

Voir de plus en plus grand pour voir de plus en plus fin

La connaissance progresse par l'observation et la compréhension. On comprend mieux quand on voit mieux grâce à des matériels de plus en plus performants. Pour alimenter cette spirale du succès, il faut prévoir les prochaines générations d'accélérateurs, qui grâce à des énergies de plus en plus grandes permettront de sonder la matière à des échelles de plus en plus petites. De passionnantes et peut-être surprenantes découvertes se profilent. En attendant, les interrogations fondamentales sont légion : les quarks eux-mêmes ont-ils une structure ? D'où vient la masse des particules ? Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu ? De quoi est faite cette matière « sombre » qui représente plus du neuvième de la masse de l'univers ? Le « modèle standard », la théorie des particules la plus perfectionnée à ce jour, permet des prédictions à l'impressionnante exactitude mais il est tributaire de 27 paramètres introduits pour les besoins de la cause. Une nouvelle théorie plus universelle se profile-t-elle, sans tous ces paramètres, avec juste les constantes universelles ? Dans ce numéro, Roy Aleksan (SPP) pose ces questions de façon très claire et dresse un panorama des accélérateurs de demain, qui soulèveront peut-être un ou plusieurs coins du voile.

Les grands accélérateurs de demain

Quel est le futur de la physique des particules auprès des accélérateurs et quels seront les accélérateurs de demain ? La communauté internationale des physiciens des particules a tenté de répondre à ces questions par l'intermédiaire de divers comités scientifiques, tel l'ECFA (European committee for future accelerators), en septembre 2001. Son rapport dégage les principaux axes de recherche pour les prochaines décennies ainsi que les actions nécessaires pour les mener à bien.

La route vers les très hautes énergies

Les accélérateurs de particules confèrent une vitesse proche de celle de la lumière aux constituants fondamentaux de la matière avant de les faire s'entrechoquer, recréant ainsi les conditions extrêmes proches de celles des tout premiers instants de l'Univers. Ce sont des outils essentiels pour comprendre la structure des particules et leurs interactions d'où découlent les lois physiques décrivant l'évolution de l'Univers au cours du Big bang. Ainsi, le Large Hadron Collider (LHC) en construction au Cern, le grand laboratoire européen de physique des particules, à Genève, sera l'accélérateur le plus puissant jamais réalisé et devrait permettre des avancées considérables sur ces points.

Pourquoi penser déjà au futur en pleine construction du LHC, dont le démarrage est prévu en 2007, sans, donc, en connaître les résultats ? C'est qu'aujourd'hui la construction de tels équipements prend plus de 15 ans entre les premières études et la première prise de données. La construction du LHC étant maintenant bien avancée, il est

temps de penser au futur et d'essayer de le planifier.

Plusieurs thèmes sont au cœur de la physique des particules. Citons l'origine de la masse des particules, l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers et l'unification des interactions fondamentales. Or, malgré les immenses acquis des décennies précédentes, d'importantes zones d'ombre subsistent.

La découverte d'une nouvelle particule, le « boson de Higgs » (voir *ScintillationS* n° 48) pourrait soulever un coin du voile. Cet objet est un élément clé du « modèle standard », la théorie qui décrit la force électromagnétique responsable de la structure atomique, la force faible à l'origine de la radioactivité bêta et la force forte confinant les quarks dans le proton et le neutron. Le modèle standard explique entre autres pourquoi le photon, vecteur des interactions électromagnétiques, est sans masse alors que les W et Z, transmettant les interactions faibles, sont environ 100 fois plus massifs que le proton.



Cavité accélératrice supraconductrice multicellule de type Tesla.

Cependant, bien que jamais encore mise en défaut par l'expérimentation, cette théorie reste incomplète. Elle n'apporte de réponse satisfaisante à aucune des trois questions soulevées plus haut. Certes, elle explique la masse des particules de matière, mais par le biais d'un mécanisme laborieux et elle a besoin d'introduire autant de paramètres que de particules pour en prévoir la masse. Elle explique l'asymétrie matière-antimatière par certains effets de

l'interaction faible mais ces effets sont trop ténus pour expliquer l'absence d'antimatière dans notre univers. Enfin, le modèle standard échoue à unifier les interactions électrofaible et forte, et ignore la gravité.

Tout donne à supposer que le modèle standard est une approximation, valable aux énergies accessibles aux machines actuelles, d'une théorie plus globale. Diverses théories possibles ont ainsi été élaborées faisant appel à de nouvelles forces, de nouvelles particules et d'éventuelles dimensions supplémentaires de l'espace-temps. Il fait peu de doute que les découvertes issues du LHC apporteront de nombreux éléments guidant les physiciens vers des théories de plus en plus exactes. Mais il faudra des accélérateurs plus puissants pour compléter ces résultats et explorer des phénomènes entrevus au LHC mais hors de sa portée.

Trois types de nouveaux accélérateurs sont envisagés : des collisionneurs linéaires électron-positon, des collisionneurs circulaires muon-antimuon avec pour première étape la production d'une source intense de neutrinos grâce à un seul des faisceaux, et des collisionneurs circulaires proton-proton, des super LHC d'une énergie jusqu'à 15 fois supérieure.

Les collisionneurs linéaires électron-positon

Les électrons et positons sont des objets non composites menant à des collisions dont les conditions initiales sont bien mieux définies que celles impliquant des protons, particules complexes. Ils permettent ainsi de faire des mesures

rayonnement synchrotron, émission de photons très utile dans des projets comme Soleil, mais d'autant plus pénalisante que l'énergie des particules est élevée et que la masse des particules est petite. La perte d'énergie est donc particulièrement sévère dans les anneaux à électrons. Aussi, les futurs collisionneurs e^+e^- seront linéaires. Plusieurs projets d'accélérateurs linéaires sont à l'étude aux États-Unis, au Japon et en Europe. Deux techniques différentes sont étudiées en Europe, l'une utilisant des matériaux supraconducteurs (projet Tesla¹ de Desy, à Hambourg) l'autre utilisant des structures conventionnelles, dites « chaudes » perfectionnées à l'extrême.



Tesla Test Facility (T. T. F.), maquette de Tesla.

Tous les projets ont un but commun : atteindre au moins une énergie de collision de 500 GeV et si possible le double. Une telle gamme devrait permettre d'étudier en détail la plupart des nouvelles particules et phénomènes qu'aura débusqués le LHC, de découvrir d'autres particules ayant échappé au LHC et de fournir des indications sur l'existence d'une nouvelle physique au delà de 1 000 GeV. Un tel

technique que celui de l'évaluation de son coût estimé à 3,2 milliards d'euros. Il a été proposé à l'approbation du Conseil scientifique du gouvernement allemand, dont les conclusions ont souligné toutes les promesses du projet et son grand degré d'avancement. Notons que ce projet propose de produire aussi, grâce au faisceau d'électrons, une source de lumière synchrotron un milliard de fois plus intense que ce qui existe aujourd'hui avec une évolution temporelle très précise et une longueur d'onde permettant de sonder la matière à l'échelle atomique.

Sur la route vers des énergies encore plus élevées le Cern étudie une toute nouvelle technique d'accélération utilisant un faisceau primaire intense dont l'énergie est transférée à un faisceau secondaire pouvant être accéléré jusqu'à plusieurs milliers de GeV. Il s'agit du projet Clic. Cette voie prometteuse fait l'objet d'une R&D intense et soutenue.

Les collisionneurs circulaires muon-antimuon

Autre possibilité de parvenir à des énergies très élevées : accélérer des muons et leurs antiparticules, les antimuons. Les muons sont des sortes « d'électrons lourds » aux propriétés similaires mais environ 200 fois plus massifs. En outre, ils ne vivent que deux millièmes de seconde, ce qui complique les choses à l'extrême. Mais monsieur Einstein et sa Relativité viennent au secours des physiciens des hautes énergies : plus une particule se déplace vite, plus elle paraît vivre longtemps à l'observateur (voir *ScintillationS* n° 49), qui dispose alors de plus de temps pour l'accélérer² ! Mais d'autres difficultés restent à surmonter. Il faut entre autres produire les muons (et antimuons) en très grande quantité et les « focaliser » (les concentrer) en un pinceau extrêmement fin de moins d'un micromètre de diamètre. La réalisation d'un collisionneur muon-antimuon exige un intense effort de R&D pendant plusieurs années pour valider le concept et proposer un projet concret. Ces efforts ont déjà commencé dans le monde entier.

... et auparavant, les usines de neutrinos

Cependant une première étape très intéressante et probablement moins difficile pourrait être réalisée plus tôt : pro-

La moisson du LEP

Le collisionneur circulaire LEP au CERN, arrêté en 2000 après onze ans de fonctionnement, a permis de faire une étude détaillée, précise et systématique du modèle standard. Outre la détermination du nombre de neutrinos légers : trois, fixant par là même le nombre de quarks et de leptons, soit douze briques élémentaires de la matière, le LEP a permis de vérifier la cohérence de la théorie et de prédire

entre autres la masse du quark le plus lourd, le « top », bien que l'énergie disponible au LEP soit trop faible pour le matérialiser. Prédiction confirmée ultérieurement au collisionneur proton-antiproton de Fermilab près de Chicago où le top a été découvert. Ce sont encore les mesures faites au LEP qui ont établi que la masse du boson de Higgs devrait être comprise entre 115 et 250 fois celle du proton.

de précision complétant remarquablement celles réalisées auprès d'accélérateurs proton-proton ou électron-proton.

L'envers de la médaille, c'est que dans un accélérateur circulaire, les électrons perdent une partie de leur énergie par

accélérateur serait un prolongement idéal au LHC et offrirait aux physiciens des particules les moyens de faire progresser substantiellement les connaissances dans leur discipline. Le projet Tesla est actuellement le plus avancé tant sur le plan

(1) Voir *ScintillationS* n° 34 au sujet de T. T. F. (Tesla Test Facility), maquette de Tesla.

(2) Un muon de 10 TeV vit deux dixièmes de secondes pour le physicien dans son labo.

duire des faisceaux intenses de neutrinos, en utilisant le fait que les muons se désintègrent en un électron, un antineutrino électronique et un neutrino muonique (voir le tableau des particules dans *ScintillationS* n° 47). On étudie également la production d'un faisceau de neutrinos plus modeste, mais obtenu plus classiquement à partir

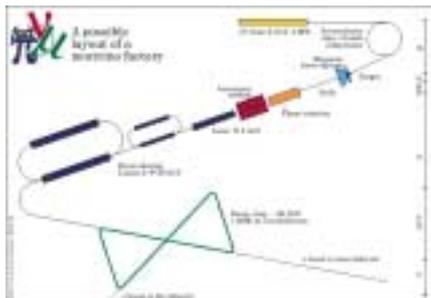


Schéma de principe d'une usine à neutrinos.

d'un accélérateur de protons de très haute intensité, comme le projet SPL du Cern. Depuis la découverte récente faite au Japon selon laquelle les neutrinos sont des objets massifs, à l'instar des autres leptons et des quarks, de tels faisceaux apparaissent comme des outils uniques pour étudier ces particules en détail. Ils permettraient entre autres d'approfondir nos connaissances sur la violation de la symétrie CP (voir n° 48), origine possible de l'asymétrie matière antimatière dans l'univers. Nos connaissances de ce phénomène dans le domaine des quarks ont fait un grand bond en avant grâce aux récents résultats des détecteurs BaBar, Belle, KTeV et NA48 (voir n° 7, 13, 22 et 46) : la violation de CP serait une propriété fondamentale des interactions faibles comme le prédit le modèle standard. Cependant, ses effets actuellement mesurés seraient insuffisants pour expliquer un univers où la matière domine. Aussi envisage-t-on très sérieusement l'hypothèse selon laquelle ce serait la violation de CP dans le domaine des leptons qui aurait conduit à notre univers. Or des faisceaux de neutrinos permettraient précisément d'étudier la violation de CP avec des leptons. Un tel enjeu mérite amplement des efforts soutenus et c'est dans ce but qu'une coordination mondiale se met en place, fortement encouragée par l'ECFA.

Les collisionneurs circulaires proton-proton de très haute énergie

L'écueil principal pour atteindre une énergie bien supérieure à celle du LHC est le gigantisme de l'accélérateur : Une pre-

mière ébauche faite au Fermilab indique qu'il faudrait un anneau de plus de 200 kilomètres de circonférence avec des aimants atteignant des champs de plus de 12 teslas pour provoquer des collisions à une énergie de 200 000 GeV. Un tel projet avec les techniques d'aujourd'hui aurait un coût pharaonique et ne peut être envisagé qu'à très long terme. Un premier pas serait d'augmenter l'intensité et l'énergie des faisceaux du LHC lui-même. Mais ceci ne pourra s'envisager qu'après le démarrage du LHC et selon les découvertes qui y seront faites. Il n'en demeure pas moins que le développement d'aimants à haut champ à prix raisonnable est un axe majeur de recherche dont l'intérêt va au-delà de la seule physique des particules.

Après avoir évalué l'intérêt scientifique de ces différentes options, le groupe de travail de l'ECFA a fortement recommandé de construire le plus vite possible un collisionneur linéaire de 500 GeV et de poursuivre la R&D au niveau mondial sur les collisionneurs proton-proton et les collisionneurs muon-antimuon avec, pour premier objectif de réaliser des faisceaux de neutrinos. Des recommandations identiques ont été émises par des groupes de travail aux États-Unis et au Japon, dégageant ainsi les objectifs à long terme de la physique des particules.

Cette convergence au niveau planétaire souligne le dynamisme et l'ambition de cette discipline. Elle propose des perspectives exaltantes aux générations futures de physiciens de l'infiniment petit dans leur quête de la théorie ultime unifiant les forces, expliquant la masse des particules et engendrant notre univers où domine la matière. Cependant pour atteindre ces objectifs, la recherche et développement dans le domaine des accélérateurs est indispensable et devra être entreprise de façon coordonnée au niveau européen, voire mondial. L'enjeu dépasse la seule physique des particules et vise aussi à résoudre des problèmes de société cruciaux comme la lutte contre le cancer par « hadronthérapie » ; mais aussi à faire progresser les connaissances en biologie moléculaire et en physique de la matière condensée grâce aux sources de lumière ou de neutrons de nouvelle génération.

La question n'est donc plus de savoir s'il y aura d'autres accélérateurs mais plutôt comment nous allons nous organiser pour voir nos rêves devenir réalité.

Roy Aleksan (SPP)

Les hoquets X d'un microquasar, accélérateur cosmique

En 1992, une équipe animée par Félix Mirabel (SAP) découvre « 1E1740.7-2942 » (*ScintillationS* n°3). Cet astre double comporte un trou noir en train de manger une étoile-compagnon. Irrésistiblement attirée par l'énorme gravitation du trou noir, la substance de l'étoile s'agglutine sur un disque entourant le trou, le *disque d'accrétion*, et y tourbillonne de plus en plus vite avant d'être happée. Mais il arrive qu'une

partie de la matière échappe à la plongée fatale, repoussée par l'intense champ magnétique de l'ogre cosmique. Elle est alors éjectée de part et d'autre du disque, à des vitesses proches de celle de la lumière. Ces monstrueux hoquets se reproduisent de temps à autre.

Par ce comportement, ces astres doubles rappellent les quasars, ces énormes trous noirs hyper-boulimiques et hyper-rayon-

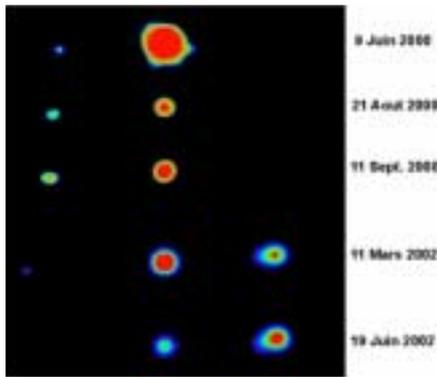
nants au centre de nombreuses galaxies ; mais ils sont des millions de fois moins massifs qu'un quasar et leurs hoquets se succèdent à une cadence tellement plus rapide, qu'il est possible d'en observer les phases successives. Mirabel a proposé de les appeler *microquasars*. Celui qu'il a découvert avec son équipe en 1992 a été le premier, suivi par bien d'autres, parmi lesquels GRS 1915+105, cracheur de nodules faussement

crus « supraluminiques » par illusion d'optique (*ScintillationS* n° 21, voir aussi n° 50).

En septembre 1998, le satellite RXTE de la Nasa découvre à 17 000 années-lumière de la Terre, le microquasar XTE J1550-564, une dizaine de fois plus massif que le Soleil. Peu de temps après, on observe ce microquasar crache d'abondants jets de matière que l'on peut suivre à la trace quelques jours pendant lesquels on peut capter leurs ondes radio. C'est assez pour voir que ces nodules vont presque aussi vite que la lumière, puis on perd leur trace.

Et voici qu'ils resurgissent pendant l'été 2000, puis à nouveau lors du printemps 2002, deux ou trois années-lumière plus loin (*cliché*). Mais ils vont en gros trois (en 2000) à six fois (en 2002) moins vite et outre des ondes radio, ils émettent des rayons X, des millions de fois plus énergiques. Du jamais vu !

L'équipe mixte du SAP et de l'université Denis Diderot (Paris 7), animée par le jeune chercheur-enseignant Stéphane Corbel, qui a observé ces émissions grâce



Migration des nodules éjectés par le microquasar révélés par leurs rayons X. Le microquasar est au centre, les nodules sont à gauche (année 2000) puis à droite (année 2002).

au satellite Chandra, de la Nasa, tient là le tout beau scoop¹. C'est la première fois que l'on détecte des rayons X dans le sillage de tels jets de matière. Or, ces X ne peuvent avoir été émis que par des particules extrêmement énergétiques, par exemple des électrons dont l'énergie est de l'ordre de dix téraélectron-volts (10 000 milliards d'eV). Ayant peaufiné ses observations, l'équipe Corbel établit le scénario

suisant : jaillis du microquasar XTE J1550-564, les nodules quasi luminiques s'enfoncent dans le cosmos. Soudain ils se heurtent à un nuage interstellaire dense. La violence du choc propulse des myriades de particules à des énergies inimaginables. Corbel et ses complices viennent d'observer, fait assez rare pour être signalé, un accélérateur de rayons cosmiques.

Qu'ils soient quasars, microquasars ou OANIs (objets accélérateurs non identifiés), de tels accélérateurs pullulent vraisemblablement dans l'univers. Mais un quasar est un monstre dont les mouvements se déroulent sur des millions d'années. Son évolution est inobservable à l'échelle humaine. La découverte de microquasars cracheurs, dont les cadences sont perceptibles à l'homme, est une fabuleuse aubaine, qui permet de percer un peu du mystère de l'accélération des rayons cosmiques.

Joël Martin (*ScintillationS*)

Sources : communiqués de presse CEA et Université de Paris 7. Contact et source : Stéphane Corbel (01 69 08 45 62)

Brèves... Brèves... Brèves... Brèves...

Le krypton décrypté Quand les formes révèlent l'intimité

Les noyaux atomiques sont à géométrie variable. Un apport d'énergie peut les « exciter² », changer l'agencement de leurs protons et neutrons et faire passer ces noyaux d'une forme à l'autre. La forme est ainsi une vitrine de ce qui se passe à l'intérieur. Décrypter les métamorphoses des noyaux, c'est mieux comprendre leur structure intime, donc mieux connaître la matière nucléaire.

En cinquante ans d'étude des noyaux qui nous environnent, l'homme a appris beaucoup sur cette matière dans son état « stable ». Mais les noyaux stables ne représentent qu'un dixième des noyaux. Les neuf autres dixièmes sont des noyaux instables, radioactifs, donc éphémères. Ils ont disparu de notre planète, mais l'homme a appris à en forger dans ces modernes creusets d'alchimistes que sont les accélérateurs. Il peut alors scruter ces noyaux exotiques, comme il sait le faire

sur les noyaux ordinaires, et en particulier étudier leurs changements de forme en choisissant les noyaux qui se prêtent le mieux à ce genre d'étude. Ainsi en est-il des isotopes légers du krypton³. Ces noyaux ont une forme très changeante, tantôt soucoupe volante et tantôt ballon de rugby et le moindre souffle d'énergie les fait passer d'une forme à l'autre. Ce sont donc des outils privilégiés pour pénétrer dans la *Terra incognita* de la matière nucléaire exotique.

Cette avancée vient de s'amorcer en juin 2002, au Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil), à Caen, où, pour la première fois un faisceau radioactif de krypton a été fabriqué et accéléré grâce au Système de production d'ions radioactifs en ligne (Spiral, voir *ScintillationS* n° 53). Ces noyaux de krypton ont bombardé une cible. Beaucoup s'en sont retrouvés excités et parfois même ont changé de forme.

Puis, grâce au détecteur Exogam, une collaboration européenne avec un noyau de dapnieuses et de dapnieux a mesuré le nombre de photons « de désexcitation » par noyau incident, émis lors du retour à la forme initiale. Malgré la radioactivité ambiante, les résultats sont si nets qu'on espère bientôt déterminer la forme de chaque état excité de ces noyaux de krypton très exotiques.

Contact :

Emmanuelle Bouchez (01 69 08 75 55)
et Wolfram Korten (01 69 08 42 72)



Le détecteur de rayonnements gamma Exogam

(1) La nouvelle a eu les honneurs de la revue *Science* du 4 octobre 2002.

(2) Chaque atome d'un tube luminescent reçoit de l'énergie quand on l'allume. Une partie de cette énergie permet à l'un de ses électrons de sauter jusqu'à une orbite plus éloignée du noyau. L'atome est alors dans un état excité. Puis l'électron retombe très vite sur son orbite habituelle en émettant un photon lumineux. De même, un noyau peut absorber de l'énergie et se retrouver excité. Ses nucléons peuvent changer de niveau d'énergie (on parle aussi de couches, l'équivalent nucléaire des orbites atomiques des électrons), ce qui bouleverse l'agencement du noyau et peut le faire changer de forme. Puis le noyau se désexcite en émettant un photon gamma (voir *ScintillationS* n° 41). Il se retrouve alors dans son état fondamental.

La transmutation moins toxique que prévu ? Le bismuth des cibles de spallation serait moins « poloniumogène »

La nocivité des déchets nucléaires vient en grande partie de leur longévité. Modernes alchimistes, les physiciens cherchent à transmuter des noyaux radioactifs à vie longue en noyaux radioactifs à vie courte, puis en noyaux stables, non radioactifs. Une voie prometteuse : bombarder les noyaux dont on veut abrégé l'existence avec des neutrons, ce qui transforme chacun de ces noyaux en un autre, à vie plus courte, ou même en un noyau stable. (voir *ScintillationS* n° 39).

Mais certains de ces noyaux transmutés sont très dangereux. Malgré l'extrême sûreté des enceintes où on les confine, il vaut mieux qu'il s'en crée le moins possible.

Exemple : de futurs systèmes de transmutation comportent des blocs de bismuth et de plomb que l'on bombarde avec des protons d'environ un milliard d'électron-

volts d'énergie. Après toute une cascade de réactions nucléaires, appelée *spallation* (voir *ScintillationS* n° 22 et 39), jaillit de ces blocs un geyser de neutrons que l'on envoie sur les noyaux à transmuter. Or, un noyau de ^{209}Bi qui capture un neutron se transforme en ^{210}Bi , obtenu sous deux formes. Mais une seule des deux, l'état fondamental, produit du polonium-210 (^{210}Po , voir le schéma). Cet élément hautement toxique est très volatil. Il est donc particulièrement dangereux.

On croyait jusqu'à présent que deux tiers des noyaux de ^{210}Bi produits l'étaient dans l'état fondamental générateur de polonium. Or, une équipe du SPHN vient de mesurer, auprès du réacteur à haut flux de neutrons de l'Institut Laue Langevin (ILL), à Grenoble, qu'en réalité seulement la moitié des noyaux de

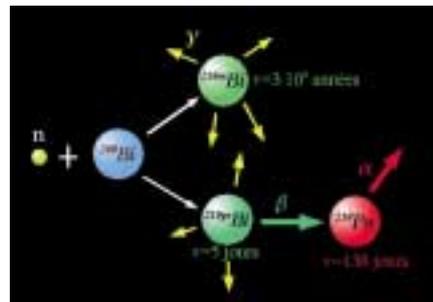


Schéma de principe de la réaction de capture d'un neutron par un noyau de ^{209}Bi , qui forge du ^{210}Bi . Ce noyau est obtenu dans deux états différents : l'état fondamental ($^{210}\text{gsBi}$) (« gs » : initiales de « ground state », l'anglais de : « état fondamental », voir la note n° 2, page 4) et l'état dit isomérique (^{210}mBi). Seul l'état fondamental (en bas, sur le schéma) conduit à la formation du ^{210}Po .

bismuth produits était « poloniumogène ».

La sécurité s'en trouve évidemment améliorée.

Contacts :

Alain Letourneau (01 69 08 73 52)

et Frédéric Marie (01 69 08 24 50)

Le LHC se magnétise

Le LHC, futur grand collisionneur de hadrons du Cern, gigantesque anneau de 27 kilomètres, s'équipe peu à peu en aimants de courbure⁴ et de focalisation (voir *ScintillationS* n° 17, 18, 31, 46).

Afin que les faisceaux restent filiformes et ne divergent pas comme un banal jet d'eau, on les fait passer tout au long de l'anneau dans de gros électroaimants à quatre pôles, les *quadripôles*. Ce sont de véritables lentilles magnétiques dont le champ ramène sur la trajectoire centrale les particules qui ont tendance à s'en écarter et ce, d'autant plus fortement que l'écart est grand (voir *ScintillationS* n° 18).

Dans ce but, l'aimant est bâti de telle sorte que son champ magnétique est nul en son centre et de plus en plus élevé à mesure qu'on s'en écarte. Le taux de variation de ce champ, du centre vers la périphérie, est appelé *gradient de champ*.

Pour guider et focaliser les faisceaux de 7 téraélectron-volts (sept mille milliards d'eV) du LHC, il faut des valeurs extrêmement élevées de champ et de gradient, qu'on ne peut obtenir qu'avec des courants électriques gigantesques. Seule la supraconductivité (voir *ScintillationS* n° 3 et 17) permet d'atteindre, sans consommation

électrique prohibitive ni aimants de taille pharaonique, les performances maximales requises :

- courant électrique de 11 870 ampères
- gradient de champ : 223 teslas par mètre, ce qui permet d'atteindre le champ maximum requis de 8,33 teslas (presque deux cent mille fois le champ magnétique à la surface de la Terre) à moins de 27 cm de la trajectoire centrale. Les quadripôles restent donc d'un diamètre très raisonnable.

Les quadripôles baigneront tous (il y en aura plusieurs centaines sur les 27 km du LHC) dans un bain d'hélium refroidi à $-271,3^\circ\text{C}$ (1,8 K), ce qui nécessite une énorme usine cryogénique. Avec l'IN2P3 et le Service des basses températures du centre CEA de Grenoble, le Dapnia est l'un des acteurs majeurs de la conception et de la réalisation de ces quadripôles et de l'usine à froid.

Grâce à la diligence et au savoir-faire de ces équipes, le premier quadripôle LHC de série a été refroidi et testé au Cern en juillet 2002. Poussé dans ses ultimes retranchements, le vaillant aimant a *quenché* (quitté son état supraconducteur) à 12 631 ampères, puis, au deuxième essai, à 12 808 ampères, soit respectivement 761 et 938

ampères de plus que son intensité nominale. Cette marge est un gage de sécurité car le retour au régime « chaud » d'un gros aimant supraconducteur s'accompagne d'un énorme dégagement de chaleur. Littéralement, l'aimant « pète les plombs », accident majeur dans un appareillage opérationnel (voir *ScintillationS* n° 23).

Performant et sûr, ce premier quadripôle de série est bon pour son service au LHC : ramener dans le droit chemin (même si c'est une ligne courbe que leur tracent les dipôles) les particules qui font trajectoire buissonnière.

Contact :

Fabrice Simon
(01 69 08 33 28)



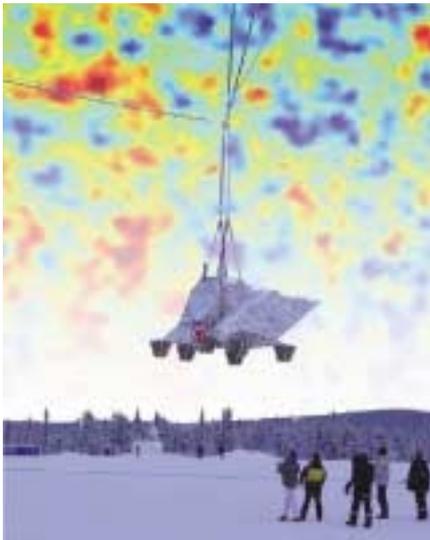
Le premier quadripôle « LHC » de série prêt à être expédié au Cern.

(3) Comme l'hélium, l'argon, le néon et le xénon, le krypton est un des gaz « rares » de l'air. Son noyau possède 36 protons et un nombre de neutrons variable selon les isotopes (des noyaux sont isotopes lorsqu'ils possèdent le même nombre Z de protons et un nombre N de neutrons différents). On trouve sur Terre six isotopes stables du krypton à 42, 44, 46, 47, 48 (le plus abondant) et 50 neutrons. Mais l'homme est capable de forger des noyaux de krypton ayant un nombre plus petit de neutrons, égal ou presque égal à leur nombre de protons, 36. Ce sont les isotopes légers du krypton.

(4) Dans un accélérateur annulaire, les particules en épousent la courbure grâce à des aimants à deux pôles. Répartis tout au long de l'anneau, ces dipôles imposent aux particules une trajectoire (en gros) circulaire. Plus élevée est l'énergie des particules, plus le champ magnétique doit être intense.

Archeops : le retour

Le numéro 54 de *ScintillationS* s'est fait l'écho du début d'Archeops, une expérience originale destinée à cartographier le cosmos à l'aide d'un appareillage emmené au dessus de la stratosphère par un ballon-sonde. On s'affranchit ainsi du rayonnement de l'atmosphère.



Lancement d'Archeops. Le ciel est figuré comme le « voit » le télescope à bolomètres.

Essentielle pour obtenir des informations précises sur l'évolution de l'Univers : densité, taux d'expansion, âge, etc. cette mesure du rayonnement fossile a été réalisée au moyen d'un télescope doté de bolomètres, détecteurs très sensibles permettant des mesures à des températures proches du zéro absolu (0,1 kelvin).

Conçue et menée à bien par une équipe internationale dont font partie des physiciens du Dapnia, l'expérience Archeops vient de communiquer les mesures les plus précises à ce jour du rayonnement fossile émis par l'Univers, peu de temps après le Big Bang. Ces mesures ont été prises lors du vol assuré le 7 février 2002 par le Centre national d'études spatiales (Cnes), depuis la base de Kiruna, en Suède. Elles confirment que l'univers est plat (il n'est pas replié sur lui-même) et apportent des précisions sur son contenu en matière ordinaire, en parfait accord avec la théorie du Big Bang. C'est un test prometteur du matériel qui sera installé à bord du futur satellite Planck de l'Agence spatiale européenne (ESA), dont le lancement est prévu

en 2007. On en attend des mesures 100 fois plus précises que celle d'Archeops.

Le rayonnement fossile a été émis environ 300 000 ans après le Big Bang. A cette époque, l'Univers était constitué d'un gaz chaud (environ 3 000 kelvins) et homogène. La lumière émise par ce gaz (à une température proche de celle de la surface du Soleil) était donc une lumière visible avec une longueur d'onde voisine du micron. Par suite de l'expansion de l'Univers, cette lumière a vu sa longueur d'onde augmenter jusqu'à être aujourd'hui proche du millimètre. Le fond du ciel apparaît donc comme le rayonnement d'ondes radio d'un « corps noir » à une température voisine de 3 kelvins.

Integral est sur orbite

Le satellite de l'Agence Spatiale Européenne Integral (INTERNational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) a été lancé avec succès le jeudi 17 octobre 2002 à 6h 41, heure française, par une fusée russe Proton depuis Baïkonour au Kazakhstan.



Moins de deux heures après, les panneaux solaires étaient déployés et le satellite placé sur une orbite très excentrique. Après avoir décrit 5 orbites en quelques deux semaines, le satellite tournera sur sa trajectoire définitive, entre 9 000 et 153 000 km de la Terre (près de la moitié de la distance Terre-Lune pour l'apogée, point le plus éloigné). Ce délai de quinze jours sera mis à profit pour une série de vérifications, entre autres sur les quatre instruments d'Integral, dont Ibis et Spi, auxquels les services du Dapnia ont très activement participé (voir *ScintillationS* n° 13, 31, 41 et 52). Huit jours après le lancement, Ibis avait déjà détecté ses premiers photons gamma. L'une de ses caméras, PICsIT (PIXellated CsI Telescope), a enregistré de magnifiques

traces de particules chargées (*cliché de droite, voir aussi n° 45 et 52*) et la première image d'un des modules de son autre caméra Isgri montre qu'elle fonctionne très bien. Le spectromètre SPI vient quant à lui d'enregistrer avec succès ses premiers spectres de bruit de fond. Les opérations de mise en route progressive des différents instruments constituant l'observatoire Integral se poursuivent de manière très satisfaisante.

Les images commentées de ces premières lumières sont intégralement visibles sur le nouveau site :

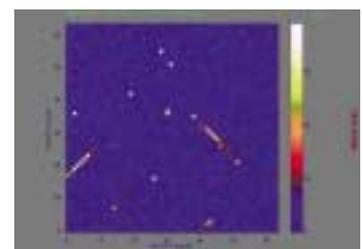
<http://www-dapnia.cea.fr/Sap/SiteIntegral/>

Contacts SAp :

Jean-Marc Bonnet-Bidaud (01 69 08 92 59),

Christian Gouiffès (01 69 08 44 23)

et François Lebrun (01 69 08 35 69)



Plumes du Daphnia

Roland Lehoucq, du SAp, est un vulgarisateur né. Longtemps chroniqueur à la revue Pour la Science, il a obtenu en 2000 le Prix de communication du Daphnia en compagnie d'Alain Milsztajn, du SPP (*ScintillationS* n° 49). Il tient la forme, puisqu'il vient de publier, chez Flammarion, un joli fascicule :

L'Univers a-t-il une forme ?

Bonne question, que se posèrent sans doute d'anciens navigateurs terrifiés à l'idée de dépasser le bord du disque terrestre et de tomber dans l'abîme du néant. On sait pourtant depuis l'Antiquité que la terre est ronde. Mais c'est difficile de bien connaître la forme d'une énorme entité dont on fait partie. L'Univers en est une, c'est même la plus énorme que l'on connaisse à cette heure. Les choses se compliquent avec les histoires d'espace replié sur lui-même et autres joyeusetés einsteiniennes. Une fourmi cantonnée sur une chambre à air ne sait pas que son univers est fini puisqu'elle peut marcher indéfiniment sans le quitter car il n'a pas de bords. Nous, les fourmis humaines, sommes dans ce cas. Mais notre « chambre à air » universelle, bien que faite surtout de vide, contient, « Dieu » merci, des grumeaux galactiques. Une fourmi intelligente capable de compter des points blancs sur son pneu et d'évaluer l'espace entre chacun pourrait « détecter » la forme de son uni-

vers. Les astrophysiciens n'ont pas d'autre but, qui se livrent de longue date à un travail de fourmi pour observer le « fond diffus cosmologique » (voir « Archeops : le retour », page 6) et dresser le catalogue des galaxies, amas de galaxies, pépinières d'étoiles et autres chandelles cosmiques. Notre Univers, que nous voyons infini, est peut-être plus petit...

Roland Lehoucq nous narre cette quête d'une plume compétente et alerte. Il s'adresse au néophyte comme au spécialiste, et complète sa saga savamment pédagogique d'un glossaire, que l'ignare qui signe ces lignes aurait préféré parfois plus explicite. Mais ledit ignare s'est régalé et engage vivement ses lecteurs à en faire autant. Bravo, Roland, et raconte nous vite la suite !

Joël Martin (*ScintillationS*)

Peut-on voyager dans le temps ?

Par Gabriel Chardin (*SPP*)

Peut-on remonter dans le passé donner sa bouillie à son grand-père ou faire un petit saut dans le futur afin de gagner à coup sûr au loto ? Les auteurs de science-fiction répondent massivement « Oui ! ». Les scientifiques sont évidemment plus circonspects. Dans ce joli petit livre paru en octobre 2002 aux éditions du Pommier (collection « Les petites pommes du savoir »), Gabriel Chardin, déjà auteur en 1996 de *L'antimatière* chez Flammarion (collection « Dominos »), examine le problème de la

flèche du temps. Il le scrute sous l'éclairage du fantomatique monde miroir des antiparticules, où les « antidroitiers » sont gauchers et les charges électriques ont le signe opposé. Et si le temps de l'antimatière s'écoulait aussi dans le sens opposé¹ ? Des théories existent, qui supputent l'existence de « portes » entre les deux mondes, ou plutôt des goulets appelés « trous de vers ». Élémentaire, mon cher H. G. Wells² : vous trouvez un trou de ver, le franchissez comme une passerelle d'autoroute et, roulez jeunesse, vous rebroussez chemin et repartez sur votre petit nuage d'antimatière dans l'autre sens... du temps. Un autre trou de ver, et le tour est joué, vous voici par exemple au dix-huitième siècle dans notre monde avec de la matière bien de chez nous. Le hic, indique Gabriel Chardin, c'est que ça vous coûterait une dépense infinie d'énergie et que de toutes façons votre machine s'autodétruirait. Et vous avec, sans doute. La nature se défendrait comme un organisme contre un corps étranger... Alors c'est fichu pour plonger en 1740 écouter Bach jouer de l'orgue à Leipzig, ou faire du gringue à la Pompadour ? Pas sûr. Gabriel ne ferme pas la porte, ou plutôt le trou de ver. Des théoriciens tentent de découvrir des fissures dans le miroir. Laissons-leur le temps...

Ce n'est pas nécessaire avec ce fascicule que l'on parcourt d'une traite. On ne sent pas le temps passer. Bravo, Gabriel, et rendez-vous chez Cléopâtre dans un lointain anti-avenir !

Joël Martin (*ScintillationS*)

Plumes (d'amis) du Daphnia

Nous avons lu avec vif plaisir les bouquins de deux physiciens, l'un nucléaire, l'autre des particules, parus dans la même collection « Bulles de sciences » chez EDP-Sciences.

Les neutrinos vont-ils au paradis ?

Par François Vannucci

Quand le polar rencontre la physique des neutrinos... Le professeur H. s'est suicidé. Pour comprendre son geste, son fidèle second va mener l'enquête, retracer le parcours de ce professeur que peut-être la chasse au neutrino a rendu fou. La réalité

est bien pire. Les neutrinos ont déclenché un vrai délire métaphysique, qui nous vaut une description à l'humour ravageur de personnages caricaturaux, méticuleusement observés dans un style vif et percutant. Des encarts indépendants de l'intrigue présentent la physique des neutrinos à ceux qui veulent en savoir plus. François Vannucci, professeur à l'Université Paris VII, est bien connu des chasseurs de neutrinos du Daphnia. Il nous révèle ici ses talents de chasseur d'énigmes. Un excellent polar. Bravo François, on en redemande !

Yves Sacquin (*SPP*)

Des séquoias dans les étoiles

Par Philippe Chomaz

Quand la physique vient aux enfants... Pauline révise. Son petit frère Arthur lit par dessus son épaule. Tous ces dessins, ces photos, on dirait de la science-fiction ! C'est de la science tout court, tout simplement racontée avec les mots qui captivent l'enfant. La tartine du petit déj³, la bague de maman, maman elle-même, tout ça c'est des atomes cent millions de fois plus petits qu'une fourmi, et des noyaux encore dix mille fois plus petits que les atomes... Mais d'où viennent-ils ? Avec la famille

(1) En 2000, au Cern, l'expérience « CP Lear » a étudié la transformation de la particule dite *kaon neutre* en son antiparticule, l'*antikaon neutre*, ainsi que la transformation inverse. Les chercheurs ont mesuré une infime différence dans la cadence des deux transformations. Il y aurait donc une minime mais réelle différence de comportement vis à vis du temps entre la matière et l'antimatière (voir *ScintillationS* n° 48).

(2) Herbert George Wells (1866-1946), écrivain britannique, auteur entre autres de *L'Homme invisible*, de *La Guerre des mondes* et de *La machine à explorer le temps*.

Faroni, Philippe Chomaz nous fait remonter jusqu'à la nuit des temps, quand le grand chaudron cosmique forgeait de minuscules corpuscules de plus en plus complexes qui donneront les astres, les planètes, les êtres vivants. Comme celles des séquoias, nos racines plongent dans les étoiles. Physicien à Ganil, et l'un des initiateurs des Bars des sciences, Philippe Chomaz est un grand de la vulgarisation.

Joël Martin (SPhN)

Les enquêtes de Marie-Odile Monchicourt (Platypus Press)

La communauté scientifique connaît et apprécie les chroniques de Marie-Odile Monchicourt à la radio. Ces textes courts, clairs, précis et bien documentés ont donné naissance à un nouveau concept dans l'édition : des fascicules de 50 pages, pas chers, faciles à lire, où l'auteur mène l'enquête, avec un spécialiste reconnu de la question, pour répondre à une interrogation scientifique d'actualité. Visant un très large public, la collection affiche déjà des titres alléchants : *Faut-il avoir peur des virus ? Que faire des déchets nucléaires ? Le génome séquencé ?*, *Avis de Tempête*, etc.

ScintillationS souhaite longue vie et abondante diffusion à cette nouvelle collection.

Yves Sacquin (SPP et conseiller scientifique de la collection)

Le gluon d'honneur

Il est attribué haut la main à l'extrait suivant du livre de Juan Luis Arsuaga : Le collier de Néandertal, paru chez Odile Jacob et traduit de l'espagnol par Sara Vassalo :

« Nous avons dans nos os du carbone du type C 12 et aussi du type C 13 (en moindre quantité) appelé carbone lourd. La différence entre les deux est que le noyau du carbone lourd a treize neurones (sic!) et celui du carbone léger, douze »

Merci à Lucile Beck, de l'INSTN, de nous avoir transmis ce scoop : matière nucléaire et matière grise ne font qu'un ! Les astrophysiciens vont fébrilement rechercher les premières étoiles à neurones, et les biologistes,

traquer les traces d'ADN dans les neutrons.

Trêve de sarcasmes mesquins : au delà de la coquille « neurone-neutron », un drame se noue : Le noyau de carbone-12 a douze nucléons ; mais si les douze sont des neutrons, que sont les protons devenus ? C'est un deuxième scoop et Spiral fait pâle figure avec son quatorze de neutrons exotiques devant ce noyau dodécaneutroné, électriquement neutre de surcroît, ce qui est rarissime chez les noyaux atomiques, même ceux des australopithèques... Pour mémoire, ^{12}C : 6 protons et 6 neutrons.

Pan ! sur le Becquerel

C'est par fatigue et non par amnésie galopante, que le porte-parole a écrit dans le n° 55 : « *La RMN est une technique qui permet de détecter les atomes d'hydrogène en les faisant tourner comme des toupies etc.* » Pan !, sur son neurone peu avisé, il fallait écrire : « ... en faisant tourner leurs noyaux etc. » Qu'on se le dise : le « N » de « RMN¹ » est la première lettre non pas de « atomique » mais de « nucléaire ».

Autre erreur technique : la dernière ligne de la page 8 du n° 55 a sauté à l'impression. Il s'agissait de « *Madeleine Soyeur (SPhN)* » l'une des trois signataires du « Regrets » consacré à notre ami René Beurtey. Merci, Madeleine de ne pas trop nous en vouloir.

Une énorme coquille s'est glissée page 2 du n° 55 dans le titre de l'article de Jean-Marc Laget : « *La structure en "partons" de la matière* » s'est transformé en « *La structure en "partons" de la lumière* ». Il y a matière à déplorer qu'il soit impossible de faire la lumière sur cette bizarre transformation, inconnue jusqu'alors, et qui viole sans doute tout un tas de symétries donc certaines nous sont encore inconnues. Le porte-parole ne peut que présenter ses plus confuses excuses.

Va-et-vient

Septembre 2002 – Arnaud Acker est recruté au SIS, Stéphane Berry, au SACM, Dominique Besin, au Sédi, Guillaume Jiolat, au SIS et Alexandre

Refregier, au SAp. Arrosage(s) en vue ?

Chantal Meuris est réintégré au SACM. Bon retour au bercail !

Martin Dentan est muté du Sédi au DRFC (fusion contrôlée), Gabriele Fioni est muté du SPhN au Siège (DES) où il est nommé adjoint au directeur de la stratégie et de l'évaluation (ça s'arrose, Gabriele), Yves Fournier est muté du SACM au SDA et Sophie Portier est mutée de Dapnia/dir à Cadarache. Bonne chance à toutes et à tous !

Anne-Marie Gauriot (SACM) part en retraite. Marc Blaquière démissionne du SACM. Bonne chance à toutes et à tous !

Octobre 2002 – Pascal Debu passe de la tête du SPP à celle du SACM en remplacement d'Alban Mosnier, qui devient chef de projet à Spiral II. Olivier Besida (SDA) est muté à Fontenay-aux-Roses, Stéphane Feray (SDA) est muté à la DEN, Marc Peyrot est muté du SACM à la Direction de la sûreté nucléaire et de la qualité et Nicolas Pichoff (SACM) part à la DAM.

Pierre Emmanuel Bernaudin est recruté au SACM, André Bouty, au SIS, Esther Ferrer Ribas, au Sédi et Alain Przybylski, au SACM. Alain Le Saux (SDA) passe annexe 1. Bienvenue et félicitations.

Les retraités de cet automne : Pierre Bonamy (SPP), Jean-Pierre Desvard (SIS), Jean-Claude Guerre (SDA), Benjamin Mayer (SPhN), Jean-Claude Paladji (SACM), Thérèse Robert (SAp). Éric Pantin (SAp) part en « congé sans solde » et Georges Lemierre (SACM), en « départ négocié ». À toutes et à tous, nous souhaitons bon vent, et qu'il ne soit pas indécis...

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Michel SPIRO
COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, Joël BELTRAMELLI, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Philippe CONVERT, Françoise GOUIGNAUD, Christian GOUFFES, Christophe MAYRI, Xavier-François NAVICK, Yves SACQUIN, Jean-Luc SIDA, Angèle SÉNÉ, Didier VILANOVA

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : GRAPHOTEC

CONTACT : Joël MARTIN - Tél. 01 69 08 73 88 -

Fax : 01 69 08 75 84 - E-mail : jmartin@dapnia.cea.fr

<http://www-dapnia.cea.fr/ScintillationS/>

Dépôt légal décembre 2002

3!

(1) Remercions Edgar Soulié, du Drecam, pour les précisions suivantes : « On détecte par RMN des noyaux porteurs d'un spin non nul en les soumettant à un puissant champ magnétique autour duquel ils tournent comme des toupies à une fréquence proportionnelle à ce champ. On superpose à ce champ une onde radio dont on règle la fréquence jusqu'à ce qu'on obtienne une résonance entre l'onde et la toupie nucléaire. » Puis on arrête l'onde excitatrice et l'on chronomètre la disparition de l'excitation. Les éréménistes parlent de la mesure des temps de relaxation.

Dans un tissu vivant, l'environnement des molécules d'eau cellulaire (contenant l'hydrogène) varie selon que la cellule est saine ou non, et le temps de relaxation n'est pas le même selon que l'eau est « liée » dans la matière cellulaire, ou « libre » (poche d'eau d'un œdème, par exemple). Cette différence aide à distinguer les zones saines des zones tumorales d'un tissu vivant. L'image par résonance magnétique nucléaire précise la taille exacte d'une tumeur déjà détectée par biopsie ou une autre méthode. Pour informations plus techniques, on peut s'adresser à Edgar Soulié (01 69 08 47 37, soulie@drecam.cea.fr) ou surfer sur www.med.univ-rennes1.fr/ceif/edicerf/BASES/BA004_cv_rb_9.html. Au sujet de l'eau des tissus vivants, on peut lire « Le double jeu de l'eau et des protéines » (*La Recherche* n° 354 juin 2002, pages 18 et 19).