

New Constraints on Hidden Photons using Very High Energy γ -rays from the Crab Nebula

Hannes-Sebastian Zechlin¹ Dieter Horns¹ Javier Redondo²

¹Institut für Experimental Physik, Universität Hamburg, Germany (hzechlin@mail.desy.de)

²Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY), Hamburg, Germany

Astroteilchenschule Obertrubach-Bärnfels 08.10. - 16.10.2008



Gliederung

- 1 Hidden Photons
- 2 Experimente
- 3 Krebsnebel (Crab Nebula)
- 4 Crab im VHE-Licht
- 5 Methode
- 6 Ergebnisse
- 7 Ausblick
- 8 Zusammenfassung

Was sind Hidden Photons?

- Erweiterungen des Standard-Modells der Teilchenphysik (STM) sagen zusätzliche $U(1)$ Eichsymmetrien vorher (String Theory, GUTs)
- STM-Teilchen ungeladen unter neuer $U(1) \Rightarrow$ Hidden Sector $U(1)_h$
- Hidden Sector Teilchen können leicht sein (\Rightarrow WISPs)
- Eichboson der neuen $U(1)_h$: Hidden Photon oder Paraphoton
- einige Experimente, die nach derartigen Teilchen suchen
- bis heute nicht detektiert!

- WISP = **W**eakly **I**nteracting **S**ub-eV **P**article

[Okun, 1982], [Holdom, 1986], [Ahlers et al., 2007], [Jaeckel et al., 2008]

Lagrange-Dichte

Hidden Photon wechselwirkt mit normalen Photon durch “gauge kinetic mixing”:

$$\mathcal{L} = \underbrace{-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{U(1)_{\text{visible}}} - \underbrace{\frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu}}_{U(1)_h} - \underbrace{\frac{\sin\chi}{2}F^{\mu\nu}B_{\mu\nu}}_{\text{kinetic mixing}} + \underbrace{\frac{\cos^2\chi}{2}\mu^2 B^\mu B_\mu}_{\mu, \text{mass}}$$

- A_μ Photonfeld, B_μ Feld des Hidden Photons
- $F_{\mu\nu}$ rel. Feldstärke-Tensor, $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$
- Annahme: Mischungswinkel $\chi \ll 1$ ($\Rightarrow \sin\chi \approx \chi, \cos\chi \approx 1$)
- Massenterm durch mgl. Symmetriebrechung der neuen $U(1)_h$ durch Higgs-Mechanismus
- Kinetic-Mixing-Term kann diagonalisiert werden:

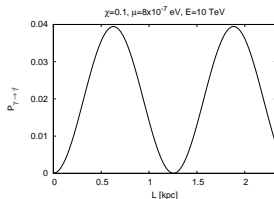
$$B_\mu \rightarrow S_\mu - \chi A_\mu \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{L}_{\text{mass}} = \frac{1}{2}\mu^2 (S^\mu S_\mu - \underbrace{2\chi S^\mu A_\mu}_{\text{mixing}} + \chi^2 A^\mu A_\mu)$$

γ - γ_s -Oszillationen

- Lösung der Euler-Lagrange-Gleichungen:
 \Rightarrow 2 Propagations-Eigenzustände: $V_1(L, t)$ and $V_2(L, t)$ (orthogonal)
- Allgemeiner Zustand: Superposition der Eigenzustände
 \Rightarrow Oszillationswahrscheinlichkeit ($\hbar = c = 1$):

$$P_{\gamma \rightarrow \gamma_s}(L) = \sin^2(2\chi) \sin^2\left(\frac{\mu^2}{4E} L\right)$$

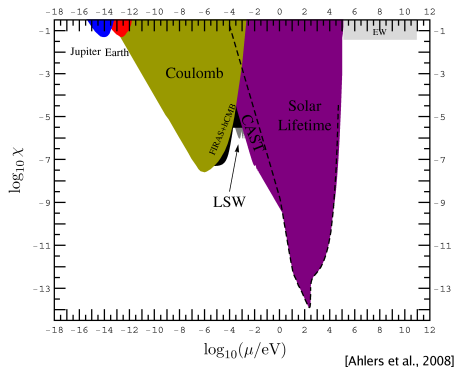
$$L_{osc} \simeq 8 \left(\frac{E}{\text{TeV}}\right) \left(\frac{\mu}{10^{-7} \text{eV}}\right)^{-2} \text{kpc}$$



- **Phenomenologie komplett analog zu der von Neutrino-Oszillationen**

bestehende Constraints

- χ und μ unbekannt
- Hidden Photon wechselwirkt **nicht** mit STM-Materie
 \Rightarrow Nachweis nur über Oszillationen möglich!
- viele Constraints bereits vorhanden, neue Experimente in Planung
- z.B. Bounds über Messung von Abweichungen vom Coulomb-Gesetz möglich



\rightarrow **keine Constraints im Hochenergie-Bereich $\mathcal{O}(\text{TeV})$ und bei Entfernungen $\mathcal{O}(\text{kpc})$**

Ziel: Suche nach Oszillations-Signaturen im VHE-Spektrum des Krebsnebels

Krebsnebel (Messier 1):

- Supernovaüberrest (AD 1054)
- Pulsar in der Nähe des geometrischen Zentrums des Nebels (PSR B0531+21)
- $D = (1,93 \pm 0,11)\text{kpc}$ [Trimble, '73]
- $B = (161,6 \pm 0,8_{\text{stat}} \pm 18_{\text{sys}})\mu\text{G}$ (modellabhängig)
- Identifiziert als VHE-Quelle durch bodengestützte Cherenkov-Teleskope (z.B. Whipple, HEGRA, MAGIC, H.E.S.S.)
- Standardkerze in VHE-Bereich



Abbildung: optisch (rot, Hubble) und Röntgen (blau, Chandra)
[Hester et al., NASA]

[Aharonian et al., 2004]

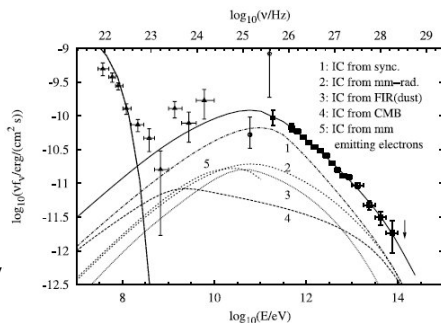
VHE - Spektrum I

- Hochenergie-Spektrum (VHE, $E > 100$ GeV) durch Inversen Comptoneffekt von beschleunigten Elektronen mit verschiedenen Seed-Photonfeldern (im wesentlichen Synchrotron-Feld)
- Elektronen vom Pulsar, stochastische (Fermi-) Beschleunigung in Shockfront (\Rightarrow Power-Law-Spektrum)
- differentielles Spektrum:

$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^\Gamma$$

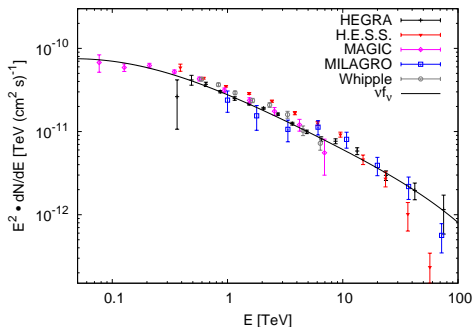
$$\Phi_0 \approx 2,83 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}$$

$$\Gamma \approx -2,62$$



VHE - Spektrum II

Krebsnebel im VHE Bereich:



$$\log(\nu f_\nu) = \sum_{i=0}^5 p_i \log^i(E), \quad p_i = \text{const}$$

- Modell passt gut an Daten
- Keine Übereinstimmung zwischen HEGRA und H.E.S.S. bei Energien $E > 10\text{TeV}$
- Abweichungen zwischen H.E.S.S. Daten und Modell bei $E > 10\text{TeV}$

[Aharonian et al., 2004]

[Khélifi et al., H.E.S.S. ICRC proceedings 2007]

[Albert et al., 2008], [Allen et al., 2007, pinned]

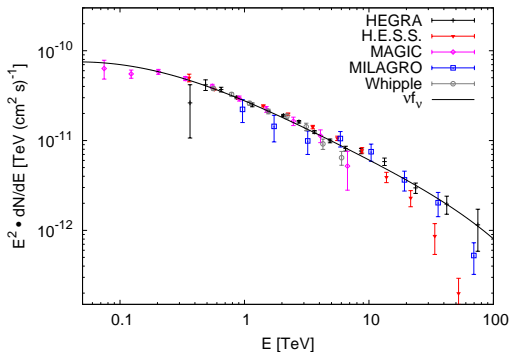
[Grube et al., 2007]

Rescaling

Abweichungen zwischen einzelnen Experimenten

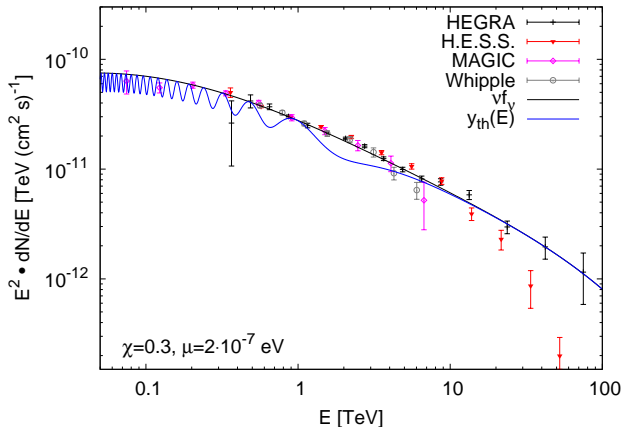
⇒ um Verschmierungen eventueller Signaturen zu vermeiden, Reskalierung der Daten ($E' = s \cdot E$) innerhalb der statistischen Fehler

Teleskop	Scalefaktor s
HEGRA	1.000
H.E.S.S.	0.921
MAGIC	0.968
MILAGRO	0.965
Whipple	0.944



Spektrale Signatur I

- keine intrinsischen Absorptionslinien im VHE-Bereich
 \Rightarrow Signatur bei Photon-Oszillationen (blau):



Spektrale Signatur II

- Messung der Spektren in Energie-Bins
 \Rightarrow Signatur: Oszillationswahrscheinlichkeit muss über Energie-Bin gemittelt werden:

$$\overline{P}_{\gamma \rightarrow \gamma_s}(\overline{E}, \Delta E) = \frac{1}{\Delta E} \int_{\Delta E} dE P_{\gamma \rightarrow \gamma_s}(E, d_c)$$

- $d_c \approx 2 \text{ kpc}$
- ΔE Bin-Breite für Bin \overline{E}

- Damit ergibt sich die erwartete Signatur:

$$y(\overline{E}, \Delta E) = (\nu f_\nu)|_{E=\overline{E}} \cdot (1 - \overline{P}_{\gamma \rightarrow \gamma_s}(\overline{E}, \Delta E))$$

für Parameter χ, μ .

Fitting

- Fit der erwarteten Signatur an Daten
- Nutze Methode der kleinsten Quadrate (χ^2_{lsq})

$$\chi^2_{\text{lsq}} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - y(E_i, \Delta E_i, \chi, \mu)}{\sigma_i} \right)^2$$

- Summe über alle Datenpunkte (E_i, y_i, σ_i)
- y_i Energie-Fluss in Bin E_i
- σ_i statistischer Fehler

- 68.3% confidence level

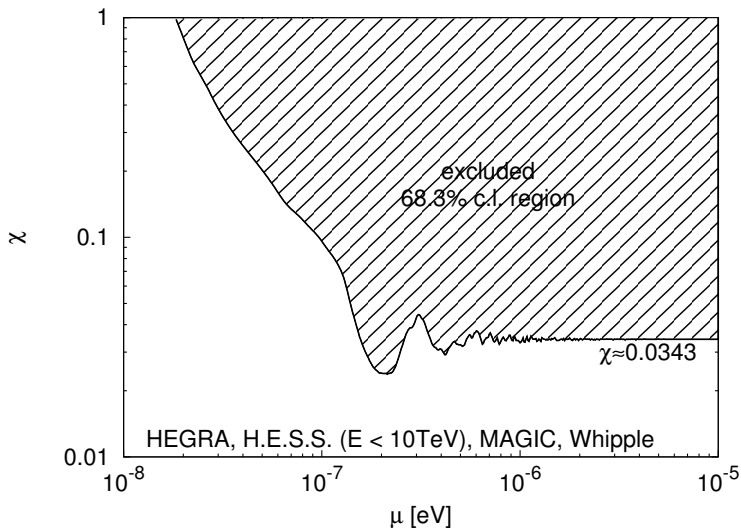
$$\left. \frac{\partial \chi^2_{\text{lsq}}}{\partial \chi} \right|_{\chi=\chi_{\text{min}}} = 0, \quad \Delta \chi^2_{\text{lsq}} = \chi^2_{\text{lsq}}(\chi) - \chi^2_{\text{lsq}}(\chi_{\text{min}}) = 1$$

- kann für alle Massen μ numerisch berechnet werden

Results I

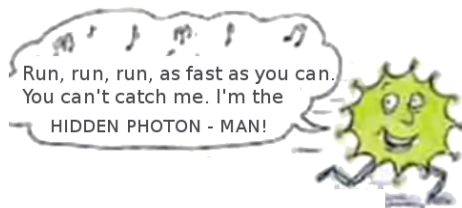
- Interpretation der Ergebnisse in “Disappearance approach”
- Aus Fit: Wert χ_{fit} für χ für jede Masse μ (@ 68.3% c.l.)
⇒ Alle $\chi \geq \chi_{\text{fit}}$ können ausgeschlossen werden
- Constraints möglich für alle Massen $\mu \leq 10^{-5}$ eV
(sonst treten Dekohärenz-Effekte auf [→ wie bei Neutrino Oszillationen])
- ⇒ Beste Limits unter Ausnutzung direkter Oszillationseffekte
- HEGRA, H.E.S.S., MAGIC, und Whipple Daten @ 68.3% confidence level
- Abweichung von H.E.S.S. Daten bei Energien $E > 10$ TeV
⇒ Daten von H.E.S.S. bei Energien $E > 10$ TeV ausgeschlossen

Results II



Ausblick

- Betrachtung anderer Wellenlängen (Energiebereiche) (z.B. aus Radio-Band folgen Massen $\mu \approx 10^{-15}$ eV)
- Auswertung anderer Quellen
- Erarbeitung anderer astronomischer Limits (z.B. appearance Effekte von Photonen von Blazaren)
- Arbeit als Poster auf der Gamma 08 (Heidelberg) vorgestellt → Proceedings (Zechlin et al., 2008)



Zusammenfassung

- Erweiterungen des Standardmodells sagen $U(1)$ Hidden Sector vorher
⇒ zusätzliches $U(1)$ -Eichboson: Hidden Photon
- Hidden Photon kann Masse haben
- WW mit normalem Photon via Kinetic Mixing
⇒ Photon-Hidden Photon Oszillationen
- Nachweismöglichkeit über Oszillationsverhalten
- neue Constraints durch Betrachtung von VHE γ -Rays
(neuer Energiebereich (TeV), neue Oszillationslänge $d_c \approx 2\text{kpc}$)
- breiter Massenbereich ausschliessbar

work in progress...