

Einschränkungen der Dichte des extragalaktischen Hintergrundlichtes mit Hilfe der TeV- γ -Strahlung von Aktiven Galaktischen Kernen

Daniel Mazin für die HEGRA-Kollaboration
 Institut für Experimentalphysik, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg



<http://www-hegra.desy.de/hegra/>

TeV- γ -Strahlung von extragalaktischen Quellen wird durch den Prozess der Paarerzeugung $\gamma_{TeV} \gamma_{EHL} \rightarrow e^+ e^-$ am extragalaktischen Hintergrundlicht (EHL) absorbiert. Die Dichte des EHL ist mit der Galaxien- und Sternentstehungsperiode korreliert und daher von großem kosmologischem Interesse. Aus dem Vergleich der mit den HEGRA-Cherenkov-Teleskopen gemessenen Energiespektren der vier extragalaktischen TeV- γ -Quellen — Markarian 501 ($z = 0.034$), Markarian 421 ($z = 0.031$), 1ES 1959+650 ($z = 0.047$) und H 1426+428 ($z = 0.129$) — können mit konservativen Annahmen für die intrinsischen Energiespektren Einschränkungen auf die Energiedichte des EHL bestimmt werden. Alle vier Quellen gehören zur BL Lac-Klasse der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN).



BL Lac-Objekte in der TeV- γ -Astronomie

Mit den abbildenden atmosphärischen Cherenkov-Teleskopen des HEGRA-Experiments konnten Energiespektren von vier BL Lac-Objekten gemessen werden [1] (Abb. 1). BL Lac-Objekte sind solche AGN, deren Jet-Achse zum Beobachter ausgerichtet ist. Die Spektren der beiden Markarian-Objekte weisen hohe Ereignisstatistik über einen großen Energiebereich (mehr als eine Dekade) auf. Die Messung des Energiespektrums von H 1426+428 ist besonders durch dessen große Entfernung ($z = 0.129$) ausgezeichnet, wodurch sein gemessenes Spektrum die stärkste Modifikation durch das extragalaktische Hintergrundlicht erfährt. Der Emissionsmechanismus kann für alle vier Objekte im Wesentlichen durch das SSC-Modell beschrieben werden [2].

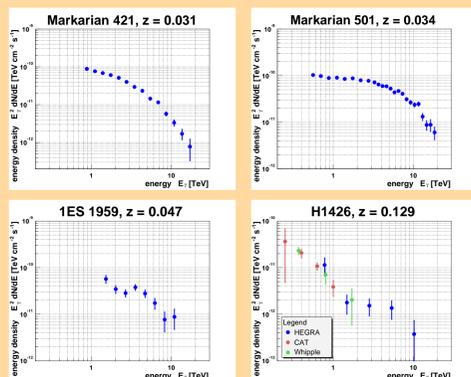


Abb. 1: Mit HEGRA gemessene Energiespektren von vier BL Lac-Objekten. Für H 1426+428 sind zusätzlich CAT- und Whipple-Messpunkte eingetragen.

Extragalaktisches Hintergrundlicht (EHL)

Das EHL stellt das gesamte Licht dar, das über die ganze Geschichte des Universums von den Galaxien emittiert wurde. Seit der Zündung der ersten Sterne ($z \approx 25$) erfüllt die frei gewordene und je nach Emissionszeitpunkt rotverschobene Strahlung das Universum. Ein Teil dieser Strahlung wird von intergalaktischem Staub absorbiert und bei größeren Wellenlängen reemittiert. Die spektrale Verteilung des EHL ist somit ein wichtiger Test der Szenarien für Galaxienentstehung und -entwicklung, sowie zum Staubgehalt und seiner Evolution. Direkte Messungen des EHL sind jedoch wegen der starken Vordergrundemissionen (Nachbarsterne, Zodiaklicht, Erdatmosphäre etc.) insbesondere im mittelfinfraroten Wellenlängenbereich extrem schwierig [3].

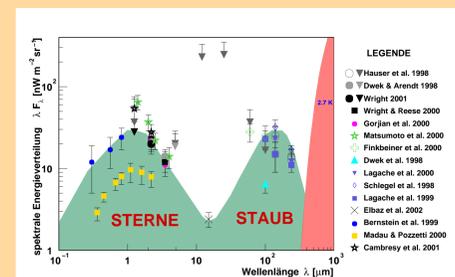
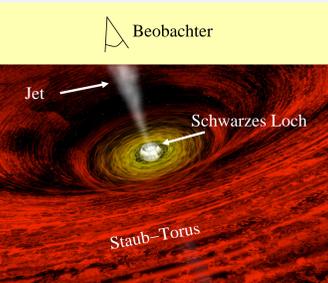


Abb. 2: Eine repräsentative Auswahl der direkten Messungen des EHL. Während die Messungen in nah- und ferninfraroten Wellenlängenbereichen gut übereinstimmen, liegen die bisherigen unteren und oberen Grenzen im mittelfinfraroten Bereich etwa zwei Größenordnungen auseinander.



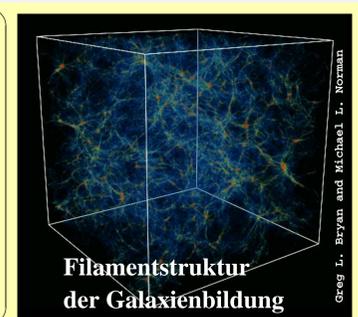
BL Lac-Objekt: künstlerische Darstellung

Absorption von TeV- γ -Strahlung am EHL

$$\tau(E, z_s) = \frac{c}{H_0} \int_0^{z_s} dz \frac{(1+z)^2}{\sqrt{(1+z)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda}} \quad (1)$$

$$\int_{-1}^1 d\mu \frac{1-\mu}{2} \int_{\epsilon_1}^{\infty} d\epsilon n(\epsilon, z) \sigma_{\gamma\gamma}(\epsilon, E, \mu, z)$$

TeV-Photonen können durch den Prozess der Paarerzeugung $\gamma_{TeV} \gamma_{EHL} \rightarrow e^+ e^-$ mit den Photonen des EHL absorbiert werden. Die optische Tiefe τ der extragalaktischen TeV-Photonen der Energie E kann numerisch berechnet werden. Dabei sind: $\mu = \cos \theta$, z_s Rotverschiebung der TeV- γ -Quelle, ϵ Energie der EHL-Photonen, $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ die Hubble-Konstante, $\Omega_m = 0.3$ und $\Omega_\Lambda = 0.7$ Dichteparameter der Materie bzw. der kosmologischen Konstante, $n(\epsilon, z)$ Photonendichte des EHL und $\sigma_{\gamma\gamma}(\epsilon, E, \mu, z)$ der Wirkungsquerschnitt der Paarerzeugung.



Filamentstruktur der Galaxienbildung

Greg J. Bryan and Michael L. Norman

Methode der Einschränkung des EHL

1. Schritt: Messung der TeV- γ -Spektren der extragalaktischen Objekte
2. Schritt: Wahl eines EHL-Verlaufes (Abb. 3a). Direkte Messungen werden berücksichtigt. Zusätzlich werden theoretische Vorhersagen über die spektrale Form des EHL-Verlaufes angenommen (z.B. ein Minimum im mittelfinfraroten Bereich [4]).
3. Schritt: Berechnung der optischen Tiefe für die TeV Photonen für jeden gewählten EHL-Verlauf (Abb. 3b).
4. Schritt: Rekonstruktion des Quellspektrums der TeV- γ -Quelle (Abb. 3c).
5. Schritt: Vergleich des Quellspektrums mit den theoretischen Vorhersagen über die Emission von TeV- γ -Strahlung in BL Lac-Objekten (SSC-Modell)

⇒ **Einschränkungen der Energiedichte des EHL**

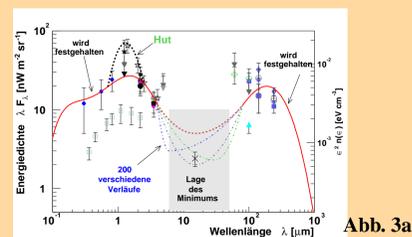


Abb. 3a

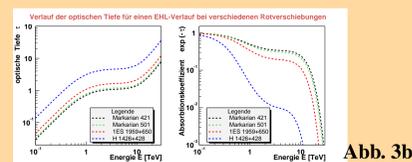


Abb. 3b

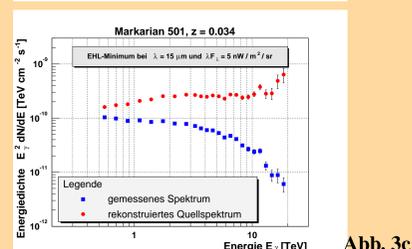


Abb. 3c

Ergebnisse

1. Eine Berücksichtigung der Messung bei $60 \mu\text{m}$ [5] führt zu einem Abknicken in den Quellspektren von Markarian 421 und Markarian 501 zu höheren Flüssen mit steigender Energie, was mit den Modellen in Konflikt steht.
2. Im mittelfinfraroten Wellenlängenbereich des EHL liefert das BL Lac-Objekt Markarian 501 die stärksten oberen Grenzen. Eine Kombination der unteren Grenze bei $15 \mu\text{m}$ aus den Galaxienzählungen (ISOCAM [6]) erfordert das Minimum der EHL-Dichte bei $\lambda > 15 \mu\text{m}$.
3. Das BL Lac-Objekt H 1426+428 liefert starke Einschränkungen auf die EHL-Dichte im nahinfraroten Bereich. Ein „Hut“ (erhöhte Dichte im Bereich 1 bis $2 \mu\text{m}$) kann ausgeschlossen werden.

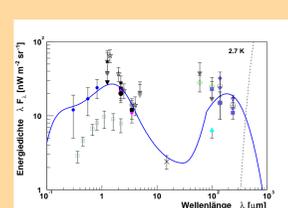


Abb. 4: Ein möglicher Verlauf der EHL-Dichte. Hierbei sind berücksichtigt:

- Direkte Messung bei $60 \mu\text{m}$ ist zu hoch
- das Minimum der EHL-Dichte liegt bei $\lambda_{\text{min}} > 15 \mu\text{m}$
- keine erhöhte Dichte im Bereich 1 bis $2 \mu\text{m}$

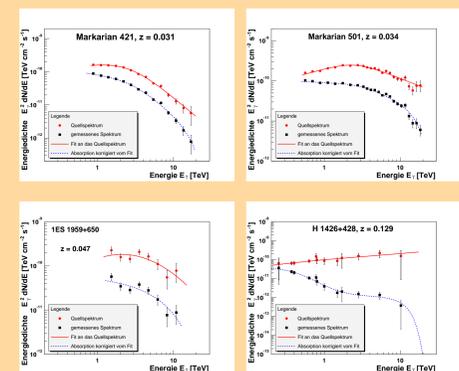


Abb. 5: Die gemessenen und die rekonstruierten Energiespektren der vier BL Lac-Objekte. Der der Absorption zugrundeliegende Verlauf der EHL-Dichte ist in Abb. 4 gezeigt.

Stand der extragalaktischen TeV- γ -Astronomie:

- Messung im Energiebereich von **500 GeV bis 20 TeV (HEGRA)**
- Energiespektren von 4 BL Lac-Objekten gemessen
- Emission der BL Lac-Objekte im TeV-Energiebereich kann im Wesentlichen durch das SSC-Modell beschrieben werden
- ⇒ ermöglicht indirekte Messung der EHL-Dichte:
- Position des Minimums im mittelfinfraroten Energiebereich
- Höhe der Energiedichte im Energiebereich von 1 bis $2 \mu\text{m}$

Status und Perspektiven



Neue Generation der abbildenden Cherenkov-Teleskope (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, CANGAROO III):

- Messung im Energiebereich von **30 GeV bis 20 TeV**
- Nachweis von vielen neuen extragalaktischen TeV- γ -Quellen
- Messung von Energiespektren mit größerer Statistik
- ⇒ können u.a. kosmologische Modelle getestet werden:
- EHL-Verlauf im mittelfinfraroten Bereich kann indirekt bestimmt werden
- Evolutionseffekte der EHL-Dichte können untersucht werden
- Modelle der Galaxienentstehung und -entwicklung können getestet werden