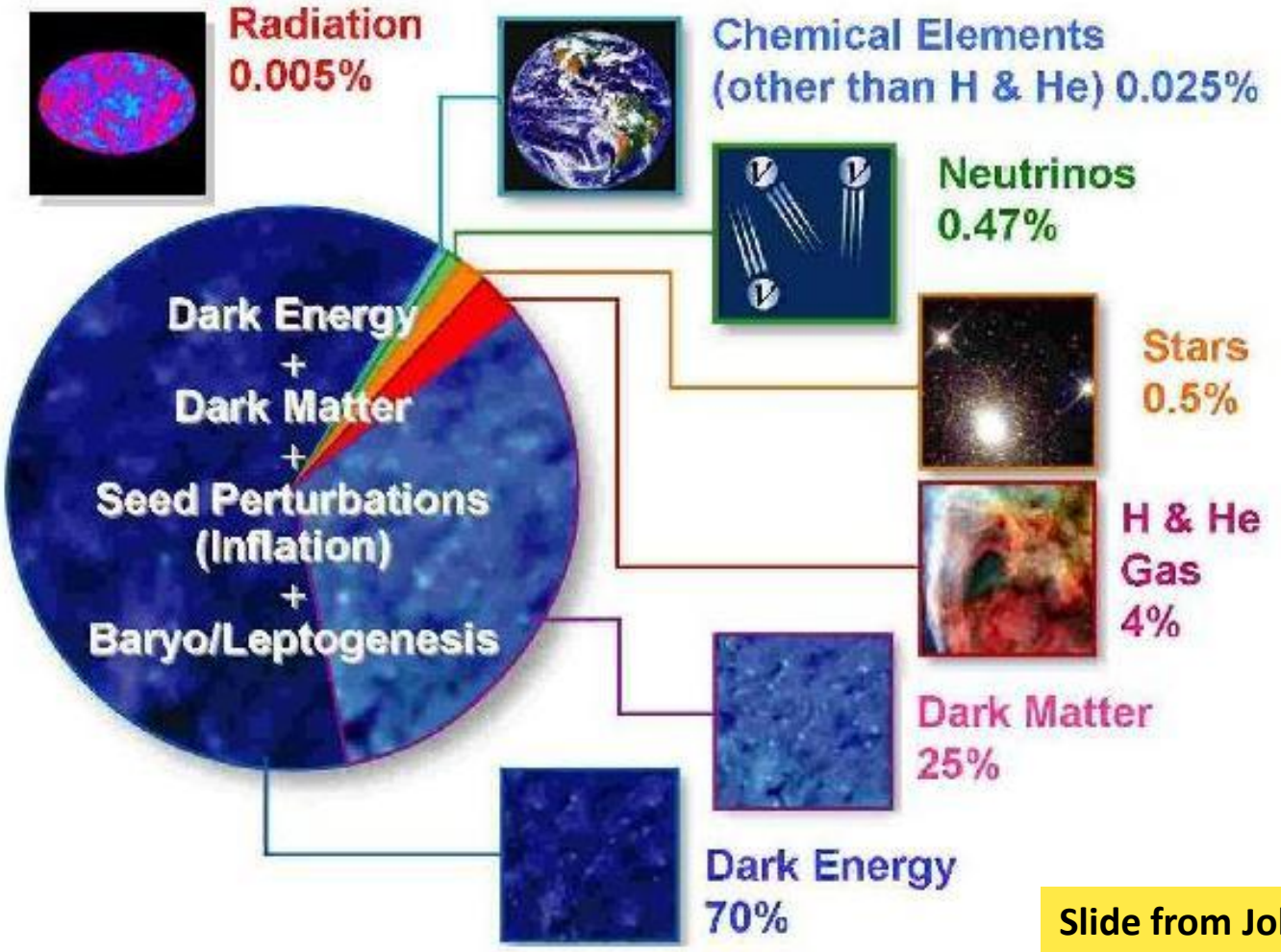
Comment caller l'orignal super-sombre dans une vallée cachée

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

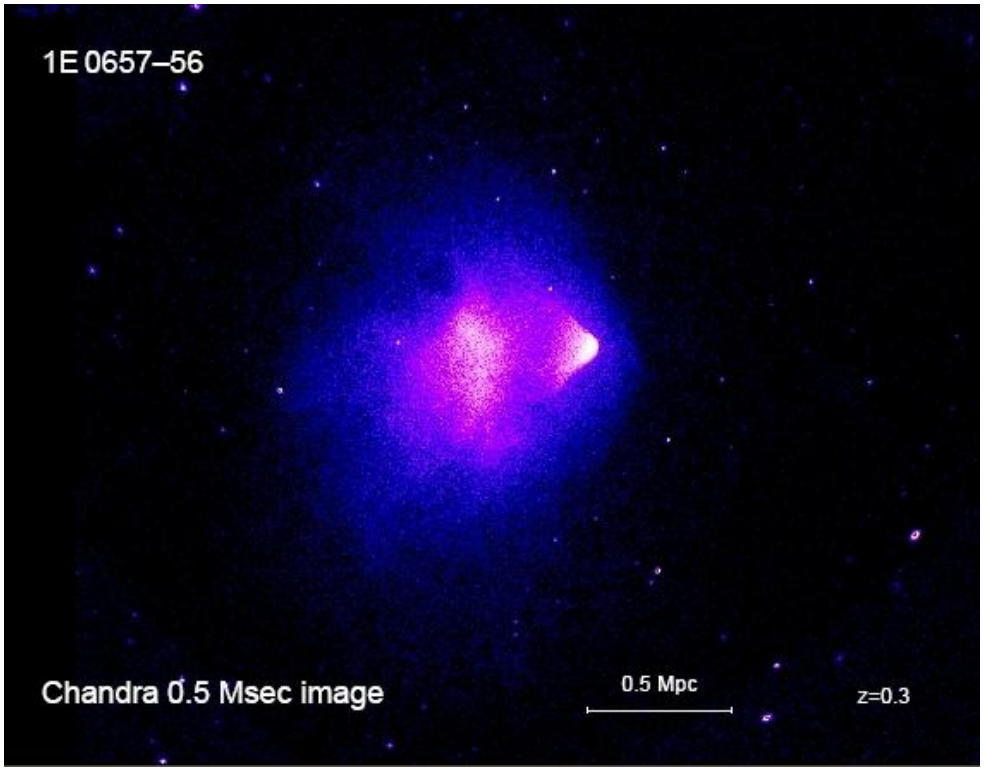
Pauline Gagnon, Indiana University

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



Slide from John Ellis

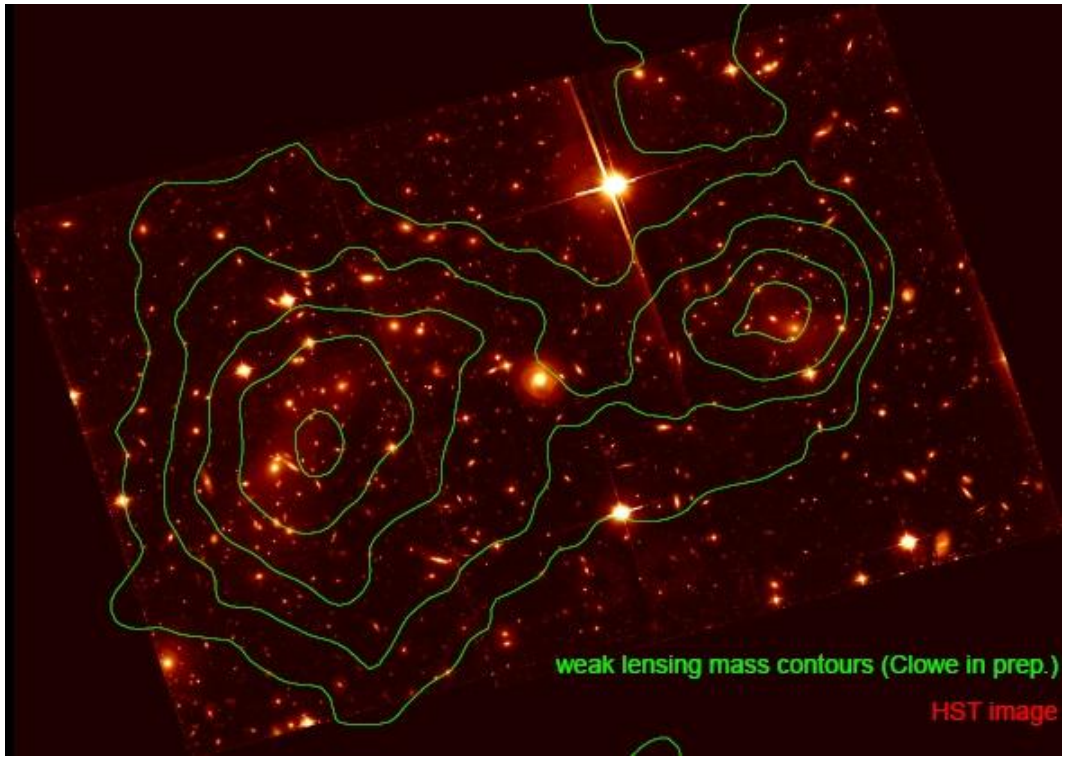
Preuve de l'existence de la matière cachée: "the bullet cluster"



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

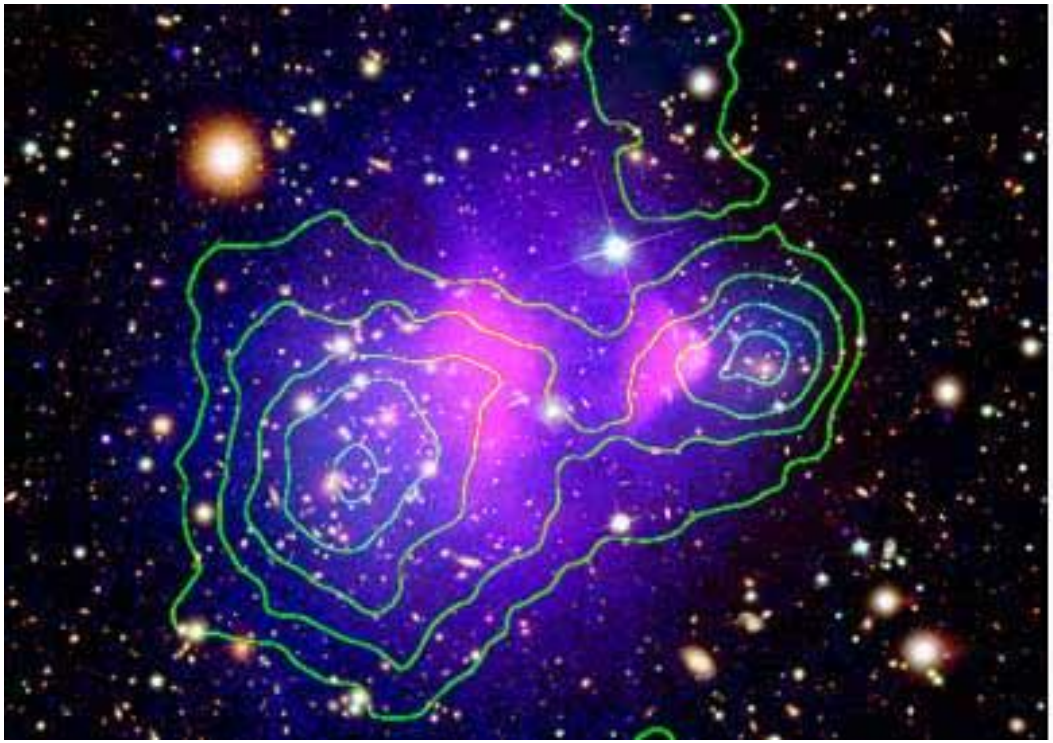
- Photo d'une collision entre deux galaxies
- Ce qui interagit, c'est le matériel intergalactique (gaz)
- Ça chauffe à 160×10^6 ^{o}C et émet des rayons X
- Ce qu'on voit c'est l'intensité des rayons X émis

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



- 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 gravitationel 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 coincident pas

Mais qu'est donc cette matière noire?

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

On a dénombre 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.

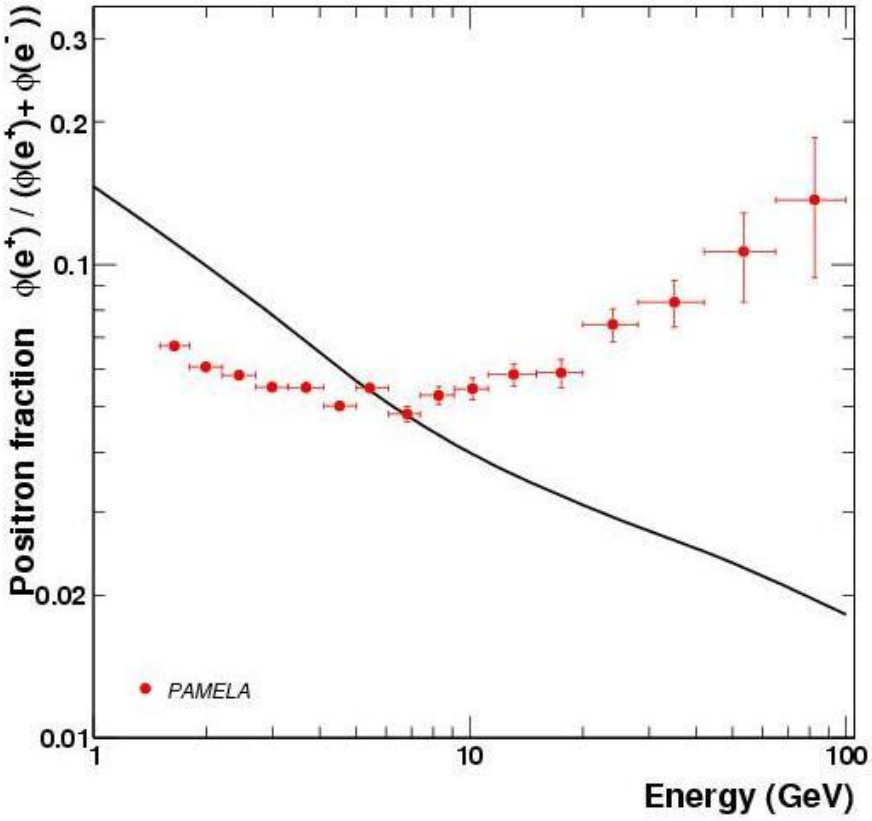
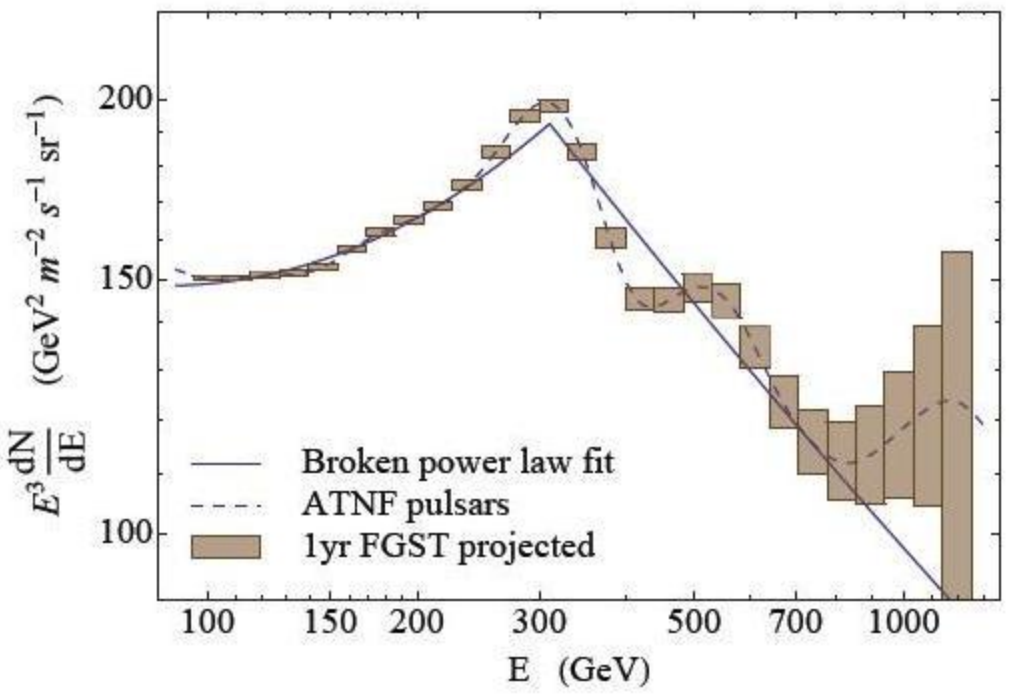


FIG. 4: **PAMELA positron fraction with theoretical models.** The PAMELA positron fraction compared with theoretical model. The solid line shows a calculation by Moskalenko & Strong[39] for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic-rays in the galaxy. One standard deviation 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

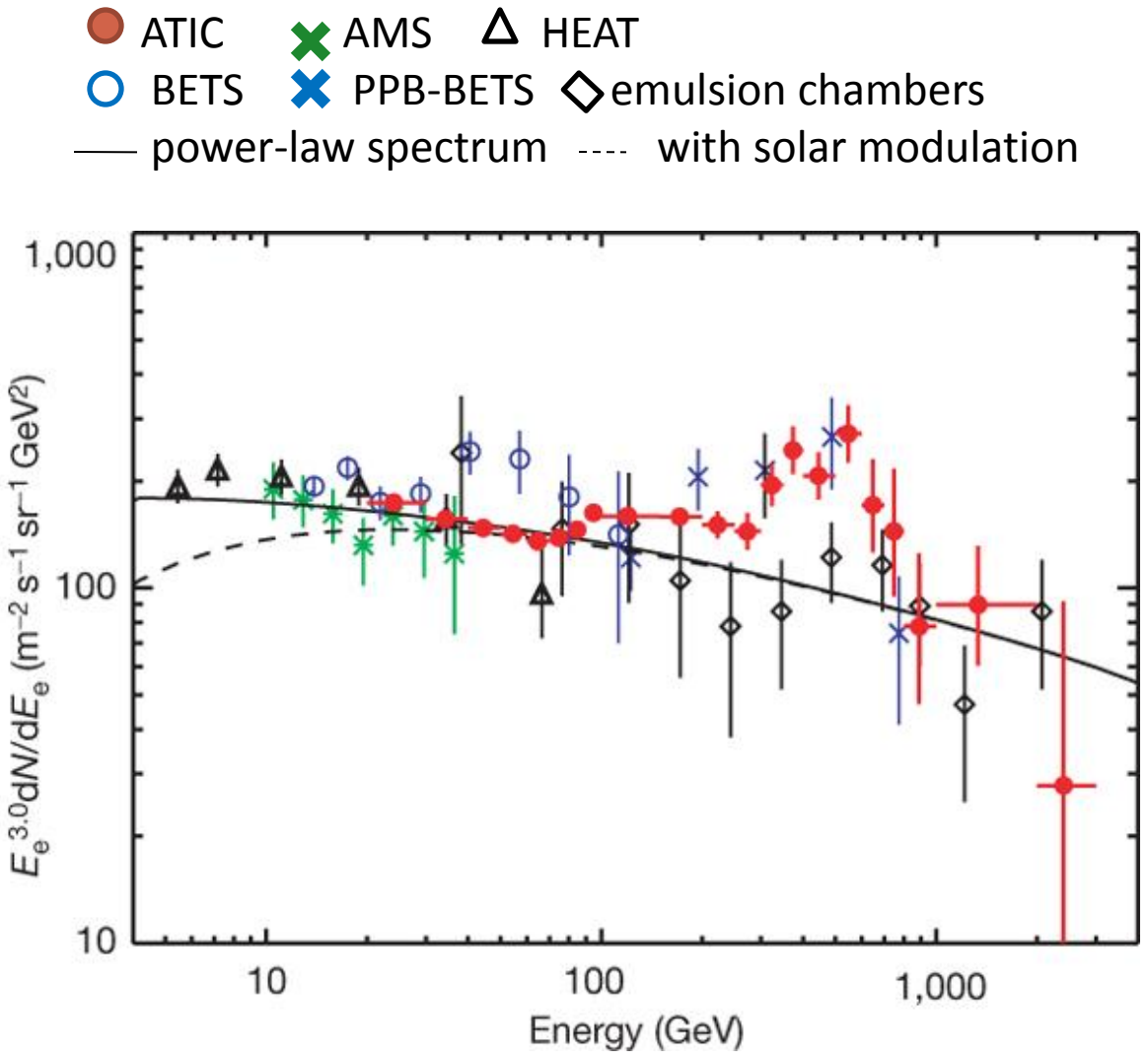
- Flux venant de pulsars est charactérizsé par des paliers
- Matière noire donnerait un spectre suivant une loi exponentielle
- Malyshev, Cholis & Gelfand ont suggéré que Fermi pourrait faire la différence (arXiv:0903.1310)

•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

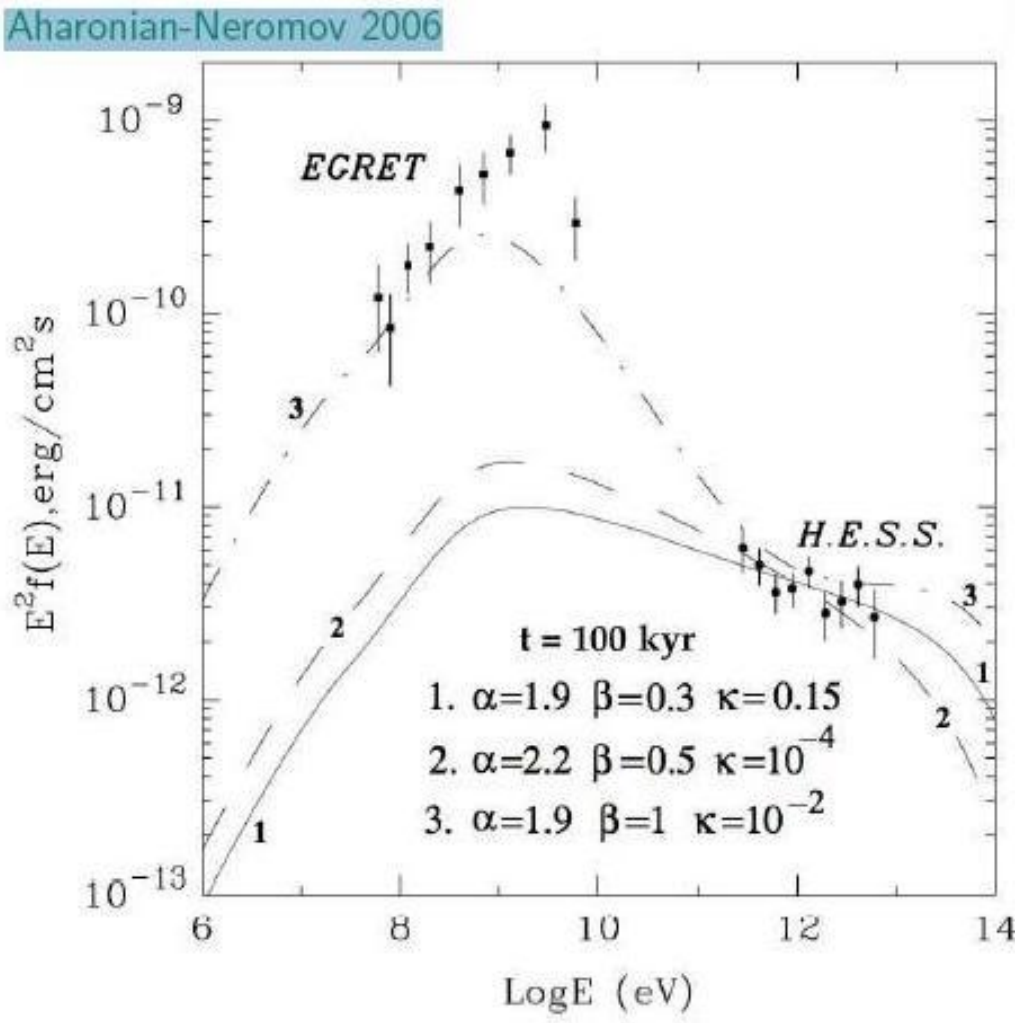
FERMI présentera sous peu ses résultats pour confirmer ou non cette observation



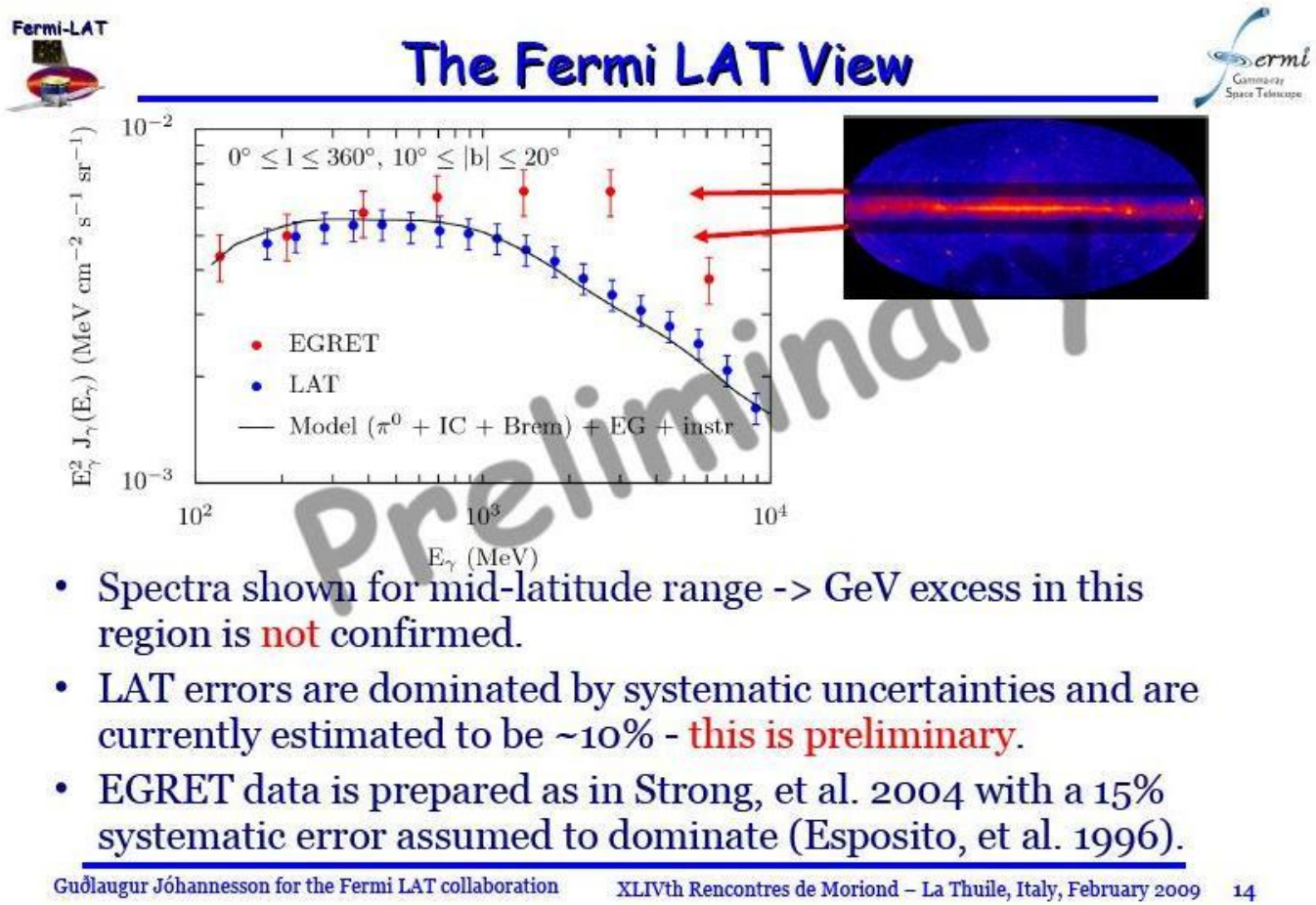
Nature 456, 362-365 (2008)

3. **EGRET:**

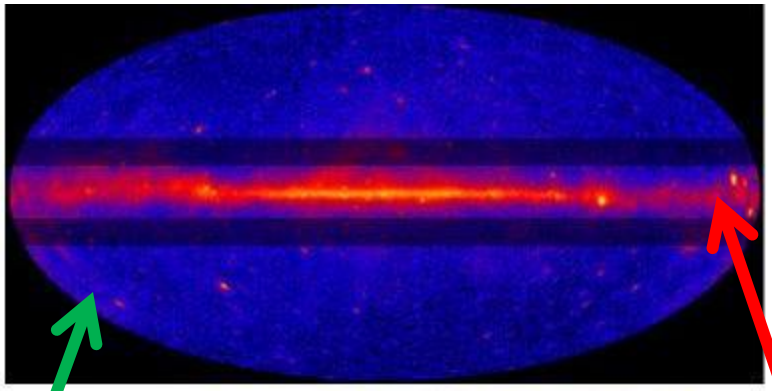
- Mesure des rayons cosmiques venant du centre de la galaxie; excès vu entre 10-50 GeV
- Le nouveau satellite FERMI recueilera autant de données en un an seulement et 25 fois plus au total
- FERMI fut lancé en juin 2008
- Premiers résultats présentés à Moriond en mars



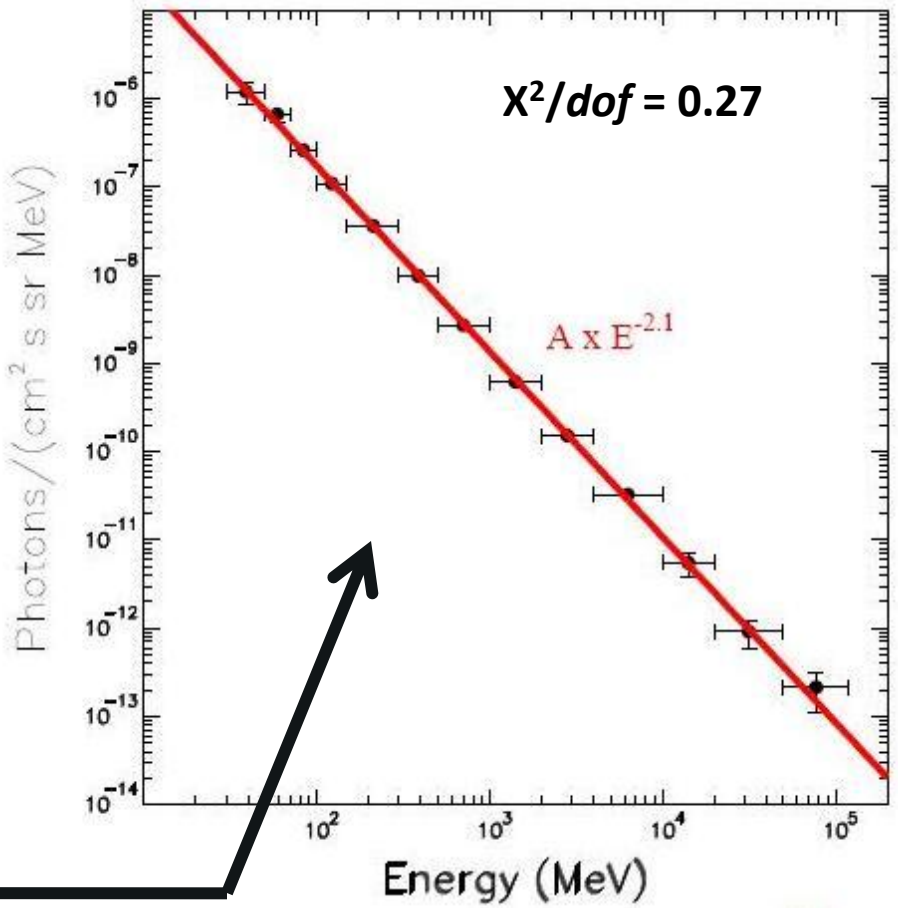
Premiers résultats de Fermi: l'excès d'EGRET n'est pas confirmé



Fermi et EGRET sont d'accord pour les données recueilies 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

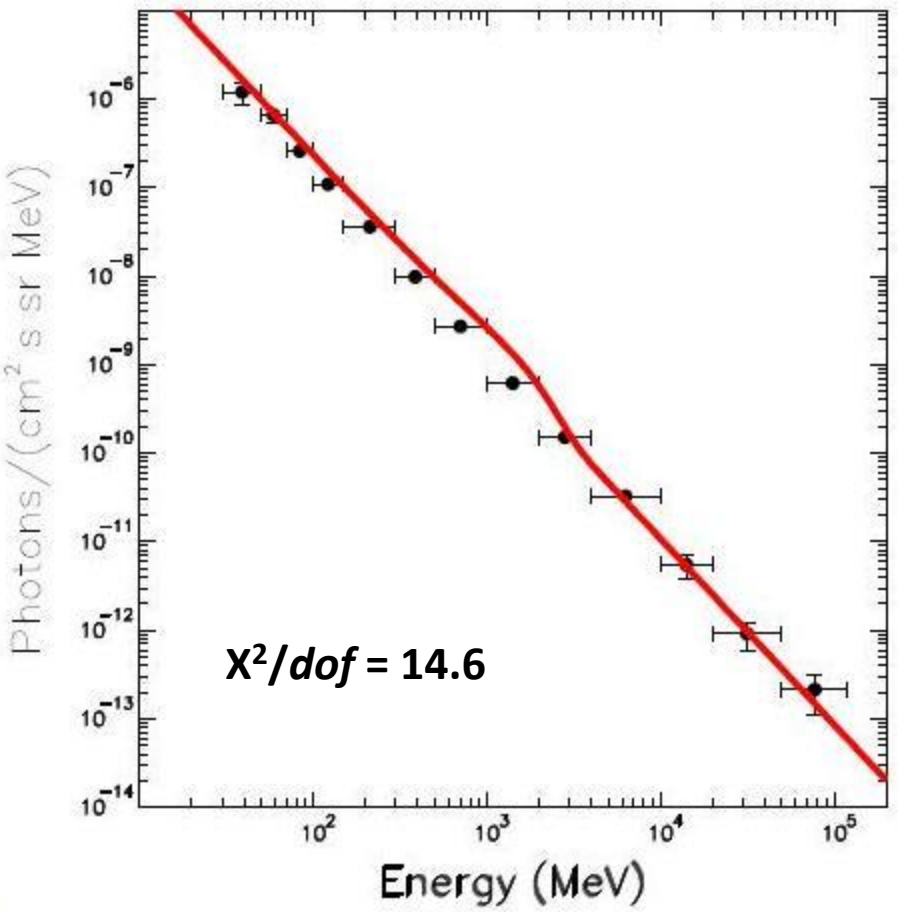


arXiv:0903.0165v1

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 quleconque

- 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 ± 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 radioactivfs nuclei de supernovae, pulsars etc.

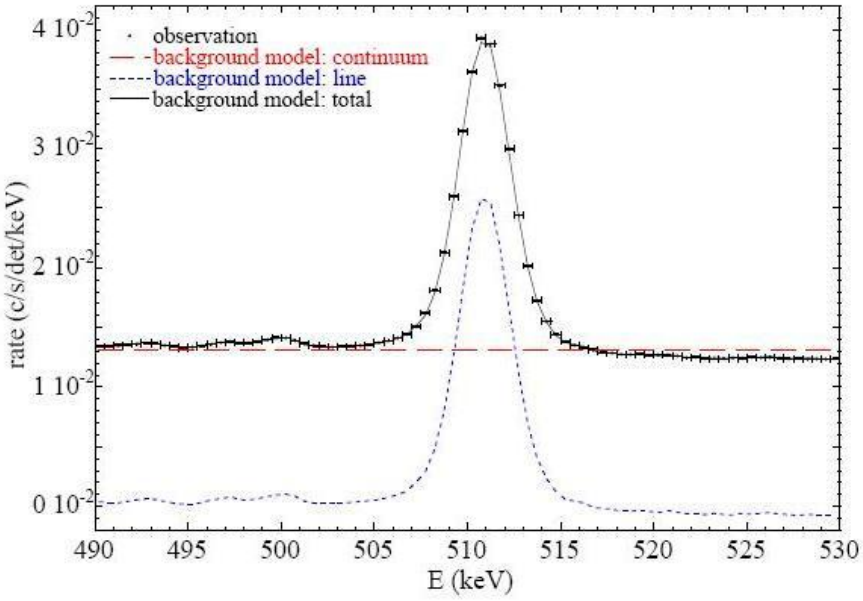
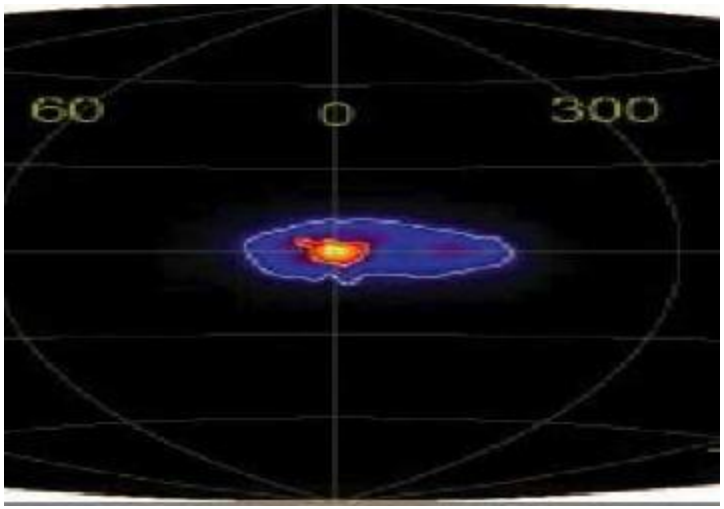


Fig. 1. Raw spectrum and background model components.

arXiv:astro-ph/0309442
arXiv:astro-ph/0309484



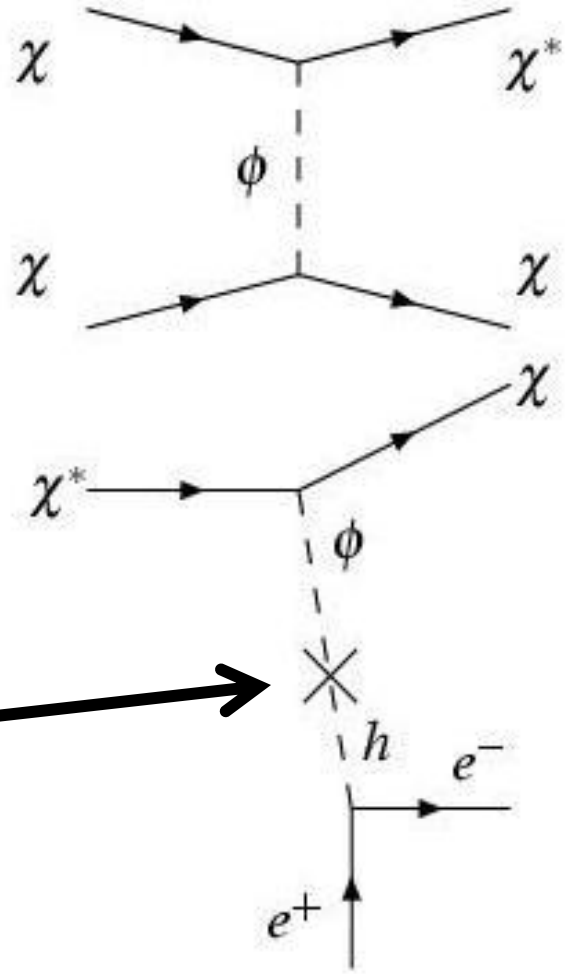
Source asymmetrique

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

- Si la matière noire a une masse m_χ ~ 500 GeV, une particule de matière noire χ voyageant à 500 km/s aurait une énergie cinétique > 511 keV
- Si χ existe aussi dans un état excité, χ*, il peut être excité dans une collision inélastique
- χ* se dé-excite en émettant une paire e^+e^- → 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 x 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 ou la matière noire est concentrés
- Tout ça peut accomoder 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”, ϕ
- ϕ peut aussi se désintégrer en e^+e^-



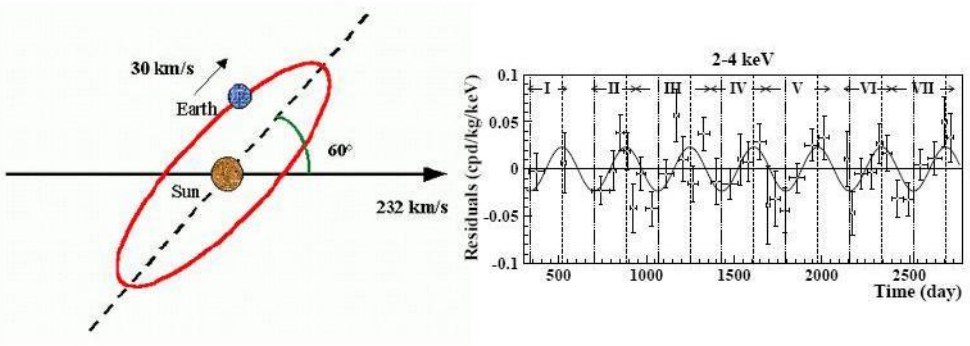
represents mixing

6. **DAMA/LIBRA**

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

Graciela Gelmini-UCLA

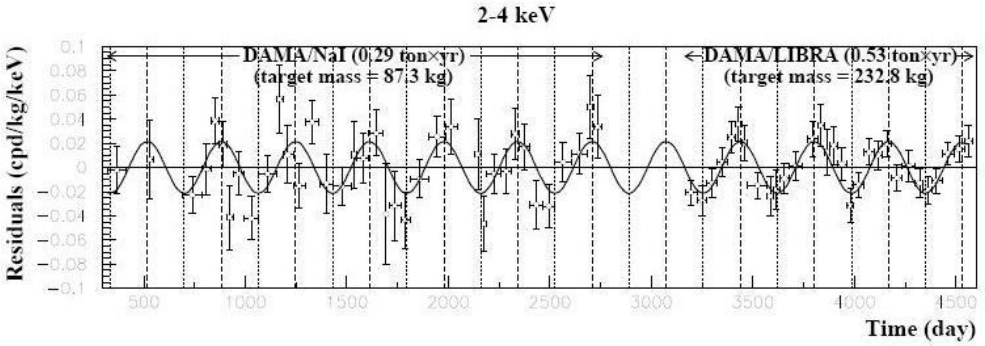
DAMA: DM signal?



7years of DAMA/NaI showed a 6σ modulation signal.

Graciela Gelmini-UCLA

DAMA+LIBRA 11 years, 0.83 ton × year, 8.2σ modulation signal.



arXiv:0804.2741

Collision inélastique de matière noire

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

$\chi N \rightarrow \chi^* N$ avec $\delta = m\chi^* - m\chi \sim 100$ 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 vélocité inférieure à

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

μ est la masse réduite du nucléonet matière noire

- Cette vélocité minimale augmente our 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. D76 (2007) 083519

Ces anomalies ont-elles un point common?

- 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 χ, 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:

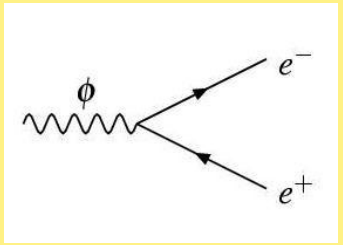
- A Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) χ avec m_χ ~ 500-800 GeV pour résoudre les problèmes à haute énergie
- Cette particule de matière noire χ peut s'annihiler en ϕ:

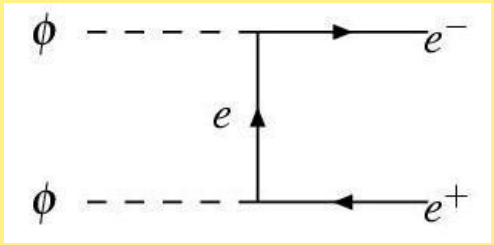
$$\chi\chi \rightarrow \phi\phi$$

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

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

- ϕ est si léger qu'il ne peut se désintégrer qu'en leptons (e ou μ)
- ϕ est un nouveau boson de masse m_ϕ ~ 100 MeV-1 GeV





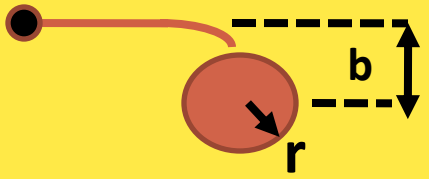
Basse énergie:

- On impose que la matière noire χ 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

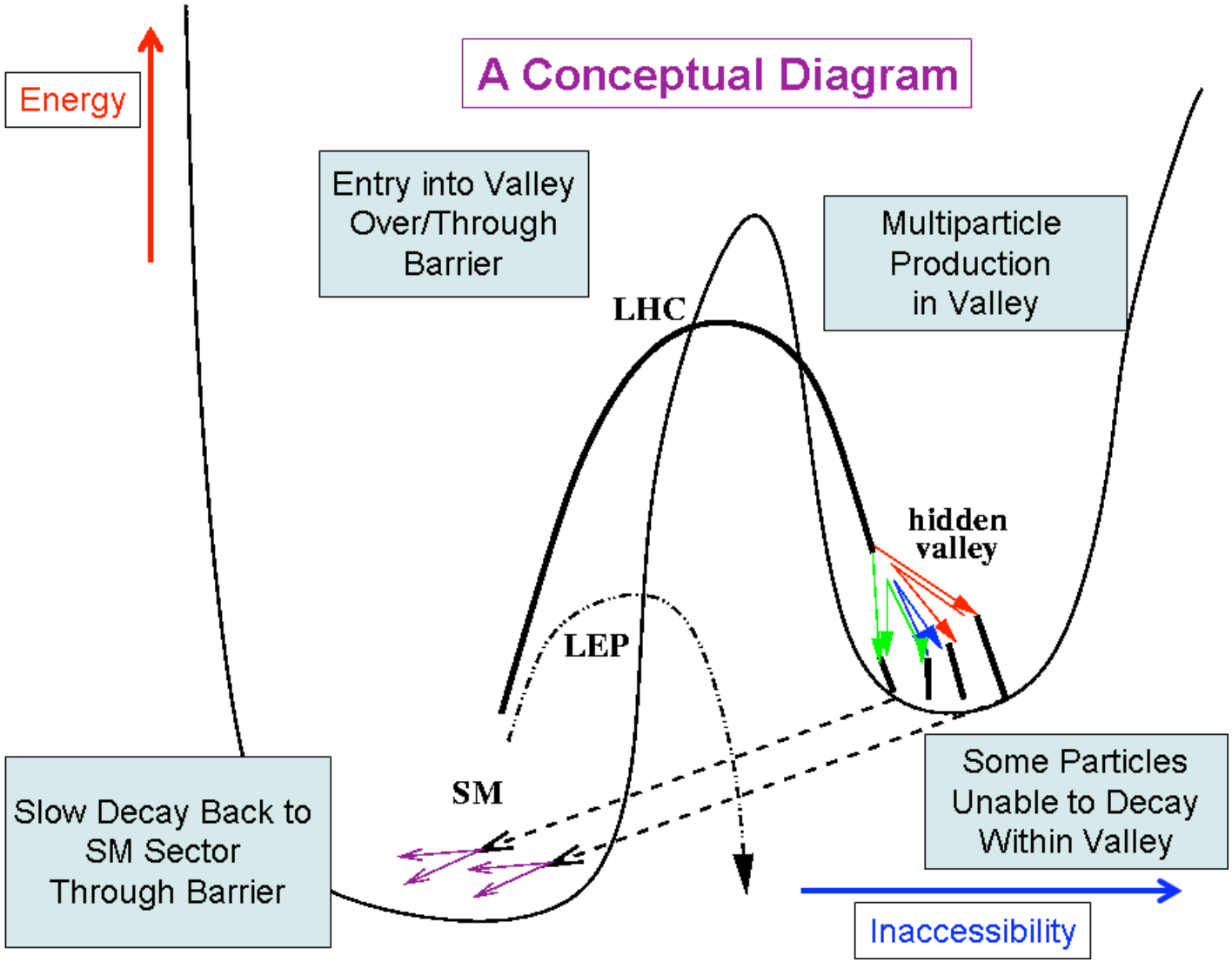
- Les auteurs partent de ce qui est nécessaire pour expliquer les observations de PAMELA et ATIC, puis imposent des contraintes pour satisfaire le taux mesuré par PAMELA
- Puis ils expliquent que χ , m_χ= 500-800 GeV ne peut être la particule supersymmétrique la plus légère (LSP)
- D'autres arguments (naturaleness) les ammènent à introduire un nouveau boson de faible masse: ϕ, m_ϕ ~ 1GeV
- 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:



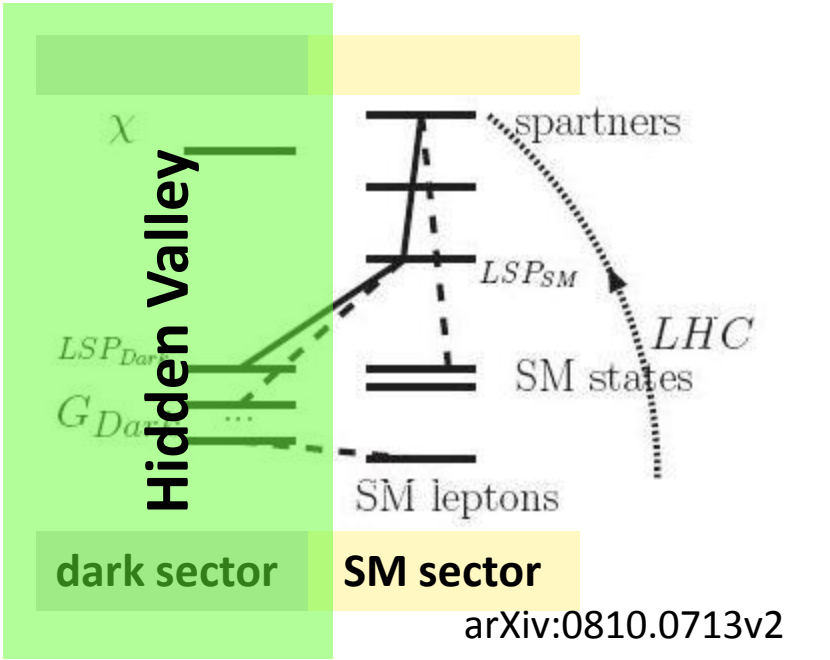
- Mécanisme quantique nécessaire pour augmenter (~ 100 fois plus grand) le taux d'annihilation de la matière noire. La section efficace normale d'un WIMP est bien trop faible pour satisfaire les observations faites par PAMELA.
- Analogie classique: la section efficace d'une étoile de rayon r est πr^2 mais cette section efficace augmente en présence de forces gravitationnelles. Elle devient πb^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 > $(\alpha M_{DM})^{-1}$, α: 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 $SUSY_{dark}$**
- **Plusieurs états excités pour χ**
- **Cette particule de matière noire χ n'est pas le LSP (lightest supersymmetric particle)**
- **ϕ est le véritable LSP**
- **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_{SM} (un faux LSP)**
- **Mais ce LSP_{SM} est un messager qui peut passer de l'autre côté (dans le dark sector) puis se désintégrer jusqu'au vrai LSP, le LSP_{dark}**
- **Et finalement le LSP_{dark} (ϕ) est aussi un messager qui peut retraverse du côté du modèle standard en se désintégrant en leptons**



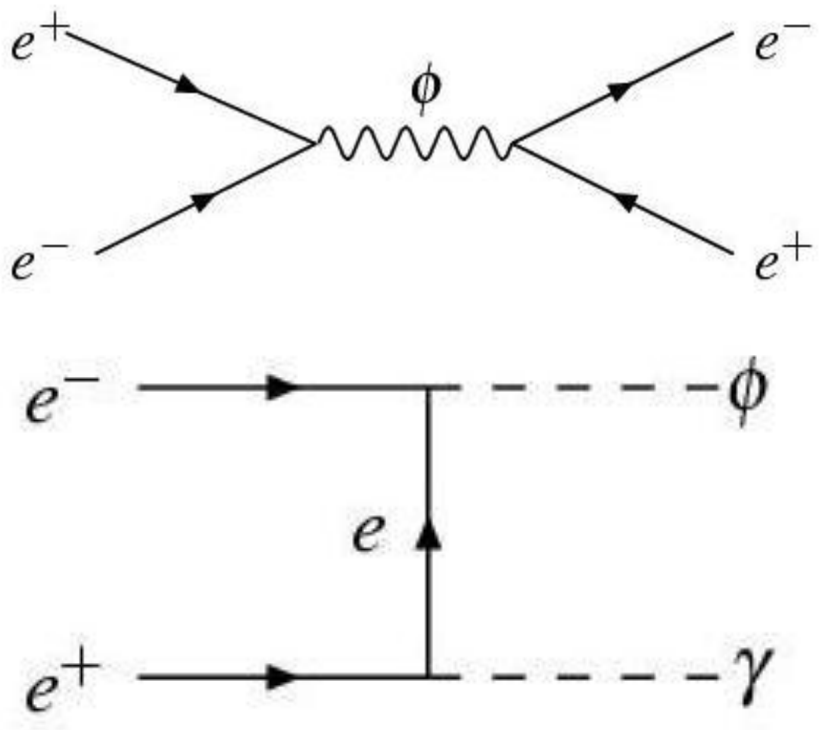
arXiv:0810.0713v2

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 ϕ a-t-il-pu nous échapper?

Si ϕ→ e+e- , alors e+e-→ϕ est aussi possible

de même que e+e- → ϕ γ

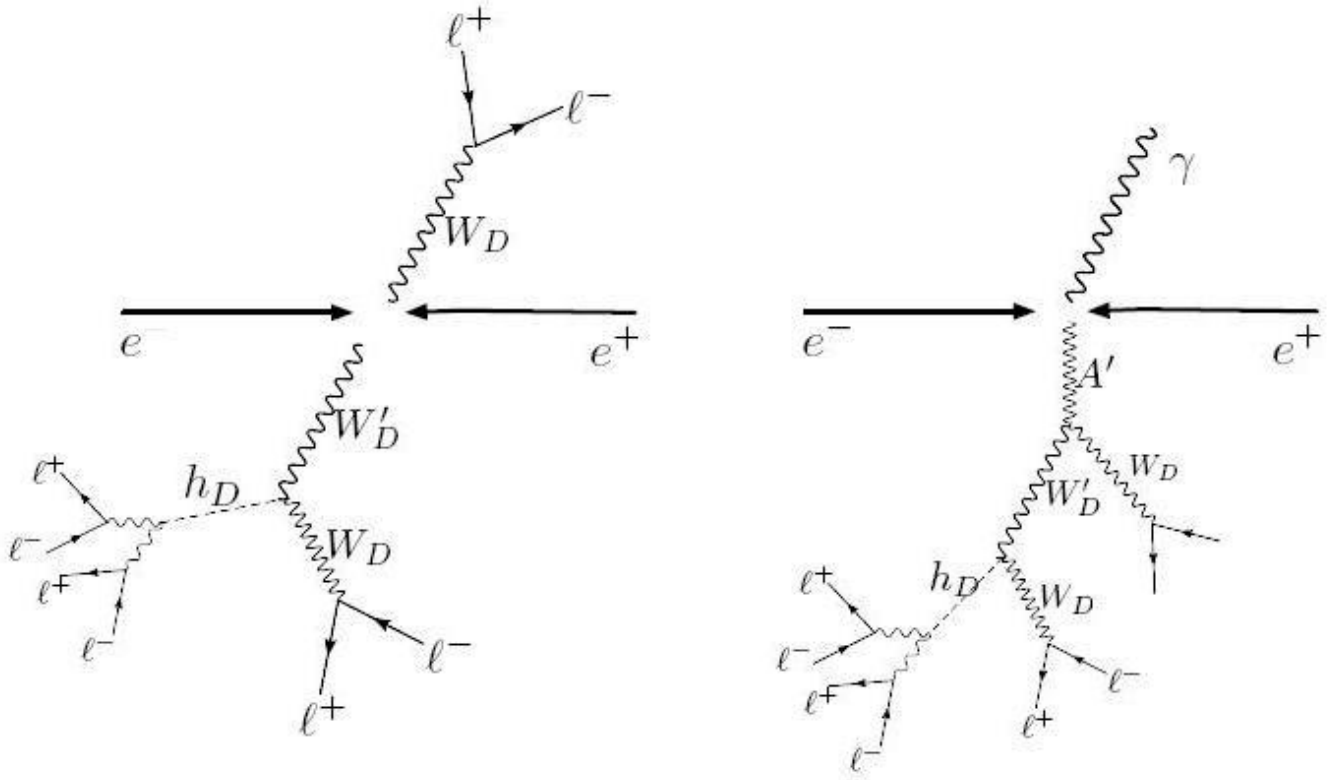


- Pourrait être vu dans les données de Belle et BaBar
  - en cours à Babar
- Mais la résonance est trop étroite même aujourd'hui
- Mieux vaut chercher un photon
  - mais ça diminue σ par ε_{eff}^2
- Une section efficace trop faible a probablement empêché sa détection dans le passé dans les recherches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



Durée de vie et résolution

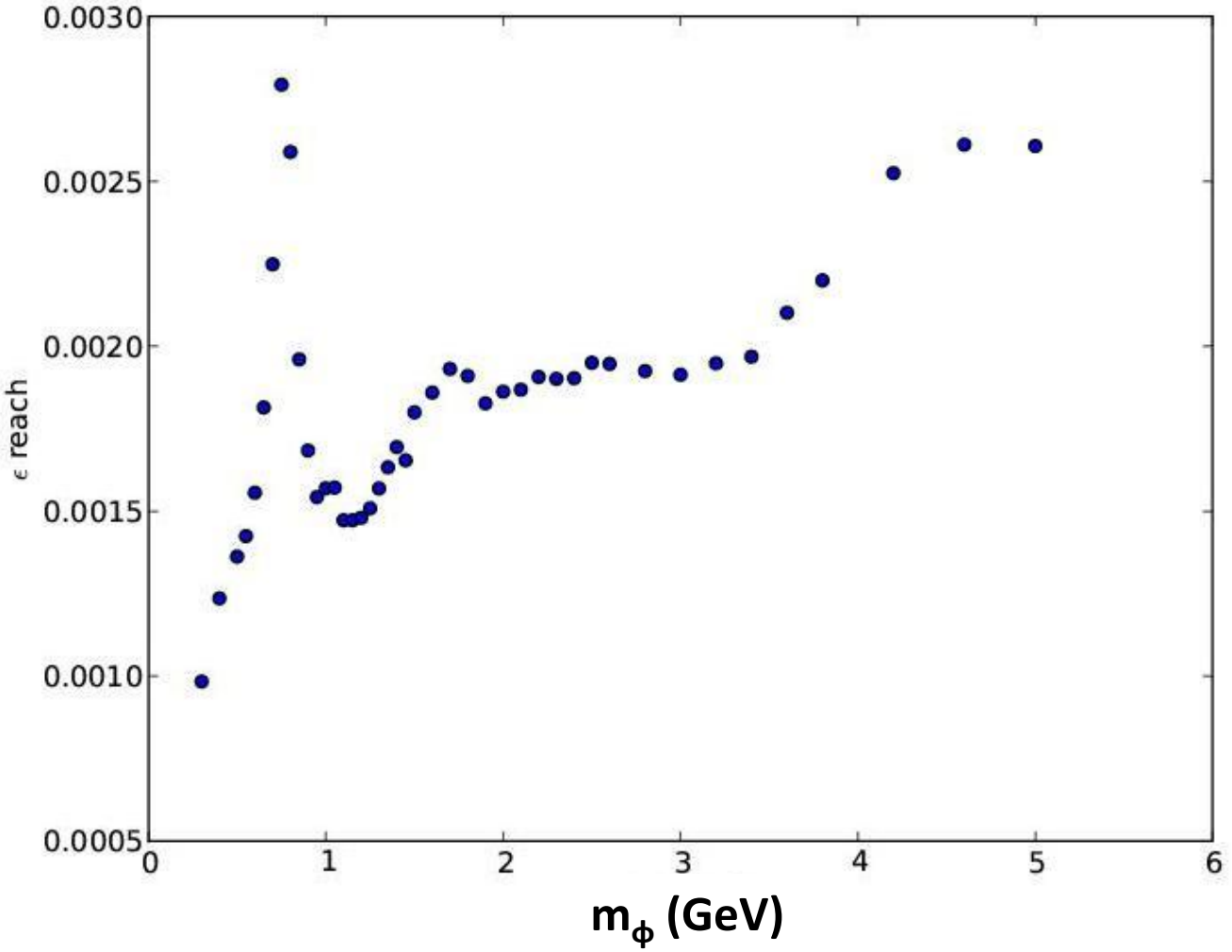
Lian-Tao Wang et al. arXiv:0901.0283v1

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

- **Un boost typique: γ ~ O(10), crée un vertex déplacé si ε < 10^{-4}**
  - **invisible au début du LHC avec 200 pb^{-1}**
- **L'angle d'ouverture entre les 2 leptons est δ(θ) ~ $m_{\gamma'}/p_T$ < 0.1**
- **Ce qui veut dire Δ(η) ~ 50 mrad à θ ~ π/2**
- **ATLAS peut distinguer 2 traces séparées de 1 mrad:**
  - **Résolution des Pixel : 100 µm; dernière couche à 12 cm**
  - **Encore plus facile à grande rapidité**
- **Pourrait être observé dès le début du LHC avec ε ≥ 10^{-3}**

Reach on ε_{eff}^2 from BaBar ~ 10^{-3}

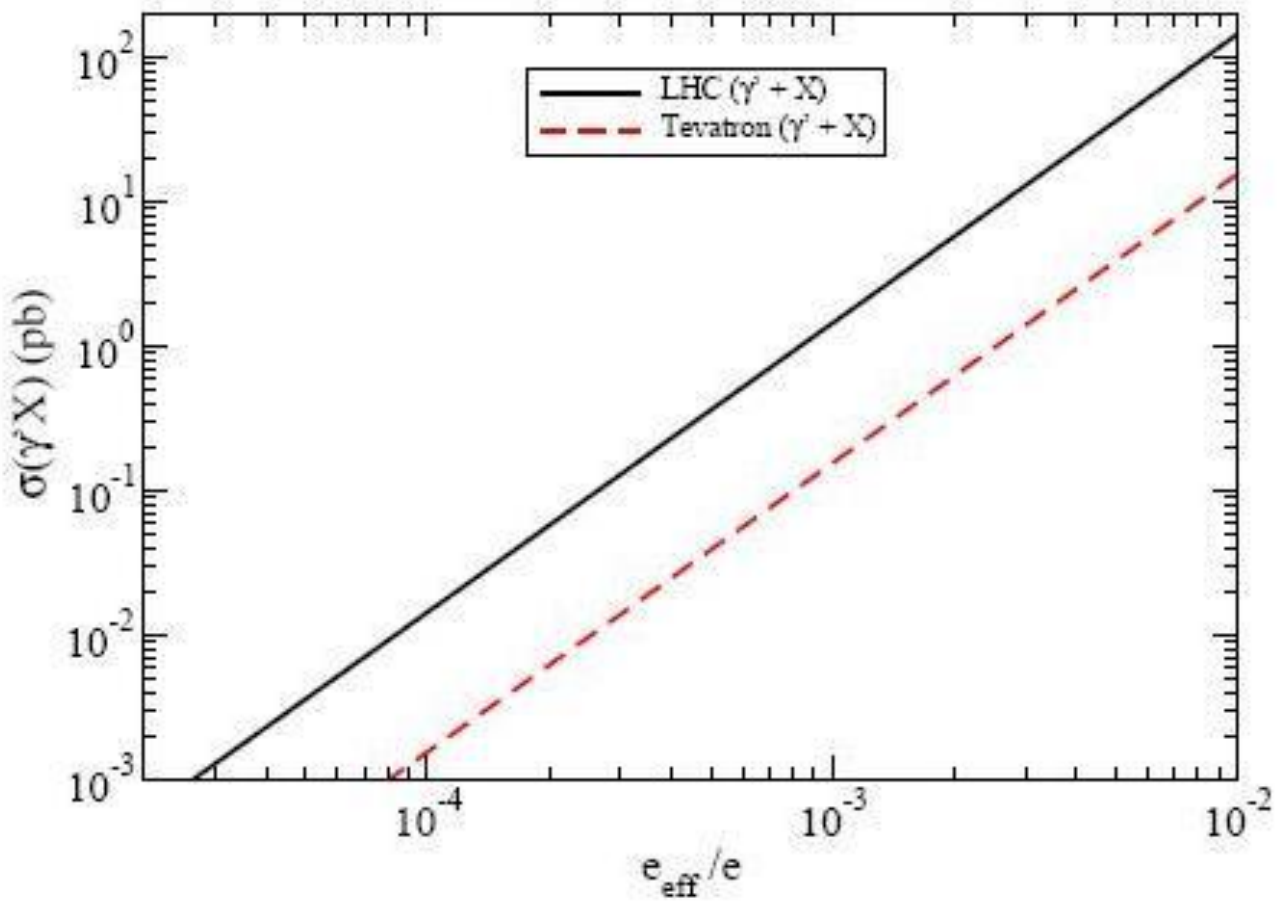
preliminary work from Lian-Tao Wang



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

On espère avoir ~200pb de donnèe durant la première année du LHC

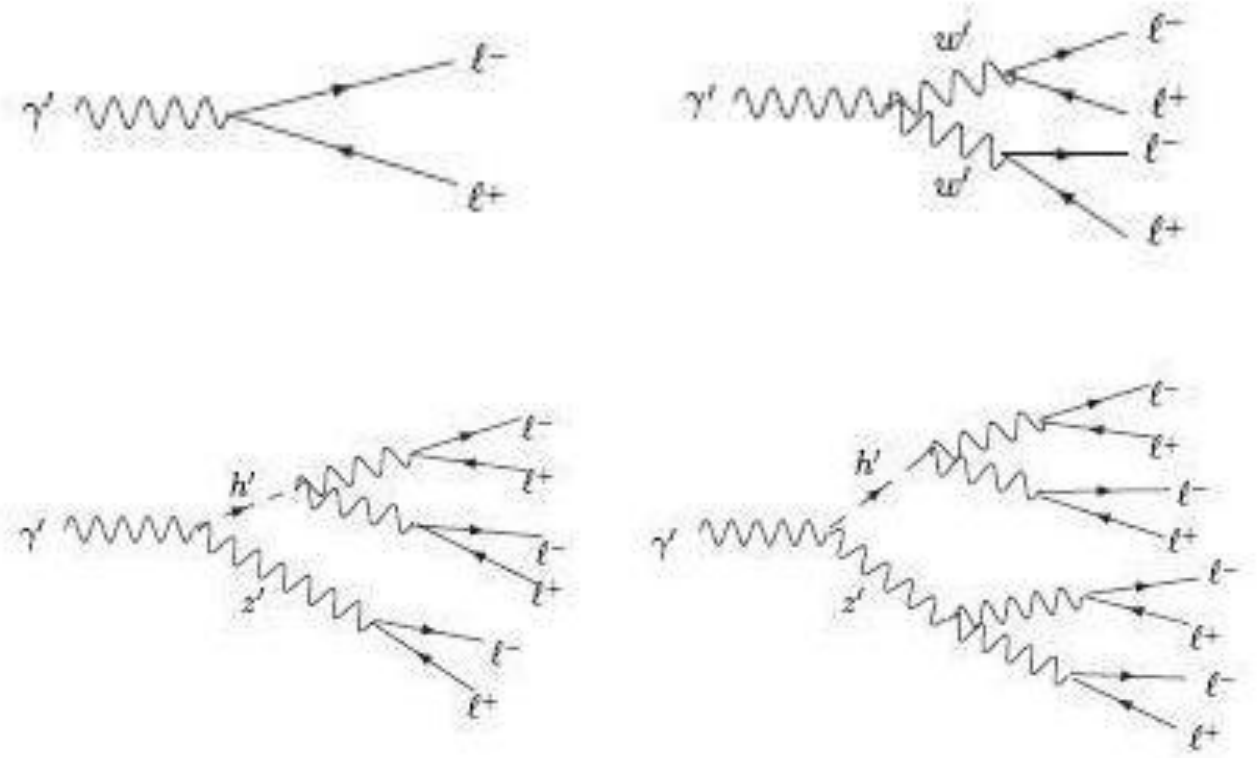
Serait visible pour $\varepsilon > 10^{-3}$



Lian-Tao Wang et al, arXiv:0901.0283v1

Désintégrations typique de la matière noire

Lian-Tao Wang et al. arXiv:0901.0283v1



- **γ'**: boson du dark sector
  - (semblable à **ϕ**)
- 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

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

$\phi \rightarrow e^+e^-$ or $\mu^+\mu^-$

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

Strassler et al.

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

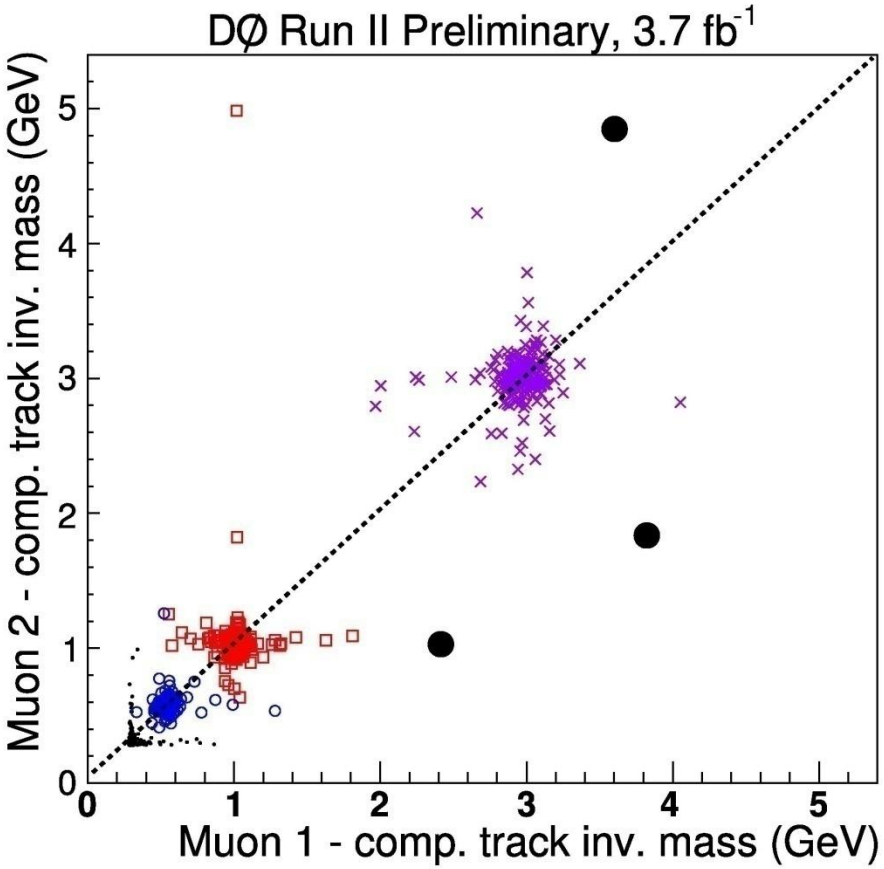
$\phi \rightarrow e^+e^-$ or $\mu^+\mu^-$

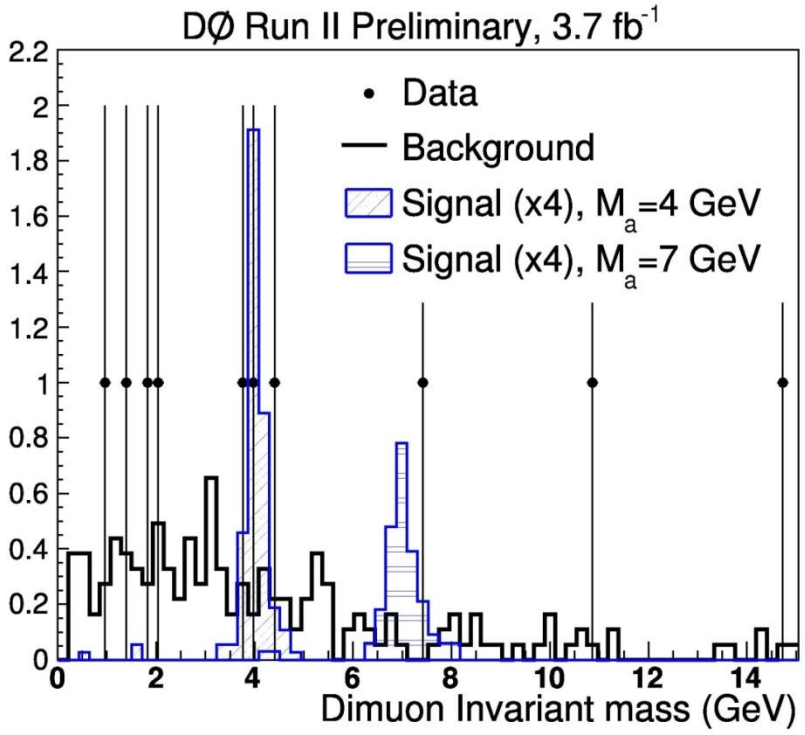
- $m_H \sim 140$ GeV
- $m_\phi \sim 100$ MeV - 1 GeV

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

Recherche du Higgs NMSSM à D0
h →aa→ μμ μμ et h →aa→ μμ ττ

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)





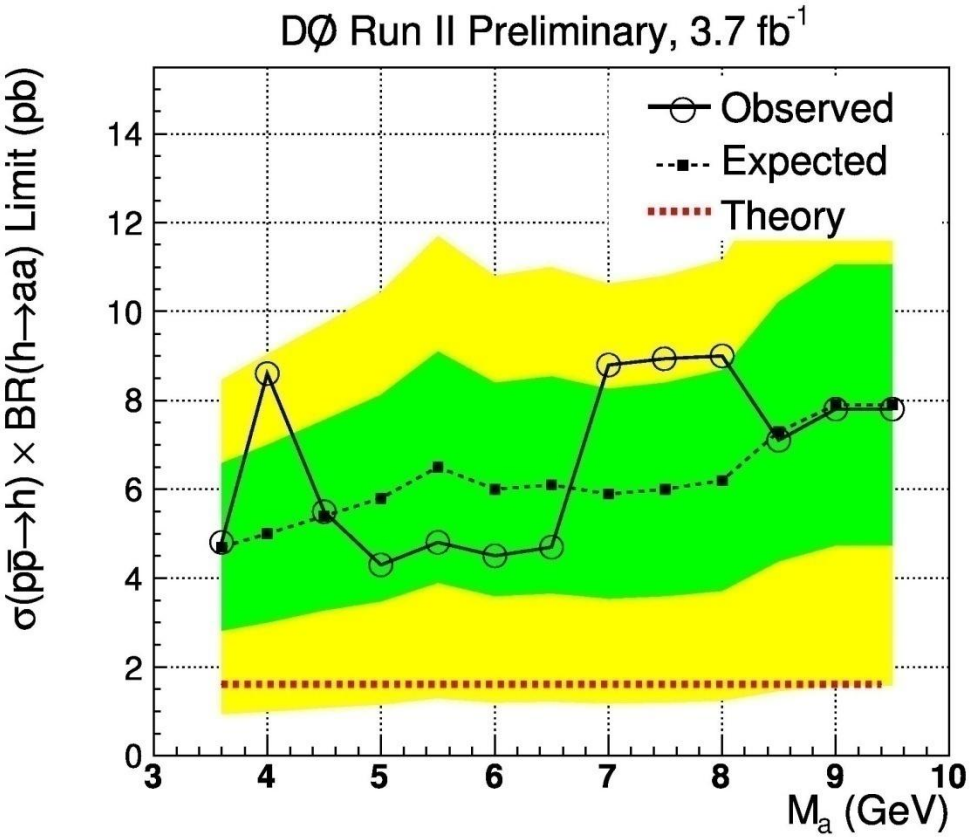
Limites pour h→aa→μμ μμ de D0

- Recherche similaire à h→ ϕϕ →μμ
- Cherchent 2 paires de muons (muon+trace)
- Limite établie pour

σ(pp →h+X) x BR(h→aa) x BR(a →μμ)^2 ~ 10 fb

- si σ(pp →h+X) ~ 100 fb,

alors BR(a →μμ) < 10% si BR(h→aa) = 100%

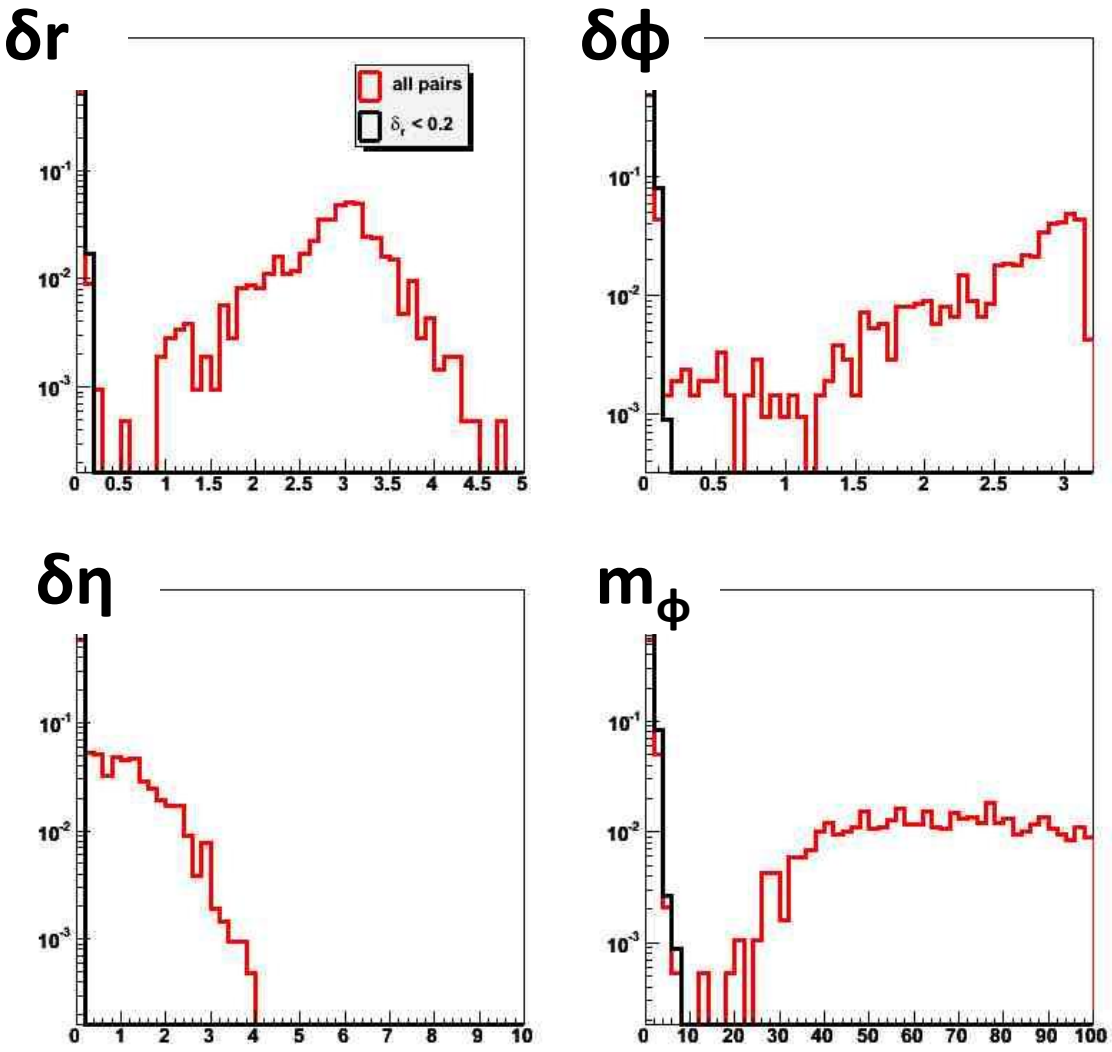


Première tentatives avec des gerbes de leptons dans ATLAS

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

$$\delta r < 0.2$$

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



Problème principal dans ATLAS: trigger

- Ces évènements sont rejetés par au second niveau
  - Premier niveau est basé complètement sur l'électronique
  - Les 2^{ième} et 3^{ième} 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

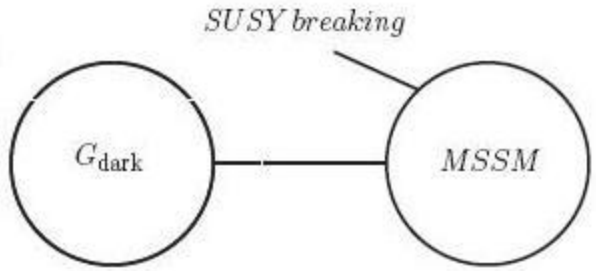
Tout reste à faire….

- 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'orignal dans tout ça?

Recette pour faire un orignal 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 SuperSymmétrie**
- **"Sombre" parce qu'on a affaire à la matière noire…**
- **Et l'orignal 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 meileur moyen d'attrapper un orignal, à ATLAS ou ailleurs…

… c'est encore de le caller

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