

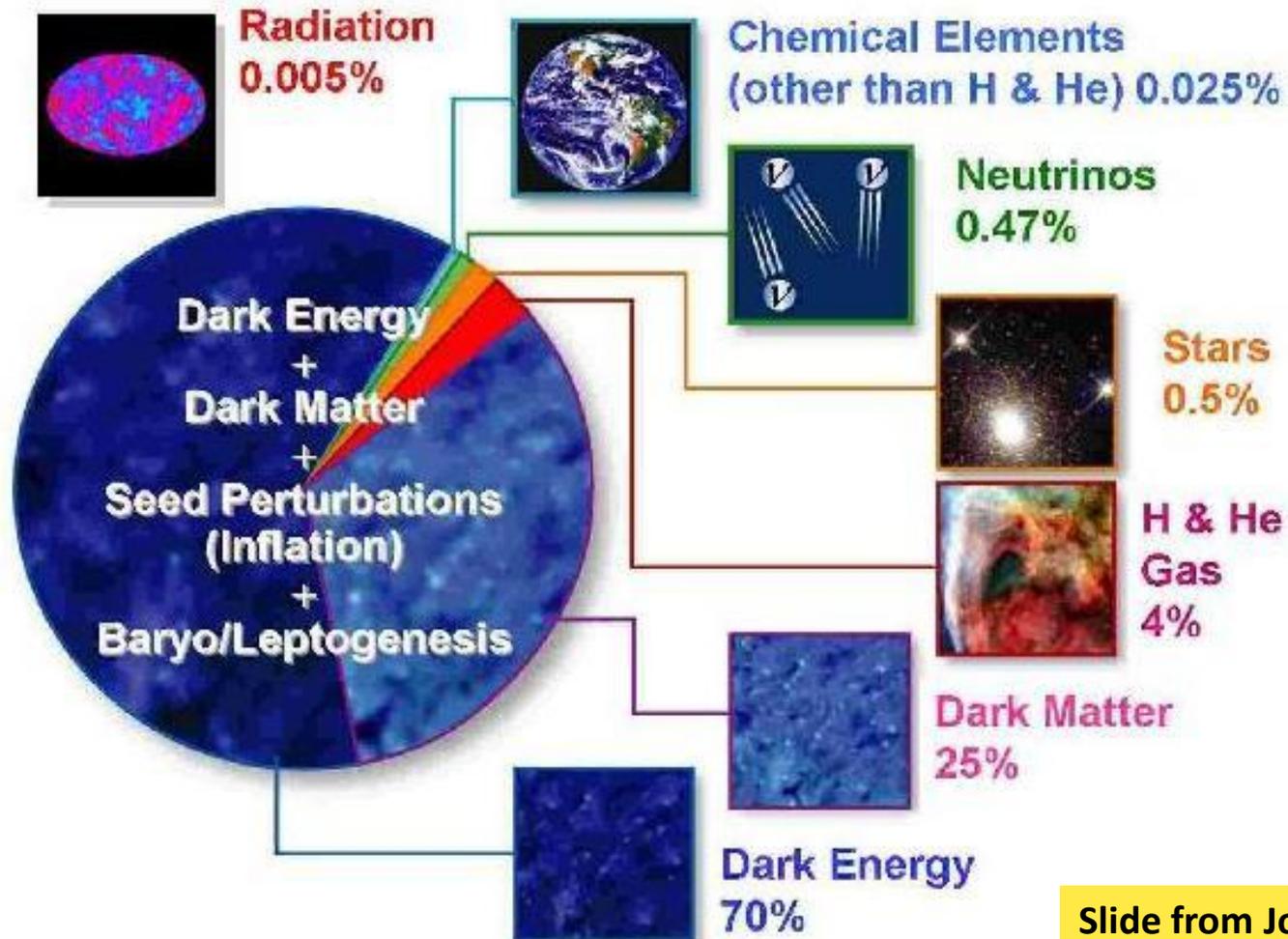
# Comment caller l'original super-sombre dans une vallée cachée



1. Anomalies observée
2. Nouvelle théorie pour la matière noire
3. Signatures dans différents collisionneurs

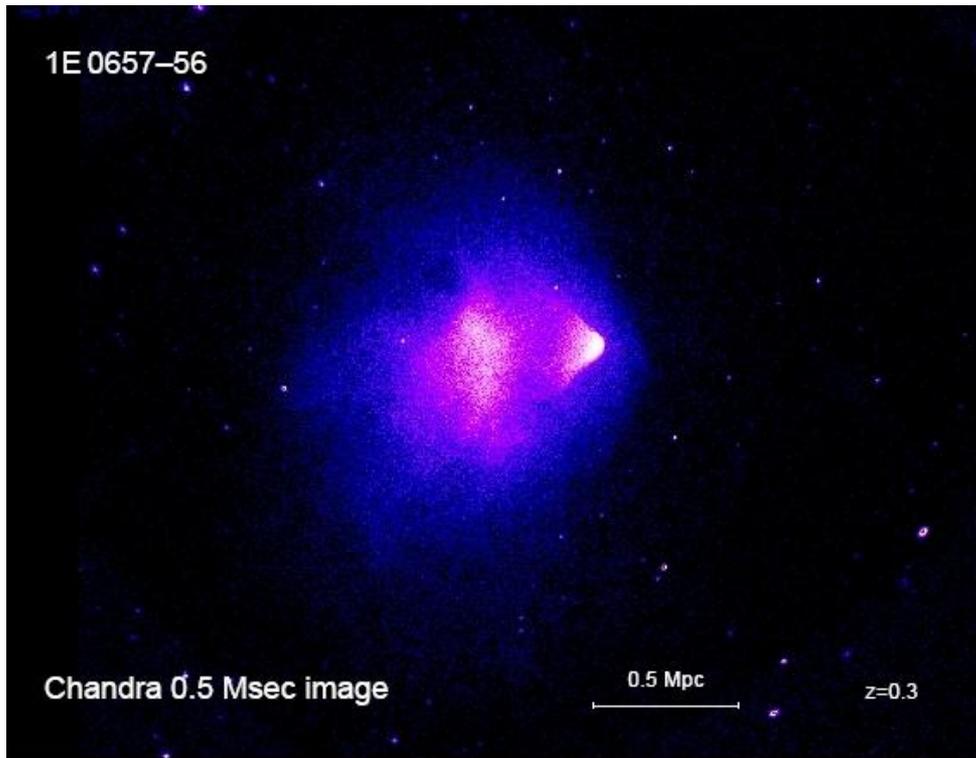
**Pauline Gagnon, Indiana University**

# Y a-t-il plus que le Modèle Standard? Oui, et la matière noire en est la preuve



Slide from John Ellis

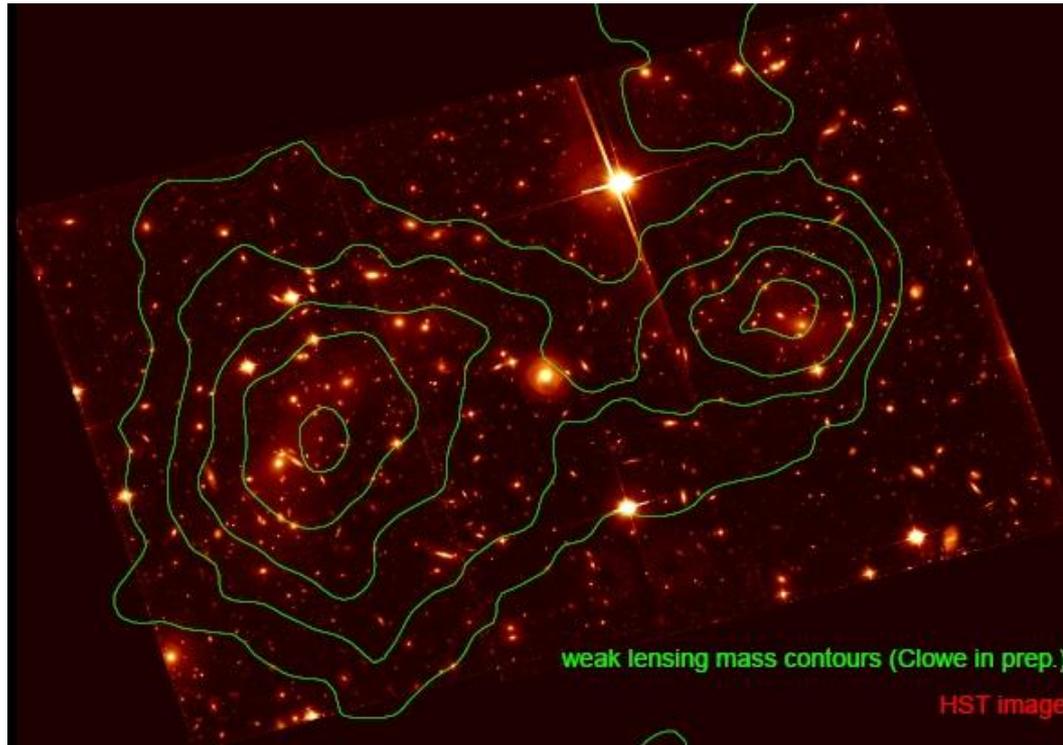
# Preuve de l'existence de la matière cachée: “the bullet cluster”



Temps d'exposition: 140 heures!  
Cette photo fait 1.6 années-lumière de large

- Photo d'une collision entre deux galaxies
- Ce qui interagit, c'est le matériel intergalactique (gaz)
- Ça chauffe à  $160 \times 10^6$  °C et émet des rayons X
- Ce qu'on voit c'est l'intensité des rayons X émis

# La matière cachée peut être vue grâce à l'effet de lentille gravitationnelle



- Voici le même évènement tel que vu par Hubble via “gravitational lensing”
- La matière noire de chaque amas galactique passe à travers l'autre sans interagir
- On voit ici les contours du champ gravitationnel causé par la matière noire

# La matière noire est bien là mais elle interagit que très faiblement



Le gaz intergalactique lui interagit pendant que la matière noire poursuit son chemin

Les centres de gravité associés à la matière visible et à la matière noire ne coïncident pas

Mais qu'est donc cette matière  
noire?

Pourrait-elle se cacher derrière une  
série d'anomalies observées ces  
dernières années?

# On a dénombré six observations anormales et inexpliquées en astrophysique

## Anomalies à hautes énergies

1. PAMELA/HEAT
2. ATIC
3. WMAP haze
4. EGRET

## Anomalies à basses énergies

1. INTEGRAL
2. DAMA/LIBRA

# 1. L'observation de PAMELA/HEAT:

(**PAMELA**: Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)

- Flux anormal de positrons dans les rayons cosmiques  $\phi_{e^+} / (\phi_{e^+} + \phi_{e^-})$  à haute énergie
- première observation par HEAT; confirmé par PAMELA
- rien de tel pour les protons
- pourrait venir de pulsars, ou rayons cosmiques interagissant avec le matériel intergalactique etc.

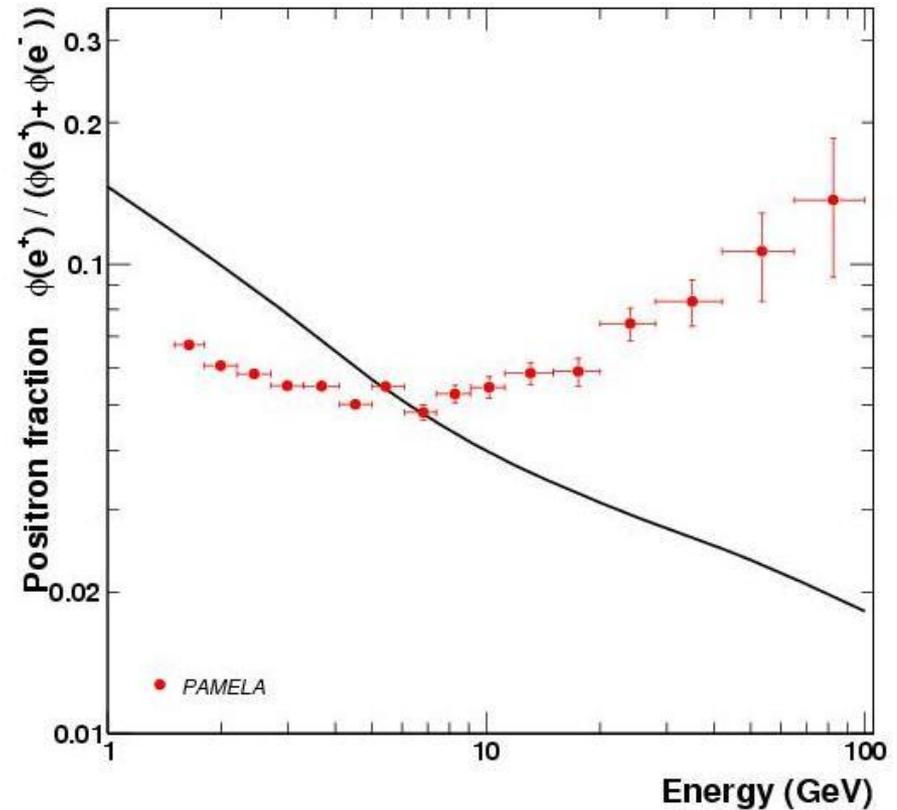
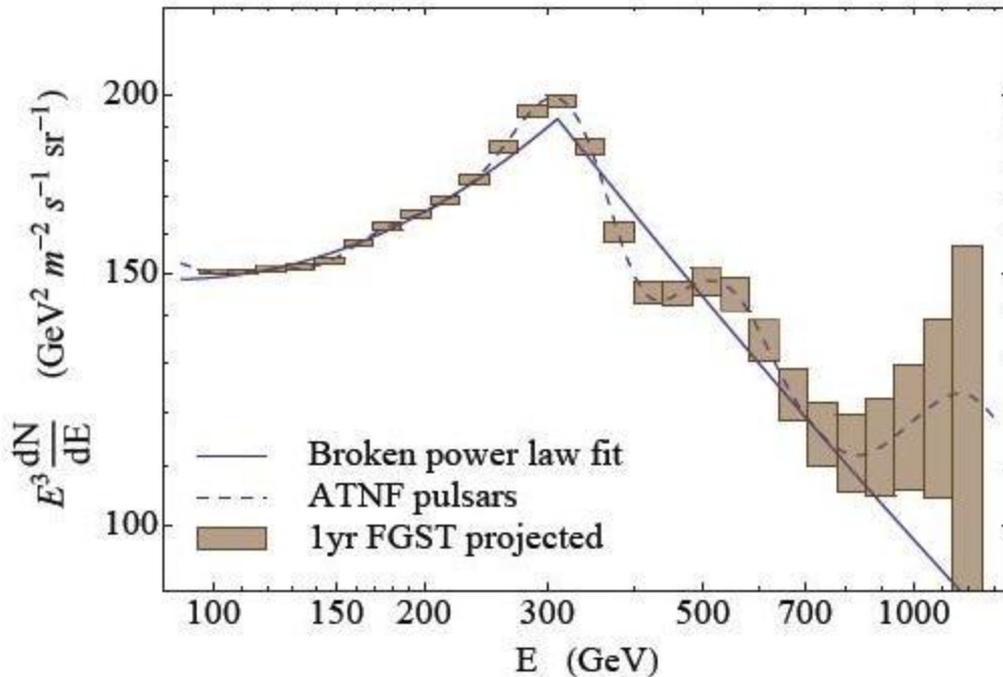


FIG. 4: **PAMELA positron fraction with theoretical models.** The PAMELA positron fraction compared with theoretical model. The solid line shows a calculation by Moskalenko & Strong[39] for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic-rays in the galaxy. One standard deviation error bars are shown. If not visible, they lie inside the data points.

# Pulsar or Dark Matter?

## Fermi may tell



ATNF: catalog of all known pulsars

- Flux venant de pulsars est caractérisé par des paliers
- Matière noire donnerait un spectre suivant une loi exponentielle
- Malyshev, Cholis & Gelfand ont suggéré que Fermi pourrait faire la différence (arXiv:0903.1310)

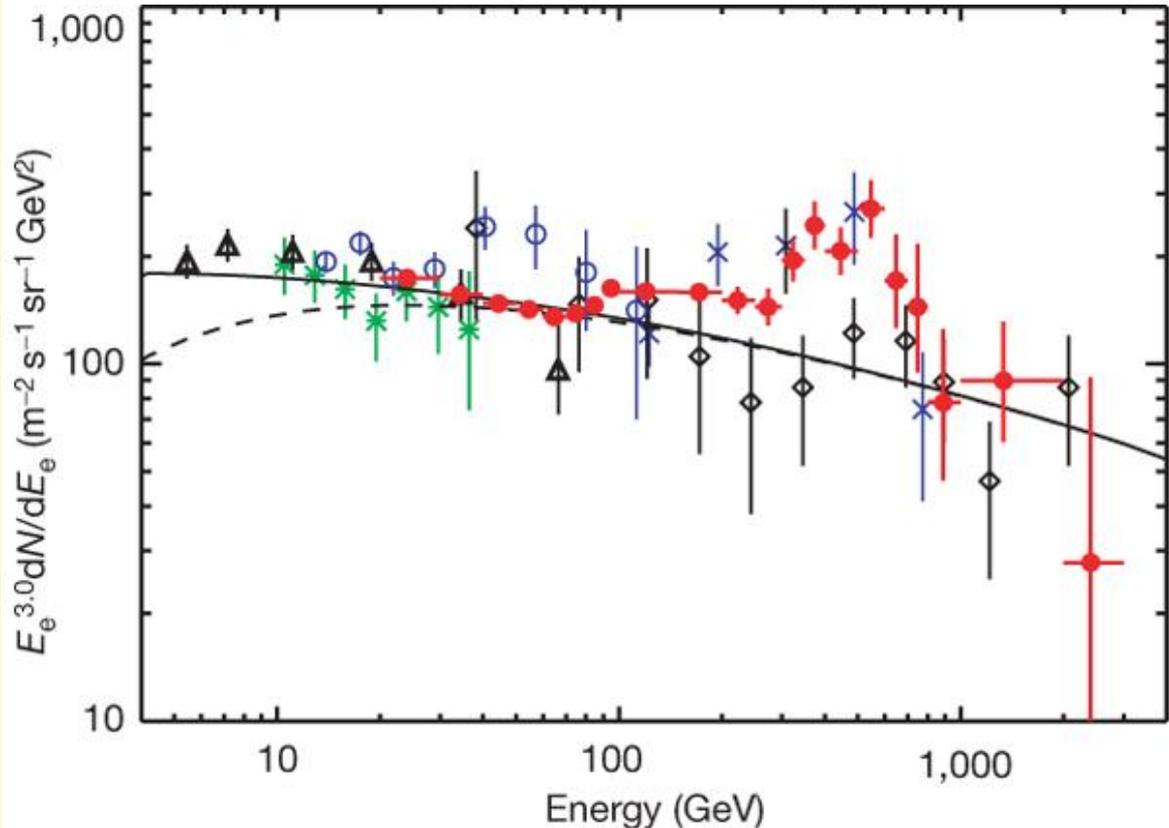
# •2. L'anomalie d'ATIC:

(ATIC: Advanced Thin Ionization Calorimeter; balloon experiment above Antarctica)

excès dans le spectre de rayons cosmiques pour les électrons entre 300-800 GeV

FERMI présentera sous peu ses résultats pour confirmer ou non cette observation

- ATIC
- BETS
- ✕ AMS
- ✕ PPB-BETS
- △ HEAT
- ◇ emulsion chambers
- power-law spectrum
- with solar modulation

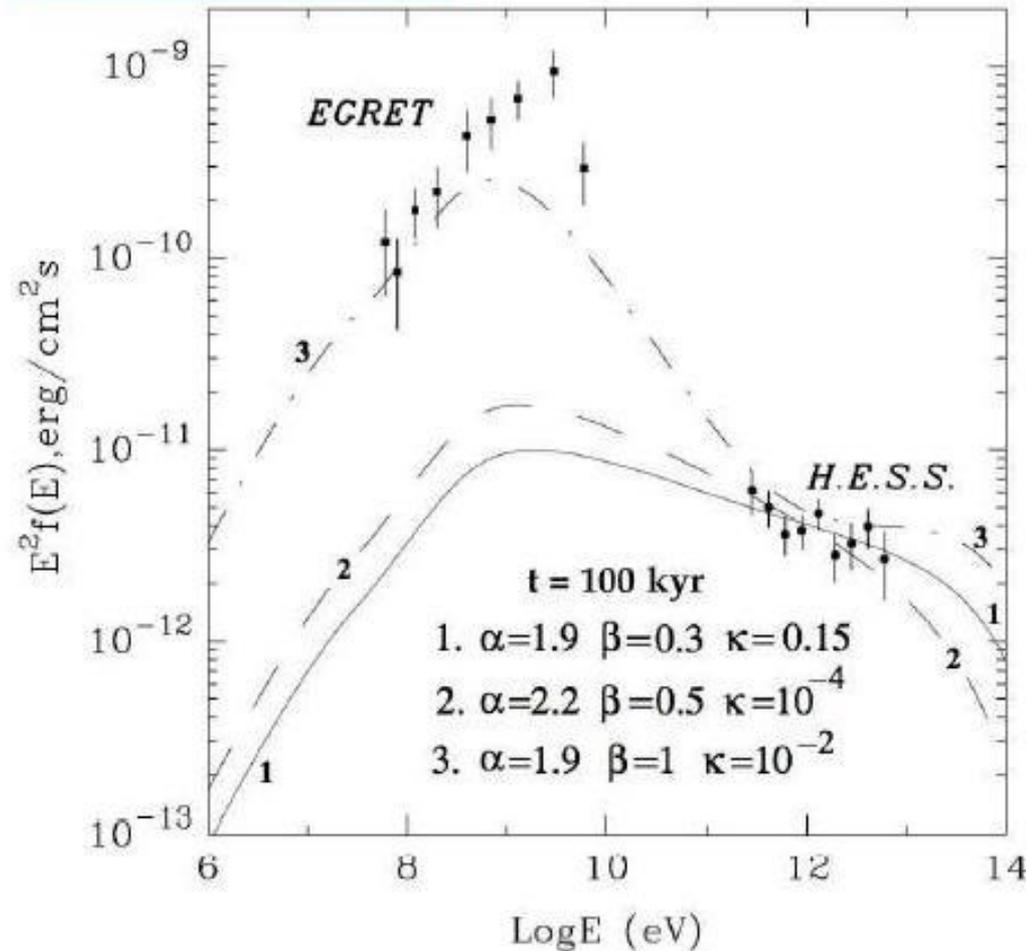


Nature 456, 362-365 (2008)

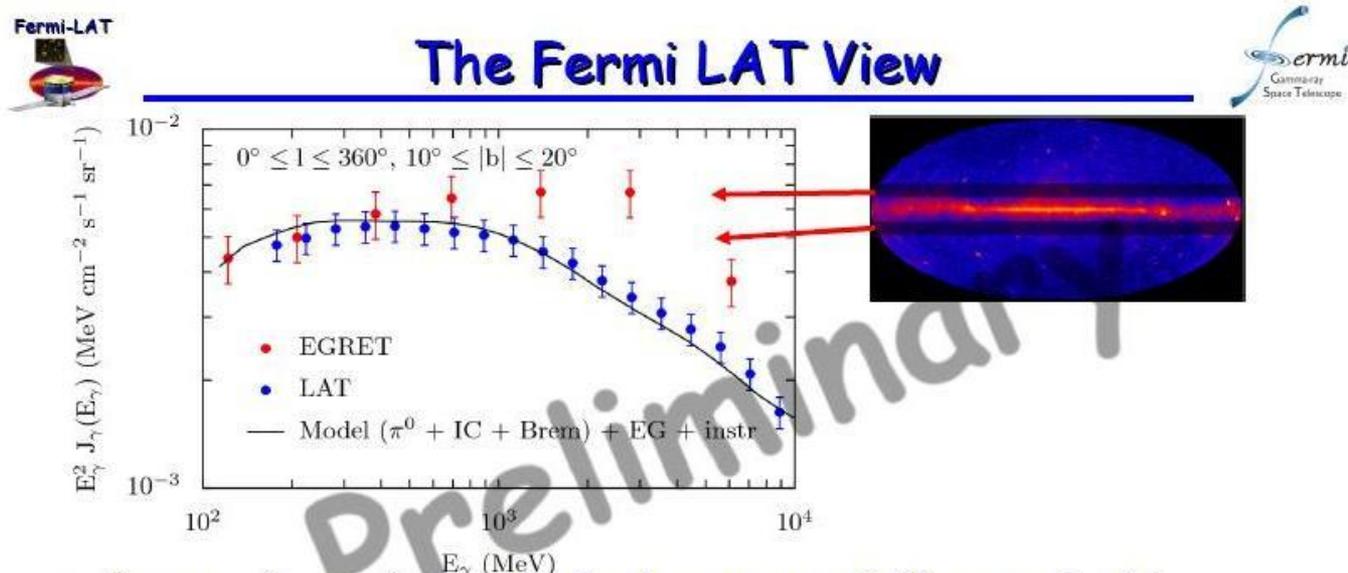
### 3. EGRET:

- Mesure des rayons cosmiques venant du centre de la galaxie; excès vu entre 10-50 GeV
- Le nouveau satellite FERMI recueillera autant de données en un an seulement et 25 fois plus au total
- FERMI fut lancé en juin 2008
- Premiers résultats présentés à Moriond en mars

Aharonian-Neromov 2006

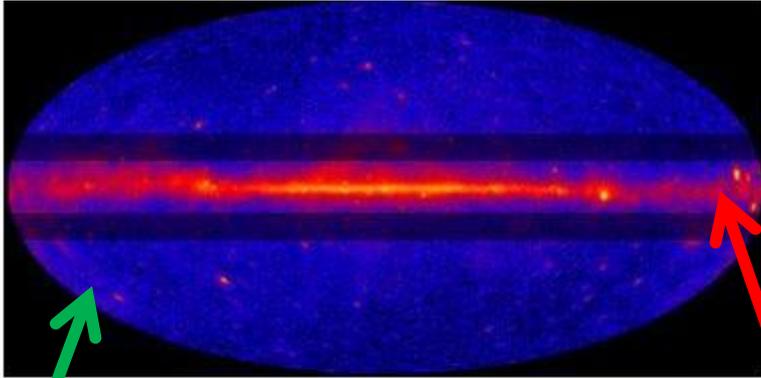


# Premiers résultats de Fermi: l'excès d'EGRET n'est pas confirmé

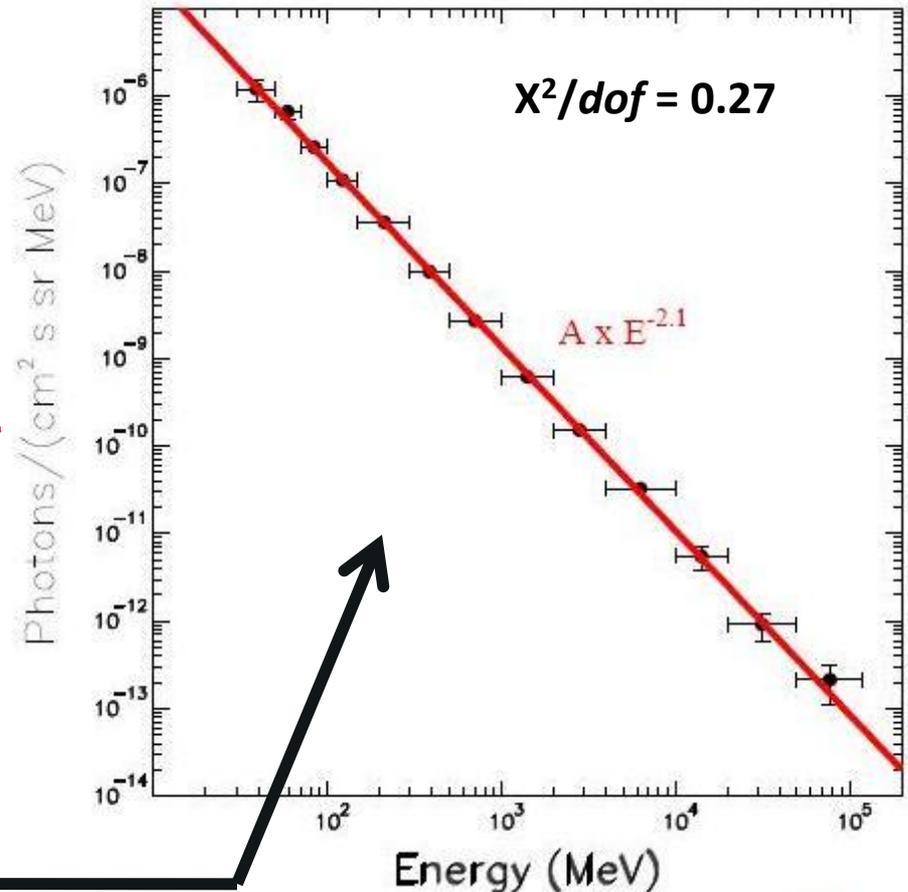


- Spectra shown for mid-latitude range -> GeV excess in this region is **not** confirmed.
- LAT errors are dominated by systematic uncertainties and are currently estimated to be  $\sim 10\%$  - **this is preliminary**.
- EGRET data is prepared as in Strong, et al. 2004 with a 15% systematic error assumed to dominate (Esposito, et al. 1996).

# Fermi et EGRET sont d'accord pour les données recueillies à large latitude mais pas au centre de la galaxie



- EGRET et Fermi en désaccord sur les données venant du centre de la galaxie
- **D'accord** sur les rayonnements gamma diffus à grande latitude
- Celui-là suit une courbe exponentielle

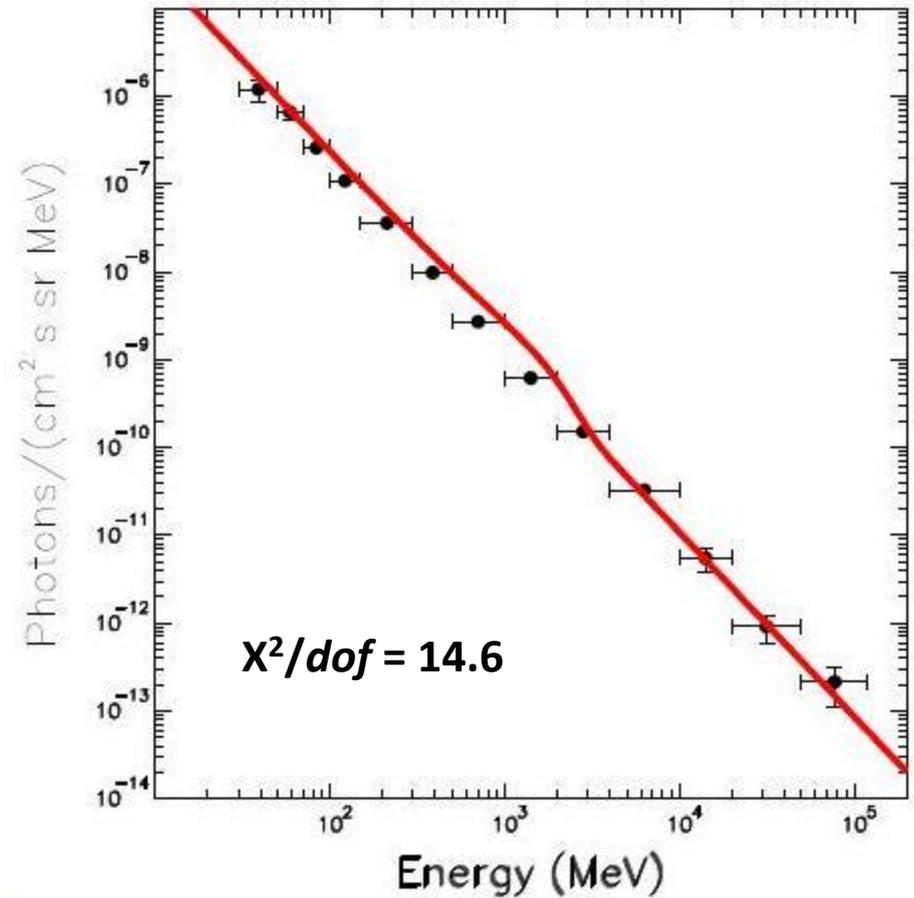


arXiv:0903.0165v1

# Dado et Dar pensent qu'ATIC est faux!

arXiv:0903.0165v1

- ATIC mesure un flux électron excessif entre 500-800 GeV ne venant d'aucune direction particulière
- Cela devrait engendré un rayonnement gamma diffus entre 0.8-2 GeV
- Mais ça ne colle pas avec les observations d'EGRET
- FERMI devrait tranché sous peu



## 4. WMAP haze dans le centre de la galaxie:

(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

- Un bruit-de-fond diffus anormal est observé par WMAP en provenance du centre de notre galaxie sans être associé à une source quelconque
- Plusieurs bandes distinctes de radiation diffuse et couvrant 12 ordres de grandeur en fréquence.
- Ces rayons gamma de haute énergie pourraient venir de radiation synchrotron accompagnant l'annihilation de matière noire en  $e^+$  et  $e^-$

## 5. SPI/INTEGRAL: International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, Ge detector array

- Observation d'une raie spectrale à 511 keV provenant du coeur de la galaxie—rien ne vient du disque
- Vue en 1970 et mesurée à  $473 \pm 30$  keV
- Celà correspond à un haut taux d'annihilation de  $e^+e^-$
- **L'origine de ces positrons est tout à fait inconnue**
- **Hypothèses:** de source astronomique comme par exemple des étoiles de neutrons, trous noirs, noyaux radioactifs nuclei de supernovae, pulsars etc.

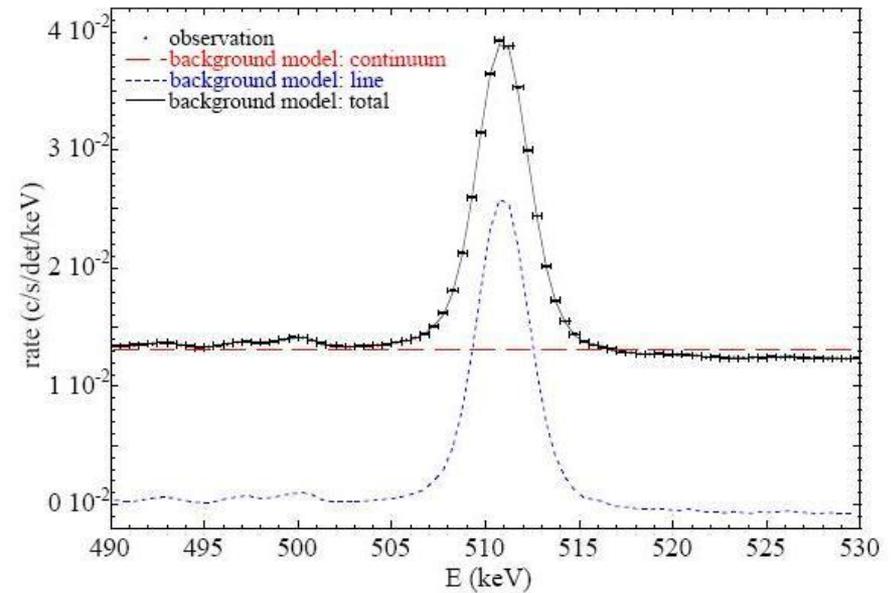
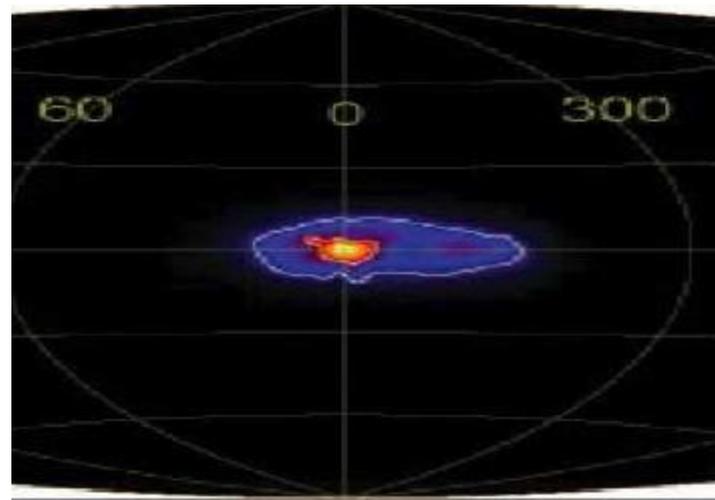


Fig. 1. Raw spectrum and background model components.



[arXiv:astro-ph/0309442](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309442)

[arXiv:astro-ph/0309484](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309484)

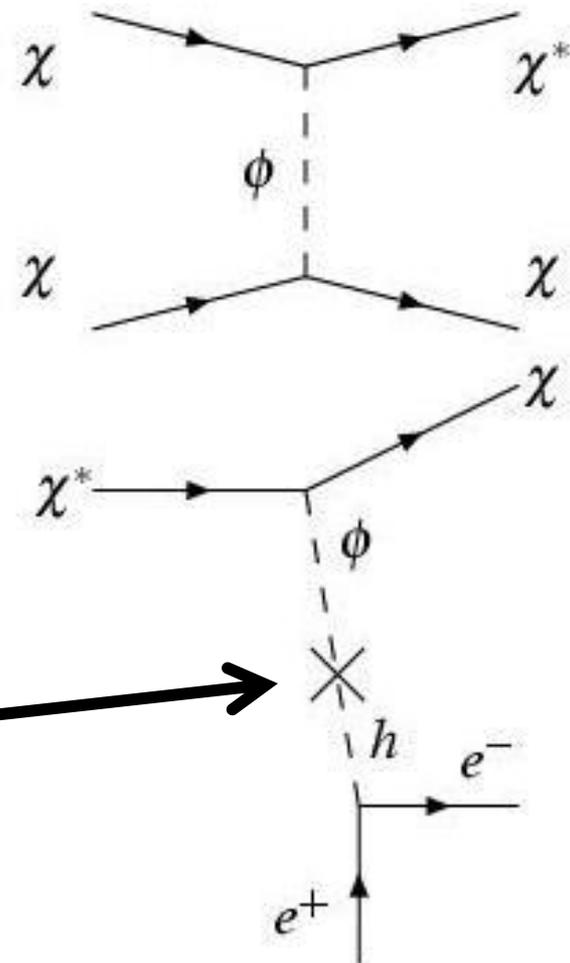
Source asymmetrique

# Explication possible: “Excited dark matter” (Finkbeiner and Weiner astro-ph/0702587)

- Si la matière noire a une masse  $m_\chi \sim 500$  GeV, une particule de matière noire  $\chi$  voyageant à 500 km/s aurait une énergie cinétique  $> 511$  keV
- Si  $\chi$  existe aussi dans un état excité,  $\chi^*$ , il peut être excité dans une collision inélastique
- $\chi^*$  se dé-excite en émettant une paire  $e^+e^- \rightarrow$  source de positrons
- La voie lactée devient un immense réservoir de WIMP ayant une énergie cinétique d'environ  $10^{60}$  erg
- La raie à 511 keV émet  $5 \times 10^{36}$  erg/s
  - Une quantité négligeable même sur la durée de vie de l'univers!
- Cette émission de 511 keV vient uniquement du coeur de la galaxie, là où la matière noire est concentrée
- Tout ça peut accommoder l'abondance de matière noire observée aujourd'hui

# Diagrammes associés à la matière noire excitée

- Ce modèle introduit aussi un autre boson de jauge venant du “dark sector”,  $\phi$
- $\phi$  peut aussi se désintégrer en  $e^+e^-$

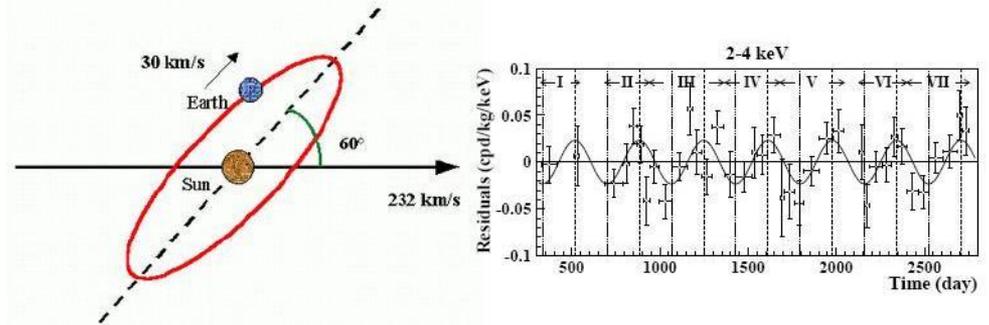


represents mixing

## 6. DAMA/LIBRA

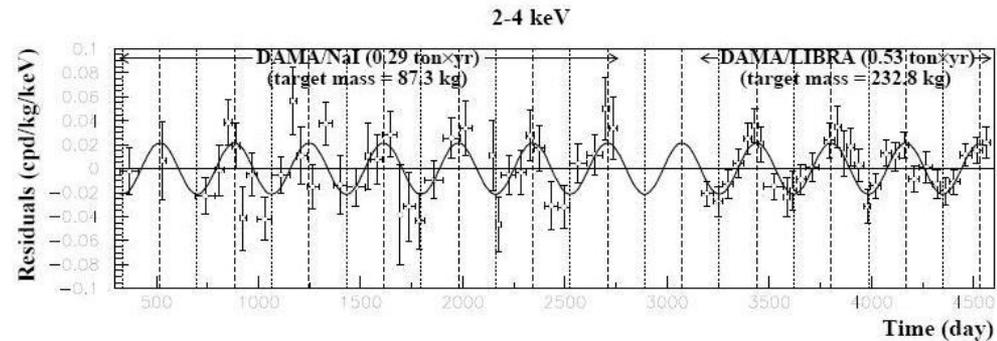
- expérience utilisant un scintillateur de NaI dans le tunnel du Gran Sasso
- 1<sup>ière</sup> exp: DAMA: disent détecter la présence de matière noire dans le halo de la galaxie (7 années de données soit 0.29 tonne-an)
- 2<sup>ième</sup> exp: DAMA/LIBRA: 0.53 tonne-an
- déviation de  $8.2\sigma$  au total
- Pas de source connue de modulation
- Les autres expériences semblable ne voient rien... (EDMS, EDELWEISS)

### DAMA: DM signal?



7 years of DAMA/NaI showed a  $6\sigma$  modulation signal.

**DAMA+LIBRA** 11 years, 0.83 ton  $\times$  year,  $8.2\sigma$  modulation signal.



arXiv:0804.2741

# Collision inélastique de matière noire

Inelastic dark matter scattering (see arXiv:0903.3941v1 pour un bon résumé)

$$\chi N \rightarrow \chi^* N \quad \text{avec } \delta = m_{\chi^*} - m_{\chi} \sim 100 \text{ keV}$$

- Pour qu'une collision inélastique soit possible, il faut que le centre de masse ait assez d'énergie pour passer au niveau excité

- La matière noire doit avoir une vitesse inférieure à

$$v_{\min} \sim (2 \delta / \mu)^{1/2}$$

$\mu$  est la masse réduite du nucléon et matière noire

- Cette vitesse minimale augmente pour un noyau léger comme l'iode utilisée par DAMA/LIBRA mais ne peut être atteinte avec le germanium de CDMS ou Edelweiss
- "Inelastic dark matter": modèle proposé par D. Tucker-Smith et N. Weiner *Phys. Rev. D* 76 (2007) 083519

# Ces anomalies ont-elles un point commun?

- Elle pourraient toutes s'avérer fausses (comme EGRET)
- Où trouver une explication en astrophysique...
- ... Où toutes être reliées à la matière noire:
- PAMELA and ATIC: l'annihilation de matière noire:  $\chi\chi \rightarrow e^+ e^-$
- WMAP: ces électrons et positrons énergétiques produiraient aussi des rayons gamma énergétiques
- Pour expliquer DAMA et être compatible avec l'absence de résultats ailleurs, il faut "inelastic dark matter model" (IDM)
- Et pour INTEGRAL, exciting dark matter is needed (XDM)
- Ces deux derniers modèles (XDM et IDM) nécessitent plusieurs états excités rapprochés pour  $\chi$ , la particule de matière noire

# Modèle à taille unique

- C'est du moins le but de "A theory of Dark Matter"  
Arkani-Hamed, Finkbeiner, Slatyer, Weiner arXiv:0810.0713v2
- Mais comment réconcilier tous ses modèles et concilier haute et basse énergie?
- Une solution: proposer non pas une, mais deux nouvelles particules
  - Une particule de haute masse pour résoudre les problèmes à haute énergie
  - Ajouter des états excités rapprochés pour expliquer les anomalies à basse énergie
  - Introduire un nouveau boson de jauge de faible masse pour ajuster tous les détails

# Comment faire d'une pierre deux coups

## Haute énergie:

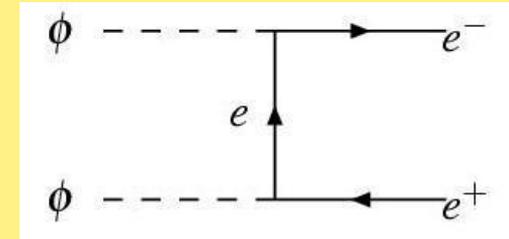
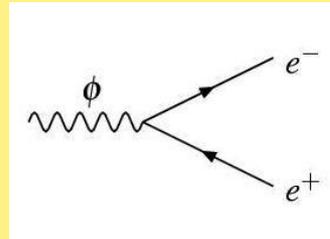
- A Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)  $\chi$  avec  $m_\chi \sim 500\text{-}800$  GeV pour résoudre les problèmes à haute énergie
- Cette particule de matière noire  $\chi$  peut s'annihiler en  $\phi$ :

$$\chi\chi \rightarrow \phi\phi$$

$$\phi \rightarrow e^+e^- \text{ ou } \mu^+\mu^-$$

- Fournit une source de énergie positrons et électrons (ATIC, PAMELA)
- Ceux-ci peuvent ensuite générer des photons énergétiques par radiation synchrotron (WMAP)

- $\phi$  est si léger qu'il ne peut se désintégrer qu'en leptons ( $e$  ou  $\mu$ )
- $\phi$  est un nouveau boson de masse  $m_\phi \sim 100 \text{ MeV} - 1 \text{ GeV}$



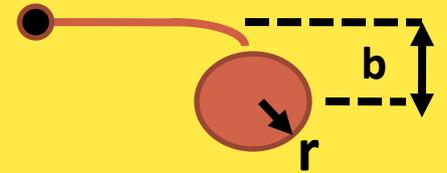
## Basse énergie:

- On impose que la matière noire  $\chi$  aient plusieurs états excités, avec de petites séparations en masse
- Du coup, on satisfait les exigences de "exciting dark matter" pour INTEGRAL et "inelastic dark matter" pour DAMA/LIBRA

# Théorie de la matière noire

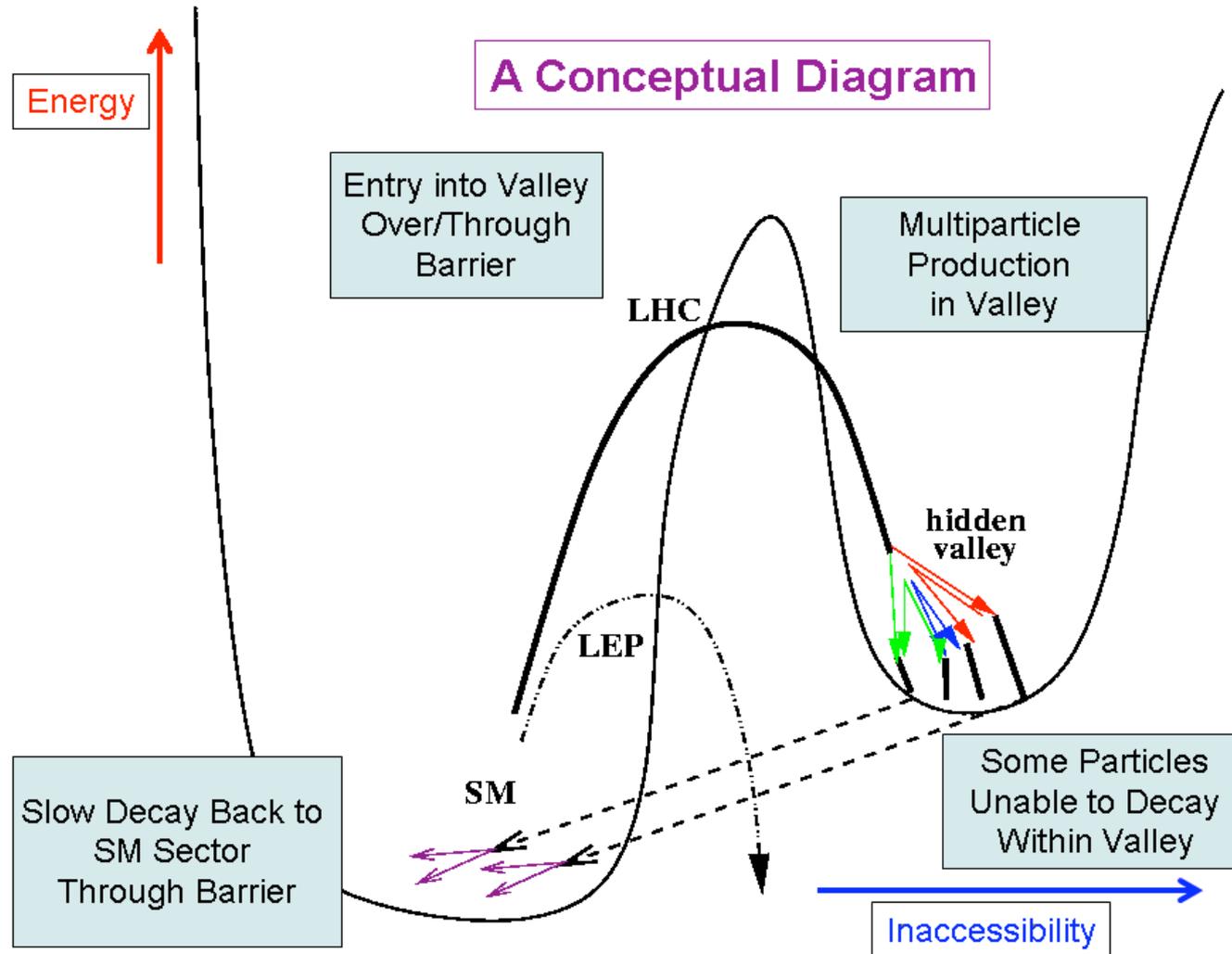
- Les auteurs partent de ce qui est nécessaire pour expliquer les observations de PAMELA et ATIC, puis imposent des contraintes pour satisfaire le taux mesuré par PAMELA
- Puis ils expliquent que  $\chi$ ,  $m_\chi = 500-800$  GeV ne peut être la particule supersymétrique la plus légère (LSP)
- D'autres arguments (naturalness) les amènent à introduire un nouveau boson de faible masse:  $\phi$ ,  $m_\phi \sim 1$  GeV
- Ceci leur permet d'invoquer un mécanisme (Sommerfeld enhancement) pour augmenter la section efficace d'annihilation  $\chi\chi \rightarrow \phi\phi$  nécessaire pour arriver à la bonne quantité de matière noire aujourd'hui (relic abundance)

# Sommerfeld enhancement:



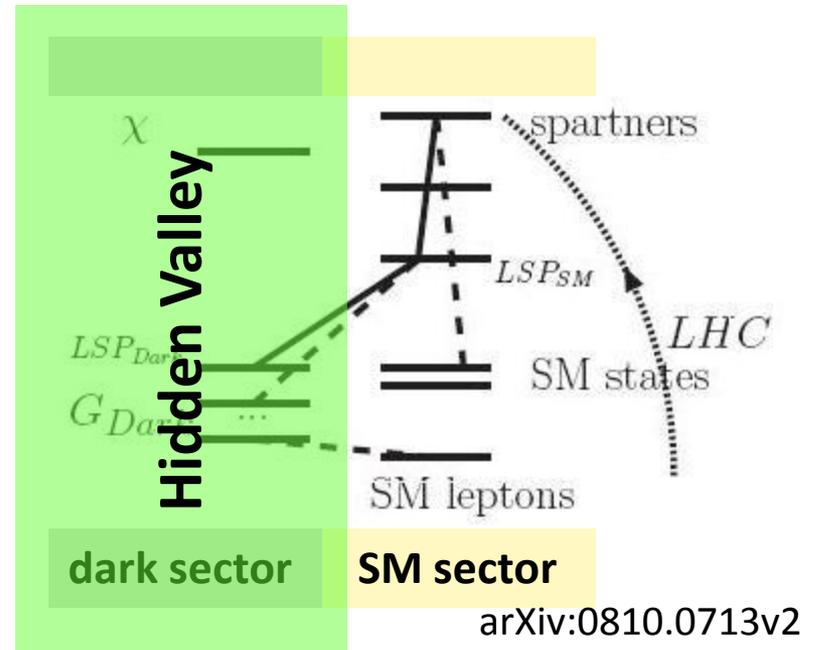
- Mécanisme quantique nécessaire pour augmenter ( $\sim 100$  fois plus grand) le taux d'annihilation de la matière noire. La section efficace normale d'un WIMP est bien trop faible pour satisfaire les observations faites par PAMELA.
- Analogie classique: la section efficace d'une étoile de rayon  $r$  est  $\pi r^2$  mais cette section efficace augmente en présence de forces gravitationnelles. Elle devient  $\pi b^2$ , où  $b$  est la distance maximale pour capture.
- Sommerfeld enhancement: intervient en présence d'un potentiel attractif (attractive force carrier) avec une longueur d'onde de Compton  $> (\alpha M_{DM})^{-1}$ ,  $\alpha$ : Dark Matter coupling.

# Le modèle de la Vallée Cachée



# Matière noire et vallée cachée

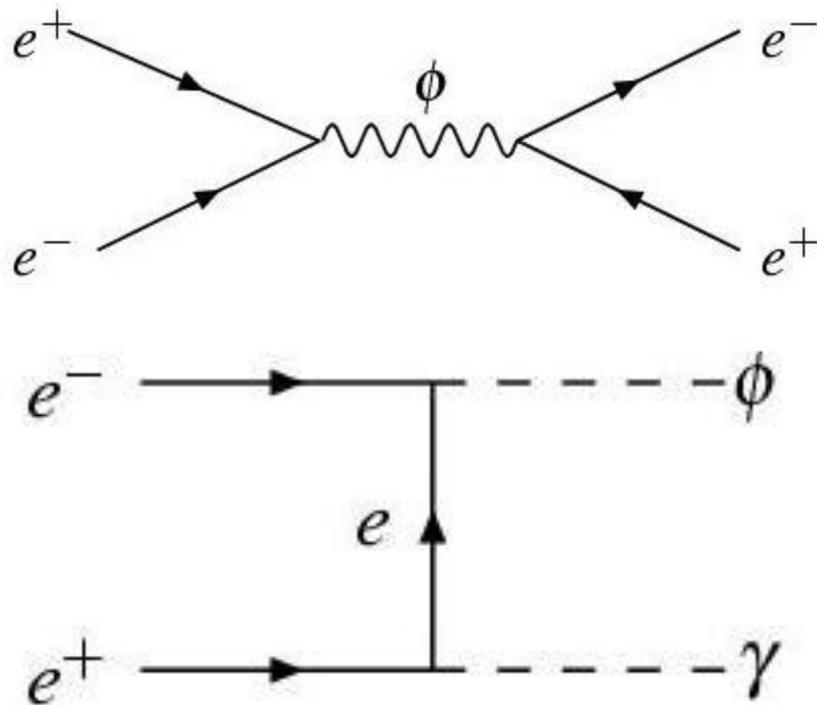
- Deux mondes en parallèle:
  - SM + SUSY
  - Le secteur noir vient aussi avec SUSY<sub>dark</sub>
- Au LHC, on peut produire les particules de SUSY les plus lourdes du côté du modèle standard
- Celles-ci se désintègrent en cascade jusqu'au LSP<sub>SM</sub> (un faux LSP)
- Mais ce LSP<sub>SM</sub> est un messenger qui peut passer de l'autre côté (dans le dark sector) puis se désintégrer jusqu'au vrai LSP, le LSP<sub>dark</sub>
- Plusieurs états excités pour  $\chi$
- Cette particule de matière noire  $\chi$  n'est pas le LSP (lightest supersymmetric particle)
- $\phi$  est le véritable LSP
- Et finalement le LSP<sub>dark</sub> ( $\phi$ ) est aussi un messenger qui peut retraverse du côté du modèle standard en se désintégrant en leptons



Seul le LHC est assez énergétique pour produire les plus hauts états de SUSY nous donnant accès au secteur de la matière noire après des cascades en série et une traversée de l'autre côté

# Mais comment $\phi$ a-t-il-pu nous échapper?

Si  $\phi \rightarrow e^+e^-$ , alors  $e^+e^- \rightarrow \phi$  est aussi possible  
de même que  $e^+e^- \rightarrow \phi \gamma$

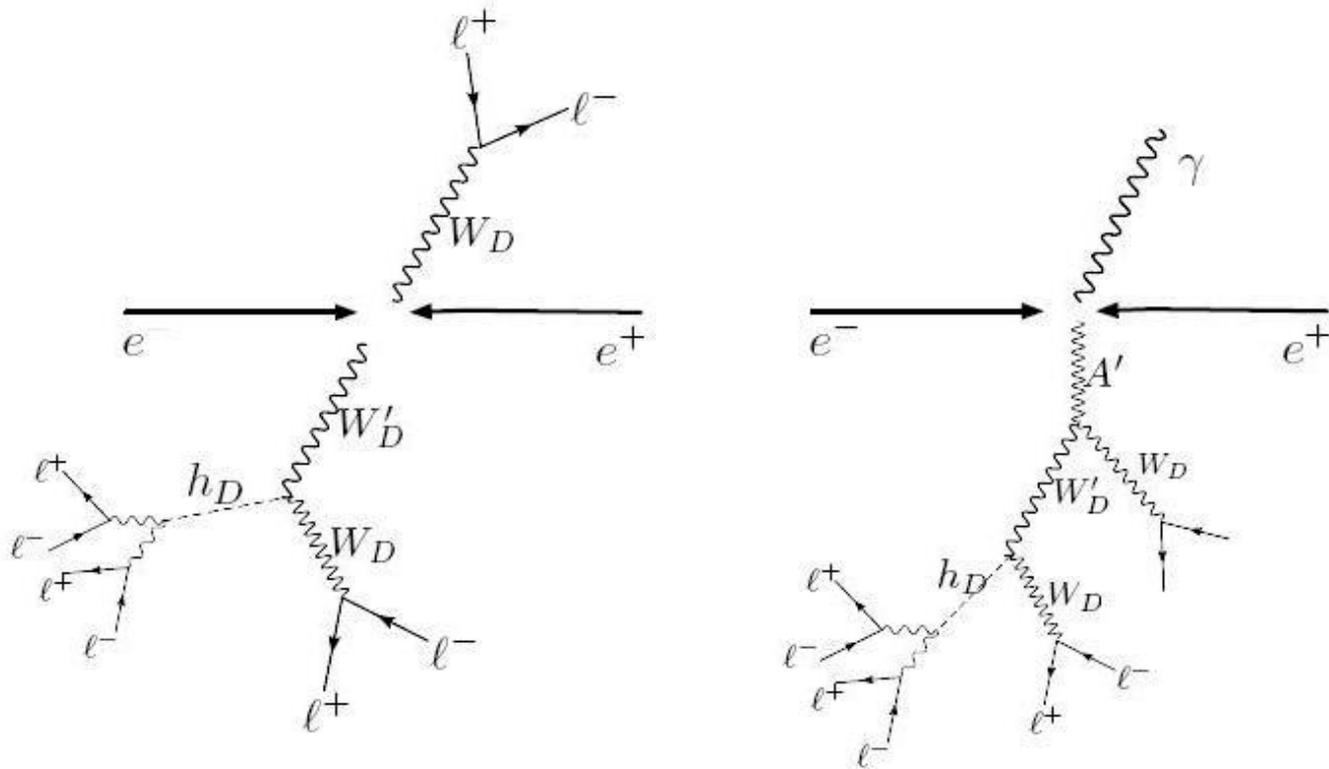


- Pourrait être vu dans les données de Belle et BaBar
  - en cours à Babar
- Mais la résonance est trop étroite même aujourd'hui
- Mieux vaut chercher un photon
  - mais ça diminue  $\sigma$  par  $\epsilon_{\text{eff}}^2$
- Une section efficace trop faible a probablement empêché sa détection dans le passé dans les recherches de photons uniques

# Production et désintégrations pour $e^+e^-$

Essig, Schuster, Toro arXiv:0903.3941v1 SLAC, Stanford

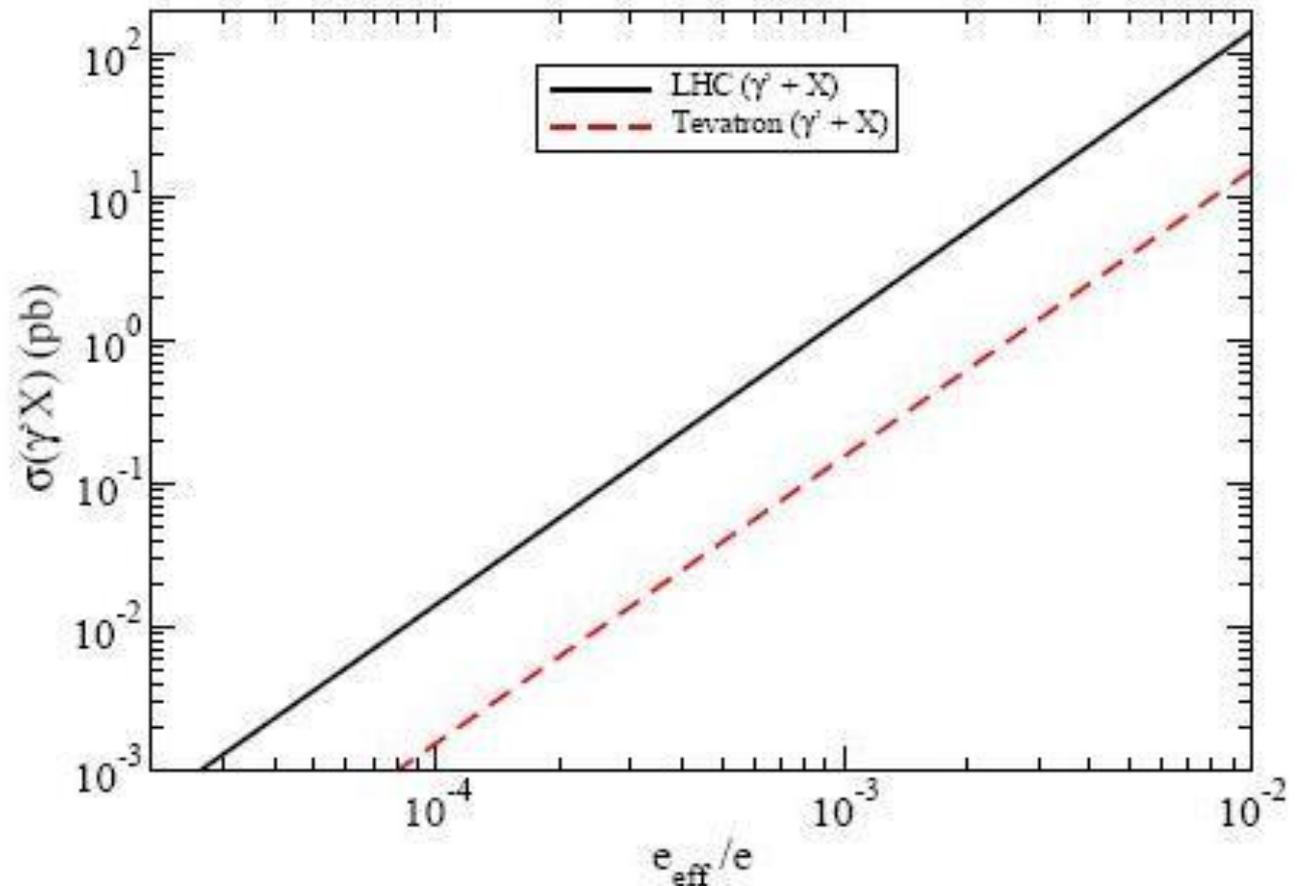
Un boson  $A'$  du secteur caché produit off-shell, se désintègrant soit en d'autres bosons  $W_D$  soit en leptons du Modèle Standard



# Cross-section in hadron collider: could be of order 1 pb for $\varepsilon \sim 10^{-3}$

On espère avoir  
 $\sim 200$  pb de donnée  
durant la première  
année du LHC

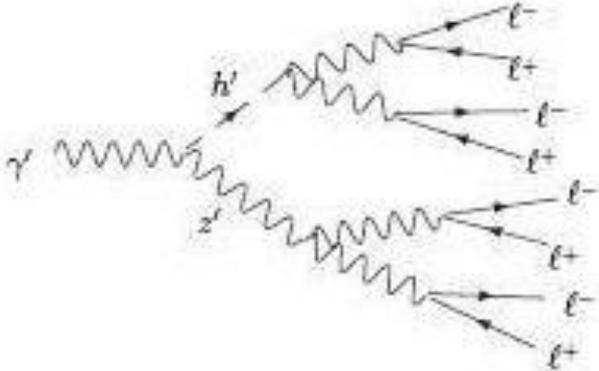
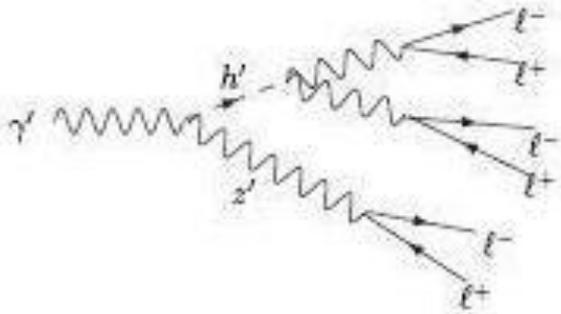
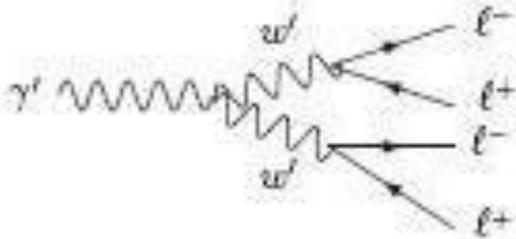
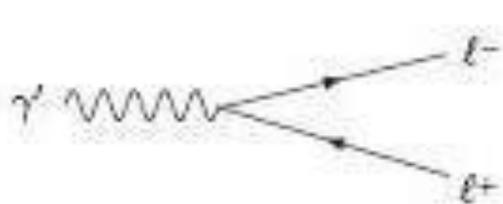
Serait visible pour  
 $\varepsilon > 10^{-3}$



Lian-Tao Wang et al, arXiv:0901.0283v1

# Désintégrations typique de la matière noire

Lian-Tao Wang et al. arXiv:0901.0283v1



- $\gamma'$ : boson du dark sector  
– (semblable à  $\phi$ )
- Peut se désintégrer en paires de leptons ou autres bosons du secteur noir  $w', z', h'$
- Donnent des gerbes de leptons contenant 2-8 leptons

# Signatures: plusieurs modèles prédisent des gerbes de leptons

Weiner et al., Lian-Tao et al. Essig et. al

$$\chi\chi \rightarrow \phi\phi$$

$$\phi \rightarrow e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^-$$

- $m_\chi \sim 500\text{-}800 \text{ GeV}$
- $m_\phi \sim 100 \text{ MeV} - 1 \text{ GeV}$

Strassler et al.

$$gg \rightarrow H \rightarrow \phi\phi$$

$$\phi \rightarrow e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^-$$

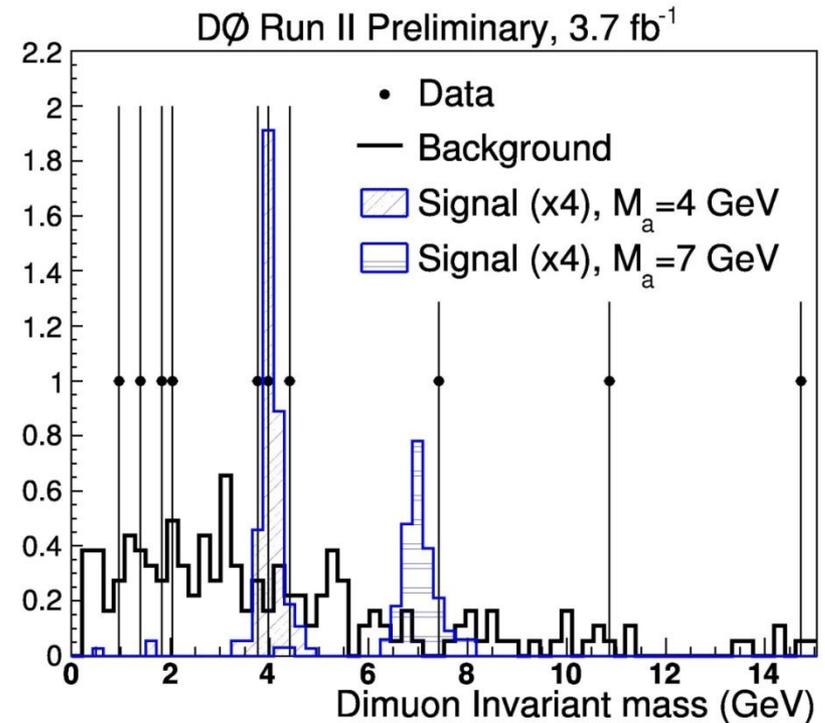
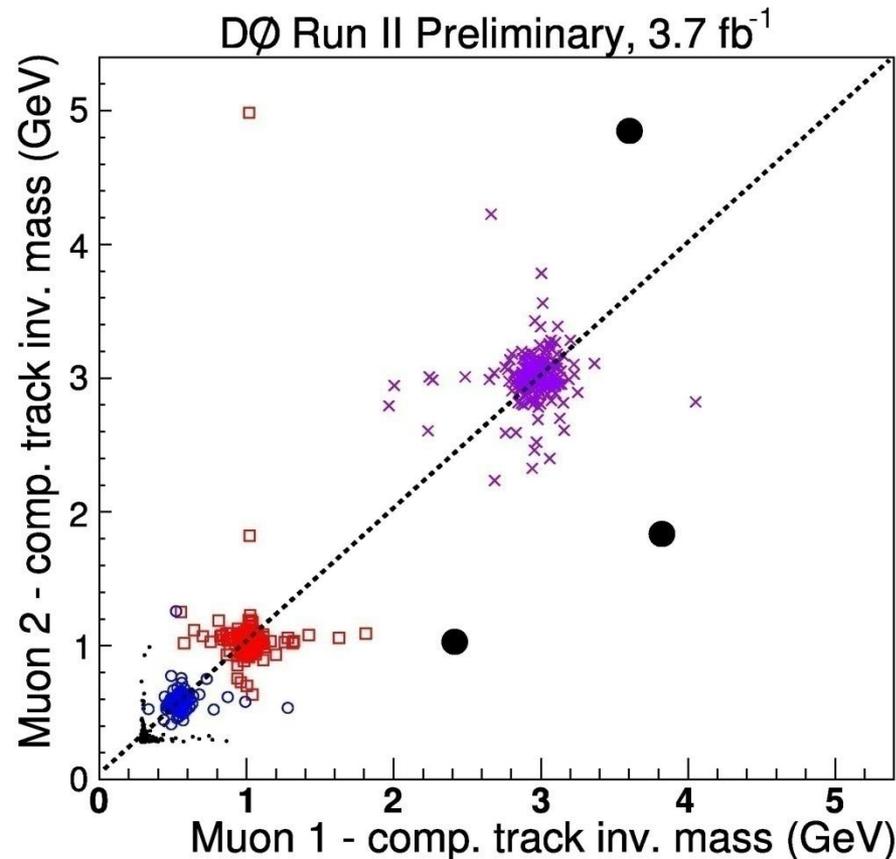
- $m_H \sim 140 \text{ GeV}$
- $m_\phi \sim 100 \text{ MeV} - 1 \text{ GeV}$

- $\phi$  a un fort boost:
  - Leptons très rapprochés ou superposés
- $\phi$  peut avoir une longue vie
  - vertex déplacé
  - Besoin de nouveaux algorithmes pour le trigger
- $\phi \rightarrow e^+e^-$  ou  $\phi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 
  - Plusieurs dépôts d'énergie correspondant à une seule trace crée la confusion
  - Rejetées par les algorithmes courants du trigger

# Recherche du Higgs NMSSM à D0

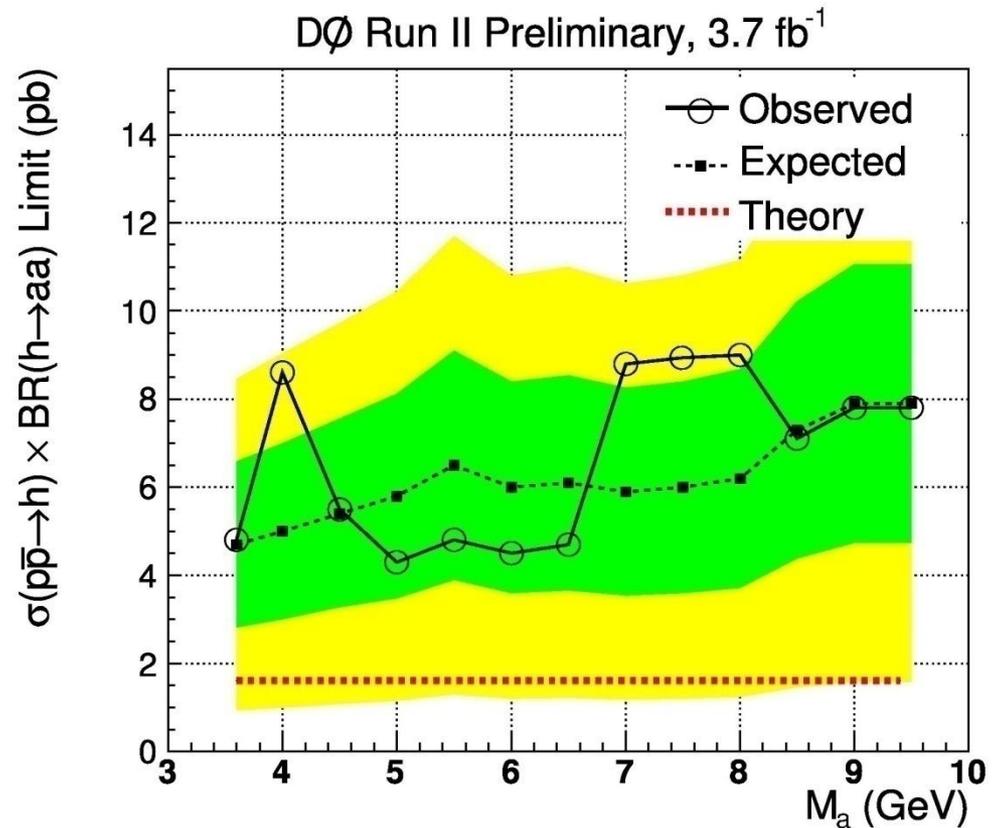
## $h \rightarrow aa \rightarrow \mu\mu \mu\mu$ et $h \rightarrow aa \rightarrow \mu\mu \tau\tau$

Recherche de deux paires de muons isolés et rapprochés; une paire de muon étant un muon plus une trace l'accompagnant (résolution trop limitée pour les muons)



# Limites pour $h \rightarrow aa \rightarrow \mu\mu \mu\mu$ de D0

- Recherche similaire à  $h \rightarrow \phi\phi \rightarrow \mu\mu$
- Cherchent 2 paires de muons (muon+trace)
- Limite établie pour  $\sigma(pp \rightarrow h+X) \times BR(h \rightarrow aa) \times BR(a \rightarrow \mu\mu)^2 \sim 10 \text{ fb}$
- si  $\sigma(pp \rightarrow h+X) \sim 100 \text{ fb}$ , alors  $BR(a \rightarrow \mu\mu) < 10\%$  si  $BR(h \rightarrow aa) = 100\%$

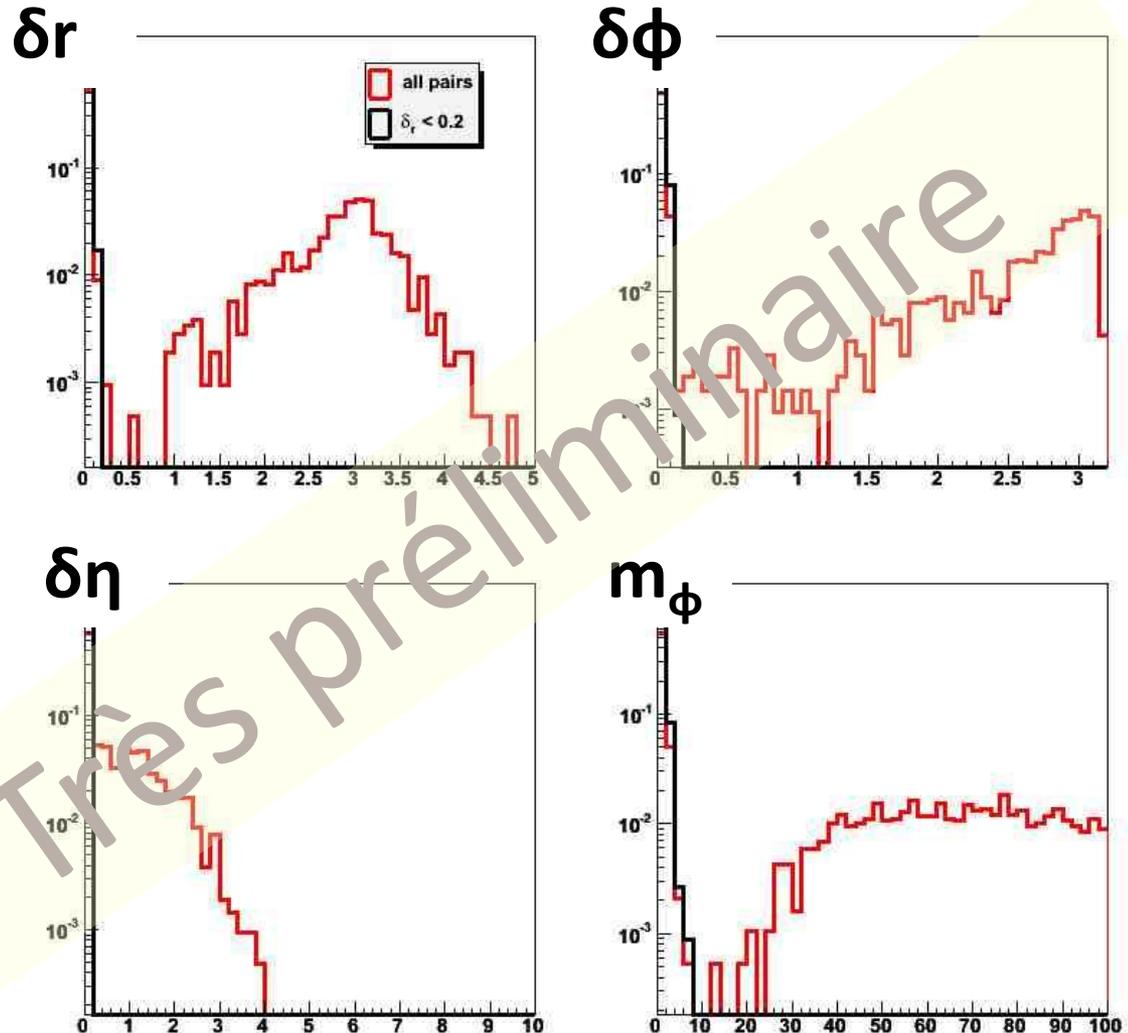


# Première tentatives avec des gerbes de leptons dans ATLAS

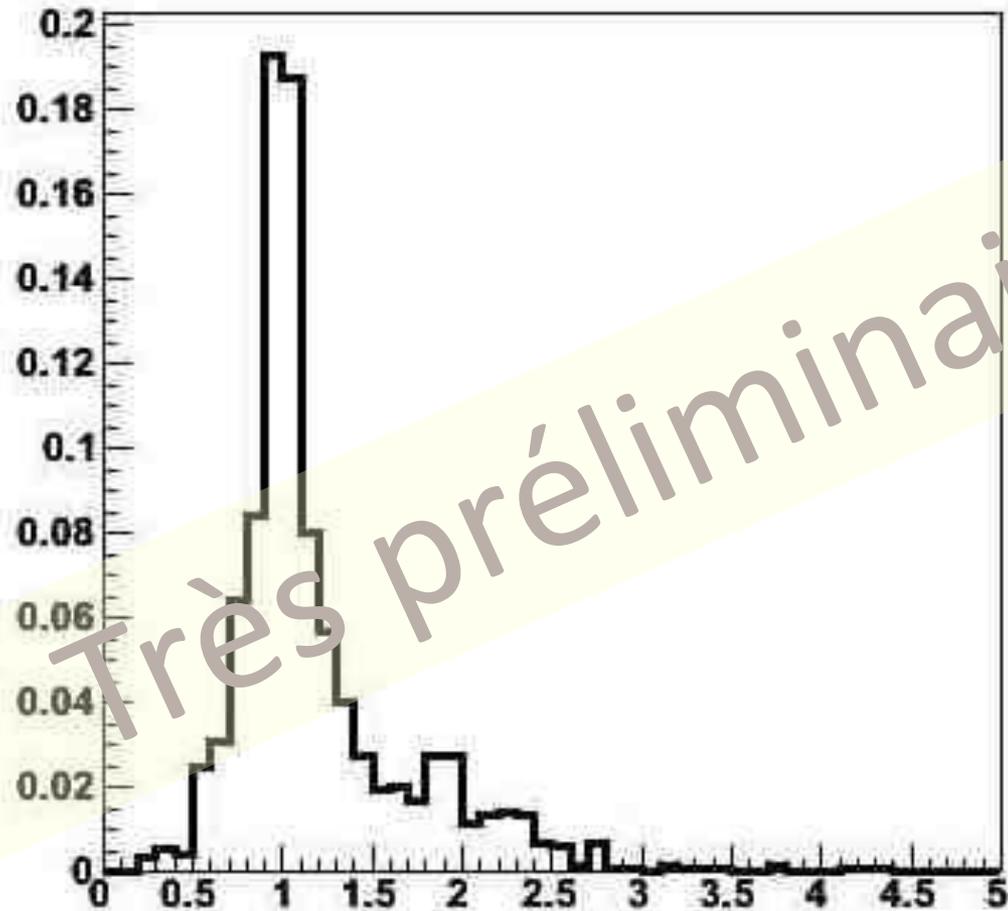
- $H \rightarrow \phi\phi \rightarrow \mu\mu \mu\mu$ 
  - Suivant les prédictions de Matt Strassler
  - $m_H = 140 \text{ GeV}$
  - $m_\phi = 1 \text{ GeV}$
- Les  $\mu$  sont facilement trouvés et forment  $\phi$
- Les paires de muons les plus rapprochées donne la bonne combo:

$$\delta r < 0.2$$

$$\delta r = \sqrt{(\delta\eta)^2 + (\delta\phi)^2}$$



# $m_\phi$ facile à reconstruire en sélectionnant une paire de muon pairs in ATLAS



$m_\phi$

# Problème principal dans ATLAS: trigger

- Ces évènements sont rejetés par au second niveau
  - Premier niveau est basé complètement sur l'électronique
  - Les 2<sup>ième</sup> et 3<sup>ième</sup> niveaux sont des logiciels
- Il faut donc élaborer de nouveaux algorithmes
  - Environ 90% des muons passent le premier niveau
  - Mais seulement ~10% sont retenus quand le système des muons tentent de mettre ensemble plusieurs segments avec une seule trace
  - Ces nouveaux algorithmes devront être très sélectifs pour ne rien laisser passer d'autres et noyer le système

# Tout reste à faire....

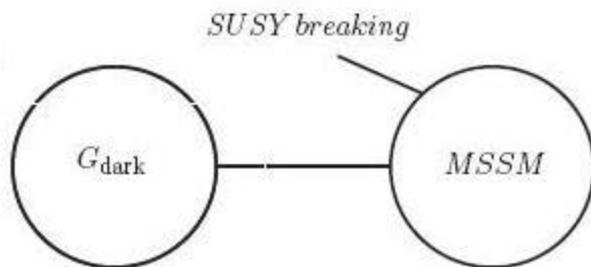
- Ce sujet n'a pas fini de faire couler l'encre!
- Mais des résultats expérimentaux seront très bientôt disponibles:
  - Venant de l'astrophysique, surtout de Fermi
  - Venant du Tevatron et du LHC
  - de Babar/Belle
  - Et même des expériences sur  $g-2$
- C'est un domaine prometteur qu'il faut garder à l'oeil

# Pis l'original dans tout ça?



# Recette pour faire un original super-sombre dans une vallée cachée

- La “Vallée Cachée”: parce que tout ça nécessite un monde parallèle appelé “Vallée Cachée”
- “Super” parce que c’est associé à la SuperSymétrie
- “Sombre” parce qu’on a affaire à la matière noire...
- Et l’original parce que “moose” ou “quiver” désigne un diagramme utilisé dans les théories de jauge à cause de sa ressemblance avec le panache d’un orignal (!) ...



?

=



Mais le meilleur moyen d'attrapper un original, à ATLAS ou ailleurs...

... c'est encore de le caller

<http://www.youtube.com/watch?v=29xM6VpXWl4>

# Extra

# Durée de vie et résolution

Lian-Tao Wang et al. arXiv:0901.0283v1

$$c\tau_{2\text{-body}}^{\gamma' \rightarrow n\ell} \sim \frac{1}{\alpha\epsilon^2 m_{\gamma'}} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ cm} \left( \frac{\text{GeV}}{m_{\gamma'}} \right) \left( \frac{10^{-3}}{\epsilon} \right)^2$$

- Un boost typique:  $\gamma \sim O(10)$ , crée un vertex déplacé si  $\epsilon < 10^{-4}$ 
  - invisible au début du LHC avec  $200 \text{ pb}^{-1}$
- L'angle d'ouverture entre les 2 leptons est  $\delta(\theta) \sim m_{\gamma'}/p_T < 0.1$
- Ce qui veut dire  $\Delta(\eta) \sim 50 \text{ mrad}$  à  $\theta \sim \pi/2$
- ATLAS peut distinguer 2 traces séparées de 1 mrad:
  - Résolution des Pixel :  $100 \mu\text{m}$ ; dernière couche à 12 cm
  - Encore plus facile à grande rapidité
- Pourrait être observé dès le début du LHC avec  $\epsilon \geq 10^{-3}$

# Reach on $\epsilon_{\text{eff}}^2$ from BaBar $\sim 10^{-3}$

preliminary work from Lian-Tao Wang

