

éducation | conférences | évènements
 ateliers | animations | formation | exposés
la médiation scientifique



Le Grand collisionneur LHC

Dossier pédagogique
 Enseignants de collège-lycée

universcience présente

LE GRAND COLLISIONNEUR LHC

Vivez la plus grande expérience scientifique de tous les temps

palais-decouverte.fr | #LHC

Palais DÉCOUVERTE **EXPO**
 17 oct. 2014 > 19 juil. 2015
 Ouvertures exceptionnelles
 lundis 20 et 27 oct., 29 déc.
 Champs-Élysées Clemenceau
 Franklin Roosevelt



SOMMAIRE

LE GRAND COLLISIONNEUR – LHC est une exposition réalisée par le Science Museum de Londres. Elle a été adaptée pour être présentée au Palais de la découverte du 17 octobre 2014 au 19 juillet 2015. L'exposition propose au visiteur une introduction à la physique des particules, une présentation du LHC, le plus grand accélérateur du monde, et du CERN, l'organisme de recherche à l'initiative du LHC.

PRÉPARER SA VISITE

- | | |
|---|-------|
| 1. Liens avec les programmes scolaires | p. 2 |
| 2. Présentation de l'exposition | p. 5 |
| 3. Présentation des offres de médiation humaine en lien avec l'exposition | p. 8 |
| 4. Place de la visite dans une progression pédagogique | p. 9 |
| 5. Rappels notionnels en physique des particules | p. 10 |

COMPLÉTER SA VISITE

- | | |
|--|-------|
| 6. Activité pour prolonger sa visite | p. 21 |
| 7. Bibliographie | p. 22 |
| 8. Ressources vidéos | p. 23 |
| 9. Conférences organisées au Palais de la découverte | p. 24 |
| 10. Les ressources de l'Institut national de Physique nucléaire et de Physique des particules (CNRS/IN2P3) | p. 25 |

- | | |
|--------------------------|-------|
| DÉTAILS PRATIQUES | p. 26 |
|--------------------------|-------|





PRÉPARER SA VISITE

1. LIENS AVEC LE PROGRAMME SCOLAIRE

COLLÈGE

3^{ÈME}

EXTRAITS DU PROGRAMME	LIENS AVEC L'EXPOSITION
<p>Découvrir et explorer des activités professionnelles.</p> <p>Distinguer des secteurs d'activité et citer quelques métiers qui les composent.</p> <p>Repérer les conditions d'accès à l'emploi.</p> <p>Citer les tâches et activités constitutives d'un métier observé.</p> <p>Identifier les similitudes et les différences des compétences requises par plusieurs métiers.</p> <p>Identifier les différents acteurs intervenant dans un espace donné.</p> <p>Décrire l'environnement d'un métier.</p> <p>Découvrir des organisations.</p>	<p>L'exposition propose une immersion dans les locaux du CERN. Qui y rencontrer ? Qu'y fait-on ?</p> <p>Dans le cadre de la recherche d'orientation, cette visite permet de rencontrer une grande variété d'emplois collaborant dans la recherche : des chercheurs, des techniciens, des ingénieurs...</p>

Accompagnement personnalisé

Exploration des métiers des sciences et de la recherche.

Dans le cadre de la recherche d'orientation, la visite de l'exposition permet de rencontrer une grande variété d'emplois collaborant dans la recherche : des chercheurs, des techniciens, des ingénieurs...

2^{DE}

EXTRAITS DU PROGRAMME	LIENS AVEC L'EXPOSITION
Un modèle de l'atome. Noyau (protons et neutrons), électrons.	La physique des particules est l'étude des constituants élémentaires de la matière.
Effet d'une force sur le mouvement d'un corps : modification de la vitesse, modification de la trajectoire.	Des dispositifs le long du LHC ont pour fonction de courber la trajectoire des particules accélérées.
Description de l'Univers : l'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies, exoplanètes et systèmes planétaires extrasolaires. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air.	L'observation de l'infiniment petit apporte des informations sur l'infiniment grand. Informations sur l'infiniment petit : le LHC et la physique des particules servent à rechercher les fondements de la matière. La mesure de l'accélération des particules utilise la vitesse de la lumière comme référent. On parle en pourcentage de la vitesse de la lumière dans le vide.

ENSEIGNEMENTS D'EXPLORATION

MPS

Vision du monde : explorer l'infiniment petit.

EXTRAITS DU PROGRAMME	LIENS AVEC L'EXPOSITION
<p>La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.</p> <p>Particules fondamentales : électrons, neutrons, protons.</p> <p>Charge élémentaire e.</p> <p>Interactions fondamentales : interactions forte et faible, électromagnétique, gravitationnelle.</p> <p>Cohésion du noyau, stabilité.</p> <p>Défaut de masse, énergie libérée.</p> <p>Ordre de grandeur des énergies mises en jeu.</p>	<p>La physique des particules est l'étude des constituants primaires de la matière.</p> <p>Dans le modèle standard, on distingue les particules composant la matière et les <i>particules d'échange</i> associées à une interaction.</p> <p>$E=mc^2$: Equivalence masse-énergie (conversion de masse en énergie et réciproquement) dans les collisions.</p>
<p>Champ magnétique : sources de champ magnétique (Terre, aimant, courant).</p> <p>Champ électrique.</p>	<p>Des dispositifs (utilisant des aimants gigantesques) le long du LHC ont pour fonction de courber la trajectoire des particules accélérées.</p> <p>Le champ électrique est utilisé pour accélérer les particules.</p>
<p>Principe de conservation de l'énergie.</p> <p>Application à la découverte du neutrino dans la désintégration bêta.</p>	<p>Les neutrinos sont des particules élémentaires.</p>

PROLONGEZ VOTRE VISITE EN RÉSERVANT UN EXPOSÉ

- **LA RADIOACTIVITÉ**
- **$E=MC^2$ -LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES** sur l'accélérateur de deutons
- **LA SUPRACONDUCTION**
- **BONJOUR M. AMPÈRE !** sur l'électromagnétisme

TERMINALE S

EXTRAITS DU PROGRAMME	LIENS AVEC L'EXPOSITION
<p>Détecteurs d'ondes (mécaniques et électromagnétiques) et de particules (photons, particules élémentaires ou non).</p>	<p>Une partie historique expose les premiers détecteurs de particules (chambre à brouillard, chambre à fils...) Une salle est entièrement consacrée aux détecteurs et leur fonctionnement.</p>
<p>Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.</p>	<p>L'exposition parle des particules élémentaires composant la matière.</p>
<p>Culture scientifique et technique ; relation science-société. Métiers de l'activité scientifique (partenariat avec une institution de recherche, une entreprise, etc.).</p>	<p>L'exposition présente les métiers que l'on peut rencontrer au CERN et plus largement dans des organismes de recherche.</p>



2. PRÉSENTATION DE L'EXPOSITION

LE PROPOS DE L'EXPOSITION

Le Grand Collisionneur-LHC est une exposition de 800m² permettant une introduction à la physique des particules, son histoire et son actualité.

Cette exposition immerge les visiteurs dans l'histoire de la découverte du boson de Higgs, en reconstituant les locaux du CERN, organisation européenne qui organise une collaboration entre états du monde entier pour mener des recherches en physique des particules.

Le visiteur comprend l'importance et le fonctionnement du LHC, l'accélérateur de particules le plus grand du monde, et découvre, grâce à de nombreuses vidéos, les métiers au sein de cette organisation.

DURÉE ESTIMÉE DE LA VISITE : 1h

DESCRIPTION DE L'EXPOSITION

Le LHC a pour fonction d'accélérer et de détecter des particules. La première salle de l'exposition revient sur l'histoire de la physique des particules. Dans un petit vestibule, des objets symboliques sont présentés :

- une chambre à brouillard, ancêtre des détecteurs de particules, dont l'image de l'intérieur est diffusée sur un écran ;
- un tube à décharge, ancêtre des accélérateurs, construit par Jean Perrin, l'un des fondateurs du Palais de la découverte.

Un panneau décrit les manipulations et le phénomène physique mis en jeu.

La salle suivante aborde l'évolution de la physique des particules et l'histoire du CERN. Des documents et des objets symboliques marquant l'histoire de la physique des particules et des portraits de physiciens pionniers y sont présentés.

Les élèves entrent ensuite dans un amphithéâtre où est projeté un film de 15 minutes sur le CERN et le Boson de Higgs. La doctorante « Melinda » (personnalisation du groupe de chercheurs ayant découvert le boson de Higgs) vient annoncer aux chercheurs travaillant sur le projet qu'elle a bien vu le signal du boson de Higgs. Ils fêtent la confirmation du Modèle Standard. On se déplace ensuite dans le CERN à la rencontre d'agents (chercheurs, ingénieurs, techniciens..) qui parlent de leur activité.



© CERN

Les visiteurs descendent dans le grand Collisionneur, à 100 mètres sous terre. Ils découvrent les métiers présents au CERN et les questions suivantes :

- La décomposition de la matière en quarks.
- Pourquoi et comment accélère-t-on les particules.
- Comment contrôler la trajectoire des particules.



© CERN

La salle suivante accueille une installation artistique, proposant une interprétation de la collision entre particules.

La visite continue dans la salle des détecteurs. Il est expliqué le fonctionnement et le rôle des détecteurs implantés sur le LHC ainsi que le traitement informatique des données.

Dans cette pièce sont exposés :

- une maquette du détecteur CMS ;
- une pièce des détecteurs ATLAS et CMS.

Le visiteur « remonte à la surface », en arpentant la reconstitution réaliste des bureaux du CERN.

Une porte ouverte donne sur le bureau de la doctorante « Melinda ». Une projection murale présente un aperçu de la vie quotidienne d'un chercheur. On aborde dans cette salle le sujet du boson de Higgs et du modèle standard. Sur l'ordinateur l'élève voit le signal du boson de Higgs qui a permis de détecter son existence.



© CERN

La salle suivante aborde la recherche actuelle. Des chercheurs du monde entier parlent de leur travail.

Ils abordent les sujets suivants :

- la matière noire ;
- les trous noirs ;
- les dimensions supplémentaires de l'espace ;
- l'antimatière ;
- la découverte du boson de Higgs ;
- le prochain grand collisionneur ;
- l'Univers invisible.

La dernière salle de l'exposition aborde les applications de la physique nucléaire en médecine. Elle présente une photo du détecteur d'ATLAS et une maquette de NeuroSpin.

Dans la salle d'exposé, en dehors des séances de médiation, un dispositif interactif 360° propose une visite virtuelle du CERN, produit par le CNRS et le CEA.

60 ANS DU CERN

Dans le cadre des 60 ans du CERN, une exposition de photos de chercheurs et autres personnalités proches du CERN, produite par le CNRS et le CEA, est présentée en dehors de l'exposition, sur la coursive (RDC).



3. PRÉSENTATION DES OFFRES DE MÉDIATION HUMAINE EN LIEN AVEC L'EXPOSITION

Nous vous invitons à compléter votre visite en réservant un exposé présenté par un médiateur scientifique.

E=MC². LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES (2^{de} à Supérieur)

Grâce à un ensemble expérimental mettant en œuvre un accélérateur de particules, les visiteurs assistent en direct à de véritables réactions nucléaires : fusion, fission, activation, transmutation, bombardement neutronique, « fabrication » de radioéléments, nucléosynthèse, etc. sont quelques-unes des expériences et quelques-uns des sujets abordés au cours de cet exposé.

LA RADIOACTIVITÉ (2^{de} à Supérieur)

Qu'est-ce que la radioactivité ? Quelques expériences réalisées à l'aide de divers détecteurs, notamment une très belle chambre à brouillard, pour se familiariser avec les notions fondamentales relatives aux rayonnements alpha, bêta et gamma, annihilation matière-antimatière.

LA SUPRACONDUCTION (2^{de} à Supérieur)

Comment la résistance électrique varie-t-elle avec la température ? Induction, conduction parfaite, lévitation, diamagnétisme, effet Meissner dans les supraconducteurs... Quelques expériences spectaculaires pour aborder la supraconduction et les supraconducteurs.

BONJOUR M. AMPÈRE ! (CM2 à Supérieur)

Exploration des phénomènes électromagnétiques à l'aide de courants de champs magnétiques intenses. Electroaimant de 10 tonnes, induction, forces de Laplace, plateau volant, transformateur de Tesla...sont au programme.



© EPPDCSI - Arnaud Robin

Vous avez également la possibilité de prolonger votre visite dans les **EXPOSITIONS PERMANENTES**

Dans l'exposition d'électromagnétisme : l'accélération et la trajectoire des particules.

Dans l'exposition Cosmologie : l'étude des particules et du Big Bang.



4. PLACE DE LA VISITE DANS UNE PROGRESSION PÉDAGOGIQUE

D'une façon générale, une visite d'une salle d'exposition peut prendre sa place dans une séquence de cours dans le cadre des programmes scolaires. Les liens des contenus de l'exposition **LE GRAND COLLISIONNEUR LHC** avec les programmes ont été précisés ci-dessus.

La visite peut également avoir lieu dans le cadre d'une démarche de projet, pour alimenter un atelier scientifique ou un projet de classe. Dans ce cas, les notions abordées peuvent être plus larges que celles des programmes, mais les compétences demandées aux élèves doivent correspondre à celles de son niveau.

Dans ces deux cas, la visite peut se faire :

- Avant d'aborder la notion : elle est utilisée comme phase d'accroche pour introduire une notion ou faire émerger une problématique. Elle peut permettre par exemple de débusquer les représentations initiales des élèves.
- Au cours d'une séquence : elle peut permettre d'apporter des éléments supplémentaires ou des réponses au questionnement des élèves. Dans ce cas, elle constitue une étape dans la démarche d'investigation.
- Après une séquence : elle complète les notions abordées et propose une ouverture culturelle.



5. RAPPELS NOTIONNELS EN PHYSIQUE DES PARTICULES

Les 8 fiches qui suivent apportent quelques informations sur les thématiques abordées dans l'exposition. Elles ont été réalisées avec les médiateurs de physique du Palais de la découverte et les enseignants relais de physique - chimie.

FICHE 1 : LE LHC

FICHE 2 : LA PHYSIQUE DES PARTICULES

FICHE 3 : CHRONOLOGIE DES DÉCOUVERTES

FICHE 4 : LE LHC ET LES NEUTRINOS

FICHE 5 : LE LHC ET LA COSMOLOGIE

FICHE 6 : LE CERN

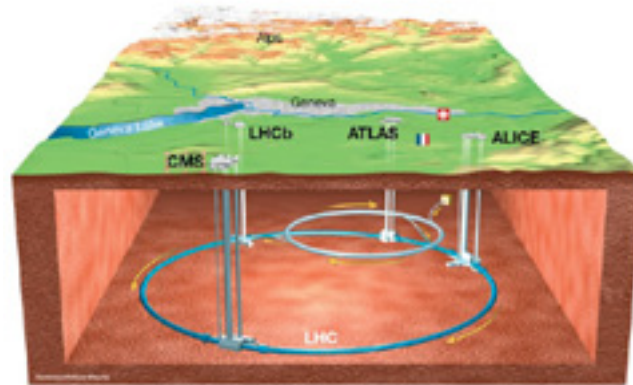
FICHE 7 : LES DÉTECTEURS CLEFS – LA CHAMBRE À BROUILLARD

FICHE 8 : LES DÉTECTEURS CLEFS – LA CHAMBRE À FILS

LHC, construit 100 mètres sous terre à cheval sur la frontière franco-suisse à Genève, est l'acronyme de Large Hadrons Collider :

- **LARGE.** Le LHC est le plus grand accélérateur de particules construit à ce jour (27 km de long),
- **COLLIDER.** Deux particules sont accélérées dans des sens opposés en vue de rentrer en collision.
- **HADRONS.** Il s'agit d'un accélérateur de hadrons, des particules composées de quarks (protons, ions lourds principalement).

LES INSTALLATIONS ET EXPÉRIENCES ASSOCIÉES



Le LHC en surface et en profondeur.
© CERN. 2014

Plusieurs dispositifs complémentaires sont implantés en quatre points différents du LHC :

- **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment : expériences sur un grand collisionneur d'ions). La rencontre de deux ions lourds libère une très grande quantité d'énergie sous forme de chaleur et de rayonnements. Les quarks (particules élémentaires constituant les ions lourds) libérés forment un plasma et interagissent avec les gluons (particule d'échange de l'interaction forte). La matière est dans un état appelé « plasma quarks-gluons ». Ce qui nous permet d'étudier l'interaction forte entre les quarks.
- **ATLAS** (A Toroïdal Lhc Apparatus : appareillage toroïdal pour le LHC) et CMS (Compact Muon Solénoïde : Solénoïde compact pour muons).

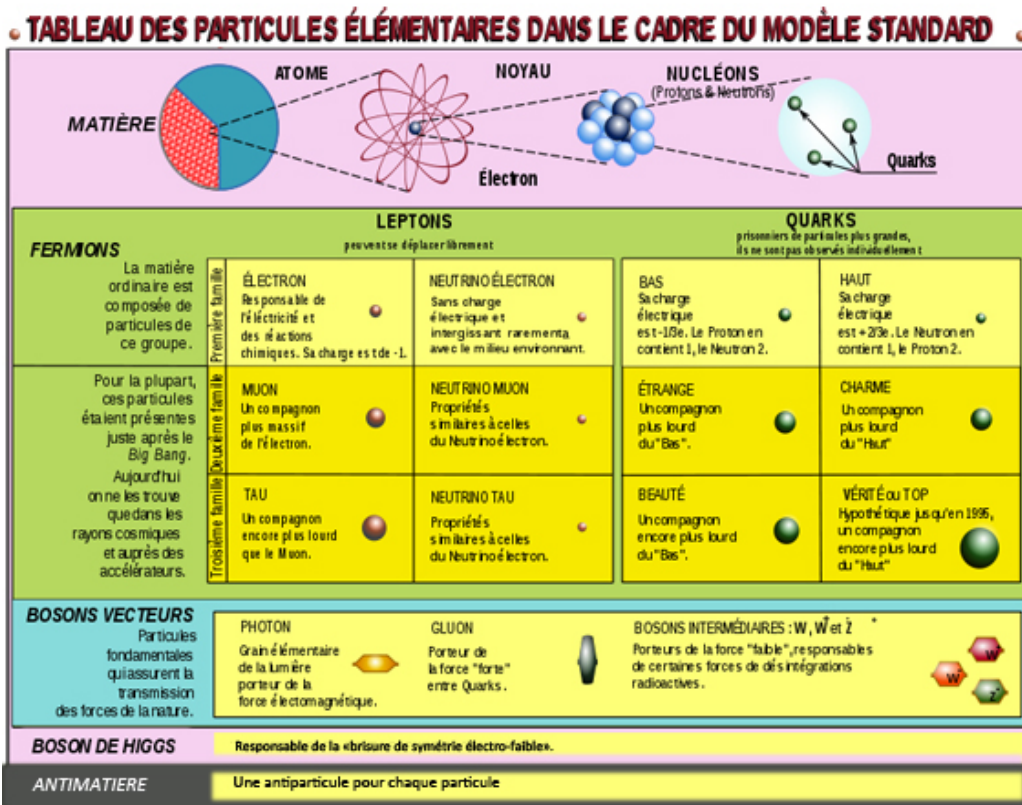
Les expériences ATLAS et CMS sont « généralistes ». Leur premier objectif était de découvrir le boson de Higgs. Maintenant qu'il est atteint, elles vont mesurer les propriétés de cette particule avec précision et tester les théories de physique au-delà du Modèle Standard : supersymétrie, dimensions supplémentaires, ...

- **LHCb** (Large Hadron Collider Beauty experiment). Le LHCb étudie les hadrons contenant un quark lourd (charme ou beauté). Ses mesures de précision permettent de tester le Modèle Standard (et d'étudier notamment les asymétries entre matière et antimatière), et de rechercher la signature de phénomènes de nouvelle physique.

En plus du LHC, le CERN comporte de nombreuses autres installations où des expériences très variées sont menées : COMPASS, ISOLDE, le décélérateur d'antiprotons AD, CAST, NA61, NA62, ...

FICHE 2 : LA PHYSIQUE DES PARTICULES

A l'état actuel de nos connaissances, les particules de notre environnement s'organisent selon un modèle dit Standard.



On peut distinguer les particules qui composent la matière et les particules dites d'échange associées aux 4 interactions fondamentales. Les particules composant la matière sont des fermions et les particules d'échange sont des bosons. On parle de fermions et de bosons élémentaires.

Il existe 12 particules élémentaires de la matière (et 12 antiparticules). Elles se répartissent dans deux groupes :

- 6 LEPTONS** : électron, tau, muon, et trois neutrinos
- 6 QUARKS** : constituants des neutrons, protons, mésons...

Chacune des interactions fondamentales est associée à une particule d'échange. Les gluons par exemple, sont responsables de l'interaction forte et assurent la cohésion des hadrons (particules composées de quarks). Ils sont au nombre de 8. Plus deux quarks s'éloignent, plus l'interaction est forte et le nombre de gluons entre deux quarks est important.

LE BOSON DE HIGGS : QU'EST-CE QUE C'EST, SON IMPORTANCE...

Lors de la genèse du Modèle Standard, les physiciens se heurtent à une difficulté : comment donner des masses non nulles aux particules élémentaires tout en conservant une théorie mathématiquement bien définie. En 1964, trois groupes de physiciens - dont Peter Higgs - proposent de manière indépendante un mécanisme pour résoudre ce problème. Il introduit un ingrédient théorique supplémentaire, « le champ de Higgs », associé à une nouvelle particule massive : le boson de Higgs.

COMMENT LE BOSON DE HIGGS PROCURE-T-IL UNE MASSE AUX PARTICULES ÉLÉMENTAIRES ?

Lorsqu'une particule traverse un champ de Higgs, selon son degré d'interaction avec lui, elle attire plus ou moins de bosons sur elle. Ainsi se voit-elle attribuer une masse plus ou moins importante.

Découvertes en physique des particules

- 1895** Rayons X produits par Wilhelm Röntgen (1845-1923) (plus tard identifiés comme photons).
- 1897** Électron découvert par Joseph John Thomson (1856-1940).
- 1899** Particule alpha découverte par Ernest Rutherford (1871-1937) dans les radiations d'uranium.
- 1900** Rayon gamma (photon de grande énergie) découvert par Paul Villard (1860-1934) dans les désintégrations d'uranium.
- 1911** Noyau atomique identifié par Rutherford.
- 1919** Proton découvert par Rutherford.
- 1932** Neutron découvert par James Chadwick (1891-1974) (prédit par Rutherford en 1920).
- 1932** Antiélectron (ou positron) première antiparticule découverte par Carl Anderson (1905-1991) (proposé par Paul Dirac (1902-1984) en 1927).
- 1937** Muon découvert par Seth Neddermeyer (1907-1988), Anderson et Jabez Street (1906-1989), en utilisant les mesures de rayons cosmiques récoltées dans une chambre à brouillard.
- 1947** Pions (particules les plus légères de la famille des mésons) découverts par Cecil Powell (1903-1969), César Lattes (1924-2005) et Giuseppe Occhialini (1907-1993) (prédit par Hideki Yukawa (1907-1981) en 1935).
- 1947** Kaon, la première particule étrange (de la famille des mésons) découverte par George Dixon Rochester (1908-2001) et Clifford Charles Butler (1922-1999).
- 1947** Λ^0 (de la famille des hadrons) découvert en étudiant des interactions cosmiques.
- 1955** Antiproton découvert par Owen Chamberlain (1920-2006), Emilio Segrè (1905-1989), Clyde Wiegand (1915-1996) et Thomas Ypsilantis (1928-2000).
- 1956** Neutrino électronique détecté par Frederick Reines (1918-1998) et Clyde Cowan (1919-1974) (proposé par Wolfgang Pauli (1900-1958) en 1931 pour expliquer le défaut d'énergie dans les désintégrations bêta).

- 1962** Neutrino muonique isolé des neutrinos électroniques par Leon Lederman.
- 1964** Baryon Ξ (sous-famille des hadrons) découvert au Laboratoire national de Brookhaven.
- 1969** Partons (constituants internes des hadrons) observés dans des collisions profondément inélastiques au SLAC (Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford). Ils furent associés au modèle des quarks prédit par Murray Gell-Mann et George Zweig en 1964 et permit ainsi la découverte des quarks haut, bas et étrange.
- 1974** Méson J/ψ découvert par le groupe de Burton Richter et Samuel Ting, démontrant l'existence du quark charme (proposé par James Bjorken et Sheldon Lee Glashow en 1964).
- 1975** Tau découvert par le groupe de Martin Perl.
- 1977** Méson upsilon découvert à Fermilab (laboratoire spécialisé dans la physique des particules des hautes énergies), démontrant l'existence du quark beauté (proposé par Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa en 1973).
- 1979** Gluon (boson ou particule d'échange associée à l'interaction forte) observé lors des événements à trois jets au cours de l'expérience DESY (synchrotron allemand à électrons).
- 1983** Bosons W et Z (particules d'échange associées à l'interaction faible) découverts par Carlo Rubbia, Simon van der Meer (1925-2011) et la collaboration UA1 (expérience de l'accélérateur Supersynchrotron à protons SPS) au CERN (prédits par Glashow, Abdus Salam (1926-1996) et Steven Weinberg).
- 1995** Quark top découvert à Fermilab.
- 1995** Antihydrogène produit et mesuré au cours de l'expérience LEAR (anneau d'antiprotons de basse énergie) au CERN.
- 2000** Neutrino tau observé en premier à Fermilab.
- 2012** Découverte du boson de Higgs par les expériences Atlas et CMS du LHC au CERN.

extrait de l'article *LHC, à la découverte de la matière*, Julien Babel, in *Découverte* n°376, septembre-octobre 2011.



FIGHE 4 : LE LHC ET LES NEUTRINOS

L'étude des neutrinos constitue une branche de la physique, comme la cosmologie pour l'astrophysique.

Le neutrino est une particule élémentaire du modèle standard de la physique des particules. Il en existe 3 sortes. Au 21^e siècle, de nombreuses expériences mesurent précisément leurs propriétés.

QUELQUES DATES

- **1930** : Wolfgang Pauli postule l'existence du neutrino dans son étude de la désintégration bêta. Il appelle cette particule « neutron » car les neutrons n'ont pas encore été découverts à l'époque.
- **1933** : Enrico Fermi renomme cette particule « neutrino » (petit neutre).
- **1956** : Frederick Reines et Clyde Cowan détectent les premiers neutrinos (de type électron) auprès d'un réacteur nucléaire.
- **1962** : découverte du neutrino muonique.
- **1990** : Le LEP (Large Electron Positron collider- grand collisionneur électron-positron), au CERN démontre qu'il n'existe que trois familles de neutrinos légers.
- **2000** : Découverte du neutrino tau.

LES PROPRIÉTÉS DES NEUTRINOS

- Les neutrinos sont neutres.
- Les neutrinos ont une masse non nulle, bien que très faible.
- Les neutrinos interagissent uniquement par interaction faible.

LES GRANDES EXPÉRIENCES ACTUELLES

De nombreux dispositifs expérimentaux cherchent encore à déterminer les propriétés des neutrinos. On peut citer :

- **OPERA** (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus). On y observe et étudie le phénomène d'oscillation de neutrinos. OPERA reçoit un faisceau de neutrinos en provenance du CERN, émis à 731 km de distance.
- **T2K** (Tokai to Kamioka, Japon) est une expérience qui étudie le phénomène d'oscillation des neutrinos, cette fois-ci avec le faisceau de neutrinos muoniques. Elle comporte deux détecteurs, l'un proche de la source de neutrinos (280 m), l'autre très éloigné (295 km). Il faut que les neutrinos parcourent de grandes distances pour que le phénomène d'oscillation soit visible.
- **DOUBLE CHOOZ** étudie encore une autre facette du phénomène d'oscillations de neutrinos. Elle est située en France dans les Ardennes, près des réacteurs de la centrale nucléaire de Chooz. Deux autres expériences, Daya Bay en Chine et RENO en Corée, réalisent des mesures similaires.
- **LES EXPÉRIENCES SUCCESSIVES DE LA FAMILLE NEMO** (Neutrino Ettore Majorana Observatory) cherchent à déterminer la nature des neutrinos. Elles se déroulent dans le Laboratoire Souterrain de Modane (situé dans le tunnel du Fréjus, entre la France et l'Italie). L'installation sous 1800 m de roche permet de s'affranchir au maximum de perturbations extérieures, notamment les rayons cosmiques. Un élément du détecteur NEMO-2 est visible dans l'exposition.

- **KATRIN** est une expérience de précision en construction en Allemagne et qui cherchera à déterminer directement la masse minuscule (plus de 500 000 fois plus faible que celle de l'électron, la plus légère des particules élémentaires de matière) des neutrinos.
- **ANTARES**, installée en méditerranée au large de la Seyne-sur-Mer, étudie les neutrinos très énergétiques en provenance du cosmos. IceCube est une expérience similaire installée au Pôle sud.

LIENS AVEC LES AUTRES DOMAINES DE RECHERCHE

Une quantité colossale de neutrinos aurait été émise au moment du Big bang. Ces neutrinos, témoins d'un passé très ancien sont normalement toujours présents et forment un « fond cosmologique ».

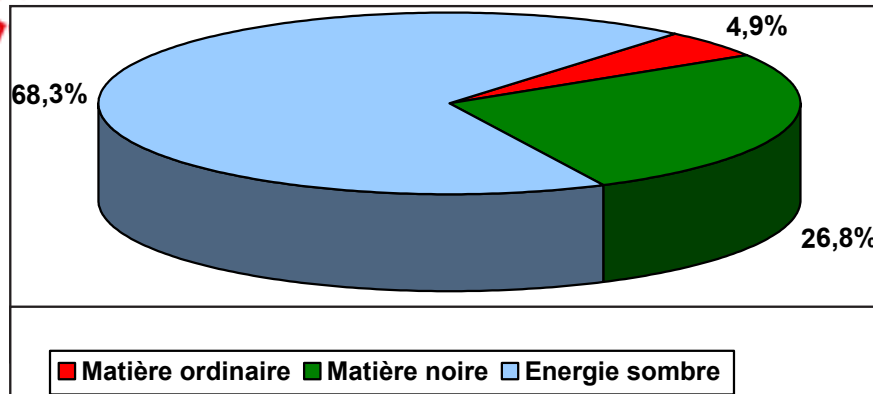
Néanmoins, leur énergie est si faible que ces neutrinos sont actuellement impossibles à détecter.

La cosmologie est la branche de l'astrophysique qui étudie la structure, l'origine et l'évolution de l'Univers.

QUELQUES DATES

- **1915** Vesto Slipher apporte la preuve expérimentale que la plupart des nébuleuses, que l'on appellera plus tard «galaxies», nous fuient : en étudiant le spectre de 15 nébuleuses, il s'aperçoit que les raies spectrales de 11 d'entre elles sont décalées vers le rouge. Il s'agit d'une conséquence de l'effet Doppler : elles s'éloignent de nous.
- **1915** Albert Einstein publie la théorie de la relativité générale qui amènera quelques années plus tard à des équations de l'Univers en expansion.
- **1925** Edwin Hubble, en observant des étoiles de type « céphéide », montre que les nébuleuses qui les hébergent ne font pas partie de notre Galaxie, mais sont d'autres galaxies très éloignées.
- **1929** Edwin Hubble, en combinant ses propres mesures de distance et le décalage vers le rouge observé par Slipher, découvre une loi de proportionnalité entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Plus une galaxie est lointaine, plus elle s'éloigne vite. Cette observation est interprétée comme la preuve d'un Univers en expansion.
- **1933** Fritz Zwicky, en étudiant les galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice, conclut à l'existence d'une «masse manquante» en son sein. La notion de **MATIÈRE NOIRE***, comme on la nommera plus tard, vient de naître.
- **1949** Sir Fred Hoyle, dans une émission de la BBC, invente par dérision le mot Big Bang.
- **1964** Arno Penzias et Robert Wilson apportent la preuve expérimentale du scénario du Big Bang : Ils détectent le **FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE**** qui serait un vestige du Big Bang.
- **1992** COBE (satellite américain) observe des fluctuations de température infimes dans le fond diffus cosmologique**, liées à des variations de densité de la distribution de matière. C'est à partir de ces dernières qu'apparaîtront les premiers embryons de galaxies quelques centaines de millions d'années plus tard.
- **1998** On s'aperçoit que l'expansion de l'Univers est accélérée. Pour expliquer ce phénomène, les astronomes sont obligés d'introduire le concept **D'ÉNERGIE SOMBRE***, qui constitue un des paramètres fondamentaux du **MODÈLE STANDARD COSMOLOGIQUE***** utilisé aujourd'hui (dit Λ CDM pour Lambda Cold Dark Matter).

*** LA MATIÈRE NOIRE ET L'ÉNERGIE SOMBRE** sont des concepts introduits pour rendre compte d'observations qui demeureraient inexpliqués dans un cadre conventionnel. Ainsi, la matière noire, de nature encore inconnue, ne se signalerait que par son attraction gravitationnelle. On l'utilise pour justifier la vitesse de rotation élevée des galaxies sur elles-mêmes et la cohésion des amas de galaxies. L'expansion accélérée de l'Univers, elle, trouverait son origine dans l'énergie sombre, une forme d'énergie qui se comporterait comme une force répulsive.



Contenu énergétique de l'Univers, tiré des observations du satellite européen Planck. 2013.

**** LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE** est la première lumière à s'être propagé librement à travers l'Univers environ 380 000 ans après sa naissance. C'est la signature de l'époque dense et chaude qu'a connue l'Univers dans le passé. Ce rayonnement a ensuite été refroidi et dilué par l'expansion. Il possède aujourd'hui une température très faible, voisine de -270°C .

***** LE MODÈLE STANDARD DE LA COSMOLOGIE** est la représentation actuellement admise de l'Univers. Il prend pour hypothèse que l'Univers est homogène (à grande échelle, il présente partout les mêmes propriétés) et isotrope (il se présente de la même façon quelle que soit la direction dans laquelle on observe). Ce modèle repose sur la théorie relativiste de la gravitation d'Einstein et prend en compte la matière noire et l'énergie sombre en plus de la matière ordinaire.

LIENS AVEC LES AUTRES DOMAINES DE RECHERCHE

Le boson de Higgs possède certaines propriétés, dont une particulièrement intéressante : son spin qui vaut 0. C'est la première particule observée à avoir cette valeur de spin. Or en cosmologie, on prévoit l'existence de particules possédant cette particularité qui pourraient être responsables de l'expansion accélérée de l'Univers. Il ne s'agit pas du boson de Higgs mais sa découverte a confirmé l'existence de telles particules.

La matière noire au cœur des recherches en cosmologie serait constituée de particules massives inconnues. Au LHC on cherche à produire directement ces particules lors des collisions très énergétiques qui s'y produisent.

Quelques millièmes de secondes après le Big Bang, la matière est dans un état unique de pression et de température. La matière est sous forme de plasma quark-gluon. Un état de la matière que l'on peut reproduire par la collision de deux protons. En effet, lors de la collision de deux protons, les quarks constituant les protons sont libérés et se retrouvent mélangés à la particule d'échange de l'interaction forte : le gluon.

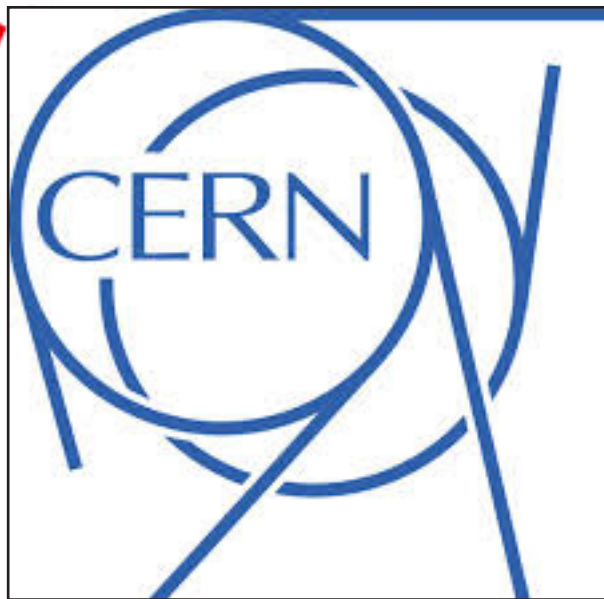
Les quatre interactions fondamentales observées aujourd'hui étaient suite au Big Bang une et une seule interaction responsable d'une unique particule d'échange. C'est ce que l'on appelle l'unification des interactions. La particule d'échange est encore inconnue.

Le CERN est une organisation européenne de recherche scientifique fondamentale.

Cette organisation a été créée en 1954 avec le soutien de l'UNESCO, suite à la suggestion en 1949 de Louis de Broglie, dans une intention de collaboration européenne.

« L'Organisation assure la collaboration entre les États européens pour les recherches nucléaires de caractère purement scientifique et fondamental, ainsi que pour d'autres recherches en rapport essentiel avec celles-ci. L'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. »
(Extrait de la convention constitutive).

Les pays fondateurs sont l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, la France, la Grèce, l'Italie, la Norvège, le Royaume-Uni, la Suède, les Pays-Bas, la Suisse et la Yougoslavie. Aujourd'hui le CERN comprend 21 membres. Il existe plusieurs statuts d'association/de partenariat avec de nombreux autres pays, selon le degré d'implication financière. Aujourd'hui tout pays peut désormais demander à devenir membre à part entière du CERN.



L'objectif premier du CERN est le progrès de la connaissance. Pour y parvenir, le CERN pilote depuis 60 ans des projets de plus en plus importants. Les mener à bien demande de nombreux développements technologiques dans tous les domaines, lesquels débouchent souvent sur des applications qui bénéficient ensuite à la société.

- Le web est né des travaux d'informaticiens du CERN.
- Les résultats informatiques. Pour améliorer le traitement de données, les physiciens du CERN ont établi les premières grandes grilles de calcul, autrement appelées *cloud computing*, l'informatique décentralisée, très à la mode désormais.
- L'imagerie médicale et la radiothérapie bénéficient des développements en physique des particules au niveau des accélérateurs et des détecteurs.

FICHE 7 : LES DÉTECTEURS CLEFS LA CHAMBRE À BROUILLARD

HISTORIQUE

Initialement pour créer une chambre à brouillard, Charles Wilson introduisait de la poussière dans la chambre à brouillard. Il s'est rendu compte que l'on pouvait créer un brouillard riche en gouttelettes avec un jet d'eau électriquement chargé. Si la chute de température est conséquente, la condensation est possible à des températures très basses sans poussières. Ainsi les ions joueraient le rôle de centres de condensation.

Il orienta donc ses recherches vers les ions. Il irradia l'air chargé de vapeur avec des rayons X et la détente de cet air produit un brouillard anormalement riche en gouttelettes. Les ions ici sont produits par les rayons X.

Après la découverte de la radioactivité et du pouvoir ionisant des rayonnements associés à ce phénomène, Charles Wilson montre qu'un minéral d'uranium a le même effet que les rayons X. En irradiant avec des rayonnements alpha et bêta, il observe des traînées filamenteuses : courtes et épaisses (particules alpha), fines et longues (électrons bêta).



© Palais de la découverte
Chantal Rousselin

Cet instrument est à l'origine de la découverte du positron, du muon et des particules étranges.

Il existe deux dispositifs expérimentaux. Dans les deux cas, il s'agit d'une enceinte emplie d'air que l'on va saturer en eau ou en alcool (selon le dispositif). La détente de cet air va entraîner la formation d'un brouillard. La détente de cet air saturé peut-être provoquée :

- Par expansion du volume de l'enceinte via un piston : c'est la chambre à expansion ou Chambre de Wilson (1911)



Les chambres de Wilson ne montrent les particules qu'une à deux fois par minute étant donné la nécessité de réaliser des cycles de détente via le piston. Le solvant utilisé peut être de la vapeur d'eau ou un mélange eau/alcool.

- Par refroidissement du support de l'enceinte : c'est la chambre à diffusion ou Chambre de Langsdorf (1939)

Les chambres de Langsdorf fonctionnent uniquement avec une phase d'alcool pur, le froid (-30°C) de la surface empêchant l'utilisation d'eau (celle-ci cristalliserait).

Les particules sont repérées par des traces blanches constituées de milliers de gouttelettes d'eau ou d'alcool qui se sont condensées à son passage. On identifie les particules par la forme des tracés (longueur, trajectoire, densité des gouttelettes). A notre altitude, 4 particules sont communément observables : les particules alpha, les protons, les électrons et les muons.

Ces détecteurs ont aussi été utilisés pour l'étude des rayons cosmiques (muons).



**RETROUVEZ UNE CHAMBRE À BROUILLARD
DANS LA PREMIÈRE SALLE DE L'EXPOSITION.**

FICHE 8 : LES DÉTECTEURS CLEFS LA CHAMBRE À FILS

DESCRIPTION

Détecteur de particules ionisées inventé en 1968 par Georges Charpak (chercheur au CERN), ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1992. Ce dispositif permet de mesurer les trajectoires de particules chargées (comme des électrons et des muons).

Il s'agit d'une enceinte emplie d'un mélange de gaz rare et d'hydrocarbures, dans laquelle on introduit des grilles planes composées de fils chargés alternativement positivement et négativement.

Lorsqu'une particule chargée pénètre dans la chambre, elle ionise le gaz. Les électrons sont alors attirés par les anodes et les ions par les cathodes. La présence de la particule est ensuite détectée par une pulsation électrique sur les fils chargés négativement.



© CERN

HISTOIRE

Avant l'invention de la chambre à fils, on utilisait préférentiellement la chambre à bulles pour mesurer les trajectoires de particules chargées. La chambre à bulles nécessitait un traitement manuel des photographies prises lors des événements impliquant un important temps mort. Avec la chambre à fils, on enregistre directement le passage des particules grâce à des circuits électroniques dédiés. Son utilisation permet donc de prendre des données à une cadence bien plus élevée : elle marque le passage de l'ère manuelle à l'ère informatique pour les expériences de physique des particules. La chambre à fils a permis d'enregistrer directement la trajectoire de la particule ce qui accélère le traitement de données.



COMPLÉTER SA VISITE

6. ACTIVITÉ POUR PROLONGER SA VISITE

CRÉER UN BROUILLARD DANS UNE BOUTEILLE

Cette activité permet de comprendre que la condensation de l'eau nécessite la présence de poussières (« centres de condensation »). C'est une étape importante de la réflexion de Charles Wilson.

DESCRIPTION

- Prendre une bouteille en plastique vide de 2 litres. Ajouter un peu d'eau. Agiter la bouteille. On a humidifié l'air contenu dans la bouteille.
- Introduire dans la bouteille une allumette enflammée qui en s'éteignant au contact de l'eau produit beaucoup de fumée. Serrer fort la bouteille.

La détente brutale de l'air s'accompagne de son refroidissement. Les poussières introduites par la fumée font office de centre de condensation.

Dans une chambre à brouillard les centres de condensation sont les ions formés le long des trajets suivis par les particules subatomiques ionisantes (ex : particules cosmiques ou issues de la radioactivité d'un élément).

POUR ALLER PLUS LOIN : CRÉER SA CHAMBRE À BROUILLARD

Voici quelques liens utiles pour créer une chambre à brouillard avec vos élèves.

- WWW.CLOUDYLABS.FR
- WWW.SCIENCEINSCHOOL.ORG
- *Comment réaliser une chambre à brouillard ?* Christian Mariaud in Le Bup physique chimie, 940 (Janvier 2012)





7. BIBLIOGRAPHIE

De nombreux articles, rédigés par des médiateurs scientifiques du Palais de la découverte autour de la physique des particules, sont parus dans la revue Découverte. En voici une sélection :

- *Les rayons cosmiques primaires, messagers de l'Univers*, un Découverte n°385, mars-avril 2013.
- *Les rayons cosmiques, 100 ans déjà !*, Guillaume Trap, in Découverte n° 383, novembre-décembre 2012.
- *Du Palais au Pic, les rayons cosmiques pour tous publics*, Guillaume Trap et Julien Babel, in Découverte n°383, novembre-décembre 2012.
- *LHC, à la découverte de la matière*, Julien Babel, in Découverte n°376, septembre-octobre 2011.
- *Les mystères de la chambre à brouillard*, Kamil Fadel, in Découverte n°364, septembre-octobre 2009.

- *LHC : enquête sur le boson de Higgs*, Michel Davier, collection Le Collège, Le Pommier-Universcience, 2013. Un ouvrage co-édité par Universcience.

- **[HTTP://WWW.LHC-FRANCE.FR.](http://www.lhc-france.fr)**

Un site très complet. Vous y retrouverez une présentation du CERN, de l'accélérateur, des portraits de chercheurs et techniciens... Les nombreuses vidéos et les BD de Lison Bonnet constituent un bon support pédagogique.



8. RESSOURCES VIDÉOS

UNIVERSCIENCE.TV est une webTV scientifique hebdomadaire. Tous les vendredis, une sélection de programmes, de thématiques et formats variés est mise en ligne.

Le site propose un large choix de vidéos libres de droit réalisées par Universcience et nos partenaires. Ils ne sont pas téléchargeables. Si vous disposez d'un accès Internet, vous avez la possibilité de les visionner en classe.

Voici une sélection de vidéos autour de l'exposition.

- **PRIX NOBEL 2013 : LE BOSON DE HIGGS**

Interview avec le physicien Etienne Klein, à l'occasion du prix Nobel décerné à Peter Higgs et François Englert pour la découverte du boson de Higgs.

Entretien réalisé par Caroline Ando. Réalisation : Christian Buffet. Universcience, 2012. Durée : 10 min.

- **BOSON DE HIGGS : LE GRAAL DES PHYSICIENS ?**

Débat entre Laurent Chevalier, physicien au CEA, et Jean Iliopoulos, physicien à l'École normale supérieure. Cette vidéo a été réalisée juste avant l'annonce, le 4 juillet 2012, de la découverte au Cern du boson de Higgs.

Réalisation : Sylvie Allonneau, Universcience, 2012. Durée : 28 min.

- **LA MASSE DES PARTICULES**

Le physicien Étienne Klein se livre à l'exercice du tableau blanc et bouleverse nos idées reçues sur la physique, et notamment la masse des particules.

Réalisation : Roland Cros, Universcience, 2010. Durée : 6 min.

- **ENTRETIEN AVEC PIERRE-GILLES DE GENNES : L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE**

C'est par leur masse que l'on distingue les étoiles des planètes : l'étoile Soleil est 1 million de fois plus massive que la planète Terre. Le Soleil brille depuis 4,5 milliards d'années et pour encore 5 milliards d'années. Les étoiles sont composées d'atomes d'hydrogène et d'hélium qui, à très haute température, se combinent : c'est la fusion nucléaire.

Journaliste : Elisabeth Martichoux, Réalisation : France 5, 2004. Durée : 5 min 30

- **CHAMBRES À BULLES / PARTICULES ÉLÉMENTAIRES**

Ce film aborde les techniques utilisées pour la détection et la visualisation des particules élémentaires, d'abord dans les chambres à bulles, puis dans les chambres à fils.

Réalisation : Hervé Colombani, CNRS Images, Cité des sciences et de l'industrie, 2005. Durée : 2 min.



9. CONFÉRENCES ORGANISÉES AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Dans le cadre de la thématique Cap sur l'invisible, le Palais de la découverte propose un cycle de conférences Des particules... pas si élémentaires, les samedis à 15h.

- **15 NOVEMBRE. ACCÉLÉRATEURS : GIGANTESQUES MICROSCOPES POUR LA MATIÈRE**

Comment le modèle standard des particules s'est-il construit ? Des accélérateurs de particules toujours plus puissants, pourquoi ? Que voit-on dans les produits de collisions de particules ?

Olivier Napoly, physicien au service des accélérateurs de cryogénie et de magnétisme du CEA, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers ; Gilles Cohen-Tannoudji, ancien directeur du département des sciences et de la matière du CEA, chercheur émérite au Laboratoire de recherche sur les Sciences de la Matière (Larsim).

- **22 NOVEMBRE. LES GRANDES LEÇONS D'UN PETIT BOSON**

François Englert et Peter Higgs, prix Nobel de physique en 2013, ont révolutionné notre façon de comprendre la masse. Comment une propriété aussi évidente des objets matériels a-t-elle pu être remise en question ?

Étienne Klein, directeur du Larsim, CEA ; Sandrine Laplace, chercheuse au CNRS, Institut national de physique nucléaire (IN2P3), Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies à Paris, co-responsable de la recherche du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS du LHC.

- **29 NOVEMBRE. ALICE AU PAYS DE LA MATIÈRE PRIMORDIALE**

Aujourd'hui, physiciens et astrophysiciens collaborent pour comprendre l'Univers à ses débuts. À partir de collisions très violentes de particules, l'expérience du LHC, ALICE, reproduit l'état dans lequel se trouvait la matière, quelques microsecondes après le Big bang.

Sébastien Descotes-Genon, chercheur au CNRS, directeur du Laboratoire de physique théorique d'Orsay ; Raphaël Granier, chercheur au CNRS, IN2P3, Laboratoire Leprince-Ringuet dans l'expérience CMS.

- **6 DÉCEMBRE. À LA RECHERCHE DE L'ANTIMATIÈRE**

Si la nature respectait la symétrie, le Big bang aurait produit autant d'antimatière que de matière dans l'Univers. Mais l'antimatière est rare, à cause d'une brisure de symétrie que les physiciens ont découverte, il y a 50 ans. Qu'avons-nous appris depuis à son sujet ?

Jérôme Charles, chercheur au CNRS, Centre de physique théorique, Marseille ; Stéphane Monteil, enseignant-chercheur, université Blaise-Pascal, Laboratoire de physique corpusculaire dans l'expérience LHCb, Clermont-Ferrand.

- **13 DÉCEMBRE. VERS UNE NOUVELLE PHYSIQUE ?**

Le modèle standard des particules ne permet pas de décrire les phénomènes à très haute énergie de l'Univers primordial parce qu'il ignore la force de gravitation. Assistons-nous à l'émergence d'une nouvelle physique ?

Jean Orloff, enseignant-chercheur à l'université Blaise-Pascal, Laboratoire de physique corpusculaire, Clermont-Ferrand ; Pierre Binétruy, enseignant-chercheur à l'université Paris-Diderot, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris.



10. LES RESSOURCES DE L'INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Fort de son réseau de 25 laboratoires, infrastructures et plateformes de recherche, l'**INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES** du CNRS (CNRS/IN2P3) propose de nombreuses ressources pédagogiques et de vulgarisation scientifique à destination des enseignants, des lycéens et des étudiants, ainsi que pour le grand public. A l'échelle nationale, cette offre est regroupée au sein de l'**ÉCOLE DES DEUX INFINIS** (http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulycee/introduction.htm).

Le CNRS/IN2P3 propose diverses offres pédagogiques. On peut citer :

- Les **CONFÉRENCES** dans les lycées et visites de laboratoires (sur demande ou lors de journées portes ouvertes comme pour la Fête de la Science).
- Les **MASTERCLASSES INTERNATIONALES** qui permettent à une classe de passer une journée dans un laboratoire, de découvrir le métier de chercheur et l'aspect international de nos disciplines, en travaillant sur de vraies données du grand collisionneur LHC du CERN.
- Le programme **COSMOS À L'ÉCOLE**, en partenariat avec le dispositif ministériel Sciences à l'école. Des appels à candidatures réguliers permettent aux enseignants sélectionnés de disposer dans leur établissement et pour une durée de trois ans d'un détecteur de rayons cosmiques performant, le cosmodétecteur, qui peut être utilisé pour de nombreuses activités en lien avec les programmes scientifiques de lycée.
- Les mallettes **COSMIX**, des détecteurs de rayons cosmiques portables qui permettent de découvrir ce rayonnement en provenance du cosmos et de s'initier à la problématique de la détection des particules.
- Le projet pédagogique **PASSEPORT POUR LES DEUX INFINIS**, en partenariat avec le CEA/IRFU et les universités. Ce projet est centré sur un livre éponyme publié aux éditions Dunod et qui est envoyé gratuitement (dans la limite des stocks disponibles) aux professeurs de sciences physiques qui en font la demande sur internet.

Vous trouverez sur internet la description de tous ces projets, ainsi que la présentation des formations à destination des enseignants et d'autres initiatives pédagogiques.

N'hésitez pas à contacter le laboratoire CNRS/IN2P3 le plus proche de chez vous ou à écrire à ecole2infinis@in2p3.fr.



DÉTAILS PRATIQUES

ADRESSE

avenue Franklin D. Roosevelt
75008 Paris
01 56 43 20 20

[HTTP://WWW.PALAIS-DECOUVERTE.FR](http://www.palais-decouverte.fr)

ACCES

Métro Champs-Élysées Clémenceau (L1, L13) ou Franklin Roosevelt (L9)
Bus : 28, 42, 52, 63, 72, 73, 80, 83, 93
R.E.R : Invalides

HORAIRES D'OUVERTURE

Du mardi au samedi de 9h30 à 18h, le dimanche de 10h à 19h.
Fermeture le lundi.

TARIFS (PAR ELEVE)

3,50 jusqu'au 31 janvier 2015, puis 4.50 euros. (2.50 euros pour les ZEP)
Ce tarif vous donne droit à la réservation de deux animations par élève maximum.

RESERVATIONS

La réservation est possible à partir du lundi 1er septembre, et pour toute l'année scolaire. En contactant le bureau des groupes

- Par téléphone

au 01 56 43 20 25.

Du lundi au vendredi, de 9h à 16h.

- Par courrier fax ou courriel

Palais de la découverte

Bureau des groupes

Avenue Franklin Roosevelt

75008 Paris

fax : 01 56 43 20 29

groupes.palais@universcience.fr

Ce document a été réalisé par le service éducation d'Universcience, en collaboration avec les médiateurs scientifiques et la direction des expositions du Palais de la découverte. Merci à Julia Blumental, pour son travail sur ce dossier durant son stage. 2014.