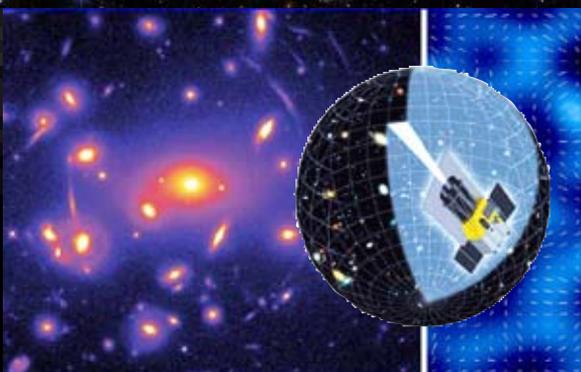
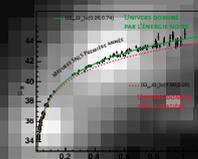


DOSSIER

Enquêtes sur un Univers exotique

▼ 500 bougies pour éclairer l'Univers p. 3 ▼ Dune, des lentilles de matière noire pour tester la cosmologie p. 4 ▼ Chassé-croisé Cosmologie-Particules p. 6 ▼ Des oscillations primordiales pour mesurer une grandeur inconnue p. 7 ▼ L'hypersensibilité d'un piège à particules sombres p. 9



ENCART

À propos d'Alain

EN DIRECT

Ursula Bassler, une façon d'aimer la physique p. 11



Tout change...

Depuis le 1^{er} janvier, le Dapnia est devenu l'Irfu, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. Ce changement résulte d'une démarche entreprise dès 2003 et d'une opportunité. Il m'était en effet apparu que la déclinaison de Dapnia en « Département d'astrophysique, de physique des particules, de la physique nucléaire et de l'instrumentation associée », compréhensible au moment de la création du département, suggérait fortement que le département était resté une collection de services, ce qui heureusement ne reflétait plus la réalité. Il fallait trouver une dénomination plus appropriée qui, au contraire, mettait en évidence la cohérence de son activité. Après consultation et réflexion, nous avons donc décidé d'utiliser dans notre communication non-administrative le nom « Laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers », mais l'alternative d'Institut plutôt que Laboratoire avait dès l'origine été évoquée. En effet, nous pensons depuis la première partie du XX^e siècle que, pour comprendre les lois de la nature, il est nécessaire d'explorer l'Univers aux plus petites et en même temps aux plus grandes échelles accessibles. Néanmoins, pendant une longue période, les études de la physique microscopique et de l'Univers à grande échelle ont continué à suivre, au moins du point de vue expérimental, des voies séparées. Depuis une vingtaine d'années, cela n'est plus le cas et les problèmes très actuels de matière et d'énergie noires, la physique des objets astrophysiques très compacts comme les spéculations sur les premiers instants de l'Univers, mettent en jeu toutes nos connaissances. Le développement d'une discipline nouvelle, l'« astroparticule », que la création du département avait en quelque sorte anticipée, en est une preuve supplémentaire.

I r f u

cea

s a c l a y

Par ailleurs, cette physique des extrêmes nécessite des développements instrumentaux propres très importants s'appuyant sur des compétences de haut niveau. La réorganisation progressive des services d'instrumentation a permis à tous les projets scientifiques du Dapnia, maintenant Irfu, de bénéficier d'un appui instrumental très solide. C'est, j'en suis persuadé, une source supplémentaire de motivation à la fois pour les techniciens, ingénieurs et physiciens de l'Institut.

En conclusion, ce changement de nom n'implique aucun changement organisationnel ou opérationnel. Il nous paraît par contre plus à même de souligner la cohérence stratégique des activités de l'Institut et d'éclairer sa démarche scientifique future.

Jean Zinn-Justin

Les changements de noms

Nous ne sommes pas les seuls à avoir changé de nom. Dans le cadre du projet « Peps management », les pôles opérationnels regroupent désormais, soit des centres (DEN, DAM), soit des instituts (DSM, DSV, DRT). Le DRFCM devient ainsi l'Inac (Institut nanoscience et cryogénie), le SPHT devient l'IPHT (Institut de physique théorique),

le DRECAM devient l'Iramis (Institut rayonnement matière de Saclay), le DRFC devient l'IRFM (Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique). Le Ganil (Grand Accélérateur national d'ions lourds) et le LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) restent inchangés.

Cinq lignes de plus pour Antares

Le matin du 7 décembre, alors qu'à 40 km de la côte, l'équipage du *Pourquoi Pas ?* faisait remonter son sous-marin



Vue d'artiste du déploiement des lignes d'Antares.

télécommandé des profondeurs de la Méditerranée, l'équipe à terre mettait sous tension 5 nouvelles lignes de détection. Le détecteur Antares compte désormais dix lignes plus une, pourvue de senseurs environnementaux et d'émetteurs de lumière destinés à l'étalonnage. Cette opération a été réalisée sur les 375 nouveaux modules optiques immergés. Les deux dernières lignes, en cours d'assemblage au centre CEA de Saclay et à Marseille, seront installées en mai 2008.

Des milliers d'ordinateurs réunis

Environ 37 projets nationaux de grilles de calcul (grid computing) se sont associés pour former l'*European Grid Initiative* (EGI). Grâce à un réseau d'informatique répartie, les ordinateurs de tous ces laboratoires constitueront un

super-ordinateur, offrant des performances de calcul rapide et capable de faire évoluer favorablement l'ensemble de la communauté scientifique européenne. L'Irfu pourrait être à la fois participant et utilisateur.

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Irfu - Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers

Directeur de la publication : Jean Zinn-Justin

Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider

Rédacteur en chef : François Bugeon

Rédacteur en chef adjoint : Claude Reyaud

Comité éditorial : Shebli Anvar, Maryline Besson, François Bugeon, Rémi Chipaux, Olivier Cloué, Philippe Convert, Philippe Daniel-Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, David Lhuillier, Christine Marteau, Christophe Mayri, Xavier-François Navick, Claude Reyaud, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Angèle Séné, Pierre Vedrine, Didier Vilanova.

Secrétariat : Maryline Besson.

Maquette : Christine Marteau, Claude Reyaud.

Photographies : Jean-Jacque Bigot.

Mise en page : Christine Marteau.

Contact : Maryline Besson - 01 69 08 21 01
maryline.besson@cea.fr

<http://www-irfu.cea.fr>

Dépôt légal février 2008

De l'humilité avant toute chose !



J'avais appris que l'histoire des hommes peut être chaotique. Je sais maintenant que celle des journaux connaît les mêmes errements. *Scintillations* ne dépend pas d'un homme, ni d'une institution, mais de la volonté de ceux qui le font. C'est pourquoi, pendant un an, l'équipe du comité de rédaction a essayé d'inventer de nouvelles façons de travailler, elle a testé de nouveaux outils (un site web entier pour nos échanges !), elle a tissé de nouvelles relations avec les gens qui font les articles (Claude Reyaud est un journaliste extérieur au CEA, le savez-vous ?) et ceux qui en sont l'objet (dans cet édition, il n'y a que des interviews). C'était passionnant, mais l'exercice nous a montré des limites que nous ne soupçonnions pas. Par exemple, qu'un numéro composé uniquement d'interviews est beaucoup plus long à composer que nous le pensions.

Certaines péripéties qu'il est inutile de détailler ici, ont fait qu'il n'y a eu que deux numéros de votre journal en 2007 et qu'un nouveau journal va certainement naître en 2008. Considérez donc celui-ci comme une expérience, une tentative novatrice de montrer l'Irfu (ex-Dapnia) sous un nouvel angle. Franchement, ça n'a pas été facile, mais le résultat de notre travail me plaît bien et j'espère très sincèrement qu'il en sera de même pour vous. Avec le recul, je m'aperçois que nous avons choisi non pas un, mais deux thèmes pour ce numéro, deux inconnus à bien y réfléchir.

Le thème que nous avons choisi initialement concerne la quasi-totalité de la masse de notre Univers, plus de 97 % dont nous ne savons presque rien, que nous imaginons à peine. Quel paradoxe ! Il a fallu créer les outils conceptuels et expérimentaux les plus puissants de toute l'histoire de la physique pour que nous prenions conscience comme jamais de l'immensité de notre ignorance. De l'humilité vous disais-je...

En vérité, avec toutes ces interviews, un autre thème s'est imposé : ce sont les gens de l'Irfu. Vous conviendrez qu'il s'agit là aussi d'un inconnu. C'est ce que nous enseignent toutes les interviews de ce numéro. Derrière les recherches il y a des gens, des hommes, des femmes comme Ursula Bessler. Venant d'Allemagne, du CNRS, et chef du SPP, rien que de bonnes raisons pour s'intéresser à elle. Comme Vanina Ruhlmann-Kleider, dont le trajet scientifique est étonnant, que dis-je, épatant.

Comme Alain Milsztajn enfin, directeur scientifique de *Scintillations*, qui nous a quitté quelques jours avant la parution du précédent numéro. Pour lui, nous avons rédigé un encart, une simple feuille mais toute entière consacrée à la trace qu'il a laissée parmi nous. Et là aussi, l'humilité s'impose, je vous l'assure...

Bonne lecture.

François Bugeon

500 bougies pour éclairer l'Univers

Vanina Ruhlmann-Kleider, physicienne des particules à l'Irfu/SPP. Elle a travaillé au LEP sur la recherche des bosons de Higgs et s'est tournée depuis deux ans vers la cosmologie observationnelle en rejoignant SNLS.



La cosmologie, pas si différent en fin de compte de la recherche du boson de Higgs. Vraiment ? Vanina Ruhlmann-Kleider nous détaille son parcours sur le chemin des supernovæ.

S : Comment est né ton intérêt pour la cosmologie ?

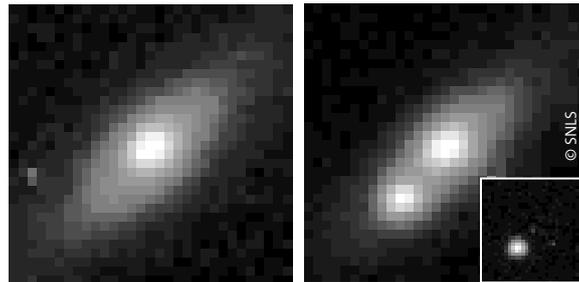
Vanina Ruhlmann-Kleider : La physique des particules a atteint un niveau de compréhension sans précédent, appelé modèle standard. Ce succès s'appuie sur des résultats venus de différents horizons expérimentaux qui tous s'accordent. Or, en 1999, lors d'un congrès international, j'ai assisté à une présentation qui montrait que les mesures faites dans différents secteurs de la cosmologie convergeaient vers une image cohérente de l'Univers. Cette démarche m'a séduite car elle ressemblait à celle de la physique des particules. Au-delà de cette similitude, il existe d'autres ponts entre les deux domaines, ne serait-ce que parce que les particules élémentaires et les interactions qui les gouvernent interviennent dans la genèse de l'Univers. À l'issue de mes travaux au LEP¹, consacrés à la recherche des bosons de Higgs², j'ai donc décidé de poursuivre en cosmologie et j'ai rejoint SNLS³, une expérience consacrée à la détection de supernovæ lointaines.

S : Quelles sont les ressemblances entre ces expériences ?

Par exemple, au quotidien, on traite dans les deux cas des lots importants de données – des millions de collisions au LEP et des milliers d'images sur SNLS – afin d'en extraire des événements correspondant au signal recherché, comme un boson de Higgs produit dans les collisions de particules ou le flux lumineux émis par des supernovæ de type Ia (SNIa). De plus, à l'instar des grands détecteurs qui sont braqués sur les collisions de particules pour comprendre les lois de l'infiniment petit, SNLS repère des SNIa non pour les étudier en tant que phénomènes célestes, mais pour en apprendre plus sur les lois qui régissent l'Univers. Dans les deux cas, on remonte à la théorie : l'origine de la mystérieuse « énergie noire » responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers pour SNLS (voir encadré ci-dessous), l'existence du boson de Higgs standard ou de particules supersymétriques pour le LEP ou le LHC.

S : Les théories sont-elles aussi avancées ?

Là s'arrêtent les similitudes. Dans le cas du boson de Higgs standard, il existe une description microscopique



À gauche, image d'une galaxie vue par SNLS avant explosion d'une SN, à droite, image de cette même galaxie après l'explosion et, en encadré, soustraction des deux images ne laissant voir que la SN.

quasiment complète. Le modèle standard est capable de prédictions étonnantes et, pour le praticien, il permet de simuler ce que l'on voit dans l'appareillage : le nombre d'événements qui lui sont dus, les différents états finals de collisions possibles, les bruits de fond qu'il faut vaincre. La situation est plus délicate dans SNLS. On est loin de tout connaître des SNIa : nous ne disposons que d'une description empirique de leurs courbes de lumière (variation temporelle du flux émis) et il n'est ni possible de prédire leur taux d'explosion, ni celui des bruits de fond. Les simulations sont donc assorties d'un plus grand degré d'incertitude qu'en physique des particules. Pourtant, cette absence de garde-fou n'empêche pas les expérimentateurs de travailler. Elle laisse peut-être une place plus grande à l'intuition, ce qui n'est pas forcément désagréable.

S : Qu'a apporté SNLS ?

SNLS appartient à la seconde génération des expériences de SNIa. En ce sens, elle bénéficie d'une stratégie de détection

(1) Large Electron Positron collider, anneau de collisions électron-positron du Cern, en activité de 1989 à 2000.

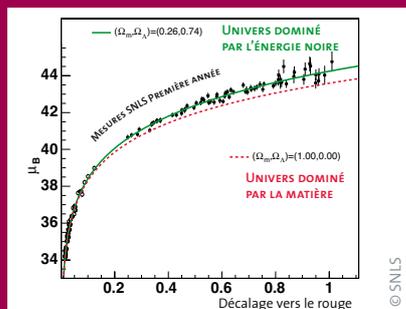
(2) Particules liées au mécanisme qui génère les masses des autres particules. Le modèle standard prédit l'existence d'un seul boson de Higgs, la supersymétrie en prédit plusieurs.

(3) SuperNova Legacy Survey.

Les supernovæ Ia, des chandelles étalonnées

A partir des spectres lumineux des SNIa, les astrophysiciens ont imaginé un mécanisme spécifique pour les générer. Il faut une naine blanche et une autre étoile, une géante, à proximité. La naine blanche plus dense attire la matière de sa compagne. Elle gagne ainsi en masse jusqu'à atteindre une limite (la masse de Chandrasekhar) au-delà de laquelle elle devient instable. Les réactions nucléaires s'emballent alors provoquant l'explosion de la naine, c'est la supernova. Durant quelques jours, son

éclat peut être comparable à celui de toute une galaxie. Pour chaque événement de cette nature, la luminosité émise est la même car il s'agit du même mécanisme. Cependant, la distance parcourue modifie la lumière qui nous parvient, d'une façon qui dépend de la géométrie de l'Univers. Les mesures montrent que la luminosité reçue des SNIa lointaines est plus faible qu'attendue pour un Univers dominé par la matière. Ainsi, il s'ajoute de la distance entre les galaxies, comme si elles étaient solidaires d'un « soufflé cosmique » lui-même en expansion accélérée.



Magnitude des SNIa (déduite du flux lumineux) en fonction de leur décalage vers le rouge⁴. Les mesures (points) sont comparées au résultat attendu pour un univers dominé par la matière (rouge) et au résultat attendu pour un univers dominé par l'énergie noire (vert).

(4) Décalage des raies spectrales vers les plus grandes longueurs d'onde du fait de l'expansion de l'Univers.

Scintillations

et de mesure optimisée par rapport aux expériences antérieures. Par exemple, les mesures sont réalisées tous les trois à quatre jours (en dehors des périodes de pleine lune) sur tous les candidats SN détectés et ce, tant qu'ils restent visibles. Nous obtenons ainsi des courbes de lumière très bien échantillonnées en temps, ce qui permet de déclencher les mesures spectroscopiques au meilleur moment et de déterminer précisément la luminosité au pic de lumière qui est l'un des ingrédients-clés pour remonter à la cosmologie. Autre progrès apporté : le grand nombre de SNIa détectées (environ 500 sur cinq ans). SNLS est vraiment un « legacy survey », un relevé digne d'être légué à la communauté scientifique.

(5) Canada
France
Hawaï
Telescope.

S : Comment ça se passe en pratique ?

SNLS utilise le télescope CFHT⁵ à Hawaï et la caméra à grand champ MegaCam, conçue et construite à l'IrFu. C'est un instrument unique au monde. Son champ permet d'observer de grandes portions du ciel en un seul pointé. Des poses longues permettent de détecter des SNIa suffisamment lointaines pour tester les lois cosmologiques. Une large fraction des détections fait l'objet de mesures spectrales sur d'autres télescopes, afin de valider le type Ia des SN et de mesurer précisément leur décalage vers le rouge. La première année a permis

d'avoir un lot homogène de 70 SN Ia confirmées, soit autant que le lot accumulé sur une dizaine d'années par les expériences antérieures. Ce lot a conduit à une analyse cosmologique qui a validé, avec une précision sans précédent, la conclusion de la première génération d'expériences : l'expansion de l'Univers est bien accélérée !

S : Quelles sont les difficultés de ce type d'expérience ?

Même si le mécanisme supposé à l'origine des SNIa est le même, les courbes de lumière mesurées montrent une dispersion d'environ 30%. D'une SN à l'autre, les courbes sont proches, mais ne deviennent superposables qu'après correction en fonction des caractéristiques intrinsèques des SNIa et ce sont les courbes de lumière corrigées qui sont utilisées pour les mesures cosmologiques.

Grâce aux données de SNLS, il est maintenant possible de vérifier si ces caractéristiques changent au sein des SN. Les 250 SNIa collectées en trois ans ont montré une différence entre les SNIa explosant dans les galaxies inactives, qui ne forment plus d'étoiles, et celles explosant dans les galaxies à fort taux de formation d'étoiles. Reste à savoir si cette différence a un impact sur les mesures cosmologiques ou si la correction que l'on fait permet de s'en affranchir.

Propos recueillis par C. R.

Dune, des lentilles de matière noire pour tester la cosmologie

Le télescope spatial dédié à l'étude des faibles déformations optiques dues à la matière noire effectuera des mesures si précises qu'il pourra aussi sonder l'énergie sombre. Les résultats attendus pourraient conduire vers une nouvelle physique.



© NASA-ESA-R. Massey (CaITech)



Alexandre Réfrégier, astrophysicien à l'IrFu/SAp. Il travaille en cosmologie observationnelle, à l'interface entre la théorie et les observations. Actuellement, il est impliqué dans des programmes spatiaux appliqués à la cosmologie. Il est P.I.¹ du projet Dune.

(1) Principal Investigator.

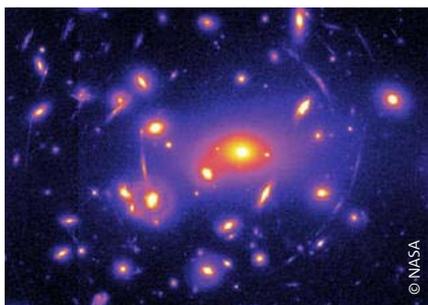
S : Qu'est-ce que l'énergie sombre ?

Alexandre Réfrégier : Ce terme s'applique à un phénomène que l'on observe au stade actuel de l'évolution cosmologique : l'expansion de l'Univers s'accélère. Il y a plusieurs façons d'observer cette accélération. En changeant la manière dont les rayons de lumière traversent l'espace, elle change le rapport entre la taille physique des objets et leur taille apparente dans le ciel. À cet effet géométrique s'ajoute une modification de la formation des structures. Répartie de manière presque homogène, hormis quelques petites fluctuations, la matière primordiale a été soumise aux effets opposés de l'accélération de l'expansion de l'Univers et de la gravité. Cette dernière concentre les particules de matière, qu'elle soit invisible

(noire) ou non, et fait évoluer les structures. L'expansion de l'Univers, au contraire, éloigne les particules les unes des autres et fige les structures existantes. L'étude de l'évolution des structures permet donc de sonder l'énergie sombre.

S : Pourquoi s'intéresser à la matière noire ?

Plus abondante que la matière visible, les concentrations de matière noire produisent une déviation gravitationnelle des rayons lumineux. Ces zones ressemblent à de gigantesques lentilles optiques, les « lentilles gravitationnelles » qui déforment légèrement les images des galaxies lointaines. Nous pouvons mesurer ces petites déformations et, par un processus mathématique d'inversion, en déduire une répartition de la matière noire. C'est ce qu'a réalisé le projet Cosmos au début 2007. Comme notre distance aux structures ainsi cartographiées est liée au temps cosmologique, nous pouvons mesurer la distribution de la matière noire à différentes époques. Ces déformations changent si l'énergie sombre intervient pendant le trajet de la lumière. En effet, en provoquant une accélération de l'expansion au cours du



Images de galaxies (arcs) déformées par l'effet de lentille gravitationnelle dû à la matière (visible et sombre) située entre l'observateur et les galaxies.

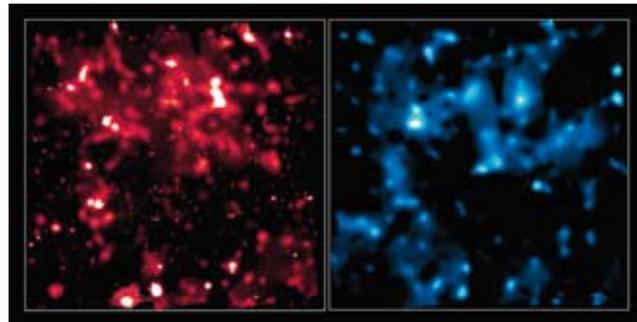
temps, l'énergie sombre dilue la matière et donc affaiblit d'avantage l'effet de lentille gravitationnelle. L'effet est de l'ordre d'un dixième de pour cent des déformations dues à la seule matière noire qui, elle-même, ne déforme les images galactiques que de quelques pourcents. Nous visons une précision de plusieurs ordres de grandeur au-dessus des mesures actuelles, ce qui nécessite une autre expérience spatiale, Dune (voir encadré ci-dessous).

S : Ce domaine spatial est très compétitif. Dans cette course, quels sont les points forts de l'Irfu ?

Les expertises spatiales du SAP et des services techniques de l'Irfu nous ont permis d'être à la tête de ce projet, dont nous sommes les responsables scientifiques (*Principal Investigator*). Notre groupe de traitement du signal a été remarqué dans Cosmos², grâce au développement d'une méthode d'analyse multi résolution appliquée au problème de la cartographie de la matière noire. Notre groupe de simulation numérique au SAP n'est pas en reste : en permettant d'interpréter les observations, il est tout à fait indispensable à la réussite de Dune et dispose des énormes moyens de calcul que peut fournir le CEA. Nous avons donc des compétences sur toute la chaîne. Et il en faudra car la réussite de ce projet nécessitera un gros travail de la part de toutes nos équipes.

S : Que va-t-on apprendre sur l'énergie sombre ?

Il existe une grande variété de modèles et de théories qui prédisent l'accélération de l'expansion de l'Univers: énergie du vide, constante cosmologique, gravité modifiée... Devant le foisonnement des modèles, nous adoptons une approche phénoménologique : l'énergie sombre est une composante supposée de l'Univers à laquelle on attribue des propriétés physiques que l'on contraint à



Matière visible (à gauche) et matière noire (à droite) dans le champ du relevé Cosmos².

© NASA-ESA-R. Massey (Caltech)

l'aide des observations. Ce faisant, on élimine certains des modèles et certaines théories. Pour faire ces choix, nous cherchons à savoir si l'équation d'état de l'énergie noire de l'Univers reste constante au cours du temps. Si tel est le cas, nous avons affaire à une constante cosmologique qui pourrait s'interpréter comme un fluide avec une pression négative. Il faudra sans doute revenir aux fondements de la physique elle-même pour en comprendre l'origine. En effet, la relativité générale qui décrit bien les phénomènes liés à la gravitation à l'échelle de l'Univers est incompatible avec la physique quantique qui décrit ceux qui interviennent à l'échelle des particules. Laquelle des deux théories faudra-t-il modifier ? La relativité générale prédit un lien entre les effets géométriques observés avec les lentilles gravitationnelles et la formation des structures. Si après nos mesures, il n'y a pas d'accord, c'est que cette théorie de la gravité doit être modifiée. Il y aurait donc derrière tous ces problèmes une nouvelle physique qui décrirait une force que nous expérimentons chaque jour, dès que nous posons le pied par terre !

Propos recueillis par C. R.

(2) Cosmos (Cosmological Evolution Survey) : Surveillance de l'évolution cosmologique.

DUNE, le satellite « explorateur de l'univers sombre » embarquera un télescope à grand champ destiné à l'étude de la matière noire et de l'énergie sombre à l'aide des lentilles gravitationnelles. À chaque instant, cet instrument observera simultanément un degré carré du ciel, contre quelques minutes d'arc carré pour le télescope spatial Hubble (HST) utilisé par Cosmos. Pour plus d'efficacité, ce degré carré est partagé en deux moitiés, l'une pour les longueurs d'ondes visibles et l'autre pour l'infra rouge. En effet, plus une galaxie est lointaine et plus la lumière qu'elle nous envoie est décalée vers le rouge. Dune permettra donc de mesurer l'image de galaxies plus éloignées – c.-à-d. plus anciennes – et d'étudier l'évolution de l'énergie sombre sur des temps cosmologiques. L'expérience entière représente un budget de 430 millions d'euros, dont 300 seraient pris en charge par l'ESA qui devrait fournir la plus grosse partie de la mission : lanceur, satellite, télescope. La responsabilité scientifique en est confiée à un consortium mené par l'Irfu et rassemblant 6 pays d'Europe et les USA.



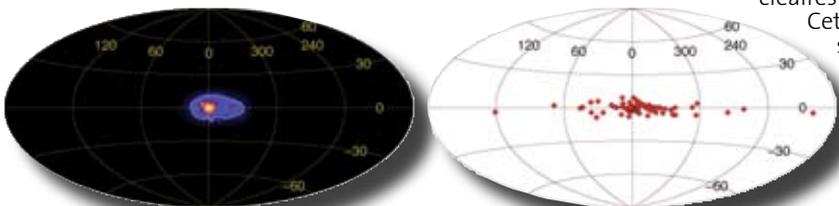
La mission Dune (Dark UNiverse Explorer) fera une carte de la structure à grande échelle de tout le ciel. Dune placera des contraintes précises sur l'énergie sombre via son effet sur la distribution de la matière dans l'Univers.

LES SOURCES GALACTIQUES D'ANTIMATIÈRE¹

La source d'antimatière tapie au centre de notre galaxie pourrait avoir livré quelques-uns de ses secrets. Une équipe européenne incluant des chercheurs du Service d'Astrophysique de l'Irfu y a cartographié précisément l'émission de photons qui signe la présence d'antimatière². Repérée en 2005 par les relevés du spectrographe SPI embarqué sur le satellite Integral, cette source a été observée durant plus de quatre ans, cumulant ainsi plus de 50 millions de secondes de temps de pose. Affinée par

cette accumulation de données, sa morphologie s'est révélée dissymétrique par rapport au bulbe galactique, et très proche de la répartition de certaines sources X binaires. Longtemps suspectées d'être des fabriques efficaces de positons, qu'elles éjectent à l'intérieur d'un plasma chaud, ces sources composées d'une étoile modeste orbitant autour d'un trou noir ou d'une étoile à neutron expliqueraient donc en partie cette présence d'antimatière. Le reste proviendrait de supernovæ thermonucléaires ou du trou noir central super massif. Cette hypothèse laisse peu de place à un scénario mettant en scène une particule exotique de matière noire.

L'image Integral du rayonnement² à 511 keV, à gauche, correspond à la distribution des sources X binaires (à droite).



© ESA/Integral/MPE/G. Weidenspointner

EN BREF

- (1) Ces travaux sont publiés dans la revue *Nature* datée du 10 janvier 2008.
- (2) L'annihilation d'un positon et d'un électron s'accompagne de l'émission de photons d'énergie caractéristique à 511 keV (gamma)

Chassé-croisé Cosmologie-Particules

Nous avons réuni Vanina Ruhlmann-Kleider, physicienne des particules, et Alexandre Réfrégier, astrophysicien, autour d'un petit-déjeuner organisé au restaurant La Rotonde à Saclay. Quelques morceaux choisis tirés de cette rencontre...



(1) Ces trois forces sont l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte.

S : Quelles sont les questions fondamentales de la cosmologie ?

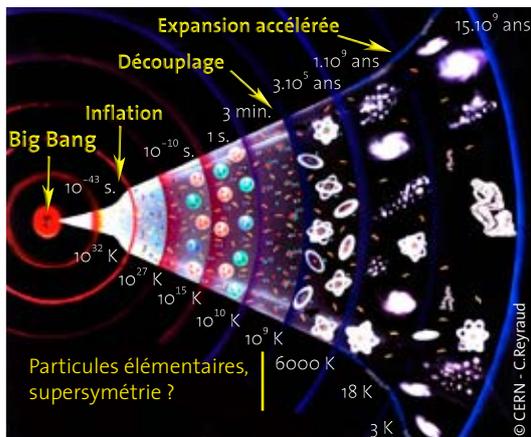
AR : Nous en avons trois : l'énergie noire, la matière noire, les conditions initiales. Mais derrière ces trois questions, on trouve en fait les propriétés de la gravité.

VRK : Il faut y ajouter le lien entre la gravité et les autres interactions fondamentales. Pour l'instant, la gravité ne peut être décrite au niveau quantique comme les trois autres forces. La théorie quantique des champs et les théories de jauge réussissent à décrire particulièrement bien ces trois interactions (c'est le modèle standard de la physique des particules), mais aboutissent à une impossibilité mathématique pour la gravité. Il reste donc à trouver un autre schéma qui conviendrait pour toutes les interactions, gravité comprise.

S : En quoi la gravité est-elle si particulière ?

AR : La première expérience de physique que nous faisons dans notre vie est de tomber... Bien que nous en ayons une connaissance pratique la plus directe qui soit, la gravité nous pose des problèmes aussi bien à des distances très faibles qu'à celles de la cosmologie, avec des incompatibilités profondes entre ces deux échelles. C'est donc la force que l'on comprend le moins. Énergie noire et matière noire sont peut-être simplement des phénomènes liés à cette incompréhension.

VRK : Il faudra beaucoup de temps pour résoudre tous les problèmes liés à la gravité. En revanche, la question de la nature de la matière noire semble plus accessible car c'est là que l'on a le plus d'informations à la fois du point de vue de la physique des particules et de celui des observations.



L'évolution de l'Univers depuis le Big Bang présente une période d'expansion accélérée dont l'explication pourrait bouleverser notre compréhension de la gravité.

S : Quelles sont les pistes pour la matière noire ?

VRK : Il faut imaginer une particule inconnue, qui interagit très peu et qui se retrouve un peu partout dans l'Univers actuel. Le bestiaire de la physique des particules offre des candidats remplissant ces critères, par exemple dans le domaine de la supersymétrie. C'est l'un des modèles favoris des théoriciens car il permet de résoudre certaines

questions laissées en suspens par le modèle standard. En revanche, en ce qui concerne l'énergie noire, nous n'avons qu'une mesure : sa densité. Nous cherchons maintenant à savoir si celle-ci évolue dans le temps.

S : Et pour l'inflation ?

VRK : Là, les théoriciens sont en avance sur nous. Il y

a longtemps qu'ils se sont attelés à ce scénario pour expliquer les premiers instants de l'Univers. Mais cette hypothèse est encore loin d'être validée par l'observation.

AR : Oui, nous avons à l'heure actuelle peu d'observations disponibles, à part la mesure de la température du rayonnement fossile. Les cartes de température mesurées sur le ciel entier révèlent des fluctuations, qui apparaissent naturellement dans les modèles d'inflation. De plus, le spectre des fluctuations observé correspond à celui prévu par les modèles d'inflation les plus simples. La prochaine génération d'expériences permettra de gagner encore en précision sur les cartes de température et donc de tester plus en détail les modèles d'inflation. La prochaine étape est toute proche, puisqu'il s'agit de Planck, expérience sur satellite à dominante européenne, qui sera lancée en 2008 et à laquelle l'Irfa participe.

S : Quelle est l'origine du rayonnement fossile ?

AR : C'est une photo de l'Univers lorsqu'il n'avait que 400 000 ans environ. Sa taille était beaucoup plus petite, sa densité et sa température beaucoup plus élevées. Il existait alors un couplage fort entre baryons et photons. Puis, l'Univers s'est refroidi suffisamment pour que les baryons forment des atomes, ce qui a libéré les photons. La lumière a alors pu voyager presque librement : d'opaque, l'Univers est devenu transparent. Le rayonnement fossile signe la surface de transition entre ces deux époques. Sa température, mesurée dans toutes les directions de l'espace, est la même à de petites fluctuations près qui révèlent les graines des grandes structures de l'Univers.

S : Comment s'expliquent ces fluctuations ?

AR : Leur origine reste incertaine et plusieurs scénarios sont envisageables, car nous ne connaissons vraiment que la physique de notre époque. Il est bien sûr possible de remonter le temps, pour atteindre une époque où la densité et la température étaient plus élevées, mais nos certitudes finissent par s'évanouir, notamment à cause de nos difficultés à appréhender les propriétés quantiques de la gravité. Notre physique atteint là ses limites.

VRK : C'est l'une des frontières de nos connaissances.

AR : Oui. Une possibilité est donc que ces fluctuations initiales surviennent dès l'époque de la gravité quantique dont on ne sait pas calculer les effets; dans ce cas leur origine nous échappe. Une autre voie est celle des modèles d'inflation qui introduisent un mécanisme pour transformer en fluctuations macroscopiques, des fluctuations quantiques microscopiques.

VRK : Est-ce parce que l'inflation va trop vite que les fluctuations quantiques sont préservées ?

AR : Dans ce type de modèles, l'Univers a, en effet, vécu une période d'inflation très rapide. Ainsi les fluctuations quantiques à petite échelle sont préservées et par la suite

amplifiées par la gravité, et pourraient donc engendrer les structures de l'Univers actuel. Cependant, même si elle repose sur des principes de physique des particules, cette théorie de l'inflation comporte des paramètres ajoutés « à la main ».

VRK : il en est souvent ainsi, les théories se construisent par tâtonnements. Par exemple, pour le modèle standard de la physique des particules : à partir d'un certain nombre de résultats expérimentaux a émergé une théorie qui expliquait toutes ces observations par quelques principes de base, comme, par exemple, le concept de symétrie. Mieux encore, le cadre mathématique ainsi défini a permis de pousser les calculs théoriques et de prédire d'autres effets à tester par l'expérience. C'est ce processus en plusieurs étapes qui fait passer d'un modèle phénoménologique à une théorie.

S : Cette démarche par bonds successifs va-t-elle produire la théorie ultime tant attendue ?

VRK : nous en sommes encore loin ! Ainsi, le modèle standard a beau avoir un fort contenu prédictif, il n'explique pas tout. Nous ne pouvons qu'espérer nous approcher d'une « théorie du tout », car il n'est même pas dit que l'on puisse en formuler une. Ce constat n'a rien de décourageant, car notre travail est d'essayer de comprendre de plus en plus, pas de tout comprendre...

AR : Et même s'il s'avère que la théorie dont on dispose à un certain moment est invalidée, elle aura tout de même été utile car l'étape qu'elle représente permet de réduire le champ des possibles.

S : C'est le cas du modèle standard de la physique des particules ?

VRK : Non, le modèle standard va plus loin. Il n'est pas standard pour rien. C'est une théorie capable de faire des prédictions et qui rend compte des phénomènes observés. Cependant, il a une validité limitée dans l'échelle d'énergie des processus qu'il prétend décrire. Au delà, nous attendons une construction théorique supérieure capable de l'englober. C'est parce qu'il ne sera pas remis

en cause dans sa totalité mais simplement dépassé, que ce modèle mérite le qualificatif de « standard ».

AR : En cosmologie, nous n'en sommes pas là, et un grand nombre de théories peuvent expliquer nos observations. Nous essayons donc, en améliorant la précision de nos mesures, de mettre à l'épreuve ces théories pour en diminuer le nombre. Le fait d'invalider une théorie fait aussi avancer les sciences : le champ des possibles se réduit, certaines théories résistent et finissent par être englobées dans un ensemble supérieur. Comme la gravitation de Newton a été englobée dans la relativité générale.

S : Les expériences actuelles vont pourtant dans plusieurs directions. Comment peuvent-elles contraindre la théorie ?

AR : Il faut tout de même que la théorie suivante rende compte des faits expérimentaux aussi bien que la théorie précédente. C'est une contrainte énorme. Ainsi, nous pouvons raisonner de manière inversée : plus on a d'observations précises et de théories possibles, plus on a d'indices pour trouver la théorie suivante.

VRK : Ce mécanisme nous permet de construire nos connaissances pièce par pièce. Un jour, probablement très éloigné, la description du monde microscopique de la physique des particules et les modèles d'inflation pourraient se rejoindre.

AR : Cette perspective est très excitante. Nous avons l'impression que, si nous poussons nos mesures et si la nature est clémente, nous allons découvrir une physique nouvelle. L'énergie noire – tout comme la matière noire – peut être le résultat d'une imbrication de phénomènes. Par exemple, elles peuvent illustrer la présence de dimensions supplémentaires ou, peut être, se prêter à une description en termes de supercordes. Les mesures faites et à venir dans le secteur de la cosmologie nous rapprochent de cette nouvelle physique.

Propos recueillis par C. R.

Christophe Yèche est physicien au service de physique des particules de l'Irfu. Il est passé de l'étude de la violation de CP avec l'expérience BaBar à la recherche sur l'énergie sombre.



Des oscillations primordiales pour mesurer une grandeur inconnue

Dès ses premiers instants, l'Univers a laissé des repères, comme cette distance caractéristique découlant des oscillations baryoniques primordiales, un étalon que les progrès électroniques nous permettent d'utiliser pour cerner la mystérieuse énergie noire. Histoire d'une quête...

Notre conception de la cosmologie a changé en seulement dix ans : pour les cosmologistes des années 1990, le terme d'énergie noire était nul alors qu'aujourd'hui, il est majoritaire. Pourtant on ne sait rien de cette composante obscure du bilan énergétique et plusieurs équipes s'acharnent, sinon à donner une explication, du moins, à contraindre ce phénomène par le biais d'observations qui défient les standards des technologies actuelles et

se complètent. Comme les trois mousquetaires étaient quatre, le trio de ces recherches de pointe sur l'énergie noire – la chasse aux supernovæ, les irrégularités du fond diffus cosmologique et les lentilles gravitationnelles faibles – compte désormais un quatrième comparse : les oscillations acoustiques baryoniques (voir encadré page 8). Pour l'équipe du SPP qui pousse en avant cette quatrième voie, la méthode recèle de nombreux atouts. Elle pourrait offrir de nouvelles opportunités et faire

Les oscillations acoustiques baryoniques

Composé en partie de photons, électrons et protons, l'Univers primordial est soumis à deux forces contraires en compétition : la pression radiative provoquant son expansion et la force attractive de gravité. Ce plasma oscille donc sous l'influence d'ondes de pression se déplaçant à une vitesse parfaitement déterminée par la théorie. Si ce n'est leur caractère relativiste, ces ondes ressemblent à celles d'un son se déplaçant dans un gaz, d'où leur nom d'oscillations acoustiques. Mais, alors que l'Univers est en expansion, il se refroidit progressivement. Intimement liés par l'intermédiaire des électrons, les baryons et les photons, qui oscillaient à l'unisson, finissent par se séparer, les uns formant les premiers atomes neutres, les autres continuant leur course et éclairant l'Univers : c'est le découplage. Ces

oscillations sont observées dans les photons qui composent le fond diffus cosmologique, et on les détecte dans la répartition de matière baryonique dans l'Univers. L'excès de densité de matière est, en effet, resté figé à une distance caractéristique des perturbations initiales. Autour de chaque galaxie, la probabilité de trouver une autre galaxie à cette distance est donc plus élevée. Cette distance de 150 Mpc, qui est la clé de la méthode, dépend de la vitesse à laquelle se déplaçait l'onde acoustique. Cette longueur étalon s'observe aujourd'hui à plusieurs distances et à travers des tranches d'Univers remplies essentiellement d'énergie noire. Finalement, les modifications de cette longueur caractéristique vont nous renseigner sur la nature de l'énergie noire.

avancer ce domaine de recherche fondamental pour la compréhension de la formation de l'Univers.

Une fois le phénomène débusqué grâce aux supernovæ (voir article page 3), il faut, en effet, faire des mesures de la plus grande précision possible afin de le cerner au mieux et de différentes façons. Que ce soit l'étude des supernovæ, celle des amas de galaxies, des oscillations baryoniques ou encore, du cisaillement gravitationnel faible, chacune de ces approches possède son lot d'erreurs expérimentales systématiques doublé de corrélations sur certains des paramètres cosmologiques. Heureusement ces paramètres ne sont pas les mêmes à chaque fois. Les méthodes sont donc complémentaires plutôt que concurrentes. Parmi elles, celle des oscillations acoustiques baryoniques fait pourtant figure d'*outsider*. Selon le rapport établi par un groupe d'experts américains (*Dark Energy Task Force* : Groupe de travail sur l'énergie noire) en 2006, cette méthode est intéressante parce qu'elle présente le meilleur compromis entre ses erreurs statistiques et systématiques.

La première observation des oscillations acoustiques, prédites dans les années 1970, n'a eu lieu qu'en 2005, et cela, seulement pour un petit volume d'Univers de 1 Gpc^3 (1 gigaparsec = $3,3 \times 10^9$ années lumière), centré autour d'un décalage vers le rouge $z \sim 0,35$ et seulement pour 50 000 galaxies. Il faut maintenant observer plus loin, pour des décalages vers le rouge de l'ordre de 1,5, permettant ainsi de sonder un volume plus grand de l'ordre de plusieurs Gpc^3 et d'engranger des données pour plusieurs milliards de galaxies !

Une méthode plus rapide

En 2005, les chercheurs ont utilisé une méthode intuitive et classique en astronomie optique : repérer une galaxie,

mesurer son spectre dans le visible pour connaître son décalage vers le rouge et faire la distribution de toutes les distances entre les galaxies prises deux à deux.

Nous proposons aujourd'hui d'utiliser les ondes radio. La méthode est plus rapide car on détecte la galaxie par son hydrogène atomique. Celui-ci présente en effet une raie en radio à la longueur d'onde de 21 cm, soit 1,4 GHz. On effectue donc, en une étape, un relevé en trois dimensions montrant la position dans le ciel et la troisième coordonnée, qui est donnée par le décalage vers le rouge de cette même raie. En pratique, on ne va plus considérer individuellement chaque galaxie mais des petits pixels d'Univers qui ont un volume de l'ordre de quelques dizaines de Mpc^3 et qui contiennent plusieurs centaines de galaxies. C'est un premier avantage de taille car lorsque l'on veut atteindre une très bonne précision, il est nécessaire de réaliser un très grand nombre de mesures. Le second avantage est technologique : 1,4 GHz est une fréquence radio située dans la bande des téléphones portables (0,9 à 1,8 GHz). Or ces téléphones utilisent des amplificateurs à bas bruit dont le prix a baissé avec le nombre d'unités vendues. Les inconvénients sont, bien sûr, l'omniprésence des radiofréquences parasites issues des téléphones portables, surtout aux abords des grandes villes, et dans une moindre mesure, celles des radars.

Les antennes de radioastronomie existent depuis les années 1950. Mais, pour éliminer une partie du bruit de fond électronique, leurs récepteurs devaient être refroidis par un coûteux système cryogénique leur imposant une forme parabolique à un seul récepteur. Aujourd'hui, grâce aux technologies développées pour les téléphones portables, il n'est plus besoin de refroidissement et les amplificateurs à bas bruit ne coûtent presque rien. Au lieu de faire des antennes paraboliques, nous proposons de réaliser un réseau de récepteurs disposés sur les axes de demi-cylindres réalisés en grillage. Leur orientation Nord-Sud permettra de balayer le ciel avec la rotation terrestre. Grâce à ce réseau, nous pourrions utiliser des méthodes interférométriques afin d'améliorer notre précision (voir encadré page 9).

Un peu comme nous le faisons pour les données du LHC, nous numérisons d'emblée le signal, à une cadence de 500 MHz. À cette fréquence, les dispositifs de numérisation – les ADC – étaient encore très onéreux il y a quelques années. Aujourd'hui, une voie ne revient qu'à une centaine d'euros. Pour notre laboratoire d'électronique, le Sedi, qui a conçu il y a cinq ans l'électronique des détecteurs du Cern avec des ADC travaillant à quelques dizaines de mégahertz, il s'agit d'une augmentation

Prototype à Pittsburgh du projet d'interféromètre radio. Il est constitué de 2 réflecteurs cylindriques de $10 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ orientés dans la direction nord-sud.



©C. Yèche/CEA

raisonnable des performances. L'utilisation de cet ADC, qui n'existait pas il y a un an et demi, est un défi très intéressant pour nos électroniciens et, dans cette entreprise, les compétences et la disponibilité du Sedi constituent notre atout majeur.

Nous pourrions tester ce dispositif à Pittsburgh sur un démonstrateur de 100 m² (voir photo page 8). Ce n'est pas un site excellent au regard du bruit des téléphones portables, mais nous avons déjà testé nos récepteurs sur le site du radiotélescope de Nançay, protégé de ces perturbations.

Si tout se déroule comme prévu, il faudra monter une collaboration internationale capable de prendre en charge le coût total du télescope: environ cinq millions d'euros, un coût comparable à celui d'autres projets comme Antares¹ ou H.E.S.S.².

Ce travail est une tentative risquée pour notre laboratoire, mais c'est aussi un investissement pour le futur: les premiers résultats qui devraient arriver en 2013-2014 pourraient devancer ceux de projets beaucoup plus ambitieux et coûteux comme SKA (Square Kilometer Array), qui va travailler dans plusieurs gammes de fréquences et sur un maillage de 3000 km. Avec un budget de l'ordre du milliard d'euros, SKA sera à pied d'œuvre autour de 2015-2020.

Quant à notre projet, il est encore dans une phase de R&D, mais si nous arrivons à démontrer qu'il peut se faire à un coût raisonnable, nous proposerons, avec ce concept, une solution originale et efficace pour étudier l'énergie noire!

Christophe Yèche et
Claude Reyraud

(1) *Antares (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch): télescope sous marin destiné à l'étude des neutrinos, en cours de déploiement au large de Toulon.*

(2) *H.E.S.S. (High Energy Spectroscopic System): réseau de télescopes destinés à l'étude du ciel dans un domaine gamma et situé en Namibie.*

Un concept élégant et précis

Plusieurs designs du projet de radiotélescope sont actuellement à l'étude. Celui qui répond le mieux aux critères demandés comprend 16 réflecteurs cylindriques de 12,5 m de large pour 200 m de long. Chaque réflecteur statique orienté Nord-Sud observe une bande du ciel et détecte la raie à 21 cm de l'hydrogène neutre grâce à 1024 récepteurs régulièrement espacés le long de la ligne focale. Leurs signaux sont numérisés d'emblée et prêts à subir une première transformée de Fourier en temps. Cette opération

classique dévoile un premier spectre montrant les pics de fréquence pour chaque récepteur le long du cylindre. On peut donc regrouper ces pics par fréquence et pour chaque groupe effectuer une seconde transformée de Fourier, cette fois en fonction de la position du récepteur le long du cylindre. En corrélant les informations entre les différents cylindres, ces opérations nous permettent de retrouver la position dans le ciel des maxima des différents signaux car les récepteurs sont régulièrement espacés et les mesures sont elles-mêmes séquentielles, profitant de la rotation de la terre pour observer différentes bandes du ciel.

Éric Armengaud a fait sa thèse au laboratoire APC (AstroParticules et Cosmologie) en 2006 après son DEA de physique théorique. Il est maintenant physicien au service de physique des particules de l'Irfu.



L'hypersensibilité d'un piège à particules sombres



Assemblage des détecteurs d'Edelweiss au Sedi/Irfu.

© J.J. Bigot/CEA

La détection directe des wimps, ces hypothétiques particules qui pourraient constituer une partie de la matière noire, est un défi majeur pour les physiciens. Enfouie sous le Fréjus, au milieu du tunnel qui le traverse, la version II d'Edelweiss¹ est bien placée dans cette quête.

(1) *Edelweiss: Expérience pour Détecter Les Wimps En Site Souterrain.*

(2) *Eros: Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres*

(3) *Machos (Massive Astronomical Compact Halo Object): Objet astronomique massif et compact du halo galactique.*

(4) *Wimps (weakly interacting massive particles): particules massives interagissant faiblement avec la matière.*

Publiée au début de l'année 2007 par la collaboration internationale Cosmos, la carte de la matière noire de l'Univers montrait la répartition de cette substance dont on observe les effets sur l'Univers visible, mais dont on ne connaît toujours pas la nature. 20 à 25 % de l'énergie de l'Univers serait sous la forme de cette matière invisible. Or la collaboration Eros² a montré qu'elle ne pouvait se trouver sous la forme de grosses planètes froides, les machos³. Puisqu'il n'y a pas de machos, la matière

noire pourrait être cachée sous forme de wimps⁴ recherchés par Edelweiss version II, à l'aide de détecteurs appelés **BOLOMÈTRES** (voir page 10) poussés aux limites de leur sensibilité.

Désormais sous la houlette de Gilles Gerbier, l'expérience peaufine ses 28 nouveaux détecteurs qui lui ouvriront de nouvelles perspectives: un facteur 100 de mieux par rapport à sa sensibilité initiale permettra de tester plusieurs des modèles proposés dans le cadre des théories de supersymétrie qui

Scintillations

(5) Bolomètre : instrument comprenant un cristal refroidi à quelques dizaines de millikelvins, très près du zéro absolu. Une particule incidente qui y dépose son énergie sous forme de chaleur provoque une très faible augmentation de température du cristal. Il permet de détecter des particules peu ionisantes – comme les wimps – avec une très grande sensibilité.

(6) CSNSM : Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse, (IN2P3, Université Paris-Sud 11).

(7) Le flux des rayons cosmiques y est divisée par un million.

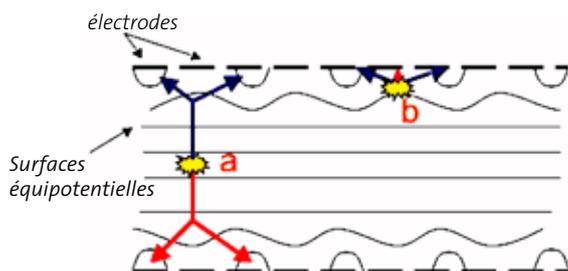
offrent de nombreuses particules candidates pour la matière noire. Des promesses qui sont cependant au bout d'une route difficile. L'ennemi principal d'Edelweiss, le bruit de fond, est en effet, encore trop important. À commencer par les rayons gamma issus de la radioactivité naturelle.

Tout est fait pour minimiser l'intensité globale de ce fond radioactif : un protocole très strict est appliqué concernant l'utilisation des matériaux, qui sont sélectionnés *ad hoc* sur leur activité *via* la mesure de leur spectre gamma. D'autre part, les détecteurs sont couverts de protections passives : 30 cm de paraffine pour ralentir les neutrons rapides issus de la roche, 15 cm de blindage de plomb, qui réduisent d'un facteur 1000 le flux des photons et 10 cm de cuivre, qui arrêtent les émissions de basse énergie dues au plomb lui-même. Au plus près des détecteurs, des protections en plomb archéologique (retrouvé sur une épave romaine au large de Ploumanac'h) ont été installées : l'ancienneté de ce plomb fait qu'il ne contient plus d'isotope ^{210}Pb , source de radioactivité réhibitoire pour Edelweiss. Au final, ces protections permettent de gagner un facteur deux par rapport à la première version d'Edelweiss.

Mais cela ne suffit pas à éliminer tous les photons gênants. Pour aller plus loin, on utilise une méthode de mesure qui permet de faire la différence entre les photons et les wimps. Les bolomètres mesurent l'augmentation de température causée par l'interaction avec une particule, photon, wimp ou autre. On y ajoute des électrodes polarisées qui permettent de mesurer simultanément l'ionisation des atomes du cristal causée par cette particule. Pour une même augmentation de température, le signal d'ionisation est plus élevé pour les photons que pour les wimps, ce qui permet de les distinguer.

Lutter contre le bruit de fond

Malheureusement, la réalité est plus complexe : lorsqu'une particule interagit à la surface d'un cristal trop près des électrodes polarisées, les signaux de chaleur et d'ionisation sont perturbés et ne permettent plus de distinguer aussi bien les wimps de la radioactivité naturelle. Bien que rares, ces événements de bruit sont une limitation majeure à la sensibilité du détecteur. Nous testons actuellement deux configurations qui lèveront ces ambiguïtés. La première est préparée au CSNSM⁶ et remplace la thermistance classique du bolomètre par un fil de niobium-silicium qui donnera un signal thermique particulier en cas d'événement de surface. La seconde est encore en cours de R&D entre le CSNSM et le Sédi de l'Irfu. Ses électrodes sont dédoublées et leur forme dessine des cercles imbriqués, qui sont polarisés alternativement + et -. Elles donnent au champ électrique superficiel une géométrie particulière. Les signaux d'ionisation mesurés ont alors des caractéristiques qui permettent à nouveau de faire la différence entre les signaux dus à la radioactivité et ceux dus aux wimps.

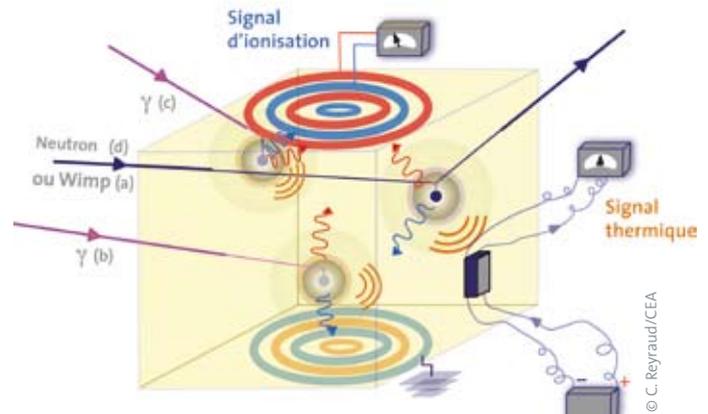


© E. Armengaud/CEA

FONCTIONNEMENT DES ÉLECTRODES À CERCLES IMBRIQUÉS

Les différents signaux enregistrés par les électrodes permettent de distinguer une interaction à l'intérieur du détecteur (a), d'une interaction à la surface (b).

Fonctionnement des bolomètres d'Edelweiss



© C. Reyraud/CEA

Un point critique de l'expérience revient à différencier les signaux provenant des wimps (a) des différents signaux parasites : (b) ceux des photons provenant de l'environnement, qui peuvent être rejetés en examinant simultanément les signaux thermiques et électriques. (c) ceux des particules provenant de l'environnement et interagissant à la surface du cristal. Ils génèrent des signaux perturbés et réclament un traitement spécifique qui fait l'objet d'une R&D pointue. (d) ceux des neutrons qui sont produits par les muons cosmiques. Ils sont rejetés grâce à un détecteur sensible aux muons incidents. Lorsqu'un muon est détecté, tout signal dans le bolomètre est rejeté.

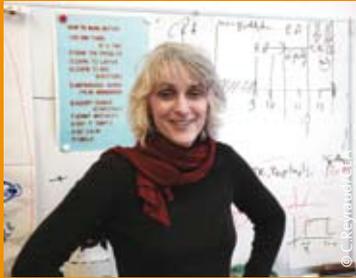
Une autre source de bruit de fond provient des muons engendrés par les rayons cosmiques. C'est en enterrant les détecteurs dans le laboratoire de Modane, sous les quelques 1600 m de roches du Fréjus⁷, que l'on peut arrêter la plus grande partie de ces muons. Toutefois, de rares resquilleurs peuvent encore faire naître des neutrons susceptibles de provoquer des signaux parasites que l'on ne peut pas distinguer des wimps, même avec le signal d'ionisation. Afin de les différencier, nous avons installé autour des bolomètres un détecteur à muons. Si ce dernier enregistre le passage d'un muon en même temps qu'une impulsion correspondant à un recul nucléaire, l'événement est alors reconnu comme étant dû à un rayon cosmique et non à un wimp.

Depuis le démarrage de l'expérience, nous avons dû faire face à de nombreuses difficultés comme, par exemple, des vibrations dégradant la qualité des signaux enregistrés. Certains de ces problèmes ont été résolus et nous pouvons maintenant ajouter progressivement des détecteurs tout en prenant de plus en plus de données, la concurrence avec d'autres expériences étant rude...

À terme, nous pourrions remplir notre coquille cryogénique d'une centaine de détecteurs de 300 g, soit 30 kg de germanium. Une telle masse de cristaux est nécessaire pour cerner efficacement un paramètre essentiel de cette quête des wimps : leur probabilité d'interaction avec la matière. Celle-ci n'est pour l'instant pas vraiment contrainte par la théorie. Certains modèles supersymétriques prévoient ainsi, pour un kilogramme de cristaux, une interaction tous les 30 ans, voire moins ! Avec 30 kg de germanium, on pourrait alors mesurer environ une interaction par an seulement. Mais cela implique d'avoir un bruit de fond encore plus faible et mieux maîtrisé. Les mesures d'Edelweiss II, ainsi que celles d'autres expériences du même type, seront complémentaires de celles du LHC dont les expériences pourraient elles aussi produire des wimps. À plus longue échéance, on envisage déjà des expériences avec une tonne de cristaux, ce qui améliorerait d'autant la sensibilité.

Éric Armengaud et Claude Reyraud.

Une façon d'aimer la physique



BIOGRAPHIE : Il est très fréquent en Allemagne de prendre une année "sabbatique" à l'étranger après le bac. Ainsi je suis venue à Paris comme jeune fille au pair et je ne suis plus repartie. J'ai fait mes études supérieures à Paris 6. Après avoir obtenu le DEA CPM en 1991, j'ai commencé ma thèse au LPNHE sur l'expérience H1 et, en 1993, j'ai été embauchée au CNRS. J'ai continué à travailler sur la mesure des fonctions de structure auprès de H1 jusqu'en 1998, date à laquelle j'ai rejoint l'expérience D0 à Fermilab. En 2005, j'ai été nommée directrice adjointe au LPNHE par Jean-Eudes Augustin et j'ai travaillé ensuite avec Pascal Debu, ancien chef du SPP et du SACM au Dapnia. Mon premier contact avec le CEA date de mon stage de DEA, où j'ai travaillé sur l'analyse des fumées des feux de savane en Côte d'Ivoire, afin de les utiliser comme traceur, avec l'équipe de Bernard Bonsang, aujourd'hui au LSCE.

Ursula Bassler a pris la suite de Bruno Mansoulié à la tête du Service de physique des particules de l'Irfu. Elle y porte un regard encore extérieur mais plein d'expérience sur le difficile métier de physicien. Une ligne d'avenir pour le SPP.

S : As-tu été facilement acceptée dans ce monde de physiciens ?

UB : (rire) Oui, je pense. Au moins à l'époque où je faisais ma thèse, les jeunes physiciennes étaient vite remarquées. Néanmoins, dans notre milieu ce n'est pas simple pour les femmes, en particulier lorsqu'il s'agit de maintenir une vie de famille tout en ayant un impact au sein d'une grande collaboration ou sur un sujet de recherche. Ce qui me heurte, ce sont des propos qui mettent en cause les compétences des femmes dans les sciences. Il ne faut pas oublier que cela ne fait que trois générations que les femmes ont accès à la physique expérimentale. Il faut du temps pour franchir toutes les barrières mentales, les siennes et celles des autres, et pour véhiculer des modèles qui rendent ces carrières attirantes pour des jeunes femmes. J'aime le travail effectué dans les collaborations de physique des particules et l'effort collectif pour faire progresser les savoirs. Certains profils y réussissent mieux que d'autres et il est très important de veiller à ce que la reconnaissance soit partagée de manière plus juste, à ce que l'esprit collaboratif prévale sur la compétition et que les exigences d'excellence ne suppriment pas le droit aux questions et à l'erreur. Sans erreurs, pas de créativité et pas d'innovation...

S : Comment vois-tu le métier de physicien ?

Il y a eu une grande évolution dans la physique des particules. Au début, des instruments ont été construits au sein d'équipes relativement modestes, au point que les physiciens étaient directement liés à l'instrument. Avec les défis technologiques, les collaborations ont grossi. La spécialisation est devenue nécessaire. Elle permet de trouver une place selon ses propres affinités. Cependant, au cours d'une carrière, il serait dommage de s'abstenir de faire le tour des différents domaines. Il ne faut pas oublier non plus les nombreuses tâches fastidieuses nécessaires avant qu'un résultat de physique ne sorte d'une expérience. Avoir de l'estime pour ce travail

effectué parfois dans l'ombre est crucial, de même que faciliter les opportunités pour que les physiciens puissent briller par l'excellence de leurs résultats.

S : Tu as connu ce genre de travail ?

J'ai travaillé avec des ingénieurs sur la conception et la réalisation du système de calibration en ligne de D0 et, durant un an, je suis allé sur place pour la mise en route du calorimètre¹ avant le Run II en tant que responsable de la qualification. Une période exténuante, mais très excitante : chaque jour, nous améliorions les performances du calorimètre en cherchant à réparer des canaux défaillants, le tout sous pression pour récolter au plus vite des données exploitables. Le savoir acquis m'a ensuite permis de prendre en charge des groupes de travail sur la reconstruction du calorimètre et les algorithmes d'identification d'objets, avant de me tourner vers la physique du quark top.

S : Chef de service, c'est un peu administratif ?

L'interaction avec les gens et les relations humaines dans un domaine qui m'est cher suffisent à me motiver. Je suis très curieuse de tous les aspects de cette fonction. Pour l'instant, j'apprends et j'essaie de rendre fructueux mes échanges avec les équipes du SPP dont les expériences concernent la quasi-totalité des grandes questions de la physique fondamentale. Le SPP est dans son domaine l'un des grands laboratoires du monde. C'est très stimulant pour moi de travailler ici.

S : Justement, le champ d'investigation du SPP n'est-il pas trop grand ?

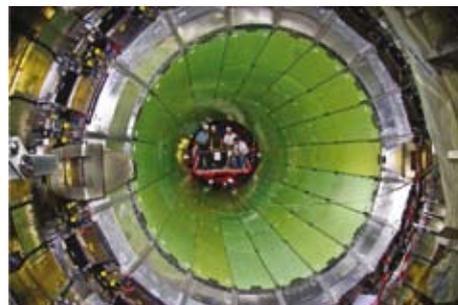
Un laboratoire ne doit pas devenir monochrome, centré sur une seule thématique. Il est important pour un physicien de pouvoir changer de domaine de recherche et de participer à différentes expériences. Ces différences maintiennent une grande richesse et favorisent les échanges d'idées et de savoir-faire.

Propos recueillis par C. R.

(1) *Élément du détecteur qui absorbe totalement une particule pour en mesurer l'énergie totale.*

Détecteur CMS au complet

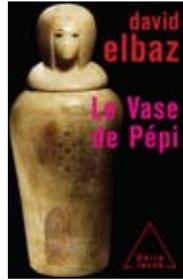
Genève, le 22 janvier 2008. Aux premières heures de la matinée, le dernier élément du détecteur CMS (Compact Muon Solenoid) a commencé sa descente dans la cavité d'expérimentation souterraine, en prévision du démarrage cet été du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN. C'est un moment crucial pour la collaboration CMS, l'expérience étant en effet la première de cette nature à avoir été construite en surface, puis descendue, élément par élément, à 100 m sous terre. Il marque l'aboutissement de huit années de travaux dans le hall de surface et le début de la mise en service finale de CMS avant l'enregistrement des collisions proton-proton au LHC.



EN BREF

Le Vase de Pépi

David Elbaz, Éditions Odile Jacob, Paris, 2007.



L'histoire du fer, sommet de la création nucléaire, est fort singulière car il n'est pas engendré par les étoiles en tant que tel, mais sous forme de son générateur radioactif, le nickel-56, édifice remarquable qui rassemble 14 noyaux d'hélium. Mais il est trop riche en protons pour être stable et définitif : il se transmute en cobalt-56 et ce dernier en fer-56. Cette histoire édifiante de genèse et de métamorphose a servi de source d'inspiration au roman scientifique de David Elbaz, *Le Vase de Pépi*. Près de Louksor, entre les vallées des Rois et des Reines,

un anthropologue découvre un vase qui relate la vie de Pépi, antique enlumineur de tombeaux. A travers époques et contrées, sur le simple fil de l'histoire d'un noyau de fer, le chercheur redécouvre l'or du temps. David Elbaz, avec un talent consommé, file en un même discours, dans une ambiance pharaonique, la cosmologie, la géologie et la biologie. Il remonte la chaîne de l'inerte au vivant qui réunit sous le sigle du fer, en une même guirlande l'étoile, le sang, la bactérie, le champ magnétique terrestre et la vie pensante. La relation entre le fer, les étoiles et le sang est plus profonde que celle que disaient les astrologues et les alchimistes. David Elbaz démontre qu'elle est consanguine : lisez son roman, vous respirerez l'essence de l'évolution.

Michel Cassé (SAP)

Cosmologie

dite à Rimbaud

Michel Cassé, Éditions Jean-Paul Bayol, Alès, 2007.



Astrophysique ou poésie ? Faut-il choisir ? Michel Cassé opte ici pour un mélange des deux, ne voulant pas choisir entre deux passions aussi dévorantes. Pour baigner dans les deux, il entreprend un dialogue avec ses deux poètes favoris, Rimbaud et Ponge, et invente une astrophysique où « Rimbaud est ma constante cosmologique, écarteur d'espace... » et Ponge la matière. On l'a compris, les deux poètes, le fou et le sage, habitent le scientifique et l'amènent à dire la science comme peut-être jamais cela n'avait été fait : avec lyrisme, en se jouant des mots, des idées, mais sans jamais tromper son monde, quitte à faire quelques rappels à l'occasion.

Voici donc une ballade qui nous parle des neutrinos et des étoiles, du big bang et des trous noirs, de la matière noire et des supernovæ, sans que l'on s'en doute, pris que l'on est au vertige des mots (et des jeux de mots: notre univers a été créé à partir du vide, et ce mot est l'anagramme de dieu...). Instructif? Sûrement, mais ce n'est pas le but du livre. Onirique ? Sans doute, mais un rêve éveillé, qui explore les limites de la science moderne. Délirant ? Oui, comme Rimbaud et Ponge peuvent l'être.

Cette science en poésie ravira les poètes, irritera les rationnels, mais surtout nous apprend que la vulgarisation se glisse dans de nombreux genres littéraires. Et la recherche fondamentale, qui explore les limites de la connaissance, est un domaine particulièrement en résonance avec la poésie, car elle est à la limite de l'imagination.

Yves Sacquin (SPP)

Va et viens

LES ARRIVÉES...

DE JUIN À JANVIER 2008

C. Césarini (M du DSM/SRTS, Senac), C. Desailly (MI, SIEEV), U. Bassler (MAD CNRS), P. Abbon (CA, Sedi), L. Latron (CA, Senac), B. Piccirelli (Rec, SACM), D. Medioni (Rec, SACM), P. Gastinel (M, SIEEV), M.-O. Levailant (Dir, M de DRHRS/Secap), N. Judas (Dir, M de AC/GSI/DF), P. Brun (Rec, SPP), F. Couderc (Rec, SPP), M.-D. Salsac (Rec, SPHN), A. Chancé (Rec, SACM), S. Bastin (Rec, Sis), I. Pacquetet (M de Sac/DSM/SPAS, Dir), G. Authelet (SACM, Rec), R. Joannes (Sedi, Rec), N. Auge (Dir, Rec), P. Joyer (M de SGN, SIEEV), M. Titov (Rec, SPP), T. Dugué (Rec, SPHN), H. Bervas (MI), B. Pottin (SACM), N. Chauvin (SACM), G. Mention (SPP), S. Fromang (SAP), C. Simon (SACM), M. Bruchon (SACM), F. Schaer (Sedi), O. Bringer (Senac), J.-C. Guillard (Sis), C. Mailleret (SACM), D. Gilles (SAP), N. Grouas (Sis), O. Tellier (Sis), M. Kebbiri (Sedi).

M : MUTATION ; MI : M. INTERNE ; MAD : MISE À DISPOS. ; CA : CHANGEMENT D'ANNEXE ; REC : RECRUTEMENT.

LES DÉPARTS...

DE JUIN À JANVIER 2008

G. Charruau (SACM, R), M. Humeau (SACM, R), J.-P. Vacher (Sis, R), A. Milsztajn (SPP, D), C. Desailly (SACM, MI), P. Abbon (Sedi, CA), J. Tartas (Sedi, R), J.-C. Saudemont (Sis, R), L. Latron (Senac, CA), J. Paul (SAP, R), N. Duportail (Sis, Dem suite à CSS/ME), D. Leclerc (Senac, R), A. Devred (SACM, Dét Iter), P. Charvin (Sedi, M Gre/Inac), M. Boyer (Dir, M LSCE), J.-P. Pansart (SPP, R), D. Schmitt (SAP, Dem), M. Manzato (SACM, M à, Gre/Inac), M. Chalifour (Sedi, Dét Iter), J.-M. Morin (Sedi, R), H. Bervas (MI, Dir).

M : MUTATION ; MI : MUTATION INTERNE ; CA : CHANGEMENT D'ANNEXE ; R : RETRAITE ; D : DÉCÈS ; DÉT : DÉTACHEMENT ; DEM : DÉMISION.