

Le Dapnia au cœur des infinis

(D, comme Département du CEA...)

Nous avons entamé la dernière année du millénaire avec les vœux de nos nouvelles autorités souhaitant au CEA des développements devant répondre à la demande des citoyens.

Notre nouvel Administrateur Général, à qui ScintillationS souhaite la bienvenue, nous rappelle fort justement que la Science est au service de l'Homme. Mais comment le sert-elle au mieux ?

Difficile question. Voici le sentiment d'une encore plus haute autorité : « Il serait dangereux de conduire le travail scientifique en fonction de la seule demande immédiate, qu'elle soit sociale ou économique [...] La recherche fondamentale a besoin de temps. Ses résultats ne sont pas pré-

visibles. Voilà deux caractéristiques en apparence peu compatibles avec les contraintes politiques. Il faut pourtant les concilier. »

Extraits du discours de Lionel Jospin lors d'une cérémonie, le 18 mars 1998, à l'École Normale Supérieure, en l'honneur de Claude Cohen-Tannoudji, Prix Nobel de physique 1997.

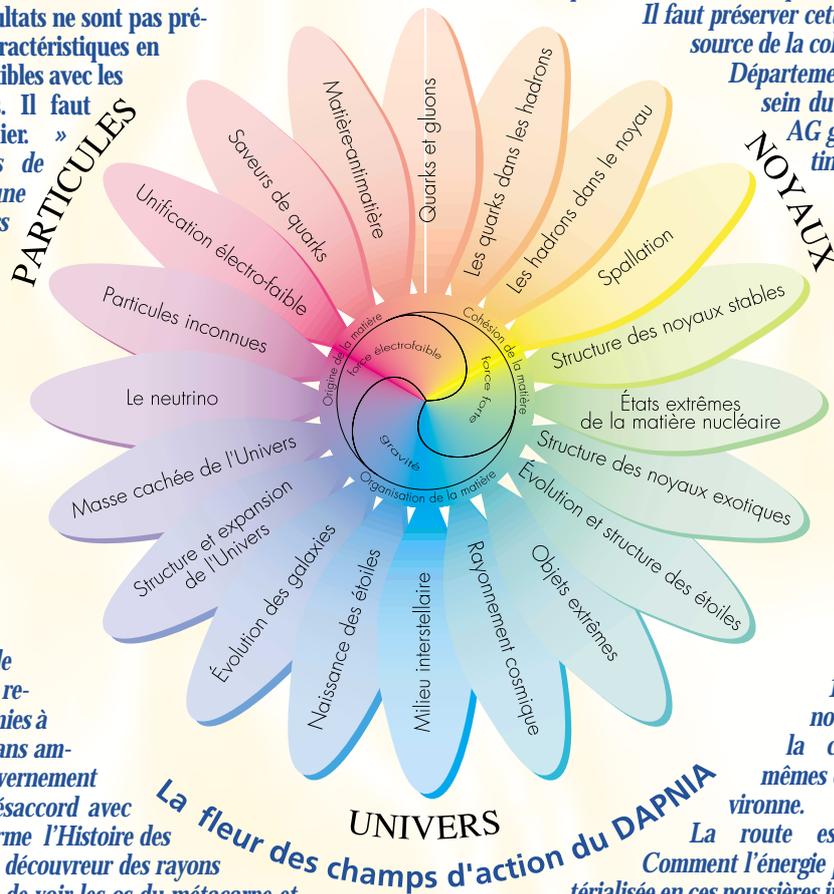
Ce point de vue du Premier ministre est extrêmement réconfortant en cette époque où certains visent à nous canaliser vers une conception utilitaire de nos activités en vue de retombées rapides et définies à l'avance. Les propos sans ambiguïté du chef du gouvernement sont clairement en désaccord avec une telle vision qu'infirme l'Histoire des sciences : Roentgen, le découvreur des rayons X, n'avait pas mission de voir les os du métacarpe et Kastler, l'inventeur du pompage optique¹, qui a conduit au laser, n'était pas payé pour mettre au point le CD. Ces retombées majeures autant qu'imprévisibles de leurs travaux furent loin d'être immédiates. Elles n'auraient probablement jamais vu le jour si l'on avait encadré l'élan créateur de ces chercheurs fondamentaux en leur demandant des résultats prédéfinis². Il ne faut pas confondre utile et utilitaire. La connaissance alimente le progrès. Si la source se tarit, l'indispensable technologie est aussi utile qu'un magnifique barrage privé d'eau.

Dans le contexte actuel, nous souhaitons ardemment que, inspirée par l'Histoire des sciences et les paroles précitées de notre Premier ministre, l'action de nos nouvelles hautes autorités s'ins-

crive dans la continuité de celle de Dautry, Joliot, Perrin, et autres Abragam et Horowitz.

Pour illustrer ce souhait, ce double numéro se veut une vitrine permettant d'apprécier nos réussites et nos projets, la variété des atouts scientifiques et techniques, et le formidable potentiel de découverte et d'innovation de notre DAPNIA. Sa structure compacte pluridisciplinaire et multimétiers est unique. Elle est régulièrement approuvée et encouragée par son Comité d'Évaluation qui compte dans ses rangs les Prix Nobel de Physique 1980 et 1990 et d'autres personnalités scientifiques de stature internationale.

Il faut préserver cette structure car elle est la source de la cohésion et de l'efficacité du Département (le D du Dapnia) au sein du CEA dont notre nouvel AG gouverne à présent la destinée.



*
À propos de destinée... D'où venons-nous, de quoi sommes-nous faits, où allons-nous ? Questions éternelles. Réponses provisoires : nous venons du Big-bang, nous sommes faits de quarks et d'électrons matérialisés aux premiers instants de l'univers, il y a 15 milliards d'années, et nous allons petit à petit vers la connaissance de nous-mêmes et du monde qui nous environne.

La route est jalonnée d'énigmes.

Comment l'énergie primordiale s'est-elle matérialisée en ces poussières incroyablement ténues que sont les particules dites élémentaires ? Par quels mystérieux mécanismes ces particules se sont-elles agrégées en corpuscules plus gros, formant des constructions de plus en plus complexes, noyaux d'atomes, étoiles, galaxies, mais aussi molécules, protéines, ADN, matière vivante ?

Il est passionnant de se plonger dans cette merveilleuse saga de la matière, d'en reconstituer le déroulement, de tenter de le reproduire. L'univers est un emboîtement de structures comme les poupées russes. Il est indispensable de l'approcher par ses deux extrêmes pour l'appréhender dans sa diversité et remonter à son début.

Côté cosmos, on sonde l'univers à des distances de plus en plus grandes pour « rattraper » des phénomènes qui nous fuient à la

vitesse d'expansion du cosmos. Les plus lointains sont les plus anciens. Plus loin voit le télescope, plus les événements qu'il détecte sont proches, dans le temps, de l'explosion originelle.

Côté corpuscules, on sonde le cœur de la matière pour connaître ses plus intimes constituants. Mais les plus fondamentaux (à ce jour), les quarks, échappent encore à notre observation directe car ils n'ont existé à l'état libre qu'aux premiers instants de l'univers. Alors, pour percer le mystère de leur genèse et de leur confinement, prélude à tout ce qui a suivi, on tente, grâce à des accélérateurs de particules de plus en plus puissants, de matérialiser ces grains primordiaux ou de les libérer par des chocs entre particules d'une violence de plus en plus proche de celle des premiers instants.

Télescope, accélérateur : deux machines à remonter le temps par deux chemins complémentaires, pour mieux savoir. En groupant ses forces, le DAPNIA favorise cette quête unificatrice. Nous faisons route avec des chercheurs du monde entier partageant la même soif de connaissances qui profiteront à tous. Ce n'est pas le moment de nous désunir, de nous essouffler.

Essoufflés, nous ? Le « APN » de DAPNIA n'est pas l'abréviation de « apnée »...

A comme astres, P comme particules, N comme noyaux. Trois infinis étroitement imbriqués : le grand, le petit, le complexe. L'expansion de la bulle-univers dépend de la masse encore inconnue de l'un de ses plus petits constituants, le neutrino (38)³. Le flux des neutrinos que projette le Soleil dépend de la nature des chocs des noyaux au cœur de notre étoile, source de son énergie et donc de notre vie. Les grumeaux de matière nés du Big-Bang s'agrègent en particules, puis en petits noyaux, dont beaucoup s'attirent en gigantesques boules qui deviennent fournaises, les étoiles. Dans ces creusets stellaires, se forment des noyaux de plus en plus gros. Puis ces étoiles explosent et des noyaux lourds naissent de ces supernovæ. PAN !, comme Particules-Astres-Noyaux. Les particules font des noyaux qui font des astres qui font d'autres noyaux qui émettent des particules etc.

Pour écouter, voir, et, pour mieux comprendre, tenter de reproduire quelques morceaux choisis de cette ronde des trois infinis, le DAPNIA a usé, use, usera d'oreilles comme GALLEX, GOLF, ANTARES, d'yeux comme ISOCAM, XMM, EROS, d'instruments

comme SPIRAL, CEBAF, LEP, SLAC, Tévatron, LHC, HERA⁴ et bien d'autres, auxquels il apporte des contributions majeures, qu'évoque ce numéro de ScintillationS.

Ces gigantesques bijoux n'ont rien de lubies de professeurs Nimbus confinés dans leur tour d'ivoire, et finissent toujours par rapporter au corps social plus qu'ils ont coûté (Texte ci-contre). Car notre soif de comprendre, qu'épaulent les multiples compétences de nos équipes d'instrumentations associées (le « IA » du DAPNIA), nous pousse à mettre au point toutes sortes d'appareils sophistiqués qui, tôt ou

tard, se révèlent utiles, voire indispensables au quotidien. Les industries chargées de les fabriquer acquièrent de multiples compétences, gagnent de l'argent et embauchent. La quête des galaxies primordiales, de la matière cachée ou d'éléments « superlourds » crée des richesses et des emplois. Et la mise au point de faisceaux torrentiels de protons (projets IPHI et INCA) répond à un enjeu de société majeur : abrégé le plus possible la carrière radioactive des cendres des centrales nucléaires.

Pour explorer l'ultime, la concentration des forces de recherche et d'ingénierie « sous un même toit », synergie propre au CEA, est un formidable avantage.

Le DAPNIA est un lieu privilégié pour la physique sans frontières des infinis enchevêtrés.

ScintillationS

Ce numéro spécial est une vitrine. Ce n'est pas une présentation exhaustive du DAPNIA, que l'on peut trouver dans le « Rapport d'Activité 1995-1996 » du DAPNIA, et la plaquette « DAPNIA 97-98 ». On peut aussi lire ou relire dans ScintillationS n° 44, le rapport du Comité d'Évaluation du DAPNIA.

¹Voir Scintillations n° 42. Alfred Kastler a obtenu le Prix Nobel de Physique en 1966.

² Il est arrivé que de grosses entreprises, comme IBM, Bell, et bien d'autres, recrutent des chercheurs fondamentaux et les paient pour chercher ce que bon leur semble. Aucun objectif ne leur est fixé. C'est dire que, même des « capitalistes » américains purs et durs ont compris qu'il était plus intelligent et, à terme, rentable, de laisser la bride sur le cou aux chercheurs fondamentaux.

³ Les nombres rouges entre parenthèses indiquent les numéros de ScintillationS qui évoquent le sujet ainsi balisé.

Autres exemples : INTEGRAL (13, 41, 44), spallation (22, 39, 44).

⁴ Tous les sigles sont explicités sur une feuille volante insérée dans ce numéro. Sur cette feuille, figure aussi un rappel sur quelques unités d'énergie et le tableau des particules.

L'Astrophysique

(Le premier « A » du DAPNIA)

Ouvrir le grand livre de l'univers depuis le début : le grand Boum, origine du temps, de l'espace et de la matière, explosion originelle de la bulle d'énergie qui renferme en germe tout. Découvrir ce qui a forgé et forge encore cet univers dont nous savons si peu de choses. Reculer les limites de l'horizon cosmique, voir l'invisible, suivre la piste de la matière disparue, comprendre la formation des corps célestes et leur évolution, écouter battre le cœur des étoiles, détecter les ultimes sursauts d'astres agonisants, les vestiges rayonnants de lointains cataclysmes... C'est cela, faire de l'astrophysique. C'est aussi fabriquer des télescopes, des satellites, des caméras capables de voir toutes les longueurs d'onde...

Le DAPNIA travaille avec des organismes de tous pays : Université, CNRS, CNES, CERN, LETI, ESA, NASA etc. Dans ce contexte international, ses astrophysiciens, physiciens des particules et physiciens nucléaires, œuvrent en symbiose quotidienne avec les instrumentalistes maison sur des sujets communs à leurs trois disciplines : neutrinos et autres astroparticules, objets sombres comme les naines brunes, astrophysique nucléaire, astrophysique des hautes énergies...

De l'astrophysique au CEA ?

Quelle drôle d'idée ! Et pourtant, c'est parfaitement logique. Dans les années 50-60, le rayonnement cosmique était la source privilégiée de particules. On l'observait au sommet des montagnes. On eut l'idée d'aller encore plus haut, au-delà de l'atmosphère. Au CEA, on savait faire des détecteurs pour la physique nucléaire. On les embarqua dans des ballons, des fusées, des satellites. Ils fournirent parmi les premières mesures de flux de particules hors atmosphère qu'il fallut interpréter, passés les premiers hurras. Quelle est l'origine de ce rayonnement ? Comment est-il accéléré ? Comment se propage-t-il dans le milieu interstellaire ? Pour tenter de répondre, une section d'astrophysique fut créée au début des années 70, qui devint service en 1983. Profondément ancré dans l'astrophysique des hautes énergies, ce service, intégré au DAPNIA en 1991, a élargi son champ d'investigation, en privilégiant les observatoires embarqués sur des satellites.

À la différence de la physique nucléaire et

de celle des particules, sciences expérimentales, l'astrophysique est une science d'observation. Faute de disposer en laboratoire d'un trou noir ou d'une galaxie, l'astrophysicien ne peut que les observer. Une expérience de physique corpusculaire a un but scientifique précis. Un observatoire astrophysique sert des objectifs multiples : En voici quelques exemples.

Les observatoires de rayons gamma de très haute énergie, comme CAT, sont essentiellement voués à l'étude des noyaux actifs de galaxies qu'on pense être des trous noirs massifs, seuls capables de produire ces rayons. Or, avant de nous parvenir, ces photons gamma se propagent dans le milieu intergalactique et sont en partie absorbés par les photons infrarouges omniprésents dans ce milieu. L'observation de photons de l'ordre du TeV fournit donc en prime une valeur de la densité des photons infrarouges de longueur d'onde 10 microns, 10^{13} fois moins énergiques que les photons directement mesurés ! ISOCAM (20, 25, 35, 36, 40), caméra dévolue à l'infrarouge, a recensé les galaxies émettrices de ces infrarouges de 10 microns, avec une sensibilité 1000 fois meilleure que les précédents observatoires, et pu ainsi donner une valeur du « fond diffus » de photons infrarouges émis par ces galaxies. Les mesures de CAT et d'ISOCAM sont en excellent accord. ISOCAM a donc identifié pratiquement toutes les sources cosmiques du « fond de ciel infrarouge à 10 microns ». Cet inventaire complet, résultat philosophiquement vertigineux, provient de la combinaison d'observations effectuées sur 13 décades, du dixième d'eV au TeV !

Autre exemple : la découverte de micro-quasars galactiques, un des

succès majeurs du DAPNIA. Complétant la découverte par SIGMA de sources de rayons gamma ayant un fort excès de flux à haute énergie, des observations en ondes radio ont montré que ces sources étaient associées à l'émission de jets puissants de particules relativistes couplés à la capture de matière par des trous noirs de masse environ dix fois celle du Soleil (36).

Ces exemples montrent l'originalité de la recherche en astrophysique. L'astrophysicien décortique les processus physiques qui se déroulent au sein des astres grâce à des observations sur tout le spectre électromagnétique, et compare ces observations à des modèles théoriques. Un observatoire, qui, par construction, ne fonctionne que dans un domaine de longueur d'onde donné, étudie de fait tous les astres qui émettent dans ce domaine, alors que les expériences de physique corpusculaire se concentrent sur un seul phénomène. Nos décideurs aiment bien les étiquettes : l'infrarouge est lié à l'univers froid, les gamma aux phénomènes violents. Mais le choc d'un proton cosmique sur un noyau d'hydrogène froid produit une cascade de mésons pi neutres qui se désintègrent en émettant des gamma d'une centaine de MeV. Qu'observe un observatoire de rayonnement diffus gamma : les sources de rayonnement cosmique, ou la distribution de la densité du milieu interstellaire froid ? Réponse non politiquement mais scientifiquement correcte : les deux mon général !

L'astronomie gamma

Originellement liée à l'étude du rayonnement cosmique, a été promue discipline à part entière, en particulier grâce à la sonde SIGMA, lancée en 1989, qui a, la première, identifié les sources de rayonnement gamma. Ces sources sont principalement liées à des objets compacts qui « accrètent » (attirent par gravitation) la matière environnante ; celle-ci s'agglutine sur un disque entourant le trou noir et tourne autour à toute vitesse. L'accrétion s'accompagne d'éjection de particules relativistes en jets perpendiculaires aux disques d'accrétion. Les disques rayonnent principalement dans les domaines X et gamma, et les jets dans tout le spectre

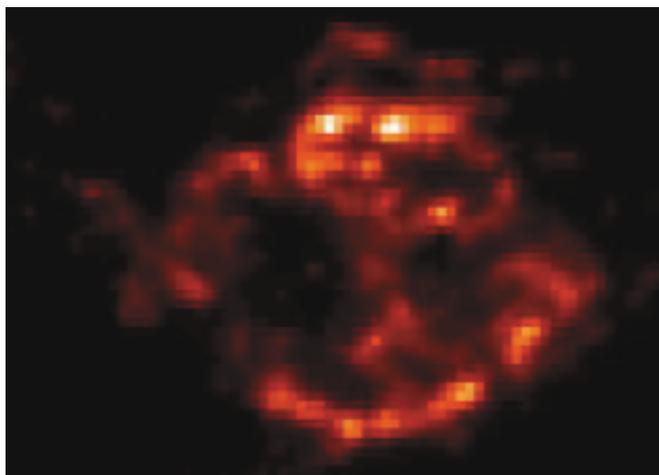
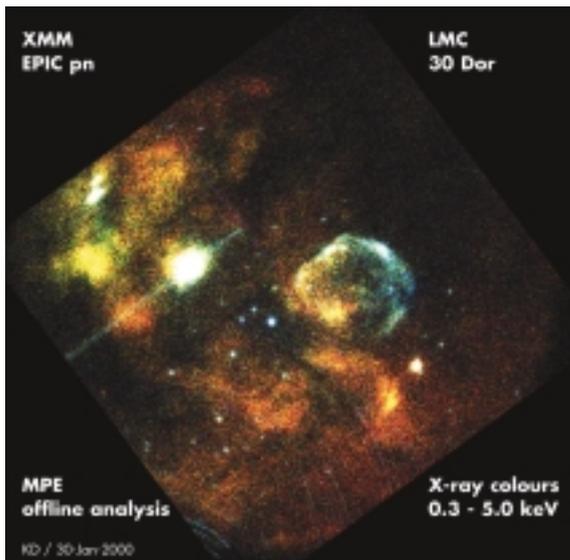


Image prise par ISOCAM du reste de la supernova Cassiopée A dont l'explosion nous est parvenue vers 1600. Les observations d'ISOCAM ont mis en évidence des globules de matière chaude (les nodules brillants), reliques de la matière éjectée lors de l'explosion de l'étoile. L'analyse des abondances de ces globules a donné des informations sur les mécanismes de mélange qui se sont produits lors de l'explosion



Première image obtenue en janvier 2000 par la caméra EPIC embarquée sur le satellite XMM de l'Agence Spatiale Européenne lancé le 10 décembre 1999. Cette image centrée sur le Grand Nuage de Magellan, la galaxie la plus proche de la nôtre, montre très nettement la structure complexe du milieu interstellaire chaud qui émet des rayons X. Les points bleus au centre de l'image sont des galaxies actives encore jamais vues, situées à des distances « astronomiques » derrière le Grand Nuage de Magellan.

électromagnétique. L'étude de ces sources gamma associées à des objets compacts sera un thème prioritaire de l'observatoire INTEGRAL (13, 41, 44), et de son « imageur » IBIS. INTEGRAL, qui sera lancé en 2002, est aujourd'hui le programme majeur du DAPNIA en astrophysique. Ces études seront poursuivies à plus haute énergie avec GLAST, prévu pour la fin 2005, avec une forte participation du DAPNIA et de l'IN2P3. Ces deux grands observatoires gamma en orbite vont fournir un flot sans précédent de données à haute énergie, qui devra s'accompagner d'un important effort d'interprétation et de modélisation, afin que le retour scientifique soit à la mesure des investissements.

L'astrophysique nucléaire

Cette discipline a pour but d'expliquer la production des éléments dans l'univers. Historiquement, les astrophysiciens du CEA ont joué un rôle majeur dans ce domaine, grâce aux travaux de Hubert Reeves et de son équipe, en élucidant l'origine des éléments lithium, béryllium et bore. Ces éléments sont produits par des réactions de spallation (22, 39, 44 et page 9 de ce n°) résultant de l'interaction des protons du rayonnement cosmique avec les noyaux du milieu interstellaire. Les éléments plus lourds sont tous produits dans les étoiles. Or, l'étoile la plus proche et donc la mieux connue est le Soleil. De même qu'on étudie la structure interne de la Terre par des expériences de sismologie, on explore celle du Soleil en observant ses modes de vibrations à l'aide de l'instrument GOLF lancé en 1995. La connaissance acquise sur le cœur nucléaire du Soleil permet de prédire la valeur du flux de neutrinos solaires et de

la comparer aux résultats des détecteurs de neutrinos solaires comme GALLEX. SPI, le spectromètre d'INTEGRAL, va ouvrir un nouveau champ de recherche en mesurant pour la première fois de manière précise l'intensité de raies gamma résultant de la décroissance de noyaux radioactifs. SPI sera le premier instrument qui permettra une mesure directe de la production d'éléments lourds dans les supernovae.

L'univers, poupée gigogne.

Sa matière est bien visible sous des formes condensées emboîtées : planètes, étoiles, galaxies, amas de galaxies, super amas et encore plus grandes structures. La force principale qui assure la cohésion de ces systèmes est la gravitation. Mais si la matière qui compose le système solaire est bien comprise, la nature de la matière qui prédomine dans les amas de galaxies et les grandes structures reste une énigme. On sait qu'elle est là. On en voit les effets. On peut même en faire des cartes, grâce aux effets de lentille gravitationnelle qu'elle produit. Mais on ne la voit pas. Quelle est la nature de cette matière noire ? Mystère, boule de gomme et point de convergence avec l'infiniment petit. Au DAPNIA, les physiciens des particules étudient sa nature avec EROS (voir la photo en bas de cette page) ou EDELWEISS (33), et les astrophysiciens étudient sa structuration : des grandes structures aux amas avec XMM et MEGACAM, le fond cosmologique avec Planck Surveyor, la formation et l'évolution des galaxies, étoiles et planètes avec ISO, VISIR et FIRST, sans oublier CIRS porté par la sonde CASSINI de la NASA qui frôlera Saturne en 2004. Une fois formées les galaxies, étoiles ou planètes, l'infrarouge devient le domaine privilégié d'investigation : soit les objets sont très froids, soit leur rayonnement intrinsèque est absorbé par les poussières du milieu interstellaire, qui, elles, rayonnent dans l'infrarouge.

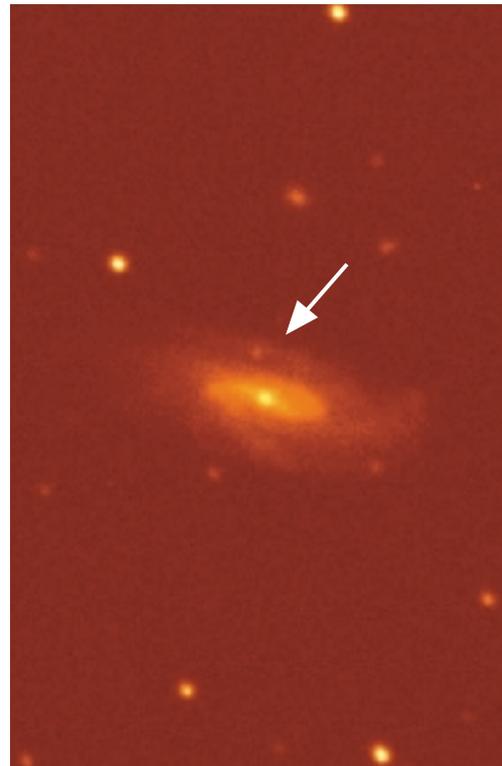
L'instrumentation spatiale

C'est un domaine d'élection au DAPNIA, qui possède l'un des cinq laboratoires reconnus par le CNES. Il jouit d'une position privilégiée en raison de son appartenance au CEA et de la symbiose entre astrophysiciens, ingénieurs et techniciens. À l'heure actuelle, les programmes d'astrophysique mobilisent environ 20 % des ressources techniques du DAPNIA. Autre atout important : des liens privilégiés avec le LETI permettent de bénéficier de technologies lourdes mises en œuvre pour d'autres buts que l'astrophysique, comme les détecteurs infrarouges qui ont équipé la caméra ISOCAM, puis la caméra TIMMI développée pour l'ESO, et le spectrographe CIRS. Cette collaboration développe actuellement des détecteurs pour la mission FIRST de l'Agence Spatiale Européenne. Une collaboration du même type est née autour des détecteurs en tellurure de cadmium pour le projet INTEGRAL. En plus de la valorisation qu'apporte

ces applications au spatial, le CEA bénéficie d'un retour d'expérience utile pour les applications propres du LETI. Deux brevets ont été pris par la DSM et le LETI à partir des techniques développées dans le cadre d'INTEGRAL pour des applications de gammagraphie médicale (45).

L'astrophysique est une science d'observation. Mais les progrès récents des lasers de puissance permettent de reproduire sur Terre les conditions physiques (température, densité) de certains plasmas cosmiques. Ils ouvrent ainsi un champ d'expérience aux astrophysiciens. L'engagement du CEA dans le programme Laser Mégajoule va renforcer cette tendance. Certains phénomènes qui durent plusieurs millions d'années dans un contexte astrophysique ne prennent que quelques microsecondes lorsqu'on les induit par laser en laboratoire. Mais des simulations numériques sophistiquées permettent de les confronter à de véritables expériences de physique. Une première simulation d'instabilité dans l'explosion d'une supernova a déjà eu lieu en 1999.

La création du DAPNIA a entraîné l'expansion de l'astrophysique au CEA. L'avenir des programmes spatiaux est assuré avec les projets GLAST (2006) et FIRST (2007). La situation est enviable si le DAPNIA conserve les moyens nécessaires à cette politique.



Vue de la galaxie MGC-01-27-020 (distance : 300 millions d'années-lumière, diamètre : 100 000 a.-l.) obtenue par une caméra CCD conçue et réalisée au DAPNIA. Cette expérience de recherche d'objets sombres n'en n'a pas trouvé assez pour qu'ils contribuent significativement à la matière cachée de l'univers. Mais par ailleurs, EROS a découvert un certain nombre de supernovae. Le point plus clair (indiqué par la flèche), situé dans le bras spiral supérieur de la galaxie, est une : sn2000S, découverte par EROS le 28 février 2000.

La physique des Particules

(Le « P » du DAPNIA)

Son but : connaître les briques élémentaires de l'univers, comprendre leurs interactions et tenter de les unifier. Elle est reliée naturellement à la physique nucléaire qui étudie les premiers édifices de la matière, et à l'astrophysique qui étudie leur genèse et leur devenir dans l'univers.

Pour débusquer des particules de plus en plus minuscules, il faut des accélérateurs de plus en plus puissants. Mais c'est à ce prix qu'on repousse les limites de la connaissance et les percées technologiques acquises profitent à tous.

« La nature est simple » aiment à dire les physiciens, usant de mots comme charme et beauté. Ils ont établi que le nombre des briques élémentaires de matière est petit : douze, dont la dernière et la plus lourde, le quark « top », a été découverte il y a cinq ans. Ils ont trouvé que deux des forces fondamentales de la nature n'en faisaient en réalité qu'une. Et ce n'est que le début de l'unification. Tant d'autres énigmes demeurent ! D'où vient la masse ? Pourquoi l'antimatière a disparu et pas la matière ? De quoi est faite cette mystérieuse matière sombre qui constitue plus des neuf dixièmes de l'univers ?

Au DAPNIA, on œuvre à relever ces défis au sein d'équipes désormais planétaires.

La quête de l'unité : une longue et fructueuse tradition

En 1667, Newton découvre que la pomme et la Lune sont soumises à la même force, la *gravitation universelle*. Voilà la mécanique unifiée. Deux siècles plus tard, en 1865, Maxwell établit que l'électricité et le magnétisme sont tous deux régis par la même interaction fondamentale, la force *électromagnétique* (42). Cette deuxième unification entraîne une cascade de découvertes : les ondes radio, les rayons X etc. qui vont bouleverser notre quotidien.

Un siècle plus tard, troisième unification prédite par le « *Modèle Standard* » (3, 23, 24), théorie actuelle des particules. La force *nucléaire faible* (42), une troisième interaction, seule capable de changer la nature des particules, responsable de la radioactivité et sans laquelle les étoiles brûleraient bien plus vite, est, avec la force électromagnétique, l'un des deux avatars d'une interaction unique : la force *électrofaible* (12, 26, 42). Cette force prévalait dans les débuts de l'Univers, puis s'est différenciée en deux branches. Spéculation théorique confirmée

de façon éclatante : en 1983 le CERN produit les premiers *bosons intermédiaires* W et Z, messagers de cette force électrofaible. Leurs masses sont celles annoncées. Les fruits de cette troisième unification sont actuellement imprévisibles. Mais les deux premières ont eu de telles retombées aussi bénéfiques qu'imprévisibles et souvent tardives (Maxwell avait-il prévu le four à micro-ondes ?), qu'il faut poursuivre cette quête de l'unité. Un des ancêtres du DAPNIA a participé à cette troisième unification en contribuant fortement aux expériences pionnières du CERN. Le DAPNIA d'aujourd'hui participe, dans les équipes DELPHI et ALEPH du LEP, aux mesures précises des propriétés du boson W, qui fixent les valeurs encadrant la masse de particules encore inconnues et que l'on cherche à synthétiser : le responsable présumé de la masse des particules, le *boson de Higgs* (23), ou des *particules super-symétriques* (24) qui pourraient faire partie de la matière cachée de l'univers etc.

La nature offre une quatrième force fondamentale : la force *nucléaire forte* (42), responsable de l'existence des protons et des neutrons par agglomération de quarks et de gluons, puis de la cohésion des noyaux.

Cette force présente des analogies mathématiques avec la force électrofaible, indice qu'il s'agirait de deux rameaux d'un même tronc, force unique qui régissait la matière à une époque encore plus reculée.

Cette dé-

marche unificatrice génératrice de tant de bienfaits a été appliquée avec succès aux deux grandes révolutions scientifiques du 20^{ème} siècle : la physique quantique et la relativité, unies dans la *Théorie quantique des Champs*. Premier succès : l'électrodynamique quantique, théorie capable de prédire au cent-millionième près la valeur de gran-



Vue du site d'ALEPH, au LEP



Un quadrupôle pour LHC. Le faisceau passe par le tube dont on voit une extrémité (diamètre intérieur : 56 mm).

deurs caractéristiques de particules, et qui introduit un concept nouveau : la création et la destruction de particules élémentaires par transformation réciproque d'énergie en matière. Phénomènes typiquement quantiques, des réactions entre particules peuvent se produire par plusieurs voies possibles et être sensibles à des particules non encore observées. Bien choisies, de telles réactions permettent de prévoir les propriétés de particules inconnues, exactement comme un astronome braque son télescope au bon mo-

ment dans une direction qu'il a calculée et voit défiler dans son champ la planète qu'il a devinée.

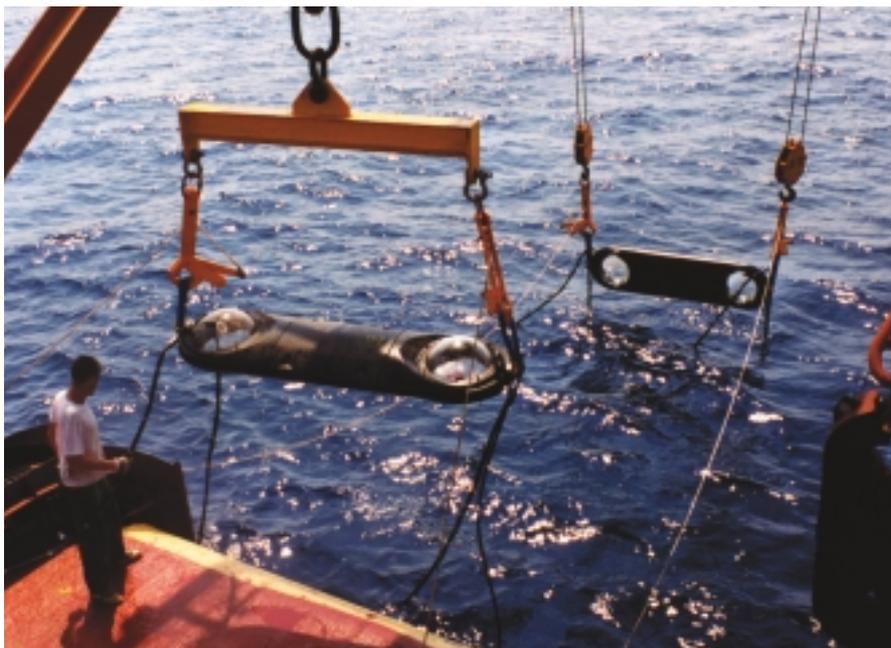
Ainsi ont été trouvés le quark « charmé » qui seul explique certains taux de désintégration du méson K, et le quark « top ». Le DAPNIA fut de cette dernière découverte, faite au TEVATRON du FERMILAB, en participant à l'expérience décisive D0 (8, 21, 33). Ainsi va-t-on traquer le boson de Higgs au CERN, dans le LHC (3, 9, 17, 18, 22, 32), futur collisionneur de protons de 14 TeV. Le

Higgs, Graal de la physique des particules pourrait donner les clés d'une compréhension nouvelle de la matière. Vu son intime connexion avec la notion de masse, il n'est pas exclu que ce mythique boson soit lié à la gravitation. Sa découverte, puis son étude seraient une étape vers la grande unification de l'interaction gravitationnelle avec les autres interactions fondamentales : forte et électrofaible. Mais d'énormes efforts théoriques sont nécessaires. Ils devront s'appuyer sur de nouveaux résultats expérimentaux ne serait-ce que pour savoir où orienter ces efforts. Le prix à payer : celui d'énormes machines comme HERA, le Tevatron, le LEP, le LHC déjà citées. Avec sa double expertise scientifique et technique, le DAPNIA est impliqué à fond dans cette quête qui consiste aussi bien à imaginer des tests fins permettant de « cadrer » la valeur de la masse du Higgs, qu'à concevoir les aimants supraconducteurs du LHC où l'on matérialisera peut-être les fameuses particules super symétriques.

Ces éventuelles découvertes auront-elles des applications pratiques ? Pour le savoir, il faut y aller voir sans craindre le prix de revient puisque d'ores et déjà le LHC rapporte à la société plus qu'il ne coûte, par les retombées techniques, industrielles et sociales (voir la figure page 2).

Les connexions avec la cosmologie et l'astrophysique

Le Modèle Standard a prédit l'existence de trois familles de particules. Ce fait, senti par les cosmologistes qui étudiaient la création des premiers noyaux légers, a été prouvé au LEP, dès 1989 (expériences ALEPH et DELPHI) en étudiant les modes



Immersion de détecteurs pour ANTARES. Ce sont les yeux pour voir les neutrinos.

de désintégration du messenger neutre de la force électrofaible : le Z^0 . Chaque boson Z^0 se désintègre en une paire particule-antiparticule. Mais seul le hasard gouverne la nature de cette paire, en quelque sorte tirée au sort dans chaque famille qu'offre la nature. Au bout d'un nombre suffisant de désintégrations, toutes les familles sont représentées. En les comptant, on en a trouvé trois. Mais pourquoi TROIS ? Réponse « *a contrario* » : avec moins de trois familles, on explique mal comment, alors que le Big-Bang a créé autant de matière que d'antimatière, la matière s'est retrouvée en « léger » excès par rapport à l'antimatière (l'antimatière s'est très vite annihilée avec une quantité équivalente de matière, et ce « léger » résidu est resté : c'est notre univers). Et pourquoi pas plus de trois familles ? On ne sait pas. Les calculs montrent en tous cas qu'avec plus de huit familles, les quarks se repousseraient et il n'y aurait pas de nucléons, donc pas d'atomes, donc pas de chercheurs. Ni bien sûr d'étoiles, de galaxies etc. Le lien avec l'astrophysique est évident.

Les très hautes températures de l'univers primordial correspondent à de très hautes énergies de particules. Les théoriciens du Big Bang font appel aux physiciens des particules pour le décrire, mais leur indiquent en retour les conséquences de leurs théories sur le contenu de l'univers. La comparaison de l'univers réel avec l'univers issu des théories permet d'ajuster ces dernières. Au DAPNIA, la navette a peu de chemin à faire... Exemple de la connexion Cosmos-corpuscules : la température résiduelle du cosmos dans son état d'expansion actuel (le fameux bruit de fond cosmologique à 2,7 K) dépend des interactions entre électrons et neutrinos. Le cosmos baignerait dans un brouet omniprésent de neutrinos non encore détectés (300 neutrinos par cm^3) plus froid que celui des pho-

tons. On peut même en prévoir la température.

L'étude des neutrinos de très haute énergie renseigne sur la production des rayons cosmiques très énergiques. Rien ne dévie les neutrinos. On sait donc précisément d'où ils viennent et ils peuvent parcourir des centaines de millions d'années-lumière sans subir d'interaction. Leur détection est très difficile mais aide à découvrir des sources dans et hors de notre galaxie. Pour distinguer les neutrinos des autres particules cosmiques, rien de tel que des kilomètres d'eau qui absorbent tout sauf les neutrinos. Au sein d'une collaboration européenne,

le DAPNIA aidé par l'IFREMER coordonne l'implantation, au fond de la Méditerranée, d'ANTARES (46), gigantesque filet à neutrinos d'un kilomètre-cube. Ce n'est pas trop pour piéger de temps en temps un neutrino.

Connexion triple astres, particules, noyaux

On a vu page 4 l'exemple de GOLF et des neutrinos solaires. En 1987, un geyser de neutrinos a traversé la Terre, jalli 170.000 ans auparavant d'une supernova. Nos détecteurs en ont signalé une vingtaine, mais la Terre a dû être traversée par 10^{19} à 10^{20} neutrinos ! Et encore, notre minuscule planète si loin du foyer de l'explosion stellaire n'a capté qu'un picro-pouillième des neutrinos crachés tous azimuts. Ce fut l'éclatante confirmation que le chant du cygne cataclysmique des étoiles massives moribondes produit des légions de neutrinos. Or on sait que ces neutrinos sont produits lors de la « fusion » de protons et d'électrons en neutrons. C'est un indice en faveur de l'existence des étoiles à neutrons, résidus de supernovæ.

Autre question primordiale : dans sa première milliseconde, l'univers était-il formé de ce plasma de quarks et de gluons dont on vient de former une goutte au CERN (46) ou de matière nucléaire ordinaire ?

Dernier exemple relevant des trois disciplines : l'état le plus stable de la matière hadronique pourrait être un mélange en égale proportions de quarks *up*, *down* et *étranges*. Les étoiles à neutrons auraient-elles un cœur de matière étrange ? Cette éventuelle étrangeté excite les physiciens nucléaires : ils cherchent si le proton, composé en première approximation de deux quarks *u* et d'un quark *d*, mais, en fait beaucoup plus compliqué, n'aurait pas un zeste d'étrangeté.

La Physique Nucléaire

(le « N » de DAPNIA)

Le noyau atomique est une étape-charnière dans l'élaboration de la matière. Cette triple poupée gigogne (le noyau contient les nucléons qui contiennent eux-mêmes les quarks et les gluons), est le point de départ de la diversification de la matière ordinaire. Rien ne distingue un proton d'un autre proton, ni un neutron d'un autre neutron. Pourtant, un paquet de 8 protons et de 8 neutrons, c'est un noyau d'oxygène (isotope 16, comme 8+8). Un paquet de 82 protons et 126 neutrons est un noyau de plomb (isotope 208). Il y a des milliers d'espèces de noyaux. Pourquoi existe-t-il tant de combinaisons variées de protons et de neutrons, alors que les quarks ne s'agglutinent que par trois ?

On connaît une différence : la force qui lie les quarks par les gluons (force de couleur) est, comme celle d'un élastique, d'autant plus attractive que les protagonistes s'éloignent. Au contraire, la force nucléaire forte qui attire entre eux les nucléons via les mésons, assurant ainsi la cohésion des noyaux, faiblit quand les nucléons s'écartent et cesse brutalement quand ils sont distants d'une dizaine de fois leur taille. Mais on n'explique pas pour autant comment cette différence change la règle du jeu de construction.

Pour mieux connaître ces deux forces, on attaque le noyau « par les deux bouts ». On en scrute l'intérieur à l'aide de sondes très pénétrantes et très précises pour déterminer l'influence des quarks sur l'interaction nucléon-nucléon. Parallèlement on explore la structure et les propriétés globales du noyau et l'on cherche les limites de sa cohésion en le portant à des états extrêmes. On reconstitue des noyaux qui ont jadis existé puis disparu par radioactivité, on en forge de très gros, de plus en plus gros, en projetant des noyaux les uns sur les autres. Et à force d'accroître l'énergie des chocs, la matière nucléaire retourne à son état primitif de purée de quarks et de gluons. La boucle est bouclée.

La physique nucléaire a du pain sur la planche ! Du quark au nucléon, c'est le champ de la physique hadronique. Du nucléon au noyau, c'est le domaine de la structure nucléaire. Du noyau au quark, cela relève de la matière nucléaire.

Au DAPNIA, volet « recherche fondamentale » de l'expertise nucléaire du CEA, on fait feu de tout bois pour mieux comprendre le noyau. Ce faisant, on espère apprendre comment abréger la vie des noyaux dangereusement radioactifs des déchets nucléaires.

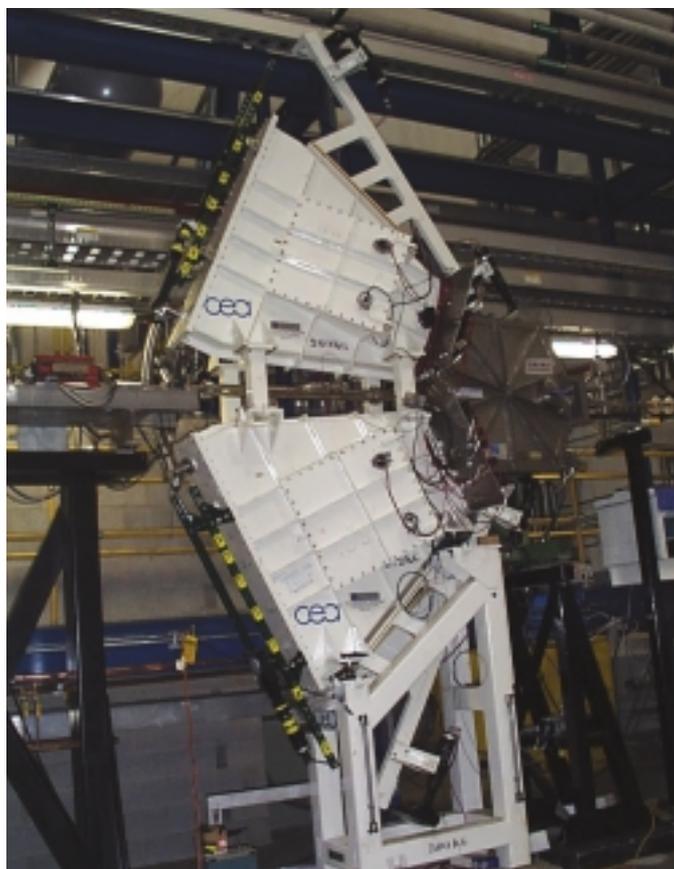
La physique hadronique

La liberté des quarks et des gluons n'a duré qu'un éclair de temps après le Big Bang. La nature a économisé son énergie en laissant ces grumeaux primitifs s'agglutiner dans les *hadrons* (nucléons, mésons etc.), cages définitives car les quarks ne retournent plus à l'état libre. Pour mieux comprendre ce *confinement*, première étape de l'édification de la matière, on étudie l'influence des constituants du nucléon sur ses propriétés et sur celle du noyau.

Quoique englués, les quarks, ces drôles d'oiseaux, remuent dans leur cage. Dans quelle mesure la rotation des quarks influence-t-elle la rotation de leur cage ? Quelle est la *structure en spin* du nucléon ? Deux expériences complémentaires – où le DAPNIA a pris une large part au niveau des cibles, des détecteurs et de l'électronique – l'une au SLAC (avec un faisceau plus intense), l'autre au CERN (avec une gamme d'énergie plus étendue) ont montré que les quarks ne semblaient pas responsables de plus de 30% du spin du nucléon. Il reste à déterminer les responsables des 70% restants. Gluons ? Une composante étrange ? Les deux ? Tout s'enchevêtre : on ne peut déterminer, par exemple, si les quarks étranges trempent dans le spin du proton, tant qu'on ignore si les gluons sont ou non de la partie. Le projet COMPASS, au CERN, va permettre d'avancer dans ce domaine. Le DAPNIA y participe au niveau de la physique et de l'instrumentation avec des détecteurs à haute résolution, comme

MICROMEGAS capable d'analyser de très intenses flux de particules (38, 41). En attendant, la présence éventuelle d'étrangeté dans le nucléon est explorée dans l'expérience HAPPEX (30, 42) qui utilise les faisceaux d'électrons polarisés de CEBAF, en Virginie. Avec les dispositifs « ARC (31), EP » (*photo*), et le polarimètre Compton (42), le DAPNIA a fourni trois outils de référence pour mesurer l'énergie et la polarisation de ces faisceaux.

Autre voie pour décortiquer les relations entre force nucléaire et force de couleur : mesurer comment répond le noyau le plus simple, le deuton, (un proton et un neutron) à un bombardement d'électrons. Le deuton a une forme de ballon de rugby dont le choc



EP - Dispositif de mesure de l'énergie du faisceau de CEBAF par diffusion Électron-Proton : on mesure la déviation des électrons par des noyaux d'hydrogène dans les deux "bras" de mesure (estampillés "CEA") que montre le cliché

est plus rude par le bout pointu que par le côté plat. C'est un peu pareil pour les chocs électrons-deutons. Or l'ovalisation du deuton est liée à la répartition et au mouvement des charges électriques portées par les quarks du proton et du neutron. Ces quarks influencent donc la réponse du deuton. Et pour que la rotation anarchique des électrons-projectiles et des deutons-cibles ne brouille pas l'observation, on « fige » leur spin. En jargon de physicien, on bombarde des deutons polarisés avec des électrons. Le DAPNIA a eu un rôle (pro)moteur dans cette expérience dite « t_{20} » (30), la toute première sélectionnée à CEBAF, éclatante consécration pour le DAPNIA.

Lorsqu'un électron est dévié par un nucléon qu'il a frôlé, il y dépose un grain d'énergie sous la forme d'un photon un peu particulier : un photon « virtuel », sonde capable de distinguer des détails d'autant plus fins que son énergie est élevée. Cette « diffusion Compton virtuelle » mesure les déformations que provoque le champ électromagnétique du photon virtuel dans les distributions de charge et de courant électriques du nucléon, grandeurs directement influencées par les quarks et les gluons. De telles expériences, menée à MAMI (Mayence) puis à CEBAF, avec une importante participation du DAPNIA, renseignent sur des caractéristiques fondamentales du nucléon, ses polarisabilités. En augmentant encore l'énergie de la sonde, on espère accéder à de nouvelles fonctions de structure du nucléon et ainsi mieux comprendre sa structure en spin.

L'interaction nucléon-nucléon passe par celle entre chaque nucléon et le méson messager de la force. Étudier la seconde renseigne sur la première. Une méthode consiste à son-

der des noyaux avec des photons, réels, ceux-là. Si un photon de quelques GeV heurte un noyau, le grain d'énergie déposée est assez concentré pour ne toucher qu'un seul nucléon du noyau et provoque un remue-ménage très local de ses quarks. Cette frappe chirurgicale éjecte du nucléon une paire quark-antiquark qui se recombine en un méson. À CEBAF, l'énergie est suffisante pour extraire des mésons lourds, des mésons vecteurs. Il en est de plusieurs sortes, en fonction de la nature de leurs quarks. Comparer les taux de production de différents mésons permet de préciser l'influence des quarks sur l'interaction nucléon-méson, « ciment » de la force forte. De telles expériences sont menées à CEBAF, avec peut-être en prime la mesure indirecte de la composante des quarks étranges dans le proton, via l'éjection du méson Φ , composé exclusivement d'une paire quark-antiquark étranges. Le DAPNIA contribue à « CLAS », le détecteur tous azimuts des produits des réactions.

Le DAPNIA mène aussi des recherches théoriques sur ces domaines et sur d'autres qui associent QCD (chromodynamique quantique) la théorie de l'interaction forte, à d'éventuels phénomènes de pseudo-gravité à l'échelle du nucléon. Un pas vers l'unification ?

Structure nucléaire et matière nucléaire

Complémentaire de la « microchirurgie », l'étude des propriétés globales des noyaux soumis à de gigantesques températures, pressions ou déformations, aux chocs les plus violents, au gavage par ajouts de nucléons, jusqu'à les casser ou même les pulvériser est une autre façon de mieux comprendre la matière nucléaire. On peut ainsi valider et éventuellement affiner les théories développées à partir d'observations sur les noyaux stables en vérifiant si elles s'appliquent aux noyaux « extrêmes ». On sait fabriquer de tels noyaux et les accélérer comme au CERN et au GANIL où le nouvel accélérateur SPIRAL fournira des faisceaux in-

tenses de noyaux radioactifs, ces noyaux « exotiques » que la nature ne nous offre que dans les étoiles agonisantes ou dans les supernovæ.

Un noyau, c'est comme un château de cartes. Il reste stable et intact tant qu'on ne le bombarde pas d'objets lourds ou rapides, qu'on ne le fait pas tourner trop vite, qu'on ne retire pas une ou plusieurs cartes cruciales pour son équi-

libre ou sa cohésion, tant qu'on ne rajoute pas trop de cartes, tant qu'on ne le met pas dans la chaudière ou sous un rouleau compresseur etc. Mais si on lui inflige ces avanies progressivement, en observant chaque fois comment il réagit, on acquiert quantités d'informations sur la façon dont les cartes tiennent les unes aux autres, lesquelles tombent en premier etc. On apprend sur les cartes comme sur leur édifice.

préférer une forme différente de sa forme habituelle. Il peut devenir poire ou ballon de rugby alors qu'il est plutôt ballon de foot quand il ne tourne pas. Comparer le noyau « normalement » déformé et son clone « super-déformé » – son *isomère de forme* (17) –, étudier comment on passe de l'un à l'autre, permet de mieux comprendre le noyau. Plusieurs études sont menées dans le monde. Certaines ont été initiées par l'IN2P3 rejoint par le DAPNIA, auprès de l'accélérateur Vivitron à Strasbourg, grâce aux détecteurs Eurogam puis Euroball, installé dans une version améliorée à Legnaro, en Italie, puis revenu à Strasbourg. Un autre programme d'études de noyaux déformés et non stables est en cours à GANIL et se poursuivra avec le futur détecteur Exogam dans lequel le DAPNIA est impliqué.

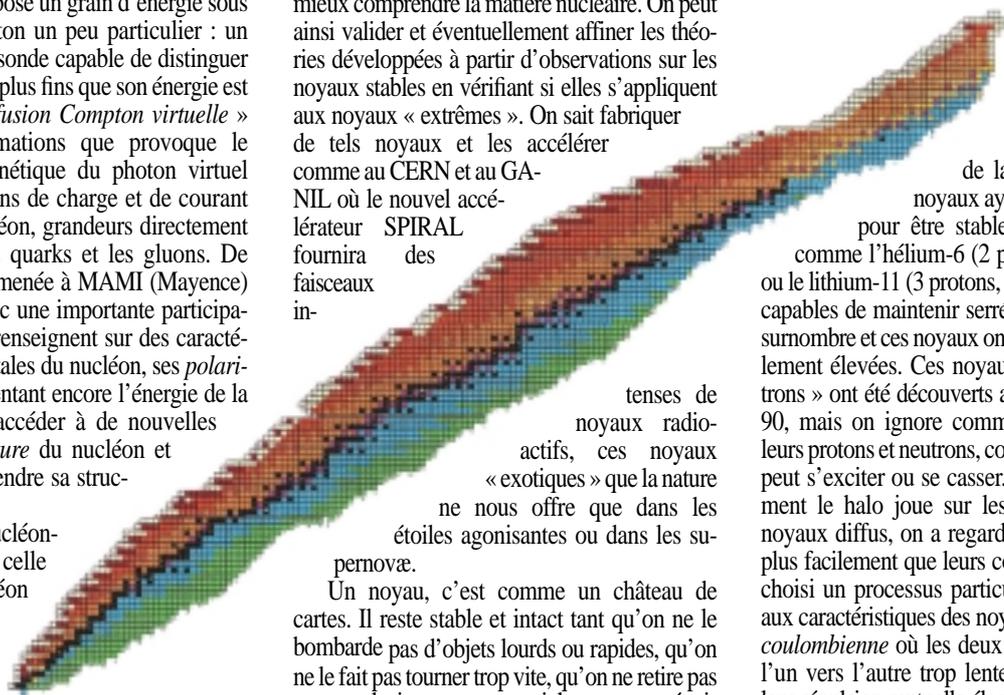
Un thème voisin de la déformation : les noyaux ayant trop de neutrons pour être stables. Les plus légers comme l'hélium-6 (2 protons, 4 neutrons) ou le lithium-11 (3 protons, 8 neutrons) sont incapables de maintenir serrés leurs neutrons en surnombre et ces noyaux ont des tailles anormalement élevées. Ces noyaux à « halo de neutrons » ont été découverts au début des années 90, mais on ignore comment se répartissent leurs protons et neutrons, comment un tel noyau peut s'exciter ou se casser. Pour étudier comment le halo joue sur les propriétés de ces noyaux diffus, on a regardé s'ils fusionnaient plus facilement que leurs cousins denses. On a choisi un processus particulièrement sensible aux caractéristiques des noyaux, la fusion sous-coulombienne où les deux noyaux se dirigent l'un vers l'autre trop lentement pour vaincre leur répulsion mutuelle électrique, leur barrière coulombienne.

Parfois pourtant, les deux noyaux passent à travers la barrière par effet « tunnel » (21), et fusionnent. Deux expériences auxquelles participe le DAPNIA, à GANIL, et à Louvain-la-Neuve, en Belgique, viennent d'établir que les noyaux à halo fusionnent plus facilement. Il est vrai que ces noyaux plus étendus que les autres de même masse s'attirent à plus longue distance.

La transmutation des déchets à vie longue

Les « cendres » des centrales nucléaires sont des noyaux radioactifs. Certains le restent des millions d'années. Pour ne pas léguer à nos descendants une planète gorgée de becquerels, il urge de rendre ces déchets inoffensifs de façon fiable et définitive. On enterre actuellement ces fûts pleins de curies sous des sites qui obligent à bétonner. Mais pour le long terme, il faut trouver des solutions plus radicales en réduisant l'activité des déchets (39).

La "Charte des noyaux" (45). Sur ce graphique, les noyaux sont représentés par des carrés de couleur : seuls les violets sont stables ; les bleus et verts sont radioactifs avec un excès de neutrons, les oranges, oranges clairs et gris le sont avec un excès de protons.



La nature nous aide : en greffant un neutron sur certains noyaux, on obtient des noyaux dont la radioactivité est bien plus brève, voire nulle. Ainsi, le technétium-99 qui « crache » moitié moins au bout de 200.000 ans est « transmuté » avec un neutron de plus en technétium-100 dont la radioactivité décroît d'un facteur mille en moins de dix minutes, et qui se transforme spontanément en ruthénium-100 stable, c'est-à-dire non radioactif. Gagné !

En théorie seulement. Car il faut bien viser les noyaux, avec des neutrons en nombre suffisant et d'énergie adéquate. Sinon, pas de transmutation ou des transmutations indésirables ou trop rares. Recherche sur deux fronts : 1) la production de geysers de neutrons à partir de réactions de spallation (22) : on catapulte sur une cible des protons d'environ 1 GeV qui y provoquent une cascade de réactions nucléaires dont la phase finale est l'éjection de neutrons pouvant atteindre plusieurs centaines de MeV ; 2) l'étude systématique (à Geel en Belgique) de la capture de neutrons de différentes énergie par toutes sortes de noyaux.

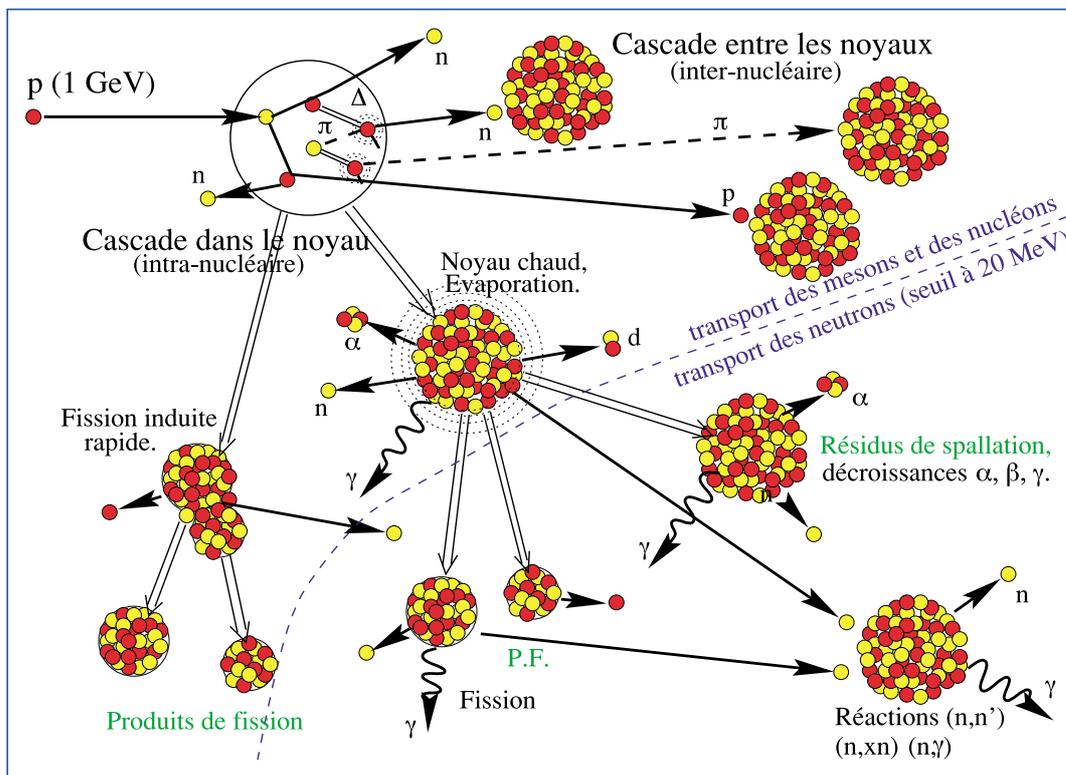
Au DAPNIA, on a pris cet enjeu de société à bras le corps, témoin l'aventure du CESEN (22), à laquelle ont largement participé des membres du département. Ce Cercle d'Études Sur l'Énergie Nucléaire* a ouvert de nouveaux horizons. Se préoccuper des déchets nucléaires a ainsi conduit à mener un travail pluridisciplinaire sur les « systèmes hybrides » : accélérateur de protons + cible de spallation + réacteur nucléaire.

Condition *sine qua non* pour disposer d'assez de neutrons de spallation : obtenir des faisceaux continus de protons d'une intensité sans précédent : pas loin de 100 milliampères (plus d'un milliard de milliards de protons par seconde). Dans ce but le DAPNIA apporte son expertise mondialement reconnue en matière

d'accélérateurs au projet IPHI. Des mesures à SATURNE ont défriché le phénomène. Les études se continuent au GSI. Elles doivent résoudre des problèmes de physique fondamentale et de simulation, mais aussi vaincre des défis technologiques considérables. Avec la DAM et l'IN2P3, le DAPNIA apporte son double savoir-faire fondamental et instrumental. Le

« bonnes » transmutations, celles qui abrègent la vie des déchets radioactifs.

Voilà pourquoi le département s'est investi dans un projet d'étude expérimentale des possibilités de transmutation : Mini-INCA. Il s'agit d'irradier des micro échantillons dans le flux de neutrons le plus intense du monde, celui du réacteur de l'ILL, afin de



La spallation : cascades de réactions à l'intérieur d'un noyau frappé par des protons de 1 GeV.

Japon, les USA, la Suède etc. y collaborent. Une fois les intenses faisceaux de protons obtenus, il faut maîtriser les paramètres de la spallation, ensemble de réactions nucléaires très complexes, afin de contrôler l'énergie et l'angle d'émission des neutrons émis. Puis, ces neutrons de spallation doivent être ralentis dans un réacteur pour qu'ils interagissent avec le combustible (produisant ainsi d'autres neutrons par fission) et les noyaux qu'on veut transmuter. Mais de combien faut-il les ralentir ? Cela se dit en langue physique : « déterminer le spectre idéal de neutrons ». On veut en effet savoir provoquer les

déterminer ce fameux spectre idéal de neutrons. Dans ce cadre, une mesure décisive sur l'américium-241 (39) a donné l'espoir de réaliser un jour ce vieux rêve des alchimistes : transmuter les éléments à volonté.

Pas pour de l'or. Pour quelque chose de bien plus précieux : une planète propre.

* Le CESEN a publié un excellent ouvrage de vulgarisation : disponible à la DSM, Saclay : « ÉLECTRONUCLÉAIRE-Une présentation par des physiciens »

Les trois infinis se chevauchent, s'imbriquent, se fécondent... Ainsi marchent ensemble les trois physiques qui les scrutent. Ainsi fonctionnent les trois modes de pensée et d'action qui poussent vers plus de savoir : l'expérience, la théorie et l'instrumentation. C'est la valse de la connaissance. Un : l'observation fait comprendre ; deux : on élabore des théories et l'on dégage des lois de la nature ; trois : l'application de ces lois permet de fabriquer des instruments d'observation plus performants. Et c'est reparti pour un tour : avec ces outils perfectionnés, on observe plus finement, on peaufine les théories, on découvre de nouvelles lois, lesquelles mènent à des appareils encore plus perfectionnés. Et rebote ! Ainsi va le progrès scientifico-technologique. Alors, quand un même organisme réunit sous un même toit expérimentateurs, théoriciens et « instrumentalistes », il contribue à ce progrès de façon particulièrement efficace. Ainsi en est-il du DAPNIA dont on vient de survoler le volet physique fondamentale. En voici le volet technologique.

L'Instrumentation Associée

(le « IA » du DAPNIA)

Il est des mots qui vous posent un communicant, « synergie » en est un. Un peu langue de bois¹, le voilà, pour une fois, lâché dans ScintillationS. Mais au fond, sous ses dehors rébarbatifs, il désigne des choses plutôt sympathiques, le résultat d'un travail en équipe en dépend, l'efficacité d'une organisation y est liée.

Ce souci de synergie est à l'origine du DAPNIA. Le pari fut que des acquis et des compétences venant des quatre horizons allaient servir à tous, une fois regroupés. Le comité d'évaluation dit « des Prix Nobel » (44) ne s'y est jamais trompé qui nous félicite régulièrement d'avoir su mettre en place cette fameuse synergie. La mayonnaise a pris.

La synergie « synergie » de façon d'autant plus efficace que l'on trouve une grande diversité de compétences pour satisfaire des besoins précis. Au DAPNIA, les besoins précis sont les instruments pour explorer les trois infinis et l'on y trouve sur place toutes les compétences nécessaires. La proximité renforce la cohésion. Cette « compacité » géographique rend encore plus efficace la synergie intellectuelle où s'allient l'imagination et la rigueur respectives des « cognitifs » et des « instrumentalistes ». Baignant dans la même recherche, les premiers acquièrent l'esprit instrumental, les seconds, l'esprit cognitif.

Résultat : un physicien progresse plus vite lorsque des tronçons tests du super accélérateur dont il a besoin, avec ses aimants, ses cavités, ses usines cryogéniques, sont ciselés par l'ingénieur et le technicien du bâtiment d'à côté. La mise au point d'un détecteur requiert d'incessantes navettes entre le cognitif qui traque une nouvelle particule et l'instrumentaliste en quête du meilleur dispositif pour la piéger. Ces navettes traînent si l'un est à Dunkerque et l'autre à Perpignan... L'ingénieur qui assure l'étude, la réalisation et le « contrôle commande » des instruments de physique propose des solutions originales s'appuyant sur les techniques dernier cri qu'il connaît bien. C'est tellement plus pratique et rapide lorsqu'il n'y a que deux cents mètres à faire pour se consulter. Quelle aubaine pour un chercheur de trouver à trois bureaux du sien les électroniciens qui concoctent son système de tri des données et peaufinent la puce miracle capable d'encaisser les pires rayonnements. C'est si commode d'être à deux pas de l'informaticien qui gère le réseau d'ordinateurs ! Lorsque mécaniciens et projeteurs sont dans le bâtiment voisin, point n'est besoin d'échanger trente-six fax pour discuter de la faisabilité d'un ensemble mécanique ou du meilleur choix de l'industriel qui va le réaliser. Ainsi, le laboratoire ne se fourvoiera pas dans une usine à gaz difficilement réalisable et hors de prix. Un grand projet dont tous les acteurs sont dans un mouchoir de poche avance forcément plus vite. Et pour faire connaître et répertorier les belles réalisations de tout ce monde-là, quel pied d'avoir sur place photographe, caméraman, archi-viste, « communicateur », spécialiste du Web, promoteur de la « démarche qualité »...

Très peu de labos au monde ont la chance de réunir l'ensemble de tous ces spécialistes dont les compétences pointues servent à trois disciplines de la physique extrême. Le DAPNIA est l'un d'eux.

La physique des accélérateurs

Les experts ès accélérateurs du DAPNIA, qu'ont rejoint récemment ceux de Saturne, ont l'esprit cognitif. Grâce à la physique, ils ont acquis des compétences tellement reconnues qu'on les sollicite de partout pour tous types de projets incluant un accélérateur, y compris pour la physique « lourde ». Cela leur a permis d'avancer dans la compréhension des phénomènes fondamentaux qui limitent la puissance des accélérateurs et dans la maîtrise technologique d'étapes délicates. Les performances s'en

ressentent : de 1987 à 2000, les cavités supraconductrices sont passées de 5 à 40 mégavolts par mètre (MV/m). On obtient ainsi la même énergie avec un accélérateur 8 fois plus court, ou 8 fois plus d'énergie avec un accélérateur de même taille.

Ce gain en « gradient accélérateur » s'est accompagné

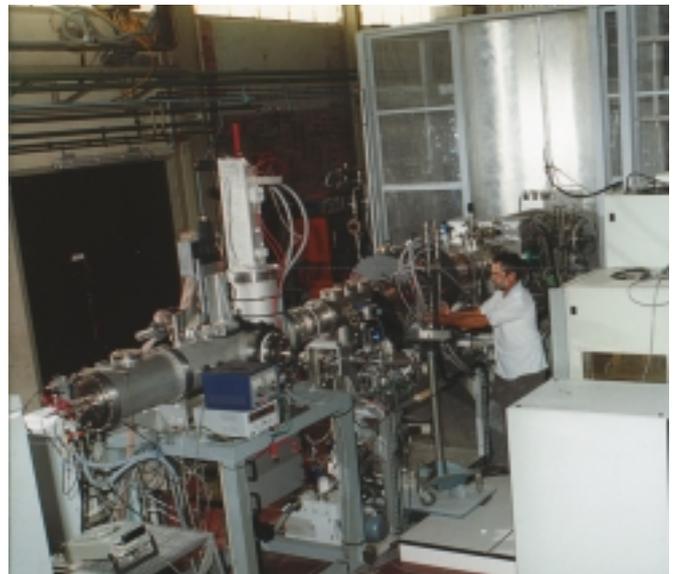
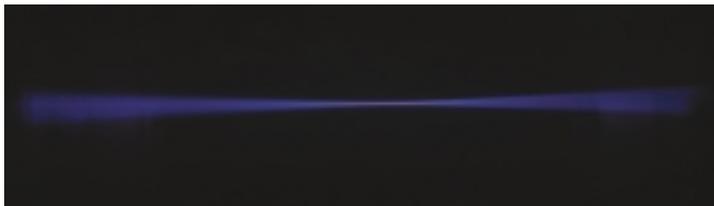


Photo d'ensemble de SILHI, source prototype de protons à haute intensité pour le projet IPHI (voir page 9 et 11).



Le faisceau de SILHI (photo de droite) à son point le plus focalisé (4 mm de diamètre). Ce très intense faisceau de proton, visible à l'œil nu à l'intérieur du tube, ionise l'hydrogène résiduel de la source, produisant cette belle couleur bleue.

d'un progrès notable en luminosité et en stabilité des faisceaux, grâce aux

développements de la dynamique de faisceau, et au perfectionnement des composants (alimentations, mesures...). Les progrès des

¹ Synergie : n.f (XVIII^e; gr. συνεργία) « coopération ». *Didact.* Action coordonnée de plusieurs organes, association de plusieurs facteurs qui concourent à une action, à un effet unique [in le petit Robert].

grosses machines pour la physique lourde profitent aux autres accélérateurs. Les allégres péripéties de SOLEIL ont rendu célèbres les accélérateurs à rayonnement synchrotron si utiles à la physique des solides ou à la biologie. On sait moins que ce rayonnement était au départ un « parasite » mangeur de l'énergie des faisceaux. À force de décortiquer ce rayonnement pour minimiser ses « nuisances », on s'est aperçu que c'était une fabuleuse source de lumière, de l'infrarouge aux rayons X, permettant de sonder la matière à presque toutes les échelles, de l'atome au cristal, de la molécule à la matière vivante. Au DAPNIA, on a conçu et fabriqué des pans entiers d'un futur accélérateur de type SOLEIL (46), cavités, cryomodules (tronçons d'accélérateur refroidis à l'hélium liquide), aimants de l'accélérateur et des lignes de transport de faisceau, contribuant à forger les sources de lumière synchrotron de demain.

Être un spécialiste des accélérateurs au DAPNIA, c'est aussi servir la société en participant au combat contre les déchets nucléaires (voir page 9). Le projet IPHI, accélérateur de protons à forte puissance destiné à produire des neutrons par spallation, a démarré sous l'œil attentif de plusieurs communautés intéressées par ce type de machines, à commencer par les physiciens nucléaires pour l'obtention de faisceaux radioactifs : (voir page 8).

Le DAPNIA a perdu certaines compétences très pointues pour cause de départs en retraite. Toutefois, le renfort des équipes de Saturne a permis de rassembler des compétences complémentaires en une équipe capable de concevoir un accélérateur de A jusqu'à Z, depuis la source jusqu'à l'entrée des détecteurs.

Le cryomagnétisme

Autre domaine où les équipes IA sont en étroite symbiose avec les équipes APN : l'élaboration des gigantesques électroaimants que requièrent les explorations de l'infiniment petit. Sous peine de dimension et de coût prohibitifs, ces monuments technologiques doivent être refroidis à l'état supraconducteur pour stocker les énergies colossales dont ils ont besoin. Il faut des technologies de pointe pour amener au degré de précision et de résistance mécanique indispensables les énormes aimants qui courbent et focalisent les faisceaux de particules ultra-énergétiques et ceux qui sont au cœur de détecteurs gros comme des nefs de cathédrales. Malgré leur taille, ce sont des pièces d'orfèvrerie.

Les multiples expertises acquises lors de leur élaboration irriguent aussi bien l'industrie que d'autres domaines de recherche. Par exemple, celles sur la fusion thermonucléaire contrôlée. Le DAPNIA conçoit actuellement une station d'essais pour les bobines supraconductrices du réacteur expérimental de fusion nucléaire W7X qui sera installé en

Allemagne. Un aimant toroidal de 20.000 ampères peut aussi bien être le cœur d'un détecteur qu'une bouteille à plasma, prélude à l'énergie de demain.

Ainsi, en acquérant des compétences pour répondre aux besoins de physiciens avides de connaissance, les instrumentalistes du DAPNIA contribuent peut-être à préparer une vie meilleure pour tous.

La synergie quotidienne du DAPNIA a permis d'atteindre dans des temps records de magnifiques objectifs. Citons entre autres : un détecteur du laboratoire DESY à Hambourg livré à la fin des années 70 (par le DPhPE, un des ancêtres du DAPNIA). Puis dans les années 80, un solénoïde pour l'expérience ALEPH au CERN, et la réalisation de quadripôles pour l'accélérateur HERA de DESY (27, 28), dont la technologie a été transférée, pour leur réalisation en série (240



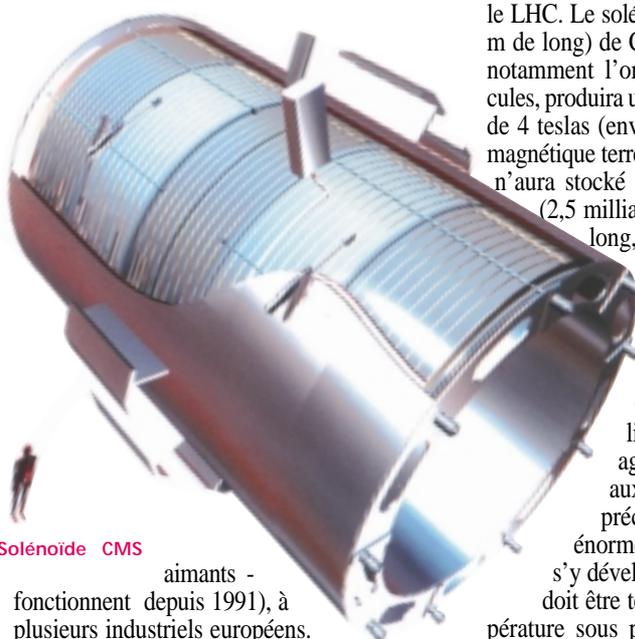
Quadripôles supraconducteurs pour LHC prêt à partir pour le CERN.

1995 à Saclay, ces prototypes détiennent toujours des records du monde (17). Trois prototypes de seconde génération sont actuellement en fabrication dans les ateliers du DAPNIA. On vient de tester l'un d'eux (46). Là encore, les compétences acquises seront transférées vers les industriels européens qui réaliseront les 400 aimants dont a besoin le LHC. La quête du Higgs crée de la richesse.

Pour répondre aux besoins toujours plus ambitieux des physiciens, le DAPNIA, partenaire de collaborations internationales, conçoit actuellement deux gigantesques aimants pour le LHC. Le solénoïde (6 m de diamètre et plus de 22 m de long, 22 m de diamètre et plus de

800 tonnes de masse froide, le toroïde du détecteur ATLAS sera l'électroaimant le plus gigantesque et le plus compliqué jamais réalisé.

Cet enchevêtrement « eiffilien » de poutrelles savamment agencées (9, 17) doit résister aux contraintes mécaniques sans précédent qu'imposent les énormes champs magnétiques qui s'y développent. Et délicat, avec ça : il doit être tenu étroitement serré en température sous peine d'une catastrophe majeure : un retour au régime « chaud » libérerait quasi instantanément la colossale énergie stockée (en gros égale à celle de cette énorme masse lancée à la vitesse d'un TGV, bonjour les dégâts !). On perçoit là encore à l'évidence le rôle majeur de la synergie de tous les corps de métiers du DAPNIA, y compris, bien sûr, les physiciens.



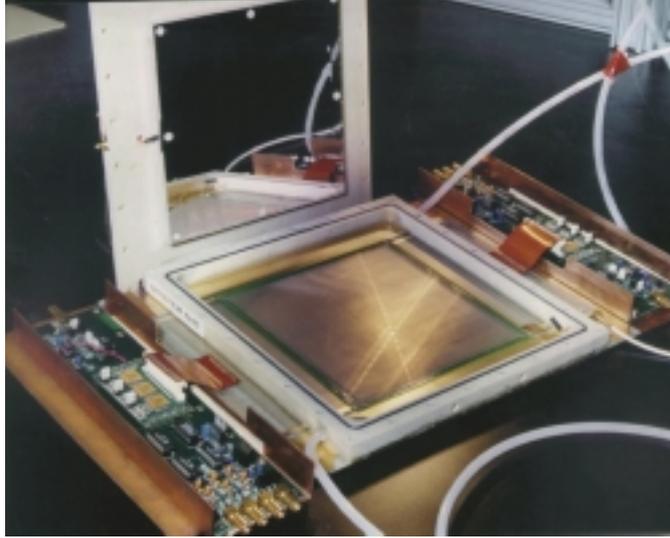
Solénoïde CMS

aimants - fonctionnent depuis 1991), à plusieurs industriels européens. La quête du gluon a rempli leurs carnets de commandes...

Avec l'étude des quadripôles du SSC (collisionneur texan de 87 km mort-né), le DAPNIA s'est fait la main sur des quadripôles capables de focaliser des faisceaux de très hautes énergies. Il réalise maintenant deux prototypes de première génération pour le LHC. Testés en

Les détecteurs.

La symbiose entre physique et détection abolit la frontière entre le fondamentaliste qui conçoit une « manip », et



Un des premiers prototypes de MICROME GAS, avec son électronique.

l'instrumentaliste qui pousse toujours plus loin les techniques de détection.

Toute expérience de physique a besoin de détecteurs. Tout expérience nouvelle se situe, par définition, aux frontières des techniques de détection : on veut plus grand, plus rapide, plus dense, plus précis, plus robuste et... moins cher. Un détecteur est une sorte de filet à particules. Ou plutôt une superposition de filets et de tamis, chacun précisément adapté à un type de particule. Le tout couplé à des « chronomètres » précis à la nanoseconde ou mieux et à des « aiguilleurs » ultrarapides et sélectifs : il faut distinguer, parmi des milliards de particules, les rares qui signent un événement caractéristique du phénomène recherché. Et si on les a distinguées, il faut en outre contrôler qu'elles s'échappent dans les bonnes directions avec les vitesses attendues. Et tout cela, à des cadences effrénées et sous d'intenses rayonnements. Quand ce n'est pas, au contraire, à un taux désespérément faible, tel que chaque événement potentiel est immédiatement soupçonné de n'être qu'un bruit de fond ou une fluctuation statistique, comme dans les expériences de neutrinos ou de matière noire. Ou encore, et souvent en même temps, à des kilomètres sous la terre, sous la mer, ou dans l'espace... La quasi-quadrature du cercle, avec un mouton à cinq ou six pattes à l'intérieur...

Bon côté de la médaille, le progrès des techniques de détection qu'entraînent les recherches du DAPNIA ont inéluctablement des retombées extérieures. Exemple :

l'instrumentation médicale exploite les perfectionnements des accélérateurs, de la scintigraphie, des détecteurs de rayons X etc. Cet enrichissement n'est pas à sens unique, et le fait d'appartenir au CEA aide souvent à nouer des collaborations mutuellement enrichissantes. Il y a des symbioses naturelles comme dans le domaine des semi-conducteurs et de l'instrumentation, en général avec le LETI. D'autres sont moins prévisibles comme celle qui se noue avec des chimistes concernés par l'extraction des actinides dans le retraitement du combustible utilisé des réacteurs nucléaires ou au sein du projet LENS de détection des neutrinos solaires.

Dans ce domaine le DAPNIA est loin d'œuvrer seul. Témoins, les nombreux projets menés en commun avec d'autres champs scientifiques et

techniques, ou dont les débouchés ne sont pas limités à ses recherches fondamentales propres : ANTHRO-SI (35), MICROME GAS (38, 41) etc. En témoigne aussi son implication à haut niveau dans les conférences d'instrumentation : Beau ne (29), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) (34), Calor 2000 etc., où se rencontrent les experts ès-détecteurs de toutes les disciplines.

Pour percevoir l'univers, il faut des « yeux » et des « oreilles ». Ceux des physiciens sont les détecteurs.

L'électronique et l'informatique

Une fructueuse synergie naquit en 1991, au moment où les physiciens des particules étaient parmi les plus gros consommateurs de moyens informatiques au monde : il en fallait d'énormes pour mettre au jour les bosons Z⁰ et W (26). Au DAPNIA, créé justement cette année-là, chaque service bénéficia naturellement de l'avance, considérable à l'époque, de la physique des particules en matière d'informatique. Sept ans plus tard, le DAPNIA gérait de façon centralisée un réseau de 220 km et 1120 machines travaillant sous huit systèmes informatiques différents.

Pour bien « synerger » il faut des besoins concrets. Surtout quand beaucoup d'argent est en jeu, ou quand il faut des compétences spécifiques pour mener à bien les projets. La microélectronique est une technologie coûteuse et peu de laboratoires de recherche peuvent s'offrir les services d'un groupe capable de concevoir, réaliser et tester des circuits intégrés.



Photo du haut : montage d'une caméra CCD pour EROS, expérience d'astroparticules. Photo du bas : test du contrôleur multi-CCD pour MEGACAM, instrument d'astrophysique. C'est en construisant les caméras CCD pour EROS que le DAPNIA a acquis le savoir-faire indispensable au développement de la caméra géante MEGACAM.

Pendant des années, des électroniciens de ce qui allait devenir le DAPNIA ont accumulé des compétences dans le domaine du traitement analogique du signal. Il fallait fabriquer des circuits électroniques rapides et à bas bruit. La physique nucléaire a toujours été grande consommatrice de ces petits bijoux. La physique des particules avait les mêmes besoins mais au lieu de quelques dizaines de voies par système, il lui en fallait plusieurs millions, tenant dans peu d'espace. Seule la micro-électronique pouvait satisfaire de telles exigences. Le DAPNIA réunit les moyens et rassembla les hommes. Sans ce type de structure, les expériences de physique des particules auraient-elles pu s'offrir pareille technologie ? Aujourd'hui la micro-électronique est au service d'expériences, où s'implique notre département, comme GLAST, COMPASS, ou ATLAS.

Appartenir à un ensemble amplifie les synergies. Ainsi, quand la Direction des Applications Militaires au CEA lança la filière micro-électronique durcie DMILL (43), la participation du DAPNIA à cette aventure permit à la physique des particules (pour ATLAS) et à l'astrophysique (pour les satellites) d'utiliser les puces issues de cette filière, profitant ainsi de leur exceptionnelle tenue aux radiations.

Parfois, comme un prospecteur, on flaire des fils de synergie. Il suffit de creuser pour en tirer des pépites. Par exemple, le télescope gamma du satellite INTEGRAL avait besoin de compétences pointues en matière de puces ASIC numériques. Ce que le DAPNIA a appris en réalisant ces puces servira demain à des expériences de physique nucléaire ou de physique des particules. L'expérience ANTARES, qui traque les neutrinos, lève aussi de beaux fils. Ses centaines de détecteurs à 2000 mètres sous la mer suscitent des développements informatiques de *systèmes distribués en temps réel*² d'un type nouveau. Ces développements utilisent des *technologies d'objets répartis*³ qui seront à la base des systèmes d'acquisition de données pour toutes sortes d'expériences futures, toutes physiques confondues.

Qui peut dire aujourd'hui combien de temps, d'argent et d'efficacité nous ont fait ga-

agner les synergies du DAPNIA, notamment en électronique et en informatique ? Qui peut même imaginer ce qu'elles nous feront gagner demain ?

L'instrumentation générale

L'expérience est montée, les détecteurs fin prêts. La « cible » attend le faisceau de l'accélérateur. Les armoires d'électronique sont sous tension et les ordinateurs prêts à se gorgier de « données ». Ce grand corps complexe peut s'animer. Mais de même qu'on s'assure qu'il y a de l'eau dans la bouilloire avant de la brancher, il faut vérifier que la cible baigne bien dans son hélium liquide, qu'elle est bien dans l'alignement du tube du faisceau, et qu'on a mis le bon champ magnétique dans les aimants qui font prendre les virages aux particules accélérées, sinon le faisceau se perd dans les tubulures et ça



DATCHA, laboratoire de développement et de caractérisation des systèmes d'alignement optique pour les chambres à muons de l'expérience ATLAS, on vise un alignement précis à 20 µm sur 20 mètres de distance.

fait mal. Il y a mille et une vérifications et mesures à faire avant et pendant la prise de données. Il faut connaître la densité et l'épaisseur de la matière de la cible que traverse le faisceau sinon ça ne sert à rien de compter les particules qui sont éjectées vers les détecteurs. Il faut connaître le débit des particules accélérées, leur énergie, leur polarisation. Les détecteurs ont des millions de « voies » à analyser...

Vu la taille des expériences dont s'occupe le DAPNIA et le nombre énorme de paramètres à régler puis à surveiller, vu l'armada de cap-

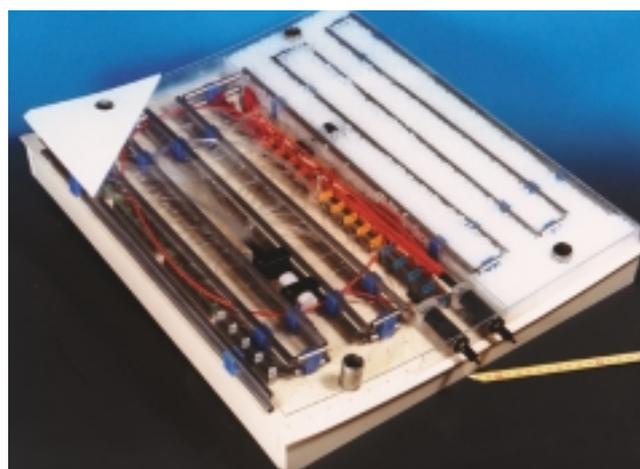
teurs, tiroirs de régulation, alimentations haute tension ou fort courant etc., il faut automatiser le plus possible les commandes, les contrôles et l'interactivité des différents composants. Ceux-ci doivent pouvoir échanger constamment des informations pour que se poursuive l'expérience. On doit pouvoir tout piloter à distance et transmettre les infor-



Cible cryogénique de CLAS (voir page 8) avec son système de contrôle-commande et instrumentation associée. Cette expérience utilise localement le réseau deterrain WorldFIP et le réseau Internet pour la supervision à distance

mations au plus vite.

Les spécialistes en instrumentation générale du DAPNIA conçoivent et implantent ce système nerveux en innovant à chaque expérience. Il sont souvent des précurseurs dans leurs domaines. Ainsi, l'utilisation de réseaux de terrain industriel (WorldFIP, 27) regroupe sur un seul câble l'information numérisée de dizaines de capteurs et rend les détecteurs moins encombrants et moins chargés



Maquette de l'installation du système optique de Monitoring pour le calorimètre électromagnétique de l'expérience CMS. Représentation de la face avant d'un Module de 400 Cristaux

de matière. Cela fait l'affaire des physiciens car la matière est un piège à particules et une source de rayonnements indésirables. Atténuer le bruit de l'autoroute permet d'entendre les cigales...

² Plusieurs processeurs répartis sur un réseau travaillent ensemble et leurs programmes subissent des contraintes de temps.

³ Pour travailler ensemble, différents programmes répartis sur un réseau se localisent les uns les autres de façon automatique.

L'instrumentation particulière requise au DAPNIA n'existe pas toujours et quand elle existe, elle est souvent inadaptée. Un appareil capable de mesurer le niveau d'hélium liquide dans un cryostat et intégrable à WorldFIP ne se trouve pas dans l'industrie car son marché est trop restreint. On l'a fait sur mesure au DAPNIA (42).

Mais quand ils existent, nous avons tout intérêt à utiliser les produits du commerce. Nous le faisons dans le domaine informatique en mêlant produits maison et outils compatibles avec le Web. On peut ainsi superviser, modifier et assurer la maintenance à distance des expériences sensibles (les cryostats d'ATLAS au CERN par exemple). Avantage pour les physiciens : ils peuvent suivre l'expérience en cours depuis leur laboratoire. Avantage pour les équipes techniques, qui ne disposent plus sur place de leurs propres installations expérimentales : elles peuvent faire leurs diagnostics à distance et économiser de coûteux déplacements.

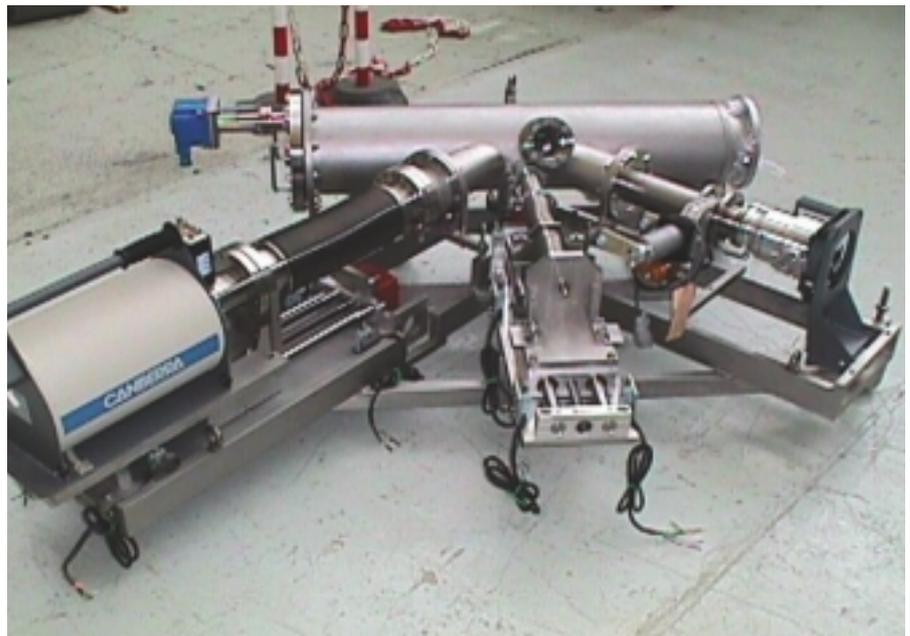
Nos domaines très spécifiques, où l'instrumentation reste forcément au stade du prototype, ne requièrent pas les mêmes méthodes qu'une industrie de production. Mais ces instruments qui resteront uniques sont conçus avec le même souci de rigueur, de qualité et de fiabilité que s'ils devaient être produits en grande série. À cela s'ajoute l'adaptabilité de nos outils de travail aux besoins des physiciens qui varient au fur et à mesure des progrès de la mise au point. Cette rigueur et cette souplesse nous ont permis de réaliser l'asservissement d'une cavité optique de haute finesse, ce qui ne s'était jamais fait avant le Polarimètre Compton (42). Cette « industrialisation dans l'artisanat » n'est possible que dans une structure de type DAPNIA grâce encore à la symbiose quotidienne entre des physiciens, des ingénieurs et des techniciens.

Ainsi, en phase de R&D on utilise une programmation graphique et une interface conviviale pour visualiser rapidement les premiers résultats grâce à un logiciel de contrôle commande adapté (capteurs d'alignement d'ATLAS). En « manip », on choisit plutôt une programmation par un automate industriel (liquéfacteurs d'hélium, CRYHOLAB, Mini INCA). Pour les systèmes contrôlant des grands instruments tels que des accélérateurs (TTF) ou des détecteurs (COMPASS), une station de travail couplée à un châssis VME offre la puissance nécessaire pour traiter un grand nombre de voies, répondre aux contraintes sévères en temps et fournir une capacité de traitement importante (par exemple, pour W7X, collecter et stocker 75 millions d'échantillons en quelques dizaines de secondes). Pour répondre aux souhaits variés des utilisateurs, nous avons même développé une interface distribuant l'information à chacun des moyens cités précédemment.

Pour conserver la qualité de la physique du DAPNIA et garder notre savoir-faire, il est crucial de préserver cette symbiose quotidienne entre physique et instrumentation qui nous

pousse vers des solutions innovantes. Conserver les indispensables équipes en génie électrique et en électromécanique nous apporte une souplesse qui, plus qu'un simple confort, est un facteur de progression rapide. Cette synergie entre APN et IA serait impuissante sans ces équipes d'experts. Il n'est pas souhaitable de sous-traiter leurs activités. Cela nous ferait perdre la souplesse et la rapidité qu'offre la proximité, ainsi que le nécessaire retour d'expérience.

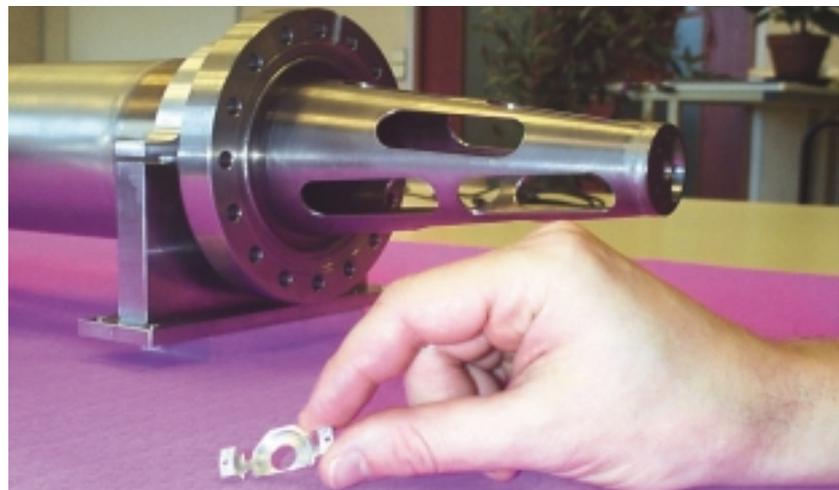
La mécanique



Mini-INCA - Chambre à réaction. Étude mécanique du système de récupération de l'analyse des échantillons irradiés sur une ligne de l'ILL. (voir page 9)

La mécanique est l'une des plus anciennes branches de la physique. En tant que science de la statique, elle est si omniprésente qu'elle en

les mécaniciens la poussent jusqu'à ses limites techniques dans des réalisations colossales, ultraminutées ou très complexes, ils font



Support d'un miroir de la cavité optique Fabry-Pérot du polarimètre Compton à CEBAF (voir page 7). Un miroir d'un centimètre de diamètre est placé à chaque extrémité de la cavité. L'exceptionnel pouvoir réfléchissant de ces miroirs : 0,999895 permet un grand nombre d'allers-retours de la lumière, ce qui amplifie considérablement (7 000 fois) le faisceau laser.

évoluer cette science et la mettent à l'honneur. Mais le plus souvent, le mécanicien est l'émittance grise qui veille à ce que tout soit à sa place au bon moment. C'est un rôle « d'intégrateur » dans lequel s'expriment parfaitement les mécaniciens généralistes du DAPNIA qui travaillent sur une expérience pour en définir la

Fabry-Pérot du polarimètre Compton (*voir page 7*) est à ce titre un exemple réussi. La pièce figure alors en bonne place dans la plaquette de l'entreprise : l'industriel a appris à la faire, il en est fier, il sera capable de la réaliser ou de l'adapter à d'autres utilisations !

En décrochant et en honorant un contrat,

buer à réaliser les rêves grandioses des physiciens, source d'enrichissement pour tous les acteurs, concepteurs comme réalisateurs, chacun transmettant aux autres ses désirs et son savoir...

Synergie, qualité et communication.

Au DAPNIA, la synergie va plus loin que la rationalisation des moyens et l'économie d'échelle. En « synergieant », le DAPNIA cherche mieux et construit plus efficacement les moyens de chercher. Tout simplement.

Sa structure particulière lui permet d'acquérir et d'utiliser des techniques quasi « industrielles » pour conduire de projets de plus en plus gigantesques. C'est impératif vu la complexité des expériences et la taille des instruments.

Gérer des grands projets, comme le fait couramment l'industrie, est moins familier aux chercheurs pas toujours rompus aux techniques de maîtrise des programmes. Une des grandes réussites du DAPNIA est d'avoir su mettre en place une organisation adaptée à ses programmes, assez souple pour gérer avec la même rigueur des expériences de toutes tailles : le DAPNIA gère près de 80 projets en parallèle, du plus petit impliquant un physicien pendant quelques mois et coûtant quelques dizaines de milliers de francs en matériel, aux plus gros (actuellement LHC et INTEGRAL) pesant plus de 100 hommes ans sur une décennie, et plus de 100 millions de francs. Dans tel projet, nous participons à l'analyse des résultats. Dans tel autre, nous apportons une expertise technique. Il arrive que le DAPNIA soit le maître d'œuvre de la totalité du projet, coordonnant nombre de laboratoires et d'industriels, souvent prestigieux.

Le coût des très grands équipements est tel que tous les pays cherchent des partenaires. Grands accélérateurs et leur cortège de détecteurs, télescopes terrestres ou satellisés, tous ces appareils sont pensés, décidés, développés de longue date par des groupes de centaines de chercheurs de tous pays. Il faut évaluer les compétences et les moyens de chacun des années à l'avance, choisir les meilleures solutions et coordonner les efforts, le tout sans perdre de temps, ni se fourvoyer dans des impasses.

Ainsi, aux frontières de la science « pure », se sont développées des techniques assurant à la recherche efficacité et économie. Difficile de distinguer les méthodes propres qu'ont développées les ingénieurs de recherche de celles qu'ils ont importées de l'industrie, car le va-et-vient est incessant. Mais, à court ou moyen terme, de manière éclatante ou plus discrète, les méthodologies développées pour la recherche de base bénéficient à tous.



Bobine BO, maquette des bobines du toroïde ATLAS. Dimensions : 8 x 3 mètres. Chacune des huit bobines définitives fera 25 x 8 mètres.

structure, les « sous-ensembles » et leur répartition dans l'espace. Le mécanicien bâtit la cathédrale qu'a élaborée le physicien en choisissant pour chaque partie le meilleur matériau afin que l'ensemble concilie la légèreté et la solidité.

Lorsque les sous-ensembles sont de la compétence d'entreprises privées, on leur en confie la conception et la réalisation et les mécaniciens du DAPNIA se chargent de mettre en place et de suivre ces contrats. Mais nombre de sous-ensembles ne peuvent être confiés d'emblée à l'extérieur car, au DAPNIA, un instrument est un prototype qui évolue souvent au rythme d'après discussions au sein de collaborations internationales. Une entreprise avec ses impératifs de rentabilité ou même de simple survie ne s'engagera pas dans la fabrication à quelques exemplaires d'un appareillage coûteux tant qu'il est modifié tous les trois jours. Elle n'entamera sa réalisation qu'une fois les choix stabilisés, ou sinon, ce sera plus cher pour le département.

On peut d'abord, lors de la mise au point d'un sous-ensemble au DAPNIA, tester sa faisabilité, puis transmettre la technique acquise à une entreprise prête à s'investir pour étendre son savoir-faire, par exemple aux aimants d'accélérateurs. Mais si ce sous-ensemble ne doit exister qu'à un seul exemplaire, le mécanicien le définit pièce par pièce jusqu'à pouvoir en distribuer la fabrication aux industriels compétents. Souvent certaines pièces dépassent les compétences d'entreprises mêmes spécialisées ; mais en collaborant avec ces entreprises, on finit par les réaliser. La cavité

première retombée patente et mesurable de la recherche, une entreprise ajoute des cordes à son arc. Ce n'est pas forcément le DAPNIA qui transmet ces nouvelles compétences. Mais nos besoins précis, notre soutien et le partage du risque aident l'entreprise à se dépasser pour réaliser un produit nouveau. Par ces petites actions cumulées nous contribuons régulièrement à l'accroissement du savoir-faire des entreprises. Ces retombées aux bénéficiaires difficilement chiffrables, mais bien réels, irrigueront assurément bien d'autres domaines que la recherche fondamentale.

Être mécanicien, c'est garder le contact avec tous les domaines scientifiques et techniques car la mécanique est au confluent de tout ce qui concourt à la réalisation d'un objet. Ceux qui, consciemment ou inconsciemment, ont choisi la mécanique pour garder ce contact trouvent au DAPNIA un lieu d'expression à la hauteur de leur curiosité. Ils ne sont pas nombreux les endroits où la même personne est capable de s'occuper successivement de la conception mécanique d'éléments magnétiques, de cavités accélératrices, de cryostats, de détecteurs, de boîtiers d'électronique, d'éléments optiques etc.

On souligne souvent l'intérêt pour les physiciens de côtoyer les techniciens et ingénieurs. Mais on oublie parfois de rappeler que côtoyer ces mêmes physiciens est une source intarissable de motivation. Leur passion communicative cause parfois notre perte (de temps libre)...

Être mécanicien au DAPNIA, c'est finalement assembler les plus belles réalisations de ses divers domaines d'excellence pour édifier un grand instrument de recherche. C'est contri-

Le DAPNIA a su trouver des équilibres dans cette complexité, tout en assurant un fort taux de succès à ses expériences. Et la proximité entre chercheurs, ingénieurs et techniciens a permis d'échanger les meilleures pratiques de chaque communauté.

Une fois juste avant l'instrument fabriqué, il faut qu'il fonctionne, et au mieux de ses performances, pour fournir les mesures de bonne



Synergie dans les entrailles de DELPHI, au CERN

qualité dont les chercheurs ont besoin. En outre, pour des programmes comme une sonde spatiale ou un détecteur à neutrinos au fond de la mer, il faut faire bien du premier coup.

Avec la conquête de l'espace, ces contraintes se sont imposées dans les années 70. L'industrie aérospatiale a peu à peu développé les techniques de conception et de contrôle propres à assurer les succès de ses programmes. Tout naturellement, les pionniers de l'instrumentation scientifique spatiale se sont inspirés de ces méthodes, en ajoutant

un degré de complexité supplémentaire lié au caractère hautement innovant de leurs instruments et d'autres disciplines ont bénéficié de leur nouveau savoir-faire.

L'organisation des projets au DAPNIA répond à ce souci de qualité : progressivité dans le déroulement, vérification régulière de l'adéquation aux objectifs. À chaque étape, on s'assure que rien n'a été négligé pour obtenir un produit aussi parfait que possible.

Tirant le meilleur des différentes technologies, cette démarche « de Qualité » permet d'identifier très tôt les points qui pourraient bloquer au cours du développement puis lors de l'utilisation du produit, et les prévient par des tests spécifiques ou des analyses plus poussées.

Chaque étape du développement de l'instrument est balisée et étayée par une documentation préalable, permettant d'obtenir progressivement une connaissance exhaustive du produit. Pour assurer la reproductibilité des résultats, on codifie les savoir-faire dans des procédures. On analyse les succès comme les erreurs et cela sert aux projets suivants. L'expérience ATLAS, rassemble près de 2000 physiciens et ingénieurs appartenant à plus de 100 organismes différents, dans une cinquantaine de pays. De telles communautés permettent de faire surgir et fructifier les meilleures idées. Mais c'est au prix de la dilution des informations. En outre, la majeure partie des projets reste dans les cartons pendant de longues années, et les impératifs d'organisation et de qualité augmentent encore l'entropie papetière. On constate vite que la circulation des informations, et la facilité à les retrouver, constituent les éléments clés de la réussite de nos programmes.

Pour maîtriser cette moderne Babel, le CERN a inventé au début des années 90 le moyen d'ordonner et de faire circuler rapidement l'énorme quantité d'information et de documentation engendrées par le gigantisme des expériences, et d'abolir les distances entre les participants.

Ce moyen a fait le tour du monde. C'est le Web. Ce pur produit de la recherche fondamentale, qui « booste » depuis cinq ans la « nouvelle économie », est en train de bouleverser la planète. Elle a du bon pour tout le monde, la recherche fondamentale !

Ironie de l'Histoire, la recherche la plus coûteuse crée les nouveaux milliardaires...



Avec l'aimable autorisation de l'Auteur

Un très gros merci à tout le comité éditorial de Scintillations

Un très gros merci également à Guillaume Blanc (SPP), Jean-Claude Brisson (ex-SEI), Christophe Bureau (DRECAM), Christian Cavata (SPHn), Joël Feltesse (DIR), Gabriele Fioni (SPHn), Jean-Claude Languillat (SIG), Jacques Martino (SPHn), Cécile Michaut (journaliste scientifique), Alain Milsztajn (SPP), François Pierre (SPP), Bijan Saghai (SPHn), Jean-Luc Sida (SPHn), Edgar Soulié (DRECAM) et Laurent Vigroux (SAp), pour leur patiente, conviviale et efficace collaboration.

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),

Claire ANTOINE, Pierre BORGEAUD, François

BUGEON, Rémi CHIPAUX, Nathalie COLOM-

BEL, Thierry FOGLIZZO, Elizabeth LOCCI, Marc

PEYROT, Franck QUATREHOMME, Yves

SACQUIN, Angèle SÉNÉ, Thierry STOLARCZYK,

Christian VEYSSIERE

MAQUETTE & MISE EN PAGE Christine MARTEAU

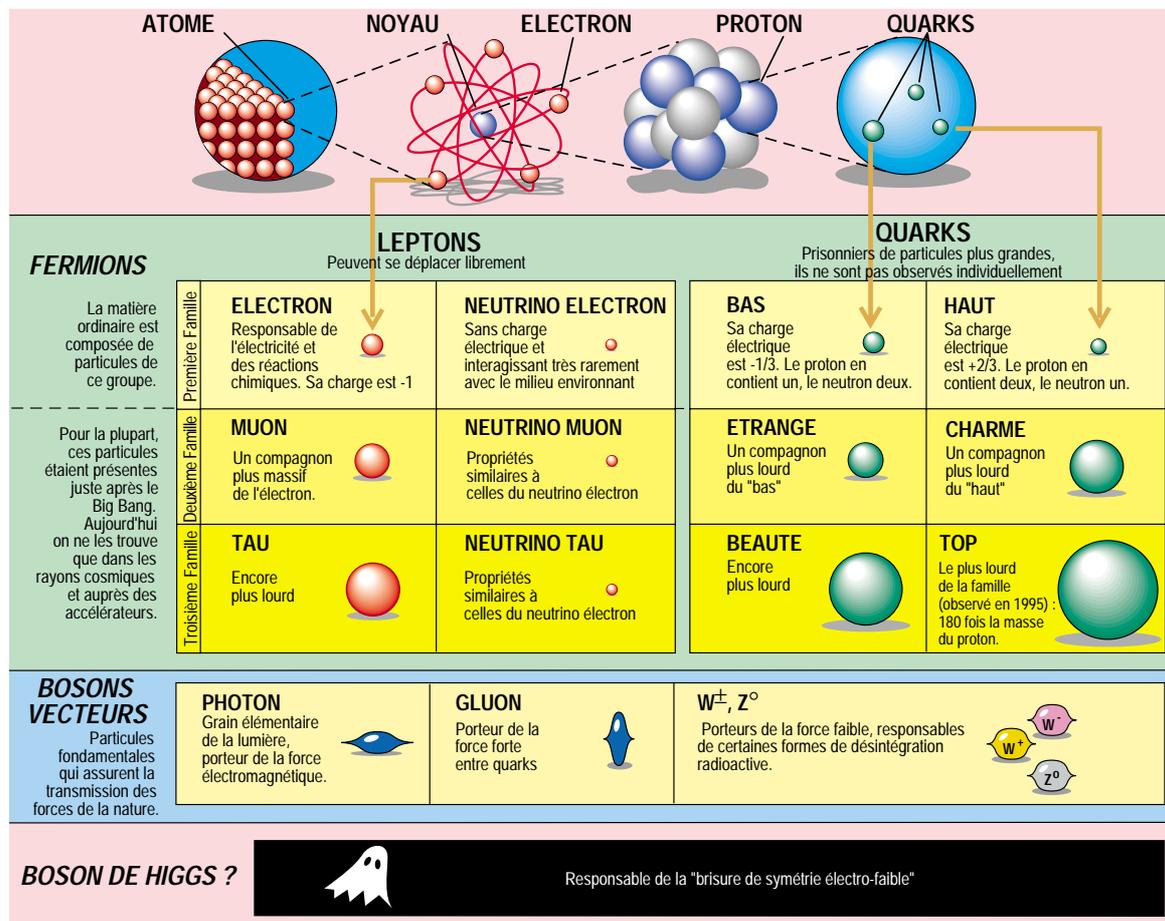
CONTACT : Joël MARTIN

Tél. 01 69 08 73 88 – Fax : 01 69 08 75 84

E.mail : jmartin@cea.fr

<http://www-dapnia.cea.fr/Com/Scintillations/>

Lexique des Expériences, Instituts, Sigles et Acronymes



ALEPH – Apparatus for LEP pHysics, un des quatre grands détecteurs implantés au LEP, au CERN

ANTARES – Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch, expérience de détection sous-marine de neutrinos cosmiques au large de Toulon

ANTHRO-SI – ANTHROporadiamétrie par détecteur au Silicium, expérience de mesure *in vivo* de la contamination pulmonaire par spectrométrie g

ARC – Dispositif de mesure de l'énergie du faisceau d'électrons de CEBAF par mesure de sa courbure dans un aimant (31)

ASIC – Application Specific Integrated Circuit, puces numériques "sur-mesures" équipant entre autres le télescope d'INTEGRAL

ATLAS – A Toroidal LHC ApparatuS, colossal détecteur implanté au LHC

CASSINI – Sonde de la NASA d'exploration de Saturne et ses satellites (atmosphères, anneaux...). Elle frôlera Saturne et Titan en 2004

CAT – Cherenkov Array at Thémis, réseau de détecteurs de rayonnement Cherenkov induits par rayons cosmiques gamma de très haute énergie, installé sur le site de l'ancien four solaire Thémis

CCD – Charge-Coupled Device, détecteurs de photons à localisation numérique (pixels)

CEA – Commissariat à l'Énergie Atomique, maison-mère du DAPNIA

CEBAF – Continuous Electron Beam Accelerator Facility, accélérateur linéaire supraconducteur d'électrons de 6 GeV situé au laboratoire Thomas Jefferson (TJNAF), en Virginie

CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, grand laboratoire, maintenant mondial, de physique des particules, sis à cheval sur la France (Pays de Gex) et la Suisse (Genève)

CESEN – Cercle d'Études Sur l'Énergie Nucléaire

CIRS – Composite InfraRed Spectrometer, spectromètre infrarouge

porté par la sonde Cassini

CLAS – Cebaf Large Acceptance Spectrometer, détecteur tous azimuts à CEBAF

CMS – Compact Muon Solenoid (et non : Colossal Mais Solide), énorme détecteur au LHC.

CNES – Centre National d'Études Spatiales

CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique

COMPASS – Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy, programme d'étude du spin du nucléon au CERN

CRYHOLAB – CRYostat HOrizontal LABoratoire, station de test d'éléments d'accélérateurs à grande puissance injectée

DAM – Direction des Applications Militaires du CEA

DAPNIA – Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée, objet de ce numéro, de tous nos efforts et de l'admiration de bien des scientifiques et autres

DELPHI – Detector for Electron, Lepton, Hadron Identification, l'un des quatre grands détecteurs implantés au LEP

DESY – Deutsch Electron SYNchrotron, laboratoire de physique des particules à Hambourg

DMILL – Durci Mixte sur Isolant Logico-Linéaire, électronique « durcie » pour résister aux radiations

DPhPE – Département de Physique des particules Élémentaires, l'un des ancêtres du DAPNIA

DRECAM – Département de Recherche sur l'État Condensé, les Atomes et les Molécules

DSM – Direction des Sciences de la Matière, au CEA. Le DAPNIA et le DRECAM en font partie.

DTA – Direction des Techniques Avancées, du CEA. Le LETI en fait partie

D0 – Expérience au FERMILAB qui a mis en évidence le quark top

EDELWEISS – Expérience pour la DÉtection boLométrie des WImp's (voir cet acronyme) En Site Souterrain, recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au laboratoire souterrain de Modane (vrai acronyme : edelweiss, NDLR)

EP – Dispositif de mesure de l'énergie du faisceau de CEBAF par diffusion Électron-Proton

EPIC – European Photon Imaging Camera, caméra CCD à rayons X à bord du satellite XMM

EROS – Expérience de Recherche d'Objets Sombres. Elle découvre aussi de brillantes supernovæ

ESA – European Spatial Agency (Agence Spatiale Européenne)

ESO – European Southern Observatory, observatoire européen dans l'hémisphère sud (Chili)

FERMILAB – FERMI national LABORatory, laboratoire américain de physique des particules, près de Chicago (voir TEVATRON).

FIP – Factory Instrumentation Protocol, standard industriel de réseaux et d'interfaces pour instrumentation

FIRST – Far InfraRed and Submillimetric space Telescope, télescope en infrarouge lointain sur satellite. Lancement prévu en 2006

GALLEX – GALLium EXperiment, détecteur de neutrinos solaires au laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie)

GANIL – Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, près de Caen. Laboratoire mixte CEA/CNRS pour la physique nucléaire

GLAST – Gamma ray Large Area Space Telescope, satellite pour l'étude de sources gamma de très haute énergie. Lancement prévu en 2002

GOLF – Global Oscillations at Low Frequencies, instrument d'héliosismologie (étude des « tremblements de soleil ») embarqué sur SOHO

GSI – German Synchrotron Installation, laboratoire allemand de physique nucléaire à Darmstadt

HAPPEX – Hall A Proton Parity EXperiment, expérience sur le spin du proton, à CEBAF

HERA – High Energy Ring Accelerator, grand collisionneur d'électrons (30 GeV) et de protons (820 GeV) de DESY

IBIS – Imager onBoard Integral Satellite, détecteur embarqué sur INTEGRAL

IFREMER – Institut Français de Recherches pour l'Exploitation de la MER

ILL – Institut Laïe Langevin, à Grenoble

INCA – INCinération par Accélérateurs, programme DSM de transmutation de déchets nucléaires

INDRA – Identification de Noyaux par DÉtection à Résolution Accrue, multidétecteur « 4p » d'ions lourds (tous azimuts) au GANIL

INTEGRAL – INTERNATIONAL Gamma Ray Astrophysics Laboratory, satellite de l'ESA dévolu à l'étude des sources gamma et X. Lancement prévu en 2002

IN2P3 – Forme compacte de NPNPP : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, du CNRS

IPHI – Injecteur de Protons de Haute Intensité. Prélude à la production de neutrons de spallation

ISO – Infrared Space Observatory, satellite de l'ESA lancé en 1995, fin de carrière en avril 1999

ISOCAM – ISOCAMera, caméra infrarouge embarquée sur le satellite ISO.

LENS – Low Energy Neutrino Spectroscopy, projet international de R&D pour la spectroscopie des neutrinos solaires

LEP – Large Electron Positron Collider, grand collisionneur d' $e^+ e^-$ de 100 + 100 GeV, au CERN

LETI – Laboratoire d'Électronique, de Technologie et d'Instrumentation, laboratoire de la DTA de recherche appliquée en électronique

LHC – Large Hadron Collider, grand collisionneur de protons de 7 + 7 TeV, au CERN. Entrée en service prévue en 2005

MAMI – MAinz MICrotron, accélérateur d'électrons (800 MeV) à faisceau continu de l'institut Max Planck à Mayence, pour la physique nucléaire

MEGACAM – Caméra CCD à grand champ destinée au foyer primaire du grand télescope Canada-France-Hawaï. Montage prévu fin 2000

MICROMEGAS – MICROMEsh GAseous Structure, détecteur de

particules de nouvelle génération capable d'encaisser de très hauts flux de particules

NASA – National Aeronautics and Space Administration, administration des États-Unis pour l'aéronautique et l'espace

PLANCK SURVEYOR – Satellite pour l'étude du fond cosmologique. Lancement : 2006 par la même fusée que FIRST

QCD – Quantum Chromodynamics (Chromodynamique Quantique), théorie de l'interaction forte

SATURNE – Synchrotron à protons (3 GeV), protons polarisés et ions légers de Saclay. Arrêté après d'ultimes prises de données sur la spallation.

SIGMA – Satellite d'Imagerie Gamma avec Masque Aléatoire, caméra gamma porté par le satellite russe GRANAT, lancé en 1989

SILHI – Source d'Ions Légers à Haute Intensité, injecteur pour IPHI (voir ce sigle)

SLAC – Stanford Linear Accelerator Center, laboratoire californien de physique des particules

SOHO – Solar & Heliospheric Observatory, sonde européenne d'exploration du soleil, lancé fin 1995

SOLEIL – Futur synchrotron français à lumière, récemment rescapé d'allègres et sombres oubliettes

SPI – SPectrometer for Integral, détecteur embarqué sur INTEGRAL

SPIRAL – Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne, accélérateur de noyaux « exotiques », au GANIL

TESLA – Tera Electronvolt Superconducting Linear Accelerator, projet allemand de collisionneur linéaire électron-positon, dans le domaine du TeV

TEVATRON – Grand collisionneur supraconducteur de 1 TeV + 1 TeV, du FERMILAB

THÉMIS – Centrale solaire expérimentale à four, construite pas EDF en 1970 près de Font Romeu, dans les Pyrénées orientales

TIMMI – Thermal Infrared Multi-Mode Instrument, caméra infrarouge à l'ESO, au Chili

TTF – Tesla Test Facility, accélérateur de démonstration, à DESY pour le projet TESLA

VISIR – VLT Imager and Spectrometer for middle InfraRed, détecteur en infrarouge moyen pour le VLT. Montage prévu vers 2001

VLT – Very Large Telescope, très grand télescope à quatre éléments en cours de construction par l'ESO sur le mont Paranal, au Chili

VME – Versa Module Eurocard, standard pour interfaces électroniques

WIMP's – Weak Interacting Massive Particles, hypothétiques particules régies par l'interaction faible qui pourraient contribuer à la matière sombre de l'univers

XMM – Satellite de l'ESA voué à l'étude de sources cosmiques X et gamma, lancé en décembre 1999.

Quelques Unités d'Énergie

Le joule (J) : unité d'énergie du Système International (SI). C'est en gros, par exemple, l'énergie dépensée pour hisser d'une longueur de 0,1 mètre une masse de 1 kilogramme de haut dans le champ de pesanteur terrestre de 9,81 m. s⁻². C'est aussi l'énergie que récupère le crâne de Newton qui reçoit une pomme de 100 grammes tombée de un mètres de haut. Aïe !

L'électronvolt (eV) : énergie d'un électron accéléré sous une différence de potentiel de 1 volt. **1eV=1,6 10⁻¹⁹J**

Le kiloélectronvolt (keV) : mille électron-volts (10³). Le faisceau d'électrons d'un tube TV est d'environ 25 keV.

Le mégaélectronvolt (MeV) : un million d'eV (10⁶). C'est la gamme d'énergie de la radioactivité nucléaire.

Le gigaélectronvolt (GeV) : un milliard d'eV (10⁹). C'est l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique des protons qui seront utilisés pour la spallation (page 9). C'est aussi, en gros, l'énergie de masse ($E=mc^2$) du proton (938 MeV) et du neutron (939,5 MeV).

Le téraélectronvolt (TeV) : mille milliards d'eV (10¹²). C'est l'énergie atteinte dans le Tevatron (le bien nommé) du Fermilab. Le LHC « collisionnera » deux faisceaux de protons de 7 TeV.