

## UN AUTOMNE AU DAPNIA



*Malgré les avis de tempêtes qui touchent le Dapnia, ponctuant la chute des feuilles mortes et celle de nos subsides eux aussi assez mal en point, la recherche y continue, fondamentale et finalisée. Les avancées se ramassent à la pelle et la mer de Fermi n'efface pas sur la plage de nos quêtes les traces des noyaux oubliés. Machines à remonter le temps, les formidables accélérateurs de particules, que d'avisés gouvernants ont encouragé à bâtir dans le seul but de faire reculer l'ignorance, déroulent à l'envers le film de notre immense histoire. Cette fantastique remontée vers le Big Bang a franchi il y a quatre ans une nouvelle étape<sup>1</sup>. Elle nous livre à présent une matière fugitive née presque en même temps que... le temps et*

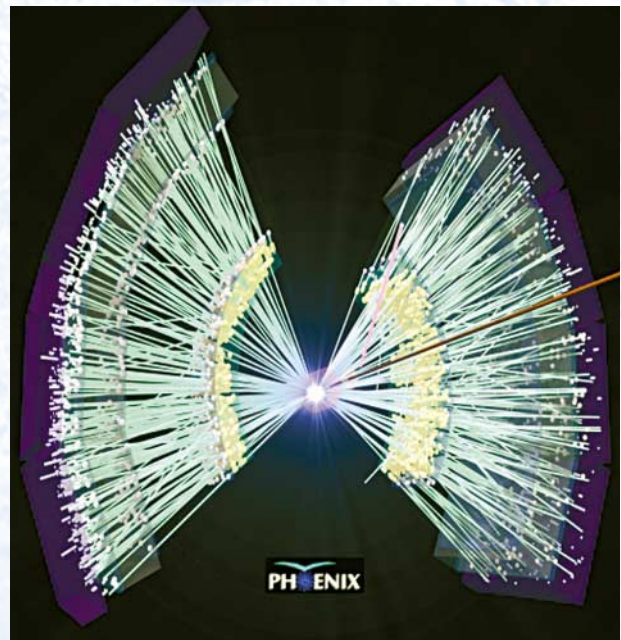
*l'espace. Le temps, pour les gouttes hyper brûlantes de cette proto matière, de zébrer l'espace à des vitesses inimaginables.*

*Le temps s'écoule. L'espace gonfle. La matière s'étale et refroidit. Quelques milliardièmes de seconde plus tard, cette brûlante soupe primordiale soudain se prend en une sorte de gel. Gel tout relatif : un thermomètre capable d'encaisser cette température indiquerait encore autour de 1 000 milliards de degrés. La suite nous est contée dans les numéros 46 et 51 de ScintillationS, ainsi que dans la suite du présent numéro...*

*Matière disparue, matière en devenir. Les cendres de nos chaudières nucléaires restent radioactives de façon trop durable pour un harmonieux développement du même nom. Modernes alchimistes, les physiciens savent transformer les noyaux radioactifs « à vie longue » en noyaux « à vie courte ». Mais ils ne savent pas encore le faire à l'échelle industrielle. Ils y œuvrent activement. En particulier au Dapnia. Une voie possible : bombarder de la matière avec des flots énormes de protons, que produiront des accélérateurs nouveaux « à très haute intensité » (voir pages 2 et 3). L'enjeu est de taille car les chocs multiples ainsi engendrés catapultent des hordes de neutrons sur les noyaux dont on veut abrégé les radiations néfaste. Avec un neutron de plus, chaque noyau de tel déchet qui aurait « craché » pendant peut-être un million d'années, est transmuté en noyau d'un nouvel élément. La collection de ces nouveaux noyaux forme un autre déchet dont les radiations s'amenuisent et s'évanouissent sur une période beaucoup plus courte. C'est meilleur pour le développement durable. Au Dapnia, nous sommes fiers d'y contribuer, mais les recherches sont difficiles et longues.*

*Pourvu que nul ne transmute le Dapnia en dipôle à vie courte !*

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)



Nous sommes poussières d'étoiles, cendres de supernovæ. Déroulons le film à l'envers, le cosmos renaît de ses cendres. Tel le Phénix.

## Cauchemar d'alchimiste ou rêve de physicien : l'or changé en purée primordiale

*(Un nouvel et très ancien état de la matière formé dans des collisions de noyaux d'or à Brookhaven ?)*

On peut lire d'abord les numéros 46 et 51 de *ScintillationS*

BOUM ! Le Big-Bang vient de se produire. Le rien contenant le tout, concentré en un point universel infiniment dense, vole en éclats. Ces éclats sont le temps, l'espace et la matière primordiale avec ses douze espèces de grains : six leptons et six quarks.

La température est infernale. Les particules s'entrechoquent en un vertigineux ballet à des vitesses telles que nulle particule ne

peut s'accrocher à une autre. Aucune structure ne peut se former dans l'hyper magma primordial hyperdense et hyper chaud (environ 100 000 fois la température du cœur du Soleil !) de la bulle univers qui gonfle de nanoseconde en nanoseconde. En gonflant, elle se refroidit.

Quelques microsecondes plus tard, la température est « tombée »

(1) Voir *ScintillationS* n° 46

à quelques 1 000 milliards de degrés. Les quarks, qui s'ébattaient librement avec leur cortège de gluons dans le *plasma de quarks et de gluons* (PQG), s'agrègent par trois ou par deux, en *hadrons* : protons, neutrons, mésons etc. (voir le schéma « mésons baryons »). Le PQG soudain se prend en une sorte de gel (gel relatif, il est encore extrêmement chaud car les hadrons s'agitent encore très vite), la *matière hadronique*. Il vient de se produire un *changement de phase*, comme lorsque l'eau se prend en glace. La matière hadronique, c'est celle qui compose entre autres les noyaux atomiques et leurs nucléons. Elle est une vingtaine de fois moins dense que le PQG – mais un million de milliards de fois plus dense que la matière atomique ordinaire. Enfermés, *confinés* dans leur cage-nucléon ou leur cage-méson, quarks et gluons ne recouvreront jamais leur liberté. Sauf quelques uns, depuis que l'homme, à l'aide d'énormes accélérateurs de particules, a réussi à recréer des gouttes du plasma primordial en projetant des noyaux les uns contre les autres avec une violence égale à celle des origines.



<http://particleadventure.org/particleadventure/frameless/hadrons.html>

Depuis que la première goutte a été créée au CERN en février 2000 (46), la physique du PQG a bien avancé (51), grâce à des expériences comme « Phenix » au Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) de Brookhaven (USA), où l'on fait s'entrechoquer deux faisceaux de noyaux d'or, noyaux dont chaque nucléon a une énergie de 100 GeV. À cette énergie, la matière des noyaux est tellement chauffée lors du choc qu'il peut se recréer du plasma de quarks et de gluons. Et comme ce plasma leur fait écran, les particules sortantes qui s'éparpillent après le choc ont plus de mal

LEPTONS Peuvent se déplacer librement		QUARKS Prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
<b>FERMIONS</b> La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	<b>ELECTRON</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1	<b>NEUTRINO ELECTRON</b> Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	<b>BAS</b> Sa charge électrique est -1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et après des accélérateurs.	<b>MUON</b> Un compagnon plus massif de l'électron.	<b>NEUTRINO MUON</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron	<b>HAUT</b> Sa charge électrique est +2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.
	<b>TAU</b> Encore plus lourd	<b>NEUTRINO TAU</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron	<b>ETRANGE</b> Un compagnon plus lourd du "bas"
			<b>CHARME</b> Un compagnon plus lourd du "haut"
			<b>BEAUTE</b> Encore plus lourd
			<b>TOP</b> Le plus lourd de la famille (observé en 1995, 170 fois la masse du proton)

à s'en dégager et arrivent moins facilement aux détecteurs, tout comme un voyageur a du mal à descendre de son métro si la foule est trop serrée.

Les physiciens caractérisent l'entrave au mouvement des particules « sortantes » par un *facteur de modification nucléaire* noté  $R$ . Ce facteur est égal à 1 si ces particules se propagent dans la zone de collision comme dans de la matière nucléaire ordinaire<sup>1</sup>, et il est inférieur à 1 si elles ont à traverser un milieu plus dense formé lors du choc. C'est précisément ce facteur  $R$  que Phenix vient de mesurer avec ses chocs de noyaux d'or. Le résultat figure sur le graphique.

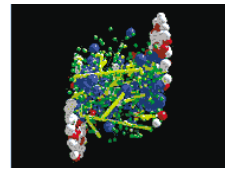


Fig 1 – Simulation de l'après collision de deux noyaux d'or (boules blanches et rouges) qui a produit du plasma quark-gluon (billes jaunes et bleues). L'aspect aplati des noyaux est un effet relativiste dû à la vitesse quasi lumineuse des noyaux.

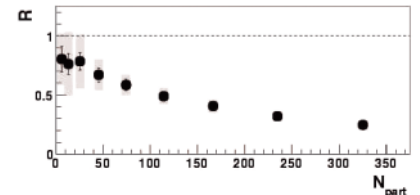


Fig 2 – Le facteur  $R$  fonction du nombre de particules éjectées lors du choc or-or. Ce nombre dépend de la *centralité* du choc (de l'effleurement au choc frontal) : plus le choc est frontal, plus les particules éjectées sont nombreuses et ont du mal à se propager. Sans doute parce que du plasma de quarks et de gluons s'est créé.

$R$  varie de 1, quand les noyaux s'effleurent, à 0,2, quand ils se cognent de plein fouet. C'est une forte indication qu'il se crée du plasma de quarks et de gluons lors de ces chocs.

Contact : Jean Gosset (SPHN) 01 69 08 73 05

[http://www-dapnia.cea.fr/Faits\\_marquants/50/](http://www-dapnia.cea.fr/Faits_marquants/50/)

## Les accélérateurs-usines de protons de demain

*Qu'y a-t-il en commun entre la transmutation des déchets nucléaires, la production de faisceaux d'ions exotiques, les usines à muons et à neutrinos, l'irradiation de matériaux, l'étude de la matière condensée, la production d'énergie ? C'est tout simplement le proton. Ou plutôt, LES protons, beaucoup de protons, des kyrielles de myriades de niagaras de protons. Panorama.*

Le proton est une particule dont regorge l'univers car toute matière ordinaire en contient. Isolé, c'est le noyau d'hydrogène, l'élément le plus abondant de la matière visible. C'est en outre un corpuscule propice à maintes transformations. En bombardant de la matière avec des protons, on peut produire toutes sortes de particules : mésons  $\pi$  (pions) positifs ou négatifs, qui en une dizaine de milliardièmes de seconde se transforment en muons ; neutrinos ; noyaux « exotiques » ; neutrons et l'on en passe (voir

le tableau des particules page 2).

Les applications sont multiples en recherche fondamentale et appliquée : physique des particules avec des sources de muons et de neutrinos, physique nucléaire avec production de faisceaux exotiques (voir n° 53 de *Scintillation*S), production d'énergie nucléaire de plus en plus compatible avec le développement durable grâce à l'incinération des déchets nucléaires dans des réacteurs hybrides (voir glossaire du n° 60), transmutation des

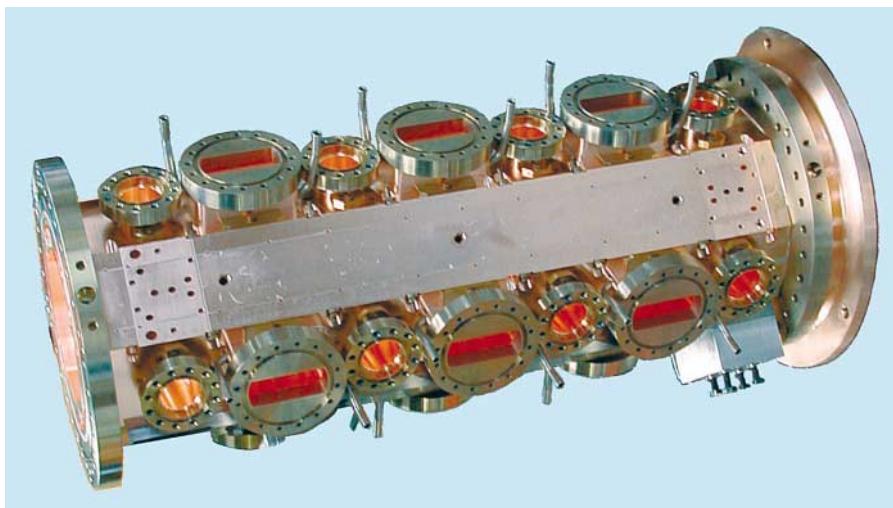
(1) Pour bien « calibrer » ce facteur  $R$ , on le mesure dans des collisions entre des protons et des noyaux de plomb, dans des conditions où il ne se forme pas de plasma de quarks et de gluons. On complète par des mesures de collisions proton-proton à la même énergie et avec le même dispositif expérimental.

déchets radioactifs « à vie longue » en déchets « à vie courte », le tout *via* la production de neutrons par spallation, étude des matériaux, production d'isotopes (tritium) etc.

Beaucoup de ces activités n'en sont pour l'instant qu'au stade du laboratoire. Pour entrer dans la phase « industrielle », il faut des niagaras de protons à très haut débit d'une énergie de l'ordre du GeV. Autant dire que la communauté internationale se penche activement sur les nouvelles générations d'accélérateurs de protons à très haute intensité. Il faut multiplier au moins par 100 la quantité de protons accélérés par rapport aux machines actuelles les plus performantes.

Avec d'autres instituts français et mondiaux, le Dapnia est à la pointe de ces recherches. Un prototype de gigafontaine à protons sera installé à Saclay dans l'ancien hall de Saturne. C'est Iphi (Injecteur de protons à haute intensité), accélérateur linéaire court (une dizaine de mètres) mais puissant (environ 300 kilowatts<sup>(1)</sup>) destiné à servir d'injecteur à un accélérateur plus long délivrant un faisceau continu de protons de l'ordre du milliard d'électronvolts (GeV). Développé avec d'autres instituts dont l'IN2P3, Iphi, dont les spécifications d'origine ont changé pour s'adapter aux demandes du Cern (changement d'énergie, passage en mode pulsé, *voir un peu plus loin*), sera alimenté par la source de protons Silhi (Source d'ions légers à haute intensité) développée au Dapnia.

Certaines applications comme la spallation<sup>(2)</sup> nécessitent plutôt des faisceaux de protons non plus continus mais émis par bouffées.



Premier des six tronçons du RFQ (longueur : environ 1 m.), quadripôle à radiofréquence conçu pour accélérer et focaliser les particules émises par la Source d'ions légers de haute intensité (Silhi) du prototype Iphi (Injecteur de protons haute intensité) développé par le CEA et le CNRS pour les études d'accélérateurs de protons en amont de futurs systèmes hybrides

[http://www.cea.fr/fr/Publications/Clefs46/Clef46fr/clefs46\\_31.html](http://www.cea.fr/fr/Publications/Clefs46/Clef46fr/clefs46_31.html)

On parle de *faisceaux pulsés*. Pour obtenir de tels faisceaux, il est paradoxalement plus efficace d'injecter dans un accélérateur de protons (noyaux d'hydrogène  $H^+$  porteurs chacun d'une charge positive) des ions hydrogènes négatifs  $H^-$  plutôt que des ions  $H^+$  pourtant beaucoup plus faciles à produire, car le rendement d'injection est beaucoup plus élevé.

Le SACM du Dapnia est en bonne place dans cette recherche sur les sources d'ions  $H^-$ . Sur le principe résumé dans l'encadré, ses équipes ont mis au point une source d'ions  $H^-$  pulsée, réussissant dès 2002 à produire des ions négatifs avec ce type de source, mais avec un rendement très faible. Pour éviter que l'onde radio – qui n'est pas totalement absorbée dans le plasma – ne détruise les ions  $H^-$  déjà produits, l'idée décisive a été de les protéger par une

## PRODUCTION D'IONS $H^-$

Pour créer les ions négatifs  $H^-$ , les spécialistes du Dapnia SACM commencent par chauffer très fortement de l'hydrogène par *résonance cyclotronique électronique* (ECR). En très gros : on plonge de l'hydrogène dans un champ magnétique. Chaque molécule d'hydrogène contient deux atomes de cet élément, chacun formé d'un proton autour duquel tourne un électron. Chaque électron se met à tourner autour de son proton avec une vitesse d'autant plus élevée que le champ est fort. Puis on injecte une onde électromagnétique dont la fréquence est celle de la fréquence de rotation des électrons (la durée d'une vibration de l'onde est égale à celle d'un tour complet d'électron). Il se produit alors un phénomène de *résonance*, et les électrons acquièrent de l'énergie, ce qui équivaut à chauffer l'ensemble. C'est comme lorsqu'une onde fait tourner plus vite des molécules d'eau. Le chauffage par ECR, c'est comme un super four à micro-ondes.

Le résultat du chauffage sur les électrons dépend de l'énergie que chacun reçoit. Certains sautent de leur orbite habituelle sur une orbite plus éloignée de leur proton. L'atome correspondant est dit *excité* (sa molécule l'est donc aussi). Il ne se casse pas mais il est plus fragile car l'électron est plus faiblement lié à son proton.

D'autres électrons se libèrent totalement de l'attraction du proton. L'atome se sépare alors en ses deux particules chargées, le proton positif et l'électron négatif. Une partie de l'hydrogène est donc *ionisée*. Il s'est ainsi créé un *plasma* d'hydrogène dans lequel coexistent des molécules neutres dont certaines sont excitées, et de la matière ionisée, formée de protons et d'électrons séparés et mobiles au sein du plasma.

Certains électrons perdent de l'énergie par chocs successifs sur d'autres corpuscules du plasma, jusqu'à tomber à moins d'un électronvolt (<1 eV) pour certains. Il leur devient alors possible de se coller à une molécule excitée, donc plus fragile. D'autres électrons de moins de 1 eV proviennent d'effets de surface sur les parois de la chambre à plasma, sans préjuger d'autres processus mal connus. Quelque soit leur provenance, des électrons « mous » sont présents. Et si une molécule excitée reçoit une pichenette d'un de ces électrons, elle peut se dissocier en un atome d'hydrogène neutre (un proton et un électron) et un ion  $H^-$  (un proton et deux électrons) au temps de vie très bref. C'est la production d'ions  $H^-$  par *attachement dissociatif*.

(1) Le choc d'une particule (le plus souvent un proton) d'énergie allant de quelques centaines de millions d'électronvolt (MeV) à quelques milliards d'électronvolts (GeV) peut créer par interactions successives l'émission d'un grand nombre de neutrons.

(2) Cela représente des courants de 100 milliampères de protons de 3 mégaelectronvolts (MeV). Cent milliampères, ce n'est pas beaucoup dans votre fer à repasser, c'est titanesque dans un faisceau de protons car cela représente un débit de six cents millions de milliards de protons par seconde

« barrière » (en fait une simple grille en inox de maille 5 mm). Gain immédiat : un facteur 2, puis 10 en optimisant la position de la grille. En chargeant électriquement la grille de façon à optimiser l'énergie des électrons entrant dans la zone de production, le gain est monté jusqu'à 200. De telles sources se rapprochent du statut de candidates au poste d'injecteur d'accélérateurs de protons à haute intensité. Encore bravo au Dapnia et à son SACM, coordonnateur par ailleurs d'un réseau européen consacré à ces recherches !

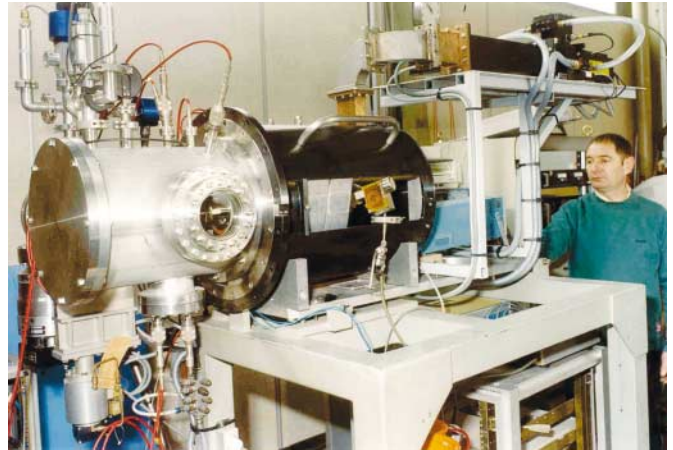
Joël Martin (SPhN et ScintillationS)

**On peut aussi débouler et découvrir les sites :**

[http://ipnweb.in2p3.fr/actualite/communication/rapport/rapact\\_2001/pdf/themes%20Tech/DA/AccPHI.pdf](http://ipnweb.in2p3.fr/actualite/communication/rapport/rapact_2001/pdf/themes%20Tech/DA/AccPHI.pdf)

[http://www.cea.fr/fr/Publications/Clefs46/clefs46fr/clefs46\\_31.html](http://www.cea.fr/fr/Publications/Clefs46/clefs46fr/clefs46_31.html)

<http://www.sfen.org/fr/avancees/dossiers/reacteurs.htm>



La nouvelle source d'ions hydrogène négatifs avec Francis Harrault (SACM).  
Contact : Raphaël Gobin (SACM)

## Notre ministre encourage les pêcheurs au neutrino

Antares<sup>1</sup> a été inauguré le 18 novembre 2003 par notre ministre de la Recherche et de la Technologie, Madame Claudie Haigneré, en présence de Michel Vauzelle président de la région PACA, de Bernard Bigot, notre Haut-commissaire et d'autres personnalités françaises et italiennes. Certains extraits du discours de notre ministre sont un baume sur les plaies récentes du Dapnia, par ailleurs si fortement impliqué dans cette exceptionnelle réalisation : « [...] *L'ampleur de ce projet est considérable, tant en ce qui concerne son objectif scientifique premier, sonder le mystère des premiers instants de l'univers, par détection et par analyse des neutrinos « messagers », que par l'excellence des technologies mises en œuvre [...] le succès et la valeur d'ANTARES résident aussi dans le formidable potentiel humain qui a permis son élaboration [...] Les travaux de recherche permis par ANTARES touchent aux sources même de la création de l'univers, pensée vertigineuse... Un tel objectif porterait à lui seul la légitimité scientifique d'ANTARES, et pourtant il existe pour ANTARES une multiplicité d'applications supplémentaires qui en renforce encore l'intérêt et l'ampleur du champ scientifique concerné.* » Comme cela fait plaisir à entendre...

Les premiers résultats de cet impressionnant détecteur de neutrinos enfoui sous 2500 mètres d'eau de la Méditerranée destinés à arrêter tout ce qui n'est pas un neutrino, ont été obtenus d'une ligne prototype le 17 mars 2003, validant les choix technologiques.

Antares va ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'univers en traquant les neutrinos très énergiques émis par les cataclysmes cosmiques les plus violents.

## Va-et-vient

**Novembre 2003** – Fabrice Feinstein (SPP) fut détaché pendant trois ans à l'université d'Aix<sup>2</sup> Marseille II. Nommé professeur des Universités à Montpellier, il quitte définitivement le CEA. Philippe Querre (Sédi) fait de même, car il intègre l'Institut de

radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) après y avoir été détaché un an. Bonne chance et vifs succès à tous deux. Mois de novembre faste (aussi pour les vignes) qui voit quatre recrutements : Isabelle Le Mer au SAP, Pierre Kestener au Sédi, Frédéric Michel et Olivier Piquet au SACM. On voit le Dapnia en frémir de joie avant de gémir de froid l'hiver prochain, où s'annonce un fort gel de ses crédits et de ses embauches.

## Pan ! sur le Becquerel

Page 10 du précédent *ScintillationS* (n° 60), un incident technique lors de l'impression a « chassé » plus que malencontreusement les deux dernières lignes du bel et émouvant article de Michel Tagger (SAP) sur René Pellat. Il aurait dû être possible de lire, avant la signature de l'infortuné auteur : « [...] *Dans l'activité scientifique comme dans les turbulences que traverse la recherche au CEA, il nous manque déjà...* »

Comme c'est vrai, et nous le mesurons plus que jamais, ces jours-ci, au Dapnia.

Michel, merci d'avoir déjà accepté mes excuses plus qu'embarassées, que je renouvelle ici.

Joël Martin (porte-parole de ScintillationS)

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Jean ZINN-JUSTIN

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Philippe CONVERT, Françoise GOUGNAUD, Christian GOUIFFÈS, Pierre GUICHON, Christophe MAYRI, Alain MILSZTAJN, Xavier-François NAVICK, Angèle SÉNÉ, Didier VILANOVA

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : GRAPHOTEC

CONTACT : Joël MARTIN -

Tél. 01 69 08 73 88 - Fax : 01 69 08 75 84 - E.mail : [jmartin@dapnia.cea.fr](mailto:jmartin@dapnia.cea.fr)

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

Dépôt légal décembre 2003

6!

(1) Antares est l'acronyme de « Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch » (Voir n° 33, 34, 41, 47 et 53)

(2) Il a eu beaucoup de sous d'Aix (ndlr).