

Chercher de la matière noire: (passé) et présent

Peter Wolf



Ether, entités invisibles, matière noire
Observatoire de Paris, 17 Mars 2016

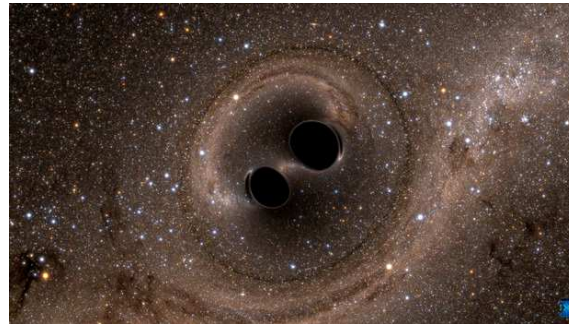
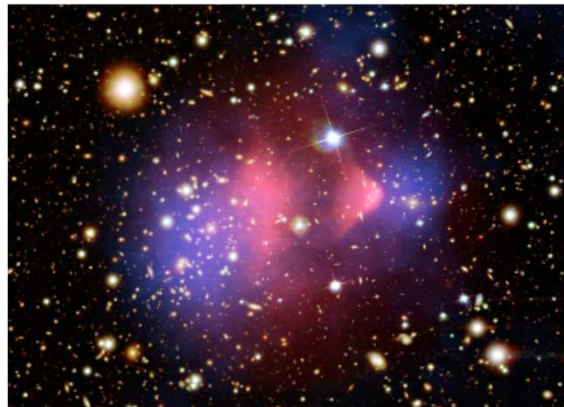
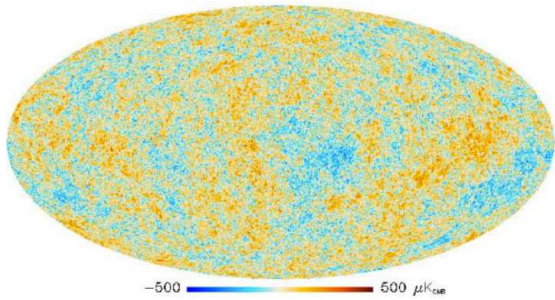


Menu

- Introduction
- Tentative d'une définition et classification
- Une « nouvelle » planète noire?
- Recherche d'un champ scalaire fondamental massif (matière noire?) au SYRTE
- Conclusion

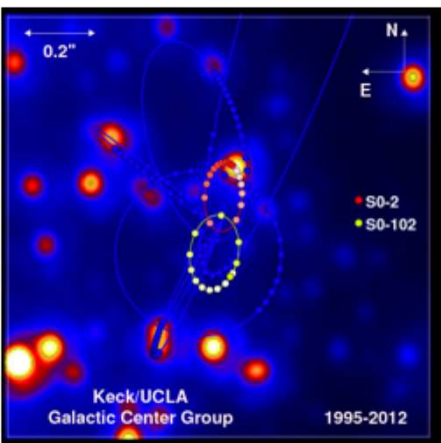
Introduction

- Les modèles physiques font fréquemment appel à des entités invisibles pour s'accommoder de résultats expérimentaux ou observationnelles incompatibles avec les lois et constituants en vigueur.
- Il est en effet beaucoup plus facile, agréable, et raisonnable d'invoquer des entités invisibles, que de modifier les paradigmes fondamentauxjusqu'à un certain point....
- Cela peut aller de proportions faibles (e.g. une planète sur 9) à très importantes (e.g. 95.1% de l'univers).
- Dans tous les cas c'est une situation inconfortable pour un physicien.
- Par ailleurs, certains entités sont invisibles, tout en étant parfaitement intelligibles dans le cadre des lois et constituants actuels (e.g. trous noirs, Planète 9).



Tentative d'une définition et classification

Définition: *Une entité gravitationnelle invisible (« noire ») est une entité dont on n'observe que les effets gravitationnelles.*

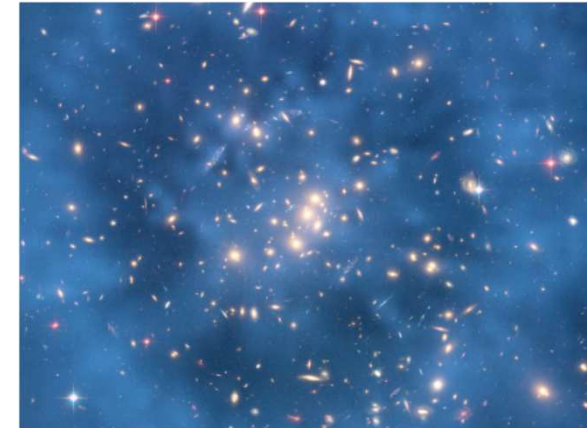


Entités noires compatibles
qu'on pense comprendre

- Planète X
- Trous noirs
- (Energie Noire)

Entités noires exotiques
témoins de notre ignorance

- Matière noire
- (Energie Noire)



Dans tous les cas, un maximum d'indices concordants et indépendants (gravitationnels et, si possible, non-gravitationnels) est souhaitable!

Une planète noire?

Désaccord mesuré
de 43'' d'arc par siècle

« Explications »

LeVerrier 1860:

- Ceinture d'astéroïdes entre soleil et mercure
- Planète « noire » (Vulcain ?)

Newcomb 1882:

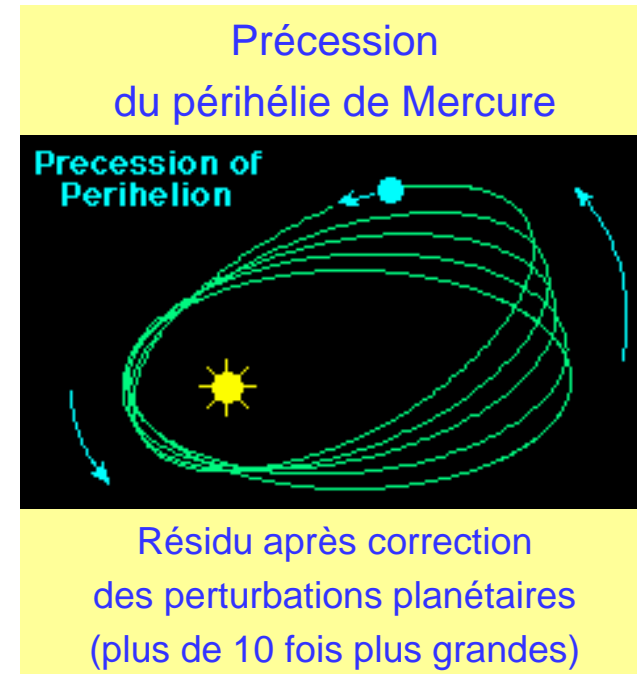
- Force en $1/r^n$ ($n=2+1.575 \cdot 10^{-7}$)

Von Seeliger, Poincaré 1906:

- Matière zodiacale

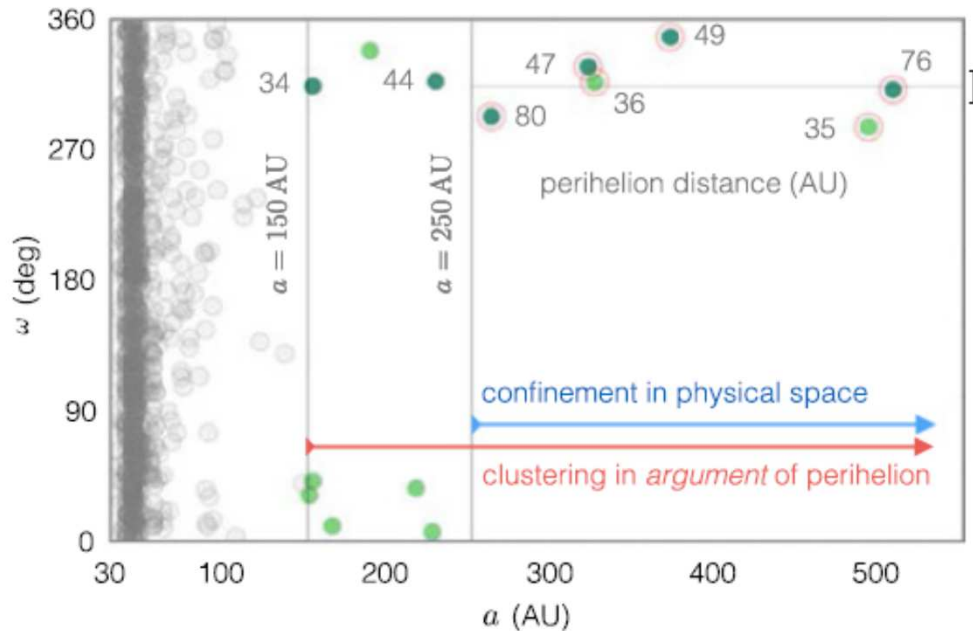
Einstein 2015:

- Relativité Générale

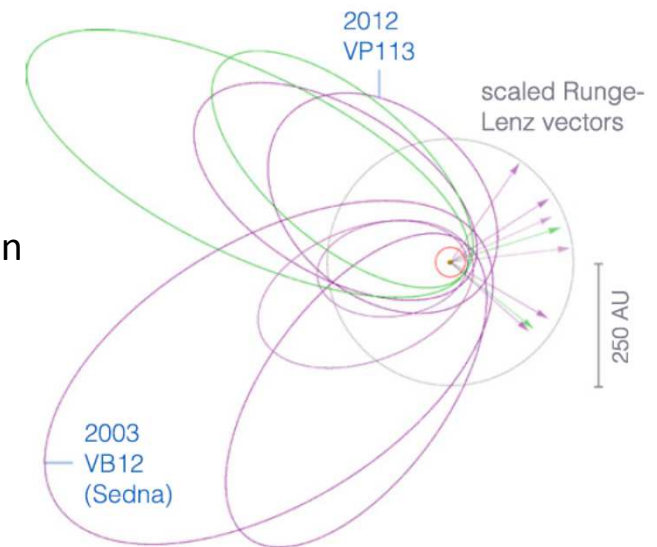


[Jean Eisenstaedt: *Einstein et la relativité générale* (2002)]

Une autre planète noire?

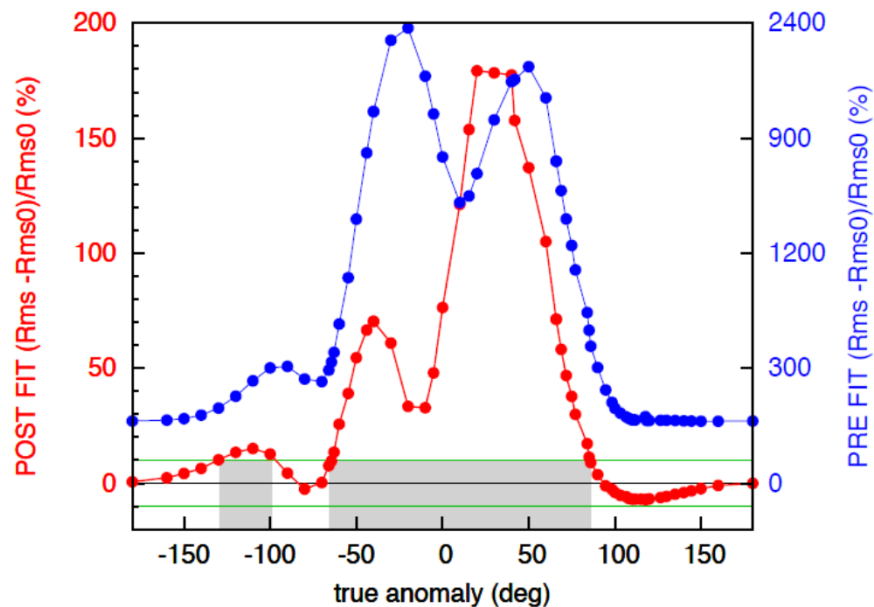


[Batygin & Brown 2016]

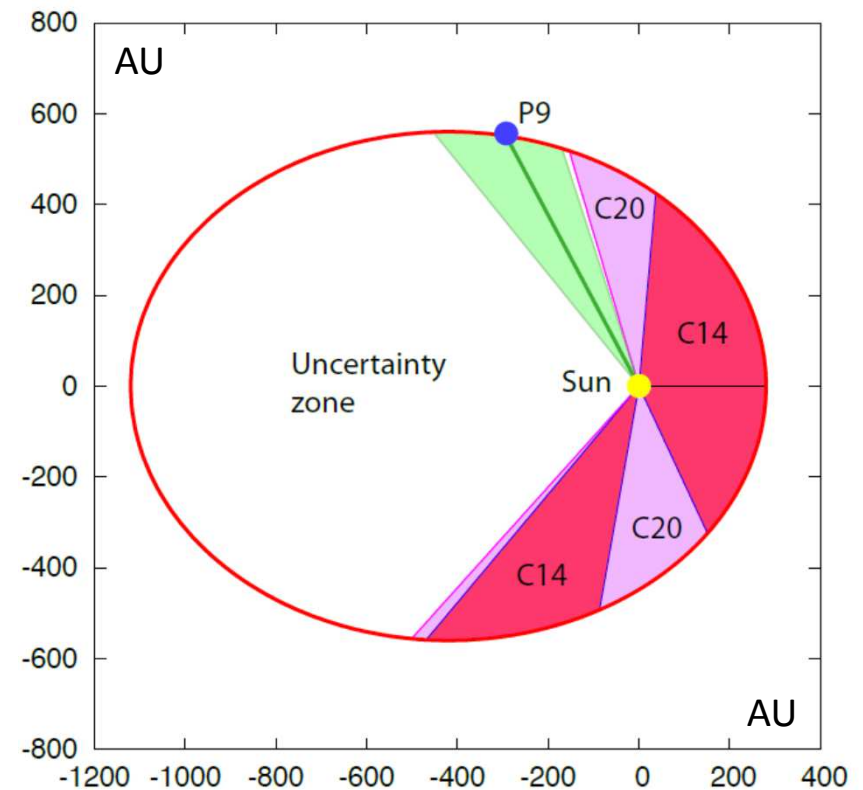


- La question de la neuvième planète (planète X) a été remise à l'actualité avec la découverte récente d'objets lointains dans le système solaire (ceinture Kuiper, nuage de Oort), à large excentricité.
- Le groupement surprenant des orbites de ces objets ($P < 0,007\%$) incite à chercher des explications
- L'hypothèse d'une planète massive (« noire ») à $\gg 200$ AU a été émise, le plus récemment par Batygin & Brown (2016)

L'effet sur le système solaire?

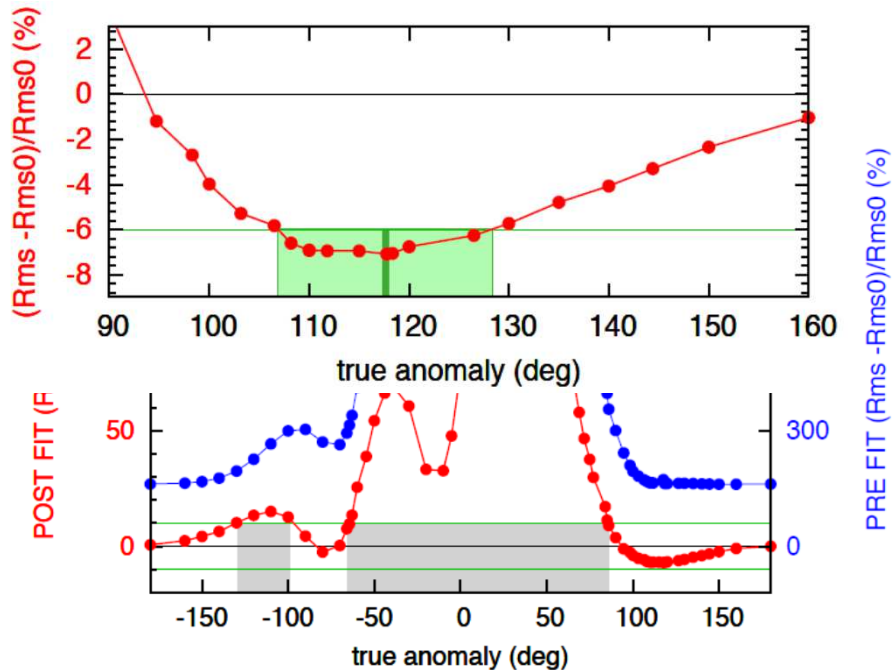


[Fienga, Laskar,
et al. 2016]

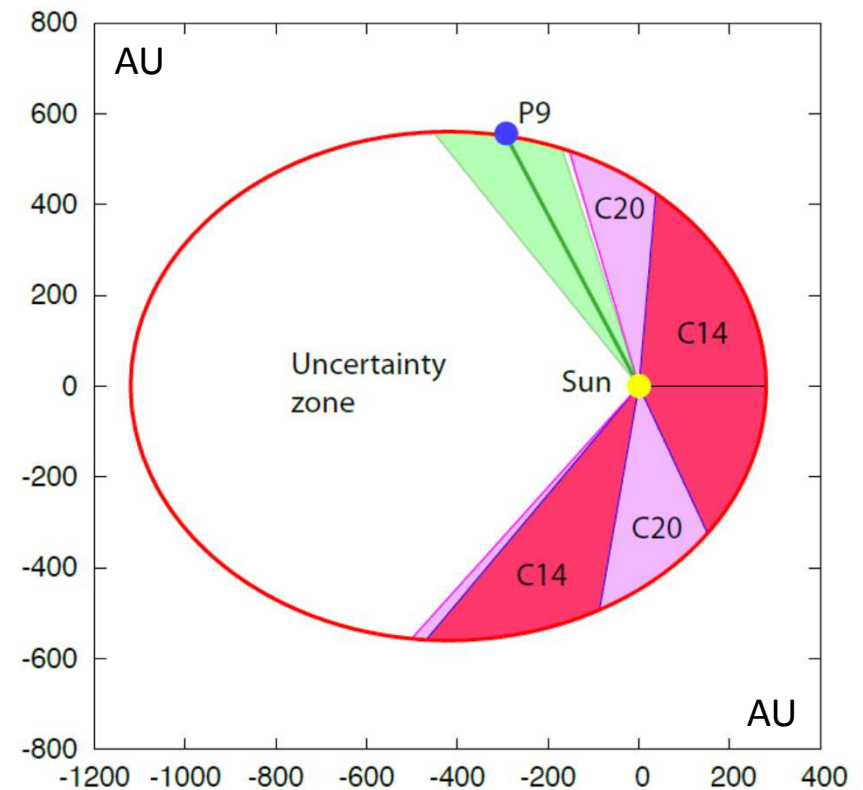


- En utilisant les éphémérides INPOP une équipe OCA + ObsPM a vérifié si une planète tel que proposé par Batygin & Brown ($a = 700$ AU, $e = 0.6$, $i = 30^\circ$; $P = 18500$ yr) était compatible avec les observations des autres planètes du système solaire, et Saturne (Cassini) en particulier.
- P9 peut exister pour certains positions sur son orbite, mais est exclu pour d'autres.
- L'incertitude de INPOP (résidus env. 10%) ne permet pas d'affirmer que rajouter P9 améliore l'ajustement.
- Donc, planète ou pas? Ca reste ouvert.....

L'effet sur le système solaire?



[Fienga, Laskar, et al. 2016]



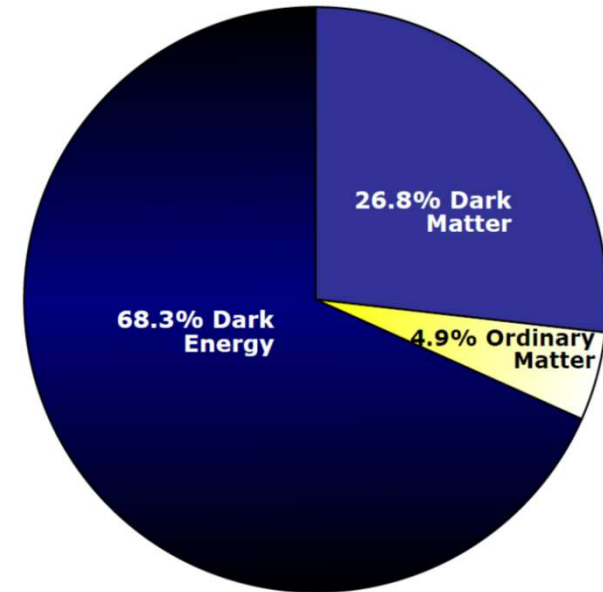
- En utilisant les éphémérides INPOP une équipe OCA + ObsPM a vérifié si une planète tel que proposé par Batygin & Brown ($a = 700$ AU, $e = 0.6$, $i = 30^\circ$; $P = 18500$ yr) était compatible avec les observations des autres planètes du système solaire, et Saturne (Cassini) en particulier.
- P9 peut exister pour certains positions sur son orbite, mais est exclu pour d'autres.
- L'incertitude de INPOP (résidus env. 10%) ne permet pas d'affirmer que rajouter P9 améliore l'ajustement.
- Donc, planète ou pas? Ca reste ouvert.....

Matière noire (intro brève, car déjà couvert)

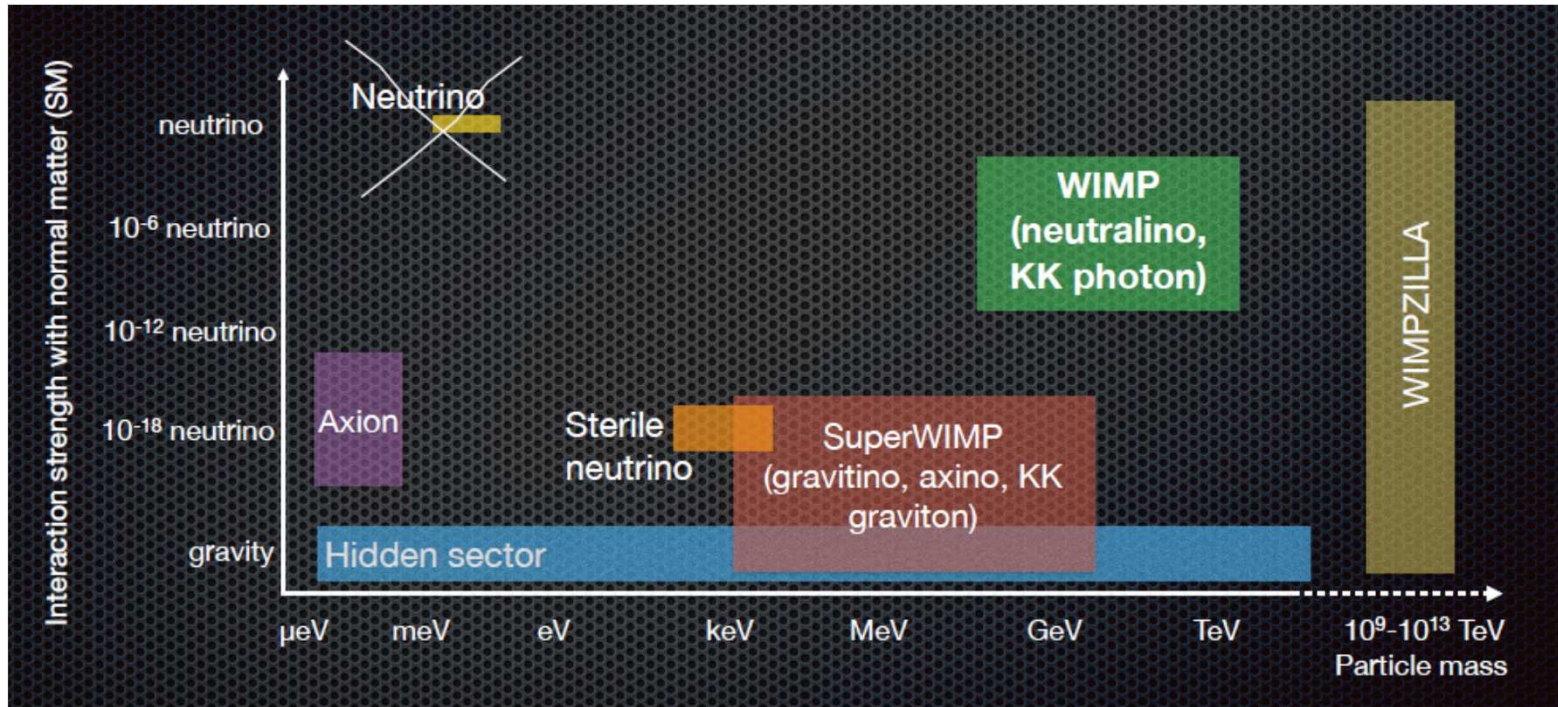
Observations nécessitant de la matière noire:

- Galaxy rotation curves
- Galaxy clusters and velocity dispersion
- Gravitational lensing
- Structure formation
- Cosmic Microwave Background (Λ CDM)

....



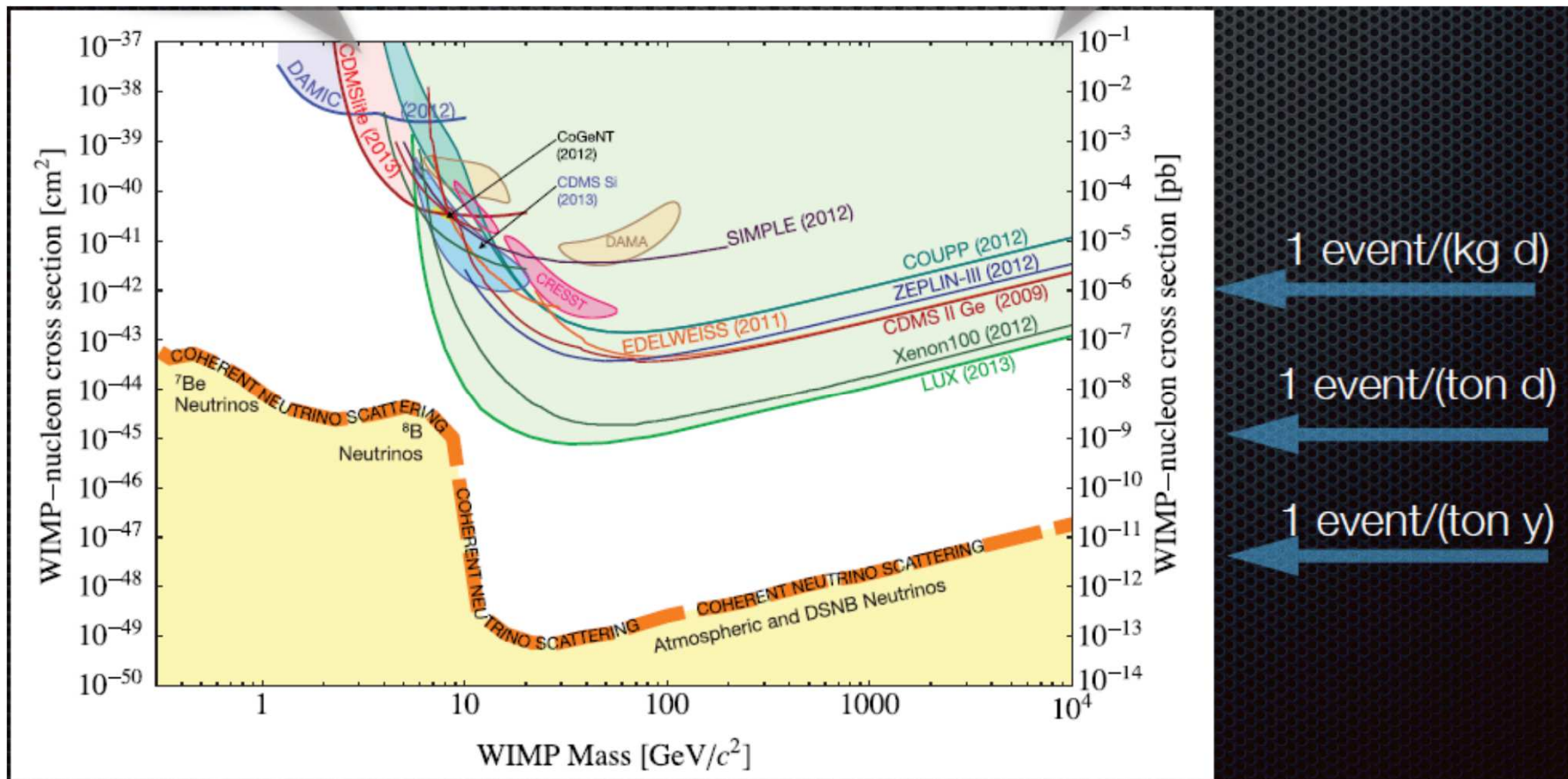
Détection de matière noire?



[Laura Baudis, *Dark matter detection review*, Paris, Nov. 2014]

- La grande majorité des tentatives de détection cherchent les traces des collisions DM-noyaux (détection directe) ou bien les signatures d'annihilation ou collisions de matière noire solaire ou galactique (détection indirecte).
- Les masses des particules hypothétiques de DM couvrent 10^{-15} à 10^{+16} de m_p .
- Plus récemment des tentatives plus « hypothétiques » à des masses bcp. plus faibles ($< 10^{-24} m_p$) ont vu le jour

Détection de matière noire: l'exemple WIMPs



[Laura Baudis, *Dark matter detection review*, Paris, Nov. 2014]

A la recherche d'un champ scalaire massif au SYRTE

A. Hees, J. Guéna, M. Abgrall, S. Bize, P. Wolf

En bref:

- Des nombreux modèles post-RG incluent un champ scalaire φ de masse nulle, ou très faible
- Un tel champ pourrait être un candidat pour la matière noire (une sorte « d'éther noir »)
- φ est peut être couplé à la matière ordinaire
- Cela résulte dans une violation du principe d'équivalence [Damour & Donoghue 2010-12]
- Une manifestation observable est l'oscillation des constantes fondamentales (α , m_q , Λ_{QCD} , m_e)
- Cela peut être recherché en comparant les fréquences d'horloges atomiques de différents types

Résultats d'une telle recherche en utilisant 6 années de données de comparaison Rb – Cs du SYRTE.

Résultats préliminaires!!

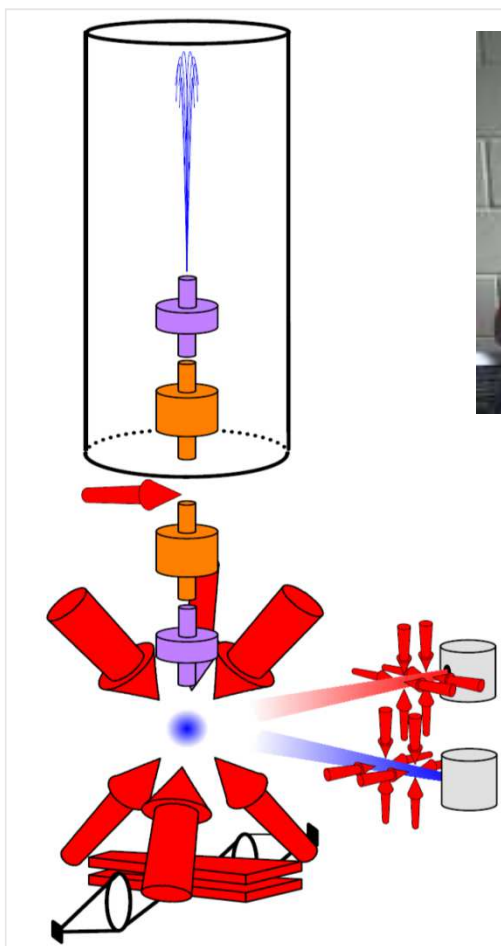
A la Recherche d'un champ scalaire massif au SYRTE

Un peu de théorie:

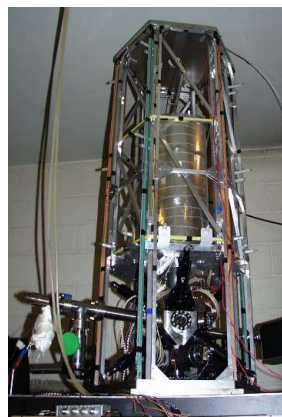
- Un champ scalaire φ rajouté au Lagrangien de RG + MS (théorie tenseur-scalaire)
- Si ce champ est massif, il est décrit par une équation de type Klein-Gordon, dont la solution oscille à sa fréquence de Broglie $f = m_\varphi c^2/h$, donc $\varphi(t) = \varphi_0 \sin(2\pi f t)$.
- En identifiant la densité (et donc l'effet gravitationnel) de ce champ à celle de la matière noire locale (0.4 GeV/cm^3 i.e. env. $\frac{1}{2}$ proton par cm^3) on fixe φ_0 .

- Choix d'un couplage linéaire de φ aux champs MS [Damour & Donoghue 2010-12]
- Du coup les constantes fondamentales deviennent des fonctions de φ e.g. $\alpha \rightarrow \alpha(\varphi)$
- Alors elles oscillent avec $\varphi(t)$, e.g. $\alpha(t) = \alpha_0(1 + d_e \varphi(t))$. L'amplitude de l'oscillation dépend des constantes de couplage d_i qui sont donc les paramètres « à déterminer » de la théorie.
- Si les couplages sont suffisamment fortes, on peut espérer d'en voir l'effet en cherchant une oscillation à fréquence inconnue des constantes fondamentales.

A la recherche d'un champ scalaire massif au SYRTE



André Clairon
1947 - 2015



- On sait que les fréquences des différentes transitions atomiques ont une dépendance différente des valeurs des constantes fondamentales.
- Cela a déjà permis de rechercher des variations des constantes fondamentales (linéaires, ou à période annuelle), d'origine cosmologique ou solaire.
- En particulier le rapport de fréquence $f_{\text{Rb}}/f_{\text{Cs}}$ est proportionnel aux variations de α , m_q , Λ_{QCD} .
- La fontaine atomique double FO2 du SYRTE a fourni > 16 ans de données de $f_{\text{Rb}}/f_{\text{Cs}}$ d'exactitude et stabilité inégalée dans le monde.
- Cette fontaine est décidément une aubaine pour la physique fondamentale (mais pas que!).

Premiers Résultats: Préliminaires!!!

- 6 ans de données de f_{Rb}/f_{Cs}
- A chaque fréquence on ajuste une amplitude A
- Aucun signal détecté 😞
- Nouvelles contraintes sur les constantes de couplage 😊
- Résultats complémentaires aux expériences précédentes
- Si l'on suppose un couplage uniquement à l'électromagnétisme, amélioration de plus d'un ordre de grandeur par rapport aux contraintes précédentes 😊

Conclusions

- Les entités « noires » sont, et vont rester, une réalité, si pas de la physique au moins de notre compréhension.
- Néanmoins, la recherche de nouvelles signatures gravitationnelles, et surtout non-gravitationnelles, de ces entités est une des frontières de la physique actuelle.
- Cela est vrai pour les entités « compatibles » mais encore plus pour les entités « exotiques ».
- L'augmentation constante des moyens d'observations et des précisions de mesure donne lieu à des nouvelles observations ou des « nouvelles contraintes à l'imagination ».
- Cela apporte les pièces d'un puzzle qui nous révélera, peut être, la physique au-delà de la Relativité Générale et du Modèle Standard des Particules.