

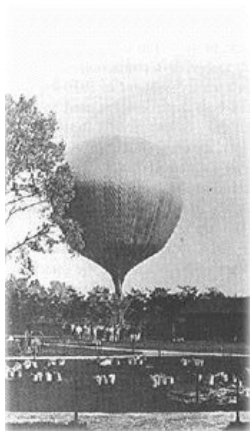
L'UNIVERS COMME LABORATOIRE

Jérôme Novak (Jerome.Novak@obspm.fr)

GdR Phénomènes Cosmiques de Hautes Énergies

Séminaire de prospective, École Polytechnique,
28-29 septembre 2009

INTRODUCTION



- Les phénomènes cosmiques de hautes énergies ont été les premiers accélérateurs naturels pour les expériences de physique des particules.
- Puis, à partir de la construction de grands accélérateurs et collisionneurs, l'univers a été moins intéressant comme laboratoire, sauf pour la gravitation.

⇒ depuis une douzaine d'années, le domaine des **astroparticules** a favorisé les échanges entre astrophysiciens, physiciens nucléaires et physiciens des particules.

PLAN

1 PARTICULES EXOTIQUES

- Quelle est la nature de la matière noire ?
- D'où vient l'asymétrie matière / antimatière ?

2 CONDITIONS EXTRÊMES

- Quelles sont les propriétés de la matière ultra-dense ?
- Comment se comportent les champs magnétiques très intenses ?
- Comment est la transition de phase de la matière nucléaire vers la matière de quarks ?

3 THÉORIES FONDAMENTALES

- L'invariance de Lorentz est-elle violée ?
- Comment tester les théories de gravitation quantiques ?
- La relativité générale décrit-elle bien les trous noirs ?

PLAN

1 PARTICULES EXOTIQUES

- Quelle est la nature de la matière noire ?
- D'où vient l'asymétrie matière / antimatière ?

2 CONDITIONS EXTRÊMES

- Quelles sont les propriétés de la matière ultra-dense ?
- Comment se comportent les champs magnétiques très intenses ?
- Comment est la transition de phase de la matière nucléaire vers la matière de quarks ?

3 THÉORIES FONDAMENTALES

- L'invariance de Lorentz est-elle violée ?
- Comment tester les théories de gravitation quantiques ?
- La relativité générale décrit-elle bien les trous noirs ?

PLAN

1 PARTICULES EXOTIQUES

- Quelle est la nature de la matière noire ?
- D'où vient l'asymétrie matière / antimatière ?

2 CONDITIONS EXTRÊMES

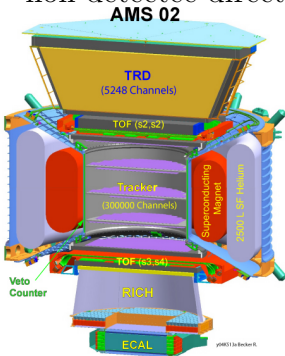
- Quelles sont les propriétés de la matière ultra-dense ?
- Comment se comportent les champs magnétiques très intenses ?
- Comment est la transition de phase de la matière nucléaire vers la matière de quarks ?

3 THÉORIES FONDAMENTALES

- L'invariance de Lorentz est-elle violée ?
- Comment tester les théories de gravitation quantiques ?
- La relativité générale décrit-elle bien les trous noirs ?

MATIÈRE NOIRE

La plupart des modèles cosmologiques prévoient la présence de matière non-baryonique, au-delà du modèle standard et non-détectée directement.



Les candidats comme le **neutralino** ou les particules résultant de dimensions supplémentaires compactifiées produiront des signatures particulières par leur annihilations dans le halo galactique.
⇒détectons des modifications des flux d'antiparticules et des rayons γ .

AMS-02 aura la capacité de détecter les particules liées aux dimensions supplémentaires jusqu'à $250 \text{ GeV}/c^2$.

INTEGRAL, Fermi, ANTARES, CTA et KM3NeT peuvent aussi rechercher des signaux indirects.

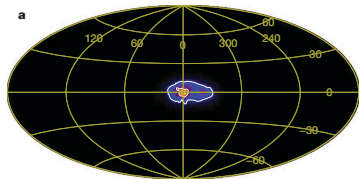
ANTIMATIÈRE

En physique des particules, l'asymétrie matière/antimatière reste une question ouverte : comment expliquer la baryogénèse ?

- non conservation du nombre baryonique et forte violation de CP ? (au-delà du modèle standard)
- existence de domaines d'antimatière primordiale ?

⇒ recherche d'antinoyaux dans les rayons cosmiques (AMS-02)

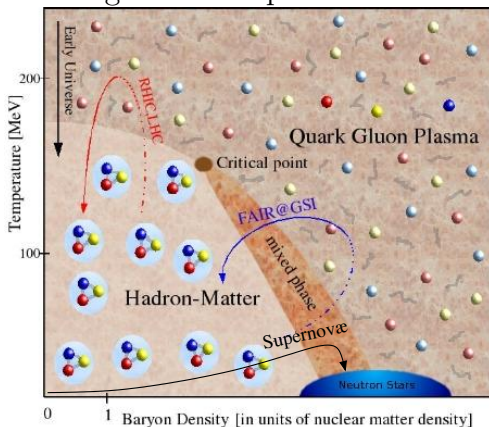
⇒ observations des raies d'annihilation à 511 keV (SPI/INTEGRAL) a permis de cartographier l'émission du centre galactique.



Weidenpointner et al. (2008)

ÉQUATION D'ÉTAT DE LA MATIÈRE DENSE

Diagramme de phase :



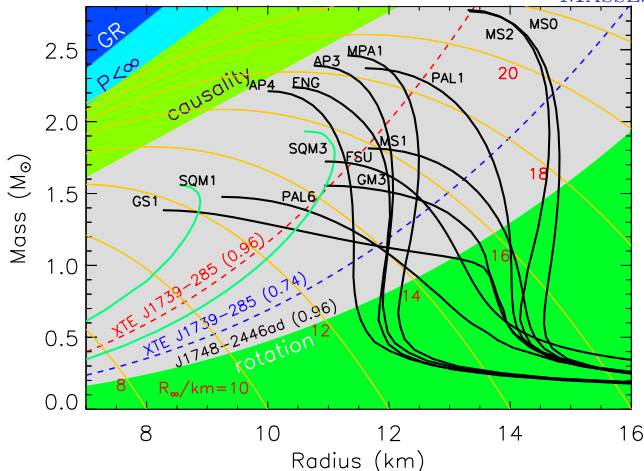
- Quelles sont la composition et les propriétés (équation d'état) de la matière au-delà de la densité nucléaire ?

⇒ les expériences terrestres ne permettent pas de tester tous les domaines.

A priori les supernovae gravitationnelles et les étoiles à neutrons sont dans ces régimes haute densité + basse température.

ÉTOILES COMPACTES :

MASSES ET RAYONS



*Lattimer &
Prakash (2005)*

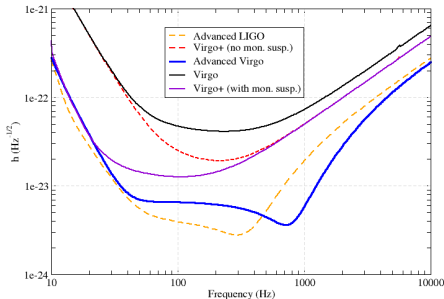
⇒ grand intérêt d'observations fiables de couples (M, R)
pour les étoiles à neutrons

ÉTOILES COMPACTES :

ASTÉROSISMOLOGIE

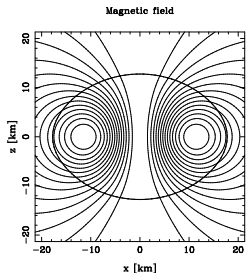
Les caractéristiques des ondes gravitationnelles émises par oscillations d'étoiles à neutrons dépendent de l'équation d'état

- rapport signal/bruit trop faible pour espérer détecter avec Virgo / LIGO ;
- \Rightarrow « Advanced Virgo » et des sources galactiques.



L'étude des éruptions géantes (par ex. SGR 1900+14) et des éventuelles QPO peut aussi contraindre l'équation d'état (*Steiner & Watts (2009)*)

CHAMP MAGNÉTIQUE EXTRÊME



Le champ magnétique très intense autour de certains pulsars—étoiles à neutrons ($\rightarrow 10^{15}$ G) permet de tester l'électrodynamique quantique dans des régimes extrêmes, impossibles à mettre en œuvre sur Terre.

\Rightarrow phénomènes exotiques : polarisation du vide, dédoublement de photons ou création de paire par un seul photon.

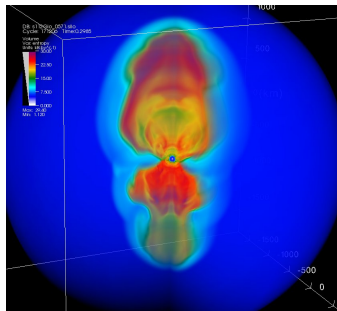
\Rightarrow possibilité de tester des candidats matière noire (Light Pseudoscalar Boson) par oscillation en photon en présence de champs magnétique intense : observation par Fermi du pulsar binaire J0737-3039 ?

SUPERNOVAE :

LABORATOIRES DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Le phénomène de supernova gravitationnelle réunit de nombreuses conditions « extrêmes » pour les théories :

- champ gravitationnel intense (formation d'un astre compact) ;
- densités nucléaires et plus ;
- températures de quelques dizaines de MeV ;
- matière opaque aux neutrinos, turbulence, MRI, SASI,...



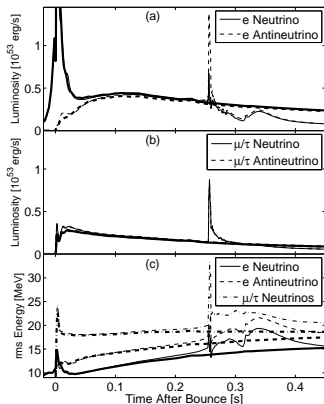
simulation de Marek & Janka (2009)

⇒ pas de consensus sur le mécanisme d'explosion, mais instabilité(s) 3D + neutrinos (+RG) à prendre en compte.

SUPERNOVAE :

ONDES GRAVITATIONNELLES ET NEUTRINOS

- Les ondes gravitationnelles provenant de supernova galactique seront détectables ;
- peu probable d'obtenir des informations sur la matière nucléaire (par ex. la compressibilité) par ce canal.



- Possibilité de transition de phase prévue par la QCD ;
 - formation d'un condensat de quarks peu après le rebond ;
- ⇒ apparition d'un second rebond et d'un second pic en neutrinos avec modification des énergies des neutrinos.

Sagert et al. (2009)

GRAVITATION QUANTIQUE ET INVARIANCE DE LORENTZ

- Les observations de sursauts γ à des distances cosmologiques permettent de contraindre de possibles violations de l'invariance de Lorentz.
- Les mesures des temps d'arrivée des photons les plus énergétiques donnent une limite sur la dépendance de la vitesse de propagation / énergie des photons.

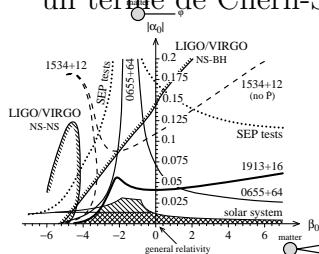


- Par exemple, l'observation par Fermi de GRB090510 a permis de mettre des contraintes sur $\Delta t \lesssim$ qqs centaines ms ;
- photons au-delà du GeV (dont un à 31 GeV) ;
- Contraintes sur l'espace des paramètres pour certaines théories quantiques de la gravitation.

ONDES GRAVITATIONNELLES ET THÉORIES ALTERNATIVES

- Détection directe des ondes gravitationnelles
 ⇒ vérification de la relativité générale ;

Limites basse énergie des théories quantiques de la gravitation = relativité générale + des champs scalaires ou un terme de Chern-Simons.



- Composantes **monopolaires** ⇒ contraignent les théories tenseurs-scalaires ; (Fig. d'après *Damour & Esposito-Farèse (1998)*) ;
- Ondes gravitationnelles vues par LISA (distances cosmologiques)

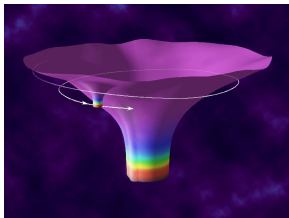
permettront de discerner les effets associés aux termes de Chern-Simons et contraindre les corrections quantiques à la relativité générale (*Alexander et al. (2008)*).

TROUS NOIRS

- Pour un observateur, un trou noir se définit par son **horizon des événements** ;
- Observations de raies fortement décalées vers le rouge par le champ gravitationnel intense ;
- Exemples en X des raies d'émission K et L du fer d'AGN par XMM-Newton (ou ASCA) \Rightarrow émission provient du voisinage proche de l'horizon (1H 0707-495 et MCG-6-30-15) + détermination du spin.
- Lors de la chute d'un « petit » trou noir dans un trou noir supermassif, il serait possible d'extraire les informations sur le champ gravitationnel de ce dernier ;
- Ondes gravitationnelles dans la bande de LISA.

TROUS NOIRS

- Pour un observateur, un trou noir se définit par son **horizon des événements** ;
- Observations de raies fortement décalées vers le rouge par le champ gravitationnel intense ;
- Exemples en X des raies d'émission K et L du fer d'AGN par XMM-Newton (ou ASCA) \Rightarrow émission provient du voisinage proche de l'horizon (1H 0707-495 et MCG-6-30-15) + détermination du spin.



- Lors de la chute d'un « petit » trou noir dans un trou noir supermassif, il serait possible d'extraire les informations sur le champ gravitationnel de ce dernier ;
- Ondes gravitationnelles dans la bande de LISA.

CONCLUSIONS

- Les supernovae et les astres compacts sont des sites où les lois de la physique sont soumises à rude épreuve.
 - Tous les messagers peuvent potentiellement amener de l'information sur la physique des particules et la physique nucléaire : rayons cosmiques, photons, neutrinos et ondes gravitationnelles.
 - De nombreux instruments très intéressants pour utiliser l'Univers comme laboratoire : INTEGRAL, Fermi, HESS, ANTARES, Virgo, ... (existants) ; CTA, AMS-02, KM3-Net, AdV, LISA, ... (à venir).
- ⇒ Nécessaire travail de **modélisation** théorique et numérique : ex. les supernovae.
- ⇒ Nécessaires échanges entre astrophysiciens et théoriciens.

SITUATION EN FRANCE

- D'une manière générale, la France semble très bien impliquée dans les grands projets instrumentaux existants ;
- Le PID “Particules et Univers” a beaucoup joué sur le rapprochement astrophysiciens – physiciens des particules (avec l'ex-CID 47) ;
- Pour les tests de la RG, des liens ont été créés entre théoriciens et expérimentateurs grâce au GdR GREX, maintenant fédération GPhyS ;
- Quelles relations avec la physique nucléaire ?
- Tous les thèmes scientifiques ne sont pas abordés en France. . .