



Centre de Physique des Particules de Marseille

- Physique des particules, astroparticule et cosmologie.
- Conception, développement et intégration de grands instruments.
- Transferts technologiques en imagerie : biomédicale, étude du milieu marin et grille de calcul.
- 150 chercheurs et techniciens en région PACA pour comprendre l'infiniment petit et appréhender l'infiniment grand.



Centre de Physique des Particules de Marseille
163, avenue de Luminy Case 902 - 13288 Marseille cedex 09
Téléphone : (33) 04 91 82 72 00

Le Centre de physique des particules de Marseille est un des laboratoires de l’Institut national de physique nucléaire et de physique des particules, institut du CNRS qui regroupe les moyens de la physique des particules. Le laboratoire est une unité mixte de recherche qui relève à la fois du CNRS/IN2P3 et de l’université de la Méditerranée.

Le personnel permanent du laboratoire compte aujourd’hui environ 35 chercheurs et enseignants-chercheurs et 70 ingénieurs, techniciens et administratifs, auxquels s’ajoutent une vingtaine de doctorants et visiteurs étrangers et de nombreux stagiaires.

La vocation principale du laboratoire est la recherche fondamentale en *physique des particules*, physique des constituants élémentaires de la matière et leurs interactions ; en astroparticules, observation des particules élémentaires dans l’Univers et en cosmologie observationnelle, compréhension de la composition de l’Univers primordial par l’étude et l’observation des supernovae.

Le laboratoire :

C’est une unité mixte de recherche avec le CNRS/IN2P3 (Institut de physique nucléaire et de physique des particules) et l’Université de la Méditerranée. Le CPPM est situé sur le parc scientifique et technologique de Marseille Luminy. Le laboratoire est constitué d’une centaine de permanents, d’une vingtaine de doctorants et de visiteurs étrangers.

Nos missions :

Etudier les composants ultimes de la matière et les forces qui les relient. Appréhender l’origine de la masse des particules; Comprendre le mécanisme ayant conduit à la disparition de l’antimatière au cours de l’évolution de l’Univers. Rechercher de nouvelles particules prédictes par les théories les plus avancées; Observer le cosmos par la détection des particules élémentaires de très haute énergie; Comprendre la composition de l’Univers primordial par l’étude et l’observation des supernovae.

Nos programmes scientifiques :

Les projets scientifiques de nos expériences s’inscrivent dans les problématiques et les interrogations fondamentales de notre discipline. Les expériences auxquelles nous participons sont réalisées au sein de grandes collaborations internationales. Elles sont installées auprès de puissants accélérateurs de particules, européens et américains, auprès de grands télescopes terrestres et spatiaux mais aussi au fond de la Méditerranée. Les enjeux expérimentaux de nos recherches nécessitent la mise en œuvre de moyens techniques avancés en électronique, en informatique et en instrumentation. Ils engendrent des concepts ou des produits innovants qui intéressent des scientifiques d’autres domaines. Cela nous conduit à développer des projets interdisciplinaires avec des entreprises industrielles et d’autres laboratoires régionaux, nationaux et internationaux.

Nos compétences techniques :

Les appareils que nous développons font appel aux technologies d’avant-garde en mécanique, en électronique et en informatique. Leur complexité requiert les méthodes formalisées de gestion de projets et la démarche qualité. A travers ces expertises, le Centre de Physique des Particules de Marseille peut collaborer avec les industriels dans de nombreux domaines technologiques. Les études des différents détecteurs nous conduisent à réaliser des applications dans les domaines de la santé et de l’environnement : l’imagerie médicale et l’étude des milieux marins en mer profonde en sont deux exemples.

Notre rôle dans la région :

Nous contribuons à créer un pôle de recherche d'avant-garde et de hautes technologies qui attirent les scientifiques internationaux de haut niveau. Nous participons à la diffusion des connaissances, à l'enseignement supérieur et à la formation par la recherche, à tous les niveaux, du secondaire à la formation doctorale. Nous soutenons le transfert technologique en collaborant avec les PME, PMI. Le laboratoire, de par ses activités - Antarès, micro-électronique, imagerie - travaille en étroite collaboration avec les pôles de compétitivité :« Mer », « Solutions Communicantes Sécurisées », « OPTITEC ».

Nos projets scientifiques :

Nos projets scientifiques s'inscrivent dans les interrogations fondamentales de la *physique des particules*, de l'astroparticule et de la cosmologie observationnelle :

Etudier les composants ultimes de la matière et les forces qui les relient; appréhender l'origine de la masse des particules; comprendre le mécanisme ayant conduit à la disparition de l'antimatière au cours de l'évolution de l'Univers; rechercher de nouvelles particules prédictes par les théories les plus avancées; Observer le cosmos par la détection des particules élémentaires de très haute énergie; comprendre la composition de l'Univers primordial par l'étude et l'observation des supernovae.

Les expériences auxquelles nous participons sont réalisées au sein de grandes collaborations nationales et internationales. Elles sont installées auprès de puissants accélérateurs de particules, européens et américains, auprès de grands télescopes terrestres et spatiaux mais aussi au fond de la Méditerranée.

Les enjeux expérimentaux de nos recherches nécessitent la mise en œuvre de moyens techniques avancés en électronique, en informatique et en instrumentation. Ils engendrent des concepts ou des produits innovants qui intéressent des scientifiques d'autres domaines. Cela nous conduit à développer des projets interdisciplinaires avec des entreprises industrielles et d'autres laboratoires régionaux, nationaux et internationaux.



L'expérience Antares

Le détecteur Antares est un télescope d'un genre nouveau installé au large de la Seyne-sur-Mer (Var) par 2500 mètres de profondeur. Il cherche à détecter des neutrinos de haute énergie émis par les cataclysmes de l'Univers ! La nouvelle astronomie neutrinos offre la possibilité d'observer le cœur des sources astrophysiques les plus énergétiques de l'Univers. Jusqu'à maintenant les sources de neutrinos de très haute énergie n'ont jamais été vues, contrairement aux sources de photons. Mais, la présence de rayons cosmiques de très hautes énergies laisse à penser que ce type de neutrinos doit être produit dans l'Univers. Détecter ces neutrinos est un nouveau défi à relever, car leur faible interaction avec la matière les rend extrêmement difficiles à observer. Le détecteur ANTARES est constitué d'un réseau d'un millier de photomultiplicateurs sensibles à la lumière Cherenkov. Ils sont répartis sur douze lignes de détection de près de 500 mètres de hauteur installées sur une surface d'environ un dixième de kilomètre carré au large de l'Île de Porquerolles.

L'infrastructure ANTARES constitue également une véritable plateforme d'expérimentation pluridisciplinaire permettant de nombreuses études dans les domaines des Sciences de la Mer, de la Terre et de l'Environnement.

Au CPPM, le groupe ANTARES joue un rôle moteur dans la réalisation, l'installation et l'exploitation de ce détecteur. Fort du retour d'expérience sur la construction d'ANTARES, il participe également aux travaux de conception d'un futur télescope à neutrinos sous-marin de seconde génération, visant à couvrir un volume de détection d'environ 1 km³, réalisés par le consortium européen KM3Net. Ce détecteur devrait être déployé en mer Méditerranée d'ici quelques années.

L'expérience Atlas

L'expérience Atlas est installée auprès du grand collisionneur proton-proton, le LHC, au Cern à Genève.

Atlas participera à la chasse au Higgs, particule à l'origine de la masse, et à l'étude de ses caractéristiques. La collaboration cherchera de nouvelles particules prédictes par les théoriciens pour dépasser les limites du cadre théorique actuel. La prise de données débutera en 2009.

Au CPPM, le groupe Atlas est maître d'œuvre des bouchons du calorimètre électromagnétique. Il contribue également au développement et à la réalisation du détecteur de vertex à pixels et du filtrage des événements en temps réel. Le groupe prépare l'analyse des données en étudiant les algorithmes de reconstruction du quark top. Il s'agit de mesurer avec précision ses caractéristiques. Le top peut être également associé aux modes de production du boson de Higgs et ainsi faciliter sa recherche.



L'expérience D0

L'expérience D0 est installée auprès du collisionneur proton-antiproton de 2 TeV, le Tevatron, à Fermilab près de Chicago.

Après la découverte du dernier quark top du Modèle Standard au milieu des années 90, une nouvelle campagne de mesure a démarré en 2001. Ses objectifs principaux sont la mesure précise de la masse du quark top et du boson W, la recherche du boson de Higgs - la pierre angulaire pour expliquer les masses des particules élémentaires - et la recherche de nouvelles particules (supersymétriques, leptoquarks, quarks excités, ...) nécessaires pour combler les insuffisances du cadre théorique actuel.

Au CPPM, le groupe D0 a contribué à la construction et à la mise en fonctionnement du nouveau trajectographe à micro-pistes silicium, aux algorithmes du système de déclenchement, à la calibration du calorimètre, au stockage des données sous forme condensée et à l'installation de sites de calcul à l'extérieur de Fermilab. L'activité principale du groupe est désormais l'analyse des données pour y chercher la présence de nouvelles particules. Récemment, le groupe a amélioré la limite inférieure sur la masse des quarks excités, des leptoquarks de première génération, des partenaires supersymétrique du quark top et bottom, et aussi contribué à rétrécir le domaine de masse possible où se cache le boson de Higgs. Le groupe assure aussi la coresponsabilité de l'ensemble des recherches de nouvelle physique dans D0 et est très actif dans plusieurs comités éditoriaux (ex. président).

L'expérience H1

L'expérience H1 est installée sur le collisionneur électron-proton Hera, à Desy près de Hambourg.

Depuis les années 90, la collaboration H1 étudie la structure profonde du proton et les collisions électron-quark de grande énergie.

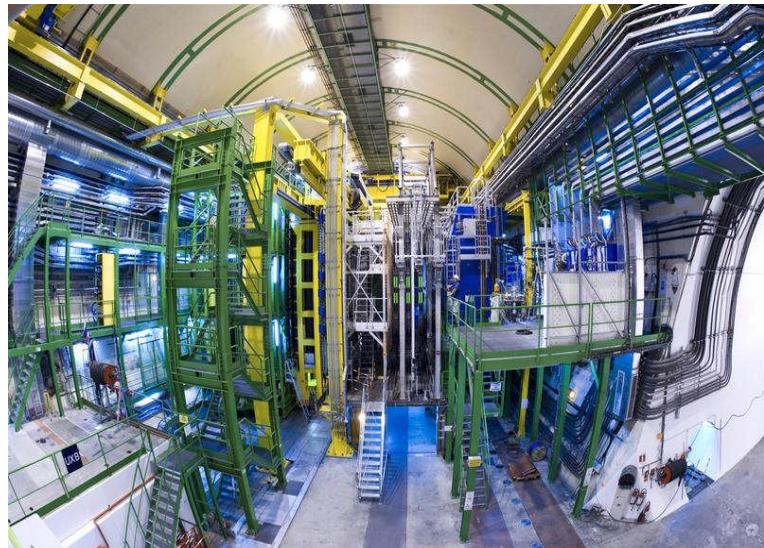
Au CPPM, le groupe H1 gère le système d'acquisition de données du calorimètre à argon liquide. Il analyse les données en recherchant des événements très rares qui pourraient révéler de nouveaux phénomènes au-delà du Modèle Standard actuel des particules élémentaires.

L'expérience LHCb

L'expérience LHCb est installée auprès du grand collisionneur proton-proton, le LHC, au Cern à Genève. Elle étudie les différences de comportement entre les particules et les antiparticules et les désintégrations rares dans les systèmes des mésons beaux. La prise de données débutera en 2009.

La théorie actuelle rend compte des différences de comportement particules-antiparticules observées dans le laboratoire auprès des kaons neutres et des mésons beaux. Mais, cette formulation théorique laisse la porte ouverte à d'autres mécanismes qui pourraient trouver leurs origines dans les extensions du modèle standard comme les modèles supersymétriques. Aujourd'hui, les mesures très précises de ces différences et la recherche des désintégrations très rares des mésons beaux sont des outils prometteurs pour révéler ces nouveaux mécanismes et pour en comprendre leur nature.

Au CPPM, le groupe LHCb est le maître d'œuvre du système de sélection à muons de premier niveau qui identifie les collisions proton-proton contenant un méson beau. Nous préparons activement l'analyse des premières données en étudiant les méthodes et les algorithmes pour mesurer : la phase faible βs dans la désintégration $B_s \rightarrow J/\Psi \mu \mu$ et le rapport de branchement de la désintégration $B_s \rightarrow \mu \mu$.



Les expériences SNLS/SNAP

Des résultats récents en cosmologie observationnelle indiqueraient que l'Univers est en accélération. La théorie de la relativité d'Einstein peut accommoder ce résultat surprenant soit à travers une constante cosmologique soit en supposant l'existence d'une nouvelle forme d'énergie appelée "énergie noire". Elle aurait les mêmes propriétés que celles de l'énergie du vide de la physique des particules et dominerait à notre époque ! Un programme ambitieux de détection se met en œuvre pour confirmer et comprendre cette avancée majeure. Il est basé entre autre sur l'observation de supernovae lointaines à l'aide de télescopes au sol ou embarqués.

Au CPPM, le groupe Renoir analyse les données supernovae des télescopes CFHT à Hawaii et VLT au Chili. Cette première étape permettra de comprendre les résultats actuels. En parallèle, le groupe participe à la définition d'un spectrographe qui sera embarqué sur le futur satellite dédié JDEM/SNAP. Cet instrument fournira des données d'une richesse et d'une précision inégalées.

Grille de calcul

Le projet EGEE III, financé par la commission européenne, est la suite des projets EGEE et EGEE II qui se sont terminés en mai 2008. La faisabilité d'une infrastructure de grille au niveau production a été démontrée avec succès pour la recherche en sciences du vivant et en physique des hautes énergies. Le but du projet EGEE III est de fournir au monde industriel et de la recherche un accès indépendant de la localisation à cette infrastructure de calcul de grille qui s'étend déjà sur plus de 50 pays et 260 sites.

Le projet se concentrera sur plusieurs axes : Combiner les grilles nationales, régionales et thématiques dans une seule et unique infrastructure pour servir la recherche scientifique et construire une grille solide pour la recherche commerciale et l'industrie; Améliorer de manière continue la qualité du logiciel afin de fournir un service fiable aux utilisateurs; Attirer de nouveaux utilisateurs scientifiques ou industriels en leur faisant découvrir le nouveau potentiel offert par cette grille de calcul et s'assurer qu'ils reçoivent une formation et un support de qualité.

La grille s'appuie sur le réseau à haut débit, GEANT, de l'Union Européenne et exploite au mieux l'expertise accumulée par les nombreux projets nationaux et internationaux de grille de calcul passés et présents. Le service informatique du CPPM fait fonctionner un nœud de grille dit « Tier-3 » qui servira les besoins des analyses des physiciens du laboratoire, ainsi que ceux d'autres scientifiques à Marseille tout en contribuant à la grille par ses éléments de calcul et de stockage. Un projet de mutualisation des moyens informatiques locaux est à l'étude. Il devrait fournir des moyens de calcul (de l'ordre de 7000 cœurs) et de stockage (environ 3 PO) à différents laboratoires universitaires et du CNRS du site de Luminy.

ImXgam

Le groupe imXgam –imagerie X et gamma– du CPPM développe une activité de recherche interdisciplinaire dans le domaine de la physique des particules appliquée à d'autres thématiques. Partant des technologies de détection de particules, d'acquisition et d'analyse de données développées pour la physique fondamentale, l'activité du groupe imXgam a pour objectif d'étudier et de démontrer, ou d'invalider, l'apport d'une technologie nouvelle dans une thématique différente de la physique des hautes énergies comme par exemple l'imagerie biomédicale ou à la cristallographie. Il mène actuellement plusieurs projets selon cet axe :

XPAD : des détecteurs à pixels hybrides

XPIX : une collaboration entre le CPPM, SOLEIL et l'ESRF

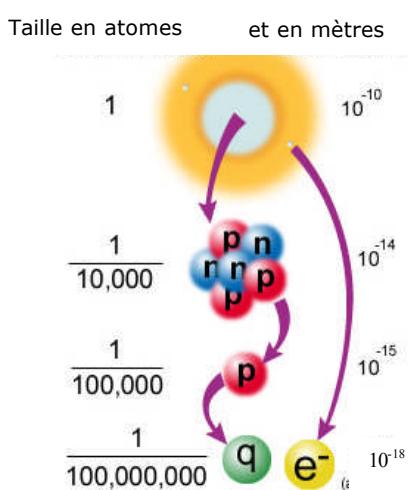
PIXSCAN : un micro-tomodensitomètre à rayons X

ClearPET/XPAD : un tomographe hybride TEP/TDM pour petits animaux

tomXgam : développement de la tomographie hybride TEP/TDM

PIXSIC : une sonde intra crânienne radiosensible pour la mesure in vivo chez l'animal vigile

De quoi sommes-nous faits ?



Nous sommes faits de quarks, électrons et de vide !



L'échange d'un ballon met en mouvement les deux barques. Le ballon joue le rôle de particule d'interaction.

La famille des particules

Démocrite (400 av. J.-C.) nous expliquait : « Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide », on peut le considérer comme l'inventeur du concept de la **particule élémentaire**. En 1935, les physiciens affirmaient : « Toute chose est faite de protons, de neutrons, d'électrons et de vide »...

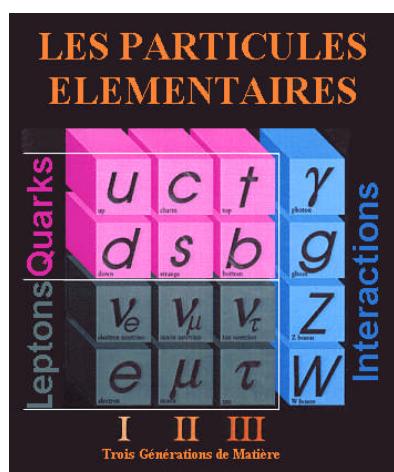
Mais nous savons aujourd'hui que les neutrons et les protons sont faits de quarks. Ainsi **quatre sortes de briques**, ni plus ni moins, permettent de rendre compte de la matière ordinaire. Ce sont les particules élémentaires appelées **quark u, quark d, électron et neutrino de l'électron**.

Quatre types de forces permettent l'interaction entre les particules. **Chaque interaction** est « véhiculée » par des **particules messagères**. La gravitation, la force qui nous est la plus familière, est la plus faible de toutes. La particule qui est censée la porter, le **graviton**, reste à découvrir. A l'autre bout de l'échelle, la force forte, portée par les **gluons**, « colle » les quarks entre eux pour former les protons et les neutrons du noyau. La force électromagnétique maintient les électrons en orbite autour du noyau et assemble les atomes les uns aux autres pour donner les molécules chimiques et biochimiques. Cette force possède comme messager : le **photon**. Enfin, la force faible produit certains types de radioactivité naturelle et contribue ainsi à faire briller les étoiles. Des particules très lourdes, les bosons **Z, W⁺ et W⁻**, en sont les vecteurs.

Pour compléter la photo de famille

Il existe **deux autres familles de particules de matière**, semblables en tout point à celle du quark u, du quark d, de l'électron et de son neutrino, mais dotées de masses plus élevées. Ces particules donnent lieu à de la **matière instable** qui se désintègre rapidement en matière ordinaire ou en énergie.

L'antimatière, qui est en quelque sorte la réflexion dans un miroir de la matière ordinaire, complète la collection des particules élémentaires. Nous savons que chaque particule est associée à une anti-particule. L'antimatière comme les particules instables existait au côté de la matière ordinaire aux premiers instants de l'univers, juste après le Big Bang.



Toutes ces particules éphémères se trouvent aujourd’hui dans tous les endroits suffisamment chauds pour les créer, **comme le cœur des galaxies** mais aussi **les accélérateurs de particules** !

Cette description de la matière et des particules d’interaction, sauf pour la gravitation, constitue ce que l’on appelle le « **Modèle standard** » des particules élémentaires.

Du « Modèle standard » au web...



Le web a été développé par les physiciens des particules !

Il y a un siècle, les scientifiques venaient de découvrir toutes sortes de **rayons mystérieux** : rayons X, rayons alpha et bêta. D'où venaient-ils ? Étaient-ils tous faits de la même chose et, si oui, de quoi ?

Ces questions ont depuis été résolues, améliorant grandement notre compréhension de l'Univers. Chemin faisant, les réponses apportées ont changé notre vie quotidienne, en nous offrant le transistor, la télévision, l'imagerie médicale, l'informatique, le « World Wide Web¹ » (WWW)...

L'étude de l'infiniment petit demande en fait des **développements technologiques d'avant-garde en électronique, informatique et mécanique**.

Ces développements ont des retombées, directes ou indirectes, dans le monde industriel ou pour des laboratoires travaillant dans un autre domaine scientifique.

Les physiciens des particules se donnent aussi pour mission de transmettre leur savoir technologique à d'autres disciplines comme les sciences de la vie, l'environnement et l'informatique.

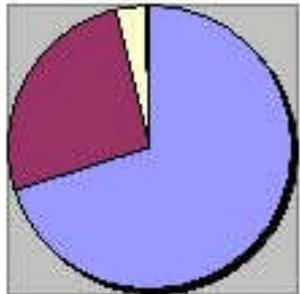


L'image médicale et la thérapie du cancer sont quelquesunes des nombreuses technologies développées par la recherche en physique des particules.

... et beaucoup reste à découvrir !

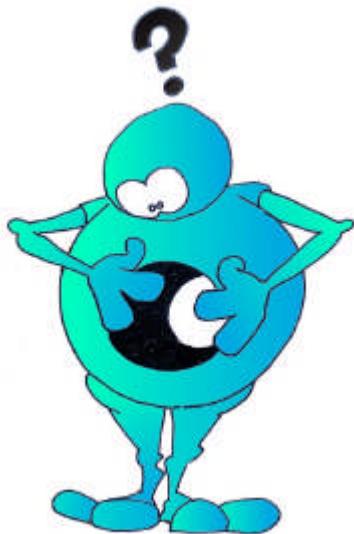
Bien que le « **Modèle standard** » résiste depuis 20 ans à l'épreuve des expériences, nous savons qu'il est **incomplet**.

(1) Le World Wide Web a été développé au CERN (« Laboratoire européen pour la physique des particules ») au début des années 90. Il fut conçu à l'origine pour améliorer et accélérer le partage des informations entre physiciens. Le Web, avec son langage HTML, est aujourd'hui à la base des interfaces graphiques de Internet.



Des résultats récents en cosmologie observationnelle indiqueraient qu'il existe une forme d'énergie inconnue, appelée "**énergie noire**", correspondant à **70%** de la densité de l'Univers. L'astrophysique indique aussi que presque **90%** de la matière dans les galaxies est invisible, il s'agirait en majorité de matière non décrite par le Modèle standard qu'on appelle « **matière noire** ». Ainsi seulement 4% environ de la densité de notre univers est décrite par le Modèle Standard. Il s'agit de **matière visible** comme les étoiles et nuages gazeux, mais surtout de **matière sombre** comme les trous noirs ou les étoiles à neutron.

Ainsi nous devons répondre à **de nombreuses questions**, notamment :



- De quoi est constituée la matière noire présente dans le cosmos ?
- L'énergie noire existe-t-elle ?
- Comment l'antimatière a-t-elle disparue au cours de l'évolution de l'Univers ?
- Pourquoi y a-t-il trois familles de particules de matière ?
- Pourquoi les particules ont-elles des masses si différentes ?
- Les particules élémentaires sont-elles vraiment «élémentaires» ?
- Existe-t-il d'autres particules que certaines théories prédisent ?

Qui peut dire où les réponses nous conduiront?

Les particules auprès des accélérateurs

Pourquoi les accélérateurs?

Pour les physiciens, les accélérateurs assurent deux fonctions.

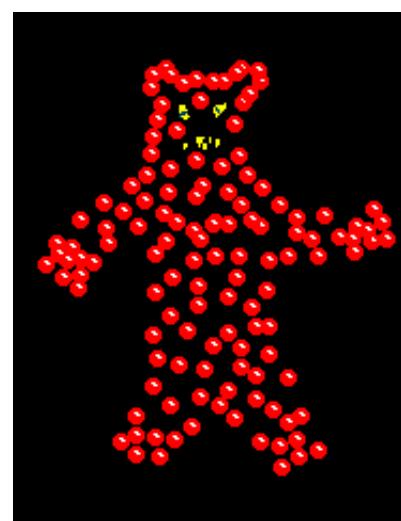
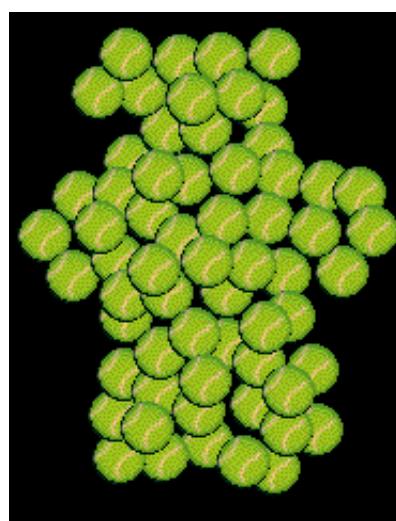
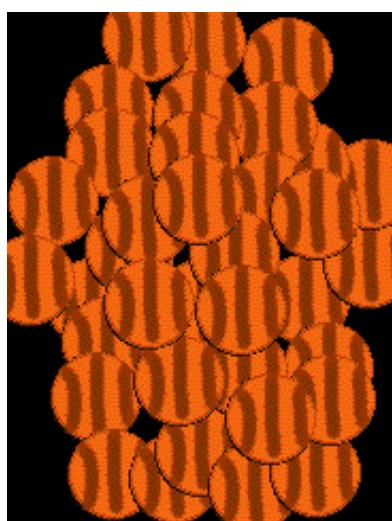


D'une part, ils **augmentent l'impulsion de la particule**. Les particules se comportent comme des ondes : en les accélérant, on diminue leur longueur d'onde. On peut ainsi les utiliser pour sonder les atomes ou les autres particules.

D'autre part, l'énergie des particules accélérées est utilisée pour **créer des particules massives** que l'on étudiera.

Le premier effet est une conséquence de la **dualité onde-corpuscule** :

Toute particule de masse m et de vitesse v se comporte comme une onde de longueur, $\lambda=h/mv$, où $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s. est la constante de Planck. Ainsi, plus l'impulsion (mv) est grande, plus la particule (la longueur d'onde) est petite et plus petits seront les « objets » que la particule sondera. Supposons par exemple vouloir, dans une cave noire, identifier un objet en face de nous. Plus petite sera la taille des ballons qu'on lui jettera, plus détaillée sera notre connaissance de l'objet ! Les accélérateurs permettent de « réduire » la taille des ballons jusqu'à moins de 10^{-18} m. Ce sont les **microscopes les plus puissants** créés par l'homme.



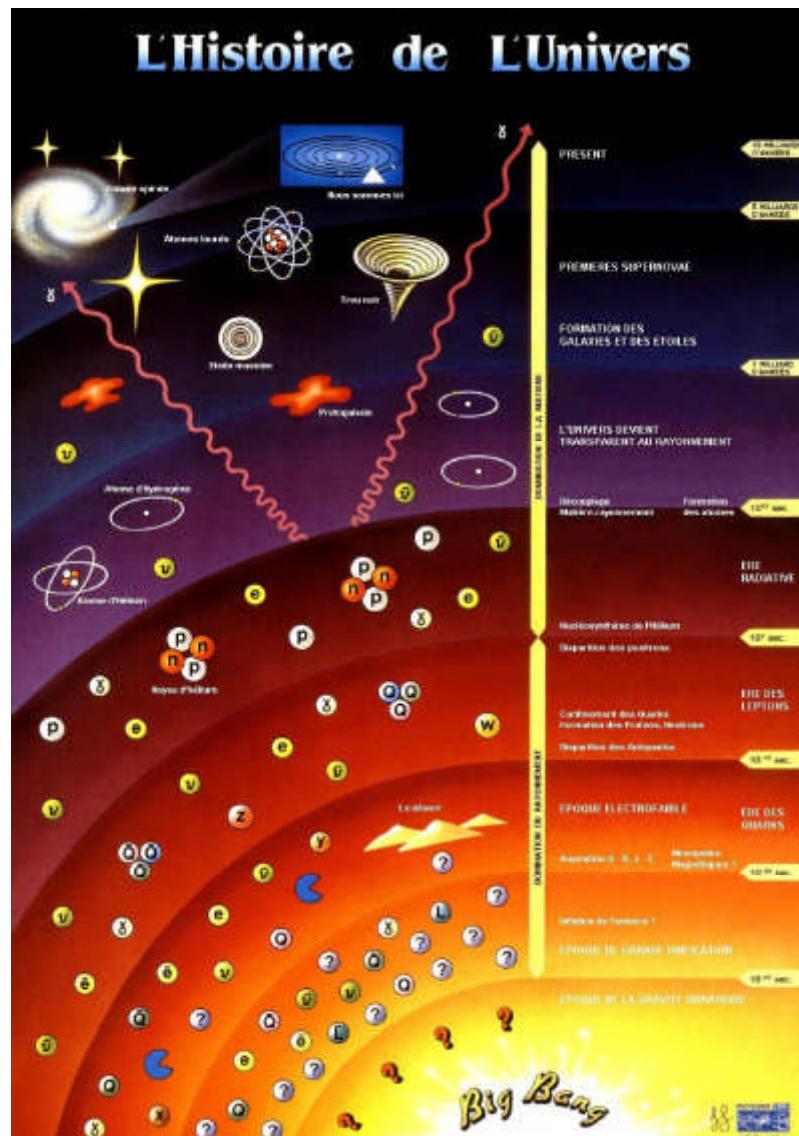
Si on jette des ballons contre un objet inconnu, ces ballons vont nous donner des informations sur cet objet. Plus les ballons sont petits, plus les informations seront précises. Plus une particule a une grande impulsion plus elle correspond à un ballon petit.



Le deuxième effet est une conséquence de la **dualité matière-énergie**, décrite par la relation $E=mc^2$ (Einstein, 1905).

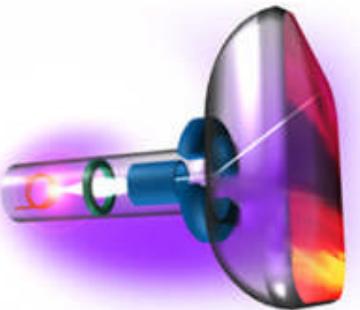
Les accélérateurs permettent de concentrer sur une particule une énorme quantité d'énergie cinétique, qui est prête à se transformer en matière lorsque la particule interagit. Les physiciens peuvent ainsi créer les particules instables associées aux quarks et leptons plus lourds. Cette concentration d'énergie reproduit en fait les conditions de l'Univers peu après le Big Bang (fraction de nano-seconde !), quand tout était un plasma de particules et d'antiparticules.

Un accélérateur peut ainsi être vu comme une **machine à remonter le temps** !



Les accélérateurs permettent de reproduire aujourd'hui l'Univers juste après le Big Bang

On accélère comment, quoi et où ?



Il existe deux types d'accélérateurs : linéaires et circulaires.



Les **postes de télévisions** constituent **les plus simples des accélérateurs** linéaires de particules : à l'intérieur du tube cathodique, des électrons sont accélérés, déviés et vont frapper l'écran afin de former une image. De façon similaire, les accélérateurs utilisent des champs électriques puissants pour transmettre de l'énergie à des faisceaux de particules. Des champs magnétiques servent également à guider les particules pour former un faisceau.

Toutes **particules chargées et suffisamment stables** peuvent être **accélérées**.

Les physiciens du CPPM travaillent aujourd'hui auprès des deux plus puissants accélérateurs circulaires au monde. Il s'agit de **Hera** avec l'expérience H1 (à Hambourg, en Allemagne) qui analyse les collisions des anti-électrons contre protons et du **Tevatron** (près de Chicago, aux États-Unis) avec l'expérience D0 qui étudie l'interaction de protons contre antiprotons.

Le CPPM est aussi largement impliqué dans la construction des détecteurs ATLAS et LHCb auprès du futur accélérateur **LHC** (Large Hadron Collider), qui sondera la matière plus profondément que jamais. Il sera installé au Cern, à Genève. Sa mise en service est prévue pour 2010 et il produira des collisions entre des faisceaux de protons à une énergie de 14 TeV².

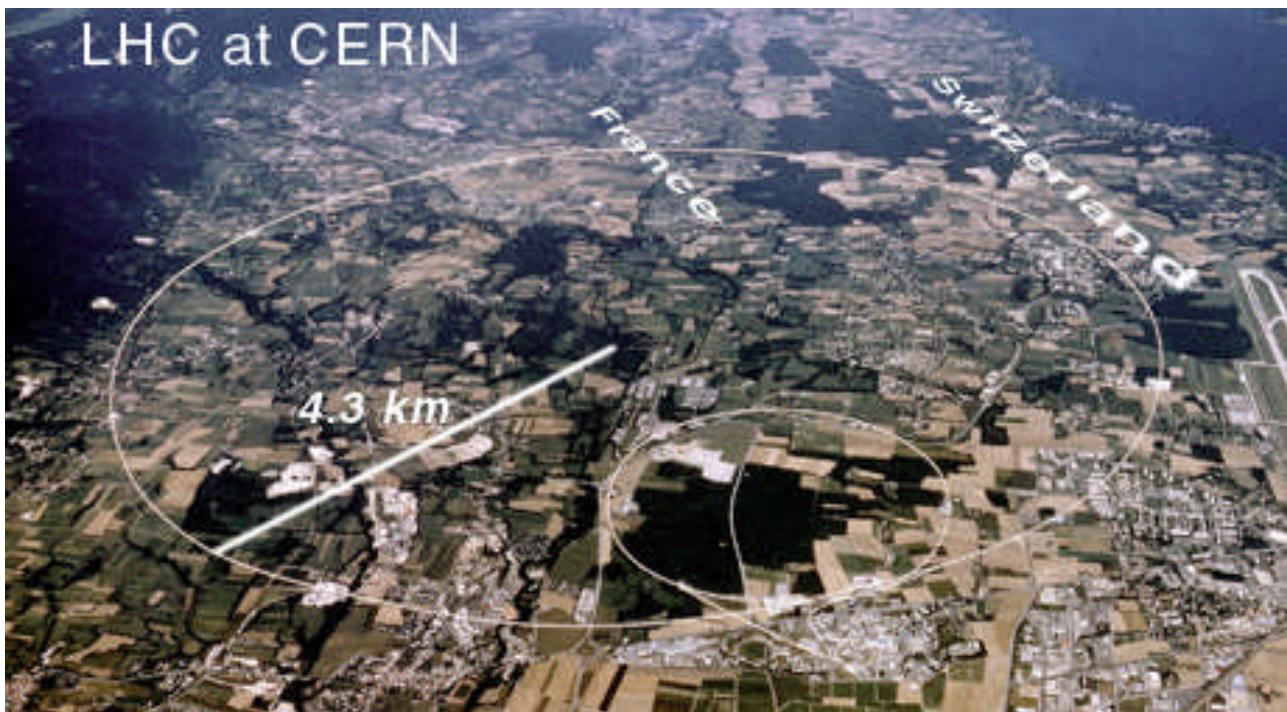


Hera accéltrait des protons à 920 GeV contre des électrons ou anti-électrons à 27,5 GeV. L'expérience H1 a pris fin à l'été 2007.



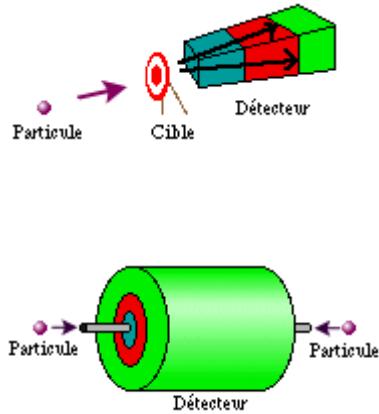
Le Tevatron accélère des protons contre des antiprotons à 900 GeV.

(2) Le TeV est une unité d'énergie utilisée en physique des particules. 1 TeV est à peu près l'énergie cinétique d'un moustique en vol. Ce qui rend le LHC si extraordinaire, c'est qu'il concentre cette énergie dans un volume environ mille milliards de fois inférieur à celui d'un moustique (source : Cern).



Le LHC produira des collisions entre des faisceaux de protons à une énergie de 14 TeV

Des détecteurs gigantesques et complexes mesurent les produits des interactions

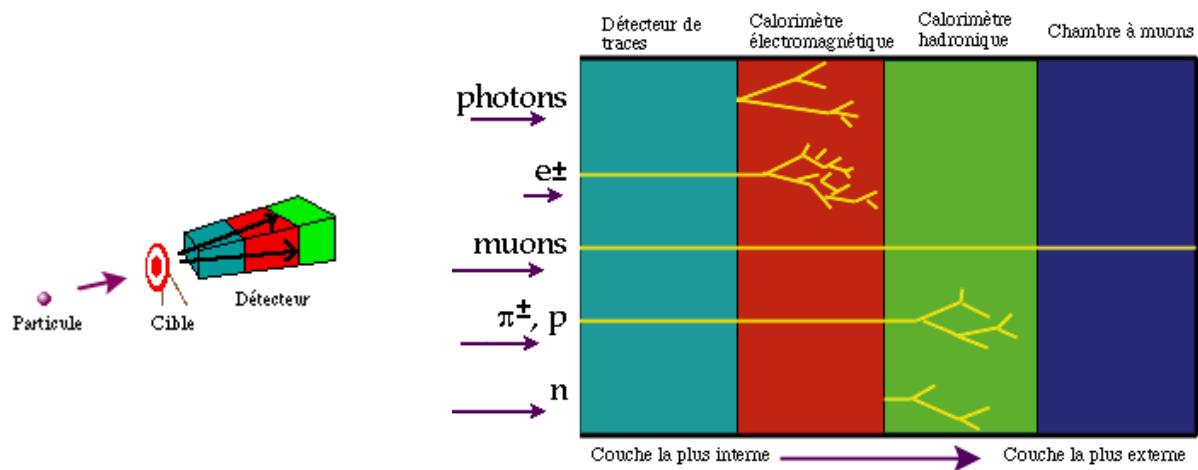


Collision à cible fixe et collision de faisceaux

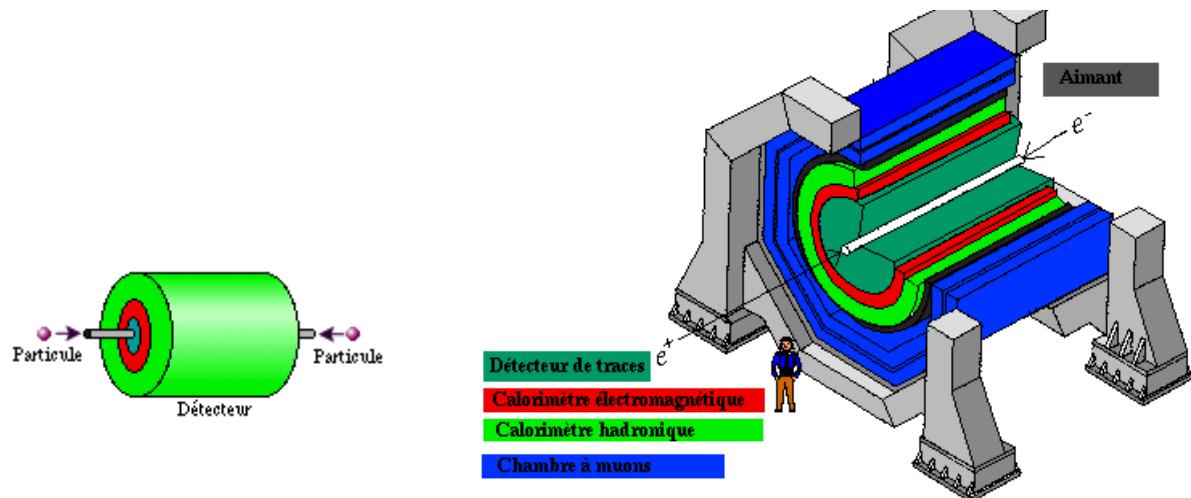
Les physiciens font interagir les **particules accélérées contre des autres particules ou des cibles fixes**.

Autour du point d'interaction, on place des détecteurs qui sont constitués de nombreux sous-ensembles qui testent chacun une propriété spécifique des particules. Ces sous-ensembles sont empilés de façon à ce que les particules traversent les différentes couches et interagissent différemment selon leur nature et énergie.

Une particule ne peut être observée que si elle interagit avec le détecteur, ou si elle se désintègre en d'autres particules, qui interagissent à leur tour.



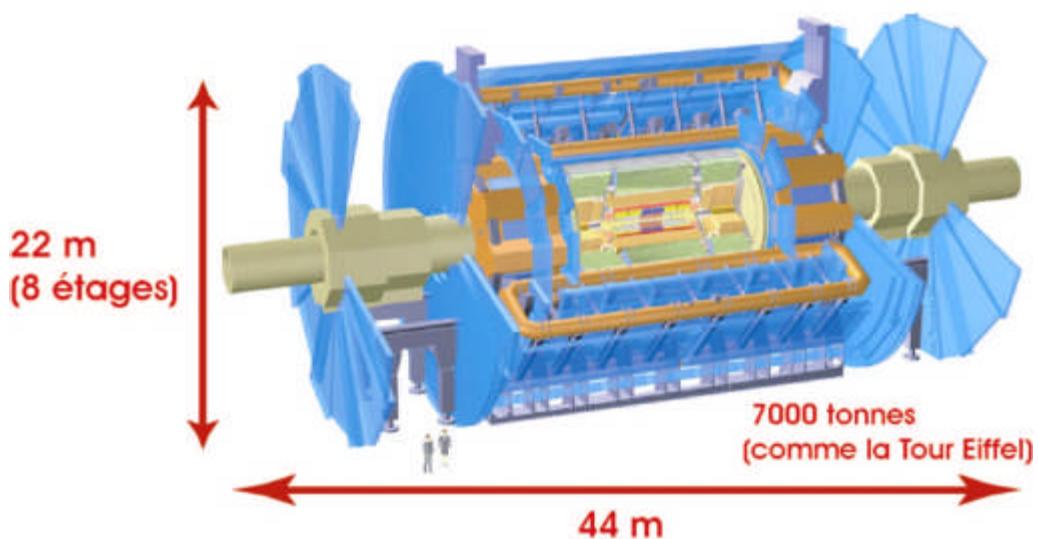
Les particules traversent les différentes couches des détecteurs et interagissent différemment selon leur nature et énergie.



Les détecteurs utilisés dans les collisionneurs ressemblent à des oignons, mais cylindriques, aussi gros que des immeubles et remplis de systèmes électroniques sophistiqués.

Le détecteur **ATLAS** construit au Cern est le **plus grand et le plus complexe jamais construit à ce jour**. Tant par le nombre de voies d'électronique (des centaines de millions) et les contraintes liées aux radiations intenses qu'il devra supporter que par le volume des données à traiter, sa réalisation implique de développer de la haute technologie dans les domaines les plus variés : mécanique, électronique, informatique mais aussi cryogénie, techniques du vide, du génie civil, de la géodésie ...

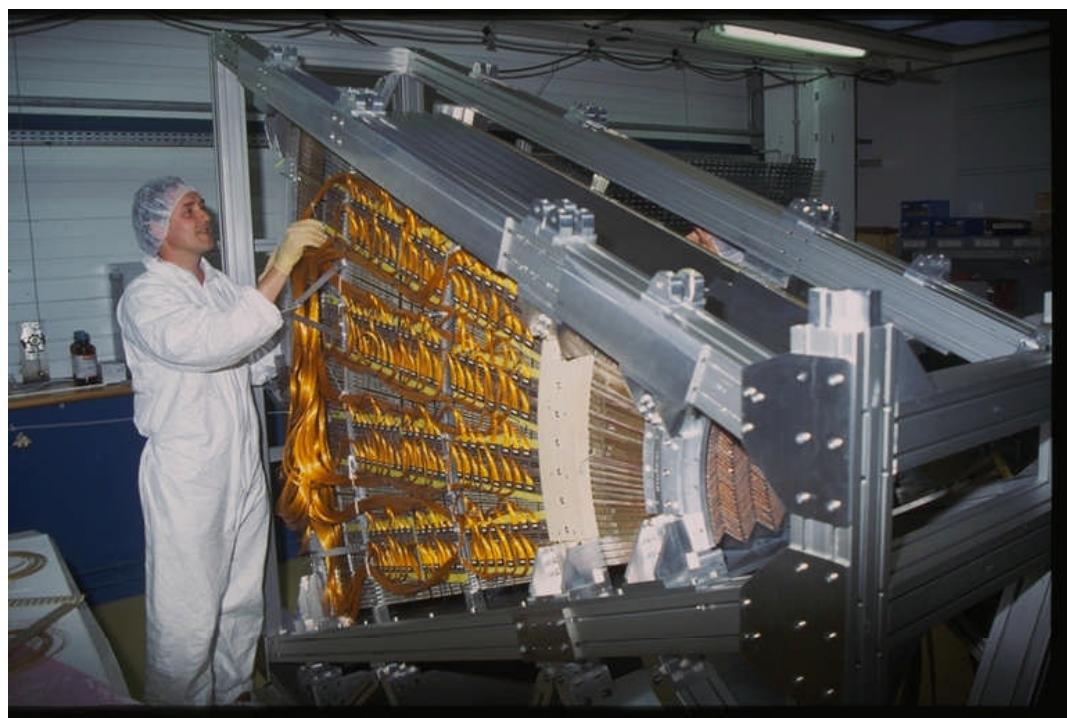
Le détecteur Atlas comprend trois éléments principaux : le **trajectographe** interne (en jaune, au centre), le **calorimètre** (en vert et orange) et le **spectromètre à muons** (en bleu). Le trajectographe interne détermine les trajectoires des particules électriquement chargées. Ses capteurs les plus centraux sont des dispositifs à semi-conducteurs mesurant la position avec une précision de 0,01 mm. Le calorimètre mesure les énergies des particules chargées et neutres. Il comporte des plaques métalliques (l'absorbeur) et des éléments sensibles. Des interactions dans l'absorbeur transforment l'énergie incidente en une « gerbe » de particules que les éléments sensibles permettent de détecter. Les muons sont des particules ressemblant aux électrons, mais 200 fois plus lourdes. Ce sont les seules particules détectables capables de traverser tout l'absorbeur du calorimètre sans être arrêtées. Le spectromètre à muons, qui entoure le calorimètre, identifie les muons et mesure leurs impulsions.



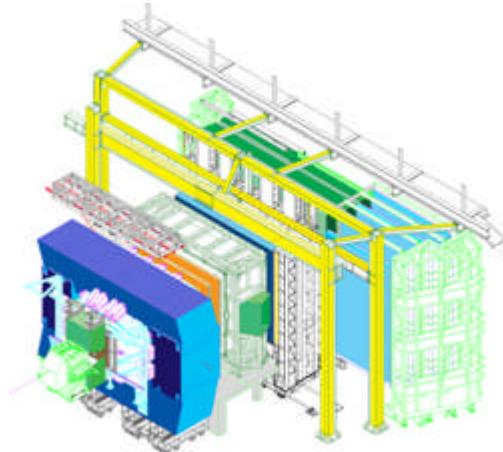
Des dizaines de millions de collisions par seconde sont attendues, soit **un débit d'information équivalent à vingt communications téléphoniques simultanées par chaque être humain sur la Terre**. Les ordinateurs traiteront les données correspondantes suffisamment rapidement pour sélectionner la collision, qui, parmi dix millions d'autres, serait susceptible de faire apparaître des phénomènes nouveaux.

Le sigle ATLAS ne désigne pas seulement un détecteur. Il désigne également une expérience de physique menée par une **collaboration mondiale de scientifiques** : environ 2000 physiciens et ingénieurs issus de 150 laboratoires de 35 pays différents sont engagés dans cette aventure, ainsi que de nombreux techniciens et administratifs.

Le **Centre de Physique des Particules de Marseille** (CPPM) participe activement à cette aventure. Il est fortement engagé dans le développement de plusieurs composants du détecteur Atlas : les détecteurs **de vertex silicium, la calorimétrie électromagnétique et le traitement des données en ligne**.



Un module du calorimètre électromagnétique d'Atlas en salle propre au CPPM, © CPPM



Le CPPM est également impliqué dans une autre expérience réalisée auprès du LHC: l'expérience **LHCb**.

LHCb est dédiée à l'étude des différences entre la matière et l'antimatière. Ces différences sont infimes mais leur compréhension représente un enjeu majeur de la physique des particules. Leur étude requiert des mesures de très grande précision. LHCb est donc doté d'un **appareillage très performant**. Le détecteur LHCb, ci-contre, est hautement spécialisé : il détectera les particules émises à petit angle, près de l'axe des faisceaux. C'est en effet dans cette région que les plus forts effets de l'asymétrie entre **particules et anti-particules** sont attendus.

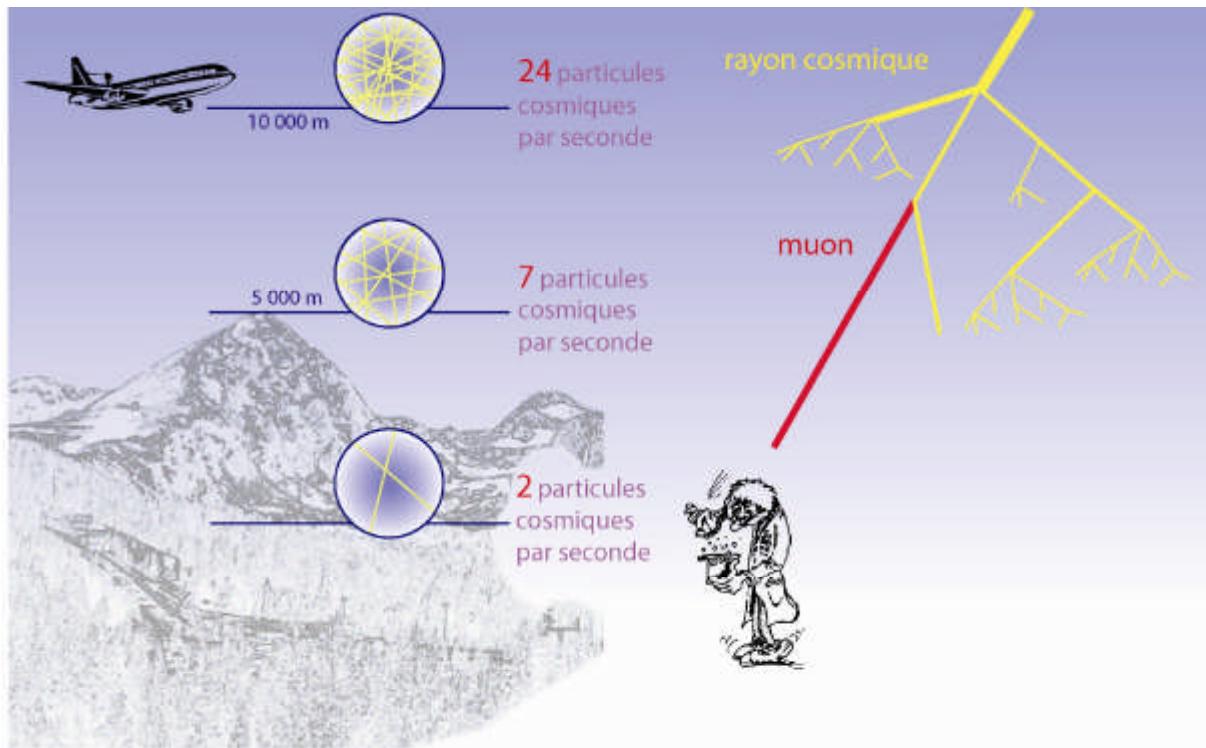
LHCb est le fruit d'une collaboration internationale. Celle-ci regroupe quelques 660 scientifiques provenant de 48 laboratoires de 15 pays. Le CPPM y est impliqué à plusieurs titres.



Le **système de déclenchement à muons** a été conçu et réalisé au laboratoire marseillais. Il s'agit d'un processeur capable d'analyser au vol une partie des données provenant du détecteur. Il est composé de plus de **50 cartes électroniques** (une de ces cartes ci-contre), comportant plus de mille composants chacune dont un PC complet. Chaque seconde, ce processeur traite **130 GBytes** d'information, de quoi remplir **30 DVDs**.

Les physiciens du CPPM contribuent également à la préparation de l'analyse des données. Chaque année, l'expérience collectera quelques **20 milliards d'événements**. Leur analyse demandera des moyens de calcul énormes. Une part importante des développements informatiques nécessaires pour utiliser les **ressources des grilles de calcul** est faite à Marseille. Au CPPM, les physiciens du groupe

LHCb participent à la mise au point des méthodes statistiques très complexes qu'il faudra mettre en œuvre pour extraire les résultats de l'expérience.



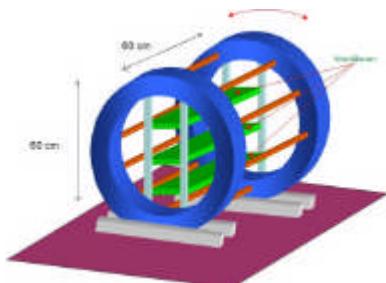
Les particules du cosmos

Les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques **ne sont pas vraiment des rayons, mais des particules** de haute énergie issues de phénomènes galactiques violents comme des éruptions solaires, des explosions d'étoiles en fin de vie, les supernovae, des trous noirs... **Ils bombardent en permanence l'atmosphère terrestre**, créant des avalanches de particules et anti-particules dont seules les plus pénétrantes, les muons, atteignent en général le niveau de la mer. Le muon est une sorte d'électron lourd, absent de la matière ordinaire car de très courte durée de vie, et capable de traverser des dizaines de mètres de matière dense sans être absorbé. **Le corps humain y est insensible, bien que plusieurs muons d'origine cosmique le transpercent chaque seconde.**

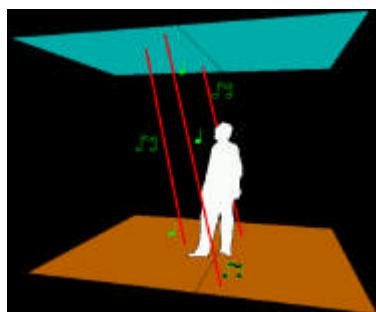
Le CPPM a mis en place plusieurs **installations ludiques** pour sensibiliser le public au **rayonnement cosmique qui bombarde la terre** et à la notion de particule élémentaire. Elles forment en soit un mini laboratoire permettant de mettre en évidence un grand nombre de phénomènes relevant de l'astrophysique, la physique des particules, la statistique, la relativité restreinte ou la synchronisation et gestion de signaux rapides...

La roue cosmique



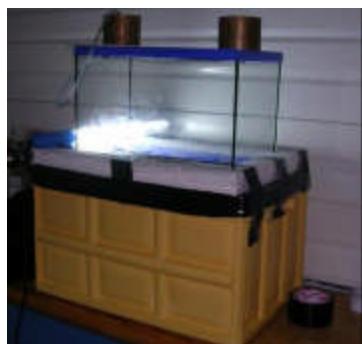
La roue cosmique est un **télescope à muons transportable**. Il est constitué d'un ensemble de trois capteurs, appelés scintillateurs. Le passage d'une particule à travers chaque scintillateur produit un signal lumineux qui est ensuite transformé en un signal électrique. Parmi les multiples possibilités du dispositif de base, nous pouvons citer la mesure de la distribution angulaire des muons cosmiques, le calcul du flux absolu, la mesure de la radioactivité naturelle, la mise en évidence des effets d'angle solide, l'étude des distributions statistiques, la mesure de la vie moyenne du muon, l'effet des blindages, la détection de gerbes cosmiques, etc.

Le cosmophone



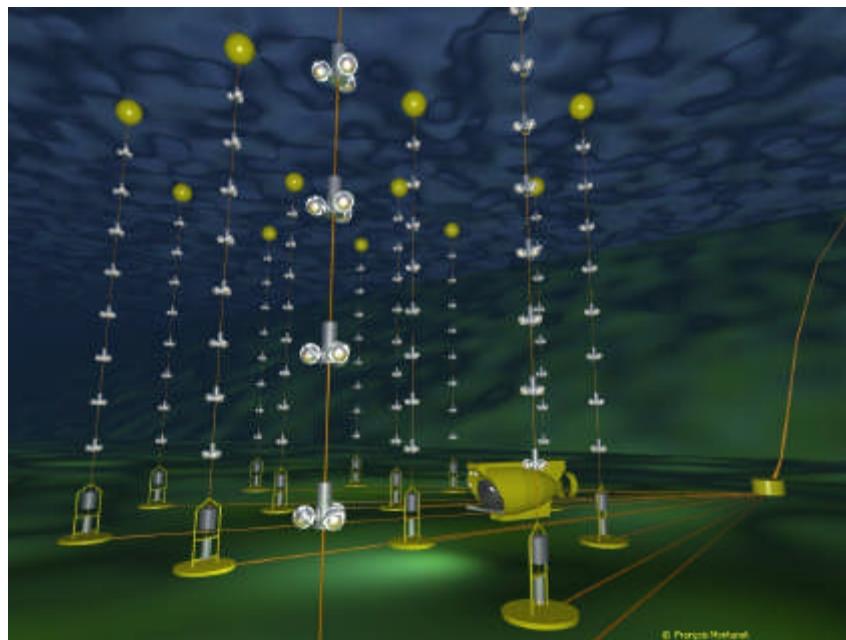
Le cosmophone est un ensemble de scintillateurs disposés autour d'une pièce. Il détecte lui aussi les rayons cosmiques par la lumière de scintillation qu'ils induisent dans le capteur. Les informations sur leur passage sont transmises quasi instantanément à un système de synthèse sonore, qui restitue leur trajectoire dans l'espace à l'instant et à l'endroit où ils passent : la position du muon est indiquée par des sons d'impact à ses points d'entrée et de sortie, et l'impression de vitesse donnée par un effet de glissement de la hauteur du son (effet « Doppler »), analogue à celui produit par la sirène d'une ambulance sur son passage. Les avalanches d'électrons et anti électrons produites de temps en temps par l'interaction d'un muon au-dessus de la pièce sont évoquées par un effet de ruissellement sonore.

La chambre à brouillard



Pour compléter le rendez-vous avec les particules du cosmos, la **chambre à brouillard** permet la visualisation en direct des particules ionisantes qui baignent notre atmosphère. Cet "imageur" matérialise le parcours des électrons, des protons, des particules alpha issues soit du rayonnement cosmique, soit de la radioactivité naturelle.

L'astroparticule avec le télescope à neutrinos ANTARES...



L'histoire et l'évolution de l'univers sont gouvernées par le comportement des particules élémentaires. Celles-ci sont aussi des messagers des confins du cosmos et des phénomènes violents qui s'y produisent. Un **domaine scientifique nouveau, appelé « astroparticule »**, est en plein développement pour explorer l'univers avec les particules élémentaires et remonter à ses premiers instants. Cette thématique scientifique nouvelle se développe à l'interface, d'une part, de la physique des particules et des noyaux et, d'autre part, de l'astrophysique et de la cosmologie. Elle utilise bien souvent des développements instrumentaux et des méthodes issus de dispositifs utilisés auprès des accélérateurs. Avec les rayons gamma de haute énergie, les neutrinos, et les ondes gravitationnelles, le domaine de l'astroparticule ouvre de nouvelles fenêtres sur l'Univers : c'est le début d'une astronomie multi-longueurs d'ondes et multi-messagers. Le croisement des observations de ces différentes astronomies va permettre d'appréhender les phénomènes cosmiques de haute énergie et les événements violents qui en sont la source.

L'objectif du projet Antares est la construction du premier télescope sous-marin à neutrinos cosmiques de très haute énergie.

Pourquoi les neutrinos ?

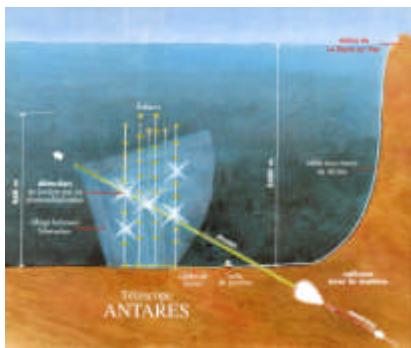


Les neutrinos sont des particules élémentaires neutres, non chargées, et qui interagissent très rarement avec la matière. Ainsi, **chaque seconde, plus de 60 milliards d'entre eux, produits en majorité par le soleil, traversent chaque centimètre carré de notre corps, sans même nous effleurer.** De ce fait, ils peuvent traverser des espaces bien supérieurs aux dimensions de notre galaxie sans interagir.

Contrairement aux autres particules, les neutrinos ne perdent pas la mémoire des conditions initiales (direction et énergie) dans lesquelles ils ont été produits. Leur détection devrait donc permettre **d'accéder aux sources les plus lointaines et les plus violentes de l'Univers**, véritables accélérateurs cosmiques de très haute énergie, tels les pulsars, les restes de supernovae, les noyaux actifs de galaxies, les sursauts gamma, les trous noirs ou les quasars. Une nouvelle fenêtre astronomique sur l'Univers et son évolution depuis le Big-Bang s'ouvre alors à nous.

Antarès pourrait aussi contribuer à **la recherche de matière noire dans l'Univers**. Cette fameuse masse manquante de notre Univers pourrait être constituée par des neutralinos, particules massives prédites dans le cadre des théories supersymétriques et non encore observées. Ces neutralinos, accumulés par gravitation au centre des corps célestes massifs, tels la Terre, le Soleil ou le centre de notre galaxie, s'annihileraient en effet en produisant des neutrinos détectables par Antarès.

Comment les détecter : le télescope Antares



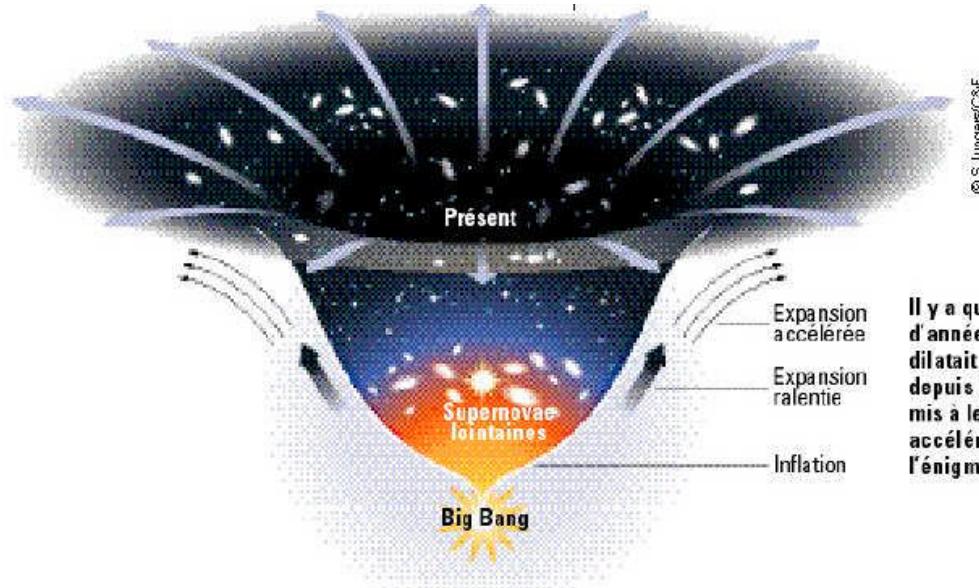
Les neutrinos sont difficilement détectables. Mais, quand ils interagissent avec la matière, ils peuvent produire des muons. Il est possible de déceler ces muons grâce aux sillages lumineux engendrés par leur propagation dans l'eau. Ces traces de lumière sont détectées par un réseau de capteurs de lumière ou modules optiques, très sensibles, répartis dans **10 millions de mètres cubes d'eau**. Ceux-ci sont installés le long de lignes verticales, longues de 450 mètres et ancrées à **2500 mètres au fond de la mer** pour se protéger des muons produits dans l'atmosphère.

Le site d'Antares se situe au large des côtes provençales. Les données sont transmises à **la station à terre de La Seyne-sur-Mer** à l'aide d'un câble électro-optique sous-marin.



Le télescope sélectionne les muons venant du fond de la mer, certifiant ainsi qu'ils proviennent bien de l'interaction de neutrinos se produisant dans la roche située sous le détecteur. En effet, seuls les fantomatiques neutrinos sont capables de traverser notre planète de part en part. Situé dans l'hémisphère nord, le télescope Antares pourra ainsi réaliser la cartographie du ciel de l'hémisphère sud en « regardant » à travers la terre.

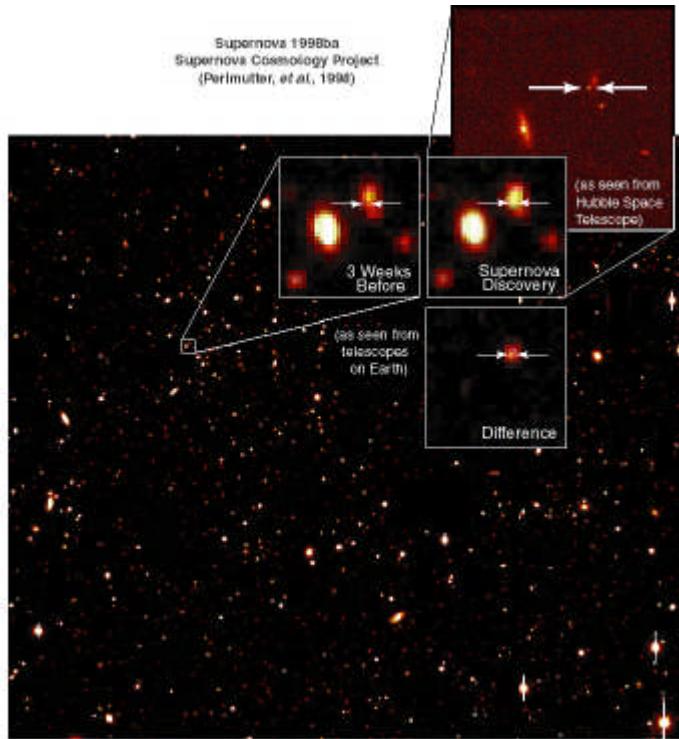
La cosmologie avec les télescopes à supernovae...



Il y a quatre à cinq milliards d'années, l'Univers, qui se dilatait de façon régulière depuis le Big Bang, s'est mis à le faire de façon accélérée. La responsable : l'éigmatique énergie noire.

Depuis plusieurs décennies, la question de la matière noire comme constituant privilégié de notre Univers interpelle physiciens et astronomes. Récemment, de nouvelles observations sont venues bouleverser les modèles habituels en suggérant que l'Univers serait, sur des échelles cosmologiques, non seulement dominé par la matière noire mais également par une **énergie noire** probablement fossile des instants les plus primordiaux du Big Bang.

La mise en évidence de cette énergie noire provient de **l'observation de supernovae lointaines qui indique que l'Univers serait en accélération**.



Les **supernovae** correspondent à la fin explosive de certaines étoiles. Phénomènes exceptionnellement lumineux, les supernovae peuvent briller pendant quelques heures autant que toutes les étoiles d'une petite galaxie. Certaines supernovae (type Ia) peuvent être utilisées comme des « **chandelles standard** ». L'explosion émet toujours la même quantité de lumière, la mesure de leur luminosité apparente (luminosité mesurée sur la Terre, elle décroît par le carré de la distance) permet donc d'en déduire la distance. L'étude de plusieurs supernovae a permis ainsi de mettre en évidence que leur distance est plus grande que celle prévue avec le taux d'expansion actuel de l'univers. Dans le passé, l'univers se dilatait plus lentement, son expansion s'est maintenant accélérée.



Le télescope CFHT à Hawaii

La théorie de la relativité d'Einstein peut accommoder ce résultat surprenant à travers une **constante cosmologique**, qui correspond à une sorte de « pression » opposée à la gravitation, responsable de l'accélération.

Un groupe de physiciens du CPPM analyse les **données des supernovae** des télescopes **CFHT** à Hawaii et **VLT** au Chili. Cette première étape permettra de confirmer les résultats actuels.

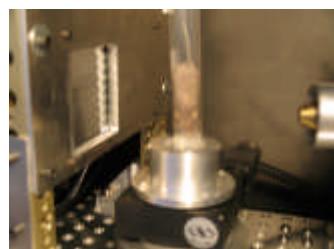
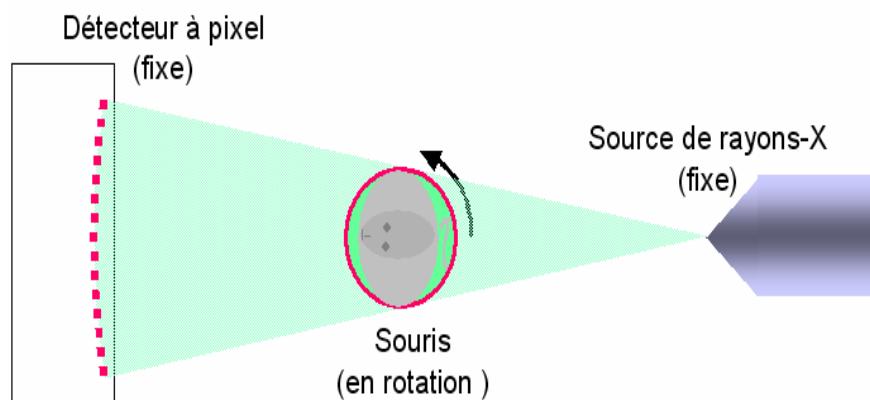
Des particules à ...

... l'imagerie du petit animal



Le CPPM étudie, en collaboration avec l'Institut de Biologie du Développement de Marseille (IBDM), la possibilité de valoriser le développement de **détecteurs à pixels hybrides** de silicium pour l'expérience ATLAS dans le domaine de l'imagerie médicale et construit pour cela le **PIXSCAN** : un **scanner-X ultra-rapide** pour l'imagerie de petits animaux tels que la souris et le rat. Ce système d'imagerie sera **combiné avec un micro tomographe à émission de positons** de haute résolution ClearPET dans le but de pouvoir observer conjointement l'anatomie et le métabolisme des animaux étudiés.

Ce travail s'effectue dans le cadre d'un **programme interdisciplinaire CNRS** de l'imagerie du petit animal. Lorsque les résultats sont satisfaisants, il sera possible d'appliquer cette technique à l'homme.



Prototype du détecteur Pixscan



Vue d'une souris obtenue par le détecteur Pixscan

... l'environnement marin



Animal émettant de la lumière à grande profondeur : Periphylla
© David Wrobel
(<http://jellieszone.com/>)

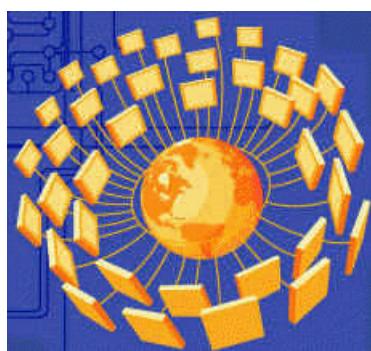
Le télescope **Antares** est un instrument scientifique novateur pour l'astronomie neutrino. C'est aussi **un observatoire sous-marin pluridisciplinaire permanent** pour les sismologues, les biologistes et les chercheurs en sciences de la mer.

Une plate-forme spécifique accueille des instruments de mesure variés :

- courantomètres ; sondes d'oxygène ;
- sondes de température et de salinité ;
- détecteurs de bioluminescence ;
- sismographes.

Ils fourniront en continu des mesures de propriétés océanographiques et sismiques. Ils permettront aussi l'étude *in situ* de la bioluminescence marine par grand fond.

... la grille de calcul : EGEE



Le projet **EGEE** (Enabling Grids for E-sciencE) est financé par la commission européenne et fait travailler ensemble des experts de 27 pays. Le but du projet EGEE est de **déployer une infrastructure de grille de calcul disponible partout en Europe 24h sur 24**, pour fournir des ressources de calcul et de stockage importantes aux chercheurs académiques et industriels indépendamment de leur localisation géographique.

Les sciences du vivant et la physique des hautes énergies ont été choisies pour démontrer la faisabilité d'une telle infrastructure

Pour plus d'informations :

CPPM

163 avenue de Luminy – case 902
13288 Marseille cedex 09
Magali Damoiseaux, chargée de communication
fete@cppm.in2p3.fr

Tél. : 04.91.82.72.00
Fax : 04.91.82.72.99

Sites internet

Le CPPM	http://marwww.in2p3.fr
Le CERN	http://cern.ch
L'expérience ATLAS	http://atlas.ch/
L'expérience LHCb	http://cdsweb.cern.ch/collection/LHCb%20Photos
L'expérience ANTARES	http://antares.in2p3.fr/index-fr.html
La grille EGEE	http://eu-egee.fr
Le Cosmophone	http://cosmophone.in2p3.fr

Et aussi

http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/informations/sites/sites.htm