

Statut de la génération  
des signaux indirects  
de matière noire  
avec MICROMEAS

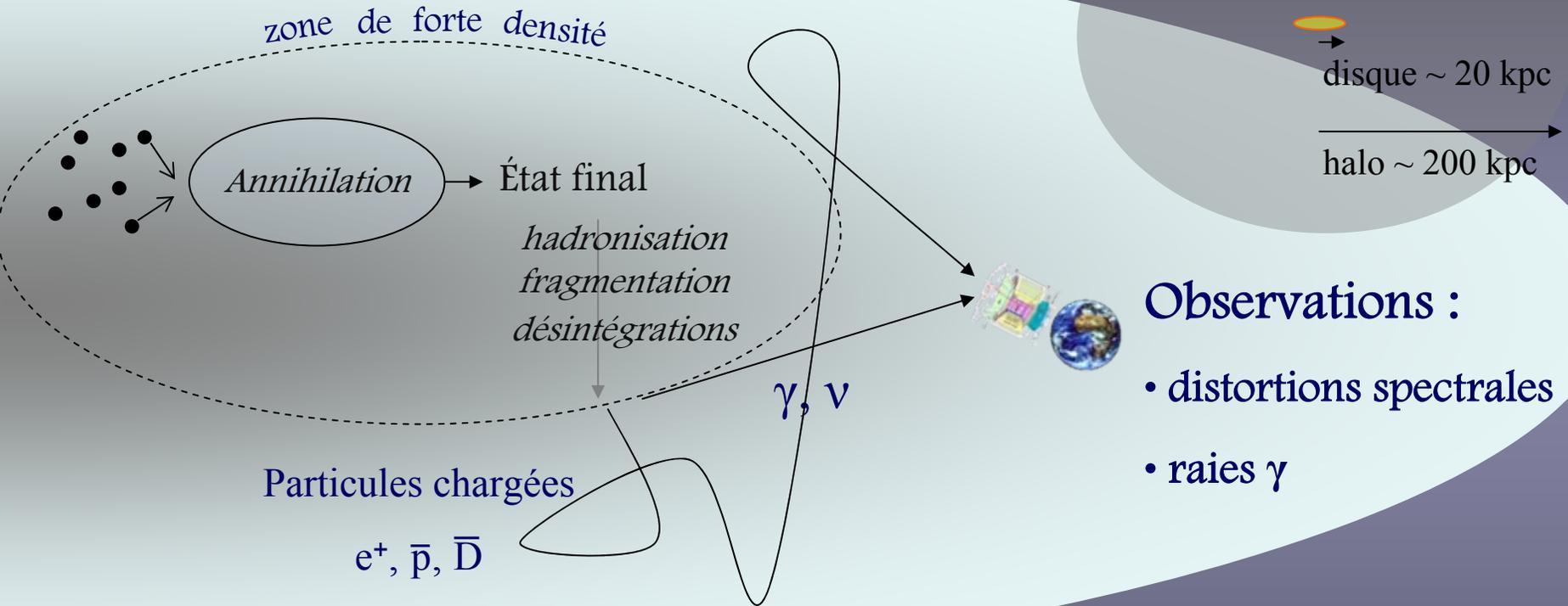
---

Pierre BRUN ~ LAPP

# Le code public

- micrOMEGAs calcule la densité relique
  - Dans un modèle générique de nouvelle physique
  - Prise en compte de toutes les co-annihilations
  - Se base sur CompHEP
  
- Construction d'un module dédié à la recherche indirecte
  - Dans le MSSM dans un premier temps
  - Outil indépendant existant : DarkSusy (P. Gondolo *et al.*)

# Recherche indirecte

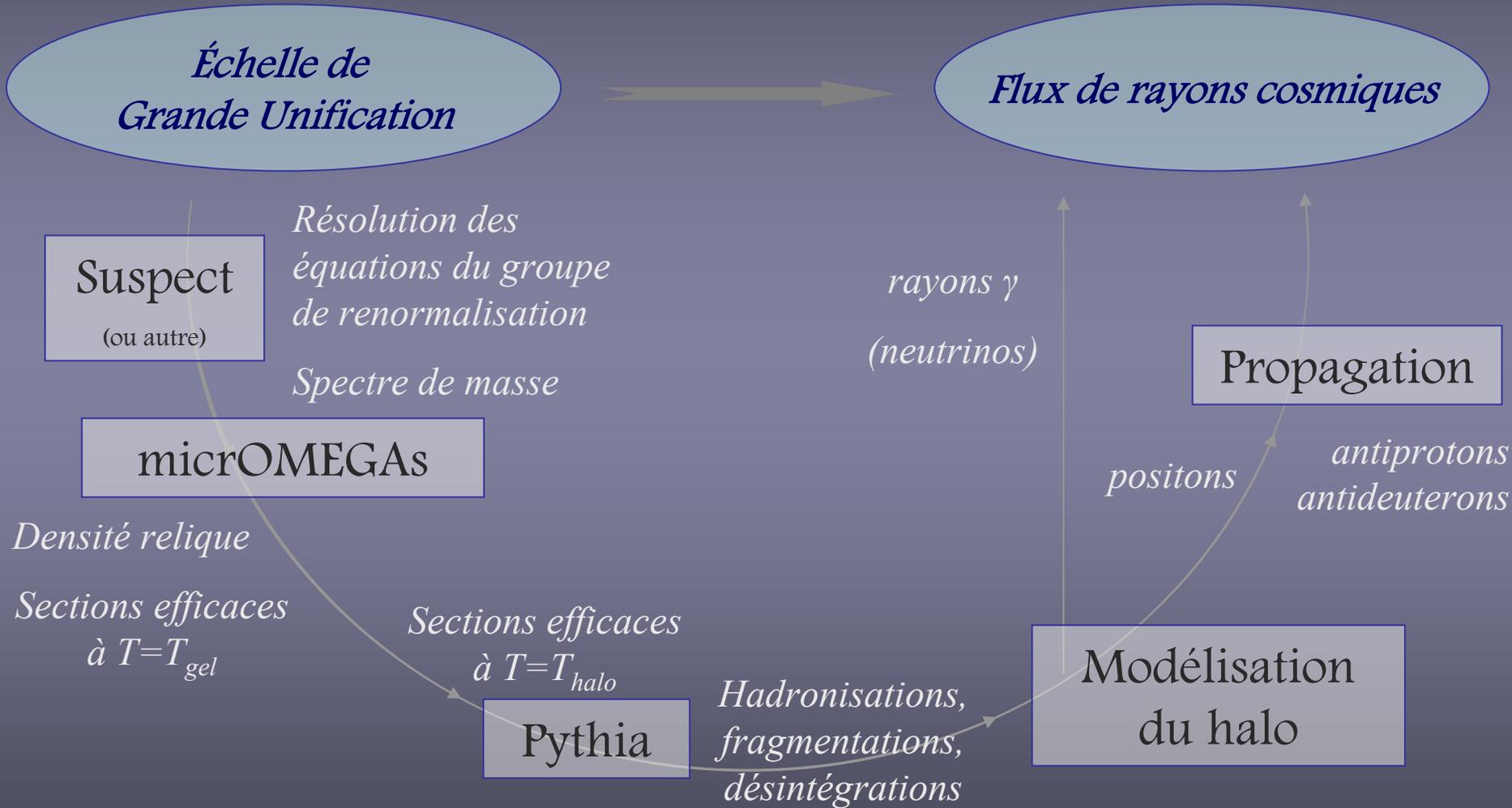


**Objectif** : développer micrOMEGAs pour prédire la production exotique de rayons cosmiques

→ travail en cours aux LAPP/LAPTH Annecy

G. Bélanger, F. Boudjema, P.B., A. Pukhov, S. Rosier-Lees, P. Salati, R. Taillet

# Avancement du projet



# Avancement du projet

*Échelle de Grande Unification*

*Flux de rayons cosmiques*

**Suspect**

(ou autre)

*Résolution des équations du groupe de renormalisation*

*Spectre de masse*

**micrOMEGAs**

*Densité relique*

*Sections efficaces à  $T=T_{gel}$*

**Outil public**

*Sections efficaces*

*à  $T=T_{halo}$*

**Pythia**

*Hadronisations, fragmentations, désintégrations*

*rayons  $\gamma$   
(neutrinos)*

**Propagation**

*positons*

*antiprotons  
antideuteron*

**Modélisation du halo**

# Avancement du projet

*Échelle de Grande Unification*

*Flux de rayons cosmiques*

**Suspect**

(ou autre)

*Résolution des équations du groupe de renormalisation*

*Spectre de masse*

**micrOMEGAs**

*Densité relique*

*Sections efficaces à  $T=T_{gel}$*

**Outil public**

*Sections efficaces*

*à  $T=T_{halo}$*

**Pythia**

*Hadronisations, fragmentations, désintégrations*

*rayons  $\gamma$   
(neutrinos)*

**Propagation**

*positons*

*antiprotons  
antideuteron*

**Modélisation du halo**

**Nouveautés**

# Calcul des signaux

- Pour les messenger neutres :

$$\Phi_{\gamma,\nu}^{SUSY} = \frac{1}{4\pi} \sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.} B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_{\chi}^2} \int_{l.o.s.} \frac{\rho_{\chi}^2}{2} dl$$

- Pour les particules chargées :

$$Q_{charged} = \frac{dN}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{\chi}^2} \rho_{\chi}^2 \longrightarrow \text{Terme source dans les équations de propagation}$$

# Calcul des signaux

- Pour les messenger neutres :

$$\Phi_{\gamma,\nu}^{SUSY} = \frac{1}{4\pi} \sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.} B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_{\chi}^2} \int_{l.o.s.} \frac{\rho_{\chi}^2}{2} dl$$

*Astrophysique*

- Pour les particules chargées :

$$Q_{charged} = \frac{dN}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{\chi}^2} \rho_{\chi}^2$$

→ Terme source dans les équations de propagation

# Calcul des signaux

- Pour les messenger neutres :

$$\Phi_{\gamma,\nu}^{SUSY} = \frac{1}{4\pi} \sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.} B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_{\chi}^2} \int_{l.o.s.} \frac{\rho_{\chi}^2}{2} dl$$

*Physique des particules  
(SUSY)*

*Astrophysique*

- Pour les particules chargées :

$$Q_{charged} = \frac{dN}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{\chi}^2} \rho_{\chi}^2$$

→ Terme source dans les  
équations de propagation

# Calcul des signaux

- Pour les messenger neutres :

$$\Phi_{\gamma,\nu}^{SUSY} = \frac{1}{4\pi} \sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.} B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_{\chi}^2} \int_{l.o.s.} \frac{\rho_{\chi}^2}{2} dl$$

*Physique des particules  
(principalement QCD)*

*Physique des particules  
(SUSY)*

*Astrophysique*

- Pour les particules chargées :

$$Q_{charged} = \frac{dN}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{\chi}^2} \rho_{\chi}^2$$

→ Terme source dans les  
équations de propagation

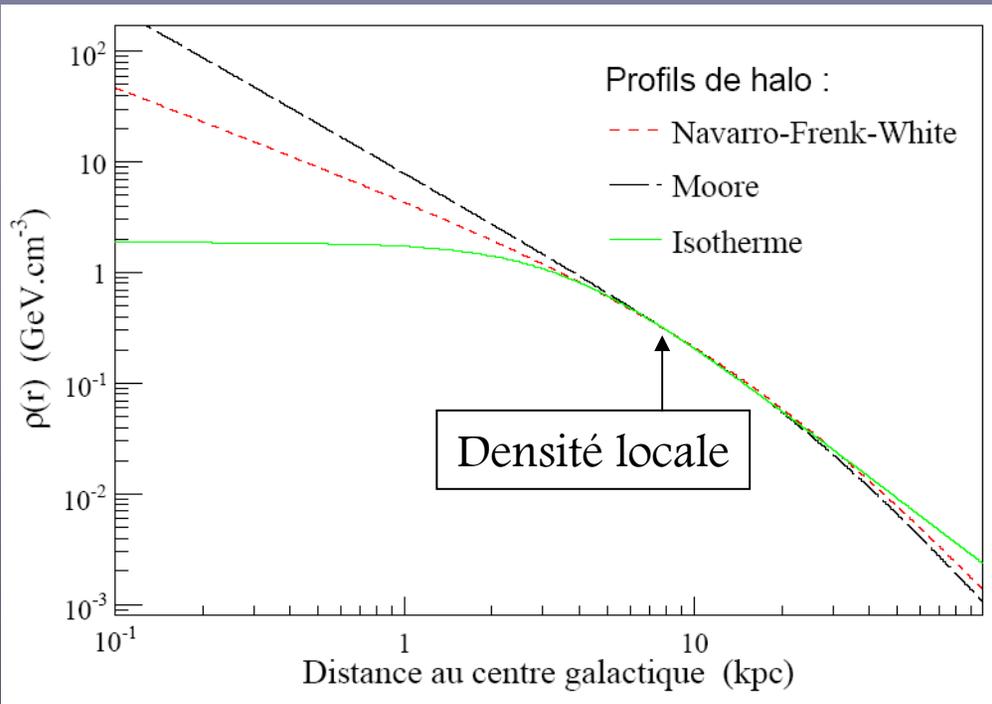
# Le halo de matière noire

$$\int_{l.o.s.} \frac{\rho_x^2}{2} dl$$

- Différents types de profils de densité sont possibles

$$\rho_{CDM}(r) = \rho_{\odot} \left[ \frac{r_{\odot}}{r} \right]^{\gamma} \left[ \frac{1 + (r_{\odot}/a)^{\alpha}}{1 + (r/a)^{\alpha}} \right]^{\frac{\beta-\gamma}{\alpha}}$$

Halo model	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	a (kpc)
Isothermal with core	2	2	0	4
NFW	1	3	1	20
Moore	1.5	3	1.5	28



Profil de densité au centre inconnu  
 ≠ influences sur ≠ canaux

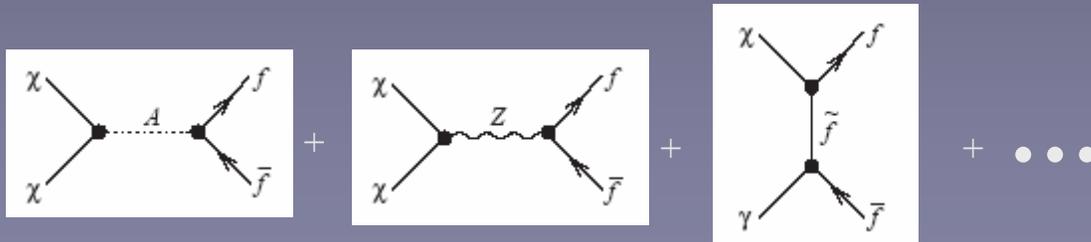
# États finaux à l'arbre

$$B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_\chi^2}$$

## Désintégration de 2 neutralinos $\chi\chi \rightarrow$

→ Des paires fermions / anti-fermions

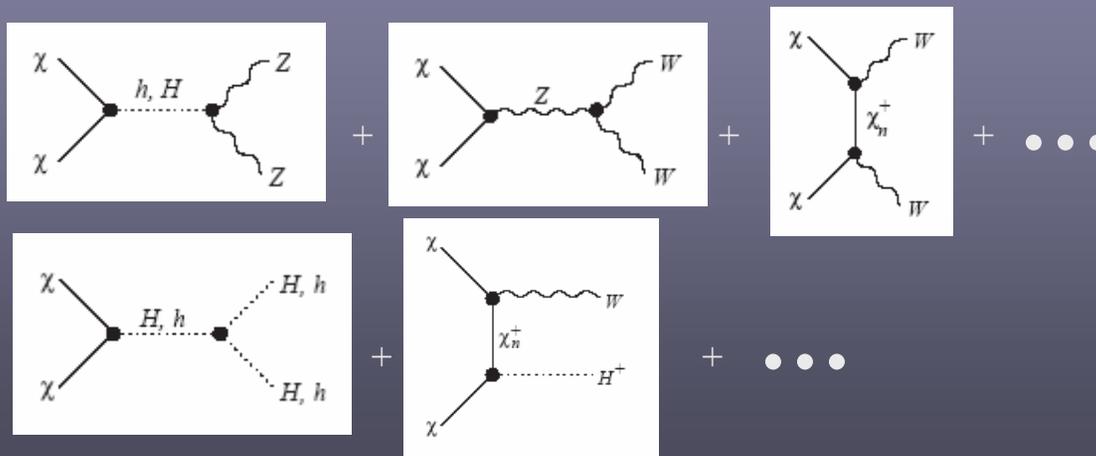
$u\bar{u}, c\bar{c}, t\bar{t}, d\bar{d}, s\bar{s}, b\bar{b}, e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \nu_i\nu_i$



Hadronisation  
Désintégrations

→ Des combinaisons de bosons de jauge et/ou de Higgs

$W^+W^-, Z^0Z^0, Z^0h^0, Z^0A^0, Z^0H^0, W^+H^\pm, h^0h^0, h^0H^0, h^0A^0, H^0H^0, H^0A^0, H^+H^-, A^0A^0$



Spectre  $\gamma$  continu  
et  
Source de  $e^+, \bar{p}, \bar{D}$

# Processus à la boucle

$$B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_\chi^2}$$

- 3 états finals sont intéressants au niveau d'une boucle

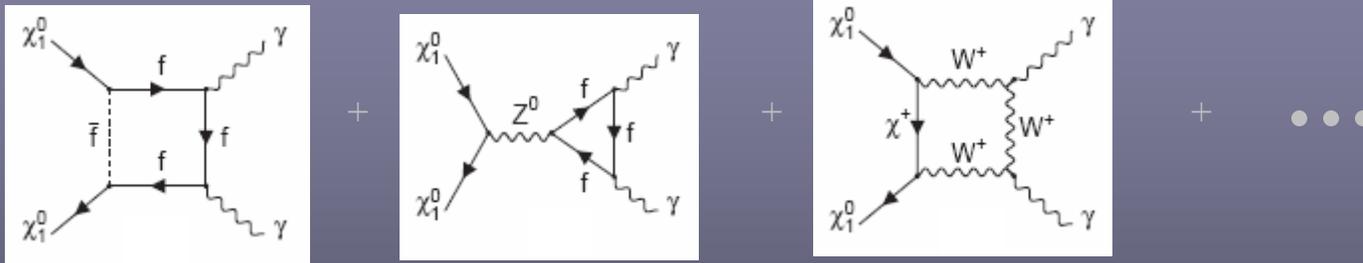
$$gg, \underbrace{\gamma\gamma, \gamma Z^0}$$

Donnent des raies en  $\gamma$  :

$$\gamma\gamma : E_\gamma = m_\chi (N_\gamma = 2)$$

$$\gamma Z^0 : E_\gamma = m_\chi \left[ 1 - \left( \frac{m_{Z^0}}{2m_\chi} \right)^2 \right] (N_\gamma = 1)$$

- Calcul effectué par Boudjema *et al.*, (hep-ph/0507127)

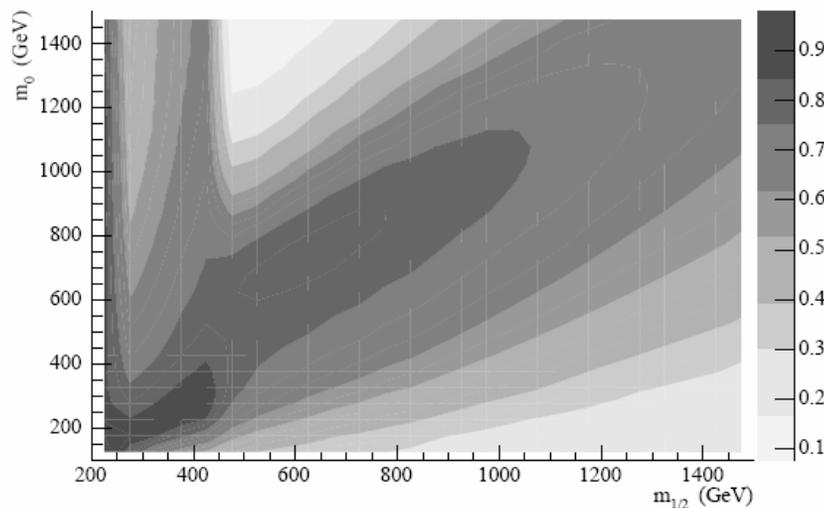


→ Illustration du futur outil **SloopS** (calcul automatique de tous les processus)

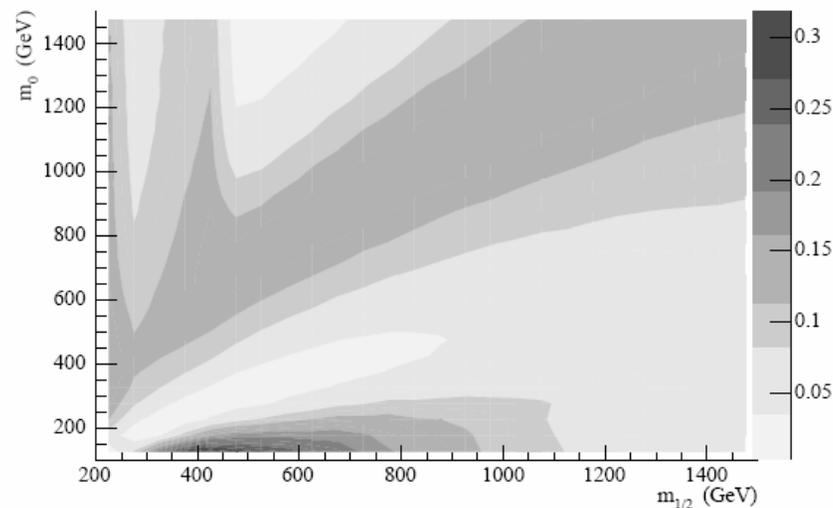
# Occurrence des états finals dans $mSUGRA$

$$B_{f.s.} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{m_\chi^2}$$

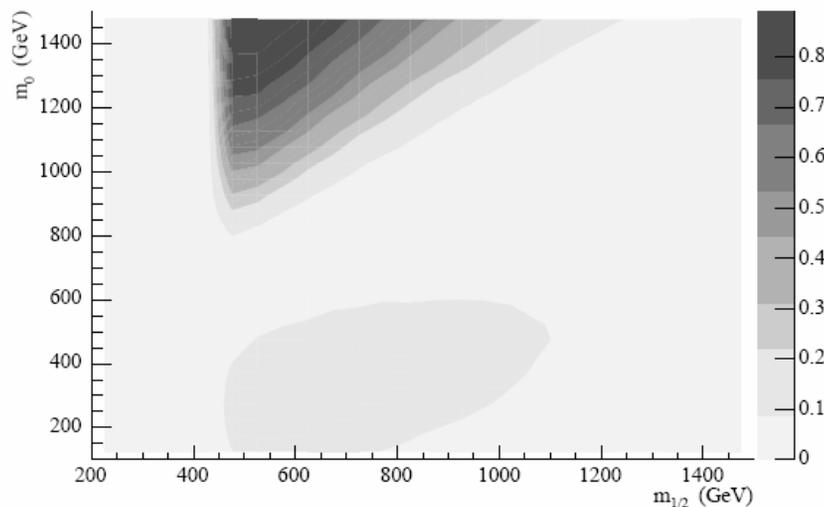
$b\bar{b}$  final state probability -  $A_0=0, \text{tg}(\beta)=10, \mu>0$



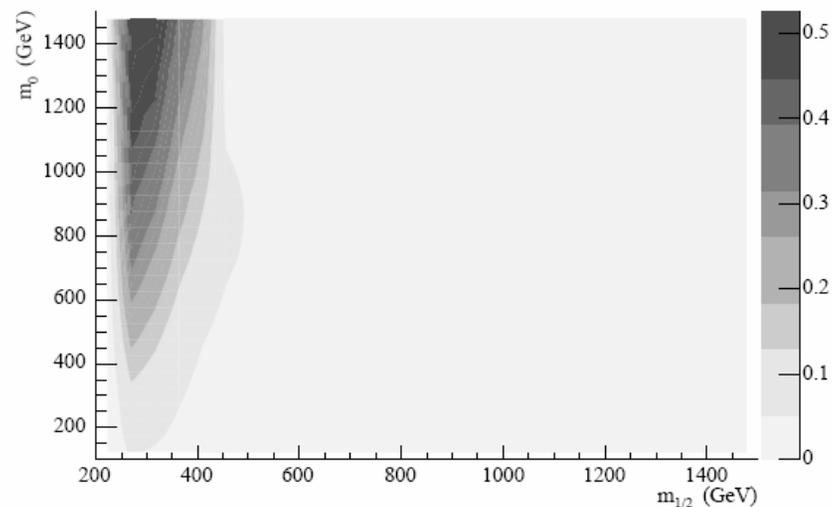
$\tau\tau$  final state probability -  $A_0=0, \text{tg}(\beta)=10, \mu>0$



$t\bar{t}$  final state probability -  $A_0=0, \text{tg}(\beta)=10, \mu>0$



$W^+W^-$  final state probability -  $A_0=0, \text{tg}(\beta)=10, \mu>0$



# Spectres de fragmentation $\sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.}$

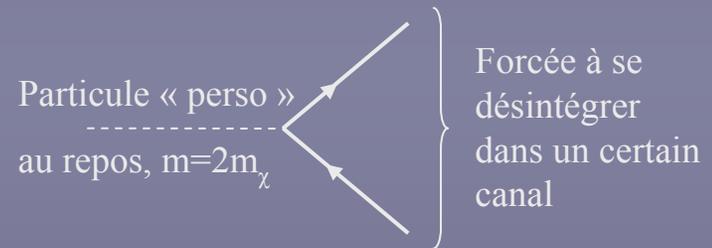
- PYTHIA est interfacé dans le code
- Différents appels sont possibles

## → Utilisation « Monte-Carlo »

- Entièrement paramétrable par l'utilisateur
- Précis
- Long

## → Interpolation de tables

- Spectres tabulés :
  - Pour chaque état final (sauf Higgs SUSY)
  - $2 \cdot 10^6$  événements pour chaque
  - 30 énergies fixées entre 50 GeV et 3 TeV
  - Stockés sur 1000 bins
- Rapide



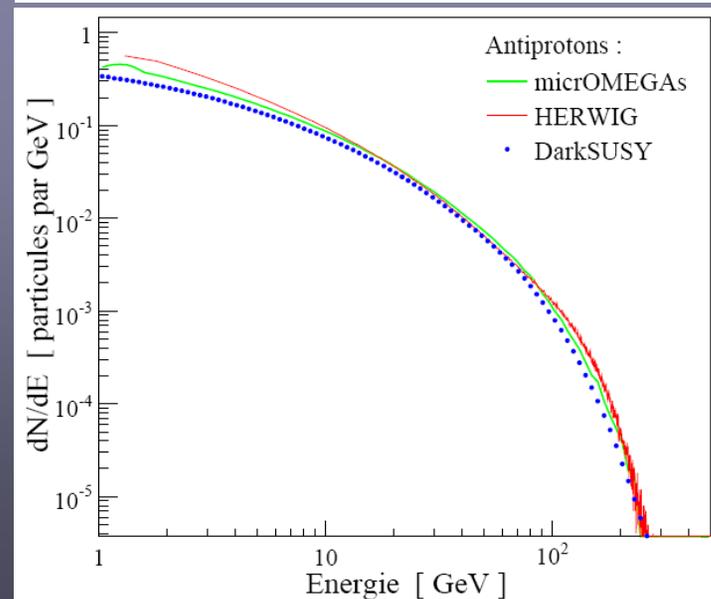
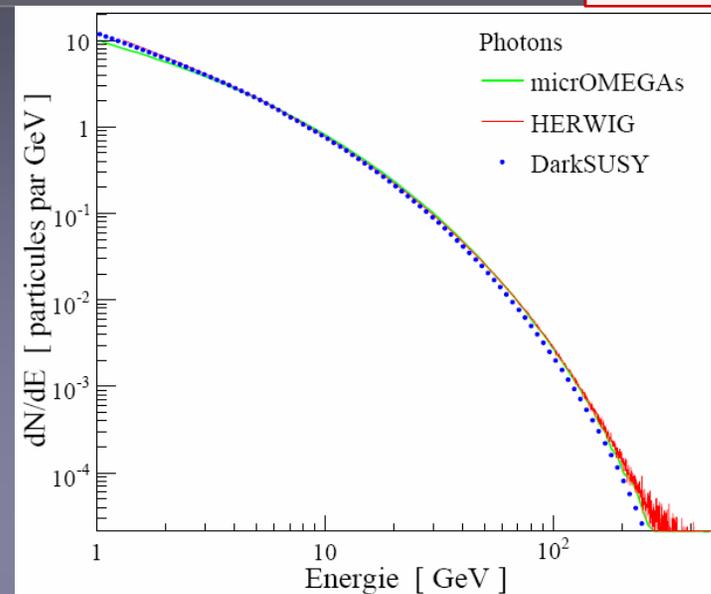
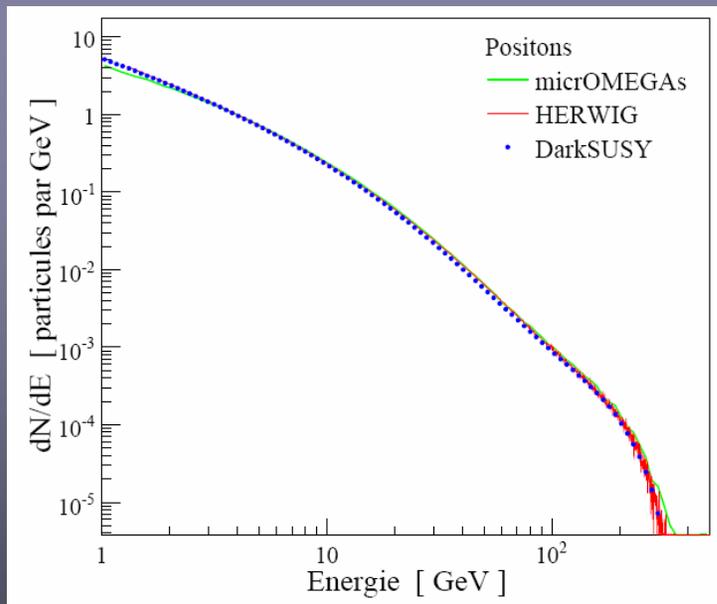
Comparaisons  
systématiques avec  
HERWIG et DarkSusy

# Spectres de fragmentation $\sum_{f.s.} \left( \frac{dN_{\gamma,\nu}}{dE} \right)_{f.s.}$

Résultats très similaires

Exemples pour

$b\bar{b} \rightarrow \gamma, e^+, \bar{p}$  à  $m_\chi = 400$  GeV



# La polarisation dans l'état final

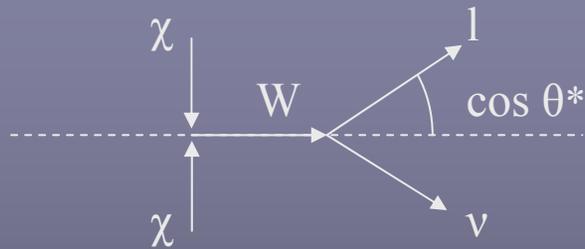
Une différence avec DarkSusy :

*la polarisation des bosons de jauge dans  $\chi\chi \rightarrow WW/ZZ$*

Annihilations à  $v=0$  de particules de spin  $1/2$



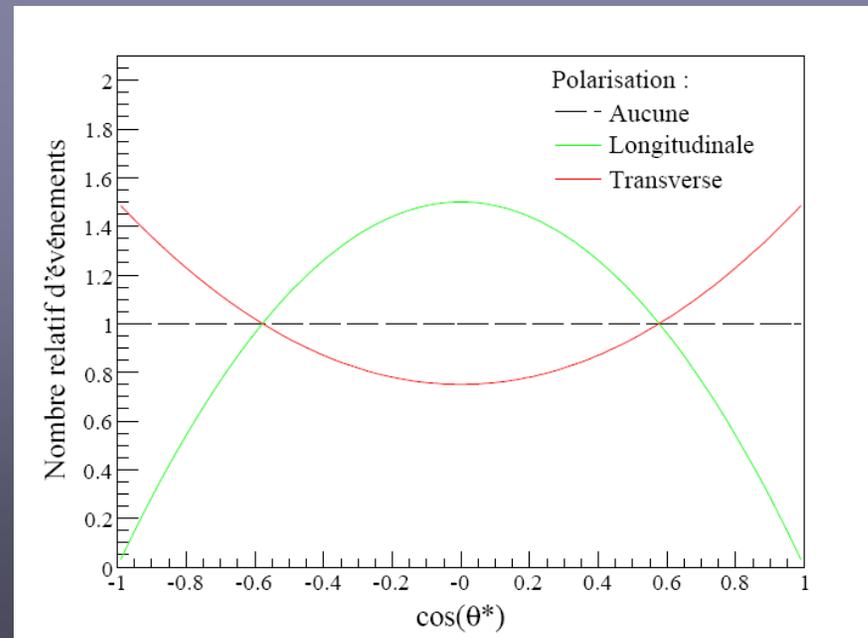
Production de bosons polarisés transversalement



Modification du spectre en énergie  
des leptons dans l'état final



Effets sur les spectres de  $e^+$  et  $\nu$



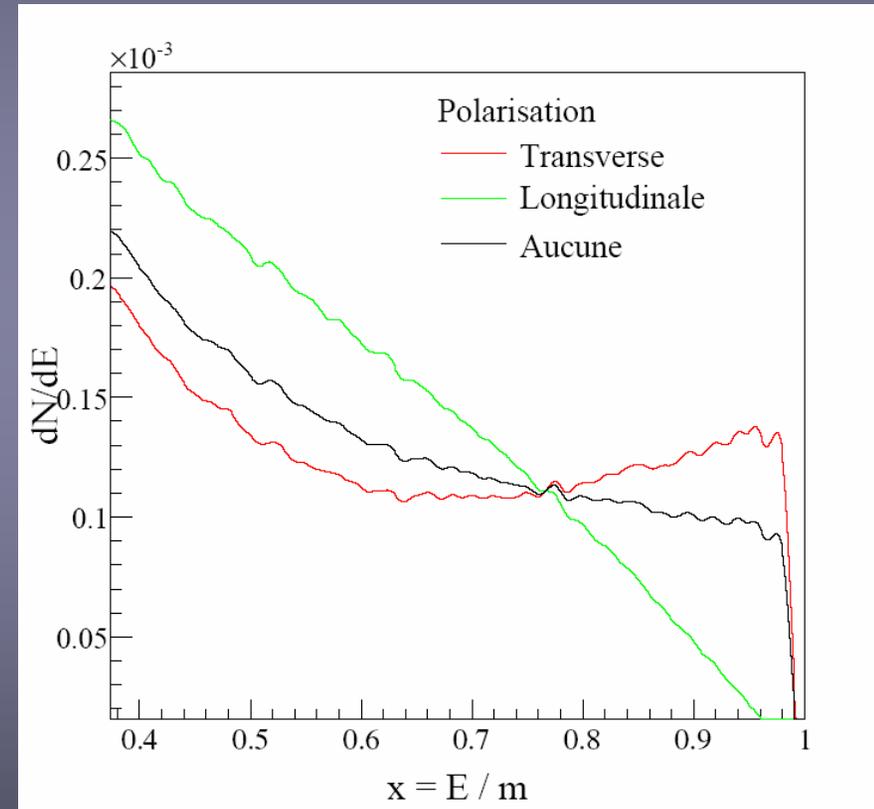
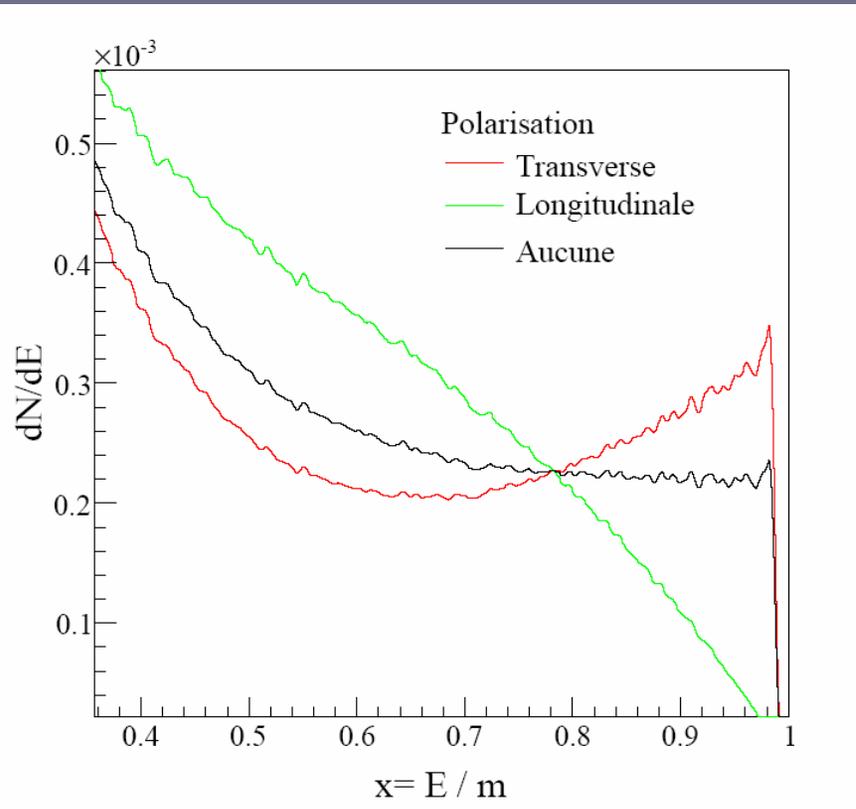
# Spectres de leptons

Re-pondérations dans les simulations PYTHIA

Positons

## Neutrinos $\mu$

Voir aussi B. Labonne, J. Orloff, E. Nezri  
*présentation GDR Susy – Matière noire Annecy 06*



Fin des spectres : fluctuations statistiques

Effet atténué par le rayonnement en  $e^+$

# Illustration en Gamma

## Exemple pour un jeu de paramètres mSUGRA

### Appel typique :

entrées SUGRA (SuSpect)

évent. rélages généraux

### Choix du halo :

`SetNFWHalo()` ;

### Facteur astrophysique :

`j = J( $\Delta\Omega$ )` ;

### Interpolation des données PYTHIA :

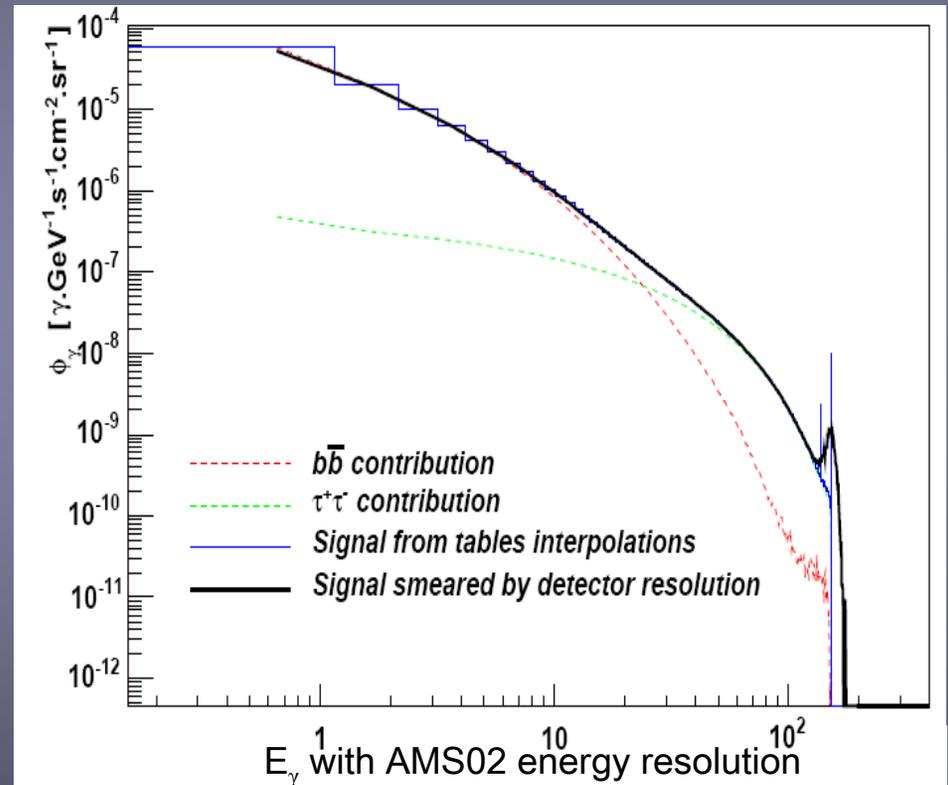
`RunCalc("gamma")` ;

### PRésolution du détecteur :

`Smear("gamma")` ;  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Sat.} \approx \% \\ \text{ACT} \approx 15\% \end{array} \right.$

### Calcul du flux :

$\Phi(E) = j * DMflux(E)$  ;



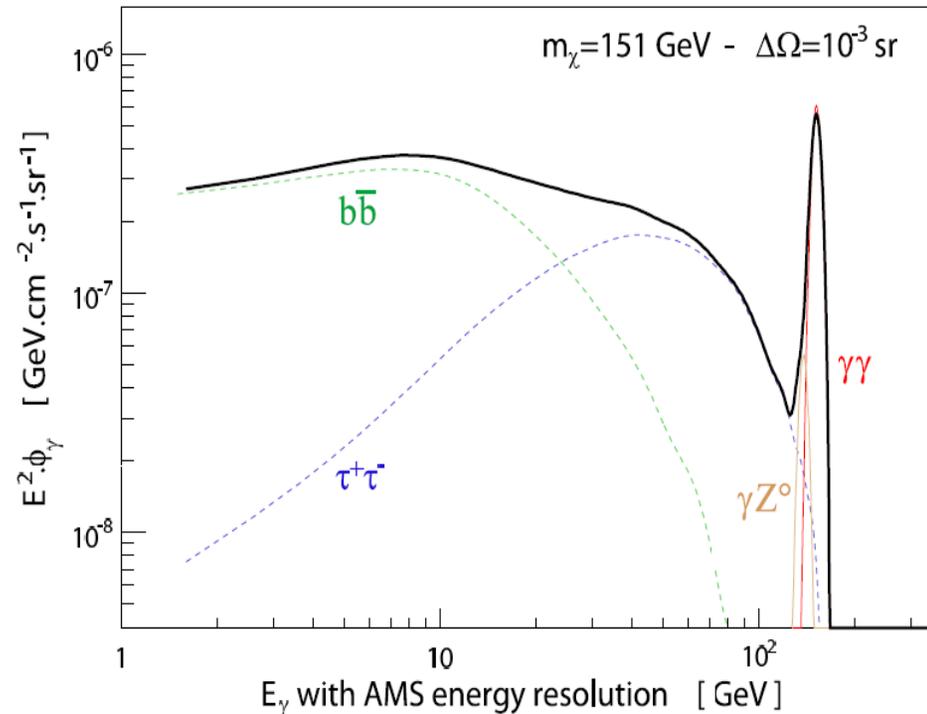
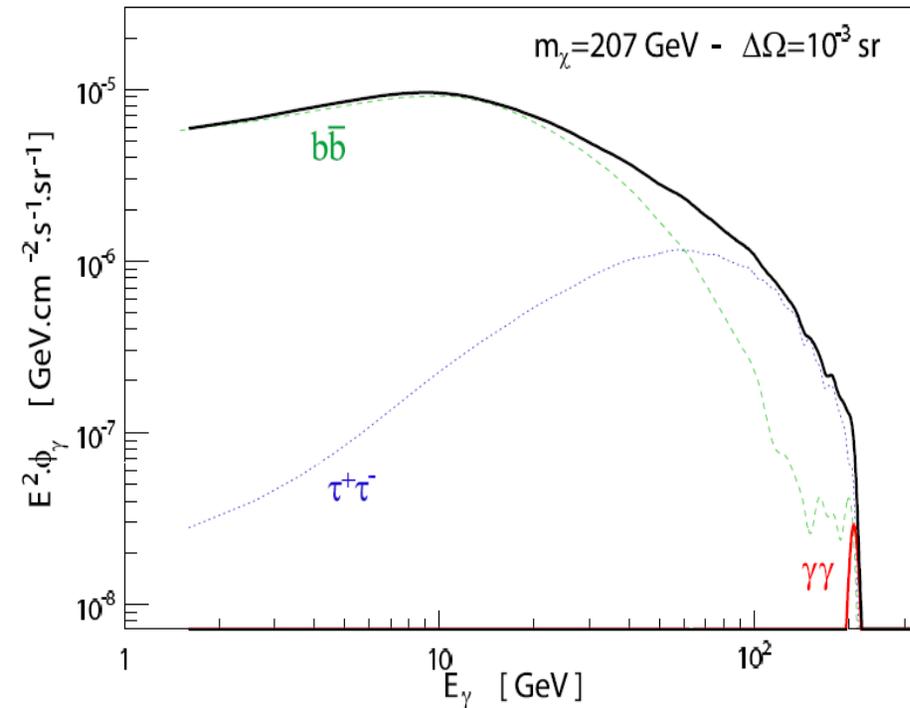
# Exemples en gamma

1° en direction du centre galactique

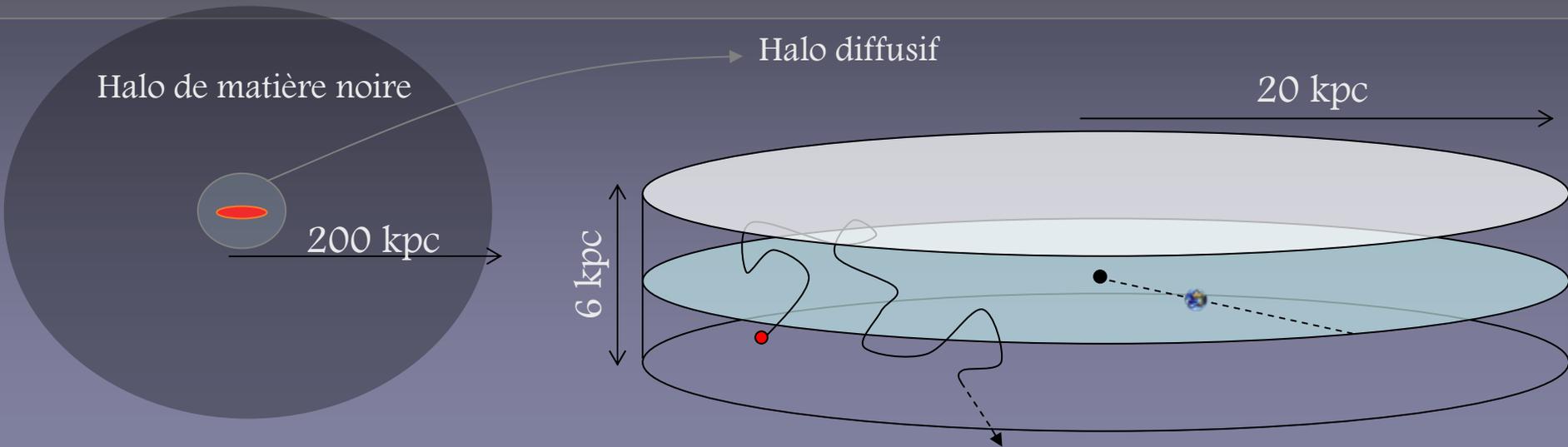
Résolution en énergie de AMS02- $\gamma$

1<sup>er</sup> jeu de paramètres

2<sup>nd</sup> jeu de paramètres



# Propagation des particules chargées



Champs magnétiques turbulents  $\Rightarrow$  marche aléatoire des particules chargées

Equation générale :

$$\partial_z (V_c \psi) - K \Delta \psi + \partial_E \{ b(E) \psi - K_{réac}(E) \partial_E \psi \} = Q(\vec{x}, E)$$

Vent convectif

Coefficient de diffusion

Pertes d'énergie

Ré-accélération

Terme source

Simplifications possibles selon les espèces considérées

# Antiprotons

Interface avec le code public Maurin-Taillet-Combet (*astro-ph/0609522*)

- Néglige les redistributions d'énergie
- Formule rapide (propagateur 1D) idéale pour les balayages d'espace des param.
- Résolution 2D (sans conditions limites)

Fonction de Green solution de  $\left\{ -K \Delta + V_c \frac{\partial}{\partial z} + n \delta(z) v \sigma \right\} \mathcal{G} = \delta(\vec{r} - \vec{r}')$

→ S'exprime avec des fonctions de Bessel

Flux = intégrale sur le halo

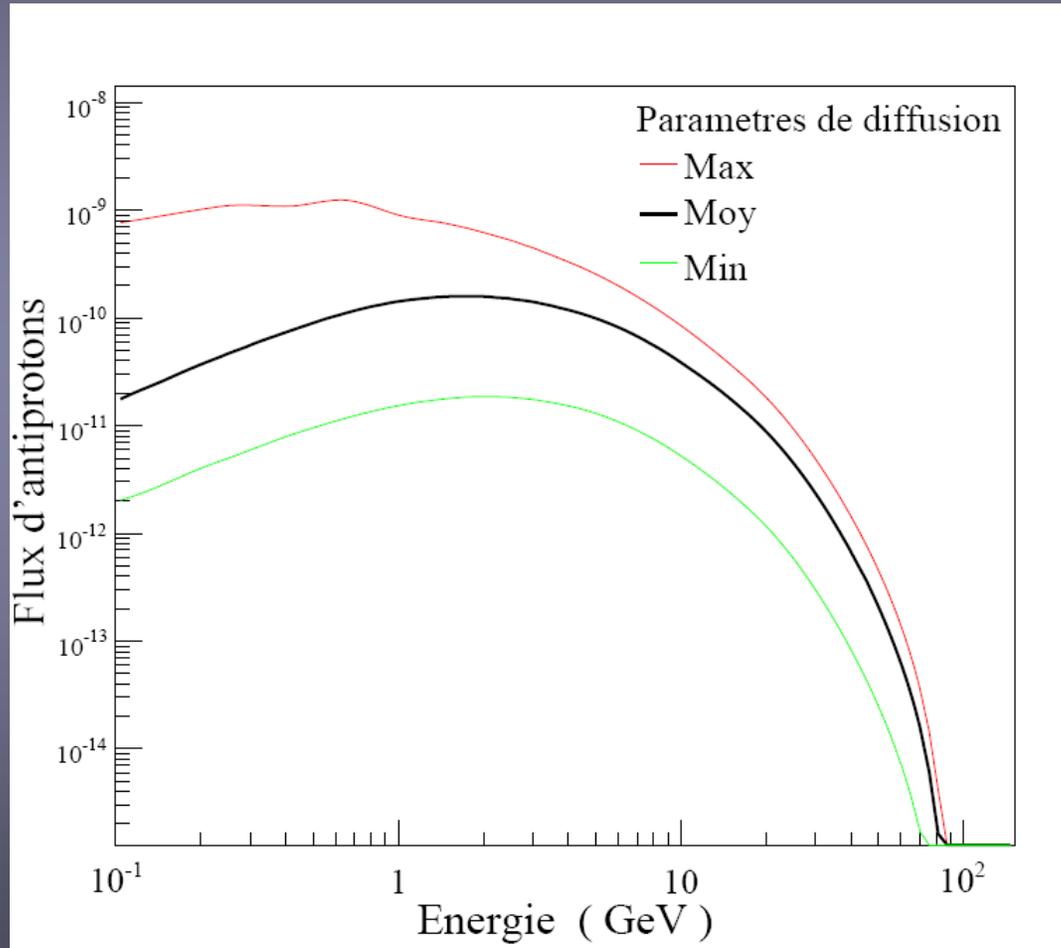
$$N(0) = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^L \int_0^R \mathcal{G}(r', \theta', z') q(r', \theta', z') r' d\theta dr' dz'$$

Terme source contenant  $\rho^2$

→ Calcul rapide bien adapté à notre outil

# Flux d'antiprotons

Pour le même jeu de paramètres mSUGRA ( $m_{\chi}=151$  GeV)



# Propagation des Positons

La propagation des  $e^+$  se fonde sur des travaux récents (J.Lavalle, J.Fochon, P.Salati & R.Taillet, astro-ph/0603796)

Résolution numérique par la fonction de Green :

$$\phi_{e^+}(E) = \frac{1}{8\pi} v_{e^+} \frac{\langle \sigma v \rangle}{m_\chi^2} \int_E^{m_\chi} \left( \frac{dN_{e^+}}{dE} \left[ \int_{halo} \mathcal{G}(E, \vec{x}_\odot, E_s, \vec{x}_s) \rho^2 d^3 \vec{x}_s \right] dE_s \right)$$

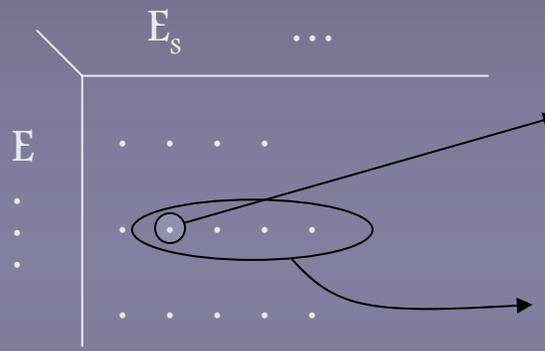
Somme des contributions  
de  $E_s=E$  à  $E_s=m_\chi$

Dépend du halo,  
des paramètres de diffusio,  
de  $E$  et  $E_s$

# Propagation des Positons

## Interpolation de matrices de diffusion

3 matrices fournies par défaut : 3 profils de halo, paramètres Moy

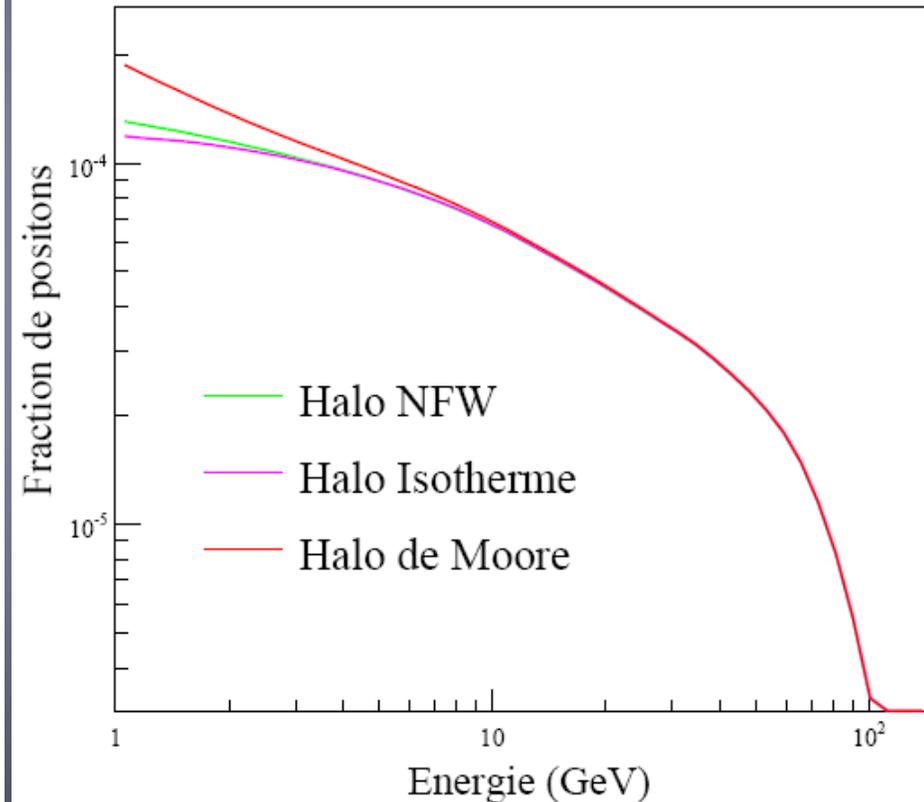
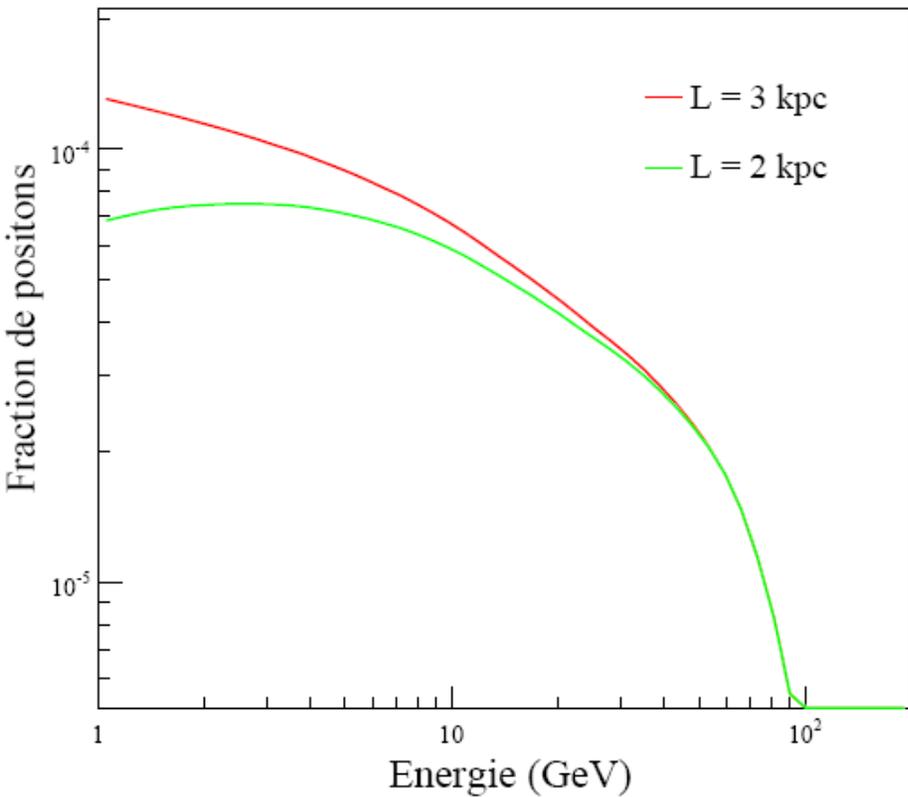

$$I_{i,j} = \int_{halo} \mathcal{G}(E_i, \vec{x}_\odot, E_{s,j}, \vec{x}_s) \left( \frac{\rho_\chi(\vec{x}_s)}{\rho_\odot} \right)^2 d^3 \vec{x}_s \times \Delta E_{s,j}$$

*Somme des contributions de  $E_s = E$  à  $E_s = m_\chi$*

- Création possible de nouvelles matrices
- Un algorithme fait le choix de la meilleure matrice
- Possibilité d'une interface avec un code de propagation indep.

# Positons : illustrations

## Fraction de positons dans différents cas



# Résumé

- L'outil est aujourd'hui complet
- Il est en phase de rodage

## La suite

- Passage du MSSM à un modèle générique
- Signaux en neutrinos
- Calcul automatique des facteurs d'amplification