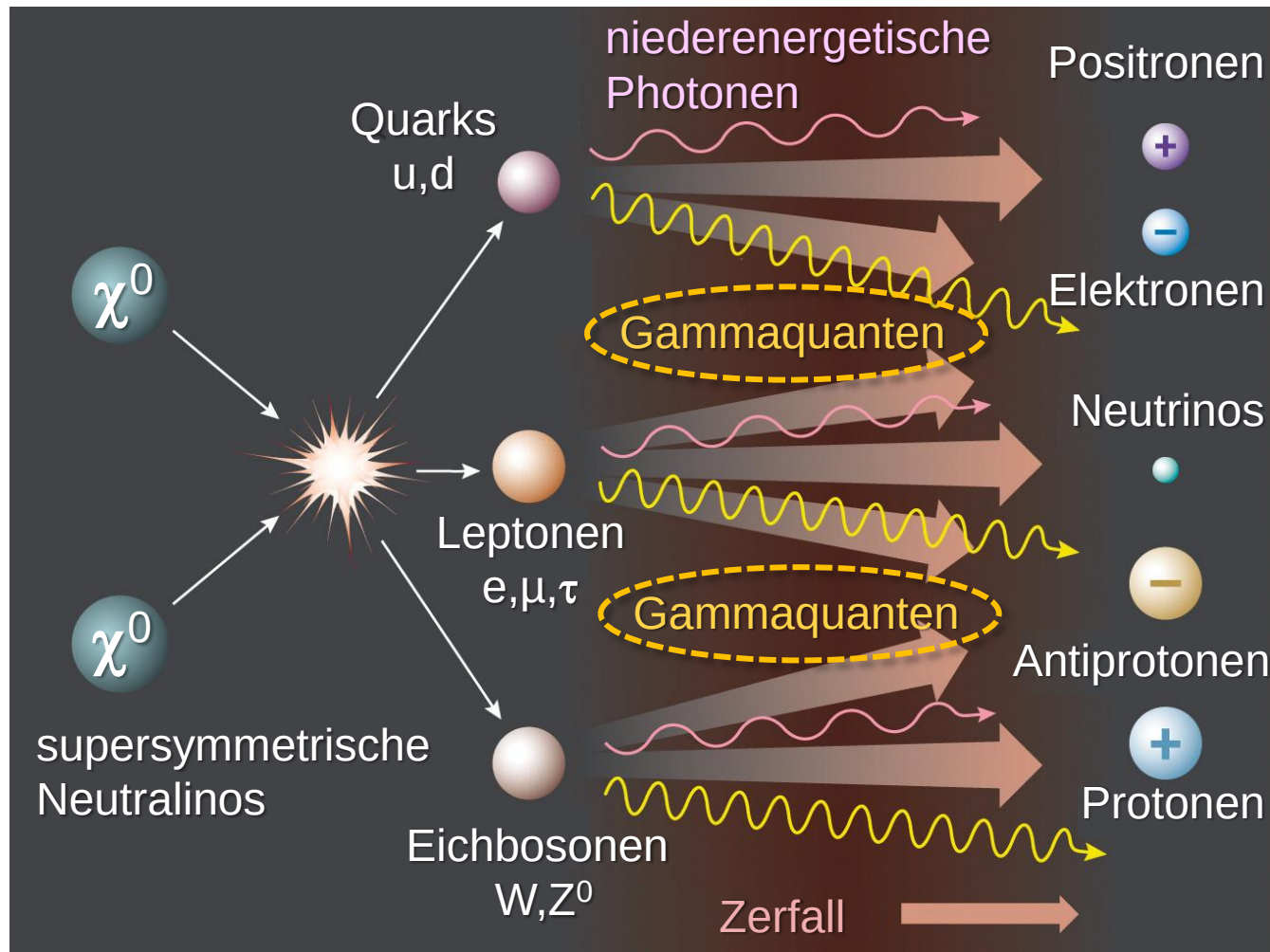
arXiv:1212.2636v1 [hep-ph] 11 Dec 2012



"WHAT IF WE SPEND ALL THESE BILLIONS, AND THERE JUST AREN'T ANY MORE PARTICLES TO FIND?"

4.2 Indirekte Nachweismethoden

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



Elektronen/Positronen aus:

- hadronische Zerfallsprozesse
- Paarbildung
- direkte Erzeugung

Neutrinos aus:

- hadron./lept. Zerfallsprozesse

Gammas aus:

- hadronische Zerfallsprozesse
- Bremsstrahlung

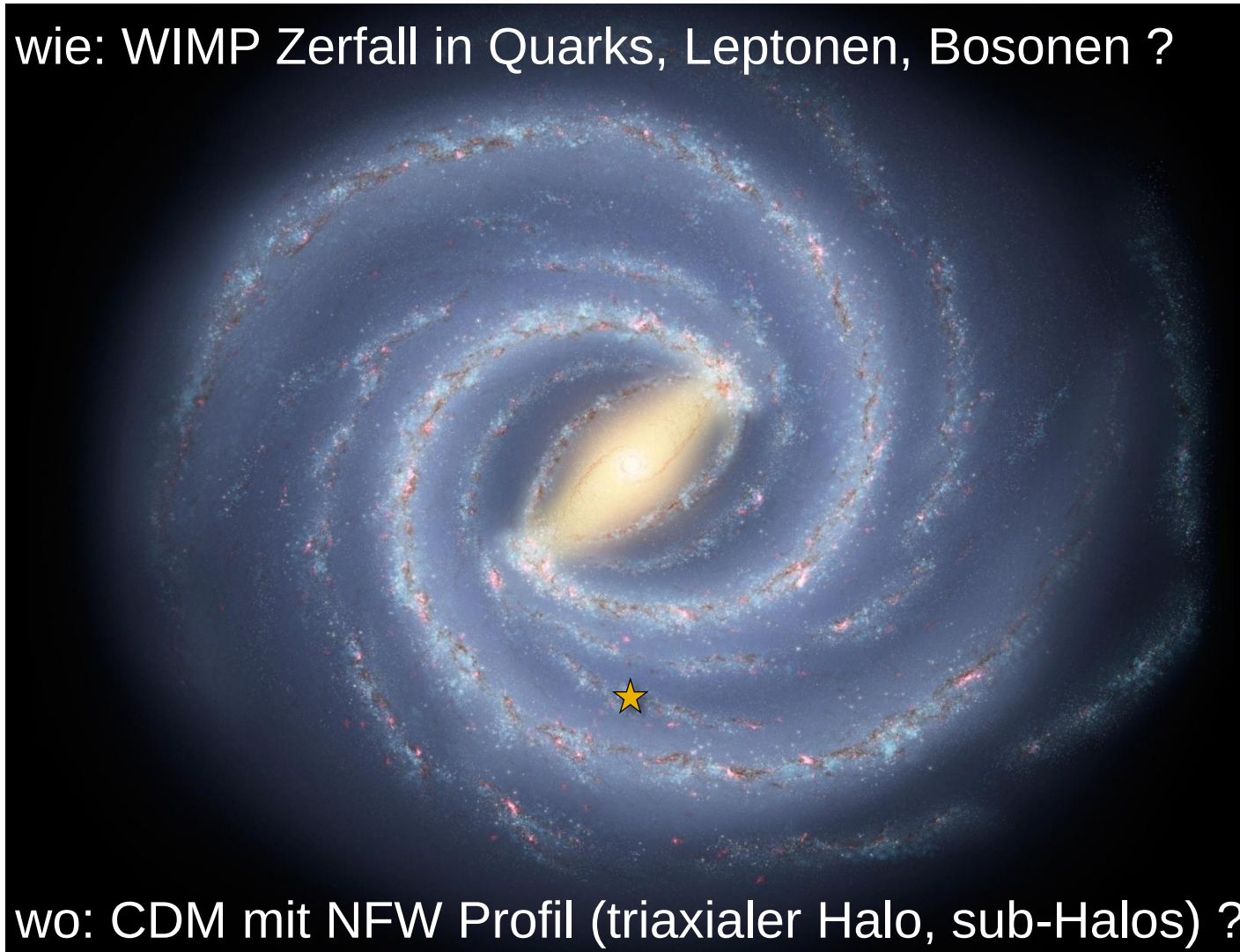
Protonen/Antiprotonen aus:

- Hadronisierung & Jets
- Eichboson-Zerfälle

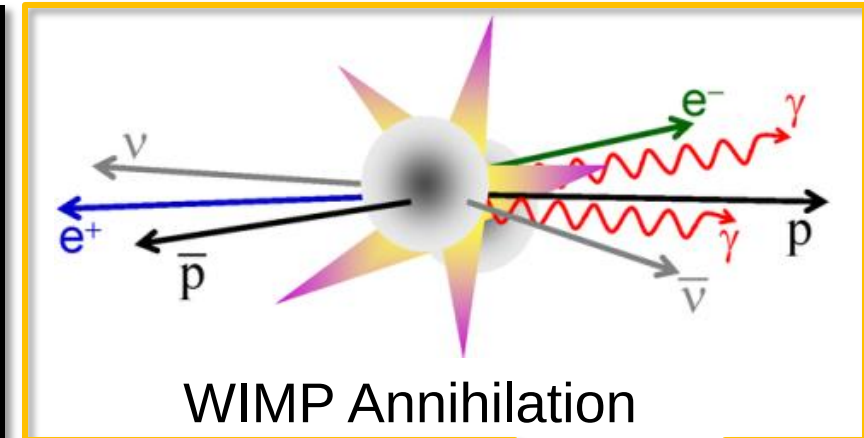
WIMP Annihilation: Modellierung

- **Nachweis der WIMP-Annihilation** erfordert präzise Modellierung von
 - a) χ^0 -Signal: Teilchenphysik (**Zerfallsmoden**) & Astrophysik (**Halomodell**)

wie: WIMP Zerfall in Quarks, Leptonen, Bosonen ?



wo: CDM mit NFW Profil (triaxialer Halo, sub-Halos) ?



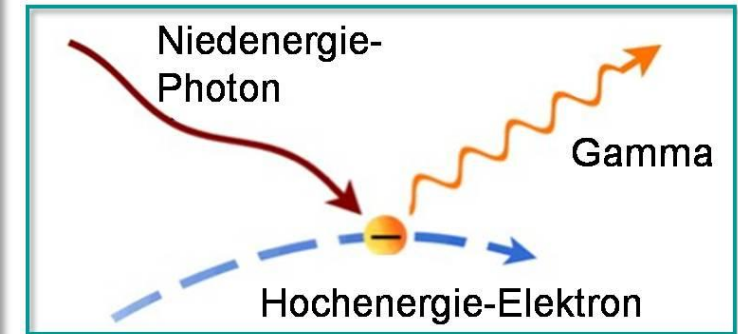
WIMP Annihilation: Modellierung

- **Nachweis der WIMP-Annihilation** erfordert präzise Modellierung von
 - b) astrophysikalischem Untergrund (**Quellen**, **Untergrundmechanismus**)

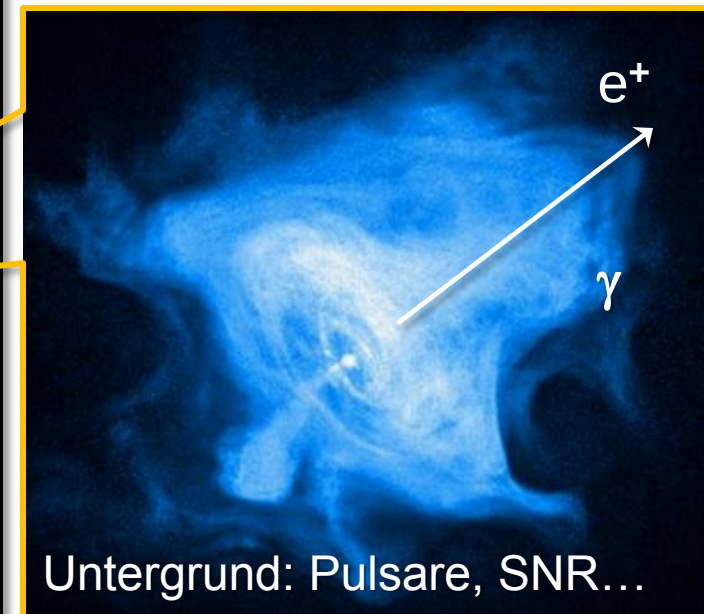
wie: Energieverteilung des Untergrunds, Prozesse ?



wo: Verteilung von Pulsaren, SNRs, CR-Quellen ?



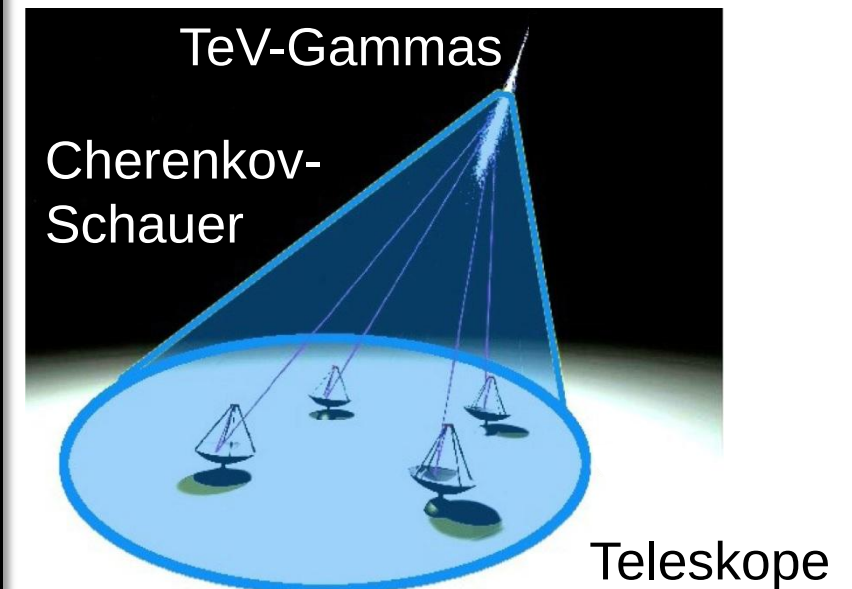
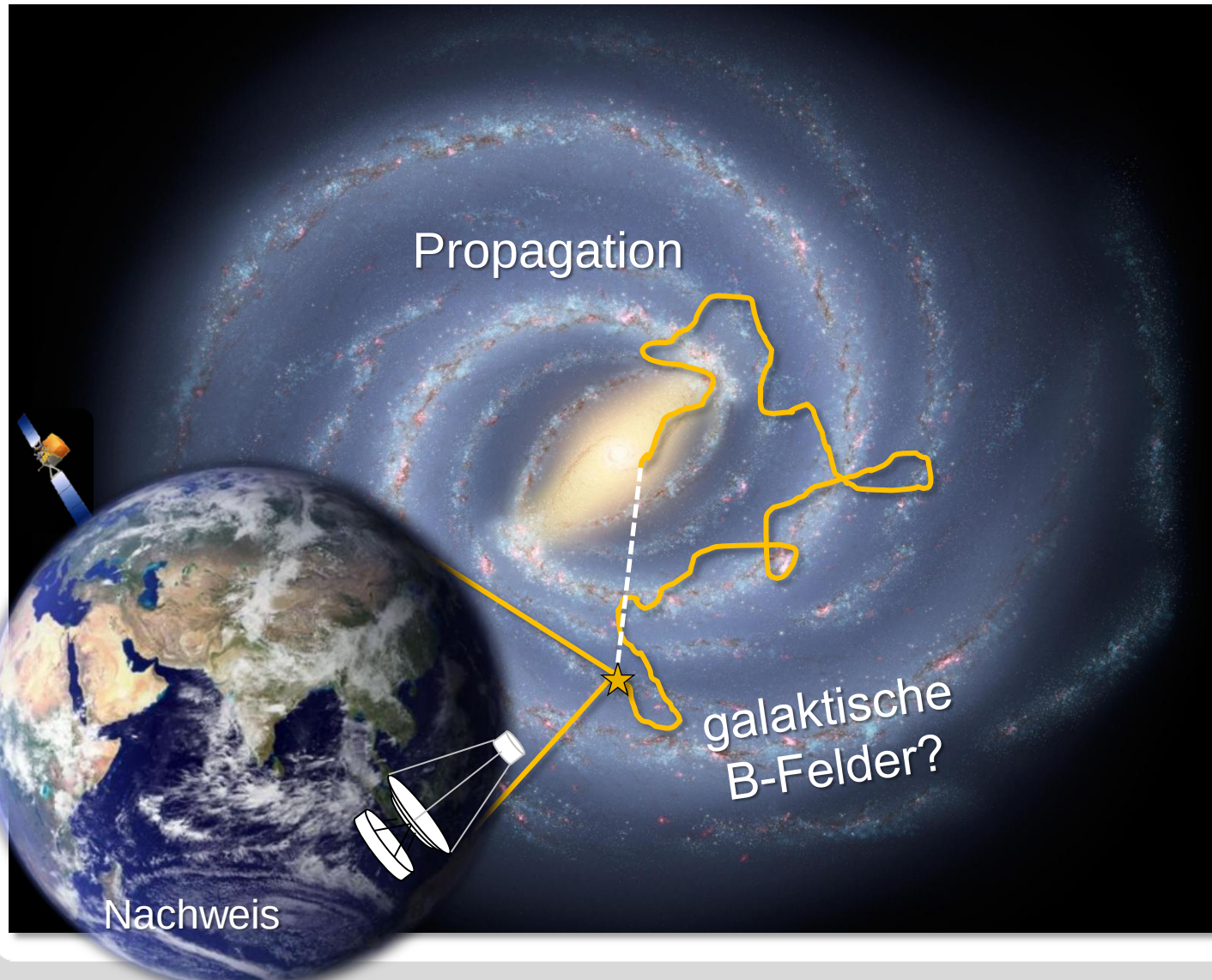
inverser Compton Effekt



Untergrund: Pulsare, SNR...

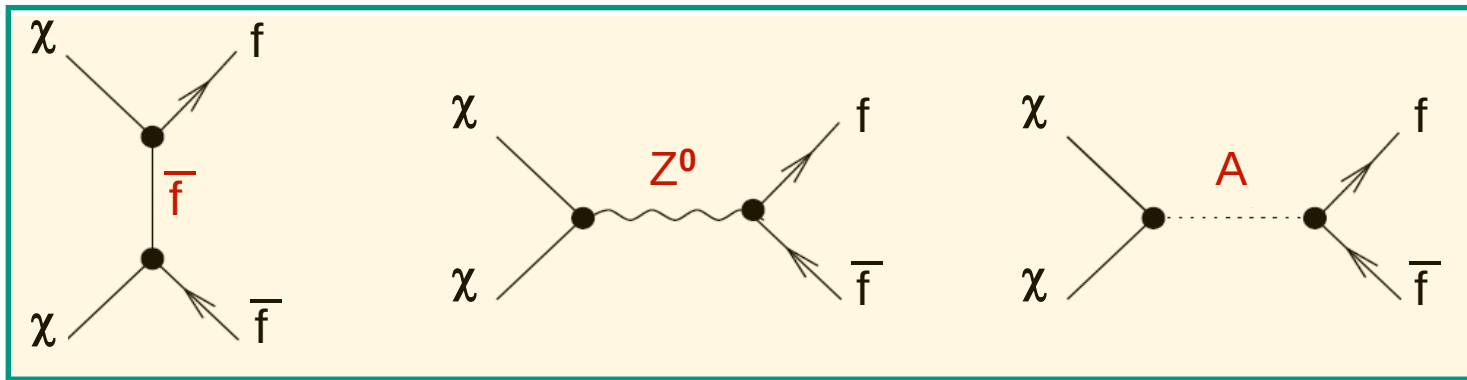
WIMP Annihilation: Modellierung

- **Nachweis der WIMP-Annihilation** erfordert präzise Modellierung von
- c) Propagation (p & e⁺: **B-Felder**) und d) Nachweis-Effizienz (**GeV-TeV Skala**)



Neutralino Annihilationsprozesse

Annihilation in Fermion-Paare (Quarks, Leptonen)



t-Kanal

s-Kanal

s-Kanal (Annihilation):

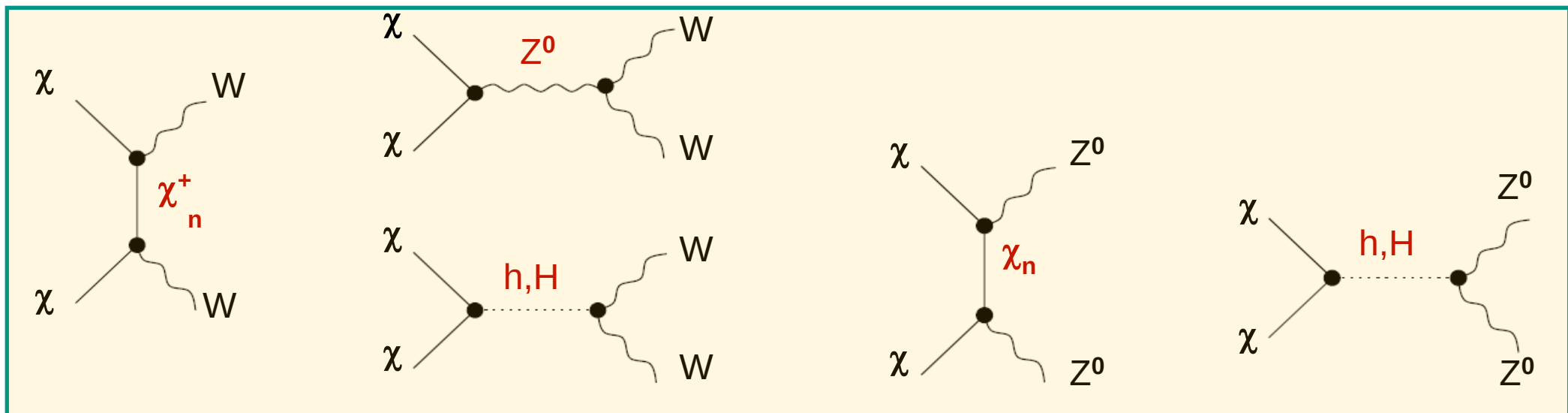
- Z^0 -Boson
- pseudoskal. Higgs A

t-Kanal (Umwandlung):

- Sfermionen ($\tilde{v}$)

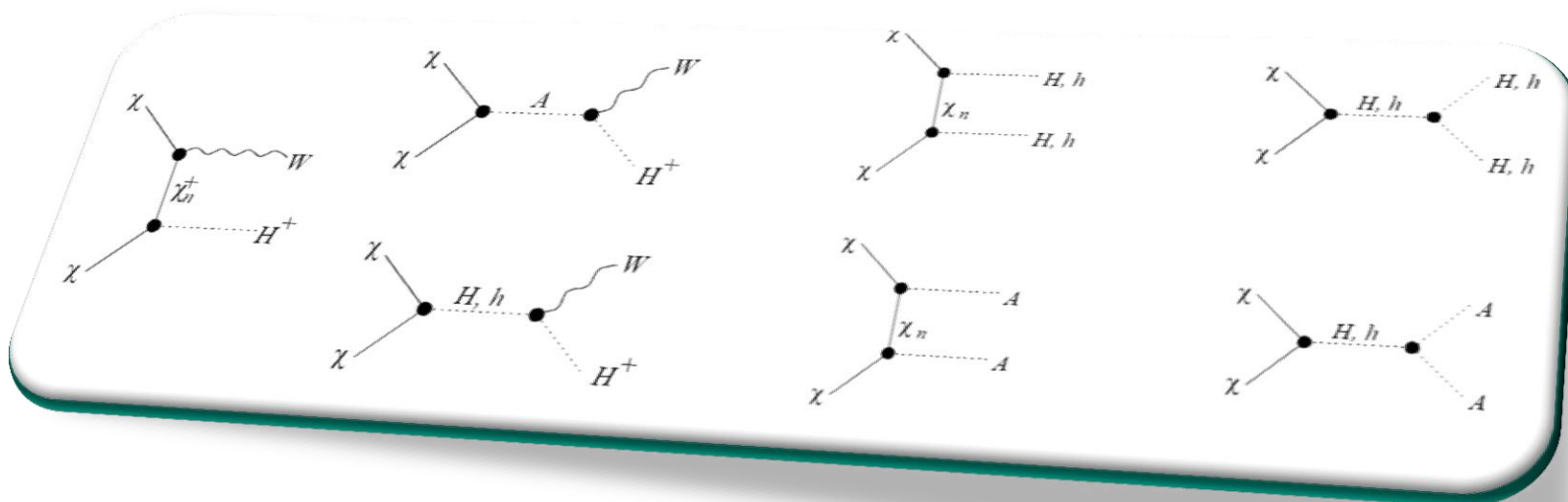
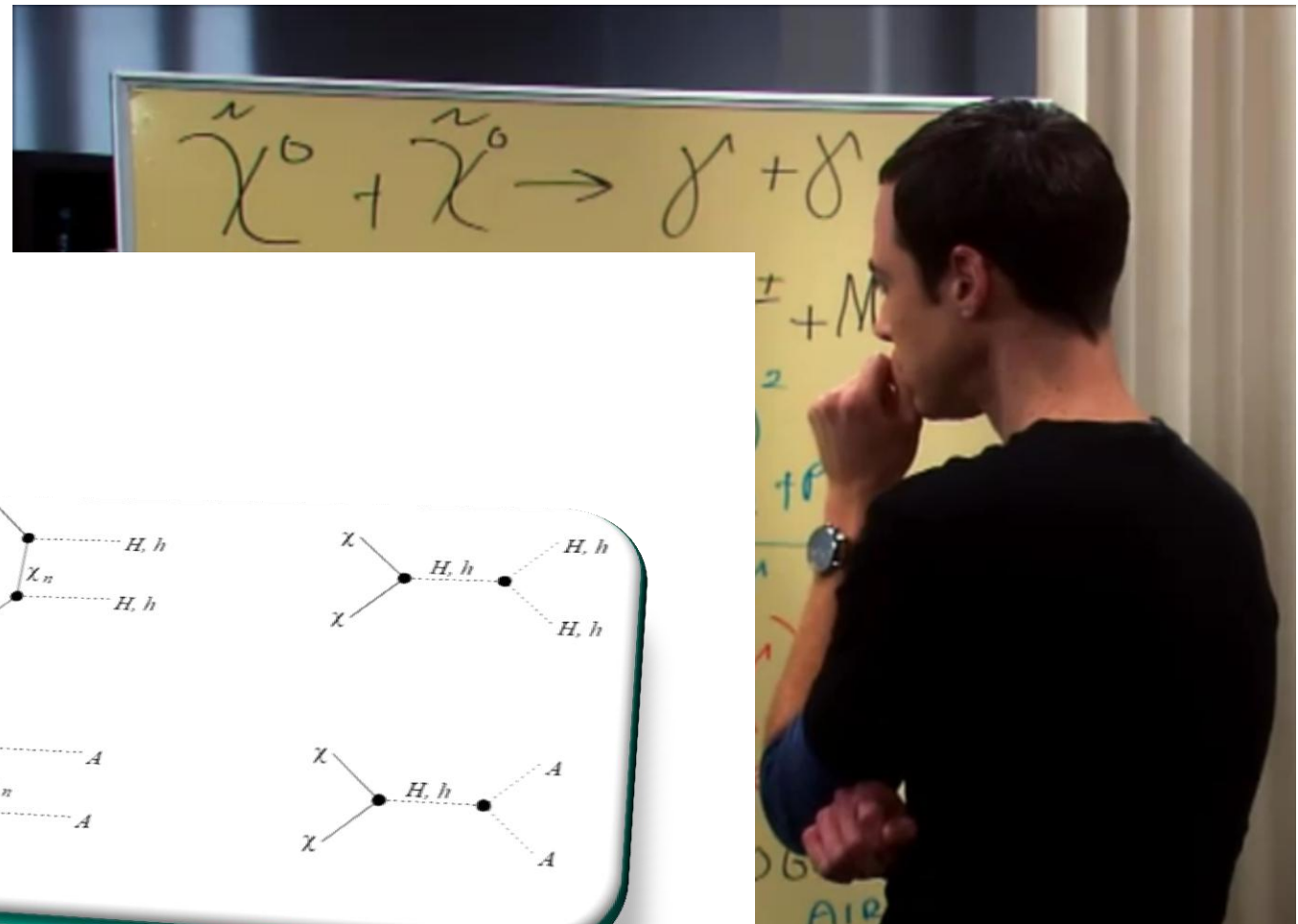
Annihilation in Eichboson-Paare $W^\pm Z^0$

t-Kanal über: Charginos, Neutralinos



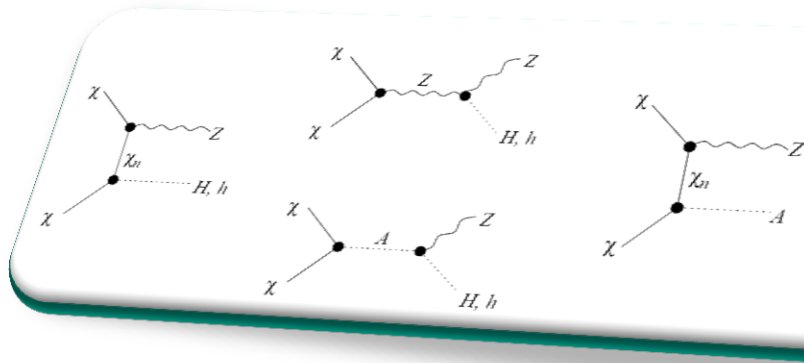
Neutralino Annihilationsprozesse

- **WIMP-Annihilationsquerschnitte** sind stark abhängig vom verwendeten SUSY-Modell und den gewählten Parametern: viele mögliche Feynman-Diagramme und Austauschteilchen

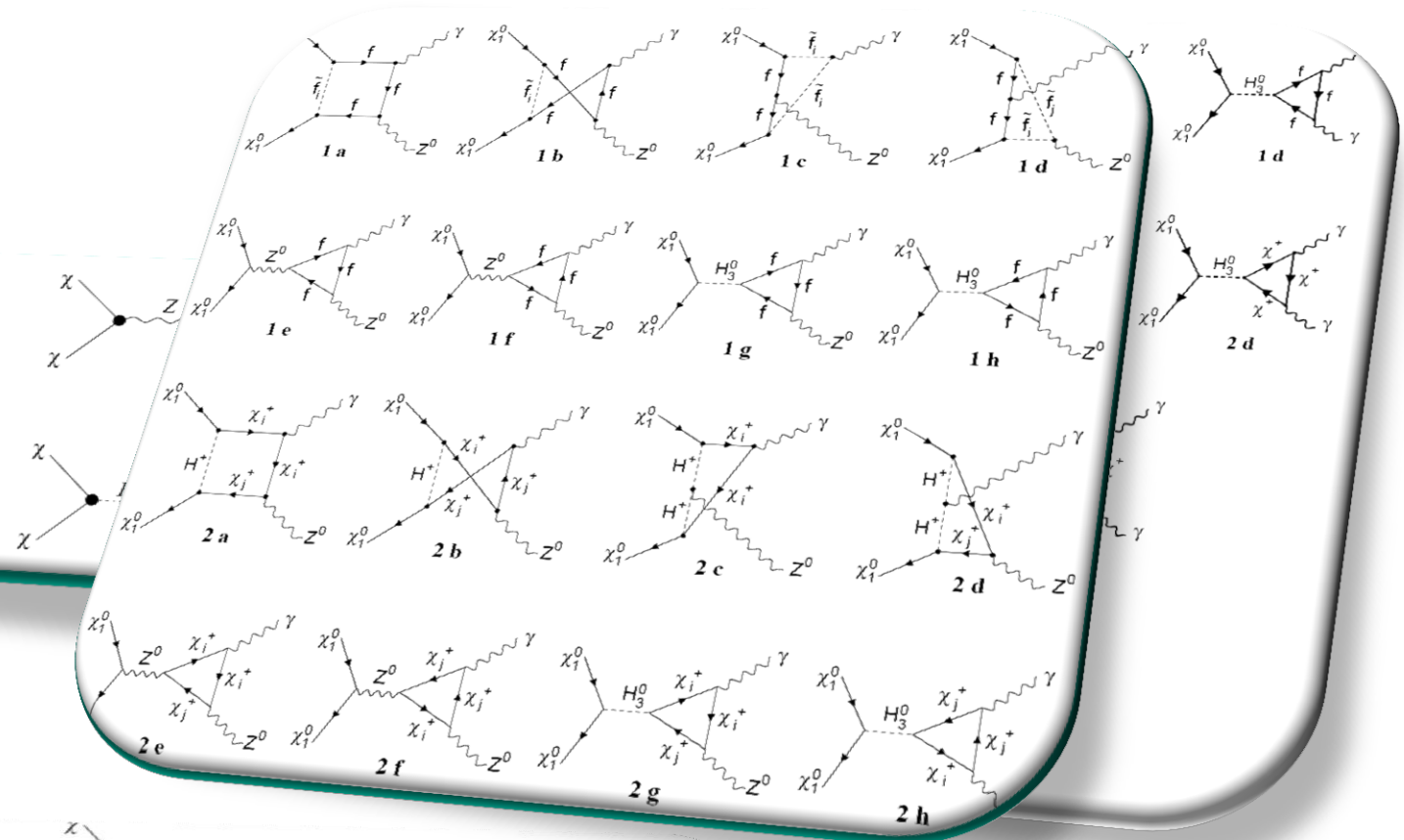
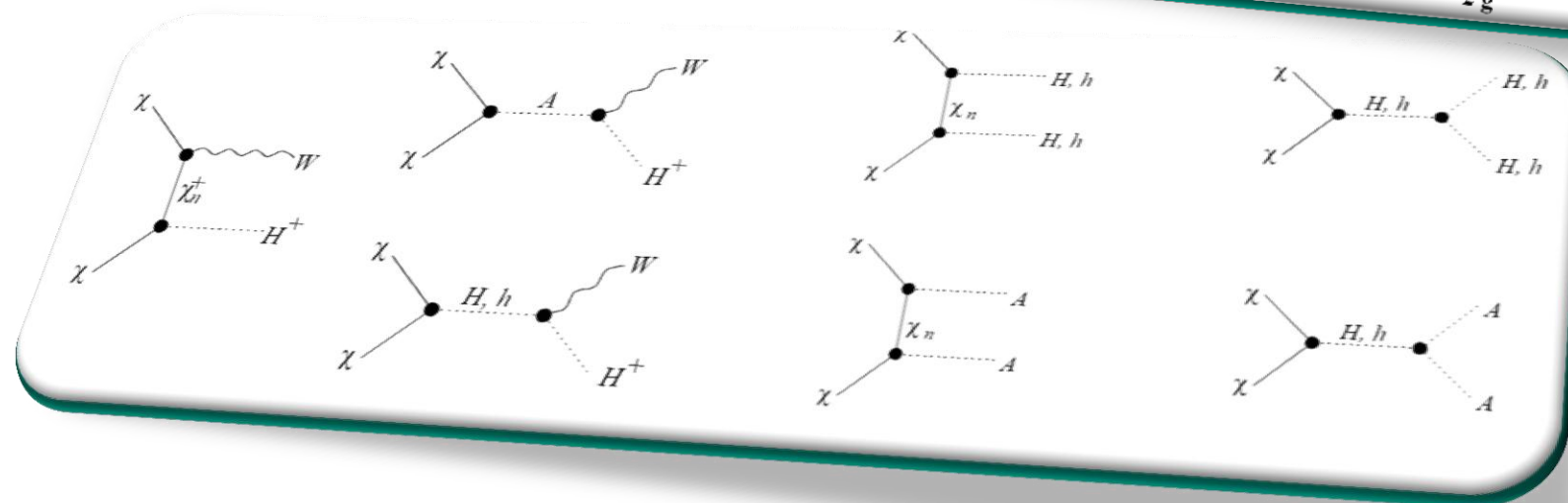


Neutralino Annihilationsprozesse

...ein Ausschnitt weiterer
Annihilationskanäle...



...in Higgs-Bosonen &
Eichbosonen...



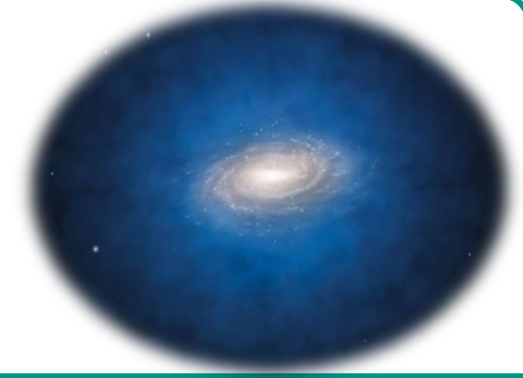
**Dark
SUSY**

WIMP Annihilation: Erzeugungsorte

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

Suche in **Bereichen mit DM-Überdichten**

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

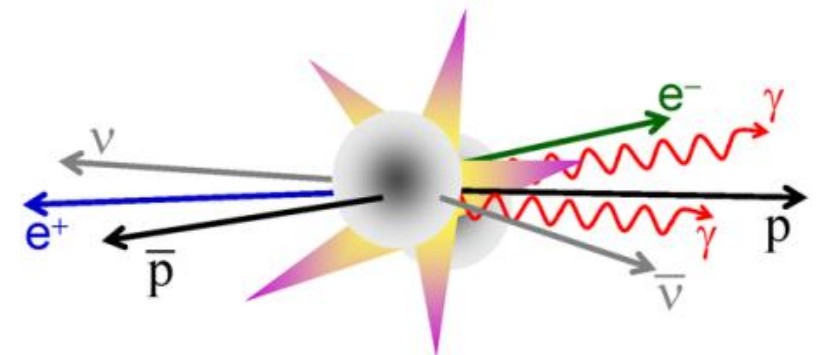


- Anzahl N_{Ann} von WIMP-Annihilationen in Halo (pro Zeit/Volumen-Einheit):

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



$$\rho_{\text{CDM}} = n_{\text{CDM}} \cdot \frac{m_{\text{CDM}}}{V}$$

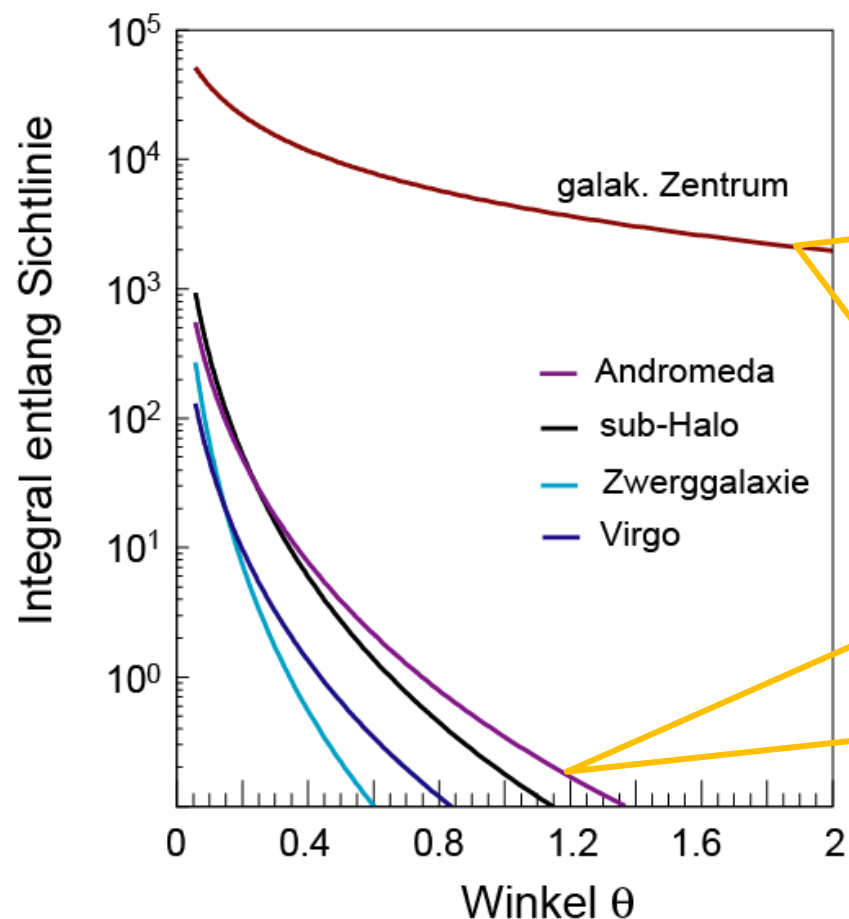


ρ_{CDM} aus NFW-Profil des CDM-Halos
 v WIMP-Geschwindigkeitsprofil im Halo
 σ_{Ann} Wq. aus theoretischen Berechnungen

- energieabhängiger Fluss $\Phi_{AP,i}$ von WIMP-Annihilationsprodukten (γ , ν) ergibt sich durch Integration entlang der Sichtlinie:

$$\Phi_{AP,i}(E) \sim \langle \sigma_{Ann} \cdot v \rangle \cdot \frac{1}{4\pi m_{CDM}^2} \cdot \frac{dN_i}{dE} \int_{Sichtlinie} \rho^2 ds$$

dN/dE : Energie-Spektrum



dominante Quelle

$d = 7.6 \text{ kpc}$

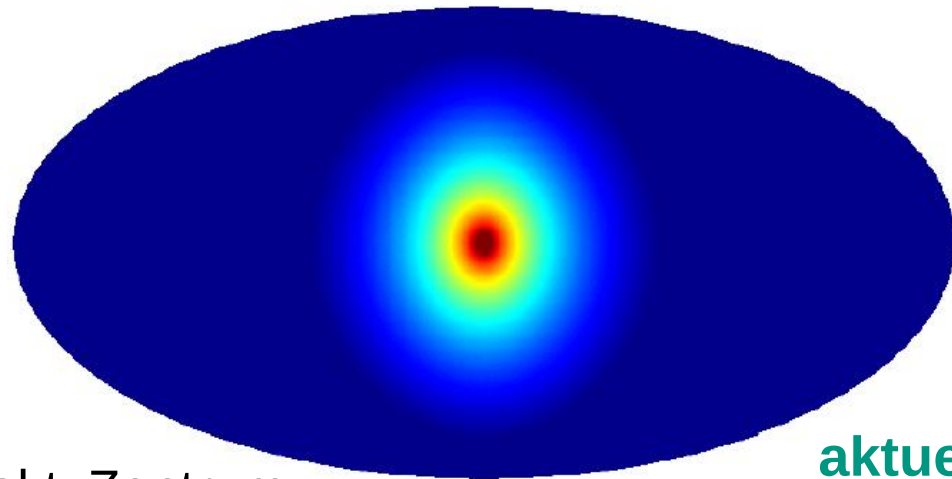


$d = 780 \text{ kpc}$

WIMP Annihilation: Raumwinkel und MC

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

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

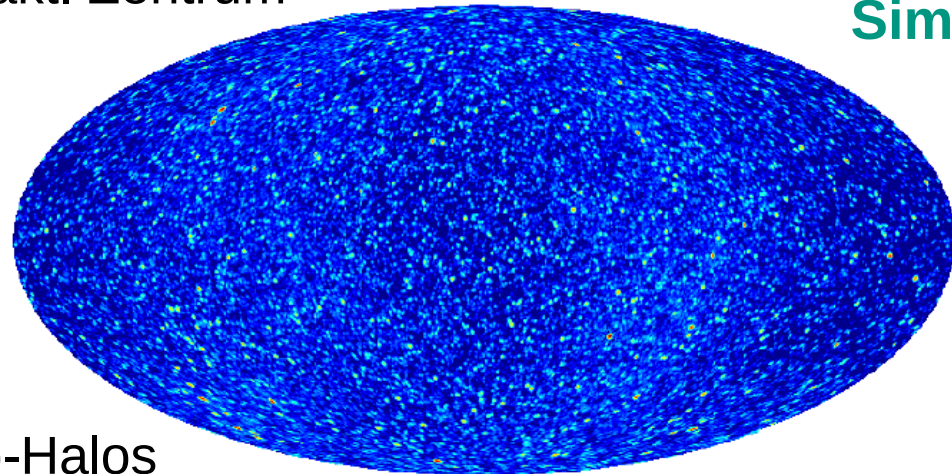


galakt. Zentrum

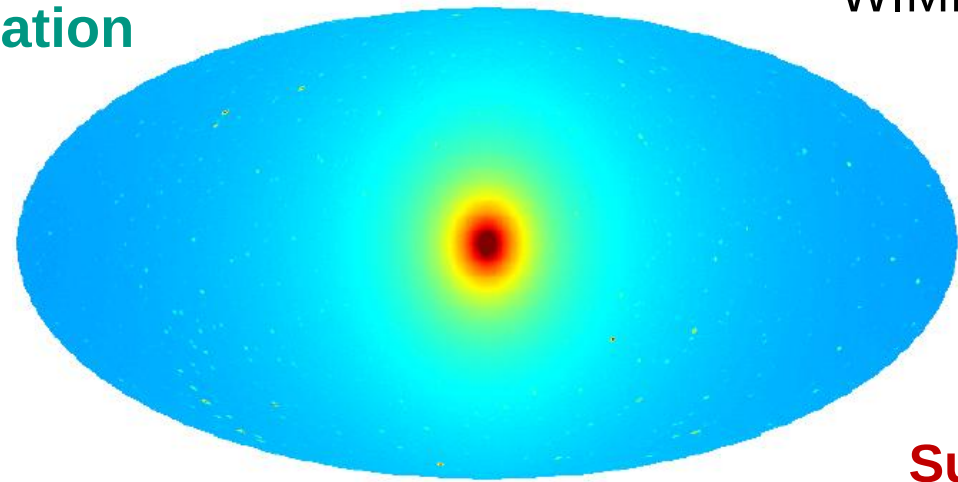


WIMP Halo

aktuelle DMA
Simulation



sub-Halos



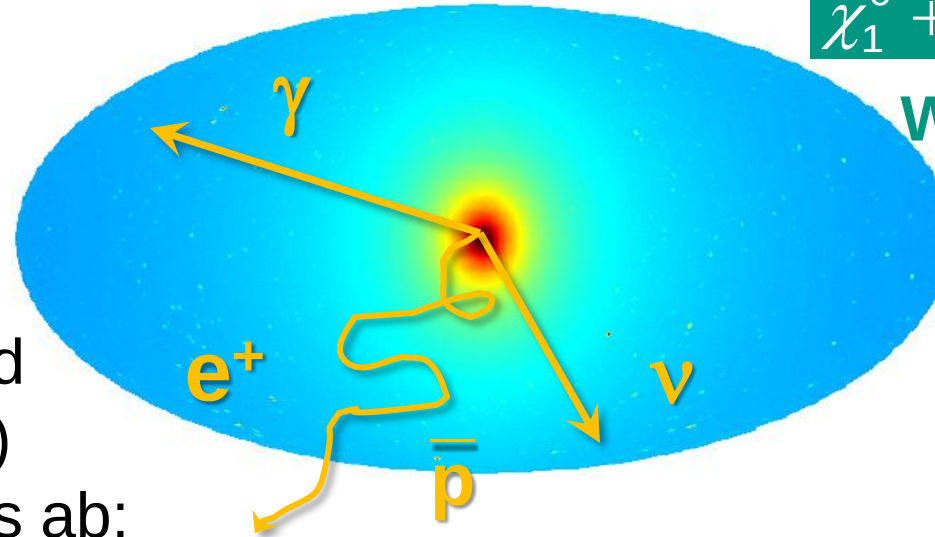
Summe

Indirekter WIMP Nachweis: Experimente

Gammaquanten:

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

Satelliten (GeV) & Cerenkov-Teleskope (TeV)



$$\chi_1^0 + \chi_1^0 \rightarrow \gamma, \bar{p}, e^+, \nu, \dots$$

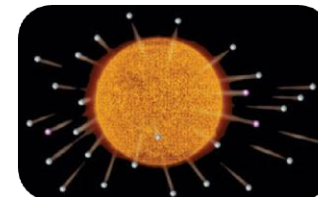
WIMP-Annihilation

im galaktischen
Zentrum,
in CDM sub-Halos

Neutrinos:

- zeigen zurück zur Quelle
- auch aus dichten Quellen (Sonne)
 - kein Energieverlust
- keine Ablenkung im B-Feld
- nur schwache Wechselwirkung
- Erde als Abschirmung

Neutrino-Teleskope (TeV)

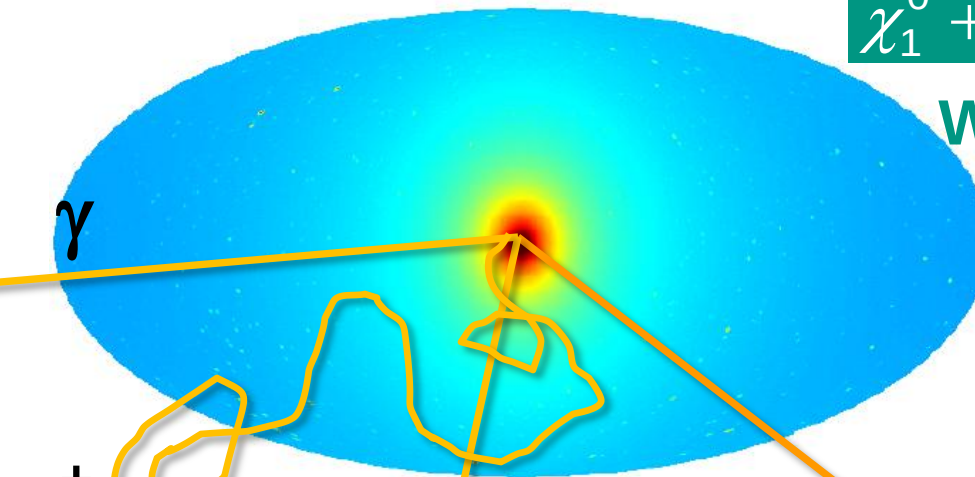
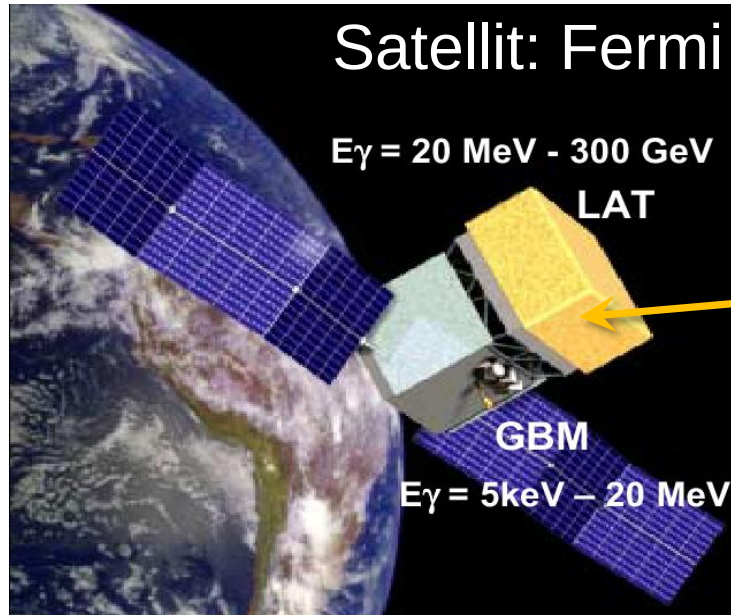


Antiprotonen, Positronen:

- Ablenkung im galaktischen B-Feld
- Energieverluste (e^+ : lokale Umgebung)
- wenig Untergrund (Antiprotonen) & klares Signal (e/m)
- Erdatmosphäre schirmt $\bar{p}$ und e^+ ab:

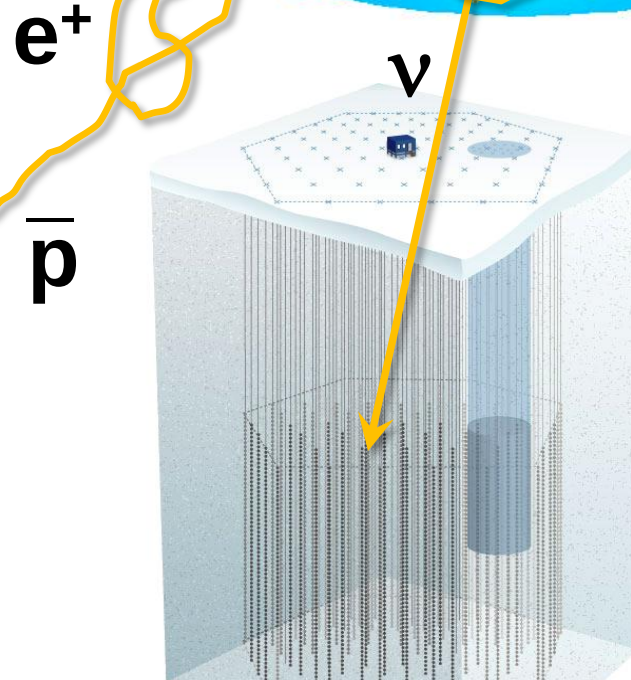
Satelliten mit B-Feld (GeV)

Indirekter WIMP Nachweis: Experimente



$$\chi_1^0 + \chi_1^0 \rightarrow \gamma, \bar{p}, e^+, \nu, \dots$$

WIMP-Annihilation
im galaktischen
Zentrum,
in CDM sub-Halos

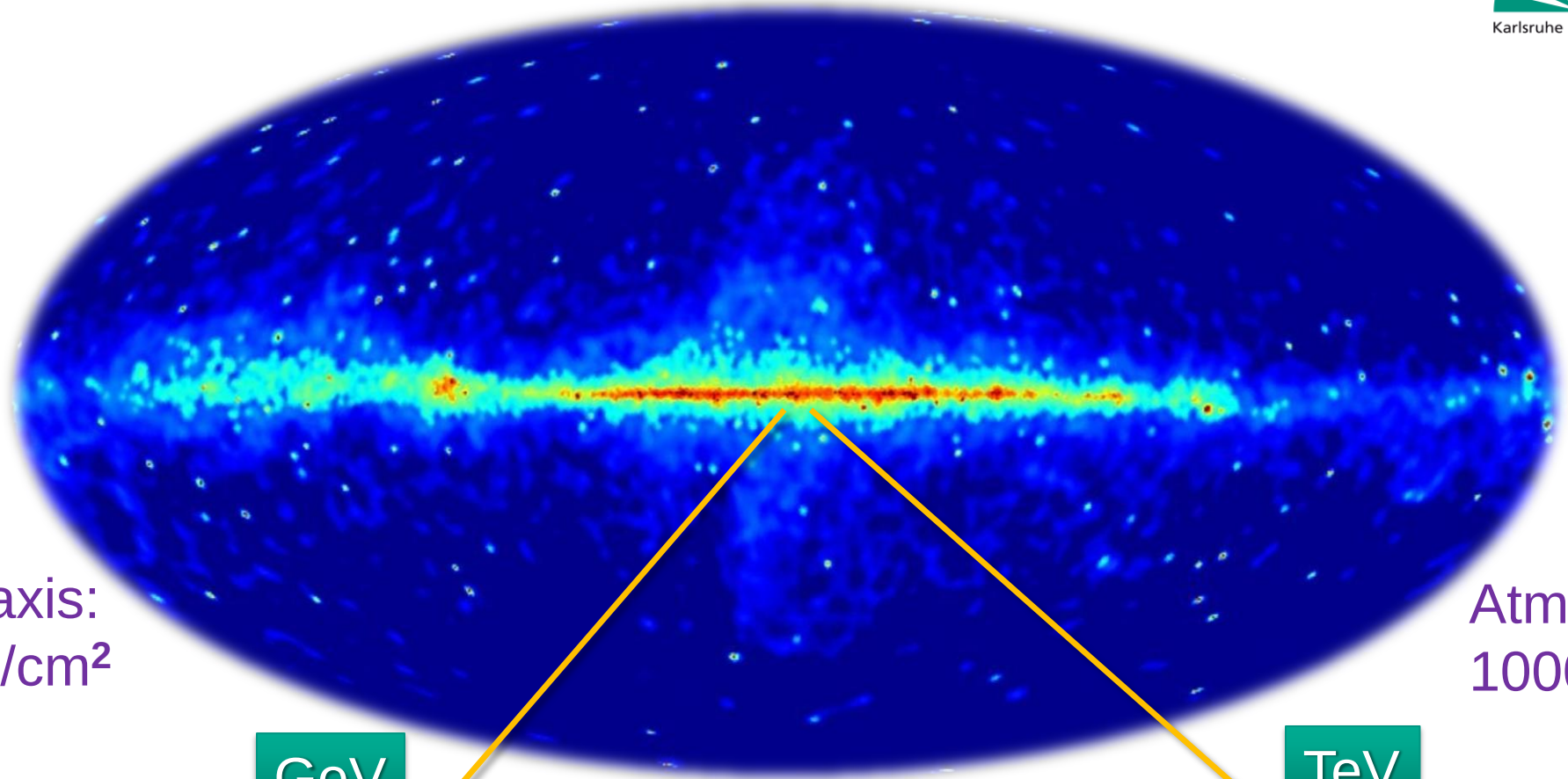


Neutrinoskope:
IceCube, km3net



Čerenkov-Teleskope
H.E.S.S., CTA, VERITAS, MAG

Indirekter WIMP Nachweis – Gammas



Galaxis:
 38 g/cm^2

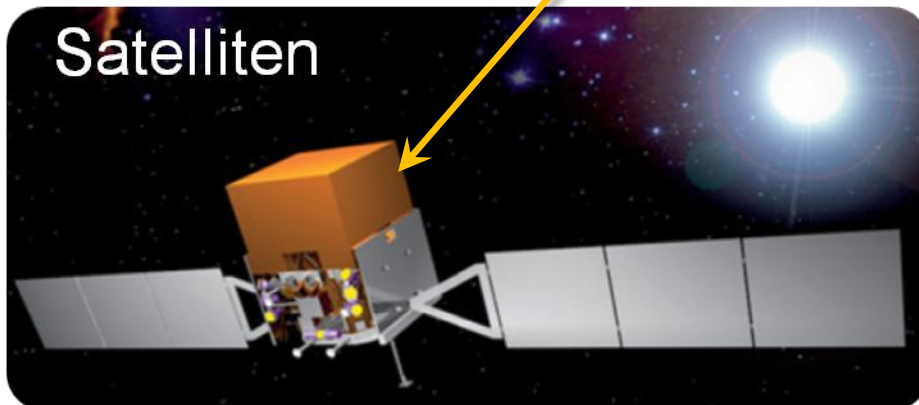
Atmosphäre:
 1000 g/cm^2

GeV

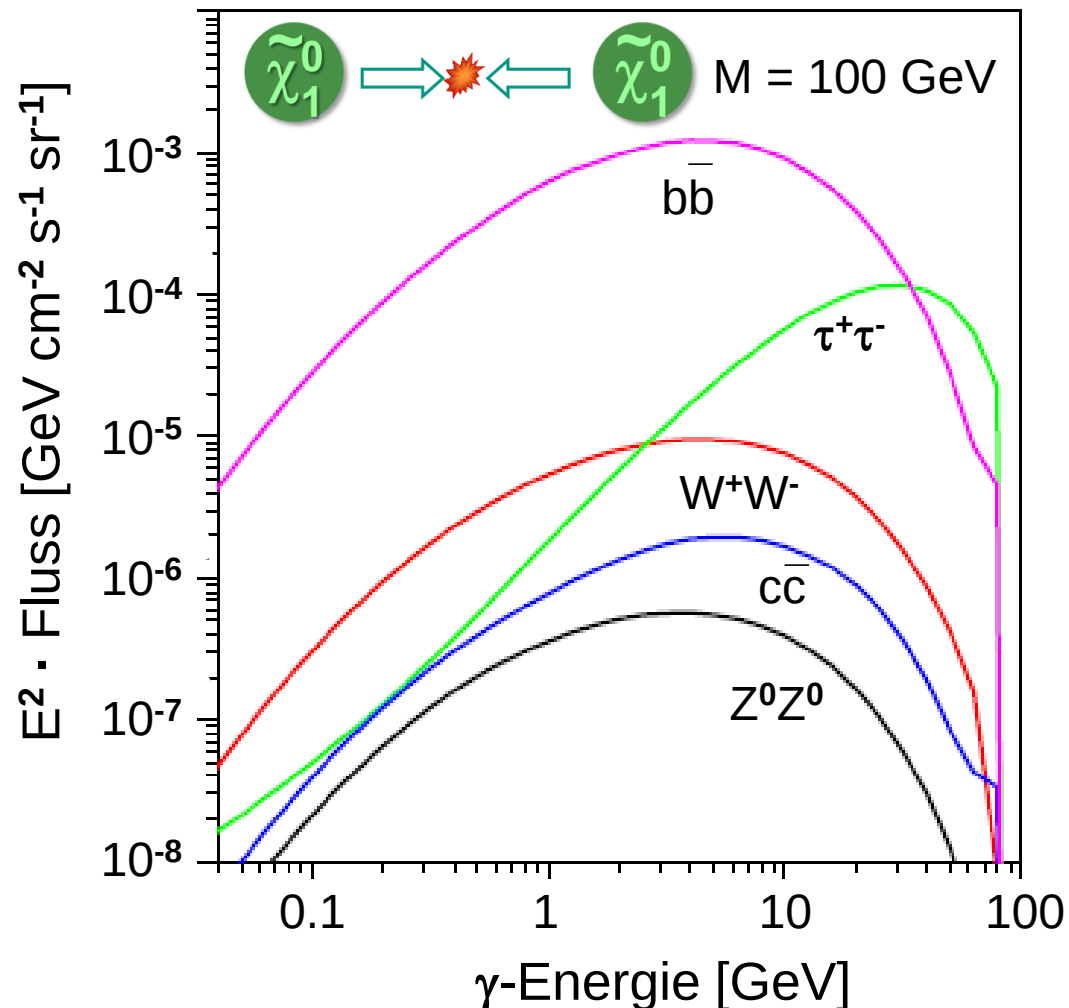
TeV

Satelliten

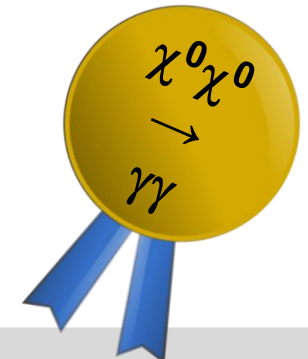
IACT



- **Neutralino-Annihilation** $\tilde{\chi}^0 \tilde{\chi}^0 \rightarrow q\bar{q}$: es entstehen im Rahmen der Quark-Fragmentierung **~30-40 Gammas** (typische Energie: GeV-TeV)
das Spektrum der Gammas ist abhängig vom Annihilationskanal ($\rightarrow b\bar{b}, Z\bar{Z}$)



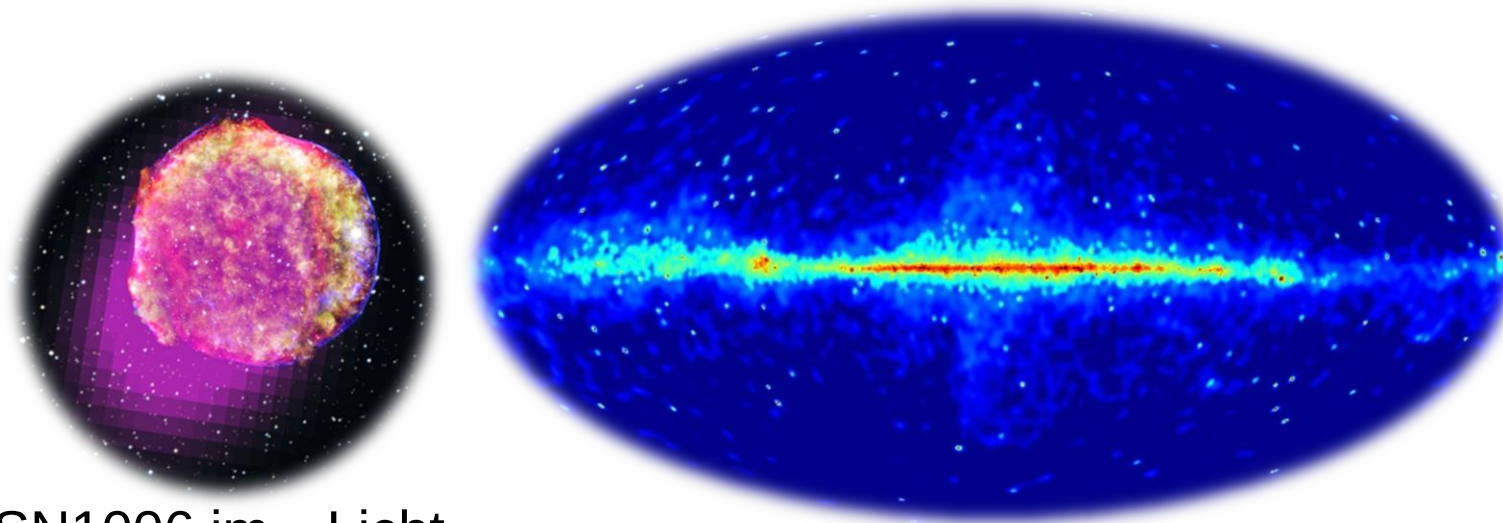
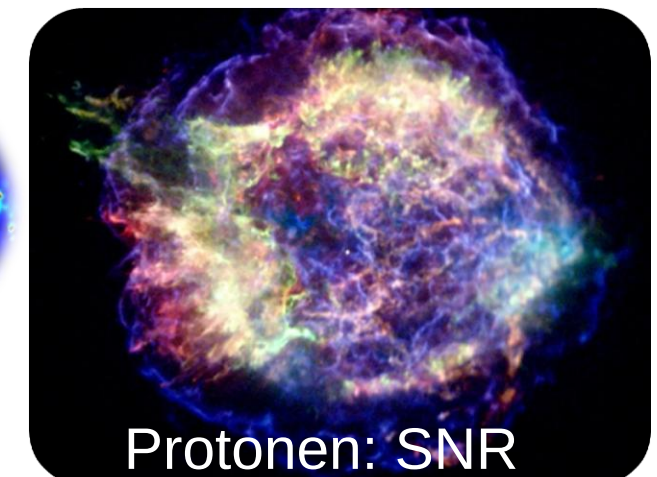
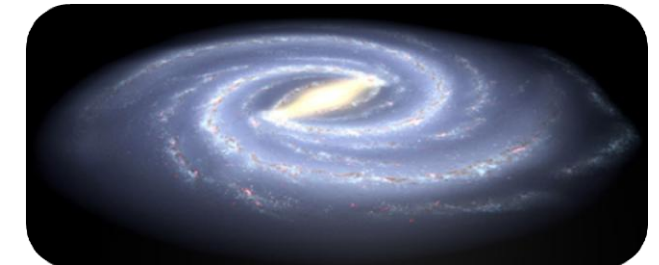
- Zerfallskanäle abhängig von $M(\chi^0)$ und χ^0 -Flavouranteilen (Bino, Wino, Higgsino)
- χ^0 -Zerfälle in leichte Quarks $u, d, \dots$ sind generell Helizitäts-unterdrückt
- $\chi^0\chi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ **Line ist stark unterdrückt**
 ↪ **goldenes Signal** im GeV/TeV Bereich:
 mono-energetische γ -Linie bei $E_\gamma = m(\chi^0)$



WIMP Annihilation: Gamma-Untergrund

■ astrophysikalische Untergrundprozesse für γ 's

- entstehen bei Erzeugung und Reaktionen der kosmischen Strahlung
- zahlreiche galaktische Quellen:
 - a) **SN-Schockwellen** in SNR (Supernova-Remnant)
 - b) **Pulsarwinde**
 - c) Prozesse im interstellaren Medium (**ISM**),
- extragalaktisch
 - a) **aktive galaktische Kerne**



SN1006 im γ -Licht

Gammas aus kosmischer Strahlung – I

- astrophysikalischer Untergrund zur WIMP-Annihilation in Gammas:
Wechselwirkungen der hochenergetischen kosmischen Strahlung

- **Erzeugung hochenergetischer Gammas:**

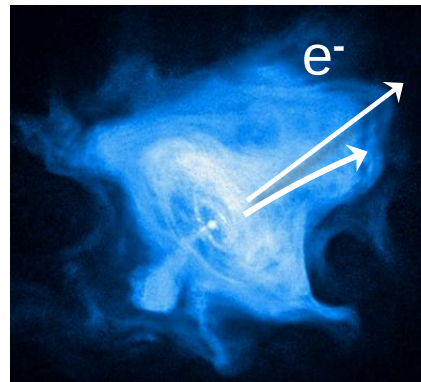
man unterscheidet zwei grundlegende Erzeugungsmechanismen:

- Elektronwechselwirkungen
Elektronen aus Pulsarwinden
- Hadronische Wechselwirkungen

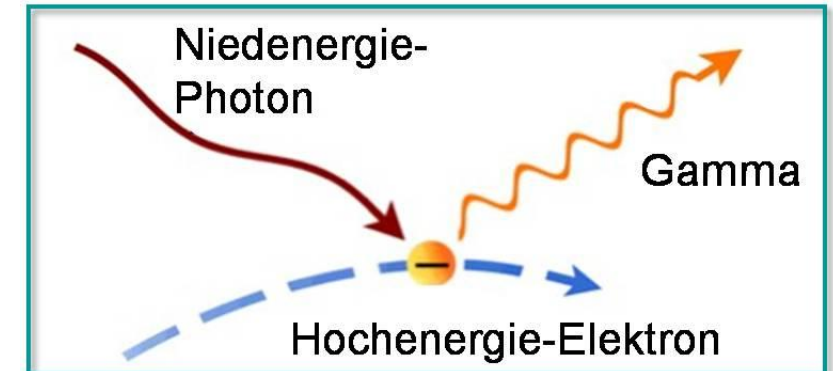
- **Elektron-Wechselwirkungen:**

- inverser Comptoneffekt
- Bremsstrahlung

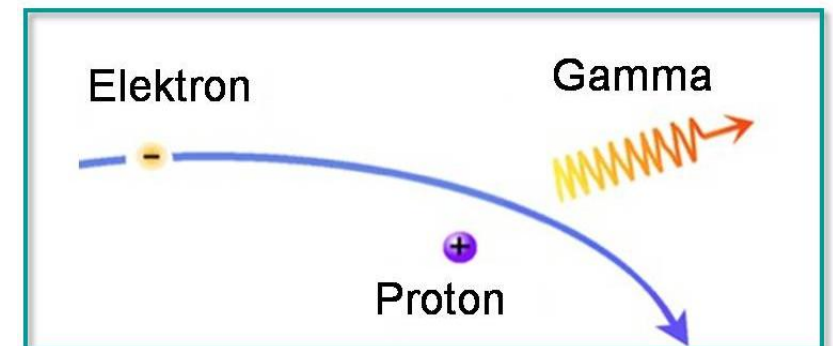
Beschleunigung von e^-
in einem Pulsarwind-Nebel



Inverser Compton Effekt



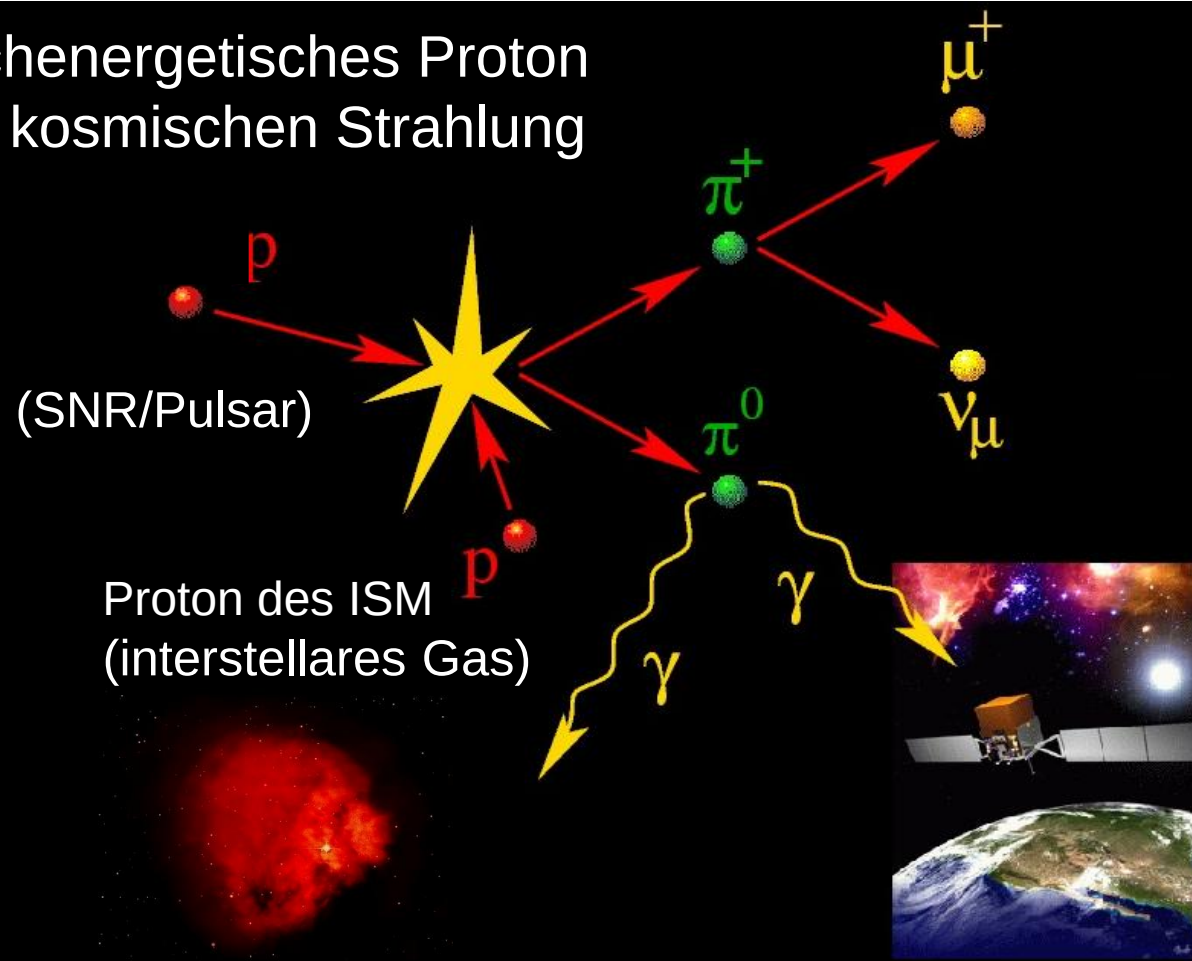
Bremsstrahlung



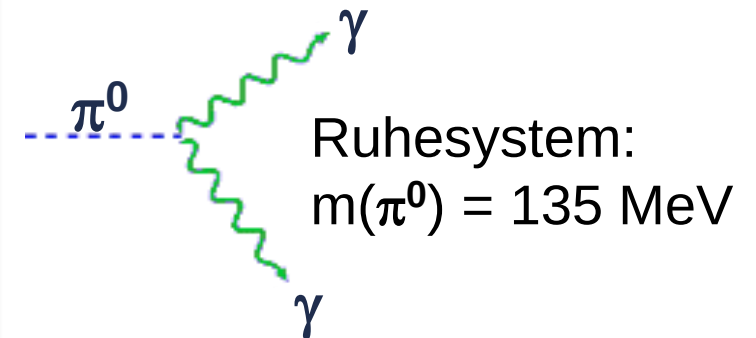
■ Hadron-Wechselwirkungen:

- **Protonen** werden von der Schockwelle eines SNR (Supernova-Überrest) beschleunigt & erzeugen beim Auftreffen auf das ISM viele Pionen ($\pi^\pm$, π^0)

hochenergetisches Proton
der kosmischen Strahlung

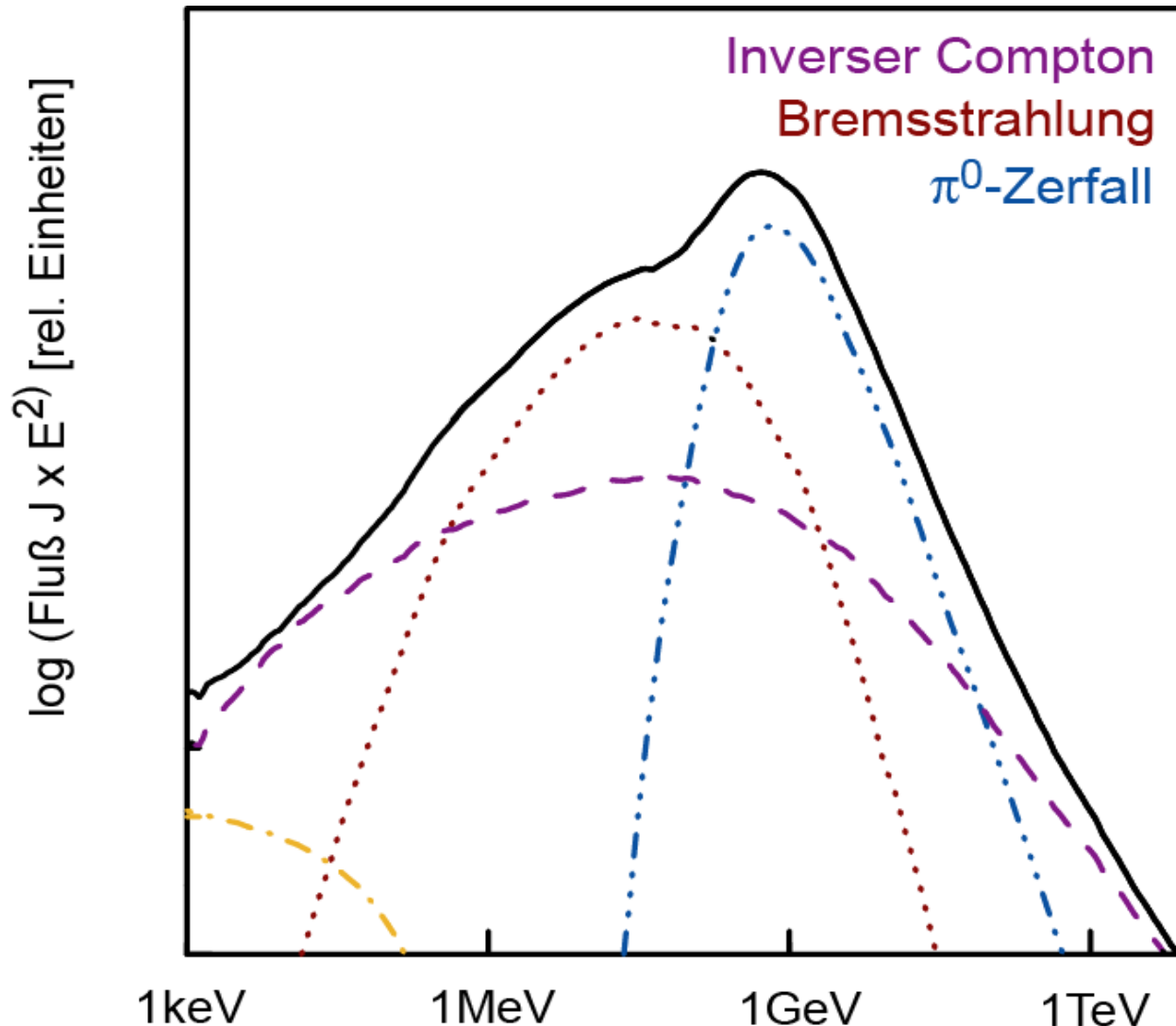


Pionzerfall

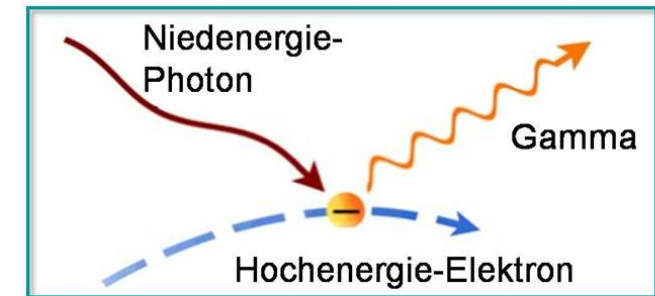


- Proton-Proton-Stöße:
Erzeugung neutraler Pionen
Gammas aus π^0 -Zerfall
 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

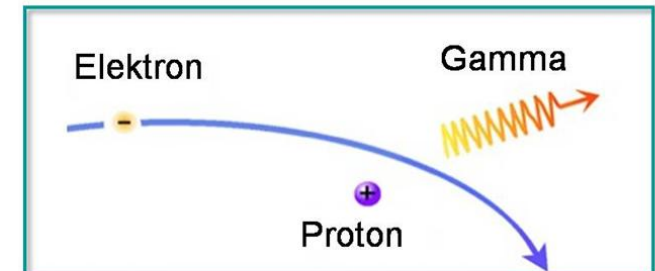
■ Modellierung des hadronischen π^0 -Beitrags und Elektron-Reaktionen (innere Galaxis)



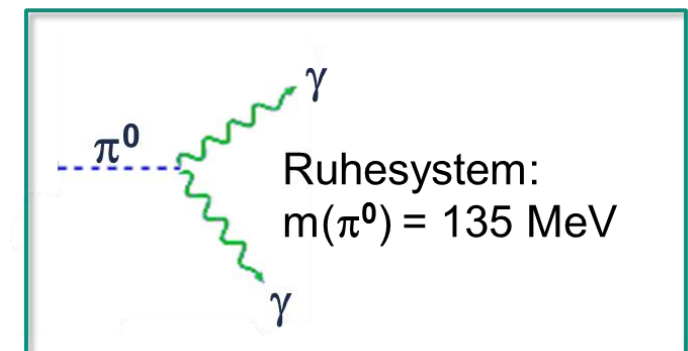
Inverser Compton Effekt



Bremsstrahlung



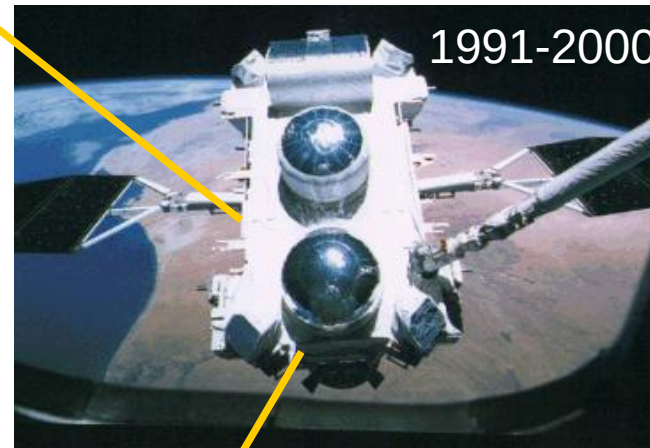
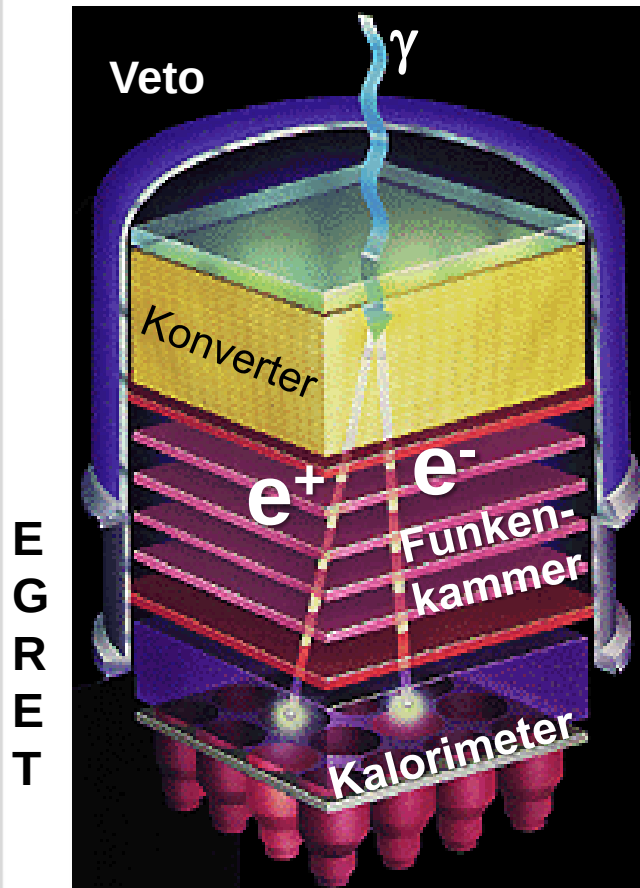
Pionzerfall



■ Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)

EGRET – **E**nergetic **G**amma **R**ay **E**xperiment **T**elescope

Himmelskarte im hochenergetischer Gamma-Bereich: Suche nach Punktquellen/ Analyse der diffusen Strahlung (4-jährige Messphase)



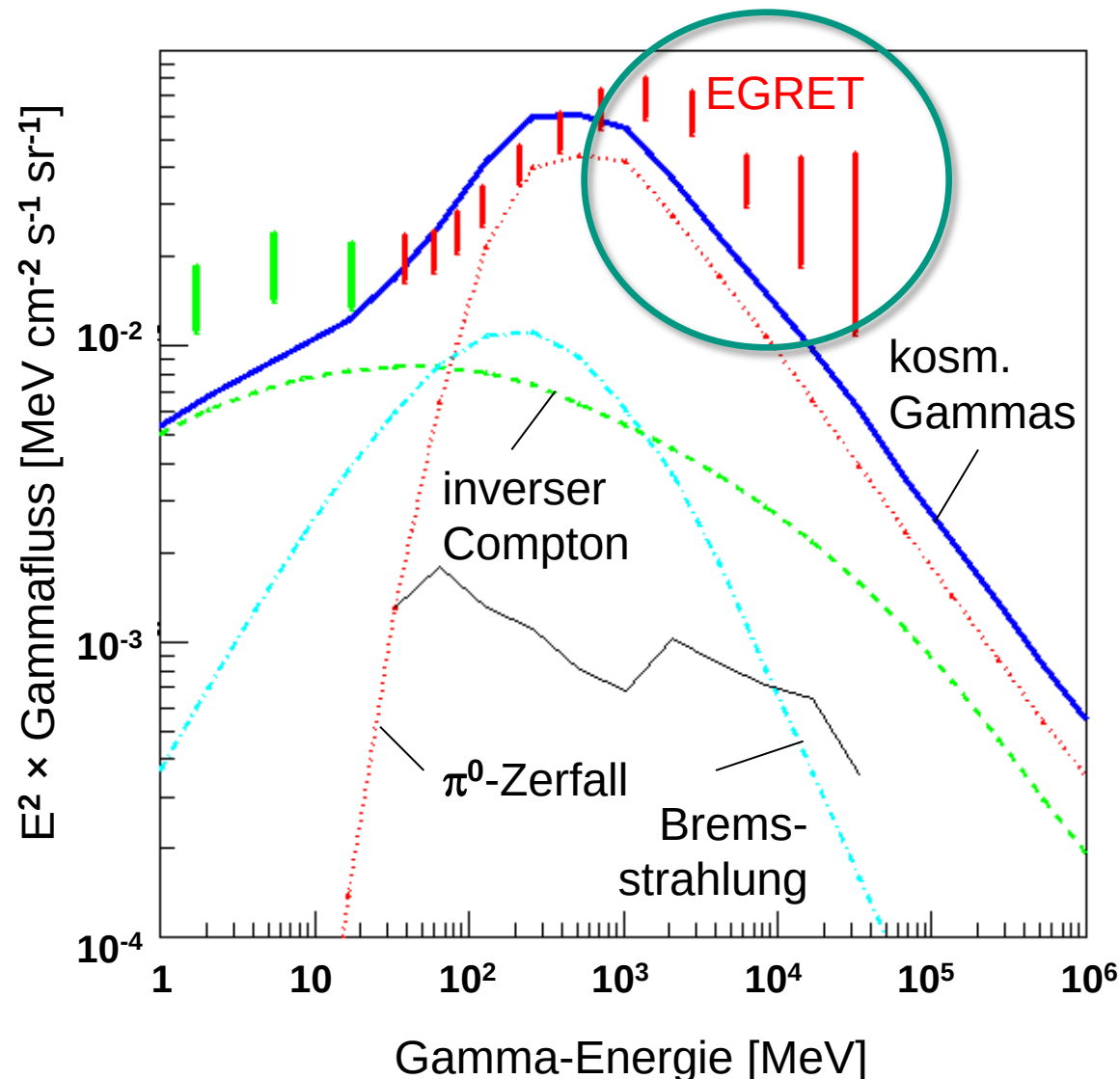
EGRET/CGRO Parameter

Datennahme	1991 - 2000
γ -Energieintervall	30 MeV – 30 GeV
Energieauflösung	~ 20 %
Winkelauflösung	> 5' - 30'

**Gammanachweis über
Paarbildung (e^- , e^+)**

EGRET: Gamma-Überschuss

- $E(\gamma) > 1 \text{ GeV}$: deutlicher Überschuss hochenergetischer Ereignisse im Vergleich zum erwarteten Spektrum (1997)

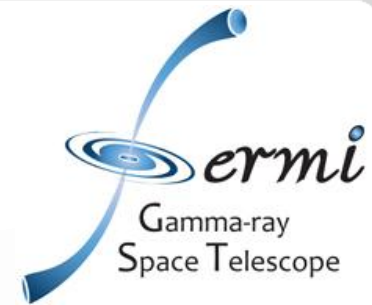


EGRET Gamma-Überschuss

- 'konventionelle' Erklärung:
systematischer Effekt in der EGRET-Energiekalibration von hochenergetischen Gammas
- 'exotische' Erklärung:
Überschuss entsteht durch **WIMP-Annihilationsprozesse** (WIM de Boer et al.)

FERMI:
Überschuss bei EGRET durch fehlerhafte Energiekalibration!

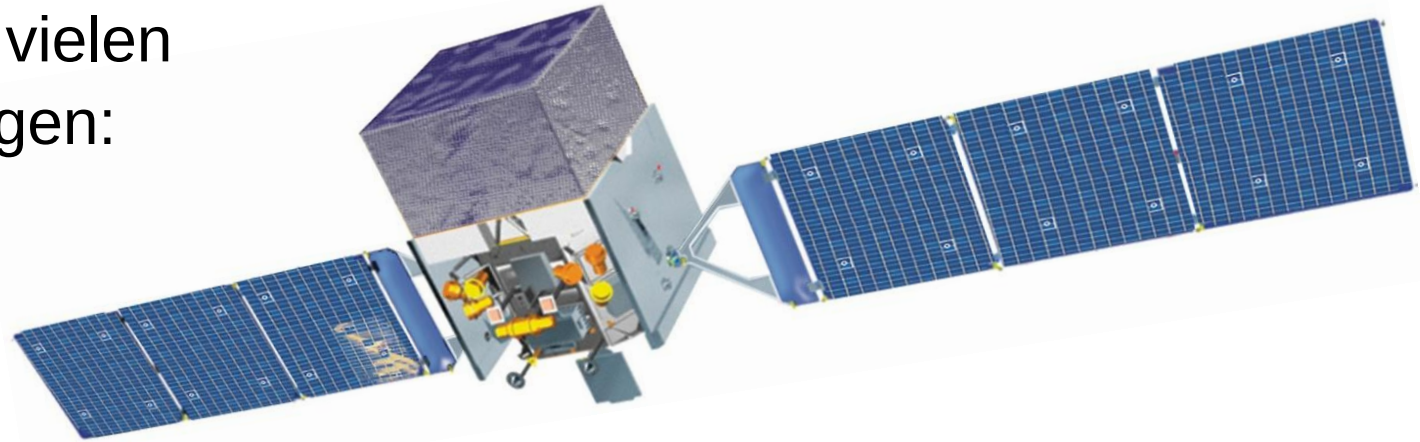
Fermi-Gamma-Observatorium



■ Fermi- γ -Observatorium

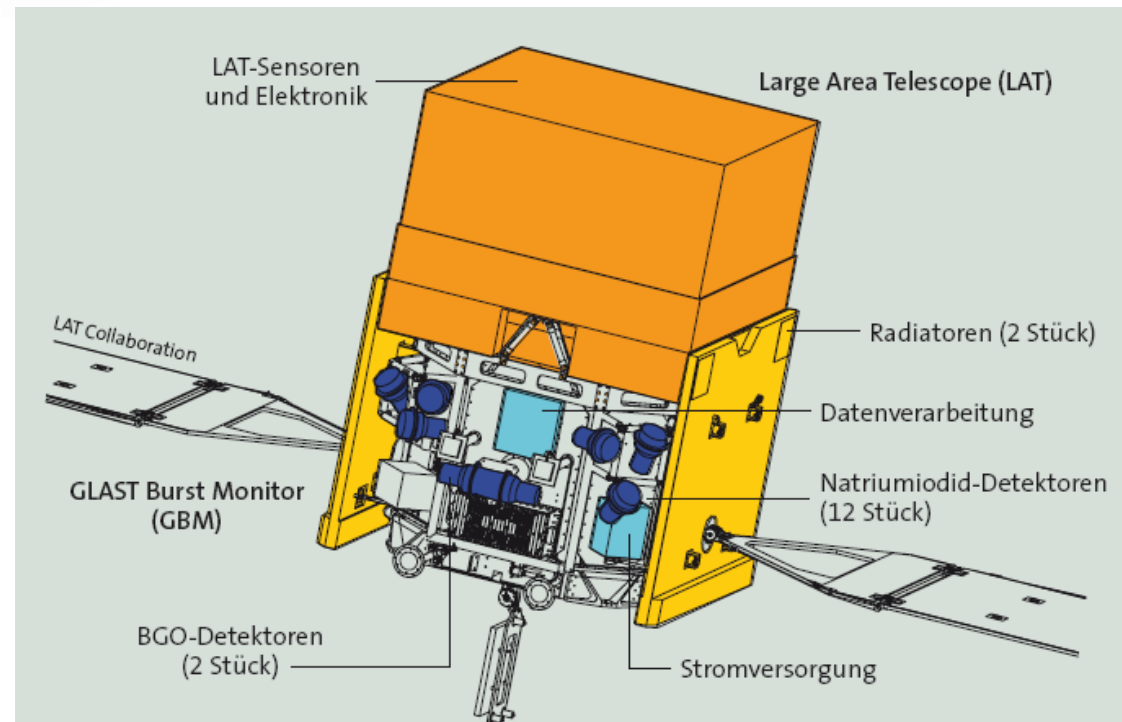
Nachfolger von CGRO mit vielen wesentlichen Verbesserungen:

- größere effektive Fläche
- bessere Winkelauflösung
- höhere γ -Energien



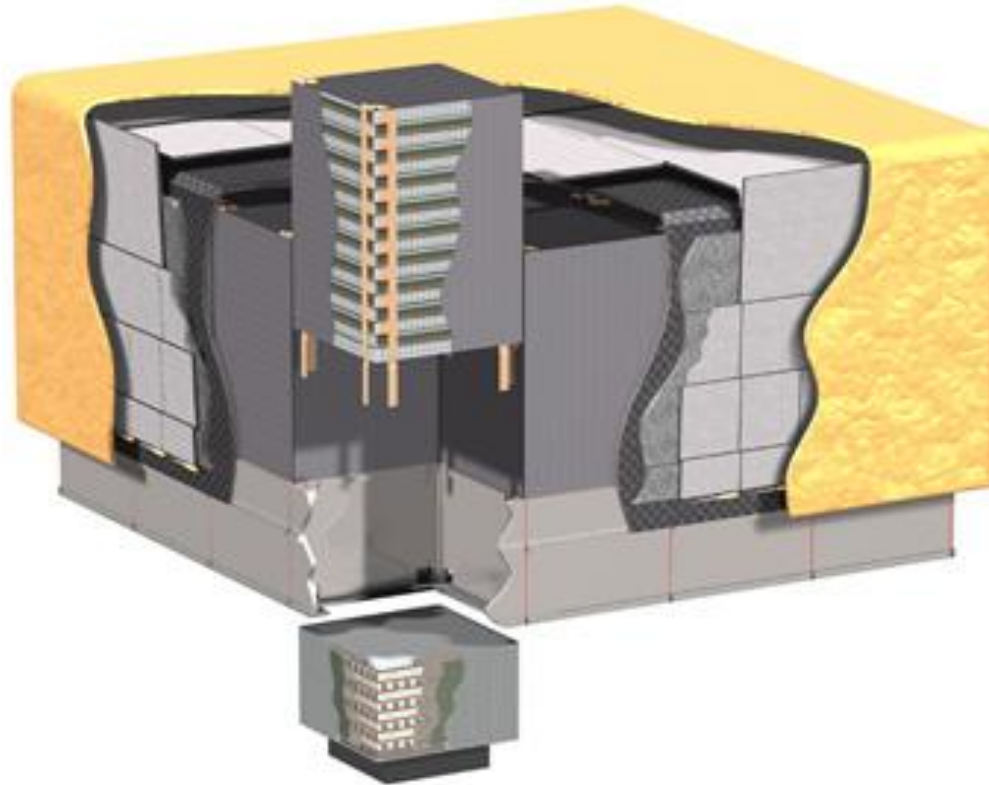
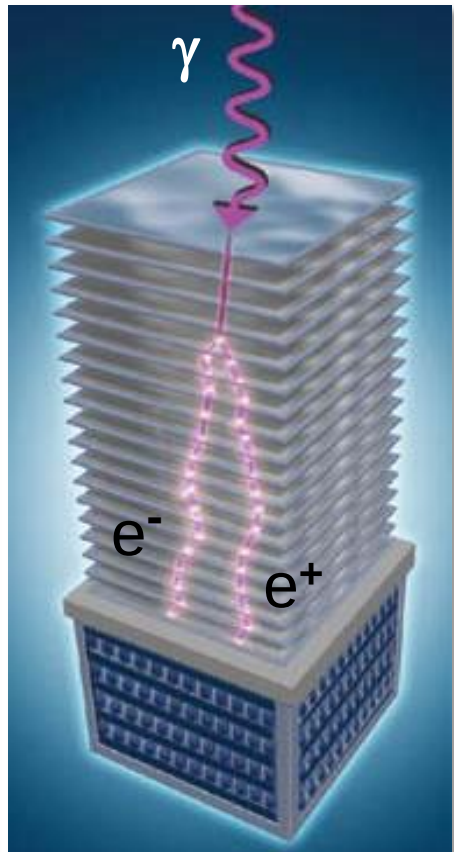
Fermi-Parameter

Datennahme	seit Mitte 2008
Flughöhe	560 km
Dimensionen	2.8 m(h) $\times$ 2.5 m($\emptyset$)
Gewicht	4.3 t
γ -Energieintervall	20 MeV – 300 GeV
effektive Fläche	1 m ²
Winkelauflösung	$\sim 1'$

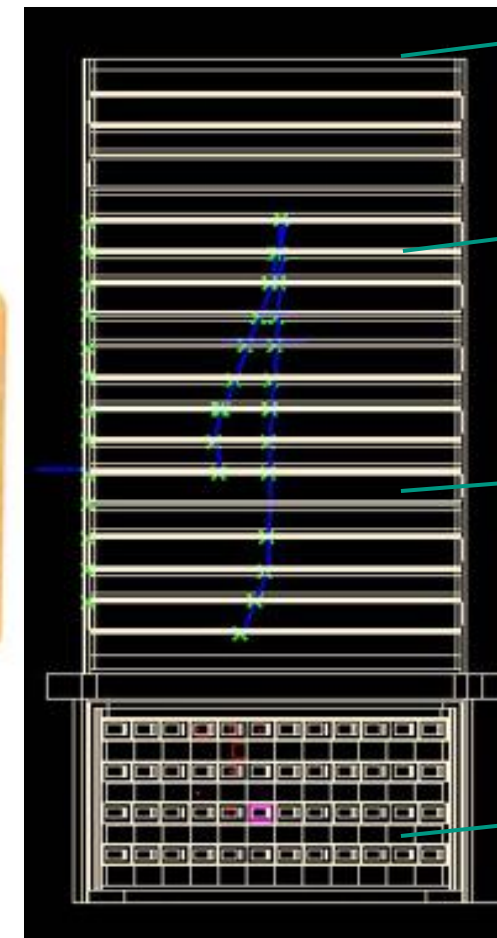


Fermi – Large Area Telescope LAT

- LAT** : Raumwinkel des deckt $d\Omega \sim 20\%$ des Himmels zu jedem Zeitpunkt ab,
- der gesamte Himmel wird alle 3 Stunden abgedeckt
 - 16 einzelne Türme



einzelner Turm



Anti-
koinzidenz

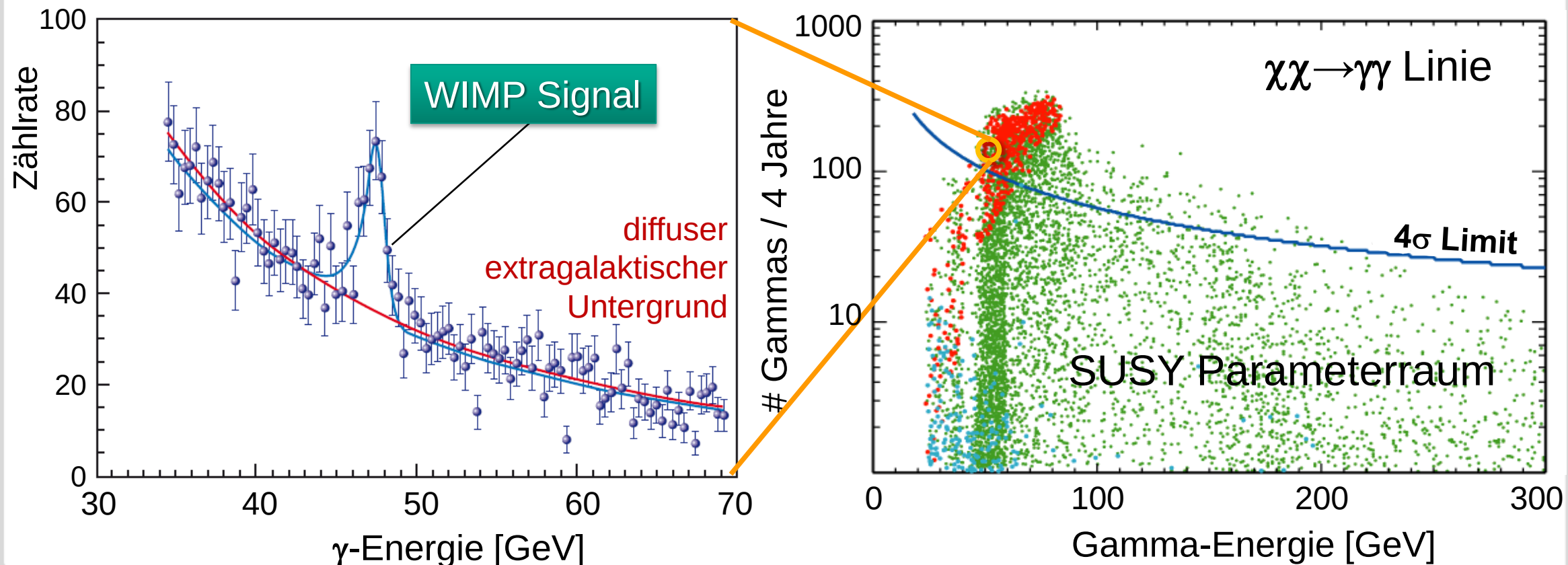
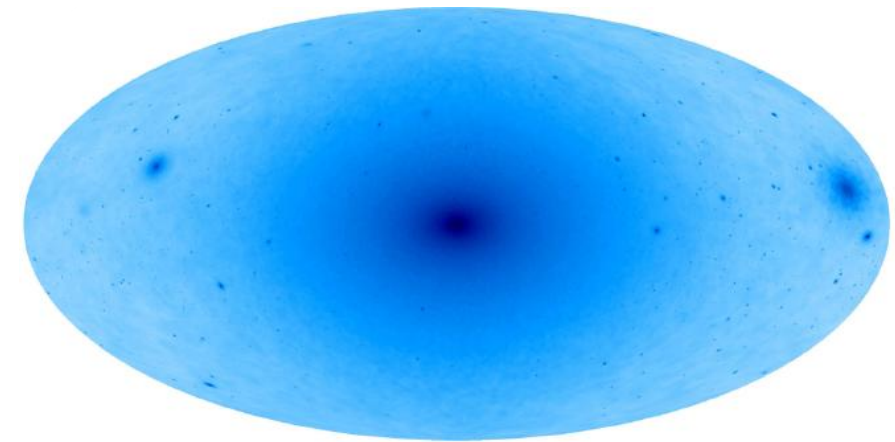
γ -Konversion
(16 W-Folien)

Si-Strips
(Spuren)

Kalorimeter
CsJ-Kristalle

Fermi – Suche nach WIMP Annihilation

- Suche nach WIMP Annihilation mit wesentlich besserer Sensitivität (Faktor ~ 30)
 - bessere Auflösungen $\Delta\theta$, ΔE und Zählrate
 - Suche nach 'goldenem WIMP Signal'
- ↳ γ -Linienignal bei $M(\chi^0)$, aus $\chi^0\chi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Fermi – Resultate nach 3 Jahren

- drei Jahre Datennahme mit Fermi – Himmelskarte im multi-GeV Gammalicht
Energiespektrum zeigt keine Hinweise auf DM-Annihilation

