

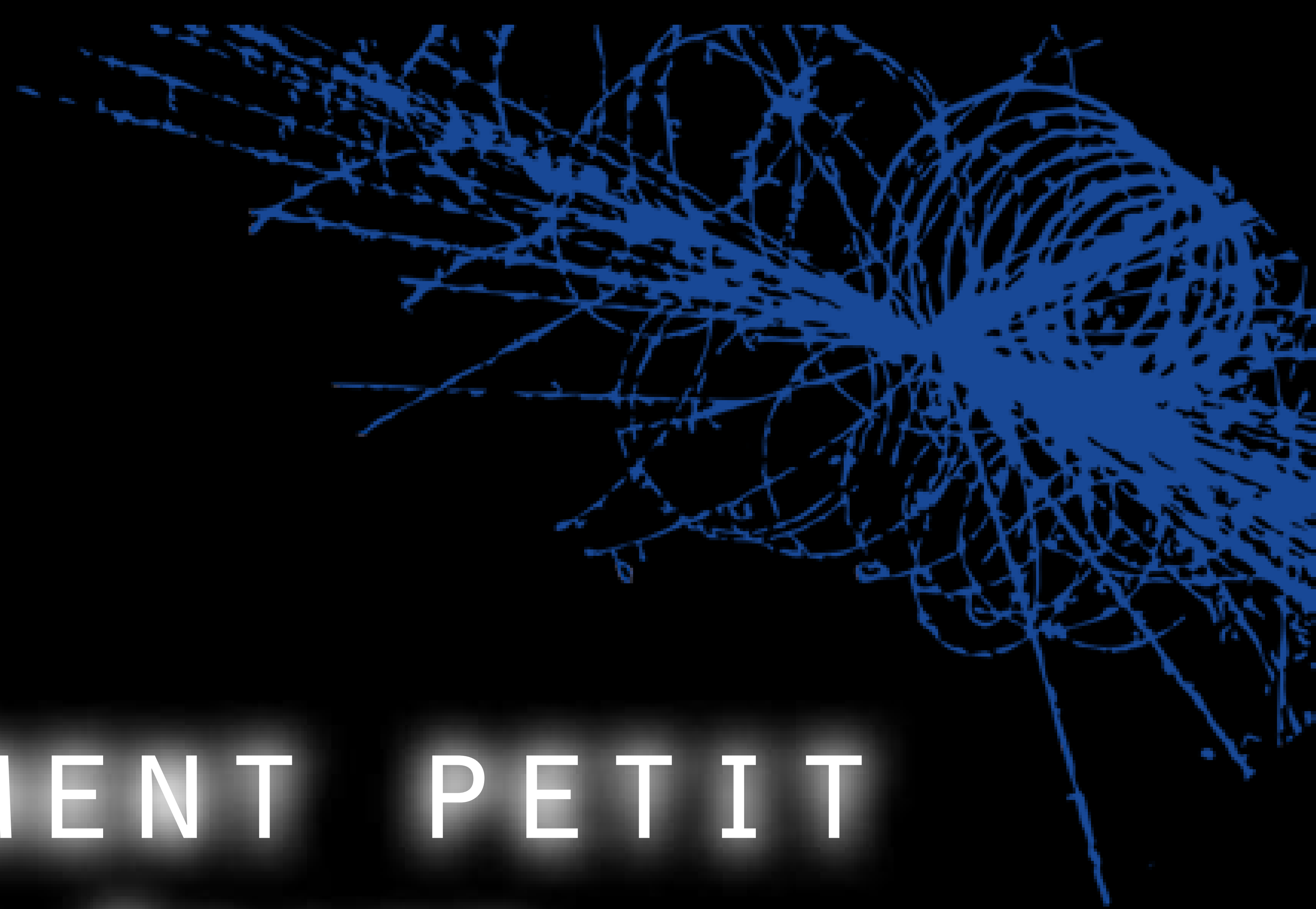
POUR SONDER LES MYSTÈRES DE
L'UNIVERS...



DANS SES PLUS PETITS COMPOSANTS...

LHC...

L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND



UNE COLLABORATION MONDIALE...

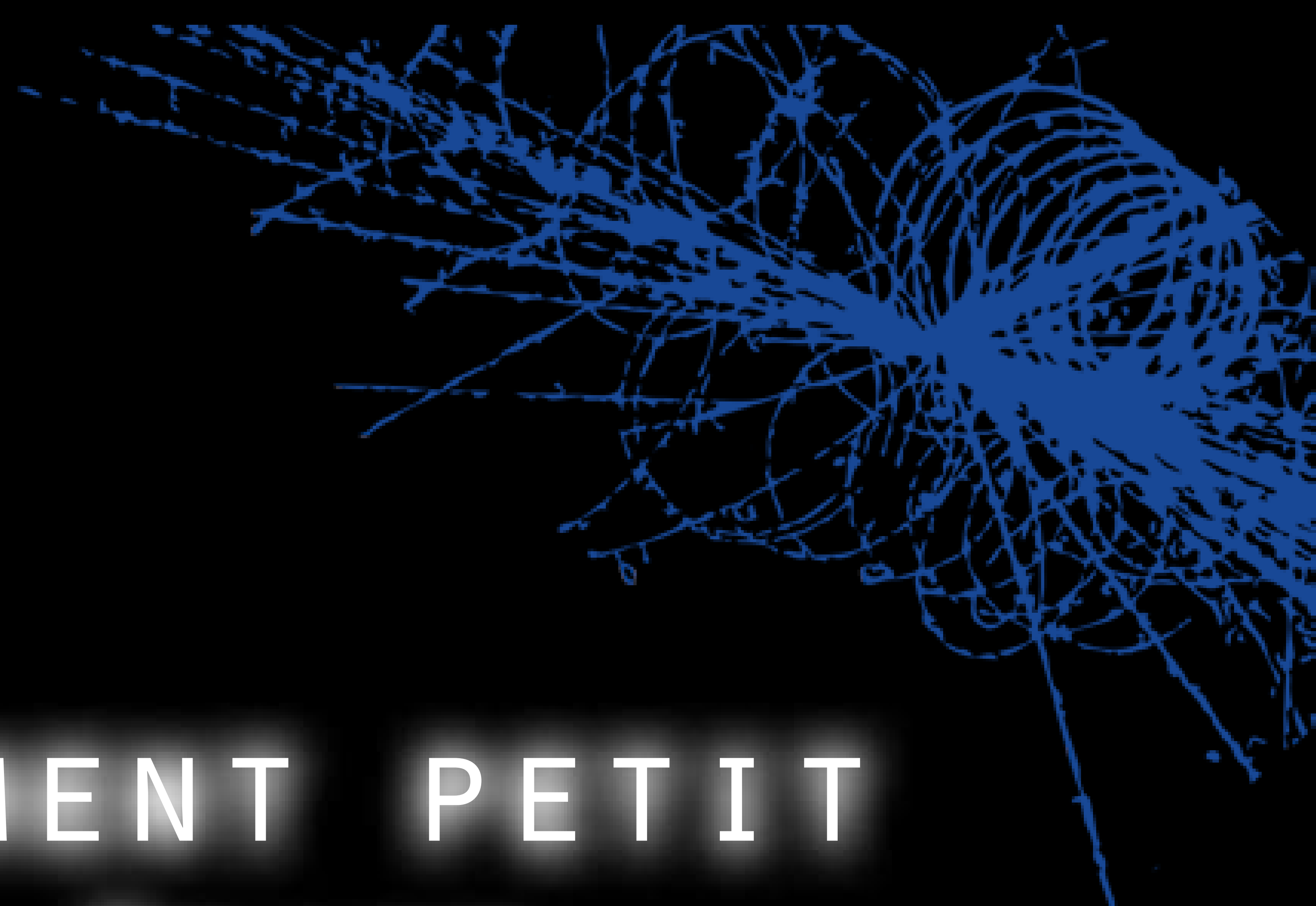
Argentine, Afrique du Sud, Allemagne,
Arménie, Australie, Autriche,
Azerbaïdjan, Belgique, Biélorussie,
Brésil, Bulgarie, Canada, Chili,
République Populaire de Chine,
Chypre, Colombie, République de
Corée, Croatie, Cuba, Danemark,
Émirats Arabes Unis, Espagne,
Estonie,
États-Unis, Finlande, France, Géorgie,
Grèce, Hongrie, Inde, Iran,
Irlande, Islande, Israël, Italie, Japon,
Kazakhstan, Malte, Maroc,
Mexique, Norvège, Nouvelle Zélande,
Ouzbékistan, Pakistan, Pays-Bas,
Pologne, Portugal, Slovaquie,
Roumanie, Royaume-Uni, Russie,
Serbie,
Suède, Suisse, Taïwan, Tchéquie,
Turquie, Ukraine...



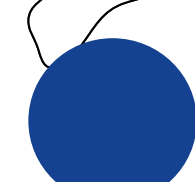
... DE PLUS DE 10 000 SCIENTIFIQUES
DE 500 INSTITUTS ET ENTREPRISES

LHC...

L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND



S'INSTALLE À LA FRONTIÈRE
FRANCO-SUISSE...



Le Cern est un laboratoire européen pour la recherche en physique des particules qui a été fondé en 1954. Situé près de Genève, il compte 28 états membres et emploie 2500 personnes environ.

Plus de 8000 scientifiques visiteurs viennent au Cern pour mener des recherches.

LHC...

L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND

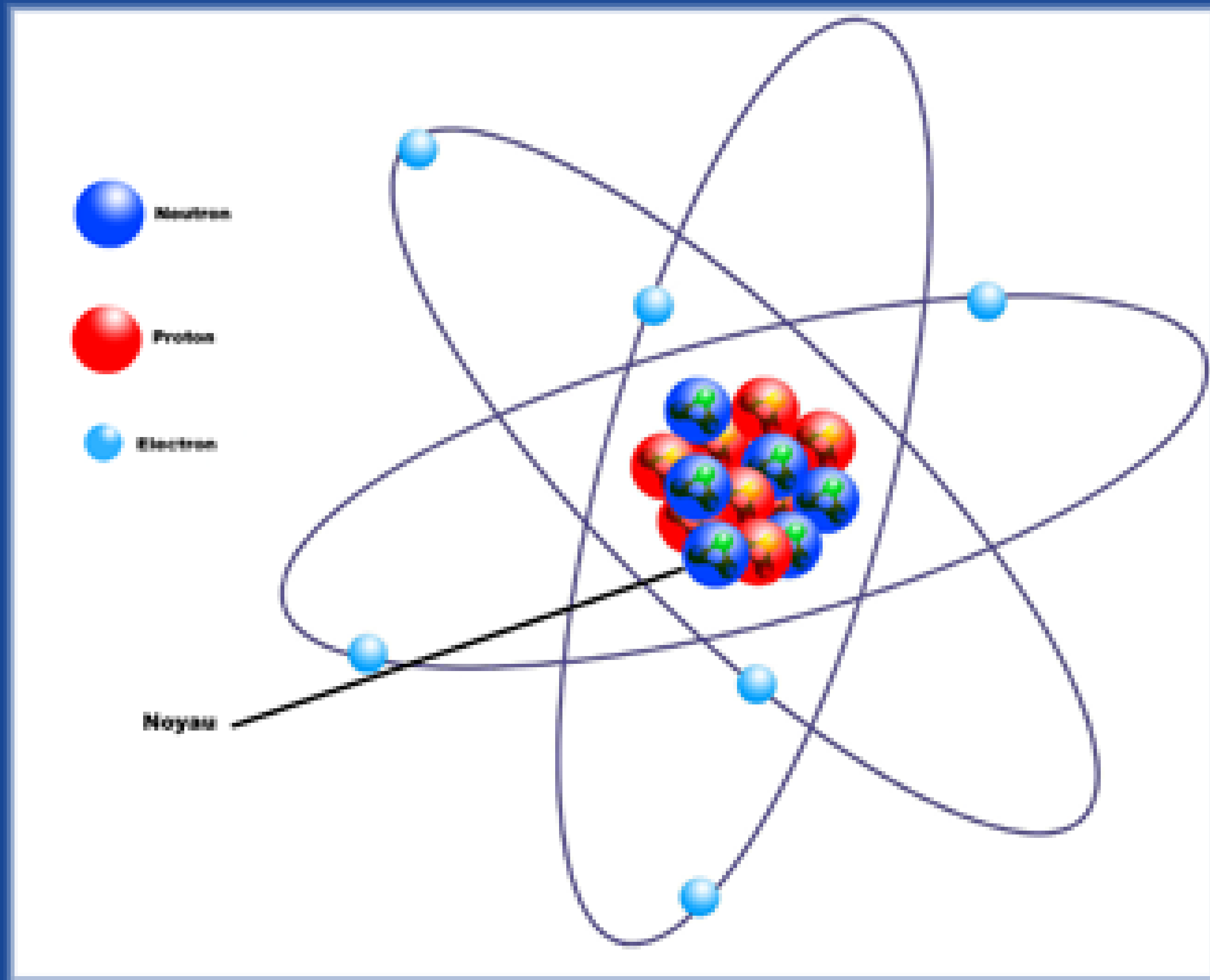
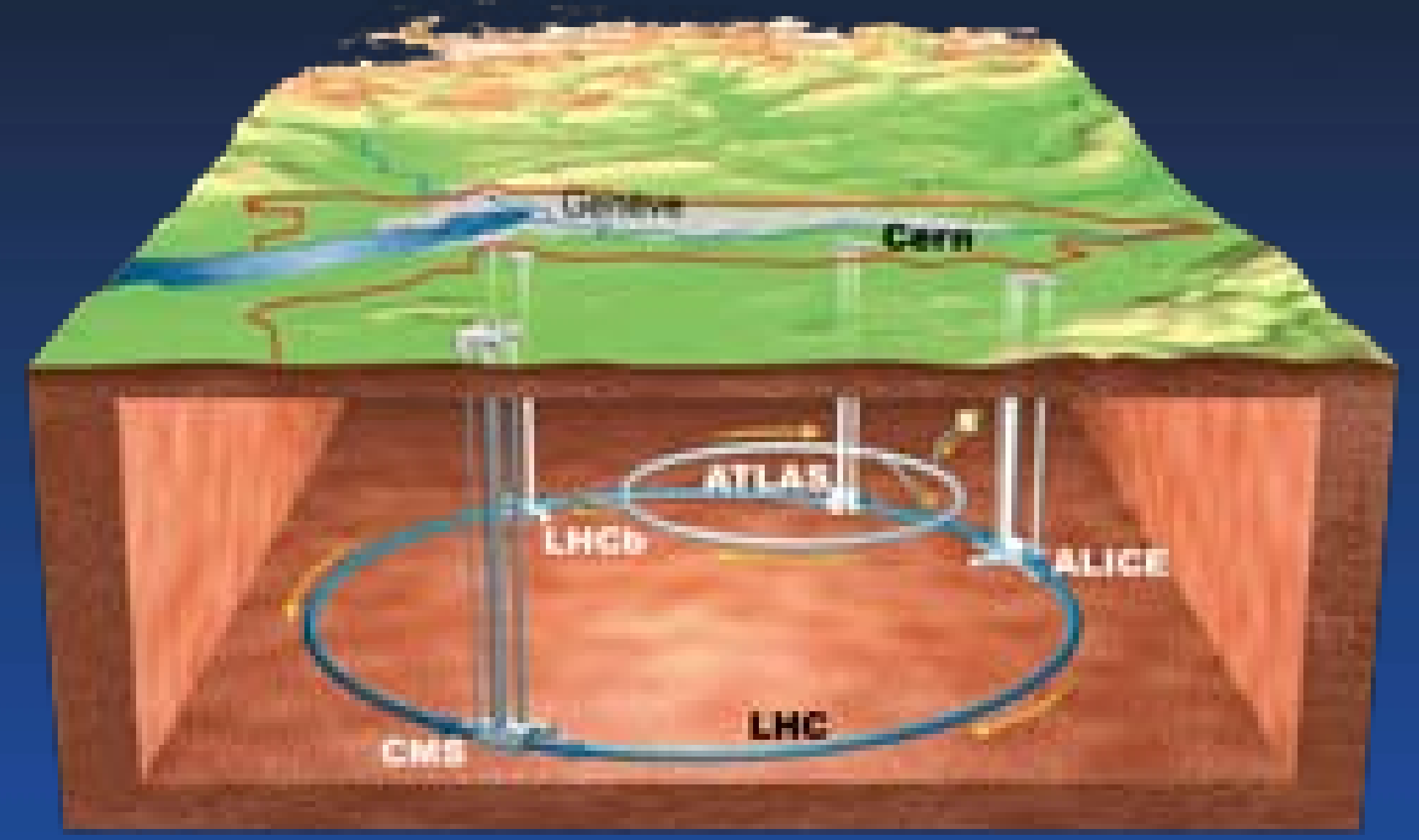


... POUR TRAVAILLER AUPRÈS DU LHC

Le LHC, c'est le Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider)... le plus grand collisionneur jamais construit !

GRAND ?

Il s'agit d'un gigantesque anneau de 27 kilomètres de circonférence, disposé dans un tunnel creusé à 100 mètres de profondeur entre la France et la Suisse, tout près de Genève.



HADRONS ?

Les noyaux des atomes sont composés de neutrons et de protons. Ceux-ci font partie de la grande famille des hadrons.

Le LHC utilise des noyaux d'hydrogène et de plomb.

Le noyau de l'atome de plomb est fait de 82 protons et 124 neutrons, soit 206 hadrons.

COLLISIONNEUR ?

Des milliards de hadrons sont accélérés en sens opposés jusqu'à une vitesse très proche de celle de la lumière pour entrer en collision en quatre points de l'anneau.



MAIS POURQUOI FAIRE DE TELLES COLLISIONS ?

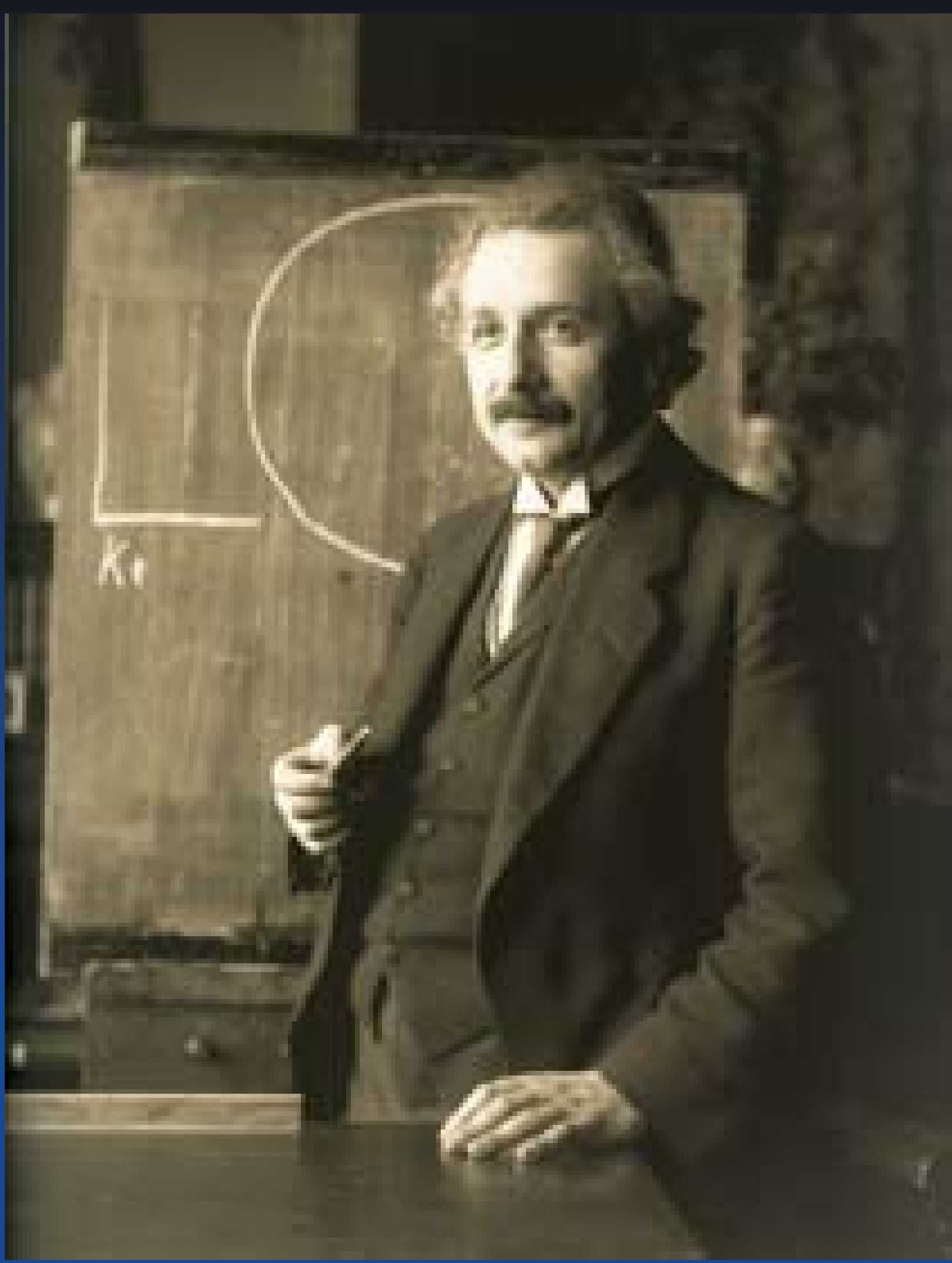
LHC...

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



LE GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS : UN OUTIL DE CRÉATION !

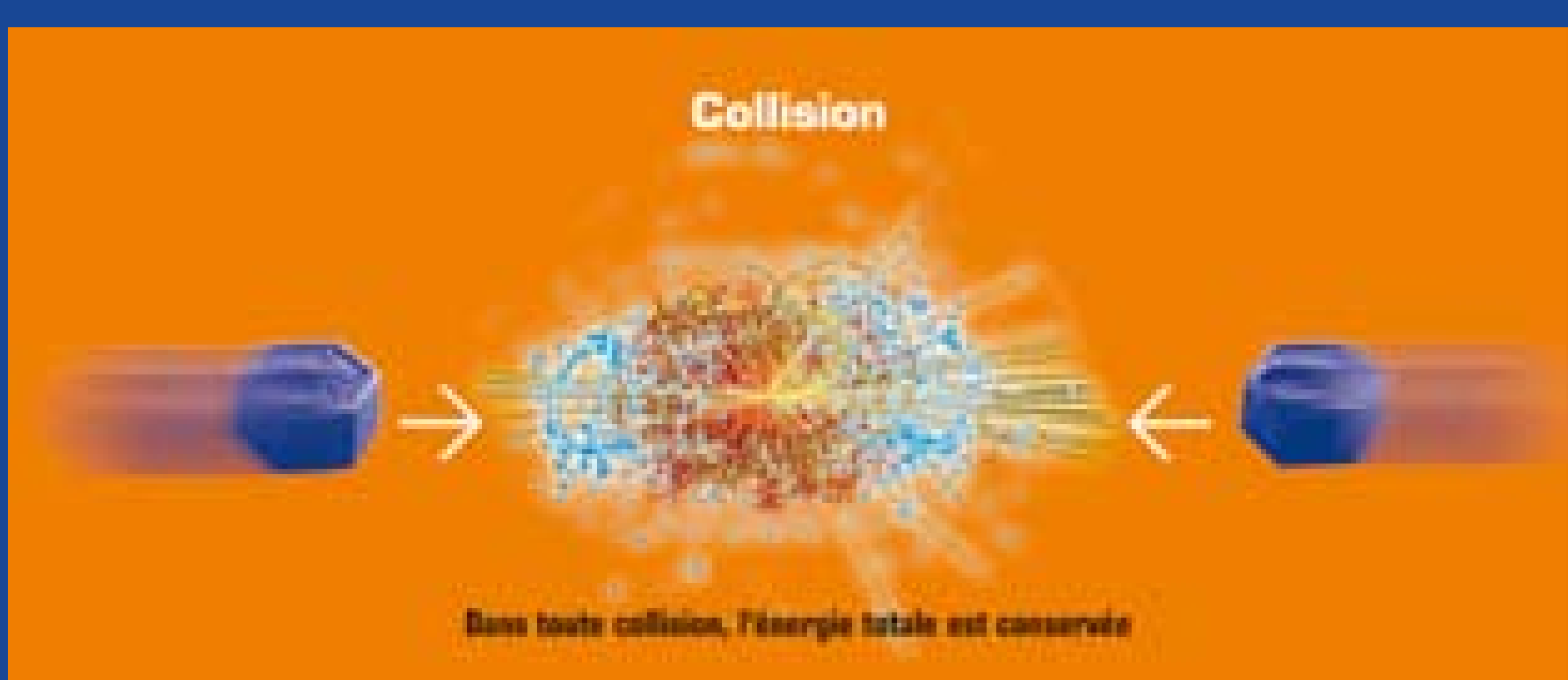
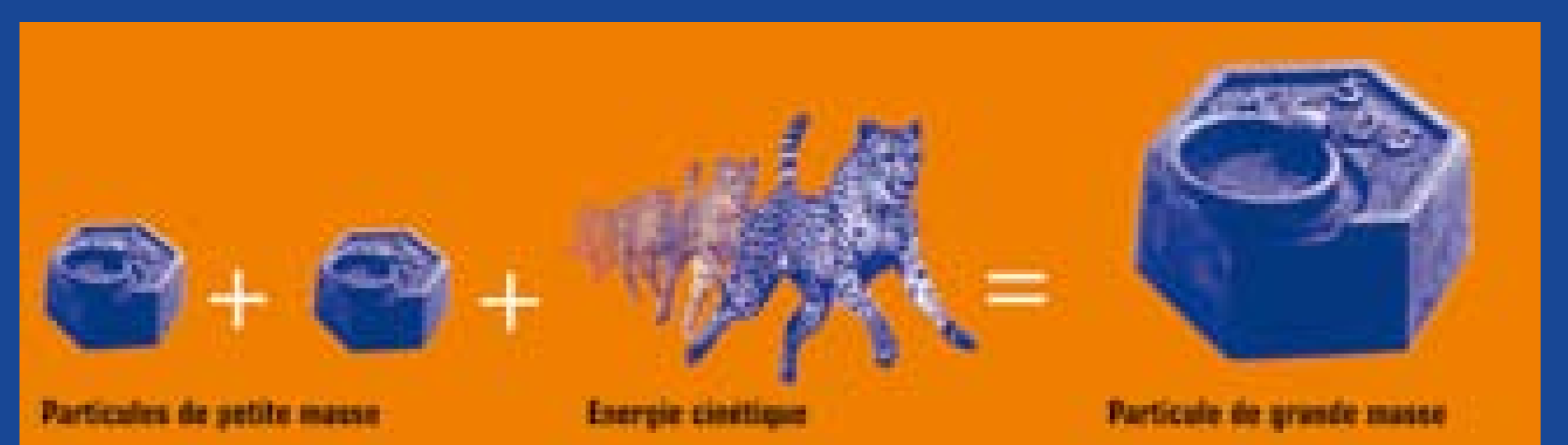


$$E = M c^2$$

Avec les travaux d'Albert Einstein, on sait que la masse M est une forme d'énergie (c représente la vitesse de la lumière dans le vide). On peut donc transformer l'énergie en masse et inversement !

Pour transformer de l'énergie en masse, il faut la concentrer suffisamment.

En accélérant des protons, le LHC concentre dans ces derniers une énergie équivalente à environ 14 000 fois leur masse.



Lors de la collision entre deux protons, la concentration d'énergie devient telle qu'on peut créer des particules... certaines connues, d'autres prédites ou d'autres encore inconnues.

Les phénomènes violents de l'univers produisent naturellement ce type de collisions sur Terre. L'avantage du LHC, c'est de réaliser ces collisions en quatre points précis autour desquels nous pouvons installer des détecteurs extrêmement performants.

LHC... L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



COMMENT ACCÉLÉRER DES PARTICULES ?

LA TÉLÉVISION : UN ACCÉLÉRATEUR D'ÉLECTRONS

Dans une télévision à tube cathodique, l'image est créée par un faisceau d'électrons qui balaye les différents pixels de l'écran.

Le faisceau est obtenu en arrachant des électrons à un filament et en les accélérant à l'aide d'un champ électrique constant.

Cette technique est également utilisée avec des protons, mais son utilisation est limitée à des énergies bien plus basses que celles du Grand Collisionneur de Hadrons.



UN PEU DE SURF

Pour obtenir des énergies plus grandes, les champs électriques sont «déplacés» avec les particules. Plus précisément, on utilise des ondes électromagnétiques préparées avec soin dans ce qu'on appelle des «cavités accélératrices». Les particules vont alors être poussées par le champ électrique de l'onde comme un surfeur est poussé par la vague.

Pour arriver à l'énergie souhaitée au LHC, il faudrait des cavités accélératrices de 1400 km de long... Soit plus que la distance Paris-Madrid !
Même en plusieurs morceaux, cela semble impossible.

ALORS COMMENT ATTEINDRE CETTE ÉNERGIE COLOSSALE QUE REPRÉSENTENT 7 TeV ?

LHC...
L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND



LA SOLUTION ADOPTÉE AU LHC

LES VERTUS DU CERCLE

Le principe est de faire tourner les particules dans un tunnel circulaire de façon à ce qu'elles passent et repassent dans les cavités accélératrices acquérant chaque fois un peu plus d'énergie.

Pour maintenir la trajectoire des particules sur le cercle, on utilise des dipôles magnétiques. Cependant, plus l'énergie des particules est élevée, plus leur trajectoire est difficile à courber.

C'est pour cela que le LHC a une si grande circonférence : cela permet d'avoir des courbes presque droites !



UNE ÉNERGIE PRODIGIEUSE : 7 TÉRA ÉLECTRON VOLT



Un électron volt c'est l'énergie acquise par un électron lorsqu'il franchit une différence de potentiel de 1 Volt.

1 TeV = 1 Téra électron volt = 1 000 000 000 000 eV

Au LHC, les protons accélérés auront une énergie de 7 TeV. C'est la même énergie que celle d'un moustique en vol. Pour un proton qui est beaucoup plus petit, c'est énorme !

DANS LES COLLISIONS DE PARTICULES, C'EST LA CONCENTRATION D'ÉNERGIE QUI EST EXCEPTIONNELLE.

Lorsque vous frappez dans vos mains, vous provoquez une « collision » d'une énergie sans doute plus élevée que celle des protons dans le LHC, mais beaucoup moins concentrée.

Si vous faites le même mouvement avec une aiguille placée perpendiculairement entre vos mains, toute l'énergie sera concentrée dans l'aiguille et l'effet certainement beaucoup plus remarquable !



LHC...

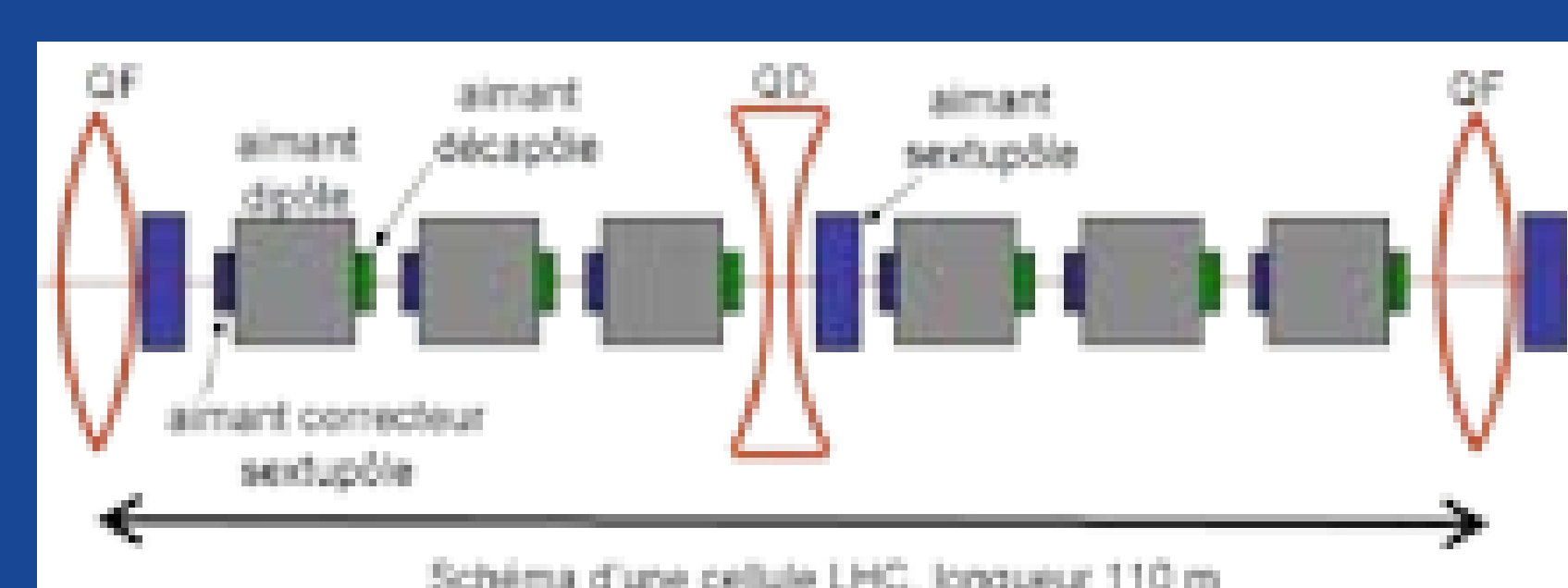
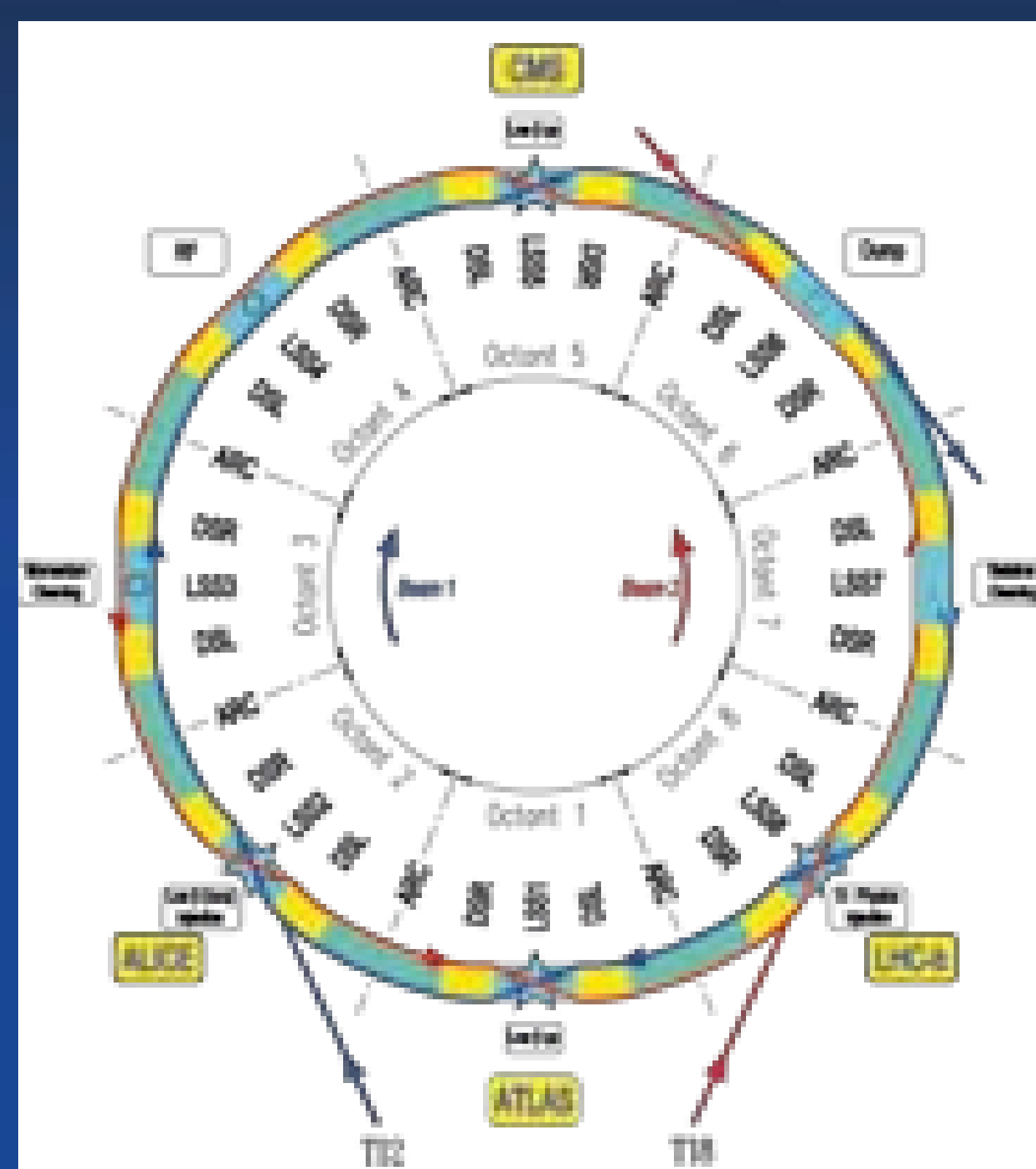
L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

LE LHC : QUELQUES DÉTAILS DE CONSTRUCTION

LA MACHINE N'EST PAS PARFAITEMENT CIRCULAIRE. ELLE EST COMPOSÉE DE 8 SECTIONS COURBES ET DE 8 SECTIONS DROITES.

LES SECTIONS COURBES

Chaque arc contient une trentaines d'unités magnétiques comportant des dipôles pour courber les trajectoires et des quadripôles ou sextupôles qui permettent de conserver la finesse du faisceau. Ces unités magnétiques fonctionnent un peu comme des lentilles optiques.



Quelque 1232 dipôles sont utilisés. Ils fournissent un champ magnétique de 8,3 tesla. Un record à cette échelle. Le courant nécessaire pour obtenir ce champ magnétique impose l'utilisation de fils supraconducteurs refroidis à la température de l'Hélium superfluide ($-271,3^{\circ}\text{C}$).

LES SECTIONS DROITES

Elles sont également constituées d'unités magnétiques mais ne contiennent pas de dipôles. Quatre d'entre elles focalisent les faisceaux vers les points de collisions des expériences Alice, Atlas, CMS et LHCb.

Une seule section droite contient une «cavité accélératrice» qui permet d'accélérer les particules à chaque tour.



L'ÉNERGIE STOCKÉE DANS LES CHAMPS MAGNÉTIQUES DU LHC EST ÉQUIVALENTE À L'ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN AIRBUS A380 VOLANT À 700 KM/H.

LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



LE LHC EN QUELQUES CHIFFRES

1 SECONDE

Le faisceau de hadrons du LHC se déplace à plus de 99,99% de la vitesse de la lumière. À cette vitesse, il parcourrait plus de 7 fois le tour de la Terre en une seconde.

600 MILLIONS DE COLLISIONS

C'est ce qui est produit chaque seconde en chacun des quatre points de collisions disposés autour des 27 km de tunnel.

346 MILLIONS DE JOULES

C'est l'énergie totale d'un faisceau de protons. Elle est équivalente à l'énergie cinétique d'un camion de 38 tonnes se déplaçant à 486 km/h.

-271,3 °C

Les aimants supraconducteurs du LHC doivent fonctionner à -271,3 °C, soit à 1,8° au dessus du zéro absolu, une température inférieure à celle de l'espace interstellaire. Il faut 1 mois pour refroidir les aimants à cette température.

0,000000000001 ATMOSPÈRE

Pour pouvoir tourner longtemps et sans heurt, les faisceaux doivent circuler dans un vide 10 fois meilleur que celui qui règne sur la Lune.

10 FOIS LA DISTANCE TERRE - SOLEIL

C'est la longueur des 6400 filaments supraconducteurs du LHC mis bout à bout. Ils ont une épaisseur de 0,07mm, soit 10 fois plus fin qu'un cheveu.

3 MILLIARDS D'EUROS

C'est le coût de la construction du LHC. Les investissements se sont étalés sur près de 14 ans.

LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



COMMENT «PHOTOGRAPHER» CES COLLISIONS ?

UN FEU D'ARTIFICE AUTOUR DES COLLISIONS

Lors des collisions, de nombreuses particules sont produites. Pour comprendre ce qui se passe lors d'une collision, on doit identifier les particules sortantes, leur trajectoire et leur énergie. L'image que nous souhaitons enregistrer est donc une image en trois dimensions qui contient énormément d'informations.



DES COUCHES D'OIGNON

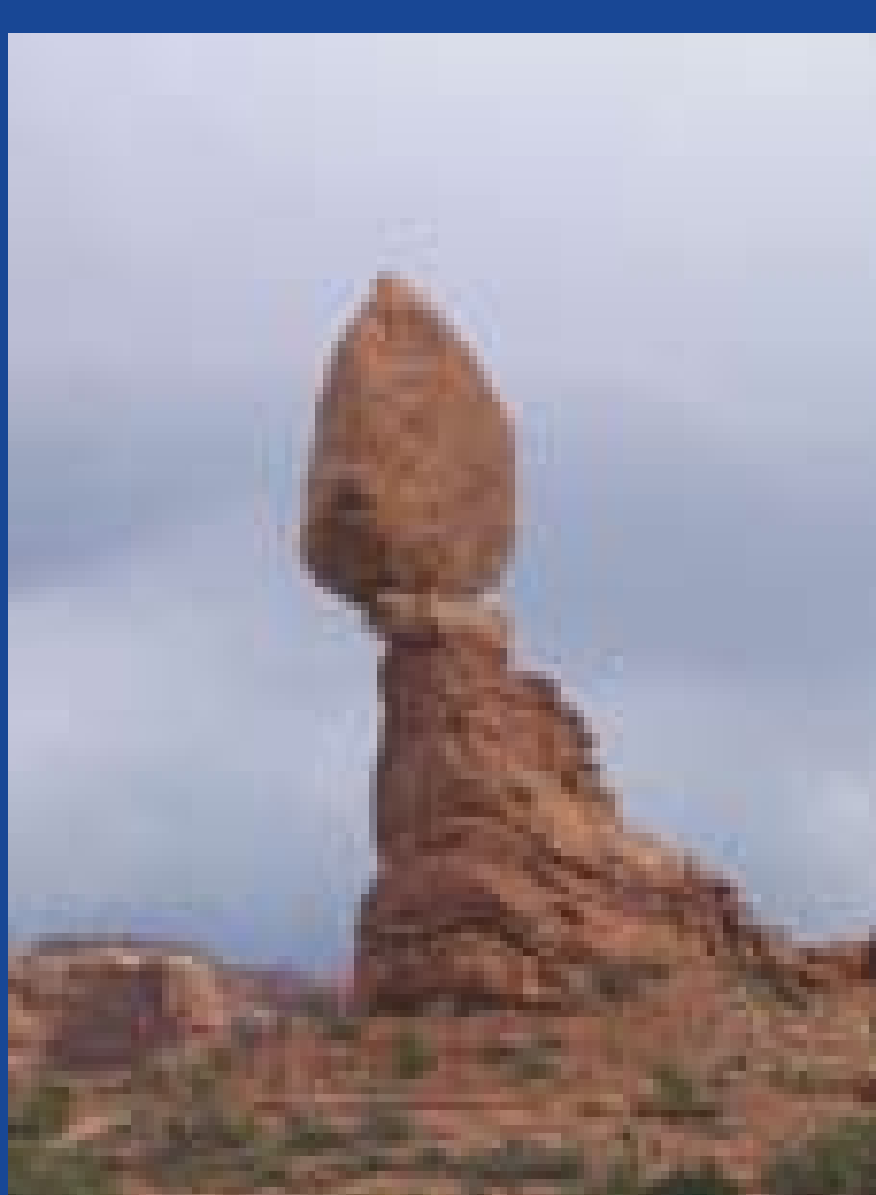
Les détecteurs qui permettent de former ces images sont construits en couches successives. Ils sont généralement placés autour du point de collision tels des couches d'oignon pour éviter au maximum qu'une particule puisse sortir sans être détectée.



LES PARTICULES TRAVERSENT LES DÉTECTEURS

La matière — et donc celle qui compose le détecteur — est «pleine de vide» et les particules peuvent la traverser avec plus ou moins de facilité en bousculant éventuellement quelques atomes ou électrons.

C'est le type de «bousculade» engendrée qui va permettre d'identifier la particule.



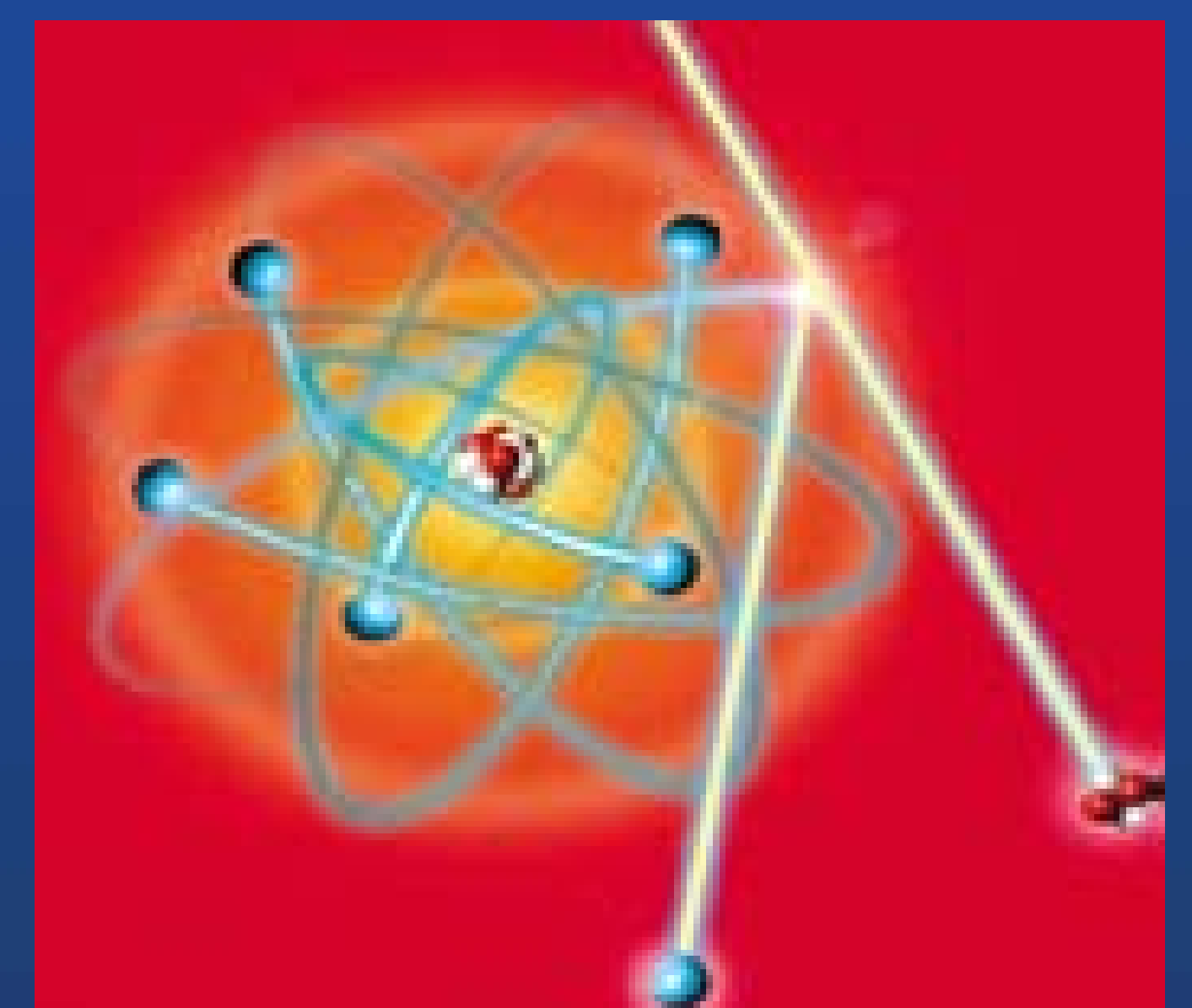
L'INSTABILITÉ POUR DÉTECTER L'INFIME

La «bousculade» produite est généralement infime et l'art de la détection demande parfois de sélectionner des matériaux dont les atomes ou les électrons sont dans un équilibre très instable de façon à rendre le passage de particules visible ou, au moins, enregistrable sur nos ordinateurs.

L'IONISATION COMME PRINCIPE

Le principe général de détection est l'ionisation d'atomes produite par le passage de particules. Elle permet d'engendrer un courant qui pourra être enregistré.

Regardez la chambre à étincelles : les étincelles sont rendues possibles grâce à l'ionisation du gaz placé à l'intérieur.



LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



LES DIFFÉRENTES COUCHES D'UN DÉTECTEUR

LE TRAJECTOGRAPHE

Une succession de détecteurs mesure plusieurs points de la trajectoire des particules chargées. La précision obtenue est de quelques millièmes de millimètre. Ainsi, le trajectographe permet de déterminer la courbure et l'origine de la trajectoire.

LE CALORIMÈTRE

Le calorimètre arrête les particules et permet ainsi de déterminer leur énergie totale. Il doit donc être suffisamment épais. Il est divisé en deux parties. La première, appelée calorimètre électromagnétique, est optimisée pour absorber complètement les électrons et les photons. La deuxième, le calorimètre hadronique, est optimisée pour arrêter les hadrons (protons, neutrons...) qui traversent la première partie.

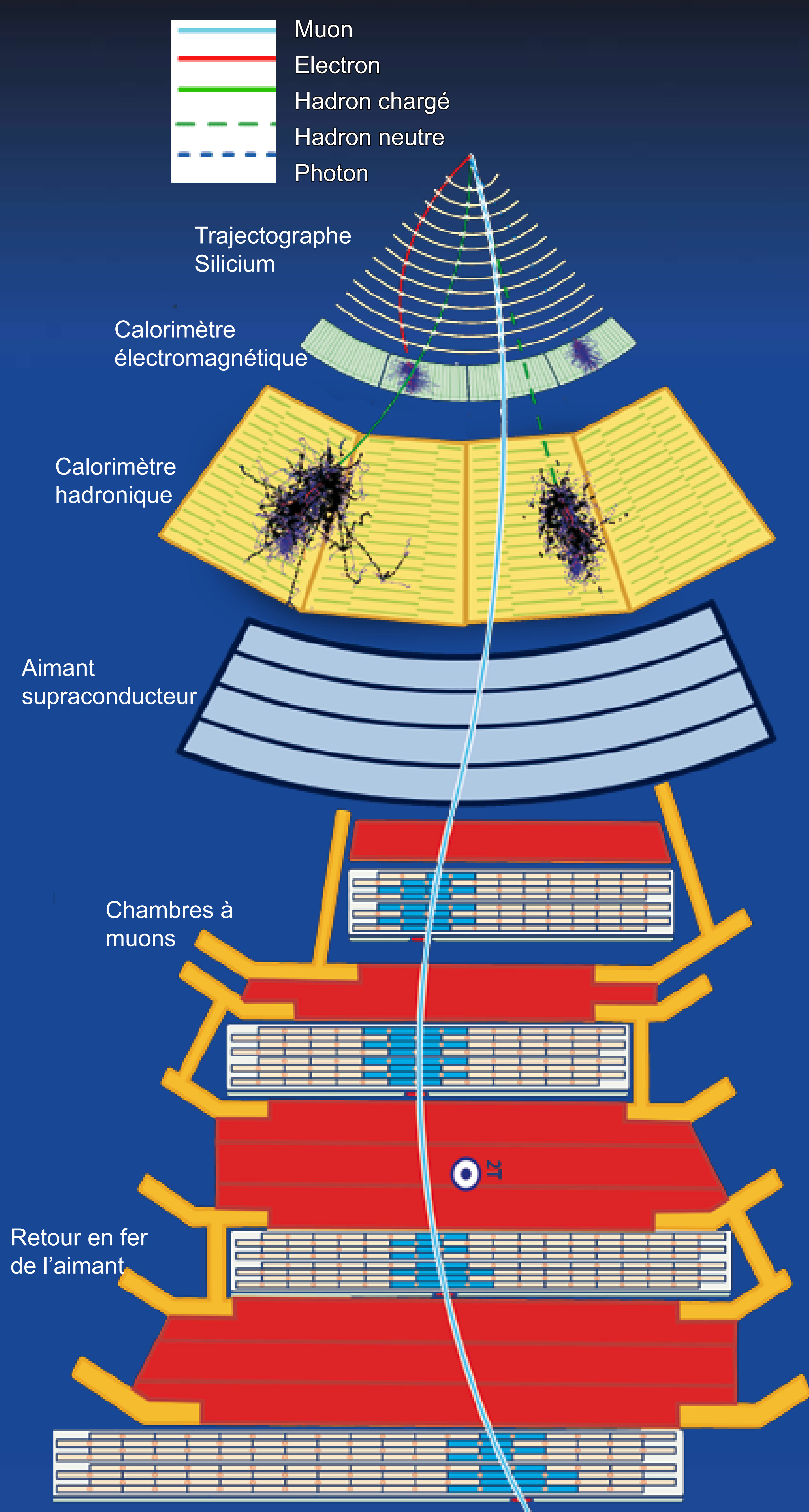
LES AIMANTS

En présence d'un champ magnétique, les particules chargées subissent une force perpendiculaire à leur vitesse. Cette force incurve la trajectoire des particules. La courbe mesurée par le trajectographe, permet de déterminer la quantité de mouvement des particules.

LES CHAMBRES À MUONS

Les particules issues de la collision vont s'arrêter avant ou dans le calorimètre. Seuls les neutrinos et les muons réussiront à dépasser ce stade et à pénétrer dans les chambres à muons. Les neutrinos traverseront sans laisser de trace et les muons seront donc les seuls à apparaître au niveau de ces chambres.

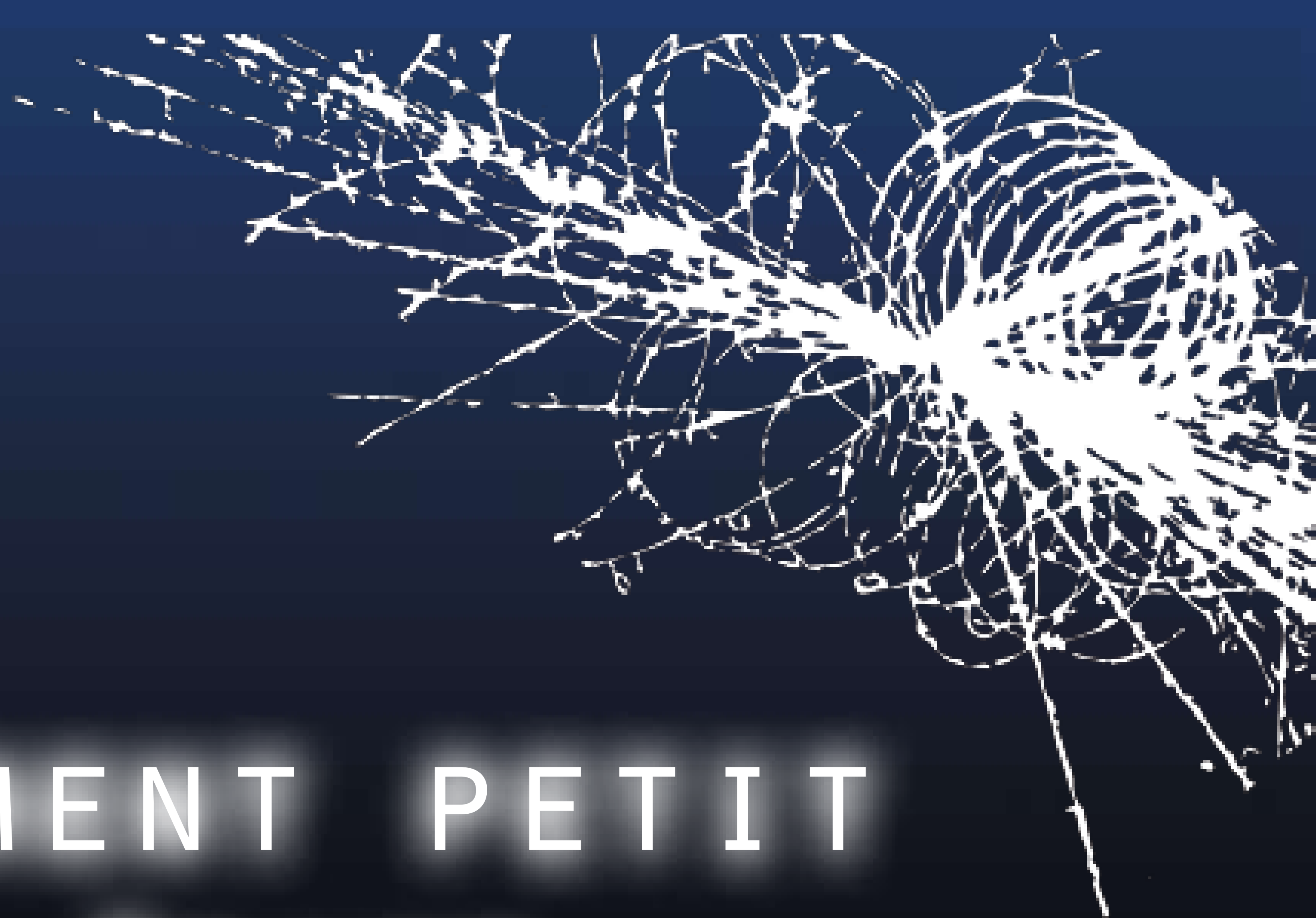
Ces détecteurs permettent donc de mettre rapidement en évidence la production de muons lors de la collision.



LHC...

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND

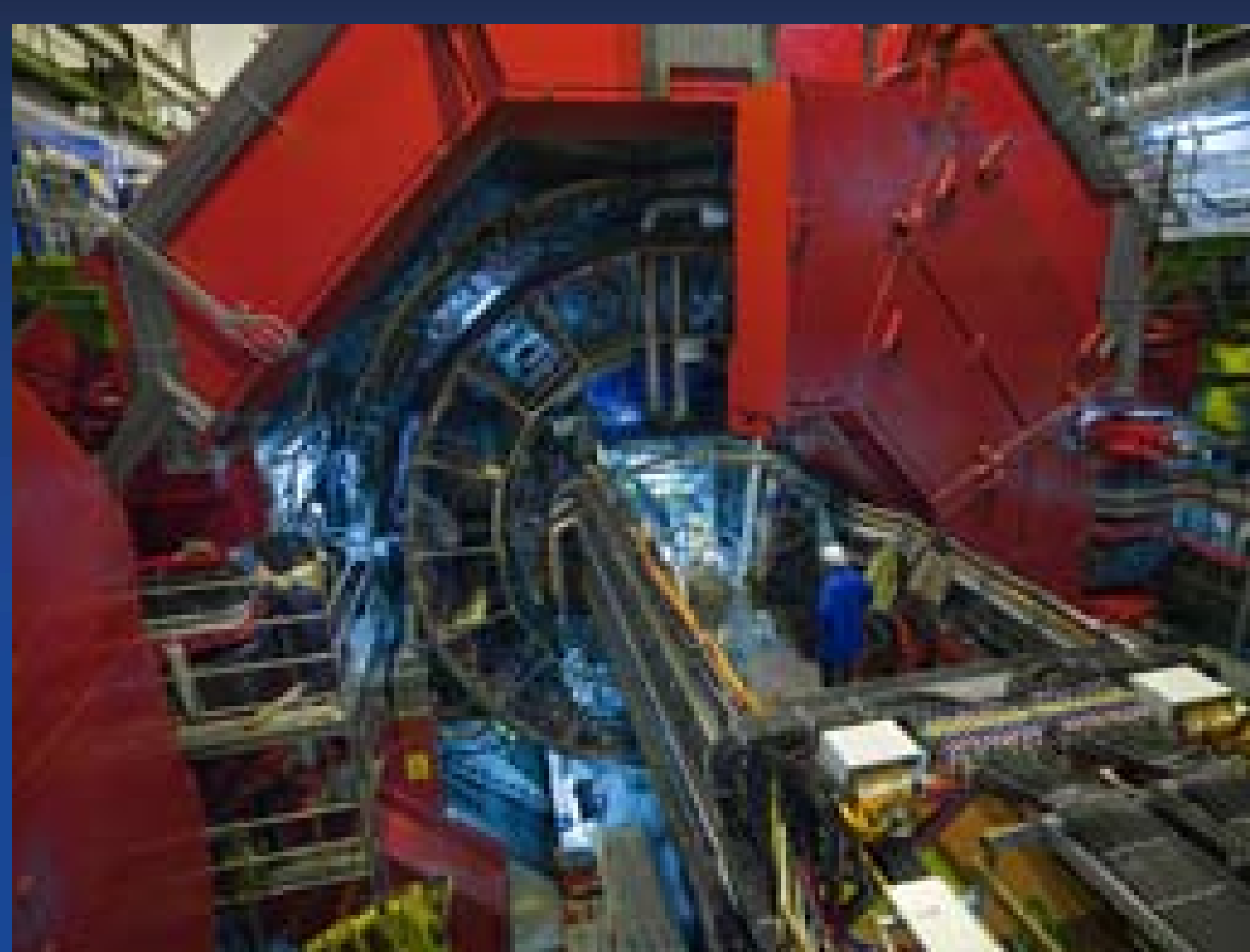


LE LHC : UN CRÉATEUR ET QUATRE PHOTOGRAPHES

LE LHC PRODUIT 600 MILLIONS DE COLLISIONS PAR SECONDE. UN TRAVAIL INUTILE SANS TÉMOIN. QUATRE ENSEMBLES COLOSSAUX DE DÉTECTEURS VONT PHOTOGRAPHIER ET TRIER LES COLLISIONS, CHACUN SELON SA SENSIBILITÉ.

ALICE

Doté d'un appareillage complexe, Alice est capable de reconstruire les trajectoires des milliers de particules émises lors de chaque collision entre noyaux de plomb et de les identifier une à une. Ces performances lui permettent d'étudier un nouvel état de la matière appelé « plasma de quarks et de gluons ».



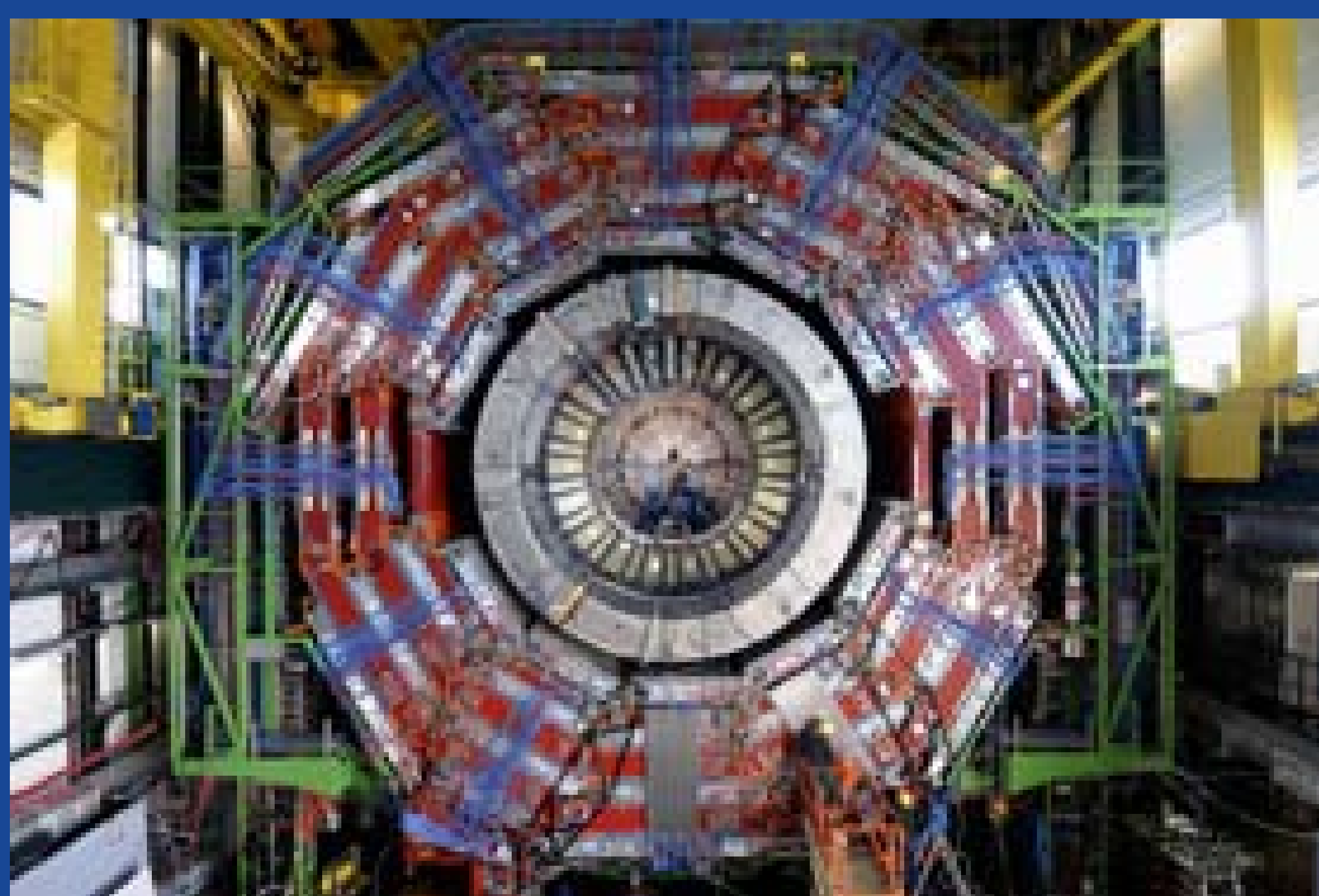
ATLAS

Haut comme un immeuble de six étages, Atlas a été conçu comme un détecteur polyvalent. Il permet de tester avec précision les prédictions du modèle standard (la théorie actuelle) et, également, d'observer des phénomènes physiques nouveaux. Il excelle dans l'identification des particules.



CMS

Équipé de l'aimant le plus puissant au monde, CMS est un détecteur polyvalent dans la même lignée qu'Atlas. Il est parfaitement équipé pour la chasse au boson de Higgs et la découverte de nouvelles particules. La puissance de son aimant permet d'atteindre des précisions inégalées.



LHCb

Contrairement aux trois autres, LHCb est construit en couches planes successives. Cette particularité lui permet d'étudier les particules émises très près du faisceau. C'est dans cette région que les différences entre matière et antimatière seraient les plus visibles.



DES MILLIONS DE COLLISIONS PAR SECONDE, CELA PRODUIT UN ÉNORME FLUX DE DONNÉES.
COMMENT TRAITER AUTANT DE DONNÉES ?

LHC...

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



UNE GRILLE DE CALCUL MONDIALE

UNE PILE DE CD DE 20 KM DE HAUT

Les données générées chaque année par les expériences du LHC représentent 15 millions de gigaoctets par an, soit l'équivalent d'une pile de CD-ROM de 20 km de haut. Leur analyse dépasse les capacités de n'importe quel superordinateur.



UN EFFORT INTERNATIONAL

Une grille de calcul a donc été mise en place pour permettre aux milliers de physiciens du LHC de traiter ces quantités phénoménales de données brutes. Toutes les données enregistrées sont accessibles grâce à cette grille de calcul, indépendamment de leur provenance. La grille de calcul relie plus de 200 centres de calcul répartis dans 33 pays de par le monde.

UNE STRUCTURE HIÉRARCHISÉE

- Niveau 0 : les données brutes issues des quatre expériences sont stockées et reconstruites une première fois au Cern.
- Niveau 1 : une copie est répartie entre onze grands centres de calcul internationaux de niveau 1 où des reconstructions successives de plus en plus précises sont réalisées.
- Niveau 2 : plus d'une centaine de centres de calcul périphériques reçoivent ces données après sélection des canaux les plus intéressants. Ces centres de niveau 2 simulent également les processus de nouvelle physique qui vont être comparés aux données réelles pour leur mise en évidence.
- Niveau 3 : l'analyse des données y est réalisée de manière simple et accessible pour l'ensemble des chercheurs.

LA FRANCE EST ASSOCIÉE AU SUCCÈS DE LA GRILLE DE CALCUL DU LHC

Situé à Lyon, le Centre de Calcul de l'IN2P3/CNRS (de niveau 1) joue un rôle central dans cette grille, de même que plusieurs centres de niveau 2, comme celui de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg.

En mettant en commun les ressources de stockage et de calcul de dizaines de milliers d'ordinateurs, on obtient une puissance informatique considérable aux multiples applications scientifiques et industrielles.



LHC...
L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND



LES RETOMBÉES DU LHC

UN MERVEILLEUX MODÈLE DE COOPÉRATION

Des scientifiques de près de 85 nationalités se côtoient au Cern pour mener des recherches impossibles sans une collaboration internationale d'envergure.

Les nombreux échanges entre laboratoires dépassent les clivages culturels et politiques et sont en cela un modèle de coopération internationale.



TRANSFERT DE TECHNOLOGIES

Des détecteurs aussi complexes ne peuvent être réalisés sans échanges soutenus avec l'industrie, notamment grâce au transfert de technologies. L'activité de recherche et développement en physique des particules impose souvent des contraintes à la limite des connaissances techniques. Ces innovations profitent à l'industrie à laquelle est confiée la production des détecteurs, ainsi que par le biais de brevets et de projets communs.

Des applications variées :

- accélérateurs, lignes de faisceau : ultra-vide, cryogénie, cavités hyperfréquences, ...
- sources : radioprotection, mesures environnementales, ...
- traitement des matériaux : tenue aux radiations, gravure nanométrique, implantation ionique, ...
- biomédical : hadronthérapie, imagerie X et gamma, tomographie à émission de positrons, ...
- informatique : réseaux, traitement d'images, calcul scientifique, ...

Rappelons que l'invention la plus célèbre du Cern est le Web.

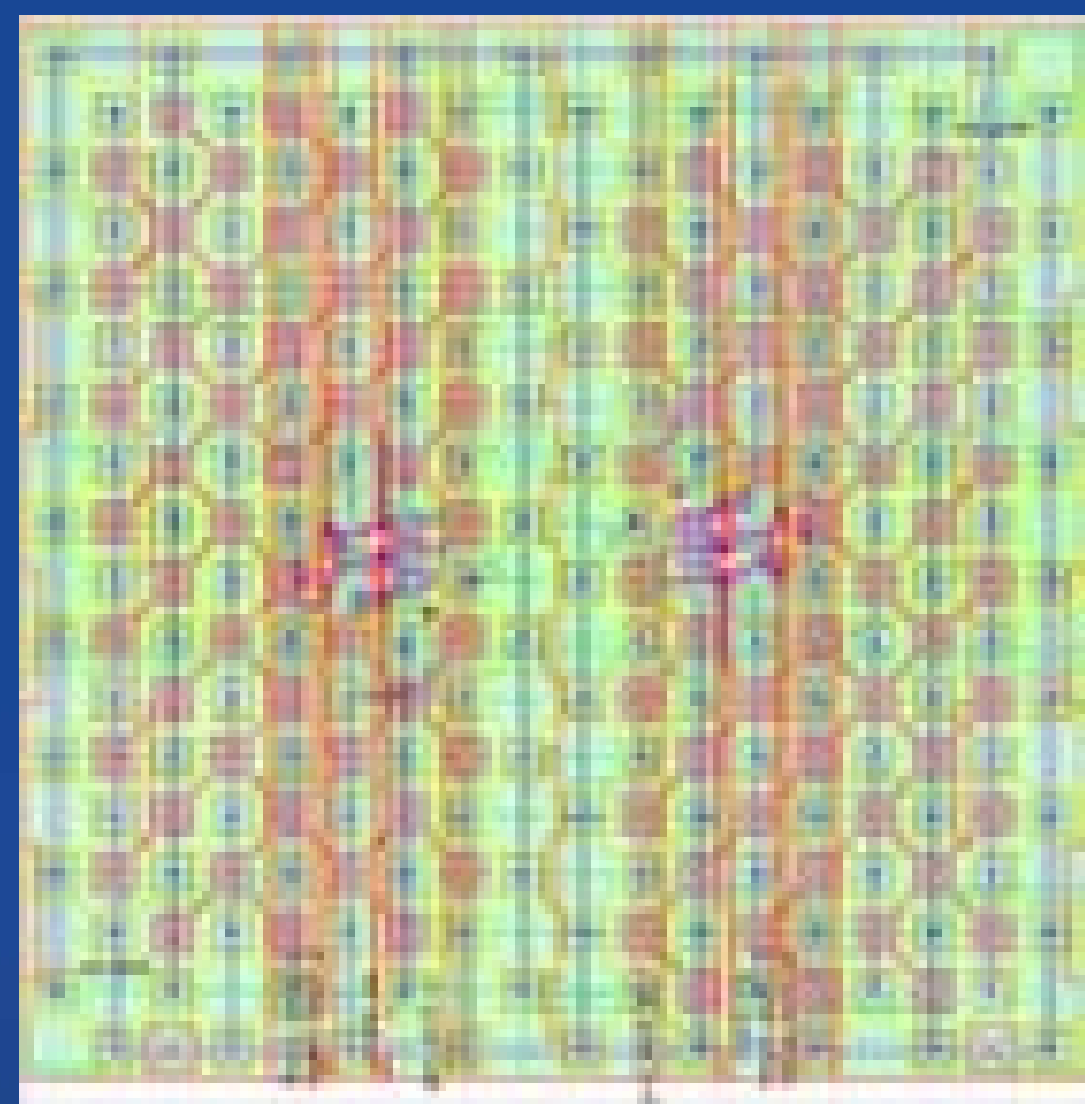


Schéma de détecteur à pixels pour le monitoring du faisceau de protons en hadronthérapie



Photosenseur CMOS pour l'imagerie biomédicale



détail d'ossature de souris avec ses reins en imagerie X



vascularisation de souris pour localiser une tumeur en imagerie X

LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



LE LHC ET APRÈS ?

LE LHC N'EN EST QU'À SES DÉBUTS ET IL EST CONÇU POUR FONCTIONNER AU MOINS 10 ANS, AFIN DE LIVRER TOUS SES SECRETS.

Des études sont d'ailleurs déjà en cours pour augmenter encore l'intensité des faisceaux du LHC et adapter en conséquence les détecteurs, afin d'y rechercher des phénomènes très rares.

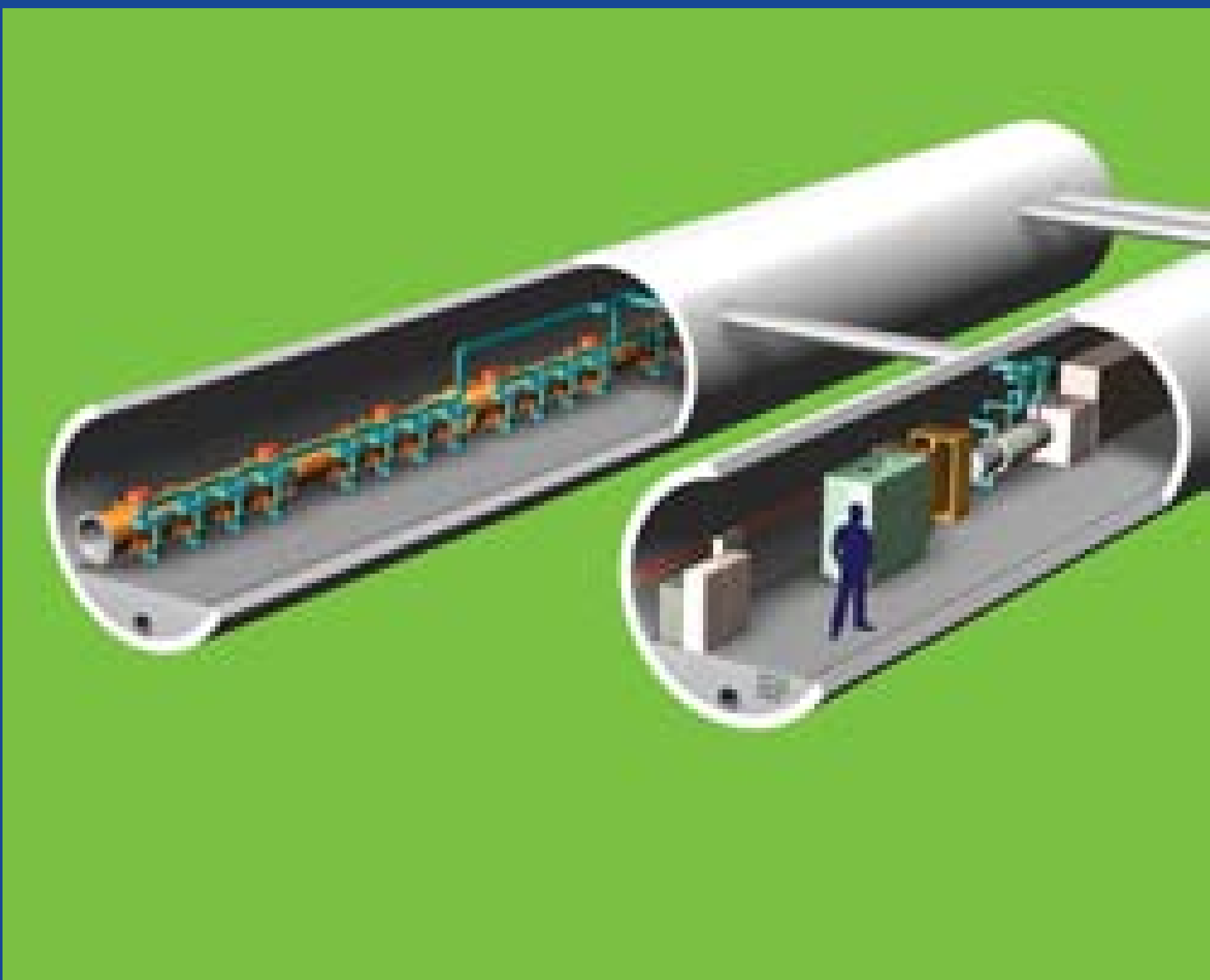
VERS DE FUTURS ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES

Les grands projets de physique des particules s'inscrivent dans une vision à long terme. Après une phase de découvertes escomptées au LHC, une compréhension fine des nouveaux phénomènes sera nécessaire. Une machine hadronique n'est pas adaptée à des mesures de trop haute précision. Les hadrons sont composés de quarks et de gluons qui engendrent des bruits de fond considérables.



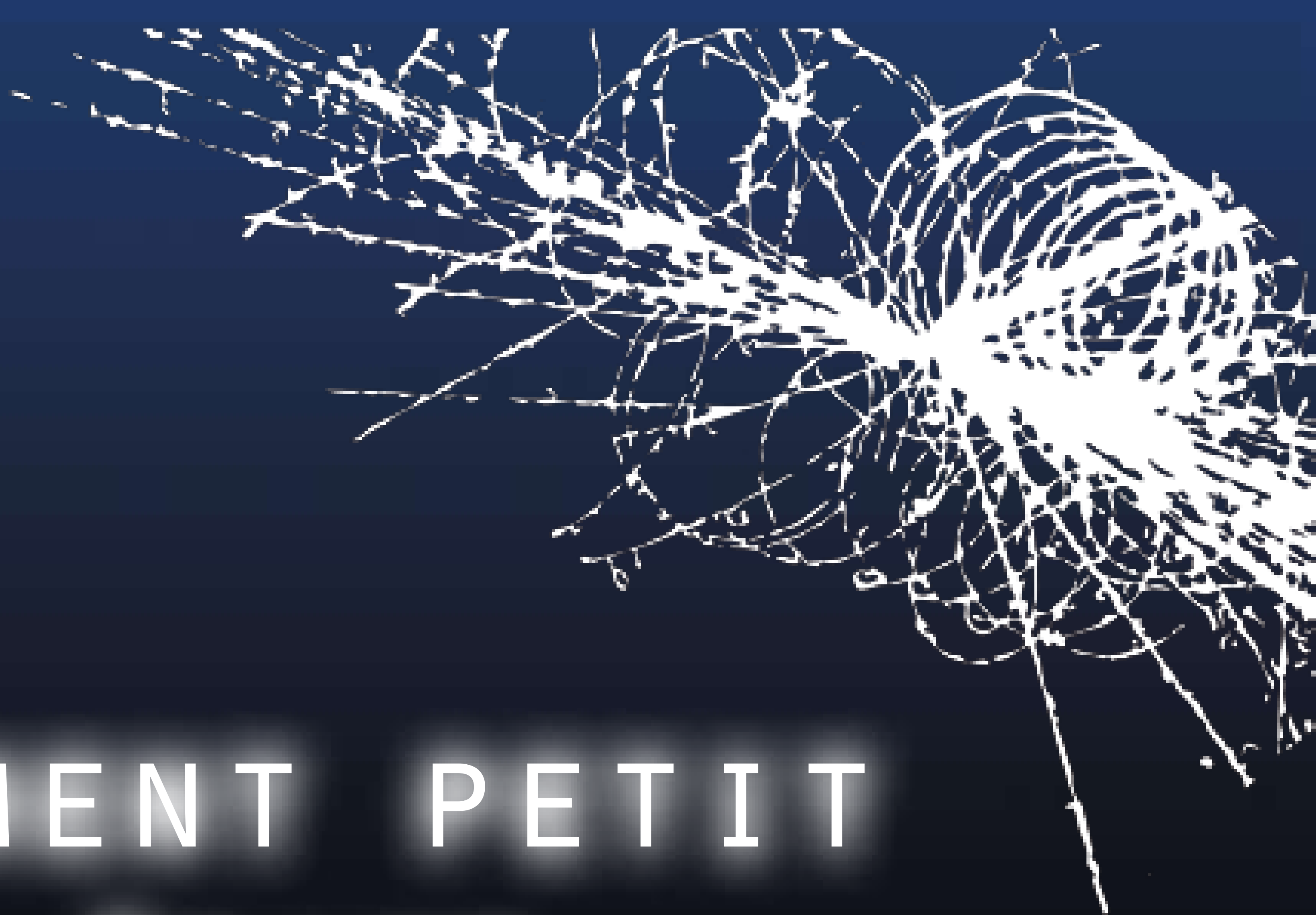
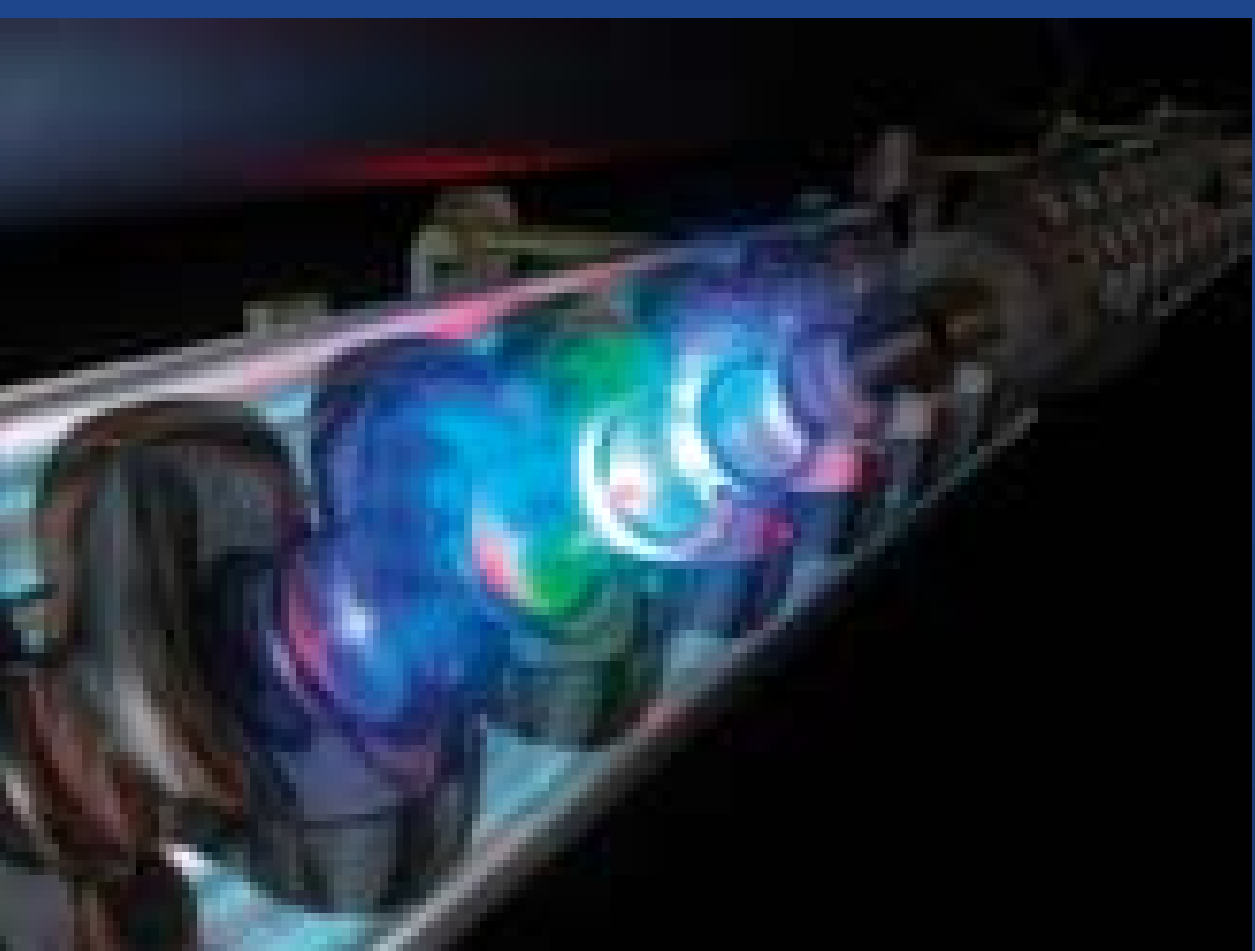
L'avenir appartient à des faisceaux de particules élémentaires tels les électrons et positrons (ou antiélectrons), voire des muons (des électrons «lourds» à relativement longue durée de vie).

Des collisionneurs électron-positron pourraient donc succéder au LHC afin de poursuivre sa quête de connaissances.



Ces réflexions ont débuté bien avant le démarrage du LHC et conduisent à proposer des accélérateurs linéaires, mieux adaptés à des particules aussi légères que des électrons : ILC (International Linear Collider) et Clic (Cern linear collider).

La faisabilité de telles machines qui pourraient mesurer plusieurs dizaines de km de long devrait être démontrée au moment des premières découvertes du LHC.



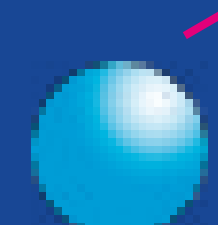
LHC...
L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND

L'UNIVERS : UN MONDE DE PARTICULES

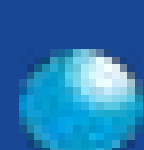
TOUT CE QUE NOUS POUVONS VOIR DANS L'UNIVERS
EST CONSTITUÉ DE PARTICULES



La matière ordinaire, dans ses plus petites briques, est composée de particules appelées fermions :



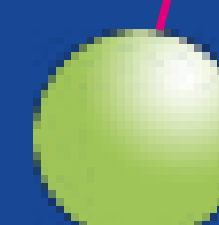
Électron



Neutrino électron

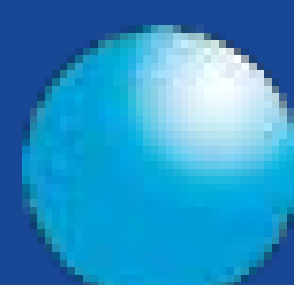


Quark bas (down)

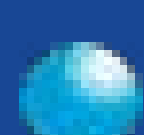


Quark haut (up)

IL EXISTE NÉANMOINS D'AUTRES PARTICULES QUI NE SONT PAS STABLES
ET QUI ÉTAIENT PRÉSENTES DANS LES PREMIERS INSTANTS DE L'UNIVERS.



Muon



Neutrino muon



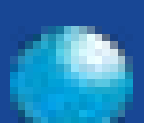
Quark étrange
(strange)



Quark charme
(charm)



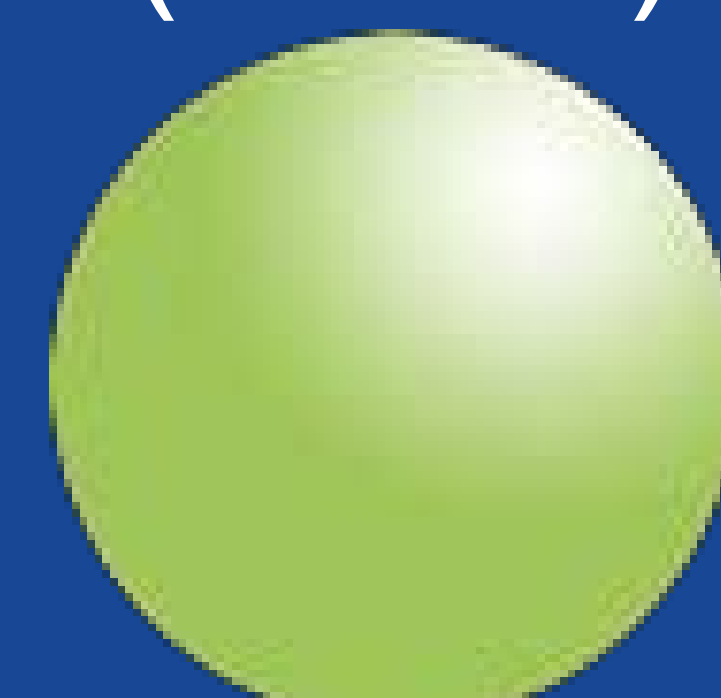
Tau



Neutrino tau

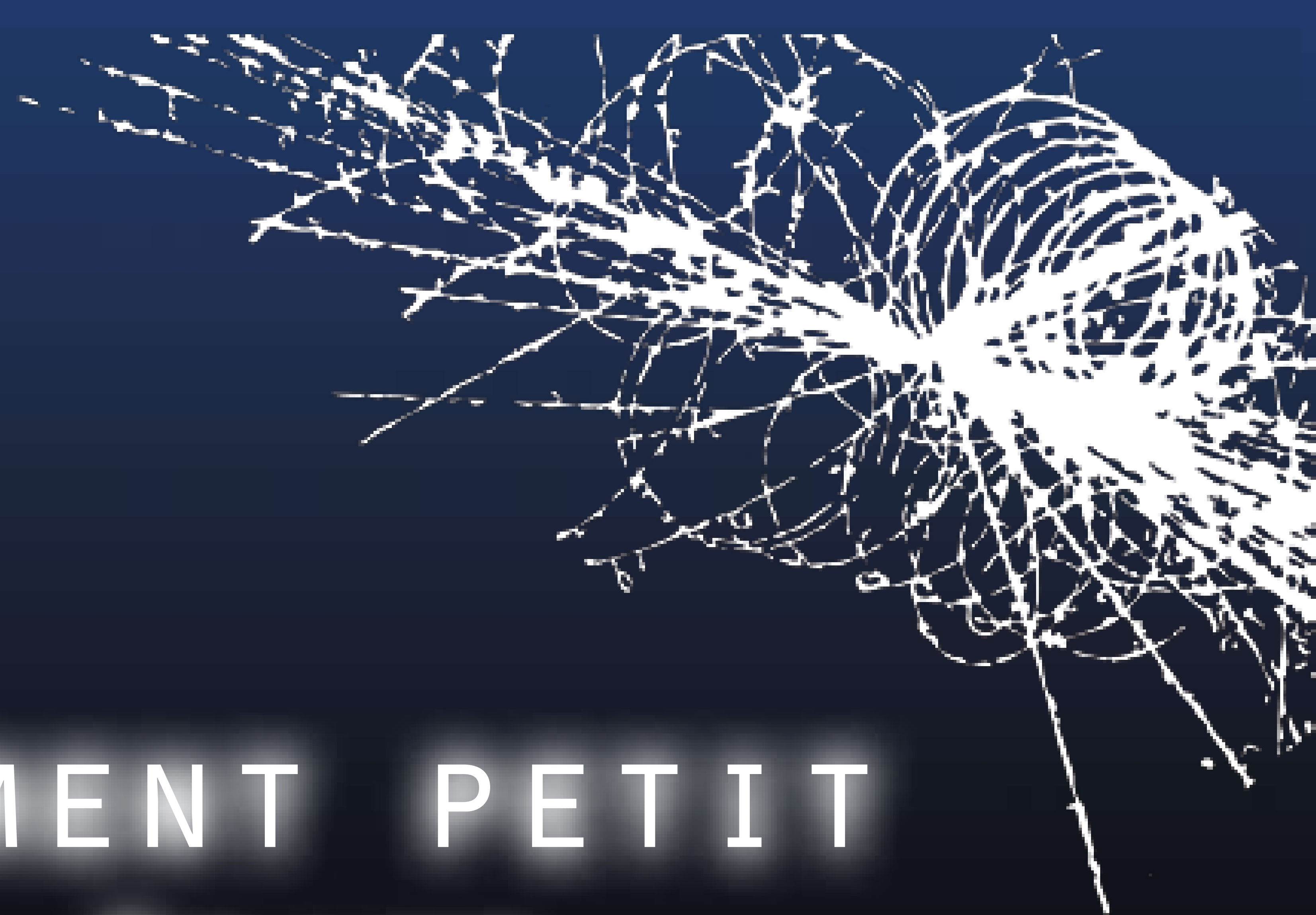


Quark beauté
(beauty)



Quark sommet
(top)

En plus des particules qui constituent la matière, d'autres véhiculent les forces qui régissent notre Univers... On appelle ces particules messagères des «bosons».



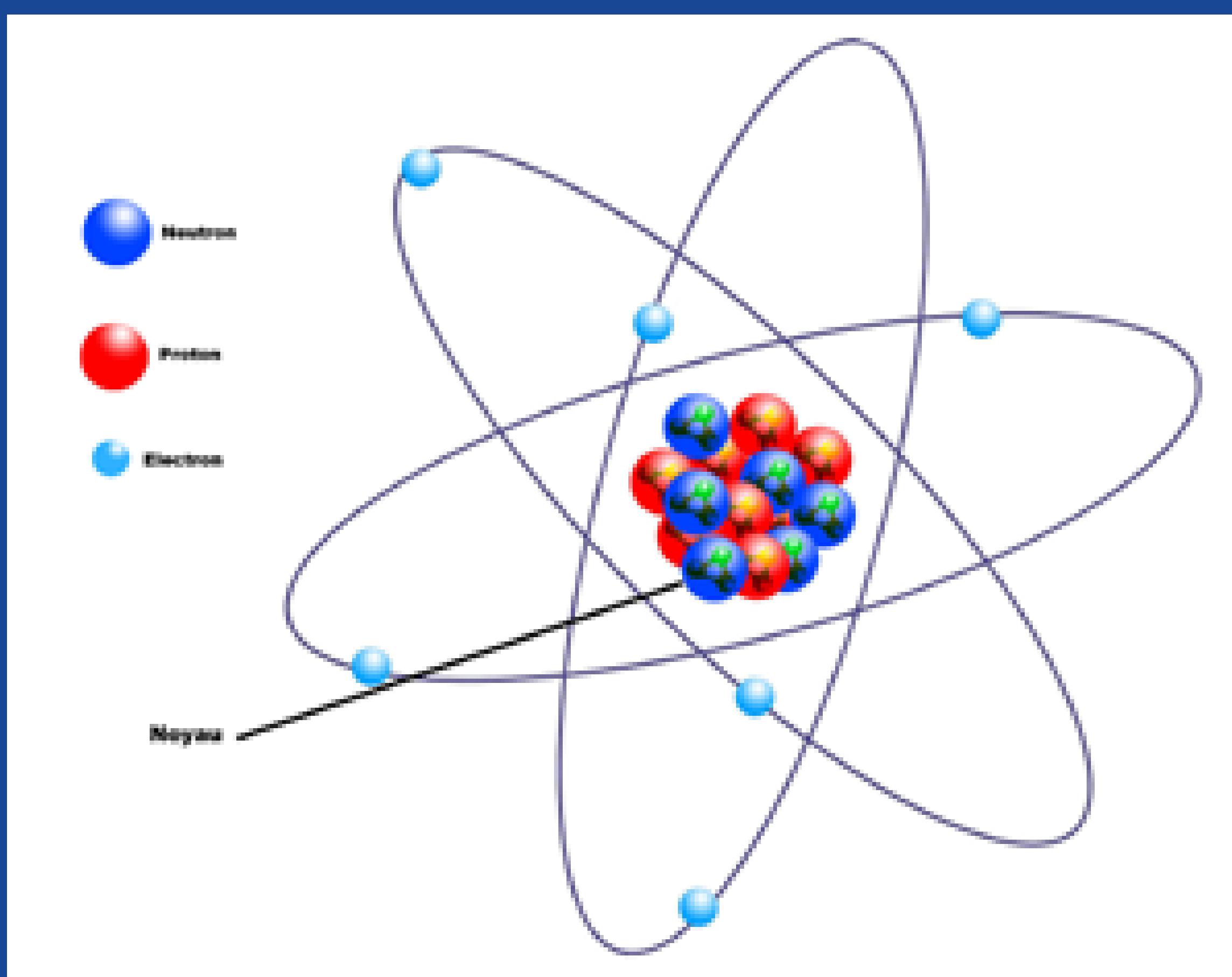
LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

L'UNIVERS : UN MONDE DE PARTICULES... ET DE VIDE

Le rayon du Soleil mesure environ 1,5 millions de km.
Pluton peut s'éloigner jusqu'à 7500 millions de km du Soleil...

La dimension du système solaire est donc 5000 fois plus grande que le rayon du Soleil.



Le rayon des noyaux mesure environ 1 millionième de millionième de millimètre.

Le rayon des atomes est environ 100 000 fois plus grand que ce noyau.

Vous trouvez que le système solaire est très vide ?

Les atomes le sont encore 20 fois plus !



ET SI NOUS SOMMES ESSENTIELLEMENT CONSTITUÉS DE
VIDE, POURQUOI NE TRAVERSONS-NOUS PAS LES MURS ?

LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



LES FORCES DE L'UNIVERS

POUR QUE TOUTES LES PARTICULES TIENNENT ENSEMBLE, IL FAUT DE LA COLLE... OU PLUTÔT DES FORCES.
ON EN CONNAÎT QUATRE.

LA PLUS CONNUE : LA GRAVITATION

C'est celle qu'on ressent tous les jours lorsqu'on monte un escalier, lorsqu'on se pèse... C'est aussi celle qui oblige notre planète à tourner autour du Soleil... Sans la gravitation, la Terre avancerait en ligne droite et s'éloignerait donc du Soleil indéfiniment... En réalité, la Terre n'existerait pas !

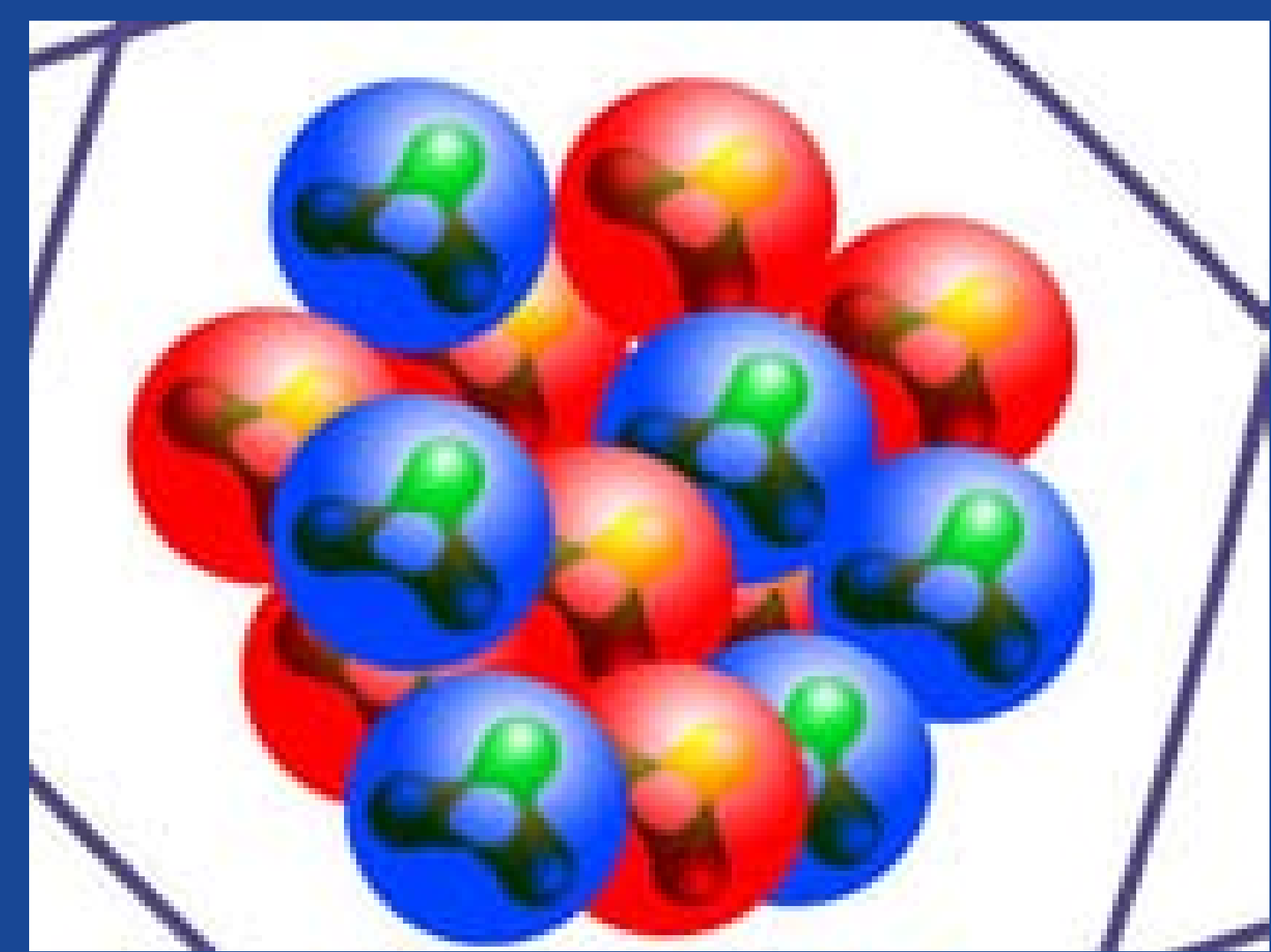


LA PLUS UTILISÉE : L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Elle explique pourquoi les aimants attirent le fer, comment la lumière se propage, comment lire et écrire sur des disques durs... C'est elle aussi qui oblige les électrons chargés négativement à tourner autour du noyau de l'atome chargé positivement... Les charges opposées s'attirent, les charges identiques se repoussent.

LA PLUS FORTE : LA FORCE... FORTE

Elle explique comment les quarks se regroupent par trois pour former des protons ou des neutrons. Elle est tellement forte qu'elle permet de «coller ensemble» des particules de même charge électrique (les protons).



LA PLUS MYSTÉRIEUSE : LA FORCE FAIBLE

C'est par elle que le coeur de notre planète est chauffé et elle joue un rôle important dans la «combustion» du Soleil. Elle explique également la plus grande partie de la radioactivité naturelle et la radioactivité à très longue durée de vie des déchets nucléaires.

LHC... L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

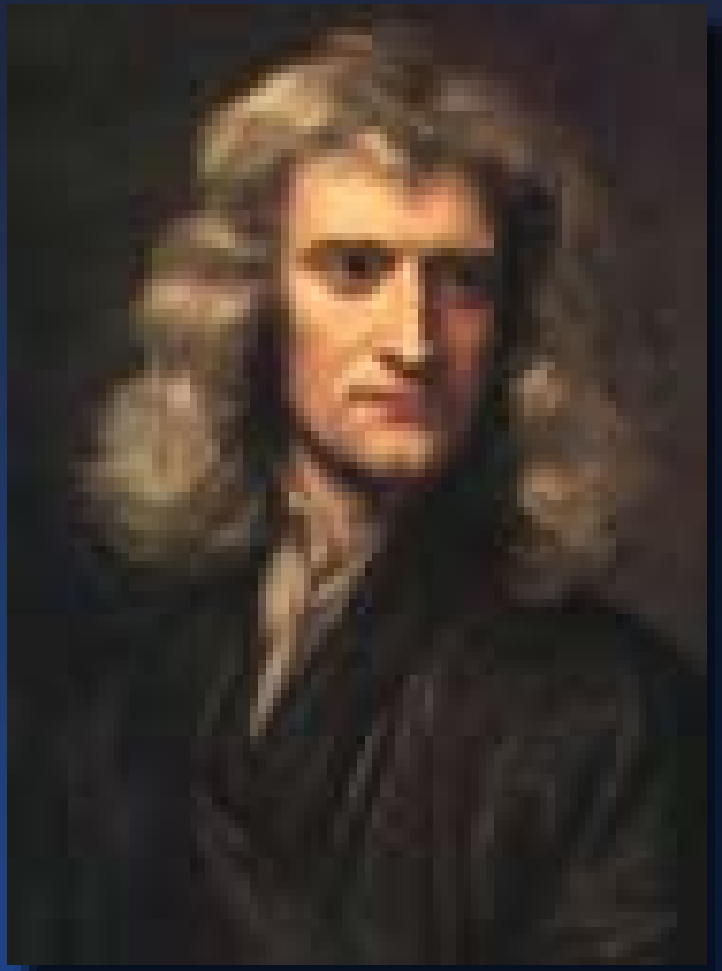


DES PARTICULES, DU VIDE ET DES FORCES ? À LA RECHERCHE D'UNE DESCRIPTION COHÉRENTE

FIN DU 17^{ÈME} SIÈCLE

Newton comprend que la Lune et la pomme sont attirées par la Terre. C'est la théorie de la gravitation universelle : la Lune tombe sur la Terre comme la pomme mais contrairement à cette dernière, elle passe toujours à côté de la Terre.

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$



1864

Avec ses équations, Maxwell donne une description unifiée des phénomènes électriques et magnétiques qui permet de déduire l'existence d'ondes électromagnétiques.

Salam et Weinberg émettent l'idée que les interactions électromagnétiques et faibles sont des manifestations différentes d'une seule interaction «électrofaible».

$$\mathcal{L}_{EW} = \bar{\psi} i \not{D} \psi - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W^{\mu\nu}_a$$

1967

Glashow, Iliopoulos et Maiani ajoutent les quarks dans la théorie «électrofaible» permettant ainsi la description d'une troisième force (la force forte) dans un formalisme commun. Le modèle standard des particules est né.



Le modèle standard est le modèle mathématique qui permet d'expliquer tous les phénomènes observables à l'échelle des particules. Mis en chantier au début des années 60, son élaboration a demandé près de 10 ans de travail et a permis à une trentaine de lauréats d'obtenir le prix Nobel. Le modèle standard est basé sur la mécanique quantique et sur la relativité restreinte et est intimement lié à l'existence de symétries.

TOUTES LES PARTICULES DU MODÈLE STANDARD SONT
IDENTIFIÉES ET OBSERVÉES SAUF UNE :
LE BOSON DE HIGGS.



LHC...
L'INFINIMENT PETIT
VU EN GRAND

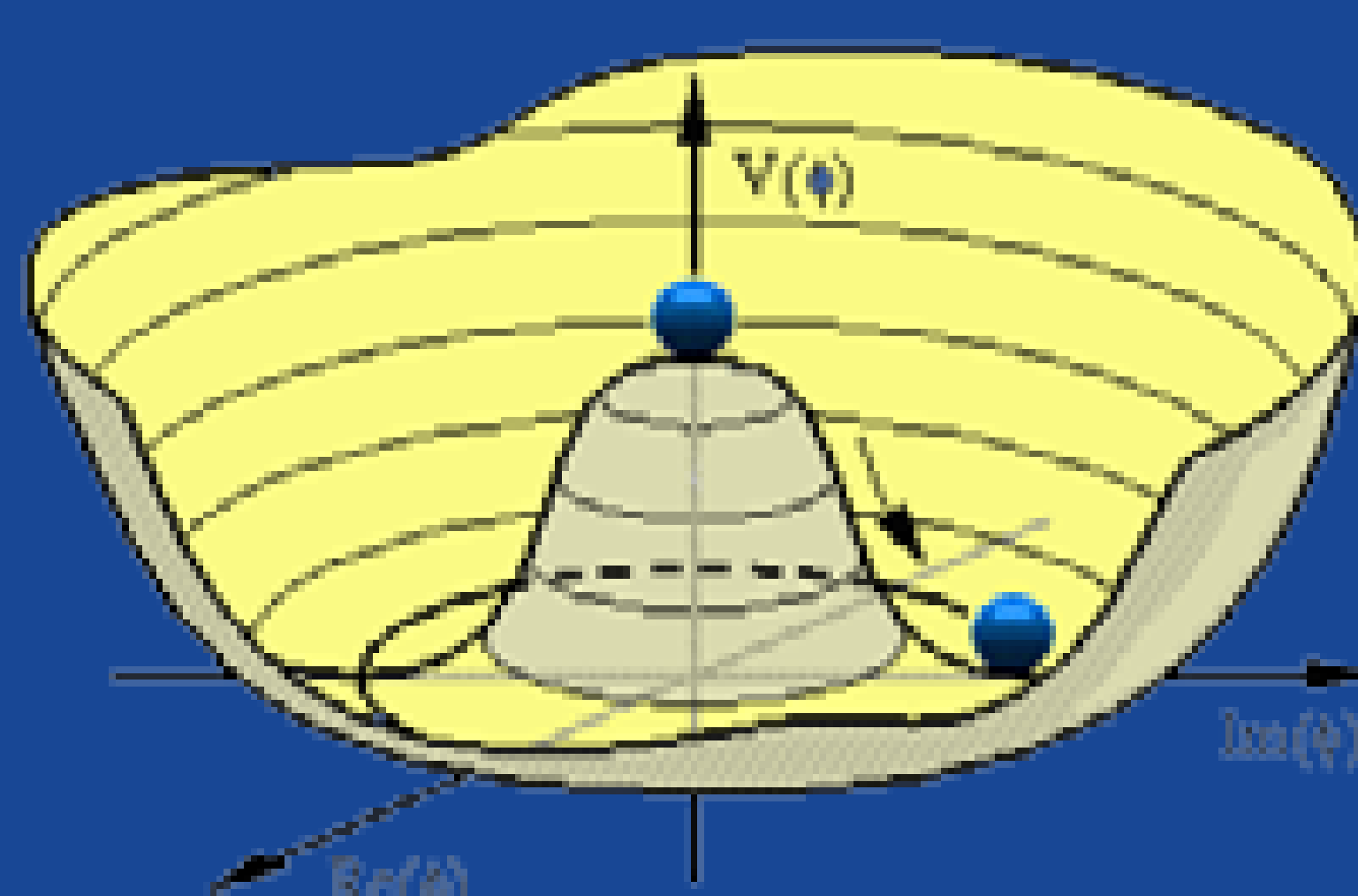
LE BOSON DE HIGGS : CLÉ DE VOÛTE DU MODÈLE STANDARD

Lors de la conception du modèle standard, un problème important s'est posé : les symétries utilisées et appréciées imposaient que toutes les particules du modèle soient sans masse ! Heureusement, en 1964, Robert Brout, François Englert et Peter Higgs ont résolu cette énigme en introduisant une particule supplémentaire : le boson de Higgs.



L'idée essentielle est la suivante : un problème parfaitement symétrique peut admettre une solution particulière qui n'est pas symétrique.

Ainsi, le bol ci-contre est parfaitement symétrique. Or si on lance une bille à l'intérieur, elle s'arrêtera quelque part dans le bas du bol, brisant ainsi la symétrie d'origine. C'est le mécanisme de Higgs.



En brisant la symétrie, le boson de Higgs permet de rendre massives les particules élémentaires en interagissant avec elles... Un peu comme nos chaussures s'alourdissent lorsque nous marchons dans la boue.



En dépit de la qualité de ses descriptions, le modèle standard contient certaines limites. Il n'inclut pas la force de gravitation par exemple, et ce malgré les efforts des physiciens durant les dernières années.

PEUT-ON ALLER AU-DELÀ DU MODÈLE STANDARD ?

LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

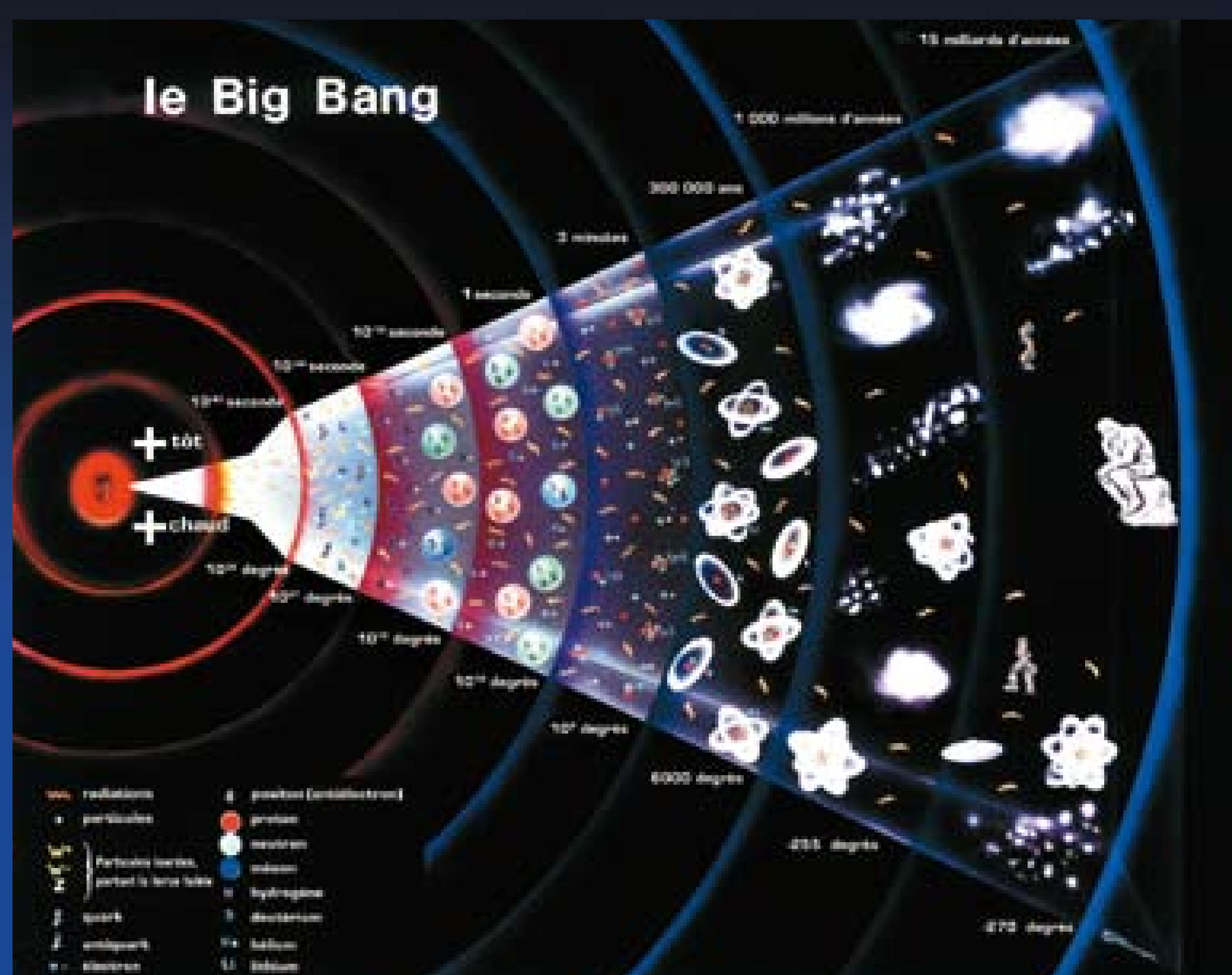


QUATRE PHOTOGRAPHES, QUATRE PRISES DE VUE DU MODÈLE STANDARD

ALICE

Que devient la matière lorsqu'elle atteint 100 000 fois la température régnant au cœur du Soleil ? Pourquoi les protons et les neutrons sont-ils 100 fois plus lourds que les quarks dont ils sont constitués ? Est-il possible de libérer les quarks de l'intérieur du proton ou du neutron ?

Afin de répondre à ces questions, Alice exploite le LHC pour recréer les conditions de l'Univers quelques microsecondes après le Big Bang.

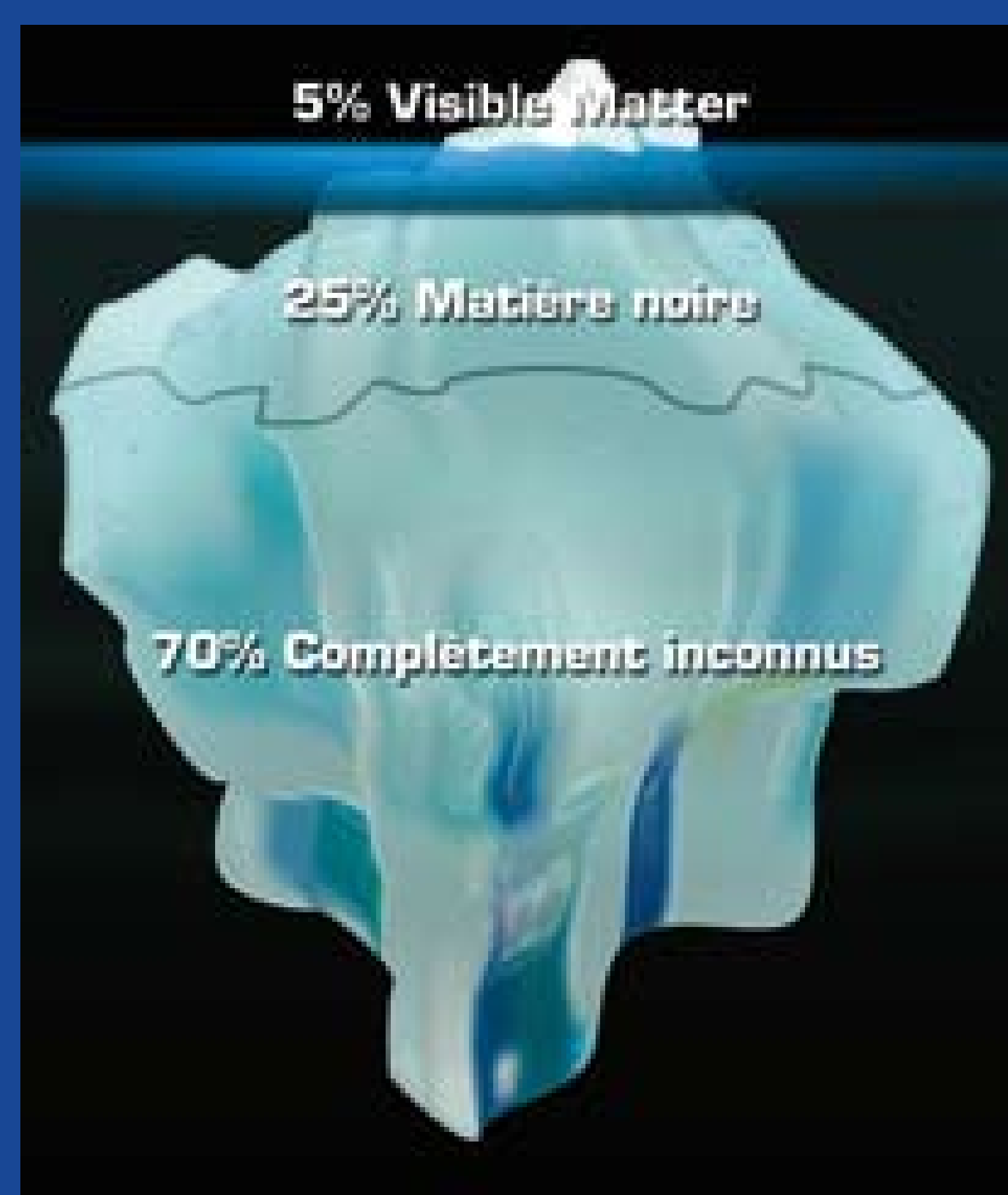


ATLAS ET CMS

Le boson de Higgs, clé de voûte du modèle standard est recherché sans succès depuis sa prédiction en 1964. ATLAS et CMS visent à déterminer si ce boson existe ou non. Dans les deux cas, l'information qui pourrait remettre en cause le modèle est attendue avec impatience.



Les observations astrophysiques suggèrent que 95% de l'Univers est de nature inconnue. Des particules neutres et massives créées en grand nombre aux premiers instants de notre Univers pourraient constituer la matière « noire », c'est-à-dire 25% de notre Univers. Certaines de ces particules pourraient être celles prédites par les théories qui tentent d'étendre le modèle standard. ATLAS et CMS recherchent activement les traces de ces particules.



LHC B



L'antimatière, ce n'est pas de la science-fiction. Son existence, prédite en 1928, a été vérifiée en 1932.

En revanche, nous ne comprenons pas pourquoi l'antimatière semble pratiquement absente de notre Univers. Quelles sont les subtiles différences entre matière et antimatière qui expliquent cela ?



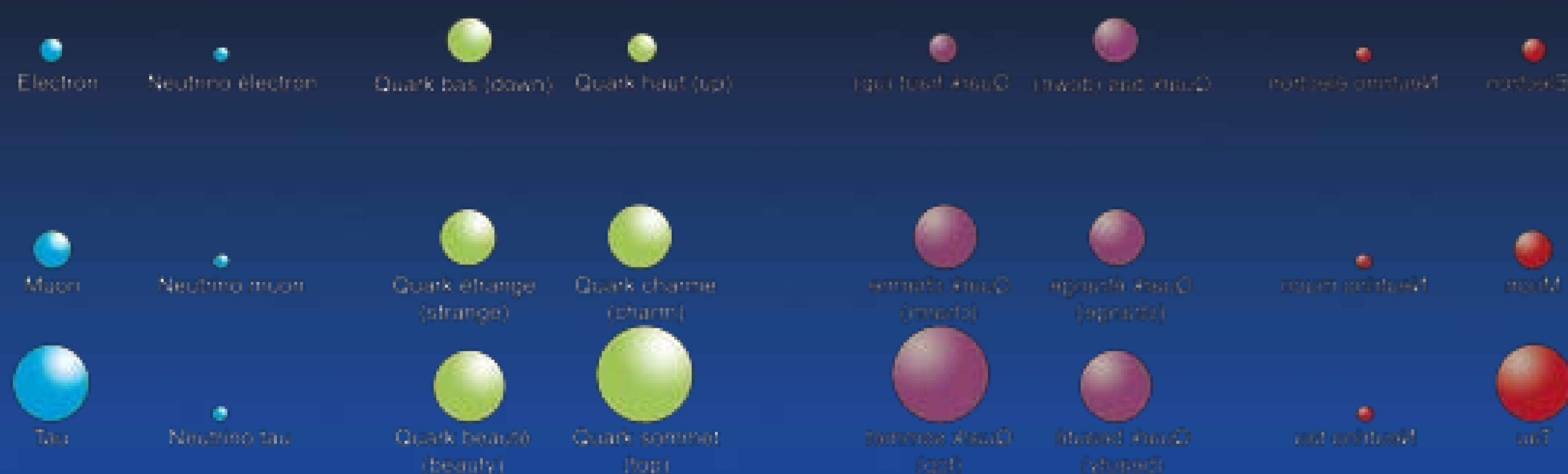
LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND

L'ANTIMATIÈRE ET LES ANTIPARTICULES

À chaque particule élémentaire de matière est associée une copie conforme appelée antiparticule, qui ne se distingue que par ses charges opposées. Régies par les mêmes lois que leurs jumelles (ou presque !), les antiparticules peuvent s'imbriquer et constituer ainsi de l'antimatière.



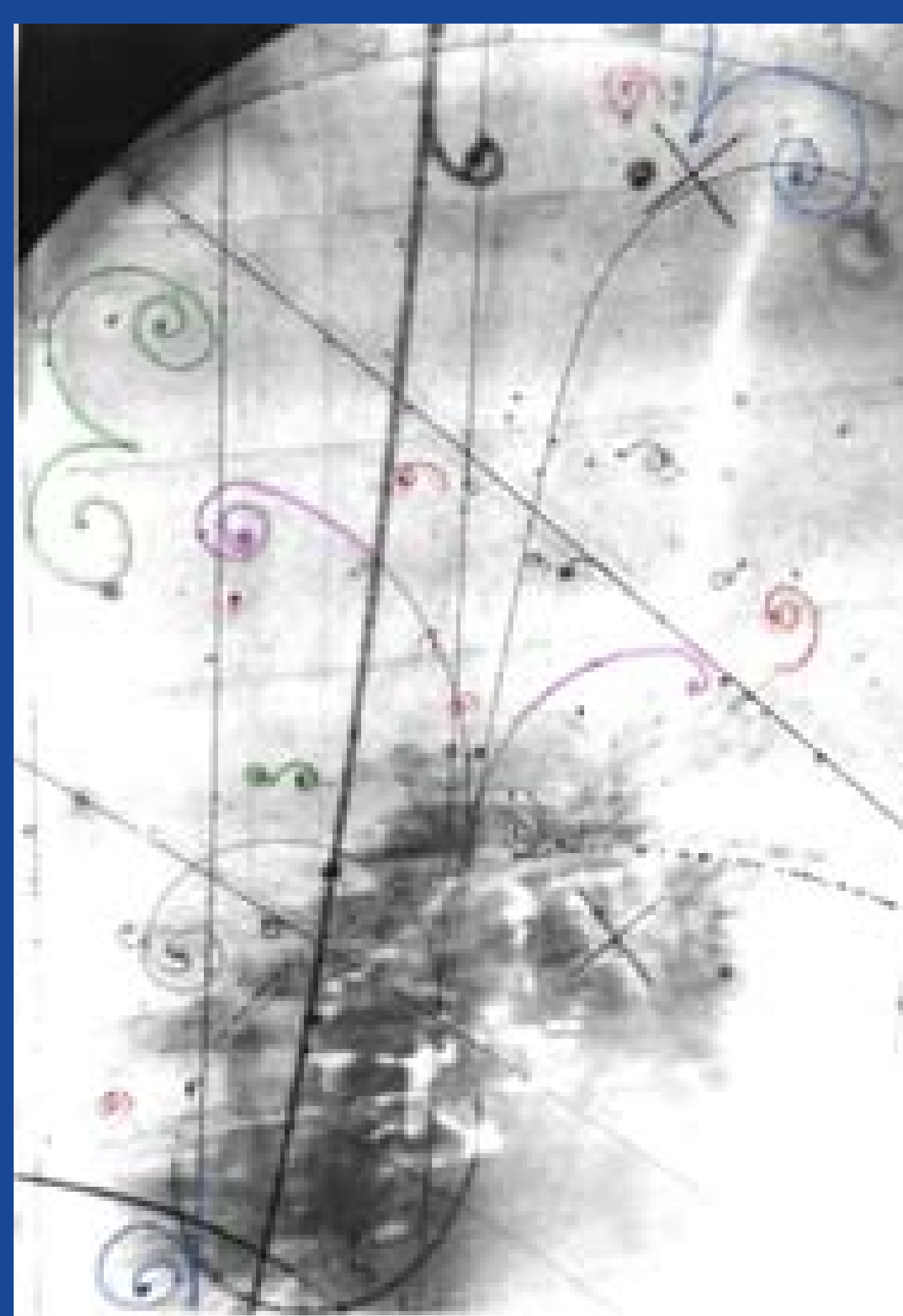
INTRIGUANTE CETTE ANTIMATIÈRE...



Pourquoi «anti» ? Ce préfixe tire son origine du caractère antagoniste des antiparticules et des particules. Leur rencontre conduit à une réaction d'annihilation à l'issue de laquelle la totalité de leur masse est convertie en énergie pure ($E=mc^2$). C'est pourquoi l'antimatière survit peu de temps dans un monde fait de matière.

L'ANTIMATIÈRE, CE N'EST PAS DE LA SCIENCE-FICTION

Prédit en 1928, l'anti-électron (électron avec une charge positive) est observé dans une émulsion photographique en 1932. Aujourd'hui, les physiciens sont capables de créer des antiparticules et même, depuis 1996, des antiatomes d'hydrogène.



POURQUOI S'INTÉRESSER À L'ANTIMATIÈRE ?

Comprendre pourquoi notre Univers semble fait presque intégralement de matière, alors qu'à son origine, matière et antimatière étaient présentes en proportions égales ?

Elle est utilisée dans certaines thérapies du cancer ou encore en imagerie médicale pour localiser, par exemple, les zones d'activité du cerveau humain.

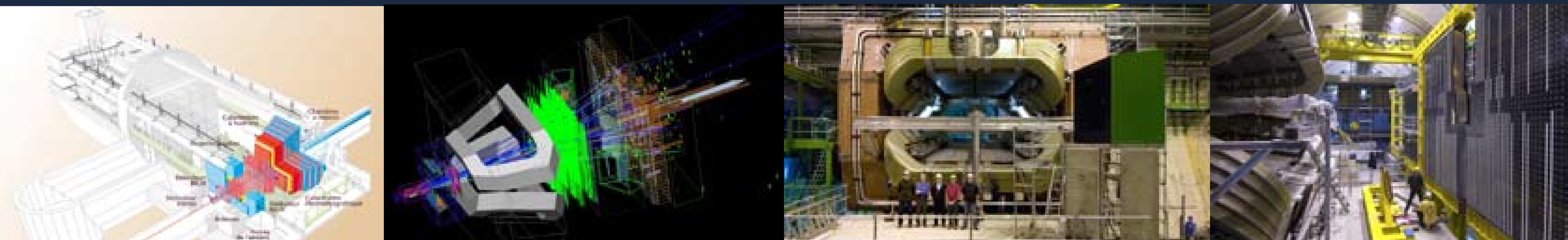
LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



LHCb TRAQUE L'ANTIMATIÈRE

LHCb cherche à comprendre l'absence d'antimatière dans l'Univers en explorant les différences de comportement entre matière et antimatière. Les particules les plus prometteuses pour mener cette étude sont les hadrons composés d'un quark b (b pour «beau »).



Pour traquer les quarks beaux émis à très petit angle, LHCb a choisi une configuration asymétrique par rapport au point de collision. Les détecteurs ne sont donc pas arrangés en couches d'oignon, mais en couches planes successives.

VELO : UN TRAJECTOGRAPHE EN DANGER

Pour repérer les quarks «b» émis dans une direction faiblement écartée du faisceau, le trajectographe «VELO» doit être placé dangereusement près (5 mm) du point de collision et de l'axe des faisceaux.

Pour éviter les dégâts que pourraient causer les faisceaux, les parties sensibles du VELO sont écartées mécaniquement pendant les phases de réglage des faisceaux et remis en place dès qu'ils sont stables... Le tout en conservant une précision de quelques millièmes de millimètres.



DES MIROIRS POUR IDENTIFIER LES PARTICULES

Chacun sait que la vitesse de la lumière ne peut être dépassée. Du moins dans le vide car dans la matière, la lumière est «ralentie». Si une particule traverse la matière plus rapidement que la lumière, elle produit l'équivalent lumineux d'un avion passant le mur du son. Ce «bang lumineux» qui dépend de la vitesse des particules est mis a profit pour leur identification.

Des miroirs en carbone du détecteur appelé RICH réfléchissent cette lumière vers des capteurs qui permettent d'identifier les particules.

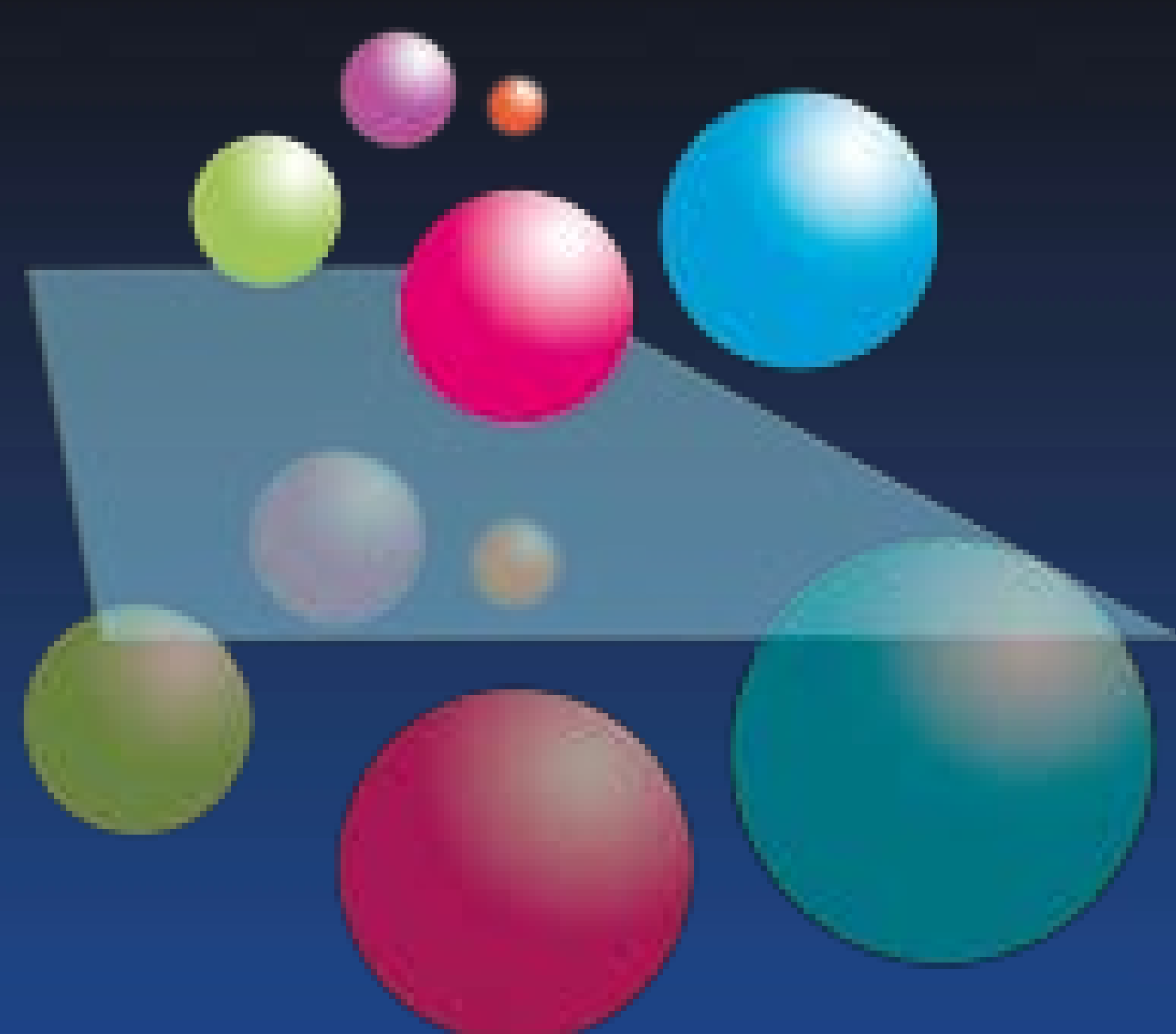
Nom : LHCb
(The Large Hadron Collider beauty experiment)
Taille : 20 m (longueur) et 11 m (hauteur)
Poids : 5 600 tonnes
Nationalités : 15 différentes
Population : 660 chercheurs

LHC... L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

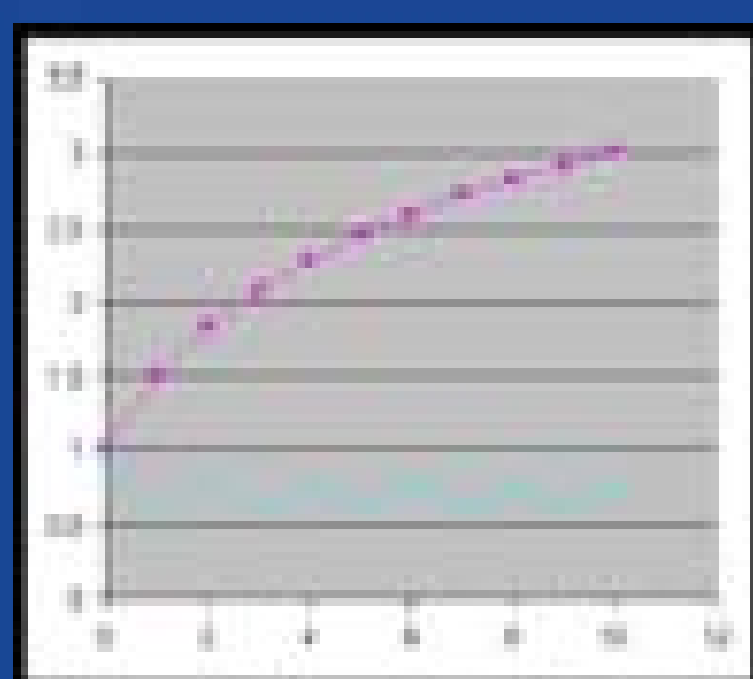


LA THÉORIE SUPERSYMÉTRIQUE OU SUSY

La théorie supersymétrique propose d'ajouter une nouvelle symétrie qui associe un fermion à chaque boson et inversement.



$$1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + \dots = \text{infini}$$



$$1 - 1/2 + 1/3 - 1/4 + 1/5 - \dots = \ln(2)$$

L'intérêt réside dans le fait que les fermions (composants élémentaires de la matière) et les bosons (particules véhiculant une force) introduisent des termes de signes opposés dans de nombreux calculs. Ainsi, les calculs qui conduisent à des infinités dans le cadre du modèle standard peuvent être ramenés à des calculs finis dans le cadre de théories supersymétriques.

En outre, si ces particules supersymétriques existent, elles pourraient former une partie de la matière noire et ainsi répondre à des interrogations astrophysiques. Un argument supplémentaire en leur faveur.

Le LHC, grâce à l'énorme énergie qu'il délivre, permettra peut-être de produire des particules supersymétriques.



LHC . . .

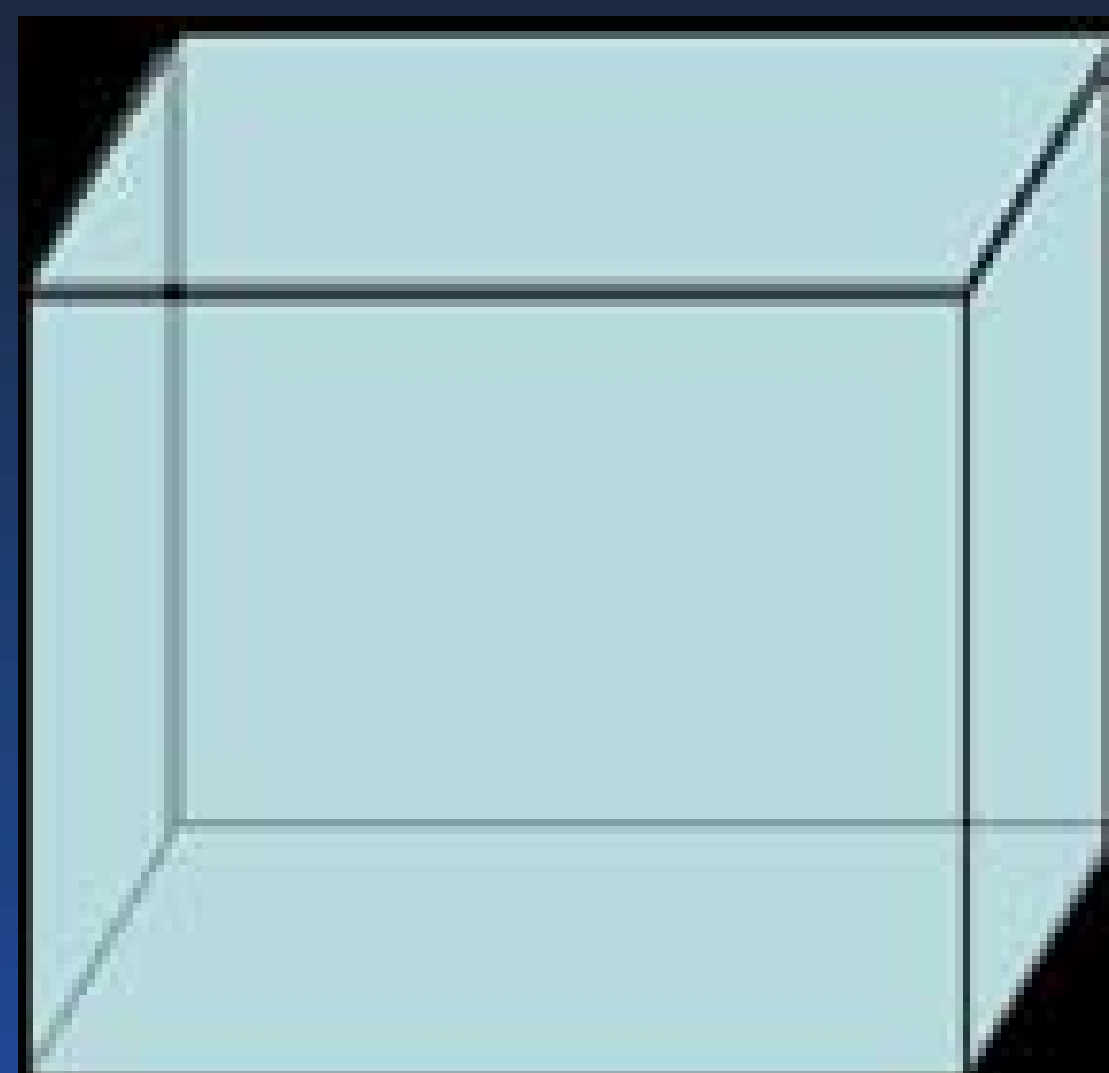
L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



LES THÉORIES DES CORDES ET LES DIMENSIONS SUPPLÉMENTAIRES

Depuis Einstein, nous pensons vivre dans un monde à quatre dimensions : ce cube a une largeur, une longueur et une hauteur. Le temps est la quatrième dimension.



Malheureusement, dans un univers à quatre dimensions, le formalisme du modèle standard semble incapable de décrire la gravitation.

Les théories des cordes proposent deux modifications majeures du modèle standard :

1° travailler dans un univers à 10 ou 11 dimensions ;

2° représenter les particules comme des cordes à une dimension plutôt que des points de dimension nulle.



Dix dimensions, c'est un petit peu perturbant parce qu'on ne les ressent pas, ces dimensions supplémentaires. Mais combien de temps a-t-il fallu pour se rendre compte que la Terre était ronde ? Et ne percevez-vous pas les lignes à haute tension comme des lignes à une dimension, alors que ce sont des sortes de cylindres à trois dimensions ?

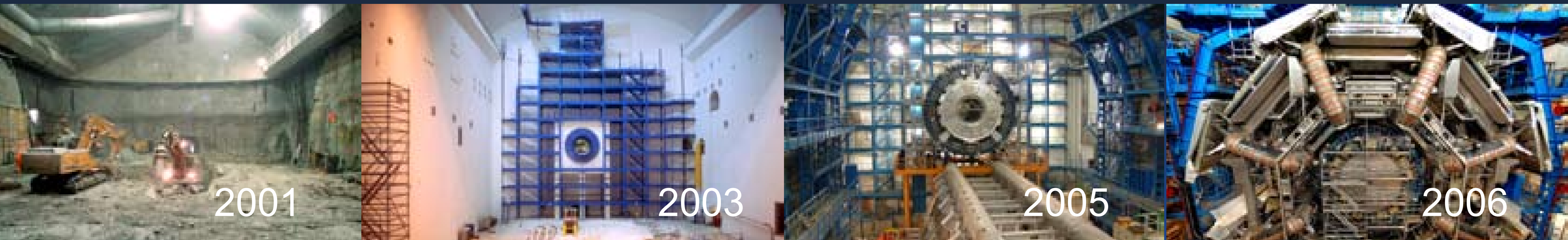
Pour savoir si ces propositions sont intéressantes, il faut considérer leurs conséquences. Ainsi par exemple, les théories à dimensions supplémentaires prédisent l'existence de nouvelles particules et il se pourrait bien que le LHC permette de les détecter ou de les exclure.



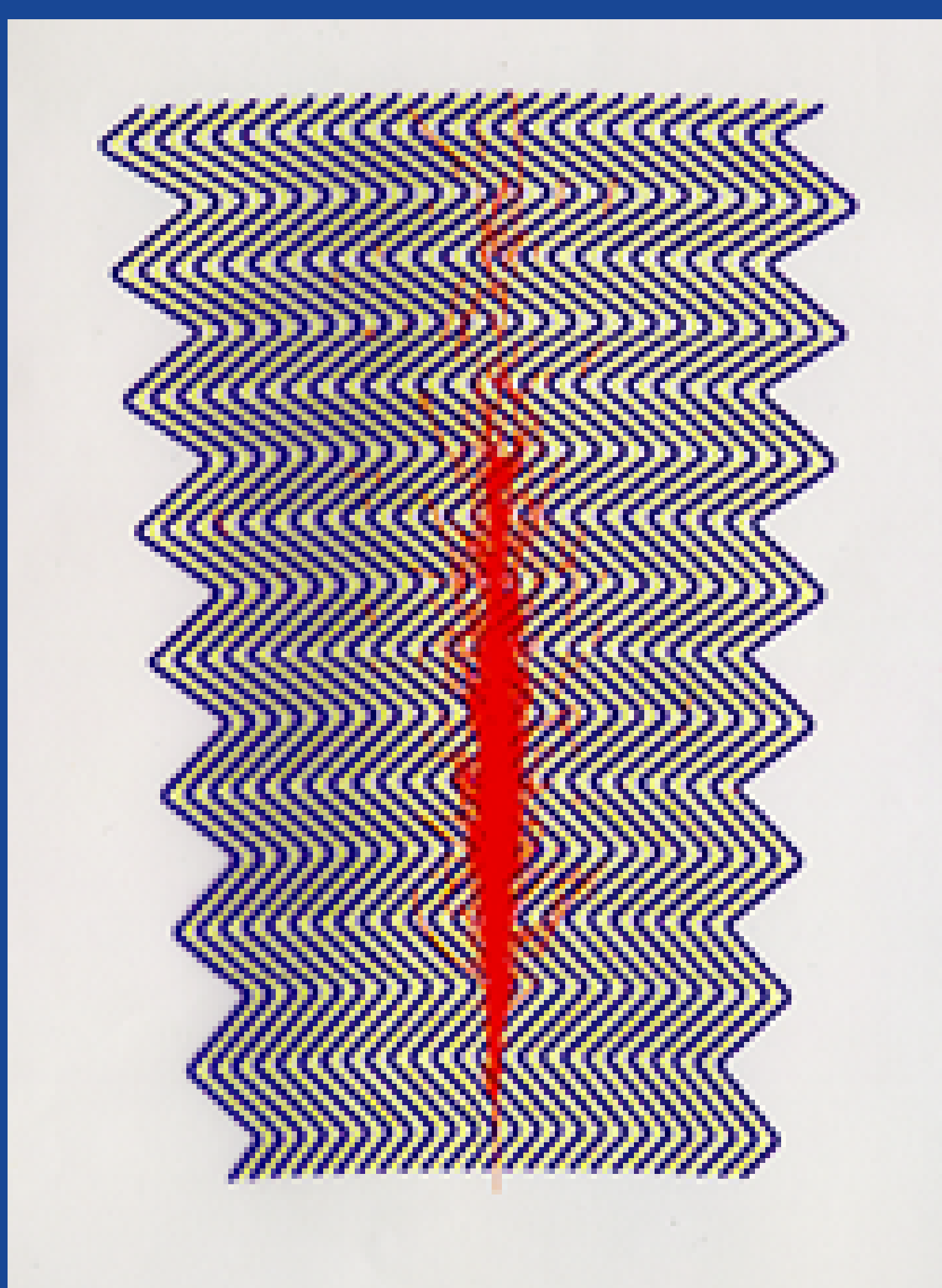
LHC . . . L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

ATLAS, UN GÉANT

Haut comme un immeuble de six étages et construit à 100 m sous terre, Atlas a nécessité l'excavation d'une caverne impressionnante (35 m de large, 55m de long et 40m de haut).



Atlas a mis l'accent sur une segmentation fine des détecteurs dans la direction de pénétration des particules produites lors des collisions. Cela permet une identification optimale du type de particules.



LE CALORIMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Il est réalisé avec une succession de feuilles de plomb et d'électrodes de 3 mètres de long pliées en accordéon. Une conception qui permet de réaliser un détecteur finement divisé avec un temps de réponse rapide (~50 milliardièmes de seconde).

LE CALORIMÈTRE HADRONIQUE

Ici la segmentation est également privilégiée, avec une succession de fines tuiles qui scintillent au passage des particules.



Nom : Atlas (A Toroidal LHC ApparatuS)
Taille : 44 m (longueur) et 25 m (hauteur)
Poids : 7 500 tonnes
Nationalités : 35 différentes
Population : 2 000 chercheurs

LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND



CMS UN DÉTECTEUR HORS DU COMMUN

CMS est la seule expérience du LHC qui a été entièrement assemblée et testée dans un hall en surface avant d'être descendue par «tranches» dans sa caverne. La plus lourde de ces tranches pèse 1920 tonnes pour un total de 12500 tonnes, l'équivalent de 22 Airbus A380 en pleine charge.



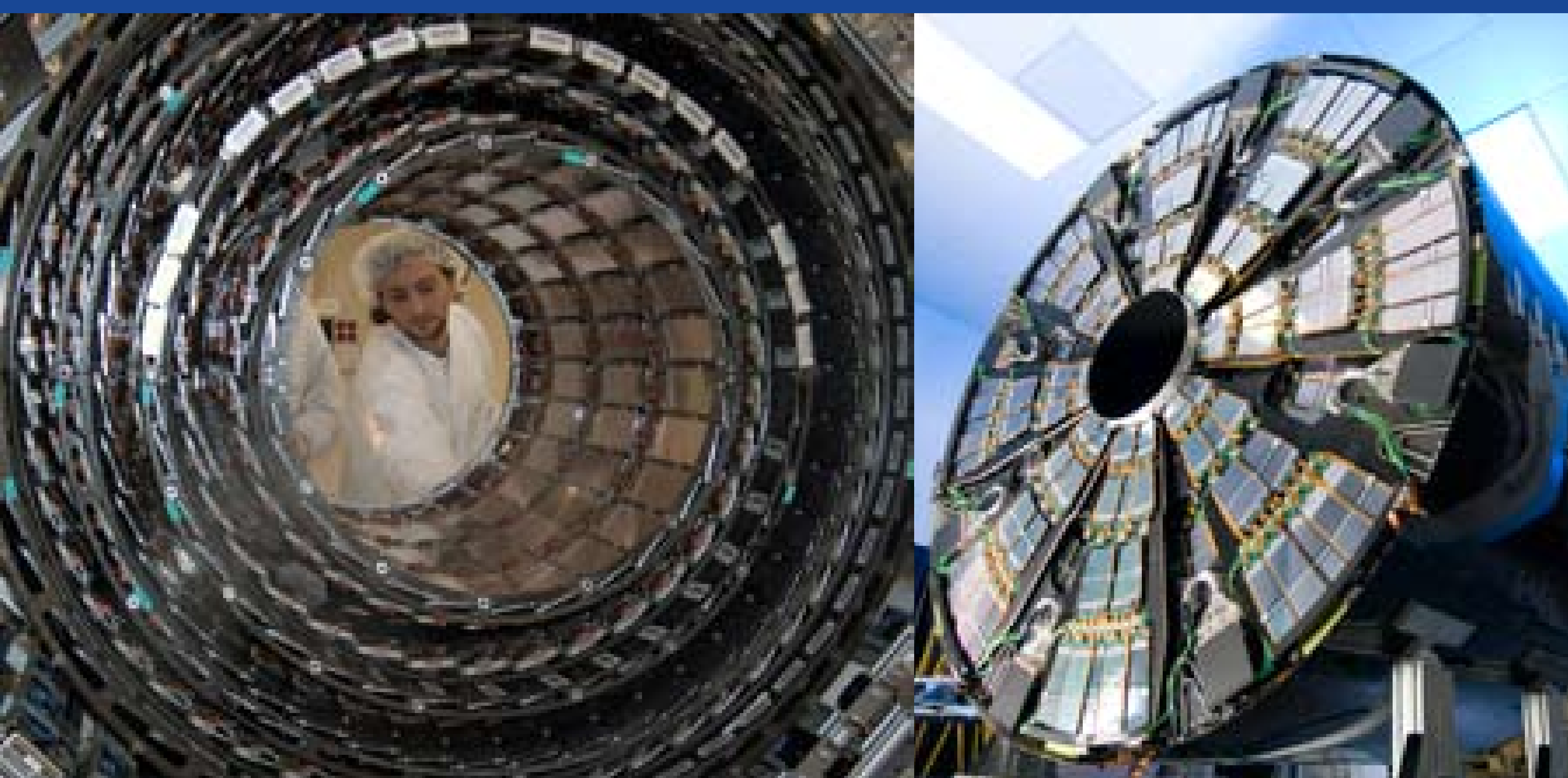
L'AIMANT LE PLUS PUISSANT AU MONDE

Un champ magnétique de 4 Tesla dans un cylindre de 12,5 mètres de long et 6 mètres de diamètre... C'est un record ! Le champ magnétique atteint est près de 100 000 fois supérieur à celui de la Terre et 10 fois celui des aimants classiques de type ferrite. L'aimant est un solénoïde : un enroulement de fils supra-conducteurs parcourus par un courant de 19 500 Ampères.



LE PLUS GRAND TRAJECTOGRAPHE AU SILICIUM

Le trajectographe de CMS est la plus importante structure de ce type jamais réalisée : il compte plus de 17 000 détecteurs au silicium d'une épaisseur de 0,3 à 0,5 mm munis de 512 à 768 pistes (soit un total de plus de 10 millions de pistes) assemblés en cylindres emboîtés et en deux bouchons.



LA SURFACE TOTALE DE SILICIUM EST ÉQUIVALENTE À CELLE D'UN TERRAIN DE TENNIS.

Nom : CMS (Compact Muon Solenoid)
Taille : 21 m (longueur) et 15 m (hauteur)
Poids : 12 500 tonnes
Nationalités : 39 différentes
Population : 2 000 chercheurs

LHC . . .

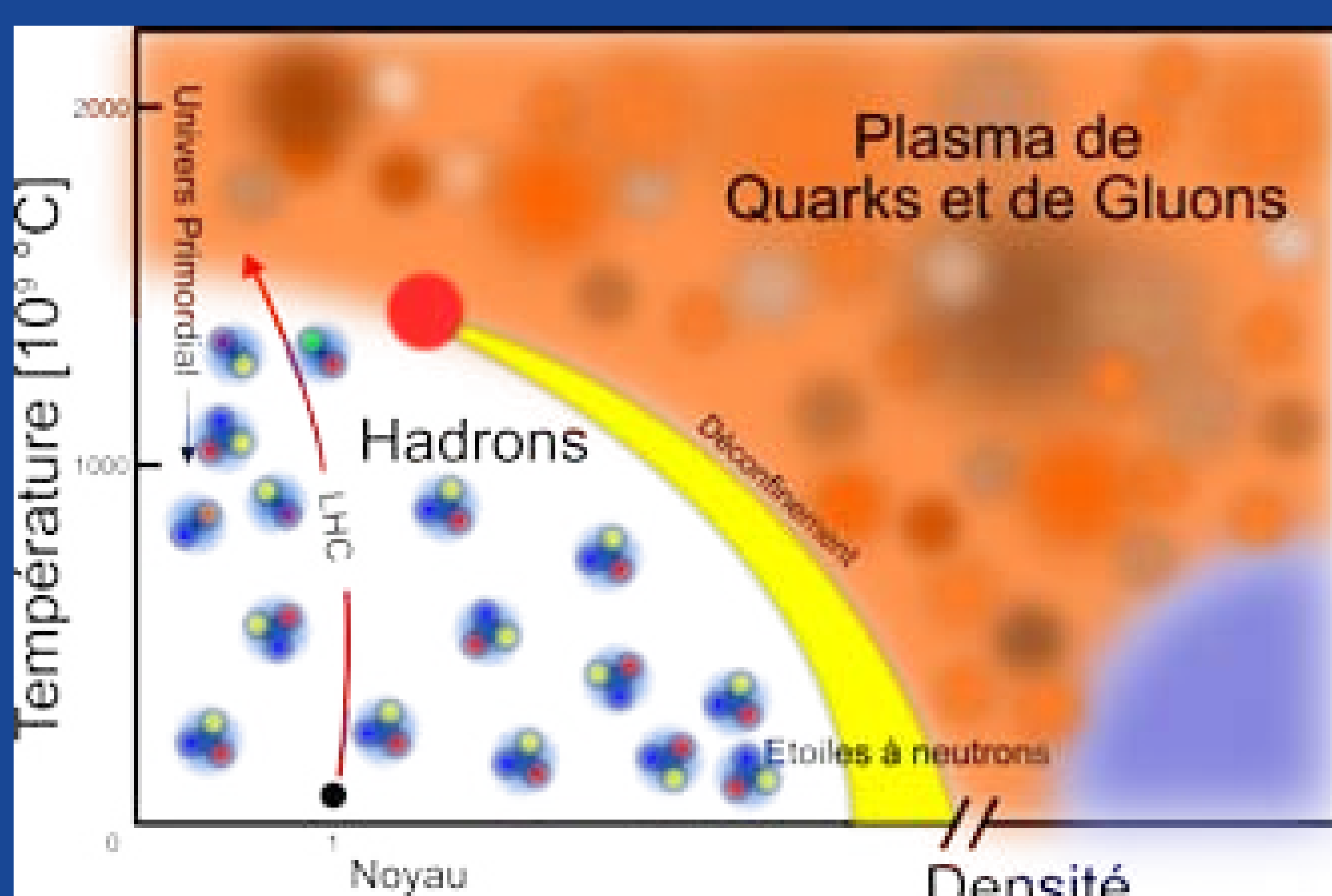
L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS

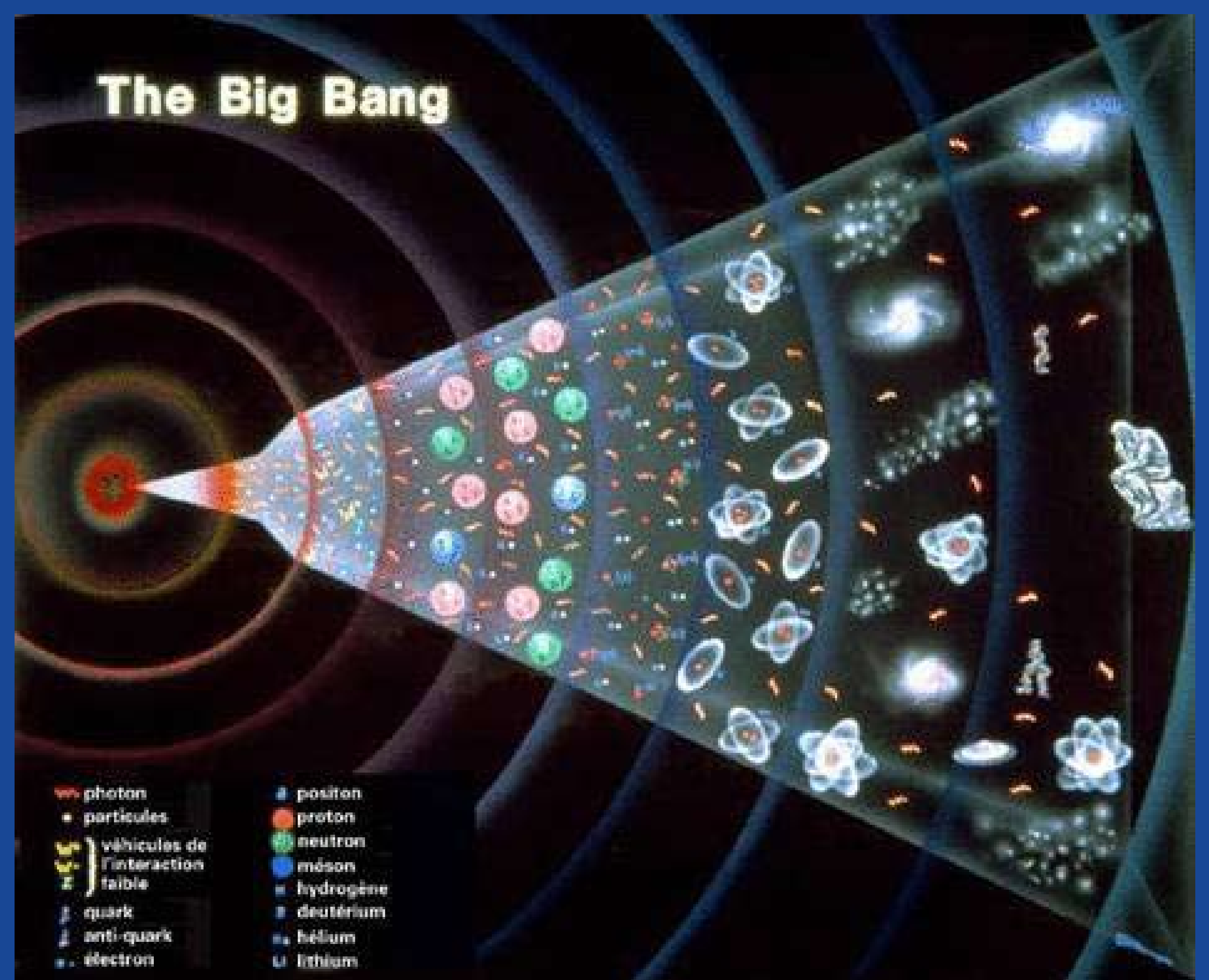
L'INTERACTION FORTE QUI LIE LES QUARKS POUR CONSTITUER LES HADRONS (PROTONS, NEUTRONS...) EST VÉHICULÉE PAR UNE PARTICULE APPELÉE GLUON.

Cette force augmente lorsque la distance entre les quarks augmente. On peut ainsi imaginer que ces gluons forment, à température normale, une sorte d'élastique « incassable » qui relie les quarks et les maintient enfermés (confinés) par groupes de deux ou trois à l'intérieur des hadrons.



En revanche, en chauffant la matière nucléaire à des températures très élevées (100 000 fois la température prévalant au cœur du Soleil) ou en la soumettant à des conditions de densité extrême (comme si l'on comprimait la pyramide de Chéops dans une tête d'épingle), on devrait accéder à un nouvel état de la matière où les quarks sont déconfinés. Cet état est appelé plasma de quarks et de gluons.

On pense que le plasma de quarks et de gluons a existé au tout début de l'Univers, c'est-à-dire quelques microsecondes après le Big Bang. En se refroidissant, l'Univers aurait ensuite subi une transition de phases conduisant les quarks à se confiner dans les hadrons.



QUELLE EST L'ORIGINE DU CONFINEMENT DES QUARKS ?

QUEL EST LE MÉCANISME À L'ORIGINE DE LA MASSE DES PARTICULES COMPOSITES ?

Un nucléon (proton ou neutron) est constitué de trois quarks. En additionnant leur masse, on obtient à peine 1% de la masse du nucléon. Comment sont générés les 99% de la masse manquante ?



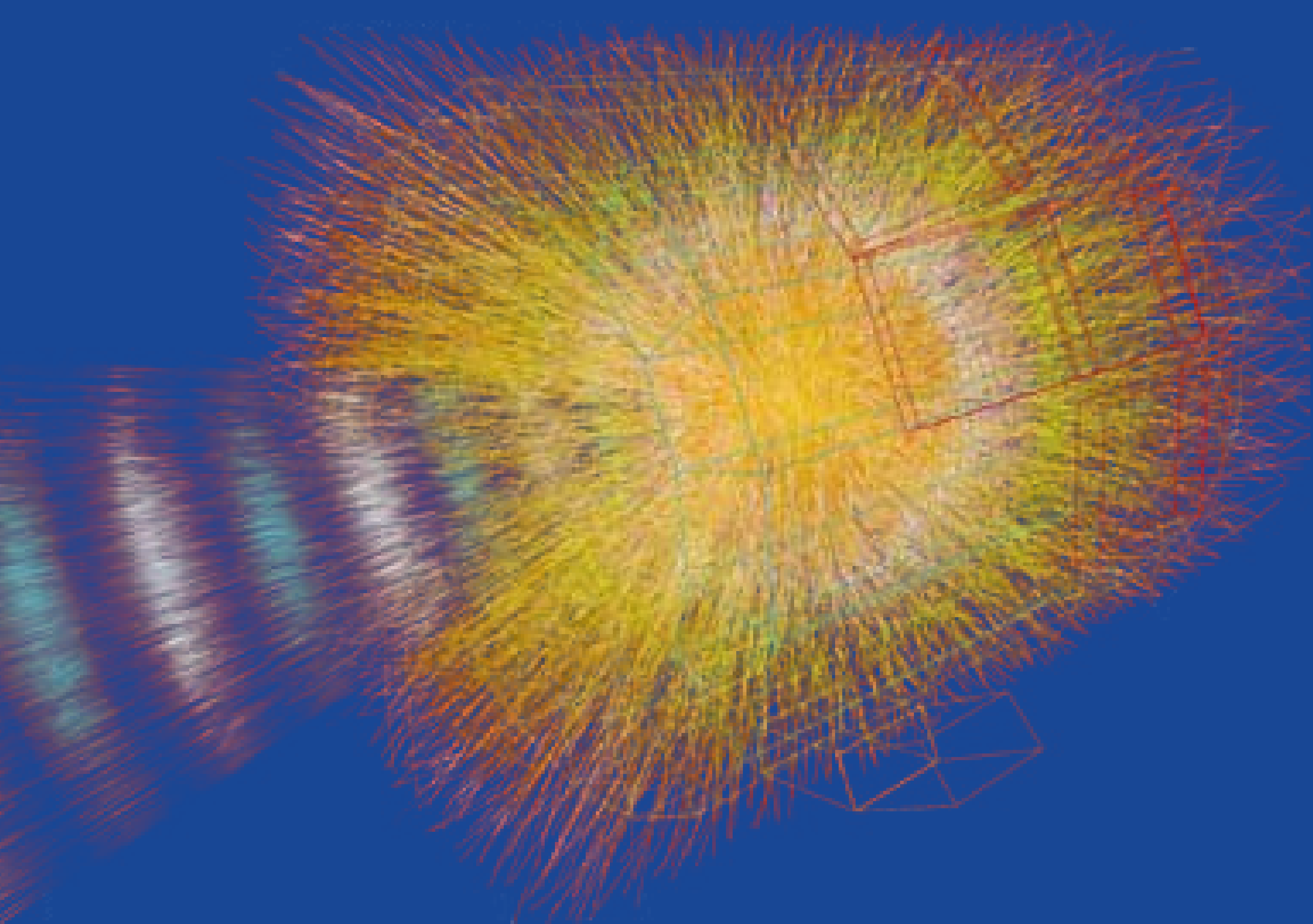
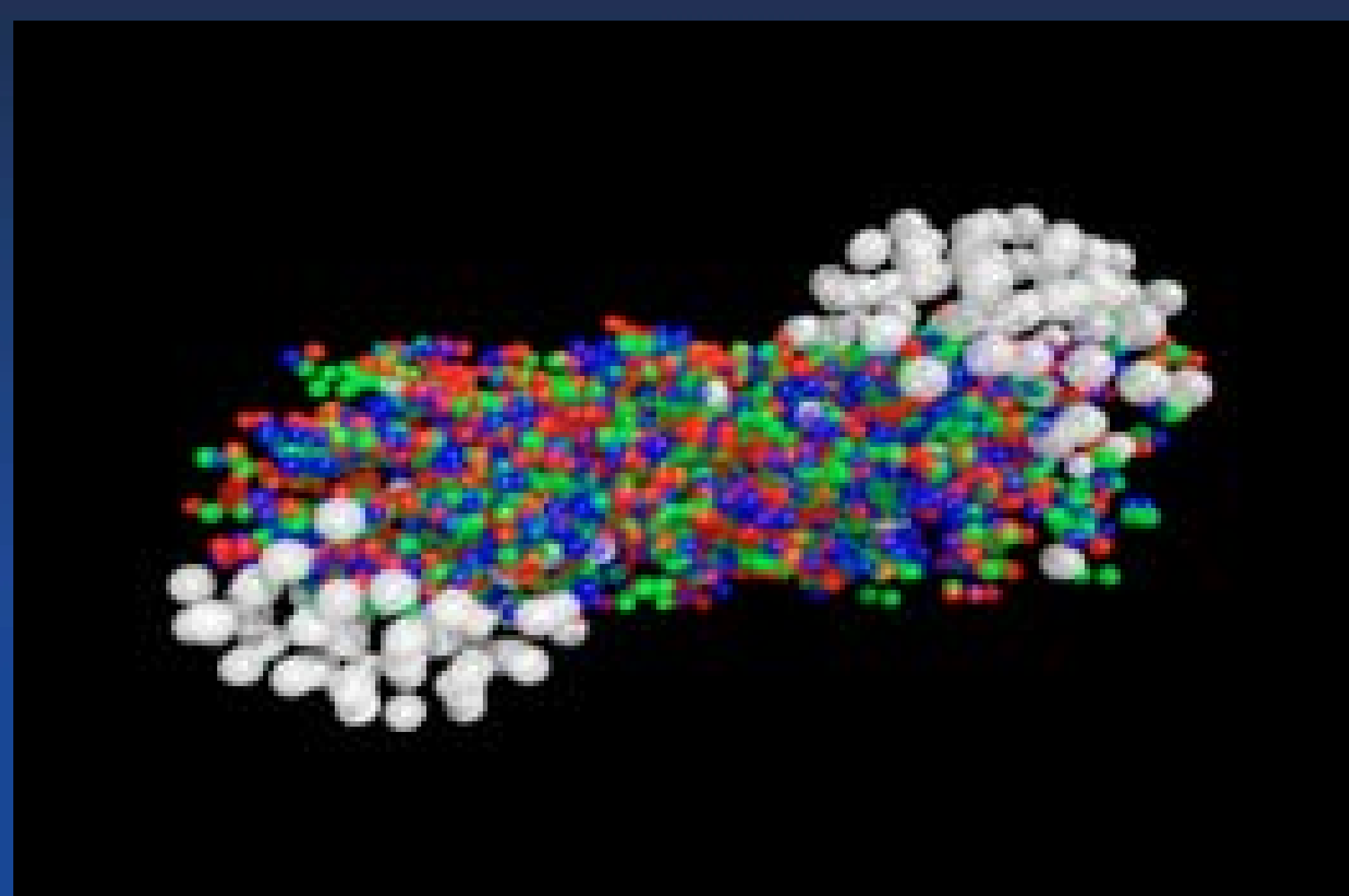
LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

ALICE AU PAYS DU BIG BANG

LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS EN LABORATOIRE

Les énergies libérées lors de collisions entre des noyaux lourds tels que le plomb, lancés à des vitesses quasiment égales à la vitesse de la lumière, permettront de produire au LHC de la matière suffisamment dense et chaude pour créer un plasma de quarks et de gluons. Cet état de la matière aurait existé quelques microsecondes après le Big Bang.



L'objectif de l'expérience Alice est d'observer les signaux émanant du plasma de quarks et de gluons et de sa transformation en matière ordinaire, afin d'étudier notamment l'origine du confinement et de la masse des particules composites. Pour ce faire, Alice est dotée d'un appareillage complexe, capable de reconstruire les trajectoires des milliers de particules émises lors de chaque collision et de les identifier une par une.

ALICE ENREGISTRERA UN FLUX DE DONNÉES PHÉNOMÉNAL !



Nom : Alice (A Large Ion Collider Experiment)
Taille : 26 m (longueur) et 16 m (hauteur)
Poids : 10 000 tonnes
Nationalités : 30 différentes
Population : 1 000 chercheurs



LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND

CMS ET ALICE

LA PARTICIPATION DE L'IPHC

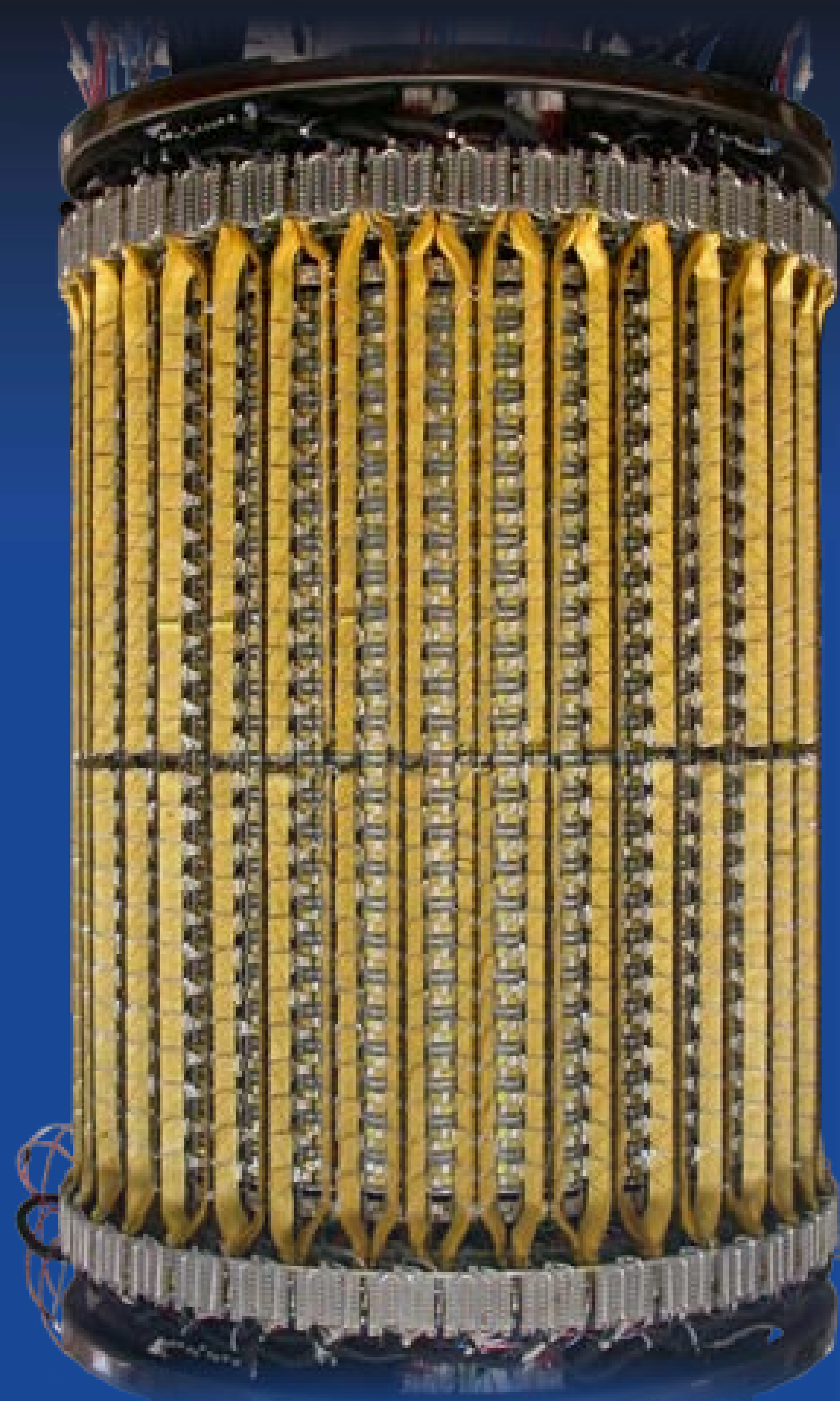
Les trajectographes au silicium, placés au cœur des détecteurs Alice et CMS, sont des merveilles de précision. Leur construction nécessite des technologies de pointe tant au niveau de la connectique que de la micro-électronique.

Le savoir-faire de l'IPHC l'a placé au cœur de la réalisation de ces instruments.

LE TRAJECTOGRAPHE D'ALICE

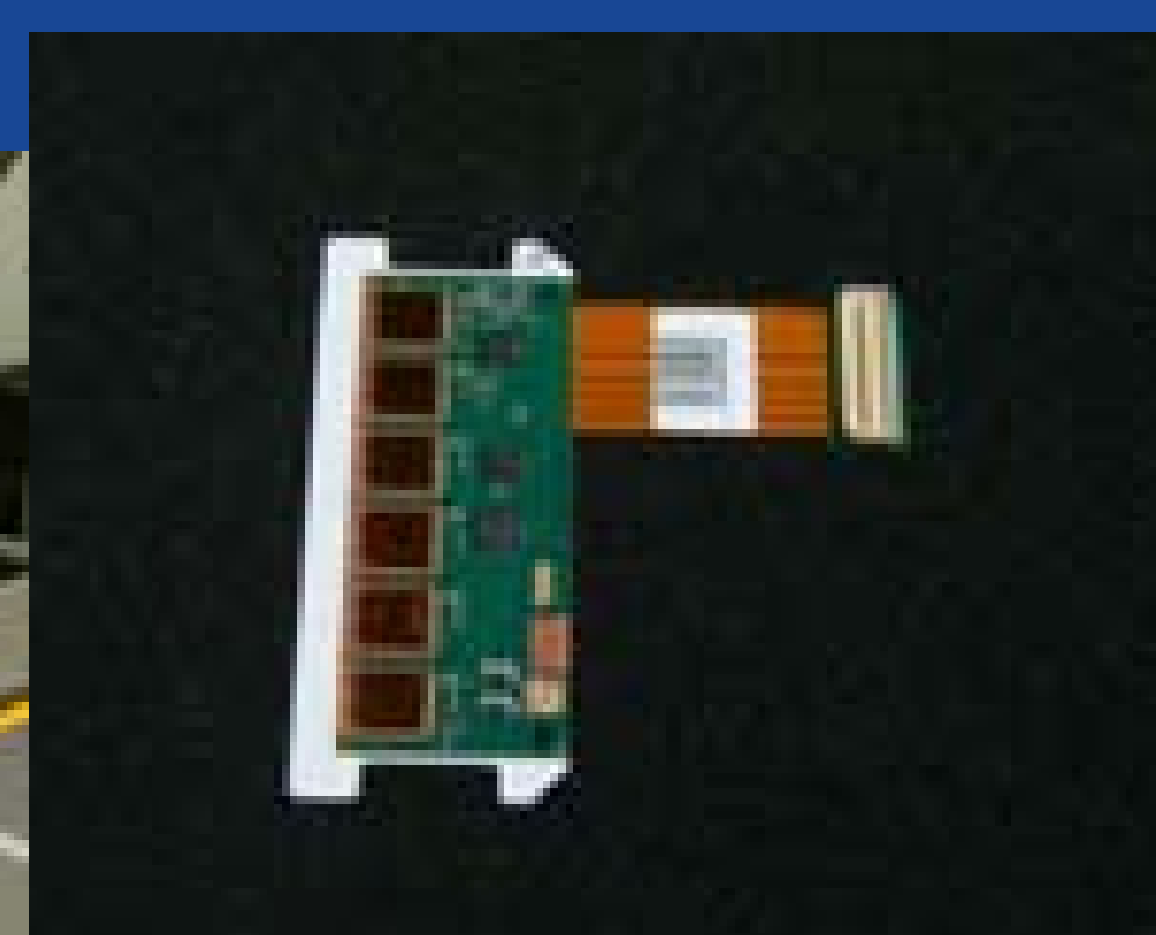
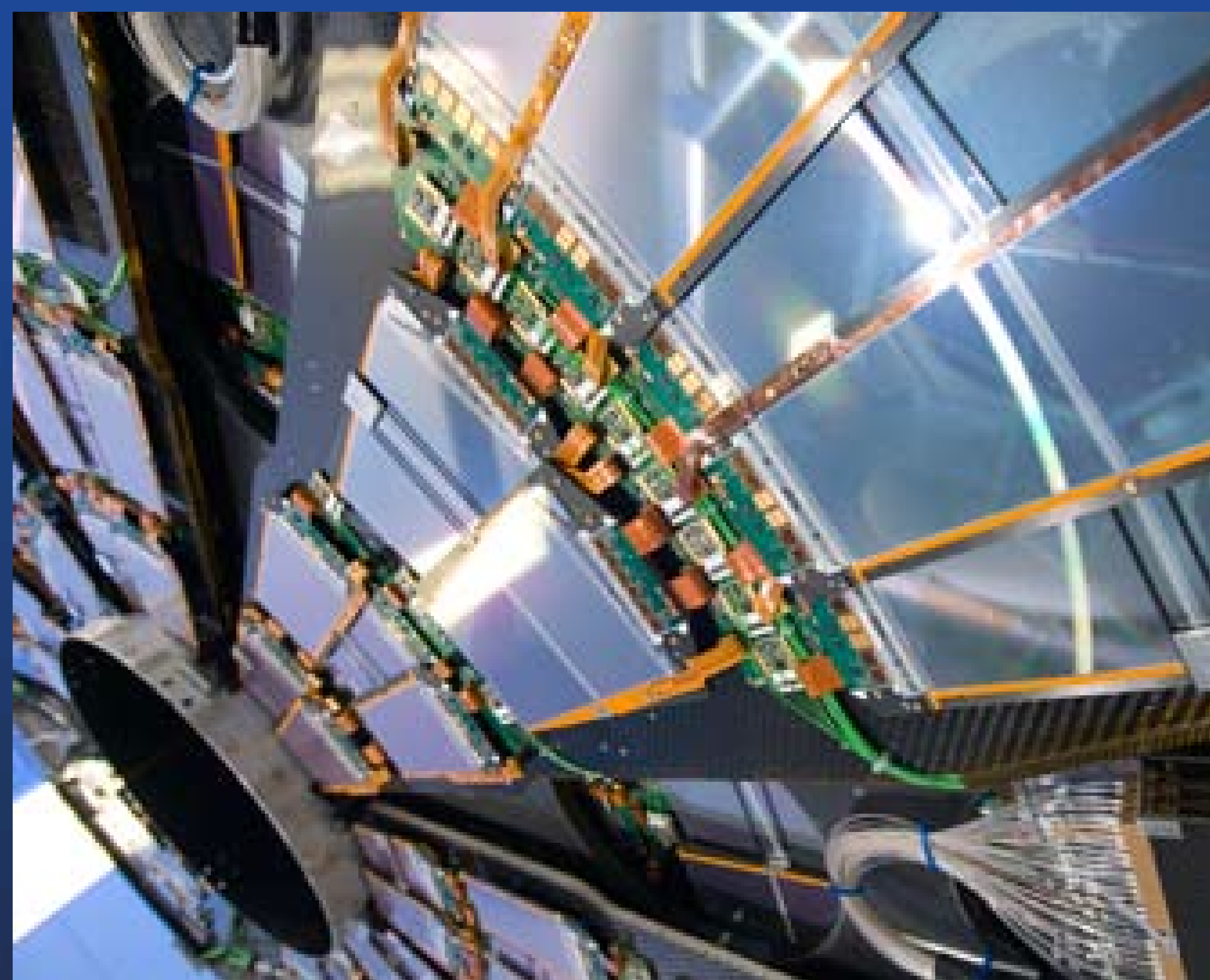
L'IPHC, en association avec 10 autres laboratoires européens, a pris en charge la réalisation des deux couches externes du trajectographe d'Alice.

Appelé « Silicon Strip Detector », ces couches cylindriques servent à mesurer avec une très grande précision la position (à 20 microns près) et la perte d'énergie des particules issues des collisions du LHC. Elles consistent en la juxtaposition de 1700 modules de détection, comprenant 2,6 millions de canaux de lecture analogiques et représentent une surface de plus de 5 m².



LE TRAJECTOGRAPHE DE CMS

L'IPHC s'est impliqué dans la réalisation de ce qui constitue le plus grand trajectographe au silicium jamais réalisé (surface d'un terrain de tennis). L'étendue de ses responsabilités touche aussi bien à la conception et au suivi de production de l'électronique de lecture qu'à l'assemblage et aux tests de composants du trajectographe (superstructures appelées « pétales », microconnectique entre les pistes de silicium et l'électronique de lecture...).



LHC . . .

L'INFINIMENT PETIT

VU EN GRAND

UN ACCÉLÉRATEUR JOUET

Dans ce saladier, quatre pistes forment une croix au centre. Elles sont portées à un potentiel positif de 10 000 Volt. Les quatre autres pistes qui se situent plus à l'extérieur sont portées à un potentiel négatif de -10 000 Volt. Une balle de ping-pong enduite d'une peinture conductrice est placée au centre.

La balle touche les pistes du centre et se charge donc positivement. Comme les charges de même signe se repoussent et que les charges de signes opposés s'attirent, la balle se met en mouvement vers les pistes négatives.



Lorsque la balle touche les pistes négatives, le phénomène inverse se produit : elle se charge négativement et est donc repoussée vers les pistes positives. La balle est ainsi accélérée de piste positive en piste négative et inversement. La forme circulaire du bol permet de réutiliser les mêmes pistes indéfiniment et la vitesse de la balle est uniquement limitée par les forces de frottement.

L'ÉNERGIE DE LA BALLE DE PING-PONG EST ÉNORME : ENVIRON 3000 TeV
MAIS ELLE N'EST PAS ASSEZ CONCENTRÉE POUR PRODUIRE DE NOUVELLES
PARTICULES, CONTRAIREMENT À L'ÉNERGIE DU LHC!

LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND



L'INSTITUT PLURIDISCIPLINAIRE HUBERT CURIEN

Unité mixte de recherche de l'Université Louis Pasteur et du CNRS, l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) est un laboratoire plutôt singulier dans le paysage de la recherche française. Né de la volonté de trois laboratoires du campus de Strasbourg-Cronenbourg d'associer leurs compétences, leurs expertises et leurs moyens, l'IPHC cherche notamment à promouvoir l'émergence de projets de recherche à la confluence de différentes disciplines, comme la physique, la biologie et la chimie.

LE DÉPARTEMENT DE RECHERCHES SUBATOMIQUES

Le département de recherches subatomiques est affilié à l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules). Ses domaines de recherche sont la physique fondamentale de l'infiniment petit, ainsi que certains des champs connexes ou dérivés. Le département est impliqué dans différentes collaborations internationales notamment autour du LHC au CERN.

LE DÉPARTEMENT D'ÉCOLOGIE, DE PHYSIOLOGIE ET D'ÉTHOLOGIE



Les axes de recherche du département s'orientent vers l'étude de l'animal, tant sur le plan comportemental que physiologique, face aux changements climatiques.

L'expertise du département repose sur le suivi des animaux dans leurs milieux naturels et les approches utilisées sont largement pluridisciplinaires : microélectronique, suivi par satellite, spectrométrie de masse, biologie moléculaire et microscopie électronique.

LE DÉPARTEMENT DE SCIENCES ANALYTIQUES

L'ensemble des programmes de recherche de ce département a pour but de concevoir de nouveaux moyens d'analyse tant en chimie, qu'en biologie et en médecine. Parmi les axes de recherche, on distingue notamment les sciences des aliments et la spectrométrie de masse bioorganique.



LHC...

L'INFINIMENT PETIT VU EN GRAND