

COMMISSION INTERDISCIPLINAIRE 47

ASTROPARTICULES

Président de la CID

Jean-Loup PUGET

Membres de la CID

Émile-Michel ARMENGAUD

Éric AUBOURG

Jean BALLET

Geneviève BÉLANGER

Karim BENAKL

Francis BERNARDEAU

Pierre BINETRUY

Luc BLANCHET

Emmanuel GANGLER

Martin GIARD

Christophe GROJEAN

Élyette JEGHAM

Jürgen KNODLSEDER

Sylvie LEES-ROSIER

Marie-Christine LÉVY-NOËL

Jean-Michel MARTIN

Yannick MELLIER

David POLARSKI

Gérard SMADJA

Tiina SUOMIJARVI

INTRODUCTION

Le domaine à l'interface entre physique des hautes énergies et astrophysique, communément appelé « astroparticules », s'est fortement développé durant les dix dernières années. Le CNRS en a fait une de ses priorités scientifiques, et une commission interdisciplinaire dédiée a été créée et renouvelée.

Les grands domaines couverts par cette spécialité sont :

– l'étude des sources extrêmes dans l'Univers, produisant des particules de très haute énergie ;

– l'utilisation de l'Univers comme laboratoire d'étude des interactions fondamentales, grâce aux très hautes énergies et densités qui y sont atteintes ;

– la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'évolution de l'Univers, depuis le Big Bang jusqu'au temps présent, ce qui donne aussi accès à la physique des plus hautes énergies.

De nombreux autres thèmes viennent s'associer à ces domaines fondamentaux : tests des lois fondamentales (gravité, physique transplanckienne), astrophysique nucléaire, etc. L'astroparticule est donc un espace de rencontres entre de nombreuses disciplines de physique (physique nucléaire, physique de la matière

condensée, physique quantique, physique des plasmas, physique de la combustion, etc.), avec également une riche activité théorique.

1 – LES GRANDES QUESTIONS

Le domaine des astroparticules souhaite répondre à un certain nombre de questions, dont le nombre et la diversité expliquent l'attrait qu'il provoque :

– **le Big Bang** : la singularité initiale est-elle fondamentale, ou un reflet de notre ignorance des lois de la physique près du Big Bang ?

– **l'inflation** : son existence semble confirmée. Quels sont les mécanismes de cette phase d'expansion exponentielle de l'Univers primordial ?

– **l'asymétrie matière-antimatière** : le modèle standard de la physique des particules ne peut l'expliquer. Quelle est son origine ?

– **la matière noire** : quelle est la nature de la matière sombre ?

– **l'expansion accélérée** : quels sont les mécanismes qui la produisent ? Faut-il modifier la gravitation ou introduire de l'énergie noire ? Dans ce cas, quelle est la nature de cette énergie noire ? Est-ce une constante cosmologique ? Quelle est son équation d'état ? Quel est son lien avec l'énergie du vide de la théorie des champs ?

– **la nouvelle physique** : gravité quantique, dimensions supplémentaires (quel est le nombre exact de dimensions spatiales de l'Univers ?) ;

– **les limites de validité de la relativité générale** : de nouvelles expériences devraient permettre de tester en particulier le principe d'équivalence (entre masse gravitationnelle et masse inertielle) ;

– **les premiers objets lumineux** : quand et comment sont apparues les premières structures (amas, galaxies, étoiles) ? Quelle est la physique de la réionisation de l'Univers ?

– **les particules à très haute énergie** : quels sont les sites d'accélération ? Les mécanismes de propagation ? Quelle est la composition de ces rayons cosmiques ? Leur spectre en énergie donne-t-il des indices d'une nouvelle physique ?

– **les trous noirs** : on sait qu'ils sont associés à de nombreuses sources de particules énergétiques. Il reste beaucoup à comprendre dans les mécanismes d'accrétion et d'éjection mis en jeu ;

– **les sursauts gammas** : on commence tout juste à percevoir ce que peut être leur origine ;

– **les supernovae** : comment explosent-elles ? On est encore incapable de simuler l'explosion de certains types de supernovae, pourtant à l'origine des éléments lourds dans l'Univers ;

– **les états extrêmes de la matière** : quelle est la structure interne d'objets tels que les étoiles à neutrons ?

– **la masse des neutrinos** : quelle est la masse des neutrinos, quel est leur rôle cosmologique, quels sont leurs paramètres de mélange, à l'origine des oscillations de neutrinos récemment mises en évidence ?

2 – LA NÉCESSITÉ D'APPROCHES CROISÉES

2.1 COMPLÉMENTARITÉ THÉORIE-EXPÉRIENCES

Parmi les questions de physique fondamentale évoquées dans le paragraphe précédent, certaines se posent dans un cadre conceptuel bien déterminé – par exemple la nécessité de compléter notre connaissance du secteur des neutrinos ou encore la recherche de matière noire supersymétrique – d'autres ont des bases théoriques moins solides et nettement moins balisées.

Ainsi le problème que pose l'existence d'une énergie noire met en cause notre compréhension même de ce que peut être le vide quantique. À ce problème il n'existe pas de réponses théoriques satisfaisantes, en tout cas pas qui répondent à l'ensemble des questions posées. Les pistes envisagées font appel, qui à une nouvelle composante du fluide cosmologique, qui à des modifications de la gravité à l'aide de dimensions supplémentaires, etc. C'est sans doute à l'aide d'observations variées de l'univers à bas redshift – évolutions des grandes structures, SNs – que l'on parviendra à mieux cerner la nature du problème.

On se trouve dans une situation similaire avec la physique de l'univers primordial. Si le paradigme inflationnaire a été largement consolidé par les observations récentes, il reste un simple cadre de travail. Contrairement au cas de la matière noire, les théoriciens peinent à proposer des candidats précis au rôle d'inflation qui puissent s'insérer dans une extension du modèle standard des hautes énergies. Les progrès que l'on pourra réaliser dans ce domaine à moyen ou à long terme s'appuient sur des recherches très transversales, théoriques bien sûr, mais aussi observationnelles avec la reconstruction du spectre des fluctuations de métrique primordial à l'aide des observations des anisotropies ou de la polarisation du CMB, mais aussi de l'ensemble des traceurs des grandes structures de l'univers, catalogues de galaxies, relevés de lentilles faibles, nuages Lyman-alpha, etc.

Il est bien sûr d'autres domaines qui bénéficient de complémentarités d'approches, la recherche des ondes gravitationnelles, la compréhension du mode de fonctionnement de sites astrophysiques très énergétiques ou encore l'émergence des premiers objets de l'univers. Au-delà du travail d'investigation théorique pur, on a besoin ici de s'appuyer sur des simulations numériques dédiées de grande ampleur.

Insistons enfin pour une grande classe de questions sur la nécessité de disposer d'approches observationnelles dites « multi-messagers ».

2.2 DES STRATÉGIES MULTI-MESSAGERS

Il est clair que la compréhension fine de sites astrophysiques extrêmes passe nécessairement par la mise en œuvre de moyens observationnels inédits en astronomie traditionnelle. Il s'agit ainsi de collecter autant d'information que possible à l'aide de plusieurs messagers :

- les photons, depuis les ondes radios jusqu'aux gammas de haute énergie qui tracent les zones d'accélération de particules, d'annihilation de matière noire et l'Univers primordial ;

- les rayons cosmiques (protons et ions), qui nous renseignent sur les phénomènes d'accélération, et sur la propagation intergalactique et galactique ;

- les neutrinos, qui donnent des informations sur les zones profondes d'objets opaques aux photons ;

- les ondes gravitationnelles, produites par les mouvements de la matière (sources astrophysiques et cosmologiques, en particulier les trous noirs et les objets compacts) et par l'Univers primordial.

Soulignons que les neutrinos de haute énergie, les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie et les ondes gravitationnelles sont des domaines pionniers.

3 – PROJETS EN COURS ET FUTURS

3.1 LES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS

Plusieurs sondes permettent d'explorer la géométrie de l'Univers, et d'accéder à des informations sur sa composition et la nature de l'énergie noire : supernovae utilisées comme chandelles standards, fond diffus cos-

mologique, relevés à grand champ, cisaillement gravitationnel, oscillations de baryons. La France a une excellente position dans le domaine des supernovae et du cisaillement gravitationnel («weak shear») grâce au programme «Legacy Survey» du CFHT, à Hawaï (CFHTLS, SNLS, SNFactory). Dans le domaine du fond diffus, elle a acquis une expérience certaine grâce à l'expérience ballon Archéops, et joue un rôle important dans la mission spatiale Planck, prévue pour 2007, avec un rôle leader dans un des deux instruments (HFI), qui devrait permettre des progrès importants sur l'étude de la polarisation du fond cosmologique. Il est important d'assurer le retour scientifique de ces projets.

Le projet américain SDSS (Sloan Digital Sky Survey), dont la France est absente, bénéficie en ce moment d'un retour scientifique exceptionnel, en grande partie dû à la combinaison entre photométrie à grand champ et spectroscopie.

Vue l'importance des sujets concernés (cisaillement gravitationnel, supernovae, oscillations de baryons, mesures d'amas de galaxies), la France (et l'Europe) doivent définir une stratégie de participation à de futurs projets d'astronomie grand champ, qui bénéficieraient, à l'instar du SDSS, d'une association avec un survey spectroscopique. En particulier se posent les questions d'une participation au projet LSST et du rôle de l'ESO. L'extension dans le domaine infrarouge de ces surveys (par exemple avec VISTA) permet de caractériser des objets plus lointains ; c'est essentiel pour la recherche de supernovae à $z > 1$.

De la même façon, la France est pour l'instant absente des projets concernant les mesures de la raie à 21 cm de l'hydrogène aux redshifts cosmologiques, qui donne accès en particulier à la physique de la réionisation et aux oscillations de baryons. À court terme il serait possible d'envisager une collaboration avec des projets tels que LOFAR en Europe ou des projets analogues aux USA et en Australie, et à plus long terme au projet SKA (Square Kilometer Array).

Du côté du fond diffus cosmologique, la prochaine étape est la mesure de sa polarisation, en particuliers des modes B. L'expérience BRAIN, en Antarctique, et le projet spatial SAMPAN sont dédiés à ce type de mesure. À l'international un certain nombre d'expériences, au Pôle Sud ou dans l'Atacama, sont en cours de construction. La comparaison entre les possibilités d'une nouvelle expérience au sol et d'un satellite est indispensable.

Un autre aspect important du fond diffus cosmologique est l'étude des avant-plans, à la fois en tant que «pollution» du signal cosmologique, et en tant qu'objets d'étude en soi (effets SZ, Rees-Sciama, physique de la Galaxie et de la MHD interstellaire). La corrélation avec des surveys optiques tels que ceux mentionnés ci-dessus est indispensable afin d'extraire les signaux les plus faibles.

3.2 ASTRONOMIE GAMMA

La France a une excellente position dans le développement d'instrumentation dans ce domaine, illustrée par son rôle de leader dans le satellite INTEGRAL (PI du spectromètre SPI, fourniture du détecteur principal de l'imageur IBIS), et à la contribution importante au télescope Cherenkov HESS en Namibie. Il convient d'assurer le retour scientifique de HESS, et le développement de HESS2 est une priorité. Le lancement du satellite GLAST est prévu pour 2007 ; malgré le retrait du financement CNES en 2003, l'IN2P3 et le CEA contribuent significativement à ce projet. HESS2 et GLAST explorent tous deux une gamme de fréquence peu observée jusqu'à présent mais cruciale.

Le projet Simbol-X en collaboration avec l'Italie, choisi dans le cadre de l'appel d'offres du CNES de satellites en vol en formation, ouvre une nouvelle génération de télescopes spatiaux pour l'astronomie à hautes énergies. Le lancement est prévu pour 2012.

Dans le domaine des sursauts gammas, une étape importante est l'analyse des contre-

parties optiques qui peuvent servir de sondes cosmologiques. C'est un des enjeux du projet X-Shooter (spectrographe au VLT, prévu pour 2007). Les enjeux concernent à la fois la cosmologie (diagramme de Hubble à plus grand z qu'avec des supernovae) et la physique des hautes énergies.

Le satellite SVOM/ECLAIRS, développé dans le cadre de la collaboration avec la Chine et prévu pour un lancement fin 2011, améliorera la détection des sursauts eux-mêmes.

3.3 RAYONS COSMIQUES DE HAUTES ÉNERGIES

L'excellente présence de la communauté française dans l'expérience AUGER, en Argentine, doit être soulignée.

La possibilité de détecter les rayons cosmiques par les ondes radio produites lors du développement de la gerbe est actuellement explorée par le projet CODALEMA. Outre son intérêt pour les rayons cosmiques (coût, et disponibilité jour et nuit du détecteur), les compétences acquises pourraient se révéler utiles dans le domaine de l'astronomie impulsionnelle et dans le cadre d'une future participation à des projets de relevés cosmologiques tels que SKA et LOFAR.

Le futur de l'expérience AMS est lié à celui de la station spatiale internationale, et donc incertain.

3.4 MATIÈRE NOIRE NON BARYONIQUE

L'expérience EDELWEISS a obtenu d'excellents résultats, en partie grâce à l'existence du Laboratoire Souterrain de Modane. La phase EDELWEISS II utilise 10 kg de germanium. Une R&D vers la tonne est entamée, il convient maintenant de construire un projet européen autour de la technologie la plus adéquate. Il est

important de pouvoir utiliser différents matériaux, et pour cela de disposer de plusieurs méthodes de réjection des particules chargées. Pour maintenir la bonne position internationale des équipes françaises sur ce domaine, un effort important sur les technologies utilisées est indispensable.

La détection indirecte offre de bonnes perspectives, aussi bien par l'intermédiaire de détecteurs gamma qu'avec des télescopes à neutrinos tels qu'Antares.

Du côté des accélérateurs, le LHC et le possible futur accélérateur linéaire pourraient apporter leur contribution à l'énigme de la matière noire, en créant en laboratoire les particules dont elle est peut-être formée.

3.5 NEUTRINOS

Pour les neutrinos de haute énergie, l'expérience Antares est en cours de déploiement et permet d'envisager un télescope à neutrinos en vraie grandeur (KM3).

Du côté des basses énergies, plusieurs technologies sont utilisables et actuellement explorées, tel le projet Double-CHOOZ (auprès d'un réacteur) ou les projets auprès d'accélérateurs, qui amélioreront notre compréhension des oscillations de neutrinos et pourraient aider à comprendre l'asymétrie matière-antimatière. Un détecteur Cherenkov Mégatonne, dans le tunnel du Fréjus, permettrait d'améliorer les limites sur la durée de vie du proton, et de détecter les neutrinos en provenance d'une supernova proche. Dans ce domaine, l'élaboration d'une stratégie à long terme et d'un choix entre ces méthodes est indispensable.

3.6 GRAVITATION

Microscope, actuellement en construction, testera le principe d'équivalence. En ce qui concerne les ondes gravitationnelles,

VIRGO entre dans sa phase d'exploitation, avec une très bonne participation française, et sera suivie par une phase VIRGO 2. L'étape suivante consiste à explorer une autre gamme de fréquence, probablement beaucoup plus riche, avec une expérience spatiale, LISA, dans laquelle la France vient d'entrer. Une première étape est le démonstrateur LISA-PathFinder. La détection des ondes gravitationnelles à l'aide d'instruments de type LISA devrait devenir, à long terme, un outil observationnel d'importance comparable à l'optique.

Le chronométrage des pulsars rapides permet de mettre une limite supérieure aux ondes gravitationnelles de périodes longues, en particulier les ondes gravitationnelles d'origine primordiale. Des réseaux internationaux de chronométrage des pulsars se mettent actuellement en place, pour réaliser le « pulsar timing array ».

Dans le domaine de la métrologie :

- le chronométrage des pulsars rapides permettra, grâce à la construction d'un référentiel céleste, de lier le système de référence du système solaire au système de référence extragalactique ;

- la réalisation d'éphémérides de pulsars à l'aide de l'observation radio est indispensable pour rechercher les contreparties gamma de ces objets, en particulier avec GLAST.

3.7 THÉORIE

Les grands chantiers de physique fondamentale restent liés d'une manière ou d'une autre au problème de la construction d'une théorie unifiant gravité et mécanique quantique. La théorie des cordes en est de loin l'approche la plus élaborée. Il reste qu'elle ne propose pas d'extension bien définie du modèle standard des particules.

In fine ce qu'on aimerait avoir c'est évidemment un scénario complet :

- qui rende compte d'une phase inflationnaire permettant d'engendrer les grandes structures de l'univers ;

- qui contienne une extension du modèle standard des particules avec une (ou des) particule(s) de matière noire et qui permette une baryogénèse ;

- qui rende compte d'une énergie noire.

On en est encore loin ; les travaux actuels s'attachent à l'une ou l'autre de ces facettes, le plus souvent dans le cadre de la théorie des cordes, quelquefois dans des approches alternatives. À ce jeu-là, c'est la richesse d'une communauté qui en fait sa force, avec des experts en théorie des cordes, en physique de l'univers primordial, en physique des particules ou encore en relativité générale. La communauté française s'est indéniablement étoffée dans ces domaines ces dernières années. L'effort doit être poursuivi.

Une autre grande activité théorique est celle de simulations numériques de milieux complexes. Citons dans ce cadre le projet Horizon dont un des objectifs est de mieux cerner les phénomènes physiques liés à la formation des premiers objets de l'univers ou encore l'évolution des grandes structures de l'univers. On peut aussi citer la réalisation de simulations numériques de coalescence d'objets compacts pour la génération des ondes gravitationnelles ou encore la réalisation de codes de magnétohydrodynamique décrivant la physique des jets ou des disques d'accrétion. Soulignons que ce sont là de véritables projets qui nécessitent des ressources humaines et techniques importantes. D'autres chantiers sont en cours d'ouverture comme la compréhension de la propagation de particules dans les milieux astrophysiques, le développement des gerbes atmosphériques.

3.8 QUESTIONS STRATÉGIQUES POUR CE SECTEUR INTERDISCIPLINAIRE

Les sections précédentes montrent la richesse de ce secteur aussi bien par les questions fondamentales posées que par les appro-

ches méthodologiques multiples qu'il nécessite.

Les chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs travaillant sur ces thèmes appartiennent au CNRS, au CEA et aux universités. L'annexe 1 donnera liste des unités concernées et leur répartition entre établissements.

L'existence de la CID 47 a non seulement permis le recrutement de chercheurs amenant dans une unité le savoir faire et la culture d'un autre département du CNRS mais a eu, par l'existence même de ces recrutements sur des critères d'interdisciplinarité, un effet incitatif sur une partie importante de la population de jeunes docteurs qui ont délibérément choisi d'aller effectuer un séjour post-doctoral dans une unité relevant d'un département ou d'une culture différents de celle de l'unité où il/elles avaient effectué leur thèse. La CID a aussi recruté au niveau CR1 et DR2 des chercheurs étrangers de haut niveau qui ont permis d'accélérer le développement de nouveaux sujets critiques. Enfin la CID a organisé un séminaire de prospective qui a réuni les chercheurs de ces thématiques et, outre la production d'un document de prospective, a aussi permis à ces communautés de débattre et d'apprendre à se connaître.

Notons cependant que ces recrutements de chercheurs étrangers sont rendus difficiles par les salaires et les moyens de recherche que la France peut offrir par rapport à d'autres pays, comme en témoignent des désistements au niveau CR1. En outre, sur certains concours, des fléchages – non pertinents pour une CID – ont compliqué le processus de recrutement.

Ce bilan est donc très positif. Les CID ne sont pas, et n'ont pas de raison d'être, des structures permanentes. Il est par contre essentiel que quand une CID est dissoute, la redistribution des thématiques qu'elle couvrait et leur place dans le dispositif de recherche soient pleinement pris en compte dans le nouveau découpage des sections du comité national qui lui non plus n'a pas vocation à être immuable.

Au sein du CNRS, tous les chercheurs et ingénieurs travaillant sur ces thèmes dépen-

dent du nouveau département MPPU. Les grands projets instrumentaux soit d'observation soit de simulation sont pilotés par l'un des deux instituts (IN2P3 et/ou INSU), souvent en collaboration avec le CEA et avec des moyens mis en place par le Centre d'Études Spatiales. De plus, trois grandes agences internationales – le CERN, l'ESA et l'ESO – pilotent les grands projets internationaux de ce secteur. Cette structure complexe appelle plusieurs remarques et suggestions :

- le partage des responsabilités entre départements et instituts doit impérativement être clarifié pour ce qui concerne les moyens humains que le CNRS dédie aux grands projets de ces secteurs, en particulier aux TGE internationaux. Les agences internationales exigent de plus en plus des engagements précis et *contractualisés*. Les mécanismes pour la mise en place d'une part, le suivi d'autre part de ces engagements doivent être établis en liaison étroite avec les établissements partenaires nationaux (CEA, CNES) ;

- la prospective de cette thématique doit être coordonnée en impliquant toutes les agences concernées, afin de définir en même temps les questions scientifiques critiques pour la période concernée et les projets dans lesquels les équipes françaises doivent s'engager. Cette prospective ne peut se faire valablement qu'avec une bonne visibilité de la situation internationale et surtout européenne. Il est à noter que l'articulation de la stratégie du CNRS par rapport aux structures européennes est implicitement incluse dans « positionnement national et international » mais pas explicitée. Dans le secteur concerné par ce rapport, le contexte international est celui de la compétition ou de la collaboration bilatérale avec les équipes travaillant sur les mêmes sujets, mais surtout l'organisation européenne de la recherche essentielle pour un secteur où les projets sont souvent lourds ;

- le recrutement de chercheurs sur les thématiques nouvelles croissantes doit être soutenu par le découpage et l'intitulé des futures sections du comité national et par des coloriages pluriannuels de postes ;

– cette thématique représente une fraction grandissante des activités des deux instituts du CNRS (IN2P3 et INSU) qui est distribuée entre eux. Le fonctionnement de ces instituts doit être rediscuté pour tenir compte de cette évolution.