

## Numéro spécial ! Couverture spéciale !

Feu d'artifice en l'honneur de notre maquettiste, Christine Marteau qui a réalisé tant de magnifiques numéros de ScintillationS et mis en valeur nos recherches, nos réalisations et nos découvertes avec grand talent, acceptant les cafouillages et corrections avec une bonne humeur et une gentillesse sans égales.

Le feu d'artifice est bien sûr aussi au cœur de ces pages :

Découvrez comment le détecteur Minos, installé au Riken au Japon, permet, en observant les noyaux très riches en neutrons, de mieux comprendre la structure du noyau (pages 2 et 3).

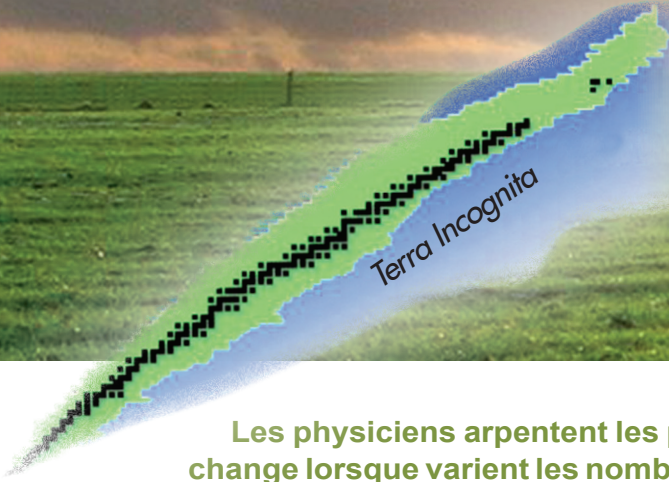
Emerveillez-vous de ce que la cosmologie, l'étude de l'Univers, permet de mettre des limites sur la masse des très légers et élusifs neutrinos grâce à l'analyse des résultats des expériences SDSS et Planck (pages 4 et 5).

Offrez-vous une plongée en pleine fusion : un dossier très complet (pages 6 à 9) vous permet de la découvrir sous toutes ses coutures, des stations d'essai au cœur des étoiles.

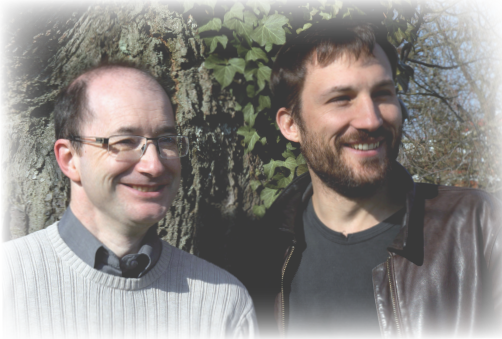
Enfin, lisez quatre doctorants, travaillant à JLab et sur Compass, qui nous expliquent comment les constituants des protons contribuent à ses propriétés fondamentales (pages 10 et 11).

Et tout ça grâce à qui ? À Christine Marteau, sans qui ScintillationS serait du texte au kilomètre ; à Alain Porcher, photographe hors pair sachant saisir l'enthousiasme des auteurs et à Didier Vilanova, qui a patiemment épluché les numéros, traquant les erreurs typographiques et autres fautes. Ils nous abandonnent mais c'est pour le meilleur ! Nous leur souhaitons des retraites pleines de joie et de repos bien mérité. Merci à eux !

*Nathalie Besson*



Les physiciens arpentent les pentes escarpées de la vallée nucléaire pour y trouver change lorsque varient les nombres de protons et de neutrons. Ces changements nous à l'origine de la structure du noyau. Pouvoir étudier les noyaux dotés d'un fort excès intenses et des méthodes expérimentales les plus efficaces est nécessaire. C'est



Les noyaux radioactifs, à la fois par leur excès de neutrons ou protons ou par leur faible énergie de liaison en regard des noyaux stables, offrent des conditions exceptionnelles pour comprendre le noyau atomique.

Il est acquis depuis les années 70 que notre vision de la structure nucléaire, établie à partir des études sur les noyaux stables, n'est pas valide pour l'ensemble des isotopes. Malgré d'intenses efforts théoriques et expérimentaux, il n'existe pas aujourd'hui de compréhension unifiée du noyau. De nombreuses interrogations restent en suspens comme, par exemple, le rôle de la structure sous-jacente des nucléons.

La construction de machines spécialisées dans la production et l'étude des noyaux radioactifs a permis l'exploration de nouvelles régions de la carte des noyaux et la découverte de nouvelles propriétés des systèmes nucléaires. La Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) au Japon est en opération depuis 2007. Il est aujourd'hui le complexe de production et d'accélération de noyaux radioactifs le plus performant au monde en terme d'intensités de faisceaux, alors que de nouvelles machines sont en construction ailleurs dans le monde.

Les équipes de l'Irfu ont développé un nouveau dispositif permettant la spectroscopie des noyaux les plus exotiques. Ce programme dénommé MINOS est en partie financé par le European Research Council (ERC). Ces recherches sont menées au RIBF en collaboration avec des partenaires japonais, le principal étant le RIKEN Nishina Center.

Des modifications significatives de structure peuvent être révélées par l'énergie d'excitation des premiers états des noyaux. Parmi les 6000 noyaux stables et radioactifs dont on prédit l'existence, moins de la moitié ont été synthétisés en laboratoire et seuls 30 % ont un premier état excité connu. La spectroscopie gamma de noyaux radioactifs qui se désexcitent en vol est une technique qui a fait ses preuves pour accéder à la spectroscopie des états liés pour des noyaux radioactifs produits à faible intensité. MINOS se concentre sur la production des noyaux exotiques par éjection d'un nucléon du noyau du faisceau après interaction avec une cible de proton. Lors de cette réaction, un proton issu du noyau du faisceau et le proton de recul de la cible, sont diffusés à grande énergie vers l'avant. Si le noyau final est produit dans un état excité de durée de vie courte, un photon gamma est émis au cours de sa désexcitation à l'endroit de la

réaction. L'instrument MINOS (voir figure 1) utilise une cible cylindrique aux parois minces (150 microns) et longue de 100-150 mm, remplie d'hydrogène liquide à  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La densité et la pureté de cette cible permettent d'augmenter la probabilité d'interaction par rapport aux dispositifs classiques. L'utilisation d'une cible épaisse dégrade cependant la précision de mesure d'énergie qui doit être corrigée en fonction du point d'interaction dans la cible. MINOS est le premier instrument qui permet cette localisation avec une précision de quelques millimètres grâce à la reconstruction des trajectoires des 2 protons par une chambre à projection temporelle (TPC) annulaire ajustée

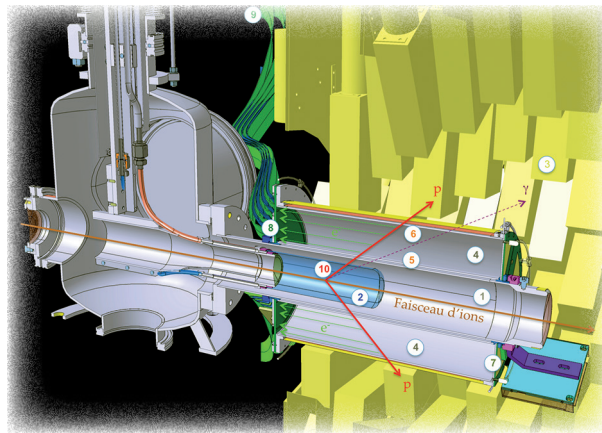


Fig. 1 Le faisceau d'ions traverse la cible d'hydrogène liquide (2) insérée dans le tube sous vide de la machine (1). Les photons gammas sont détectés dans le détecteur DALI2 (3). La reconstruction dans l'espace des trajectoires des 2 protons "p" permettent de localiser le point d'interaction (10). Pour cela, les électrons "e-" arrachés aux molécules du gaz (4) sont guidés vers le détecteur micromegas (8) où ils sont multipliés par un facteur 1000 environ. Le champ électrique de guidage des électrons est défini par les tensions appliquées à la cathode (7) et aux cages de champ cylindriques interne (5) et externe (6) de la TPC. Un signal électrique est ainsi généré localement sur quelques uns des 4000 pixel qui composent le détecteur micromegas. Ce signal est transmis à l'électronique (9) qui mesure également le temps d'arrivée des électrons pour reconstruire les trajectoires en 3 dimensions.

à la cible, et dont le plan de lecture est un détecteur Micromegas. Le défi a été de concevoir et réaliser un instrument suffisamment compact et « transparent » pour assurer une excellente efficacité géométrique et ne pas perturber les réactions envisagées. La cage de champ de

# dans le Noyau

Par Alain Delbart et Alexandre Obertelli

les clés de la structure du noyau atomique. La structure en couches des noyaux livrent de précieux indices quant à la nature de la force nucléaire et aux mécanismes de neutrons n'est pas à la portée de tous : la combinaison des faisceaux les plus ambitieux du projet Minos auprès de l'accélérateur RIBF au RIKEN au Japon.

la TPC de MINOS est ainsi constituée de 2 mm de roha-cell (une sorte de polystyrène) recouverts d'un kapton de 50  $\mu\text{m}$  sur lequel sont gravées 200 pistes de cuivre. Les performances de localisation des traces dans le volume gazeux du détecteur dépendent de l'uniformité du champ électrique de dérive (définie par la cage de champ), de la granularité de l'imageur (nombre et taille de ses pixels sensibles), et de la précision de la mesure du temps d'arrivée des électrons arrachés au gaz le long de la trace à visualiser. La zone sensible de l'imageur est constituée de plus de 4000 pixels lus par une électronique développée à l'Irfu. L'ensemble de l'instrument (cible, gaz, électronique de lecture et hautes tensions) est contrôlé à distance.

Plusieurs noyaux-clés riches en neutrons, des isotopes d'argon ( $Z=18$ ) aux isotopes de zirconium ( $Z=40$ ) peuvent enfin être étudiés à RIBF avec MINOS couplé au détecteur de photons gamma à haute efficacité DALI2 (40 % pour un gamma de 1 MeV émis en vol) (figure 2). La collaboration internationale *Seastar*, composée d'une centaine de physiciens et dont le

binôme Irfu-Nishina Center est le porte-parole, a organisé avec succès sa première campagne expérimentale en mai 2014 au Riken.

La première spectroscopie du noyau doublement magique  $^{78}\text{Ni}$  a été effectuée, ainsi que celles des noyaux de  $^{66}\text{Cr}$  et de  $^{72}\text{Fe}$ . Le  $^{78}\text{Ni}$ , avec 28 protons et 50 neutrons, est un cas unique de la carte des noyaux et fait partie des motivations pour la construction de nombreuses machines produisant des noyaux radioactifs ! Cette première moisson de données nourrit plus de dix analyses différentes en parallèle. Les premiers résultats devraient voir le jour en 2015. Une seconde campagne, prévue en 2015, permettra entre autres la première spectroscopie du  $^{110}\text{Zr}$ , dont la théorie prédit qu'il est un point d'arrêt du processus «  $r$  » (processus astrophysique responsable de la nucléosynthèse des éléments les plus lourds par captures successives de neutrons au cours de certains événements violents de notre univers comme supposément des explosions de supernovæ). D'autres mesures sont prévues pour 2016-2018.

Alain Delbart et Alexandre Obertelli

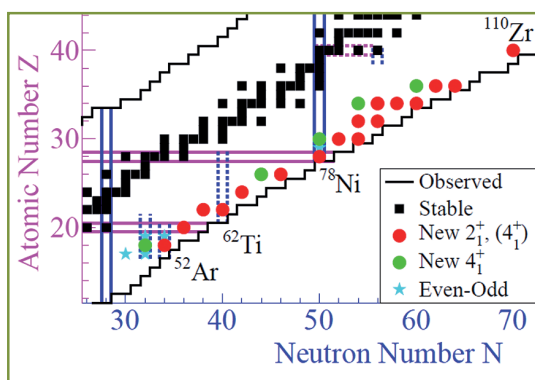
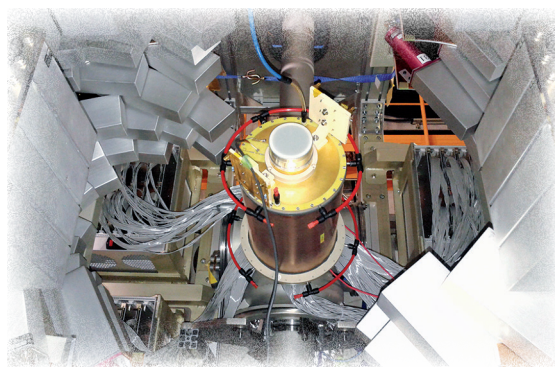
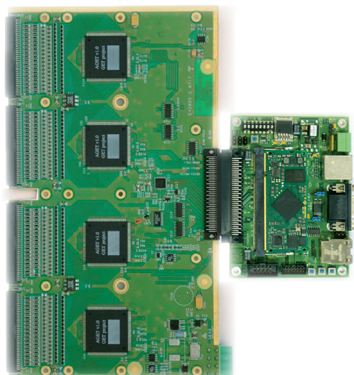


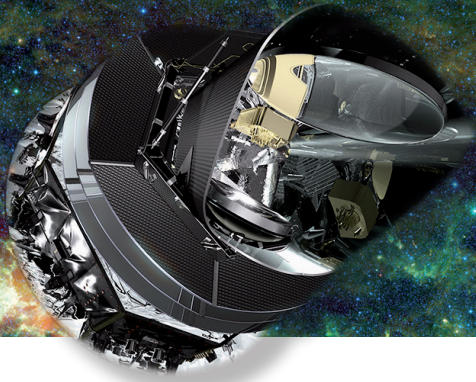
Fig. 2 Zoom sur la carte des noyaux et la région des noyaux riches en neutrons étudiés avec MINOS par la collaboration SEASTAR. Les noyaux pair-pair pour lesquels la première spectroscopie sera effectuée sont indiqués en rouge. Les noyaux  $^{52}\text{Ar}$ ,  $^{62}\text{Ti}$ ,  $^{78}\text{Ni}$  et  $^{110}\text{Zr}$ , pour lesquels une (des) fermeture(s) de couches est (sont) prédite(s) par certains modèles théoriques, doivent apporter des informations cruciales pour comprendre la structure des noyaux radioactifs.

Carte électronique frontale équipée de 4 puces AGET (total 256 canaux) couplée à la carte de lecture FEMINOS. L'ensemble du système a été développé à l'Irfu.



La TPC MINOS insérée à l'intérieur du détecteur de photons gamma DALI2. Sur la photo, le faisceau vient vers vous. Ici, le détecteur est en cours d'installation et DALI2 est ouvert en deux moitiés latérales. En prise de données, MINOS est enfermé dans DALI2 en une configuration très compacte afin de maximiser l'efficacité de détection.

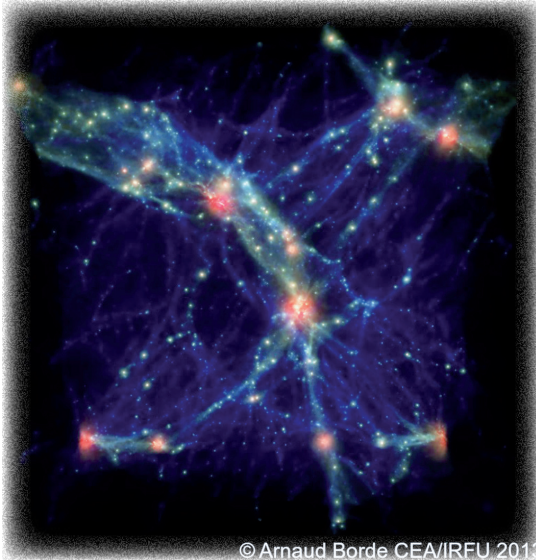
# Neutrinos et co



**Les neutrinos laissent une empreinte sur le rayonnement fossile du Big Bang et à détecter ces traces subtiles et à en déduire des informations sur la somme des Sky Survey (SDSS) mené à l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique et le**

## Des neutrinos de plus en plus légers

Imaginez un astre si brillant qu'on pourrait le percevoir à travers tout l'Univers observable. Sa lumière, pour nous parvenir, voyagerait durant plus de 10 milliards d'années, traversant la toile cosmique, savant mélange de filaments ténus constitués de gaz intergalactique, d'espaces quasiment vides, ou de grumeaux plus denses abritant quelque galaxie ou protogalaxie. Ce phare cosmique, c'est un quasar. Il tire sa luminosité spectaculaire de la matière qui s'engouffre dans son trou noir central, dont la masse est de plusieurs millions voire de plusieurs milliards de fois celle du Soleil.



© Arnaud Borde CEA/IRFU 2013

Cette image issue de simulations au TGCC montre des nuages de gaz dans un cube d'univers de 65 millions d'années-lumière de côté. Les zones rouges indiquent des amas de galaxies. Les filaments bleus sont les régions remplies de gaz de faible densité.

SDSS, comporte une succession de pics d'absorption, empreinte de la répartition de la matière dans l'Univers alors qu'il n'était âgé que d'un à trois milliards d'années. La qualité des données de SDSS permet d'étudier des petites structures de la taille d'un amas de galaxies, telles qu'elles étaient au moment où les nuages de gaz commençaient à former des galaxies.

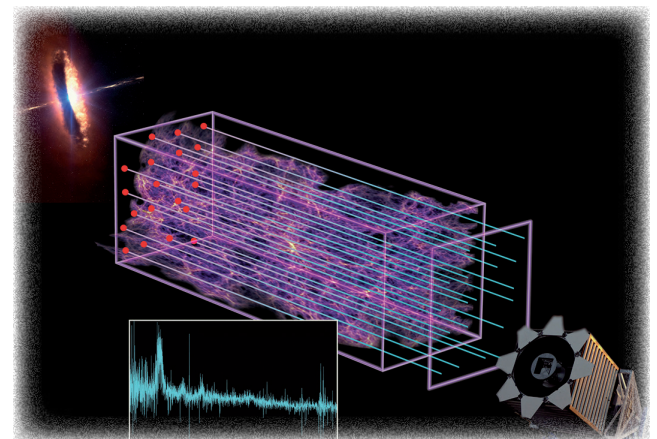
Ces données sont suffisamment précises pour délivrer des informations sur des particules parmi les plus méconnues : les neutrinos. Produits dans le lointain passé de l'Univers en même temps que les autres particules de matière, les neutrinos se distinguent par leur très faible masse. Se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière, ils ont « dilué » les grumeaux de matière à l'origine des galaxies et des nuages de gaz. L'impact précis des neutrinos sur la formation des structures se

détermine au moyen de simulations numériques de grande ampleur, nécessitant plusieurs millions d'heures de calcul, que les physiciens du SPP ont réalisées au centre de calcul intensif de Bruyères-le-Châtel (TGCC). Les chercheurs ont simulé avec une précision inégalée une cinquantaine de cartes reproduisant l'effet des neutrinos selon différentes valeurs de leurs masses et plusieurs hypothèses cosmologiques ou astrophysiques.

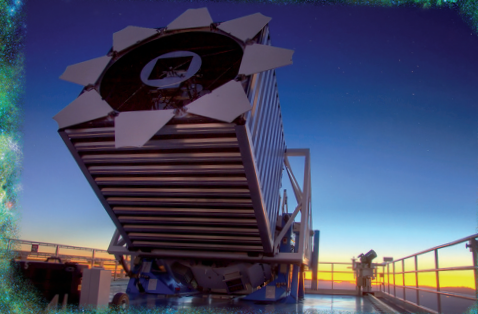


En comparant données expérimentales et simulations numériques, les physiciens du SPP ont ainsi pu fixer à 1,1 eV la limite supérieure sur la somme des masses des trois saveurs connues de neutrinos. En combinant les données de SDSS à celles fournies par le satellite Planck en 2013, cette limite a été ramenée à 0,15 eV, meilleure contrainte à ce jour sur la masse des neutrinos.

Nathalie Palanque-Delabrouille



La lumière de quasars distants (points rouges à gauche) est partiellement absorbée lorsqu'elle traverse des nuages d'hydrogène (en violet au centre). Ce phénomène crée une multitude de raies d'absorption permettant de dresser une carte précise du gaz intergalactique.



Par Nathalie Palanque-Delabrouille et Jean-Baptiste Melin

sur la répartition du gaz et des galaxies dans l'Univers. Les physiciens s'emploient à mesurer les masses des neutrinos. Les acteurs incontournables sur ce sujet sont le Sloan Digital Sky Survey et le satellite Planck, dont l'ensemble des données a été rendu public en février 2015.



## La formation des amas de galaxies sensible aux masses des neutrinos

Les neutrinos influencent non seulement la distribution du gaz intergalactique mais aussi l'ensemble du processus de formation des structures dans l'Univers, depuis les plus petits grumeaux de matière jusqu'aux amas de galaxies.

C'est à ces derniers que les physiciens du SPP et SAP engagés dans Planck se sont intéressés pour réaliser une analyse cosmologique indépendante des analyses standards utilisant le fond diffus cosmologique (CMB), les oscillations acoustiques baryoniques (BAO) ou les supernovæ.

En utilisant la totalité des données du satellite, ils ont produit le plus grand catalogue d'amas détectés par effet Sunyaev-Zel'dovich (voir encadré). Ce catalogue, publié en février 2015, comprend 1653 sources dont 1203 confirmées grâce à d'autres jeux de données (téléscopes optiques ou satellite XMM). Planck détecte les amas les plus massifs de l'Univers (masse de plusieurs fois  $10^{14}$  masses solaires) pour des décalages spectraux<sup>1</sup> compris entre 0 et 1.

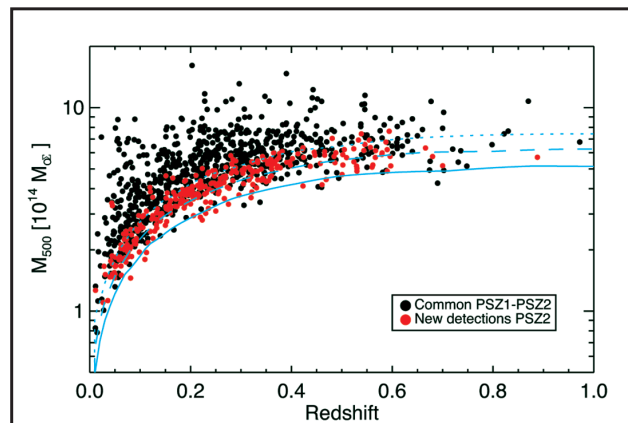
### L'effet Sunyaev-Zel'dovich

L'effet Sunyaev-Zel'dovich résulte de la diffusion des photons du fond diffus cosmologique sur le gaz chaud situé à l'intérieur des amas que ces photons traversent. Les photons du CMB gagnent un peu d'énergie lors de l'interaction. Planck peut détecter cet effet sur le ciel et ainsi détecter des amas de galaxies.

Un sous-échantillon de 439 amas a ensuite été sélectionné pour réaliser une analyse cosmologique poussée à partir des comptages d'amas en fonction du décalage spectral. Ces comptages sont particulièrement sensibles à l'amplitude des fluctuations de densité de matière, qui domine l'évolution des structures dans l'Univers. Alors que le CMB mesure une valeur de cette amplitude de 0,83 avec une incertitude de 0,01, les amas donnent une valeur comprise entre 0,72 et 0,80. Il y a donc désaccord

entre les résultats des études du CMB et des amas !

Ce désaccord peut être résolu si l'on suppose que la somme des masses des neutrinos a une valeur comprise entre 0,2 et 0,3 eV au lieu de la valeur minimale de 0,06 eV (déduite des expériences d'oscillation) fixée dans l'analyse initiale. Cependant, cette valeur élevée est en conflit avec les mesures issues des spectres des quasars et du CMB exposées plus haut, qui imposent à cette somme d'être inférieure à 0,15 eV. La masse des neutrinos ne peut donc pas être le seul ingrédient entrant dans le désaccord entre amas et CMB. Une partie de la solution est peut-être à trouver du côté



Masse des amas détectés par Planck en fonction de leur décalage spectral  $z$ . Les points noirs sont les détections communes à l'analyse d'une partie des données, publiée en 2013 et à celle de la totalité des données, publiée en 2015. Les nouvelles détections apportées par l'analyse de 2015 sont en rouge, situées à plus petite masse. Les lignes bleues continue/tirée/poinillée délimitent les zones où un amas donné a respectivement 20/50/80 % de chance d'être détecté par Planck.

1- Du fait de l'expansion de l'Univers, le spectre des objets astronomiques est décalé vers les grandes longueurs d'onde (donc vers le rouge pour le spectre visible).

de l'astrophysique, car le désaccord pourrait être réduit en revoyant à la hausse l'estimation de la masse des amas. Il est donc nécessaire de poursuivre les analyses, en cherchant à mesurer la masse des amas avec toujours plus de précision.

Jean-Baptiste Melin

L'Irfu s'est engagé pour la fusion nucléaire contrôlée dès 1998, en mettant au service physique. Aujourd'hui, d'étroits liens se sont tissés entre le monde de la fusion et sous forme de patchwork, nous allons esquisser ces points de convergence très

## Des lasers pour mieux comprendre le cœur des étoiles

Les réactions de fusion entre noyaux atomiques apportent aux étoiles la stabilité qui explique l'âge du Soleil : plusieurs milliards d'années. La recherche sur la fusion en laboratoire offre donc naturellement une opportunité de valider certains aspects des phénomènes microscopiques à l'œuvre en physique stellaire. Les lasers de puissance, tels que le Luli sur le plateau de Saclay ou le Laser Mégajoule (LMJ) en Aquitaine, sont pour cela des outils privilégiés. Le mécanisme d'interaction laser-matière génère des plasmas comparables en température et en densité à ceux qui existent dans le cœur des étoiles. La durée des impulsions de ces lasers, de l'ordre de la nanoseconde, permet d'atteindre un état proche de l'équilibre thermodynamique local représentatif des plasmas stellaires, contrairement aux lasers plus courts qui génèrent des plasmas hors équilibre. L'astrophysique de laboratoire, comme on la qualifie, trouve une place naturelle à l'Irfu, en lien étroit avec le développement des modèles stellaires. Les besoins des modèles théoriques sont ainsi mis en perspective avec les possibilités offertes par les installations expérimentales. Les travaux en cours actuellement au SAp concernent le transport des photons dans les structures stellaires internes et les probabilités de fusion dans les plasmas denses et chauds soumis à l'influence de l'écrantage coulombien. Soutenue en grande partie par le projet ANR Opacity et l'ÉquipEx Petal+, cette activité inclut le développement d'un détecteur de particules chargées (Sépage), dont la conception mécanique est assurée par le SIS), et d'un spectromètre à neutrons (MiNeF2) qui s'appuie sur la technologie MicroMegs développée au Sédi.

J-E. Ducret, S. Turck-Chièze (SAp)

1- Hormis dans le cas de la « fusion froide », non admise par la majorité de la communauté scientifique, qui ne sera pas évoquée ici.

2- Limite de Jeans : masse d'une distribution de matière au-delà de laquelle elle devient gravitationnellement instable, déclenchant la fusion dans les étoiles.

3- Au LMJ, l'éclairement laser est de l'ordre de  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>.

4- Scintillations n°81 page 9.

5- Broader Approach, accord signé entre l'Europe et le Japon en 2007. Voir Scintillation n°82, page 5.

La fusion consiste à assembler deux noyaux atomiques légers pour en former un plus lourd. Les noyaux sont des ions constitués de neutrons et de protons. À cause de leur charge positive, ils se repoussent sous l'effet de la force électrique. Le franchissement de cette « barrière coulombienne » peut se faire par effet tunnel, tel que le prévoit la physique quantique, un effet statistique. Que ce soit au cœur d'une étoile ou en laboratoire, le défi est de communiquer suffisamment d'énergie à un plasma d'ions pour qu'une fraction suffisamment importante fusionne. Comme la somme des masses des noyaux de départ est très légèrement supérieure à la masse du noyau final, il subsiste un reliquat de masse qui est converti en énergie selon la fameuse équation  $E=mc^2$ . C'est cette énergie que chercheront à récupérer les réacteurs du futur, et qui fait que les étoiles rayonnent. Les produits des réactions de fusion ont des énergies élevées qui leur permettent soit de s'échapper (c'est le cas des neutrons) soit de chauffer localement le plasma qui se détend naturellement. L'entretien du cycle de fusion nécessite donc un confinement<sup>1</sup>. On en distingue trois types :

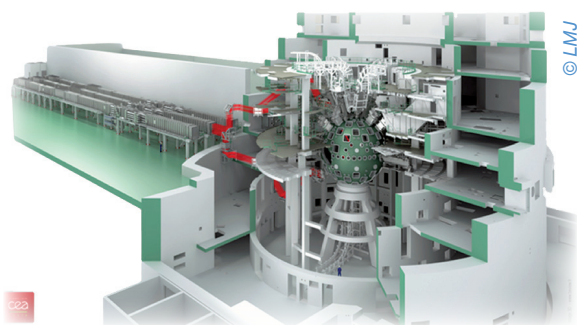
**Le confinement gravitationnel** (étoiles) : au-delà de la limite de Jeans<sup>2</sup>, la force gravitationnelle engendre l'effondrement d'une masse de matière qui entraîne la montée en température de son centre, jusqu'au point où les processus de fusion nucléaire se déclenchent massivement, faisant briller l'étoile.

**Le confinement inertiel** (laser Mégajoule ou LMJ) : l'irradiation de petites capsules d'un mélange de deutérium et de tritium par un laser intense<sup>3</sup> génère une onde de choc qui comprime et chauffe fortement le combustible, ce qui déclenche la fusion.

**Le confinement magnétique** (JT60, Iter, Demo) : un plasma de noyaux de deutérium et de tritium est chauffé par des ondes électromagnétiques à environ 150 millions de degrés. Il est confiné dans une enveloppe magnétique, nécessairement non matérielle puisqu'aucun matériau de structure ne pourrait tolérer ces conditions thermiques.

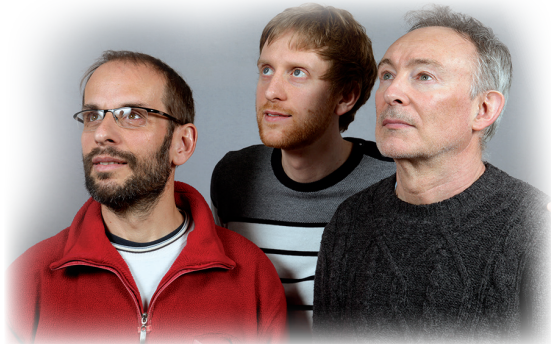
L'objectif ultime des physiciens de la fusion est de produire davantage d'énergie sous forme utilisable (électricité par exemple) que celle qui est consommée pour chauffer, alimenter et confiner le plasma. Plus modestement, les études actuelles (dont Iter) visent à générer au moins autant d'énergie thermique qu'on en dépense (on parle de *breakeven*).

La voie du confinement inertiel sera étudiée au LMJ. La physique à l'œuvre étant similaire à celle qui régit le cœur des étoiles, le SAp s'est donc naturellement positionné sur des expériences auprès de lasers de ce type (voir encadré page 6), en lien étroit avec le développement des modèles stellaires.



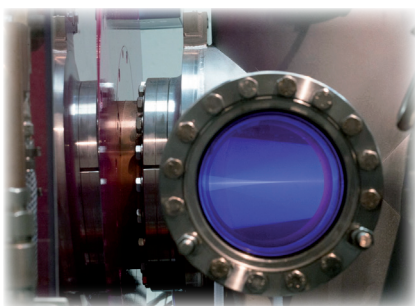
Vue écorchée du Laser Mégajoule : à gauche une partie des lignes d'amplification laser, au centre la sphère de réaction (10 m de diamètre). La couleur rouge souligne les optiques finales de transport et de focalisation des faisceaux sur la cible, au centre de la sphère.

du projet W7X des technologies développées dans le cadre de nos programmes de l'Irfu, autour de problématiques scientifiques et technologiques. En quatre pages divers qui impliquent nombre de nos métiers.



Mais historiquement, dès les années 1950, c'est d'abord au confinement magnétique que se sont intéressés les scientifiques, en développant des stellarators et des tokamaks... qui ont respectivement abouti à W7X<sup>4</sup> et à Iter par exemple.

La maîtrise de la fusion par confinement magnétique impose de relever deux grands défis : d'abord celui de maintenir un plasma sur de très longues durées afin de produire continuellement de l'énergie ; ensuite, ce qui est souvent sous-estimé, celui d'assurer la tenue radiative des matériaux de structure, soumis à des flux de neutrons tels qu'ils subissent des dommages rapides et irrémédiables. L'Irfu bénéficie d'atouts sur ces deux thématiques : sa grande expérience dans la conception des aimants supraconducteurs, la cryogénie et les stations d'essais ; et son expertise dans le domaine des accélérateurs qui composent les installations permettant de qualifier les matériaux candidats. Dans le cadre de l'approche élargie<sup>5</sup>, le SACM et le SIS sont fortement impliqués dans la construction de composants de l'accélérateur prototype d'Irfmif : injecteur (voir article pages 8-9), cryomodule supraconducteur, systèmes de diagnostic,



Fluorescence du gaz résiduel sous l'effet d'un faisceau de protons dans l'injecteur d'Irfmif.

en plus des calculs de dynamique du faisceau. Un autre volet de l'approche élargie est le passage du tokamak japonais JT60 d'une technologie conventionnelle à une technologie supraconductrice. Ses imposantes bobines supraconductrices seront testées à Saclay dès la fin de l'année (voir encadré page 8).

La communauté internationale de la fusion est à l'œuvre à Cadarache pour la construction d'Iter. Le SIS contribue aux études du système de protection de ses aimants (voir encadré page 7). Dans un scénario de très long terme,

elle prévoit la construction d'un réacteur à fusion, Demo, qui devrait évoluer après une phase de tests vers une phase électrogène. Des calculs thermomécaniques entrepris au SIS et au SACM permettent d'ores et déjà d'anticiper les difficultés à venir (voir encadré page 9).

## Les aimants du futur réacteur Iter sous protection numérique

Les grands équipements de physique utilisent des aimants supraconducteurs qui permettent le passage d'un fort courant électrique sans pertes résistives lorsqu'ils sont portés à des températures inférieures à leur température critique (quelques kelvins). Le déclenchement d'un *quench*<sup>1</sup> peut entraîner l'indisponibilité de l'équipement... et dans le pire des cas sa destruction. La détection du *quench* par un système de protection dédié (MSS pour *Magnet Safety System*) permet une mise en sécurité de l'aimant en commandant de façon maîtrisée la décharge de son énergie.

Pour les systèmes magnétiques simples, la détection est basée sur la mesure de la tension qui apparaît à ses bornes lors de l'incident. Lorsqu'elle dépasse un seuil défini pendant une certaine durée, la décharge de l'aimant est déclenchée.

Dans le cas des systèmes plus complexes, les couplages magnétiques génèrent des tensions qui ne sont pas dues à un *quench*. Pour éviter les fausses alertes que ces tensions pourraient déclencher, les équations caractérisant le *quench* doivent être beaucoup plus élaborées. Sur les tokamaks de fusion comme Iter vient également se rajouter l'effet du courant du plasma dans le champ magnétique, qui perturbe l'analyse.

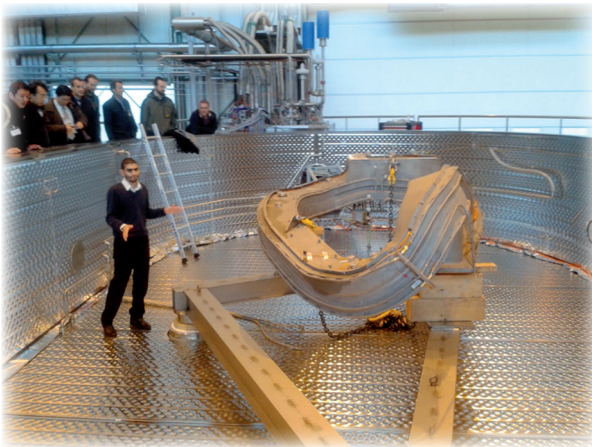
Pour visualiser le signal de *quench*, les premières générations de MSS utilisaient des circuits analogiques et des équations simples. Les systèmes complexes nécessitent le passage à des équations numériques prenant en compte la valeur digitalisée des tensions aux bornes de leurs aimants. Ces équations sont définies par simulation. Iter étant un équipement de recherche sophistiqué et évolutif, la souplesse du numérique facilitera la maîtrise de la protection des futures machines.

Le SIS a une compétence reconnue dans la conception des MSS et étudie déjà celui d'Iter, qui comportera trois ensembles de détection basés sur des principes de mesures différents. Un vote majoritaire à partir des trois résultats déclenchera la mise en sécurité de la machine. Au total, près de 2 500 voies de détections dans 30 baies d'électronique constitueront le système de protection du tokamak. La fiabilité de l'analyse et du traitement numérique des signaux reste un des principaux défis à relever.

F. Molinié (SIS)

*1- Quench : transition non maîtrisée et irréversible de l'état supraconducteur à l'état résistif, qui s'accompagne d'un passage brutal du liquide cryogénique à l'état gazeux. Les conséquences peuvent être désastreuses, comme l'a montré l'arrêt du LHC durant 14 mois pour réparer pas moins de 29 aimants !*

Étape importante de l'aventure de la fusion, l'accélérateur Ifmif a pour objectif de destinés aux futurs réacteurs de fusion thermonucléaire. C'est à l'Irfu qu'a été conçu Japon où il sera assemblé avec les autres composants de l'accélérateur. S'inspirant vie à ce premier maillon de la chaîne accélératrice composé d'une source d'ions à nous allons décrire.



Walid Abdel Maksoud dans le cryostat de test JT60SA avec une bobine de W7X.

## Un injecteur pour l'accélérateur Ifmif

Dans une source d'ions à résonance cyclotronique électronique (ECR), les ions sont produits dans le plasma par interaction d'une onde électromagnétique avec le gaz hydrogène dans une enceinte où règne un champ magnétique. Le champ magnétique est ajusté pour que la fréquence de rotation des électrons autour des lignes de champ soit égale à celle de l'onde électromagnétique injectée. Par résonance, l'énergie de l'onde est transférée aux électrons du plasma qui acquièrent une énergie suffisante pour casser les molécules et ioniser les atomes.

La densité de plasma est ensuite optimisée pour en extraire un faisceau intense (de 10 mA à plus de 100 mA). Le faisceau d'ions est extrait en plaçant la source sur une plateforme isolée à la haute tension. Il est ensuite focalisé, guidé et mis en forme dans la ligne de transport basse énergie grâce à deux aimants solénoïdes et des déviateurs sous le contrôle de diagnostics, jusqu'à l'entrée du quadripôle radiofréquence (RFQ) qui constitue la première cavité accélératrice.

Dans le cas d'Ifmif, du deutérium (D) gazeux est injecté dans la source pour obtenir des ions  $D^+$ . À basse énergie, lors d'impacts avec une surface (parois, diagnostics ou bloc d'arrêt), les ions produits se recombinaient avec des électrons. Rapidement, des neutrons indésirables de quelques MeV sont alors produits par réaction des deutons sur le deutérium ainsi implanté. Ce phénomène a un gros impact sur la sécurité d'exploitation de l'équipement.

En 2012, les tests de validation effectués à Saclay ont permis de produire des faisceaux de deutons avec des caractéristiques très proches des spécifications en mode pulsé. En mode continu, un faisceau de 140 mA de  $D^+$  a été produit, constituant un record mondial pour un accélérateur de particules.

Suite à cette validation, l'ensemble de l'injecteur (23 tonnes dans 35 caisses<sup>2</sup>) a été transféré au Japon. Une dizaine d'agents de l'Irfu a participé aux opérations de déballage, remontage, contrôle et remise en route sur place. Le premier faisceau sur le site de Rokkasho a été



## L'Irfu teste les grands aimants du tokamak JT60

Dans le cadre de l'accord entre l'Europe et le Japon sur l'approche élargie pour la fusion contrôlée par confinement magnétique, l'Europe a en charge le passage à la technologie supraconductrice du tokamak JT60 situé à Naka au Japon.

Cela recouvre en particulier le suivi de la réalisation et les tests au SACM de 18 nouveaux aimants supraconducteurs toroïdaux utilisés pour confiner le plasma.

L'objet du projet JT60-SA Cold Test Facility est la réalisation de la station d'essais et des tests permettant de valider ces 18 aimants supraconducteurs qui seront ensuite envoyés au Japon. Les aimants seront testés avec un courant nominal de 25,7 kA. L'hélium liquide assurant leur refroidissement aura une pression d'entrée de 5 bars pour un débit global de 24 g/s. La température de test sera incrémentée jusqu'à la limite des conditions de quench (de 5 K à 7,5 K).

Un gigantesque cryostat de 7 m par 10 m permettra de tester les aimants un par un, dans un vide de  $10^{-5}$  mbar. La validation de la station d'essais sera réalisée avec un aimant de démonstration du stellerator W7X dont les performances sont connues (photo). Le test du premier aimant JT60 est prévu fin 2015.

L. Vieillard (SACM)

1- Iphi : Injecteur de Protons à Haute Intensité, conçu et exploité à Saclay.

2- Voir Scintillations n°89, page 8.

3- Spiral2 : accélérateur en cours de construction au Ganil à Caen pour la physique nucléaire.

4- Fair : Facility for Antiproton and Ion Research, en cours de construction au GSI près de Darmstadt en Allemagne.

5- ESS : European Spallation Source en cours de conception.



# ion contrôlée

Dossier suivi par Jean-Éric Ducret, Pierre Manil et Jacques Marroncle

fournir une source intense de neutrons qui permettra de caractériser les matériaux et testé l'injecteur de deutons. Il a ensuite été transféré sur le site de Rokkasho au de la source développée pour le projet Iphi<sup>1</sup>, les équipes du SACM et du SIS ont donné résonance cyclotronique électronique et d'une ligne de transport à basse énergie que

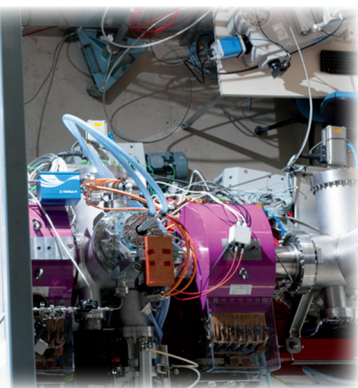
produit début novembre 2014 et la phase de mise en service va se poursuivre en 2015.

Notre savoir-faire pour la réalisation de telles sources d'ions place l'Irfu parmi les premiers acteurs mondiaux dans ce domaine. Hormis Iphi et Ifmif, nous sommes également impliqués dans la construction des sources d'ions pour les projets Spiral2<sup>3</sup> et Fair<sup>4</sup> et nous collaborons au projet ESS<sup>5</sup>.

Plusieurs domaines d'application plus proches du public s'ouvrent à ces sources d'ions, comme les réacteurs nucléaires pilotés par des accélérateurs (*Accelerator Driven System, ADS*) ou la thérapie pour les tumeurs malignes par capture de neutrons par le bore (*Boron Neutron Capture Therapy, BNCT*).

Le CEA (via l'Irfu) a signé un accord de licence avec une société française pour commercialiser ce type de source. En 2014, elle a déjà vendu deux sources à des laboratoires, en Inde et en Chine. Des contacts sont en cours avec un laboratoire japonais pour une source destinée à la BNCT, ainsi qu'avec une société américaine pour d'autres applications médicales.

R. Gobin (SACM)



Installation de l'injecteur d'Irfu à Saclay, pour tests.

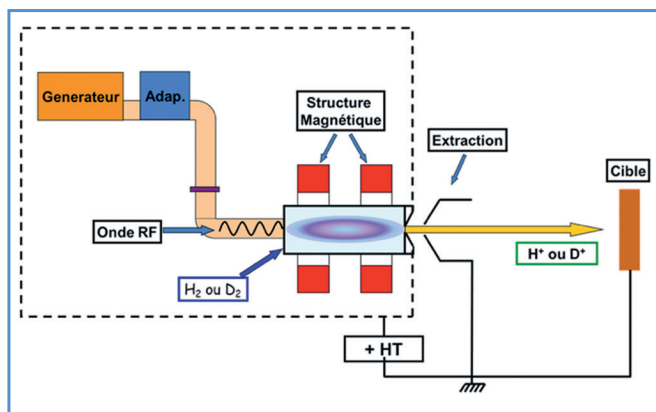
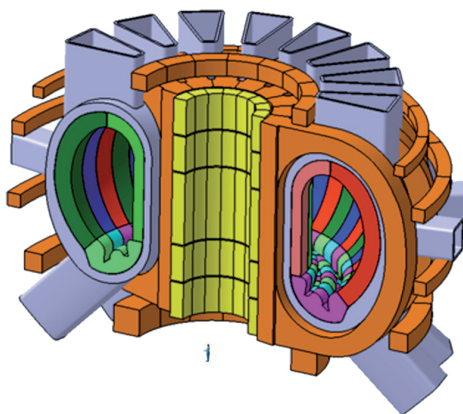


Schéma de principe d'une source d'ions à résonance cyclotronique électronique.

## L'après-Iter déjà à l'étude

Demo, successeur du réacteur expérimental de fusion Iter à l'horizon 2040-2050, constitue la prochaine étape vers l'exploitation de l'énergie de fusion par confinement magnétique. Demo a pour objectif de développer et de tester des technologies, des régimes de physique et des routines de contrôle d'exploitation d'un réacteur de fusion considéré non plus comme une expérience scientifique, mais comme une centrale électrique, en phase préindustrielle.

1- La thermo-hydraulique est l'étude des écoulements fluides soumis aux effets de la température.

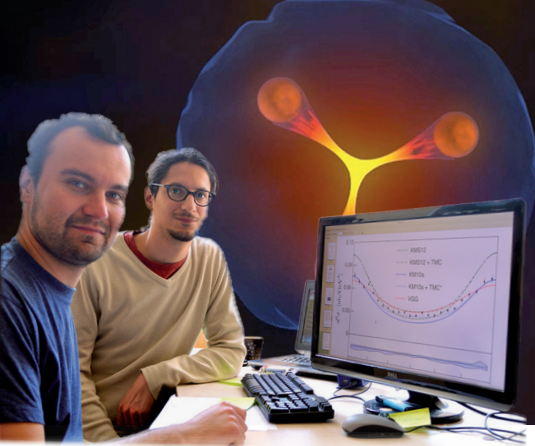


Modèle géométrique simplifié du réacteur de fusion Demo, utilisé pour les calculs de pré-dimensionnement. L'échelle est donnée par le mannequin en bas au centre.

Afin de préparer le terrain pour l'étude conceptuelle de Demo, l'Irfu participe aux pré-études des aimants de ce tokamak qui devrait permettre de produire au moins deux gigawatts, dans un volume de plasma deux fois supérieur à celui d'Iter.

Sous le pilotage d'EUROfusion et en collaboration avec plusieurs instituts européens (dont l'IRFM et l'Inac au CEA), l'Irfu participe à la réalisation d'outils de modélisation couplés en thermo-hydraulique<sup>1</sup> et thermique ainsi qu'aux études de fabricabilité basées sur le retour d'expérience de JT60 et Iter. Le SIS et le SACM préparent la mise en place d'une plateforme logicielle de simulation multi-physique (intégrant mécanique, mécanique des fluides et thermique) dans le contexte des aimants supraconducteurs.

F. Nunio (SIS) et R. Vallcorba (SACM)



**Les nucléons, protons et neutrons, forment la majorité de la masse découverte des quarks, notre compréhension de leur structure a beaucoup progressé. décrit les hadrons, dont les nucléons font partie, comme des états liés de quarks et de gluons. Pourtant, les nucléons recèlent encore beaucoup de mystères : pourquoi les quarks possèdent-ils un spin 1/2 ? Quelle est l'origine du spin 1/2 des nucléons ?** Vincent Andrieux, Maxime Levillain, du Nucléon (le LSN), travaillent à l'amélioration de la modélisation théorique des

## Sonder le cœur de la matière au Jefferson Laboratory

Les quarks et les gluons demeurent confinés à l'intérieur des hadrons (protons, pions...). Si les mécanismes de confinement restent aujourd'hui mystérieux, il est possible d'observer et de décrire la structure interne tridimensionnelle des hadrons à l'aide de fonctions à plusieurs variables, les distributions de partons généralisées (GPD).

Expérimentalement, les GPD peuvent être déterminées à l'aide de processus dans lesquels un électron diffuse sur un nucléon avec l'émission d'un photon (diffusion Compton profondément virtuelle ou DVCS) ou un méson (DVMP), tandis que le nucléon recule intact. Maxime Defurne participe à l'analyse des résultats de deux expériences spécialisées dans la mesure des sections efficaces<sup>1</sup> DVCS et d'électroproduction de  $\pi^0$  sur proton (un cas particulier de DVMP), réalisées en 2004 et 2010 par la collaboration DVCS Hall A du Jefferson Laboratory. L'accélérateur fournit un faisceau de haute intensité d'électrons polarisés de 6 GeV qui interagit avec une cible d'hydrogène liquide.

Les électrons diffusés sont détectés à l'aide d'un spectromètre de haute résolution tandis que les photons issus du DVCS et de la désintégration du  $\pi^0$  le sont par un calorimètre électromagnétique. Le nucléon diffusé n'étant pas détecté, il est identifié par une technique de « masse manquante » : on demande que la masse totale des particules non détectées soit compatible avec celle d'un nucléon. Un soin particulier est consacré à la simulation par méthode Monte-Carlo, afin de reproduire le dispositif expérimental dans ses moindres détails.

La précision sur la section efficace obtenue est inégalée à ce jour (figure 1), et permet de tester la compatibilité aux données des différents modèles de GPD, dont certains sont développés au LSN.

A ce sujet, une approche novatrice de modélisation analytique des GPD est développée au LSN par Cédric Mezrag. Elle repose sur des calculs de QCD *ab-initio*, c.-à-d. qui n'ont pas recours à des modèles ou formules empiriques, et notamment sur les équations de Schwinger-Dyson qui permettent de faire des calculs non perturbatifs. Appliquée au pion, cette approche permet de calculer certaines de ses propriétés, comme son facteur de forme, en très bon accord avec les résultats expérimentaux disponibles (figure 2). Cette modélisation sera prochainement étendue au nucléon et incorporée dans la suite logicielle PARTONS consacrée aux GPD et financée par l'ANR.

1- Section efficace : probabilité de réalisation d'un processus d'interaction

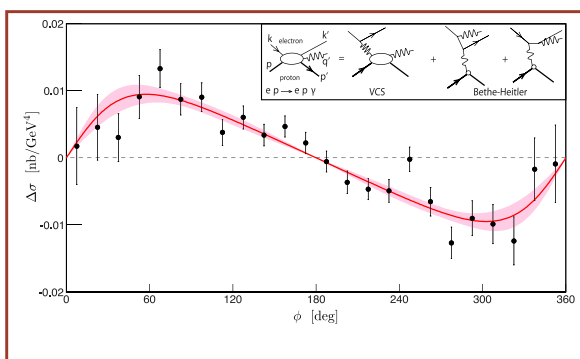


Figure 1 : Différence entre les section efficaces DVCS mesurées avec une polarisation positive et négative du faisceau. L'électron incident interagit avec un quark à l'intérieur d'un proton par l'intermédiaire d'un photon virtuel. Le quark se désexcite en émettant un photon réel. Pour le DVMP, un méson ( $\pi^0$ ,  $\rho$ ...) remplace le photon de l'état final du DVCS. Les données sont représentées en fonction de l'angle  $\phi$  entre le plan de diffusion de l'électron (indiqué par  $kk'$  dans l'encadré sur le schéma) et le plan défini par le photon et le proton dans l'état finale ( $q'p'$  dans l'encadré).

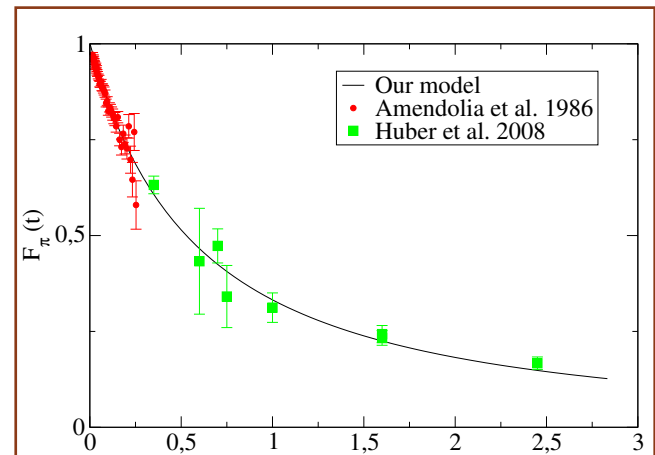


Figure 2 : Comparaison des résultats des calculs basés sur les équations de Schwinger-Dyson avec les données expérimentales disponibles de facteur de forme du pion. Les valeurs sont représentées en fonction du carré de la quadri-impulsion transférée au pion.

Aujourd'hui, une nouvelle ère s'ouvre avec la montée en énergie à 12 GeV de l'accélérateur de JLab, qui sera suivie à l'horizon 2025 par la construction d'un collisionneur électron-ion (EIC). L'étendue et la précision des mesures prévues à JLab permettront d'affiner grandement les modèles théoriques. Un pas significatif vers la compréhension du confinement !

Maxime Defurne, Cédric Mezrag

# nucléons



Par Vincent Andrieux, Maxime Defurne, Maxime Levillain, et Cédric Mezrag

visible de l'Univers. Depuis les années 70 et la La théorie moderne de l'interaction forte (la chromodynamique quantique ou QCD) gluons. Elle permet d'interpréter avec succès de nombreux résultats expérimentaux. et les gluons y sont-ils confinés et ne sont pas observés en tant que particules libres? Maxime Defurne et Cédric Mezrag, quatre doctorants du Laboratoire de Structure nucléons et tentent de résoudre ces énigmes.

## Tester la structure en spin du nucleon au CERN

Deux analyses récentes des données de l'expérience Compass au CERN apportent un nouvel éclairage sur la structure en spin du nucléon. Compass dispose d'un faisceau de muons polarisés de haute énergie, unique au monde, et d'une cible solide, polarisée elle aussi. Cela permet de réaliser des mesures d'asymétrie de section efficace selon la polarisation positive ou négative de la cible (ou plus simplement « asymétrie de spin »). L'étude des asymétries dans plusieurs canaux permet de déterminer la contribution du spin des quarks  $\Delta\Sigma$  et du spin des gluons  $\Delta G$ , au spin  $1/2$  du proton.

Alors que des modèles simples prédisaient que la majeure partie du spin du nucléon était portée par les quarks, en 1986 l'expérience EMC au CERN trouvait une valeur de  $\Delta\Sigma$  compatible avec zéro. Ce résultat surprenant a entraîné de nouvelles campagnes de mesure de  $\Delta\Sigma$  et par la suite de  $\Delta G$ . SMC, Compass et d'autres expériences s'accordent maintenant sur une valeur non nulle de  $\Delta\Sigma$ , de l'ordre de 30 %, qui est par ailleurs confirmée par les premières estimations provenant de calculs de QCD sur réseaux. En parallèle, les mesures de  $\Delta G$  effectuées par les expériences auprès du collisionneur de protons polarisés RHIC et par Compass conduisent à une valeur positive de  $\Delta G$ , ce qui indiquerait qu'une fraction du spin est effectivement portée par les gluons.

qui permettent de déterminer la corrélation entre le spin du nucléon et celui de ses constituants fondamentaux, modélisé par la fonction de structure en spin  $g_1$ . Celle-ci est sensible principalement à la contribution du spin des quarks  $\Delta\Sigma$ , mais aussi à celle du gluon  $\Delta G$  au moyen de son évolution selon la cinématique de la réaction de diffusion. Les récentes données acquises par Compass avec un faisceau de muons de 200 GeV, énergie la plus élevée au monde pour un faisceau de ce type, ont permis d'étendre les mesures dans la région cinématique correspondant à une diffusion sur les quarks et gluons de la mer (valeurs de  $x$  plus petit dans la figure 3). L'analyse, à l'aide de QCD, de l'ensemble des données de toutes les expériences, menée par Vincent Andrieux, permet de déterminer que  $\Delta\Sigma$  est compris entre 26 et 36 %. Cette analyse montre également que l'incertitude dominante sur cette mesure est la méconnaissance de  $\Delta G$ , la mesure de  $\Delta\Sigma$  dépendant partiellement de la valeur de  $\Delta G$ .

Par ailleurs, les mesures directes de  $\Delta G$  effectuées par Compass reposaient jusqu'à maintenant sur un modèle théorique ne prenant en compte que le terme dominant des approximations de QCD. Or, de récents développements théoriques permettent maintenant une interprétation des mesures plus précise du point de vue de QCD, pour le cas particulier de la réaction  $\mu p \rightarrow \mu' h X$  dans laquelle un hadron  $h$  est détecté dans l'état final de la diffusion d'un faisceau de muons sur une cible de protons. Cette nouvelle approche permet de comparer, qualitativement pour l'instant, l'asymétrie de spin mesurée avec celle attendue pour différentes hypothèses de  $\Delta G$ . Les premiers résultats (figure 4), obtenus par Maxime Levillain, sont plutôt en faveur d'une valeur positive de  $\Delta G$  dans la région de mesure. Une fois les calculs théoriques achevés, ces résultats pourront être inclus dans les analyses globales de données mondiales au même titre que ceux de RHIC, pour déterminer  $\Delta G$  avec une meilleure précision.

Ainsi, l'origine du spin du nucléon est de mieux en mieux comprise. La future estimation de  $\Delta G$ , qui dépend également des développements théoriques, est maintenant d'autant plus attendue qu'on a mis en évidence sa corrélation avec l'incertitude sur  $\Delta\Sigma$ .

2- Polarisation : degré de corrélation entre le vecteur de spin d'une particule et la direction du faisceau.

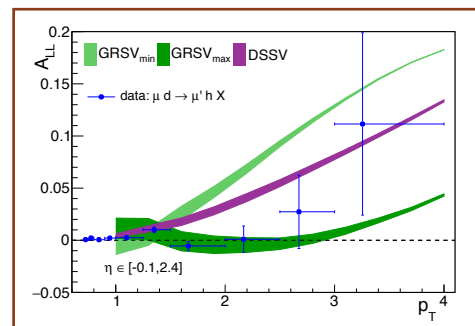
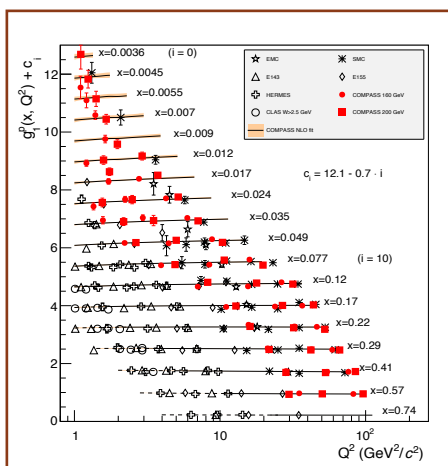


Figure 3 Asymétrie de spin mesurée pour la réaction  $\mu p \rightarrow \mu' h X$ , en fonction de la composante de l'impulsion du hadron  $h$  transverse à la direction du faisceau. Les données de Compass sont comparées à 3 prédictions théoriques correspondant à des hypothèses différentes pour la polarisation des gluons  $\Delta G$  (-0.3 pour GRSVmin, +0.4 pour GRSVmax et la valeur du meilleur ajustement pour DSSV).



Ces résultats sont fondés sur les mesures de diffusion d'un faisceau de leptons de haute énergie sur une cible de protons polarisée ( $\mu p \rightarrow \mu' X$ )

Figure 4 Ensemble des mesures existantes de  $g_1$ , la fonction de structure en spin du proton, en fonction de  $Q^2$  (échelle de l'interaction)

pour différentes valeurs de  $x$  (fraction d'impulsion du nucléon portée par la particule constituante sondée, points décalés en ordonnée). En rouge, les données de Compass. Les courbes noires représentent l'analyse globale QCD basée sur l'ensemble des données.

Vincent Andrieux, Maxime Levillain

# Double Chooz, intégration du détecteur proche

Par Olivier Corpace et Christian Veyssière

Double Chooz a pour objectif la mesure d'un des paramètres de l'oscillation des neutrinos. Le premier détecteur, entré en service en 2010, a fourni la mesure initiale de ce paramètre un an plus tard. Avec la construction du second détecteur, Double Chooz prend tout son sens ; des neutrinos plus nombreux et une erreur de mesure réduite aboutiront à une mesure plus précise des oscillations de neutrinos.



Olivier Corpace, responsable de l'intégration sur site lors du montage des supports d'enceintes en acrylique.

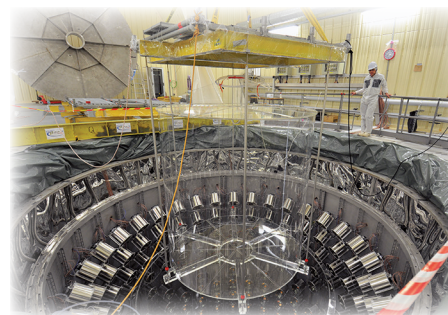
En juin 2013 à Chooz dans les Ardennes, l'ensemble de la collaboration entoure le puits de 8 m creusé au milieu d'un nouveau laboratoire. Chacun mesure alors le travail à fournir pour y monter le second détecteur dont la coordination technique a été confiée à l'Irfu....

Pendant 18 mois, les laboratoires et les entreprises de 7 pays se succéderont sur le site. Chacun

apportera sa pièce du puzzle, que ce soit la cuve en inox de 12 tonnes ou l'un des 450 photomultiplicateurs qui sont les « yeux » du détecteur. Le montage ressemble à celui d'un système embarqué dont l'accessibilité réduite et chaque lot fait l'objet d'une revue d'intégration. L'ennemi du détecteur est la radioactivité, qu'elle

provienne de la poussière de roche ou des matériaux utilisés pour la construction du détecteur. On travaille donc en atmosphère de salle blanche, les outillages ont été nettoyés à leur entrée dans le laboratoire et la radio-pureté des matériaux a été strictement contrôlée.

En septembre 2014 à Chooz, l'ensemble des élus locaux et des directeurs d'instituts se regroupe derrière le ruban tendu à l'entrée du laboratoire. Ils peuvent déjà voir les signaux électroniques qui traduisent les interactions des premiers neutrinos dans la cible du détecteur.



Descente de la cible.

## Va-et-vient

Mai 2014 - Mai 2015

### Tu vas...

Mutations : Nicolas AUGÉ, Olivier BRINGER et Aymeric VAN LAUWE à la DEN, Thierry MORIN à DSM/SAC/UC et Laurent VIGROUX à DSM/DPE.

Démissions : Frédéric DRUILLOLE, Frédéric MASSET, Julien MIGNE et Romain TEYSSIER.

Départs à la retraite : Alain BOUDARD, Gilles DISPAU, Mylène DONNART-BARRAIL, Dominique DURAND, Mario ESTEVES NOVO, Jean-Luc JANNIN, Claude JEANNEY, Patrick LE DORTZ, Francis LUGIEZ, Patrice MICOLON, Pierrick MICOUT, Danielle PHILIP et Bijan SAGHAL.

Décès : Michel BOYER et Jean-Pierre CHIEZE.

### et tu viens.

Mutations internes Irfu : Marie-Cécile AUBERT de l'UST à la DIR, Etienne BERTON de SAC/UCG/SC au SIS/LRI et Alexandre THAUMOUX-CROZAT de l'IPhT à la DIR.

Recrutements : Romain ANDRIEU au SEDI/LIS, Ayoub BOUNAB au SIS/LEI, Florent BOUYJOU au SEDI/LDEF, Damien CHAPON au SEDI/LILAS, Didier CHIRPAZ-CERBAT au SACM/LEDA, Barbara DALENA au SACM/LEDA, Quentin GUIHARD au SIS/LEIGE, Mickael LACROIX au SIS/LCAP, Gabriel PRATT au SAP/LCEG, Sébastien SOMSON au SACM/LEAS, Fabrizio ROSSI au SIS/LCAP et Vadim STEPANOV au SACM/LCSE.

Réintégrations : Pascale DELBOURGO du MESR au SAP, Emmeric DUPONT de l'OCDE au SPH/LEARN, Philippe FERRANDO du MESR au SAP et Anne-Claire GOUZE à la DIR.

**Directeur de la publication :** Philippe Chomaz    **Directeur scientifique :** Vanina Ruhlmann-Kleider    **Secrétariat :** Maryline Besson

**Rédacteur en chef :** Nathalie Besson

**Mise en page :** Christine Marteau    **Impression :** Idées fraîches

**Comité éditorial :** Maryline Besson, Frédéric Déliot, Mylène Donnart-Barrail, Andrea Ferrero, Christian Gouffès, Fabien Jeanneau, Sophie Herhoas-Cavata, Marie-Odile Levallant, Ange Lotodé, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Emmanuel Moulin, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Marie-Delphine Salsac, Angèle Séné, Didier Villanova.

**Crédits photo :** Cern, Google Images, Imag'In Irfu (Alain Porcher),

**Abonnement :** Sophie Durand Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.durand@cea.fr

**Dépôt légal :** Juillet 2015

**ISSN 1268-7855**