

Scintillation2

N° 95 - SEPTEMBRE 2016

La musique des deux infinis

- ♦ **Feynman en musique** (p. 2-3)
- ♦ **Le quark top**, partenaire particulier au **LHC** à 13 TeV (p. 4-5)
- ♦ **n_TOF** ouvre une nouvelle **aire au Cern** (p. 6-7)
- ♦ **ESS** à l'Irfu (p. 8)
- ♦ **Saraf**, accélérateur linéaire « clefs en main » (p. 9)
- ♦ **Dossier** : L'invisible **matière noire froide** et le miracle des **wimps** (p. 10-11),
 - Détecter les **wimps** : des particules furtives (p. 12)
 - $E=mc^2$ vers l'invisible au **LHC** (p. 13)
 - Matière noire au TeV : contraintes posées par **H.E.S.S.** (p. 14-15)
- ♦ **Le PeVatron** révélé par H.E.S.S. au centre de la Voie lactée (p. 16-17)
- ♦ L'éruption du **trou noir V404 Cygni** (p. 18-19),
Astro-H, **Hitomi**, derniers moments - et résultats! (p. 19)
- ♦ Hommage de l'Irfu à **André Brahic** (p. 20)

Ce numéro retrace les partitions jouées par l'Irfu, de la mise en musique des cavités (ESS, Saraf), à celle des détecteurs pour mesurer les résonances nucléaires (n_TOF) jusqu'à la symphonie des observations de rayons gamma à haute énergie, révélant des phénomènes uniques sur l'activité des supernovæ et des trous noirs (Hitomi, V404 Cygni, PeVatron). Pour trouver de nouvelles particules auprès du collisionneur du LHC, les physiciens orchestrent des analyses des différentes voies de réaction, notées par des diagrammes de Feynman.

Physique et musique : c'est le sujet de la nouvelle qui nous fait imaginer les processus de la création scientifique chez Feynman. Certains diagrammes ouvrent aussi une fenêtre sur l'univers. Nous examinerons comment ils tissent les liens entre les deux infinis, par le mécanisme de production de la « matière noire », qui substantialise (cf. n°94) l'inconnu de l'infiniment grand : le bilan en masse et en énergie de l'univers, déduit des observations cosmologiques, fait apparaître un déficit lorsqu'il est comparé à la masse totale de tous les objets que nous y connaissons. Sur cette question qui se joue des particules infimes aux « espaces infinis », les expérimentateurs se sont lancés dans une quête des hypothétiques corpuscules de matière noire. L'un des secteurs de recherche est celui des candidats massifs, les wimps. Le dossier vous présentera les études menées à l'Irfu pour les détecter : mesures de leurs interactions directes dans les laboratoires souterrains, production auprès du LHC, ou traces de leurs annihilations dans l'espace avec les télescopes qui scrutent les rayons gamma à haute énergie. Ainsi traquée à toutes les échelles, si cette matière existe, elle sera bientôt trouvée !

Valérie Lapoux



Steve Reich rêve-t-il d'analyse en déphasage ?

Par Jacques Ball (SPHn)



DANS LA PEAU

D'ARCHIMÈDE, EINSTEIN ET LES AUTRES...
CONCOURS DE NOUVELLES



3^{ème} prix Grand Public
Jacques BALL
Steve Reich rêve-t-il d'analyse en déphasage ?

Concours organisé par l'ENSTA ParisTech
Sous le patronage du ministère de l'Éducation nationale,
de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
En partenariat avec :

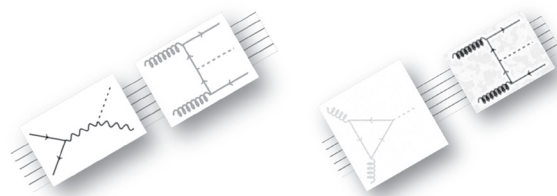


MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

N° 95 - SEPTEMBRE 2016

Pour décrire les processus de la physique, nous employons des images, des schémas... des diagrammes « à la Feynman » qui constituent une partie de notre langage scientifique (le bandeau présente l'un des diagrammes « boson de Higgs »). Qu'avait en tête Feynman quand il a proposé ses diagrammes ? Que voyait-il... qu'entendait-il ? Jacques Ball a proposé une vision de l'imaginaire de Feynman, en adoptant l'angle musical, dans sa nouvelle primée (3^e prix du jury) au dernier concours de l'ENSTA¹ sur le thème imposé « Dans la peau d'Archimède, Einstein... et les autres ». Le texte suivant est une version adaptée de la nouvelle, le lecteur de Scintillations pourra en lire l'intégralité dans le recueil de 2016 publié aux presses de l'ENSTA.

Automne 1964, je me trouvais à Nashville à une soirée organisée par l'Université afin de ramasser des fonds en invitant à la fois de potentiels généreux donateurs et des personnalités du corps professoral. Le doyen de CalTech m'avait demandé d'y aller pour participer à la remise des diplômes des étudiants lauréats et permettre par ma présence de faire monter les enchères. Nous étions quelques malheureux élus ainsi coincés pour la bonne cause. Quoique je pense de Nashville, cette ville a un héritage, c'est la patrie de la country music et j'aime assez la country, la vraie, pas les sonnettes qu'on sert en Californie. J'aime surtout le soul jazz. Je collectionnais les disques et je ne manquais jamais de dénicher de nouveaux trucs parmi les bacs de vieux 45 tours. Une de mes trouvailles récentes était un single, *Evil ways*, par Jack Costanzo, dont le surnom était Mr Bongo. C'était enregistré live dans un nightclub de Boston, un de ces instrumentaux où la voix surgit, *You've got to change your evil ways* avec un assortiment bien senti de grognements, et un saxophoniste génial Ed Strum. J'adorais ce disque.



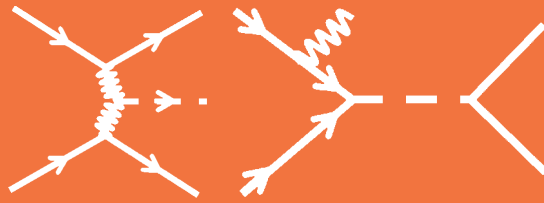
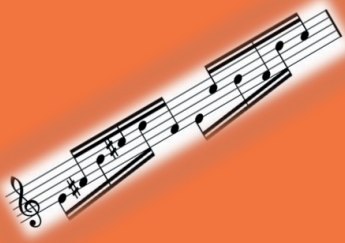
Les organisateurs fixaient tout le monde. Avais-je un air si décalé ? Les choses prirent un drôle de tour quand les paillettes s'intéressèrent à moi et me demandèrent des autographes. D'abord une puis la foule. Je sais qu'elles ne pouvaient pas être des fans de physique, mais pour qui me

prenaient-elles ? Un prix Nobel ? Peut-être qu'elles ne le savaient même pas mais se disaient qu'au cas où je serais « quelqu'un » il valait mieux assurer. Je souriais et saluais de la main en essayant de garder un profil bas. Pas que je n'appréciais pas ces égards inattendus mais c'était vraiment trop mal barré. La party commençant à battre son plein, j'en profitai pour m'esquiver à la grande joie des hommes en tuxedo. Je partis à la recherche de la première diligence pour rentrer. Me voilà à l'extérieur dans un quartier inconnu de Nashville. Seule lumière dans les parages, la salle des fêtes derrière moi. Je commençai à marcher dans la rue quand un taxi s'arrêta. Je demandai au taxi « Vous êtes libre ? », à quoi il répondit « Ouai, depuis la déclaration d'indépendance, monte cowboy ! » Enfin quelqu'un avec un cerveau et qui sait qui est quoi. Maintenant j'étais dans le tacs et ce chauffeur noir me regardait dans son rétro avec un large sourire « Vous êtes dans le show business, hein ? » Oh non s'il vous plaît. Il souriait : « Où on va ? » Je lui donnais le nom de l'hôtel. Il brancha son compteur et nous voilà partis. Je regardais dehors parce que j'avais du mal à supporter son regard fixe sur moi dans le rétroviseur. Avec ses yeux écarquillés et son large sourire, il fit : « Vous ressemblez à un musicien. » Je cédai : « Ouais, je joue du bongo, mais je ne suis personne que vous ne connaissiez, vraiment ». Il répondit avec humour : « Ouais moi non plus. Mais vous n'êtes pas d'ici, ça je le sais. » J'étais fatigué mais je me pris au jeu. « Comment vous savez ça ? », je riais. « Vous avez pas l'accent du coin et j'ai vu du pays. Z'êtes de New York, hein ? » Me détendant et commençant à apprécier le bonhomme, je dis : « New York, puis Boston ». « J'y suis allé aussi », me répondit-il. « Qu'est-ce que vous faites là-bas, vous jouez du bongo ? Vous avez joué ce soir ? » « Je joue, mais pas ce soir, je suis ici pour le business. » J'aurais pu miser un dollar et gagner, pour la question qui allait suivre « Quel genre de business ? »

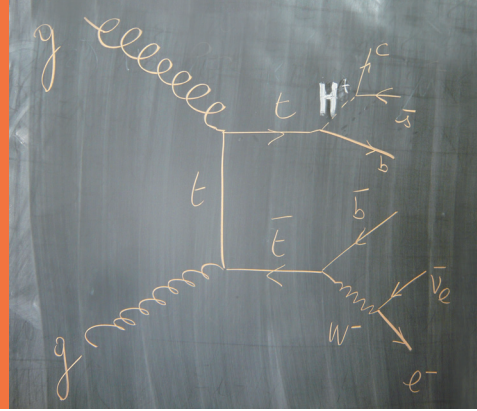
Le pince-fesses était organisé dans une chouette salle des fêtes, après la cérémonie des diplômes pendant laquelle j'avais donné mon point de vue de physicien un peu connu sur les travaux des uns et des autres. Un des étudiants, un petit malin, avait saisi l'occasion pour me poser une question technique sur les constantes de couplage. La réponse serait longue, je l'engageai à m'écrire. Il marmonna : « C'est curieux parce que j'avais posé la même question au professeur Schwinger... » Je ne pus m'empêcher de lui demander : « Que vous a répondu Julian ? » « Comme vous, que je devais lui écrire ». En réalité, j'avais l'esprit taraboué par un problème de déphasage que j'avais du mal à relier à la constante de couplage et ce gamin m'avait rendu maussade. Tout le monde portait des smokings ou des robes à paillettes, enfin presque : j'avais oublié d'emporter le costume sombre préparé par Gweneth, j'avais seulement un jean, une veste en lin clair sur une chemise hawaïenne. Les organisateurs n'avaient pas du tout eu l'air impressionnés à ma vue. D'autres remarquèrent mon entrée. Les femmes me regardaient fixement et les hommes fixaient les femmes qui me fixaient.



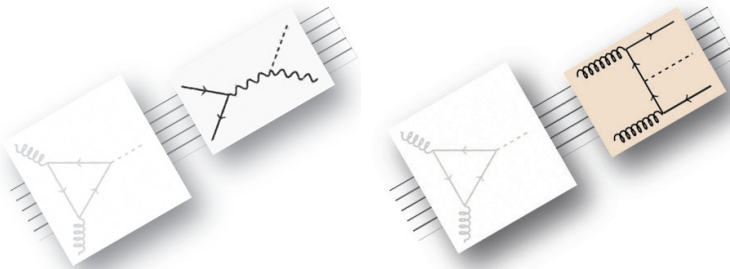
¹ ENSTA : École Nationale Supérieure des Techniques Avancées, le concours sur <http://concours-nouvelles.ensta-paristech.fr/2016>



Feynman en musique



« La physique », je soupirai. « Moi je connais du monde à Boston dans le business du disque », il se mit à nouveau à sourire dans le rétro, « mais personne que vous connaissiez! » OK, maintenant j'étais bien réveillé, prêt pour le grand jeu. « Comment ça se fait que vous ayez des contacts dans le disque à Boston? » « Je me balade mon pote, j'ai fait des disques là-bas à Roxbury. » Bon, me voilà tout ouïe « Quels disques? ». Lui était tout aussi réveillé que moi, il y avait de la lumière à tous les étages, il s'exclama : « Je jouais du sax, je suis Hudson Jim! » Je lui avouai un peu défait : « Jamais entendu parler ». Je lui confessai être collectionneur et que son nom était inconnu au bataillon. Il me dit : « Vous avez des disques de jazz? Quoi, dites-moi qui vous aimez? » Je citai Stan Getz, pour le tester. « C'est cool » répondit-il rapidement. Il nous amena dans une rue étroite et demanda : « Qui encore? » Je mentionnai ma trouvaille récente, juste pour nommer un disque bien rare, « Jack Costanzo avec Ed Strum au saxo ». Il péta un coup de frein à en traverser le plancher et se retourna. Je m'arc-boutai. Il me regardait comme un dément. OK il va me tabasser dans cette rue paumée pour la vingtaine de dollars que j'ai sur moi. Il me regardait, éberlué, la transpiration coulant sur son front. Je saisis la poignée de la porte et commençais à la baisser quand il s'exclama « Je suis Ed Strum! » « JE SUIS ED STRUM! » J'avais comme l'impression d'avoir reçu le coup du lapin en changeant de vitesse trop vite dans ma tête. « Vous êtes Ed Strum? Je croyais que vous étiez Hudson Jim? » « Naan, c'est un nom pour ici. Ça rend les bouseux du coin heureux, un nom comme ça ». « Vous avez vécu à Boston et enregistré des 45 tours? » On était arrêté, à minuit, dans cette petite rue. Une voiture commença à klaxonner derrière. Il se gara, stoppa son compteur et me dit : « J'ai enregistré un 45 dans un des clubs de là-bas. » Je criai : « Non! *Evil ways* sur *A-Square records* c'est vous!? » Il respirait bruyamment. « Je suis Ed Strum! » On faisait tous les deux des bonds dans la voiture, nous nous mîmes à chanter *You've got to change your evil ways* Ow! Il exultait « Vous avez ce disque? ». Il rabattit le pare-soleil et me montra sa licence. Je m'écriai : « Vous ETES Ed Strum?! » Il devenait fou : « Oui, c'est MOI ». Il décrocha un téléphone dans le taxi, un truc avec un fil relié au tableau de bord.



Il appela son régulateur, en fait sa femme. « Hey j'ai un white guy dans mon cab qui sait qui je suis. » Silence... « Quoi? » Il se tourna d'un air désespéré vers moi : « Dites-lui que vous savez qui je suis. DITES LUI ». Je m'étirai pour saisir le combiné et j'entendis une voix énervée, très haut perchée à laquelle je dis : « Hum, ici c'est le cab de Ed Strum et je le connais. » Elle cria : « Pas besoin de me dire qui IL est, je le sais, mais vous, qui êtes-VOUS? » Je me mis à rire : « Je suis Dick Feynman, le white guy ».

« Redonnez-moi ça » dit Ed. Il lança fermement « J'ai ici dans mon cab ce type qui me connaît, je l'amène en ville et je te parlerai plus tard ». Il raccrocha. On resta assis à se regarder. *Evil ways*, c'est tout ce qui occupait mon esprit bien secoué, les bongos, ça martelait dans mon crâne. Soudain je repensai à ce jeune type, Steve, que j'avais croisé à Cornell, un musicien expérimental qui domptait les déphasages en faisant interpréter le même thème musical à plusieurs instruments et en les décalant progressivement l'un par rapport à l'autre pour créer une composition évoluant jusqu'à revenir au début comme si le temps avait été inversé, comme dans mes griffonnages. Voilà comment je devais bidouiller mon couplage! Alléluia! Ed me regardait, des yeux sympas, visage étroit, souriant. Il hocha la tête et soupira « Je suis Ed Strum ». Je le laissai à ses pensées et je sus ce que je devais lui demander : « Hey Ed, est ce que je peux avoir un autographe? » J'eus l'impression qu'on allait pleurer tous les deux. Il prit une carte du taxi, écrivit : « Pour Dick, Hudson Jim-Ed Strum ». On se dévisagea pendant une minute en souriant. Je lui dis : « J'adore ton disque, Ed ». Son visage s'illumina comme le tableau d'un flipper. Il embraya. Arrivés au parking de l'hôtel, on sortit du cab, on se serra dans une accolade inévitable. Il voulut me faire cadeau de la course mais j'insistai pour payer. « Un honneur de vous rencontrer, Mr Strum. Vous n'imaginez pas combien de fois j'ai écouté votre disque. » Soudain timide, embarrassé, il me remercia très chaleureusement et me dit que chaque fois que

j'aurais besoin d'un cab à Nashville, je n'aurais qu'à appeler le numéro sur la carte. On a ri et il est parti. Novembre 64, j'assistai à la première d'*In C* par Terry Riley et son ensemble où officiait Steve Reich.





Le quark top, partenaire particulier au LHC à 13 TeV

Par Romain Kukla (SPP) et Inna Kucher (SPP)

Le grand collisionneur LHC fournit depuis 2015 des collisions à l'énergie sans précédent de 13 TeV de faisceaux de protons très denses. Ces caractéristiques exceptionnelles permettent des recherches de phénomènes rares ou spéculés. Parmi les particules produites au LHC, le quark *top* fait partie des « signatures » privilégiées de processus nouveaux, comme la production de bosons de Higgs, ou hypothétiques, comme celle de particules « exotiques ». Deux doctorants du SPP, Romain Kukla et Inna Kucher, en thèse¹, respectivement dans les collaborations Atlas et CMS, nous présentent leurs travaux... au top !

ATLAS à la recherche des partenaires exotiques du quark top

Après le succès de la première phase d'exploitation du LHC (2010-2012), confirmant l'existence du boson de Higgs, le chapitre de l'au-delà du Modèle Standard (MS) reste encore à écrire. Il s'agit de répondre à de nombreuses questions ouvertes dont une des plus importantes est : comment prendre en compte la force gravitationnelle ? Différentes théories essaient de l'incorporer au MS, à l'image des modèles composites qui incluent la gravitation dans le langage des particules à travers l'hypothèse des *dimensions supplémentaires repliées* (voir encadré).

De façon très simplifiée, dans les modèles dits *composites* les particules du MS résultent du mélange d'états de notre univers avec les états du monde de la gravitation caractérisé par un « secteur fortement couplé ». Ce « secteur fort » contiendrait le boson de Higgs et « les partenaires composites » des particules du MS (voir encadré). Plus la part composite du secteur fort est importante dans le mélange, plus la masse de la particule résultante est grande : d'où le rôle prépondérant du quark *top*, particule la plus lourde du MS (~ 340 000 fois la masse de l'électron), qui pourrait être majoritairement composite et posséderait des partenaires exotiques, dont un quark lourd, le « $T_{5/3}$ », auquel je me suis intéressé.

Cette particule, de charge inhabituelle, +5/3, se désintègre en donnant un boson W^+ et un quark top, lui-même se désintégrant en un deuxième boson W^+ et un quark b . Ainsi, la création d'un $T_{5/3}$ peut donner une signature très rare dans le MS : une paire de leptons de même charge associée à des jets de particules. L'analyse des données à 8 TeV², effectuée par la collaboration Atlas sur cet état final singulier a résulté en un léger excès dans les données vis-à-vis des prédictions (6 événements vus contre $1,1 \pm 0,9$ attendus). Les données à 13 TeV produites en 2015 ont permis de vérifier que cet excès n'était qu'une fluctuation statistique et de repousser la limite inférieure sur la masse du $T_{5/3}$ jusqu'à 990 GeV (voir figure 1) ce qui constitue à ce jour la contrainte la plus forte pour ce modèle. La deuxième phase d'exploitation du LHC promet de beaux résultats dans le secteur du *top* et des modèles composites.

Le bestiaire de la physique exotique

Les dimensions supplémentaires repliées supposent que notre monde (à 3+1 dimensions) nage dans un univers 5D et est connecté à un autre monde 4D. Les masses et la gravitation décroissent exponentiellement du monde de la gravité au nôtre.

Une théorie fortement couplée est constituée d'un ensemble de particules qui interagissent uniquement via une force prépondérante par rapport à celles décrites dans le MS.

Les modèles composites sont une classe de nouvelle physique comportant un secteur fortement couplé, à la différence des théories supersymétriques dont les particules interagissent selon les différentes forces.

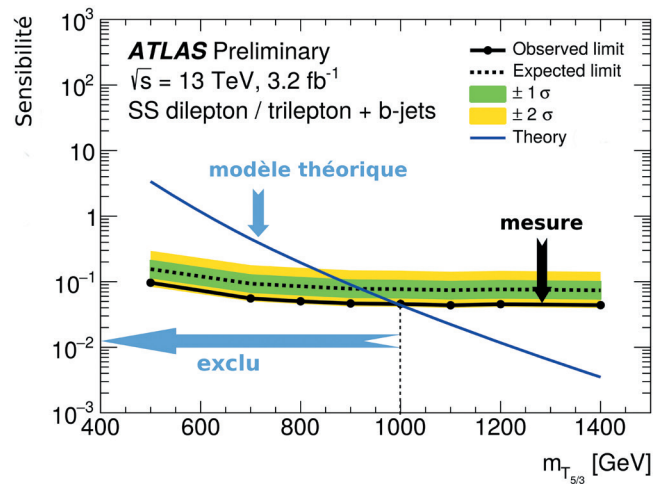
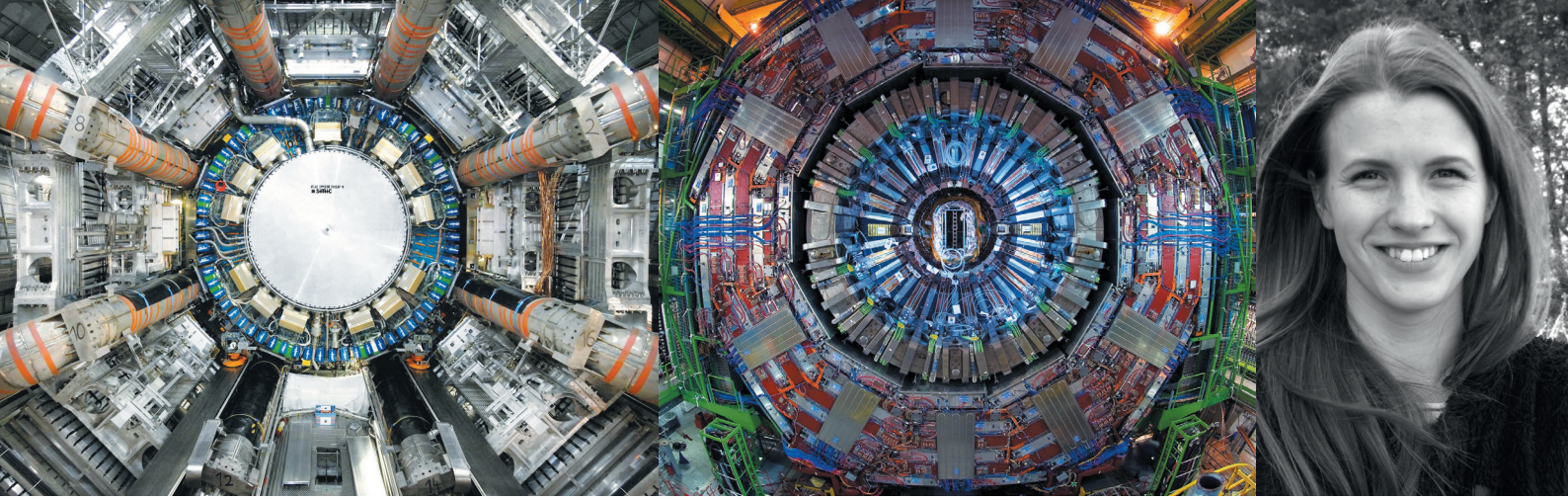


Figure 1. Limites de sensibilité de la mesure à la production de paires de $T_{5/3}$ à 13 TeV. Les pointillés noirs avec les bandes d'incertitudes jaunes et vertes représentent la sensibilité attendue. La limite en trait plein est celle observée avec la statistique disponible. Lorsque la prédiction théorique en bleu est supérieure à la sensibilité, les masses associées sont exclues.

¹ Romain Kukla est désormais docteur, il a soutenu sa thèse le 17 juin 2016, sur le sujet : « Le quark top comme sonde pour la recherche de nouvelle physique au LHC, avec le détecteur Atlas ». Inna Kucher entre en septembre 2016 dans sa 3^e année de thèse.

² Le LHC a fourni des collisions proton-proton à une énergie de 7 TeV en 2010-2011 et de 8 TeV en 2012. Il a redémarré en 2015 avec une énergie de 13 TeV. Voir *Scintillations* n°93 p. 14.



CMS en chemin vers la mesure du couplage Boson de Higgs-quark *top*

Depuis l'annonce en 2012 de la découverte au LHC d'un nouveau boson, les études expérimentales se sont surtout attachées à la question de savoir si les propriétés de la nouvelle particule sont compatibles avec celles d'un boson de Higgs du Modèle Standard (MS). Une des caractéristiques les plus marquantes du boson de Higgs du MS est son couplage³ très fort au quark *top* comparé à ses couplages aux autres particules de matière du MS. Pour le mesurer, il faut un processus dans lequel un boson de Higgs et des quarks *top*, présents dans l'état final, peuvent être explicitement reconstruits via leurs produits de désintégration. C'est le cas de la production associée ttH : un boson de Higgs et une paire d'un quark *top* et d'un antiquark *top*. L'observation d'un écart significatif de la section efficace (ou probabilité) de production de cet état final par rapport à la prédiction du MS serait une indication indirecte de « nouvelle physique », hors MS.

La désintégration du boson de Higgs en deux photons, $H \rightarrow \gamma\gamma$, donne une signature très claire dans le détecteur : deux photons isolés de grande énergie. De plus, ce canal de détection du boson de Higgs bénéficie d'une très bonne résolution en masse d'environ 1 % (la masse du boson de Higgs est calculée à partir des caractéristiques de ses produits de désintégration, ici les deux γ ; elle est notée $m_{\gamma\gamma}$). Cependant, ces événements ttH sont très rares parce que la petite section efficace de production de ttH, d'environ 507 fb⁽⁴⁾ doit être multipliée par la probabilité de désintégration du boson de Higgs en $\gamma\gamma$ qui est de 0,2 % !

Pour étudier les événements ttH avec $H \rightarrow \gamma\gamma$, on les classe selon les produits de désintégration des quarks *top*. Ces derniers se désintègrent dans quasiment 100 % des cas en un boson W et un quark b. La catégorie d'événements dite « hadronique » contient ceux dans lesquels les deux bosons W se désintègrent en paires de quarks.

Le groupe CMS du SPP joue un rôle important dans l'étude des événements ttH avec $H \rightarrow \gamma\gamma$. En particulier, il a la charge d'optimiser la sélection des événements dans les conditions de la nouvelle période d'acquisition de données du LHC².

Dans les données enregistrées en 2016 et analysées, on attend 2,42 événements dits « de signal » (ttH avec $H \rightarrow \gamma\gamma$) et 1,12 événement dit « de bruit de fond » (sélectionné comme un ttH mais provenant d'autres processus) par région de $m_{\gamma\gamma}$ de 1 GeV dans la catégorie hadronique. Les résultats en termes de $m_{\gamma\gamma}$ sont présentés sur la figure 2. La position du pic du boson de Higgs (trait plein rouge) est à peine visible, à 126 GeV. On constate un léger excès d'événements dans cette zone. Cependant l'incertitude statistique est trop grande pour en tirer une conclusion et le résultat est aussi bien compatible avec le MS qu'avec une absence de signal.

Le groupe CMS du SPP travaille à améliorer la sensibilité de l'analyse et on attend deux à trois fois plus de données d'ici à la fin de l'année 2016. Cela devrait permettre d'obtenir les toutes premières contraintes sur le couplage boson de Higgs-quark *top*.

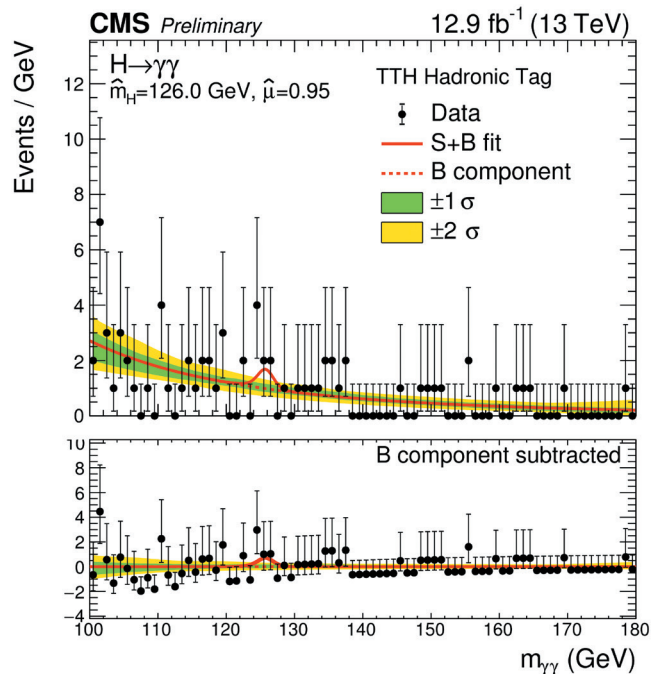


Figure 2. Distribution de la masse invariante $\gamma\gamma$ pour la catégorie hadronique dans 12,9 fb⁻¹ de données enregistrées par CMS en 2016. Les points représentent les données avec les incertitudes statistiques et la ligne rouge en trait plein ce qui est attendu dans le MS en présence de signal ttH.

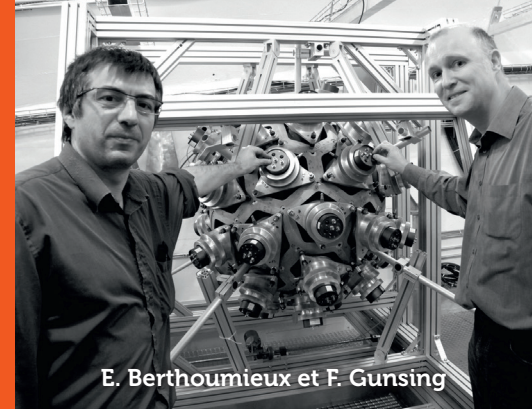
³ Le couplage de deux particules traduit la probabilité qu'elles interagissent.
⁴ fb = femtobarn, unité de mesure des sections efficaces, à titre de comparaison, la section efficace totale (toutes les collisions) au LHC à 13 TeV d'énergie de collision est dix mille milliards de fois plus grande que celle du processus ttH.



M. Diakaki et E. Dupont

n_TOF ouvre une nouvelle aire au Cern

Par Eric Berthoumieux, Maria Diakaki, Emmeric Dupont et Frank Gunsing (SPhN)



E. Berthoumieux et F. Gunsing

La source de neutrons de spallation n_TOF¹ du Cern est dédiée à l'étude de réactions nucléaires induites par neutrons. Elle s'est récemment dotée d'une seconde aire expérimentale avec un flux 25 fois plus intense qui permettra des mesures jusque-là inaccessibles, telles que l'utilisation de cibles très radioactives ou encore l'étude de réactions avec de faibles taux d'interaction.

L'installation n_TOF se compose d'une source de neutrons de spallation² et de deux aires expérimentales (EAR1 et EAR2) contenant les dispositifs de détection (Fig. 1). La large gamme en énergie des neutrons produits et la résolution exceptionnelle de n_TOF permettent de mesurer des quantités (comme les sections efficaces³ de capture neutronique) intervenant dans différents champs de recherche, reliant la physique nucléaire à l'astrophysique, la production d'énergie nucléaire et les applications médicales.

L'histoire de n_TOF débute en 1998, lorsque Carlo Rubbia et ses collaborateurs proposent de construire une source de neutrons au Cern pour mesurer les données nécessaires aux applications de l'énergie nucléaire. L'installation utilise une partie des paquets de protons accélérés par le Proton Synchrotron (PS) puis envoyés sur une cible de spallation pour produire des faisceaux de neutrons pulsés. Ces derniers sont utilisés pour étudier les réactions nucléaires en fonction de leur énergie. L'installation est opérationnelle depuis 2001 et l'Irfu a joué un rôle majeur dans la réalisation des expériences de capture et l'analyse des données de cette première campagne de mesures. En 2008, une nouvelle cible conçue pour réduire le bruit de fond du faisceau de neutrons est installée. La même année, la transformation de l'aire expérimentale EAR1 en laboratoire de type A permet la mesure d'échantillons très radioactifs. En 2014, une seconde ligne de faisceau verticale associée à une nouvelle aire EAR2 est mise en service à l'occasion du démarrage de la troisième campagne de mesures qui s'achèvera en 2018.

Les données mesurées à n_TOF bénéficient à différents domaines de recherche. En astrophysique nucléaire, un sujet fascinant est la compréhension de la formation des noyaux atomiques présents dans l'univers. L'hydrogène ainsi que de petites quantités d'hélium et de lithium ont été créés dans l'univers primordial. Les réactions de fusion successives dans les étoiles sont à l'origine des noyaux jusqu'au fer. Ce sont ensuite les réactions de capture neutronique dans les étoiles et les supernovæ qui produisent les éléments plus lourds.

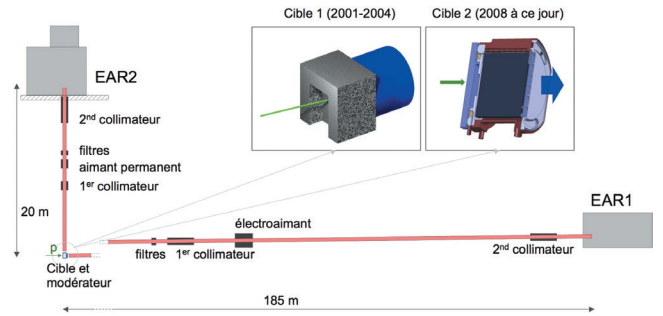


Figure 1. Aperçu de l'installation n_TOF avec ses deux lignes de faisceau se terminant dans les aires expérimentales EAR1 et EAR2.

En physique nucléaire, les réactions induites par neutrons révèlent la structure des niveaux nucléaires au voisinage du continuum⁴ (Fig. 2). L'étude des propriétés de ces niveaux apporte une contribution importante aux modèles de structure nucléaire. Enfin, une connaissance précise des réactions induites par neutrons dans les matériaux composant les dispositifs et installations nucléaires est essentielle pour simuler leur comportement. Ces données sont utilisées dans toutes les applications de la physique nucléaire, qu'il s'agisse du domaine médical ou de la production d'énergie.

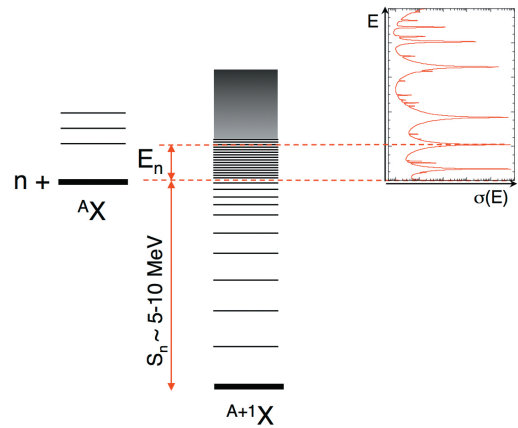


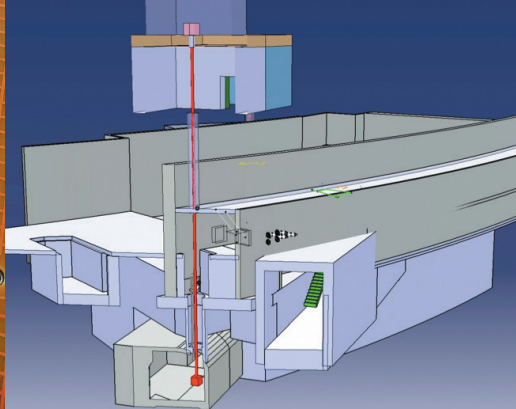
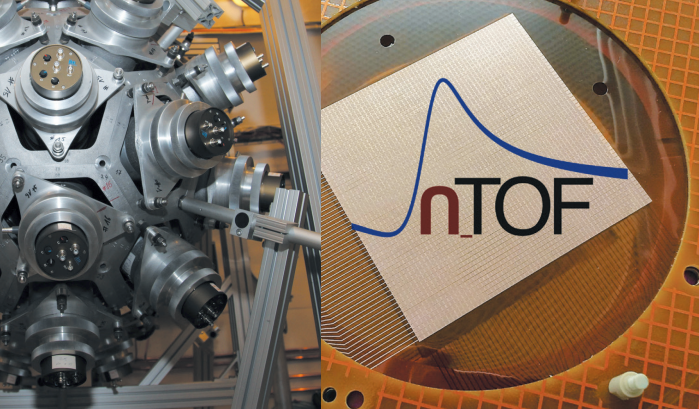
Figure 2. Spectroscopie des états nucléaires dans le continuum. Pour des énergies incidentes de neutrons dans la gamme de l'électron-volt (eV), les sections efficaces peuvent présenter des variations de plusieurs ordres de grandeur. L'origine de ces résonances est liée à l'excitation des états nucléaires dans le système formé par le neutron et le noyau cible, à des énergies d'excitation situées au-dessus de l'énergie de liaison du neutron, typiquement de plusieurs MeV.

¹ n_TOF est l'acronyme de « neutron Time Of Flight » (temps de vol des neutrons). Pour plus d'informations sur l'installation n_TOF: <http://www.cern.ch/ntof>.

² La spallation est une réaction nucléaire au cours de laquelle un proton incident de grande énergie décompose un noyau lourd en produisant des jets de particules plus légères, dont les neutrons.

³ La section efficace est une mesure de la probabilité de réalisation d'un processus d'interaction.

⁴ Le continuum est caractérisé comme la région en énergie où les niveaux nucléaires ne peuvent plus être distingués car leur espacement est inférieur à leur largeur.



Notre équipe au SPhN s'est spécialisée dans l'étude des réactions de capture induites par neutrons et la mesure de données pour les applications. Elle a également été très impliquée dans toutes les campagnes de mesures, en prenant en charge : la coordination technique des expériences de la deuxième campagne (E. Berthoumieux); la coordination du programme de physique de la troisième campagne (F. Gusing); les développements des détecteurs Micromegas utilisés pour contrôler le flux et le profil du faisceau de neutrons⁵ (M. Diakaki en collaboration avec le Sédi); la coordination de la dissémination des données mesurées en étroite collaboration avec les institutions internationales, AIEA et AEN⁶ (E. Dupont).

Une des caractéristiques de l'installation n_TOF est la large gamme en énergie des neutrons produits (Fig. 3). Les neutrons d'énergie élevée sont directement issus des réactions de spallation induites par les protons de 20 GeV dans la cible de plomb. Les neutrons sont ensuite partiellement ralentis pour couvrir toute la gamme d'énergie jusqu'à 10 meV. Cette gamme en énergie couvre les spectres des réacteurs de fission et de fusion ainsi que les spectres des étoiles à différentes températures. La mesure du temps de vol des neutrons permet de déduire leur vitesse et donc leur énergie cinétique : le temps de départ est donné par l'impact du faisceau de protons sur la cible de spallation et le temps d'arrivée est mesuré par des détecteurs situés dans les aires⁷ EAR1 et EAR2.

Une autre caractéristique de n_TOF est le nombre très élevé de neutrons produits par proton incident, également appelé flux de neutrons instantané. Dans le cas de mesures avec des échantillons radioactifs, ce flux élevé permet un rapport très avantageux entre le nombre de signaux dus à des réactions induites par neutrons et ceux inhérents à la radioactivité de l'échantillon. Alors que la longue base de vol EAR1 (185 m) bénéficie d'une excellente résolution en énergie (de l'ordre de 10^{-4} dans le domaine de l'eV), la base de vol plus courte EAR2 (20 m) bénéficie d'un flux de neutrons plus intense (Fig. 3). Ces flux élevés permettent des mesures avec des cibles très radioactives de faibles masses ou ayant de faibles sections efficaces de réaction. À titre d'exemple, on peut citer les mesures en cours sur EAR2 des sections efficaces (n, p) et (n, α) d'un échantillon très radioactif de quelques microgrammes de ^7Be dont la demi-vie ($T_{1/2}$) n'est que de 53 jours. Ces nouvelles données permettent d'affiner la simulation de la nucléosynthèse primordiale⁸.

Un autre exemple d'utilisation de la nouvelle aire concernera l'amélioration des données pour l'énergie nucléaire, en particulier la section efficace de fission des actinides à vie courte tels que le ^{240}Pu ($T_{1/2} \sim 6561$ ans), voire le ^{238}Pu ($T_{1/2} \sim 88$ ans) et le ^{241}Pu ($T_{1/2} \sim 14$ ans), dont la mesure constitue un véritable défi.

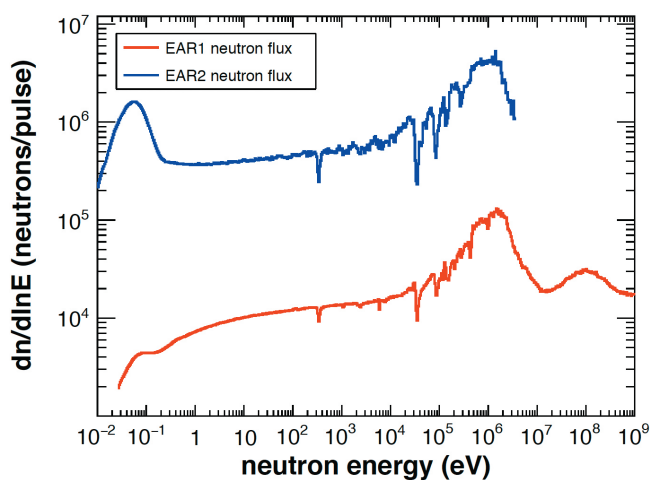


Figure 3. Flux de neutrons instantanés à 185 m (EAR1) et à 20 m (EAR2). La combinaison d'un flux 25 fois plus élevé et de temps de vol 10 fois plus court permet à EAR2 de bénéficier d'une amélioration du rapport signal sur bruit d'un facteur 250 pour les échantillons radioactifs par rapport à EAR1, qui conserve bien entendu l'avantage en terme de résolution en énergie.

Les mesures utilisant l'installation de temps de vol des neutrons n_TOF, avec ses caractéristiques uniques, contribuent à améliorer notre connaissance des réactions induites par les neutrons, tant du point de vue de la physique nucléaire que de ses applications. La collaboration n_TOF, composée d'environ 150 chercheurs de 40 instituts, poursuit actuellement sa troisième phase de prise de données dans les deux aires. Dans quelques années la cible de spallation devra être remplacée et les études de conception en cours permettront d'améliorer encore les performances de la nouvelle aire EAR2 : n_TOF devrait alors écrire encore quelques belles pages de son histoire déjà riche de 15 ans d'études des réactions nucléaires induites par neutrons.

⁵ Ce développement a fait l'objet d'un fait marquant Irfu en décembre 2015 :

http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3680

⁶ L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) dépend de l'Organisation des Nations Unies (ONU). L'Agence pour l'Énergie Nucléaire (AEN) dépend de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE).

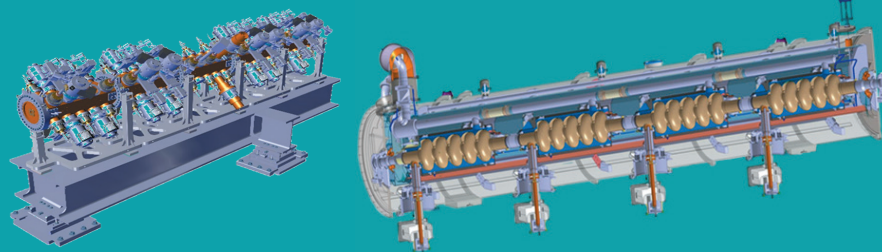
⁷ De gauche à droite, le bandeau présente : le calorimètre 4 π constitué de 40 cristaux de BaF₂ (fluorure de baryum), qui détectent les gammas émis sur l'aire EAR1, le profileur pour les neutrons (Micromegas) développé à l'Irfu, un schéma de l'installation EAR2 et une photo du bâtiment de EAR2 au Cern.

⁸ Lire l'article de la collaboration n_TOF sur la mesure de $^7\text{Be}(n, \alpha)^4\text{He}$ liée au "Cosmological Lithium Problem (CLiP)" de la nucléosynthèse primordiale, publié dans *Physical Review Letters* **117**, 152701 (2016), (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.152701>).



ESS à l'Irfu

Par Pierre Bosland (SACM)



ESS est la future Source de Spallation Européenne en construction à Lund (Suède) qui démarrera en 2019 et sera pleinement opérationnelle en 2025. Elle délivrera des neutrons produits par spallation, réaction nucléaire résultant de l'irradiation d'une cible de tungstène par un faisceau de protons intense et de haute énergie lui-même produit par un accélérateur de particules linéaire et supraconducteur (Linac supra).

La source ESS sera pulsée à 14 Hz avec un cycle utile de 4 % et une durée d'impulsion (*pulse*) de 2,86 ms. De par ses performances techniques, ESS fournira le faisceau de neutrons de plus haute brillance¹ produit par ce type de sources (Fig. 1). Les applications d'ESS concerneront la recherche sur la matière dans les domaines de l'énergie, les télécommunications, la fabrication de nouveaux matériaux pour l'industrie, les transports, les technologies de l'information, la santé et les biotechnologies. En 2009, au lancement du projet, l'Irfu a été l'un des premiers partenaires de la collaboration et a contribué à la conception des composants majeurs de l'accélérateur tels que le RFQ (Quadripôle Radio Fréquence) et les deux sections des cryomodules² de bêta moyen ($\beta = v/c = 0,67$) et de bêta élevé $\beta = 0,86$ (Fig. 2).

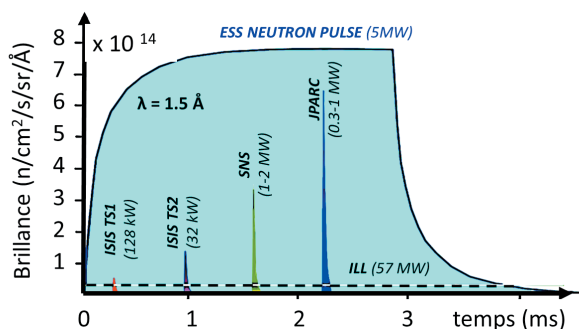


Figure 1. Comparaison dans la durée du pulse ESS des brillances des sources pulsées existantes (ISIS en Angleterre, Spallation Neutron Source SNS à Oak Ridge, J-PARC au Japon) et de celle de l'ILL (Institut Laue Langevin, à Grenoble) qui est une source continue.

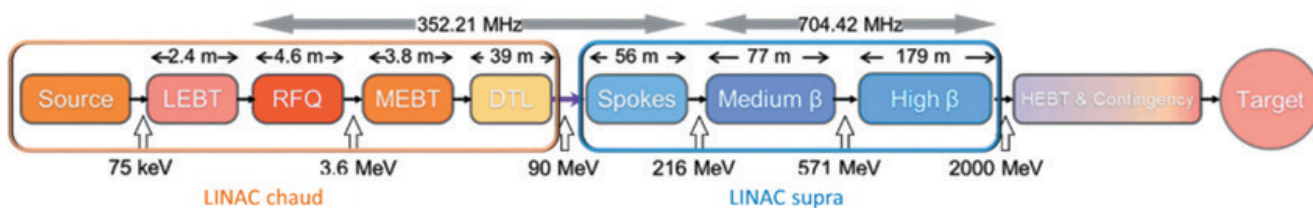


Figure 2. Schéma de l'accélérateur de l'ESS. La source d'ions produit un faisceau de protons transporté dans la ligne de basse énergie (Low Energy Beam Transport LEBT) jusqu'à la première cavité accélératrice RFQ. Le faisceau traverse ensuite la ligne de moyenne énergie (MEBT, Medium Energy BT) qui injecte dans le deuxième étage accélératrice constitué du tube à dérive Linac (Drift Tube DTL), l'accélération est ensuite assurée successivement par trois familles de cavités supraconductrices : des cavités « spokes » et des cavités « elliptiques » à bêtas moyen et élevé. Après accélération, le faisceau est transporté par la ligne de haute énergie (High Energy HEBT) et envoyé sur la cible (Target).

Depuis 2013, la contribution de l'Irfu a augmenté jusqu'à couvrir 70 % de la longueur du Linac avec la fourniture du RFQ et de 30 cryomodules en plus de certains outils de diagnostic du faisceau (profil, intensité) et d'éléments du système de contrôle. Le RFQ (*illustration du bandeau, à gauche*) est la première cavité accélératrice de la section chaude du Linac (partie à basse énergie non supraconductrice). Le faisceau de protons continu y est injecté à une énergie de 75 keV et sort du RFQ à une énergie de 3,6 MeV transformé en paquets à la fréquence de 352 MHz. L'expérience acquise sur les RFQ d'Iphi (à Saclay), Spiral2 (à Caen) et Linac4 (Cern) a été mise à profit pour optimiser la fiabilité de fonctionnement et la fabrication de ce nouveau RFQ. En aval, le faisceau est accéléré par d'autres cavités adaptées à la célérité des particules qui évolue le long du Linac. Les 30 cryomodules à cavités elliptiques, neuf à bêta moyen et 21 à bêta élevé, sont les contributions les plus importantes de l'Irfu.

Ces contributions couvrent l'ensemble des activités de conception, prototypage (deux cryomodules à moyen et haut bêtas seront réalisés et testés à Saclay) ainsi que la fourniture des composants de la série (sauf les cavités supraconductrices), l'assemblage des 30 cryomodules et les tests en puissance des premiers cryomodules assemblés. Les cryomodules (*bandeau, à droite*) de 6,6 m de long abritent quatre cavités supraconductrices fonctionnant à 2 K, chacune étant alimentée par un coupleur de puissance RF transmettant jusqu'à 1,1 MW pic. Chaque cavité à moyen et haut bêtas pourra respectivement fournir une tension accélératrice de 14,3 mV et 18,2 mV. Les études mécaniques du cryostat ont été effectuées en collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay. L'assemblage des 30 cryomodules ESS, qui débutera à la fin de 2017, s'inscrit dans la continuité des cryomodules fabriqués pour le projet XFEL et bénéficiera de l'expérience acquise et des infrastructures libérées par XFEL en 2016.

¹ Brillance : flux de neutrons par émittance et par bande passante (en Angström, Å), unité : nombre de neutrons/s/sr/Å.
² Les cryomodules sont des éléments de systèmes radio-fréquence (RF) supraconducteurs, utilisés pour l'accélération de particules. Ici, le cryomodule est un module constitué d'un cryostat contenant des cavités accélératrices supraconductrices en niobium et refroidies à 2 K.

Le projet Saraf-Linac : un accélérateur linéaire « clés en main »

Par Nicolas Pichoff (SACM)



Saraf, Soreq Applied Research Accelerator Facility, est un projet du SNRC (Soreq Nuclear Research Center) piloté par l'IAEC (Israel Atomic Energy Commission). L'IAEC a demandé au CEA de lui fournir l'accélérateur linéaire (linac) qui délivrera des protons et deutons en faisceau continu d'intensité maximale de 5 mA pour des énergies allant jusqu'à 40 MeV. Le démarrage est prévu en 2022. Le CEA est responsable des études du système et des composants de base (aimants et cavités supraconducteurs) jusqu'au démarrage de la machine, en passant par la fabrication et les tests des prototypes et des séries, l'assemblage, le transport et l'installation au SNRC de la ligne de moyenne énergie (1.3 MeV/u en sortie) et des quatre cryomodules.

Le projet Saraf du centre de recherche de Soreq mettra à disposition de la communauté israélienne une source « extrême » (haute intensité) de neutrons rapides et de noyaux radioactifs, utilisée pour explorer les réactions nucléaires rares et produire des radionucléides pour la médecine nucléaire. Certaines opérations d'études de matériaux (neutrographie par exemple) nécessitent des flux élevés de neutrons (autour de $10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), seulement disponibles actuellement auprès des réacteurs nucléaires. Sur Saraf, ces neutrons seront produits par l'interaction d'un faisceau de 5 mA de protons ou de deutons jusqu'à une énergie de 40 MeV avec plusieurs cibles spécifiques. Les neutrons seront ensuite ralentis (modérés).

Après une première phase dans laquelle la source, la ligne de basse énergie, un quadripôle radiofréquence (RFQ) et un cryomodule prototype ont été construits au SNRC, l'IAEC a sollicité le CEA pour qu'il lui fournisse l'accélérateur linéaire (linac) à 176 MHz de la phase 2, capable de produire un tel faisceau.

La contribution du CEA au linac comprend :

- ♦ l'étude (2015-2018),
- ♦ la réalisation et les tests (2018-2021),
- ♦ l'installation et le démarrage au SNRC (2021-2022) de la ligne moyenne énergie (MEBT) et du linac supraconducteur (SCL) (pour une longueur d'environ 25 m, Figure ci-contre).

Le SCL est composé de quatre cryomodules d'environ 5 m chacun. Les deux premiers, identiques, contiennent six blocs aimants et six cavités à bas bêta ($\beta = v/c = 0,09$) supraconducteurs. Les deux suivants, identiques aussi, contiennent quatre blocs aimants et sept cavités à haut bêta ($\beta = 0,18$) supraconducteurs.

La MEBT, d'environ 5 m, permet principalement d'adapter au SCL le faisceau sortant d'une version modifiée du RFQ de la première phase. La MEBT contient trois regroupeurs (cavités RF en cuivre), neuf quadripôles magnétiques, des éléments de diagnostic et des composants mesurant et nettoyant le faisceau.

Des composants comportant un risque technique avéré, font l'objet d'une phase de prototypage en 2017-2018 :

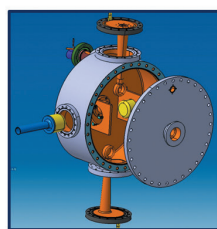
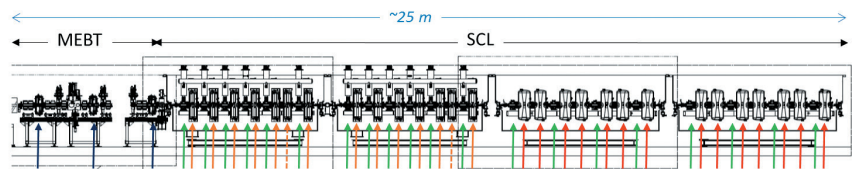
- ♦ un regroupeur de la ligne à moyenne énergie,
- ♦ les deux cavités supraconductrices (à bas et haut bêtas),
- ♦ les coupleurs RF les alimentant,
- ♦ un bloc aimant supraconducteur.

Leurs designs ont été figés en revue critique de conception (Critical Design Report, CDR) en juin 2016.

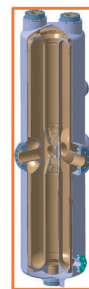
Les designs des cryomodules seront figés ensuite à la fin de 2017, marquant le début d'une phase de quatre ans de fabrication, d'assemblage et de tests à Saclay.

Ces éléments seront alors transportés, installés et démarrés au SNRC.

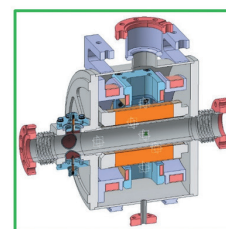
Le premier faisceau à pleine énergie est attendu pour la mi-2022.



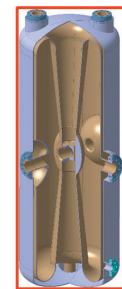
Regroupeurs (x3)



Cavités bas- β (x12)



Aimants supras (x20)



Cavités haut- β (x14)

Figure. Illustration des composants critiques du projet Saraf.



L'invisible matière noire froide et le miracle des wimps

Par Sophie Kerhoas-Cavata (communication Irfu)

L'interprétation cohérente des observations astrophysiques et cosmologiques nécessite de postuler l'existence d'une matière noire qui représenterait 84 % de la matière de l'univers. Cette mystérieuse matière a été postulée il y a plus de 70 ans pour ne pas remettre en cause les lois de la gravité d'Einstein¹. Cette composante essentielle échappe encore à la détection. Ce dossier vous présente quelques expériences menées à l'Irfu pour mettre en évidence cette matière sous forme de particules massives appelées wimps².

10
N° 95 - SEPTEMBRE 2016

L'observation des grandes structures de l'univers (galaxies, amas de galaxies) ne s'explique pas s'il n'y avait eu que la composante de matière que nous connaissons, la matière ordinaire (dite baryonique). Il faut inclure dans les modèles de formation un autre type de matière, l'hypothétique matière noire, bien plus abondante, qui va se concentrer sous l'effet de sa propre masse et entraîner avec elle la matière ordinaire au moment où celle-ci va être libérée de son plasma originel³. Pourquoi noire ? Car elle n'émet ni ne réfléchit de la lumière. Elle interagit essentiellement par gravitation. Et espérons qu'elle soit sensible à l'interaction faible pour pouvoir la détecter sous forme de particules.

Les simulations cosmologiques rejouent la construction de cette toile cosmique avec différents types de matière noire. Suivant que sa nature soit non relativiste (dite **froide**, correspondant à une masse m supérieure au GeV) ou relativiste (dite **chaude**, m inférieure au KeV) ou un mélange (dit **tiède**, m de quelques KeV), il y aura formation de structure de tailles différentes. Ce dossier se limite⁴ au cas de la **matière noire froide**, pour laquelle le modèle cosmologique Λ CDM fournit des interprétations cohérentes des observations. Dans ce cadre, les wimps sont une classe particulièrement intéressante de candidats : pour eux, les simulations nous apprennent que nous sommes dans un univers où se forment d'abord les petites structures, les galaxies, qui ensuite fusionnent pour donner les grandes, les amas de galaxies.

Rappels historiques

Dans les années 30, Fritz Zwicky relève une anomalie dans le mouvement des galaxies en observant un amas : elles tournent trop vite. Les lois de Newton voudraient que la force centripète les éjecte de l'amas. Il imagine une masse manquante invisible qui agirait par gravitation pour garder tel quel l'amas. Ses collègues se moquent de lui. En fait, cette anomalie était explicable en considérant le gaz indétectable à l'époque. Mais son intuition était bonne. Il a fallu attendre les années 70 que Vera Rubin fasse le même constat, mais à l'échelle des galaxies : les étoiles y tournent trop vite. Mais la cause ne vient pas uniquement du gaz chaud. L'hypothèse de la matière noire revient. Dans les années 80, l'observation du fond diffus cosmologique montre que la densité de matière visible n'est pas suffisante pour former les grandes structures de l'Univers. La question de la matière noire, non baryonique, s'impose.

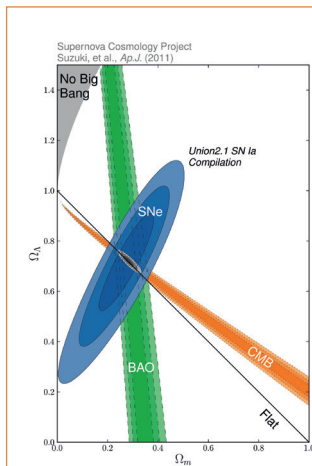


Figure 1. Contraintes sur la densité de matière totale Ω_m (matière noire + matière ordinaire) en abscisse et la densité d'énergie noire (en ordonnée) obtenues à partir de données compilées entre 2008 et 2011 pour trois expériences différentes. [Source : Supernovae cosmology project, Suzuki et al, Ap.J (2011)].

Le modèle cosmologique de concordance

Le modèle de concordance est le nom donné au scénario qui permet, à ce jour, d'expliquer au mieux l'ensemble des propriétés de l'univers que nous connaissons dans le cas où la gravité d'Einstein est valable à toutes les échelles. Il est aussi appelé Λ CDM, pour indiquer ses deux constituants majoritaires, à savoir la matière noire froide (CDM, *Cold Dark Matter*) et l'énergie noire, symbolisée en référence à la constante cosmologique notée depuis Einstein par la lettre grecque lambda (Λ). Ce modèle a six paramètres libres, dont la densité de matière (baryonique+noire). Ces paramètres sont expérimentalement connus grâce aux mesures cosmologiques de précision telles que les inhomogénéités du fond diffus cosmologique (CMB), l'empreinte des ondes acoustiques baryoniques (BAO) dans la répartition des galaxies ou encore les analyses des Supernovae (SNSL, *SuperNova Legacy Survey*). Ils sont ajustés pour chaque ensemble de données. On peut alors comparer (voir Fig. 1) les zones des valeurs possibles pour la densité de matière de l'univers. Les derniers résultats donnent une répartition de 26% de matière noire et 5% de matière ordinaire. Cette densité de matière noire est aussi appelée la densité *relique* car elle date de l'univers primordial.

Comment s'est formée cette densité relique de matière noire froide ?

Dans l'univers primordial, le scénario proposé est que les particules de matière noire s'annihilent en deux particules de matière ordinaire, ce processus serait réciproque. Avec l'expansion de l'univers, densité et température diminuent : les particules sont diluées, elles ne se rencontrent plus et ne peuvent plus s'annihiler. La densité de particules de matière

noire, dite relique, serait alors gelée. Tout candidat de matière noire doit reproduire cette densité relique. Celle-ci peut être calculée à partir de la probabilité d'annihilation des particules et leur masse. Dans le cas des wimps, ayant une énergie du GeV au TeV, leur annihilation est due à l'interaction faible du modèle standard de la physique des particules. En prenant ces paramètres, on obtient exactement la densité relique mesurée par ces expériences. C'est cet accord que l'on appelle « le miracle des wimps ».

¹ Les physiciens s'interrogent aussi sur la validité de la gravitation d'Einstein. Ce débat a été évoqué dans un article du N°94, « Nouveaux modèles ou nouvelles particules ? »

² Acronyme anglais pour *Weakly Interactive Massive Particle*. En français, cette particule est une mauviette.

³ Au moment où les électrons et protons se lient ensemble pour former les premiers atomes d'hydrogène, les autres baryons peuvent migrer vers les puits de matière formés par la matière noire. On appelle cette période le moment du découplage, situé à 380 000 ans après le big bang.

⁴ Les autres candidats plus légers comme les axions et les neutrinos stériles ne font pas l'objet de ce dossier. Ils sont recherchés par des expériences où des équipes de Irfu participent : Cast, H.E.S.S., Edelweiss pour les axions, CeSOX et Stereo pour les neutrinos stériles dans le domaine de l'eV ; voir aussi les candidats intéressants dans le "livre blanc sur la matière noire sous forme de neutrinos stériles au keV" (sur le site : http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3720, <http://arxiv.org/abs/1602.04816>).

« Le problème de l'origine du monde a de tout temps préoccupé tous les hommes qui réfléchissent ; il est impossible de contempler le spectacle de l'Univers étoilé sans se demander comment il s'est formé. »

Henri Poincaré, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* (1911)

Carte d'identité des wimps du GeV à quelques dizaines de TeV

Si la matière noire existe sous la forme de ces particules massives, examinons leurs caractéristiques :

- ♦ Comme pour tout candidat de matière noire, la densité de cette particule doit être compatible avec la densité relique connue grâce aux observations cosmologiques (CMB, BAO, SNLS...)
- ♦ Sa masse peut prendre une valeur sur un large intervalle allant du GeV à plusieurs dizaines de TeV, voire au-delà.
- ♦ Elle doit être électriquement neutre car elle n'émet pas de lumière, et neutre de charge de couleur, car insensible à l'interaction forte (sinon on l'aurait déjà vue dans les réactions en mode de couplage par interaction forte)
- ♦ Elle doit être stable car elle existe depuis l'origine de l'univers.
- ♦ Elle doit avoir peu d'interaction, car elle ne fait pas de collisions ni de dissipation contrairement à la matière ordinaire.

Le Modèle Standard de la physique des particules n'explique pas la matière noire. Des modèles prenant le relais ont été bâtis : ils décrivent ces nouvelles particules et leurs processus d'interaction avec la matière. Ils peuvent être testés de différentes manières.

Techniques d'investigation de la matière invisible

Les expériences de mesure peuvent être mises en œuvre suivant trois méthodes : directe, en collisions et indirecte :

- ♦ Méthode directe par étude de l'interaction entre une particule de matière noire (MN) et une de matière ordinaire (MO) produisant en voie de sortie MN+MO. Si la particule de matière noire frappe un noyau cible (MO) des détecteurs, la détection du recul de noyau permettrait de signer le passage de la matière noire. Une équipe de l'Irfu est impliquée depuis des années sur l'expérience Edelweiss se déroulant au laboratoire souterrain de Modane. Nous verrons que les sensibilités des expériences sont de plus en plus incroyables pour obtenir les signaux éventuels (p. 12) de ces particules.

- ♦ Une technique sur collisionneur consiste à étudier la signature d'une interaction : $MO+MO \rightarrow MN+MN$, deux particules de matière ordinaire (MO) produisent des particules de matière noire (MN). L'énergie atteinte lors des collisions de protons au LHC permet en théorie de créer des particules massives de matière noire. Des équipes de l'Irfu, des expériences Atlas et CMS, analysent les produits de collision des protons à la recherche de wimps (voir p. 13).

- ♦ Les méthodes indirectes étudient les mesures des rayonnements gamma aux grandes énergies, produits par les réactions $MN+MN \rightarrow MO+MO$, dans une région dense, comme par exemple au centre des galaxies ; le processus correspond à deux particules de matière noire qui s'annihilent en particules de matière ordinaire du modèle standard. L'Irfu est impliqué dans ces recherches avec le télescope H.E.S.S. et le sera ensuite avec l'observatoire CTA. Nous verrons (p. 14-15) comment les physiciens recherchent les signes d'annihilation de wimps dans le ciel des hautes énergies.

Les observations astrophysiques compatibles avec le postulat de la matière noire sous forme de particules

L'image du « *bullet cluster* » (« amas du boulet ») (Fig. 2) est la reconstitution d'une collision d'amas de galaxies produite il y a des milliards d'années. Les zones rouges proviennent de la détection de rayons X venant de l'interaction du gaz qui constitue l'essentiel de la masse ordinaire de l'amas. Les zones bleues représentent la cartographie de la matière noire présente à 80 % dans la masse des amas. La matière noire dévie la trajectoire de la lumière provenant des galaxies lointaines altérant ainsi leur forme apparente. Ces régions sont déduites des mesures de ces effets de lentille gravitationnelle. Ainsi le scénario de cette collision d'amas a été élucidé : les composantes que sont la matière ordinaire (le gaz et les étoiles) et la matière noire se comportent différemment durant la collision. La séparation claire s'explique par le fait que la matière ordinaire de chaque amas se ralentit beaucoup plus, du fait de ses interactions multiples alors que la matière noire interagit essentiellement par gravitation et se « freine » beaucoup moins.



Figure 2. Image en fausses couleurs du « *bullet cluster* ». En bleu, la matière noire associée aux amas de galaxies, en rouge, les gaz chauds émettant des rayons X [Crédit composite NASA/CXC/CfA set ESO WFI, Magellan, U. Arizona, <http://apod.nasa.gov/apod/ap060824.html>].

Analyse conjointe pour une carte complète des wimps

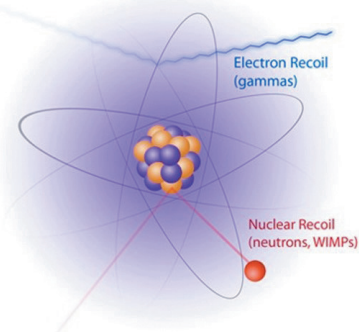
Si on découvre par la méthode indirecte un candidat venant de notre galaxie, il faudra faire le lien de l'astrophysique avec la physique des particules pour déterminer ses propriétés en détail. Serait-il une particule supersymétrique ou une particule issue d'un modèle de dimension supplémentaire ? Réciproquement, si on détecte une particule au LHC, celle-ci sera-t-elle suffisamment abondante pour correspondre à la matière noire de l'univers ? Les expériences directes contraignent seulement le produit de la probabilité d'interaction et de la densité locale des particules qui a créé le taux des événements observés. Il faut nécessairement les autres expériences pour définir les propriétés de la matière noire.

La prochaine décennie marquera une période décisive pour les wimps : les observations devraient permettre soit de les identifier, soit de les exclure.

Détecter les chocs de la matière noire avec la matière ordinaire

Par Sophie Kerhoas-Cavata (Communication Irfu)
d'après un entretien avec Eric Armengaud (SPP)

Les wimps : des particules furtives



Ces particules wimps auraient un pouvoir d'interaction avec la matière excessivement faible analogue à celui d'une particule dont la taille serait un milliard de fois plus petite que celle des noyaux atomiques.

Une très faible proportion d'entre elles auraient des chances d'interagir avec la matière d'un détecteur. Pour être sensible à ces événements si ténus, il faut être sûr qu'ils ne viennent pas d'une autre source comme la radioactivité naturelle ou le rayonnement cosmique.

Trois difficultés sont à combattre :

1. les impuretés des détecteurs eux-mêmes : tous les matériaux utilisés sont sélectionnés suivant leur taux de radioactivité naturelle ;

2. bloquer les radiations venant de l'environnement (la roche) avec des protections passives (la radiation stoppée n'est pas détectée) ;

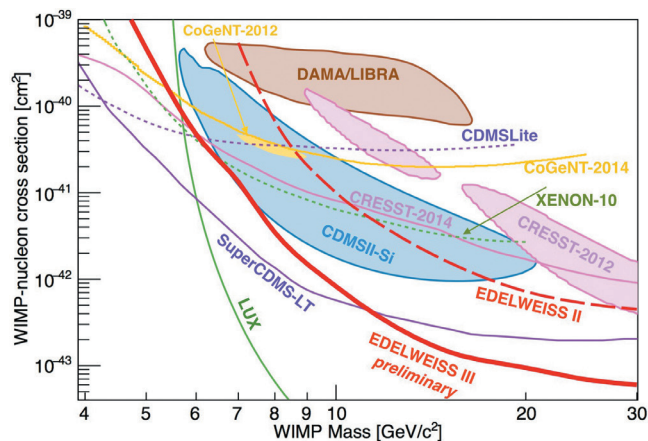
3. même si l'environnement des expériences (sous terre, sous la glace...) réduit le taux de rayonnements cosmiques atteignant les détecteurs, il faut les détecter pour déclencher un véto et ne pas les enregistrer.

Mais cela ne suffit pas à se débarrasser des bruits gênants. La plupart de ces expériences mesurent deux types de signaux (*image du bandeau*) qui permettront de discriminer les reculs nucléaires, potentiellement dus aux chocs de wimps ou à d'autres types d'interactions comme les reculs électroniques dus aux électrons et aux photons.

Pour augmenter la chance d'interaction d'un wimp avec un noyau atomique, on peut augmenter le nombre des noyaux cibles, donc la masse des détecteurs. Il y a eu une augmentation progressive dans le temps pour ces expériences passant de quelques dizaines de grammes à quelques dizaines de kilos, et atteignant maintenant la tonne.

Expériences avec des détecteurs solides à très basse température

Une course mondiale à la détection des wimps est engagée depuis plus de dix ans, et de nombreuses expériences sont en lice pour sa découverte. Les expériences CDMS, Edelweiss et CRESST⁵ utilisent des détecteurs de type cristal⁶ refroidis à des températures cryogéniques permettant deux canaux de lecture. Ils sont capables de mesurer à la fois l'ionisation et la chaleur (CDMS, Edelweiss) ou la scintillation et la chaleur (CRESST). Le rapport de ces deux réponses permet de distinguer les événements de recul nucléaire, signant le passage d'un wimp, des électrons de recul générés par la radioactivité naturelle (gamma et bêta). Jusqu'à la fin des années 2000, les expériences CDMS et Edelweiss ont mené le domaine de la détection directe, en fournissant les contraintes les plus strictes pour les hautes masses (> 50 GeV). La R&D des détecteurs a permis d'atteindre avec les derniers résultats d'Edelweiss des limites sur les sections efficaces de plus en plus faibles avec des contraintes sur des masses de wimp dans la gamme de 5 à 30 GeV excluant l'ensemble des valeurs plus élevées indiquées par les expériences précédentes (*Figure*).



La section efficace d'interaction wimp-nucléon en fonction de la masse du wimp. Plus une expérience est sensible, plus elle est capable de mesurer des sections efficaces petites. Lorsqu'une expérience n'a mesuré aucun signal, elle traduit cette absence de signal par une courbe d'exclusion (la zone au-dessus est exclue). Les contours sont associés aux candidats de détection positive. [Source : collaboration Edelweiss III, conférence TAUP15].

Expériences avec du xénon liquide

À la fin des années 2000, une technique basée sur des liquides d'éléments nobles (xénon notamment) s'est révélée être un sérieux compétiteur. Comme pour les détecteurs à l'état solide, ils permettent aussi de distinguer le recul nucléaire des reculs d'électrons en mesurant deux types de signaux obtenus par scintillation et ionisation. Entre 2010 et 2015, les expériences XENON100⁷ et LUX⁸ ont amélioré de plusieurs ordres de grandeur les sensibilités précédentes pour les wimps de masse élevée. Les meilleures sensibilités aux « petites » masses (inférieures à 6 GeV) sont encore détenues par les expériences cryogéniques.

Les expériences de détection directe n'ont pas encore détecté de candidat pour la matière noire. Quelques signaux ont été annoncés entre 2008 et 2014, mais aucun des candidats n'est recevable pour porter le titre de wimp car ils ont été exclus par d'autres expériences. Ces résultats ont permis d'écartier de nombreux modèles de matière noire. Les futures expériences utilisant des cibles de xénon liquide vont atteindre une tonne (XENON1T) et même 40 tonnes (projet DARWIN). Les expériences utilisant des détecteurs cryogéniques sont en train d'améliorer rapidement leurs performances en termes de sensibilité aux wimps de petites masses. La compétition s'annonce acharnée et stimulante : ainsi traqué, le wimp, s'il existe, finira par être observé !

Une telle détection directe posera des contraintes sur la masse et l'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire mais ne mesurera pas précisément la masse de celle-ci. Pour cela, il faudra la créer en laboratoire : des études sont en cours au LHC (p. 13), le grand collisionneur de protons du Cern.

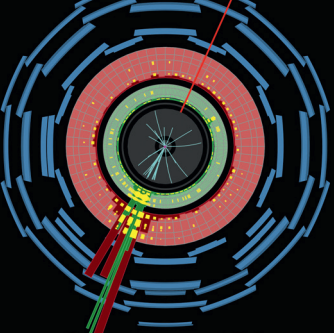
⁵ CDMS (*Cryogenic Dark Matter Search*) installée dans une mine de fer du Minnesota depuis 2003, Edelweiss (Expérience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain) installée au Laboratoire Souterrain de Modane sous 1600 m de roche et CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) installée au laboratoire sous terrain de Gran Sasso en Italie depuis 2001.

⁶ Les détecteurs de type cristal sont des cristaux de germanium et de silicium (CDMS), de germanium Ge (Edelweiss) et de tungstate de calcium (CRESST). La photo du bandeau présente une vue d'ensemble des cristaux de Ge du bolomètre d'Edelweiss.

⁷ Expérience protégée par 1400 mètres de roche, installée au laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie.

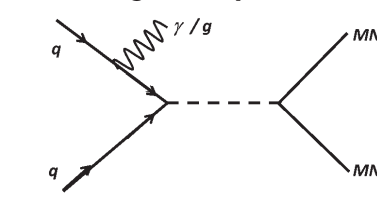
⁸ Installée dans une mine désaffectée dans le Dakota du Sud.

Les matières noire et ordinaire interagissent via la gravitation mais elles pourraient aussi se coupler via l'interaction faible, ce qui laisserait la possibilité de créer la matière noire lors des collisions de protons au LHC. Les physiciens de l'Irfu des collaborations CMS et Atlas recherchent des candidats potentiels de type wimps cachés dans ces produits de collisions.



Le mot « caché » n'est pas exagéré car la matière noire à peine créée s'échappe des détecteurs sans interagir. Si cette création est associée à de la matière ordinaire qui laisse, elle, une trace mesurable de son passage, on peut reconstruire une source d'énergie manquante importante. En effet, dans le plan transverse à la collision, l'énergie totale du système formé par toutes les particules issues de la collision initiale doit être nulle (car l'énergie transverse initiale est nulle, la collision ayant lieu sur l'axe horizontal des faisceaux). Si des particules invisibles emportent de l'énergie, cette partie sera « vue » dans ce bilan en énergie manquante. Il sera alors possible d'en déduire l'existence de la matière noire. Cet article présente deux stratégies de recherche menée à l'Irfu. La première consiste à regarder une signature particulière où la matière ordinaire créée en même temps que la matière noire serait un « mono objet ». La seconde est de produire des bosons de Higgs qui se désintègrent en particule de matière noire.

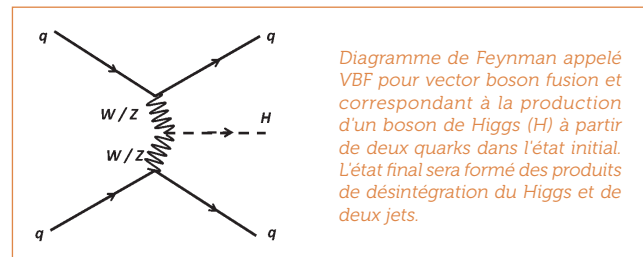
Exemple d'une recherche en « mono objet » associé à de l'énergie manquante



Sur le diagramme ci-contre, le scénario d'une collision se lit de gauche à droite. Deux quarks (chacun issu d'un proton de chaque faisceau) se rencontrent. L'un des deux rayonne un photon (ou un gluon) avant l'interaction qui donnera lieu au « mono objet » détecté. De l'énergie de cette collision est créée une nouvelle particule, appelée un médiateur (ligne pointillée sur le diagramme), qui va immédiatement se désintégrer en une paire de particules de matière noire (MN) invisible dans le détecteur. Seul le mono objet sera détecté. Dans ce cas, celui-ci sera constitué par un photon ou un « jet »⁹ (si c'est le gluon qui a été rayonné). La probabilité de ce processus peut être évaluée dans le cadre d'un modèle théorique simplifié comprenant peu de paramètres. Parmi ceux-ci figurent les masses des particules de matière noire, du médiateur ainsi que l'intensité du couplage matière noire-médiateur. Les analyses des données (2015 et 2016 à 13 TeV) d'un mono objet associé à une grande énergie transverse manquante (signant la présence potentielle de matière noire) sont jusqu'à présent compatibles avec les prédictions du Modèle Standard (MS). La principale contribution vient de la production d'un jet (le mono objet) et d'un boson Z se désintégrant en deux neutrinos, interagissant très faiblement et donc invisibles dans le détecteur. Cette absence de signal, hors MS, peut se traduire par des contraintes sur les paramètres du modèle simplifié comme la masse du médiateur et du wimp pour un type de médiateur donné (suivant les nombres quantiques de celui-ci). Par exemple, pour le cas d'un médiateur vectoriel de masse inférieure à 2 TeV, la zone couvrant le domaine des wimps de masse inférieure à 200 GeV est exclue par les dernières analyses de la collaboration CMS. Mais ce type d'analyse ne fait que commencer à 13 TeV. Les autres régions seront bientôt explorées grâce à l'accumulation des données augmentant la sensibilité aux sections efficaces de plus en plus faibles.

Le boson de Higgs, un portail vers un secteur noir ?

L'intensité du couplage du boson de Higgs (H) avec les particules augmente avec les masses de celles-ci. Les particules de matière noire étant massives, il est possible que le H, une fois créé lors de collisions de particules ordinaires, se désintègre en paire de Wimps. Le modèle standard prédit 8 canaux de désintégration du H ($b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $\tau^+\tau^-$, $\gamma\gamma$, $Z\gamma$, ZZ , gg , WW) qui donnent lieu à des particules ordinaires laissant une trace dans le détecteur. Ces canaux sont dits visibles. Mais parmi ces derniers, il y a quelque fois des canaux dits invisibles par exemple ceux donnant lieu à des neutrinos (venant de la désintégration des bosons Z). Si le H se désintègre en particules de matière noire, ce canal sera appelé aussi invisible. Comme pour le cas précédent, pour détecter ce H invisible, il faut que celui-ci soit associé à une partie visible, incarnée par des particules ordinaires.



Le diagramme VBF ci-dessus représente une voie de production du H. L'état final dans le détecteur est formé des produits de désintégration de ce dernier et de deux jets. Dans le cas du « Higgs invisible », la topologie des événements est alors de l'énergie manquante et 2 jets. À ce jour, les données récoltées pour ces cas d'événements sont compatibles avec les prédictions du MS où le H se désintègre en canaux invisibles mais via des particules du MS (comme des bosons Z qui se désintègrent eux-mêmes en neutrinos). Aucune signature de particules de matière noire n'a encore été trouvée mais les physiciens ont la foi car ce secteur caché laisse déjà son empreinte dans une des caractéristiques mesurée qui est la largeur du pic du H. La largeur de la distribution de masse d'une particule instable reflète le temps de vie de celle-ci. Plus ce temps est court et plus cette largeur est grande. De plus, le nombre de voies de désintégration, qu'elles soient visibles ou non, influe aussi sur cette durée de vie : plus il y en a, plus cette durée est courte. Les physiciens utilisent les mesures de précision des modes de désintégration visibles du H pour contraindre sa largeur invisible. À ce jour, ils ont établi une limite supérieure du rapport de branchement des canaux invisibles d'au moins 23% (à 95% de degré de confiance). Ce qui laisse encore espérer atteindre les particules de matière noire via le H. Dans la phase à 13 TeV¹⁰ du LHC, la recherche en mono objet (γ , jet, W, Z, h...), la production de H invisible, et bien d'autres pistes, non évoquées ici, ne font que commencer. Laissons les collisions s'accumuler, les physiciens poursuivre et raffiner leurs analyses, pour savoir si cette mystérieuse matière existe et, si elle est enfin débusquée, en connaître les propriétés. Celles-ci fourniront alors des contraintes sur les gammes en énergie des observations astrophysiques. À suivre en pages 14-15...

⁹ Un gluon ou un quark, ne reste jamais « nu ». L'énergie qu'il a extraite pour se libérer du proton est utilisée pour créer des paires quark-antiquark qui se déplacent toutes à peu près dans la même direction (d'où le jet) et s'assemblent pour former de nouvelles particules, les hadrons, qui génèrent les jets visibles. L'image du bandeau, à gauche, présente une vue transverse d'un événement dit mono objet, le jet associé à un grand dépôt d'énergie est symbolisé par les barres vertes et rouges, il doit être équilibré par de l'énergie manquante symbolisée par la flèche rouge.

¹⁰ La phase à 13 TeV du LHC, appelée Run2, s'étend de juin 2015 à la fin de 2017.

H.E.S.S. pose les contraintes les plus fortes sur la matière noire au TeV

Par Emmanuel Moulin (SPP)

Le réseau de télescopes Tcherenkov H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) traque la matière noire sous forme de wimps à travers la détection des rayons gamma à haute énergie produits lors de leur annihilation. Les recherches menées dans les 300 parsecs¹ centraux de notre galaxie avec dix ans d'observations de H.E.S.S. permettent d'obtenir les contraintes les plus fortes jamais obtenues dans la plage en masse du TeV. Pour la première fois, les observations en rayons gamma atteignent les sections efficaces attendues par la densité relique de matière noire froide mesurée pour des particules de matière noire au TeV.

La recherche indirecte de matière noire sous forme de wimps repose sur la détection des produits d'annihilation de paires de particules de matière noire (Fig. 1). Parmi eux se trouvent des particules d'énergies élevées, comme les particules d'antimatière (anti-p, e⁺, anti-D...), les neutrinos et les photons. Ces deux derniers messagers sont particulièrement intéressants car ils se propagent en ligne droite, ce qui permet de tracer la morphologie de leur source. Ceci est en contraste avec les particules chargées comme les positrons ou les antiprotons qui sont déviées dans les champs magnétiques galactiques.

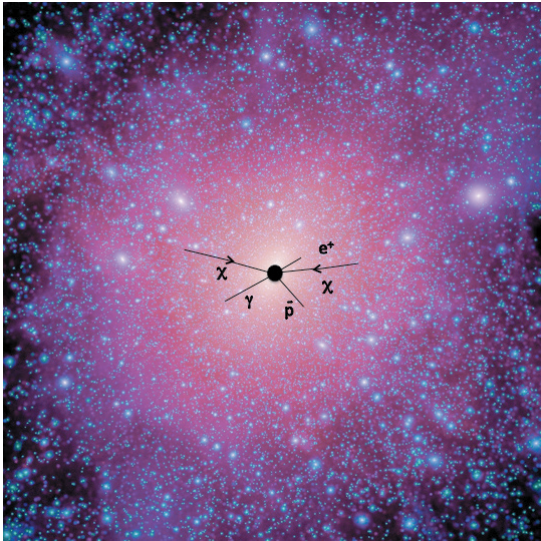


Figure 1. Densité de matière noire projetée d'une galaxie comme la Voie lactée obtenue à partir de la simulation cosmologique Aquarius. L'intensité de l'image est proportionnelle au logarithme du carré de la densité de matière noire le long de la ligne de visée. [Source, crédit de l'image: Aquarius project.]

La stratégie d'observation de rayons gamma de haute énergie (> 100 GeV) pour la recherche d'un signal de matière noire se concentre vers les régions du ciel où sont attendus une importante densité de matière noire et un bruit de fond en rayons gamma d'origine conventionnelle réduit. Ces observations dans la région du centre galactique sont une piste prometteuse pour rechercher un signal d'annihilation de matière noire étant donné sa proximité et son fort contenu en matière noire. Le signal attendu en direction du centre galactique est plus fort que celui en provenance des galaxies naines satellites de la Voie lactée de plusieurs ordres de grandeur. Cependant, contrairement au cas des galaxies naines, les recherches au centre galactique doivent faire face à un bruit de fond conventionnel important.

Le flux de rayons gamma provenant de l'annihilation de deux particules de matière noire dépend de leurs propriétés via leur section efficace et leur canal d'annihilation. Le flux attendu consiste en un spectre continu caractérisé par une coupure en énergie à la masse de la particule. La morphologie spatiale du signal dépend du carré de la distribution de matière noire le long de la ligne de visée. Ces caractéristiques spectrale et spatiale du signal de matière noire permettent une discrimination efficace du bruit de fond.

L'observatoire H.E.S.S.² en Namibie à 1800 m d'altitude est un réseau de cinq télescopes imageurs à effet Tcherenkov conçu pour détecter des rayons gamma à haute énergie. H.E.S.S. détecte les rayons gamma en capturant les photons Tcherenkov émis par les particules chargées de la gerbe initiée par le rayon gamma à son entrée dans l'atmosphère.

Ces photons sont collectés sur des miroirs et focalisés sur des caméras ultra-rapides équipées de photomultiplicateurs pour enregistrer ce signal ténu de quelques nanosecondes seulement. L'analyse des images de la gerbe permet de reconstruire l'énergie et la direction du rayon gamma.

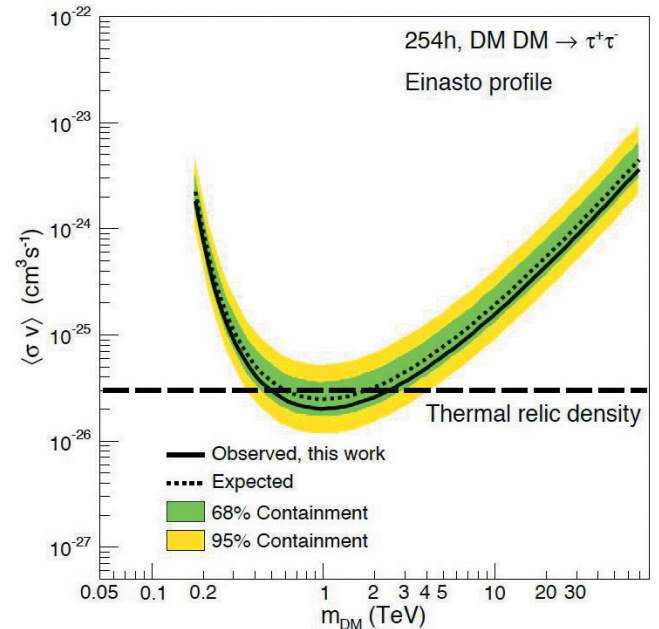


Figure 2. Limites (trait plein) sur la section efficace d'annihilation en fonction de la masse de la particule de matière noire pour des particules s'annihilant en paires de leptons τ . Les limites sont calculées à 95 % de niveau de confiance. La limite attendue (tirets) avec ses intervalles de confiance à 68 % (bande verte) et 95 % (bande jaune) est tracée. La ligne horizontale (tirets longs) correspond à la section efficace thermique.

¹ Le parsec est une unité de longueur utilisée en astronomie valant, par définition, exactement $(648\,000/\pi)$ unités astronomiques (une ua valant 149 597 870 700 m). Son nom vient de la contraction de « parallaxe-seconde ».

² <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>



La localisation de H.E.S.S. dans l'hémisphère Sud lui permet d'observer le centre galactique avec une sensibilité en flux inégalée par les réseaux au sol actuels. L'ensemble des observations cumulées depuis plus de dix ans fournit le temps d'exposition le plus important en rayons gamma de haute énergie, avec plus de 250 heures d'exposition sur le centre de notre galaxie. Aucun excès significatif par rapport au bruit de fond n'est détecté dans les données ce qui permet de dériver des contraintes sur la section efficace d'annihilation de particules de matière noire. La figure 2 montre les limites supérieures sur la section efficace d'annihilation à 95 % de niveau de confiance pour des particules de matière noire s'annihilant en paires de leptons τ . Sont également présentées la sensibilité attendue ainsi que ses intervalles de confiance à 68 % et 95 %.

Les limites atteignent $2 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ pour une masse de 1 TeV. Pour la première fois, des observations gamma au sol permettent d'atteindre la valeur de section efficace d'annihilation thermique pour des particules de matière noire au TeV.

La figure 3 présente une comparaison des contraintes actuelles obtenues avec les observations de l'instrument MAGIC vers la galaxie naine Segue 1, celles obtenues par H.E.S.S. avec l'observation de quatre galaxies naines, et celles obtenues avec le satellite Fermi avec l'observation de 15 galaxies naines. Les contraintes H.E.S.S. sont les plus fortes jamais obtenues dans la plage en masse du TeV. Avec celles obtenues par Fermi, elles permettent de contraindre des valeurs de section efficace d'annihilation sur quatre ordres de grandeur en masse.

Les contraintes actuelles présagent un fort potentiel pour les recherches futures dans la région du centre galactique, en particulier avec la prochaine génération de télescopes Tcherenkov au sol.

Le futur de l'astronomie gamma sol est incarné par l'observatoire CTA³ (Cherenkov Telescope Array). Il sera composé de deux sites, l'un dans l'hémisphère sud proche de Paranal au Chili, et l'autre au nord à La Palma dans les îles Canaries. Cet observatoire, composé de plus de cent télescopes au total, améliorera significativement les performances des expériences en cours, avec un gain en sensibilité en flux d'un facteur dix dans la plage en énergie du TeV.

Dans le cadre du consortium établi pour organiser CTA, des programmes d'observation importants basés sur la sélection des objectifs scientifiques prioritaires à réaliser dans le cadre du consortium dans les premières années de fonctionnement de CTA ont été définis. Parmi eux se trouve l'observation du centre galactique, avec un temps d'exposition prévu de plus de 500 h dans les 5 degrés autour du centre galactique. Cette région est la cible la plus prometteuse pour la découverte d'un signal de matière noire. La sensibilité attendue de CTA permettra d'atteindre la section efficace thermique dans tous les canaux d'annihilations, avec un fort potentiel de découverte dans de nombreux modèles de wimps. En particulier, parmi les plus populaires se trouvent les candidats wimps proposés dans le cadre d'extensions du Modèle Standard comme la supersymétrie ou les théories à dimensions supplémentaires. Parmi les particules candidates à la matière noire, les recherches de wimps menées au LHC contraignent fortement leur masse jusqu'à plusieurs centaines de GeV, offrant une opportunité unique aux réseaux de télescopes Tcherenkov au sol pour détecter des wimps dans la plage en masse du TeV.

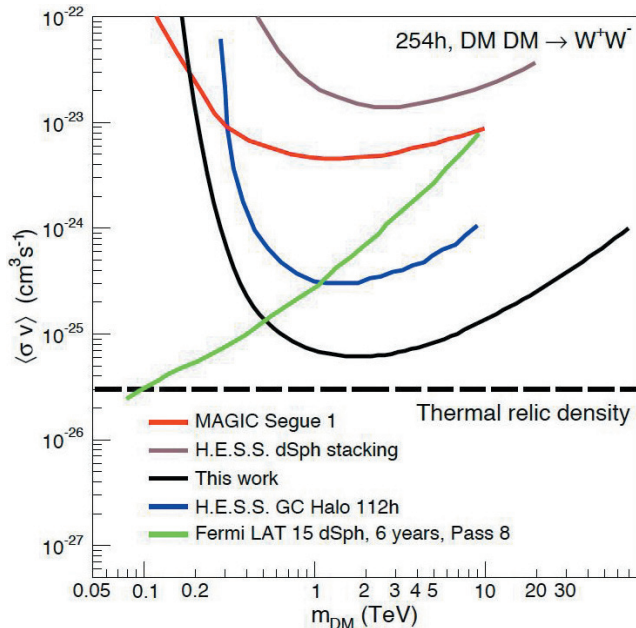


Figure 3. Comparaison de la limite donnée par H.E.S.S. (courbe noire) avec les contraintes actuelles pour des particules de matière noire s'annihilant en paires de bosons de jauge W. Les limites H.E.S.S. vers le centre galactique obtenues en 2011 (courbe bleue) et vers les galaxies naines (courbe marron) sont tracées. Les autres courbes donnent la limite fournie par MAGIC vers la galaxie naine Segue 1 (courbe rouge) et celle obtenue par Fermi avec 15 galaxies naines (courbe verte). La ligne horizontale (tirets longs) correspond à la section efficace thermique.

³ <https://www.cta-observatory.org> Le bandeau de la page présente à droite une vue d'artiste du futur réseau de télescopes Tcherenkov au sol CTA. Composé de trois tailles différentes de télescopes, l'instrument dans l'hémisphère Sud permettra l'observation de la région du centre galactique avec une sensibilité en flux sans précédent. L'image à gauche représente le réseau actuel H.E.S.S.



H.E.S.S. révèle l'existence d'un PeVatron au centre de la Voie Lactée

Par Emmanuel Moulin (SPP)

16

N° 95 - SEPTEMBRE 2016

Le réseau de télescopes Tcherenkov H.E.S.S. (*High Energy Steroscopic System*) traque les phénomènes les plus violents à l'œuvre dans l'univers pour sonder l'origine du rayonnement cosmique à des énergies de 1012 à 10^{15} eV. Dix ans d'observations du centre galactique avec H.E.S.S. ont fourni l'image de cette région, la plus détaillée à ce jour en rayons gamma d'énergie supérieure à 100 GeV. L'analyse des données révèle l'existence d'un accélérateur de protons à des énergies de l'ordre du PeV (1 PeV = 10^{15} eV), un PeVatron, en lien probable avec le trou noir supermassif Sagittarius A* au cœur de notre galaxie. L'origine du rayonnement cosmique galactique au PeV pourrait donc être autre que les vestiges de supernovæ, longtemps proposés comme source principale, mais dont l'émission à ces énergies n'a jamais été observée.

Plus d'un siècle après la découverte des rayons cosmiques (par Victor Hess !), l'origine dans notre Galaxie des rayons atteignant des énergies autour du PeV reste un mystère. Les observations menées par les réseaux de télescopes Tcherenkov au sol ont révélé de nombreuses sources accélérant des rayons cosmiques au TeV. Jusqu'à récemment, aucun PeVatron, accélérateur de rayons cosmiques au PeV, n'avait été identifié. Depuis plusieurs décennies, les vestiges de supernovæ ont été proposés comme source du rayonnement cosmique à haute énergie. Les observations autour du GeV ont montré l'accélération de rayons cosmiques hadroniques dans les vestiges de supernovæ. Celles menées depuis plus d'une décennie avec les réseaux de télescopes Tcherenkov ont permis de détecter plus d'une dizaine de vestiges de supernovæ au TeV. Aucun n'a les caractéristiques spectrales requises pour accélérer efficacement les rayons cosmiques au PeV. Actuellement un consensus théorique a émergé sur la présence de quelques PeVatrons dans la Voie lactée, mais aucun d'entre eux n'avait encore été révélé par les observations.

L'observatoire H.E.S.S. en Namibie à 1800 m d'altitude est un réseau de 5 télescopes imageurs à effet Tcherenkov conçu pour détecter des rayons gamma de haute énergie (>50 GeV). H.E.S.S. détecte les rayons gamma en capturant les photons Tcherenkov émis par les particules chargées de la gerbe initiée par le rayon gamma à son entrée dans l'atmosphère. Ces photons sont collectés sur des miroirs et focalisés sur des caméras ultra-rapides équipées de photomultiplicateurs pour enregistrer ce signal ténu de quelques nanosecondes seulement. L'analyse des images de la gerbe permet de reconstruire l'énergie et la direction du rayon gamma. Situé dans l'hémisphère Sud, H.E.S.S. est bien placé pour observer le centre galactique, sur lequel il est revenu régulièrement depuis plus de dix ans, fournissant la cartographie en rayons gamma de haute énergie la plus précise à ce jour. Une source ponctuelle, HESS J1745-290, coïncidant en position avec le trou noir supermassif Sagittarius (Sgr) A* a été détectée ainsi qu'une émission étendue (Fig. 1) issue de la région centrale riche en nuages de gaz moléculaire.

La nature de HESS J1745-290 est encore inconnue et les hypothèses possibles incluent Sgr A*, la nébuleuse à vent de pulsar G359.95-0.04, ou encore un pic d'annihilations de particules de matière noire. La distribution des rayons gamma de l'émission étendue est corrélée spatialement à la distribution des nuages moléculaires, ce qui suggère une origine hadronique de cette émission, dont les rayons gamma seraient produits par l'interaction de protons relativistes avec le gaz ambiant (ce processus¹ est schématisé sur le bandeau à droite).

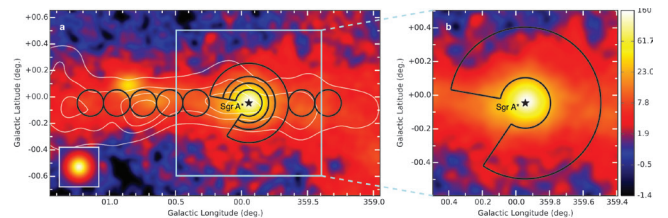


Figure 1. À gauche : carte du ciel en rayons gamma vue par H.E.S.S. après dix ans d'observations du centre galactique. L'étoile indique la position du trou noir supermassif Sgr A*. L'insert en bas à gauche correspond à une source ponctuelle vue par H.E.S.S. Les régions de mesure sont cerclées de noir. Le complexe de nuages de gaz moléculaires est matérialisé par les contours blancs. À droite : zoom sur les 150 parsecs centraux. La source HESS J1745-290 qui coïncide en position avec Sgr A* est en jaune, l'émission étendue de la zone moléculaire centrale est en rouge.

L'analyse morphologique de l'émission étendue permet de remonter à la distribution spatiale des rayons cosmiques. La densité mesurée est dix fois supérieure à celle qu'on trouve au voisinage du système solaire, ce qui signe la présence d'un accélérateur de protons dans la région centrale de la Galaxie. La figure 2 montre le profil radial de la densité de rayons cosmiques dans les 200 parsecs² centraux de notre galaxie. Ce profil piqué permet de localiser l'accélérateur dans les 10 parsecs du centre galactique. Le meilleur ajustement aux données montre une dépendance en $1/r$. Cela indique une injection continue de protons sur quelques milliers d'années.

¹ La figure du bandeau illustre les protons de haute énergie interagissant avec les protons du gaz interstellaire, les réactions produisent des rayonnements gamma, et d'autres particules, ainsi que celles issues de leur décroissance.

² 1 parsec vaut exactement $(648000/\pi)$ unités astronomiques, soit environ 3,2616 années-lumière ($\approx 3,0857 \times 10^{16}$ mètres).

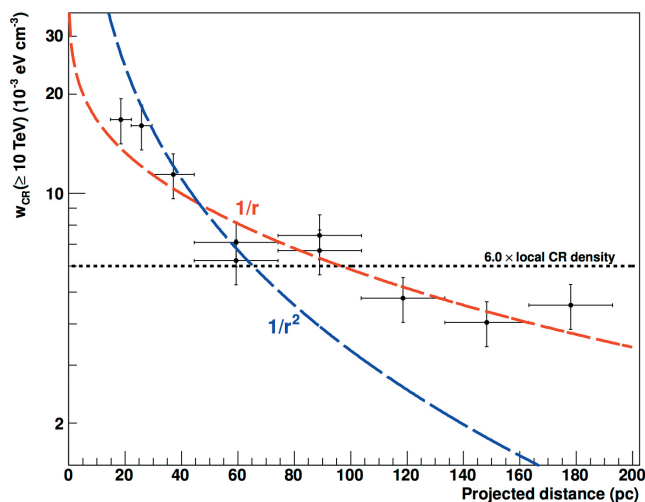


Figure 2. Densité de rayons cosmiques au-delà de 10 TeV en fonction de la distance au centre de la Galaxie (points noirs avec barres d'erreurs). Figurent aussi les résultats des ajustements des données par plusieurs profils de densité radiale : en $1/r$ (courbe rouge, meilleur ajustement), en $1/r^2$ (courbe bleue) et constant (ligne noire).

L'analyse spectrale de l'émission étendue montre une distribution en loi de puissance s'étendant jusqu'à plusieurs dizaines de TeV sans coupure en énergie (Fig. 3). Les rayons gamma seraient principalement issus de la décroissance de pions neutres produits lors de la collision inélastique proton-proton. Connaissant la cinématique de ce processus d'interaction, le spectre mesuré implique que la distribution des protons doit s'étendre jusqu'à des énergies proches de 1 PeV. Il s'agit de la première détection d'un accélérateur cosmique hadronique opérant comme un PeVatron.

Un contenu en énergie de 10^{49} ergs pour le site accélérateur est calculé à partir du spectre mesuré (1 erg = 10^{-7} J, soit 0,62 TeV). Différents objets dans les 10 parsecs centraux pourraient fournir cette énergie et contribuer à l'accélération de protons à plusieurs centaines de TeV. Le vestige de supernova Sgr A East est exclu car il ne serait capable d'accélérer efficacement des protons qu'entre 10 et 100 ans et non pas sur 1000 ans au moins comme indiqué par les données. Un autre site potentiel d'accélération est l'amas d'étoiles compact central de taille 0,4 parsec. Pour ce site, les vents stellaires fournissent les conditions adéquates pour l'accélération de protons à l'énergie requise mais nécessitent la présence d'une dizaine de supernovæ dans les 10 parsecs centraux, ce qui paraît irréaliste dans cette région.

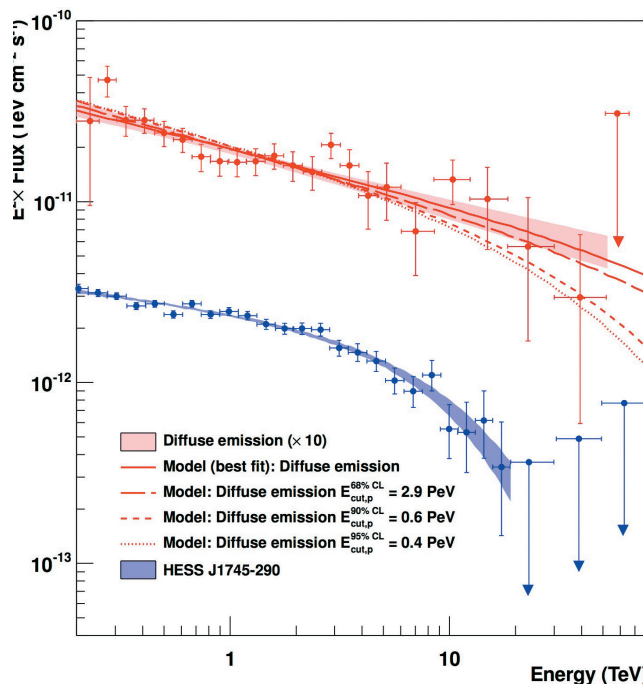


Figure 3. Spectre en rayons gamma de l'émission étendue (« diffuse emission » points rouges, flux multiplié par 10 pour plus de clarté) et de la source HESS J1745-290 (points bleus). Les flèches indiquent des limites supérieures en flux. Les bandes donnent les intervalles d'erreur autour des meilleurs ajustements aux données, obtenus pour un spectre d'injection de rayons cosmiques en loi de puissance sans coupure (trait rouge plein). Les autres lignes rouges décrivent les cas d'un spectre en loi de puissance avec coupure en énergie à 2,9 PeV (tirets longs), 0,6 PeV (tirets courts) et 0,4 PeV (pointillés).

Sagittarius A* apparaît donc comme la source la plus plausible, les protons relativistes étant accélérés dans l'environnement proche du trou noir. Dans ce cas-là, le taux d'accélération déduit des mesures constitue environ 1 % du taux d'accrétion³ actuel et dépasse la luminosité bolométrique⁴ de Sgr A* de deux à trois ordres de grandeur. Ceci suggère qu'une fraction importante de l'énergie accrétée par le trou noir sert à l'accélération de particules plutôt qu'à l'émission de rayonnement électromagnétique. De plus, s'il est aujourd'hui modeste, Sgr A* a pu fonctionner par le passé à des taux d'accrétion beaucoup plus élevés, ce qui pourrait expliquer la majorité du flux total de rayons cosmiques mesuré au PeV. Cela remettrait en cause le paradigme des vestiges de supernovæ comme source principale du rayonnement cosmique galactique à ces énergies !

³ Le taux d'accrétion d'un trou noir est la quantité de matière qu'il attire par unité de temps.

⁴ La luminosité bolométrique correspond au flux d'énergie émis intégré sur tout le spectre électromagnétique. Elle peut se comparer directement au taux d'accrétion du trou noir et à son taux d'accélération de particules.



Flot d'information unique durant l'éruption du trou noir V404 Cygni

Par Jérôme Rodriguez et Alan Loh (SAP)

V404 Cygni¹, un microquasar² situé dans la constellation du Cygne, est entré en éruption en juin 2015 après environ 30 ans de sommeil. Pendant dix jours il est devenu l'objet le plus brillant du ciel en rayons X.



La majorité des systèmes binaires X et microquasars galactiques sont des sources transitoires. La plupart du temps indétectables, elles entrent, très sporadiquement, dans des périodes dites d'éruption (Fig. 1). Durant ces périodes, qui peuvent durer de quelques semaines à une ou deux années, la luminosité, à toutes longueurs d'onde, s'accroît de plusieurs ordres de grandeur. Les microquasars sont, durant leurs éruptions, extrêmement variables, et ce à toutes échelles de temps, de la milliseconde à des périodes de l'ordre de la journée ou plus. Ces variabilités sont, de plus, associées à de grands changements de saveurs spectrales traduisant une forte évolution des contributions relatives des divers milieux émetteurs (disque d'accrétion, jets, couronne d'électrons...). L'étude de ces variations et de leur (co-) relations est le seul moyen de comprendre le fonctionnement de ces sources et les phénomènes d'accrétion et d'éjection, omniprésents dans l'univers (formations d'étoiles, quasars, sursauts gamma). Non exhaustivement, les grandes questions actuelles concernent les mécanismes menant aux éruptions, les connexions entre le disque et le jet, la composition de ceux-ci (hadrons, leptons, photons), la production de vents de disques, l'influence du champ magnétique dans le disque et le jet, le rôle du spin du trou noir, son effet sur la production des jets...

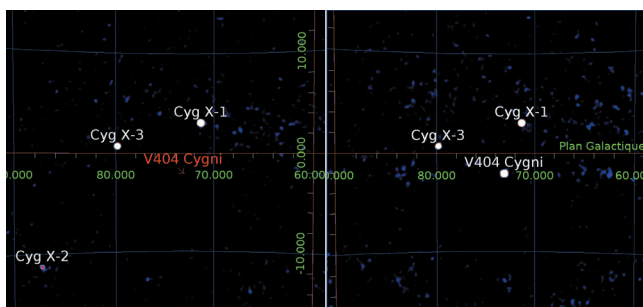


Figure 1. Images 20-40 keV du champ autour de V404 Cygni obtenues par le satellite Integral. À gauche V404 est dormante, à droite : pendant l'éruption. [Source : J. Rodriguez, CEA].

Le 15 juin 2015, le satellite Swift détectait un renouveau de l'activité provenant de V404 Cygni. Immédiatement transmise à la communauté internationale, l'alerte permit de pointer rapidement un grand nombre de télescopes : ceux sensibles aux rayons X et gamma comme Swift et Integral (*the International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*), mais

aussi des instruments au sol sensibles dans les domaines de longueurs d'onde du visible, de l'infra-rouge et radio. Les premiers résultats obtenus à partir des données d'Integral ont montré que le flux X de la source pouvait varier quasiment d'un facteur 1000 en des temps relativement courts, de l'ordre de l'heure.

Les suivis aux longueurs d'onde les plus grandes ont aussi montré de grandes variations de flux, qui semblent corrélées, de manière non triviale, aux variations à hautes énergies (Fig. 2). Alors qu'il est clair que ces variations sont liées à des connexions accrétion-éjection, les analyses fines faites par les équipes du SAP montrent que l'émission de haute énergie n'est pas directement due au disque ou à sa couronne d'électrons, comme c'est généralement le cas, mais résulterait plutôt du rayonnement synchrotron des particules énergétiques du jet, amplifiées et collimatées par les effets relativistes. Cela implique que le jet de V404 Cygni pointe probablement directement dans notre direction. Cette interprétation est notamment confortée par la détection de rayonnement gamma (avec le satellite Fermi), une première pour ce type d'objet³ (Fig. 2).

La détection en rayons gamma n'est cependant pas la seule surprise que nous a réservée cette source. Les analyses des observations faites avec le spectromètre SPI d'Integral ont permis de découvrir d'intenses phases d'émission de photons d'énergie de 511 keV. Cette émission est la signature de l'annihilation de paires électrons-positrons⁴. L'intensité observée durant les dix jours d'activité de V404 Cygni implique un taux de production de plus de 10^{42} paires/s durant les sursauts. Ce résultat apporte un élément de réponse à la question largement débattue de l'origine de l'émission à 511 keV observée dans le bulbe galactique. Cette dernière requiert qu'à tout moment dix sources connaissent une phase d'activité similaire à V404 Cygni, en considérant son taux de production de paires sur une période d'environ dix jours. Avec un rendement (période active/période calme) de 1/1000⁶, il faudrait de 1000 à 10 000 systèmes similaires pour rendre compte de l'émission galactique, ce qui est plausible au regard des modèles de synthèse de populations.

¹ V404 Cygni est située à 2,4 kiloparsecs de la Terre dans la constellation du Cygne. Découverte à l'origine dans le domaine du visible comme une source variable (le V de son nom), elle fut détectée dans le domaine des rayons X en 1989 par le satellite japonais Ginga et cataloguée alors comme GS 2023+338. V404 Cygni est une binaire X composée d'une étoile de masse légèrement inférieure à celle du Soleil orbitant avec une période de 6,4 jours autour d'un astre compact de dix masses solaires. Image du bandeau à droite : V404 Cygni, source : *Instituto de Astrofísica de Canarias* (IAC).

² Microquasar : système binaire X (dont la majorité de la luminosité est émise en rayons X), aussi connu pour être un fort émetteur radio. Cette émission radio est associée à des jets de matière extrêmement énergétiques. Le nom provient de l'analogie entre ce phénomène et celui des noyaux actifs de galaxies (ou quasars). Ils furent découverts et nommés par F. Mirabel du SAP en 1992.

³ Alan Loh et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, MNRAS Letters, Vol. 462, Issue 1, Pp. L111-L115 ; <http://mnras.oxfordjournals.org>

⁴ Pour en savoir plus : http://irfu.cea.fr/Sap/Phoece/Vie_des_labos/News/index.php?id_news=3397

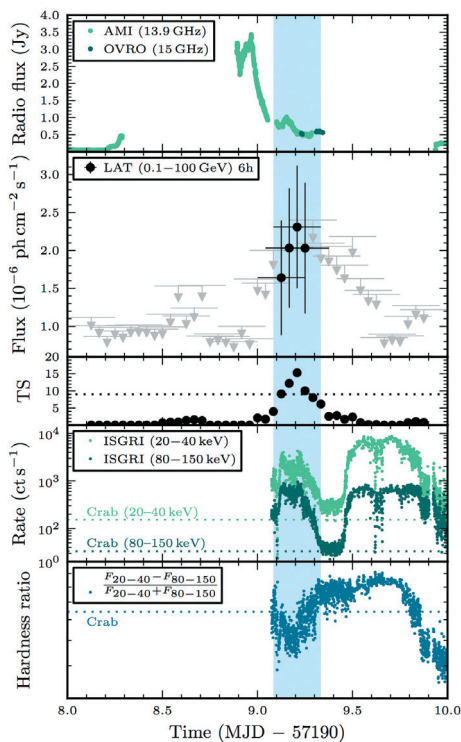
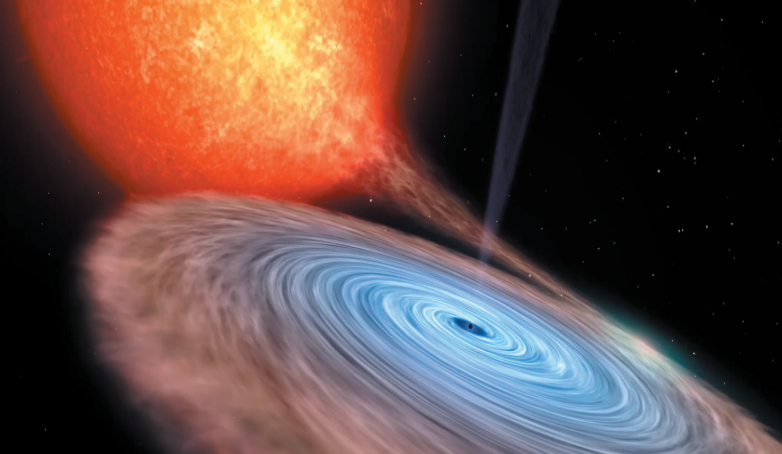


Figure 2. Courbes de lumière de V404 Cygni durant un sursaut particulièrement brillant. De haut en bas, radio, rayons gamma, et rayons X durs. Le panneau du bas montre le rapport de dureté en X dur. [Source⁵ : Loh et al. 2016].

V404 Cygni est l'un des microquasars dont la période orbitale est la plus grande¹. Le disque d'accrétion (le réservoir de matière) est donc de grande taille, impliquant (intuitivement) des éruptions longues. Or l'épisode de 2015 n'a duré que 10 jours.

Dans le domaine du visible, des observations menées au télescope de 10 m des Canaries ont permis de détecter la présence d'un vent de matière⁵ (H et He) formé dans les parties externes du disque d'accrétion (à plus de 10^6 km, soit $3 \times 10^4 R_{\text{Schwarzschild}}$ du trou noir⁶). Avec une vitesse de 3000 km/s, bien supérieure à la vitesse de libération, la matière peut s'arracher à l'attraction du trou noir, donnant au vent le rôle de régulateur du flot d'accrétion. La découverte d'une nébuleuse ténue, résidu de la matière transportée par le vent, permet d'estimer à 10^{-8} masse solaire la masse totale réinjectée par le vent. C'est la première fois qu'un tel phénomène est détecté dans un microquasar. L'observation systématique de tels vents dans d'autres systèmes permettrait de mieux sonder leur rétroaction sur le milieu interstellaire.

V404 Cygni n'a pas fini de nous révéler tous ses secrets, puisque seule une quantité infime des données a été analysée. *La suite en 2017...*

Astro-H, Hitomi : les derniers moments- et résultats ! Par Philippe Laurent (Sap)

Le projet de la JAXA, ASTRO-H, renommé *Hitomi*^{*}, est le 6^e satellite japonais à observer le ciel dans une bande d'énergie allant de 0,3 à 600 keV. Il permet d'observer les phénomènes à haute énergie dans l'univers, comme la matière avalée par les trous noirs, la matière noire retenue à l'intérieur des amas de galaxies, ou encore les plasmas portés à des températures extrêmes. Ces observations sont obtenues en combinant quatre types d'instruments pour des mesures d'énergies complémentaires : le **spectromètre X** (0,3 à 12 keV, avec une résolution spectrale de 5 eV, inégalée à ce jour) ; l'**imageur X** (bande en énergie similaire, avec un plus grand champ de vue, mais une résolution spectrale moindre, de 150 eV) ; l'**imageur « X dur »** (5 - 80 keV) ; l'**imageur gamma**, un télescope Compton qui permet d'étendre les observations jusqu'à 600 keV. Des équipes du Sap de l'Irfu, avec le laboratoire APC de Paris, ont été chargées de l'étude des effets des radiations sur l'électronique embarquée et du comportement à long terme des détecteurs DS-CdTe. Le satellite a été placé sur une orbite basse à 550 km d'altitude le 17 février 2016. Malheureusement *Hitomi* est passé en mode « *Survie* » le 26 mars, après une erreur d'attitude (le repérage en 3D dans l'espace). Suite à ce bug du programme informatique, le satellite a effectué des rotations anormales et commencé à perdre des morceaux... Devant l'impossibilité de communiquer avec le satellite pour lui faire reprendre une trajectoire normale, la JAXA a déclaré la mission perdue le 28 avril. Des discussions ont été menées pour examiner la possibilité d'une nouvelle mission. *À suivre en 2017...* Cependant, avant le décès officiel du satellite, les physiciens ont pu recueillir ses derniers soupirs sous forme d'observations enregistrées avant ses jours d'errance. L'analyse des données, publiée dans la revue *Nature*, a conduit à des images et des spectres de haute précision** révélant l'activité du trou noir supermassif au centre de l'amas de Persée et décrivant le gaz chaud l'entourant. D'autres observations sur le reste de supernova G21.5-0.9 ou la nébuleuse du Crabe sont en cours de traitement.

⁵ Pour en savoir plus : http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3719

⁶ $R_{\text{Schwarzschild}} = 2GM/c^2 = 2R_{\text{Crab}} = 3M/M_{\odot} \text{ km}$, M_{\odot} masse solaire.

* Pour en savoir plus sur la mission *Hitomi* (en japonais, littéralement pupille, œil) :

- fait marquant « *Astro-H, Hitomi* » sur http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?id_ast=3715

- site *Astro-H* de l'agence spatiale japonaise JAXA <http://astro-h.isas.jaxa.jp/en/>

- fin de la mission : http://global.jaxa.jp/projects/sat/astro_h/topics.html

** *Hitomi* collaboration, *Nature* **535**, 117-121 (2016). doi : 10.1038/nature18627

Hommage de l'Irfu à André Brahic



« La vie est trop courte, ne perdez pas de temps.
Allez au bout de vos passions. »
André Brahic

La direction et les salariés du CEA ont rendu hommage à André Brahic, astrophysicien de renommée mondiale, décédé le dimanche 15 mai.

Scientifique unanimement reconnu, spécialiste du système solaire et de son exploration spatiale, André Brahic (30 novembre 1942, 15 mai 2016), était astrophysicien à l'Irfu et professeur à l'Université Paris 7- Denis Diderot.



Il participa à plusieurs missions d'observation (notamment avec les sondes Voyager et Cassini) et aux études sur les anneaux des planètes du système solaire. Il était spécialiste des anneaux de Saturne et il fut à l'origine de la découverte des anneaux de Neptune (figure du bandeau) et de ses arcs étonnants. Ses travaux théoriques ont porté sur les processus de structuration des anneaux. Il nomma trois des quatre arcs¹ de l'anneau externe, Adams, suivant la devise « Liberté », « Égalité », « Fraternité ». En 1990, l'astéroïde (3488) Brahic fut baptisé en son honneur.

Auteur de nombreux ouvrages, il travailla avec passion pour diffuser les connaissances scientifiques dans la société, auprès des médias ou en conférences. André Brahic fut nommé chevalier de la Légion d'honneur le 14 juillet 2015. Au cours de sa carrière, il reçut plusieurs distinctions (médaille Carl Sagan aux États-Unis en 2001, prix Jean Perrin de la SFP en 2006) pour ses travaux scientifiques et son œuvre de vulgarisation. Son action s'exerçait non seulement comme « passeur de science » mais était aussi soutenue par une vision politique, comme en témoigne son ouvrage « *La recherche, une ambition pour la France* ».

1 Arcs de Neptune « Liberté Égalité, Fraternité » visibles de gauche à droite sur la photo (bandeau) de l'anneau Adams prise par Voyager 2 (Source NASA).

Conférences

La 26^e édition de la Nuit des Etoiles (5-8 août 2016) est dédiée à André Brahic : <https://www.afastronomie.fr/les-nuits-des-etoiles>



Voir la conférence Cyclope d'André Brahic, « Saturne et ses anneaux », vidéo (10 novembre 2009) :

<http://www-centre-saclay.cea.fr/fr/SATURNE-ET-SES-ANNEAUX-video-de-la-conference-Cyclope-du-10-novembre-2009-par-Andre-Brahic-astronome-astrophysicien-au-CEA-de-Saclay-professeur-a-l-Universite-Paris-7-Denis-Diderot>

Sur le site du CNES :

<https://cnes.fr/fr/andre-brahic-un-planetologue-atypique>

Émissions

Écouter sur France Culture la série « Six leçons sur l'Univers » réalisée par André Brahic en 2013 :

<http://www.franceculture.fr/sciences/six-lecons-sur-l-univers-par-andre-brahic>

Écouter l'émission sur France Inter « La tête au carré » en hommage à André Brahic, le 16 mai 2016 :

<http://www.franceinter.fr/emission-la-tete-au-carre-hommage-a-andre-brahic>

Parmi ses ouvrages :

- ♦ André Brahic et Pierre Debray-Ritzen, *Conversations dans l'univers*, Paris, Albin Michel, 1986 (réimpr. 2013).
- ♦ André Brahic, *Enfants du Soleil : histoire de nos origines*, Paris, Odile Jacob, 1999.
- ♦ André Brahic et Isabelle Grenier, *Lumières d'étoiles : les couleurs de l'invisible*, Paris, Odile Jacob, 2008.
- ♦ André Brahic, *De feu et de glace : ardentes géantes*, Paris, Odile Jacob, 2010.
- ♦ André Brahic, *La science, une ambition pour la France*, Paris, Odile Jacob, 2012.
- ♦ André Brahic et Bradford Smith, *Terres d'ailleurs : à la recherche de la vie dans l'univers*, Paris, Odile Jacob, 2015.

Directeur de la publication (chef de l'Irfu) : A.-I. Etievre - **Conseiller scientifique :** G. Cohen-Tannoudji - **Édition, rédaction en chef :** Valérie Lapoux

Comité éditorial et scientifique du numéro 95 : Nathalie BESSON (SPP), Gilles COHEN-TANNOUDJI (Larsim), Bertrand HERVIEU (SACM, LCSE), Fabien JEANNEAU (SEDI, DEPHYs), Valérie LAPOUX (SPhN, LENA), Ange LOTODE (SIS, LEIGE), Pierre MANIL (SIS, LCAP), Jacques MARRONCLE (SEDI, LASyD), Thomas MATERNA (SPhN, LEARN), Emmanuel MOULIN (SPP), Vanina RUHLMANN-KLEIDER (SPP), Yves SACQUIN (SPP), Didier VILANOVA (SPP) ; avec la collaboration de la cellule de communication de la direction de l'Irfu : Sophie KERHOAS-CAVATA (Dir Com), Philippe BRIET (SEDI), Angèle SÈNÉ (Dir Com), Alice MOUNISSAMY (stage Irfu, Com).

Crédit Photos : CEA, Irfu (p. 4-5, p. 10-14, p. 20) ; collaborations : NTOF (p. 6-7), ESS (p. 8), SARAF (p. 9), Edelweiss (p. 12), Atlas (p. 5, 13), CMS (p. 4), H.E.S.S. (p. 14-17) ; Integral (p. 18-19), Astro-H, JAXA (p. 19) ; NASA (p. 10-11, J. Diemand et al., *the Via Lactea project*), V. Lapoux (p. 1-3). Voir aussi la mention « source » dans les légendes de figures. Musique p. 1, p. 3 : Steve Reich (unité de base de 12 notes, 1^{re} section, Phase du Piano) ; motif rythmique de *Clapping Music*.

Dépôt légal : Septembre 2016 - ISSN 1268-7855

Numéros de scintillations : <http://irfu.cea.fr/ScintillationS>