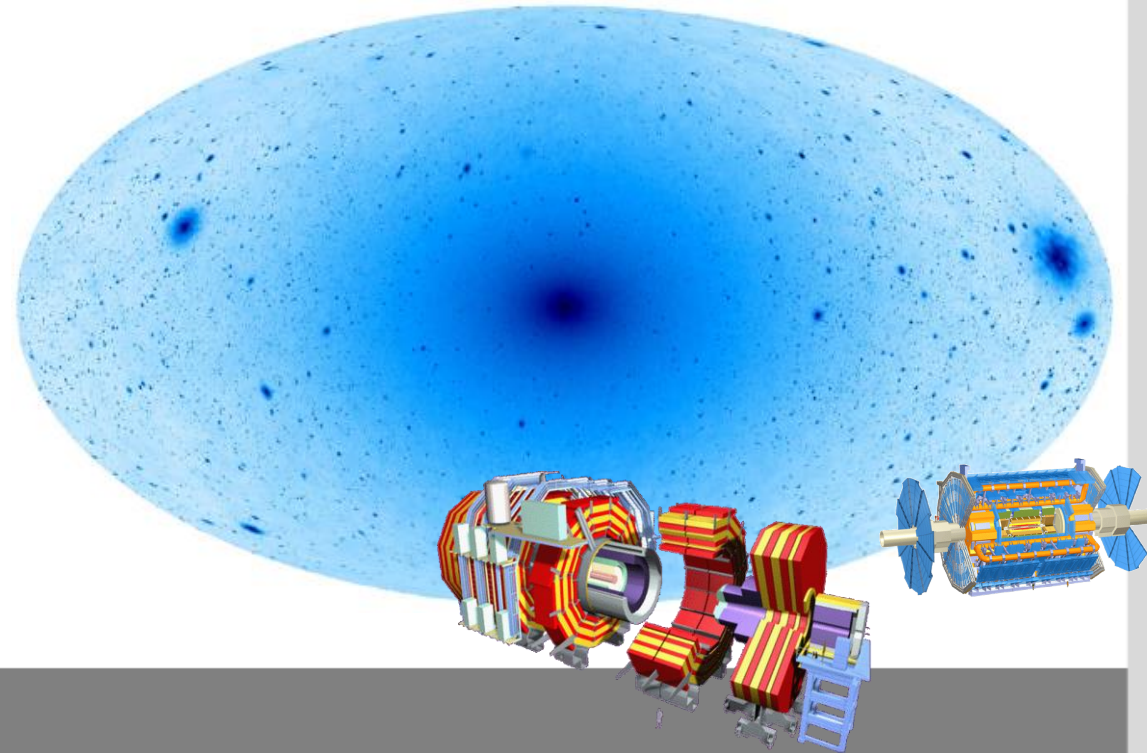


Astroteilchenphysik – I

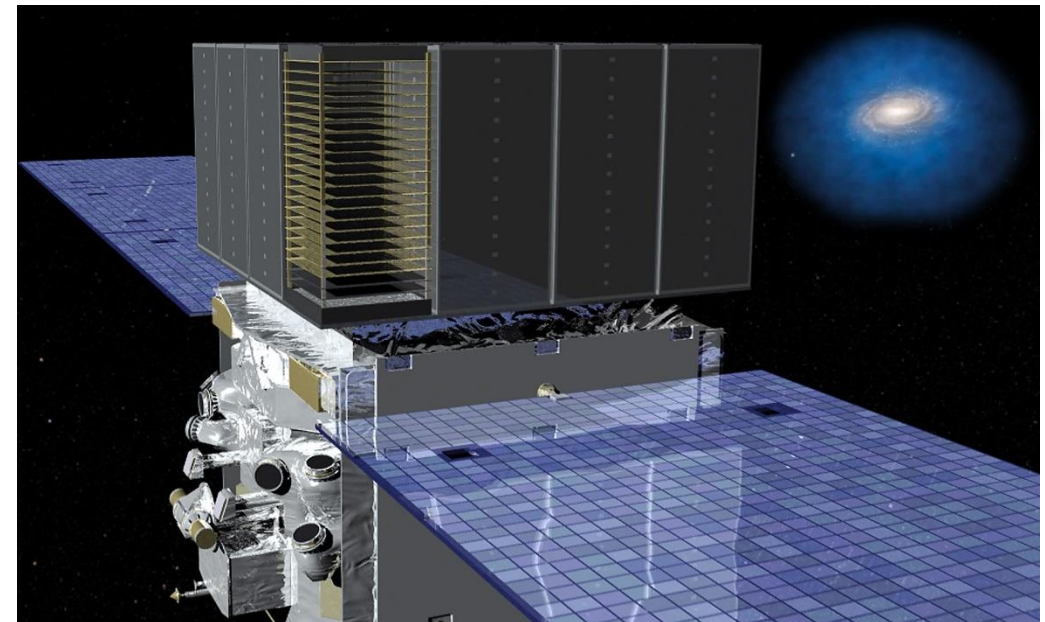
Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 12, 23.01.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Dunkles Universum

- LHC: Neutralino-Suche
- indirekter WIMP-Nachweis:
DM-Annihilationsprozesse
DM-Halos
- GeV-Gammas: FERMI
- TeV-Gammas: H.E.S.S.



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?

3.3 Neutralinosuche am LHC

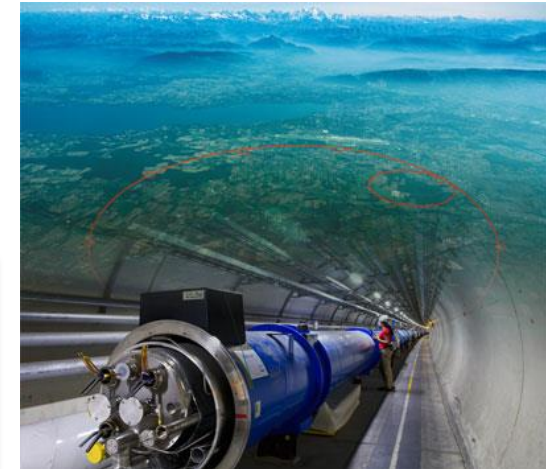
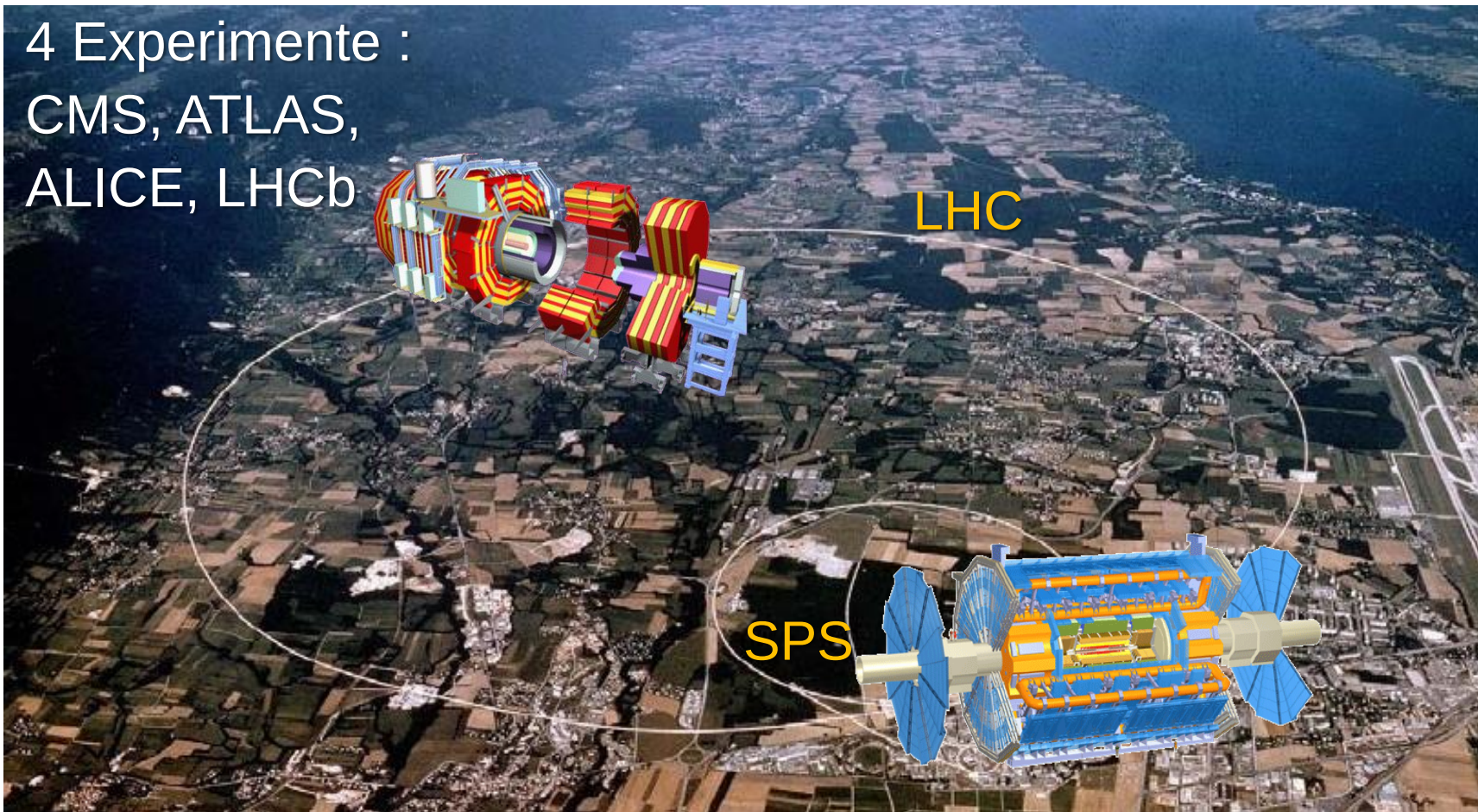
■ p-p Kollisionen bei $\sqrt{s} = 7\text{-}14$ TeV Schwerpunktsenergie

Datennahme seit Frühjahr 2010 bei $E_p = 3.5$ (4.0) TeV

Ziele: - Nachweis des Higgs-Bosons

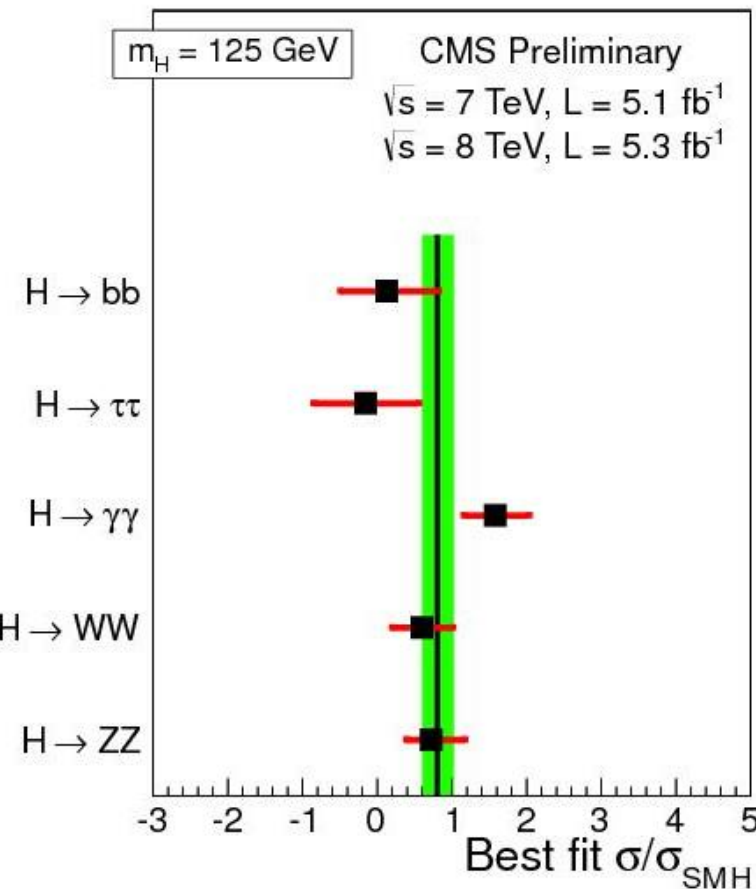
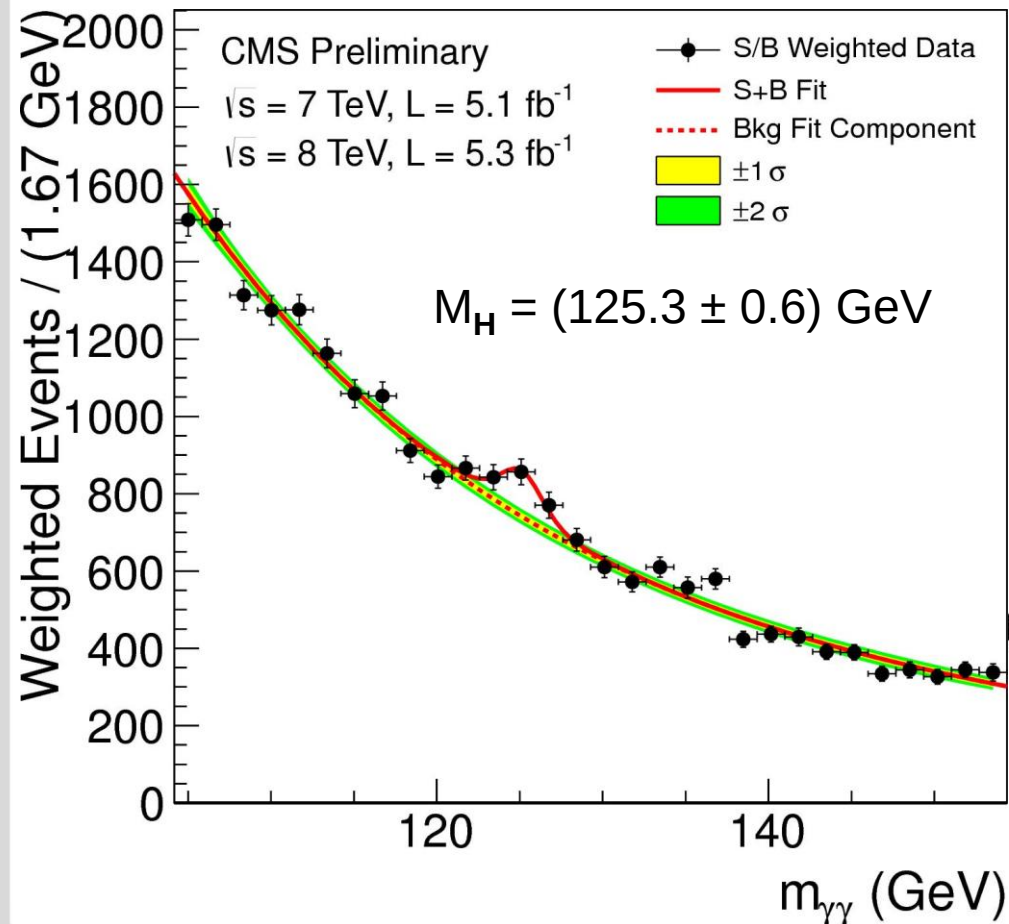
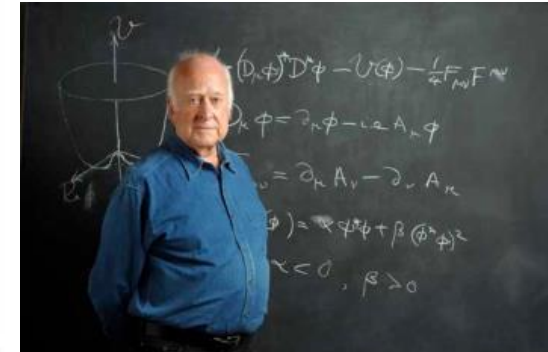
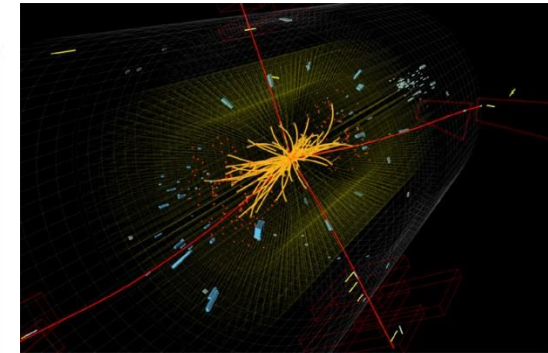
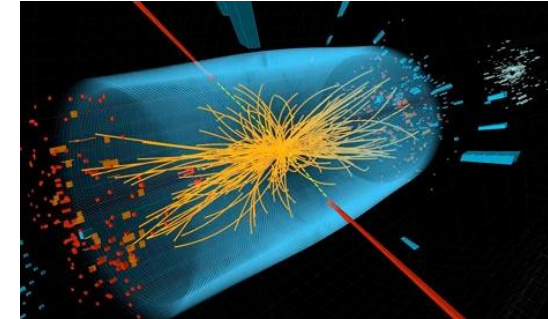


4 Experimente :
CMS, ATLAS,
ALICE, LHCb



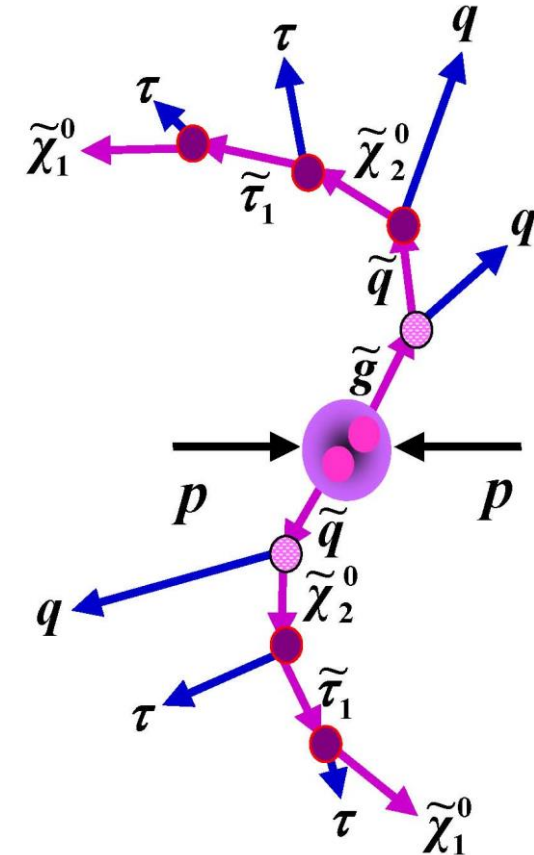
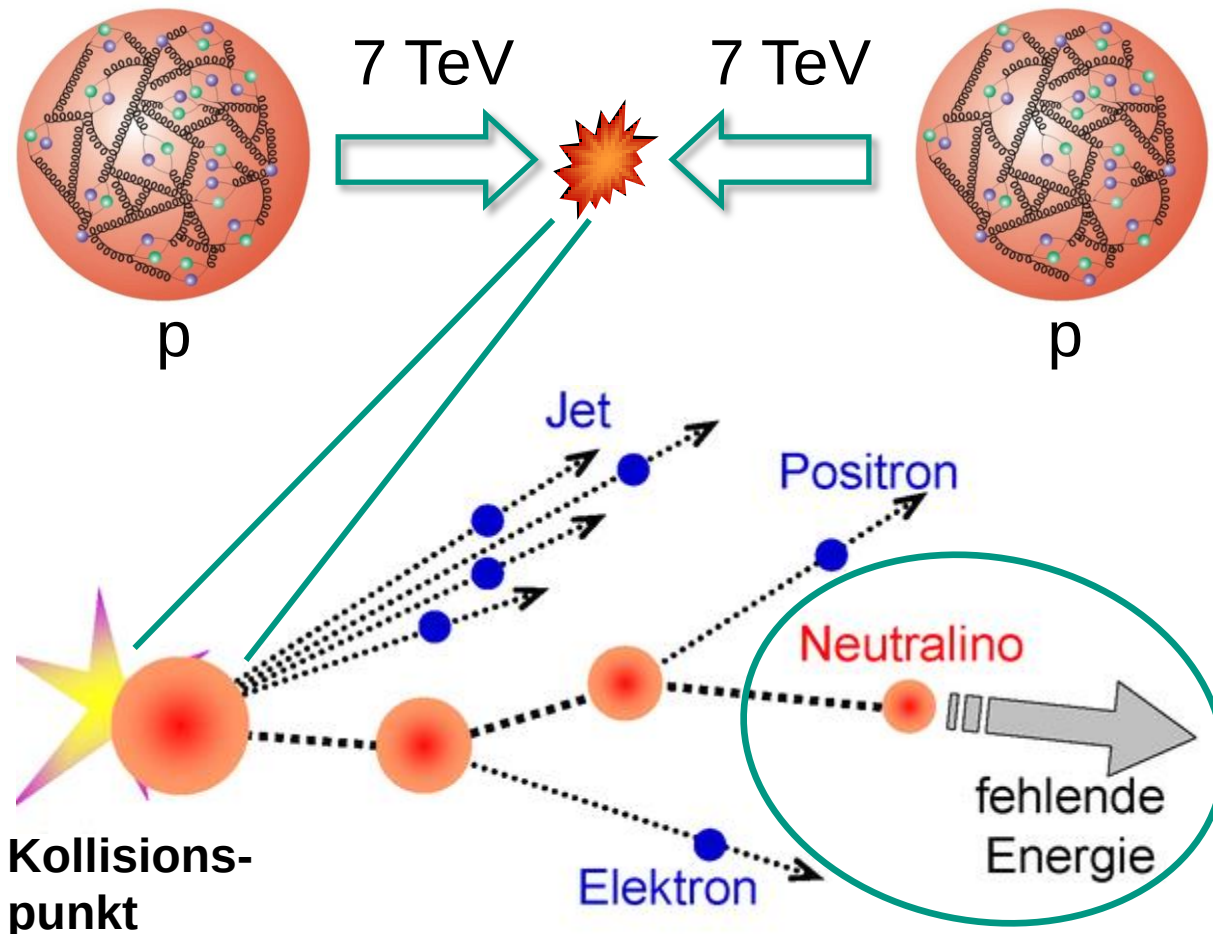
LHC: Higgs-Signal & SUSY

- 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 – Protonwechselwirkungen

- 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** χ^0

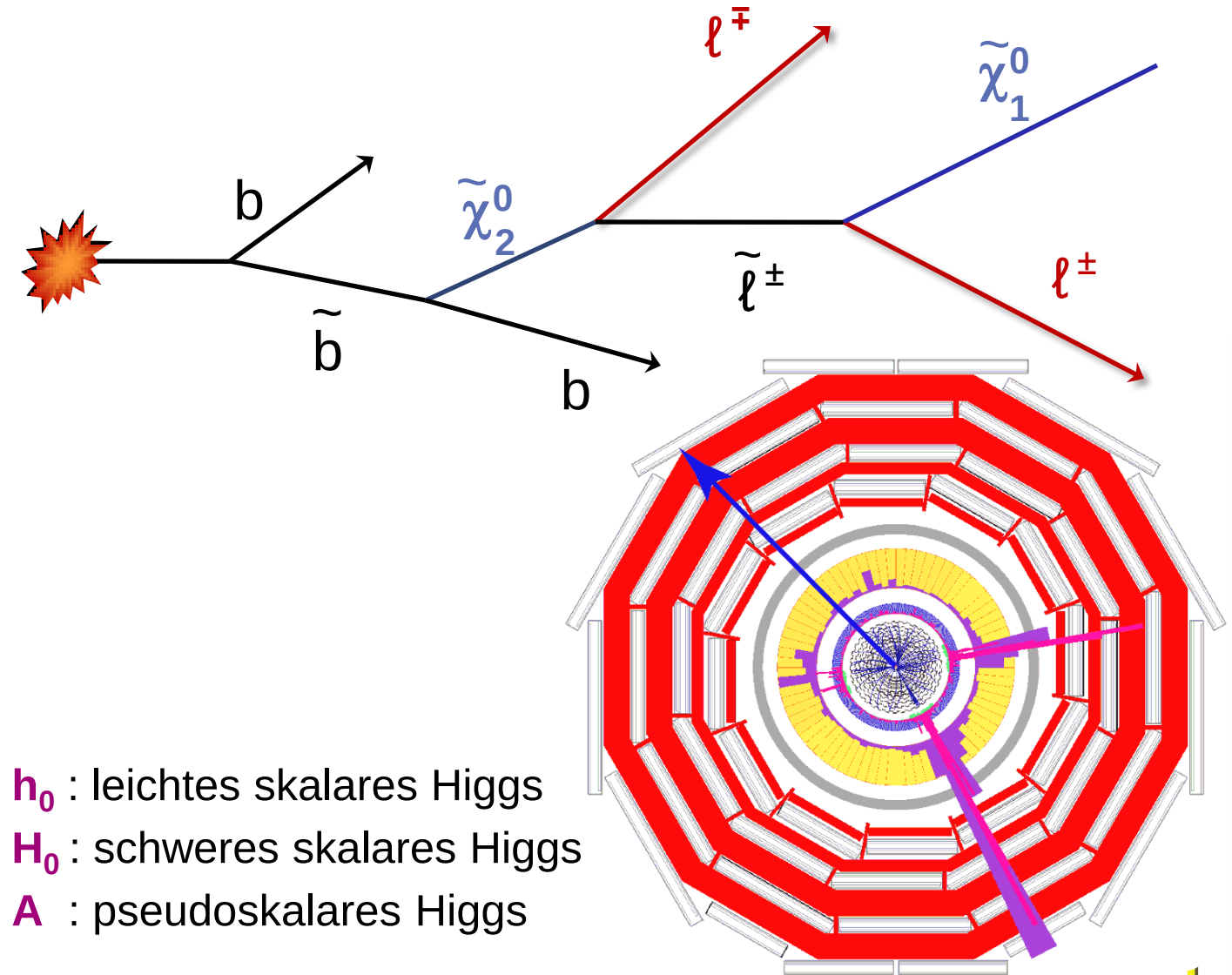
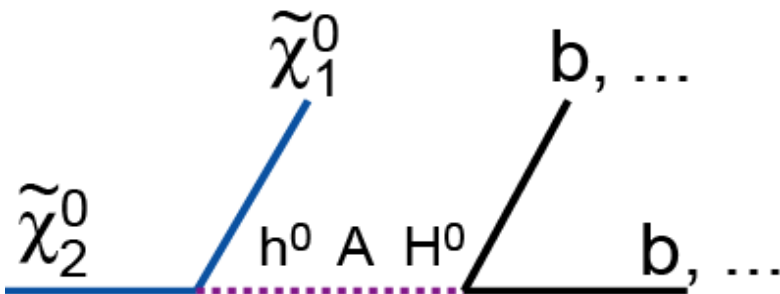
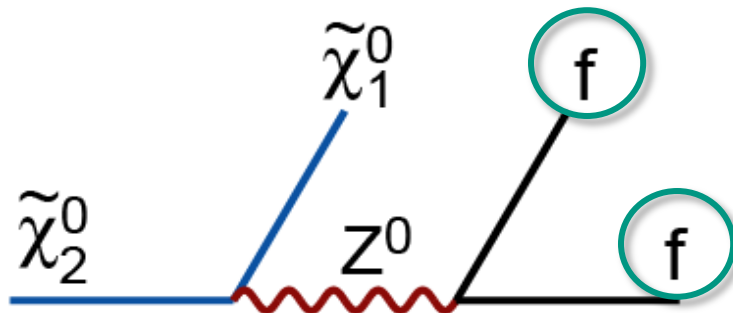
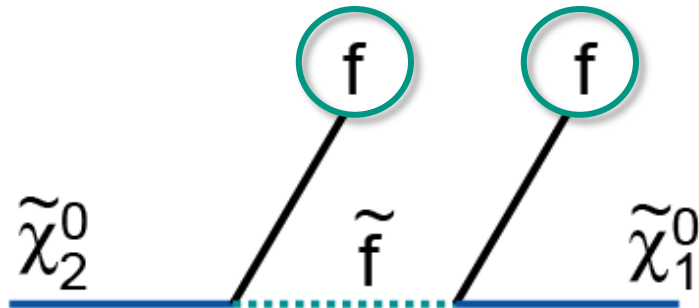


■ Neutralino-Signatur am LHC:

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

3-Körper Zerfälle von Neutralinos

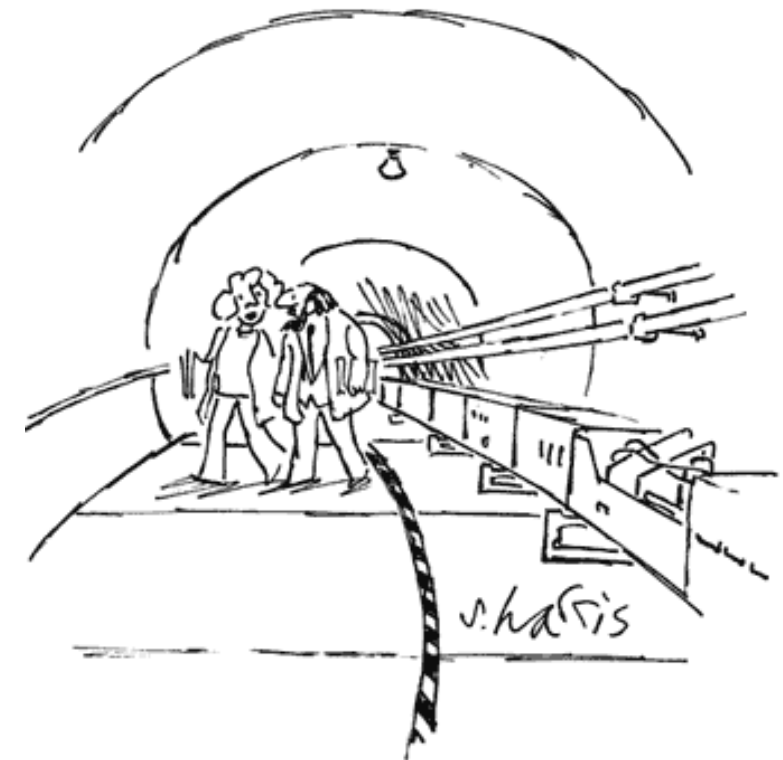
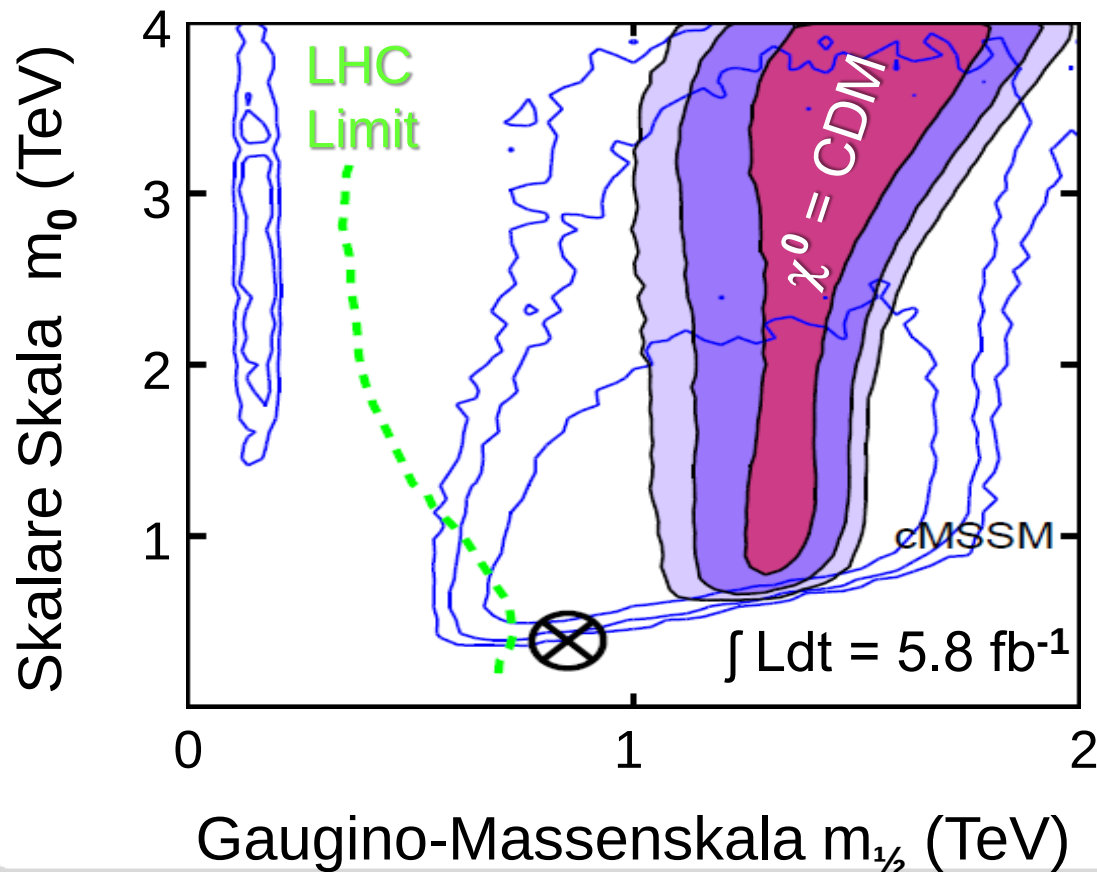
- Zerfall des zweitleichtesten Neutralinos $\tilde{\chi}_2^0$ (NLSP) in das stabile leichteste Neutralino $\tilde{\chi}_1^0$ (LSP): $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \ell^\pm + \ell^\mp$



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

■ Aktuelle SUSY Limits und cMSSM-Analysen:

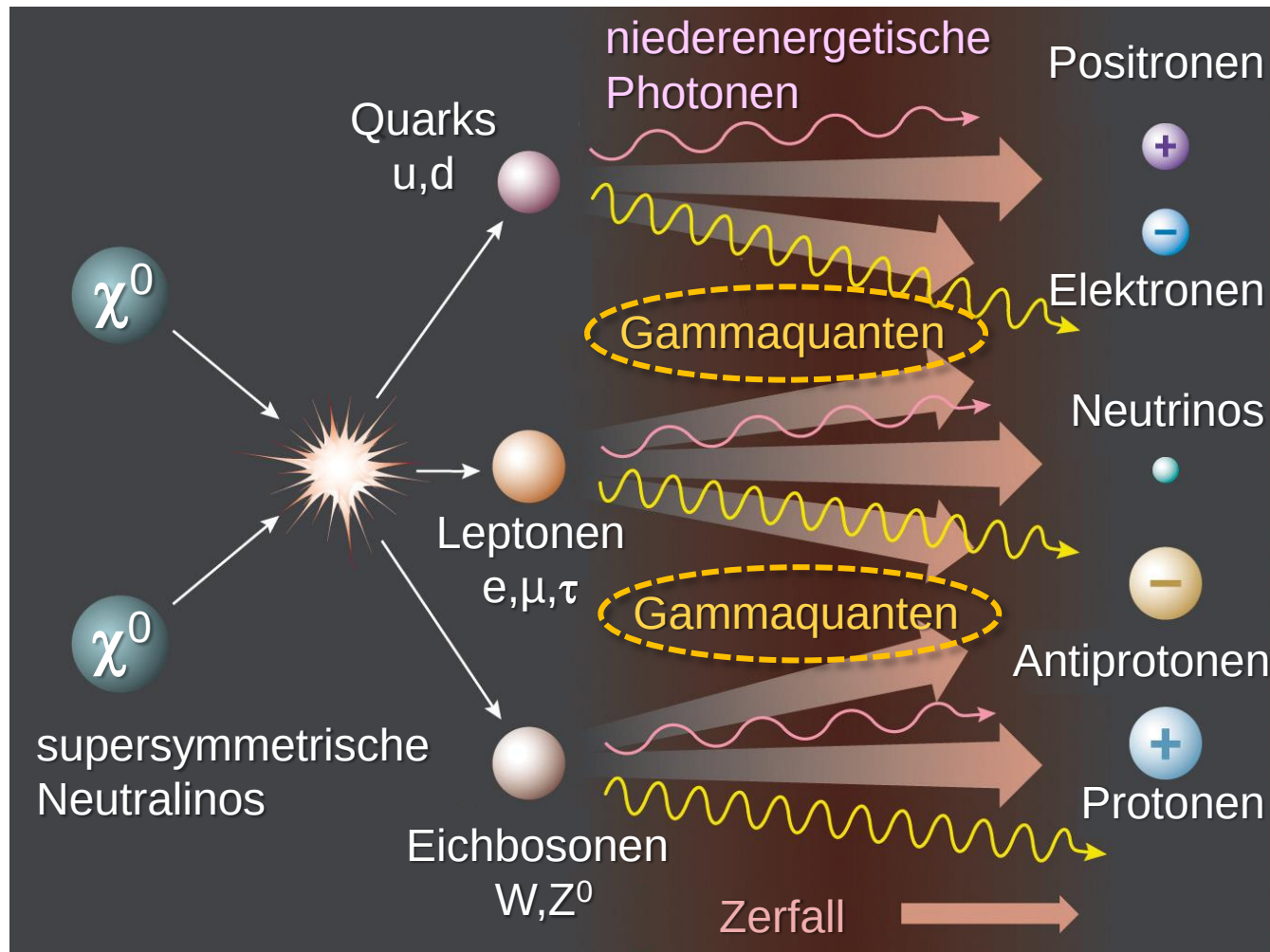
- $\sqrt{s} = 7(8)$ TeV : **keine Evidenz für SUSY Teilchen**
- LHC-Limits: Gauginomasse $m_{1/2} > 0.5$ TeV
(ab $m_{1/2} > 1.5$ TeV wird Chargino $\chi^\pm$ zum LSP!)
- verbessertes SUSY-Entdeckungspotenzial nach LHC Upgrade @ 14 TeV



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

3.4 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:

- hadronischer Zerfall
- Paarbildung
- direkte Erzeugung

Neutrinos:

- hadron./lepton. Zerfall

Gammas:

- hadronischer Zerfall
- Bremsstrahlung

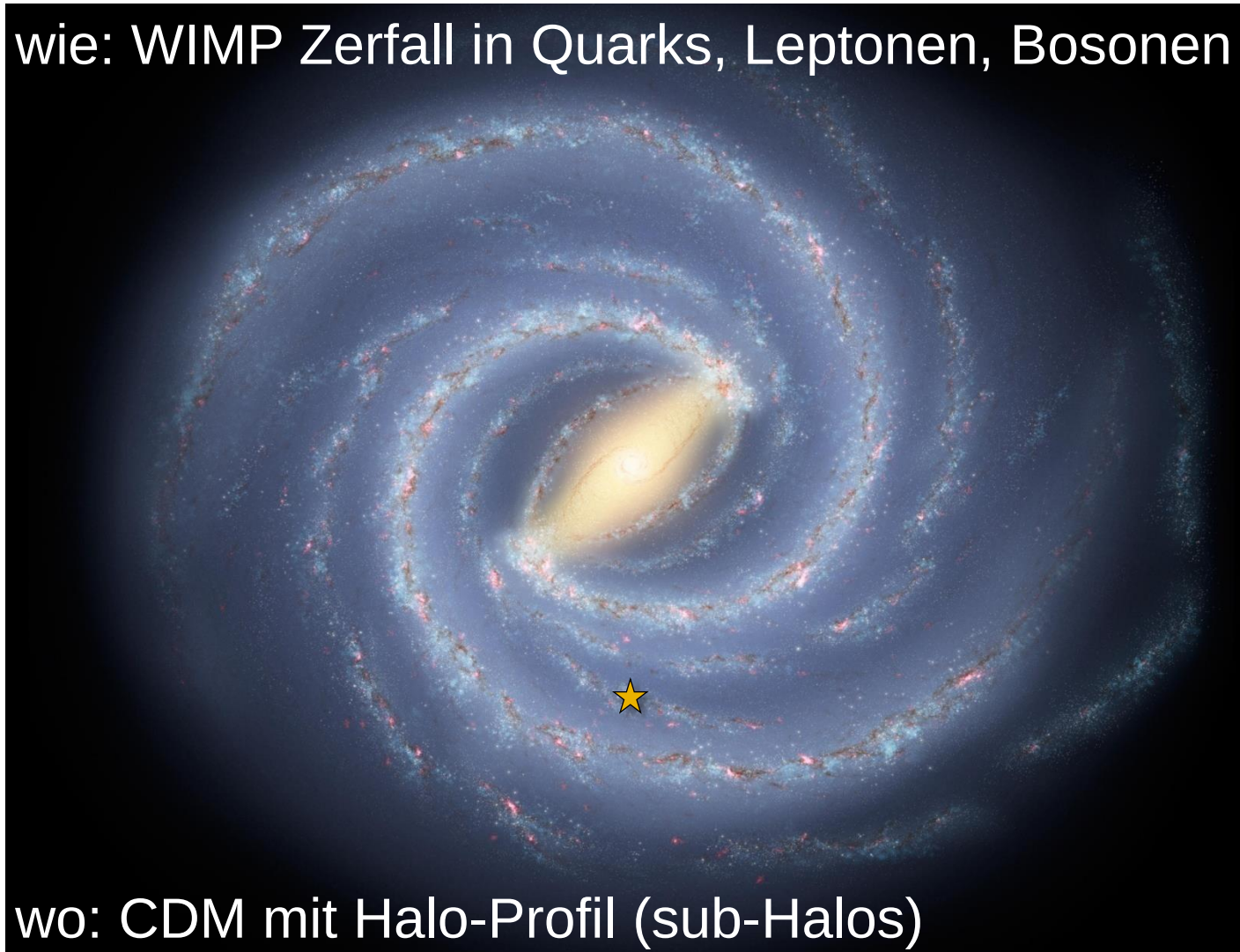
Protonen/Antiprotonen:

- Hadronisierung & Jets
- Eichboson-Zerfälle

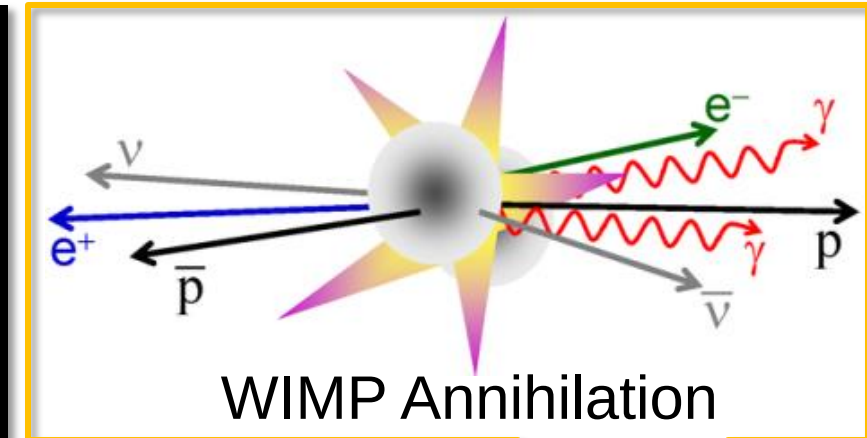
WIMP Annihilation: wo und wie

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

wie: WIMP Zerfall in Quarks, Leptonen, Bosonen



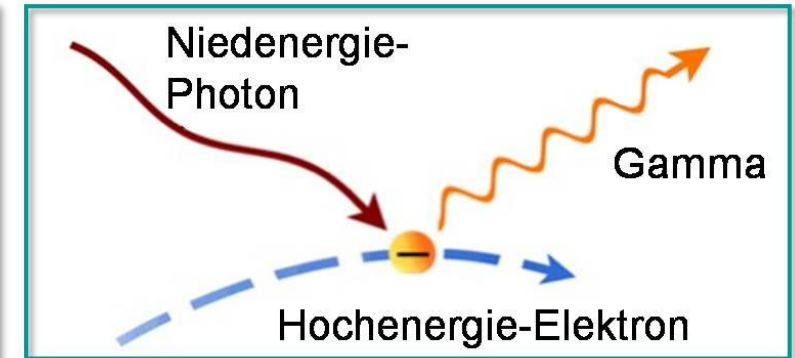
wo: CDM mit Halo-Profil (sub-Halos)



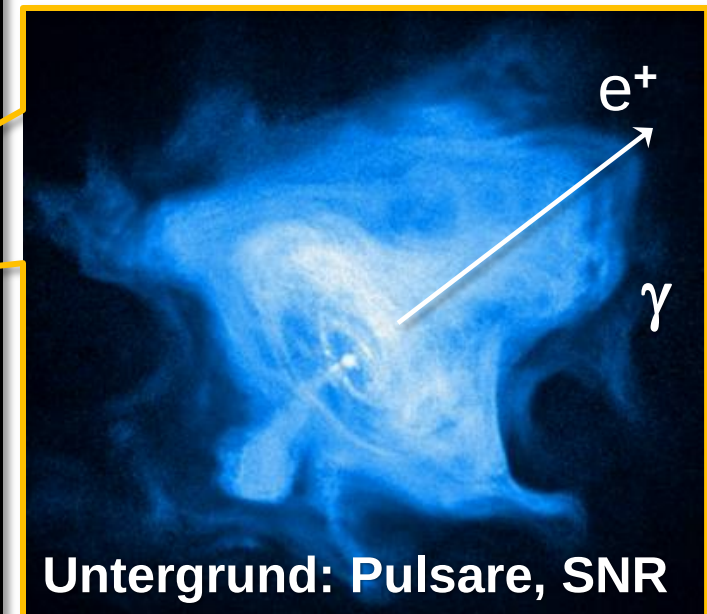
WIMP Annihilation: Untergrund

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

wie: Energieverteilung des Untergrunds, Prozesse?



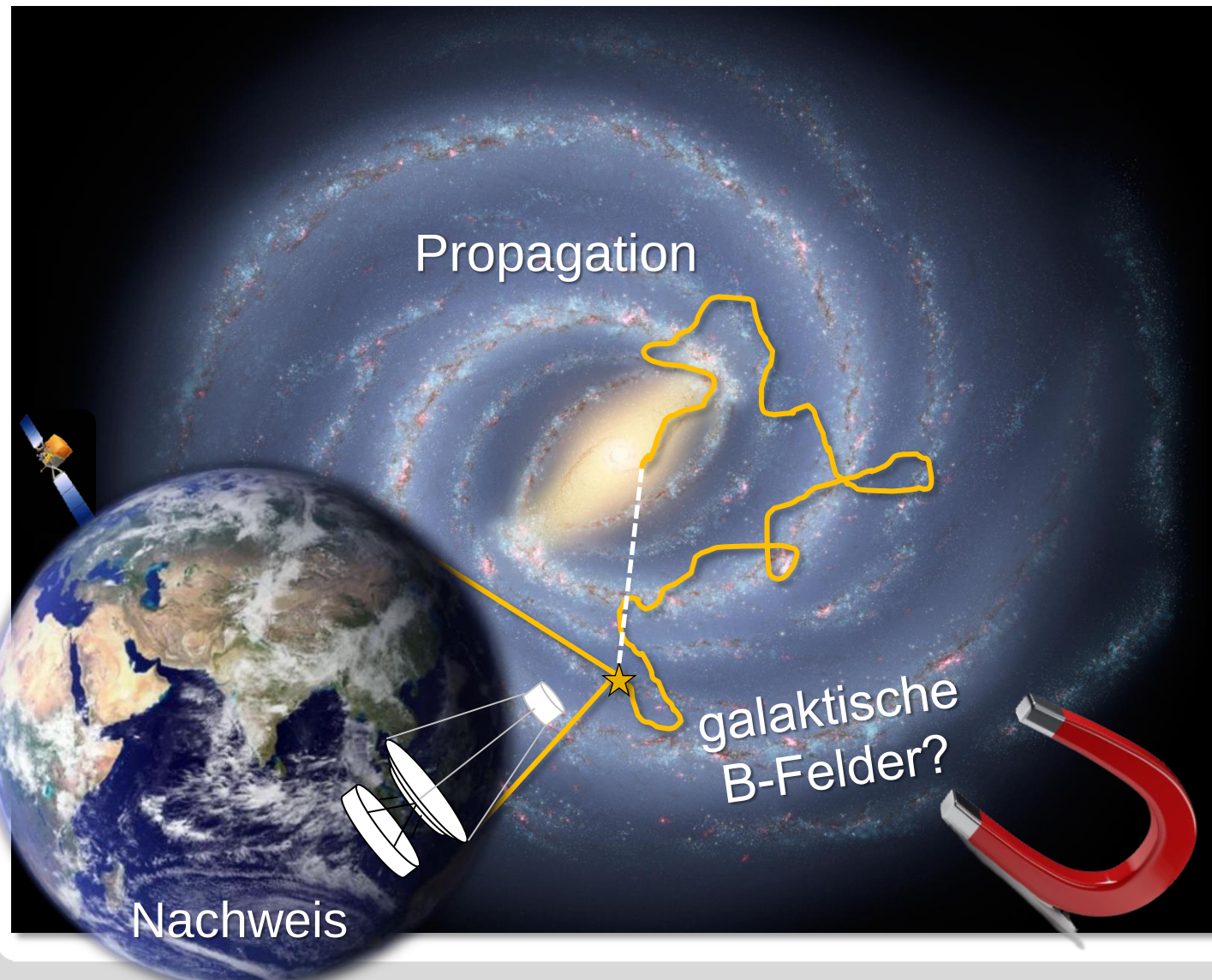
inverser Compton Effekt



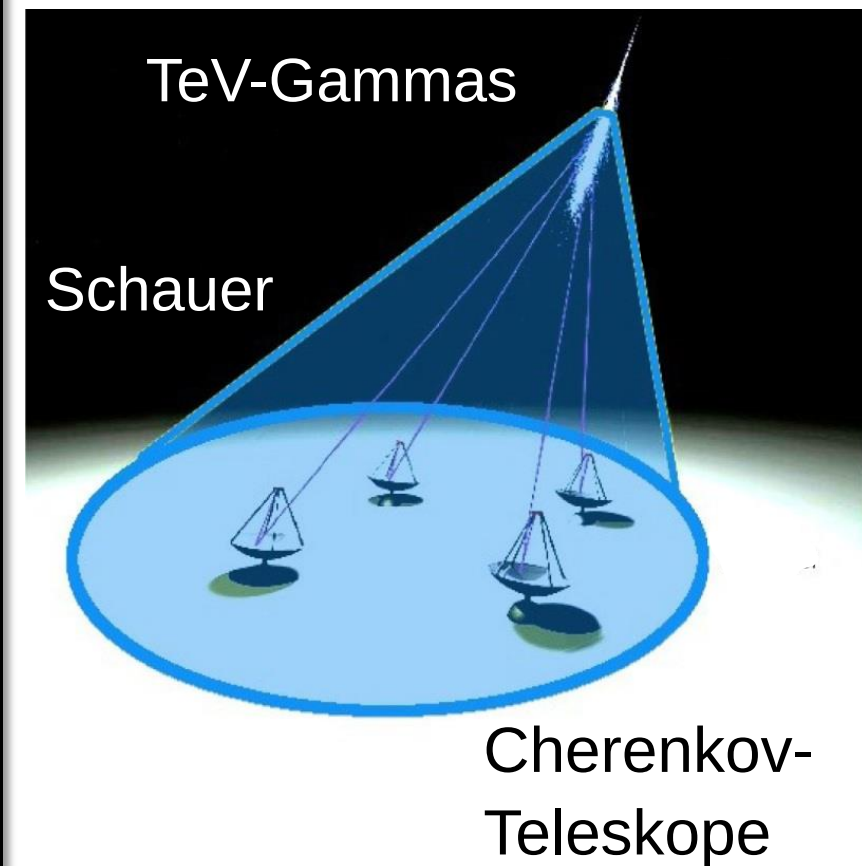
Untergrund: Pulsare, SNR

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

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



Energiekalibration, Effizienz



■ Astrophysikalische und teilchenphysikalische Unsicherheiten bei DMA:

ASTRO

DM-Haloprofil
(sub-Halos)

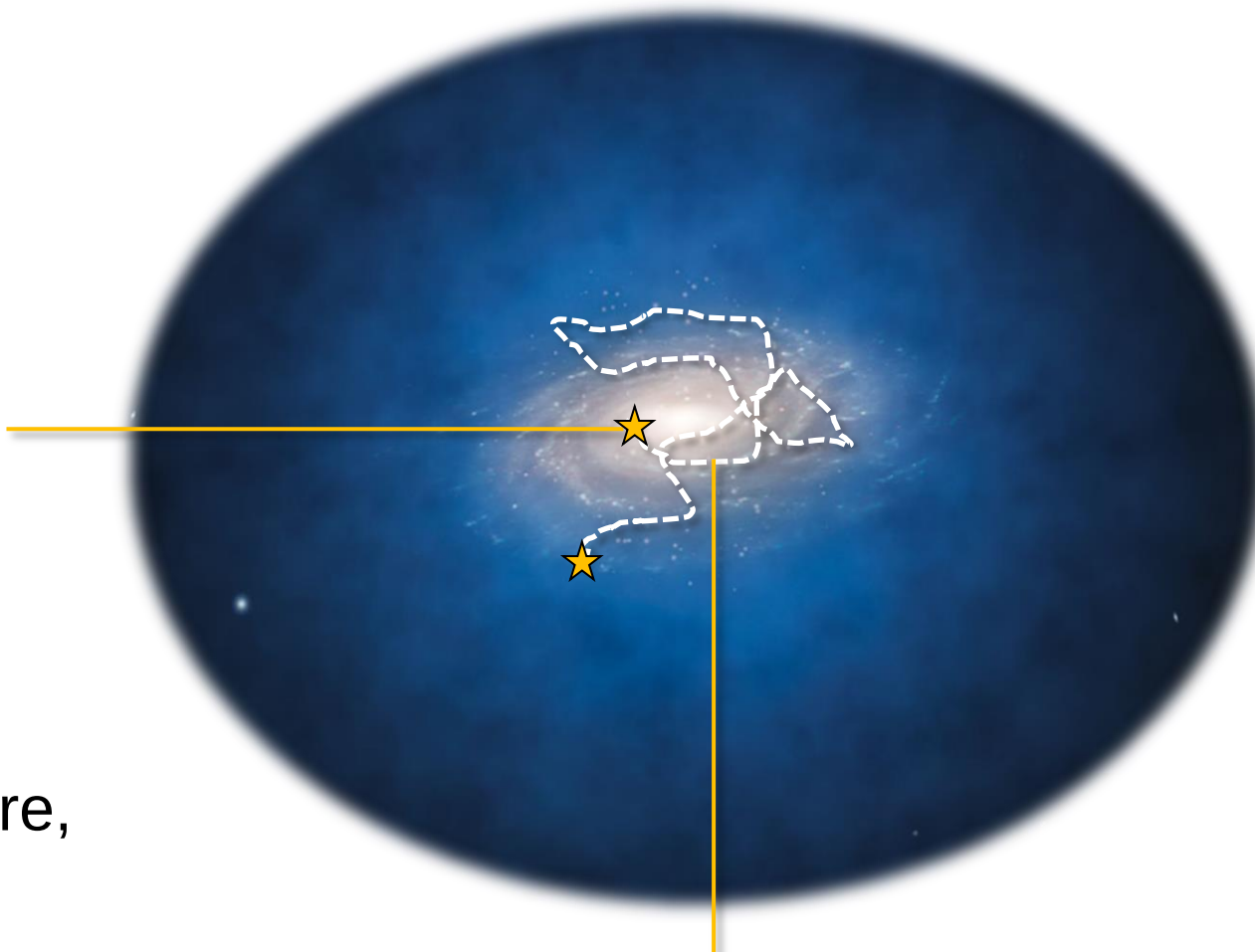
- Untergrund-
quellen (Pulsare,
SNR,...)

Propagation der DMA-Messengerteilchen
(Energieverlust, B-Felder)

SUSY

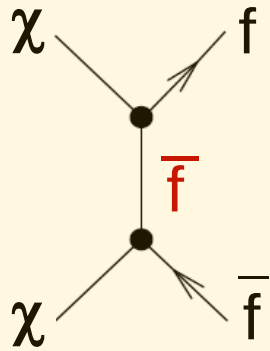
- WIMP-
Eigenschaften:
- Masse
 - Flavour ($\tilde{B}^0$, $\tilde{W}^0$)
 - $\sigma_{\text{Ann}} \cdot v$
 - Zerfallskanäle

**Dunkel-
Materie
Annihilation**

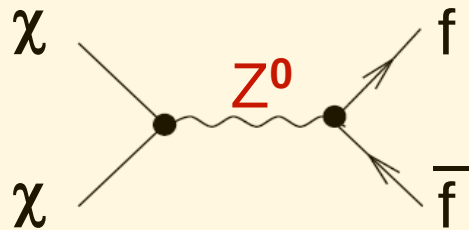


Neutralino Annihilationsprozesse

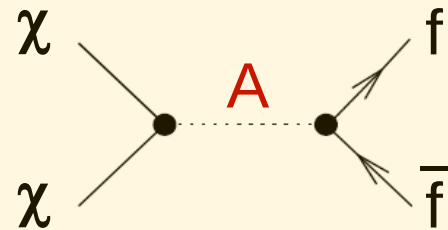
Annihilation in Fermion-Paare (Quarks, Leptonen)



t-Kanal



s-Kanal



s-Kanal (Annihilation):

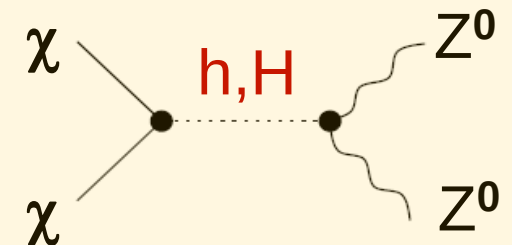
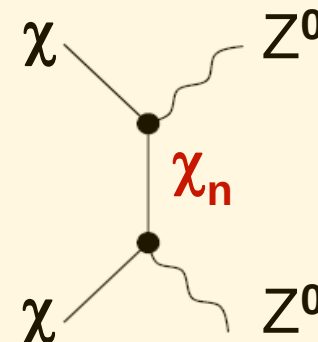
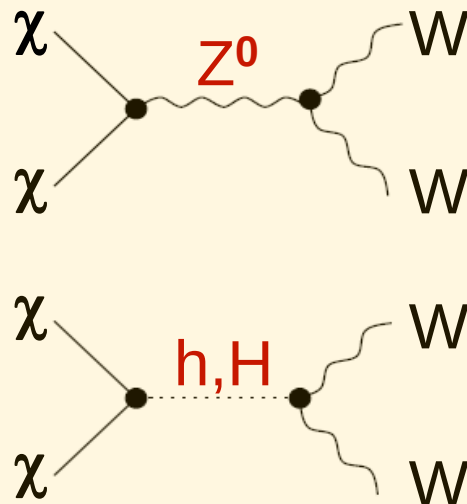
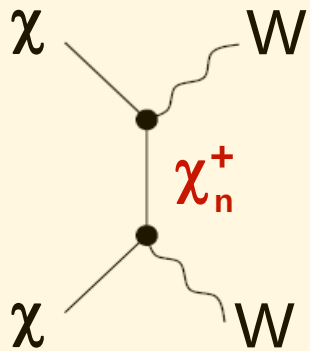
- Z^0 -Boson
- pseudoskal. Higgs A

t-Kanal (Umwandlung):

- Sfermionen ($\tilde{v}$)

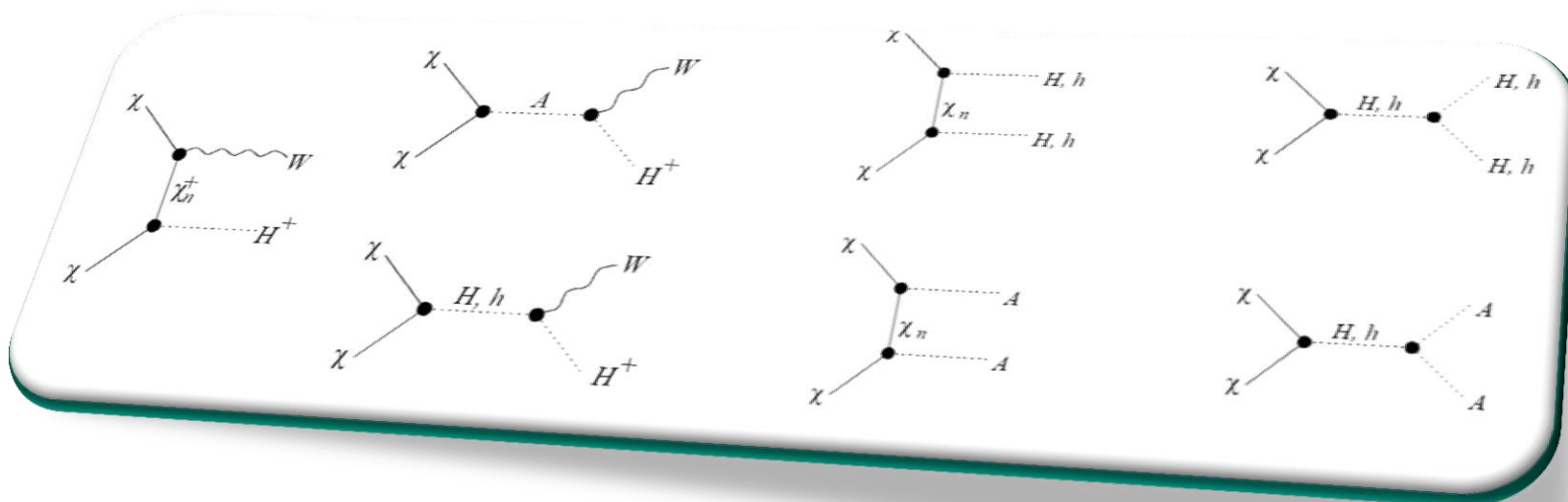
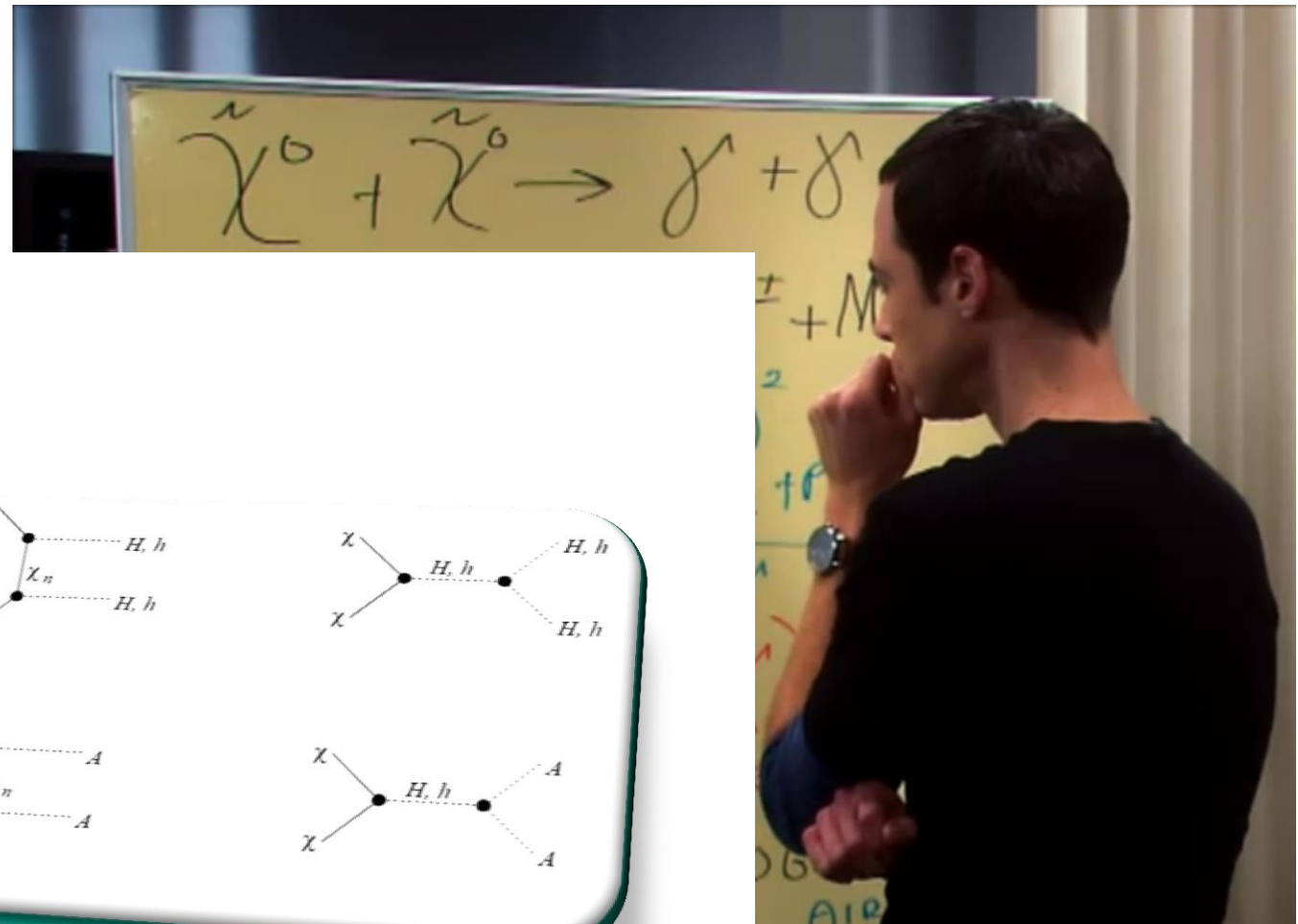
Annihilation in Eichboson-Paare $W^\pm Z^0$

t-Kanal via Charginos, Neutralinos



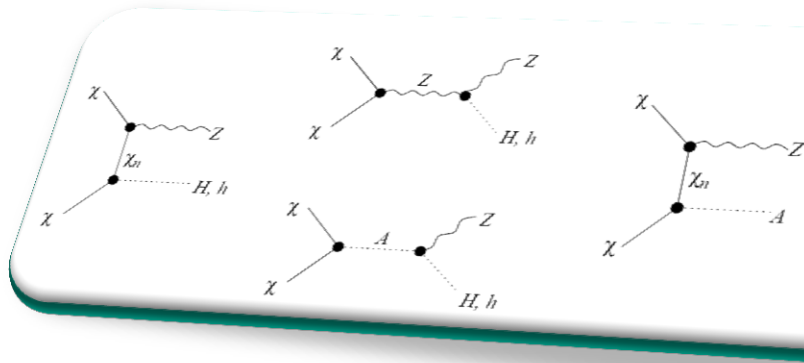
Neutralino Annihilationsprozesse

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

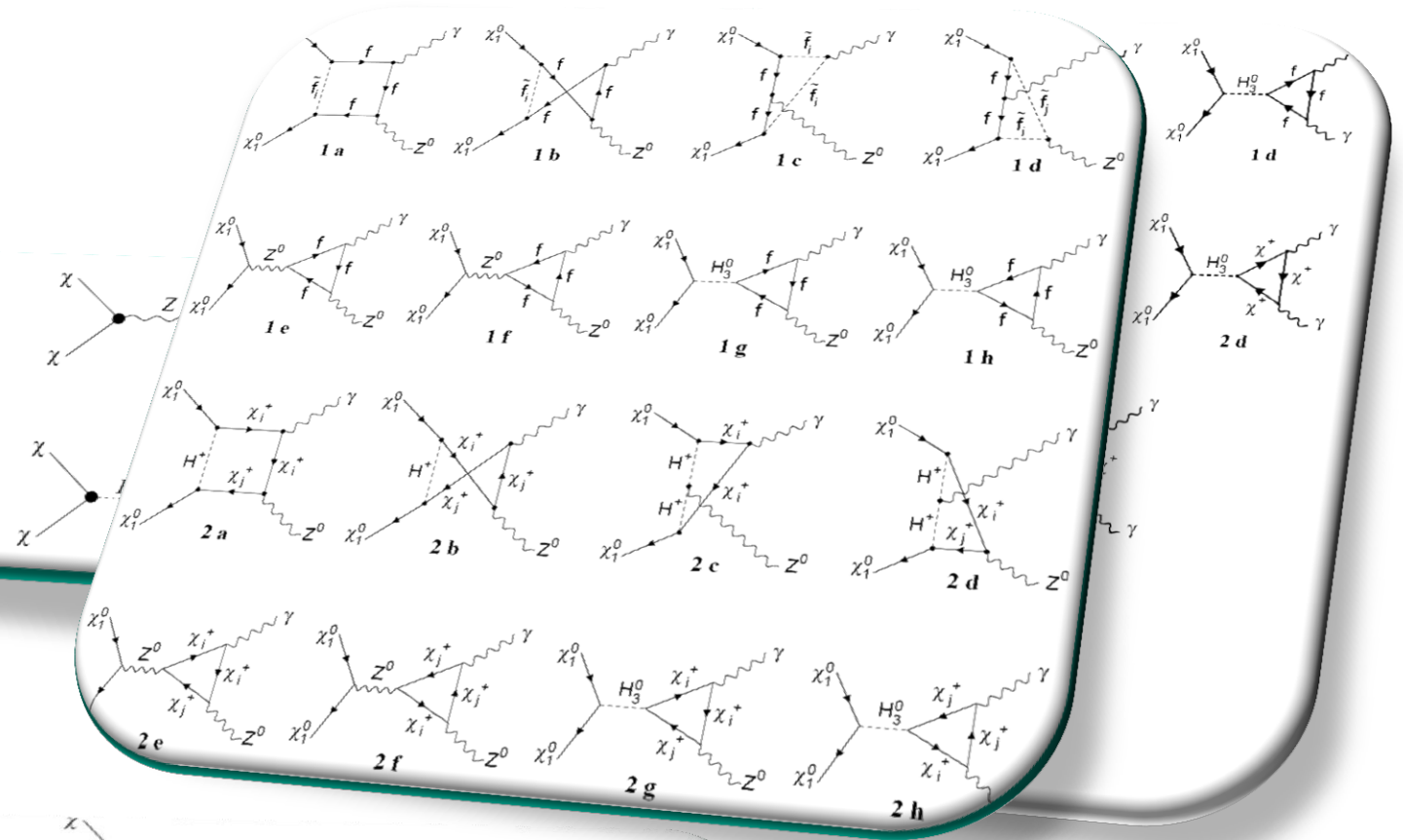
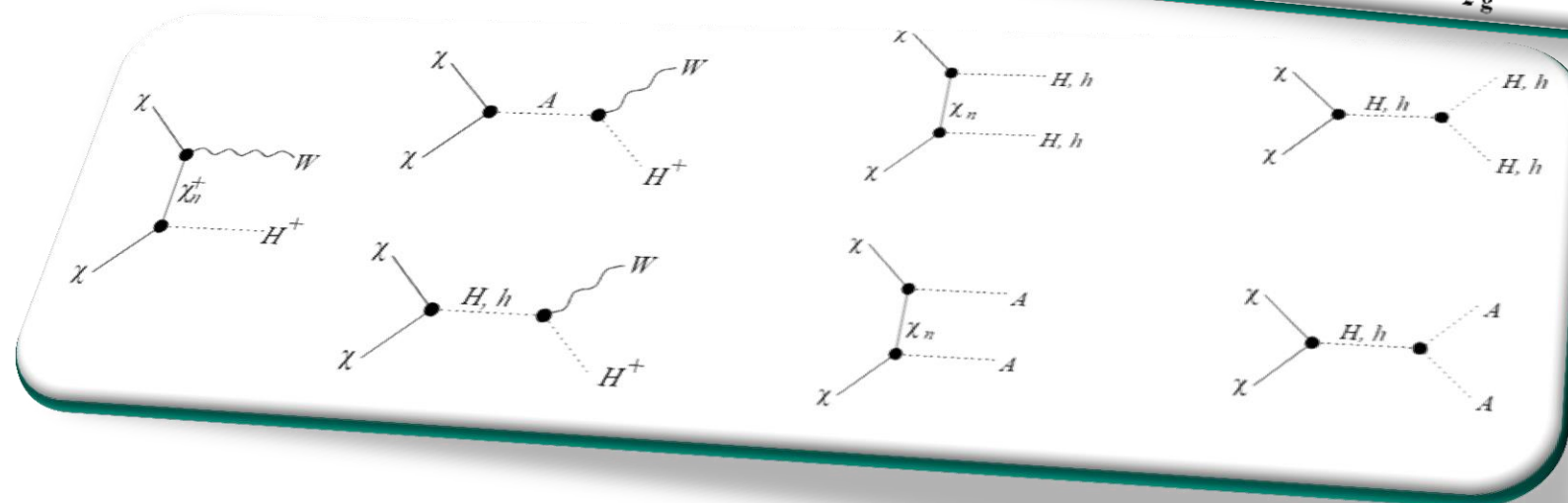


Neutralino Annihilationsprozesse

...ein Ausschnitt weiterer
Annihilationskanäle...



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



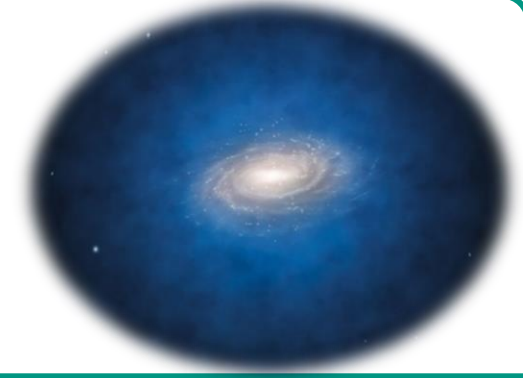
**Dark
SUSY**

WIMP Annihilation: Erzeugungsorte

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

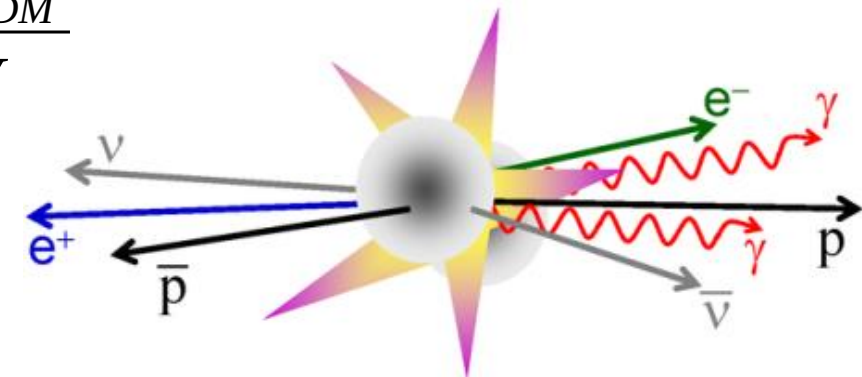
Suche in **Bereichen mit DM-Überdichten**

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



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

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

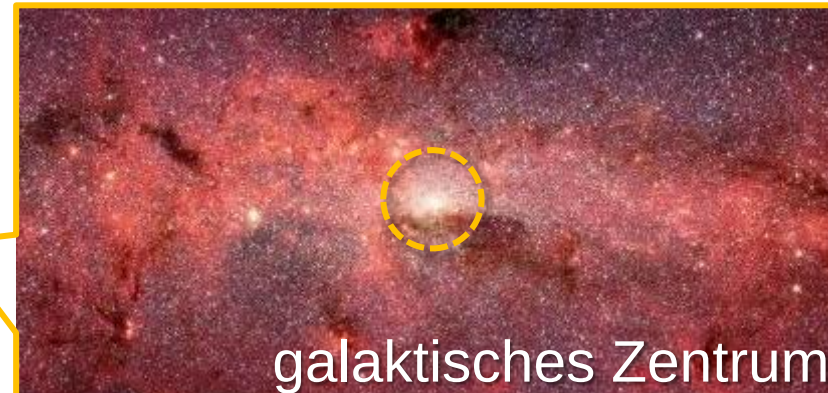
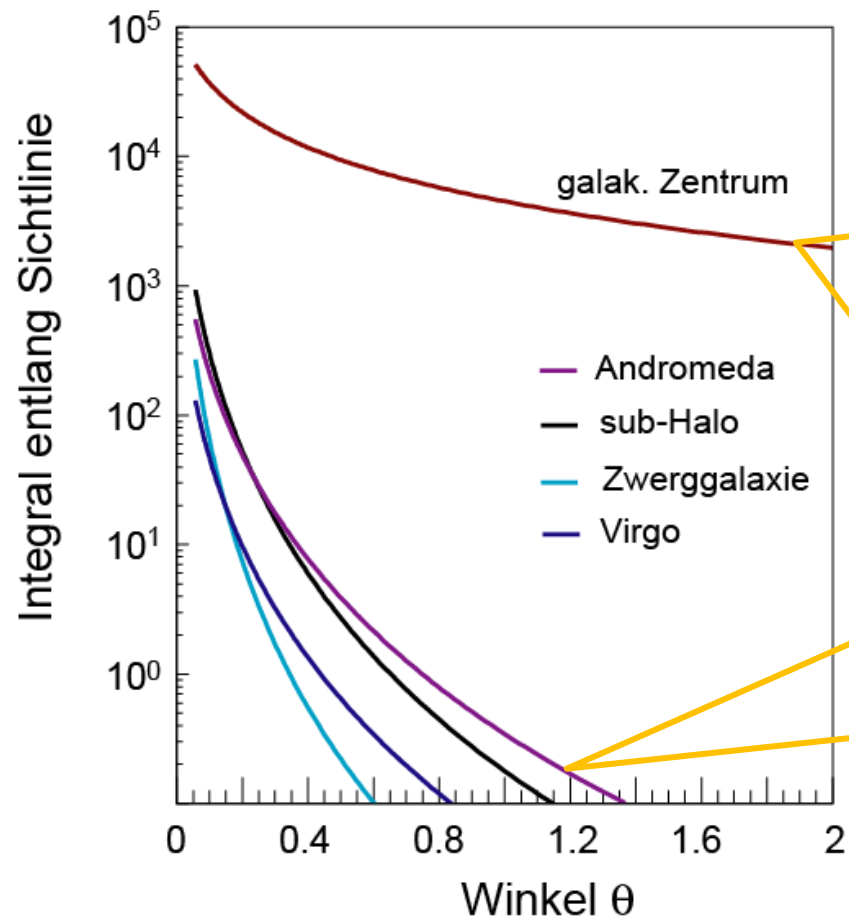
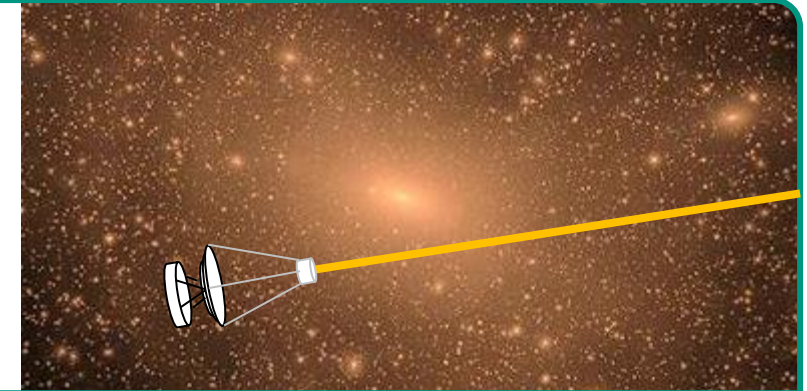


ρ_{CDM} aus Profil des CDM-Halos
 v WIMP-Geschwindigkeitsprofil im Halo
 σ_{Ann} Wq. aus theoretischen Berechnungen

WIMP Annihilation: Sichtlinie

- Fluss Φ_{Ann} von WIMP-Annihilationsprodukten durch **Integration entlang der Sichtlinie**:

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



dominante Quelle

d = 8.3 kpc



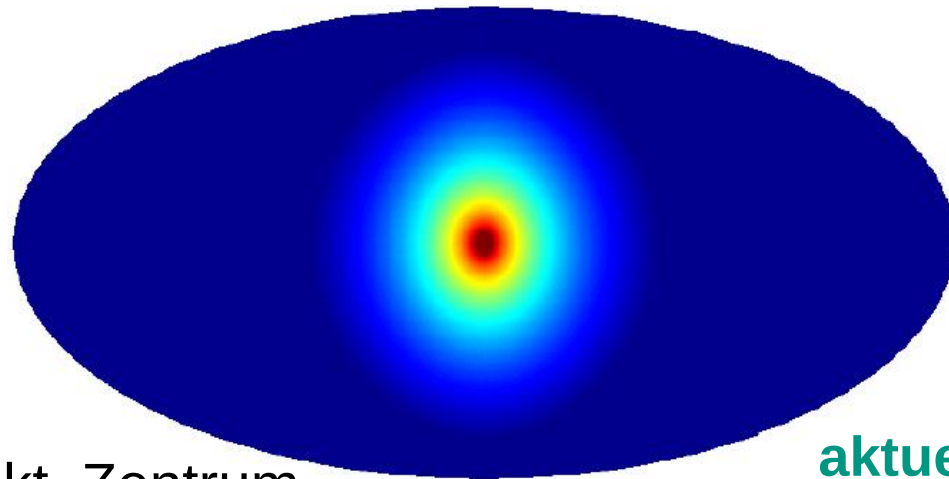
d = 780 kpc

WIMP Annihilation: Raumwinkel und MC

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

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

$\Delta\Omega$: Raumwinkel

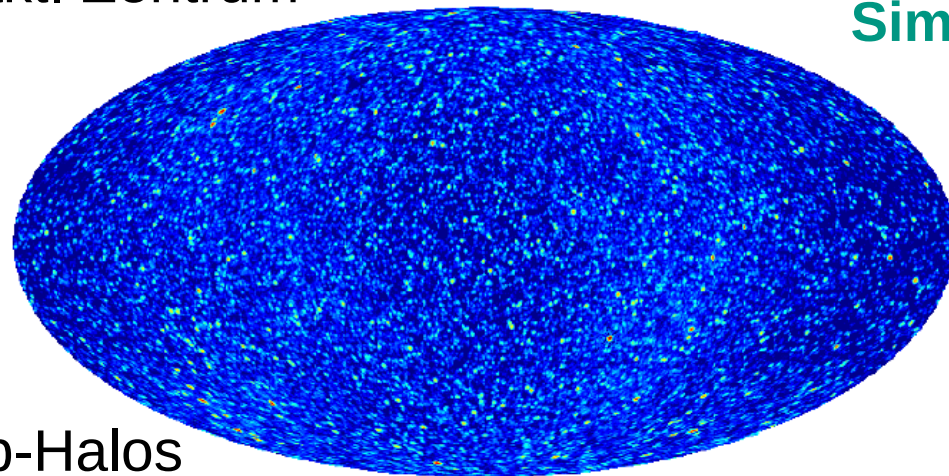


galakt. Zentrum

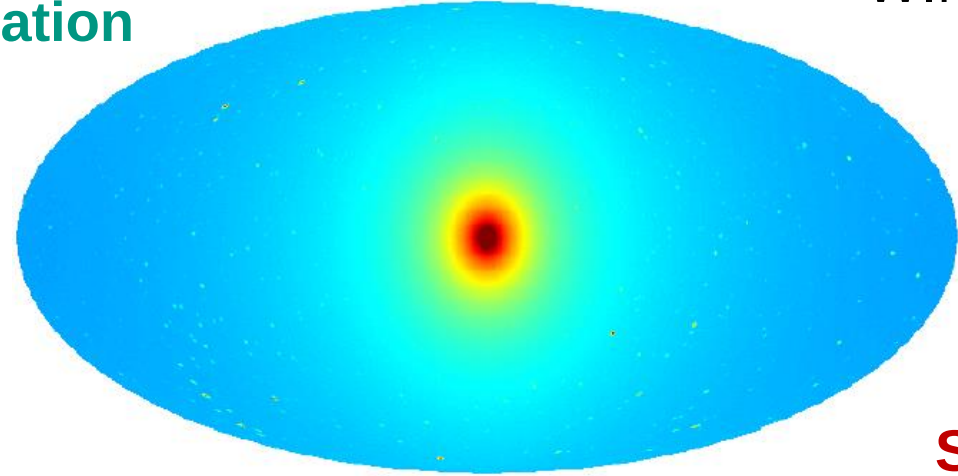


WIMP Halo

aktuelle DMA
Simulation

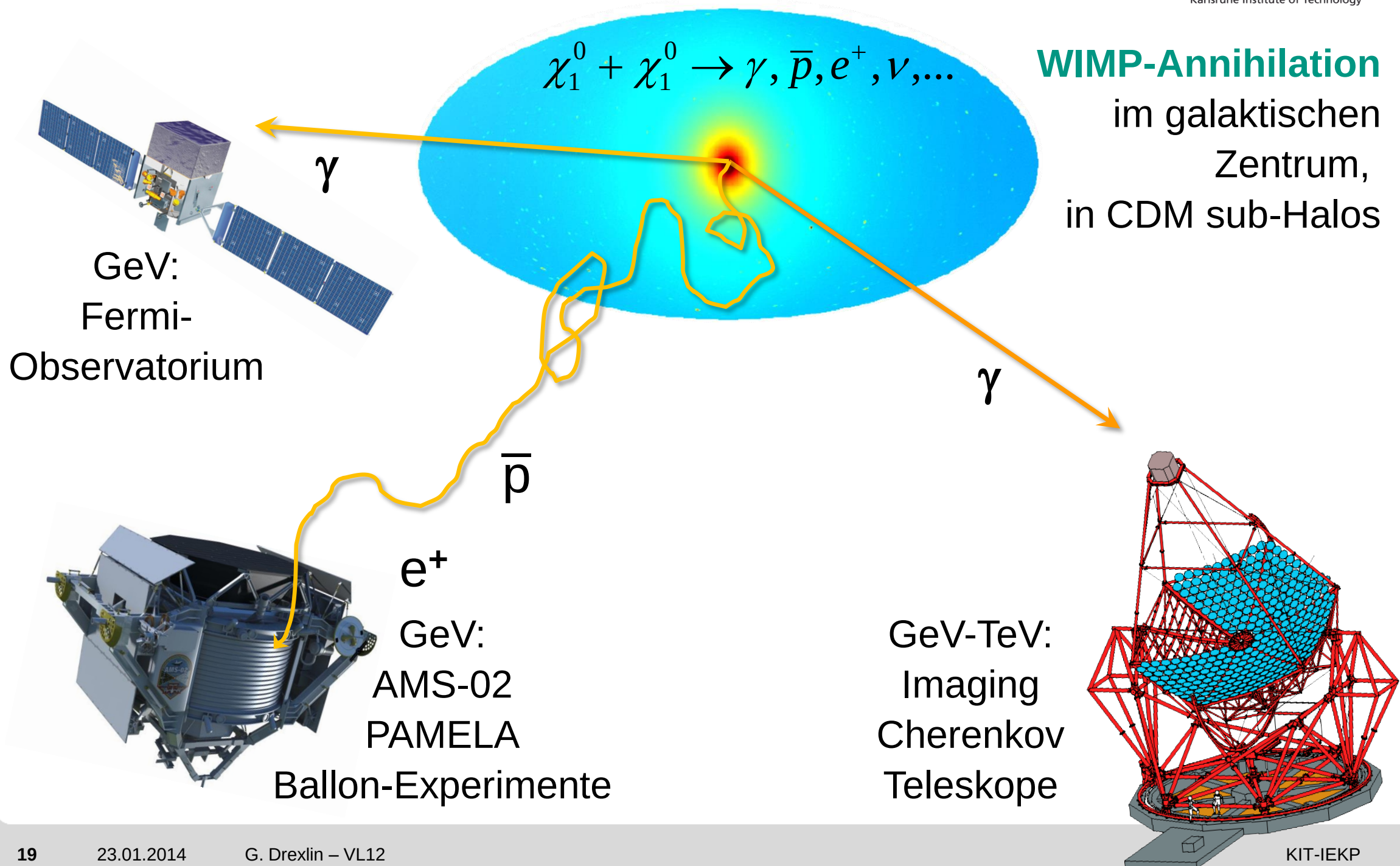


sub-Halos



Summe

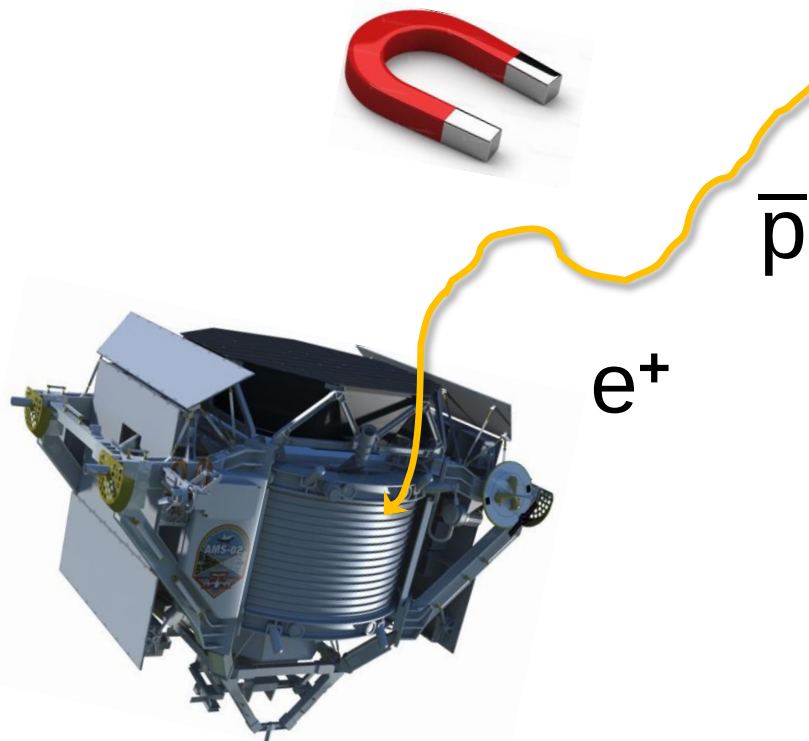
3.4.1 Gammas und Positronen



DMA: Antiprotonen, Positronen

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

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

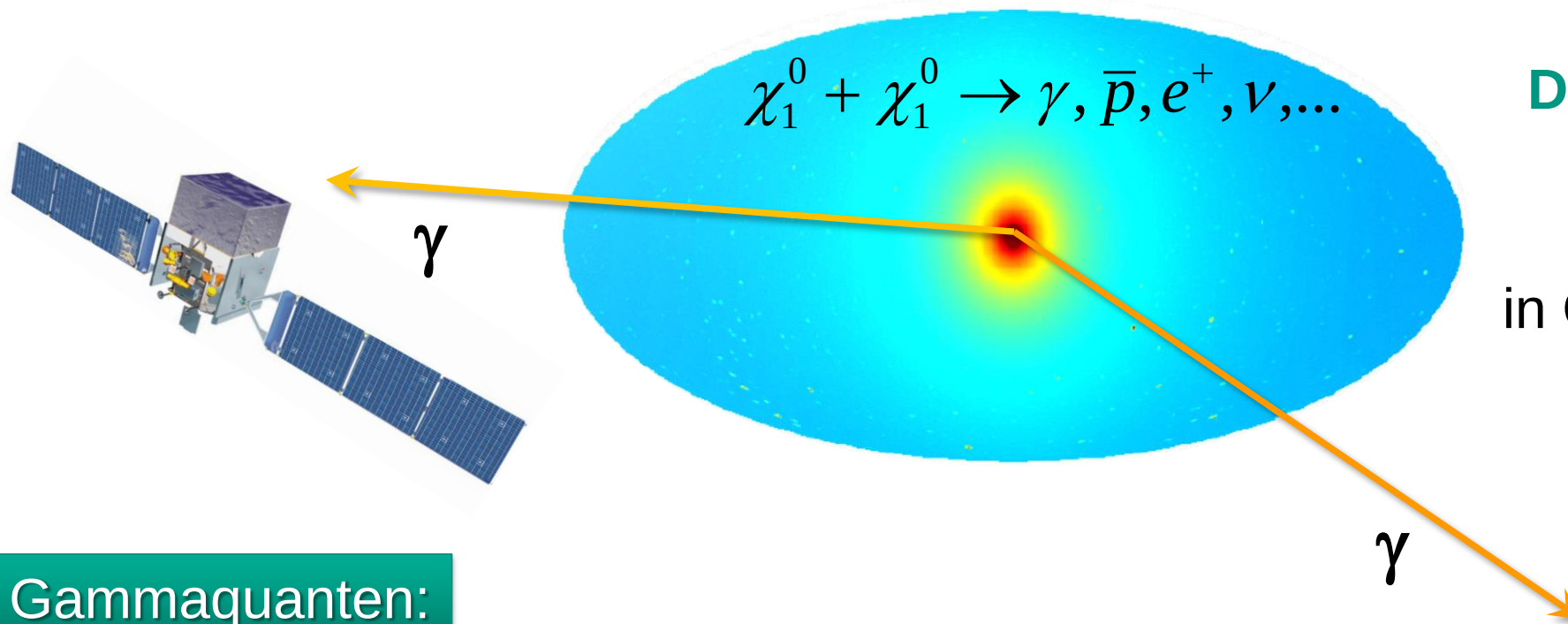


Antiprotonen, Positronen:

- 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)

DMA: Gammas

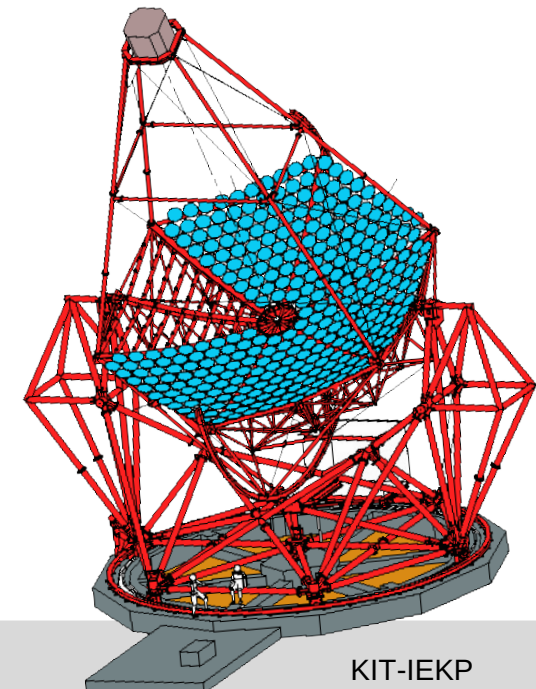


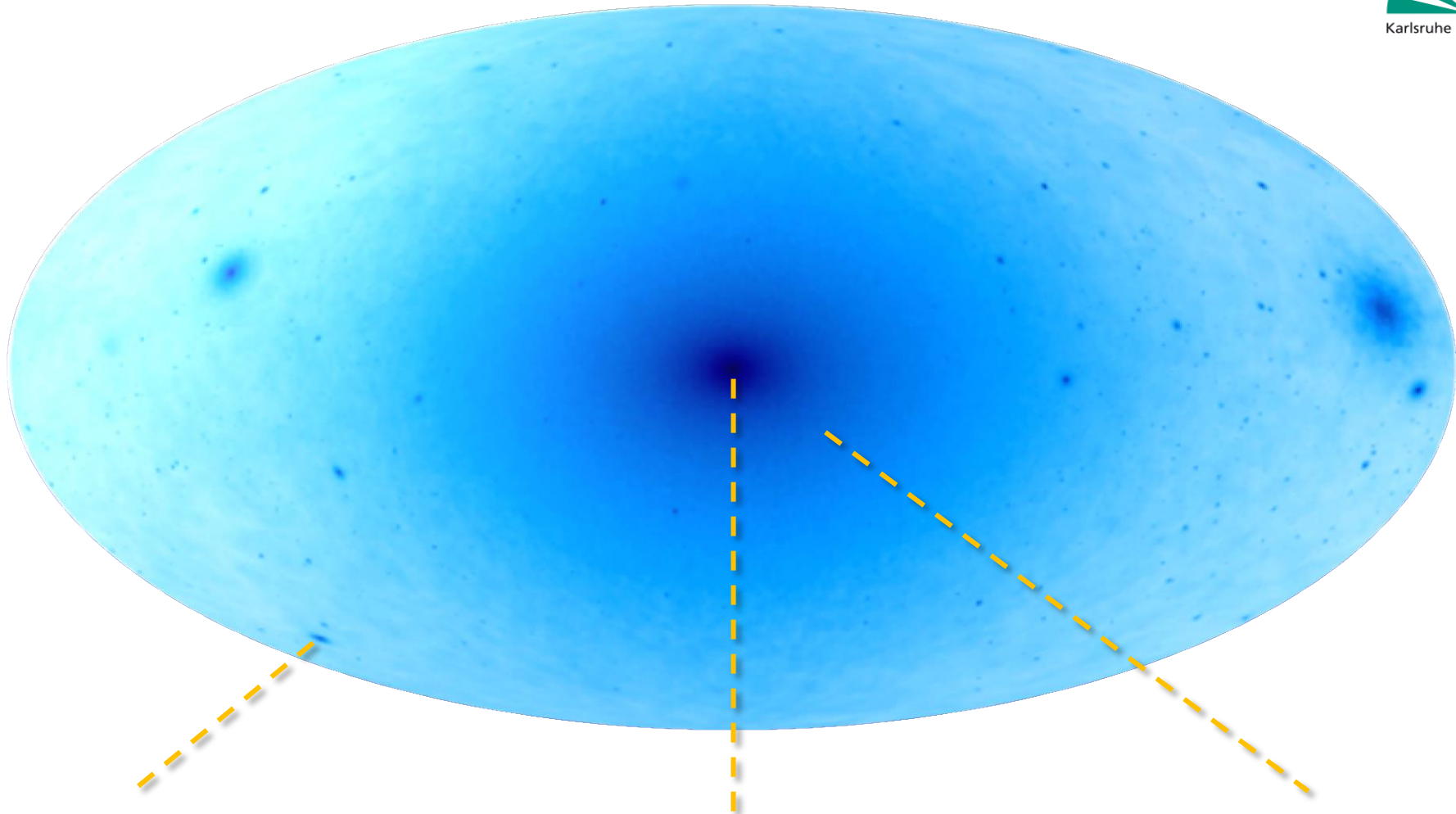
DM-Annihilation
im galaktischen
Zentrum,
in CDM sub-Halos

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)





extra-galaktisch:
gute Statistik 😊
diffuser Untergrund ☹️

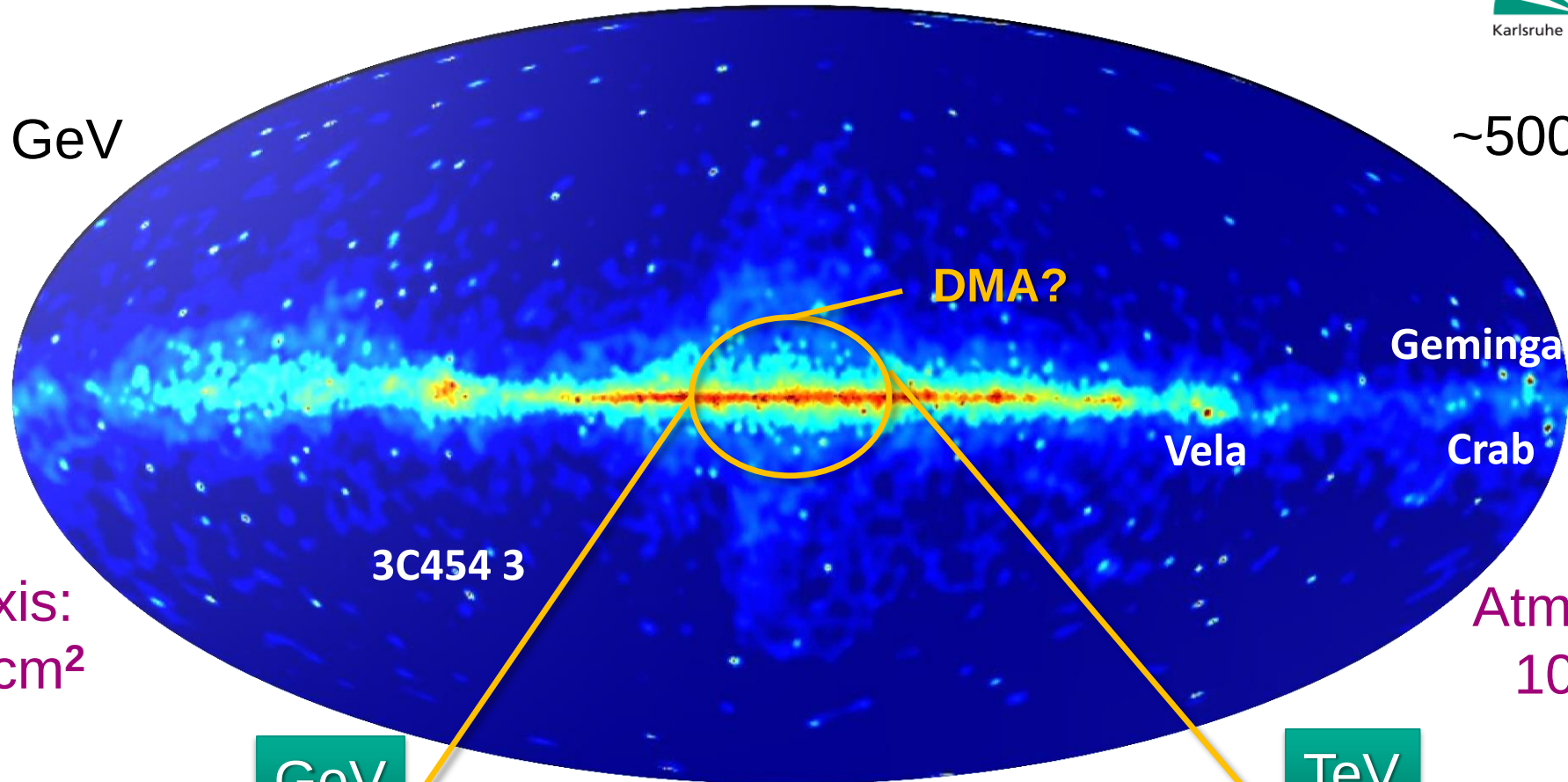
galaktisches Zentrum:
sehr gute Statistik 😊
zahlreiche Quellen ☹️

galaktischer Halo:
gute Statistik 😊
diffuser Untergrund ☹️

DMA: Gammas

$E > 10 \text{ GeV}$

~500 Quellen

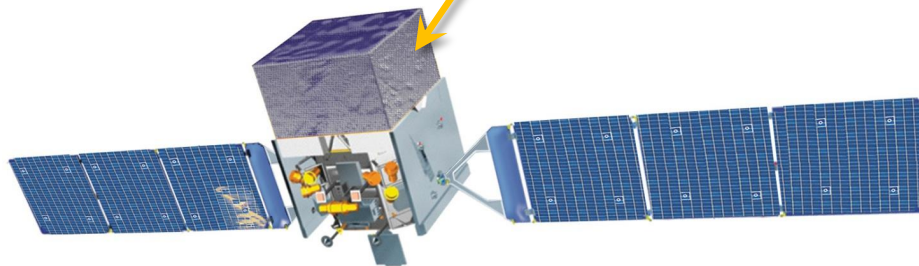


Galaxis:
 38 g/cm^2

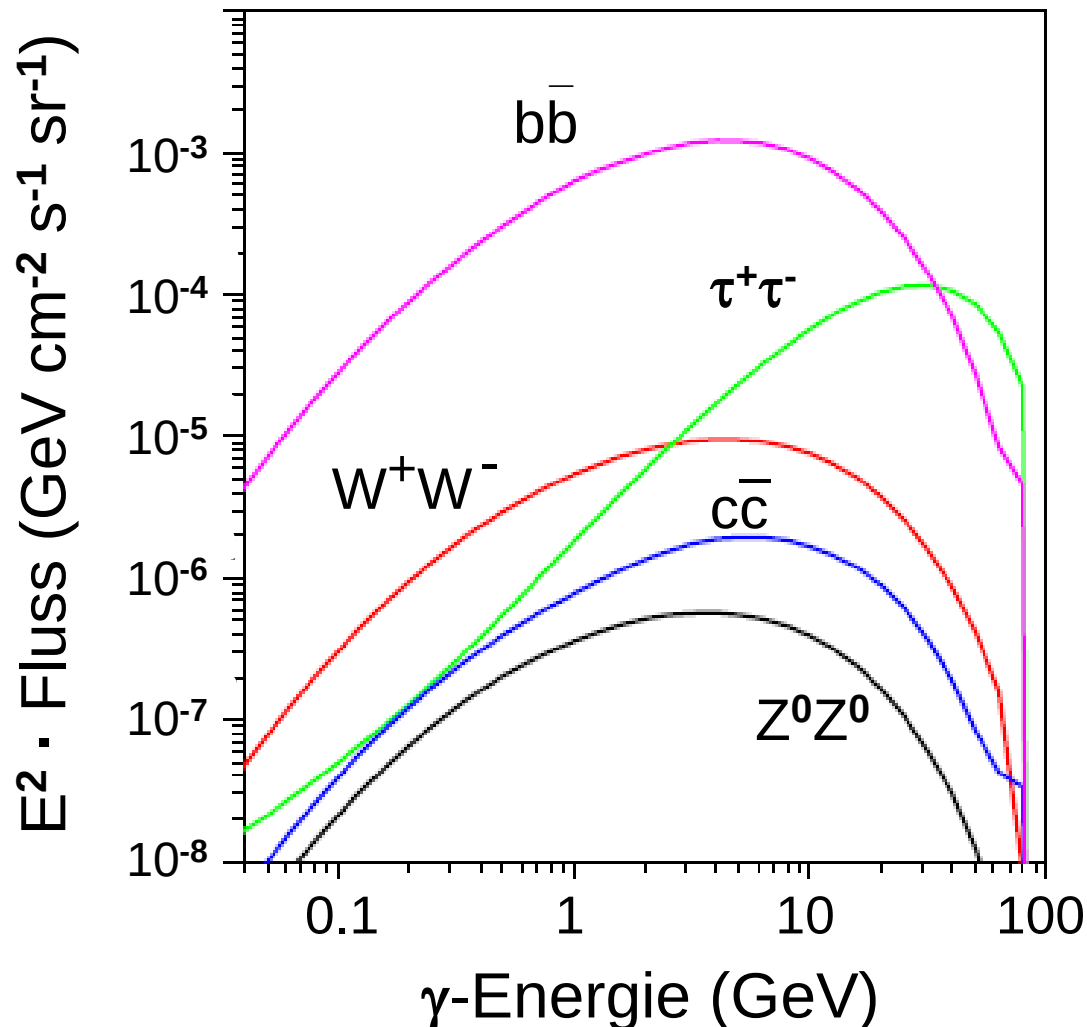
Atmosphäre:
 1000 g/cm^2

GeV

TeV



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



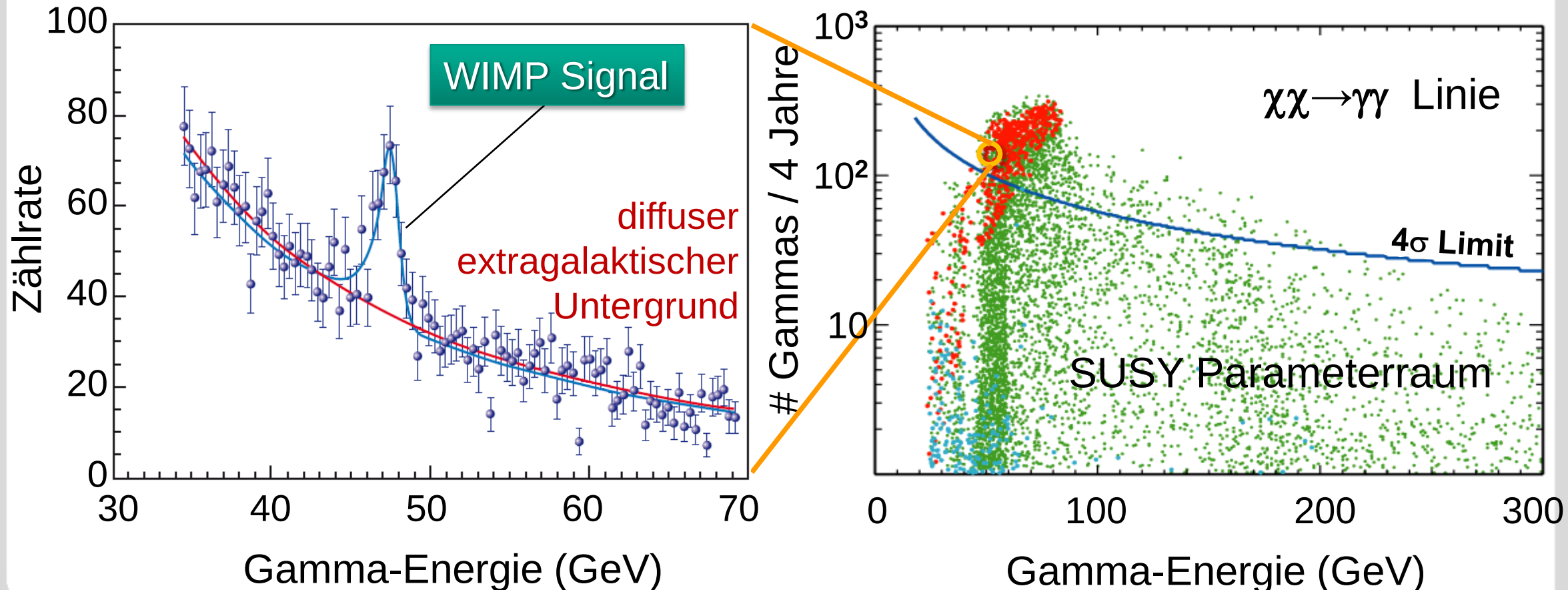
- Zerfallskanäle abhängig von:
 - a) WIMP-Masse $M(\chi^0)$
 - b) WIMP-Flavouranteile (Bino, Wino, Higgsino)
- χ^0 -Zerfälle in leichte Quarks $u, d, \dots$ (und masselose γ 's) sind generell (helizitäts-) unterdrückt

Goldenes WIMP Signal

■ das 'goldene WIMP Signal'

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

- $\chi^0\chi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ Linie ist stark unterdrückt, da neutrale Teilchen nicht direkt an Photonen koppeln (nur via Loops)



■ Fermi- γ -Observatorium

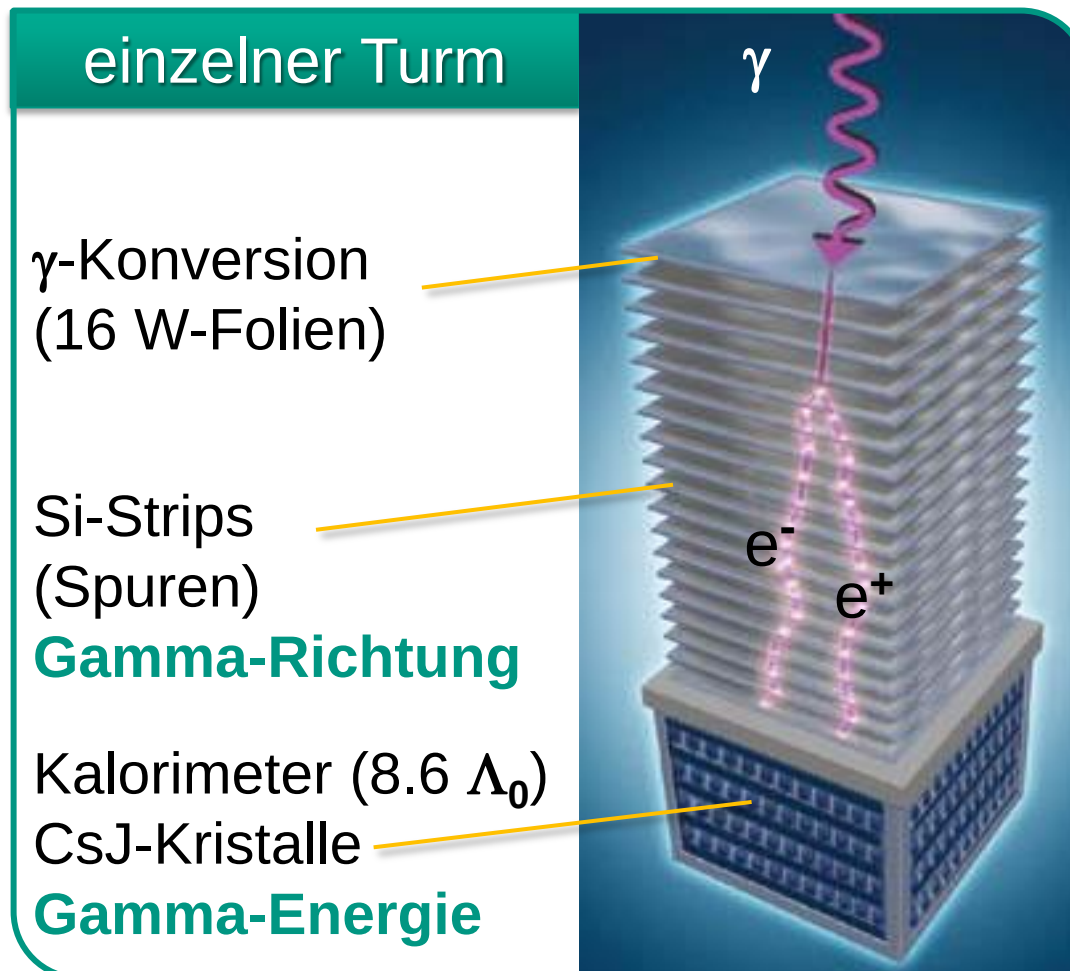
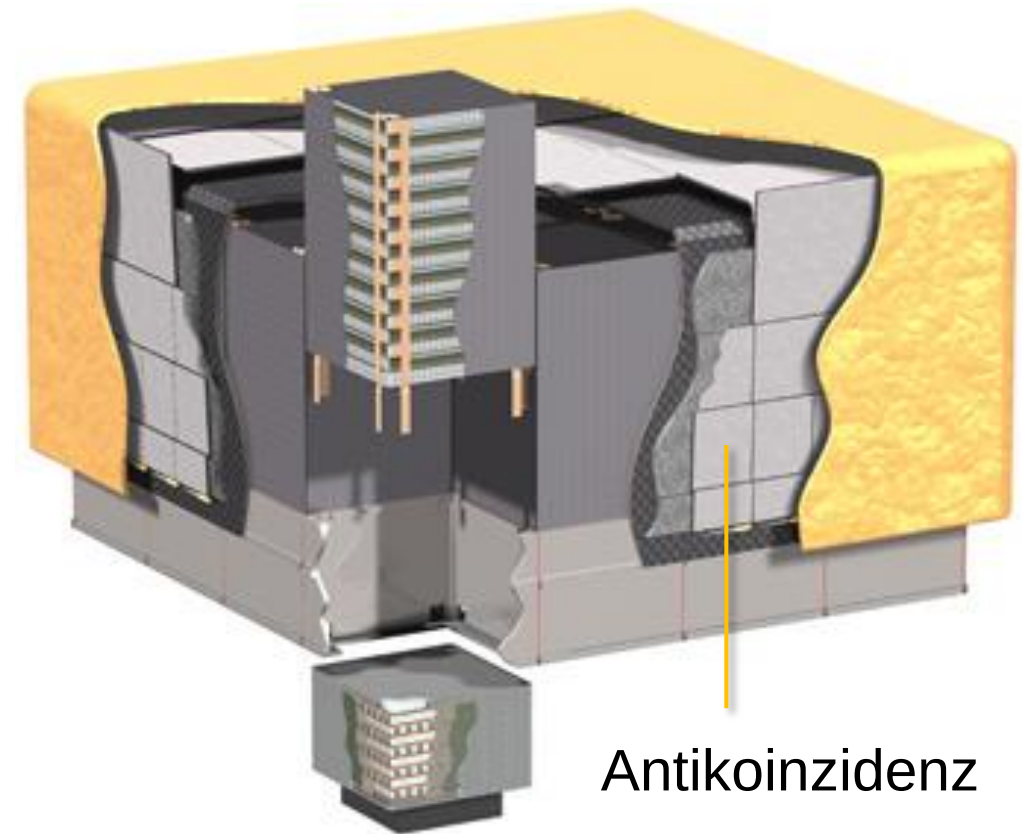
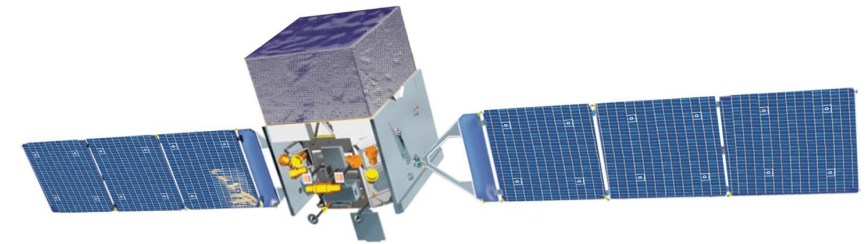
- Messprinzip: **Paarkonversion**
- Nachfolger des Compton-GRO mit vielen wesentlichen experimentellen Verbesserungen:
 - größere effektive Fläche
 - bessere Winkelauflösung
 - höhere γ -Energien

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	$\sim 1'$



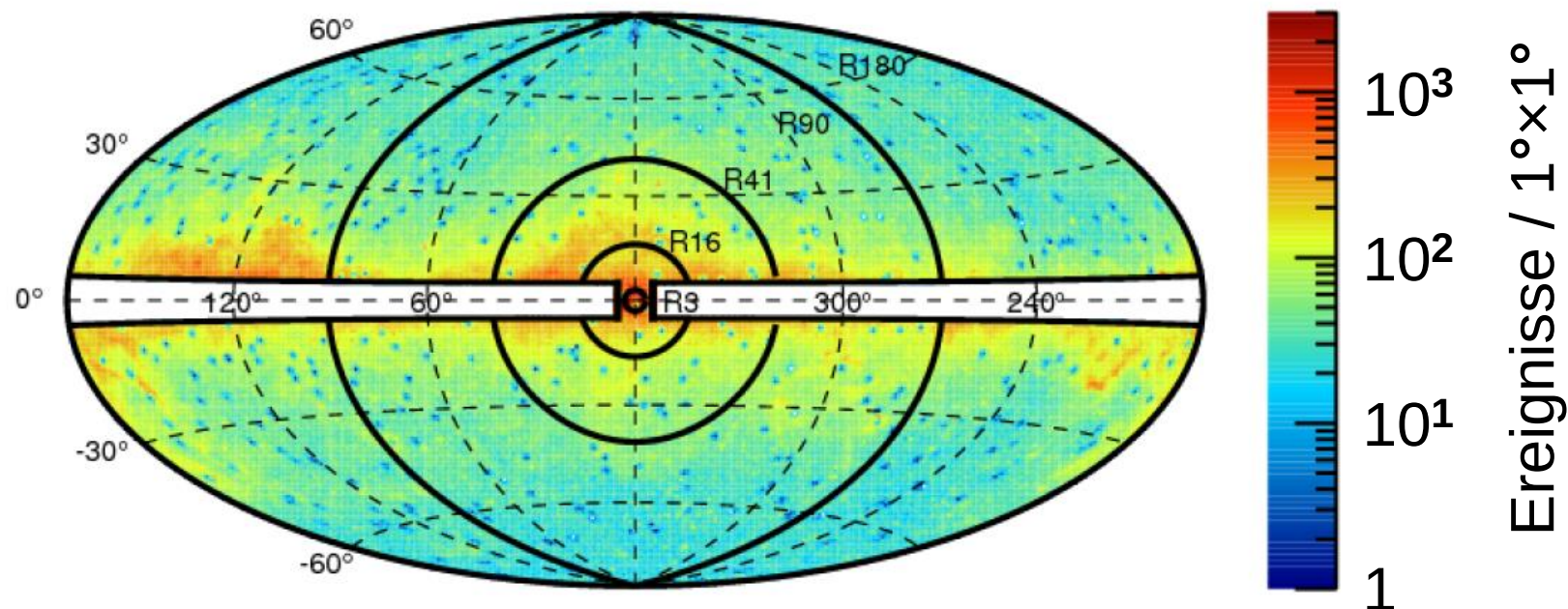
Fermi – Large Area Telescope LAT

- **LAT**: große Fläche $\Rightarrow$ zu jedem Zeitpunkt abgedeckter Raumwinkel $d\Omega \sim 20\%$
 - Abdeckung von 4π alle 3 Stunden
 - 16 einzelne Türme



Fermi – Resultate nach 3.7 Jahren

- **Datennahme von 8/2008 – 4/2012:** Himmelskarte 2.6 – 541 GeV
 - mehr als 500 Punktquellen aus den Daten entfernt

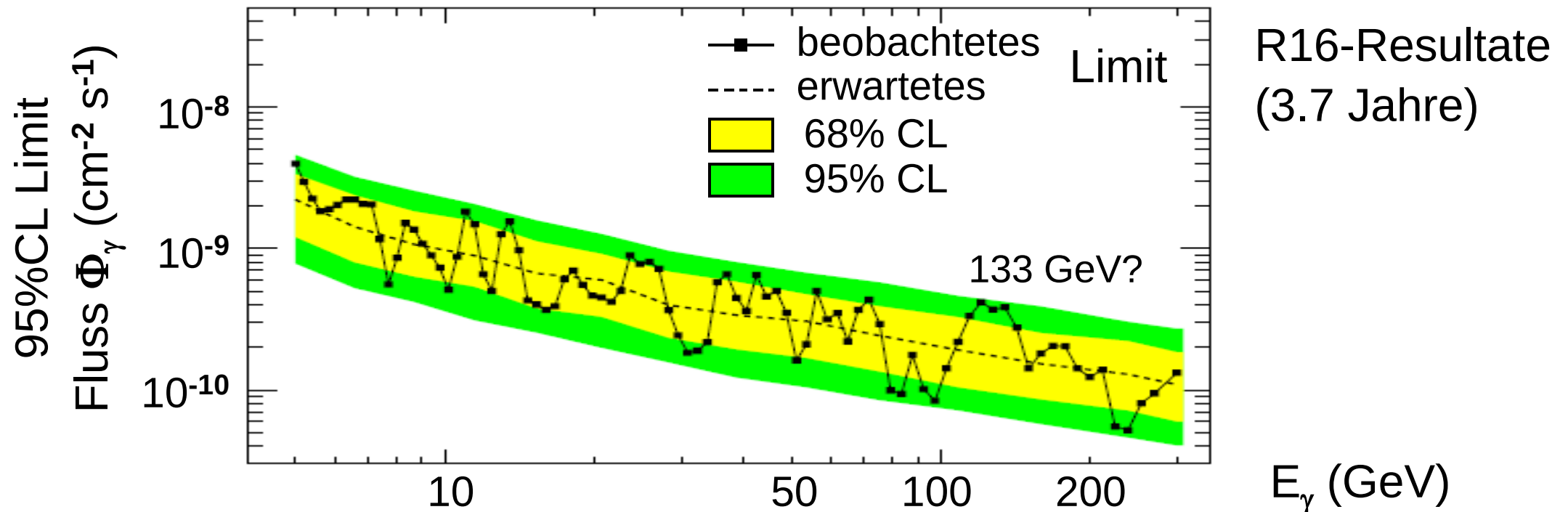


- Definition von ROIs (Regions-Of-Interest) um das galaktische Zentrum
 - R3 - 3° / R16 - 16° / R41 - 41° ... um das galaktische Zentrum
- Likelihood-Analysen zur Suche nach Linienquellen

AKTUELL

Fermi – Resultate nach 3.7 Jahren

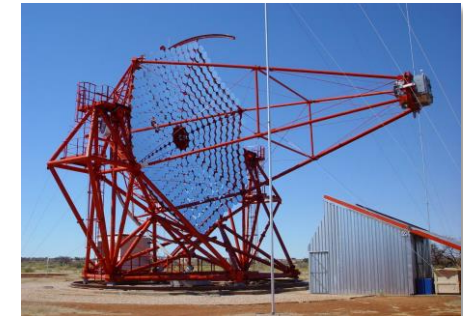
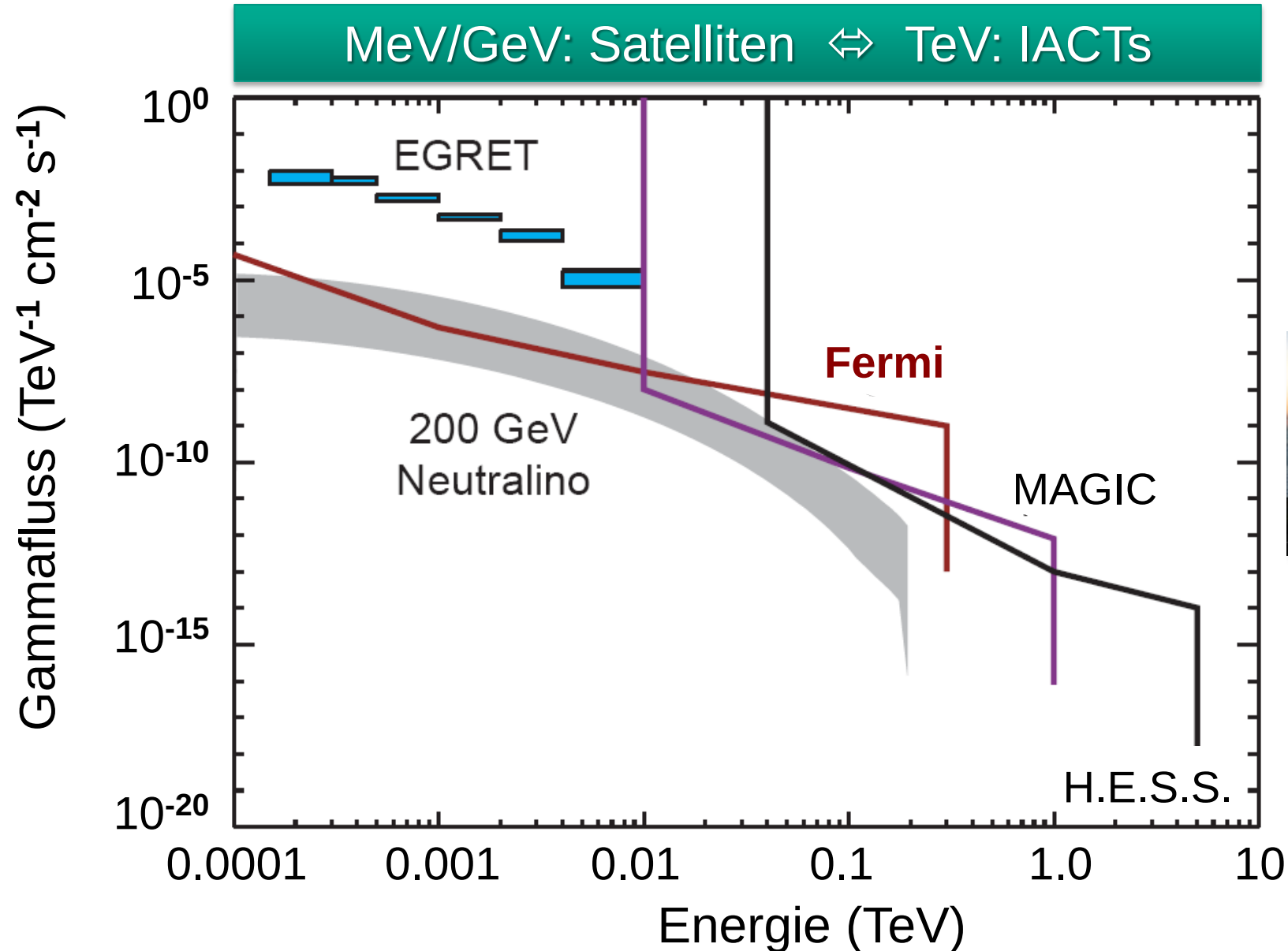
- Datennahme von 8/2008 – 4/2012: Himmelskarte 2.6 – 541 GeV
 - keine signifikante γ -Linie in den Gesamtdaten ☹



- schwache Hinweise auf Line bei $E_\gamma = 133 \text{ GeV}$ (besonders bei R3) ☺
- Signal tritt auch auf (aber schwächer) in Richtung des Erdhorizonts! ☹
- bisherige Signifikanz $1.5 - 3.2 \sigma$ (je nach Analyseintervall & Modell) ☺

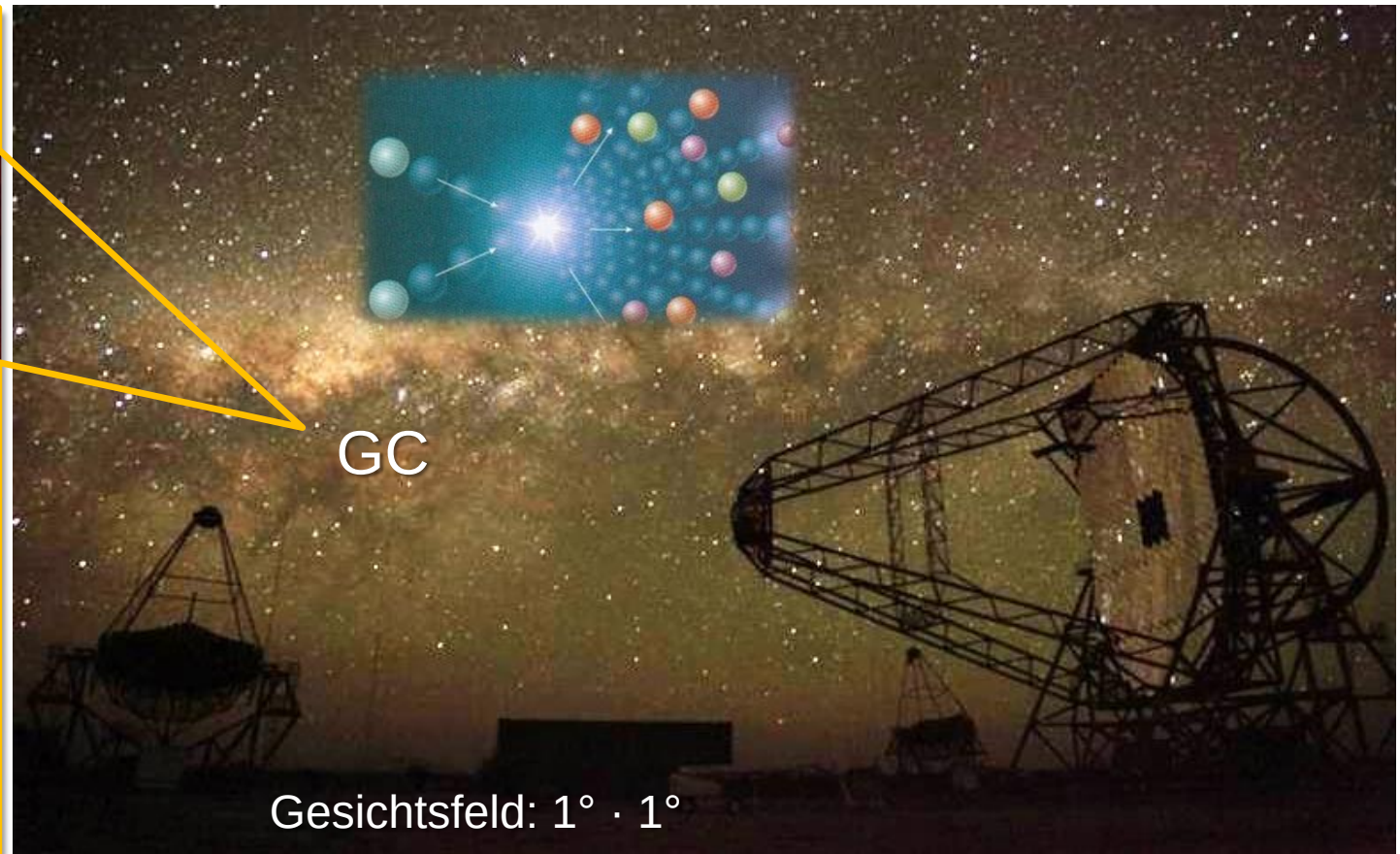
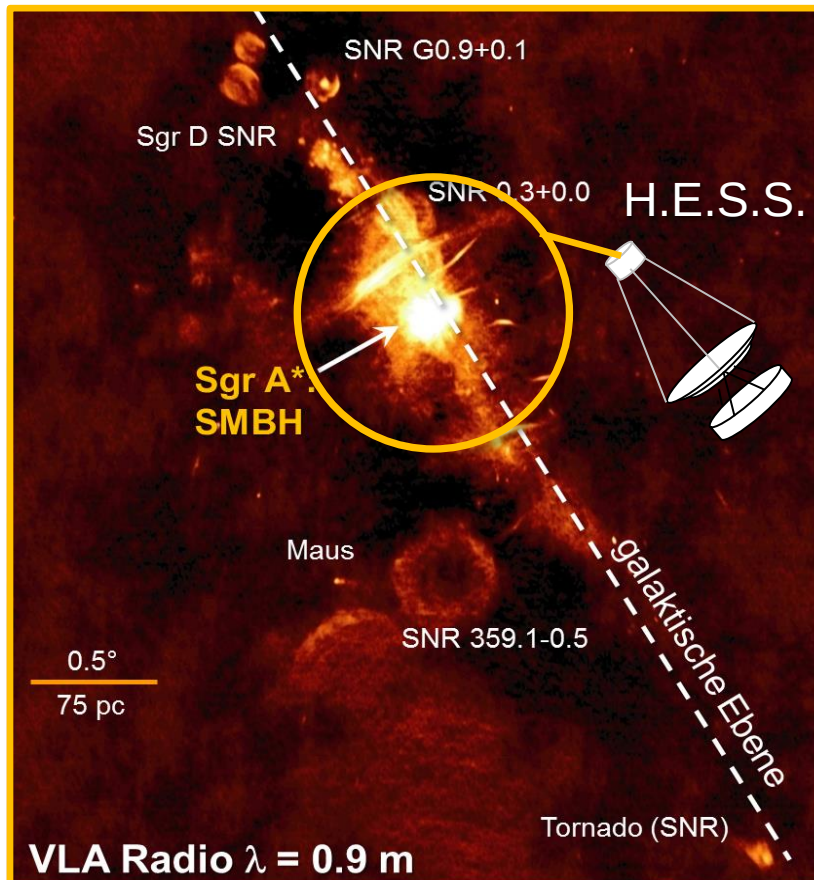
DMA: Cherenkov-Teleskope & Fermi

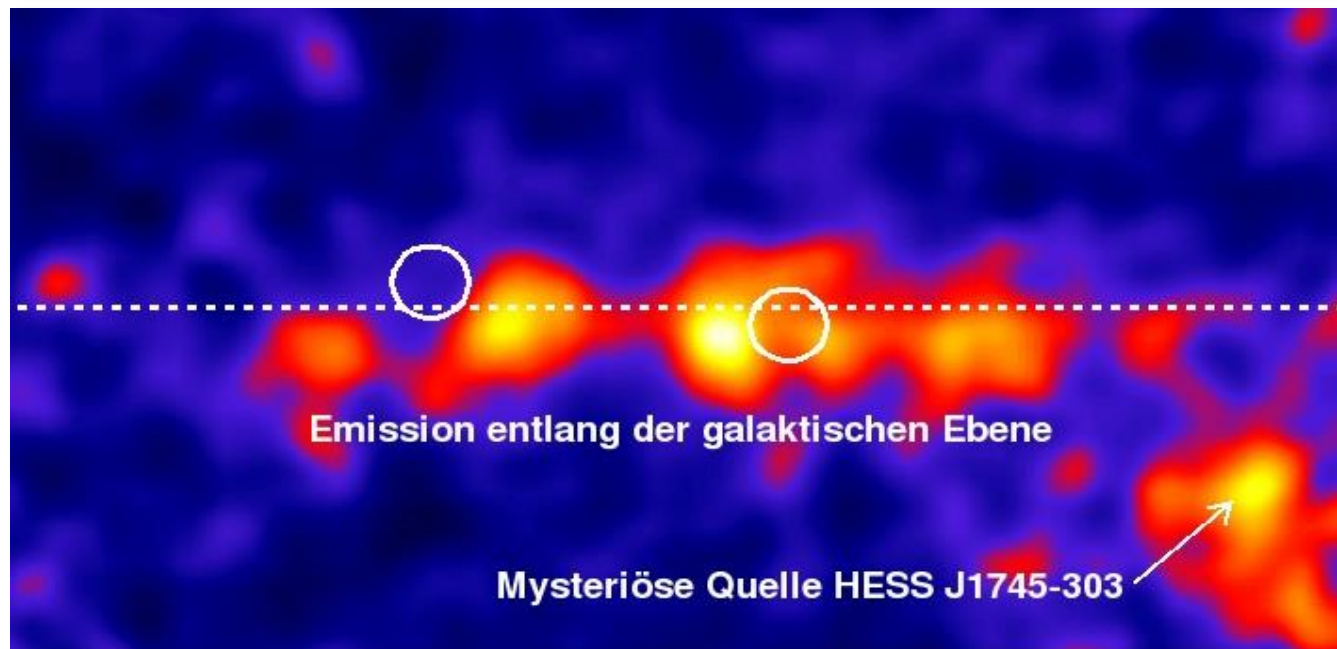
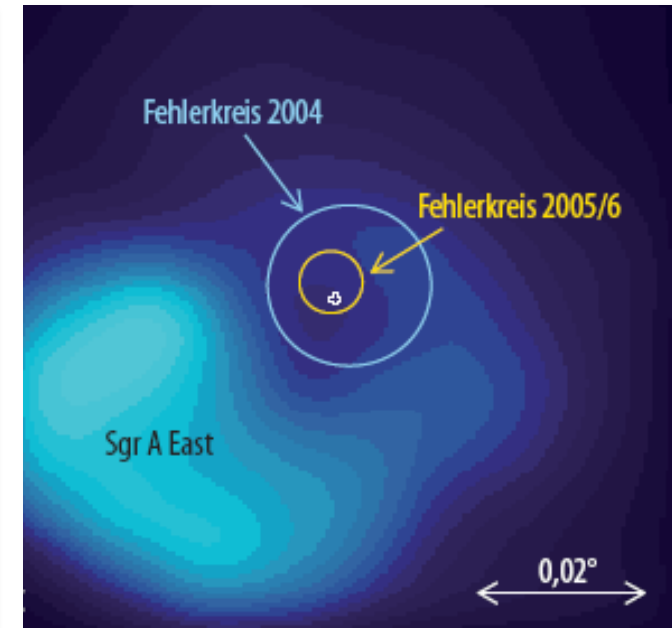
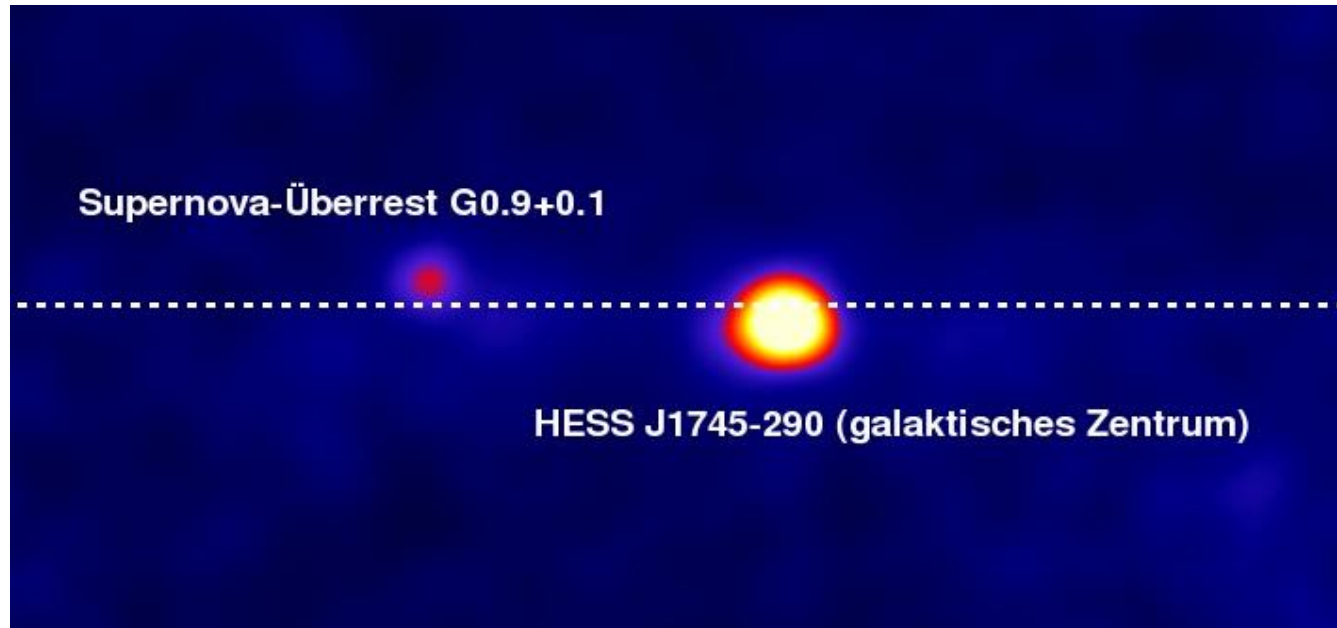
- IACTs: ideale Sensitivität für hohe γ -Energien: 10 GeV - **multi-TeV-Bereich**



■ Suche nach TeV-Gammas aus DMA im galaktischen Zentrum (GC)

- galaktisches Zentrum: zahlreiche Untersuchungen im Radiobereich, IR-Bereich, supermassives Schwarzes Loch (SMBH) mit $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$
- zahlreiche Quellen kosmischer Strahlung (SNR, Pulsare, ...)





- HESS beobachtet ein klares **TeV γ -Signal** vom Ort des galakt. Zentrums Sgr A*
- nach Abzug dieser Quelle werden Regionen mit TeV- γ 's sichtbar: die γ 's entstehen durch Wechselwirkungen von Protonen & Molekülwolken

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

- in innersten Bereichen des galakt. Zentrums erhöhte Rate an hoch-energetischer kosm. Strahlung durch:

↪ Supernova-Explosionen
↪ erhöhte Aktivität des zentralen SMBHs

- Phänomenologische Beschreibung des Energiespektrums (kein Signal)

