

# Safari:

# Particules exotiques

Jean Orloff  
LPC Clermont-Ferrand

# Plan

- Préparation au voyage
- Susy & dimensions supplémentaires
  - Matière noire, WIMPS, SIMPS, CHAMPS
- Objets topologiques:
  - murs de domaines, cordes, monopoles
- Objets légers:
  - axions, gravitinos, matière noire légère
- Objets lourds:
  - neutrinos droits, wimpzillas
- Objets collectifs:
  - strangelets, boules de charge

# Préparation au voyage

Grande diversité d'objets d'intérêt cosmo/astroparticules imaginés par physiciens depuis >30 ans → classification utile (~botanique).

Essayons selon:

1. **Motivations** théoriques:  
+/- valables pour phys. des particules, -/+ ad-hoc pour cosmo/astro
2. **Stabilisation**: durée de vie nécessaire:  $\Gamma^{-1} \gtrsim 10^{10} \text{ans} \approx 5 \times 10^{41} \text{GeV}^{-1} \rightarrow$ 
  - protection par une symétrie /
  - topologique
3. **Production**:
  - à l'équilibre + découplage (→calculable pour micro-physique connue) /
  - hors équilibre
4. **Signatures** éventuelles

**Candidats bien motivés,  
protégés par symétrie,  
produits à l'équilibre**



# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- Motivations: \*\*\*\*\*

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations:** \*\*\*\*\*  
 $QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$ 
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations:** \*\*\*\*\*  
 $QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$ 
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***  
 $QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$ 
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

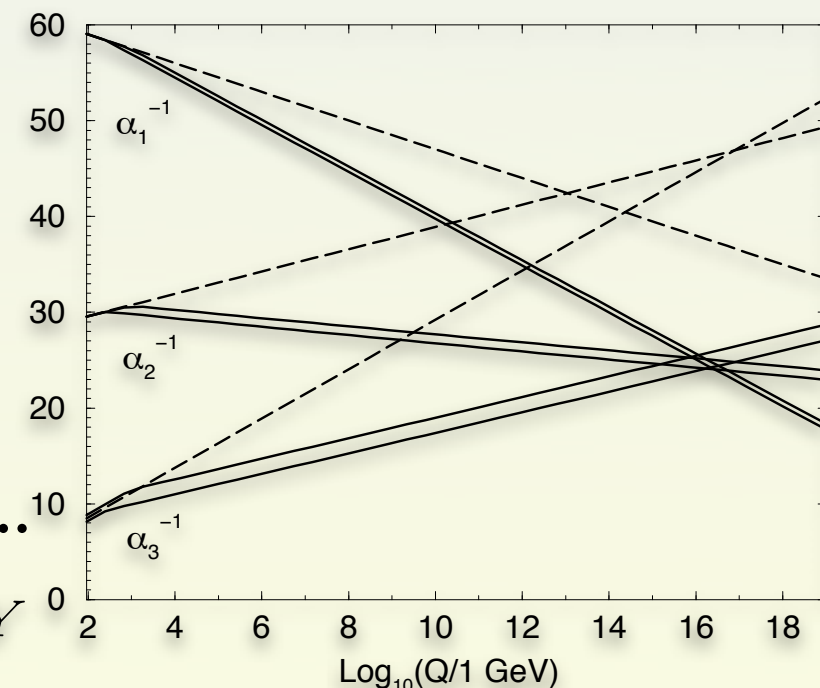
- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***
$$QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$$
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons  $\bigoplus$  tuent boucles fermions  $\bigotimes$   
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...

# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$   
de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***

$$QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$$
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons  $\oplus$  tuent boucles fermions  $\ominus$   
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...
  - “focalise” l’unification  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$



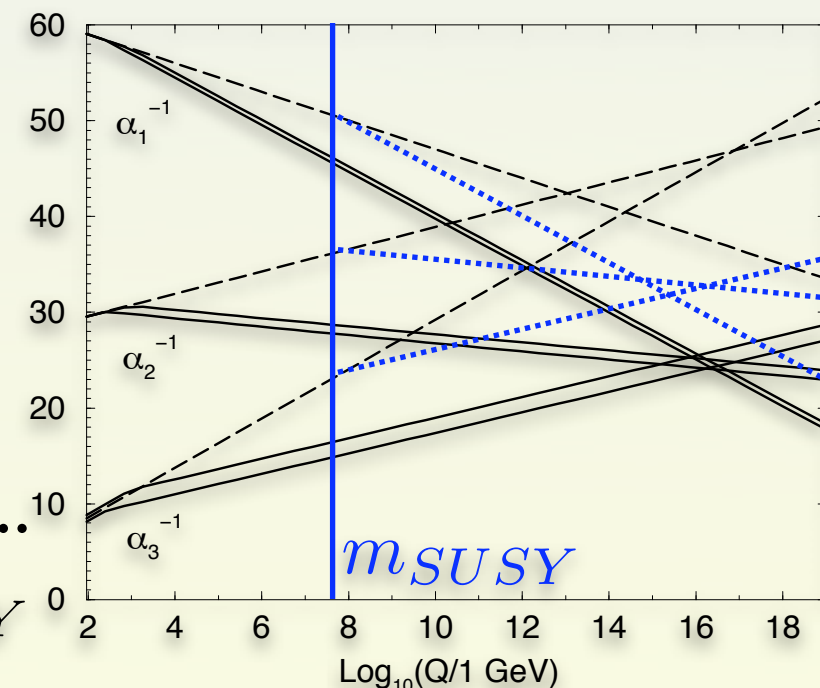


# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$  de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***

$$QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$$
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons  $\oplus$  tuent boucles fermions  $\ominus$   
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...
  - “focalise” l’unification  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$



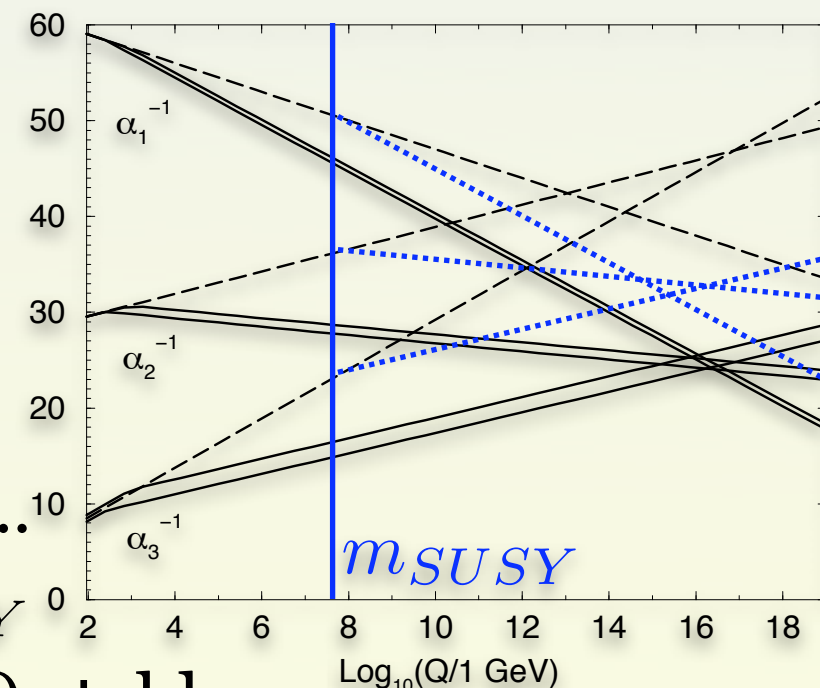


# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|part.\rangle = |spart.\rangle$  de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***

$$QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$$
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons  $\oplus$  tuent boucles fermions  $\ominus$   
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...
  - “focalise” l’unification  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- **Stabilité:** *Lightest Supersymmetric Particle* (LSP) stable grâce à symétrie  $R_p = (-1)^{2S+3(L-B)}$ , utile à la stabilisation du proton

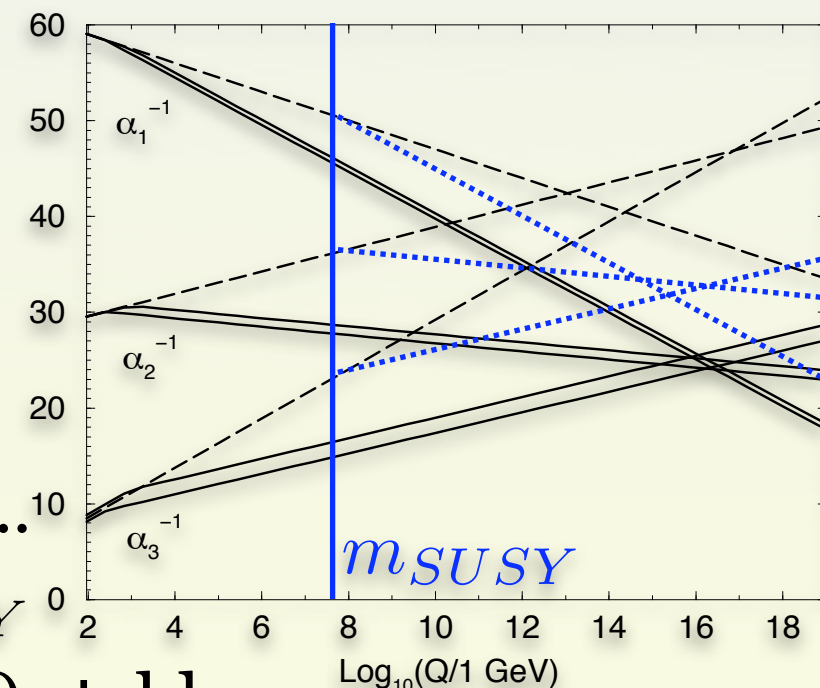


# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$  de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations: \*\*\*\*\***

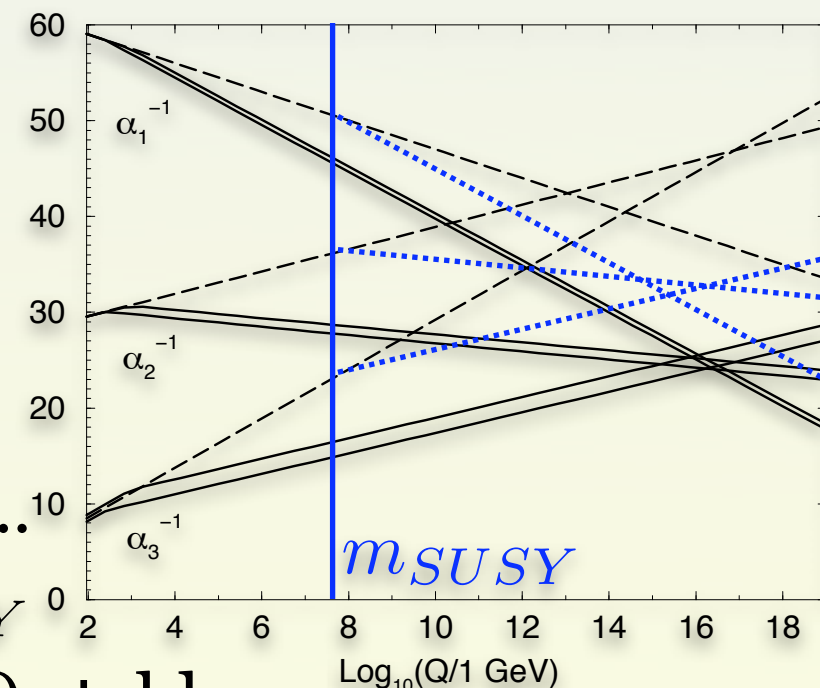
$$QQ^\dagger + Q^\dagger Q = P_\mu$$
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons  $\oplus$  tuent boucles fermions  $\ominus$   
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...
  - “focalise” l’unification  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- **Stabilité:** *Lightest Supersymmetric Particle* (LSP) stable grâce à symétrie  $R_p = (-1)^{2S+3(L-B)}$ , utile à la stabilisation du proton
- **Production:** à l’équilibre par interactions usuelles (brisure douce...)



# SUperSYmétrie

Martin hep-ph/9709356

- Relie bosons et fermions (espoir: photon-neutrino? non!)
- Associe à chaque particule connue une s-particule:  $Q|\text{part.}\rangle = |\text{spart.}\rangle$  de spin différent de  $\pm 1/2 \rightarrow$  **exotiques à la pelle!**
- **Motivations:** \*\*\*\*\*
  - extension max. de Poincaré:  $Q \approx \sqrt{\text{translation}}$
  - version locale contient la gravitation (sugra)
  - présente dans les théories de cordes
  - boucles bosons (+) tuent boucles fermions (-)  
 $\rightarrow$  sol. hiérarchie ( $m_{SUSY} \approx 100\text{GeV}$ ), cte cosmo...
  - “focalise” l’unification  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- **Stabilité:** *Lightest Supersymmetric Particle* (LSP) stable grâce à symétrie  $R_p = (-1)^{2S+3(L-B)}$ , utile à la stabilisation du proton
- **Production:** à l’équilibre par interactions usuelles (brisure douce...)
- **Signatures:** dépendent de la nature de la LSP, donc des paramètres de brisure SUSY (e.g. masses partenaires)



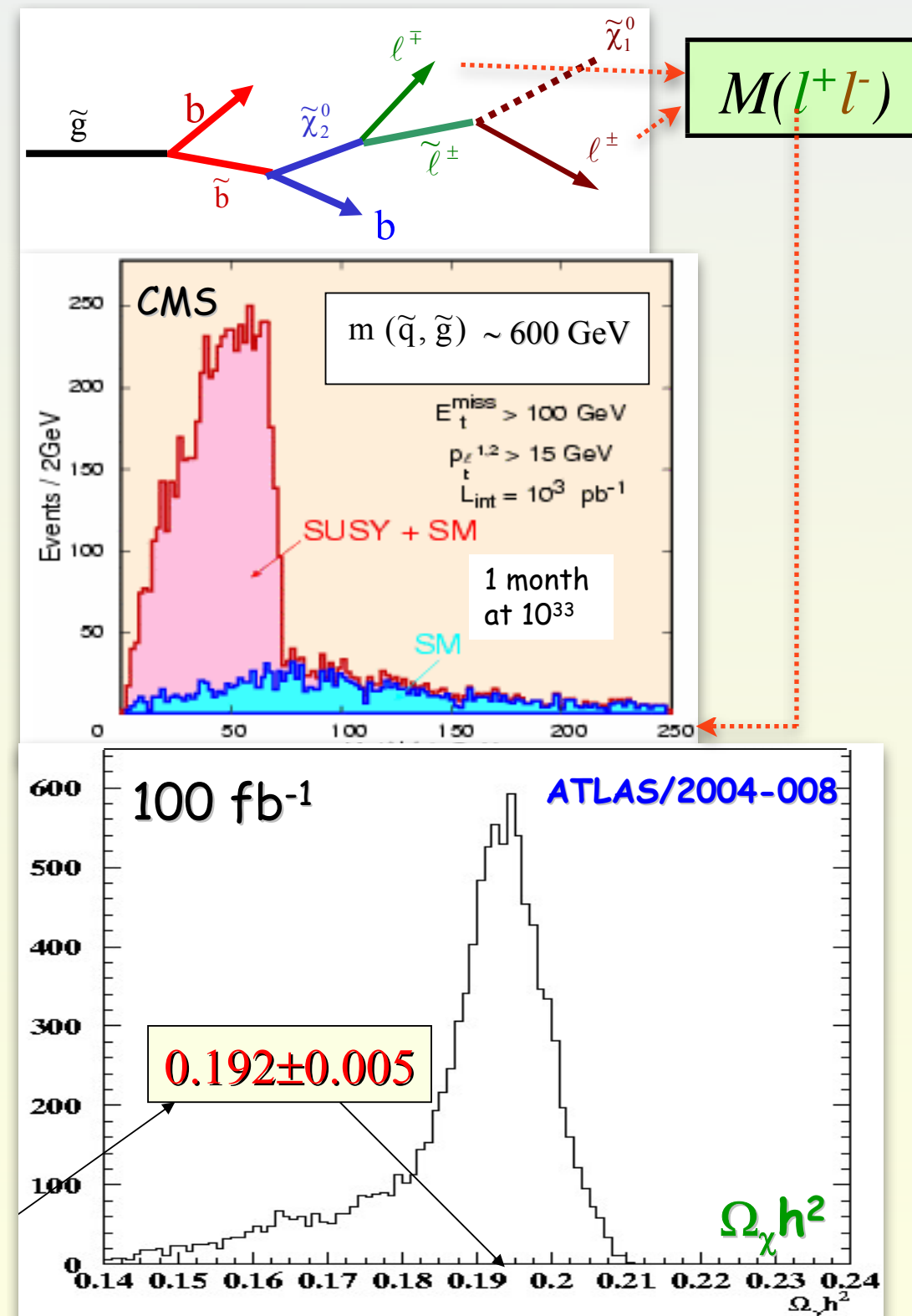
# Neutralino $\chi$ LSP ( $\in$ *Wimps*)

- Neutralinos = 4 mélanges (2Higgsinos-Zino-photino)
- Weak Interactions only (**W**Imp)
- Le plus léger est “*souvent*” LSP mais:
  - brisure SUSY nécessaire
  - aucun mécanisme de brisure prédictif convainquant
  - choix habituel (mSugra)  
≠ prédiction théorique!!!
- Vraie justification = candidat matière noire non-baryonique:
  - prédictif
  - signatures testable (c.f. Salati/Lavalle)



# Neutralino $\tilde{\chi}$ LSP ( $\in$ Wimps)

- Neutralinos = 4 mélanges (2Higgsinos-Zino-photino)
- Weak Interactions only (**W**Imp)
- Le plus léger est “souvent” LSP mais:
  - brisure SUSY nécessaire
  - aucun mécanisme de brisure prédictif convainquant
  - choix habituel (mSugra)  $\neq$  prédiction théorique!!!
- Vraie justification = candidat matière noire non-baryonique:
  - prédictif
  - signatures testable (c.f. Salati/Lavalle)
  - lien collisionneurs: dans cas optimal, mesure densité relique au LHC!!! (hypothèses...)



# Gluino $\tilde{g}$ LSP ( $\in$ *Simps*)

- Origine théorique “gluino léger”: masse jauginos protégée par R-symétrie (=symétrie sous laquelle Q est chargée) Farrar, Fayet, 1978
- Gluino doit s’hadroniser  $\rightarrow$  R-hadrons, e.g: R-gluonium  $\tilde{g}g$ , R-pion  $\tilde{g}\bar{u}u$
- Le plus léger: de préférence neutre (c.f. Champs, + loin)
- Peut se lier aux nucléons pour former R-isotopes

Candidat matière noire  
AVEC INTERACTIONS:

- distribution MN + isotherme au centre (efface sur-structure à petite échelle)

Wandelt & al. a-ph/0006344

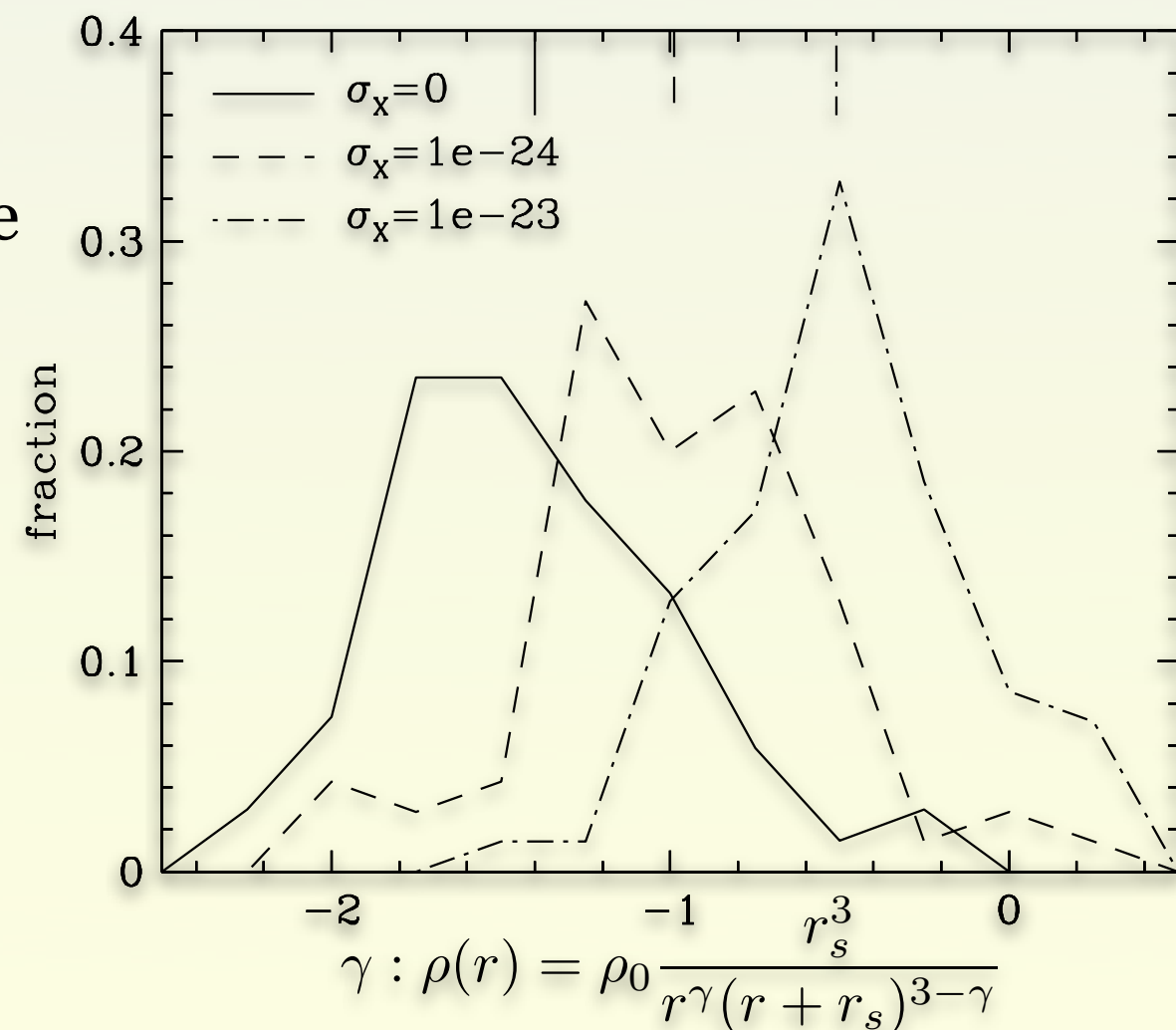
- Contourne borne GZK (comme Fe)
- Problème: densité relique demande

$$\sigma_{ann} \sim \alpha_s^2 / m_{Simp}^2 \sim \Omega_{Simp}^{-1}$$

$$\Rightarrow m_{Simp} \sim \frac{\alpha_s}{\alpha_W} m_{Wimp}$$

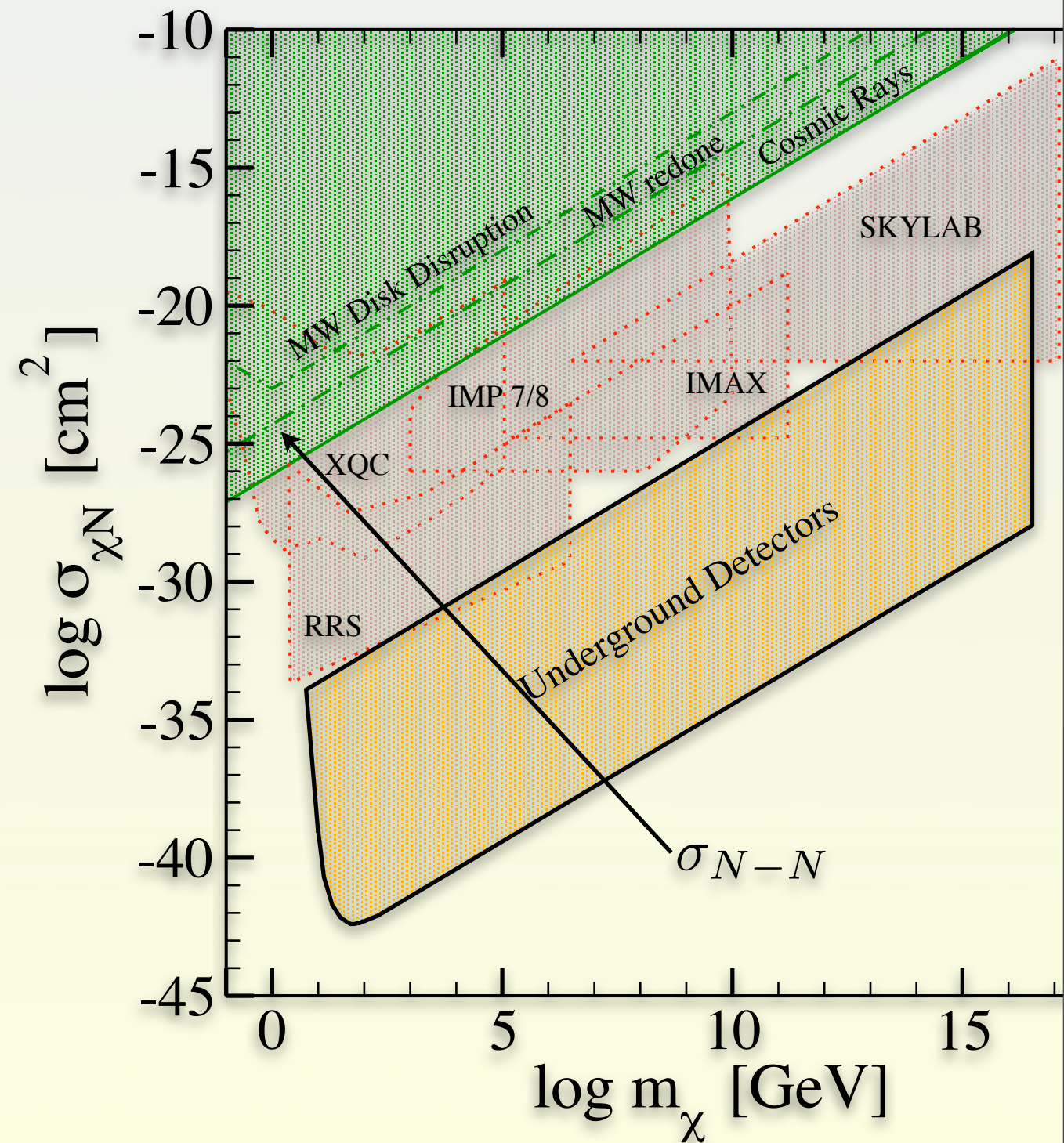
“léger”?

- Autres Susy-Simps: stop, sbottom...



# Limites Simp-N

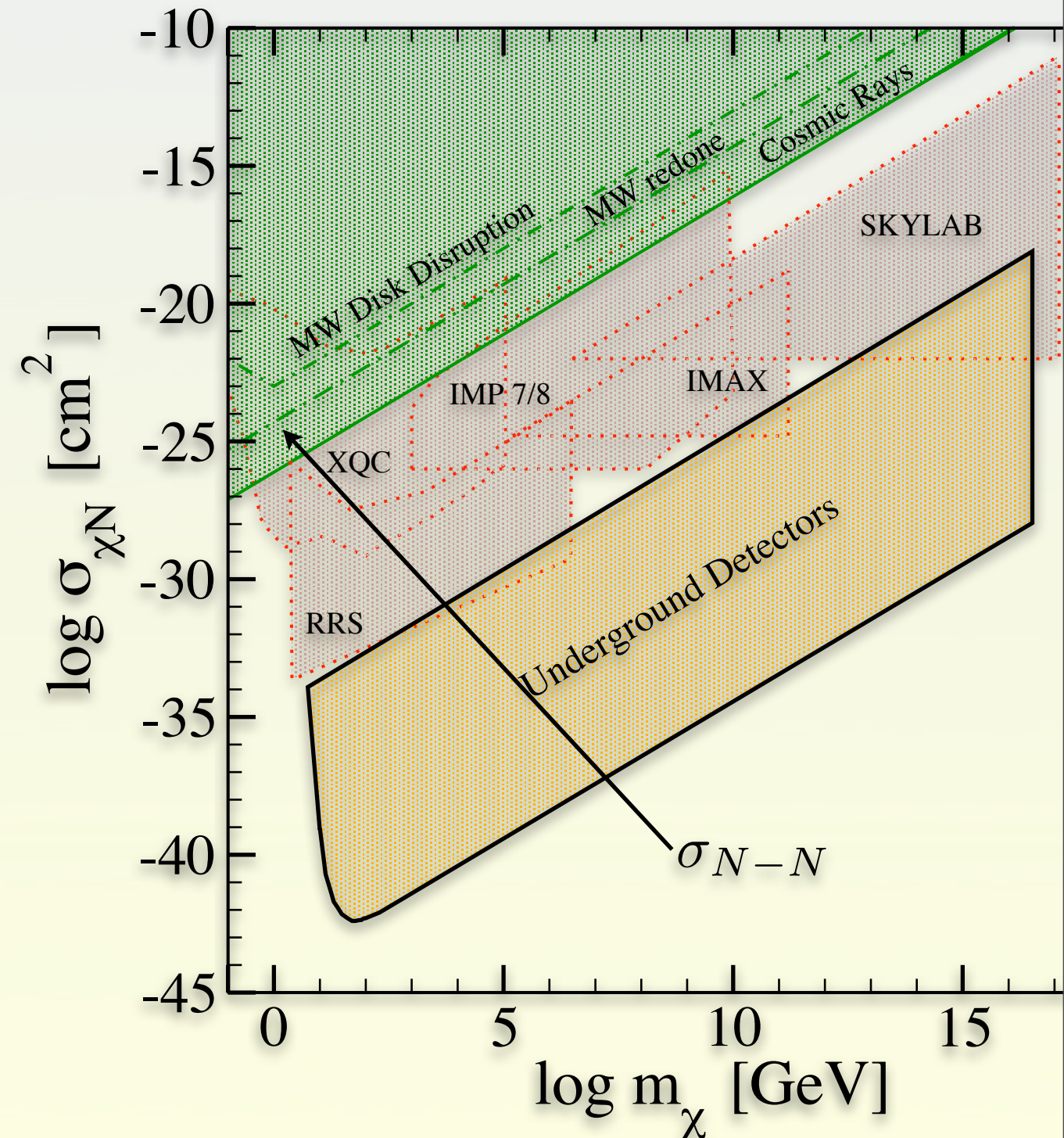
Mack, Beacom, Bertone 0705.4298



# Limites Simp-N

- # évt.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$

Mack, Beacom, Bertone 0705.4298

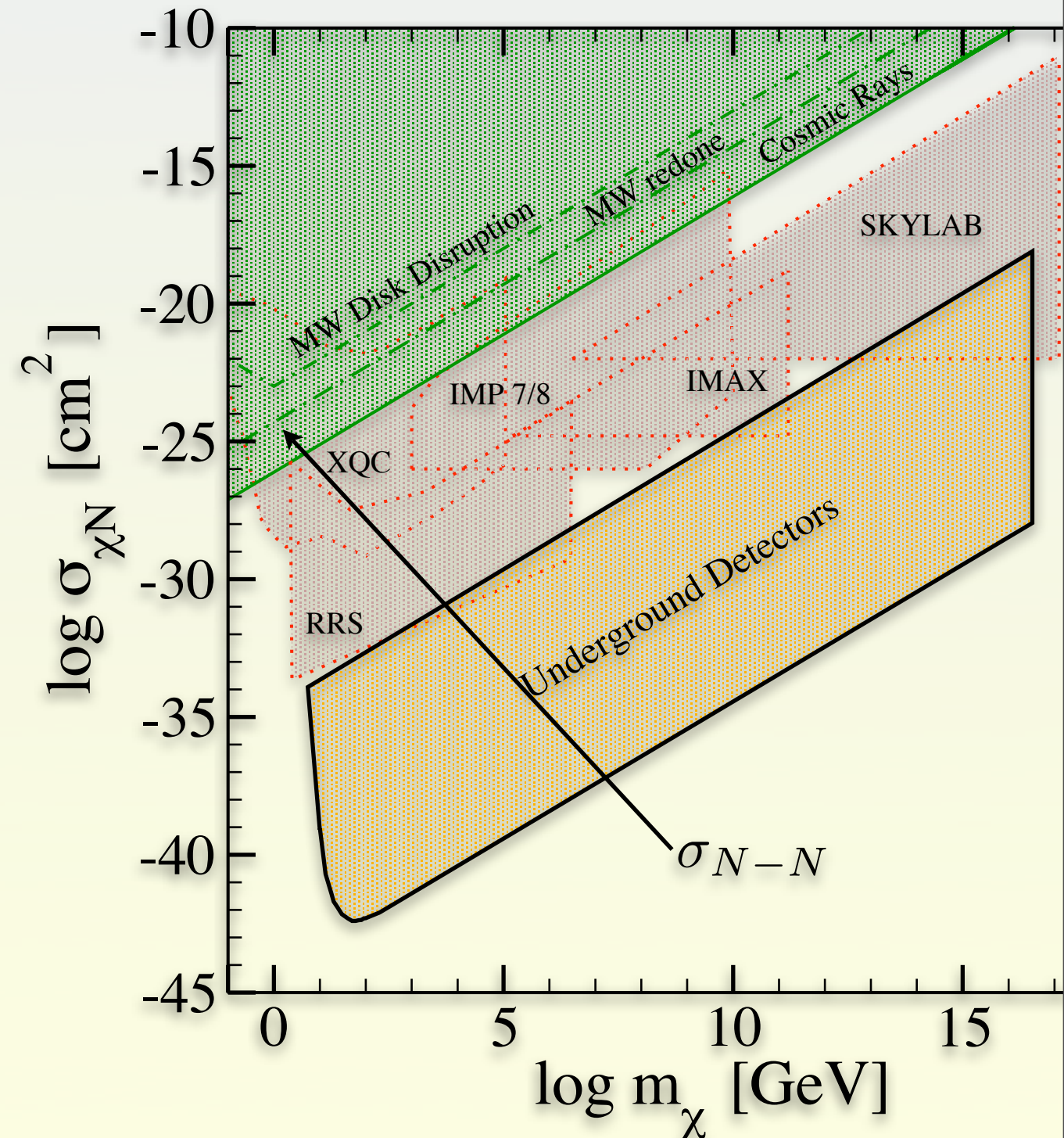




# Limites Simp-N

- # évt.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terreine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp

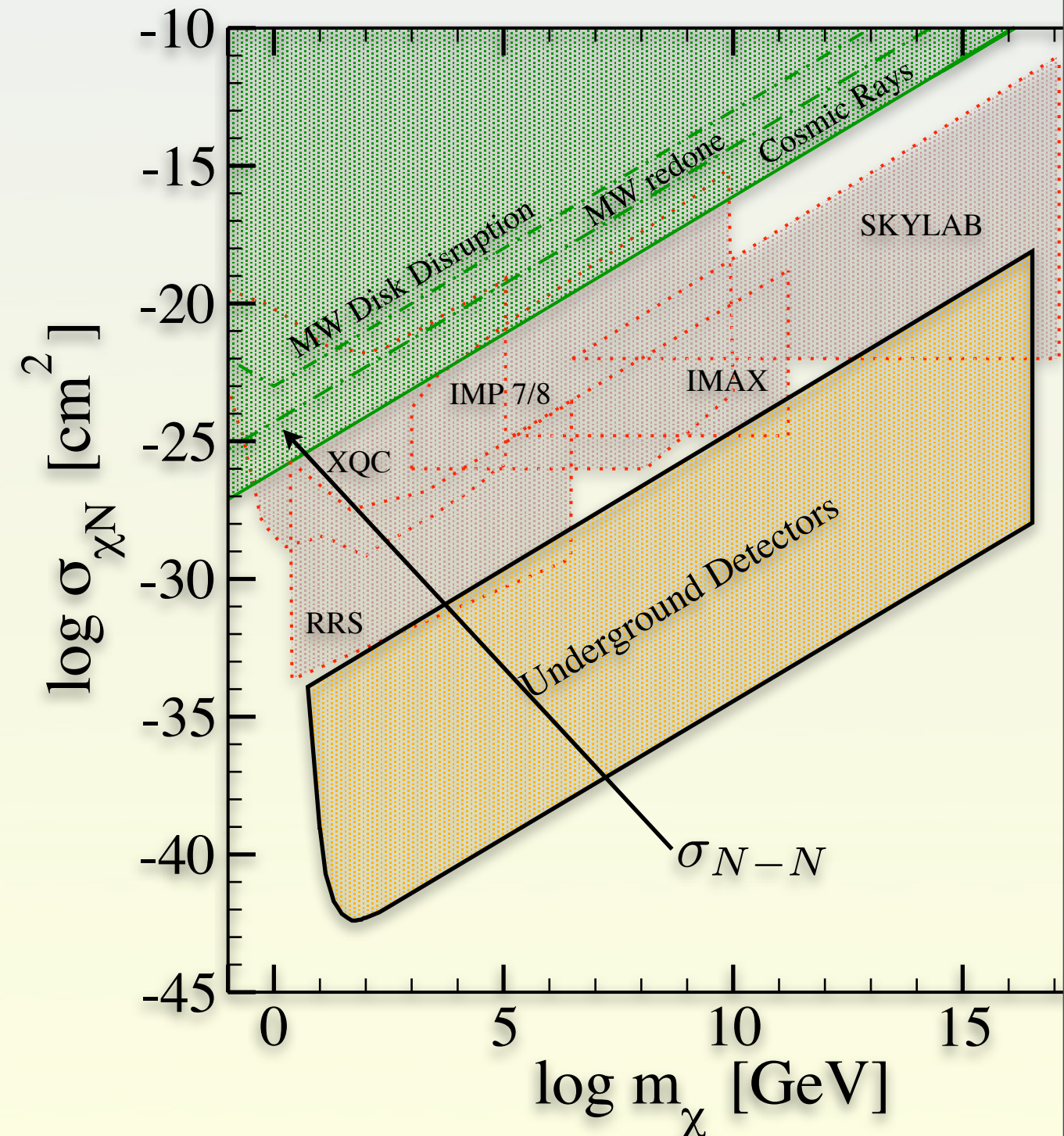
Mack, Beacom, Bertone 0705.4298



# Limites Simp-N

- # évt.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terreine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut:  
IMAX (ballon), Skylab,  
satellites IMP7/8, XQC

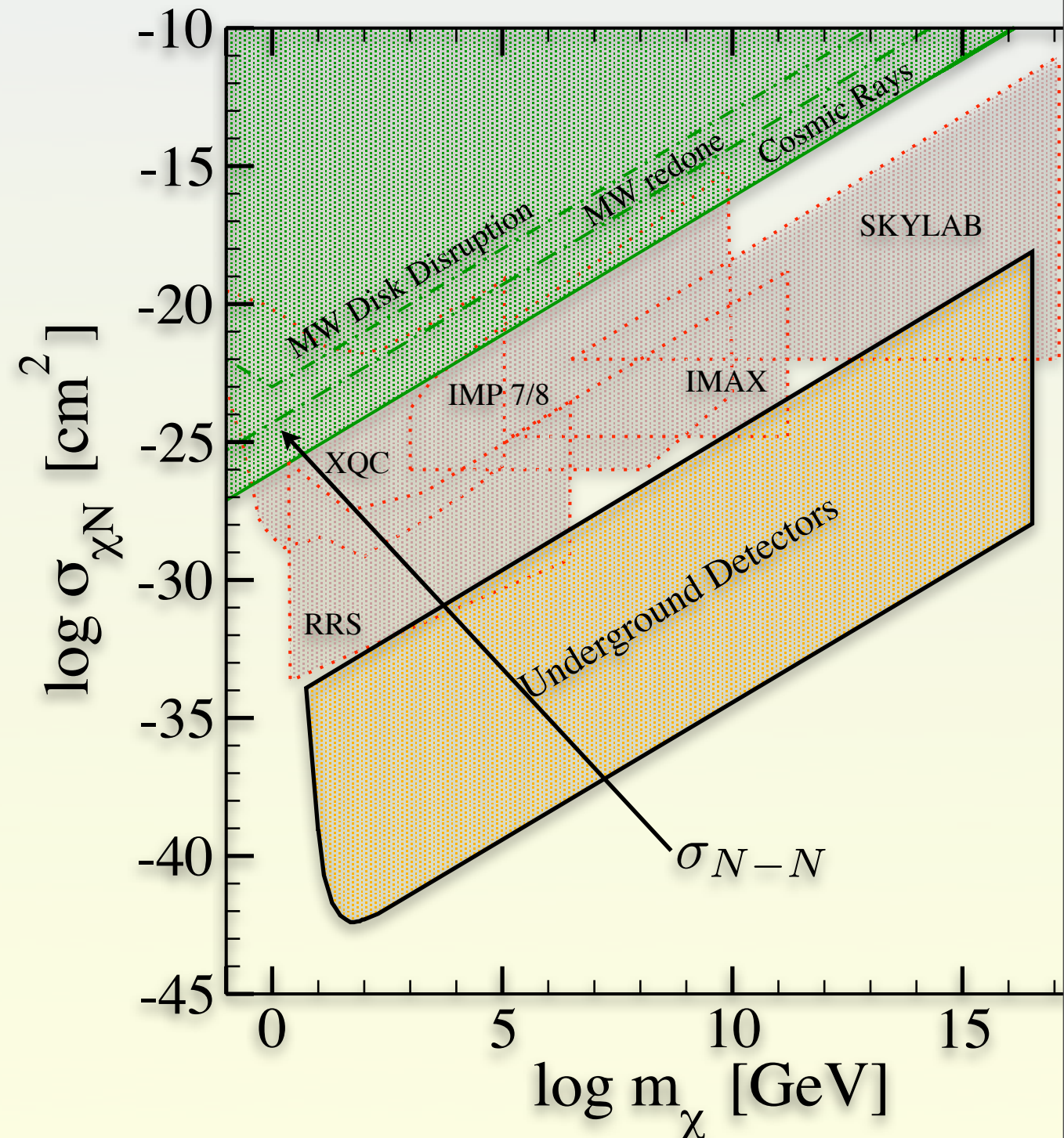
Mack, Beacom, Bertone 0705.4298



# Limites Simp-N

- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut:  
IMAX (ballon), Skylab,  
satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction  
du disque galactique

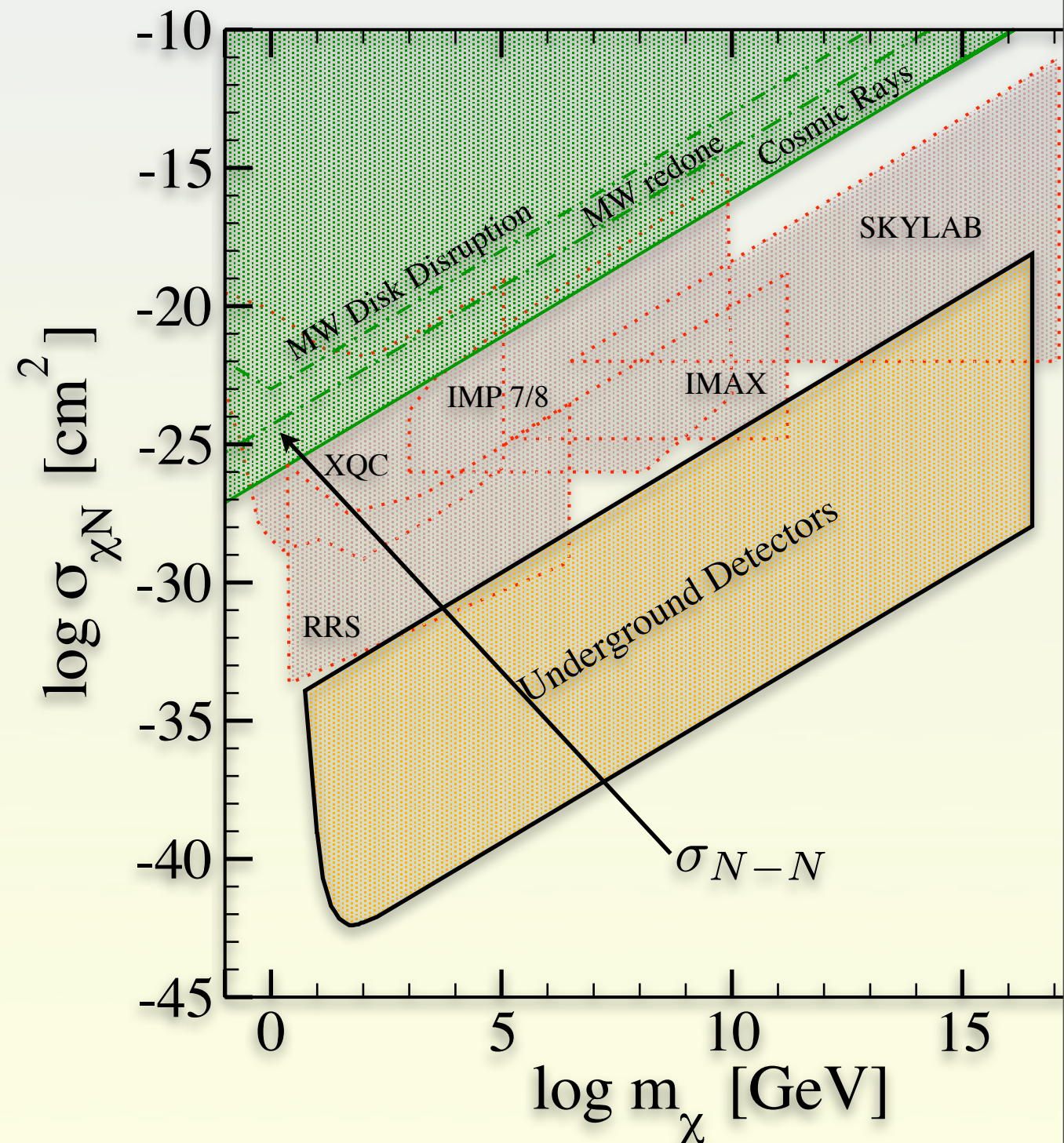
Mack, Beacom, Bertone 0705.4298



# Limites Simp-N

- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut:  
IMAX (ballon), Skylab,  
satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction  
du disque galactique
- Protons cosmiques + Simp  $\rightarrow$   
gammas (pas vus): renforcent limite  
(tue région pour halo isotherme...)

Mack, Beacom, Bertone 0705.4298

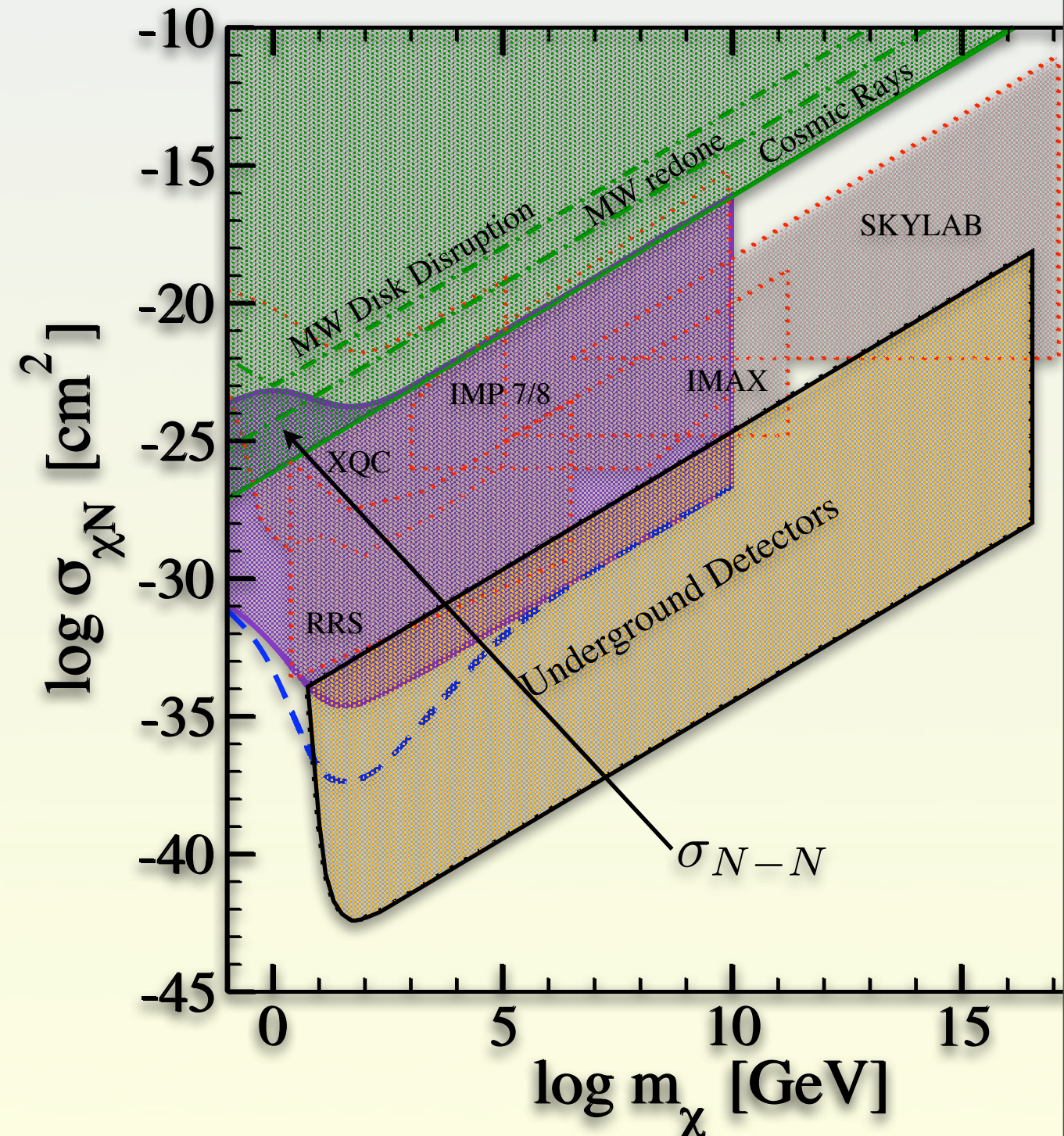




# Limites Simp-N

- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut:  
IMAX (ballon), Skylab,  
satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction  
du disque galactique
- Protons cosmiques + Simp  $\rightarrow$   
gammas (pas vus): renforcent limite  
(tue région pour halo isotherme...)
- Idée nouvelle: Simps capturés par  
terre, peuvent s'annihiler, libèrent au  
centre 3300TW  
>> 44 TW (gradient de T) sauf si

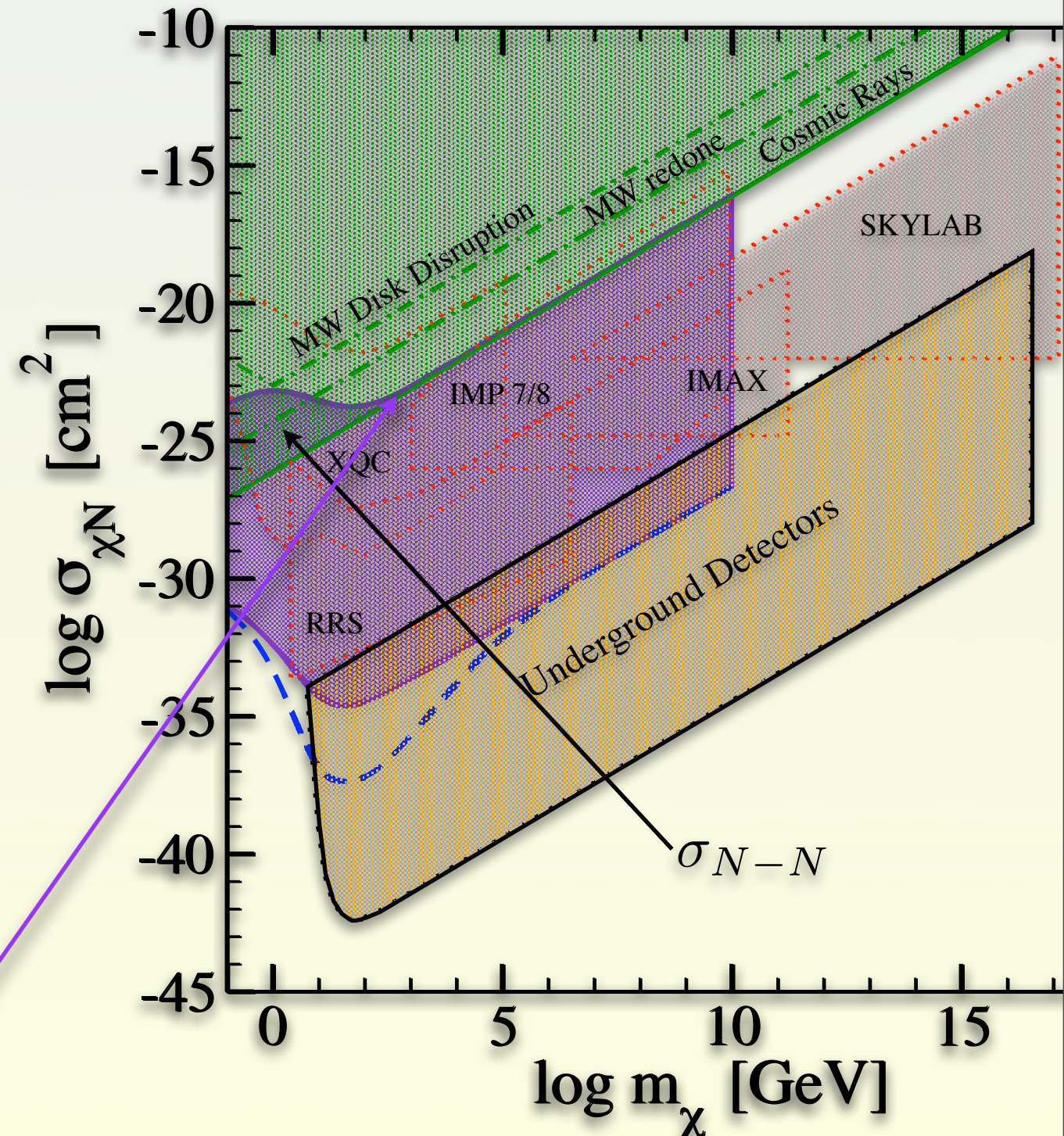
Mack, Beacom, Bertone 0705.4298



# Limites Simp-N

Mack, Beacom, Bertone 0705.4298

- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp, s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut: IMAX (ballon), Skylab, satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction du disque galactique
- Protons cosmiques + Simp  $\rightarrow$  gammas (pas vus): renforcent limite (tue région pour halo isotherme...)
- Idée nouvelle: Simps capturés par terre, peuvent s'annihiler, libèrent au centre 3300TW  
>> 44 TW (gradient de T) sauf si
  - englués avant annihilation au centre

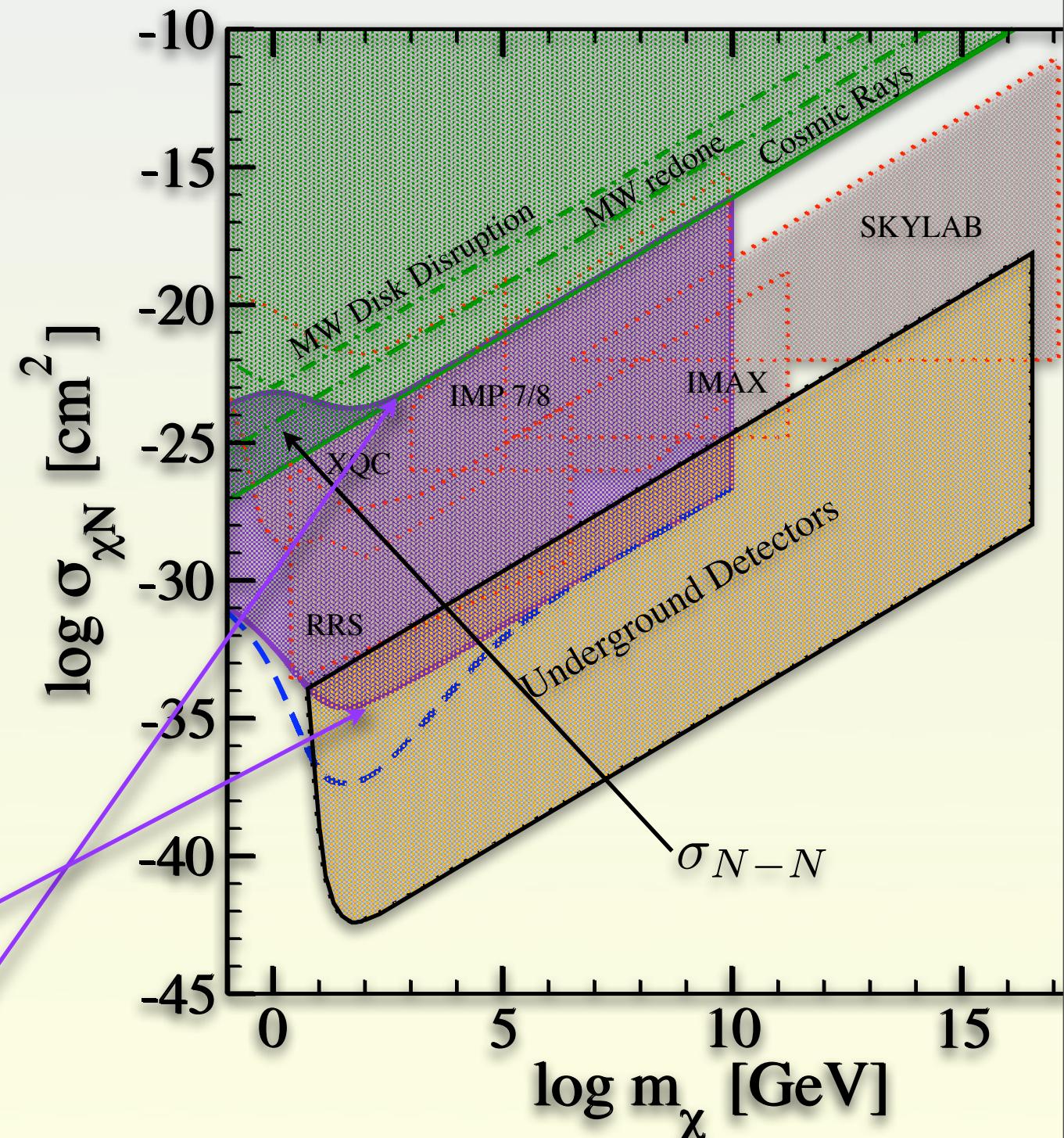




# Limites Simp-N

Mack, Beacom, Bertone 0705.4298

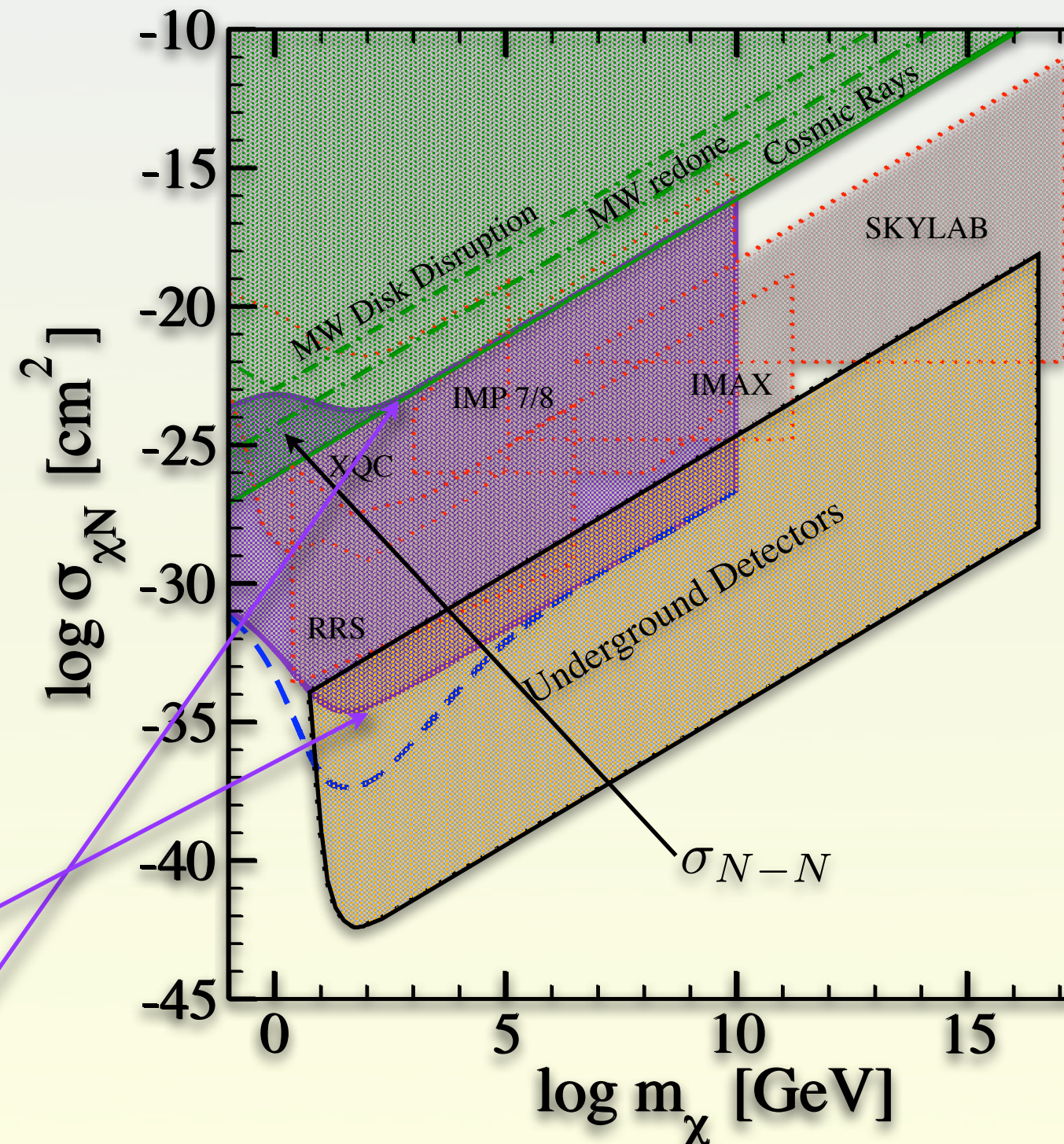
- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp, s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut: IMAX (ballon), Skylab, satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction du disque galactique
- Protons cosmiques + Simp  $\rightarrow$  gammas (pas vus): renforcent limite (tue région pour halo isotherme...)
- Idée nouvelle: Simps capturés par terre, peuvent s'annihiler, libèrent au centre 3300TW  
 $\gg 44 \text{ TW}$  (gradient de T) sauf si
  - englués avant annihilation au centre
  - capture trop faible



# Limites Simp-N

Mack, Beacom, Bertone 0705.4298

- # évts.  $\sim \sigma n_{Simp} n_N \sim \sigma / m_{Simp}$   
pour halo  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- DD sous-terrine: OK pour Wimp,  
s'éteint pour Simp
- $\rightarrow$  aller de + en + haut:  
IMAX (ballon), Skylab,  
satellites IMP7/8, XQC
- Si interaction trop forte, destruction  
du disque galactique
- Protons cosmiques + Simp  $\rightarrow$   
gammas (pas vus): renforcent limite  
(tue région pour halo isotherme...)
- Idée nouvelle: Simps capturés par  
terre, peuvent s'annihiler, libèrent au  
centre 3300TW  
>> 44 TW (gradient de T) sauf si
  - englués avant annihilation au centre
  - capture trop faible



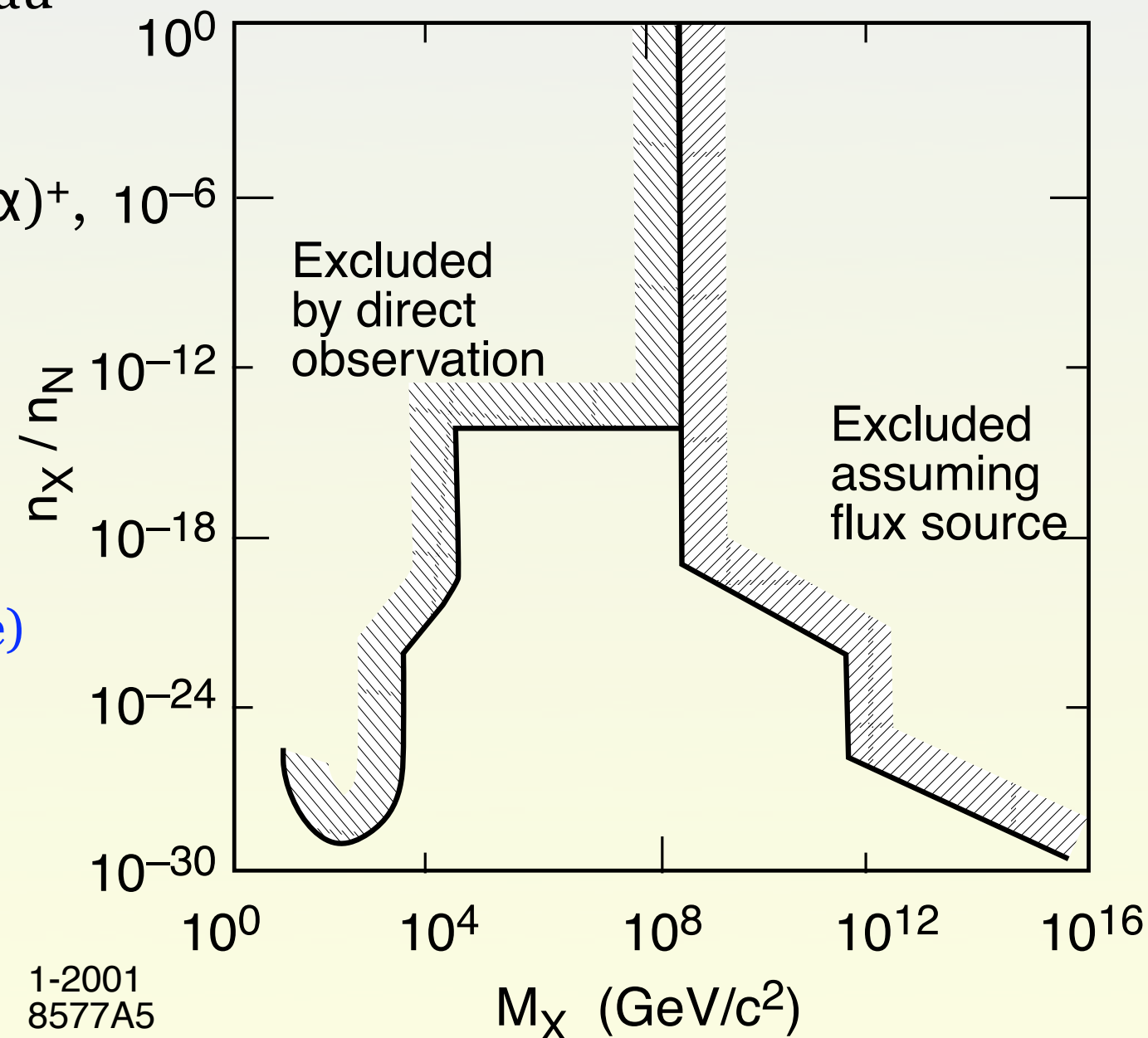
$\rightarrow$  Simp's off!



# Stau $\tilde{\tau}$ LSP ( $\in$ Champs)

- $C^+$  formerait atomes isotope H super-lourd à recombinaison  $\rightarrow$  molécules eau lourde  $HCO$ , à chercher dans océans
- $C^-$  formerait “neutrachamp”  $Cp$  à nucléosynthèse, mais aussi état lié  $(C\alpha)^+$ , similaire à  $C^+$ , moins abondant
- **Conclusion: en-dessous de 100 TeV, densité  $C^+ \ll$  densité MN**
- Au-dessus  $10^8$  GeV, faibles pertes d'énergie dans matière  
 $\rightarrow$  atteignent MACRO (sous 3300 m.w.e)  
 $\rightarrow$  borne sup. flux  
 $\rightarrow$  borne sup. enrichissement surface
- Entre les 2, Verkerk...Fayet: (centrifugation eau de mer)
- **Champs peuvent exister, mais pas DM**
- Dommage: accélérateurs...

“Search for stable massive particles”  
 hep-ex/0102033



# Sneutrino LSP (*€ Wimps*)

- Exclut comme MN:
  - densité relique OK pour masses 550-2300 GeV mais
  - taux de détection directe trop élevé, tout comme neutrino de Dirac

# Kaluza Klein

Bertone et al, hep-ph/0404175

- **Motivations:**
  - nombreuses dimensions supplémentaires compactes inévitables en théorie des cordes (pourquoi 4 non-compactes???)
  - faiblesse: pourquoi rayon compactification  $R \sim 1/\text{TeV}$  ?
- **Stabilité** (pour Univ. Extra-Dims.): cons. impulsion  $p_5 = 2n\pi/R$  empêche LKKP ( $|n| = 1, m = 2\pi/R$ )  $\rightarrow$  standards ( $n_1 = 0, n_2 = 0, \dots$ )
- **Production:** à l'équilibre; densité relique OK pour masses 400-1200 GeV
- **Signatures:** comme Susy, CHAMPS, SIMPS exclus comme MN; seuls WIMPS neutres (e.g. LKKP= $B_1$ ) subsistent. Différences:
  - pas de suppression d'hélicité (pas Majorana) dans  $2B_1 \rightarrow e^+e^-, \bar{\nu}\nu$
  - spectres plus durs
  - plage plus restreinte dans prédiction signaux

# Minimal DM

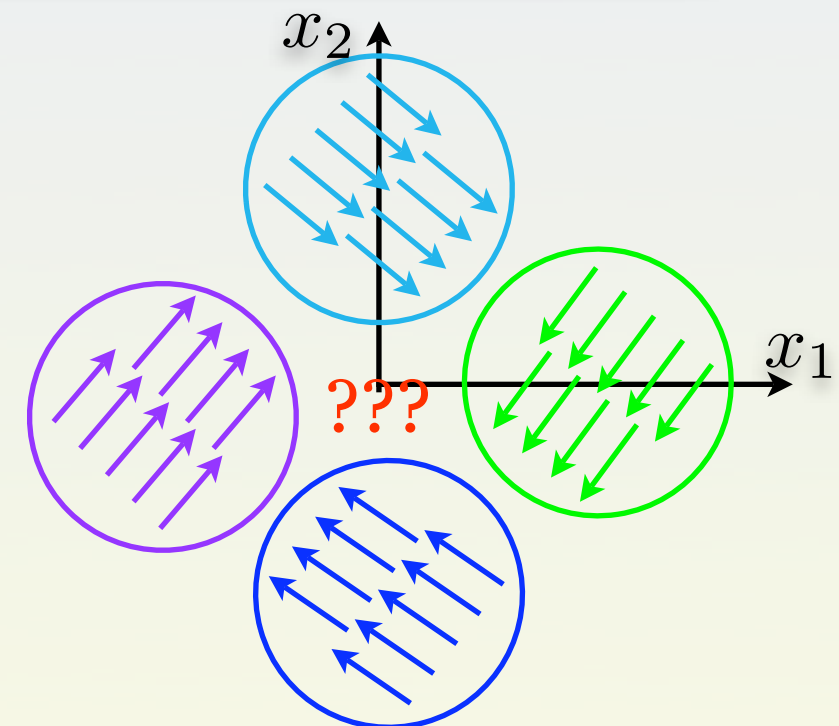
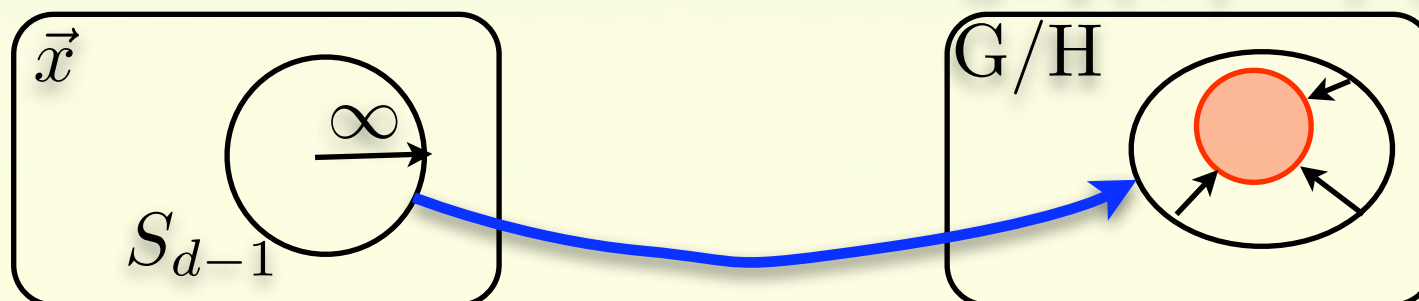
- Motivation: se débarrasser de tous les exotiques sauf le strict minimum (e.g. candidat matière noire)
- Stabilité:
  - Cirelli et al. [ph/0512090](#): MN=représentation assez élevée (5, 7) de SU(2), qui ne peut se désintégrer en # renormalisable de petites repr. (2, 3)
  - Tytgat et al. [ph/0612275](#): MN=2<sup>e</sup> doublet (inerte), protégé par son Z<sub>2</sub> (H<sub>2</sub> → -H<sub>2</sub>)
- Production: thermique OK pour densité relique

# Objets topologiques

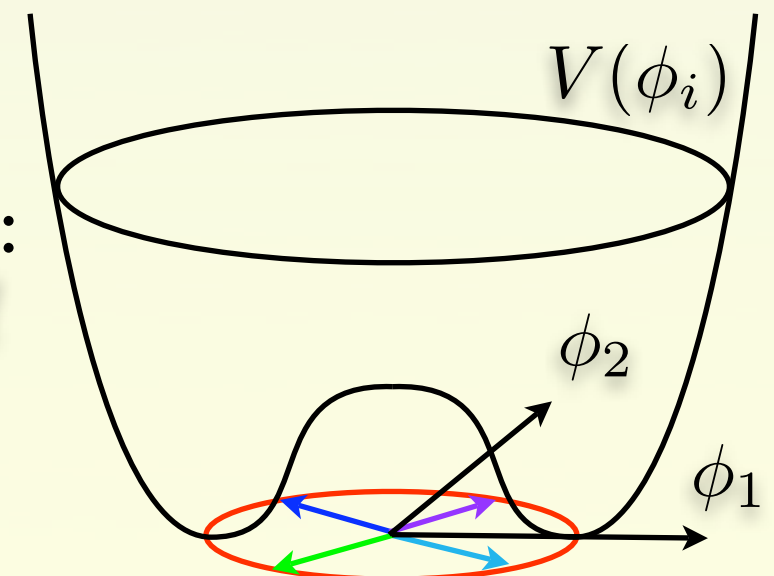
# Défauts topologiques & brisure de symétrie

- Analogie: **vortex** à 2d:
- $G$  = groupe de symétrie ( $SO(2)=U(1)$ )  
 $\downarrow$  brisé en  
 $H$  = groupe de symétrie résiduel (rien= $I$ )  
 $G/H = \{\text{minima possibles}\}$  ( $SO(2)/I = \text{cercle}$ )
- **Défaut ou soliton** = conf. statique d'énergie min.  
 $E(\phi) = \int d^d x \frac{1}{2} (\partial \phi_i(\vec{x}))^2 + V(\phi_i(\vec{x}))$   
 $* (\partial \phi_i(\vec{x}))^2 > 0$  homogénéise  $\phi$   
 $* V(\phi) > 0$  tire  $\phi$  vers  $G/H$ , sauf dans volume fini  
 $\rightarrow \phi(|\vec{x}| \rightarrow \infty) \in G/H$  (sinon  $E = \infty$ )
- Si à l'infini ( $S_{d-1}$ ) on peut déformer le champ en une constante, alors  $E_{\min}=0$ ;
- Sinon,  $E_{\min}>0$ , stabilité vient de "trou" dans  $G/H$ :

$$\Pi_{d-1}(G/H) \neq Id$$



$\downarrow \phi_i(\vec{x})$





# Types de défauts

- **Corde** de Nielsen-Olesen (**supra-cond. II**) = vortex + 1 dim + ch. jauge

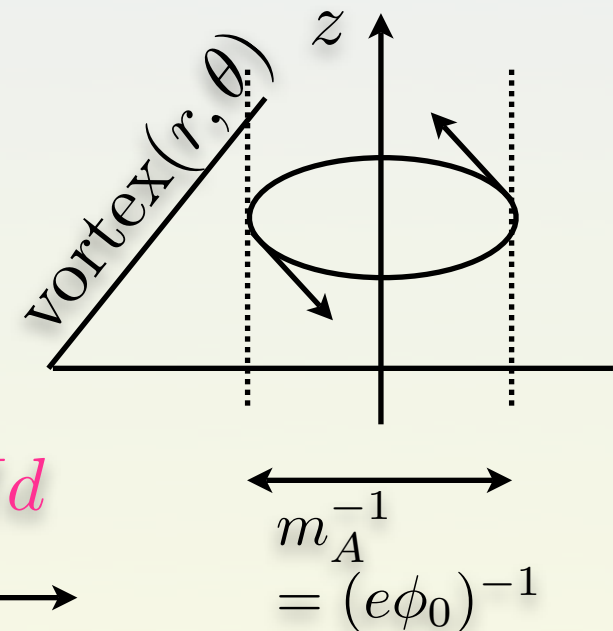
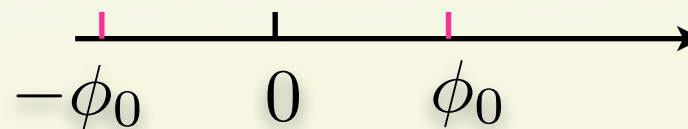
$$E(\phi, \vec{A}) = \int dl d^2x \frac{1}{2} B^2 + |(\vec{\partial} - ie\vec{A})\phi|^2 + V(\phi)$$

Tension:  $\mu = \pi\phi_0^2 \log(e^2/\lambda)$

Stable si  $\Pi_1(G/H) \neq Id$

- **Membrane** (ou 2-brane ou mur de domaine):

stable si brisure symétrie discrète:  $\Pi_0(G/H) \neq Id$



- **Monopoles**: stables si appl. non-triviales de  $S_2$  sur  $G/H$ :  $\Pi_2(G/H) \neq Id$

Ex. 't Hooft-Polyakov:  $G=SU(2) \rightarrow H=U(1)$

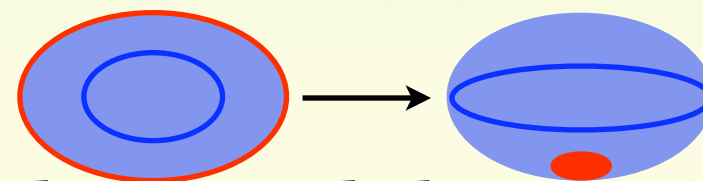
- Charge magnétique:  $q_m = 4\pi/e \rightarrow \alpha_m = 1/\alpha = 137!!!$

- Masse monopole:  $M \sim E_{EM} \sim m_A^{-3} \vec{B}^2 \sim m_A/e^2$

- Rem: si  $\Pi_d(G) = I$ ,  $\Pi_d(G/H) = \Pi_{d-1}(H)/\Pi_{d-1}(G)$

“trou” par identification de **H**:

disque dans  $G \rightarrow$  sphère dans  $G/H$



- Produits hors équil. lors de transition de phase de brisure ( $\sim 1/\text{horizon}$ )

# Brisures en physique des particules

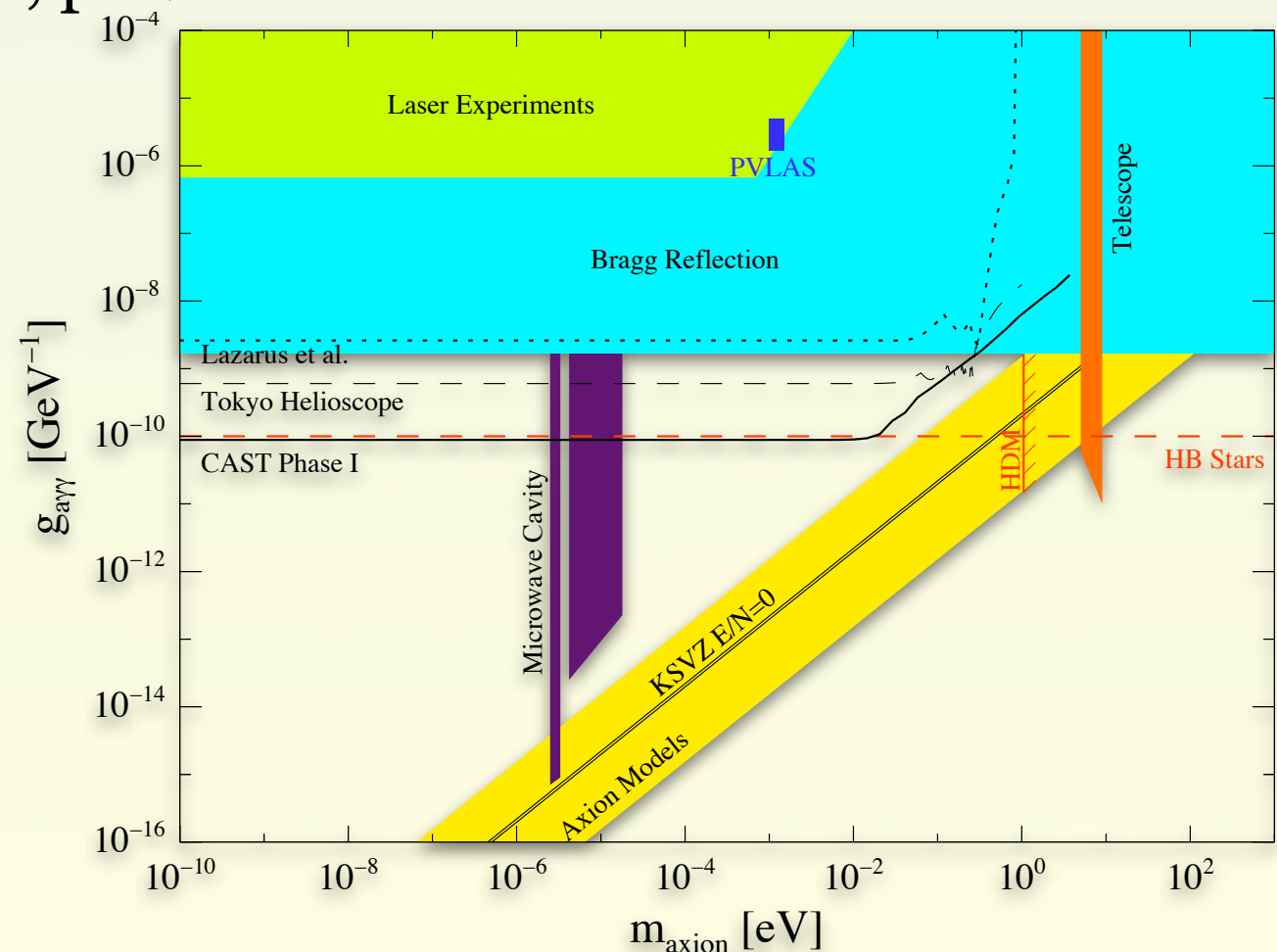
- **Grande Unification**:  $G \rightarrow ??? \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{EM}$  :  $\Pi_2(G/H) = \Pi_1(U(1)) = Z$   
**Monopoles** sont **inévitables!!!** Quelque soit le chemin d'unification!!!
  - Masse du monopole = échelle de dernière brisure
  - Brisure directe: masse  $10^{16}$  GeV; au centre du monopole, lepto-quarks légers  $\rightarrow$  désintégration du proton non-supprimée
  - Production de monopoles  $\Omega_M \approx 10^{11} (T_c/10^{14} \text{ GeV}) (m_M/10^{16} \text{ GeV})$   
**Inflation** nécessaire!!! Recherche limites sup. sur flux [hep-ex/070205](#)
- Groupe intermédiaire (p.ex.  $SU(2)_L \times SU(2)_R$ ) brisé à  $10^{7-10}$  GeV; monopoles de masse intermédiaire (IMM):
  - peuvent être produits (hors équilibre, après inflation)
  - peuvent être accélérés dans domaines magn. galactiques (UHECR?)
- $G = SO(10) \rightarrow SU(5)_{GUT} \times U(1)_{B-L} \rightarrow$ 
  - Brisure  $U(1)_{B-L}$  donne cordes cosmiques
  - ancienne source de structure grde échelle, démentie WMAP...(**inflation**)
- $G = P$  ou  $CP$ 
  - murs de domaines: dominant rapidement densité critique (**inflation**)



# Objets légers

# Axion

- **Motivation:** résolution naturelle du pb. CP fort  $\theta_{QCD} < 10^{-10}$  dans  
 $\mathcal{L}_{QCD} = \dots + \theta F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = \dots + \theta \vec{E} \cdot \vec{B}$  par  $\theta = \langle a \rangle / V_{PQ}$   
 (vev champ d'axion)
  - se translate sous nouvel  $U(1)_{PQ}$ , spontanément brisé
  - axion=boson de Goldstone  $U(1)_{PQ}$
  - brisure explicite par masse quarks  $\rightarrow$  axion massif  $m_a \sim m_\pi f_\pi / V_{PQ} \sim g_{a\gamma\gamma}$
  - si un quark (p.ex. u) de masse nulle, problème résolu **sans axion**
- **Stabilité:**  $\Gamma \sim H_0 (m_a / 10 \text{ eV})^5$
- **Production:** hors équilibre
- **Signatures:** candidat matière noire
  - interactions avec photons (soleil, refr. SN,...)
  - effet Laser (PVLAS, non confirmé)  
[Battesti et al, 0705.0615](#)



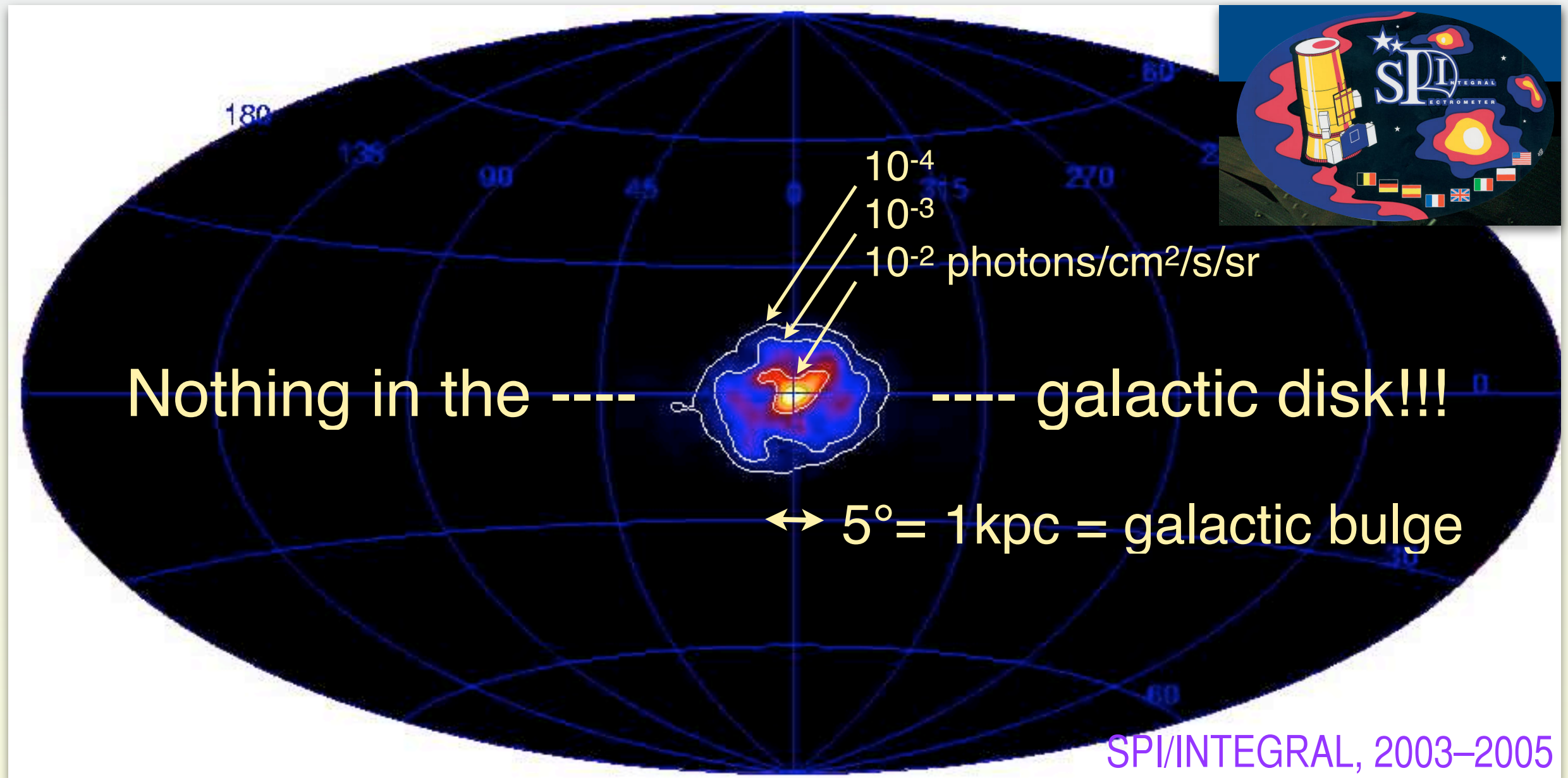
# Gravitino LSP

- **Motivation:** LSP très naturel (dans cadre Susy)
- **Stabilité:** R-parité usuelle
- **Production:** hors équilibre après inflation, ou decay NLSP (calculable)
- **Signatures:** aucune, sauf permettre decay tardif NLSP ([aide BBN Li](#))

# Matière Noire légère

- **Motivations:**
  - théorique faible (anti-unification!)
  - purement phénoménologique (pas interdit)
- **Stabilité:** vient de la légèreté ( $<$  masse du pion...), et symétrie
- **Production:** à l'équilibre (mais via canal ad-hoc U)
- **Signatures:**
  - détection directe difficile!
  - indirecte: positrons et photons

# $\gamma$ 's 511 keV du Centre Galactique



- 1.6 10<sup>-3</sup> photons/cm<sup>2</sup>/s du bulbe, avec energie 511±1 keV
- ⇒ positronium au repos s'annihilent en 2 photons

**D'où viennent ces positrons???** Pas loin!!! (s'arrêtent en 1 pc)

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?



# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae)  
plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae)  
plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae) plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)
- Signal stationnaire diffus demande au moins 8(?) sources ponctuelles stables(?)

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae) plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)
- Signal stationnaire diffus demande au moins 8(?) sources ponctuelles stables(?)

Alors que la densité de Matière Noire:

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae) plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)
- Signal stationnaire diffus demande au moins 8(?) sources ponctuelles stables(?)

Alors que la densité de Matière Noire:

- doit augmenter dans le bulbe, et donnerait un signal stationnaire et diffus



# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae) plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)
- Signal stationnaire diffus demande au moins 8(?) sources ponctuelles stables(?)

Alors que la densité de Matière Noire:

- doit augmenter dans le bulbe, et donnerait un signal stationnaire et diffus
- colle à profil raisonnable:  $\rho_{NFW}(r) \sim 1/r$  (Ascasibar a-ph/0507142)

# Ces $e^+$ sont-ils “Noirs”?

*“Found a 0.5 MeV radiation excess?  
Do your Nuclear Physics right!”*

Mais:

- Sources astrophysiques potentielles (e.g. hypernovae) plus fréquentes dans le disque que dans le bulbe
- Sources  $e^+$  connues sont aussi des émetteurs gammas intenses (pas vu)
- Signal stationnaire diffus demande au moins 8(?) sources ponctuelles stables(?)

Alors que la densité de Matière Noire:

- doit augmenter dans le bulbe, et donnerait un signal stationnaire et diffus
- colle à profil raisonnable:  $\rho_{NFW}(r) \sim 1/r$  (Ascasibar a-ph/0507142)
- mais demande **à la fois** un nouveau scalaire léger (dm),  
des fermions lourds F (pour signal  $e^+$ )  
et boson de jauge U (dim. densité relique)

$$\sigma v \sim C^4 m_F^{-2}$$

$$\sigma v \sim v^2 q_{Udm}^2 q_{Ue}^2 m_{dm}^2 / m_U^4$$

avec: 
$$\begin{cases} m_F > 100 \text{ GeV} \\ m_{dm} \sim 1 \rightarrow 100 \text{ MeV} < m_U \\ q_{dmU} q_{eU} \sim 10^{-6} \text{ (for } m_U \sim m_{dm}) \end{cases}$$

# Fenêtre MN légère

# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{\text{dm}}$ :

# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{\text{dm}}$ :
  - FSR:  $\phi_{\text{cont}}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{\text{obs.}}(.5 \rightarrow 5 \text{MeV})$   
→  $m_{\text{dm}} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
ou  $m_{\text{dm}} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)

# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{dm}$ :
  - FSR:  $\phi_{cont}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{obs.}(.5 \rightarrow 5 MeV)$   
→  $m_{dm} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
ou  $m_{dm} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum →  $m_{dm} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum →  $m_{dm} < 20 \text{ MeV}$



# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{dm}$ :
  - FSR:  $\phi_{cont}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{obs.}(.5 \rightarrow 5 MeV)$   
 $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
ou  $m_{dm} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum  $\rightarrow m_{dm} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum  $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$
- Limite inférieure sur  $m_{dm}$ :

# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{\text{dm}}$ :
  - FSR:  $\phi_{\text{cont}}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{\text{obs.}}(.5 \rightarrow 5 \text{MeV})$   
 $\rightarrow m_{\text{dm}} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
ou  $m_{\text{dm}} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum  $\rightarrow m_{\text{dm}} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum  $\rightarrow m_{\text{dm}} < 20 \text{ MeV}$
- Limite inférieure sur  $m_{\text{dm}}$ :
  - Nucléosynthèse perturbée par annihilations  $\rightarrow m_{\text{dm}} > 2 \text{ MeV}$   
(Serpico, Raffelt, a-ph/0403417)

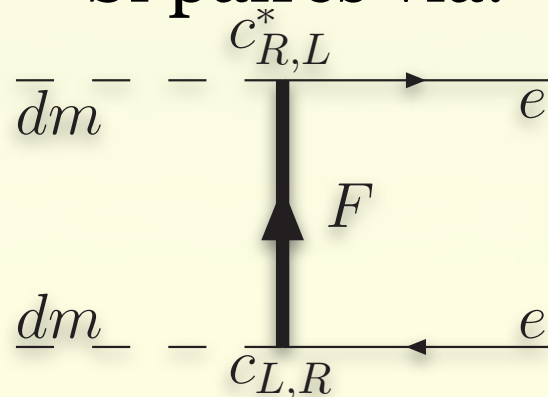
# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{\text{dm}}$ :
  - FSR:  $\phi_{\text{cont}}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{\text{obs.}}(.5 \rightarrow 5 \text{MeV})$   
 $\rightarrow m_{\text{dm}} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
ou  $m_{\text{dm}} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum  $\rightarrow m_{\text{dm}} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum  $\rightarrow m_{\text{dm}} < 20 \text{ MeV}$
- Limite inférieure sur  $m_{\text{dm}}$ :
  - Nucléosynthèse perturbée par annihilations  $\rightarrow m_{\text{dm}} > 2 \text{ MeV}$   
(Serpico, Raffelt, a-ph/0403417)
  - Neutrinos rendent SN1987A trop froide (Fayet, Sigl, hep-ph/0602169)  
 $\rightarrow m_{\text{dm}} > 10 \text{ MeV}$  si couplage sign. avec neutrinos (pas obligé)

# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{dm}$ :
  - FSR:  $\phi_{cont}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{obs.}(.5 \rightarrow 5 MeV)$   
 $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
 ou  $m_{dm} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum  $\rightarrow m_{dm} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum  $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$
- Limite inférieure sur  $m_{dm}$ :
  - Nucléosynthèse perturbée par annihilations  $\rightarrow m_{dm} > 2 \text{ MeV}$   
 (Serpico, Raffelt, a-ph/0403417)
  - Neutrinos rendent SN1987A trop froide (Fayet, Sigl, hep-ph/0602169)  
 $\rightarrow m_{dm} > 10 \text{ MeV}$  si couplage sign. avec neutrinos (pas obligé)
- Comment recouper ce signal  $e^+$  ?

Si paires via:

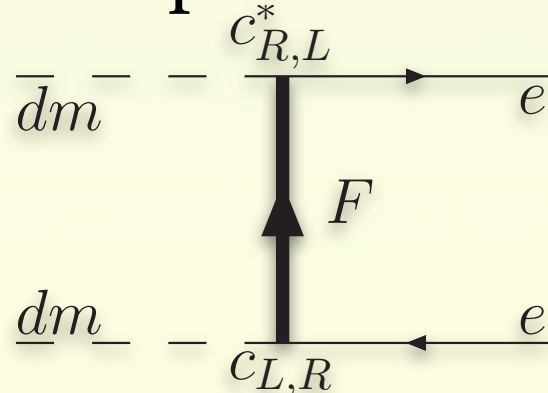




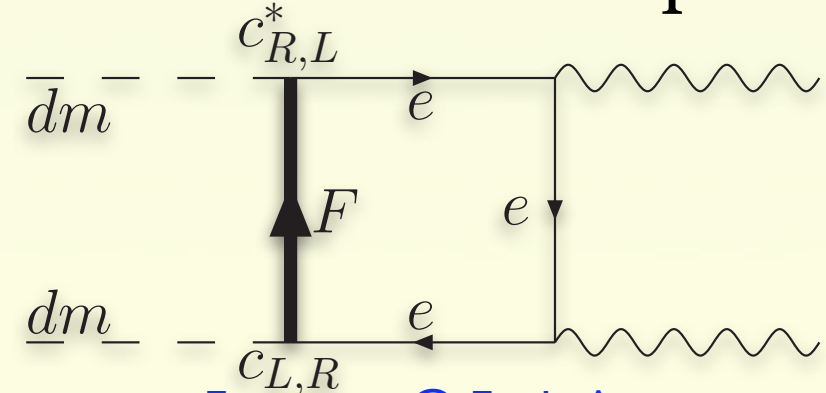
# Fenêtre MN légère

- Limite supérieure  $m_{dm}$ :
  - FSR:  $\phi_{cont}^{\gamma}(dm + dm \rightarrow e^+ e^- \gamma) > \phi_{obs.}(.5 \rightarrow 5 MeV)$   
 $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0409403)  
 ou  $m_{dm} < 35 \text{ MeV}$  avec bonne sect. eff. (Boehm, hep-ph/0606058)
  - Annihilation en vol: qqes  $e^+$  s'annihilent avant de s'arrêter, dépassant
    - barres d'erreur(???) sur continuum  $\rightarrow m_{dm} < 3 \text{ MeV}$  (Beacom, a-ph/0512411),
    - continuum continuum  $\rightarrow m_{dm} < 20 \text{ MeV}$
- Limite inférieure sur  $m_{dm}$ :
  - Nucléosynthèse perturbée par annihilations  $\rightarrow m_{dm} > 2 \text{ MeV}$   
 (Serpico, Raffelt, a-ph/0403417)
  - Neutrinos rendent SN1987A trop froide (Fayet, Sigl, hep-ph/0602169)  
 $\rightarrow m_{dm} > 10 \text{ MeV}$  si couplage sign. avec neutrinos (pas obligé)
- Comment recouper ce signal  $e^+$  ?

Si paires via:



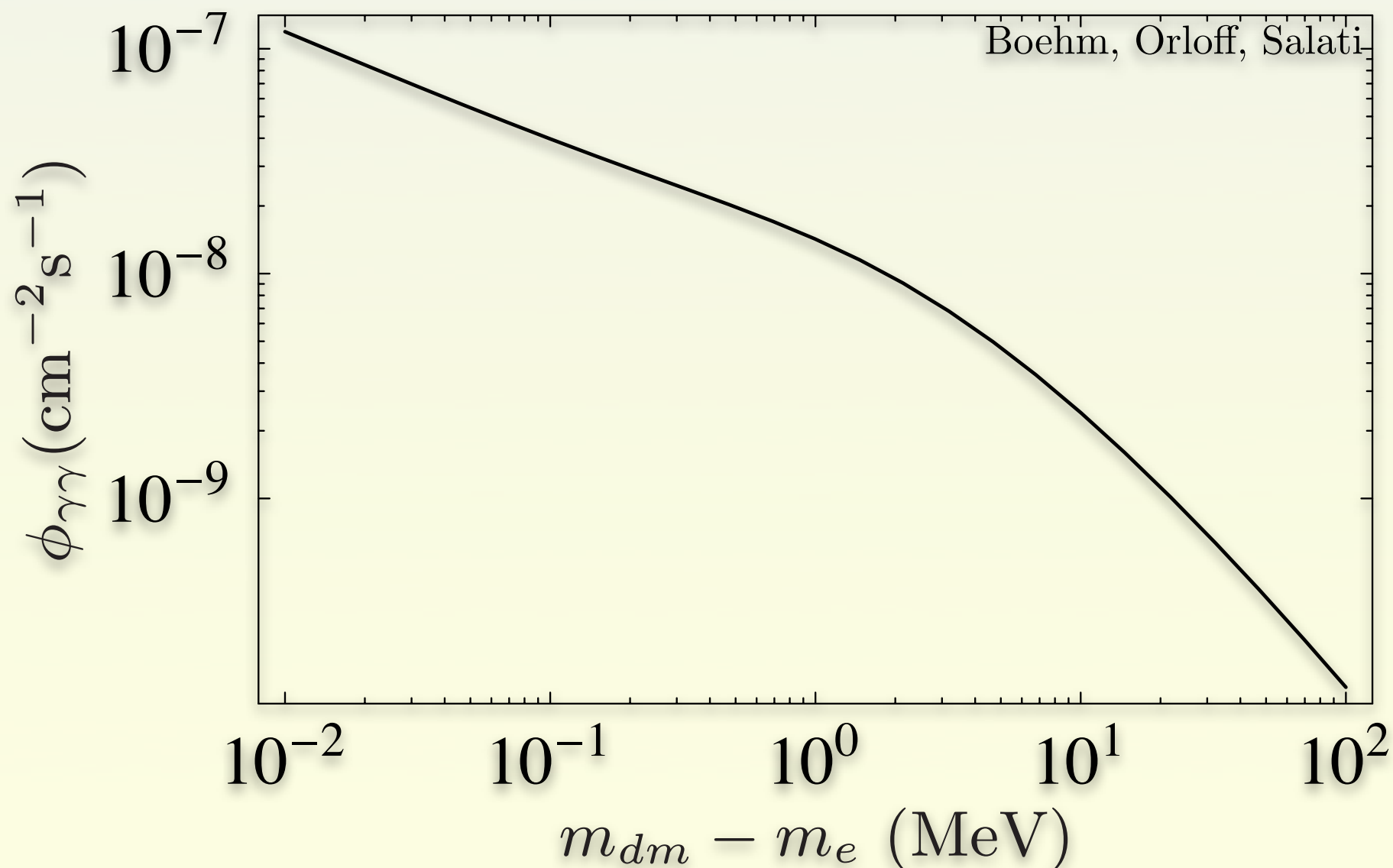
Alors gammas monochromatiques via:



# Détectabilité ligne $\gamma$

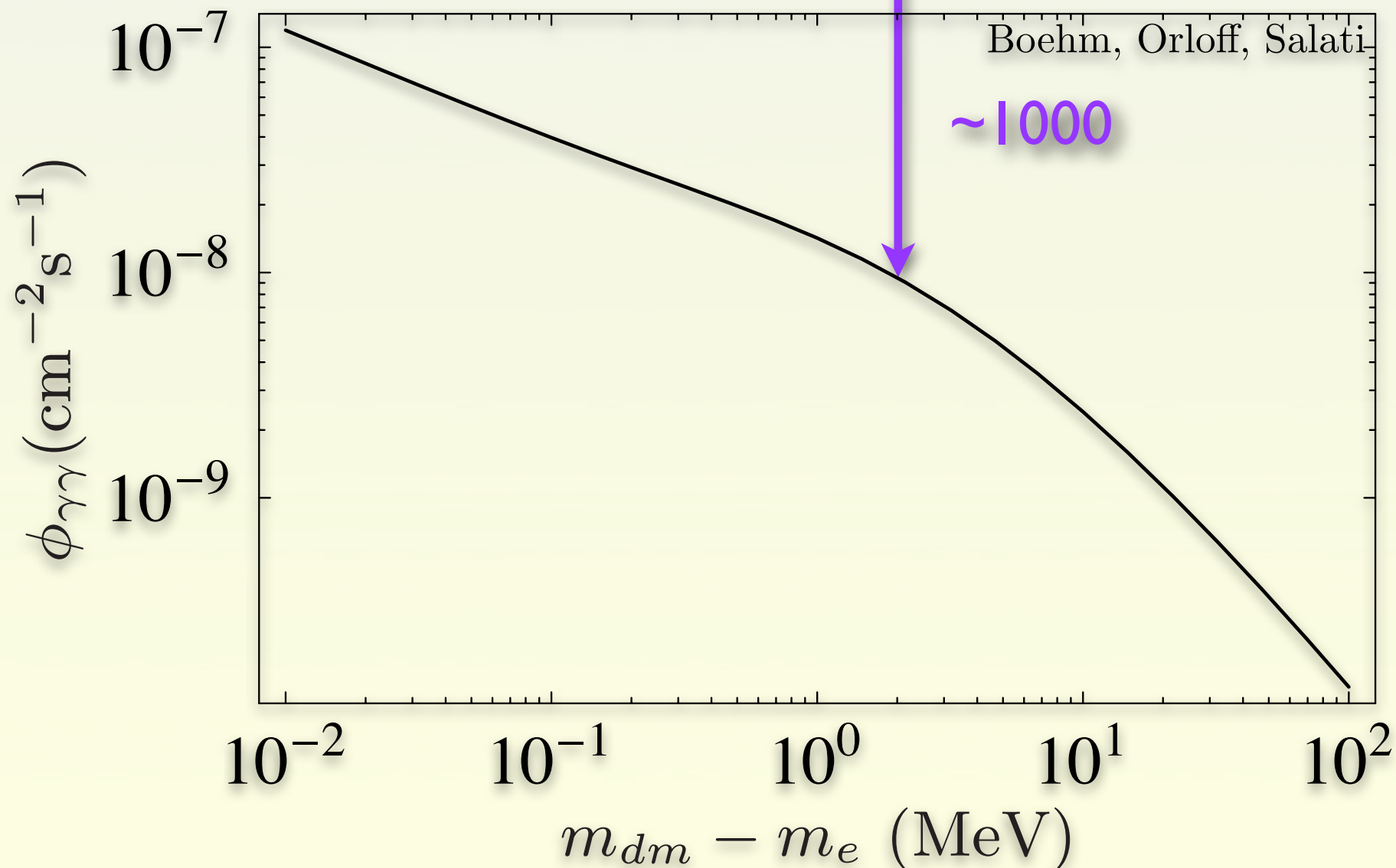
# Détectabilité ligne $\gamma$

- Flux entièrement fixé par masse; sensibilité SPI à lignes étroites pour source ponctuelle:  $2.5 \cdot 10^{-5}$  photons/cm<sup>2</sup>/s, en  $10^6$  s à 2MeV



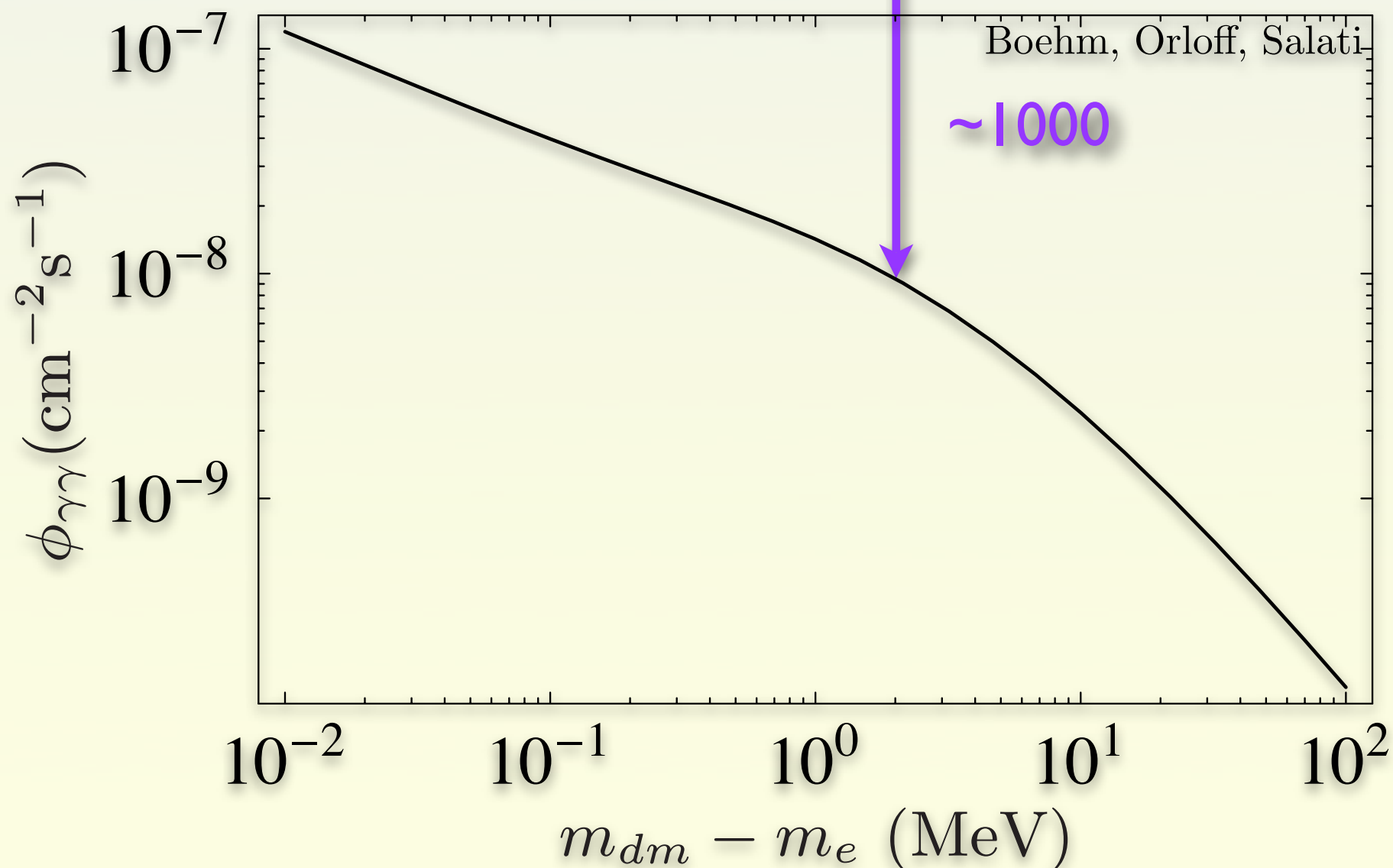
# Détectabilité ligne $\gamma$

- Flux entièrement fixé par masse; sensibilité SPI à lignes étroites pour source ponctuelle:  $2.5 \cdot 10^{-5}$  photons/cm<sup>2</sup>/s, en  $10^6$  s à 2MeV
- Signal 1000 fois + faible, au mieux: attendre 30 ans????



# Détectabilité ligne $\gamma$

- Flux entièrement fixé par masse; sensibilité SPI à lignes étroites pour source ponctuelle:  $2.5 \cdot 10^{-5}$  photons/cm<sup>2</sup>/s, en  $10^6$  s à 2MeV
- Signal 1000 fois + faible, au mieux: attendre 30 ans????
- On pourrait gagner en résolution en énergie, ou surface...





# Objets lourds

# Wimpzillas=Super Heavy DM

- **Motivations:** produire contre-exemple à limite d'unitarité perturbative si équilibre  $\langle \sigma v \rangle \sim \alpha^2 / M_X^2 \sim \Omega^{-1} > 1$ ;  $\alpha < 4\pi \rightarrow M_X < 10^5 \text{ GeV}$
- **Stabilité:** ad-hoc
- **Production:**
  - HORS équilibre
  - Après inflation
  - p.ex. durant le reheating en sortie d'inflation (très faible densité suffit,  $\ll$  équilibre...), on peut produire jusqu'à  $M_X = 10^4 T_{\text{RH}}$
  - sinon **pre-heating** (couplage résonnant inflaton-X) permet d'atteindre  $10^{15} \text{ GeV}$
- **Signatures:** difficiles (rares!)
  - limites Champs/monopoles s'appliquent (si chargés!)

# Neutrinos droits

- **Motivation:** masse neutrinos faibles ( $\ll$  quarks, leptons)
  - ajustement très fin si masse Dirac
  - besoin violation L pour masse Majorana  
mécanisme bascule (see-saw):
  - “modèle standard baryogénèse”=leptogénèse:
    - désintégration N donne asymétrie leptonique
    - transférée au quarks par processus anomaux (du MS)
- **Stabilité:** aucune; couplages yukawas  $N \rightarrow \nu h$
- **Production:** à l'équilibre, parfois pre-heating
- **Signatures:** rien (à part asymétrie baryonique...)

# Effet collectifs

# Q-balls

- **Motivations:** alternative intéressante
- **Stabilité:** liée à charge
  - si boule de masse  $M$ , charge  $Q$ , avec (non-ext.):  $M(Q) = M_0 Q^\alpha$ ;  $\alpha < 1$
  - alors stabilisation par charge conservée  $M(Q_1 + Q_2) < M(Q_1) + M(Q_2)$   
dès que assez grosse:  $Q^{1-\alpha} > \frac{q}{m} M_0$
- **Production:** hors équilibre
- **Signatures:**
  - assez extravagantes
  - tombe peut-être sous le coup de SIMP (si contient quarks)...



# Résumé

Candidat	Motiv.	Stab.	Prod.	Intérêt
Wimp Susy, KK	Th!!!	Sym.	Equ.	MN++++
Simp, Champ	“	“	“	Exclus MN
Monopoles	“	Top.	H-eq.	Masses intermédiaires
Cordes, domaines	bof	“	“	Faible ou négatif
Axion	+/-	lent	H-eq.	MN, non exclus
Gravitino	+++	Sym.	H-eq.	Peu de signaux
Matière noire légère	ad-hoc	OK	Equ.	Demande confirmation
Wimpzillas	c-ex	ad-hoc	H-eq.	Bof
Neutrinos droits	+++	non	Equ.	OK
Q-balls	?	++	H-eq.	A garder à l'esprit