

Nébuleuses de pulsars (PWNe) ou “plérions” et Vestiges de supernovae en “coquilles” (SNRs)

Yves Gallant

LPTA, CNRS/IN2P3, U. Montpellier 2

Avancées en physique des astroparticules
Observatoire de Haute-Provence, le 11 septembre 2009

Nébuleuses de pulsars

Observations en rayons γ au TeV

Magnétosphères et vents des pulsars

Accélération de particules aux chocs relativistes

Interlude: Sources de rayons cosmiques?

Vestiges de supernovae (en “coquilles”)

Implications des observations en rayons X

Observations en rayons gamma au TeV

Addendum: Superbulles

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

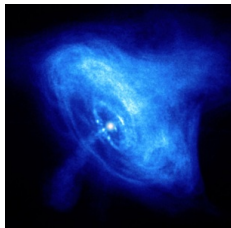
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

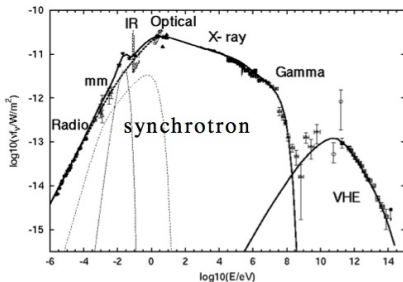
TeV γ -ray emitting Pulsar Wind Nebulae

In the beginning, there was the Crab Nebula...

- ▶ “standard candle” of TeV γ -ray astronomy since its discovery



Chandra



- ▶ *synchrotron* emission in most of the electromagnetic spectrum, from e^\pm accelerated in the pulsar, wind, termination shock
- ▶ TeV γ -ray emission results from *Inverse Compton* scattering of lower-energy photons (synchrotron, CMB, IR, starlight...)
- ▶ (hadronic contributions also proposed, e.g. Horns et al. 2007)
- ▶ for most other such *plerions*, non-thermal radiation detected only in radio and X-rays — until recently...

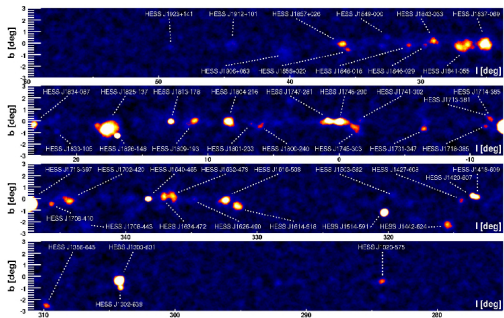
Galactic TeV γ -ray sources and PWNe

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- ▶ much improved sensitivity of current generation of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs), inaugurated by HESS (initial 4-telescope array completed 5.5 years ago)



- ▶ HESS Galactic plane survey (now covering Gal. longitudes -80° to 60°)

- ▶ currently about 50 Galactic TeV sources known
- ▶ about half are identified as PWNe and candidate PWNe

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

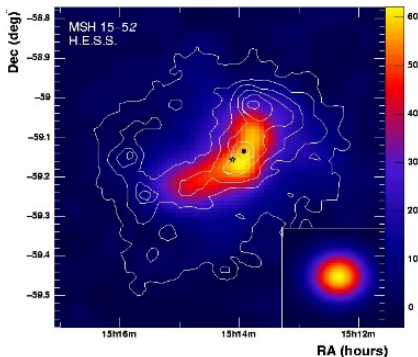
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

I – Young PWNe (and composite SNRs)

- ▶ in addition to the **Crab**, HESS discovered TeV emission from **G 0.9+0.1** (A&A, **432**, L25, 2005), **G 21.5–0.9** and **Kes 75** (Djannati-Ataï et al. 2007, ICRC, arXiv:0710.2247)
- ▶ **MSH 15–52** : first PWN angularly resolved in TeV γ -rays
- ▶ A&A **435**, L17 (2005)
- ▶ contours: ROSAT
- ▶ X-ray thermal shell and non-thermal “jet-like” nebula
- ▶ other composites similar in X-rays
- ▶ IC emission \propto (approximately uniform) target photon density
 \Rightarrow direct inference of spatial distribution of electrons



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “détachées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

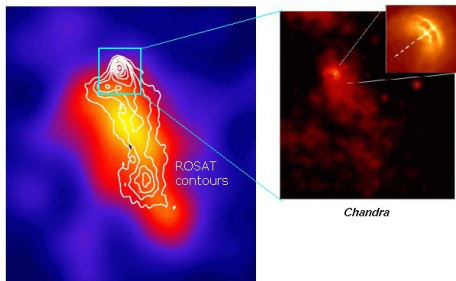
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

II – Older, “offset” PWNe

- ▶ TeV emission from the **Vela X** nebula (A&A **448**, L43, 2006)



- ▶ coincident with one-sided “jet” (Markwardt & Ögelman 1995)
- ▶ compact X-ray nebula not conspicuous in TeV γ -rays \Rightarrow torii and jets bright in X-rays because of higher magnetic field
- ▶ offset morphology explained by passage of anisotropic reverse shock, “crushing” the PWN (Blondin et al. 2001)?
- ▶ two TeV PWNe in **Kookaburra** appear to fall in same category

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

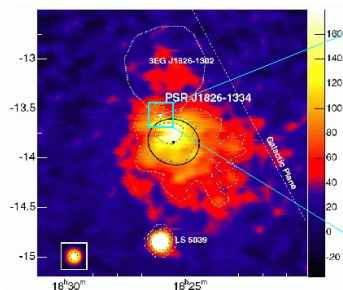
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

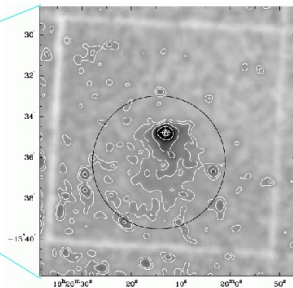
PWN established from TeV properties

- ▶ previous identifications based on positional and (when resolved) morphological match to known X-ray (or radio) PWNe

HESS J1825–137 as nebula of PSR B1823–13



HESS (A&A **460**, 365, 2006)



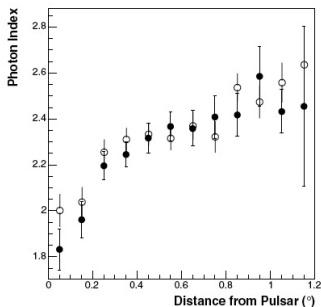
XMM (Gaensler et al. 2003)

- ▶ large TeV source, offset from PSR B1823–13 position
- ▶ smaller X-ray extension, E–W compact nebula and cometary “tail” in the direction of HESS source centroid

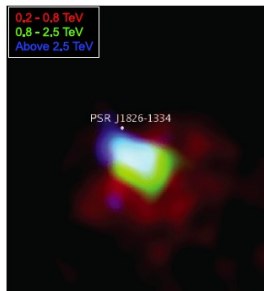
PWN established from TeV properties

- ▶ previous identifications based on positional and (when resolved) morphological match to known X-ray (or radio) PWNe

HESS J1825–137 as nebula of PSR B1823–13



A&A 460, 365 (2006)



Funk et al. 2007

- ▶ TeV γ -ray spectral steepening with distance away from pulsar
- ▶ consistent with radiative losses of e^\pm accelerated near the pulsar
- ▶ electron scattering CMB to 1 TeV radiates synchrotron \ll 1 keV (for typical B 's) \Rightarrow consistent smaller size of X-ray nebula

Young PWNe and composite SNRs

- ▶ plerion **G 54.1+0.3** (PSR J1930+1852) detected by *VERITAS* :
 $\Gamma \sim 2.3 \pm 0.3 \pm 0.3_{\text{sys}}$, $F(>1 \text{ TeV}) \sim 3\%$ Crab (Aliu et al. 2009)
- ▶ composite **G 292.2–0.5** (PSR J1119–6127) detected by *HESS* :
flux $\sim 4\%$ Crab, Γ steeper than typical, TeV offset from pulsar
(Djannati-Ataï et al. 2009)

Offset PWNe

- ▶ *VERITAS* discovery of extended emission from **G 106.3+2.7**
("Boomerang"), offset to PSR J2229+6114 : Flux $\sim 5\%$ Crab,
 $\Gamma \sim 2.3 \pm 0.3 \pm 0.3_{\text{sys}}$ (Aliu et al. 2009)
- ▶ *HESS* evidence for spectral steepening in **HESS J1303–631**
away from PSR J1301–6305 (Dalton et al., ICRC 2009)
- ▶ In G 292.2–0.5 and G 106.3+2.7, shell contribution plausible

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des
pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs
relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

 B et E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

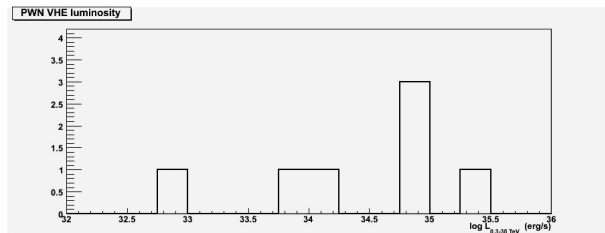
Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

TeV luminosities of established PWNe



- ▶ PWN distances: when pulsar detected (in radio), can use dispersion measure (DM) and Galactic electron distribution (Cordes & Lazio 2002)
- ▶ “Established” PWNe with known pulsars:
Median luminosity : $L_{0.3-30 \text{ TeV}} \approx 7 \times 10^{34} \text{ erg/s}$ ($\sim L_{\text{Crab}}$)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

 B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

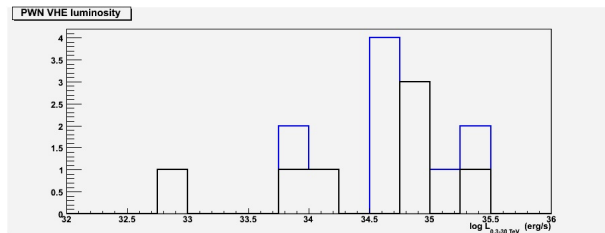
Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

TeV luminosities of candidate PWNe



- ▶ “Candidate” PWNe are TeV sources coincident with an energetically plausible pulsar, but with weaker/no MWL evidence for association
- ▶ Median luminosity : $L_{0.3-30 \text{ TeV}} \approx 5 \times 10^{34} \text{ erg/s}$
(consistent with confirmed PWN luminosity distribution)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

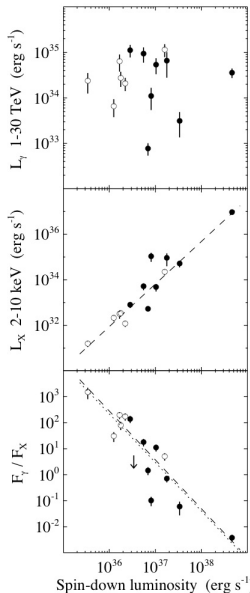
Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

TeV luminosity distribution of PWNe



- ▶ L_{TeV} much more tightly clustered (~ 2 decades) than L_X (6 decades); no correlation with \dot{E} (2-3 decades)
- ▶ strong correlation of L_X with \dot{E} , hence correlation of L_{TeV}/L_X with \dot{E} (ratio independent of estimate for D) (Grenier 2009, [Mattana et al. 2009](#))
- ▶ X-rays trace recently injected particles, whereas TeV γ -rays reflect history of injection since pulsar birth

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Overview of TeV-emitting PWNe

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- ▶ TeV γ -rays have opened a new observational window for the study of Pulsar Wind Nebulae, giving a more direct view of the accelerated particle population
- ▶ About half of Galactic TeV sources are PWNe or candidates:
 - ▶ 11 (+1) established TeV PWNe
 - ▶ 11 TeV sources coincident with known energetic pulsars
 - ▶ 5 TeV sources coincident with non-thermal X-ray nebulae
- ▶ Two broad categories of TeV PWNe:
 - ▶ young PWNe, typically in composite SNRs
 - ▶ offset PWNe, typically with older Vela-like pulsars
- ▶ With X-ray synchrotron, yield information about B in PWNe
- ▶ Deeper X-ray and radio observations may well yield further TeV PWNe or candidates

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

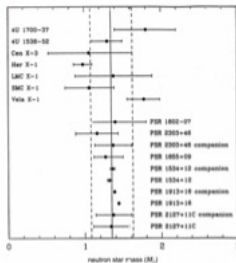
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Étoiles à neutrons

- Un des stades finaux de l'évolution stellaire ("étoiles mortes") avec les naines blanches et les trous noirs
- Formées dans les explosions en supernovae d'étoiles massives (d'environ 4 à 10 M_{\odot})
- Maintenues par la *pression de dégénérescence* des neutrons (comme celle des électrons pour les naines blanches) \Rightarrow masse maximale $\sim 3 M_{\odot}$ (dépend de l'équation d'état)
- Masses observées (dans les binaires où on peut la déduire) $\sim 1.4 M_{\odot}$
- Rayon ~ 10 km \Rightarrow moment d'inertie $I \approx 10^{45} \text{ g cm}^2$



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "détachées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

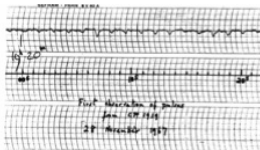
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Rotation rapide

- Découverte des pulsars (1967): pulsations radio B1919+21, $P = 1.33$ s
- \Rightarrow étoile à neutrons (aucun autre objet connu ne peut tourner à cette vitesse)
- Pulsars jeunes: $P \sim$ quelques $\times 10$ ms (Crabe : 33 ms; PSR J0537-6910 : 16 ms)
- S'explique par la conservation du moment cinétique lors de l'effondrement du coeur de l'étoile massive
- Pulsars "milliseconde" ($P < 10$ ms) : "recyclés", rotation accélérée par transfert de masse dans une binaire PSR B1937+21 (découvert en 1982): $P = 1.56$ ms J1748-2446ad (découvert en 2005) : $P = 1.40$ ms
- Énergie de rotation $E_{\text{rot}} = \frac{I\Omega^2}{2} = 2.0 \times 10^{52} P_{\text{ms}}^{-2} \text{ erg}$



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

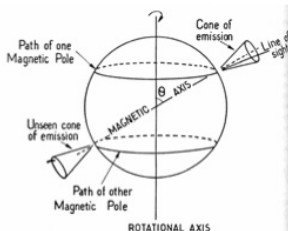
Addendum: Superbulles

Champ magnétique fort

- Tous les pulsars isolés ralentissent (*spin down*)
- Dipôle magnétique dans le vide:

$$\dot{E}_{\text{rot}} = I\Omega\dot{\Omega} = -\frac{B_*^2 R_*^6 \Omega^4}{6c^3}$$

(validité plus générale)



- Mesure de P et \dot{P} , I et R_* supposés connus \Rightarrow “mesure” de B_*
- Pulsars “ordinaires” : $B_* \sim 10^{12}$ gauss (= 10^8 tesla) (!)
- Dans les pulsars X accrétants, raies d’absorption cyclotron correspondant à un champ magnétique du même ordre
- Conservation du flux magnétique lors de l’effondrement
- Pulsars “milliseconde” : $B_* \sim 10^8$ gauss
- Dissipation de B_* lors de la phase d’accrétion?

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Conséquence : Champs électriques forts

- Champ électrique induit

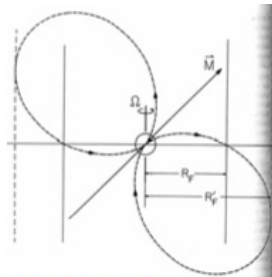
$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} = -\frac{1}{c}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$$

partout où un plasma dense
est en corotation

- Notamment à l'intérieur de
l'étoile à neutrons
- Implique la présence d'une certaine densité de charge

$$\rho = \frac{1}{4\pi} \nabla \cdot \mathbf{E} \approx -\frac{\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B}}{2\pi c} \equiv \rho_{GJ} \quad (\text{Goldreich \& Julian 1969})$$

- À la surface, $\mathbf{E} \gg$ gravité, forces interatomiques (*work function*) \Rightarrow particules chargées aisément extraites de l'étoile jusqu'à $\rho \approx \rho_{GJ}$ (*space-charge limited flow*)



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des
pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs
relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

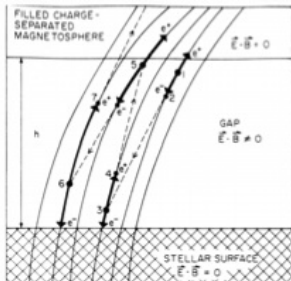
Addendum: Superbulles

Conséquence : Création de paires e^\pm

- Particules accélérées (e^-) par \mathbf{E} suivent la direction de \mathbf{B}

- \Rightarrow rayonnement "de courbure" jusqu'aux rayons γ

- Observée au GeV (*EGRET*)? (modèle de la calotte polaire)



- Interaction du γ avec \mathbf{B} de l'étoile : création d'une paire e^\pm dès que $\frac{E_\gamma}{m_e c^2} \frac{B}{B_{\text{crit}}} \sin \theta > 8.8 \times 10^{-2}$, $B_{\text{crit}} \approx 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$
- e^\pm sont accélérés dans le même \mathbf{E} et rayonnent à leur tour \Rightarrow création de paires en cascade
- Permet d'annuler le champ électrique ($\rho = \rho_{GJ}$) dans la magnétosphère, au-delà du front de formation de paires

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

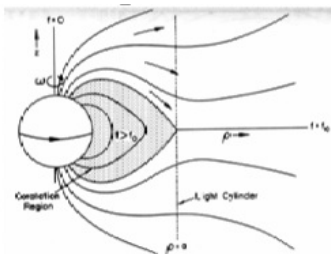
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Cylindre-lumière et calottes polaires

- Au-delà d'un rayon $R_{LC} = c/\Omega$, la corotation n'est plus possible ($v_{\text{rot}} > c$) : "cylindre-lumière"
- Lignes de champ magnétique "fermées" à l'intérieur de R_{LC} : plasma e^\pm dense, en corotation
- Lignes de champ "ouvertes" : plasma s'échappant de la magnétosphère, en un "vent" relativiste
- Points d'ancrage des lignes ouvertes à la surface de l'étoile : définition des "calottes polaires"
- Champ approximativement dipolaire à l'intérieur de R_{LC}
 \Rightarrow surface d'une calotte polaire : $A_{PC} \approx \pi \Omega R_*^3 / c$



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

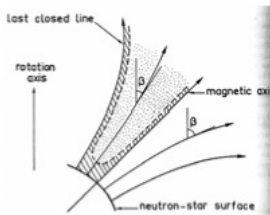
Courant de Goldreich-Julian et E_{\max}

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- Vent du pulsar vers le milieu ambiant issu des calottes polaires
- Densité de courant maximale pour les particules extraites de la surface : $\rho_{\text{GJ}} \cdot c$



- Courant total :

$$\dot{N}_{\text{GJ}} \equiv \frac{A_{\text{PC}} \cdot \rho_{\text{GJ}} \cdot c}{Ze} = \frac{B_* R_*^3 \Omega^2}{2Zec} \approx 5 \times 10^{33} \left(\frac{B_*}{4 \times 10^{12} \text{ G}} \right) \frac{1}{Z} \left(\frac{\Omega}{200 \text{ s}^{-1}} \right)^2 \text{ s}^{-1}$$

- Énergie maximale par particule extraite de l'étoile:

$$E_{\max} \equiv \frac{\dot{E}_{\text{rot}}}{\dot{N}_{\text{GJ}}} = \frac{Ze B_* R_*^3 \Omega^2}{3c^2} \approx 1.8 \times 10^{16} \cdot Z \left(\frac{B_*}{4 \times 10^{12} \text{ G}} \right) \left(\frac{\Omega}{200 \text{ s}^{-1}} \right)^2 \text{ eV}$$

ou différence de potentiel maximale à travers la calotte polaire :

$$E_{\max} \approx Ze \Phi_{\max} \quad \left(\text{N.B. : } \dot{N}_{\text{GJ}} \propto \Phi_{\max} \propto \sqrt{\dot{E}_{\text{rot}}} \right)$$

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

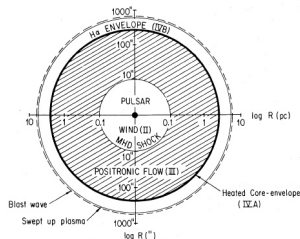
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Choc terminant le vent et nébuleuse synchrotron

- ▶ vent relativiste rencontre le milieu ambiant (vestige de la supernova qui a donné naissance au pulsar) : *chocs*

1. choc de terminaison du vent
2. choc d'expansion de la nébuleuse dans les éjecta (non-relativiste)



- ▶ nébuleuse synchrotron (radio, rayons X, ...) en aval du choc
- ▶ spectre en loi de puissance des électrons / positons
- ▶ $\Rightarrow e^{\pm}$ accélérés au choc de terminaison du vent (relativiste)?

Accélération de particules aux chocs relativistes

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

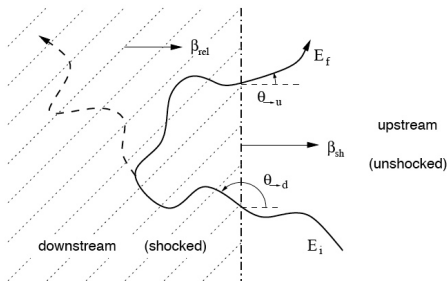
Addendum: Superbulles

Accélération de Fermi aux chocs : bases

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009



► particule diffuse élastiquement en amont et en aval ($E'_i = E'_f$)

► traversées du choc \Rightarrow transformations de Lorentz :

$$E'_i = \Gamma_{\text{rel}}(1 - \beta_{\text{rel}} \cos \theta_{\rightarrow d})E_i \text{ et } E_f = \Gamma_{\text{rel}}(1 + \beta_{\text{rel}} \cos \theta_{\rightarrow u})E'_f$$

► en moyenne, gain d'énergie pour chaque traversée du choc

► probabilité d'échappement en aval (et fin de l'accélération)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Chocs non-relativistes

- ▶ distribution des particules accélérées approximativement isotrope $\Rightarrow \langle \cos \theta_{\rightarrow d} \rangle \approx -2/3$ et $\langle \cos \theta_{\rightarrow u} \rangle \approx 2/3$
- ▶ gain d'énergie moyen

$$G_E \equiv \left\langle \frac{E_f}{E_i} \right\rangle \approx (1 - \beta_{\text{rel}} \langle \cos \theta_{\rightarrow d} \rangle)(1 + \beta_{\text{rel}} \langle \cos \theta_{\rightarrow u} \rangle) \\ \approx 1 + \frac{4}{3} \beta_{\text{rel}} = 1 + \frac{4}{3} (\beta_1 - \beta_2)$$

- ▶ probabilité de retour : $P_{\text{ret}} = 1 - 4\beta_2$
- ▶ \Rightarrow spectre en **loi de puissance** :

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-p}, \quad p = 1 - \frac{\ln P_{\text{ret}}}{\ln \langle E_f/E_i \rangle} = \frac{r+2}{r-1},$$

où $r \equiv \beta_1/\beta_2$ est le *rapport de compression* du choc

- ▶ choc fort dans un gaz atomique non-relativiste : $r = 4 \Rightarrow p = 2$
(spectre de Fermi aux chocs pour des *particules-test*)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

 B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

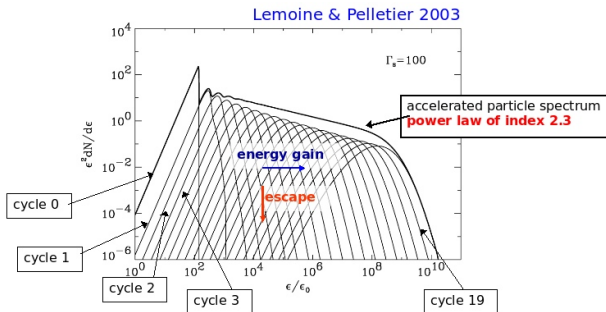
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Accélération de Fermi aux chocs relativistes

- ▶ cas ultra-relativiste : $\Gamma_{\text{rel}} \gg 1$ (vents de pulsars $\sim 10^3 - 10^6$)
- ▶ grande probabilité d'échappement par cycle : $P_{\text{ret}} < 0.5$
- ▶ distribution des particules accélérées très anisotrope : $G_E \sim 2$ (sauf traversée initiale du choc : $G_E \sim \Gamma_{\text{rel}}^2$)
- ▶ après plusieurs cycles de traversées du choc : loi de puissance (Gallant & Achterberg 1999, Achterberg et al. 2001)



- ▶ indice spectral dépend de la nature du transport des particules

Nébuluses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

 B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

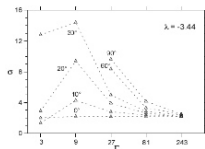
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Universal spectrum at ultra-relativistic shocks(?)

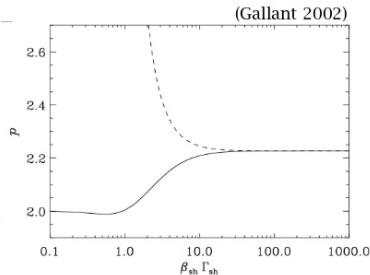
- Assume *isotropic* direction-angle diffusion as dominant particle transport process both upstream and downstream (i.e. isotropic turbulence dominates over regular magnetic field)
- Monte-Carlo simulations (Achterberg et al. 2001) and semi-analytical eigenfunction method (Kirk et al. 2000) yield power-law spectrum with spectral index $p = 2.23 \pm 0.01$ for ultra-relativistic shocks ($\Gamma \gg 1$)



- Convergence to a compatible value at high Γ earlier found in simulations with anisotropic transport (Bednarz & Ostrowski 1998)

- Independent of equation of state in shock jump conditions
- Agreement with analytical result (Keshet & Waxman 2005)

$$s_{\text{iso}} = (3\beta_u - 2\beta_u\beta_d^2 + \beta_d^3)/(\beta_u - \beta_d)$$
- Confirmed in other numerical studies (Ellison & Double 2002, Lemoine & Pelletier 2003, Morlino et al. 2007...)



Short-scale magnetic turbulence

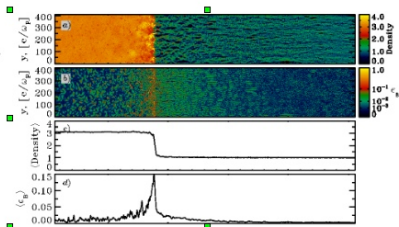
PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- Turbulent fields need not exist upstream (if generated at the shock); acceleration can still operate, then yields $p=2.3$ (Achterberg et al. 2001; Morlino et al. 2007)
- Turbulent magnetic field with short (compared to r_L) correlation length is needed to allow efficient acceleration with multiple cycles
- Such turbulent fields could be produced by a Weibel instability (Medvedev & Loeb 1999), and seem to be present in GRB blast waves (Gruzinov & Waxman 1999)

(Spitkovsky 2008) →



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

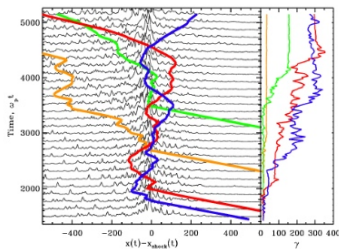
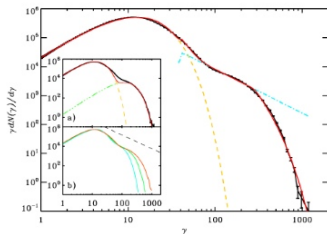
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Long-term Particle-In-Cell (PIC) Simulations : Fermi process at last? (Spitkovsky 2008)

- Self-consistent simulations of field structure and particle dynamics
- Relativistic ($\Gamma=21$) shock in initially *unmagnetised*, e^+/e^- plasma
- Downstream spectrum well described as (relativistic) Maxwellian + power-law tail (exp. cutoff) : $p=2.4\pm0.1$
- Cutoff energy increasing with time
- Energy gain process similar to Fermi mechanism: gain from scattering in upstream (measured downstream)
- $\sim 10\%$ of energy in non-thermal tail
- Valid for weakly magnetised shocks
- **To be continued** (longer simulations, electron-ion)...



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

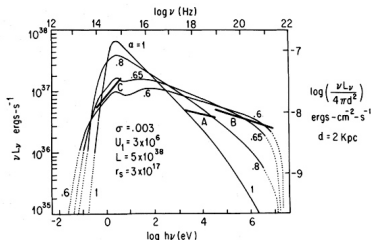
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Comparison with observations

X-ray (and TeV γ -ray) spectra of PWNe

- Kennel & Coroniti (1984b) found a best fit to the optical and X-ray spectrum of the Crab Nebula requiring injection of particles with $p = 2.2-2.3$, where $dN/d\gamma \propto \gamma^{-p}$



- many other PWNe have X-ray spectra consistent with this value

Spectra of gamma-ray burst afterglows

- in the relativistic fireball model, afterglow results from particles accelerated at the relativistic outer blast wave
- typical inferred spectrum $p = 2.3 \pm 0.1$ (Waxman 1997, Meszaros 2002, Piran 2004)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

PWN radio spectra and pre-acceleration

PWNe et SNRs

Yves Gallant

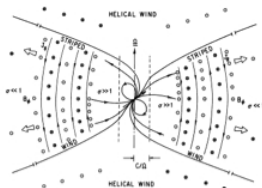
OHP, 11/9/2009

- X-ray spectrum of the Crab Nebula and other plerions compatible with (synchrotron-loss-steepened) relativistic Fermi acceleration spectrum ($\alpha_X \approx 1.1$)
- plerion radio spectra ($\alpha_R \sim 0$) require a different mechanism
- Crab radio wisps (Bietenholz et al. 2004) and infrared spectral map (Gallant & Tuffs 2002) suggest radio-emitting electrons are accelerated at present time

Resonant ion cyclotron wave acceleration?

- a possibility (Gallant et al. 2002) is the resonant ion wave acceleration mechanism of Hoshino et al. (2004), working from $\Gamma_w m_e c^2$ to $\Gamma_w m_i c^2$
- would imply $\Gamma_w \sim 10^3$ for the Crab (vs $\geq 10^6$ in Kennel & Coroniti 1984b)!

Striped wind reconnection at termination shock?



- Oblique rotator wind has alternating magnetic polarities in equatorial wind ("striped" pattern): Coroniti (1990), Bogovalov (1999)
- reconnection too slow to annihilate stripes inside Crab termination shock (Lyubarsky & Kirk 2001)?
- Lyubarsky (2003) examined shock in striped wind, and concluded that stripes reconnect completely at shock, accelerating electrons to required $p \approx 1$ spectrum

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

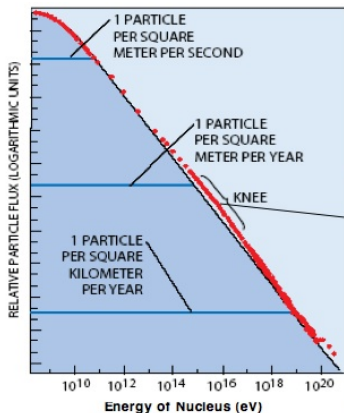
Addendum: Superbulles

Galactic Cosmic Rays (GCRs)

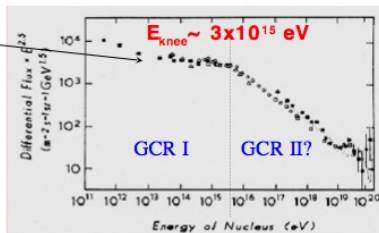
PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009



- $E < \text{a few hundred MeV}$: Solar cosmic rays
- $E > 3 \times 10^{18}$ eV (not confined by B) : extragalactic (UHE)CRs
- in between: Galactic CRs



- Direct measurements only at Earth (satellites and atmosphere)
- Known to fill the Galaxy from diffuse gamma-ray emission (*EGRET*)
- Known *not* to fill intergalactic space from non-detection of SMC (and lower inferred CR density in LMC)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

OHP: 11/9/2009

SNRs avec MCs

- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡

Théorie moderne de l'accélération aux SNRs

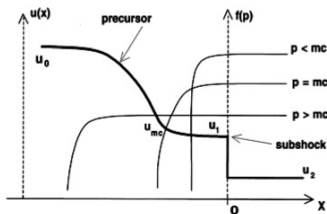
PWNe et SNRs

Yves Gallant

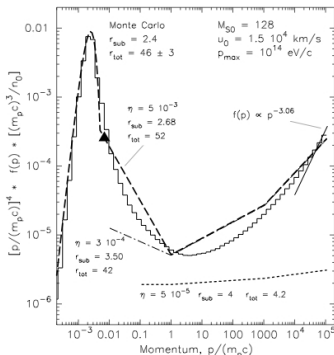
OHP, 11/9/2009

Modifications non-linéaires du choc

- ▶ densité d'énergie des particules accélérées non-négligeable
⇒ freinage et chauffage du gaz en amont (*précurseur*)
- ▶ rapport de compression du (sous-)choc < 4 , rapport total > 4
- ▶ modification du spectre des particules accélérées : "concavité"



(Berezhko & Ellison 1999)



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "détachées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

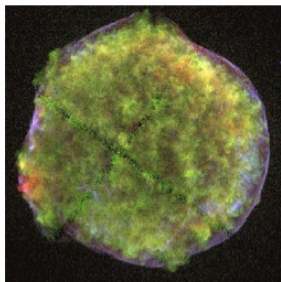
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

X-ray evidence : the case of Tycho's SNR

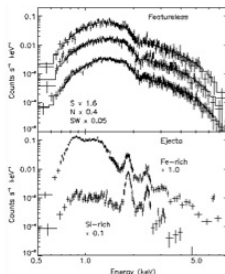
(1) Non- thermal spectra

(Warren et al. 2005)



X-ray colors: **S,Si** and **Fe** line
Emission (thermal from ejecta),
4- 6 keV continuum

- most young shell SNRs (Cas A, *Kepler*, SN 1006, **G347.3-0.5**, **G266.2-1.2**, RCW 86...) display (dominant) non- thermal spectra
- if synchrotron radiation, $\Rightarrow E_e \sim 10\text{-}100\text{ TeV}$ (for typical B)



Continuum rim (**blast wave**)
shows featureless power-law
spectra (no detectable thermal
line emission)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des
pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs
relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNr

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

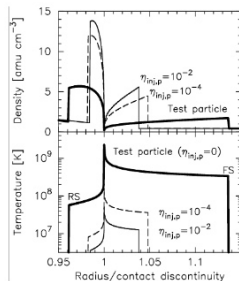
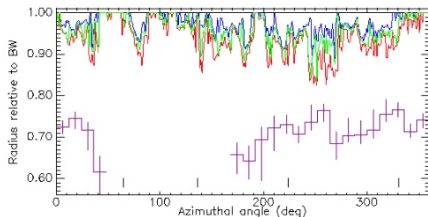
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

(2) Indirect evidence for accelerated ions : Modified hydrodynamics

- Warren et al. (2005) measured ratio between blast wave (BW) and contact discontinuity (CD) radii : mean 0.96
- ejecta / shocked ambient medium CD subject to Rayleigh-Taylor instability => protruding fingers; correcting for this bias, still get ~ 0.93
- pure gas dynamics: expect 0.86 or less



- Decourchelle, Ellison & Ballet (2000) showed this can be explained by significant accelerated ion pressure
- **Caveat:** turbulent B -field pressure not taken into account (for which see Caprioli et al. 2009)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "détachées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

 B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

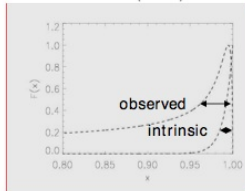
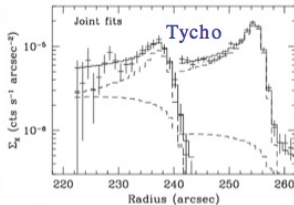
(3) Morphology : Thin non-thermal rims

- Thin, non-thermal filaments at SNR edge: not expected morphology for thermal or adiabatic synchrotron emission
- Most likely due to synchrotron losses of the high-energy emitting electrons (Vink & Laming 2003, Berezhko & Völk 2004...); implies large magnetic fields
- Magnetic field amplification driven by CRs (Bell & Lucek 2001, Bell 2004) can help accelerate ions towards $E \sim 3 \times 10^{15}$ eV
- Filament geometry: projection effect

Δ For an exponential profile
the de-projected width is $P/4.6$
(Ballet 2005)

Typical filament width = 0.05 - 0.2 pc

- Alternate explanation: sharp rim due to decay of magnetic turbulence (Pohl, Yan & Lazarian 2005); but consistent with radio morphology?



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

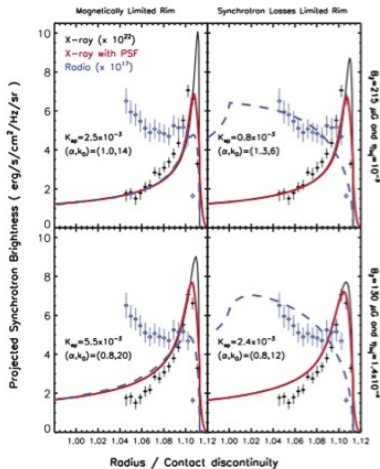
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

More detailed studies in Tycho

(Cassam-Chenaï et al. 2007)

- Observe X-ray spectral steepening behind shock (synchrotron losses)
- Lack of thermal emission from rim: $n_0 < 0.6 \text{ cm}^{-3}$
- Use cosmic-ray-modified hydrodynamics to reproduce distance between blast wave and contact discontinuity
- Consider synchrotron-loss vs magnetic damping-limited rims, radio and X-ray profiles
- Magnetic damping scenario fails to explain radio profile



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B et E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Methodology : Self-consistent magnetic field

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

■ *Isotropic* turbulence + diffusion laws up/downstream

• Radiatively limited rims:

$$t_{\text{acc}}(E_{\text{emax}}) = t_{\text{sync}}(E_{\text{emax}})$$

• Compare $\Delta R_{\text{obs}}/P$ with size of the rim:

$$\Delta R_{\text{rim}}(D, B) = f(\Delta R_{\text{adv}}, \Delta R_{\text{diff}}) \quad \text{Berezhko \& Voelk 2004}$$

$$\Rightarrow \Delta R_{\text{rim}}, E_{\text{emax}} \Rightarrow B(\alpha, r, V_{\text{sh}}, E_{\text{ph-cut-off}}, \Delta R_{\text{obs}})$$

Parizot, Marcowith, Ballet & Gallant 2006

SNR	($r=4$)	$B(\alpha=1, r=4) \mu\text{G}$	$B(1,10)$	$B(1/3,4)$
Cas A	3.2	390	280	350
Kepler	4.5	340	250	300
Tycho	10	530	400	400
SN 1006	1	110	95	100
G347.5-0.5	1	96	84	92

The magnetic field is highly amplified in SNR displaying X-ray filaments

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

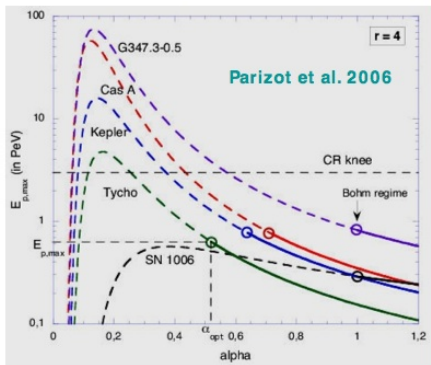
Maximum energy and constraints on turbulence

- $B \Rightarrow E_{pmax}(\alpha)$ for protons
 $t_{acc}(E_{pmax}) = t_{SNR}$

- Constraints on α :
Dashed lines are the
rejected values of α :
 $D(E_{pmax}) < D_{Bohm}$

$$E_{pmax} < E_{knee} (3 \text{ PeV})$$

- “Worse” for $r = 10$



It is difficult to reach/go beyond the knee
even with B- field amplification

Caveat: Turbulence assumed *isotropic*: $\kappa_{perp} = \kappa_{parallel}$

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “détachées”

Population au TeV

Magnétosphères des
pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs
relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

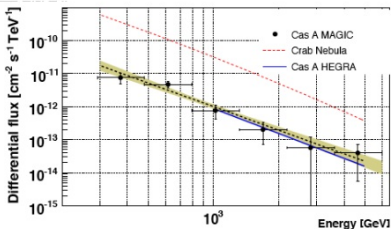
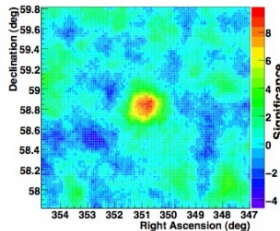
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

TeV γ -ray observations

(next to) youngest Galactic SNR : Cassiopeia A

- age ~ 330 yr (no clear SN observation)
- VHE emission discovered by *HEGRA* (Aharonian et al. 2001, *A&A* **370**, 112)
- 232 hours (!), significance 5σ
- unresolved, centroid in Cas A
- Confirmed by *MAGIC* : 5.2σ in 47 h (Albert et al. 2007) and by *VERITAS*



- spectra compatible
- steep spectrum : $\Gamma = 2.4 \pm 0.2$
- $L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 3 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
($D \approx 3.4 \text{ kpc}$)
- sharp synchrotron X-ray rims, etc. \Rightarrow high $B \sim \text{mG}$
- hadronic emission favoured

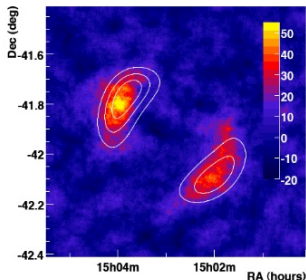
Other historical shell-type SNR : SN 1006

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- $\sim 30'$ diameter shell
- *CANGAROO-I* claimed bright NE hotspot (Tanimori et al. 1998), not confirmed by *HESS* (2005, *A&A* 437, 135) nor *CANGAROO-III*
- after 130 h, *HESS* detection! (Naumann-Godo et al., ICRC 2009)
- flux $\Rightarrow L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 6 \times 10^{32} \text{ erg/s}$ (assuming $D \approx 2.2 \text{ kpc}$)



- Morphology seems to match X-ray synchrotron (contours: *XMM* map smoothed to match *HESS* PSF)
- Leptonic scenario $\Rightarrow B \sim 30 \mu\text{G}$ (lower than inferred from rims)
- Hadronic scenario : given low ($n \sim 0.05 \text{ cm}^{-3}$) medium density, requires flat ($p \approx 2$) spectrum for reasonable energetics
- whether protons or electrons, shows distribution of accelerated particles in SN 1006

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

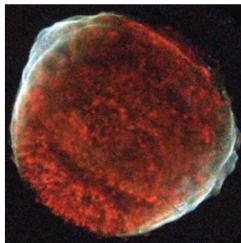
Bipolar morphology of particle acceleration

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

- SN 1006 : explosion in nearly uniform, undisturbed medium?
 - Type Ia : no stellar progenitor wind
 - High above the Galactic plane
- Rothenflug et al. (2004) : X-ray image compatible with synchrotron “polar caps”, not with “equatorial band”
- Suggests that **parallel** shocks, and not **perpendicular**, are where particle acceleration is most efficient



Young SNRs in TeV gamma-rays

- Other historical shell-type SNRs somewhat less luminous in TeV γ -rays than Cas A
- Lower surrounding medium density(?), or less efficient particle acceleration

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

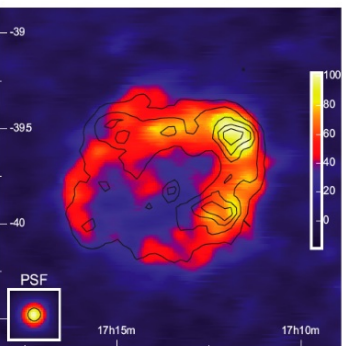
SNRs with shell morphology in TeV γ -rays

PWNe et SNRs

Yves Gallant

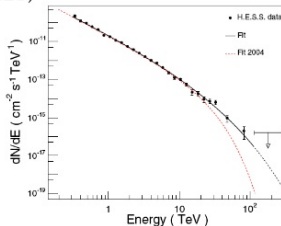
OHP, 11/9/2009

RX J1713.7-3947 (or G347.3-0.5)



- VHE γ -ray emission discovered by CANGAROO (Muraishi et al. 2000)
- first resolved SNR shell in VHE γ -rays (HESS 2004, *Nature* 432, 75)
- very good spatial correlation with (non-thermal) X-rays (ASCA 1-3 keV) (HESS 2006, *A&A* 449, 223)
- large zenith angle observations \Rightarrow spectrum 0.3-100 TeV (HESS 2007, *A&A* 449, 223)

- power law $\Gamma \approx 2.0$ with cutoff or break at $E_\gamma \sim 10$ TeV (depending on model)
- $L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 10^{34} \text{ erg/s}$ (assuming $D \approx 1.3 \text{ kpc}$)
- leptonic emission scenario $\Rightarrow B \sim 9 \mu\text{G}$



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SN

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B et E_γ maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

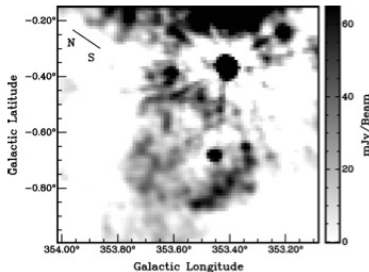
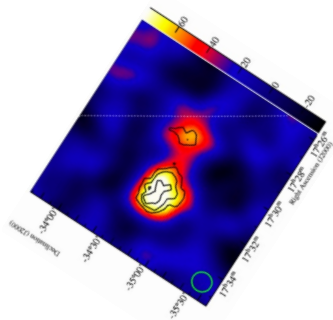
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

A new non-thermal shell : HESS J1731-347

- ▶ discovered in *HESS* Galactic plane survey; $\Gamma = 2.3 \pm 0.1 \pm 0.2$
- ▶ coincident radio shell discovered with ATCA data: G 353.6-0.7

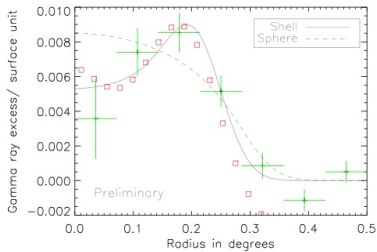
(Tian et al. 2008)



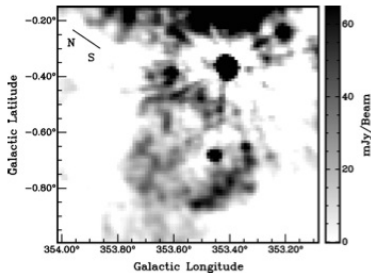
A new non-thermal shell : HESS J1731–347

- ▶ discovered in *HESS* Galactic plane survey; $\Gamma = 2.3 \pm 0.1 \pm 0.2$
- ▶ coincident radio shell discovered with ATCA data: G 353.6–0.7

(Acero et al., ICRC 2009)



(Tian et al. 2008)

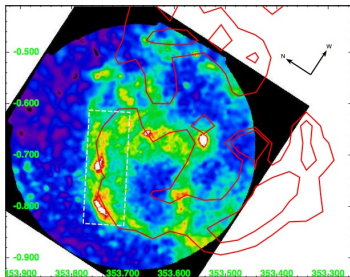


- ▶ further *HESS* observations: hint of limb-brightening ($\sim 2\sigma$ level)

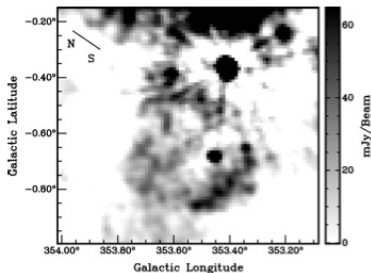
A new non-thermal shell : HESS J1731-347

- ▶ discovered in *HESS* Galactic plane survey; $\Gamma = 2.3 \pm 0.1 \pm 0.2$
- ▶ coincident radio shell discovered with ATCA data: G 353.6-0.7

(Acero et al., ICRC 2009)



(Tian et al. 2008)



- ▶ further *HESS* observations: hint of limb-brightening ($\sim 2\sigma$ level)
- ▶ X-ray observations of (part of) shell reveal rims of emission with non-thermal spectra! (no evidence for thermal emission)
- ▶ X-ray absorption gradient suggest SNR lies behind a CO cloud
- ▶ $D > 3.5 \text{ kpc} \Rightarrow L_{1-10 \text{ TeV}} > 2 \times 10^{34} \text{ erg/s}, R > 15 \text{ pc}$

One-zone spectral modeling of G 347.3–0.5

PWNe et SNRs

Yves Gallant

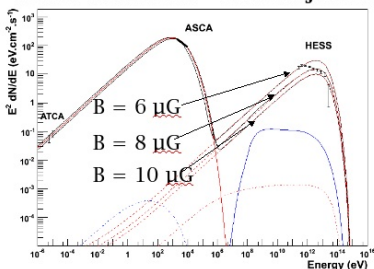
OHP, 11/9/2009

Primary population: electrons ?

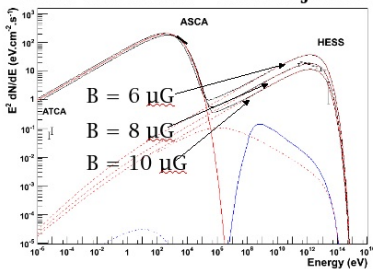
- Need about 8 μG B field to match flux ratios
- Simplest electronic models don't work well

- Simple one-zone model
- Electrons & protons injected with the same spectral shape
- Energy losses + escape of particles out of the shell taken into account

Power-law index = 2.2 at injection



Power-law index = 2.4 at injection



(M. Lemoine-Goumard)

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

One-zone spectral modeling of G 347.3–0.5

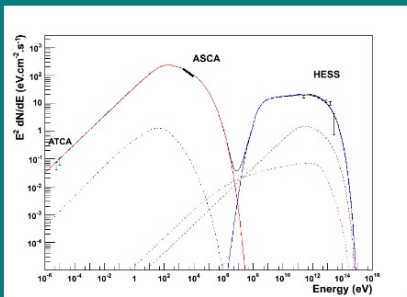
PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

Primary population: protons ?

- Spectral shape at injection : power-law w/ exponential cut-off
 $E_{\text{cut}} = 120 \text{ TeV}$ and index = 2.0
- Energy injected = 10^{50} ergs
- Electron/proton ratio = 5×10^{-4}
- Magnetic field = $35 \text{ } \mu\text{G}$ & Density = 1.5 cm^{-3}



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

(M. Lemoine-Goumard)

SNR / Molecular Cloud interactions : W 28

(*HESS* 2008, *A&A* **481**, 401)

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNr

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

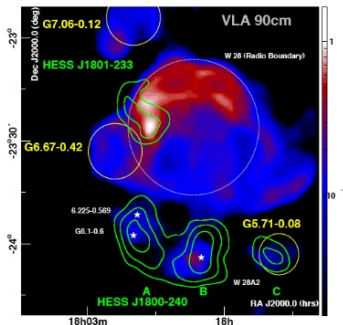
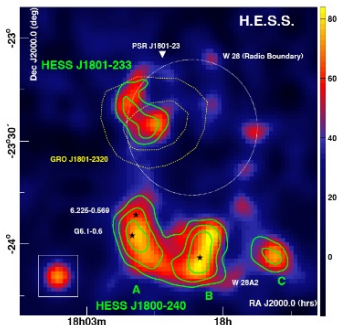
Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

- new source HESS J1801-233 on E rim of SNR W 28, radio hot spot
- coincident with EGRET source



SNR / Molecular Cloud interactions : W 28

(*HESS* 2008, *A&A* **481**, 401)

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "détachées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNr

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B et E_p maximale

Observations au TeV

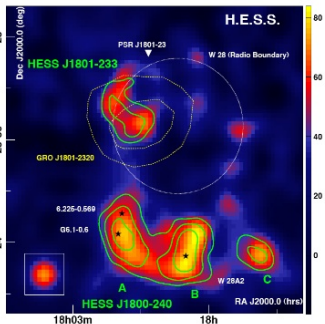
Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

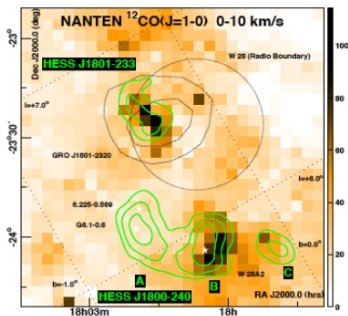
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles



- new source HESS J1801-233 on E rim of SNR W 28, radio hot spot
- coincident with EGRET source
- morphological match to CO cloud
- 1720 MHz OH masers : signature of shock / MC interaction



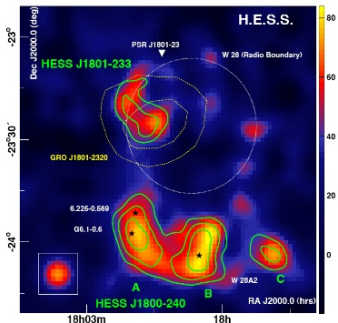
SNR / Molecular Cloud interactions : W 28

(*HESS* 2008, *A&A* **481**, 401)

PWNe et SNRs

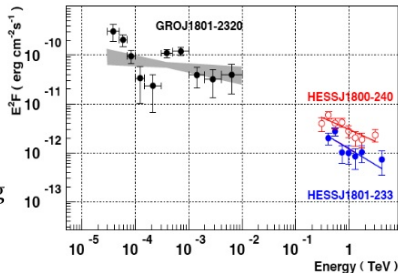
Yves Gallant

OHP, 11/9/2009



- new source HESS J1801-233 on E rim of SNR W 28, radio hot spot
- coincident with EGRET source
- morphological match to CO cloud
- 1720 MHz OH masers : signature of shock / MC interaction

steep spectrum, $\Gamma = 2.7 \pm 0.3_{\text{stat}}$
 (flattening in EGRET range)
 $L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 5 \times 10^{32} \text{ erg/s}$, assuming
 $D \sim 2 \text{ kpc}$



Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNr

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

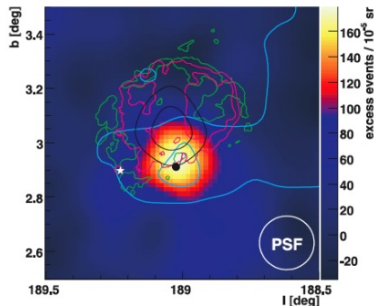
Addendum: Superbulles

SNR / Molecular Cloud interactions : IC 443

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009



- discovery of an unresolved source in IC 443 (*MAGIC* 2007, *ApJ* 664, L87)
- not coincident with PWN (white star)
- direct coincidence with peak CO density (blue contours), 1720 MHz OH maser (black dot)
- compatible with 3EG J0617+2238
- very steep spectrum, $\Gamma = 3.1 \pm 0.3_{\text{stat}}$
- $L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 2 \times 10^{32} \text{ erg/s}$ with $D \approx 1.5 \text{ kpc}$

General properties

- correlation with high density \Rightarrow strongly suggests hadronic emission
- steep spectra, flattening in EGRET range, low 1–10 TeV luminosities
- Probe of accelerated proton spectra in SNRs?
- Caveat : passage in MC may alter shock acceleration properties

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

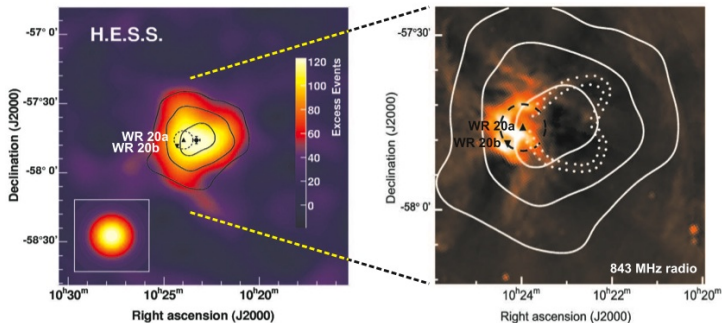
Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

Discovery of TeV γ -rays from Westerlund 2

(*HESS* 2007, *A&A* **467**, 1075)



MOST (843 MHz)

- ▶ significantly extended source (Gaussian width 0.18°)
- ▶ steep spectrum : $\Gamma = 2.53 \pm 0.16 \pm 0.10_{\text{sys}}$ (380 GeV – 20 TeV)
- ▶ $D = 6.0 \pm 1.0$ kpc (Dame 2007) $\Rightarrow L_{1-10 \text{ TeV}} \sim 4 \times 10^{34}$ erg/s ($\sim L_{\text{Crab}}$), more luminous than any shell SNR
- ▶ emission consistent with radio “blister” blown into medium (Whiteoak & Uchida 1997); $R \sim 20$ pc

PWNe et SNRs

Yves Gallant

OHP, 11/9/2009

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe “décalées”

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNr

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges “historiques”

Coquilles au TeV

Interprétation

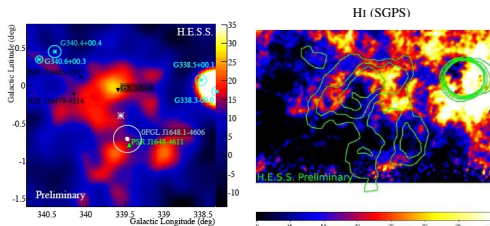
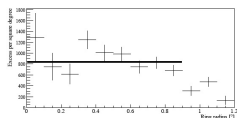
SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

The TeV-emitting superbubble of Westerlund 1

- ▶ extremely massive star cluster: 24(!) Wolf-Rayet stars (versus 2 in Westerlund 2), 80 blue supergiants...

(Ohm et al. for *HESS*,
ICRC 2009)



- ▶ very extended TeV γ -ray emission, up to 0.9° from Westerlund 1
- ▶ hint of shell morphology, but limb-brightening not significant
- ▶ at $D = 4$ kpc, fills region of $R \sim 60$ pc (!)
- ▶ matches HI shell around Westerlund 1 (Kothes & Dougherty 2007)
- ▶ more than enough power in stellar winds ($L \sim 10^{39}$ erg/s, + SNe, Muno et al. 2006) to explain a superbubble of this size
- ▶ spectral analysis in progress...

Nébuleuses de pulsars

Observations au TeV

Similaires au Crabe

PWNe "décalées"

Population au TeV

Magnétosphères des pulsars

Propriétés

Conséquences

Accélération aux chocs relativistes

Mécanisme de Fermi

Spectre et turbulence

Spectres observés

Rayons cosmiques

Vestiges de SNe

Contexte théorique

Observations en X

Spectres non-thermiques

Hydrodynamique modifiée

Bords synchrotron minces

B and E_p maximale

Observations au TeV

Vestiges "historiques"

Coquilles au TeV

Interprétation

SNRs avec MCs

Addendum: Superbulles

