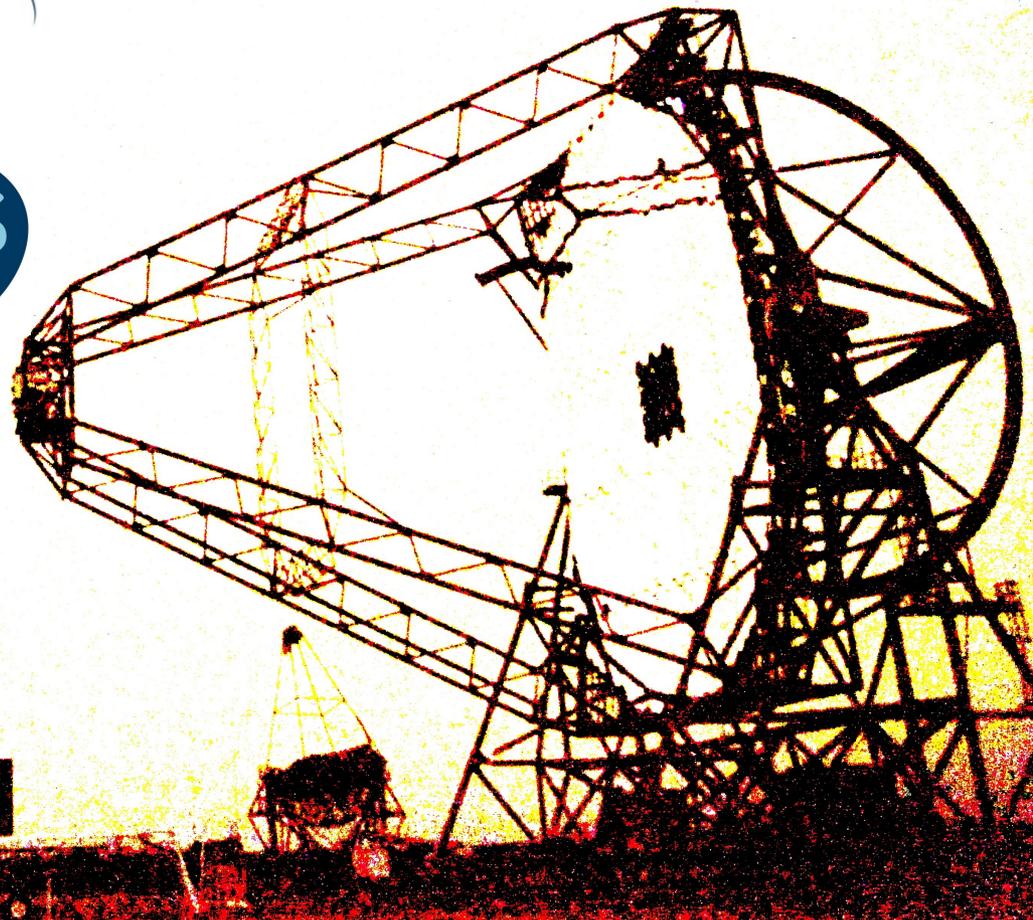


# Recherche de l'émission périodique des pulsars et étude de la violation de l'invariance de Lorentz avec HESS-II



**Mathieu Chretien**  
**Julien Bolmont**



**JRJC 2013, 1-7 Décembre 2013**

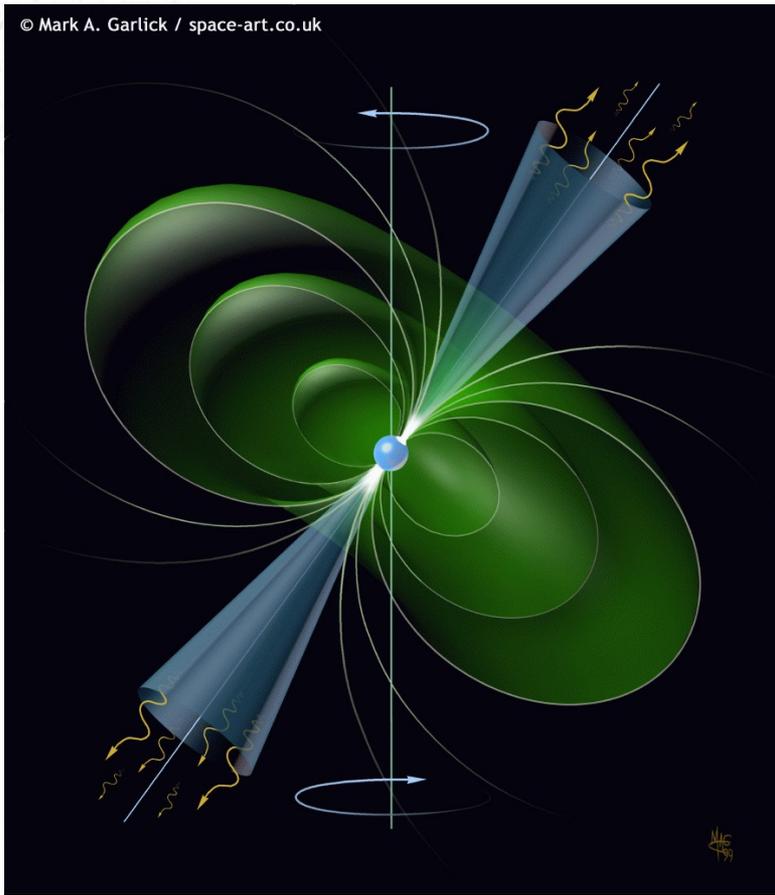
# Outlook

**1) Pulsar**

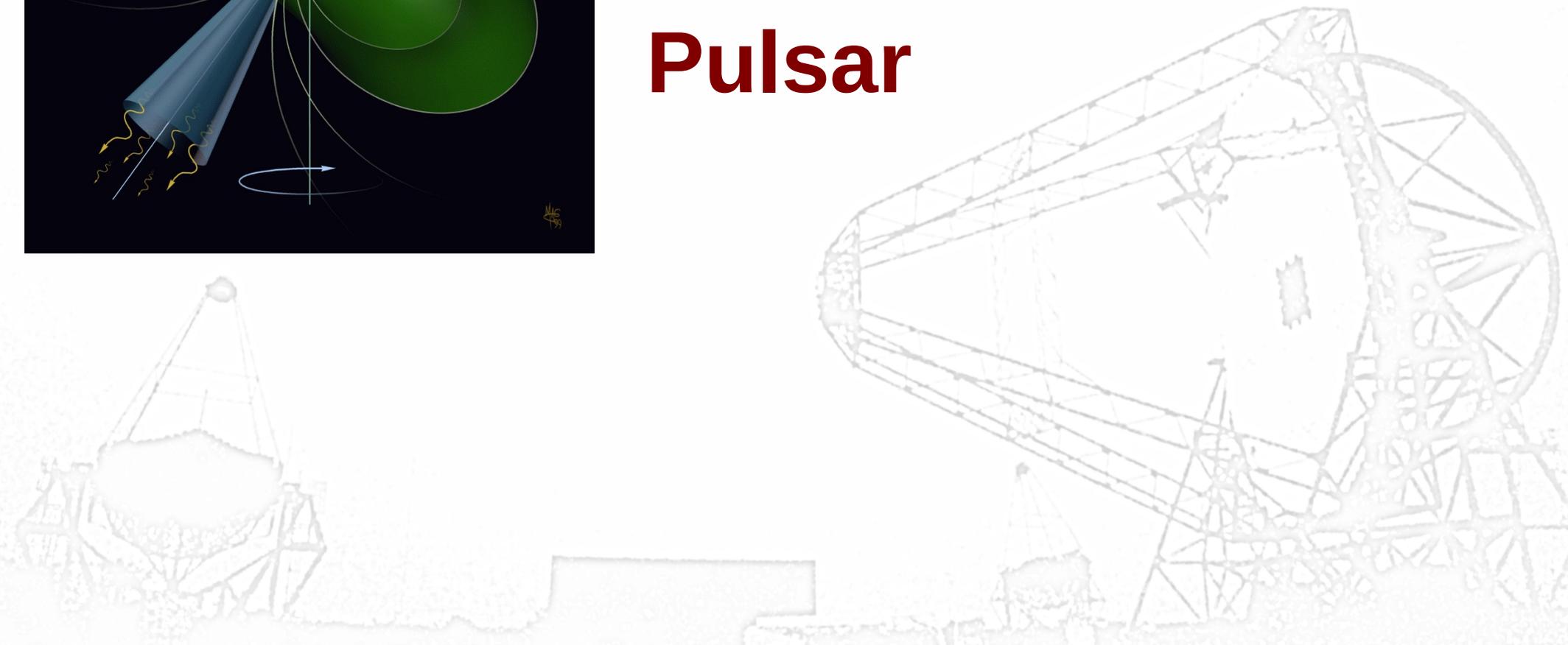
**2) Astronomie gamma au sol**

**3) Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars**

**4) Conclusions**



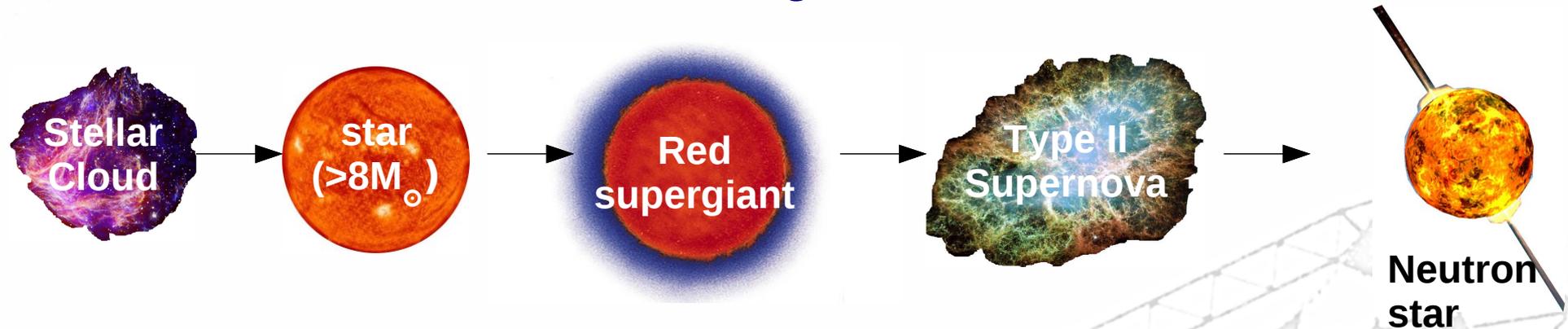
# Pulsar



# Pulsar

## De la poussière au pulsar

- Découvert en 1967 (J. Bell and A. Hewish, Cambridge Radio telescope)
- **Etoiles à neutrons fortement magnétisées en rotation.**

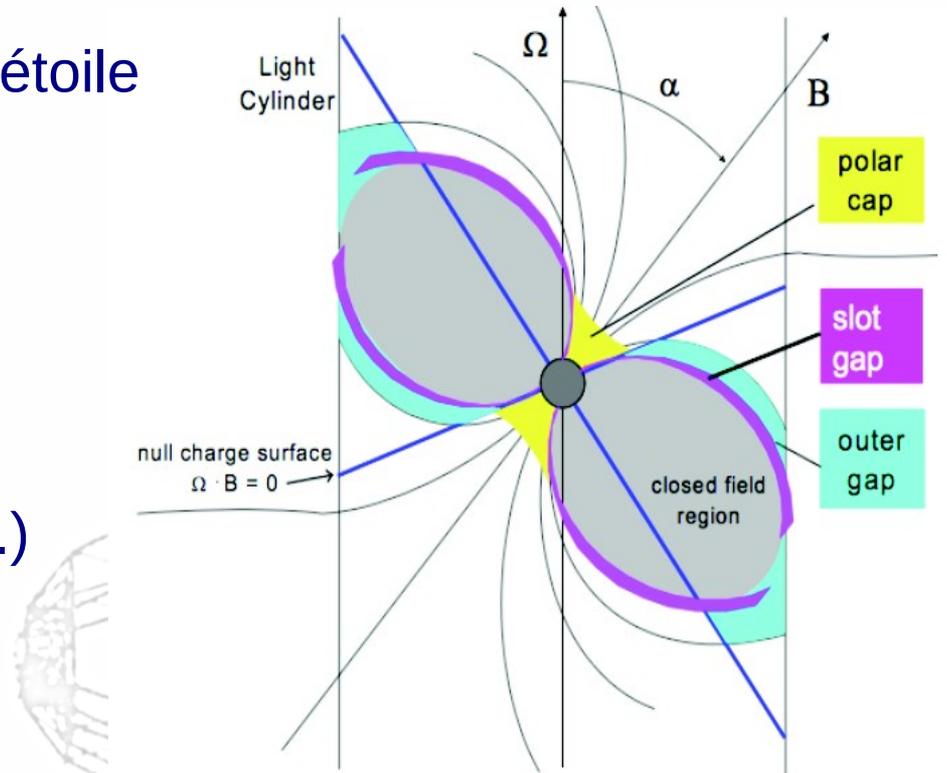


- **Très dense**:  $\sim 1.4M_{\odot}$  dans 10 km de rayon.
- **Moment angulaire conservé**:
  - $P_{ns} \sim 10\text{ms}$  pour \* avec  $I \sim 10^{45} \text{ g.cm}^2$  et  $P_* \sim 10^6\text{s}$ .
- **Flux magnétique conservé**:
  - $B_{ns} \sim 10^{10} \text{ T}$  pour  $B_* \sim 10^{-2} \text{ T}$ .
- Un pulsar **ralentit** (transfert d' $E_c$  de rotation)

# Pulsar

## Le modèle standard (*Goldreich & Julian 1969*)

- Pulsar  $\approx$  **Dipole magnétique tournant**
  - Induit  $\vec{E}$  intense
  - **Particules chargées arrachées de l'étoile**
  - **Remplissent la magnétosphère**
- Régions de densité de charge = 0
  - **Accélèrent** particules chargées
  - **Rayonnent  $\Upsilon$**  (très) haute energies (rayonnement de courbure, IC, etc..)
- 2 régions d'émission de rayons  $\Upsilon$ :
  - **Polar Cap** (*Sturrock 1971*)
    - **Coupure super-exponentielle** dans le spectre des  $\Upsilon$ ! ( $\vec{B}$  Intense)
  - **Outer Gap** (*Cheng 1986, Sturrock 1971, Romani & Yadigaroglu 1995*)
    - **Coupure exponentielle** ( $\vec{B}$  moins intense)

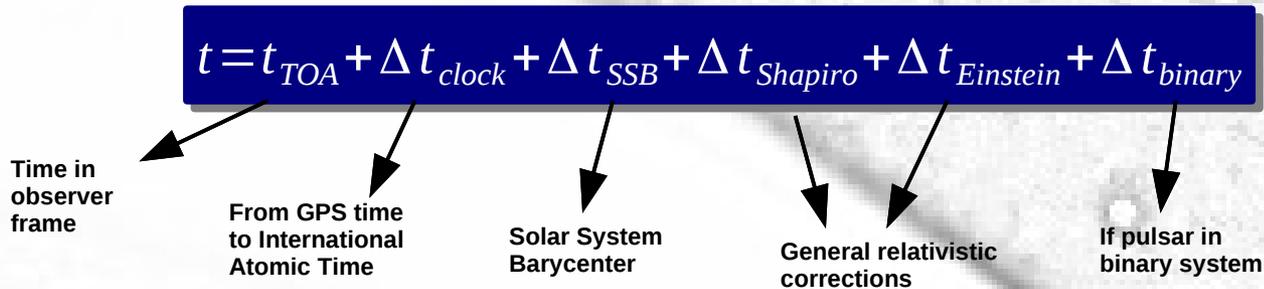


# Pulsar

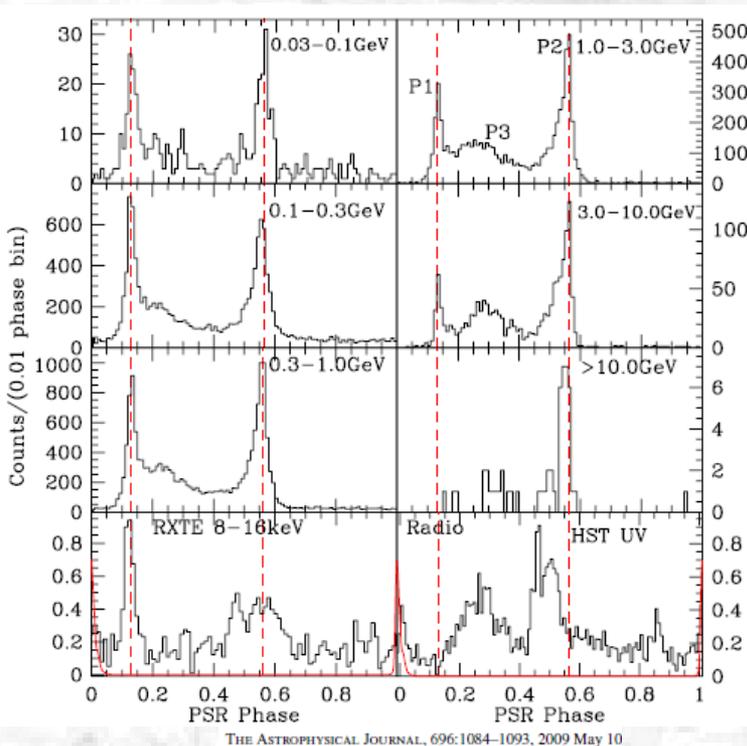
## Chronométrie des pulsars

• Emission périodique (faisceau qui balaie la ligne de visée de l'observateur)

1) Convertir le temps d'arrivée (TOA) dans référentiel du pulsar :



2) Empiler les photons détectés par période de rotation: Phasogramme



$$\Phi(t) = \Phi_0 + f_0 \times (t - T_0) + \frac{\dot{f}_0}{2} \times (t - T_0)^2 + \dots$$

$$f(t) = f_0 + \dot{f}_0 \times (t - T_0) + \dots$$

Fréquence de rotation diminue à du ralentissement du pulsar

**La connaissance des éphémérides est cruciale!**

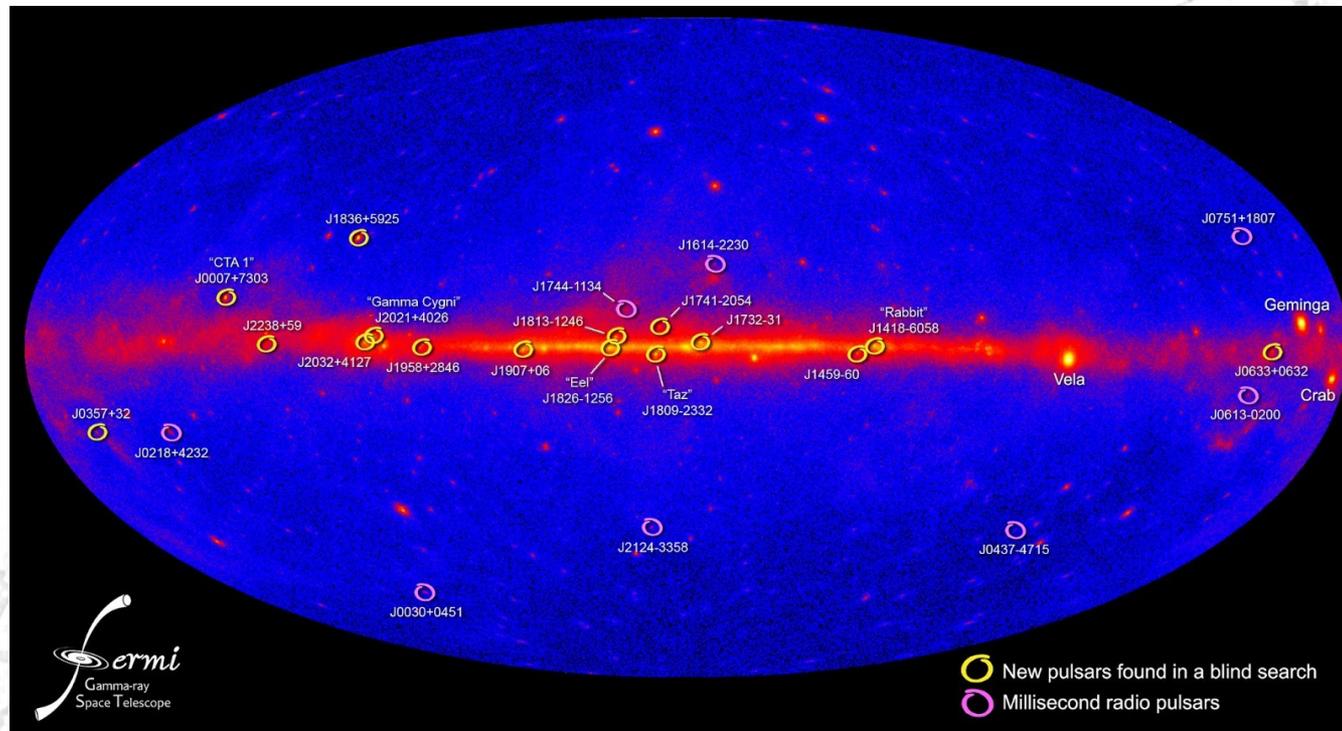
# Pulsar

## Le point de vue Fermi/LAT

- Calorimètre à bords d'un satellite,  $E_{\text{seuil}} > 100 \text{ MeV}$



- 2<sup>nd</sup> catalogue Fermi : ~117 pulsars en rayons  $\gamma$  (arXiv:1305.4385)  
→ Tous un spectre en **loi de puissance + coupure exponentielle**

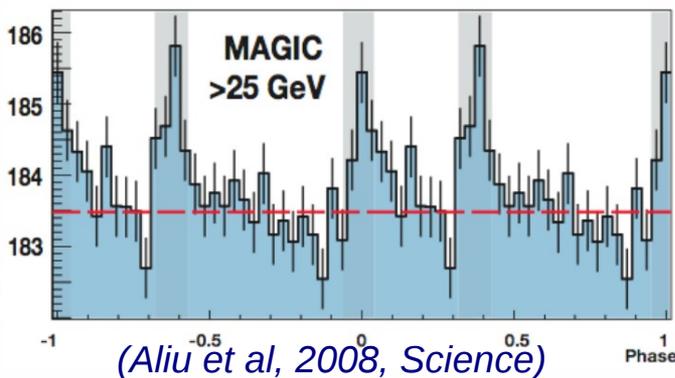


# Pulsar

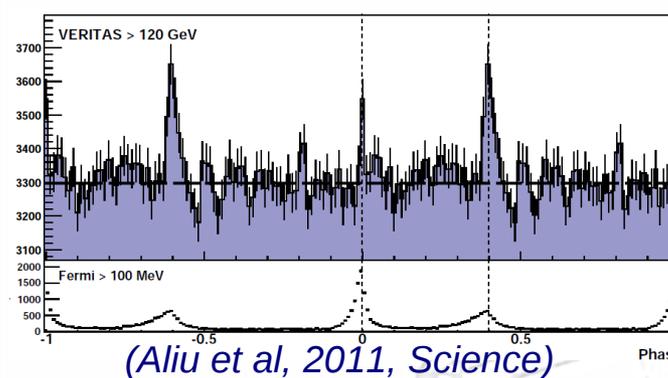
## Le cas spécial du pulsar du Crabe?

- Un des plus puissant en rayons  $\gamma$  (hémisphère nord)
- Observation de signal pulsé par des Télescopes Cherenkov (au sol):

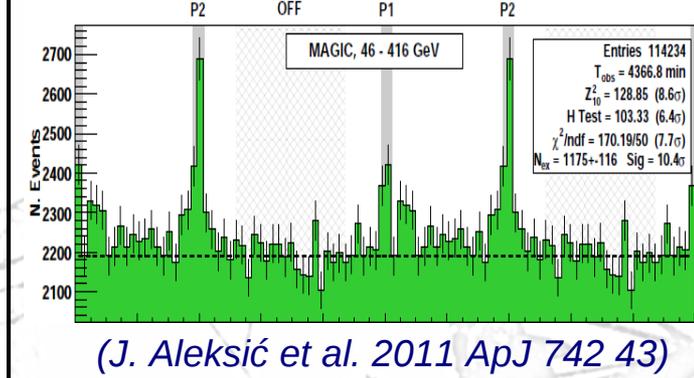
**MAGIC**  
 $E > 25$  GeV



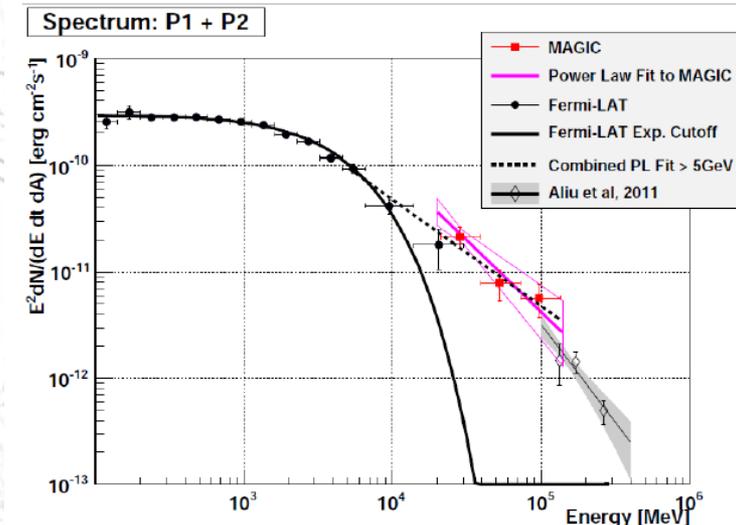
**VERITAS**  
 $E > 100$  GeV



**MAGIC**  
 $E > 50$  GeV



- Spectre ajusté avec **Loi de Puissance Brisée**
  - Pas de coupure exponentielle (Fermi)
  - **Est-il le seul dans la Galaxie?**

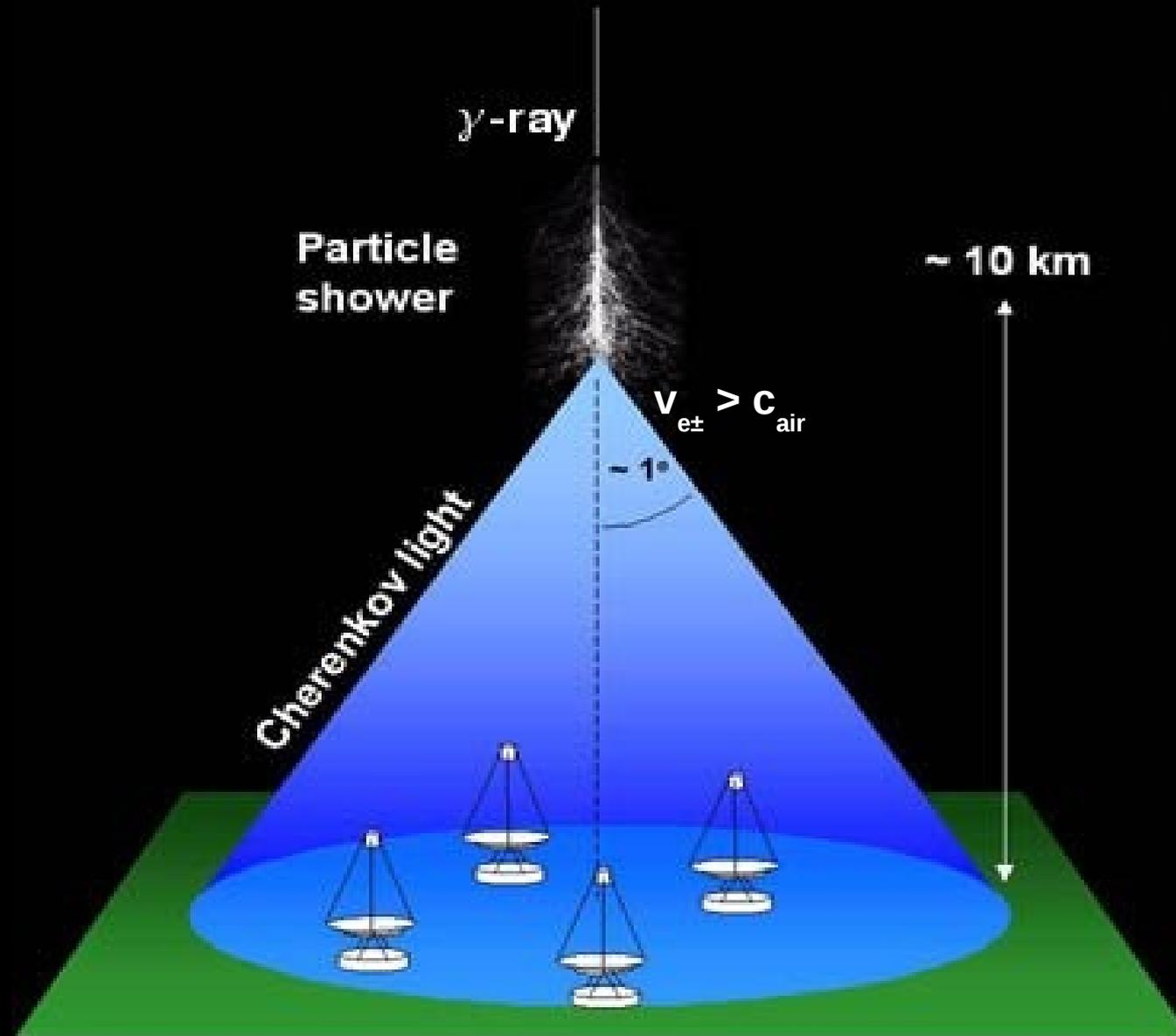


# Astronomie gamma au sol



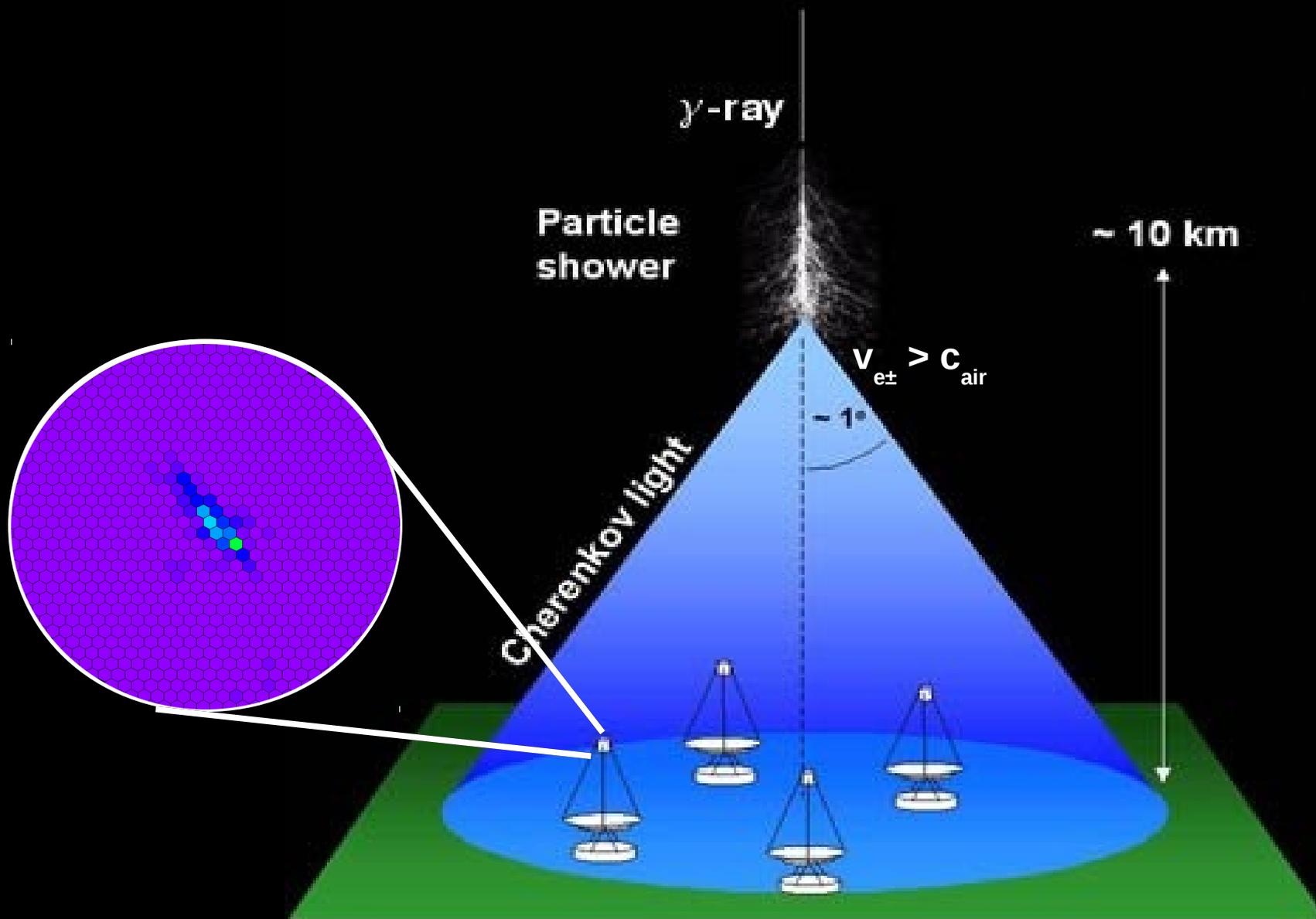
# Astronomie gamma au sol

## Technique d'imagerie Cherenkov atmosphérique



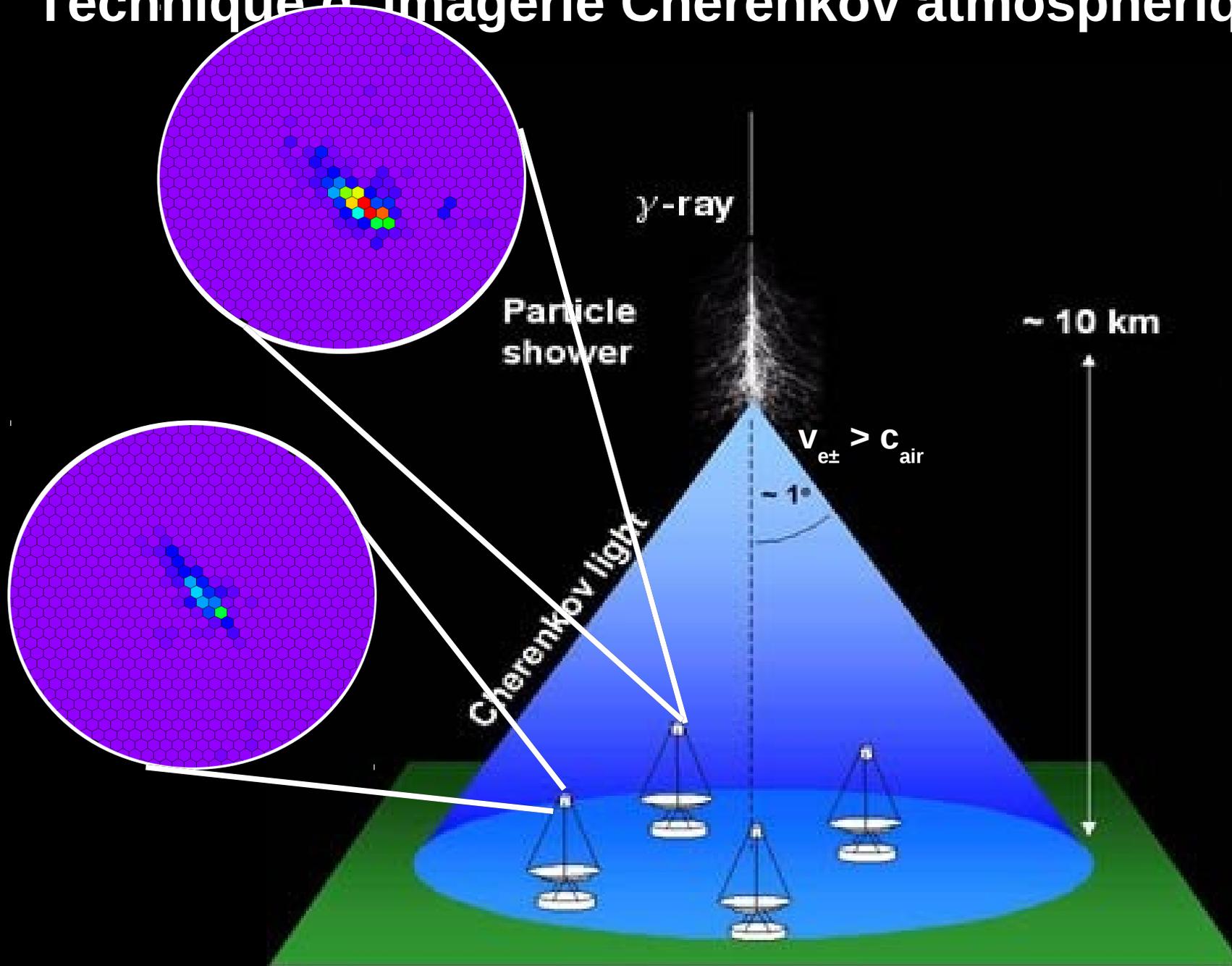
# Astronomie gamma au sol

## Technique d'imagerie Cherenkov atmosphérique



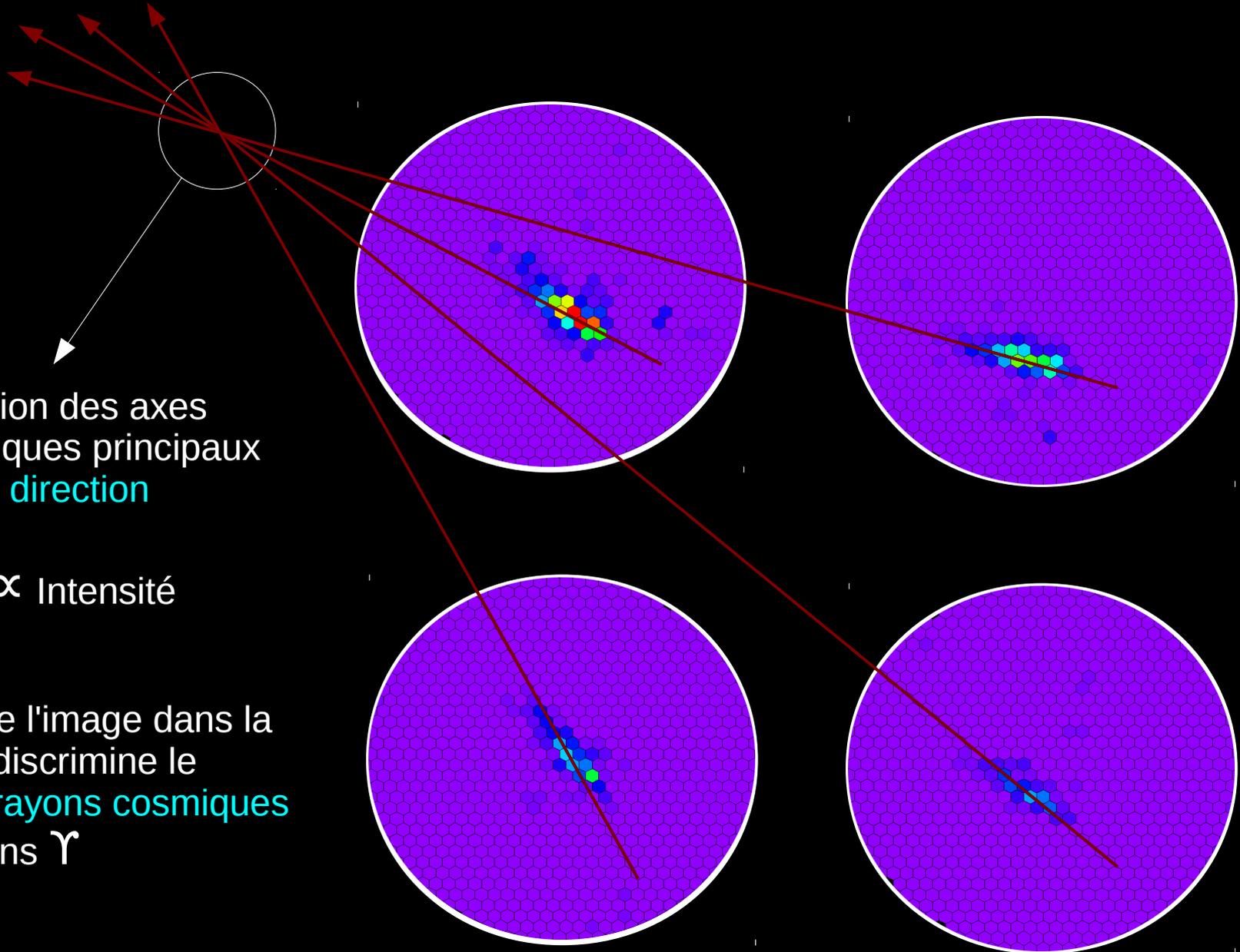
# Astronomie gamma au sol

## Technique d'imagerie Cherenkov atmosphérique



# Astronomie gamma au sol

## Technique d'imagerie Cherenkov atmosphérique



Intersection des axes géométriques principaux donne la **direction**

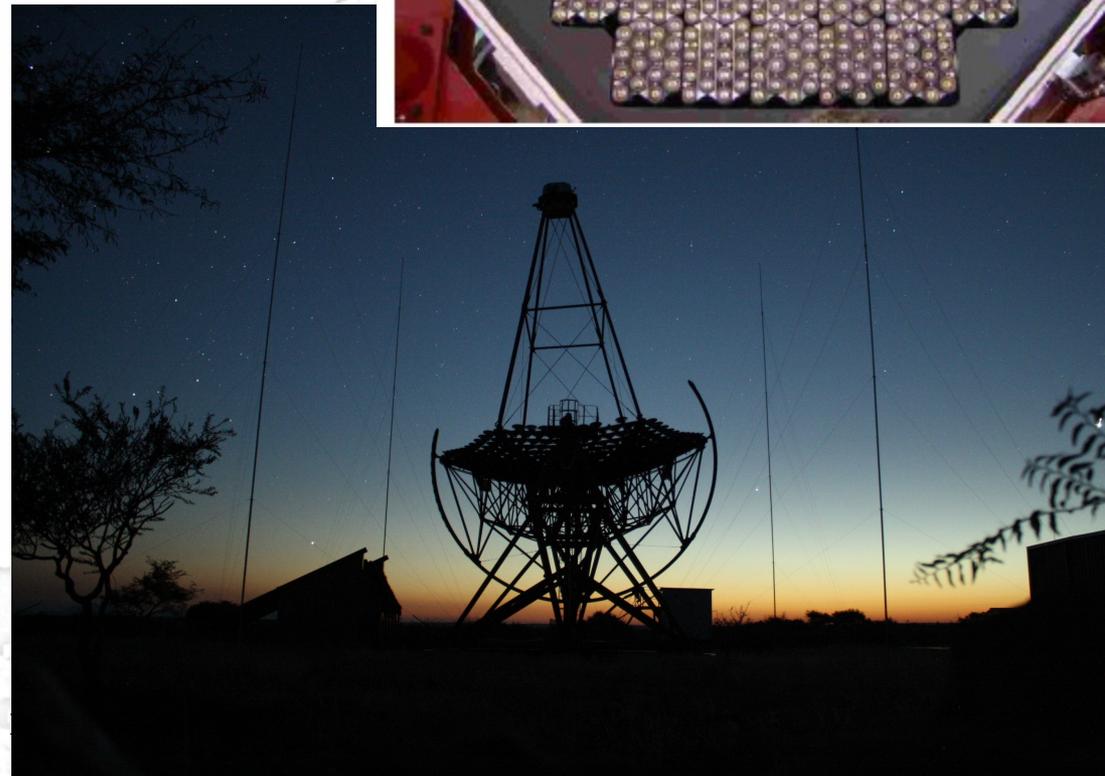
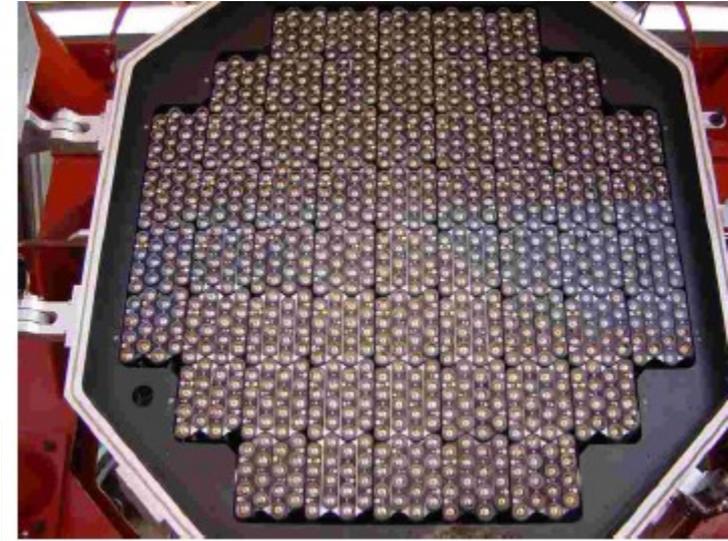
**Energy**  $\propto$  Intensité

Forme de l'image dans la camera discrimine le **fond de rayons cosmiques** des rayons  $\gamma$

# Astronomie gamma au sol

## H.E.S.S.

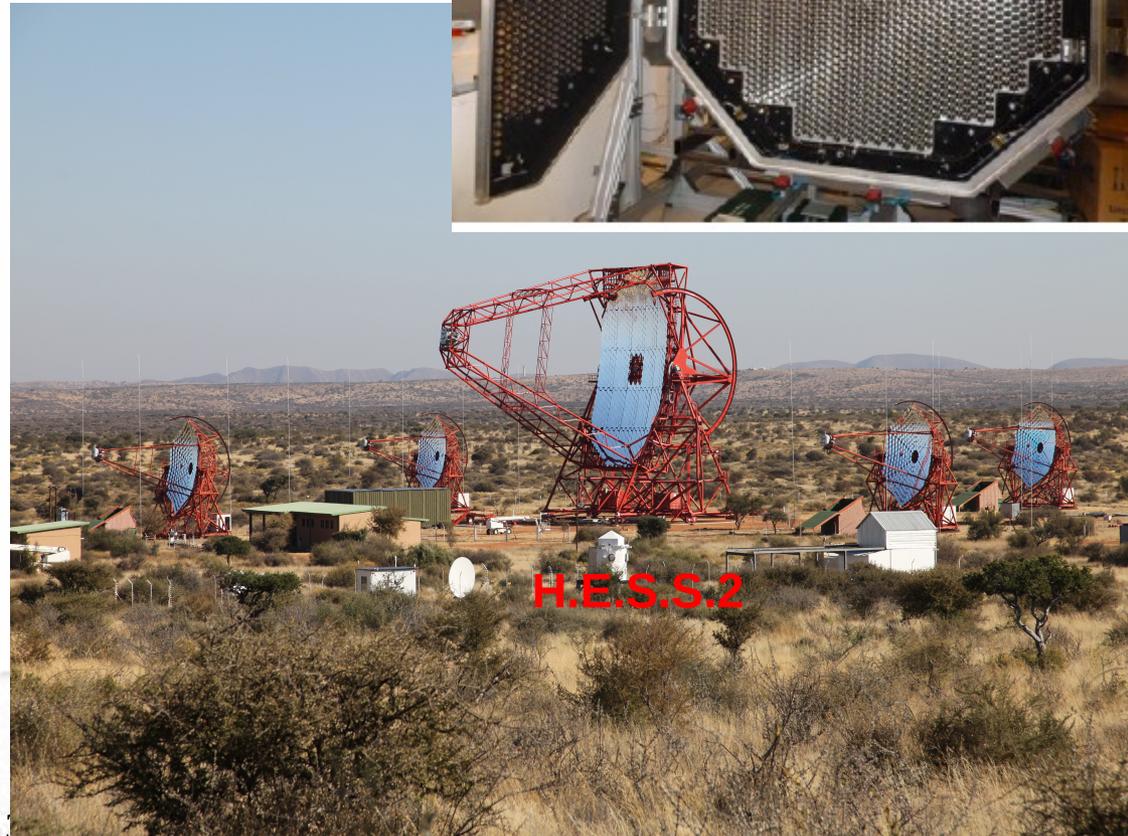
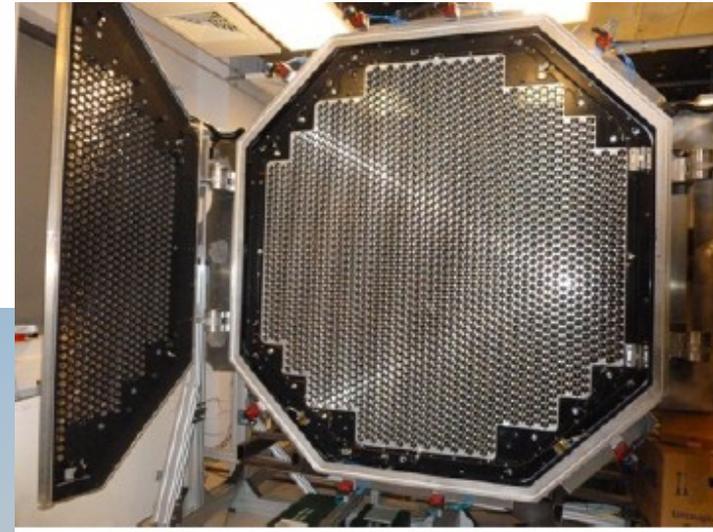
- Réseau de 4 Télescope à imagerie Cherenkov atmosphérique
- Khomas Hochland, Namibia.
- En opération depuis 2004
- Chaque telescopes:
  - Mirroirs  $107 \text{ m}^2$
  - 960 pixels par camera
- Champ de vue  $5^\circ$
- $E_{\text{seuil}} \sim 100 \text{ GeV}$



# Astronomie gamma au sol

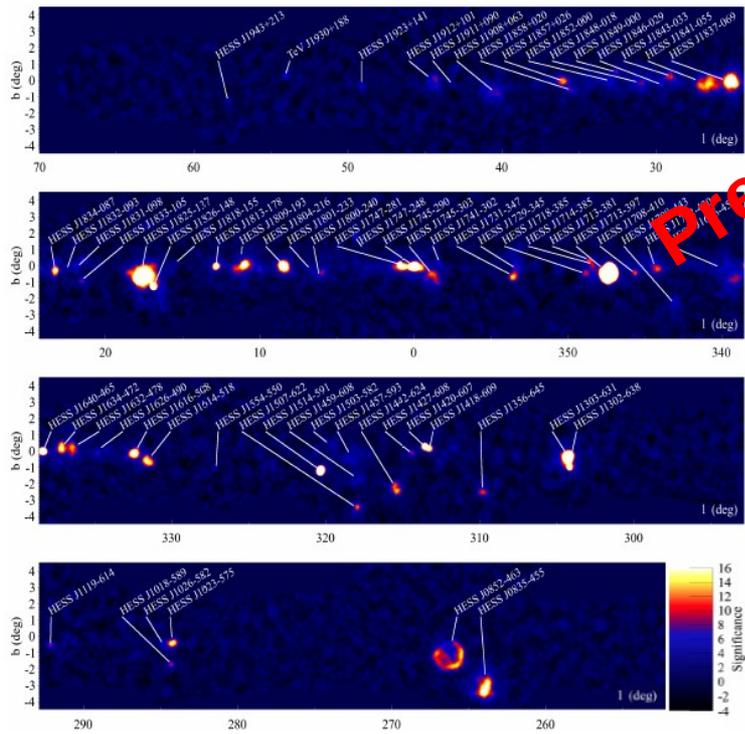
## Mise à niveau H.E.S.S.2

- Arrivé d'un monstre au centre du réseau (Sept. 28, 2012)
- Caractéristiques:
  - Mirroirs 614 m<sup>2</sup>
  - 2048 pixels
  - 580 tonnes!
- Champ de vue 3.2°
- $E_{\text{seuil}} \sim 30 \text{ GeV}$

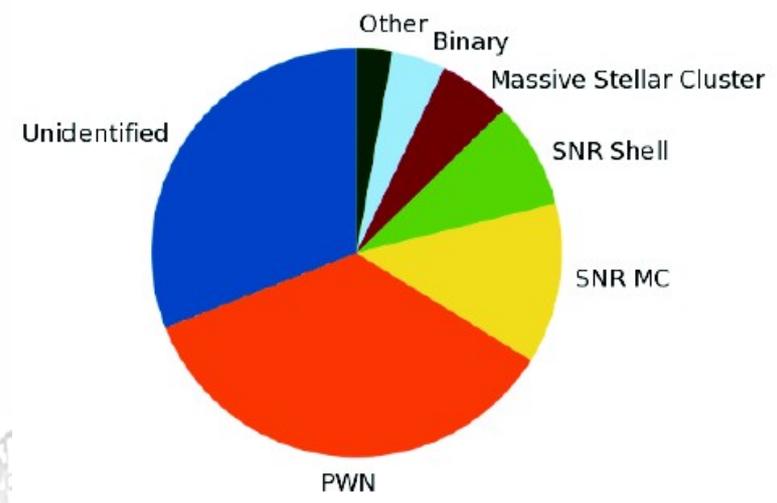


# Astronomie gamma au sol

## Pulsars, le point de vue de H.E.S.S.



Preliminary

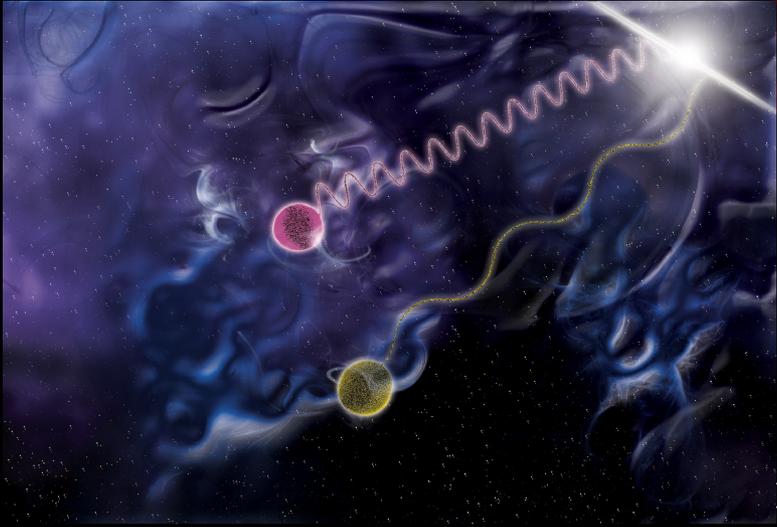
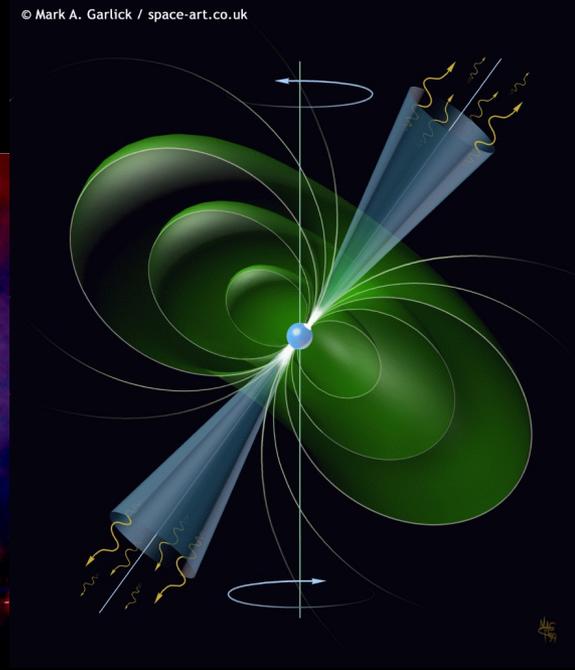
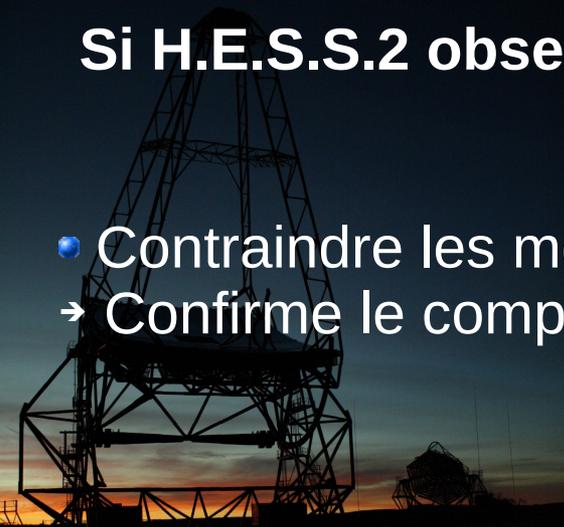


The H.E.S.S. Galactic Plane Survey - maps, source catalog and source population, ICRC 2013 (arXiv:1307.4690)

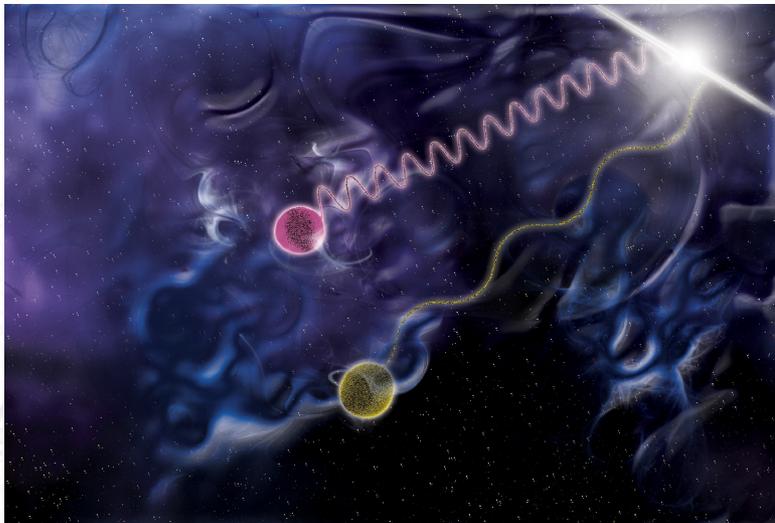
- Depuis 2004, une variété de sources Galactiques observées par H.E.S.S.
- Malheureusement pas de pulsar!
- $E_{\text{seuil}}$  trop grand
- H.E.S.S.2 devrait être capable d'en détecter car  $E_{\text{seuil}} \sim 30 \text{ GeV}$ .

# Si H.E.S.S.2 observe un pulsar, quelle science?

- Contraindre les modèles d'émission
  - Confirme le comportement du Crabe?
- Etude de populations
  - Un pulsar n'est pas suffisant
- Sonder la Violation d' Invariance de Lorentz (LIV)

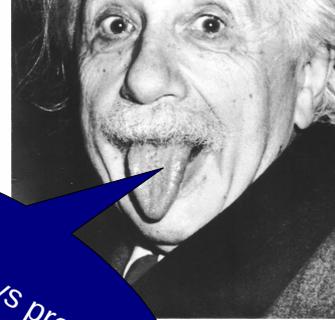


# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars



# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Violation d'Invariance de Lorentz (LIV)



"... light is always propagated in empty space with a definite velocity  $c$  which is independent of the state of motion of the emitting body"

- Invariance de Lorentz:  $c^2 p^2 = E^2$
- Gravité Quantique (QG):
  - Unification de la **Relativité Générale** et la **physique microscopique**.
- Des modèles de QG prédisent une LIV à  $E \sim E_p = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$  :
  - Théorie des cordes, Gravité Quantique à boucles, etc..
- La **Vitesse** de la lumière **dépend de l'énergie** (dévlpt. de  $v$  au 2<sup>nd</sup> ordre):

$$v = \delta E / \delta p = c \left( 1 - \xi \left( E / E_{\text{planck}} \right) - \zeta \left( E / E_{\text{planck}} \right)^2 \right)$$

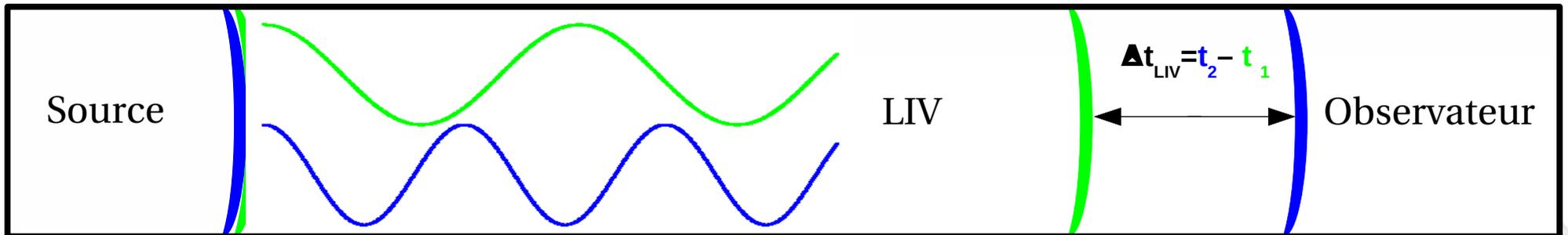
$\xi(\zeta) < 0$  **Plus vite que la lumière !**

$\xi(\zeta) > 0$  **Moins vite que la lumière..**

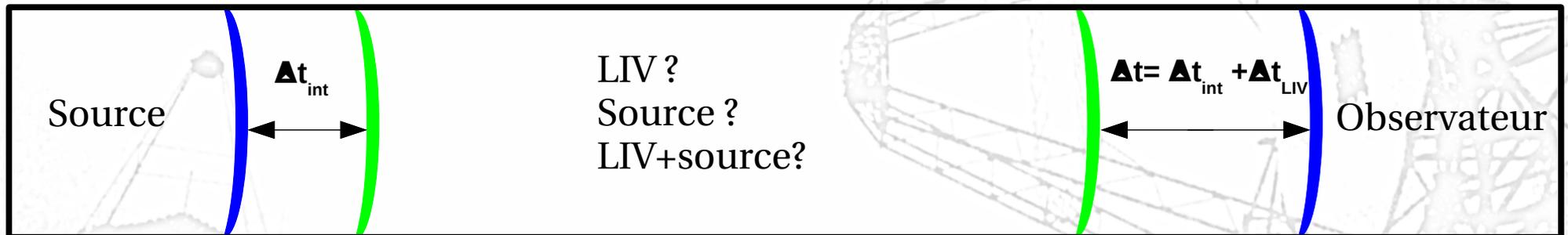
# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## LIV et dispersion dans le vide

- 2 photons d'énergies  $E_1$  and  $E_2 (>E_1)$  émis au temps  $t$
- Observés avec délai relatif  $\Delta t_{LIV} = t_2 - t_1$  ( $>0$  or  $<0$ )



- Possible **décalage intrinsèque** de la source:



- Effets source

Additifs

Conspirationnistes

Etude en fonction de la distance!

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Sensibilité au LIV

### • Energie de Gravité Quantique

$$E_{QG}^l = \frac{E_{\text{planck}}}{\xi}$$

Correction 1<sup>er</sup> ordre

$$E_{QG}^q = \frac{E_{\text{planck}}}{\sqrt{(\xi)}}$$

Correction 2<sup>nd</sup> ordre

→  $E_{QG} \gg E_{\text{planck}}$  : pas de LIV

→ Sensibilité d'une expérience au LIV déterminée pour l'hypothèse  $E_{QG} \gg E_{\text{planck}}$

### • Figure de mérite : (correction 1<sup>er</sup> ordre)

$$\xi \approx \frac{c E_p \Delta t}{d \Delta E}$$

Echelle de variabilité temporelle de la source

Bras de levier en énergie

Distance de la source

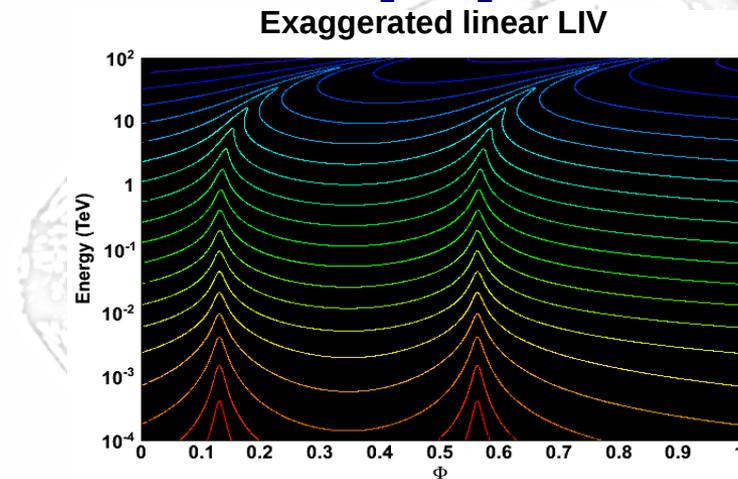
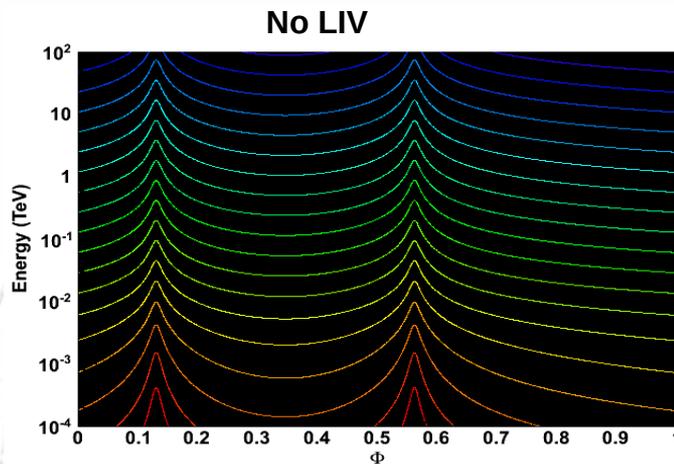
### • Meilleure sensibilité:

- Variabilité temporelle rapide
- Grandes distances
- Sources énergétiques

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Tests de LIV avec les pulsars

- Sources galactiques mais bonnes sondes tout de même:
  - Possible large  $\Delta E$
  - Accumule beaucoup de statistiques ( $\neq$  variabilité aléatoire)
  - $\Delta t$  mesuré avec grande précision
- Référentiel pulsar:
  - LIV introduit délai de phase de rotation entre 2 photons ( $E_1 \neq E_2$ ).



$\neq$  de phase entre 2 photons

$$\Delta \Phi(t) = \frac{\Delta t}{P(t)}$$

Période du pulsar

$$P(t) \approx P + \dot{P}t$$

Pour échelle de temps courts:  $P(t) \approx P$

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## La méthode

- Adaptée de *Martinez & Errando (Astropart.Phys. 31 (2009) 226)*



$F_s(\Phi_s)$  Phasogramme à la source

$\Gamma(E_s)$  Spectre en énergie à la source

Espace-temps

$\Delta\Phi(E_s, E_{QG})$



$A(E_s)$

Acceptance

$G(E - E_s, \sigma(E_s))$

Résolution en énergie

- On définit la fonction de densité de probabilité:

$$P(E, \Phi) = N \int_0^\infty A(E_s) \Gamma(E_s) G(E - E_s, \sigma(E_s)) F_s(\Phi_s - \Delta\Phi) dE_s$$

- Maximum de Vraisemblance** pour estimer  $E_{QG}$

$$L = \prod_i P(E, \Phi)$$

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Le(s) Modèle(s)

- **Phasogramme**

- 1 pulse gaussien,  $\mu=0.500$
- $\sigma = 2.10^{-2}$  (phase rotationnelle)

- **Spectre en énergie**

- 30 GeV- 1TeV, Loi de Puissance

- $$\frac{dN}{dE} = A \left( E / E_0 \right)^{-\Gamma}, \Gamma=3.3$$

- **signal/fond** (fond de rayons cosmiques, “gamma like”)

**model B1:**  $S/B=\infty$

**model B2:**  $S/B=1$  pour  $\Phi \in \mu \pm 2.5\sigma$

- Pas de LIV pour le fond de protons

- **Acceptance & résolution**

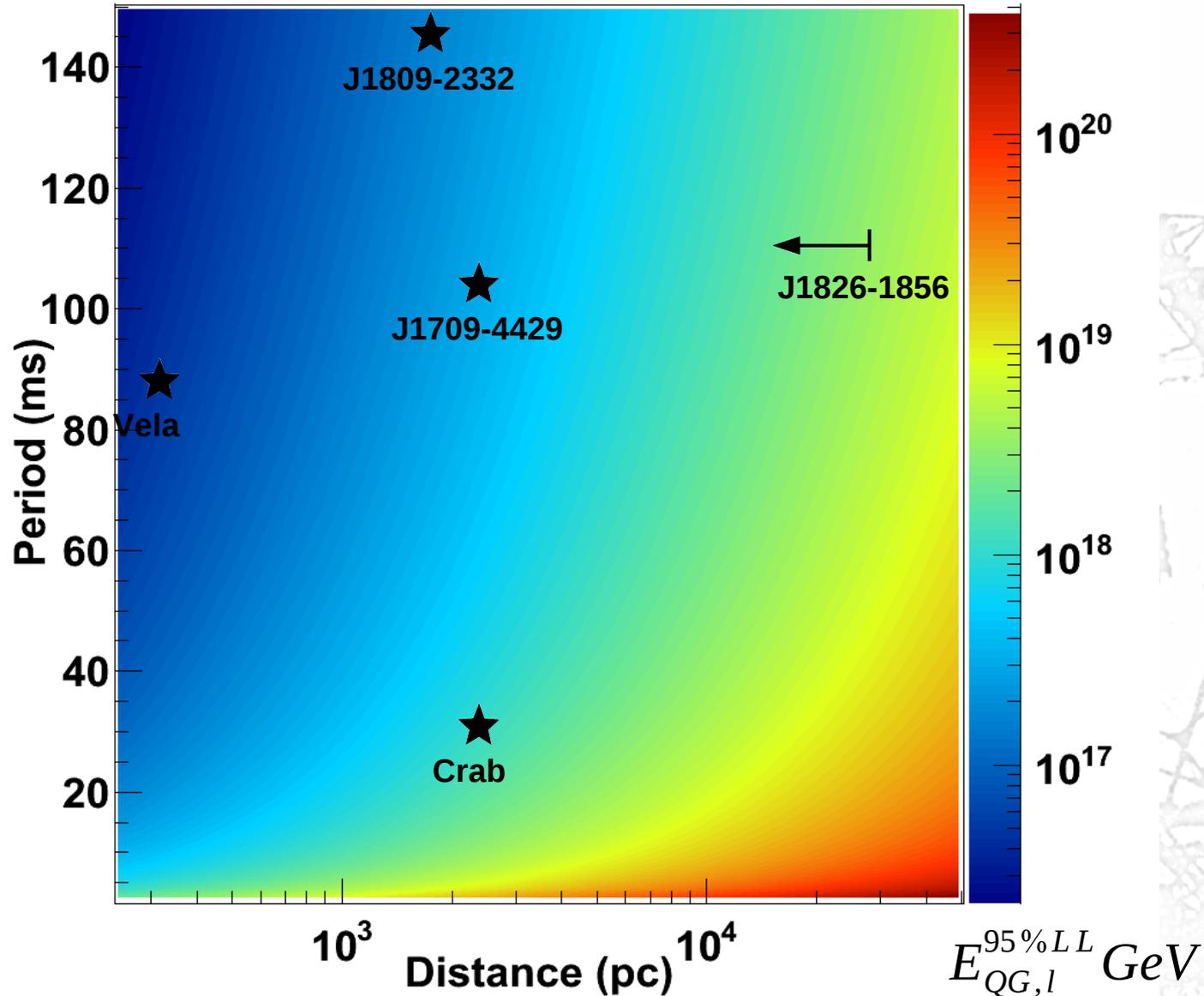
- H.E.S.S.2 mono

- $\Delta E/E \sim 35\%$

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Etude de sensibilité (résultats)

$S/B=\infty$ ,  $n=1$ , "moins vite la lumière"



# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

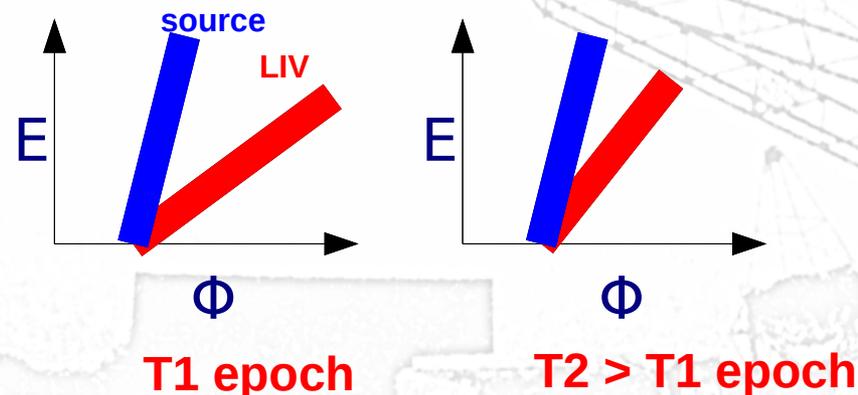
## Etude de sensibilité (résultats)

$E_{QG}^{95\%LL}$ (GeV) candidats H.E.S.S.2	1 <sup>er</sup> ordre		2 <sup>nd</sup> ordre	
	S/B=∞	S/B=1	S/B=∞	S/B=1
<b>Crab</b>	$1.04 \times 10^{18}$	$5.47 \times 10^{17}$	$1.74 \times 10^{10}$	$1.48 \times 10^{10}$
<b>PSR J1826-1256*</b>	$< 3.18 \times 10^{18}$	$< 1.83 \times 10^{18}$	$< 3.19 \times 10^{10}$	$< 2.72 \times 10^{10}$
<b>PSR J1709-4429</b>	$3.19 \times 10^{17}$	$1.84 \times 10^{17}$	$1.01 \times 10^{10}$	$8.63 \times 10^9$
<b>PSR J1809-2332</b>	$1.64 \times 10^{17}$	$9.5 \times 10^{16}$	$7.25 \times 10^9$	$6.20 \times 10^9$
<b>Vela</b>	$4.69 \times 10^{16}$	$2.71 \times 10^{16}$	$3.87 \times 10^9$	$3.31 \times 10^9$

\* from published upper limit on distance (Fermi 2<sup>nd</sup> year catalog)

# Conclusions

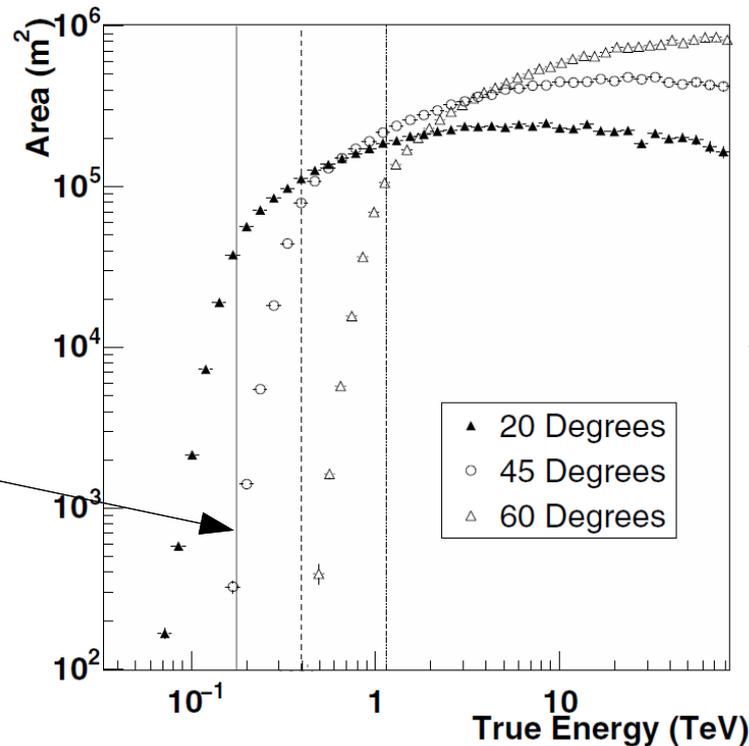
- Premières données H.E.S.S.2 pour quelques pulsars (Crabe, Vela)
  - Besoin de les comprendre, calibration pas encore terminée.
- Dans le cas d'une observation positive, possibilité de contraindre modèle d'émission
  - Est-ce que d'autres pulsars suivent le même comportement que le Crabe  $> 25$  GeV?
- Premières estimations de sensibilité au LIV avec les pulsars encourageantes.
- Crabe:  $\sim 1$  ordre de grandeur en dessous  $E_{\text{planck}}$
- Délais intrinsèques de la source: **problème majeur** pour la recherche de LIV
  - Pulsars offrent opportunité de les distinguer (ralentissement du pulsar)



# Back-up slides

## Surface effective H.E.S.S.

- À très hautes énergies, flux très faible => Requier une **grande surface de collection**
- Surface effective de collection
  - déterminée par "l'éclairement" Cherenkov au sol
  - dépend de  $E_\gamma$  et  $\theta_{\text{zenithal}}$



A&A 457, 899–915 (2006)

- Faible  $E_\gamma$ :
  - gerbe moins étendue donc surface effective plus petite
- Grand  $\theta_{\text{zenithal}}$ : profondeur d'atmosphère plus grande
  - Faible  $E_\gamma$  => surface effective plus petite (absorption)
  - Grande  $E_\gamma$  => surface effective plus grande

# Back-up slides

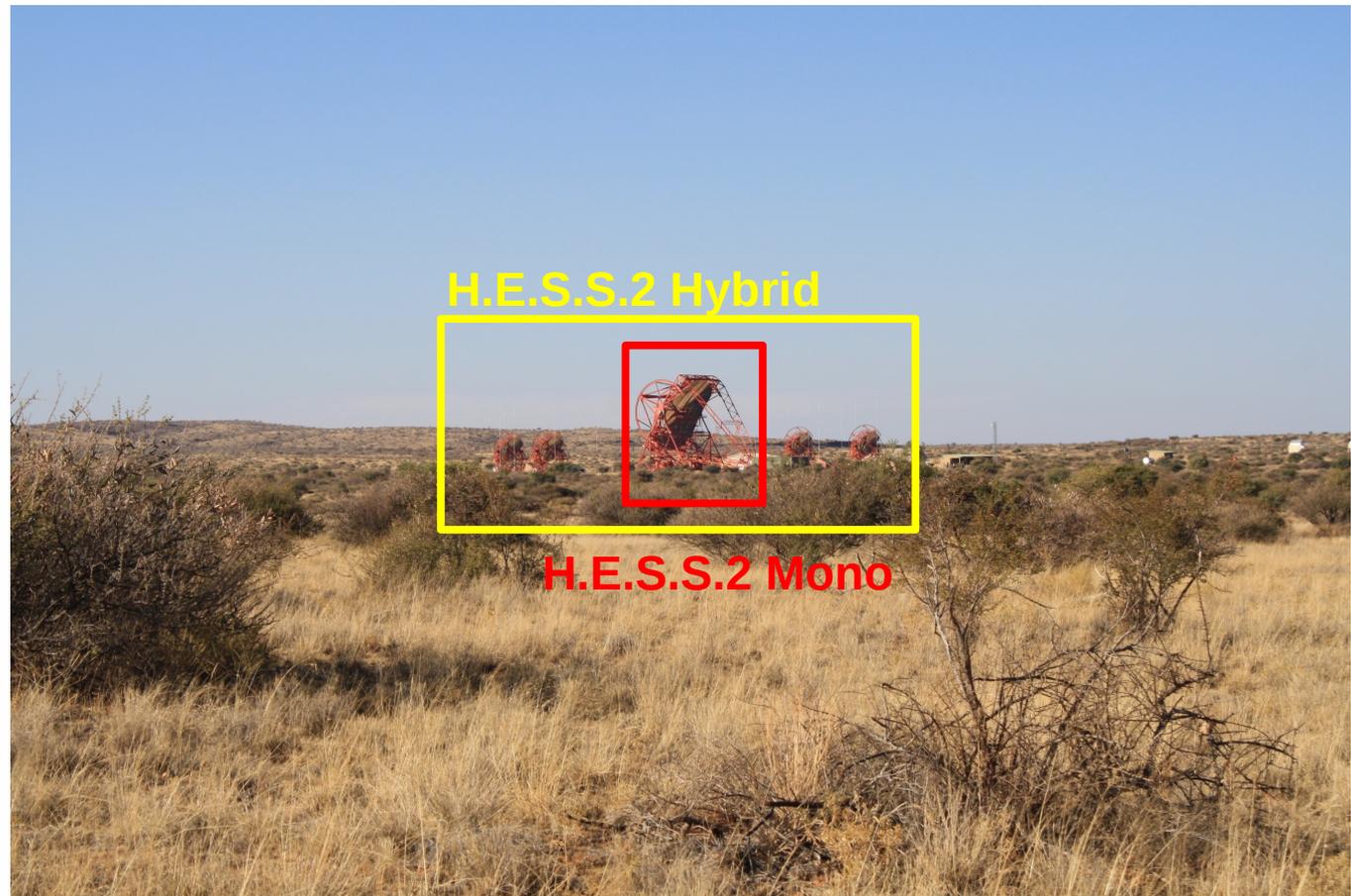
## Trigger modes

- **Hybrid**

- $E_{\text{seuil}}$  plus haute
- Accès aux énergies plus hautes

- **Mono**

- $E_{\text{seuil}}$  plus basse
- Accès aux énergies les plus basses



## Back-up slides

### Séparer délais de LIV et intrinsèque à la source

- **LIV delay:**

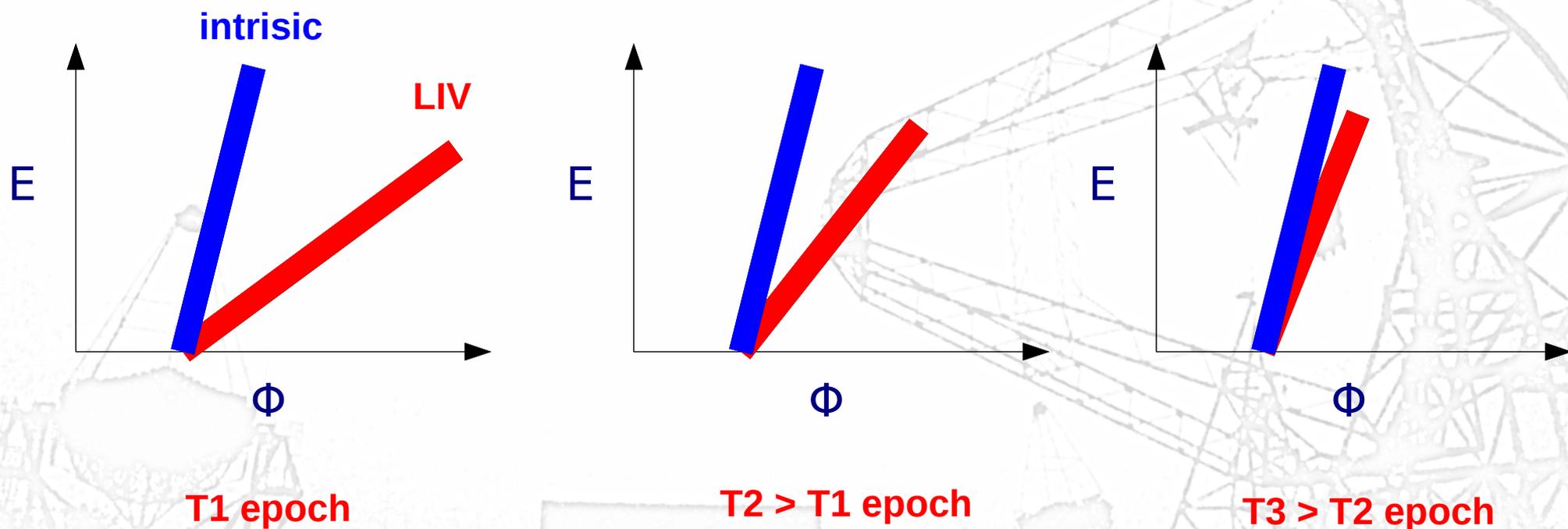
- $P(t) = P + dP/dt t$  and  $\Delta\Phi(t) = \Delta t / P(t)$  in pulsar frame

- $\Delta\Phi$  decreases with time for LIV delays.

- **Source Intrinsic delay:**

- $\Delta\Phi = \text{Constant}$  in pulsar frame (if not correlated with period increase)

- No change with time



# The High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

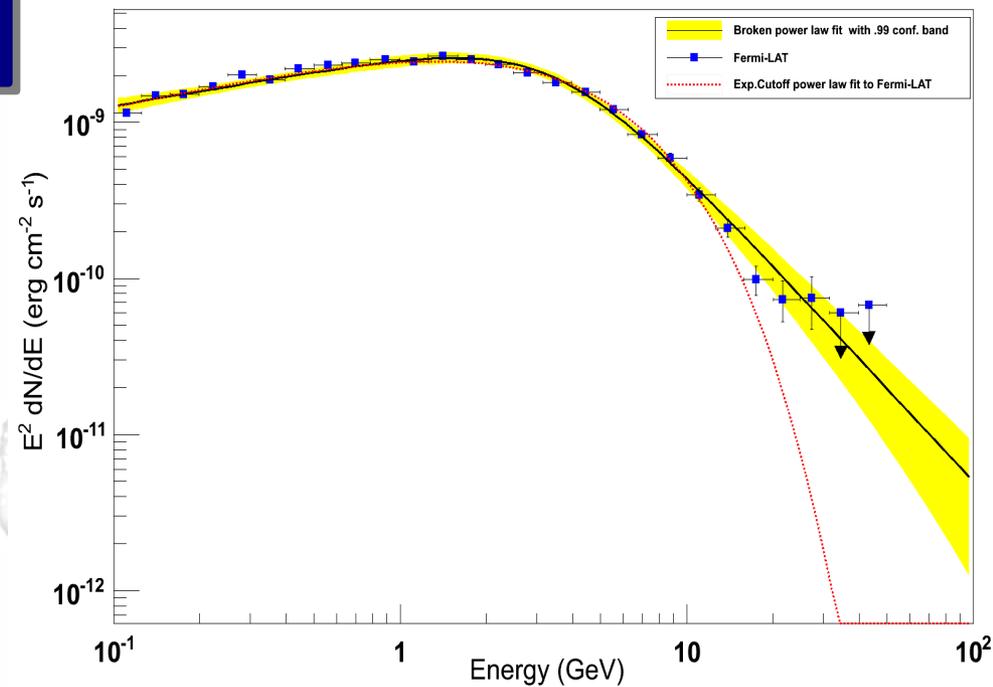
## Candidats pulsar pour H.E.S.S.2

- 2<sup>nd</sup> Catalogue Fermi des pulsars (arXiv:1305.4385)
  - Extrapole spectres aux énergies H.E.S.S.2 avec **Loi de Puissance Brisée**

$$\frac{dN}{dE} = A \frac{(E/E_0)^{-\alpha}}{1 + (E/E_0)^{-\alpha+\beta}} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ TeV}^{-1}$$

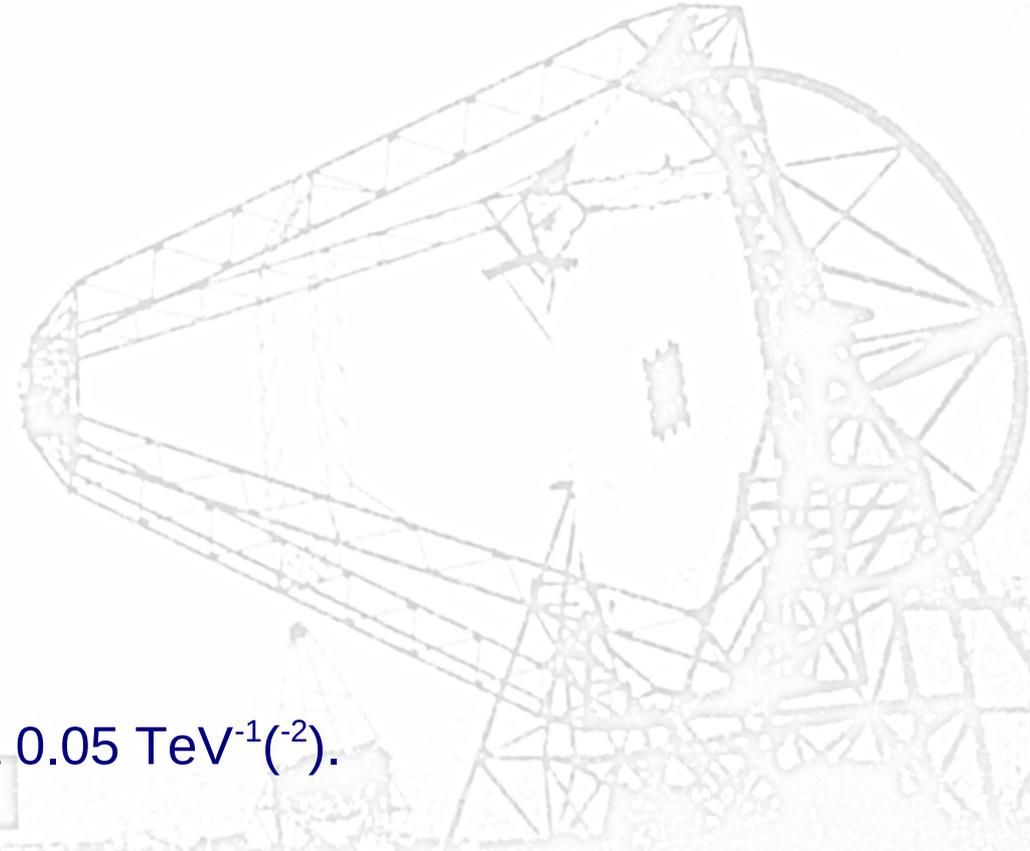
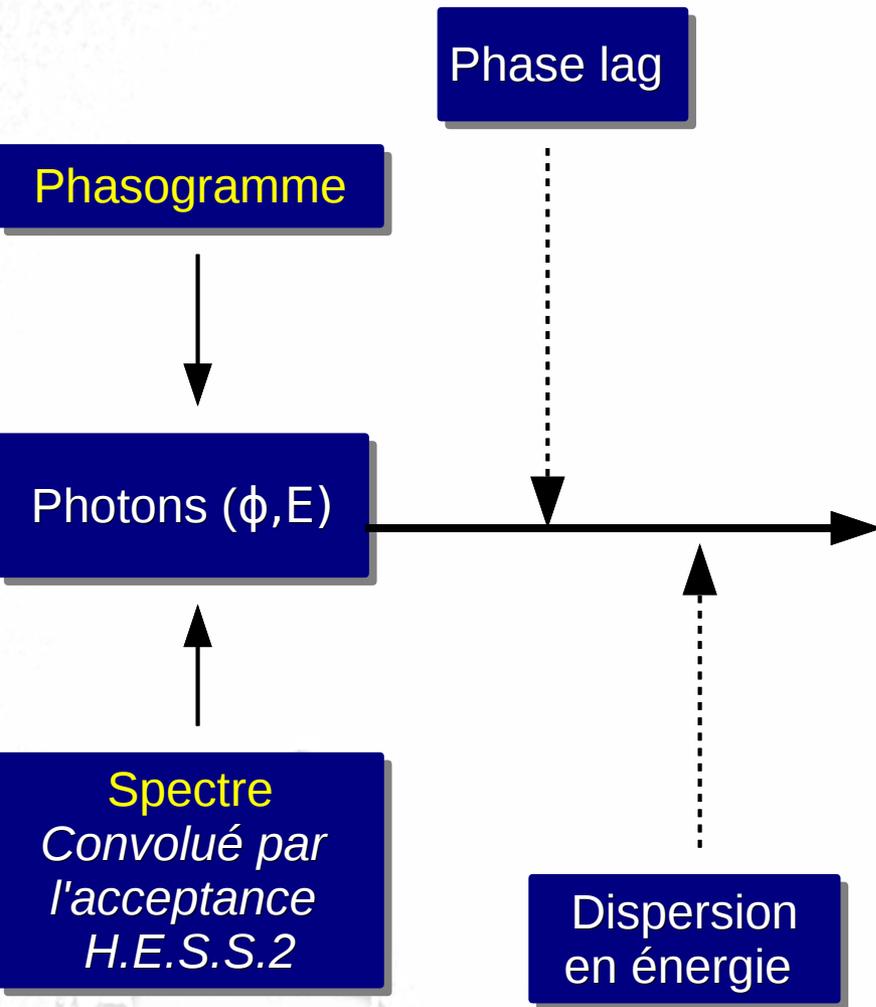
- Selection:
  - Les plus **grand fluxes**
  - La plus **grande gamme de  $\beta$**
  - **Angle zénithale  $< 30^\circ$**
- Top 4  $\beta \in [3.00-3.70]$ 
  - Vela, PSR J1709-4429, PSR J1809-2332, PSR J1826-1256
- Outil de simulation de pulsars avec Monte Carlo H.E.S.S.2 en dév. :
  - Test des performances
  - Validation de la chaîne d'analyse

Phase averaged differential energy flux of Vela 0.1-100GeV  
The Astrophysical Journal, 713:154-165, 2010 April 10



# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

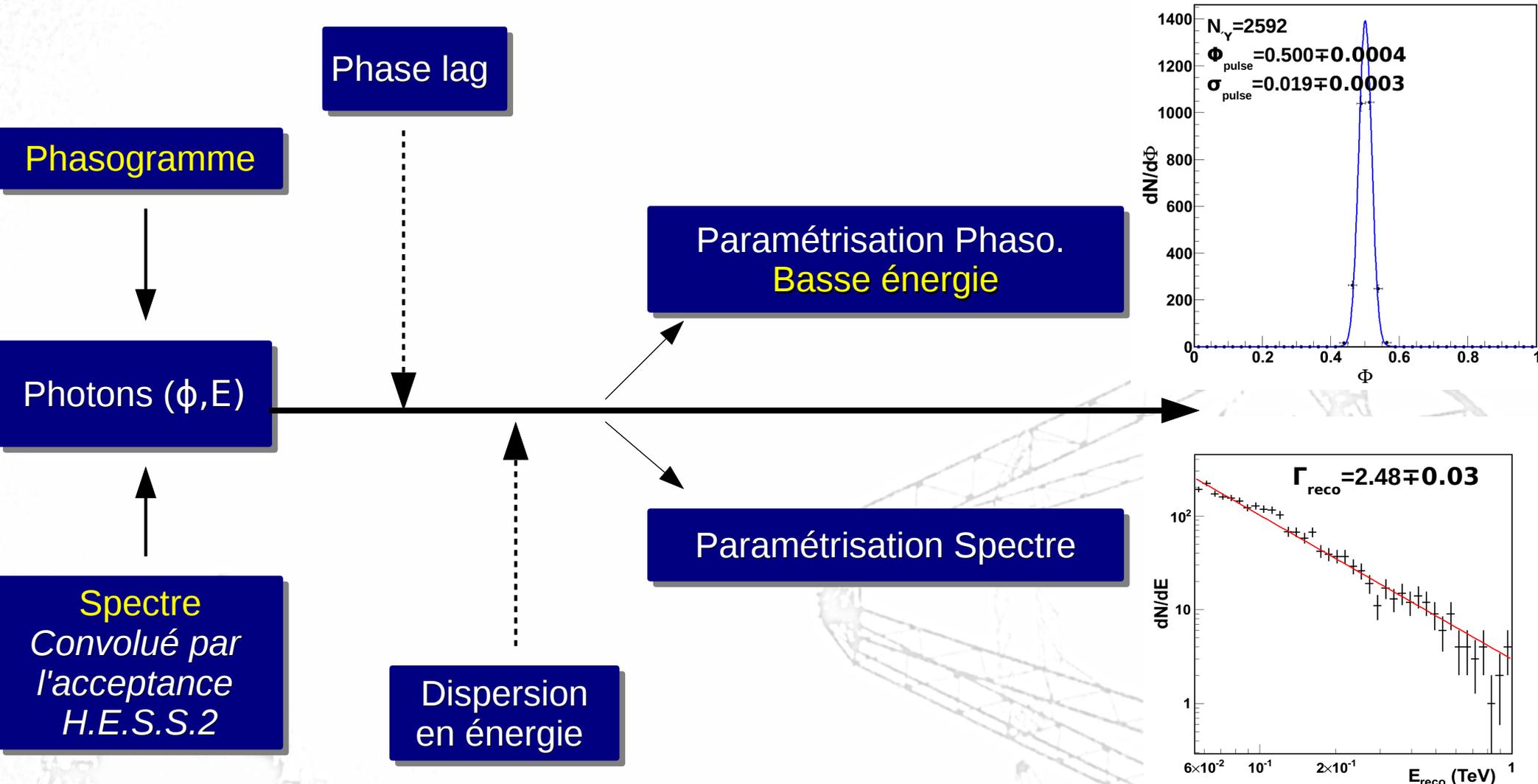
## Etude de sensibilité (simulation Monte Carlo)



- 500 realisations.
- On injecte un “phase lag”  $\varphi_n^{injec}$  de  $-0.05$  à  $0.05 \text{ TeV}^{-1}(-^2)$ .

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

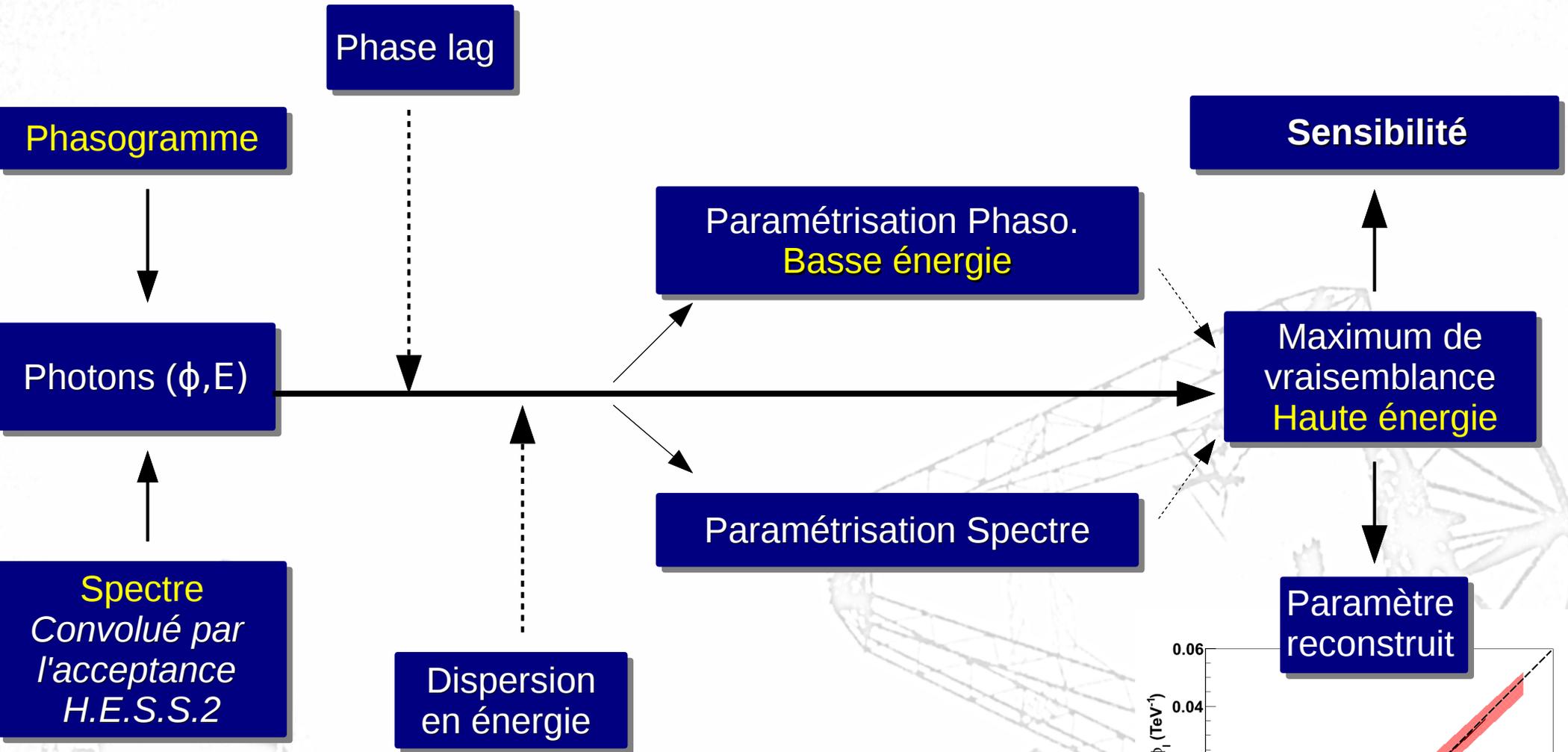
## Etude de sensibilité (simulation Monte Carlo)



- 2 intervalles : **basse énergie** (30 –55 GeV) & **haute énergie** (55 GeV–1 TeV)
- ~2000 photons pulsés dans chaque intervalles

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

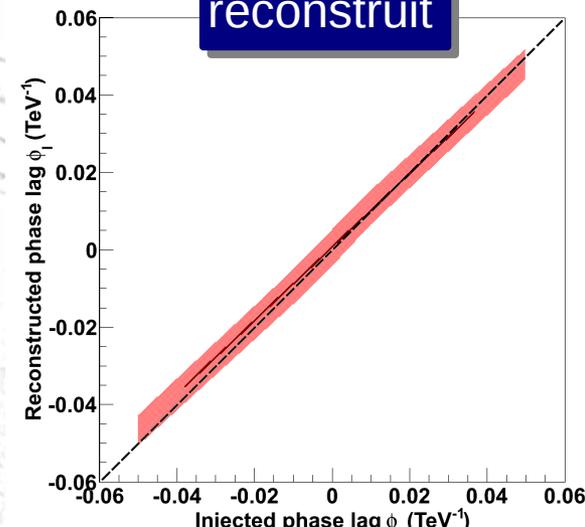
## Etude de sensibilité (simulation Monte Carlo)



- Calibration de la méthode  $\varphi_n^{reco} = f(\varphi_n^{injec})$

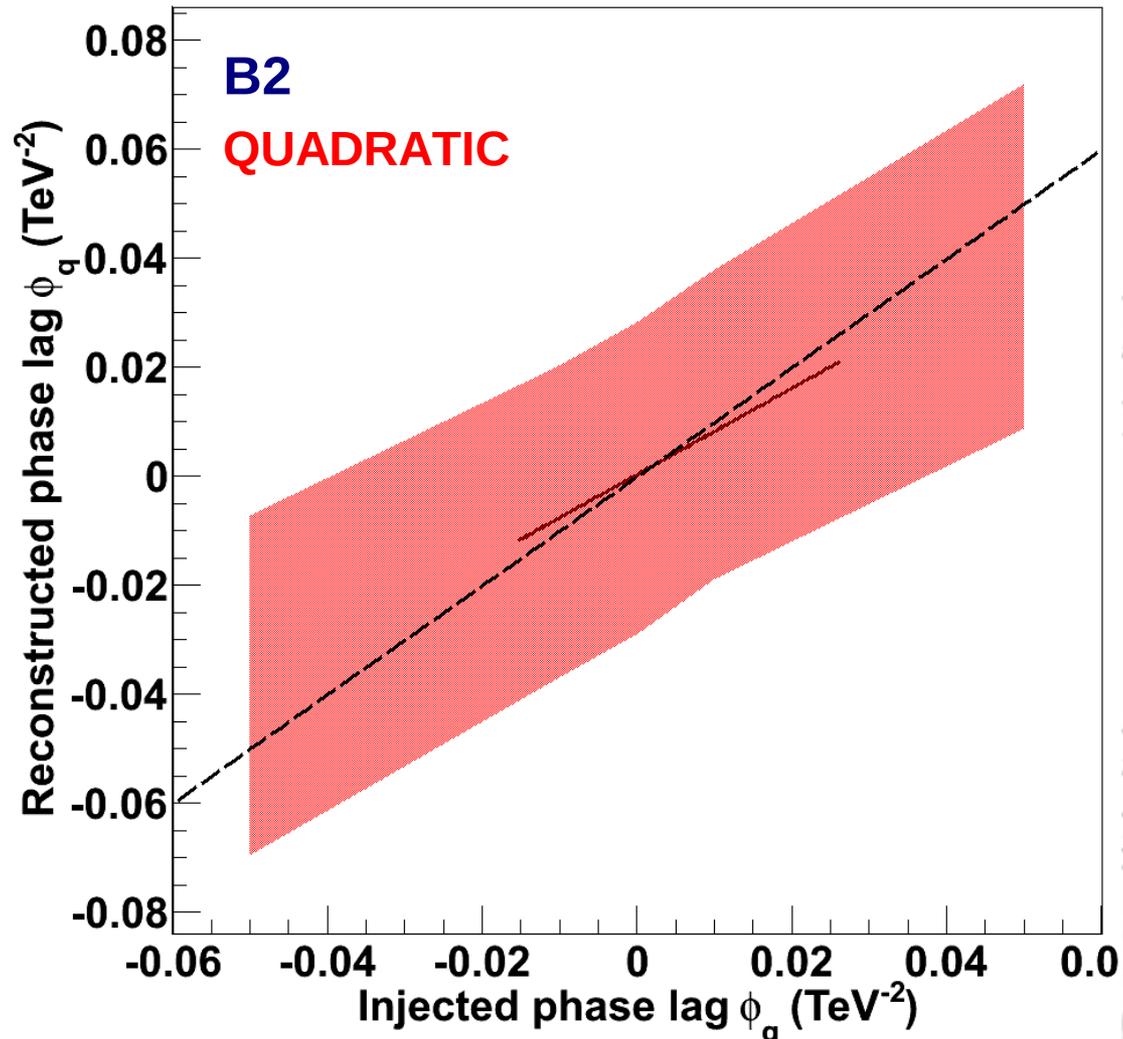
- Sensibilité obtenue pour  $\varphi_n^{injec} = 0$

JRJC 2013, 1-7 Décembre 2013



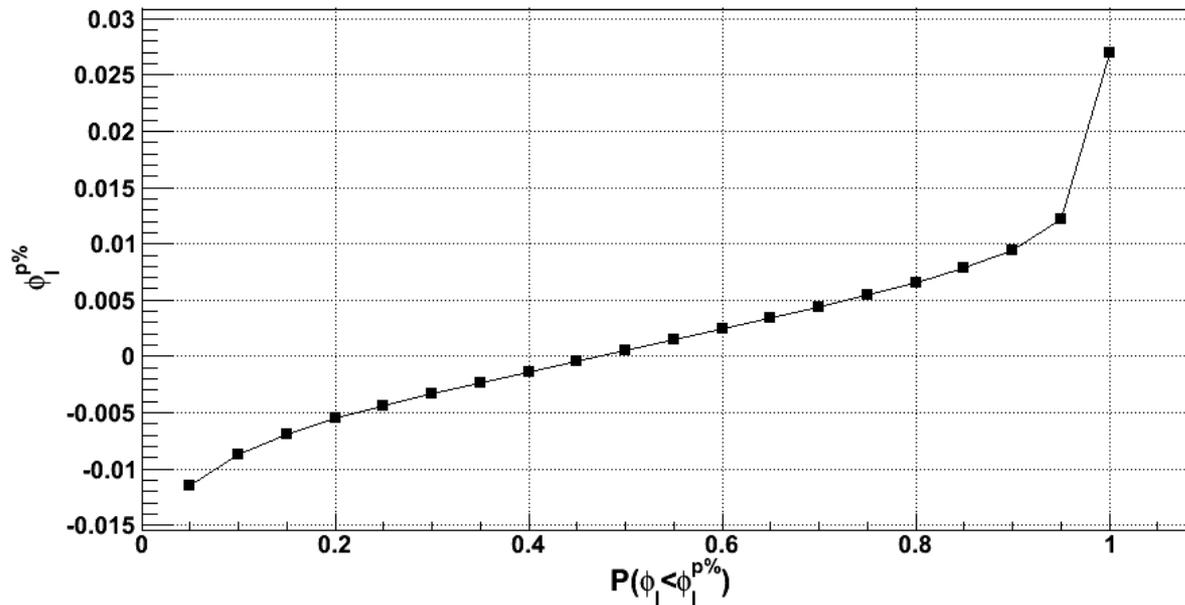
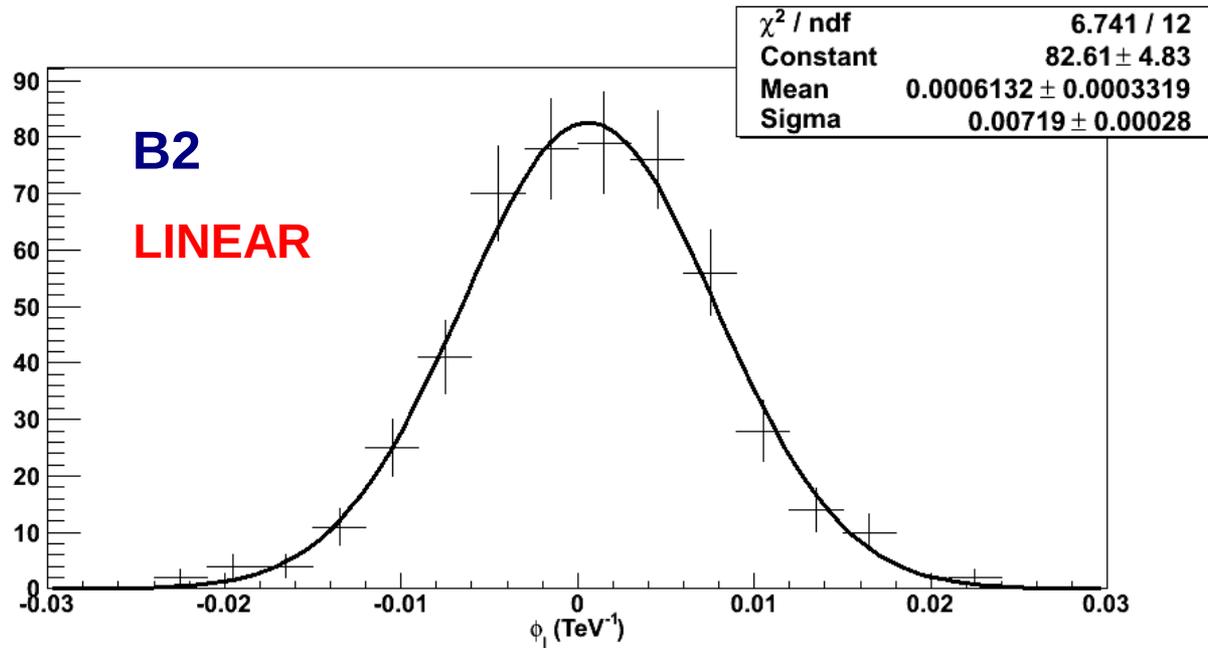
# Backup slides

## Calibration curves



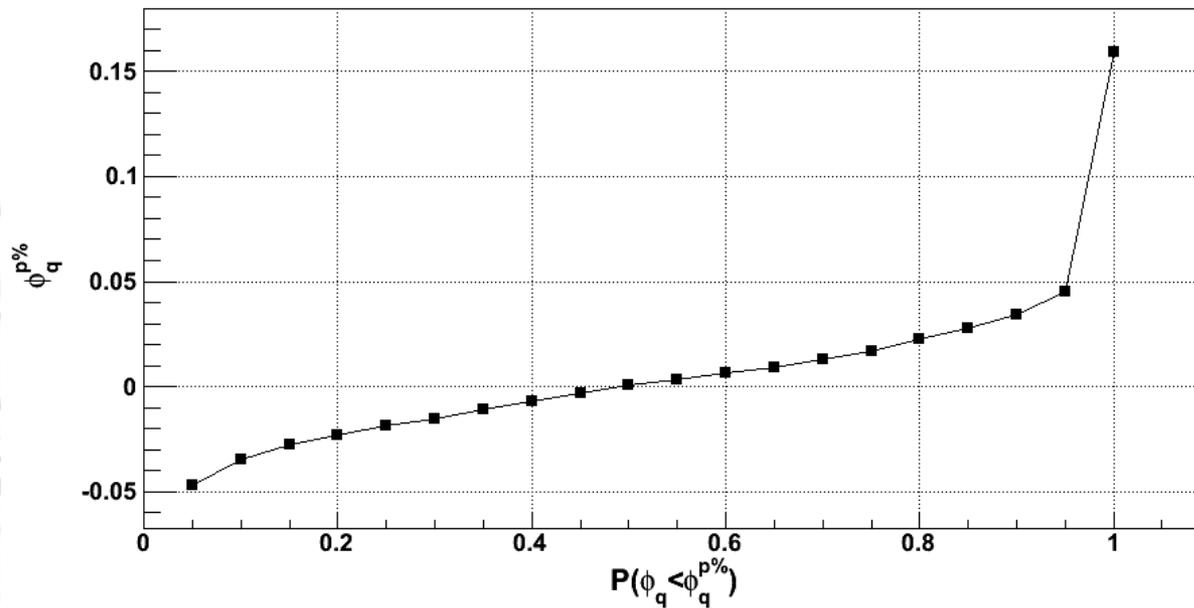
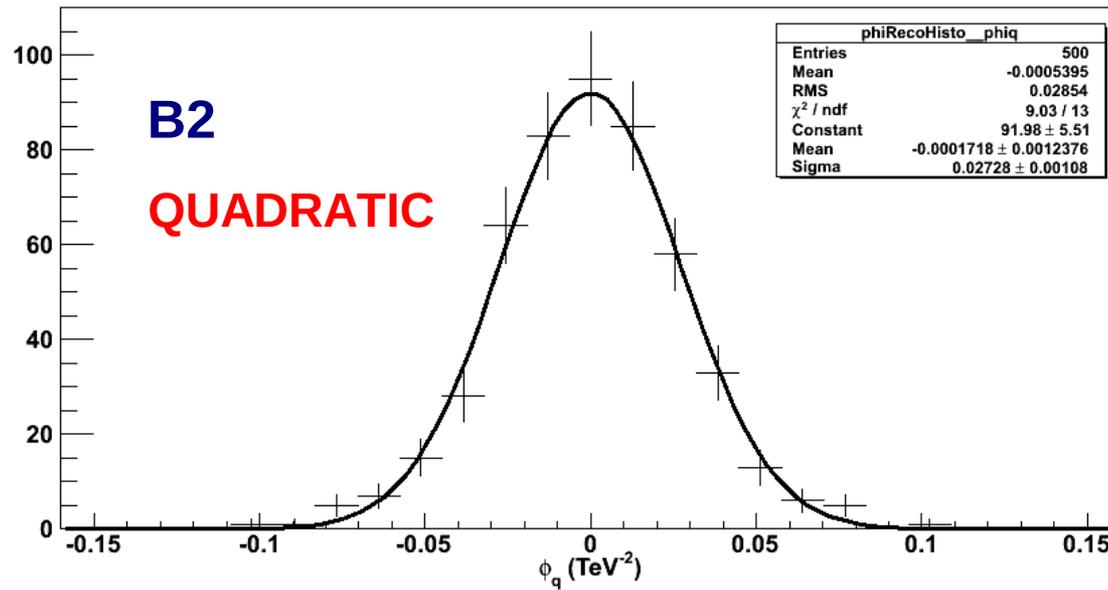
# Backup slides

## Distribution of reconstructed phase lag (no LIV)



# Backup slides

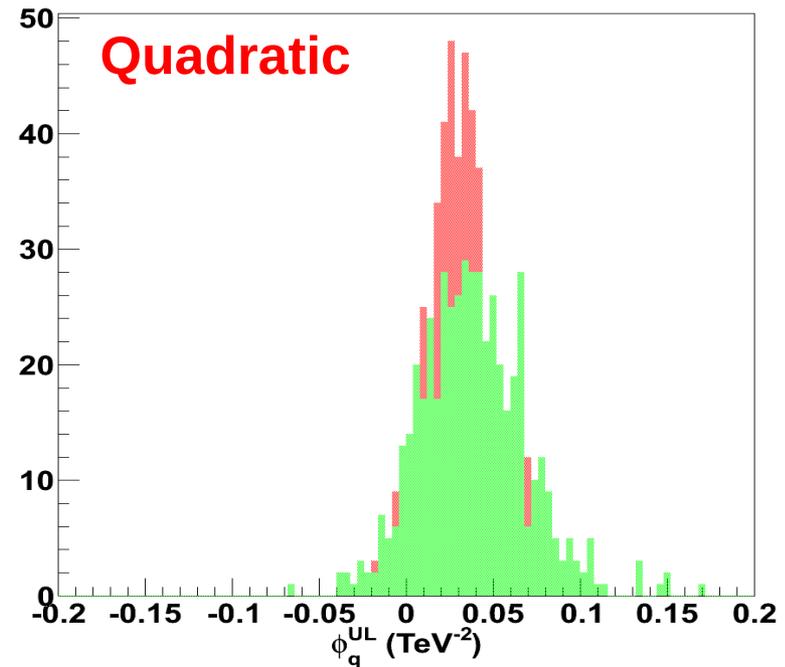
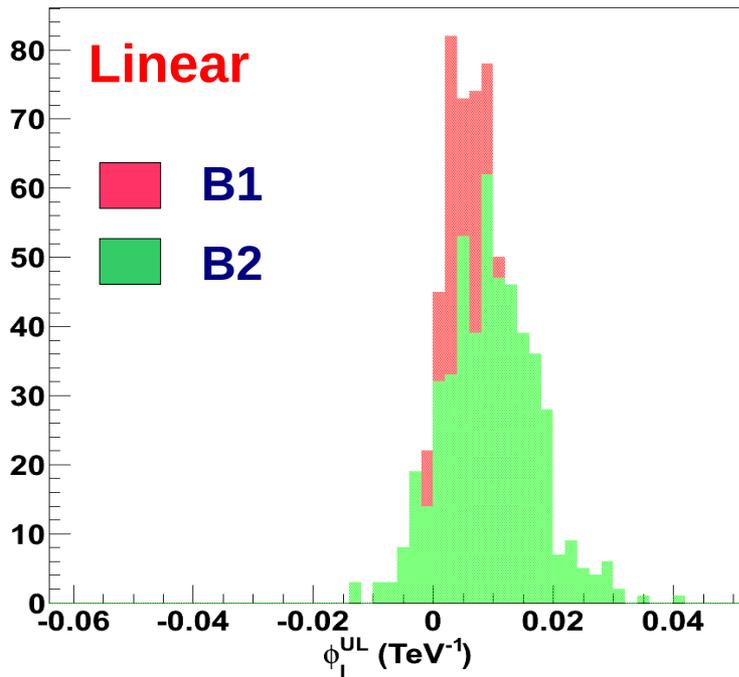
## Distribution of reconstructed phase lag (no LIV)



# Prospect for H.E.S.S.2

## Calibration of confidence intervals

- 95% CL upper/lower limits on **phase lag parameter** are derived from  $-2\Delta\ln(L)$ .



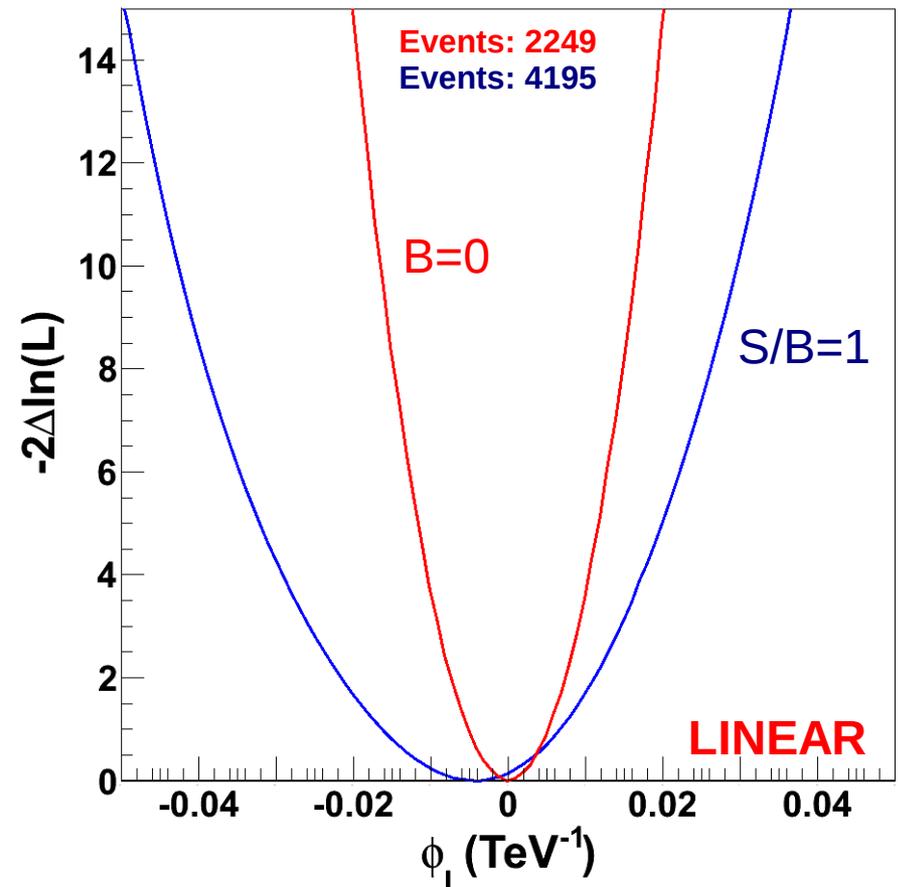
- **Improper coverage** (frequentist interpretation) ?
  - Phasogram Template uncertainties
  - Spectrum parametrization
- **Refine threshold** on  $-2\Delta\ln(L)$  to get proper coverage.
  - Derive mean upper/lower limits on linear and quadratic phase lag parameter
  - Lower limits on quantum gravity scale  $E_{\text{QG}}$

# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Etude de sensibilité (“phase lag”)

- Pour chaque réalisations:
  - Limites à 95% CL sur le paramètre de “phase lag” dérivées de  $-2\Delta\ln(L)$ .
  - 1) Limite inférieur : “plus vite que la lumière”
  - 2) Limite supérieur : “moins vite que la lumière”
  - Doivent avoir le bon “coverage”

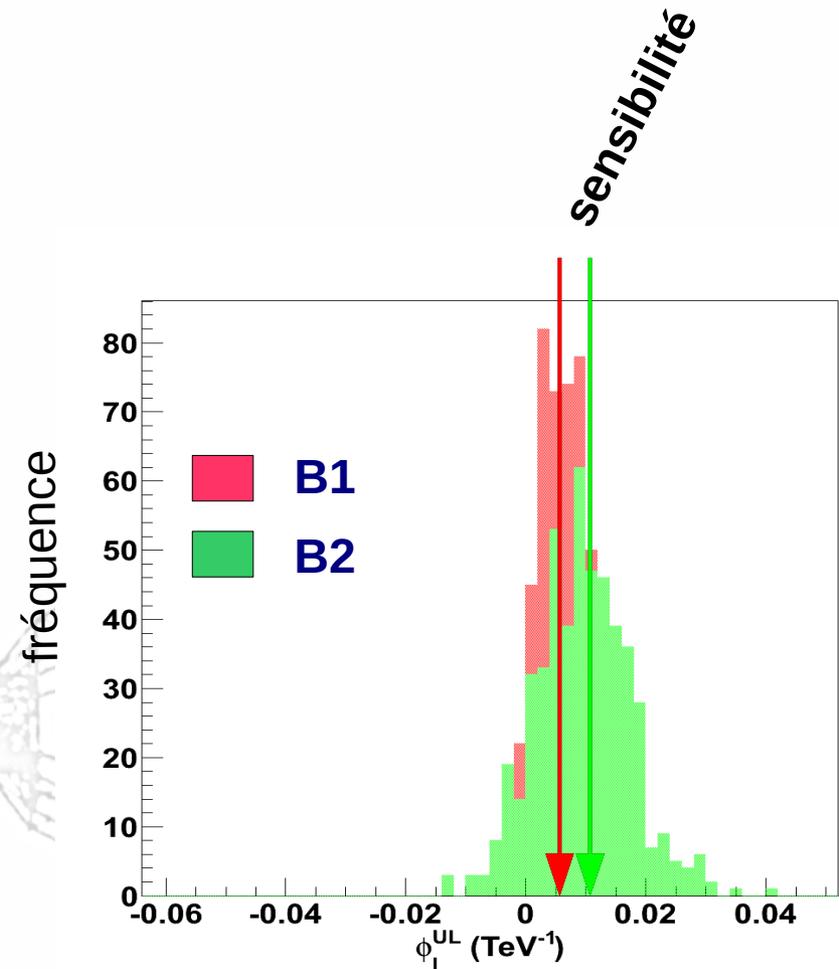
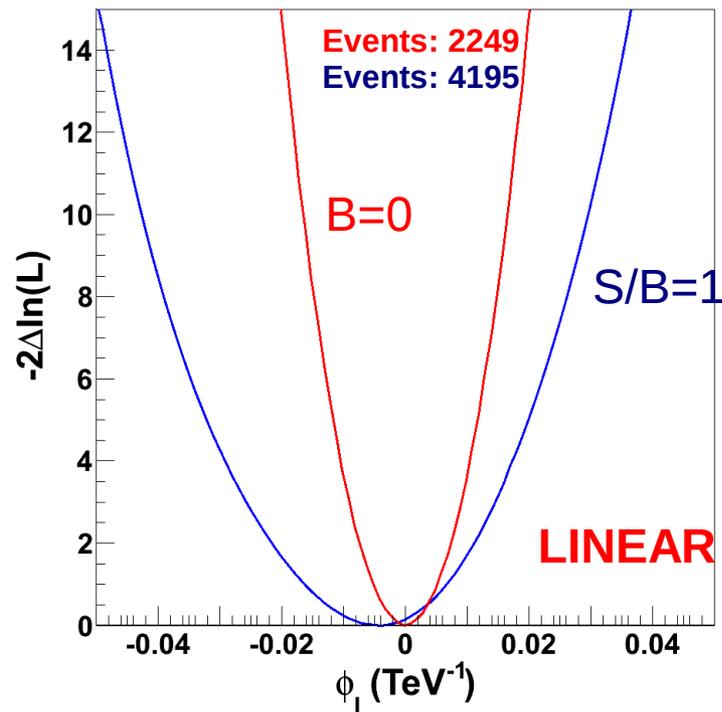
- Sensibilité sur  $\varphi_n$ 
  - = Limite moyenne (500 estimations)
  - Limite inférieur sur  $E_{QG}$



# Sonder la Gravité Quantique avec les pulsars

## Etude de sensibilité (“phase lag”)

- On dérive les limites à 95% CL
  - Supérieure (“moins vite que la lumière”)
  - Inférieure (“plus vite que la lumière”)



Distribution des limites supérieures à 95% CL (500 réalisations)