

PREFACE

Au sein du DAPNIA de la Direction des Sciences de la Matière du CEA, les objectifs du Service de Physique des Particules (SPP) sont :

- effectuer des tests de plus en plus précis et ainsi délimiter le domaine de validité d'un modèle théorique appelé « modèle standard de la physique des particules ». Ce modèle unifie partiellement l'interaction faible et électromagnétique et pose les bases de l'interaction forte. Il inclut un mécanisme de génération des masses et de brisure spontanée de la symétrie électrofaible, le fameux mécanisme de Higgs.
- découvrir de nouvelles particules et peut-être de nouvelles symétries.
- étudier l'asymétrie matière-antimatière.
- ouvrir des fenêtres entre l'infiniment petit et l'infiniment grand (matière noire et astronomie neutrino).

La lecture du rapport d'activité 1997-1998 permet de situer l'apport du SPP dans les expériences auxquelles il contribue et de le comparer aux progrès accomplis dans ces domaines. Le SPP n'a pas pour vocation de participer à toutes les expériences afférentes à ces questions, mais d'avoir un impact spécifique sur la conception, la réalisation ou l'analyse de celles auxquelles il participe.

Au début de l'année 1999, le SPP comprend 89 physiciens CEA (4 de moins qu'il y a 2 ans), 9 physiciens CNRS, 10 postdocs ou visiteurs étrangers, 21 thésards, 3 secrétaires et 1,5 techniciennes. Les moyens techniques nécessaires au SPP se trouvent pour l'essentiel dans les services techniques du DAPNIA qui construisent les détecteurs. Ces détecteurs sont ensuite utilisés à travers le monde par les physiciens du SPP auprès des accélérateurs du CERN (Genève), de DESY (Hambourg), de Fermilab (Chicago) et de SLAC (Californie), dans les laboratoires souterrains de Modane et du Gran Sasso (Italie), à l'observatoire de l'ESO (Chili), ou bien encore dans les sites sous-marins au fond de la Méditerranée.

Sur le plan scientifique, ces deux dernières années ont été marquées par une grande variété de résultats ou de développements :

- la préparation intensive des expériences ATLAS (calorimètre électromagnétique, système d'alignement des détecteurs de muons, système de déclenchement) et CMS (calibration du calorimètre à cristaux) auprès du LHC, qui restent la priorité du service ;
- l'acceptation d'une participation au programme du Tévatron de Fermilab (expérience D0) pour la période 2000-2003, potentiellement riche en physique et utile préparation à la physique auprès du LHC ;
- la montée en énergie du LEP, dont les données semblent s'approcher de « l'inaccessible » boson de Higgs et contraindre la supersymétrie ;
- la poursuite du programme H1 avec, regrettons-le, la probable disparition du signal « exotique » annoncé il y a deux ans ;
- la mesure de la violation de T par l'expérience CPLEAR, qui se termine en beauté ;
- le démarrage réussi de l'expérience NA48 dont les premiers résultats sur la mesure directe de la violation de CP sont attendus prochainement ;
- le parfait respect du calendrier de construction et de montage de la contribution à l'expérience BABAR, qui doit démarrer en mai 1999 ;

- les résultats définitifs de l'expérience GALLEX et le démarrage d'une R&D (LENS) sur un futur détecteur de neutrinos solaires ;
- la fin de l'expérience NOMAD, qui, faute d'avoir observé les oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, a présenté les premiers résultats sur les limites ;
- le succès de l'expérience bolométrique Edelweiss à caractériser la double signature ionisation-chaleur ;
- la moisson de résultats d'EROS-2 tant en ce qui concerne les effets de microlentille vers les Nuages de Magellan, que la découverte de quelques dizaines de supernovas ;
- les succès de la R&D menée par ANTARES, qui devraient se concrétiser par une nouvelle étape au printemps 1999, avec un objectif scientifique multiple : l'ouverture d'une nouvelle fenêtre avec l'astronomie des neutrinos, les oscillations des neutrinos atmosphériques, l'annihilation des neutralinos au centre de la Terre ;
- la participation du SPP au retraitement de déchets et aux réacteurs du futur (INCA) et à la R&D sur le détecteur Micromégas.

Cette diversité scientifique témoigne de la vitalité des activités du service. Vous trouverez les détails sur la richesse des résultats acquis et du futur programme dans les pages qui suivent.

Sur le plan politique concernant notre discipline, deux points importants sont à souligner : la suppression programmée des contrats de formation par la recherche (CFR), dont les conséquences, qui risquent d'être néfastes, restent à apprécier non seulement pour notre discipline mais aussi pour le CEA ; le rapprochement entre la DSM et l'IN2P3. Ce rapprochement est sans doute nécessaire, sous une forme encore à préciser qui préserve à la fois les intérêts de notre discipline, ceux du CEA et ceux du CNRS (en liaison accrue avec l'Université).

Ceci ne doit pas assombrir les perspectives des années à venir, très fortes sur le plan scientifique : les deux dernières années de fonctionnement du LEP à 200 GeV, avec des chances importantes de découverte du boson de Higgs et/ou de la supersymétrie ; la poursuite de la construction d'ATLAS et CMS auprès du LHC, dont le démarrage est toujours prévu en 2005 ; l'augmentation de la luminosité du collisionneur HERA ; la découverte de la violation de CP dans le système des mésons B (BABAR) ; des percées attendues dans le domaine de la matière noire (Edelweiss, EROS) et de l'astronomie neutrino (ANTARES). Au delà du LHC, une réflexion s'engage déjà dans la communauté et je voudrais citer le projet de collisionneur TESLA, auquel le DAPNIA contribue, et un possible collisionneur à muons. L'horizon du SPP va bien au-delà de l'an 2000 !

Ce rapport est une mise à jour utile du rapport qui avait été écrit pour les années 1995-1996 et n'a pas prétention à l'originalité dans sa forme. Sa lecture complète judicieusement la plaquette que le DAPNIA édite en ce printemps 1999. Je remercie les chefs de groupe et les rédacteurs d'avoir répondu rapidement et fourni les illustrations nécessaires, D.Vignaud pour avoir coordonné la collecte et la mise en pages et A.Milsztajn pour avoir écrit une introduction aux activités du service (« le contexte des recherches ») et pour sa relecture attentive.

Michel Spiro

5 mai 1999

Table des matières

Le contexte des recherches :	4
Les collisions électron-positon :	11
ALEPH	
DELPHI	
Les collisions pp ou $p\bar{p}$:	15
D0	
ATLAS	
CMS	
Les collisions électron-proton :	26
H1	
La violation de CP :	28
CLEAR	
NA48	
BABAR	
Neutrinos et matière noire :	37
NOMAD	
GALLEX/LENS	
EROS	
Matière noire (Edelweiss)	
ANTARES	
Autres activités :	52
INCA	
Micromégas	

LE CONTEXTE DES RECHERCHES

Le but de la physique des particules est l'étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions fondamentales. Jusqu'au milieu des années 60, quatre interactions avaient été identifiées. Celles-ci sont, par ordre d'intensité décroissante à basse énergie : l'interaction forte, responsable de l'existence des nucléons et des noyaux, l'interaction électromagnétique, l'interaction faible - la seule qui soit capable d'altérer la nature d'un constituant élémentaire de la matière - et l'interaction gravitationnelle.

Le Modèle Standard

Les très importants progrès théoriques et expérimentaux des trente dernières années ont mis dans une position centrale ce que nous nommons aujourd'hui le « Modèle Standard ». L'émergence des théories de jauge et l'unification des interactions faible et électromagnétique qui s'en est suivi ont été des étapes décisives à cet égard. Le Modèle Standard est une juxtaposition de deux théories quantiques de champs de jauge, la théorie électrofaible et la théorie des interactions fortes (la chromodynamique quantique, ou QCD). Il a été mis à l'épreuve dans de nombreuses expériences et aucune contradiction convaincante entre le Modèle Standard et les résultats expérimentaux n'a été obtenue, y compris dans des mesures de précision. En particulier, les intensités des interactions, également dénommées constantes de couplage, ont été mesurées avec précision et leur variation prédite observée.

Dans le Modèle Standard, les particules fondamentales (des fermions) sont $2N$ leptons et $2N$ quarks, où N est le nombre de familles ou de générations. Les expériences ont permis de montrer qu'il y a exactement $N=3$ générations, mais la raison pour que N prenne cette valeur nous est inconnue. Il y a donc trois leptons chargés - l'électron, le muon et le lepton tau - et leurs trois partenaires électriquement neutres, les neutrinos. Les leptons interagissent par interaction électrofaible, encore que les neutrinos, non chargés, ne sentent pas la composante électromagnétique de cette interaction. Il y a également six quarks. Trois d'entre eux, les quarks d (pour *down*, bas), s (pour *strange*, étrange) et b (pour *bottom*, fond), ont une charge électrique égale à un tiers de celle de l'électron ; les trois autres, u (*up*, haut), c (charmé) et t (*top*, sommet), ont quant à eux une charge égale à moins deux tiers de celle de l'électron. Contrairement aux leptons, les quarks peuvent interagir via toutes les interactions connues. Ces douze fermions fondamentaux ont tous été observés directement à ce jour, à l'exception du neutrino tau, pour lequel plusieurs mesures indirectes existent néanmoins. La découverte du quark le plus lourd, le *top*, en 1995 a mis un point final à une quête remontant à une vingtaine d'années.

Si la situation actuelle est évidemment un succès impressionnant pour les théories de jauge, en tout cas infiniment meilleure que celle du milieu des années soixante où les physiciens se lamentaient de l'absence d'un cadre théorique général, les mêmes physiciens semblent aujourd'hui attendre une expérience qui s'écarterait du Modèle Standard, indiquant ainsi la voie vers une théorie encore plus générale. Il ne faudrait pas interpréter cette attitude comme une sorte d'ennui qui s'installerait à tester avec une précision accrue le Modèle Standard, mais plutôt comme la prise de conscience que plusieurs points du Modèle Standard ne sont pas tout à fait satisfaisants.

La brisure de symétrie électrofaible

Dans le secteur électrofaible du Modèle Standard, malgré la symétrie sous-jacente entre les interactions faible et électromagnétique, celle-ci est brisée pour des énergies inférieures à celles que l'on obtient de nos jours dans les accélérateurs de particules. Ainsi, l'interaction faible apparaît moins intense que l'interaction électromagnétique du fait qu'elle est véhiculée par les bosons W et Z, plus lourds que le photon à cause de leurs interactions avec un nouveau champ, le champ de Higgs. On pense donc que cette brisure de symétrie est provoquée par des particules de Higgs, inobservées à ce jour, ou plus précisément par la nature asymétrique de leur état fondamental (vide). Dans la description la plus simple de la brisure de symétrie, il n'y a qu'une particule de Higgs, électriquement neutre. Sa masse et son état fondamental sont décrits par un *ansatz* phénoménologique simple, assez analogue à celui de la théorie de la supraconductivité ; la valeur précise de la masse n'est pas donnée par la théorie et elle pourrait aller jusqu'à 1000 GeV.

En plus d'être considéré comme la source des masses des bosons intermédiaires faibles, le champ de Higgs est aussi tenu comme responsable des masses de tous les fermions de la théorie, soit les six quarks et six leptons. L'interaction entre ces fermions et le champ de Higgs est assez simpliste : les masses des fermions sont la résultante de la valeur non-nulle du champ de Higgs dans son état fondamental (vide) et de constantes de couplage directement proportionnelles à la masse des fermions. Comme les masses des douze fermions ne peuvent être calculées ou prédites dans le cadre du Modèle Standard, cette « explication » est équivalente au remplacement de douze masses inconnues par douze constantes de couplage qui ne peuvent pas être calculées non plus, une amélioration bien mince ! Naturellement, il doit bien y avoir un fond de vérité au mécanisme de Higgs, sans quoi le Modèle Standard n'existerait même pas. Néanmoins, toutes ces incertitudes ainsi que le fait que la particule de Higgs est la dernière composante inobservée du Modèle Standard font qu'il est très important de la rechercher et d'étudier le mécanisme de brisure de symétrie. En effet, il semble logique de se concentrer sur le maillon apparemment le plus « faible » du Modèle Standard si l'on veut progresser ; ce sujet sera le thème de recherche principal du SPP dans les années à venir.

Il existe une autre voie pour essayer de comprendre l'origine des masses des fermions, celle de l'étude des « mélanges » entre quarks ou entre leptons. Cela se fait usuellement par l'étude des désintégrations par interaction faible des quarks, ou par celle de la violation de la symétrie CP, et par la recherche d'oscillations entre différents types de neutrinos. La connaissance des matrices de mélange des fermions pourrait apporter des informations utiles : par exemple, des modèles qui prédisent l'existence de relations entre les masses et les mélanges des fermions pourraient être testés.

La chromodynamique quantique

La chromodynamique quantique (QCD) décrit les interactions fortes des quarks par échange de gluons de masse nulle. En QCD, les charges dites de « couleur » portées par les quarks et les gluons sont analogues à la charge électrique de l'interaction électromagnétique (QED), à ceci près qu'il en existe trois. Fait remarquable, ceci est une nécessité si l'on veut que la partie électrofaible du Modèle Standard soit cohérente : en effet, la somme de toutes les charges

électriques des fermions fondamentaux doit y être nulle. Cette propriété, uniquement vraie s'il existe trois types de couleur, est vérifiée séparément pour chacune des trois générations. L'origine de cette symétrie entre quarks et leptons est inconnue mais elle nous renforce dans l'idée que le Modèle Standard est un peu plus qu'une simple juxtaposition de deux théories de jauge indépendantes.

Une différence marquante entre QCD et QED vient du fait que les gluons eux-mêmes ont une charge de couleur, alors que les photons n'ont pas de charge électrique. La conséquence en est un comportement différent des deux interactions : l'interaction forte augmente avec la séparation des quarks, avec pour conséquence le « confinement » des quarks à l'intérieur des hadrons. A l'opposé, à grande énergie ou à courte distance, elle est moins intense, ce qui permet de mener des calculs perturbatifs qui peuvent être comparés aux mesures expérimentales. Ainsi, QCD est une théorie intrinsèquement plus difficile à tester que le secteur électrofaible, en ce que ses prédictions concernent les quarks libres, alors que les expériences se font sur des hadrons constitués de quarks confinés. Il existe heureusement quelques processus inclusifs ou semi-inclusifs où les prédictions théoriques peuvent être comparées plus facilement et de manière plus fiable aux mesures expérimentales. Citons les cas du taux total de désintégration du boson Z ou du lepton tau, ainsi que la diffusion profondément inélastique de leptons sur des nucléons.

L'unification

Comme les deux secteurs du Modèle Standard ont la même structure formelle en terme de champs de jauge, il se pourrait bien qu'ils ne soient qu'une manifestation de basse énergie d'une théorie unifiée plus simple. Les nombreuses tentatives de fusion de QCD et de la théorie électrofaible n'ont pas encore abouti à un succès : les modèles les plus simples prédisent la non-stabilité du proton à un taux qui, bien que faible, aurait déjà dû être observé. Il se peut que des modèles plus complexes soient nécessaires, à moins qu'il ne faille recourir à des idées toute différentes. La « super-symétrie » semble le concept le plus prometteur d'un point de vue théorique ; il s'agit d'une nouvelle symétrie entre fermions (« matière ») et bosons (« interactions »). La super-symétrie pourrait en particulier permettre d'incorporer la gravitation dans cette unification des interactions fondamentales. A ce jour, aucune particule partenaire super-symétrique d'une particule connue n'a encore été observée, bien que leur recherche constitue une fraction substantielle des travaux auprès du LEP et du Tevatron. Certains présument que la particule super-symétrique la plus légère est stable et qu'elle est le composant principal de la fameuse « matière sombre » de l'Univers.

Le SPP au sein de la physique des particules

D'un mot, la ligne principale de recherche au SPP est la mise à l'épreuve expérimentale du Modèle Standard avec une précision toujours accrue, ou dans des domaines d'énergie encore inexplorés. Une motivation importante de ces tests consiste en l'espoir de buter sur une contradiction ou un indice qui montrerait la voie à suivre vers une théorie plus générale ou plus simple. Dans cette activité, il faut mesurer avec précision les paramètres fondamentaux des particules, leurs masse, durée de vie, modes de désintégration, et les comparer à la théorie chaque fois que c'est possible. Par ailleurs, certains processus ou réactions qui peuvent à la fois être calculés de manière fiable en théorie et mesurés avec précision sont souvent des tests efficaces du

Modèle Standard. On peut également choisir de s'attaquer aux processus où les prédictions du Modèle Standard sont soit vagues, soit différentes de celles de théories plus générales contenant le Modèle Standard. Enfin, il faut éviter de se restreindre aux particules ou réactions au sein du Modèle Standard, et rester ouvert à tout nouveau phénomène potentiel. La liste ci-dessus, malgré son caractère vague, est loin d'être exhaustive.

Dans ce rapport, nous avons groupé les activités du SPP en cinq thèmes principaux : les collisions électron-positron, les collisions proton-(anti)proton, la structure du nucléon, la violation de la symétrie CP, les neutrinos et la matière sombre. Une telle séparation est toujours quelque peu arbitraire, du point de vue de la physique, et elle peut refléter plus une séparation entre divers types d'expériences qu'entre divers sujets de physique. Nous passons maintenant à une brève description de ces cinq thèmes, avant de décrire un par un les différents projets dans les sections suivantes.

L'étude des collisions électron-positron se déroule auprès du collisionneur LEP du CERN à Genève, dont la mise en service remonte à 1989. Les sujets de recherche y sont extrêmement variés. Des mesures précises des observables électrofaibles permettent de réaliser des tests fins de la théorie ainsi que d'obtenir des contraintes indirectes sur les masses du quark top et du boson de Higgs. Le boson de Higgs peut aussi y être recherché de manière directe. La mesure de la durée de vie du boson Z a permis de déterminer le nombre de types différents de neutrinos (sans même les observer directement) et ainsi de connaître le nombre de générations, un des paramètres libres du Modèle Standard. Comme le boson Z se désintègre « démocratiquement » dans tous les fermions fondamentaux (sauf le quark top, trop lourd), des échantillons à haute statistique de hadrons contenant des quarks charmé ou beau (c ou b) peuvent être étudiés. Une attention particulière se porte sur les mésons B neutres, qui permettent de mesurer ou contraindre la matrice de mélange des quarks. La chromodynamique peut également être testée de nombreuses façons à LEP, par exemple par l'étude du nombre et des propriétés des jets de hadrons issus de « l'habillage » des quarks produits dans les désintégrations des bosons Z. Depuis 1996, LEP a entrepris une montée en énergie qui lui permet de produire des paires de bosons W. Les buts de cette nouvelle phase de l'exploitation de LEP sont l'étude précise des bosons W et l'extension des recherches du boson de Higgs et de particules super-symétriques.

Les collisions proton-antiproton sont à ce jour étudiées au collisionneur Tevatron du Laboratoire Fermi, près de Chicago (USA). Là aussi, les sujets de physique étudiés sont très divers. Comme il s'agit du collisionneur de plus haute énergie actuellement en service dans le monde, il était naturel d'y rechercher le sixième (et probablement dernier) quark, le top, qui a finalement été découvert après une traque de près de 20 ans. La production de bosons W est abondante au Tevatron, ce qui a permis une des meilleures mesures à ce jour de sa masse. De nombreuses particules hypothétiques, comme par exemple des bosons W' ou Z' et des partenaires super-symétriques, ont été également recherchées, mais sans succès. De nombreuses études en chromodynamique ont été menées. Au milieu de la prochaine décennie, le collisionneur à protons de 14 TeV (14 000 GeV) du CERN, le LHC, attaquera de front la question cruciale du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible, par une recherche du (ou des) boson(s) de Higgs dans une très vaste gamme d'énergie. Il s'agit, selon la plupart des physiciens, de la question la plus importante en physique des particules aujourd'hui. En outre, le LHC sera une « usine » à produire des quarks top et beau (t et b), permettant ainsi des études détaillées de leurs

propriétés. Le saut en énergie par rapport aux 2 TeV du Tevatron ouvrira un vaste domaine pour la recherche de particules super-symétriques ou de tout autre nouveau phénomène.

Les collisionneurs de protons, qui permettent d'atteindre des énergies très élevées, sont en réalité des collisionneurs de quarks et de gluons à des énergies sensiblement plus basses. Pour être capable d'interpréter les résultats issus de ces collisionneurs, il est indispensable de connaître les distributions de quarks et de gluons dans le proton. Celles-ci peuvent être mesurées par diffusion profondément inélastique de leptons (électrons, muons ou neutrinos) sur des nucléons (neutron ou proton). Le SPP a une longue tradition d'étude de ce domaine. En outre, la mesure des variations de ces distributions avec le pouvoir de résolution permet de tester QCD, la théorie de l'interaction forte, et de mesurer l'intensité de son couplage. A ce jour, les mesures se poursuivent auprès du collisionneur HERA à DESY (Hambourg).

La nature de la violation de la symétrie CP par les interactions faibles n'est toujours pas élucidée. Dans le Modèle Standard, une telle violation est « naturelle » dans le secteur des quarks via leur matrice de mélange, à condition qu'existent au moins trois générations de fermions fondamentaux. En corollaire, la mesure des paramètres de la violation de CP permet de déterminer certains éléments de la matrice de mélange des quarks, testant ainsi cette explication possible de la violation. Des tests extensifs supposent l'étude d'un nombre de systèmes différents aussi élevé que possible, d'où l'étude des kaons neutres et des mésons B neutres. Remarquons en outre que la violation de CP semble être une condition nécessaire à l'existence d'une asymétrie baryon-antibaryon significative dans l'Univers, condition de notre présence.

Dans la version minimale du Modèle Standard, la masse des trois neutrinos est exactement nulle. Ce fait ne semble néanmoins avoir aucune signification profonde, du fait que les masses de fermions ne sont pas prédites par cette théorie. On ne connaît aucun principe qui impliquerait des masses nulles pour les neutrinos, au contraire du cas du photon par exemple. En conséquence, la majorité des physiciens soupçonne que les neutrinos ont bien une masse, trop faible pour avoir été mesurée à ce jour. Les limites existantes sur ces masses, qu'elles soient d'origine cosmologique ou issues de mesures directes, impliquent que les neutrinos sont bien plus légers que les fermions chargés de la même génération, d'entre 5 et 8 ordres de grandeur au moins. On espère qu'une mesure des masses de ces neutrinos permettrait d'avancer dans la compréhension du problème des masses dans le Modèle Standard. La méthode la plus utilisée aujourd'hui consiste en la recherche d'oscillations de neutrinos, un phénomène de conversion entre divers types de neutrinos ; on utilise à cette fin les sources de neutrinos que sont le Soleil ou les accélérateurs de particules, voire les rayons cosmiques. Suivant les valeurs de leur masse, les neutrinos pourraient même jouer un rôle important dans l'évolution de l'Univers aujourd'hui. Il suffirait d'une masse de quelques électronvolts pour l'un des trois neutrinos, et les neutrinos prendraient du jour au lendemain le statut de composante principale de la matière sombre de l'Univers. A l'été 1998, l'expérience SuperKamiokande, installée au Japon, a annoncé la découverte de l'oscillation des neutrinos entre les espèces ν_μ et ν_τ , à partir de l'observation des neutrinos « atmosphériques » produits dans l'interaction des rayons cosmiques primaires dans l'atmosphère terrestre. Ce résultat important reste à confirmer.

L'intérêt pour la matière sombre au SPP ne se restreint pas à l'étude des neutrinos. D'autres candidats potentiels sont activement recherchés, tels les WIMPs (Weakly Interacting Massive

Particules, particules massives interagissant faiblement) qui pourraient être des particules supersymétriques vestiges du Big Bang, ou les MACHOs (Massive Astronomical Compact Halo Objects, corps astronomiques massifs compacts du Halo galactique), des objets de type stellaire, soit trop peu massifs pour entretenir un cycle complet de réactions thermonucléaires, soit trop petits pour émettre une quantité appréciable de rayonnement électromagnétique. Enfin, un nouveau thème de recherche émerge dans le domaine de la physique des rayons cosmiques, celui de l'astronomie des neutrinos de haute énergie. En effet, outre l'intérêt qu'il y a à étudier leurs particularités propres, les neutrinos permettent de sonder l'intérieur des objets denses, comme on l'a vu récemment avec l'étude des neutrinos solaires (de basse énergie). La détection de neutrinos de haute énergie ouvrirait une nouvelle fenêtre en astronomie, permettant l'étude de sources ponctuelles de neutrinos, de bruits de fond diffus ou même l'annihilation de WIMPs au cœur du Soleil ou de la Terre ; elle pourrait permettre également de confirmer ou d'infirmer la découverte de l'oscillation des neutrinos annoncée par SuperKamiokande.

Outre ces cinq thèmes de recherche principaux, quelques physiciens du SPP étudient de nouvelles solutions au problème du retraitement des déchets nucléaires, en particulier en ce qui concerne l'élimination des radioéléments de longue durée de vie par l'emploi d'accélérateurs (INCA). Cet effort s'est poursuivi en coopération avec le SPhN.

Dans toutes ces expériences ou projets, le SPP est actif dans toutes les étapes de la recherche : la conception et la construction des expériences ou détecteurs, le déclenchement et les systèmes d'acquisition et de contrôle en ligne des données, en collaboration étroite avec les services techniques du DAPNIA (SED, SEI, SGPI, SIG, STCM). Ce sont souvent les physiciens participant à la conception des détecteurs qui écrivent les logiciels correspondants de reconstruction et de simulation, déjà nécessaires dans cette étape de définition. Quand l'expérience est en phase de prise de données, les physiciens prennent leur part de travail posté et de coordination. Le but final est évidemment l'analyse des données recueillies et sa communication sous forme orale et écrite. Là encore, la contribution des physiciens du SPP est notable. Dans les sections qui suivent, nous allons décrire ces activités, en insistant là où c'est possible sur les analyses et les conclusions physiques. Il faut noter que la taille du SPP, environ 125 physiciens et étudiants, ainsi que le fort soutien des services techniques du DAPNIA permettent aux physiciens du SPP de jouer un rôle dans la plupart des sujets considérés comme importants en physique des particules aujourd'hui. Les expériences auxquelles nous participons sont de taille et de nature variées, et sont menées sur de nombreux sites ; ceci représente également un sain élément de diversité. Malgré cette diversité, une tendance à la réduction du nombre d'expériences est apparente, d'environ vingt il y a dix ans à une douzaine aujourd'hui, vers probablement moins d'une dizaine prochainement.

Depuis quelques années, trois lignes de recherche principales se sont dégagées dans les activités du SPP : les fondations du Modèle Standard (regroupant les activités collisions électron-positron, collisions proton-proton et structure du nucléon que nous avons mentionnées plus haut), la violation de la symétrie CP et les neutrinos et la matière sombre. Un risque a été identifié, pour la période 2000-2005 d'une « sécheresse » de données ; en effet, à cette époque, les seules données « fraîches » pour le SPP proviendront des expériences BABAR et H1, puisque le LEP aura été arrêté pour permettre la construction du LHC. Pour cette raison, et aussi en vue d'une préparation à l'analyse des données du LHC, une participation du SPP à la prolongation de l'expérience DØ

du laboratoire Fermi a été approuvée en 1997.

COLLISIONS ELECTRON - POSITRON

Les années 1997-1998 ont été marquées par la montée régulière en énergie au-dessus du seuil de production de paires de bosons W et Z. Cette seconde phase du LEP (appelée LEP2) a atteint une valeur de l'énergie disponible de 189 GeV avec une luminosité intégrée correspondant à l'observation d'environ 3500 paires de W par expérience. Ces données ont ouvert la voie à une mesure précise de la masse du boson W qui permet une recherche indirecte du boson de Higgs du modèle standard. La recherche directe du boson de Higgs ainsi que de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard a vu ses limites poussées plus avant grâce au gain en énergie.

L'expérience ALEPH

Le groupe du SPP est engagé dans plusieurs analyses.

La recherche des bosons supersymétriques au LEP2

L'élucidation du mécanisme de brisure de la symétrie électro-faible est une des plus hautes priorités de la physique des particules. Les analyses des données du LEP2 ont permis d'exclure l'existence d'un boson de Higgs standard qui soit plus léger que $90,5 \text{ GeV}/c^2$. On espère, à la fin du programme LEP2, pouvoir étendre cette limite jusqu'à $107 \text{ GeV}/c^2$, à défaut de le découvrir. Cependant, la description fournie par le modèle standard de la brisure de symétrie n'est pas satisfaisante. Les extensions supersymétriques du modèle standard offrent une solution à ce problème, avec une structure plus riche en bosons de Higgs : dans l'extension minimale, il existerait cinq bosons de Higgs, dont deux chargés. Deux paramètres suffisent pour exprimer la masse de ces cinq particules. Dans ce schéma, la masse du boson de Higgs le plus léger devrait se situer en dessous de $135 \text{ GeV}/c^2$, offrant ainsi aux expériences du LEP une chance raisonnable de le découvrir.

La production associée de deux bosons de Higgs neutres, h et A (le plus léger et le pseudoscalaire) a été étudiée. Leurs désintégrations s'effectueraient, de manière prédominante, en paires de quarks b, ou plus rarement en paires de leptons τ . Les événements où quatre jets compatibles avec des quarks b sont produits, ou bien deux jets et deux leptons τ , ont été spécialement recherchés. Une approche par réseau neuronal a permis de maximiser l'efficacité de l'étiquetage des quarks b. En l'absence de candidats dans les données, une limite inférieure de $81,3 \text{ GeV}/c^2$ a pu être attribuée aux masses des bosons h et A. En ce qui concerne les bosons H^+ et H^- , deux études menées à Saclay, l'une dans le mode $(c \bar{s} \bar{c} s)$, l'autre dans le mode $c\bar{s}\tau\nu$, ont porté la limite à une valeur de $62,5 \text{ GeV}/c^2$.

Les mesures de la masse du boson W

L'intérêt principal de la mesure précise de la masse du boson W vient des contraintes que cette mesure permet d'imposer à la masse du/des boson(s) de Higgs (figure ci-dessous). De plus, les corrections radiatives au calcul de la masse du boson W sont différentes entre le modèle standard

et son extension supersymétrique minimale. Le but est d'atteindre une précision de mesure de 0,5‰ ; une telle précision permettrait soit de départager les deux modèles, soit, si le résultat est compatible avec les deux, de contraindre la masse des partenaires supersymétriques à être supérieure à 1 TeV/c² (à l'exception de celle des bosons de Higgs).

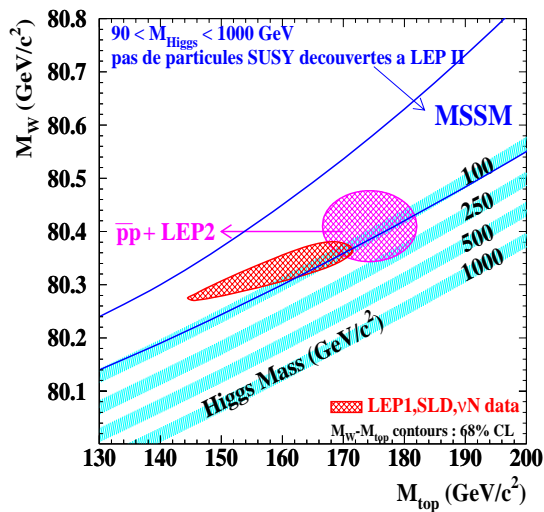


Diagramme montrant la relation entre les masses du quark top et du boson W et celle du boson de Higgs et les contraintes expérimentales actuelles. Il s'agit d'une compilation de toutes les données actuellement disponibles.

Aux énergies de 183 à 189 GeV, correspondant aux prises de données de 1997 et 1998, la mesure directe de la masse à partir des produits de désintégration a permis d'atteindre une erreur relative de 1‰ par expérience. Le groupe ALEPH du SPP a fourni, quasiment en ligne, la première analyse des différents canaux. Cette analyse a été utilisée pour les présentations aux conférences de l'hiver 1997. L'ajustement des paramètres du modèle standard aux mesures de LEP1 et maintenant LEP2, ainsi qu'aux mesures du Tévatron permet par exemple de donner une limite supérieure à 95% de confiance sur la masse du boson de Higgs de 220 GeV/c² et une valeur préférée de 90^{+55}_{-35} GeV/c².

La confrontation avec la recherche directe promet une période passionnante pour la fin du programme LEP2.

Le groupe du SPP dans ALEPH

Outre les engagements dans les différentes analyses mentionnées ci-dessus, le groupe ALEPH des physiciens du SPP continue de faire fonctionner et d'analyser les données du luminomètre SICAL qu'il a conçu, construit et mis en œuvre. Il contribue à la rédaction de la publication finale sur l'étude de la courbe de résonance du boson Z en utilisant les données prises à LEP1. Il est également responsable d'une partie du système d'acquisition du calorimètre électromagnétique (convertisseurs ADC, superviseur du système de déclenchement).

L'expérience DELPHI.

Mise en route en 1989, l'expérience DELPHI a accumulé pendant 6 ans un lot très important de collisions e^+e^- produisant des bosons Z. Le programme de montée en énergie des faisceaux du LEP a débuté en 1995 pour se poursuivre en 1996 par le franchissement du seuil de la production de paires de bosons W^+W^- (160 et 172 GeV). La montée en énergie a ensuite continué au-delà du seuil de production d'une paire de bosons Z en 1997 où a été accumulée une luminosité intégrée de 54 pb^{-1} à 183 GeV, et en 1998 lors d'une prise de données à haute statistique où 150 pb^{-1} ont pu être enregistrés à 189 GeV.

L'appareillage : détecteurs au silicium et TPC

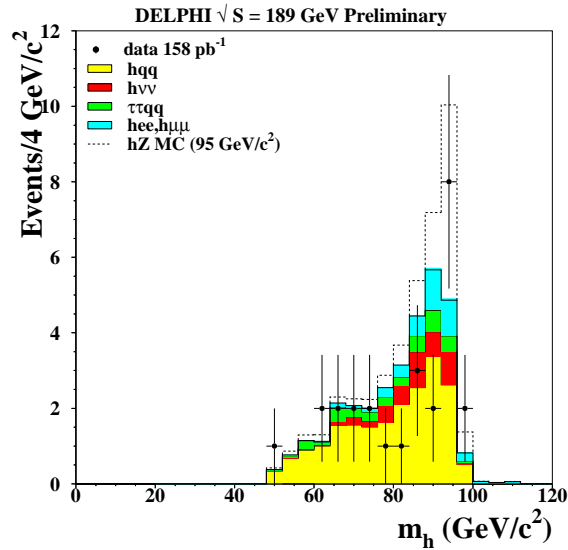
Au cœur de DELPHI se trouve la chambre à échantillonnage temporel (TPC), construite à Saclay. Grâce à la maîtrise du fonctionnement de la TPC, à laquelle le groupe du SPP continue d'apporter une contribution majeure, celle-ci fournit des mesures de très bonne qualité, tant du point de vue géométrique que du point de vue de l'identification (par la mesure de la perte d'énergie linéique, dE/dx), supérieures aux objectifs initiaux.

Le détecteur DELPHI qui avait été complété en vue des prises de données à haute énergie n'a pas été grandement modifié depuis, si ce n'est par la mise en œuvre d'un sous-détecteur au silicium pour la mesure du rayonnement synchrotron induit par l'accélérateur lui-même. Ces compteurs, développés à Saclay, ont été testés auprès des faisceaux du LEP en 1995 et mis en place en 1996. Leurs principales caractéristiques sont leur rapidité et la mesure simultanée de l'énergie et du temps de passage des rayonnements avec une très bonne résolution. Ils ont effectivement permis d'améliorer la mise en œuvre de la TPC lors des prises de données où l'on craint un fort taux de radiation : ces détecteurs additionnels ont donc augmenté la luminosité effective en autorisant la mise sous tension de la TPC et de l'ensemble de DELPHI dès que le taux de radiation était acceptable. De plus, ils ont fourni aux ingénieurs du LEP un important outil de diagnostic pour l'ajustement et l'étude des faisceaux.

Les analyses faites au SPP

L'analyse des données de LEP1 (à l'énergie du Z) s'est prolongée à Saclay sur l'étude des oscillations du méson B_s porteur à la fois des quarks beau et étrange, et sur l'étude de ses désintégrations. L'analyse des données de LEP2 (aux énergies supérieures à celle du Z), est très active à Saclay et touche les sujets suivants :

- recherche du/des boson(s) de Higgs, dans le cadre du modèle standard ou dans celui des modèles supersymétriques à deux doublets de Higgs (bosons neutres et chargés) ; les états finals explorés correspondent aux canaux $H\nu\bar{\nu}$, $H\mu^+\mu^-$ et 4 jets.



Spectre de masse des « candidats » bosons de Higgs produits à 189 GeV dans la réaction $e^+e^- \rightarrow hZ$ dans DELPHI. Les points représentent les données et les histogrammes grisés les diverses contributions attendues pour le modèle standard ; l'histogramme pointillé montre l'excès d'événements prédit par ce même modèle standard pour un boson de Higgs de 95 GeV/c².

- recherche de partenaires supersymétriques des quarks t et b (*stop* et *sbottom*). Ces travaux donnent également lieu à une participation active au GDR commun au CNRS et au CEA sur la supersymétrie ;
- recherche de *stop* dans le cadre des extensions de modèles de supersymétrie avec violation de la parité R ;
- mesure de la masse des bosons W ; le travail à Saclay est concentré sur les désintégrations mixtes des paires de W, où l'un des bosons se désintègre en quarks, et l'autre en un lepton et son neutrino associé. La détermination précise de cette masse, qui est un paramètre très important du modèle standard, permettra de contraindre de façon notable le domaine de masse possible pour le boson de Higgs, en complément des recherches directes déjà mentionnées. Celles-ci, bien qu'elles n'aient toujours pas donné lieu à l'observation de nouvelles particules, ont toutefois mené à une vérification de plus en plus précise du modèle standard.

Les responsabilités des physiciens du SPP

Les physiciens de Saclay assument d'importantes responsabilités au sein de la collaboration, aussi bien sur le plan du détecteur qu'au niveau des groupes d'analyse. Un physicien du SPP est membre du comité exécutif restreint de DELPHI (DEC). Le groupe participe activement au comité de liaison (LEDI) entre le LEP et DELPHI, y apportant son expertise sur les détecteurs au silicium de la TPC.

Un physicien de Saclay assure la direction (*project leader*) du sous-ensemble TPC. Cela implique la coordination d'une trentaine de physiciens, ingénieurs et techniciens de différents laboratoires de la collaboration, pour assurer la maintenance, les développements techniques nécessaires (aussi bien matériels que logiciels) et les prises de données de la TPC, détecteur pivot pour la

reconnaissance de traces dans DELPHI.

Le groupe assume également des responsabilités dans la maintenance et le développement de logiciels généraux de DELPHI : filtre en ligne de quatrième niveau des données, écriture de la DST. Il prend aussi une part importante à la production de données simulées qui seront ensuite utilisées par toute la collaboration ou encore pour des analyses particulières.

Sur le plan de l'analyse, deux physiciens du SPP sont coordinateur de groupes de travail sur la recherche du boson de Higgs et de nouvelles particules. Ils représentent également la collaboration dans le groupe de travail du LEP sur les recherches de boson de Higgs. Un troisième physicien est coordinateur du groupe de travail sur la mesure de la masse du boson W.

COLLISIONS PROTON - (ANTI) PROTON

L'expérience DØ

Le SPP participe à l'expérience DØ, une des deux expériences installées auprès du «Tévatron», le collisionneur du laboratoire Fermilab, qui a pour but l'étude des interactions $p\bar{p}$ à une énergie de 1800 GeV. Durant la première phase de saisie des données, entre juin 1992 et février 1996, une luminosité totale de 110 pb^{-1} a été accumulée. De nombreux résultats très importants ont été obtenus avec, en particulier, la découverte du 6^{ème} quark, le quark top, qui avait échappé à toutes les recherches précédentes. Durant cette prise de données, la collaboration DØ comprenait environ 450 physiciens issus de 48 laboratoires de 10 pays avec Saclay comme seul laboratoire d'Europe Occidentale.

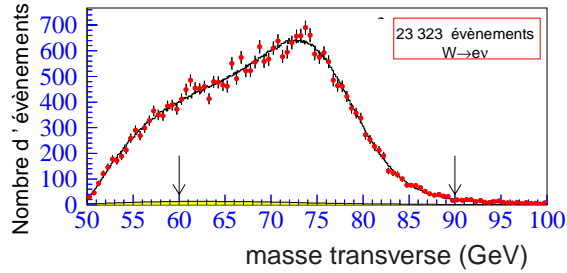
La prochaine prise de données avec une machine aux performances accrues et des dispositifs expérimentaux améliorés devrait débuter en l'an 2000 et durer jusqu'à la mise en route du LHC. Elle apportera un accroissement de plus d'un facteur 20 de la statistique accumulée. Devant l'intérêt du programme de physique qu'il sera possible d'exploiter avec cette machine, qui préfigure l'expérimentation auprès du LHC, des physiciens du SPP ont décidé de continuer leur participation à l'expérience DØ au sein de laquelle ils ont été rejoints par leurs collègues de l'IN2P3.

Nous rappellerons les principaux buts de physique poursuivis par l'expérience et nous présenterons un résumé des modifications apportées au détecteur DØ pour son exploitation auprès du Tévatron amélioré.

L'analyse des données 1992-1996.

Le programme de recherche recouvre l'étude d'un grand domaine de processus fondamentaux : physique du quark *top*, physique électrofaible avec les bosons W et Z, recherche de nouvelles particules, physique des interactions fortes (QCD) et études du quark b. L'analyse des données s'est poursuivie jusqu'à aujourd'hui.

Depuis l'annonce de la découverte du quark *top* en 1995 par DØ et CDF, les mesures de la masse et de la section efficace de production ont été affinées et sont en accord dans les deux expériences. Les valeurs moyennes de la section efficace de production : $\sigma(t\bar{t}) = 5,7 \pm 1,7 \text{ pb}$ et de la masse : $174,3 \pm 3,2 \text{ (stat)} \pm 4,0 \text{ (syst) GeV}/c^2$ sont en parfait accord avec le Modèle Standard. Des recherches de désintégrations « exotiques » du quark top ont été menées sans succès.



Ajustement de la masse effective transverse électron-neutrino permettant de déterminer la masse du W.

Plusieurs dizaines de milliers d'événements issus de la désintégration $W \rightarrow e\nu$ ont été accumulés ce qui a rendu possible des tests précis du Modèle Standard. Les principales études, complémentaires de celles effectuées auprès du LEP, portent sur la masse et la largeur du boson W, l'étude des couplages à 3 bosons de jauge, l'universalité des couplages des bosons W aux leptons chargés. La valeur moyenne de la masse du boson W mesurée auprès du Tévatron, $M_W = 80,41 \pm 0,09 \text{ GeV}/c^2$, est en bon accord avec la mesure effectuée auprès du LEP.

DØ étudie la théorie des interactions fortes, QCD, en analysant les réactions comportant des jets, les propriétés de la production de quarks b et t et des bosons W et Z. Il y a de façon générale un bon accord avec les prédictions basées sur les calculs de QCD à l'ordre suivant l'ordre dominant (NLO).

Les études de DØ ont également porté sur la production inclusive du quark b, les corrélations $b\bar{b}$, la production de charmonium (J/ψ) et bottomium. Le résultat le plus intéressant provient de la mesure de la section efficace de production du quark b, qui a une valeur plus élevée d'un facteur 2 que les prédictions théoriques.

Le Tévatron étant la machine actuelle qui fournit l'énergie dans le centre de masse la plus élevée, un programme important de recherche de phénomènes au-delà du Modèle Standard y est poursuivi. A ce jour, seules ont été publiées des limites de sections efficaces de production ou des limites inférieures de la masse de nouvelles particules : il n'a été observé aucune nouvelle particule prédite dans différentes extensions du Modèle Standard (particules supersymétriques, leptoquark, W ou Z lourds...).

La seconde prise de données (à partir de 2000).

Le nombre d'antiprotons disponibles à tout moment est le facteur déterminant fixant la valeur de la luminosité : des améliorations pour augmenter leur production, leur stockage, et la possibilité de leur récupération forment la base de meilleures performances. Ce but est atteint en remplaçant l'anneau principal, par un nouvel accélérateur, l'« *Injecteur Principal* », et en ajoutant un nouvel anneau d'accumulation des antiprotons, l'« *Anneau recycleur* » dans un tunnel commun, adjacent à celui du Tévatron. Ces changements entraînent une augmentation à la fois du nombre d'antiprotons par paquet et du nombre de paquets.

L'objectif du programme d'amélioration de la machine et des détecteurs est l'accumulation d'environ 20 fois plus d'événements que lors de la première phase. Les dispositifs expérimentaux de CDF et DØ contiennent des détecteurs ne pouvant pas fonctionner sous ces conditions et qui sont donc en cours de modification ou de remplacement.

L'*injecteur principal* est un synchrotron à protons de 120 GeV, à large ouverture et à cyclage

rapide, qui fournira un faisceau extrait de 120 GeV contenant $3 \cdot 10^{13}$ protons avec un cycle de 2,9 secondes. L'*anneau recycleur* est un anneau de stockage d'antiprotons à 8 GeV construit à partir d'aimants permanents. Il apporte un gain en luminosité d'un facteur 2 par rapport à la mise en œuvre de l'injecteur principal seul. L'énergie de chaque faisceau est portée à 1 TeV et le nombre de paquets est porté à 36 contre 36.

L'augmentation de la luminosité et la réduction du temps entre deux croisements entraîne un accroissement du taux d'occupation dans les détecteurs, ce qui rend nécessaire des transformations radicales dans les dispositifs expérimentaux. Le taux de rayonnement plus élevé impose l'installation de blindages supplémentaires. Le système de saisie des données doit être modifié afin de supporter un taux d'acquisition environ 40 fois plus élevé que lors de la première phase. Les principales modifications du dispositif expérimental sont les suivantes :

1. Le détecteur central de traces est remplacé par un spectromètre magnétique comprenant un aimant solénoïdal de 2 T installé au sein du calorimètre central. A l'intérieur de la cavité interne de cet aimant se trouve le détecteur de traces comprenant : a) un détecteur au silicium (**SMT**) comprenant plus de 800 000 canaux, b) un détecteur à fibres scintillantes (**CFT**) comprenant 74 000 fibres, c) des détecteurs de pieds de gerbe composés de bandes de scintillateurs et d'une plaque de plomb.
2. Le calorimètre à argon liquide et uranium reste inchangé à l'exception du système d'électronique modifié pour tenir compte de la réduction du temps d'analyse des signaux.
3. Le système de détection des muons voit le remplacement des chambres avant-arrière par 2 sous-systèmes : tubes à mini distances de dérive (**MDT**) et 3 couches de compteurs à scintillation à fine granularité (pixels).
4. Refonte complète du système de déclenchement et du système d'acquisition des données.
5. Réécriture complète des logiciels de simulation, reconstruction et d'analyse en utilisant les techniques de la programmation orientée objet et le langage C++. Les physiciens du SPP participent activement à cette activité.

Il est prévu d'accumuler environ 250 millions d'événements par an.

L'amélioration de la précision de mesure des impulsions des leptons et la possibilité d'identifier les désintégrations des quarks b entraînent une efficacité d'identification doublée des événements

tt. On pourra mesurer la masse m_{top} avec une précision de 3 GeV ; on pourra également rechercher les désintégrations rares du quark t: ($t \rightarrow c\gamma$, $t \rightarrow cZ$, $t \rightarrow H^+b$). Plus de 2 millions d'événements $W \rightarrow e\nu$ avec un nombre à peu près égal d'événements $W \rightarrow \mu\nu$ seront disponibles pour des tests de précision du modèle standard dans le secteur électro-faible. En particulier, la masse du boson W sera déterminée avec une précision de l'ordre de 40 MeV/c². Les tests de QCD seront affinés. Avec la luminosité prévue, 10^{11} hadrons contenant un quark **b** seront produits par an. Ce taux permettra de poursuivre un vaste programme de physique du quark b. L'étude de la violation de CP dans la désintégration $B \rightarrow J/\psi K_S$ permettra de déterminer le paramètre $\sin(2\beta)$ avec une précision de l'ordre de 0,12. L'erreur de mesure sur la masse du quark top combinée avec l'incertitude sur la masse du W à partir des mesures de LEP2 et du Tevatron (~ 30 MeV/c²) permettra de déterminer, dans le cadre du Modèle Standard, la masse du boson de Higgs avec une précision relative de 30 à 40%.

La prise de données de la phase II permettra de couvrir un très large espace de phase des paramètres du Modèle supersymétrique Minimal, pour les charginos, neutralinos, squarks et gluinos.

En conclusion, le Tévatron sera l'une des seules machines de pointe encore en fonctionnement vers le début du siècle prochain, et le restera jusqu'au démarrage du LHC. L'exploitation des données de DØ permettra de nous préparer à la physique qui nous attend au LHC tout en réalisant de nouveaux tests fins du modèle standard et peut être sera-t-il possible de mettre au jour des phénomènes indicatifs de « nouvelle physique ».

L'expérience ATLAS

Le groupe de Saclay est actif dans l'expérience ATLAS depuis le début et a pris des responsabilités importantes dans le spectromètre à muons, le calorimètre électromagnétique à l'argon liquide et la sélection des données en ligne. Ses activités sont variées et comprennent la simulation de la physique et des détecteurs, le développement de logiciels de reconstruction d'événements et d'analyse, la mise au point de détecteurs et de leur électronique, le suivi industriel de la construction de certains détecteurs, l'étude de moyens modernes de sélection et de traitement des données en ligne.

Motivations de physique d'ATLAS

Le LHC est une machine de découverte qui a une énergie 10 fois plus élevée et une luminosité 100 fois plus élevée que les accélérateurs actuels. Il a un grand potentiel de découverte et, parmi les sujets qui seront explorés, on peut noter :

- la recherche et l'étude du boson de Higgs à l'origine de la brisure de la symétrie électrofaible et de la masse des particules. Le domaine de masse qui sera exploré s'étend au-delà de la limite actuelle de 95 GeV/c² fournie par LEP2 et va jusqu'à 1 000 GeV/c².
- l'étude détaillée des quarks lourds b et t.
- des recherches au-delà du Modèle Standard : particules supersymétriques, interactions et structures nouvelles.

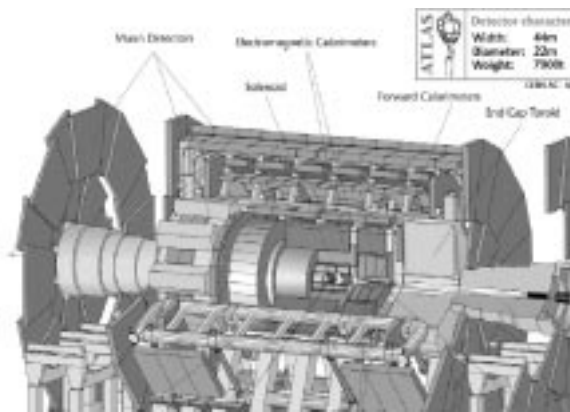
Le détecteur ATLAS

ATLAS est construit pour exploiter entièrement le potentiel de découverte du LHC. Son but premier est de fonctionner à haute luminosité ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) avec la capacité d'identifier et de mesurer les objets suivants : e, γ , μ , jets, énergie manquante. L'accent est mis aussi sur la robustesse et la redondance des mesures.

La conception du détecteur a été guidée par un grand nombre d'études détaillées qui ont conduit aux caractéristiques suivantes : i) une très bonne calorimétrie pour l'identification des électrons et des γ , complétée par une calorimétrie hermétique des jets et de l'énergie transverse manquante ; ii) une trajectographie efficace à haute luminosité pour les mesures d'impulsion des traces chargées et l'étiquetage du quark b ; iii) la reconstruction du vertex du tau et des saveurs lourdes à basse luminosité ; iv) des mesures extrêmement précises du muon pour les luminosités les plus élevées. De plus, le domaine de physique accessible est maximisé grâce à une grande acceptance et à la capacité de déclencher et de mesurer des particules de faible impulsion transverse.

Tous ces buts sont obtenus grâce à une configuration de champ magnétique qui combine i) un solénoïde supraconducteur intérieur entourant la cavité du détecteur interne ; ii) un toroïde à air

supraconducteur fait de 8 bobines symétriques indépendantes au-delà du calorimètre. Ce concept permet d'atteindre une résolution élevée, une grande acceptance et une mesure robuste des muons, avec peu de contraintes sur la calorimétrie et le détecteur interne.



Vue d'ensemble du détecteur ATLAS.

Activités et responsabilités du groupe DAPNIA dans ATLAS.

La détection des muons et des électrons/photons joue un rôle important au LHC. Le groupe de Saclay contribue de manière importante aux trois systèmes de détection suivants : le spectromètre à muons, le calorimètre électromagnétique, le système de déclenchement.

Tous les documents qui décrivent de manière très détaillée la construction et les performances des détecteurs ont été publiés. Après le « Technical Design Report » (TDR) du calorimètre à l'argon liquide paru dès 1996, d'autres documents ont bénéficié d'une forte contribution des équipes de Saclay : TDR de l'aimant toroïdal central et TDR du spectromètre à muons en 1997, rapport d'étape du système de déclenchement en 1998 et aussi le TDR de physique qui fait le point sur les capacités de découvertes d'ATLAS compte tenu des dernières optimisations. D'autre part le *Memorandum of Understanding* qui décrit pour chaque institut les responsabilités et les ressources fournies a été signé en 1998. Ceci a donné le coup d'envoi de la phase de construction du détecteur ATLAS. Les trois activités du groupe de Saclay dans ATLAS sont décrites ci-dessous.

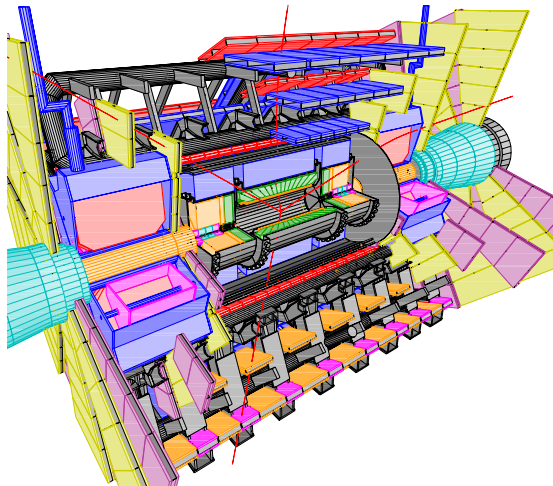
❖ *Le spectromètre à muons.*

La conception d'un spectromètre à muons utilisant un toroïde à air dans une expérience LHC est une idée originale de Saclay et est motivée par le souhait d'obtenir une excellente résolution sur un large spectre d'impulsions allant de $p_T = 10$ à $1\,000$ GeV et ceci de façon autonome, sans l'utilisation du détecteur de trace interne.

La contribution du groupe en 1997-1998 a concerné l'optimisation finale du spectromètre à l'aide de simulations et de calculs d'acceptance et de résolution. La base de données qui décrit dans le détail l'agencement des chambres dans le spectromètre a été consolidée et incorporée dans le logiciel général de l'expérience. Il en est de même avec le programme de reconstruction des traces développé à Saclay. D'autre part un outil original de visualisation 3-D de tout le détecteur ATLAS a été mis au point. Il permet de façon interactive de visualiser les traces des particules à travers toutes les couches du détecteur et de prendre en compte leurs interactions.

Des mesures de champ magnétique faites à l'aide de sondes à effet Hall placées à l'extérieur du cryostat d'un prototype d'une bobine de taille réduite (« race track ») ont permis de déterminer la position de la bobine à quelques millimètres près ; la méthode de calcul du champ magnétique a ainsi été validée.

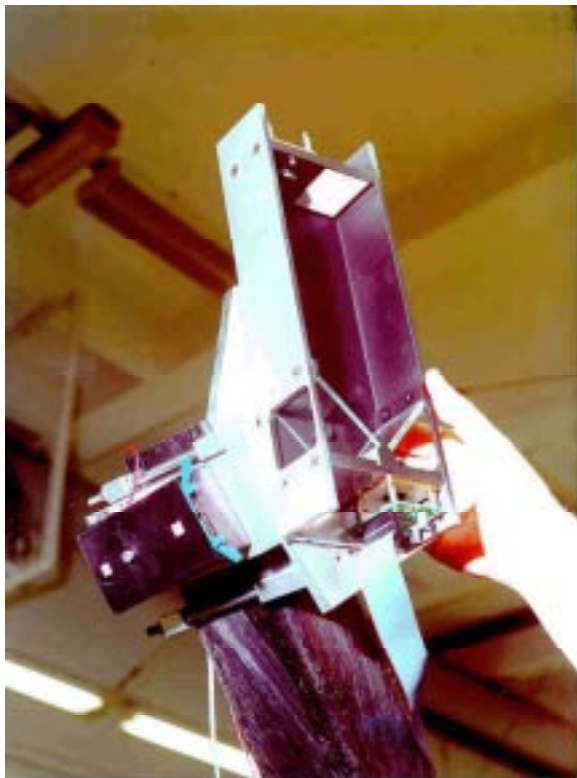
Comme réalisation principale, le groupe muon a pris en charge l'alignement des chambres à muons. Pour obtenir la résolution requise, la position des chambres à muons doit être connue et surveillée à moins de 20 μm près sur des distances allant jusqu'à 10 mètres. Une station de tests à échelle 1 (DATCHA) construite à Saclay a permis, au cours des deux dernières années, de démontrer expérimentalement la validité du principe d'alignement pour les chambres de la partie centrale du spectromètre. Les précisions requises ont été obtenues à l'aide du système RASNIK disposé sur la structure métallique des chambres et qui utilise la rectitude des rayons lumineux pour aligner les trois « points » que constituent un masque en damier codé, une lentille et une caméra CCD.



Simulation d'un événement $H \rightarrow 4\mu$ dans le détecteur ATLAS.

La deuxième partie de l'expérimentation avec DATCHA a commencé et concerne l'alignement des chambres du spectromètre avant-arrière. Dans ce contexte, le groupe de Saclay a mis au point un télescope (STAMP) visant à reconstruire la position et la direction d'un faisceau laser pour l'alignement d'un grand nombre de chambres.

Le groupe participe aussi aux études d'intégration générale des systèmes d'alignement dans le spectromètre à muons. Des bancs de calibrage des systèmes d'alignement sont également à l'étude à Saclay. Finalement, les premiers éléments mécaniques de fixation des capteurs optiques sur les chambres, dont le groupe a pris la responsabilité, sont prêts à être livrés à temps pour le démarrage de la construction des chambres dans une dizaine d'instituts de la collaboration.

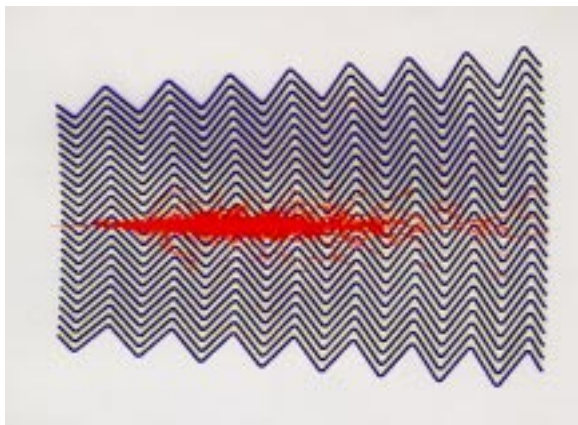


Télescope pour l'alignement des chambres d'ATLAS.

❖ *Calorimétrie électromagnétique à argon liquide*

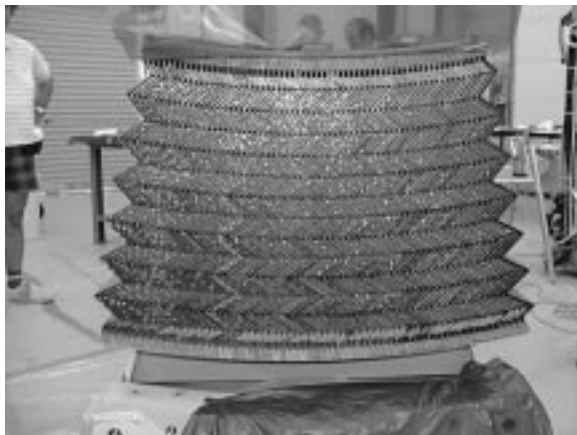
La physique avec les électrons et les gammas utilise un calorimètre électromagnétique qui est constitué de plaques d'absorbeur en plomb en forme d'accordéon et d'argon liquide comme milieu actif.

Au cours des deux dernières années, des modules prototypes à échelle 1 ont été construits et testés dans un faisceau de particules. Ceci a permis d'étudier et de comprendre de façon systématique les points qui sont critiques pour la réalisation d'un calorimètre performant et fiable. C'est ainsi que les paramètres importants du point de vue de la mécanique et de l'électronique ont été maîtrisés de sorte que la mise au point des procédés de fabrication de la série industrielle a été achevée et que des spécifications précises ont été fournies aux fabricants dans une démarche de contrôle de qualité.



Simulation de la détection d'un électron de haute énergie dans le calorimètre électromagnétique à argon liquide d'ATLAS.

La phase de construction a commencé avec la mise en route de la chaîne de fabrication des absorbeurs au LAL d'Orsay. Un laboratoire destiné à l'intégration et aux tests des modules a été équipé à Saclay et comprend une salle blanche ainsi qu'une installation cryogénique pour que les tests soient réalisés à froid dans des conditions réalistes. Une autre responsabilité du groupe qui a été menée à terme concerne l'étude et la mise au point de l'intégration globale et les procédures d'assemblage du calorimètre central.



Un module prototype à échelle 1 du calorimètre électromagnétique à argon liquide d'ATLAS. On remarquera la forme caractéristique en « accordéon » des absorbeurs en plomb.

Enfin, le groupe participe à des projets d'électronique pour le calorimètre. Ces deux dernières années ont vu la réalisation de plusieurs cartes d'électronique dans leur version définitive. Il s'agit du stockage des signaux du calorimètre en attente de la décision du déclenchement. Cette fonction est assurée par un pipe-line incorporé à des puces de micro-électronique conçues à Saclay et fabriquées en utilisant la technologie DMILL, une technologie développée par le CEA en partenariat avec l'industrie. D'autre part une carte qui réalise la sommation des signaux analogiques venant des cellules du calorimètre afin de construire le déclenchement du premier niveau a été testée avec succès et soumise à la réalisation.

Le travail de simulation et d'optimisation s'est poursuivi dans le cadre de la contribution du

groupe à l'écriture du TDR de physique, publié en avril 1999. C'est ainsi que la compréhension des performances du calorimètre pour la mesure d'énergie (résolution meilleure que $10\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$) et l'identification des électrons et des gammas a été poussée au maximum par la maîtrise d'effets subtils dans le calorimètre et aussi en utilisant les mesures provenant des autres détecteurs (trajectographie interne, calorimètre hadronique et spectromètre à muons); des techniques de réseaux de neurones ont été utilisées pour certaines corrections fines. Enfin, une étude poussée sur la possibilité de détecter dans ATLAS le mode de désintégration rare d'un boson de Higgs du modèle standard ou supersymétrique en $Z^0 + \gamma$ a été menée à bien par le groupe de Saclay.

❖ *Système de déclenchement*

Le taux de collision du LHC (40 MHz) et le grand nombre de voies d'électronique du détecteur ATLAS apportent de fortes contraintes sur le système de déclenchement. Le taux de données doit être réduit par 10^6 avant l'enregistrement permanent. Le déclenchement de niveau 1 trouve les muons dans le spectromètre et les dépôts d'énergie dans les calorimètres pour définir les régions d'intérêt (RoI). Le groupe de Saclay étudie le système de déclenchement de niveau 2 pour en augmenter les performances grâce à une meilleure compréhension globale de la structure des données provenant des détecteurs et des exigences de la physique.

Des simulations de physique ont été faites pour obtenir un menu de déclenchements : les seuils en énergie et les taux de déclenchement ont été estimés pour toutes les signatures des canaux de physique à l'aide notamment d'un programme de simulation rapide qui étudie les jets et les hadrons. Les temps d'exécution des algorithmes spécifiques pour le calorimètre et les autres détecteurs ont été optimisés pour différents processeurs.

A partir de ces études un modèle de déclenchement qui optimise la performance du système a été conçu. Basé sur le traitement séquentiel des données, cette sélection de niveau 2 utilise d'abord tous les détails de l'information contenue dans des régions d'intérêt (chambres à muons et calorimètre), puis incorpore les données du détecteur de traces interne, avant de procéder à la sélection globale des événements selon les topologies définies par le menu de déclenchements. Pour les événements retenus par le niveau 2, la reconstruction finale des événements utilise l'ensemble des données dans toutes les régions du détecteur.

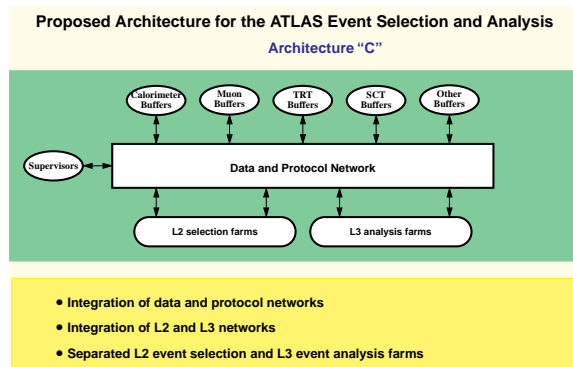
Le matériel pour construire l'architecture du système de déclenchement basé sur ces principes a été assemblé à Saclay dans un projet pilote. Le système est articulé autour d'un réseau de commutation ATM de 32 nœuds : les données et les signaux de contrôle transitent à travers ce réseau qui relie les mémoires tampon (également développées par le groupe) contenant les données des détecteurs, les processeurs et le système superviseur. Des données simulées ont été traitées par des algorithmes optimisés et les performances du système ont été étudiées pour chaque élément et pour le système complet. Des quantités telles que la latence, l'interférence de trafic et la bande passante effective ont été mesurées et ont permis de démontrer que ce système satisfait les spécifications du déclenchement d'ATLAS.

Le groupe a également mis au point une modélisation du système : à partir des paramètres mesurés par le système pilote, cette simulation permet d'extrapoler les résultats à la configuration finale de l'expérience et indique quelle doit être la taille du réseau et le nombre de processeurs.

Les résultats obtenus par le groupe de Saclay ont été incorporés dans un document de la collaboration (« ATLAS Technical Progress Report ») qui doit servir de base à la proposition technique « Trigger/DAQ Technical Proposal » à paraître en 1999.

Conclusion

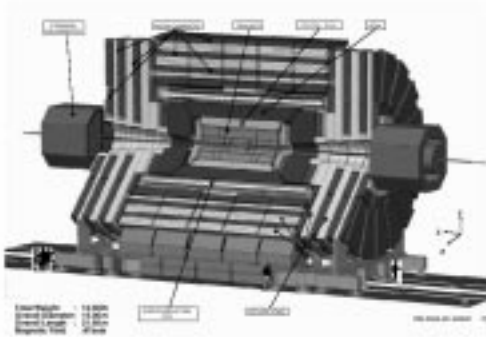
Le groupe de Saclay a plusieurs responsabilités dans la construction du détecteur ATLAS : le système d'alignement des chambres à muons, le calorimètre électromagnétique à argon liquide et le système de déclenchement de niveau élevé. Dans ces trois activités, des simulations détaillées de la physique et du détecteur ont été réalisées par le groupe afin d'optimiser la performance globale de l'expérience. Ce travail contribue à la compréhension profonde du détecteur ATLAS et forme la base de l'engagement futur du groupe de Saclay dans l'analyse des données. La phase de construction d'ATLAS a commencé, et le groupe de Saclay y participe pleinement dans ses trois composantes.



Architecture du système de déclenchement d'ATLAS étudiée à Saclay.

L'expérience CMS

Le groupe Saclay de CMS a choisi de concentrer ses efforts et ses moyens sur la calorimétrie électromagnétique.



Vue du détecteur CMS

Avec la détection des muons, la calorimétrie électromagnétique doit jouer un rôle primordial dans le potentiel de découverte des expériences LHC. En effet quel que soit le modèle le plus proche de la réalité (modèle standard, modèle super-symétrique,) on s'attend à ce que la majorité des processus physiques intéressants ait une signature claire donnant une désintégration en électron(s), photon(s) et jets. La collaboration CMS a choisi de construire un calorimètre électromagnétique avec d'excellentes performances (résolution de 0,6% à 120 GeV) permettant d'obtenir des résultats significatifs dès le démarrage du LHC, en particulier lors du fonctionnement à basse luminosité.

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) de CMS est constitué de cristaux scintillants de PbWO_4 dont la lumière est détectée par des photodiodes à avalanche (APD) fonctionnant dans un champ de 4 teslas. Les calorimètres « tonneau » et « bouchon » sont constitués d'environ 83000 voies de mesures : cristaux, APD, électronique de lecture. Le groupe de Saclay a pris une part prépondérante dans l'ensemble de ces choix.

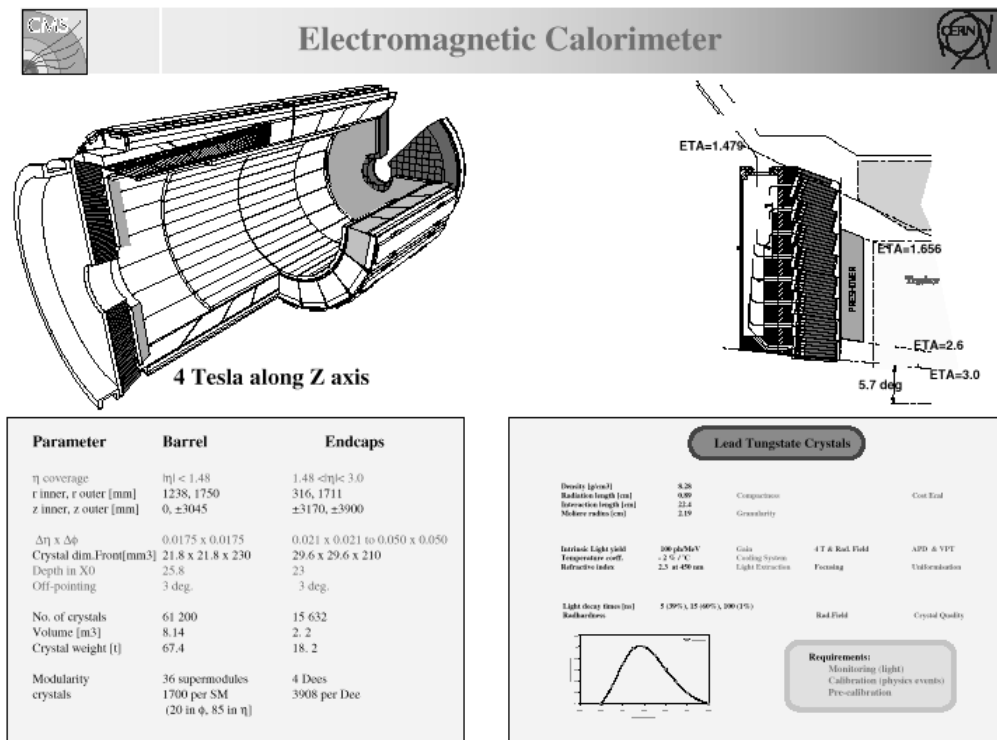
Le SPP dans CMS

L'activité du groupe s'est organisée autour de trois axes :

- un travail général de R&D et d'optimisation sur le calorimètre, largement achevé ;
- un travail plus spécifique, sous la responsabilité du laboratoire : le système de monitoring et de calibration ;
- une activité de management au niveau de CMS.

Un des axes de développement concernait le fonctionnement sous rayonnement des différents éléments du calorimètre : cristaux, APD, électronique, ... Nous avons tiré profit des spécificités

du CEA pour installer un irradiateur gamma au cobalt (COCASE) et utiliser, en collaboration avec l'INSTN, le réacteur Ulysse. Ces possibilités, ainsi que la mise au point de bancs de test performants, nous ont permis de prendre une part essentielle dans cette phase de développement qui conditionne les performances finales du détecteur. De même nous avons une activité également importante dans les tests de prototypes en faisceau au CERN ; ces tests ont validé les choix issus de la R&D et permis l'élaboration de la stratégie de calibration. D'autre part, un travail de simulation détaillée des performances permet, en collaboration avec les groupes en charge de la construction, d'optimiser l'ensemble des paramètres du calorimètre. Cette activité utilise dès aujourd'hui d'importants moyens de calcul.



Caractéristiques du calorimètre électromagnétique de CMS

Nous avons choisi de prendre la responsabilité du monitoring et de la calibration. En effet, les performances ultimes du calorimètre dépendent de la bonne connaissance de son évolution dans le temps et de l'intercalibration des voies (cristal, APD, électronique). Le monitoring et la calibration sont donc les clefs de l'analyse et doivent nous permettre d'y jouer un rôle primordial. Cette activité implique une excellente maîtrise de l'ensemble des caractéristiques du détecteur

Le système de monitoring optique distribue les impulsions lumineuses fournies par laser aux cristaux via un réseau de fibres optiques en silice ; la quantité de lumière est contrôlée précisément, impulsion par impulsion. Le DAPNIA (SPP/SED/SEI) assure la conception et la réalisation de ce système en collaboration avec Caltech, responsable de la source laser. Le groupe

a rédigé le chapitre sur le monitoring et la calibration du *ECAL Technical Design Report*. Afin de valider les choix technologiques, des prototypes du système ont été installés sur les tests du calorimètre au CERN. Ces mesures doivent également permettre de valider les modèles et simulations optiques que le groupe a développés. L'aboutissement de ces caractérisations sera la calibration *in situ* pendant l'expérience. Le travail de mise au point des outils (base de données), de définition des triggers spécifiques ainsi que des algorithmes a commencé et est testé lors des prises de données sur prototypes.

Un physicien du SPP était, jusqu'en octobre 1998, le *deputy project manager* pour le calorimètre électromagnétique et, à ce titre, il est intervenu sur l'ensemble du projet ECAL. Le DAPNIA assure une tâche de planification générale du projet ECAL. Un autre physicien est le coordinateur pour la physique dans CMS. A ce titre, il anime les différents groupes de travail. Une part importante de ces travaux a été consacrée à l'optimisation de l'ensemble du détecteur CMS pour l'identification de particules super-symétriques, à la physique du B et aussi à la physique des ions lourds. Un troisième physicien est le coordinateur de la calibration du ECAL. En raison de nos responsabilités dans le management, le SPP a joué jusqu'ici un rôle important en ce qui concerne les choix pour le détecteur comme pour la physique.

COLLISIONS ELECTRON-PROTON

L'expérience H1

L'anneau de collisions électron (ou positron)-proton HERA, est opérationnel depuis 1992. Il permet d'explorer la structure du proton à des échelles très petites, de l'ordre de 10^{-16} cm, à travers l'échange de bosons de jauge virtuels. Le but de ces expériences de diffusion profondément inélastique est d'obtenir une compréhension plus profonde de la structure du proton en terme de partons et de vérifier la validité de la chromodynamique quantique dans une région cinématique encore inexplorée.

La luminosité intégrée fournie par HERA augmente chaque année. H1 a accumulé $27,3 \text{ pb}^{-1}$ de données positron-proton en 1997, ce qui a permis de disposer pour les analyses de physique d'un ensemble total de données positron-proton de 37 pb^{-1} . L'arrêt annuel de l'hiver 97-98, qui a duré environ 6 mois, a été mis à profit pour modifier l'anneau d'électrons afin de permettre le fonctionnement du collisionneur en électron-proton. Ceci a nécessité entre autres le remplacement du dispositif de pompage de la chambre à vide. D'autre part l'énergie du faisceau de protons a été portée de 820 à 920 GeV. Pendant la seconde partie de 1998, $6,5 \text{ pb}^{-1}$ de données électron-proton ont été accumulées.

Un programme d'amélioration de l'accélérateur est en cours depuis 1997 pour augmenter la luminosité. Les changements apportés à la région d'interaction, notamment l'insertion à l'intérieur du détecteur H1 de deux aimants supraconducteurs à 1,5 m de part et d'autre du point d'interaction nominal, ont conduit à des modifications significatives des éléments du détecteur. Le DAPNIA/SGPI a calculé l'effet de la charge additionnelle de ces aimants sur l'enceinte intérieure du cryostat du calorimètre à argon liquide et montré qu'il était négligeable. HERA devrait s'arrêter en mai 2000 et redémarrer avant l'été 2001, après incorporation des modifications.

Les données enregistrées entre 1994 et 1998 sont en cours d'analyse et ont déjà donné lieu à plusieurs publications. Les analyses auxquelles ont participé les physiciens du SPP sont :

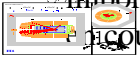
1) L'étude des fonctions de structure $F_2(x, Q^2)$, menée en deux temps :

a/ Analyse des données à petits moments transférés Q^2 et petits x , prises en 1995. Un ajustement en QCD perturbative à l'ordre suivant l'ordre dominant (NLO) des données F_2 de H1 et des expériences sur cible fixe montre que la diffusion profondément inélastique est en accord avec la théorie pour des valeurs de $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$.

b/ Etude des phénomènes profondément inélastiques diffractifs en utilisant des événements avec des « gaps » en rapidité. Elle a permis l'extraction de la fonction de structure $F_2^D(3)$ pour des valeurs de $Q^2 > 5 \text{ GeV}^2$. Un programme de résolution des équations de QCD perturbative par une méthode polynomiale a été développé et des ajustements des données $F_2^D(3)$ de 94 et 95 ont conduit à une extension à petits Q^2 (environ 5 GeV^2). Un résultat intéressant est que pour $Q^2 < 5 \text{ GeV}^2$ les effets non perturbatifs sont déjà importants en physique diffractive, ce qui n'est pas le cas en physique de la diffusion profondément inélastique.

2) La recherche de particules exotiques, annonciatrices d'une physique au-delà du Modèle Standard.

a/ L'excitation ressentie à la fin 1996 dans les deux collaborations à HERA, H1 et ZEUS, provoquée par l'observation dans l'analyse des données positron-proton d'un excès d'événements par rapport au Modèle Standard à grand Q^2 , s'est quelque peu atténuée après l'analyse des données de 1997. Celles-ci ont montré que l'effet, bien que toujours présent, était moins important que celui observé en 1996. L'analyse des données en électron-proton prises en 1998 est en cours.



b/ Sur l'ensemble des données prises de 1994 à 1997, des recherches de leptoquarks ou de particules supersymétriques ont également été faites. Aucun signal n'ayant été trouvé, des limites inférieures pour les masses de ces particules hypothétiques ont été données et communiquées aux conférences internationales.

Dans les 37 pb⁻¹ de données e⁺p, H1 a observé 5 événements avec un muon isolé et de l'impulsion transverse manquante, pour 0,8 prédits par le Modèle Standard. Deux des événements, dont celui-ci, sont compatibles avec une production de W se désintégrant en muon et neutrino.

LA VIOLATION DE CP

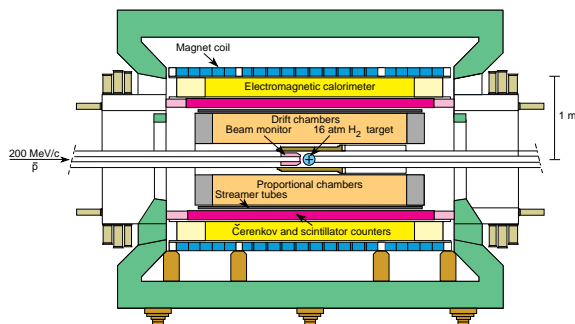
L'expérience CPLEAR

L'anneau d'antiprotons de basse énergie du CERN, le LEAR (Low Energy Antiproton Ring) qui a fonctionné de 1983 à 1996, a rendu possible l'observation d'un nombre important de réactions d'annihilation : $\bar{p} \rightarrow K^0 K^- \pi^+$ et $\bar{p} \rightarrow \bar{K}^0 K^+ \pi^-$ par l'expérience CPLEAR. Ces réactions sont intéressantes car la nature du kaon neutre (K^0 ou \bar{K}^0) est déterminée par le signe du kaon chargé associé (le K^- pour le K^0 et le K^+ pour le \bar{K}^0). En effet, de même qu'une charge électrique ne peut être produite sans la production d'une autre charge de signe opposé, les kaons qui sont porteurs d'une charge dite d'étrangeté ne peuvent être produits que par paire de charges d'étrangeté de signes contraires. Cet étiquetage de l'étrangeté au moment de la production, permet de comparer l'évolution temporelle du K^0 et du \bar{K}^0 , et ainsi d'étudier directement les symétries CP, CPT et T par des méthodes interférométriques, alors que les méthodes traditionnelles étudient le comportement temporel d'états de superposition des K^0 et \bar{K}^0 : les K_S et K_L . En plus des réactions citées précédemment, il faut mentionner la réaction : $\bar{p} \rightarrow K^0 \bar{K}^0$ qui permet d'étudier le comportement conjoint de l'évolution des K^0 et \bar{K}^0 . Ce comportement est prévu par la mécanique quantique et son étude constitue un test de la validité de celle-ci.

CPLEAR a enregistré des données jusqu'en 1996, et a effectué l'analyse de celles-ci jusqu'à la fin de 1998. Les dernières publications seront soumises aux revues scientifiques dans le courant de l'année 1999.

Présentation de l'expérience

Le dispositif expérimental est constitué de détecteurs à traces placés dans un solénoïde de même axe que le faisceau d'antiprotons.



Les réactions d'annihilation ont lieu dans une cible d'hydrogène gazeux située au centre du solénoïde. Les trajectoires des particules chargées sont matérialisées par un ensemble de huit chambres à traces : six d'entre elles, les chambres à dérive, ont été étudiées et construites au

DAPNIA. Ce dispositif expérimental a fonctionné sans problème important de 1989, début de l'expérience, jusqu'à la fin de la prise de données en juin 1996. À partir de 1995, afin d'améliorer sensiblement l'efficacité du système de sélection du type d'annihilation et de permettre d'effectuer les tests de la mécanique quantique proposés par le groupe du SPP, un compteur rapide de multiplicité des particules chargées produites dans chaque annihilation a été ajouté autour de la zone d'interaction. Pour installer ce nouveau détecteur (une chambre proportionnelle multifils pouvant supporter des flux élevés de particules), la cible d'hydrogène a été remplacée par une nouvelle plus petite à très haute pression (30 bars). Cette modification de l'appareillage a permis d'accumuler au cours de la dernière année de prise de données autant d'annihilations $p\bar{p}$ avec un K^0 ou un \bar{K}^0 que pendant les cinq années précédentes. Cette amélioration, proposée par les physiciens du SPP, a été étudiée et réalisée par les services techniques du DAPNIA, en collaboration avec le CERN en ce qui concerne la cible d'hydrogène à haute pression.

Analyse des données

Le groupe de physiciens du SPP a pris une grande part dans le développement des outils de reconstruction et de sélection des événements qui ont été utilisés dans le traitement des données provenant de l'appareillage. Ils ont ainsi créé une boîte à outils informatique, utilisée par toute la collaboration qui permet de sélectionner de manière efficace les différents types d'événements. Le groupe a aussi pris part au traitement des données expérimentales et à la simulation nécessaire à l'analyse.

Parmi les voies de désintégration du K^0 étudiées dans l'expérience CPLEAR, les physiciens du SPP se sont particulièrement investis dans l'étude des canaux $\pi^+\pi^-$ et semileptonique. Un physicien du SPP avait la responsabilité d'organiser le groupe d'analyse semileptonique au sein de la collaboration. L'étude de ces deux voies a permis de mesurer les paramètres de la violation de CP et de T ainsi que de vérifier la conservation de la symétrie CPT.

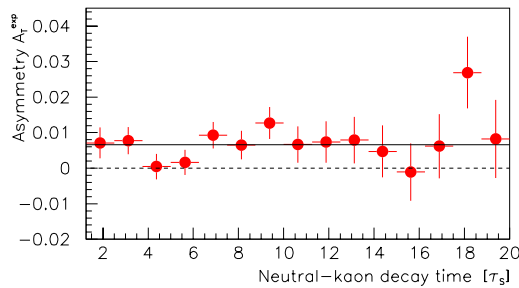
Étude de la violation de CP

La façon dont on a étudié la violation de CP dans l'expérience CPLEAR a été de comparer deux réactions physiques qui sont l'image l'une de l'autre à travers le "miroir" CP. Toute différence de comportement entre les deux réactions est une preuve directe de la violation de CP. Une étude précise de ces différences a permis de mesurer les paramètres du modèle phénoménologique qui décrit cet effet. Les deux réactions comparées sont : $K^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ et $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$, qui sont bien conjuguées par l'opérateur CP. Le but de l'analyse développée en partie par les physiciens du SPP a été de sélectionner les événements avec le minimum de biais possible. En effet, il était très important de ne pas introduire d'erreurs de mesure systématiques qui auraient pu induire une différence de comportement entre les deux réactions, et ainsi simuler un effet de violation de CP. Afin de mieux contrôler les effets systématiques pouvant affecter les résultats des mesures, une prise de données spécifique a été réalisée au cours de l'année 1996 en vue de mieux connaître l'effet de l'interaction des particules K^0 et \bar{K}^0 avec la matière composant l'appareillage (effet de régénération). Cet effet était mal connu dans le domaine d'énergie utilisé dans l'expérience CPLEAR et limitait la précision de la mesure. Les résultats de cette analyse ont été publiés et ont permis la finalisation de l'étude de la violation de CP dans le canal $\pi^+\pi^-$, qui vient d'être

soumise à publication.

Étude de la violation de T

Comme l'interaction faible ne conserve pas l'étrangeté, les processus virtuels de désintégration et de réinteraction permettent l'oscillation du K^0 en \bar{K}^0 et réciproquement. L'invariance par renversement du cours du temps (symétrie T) dans les processus élémentaires impliquerait que les taux de transition $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ et $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ doivent être égaux. Dans l'expérience CPLEAR, il a été possible de comparer expérimentalement ces deux taux et ainsi de mettre en évidence, pour la première fois de manière explicite, une violation de la symétrie T. En effet, nous connaissons l'étrangeté du kaon neutre produit à l'origine, grâce à la charge du kaon chargé, et nous pouvons identifier l'étrangeté au moment de la désintégration en identifiant la charge du lepton de désintégration (règle $\Delta S = \Delta Q$). Le résultat (voir figure) montre une telle violation à plus de quatre écarts standards, les deux taux de transition différant de : $A_T = (6.6 \pm 1.3 \text{ (stat)} \pm 1.0 \text{ (syst)}) 10^{-3}$. Il est important de noter que cette mesure n'avait jamais été réalisée auparavant et que, pour la première fois, on a pu mettre en évidence une non-réversibilité d'un processus élémentaire.



Ce résultat a été l'un des faits marquants de la DSM de l'année 1998. Il a donné lieu à un communiqué de presse conjoint CEA-IN2P3 et a été largement repris dans la presse quotidienne et scientifique grand public.

L'analyse des désintégrations semileptoniques a aussi permis de mesurer de manière précise la différence de masse entre le K_S et le K_L , de contrôler la validité de la règle $\Delta S = \Delta Q$, de mettre une limite supérieure sur la possibilité d'une violation de la symétrie CPT dans les désintégrations semileptoniques, mesure qui n'avait jamais été réalisée auparavant.

Étude de la violation de CPT

En prenant les résultats trouvés par les deux analyses précédentes, il est possible de calculer la différence de masse entre le K^0 et le \bar{K}^0 . Cette mesure permet de vérifier expérimentalement la validité du théorème CPT. En utilisant les mesures de CPLEAR, on trouve une limite qui approche les 10^{-19} GeV. Outre le fait qu'elle est la plus précise à ce jour, cette limite est particulièrement intéressante car elle permet d'approcher des domaines où des effets de gravitation quantique pourraient se manifester.

Test de la mécanique quantique

L'annihilation d'antiprotons à l'arrêt peut créer deux kaons neutres, principalement par la réaction : $p\bar{p} \rightarrow K^0 \bar{K}^0$. La mécanique quantique prévoit que l'évolution des deux kaons est décrite par une seule fonction d'onde. Il existe donc une corrélation entre le comportement probabiliste des deux kaons bien qu'ils soient spatialement séparés : ils ne peuvent pas se trouver dans le même état après avoir vécu des temps égaux. Ceci est une manifestation du paradoxe EPR (Einstein, Podolsky, Rosen). Profitant de la présence du régénérateur de carbone installé en 1996 qui couvre un angle azimutal de 120 degrés autour de la cible, des données ont été prises après l'adjonction d'un absorbeur en cuivre sur les 240 degrés restants. L'interaction d'un K^0 dans un des deux absorbeurs permet d'identifier son état d'étrangeté au moment de l'interaction. L'expérience a consisté à vérifier que la corrélation entre les étrangetés des deux kaons suit bien les prédictions de la mécanique quantique. L'analyse a montré que c'est effectivement le cas et prouve pour la première fois la non-séparabilité du système $K^0 \bar{K}^0$. La mesure d'un des deux kaons permet donc de déterminer l'état du second au même instant bien qu'il ne soit pas mesuré directement.

L'expérience NA48

L'expérience NA48 proposée en 1990, a été approuvée par le CERN et par le SPP en 1991. Elle est constituée de 16 laboratoires regroupant environ 150 physiciens. L'objectif essentiel de l'expérience réside dans la mesure avec une précision d'environ $2 \cdot 10^{-4}$, du paramètre ϵ'/ϵ qui caractérise la violation directe de CP lors de la désintégration du kaon neutre en deux pions. La technique expérimentale repose sur la mesure du double rapport :

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)} / \frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \equiv 1 - 6 \operatorname{Re}(\epsilon'/\epsilon)$$

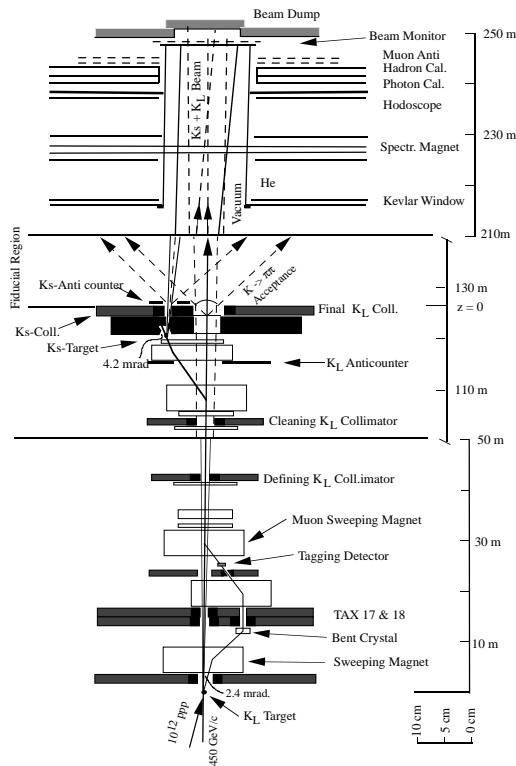
Il s'agit donc d'une expérience de comptage. Pour atteindre la précision voulue, 4 à 5 millions d'événements provenant du canal de désintégration $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ (le mode le plus rare) sont nécessaires. Afin de minimiser les erreurs systématiques sur la détermination du rapport ϵ'/ϵ , les quatre canaux sont mesurés simultanément dans le même espace de désintégration des K_L et des K_S . L'utilisation d'un spectromètre magnétique à haute résolution pour la détection des modes chargés $K_{L,S} \rightarrow \pi^+ \pi^-$ et d'un calorimètre électromagnétique à krypton liquide quasi-homogène pour les modes neutres $K_{L,S} \rightarrow \pi^0 \pi^0$ permet en outre de limiter les niveaux de bruit de fond à quelques pour mille.

Le DAPNIA a pris en charge la réalisation et le fonctionnement en faisceau des quatre chambres à dérive du spectromètre magnétique ainsi que du système de déclenchement de l'expérience pour la reconstruction en ligne des événements $K_{L,S} \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Le laboratoire a aussi contribué d'une manière essentielle à la construction d'un prototype de calorimètre à krypton liquide de même qu'à la conception et à l'assemblage du calorimètre électromagnétique final. Les physiciens du SPP ont de plus la responsabilité du programme de reconstruction des traces dans le spectromètre

et du programme de simulation détaillée de l'expérience. Ils sont en outre fortement impliqués dans l'analyse des données.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental NA48 est schématiquement représenté dans la figure ci-dessous.



Le dispositif expérimental NA48

Il comprend:

- 1) Une cible de production de K_L située à 216 mètres en amont du détecteur et suivie d'aimants de déflexion et de collimateurs qui permettent de définir le faisceau neutre de K_L .
- 2) Une cible de production de K_S située 120 mètres après la cible de K_L , elle aussi suivie d'aimants et de collimateurs. Les faisceaux de K_L et de K_S , de quelques millimètres de diamètre, sont séparés verticalement de 7 cm au niveau de la cible K_S et convergent au centre du calorimètre. De la sorte, l'acceptance du détecteur pour les produits des désintégrations de K_S est pratiquement la même que pour ceux de K_L .
- 3) Un système d'étiquetage des protons : les protons sortant de la cible K_L et déviés vers la cible K_S sont interceptés par un ensemble de compteurs en scintillateur. Il permet de définir une porte temporelle de quelques nanosecondes qui valide les désintégrations du K_S en deux pions.

4) Un spectromètre magnétique constitué de quatre chambres à dérive octogonales de 2,7 mètres d'envergure. Elles sont placées de part et d'autre d'un aimant dipolaire de 0,7 T qui induit sur les particules chargées une déflexion équivalente à une impulsion transverse de 267 MeV/c dans le plan horizontal. La résolution spatiale des chambres à dérive est meilleure que 100 μm pour chacune des coordonnées.

5) Un hodoscope fait de deux plans orthogonaux de scintillateurs pour le déclenchement des événements $K_{L,S} \rightarrow \pi^+\pi^-$ et pour la mesure précise du temps des traces ($\sigma_t < 400$ ps) traversant le spectromètre.

6) Un calorimètre électromagnétique à krypton liquide, segmenté en 13000 cellules, utilisé pour la mesure des canaux $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$. Les résolutions en énergie et spatiale à 20 GeV sont respectivement de 1,1% et de 1 mm environ, et la résolution temporelle meilleure que 300 ps à 50 GeV en faisceau d'électrons. Ce calorimètre permet en outre de rejeter efficacement le bruit de fond K_{e3} par la comparaison de la mesure d'énergie des particules dans le détecteur avec celle de l'impulsion dans le spectromètre.

7) Un calorimètre hadronique pour la mesure de l'énergie totale des produits de désintégration des K^0 .

8) Un détecteur fait d'un assemblage fer-scintillateur pour l'identification des muons et la réjection du bruit de fond $K_{\mu 3}$.

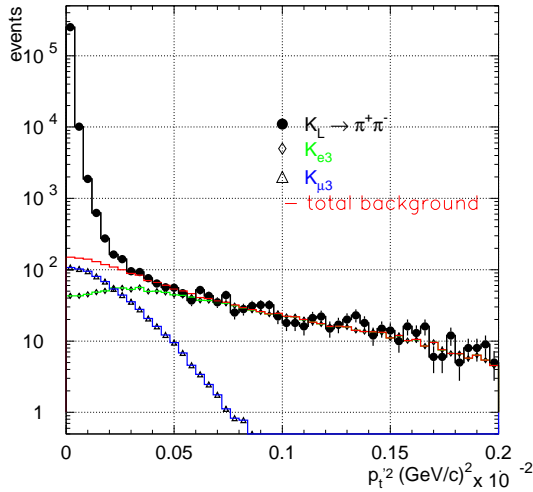
Prise de données et analyse

La prise de données de l'expérience NA48 a débuté en septembre 1997 après l'installation et la mise en route du système complet de lecture du calorimètre à krypton liquide. Elle s'est déroulée pendant 42 jours durant l'automne 1997 et s'est poursuivie sur une période de 120 jours au cours de l'été 1998.

Pendant la campagne de mesures de 1997, environ 650 000 désintégrations $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ dans la région d'énergie des K^0 comprise entre 70 et 170 GeV ont été observées. L'intensité moyenne du faisceau de protons sur la cible de production de K_L était de 10^{12} protons par cycle SPS (2,4s), soit les 2/3 de sa valeur nominale. Un volume de 25 Téraoctets de données a été enregistré avec une vitesse de lecture de l'ordre de 80 Mégaoctets/s.

L'analyse des données recueillies en 1997 est très avancée et confirme les performances attendues du détecteur NA48. En particulier, une efficacité de détection supérieure à 99,98% a été obtenue pour le système d'étiquetage des protons sur la cible K_s , indépendante du mode observé, chargé ou neutre. Les performances du calorimètre électromagnétique à krypton liquide ont été très satisfaisantes bien que le détecteur ait fonctionné avec une haute tension limitée à 1,5 kV en raison de condensateurs de découplage défectueux. La linéarité de la réponse du calorimètre a été vérifiée à mieux que 0,2% sur une plage d'énergie de 5 à 100 GeV et la résolution obtenue sur la masse reconstruite de π^0 est de 1,1 MeV/c². En ce qui concerne le spectromètre magnétique, l'efficacité moyenne des plans de lecture des chambres était supérieure à 99% et la résolution sur la masse reconstruite des K^0 pour les événements $\pi^+\pi^-$ d'environ 2,6 MeV/c². Les niveaux

résiduels de bruit de fond pour les modes recherchés $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ et $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ sont respectivement de 0,3% et de 0,1% après les coupures d'analyse. A titre d'exemple, la figure ci-dessous montre la distribution de l'impulsion transverse au carré (P_T^2) pour les événements $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ et pour les sources de bruit de fond résiduel provenant des désintégrations $K_{\mu 3}$ et $K_{e 3}$.



Contribution des différentes sources de bruit de fond au mode de désintégration $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$

La précision attendue sur la valeur du paramètre $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ avec les données prises en 1997 devrait être comparable à celles des expériences antérieures faites au CERN (NA31) et au Fermilab (E731).

En 1998, plusieurs améliorations ont été apportées au dispositif expérimental. D'une part, les condensateurs de découplage de haute tension du calorimètre à krypton liquide ont été remplacés permettant ainsi un fonctionnement stable du détecteur à une tension de 3 kV. Par ailleurs, de nouveaux processeurs plus rapides, fonctionnant à une fréquence de 200 MHz, ont été incorporés dans le système de déclenchement pour les modes chargés. Cette modification, entièrement mise en oeuvre par le SEI et le SPP, a rendu possible l'acquisition des événements $K_{LS} \rightarrow \pi^+\pi^-$ à un taux deux fois plus élevé qu'en 1997. Elle a aussi permis l'utilisation d'algorithmes de reconstruction de traces plus complexes pour l'étude de modes de désintégration rares de K^0 impliquant quatre particules chargées (e.g. $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$). Une autre réalisation du DAPNIA en 1998 a concerné la conception et l'installation d'un tube à vide de faible masse, en fibre de carbone, en remplacement de celui initialement utilisé. La diminution de la quantité de matière dans la partie de l'appareillage la plus exposée au faisceau a apporté une baisse substantielle ($\approx 30\%$) de l'activité accidentelle dans le spectromètre. Enfin, le système d'acquisition en ligne de l'expérience NA48 a été amélioré de manière à absorber un flux de données plus important.

Environ 75 Téraoctets de données ont été enregistrées en 1998 totalisant plus de 2.10^6 événements $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ observés dans la région cinématique étudiée. La première phase de traitement des données 1998 (calibration et reconstruction) est en cours et l'analyse devrait démarrer au début de l'année 1999.

Outre le programme expérimental dédié à la mesure de $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$, plusieurs canaux de désintégration rare du K^0 ont été soumis à investigation. Citons en particulier la mesure du paramètre α_K dans le processus $K_L \rightarrow e^+ e^- \gamma$ en complément de l'étude faite en 1995 sur le mode $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$, l'observation du canal $K_L \rightarrow \pi \mu \nu \gamma$, l'étude du processus de désintégration $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$. Ce dernier mode est particulièrement intéressant puisqu'il offre la possibilité d'étudier la violation indirecte de CP et la violation de T à travers la mesure d'asymétrie de la distribution de l'angle entre les deux plans formés respectivement par les deux pions et les deux leptons. En 1998, plusieurs centaines d'événements de ce type ont clairement été identifiés et une mesure préliminaire du rapport de branchement de $(3,13 \pm 0,23) \cdot 10^{-7}$ a été obtenue, en accord avec le résultat de l'expérience KTeV au Fermilab. La détermination de l'asymétrie, bien que limitée par la précision statistique de nos mesures, est en bonne voie.

Finalement, une limite intéressante sur la production de gluinos légers a été obtenue en 1997 avec le détecteur NA48 et une mesure de la polarisation de la particule Λ^0 produite dans des interactions inélastiques pN à 450 GeV/c a été menée à bien.

L'expérience BABAR

L'objectif principal de la collaboration BABAR, forte de 500 physiciens venant de 9 pays, est de réaliser une étude complète de la violation de CP en utilisant le système des mésons B. Ce système particulier permet de vérifier que la violation de CP est réellement une particularité de la nature au niveau des quarks et peut donner une indication sur l'origine de l'asymétrie baryon-antibaryon observée dans l'Univers. Cette étude doit permettre aussi de vérifier la cohérence du modèle standard des interactions faibles, et de réduire l'incertitude sur la connaissance des paramètres de mélange des quarks relatifs à la violation de CP. En même temps que la réalisation de ce programme ambitieux, l'étude détaillée des désintégrations des mésons B et D et des leptons τ ainsi que des interactions $\gamma\gamma$ doit permettre d'améliorer notre connaissance des interactions faible, forte et électromagnétique.

Le site accueillant cette grande collaboration est le centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) en Californie, où la construction des deux anneaux du collisionneur électron-positron à haute intensité a été terminée en 1998. L'accélérateur a été étudié pour fonctionner dans le domaine d'énergie autour de la résonance $Y(4S)$ avec des faisceaux d'énergies différentes (9 GeV et 3,1 GeV). Il est prévu d'atteindre des luminosités très élevées : $3 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Afin de faciliter la mise en œuvre et d'optimiser les performances du collisionneur, un détecteur de validation a été construit et a été utilisé avant que le détecteur BABAR ne soit inséré dans les lignes de faisceau.

Le détecteur BABAR, d'environ 6 mètres de long sur 6 mètres de haut, a une géométrie cylindrique couvrant un angle solide proche de 4π . Il est composé d'un détecteur de vertex en silicium, d'une chambre à dérive centrale, d'un système d'identification de particules utilisant la détection de la lumière Cherenkov et d'un calorimètre à cristaux d'iodure de césium. Le tout est placé à l'intérieur d'un solénoïde supraconducteur engendrant un champ magnétique longitudinal de 1,5 T. Le fer canalisant le retour de champ est segmenté afin de permettre la mise en place de chambres à plans résistifs et d'identifier ainsi les muons.

Les principales étapes du projet

1993 : approbation du projet de collisionneur PEP2
1994 : approbation de la lettre d'intention de BABAR
1995 : approbation du rapport d'étude technique
1997 : premier faisceau d'électrons dans le faisceau de haute énergie et début de la validation de l'accélérateur
1998 : première collision électron-positron et achèvement de la construction du détecteur BABAR
1999 : mise en place du détecteur dans la ligne de faisceau et début du programme de physique

Implication du DAPNIA dans le projet

Le DAPNIA contribue de manière très importante au projet BABAR. L'équipe comprend 12 physiciens du SPP et un du SPhN. En outre des ingénieurs du SED, SEI et du SGPI sont fortement impliqués. Deux physiciens du SPP ont pris d'importantes responsabilités dans la gestion du projet BABAR : l'un a été co-porte-parole de la collaboration jusqu'en 1997 et est à présent co-responsable du système d'identification des particules (DIRC), l'autre est l'un des 3 coordinateurs pour l'analyse des données.

Le DAPNIA a pris part à la construction du DIRC (*Detection of Internally Reflected Cherenkov Light*) et a participé aussi à la construction du détecteur de validation en collaboration avec d'autres laboratoires du CNRS en France et des laboratoires des Etats-Unis. La principale responsabilité consiste à construire le détecteur de lumière Cherenkov et de réaliser son étalonnage ; il s'agit d'un grand réservoir rempli de 6 m³ d'eau sur lequel sont montés 11000 photomultiplicateurs, d'une grande structure métallique qui sert de blindage magnétique aux photomultiplicateurs, et d'un système de cartographie du champ magnétique. De plus, le DAPNIA a été co-responsable de la fabrication d'un détecteur en iodure de césium en forme d'anneau, en collaboration avec le LAPP d'Annecy. Cet appareillage a servi comme détecteur de validation de PEP2 en mesurant le niveau de bruit de fond généré par l'accélérateur ainsi que sa luminosité.

La construction du détecteur Cherenkov s'est terminée en 1998 de manière tout à fait satisfaisante. Il a été testé avec le rayonnement cosmique et les premiers résultats ont démontré que les performances visées pourront être atteintes.

La préparation de l'analyse des données représente un gros effort au sein du DAPNIA en ce qui concerne la programmation. En plus de la responsabilité du programme de reconstruction du DIRC, le groupe a été très impliqué dans plusieurs ateliers BABAR qui ont étudié les performances du détecteur. Les sujets étudiés sont le mélange des mésons B, la mesure des paramètres V_{cb} et V_{ub} et la mesure de la violation de CP dans les voies $\pi\pi$, $\rho\pi$ et $\rho\rho$ et ont fait l'objet de plusieurs chapitres du « Physics Book » de BABAR publié en 1998. Ces efforts seront poursuivis au sein des groupes de physique de BABAR qui analyseront les premières données, attendues pour l'été 1999.

Les différents sujets de R&D réalisés lors de l'étude du système d'identification de particules ont abouti à de nombreuses publications, ainsi que de nombreuses présentations dans les conférences de la part de physiciens du DAPNIA.

En résumé, le DAPNIA est fortement impliqué dans l'étude de la violation de CP dans le système

du B en participant à la collaboration BABAR. Il est reconnu pour son rôle majeur et a ainsi pris de grandes responsabilités dans la collaboration.



En haut à gauche : Maquette du détecteur BABAR avec le système de détection de photons Cherenkov DIRC au premier plan (le faisceau d'électrons rentre de ce côté).

En bas à gauche : Installation de la partie avant (le faisceau de positrons rentre de ce côté).

A droite : Installation de l'enceinte de détection du DIRC.

NEUTRINOS ET MATIERE NOIRE

Les neutrinos solaires (GALLEX et LENS)

La première génération d'expériences de neutrinos solaires a non seulement établi le déficit des neutrinos solaires, mais a fortement contribué au soupçon que les neutrinos doivent changer de saveur pour expliquer les résultats expérimentaux ; une telle explication implique une masse non nulle pour le neutrino. Les résultats définitifs de GALLEX confortent cette énigme et de nouvelles idées expérimentales pourraient préciser la nature des oscillations de neutrinos.

L'expérience GALLEX, au laboratoire souterrain du Gran Sasso, a achevé sa prise de données en janvier 1997 et son bilan est largement positif. Pendant les six années de mesures, 65 expositions de 3 ou 4 semaines ont permis de mesurer le flux de neutrinos solaires pendant près de 1600 jours, le résultat final, $77,5 \pm 7,7$ SNU (*Solar Neutrino Unit*), est établi à partir du comptage d'environ 320 atomes de germanium-71 produits par l'interaction des neutrinos solaires dans les 30 tonnes de gallium du détecteur. Ce résultat est nettement inférieur aux prédictions des modèles solaires (125 - 130 SNU). Il est de plus conforté par celui des expositions du détecteur aux deux sources artificielles de neutrinos, qui ont montré que les neutrinos interagissaient et étaient détectés comme prévu ainsi que l'indique la valeur du rapport R entre les atomes de germanium-71 mesurés et prédits : $R = 0,93 \pm 0,08$. De plus la production *in situ* d'un grand nombre d'atomes de germanium-71 provenant de la désintégration d'arsenic-71, suivie de leur extraction et de leur comptage, a permis de valider solidement la technique expérimentale.

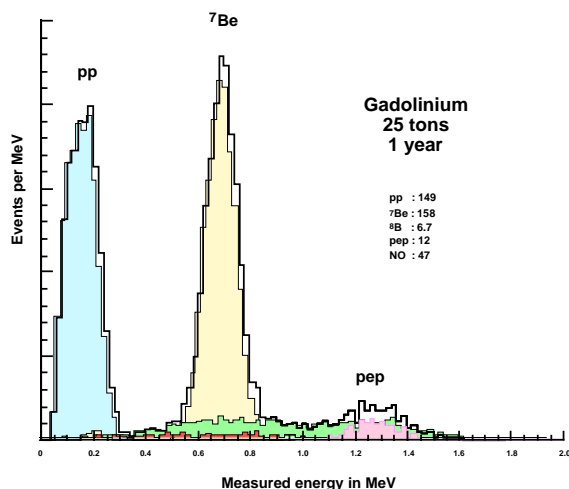
L'énigme des neutrinos solaires se présente aujourd'hui différemment que lorsque GALLEX a débuté en 1990. Les 5 expériences (chlore, Kamioka, GALLEX, SAGE et SuperKamioka) s'accordent pour observer un déficit significatif du flux attendu de neutrinos. Les solutions astrophysiques ne semblent pas capables de rendre compte des résultats expérimentaux car la combinaison de l'ensemble des résultats montre que le déficit porte essentiellement sur les neutrinos d'énergie intermédiaire, inférieure au MeV (les neutrinos du ^7Be) tout en préservant les neutrinos (pp) de basse énergie et une partie des neutrinos d'énergie plus élevée (^8B). De plus ces modèles sophistiqués rendent bien compte de toutes les autres observables du Soleil ; ils sont en particulier capables de reproduire les mesures récentes et précises de vitesse du son à quelques pour mille, y compris dans les régions centrales du Soleil, là où sont produits les neutrinos. Il semble bien que l'oscillation des neutrinos entre le cœur du Soleil et la Terre s'impose comme explication de ces déficits, sans toutefois que l'on soit capable de trancher entre les variantes de ces mécanismes (effet MSW, qui implique l'effet spécifique de la matière du Soleil, ou oscillations dans le vide) ni de choisir entre plusieurs régions (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) des paramètres de l'oscillation.

On conçoit la nécessité de mesures expérimentales les plus discriminantes possibles. La deuxième génération d'expériences (SuperKamioka, SNO) devrait apporter des indications essentielles sur la pertinence du mécanisme MSW dans la région des neutrinos les plus énergiques (> 5 MeV). Toutefois ce sont les neutrinos solaires d'énergie inférieure à 1 MeV qui sont le plus sensibles aux détails des mécanismes d'oscillations, et en même temps ceux pour lesquels les prédictions des modèles solaires sont les plus fiables. Étudier sous quelle forme et avec quel flux ces composantes de neutrinos abondamment produits au centre du Soleil parviennent sur Terre, telle est l'ambition des détecteurs de la génération suivante.

Dans ce contexte, une des idées consiste à d'utiliser comme cible une nouvelle classe de noyaux où les neutrinos, par une réaction β inverse, forment un état excité du noyau $Z+1$, mais dont l'état fondamental est plus lourd que l'état de départ. Trois de ces noyaux ^{176}Yb , ^{160}Gd et ^{82}Se ont été identifiés en 1996 par R. Raghavan. Pour prendre l'exemple du gadolinium-160, l'interaction du neutrino conduit à un état excité du terbium-160 avec émission d'un électron dont l'énergie cinétique est celle du neutrino diminuée du seuil de la réaction (244 keV) ; l'état excité métastable se désintègre avec un temps de vie de 86 ns en émettant deux photons caractéristiques (75 et 64 keV). Le seuil, très proche de celui du gallium, offre une sensibilité à l'ensemble du spectre des neutrinos solaires. Cette signature caractéristique permet de rejeter efficacement les bruits de fond. Les deux autres cibles potentielles ont des schémas de détection semblables avec des énergies et des temps caractéristiques du même ordre de grandeur.

Dans la phase actuelle de R&D qui a démarré en 1998, plusieurs techniques expérimentales sont étudiées au DAPNIA : des liquides scintillants contenant un fort pourcentage en masse (10%) de l'élément cible, des cristaux scintillants comme le silicate de gadolinium (GSO) qui avait déjà fait l'objet d'études pour le LHC, et des détecteurs utilisant un composé gazeux de sélénium avec des lectures rapides du type Micromégas. Il est proposé de vérifier si les performances nécessaires peuvent être atteintes, d'étudier les meilleures conditions expérimentales pour y parvenir, et de réfléchir à un détecteur futur.

Une collaboration, dénommée LENS (Low Energy Neutrino Spectroscopy), s'est constituée en 1998 pour coordonner les efforts de R&D dans les différents pays (Allemagne, France, États-Unis, Italie, Japon, Russie) et se prépare à exploiter cette séduisante idée pour construire un détecteur qui pourrait s'installer au Gran Sasso. Les performances espérées d'un tel détecteur devraient permettre une mesure du spectre des neutrinos solaires à basse énergie séparant clairement les composantes principales (pp et béryllium-7) comme le montre la simulation ci-dessous.



Exemple de signal attendu avec un détecteur au Gadolinium pour une résolution de 200 photoélectrons/MeV.

L'expérience NOMAD

Le but principal de l'expérience NOMAD (*Neutrino Oscillation MAgnetic Detector*) est la recherche de l'apparition de neutrinos-tau ν_τ dans le faisceau à large bande du SPS du CERN. Ce faisceau a une énergie moyenne de 24 GeV et contient essentiellement des neutrinos-mu ν_μ . Un sous-produit de l'expérience est une limite sur les oscillations de ν_μ en ν_e . La collaboration NOMAD regroupe 140 physiciens de 23 instituts.

Le détecteur NOMAD

Le détecteur NOMAD mesure et identifie la plupart des particules chargées et neutres produites dans les interactions des neutrinos dans le détecteur. La cible active est un ensemble de 44 chambres à dérive avec une masse fiducielle d'environ 2,7 tonnes et une densité moyenne faible (100 kg/m^3). Le détecteur est situé dans un champ magnétique dipolaire de 0,4 T qui permet de déterminer les impulsions des traces chargées à partir de leur courbure. La cible active est suivie d'un détecteur à rayonnement de transition pour identifier les électrons, un calorimètre électromagnétique précédé d'un détecteur de pieds de gerbe, un calorimètre hadronique et enfin de chambres à muons situées en aval de l'aimant.

En quatre ans de prises de données au CERN (1995-1998), NOMAD a accumulé plus de 2 millions d'interactions de neutrinos. L'apparition de ν_τ par oscillation est recherchée au travers des interactions par courant chargé $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$. Compte tenu de la vie moyenne du tau et des énergies considérées ici, le tau parcourt environ 1 mm avant de se désintégrer. La résolution spatiale de NOMAD, quoique bonne, n'est pas suffisante pour reconnaître des traces aussi courtes. C'est pourquoi les désintégrations des taus sont recherchées en utilisant des critères topologiques et cinématiques, se basant en particulier sur une mesure précise de l'impulsion transverse manquante dans l'état final.

Cette méthode de recherche est rendue possible par les qualités spécifiques du détecteur NOMAD, capable de :

- 1) Mesurer les impulsions des particules chargées dans les chambres à dérive avec une bonne précision.
- 2) Identifier et mesurer les électrons et les photons.
- 3) Identifier et mesurer les muons.
- 4) Rejeter efficacement les traces susceptibles de simuler électrons et muons.

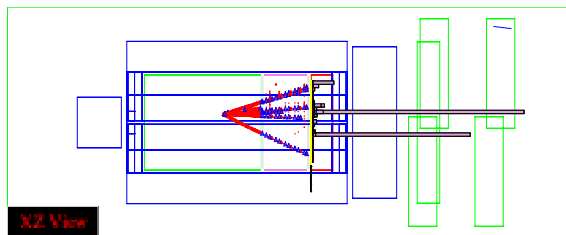
Les chambres à dérive

Le DAPNIA a eu la responsabilité de construire 55 grandes chambres à dérive (3 mètres x 3 mètres). Ces chambres, qui fournissent en même temps le matériau-cible et assurent la mesure de l'impulsion des particules chargées, constituent une partie cruciale du détecteur. Elles ont été conçues avec la double nécessité (conflictuelle) de fournir une masse de cible importante afin d'obtenir un grand nombre d'interactions de neutrinos et de minimiser la diffusion multiple des particules chargées afin de bien mesurer leur impulsion.

C'est pourquoi le choix s'est porté sur l'utilisation de matériaux composites, composés d'éléments de faible numéro atomique Z, de sorte qu'il y ait moins de 1 % d'une longueur de radiation entre

deux plans de mesure consécutifs. Ces chambres, bien que de construction délicate, ont finalement donné entière satisfaction et correctement fonctionné pendant les 4 ans de prise de données (au lieu des 2 ans initialement prévus). Dans les conditions normales d'opération des chambres, l'efficacité typique d'un fil est de 97 % (l'essentiel de la perte étant dû aux barrettes supportant les fils). La résolution spatiale, obtenue après alignement de tous les fils à l'aide de muons traversant tout le détecteur et une détermination très détaillée de la relation temps-distance, atteint en moyenne 150 μm , c'est-à-dire une valeur proche de la précision intrinsèque attendue. Un gros effort d'améliorations successives du programme de reconstruction des traces chargées, auquel Saclay a participé activement et qui est sur le point d'aboutir, laisse espérer une amélioration substantielle de la séparation entre le signal recherché et les divers bruits de fond.

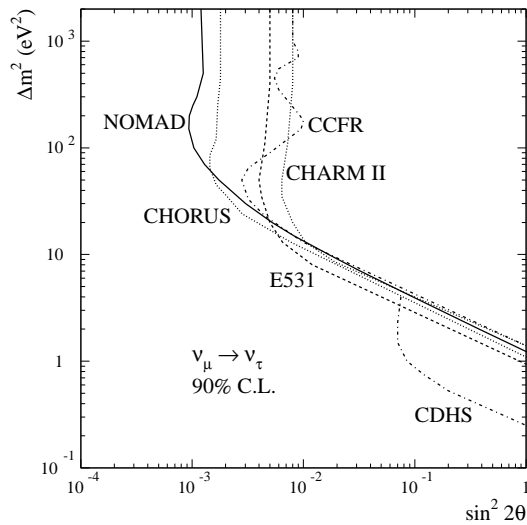
La figure ci-dessous montre un exemple de reconstruction d'une interaction de neutrino observée dans NOMAD.



L'excellente performance des chambres est le résultat d'un effort commun de plusieurs services du DAPNIA. La conception des chambres et l'outillage ont été faits avec l'aide du SGPI. Quinze techniciens du SED (avec l'aide d'autres services) ont installé la ligne de montage et construit les chambres. Les techniciens du SIG ont conçu et réalisé le système de gaz pour les chambres, en incluant le logiciel pour le monitoring. Le SEI a conçu l'électronique rapide pour ces chambres.

Situation actuelle

La collaboration NOMAD vient de publier les résultats d'une recherche d'oscillations de ν_μ en ν_τ basée sur les données accumulées jusqu'en 1997, ce qui représente 60 % de la statistique totale. L'absence de signal observé permet de mettre une limite sur ces oscillations 4 fois plus basse que celle obtenue par les expériences précédentes. Ce résultat est montré sur la figure ci-après.



L'ajout des données prises fin 1997 et en 1998, ainsi que les récentes améliorations de la reconstruction, devraient permettre de publier dans le courant de l'année 2000 un résultat encore meilleur. Une thèse va être soutenue en 1999 à Saclay sur la recherche d'interactions de ν_τ dans lesquelles le tau produit se désintègre en p .

Il faut également signaler qu'outre la recherche d'oscillations, le grand nombre d'événements accumulés par NOMAD avec une cible de densité voisine de celle des chambres à bulles à hydrogène permet d'explorer en détail bien d'autres processus induits par les neutrinos, comme par exemple la production de particules charmées, sujet ayant fait l'objet de 2 thèses à Saclay.

Le programme EROS

Le SPP a commencé à s'intéresser au problème de la matière sombre il y a une quinzaine d'années, en la recherchant tout d'abord sous forme de particules (les WIMPs pour Weakly Interacting Massive Particles, voir section suivante). Par la suite, cet intérêt s'est élargi à la recherche de corps macroscopiques, des astres sombres compacts de notre galaxie.

La matière sombre

Les indices de la présence de matière sombre dans les galaxies spirales - dont la Voie Lactée est un exemple - sont de nature observationnelle et théorique. Par exemple, les courbes de rotation de ces galaxies présentent des vitesses anormalement élevées à grande distance du centre, compte tenu de la matière visible sous forme d'étoiles, de gaz ou de poussières ; dans certains cas, il faudrait dix fois plus de matière qu'on n'en voit pour rendre compte de ces vitesses. Par ailleurs, les abondances mesurées des éléments légers primordiaux - tels le deutérium ou le lithium - impliquent qu'il y a plus de nucléons dans l'Univers que nous n'en voyons. C'est le

rapprochement de ces deux faits qui amène à l'hypothèse que la matière sombre des galaxies soit entièrement sous forme de matière ordinaire, de nucléons. Dans ce cas, elle pourrait être sous forme de noyaux atomiques, soit dans des astres compacts trop légers pour entretenir un cycle complet de réactions thermonucléaires (astres de masse inférieure à 8% de la masse du Soleil) soit dans des produits finals de l'évolution stellaire - naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs. La détection directe de tels objets est difficile, voire impossible parfois.

Les microlentilles gravitationnelles

On ne semblait donc pas capable de tester cette hypothèse quand, en 1986, B.Paczynski (Princeton) suggéra de recourir à une détection indirecte par la déflexion gravitationnelle de la lumière provenant d'étoiles extra-galactiques. Quand l'étoile-source, l'objet sombre et l'observateur terrestre sont presque parfaitement alignés - à mieux qu'un millième de seconde d'arc - la lumière de la source peut arriver à l'observateur en passant des deux côtés de l'astre sombre ; ce dernier reçoit alors plus de lumière de la source qu'en l'absence d'astre sombre sur la ligne de visée : c'est le phénomène de microlentille gravitationnelle. Le corollaire d'un alignement si parfait est la grande rareté du phénomène : si toute la matière sombre galactique est sous forme de tels astres, on peut au mieux espérer observer un événement par million d'étoiles surveillées et par an. Comme les acteurs du phénomène de microlentille sont tous trois en mouvement, les physiciens doivent rechercher des étoiles apparemment banales dont la luminosité croît puis décroît à mesure que l'astre-lentille s'approche puis s'éloigne de la ligne de visée de l'étoile. La durée du phénomène est d'autant plus grande que la masse de l'astre sombre est importante ; un astre d'une masse solaire provoque un phénomène qui dure plusieurs mois.

C'est fin 1989 que trois groupes décidèrent de se lancer à la recherche des microlentilles. Deux d'entre eux, l'un français, EROS, pour Expérience de Recherche d'Objets Sombres et l'autre australo-américain MACHO, pour Massive Astronomical Compact Halo Objects commencèrent à suivre plusieurs millions d'étoiles du Grand Nuage de Magellan, galaxie satellite de la nôtre, suffisamment proche pour présenter les millions d'étoiles résolues nécessaires à la détection du phénomène. Le groupe polonais OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), quant à lui, se concentra sur l'observation du centre de notre galaxie.

C'est un groupe de physiciens du SPP qui a lancé le projet EROS et qui y joue depuis un rôle moteur ; le porte-parole et le coordinateur technique de l'expérience sont des physiciens du SPP. Le groupe du SPP participe à la quasi-totalité des analyses décrites ci-après.

Etat actuel des recherches de microlentilles

Les années 1997 et 1998 ont vu l'achèvement de l'analyse des données enregistrées lors de la première phase du programme EROS (1990-1995) ; en parallèle, la prise de clichés de la deuxième phase (1996-2002) s'est intensifiée et les premières analyses de ces données ont été menées. Les deux caméras mosaïques de 8 CCD (32 millions de pixels chacune), construites au DAPNIA, ainsi que les automates, l'électronique et l'informatique associées fonctionnent de manière fiable depuis leur installation en juin 1996.

Les principales conclusions tirées de la phase EROS-1 ainsi que des résultats des autres groupes

sont les suivantes. Tout d'abord, la réalité du phénomène de microlentille est clairement établie. Plusieurs centaines d'événements ont été détectés dans la direction du centre de notre galaxie (en particulier par OGLE et MACHO). Certains d'entre eux présentent des courbes de lumière « exotiques » - lentille double, modulations dues au mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil ou bien de l'étoile source autour d'un compagnon - qui apportent plus d'informations qu'un phénomène classique ; ils sont inexplicables autrement que par un effet de microlentille.

Ces observations vers le centre galactique ne contraignent pas directement le problème de la matière sombre - elles ne sondent pas le halo - au contraire des observations des Nuages de Magellan, qui ont permis d'établir deux résultats sur la masse manquante de notre galaxie. Tout d'abord, des astres sombres d'une masse comprise entre un dix-millionième et un pour cent de la masse du Soleil ne constituent pas une fraction substantielle de cette matière sombre : ceci se déduit de l'absence de phénomènes de lentille de durée inférieure à deux semaines, résultat qui a fait l'objet d'une analyse combinée des observations de MACHO et d'EROS. Par contraste, EROS a détecté deux candidats d'une durée de l'ordre du mois et MACHO a présenté une dizaine de candidats d'une durée un peu supérieure. Si ces phénomènes sont bien dus à des astres sombres du halo galactique, on pourrait en conclure qu'entre 10 et 50% de la masse du halo est sous forme de tels objets, ayant une masse de l'ordre de la moitié de celle du Soleil. Il pourrait donc s'agir d'étoiles naines rouges ou naines blanches, auquel cas les plus proches d'entre elles devraient être détectables directement aujourd'hui ou dans un futur très proche. Si ces objets restent indétectés, il ne resterait que deux hypothèses : soit ce sont des astres bien plus petits, tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs, soit les phénomènes de lentille observés sont dus à des astres de masse un peu plus faible situés dans les Nuages de Magellan eux-mêmes.

Observations des Nuages de Magellan

Les considérations qui précèdent guident la stratégie scientifique d'EROS-2 sur le problème de la matière sombre. Le but est de répondre aux questions suivantes : y a-t-il des étoiles variables d'un type inconnu qui contaminent le lot de candidats obtenus à ce jour ? Où sont situés les astres-lentilles, halo galactique ou Nuages de Magellan ? Pour répondre à la première question, EROS observe maintenant plus de trente millions d'étoiles, soit près de dix fois plus que dans EROS-1, avec une meilleure précision. Pour répondre à la seconde question, plusieurs angles d'attaque existent. Tout d'abord, on peut comparer les propriétés des phénomènes de microlentilles observés vers le Grand et le Petit Nuage de Magellan, dont les directions sont assez proches. Si ces propriétés sont significativement différentes, la balance penchera en faveur de lentilles situées dans les Nuages.

Pour l'instant, deux événements de microlentille ont été observés vers le Petit Nuage (SMC). Le premier est d'une durée supérieure à tous ceux observés vers le Grand Nuage (LMC), ce qui est peu naturel si les lentilles sont situées dans le halo. De plus, malgré sa grande durée, EROS a constaté que le mouvement circulaire de la Terre autour du Soleil ne provoquait aucune déformation visible de sa courbe de lumière : ceci indique que la lentille est bien plus proche du Petit Nuage que du Soleil. L'observation de cet unique candidat a permis à EROS de contraindre encore un peu plus la quantité de matière sombre sous forme d'astres compacts du halo et d'éliminer ainsi la moitié de la zone favorisée par les résultats du groupe MACHO (voir figure ci-dessous).

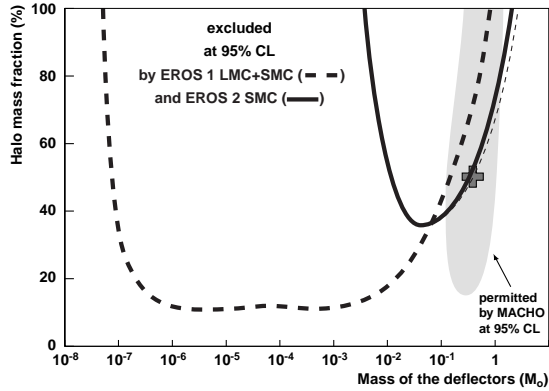
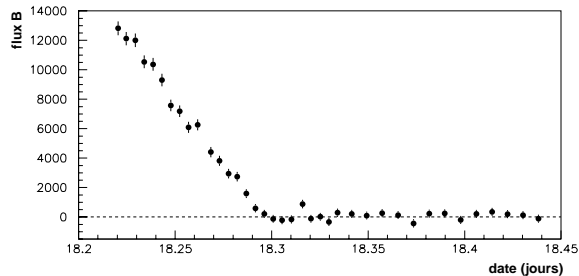


Diagramme d'exclusion de masse des constituants du halo galactique (EROS-1 vers les Nuages de Magellan – tirété- et EROS-2 vers le Petit Nuage de Magellan -continu). Les zones exclues sont au-dessus des 2 courbes. La zone en grisé correspond au domaine compatible avec les résultats de MACHO, la croix indiquant leur valeur la plus probable, marginalement compatible avec la limite d'EROS-2.

Une autre approche consiste à exploiter des phénomènes de microlentille « exotiques », plus riches en information. C'est le cas du deuxième événement vers le SMC, qui a été détecté par le groupe MACHO sur une étoile très faible et a donné lieu à l'observation spectaculaire par une vaste collaboration internationale d'un phénomène rare, le passage de l'étoile source derrière une « courbe caustique » le 18 juin 1998. Il s'agit de variations extrêmement rapides et importantes de la luminosité de l'étoile, provoquées par le fait que l'astre faisant lentille est double. La mesure de ces variations renseigne sur la vitesse de la lentille double par rapport à l'étoile source, qui est plus faible si cette lentille est dans le Petit Nuage. C'est bien ce qui a été observé, en particulier par EROS qui a été le seul groupe à observer en détail la fin du phénomène (voir figure ci-dessous).



Luminosité de l'étoile du SMC subissant un phénomène de microlentille double en fonction du temps. Seul le passage derrière la courbe caustique le 18 juin 1998 tel qu'il a été mesuré par EROS est présenté. La théorie prévoit le comportement linéaire puis quasi-constant de la luminosité qui est observé. Le fait qu'aucune courbure ne soit visible au début des observations permet de conclure que la vitesse projetée de la lentille double par rapport à la source est faible, et donc que la lentille est située dans le SMC.

Du côté du Grand Nuage, l'analyse de plus de vingt millions d'étoiles est en cours et devrait aboutir en 1999. Il sera en particulier intéressant de voir si EROS confirme ou non le résultat de MACHO, et si la distribution spatiale des événements observés est uniforme ou ramassée vers le centre du Grand Nuage (une distribution uniforme est attendue si les lentilles sont dans le halo galactique).

Observations dans notre galaxie

En direction du bulbe galactique, la stratégie suivie par EROS-2 est complémentaire de celle du groupe MACHO. Alors que ces derniers surveillent un grand nombre d'étoiles (vingt millions) sur un faible champ (dix degrés carrés), nous avons décidé de suivre, sur un plus grand champ d'environ 80 degrés carrés, les cinq millions d'étoiles les plus brillantes, en particulier les géantes rouges. Avec le programme décrit ci-dessus, on compte observer au moins une vingtaine de phénomènes de microlentille par saison. L'analyse des trois premières saisons de données est en cours et devrait aboutir à de premiers résultats en 1999.

Parallèlement, le système d'alerte en ligne sur des événements de microlentille a été testé en avril-mai 1998 sur un dixième des champs observés vers le centre galactique. Quatre candidats ont été détectés en cinq semaines, dont trois ont été confirmés par MACHO et OGLE. Ce système sera pleinement en service en 1999. Il permettra de suivre à la fois les Nuages de Magellan et la zone du centre galactique.

Une spécificité des observations « galactiques » d'EROS-2 est l'observation d'étoiles du disque, relativement éloignées du centre et du bulbe, jusqu'à 60 degrés. Le but de ce programme est d'étudier la variation du taux d'effet de microlentille avec la longitude galactique : on s'attend à ce que ce taux décroisse quand la ligne de visée s'éloigne du centre, mais la décroissance dépend de la distribution de matière au sein du disque de notre Galaxie. EROS-2 surveille un total de neuf millions d'étoiles du disque, dans quatre directions. L'analyse des deux premières saisons a permis de trouver trois événements microlentilles dont un de grande amplification et un qui présente une modulation due à une binarité de l'étoile-source. Le faible taux d'événements mesuré ainsi que les longues durées sont en bon accord avec des modèles simples du disque galactique; ceci confirme *a contrario* que la plupart des événements observés en direction du bulbe, plus nombreux et plus courts, sont dus à des lentilles situées dans le bulbe.

Recherche directe d'astres du halo

Dans l'hypothèse où les candidats microlentilles vers les Nuages de Magellan sont dûs à des astres sombres du halo, il est aisé de calculer la densité locale de tels astres du halo dans le voisinage solaire. Ces astres seraient en train de traverser le disque galactique à grande vitesse, ce qui rendrait leur mouvement angulaire visible à l'échelle de l'année ou de quelques années. Comme les résultats actuels peuvent s'interpréter avec des lentilles d'environ 0,5 masse solaire (voir plus haut), ces astres pourraient être directement observables malgré leur très faible luminosité, à condition qu'ils passent dans le voisinage immédiat du Soleil (quelques dizaines de parsecs). Pour tenter de détecter quelques uns de ces objets à grand mouvement propre, EROS mène un programme spécifique d'observation d'environ quatre cents degrés carrés sur plusieurs années, quelques fois par an. Ce programme a des exigences bien différentes de celles des recherches de microlentilles. Ce qui compte, ce n'est pas le nombre d'étoiles surveillées ni d'obtenir des clichés fréquents, mais le volume total accessible - donc l'angle solide - et la durée totale du programme.

A ce jour, les deux premières époques ont été analysées. Une sélection des objets présentant un déplacement marqué (seulement quelques pixels) a permis la découverte de deux étoiles naines

proches, une naine brune et une naine de classe L. Cette dernière est le compagnon d'une étoile plus brillante, ce qui lui permet d'être la première de sa classe dont la distance soit connue. Ces deux naines sont plus probablement dans le disque que dans le halo galactique. Aucun candidat naine blanche n'a été détecté, ce qui permet de contraindre l'abondance de tels objets dans le halo. La troisième époque de clichés est en cours d'analyse. Comme ce programme utilise en partie les mêmes champs que la recherche de supernovas (voir section suivante), il s'effectue en parallèle sans nécessiter d'observations supplémentaires.

Recherche d'explosions de supernovas

L'intérêt d'une recherche systématique de supernovas (SN) vient de ses implications cosmologiques. Les supernovas de type Ia représentent à l'heure actuelle l'un des meilleurs indicateurs de distance des galaxies lointaines. La détection d'un grand nombre de ces supernovas doit permettre tout d'abord de vérifier la qualité de ces indicateurs de distance, et donc de « corriger » ou rejeter certaines supernovas atypiques.

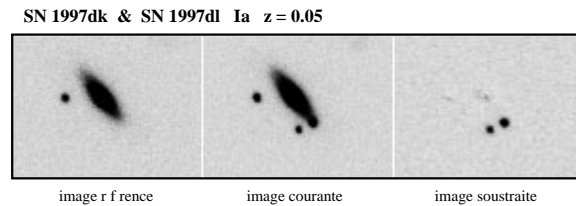
Le diagramme de Hubble (magnitude versus décalage vers le rouge, ou redshift z), des SNIa détectées permet ensuite d'estimer, par comparaison avec des supernovas plus proches dont la luminosité est connue, la constante de Hubble. Une fois cette calibration réalisée pour des z compris entre 0,02 et 0,20 environ, il est ensuite possible d'observer l'incurvation de la relation redshift-magnitude dans le diagramme de Hubble pour des SNIa de grand redshift ($z > 0,4$) ce qui donne accès au paramètre de décélération q_0 . Un tel programme contribue ainsi à la détermination des paramètres dynamiques de l'Univers (vitesse d'expansion, densité).

Deux groupes, le *Supernova Cosmology Project* (SCP) et le *High- z Supernova Search*, ont annoncé en 1998 l'observation d'une incurvation significative dans le diagramme de Hubble qui favorise l'hypothèse d'une constante cosmologique non nulle. Cette conclusion repose de manière cruciale sur la comparaison de SN relativement proches et de SN lointaines détectées par ces deux groupes. La principale incertitude vient du fait que les deux groupes utilisent le même lot de SN proches, découvertes en utilisant des plaques photographiques. C'est pourquoi les deux groupes souhaitent confirmer ce résultat à partir d'un échantillon de SN proches indépendant, découvertes à partir d'observations CCD, ce qui permettrait de s'affranchir de cette incertitude.

EROS-2 est bien placé pour une telle recherche de SN proches, grâce à sa caméra à grand champ qui permet de surveiller un grand nombre de galaxies lointaines dans un temps raisonnable. Nous menons depuis 1996 un programme qui utilise les mêmes clichés que le programme de recherche directe d'objets proches faiblement lumineux. La difficulté principale en est que les candidats SN doivent être détectés si possible avant le maximum de lumière de l'explosion, car c'est cette quantité qui est portée dans le diagramme de Hubble. Si un candidat est détecté et confirmé la nuit suivante, l'information est répercutée à d'autres télescopes qui peuvent effectuer une photométrie plus précise ou prendre des spectres de la supernova pour s'assurer qu'elle est bien du type Ia.

A la fin 1998, EROS-2 avait détecté 30 SN, ce qui correspond au nombre attendu et a permis une mesure du taux d'explosion des SNIa. Ces supernovas ont des redshifts compris entre 0,02 et 0,25. (Petite curiosité : nous avons observé une galaxie où deux SN étaient visibles

simultanément, voir figure).



Une galaxie située à un décalage vers le rouge de 0,05 où, malgré la rareté du phénomène, deux supernovas (SN1997dk et SN1997dl) ont été détectées simultanément.

Parallèlement à ces premiers résultats encourageants, EROS a obtenu du temps d'observation sur d'autres télescopes de l'ESO à La Silla, puis a engagé une collaboration avec le groupe SCP. Une campagne conjointe d'observations est organisée pour le premier trimestre 1999, où EROS jouera entre autres le rôle de « découvreur de supernovas » qui seront ensuite suivies par de plus gros télescopes.

Etoiles variables

Une retombée naturelle de la recherche d'effets de microlentille est l'obtention d'importants catalogues d'étoiles variables. Parmi celles-ci, certaines sont particulièrement intéressantes à cause de leurs implications pour la mesure des distances extra-galactiques, comme les Céphéides des Nuages de Magellan. Elles présentent une relation linéaire entre les logarithmes de leur période et de leur luminosité absolue ; les Céphéides sont par exemple utilisées par le *Hubble Space Telescope* pour mesurer la distance des galaxies de l'amas de la Vierge.

EROS-2 a consacré un programme d'observation dédié aux Céphéides du LMC et du SMC dans la saison 1996-97. Près d'un millier de Céphéides ont été identifiées et leurs relations Période-Luminosité ont été étudiées. Ceci contribuera à une mesure plus précise de la distance des Nuages de Magellan.

Cette étude a fourni un résultat surprenant. La relation Période-Luminosité des Céphéides du petit Nuage de Magellan présente une non-linéarité pour les étoiles dont la période de pulsation est inférieure à 2 jours. Cet effet n'était prédit par aucun modèle et il n'avait jamais pu être observé car aucun échantillon important de Céphéides de basse période n'avait été obtenu jusque là. Son interprétation n'est pas encore établie. Cette découverte n'affecte pas la détermination des distances extra-galactiques par le télescope Hubble car celle-ci s'appuie sur les Céphéides les plus brillantes, qui sont aussi celles de longue période.

Un autre travail en cours concerne l'estimation de la profondeur des Nuages de Magellan en utilisant les Céphéides. (Un outil important pour cette étude est l'identification d'amas stellaires contenant plusieurs Céphéides.). Ce travail aurait comme conséquence une meilleure estimation du taux d'événements de microlentille dûs à des astres des Nuages de Magellan. Une fois cette étude menée sur les petites zones étudiées à ce jour (deux degrés carrés dans chaque Nuage), il faudra l'étendre à une dizaine de degrés carrés au moins. On voit là que la boucle est bouclée : les étoiles variables, retombée des recherches de microlentille, permettraient à leur tour d'éclairer le

problème de la localisation des lentilles.

Matière Noire sous forme de particules

La recherche de Matière Noire sous forme de particules a commencé à Saclay il y a une douzaine d'années. Après une première expérience (la recherche de cosmions) utilisant une diode au silicium classique réalisée à Berkeley et calibrée à très basse énergie dans un faisceau de neutrons à Bruyères-le-Châtel (CEA), deux lignes de recherche ont été développées au SPP, la première utilisant les cristaux scintillants et la seconde des détecteurs cryogéniques (bolomètres). Cette recherche s'est focalisée depuis 1997 sur les bolomètres, après l'arrêt de la prise de données avec les scintillateurs NaI au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM).

Ces deux dernières années, une activité d'analyse importante sur les données NaI obtenues au LSM, utilisant notamment la connaissance de la forme des signaux de scintillation pour la discrimination du bruit de fond, a néanmoins été poursuivie et a donné lieu à un article détaillé, en cours de publication. Deux notes critiques (preprints DAPNIA) ont d'autre part été rédigées au sujet d'une possible « indication » de modulation annuelle du signal, comme signature de l'existence d'un neutralino de 60 GeV, présentée par le groupe italien DAMA.

Sur le plan technique, un détecteur NaI à boîtier démontable sous circulation d'azote a été réalisé au LSM. Il a pour but la mesure du bruit radioactif à très basse énergie des composants des installations EDELWEISS. Un autre banc de test utilisant un scintillateur plastique a été spécialement développé au LSM pour la détection du rayonnement β émis par des échantillons de ces mêmes composants.

Les principales activités en 1997-98 avec les bolomètres se sont faites dans le cadre de la collaboration EDELWEISS entre le CEA (DSM/DAPNIA et DRECAM) et le CNRS (IN2P3/CSNSM et IPN Lyon, INSU/IAP, SPM/CRTBT), dont le porte-parole est un physicien du SPP. Elles comportent :

1) la calibration d'un détecteur de 70 g en germanium avec obtention d'une excellente séparation entre reculs de noyaux et reculs d'électrons, en juillet 1997 au LSM. Ce succès a été suivi d'une prise de données avec le même détecteur, permettant d'atteindre un taux de comptage inférieur à 0,6 événement/kg/jour/keV, dans la région d'énergie de recul de 15 à 45 keV. Ceci représente un gain en sensibilité d'un facteur 500 par rapport à l'expérience réalisée en 1994-95.

2) le déménagement de l'installation EDELWEISS I au fond du hall du LSM, accompagné de plusieurs améliorations (système d'amortissement sur les tuyaux de pompage, enceinte étanche pour circulation d'azote 'anti-radon', blindage de paraffine, nouveau câblage, etc.). Cette nouvelle installation a été validée par des runs de test avec 2 détecteurs de 70 g.

3) le lancement d'une R&D au DAPNIA/SED sur les détecteurs ionisation-chaleur, en particulier sur les senseurs thermiques NTD, le câblage et les supports mécaniques pour 3 nouveaux bolomètres de 70 g et pour les 3 premiers bolomètres de 320 g. Une nouvelle procédure de fabrication a été mise en place en impliquant les industriels pour certaines étapes, en vue de sous-

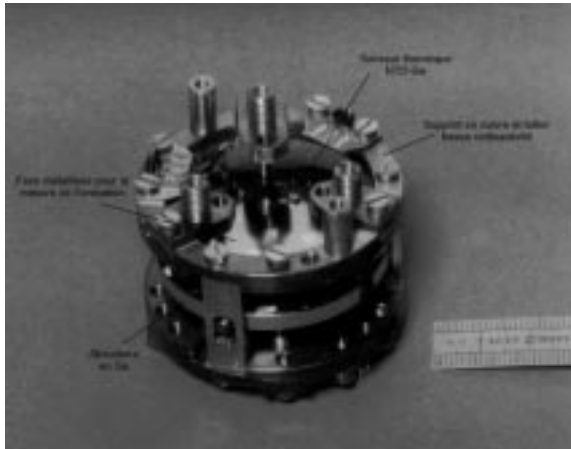
traiter la fabrication des futures séries de détecteurs.

4) l'installation d'un banc de test par les services SED et SGPI (réfrigérateur avec son banc de circulation des fluides, blindage, système d'acquisition, etc.) pour ces différents types de bolomètres et pour ceux qui suivront.

5) le démarrage de l'étude d'un système d'acquisition adapté à la phase EDELWEISS II (20 puis 100 bolomètres de 320 g chacun).

6) la prise en charge du système de contrôle (l'automate par le SIG et le logiciel par le SPP) du banc de circulation des fluides (en cours de réalisation par le DRECAM/SPEC) pour le réfrigérateur à dilution de 100 litres, en cours de réalisation au CRTBT à Grenoble.

En résumé : l'installation EDELWEISS I au LSM est prête pour l'étape dite « 1kg »; les 3 cristaux de Ge de 320 g sont pratiquement prêts à être testés en voie ionisation, et le banc de test à Saclay est dans sa phase d'achèvement.



Premier bolomètre chaleur-ionisation (masse du cristal de Ge : 70 g)

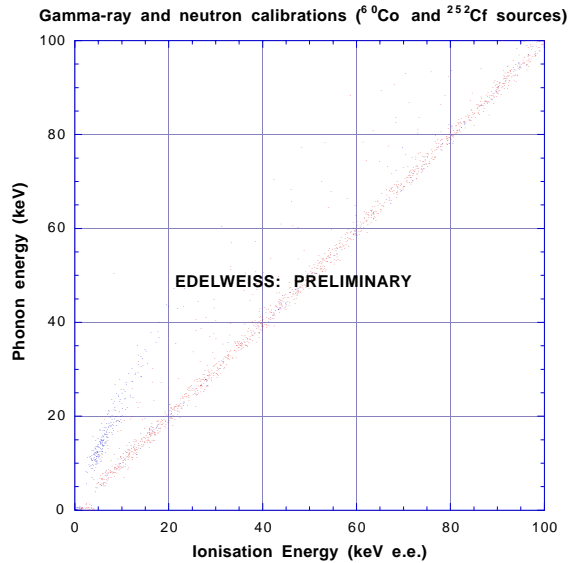


Diagramme de calibration du premier bolomètre chaleur-ionisation en neutrons et gammas (source de Cf 252).

L'expérience ANTARES

Le projet ANTARES a pour but d'observer des neutrinos de haute énergie (> 10 GeV) par mise en œuvre d'un détecteur déployé au fond de la mer. Initialement destiné à la recherche de sources cosmiques de neutrinos, ce projet a considérablement évolué depuis l'été 1998, pour permettre également la détection des oscillations de neutrinos produits dans l'atmosphère terrestre.

La détection de neutrinos cosmiques de haute énergie est complémentaire de celle des gammas et pourrait même permettre une meilleure compréhension des mécanismes de production des rayons cosmiques de haute énergie ($> 10^{20}$ eV). Il y a plusieurs avantages à utiliser les neutrinos :

- 1) Ils sont neutres (comme les photons) et pointent directement sur la source puisqu'ils ne subissent pas de déviation par les champs magnétiques galactique et extragalactique.
- 2) Leur longueur d'interaction à 1 TeV est environ $2,2 \cdot 10^{11} \text{ g cm}^{-2}$. Au contraire les photons de haute énergie sont absorbés par quelques 10^2 g.cm^{-2} et leur interaction avec les photons infrarouges et le fond cosmologique à 2,7 K limite leur libre parcours moyen à environ 100 Mpc.

La méthode proposée consiste à détecter le muon produit par interaction d'un neutrino-mu ν_μ avec la matière entourant le détecteur. La section efficace d'interaction du neutrino et le libre parcours moyen du muon augmentent avec l'énergie, ce qui enrichit fortement l'échantillon en événements de haute énergie. En raison de la faible section efficace d'interaction des neutrinos, le détecteur devrait avoir une taille de 1 km^3 et être blindé contre le rayonnement cosmique de haute énergie. Plusieurs laboratoires ou collaborations envisagent aujourd'hui de construire un détecteur sous-marin de neutrinos, constitué d'un réseau de photomultiplicateurs immergés à une profondeur de plusieurs kilomètres. Les muons traversant l'eau seraient détectés grâce à la lumière Cherenkov qu'ils émettent.

Les calculs montrent que la plupart des sources gamma galactiques et extragalactiques observées par le satellite EGRET peuvent être détectées comme des sources de neutrinos de haute énergie avec un détecteur de 1 km^3 , dans l'hypothèse où le spectre des neutrinos est le même que celui

des gammas. En outre, plusieurs sources peuvent être détectées comme des émetteurs de neutrinos même si le flux de neutrinos est seulement quelques pour cent du flux de gammas. Au delà de l'importance d'une première détection des neutrinos de haute énergie venant de sources cosmiques, la mesure du rapport du flux de neutrinos au flux de gammas permettra d'améliorer considérablement notre compréhension des mécanismes de production des rayons cosmiques.

En plus de la recherche de sources lointaines de neutrinos, la détection d'interactions de neutrinos à proximité de l'une quelconque des lignes, produisant un muon vertical dont le parcours serait de 30 à 250 m parallèlement à la ligne, devrait permettre d'étudier le spectre en énergie des neutrinos atmosphériques produits aux antipodes et ayant donc traversé tout le diamètre terrestre. Il se trouve que si le ν_μ oscille en ν_τ , comme semblent le suggérer les résultats récents de SuperKamiokande, le spectre en énergie des événements sera modifié par rapport à ce que l'on pourrait attendre dans le cas où il n'y aurait pas d'oscillation.

Pour des énergies supérieures, allant jusqu'à quelques TeV, la détection d'un excès de neutrinos venant du centre de la Terre ou du Soleil, liés à l'annihilation de particules supersymétriques de charge nulle, pourrait fournir la preuve de l'existence de Matière Noire non baryonique dans le Halo de notre Galaxie.

En résumé, le télescope à neutrinos proposé permettra d'étudier des sujets de physique variés. A basse énergie (entre 10 et 50-100 GeV), il permettra d'étudier les oscillations de neutrinos, à des énergies intermédiaires (jusqu'à quelques TeV), c'est le problème de la masse cachée de l'Univers qui sera étudié, aux énergies supérieures (au delà du TeV), le détecteur recherchera les sources cosmiques de neutrinos de haute énergie.

La collaboration, formée en 1996 entre Marseille et Saclay, s'est agrandie et comprend aujourd'hui Amsterdam, Marseille, Moscou, Mulhouse, Oxford, Saclay, Sheffield, Strasbourg et Valence, avec une aide importante de l'IFREMER. L'activité de la collaboration s'est articulée dans deux directions : la construction d'un prototype et son déploiement à 40 km au large des côtes varoises et la mise en œuvre de systèmes autonomes capables de mesurer les paramètres marins du site choisi.

La première ligne prototype sera équipée de 16 étages éloignés l'un de l'autre de 15 mètres ; chaque étage pourra recevoir deux modules optiques. Chaque module optique est constitué d'un photomultiplicateur 8-10" protégé par une sphère en verre, résistant à la pression de l'eau. Les signaux fournis par le module optique seront envoyés à la côte par un câble électro-optique connectant une boîte de jonction sous-marine à la salle de contrôle située sur la côte. Les lignes suivantes seront déployées en les connectant à la boîte de jonction avec un sous-marin habité.



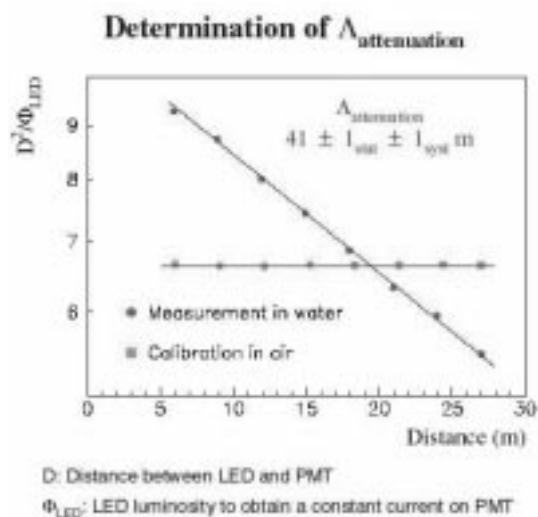
Photo 1. Mise à l'eau de la première ligne pour des essais mécaniques.

Les premiers essais mécaniques sur site à 2300 m de profondeur (photo 1) ont été effectués en juin 98 et ont été couronnés de succès. Les essais de connexion et de déconnexion d'une liaison électrique ainsi que les procédures de mise en œuvre ont été effectués en décembre 98 en utilisant le sous-marin habité « Le Nautilus » de l'IFREMER (photo 2) et ont donné entière satisfaction. Il est prévu d'immerger la première ligne équipée de 8 photomultiplicateurs et de la relier à la côte pendant le printemps 99.



Photo 2. Le sous-marin Le Nautilus lors d'une mise à l'eau.

Le programme d'évaluation des sites a fourni quantité d'informations en ce qui concerne le bruit de fond optique, essentiellement dû à la luminescence des organismes présents dans l'eau de mer et du rayonnement β du ^{40}K , de l'opacification des sphères en verre due à la sédimentation et de la transparence de l'eau. Le résultat de toutes ces mesures effectuées depuis 3 ans sur le site choisi peuvent se résumer de la façon suivante. La transparence de l'eau est tout à fait satisfaisante (longueur d'atténuation supérieure à 40 m) (voir figure ci-dessous), même au-delà de ce que l'on pouvait espérer, la sédimentation n'affecte que de façon minime (1% de perte au bout d'un an) la transparence des sphères en verre et, enfin, le bruit de fond optique est acceptable. Les courants marins sont faibles, ce qui n'amènera pas de contraintes pour la mécanique.



Mesure de la longueur d'atténuation de l'eau de mer au large de La Seyne-sur-Mer par ANTARES

AUTRES ACTIVITES

Le projet INCA

La loi du 30 décembre 1991 relative à la gestion des déchets nucléaires fixe un cadre aux recherches permettant d'apporter des solutions à cet important problème de société. Elle demande d'approfondir 3 axes de recherches : le stockage géologique, l'entreposage en surface et la transmutation des déchets à vie longue. Le CEA est bien évidemment impliqué dans ces recherches et le DAPNIA a apporté sa contribution quant aux possibilités de transmuter les actinides mineurs. En collaboration avec nos collègues du SPhN, un groupe du SPP a effectué plusieurs apports significatifs en 1997-1998. Le programme porte le nom d'INCA (incinération des déchets par accélérateur ou incinération des actinides).



L'étude globale des stratégies pour l'incinération des déchets nucléaires dans les réacteurs hybrides a fait l'objet d'une thèse soutenue en décembre 1998. Ce travail, original par sa démarche et ses moyens, évalue globalement les caractéristiques que devraient avoir des réacteurs dédiés à l'incinération des déchets. Il permet ainsi de s'orienter dans la multitude des options techniquement possibles.

Cette étude a révélé l'imprécision de plusieurs sections efficaces susceptibles de jouer un rôle important. En particulier, l'incertitude par un facteur 20 de la section efficace de capture des neutrons sur l'état fondamental de l'américium-242, rendait très aléatoire certaines incinérations. Le groupe DAPNIA (SPhN et SPP) a effectué plusieurs irradiations d'américium-241 à l'ILL de Grenoble. L'analyse des résultats nous a permis de confirmer la valeur basse de cette section efficace, ouvrant la voie à l'incinération de cet isotope-déchet.

Les réacteurs hybrides, qui couplent un réacteur nucléaire sous-critique à un accélérateur de protons, ont des caractéristiques physiques particulières. Il nous a paru opportun et efficace de

développer un outil souple permettant d'étudier les caractéristiques neutroniques de ces nouvelles installations. Un Monte-Carlo original, MCAP, écrit en C++, avec une interface Java très conviviale a été développé dans le service et a complété et validé les études globales de stratégies par des calculs plus élaborés.

Micromégas

Pour faire face à l'accroissement du flux des particules dans les futures expériences, et plus particulièrement celles projetées au LHC, le SPP participe avec le DAPNIA/SED au développement d'un nouveau détecteur gazeux, Micromégas, entièrement conçu au DAPNIA.

Lorsque le flux de particules chargées est supérieur à 10^4 Hz/cm², les chambres à fils classiques ne conviennent plus car elles sont inefficaces. C'est l'encombrement par les ions de l'espace de la cellule de chaque fil qui limite le flux qu'elles peuvent supporter. Le concept de Micromégas permet de franchir ce seuil.

Comme toute invention technique durable, l'idée de base en est simple et donc sa mise en œuvre industrielle rapide et peu onéreuse. De plus, une fois le détecteur construit, sa robustesse est à toute épreuve. Il n'est mécaniquement pas fragile et n'est pas destructif au-delà de ses conditions de fonctionnement standard.

Le principe de Micromégas

Dans Micromégas, le problème de l'encombrement ionique est évacué en découplant électriquement, par une grille conductrice percée d'un grand nombre de trous (typiquement un trou tous les 50 μ m), les deux zones du détecteur où règnent des champs électriques uniformes E_1 et E_2 (voir figure) : l'espace de conversion (de quelques mm) et l'espace d'amplification (de 50 à 100 μ m).

Lorsque le rapport des champs E_2/E_1 est supérieur à 20, la grille devient 100% transparente aux électrons. Chaque électron libéré dans l'espace de dérive se précipite, par effet d'entonnoir à travers un trou de la grille et passe dans le mini-espace d'amplification où il va développer une avalanche. Les ions remontent vers la grille sur une distance faible ce qui ne leur prend que 100 ns. Le problème de l'encombrement des ions est ainsi résolu.

De plus, comme l'avalanche se développe sur une distance de plusieurs dizaines de μ m, le signal électronique devient détectable.

Caractéristiques observées

La démonstration a été faite au laboratoire que le détecteur peut supporter des flux aussi élevés que 10^6 Hz/mm² de rayons X avec un gain supérieur à 10^4 . Ce qui ouvre de nouvelles perspectives, en particulier dans le domaine médical. Cependant il existe un gain maximum pour lequel s'amorcent des décharges. C'est le gain qui correspond à une charge de l'avalanche de

quelques 10^7 électrons.

Une remarquable stabilité du gain en tout point du détecteur a été observée avec des particules chargées au minimum d'ionisation (faisceau test au CERN), avec une efficacité supérieure à 98%. La résolution spatiale est essentiellement limitée par la diffusion dans le gaz. Avec un mélange gazeux peu diffusant comme He-DME (80-20 %), la précision de reconstruction du point d'impact d'une trace chargée avec le détecteur perpendiculaire à celle-ci est expérimentalement de 25 μm .

Dans un champ magnétique, le fonctionnement et plus particulièrement la résolution spatiale ne sont pas dégradés, pourvu que le détecteur soit disposé de façon à compenser l'angle de Lorentz induit (angle entre les lignes de champ électrique et la direction de dérive des électrons). Cette étude fait l'objet d'une thèse qui va être soutenue prochainement.

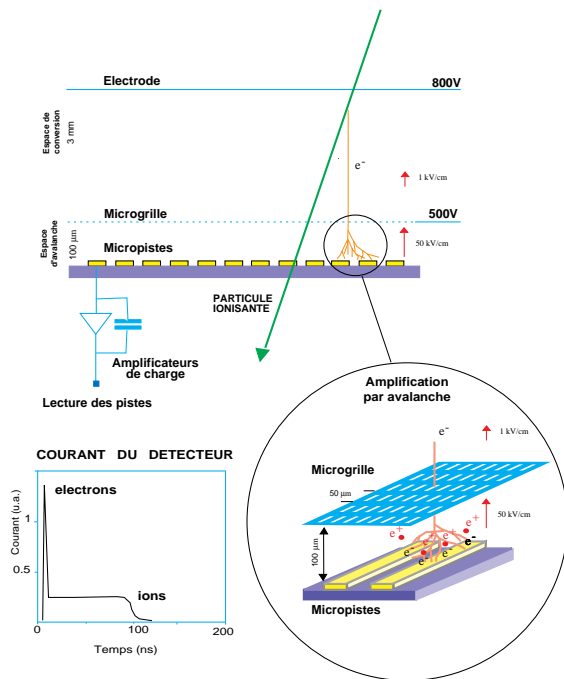
Le signal électronique a été détecté avec une préamplification adéquate. Deux électrons arrivant sur la grille séparés de 7 ns sont clairement discriminés. Ce qui ouvre un vaste champ d'applications, en particulier dans la détection par la technique TPC (Time Projection Chamber).

Une autre retombée de Micromégas est son utilisation comme photodétecteur qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet. Nous avons montré qu'en illuminant la grille par des photons UV, les photoélectrons produits sont aisément détectables.

Par ailleurs, des études de simulation sont développées. Elles sont suffisamment fiables pour rendre compte des données.

Plusieurs développements liés à Micromégas sont envisagés dans le futur : amélioration de la résolution spatiale ; diminution de l'effet des étincelles (fréquence, intensité et temps mort) ; lecture bidimensionnelle ; photodétection ; détection basée sur le signal électronique.

MICROMEGAS Micro Mesh Gaseous Structure Schema de principe



Le principe de détection de Micromégas.