



Matière Noire Fermionique Effective

Détection Indirecte de Matière Noire supersymétrique en Astronomie γ avec CELESTE

Julien Lavalle

LPTA IN2P3/CNRS - Université Montpellier II

CPPM – Marseille, lundi 24 janvier 2005

Plan de l'exposé

- 1. La problématique “Matière Noire”**
- 2. Phénoménologie de la Matière Noire :**
 - △ Le Neutralino–Matière Noire
 - △ Annihilation de neutralinos dans M31 :
 - Ajustement du halo
 - Prédictions de flux de rayonnement γ
 - △ Modèle effectif de Matière Noire fermionique
 - Principes
 - Densité relique et flux γ
- 3. Détection Indirecte dans CELESTE :**
 - △ Analyse des données M31
 - △ Limite CELESTE
- 4. Conclusions et perspectives**

La problématique “Matière Noire”

La découverte d'une quantité inattendue de **Matière Noire** (Zwicky, 1933) repose sur l'estimation contradictoire des masses de structures diverses de l'Univers (galaxies, amas de galaxies, super-amas) que fournissent deux méthodes différentes :

1. Considérer uniquement la masse des objets visibles (M_{visible})
2. L'évaluation dynamique basée sur la corrélation entre les vitesses des objets visibles et la masse totale environnante ($M_{\text{dynamique}}$)

On trouve systématiquement $M_{\text{dynamique}} \geq M_{\text{visible}}$, l'écart se creusant à mesure que l'échelle des structures grandit.



La problématique “Matière Noire”

La découverte d'une quantité inattendue de **Matière Noire** (Zwicky, 1933) repose sur l'estimation contradictoire des masses de structures diverses de l'Univers (galaxies, amas de galaxies, super-amas) que fournissent deux méthodes différentes :

1. Considérer uniquement la masse des objets visibles (M_{visible})
2. L'évaluation dynamique basée sur la corrélation entre les vitesses des objets visibles et la masse totale environnante ($M_{\text{dynamique}}$)

On trouve systématiquement $M_{\text{dynamique}} \geq M_{\text{visible}}$, l'écart se creusant à mesure que l'échelle des structures grandit.

L'estimateur de la quantité de Matière Noire est le rapport Masse sur Luminosité (M/L). Pour des étoiles, on a typiquement :

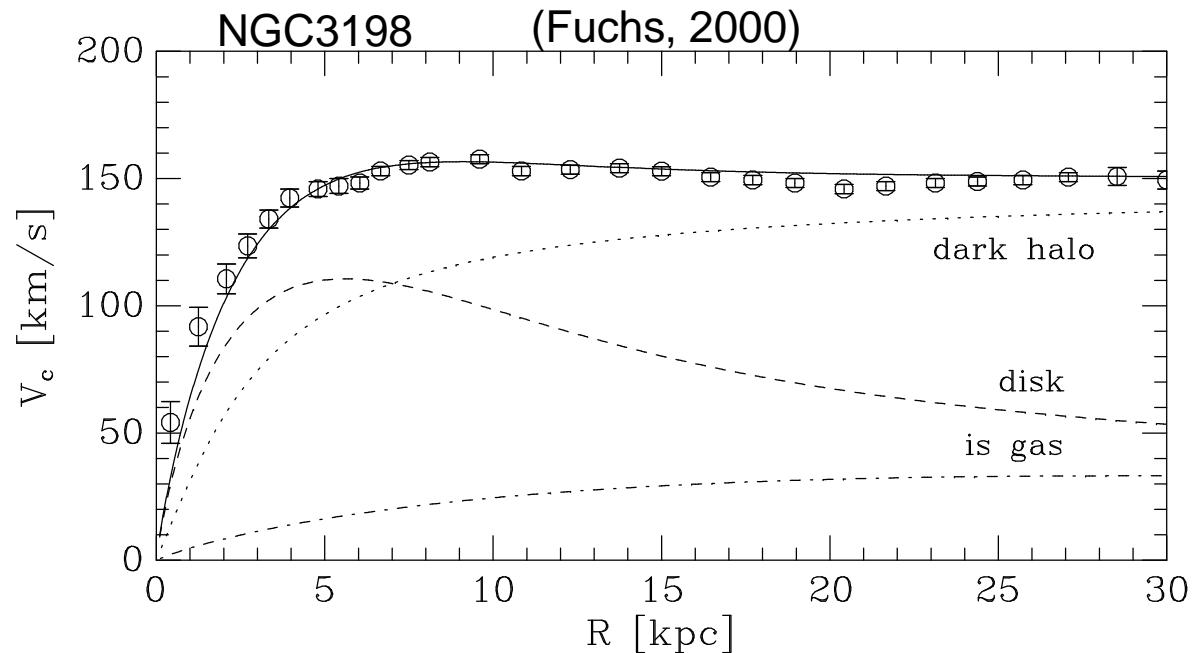
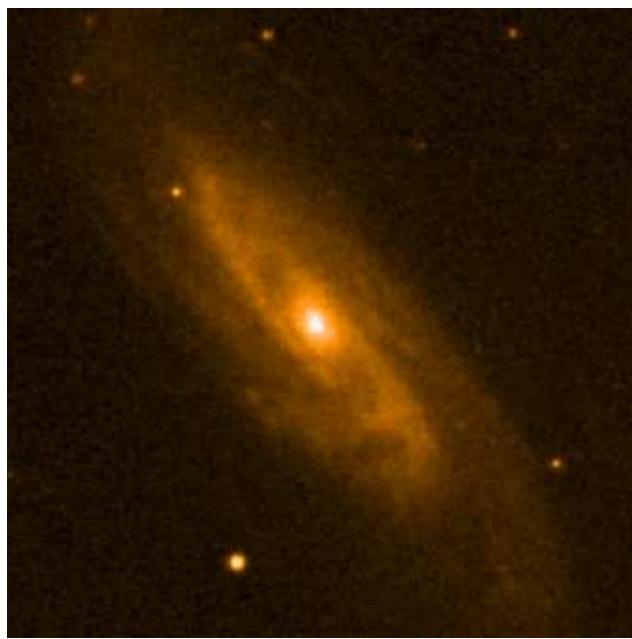
$$\frac{M_*}{L_*} \simeq (1 - 5) \frac{M_\odot}{L_\odot}$$

Échelle galactique

Mise en évidence à l'échelle des galaxies :

1. **Spirales** : mesure des vitesses de rotation d'étoiles et du gaz

Champ de vitesse des
galaxies (viriel+Doppler)



vitesse newtonienne
d'orbites circulaires :

$$\frac{v^2(r)}{r} = \frac{GM(r)}{r^2}$$

Échelle galactique

Mise en évidence à l'échelle des galaxies :

1. **Spirales** : mesure des vitesses de rotation d'étoiles et du gaz
2. **Elliptiques et naines sphéroïdales** : mesure des dispersions de vitesse $\langle v^2 \rangle$

→ **existence de halos sombres étendus (ou modification de la gravité avec l'échelle)**

On a typiquement pour ces objets :

$$\frac{M}{L} \sim 10 - 100$$

Le bilan “universel” (?)

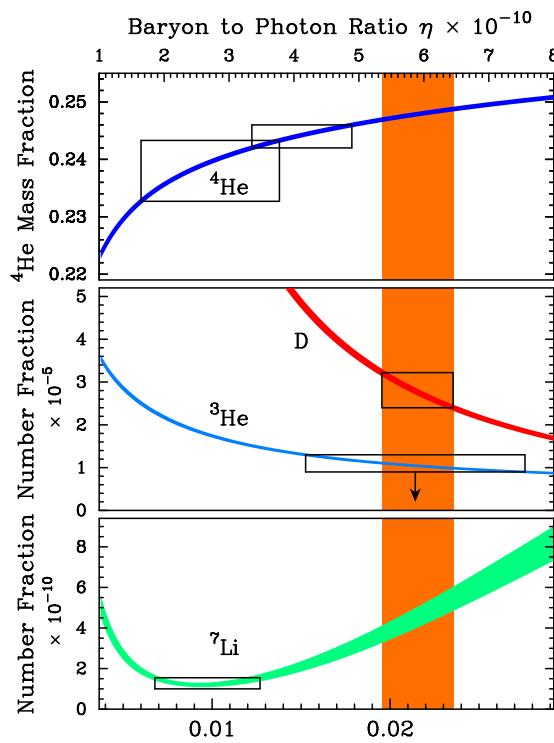
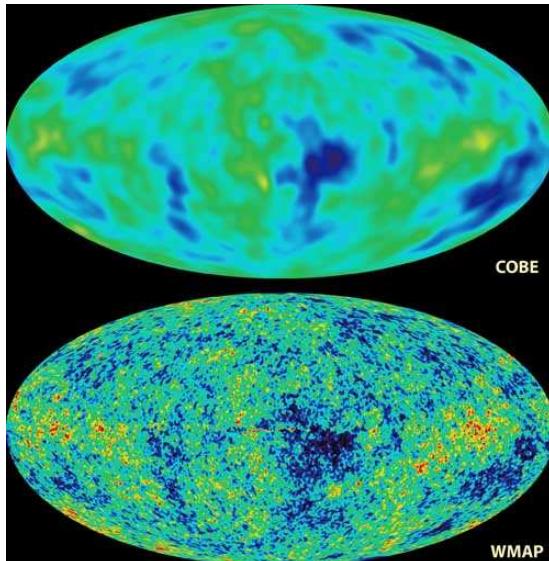
Mise en évidence à l'échelle cosmologique :

1. Fond diffus micro-onde : mesure de

$$\Omega_{\text{tot}} = \rho_{\text{tot}} / \rho_{\text{critique}} = \Omega_{\text{matière}} + \Omega_{\Lambda}$$

2. Supernovæ de type IA : mesure de $\Omega_{\text{matière}} - \Omega_{\Lambda}$

3. Nucléosynthèse primordiale : estimation de Ω_{baryons}



Bilan cosmologique :

$$\Omega_{\text{tot}} \approx 1$$

$$\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$$

$$\Omega_{\text{matière}} \approx 0.3$$

$$\Omega_{\text{baryons}} \approx 0.04$$

Les candidats

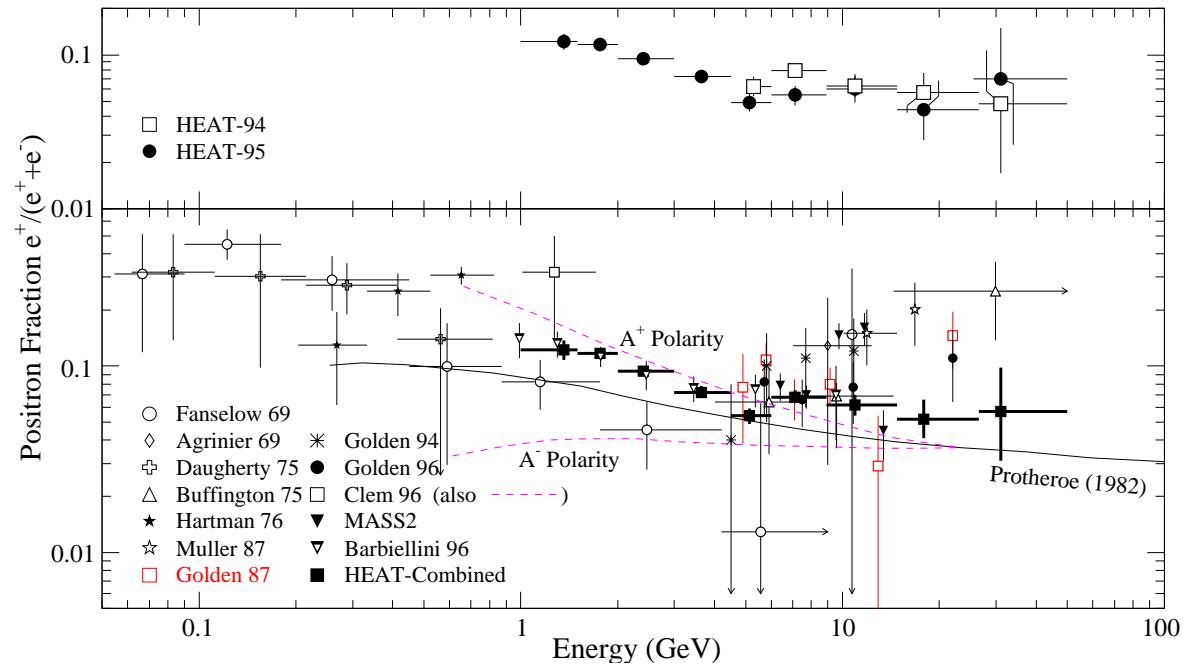
Candidats non-standard de matière noire massive interagissant faiblement :

- ⌚ neutrino stérile (fermion, oscillation des neutrinos)
- ⌚ axion (scalaire, violation de CP forte)
- ⌚ axino (fermion, supersymétrie)
- ⌚ excitation de Kaluza-Klein (dimensions supplémentaires)
- ⌚ **neutralino (fermion, supersymétrie)**
- ⌚ etc ...

Des avatars de la Matière Noire ?

Résultats expérimentaux pouvant induire la matière noire :

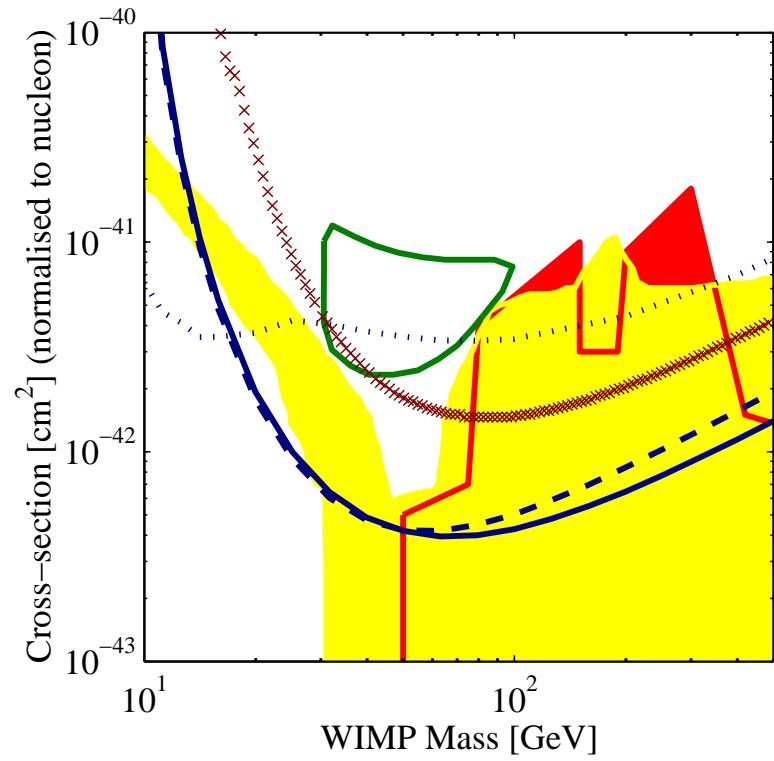
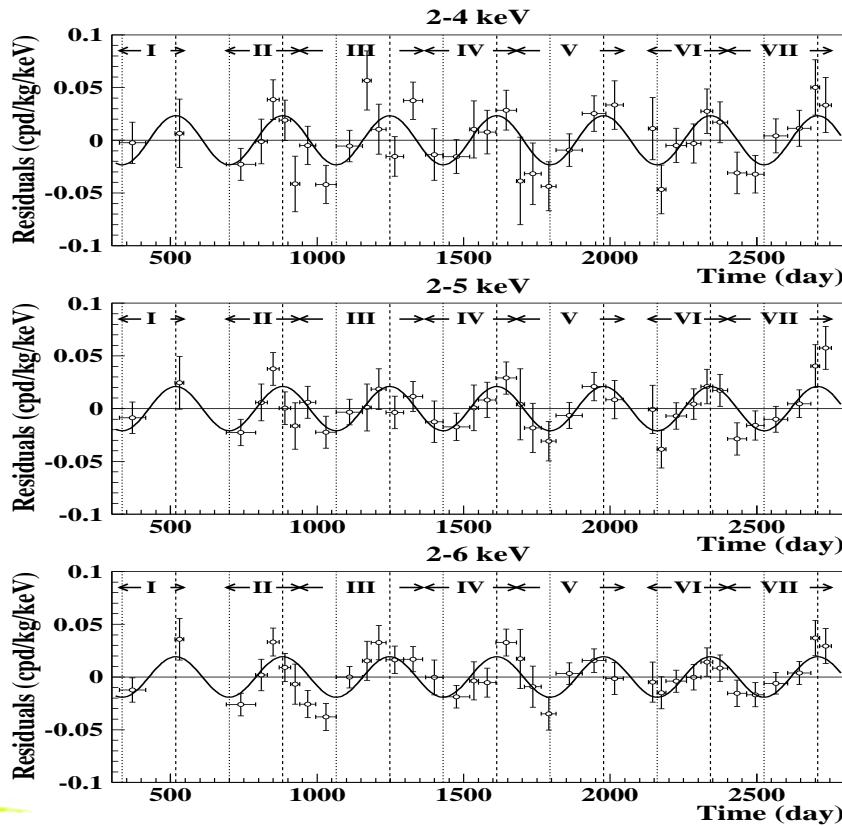
⑥ HEAT : excès de positrons (1997)



Des avatars de la Matière Noire ?

Résultats expérimentaux pouvant induire la matière noire :

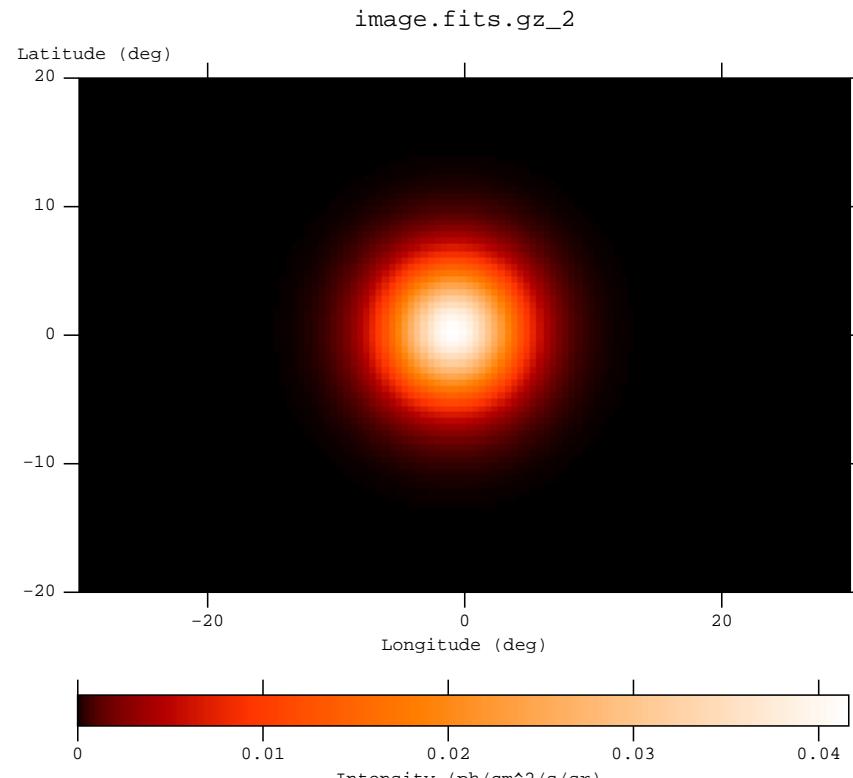
- ⑥ HEAT : excès de positrons (1997)
- ⑥ **DAMA : modulation annuelle de dépôt d'énergie (2000) ; non confirmé**



Des avatars de la Matière Noire ?

Résultats expérimentaux pouvant induire la matière noire :

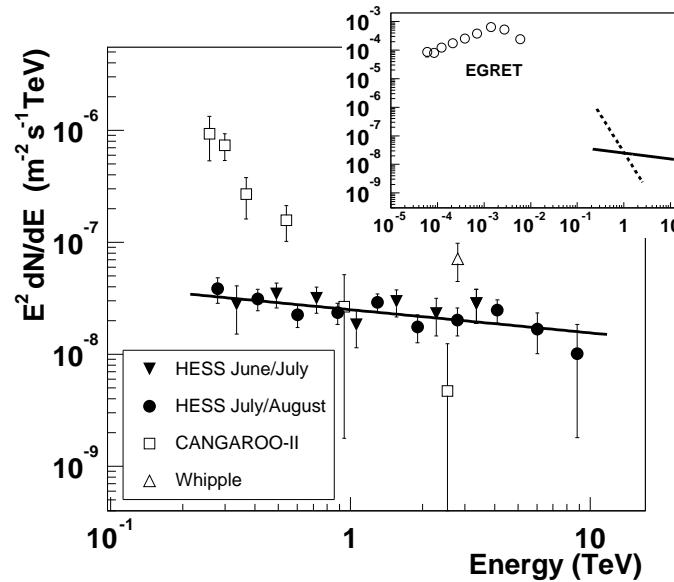
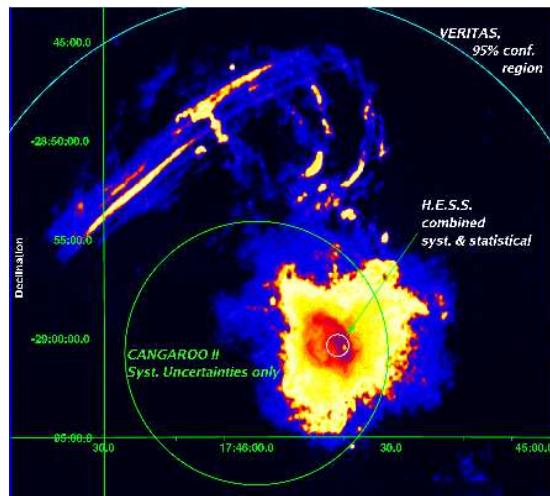
- ⌚ HEAT : excès de positrons (1997)
- ⌚ DAMA : modulation annuelle de dépôt d'énergie (2000) ; non confirmé
- ⌚ **INTEGRAL : détection d'un signal diffus à 511 keV du centre galactique (2003)**



Des avatars de la Matière Noire ?

Résultats expérimentaux pouvant induire la matière noire :

- ⌚ HEAT : excès de positrons (1997)
- ⌚ DAMA : modulation annuelle de dépôt d'énergie (2000) ; non confirmé
- ⌚ INTEGRAL : détection d'un signal diffus à 511 keV du centre galactique (2003)
- ⌚ **CANGAROO, (VERITAS), HESS : détection d'un signal gamma du centre galactique (2003-2004)**



Matière Noire Supersymétrique

Le Neutralino-Matière Noire

Extension SUSY minimale

Le MSSM en Supergravité minimale (mSUGRA) :

- ➊ Un doublet de Higgs
- ➋ Brisure de la supersymétrie dans un secteur caché propagée par la gravité
- ➌ Hypothèses d'unification à l'échelle de GU :
 m_0 , $m_{1/2}$ et A_0
- ➍ Fixation du rapport des valeurs moyennes des champs de Higgs à l'échelle électrofaible : $\tan \beta$
- ➎ Choix du **signe** du paramètre de mélange des champs de Higgs μ ($|\mu|$ étant fixé par la brisure de la symétrie électrofaible)

→ **Le neutralino = Combinaison linéaire des champs de jaugeinos (\tilde{B}, \tilde{W}) et higgsinos (\tilde{H}_1, \tilde{H}_2) neutres.**

Le neutralino

Le neutralino dans mSUGRA :

- fermion de Majorana, massif, interagissant faiblement
- essentiellement de type bino

Le neutralino

Le neutralino dans mSUGRA :

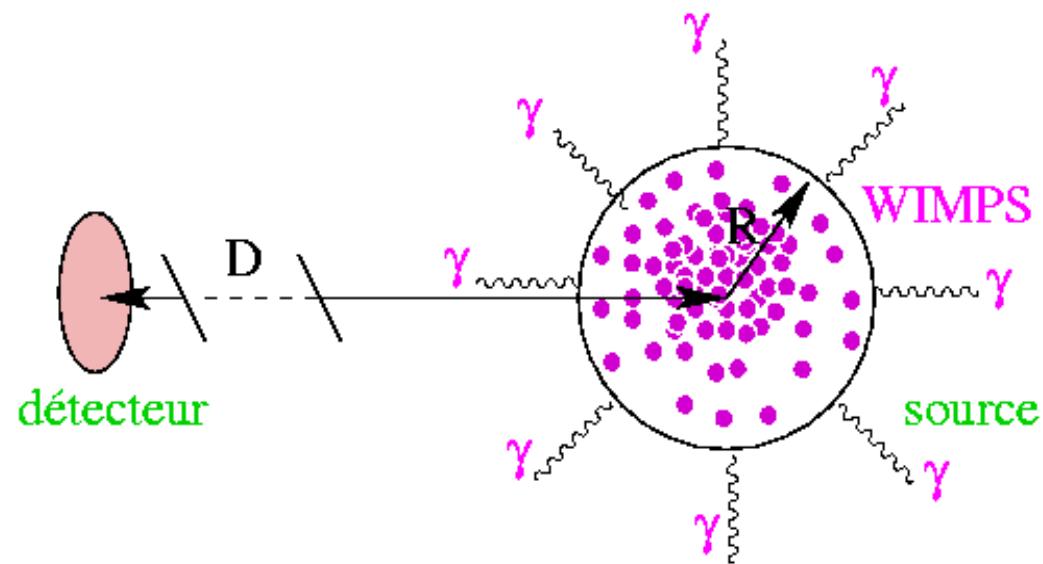
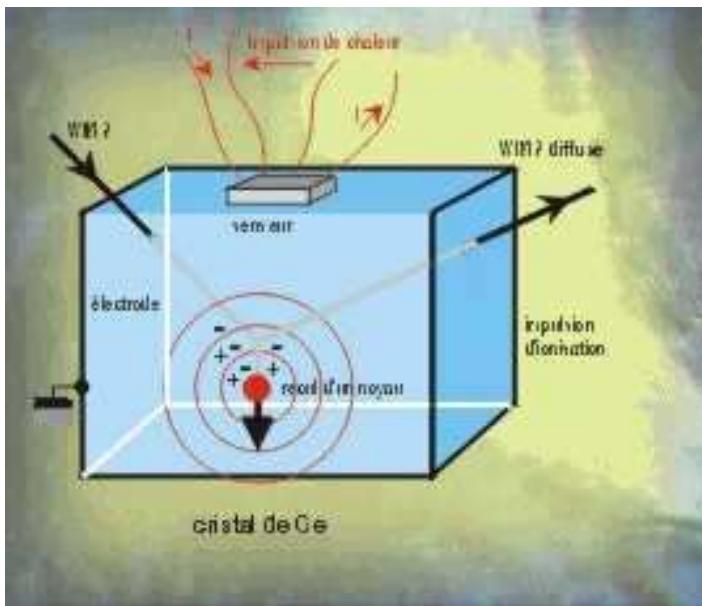
- fermion de Majorana, massif, interagissant faiblement
- essentiellement bino

Histoire thermique : La caractérisation d'un modèle permet de calculer son taux d'interaction

- ⌚ Découplage du plasma primordial $H > \Gamma_{\text{interaction}}$
 - ⌚ Abondance fossile : $\Omega_\chi h^2 \propto \mathcal{O}(1)$
- **Candidat naturel à la matière noire**

Types de détection

En attendant le LHC, modes de détection directe ou indirecte:



Détection Indirecte

Détection indirecte en γ :

→ Annihilation dans les halos de galaxies :

△ **Raies** : $\chi\chi \rightarrow 2\gamma, \gamma Z^0$ (2^{ième} ordre)

△ **Continuum** :

$$\chi\chi \rightarrow q\bar{q}, W^+W^-, Z^0Z^0 \rightarrow \pi^0 + X \rightarrow 2\gamma + X$$

Flux attendu dans un intervalle dE et pour une intégration dans Ω srad :

$$\frac{d\Phi_\gamma(E)}{dE} = \frac{\sum_i \frac{dN_{\gamma,i}(E)}{dE} \times <\sigma_{\chi\chi \rightarrow \pi^0 X} \times v>_i}{8\pi m_\chi^2} \int_{\text{visée}} \int_{\Omega} \rho^2(s) \, ds \, d\Omega$$

Détection Indirecte

Détection indirecte en γ :

→ Annihilation dans les halos de galaxies :

△ **Raies** : $\chi\chi \rightarrow 2\gamma, \gamma Z^0$ (2^{ième} ordre)

△ **Continuum** :

$$\chi\chi \rightarrow q\bar{q}, W^+W^-, Z^0Z^0 \rightarrow \pi^0 + X \rightarrow 2\gamma + X$$

Flux attendu dans un intervalle dE et pour une intégration dans Ω srad :

$$\frac{d\Phi_\gamma(E)}{dE} = \frac{\sum_i \frac{dN_{\gamma,i}(E)}{dE} \times <\sigma_{\chi\chi \rightarrow \pi^0 X} \times v>_i}{8\pi m_\chi^2} \int_{\text{visée}} \int_{\Omega} \rho^2(s) ds d\Omega$$

Partie SUSY :

→ spectre,
sections efficaces

Partie astrophysique :

→ profil de densité
(NFW $\propto r^{-1}$ Moore $\propto r^{-1.5}$)

Observation de M31

Prédictions pour M31

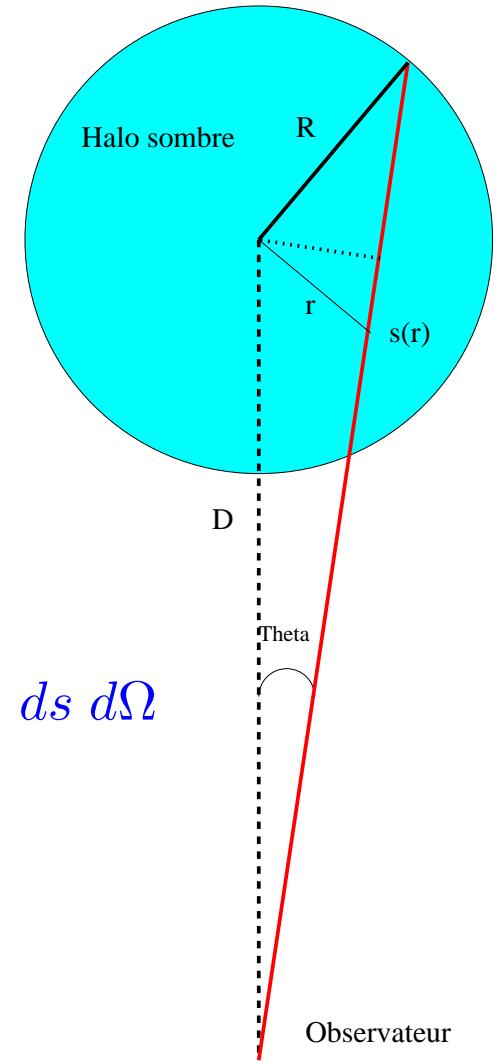
Caractéristiques de M31

M31 avec CELESTE :

- ⑥ Source observable dans l'hémisphère nord
Thémis : M31 en octobre-décembre
- ⑥ Source proche contenant une grande quantité de matière noire :
 - △ **M31** : $d \simeq 800 \text{ kpc}$; $M(r = 125 \text{ kpc}) \simeq 7 \times 10^{11} \text{ M}_\odot$;
 $M/L \sim 7$
- ⑥ Dynamique stellaire déjà étudiée : Braun (1991) → le profil de densité pour la matière noire peut être contraint

Contribution astrophysique pour M31

Facteur astrophysique pour M31 :

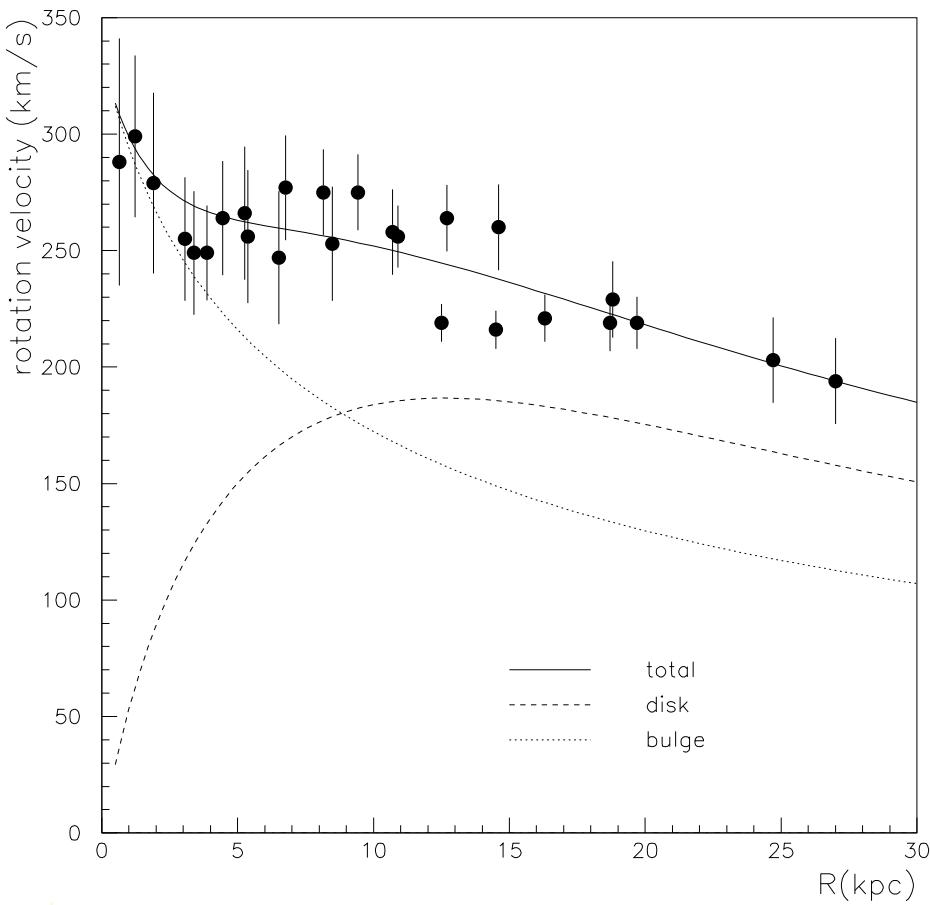


Profil sphérique :

$$\Sigma(\theta) \equiv \int_{\text{visée}} \int_{\Omega} \rho^2(s) ds d\Omega$$

Braun (1991): M31 sans matière noire

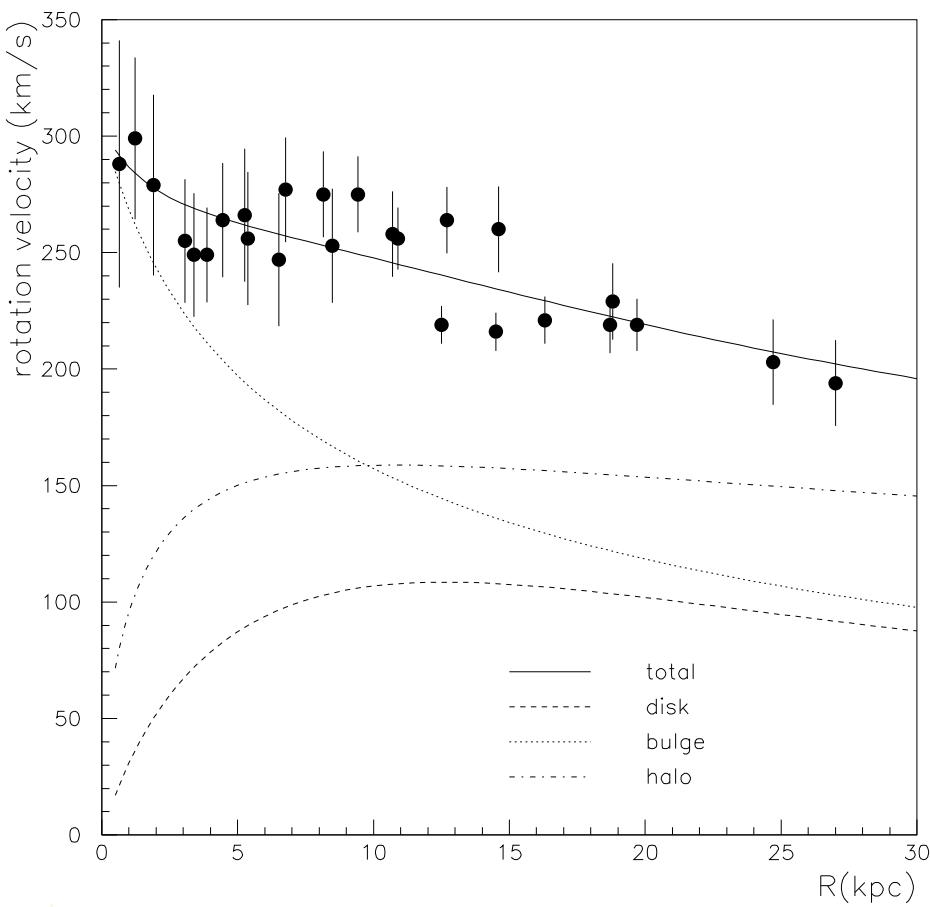
Facteur astrophysique pour M31 :



Braun ajuste les vitesses sans matière noire mais utilise des rapports M/L trop importants → avec $(M/L)_{\text{disque}}$ et $(M/L)_{\text{bulbe}}$ plus raisonnables, on ajoute un halo de matière noire.

Ajout d'un halo sombre NFW

Facteur astrophysique pour M31 :



Le meilleur ajustement est obtenu pour un profil NFW :

$$\Sigma = 3 \times 10^{19} \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$$

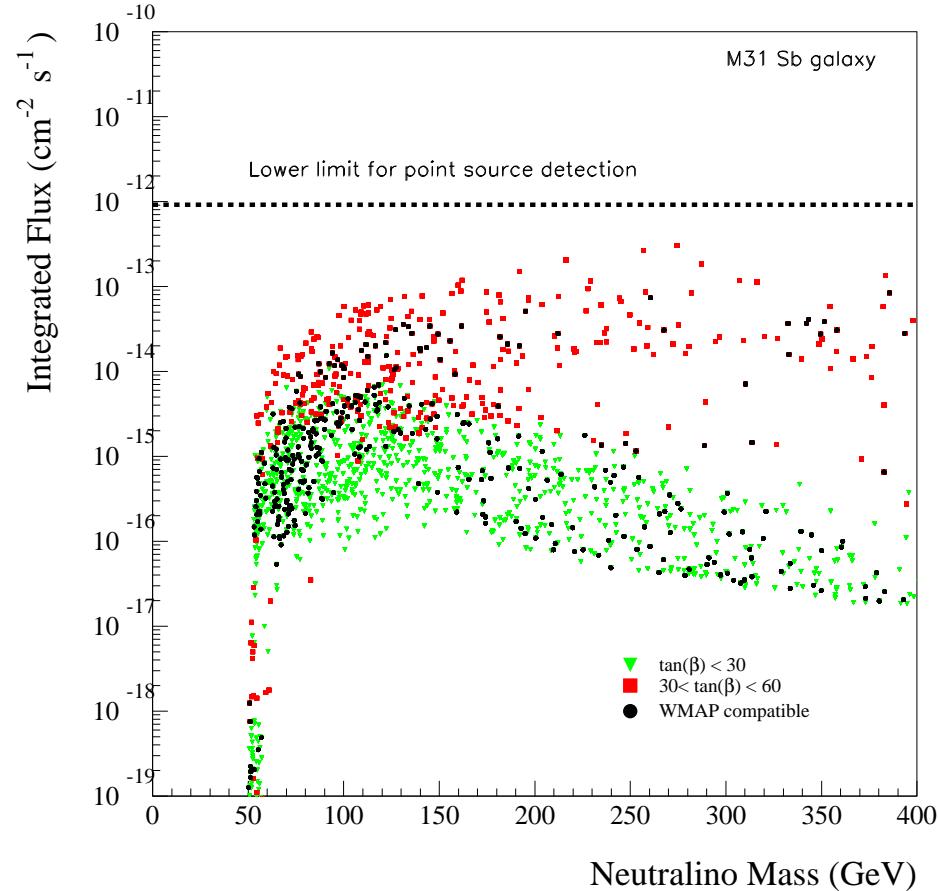
(Falvard *et al.*, 2003)

Contribution supersymétrique : Outils numériques de simulations :

- ⑥ **Suspect (Djouadi, Kneur, Moultaka)**
5 paramètres mSUGRA à
 $M_{\text{GUT}} \rightarrow \text{RGE} \rightarrow$ échelle EF
spectre, masses, couplages
 - ⑥ **DarkSusy (Edsjö et al.)**
sections efficaces, densité relique, hadronisation,
contraintes expérimentales
- ⇒ interface des deux programmes

Prédictions de flux γ

Flux intégrés au-delà de 50 GeV pour M31 :



$$\Phi_{\text{SUSY}}^{\text{Max}} \sim 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

(Prédictions compatibles avec les limites d'EGRET (Blom et al, 1999) et d'HEGRA (Aharonian et al, 2002))

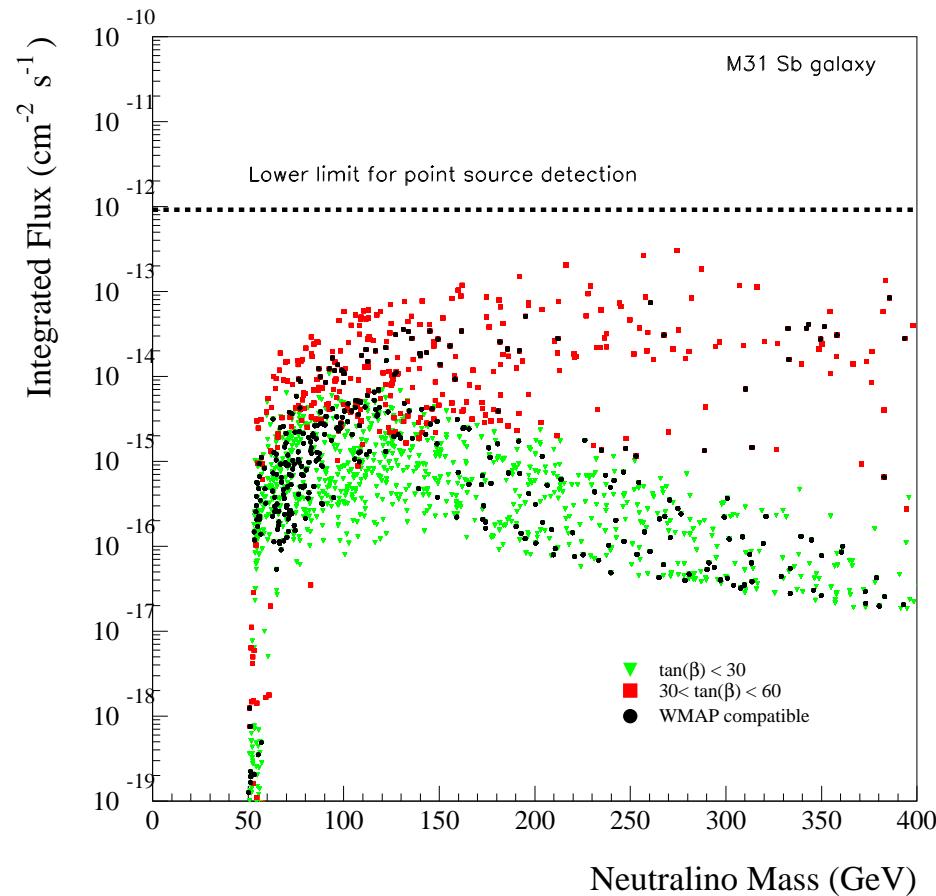
Or, CELESTE est sensible à des flux $\sim 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

→ **2-3 ordres de grandeur à combler**

Prédictions de flux γ

Flux intégrés au-delà de 50 GeV pour M31 :

$$\Phi_{\text{SUSY}}^{\text{Max}} \sim 10^{-13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$



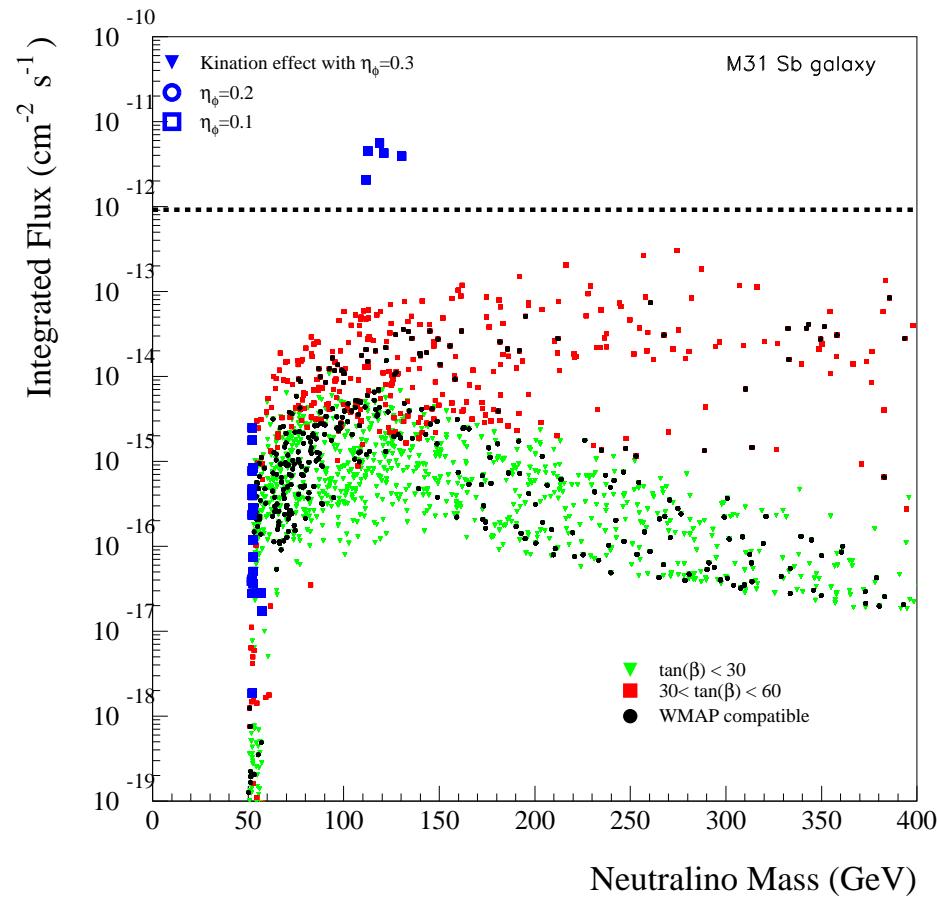
Or, CELESTE est sensible à des flux
 $\sim 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
→ **2-3 ordres de grandeur à combler**

Facteurs d'augmentation ?

- ➊ **astrophysiques**
(trou noir, grumeaux)
- ➋ **cosmologiques**
(quintessence, production non-thermique après découplage)

Facteur cosmologique

Flux intégrés au-delà de 50 GeV pour M31 :



Exemple :

Augmentation du taux d'expansion de l'univers primordial sous l'effet d'un **champ de quintessence** :

- découplage plus rapide et plus tôt
- autorise des **sections efficaces plus grandes** (Salati, 2002)
- contrainte par la nucléosynthèse primordiale

Conclusions préliminaires

Conclusions de cette partie :

- ⌚ Les flux prédits par la supersymétrie sont faibles
- ⌚ CELESTE n'a pas a priori une sensibilité suffisante pour atteindre l'espace des paramètres SUSY

Questions :

- ⌚ Cela provient-il de la spécificité de la théorie ? (couplages faibles et fortes corrélations avec les masses des quarks produits)
- ⌚ Peut-on atteindre un niveau de flux supérieur en relaxant ces contraintes ?
- ⌚ CELESTE pourrait-elle contraindre davantage des couplages plus généraux ?

Conclusions préliminaires

Conclusions de cette partie :

- ⌚ Les flux prédits par la supersymétrie sont faibles
- ⌚ CELESTE n'a pas a priori une sensibilité suffisante pour atteindre l'espace des paramètres SUSY

Questions :

- ⌚ Cela provient-il de la spécificité de la théorie ? (couplages faibles et fortes corrélations avec les masses des quarks produits)
- ⌚ Peut-on atteindre un niveau de flux supérieur en relaxant ces contraintes ?
- ⌚ CELESTE pourrait-elle contraindre davantage des couplages plus généraux ?

Il est possible de répondre à ces questions en construisant et étudiant un modèle plus général et indépendant des théories phénoménologiques

Phénoménologie : modèle effectif

Modèle effectif de Matière Noire fermionique

Ingrédients du modèle

But : modéliser les interactions de particules de Matière Noire avec les champs du MS. Pour ce faire, on définit :

- 1 champ fermionique χ quelconque (Dirac ou Majorana) pour la Matière Noire.
- 1 champ scalaire neutre ϕ_0 (échange en voie s).
- N champs scalaires $\phi_{f,i}$ chargés ou neutres (échanges en voie t) ($N \geq$ nombre de charges électriques différentes dans le MS).
- Les couplages associés à chaque processus non standard.

Lagrangien effectif

Un lagrangien général peut s'écrire :

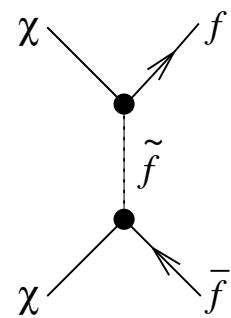
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{eff}} = & \mathcal{L}_{\text{cinétique}} + \bar{\chi}(C_1)\chi\phi_0 + \bar{\chi}\gamma^\mu(C_2)\chi Z_\mu \\ & + \sum_{\text{fermions}} \left[\bar{f}(C_f)f\phi_0 + \bar{f}\gamma^\mu(\tilde{C}_f)fZ_\mu \right] \\ & + \sum_{i \in Q} \bar{\chi}(\tilde{C}_i)f_i\phi_{fi} \\ & (+ [ZWW] + [\phi_0WW] + [\phi_0ZZ] + [\phi_\alpha\chi Z] + [\phi_\beta\chi W]) \\ & + (\text{complexe conjugué})\end{aligned}$$

On ne considère que $\chi\bar{\chi} \rightarrow f\bar{f}$ dans un premier temps.

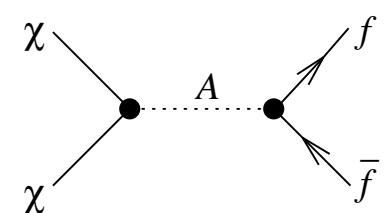
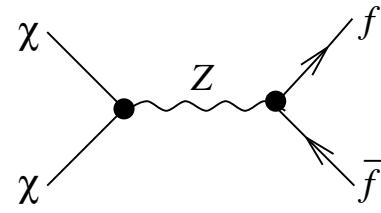
Liens avec le MSSM

La correspondance avec le MSSM est limpide si l'on considère un fermion de Majorana :

⌚ $\phi_{f,i} \leftrightarrow \tilde{f}_i$



⌚ $\phi_0 \leftrightarrow A$



Couplages et paramètres libres

Chaque couplage à un scalaire est défini selon :

$$C = \frac{C_{\text{droit}}}{2}(1 + \gamma_5) + \frac{C_{\text{gauche}}}{2}(1 - \gamma_5)$$

Nota : aucune dépendance des couplages aux scalaires en la masse des fermions a priori.

Les paramètres libres du modèle sont :

- ➄ les masses m_χ , M_{ϕ_0} et M_{ϕ_f} ;
- ➄ les couplages gauches et droits associés à chaque processus.

Quantités physiques à déterminer

Le modèle étant défini par les masses et couplages,
on doit calculer :

- ⑥ la section efficace d'annihilation ($\chi\bar{\chi} \rightarrow f\bar{f}$)
- ⑥ la densité relique $\Omega_\chi h^2$
- ⑥ les flux de γ issus de l'hadronisation

Densité relique

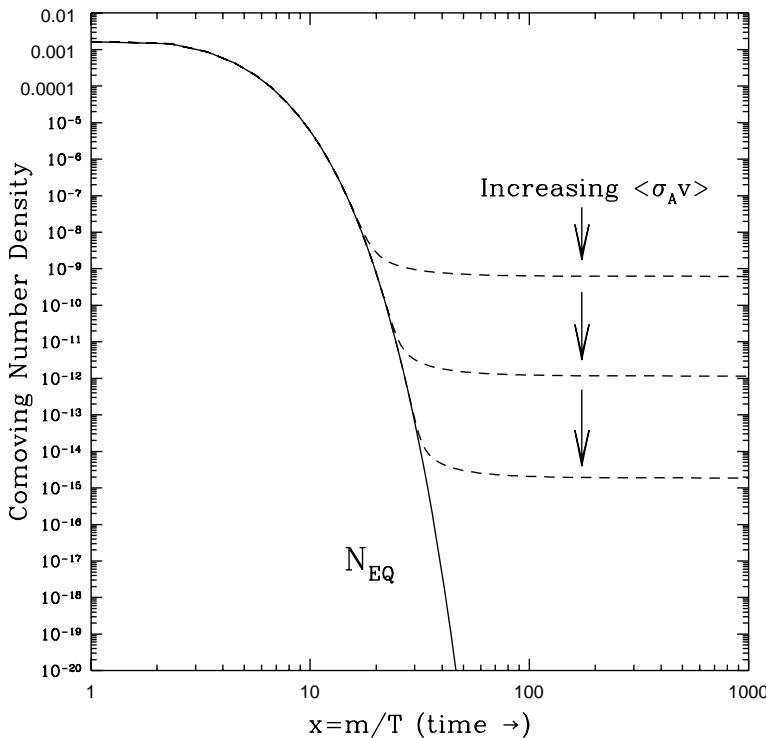
L'évolution des populations est régie par l'équation de Boltzmann (sans co-annihilation) :

$$\frac{dn(t)}{dt} = -3Hn(t) - \langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle (n^2(t) - n_{\text{eq}}^2(t))$$

Densité relique

L'évolution des populations est régie par l'équation de Boltzmann (sans co-annihilation) :

$$\frac{dn(t)}{dt} = -3Hn(t) - \langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle (n^2(t) - n_{\text{eq}}^2(t))$$



Découplage thermique du plasma primordial quand $H \geq \Gamma_{\text{annihilation}}$: $n(t)$ ne subit plus que la dilution.
(figure extraite de Jungman et al., 1996)

Densité relique

L'évolution des populations est régie par l'équation de Boltzmann :

$$\frac{dn(t)}{dt} = -3Hn(t) - \langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle (n^2(t) - n_{\text{éq}}^2(t))$$

Découplage thermique quand $H \geq \Gamma_{\text{annihilation}}$.

Matière noire froide \rightarrow section efficace **faible** et espèce **non-relativiste** au découplage (typiquement $T_{\text{déc}}/m_\chi \sim 0.05$) :

- ⑥ distribution de Maxwell-Boltzmann pour $n_{\text{éq}}$;
- ⑥ développement de Taylor de $\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle$ selon la variable d'échelle $x = T/m_\chi \rightarrow 0$.

Densité relique

L'évolution des populations est régie par l'équation de Boltzmann :

$$\frac{dn(t)}{dt} = -3Hn(t) - \langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle (n^2(t) - n_{\text{éq}}^2(t))$$

Découplage thermique quand $H \geq \Gamma_{\text{annihilation}}$.

Matière noire froide \rightarrow section efficace **faible** et espèce **non-relativiste** au découplage (typiquement $T_{\text{déc}}/m_\chi \sim 0.05$) :

- ➊ distribution de Maxwell-Boltzmann pour $n_{\text{éq}}$;
- ➋ développement de Taylor de $\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle$ selon la variable d'échelle $x = T/m_\chi \rightarrow 0$.

Notre modèle \rightarrow développement à l'ordre 3 (cf. Srednicki et al., 1987) selon:

$$\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle = a + bx + cx^2 + dx^3 + \mathcal{O}(x^4)$$

Densité relique : résumé

Procédure d'estimation de la densité relique :

- ➄ calcul analytique des termes du développement de $\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle$;
- ➄ résolution numérique de l'équation de Boltzmann ;
- ➄ estimation de la température du découplage.

Densité relique : résumé

Procédure d'estimation de la densité relique :

- ⌚ calcul analytique des termes du développement de $\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle$;
- ⌚ résolution numérique de l'équation de Boltzmann ;
- ⌚ estimation de la température du découplage.

Au final, on attend le comportement suivant (Kolb & Turner, 1994) :

$$\Omega_\chi h^2 \propto \left[\frac{1}{\langle \sigma_A v_{\text{rel}} \rangle} \right]_{T=T_{\text{déc}}}$$

Hadronisation

Le flux en γ provient de l'**hadronisation**, et pour $\chi\bar{\chi} \rightarrow f\bar{f}$:

$$\Phi_\gamma \propto \sum_{i \in \text{quarks}} N_{\gamma i} \langle \sigma_i v_{\text{rel}} \rangle$$

Nota : seule l'onde S contribue au flux.

Hadronisation

Le flux en γ provient de l'**hadronisation**, et pour $\chi\bar{\chi} \rightarrow f\bar{f}$:

$$\Phi_\gamma \propto \sum_{i \in \text{quarks}} N_{\gamma i} \langle \sigma_i v_{\text{rel}} \rangle$$

Nota : seule l'onde S contribue au flux.

Comment estimer $N_{\gamma i}$?

Hadronisation

→ Fonction paramétrique à partir du spectre de Hill pour les hadrons issus des processus de fragmentations (Tasitsiomi *et al.*, 2002).

Avec une variable d'échelle $x = E/m$, il vient :

$$\frac{dN_{\text{hadrons}}}{dx_{\text{hadrons}}} \sim \frac{1}{3} \frac{dN_{\pi^0}}{dx_{\pi^0}} \rightarrow \frac{dN_\gamma}{dx_\gamma}$$

Spectre effectif

Fonction de Tasitsiomi *et al.* pour le spectre γ issu de
 $\chi^0\chi^0 \rightarrow q\bar{q}$ (spectre T) :

$$\frac{dN_\gamma}{dx_\gamma} = \frac{10}{3} - \frac{5}{12} \frac{(6x_\gamma + 3x_\gamma^2 - 1)}{x_\gamma^{3/2}}$$

où $x_\gamma = E_\gamma/m_{\chi^0}$; soit au-delà d'un seuil x_0 :

$$N_\gamma(x_0) = \frac{5(\sqrt{x_0} - 1)^4}{6\sqrt{x_0}}$$

Spectre effectif

Fonction de Tasitsiomi *et al.* pour le spectre γ issu de
 $\chi^0 \chi^0 \rightarrow q\bar{q}$ (spectre T) :

$$\frac{dN_\gamma}{dx_\gamma} = \frac{10}{3} - \frac{5}{12} \frac{(6x_\gamma + 3x_\gamma^2 - 1)}{x_\gamma^{3/2}}$$

où $x_\gamma = E_\gamma/m_{\chi^0}$; soit au-delà d'un seuil x_0 :

$$N_\gamma(x_0) = \frac{5(\sqrt{x_0} - 1)^4}{6\sqrt{x_0}}$$

Divergence en $x \rightarrow 0$

Défaut : fonction globale pour l'ensemble des quarks, et divergence en $x \rightarrow 0$

Spectre effectif

Fonction de Tasitsiomi *et al.* pour le spectre γ issu de
 $\chi^0 \chi^0 \rightarrow q\bar{q}$ (spectre T) :

$$\frac{dN_\gamma}{dx_\gamma} = \frac{10}{3} - \frac{5}{12} \frac{(6x_\gamma + 3x_\gamma^2 - 1)}{x_\gamma^{3/2}}$$

où $x_\gamma = E_\gamma/m_{\chi^0}$; soit au-delà d'un seuil x_0 :

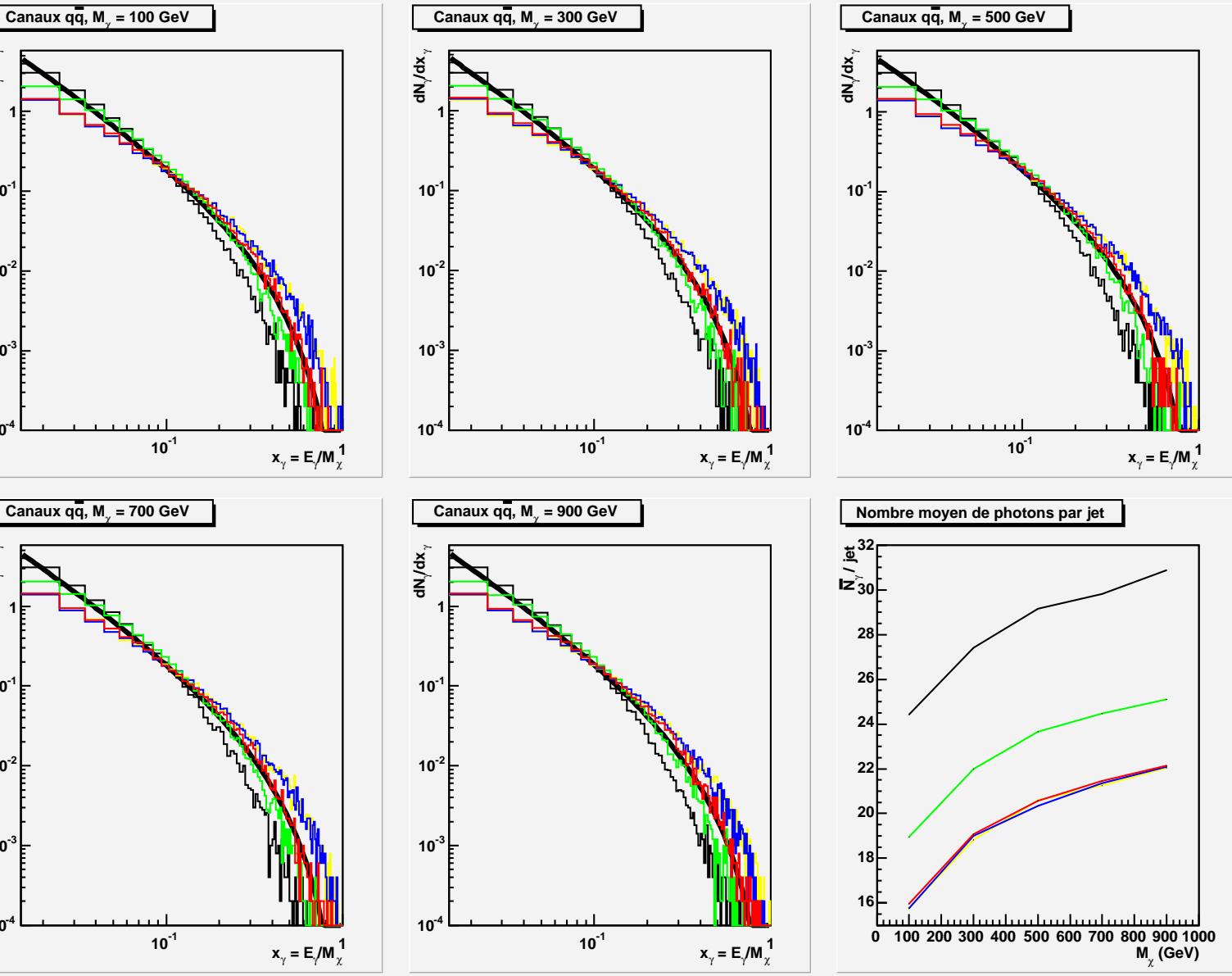
$$N_\gamma(x_0) = \frac{5(\sqrt{x_0} - 1)^4}{6\sqrt{x_0}}$$

Défaut : fonction globale pour l'ensemble des quarks. et divergence en $x \rightarrow 0$

But : avoir une fonction spécifique et simple pour chaque saveur de quarks

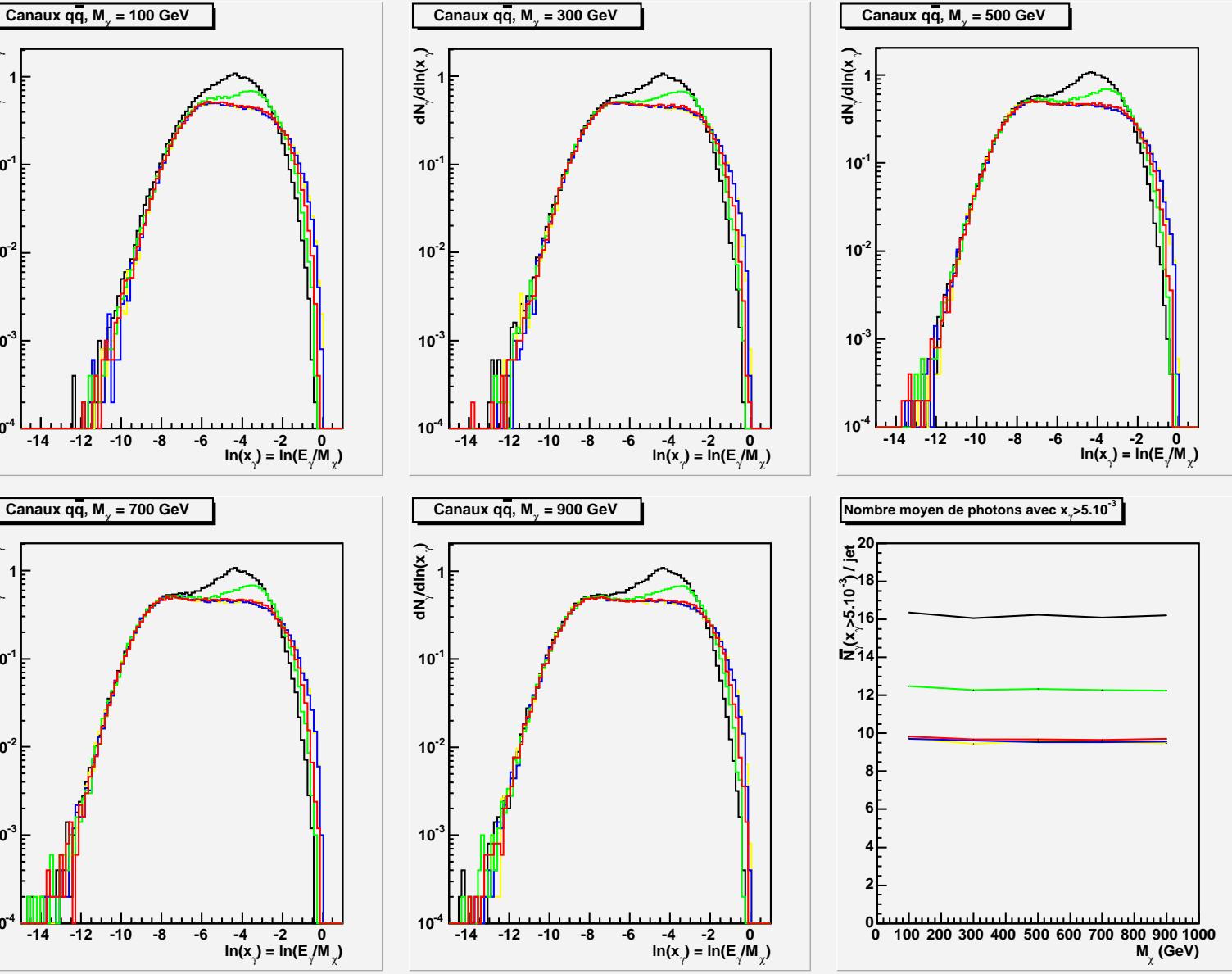
Moyen : confronter le spectre T à des simulations Pythia pour différents $q\bar{q}$ et différentes masses m_χ .

Comparaisons spectre T / Pythia



Distributions de photons dN_γ/dx_γ après fragmentation : $b\bar{b}$, $s\bar{s}$, $d\bar{d}$, $c\bar{c}$, $u\bar{u}$ (simulations Pythia).

Domaine de validité du spectre T



Distributions
de photons
 $dN_\gamma/d\ln(x_\gamma)$
après fragmentation
: $b\bar{b}$, $s\bar{s}$, $d\bar{d}$, $c\bar{c}$,
 $u\bar{u}$ (simulations
Pythia).

Spectre effectif final par saveur

Usage modifié du spectre T pour l'estimation du spectre γ :

- ⑥ Le spectre T diverge en $x_\gamma \rightarrow 0$
→ définition d'un domaine de validité selon $x_\gamma^{\min} = 5 \times 10^{-3}$
(cf. distributions logarithmiques).
- ⑥ Normalisation aux distributions de Pythia pour **chaque saveur de quark** (α_i)

Spectre effectif final par saveur

Usage modifié du spectre T pour l'estimation du spectre γ :

- ⑥ Le spectre T diverge en $x_\gamma \rightarrow 0$
→ définition d'un domaine de validité selon $x_\gamma^{\min} = 5 \times 10^{-3}$
(cf. distributions logarithmiques).
- ⑥ Normalisation aux distributions de Pythia pour **chaque saveur de quark** (α_i)

L'expression finale du flux est la suivante :

$$\Phi_\gamma(E_\gamma^{\text{seuil}}, m_\chi) \propto \sum_{i \in \text{quarks}} \langle \sigma_i v_{\text{rel}} \rangle \times \alpha_i(x_\gamma^{\text{seuil}}) \times \left[\frac{5(\sqrt{x_\gamma^{\text{seuil}}} - 1)^4}{6\sqrt{x_\gamma^{\text{seuil}}}} \right]$$

Du lagrangien aux outils numériques

À partir du lagrangien :

1. **Calcul analytique de la section efficace d'annihilation.**
 2. **Calcul analytique du développement de $\langle \sigma v \rangle$.**
 3. **Construction d'un outil numérique encodant les expressions finales pour :**
 - 6 estimer la densité relique (résolution numérique de l'équation de Boltzmann) ;
 - 6 estimer le flux γ (pour différents seuils en énergie) ;
- **Comparaisons qualitatives possibles avec le MSSM**

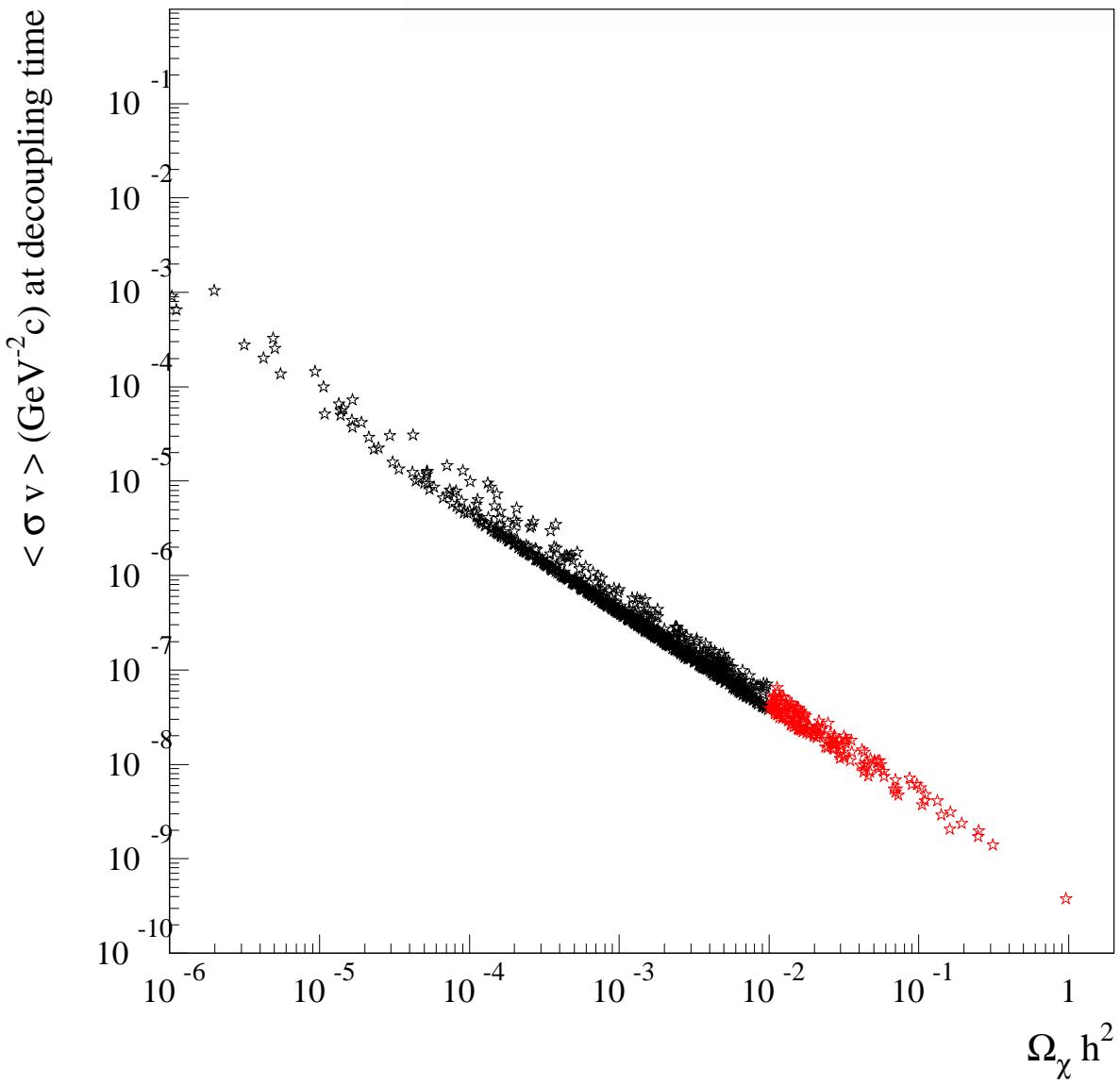
Espace des paramètres effectifs

Possible balayage aléatoire d'un espace des paramètres.

Pour les prochains résultats :

- ➊ χ est une particule de Majorana ;
- ➋ $50 \leq m_\chi \leq 1000$ GeV ;
- ➋ $100 \leq M_{\phi_0} \leq 1000$ GeV (scalaire en voie s) ;
- ➋ $100 \leq M_{\phi_f} \leq 1000$ GeV (scalaires en voie t) ;
- ➋ $|\text{couplages gauches et droits}| \leq 0.9$;

Résultats : densité relique

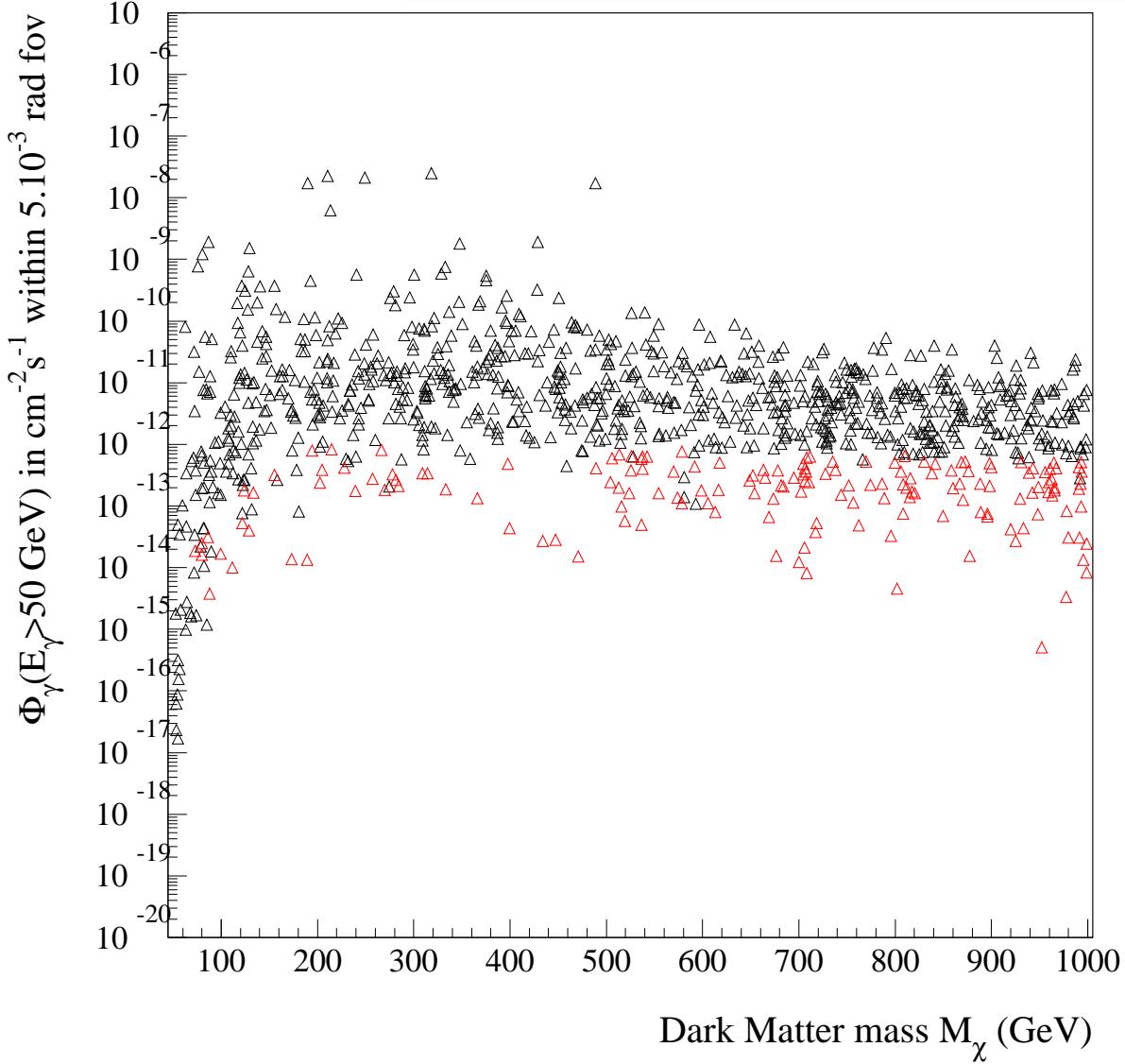


Densité relique $\Omega_\chi h^2$

La loi

$\Omega_\chi h^2 \propto (\langle \sigma v \rangle)^{-1}$
est vérifiée, mais l'espace des paramètres balayé favorise les faibles densités reliques.

Résultats : flux de γ



Flux intégrés au-delà
de 50 GeV pour M31

En fonction de la masse m_χ :
seuls les points rouges sont intérêtants ($\Omega_\chi h^2 \geq 0.01$).

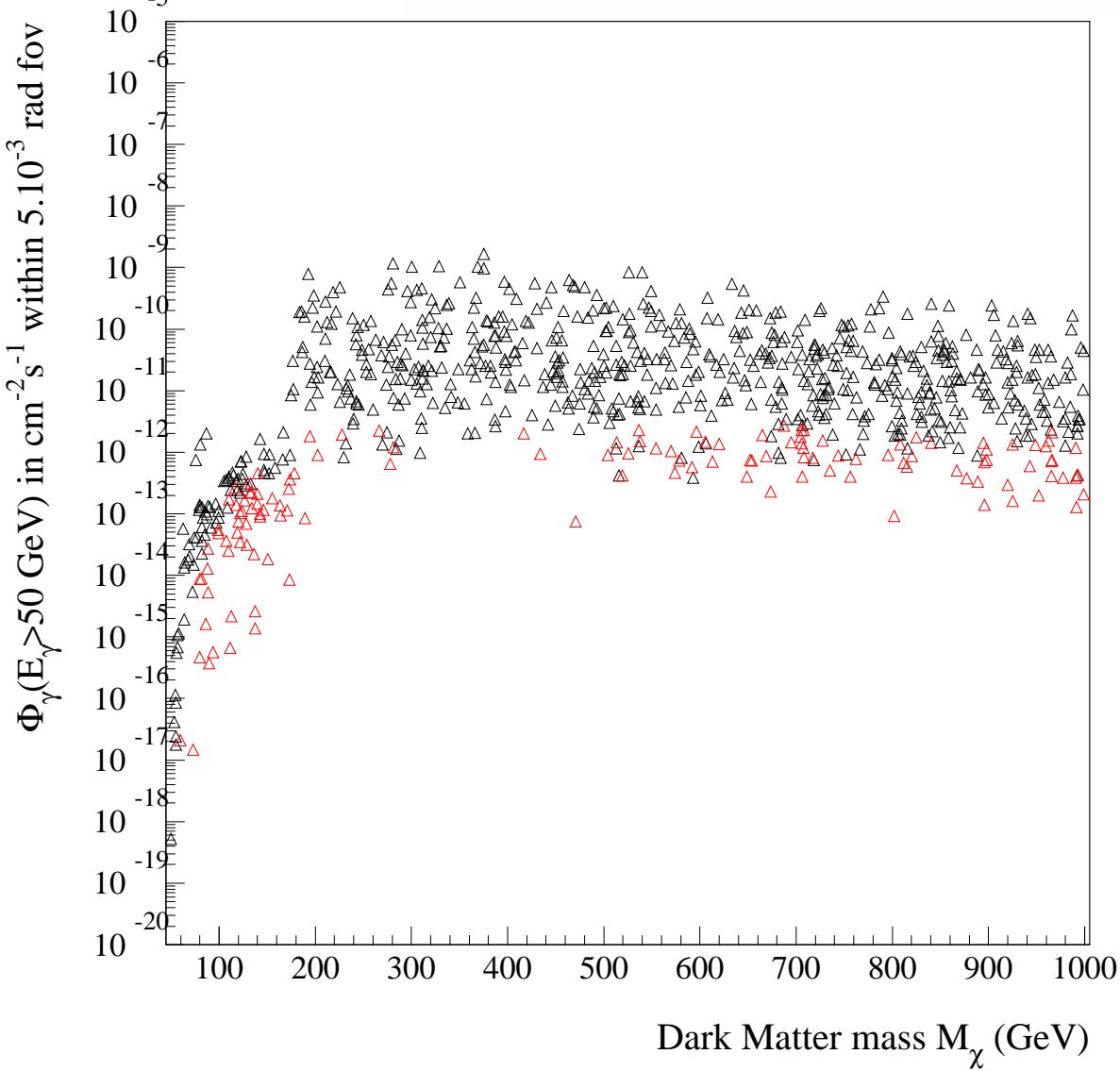
→ flux faibles pour des den-
sités reliques d'intérêt cos-
mologique

Premières remarques

Flux du même ordre de grandeur que le MSSM mais :

- Le MSSM favorise les quarks lourds (et *down*) dans l'état final ($b\bar{b}$), du fait des couplages de Yukawa dépendants des masses (partie higgsino), et de la symétrie chirale (partie jaugino) : quel est l'effet sur nos modèles ?
- Peut-on maximiser le terme d'onde S par rapport aux termes d'ordres supérieurs ?

Résultats : couplages $\propto m_f$ et flux



Flux intégrés au-delà de 50 GeV pour M31

Couplages $\propto m_f/M_{Z^0}$
Fort effet de seuil de production du quarks *top*, contrairement au MSSM pour lequel cet état final est supprimé. La densité relique reste un facteur limitant.

Conclusions préliminaires

Conclusion, dans le cadre notre modélisation :

- ➄ La densité relique est la principale limitation au flux γ issu de l'annihilation d'une matière noire fermionique de Majorana

Limitations du modèle :

- ➄ Bosons dans l'état final non pris en compte (*coming soon* : les sections $\chi\chi \rightarrow WW, ZZ$ sont calculées)
- ➄ Méthode d'estimation de la densité fossile non valide au voisinage de seuils (*top*), ou de pôles

Conclusions préliminaires

Conclusion, dans le cadre de notre modélisation :

- ⑥ La densité relique est la principale limitation au flux γ produit par l'annihilation d'une matière noire fermionique de Majorana

Limitations du modèle :

- ⑥ Bosons dans l'état final non pris en compte (*coming soon* : les sections $\chi\chi \rightarrow WW, ZZ$ sont calculées)
- ⑥ Méthode d'estimation de la densité fossile non valide au voisinage de seuils (*top*), ou de pôles

L'observation de M31 par CELESTE pourra-t-elle apporter de nouvelles contraintes ?

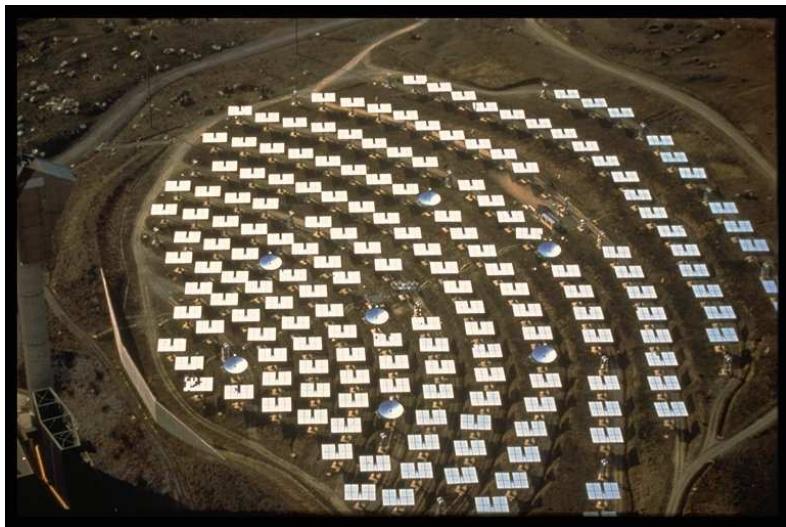
Recherche de Matière Noire dans CELESTE

Détection Indirecte avec CELESTE

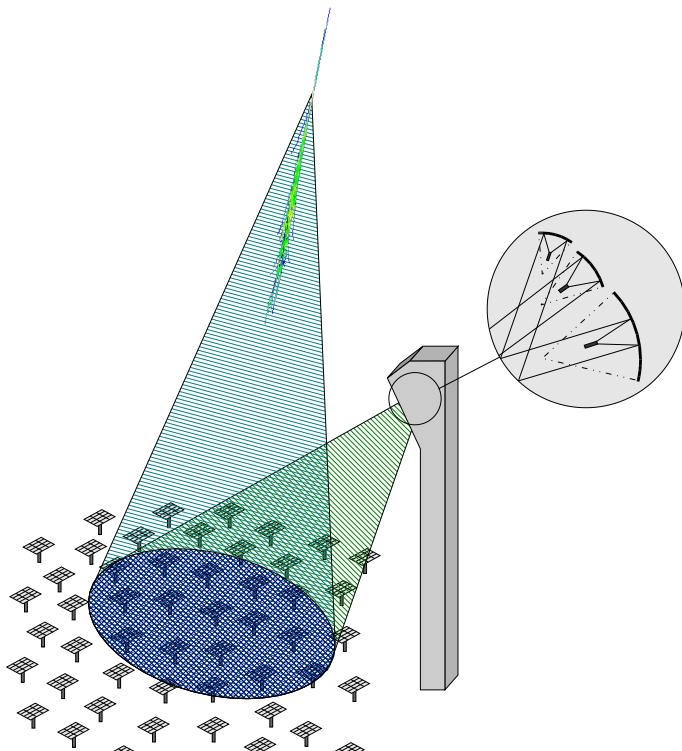
Principes de l'astronomie γ au sol (télescope Čerenkov) :

- ➊ Utiliser l'atmosphère comme calorimètre
- ➋ Récolter la lumière Čerenkov issue des gerbes atmosphériques
- ➌ Discriminer les photons γ des rayons cosmiques en analysant la topologie des gerbes

CELESTE (Thémis, Pyrénées, 1600 m) :



- ➊ Centrale solaire reconvertis en échantillonneur Čerenkov (1996)
- ➋ 53 héliostats (54m^2 chacun) utilisés depuis 2002
- ➌ Électronique rapide : FADC à 1 GHz
- ➍ Champ de vue ~ 5 mrad
- ➎ **Seuil de déclenchement**
 $\sim 50 \text{ GeV}$ (– était – le plus bas parmi les expériences en opération, grand avantage pour la détection indirecte)



Bruits de fond et extraction du signal

Principaux bruits de fond :

- ➊ bruit de fond de ciel (seuil)
- ➋ hadrons (~ 20 Hz, bruit de fond isotrope)

Principe global d'extraction du signal

Sélection des événements γ

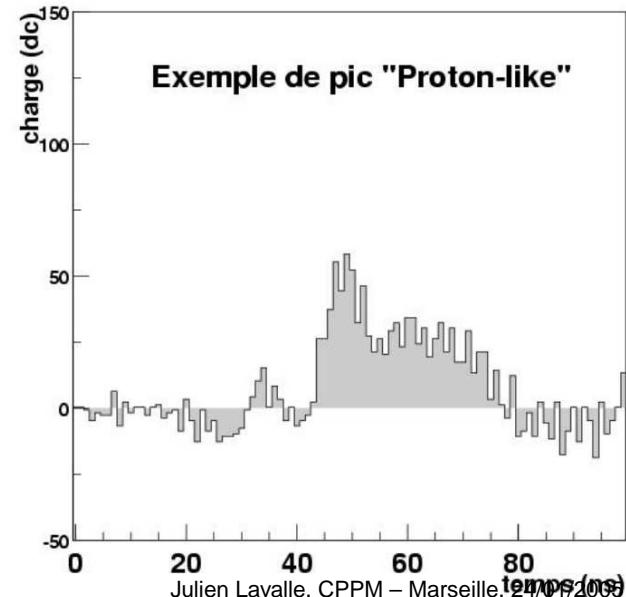
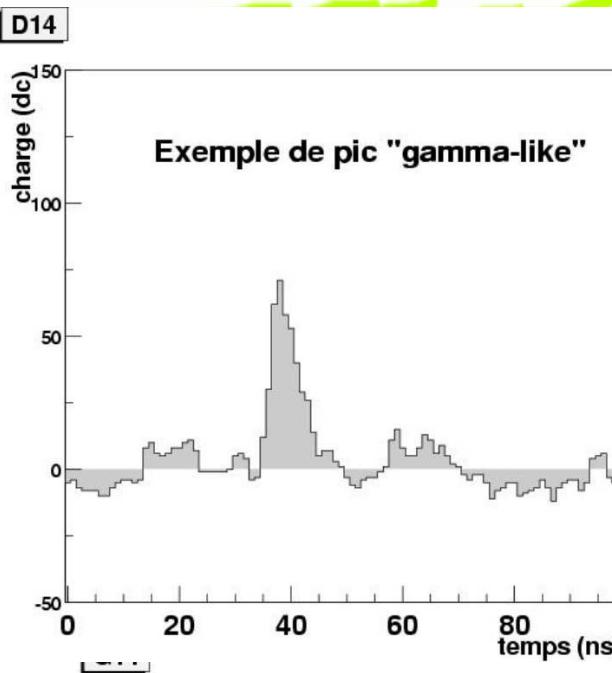
→ par la **forme du signal électronique** :

- ➊ piqué pour des γ (gerbe compacte, front d'onde mince)
- ➋ plus large pour des hadrons (front d'onde plus chaotique)

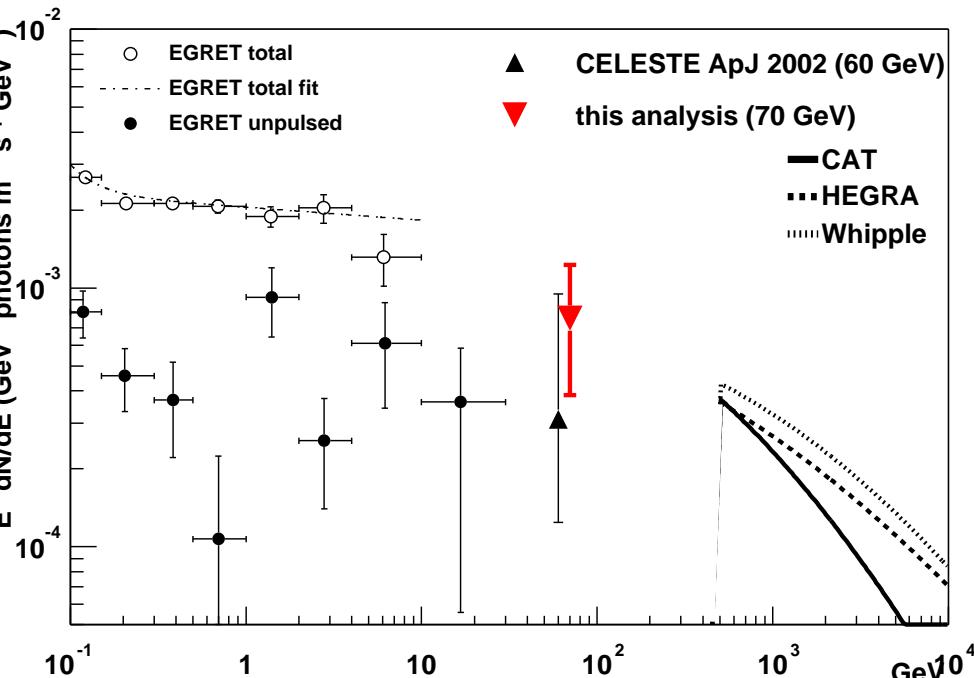
→ par les **temps d'arrivée** :

- ➊ front d'onde sphérique et compact pour les γ

Élimination du bruit de fond hadronique résiduel par soustraction On-Off



Sensibilité du détecteur



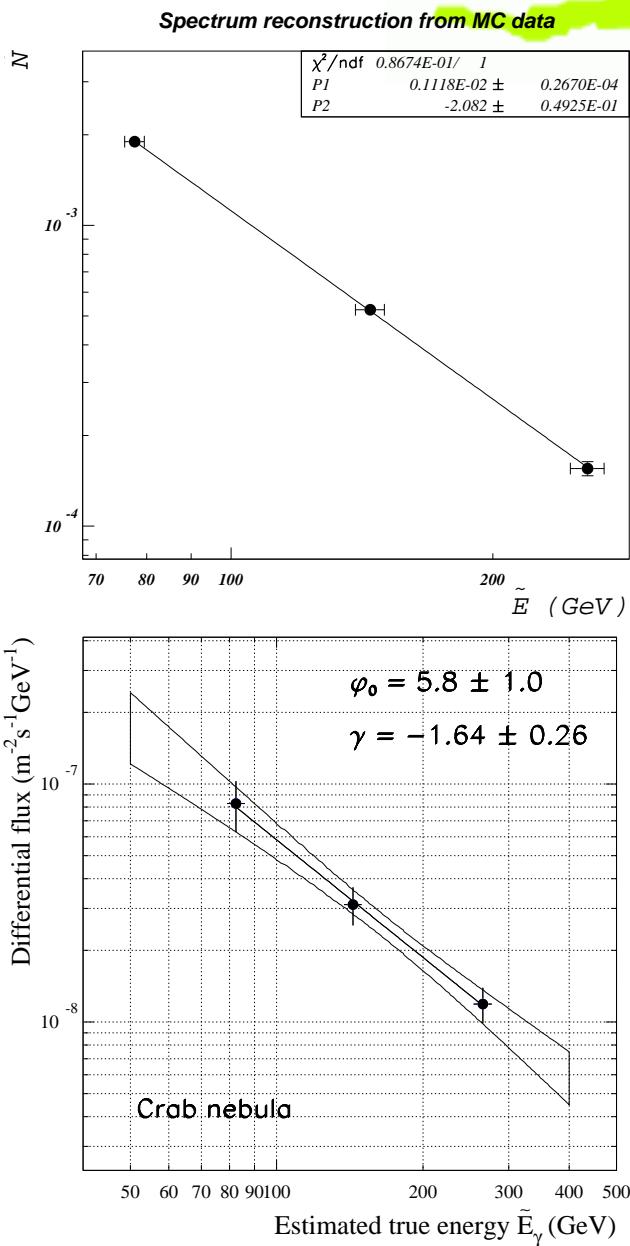
Performances sur la nébuleuse du Crabe
De Naurois *et al.* (2002) :

- ➊ $2.15\sigma/\sqrt{\text{hr}}$ (ApJ 566, 2002)
- ➋ Analyse (40 héliostats) : homogénéité de la tache Čerenkov

Manseri *et al.* (2004) :

- ➊ $5.8\sigma/\sqrt{\text{hr}}$ (thèse Manseri, 2004)
- ➋ Analyse (53 héliostats) : forme du signal après sommation des voies individuelles

Préalable à la recherche de Matière Noire : la Reconstruction Spectrale



Méthode de reconstruction spectrale, sur simulations du Crabe

Jacholkowska, Lavalle, Piron et al. (thèse Lavalle, 2004) :

- Estimation du flux moyen dans des intervalles en énergie grands devant la résolution
- Ajustement itératif d'une loi de puissance (en combinant spectre reconstruit et acceptance)

Reconstruction sur les données Crabe 1999-2000

Piron, Lavalle, Jacholkowska et al. (Kashiwa, 2002) :

- $\phi(E) = \phi_0(E/100\text{GeV})^\gamma$
- indice reconstruit : $\gamma = -1.64 \pm 0.26(\text{stat})$
- flux reconstruit : $\phi_0 = 5.8 \pm 1.0(\text{stat})$

Campagne d'observation de M31

3 saisons d'observation :

- ⦿ 2001 : 40 héliostats
- ⦿ 2002-03 : 53 héliostats

Sélection des données :

- ⦿ stabilité du taux de comptage
- ⦿ stabilité des courants

Bilan :

- ⦿ **10 h sélectionnées (mauvais temps)**

La spécificité de M31

M31 est une source brillante (mag~4) :

- fond de ciel beaucoup plus important
- taux de comptage par groupe de déclenchement plus important
- **perte d'efficacité** affectant le déclenchement global, nouveau temps mort

Difficultés :

- ⑥ Off non affecté ⇒ soustraction On-Off délicate
- ⑥ Inefficacité différente selon le nombre de groupes ayant réellement déclenché
⇒ définition de types d'événements (3, 4, 5 ou 6 groupes)
- ⑥ Risque de nouvelles systématiques

“Remède” :

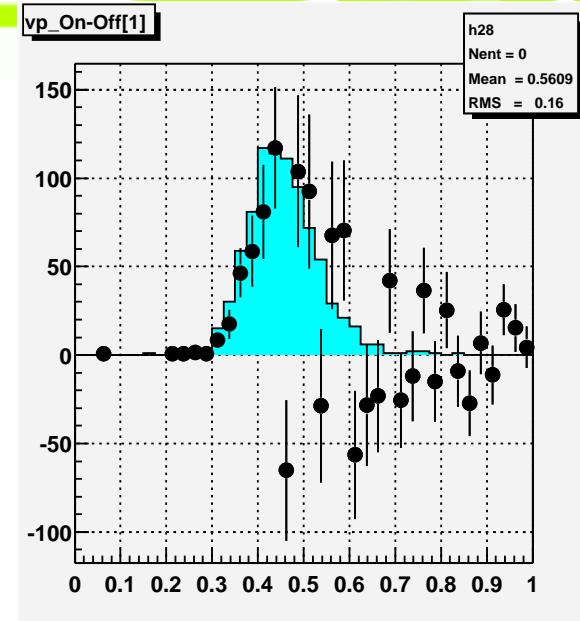
- ⑥ estimation de l'efficacité moyenne par type d'événement
- ⑥ correction d'efficacité type par type avant On-Off

Sélection des événements



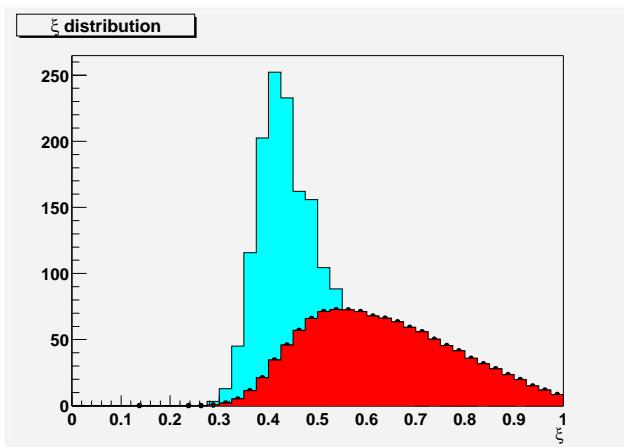
Sélection des événements :

- Application de l'analyse Manseri & Bruel (2004)
(caractéristiques du signal sommé, après mise en temps des voies individuelles sur la ligne de visée à 11 km)
→ variable ξ



Étude des coupures sur simulations de M31 au transit :

- Coupure identique au Crabe :
 $\xi < 0.45$
- + sélection en majorité 4/5 ou 5/6
(2001 ou post-2001) :



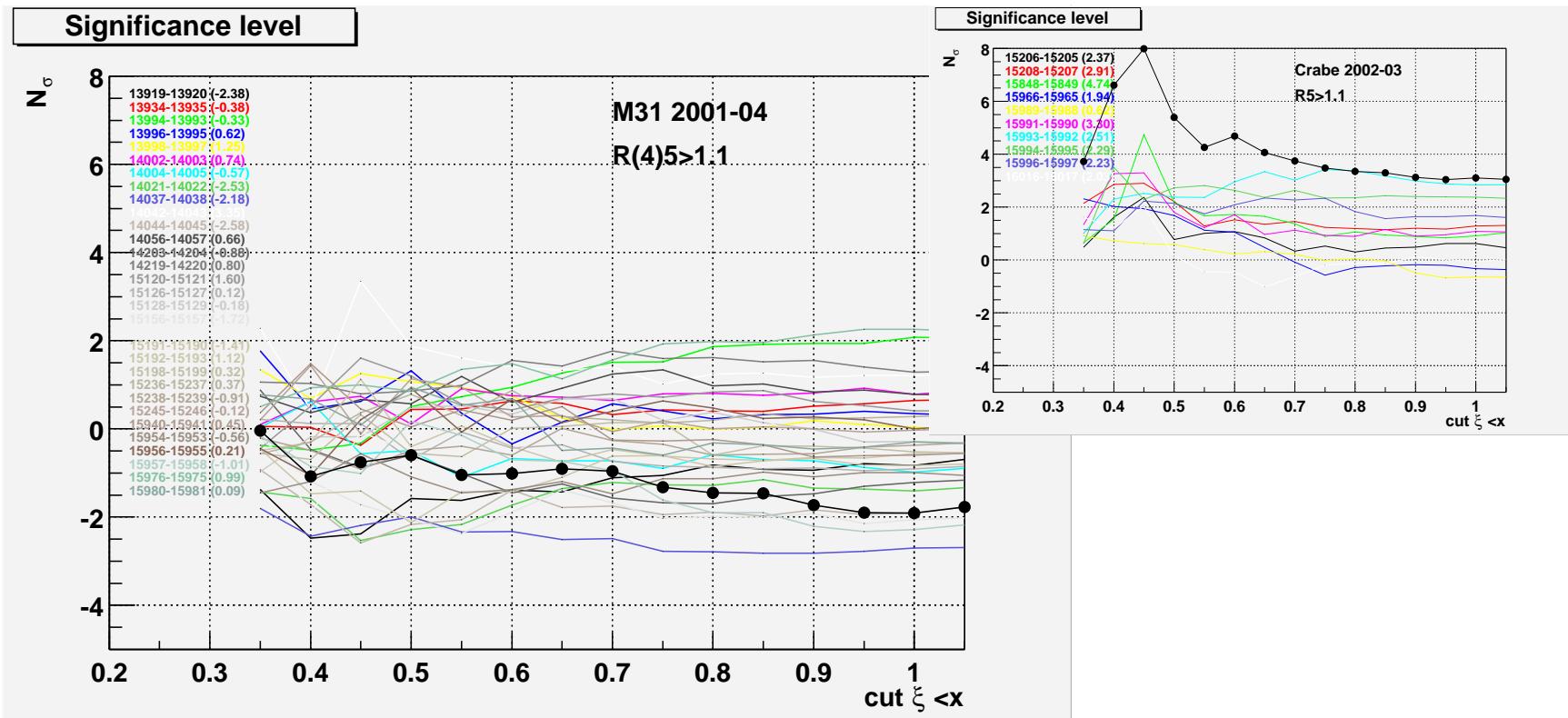
Statistique finale

Statistique finale pour 10 h d'observation :

Coupure appliquée	Nombre total d'événements On-source	Nombre total d'événements Off-source	Soustraction On-Off	Significativité N_σ
aucune*	495089	496833	-1744	-1.75
$R_i > 1.1$	322624	325679	-3055	-2.25
$+\xi < 0.45$	33674	34022	-348	-1.14
$E_\gamma \leq 50 \text{ GeV}$	5677	5814	-137	-1.12
$E_\gamma \leq 100 \text{ GeV}$	15438	15613	-175	-0.87
$E_\gamma \leq 150 \text{ GeV}$	21026	21382	-356	-1.51

Stabilité du résultat

Stabilité du résultat : variation de la coupure en ξ .



Limite supérieure en flux

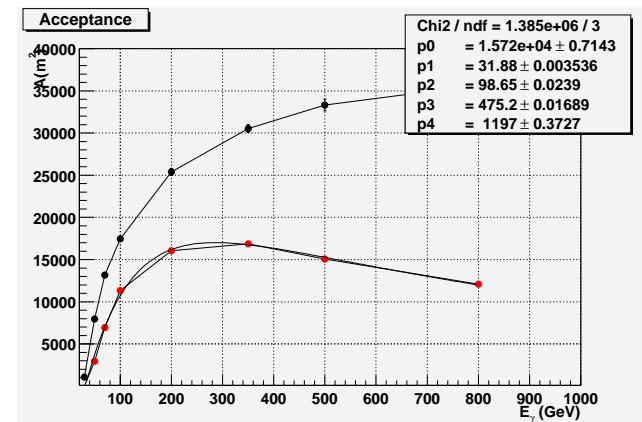
Limite expérimentale à N_σ ; principe :

$$\Phi(E_\gamma \geq E_{\text{seuil}}) \leq \frac{N_\sigma \times \sqrt{(\delta \tilde{N}_{\text{On}})^2 + (\delta \tilde{N}_{\text{Off}})^2} \times \int_{E_{\text{seuil}}}^{\infty} f(E_\gamma) dE_\gamma}{T_{\text{obs}} \int_{E_{\text{seuil}}}^{\infty} \mathcal{A}(E_\gamma) f(E_\gamma) dE_\gamma}$$

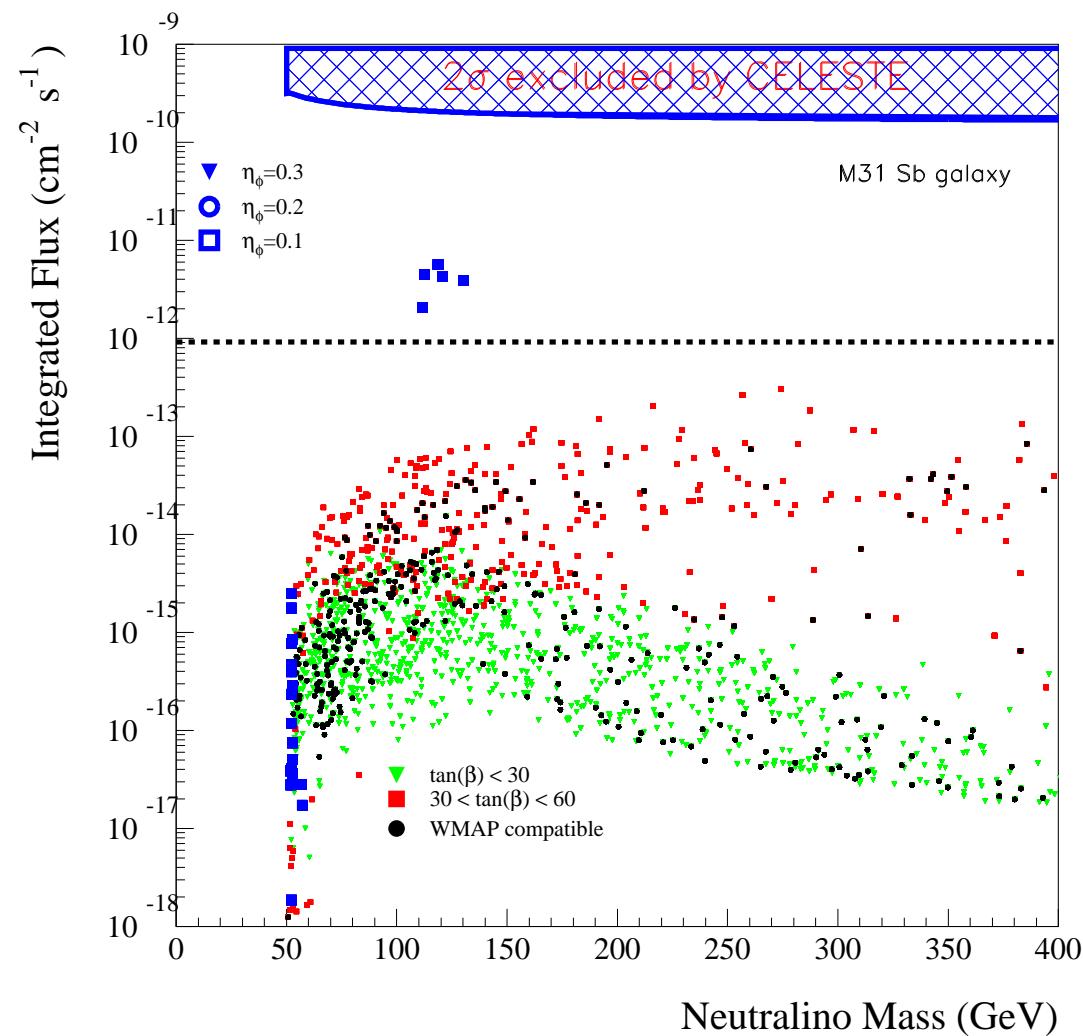
→ **hypothèse de forme spectrale $f(E_\gamma)$.**

Forme d'acceptance déterminée par des simulations de γ à différentes énergies au transit de M31 :

$$\mathcal{A}_{\text{coup}}(E) = A_0 (1 - e^{-\frac{(E-E_{c1})}{E_u}}) e^{-\frac{(E-E_{c2})}{E_d}}$$

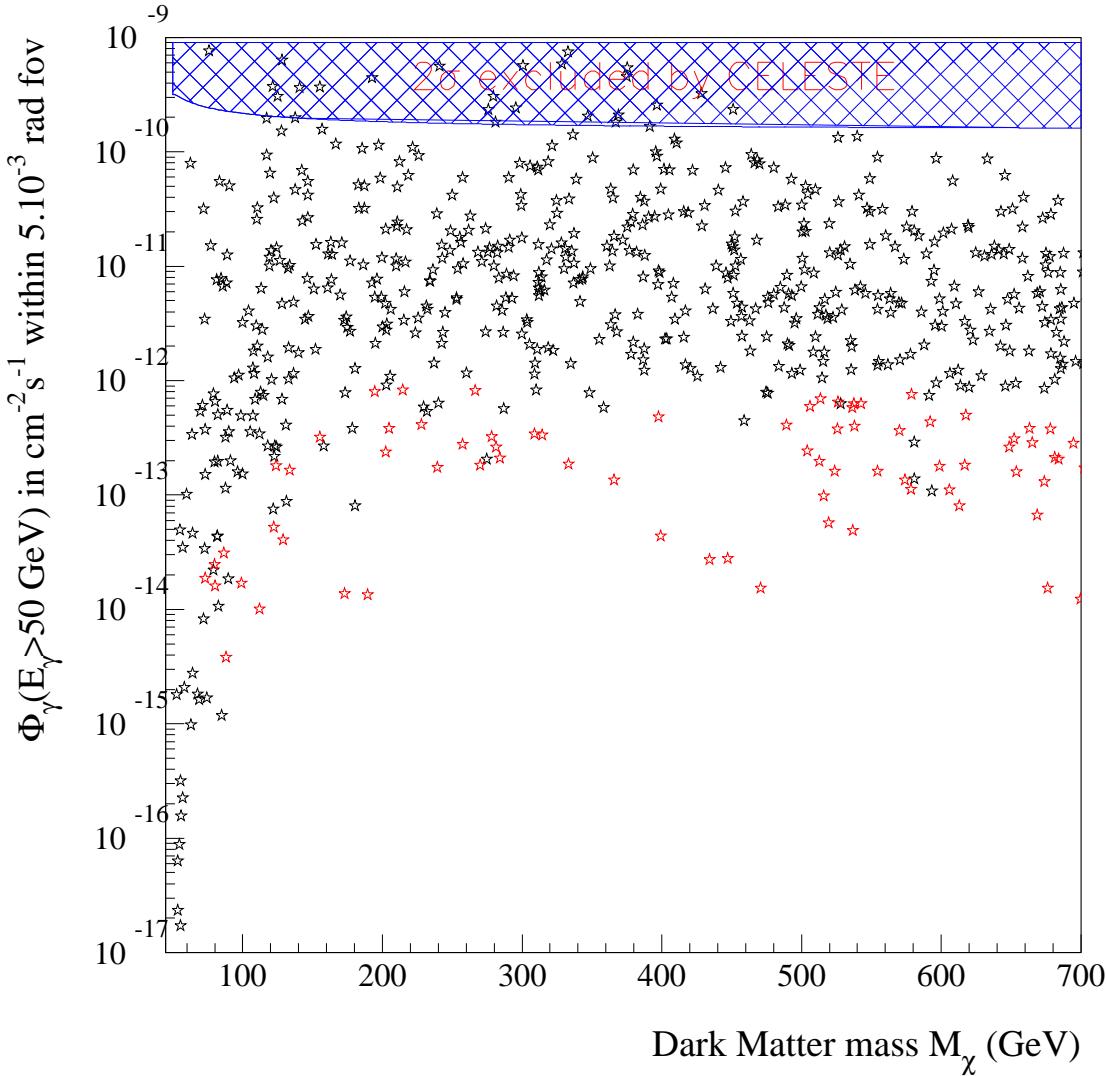


Limite sur les modèles SUSY



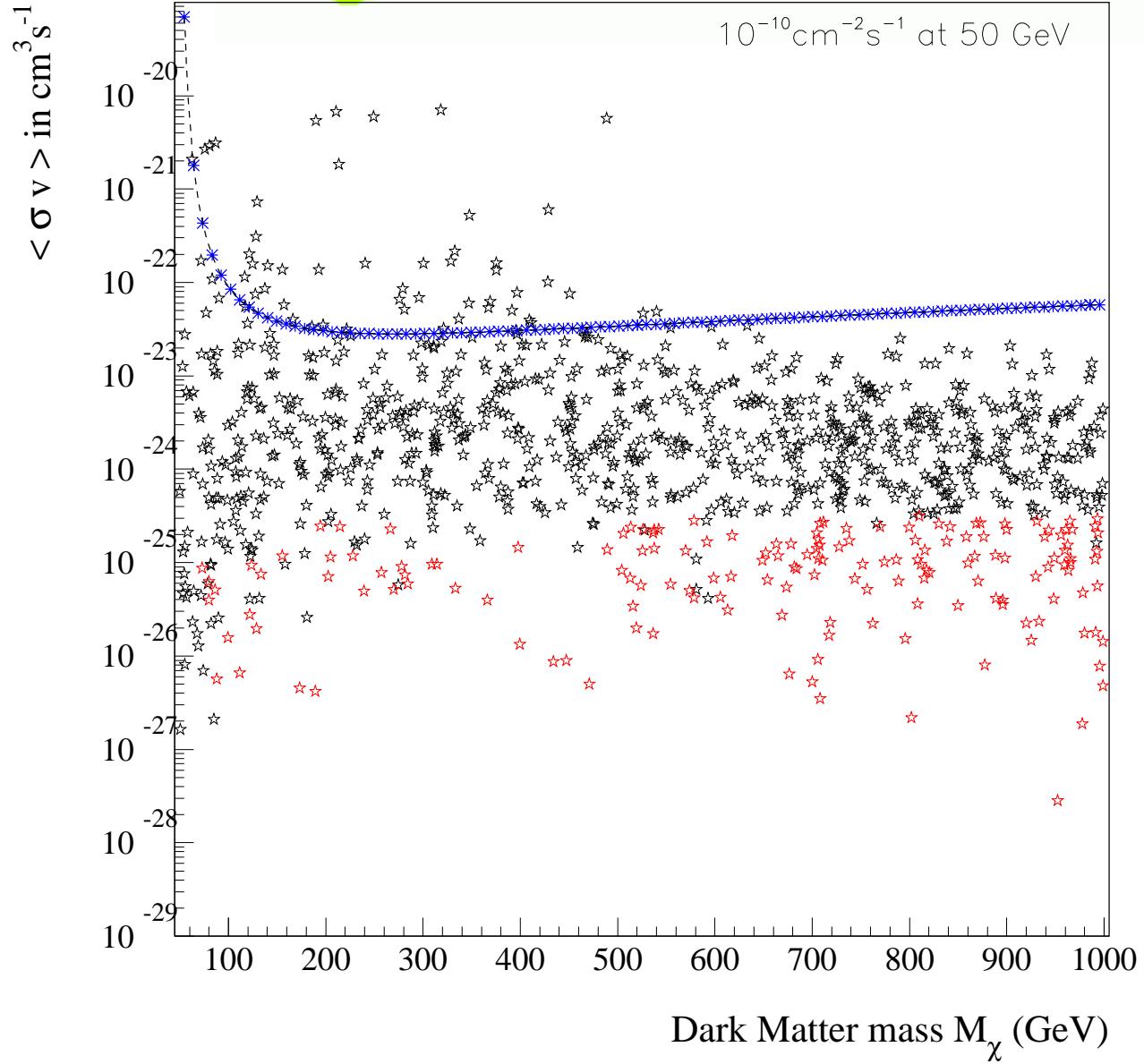
Première limite expérimentale sur M31 dans l'intervalle 50-500 GeV : complémentaire d'EGRET (< 100 GeV) et HEGRA (> 1 TeV). La limite tient compte de la dépendance du spectre en la masse du neutralino.

Limite sur les modèles effectifs

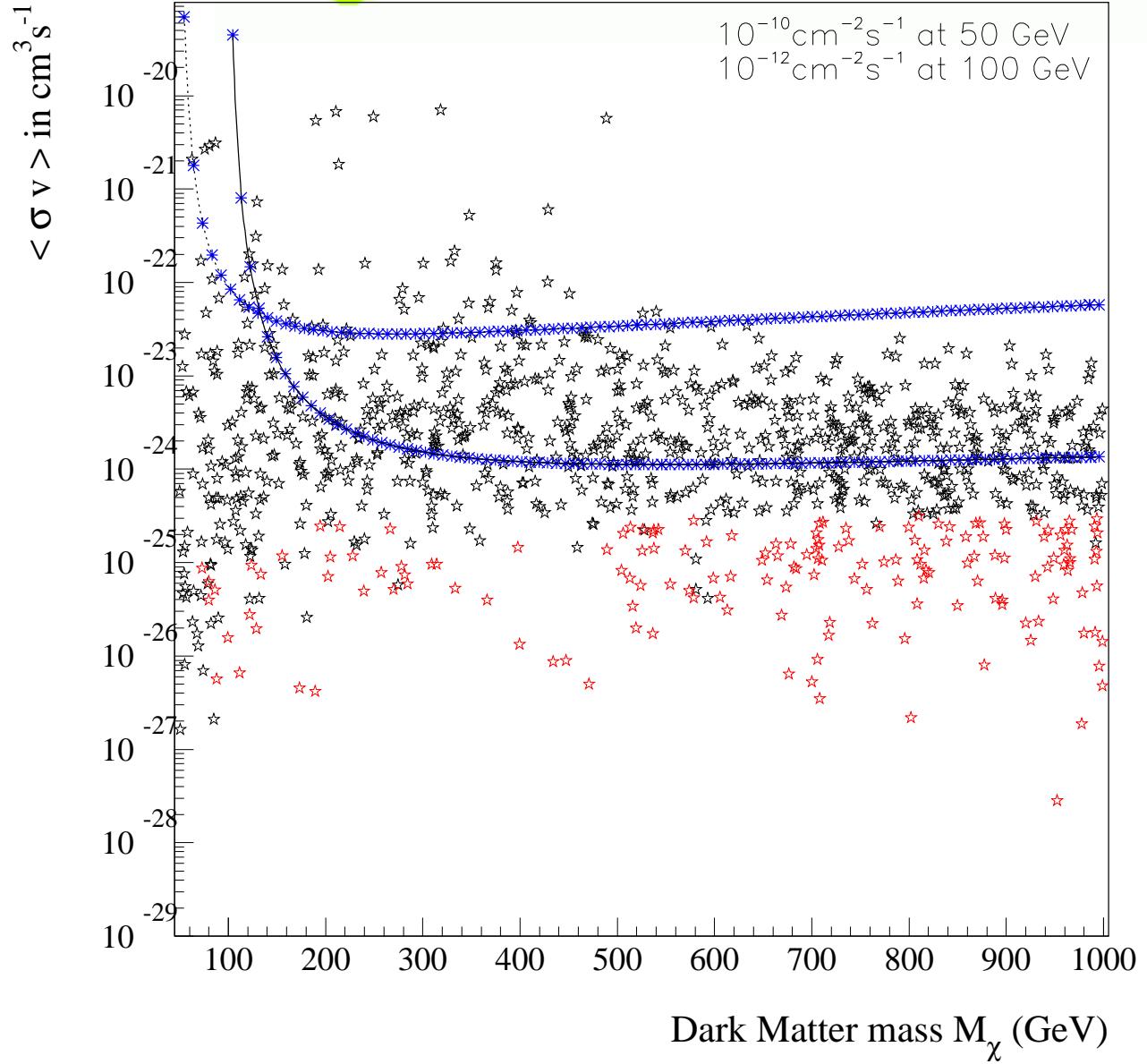


Limite plus contraignante sur les modèles effectifs, en particulier lorsque la contrainte en densité relique est relaxée

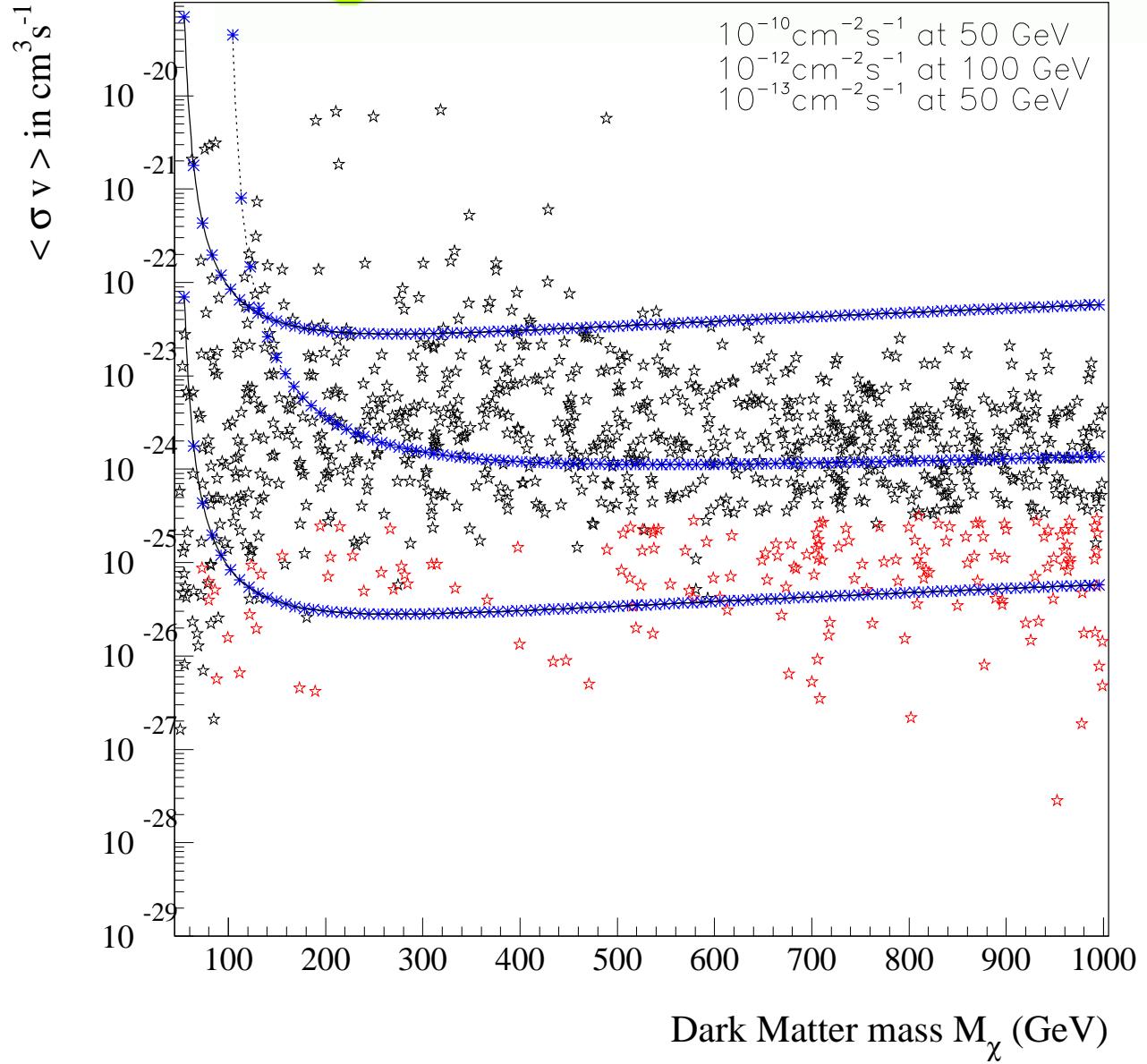
Comparaison des potentiels expérimentaux



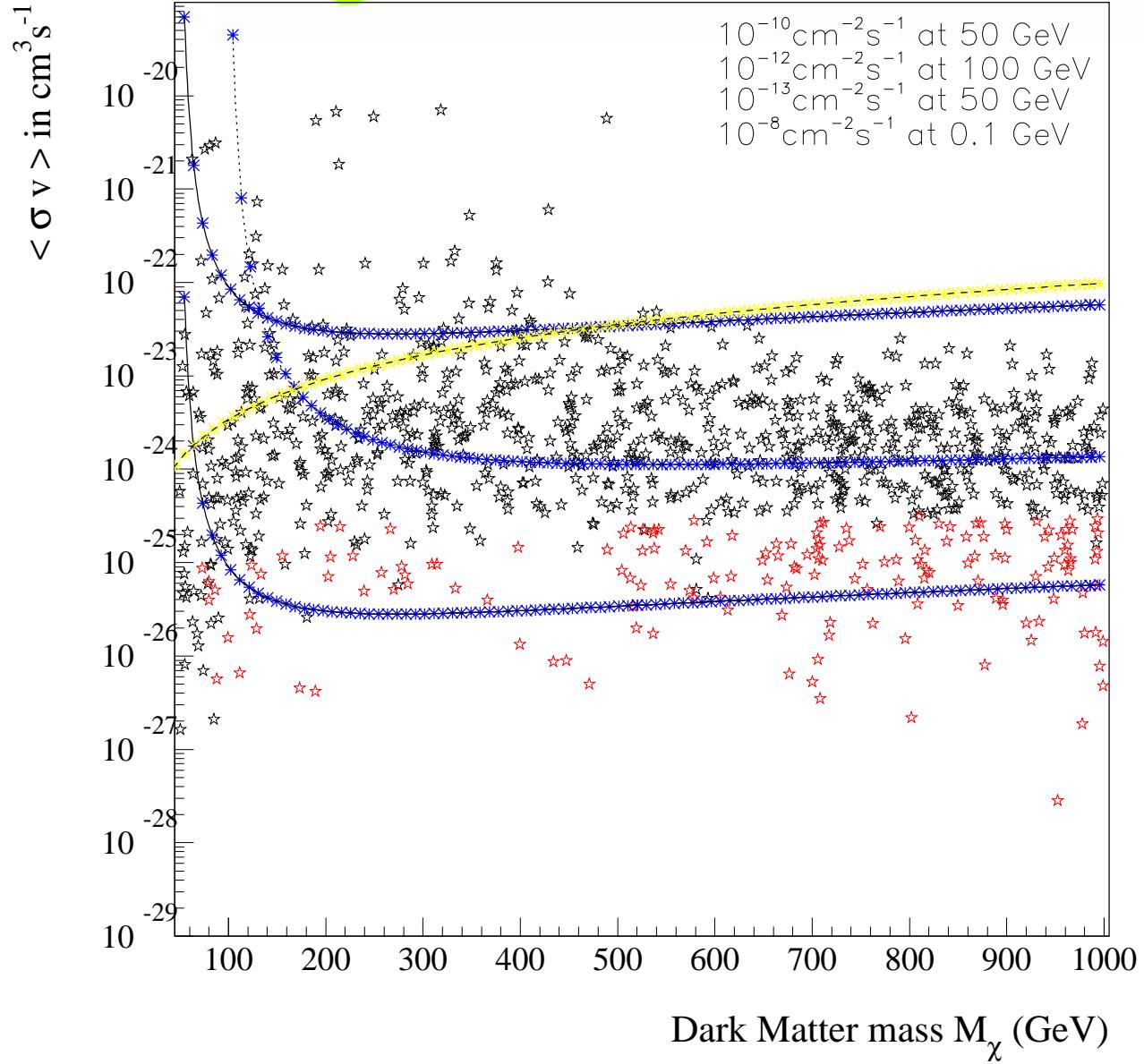
Comparaison des potentiels expérimentaux



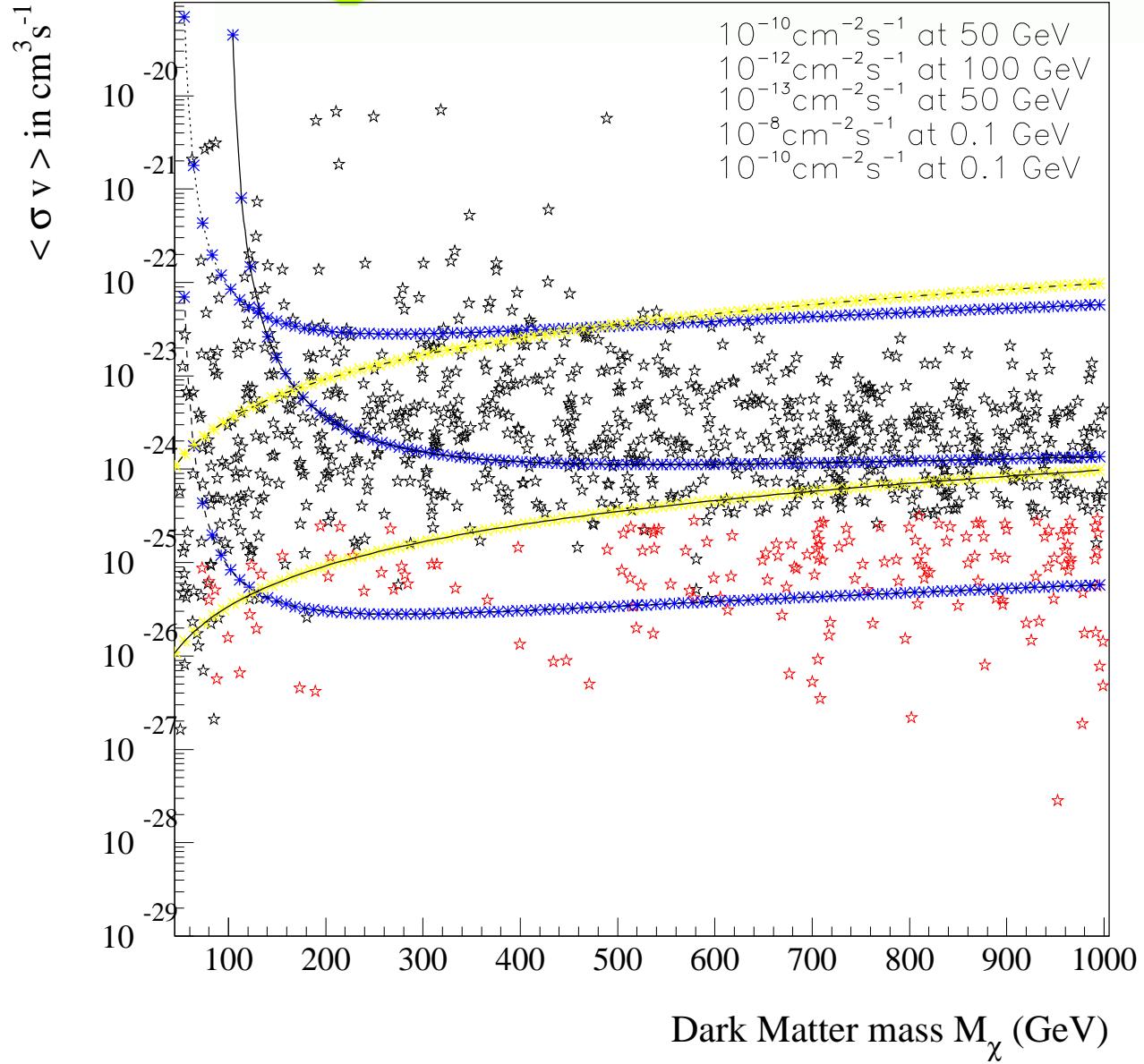
Comparaison des potentiels expérimentaux



Comparaison des potentiels expérimentaux



Comparaison des potentiels expérimentaux



Résumé : Phénoménologie

Phénoménologie :

Prédictions de flux γ en SUSY pour M31 :

- ⌚ modélisation du halo
 - ⌚ balayage de l'espace des paramètres SUSY
- Flux faibles, inaccessibles pour CELESTE

Élaboration et étude d'un modèle effectif :

- ⌚ Calcul complet de la section efficace d'annihilation en $f\bar{f}$
 - ⌚ Outil numérique pour estimer l'abondance fossile et les flux γ
 - ⌚ Comparaisons qualitatives au MSSM
- Forte limitation des flux due à la densité relique

Résumé : *Expérience CELESTE*



Partie expérimentale :

Détection indirecte de Matière Noire avec CELESTE → aucun excès n'a été mis en évidence

- Première limite expérimentale sur M31 à $\sim 50\text{-}100 \text{ GeV}$
- Limite peu contraignante pour la supersymétrie
- Limite plus contraignante pour les modèles effectifs

Perspectives générales :

- ⑥ Améliorer le traitement numérique du modèle effectif (densité relique) ; compléter l'étude avec les cas Dirac (en cours de vérification), scalaire et vecteur
- ⑥ Outre les gamma, ajouter la production d'autres rayons cosmiques (antiprotons, positrons – PAMELA, AMS-2 – neutrinos – ANTARES)
- ⑥ Rendre les outils numériques publics (été 2005)
- ⑥ Résultats expérimentaux des expériences γ de dernière génération (HESS, VERITAS – GLAST, AMS γ)
- ⑥ Avoir une contribution active au sein d'une expérience d'astroparticules impliquée dans la détection indirecte de Matière Noire (calibration, analyse)

Perspectives

Coming soon :

- ⑥ *Indirect Searches for Supersymmetric Dark Matter with the CELESTE Experiment, Lavalle & the CELESTE Collaboration*
- ⑥ *Effective Fermionic Dark Matter, Lavalle & Moultaka*