

Accélération de rayons cosmiques par vents stellaires et probable détection de rayons gamma d'un amas ouvert avec HEGRA

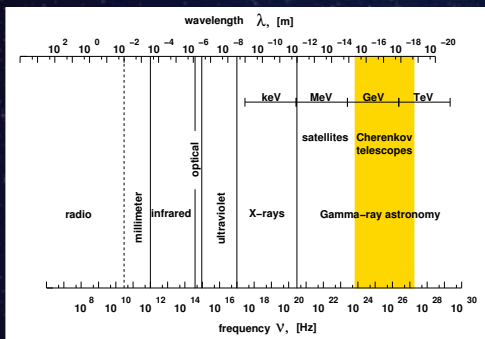
Martin Tluczykont
Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

- L'astronomie gamma et les accélérateurs des rayons cosmiques
- Les amas ouverts jeunes
- L'expérience HEGRA et observations d'amas ouverts
- Modélisation de spectres gamma par décroissance de π_0
- Détection de l'amas ouvert Cyg OB2 ?
- Conclusions et perspectives

I. L'astrophysique

Astronomie Gamma

Le spectre électromagnétique

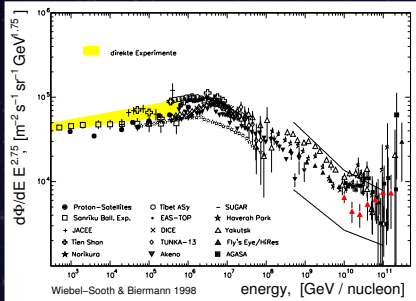


Motivations:

- Astrophysique:
 - mécanismes de production
 $e^\pm\gamma \longrightarrow e^\pm\gamma, \pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma$
 - étude de l'environnement des objets observés
- Mesure indirecte de la lumière de fond extragalactique $\gamma_{\text{TeV}}\gamma_{\text{EBL}} \longrightarrow e^+e^-$
- Recherche de la matière noire
- **Origine des rayons cosmiques**

Le rayonnement cosmique et la recherche des accélérateurs

Découverte par V. Hess 1912



Questions ouvertes:

- Composition ($E > 10^{15}$ eV)
- Origine du «genou»
- Origine des rayons Cosmiques

Origine? —> Information directionale

- particules chargées: perdue (champs magnétiques)
- particules/rayons neutres: préservée —> Astronomie Gamma

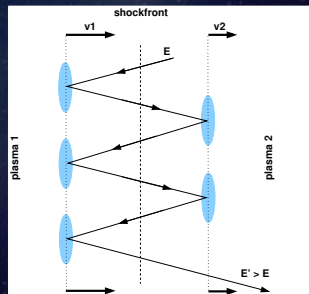
Objets candidats pour l'accélération:

- Restes de supernova
- Microquasars
- M 87 (RCUHE)
- Etoiles massives / Amas ouverts

Mécanisme d'accélération d'étoiles massives : Vents stellaires

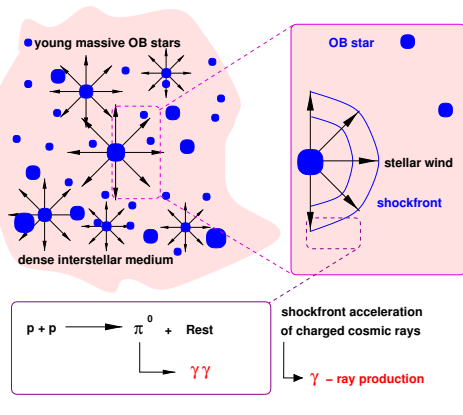
- Etoiles froides (6000 K) ↔ Soleil
 - échauffement de la couronne par convection (10^6 K)
 - expansion par pression coronale
 - Vitesse asymptotique $\sim 100 - 700$ km/s
- Etoiles chaudes (10000 – 100000 K) ↔ Etoiles massives
 - Zone de convection faible
 - pression radiative ($\sim T^4$) sur poussière & gaz
 - Vitesse asymptotique $\sim 1000 - 5000$ km/s

→ vent stellaire + milieu interstellaire = ondes de choc
→ accélération hadronique par vents stellaires
→ collisions hadroniques → π^0 → $\gamma\gamma$

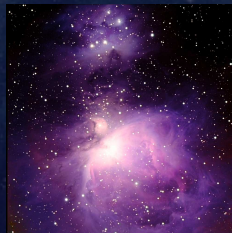


Amas ouverts jeunes

Acceleration of charged cosmic rays and the production of gamma-rays in young open star clusters



- Étoiles jeunes & massives ($\approx 60 M_{\odot}$)
- Vents stellaires (1000 – 5000 km/s)
- Milieu interstellaire dense
- 50, 100, 100+ étoiles
- Phase d'accélération ≈ 100 Ma



Nébuleuse d'Orion

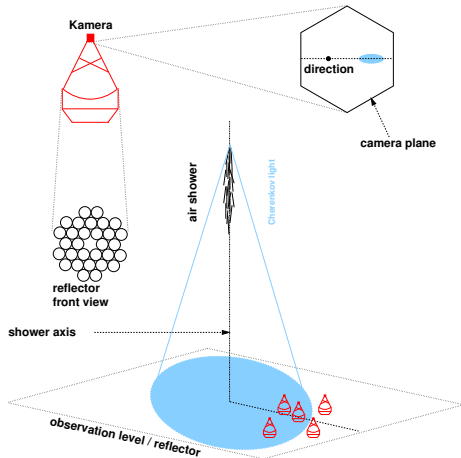
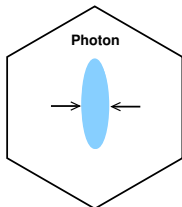
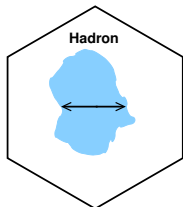
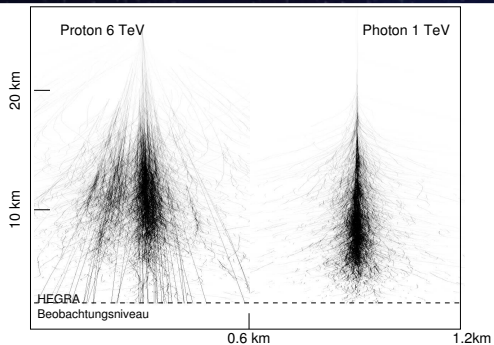
Nébuleuse du Coeur



\Rightarrow Observation de $\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma \Leftrightarrow$ Origine des rayons cosmiques
Montmerle 1979, Cassé & Paul 1980, Völk & Forman 1982

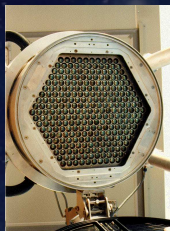
II. Méthode d'observation

Observation avec un télescope Cherenkov

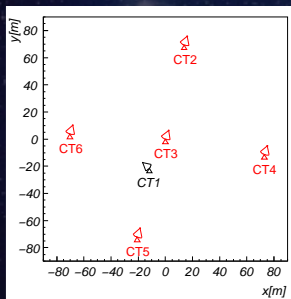


L'expérience HEGRA

High
Energy
Gamma
Ray
Astronomy

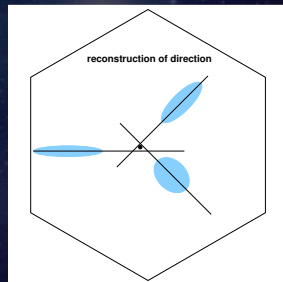


- 6 Télescopes
- La Palma, Canaries
- 28.75° N, 17.90° O
- 2200 m a.s.l.

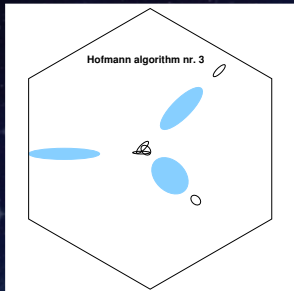


Le système stéréoscopique

- 5 télescopes en coïncidence
- Trigger: 2 / 5
- $E_{\text{thr}} (\theta = 0)$: 500 GeV
- Rés. angulaire: 0.1 deg
- Rés. énergétique: 10-20 %



Stéréoscopie

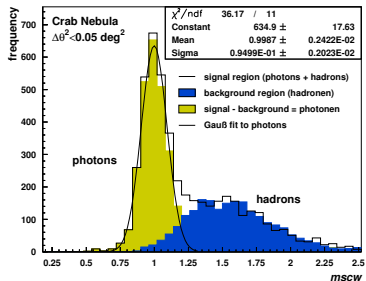
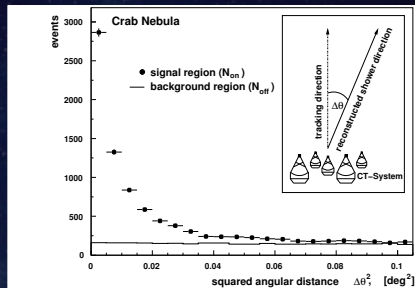


≥ 2 images \rightarrow superposition:

- ... dans la caméra \rightarrow direction ($\Delta\theta^2$)
- ... au niveau d'observation \rightarrow position d'impact (*core*)

Rejet des hadrons:

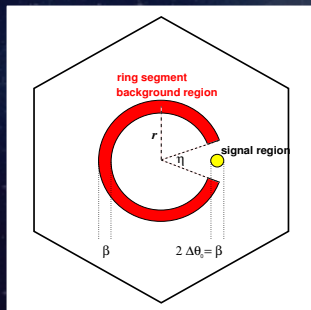
core + amplitude + angle zénital \rightarrow *mean scaled width (mscw)*



Méthode d'estimation du bruit de fond hadronique

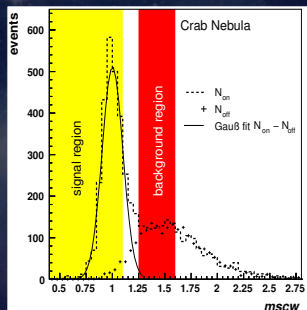
Méthode directionale

- N_{on} : signal region
- N_{off} : Arc de cercle concentrique
- $\alpha = \Omega_{\text{on}}/\Omega_{\text{off}}$



Méthode non directionale (G. Rowell)

- N_{on} : $mscw < 1.1$
- N_{off} : $1.3 < mscw < 1.5$
- $\alpha = \sum N_{\text{on}}/\sum N_{\text{off}}$



Analyse

- Critères de qualité (météo, ...)
- Reconstruction stéréo standard
- Coupures: $\Delta\theta^2$, *m_{scw}*, *core*
- Dépendances des coupures:
 - Multiplicité
 - Angle zenital
 - Période d'observation

⇒ Coupures dynamiques

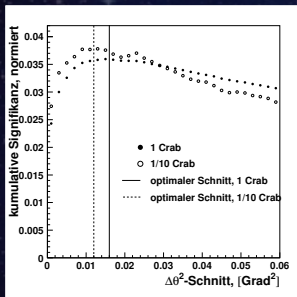
⇒ $\alpha \longrightarrow \alpha_i$

| | | |
|------------------------|---|-----------|
| rate | > | 7Hz |
| rate deviation | < | 20% |
| technical problems | – | |
| # of defective pixels | < | 15 |
| image <i>size</i> | > | 40 ph.e. |
| <i>distance</i> | < | 0.78 |
| telescope multiplicity | ≥ | 3 |
| <i>core</i> | < | f(subset) |
| <i>m_{scw}</i> | < | 1.1 |
| $\Delta\theta^2$ | < | f(subset) |

$$S = \sqrt{2} \times \left[\sum_i N_{\text{on}}^{(i)} \ln \left(\frac{\sum_i N_{\text{on}}^{(i)}}{\sum_i \frac{\alpha_i}{1+\alpha_i} (N_{\text{on}}^{(i)} + N_{\text{off}}^{(i)})} \right) + \sum_i N_{\text{off}}^{(i)} \ln \left(\frac{\sum_i N_{\text{off}}^{(i)}}{\sum_i \frac{1}{1+\alpha_i} (N_{\text{on}}^{(i)} + N_{\text{off}}^{(i)})} \right) \right]^{1/2}$$

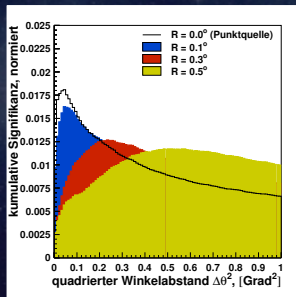
Analyse: Optimisation des coupures

- sources non étendues (Nébuleuse du Crabe)

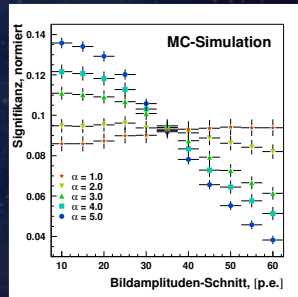


Coupures dynamiques

- sources étendues (Monte Carlo)



- indice spectral > 3 (Monte Carlo)



Variation : *size*

Observations «directes» d'amas ouverts avec HEGRA

Temps d'observation total: 56.5 h

| Objet | campagnes d'observation | | | Σ | Σ' |
|-----------------|-------------------------|-----------|---------|----------|-----------|
| Berkeley 87 | 8/1999 | 9/2000 | 10/2001 | 12.4 h | 10.3 h |
| | 8 h | 2.7 h | 1.7 h | | |
| IC 1805 | 10-12/2000 | | | 16 h | 15.3 h |
| | 16 h | | | | |
| CG135+1_QSO0241 | 10-11/1999 | 9-10/2000 | | 34.3 h | 29.2 h |
| | 23 h | 11.3 h | | | |
| M 42 | 11/2001 | | | 2 h | 0.7 h |
| | 2 h | | | | |
| V* V785 Ori | 10/2002 | | | 1.3 h | 1.0 h |
| | 1.3 h | | | | |

Observations directes: Résultats

Résultats négatifs → limites supérieures

| Objekt | N_{on} [#] | αN_{off} [#] | t [h] | S [σ] | $S_{\text{Kol/Prahl}}$ [σ] | E_{thr} [TeV] | $F_{\text{OG}}^{99\%}$ [Crab] | $\Phi_{\text{OG}}^{99\%}$ [$10^{-12} \gamma \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------|------------|---------------------|--|---------------------------|----------------------------------|---|
| Berkeley 87 | | | | | | | | |
| | 22 | 28 | 11.3 | -1.1 | 0.3/-0.3 | 0.90 | 0.05 | 0.98 |
| IC 1805 | | | | | | | | |
| (1) | 27 | 39 | 15.3 | -2.0 | -0.3/0.4 | 1.18 | 0.06 | 0.79 |
| (2) | 41 | 37 | 34.3 | 0.6 | — | 1.20 | 0.08 | 1.08 |
| (1)+(2) | 68 | 76 | 49.6 | -0.8 | — | 1.19 | 0.05 | 0.64 |
| M 42 | | | | | | | | |
| NGC 1976 | 74 | 73 | 0.7 | 0.0 | — | 1.07 | 2.95 | 45.0 |
| NGC 1977 | 12 | 3.1 | 0.7 | 2.3 | — | 1.07 | 1.66 | 25.3 |
| NGC 1980 | 14 | 11.6 | 0.7 | 0.6 | — | 1.07 | 1.37 | 20.9 |
| NGC 1981 | 13 | 7.5 | 0.7 | 1.8 | — | 1.07 | 1.50 | 22.9 |
| P_{CM} | 107 | 62.7 | 0.7 | 3.4 | — | 1.07 | 3.00* | 34.4* |
| V758 | | | | | | | | |
| P _{CM} | 101 | 101.5 | 1.0 | 0.0 | — | 1.45 | 3.35 | 27.0 |

Berkeley 87: Rejet des prédictions de Giovanelli et al. 1996

Berkeley 87:

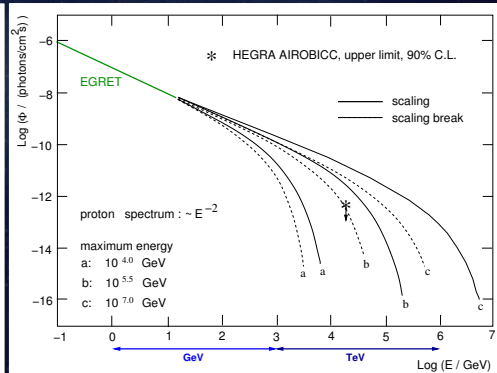
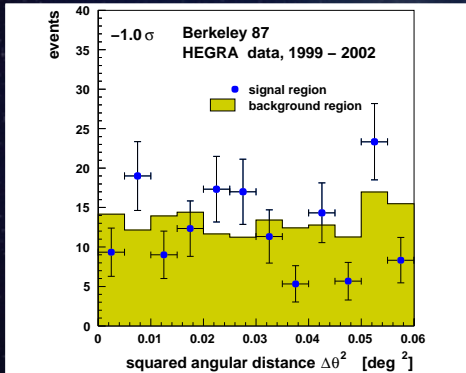
- Plus de 100 étoiles massives
- WR 142 : 5200 km/s
- EGRET : 3EG J2021+3716
- HEGRA : $F(> 1\text{TeV}) < 0.05\text{Crab}$

Manchanda et al. 1996 :

meilleur candidat pour accélération par vents stellaires ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)

Giovanelli et al. 1996 :

Prédictions pour Berkeley 87



Berkeley 87: Rejet des prédictions de Giovanelli et al. 1996

Berkeley 87:

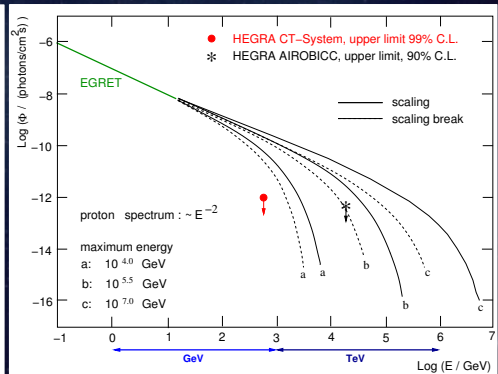
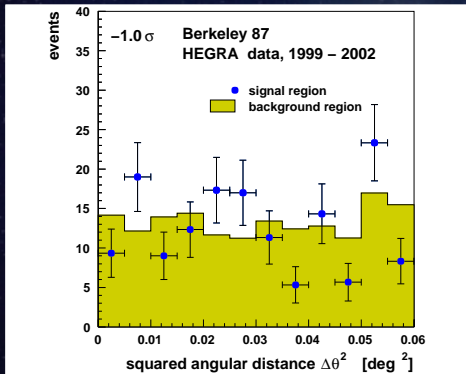
- Plus de 100 étoiles massives
- WR 142 : 5200 km/s
- EGRET : 3EG J2021+3716
- **HEGRA** : $F(> 1\text{TeV}) < 0.05\text{Crab}$

Manchanda et al. 1996 :

meilleur candidat pour accélération par vents stellaires ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)

Giovanelli et al. 1996 :

Prédictions pour Berkeley 87



III. Modélisation

Modellisation de spectres gamma par décroissance de π^0

L'algorithme:

- π^0 inclusive cross section (Badhwar 1981)
- intégrations numériques
- Paramètres du modèle:
 - E_{\max} Énergie maximale des protons
 - α indice spectral des protons
- Normalisation: EGRET / HEGRA ...

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = A f(E_p) (1 - \tilde{x})^\alpha e^{-B p_\perp / (1 + 4m_p^2/s)}$$

$$\frac{d\sigma(E_\pi, E_p)}{dE_\pi} = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} p_\perp \left(E \frac{d^3\sigma}{dp^3} \right) d\theta$$

$$q_{\pi^0}(E_\pi) = 4\pi K \int_0^{E_{\max}} E_p^{-\alpha} \frac{d\sigma(E_\pi, E_p)}{dE_\pi} dE_p$$

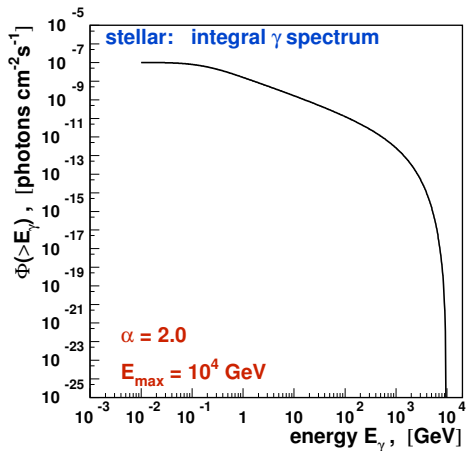
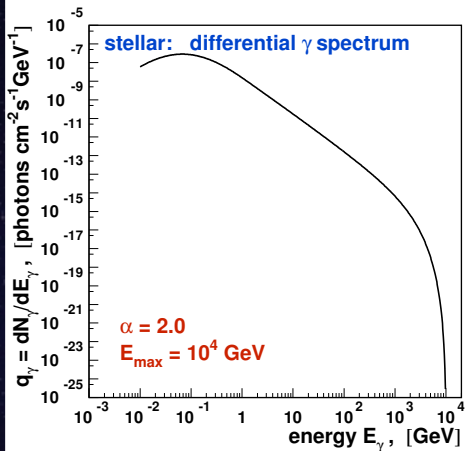
$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = q_\gamma(E_\gamma) = 2 \int_{E'_\pi}^\infty \frac{q_{\pi^0}(E_\pi)}{\sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2}} dE_\pi$$



Programme «stellar»

Spectre dénergie de rayons gamma pour amas ouverts

Programme stellar: Résultats

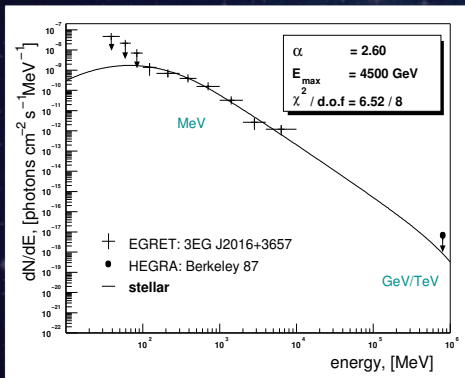


Berkeley 87: Comparaison des résultats au modèle (stellar)

Association de Berkeley 87 avec 3EG J2021+3716

Informations disponibles : Spectre différentiel (EGRET), Limite supérieure (HEGRA)

Fit (stellar & EGRET + HEGRA) : χ^2

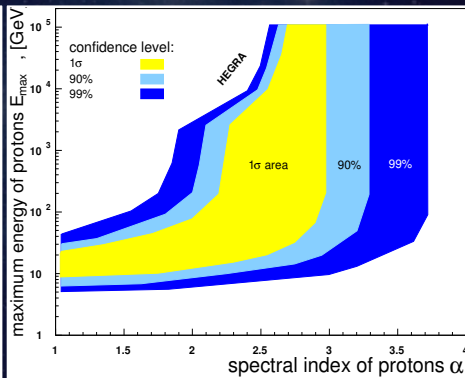
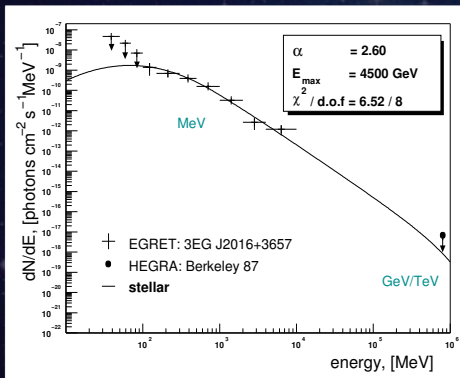


Berkeley 87: Comparaison des résultats au modèle (stellar)

Association de Berkeley 87 avec 3EG J2021+3716

Informations disponibles : Spectre différentiel (EGRET), Limite supérieure (HEGRA)

Fit (stellar & EGRET + HEGRA) : χ^2 Variation : $5000 \times \alpha$, E_{\max}

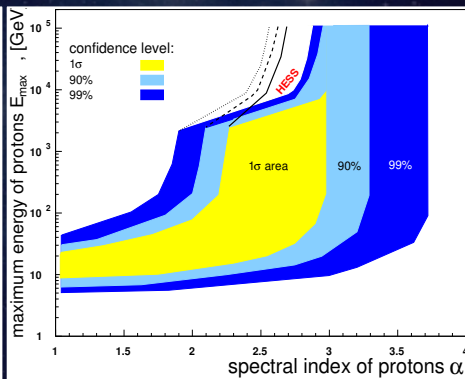
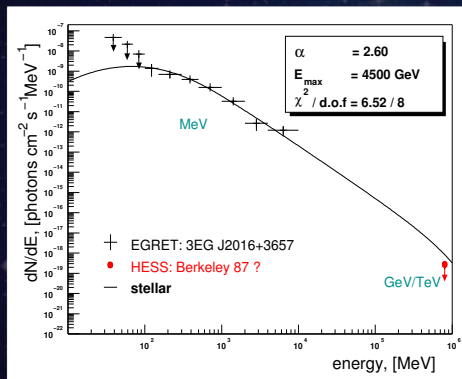


Berkeley 87: Comparaison des résultats au modèle (stellar)

Association de Berkeley 87 avec 3EG J2021+3716

Informations disponibles : Spectre différentiel (EGRET), Limite supérieure (HEGRA)

Fit (stellar & EGRET + H.E.S.S.) : χ^2 Variation : $5000 \times \alpha$, E_{\max}



IV. TeV J2032+4130 :
Détection inattendue dans le Cygne

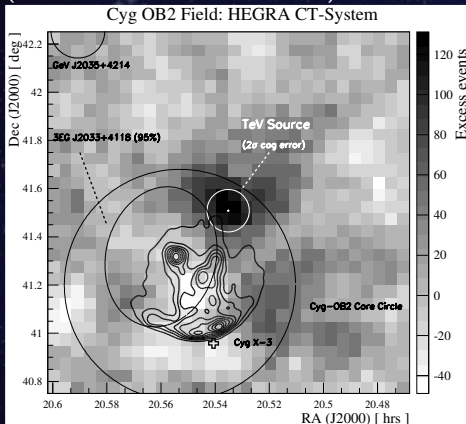
La source non identifiée TeV J2035+415: Cyg OB2 ?

Observations de Cyg-X3, GeV J2035

1999 - 2001 : 113 h, G. Rowell

→ TeV J2032+4130

(4.6 σ , Aharonian et al. 2002)



Observations de TeV J2032+4130 (2002)

→ 7 σ (1999 - 2002)

L'association stellaire Cyg OB2

- TeV J2035+415 dans le noyau
- 2600 étoiles OB
- 400 étoiles O
- Vents stellaires (1000 - 3800 km/s)

→ accélération par vents stellaires

→ émission TeV par décroissance de π^0

Interprétation alternative de l'émission TeV:

Microquasar → Jet (e^\pm) → IC

HEGRA array: 4 σ ($E > 40$ TeV), position compatible TeV J2032

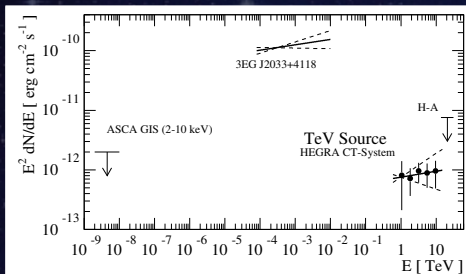
radio: Cyg-X3 flare

(Merck 1993, Krawczynski 1994)

TeV J2032+4130 & 3EG J2033+4118

Association possible ?

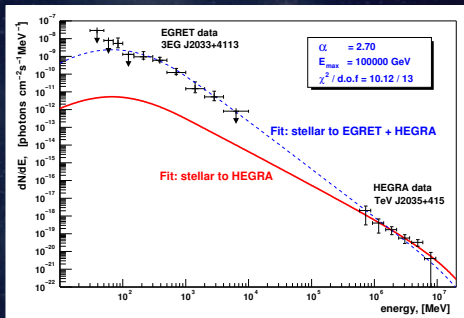
- Positions : Compatibilité marginale
- Flux énergétique : Incompatible (?)



1. Sources non associés
2. Deux populations / mécanismes

Mécanisme d'accélération hadronique? stellar + EGRET + HEGRA

- Comparaison simultanée du modèle avec EGRET et HEGRA ('99 - '01)



- Association? → **GLAST & H.E.S.S**

(Tous) les amas ouverts détectables en GeV / TeV ?

Observations avec HEGRA :

| Amas ouvert | T_{eff} | Détection ? | limite supérieure / Flux | Distance |
|-------------|------------------|-------------|--------------------------|----------|
| Berkeley 87 | 11 h | | <0.05 | 0.9 |
| IC 1805 | 40 h | | <0.05 | 2.4 |
| NGC 1976 | 1 h | | <2.95 | 0.4 |
| NGC 1977 | 1 h | négatif | <1.66 | 0.4 |
| NGC 1980 | 1 h | | <1.37 | 0.4 |
| NGC 1981 | 1 h | | <1.50 | 0.4 |
| Cyg-OB2 | 113(>200) h | | positif | 0.03 |

Hypothèse : Flux typique pour amas ouverts à 1.7 kpc $F(E > 1 \text{ TeV}) \lesssim 0.03 \text{ Crab}$

Conséquences : Temps d'observation insuffisant \rightarrow nouvelle Génération plus sensible
Contribution d'amas ouverts à l'accélération des RC n'est pas exclue



H.E.S.S

Amas ouverts avec H.E.S.S

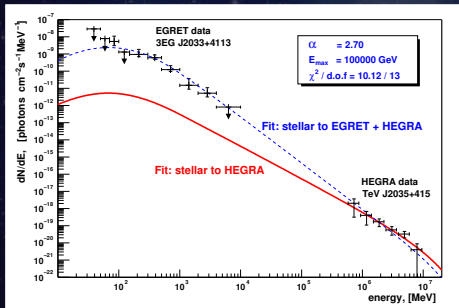
Critères de sélection :

- Visibilité (hémisphère Sud...)
- Distance
- Nombre d'étoiles etc.
- (Source EGRET)

Amas ouverts avec H.E.S.S.

Critères de sélection :

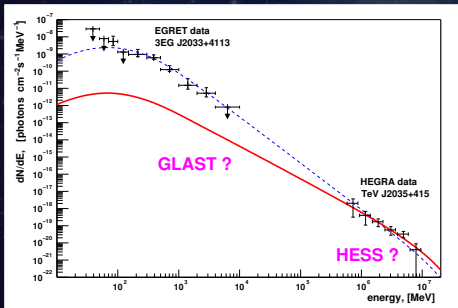
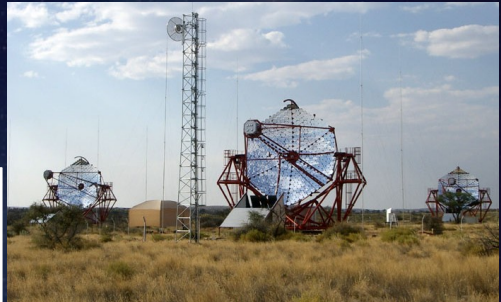
- Visibilité (hémisphère Sud...)
- Distance
- Nombre d'étoiles etc.



Amas ouverts avec H.E.S.S.

Critères de sélection :

- Visibilité (hémisphère Sud...)
- Distance
- Nombre d'étoiles etc.



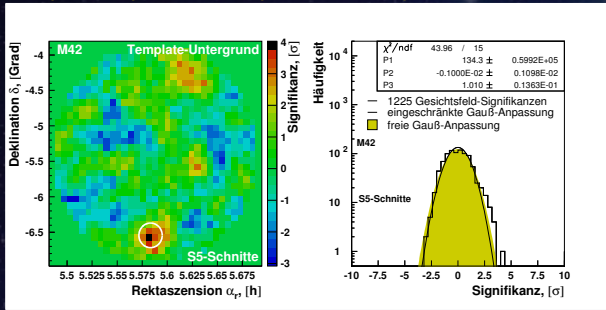
- Sensibilité supérieure
- Seuil d'énergie plus bas
- Voie Lactée visible en grande partie

Conclusions

- Observations d'amas ouverts avec HEGRA :
 - Résultats négatifs
 - Temps d'observation trop court ?
- Modélisation :
Limite supérieure de Berkeley 87 → Restriction des paramètres du modèle
→ Amélioration avec H.E.S.S/ GLAST
- Nouvelle Source TeV J2032+4130 :
 - Association avec l'amas ouvert Cyg OB2 probable
→ Accélération hadronique par vents stellaires ?
- → Futures observations d'amas ouverts plus sensibles avec GLAST & H.E.S.S

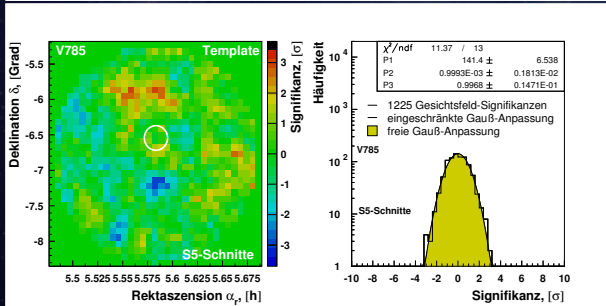
M 42 : Observation

Coupages optimisées pour indice spectral élevé



M 42, Nébuleuse d'Orion

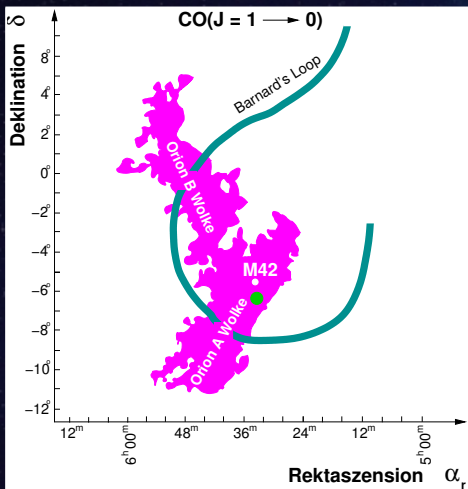
- 0.7 h d'observation
- $E_{\text{thr}} \approx 1.1 \text{ TeV}$
- Position P : 4.1σ



V 785

- 1.0 h d'observation
- $E_{\text{thr}} \approx 1.5 \text{ TeV}$
- Position P : 0.0σ

M 42 : Interprétation



- > 400 Objets intéressants (sources X, radio, ...)
- Position à l'intérieur de «Barnard's Loop»

Citations

Aharonian, F., the HEGRA Collaboration, 2002, A&A, 393, L37

Cassé, M. & Paul, J.a., 1980, Astrophysical Journal, 237, 236

Giovanelli, F., Bednarek, W. & Karakula, S., 1996, J. Phys. G.: Nucl. P.P., 22, 1223

Hofmann, W., Jung, I., Konopelko, A., et al., Astroparticle Physics, 12, 135

Manchanda, R.K., Polcaro, V.F., Norci, L., et al., 1996

Montmerle, T., 1979, Astrophysical Journal, 231, 95

Völk, H. & Forman, M., 1982, Astrophysical Journal, 253, 188