

Πηγές ακτίνων γ ενέργειας TeV

Πηγές

Γαλαξιακές

SNR Υπολείμματα Σουπερ Νόβα.

PWN pulsar wind nebule

BP Διαδικοί Πάλσαρ

GMC Γιγάντια Μοριακά νέφη.

Εξωγαλαξιακές

AGN (Blasars) Ενεργοί Πυρήνες Γαλαξιών.

Παραγωγή κατά τις Αντιδράσεις:

Πρωτόνια αντιδρούν με το αέριο γύρω από τη πηγή και παράγουν π^0 το οποίο διασπάται σε δύο φωτόνια γ . $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

Ηλεκτρόνια επιταχύνονται στα κύματα κρούσης, στη συνέχεια, με αντίστροφη σκέδαση Compton, μεταφέρεται η ενέργεια τους στα φωτόνια γ . $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$

Ο πρώτος μηχανισμός επικρατεί στα πυκνά νέφη, ($N > 100 \text{ p/cm}^3$)

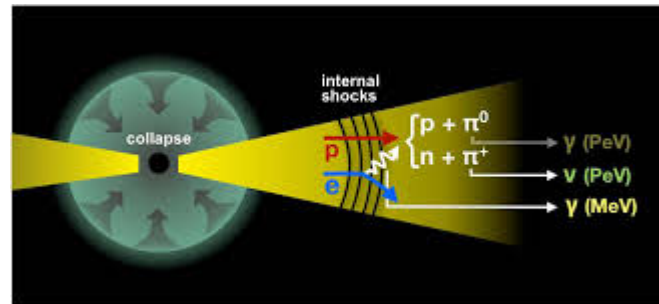
Ο δεύτερος στα αραιά νέφη. ($N < 100 \text{ p/cm}^3$)

Παραγωγή

$p + p \rightarrow p (n) + m \pi^0 + 2m \pi^{\pm}$
 m η πολλαπλότητα.

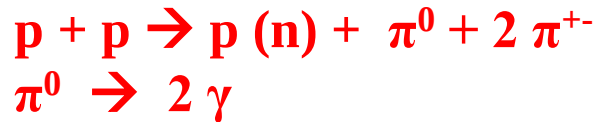
π^0	π^+	π^-	p
1/6	1/6	1/6	1/2
$\gamma \gamma$	$e^+ \nu_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	$e^- \nu_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	

Ενέργεια σε γ , $e^+ e^-$ ίση με την ενέργεια που πάει σε νετρίνα.



Παραγωγή ακτίνων γ από π^0

Πρωτόνια αντιδρούν με το αέριο γύρω από τη πηγή και παράγουν π^0 το οποίο διασπάται σε δύο φωτόνια γ .



Κοντά στην περιοχή επιτάχυνσης πρέπει να υπάρχει νέφος μεγαλύτερης πυκνότητας είτε υπόλειμμα από τον αρχικό αστέρα, ή μοριακό νέφος που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο SNR.

Η πυκνότητα της ύλης, πρέπει να είναι αρκετή για την αντίδραση των πρωτονίων, αλλά αρκετά μικρή για να μπορούν να διαφύγουν οι ακτίνες γ πριν αντιδράσουν.

Από τις παρατηρήσεις αποδείχθηκε ότι τα SNR αποτελούν πηγές επιτάχυνσης κοσμικών ακτίνων.

Παραγωγή ακτίνων γ από ηλεκτρόνια

Ηλεκτρόνια επιταχύνονται στα κύματα κρούσης, με τον μηχανισμό Fermi, στη συνέχεια, με αντίστροφη σκέδαση Compton, μεταφέρεται η ενέργεια τους στα φωτόνια γ .

Σε περιοχές όπου υπάρχει ισχυρό μαγνητικό πεδίο τα ηλεκτρόνια διαγράφουν κυκλικές τροχιές. Λόγω της επιτάχυνσης τα ηλεκτρόνια εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον. Η ενέργεια των φωτονίων είναι στην περιοχή ακτίνων X.

Αν η πυκνότητα των φωτονίων X είναι υψηλή τότε σκεδάζονται στα ηλεκτρόνια με αντίστροφη σκέδαση Compton και αποκτούν υψηλότερη ενέργεια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τον νεφέλωμα Crab.

Αντίστροφη Σκέδαση Compton

Είναι γνωστό το φαινόμενο **Compton** κατά το οποίο, ένα φωτόνιο σκεδάζεται σε ένα ατομικό ηλεκτρόνιο, μεταφέροντας ένα μέρος της ενέργειας του στο ηλεκτρόνιο.

Εάν το **ηλεκτρόνιο έχει μεγάλη κινητική ενέργεια** συμβαίνει τον αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή **το φωτόνιο κερδίζει ενέργεια**.

Για μία μετωπική κρούση, υπολογίζεται :

$$\hbar\omega = \frac{4}{3} \gamma^2 \hbar\omega_0$$

Αν ηλεκτρόνιο με $\gamma=1000$ ($E=510 \text{ MeV}$) (γ είναι ο παράγοντας Lorentz)

σκεδαστεί με φωτόνιο

R.F. $\nu=10^9 \text{ Hz} \rightarrow 10^{15} \text{ Hz}$ (UV)

I.F. $\nu=3 \times 10^{12} \text{ Hz} \rightarrow 3 \times 10^{18}$ (x-ray)

visual $\nu=4 \times 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow 4 \times 10^{20}$ (γ 1,6 MeV)

Ακτινοβολία Σύνχροτρον ή μαγνητικής πέδησης.

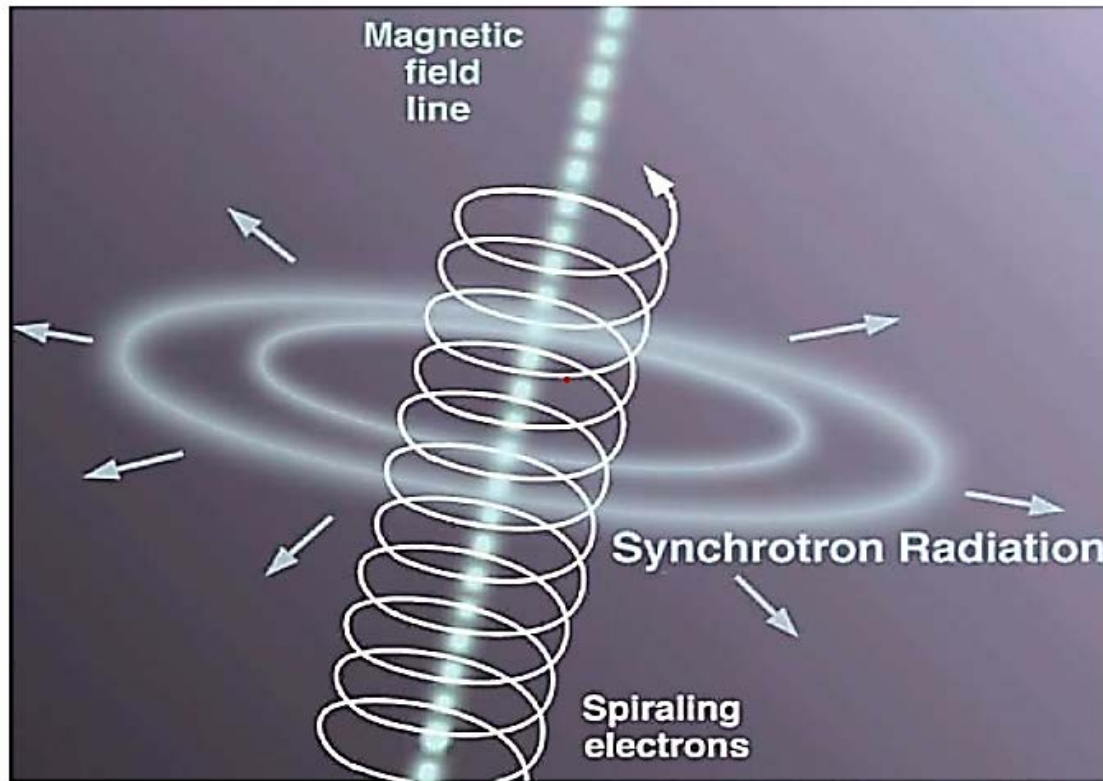


Fig. 1.— Artist's conception of synchrotron radiation. Cool figure from <http://www.gemini.edu/gallery/science/m87/Synchrotron-Radiation-med.jpg>

Εκπέμπεται κατά την καμπύλωση της τροχιάς του ηλεκτρονίου από μαγνητικό πεδίο. Παρατηρήθηκε πρώτη φορά σε επιταχυντές σύγχροτρον.

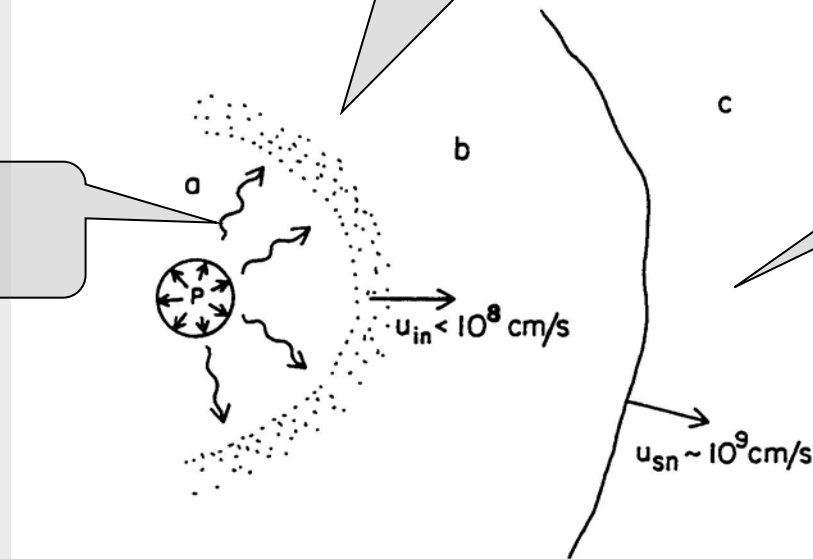
Κύμα κρούσης σε Υ.Κ.

Εκτοξευμένη ύλη που
επεκτείνεται

Acceleration to $> 100 \text{ TeV}$

167

Άνεμος
Πάλσαρ



Διαστρικό
μέσο.

Figure 12.2: A very young supernova remnant: (a) shocked pulsar wind; (b) expanding ejecta; (c) interstellar medium (perhaps modified by wind of

Στα Pulsed Wind Nebulae , η ύλη που εκτοξεύεται από τον πάλσαρ, ωθεί το κρουστικό κύμα σε μεγάλες ταχύτητες . Από μετρήσεις προκύπτει ότι αυτά SNR παράγουν ακτίνες γ ενέργειας δεκάδων TeV. Τα φωτόνια παράγονται από την διάσπαση π^0 άρα η ενέργεια των αρχικών πρωτονίων πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές υψηλότερη.

Πηγές στον Γαλαξία

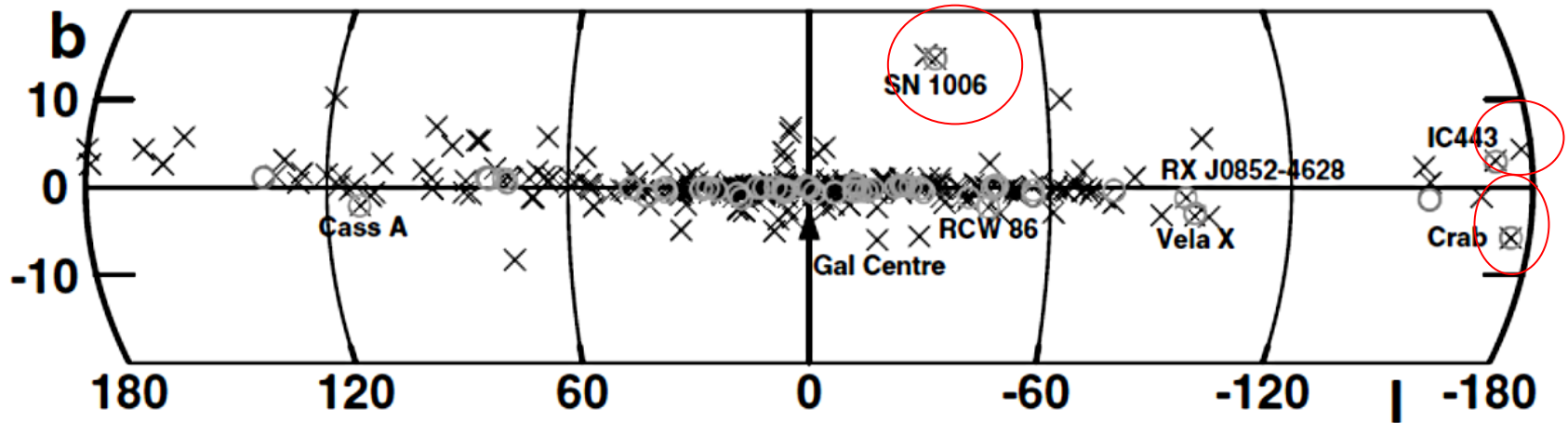


Fig. 10.5. Circles show the positions of the TeVCat TeV γ -ray sources and the x 's show the positions of 274 supernova remnants from D.A. Green's catalog in galactic coordinates.

Κατανομή των πηγών **TeV** στον Γαλαξία. Παρατηρούμε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση κοντά στον πυρήνα του γαλαξία. Παρατηρούμε για ορισμένες πηγές TeV σύμπτωση με SNR. Ξεχωρίζει η σύμπτωση με τον SN 1006. Επίσης παρατηρούμε σύμπτωση με το νέφος IC443 ενώ δείχνει πηγή κοντά στο νεφέλωμα Crab.

Σύγκριση με θέση SNR

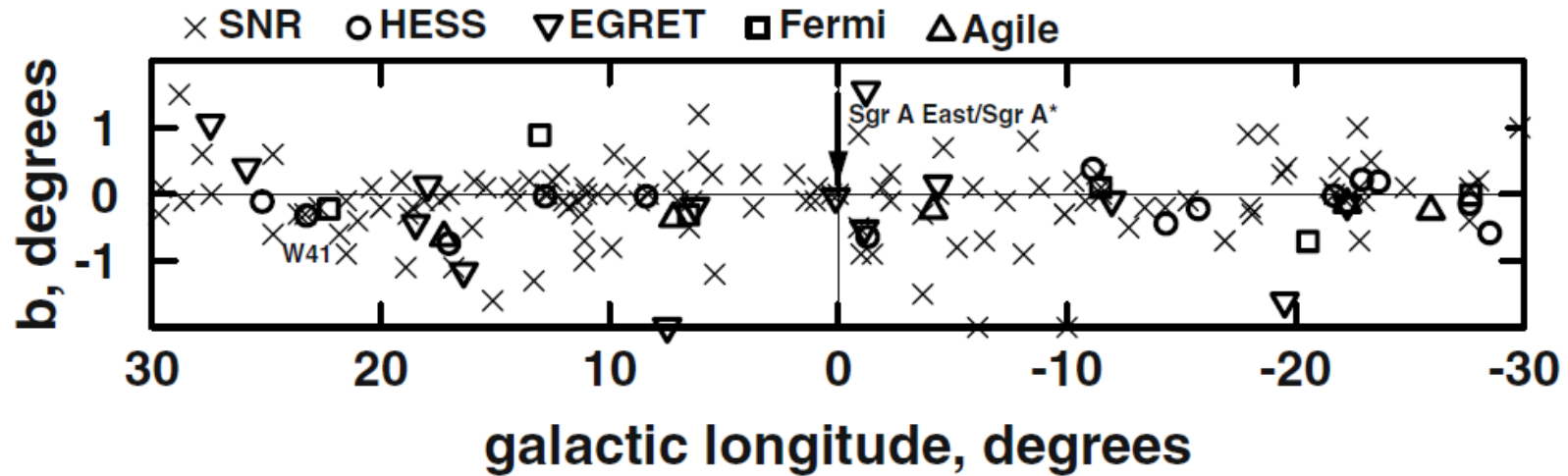
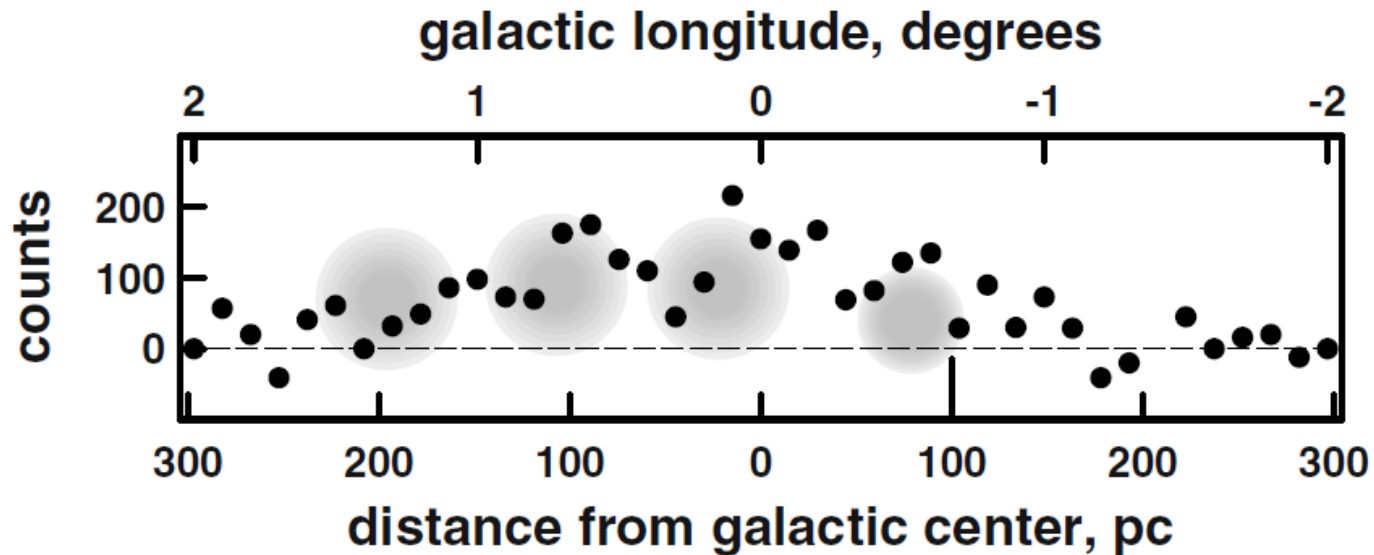


Fig. 10.6. The HESS survey of the central galaxy compared to the positions of SNR and data from GeV γ -ray telescopes.

Πηγές GeV και σύγκριση με SNR. Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες πηγές δεν υπάρχει ακριβής σύμπτωση.

Μοριακά νέφη



Οι πηγές που ανίχνευσε το HESS, κοντά στο γαλαξιακό επίπεδο, σε σχέση με τα μοριακά νέφη. Συμπεραίνουμε ότι στις πηγές επιταχύνονται πρωτόνια τα οποία αντιδρούν και παράγουν TeV gamma στο υλικό του μοριακού νέφους

Ακτίνες γ με ενέργεια TeV, από SNR (υπόλειμμα Σ.N.)

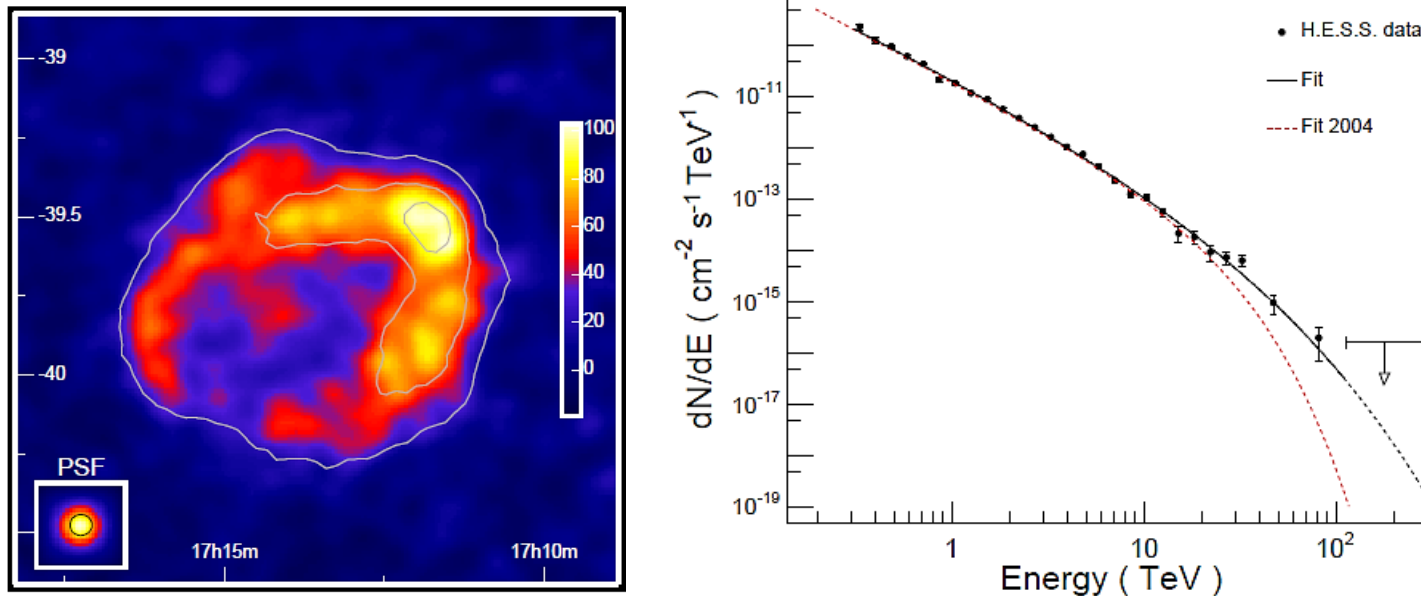


Fig. 1. The TeV gamma-ray image of RX J1713.7-3946. The energy spectrum of gamma-rays from RX J1713.7-3946. The spec

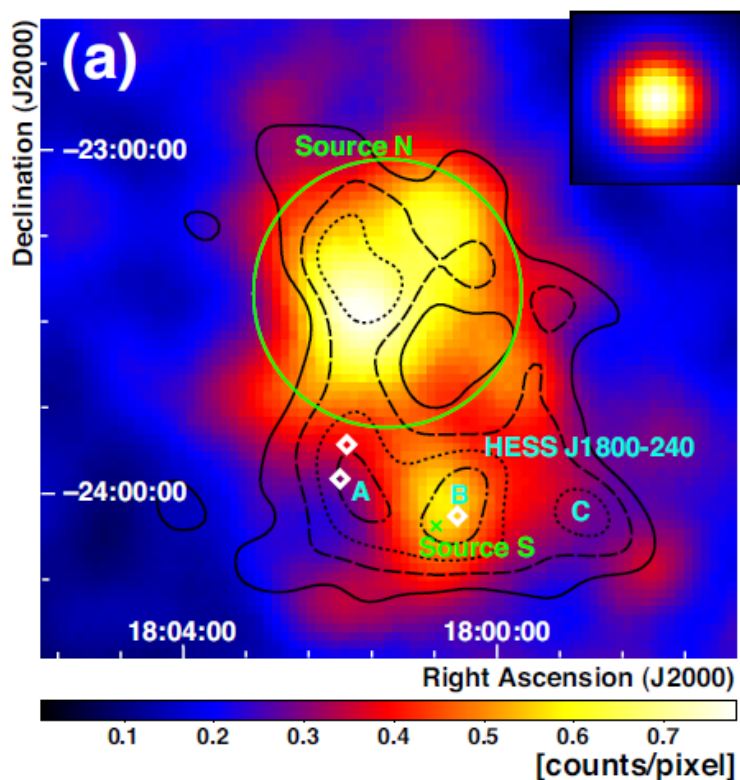
The Fascinating TeV Sky

Felix Aharonian

Παραγωγή TeV γ από
πρωτόνια υψηλής ενέργειας

Παραγωγή σε μοριακά νέφη.

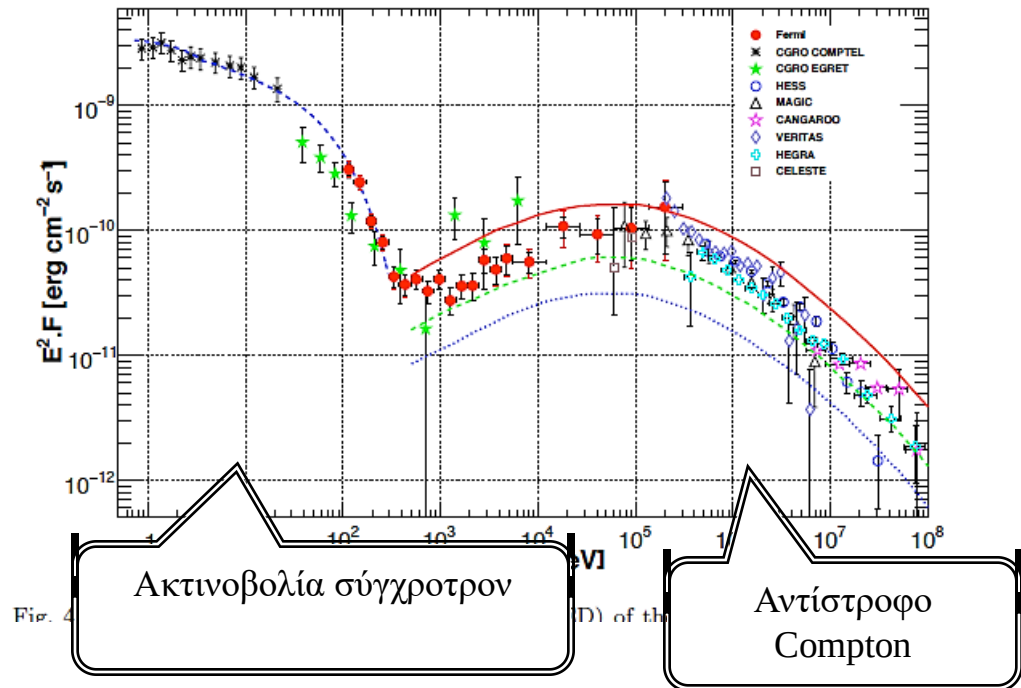
Τα περιγράμματα αντιστοιχούν σε θερμές περιοχές σε ακτινοβολία TeV, πρόκειται για μοριακά νέφη τα οποία βρίσκονται στη διαδρομή των πρωτονίων μετά την έξοδο από το SNR και ίσως σχετίζονται με προηγούμενο στάδιο του SN.



W28 Fermi-LAT 2-10GeV ,
HESS TeV

noothed image of 2-10 GeV gamma-rays around W28 obtained w
ontours show the HESS significance map for TeV gamma-rays (20%,

Grab Nebula , Αντίστροφη σκέδαση Compton



Fermi-LAT, HESS

Παραγωγή TeV γ από Ηλεκτρόνια.

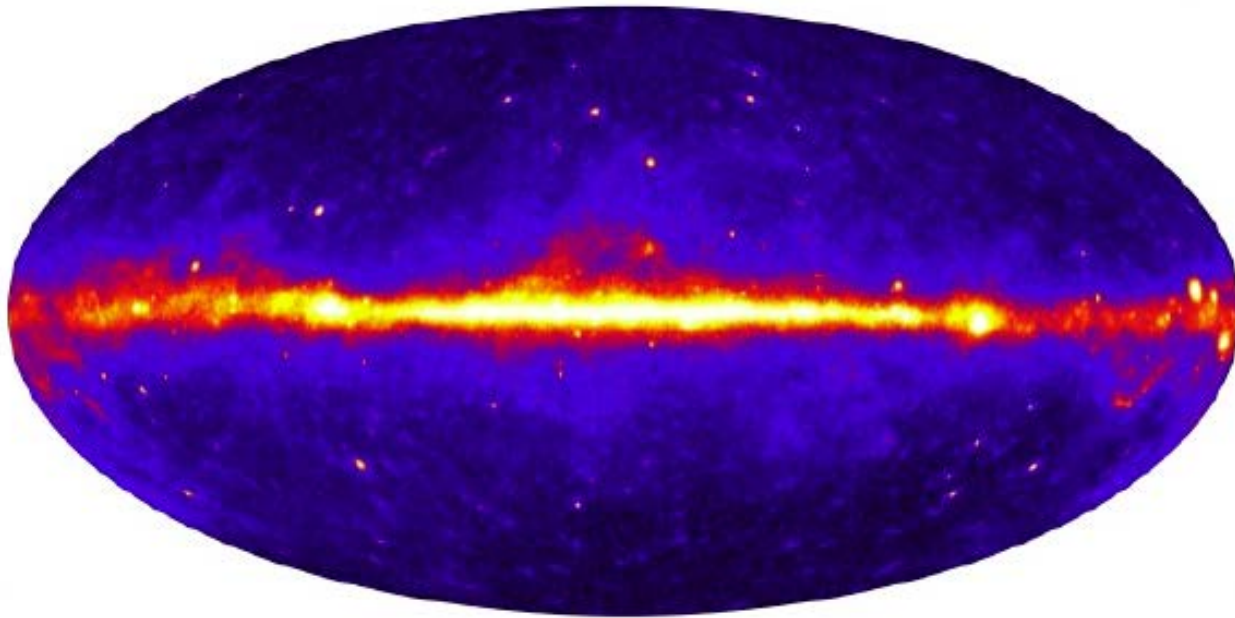
Συνδυασμός δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων

Crab Nebula

Το νέφος Crab δημιουργήθηκε από έκρηξη Σ.Ν. πιθανόν το 1054 και είναι η ισχυρότερη πηγή ακτινών γ που διακρίνεται στον γαλαξία. Αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο αστέρα νετρονίων που δημιουργεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Χαρακτηριστικό Pulsar Wind Nebula. Οι πηγές ακτινών γ ενέργειας $> \text{TeV}$ έχουν εντοπιστεί στην περιφέρεια του νέφους που περιβάλλει τον πάλσαρ. Στην περιοχή αυτή δημιουργούνται κύματα κρούσης τα οποία επιταχύνουν τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια, με αντίστροφη σκέδαση Compton μεταφέρουν την ενέργεια τους σε φωτόνια του μικροκυματικού υπόβαθρου τα οποία αποκτούν $E > \text{TeV}$. $B > 100 \mu\text{G}$

Όταν η πυκνότητα του νέφους είναι μικρότερη από 100 p/cm^3 οι ακτίνες γ δεν μπορούν να παραχθούν από τις αντιδράσεις πρωτονίων, αλλά από την αντίστροφη σκέδαση Compton.

Εικόνα του Γαλαξία από την παρατήρηση των ακτίνων γ



Διακρίνονται η διάχυτη ακτινοβολία στο γαλαξιακό επίπεδο, καθώς και ισχυρές πηγές.

Εξωγαλαξιακές πηγές

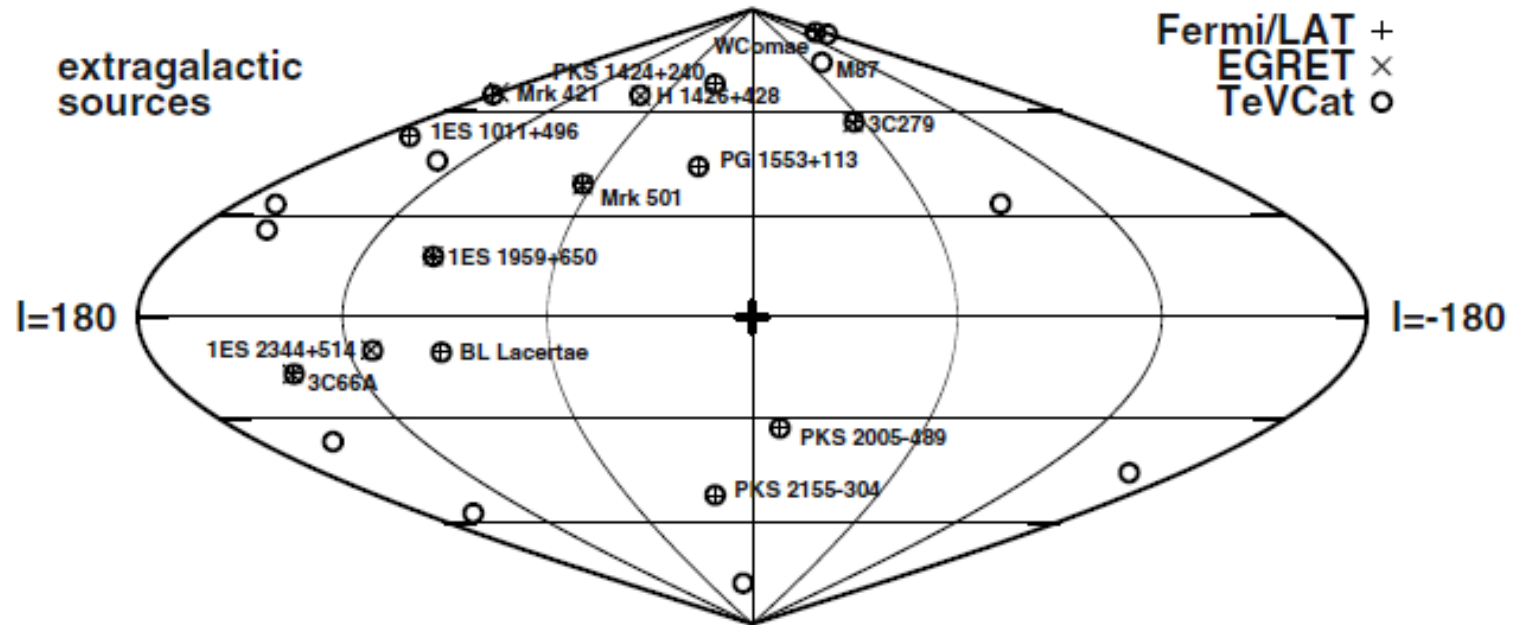


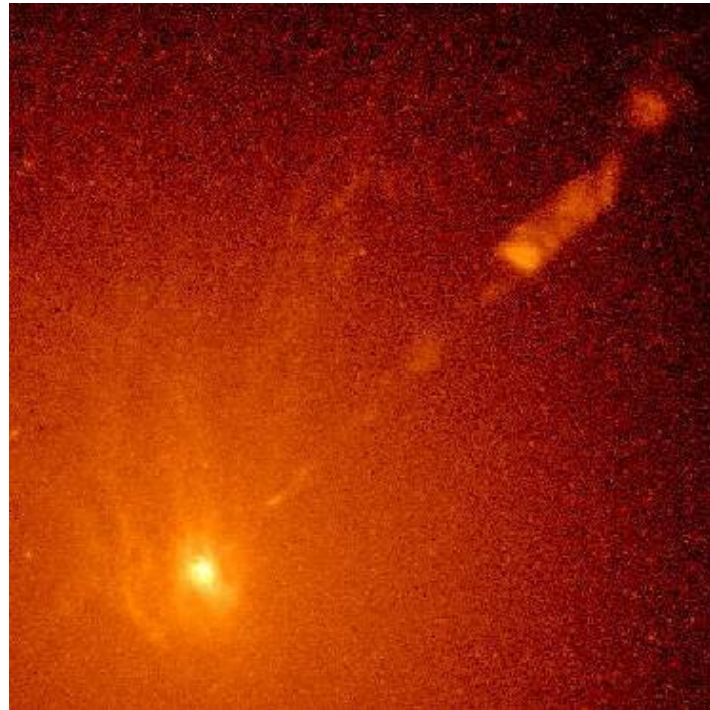
Fig. 10.9. Twenty-three TeV γ -ray sources listed in TeVCat are shown with circles

Κατανομή εξωγαλαξιακών πηγών TeV. Τα δεδομένα είναι από δορυφορικά και επίγεια πειράματα. Οι πηγές ταυτίζονται με ενεργούς γαλαξίες AGN δηλαδή με γαλαξίες που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης.

Οι πηγές αυτές χαρακτηρίζονται από φωτεινότητα σε ενέργειες GeV μεγαλύτερη από τη φωτεινότητα στο ορατό.

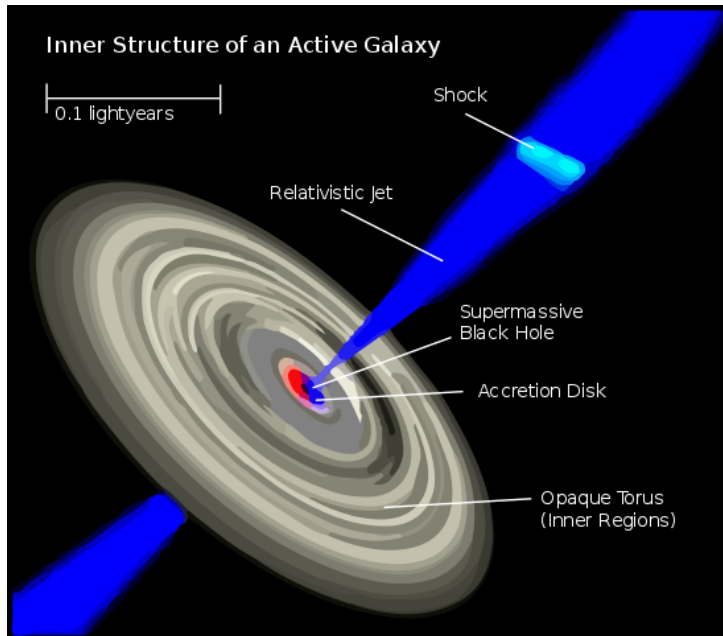
Ραδιογαλαξίας M87

Απόσταση 16 Mpc
Μάζα Μαύρης Οπής $3 \cdot 10^9$ ηλ.
Μεταβλητή ροή ακτίνων TeV.
Η παραγωγή γίνεται στην
κεντρική περιοχή.

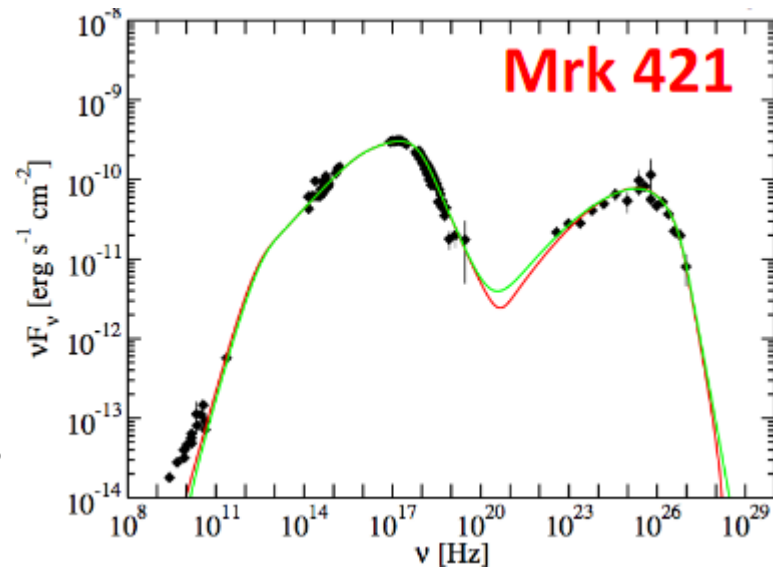


MRK421

Ο Markarian 421 είναι εξαιρετικά ενεργός σε παραγωγή αντίνων γ μέχρι TeV. Το ενεργειακό φάσμα ερμηνεύεται σαν συνδυασμός της παραγωγής από π^0 και ακτινοβολίας σύγχροτρον.



Αναπαράσταση Active Galactic Nucleus



Δυαδικοί αστέρες Cygnus X3

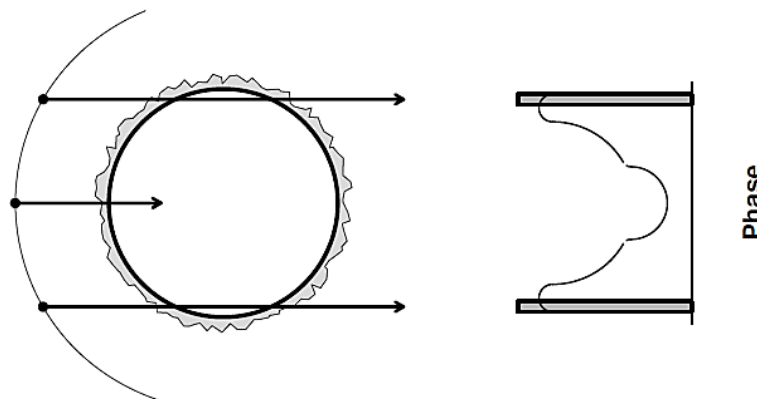


Fig. 10.4. The Vestrand–Eichler model of signal production in a binary system and the light curve for γ -ray (shaded) and neutrino fluxes.

Τα πρωτόνια επιταχύνονται στον αστέρα νετρονίων και αντιδρούν στην ατμόσφαιρα του συνοδού αστέρα. Οι ακτίνες γ παρατηρούνται στην γη μόνον όταν περνούν από το αραιό στρώμα στην περιφέρεια του συνοδού αστέρα. Ο Cygnus X3 δεν επιβεβαιώθηκε, όμως έχουν παρατηρηθεί TeV γ σε άλλα συστήματα

Εκπομπή από binaries

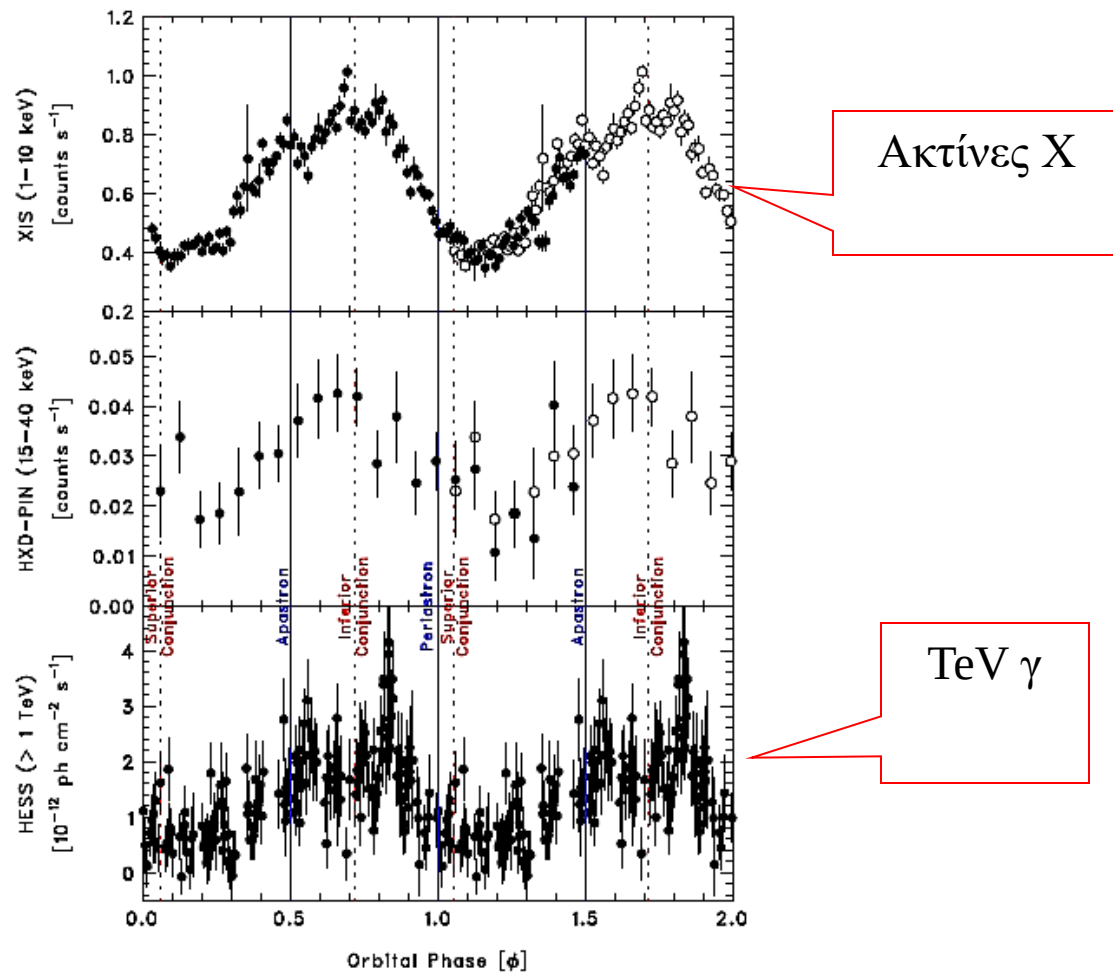


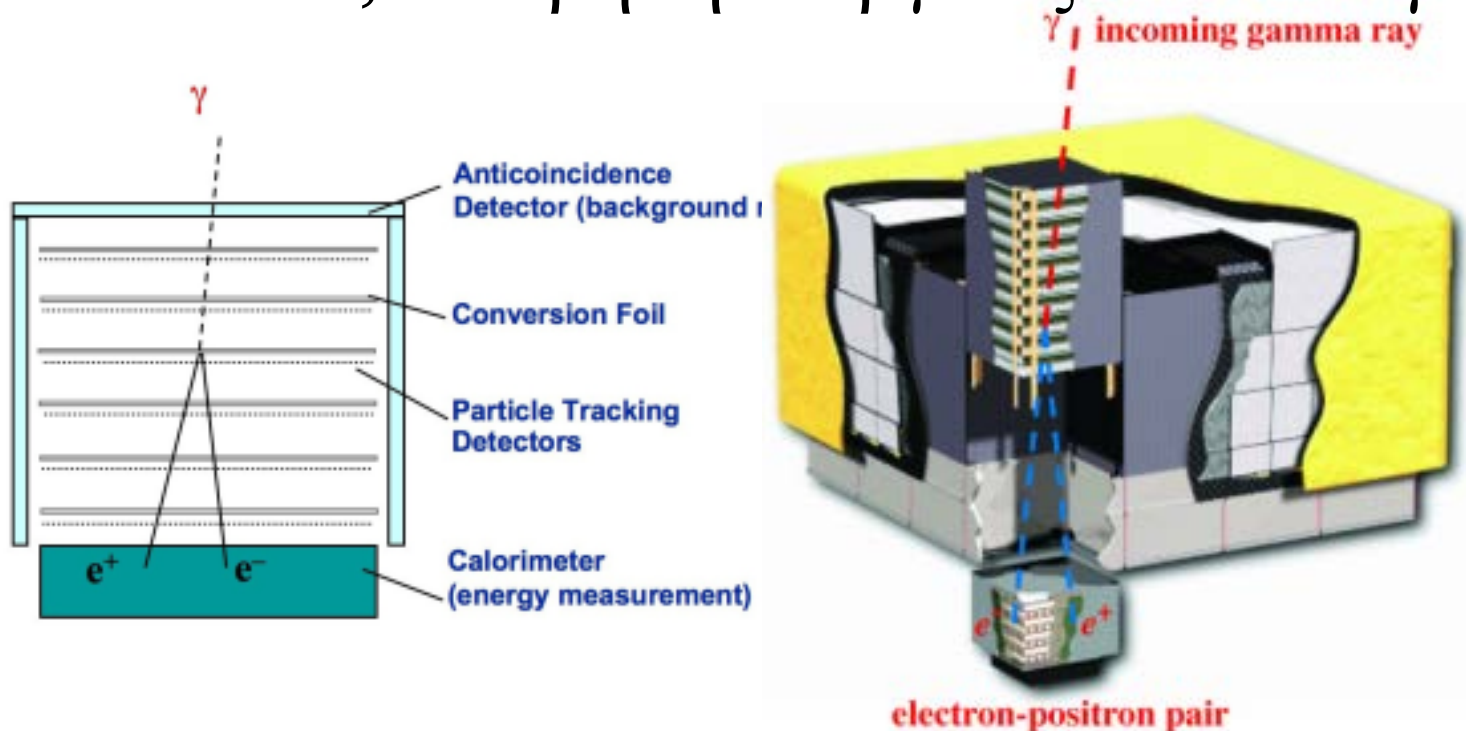
Fig. 6. X-ray and TeV gamma-ray orbital lightcurves of LS 5039. *Suzaku* count rates in the 1–10 keV (top) and 15–40 keV (middle) bands continuously obtained for a 200 ks duration (filled circles). The light curve of integral fluxes at energies $E > 1$ TeV (bottom) is obtained by HESS on

Δορυφορικά πειράματα

Οι μετρήσεις ακτίνων γάμα με δορυφόρους ξεκίνησαν το 1972 και συνεχίζονται με διαρκώς αυξανόμενη περιοχή ενεργειών.

SAS2	1972	max E	1 GeV
COS-B	1975		5 GeV
EGRET	1991		30 GeV κατέγραψε 271 πηγές
AGILE	2007		50 GeV Λειτουργεί
Fermi-LAT	2008		200 GeV Λειτουργεί

FERMI, Μέτρηση ενέργειας ακτίνων γ .



Large Area Telescope

Pair-production instrument

Energy range: 20 MeV to > 300 GeV

Field of view: 2.4 steradians

Single photon angular resolution: $<1^\circ$ at 1 GeV

Timing accuracy: 1 microsecond

LAT Web site:

<https://www-glast.stanford.edu/instrument.html>

Gamma-ray Burst Monitor

NaI and BGO scintillators

Energy range: 8 keV to 40 MeV

Field of view: 9.5 steradians

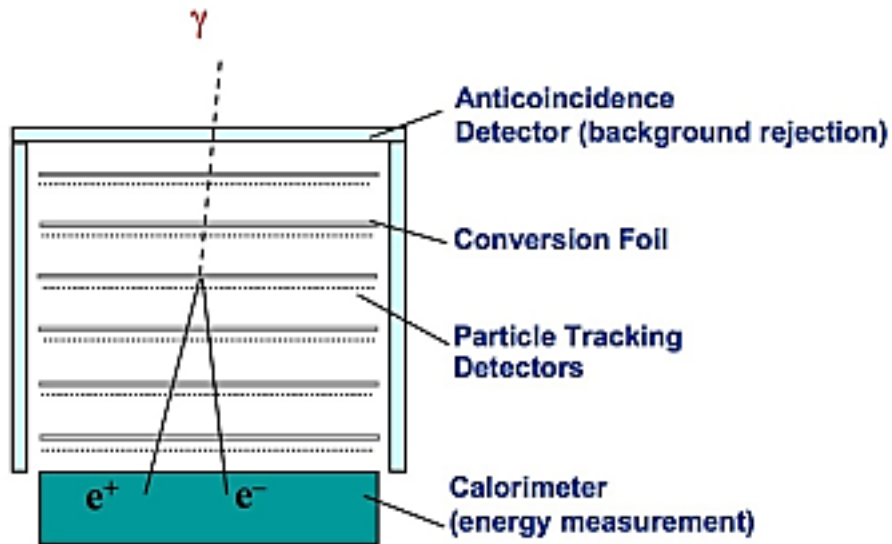
Gamma-ray burst localization: typical 3°

Timing accuracy: 2 microseconds

GBM Web site:

<http://f64.nssc.nasa.gov/gbm/instrument/>

Ανιχνευτής ακτίνων γάμα GLAST Fermi Gamma-ray Space Telescope



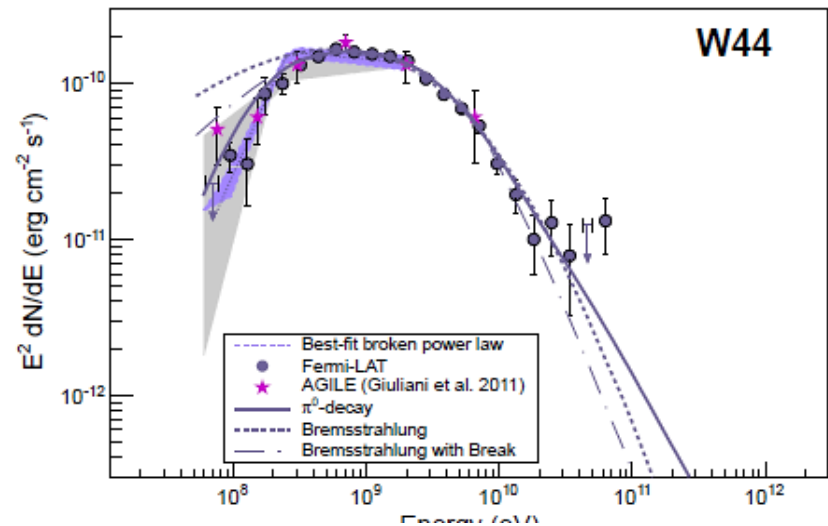
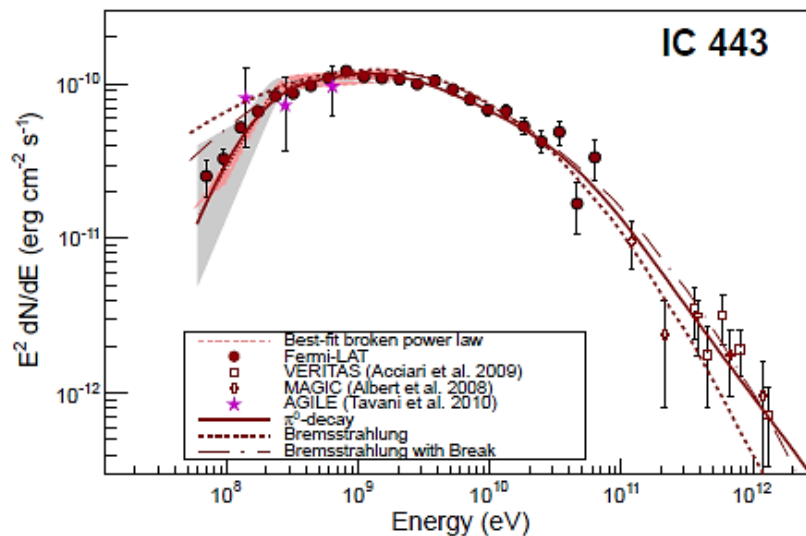
Λεπτά φύλλα μολύβδου χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των ακτίνων γ σε ζεύγη. Ακολουθούνται από επίπεδα silicon strip, τα οποία μετρούν την τροχιά των φορτισμένων σωματιδίων. Ο ανιχνευτής με μπλόκ CsI, μετρά την ολική ενέργεια του φωτονίου.



Φωτόνια (20 MeV) μέχρι (300 GeV)

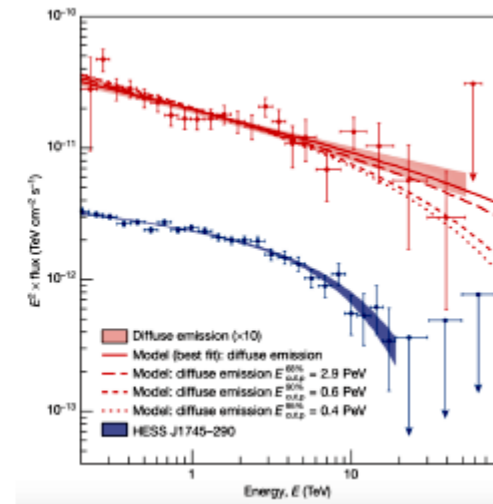
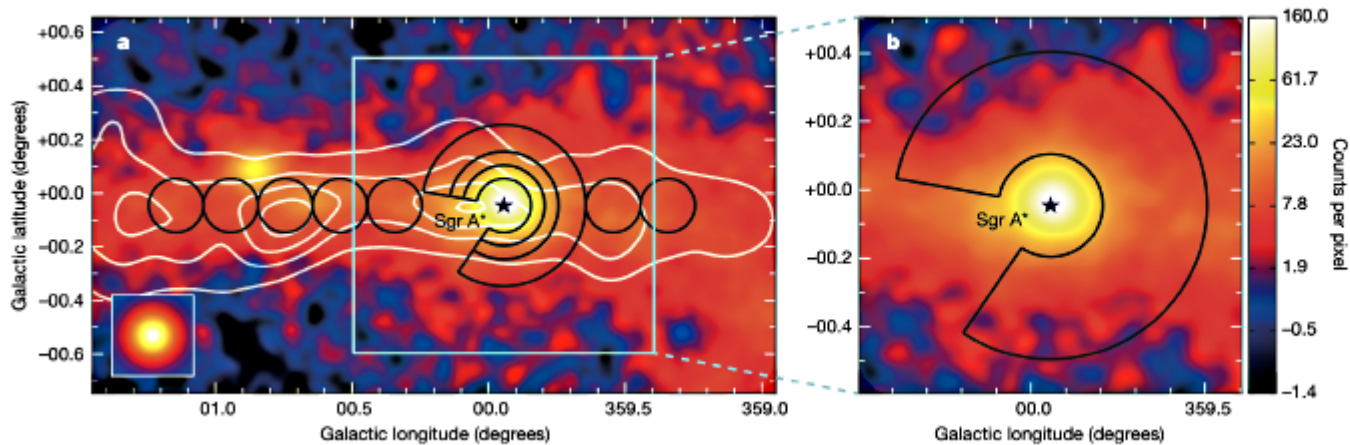
FERMI Επιβεβαίωση μοντέλου επιτάχυνσης SNR

Μέτρησαν το φάσμα εκπομπής ακτίνων γ από τα δύο νέφη IC433 και W44. Χρησιμοποιώντας το ενεργειακό φάσμα των πρωτονίων, υπολόγισαν το φάσμα των ακτίνων γ, που παράγονται από την διάσπαση των π^0 . Η καμπύλη συμφωνεί με τα δεδομένα.



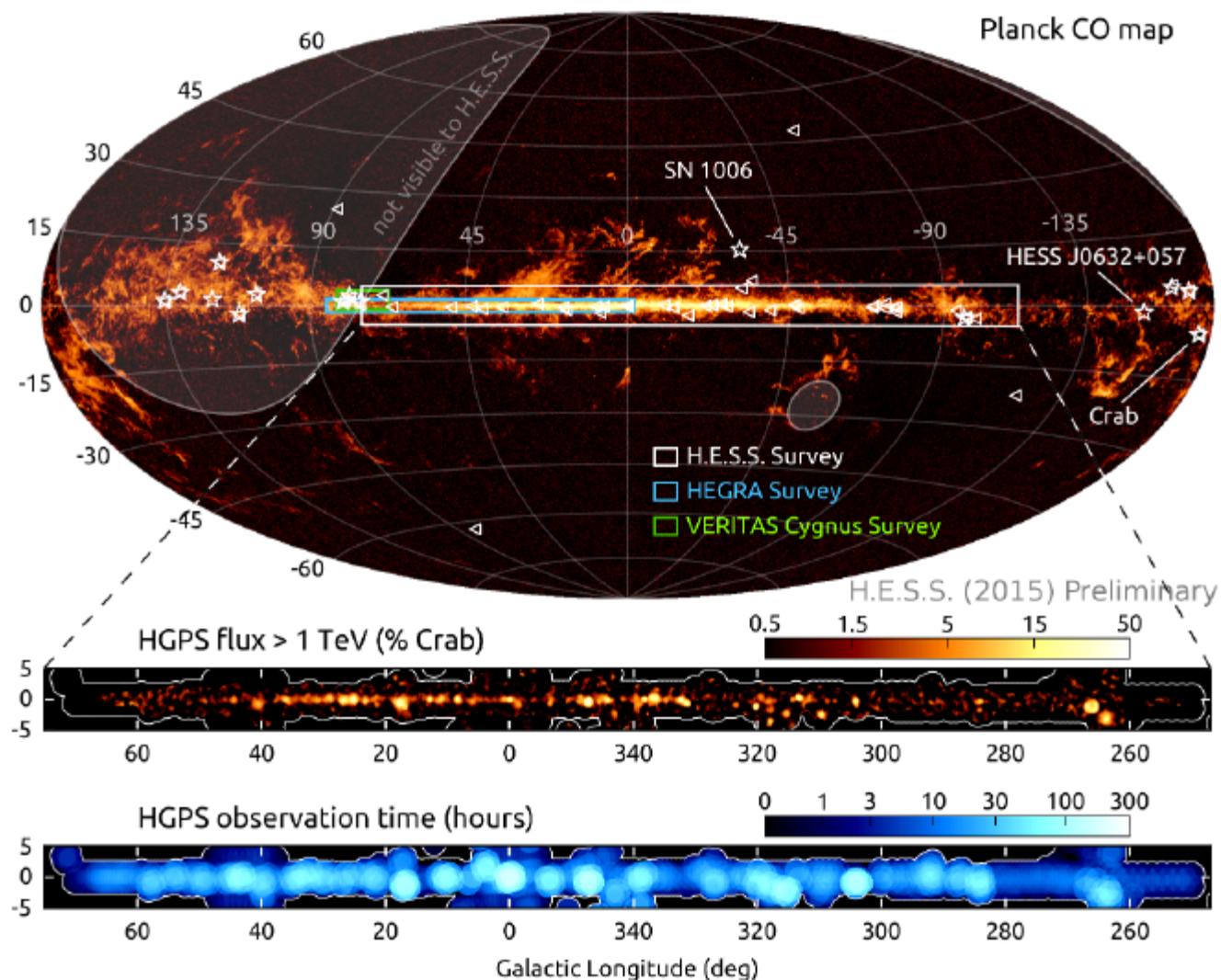
Latest Results from the Fermi Gamma-Ray Telescope Aldo Morselli

Μετρήσεις από το IACT HESS στο Κέντρο του Γαλαξία.



Αριστερά η σάρωση στην περιοχή του Γαλαξιακού κέντρου , παρατηρείται μεγάλη ροή ακτίνων γ TeV. Η περιοχή με την μεγαλύτερη ροή συμπίπτει με την θέση της γιγάντιας Μαύρης Οπής που βρίσκεται στο κέντρο του Γαλαξία. Δεξιά το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων γ . Η ενέργεια των αρχικών πρωτονίων που τις δημιουργούν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 PeV (10^{15} eV).

The H.E.S.S. Galactic plane survey (HGPS) [13] was performed with the H.E.S.S.-I Cerenkov telescope array in Namibia from 2004 to 2013. After several publications on a small ($\sim 10\%$) fraction of the current data set [14, 15], it is the deepest and most comprehensive, high resolution (~ 0.1 degrees) and sensitive ($\lesssim 2\%$ Crab Nebula point-source sensitivity) survey of the Milky Way in very-high-energy γ rays ($0.2 \lesssim E \lesssim 100$ TeV). Roughly ~ 2700 hours of high-quality



T. Stanev, High Energy Cosmic rays, Springer 2009.

The Fascinating TeV Sky

Felix Aharonian

The Very High Energy Sky from ~20 GeV to Hundreds of TeV

Διαδραστικός κατάλογος πηγών TeV