

Astronomie γ depuis le sol (et l'espace)

Aperçus de la préhistoire du domaine et
des activités en France

Arache Djannati-Atai

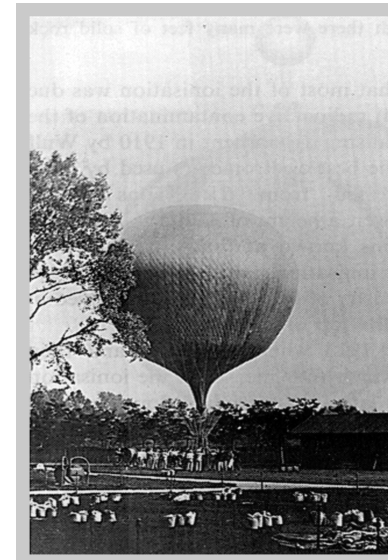
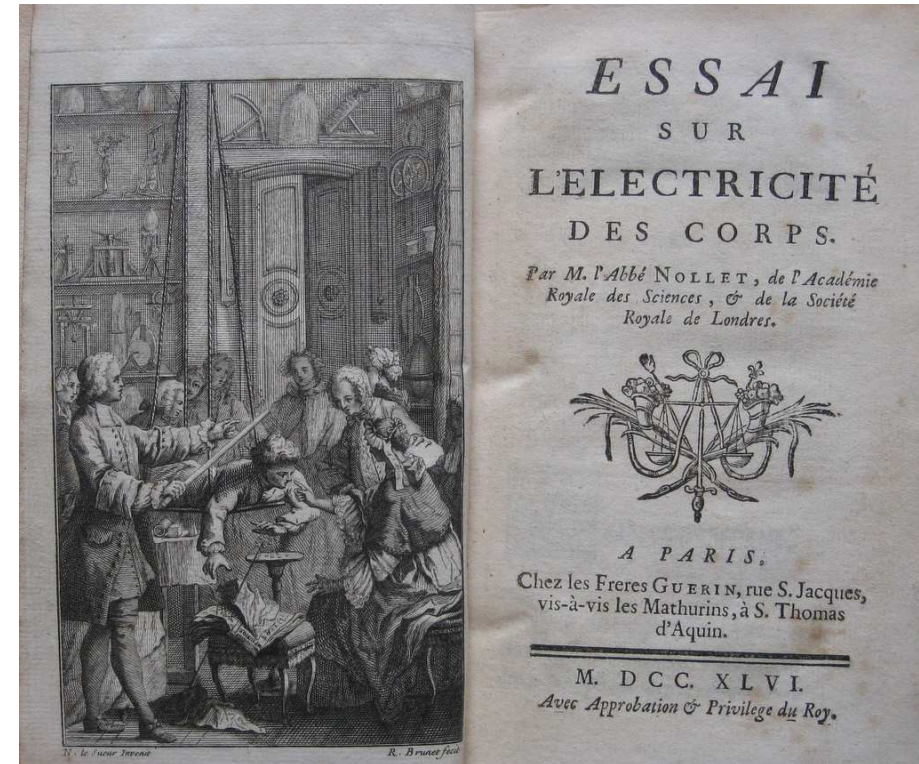
APC

Meudon, le 2 octobre 201

1740-1927

Découverte des Rayons cosmiques

- 1747-1750
 - L'abbé Jean-Antoine Nollet invente l'électroscope (sureau, feuille d'or)
- 1785 : Jean-Augustin de Coulomb
 - Première et deuxième lois
 - Invente la balance de torsion
 - Q : Cause de la décharge progressive d'un corps électrisé (support, air, humidité)
- 1907-1910 : Théodore Wulf
 - Expériences avec Paul Langevin sous-terre et en altitude (Tour Eiffel)
 - Baisse trop faible de l'ionisation
- 1911-1912 : Victor HESS
 - Vol à plus de 5 km : augmentation du taux d'ionisation
- 1912-1913 : Werner Kohlhooster
 - Confirmation : vol à 9 km
- 1913-1927 :
 - Controverses : phénomènes dans les hautes couches de l'atmosphère, comètes, supernovae!
- 1926 : Robert Millikan
 - Donne son nom aux "rayons cosmiques" convaincu qu'il s'agissait de photons
- 1934: B. Rossi, T. H. Johnson
 - Effet Est-Ouest : domination des particules positives
 - Aussi confirmé par l'expédition Pierre Auger et Louis Leprince-Ringuet de Hambourg à Buenos Aires



1932-1949 Naissance de la Radioastronomie

- Karl Jansky :
 - Ingénieur Bell Tel. Labs
 - 1932 : sources de parasites affectant les communications Trans-Atlantique
 - *A steady hiss type static of unknown origin*
 - 1935 : rayonnement provenant de tout le disque, plus intense vers le centre de la Galaxie
- Grote Reber :
 - Ingénieur, radioastronome amateur
 - Télescope de 10 m dans son jardin près de Chicago
 - Premières cartes à 160 MHz dès 1944
- Impulsion aux professionnels : Manchester, Cambridge (Angleterre), et CSIRO (Australie)
- Première source discrète : Cygnus [Hey, Parsons, Philipps, 1946]
 - Découverte par hasard (balayage 60 MHz de la VL) comme une source scintillante (1s)
 - Fluctuations dues à l'atmosphère
 - *Could only originate from a small number of discrete sources*
- Confirmation par Bolton & Stanley (1948) :
 - Interférométrie falaise/mer (Limite Sup de 8')

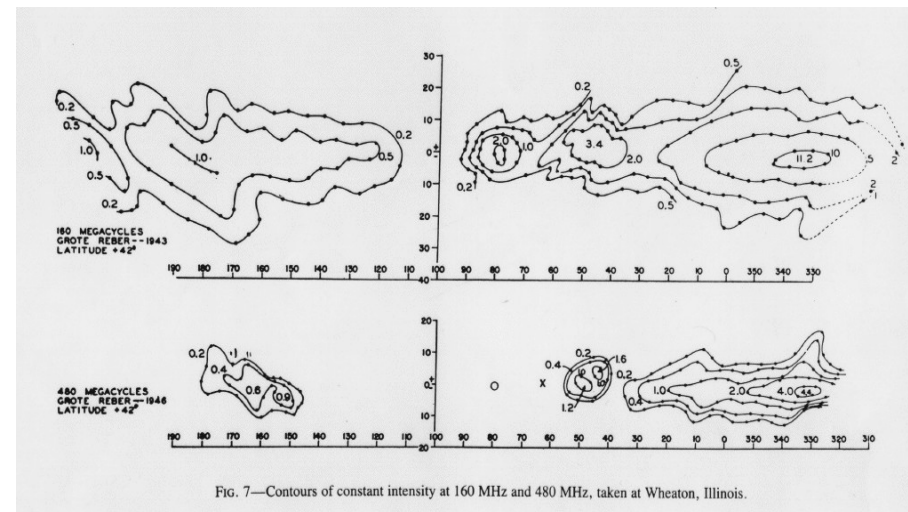
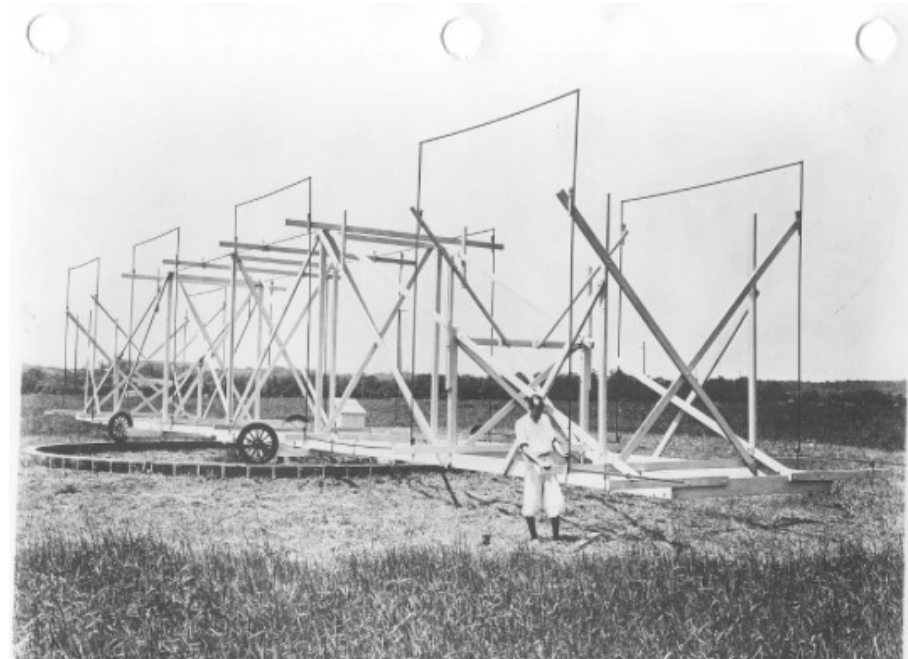


FIG. 7.—Contours of constant intensity at 160 MHz and 480 MHz, taken at Wheaton, Illinois.

Les années 1950 :

Jonction entre l'astronomie et l'étude des rayons cosmiques

Découverte d'une composante jusqu'alors inconnue de l'Univers :
le plasma relativiste

1950 Connexion Rayons Cosmiques ↔ Cosmos

- Karl-Otto Kiepenheuer
allemand
spécialiste physique solaire
- Rayonnement radio 160 MHz diffus :
 - N'est pas un corps noir : processus **non thermique**
 - ne peut provenir d'étoiles à moins de suppositions **ad hoc** (oscillation cohérente de plasma sur des zones étendues)
 - Plaide pour une source diffuse comme Fermi en 1949
 - En opposition avec
Edward Teller : sources discrètes
Alfvén & Horlofson : radio-stars
 - Sources discrètes
vs
Processus diffus/collectif

Kiepenheuer, K. O. Cosmic rays and radio astronomy.

It will be shown that the cosmic radiation in our galaxy is of sufficient power to explain the general galactic noise in the meter-wave band. It is now known that this galactic radio emission is not a thermal free-free radiation of interstellar gas, as was first believed, since the electronic temperature would then have to be of the order of 100,000°. All spectroscopic evidence leads to values around 10,000°. Stars could be considered as sources only under very artificial assumptions. The observed intensities, which have

Cosmic Rays as the Source of General Galactic Radio Emission

K. O. KIEPENHEUER

Yerkes Observatory, University of Chicago, Williams Bay, Wisconsin

June 20, 1950

1949-1954 Polarisation : la clef!

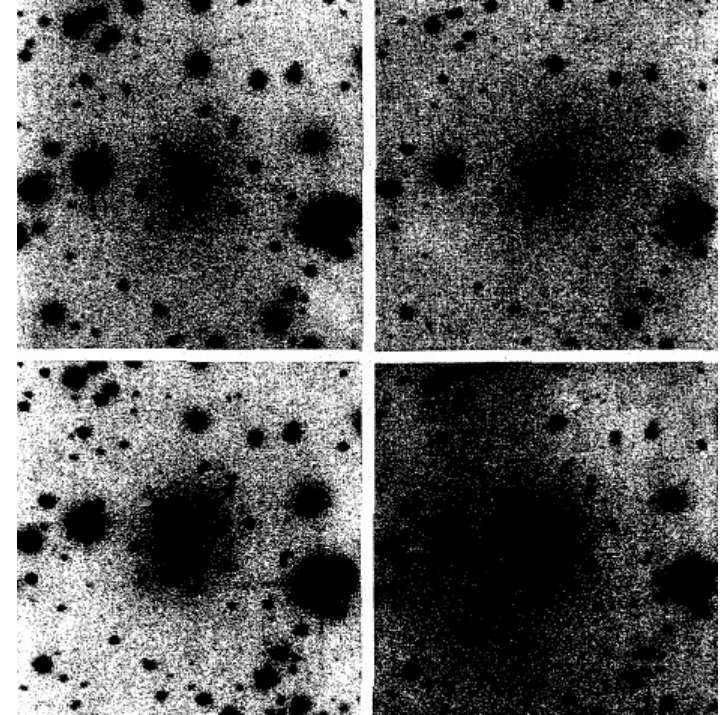
- 1949 : Bolton, Stanely, Slee:
 - Identification de Taurus A avec le vestige du Crabe
- 1953 : Iosif Shklovskii
 - Continuum de l'émission de la nébuleuse du Crabe : rayonnement synchrotron
- 1954 : Victor Dombrovsky et Mikhail Vashkadize
 - Confirmation spectaculaire : polarisation linéaire en optique
 - Puis : Vitkevitch en radio
- 1954 : Baade et Minkowski identifient Cas A
 - Mais : *since there is every reason to believe that the Cassiopeia source has nothing to do with supernovae, the attempt by I.S. Shklovsky to identify the source with a new star as A.D. 369 is beside the point.*
- Confirmation de l'existence de vastes quantités d'électrons énergétiques au sein de ces vestiges
- **Questions** : source d'énergie, mécanisme de transformation en particules relativistes et origine du champ magnétique au sein des vestiges



1949-1954 Monde Extragalactique

Cyg A

- 1954 : Baade et Minkowski
 - Identification de Cygnus A avec une galaxie de $z=0.057$
 - La luminosité radio dépassait de six ordres de grandeur celle de la Voie Lactée
 - Sous l'hypothèse d'un rayonnement synchrotron : vastes quantités de matière relativiste
- 1954 -1960 : Geoffrey Burbidge
 - Hyp. équipartition : pour quelques radiogalaxies au minimum des énergies colossales d'un million de masses solaires étaient nécessaires
- Autre fait surprenant :
 - L'émission radio provenait des lobes radio, bien loin des confins des galaxies
 - La matière relativiste devait être expulsée en directions opposées sur des Mpc
- **Questions** : l'origine de l'énergie, des mécanismes de sa transformation et de son transfert se posaient de manière encore plus aigüe dans le monde extragalactique

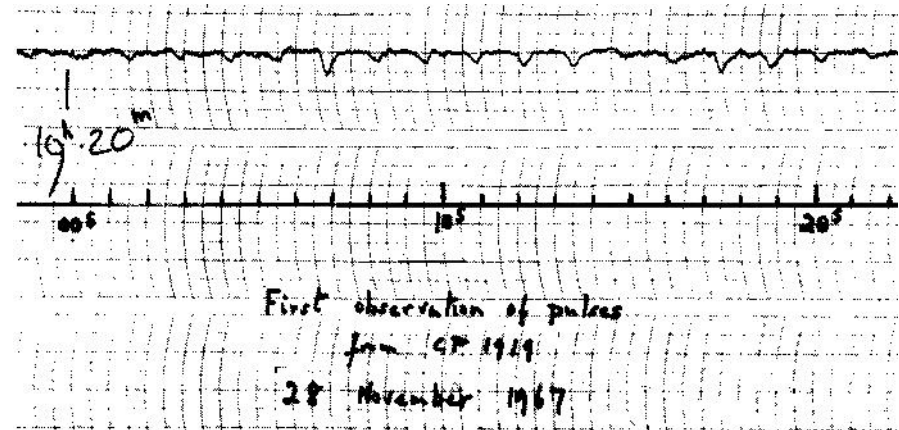


A l'aube des années 1960

La question de l'origine des rayons cosmiques, initialement confinée à l'étude des particules détectées par compteurs et ballons près de la Terre, se trouvait ainsi projetée dans le cadre beaucoup plus général de la compréhension de l'origine et de la nature des plasma relativistes dans la Galaxie et au-delà

1967-1969 Découverte du premier pulsar : Solution pour la source d'énergie

- 1967: Jocelyn Bell et Antony Hewis
 - Découvrent le premier pulsar CP 1919+21 de $P=1.33$ s avec le télescope de Cambridge
 - Observations initialement dédiées à la mesure de la scintillation des radiosources (fluctuations de densité du plasma interplanétaire)
 - Certains modèles de naines blanches pouvaient encore tenir une période de rotation d'une seconde, mais à la limite de rupture.
- Découverte de deux pulsars de périodes bien inférieures:
 - PSR 0833-45 $P= 89$ ms (Vela)
 - NP 0532 $P= 33$ ms (Crabe)
 - hors de doute le fait qu'il devait s'agir là d'astres bien plus compacts que les naines blanches
- Dès 1934 Baade et Zwicky avaient prédit l'existence de tels astres compacts en tant qu'étape finale possible de la vie stellaire
- Deux mois avant la découverte de CP 1919+21 : Franco Pacini
 - Le rayonnement dipolaire d'une étoile à neutrons magnétisée et oblique comme source d'énergie pour la nébuleuse du Crabe
- Dès 1957 : J. H. Piddington
 - la rotation rapide d'un objet magnétisé pouvait remplir la nébuleuse avec un champ magnétique toroïdal \perp à l'axe du rotateur central pour expliquer la zone de polarisation quasi uniforme au centre



1934 Baad & Zwicky Intuitions...

- Deux ans seulement après la découverte du neutron par James Chadwick
- Distinction Novae et Super-Novae
 - Taux sousestimé à 1/millénaire
- Supernovae : source des rayons cosmiques
- Remarque additionnelle :
 - *With all reserve we advance the view that a super-nova represents the transition of an ordinary star into a neutron star, consisting mainly of neutrons. Such a star may possess a very small radius and an extremely high density*
- Ils s'inspiraient de Ralf Fawler (1925) et de Subrahmanyan Chandrasekhar (1931)

ON SUPER-NOVAE

BY W. BAADE AND F. ZWICKY

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON AND CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, PASADENA

Communicated March 19, 1934

COSMIC RAYS FROM SUPER-NOVAE

BY W. BAADE AND F. ZWICKY

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON AND CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, PASADENA

Communicated March 19, 1934

[Proc. NAS 20 (1934) 254-259]
[Proc. NAS 20 (1934) 259-263]

1966-1969 Avancée décisive: Association de NP 0532 avec le Crabe

- 1966 : Iosif Shklovskii
 - S'appuie sur la cassure spectrale entre la radio et l'optique (synchrotron) et jusqu'aux rayons X
 - Démontre la nécessité d'une injection permanente d'électrons
 - Estime l'ordre de grandeur de la puissance totale nécessaire à $\sim 10^{38}$ erg/s
- 1969 : Thomas Gold
 - Calcule la puissance rotationnelle du pulsar
 - Démontre son accord avec l'estimation de Shklovskii
- Peu de doute sur rôle du pulsar en tant que source d'énergie pour la nébuleuse
- **Questions** : Structure interne des étoiles à neutrons, la nature de l'environnement immédiat des pulsars et l'électrodynamique, mécanisme d'émission des signaux pulsés radio

REMARKS ON THE SYNCHROTRON-RADIATION SPECTRUM OF THE CRAB NEBULA

I. S. Shklovskii

Shternberg Astronomical Institute
Translated from *Astronomicheskii Zhurnal*, Vol. 43, No. 1,
pp. 10-12, January-February, 1966
Original article submitted October 20, 1965

Rotating Neutron Stars and the Nature of Pulsars

by
THOMAS GOLD
Cornell-Sydney University Astronomy Center,
Cornell University,
Ithaca, New York

Recent observations of pulsars support the rotating neutron star hypothesis.

[Sov. Astron. AJ 10 (1966) 65]
[Nature 221 (1969) 25]

1963 Découverte des Quasars

- Sources radio mystérieuses :
 - Toutes petites dimensions angulaires
 - Associées pour certaines à des objets ponctuels en optique de spectre très étrange
 - *Radio-Stars*
- Positionnement précis de 3C 273 par Cyril Hazard par occultation lunaire
- Puis identification par Maarten Schmidt à $z=0.158$
- Une immense surprise
 - La luminosité optique de 3C 273 dépassait d'un facteur ~ 100 celle des galaxies les plus lumineuses
 - Et en radio, celle des radiogalaxies dont on avait déjà du mal à expliquer la source d'énergie
- Dès 1960 : Greenstein avait les indications suffisantes pour la bonne valeur de z de la contrepartie de 3C 48
- Confesse qu'il avait écarté une valeur élevée de z de peur de passer pour quelqu'un d'encore plus radical que sa réputation ne laissait croire. . .
- Variabilité spectaculaire
 - 1963 : Archives optiques de Harvard : variabilité à une échelle de quelques années de 3C 273
 - 1965 : Radio : facteur 12 en 3 ans
 - Confinement dans de tout petits volume; densités d'énergie énormes
- **Personne n'avait anticipé de tels phénomènes, contrairement au cas des étoiles à neutrons**

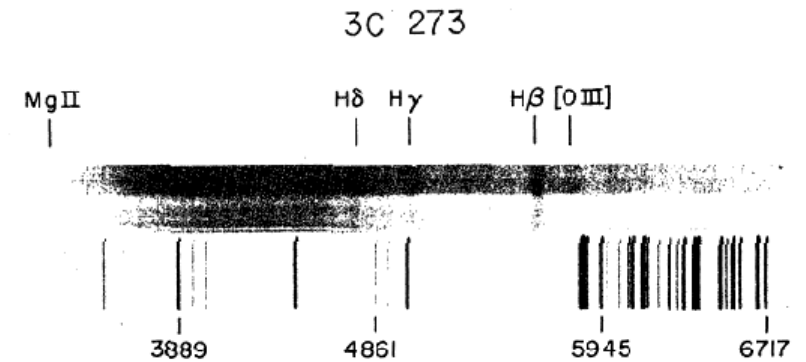
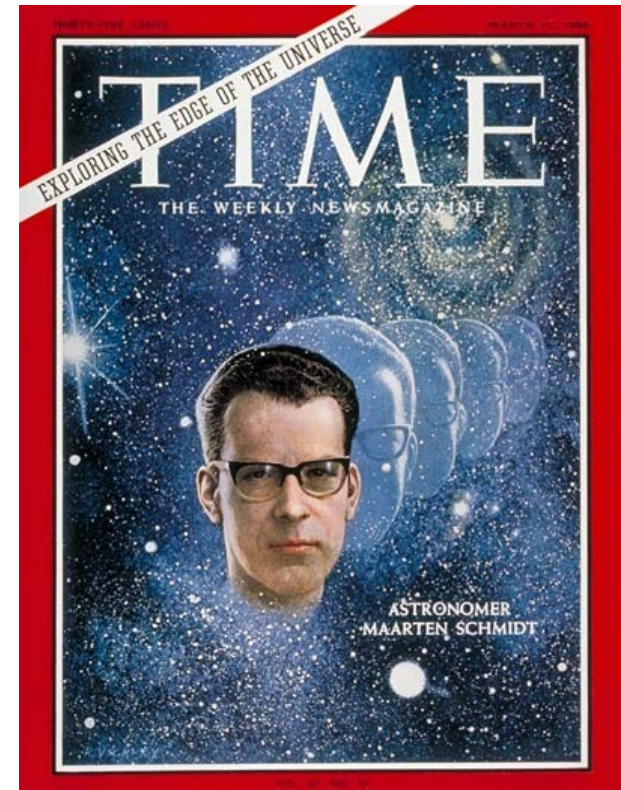


FIG. 2.— Spectrum of the quasi-stellar object 3C 273B, 400 Å/mm original, 103a-F, January 23, 1963. The comparison spectrum is H + He - Ne. Exposure over the upper half of slit was three times that over the lower half. Redshifted emission lines of H and [O III] are indicated; also the barely visible line of Mg II, confirmed on denser exposures.



1964-1966 Accrétion, astres effondrés

Sources relativistes

- 1964 : Edwin Salpeter et Yakov Zeldovitch
 - Provision immense d'énergie par l'accrétion de matière par un corps statique, dense puis effondré
- 1966 : Martin Rees s'inspirant de Shklovskii
 - Hypothèse d'une expansion **relativiste** des parties centrales
 - Contraintes à la baisse sur la taille
 - Solution de la *catastrophe inverse Compton*
 - Prédiction : mouvements super-luminiques 5 ans avant leur découverte:
 - *The most important feature of the model described [...] is the simple fact that an object moving relativistically in suitable directions may appear to a distant observer to have a transverse velocity much greater than c .*
- Mécanismes de façonnage des zones d'émission radio (jets!), fraction et transport continu de l'énergie depuis le noyau jusqu'aux lobes radio
 - 1974 : Blandford & Rees : le paradigme : trou noir central, deux jets par pression de radiation
 - 1977 : Blandford & Znajek : rotation du trou noir
 - 1982 : Blandford & Payne: interaction entre le disque d'accrétion ionisé et un champ magnétique à gde échelle
- **Questions** : contenu des jets, plasma normal ou de paires, magnétisation, densité de masse, force de collimation,...

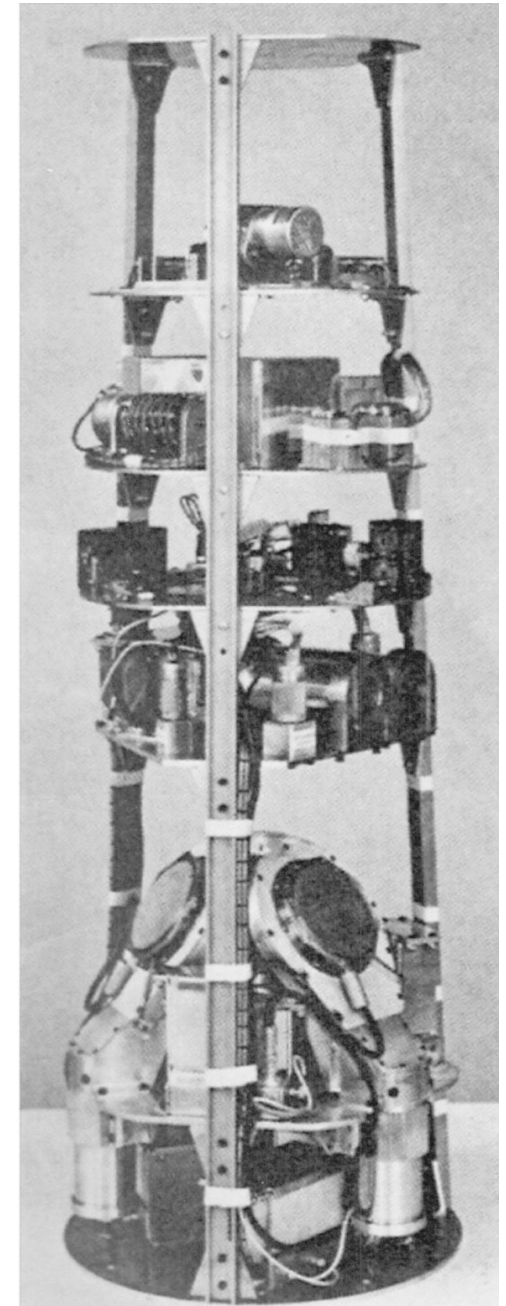
La décennie 1960

a ainsi été cette période décisive où, grâce aux progrès accomplis en astronomie optique et en radioastronomie, le concept d'**objets compacts** –étoiles à neutrons et trous noirs– et le terme de **violence dans le cosmos** ont fait leur entrée en astrophysique à travers la découverte des **quasars** et des **pulsars** et où, corrélativement, *la nécessité de recourir à la relativité générale* s'est imposée de plus en plus à la communauté astrophysique. Le premier Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (1963) marque symboliquement cette évolution.

1962-1968 Prémices de l'astronomie X

Invention des binaires X

- 1962 : Giacconi, Gursky et al. :
 - Découverte inattendue de la première source X, Sco X-1
 - Seules sources projetées : la couronne solaire et la fluorescence de la lune
- 1967 : Iosif Shklovskii
 - L'énorme luminosité en X ; faible magnitude de la contrepartie optique
 - Processus d'accrétion par une étoile à neutrons
 - Publication datant du 3 février 67 : quelques mois avant la découverte du premier pulsar!
- 1968 : Kevin Pendergast et Geoffrey Burbidge
 - Nécessité du transfert de moment angulaire : formation d'un disque
 - Les binaires X étaient inventées avant même leur véritable découverte en 1971 avec *Uhuru*.



AS&E

1970-1978 Emergence de l'astronomie X Avec le satellite *Uhuru*

- 1970 (déc) : Lancement d'*Uhuru*
- Mettait fin à une période de tâtonnements due à la variabilité des sources et la brièveté des vols en roquette
- Diversité des sources dès les tout premiers résultats (février 1971) :
 - Découverte en X des galaxies de Seyfert NGC 1451, NGC 1275, mesures positions de Sco X-1, Cyg X-1, Cyg X-2 et mesures Cas A, M 87, 3C 273 et Cen A
- 1978 : 4ème catalogue : 339 sources dont 1/3 de binaires X
- Laboratoires formidables pour l'étude des processus d'accrétion et des étoiles à neutrons
 - Mesure précise des paramètres fondamentaux, masse et rayon
 - Équation d'état de la matière
- Mesure précise des masses : recherche de candidats trous noirs, par ex Cyg X-1

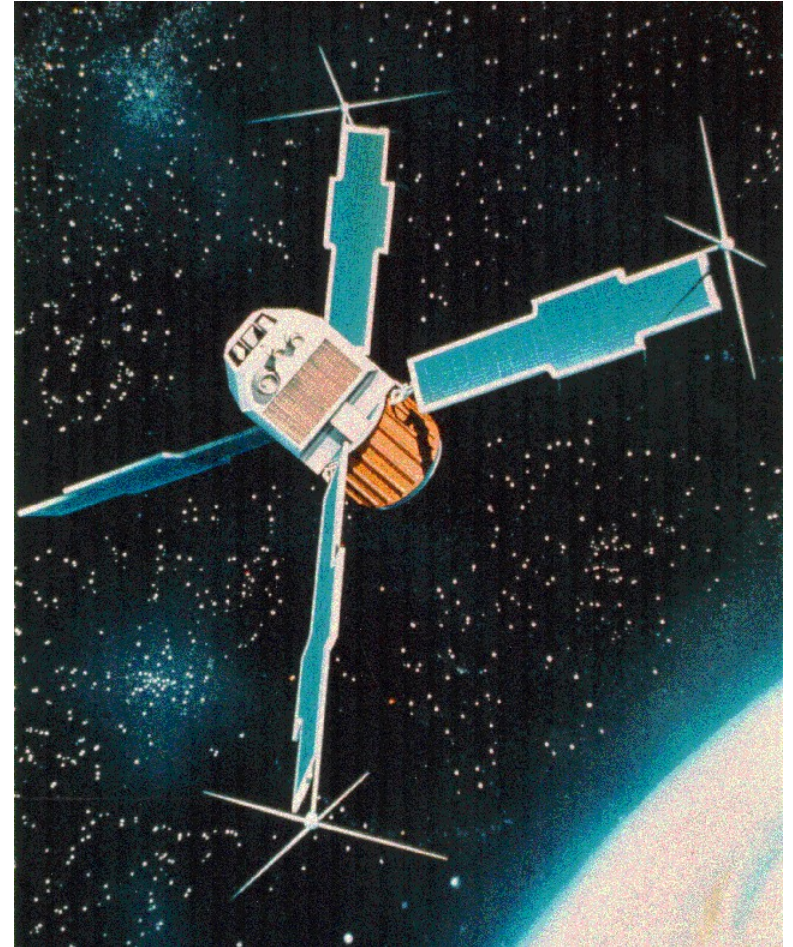
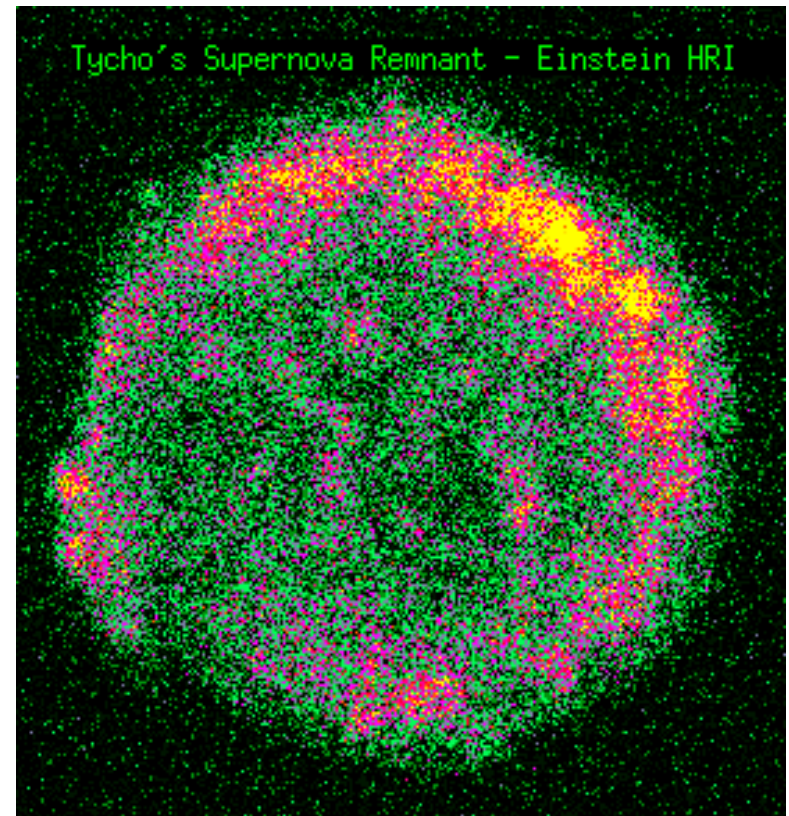


Image d'artiste!

1970-80's Accélération de l'astronomie X

Marche vers la maturité

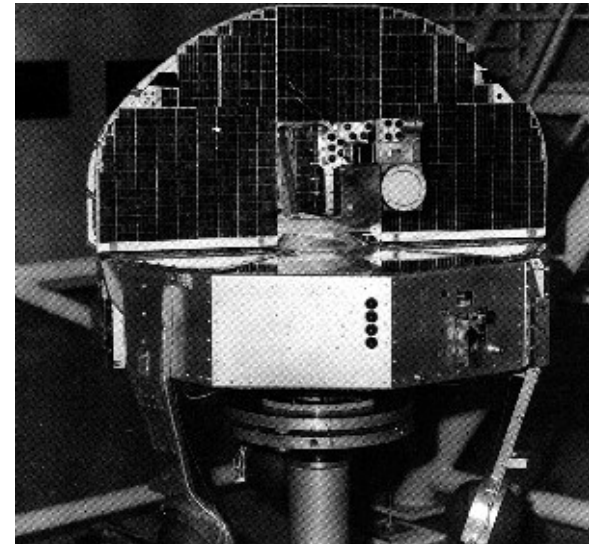
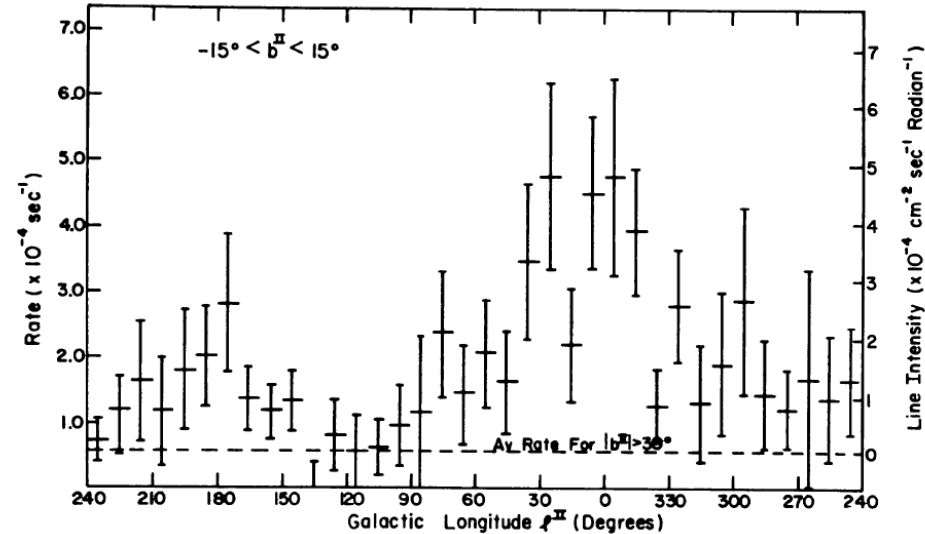
- En moins d'une décennie 7 instruments embarqués
- Apogée avec *Einstein*
 - Deux spectromètres et un imageur d'une résolution angulaire de quelques arc-secondes
- Des dizaines de sources dans M31
- Etude détaillée de toutes les classes de sources X :
 - Pulsars jeunes, vestiges de SNe, AGNs, radiogalaxies, mais aussi gaz chauds à l'échelle des amas
- Images saisissantes des vestiges
 - Nébuleuse du Crabe, Kepler, Cas A, SN 1006, Cyg Loop
 - Diversité de la morphologie
 - Progrès sans précédent dans la compréhension de la structure mais aussi de la physique à l'aide de la spectro-imagerie X
- 1980s : EXOSAT et GINGA
- Il faudra attendre les années 1990
 - ROSAT, ASCA, RXTE, puis Chandra et XMM-Newton



1960's

Préhistoire de l'astronomie γ spatiale

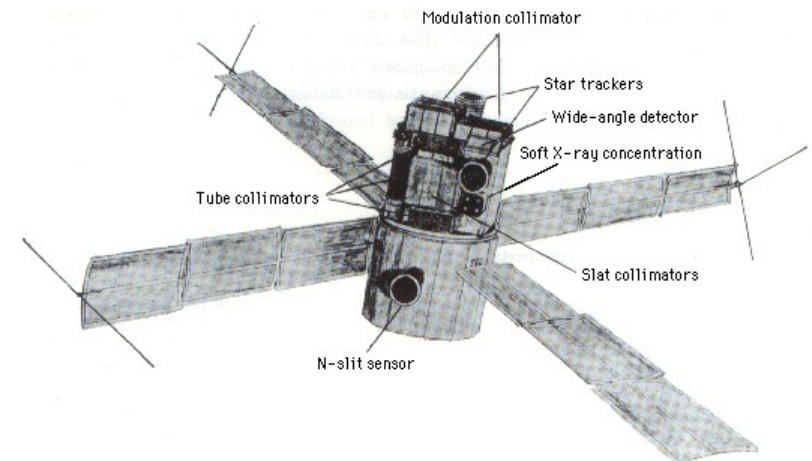
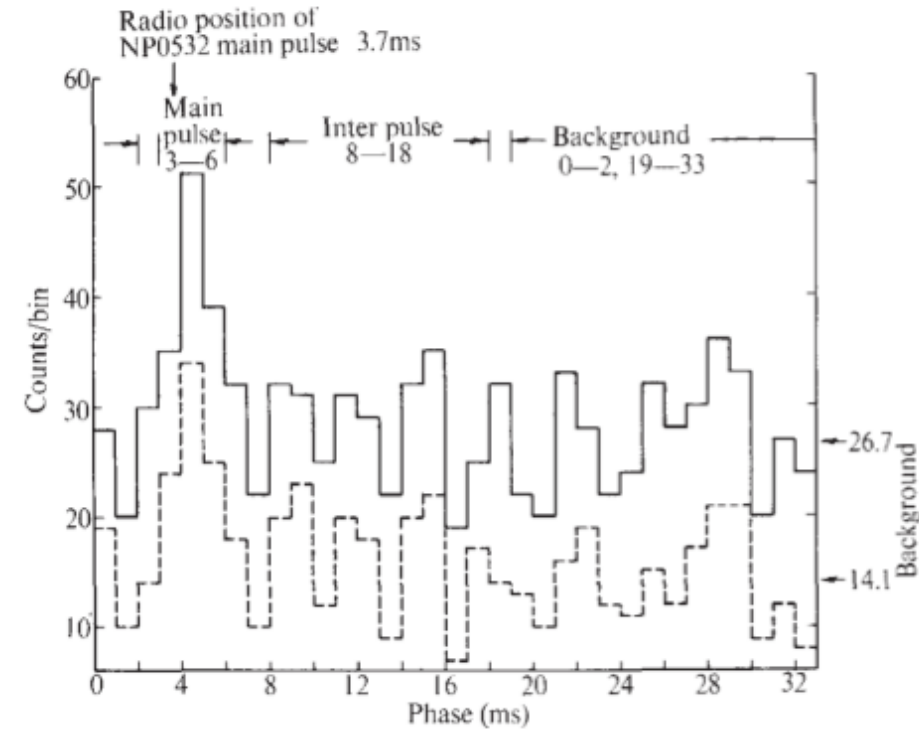
- 1958 : Philp Morrison
 - Rôle spécifique et privilégié des rayons γ en tant que sondes des processus de haute énergie du cosmos
 - Perspectives optimistes basées sur 4 types de sources 200 keV-400 MeV :
 - éruptions solaires, nébuleuse du Crabe (raies nucléaires du Ra^{226})
 - M87
 - Colliding pair of Cyg A radio source
 - Annihilation cosmologique de la matière-antimatière
- 1967 : lancement OSO-III
 - Seuil de 70 MeV; orbite 350 km
 - Premiers rayons γ d'origine cosmique
 - Plan de la Galaxie, excès dans la direction du centre
 - Interprétation : désintégration π_0 dues aux collisions ions-matière interstellaire suivant les travaux de Gould & Burbidge et Ginzburg & Syrovatsky du côté russe



1970's

Les prémices de l'astronomie γ spatiale

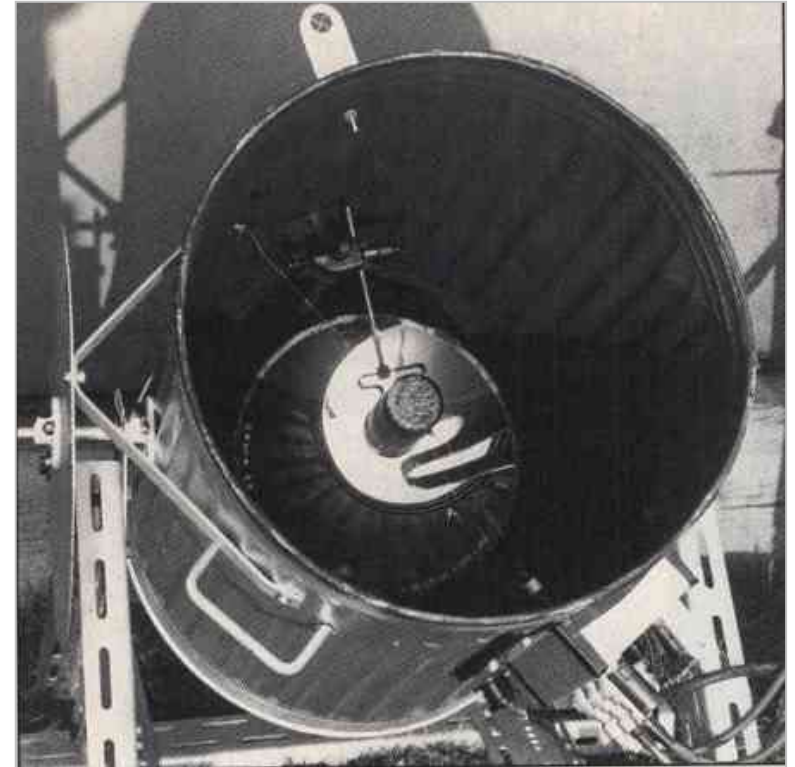
- 1972 : P. Albats et al. (EU/Australie)
 - Première détection significative du pulsar du Crabe en rayons γ
 - Indication à 3.5 écarts pour celui de Vela (mais un seul pic!)
- 1972 : satellite SAS-II
 - 8 mois, 8000 γ
 - Confirmation plan galactique, et détection du pulsar de Vela
 - Emission isotrope extragalactique
 - Cyg X-3 (publié en 1977)
- 1973 : dévoilement de la découverte des flashes γ intenses par les satellites militaires nord-américains *Vela* détectés dès 1967
- Une des découvertes les plus importantes du siècle: les sursauts gamma



1960's

Préhistoire de l'astronomie γ depuis le sol

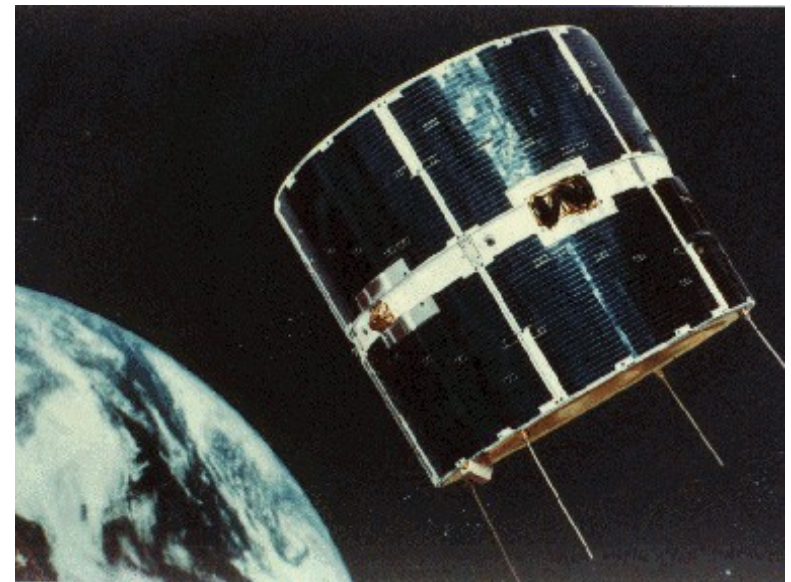
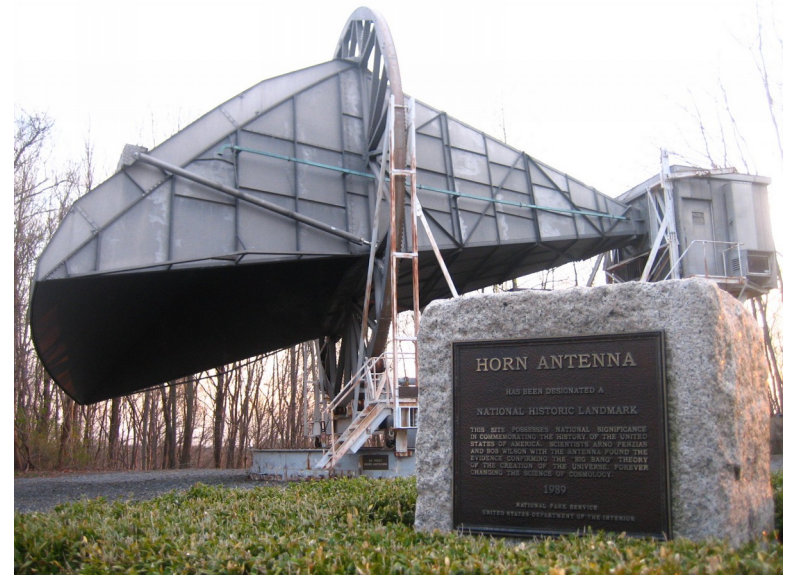
- 1953 : Galbraith & Jelley
 - Motivés par une prédiction de P. M. S. Blackett découvrent l'émission Tcherenkov des gerbes atmosphériques
 - Instrumentation rudimentaire: photo-multiplicateur de 5cm, miroir parabolique de 25 cm, un oscilloscope, le tout dans une poubelle près la centrale Harwell
- 1959 : prédiction de Cocconi
 - Emission intense au TeV de la nébuleuse du Crabe (processus à base d'ions)
- 1960-63 : A. E. Chudakov et al.
 - Tentatives à base de miroirs DCA, seuil de 4 TeV, sensibilité 25 x Crabe
- Nombre de dispositifs analogues
 - Groupes irlando-anglaise, américains, indiens,...
- 1968 : Giovanni Fazio, Trevor Weekes
 - Construction du premier télescope dédié Whipple (Arizona) : 10m de diamètre
 - Motivation principale : prédiction par Gould d'un flux ($> \text{TeV}$) $\sim 10^{-10}$ ph/cm²/s basé sur un modèle synchro-Compton; surestimé d'un facteur 5 seulement...



1970's

Traversée de désert au sol Décollage lent pour le spatial

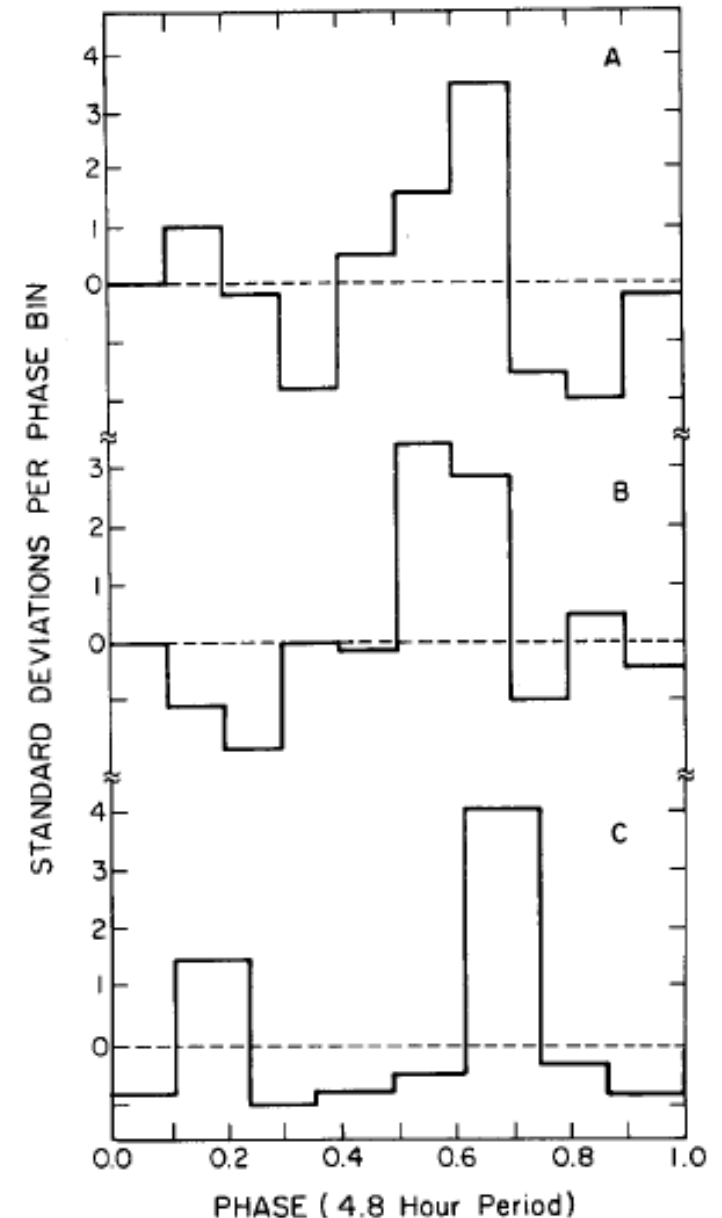
- 1965 : Penzias et Wilson
 - Découvrent le fond cosmologique micro-onde
 - Gould et Shreder montrent l'opacité de l'Univers aux photons du PeV
 - Perspective sombre pour l'astronomie γ au PeV
- 1975 : satellite COS-B
 - Orbites haute (90000 km) : forte exposition aux cosmiques
 - 6 ans de vol, 25 sources, dont 4 identifiées : pulsars Crabe et Vela, 3C 273 et le nuage ρ Oph
 - Absence d'une connaissance précise de la distribution de la matière interstellaire : fond diffus considérable méconnu
 - Cyg X-3 : pas de signal



1980's

Redémarrage au sol sur une piste peu solide

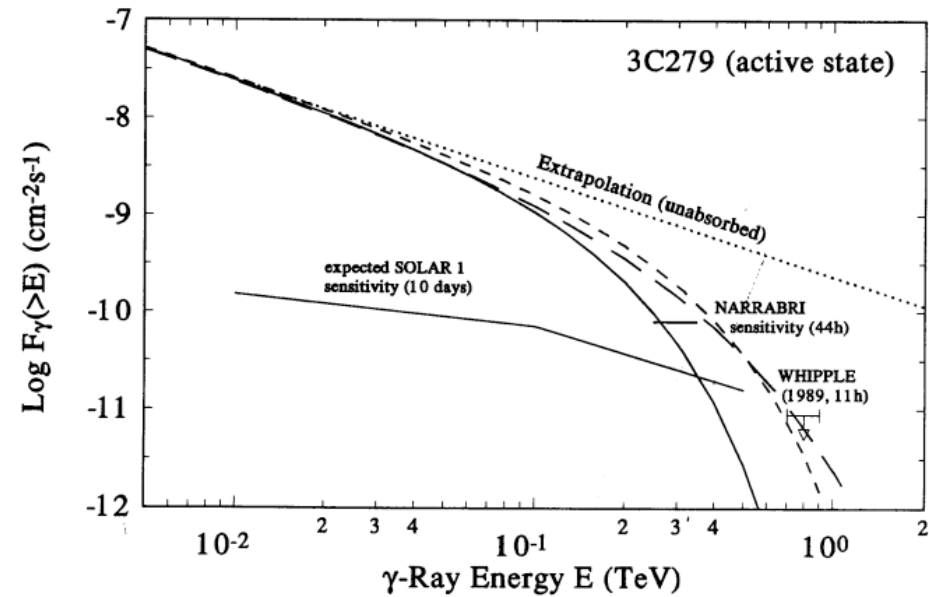
- 1980-85 : Détection de Cyg X-3 à la période de 4.8 h du système binaire
- Par une dizaines de groupes aussi bien au TeV qu'au PeV, mais dans des intervalles de phases différents
- Trois équipes aux E.U. à l'aide de télescopes déclenchés en coïncidence, au TeV
- Le niveau de confiance restait inférieur à 5 écarts
- 1983 : publication au PeV des donnés du réseau Kiel
- Seulement à 2.5 écarts, mais controverse sur la nature des particules : taux de muons compatibles avec des ions!
- Confirmation par divers groupes, Haverah Park (R.U.), Soudan-1 et Nusex
- Mais résultats négatifs des expériences Fréjus (Fr), Kamioka (Jp) et Baksan (Caucase)
- 1988 : revue critique Chardin & Bonnet-Bidaud, Chardin & Gerbier
 - Toutes les mesures statistiquement fragiles et sujets aux effets systématiques
 - Celle de SAS-II y est remise en cause dans la foulée
 - La découverte par Fermi-LAT du signal au GeV de Cyg X-3 plus de 20 ans après...
- S'ajoutaient à ce paysage d'autres détections de signaux périodiques/transitoires Her X-1, Cen X-3, LMC X-4, les pulsars du Crabe, Vela, mais aussi *ms* comme B1937+21
- Un vif intérêt avait déjà été soulevé...



1990's

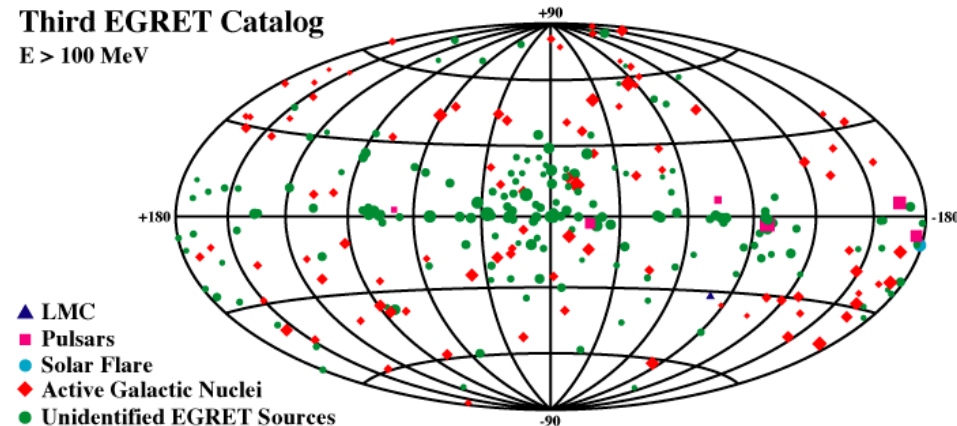
L'ouverture du ciel γ haute énergie avec *CGRO/Egret*

- 1991 : Deuxième grand observatoire de la NASA, avec 4 instruments à bord:
 - Egret (> 100 MeV),
 - Comptel (1-30 MeV),
 - OSSE (Spectro raies)
 - BATSE (sursauts γ)
- Après 15 mois, Egret détectait 9 quasars dont 3C 279 de $z=0.54$, et sa variabilité à l'échelle de 2 jours
- Dès décembre 1991 : Floyd Stecker et Okkie de Jager
 - Implication cruciale de la distance cosmologique de 3C 279 : le spectre dur de celle-ci ouvrait la voie pour le sondage de la lumière IR intergalactique
- Après 10 ans en orbite, Egret a détecté > 70 AGNs, véritable révolution
 - Prépondérance de la puissance au GeV
 - Rôle essentiel dans l'émergence d'une vision unifiée des AGNs et les blazars en particulier
 - $\gamma > 30$ MeV des sursaut + indication pour une composante retardée pour dans le GeV
 - Mesure du diffus extragalactique
 - 5 pulsar gamma (+2)
- Ces découvertes soulevaient plus de questions qu'elles n'apportaient de réponses...



Third EGRET Catalog

$E > 100$ MeV



1988-2004 Thémis : Le berceau de l'astronomie γ depuis le sol en France

- 1985 : formation d'un groupe de travail issus principalement des laboratoires de physique des particules [1]
- “En vue d’obtenir une exploration de la matière à des énergies qui ne seront pas disponibles auprès des accélérateurs actuels ou prévisibles”
- Première tentative de retour vers le cosmos pour la physique des particules, 30 ans après la création du CERN.
- Communauté astrophysique, Philippe Goret du Sap/CEA : exploration du site de Thémis/Pyrénées Orientales
- Objectifs : Dispositifs Tcherenkov à haute résolution temporelle
- Convergence entre deux communautés : début d'une série de 4 expériences :

ASGAT, THEMISTOCLE,
CAT et CELESTE



• [1] Claude Ghesquière, (PCC) Collège de France, 1986

1989

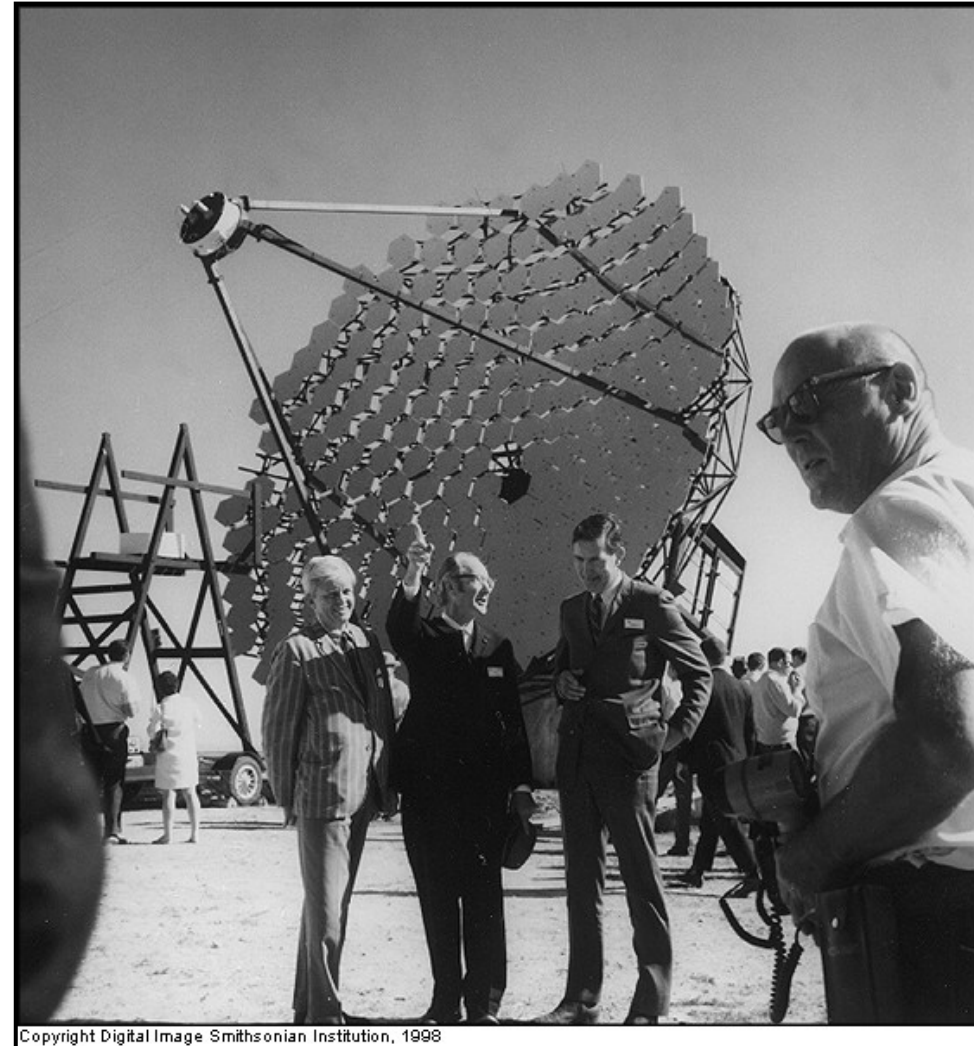
Première détection significative de la nébuleuse du Crabe

- Annoncé au 173ème meeting de l'AAS à Boston
- Signal obtenu à un niveau de confiance de 9 écarts-standard après 100h d'observations
- Progrès notable : pouvoir de discrimination grâce à une caméra à 37 pixels
- Simulations numériques de M. Hillas (1985)
- Signal espéré pour plus de 20 ans par Trevor Weekes!
- Article de revue 1988 : n'y figuraient encore que des sources loin d'être solides; on y lit une certaine solitude de l'auteur :

Having been involved (somewhat forlornly) in this field of research for the past two decades, the author must also confess a selfish motive, namely to justify the long years of effort before believable results emerged.

- Dernière phrase du résumé soumis :

There is no reason to doubt that primaries are gamma-rays.



Copyright Digital Image Smithsonian Institution, 1998

1989

Première détection significative de la nébuleuse du Crabe

- Annoncé au 173ème meeting de l'AAS à Boston
- Signal obtenu à un niveau de confiance de 9 écarts-standard après 100h d'observations
- Progrès notable : pouvoir de discrimination grâce à une caméra à 37 pixels
- Simulations numériques de M. Hillas (1985)
- Signal espéré pour plus de 20 ans par Trevor Weekes!
- Article de revue 1988 : n'y figuraient encore que des sources loin d'être solides; on y lit une certaine solitude de l'auteur :

Having been involved (somewhat forlornly) in this field of research for the past two decades, the author must also confess a selfish motive, namely to justify the long years of effort before believable results emerged.

- Dernière phrase du résumé soumis :

There is no reason to doubt that primaries are gamma-rays.

46.10

Detection of TeV Gamma Rays from the Crab Nebula.

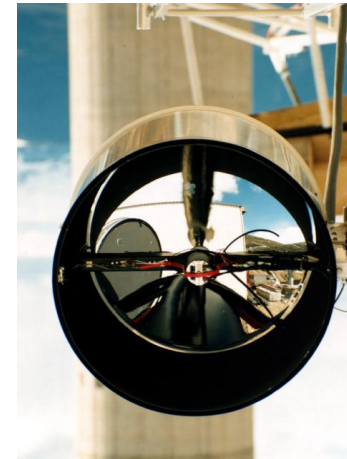
T.C. Weekes, P. Kwok, K.G. Gibbs, (Smithsonian Astro. Obs.), R.C. Lamb, D.A. Lewis, D. Macomb, G. Vacanti, (Iowa S. Univ.), A.M. Hillas, (Univ. of Leeds), D.J. Fegan, N.A. Porter, P.T. Reynolds, (Univ. Coll., Dublin), M.F. Cawley, (St. Patricks Coll., Maynooth).

A flux of 0.7 TeV gamma rays has been detected from the direction of the Crab Nebula using the atmospheric Cherenkov imaging technique. With the Whipple Observatory 10 m optical reflector operating as a 37-pixel camera, the Crab Nebula and a comparison region were each observed for more than 100 hours; events were preferentially selected that matched the gamma-ray shower image characteristics predicted by Monte Carlo shower simulations. More than 98% of the background was thus rejected, yielding a gamma-ray excess at the 9.0 sigma level from the direction of the Crab Nebula. This was 0.2% of the cosmic ray background and corresponded to a flux of 1.8×10^{-11} photons-cm⁻²-s⁻¹ (with a factor of two uncertainty in both flux and energy). No evidence was found for variability over the epoch 1983-88 suggesting that this might be the long sought (albeit weak) standard candle for TeV gamma-ray astronomy. Less than 25% of the detected gamma rays were pulsed at the frequency of the pulsar in the Crab Nebula. There is no reason to doubt that the primaries are gamma rays.

Research supported by the U.S. Department of Energy and the N.B.S.T. of Ireland.

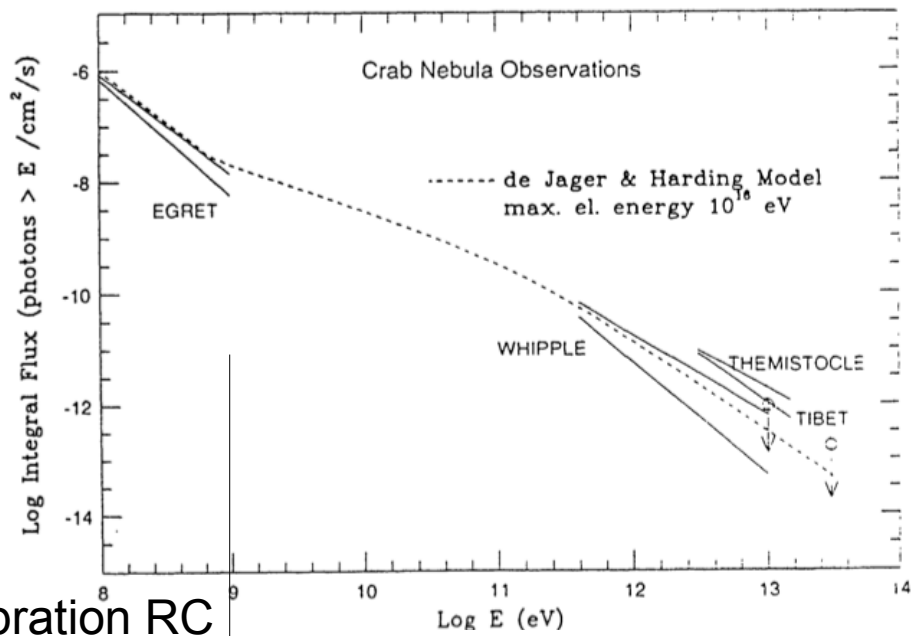
1988-1995 Themistocle : une expérience d'astrophysique des particules

- 1990 : début prise de données sur la nébuleuse du Crabe
- Objectifs :
 - démontrer à la fois la faisabilité de l'expérience et la réalité des faisceaux au-delà du TeV
- 1991 : premier signal
 - 60 h de données, 3-10 TeV à 3.5 écarts standard
- Février 1992 : annonce au 26ème ICHEP/Dallas d'un signal à 6.5 écarts
- Première confirmation du signal au TeV du Crabe par une méthode alternative, tout en étendant la gamme en énergie
- La détection par ASGAT suivait de peu :
 - 100h, à 5.7 écarts, > 600 GeV
- La première source au TeV était établie!
 - Aux effets systématiques près...

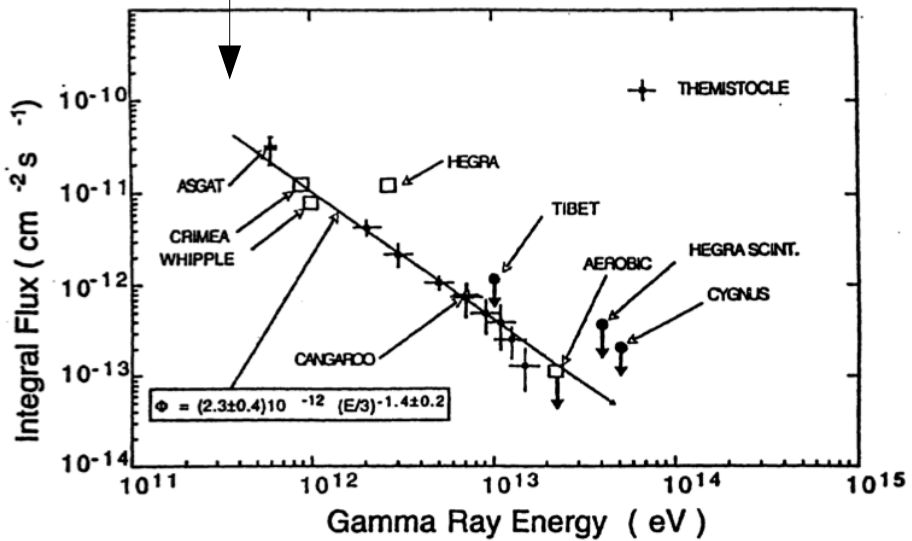


Themistocle Effets systématiques Application astrophysique

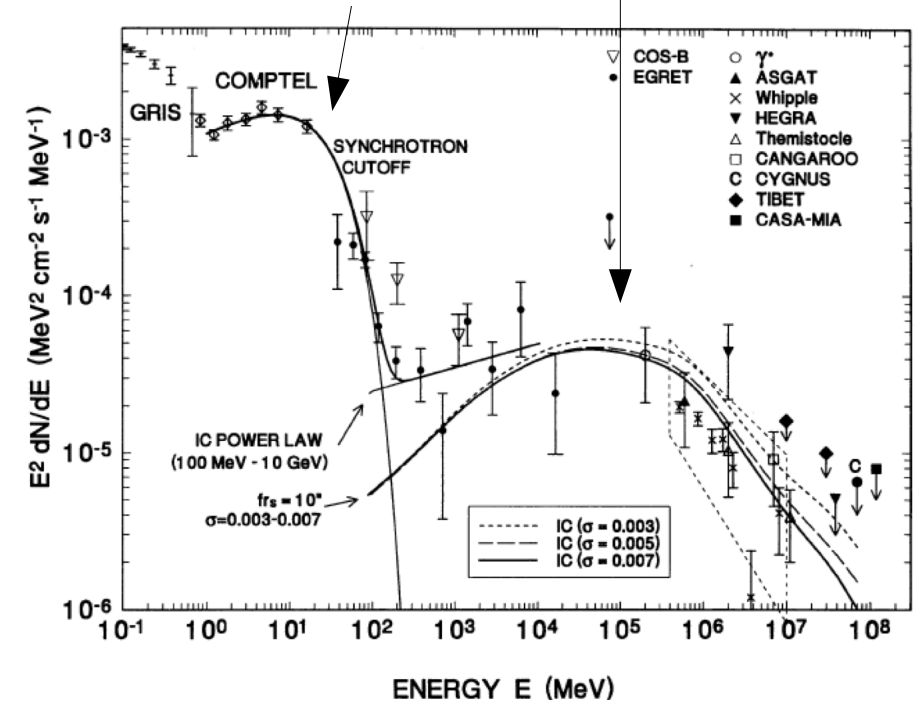
[Weekes1996]



Calibration RC

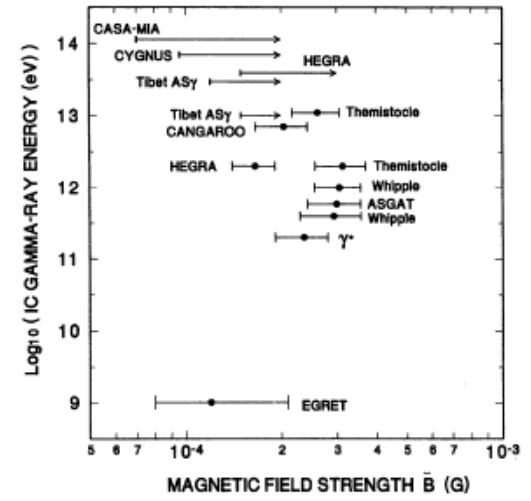


Synchrotron Inverse Compton (IC)



Première application astrophysique :
Contrainte sur l'intensité du champ magnétique de la nébuleuse

[De Jager & Harding 1996]



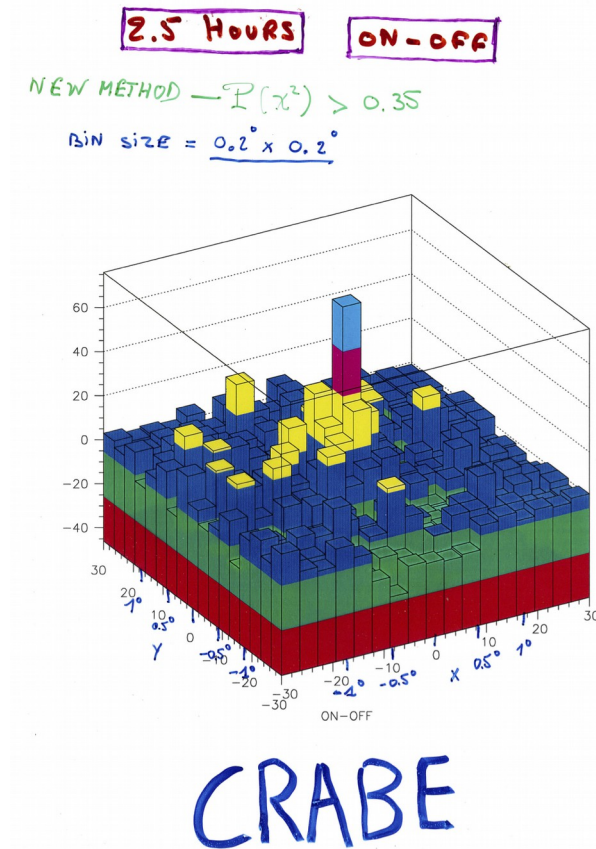
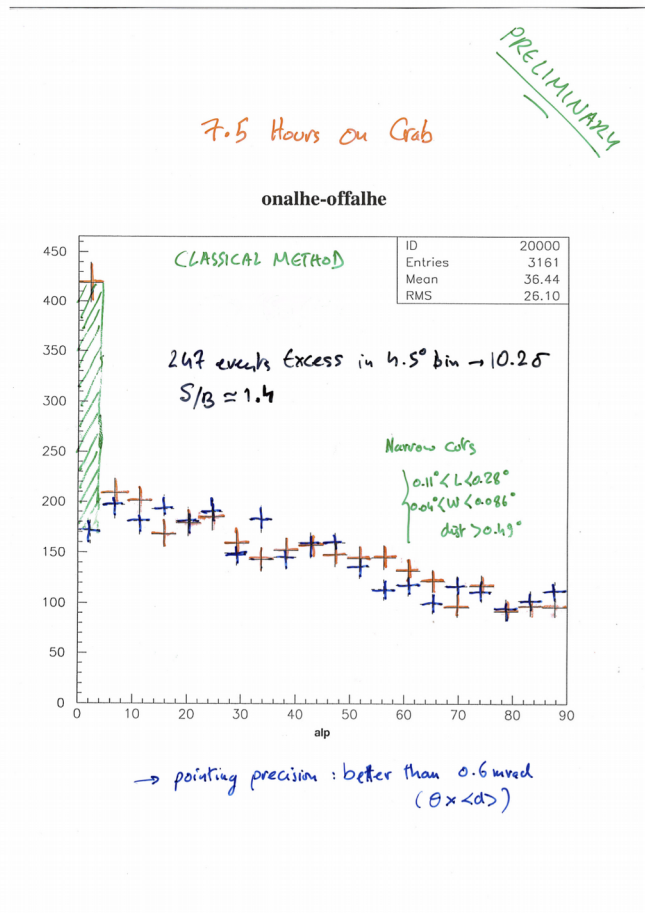
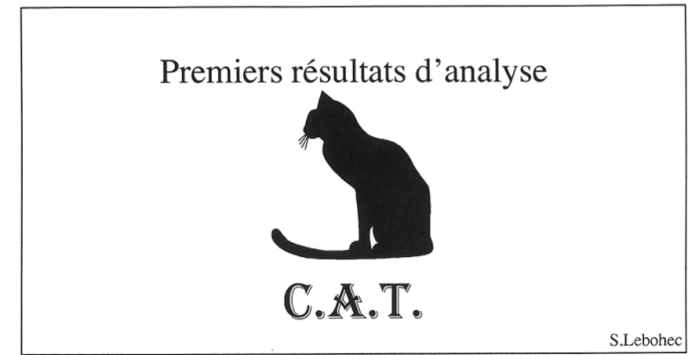
1996-2002 Le télescope à imagerie fine CAT

- CAT : suite logique des activités Themistocle et ASGAT à Thémis
- Le choix de l'imagerie allait de paire avec la transition vers l'astrophysique
- Pleinement bénéficié de l'expérience acquise auprès du Whipple à travers l'exp. Artemis (imaginée par Marcel Urban)
- Eric Paré & Patrick Fleury: les premiers à réaliser le potentiel de cette technique, puis à entreprendre l'étude qui a mené à l'élaboration détaillée du projet
- Télescope de taille beaucoup plus modeste que celui de Whipple (17m^2 versus 75m^2)
- Mais bien plus précis :
 - Optique : dispersion <1.6 ns
 - Caméra : 600 Pms, fine pixelisation 0.12°
 - Electronique de déclenchement ultra-rapide à discrimination analogique
 - Guides de lumière de type Winston



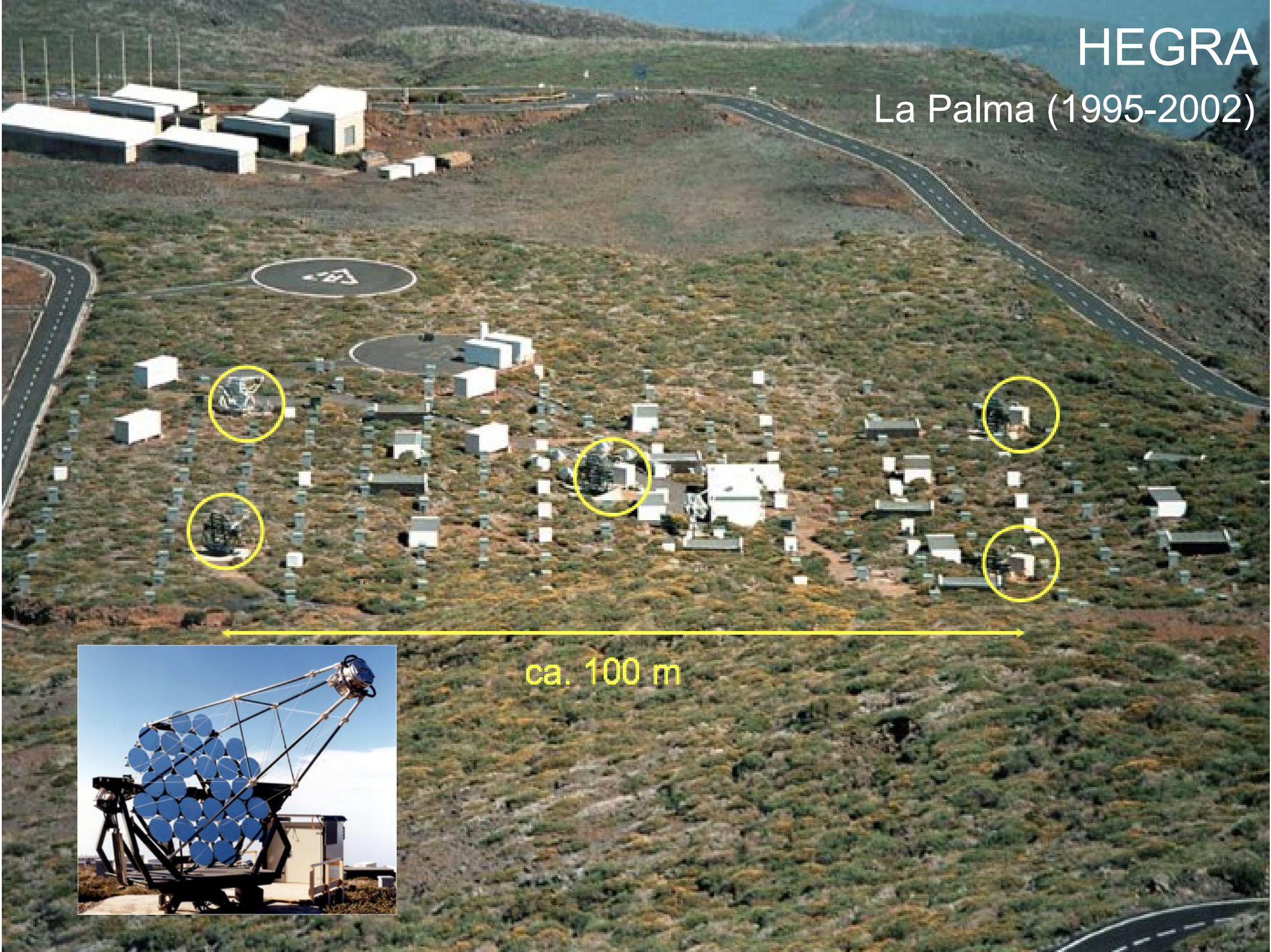
CAT

- Autre innovation : méthode de reconstruction de gerbes développée par Stéphane Le Bohec à base d'abaques semi-analytiques projetés dans le plan focal.
- Permettait de tirer avantage de la granularité très fine de la caméra de CAT pour de meilleures performances
 - en précision angulaire,
 - en rejet du bruit de fond
 - capacité à produire des cartes 2D
- Méthode reprise et étendue au mode stéréoscopique pour HESS



HEGRA

La Palma (1995-2002)

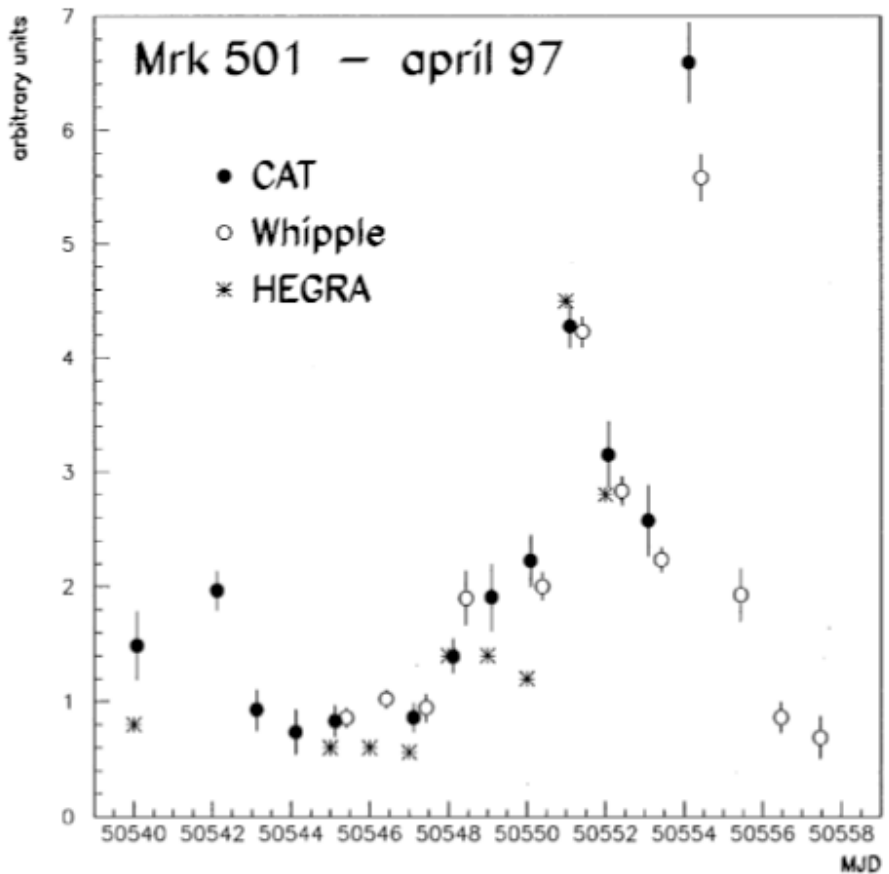


ca. 100 m

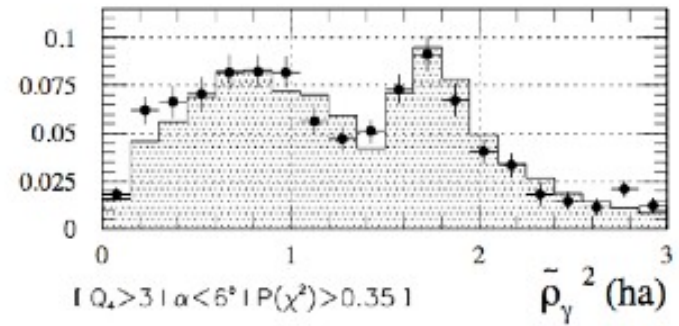
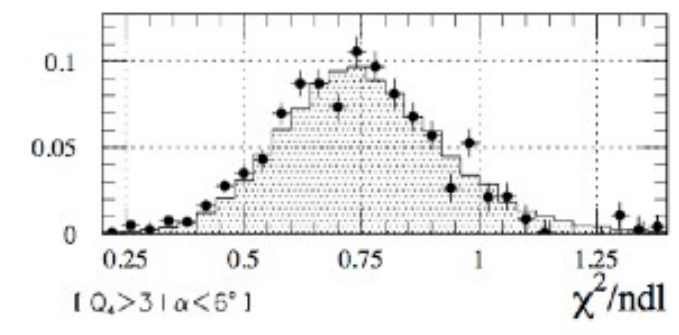
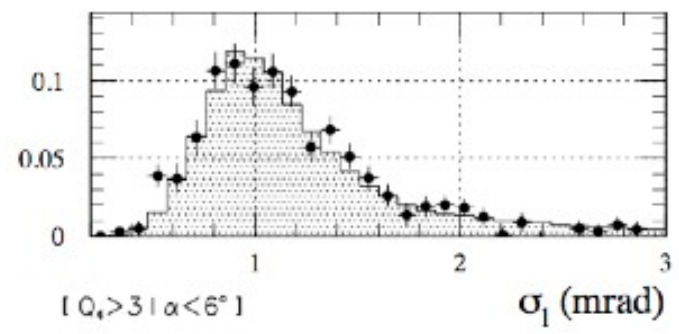
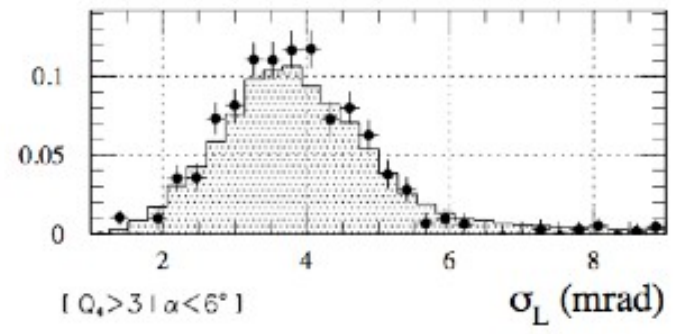


CAT

Activité historique de Mkn 501 Avril 1997



[ICRC Durban 1997]

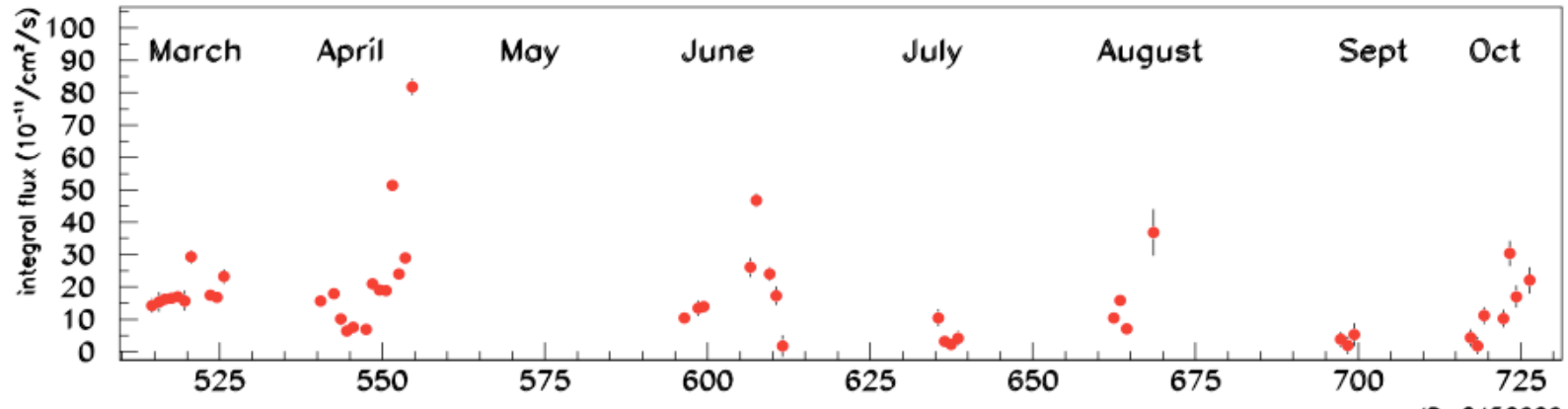
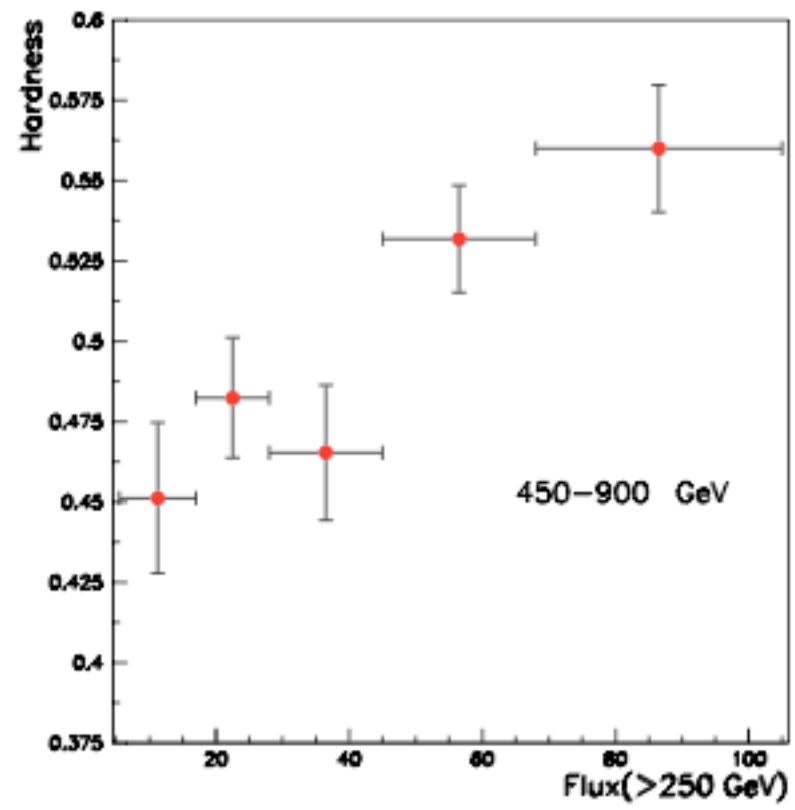
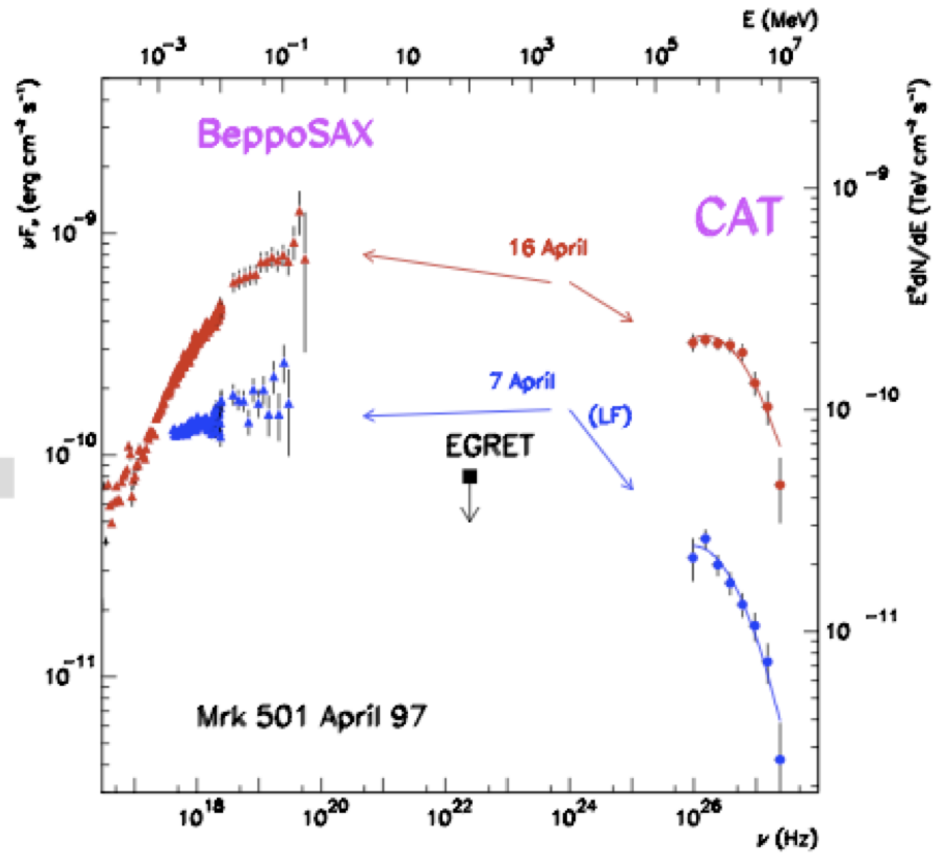


[Thèse Frédéric Piron]

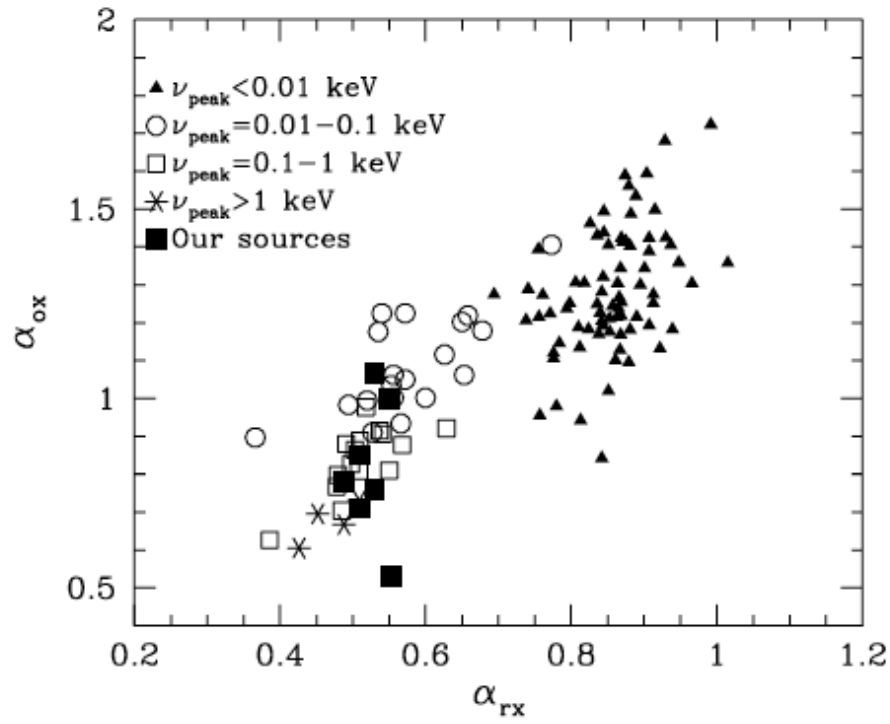
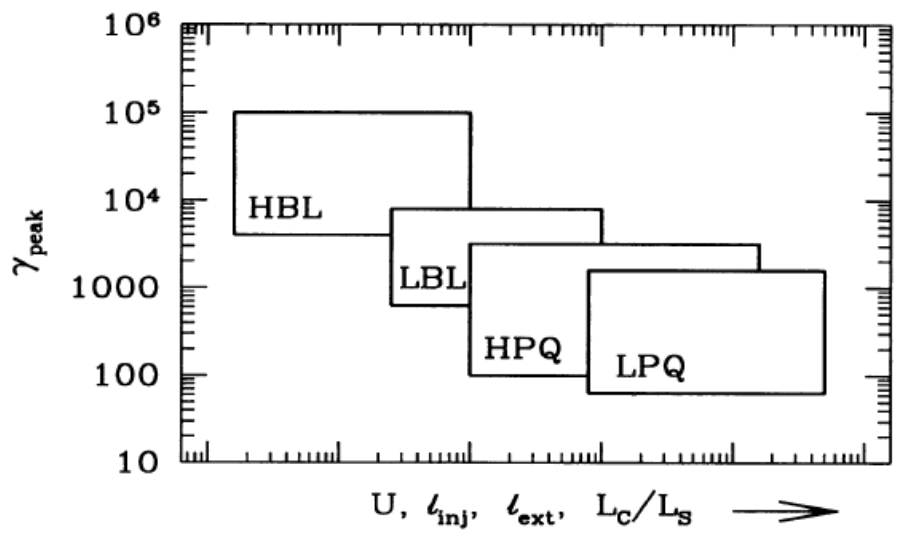
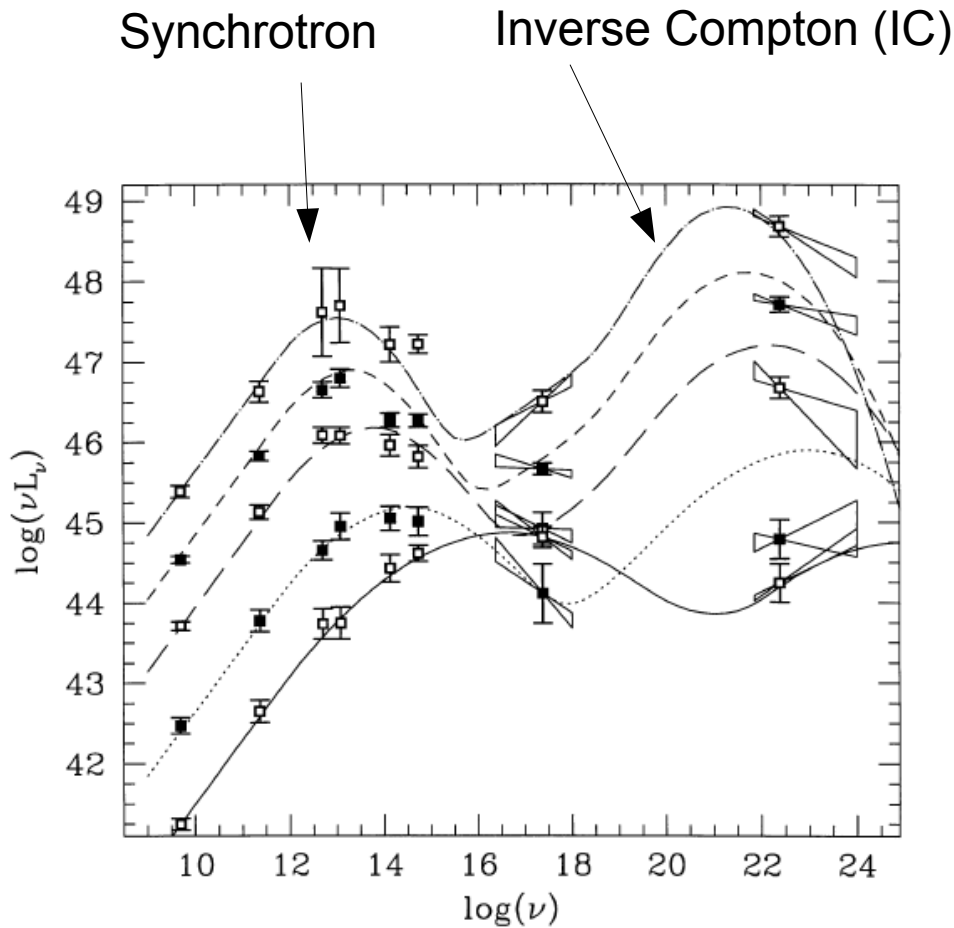
CAT

Etude détaillée de Mkn 501

Les débuts de l'astrophysique extragalactique

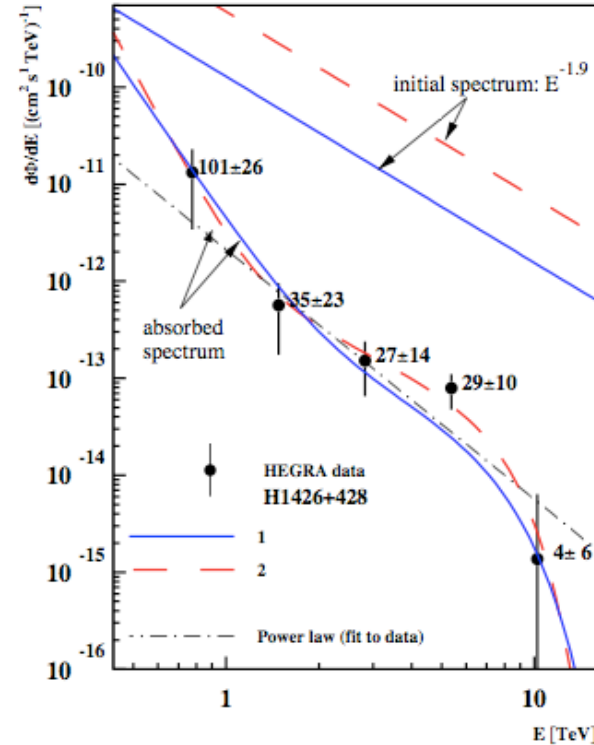
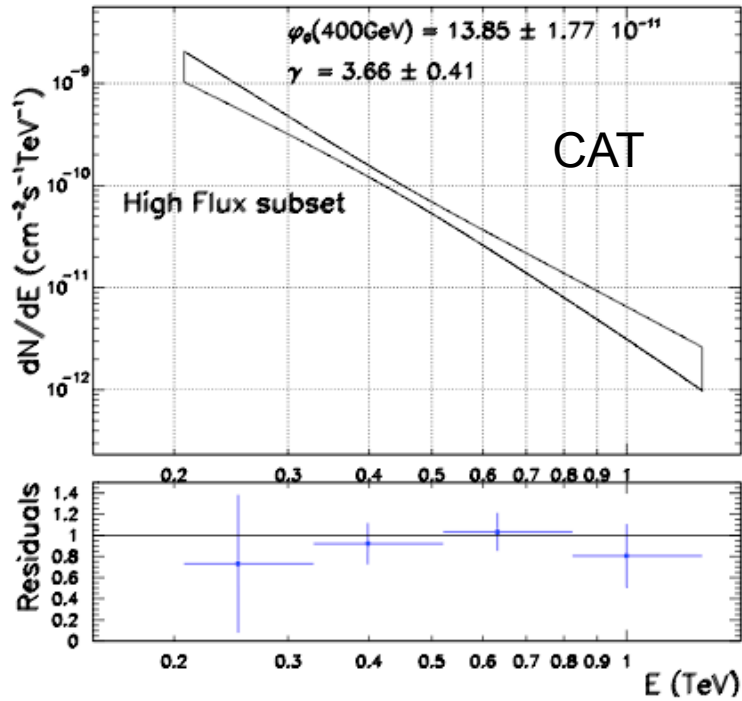


Rapprochement entre observateurs et théoriciens

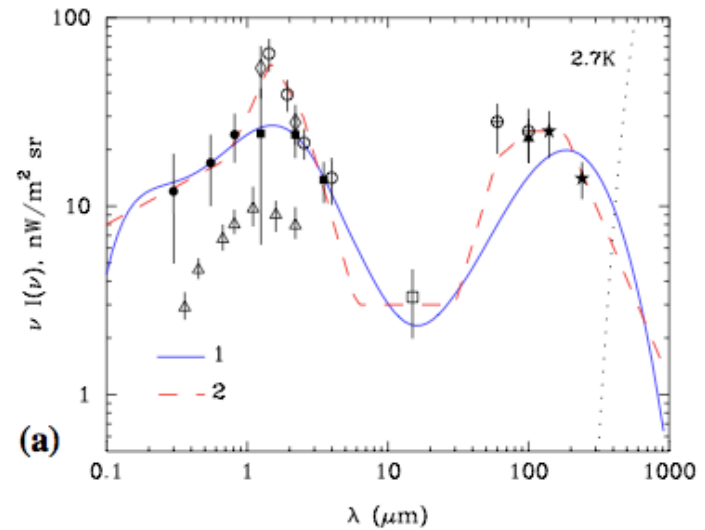


CAT

Détection du BL Lac le plus lointain de l'époque : 1ES 1426+428, $z=0.129$

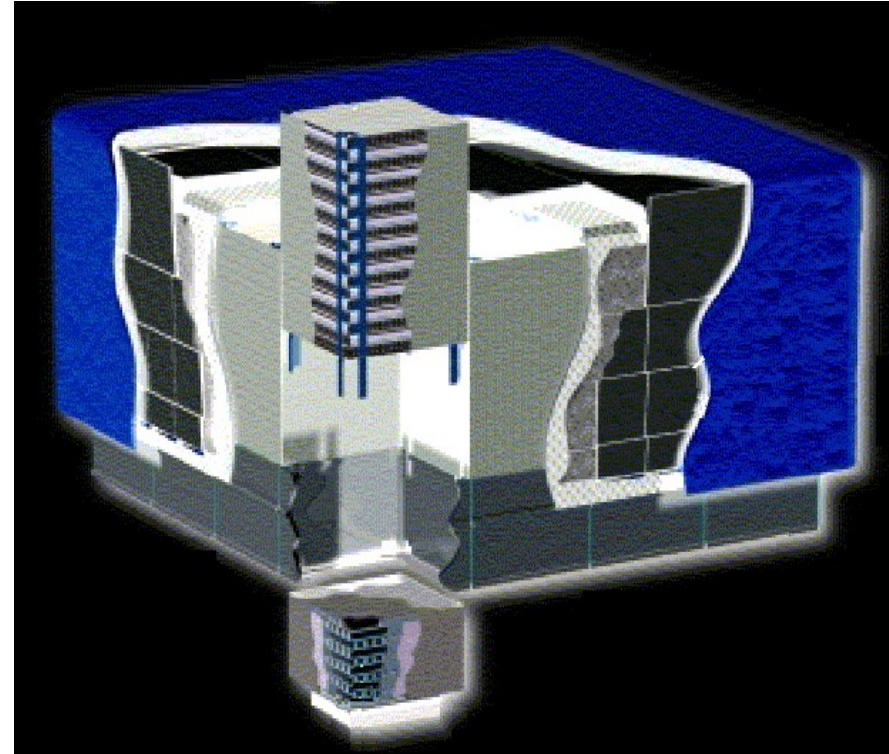


HEGRA



1998-2002 Le projet de satellite GLAST/*Fermi*

- GLAST : considéré à juste titre comme une des pierres angulaires de l'astrophysique des hautes énergies dès les prémices de sa conception dans les années 1990
- Il fallait engager le CNRS dans cette aventure en parallèle avec le projet HESS [E. Paré, P. Fleury; ADA 1998]
- Concept initial : 0.7 X0 en 15 plans : perte de 40%
- Proposition du pré-calorimètre
- Dès l'été 1998 tests faisceau au CERN d'un prototype d'un rapport fibre/Pb de 1/4
- Dégradation de la résolution en énergie autour de 100 MeV



- On redémarre : Oh joie pleurs de joie!
ça cause!

GLAST
CERN BAMTEST

1998-99

GLAST/*Fermi* Les apports français au projet

- Structure du calorimètre en fibre de carbone
- Inspirée de CMS/CERN : Oscar Ferreira (LLR)
- Modélisation numérique : Régis Terrier, A. Chektman, A.D-A (PCC)
- Algorithmes de reconstruction de l'énergie dans le calorimètre :
 - 3 régimes dégagés : fonction de l'angle zénithal et de l'énergie
 - Validation sur faisceau
- Optimisation taille/épaisseur diodes de lecture (PCC):
 - Gain d'un facteur 1.5
- L'enrobage des cristaux : Gilles Bogaert (LLR)
- Définition, réalisation assemblage cristaux/photo-diode par collage : Claude Chaperon, Didier Imbault (PCC)
 - En partant de zéro, travail méthodologique exemplaire : procédures, outils, infrastructure mis en place en quelques mois
 - La procédure d'assemblage-collage agréée spatiale
 - Première série de cristaux assemblés livrée
 - Banc de test mis au point (Santiago Pita PCC)
- Différents avec les partenaires du SAp : arrêt brusque
- L'ensemble des procédures a été repris par le NRL (via le SAp)

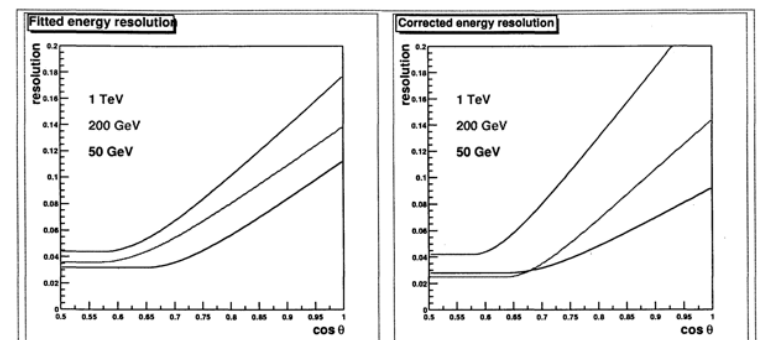
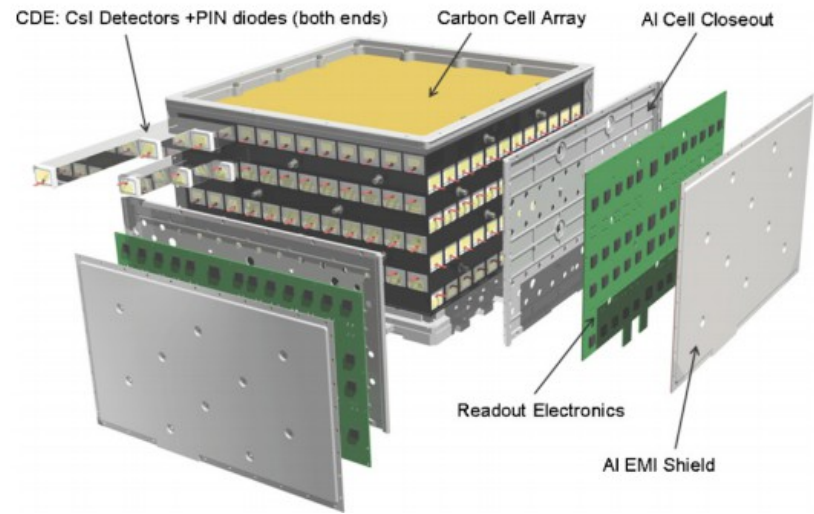
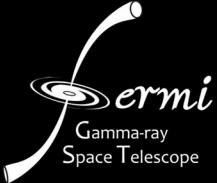
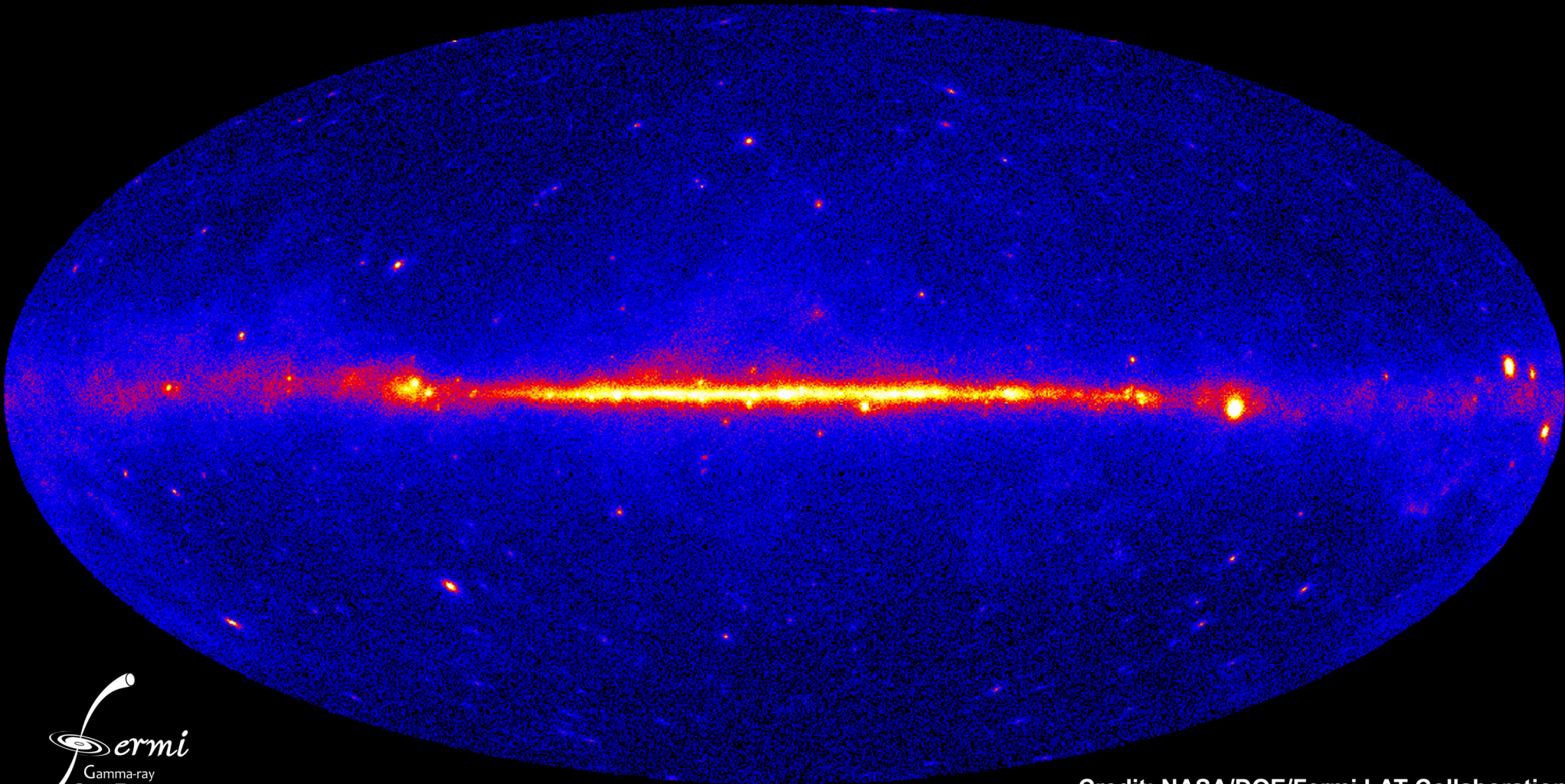


FIGURE 1. Energy resolution obtained using mean profile fitting on the left plot, and last layer correction on the right plot.

GLAST/*Fermi* Ca valait le coup !

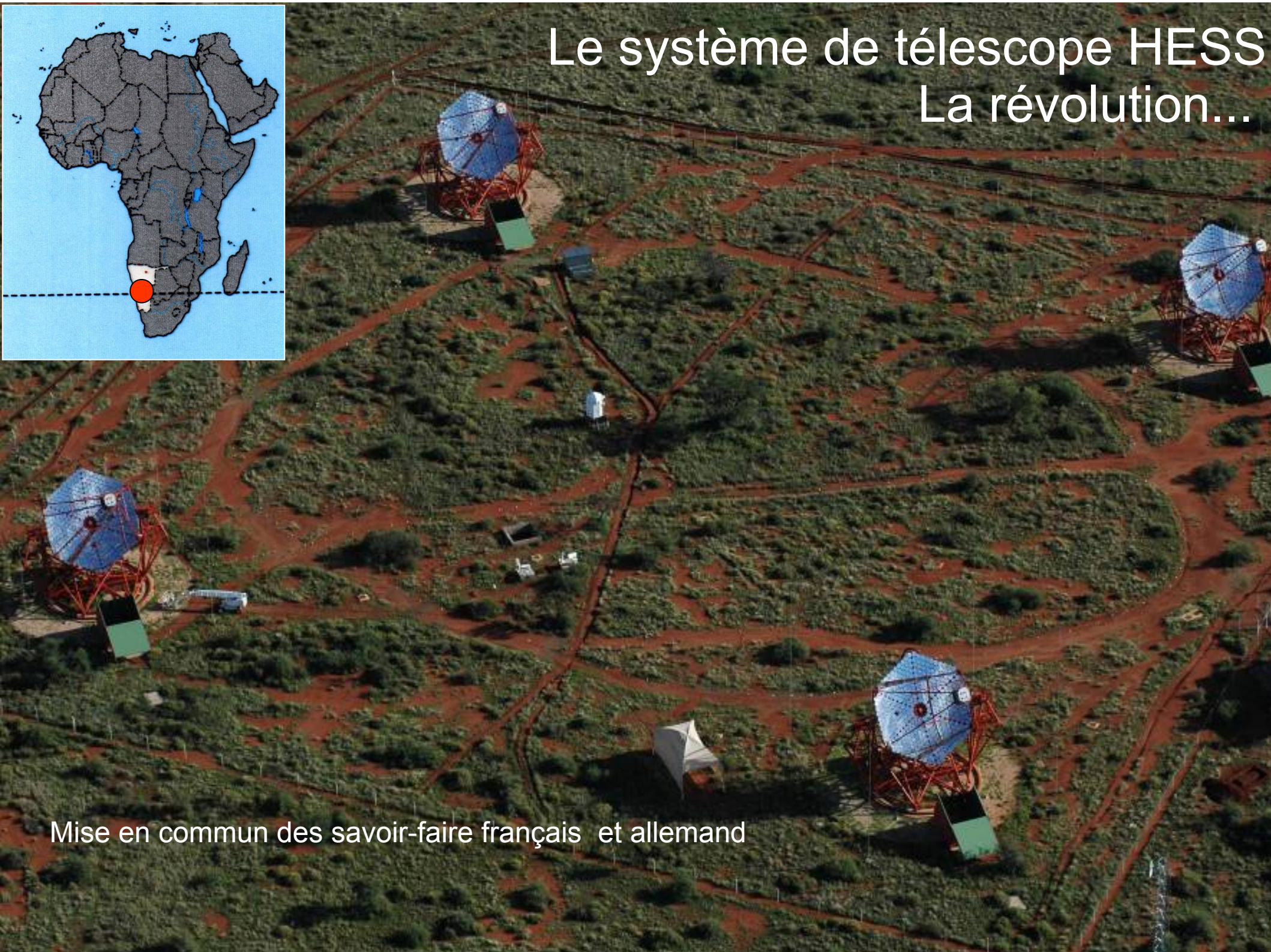
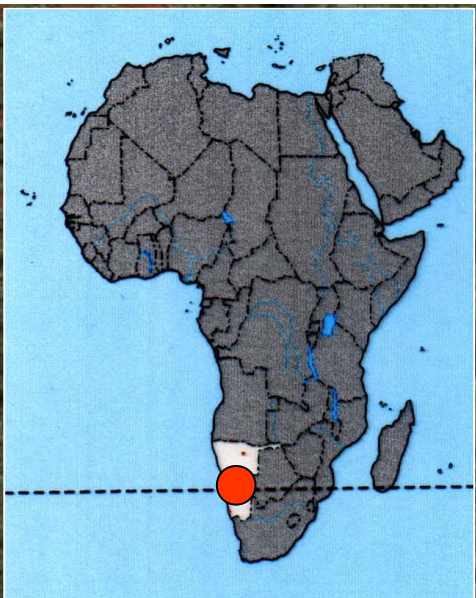
NASA's *Fermi* telescope reveals best-ever view of the gamma-ray sky



Credit: NASA/DOE/*Fermi* LAT Collaboration

Fin de la préhistoire

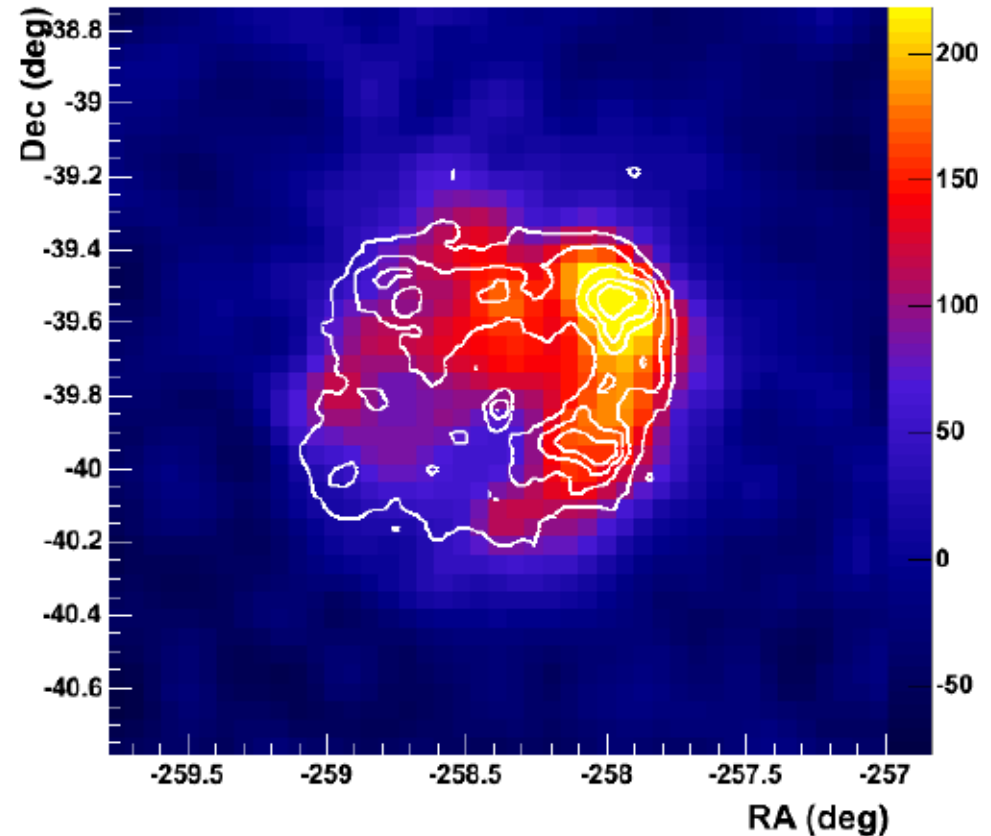
Le système de télescope HESS La révolution...



Mise en commun des savoir-faire français et allemand

Les toutes premières découvertes et leurs implications

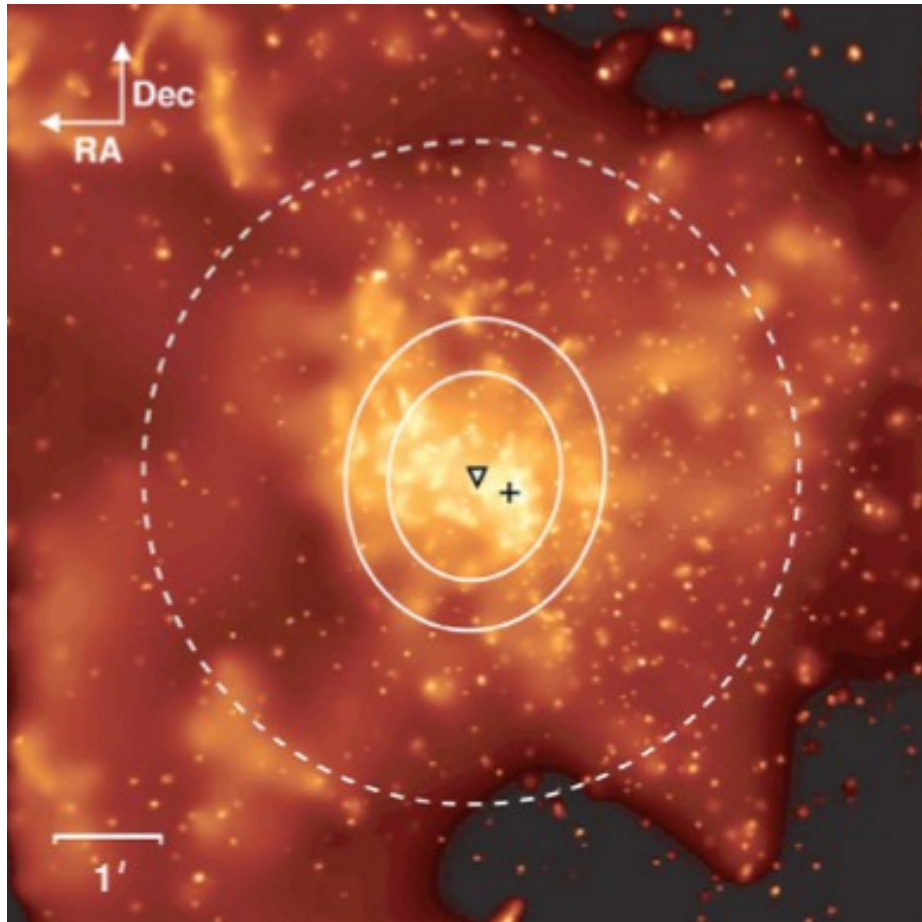
- Première Image d'un vestige de supernova en coquille de toute l'histoire de l'astronomie γ !
- Un des objectifs majeurs de la discipline : sondage des sites d'accélération des rayons cosmiques
- Preuve était apportée que des particules ultrarelativistes étaient présentes au sein de ce vestige
- Corrélation avec les X non-thermiques \rightarrow deux possibilités :
 - la nature des particules : électrons, ou alors protons/ions
 - Processus Inverse-Compton (IC) ou collisions inélastiques hadroniques (H)
 - Sans exclure un scénario mixte
- Arguments nombreux *pour* et *contre* :
 - Valeur B $\sim 10 \mu\text{G}$ (IC) vs $\sim 100 \mu\text{G}$ déduite de la largeur des filaments, si B uniforme, ce qui est loin d'être établi
 - Pente du spectre au GeV *Fermi* $n = 1.5$ (IC)
 - L'absence d'émission thermique (IC)
 - Mais il pourrait y avoir des clumps (H, *ad hoc*)
 - Etc
- Invalidation du résultat de Cangaroo



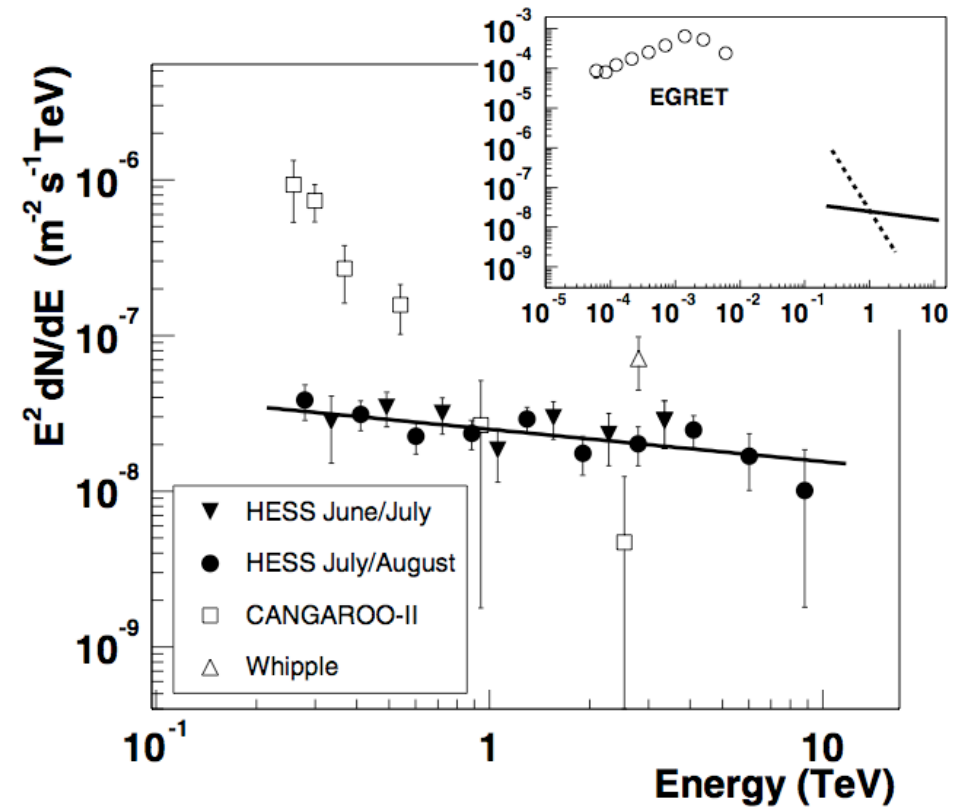
Innovation (Fr) : reconstruction à base d'un modèle à 3D
 [Thèse Marianne Lemoine-Goumard]

HESS

Les toutes premières découvertes et leurs implications

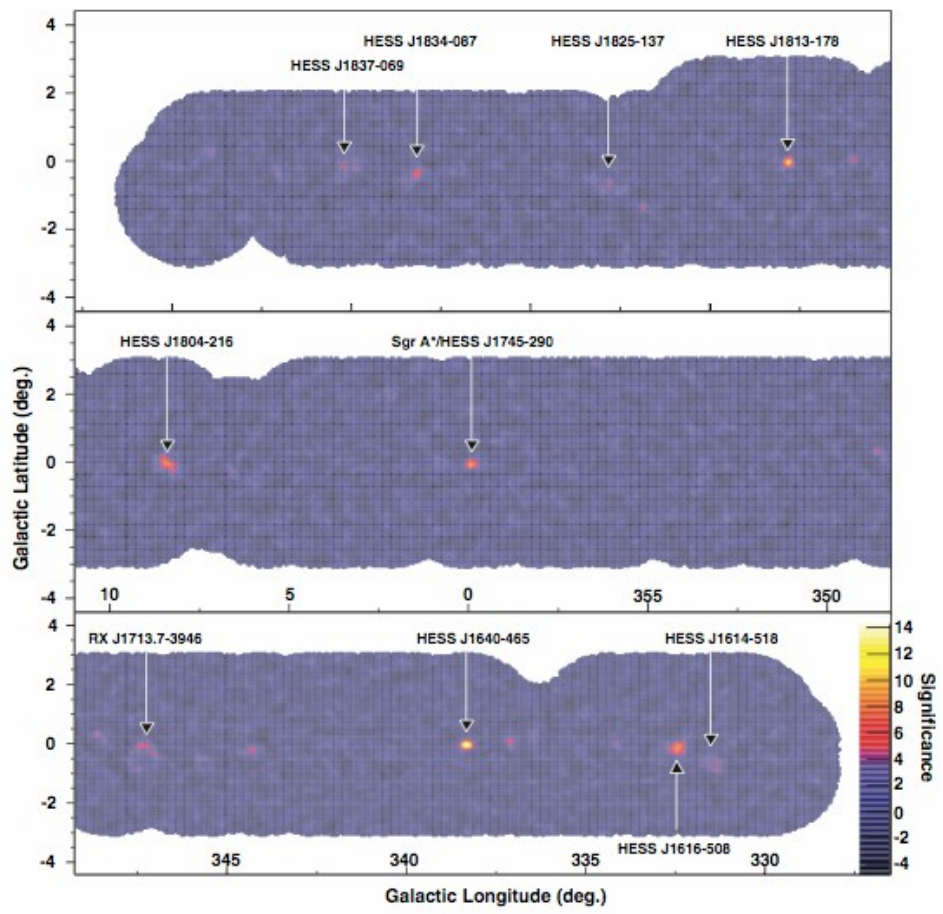


- Invalidation du résultat de Cangaroo
- Extension spectrale jusqu'à 4 TeV sans coupure: limite inférieure sur la masse du neutralino à 12 TeV excluant les candidats ~ 500 GeV



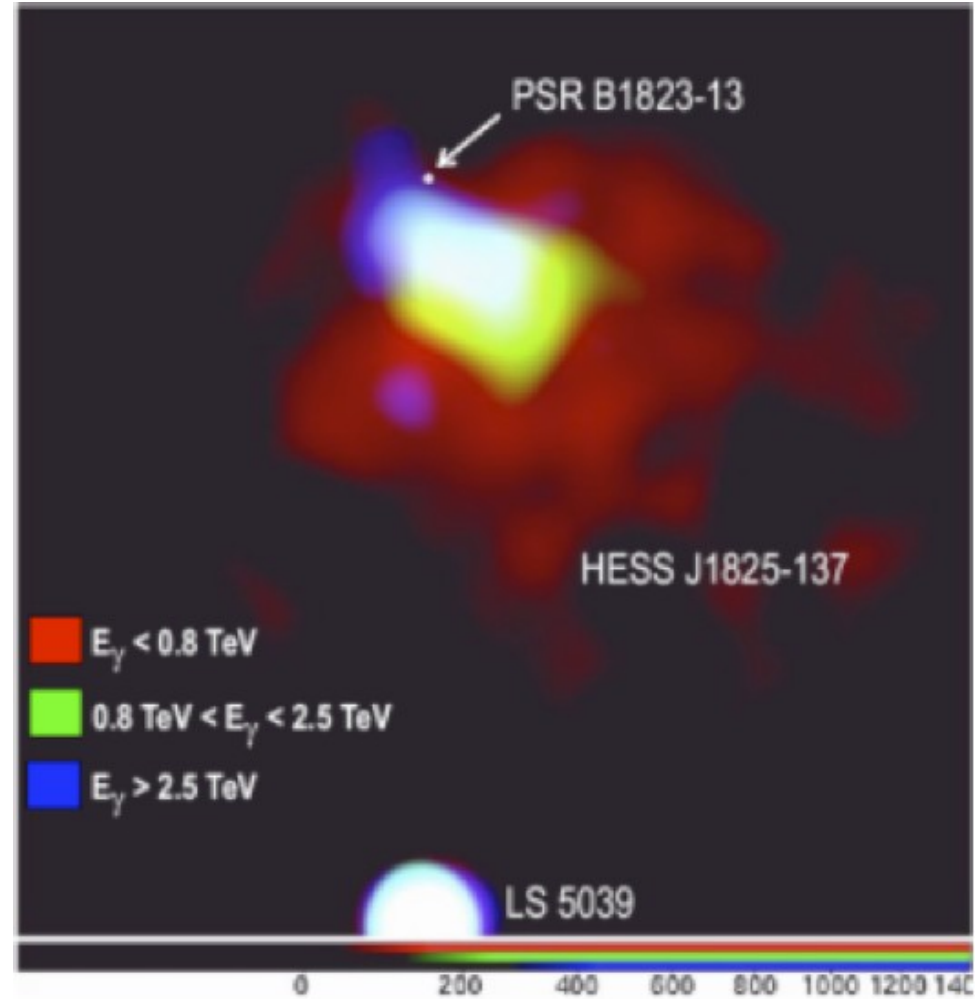
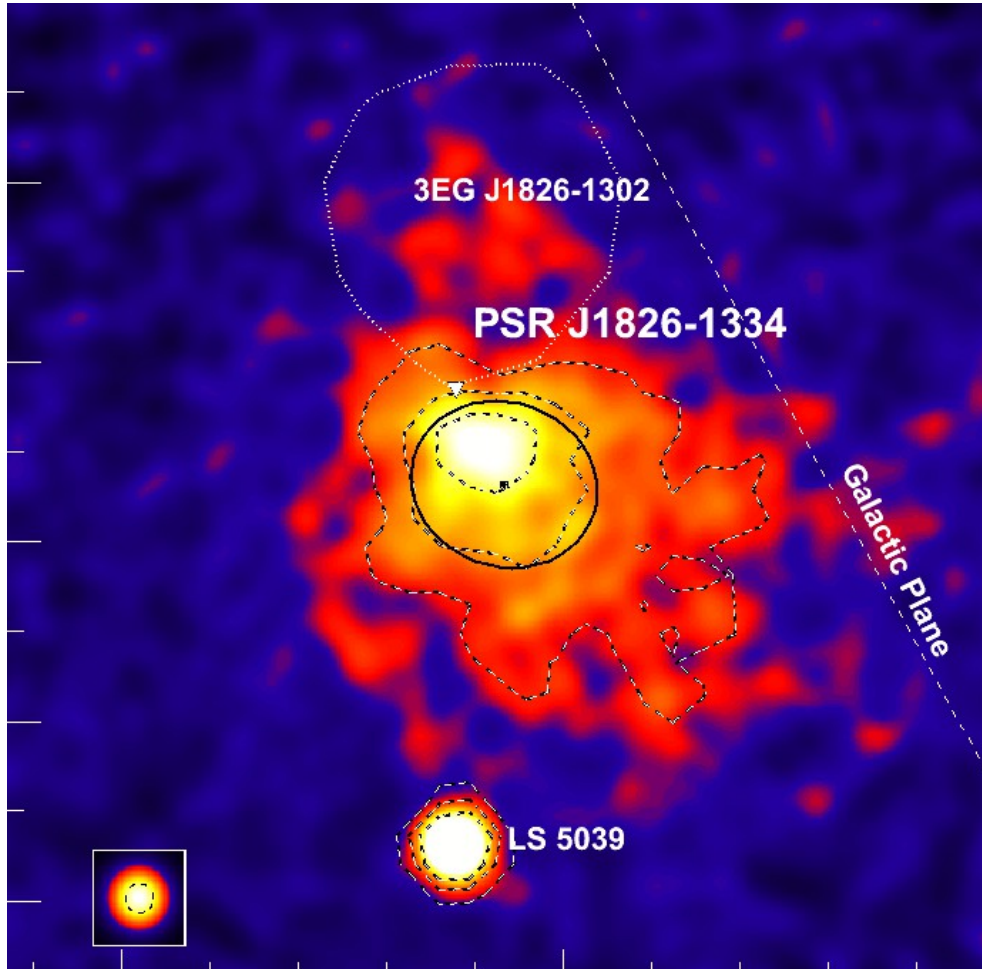
HESS

Le dévoilement de la Galaxie au TeV (2005)



HESS

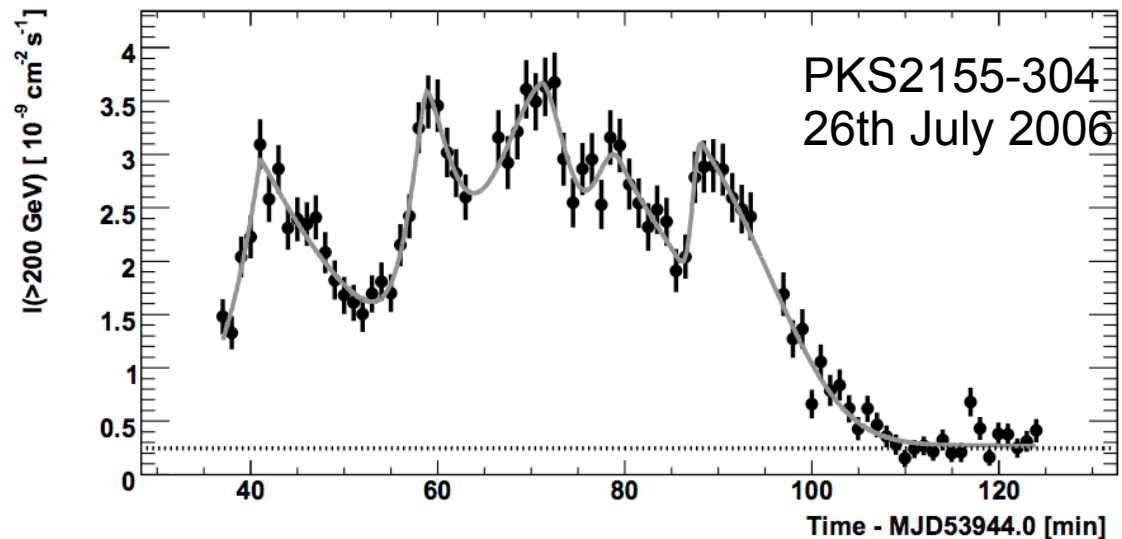
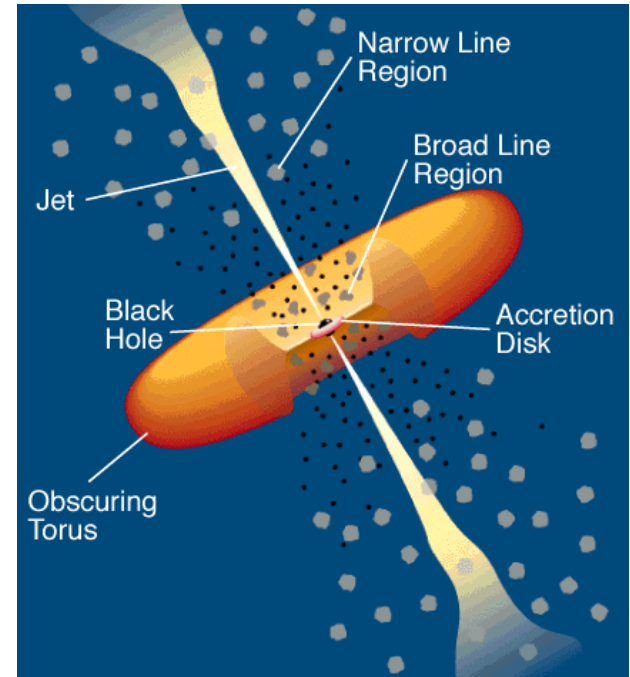
Des reliques rayonnantes au TeV



HESS

Fougue au-delà de la Galaxie

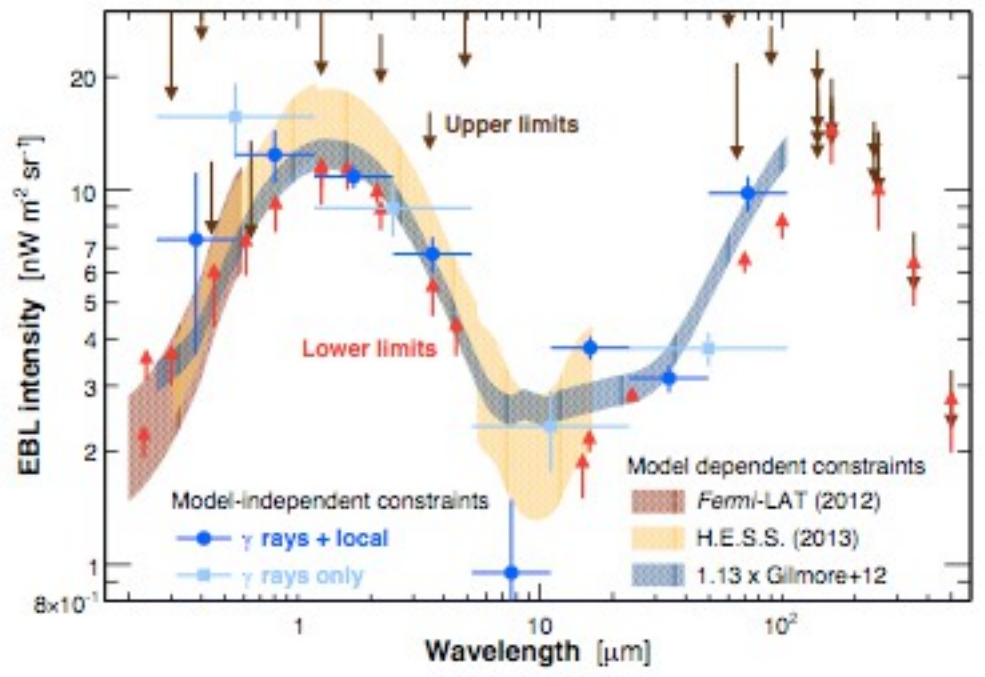
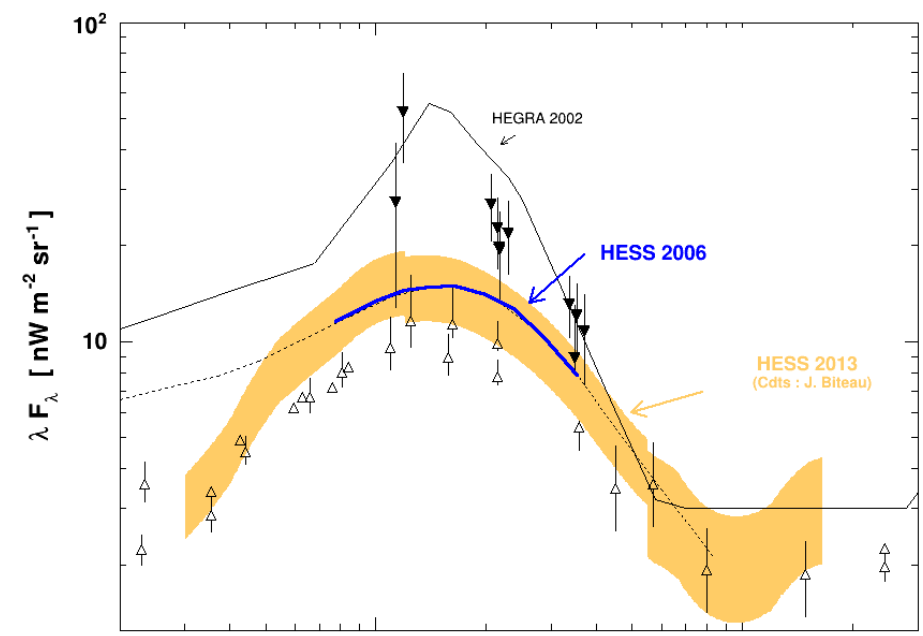
- Dans la nuit 26 au 27 juillet 2006, PKS 2155-304 : x10 Crabe
- Variabilité à l'échelle de quelques minutes
- Contraintes fortes sur les modèles à variation chromatique de c
- Implications fortes pour les modèles de blazars:
 - Taille extrêmement compacte de la zone d'émission, inférieure au temps de croisement lumière de l'horizon du candidat trou noir
 - Nécessité de facteurs de Lorentz > 50 et existence de mini-jets dans le jet
- La nature \sim log-normale de la variation est compatible avec ce type d'hypothèse
- Angle mort dans la prise en compte de cette variabilité ultra-rapide : rôle majeur de la variabilité dans la construction "sociale" et l'acceptation du concept du trou noir!



HESS

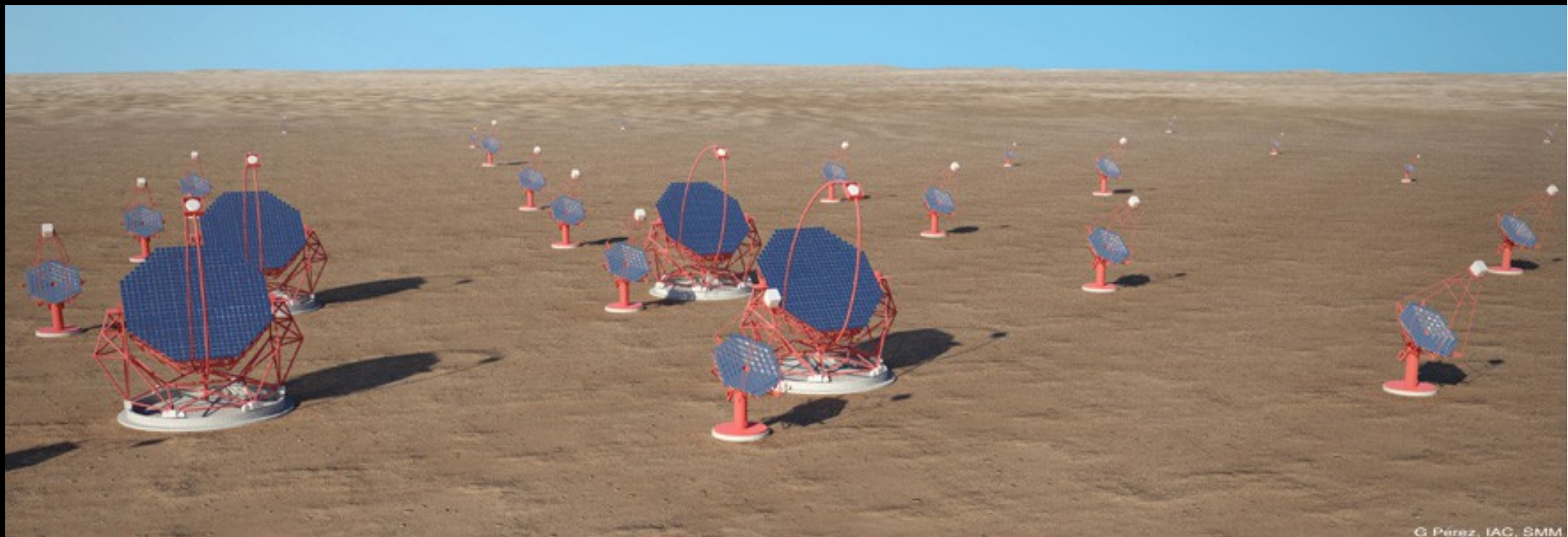
Opacité au-delà de la Galaxie Le signal γ : une sonde précieuse

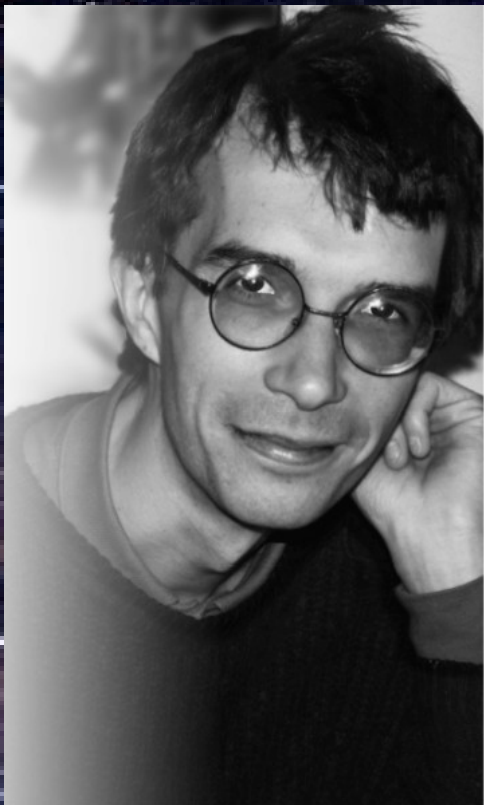
- En marche vers une certaine crédibilité dans les applications cosmologiques de l'astronomie γ :
- 2006 : Découvertes de blazars à spectres durs et relativement distants
- 2013 : utilisation de 7 blazars comme sondes de la lumière intergalactique
 - Exclut de fait la profile suggéré par Hegera en 2002/2003
 - Toujours modèle-dépendant
- 2015 : Biteau & Williams
 - Formation d'une base de données regroupant $\sim 80\%$ des mesures spectrales au TeV
 - Contraintes plus fortes sous hypothèse d'un modèle
 - Contraintes libres de modélisation
 - Exclusion d'anomalies



La suite est une histoire
passionnante de découvertes
qui ouvrent la voie
au projet
CTA

N.B. First workshop of the series “Towards a
major atmospheric Cherenkov detector”
Palaiseau 1992 (Patrick Fleury)





Eric Paré
1959-1998



Patrick Fleury
1935-2017