

curieux mécanismes

Presque cinquante ans se sont écoulés entre la naissance conceptuelle du boson de Higgs, postulé en 1964 par Brout, Englert et Higgs, et le prix Nobel qui a récompensé les deux théoriciens encore vivants, suite à sa découverte au LHC. De quoi rouler des mécaniques ! En proposant un mécanisme expliquant la brisure de l'interaction électrofaible en deux interactions, ils ont permis de comprendre pourquoi certaines particules ont une masse (p. 2).

Les équipes de l'Irfu sont déjà à pied d'œuvre pour concevoir de nouveaux détecteurs pour le LHC de 2020. Elles « réinventent la roue » en associant d'ingénieux détecteurs à une subtile mécanique (p. 3).

Certains regards se posent encore plus loin, jusqu'en 2050 : Michel Spiro décortique pour nous la stratégie européenne de la physique des particules et ses mécanismes de fonctionnement (p. 4). Où l'on rencontre un collisionneur d'une centaine de kilomètres, qui passerait sous le lac Léman !

Le regard curieux de nos doctorants en cosmologie porte loin, aussi. Trois d'entre eux nous expliquent les curieux mécanismes qui sont – ou que nous croyons être – à l'œuvre dans l'Univers (p. 6).

À l'échelle des nucléons, enfin, Caméra nous montre la mécanique qu'il faut savoir régler pour comprendre en détail les quarks et les gluons qui les constituent (p. 5).

Ces fabuleux mécanismes, toujours mieux maîtrisés ou compris, ne laisseraient-ils aucune place à la rêverie ? Une visite sur le très joli site [explornova360°](http://explornova360.com) (p. 8), heureusement, permet de se rassurer pour longtemps...

Pierre Manil



Boson de Higgs : la masse

La physique du vingtième siècle nous enseigne que les interactions entre particules élémentaires émergent de symétries fondamentales. Certaines de ces symétries ne sont perceptibles qu'à très courte distance. C'est pourquoi les physiciens poursuivent leur quête vers les très hautes énergies, qui permettent de sonder la matière aux plus petites échelles, là où règnent la simplicité, l'élégance et l'unité des lois de la nature.

Le prix Nobel de physique 2013 a été attribué aux théoriciens belge François Englert (81 ans) et britannique Peter Higgs (84 ans), qui ont postulé l'existence du boson éponyme avec le belge Robert Brout, décédé en 2011. À voir sur le site Web de l'Irfu : un micro-trottoir regroupant plusieurs réactions sur le vif à l'annonce de ce prix.

Parmi ces symétries fondamentales, celle qui lie l'électron et le neutrino témoigne de l'origine commune de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible¹. Pourtant, cette symétrie est cachée. En effet, la force électromagnétique, transmise par un boson² de masse nulle (le photon), agit à toutes les échelles tandis que la force faible n'agit que sur des distances plus petites que le centième de la taille du proton. Ceci est dû à la très grande masse des bosons W et Z qui la transmettent : la portée d'une interaction est inversement proportionnelle à la masse des bosons échangés.

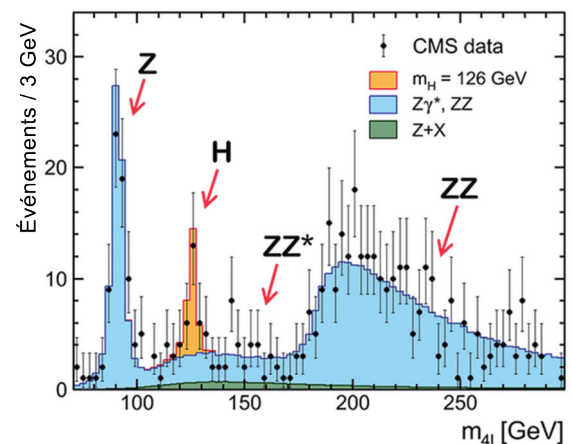
La symétrie entre électron et neutrino est une propriété exacte des équations qui gouvernent les interactions électromagnétique et faible. Mais cette symétrie n'est pas satisfaite par les solutions de ces équations, qui décrivent les particules élémentaires elles-mêmes. Les physiciens ont compris dans les années 1960 qu'une « brisure spontanée de symétrie » permettait de rendre compte de la masse des bosons W et Z tout en préservant

la symétrie des équations, donc leur cohérence mathématique. Dans la théorie électrofaible, cette brisure de symétrie est attribuée au champ de Brout-Englert-Higgs.

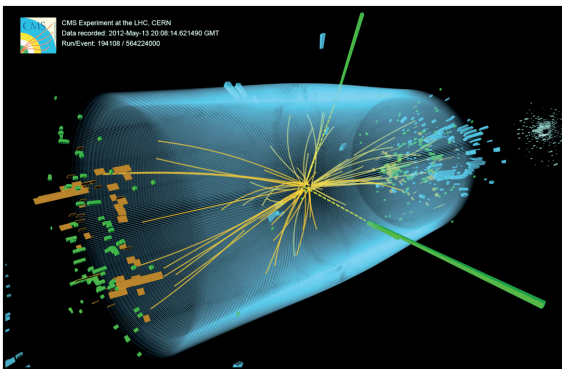
En physique quantique relativiste, les physiciens pensent à la fois en termes de particules et en termes de champs. Les particules associées à un champ en sont les excitations observables, les *quanta*.

Ainsi, tous les électrons de l'Univers (et leurs antiparticules, les positons) résultent du même champ, celui de l'électron qui emplit l'espace-temps. De ce point de vue, le concept de champ est plus fondamental que celui de particule. Dans le vide quantique, même en absence de particule réelle, les champs associés sont présents. La valeur de leur énergie est nulle en moyenne mais, en vertu du principe d'incertitude

de Heisenberg, ils sont le siège de fluctuations d'énergie d'amplitude d'autant plus grande que la distance sondée et le temps d'observation sont petits.



Distribution de la masse reconstituée du système de quatre leptons dans CMS. L'axe des abscisses représente la masse, exprimée en GeV. L'axe des ordonnées représente le nombre d'événements sélectionnés par tranches de 3 GeV. Les points noirs avec barres d'erreur représentent les données de CMS. Les histogrammes sont obtenus par simulation. En vert et bleu, ils représentent les deux sources de bruit de fond. Le pic à la masse de 90 GeV, indiqué par un "Z" est le signal de la désintégration rare du boson Z en quatre leptons. La bosse indiquée par un "ZZ" indique la production de paires de bosons Z. Dans la région "ZZ*", le bruit de fond total a une distribution quasi-uniforme. On y observe un pic significatif, indiqué par un "H": c'est le signal du boson de Higgs. L'histogramme orangé représente la prédiction par simulation de ce signal pour un boson de Higgs de masse 126 GeV, en très bon accord avec les données.



Représentation dans l'espace d'un événement candidat pour la recherche du boson de Higgs, dans le canal de désintégration en deux photons (déTECTEUR CMS). L'enveloppe du calorimètre électromagnétique central de CMS est représentée en bleu. Les traces des particules chargées produites dans la collision (lignes jaunes), reconstruites par ordinateur, sont courbées par le champ magnétique de CMS et s'enroulent autour de l'axe du faisceau (non représenté). Les volumes verts, orangés ou bleus représentent les dépôts d'énergie dans les calorimètres. Leur taille radiale est proportionnelle à l'énergie déposée. Les deux photons sont reconnaissables à leurs dépôts de très haute énergie dans le calorimètre électromagnétique, représentés par les deux longues tiges vertes. Les trajectoires des photons sont figurées par des lignes pointillées jaunes issues du point de collision et pointant vers ces tiges.

Le champ de Brout-Englert-Higgs fonctionne différemment. Contrairement aux champs associés aux particules de matière et de force, il fluctue dans le vide autour d'une valeur non nulle d'énergie. Cette situation résulte d'une transition de phase qu'aurait subie l'Univers primordial un dix-milliardième de seconde après le Big Bang, au cours de laquelle le champ de Brout-Englert-Higgs s'est orienté spontanément dans une direction particulière de l'espace. Parmi l'infinité de solutions possibles, toutes reliées entre elles par la symétrie, la nature en a sélectionné une. Cette brisure spontanée de symétrie a une conséquence importante : elle fournit une masse aux bosons W et Z. Elle a le même effet sur les quarks et les leptons³ : en interagissant avec la densité

masse au champ donneur

Gautier Hamel de Monchenault

d'énergie qui imprègne le vide, une particule élémentaire initialement sans masse acquiert une inertie, donc une masse, proportionnelle à l'intensité d'interaction avec le champ de Brout-Englert-Higgs.

La particule associée au champ de Brout-Englert-Higgs est connue sous le nom de boson de Higgs. La théorie en prédit l'existence sans en préciser la masse. Seule son observation directe peut permettre d'établir la réalité physique du champ à l'origine du phénomène.

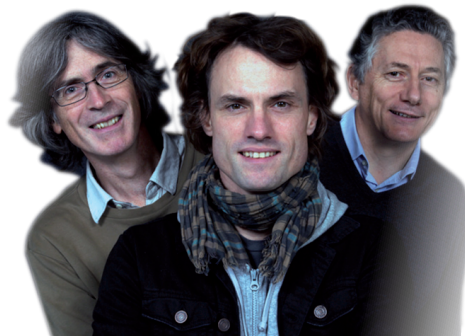
Pendant plusieurs décennies, les physiciens ont recherché en vain le boson de Higgs, notamment auprès du LEP au Cern puis du Tevatron à Fermilab. Enfin, le 4 juillet 2012, les expériences Atlas et CMS auprès du LHC au Cern ont annoncé indépendamment la découverte d'une nouvelle particule confirmée depuis comme étant bien le (ou un) boson de Higgs.

Le processus dominant de production du boson de Higgs dans les collisions proton-proton au LHC fait intervenir virtuellement le quark top, qui est la particule élémentaire la plus massive. Parmi le million de milliards de collisions produites au cœur des expériences Atlas et CMS, seuls quelques centaines de milliers de bosons de Higgs auraient été produites.

À peine apparu, le boson de Higgs se désintègre instantanément. Seule une fraction infime des désintégrations est exploitable expérimentalement. La découverte s'est appuyée sur trois modes de désintégrations où le boson de Higgs se transforme en deux bosons W, en deux bosons Z ou en deux photons. En utilisant les deux derniers canaux, les expériences ont pu mesurer une masse du boson de 126 GeV (environ 134 fois la masse du proton) avec une précision de l'ordre du pour cent. D'autres modes de production et de désintégration sont à l'étude, avec des sensibilités encore insuffisantes pour des mesures précises. Tous les résultats obtenus sont en accord avec les prédictions du modèle standard de la physique des particules.

Cette découverte majeure marque l'entrée de la physique des particules dans une nouvelle ère. L'étude détaillée des propriétés du nouveau boson, pour lesquelles il existe des prédictions théoriques précises, pourrait indiquer la voie d'une physique au-delà du modèle standard. Les physiciens attendent avec impatience d'analyser les futures données du LHC à son énergie nominale à partir de 2015, et réfléchissent déjà aux moyens d'améliorer encore les performances de cette machine...

Gautier Hamel de Monchenault est physicien au SPP, membre de l'expérience CMS au Cern.



Une idée lumineuse

Par Philippe Schune, Fabien Jeanneau et Patrick Ponsot

Un an après l'annonce de la découverte du boson de Higgs, la communauté des physiciens pense déjà à améliorer les performances des expériences du LHC... Avec en ligne de mire le LHC à haute luminosité : « HL-LHC ». Le projet des « nouvelles petites roues » (*New Small Wheels*) est l'une des améliorations indispensables au bon fonctionnement d'Atlas après 2018.

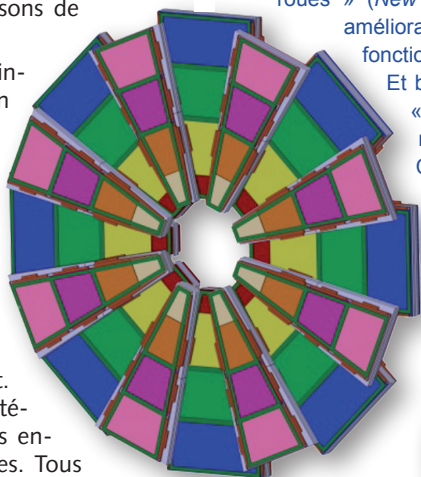
Et bien sûr, quand il s'agit d'Atlas, « petites » prend un sens tout relatif !

Constituées de détecteurs gazeux Micromegas (inventés à l'Irfu) et de chambres multi-fils, ces deux « petites » roues couvriront la moitié de l'acceptance⁴ finale du spectromètre à muons, pour une surface de Micromegas de 1200 m² : la moitié du parking du bâtiment 141 !

La proposition soutenue par l'Irfu et ses partenaires a été retenue face à deux projets concurrents. De gros progrès ont été faits depuis un an dans la compréhension des Micromegas, dont les caractéristiques techniques sont poussées vers de nouvelles limites. Les roues seront constituées de 8 couches de 80 m² de ces détecteurs, parallèles à 10 micromètres près. Leurs pistes seront positionnées à mieux que 50 micromètres !

Après avoir prouvé la tenue des Micromegas au niveau de rayonnement attendu au HL-LHC, l'équipe de Saclay s'est engagée dans le positionnement, l'alignement et les études thermomécaniques de ces détecteurs.

Au-delà des défis de conception, il faut préparer la production des détecteurs qui se fera à Saclay, en collaboration avec un industriel français.



Vue d'ensemble d'une « nouvelle petite roue » Atlas-NSW, destinée à l'upgrade en luminosité d'Atlas en 2018.

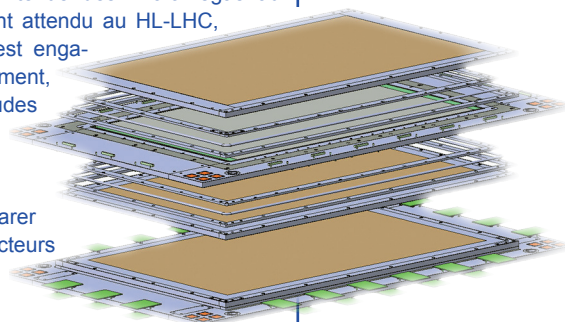
1- Du point de vue de la symétrie qui régit l'interaction faible, l'électron et le neutrino sont deux aspects d'une même particule : le lepton "gauche". Or, bien sûr, l'électron et le neutrino sont deux particules distinctes.

2- Boson : particule échangée dans les interactions entre les fermions (particules de matière).

3- Lepton : électron, muon, tau, neutrino ou leurs antiparticules.

4- Acceptance : couverture spatiale du détecteur.

Architecture multicouche d'un module de détection Atlas-NSW.



Au-delà du modèle standard

Le 30 mai 2013, moins d'un an après l'annonce de la découverte du boson de Higgs, la feuille de route stratégique pour l'avenir de la physique des particules a été approuvée à Bruxelles et présentée aux ministres européens de la Recherche. Michel Spiro, directeur de recherche au CEA et président du Conseil du Cern entre 2010 et 2012, commente pour *Scintillations* cette étape importante pour la discipline.

Scintillations : Michel Spiro, pouvez-vous nous expliquer le rôle du Cern dans cette stratégie européenne pour la physique des particules ?

Michel Spiro : Cette stratégie a été élaborée sous l'autorité du Conseil du Cern qui réunit les représentants de ses états membres. Mais c'est avant tout un travail collectif qui a associé les chercheurs de tous les pays, leurs laboratoires d'origine, les agences qui les financent et même les états non membres du Cern.

S : Le modèle de financement de la physique des particules en Europe repose sur un engagement à long terme des états membres qui financent le Cern et de leurs laboratoires nationaux. Avec les incertitudes économiques actuelles, l'Europe va-t-elle pouvoir préserver ce modèle ?

MS : C'est ce que j'espère, car ce modèle collaboratif mondialisé (la « coopétition »), basé sur une stratégie à long terme, est porté par l'histoire et le savoir-faire de l'Europe. C'est un plus pour les pays membres, que ce soit pour la science, pour l'innovation ou pour la paix.

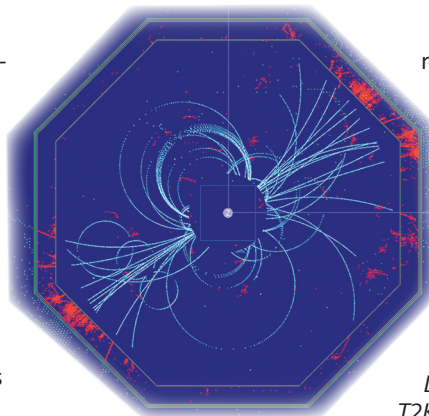
S : Quelles sont les activités prioritaires qui ont été retenues dans cette feuille de route ?

MS : Il y en a plusieurs :

- garder le modèle du Cern pour coordonner la stratégie européenne en physique des particules ;
- exploiter pleinement le LHC jusqu'en 2030 environ de manière à dépasser les performances prévues initialement, à étudier en détail les propriétés du boson de Brout, Englert et Higgs et à trouver des signes d'une possible nouvelle physique au-delà du modèle standard ;
- travailler sur la machine qui succédera au LHC. Elle pourrait être construite au Cern. On pense notamment à un collisionneur de protons de 100 TeV dans un anneau de 100 km de circonférence qui passerait sous le lac Léman et qui pourrait abriter dans un premier temps un collisionneur électron-positon pour étudier encore plus en détail le modèle standard et ses limites (voir figure).

S : Le Japon semble vouloir se positionner pour accueillir un collisionneur linéaire. Que deviendrait le Cern dans cette hypothèse ?

MS : Le Japon est depuis longtemps un très grand partenaire pour le Cern. Il a apporté des contributions décisives au LHC. Si le Japon se lance dans une nouvelle machine, le Cern



rendra certainement la pareille au Japon en y contribuant.

Le collisionneur planifié au Japon serait un collisionneur électron-positon. Il ne remettrait pas en cause le très grand collisionneur de protons de 100 km de circonférence évoqué plus haut.

S : La physique des neutrinos vient de confirmer l'oscillation des neutrinos des trois familles. L'Irfu contribue aux deux expériences T2K (Japon) et Double Chooz (France).

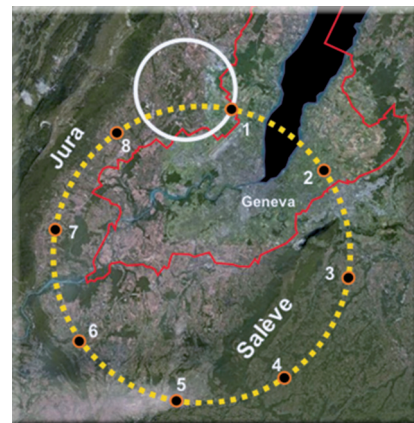
L'Europe continuera-t-elle de jouer un rôle important dans les futures expériences de physique des neutrinos malgré la concurrence japonaise et américaine ?

MS : L'Europe a une longue tradition et un savoir-faire unique dans le domaine de la physique des neutrinos. L'Europe continuera d'explorer cette physique qui ouvre peut-être déjà des perspectives au-delà du modèle standard. Mais l'Europe ne peut pas tout faire sur son sol et sera sans doute amenée à participer aussi à des projets phares dans ce domaine dans d'autres régions du monde.

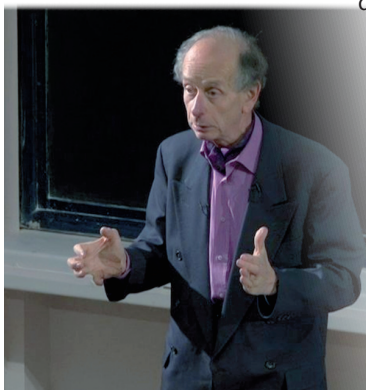
S : Après trois ans seulement de fonctionnement du LHC à la moitié de son énergie nominale, le boson de Higgs a été découvert... sans preuve à ce jour d'une nouvelle physique. Pensez-vous que cette nouvelle physique sera révélée au LHC ?

MS : Une nouvelle physique existe certainement. On en a des signes avec les neutrinos, la matière noire, l'absence d'antimatière observable dans l'Univers, l'énergie noire qui accélère l'expansion de l'Univers. Sera-t-elle révélée au LHC ou dans les prochaines machines qui lui succéderont ? C'est la glorieuse incertitude de la recherche, qui ne peut être planifiée. Peut-être découvrira-t-on des phénomènes totalement inattendus.

Propos recueillis par
Sophie Kerhoas-Cavata.



Projet d'implantation d'un collisionneur circulaire de 80 km de circonférence autour du Cern, HE-LHC (en pointillés). Le LHC actuel apparaît en blanc.



Michel Spiro.

Coup de projecteur sur Caméra

Etienne Burtin

Le détecteur Caméra, construit par l'Irfu, a été mis en place au Cern il y a un an. Il a pour mission de mesurer des réactions exclusives¹ auprès de l'expérience Compass, permettant ainsi d'explorer la distribution spatiale des constituants des nucléons.

Les nucléons - protons et neutrons - sont les constituants de la matière ordinaire. Ils sont eux-mêmes composés de quarks et de gluons en interaction perpétuelle. Aujourd'hui, la tomographie du nucléon (c'est-à-dire la mesure de la distribution spatiale des constituants de ce nucléon) est rendue possible par l'étude de la production exclusive de photons, encore appelée « diffusion Compton virtuelle » (DVCS). Le programme Caméra, proposé par une équipe de l'Irfu, est l'un des objectifs majeurs de la collaboration Compass au Cern. C'est aussi un axe important des recherches au JLab ainsi qu'auprès des futurs collisionneurs électron-proton. Lors de la réaction DVCS, un faisceau polarisé de muons de 160 GeV est diffusé par les protons contenus dans une cible d'hydrogène liquide de 2,5 mètres de longueur. En sortie, on retrouve uniquement trois particules : le muon diffusé accompagné d'un photon de haute énergie (tous deux émis vers l'avant) et le proton cible qui recule suivant un angle élevé, avec une impulsion inférieure à 1 GeV. La détection du muon diffusé et du photon est déjà possible dans l'expérience Compass.

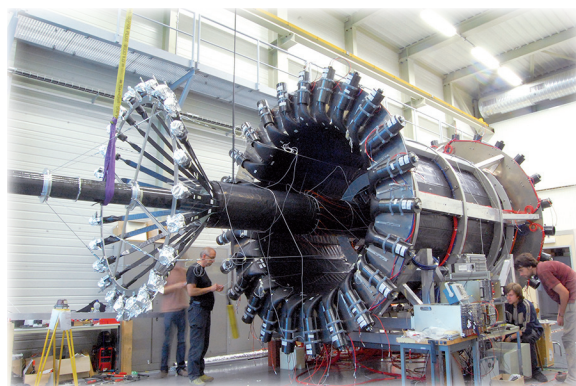
Mais c'est l'existence du proton de recul qui permet de signer sans ambiguïté cette réaction

« exclusive ». Le projet Caméra (*Compass Apparatus for Measuring Exclusive ReActions*) a consisté à réaliser et à mettre en œuvre un détecteur de protons de recul. Il a été réalisé en collaboration avec les Universités de Fribourg-en-Brigau, Mayence et Varsovie.

Caméra identifie les protons et mesure leur quantité de mouvement en mesurant leur temps de vol entre deux couronnes de 24 scintillateurs plastiques associés à des photomultiplicateurs. Les éléments de la couronne externe mesurent 3,6 m de long. Leur épaisseur de 50 mm permet d'arrêter une grande partie des protons et de les identifier jusqu'à une quantité de mouvement proche du GeV. Les éléments de la couronne interne mesurent 2,75 m de long. Leur faible épaisseur (4 mm) permet d'abaisser le seuil de détection des protons à 270 MeV. La chaîne de photodétection (scintillateurs, guides de lumière, photomultiplicateurs) a été mise au point par l'Irfu.

L'enjeu de la conception mécanique était de parvenir à maintenir la couronne interne dans la structure tout en assurant le montage. Pas facile, vu la souplesse et la fragilité de ces scintillateurs longs et fins. D'autant qu'il fallait minimiser la quantité de matière servant à supporter la couronne interne pour éviter d'augmenter le seuil de détection des protons. La solution retenue consiste à s'appuyer dans un premier temps sur un tube de carbone inséré dans la structure. Un système de haubans et d'anneaux rigides est alors mis en place pour maintenir la couronne interne, après quoi le tube de carbone peut être enlevé. La structure complète pèse un peu plus de 5 tonnes et les déformations maximales sont de l'ordre de 3 mm.

Après 18 mois de conception et de réalisation, Caméra a été installé en temps et en heure. Des mesures préliminaires ont ensuite été réalisées pendant un mois pour consolider le protocole expérimental. La prise de données pour la physique, dont l'analyse est en cours, s'étendra au-delà de 2014. Après une longue phase de



Didier Pierrepont en plein bricolage sur Caméra.

préparation, Caméra nous livrera bientôt ses plus belles images. « Science, on tourne ! Moteur ! »

Etienne Burtin est physicien au SPHn.

Caméra, c'est aussi des monteurs !

Interview de Didier Pierrepont (Sédi - Antenne Cern)

« Sur Caméra, le montage final devait se faire au Cern et il était naturel que l'antenne de l'Irfu prenne un rôle important. Dans ce genre de projet, il faut souvent adapter la conception mécanique à la réalité du terrain. D'un point de vue personnel, j'ai apprécié pleinement de suivre toute la vie du projet. Les phases critiques, quand toute l'équipe est sur le pont pour trouver des solutions, sont tendues mais apportent leur part de satisfaction lorsque le détecteur est sous faisceau et qu'il joue pleinement son rôle...! »



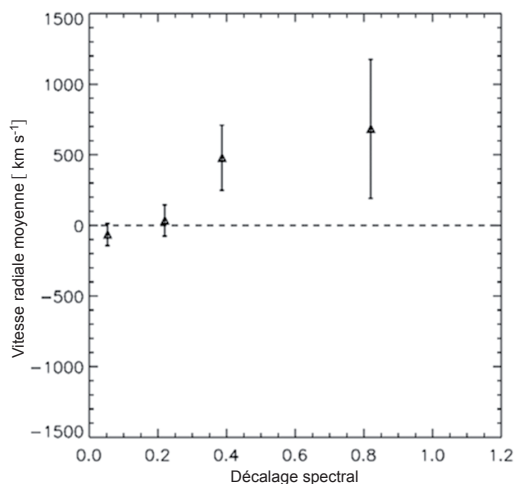
1- Une réaction est dite exclusive lorsque toutes les particules de l'état final sont détectées.

Trois doctorants face à

La cosmologie étudie la structure, l'origine et l'évolution de l'Univers dans son ensemble. Elle rassemble plusieurs domaines d'étude passionnants qui partagent des motivations communes : valider les grands principes cosmologiques comme celui de l'homogénéité et de l'isotropie de l'Univers, mais aussi étudier son contenu en énergie et en matière. Sarah, Timothée et Jérémy, trois doctorants du SPP, racontent leur travail et leur aventure scientifique face à ces grandes questions.

L'effet Sunyaev-Zel'dovich

Les amas de galaxies sont les plus grandes structures de l'Univers. En plus des galaxies qui les composent, ils contiennent aussi une grande quantité de gaz : le « gaz intra-amas ».



Vitesse radiale moyenne des amas de galaxies mesurée par le satellite Planck pour différents décalages spectraux. La valeur mesurée est compatible avec une valeur nulle, ce qui est en accord avec le principe cosmologique.

1- Décalage spectral : décalage des raies d'un spectre dû au mouvement relatif entre la source du spectre et l'observateur terrestre. Lorsqu'un amas s'éloigne de nous par exemple, nous percevons une lumière de longueur d'onde plus grande (donc plus « rouge ») que celle émise.

2- Modèle Λ CDM : modèle cosmologique postulant un Univers homogène et isotrope, contenant de la matière noire et de l'énergie noire. L'énergie noire est modélisée par une simple constante Λ rajoutée aux équations de la gravitation.

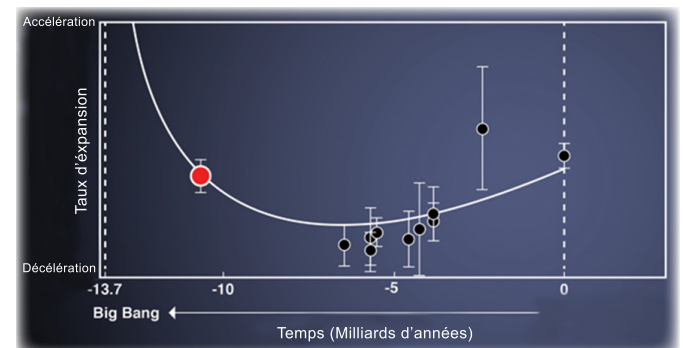
cosmologique, la diffusion crée un décalage spectral¹ semblable à un effet Doppler et le fond diffus cosmologique apparaît localement plus bleu ou plus rouge selon le sens de déplacement de l'amas. C'est l'effet SZ cinétique, qui agit proportionnellement à la vitesse radiale de l'amas. Le satellite Planck, lancé en mai 2009, fournit des cartes de la totalité du ciel dans neuf gammes de longueurs d'onde différentes. Conçu avec une participation de l'Irfu, le détecteur a mesuré avec une précision sans précédent les anisotropies du fond diffus cosmologique. Mais il permet aussi d'étudier en détail l'effet SZ...

Mesurer la vitesse des amas de galaxies permet de mieux connaître l'évolution des structures (amas, galaxies...), mais également de tester le principe cosmologique, qui stipule que l'Univers est homogène et isotrope, donc que la vitesse propre des amas doit en moyenne être nulle. Nous avons pu réaliser pour la première fois cette mesure, aboutissant à une valeur compatible avec zéro. C'est un premier pas encourageant dans un domaine d'étude nouveau pour la cosmologie. **S.P.**

Les oscillations acoustiques de baryons

L'accélération de l'expansion de l'Univers a été mise en évidence en 1998. Pour l'expliquer, on a postulé l'existence dans l'Univers d'un « fluide » de pression négative. La nature profonde de ce « fluide », baptisé énergie noire, reste l'un des mystères de la cosmologie. Dans le cadre de la relativité générale, on peut le décrire grâce à une unique constante rajoutée aux équations : la constante cosmologique (modèle Λ CDM²). Mais peut-être nous faudra-t-il un jour revoir totalement notre compréhension de la gravitation... et les équations qui la gouvernent.

Chaque modèle fait ses propres prédictions qui doivent être confrontées aux résultats expérimentaux. Pour résoudre l'énigme de l'énergie noire, nous devons être capables de mesurer de façon très précise le taux



Taux d'expansion de l'Univers en fonction de son âge (en milliards d'années). Plus le taux est élevé, plus l'Univers se dilate rapidement. Les mesures les plus anciennes sont à droite sur le graphique. La mesure récente de BOSS (point rouge) sonde la structure de l'Univers à une époque où son expansion était encore en train de ralentir doucement.

d'expansion de l'Univers. Une méthode consiste à utiliser une distance de référence, dite standard : si cette distance caractéristique est connue et mesurable à différentes époques, la variation de sa taille apparente au cours du temps permet de déduire le taux d'expansion. Fort heureusement, nous avons aujourd'hui à notre disposition une référence standard : 300 000 ans après le Big Bang, la distance moyenne entre les grumeaux de matière, graines de futures grandes structures de l'Univers, s'est figée à 150 kpc (soit 490 000 années-lumière).

L'observation de cette distance caractéristique peut se faire en sondant la densité de matière sur une très grande



aux énigmes de l'Univers

Timothee Delubac, Sarah Puisieux et Jérémy Neveu

portion d'Univers. L'expérience BOSS³, dans le cadre du programme SDSS⁴, mesure les spectres de 160 000 quasars. Ces spectres nous renseignent sur les quasars eux-mêmes, mais également sur le milieu intergalactique qu'a traversé la lumière avant de nous parvenir. Il est ainsi possible de déceler la présence de nuages d'hydrogène le long de la ligne de visée de chaque quasar. Grâce à l'analyse de 50 000 de ces spectres, nous avons pu étudier la distribution des nuages d'hydrogène et y retrouver l'échelle caractéristique de 150 kpc, dilatée comme attendu du fait de l'expansion. Cette détection a permis la première mesure du taux d'expansion de l'Univers tel qu'il était il y a plus de 10 milliards d'années, quand il n'était âgé que de 3 milliards d'années. On a ainsi pu vérifier expérimentalement l'existence d'une décélération de l'expansion de l'Univers précédant l'accélération observée aujourd'hui. **T.D.**

structures de l'Univers mesurés entre autres par BOSS. Pour toutes ces mesures, des prédictions ont été calculées pour différents jeux de paramètres du galiléon. Elles ont été confrontées aux valeurs mesurées. C'est la première contrainte sur ce modèle qui utilise de façon rigoureuse les mesures données par les expériences de cosmologie les plus récentes. Nous avons montré que le modèle du galiléon est tout à fait compatible avec les données expérimentales. Nous en avons déduit les valeurs de ses paramètres, confirmant qu'il est un excellent candidat pour expliquer le mystère de l'énergie noire. Mais l'affaire est loin d'être classée... **J.N.**

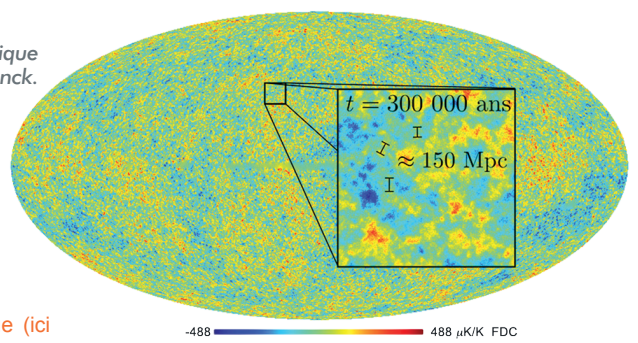
- 3- Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : relevé mené auprès du télescope de l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique (Etats-Unis).
- 4- Sloan Digital Sky Survey.
- 5- SuperNova Legacy Survey.
- 6- Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.

Le galiléon

Le modèle du galiléon a été introduit en 2008 pour tenter d'expliquer la nature de l'énergie noire. Il s'agit d'un modèle de gravité modifiée (un de ceux qui demandent de modifier les équations existantes, contrairement au modèle Λ CDM). Grâce à un mécanisme astucieux, il s'accorde parfaitement avec toutes les mesures expérimentales de la gravitation dans notre Univers local, tout en proposant une explication à l'accélération de l'expansion de l'Univers. En plus des paramètres habituels tels que les quantités de matière et de rayonnement dans l'Univers, le modèle du galiléon introduit cinq nouveaux paramètres que nous avons cherché à déterminer. Aujourd'hui, de nombreuses mesures cosmologiques sont faites pour tester ce modèle.

Au SPP, afin de vérifier la compatibilité de ce modèle avec l'histoire réelle de notre Univers, nous avons utilisé les 472 supernovæ décrites par SNLS⁵ (qui proviennent de différents relevés), la mesure du fond diffus cosmologique réalisée par le satellite WMAP⁶ (prédécesseur de Planck), les oscillations baryoniques acoustiques et le taux de croissance des grandes

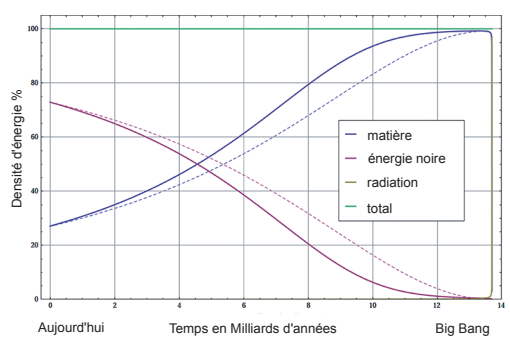
Le fond diffus cosmologique vu par Planck.



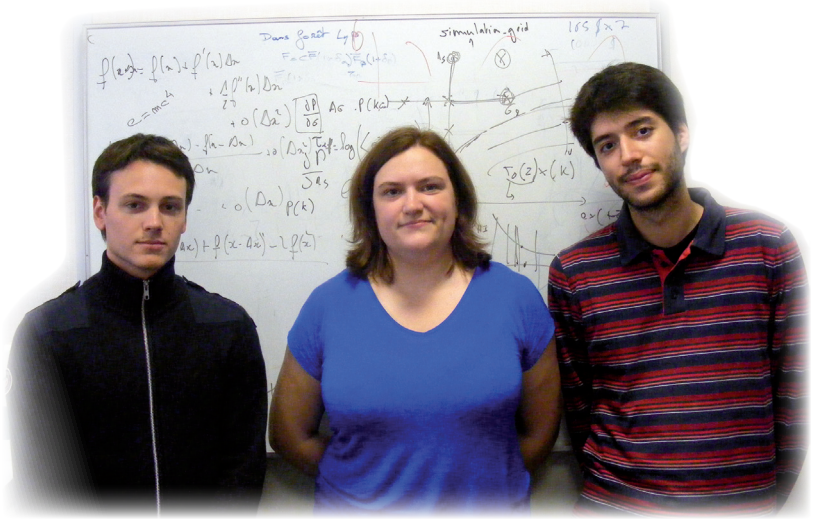
Le fond diffus cosmologique (ici vu par Planck) est la première lumière émise par l'Univers dans son histoire, lorsqu'il n'était âgé que de 300 000 ans. À cet instant, connu sous le nom de « recombinaison », les électrons et les protons du plasma primordial se sont assemblés pour former un gaz électriquement neutre en libérant les photons jusqu'alors piégés. Ces photons encore visibles aujourd'hui, refroidis par la dilatation de l'espace, nous permettent de remonter à la température en chaque point de l'Univers à cet instant de son histoire : on y voit des points légèrement plus chauds (en rouge) et des points légèrement plus froids (en bleu), témoins de petites différences de densité de matière en moyenne espacées de 150 kpc. On peut y voir l'origine des structures de l'Univers tel que nous le connaissons. **''**

La mesure du taux d'expansion de l'Univers il y a plus de 10 milliards d'années a été récompensée par le prix «La Recherche» 2013 en astrophysique, remis à quatre chercheurs dont T. Delubac et J. Rich du SPP.

Timothee Delubac et Sarah Puisieux (à gauche) ont soutenu leur thèse en septembre. Jérémy Neveu (à droite) est en troisième année de thèse au SPP.



Évolution au cours du temps des densités d'énergie dans les modèles Λ CDM (tirets) et Galiléon (traits pleins) : les deux sont très similaires.

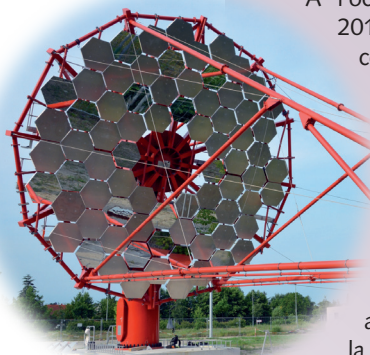




Brèves

CTA se concrétise

À l'occasion du colloque AtmoHEAD en juin 2013, une cinquantaine de physiciens des cinq continents sont venus partager leur expérience et discuter entre autres du projet CTA. CTA sera le nouvel observatoire consacré à l'astronomie au sol des rayons gamma de très haute énergie. Il comprendra plusieurs dizaines de télescopes Tcherenkov de tailles différentes. Un prototype de télescope Tcherenkov de la classe des 12 mètres a été inauguré en mai 2013 au sud de Berlin. Il est destiné à en valider la conception mécanique et à servir de banc d'essai grandeur nature pour les miroirs de CTA. Les services de l'Irfu ont contribué au dessin des bras soutenant la caméra de 2 tonnes située à 16 m des miroirs.



Livraison de l'injecteur Ifmif sur le site de Rokkasho au Japon

Après la livraison de la source d'ions au mois de mars 2013, les 32 derniers colis de l'injecteur Ifmif (voir photo du bandeau ci-dessus) sont arrivés en mai sur le site de Rokkasho au Japon, après un long périple maritime d'environ 12 000 km. La phase de remontage va commencer très prochainement. Des équipes de l'Irfu se sont rendues sur place dès novembre et décembre pour apporter leur expertise.

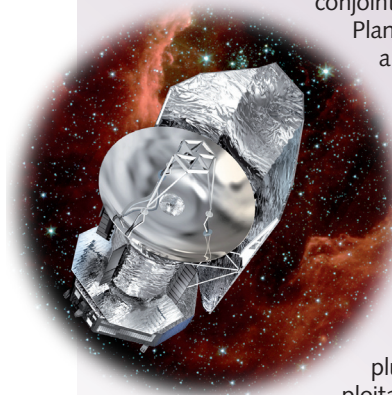
Zoom

L'exposition Zoom2013, organisée par le labex P2IO, s'est tenue du 2 au 16 novembre 2013 à Orsay. Cette exposition a été réalisée par Relais d'science (le centre de culture scientifique et technique de Basse-Normandie, situé à Caen). Elle met en scène de nombreuses images et vidéos de l'Irfu. Pour accueillir les 800 élèves de la 3^e à la Terminale (23 classes de 15 établissements) et les 500 visiteurs du grand public durant 1000 heures d'animation, l'Irfu s'était mobilisé : 4 doctorants sur les 9 de l'équipe et 13 seniors sur les 20 présents ont mis toute leur énergie à faire découvrir la physique des deux infinis à un public ravi.



La fin d'Herschel

L'observatoire spatial Herschel a cessé ses opérations scientifiques le 29 avril 2013, lorsqu'il est arrivé au bout de ses réserves de fluide cryogénique indispensable à son fonctionnement (il s'agit d'hélium liquide). Lancé conjointement avec le satellite Planck en mai 2009, Herschel a exploré l'Univers dans le domaine de l'infrarouge lointain et submillimétrique à travers 600 programmes scientifiques, depuis l'étude des galaxies lointaines jusqu'aux objets du système solaire. Il aura fonctionné presque 4 ans, soit 6 mois de plus que prévu. L'exploitation des données scientifiques est loin d'être achevée. Un premier bilan post-mission a eu lieu à Noordwijk aux Pays-Bas en octobre 2013.



Site explornova360° : une co-production CEA - université de Nantes

Partez à la découverte du système solaire et de l'Univers grâce au site explornova360.com ! À partir de notre base lunaire, partez sur Mars à bord du rover Curiosity ou vers les galaxies à travers le miroir de l'observatoire spatial Herschel...



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

Rédacteur en chef : Pierre Manil

Mise en page : Christine Marteau Impression : Idées fraîches

Comité éditorial : Maryline Besson, Nathalie Besson, Étienne Burtin, Frédéric Déliot, Mylène Donnat-Barrail, Antoine Drouart, Pascal Gallais, Christian Gouiffès, Fabien Jeanneau, François-Paul Juster, Sophie Kerhoas-Covata, Ange Lotode, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Emmanuel Moulin, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Marie-Delphine Salsac, Angèle Sené, Didier Vilanova.

Crédits photo : Agence Franck Castel, Google Images, Imag'Irfu (Alain Porcher).

Abonnement : Sophie Durand Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.durand@cea.fr - Dépôt légal : décembre 2013 - ISSN 1268-7855