

III. Apport de l'astrophysique à la physique fondamentale

Grâce à la mise en service de nombreux nouveaux télescopes, l'astrophysique est entrée dans une ère de haute précision. Plusieurs sondes astrophysiques peuvent ainsi être utilisées pour contraindre les lois de la physique fondamentale. Au SAP, des programmes de recherche portant sur des échelles allant des étoiles à la cosmologie ont permis d'étudier la physique de l'énergie sombre, des neutrinos et la variation cosmologique des "constantes" fondamentales.

Etude de l'énergie sombre

Évidences cosmologiques pour l'énergie sombre

Notre compréhension des conditions initiales et de l'évolution de notre univers a fait des progrès remarquables au cours des dernières années. En particulier, les mesures du fond diffus cosmologique, des supernovae et des grandes structures de l'univers s'accordent à présent et confirment le modèle cosmologique standard (Λ CDM). Étonnamment, celui-ci comprend une contribution dominante d'énergie sombre (70% de la densité d'énergie à notre époque). Cette composante peut être interprétée comme une modification de la gravité (par ex. comme une constante cosmologique) ou comme la manifestation d'énergie du vide produite par des champs quantiques (par ex. champs de types "quintessence"). L'énergie sombre est ainsi devenue l'un des problèmes majeurs de la physique fondamentale, en raison de son échelle d'énergie qui est incompatible avec les théories issues de la physique des particules. Au SAP, plusieurs sondes astrophysiques sont utilisées pour contraindre la distribution des grandes structures et ainsi mesurer les propriétés de l'énergie sombre.

Relevés d'amas de galaxies

Pendant la formation des structures cosmologiques, les fluctuations les plus grandes s'effondrent gravitationnellement pour former des amas de galaxies. Ces événements extrêmes sont très sensibles à l'évolution des structures et donc à la présence d'énergie sombre qui en modifie le taux de croissance. Le survey XMMLSS qui est mené par le SAP (Pierre et al. 2004) a pour but de mesurer, à la fois l'abondance des amas jusqu'à un redshift de 1 mais aussi leur fonction de corrélation spatiale. Ces informations complémentaires permettront de placer des contraintes fortes sur les paramètres cosmologiques (Refregier et al. 2002) [4], y compris sur l'équation d'état de l'énergie sombre. Ce survey qui est basé sur des observations avec le satellite XMM, avec la camera Megacam au Canada-France-Hawaii Telescope, ainsi qu'avec de nombreuses autres instruments multi longueur d'onde permettra de manière unique de découpler la physique des amas de la cosmologie.

Effet de lentille par les grandes structures

L'effet de lentille gravitationnelle faible (ou *weak lensing*) a récemment émergé comme une sonde unique des grandes structures dans l'univers (Refregier 2003) [5]. Cet effet permet en effet de directement cartographier la distribution de la masse dans l'univers, sans hypothèses sur l'état physique de la matière. En particulier, l'effet de lentille permet de mesurer le taux de croissance des structures en fonction du redshift, quantité qui est sensible à l'énergie sombre. La figure 1 montre les contraintes qui pourront être déduites avec l'effet de lentille sur la quantité $(1-\Omega_m)$ et l'équation d'état (ω) de l'énergie sombre avec le futur satellite JDEM/DUNE (voir Refregier et al. 2004) [6]. Ces contraintes sont comparables et complémentaires de celles qui peuvent être dérivées à partir du relevé de Supernovae avec le même satellite.

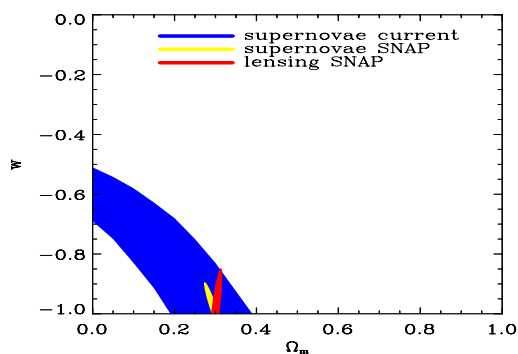


Figure 1 : Contraintes sur l'énergie sombre à partir du weak lensing et des supernovae. Les paramètres considérés sont la quantité d'énergie sombre $1-\Omega_m$ et son paramètre d'équation d'état ω . Les contraintes actuelles à partir de 42 supernovae (Perlmutter et al. 1999) sont affichées, ainsi que celle attendues avec le futur satellite JDEM/DUNE (Perlmutter et al. 2003). Les contraintes attendues à partir weak lensing avec le même satellite sont aussi affichées et sont comparables et complémentaires. Tous les contours correspondent à un niveau de confiance de 68%.

Le Soleil, source de neutrinos

Le Soleil est la deuxième source de neutrinos de l'Univers et la première source détectable. Pour cette double raison, il est important de connaître cette source précisément pour déterminer les flux de neutrinos émis et les propriétés de la matière qu'ils rencontrent avec un double objectif :

- 1) mieux connaître le Soleil et donc les autres étoiles
- 2) contribuer à progresser sur la connaissance de cette particule encore mal connue qu'est le neutrino.

Ces motivations ont conduit les équipes du CEA, depuis les années 80, à avoir des contributions majeures dans le domaine astrophysique et dans le domaine de la Physique des Particules.

Ces dernières années, la vision purement théorique de l'intérieur solaire s'est enrichie d'une vision observationnelle descendant jusqu'au lieu d'émission des neutrinos grâce au développement de l'héliosismologie.

C'est pourquoi le SAP s'est fortement impliqué dans la construction et l'analyse de GOLF, l'instrument le mieux adapté pour connaître le cœur nucléaire, ainsi que dans la modélisation statique puis dynamique de l'intérieur solaire (voir chapitre Plasmas Stellaires et Astrophysique Nucléaire).

Le spectre en énergie des neutrinos solaires s'étend jusqu'à 14 MeV et depuis plus d'une dizaine d'années l'ensemble des sources associées aux protons, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$ et ${}^{17}\text{F}$ est accessible à la détection. Toutefois, ces sources sont très différentes. La première, de loin la plus forte, émise à basse énergie est directement liée à la réaction fondamentale $p+p$ et donc connue précisément par la luminosité solaire, elle ne nécessite pas une connaissance détaillée du Soleil toutefois, elle n'est pas encore accessible à l'observation, seule, car le spectre à basse énergie (< 0.43 MeV) n'est pas encore atteignable. Ce n'est pas le cas des neutrinos de plus haute énergie, qui dépendent de plus en plus fortement des conditions du plasma, en particulier de leur température. Les plus énergétiques, ceux associés à la marginale section efficace ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + \nu$ sont aujourd'hui détectés seuls par deux expériences Superkamiokande et SNO et leur spectre est observé.

Sur le plan astrophysique, la modélisation interne du Soleil s'est enrichie d'une physique complexe émanant de nombreuses disciplines et validée par les contraintes sismiques sur le contenu d'hélium, la base de la zone convective, le profil de vitesse du son et celui de la rotation (voir chapitre Plasmas Stellaires et Astrophysique Nucléaire). Ceci a permis de répondre à la plupart des questions posées sur le cœur nucléaire : rôle de l'écrantage, mélange central ? prise en compte des interactions photons éléments lourds mais de faible abondance. Le SAP a contribué à répondre à ces questions depuis 1988 en contribuant sur l'ensemble des thématiques importantes. Un bilan en a été fait dans deux revues présentées dans des conférences d'Astroparticule à Valence et à Moscou (Turck-Chièze 2003a, b) [7][8].

Coté instrumental, le maximum de soin a été apporté à l'instrument GOLF pour qu'il atteigne la précision nécessaire pour extraire de ces observations un modèle sismique qui traduise en température centrale notre connaissance thermodynamique du cœur nucléaire.

De cet effort ont été déduits :

- une vérification expérimentale de la section efficace pp (inaccessible au laboratoire) entre autres,
- des flux de neutrinos, validés par l'ensemble de la communauté sismique (voir les références de la section Plasmas stellaires et Astrophysique Nucléaire) et qui permettent à la communauté de Physique des Particules de pouvoir avancer sur les propriétés des neutrinos en ayant confiance dans la source de neutrinos.

C'est ainsi qu'il a été possible de constater en 2001-2002 l'accord remarquable entre flux de neutrinos « sismiques » et détections des 3 saveurs, montrant l'intérêt de cette physique de l'Univers, ou l'Univers comme laboratoire. Cet accord remarquable a permis de mettre de fortes contraintes sur Δm_{21}^2 et θ_{12} .

Grâce au développement continu de la sismologie, le rôle du Soleil dans l'évolution des disciplines de la physique fondamentale n'est certainement pas terminé. En effet l'image d'un soleil standard est entrain de disparaître au profil d'une étoile magnétique. La connaissance de cette

nouvelle observable et de son action dans la redistribution du moment cinétique interne apportera probablement encore d'autres contraintes (voir mesures) sur (du) moment magnétique du neutrino.

Variation des constantes cosmologiques

Champs scalaires et variation des constantes

La plupart des théories unitaires se ramènent, dans les conditions astrophysiques et cosmologiques, à des théories effectives faisant intervenir des champs scalaires. Des chercheurs du SAP ont examiné certaines théories (de type Kaluza-Klein) avec un champ scalaire additionnel qui modifie la gravitation en fonction de la valeur du champ électromagnétique, et vice-versa (Mbelek et Lachièze-Rey 2002a) [1]. Ce couplage effectif entre gravité et électromagnétisme induit une variation des constantes d'interaction.

Variation de la constante de Newton G

Aujourd'hui, les différentes mesures de la constante de Newton G fournissent des valeurs incompatibles. Ces théories prédisent que G (effectif) dépend du champ électromagnétique. Les variations du champ géomagnétique avec le lieu peuvent effectivement rendre compte des mesures (Mbelek J.-P. et Lachièze-Rey M. 2002b) [2].

Variation de la constante de structure fine α

Pour les mêmes raisons, la constante de structure fine, α , pourrait varier en fonction du champ gravitationnel, ou, en cosmologie, avec le temps. Ces théories à champs scalaire supplémentaire prédisent une variation en accord avec les récentes mesures de raies d'absorption devant les quasars (Mbelek J.-P. et Lachièze-Rey M. 2003) [3].

Références

- [1] Mbelek J.-P. and Lachièze-Rey M. 2002, *A five dimensional model of varying effective gravitational and fine structure constant*, *International Journal of Modern Physics A*, vol.17, 29, p.4317-4323, november 2002
- [2] Mbelek J.-P. and Lachièze-Rey M. 2002b, *Possible evidence from laboratory measurements for a latitude and longitude dependence of G* , *Grav.Cosmol.* 8 (2002) 331-338
- [3] Mbelek J.-P. and Lachièze-Rey M. 2003, *A five dimensional model of varying effective gravitational and fine structure constants (I)*, *A&A.* 397 - 3, January III 2003
- [4] Refregier, A.; Massey R; Rhodes J et al. Valtchanov, I, Pierre, M., 2002, *A&A*, 390, 1
- [5] Refregier, A., 2003, *Weak Gravitational Lensing by Large-Scale Structure*, *ARAA*, 41, 645
- [6] Refregier, A., et al. 2004 *AJ*, 127, 3102R
- [7] Turck-Chièze, S. 2003a, *MeV Neutrinos: what is seismology telling us? International workshop on Astroparticle and High Energy Physics, Valencia*
- [8] Turck-Chièze, S. 2003b, *Quiet and active Sun and the Neutrino properties, Moscow, Lomonosov conference*