

Scintillation2

20 ans de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers

Septembre 2011

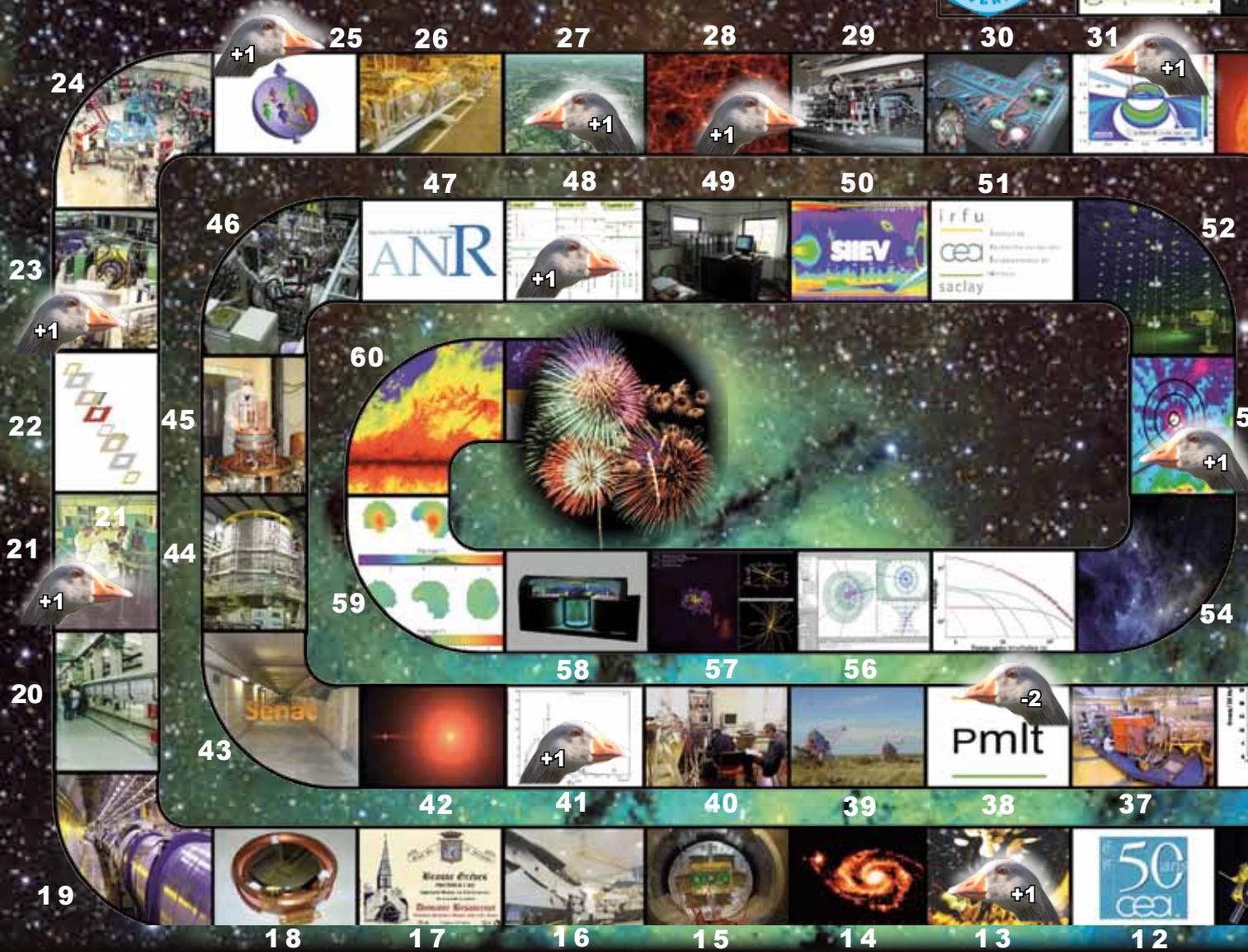
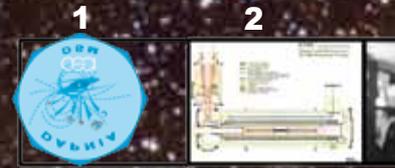
DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Ponder les mystères de l'Univers



Jeu de l'oie fondamentale de l'Univers

Par Antoine Drouart



1991

1 Création du Dapnia, vous partez à la recherche de l'oie symbolisée par sa tête sur le parcours. Dès que vous acquérez trois lois, vous améliorez votre indice de citations : relancez les dés.

2 Succès de la cible polarisée de SMC. Lisez : [Quelle est la structure du nucléon ?](#) p. 8 et sautez case 25.

1992

3 Prix Nobel de Georges Charpak : [Traqueur de traces](#), p. 22.

4 Diffusion du premier [Scintillations !](#)

5 Expérience Gallex : il vous manque des neutrinos solaires ! Passer un tour à lire [Neutrinos, 20 ans d'interaction forte](#), p. 5. Vous gagnez une loi.

1993

6 Un prototype de quadripôle pour le LHC est testé à Saclay. Vous êtes accéléré, relancez un dé par faisceau.

7 Indra s'attaque aux réactions nucléaires : [L'Irfu fait réagir](#), p. 10.

8 Observation d'une microlentille gravitationnelle, [Les yeux brillants d'Eros](#), p. 6. Relancez les dés et avancez ou reculez d'autant de cases.

1994

9 La comète Shoemaker-Lévy percute Jupiter. Reculez de cinq cases.

10 Premières traces du quark top : [Élémentaire mon cher Irfu !](#) p. 6.

11 Ulysse survole le pôle sud du Soleil.

1995

12 Célébration des 50 ans du CEA.

13 Violation de parité mesurée à CP Lear : [L'asymétrie matière-antimatière](#), p. 7.

14 Mise en orbite du satellite ISO : [À la genèse des galaxies](#), p. 15.

1996

15 Micromégas : détecteur aux multiples utilisations, p. 22. Lancez deux fois les dés pour choisir votre prochain total.

16 Premières expériences avec un faisceau d'électrons au *Jefferson Laboratory* : [Des nucléons aux noyaux](#), p. 9.

17 Première conférence de Beaune sur les photodétecteurs. Vous abusez : lancez un dé et reculez d'autant de cases.

1997

18 Discrimination neutron/gamma avec un bolomètre d'Edelweiss. [Irfu Xtr'M](#), p. 24.

19 Quench d'aimants supraconducteurs ! Passez votre prochain tour. [La froide accélération](#), p. 21.

20 Faisceau d'électrons dans TTF, la maquette du futur Tesla.

1998

21 Étude sur la transmutation de l'américium 241.

22 Sortie du logiciel de conception assistée par ordinateur Catia V5. [De la planche à la CAO](#), p. 20.

23 CP Lear montre l'intrication en étrangeté dans le système kaon-antikaon. Vous êtes symétrisé : direct case 32 !

1999

24 Création du Service de déclassement des accélérateurs. [Rayonnement du savoir](#), p. 18.

25 Vous avez un problème de spin dans le proton. Consultez le Dr Folamour et lisez [La structure du nucléon](#), p. 8 dans sa salle d'attente !

26 Les cryomodules réalisés pour Soleil permettent de monter à des champs de 7 MV/m.



20 ans de recherches

3

4

32

33

34

35

36

11

+1

5

6

+1

7

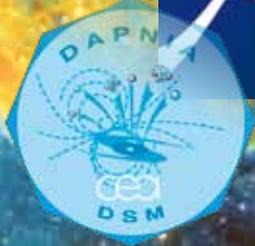
+1

8

9

+1

10



2000

- 27 Campagne d'étude du proton et de production du W à Hera.
- 28 Amas de galaxies vus par XMM. L'amas toujours faire ainsi, p.12.
- 29 Mise en service du polarimètre Compton à JLab. Elève Chaprot restez tranquille, cela n'a rien à voir avec la pomme de Newton. Passez un tour.

2001

- 30 Démarrage de l'accélérateur Spiral au Ganil : Le complexe du noyau, p. 10.
- 31 Viol de CP par Babar, p. 7.
- 32 Cinq ans de Golf à bord du satellite Soho : Une étoile est née, p. 14.

2001

- 33 On a retrouvé le trésor des Mini-Inca : une micro chambre à fission.
- 34 Découverte d'un trou noir ! Lisez Les étoiles du firmament sous Les masques de l'irfu p. 16 et 17 et retournez à la case Départ.
- 35 Dix ans du Dapnia. Création des Services Accélérateurs et cryomagnétisme, Électronique des détecteurs et informatique et Ingénierie des systèmes.

2003

- 36 Les tribulations du pentaquark. Il nous arrive aussi de nous tromper momentanément.
- 37 Vamos a la playa... au Ganil.
- 38 Plan à moyen et long terme du CEA. Passez deux tours à justifier vos recherches...

2004

- 39 Démarrage d'Hess. Insaisissable matière noire, p. 6.
- 40 Les détecteurs de faisceau Kabes s'installent sur NA48. Vous vous prenez un gnon sur la Kabes, vous perdez un tour.
- 41 L'oscillation des neutrinos confirmée par K2K.

2005

- 42 Première planète tellurique à être découverte par microlentille gravitationnelle : L'histoire d'un disque, p. 16.
- 43 Création du Service d'expertise nucléaire en assainissement et conception.
- 44 CMS peut monter sa bobine. Pour tout savoir, en plus, sur ses puces, lisez Les puces de l'irfu, p. 21.

2006

- 45 Un grand coup dans les bolos d'Edelweiss 2 : La sombre évolution de notre univers, p. 12.
- 46 Polarisation de la cible pour l'expérience Compass. Avancez d'une case.
- 47 Vous proposez une ANR. Relancez un dé : si vous faites un nombre pair, rejouez, sinon passez un tour.

2007

- 48 Haute précision sur la désintégration des kaons chargés !
- 49 Du Caribou au Groenland : station de mesure CO₂.
- 50 Création du Service d'ingénierie Ifmif Eveda pour le programme Fusion.

2008

- 51 Le Dapnia devient l'Irfu. Vous touchez un joli logo.
- 52 Construction du détecteur Antarès pour l'observation des neutrinos.
- 53 Surstabilité des noyaux à 120 protons ou plus. Passez un tour.

2009

- 54 Lancement des satellites Planck et Herschel par Ariane. Lancez les deux dés comme la fusée, si vous avez réussi, ils sont au point de Lagrange !
- 55 Mesures des gammas retardés d'actinides pour l'identification de déchets radioactifs.
- 56 Premières collisions dans le détecteur Alice du LHC. Lancez les deux dés l'un contre l'autre et avancez du total obtenu.

2010

- 57 Premières collisions à 7 TeV au LHC. Criez tous ensemble : «Jet, Top, Quark, Higgs !» Celui qui a crié le plus fort rejoint cette case.
- 58 Passez un tour à remplir la cuve du détecteur Double Chooz.
- 59 Images IRM *in vivo* à 7 teslas réalisées à Neurospin.

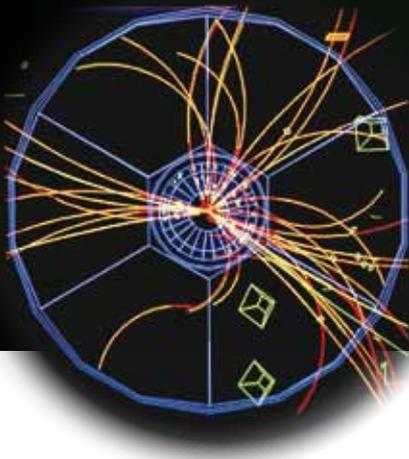
2011

- 60 Premier tour de ciel pour le satellite Planck.
- 61 Victoire, vous découvrez la théorie du Grand Tout. Venez débattre du futur de l'irfu : L'irfuturiste, p. 26.

Faire progresser les connaissances sur les lois fondamentales
12) structurent cette recherche au CEA en abordant l'Univers à
les plus élémentaires et la formation de structures d'une grande

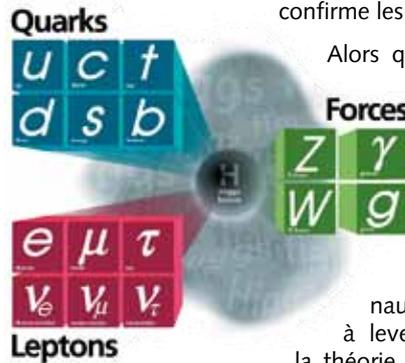
Quel est le contenu

Afin d'avancer vers une réponse à cette première question, on étudie le
en particulier celles des neutrinos, on cherche quelles particules forment



1990 - Événement dans Delphi au LEP.

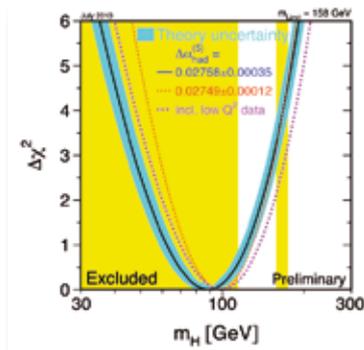
En 1991, la physique des particules élémentaires dotée de son modèle standard, range les constituants élémentaires, quarks et leptons, en trois familles. Elle décrit leurs interactions par les forces électrofaible et forte. Bien qu'unifiée à très haute énergie, la symétrie électrofaible est spontanément brisée à basse énergie, différenciant l'interaction faible, portée par les bosons massifs W et Z, et l'électromagnétisme véhiculé par le photon, de masse nulle. Le mécanisme le plus simple pour cette brisure est celui proposé, entre autres, par P.W. Higgs qui conserve les propriétés essentielles de la théorie et stipule l'existence d'un boson neutre, le fameux boson de Higgs, dont toutes les propriétés sont prédictibles, sauf sa masse. L'interaction forte est portée par les gluons et confine les quarks dans les nucléons. Elle ne permet pas d'observer les quarks à l'état libre ce qui complique l'étude de cette interaction.



Par Nathalie Besson
permettent de prédire la masse du boson de Higgs à quelques dizaines de GeV/c² près même si celui-ci reste inobservé, la dépendance en énergie de l'intensité de l'interaction forte confirme les prédictions de QCD...

Alors que les résultats s'accumulaient, établissant la cohérence du modèle standard sans toutefois trouver l'origine de la brisure de la symétrie électrofaible, les chercheurs préparaient le futur, le LHC et ses expériences, qui devraient répondre à cette question. Après le succès du démarrage récent du LHC, la communauté se prépare à lever le voile sur la théorie qui prendra le relais du modèle standard à haute énergie !

En vingt ans, notre physique a été accueillie par différentes structures (DPHPE, Dapnia, Irfu) mais notre engagement, notre enthousiasme et nos succès sont plus présents que jamais.



Les contraintes mises sur la masse du boson de Higgs grâce aux expériences du LEP et du Tevatron. Les zones en jaune sont exclues.

4



2008 - Le détecteur géant Atlas, lors de sa construction.

Avant la création du Dapnia, la physique des particules avait donc un modèle très prédictif mais qui laissait beaucoup de questions ouvertes : Combien y a-t-il de familles de particules au total ? Toutes les forces peuvent-elles être unifiées ? Va-t-on réellement observer un sixième quark ? Le mécanisme de Higgs est-il bien à l'origine de la brisure de symétrie électrofaible ? Comment accéder avec précision à l'interaction forte ? Les équipes internationales, dans lesquelles le tout nouveau Dapnia était largement représenté, se sont attelées à la tâche auprès des grands instruments : le LEP au Cern, le Tevatron au Fermilab, Hera à Desy pour explorer aussi bien le secteur électrofaible que la chromodynamique quantique. Et la moisson de résultats est au rendez-vous : le quark top est observé en 1995, l'étude du boson Z montre sans ambiguïté qu'il n'y a que trois neutrinos légers et donc que trois familles de particules standards, les paramètres de l'interaction électrofaible

La quête du Higgs : du LEP à l'ILC

« Concernant le Higgs, on dit un peu vite que le LEP n'a rien trouvé. Il est vrai que nous ne l'avons pas observé. Ce n'est pourtant pas par manque de l'avoir cherché, directement dans toutes ses signatures et indirectement par les effets qu'il induit grâce à des mesures de précision comme celles des masses des bosons Z et W. Par contre, nous avons éliminé toute la plage en masse qui nous était accessible, jusqu'à 114 GeV. Il y a eu une forte excitation au cours de l'été 2000, quand deux expériences ont montré une poignée d'événements compatibles avec un boson de Higgs de 115 GeV ! On s'est alors battu pour avoir une année supplémentaire de prise de données sans arriver à vaincre l'argument : "Ça va retarder le LHC". Après avoir digéré cet échec, je me suis tourné vers le futur avec le projet ILC. Si le boson de Higgs existe, il sera vu au LHC d'ici peu et l'ILC serait la machine idéale pour en étudier toutes les propriétés. »

Entretien avec Pierre Lutz

1992	1992	1993	1993	1993	1994
Premiers événements dans DO au Fermilab (USA)	Première publication de l'expérience Gallex	Observation de la première micro lentille à Eros	Abandon du projet américain SSC	Les gluons de la mer montent (H1-Hera)	Décision de construire le LHC

qui régissent l'Univers... Trois questions essentielles (p. 4, 8 et petite et à grande échelle, en étudiant le lien entre les aspects complexité.

élémentaire de l'Univers ?

modèle standard et ses limites ainsi que les caractéristiques des particules, la matière noire et la source du déséquilibre entre matière et antimatière.



2000- La cavité qui accueillera le détecteur CMS.

Les neutrinos, 20 ans d'interactions fortes

Par Michel Cribier

Les résultats des deux dernières décennies ont profondément modifié notre connaissance des neutrinos, imposant une révision du modèle standard. Ils ont été créés en abondance dans les premières secondes du big bang et leurs masses influent sur les grandes structures de l'Univers. Ils sont produits au centre du Soleil, dans les explosions de supernovas, dans le rayonnement cosmique qui arrose la Terre et dans les entrailles de notre chère planète. Ils sont également créés en grand nombre par les centrales nucléaires et par certains faisceaux de particules.

Toutes les manifestations des neutrinos ont été étudiées par des successions d'expériences remarquables qui ont valu plusieurs prix Nobel (F. Reines en 1995, R. Davis et M. Koshiba en 2002) et dont les résultats concordent : les trois espèces de neutrinos ont la faculté de se transformer les unes dans les autres. Cette «oscillation» des neutrinos prouve qu'ils sont massifs, à l'opposé des postulats d'il y a 20 ans. Ainsi, l'apparent déficit des neutrinos du Soleil, confirmé par l'expérience Gallex, a plus tard été expliqué par l'expérience SNO au Canada : tous les neutrinos solaires sont bien là quand on mesure les trois espèces. KamLand, en mesurant à grande distance les antineutrinos des centrales japonaises, a peu après conforté le modèle d'oscillation des neutrinos. De même, les neutrinos muoniques produits dans la haute atmosphère par le rayonnement cosmique sont moins nombreux s'ils viennent des antipodes. Ce n'est pas la Terre qui est un obstacle pour ces particules, mais le plus long voyage leur donne le temps de se métamorphoser en une autre espèce. L'expérience K2K a confirmé ce résultat il y a quelques années.

Les centrales nucléaires sont des sources abondantes de neutrinos exploitées par de nombreuses expériences comme Bugey, et Chooz qui ont contraint les modèles de transformation des neutrinos. D'autres expériences qui viennent de démarrer (Double Chooz, T2K) permettront d'aller plus loin. Une anomalie dans l'ensemble des observations sur les réacteurs nucléaires a d'ailleurs été récemment découverte et semble indiquer une nouvelle surprise : il pourrait y avoir une famille de neutrinos complémentaires dits stériles car non sensibles à l'interaction faible !



Le neutrino est une particule élémentaire sensible à l'interaction faible et à la gravitation. Il existe une espèce de neutrino différente pour chaque lepton chargé, électron, muon et tau. De masse supposée nulle dans le modèle standard, les résultats des 20 ans passés ont invalidé cette hypothèse.

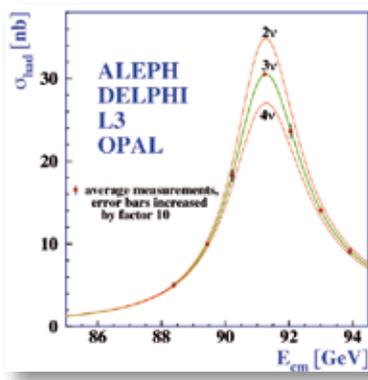
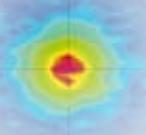
AIEA: l'Agence internationale de l'énergie atomique est une organisation autonome sous l'égide de l'ONU.

Notre connaissance des neutrinos a tant progressé que l'on peut les utiliser aujourd'hui comme un outil. Ainsi, la mesure des neutrinos provenant des éléments radioactifs dans la Terre permet de trancher entre plusieurs modèles de géophysique. De même, Nucifer est un dispositif prototype pour contrôler le fonctionnement pacifique des réacteurs nucléaires ainsi que le souhaite l'AIEA.

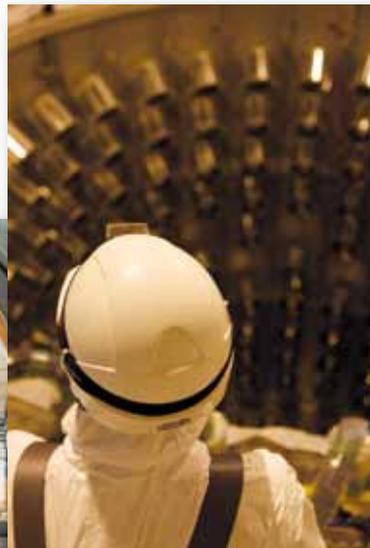
En dépit de leur faible interaction, les neutrinos génèrent une

interaction forte entre les services de l'Irfu car seule une coopération permet de comprendre la variété des phénomènes où ils sont présents : sites astrophysiques, radioactivités, modèle standard...

Le Soleil vu à travers les neutrinos qu'il émet dans le détecteur japonais de SuperKamio-kande (exposition de 400 jours).



Nombre de bosons Z produits au LEP en fonction de l'énergie de collision. Les points de mesure très précis (les barres d'erreur ont été augmentées d'un facteur 10 !) sont comparées aux prédictions théoriques pour différentes hypothèses sur le nombre de neutrinos légers. L'hypothèse de trois neutrinos sensibles à l'interaction faible (et donc de trois familles de particules standard) est clairement retenue par les données.



1992-1995- Mesure du déficit de neutrinos solaires avec Gallex (gauche). 2010- Le détecteur Double Chooz en construction dans les Ardennes pour mesurer l'oscillation des neutrinos électroniques.

1995	1995	1996	1999	2000
Observation du quark top dans D0	Étalonnage de Gallex avec un « soleil » artificiel	Montée en énergie du LEP (136 GeV)	Immersion d'une première ligne test pour Antares	Arrêt du LEP

Quel est le contenu



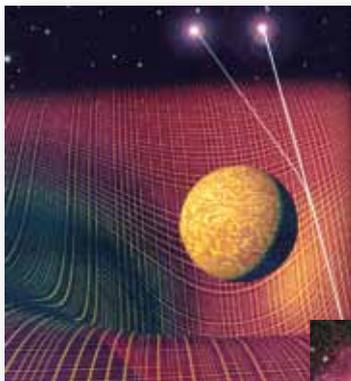
Baryons : constituants de la matière ordinaire

Insaisissable matière noire

par Nathalie Palanque-Delabrouille

Les galaxies spirales, dont la nôtre, semblent enveloppées d'un épais halo de matière sombre. Etrange coïncidence, la quantité totale de baryons dans l'Univers, suivant le modèle du big bang, correspond à celle requise pour remplir ces halos ! S'y cachent-ils sous forme de planètes, de naines blanches ou brunes, petites étoiles dont l'éclat est si faible qu'on ne pourrait le percevoir ? Tandis que le XXI^e siècle se profile à l'horizon, l'Irfu se lance dans la quête de ces astres, en cherchant à les détecter par l'effet de microlentille gravitationnelle qu'ils induisent sur les étoiles des nuages de Magellan. Menant l'enquête depuis l'observatoire de la Silla au Chili, l'expérience Eros s'octroie les grands titres, en 1993, en annonçant la découverte des premiers événements, pourtant si rares et si difficiles à détecter ! Mais les espoirs retombent peu à peu.

théoriques. Mais toujours pas le moindre wimp. L'Irfu multiplie ses efforts, attaquant la question de tout côté : lorsqu'ils se rencontrent, les wimps peuvent s'autodétruire et donner naissance à des photons énergiques ou à des neutrinos. Qu'à cela ne tienne ! Depuis le fond de la Méditerranée, avec ses lignes de détection qui ondulent depuis 2006 au gré des courants, Antares étudie patiemment les flashes lumineux trahissant le passage de neutrinos. A l'autre bout du monde, sur le plateau namibien, Hess pointe ses télescopes vers le ciel pour capturer les photons gamma en provenance des régions possibles d'annihilation des wimps. Le LHC n'est pas en reste. En fonctionnement depuis 2009, l'accélérateur de particules produira-t-il des wimps, prouvant alors enfin leur existence ?



Effet de lentille gravitationnelle. La présence d'une masse entre un objet brillant et un observateur induit un mirage qui permet de caractériser cet objet.



Grand nuage de Magellan, dans le ciel austral. Eros a mesuré pendant quinze ans la brillance de millions d'étoiles, à la recherche d'une variation trahissant le passage d'un objet sombre.

Quinze intenses années de traque ont à présent exclu une présence importante de tels corps célestes dans le halo. Ce résultat relance toutefois les recherches de wimps (weakly interactive massive particles) : ces particules seraient-elles responsables de la matière noire ? Enterrée dans le laboratoire souterrain de Modane pour réduire les bruits parasites, l'expérience Edelweiss tente de détecter l'infime variation de température induite par le choc d'un wimp. Au fil des améliorations successives, Edelweiss atteint aujourd'hui les sensibilités requises d'après les modèles



Les yeux brillants d'Eros

Expérience de recherche d'objets sombres

« En 1989, je suis parti vers un premier programme d'observations astronomiques à la recherche de la matière noire, une première pour un physicien des particules plutôt habitué à travailler au fond de tunnels obscurs. De 93 à 97, une grande caméra de 3.7 millions de pixels (Mp) a été construite pour l'observatoire de La Silla au Chili, puis, de 96 à 2002, deux caméras plus grandes de 67 Mp. Elles nous ont permis d'observer pendant 14 années. Nous savons maintenant que les « machos » (petites étoiles avortées qui auraient pu composer la matière noire galactique) n'existent pas.

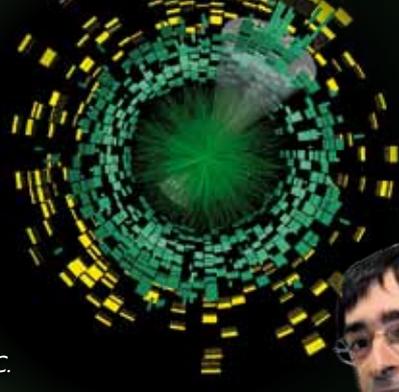
Il restera toujours dans nos esprits ces levers de soleil sur les Andes quand finissent les observations, ces interminables crépuscules aux couleurs improbables sur le Pacifique, l'exceptionnelle clarté des nuits où les myriades d'étoiles laissent à peine deviner les constellations et ce pays si attachant, que beaucoup d'entre nous ont longuement parcouru. »

Entretien avec Christophe Magneville



2001	2001	2006	2007	2008
Observation de la violation de CP directe (NA48 et Babar)	Le ballon Archeops explore le temps	Hess découvre un accélérateur cosmique	Publication finale d'Eros	Les 12 lignes d'Antares détectent les lumières abyssales

élémentaire de l'Univers ?



2011 - Événement dans Atlas au LHC.



L'asymétrie matière – antimatière

par Georges Vasseur

L'Univers observable est constitué uniquement de matière. Grand mystère de la physique : où est l'antimatière produite pourtant dans les mêmes proportions peu après le big bang ? Il faut supposer que la nature se comporte différemment vis-à-vis des particules et des antiparticules : il y a violation d'une symétrie, dite symétrie CP. Mise en évidence expérimentalement en 1964 pour les kaons neutres, les théoriciens japonais M. Kobayashi et T. Maskawa, prix Nobel 2008, en proposèrent une explication révolutionnaire en postulant l'existence de trois familles de quarks.

Au cours des vingt années écoulées, l'Irfu a joué un rôle majeur dans plusieurs expériences qui ont

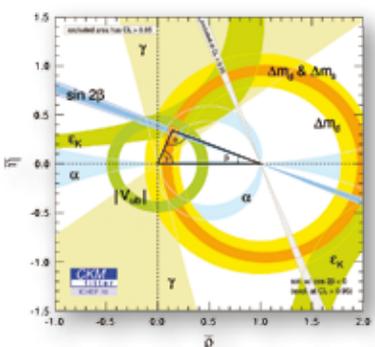
approfondi l'étude de l'asymétrie matière-antimatière à travers celle de la symétrie CP.

Les expériences ont tout d'abord identifié l'interaction qui ne respecte pas la symétrie CP : l'interaction faible. A la création du Dapnia, l'étude des kaons neutres avait révélé un effet de violation de CP dans la constitution des états

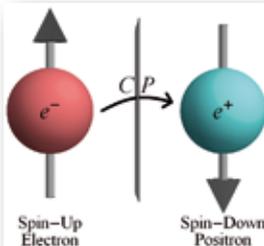
quantiques décrivant ces particules. Entre 1993 et 2003, des expériences au Cern et au Fermilab ont mis en évidence un effet bien plus faible, la violation de CP dans les désintégrations

dues à l'interaction faible de ces mêmes kaons neutres, tandis qu'en 1998, l'expérience CPLEar au Cern a observé un effet apparenté, toujours à l'aide des kaons : la violation de la symétrie par renversement du sens du temps. Par la suite, les expériences Babar au Slac et Belle à KEK ont montré que le phénomène était général en découvrant, en 2001, la violation de CP dans le système des mésons B. Puis, par un ensemble exhaustif de mesures, elles ont confirmé de manière éclatante le mécanisme imaginé par M. Kobayashi et T. Maskawa pour expliquer ce phénomène dans le cadre du modèle standard.

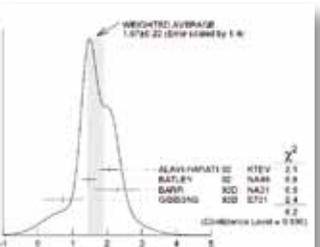
Cependant, la distinction que fait l'interaction faible entre particules et antiparticules au niveau des quarks ne suffit pas à expliquer un univers fait de matière uniquement. Tout en se poursuivant dans le système des mésons B avec l'expérience LHCb au Cern, les recherches explorent donc de nouveaux axes. Dans un avenir proche, l'effet de la gravité sur des anti-atomes d'hydrogène sera étudié. A plus long terme, l'expérience T2K ouvrira la voie de l'étude de la violation de CP dans le secteur des neutrinos.



Détermination du paramètre complexe $\rho+i\eta$ (sommet du triangle) régissant la violation de CP. Toutes les contraintes sont en bon accord.



Les symétries de charge (C), de parité (P) et par renversement du temps (T) sont vérifiées par toutes les interactions connues exceptée l'interaction faible. Alors que l'on avait déjà observé les violations de C et P dans les années 50, on pensait que leur conjugaison CP pourrait être conservée, ce qui n'est pas le cas. Seule la composition des trois, CPT, est vérifiée et demeure un pilier des lois de l'Univers.



Mesures de la fraction de violation de CP directe dans le système des kaons neutres.

Des cosmiques au cosmos

Dans la première moitié du XX^e siècle, ce sont les rayons cosmiques qui permirent de découvrir de nouvelles particules : positrons, muons, pions et kaons. Puis, vint l'âge d'or des accélérateurs avec leurs grands détecteurs. Mais, vers la fin des années 80, pour élucider certaines questions, comme celles liées à la durée de vie du proton ou aux oscillations des neutrinos, de grands appareillages sont mis en place « hors accélérateur ». Un autre tournant s'opère lorsque des physiciens décident de rechercher la matière sombre de l'Univers, qu'elle soit sous forme d'astres compacts ou de particules interagissant faiblement. Les détecteurs changent, le regard se tourne vers le cosmos mais la méthodologie est héritée de la physique des particules. Un pas en amenant un autre, les détecteurs de particules étudient des objets célestes grâce aux neutrinos, gammas de haute énergie et rayons cosmiques : la physique des astroparticules est née. Dernière évolution en date, les physiciens cherchent à décrypter l'expansion accélérée de l'Univers. Les instruments et les objets d'étude sont ceux de l'astrophysique, la finalité – comprendre les lois fondamentales de l'Univers – rejoint celle de la physique des particules.

Vanina Ruhlmann-Kleider et Didier Vilanova

2008	2009	2010	2010	2011
Le proton en 3D (H1)	Démarrage du LHC	Première publication du LHC	Premiers neutrinos détectés dans T2K (Japon)	Premiers neutrinos détectés dans Double-Chooz

Comment s'organise

La matière nucléaire émerge depuis l'Univers Au-delà de l'étude de cet état, il nous faut sur la base de ces premières briques. La au centre de l'atome. Les noyaux étudiés dans nombreuses descriptions nucléaires qui

Quelle est la structure du nucléon ?

par Etienne Burtin



8

La matière qui nous entoure, depuis l'atome d'hydrogène jusqu'au plus gros amas de galaxies, est constituée essentiellement de protons et de neutrons agrégés les uns avec les autres pour former le noyau des atomes. Les protons et les neutrons sont eux-mêmes composés de quarks liés entre eux par des gluons, médiateurs de l'interaction forte. Comprendre la structure du proton à partir de ses constituants est un des objectifs principaux de l'étude de la matière nucléaire. Un fait historique marquant fut la découverte, en 1988 par la collaboration EMC au Cern, que les quarks contribuent peu au spin du proton et que les quarks de type « étrange » y contribueraient perceptiblement. Ce résultat a déclenché un large programme expérimental auquel l'Irfu a pris une part importante.

Dans un premier temps, des équipes ont rejoint l'expérience SMC au Cern et les expériences dans la « End Station A » à Stanford (USA). Après plusieurs années de mesure, le verdict est tombé. Les quarks ne contribuent que pour 30 % au spin du proton avec une contribution des quarks « étranges » à hauteur de 10 %. Par ailleurs, l'Irfu s'est engagé dans la collaboration Happex au Jefferson Lab. (USA). Cette expérience a montré que les quarks « étranges » ne contribuent pas à la charge électrique du proton.

Par la suite, les physiciens se sont tournés vers la mesure de la contribution des gluons au spin du nucléon avec

Deux visiteuses du Cern essayent de séparer deux « quarks » à l'intérieur d'un hadron. La quantité d'énergie pour le faire est tellement grande qu'elle engendre la création d'une nouvelle paire de quark-antiquark.

La communication est l'une des tâches importantes à laquelle s'est employé l'Irfu, dès sa création.

l'expérience Compass au Cern. Après plusieurs années de prises de données, il est maintenant exclu que les gluons aient une grande contribution, ils semblent même ne pas contribuer du tout.

L'énigme du spin n'est toujours pas résolue et la question des quarks étranges reste en suspens. Il faut pour cela sonder encore plus précisément le nucléon. Depuis 15 ans, des développements théoriques majeurs permettent d'envisager la mesure de la distribution spatiale des constituants du proton. L'Irfu, qui est un des meneurs de cet effort mondial, contribue à la conception et à la réalisation des expériences qui permettront, un jour, de lever le voile sur la structure du proton.



Deux physiciens testent la cavité micro-onde de la cible de protons et deutons polarisés de l'expérience Compass au Cern. Cette cible a permis la mesure de la contribution des quarks et des gluons au spin du nucléon.

La polarisation

« Il est rare de travailler avec de la matière polarisée. Dans nos expériences, il faut pourtant que la cible et les projectiles le soient ! Le faisceau de muons du Cern est "naturellement" polarisé car il provient de la désintégration de particules mais, du temps de SMC, nous avons dû faire une expérience consacrée à la mesure de cette polarisation car elle était mal maîtrisée. Pour polariser les protons de la cible de Compass, il faut combiner une température de 100 mK, un champ magnétique de 2,5 T et injecter des micro-ondes. Cette cible détient, de loin, le record mondial de longueur avec ses 1,2 m.

La recherche est aussi faite de hasards heureux : en 1992, la réparation d'une des alimentations par un physicien a induit involontairement une modulation de la fréquence micro-onde. Contre toute attente, elle a permis de doubler la polarisation et a ainsi contribué au succès de SMC ! »

Entretien avec Jean Marc Le-Goff



1993	1996	1996	1999	2000	2000
Résonances géantes dans les noyaux chauds (Accélérateur de Saclay)	Quark = 30% au spin du nucléon (SMC au Cern)	Transition de phase de la matière nucléaire (Indra à Ganil)	Formalisme nécessaire à la vision du nucléon en 3D	Résonances neutroniques dans le ⁹⁹ Tc (Gelina à Geel)	Résolution de l'énigme de la fusion des noyaux à halo (Louvain-la-Neuve)

la matière nucléaire ?

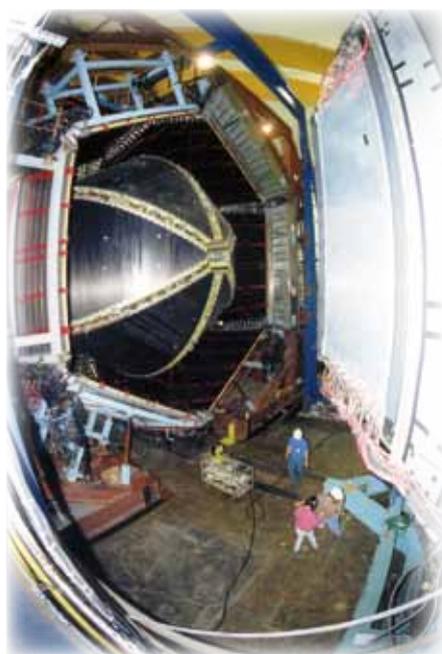
primordial sous forme d'un plasma de quarks et de gluons. comprendre la structure des nucléons composant le noyau matière s'organise encore différemment à l'échelle du noyau, des conditions extrêmes nous permettent de trier parmi les subsistent encore.



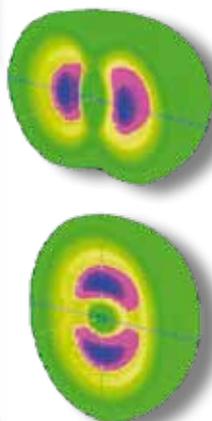
Des nucléons aux noyaux

par Michel Garçon

Le nucléon est un objet composite, la première composition de l'Univers à partir des particules « élémentaires ». Qui dit assemblage dit structure et extension spatiale. Le rayon du nucléon est de l'ordre de 0,85 fm. Pour construire le noyau, les nucléons s'agrègent de telle façon que la distance moyenne qui les sépare est de



Le Cebaf large acceptance spectrometer (JLab, USA), un multidétecteur permettant d'étudier la structure des nucléons et des noyaux avec un faisceau d'électrons de 6 GeV.



Profils de densité dans le deuteron, dans deux états de spin différents.

l'ordre de 2,2 fm. Si l'on s'imagine chaque nucléon comme une sphère rigide dans un sac, la distance entre deux sphères ne pourrait être inférieure à 1,7 fm.

Premier paradoxe : comment arrive-t-on à « tasser » les nucléons dans un noyau si petit alors que leur taille leur permet à peine d'y bouger ?

Deuxième paradoxe : dans tout calcul du noyau, il s'avère proprement inutile de considérer la taille et, a fortiori, le détail de la structure interne des nucléons ! Au-delà de l'étude de la structure des hadrons, c'est un deuxième objectif de la physique hadronique que de résoudre ces paradoxes.

A la naissance du Dapnia, on venait de mettre en évidence, à l'accélérateur linéaire de Saclay (ALS) et au synchrotron Saturne, des effets liés aux corrélations à très courte portée entre nucléons dans le noyau. On avait aussi réussi à « photographier » l'instant même où ils entrent en interaction en échangeant des mésons. Pour autant, ces effets participent très peu à notre

compréhension globale du noyau.

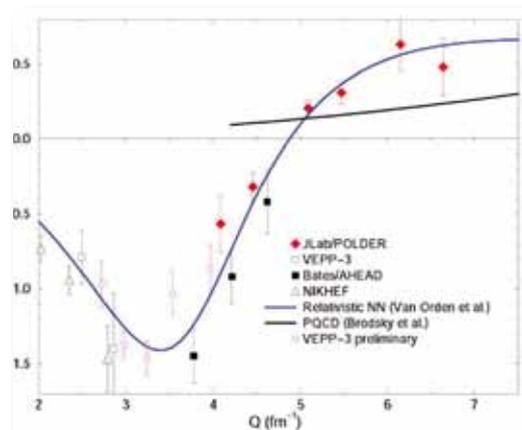
Une des premières expériences de Jefferson Lab, menée en 1997 par des équipes du Dapnia et de l'IN2P3, étudia dans ses plus fins détails la structure du deuteron noyau

simple s'il en est, composé uniquement d'un proton et d'un neutron. Même dans les configurations les plus extrêmes où les deux nucléons sont très proches l'un de l'autre (0,2 fm !) tout se passe encore comme si les caractéristiques du noyau étaient insensibles à la structure interne des nucléons. Le mystère allait s'épaississant...

Corrélativement, il serait contre-intuitif que le nucléon demeure inchangé dans le milieu nucléaire. Un ensemble d'expériences à l'ALS et au Jefferson Lab (répartition des charges dans le noyau), ainsi qu'au Cern et au Slac (effet EMC) indique que tel ne serait pas le cas : le nucléon dans le noyau n'est pas un nucléon libre.

Dans le même temps, à l'Irfu, un théoricien montrait comment l'interaction entre nucléons, construite à partir d'interactions entre quarks constituants et mésons échangés, se modifie compte tenu de l'extrême densité du milieu nucléaire. Il retrouvait ainsi les caractéristiques principales de la force telle qu'utilisée dans les calculs du noyau.

Dans les dix dernières années, le paradigme a changé : on progresse tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique dans la description de la dynamique des quarks et des gluons. On entrevoit enfin comment construire rigoureusement une interaction nucléon-nucléon, y compris dans le milieu nucléaire dense. A partir de là, les paradoxes mentionnés devraient à terme être résolus.



Polarisation du deuteron mesurée dans la diffusion élastique électron-deuteron. Un modèle n'incluant pas d'effets dus aux quarks (ligne bleue) permet de reproduire les données, même pour des distances inférieures à 0,2 fm ($q > 5 \text{ fm}^{-1}$). Le modèle noir, basé sur QCD, ne reproduit pas les données pour le moment.

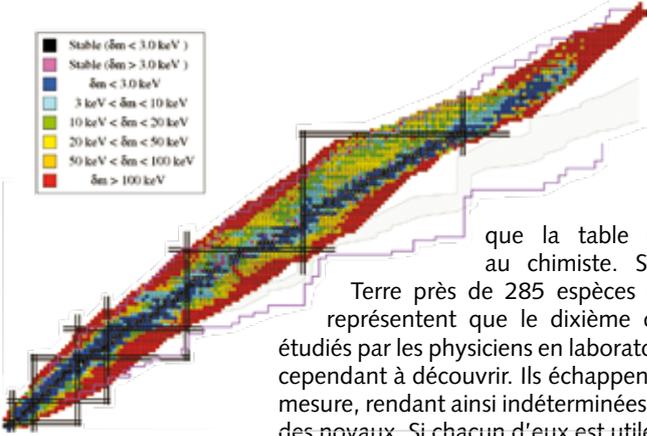
2000	2001	2002	2002	2003	2004
Publication sur les facteurs de forme du deuteron (JLab)	Pas de quarks étranges dans la charge électrique du proton (Happex à Jlab)	Publication sur les neutrons de spallation (Saturne)	Modèle de cascade intranucléaire pour l'étude de la spallation	Étude des transférmiiums (Jyväskylä, Ganil)	Spectroscopie des états non liés des héliums-6,7,8 (Must à Spiral)

Comment s'organise



Le complexe du noyau

par Laurent Nalpas



Défaut de masse des noyaux connus.

La carte des noyaux est au physicien nucléaire ce que la table de Mendeleïev est au chimiste. Si on rencontre sur

Terre près de 285 espèces de noyaux, elles ne représentent que le dixième des noyaux connus, étudiés par les physiciens en laboratoire. La majorité reste cependant à découvrir. Ils échappent pour l'essentiel à la mesure, rendant ainsi indéterminées les limites de la carte des noyaux. Si chacun d'eux est utile à la compréhension des lois qui régissent les édifices nucléaires, certaines régions revêtent une importance particulière car le comportement quantique des noyaux y est exacerbé. Pour les études avec des noyaux stables, il s'agit du voisinage des nombres de protons ou de neutrons 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Avec les noyaux radioactifs, apparaissent de nouveaux nombres magiques 6, 16, 40 qu'il nous faut expliquer, en incluant les dépendances de l'interaction au-delà de la symétrie neutron-proton. Certains de ces noyaux comme ^{24}O , $^{48,78}\text{Ni}$ et $^{100,132}\text{Sn}$ jouent un rôle d'étalon pour discriminer entre les modèles et les descriptions de l'interaction nucléaire.

Dans les années 90, les physiciens s'intéressaient principalement aux propriétés des noyaux stables mais portés dans des états extrêmes d'énergie d'excitation, de déformation ou de moment angulaire. Ces études des modes collectifs des noyaux et des propriétés de la matière nucléaire étaient menées au tandem de Saclay, au Vivitron de Strasbourg, à Legnaro et au Ganil. Par la suite, le développement des faisceaux radioactifs a favorisé les études de structure des noyaux loin de la stabilité.

Citons en particulier les noyaux radioactifs légers présentant des halos ou peaux de neutrons. Avec les faisceaux $^6,8\text{He}$ (Sissi, Spiral), les physiciens nucléaires ont réalisé la spectroscopie des états non liés des isotopes

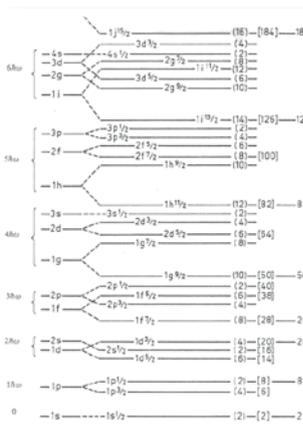
d'hélium riches en neutrons. Ils mènent également des recherches sur l'évolution de la structure en couche loin de la stabilité ($N = 16, 20, 28$) et la spectroscopie des noyaux superlourds, au Ganil et à Jyväskylä, pour déterminer les états responsables des dernières fermetures de couche de la carte des noyaux.



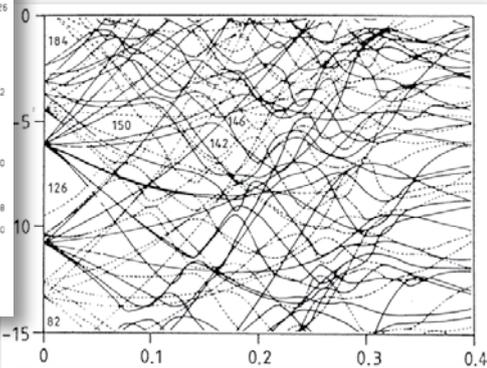
Installation du détecteur de gammas Exogam au point cible du spectromètre Vamos (Ganil).

Ils étudient enfin l'évolution des formes des noyaux le long de certaines chaînes isotopiques (Kr, Se, Pb, Bi) où un noyau peut adopter une forme dans un état excité de basse énergie très différente de celle de l'état fondamental, voire plusieurs formes coexistant dans un même état.

10



Les niveaux des nucléons tels qu'enseignés dans les cours de physique nucléaire à comparer avec la réalité du physicien qui doit faire face à une grande variété de phénomènes (déformation, densités, couplage entre états quantiques...) pour chaque noyau de la carte.



Ces évolutions s'accompagnent de travaux au sein de l'Espace de structure nucléaire théorique. On y améliore les modèles nucléaires et leur pouvoir prédictif, en particulier par une réduction du nombre de paramètres libres dans l'expression de l'interaction nucléon-nucléon et le recours à des approches dérivées des premiers principes. Ces travaux sont rendus possible grâce à l'augmentation régulière de la puissance de calculs parallèles.



2004	2005	2005	2006	2006
Création de l'Espace de structure nucléaire théorique	Mise en évidence d'un milieu dense et chaud au Rhic (Phenix à BNL)	Fermeture de couche exotique N=16 (Exogam à Spiral)	Mise en évidence de l'invariance d'échelle dans le processus DVCS (Jlab)	Capture neutronique dans le ^{232}Th (n_TOF au Cern)



la matière nucléaire ?

L'Irfu fait réagir

par Frank Gusing

L'étude des réactions entre noyaux atomiques permet de comprendre comment la matière est structurée et s'organise à l'échelle nucléaire. Les expériences réalisées depuis 20 ans à l'Irfu contraignent les modèles physiques qui décrivent leurs caractéristiques, quelque soit la cible et le projectile. Au-delà de l'étude de la matière nucléaire, la connaissance des réactions sert d'autres domaines comme les technologies nucléaire et médicale ou encore l'astrophysique.

Les réactions entre noyaux lourds ont été longuement étudiées dans les années 90 avec le détecteur Indra au Ganil avec une forte implication des équipes de l'Irfu tant au point de vue du développement des détecteurs que de l'analyse des résultats. Nous avons ainsi pu observer les spécificités de la matière nucléaire « chaude », siège d'une haute densité d'énergie à la suite de ces collisions, par la mesure de leurs produits de décroissance. Les physiciens recherchaient en particulier le changement d'état entre une matière nucléaire assimilable à un fluide et le moment où elle se transforme en un gaz.

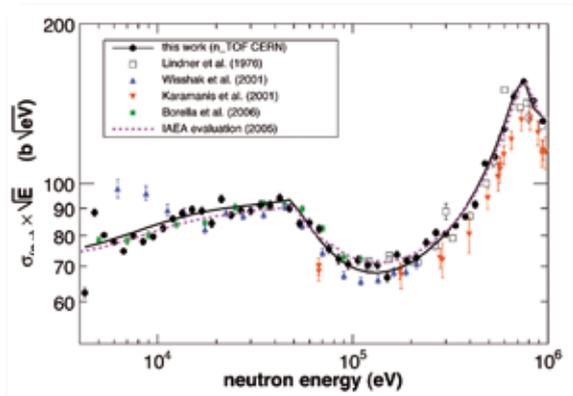
D'autres systèmes nucléaires chauds et leur changement d'état ont été étudiés dans les réactions induites par des protons très énergiques, cassant des noyaux lourds par spallation. Après l'arrêt du laboratoire national Saturne, une vaste quantité de données a été récoltée à GSI (Allemagne) et un effort considérable de modélisation nucléaire a été entrepris pour affiner des modèles des-

Les mêmes motivations ont conduit l'Irfu, dans les années 90, à commencer des programmes de recherche sur les réactions induites par neutrons auprès de l'installation Gelina à l'IRMM (Belgique) et auprès du réacteur à haut flux de l'ILL à Grenoble. L'étude de certains produits de fission et des actinides avait entre autres un intérêt direct pour la transmutation des déchets nucléaires. De plus, une collaboration internationale comprenant l'Irfu a construit le dispositif n_TOF au Cern, opérationnel depuis 2000. Nous avons pu ainsi étudier les probabilités de fission ou de capture d'un grand nombre de noyaux, depuis des isotopes du magnésium jusqu'au curium. Les données nucléaires obtenues et publiées par l'Irfu trouvent leur place dans des bibliothèques de données, expérimentales ou évaluées, mais aussi dans des modélisations intégrées dans les codes de calcul de référence.

D'autres réactions étudiées par l'Irfu ont une application directe comme les données concernant les photons et neutrons émis par les fragments de fission, retardés par la décroissance bêta. Ils permettent d'identifier le contenu des colis de produits nucléaires sans les ouvrir, ce qui est à l'étude dans d'autres unités du CEA.

Nous travaillons aussi au développement de nos outils de recherche en développant de l'instrumentation ou en réalisant des simulations comme pour Eurisol, projet européen d'accélérateur de noyaux exotiques de troisième génération.

Ces projets sont souvent structurés par des programmes de recherche européens. Alors qu'il y a 20 ans nous travaillions localement sur cette thématique, aujourd'hui nos collègues de tous les jours ne sont pas seulement dans le bureau à côté mais se trouvent dispersés à travers les instituts du monde entier.



La section efficace de capture neutronique de ²³²Th mesurée à n_TOF au Cern, d'après G. Aerts et al, Phys. Rev. C, 73 (2006) 054610.

criptifs et prédictifs. Ces études étaient en outre motivées par une application possible de source intense de neutrons dans des cycles nucléaires innovants comme les réacteurs pilotés par des accélérateurs ou pour des incinérateurs de déchets de l'industrie électronucléaire. Pour ces études, la compréhension des réactions s'avère indispensable.



2006	2006	2008	2010	2010
Coexistence de forme dans les isotopes légers de Kr et Se (Exogam à Spiral)	Faible contribution des gluons au spin du nucléon (Compass au Cern)	Mesure du temps de fission de noyaux superlourds (Ganil)	Résultat inattendu sur la suppression du J/Psi (Alice au Cern)	Section efficace de capture neutronique du ²³⁷ Np (ILL)

Comment l'Univers

L'Univers est composé de diverses formes de matière et d'énergie : neutrinos... Sa composition change au cours du temps du fait A l'Irfu, nous étudions aussi bien les grandes structures de

La sombre évolution de notre univers

par Dominique Yvon

La cosmologie a pour but de comprendre la formation de l'Univers et de modéliser son évolution. Cette discipline a beaucoup évolué depuis la première détection du fond diffus cosmologique micro-onde (FDCM), en 1964. Dans les années 80, la cohérence entre les modèles de nucléosynthèse primordiale et les observations s'est précisée. L'observation de l'expansion de l'Univers, l'existence du FDCM et la nucléosynthèse primordiale sont les trois piliers des modèles décrivant l'Univers primordial et son évolution.

Cependant, les premiers modèles étaient encore grossiers : on croyait que l'Univers était composé uniquement de matière baryonique.

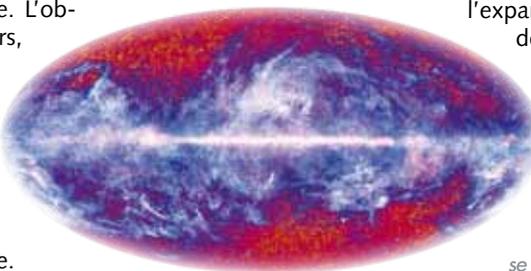
L'incroyable précision du spectre du corps noir et la régularité des cartes du FDCM obtenues par le satellite Cobe (1989) nous ont appris que l'Univers primordial était extrêmement homogène : on observe des contrastes de densité de 1 pour cent mille. Pourtant l'Univers proche est très inhomogène ; nous observons des étoiles, des galaxies et des amas de galaxies. Pour que la gravitation parvienne à concentrer la matière, il devient nécessaire de supposer l'existence de matière sombre dominant la dynamique gravitationnelle de l'Univers.

En 1998, les expériences Boomerang et Maxima embarquées en ballon détaillent la structure spatiale du FDCM et « font le ménage » dans les quelques 2000 variantes d'univers imaginées par les théoriciens depuis

Cobe. Au même moment, des expériences utilisent les supernovas thermonucléaires comme étalon de luminosité aux échelles cosmologiques. Elles concluent que l'Univers est en expansion accélérée depuis quelques milliards d'années. Pour comprendre ceci, l'hypothèse supplémentaire la plus simple est l'existence d'énergie sombre, qui domine la dynamique d'expansion de l'Univers récent.

Ce modèle cosmologique, très sombre, résiste depuis à toutes les observations. Bien des problèmes subsistent. En particulier, malgré des décennies d'efforts, nous ne connaissons pas la nature de la matière sombre, nous savons seulement ce qu'elle n'est pas. Nous avons tout aussi peu d'idées sur la nature de l'énergie sombre...

A l'Irfu, nous sommes fiers d'avoir mené ou participé depuis 1990 à des expériences, parfois hors des sentiers battus mais toujours à la pointe. On peut citer les expériences Eros et Edelweiss, consacrées à la nature de la matière sombre, le ballon Archeops et le satellite Planck raffinant l'étude du FDCM, l'expérience SNLS précisant la mesure de l'accélération de l'expansion de l'Univers et enfin de grands programmes d'étude et de simulation de formation des amas de galaxies.



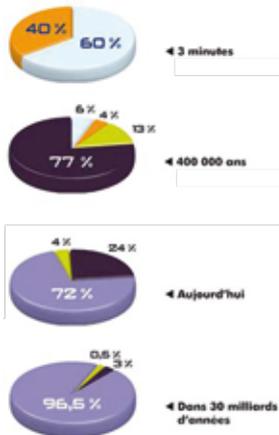
Première carte du ciel observée par le satellite Planck. Sur cette image se superposent la carte des inhomogénéités du FDCM et la carte des poussières de notre galaxie.

Les variations du FDCM mesurées dans les parties rouges sont de l'ordre de 0,001 %.

Nucléosynthèse primordiale : synthèse des noyaux des premiers atomes, essentiellement hydrogène et hélium, au cours des trois premières minutes de la formation de l'Univers.

12

- Rayonnement
- Neutrinos
- Matière ordinaire
- Matière noire
- Énergie noire



Évolution des abondances énergie-matière au cours du temps.



Simule moi un Univers

« Il y a eu une montée en puissance du calcul intensif appliqué à des problèmes d'astrophysique depuis dix ans. Elle est liée à une évolution culturelle ainsi qu'à l'augmentation de la puissance des ordinateurs qui permet maintenant de modéliser avec un certain réalisme les systèmes complexes rencontrés en astrophysique. Le métier d'astrophysicien s'est alors diversifié. En plus des approches observationnelles ou théoriques, la modélisation s'est imposée comme une troisième voie pour appréhender et comprendre les objets astrophysiques.

Les calculs de haute performance pour l'astrophysique se sont structurés. Un programme de l'Irfu, Coast, par exemple, associe calcul et outils logiciels adaptés à nos problèmes. Nous pouvons y aborder toutes sortes de problèmes depuis la cosmologie et l'histoire de l'Univers, la formation de disques stellaires et de planètes jusqu'au fonctionnement du Soleil. Cet investissement va encore se renforcer avec l'avènement de la Maison de la simulation dont j'ai la responsabilité. Située sur le plateau de Saclay, elle regroupe CEA, CNRS, universités et l'Institut de recherche en informatique et automatisme (Inria) dans un cadre national. »

Entretien avec Edouard Audit

1990	1991	1992	1992	1994
Lancement du télescope spatial Hubble	Carte du centre galactique par le télescope Sigma	Découverte du premier microquasar	Ulysse sort du plan de l'écliptique	Impact de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter

est-il structuré ?

lumière, matière ordinaire, matière noire, énergie noire, des propriétés de ses constituants et de son évolution. l'Univers que la vie des étoiles.

L'amas toujours faire ainsi

par Monique Arnaud



Situés au croisement des grands filaments cosmiques, les amas de galaxies sont les plus grands objets de l'Univers. Ils sont constitués de 85% de matière noire et de 15% de matière visible, principalement du gaz chaud inter-galactique. Leur étude est indispensable pour comprendre l'évolution de l'Univers.

Dans les années 90, les chercheurs de l'Irfu ont utilisé les observatoires Rosat (Allemagne) et Ginga (Japon) pour étudier l'enrichissement en éléments lourds du milieu intra-amas et les propriétés statistiques de la population d'amas. Cependant ces satellites ne permettaient pas de produire des cartes de température du gaz et donc de caractériser leurs propriétés thermodynamiques. Pour ce faire, il a fallu la mise au point de caméras CCD sensibles aux rayons X et l'extension de la gamme d'énergie des télescopes. L'Irfu s'est alors investi dans l'instrument Epic embarqué sur XMM-Newton, lancé fin 1999, et il a réalisé la caméra optique Megacam installée au Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT).

S'appuyant sur cet investissement technique important, les chercheurs de l'Irfu mènent de grands projets d'étude des amas. Ainsi, ils ont déterminé avec XMM-Newton les propriétés statistiques et structurelles des amas proches,

test important pour comprendre leur formation (projet Recess). Un grand relevé d'amas distants, le XMM-LSS, a été réalisé en combinant les données de XMM avec celles recueillies par Megacam. Il va être étendu à une région cinq fois plus grande pour contraindre l'équation de l'énergie noire avec les amas (projet XXL accepté fin 2010). D'autre part, une cartographie de l'amas de

La Vierge est en cours avec Megacam pour détecter jusqu'aux débris des collisions de galaxies et mieux comprendre l'histoire de leur formation.

Le satellite Planck, lancé en 2009, est en train de détecter des amas et même des super-amas sur l'ensemble du ciel via l'interaction des photons du fond diffus cosmologique avec le

milieu inter-amas. L'Irfu s'est beaucoup investi dans le traitement du signal pour Planck, la détection des amas et leur suivi avec XMM-Newton. Les nouveaux amas détectés par Planck semblent beaucoup plus perturbés que ceux détectés en X, suggérant une formation et une évolution différentes pour ces grandes structures.

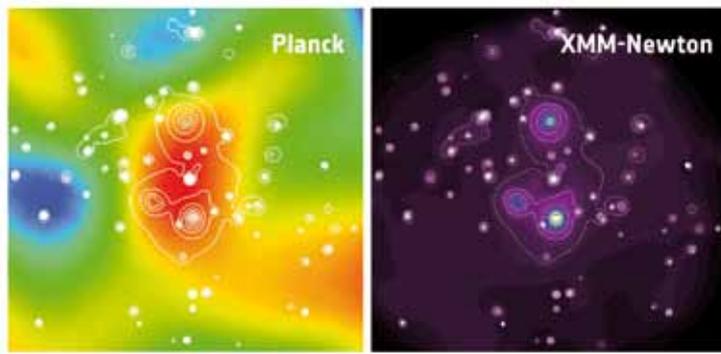


Image d'un superamas de galaxies découvert par Planck, le premier super-amas détecté par son impact sur le fond diffus cosmologique (en rouge, à gauche). L'image obtenue en X avec XMM-Newton (à droite) révèle la présence de trois amas. Les contours de l'émission X sont tracés en blanc sur les deux images. Crédit ESA/Planck/XMM-Newton

13



XMM Newton

XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror) est le plus grand satellite artificiel d'observation de rayons X.

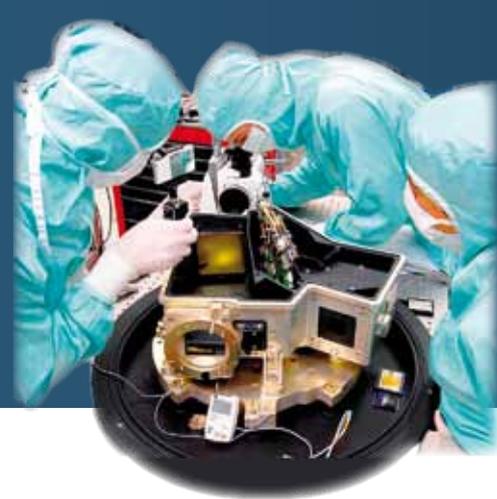
L'équipe de ce projet approuvé par l'ESA en 1985 a été constituée en 1993 et le développement du satellite a débuté en 1996. Il fut lancé le 10 décembre 1999, par une fusée Ariane 5. Il est maintenant placé sur une orbite allant de 7 000 à 114 000 kilomètres. Les premières observations ont commencé dès l'année 2000. L'Irfu s'est investi dans la réalisation de la caméra Epic, l'un des principaux instruments de ce satellite.



Le super ordinateur Mare Nostrum à Barcelone (Espagne).

1995	1997	1998	1999	2000
Lancement des satellites ISO et Soho	Image de la comète Hale-Bopp	Première images du VLT	Lancement de XMM-Newton	Disque de poussière autour de Iota de l'Horloge

Comment l'Univers



A la genèse des galaxies

par David Elbaz

En 20 ans, on a paradoxalement appris énormément et, tout à la fois, peu de choses sur la formation et l'évolution des galaxies. On ne connaissait qu'une poignée de galaxies quand le miroir de 2,40 m du télescope spatial Hubble (HST), lancé en 1990, libéré des perturbations atmosphériques, nous a montré des galaxies aux formes étonnantes, loin de celles de la belle galaxie spirale d'Andromède... Commence alors la quête de la morphogénèse des galaxies. En 1996, un bond prodigieux vers l'Univers lointain est effectué grâce à une idée

ingénieuse, la technique de la discontinuité de la raie Lyman de l'hydrogène qui permet de mesurer la distance des galaxies sur 90% de l'histoire de l'Univers, un milliard d'années après le big bang. Des centaines de galaxies sont détectées. La génération des 8-10 m validera ces mesures dès la fin des années 90 ouvrant la voie à l'histoire cosmologique de la formation des galaxies.

Mais les galaxies sont rebelles et cachent leurs pouponnières d'étoiles jeunes et massives dans des cocons de poussière qui ne laissent passer ni la lumière ultraviolette ni la lumière visible. C'est ISO avec sa caméra infrarouge Isocam et son miroir de 60 cm, qui va révéler que l'histoire dessinée par les grands télescopes est fautive d'un facteur 10, des flambées de formation d'étoiles ayant échappé aux observations ! La course à l'Univers invisible avait commencé.

En parallèle, une équipe française dirigée par J.L. Puget découvrirait, grâce au satellite américain Cobe, une lumière infrarouge en provenance de toutes les directions du ciel, porteuse de la plus grande quantité d'énergie lumineuse après celle du bruit de fond du big bang. Il s'agit de toutes les naissances

d'étoiles et de galaxies sur les 13 milliards d'années de l'Univers depuis le big bang, l'équivalent d'un livre d'histoire dont les lettres auraient toutes été imprimées sur une seule page.

Après l'europpéen ISO, puis l'américain Spitzer avec ses 80 cm de diamètre, un autre bond de géant va permettre de lire la trace fossile de l'histoire des galaxies. En 2009, le satellite Herschel et son miroir de 3,5 m, le plus grand jamais envoyé dans l'espace, est lancé par l'ESA afin de lire les lettres du livre à page unique et de mettre de l'ordre dans la confusion de l'Univers infrarouge sondé par les petits miroirs. Mais au lieu de s'éclaircir, le mystère s'épaissit. Il est apparu, en particulier grâce à HST, qu'un acteur inattendu jouait un rôle majeur dans l'histoire des galaxies, un trou noir supermassif de centaines de millions de masses solaires, au cœur de chaque galaxie. Pour une raison inconnue sa masse correspond toujours au millième de celle des étoiles...

En 20 ans, le rôle des fusions de galaxies les unes avec les autres a d'abord été porté aux nues, dessinant une histoire *matriochkésque* des galaxies naines aux géantes... jusqu'à ce que l'on découvre que les plus massives s'étaient formées plus tôt que les naines ! Par ailleurs, les simulations révèlent le rôle majeur joué par des filaments de matière intergalactique invisible nourrissant les galaxies comme des intraveineuses tout au long de leur existence. L'interféromètre sub-millimétrique au sol Alma, puis les futurs télescopes spatiaux Spica et JWST, vont pousser l'exploration des galaxies plus loin dans le temps et dans la précision spatiale, en attendant l'avènement de l'interférométrie spatiale.

Mais les véritables maîtres de la genèse des galaxies, filaments de matière intergalactique, matière noire et énergie noire, continuent d'échapper aux assauts de nos télescopes.

14

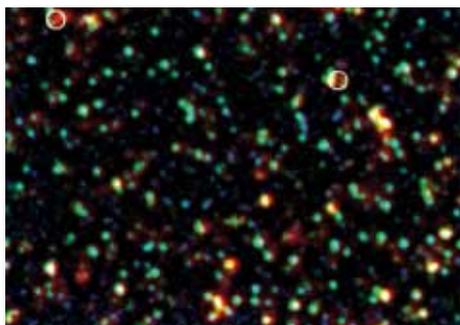
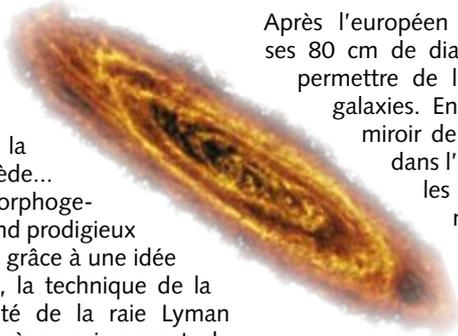


Image trois couleurs du ciel profond vu par Herschel, chaque point sur cette image est une galaxie avec ses dizaines de milliards d'étoiles, comme la galaxie spirale géante d'Andromède. Les galaxies les plus rouges sont les plus lointaines. Les deux cercles montrent les galaxies GN10 et GN20, situées à si grande distance que nous les voyons telles qu'elles étaient il y a 12,2 milliards d'années, au moment de la formation des premières galaxies..



La caméra Isocam du satellite ISO lancé en 1995.



2001	2002	2003	2003	2004
Observation de proto-étoiles	Le satellite Integral est lancé	Première image officielle de la caméra Megacam	Golf mesure la rotation du Soleil	Visir découvre le ciel

est-il structuré ?



Une étoile est née

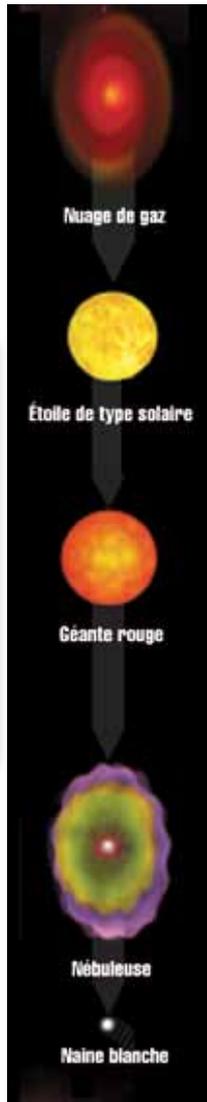
par Vincent Minier

Durant l'hiver, la constellation d'Orion crève le ciel de son éclat avec ses trois étoiles alignées, Alnitak, Alnilam et Mintaka mais l'essentiel demeure invisible à nos yeux. Entre ces étoiles, l'espace n'est pas vide mais rempli de gaz et de poussières, c'est le milieu interstellaire, le réservoir des futures étoiles. Reconstituer les grandes étapes qui conduisent à former une étoile à partir d'un nuage de gaz interstellaire quasiment vide est l'objet de recherches à l'Irfu depuis 20 ans. Les observatoires spatiaux ISO et Herschel, entre autres, ont permis d'aboutir à un scénario global de la naissance d'une étoile.



Grâce aux images du télescope spatial Herschel, les astrophysiciens viennent pour la première fois de dévoiler la fabrication, jusqu'alors invisible, d'amas d'étoiles dont certaines « pèsent » plus de dix fois la masse du Soleil. (Crédit Hobys)

A la fin des années 80, les spécialistes de la naissance des étoiles s'attachaient à répondre à la question : Quelle est la séquence d'événements qui conduit à la formation d'une étoile à partir d'une poche de gaz ? La réponse ne se fit pas attendre. Les observations de nébuleuses, véritables maternités d'étoiles, conduisirent à une classification des « embryons » d'étoiles sur une période de gestation courte, environ 100 000 ans. Les techniques d'observation employées étaient adaptées au stade d'évolution de l'étoile : les micro-ondes et ondes millimétriques pour les « embryons », le rayonnement infrarouge pour la naissance et la lumière visible et ultraviolette pour les étoiles bien formées.



Evolution d'une étoile de masse solaire depuis sa naissance dans le gaz interstellaire jusqu'à la formation d'une naine blanche.

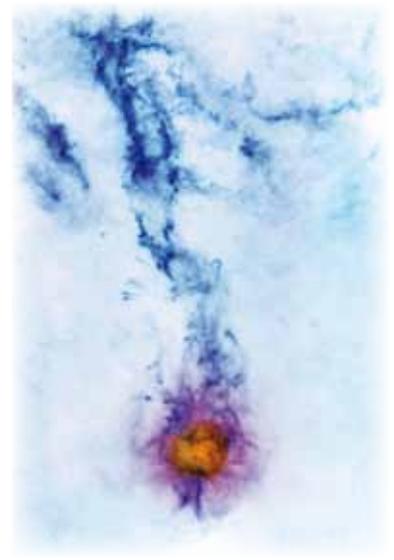
A la fin des années 90, une percée est effectuée par le satellite ISO, lancé en 1995. Les observations permirent de recenser les étoiles jeunes au sein des nébuleuses ; elles se

regroupent généralement par centaines pour former un amas. Appuyé par des observations dans le domaine des rayons X, il devint évident que c'est tout l'environnement des étoiles qu'il fallait prendre en compte désormais pour comprendre la naissance de chacune.

Alors que les résultats des recherches s'accumulaient, Herschel, un télescope destiné à l'observation des mécanismes de formation des étoiles était en construction. Lancé en 2009, il nous livre aujourd'hui une vision globale de la formation des étoiles : des ondes de chocs traversent les nuages de gaz interstellaire, le compressent et l'organisent en réseaux de filaments qui, pour les plus massifs, s'effondrent et se fragmentent pour donner naissance à des amas d'étoiles. Un scénario se dessine.

Malgré ces avancées, la formation des étoiles massives et le rôle précis qu'elles jouent dans le planning familial est encore un mystère. L'énergie colossale et les flots de matière qu'elles libèrent freinent l'accumulation de masse, perturbent et enrichissent l'environnement, balayent le gaz interstellaire...et déclenchent la formation de nouvelles générations d'étoiles.

Notre soleil, isolé comme les étoiles d'Orion, serait le descendant de plusieurs générations d'étoiles qui se sont succédées, il y a 5 milliards d'années. Son amas original, sa famille, s'est dispersé depuis en quelques dizaines de révolutions autour du centre de la Galaxie.



Le réseau de filaments interstellaires dans IC5146. Programme Gould Belt/Herschel/ESA

2004	2004	2005	2005	2006
Hess découvre une source de rayons cosmiques	Integral perce le brouillard gamma	Lancement du projet Coast	Ciris mesure la température des anneaux de Saturne	Observation du cycle instable et de la vitesse des étoiles à neutrons

Comment l'Univers

Les étoiles du firmament

par Stéphane Mathis

Lieu de synthèse des éléments chimiques, les étoiles ont un impact majeur sur le milieu interstellaire et sur l'évolution galactique. D'autre part, du fait de leur rayonnement et de leur activité magnétique, elles influencent fortement leur environnement proche et donc leur possible système planétaire.

C'est en 1995, que débute, avec le lancement du satellite Soho, l'exploration spatiale des couches internes des étoiles. Ainsi, grâce à l'instrument Golf (installé sur ce satellite) auquel les équipes de l'Irfu ont fortement contribué, les astrophysiciens sondent les couches internes du Soleil grâce à l'héliosismologie. Cette méthode, à l'image de la sismologie terrestre, caractérise les propriétés de l'intérieur du Soleil à partir des ondes qui s'y propagent. Pour la première fois, la communauté scientifique acquiert une connaissance de la dynamique interne du Soleil et de sa structure avec une précision inégalée.

La découverte d'une vitesse de rotation différente entre le cœur quasi-rigide de l'étoile, jusqu'à 0,2 rayon solaire, et celle des régions externes souligne la complexité de sa structure interne.

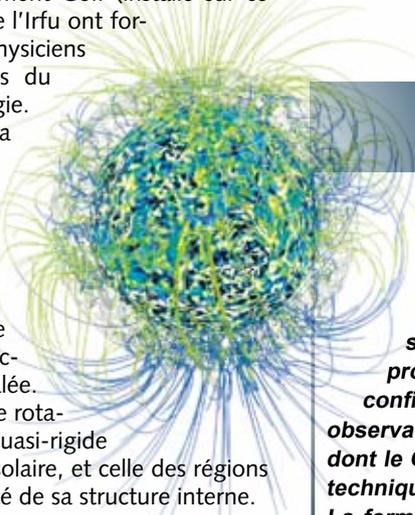
Une seconde étape est franchie avec les lancements de deux satellites, Corot du Cnes en 2006 puis Kepler de la Nasa en 2009. Ils permettent l'avènement de la sismologie stellaire ou astérosismologie qui, de la même façon que l'héliosismologie, permet de sonder l'intérieur des étoiles grâce à l'étude de leurs oscillations.

De l'étude du Soleil initiée dans les années 90, la structure interne des étoiles est dorénavant accessible. Les équipes de l'Irfu, en collaboration avec des équipes européennes et américaines, commencent à découvrir l'importance des processus dynamiques à chaque étape de la vie d'une étoile.

D'une vision statique nous passons à une vision dynamique où convection, turbulence, rotation et champ magnétique doivent être pris en compte.

grâce à la puissance croissante des supercalculateurs, accompagnant les progrès observationnels. Les détails de la rotation interne, élément-clé de l'évolution des étoiles, sont maintenant à portée de main.

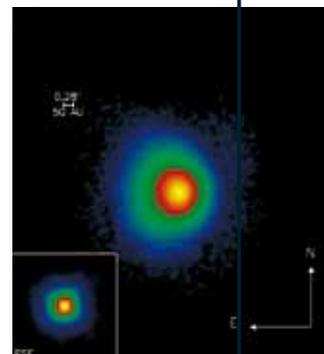
Corot et Kepler permettent aussi la recherche d'exoplanètes. Les chercheurs étudient donc également l'impact des étoiles sur leur environnement et les conséquences sur l'apparition de la vie.



L'histoire d'un disque

« Quand une étoile se forme à partir d'un nuage de gaz, elle tourne par rapport à un axe. La matière qui tourne en dehors du plan perpendiculaire à cet axe subit plus de frottements et s'aplatit pour former un disque. Ce disque protoplanétaire est évasé ce qui a été confirmé pour la première fois grâce à des observations avec l'instrument Visir (VLT, Chili) dont le CEA a eu la responsabilité scientifique et technique lors de sa conception et construction. La formation de planètes demande au préalable celle de planétésimaux, objets dont les tailles sont comprises entre 1 et 100 km, en partant de poussières très fines. Il suffit d'un million d'années pour voir émerger une planète à partir de ces briques. Certaines étapes de la croissance des planétésimaux restent mal connues. La première exoplanète a été observée en 1995. Nous en avons recensé plus de 500 aujourd'hui, certaines grosses comme dix fois la taille de Jupiter. »

Entretien avec Eric Pantin



Gaz d'hydrogène moléculaire contenu dans le disque entourant une étoile très jeune, l'étoile HD97048, âgée de seulement trois millions d'années observée par Visir en infrarouge. Vue de la Terre, la surface de ce gaz a une forme de bol.

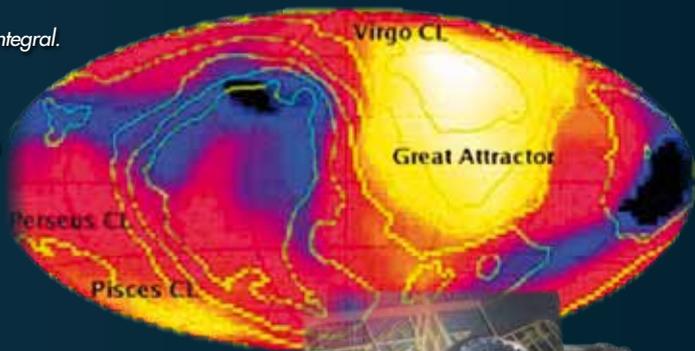
16



En parallèle, modélisation théorique et simulation numérique de la dynamique des intérieurs stellaires se développent

2006	2007	2008	2008	2009
Un modèle pour expliquer la formation des galaxies naines	Publication du plus grand catalogue de sources X par XMM-Newton	Lancement du satellite Fermi	La micro-caméra X Caliste voit le jour	Année mondiale de l'Astronomie

est-il structuré ?



Les masques de l'Irfu

par Bertrand Cordier



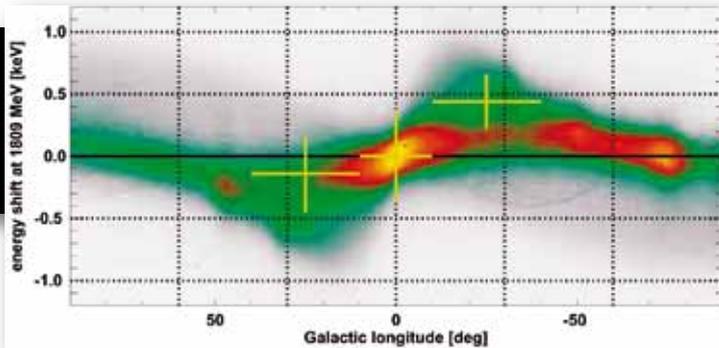
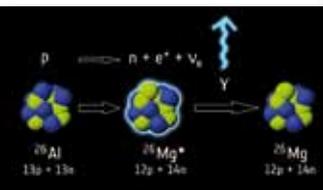
Pour pratiquer l'astronomie dans le domaine des rayons gamma, il est très difficile d'utiliser miroirs et lentilles car les longueurs d'onde des rayons gamma sont inférieures aux distances entre les atomes ; les télescopes traditionnels sont inutilisables. Comment faire une image des gammas du ciel ? Les astronomes de l'Irfu se sont attelés à cette question depuis plus de vingt ans !

Svom consacré à l'étude des énigmatiques sursauts gamma, les événements les plus énergiques de l'Univers depuis le big bang. Grâce à son masque codé, le télescope spatial Eclair sera en mesure de localiser avec précision ces sursauts gamma. Vingt ans après les premiers résultats, l'astronomie gamma avance donc toujours masquée.

En ce qui concerne les photons gamma de basse énergie, la solution est venue à la fin des années 80 grâce aux chambres à ouvertures codées, des dispositifs s'inspirant des chambres noires (ou caméra à trou d'épingle) qu'utilisèrent les premiers photographes.

Notre environnement est composé de poussières d'étoiles, éléments chimiques formés au cours du temps au cœur des étoiles et lors des explosions de supernovas. En cartographiant la Galaxie à des énergies très précises, signatures de la décroissance radioactive d'un élément, Integral a mis en évidence la présence de l'aluminium-26. Ceci a permis de déduire le taux d'explosion de supernovas dans la Galaxie : deux explosions par siècle, une valeur en bon accord avec d'autres indicateurs.

Ces résultats sont indispensables pour comprendre non seulement les différentes étapes de fabrication des éléments au cœur des étoiles mais aussi pour expliquer l'enrichissement en éléments lourds de la Galaxie.



Répartition des émetteurs de rayonnement gamma liés à la décroissance de l'aluminium-26 dans les régions centrales de la Galaxie (crédit MPE).

La première utilisation date de 1989 lorsque le télescope à masque codé Sigma (Système d'imagerie gamma à masque aléatoire) est embarqué à bord de la mission spatiale franco-soviétique Granat. Sigma a enregistré la première carte à haute résolution de la région centrale de notre galaxie. A la surprise générale, les chercheurs de l'Irfu découvrirent que l'émission principale ne provenait pas du centre même de la Galaxie mais d'une source voisine, baptisée «grand annihilateur» car surprise à émettre des bouffées de positons. Cette source s'avérera plus tard posséder deux jets de matière visibles en radio ; le premier microquasar était découvert.

Fort du succès de Sigma, l'Agence spatiale européenne engagera en 1994 la mission Integral avec à son bord trois instruments qui utilisent cette technique instrumentale. En orbite depuis 2002, l'observatoire Integral tire depuis le meilleur profit de ses masques codés. Les chercheurs de l'Irfu ont pu établir une carte sans précédent de la Voie lactée, découvrir de nouvelles classes d'objets ou encore étudier la présence d'antimatière au centre de la Galaxie.

Devenu expert du domaine, l'Institut porte aujourd'hui la responsabilité scientifique du projet sino-français

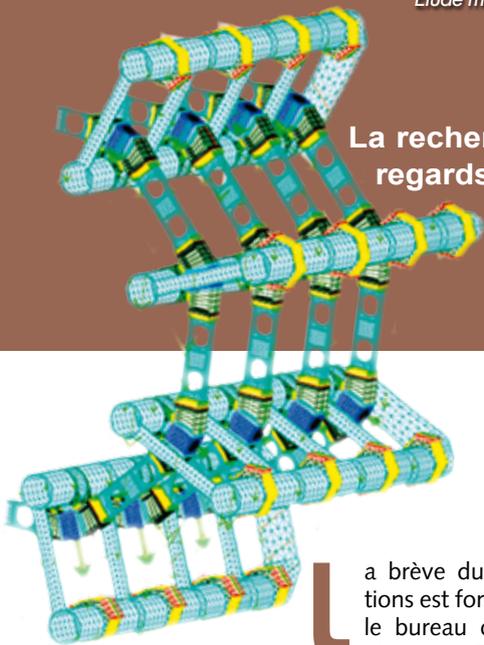
Le masque et son principe

En perçant un trou dans la face avant d'une boîte opaque et en disposant une plaque sensible sur la face opposée, on réalise une chambre photographique très primitive mais qui permet de former des images. En disposant d'un grand nombre de trous, on accroît la luminosité sans perdre en finesse. Dans notre cas, la face avant est un motif formé de pavés de tungstène opaques aux rayons gamma et de trous, le tout judicieusement réparti. Les photons qui traversent ce masque sont captés par un détecteur qui mesure leur point d'impact. L'image du ciel observé est ensuite reconstruite.



2009	2010	2010	2011	2011
Lancement de Herschel-Planck	Planck découvre un super-amas	Les galaxies des Antennes décodées	Le cœur des étoiles géantes sondé	Herschel mesure les filaments interstellaires

La recherche fondamentale se développe aux frontières de l'excellence regards sur l'Univers sans suivre les évolutions techniques et de détection, d'accélération mais aussi élaboration de simulations sur ordinateur de plus en plus abouties.



De la planche à la CAO

par Philippe Daniel-Thomas

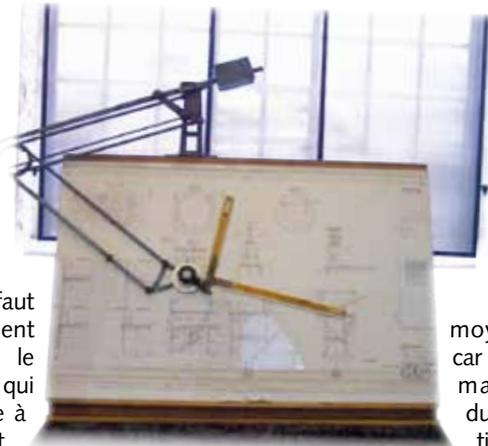
La brève du numéro 2 de Scintillations est formelle : mars 1992, le bureau d'études mécaniques du Dapnia (BE) est maintenant équipé de neuf postes de conception assistée par ordinateur (CAO). Un curieux ménage à trois débute alors : les planches à dessin regardent d'un œil inquiet ces machines, les projeteurs, eux, demandent à voir.

Première constatation, les logiciels de CAO facilitent l'appréhension d'un système mécanique. Au début des années 90, un système mécanique est représenté avec une série de plans et il faut se le projeter mentalement en 3D pour en saisir le fonctionnement, ce qui peut être difficile. Grâce à l'informatique, on peut réaliser des ensembles mécaniques directement en 3D, apprécier l'environnement architectural, optimiser les jeux et animer des pièces en mouvement. Organiser des réunions d'avant-projet sans avoir créé un dossier de plans devient possible et on peut même y inviter des non-mécaniciens, aucune connaissance en dessin technique n'est nécessaire !

Les planches peuvent s'inquiéter. Alors qu'elles sont habituées depuis longtemps à être choyées, gratouillées et admirées, elles voient défiler un nombre impressionnant de projets sur leurs voisins à processeurs. Effectivement, avec la CAO, le rythme s'accélère, les modifications des ingénieurs et physiciens sont réalisées sur les pièces puis répercutées immédiatement sur l'ensemble mécanique complet. Malgré les modifications sans fin des modèles, les études sont plus courtes, les modifications sur les projets pouvant être prises en compte immédiatement. Finalement, la dernière planche à dessin rend les armes en 1996, poussée vers la sortie par l'expansion d'un parc de machines toujours plus puissantes.

Dans le même temps, au BE, les calculs de contraintes et déplacements effectués de manière analytique et à la main voient l'arrivée de logiciels spécialisés utilisant la méthode des éléments finis. La modélisation du comportement mécanique et thermique de systèmes complexes devient accessible. Là aussi, plus de flexibilité s'offre aux ingénieurs,

avec en prime, la possibilité de présenter des états de contraintes via des interfaces graphiques conviviales.



Mais cette révolution n'a pas tout changé. Comme avant, les intervenants du bureau d'études apportent leurs savoir-faire et ingéniosité en gardant un œil sur les moyens de fabrication car imaginer c'est bien, mais pouvoir passer du virtuel à la réalisation, c'est mieux.

Finalement, le BE fournit le plus souvent un dossier de plans « papier » au fabricant car il reste le principal vecteur d'information pour obtenir les pièces imaginées au BE. Mais même cela est en train de changer...

18



De la fraise à

Au delà de l'évolution des techniques, en vingt personnes. Marc Riallot nous raconte son parcours, professionnel.

« Je suis arrivé au CEA bien avant la création du Dapnia, en décembre 82, avec un CAP de mécanicien-fraiseur, j'avais 21 ans. Notre chef de groupe tenait à ce que les mécaniciens participent aux montages ; j'ai ainsi eu la chance de découvrir ce qu'est une expérience de physique. Au moment de la restructuration, j'ai intégré l'équipe de Claude Mazur qui cherchait un technicien-mécanicien capable de modifier les pièces, de concevoir des outillages ou de tracer des petits plans, à la main à l'époque ! Il a fallu apprendre à souder plusieurs centaines de fils, à coller des structures... pour être capable de développer et de réparer les détecteurs. »

1992

Mise en service du TDR dur DO au Fermilab

1993

Modèle de vol Isocam pour lancement en 1995

1994

Étalonnage de Gallex avec la source artificielle de neutrinos

1995

Fin de l'intégration des 50 chambres à dérivés de Nomad

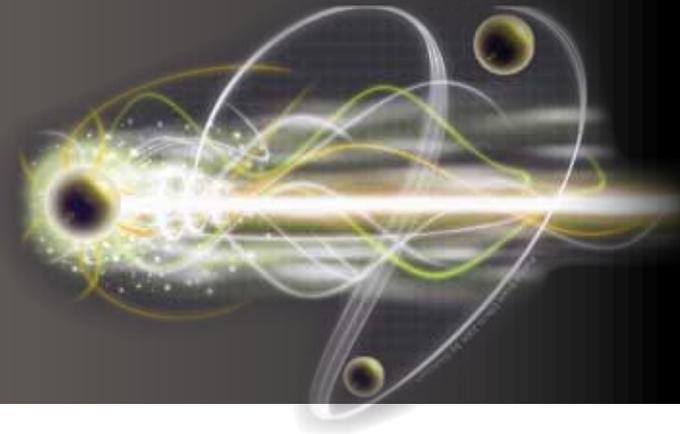
1996

Première conférence sur les photodétecteurs à Beaune

1997

Installation de la cible cytogénique de Clus à JLab

technologique. On n'ouvre pas de nouveaux l'innovation dans tous les champs : techniques nouveaux systèmes à travers des conceptions et des

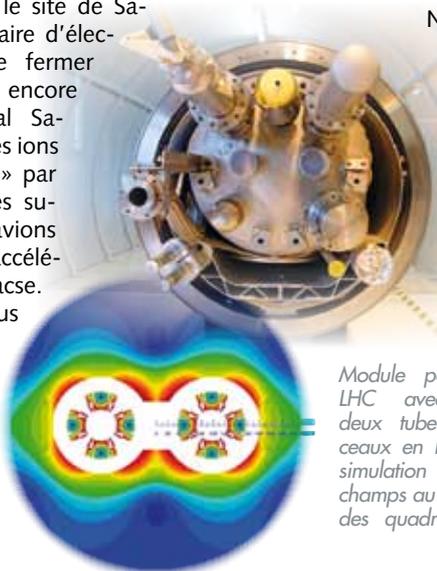


La froide accélération

Entretien avec Antoine Dael

S cintillations : Quel était le paysage des accélérateurs et du cryomagnétisme en 1991 ?

Antoine Dael : Il y avait encore des accélérateurs sur le site de Saclay. L'accélérateur linéaire d'électrons (ALS) venait de fermer mais nous accueillions encore le Laboratoire national Saturne, le tandem dont les ions lourds étaient «boostés» par un ensemble de cavités supraconductrices. Nous avions aussi une maquette d'accélérateur d'électrons, Macse. Coté magnétisme, nous faisons essentiellement un travail de R&D pour définir les paramètres du LHC et ceux des grands détecteurs qui deviendront Atlas, Alice et CMS.



Module pour le LHC avec ses deux tubes faisceaux en haut et simulation des champs au niveau des quadrupôles.

S : Comment le LHC a-t-il influencé vos méthodes de travail ?

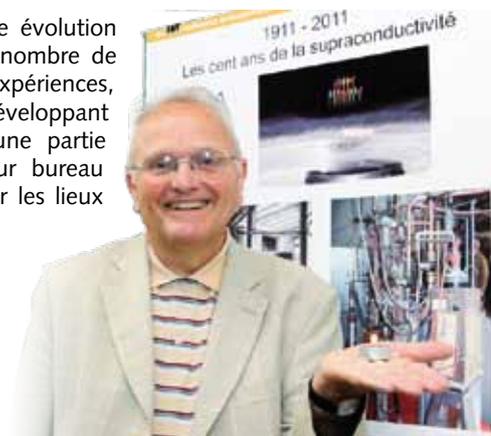
A.D. : De 1995 à 2005, les travaux pour le LHC, accélérateur et détecteurs, ont rythmé notre quotidien. Nous développons nos réalisations au sein de grandes collaborations et sans en avoir la maîtrise d'œuvre, de façon quasi systématique. Alors que ce n'était pas dans les habitudes du CEA, cette pratique est courante aujourd'hui pour réunir les moyens nécessaires à la réalisation des très grands projets auxquels nous participons.

S : Quelles sont les évolutions les plus marquantes au cours de ces vingt ans ?

A.D. : Avec la fermeture des accélérateurs, nous avons dû apprendre à démanteler, savoir qui est devenu une expertise importante et reconnue de l'Irfu. Il y a eu ensuite une montée en puissance des recherches et développements pour les accélérateurs. Ce savoir-faire, associé à celui de la réalisation du LHC, nous a conduit à construire des accélérateurs pour l'extérieur (Spiral2, Xfel, Ifmif, ESS). Nous avons suivi une évolution similaire pour la construction de grands aimants froids (projet Iseult pour Neurospin, R3B-Glad) avec un engagement croissant dans des projets liés aux études sur la fusion par confinement magnétique (W7X, JT60).

Notre mode de financement a beaucoup évolué. Alors que pour les accélérateurs locaux nous disposions essentiellement de fonds propres, nous allons aujourd'hui chercher des financements extérieurs pour nos recherches, auprès de l'ANR et sur des programmes européens.

Dans le même temps, il y a eu une évolution de notre métier. Avec la baisse du nombre de techniciens, nous réalisons moins d'expériences, de prototypes, les ingénieurs développant plus de simulations restant pour une partie importante de leur temps dans leur bureau là où nous étions précédemment sur les lieux d'expérience.



Entretien avec Marc Riallot

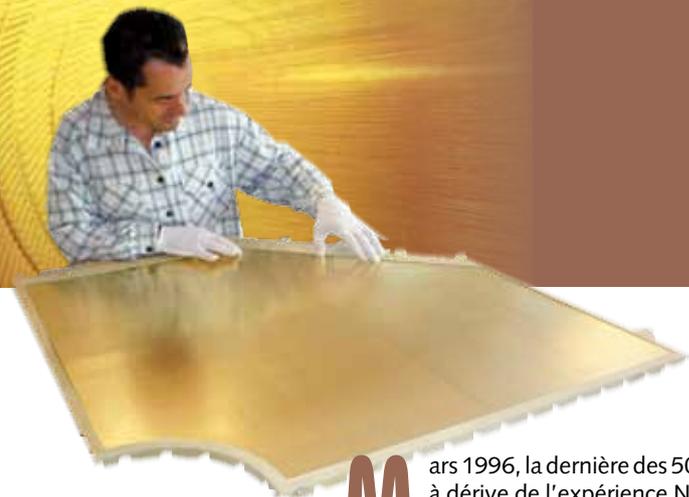
l'indépendance

ans, chaque membre de l'Irfu a vécu une évolution un exemple parmi tant d'autres d'enrichissement

Je participais toujours à leur intégration, en particulier au Ganil : tirer des câbles, ramper dans des endroits impossibles pour assurer des mesures, suivre le "débugage" du début, voir le détecteur réagir sous vide et les premiers tests avec source avant l'arrivée du faisceau...

Je suis maintenant plus indépendant, je commence à suivre les projets en amont, depuis les discussions avec les physiciens jusqu'à l'intégration, en passant par la conception sur ordinateur. »

1998	1998	1999	2000	2001	2001
Intégration du Dirc sur Babar (Slac)	Livraison d'Epic pour XMM, lancement en 1999	Premiers tests d'Exogam sur Spiral	Naissance du projet de grille de calcul européenne	Livraison de Megacam au CHFT	Livraison d'Intégral à l'ESA, lancement en 2002



Chambres à fils réalisées à Orsay pour le détecteur Alice par nos collègues du Laboratoire d'excellence Physique des deux infinis et des origines (P2IO).

Traqueurs de traces

par Philippe Mangeot

Mars 1996, la dernière des 50 grandes chambres à dérive de l'expérience Nomad quitte Saclay pour le Cern. Quelques semaines plus tard, il en est de même pour la quatrième chambre de NA48. Chacune de ces réalisations aura mobilisé une quinzaine de personnes pendant trois ou quatre ans. Nomad a nécessité l'installation d'une véritable chaîne de montage pour mener à bien l'assemblage de près de 150 plans de lecture de 10 m². L'achèvement de ces détecteurs correspond à la fin d'une ère commencée au milieu des années 70 avec l'avènement des détecteurs gazeux pour les grandes expériences de physique des particules sur cible fixe. Dans ce domaine, le CEA avait acquis un grand savoir-faire, renforcé par la qualité de son personnel, la complémentarité de ses métiers et son organisation en projets.

Plus tard, avec la recherche de phénomènes rares à haute énergie, la priorité revenait aux expériences sur collisionneurs, des expériences de plus en plus imposantes impliquant un grand nombre d'instituts. En attendant le LHC, le CEA se recentrait sur les activités de recherche et d'innovation au détriment des réalisations. Il réduisait fortement le personnel technique consacré aux activités de fabrication et d'assemblage. Par choix stratégique et nécessité, le département reporta son effort, en matière

de détecteurs gazeux, sur les détecteurs de traces centraux, comme le détecteur à radiation de transition de D0, ou la chambre à dérive centrale de CP-Lear. Les détecteurs pour le LHC imposaient encore un nouveau défi de R&D pour concevoir les détecteurs capables de supporter un flux colossal de particules, avec une résolution spatiale et temporelle inégalée. Les détecteurs gazeux furent un temps considérés comme de bons candidats

pour les détecteurs centraux. L'Irfu a participé ainsi à l'étude des *Microstrip gas chambers*, détecteurs dont les électrodes très fines gravées sur un substrat de verre remplaçaient les fils des chambres classiques. Ces détecteurs performants mais trop fragiles ont été supplantés par les détecteurs à micro-pistes de silicium.

En 1996, une équipe du département, en collaboration avec Georges Charpak, invente le détecteur microme-

gas, qui permet enfin de s'affranchir des fils fragiles des chambres à dérive développées à la fin des années 60. Les électrodes de ce détecteur sont gravées par photolithographie sur un substrat isolant ce qui autorise une grande précision et une multitude de géométries. Micromegas peut supporter des flux très intenses et obtient une précision spatiale micrométrique, propriétés utilisées avec succès dans le détecteur Compass. Cette technologie peut se prêter à une fabrication en volume, éventuellement par l'industrie, comme l'a montré la réalisation par l'Irfu des détecteurs de l'expérience T2K qui couvrent près de 10 m². Mais les chambres à fils classiques n'ont pas dit leur dernier mot comme le prouvent les grands détecteurs de muons de l'expérience Alice construits par l'Irfu en 2005...



Prototype de détecteur micromegas courbe pour équiper le trajectographe cylindrique de l'expérience Clas12.

20



Chambre à fils de l'expérience NA48. Empilage de plans de fils.

Se'D, une référence

On a tendance à se souvenir des réalisations. Chaque jour la recherche nécessite d'innover. L'Irfu a créé le Se'D, un détecteur pour la physique des ions lourds. Il permet de localiser et de mesurer leur temps de passage.

« L'idée initiale, en 2000, était de concevoir à moindre coût un détecteur de temps de vol et de position pour mesurer les ions lourds entrant dans le spectromètre Vamos, les technologies existantes s'étant vite avérées inappropriées. Pourquoi ne pas faire le pari des détecteurs gazeux basse pression, un savoir-faire déjà maîtrisé à l'Irfu, qui semblaient plus adaptés aux grandes dimensions ? Notre détecteur, le Se'D (secondary emission detector), collecte hors faisceau les électrons secondaires émis par une feuille de Mylar placée sur le

2002

Chambres à dérive et micromegas opérationnels sur Compass

2003

Stations de tests de W7X opérationnelles

2004

Livraison de Visir au VLT

2005

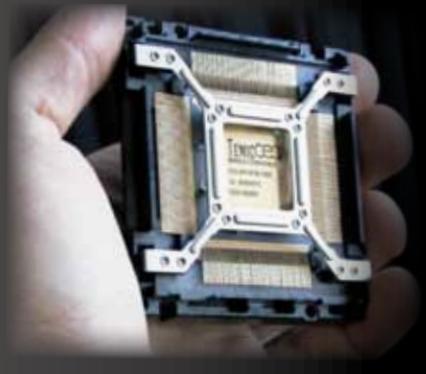
Installation mécanique du cryostat pour Edelweiss II

2006

Installation du toroïde Atlas et du solénoïde CMS,

2007

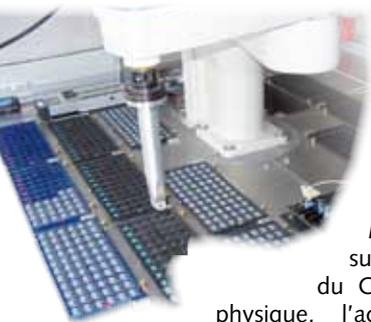
Mise en service des détecteurs Alice, Atlas et CMS au LHC



pointe

Les puces de l'Irfu

Entretien avec Michel Mur



Tests automatisés
des puces Hamac.

S : Quelles sont les innovations majeures en électronique pour la physique ?

M.M. : L'électronique frontale tend désormais à fusionner avec le détecteur lui-même, tout en restant paramétrable à distance. L'augmentation du nombre de voies de détection lui demande d'être miniaturisée, peu chère et de basse consommation. Proche des réactions aux radiations et être fiable, car difficile d'accès. La sélection d'événements rares nécessite la mémorisation du signal au sein du détecteur, de manière analogique ou numérique, en attente de la prise de décision. L'intégration et la miniaturisation des ensembles détecteur-électronique résultants permettent d'atteindre des niveaux de sensibilité inégalés jusqu'alors. Pour la partie numérique, où le développement de circuits intégrés spécifiques (Asic) est resté parfois nécessaire, la plupart des réalisations ont tiré parti de la souplesse et de l'évolution très rapide des circuits logiques reconfigurables par l'utilisateur (FPGA). Les FPGA accueillent sur le même circuit la logique de traitement de signal et les programmes logiciels exécutant les algorithmes de décision.

Michel Mur : S'appuyant sur un savoir-faire historique du CEA en électronique pour la physique, l'activité microélectronique a débuté dans les années 90 pour répondre aux contraintes spécifiques du LHC. La puce Hamac, produite à 80000 exemplaires pour la lecture du calorimètre à argon liquide d'Atlas, a utilisé une nouvelle technologie de durcissement aux radiations (Dmill), développée en partenariat avec la DAM et le Leti. Fondée sur une architecture originale de mémorisation analogique du signal, elle est à l'origine d'une famille de circuits intégrés de complexité croissante : circuits pour les programmes de physique (ARS pour Antares puis Hess, SAM pour Hess II), valorisation dans un instrument industriel (oscilloscope Metrix).

Dans les années 2000, le champ d'application des circuits microélectroniques s'est progressivement étendu à l'astrophysique spatiale et à la physique nucléaire. La filière Irfu de puces électroniques pour la physique est aujourd'hui reconnue dans la communauté scientifique. Nos circuits sont parfois repris par d'autres pôles du CEA (DAM, DRT) pour leurs propres applications.



Capacités miniaturisées déposées sur une touche de clavier.



Conception assistée par ordinateur de l'électronique nécessaire aux expériences de physique.

- Hamac :** rad-hard analog memory for Atlas calorimeter.
- Dmill :** durcie mixte isolée logico linéaire. Filière microélectronique durcie développée au CEA et commercialisée par Temic.
- ARS :** analogie ring sampler. Circuit d'échantillonnage et de classification des signaux des modules optiques d'Antares.
- SAM :** swift access memory. Circuit d'échantillonnage au GHz pour les télescopes d'HessII.
- Asic :** application specific integrated circuit. Circuit intégré développé pour une application particulière.
- FPGA :** field programmable gate array. Circuit logique personnalisable par l'utilisateur.

S : Ces évolutions ont-elles entraîné des changements dans la manière de travailler ?

M.M. : Grâce à l'utilisation de puissants outils de simulation, les circuits intégrés réalisés sont en général fonctionnels dès la première fonderie. On observe une convergence des méthodes pour concevoir désormais les circuits mixtes analogiques et numériques. Nous imaginons maintenant des puces en trois dimensions fusionnant le détecteur et son électronique, bien adaptées aux zones très denses. En suivant une approche système poussée pour le développement des ensembles de détection, nous pouvons contribuer à l'ensemble de la chaîne de mesure et de traitement, comme en témoigne notre engagement dans Antares et dans T2K. Le succès résulte souvent de la mise en place d'équipes fortement intégrées, rassemblant électroniciens et spécialistes des détecteurs.

pour les ions lourds

extrêmes mais ce n'est pas notre quotidien. Emmanuelle Bougamont nous raconte comment nucléaire, transparent aux ions mais permettant de

trajet des ions. Bien que robuste et facile à maintenir, sa fabrication a nécessité une attention particulière pour s'affranchir des problèmes de claquage. Il y a eu des moments de doute. La résolution spatiale du prototype était insuffisante, nous amenant à ajouter un aimant solénoïdal focalisant les électrons. La résolution temporelle aussi n'a pas été satisfaisante du premier coup. Mais aujourd'hui, le Se'D est utilisé en physique nucléaire et sert de référence pour de futurs détecteurs. »

2007	2008	2009	2010	2010	2011
Livraison Spire et Pacs pour Herschel, lancement en 2009	Choix supra proposé et retenu pour Ifmiif-Eveda	Intégration des trois chambres T2K à JParc au Japon	Livraison de Miri pour le JWST	Remplissage du détecteur lointain de Double-Chooz	Bobinage de l'aimant Iseult pour Neurospin

RAYONNEMENT

« L'Irfu produit environ 14% des publications du CEA alors qu'il ne représente que 4% de son personnel. »

La connaissance est mière de l'Irfu à laquelle buent Les collaborations techniques et scientifiques mentaux de l'Irfu, tandis que de spécifiques (voir rubriques non rayonnement vers l'extérieur.

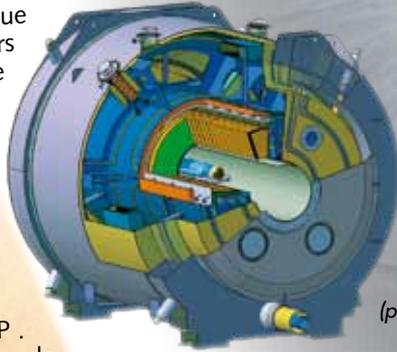
Ce sont les exigences des proles développements techniques chements, qui sont garants de l'Irfu. La recherche fondamentale insoupçonné qu'elle peut apporter «étrangers».

Au fil de ses réalisations, connaissances et de samedée mondiale. Comme ses accorde une importance vecteurs de cette connaissance au dynamisme de la recommunication scientifique et

SANTÉ

Dès les premières heures de la physique corpusculaire, les physiciens ont utilisé leurs connaissances pour des applications touchant le secteur de la santé.

- **Alexia et CaliCEA** : automates destinés à réduire les risques radiologiques des manipulateurs en médecine nucléaire.
- **Anthro-Si** : étude et réalisation d'un gilet de «radioprotection» pour la dosimétrie interne commercialisé par Canberra.
- **ART** : instrumentation aidant à la mise au point de radio-traceurs pour l'imagerie TEP.
- **Calipso** : innovation dans la détection de photons pour l'imagerie TEP
- **Diedac** : dosimètre portable séparant la contribution des neutrons et des photons commercialisé par Saphymo.
- **Gantry** : dispositif rotatif de transport d'un faisceau de particules autour d'un patient.
- **Iseult** : aimant supraconducteur de 11,7 teslas pour l'IRMN de très haute résolution du cerveau à Neurospin.



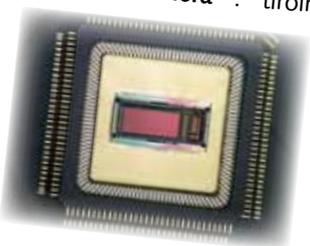
Aimant (projet Iseult)

La pérennité de ces L passe avant tout tion des résultats, essentiel publications. Ainsi, la connaissance par une large production littéraire composée dans des revues internationales, d'ouvrages de d'actes de conférences, de brevets et de raprevues à comités de lecture publiés par an (~700 publications du CEA alors qu'il ne représente que connaissances s'opère également à travers la pré-internationales. Les invitations à des congrès ou porte-paroles d'expériences sont autant de manil'Irfu, attestées par de multiples récompenses.

ELECTRONIQUE

L'électronique développée pour les besoins de la recherche suit la pointe de la technologie. Elle trouve des applications dans d'autres secteurs de recherche ou industrielles.

- **Matacq et Pipeline** : puces développées en collaboration avec le LAL Orsay, équipant des cartes d'acquisitions commerciales et des oscilloscopes numériques.
- **Chimera** : tiroir amplificateur de spectroscopie pilotée à distance avec logique embarquée commercialisé par CAEN.
- **Muscade** : outil web de supervision et d'acquisition de données pour vos systèmes embarqués.



DEMANTELEMENT

Suite à l'arrêt des deux accélérateurs Saturne en 1997 et ALS en 1990, il a fallu les démanteler. L'Irfu utilise aujourd'hui le retour d'expérience acquis ainsi que les solides compétences en physique nucléaire de l'Institut pour mener des études sur le démantèlement d'autres installations nucléaires. En amont, l'Irfu participe à la naissance de nouvelles installations (accélérateurs, lasers de puissance, protonthérapie...). Il apporte en particulier des solutions aux problématiques de sécurité et de sûreté, de radioprotection, d'activation et de gestion des déchets auxquelles devront faire face ces installations.

FORMATION Le renouvellement de celui des générations : dans des actions de formation. Il faut souligner de l'institut : entre 30 et 40 nouveaux étudiants de environ 80 thésards permanents), sans compter Les physiciens et ingénieurs de l'Irfu sont pédagogiques : en 2010, près d'une centaine de écoles ou universités.

TRANSFERTS TECHNI

reste limitée bien qu'en forte progression : de 50 brevets. Le transfert technologique a conception qui tient plus de l'échange de bons été privilégiée à la valorisation par les brevets.

OUTILS DE DIFFUSION

90 voient l'apparition des premiers traitements de tion majeure dans le mécanisme de la publication leur... L'époque signe également le déferlement fait ouvrir le premier serveur Web institutionnel diffusion numérique.

T DU SAVOIR

la mission pre-tous ses agents contributives entre services assurent les succès expérimentaux développements exhaustives) illustrent son

grammes de recherche, poussant jusque dans leurs derniers retransl'innovation technologique de tale démontre ainsi ce potentiel ter à des domaines qui lui sont a

l'Irfu a généré un capital de voir-faire qui font sa renommabilité nombreux partenaires, l'Irfu primordiale aux différents sance, indispensables cherche à l'instar de la tifique, du transfert de l'enseignement.

connaissances par la communicationnellement sous forme de sance de l'Irfu se matérialise sée d'articles scientifiques et techniques référence et de vulgarisation scientifique, ports. Avec une moyenne de 500 articles de en 2010), l'Irfu produit environ 14% des 4% de son personnel. La transmission des sation de résultats dans les conférences à des comités d'experts ou la désignation de festations du rayonnement scientifique de

la recherche s'appuie nécessairement sur l'Irfu s'est ainsi constamment investi l'importance de celle des thésards au sein thèses sont accueillis chaque année (soit les post-doctorants et autres stagiaires. souvent sollicités pour leurs compétences cours ont été dispensés dans les grandes

OLOGIQUES La production de brevets en 20 ans, l'Irfu a déposé plus toujours existé, mais la dissémination, procédés entre partenaires, a longtemps

On ne saurait parler de connaissance sans aborder brièvement ses outils. Les années texte et ordinateurs personnels, une évolution qui s'accélère : exit la trousse du petit brico-du World Wide Web : précurseur, le Dapnia du CEA et s'offre ainsi ses premiers outils de

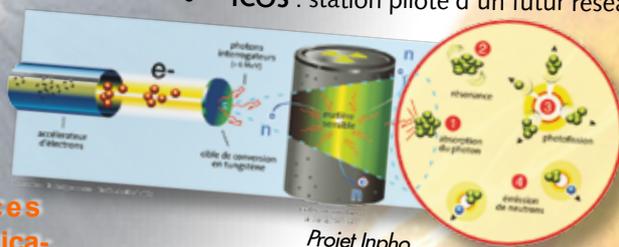
«En vingt ans, L'Irfu a déposé plus de cinquante brevets.»

Par Jacques Marroncle, Corine Salmon et Angèle Séné

ENVIRONNEMENT

L'environnement prend une place de plus en plus importante dans les applications des savoirs de l'Irfu, en particulier en collaboration avec les équipes de climatologues du CEA.

- **Caribou** : stations de mesures pilotées à distance pour le suivi à long terme du CO₂ atmosphérique pour le LSCE.
- **ICOS** : station pilote d'un futur réseau européen de mesures de gaz à effet de serre.
- **ForFire** : prévention des incendies de forêts par des micromegas détectant les UV.

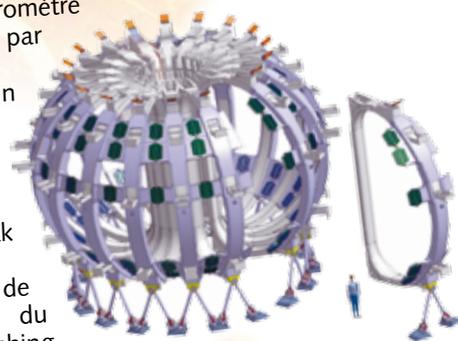


Projet Inpho

FUSION

La fusion est une source d'énergie qui demande encore beaucoup de recherches. L'Irfu s'y investit en utilisant ces savoir-faire en détection et accélération.

- **Demin** : développement d'un spectromètre à neutrons rapides pour la fusion par confinement inertiel.
- **Ifmif-Eveda** : développement d'un accélérateur prototype de haute intensité.
- **JT60** : tests et caractérisation de 18 aimants toroïdaux supraconducteurs du tokamak JT60SA à Naka (Japon).
- **W7X** : tests et caractérisation de 70 aimants supraconducteurs du stellarator Wendelstein à Garching (Allemagne).



Aimants supraconducteurs toroïdaux (projet JT60)

SOCIÉTÉ

Les services de l'Irfu sont sollicités pour de nombreux problèmes comme l'inspection des colis de déchets de l'industrie nucléaire, la surveillance du traité de non-prolifération des armes atomiques ou pour son expertise en techniques d'accélération.

- **Demip** : détection de matières dans des conteneurs par interrogation photonique.
- **Grille EGI/LCG** : infrastructure mondiale de calcul et de données distribuées pour la science.
- **Inpho** : caractérisation de fûts de déchets par interrogation photonique.
- **Nucifer** : détecteur de neutrinos pour la surveillance à distance des centrales (non-prolifération des armes nucléaires).
- **Revolution-MR** : études des structures mécaniques et de l'instrumentation associées aux premiers appareils de RMN constitués d'aimants permanents.
- **Soleil** : design et construction du premier module accélérateur supraconducteur du synchrotron Soleil.
- **Xfel** : assemblage de cryomodules pour le laser X européen Xfel.

La curiosité, la pugnacité, l'audace sont les
Curiosité qui vous pousse à effectuer une
détecteur sous-marin, pugnacité repoussant
fonctionnant comme des horloges suisses,
particules fantômes, audace pour ouvrir dans

Xtr'mement profond

« On demande un volontaire de Saclay pour une visite du site Antares à bord du Cyana, un des deux sous-marins de recherche de l'Ifremer. Je saute sur cette occasion unique. Patrick Lamare y avait goûté quelques temps auparavant. Il s'agit de balayer un carré d'un kilomètre de côté, candidat pour accueillir le détecteur, par 2470 mètres de fond dans le but de vérifier, aidé d'un sonar panoramique, qu'il ne s'y trouve pas trop d'obstacles. Un canon de marine, un arbre, des engins militaires et quantité de déchets (bouteilles, conserves,...) parmi lesquels circule un crabe et quelques poissons bien vivants dans cet obscur désert végétal. Le site sera déplacé de quelques hectomètres.

Huit heures dans l'eau dont six heures au fond... une expérience inoubliable, menée en toute sécurité grâce au professionnalisme de l'équipe de l'Ifremer. De ce jour, je n'ai plus jeté aucun objet à la mer, ça va de soi. Peu après le Cyana a pris sa retraite au Musée de Cherbourg ».

Témoignage de Pascal Vernin

Xtr'mement froid

« Il est possible d'observer l'espace en infrarouge lointain depuis le sol car un ciel sec et sans eau, comme celui de l'Antarctique, est transparent pour ce rayonnement. Il n'y a pas de petit manuel sur " Comment construire un télescope en Antarctique " alors on avance en expérimentant. Dans cet environnement, il faut que les instruments fonctionnent à -70 °C pendant sept mois de l'année et ne cassent pas à -83 °C, température extrême en hiver.

Nous avons commencé par mesurer les qualités de transparence et de stabilité du ciel. Avec des variations de 1% dans la journée, nous sommes plus stables que les sites placés au-dessus des montagnes, à plus de 5000 m. Notre installation est compliquée mais à transparence de ciel identique, nous bénéficions d'une grande continuité d'observation avec des nuits polaires de sept mois.

La prochaine étape est de faire l'image d'une portion de ciel. L'imageur Camistic, conçu et réalisé à l'Irfu, sur la base d'une matrice de bolomètres d'Herschel sera du voyage. Nous préparons hommes et matériels pour ce futur hivernage... en 2013. »

Témoignage de Gilles Durand

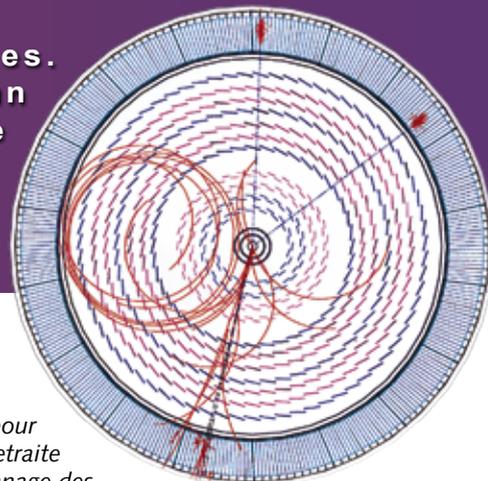
Xtr'mement sensible

« Un événement par an et par tonne de détecteur, c'est la sensibilité que l'on doit atteindre avec nos bolomètres pour détecter ces particules de matière noire appelées les wimps. Sous presque deux kilomètres de roche, à Modane, nous installons des détecteurs capables de signer les reculs nucléaires que provoquent ces wimps sur les noyaux de germanium constituant nos détecteurs semi-conducteurs. Il faut être certain que ce dépôt d'énergie vienne bien d'un wimp et non de particules issues de processus radioactifs naturels. Le niveau de réjection de la radioactivité est extrême : une empreinte de doigt est déjà trop radioactive pour nos détecteurs, de même que la pollution de l'air par le radon. L'air du laboratoire est remplacé toutes les 40 minutes, divisant par vingt cette activité. À l'extrême du froid, de la basse radioactivité, de la compréhension des semi-conducteurs s'ajoute l'extrême des relations humaines. Il n'est pas si facile de gérer la pression, dans ce simili sous-marin, enfermé sous terre les trois quarts de la journée. »

Témoignage de Xavier-François Navick

moteurs indispensables pour aller au bout de nos rêves.
plongée à 3000 m de fond pour scruter le site d'un
l'impossible construction de détecteurs-cathédrale
ténacité pour détecter le souffle infime laissé par des
l'espace de nouveaux regards...

2011 - Mesure des trajectoires des particules dans CMS



Xtr'mement fiable

« Lorsque que j'ai commencé en 90 dans l'aventure LHC, je savais que j'allais en prendre pour 20 ans. J'ai la chance inouïe d'avoir été présent dès le départ et de ne pas être à la retraite au moment de l'exploitation. Le groupe de Saclay est responsable du suivi de l'étalonnage des 80 000 cristaux du calorimètre électromagnétique Ecal de CMS. C'est un point stratégique pour l'analyse. Le groupe a travaillé depuis la conception du système d'injection de lumière et sa distribution par fibres optiques vers chacun des cristaux jusqu'à l'exploitation actuelle de cet étalonnage par l'analyse. Ce contrôle sera essentiel pour suivre le vieillissement des cristaux qu'il faudra corriger de leur perte d'efficacité. Les techniciens et ingénieurs de l'Irfu ont fait un travail énorme et remarquable en installant ce système au Cern pendant plus de dix ans.

L'incident de la machine au démarrage du LHC en 2008 a été une grande frustration. Cependant, l'année de retard a été bénéfique et les expériences ont perfectionné leur analyse grâce aux rayons cosmiques. Lors des premières collisions fin 2009, plus de 98% des voies fonctionnaient et la collaboration a commencé à étudier la physique seulement quelques jours après. Ne pas avoir rencontré de problèmes sur l'ensemble de la chaîne détecteur, acquisition, système de déclenchement, analyse a été le plus sidérant pour moi. »

Témoignage de Jean-Louis Faure



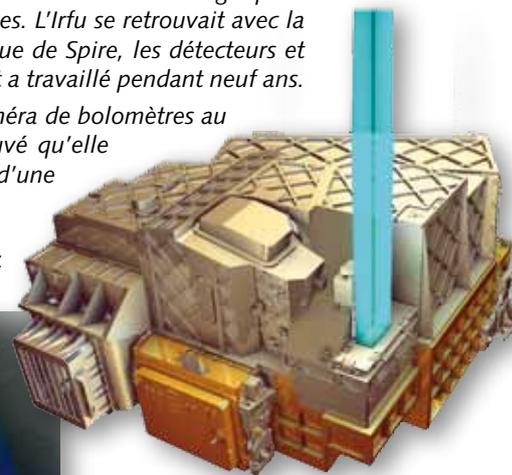
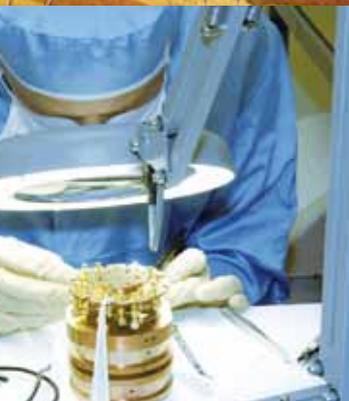
Xtr'mement innovant

« Au début de la compétition pour réaliser les détecteurs pour le satellite Herschel, nous n'avions pas été retenus avec nos bolomètres pour faire la caméra de l'instrument Spire.

En février 2000, le projet des Allemands pour l'autre caméra appelée Pacs n'était plus autorisée à partir. Ce fut une excellente nouvelle pour les astrophysiciens du CEA car nous les avons alors rejoints avec notre expertise sur les bolomètres : nous étions de nouveau engagés dans un projet spatial innovant et de haute technologie pour détecter des rayonnements infrarouges submillimétriques. L'Irfu se retrouvait avec la responsabilité de trois sous-systèmes clés : l'électronique de Spire, les détecteurs et l'électronique pour Pacs. Des défis sur lesquels l'Institut a travaillé pendant neuf ans.

En juin 2009, depuis l'espace, Pacs, la plus grande caméra de bolomètres au monde, avec ses huit matrices de 2048 pixels, a prouvé qu'elle marchait exceptionnellement bien en faisant l'image d'une galaxie spirale avec une finesse de résolution inédite. »

Témoignage de Louis Rodriguez



La caméra Pacs, développée à l'Irfu, est l'un des trois instruments placés au foyer du télescope spatial Herschel dont le miroir primaire mesure 3,5 mètres de diamètre. Cet observatoire porte un nouveau regard sur l'Univers depuis juin 2009.



Lundi matin, légère brume sur Saclay. Vincent Bontems, philosophe des techniques (Larsim), discute avec François Kircher, papa de nombreux grands aimants réalisés déjeuner Irfuturiste. Sophie Kerhoas peaufine l'organisation de cette rencontre entre de débrider le futur, d'imaginer les questions de demain, de projeter l'Irfu dans l'avenir. Ursula Bassler, heureuse d'avoir planté un cerisier ce week-end en communiant avec et Philippe Brax qui râlent tous les deux sur notre incapacité à prévoir le trafic, se rapidement que, Claire Antoine, spécialiste des matériaux partageait les bancs de Thomas Duguet et Franck Sabatié, physiciens nucléaires, n'ont pas pu prendre la café banc ensoleillé de l'Orme des Merisiers.

Comme un tour de table sur les grandes découvertes possibles dans les deux ans à venir, les bouleversements du futur proche. Ursula pense tout de suite aux expériences du LHC : boson de Higgs, supersymétrie... Ce nouvel horizon expérimental définira l'après LHC. Selon Vincent, l'histoire des lignées techniques suggère que le prochain stade des accélérateurs de protons pourrait être atteint en 2037, si l'on se fie aux lois log-périodiques de Brissaud et Baron. Nos spécialistes accélérateurs pensent qu'il ne s'agira pas d'un accélérateur circulaire car on atteint la limite où la puissance transmise se transforme en rayonnement plutôt qu'en énergie. Dans un accélérateur circulaire, la recirculation permet d'accélérer en mettant à chaque fois « un petit coup de pied au cul » des particules. Dans un accélérateur linéaire, il faut savoir donner de grands coups de pied au cul et utiliser des aimants avec des champs deux fois plus élevés que ceux réalisables actuellement, ce qui pose des problèmes de matériaux. Saura-t-on le faire ? Trouvera-t-on un industriel intéressé par ce marché ?

ayons pu en observer une seule depuis 1604 ! Nous militons avec lui.

Thomas Duguet vit une révolution en marche : « Pour comprendre les observations actuelles, on atteint la limite de la description des noyaux avec des interactions à deux nucléons. Il faut tenir compte d'interactions entre plus de deux nucléons, aussi bien pour comprendre les propriétés de la matière nucléaire que celles des noyaux légers ainsi que l'évolution de la structure de tous les noyaux riches en neutrons ». Franck Sabatié s'attend lui à ce que l'on résolve prochainement la crise du spin. Elle dépend d'un glaçon ! Après l'expérience

Compass qui permet d'extraire la contribution des quarks et des gluons au spin du nucléon, une expérience sur Clas à Jlab devrait permettre d'extraire le moment angulaire porté par les quarks. Les premiers tests ont lieu en mai, la partie critique de l'expérience résidant dans la cible cryogénique d'hydrogène polarisée, le fameux glaçon. Les prochains résultats de QCD sur réseau, avec des masses de pions de plus en plus proches de la masse réelle, viendront compléter ces expériences ainsi que la prochaine moisson de résultats attendus sur l'étude du plasma de quarks et de gluons avec Alice au LHC.

« Voir l'Univers d'avant la lumière... »

Nous discutons ensuite de l'observation d'ondes gravitationnelles et, d'une façon plus générale, de tous les messagers célestes qui ne sont pas des ondes électromagnétiques. Ils permettraient d'avoir une image de l'Univers d'« avant la lumière ». Il existe aussi beaucoup de lumières que l'on ne voit pas, en particulier à cause de l'opacité de notre galaxie. Roland milite pour plus de transparence dans la galaxie, en particulier pour voir « nos » supernovas. Elles explosent à raison d'une tous les trente ans sans que nous



2016	2019	2025	2028	2029
L'antihydrogène antigravité !	Image 3D du nucléon	Détection directe d'une onde gravitationnelle	Création d'un noyau bulle superlourd de densité nulle au centre	Les récentes découvertes conduisent à l'abandon du concept « d'énergie noire »

uriste

au Laboratoire des recherches par l'Irfu, en attendant l'arrivée utopistes, entre scientifiques et Jacques Payet, spécialiste des accélérateurs, rejoint François Kircher. Les victimes de la tragédie japonaise, arrive en même temps que Roland Lehoucq demandant alors comment imaginer la science de demain. On découvre l'école avec le grand frère de Vincent ; le monde de la science est-il si petit ? avec nous ce matin là, nous les avons interrogés un peu plus tard sur un



Fin du premier tour de table du futur proche. « Racontez-moi votre rêve... » Sophie ne peut définir plus clairement le périmètre du deuxième tour de table, celui qui nous projette dans un futur au conditionnel. François Kircher et Jacques Payet seront les premiers à s'exprimer. Pour tous les projets de grands instruments, la tendance est à l'augmentation des champs magnétiques. Pour cela, il faudrait trouver un supraconducteur aussi facile d'utilisation que le cuivre et pouvant transporter cent fois plus de courant. Il faudra y associer une cryogénie à la fois simple et peu cher. Nous digressons sur les acteurs susceptibles d'accueillir des projets comme Demo, ILC... et l'éveil de la puissance chinoise sur fond d'inquiétude de ne pas pouvoir faire en Europe les investissements humains et financiers nécessaires à l'accueil de ces projets mondiaux. Claire Antoine s'enthousiasme pour les nouvelles technologies à venir pour la fabrication des accélérateurs. Les progrès des matériaux supraconducteurs présagent des améliorations des performances des cavités. Plus futuriste, il existe des champs accélérateurs gigantesques dans les plasmas laser même si nous ne savons pas encore les mettre en musique pour concevoir un accélérateur.



« Existe-t'il une fin aux infinis ? »

Ursula veut arrêter de jouer à la poupée ... gigogne. Existe-t-il une fin à l'infiniment petit ? Elle veut jouer avec l'hypothétique bille centrale... mini trou noir, manifestation de dimensions supplémentaires ? Vincent Bontems imagine ce qu'il adviendrait si le champ de Higgs pouvait être modifié pour dilater ou contracter la masse des autres particules. Leurs rêves

s'emmêlent. Philippe Brax rebondit dans un rêve anthropique infiniment grand : Nous-l'Univers. Est-ce que, puisque nous observons l'Univers, il ne peut être que celui là ? Pourrait-on observer dans notre univers des preuves de l'existence d'autres Univers ? Notre univers, Roland Lehoucq veut l'explorer en allant toujours plus loin. Il veut observer le milieu inter-



stellaire et plus vite que ça ! Pour le moment, la sonde Pioneer 10, lancée en 1972, se situe vers 100 UA et voyage en direction de l'étoile Aldebaran qu'elle atteindra dans deux millions d'années ! Cette sonde qui se situe à la limite du système solaire présente une décélération que les lois de la physique n'expliquent pas. Il veut que nous retrouvions notre âme d'explorateur et aller voir là-bas

sans attendre. Pour cela, il faut envoyer des sondes à des vitesses au moins dix fois plus grandes.

« Est-ce que, puisque nous observons l'Univers, il ne peut être que celui-là ? »

Nous débattons une question sous-jacente à ces grands projets : comment motiver la relève de scientifiques si le décalage entre conception et observation atteint la durée de vie d'un homme ? Pour aller voir des objets de plus en plus petits, il faut taper de plus en plus fort mais est-ce la seule manière de tester le modèle standard ? Franck Sabatié aimerait le sonder/casser de l'intérieur par des mesures de précision à l'interface entre les physiques des particules, du noyau et des atomes : précision plutôt qu'énergie, intelligence plutôt que force.

Pour finir, ne voulons-nous pas tous faire le rêve de Thomas ? Plus que le but de la recherche, il puise sa passion dans le parcours du chemin. Comprendre un problème, le circonvenir aux questions essentielles, tester les solutions pour y répondre. Face aux énigmes de la matière, sans cesse relever le défi. Il est là, encore et toujours, LE défi Irfuturiste : alimenter la passion pour explorer toujours un peu plus loin les mystères de l'Univers.

L'unité astronomique correspond à la distance moyenne Terre-Soleil

27



2031	2035	2047	2051	2069
Premiers indices d'une vie extraterrestre sur une exo-Terre	Semiconducteurs incluant détection et électronique, sans connectique	Étude du milieu interstellaire <i>in situ</i> grâce à une mission envoyée par un lanceur rapide en 2036	Accélérateur compact d'électrons au TeV généré par plasma laser incluant des aimants supra à haute température	Calcul de la fission des noyaux depuis QCD

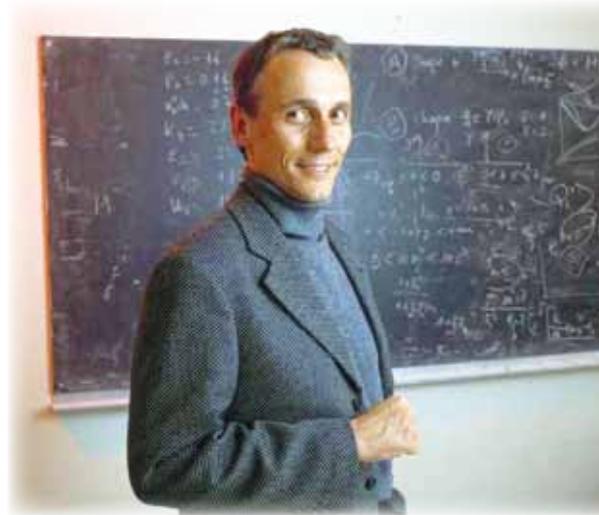


Vingt ans !

En 1991, le Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée (Dapnia) voit le jour au CEA. Ce département pluridisciplinaire, qui veut transcender la juxtaposition de thématiques jusqu'alors disjointes, se lance le défi de réunir les physiques de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. Il devient l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) en 2008.

J'ai tout d'abord vu évoluer ce département depuis l'extérieur et j'étais admiratif de la quantité et de la qualité des projets qui ont été menés à bien : réalisations d'accélérateurs, de détecteurs, conception d'expériences, analyse de données, simulations. Il vient l'exemple du LHC et l'investissement de l'Irfu de 14 hommes-siècle mais il ne faut pas s'arrêter à cela et les réalisations d'exception se retrouvent aussi bien dans l'espace, que sous la mer, sous terre, sous les tropiques ou dans les glaces du pôle sud. Je réalise encore mieux aujourd'hui, après avoir rejoint l'Irfu, l'ampleur de la tâche accomplie par l'ensemble du personnel et je peux témoigner de la notoriété de notre institut et, à travers lui, de celle du CEA, au sein de la recherche scientifique internationale.

En arrivant à l'Institut, il y a trois ans, j'ai été impressionné par l'efficacité de son organisation matricielle et par la qualité et la motivation de l'ensemble du personnel. Malgré un contexte budgétaire difficile, l'Irfu porte de nouveaux projets scientifiques de tout premier plan. Il est membre fondateur des Laboratoires d'excellence Physique des deux infinis et des origines (P2IO) et UnivEarth. Cette reconnaissance exceptionnelle permettra de soutenir pendant les dix ans qui viennent notre action au service de la recherche et de la formation grâce à des moyens nouveaux qui bénéficieront aux projets et grâce à l'engagement pris par nos tutelles de maintenir sur cette période les ressources humaines et financières au niveau actuel. Vingt ans ! Ce numéro de Scintillations fête un Joyeux anniversaire et témoigne du chemin parcouru par notre institut de recherche qui poursuit son travail d'excellence au service de l'avancée et du partage des connaissances.



Philippe Chomaz

Directeur de la publication : Philippe Chomaz

Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider

Rédacteur en chef : Jean-Luc Sida

Secrétariat : Maryline Besson

Mise en page : Christine Marteau

Impression : idées fraîches

Comité éditorial : Maryline Besson, Étienne Burtin, Rémi Chipaux, Olivier Corpace, Philippe Daniel -Thomas, Antoine Drouart, Pascal Gallais, Christian Gouiffès, Fabien Jeanneau, François Paul Juster, Sophie Kerhoas-Cavata, Emmanuelle de Laborderie, Pierre Manil, Jacques Marronde, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Corinne Salmon, Angèle Sené, Didier Vilanova.

Crédits Photo : CEA - Cern - Deviantart - Gani/J.M. Enguerrand - Imag'In lfu (Alain Porcher) - IPN Orsay - interactions.org - Nasa - P. Stroppa - Merci à Valérie, Michel et Simon, pour ce petit garçon qui sera peut être notre relèvé, dans vingt ans, pour découvrir les secrets de l'Univers. Merci à Sophie Duhamel pour sa relecture attentive.

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

Dépôt légal : septembre 2011