

Vestiges de supernova et nébuleuses de pulsar observées par le satellite *Fermi*

Marie-Hélène Grondin

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan Université Bordeaux 1 - CNRS/IN2P3



- Les vestiges de supernovae et les nébuleuses de pulsars
- Le ciel dans le domaine gamma avant le lancement de *Fermi*
- Le télescope Fermi

 Observations de vestiges de supernovae et nébuleuses de pulsars avec *Fermi*



- Les vestiges de supernovae et les nébuleuses de pulsars
- Le ciel dans le domaine gamma avant le lancement de *Fermi*
- Le télescope Fermi

 Observations de vestiges de supernovae et nébuleuses de pulsars avec *Fermi*

Les rayons cosmigues

- Découverts en 1912 (V. HESS)
- 10 ordres de grandeurs en énergie
- Origine : inconnue

Sermi Gamma-ray Space Telescope

Composition : 90% de protons



ermi Les sources de rayonnement cosmigue Dace Telescope

- Les rayons cosmigues sont des particules chargées, donc déviés par les champs électriques et magnétiques
- → Perte d'information sur leur direction d'arrivée

Gamma-rav



Les rayons gamma se propagent en ligne droite → Informations sur les sites d'accélération

Les explosions en supernova sont de très bons candidats pour expliquer le spectre du rayonnement cosmique jusqu'au genou MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009



La vie d'une étoile

Région de formation stellaire

MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009

Étoile massive qui utilise son carburant d'hydrogène pour survivre

Protoétoile

Lorsque l'étoile commence à manquer de carburant, le cœur se contracte

Ces étoiles très massives peuvent atteindre de très hautes températures et densités en leur cœur. Les couches externes de l'étoile attirées sont par la gravitation et rebondissent sur le cœur, ce qui entraine une importante explosion: c'est le phénomène de supernova



Les vestiges de supernovae

Deux processus physiques à l'origine des Supernovae SNIb, SNIc, SNII : effondrement du coeur d'une géante rouge (SNII) ou d'une super-géante sans Hydrogène (SNIb,SNIc) en étoile à neutron 2-3 10⁵³ ergs produits, mais la majorité (99%) de l'énergie extraite est emportée par les ν . Futur de toute étoile de plus de 8 M_o SNIa : explosion thermonucléaire d'une naine blanche de \sim 1.4 M $_{\odot}$: • 0.6-0.7 M $_{\odot}$ de ${}^{56}Ni$ produit 10⁵¹ ergs d'énergie cinétique (2/3 de l'énergie) nucléaire libérée)



Supernovae thermonucléaires

Explosion thermonucléaire d'une naine blanche



Artist's rendition of a white dwarf accumulating mass from a nearby companion star. This type of progenitor system would be considered singly-degenerate.

Image courtesy of David A. Hardy, © David A. Hardy/www.astroart.org.

Gamma-ray Space Telescope Space Telescope

Cas A, rémanent d'une explosion de type IIb

Bleu/Vert : données X (Chandra) Rouge : IR (Spitzer) Jaune : visible (Hubble)



Cassiopia A Supernova Remnant NASA / JPL-Caltech / O. Krause (Steward Observatory) ssc2005-14c

Spitzer Space Telescope • MIPS Hubble Space Telescope • ACS Chandra X-Ray Observatory

Annal Rollinson

Gamma-ray Space Telescope

Les preuves observationnelles de l'accélération des électrons dans les SNRs

- Emission radio => électrons accélérés jusqu'à 10⁹ eV
- Emission synchrotron observée en X => électrons accélérés jusqu'à 10¹² eV
- Première preuve observationnelle de l'accélération des électrons jusqu'à ~100 TeV=> observation en X du vestige de supernova SN1006 par ASCA



Modèles leptonique et hadronique

Processus leptonique :

Gamma-ray Space Telescope

le spectre de photons de haute énergie est produit par émission Compton inverse des électrons sur les photons ambiants (CMB, poussière, photons synchrotron, ...) Processus hadronique :

le spectre de photons de haute énergie est produit par interaction proton-proton, produisant un pion neutre, luimême se désintégrant en 2 photons

Interaction p-p

Inverse Compton (+Bremsstrahlung)

Gamma-ray Space Telescope

Modèles leptonique et hadronique

 Fermi pourrait permettre de discriminer les modèles dans certains cas

Flux prédit par la diffusion Compton inverse et l'interaction proton-proton significativement différente



MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009



Les nébuleuses de pulsars

- Après l'explosion en supernova, le pulsar émet un vent de particules chargées (e±) à des vitesses très importantes.
- Une onde de choc se forme à proximité du pulsar, zone d'accélération des particules.



Description schématique d'une nébuleuse de pulsar entourée par un vestige de supernova

Sermi Gamma-ray Space Telescope

Les nébuleuses de pulsars

G21.5-0.9: une nébuleuse composite

Au centre, émission étendue d'une nébuleuse alimentée sans cesse par le pulsar J1833-1034





Mécanismes d'émission dans les nébuleuses de pulsar

- 2 principaux mécanismes d'émission non thermique:
- Du domaine radio aux rayons X : émission synchrotron des particules chargées au niveau de l'onde de choc
- Des rayons X aux rayons gamma de très haute énergie : émission Compton inverse des particules chargées sur les photons ambiants ou interaction proton-proton







Nébuleuse du Crabe

15

Pourquoi étudier les nébuleuses de pulsars avec Fermi?

- Une guinzaine de nébuleuses situées dans des boîtes d'erreurs EGRET, mais pas fermement identifiées (résolution angulaire médiocre, surface efficace insuffisante)
- Population dominante (dans les sources galactiques) à très haute énergie (E>100 GeV)
- De nombreux pulsars vus par Fermi
- \rightarrow Détection et identification de nébuleuses fortement attendue dans la bande d'énergie de Fermi



- Intervalle d'énergie permettant de contraindre, voire discriminer les modèles leptonique vs hadronique
- Processus d'émission dans la nébuleuse liés aux paramètres physiques du pulsar

→ Intérêt physique : l'étude de l'émission provenant des nébuleuses de pulsars permet la compréhension des phénomènes d'accélération de particules au niveau du choc et une meilleure connaissance des phénomènes physiques ayant lieu à proximité du pulsar. MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009 16



- Les vestiges de supernovae et les nébuleuses de pulsars
- Le ciel dans le domaine gamma avant le lancement de *Fermi*
- Le télescope Fermi

 Observations de vestiges de supernovae et nébuleuses de pulsars avec *Fermi*

Gamma-ray Space Telescope

Détecteurs embarqués:
 – CGRO/EGRET (1991 - 2000)



271 SOURCES, dont 170 non-identifiées.

- AGILE (2007 -)

MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009



3^{ème} catalogue EGRET

- AGN blazars
- Non id.
- pulsars
- LMC



Le ciel à plus haute énergie

Détecteurs au sol : CANGAROO, HESS, MAGIC, VERITAS, ...



Une gamme d'énergie inexplorée…

Gamma-ray Space Telescope



• Années 1990-2000 : mission CGRO, constituée de BATSE, OSSE, COMPTEL et EGRET (prédécesseur du satellite Fermi).

• 2007 : lancement de la mission AGILE

 2008 : lancement de la mission Fermi, qui comble une gamme d'énergie jusqu'alors inexplorée.



- Les vestiges de supernovae et les nébuleuses de pulsars
- Le ciel dans le domaine gamma avant le lancement de *Fermi*
- Le télescope Fermi

 Observations de vestiges de supernovae et nébuleuses de pulsars avec *Fermi*



Fermi, un détecteur spatial

- 2 instruments :
 - Le Large Area Telescope (LAT)
 - Le Gamma Burst Monitor (GBM)
- Lancé le 11 juin 2008.
- Durée de vie : 5 à 10 ans.





Le Large Area Telescope

- Détecteur de photons
 γ (20 MeV 300 GeV) par
 conversion de paires :
 → e⁺ + e⁻
- Distingue les rayons γ des particules chargées (détecteur d'anti-coïncidence)
- Trajectographe et calorimètre permettent la mesure de la direction et de l'énergie du photon

State I MARTINE TO

Mesure de la trajectoire du photon Trajectographe micropistes de Silicium + Convertisseur de Tungstène Couverture de protection contre les micrométéorites

Mesure de l'énergie du photon -Calorimètre Cristaux d'Iodure de Césium

Rejet des rayons cosmiques chargés système anti-coïncidence Tuiles de scintillateur



Trajectographe



Calorimètre





Conception du calorimètre : France (IN2P3 & CEA), Suède, et USA ₂₄



Des performances accrues

- EGRET a découvert 270 sources, 0.1 à 5 GeV.
- GLAST localise les sources avec 2 à 3 fois plus de précision.
- Un volume d'espace ~25^(3/2) = 125 fois plus grand
- Très grand champ de vue: 20% du ciel à tout instant
- Couvre l'ensemble du ciel en 3 heures (2 orbites)
- 25 fois plus sensible que son prédécesseur, EGRET



Fermi-LAT (2008 - 🔅

Mesure de la trajectoire du photon Trajectographe micropistes de Silicium + Convertisseur de Tungstène Couverture de protection contre les micrométéorites

Mesure de l'énergie du photon Calorimètre Cristaux d'Iodure de Césium

Rejet des rayons cosmiques chargés système anti-coïncidence Tuiles de scintillateur

Gamma-ray Space Telescope

Une collaboration internationale



Etats-Unis (1, 2, 3, 4) : University of California at Santa Cruz , Goddard Space Flight Center, Naval Research Laboratory, Ohio State University, Sonoma State University, Stanford University (SLAC and HEPL/Physics), University of Washington, Washington University, St. Louis France (5, 6, 7) : CNRS/IN2P3, DAPNIA/SAP Italie (8) : INFN, ASI, INAF Japon (10) : Hiroshima University, ISAS, RIKEN Suède (9) : Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm University MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009 26 11 Juin 2008: lancement de Fermi, Cap Canaveral (Floride, Etats-Unis) Gamma-ray Space Telescope

Space Telescope Carte du ciel de Fermi après 3 mois





Objectifs scientifiques

Vastes champs d'études :

- Noyaux actifs de galaxie (CENBG)
- Sursauts γ
- Physique solaire
- Pulsars, nébuleuses à vent, vestiges de supernovae (CENBG)
- Amas globulaires
- Etoiles massives
- Binaires γ
- Emission diffuse, centre
 - galactique
 - Electrons
- Matière noire?











- Les vestiges de supernovae et les nébuleuses de pulsars
- Le ciel dans le domaine gamma avant le lancement de *Fermi*
- Le télescope Fermi

 Observations de vestiges de supernovae et nébuleuses de pulsars avec *Fermi*



La nébuleuse du Crabe

 Vestige de l'explosion en supernova observée par les astronomes chinois en 1054





La nébuleuse du Crabe

- 1^{er} objet du catalogue de Messier
- Nébuleuse (pas de vestige de supernova détecté)
- Distance : 2 kpc (= 6.10¹⁹ m)
- Age : 955 ans

Domaine radio





VI.





La nébuleuse du Crabe

^{Space Teles} Etudiée du domaine radio aux très hautes énergies (VHE)

 Observations dans le domaine gamma par EGRET (70 MeV -10 GeV) : larges incertitudes sur le spectre à la "croisée" des deux composantes

- Domaine de 10 GeV à 100 GeV inexploré jusque là



MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009

Gamma-ray

La nébuleuse du Crabe vue par Fermi



(article soumis à Astrophysical Journal)

- Précision du spectre
- \rightarrow Contraintes sur :
 - le spectre des électrons (composante synchrotron)
 - les mécanismes responsables de l'émission γ à haute énergie
 - les paramètres physiques de la nébuleuse, tels que le champ magnétique, parfois déjà contraints par d'autres expériences (notamment les télescopes Cherenkov).



Vela X

- Nébuleuse alimentée par le pulsar de Vela (le plus brillant dans la bande d'énergie de *Fermi*)
- Distance = 290 pc (= 9.10¹⁸ m)
- Age = 11300 ans

Gamma-ray Space Telescope

• A l'intérieur du vestige de supernova de Vela (8° de diamètre!)









Observation de Vela X avec Fermi

(article en préparation)

Une nébuleuse étendue (a) et en corrélation avec les observations dans le domaine radio (b)





De nouvelles contraintes...

- Contraintes sur les modèles d'émission:
 - Existence de 2 populations d'électrons
 - Contraintes sur le spectre des électrons produisant l'émission radio et γ





Observation de W28 avec Fermi

- Distance : 1.8 3.3 kpc
- Age : 35000 150000 ans
- Emission gamma étendue
- Coïncidence spatiale avec l'émission observée à très haute énergie et située au nord-est du vestige de supernova W28.





D'autres détections de vestiges de supernovae détectées avec *Fermi*





D'autres détections de vestiges de supernovae détectées avec *Fermi*





Conclusions et perspectives

- De nombreux résultats dès la première année de données : parmi les sources galactiques, la majorité des détections est liée aux pulsars, nébuleuses de pulsars et vestiges de supernovae.
- Nébuleuses de pulsars : nébuleuse du Crabe et Vela X sont détectées dans les régions non-pulsées des phasogrammes. La seconde est étendue par rapport à la résolution angulaire de *Fermi*
- Vestiges de supernovae : sources étendues, coïncidentes avec les contours radio et/ou X, contraintes apportées sur les modèles leptonique/hadronique.
- · Catalogues de nébuleuses et de sources étendues
- De nombreux articles publiés et à venir par la collaboration Fermi...



Back-up slides

MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009

R

2 8



	AGILE	FERMI/LAT
A_{eff} (100 MeV) (cm ²)	~400	~ 2000-2500
A_{eff} (10 GeV) (cm ²)	500	~ 8000-10000
FOV (sr)	2.5	2.5
sky coverage	1/5	whole sky
Energy resolution (~ 400 MeV)	50 %	10 %
PSF (68 % cont. radius) 100 MeV 1 GeV	3° - 4° <1°	3° - 4° < 1°



	AGILE(GRI D)	FERMI (LAT)
FOV (sr)	2.5	2.5
sky coverage	1/5	whole sky
Average source livetime fraction per day	~ 0.4	~ 0.16
Attitude	fixed	variable
	i +	

MH Grondin, Société Astronomique de Bordeaux, 14 Oct. 2009



Etude de la nébuleuse du Crabe avec

- Chandelle standard de l'astronomie γ
- Ne peut être séparée spatialement du pulsar par *Fermi*
- → Nécessité d'éphémérides très précises pour construire le phasogramme du pulsar du Crabe.
 - Etude de la nébuleuse dans la région non-pulsée (rectangles bleus), donc non contaminée par le pulsar





<u>Phasogramme du pulsar du Crabe en rayons γ </u> (noir) et dans le domaine radio (rouge)



Etude de sources étendues

- Certaines nébuleuses sont plus étendues que la résolution angulaire de *Fermi*
- → Nécessité de caractériser leur extension et estimer leur flux. Pour cela, l'émission du fond diffus (galactique, extragalactique) doit être connue avec une grande précision



M.-H. Grondin & M. Lemoine-Goumard, ICRC 2009

Intérêt primordial pour l'étude de différents types de sources :

nébuleuses de pulsars, vestiges de supernovae, amas de galaxies...