



© 2011 CERN

Au CERN, la science : un pont entre les cultures







Au CERN,  
la science : un pont entre les cultures

Édité par Marilena Streit-Bianchi

Genève  
2018



Ce livre est disponible aussi en anglais (v.o.), allemand, italien et portugais.

Dessins en page de couverture :

recto :

**“Pushing particles near to the speed of light”** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

verso :

**“Geneva, Switzerland”** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine en couleur

© 2018 [[l’auteur(s) ]]. Les articles de ce livre sont disponibles en libre accès selon la licence CC  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Œuvre(s) selon la licence “Attribution-Non Commercial-ShareAlike 4.0 International”  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Citer article(s) ou Œuvre(s) : [[Nom(es) auteur(es) ou artiste(s)]], [[Titre de la contribution ou Œuvre]] dans  
“Au CERN, la science : un pont entre les cultures, ed. Marilena Streit-Bianchi, 2018, pp [[page]]

DOI : 10.5281/zenodo.1196811



Dédié au Dr. Karl-Peter Streit, physicien qui a été membre de l'Université d'Heidelberg et assistant du Professeur Volker Soergel. Il a participé aux expériences WA2, WA42, WA46 étudiant les caractéristiques des hypérons. En 1983, la collaboration WA62, dont il était porte-parole, démontra l'existence du baryon étrange charmée  $\Lambda^+$  (CSU) à  $2.46 \text{ GeV}/c^2$  et en 1984 du baryon charmée doublement étrange  $T^0$  (cSU) à  $2.74 \text{ GeV}/c^2$ . Après avoir travaillé dans l'industrie, au cours des dernières années dans le groupe du professeur Allan Clark au Département de physique nucléaire et corpusculaire de l'Université de Genève, sa dernière contribution scientifique fut l'estimation des paramètres de dureté au rayonnement du détecteur au silicium à pixels pour les améliorations futures du détecteur interne de traces de l'expérience ATLAS (IBL, Insérable B layer, e HL-LHC, LHC haute luminosité). Il a été membre pendant de nombreuses années de la communauté des utilisateurs du CERN.

Le CERN a été sa maison d'appartenance professionnelle et intellectuelle de la science, la culture et l'humanité.

Marilena Streit-Bianchi et Rolf Heuer



## Préface

Je sais, grâce à ma longue expérience au CERN, qu'il a été et reste le lieu où la connaissance, la compétence technique et la compréhension trouvent leur demeure. Il en a été ainsi depuis la création de l'Organisation dans les années 1950 et continuera à l'être aussi longtemps que le CERN existera. En effet, ceux qui travaillent au CERN dans la recherche ou dans le secteur opérationnel sont motivés par le désir de faire avancer la frontière de notre compréhension des forces fondamentales de la nature, indépendamment de leur provenance ou de toute idée préconçue.

Ce livre donne un aperçu des activités du CERN et met aussi en lumière diverses facettes moins connues du Laboratoire et pourtant essentielles pour la recherche en physique des hautes énergies. Le CERN est non seulement un excellent exemple d'excellence en matière de recherche, de technologie et d'innovation, mais également un véritable creuset de diversité de compétences et d'humanité.

La science et l'art ont la créativité et l'esprit d'ouverture comme commun dénominateur. Ce livre nous montre comment ces deux mondes, jadis clairement unis mais maintenant perçus comme distincts, restent en fait, des manifestations du même esprit de la quête humaine. Il montre aussi comment des artistes de différents horizons culturels perçoivent le CERN et le travail qui y est effectué\*. Le travail graphique de Justino António Cardoso y apporte une touche africaine, unique et incomparable.

Pour conclure je tiens à souligner que ce livre, dans ses différentes versions linguistiques, a été rendu possible grâce à la contribution de tous les auteurs et artistes qui, en plus de leur travail quotidien, ont pris le temps de participer bénévolement à cette réalisation.

J'en profite pour remercier chaleureusement :

- Sergio Bertolucci, professeur à l'Université de Bologne et ex-Directeur de la Recherche et de l'Informatique du CERN, pour l'aide fournie lors du séjour de Justino António Cardoso au CERN.
- João Penedones Fernandes, professeur de Physique à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour avoir expliqué à Justino António Cardoso le CERN et ses activités et
- José Carlos Rasteiro Da Silva, ingénieur électronique du LIP (*Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas*) de Lisbonne qui travaille dans l'expérience CMS au LHC, pour avoir montré à Justino António Cardoso les installations du CERN.

Je suis profondément reconnaissante à Beatrice A. Bressan, Melissa Gaillard, James Gillies, Paulo Gomes, Bettina Hamoudi, João Antunes Pequeno, Pascale Pessy, Délio Duarte Ramos, Klaus Michael Streit pour l'aide à la traduction et révision de ce livre.

Marilena Streit-Bianchi

\* Davide Angheluddu (Italie), Justino António Cardoso (Mozambique), Margarita Cimadevila (Espagne), Angelo Falciano (Italie), Michael Hoch (Autriche), Karen Panman (Pays-Bas), Islam Mahmoud Sweity (Palestine).

## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| <b>Préface</b> <i>Marilena Streit-Bianchi</i> .....   | IV |
| <b>Le CERN, Laboratoire européen pour la physique des particules</b> <i>Marilena Streit-Bianchi</i> ..... | 3  |
| <b>CERN - Science pour la paix</b> <i>Emmanuel Tsismelis</i> .....  | 5  |
| <b>Le Modèle standard et recherches pour une nouvelle physique fondamentale</b> <i>John Ellis</i> .....   | 9  |
| <b>Accélérateurs : le comment et le pourquoi</b> <i>Lucio Rossi</i> .....                                 | 13 |
| <b>Les physiciens et les expériences</b> <i>Ana Maria Henriques Correia et João Martins Correia</i> ..... | 23 |
| <b>Le CERN et les technologies de l'information</b> <i>Frédéric Hemmer</i> .....                          | 31 |
| <b>Transfert des connaissances et technologies</b> <i>Giovanni Anelli</i> .....                           | 35 |
| <b>ClearPEM</b> <i>João Varela</i> .....  | 36 |
| <b>ARTSCI au CERN</b> <i>Arthur I. Miller</i> .....   | 39 |
| <b>Science, politique et société</b> <i>Rolf Heuer</i> .....  | 41 |

## Artistes et titres des œuvres

*Justino António Cardoso (Mozambique) :*

|  |                  |
|--|------------------|
| <b>Pushing particles near to the speed of light</b> .....                | Couverture recto |
| <b>Geneva, Switzerland</b> .....   | Couverture verso |
| <b>CERN, the largest particle physics laboratory in the world</b> .....  | 1                |
| <b>The evolution of our Universe</b> .....                               | 2                |
| <b>How to extend the Standard Model?</b> .....                           | 4                |
| <b>The forces</b> .....  | 8                |
| <b>Strings propagate through space and interact</b> .....                | 11               |
| <b>The search is open</b> .....  | 12               |
| <b>CERN's accelerator complex</b> .....                                  | 14               |
| <b>Energetic protons in a circular collider</b> .....                    | 16               |
| <b>Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe</b> ..... | 18               |
| <b>Tanks of liquid helium to cool the LHC</b> .....                      | 18               |
| <b>A look into the future</b> .....                                      | 20               |

|   |       |
|---|-------|
| Chameleon a hypothetical scalar particle .....  | 27    |
| Accelerators and detectors to understand the Universe .....   | 30    |
| A clinical case: ClearPEM .....   | 35    |
| An innovative technology .....  | 37    |
| The gravitation law I know .....  | 38    |
| Knowledge and black holes .....   | 43    |
| Gargamelle and the neutral currents .....   | 44    |
| Cosmic microwave background .....   | 45    |
| <br><i>Angelo Falciano (Italie) :</i>   |       |
| Congetture circolari .....  | 14    |
| <br><i>Margarita Cimadevila (Espagne) :</i>   |       |
| Quarks .....  | 21    |
| <br><i>Islam Mahmoud Sweity (Palestine) :</i>   |       |
| François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012 .....  | 22    |
| <br><i>Davide Anghelddu (Italie) :</i>  |       |
| ATLAS Remeshed-Higgs Boson (sculpture) .....  | 24    |
| ATLAS Remeshed-Higgs Boson (photo digitale) .....   | 24    |
| <br><i>Michael Hoch (Autriche) :</i>  |       |
| Matter-Anti-Matter, symmetry 4 .....  | 25    |
| <br><i>Karen Panman (Pays-Bas) :</i>  |       |
| Strings at the horizon of a black hole .....  | 40    |
| <br><i>Photos</i>   |       |
| Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN (CERN-PHOTO-8410523) ..... | 22    |
| Justino António Cardoso au CERN .....   | 46-47 |





Le plus grand Laboratoire de physique des particules  
au monde est une Organisation phare  
dans la création de la connaissance







**"The evolution of our Universe"** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

*Il a fallu des milliards d'années dans l'évolution de notre Univers pour voir la vie sur Terre. Avec le LHC, les physiciens étudient ce qui s'est passé  $10^{-12}$  seconde après le Big Bang. L'hydrogène et les atomes d'hélium ne furent formés qu'environ 380 000 années après.*

# **Le CERN, Laboratoire européen pour la physique des particules**

*Marilena Streit-Bianchi*

Le CERN, Organisation européenne pour la recherche nucléaire, le plus grand Laboratoire au monde pour la recherche en physique de particules est de longue date un exemple au niveau européen de recherche, d'éducation et de transfert des connaissances.

Le Laboratoire, à cheval sur la frontière franco-suisse, près de Genève, a été fondé en 1954 dans le but de créer un centre de recherche de classe mondiale en physique de particules afin d'arrêter la fuite des cerveaux vers les États-Unis d'Amérique et de fédérer l'Europe autour d'un projet de recherche qui ne pouvait pas être réalisé par une seule nation. Le groupe de scientifiques visionnaires et diplomates qui ont fondé le CERN ont voulu favoriser la compréhension entre les personnes indépendamment de leur nationalité, appartenance politique ou religieuse.

Le CERN aujourd'hui est très international, en particulier dans les collaborations de recherche. Plus de six cent instituts et universités du monde entier utilisent les installations du CERN. Le CERN est également un centre d'excellence de renommée mondiale qui a contribué à d'importantes découvertes dans le domaine de la physique des particules et continue d'être une organisation de premier plan dans la création de connaissances. Son rôle et son importance pour l'éducation et la formation de physiciens, d'ingénieurs, de scientifiques et d'informaticiens ne cessent de croître. Environ un millier de jeunes reçoivent chaque année des diplômes pour le travail effectué au CERN.

Au fil des ans, l'acquisition et le transfert de connaissances se sont révélés substantiels et le Laboratoire est une source de développements technologiques continus.

Au CERN, les résultats obtenus à partir de la recherche fondamentale sont publiés, librement échangés et mondialement disponibles. Depuis le début, les scientifiques du CERN ont développé un concept réel et naturel de partage de l'information, qui implique chercheurs, ingénieurs et étudiants. En conséquence, tout le monde est en mesure d'exercer et d'assouvir sa curiosité en interagissant avec des personnes de différentes origines, de différents champs de compétences et d'expertise.

Les infrastructures gigantesques du Laboratoire et le libre esprit d'équipe, d'apprentissage et de partage sont une grande découverte pour tout nouvel arrivant. Dans les grandes collaborations, le rôle de gestion et de coordination est la clé du succès de l'entreprise scientifique. L'impact dans de nombreux domaines de la connaissance générée par les grands ou petits projets, et ce qui en résulte, est bien documenté.

Le CERN a une longue tradition dans la promotion des relations avec l'industrie pour le développement des technologies innovantes nécessaires à la construction d'accélérateurs et de détecteurs. Aujourd'hui, ayant institutionnalisé le Transfert de Connaissances et de Technologie et ayant augmenté les efforts visant à assurer un impact plus rapide et efficace, le CERN joue un rôle davantage actif dans le transfert des innovations de la recherche fondamentale à la société.





"How to extend the Standard Model?" Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

## CERN - Science pour la paix

*Emmanuel Tsesmelis*

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la science européenne n'était plus dans une position de force. Inspirés par l'exemple d'autres organisations internationales, un certain nombre de scientifiques et diplomates visionnaires propose alors la création d'un laboratoire européen de physique nucléaire. Un tel laboratoire non seulement a pour but de réunir les scientifiques européens, mais aussi de leur permettre de partager les coûts élevés des installations de physique nucléaire. Le physicien français Louis de Broglie présente la première proposition officielle pour la création d'un laboratoire européen à la conférence culturelle européenne qui eut lieu à Lausanne le 9 décembre 1949. Ensuite, lors de la cinquième conférence générale de l'UNESCO à Florence en juin 1950, le physicien américain et lauréat du prix Nobel Isidor Rabi fait inscrire une résolution autorisant l'UNESCO à « assister et encourager la création de laboratoires régionaux pour accroître la coopération scientifique internationale... ».

Lors de la sixième session du Conseil du CERN, qui eut lieu à Paris du 29 juin au 1er juillet 1953, on signe, sous réserve de ratification, la Convention du CERN instituant l'Organisation. La convention a été progressivement ratifiée par les douze États membres fondateurs : la Belgique, le Danemark, la France, la République fédérale d'Allemagne, la Grèce, l'Italie, les Pays-Bas, la Norvège, la Suède, la Suisse, le Royaume-Uni et la Yougoslavie. Le 29 septembre 1954 le CERN - l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire - a officiellement vu le jour.

Depuis plus de 60 ans, la Convention du CERN résiste à l'épreuve du temps et permet à l'Organisation de s'adapter à un environnement politique changeant et aux nouveaux défis scientifiques et technologiques. La Convention témoigne de la sagesse et de la prévoyance des pères fondateurs du CERN, à la hauteur de leur ambition de reconstruire la paix en Europe en établissant un lieu unique pour favoriser la collaboration scientifique, à une échelle sans précédent, entre les nations qui avaient combattu lors de la guerre seulement quelques années auparavant.

Le CERN a depuis et à jamais contribué à renforcer la confiance mutuelle à travers les frontières. En 1968, au cours des années de la guerre froide, le CERN a conclu un accord avec l'Union soviétique, en établissant une coopération avec l'IHEP (*Institute of High Energy Physics*) le grand laboratoire national russe de Protvino près de Serpukhov. En 1956, le laboratoire international JINR, (*Joint Institute for Nuclear Research*) a été fondé à Dubna au nord-est de Moscou, selon le modèle du CERN, ses membres, les « États du pacte de Varsovie » derrière le rideau de fer. La coopération entre JINR et le CERN a fourni l'un des rares ponts de coopération entre les physiciens de l'Ouest et de l'Est pendant la période de la guerre froide. Il a joué un rôle particulièrement important en permettant la coopération entre les scientifiques de l'Allemagne de l'Ouest et de l'Allemagne de l'Est, cela a été longtemps la seule possibilité pour les scientifiques de ces deux parties de l'Allemagne de travailler ensemble. La coopération entre JINR et le CERN a été renforcée au cours des dernières décennies et a conduit à un accord de concession réciproque du statut d'observateur (le CERN est donc Observateur de JINR et JINR est Observateur dans le Conseil du CERN). Un autre exemple est la coopération entre le CERN et la République populaire de Chine. Il a débuté dans les années 1970, d'abord dans la technologie des accélérateurs et la physique théorique, suivi plus tard par la participation au programme de physique expérimentale du CERN. S'appuyant sur les accords de coopération internationale signés avec la République populaire de Chine dans les années 1990, les universités de la République populaire de Chine participent désormais à quatre expériences LHC (ALICE, ATLAS, CMS et LHCb), à la grille informatique du LHC et à l'étude CLIC. Le CERN a aussi développée une coopération avec la Palestine. Suite à la manifestation d'intérêt de l'université nationale An-Najah signée avec ATLAS, la Palestine consolida sa collaboration avec le CERN en signant l'accord Internationale de coopération en décembre 2015. En suite un certain nombre d'initiatives suivirent en Palestine telles que des cours spécialisés, l'école de physique qui a eu lieu à l'université arabo-américaine de Jénine et la participation des professeurs palestiniens au programme pour les



professeurs du secondaire consacré à SESAME (*Synchrotron Radiation for Experimental Science and Applications in the Middle East*). Enfin le CERN a servi de modèle à d'autres organisations scientifiques prospères et, plus récemment, à SESAME.

Aujourd'hui, le LHC (*Large Hadron Collider*) est le projet scientifique phare du CERN qui a ouvert une nouvelle ère de recherche et de découvertes en physique des particules. Les expériences au LHC ont fourni l'observation du boson de Higgs, validant le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (BEH), l'une des découvertes majeures dans l'histoire de la physique fondamentale. Les attentes du LHC sont excellentes, avec la perspective de révolutionner notre compréhension de l'infiniment petit et des premiers instants de l'Univers. Le CERN et ses projets scientifiques de grande envergure, comme le LHC, bénéficient en continu d'une infrastructure importante et des collaborations globales à grande échelle. Les collaborations internationales du LHC fournissent un environnement où les gens apprennent à travailler et à partager tout en offrant également l'opportunité de connaître les différences, de les accepter et d'apprendre à respecter la diversité.

Le CERN est également un exemple de cohésion vis-à-vis des efforts fournis dans de nombreux domaines de compétence très différents. Ingénieurs, techniciens et administrateurs travaillent dans un but commun : fabriquer des équipements à la pointe de la technologie et fournir des services et un support pour le fonctionnement des infrastructures nécessaires à la recherche. Pour la construction d'infrastructures d'une telle complexité comme celles du LHC on a eu besoin d'ingénieurs, de techniciens et d'administrateurs pour le génie civil, l'installation des composants de la machine et des expériences, la conception et le développement des aimants, du système de radiofréquence, du vide, de la cryogénie, l'électricité, la santé et la sécurité, la radioprotection, le service juridique, les pompiers, la logistique, les finances, les achats, la gestion des ressources humaines, etc. Ce personnel représente la grande majorité du personnel du CERN qui, en 2017, compte environ deux mille cinq cent personnes. En outre, environ mille contractants fournissent des services qui ne font pas partie de la compétence de base du CERN et qui peuvent être externalisés.

Les résultats du LHC et ses mises à niveau guideront la façon dont la physique des particules évoluera dans les années à venir. Le CERN, qui abrite le LHC, occupe une position unique et explore deux axes différents, pour préparer son avenir – le CLIC (*Compact Linear Collider*) et le FCC (*Future Circular Collider*).

Les installations pour la physique des énergies élevées deviennent de plus en plus grandes et coûteuses. Dans de nombreux pays, le financement dans ce domaine n'augmente pas. Donc, le calendrier des projets s'allonge. Ces deux facteurs ont également un impact sur le nombre d'installations qui sont réalisées. La physique des particules doit s'adapter à cette évolution qui requiert une coordination accrue et une plus grande collaboration à l'échelle mondiale. L'expertise en physique des particules doit être maintenue dans tous les pays, assurant ainsi une stabilité et un soutien à long terme. Il devient nécessaire d'engager tous les pays qui ont des communautés spécialisées en physique de particules et aussi d'intégrer les communautés émergentes d'autres pays. Les organismes de financement doivent à leur tour fournir une vision globale. La planification et l'exécution de projets en physique de hautes énergies nécessitent aujourd'hui des partenariats à l'échelle mondiale avec des projets mondiaux, régionaux et nationaux pour réaliser l'ensemble du programme. La physique des particules doit s'adapter à cette réalité évolutive en favorisant une plus grande coordination et collaboration à l'échelle mondiale.

Le CERN s'appuie sur une longue tradition d'engagement mondial dans son travail scientifique. L'Organisation entretient des relations officielles avec des États non membres par le biais d'accords bilatéraux de coopération internationale, actuellement en vigueur avec une cinquantaine de pays. Sur un total d'environ treize mille utilisateurs au CERN, la participation des utilisateurs des États Non Membres est maintenant de près de 40 % - la majorité de ces utilisateurs sont des chercheurs des États-Unis et de la Fédération de Russie travaillant sur le LHC. La participation globale des États Non Membres au programme de recherche non-LHC est actuellement d'environ 20 %. Les ressources financières pour les programmes de recherche, notamment les coûts d'entretien et d'exploitation pour les expériences du LHC, sont partagées entre les États membres, les



membres associés et les États Non Membres. De plus, il y a un intérêt croissant pour la collaboration sur la R&D (Recherche et Développement) des accélérateurs, des aimants à grande surface, des systèmes d'accélération et technologies connexes, en particulier sur l'augmentation de luminosité du LHC ainsi que sur les études FCC et CLIC. Le nombre d'États impliqués dans de telles activités augmente déjà au-delà du cercle des États Non Membres qui ont contribué à la construction du LHC.

L'intérêt international pour le CERN se traduit également par une demande croissante des programmes d'éducation et de formation du CERN - relevant de la mission du CERN d'aider à renforcer les capacités dans les pays qui développent leurs communautés de physique des particules.

Les réalisations scientifiques du CERN, au fil des années, sont allées de pair avec sa politique visant à accroître les réseaux mondiaux et la collaboration scientifique, technologique et d'éducation avec des partenaires dans le monde entier. Compte tenu de ce fait, en 2010, le Conseil a approuvé un changement de paradigme concernant la politique d'appartenance au CERN, l'intégrant dans une nouvelle politique d'élargissement géographique qui permet l'adhésion complète aux pays non européens indépendamment de leur situation géographique. Dans le même temps, le Conseil a introduit un nouvel instrument d'adhésion des membres associés pour faciliter l'adhésion de nouveaux membres, y compris les pays émergents hors d'Europe, qui ne disposent pas de ressources suffisantes pour soutenir une adhésion complète dans un futur prévisible.

Aujourd'hui, le CERN compte vingt-deux États membres<sup>1</sup>, huit États membres associés<sup>2</sup> et six observateurs<sup>3</sup>. Israël est devenu le 21<sup>ème</sup> État membre du CERN en 2014, tandis que la Roumanie s'est jointe en tant que 22<sup>ème</sup> État membre en 2016. Chypre, la Serbie et la Slovénie sont actuellement membres associés dans une phase préalable à l'adhésion, tandis que l'Inde, la Lituanie, le Pakistan, la Turquie et l'Ukraine sont membres associés. Le Brésil et la Croatie ont également demandé l'adhésion comme membres associés. À l'heure où le CERN attire de nouveaux États membres et des États membres associés, les relations formelles avec d'autres États non membres évoluent, par exemple grâce à la conclusion de nouveaux accords de coopération internationale. Aujourd'hui, environ 50 accords de coopération internationale sont en vigueur avec une répartition géographique diversifiée et étendue et des contacts scientifiques ont également été établis avec beaucoup d'autres<sup>4</sup>.

La politique d'élargissement géographique de 2010 offre d'importantes opportunités à l'avenir de l'Organisation. Maintenant, le CERN l'a incorporée au plan de stratégie, présenté au Conseil en mars 2016, afin de s'assurer que l'élargissement géographique puisse consolider sa base institutionnelle et ainsi renforcer à long terme les aspirations scientifiques du CERN. L'élargissement n'est pas un but en soi. L'accent est plutôt mis sur le renforcement des relations avec les pays qui peuvent apporter l'expertise scientifique et technologique au CERN et, à leur tour, peuvent bénéficier d'un engagement plus étroit, tout en contribuant à renforcer les capacités dans les pays qui ont des communautés de physique des particules en développement.

Il est essentiel que l'adhésion en tant que Membre et Membre Associé soit bénéfique à la physique des particules dans chaque pays et que les gouvernements continuent d'investir

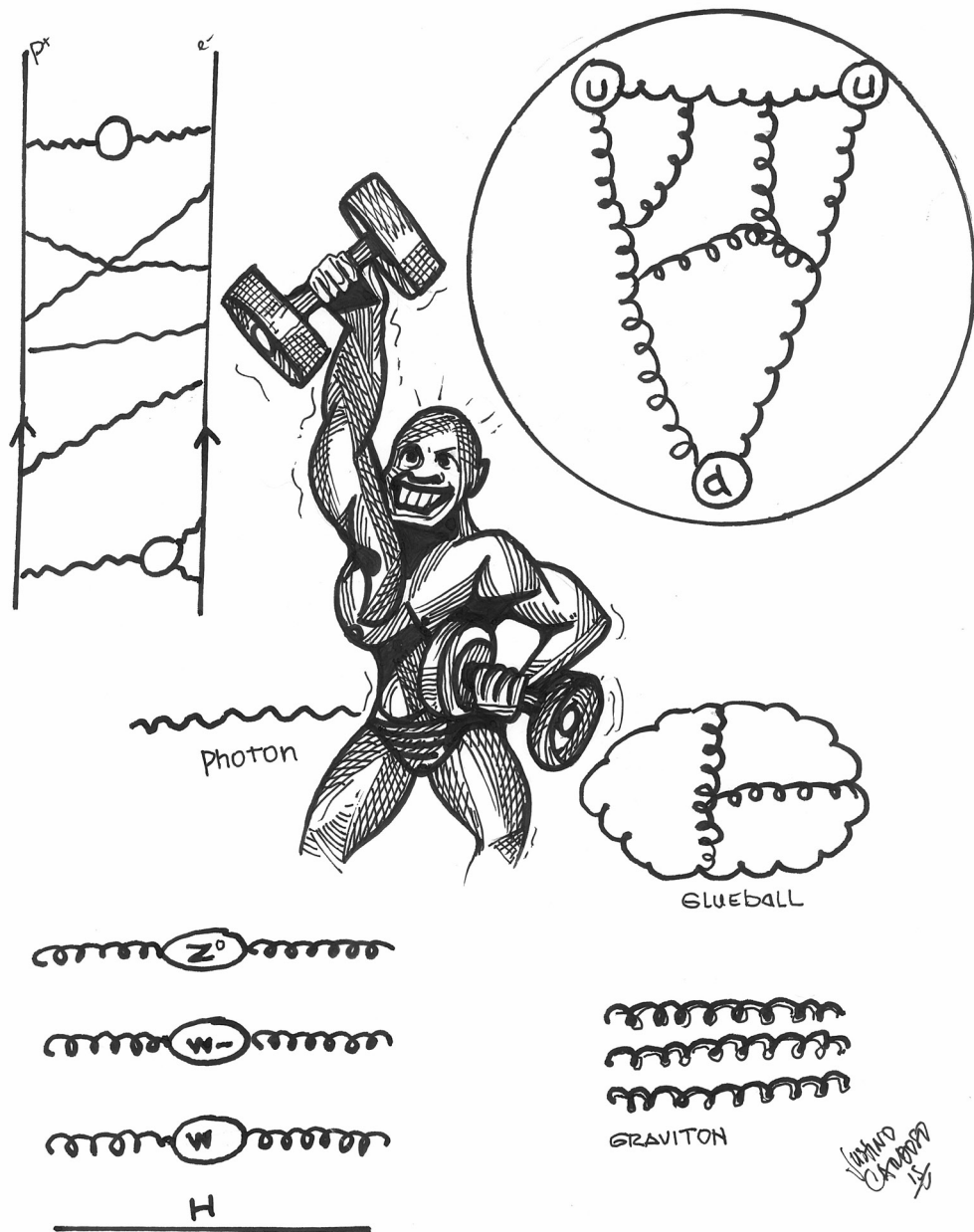
<sup>1</sup> États membres : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Royaume Uni, Suède et Suisse

<sup>2</sup> Chypre, la Serbie et la Slovénie sont États membres associés dans une phase préalable à l'adhésion. L'Inde, la Lituanie, le Pakistan, la Turquie et l'Ukraine sont États membres associés.

<sup>3</sup> Japon, Fédération de Russie, États Unis d'Amérique, Union européenne, JINR et UNESCO.

<sup>4</sup> <http://international-relations.web.cern.ch/stakeholder-relations/Associate-Non-Member-State-Relations>  
États non membres, territoires et régions qui collaborent avec le CERN : Afrique du Sud, Albanie, Algérie, Arabie Saoudite, Argentine, Arménie, Australie, Azerbaïdjan, Bangladesh, Biélorussie, Bolivie, Brésil, Canada, Chili, Chine, Colombie, Costa Rica, Croatie, Cuba, Equateur, Égypte, Emirats Arabes Unis, Estonie, Géorgie, Ghana, Hong Kong, Islande, Indonésie, Iran, Irlande, Jordanie, Kazakhstan, Corée, Lettonie, Liban, Madagascar, Malaisie, Malte, Maroc, Mexique, Mongolie, Monténégro, Mozambique, Népal, Nouvelle-Zélande, Oman, Ouzbékistan, Palestine, Pérou, Philippines, Qatar, ex-République yougoslave de Macédoine, Rwanda, Singapour, Sri Lanka, Taïwan, Thaïlande, Tunisie, Vietnam.

dans la croissance des communautés nationales. Cependant, l'élargissement ne doit pas entraver l'efficacité opérationnelle du Laboratoire. L'engagement du CERN en physique des particules est clairement orienté vers l'aboutissement des objectifs énoncés dans la Convention du CERN et vers une politique d'élargissement géographique, car l'étude de l'unification des forces fondamentales de la nature nécessite dans cette discipline des efforts à l'échelle mondiale.



**"The forces"** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

Les forces ou interactions fondamentales connues sont au nombre de quatre. La force forte permet la cohésion des quarks et les gluons sont les médiateurs de cette force. La force électromagnétique lie dans les atomes les électrons aux noyaux et les atomes aux molécules, elle a comme médiateur les photons. La force faible subit la radioactivité et les réactions nucléaires et a comme médiateurs les bosons faibles  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$ . La gravitation est la force attirante qui fait tomber les objets, lie la matière aux planètes et aux étoiles et les étoiles dans les galaxies, le médiateur de cette force est le graviton (pas encore découvert).

## ***Le Modèle standard et recherches pour une nouvelle physique fondamentale***

*John Ellis*

### **D'où venons-nous ?**

« D'où venons-nous ? Qui sommes-nous ? Où allons-nous ? » Ce sont des questions intemporelles et universelles que les gens se posent depuis des milliers d'années. Célèbre titre d'un tableau de Paul Gauguin créé en 1897, l'année de la première découverte d'une particule élémentaire : l'électron.

Les physiciens des particules poseraient la deuxième question de Gauguin ainsi « De quoi sommes-nous faits ? » et leur réponse serait : le Modèle standard, un modèle qui décrit la matière visible de l'Univers. Le succès culminant du Modèle standard a été la découverte dans les expériences au grand collisionneur de hadrons du CERN (LHC) du boson de Higgs, la dernière particule attendue du modèle standard. Sa découverte nous donne également un aperçu de ce qui s'est passé lors des débuts de l'Univers et soulève des questions sur son possible avenir, répondant ainsi aux deux autres questions de Gauguin.

Toutefois, le Modèle standard est incomplet. Par exemple, il n'explique ni l'origine de la matière dans l'Univers ni la mystérieuse matière noire qui permet aux galaxies de se former et de les maintenir ensemble. Les expériences se poursuivent au LHC pour répondre à ces questions, mais les physiciens des particules sont également en train de débattre sur ce qui pourrait être la prochaine étape de la quête universelle illustrée par Gauguin.

Les collisions réalisées au LHC et dans des machines similaires recréent les processus qui ont eu lieu très tôt dans l'histoire de l'Univers, et les collisions à des énergies plus élevées que celles du LHC nous permettront de regarder plus loin dans le temps. Par conséquent, une option serait de construire une version plus puissante du LHC dans un plus grand tunnel circulaire. Le LHC accélère et produit des collisions entre protons (noyaux d'hydrogène) à des énergies jusqu'à environ 14 000 fois leur énergie de masse au repos, et un collisionneur circulaire de plus haute énergie pourrait être en mesure de produire des collisions équivalentes à 100 000 fois l'énergie de masse au repos du proton. Ces collisions pourraient enfin nous révéler l'origine de la matière noire qui remplit l'Univers. Une autre possibilité serait de faire entrer en collision des électrons avec leurs antiparticules. Ces collisions se feraient à des énergies plus modestes, mais elles pourraient nous fournir des informations beaucoup plus précises sur les particules produites, comme le boson de Higgs. Ces études de haute précision pourraient nous aider à mieux comprendre leur rôle dans le début de l'histoire de l'Univers, et pourraient fournir des indices indirects d'une nouvelle physique qui pourrait exister au-delà du modèle standard.

La prochaine étape dans la physique des particules sera un véritable défi mondial, qui nécessite le développement de multiples technologies, la formation de nombreux ingénieurs et scientifiques, des ressources financières importantes et un large soutien politique. Les technologies nécessaires vont du génie civil à la cryogénie, à la science des matériaux, à l'électronique et à l'informatique. Beaucoup de ces technologies trouveront des applications pratiques en plus de répondre aux questions que soulevait Gauguin. Il est maintenant temps de réfléchir ensemble comment relever ce défi de curiosité humaine.

### **Modèle standard et nouvelles recherches**

La physique des particules nous a fourni une théorie, appelée le Modèle standard, qui décrit avec succès toute la matière visible dans l'Univers. Cependant, les astrophysiciens et les cosmologistes ont montré que l'Univers contient beaucoup plus que ce que l'œil peut voir, ou même les astronomes avec les télescopes. Dans les années 1930, l'astronome suisse Fritz Zwicky a découvert que les galaxies à proximité de l'amas de la chevelure de Bérénice ou amas de Coma sont déplacées par un champ gravitationnel beaucoup plus fort que celui généré par la matière visible dans l'amas.



Il a suggéré que ce champ gravitationnel supplémentaire soit dû à une invisible “matière noire” qui ne dégage pas de lumière.

Cette idée, radicale en son temps, fut lente à se faire accepter, mais la preuve cruciale fut apportée dans les années 1970 par les mesures de l’astronome américaine Vera Rubin et d’autres sur les mouvements des étoiles dans différentes galaxies. Contrairement au système solaire, où selon les lois de Kepler les planètes qui sont plus loin du Soleil se déplacent plus lentement, il a été constaté que les étoiles qui sont le plus éloignées des centres des galaxies se déplacent beaucoup plus rapidement que prévu par l’attraction gravitationnelle de la matière visible, à des vitesses similaires à celles des étoiles plus proches. Ces observations montrent qu’il doit y avoir plus de matière sombre invisible entourant les galaxies que celle que nous voyons. De nombreuses observations ont ensuite soutenu l’hypothèse de la matière noire.

Cependant, cela fut une grande surprise à la fin des années 1990 et au début des années 2000 quand les astronomes découvrirent que, en plus de la matière noire agglomérée dans les galaxies et dans les amas, il doit y avoir, dans l’espace vide entre elles, une énergie supplémentaire appelée « énergie noire » ou « énergie sombre ». Contrairement à la matière ordinaire et à la matière noire dont l’attraction gravitationnelle entraîne le ralentissement de l’expansion de l’Univers, l’énergie noire porte à l’expansion accélérée de l’Univers. Dans l’ensemble, la densité de l’énergie noire serait environ trois fois supérieure à celle de la matière.

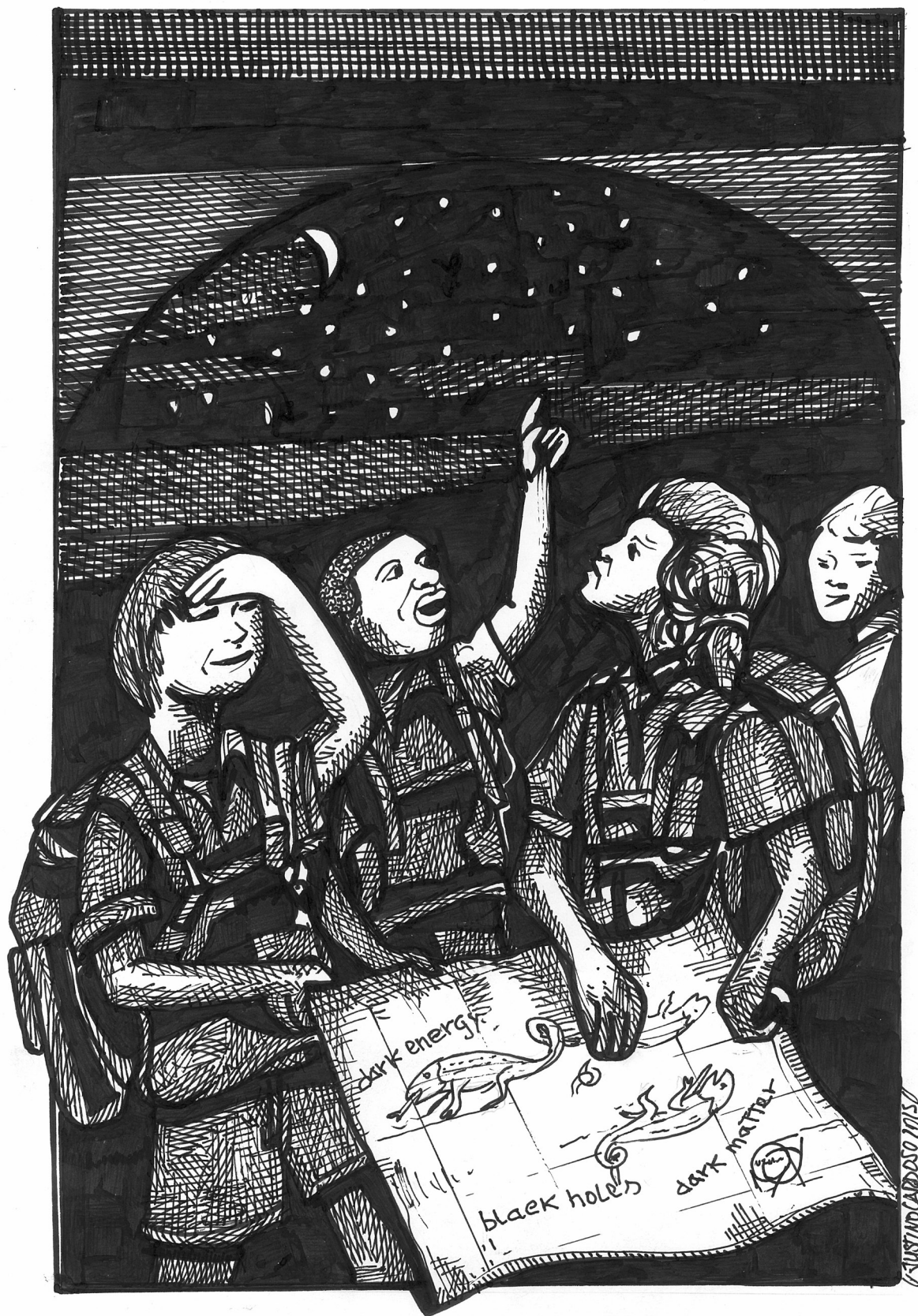
De quoi pourrait être composée la matière noire ? Une idée populaire présume qu’elle pourrait être constituée d’un type inconnu de particules massives qui interagissent faiblement. Le Modèle standard ne contient pas de candidats possibles, mais il y a eu de nombreuses extensions au Modèle standard. On présume que la particule de matière noire aurait une masse comprise entre cent et mille fois celle du proton, ce qui pourrait la mettre à la portée du Grand collisionneur d’hadrons du CERN. Les expériences du LHC ont recherché, sans aucun résultat jusqu’à présent, des collisions dans lesquelles une grande quantité d’énergie serait emportée par des particules invisibles de matière noire. Les recherches au LHC se poursuivent à des énergies plus élevées, mais la découverte de la matière noire pourrait être possible uniquement avec le futur collisionneur FCC.

Des expériences d’astrophysique sont à la recherche de la matière noire, parmi celles-ci l’expérience **AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)**, dont la salle de contrôle est hébergée par le CERN. Cette dernière qui est installée sur la station spatiale internationale étudie les particules générées par la matière noire s’annihilant dans l’espace interstellaire.

Et l’énergie sombre ? La possibilité de son existence a été suggérée par Einstein en 1917, avec ce qu’il a appelé la constante cosmologique. Toutes les théories de la physique fondamentale prédisent les contributions possibles à la densité de l’énergie noire, par exemple, par le biais du boson de Higgs dans le Modèle standard, de sorte que son observation ne devrait pas être une surprise. Cependant, ces théories prédisent qu’il devrait y avoir généralement beaucoup plus d’énergie noire que la quantité découverte à nos jours par les astronomes. Le puzzle toutefois concerne plutôt à savoir pourquoi la densité de l’énergie noire est si petite. Les études sur le boson de Higgs au LHC et avec les collisionneurs du futur nous aideront à éclaircir ce mystère. Une possibilité est que l’énergie sombre soit mimée par une nouvelle particule dont la masse dépendrait de la densité locale de la matière : une telle particule ‘caméléon’ serait très difficile à détecter expérimentalement, comme son homonyme de lézard, changeant de couleur.



**“Strings propagate through space and interact”** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine  
Beaucoup de physiciens théoriciens pensent que, au niveau le plus fondamental, les particules élémentaires se comportent comme des cordelettes vibrantes et tentent de construire des modèles d’unification basés sur cette idée. (légende de John Ellis)



"The search is open" Justino António Cardoso 2015, encre de Chine



# Accélérateurs : le comment et le pourquoi

Lucio Rossi

Accélérer verbe transitif accroître la vitesse (Larousse) : depuis l'apparition du manifeste du Futurisme en 1909, l'accélération est une des marques du temps contemporain. Les accélérateurs de particules, inventés au XX<sup>e</sup> siècle, sont un produit typique de cette période quand les barrières furent brisées et de nouvelles frontières de la connaissance atteintes.

Rutherford a compris en premier que la structure atomique peut être dévoilée en la bombardant avec des particules nucléaires, ouvrant ainsi la voie aux accélérateurs de particules. Dans son célèbre discours d'ouverture de 1927 comme président de la Royal Society, il dit : « *L'avancement de la science dépend dans une large mesure du développement de nouvelles méthodes techniques et de leur application... Du point de vue purement scientifique, l'intérêt est principalement axé sur l'application de ces grands potentiels et des tubes à vide afin d'obtenir une production élevée d'électrons et d'atomes à grande vitesse... Cela ouvrira un champ d'investigation extraordinairement intéressant qui ne manquera pas de nous fournir des informations de grande valeur, non seulement dans la constitution des noyaux atomiques mais aussi dans beaucoup d'autres directions.* » Il est maintenant facile de reconnaître à quel point ses mots étaient prophétiques !

## Brève description d'un accélérateur

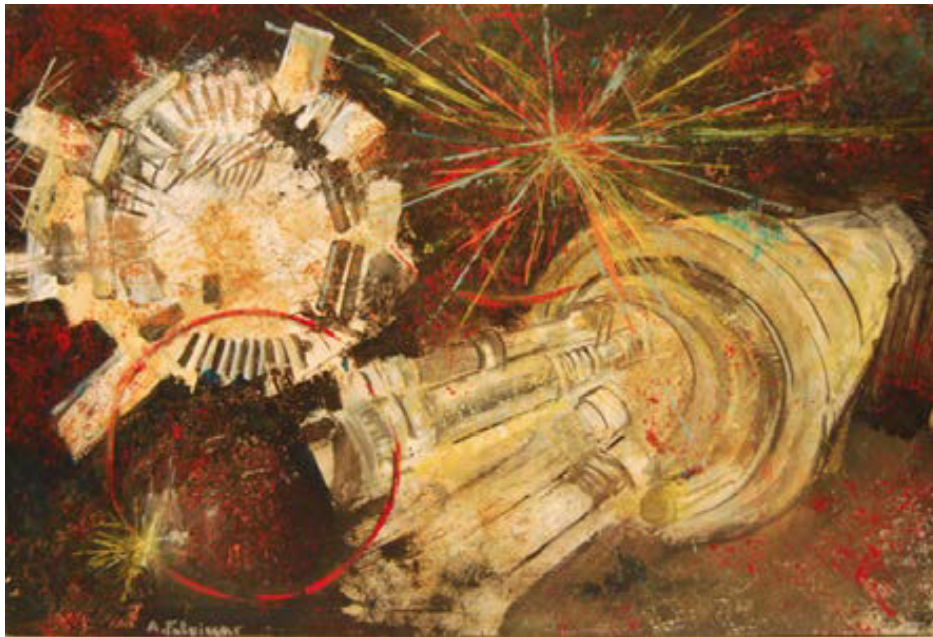
Un accélérateur de particules est constitué de quatre composants principaux :

- a. Une chambre à vide, où les molécules et les atomes sont évacués, au niveau de  $10^{-7}$  à  $10^{-11}$  mbar (c'est-à-dire atteignant un niveau de molécules de presque un million de milliards de fois moins élevé que dans l'air atmosphérique).
- b. Un champ électrique qui accélère les particules (qui sont des particules chargées électriquement).
- c. Un champ magnétique qui courbe la trajectoire des particules (champ dipolaire, généré par un aimant à deux pôles).
- d. Différents types de champs magnétiques comme celui créé par les quadripôles (aimants à quatre pôles) qui focalisent le faisceau de particules, évitant que les particules s'égarer et finissent par toucher le tube à vide.

Les minuscules particules subatomiques sont assemblées en une longue ligne mince, le faisceau de particules. Le faisceau, ou la ligne de particules, n'est généralement pas continu : les particules sont regroupées en paquets. Le faisceau de particules accélérées peut être utilisé pour bombarder une cible fixe (habituellement, une mince feuille solide, ou une chambre de gaz, ou une épaisse cible solide ou liquide). Dans les années 60, Bruno Touschek propose et construit le premier collisionneur, AdA (*Anello di Accumulazione*) à Frascati (Italie) où le faisceau de particules est accéléré et ensuite dirigé contre un autre faisceau de particules qui se déplace dans la direction opposée. A partir de là, presque tous les accélérateurs qui ont établi des records d'énergie dans leur fonctionnement ont été utilisés en mode collisionneur.

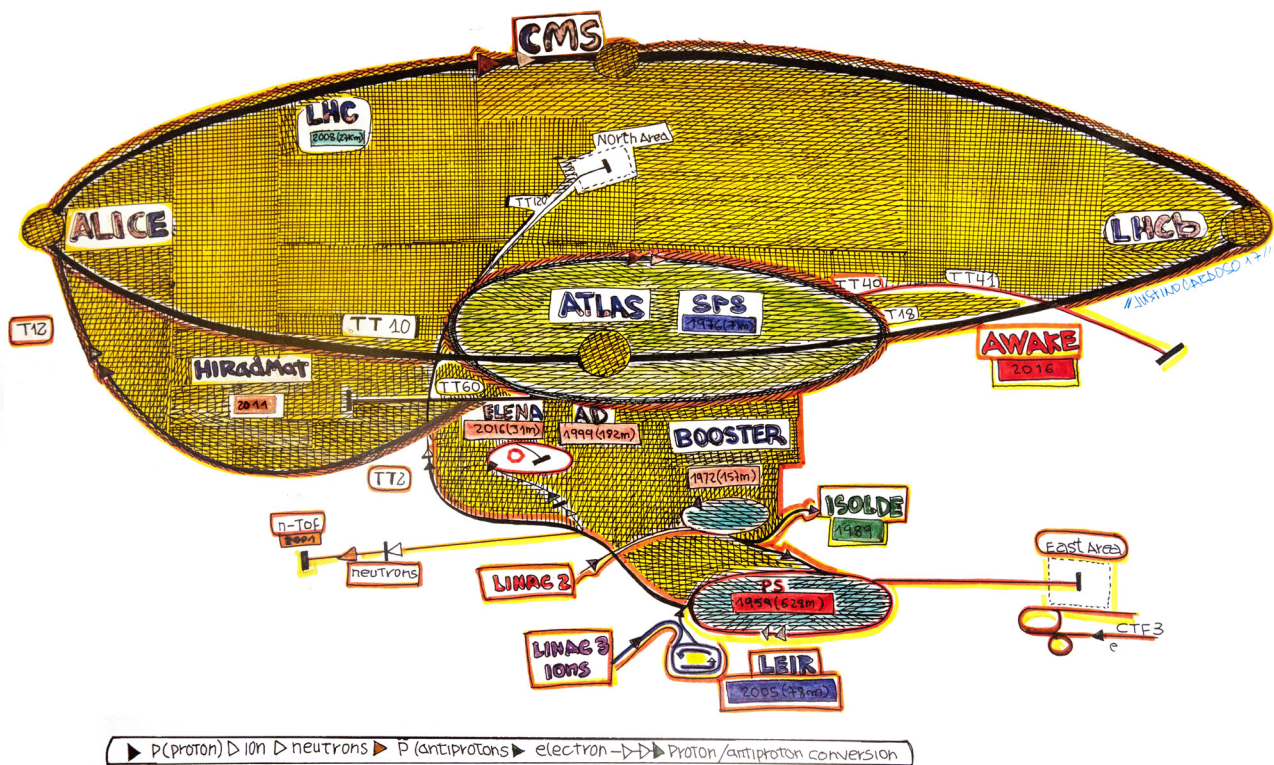
Les champs électriques sont utilisés pour donner de la vitesse (quantité de mouvement) aux particules : habituellement ils sont en forme d'ondes électromagnétiques, avec une fréquence dans la gamme des ondes radio/TV et jusqu'aux micro-ondes. Ils sont tous appelés champs de radiofréquence (RF), car initialement la fréquence de 10-200 MHz a été utilisée, mais dans les accélérateurs modernes des fréquences de dizaines de GHz (c'est-à-dire dans la gamme de micro-ondes) sont en réalité utilisées. Ces ondes électromagnétiques sont piégées dans une boîte métallique vide, appelée cavité RF, tout comme une onde acoustique est piégée dans un tube d'orgue. Chaque fois que le faisceau traverse la cavité, chaque particule est poussée en avant, pourvu qu'elle entre à la bonne phase, tout comme un surf est poussé vers l'avant s'il reste sur la crête de la vague. Une cavité peut fournir une tension de 1 à 10 MV (qu'en énergie, nous appelons 1-10 MeV). Pour atteindre des giga-électron-volts (GeV) ou des téra-électron-volts (TeV) (énergie du LHC), il faut faire passer le faisceau à travers une cavité des milliers à des millions de fois.





“Congettare circolari” Angelo Falciano 2011, Acrylique sur masonite

Dans l'accélérateur une course de particules du connu vers l'inconnu.



“CERN’s accelerator complex” Justino António Cardoso 2015, encre de Chine colorée (d’après OPEN-PHO-CHART-2013-001-1, photo : Fabienne Marcastel)

La chaîne du LHC comprend le Linac2, the PSB (Booster du synchrotron à protons), le PS (synchrotron à protons) et le SPS (Super PS) connectés au LHC par les tunnels de transfert TT2 et TT8.

Les accélérateurs peuvent avoir deux configurations principales :

a. *Linacs - Accélérateurs linéaires*, où des cavités RF en série linéaire fournissent l'accélération. Plus il y a des cavités et plus haute sera l'énergie atteinte, par conséquent la taille de l'accélérateur et son coût augmentent.

b. *Accélérateurs circulaires*, où le faisceau passe à travers les mêmes cavités, des millions de fois, jusqu'à ce que l'énergie maximale soit atteinte. Dans de telles machines, par exemple dans le LHC, la partie de la cavité est très courte, une dizaine de mètres, sur une longueur de 27 km, tandis que la partie magnétique est nettement plus longue.

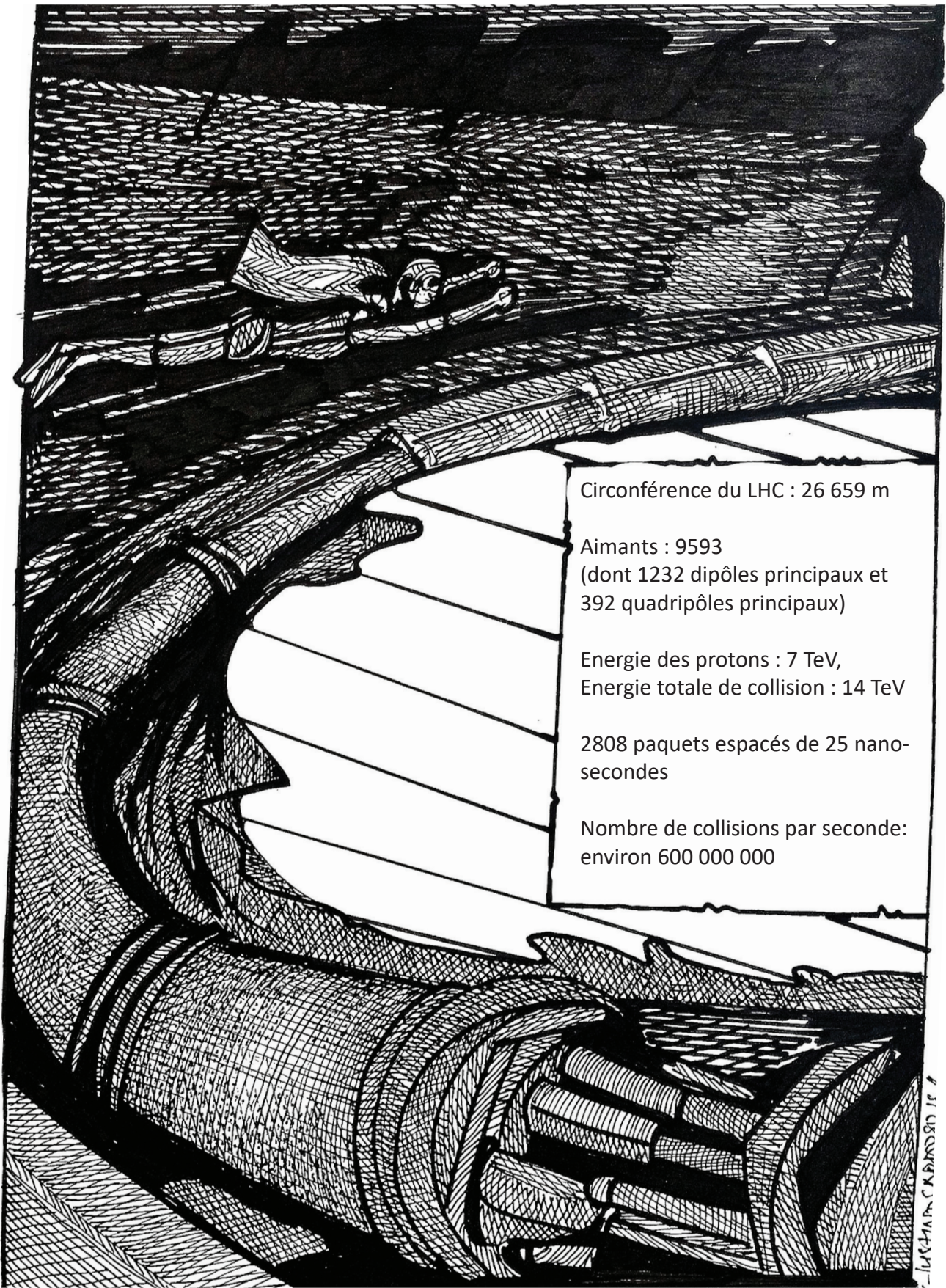
Les champs magnétiques sont nécessaires pour guider les particules. Le premier type d'aimants que nous rencontrons est celui à champ dipolaire où un champ magnétique uniforme permet de courber la trajectoire des particules. Une série de dipôles conservent les particules dans une trajectoire circulaire. Plus le dipôle est puissant, plus forte sera la force centripète (appelée aussi force de Lorentz) sur la particule et plus élevée sera par conséquent l'énergie atteinte. Dans un accélérateur circulaire, l'énergie des particules est exprimée par une relation simple (en approximation relativiste) :  $E_{\text{faisceau}} = 0,3 BR$  où B est la valeur du champ magnétique et R le rayon du cercle suivi par la particule. Lorsqu'on insère les paramètres des aimants du LHC, 8,3 Tesla de champ et 2,8 km de rayon, on obtient l'énergie des protons du LHC, 7 TeV pour chaque faisceau, équivalent à l'accélération fournie par une tension de 7 millions de millions de Volts ! Cependant, la cavité RF du LHC fournit environ 10 MV, donc le faisceau doit passer à travers ces cavités des millions de fois pour pouvoir atteindre l'énergie maximale. Ceci est possible grâce au pouvoir de flexion de 1232 dipôles, chacun de 15 m de longueur qui occupent 18 km de 27 km du tunnel du LHC. Les champs magnétiques ont également pour tâche de stabiliser le faisceau de tout petit écart de la trajectoire idéale. Comme un conducteur de voiture maintient le véhicule sur la piste par des subtils ajustements continus du volant, entre les dipôles les quadripôles (composés de quatre pôles magnétiques) corrigent les imperfections inévitables de la trajectoire. Sans les quadripôles toute machine, linac inclus, ne peut pas fonctionner car le faisceau diverge rapidement et finit par heurter la chambre à vide. Dans le LHC, l'enveloppe du faisceau est d'environ 1 mm, grâce à ses 400 quadripôles. Ainsi, le faisceau dans le LHC est constitué d'une série de paquets cylindriques, de 1 mm de diamètre et 20-30 cm de longueur, espacées de 7,5 m (et dans le temps de 25 nanosecondes). Il y a environ 2800 paquets qui, chacun en sens inverse, circulent dans les 27 km de longueur des deux anneaux. Il existe de nombreux autres types d'aimants : les sextupôles (six pôles), et ainsi de suite, jusqu'aux dodécapôles (12 pôles), un type d'aimant pour chaque instabilité spécifique.

## La chaîne du LHC

Le LHC représente la phase finale la plus importante d'une chaîne d'accélérateurs. Les molécules d'hydrogène, extraites sous forme de gaz d'une bouteille, sont ionisées au moyen d'une décharge électrique, formant un plasma, c'est-à-dire un gaz de particules chargées (comme celui du soleil). Ensuite, les noyaux d'hydrogène chargés positivement, les protons, sont séparés des électrons au moyen de champs statiques, formant un faisceau qui est ensuite accéléré à 50 MeV par un Linac d'environ 30 mètres de long. Ce faisceau alimente ensuite un accélérateur circulaire, un synchrotron de 150 mètres de longueur appelé Booster, qui accélère le faisceau jusqu'à 1 400 MeV (1,4 GeV). Le faisceau est ensuite guidé dans le Proton Synchrotron (PS), le plus ancien accélérateur du CERN inauguré en 1959, d'une circonférence de 600 mètres qui accélère le faisceau de protons jusqu'à 25 GeV. Les particules sont ensuite injectées dans le Super Proton Synchrotron (SPS)<sup>6</sup>, un anneau d'accélération de 7 kilomètres qui les pousse à 450 GeV. Enfin après le SPS, les protons sont injectés dans le LHC : deux faisceaux sont formés chacun circulant dans la direction opposée et accélérés jusqu'à 7 000 GeV, c'est-à-dire 7 TeV, pour libérer dans la collision frontale 14 TeV d'énergie dans le centre de masse.

<sup>6</sup> Le SPS a été transformé pendant une courte période en collisionneur proton-antiproton, ce qui a permis la découverte en 1983 des particules W et Z, qui fut couronnée du Prix Nobel à Carlo Rubbia et Simon van der Meer en 1984.





Circonférence du LHC : 26 659 m

Aimants : 9593  
(dont 1232 dipôles principaux et  
392 quadripôles principaux)

Energie des protons : 7 TeV,  
Energie totale de collision : 14 TeV

2808 paquets espacés de 25 nano-  
secondes

Nombre de collisions par seconde:  
environ 600 000 000

“Energetic protons in a circular collider” Justino António Cardoso 2015, encre de Chine



Toute la chaîne du complexe a plus de 40 kilomètres de longueur, dont 27 kilomètres pour le tunnel du LHC. Les premières machines sont en surface, mais le SPS se trouve dans un tunnel à 40 mètres de profondeur. Les deux tunnels d'injection connectant le SPS avec le LHC, de plus de 3 kilomètres de long, dits TI2 et TI8, doivent eux amener le faisceau de protons de 40 mètres à 100 mètres sous terre. Chaque pièce de la machine est une merveille et des dizaines de milliers d'équipements complexes doivent tous travailler conjointement pour que les protons de la bouteille d'hydrogène fournissent aux détecteurs des expériences LHC les collisions à 14 TeV nécessaires pour produire le boson Higgs.

## **Une technologie innovatrice : la supraconductivité**

La recherche d'énergies toujours plus élevées ne peut être satisfaite que par le gigantisme car des limites s'imposent à la taille d'un accélérateur. Une façon d'en limiter la taille consiste à augmenter le champ magnétique, car à champ supérieur équivaut à énergie supérieure. Grâce au fait que dans un supraconducteur, la résistance électrique est nulle, dans un câble supraconducteur, nous pouvons envoyer un courant énorme sans dissipation d'énergie : dans le LHC, nous alimentons les aimants avec des courants de 12 000 ampères sans générer de chaleur dans la bobine. Grâce à cela, les aimants du LHC sont cinq fois plus puissants que les aimants des accélérateurs à technologie classique. Le cœur supraconducteur du LHC est formé par les 300 000 kilomètres d'un fil supraconducteur d'un millimètre, un composite, dans une matrice de cuivre très pur, dans lequel des milliers de filaments fins du précieux alliage Niobium Titanium, Nb-Ti, donnent la supraconductivité : il y a 2 100 millions de kilomètres de filaments supraconducteurs dans les aimants LHC, assez pour aller jusqu'au Soleil et en revenir sept fois ! Cette merveille a été le prix d'un défi technologique extrême : l'alliage supraconducteur utilisé pour le LHC en Nb-Ti, exige une température exceptionnelle,  $-271^{\circ}\text{C}$ , une température beaucoup plus froide que l'espace cosmique, température qu'on peut obtenir grâce à l'hélium superfluide.

Le LHC est la plus grande installation cryogénique, et ses énormes frigos consomment environ 50 MW. Ce n'est pas rien. Cependant, un LHC sans supraconductivité, c'est-à-dire avec une technologie d'aimants classiques, aurait exigé un anneau de 100-120 kilomètres et une consommation électrique d'environ 1000 MW, la puissance fournie par une centrale nucléaire de bonne taille. Décidemment la supraconductivité a été un bon investissement, du point de vue technologique, économique et environnemental !

## **La physique moderne sur le terrain :**

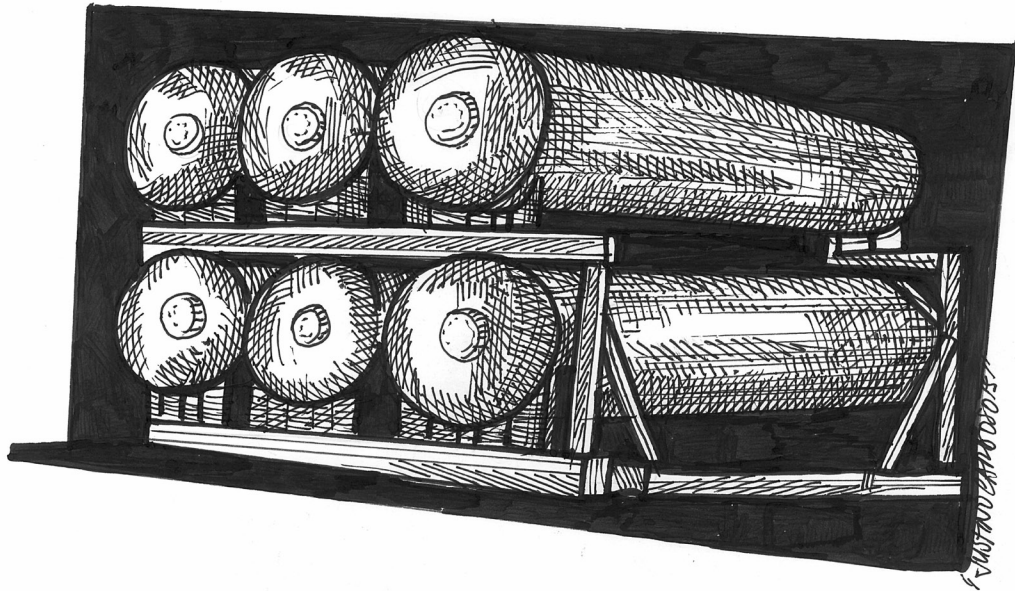
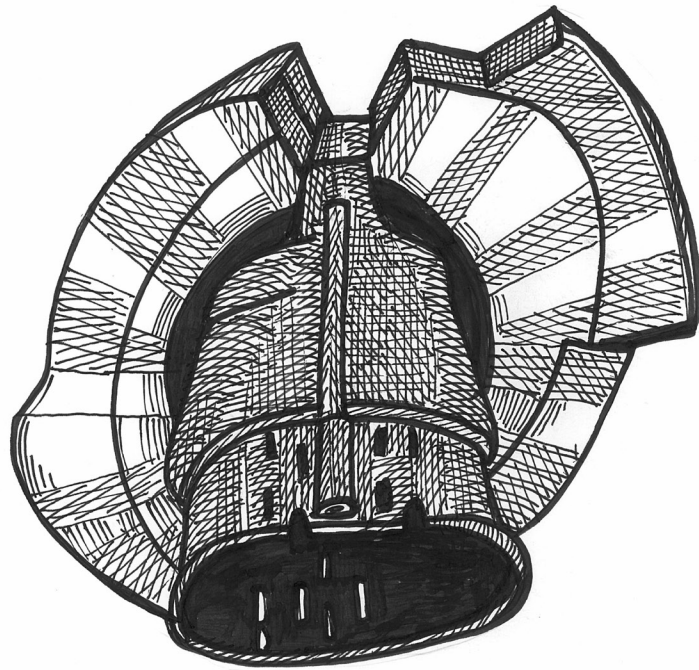
### **1 - Relativité**

Une caractéristique intéressante des accélérateurs est la manifestation macroscopique des effets physiques modernes "étranges". Le fait que nous poussons des particules à une vitesse très proche de celle de la lumière signifie que tout ce qui était prévu par Einstein, nous le voyons macroscopiquement. Les particules lorsqu'elles approchent la vitesse de la lumière s'accroissent de moins en moins. La vitesse est limitée à la vitesse de la lumière et elles commencent à augmenter en masse (précisément elles augmentent en quantité de mouvement). Nous détectons cet effet très facilement, car si nous n'avions pas pris la contre-mesure nécessaire, nous perdriions les particules.

En augmentant leur masse, elles se déplaceraient hors de l'orbite car la vitesse, la masse et le champ sont finement synchronisés. Cela fut vite évident à Ernest O. Lawrence, l'inventeur du cyclotron. Un autre effet intéressant est le fait que, lorsqu'elles sont instables - à courte vie - les particules qui sont accélérées, voient leur durée de vie allongée, suivant exactement la prédiction de la relativité spéciale d'Einstein, *Annus mirabilis* 1905.

### **2 - Microscopes et mécanique quantique**

Les accélérateurs peuvent être considérés comme des super microscopes qui nous permettent de pénétrer dans le monde de l'infiniment petit.



**“Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe”** Justino António Cardoso 2015, *encre de Chine*

**“Tanks of liquid helium to cool LHC”** Justino António Cardoso 2015, *encre de Chine*

La résolution d'un microscope, toutes limites techniques et imperfections mises de côté, est limitée par les effets de diffraction de la longueur d'onde de la lumière utilisée. C'est la raison pour laquelle, avec la lumière visible, nous sommes limités à environ 500 nanomètres (nm). Cependant, si nous employons des rayons X, des ondes électromagnétiques de la même nature que la lumière mais avec une longueur d'onde beaucoup plus courte, de 0,1 à 1 nm, nous pouvons visualiser les atomes qui sont à la même échelle. La mécanique quantique nous apprend que les particules se comportent comme des ondes avec longueur d'onde  $\lambda = hc / E$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $c$  la vitesse de la lumière. Plus l'énergie de la particule augmente, et plus petite est la longueur d'onde associée. En accélérant la particule à 7 TeV, le LHC "utilise" une longueur d'onde de  $10^{-19}$  m, c'est-à-dire un milliardième de 0,1 nm du microscope électronique.

Le LHC, avec ses expériences, étudie des espaces beaucoup plus petits que les atomes et les noyaux atomiques, pour voir ce qui est dix mille fois plus petit que le proton lui-même ! En raison de ceci, le LHC nous amène au tout début de l'Univers, soit à environ un milliard de milliard de secondes après le Big Bang.

## Quel avenir pour les accélérateurs en physique de hautes énergies ?

Les accélérateurs ne sont pas utilisés que pour la physique des hautes énergies ; des milliers d'accélérateurs sont utilisés pour l'industrie et la médecine, et des centaines pour des recherches appliquées, principalement comme générateurs de la lumière synchrotron. Seules des dizaines d'accélérateurs sont destinés à la recherche fondamentale de particules et nucléaire. Cependant, sans aucun doute, la physique des particules est le principal moteur technologique d'innovation dans le domaine des accélérateurs.

Alors, quelle sera la prochaine étape après le LHC ? Tout d'abord, le LHC de haute luminosité, HL-LHC (**High Luminosity LHC**). Ce projet est basé sur l'emploi de nouveaux aimants supraconducteurs, environ 50 % fois plus puissants que ceux du LHC 1<sup>ère</sup> phase, cette nouvelle configuration du LHC vise à augmenter considérablement le nombre de collisions. C'est comme si on emploie une lumière plus puissante pour éclairer une pièce : on va pouvoir voir beaucoup mieux et découvrir des détails autrement masqués par le bruit de fond. HL-LHC, qui est maintenant en construction, sera installé vers 2024-25 et restera en fonction jusqu'à presque 2040. Dans l'intervalle, un grand réseau de laboratoires et d'institutions du monde entier collabore avec le CERN pour étudier les nouvelles machines qui marqueront l'ère de l'accélérateur post-LHC / HL-LHC.

Deux projets géants sont à l'étude :

- *Un collisionneur linéaire électron-anti-électron* (positron). Deux projets sont en concurrence dans ce domaine. L'un s'appelle ILC (*International Linear Collider*) qui est une machine longue de 30 kilomètres avec des cavités supraconductrices ; l'autre s'appelle CLIC (*Compact Linear Collider*) et son fonctionnement se base sur des cavités RF résistives de haute fréquence (12 GHz), avec une ouverture de faisceau millimétrique et une précision d'alignement nanométrique sur toute la longueur d'un tunnel de 50 kilomètres. Alors que le collisionneur ILC est limité à 0.5-1 TeV, le CLIC peut atteindre 3TeV dans le centre de masse, mais cela comporte des consommations électriques très élevées, 600 MW (pas de supraconducteur !).

- *Un futur collisionneur circulaire* (FCC, *Future Circular Collider*), avec un anneau circulaire de 100 kilomètres. En utilisant des aimants supraconducteurs, deux fois plus puissants que les aimants du LHC, les collisions proton-proton à 100 TeV d'énergie au centre de la masse peuvent être envisagées. Atteindre cette énergie inimaginable, dépendra fortement du développement de nouvelles technologies supraconductrices pour les aimants de l'accélérateur, qui doivent être deux fois plus puissants que ceux du LHC. Le développement de la technologie des aimants pour le FCC vient de commencer en s'appuyant sur les résultats obtenus avec HL-LHC, première étape au-delà du LHC. Lequel de ces deux accélérateurs va gagner la course ? Difficile à dire.

Pour préparer la mise à jour de la Stratégie européenne en Physique des particules en 2020, un processus qui implique tous les principaux laboratoires européens, le CERN a lancé une étude



complète du FCC, avec l'évaluation de la géologie et du génie civil du tunnel de 100 kilomètres, avec ses formidables défis, comme le passage sous le lac de Genève et sous diverses chaînes de montagnes. La fin de cette décennie sera le moment idéal pour une prise de décision, car les résultats du LHC 2<sup>ième</sup> Étape (2015-2018) seront disponibles et il sera temps de préparer à ce moment les accélérateurs de la prochaine génération (après 2040), car ces projets ont des cycles de vingt ans. En attendant, nous espérons que la nouvelle technologie développée pour augmenter la luminosité du LHC entre en application très rapidement, par exemple dans des secteurs comme la médecine et les énergies renouvelables.



**"A look into the future"** Justino António Cardoso 2015, *encre de Chine*





**“Quarks”** Margarita Cimadevila 2006, Acrylique technique mixte sur toile  
[www.cimadevila.tk/](http://www.cimadevila.tk/)

Les particules à interaction nucléaire forte (hadrons) s'assemblent par deux ou par trois, soit en paire quark-antiquark (mésons), soit en trois quarks (baryons). Les particules qui ne peuvent pas être classées dans ce schéma sont appelées exotiques, à quatre quarks (tétraquarks) et à cinq quarks (pentaquarks). En 2016, l'expérience LHCb a confirmé l'observation annoncée en 2015 des particules composées de cinq quarks (pentaquarks).



**“Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN” (CERN-PHOTO-8410523)**

*Le prix Nobel de Physique en 1984 a été décerné conjointement à Carlo Rubbia et Simon van der Meer « pour leur contribution décisive au grand projet qui a permis la découverte des particules W and Z, médiateurs de l'interaction faible. »*



**“François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012” Islam Mahmoud Sweity 2014, dessin au fusain (d'après une photo de Maximilian Brice, CERN)**

*Le Prix Nobel de Physique 2013 a été décerné conjointement à François Englert et Peter W. Higgs « pour la découverte théorique du mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et qui a été récemment confirmée par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN. »*



## Les physiciens et les expériences

Ana Maria Henriques Correia et João Martins Correia

L'histoire que nous vous racontons concerne le CERN avec ses accélérateurs gigantesques et ses énormes détecteurs de particules et comment cette infrastructure, unique au monde, apporte des idées qui peuvent être utiles à d'autres domaines de la science tout en produisant une ingénierie exigeante applicable dans notre vie quotidienne. Dans le plus grand accélérateur de particules au monde se réalisent les collisions de particules à très (très !) haute énergie, produisant les briques à l'origine de la matière qui sont analysées dans les expériences du LHC. À l'aide de machines et de détecteurs sophistiqués, le CERN recrée donc les processus qui se sont déroulés très tôt dans l'histoire de notre univers.

**ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)** et **CMS (Compact Muon Solenoid)** sont les deux plus grandes des quatre principales expériences du LHC. Ce sont des expériences conçues pour exploiter entièrement le potentiel de découverte fourni par le LHC. ATLAS est en volume le plus grand détecteur construit pour un collisionneur de particules, avec son cylindre de 46 m de long et 25 m de diamètre, pesant 7000 tonnes, un poids semblable à celui de la Tour Eiffel. Ce détecteur se trouve à l'intérieur d'une caverne à 100 m sous terre. En comparaison, le détecteur CMS mesure « seulement » 21 mètres de long et 15 mètres de diamètre, mais il est construit autour d'un énorme aimant solénoïde qui génère un champ de 4 Tesla, environ 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Le champ est confiné dans une culasse en acier, qui constitue la masse principale du détecteur qui a un poids total de 14 000 tonnes, deux fois celui de la Tour Eiffel !

Les détecteurs eux-mêmes sont des instruments à plusieurs éléments disposés en couches et conçus pour détecter certaines des particules les plus minuscules et énergétiques jamais créées sur terre. Un détecteur se compose de différents sous-systèmes de détection enveloppés concentriquement autour du point de collision pour enregistrer la trajectoire, le moment et l'énergie des particules, ce qui permet de les identifier et de les mesurer individuellement. D'énormes systèmes magnétiques courbent la trajectoire des particules chargées afin que leur moment puisse être mesuré aussi précisément que possible. Avant d'effectuer les collisions, les faisceaux de particules sont stockés dans des paquets à l'intérieur de l'anneau de 27 km du LHC et accélérés à une vitesse qui approche 99,999999 % de celle de la lumière. Ensuite, de temps en temps, les trajectoires des particules sont courbées et entrent en collision au centre des détecteurs ATLAS et CMS. Lorsque cela se produit, une partie de l'énergie de la collision se transforme en masse et des particules, précédemment non observées et de courte durée de vie - qui pourraient fournir des indices sur la façon dont la nature se comporte au niveau fondamental - volent dans toutes les directions dans les diverses couches du détecteur. Plus d'un milliard d'interactions de particules ont lieu à chaque collision dans le centre du détecteur, un débit de données équivalent à 20 conversations téléphoniques faites en simultané par chaque personne sur la terre. A noter que seule une collision, parmi un million, est signalée comme potentiellement intéressante et donc enregistrée pour une étude plus approfondie. Atlas et CMS ont ainsi pu annoncer, le 4 juillet 2012, la découverte du boson de Higgs avec une énergie de masse au repos de 126,5 GeV et un niveau de confiance de 4,9. Maintenant, les expériences du LHC analysent davantage la propriété et les caractéristiques du boson de Higgs, explorant des territoires à énergie plus élevée et aussi les événements qui dérivent de collision protons-plomb.

Parmi les autres expériences du LHC, le **LHCb (Large Hadron Collider beauty)** étudie ce qui s'est passé dans les premières secondes après le Big Bang lorsque l'antimatière a disparu et le monde de matière dans lequel nous vivons, et qui nous entoure, s'est formé. Sûrement insoupçonné par beaucoup d'entre nous, notre monde et son existence au quotidien représente en fait un énorme mystère cosmique ! Lorsque l'antimatière et la matière entrent en contact, le résultat est dramatique. En un clin d'œil, les deux disparaissent et en se détruisant laissent derrière elles une poussière d'énergie. Cette interaction explosive soulève des questions intrigantes. Par exemple, est-ce que la matière et l'antimatière ont été créées en quantité égale pendant le Big Bang ?



**“ATLAS Remeshed-Higgs Boson”** Davide Angheldu 2016, *fibres de verre et fibres acryliques* L 1,5 m

Représentation 3 D du Boson de Higgs à partir d’une simulation par ordinateur fournie par l’expérience ATLAS (**A Toroidal LHC ApparatuS**). Le boson de Higgs se matérialise dans les 2 muons et 2 électrons représentés en bleu.

La sculpture est réalisée en 3 étapes :

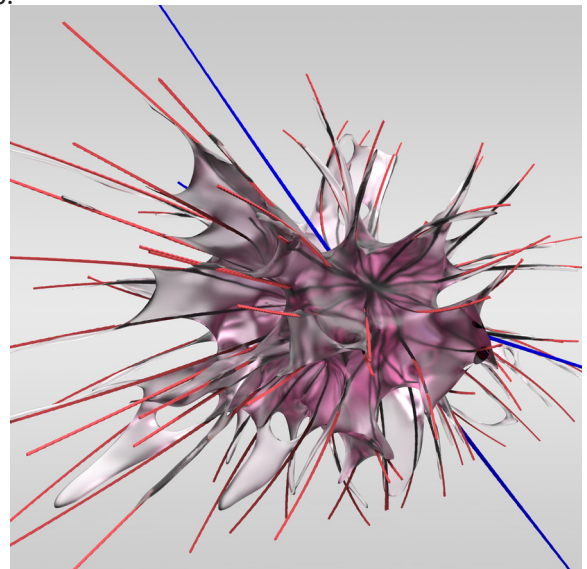
- à partir de la simulation originale à l’aide d’un processus graphique informatique utilisant un algorithme de remaillage on dessine un modèle de sculpture virtuel,
- par frittage de poudre au laser on obtient un modèle en nylon de haute précision,
- ensuite on utilise la méthode classique de fonte en cire perdue pour faire une sculpture avec le matériel choisi.

La sculpture a été présentée à l’exposition « Extreme in search of particles », organisée en Juillet 2016 par le Musée National de Science et de Technologie Leonardo da Vinci à Milan en partenariat avec le CERN et INFN.

La sculpture et la vidéo qui montre le processus de remaillage ont été présentées à la Grunwald Art Gallery, Indiana University, Bloomington en Novembre 2016.

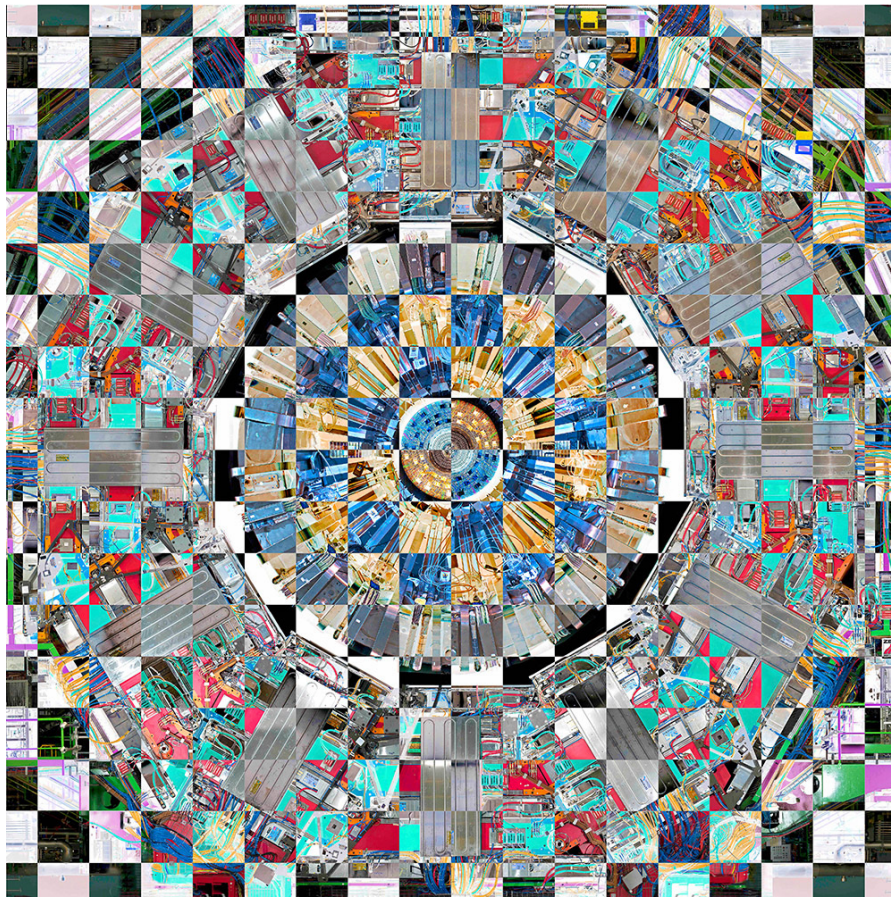
**“ATLAS Remeshed-Higgs Boson”**

Davide Angheldu 2015  
photoprint



[www.davideangheldu.weebly.com](http://www.davideangheldu.weebly.com)





**“Matter-Anti-Matter, symmetry 4”** Michael Hoch, 2012 *photo collage à partir du détecteur CMS (Compact Muon Solenoid) sur Alu- Dibond 100 x 100 cm.*

*CMS est l'un des détecteurs de particules à usage général du LHC, il a la taille d'un immeuble de six étages et contient des senseurs qui, dans certains cas, ont la largeur d'un cheveu.*

*Lors de la conférence EPS-HEP 2017 à Venise, Michael Hoch, fondateur d'Art @CMS, a reçu le prix Outreach de la Division de la physique des particules et de l'énergie de la Société européenne de physique «pour les initiatives qui mettent en évidence la beauté conceptuelle et physique de la physique des hautes énergies, et les qualités d'inspiration qui sont communes à l'art et à la science ». Le comité a reconnu «le talent exceptionnel de Michael Hoch dans la réflexion scientifique qui s'adresse au grand public ...».*

*art @ CMS est un programme éducatif et d'engagement de l'expérience CMS au Large Hadron Collider. Il s'agit d'une collaboration entre la communauté scientifique en physique des hautes énergies, artistes et communautés artistiques, musées, professeurs d'art et professeurs de sciences. Ce projet vise à construire des ponts entre l'art et la science tout en illustrant le travail de CMS et du CERN au grand public.*

*Il est composé de deux modules complémentaires :*

*- Expositions art @ CMS, pour un dialogue entre la communauté scientifique et des communautés artistiques. Son objectif : créer et présenter les œuvres d'art issues de cette collaboration partout dans le monde par des expositions collectives et individuelles.*

*- SciArt Workshops (Science & Art @ School) est un atelier interdisciplinaire conçu pour présenter les étudiants en art et sciences de l'école / collège / université au monde scientifique de la physique des particules et de la recherche fondamentale par une quête artistique. Son objectif : agir comme une usine d'idées.*

*Faisant fonction d'usine d'idées, art @ CMS, est conçu comme une plate-forme d'apprentissage et de partage.*

<https://artcms.web.cern.ch>



Pourquoi sommes-nous dans un univers fait uniquement de matière ? Quel mécanisme inconnu est intervenu pour empêcher la matière et l'antimatière de s'annuler complètement ? LHCb a été conçu pour étudier les légères asymétries entre matière et antimatière moyennant des particules connues sous le nom de quarks « de beauté ». Bien qu'absents de l'univers aujourd'hui, les quarks « de beauté » étaient courants juste après le Big Bang, et sont générés par milliards dans le LHCb avec leurs homologues d'antimatière, les quarks « anti-beauté ». En étudiant la légère différence de désintégration entre le quark « de beauté » et son antiparticule avec une précision sans précédent, l'expérience LHCb nous dévoile l'un des mystères parmi les plus fondamentaux de l'univers. LHCb a récemment annoncé l'observation d'une nouvelle particule  $\Xi_{cc}^{++}$  ( $\Xi_{cc}^{++}$ ) contenant deux quarks charmés et un quark up. La masse de ce nouveau baryon est d'environ 3621 MeV, c'est-à-dire quatre fois celle du proton.

**ALICE** (*A Large Ion Collider Experiment*), une autre expérience du LHC, étudie l'existence et les propriétés de la fusion des protons et des neutrons quand ils libèrent leurs constituants quarks et gluons dans des conditions extrêmes de température et de densité. Cette substance est appelée le plasma quark-gluon, et l'un des objectifs d'ALICE est de comprendre comment il se forme. En fait, la matière ordinaire est constituée d'atomes, dont chacun est constitué d'un noyau entouré d'un nuage d'électrons. Les noyaux sont ensuite composés de protons et de neutrons, qui sont à leur tour composés de quarks.

Les quarks sont liés ensemble dans les protons et les neutrons par une force connue sous le nom d'interaction forte, et maintenus ensemble par l'échange de particules appelées gluons. Aucun quark (ni gluon) n'a jamais été observé seul : les quarks, ainsi que les gluons, semblent être liés ensemble de manière permanente et confinés à l'intérieur de particules composites, comme les protons et les neutrons. Ce phénomène est appelé confinement. Bien qu'une grande partie de la physique de l'interaction forte soit bien comprise, deux questions fondamentales demeurent non résolues : l'origine du confinement et le mécanisme de génération de la masse. Les protons et les neutrons sont connus pour être composés de trois quarks, mais en ajoutant les masses des trois quarks, on obtient seulement environ 1 % de la masse du proton ou du neutron.

D'où viennent les 99 % restants ? La théorie actuelle de l'interaction forte (appelée chromodynamique quantique) prédit qu'à des températures et des densités très élevées, les quarks et les gluons ne seraient plus confinés dans des particules composites. Ils devraient, au lieu de cela, exister librement dans un nouvel état de matière dénommé plasma de quarks et gluons. Une telle transition devrait se produire lorsque la température dépasse une valeur critique estimée à environ 100 000 fois plus chaude que le noyau du soleil ! De telles températures n'existent pas dans la nature depuis la naissance de l'univers. En produisant des collisions frontales entre noyaux lourds (tels que les noyaux d'atomes de plomb) accélérés par le LHC à une vitesse proche de celle de la lumière, les physiciens devraient pouvoir obtenir, bien que sur un petit volume, environ la taille d'un noyau et pour un instant fugace - une petite goutte du plasma primordial et observer comment il redevient matière ordinaire par expansion et refroidissement. Donc, ALICE devrait pouvoir explorer avec précision la physique du confinement, et la génération de la masse dans les interactions fortes et donner un aperçu de comment la matière était immédiatement après le Big Bang.

En outre, les collisions dans le LHC fournissent un micro-laboratoire pour enquêter sur de nombreux phénomènes, y compris ceux relatifs aux protons. C'est la physique pour laquelle l'expérience **TOTEM** (*TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement*) a été spécialement conçue. En effectuant des mesures de très grande précision des particules émergeant au plus près du point d'interaction des faisceaux du LHC – dite direction « vers l'avant » - TOTEM étudie une physique qui n'est pas facilement accessible aux autres expériences du LHC.

Parmi les diverses études, TOTEM mesure la probabilité totale, ou « section transversale », des interactions proton-proton, en quelque sorte la dimension du proton en tant que « cible ». L'expérience étudie également des phénomènes de diffusion analogues à la diffraction de la lumière.

Une vingtaine d'installations et de projets expérimentaux différents profitent des protons

accélérés, de l'expertise et de l'innovation technologique du CERN. Parmi eux, une tradition de longue date au CERN, la physique des neutrinos. Le CERN héberge actuellement la recherche et le développement de détecteurs pour les futures expériences de neutrinos qui auront lieu ailleurs dans le monde.

Le CERN poursuit également depuis de nombreuses années des recherches sur l'antimatière avec l'installation **AD (Antiproton Decelerator)**. Récemment, **ELENA (Extra Low ENergy Antiproton)**, un anneau d'antiprotons à très basse énergie a été inauguré. Il décélère à 100 KeV les antiprotons de 5,3 MeV livrés par l'installation AD. Ainsi, les physiciens vont pouvoir, non seulement produire et piéger des atomes d'antimatière, mais aussi étudier plus exactement les propriétés fondamentales et les interactions des ions anti-hydrogène, les antiprotons et l'anti-hydrogène à l'état libre ou lié, pour chercher à comprendre si un monde entièrement constitué d'antimatière serait à 100 % égal à notre monde, c'est-à-dire serait son image miroir.

Dans la Hall Nord de l'accélérateur SPS, l'expérience **NA64** recherche, en utilisant des faisceaux d'électrons, les désintégrations visibles et invisibles de photons noirs, particules élémentaires hypothétiques qui seraient les médiateurs de l'in-teraction entre la matière noire et la matière visible. Avec **CAST (CERN Axion Solar Telescope)**, le télescope pour les axions solaires du CERN, les chercheurs tentent de détecter les axions ou les caméléons. Ces particules théoriques, si elles existent, sont respectivement les constituants de la matière noire et de l'énergie sombre. Ensemble, ils représentent environ le 95 % de l'Univers. Les axions et les caméléons pourraient nous parvenir du plasma du centre du soleil (température de 16 millions de degrés).



“Chameleon a hypothetical scalar particle” Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

Les particules Caméléons ont été proposées en 2003 par Justin Khoury et Amanda Weltman.

Dans une branche de recherche assez différente, plus petite mais importante, environ 50 expériences par an sont réalisées au séparateur de masse isotopique connu sous le nom d'**ISOLDE** (isotope separator online), une installation unique au monde qui produit en ligne une panoplie de noyaux radioactifs issus des collisions de protons énergétiques de l'accélérateur Booster sur des cibles fixes de différents éléments. ISOLDE, une fabrique qui imite les étoiles, délivre des noyaux radioactifs exotiques aux chercheurs qui étudient la physique nucléaire et atomique, la physique des états solides, les matériaux ou les sciences de la vie. L'énergie d'ISOLDE a été récemment augmentée. Après accélération, la production de noyaux radioactifs exotiques, d'états excités et la création des conditions de réactions similaires à celles qui ont lieu dans les étoiles, font rester ISOLDE à l'avant-garde de la recherche nucléaire fondamentale et des applications de techniques uniques dans le domaine des radioisotopes. Avec la construction en cours de l'installation **CERN-MEDICIS**, on implémente dans ISOLDE une branche particulière dédiée à l'optimisation du diagnostic et de la thérapie du cancer. Cela se fait dans le cadre de la collaboration MEDICIS-PROMED et vise à la formation d'une nouvelle génération de scientifiques entrepreneurs, qui pourront interagir avec différentes disciplines dans des institutions de recherche fondamentale, dans des entreprises privées et dans des hôpitaux. Ceci est nécessaire pour une implémentation rapide de nouveaux types d'équipements dans les entreprises et des produits radiopharmaceutiques pour le traitement du cancer dans les hôpitaux. Des faisceaux d'ions radioactifs, jamais utilisés auparavant, seront utilisés pour la production des lots de produits radiopharmaceutiques à usage médical. En 2017 les premiers radioisotopes destinés à la recherche médicale y ont été produits.

Enfin, l'expérience **CLOUD** (*Cosmics Leaving Outdoor Droplets*) étudie comment les rayons cosmiques, particules chargées bombardant l'atmosphère terrestre depuis l'espace extra-atmosphérique, peuvent influencer la couverture nuageuse, par la formation de nouveaux aérosols (petites particules suspendues dans l'air qui peuvent pousser à former des germes de gouttelettes pour le nuage) ou en affectant directement les nuages eux-mêmes. Les nuages exercent une forte influence dans le bilan énergétique terrestre. En effet, des changements de seulement quelques pourcents, affectent de manière significative le climat. Cependant, malgré son importance, la formation d'aérosols est encore mal comprise. Les mesures de microphysique, effectuées dans des conditions de laboratoire contrôlées, sont importantes pour une meilleure compréhension de l'aérosol atmosphérique et pourront nous fournir la clé pour comprendre la connexion possible entre les rayons cosmiques et les nuages. Le Synchrotron Proton fournit à cet effet une source artificielle de "rayons cosmiques" qui simule les conditions naturelles existantes entre le niveau du sol et la stratosphère. Un faisceau de particules passe à travers la chambre à nuages et les effets observés sur la production d'aérosols ou sur des nuages liquides ou glacés à l'intérieur de la chambre y sont enregistrés et analysés.

Un autre signe de l'utilisation et de l'utilité mondiale du CERN est la grille informatique du LHC. Les données provenant des collisions sont produites à un rythme sans précédent depuis le temps des premières collisions, des dizaines de pétaoctets par an, (1pB = 1.000.000.000.000.000 B, environ deux mille 500 GB de disque dur) un défi majeur résolu en 2012 avec le déploiement d'une infrastructure de réseau de connexion basée sur la grille entre 140 centres informatiques de 35 pays. La grille mondiale de calcul LHC (WLCG) est aujourd'hui le plus important réseau d'informatique distribué au monde, comprenant plus de 170 installations informatiques et un réseau mondial de 42 pays. En fait, la mission du projet WLCG est de fournir des ressources informatiques pour stocker, distribuer et analyser les plusieurs pétaoctets de données générées par le LHC. En 2017 pendant un seul mois 12,3 petabytes ont été enregistrés. Mais les activités de la grille s'étendent aujourd'hui à de nombreux autres projets dans le domaine public : la protection civile, les sciences de la Terre, la chimie computationnelle, les sciences de la vie pour la gestion et l'analyse des données médicales.

La seule façon de réaliser des projets aussi exigeants, avec les ressources intellectuelles et financières nécessaires en maximisant la production scientifique, a été la mise en place de nombreuses collaborations internationales regroupant des milliers de personnes. Ceci a été rendu



possible grâce à la nature universelle des expériences menées au LHC qui attirent des participants de plus de 100 nationalités de tous continents, y compris l'Afrique. Les fonds des projets pour les expériences proviennent principalement d'organismes de financement des pays participants. ATLAS et CMS (les plus grands), ont pu compter aussi sur les contributions du CERN, et sur les ressources en provenance de multiples universités.

Pour que cela fonctionne, ATLAS et CMS ont adopté une direction avec une structure organisationnelle qui permet aux équipes de s'autogérer, en outre chaque membre est directement impliqué dans les processus décisionnels. Les scientifiques travaillent généralement en petits groupes, en choisissant les domaines de recherche et les données qui les intéressent le plus. Tout résultat d'une collaboration est partagé par tous ses membres et fait l'objet d'un examen rigoureux et des processus de vérification avant d'être rendus publics. Le succès de la collaboration est donc lié à l'engagement individuel vers la physique et à la perspective d'obtenir de résultats nouveaux et excitants qui peuvent être réalisés uniquement par un effort collaboratif complet et cohérent des scientifiques, des innombrables ingénieurs, des techniciens et du personnel administratif.

Tout en étant une source unique de connaissance, de diversité et de complémentarité, qui contribue largement à l'enseignement, à l'éducation et à la sensibilisation sur les derniers développements de l'art de la science et de la technologie, le CERN se projette déjà vers l'avenir. Il développe les capacités du laboratoire de recherche et définit la stratégie de la physique de haute énergie du futur et en parallèle, avec le groupe d'étude sur la physique au-delà des collisionneurs (Physics Beyond Colliders Study Group), explore les possibilités offertes par ses accélérateurs. Ceci car de nos jours, le Modèle Standard ne peut pas expliquer plusieurs phénomènes : la matière noire, la prévalence de la matière sur l'antimatière et la masse de neutrinos.

Comme dit par l'actuelle Directrice Générale du CERN, Fabiola Gianotti en janvier 2017 :

*« Nous savons qu'il y a une nouvelle physique, nous ne savons pas dans quelle échelle d'énergie et / ou quels couplages, mais nous devons être aussi ouverts que possible dans notre approche de recherche car la diversité scientifique est indispensable. En exploitant les capacités uniques de l'infrastructure et du complexe d'accélérateurs du CERN, en complément avec tout autre effort au niveau international et en optimisant les ressources dans ce domaine à l'échelle mondiale... ».*

La créativité et l'innovation sont absolument nécessaires au développement de ce domaine de la physique, il nous faudra davantage améliorer les paramètres de l'accélérateur et réaliser des expériences sans précédent. Un délai important, environ vingt ans, s'écoule entre la conception et la construction d'un accélérateur à grande échelle et nécessite l'accomplissement d'efforts coordonnés. L'objectif étant d'assurer la continuité après l'ère du LHC du programme en physique des particules au niveau mondial. Le LHC à haute luminosité sera l'instrument principal de recherche au niveau mondial jusqu'en 2035. Cela définit la fenêtre de temps pour la préparation d'une infrastructure de recherche aux énergies post-LHC.



"Accelerators and detectors to understand the Universe" Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

# Le CERN et les technologies de l'information

Frédéric Hemmer

## Un regard vers le passé

L'histoire de l'informatique au CERN remonte aux débuts mêmes de l'Organisation. Dès novembre 1955, à l'ordre du jour de la troisième réunion du comité scientifique du CERN présidée par Werner Heisenberg, pionnier de la physique quantique, figurait déjà la proposition d'acheter un ordinateur électronique. Le premier ordinateur installé au CERN fut un Ferranti Mercury. Il fallut pas moins de deux ans aux ingénieurs de la firme pour le construire. Lorsque son installation fut terminée, durant l'été 1958, il occupait à lui seul l'entièreté de la salle informatique. Son cycle d'horloge était de 60 microsecondes. Les cœurs de processeurs actuels sont des centaines de milliers de fois plus rapides !

L'étape clé suivante dans l'histoire de l'informatique du CERN fut l'acquisition d'un IBM 709. Installé en 1961, il utilisait encore des tubes à vide. Cette machine était alors la seule de sa génération permettant d'utiliser le FORTRAN (**FOR**mula **TRAN**slator) comme langage de programmation. Elle fut ensuite remplacée par le 7090, utilisant des transistors. C'est à cette même période que les mini ordinateurs commencèrent à apparaître. Généralement directement connectés aux équipements des halls des expériences, ils permettaient d'enregistrer les données sur des bandes qui étaient ensuite envoyées au centre de calcul pour analyse. A la fin des années soixante, plus de 50 de ces mini ordinateurs étaient disséminés au CERN.

Il est remarquable de penser que, déjà à cette époque, eurent lieu des tentatives pour connecter les ordinateurs centraux aux zones expérimentales via des systèmes de réseau 'maison'. Ces derniers étaient destinés à remplacer ce que l'on appelait affectueusement la méthode de transport par bicyclette en ligne des bandes vers le centre de calcul. L'objectif était de permettre un traitement prioritaire pour obtenir un retour rapide pour les expériences.

Les premières machines CDC (**C**ontrol **D**ata **C**orporation) furent également installées à cette période. Leur mise en service fut longue, en grande partie à cause de l'instabilité des systèmes d'exploitation. Le début des années soixante-dix fut quant à lui marqué par l'installation du premier ordinateur central à temps partagé, le CDC 7600. Au cours des 15 années suivantes, le 7600 fut mis à niveau avec différents modèles de Cybers, tandis que des systèmes IBM (370/168, 3081, 3050, ES9000, etc.) étaient achetés ou loués pour compléter la capacité informatique requise pour les expériences. Un superordinateur Cray XMP succéda finalement aux machines CDC en 1988. A partir de 1992, la firme Digital Equipment Corporation (DEC), qui avait alors installé des centaines de PDPs et VAXs sur le site, fit son entrée dans le centre de calcul avec des systèmes centraux basés sur le VAX (**V**irtual **A**ddress **e**Xtension).

Le début des années quatre-vingt-dix coïncide avec l'apparition des stations de travail RISC des marques Apollo, DEC, HP, SGI, SUN et bien d'autres. Elles remplacèrent les ordinateurs centraux quelques années plus tard, offrant un bien meilleur ratio coût performance, non seulement pour ce qui est de la vitesse du processeur mais également, et plus important encore, en ce qui concerne le stockage sur disque.

Au même moment, la vitesse de traitement des ordinateurs personnels basés sur la technologie Intel devint suffisamment rapide (200 MHz) pour pouvoir les utiliser afin de traiter les données de physique. C'est ainsi que le matériel informatique standard fit son entrée dans le centre de calcul, remplaçant toutes les autres solutions. Le centre de calcul contient à l'heure actuelle 14 000 serveurs, 200 000 cœurs de processeurs et 200 Po de données sur bandes.

## Vers le présent

### Les réseaux informatiques

Le CERN commença à développer différents systèmes (FOCUS, OMNET, CERNET) de communications informatiques très tôt, dès le début des années soixante, avant d'adopter Ethernet,



le standard de l'industrie qui équipe de nos jours chaque bureau, accélérateur ou détecteur, et aussi d'exécuter le protocole TCP/IP.

Au fil des ans, l'évolution des réseaux externes a vraiment changé les règles du jeu. Au début des années quatre-vingt, les transferts s'effectuaient au niveau du Kbps et n'interconnectaient qu'une poignée de sites. Dans les années quatre-vingt-dix, des capacités de plusieurs centaines de Kbps deviennent disponibles, et le CERN devient alors le plus grand point d'échange internet d'Europe, voyant transiter 80 % de la capacité européenne d'Internet. De nos jours, les instituts de la physique des hautes énergies sont généralement connectés au CERN à des vitesses de l'ordre du gigabit par seconde, certains sites bénéficiant même de connexions de l'ordre de plusieurs centaines de gigabits par seconde.

La capacité des réseaux informatiques est essentielle pour permettre à la communauté de la physique des hautes énergies de collaborer avec le CERN ou depuis le CERN, sans que la présence physique des personnes ne soit requise. Les données du LHC sont répliquées partout dans le monde, sept jours sur sept, dans d'autres centres de calcul, afin qu'une copie à jour soit toujours disponible.

## **Le Web**

Il est bien entendu impossible de parler de l'informatique au CERN sans mentionner le Web. Au-delà de la vision même de Tim Berners-Lee, ce sont les besoins de milliers de scientifiques de la physique des hautes énergies disséminés de par le monde, combinés à l'émergence de nouvelles technologies telles que des interconnexions globales et rapides via TCP/IP, et l'apparition de stations de travail graphiques suivies plus tard de Macs et PCs accessibles à tous, qui ont permis au World Wide Web de révolutionner le monde.

## **La Grille**

La Grille mondiale de calcul pour le LHC représente le plus grand effort scientifique dédié au partage de ressources informatiques dans le monde entier. Le projet a débuté au début du siècle sur la base d'idées et de développements initiés à Argonne et dans l'université de Santa Cruz, avec des contributions importantes de la Commission européenne et des instituts de la physique des hautes énergies du monde entier. Cette Grille est ainsi devenue un système distribué robuste et résilient s'étendant à plus de 170 sites, mettant à disposition un demi-million de cœurs de processeurs pour traiter 500 pétaoctets de données disponibles pour les analyses du LHC, le tout interconnecté via des liens haute vitesse allant à des multiples du Gbps.

La Grille de calcul mondiale pour le LHC traite de façon régulière un demi-million de calculs en simultané : une amélioration de taille si l'on pense à ce que le Ferranti Mercury était capable d'effectuer il y a de cela soixante ans.

## **La préservation des données**

Le défi de ces 50 dernières années a été de gérer et traiter les données produites par les accélérateurs et les expériences. Mais que se passe-t-il dès lors que les expériences se terminent et que les détecteurs sont démantelés ? Les données resteront-elles pour toujours sur bandes ? Les programmes en FORTRAN des années soixante permettent-ils toujours de lire ces données et de les comprendre ? Serons-nous toujours capables de comprendre ce qu'exécutait le programme et les hypothèses prises par son auteur ? C'est là tout l'enjeu de la préservation des données, un défi que la physique des hautes énergies se doit de relever. De mon point de vue, c'est en réalité un problème qui reste très largement sous-estimé et qui dépasse de loin notre domaine. Êtes-vous sûr d'être toujours en mesure de revoir les vidéos de vos enfants tournées il y a de cela 10 ans ? Êtes-vous toujours à même de lire des médias sur lesquels elles étaient stockées ? Pouvez-vous toujours lire les documents Word écrits au milieu des années quatre-vingt-dix ? Vous est-il même possible de les retrouver ?

## Libre accès (publications, données et code)

Le CERN s'engage pour le libre accès, car il reflète les valeurs inscrites dans la Convention de l'Organisation depuis plus de soixante ans et cela devient de plus en plus important pour les États membres du CERN, la Commission européenne et d'autres partenaires institutionnels à travers le monde. Depuis plus de vingt ans, la plupart des publications de physique du CERN sont publiées immédiatement et accessibles en ligne, sous forme de pré-publications du CERN, avant d'être publiées dans des revues. Ceci est généralement connu sous l'appellation de voie verte ou "Green Open Access".

Les revues Gold Open Access mettent gratuitement à la disposition des lecteurs des articles évalués par des pairs. Ces revues sont généralement financées par les frais perçus pour la publication des articles, ces frais sont aussi connus sous le nom de APC (acronyme de **A**rticles **P**rocessing **C**harges). Jusqu'en 2013, le Service d'information scientifique du CERN couvrait ces frais pour certaines revues de manière centralisée. Grâce à des partenariats avec la plupart des grandes maisons d'édition, les articles des collaborations du LHC sur les résultats expérimentaux ont systématiquement été publiés en tant que Gold Open Access depuis 2010. Les auteurs du CERN doivent ainsi publier tous leurs résultats dans les revues Gold Open Access.

Plusieurs technologies du CERN sont développées dans cette logique d'accès ouvert. Invenio est par exemple un logiciel open source de gestion de bibliothèque numérique bénéficiant des contributions internationales de nombreux instituts. Le CERN investit également depuis longtemps, avec le cofinancement de la Commission européenne, dans un système d'archivage de données ouvertes au service de la communauté scientifique au sens large : Zenodo.

## Travailler avec l'industrie : CERN openlab

CERN openlab est un partenariat public-privé unique qui vise à accélérer le développement de solutions de pointe pour la communauté mondiale du LHC et la recherche scientifique au sens large. Via le CERN openlab, le CERN collabore avec des entreprises des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) et des instituts de recherche de premier plan.

Créé en 2001, CERN openlab entre en 2018 dans une sixième phase de trois ans. Ainsi que dans sa cinquième phase s'attache à relever d'ambitieux défis couvrant les besoins les plus critiques des infrastructures informatiques tels que l'acquisition de données, les plates-formes de calcul, l'architecture de stockage de données, la mise en service et la gestion d'ordinateurs, les réseaux et la communication, et l'analyse de données.

Dans ce cadre, les partenaires ont accès à l'expérience du Laboratoire en matière d'ingénierie et à son infrastructure informatique complexe, étendue dans certains cas à des instituts de recherche dans le monde entier. Les tests effectués dans des environnements exigeants et des conditions extrêmes poussent la technologie à ses limites, donnant ainsi aux partenaires de l'industrie informatique un précieux retour d'information sur leurs produits, tout en permettant au CERN et aux laboratoires de recherche associés d'évaluer les mérites de nouvelles technologies dans leurs premiers stades de développement, en vue d'une éventuelle utilisation future. Ce cadre constitue également un terrain neutre où il est possible de mener des activités poussées de recherche et développement avec la participation de plusieurs entreprises.

## Éducation

L'École d'informatique du CERN (*CSC - CERN School of Computing*) dure deux semaines chaque année et est une université d'été proposant une série de conférences et d'exercices pratiques, avec un diplôme officiel du CSC obtenu sous condition de succès à l'examen du CSC (et donnant souvent accès à des crédits ECTS (*European Credits Transfer System*)). Elle est ouverte aux étudiants de troisième cycle et aux chercheurs, travaillant au CERN ou dans des instituts externes, avec quelques années d'expérience en physique des particules élémentaires, en informatique ou dans des domaines connexes.

Les participants viennent de laboratoires et universités du monde entier, y compris de domaines autres que celui de la physique des particules, généralement attirés par les sujets pointus qui sont enseignés. La fréquentation varie de 60 à 80 étudiants, avec typiquement de 15 à 30 nationalités représentées. Au cours des 10 dernières années, des personnes de plus de 60 nationalités différentes ont participé à ce programme. Environ 80 % des étudiants viennent de pays européens.

### ***Un regard vers le futur***

L'informatique au service du LHC étant bien en ligne avec ses objectifs, la collaboration de la Grille mondiale du LHC se penche d'ores et déjà sur l'avenir, en se concentrant sur les deux phases de mises à niveau prévues pour le LHC. Durant la première phase (2019-2020), des mises à niveau majeures des expériences ALICE et LHCb sont prévues, ainsi qu'une augmentation de la luminosité du LHC. La deuxième phase, le projet LHC haute luminosité (HL-LHC) actuellement prévue pour 2024-2025, portera la luminosité du LHC à un niveau beaucoup plus élevé et augmentera de façon substantielle la précision des détecteurs ATLAS et CMS.

Les exigences tant au niveau des données elles-mêmes que de l'informatique vont augmenter de façon spectaculaire au cours de cette période, avec des taux de 500 Po / an prévus pour le HL-LHC. On s'attend ainsi à ce que les besoins de traitement augmentent 10 fois plus que ce que l'on pense que l'évolution de la technologie permettra de fournir. Autant de défis importants et passionnants. Il est clair que l'informatique au service du LHC continuera d'évoluer, et que dans 10 ans les choses auront l'air très différentes, tout en conservant les fonctionnalités qui permettent et renforcent la collaboration mondiale.



## Transfert des connaissances et technologies

*Giovanni Anelli*

Pour poursuivre ses ambitieux objectifs de recherche, le CERN doit constamment développer des instruments avancés et des solutions technologiques innovantes, principalement dans les domaines liés aux détecteurs de particules, aux technologies des accélérateurs et aux technologies de l'information. Ceux-ci incluent de nombreux domaines tels que, par exemple, la microélectronique, la supraconductivité, la cryogénie, les matériaux de pointe. Ces technologies et, plus important encore, les connaissances qui en sont à la base, sont des atouts essentiels de l'Organisation et il est primordial que la société en général puisse en bénéficier.

Depuis de nombreuses années, le CERN étudie activement les applications possibles de ses innovations dans des domaines autres que la physique des hautes énergies et a développé différents outils afin de transférer son savoir-faire et son expertise aux entreprises et autres institutions de recherche. Quelques exemples de ces outils sont la License Open Hardware du CERN, des partenariats avec l'industrie, des licences, des contrats de service et d'expertise et un réseau d'incubateurs d'entreprises dans les Etats membres du CERN pour aider les start-up à adopter les technologies du CERN.

Le transfert de connaissances vers l'industrie passe aussi par l'acquisition de composants de haute technologie et par la mobilité des personnes: de nombreux étudiants et jeunes chercheurs, qui ont travaillé au CERN au début de leur carrière, se déplacent vers l'industrie en tirant profit de la richesse des connaissances qu'ils ont acquises lorsqu'ils travaillaient pour l'Organisation.

Les relations avec l'industrie sont vitales pour l'Organisation. Le CERN a besoin de l'industrie pour ses instruments avancés et, en même temps, il aide l'industrie à développer de nouveaux produits et services en étant à la fois client et fournisseur de technologies et de savoir-faire révolutionnaires.

En utilisant la plus grande infrastructure de recherche dans le domaine de l'HEP, le CERN a des besoins uniques et développe donc des technologies uniques. Il existe de nombreux exemples de la manière dont les connaissances générées au CERN ont eu un impact sur la société, et ce, dans des domaines aussi variés que l'imagerie médicale avancée, le traitement du cancer, la dosimétrie, les applications aérospatiales, la production d'énergie, le stockage et l'analyse de données.

Ci-dessous, un exemple récent d'une application pratique en étude préclinique dans les hôpitaux : ClearPEM.



"A clinical case: ClearPEM" Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

## ClearPEM

João Varela

ClearPEM est un scanner de mammographie à émission de positons (1.4 mm) de haute spécificité spatiale qui a été développé par la Collaboration Crystal Clear au CERN pour détecter les lésions de cancer du sein. Il utilise une technique d'imagerie qui emploie un radioisotope marqueur qui, injecté dans le flux sanguin, se lie aux cellules cancéreuses en émettant des positons. Comme le traceur se concentre dans les lésions cancéreuses, il est possible de reconstituer une image de sa répartition spatiale dans le corps en détectant les paires de photons qui résultent de l'anéantissement des positons avec les électrons présents dans le corps.

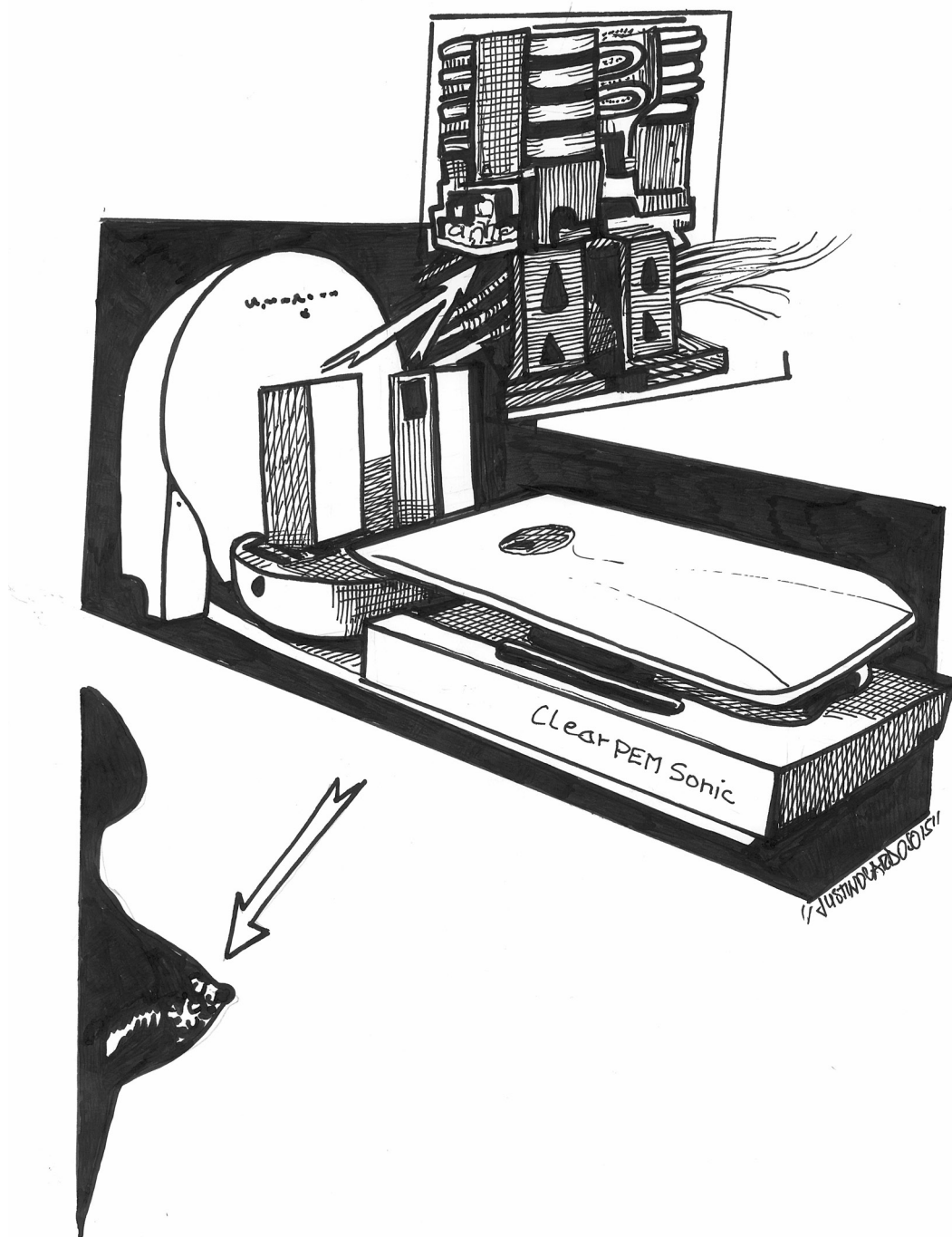
Le positon est l'antiparticule de l'électron et donc, lorsque les deux se rapprochent, ils s'annihilent et deux photons énergétiques sont émis dans des directions opposées mais de façon aléatoire. Dans la tomographie par émission de positons, communément appelée PET, de nombreux événements sont enregistrés par des détecteurs de photons externes ce qui permet de reconstituer leurs directions d'émission et, en utilisant des algorithmes sophistiqués, de créer une image 3D de la tumeur. Presque un siècle après la découverte de l'antimatière, la PET émerge comme une application pratique spectaculaire de l'antimatière.

Le scanner ClearPEM est le résultat de développements de longue date réalisés sur les détecteurs à cristaux, photo senseurs et électronique de lecture pour l'expérience CMS au LHC (*Large Hadron Collider*). Le grand détecteur de photons dit ECAL (*Electromagnetic Calorimeter* (calorimètre électromagnétique) construit par la collaboration CMS et opérationnel depuis 2009, utilise environ 80 000 cristaux de tungstate de plomb pour détecter et mesurer les photons de haute précision produits lors des collisions de protons au LHC. Des paires de photons devaient être le produit de la désintégration d'une nouvelle hypothétique particule, le boson de Higgs, découvert en 2012 entre autres par l'observation d'événements à deux photons. Il existe toutefois une grande différence entre les photons de la désintégration de Higgs et les photons de l'annihilation positron-électron : les premiers sont cent mille fois plus énergétiques ! Une conséquence importante est que le détecteur de photons dans le second cas peut être beaucoup plus petit que l'ECAL, ce qui le rend approprié pour l'analyse du sein.

La connaissance et la compréhension acquises par les physiciens ont amené à la création d'un consortium afin d'utiliser ces nouvelles technologies dans cette importante application pratique. Il en résulte la conception et la construction d'une instrumentation formée des têtes de détecteurs composées de cristaux de lutétium 6144 LYSO de dimension 2x2x20 mm pour détecter les photons émis par les radioisotopes accumulés dans la lésion. Pour la première fois, les photo-capteurs de silicium développés pour ECAL, la photodiode d'avalanche (APD), ont été utilisés dans un scanner PET pour évaluer la lumière générée dans les cristaux au lieu du traditionnel photomultiplicateur. Associés à une nouvelle micro puce dédiée, les APD ont permis de construire des têtes de détecteurs très compactes qui peuvent être placées étroitement autour de la poitrine. Le système a une sensibilité de détection élevée permettant non seulement de déterminer l'emplacement de la (des) lésion(s), mais aussi leur activité métabolique et donc une évaluation plus précise de l'étendue de la maladie et une meilleure définition entre les lésions bénignes et malignes. Ceci est bien sûr déterminant pour la planification et la suite du traitement de la maladie et pour les résultats que cela aura sur le patient.

Deux machines ClearPEM ont été construites. L'une est maintenant installée à l'hôpital universitaire de Coimbra (ICNAS, *Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saúde*), une autre est opérationnelle à l'hôpital San Gerardo à Monza. La performance de ces machines a été validée pour les patients atteints de cancer du sein diagnostiqués selon les procédures et les examens standards, et après le traitement. La comparaison entre les images des mêmes patients obtenues avec le détecteur PET commercial et ClearPEM montre qu'il y a une bien meilleure résolution spatiale avec ce dernier.

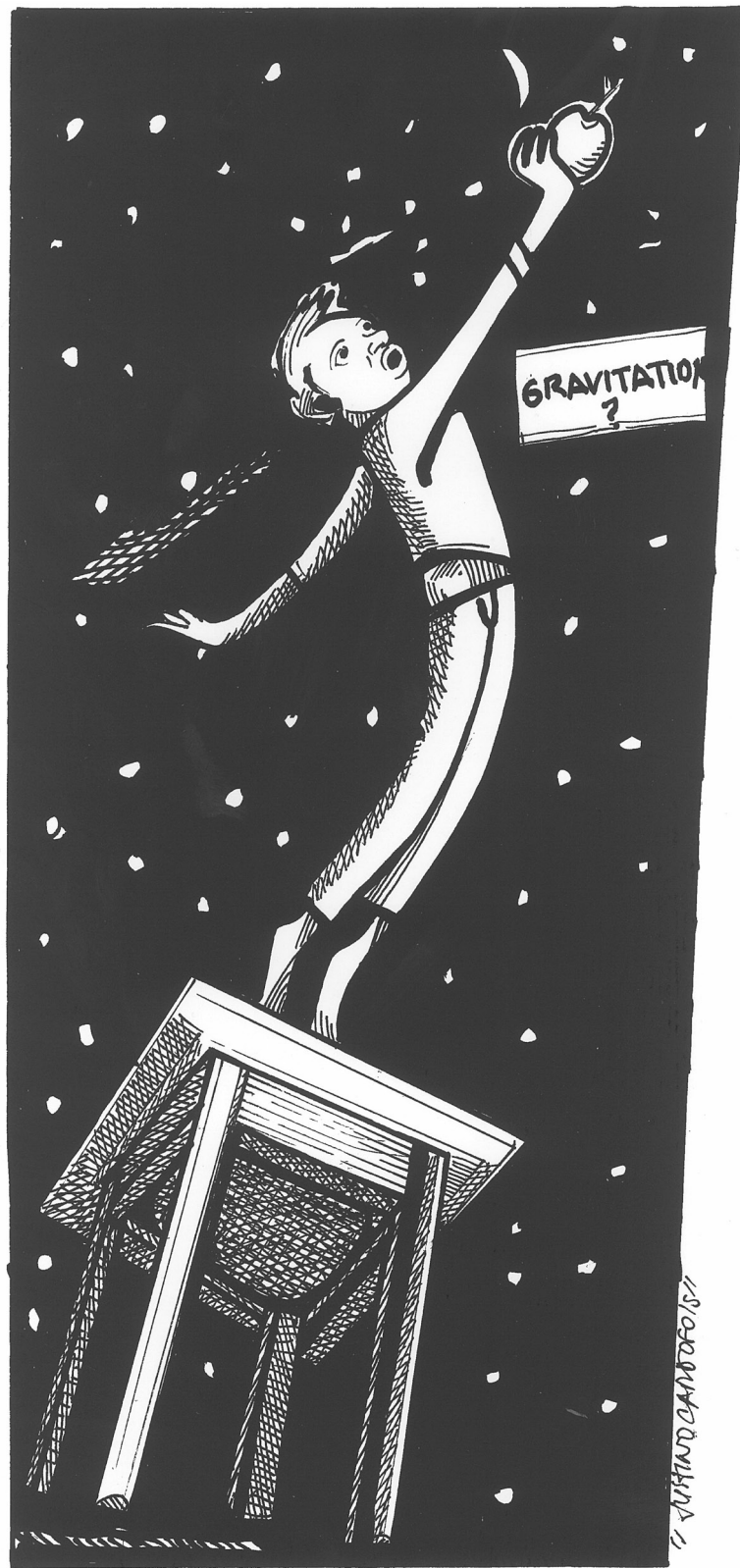
Dans un laboratoire où les physiciens étudient l'origine de notre Univers, en essayant de comprendre l'asymétrie entre matière et antimatière et dévoiler le mystère de la matière noire, un projet comme Clear PEM a stimulé notre imagination. En fait, cet exemple illustre comment la recherche fondamentale en physique des particules a conduit en plusieurs occasions à des percées importantes en termes d'innovation et de transfert technologique au profit de notre vie quotidienne.



**“An innovative Technology”** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

*ClearPEM est un scanner pour la mammographie à émission de positrons qui a été développé par la collaboration Crystal Clear au CERN pour détecter les lésions du cancer du sein. Elle est une mise en œuvre pratique de développements technologiques réalisés pour CMS, une expérience menée au LHC.*





**"The gravitation law I know"** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

En 1687, Isaac Newton publie dans "Principia" la loi de la gravitation. La gravité est la plus faible des quatre interactions fondamentales qui existent dans la nature. Des dimensions supplémentaires pourraient expliquer pourquoi la gravité est si faible. Les physiciens avec la théorie du tout (Theory of Everything) cherchent à unifier toutes les interactions fondamentales de la nature : gravitation, interaction forte, interaction faible et l'électromagnétisme.

## ARTSCI au CERN

*Arthur I. Miller*

Le CERN est le leader mondial dans la recherche du monde mystérieux des particules élémentaires. C'est un lieu privilégié qui permet de lier l'art à la science, où les artistes et les scientifiques travaillent ensemble pour produire de nouvelles manières de représenter l'Univers dans lequel nous vivons. Cela a commencé vers l'an 2000 lorsque l'artiste londonien, Ken McMullen, a réuni dans un projet au CERN, un groupe d'artistes européens confirmés. Ces artistes ont visité le CERN pendant de courtes périodes, et sont ensuite retournés dans leurs ateliers pour travailler sur des idées inspirées par les conversations qu'ils avaient eues avec des scientifiques du CERN. L'exposition « Signatures of the Invisible », qui comprenait des peintures et des sculptures, fut inaugurée en 2001 à l'Atlantis Gallery de Londres, et fut présentée entre autres à Stockholm, Lisbonne, Paris et au MOMA PS1 de New York.

Au cours des années qui ont suivi, le CERN a continué à faire la une dans les journaux. En 2009, le roman à succès de Dan Brown, « Angels and Demons », rempli de sociétés secrètes, de symbolisme et en plus, d'une bombe d'antimatière fabriquée au CERN, le film se passait en partie sur le site. Le CERN a fait savoir maintes fois que l'histoire du roman et la bombe étaient de la pure fiction. Peu de temps après, Robert Harris fonde son thriller « Fear Index » sur un chercheur ayant travaillé dans le passé au CERN.

Mais l'événement le plus important qui a permis de faire avancer l'art au CERN a été l'arrivée en 2009 d'Ariane Koek, une productrice de programmes culturels pour la BBC à Londres, qui a lancé un programme de résidence en arts. Elle l'a appelé « Collide @ CERN », financé en partie par Ars Electronica, une organisation basée à Linz, en Autriche.

L'artiste en résidence était choisi par un concours officiel, afin de passer deux mois au CERN et un mois à Ars Electronica pour développer une œuvre inspirée par le CERN. Cela différait du programme de McMullen dans lequel les artistes passaient plusieurs périodes de courte durée au CERN mais travaillaient dans leurs propres ateliers. Au CERN, l'artiste choisi a été associé à un scientifique par « speed dating », l'idée étant de pouvoir lui faire rencontrer autant de scientifiques que possible, chacun d'eux expliquant son travail. Aujourd'hui, ce programme est dirigé par la critique d'art et commissaire d'exposition espagnole Monica Bello. Le problème est que le scientifique est trop souvent mal à l'aise avec le monde de l'artiste et vice versa, et ce qui complique la chose est que l'artiste connaît très peu les sujets scientifiques.

Parmi les artistes qui ont suivi le programme, je voudrais nommer l'artiste japonais de visualisation de données, Ryoji Ikeda. Les artistes de visualisation de données utilisent des algorithmes afin d'extraire d'énormes quantités de données et en faire une représentation esthétique. Comme les scientifiques, ils recherchent des modèles parce que les modèles pour les données représentent leur ADN. Les données sont aussi l'affaire du CERN, son essence vitale, et Ikeda vit et respire dans ce monde. Ses installations utilisent la programmation informatique en temps réel pour représenter une énorme masse de données avec des points de lumière scintillants dans des motifs variés accompagnés d'une bande son hypnotique. Le tout est littéralement à couper le souffle, captant l'excitation des données du monde sous-microscopique recueillies par d'immenses détecteurs.

Le CERN a le prestige qu'il faut pour attirer des artistes de premier ordre qui, à mon avis, devraient être invités et payés pour leurs services, étant donné qu'ils vont produire une œuvre qui reste sur le site. Imaginez cela - une galerie d'art au CERN !

Puisque la recherche au CERN s'efforce de rendre visible l'invisible, des artistes qui se spécialisent dans l'abstraction devraient être sollicités, comme le fameux artiste anglais Keith Tyson, lauréat en 2002 du prestigieux prix Turner. Son travail - peintures et sculptures - englobe des systèmes de génération automatique et embrasse la complexité et l'interdépendance de l'existence. Il n'est donc pas surprenant que le Groupe Théorie du CERN ait été très impressionné par lui lorsqu'il est venu au CERN.

Les scientifiques du CERN sont une élite et devraient interagir avec les meilleurs artistes laissés libres d'aller et venir à leur guise.

Dans mon livre « *Colliding Worlds: How Cutting-Edge Science Has Redefined Contemporary Art* »\*, je parle du programme « *Collide @ CERN* » de manière assez détaillée. Sur la base de plus d'une centaine d'entretiens avec des artistes du 21<sup>ème</sup> siècle, il est apparu que l'art, la science et la technologie tels que nous les connaissons sont en train de disparaître, fusionnant dans ce que j'appelle une troisième culture, une nouvelle avant-garde. Ses adeptes représentent une nouvelle génération d'artistes - artiste, scientifique et technologue réunis. C'est une nouvelle vague d'artistes hybrides qui travaillent dans un secteur de l'art passionnant et controversé, celui associé à l'intelligence artificielle (IA). Le CERN devrait envisager d'inviter cette nouvelle vague d'artistes.

\* plus d'information : [www.arthurimiller.com/](http://www.arthurimiller.com/) [www.collidingworlds.org/](http://www.collidingworlds.org/) ou [a.miller@ucl.ac.uk](mailto:a.miller@ucl.ac.uk)



**“Strings at the horizon of a black hole”** Karen Panman 2014, terre cuite émaillée et cordelettes en plastique



## Science, politique et société

Rolf Heuer

Le progrès est un phénomène complexe en soi mais une chose est sûre, il repose sur la curiosité sans laquelle les êtres humains vivraient encore dans la grande vallée du Rift. Grâce à cette curiosité, l'homme a appris à connaître le monde et à en explorer d'autres. Il a pu observer la nature de notre Univers et améliorer la qualité de vie de façon inimaginable.

Même si cela ne fait que quelques décennies que la science fait partie intégrante de la société et de la culture, nous vivons à une époque dans laquelle la curiosité scientifique touche désormais presque tous les aspects de notre vie. Chacun d'entre nous peut être amené à prendre des décisions basées sur la science mais la communauté scientifique n'accomplit pas son devoir lorsqu'elle ne fournit pas les informations. Si nous, scientifiques, restons cloîtrés dans notre tour d'ivoire, cela signifie que nous ne faisons pas notre travail. La science a la responsabilité d'aider les gens à faire des choix rationnels dans la vie quotidienne.

Celui ou celle qui, comme moi, travaille dans la recherche scientifique financée par des fonds publics, a davantage une obligation morale vis-à-vis du public. Au CERN, nous faisons de la recherche fondamentale afin de connaître l'Univers. De par leurs fonctions, les scientifiques et les ingénieurs développent différentes technologies comme le "World Wide Web", les détecteurs pour les scanners médicaux et les techniques de l'ultra-vide. Toutes ces technologies trouvent leur application dans des secteurs divers comme les capteurs d'énergie solaire ou les accélérateurs de particules utilisés dans les traitements du cancer.

Le savoir est notre raison d'être. Selon mon expérience, la connaissance que nous offrons satisfait un des besoins fondamentaux de l'être humain, celui d'apprendre. La recherche fondamentale nourrit l'esprit. Je tiens à souligner que le public qui nous finance a le droit de savoir ce que nous faisons et si les financements sont investis à bon escient.

Au CERN, ces responsabilités sont prises très au sérieux. Nous avons profité du démarrage de l'accélérateur de particules le plus puissant du monde, le LHC (*Large Hadron Collider*), pour améliorer notre image et toucher un plus large public. Depuis les enfants des écoles primaires jusqu'aux décideurs, en passant par les artistes et les personnes de différentes religions, nous avons instauré des échanges qui font la différence.

Cela constitue mon premier message clé : aujourd'hui plus que jamais, il est vital que la science s'accorde avec la société puisque nous dépendons tous de la science. Notre avenir dépend de la science qui a l'obligation morale de s'engager.

Mon deuxième message clé : il est tout aussi vital que la science soit appliquée en collaboration et non de manière isolée. En Europe, cela fut préconisé après la Seconde Guerre mondiale, par un petit groupe de scientifiques et de diplomates visionnaires qui, en combinant la science à l'éducation, a créé une résonance qui a changé à jamais la vision de science transfrontalière. Le 29 septembre 1954, cette résonance se concrétisa par la création du CERN et l'établissement d'un plan directeur de collaboration scientifique internationale sur le long terme. Les pères fondateurs du CERN ont créé, pour soutenir la science fondamentale, un système stable de financement par le secteur public. Depuis lors, le monde a connu des périodes économiques plus ou moins favorables mais l'application de la science fondamentale a toujours été maintenue au CERN. Si toutes les sciences fondamentales pouvaient être appliquées suivant le modèle du CERN : à l'international, en mode collaboratif et ouvert, avec une structure stable de financement par le secteur public, le progrès serait assuré. Le monde deviendrait peut-être un peu plus résistant à la récession qu'il ne l'est aujourd'hui.

Le CERN est une Organisation européenne fondée sur des principes d'équité pour ses membres et d'ouverture sur le monde. En conséquence, son modèle de gouvernance donne un même pouvoir de décision à tous ses Etats membres, petits ou grands. Son modèle de financement permet aux Etats membres de contribuer selon leurs moyens. Et son modèle de recherche accueille les scientifiques du monde entier qui peuvent contribuer positivement aux programmes de recherche

du Laboratoire. Grâce à ses principes de base, le CERN représente une référence de stabilité de collaboration transfrontalière en Europe, d'engagement coordonné entre l'Europe et le reste du monde et de programme de leadership dans le domaine de la physique des particules. Actuellement, force est de constater que le CERN est indéniablement le pôle d'une communauté mondiale de scientifiques qui repoussent les frontières de la connaissance. Ceci est un brillant exemple de ce que les gens peuvent faire lorsqu'ils travaillent ensemble.

Aujourd'hui, nous devons déployer ce modèle plus largement. La science s'étend de plus en plus et la physique des particules est à l'avant-garde de ce développement. En 2010, il était donc tout à fait naturel que le CERN dépasse les limites de l'Europe, ouvrant ainsi la possibilité d'adhésion ou d'association en tant que membre à tous les Etats, indépendamment de leur situation géographique.

Par conséquent, l'idéal de paix du CERN et de compréhension entre les nations, unifié par le langage universel de la science, est visible dans le monde entier. A cela s'ajoute la joie d'une curiosité humaine partagée et les avantages concrets de l'éducation, de l'innovation et de la collaboration.

Une institution comme le CERN peut jouer un rôle vital dans l'éducation. Commençons par les plus jeunes de nos parties prenantes. Les enquêtes de l'industrie démontrent régulièrement un manque de diplômés en science et en ingénierie. Comment traiter ce problème ? A mon avis, en motivant les plus jeunes. En 2009, les résultats de notre enquête sur l'opinion du CERN dans la région de Genève étaient sans surprise. Nos voisins étaient frileux mais reconnaissaient l'impact économique local d'avoir une grande Organisation intergouvernementale à leur porte. Nous les avons sollicités dans le but d'obtenir une meilleure cohabitation. Parmi les attentes, la principale était de présenter la science dans les classes d'école primaire.

Nous avons donc travaillé avec les institutions scolaires en France et dans le canton suisse de Genève, ainsi qu'avec l'université de Genève, pour élaborer un projet de recherche pour les enfants. Pour faire simple, les élèves ont reçu une boîte scellée, et en adoptant le raisonnement scientifique, aidés de quelques indices, ont dû deviner le contenu sans l'ouvrir. Le projet a été présenté lors de conférences, traduit en plusieurs langues et déployé jusqu'au Mexique. Il est trop tôt pour dire si cela encouragera davantage de jeunes à se tourner vers la science, fournissant un éventail de personnes qualifiées pour l'industrie, mais même si la finalité est simplement d'inciter les enfants à ne pas perdre leur curiosité, alors cela aura été utile.

Abordons à présent la politique, les décideurs, voici mon troisième message clé : il est vital pour la communauté scientifique de s'engager davantage dans les cercles politiques. Combien de fois avons-nous vu les politiciens prendre une mauvaise décision en raison d'un mauvais raisonnement scientifique ? Avec des questions aussi importantes que le changement climatique exigeant une action urgente, il est essentiel que ceux auxquels nous confions la prise de décision puissent bien évaluer les aspects scientifiques. C'est pourquoi, le CERN a demandé et obtenu le statut d'observateur permanent à l'ONU, où nous avons porté un message important aux politiciens : c'est votre mission, en tant que gardiens des deniers publics, de maintenir une base scientifique solide. En fait, c'est précisément ce que l'Europe a réalisé il y a plus de 60 ans avec la création du CERN et, depuis lors, de sept autres Organisations de recherche intergouvernementales européennes de renommée mondiale.

Travailler pour garantir une classe dirigeante scientifiquement alphabétisée et un vivier de diplômés en sciences et en ingénierie, peut être considéré comme un des objectifs clairs pour le CERN, mais qu'en est-il des autres communautés ? Les artistes ? Les personnes des principales religions du monde ? Au cours de mon mandat en tant que Directeur général du CERN, nous avons lancé un programme d'accueil d'artistes qui a déjà vu s'établir des interactions exceptionnelles entre deux éléments apparemment opposés du spectre culturel. Nous constatons que les artistes et les scientifiques ont beaucoup en commun. Ils sont à la fois curieux du monde dans lequel ils vivent, et à la fois très créatifs.

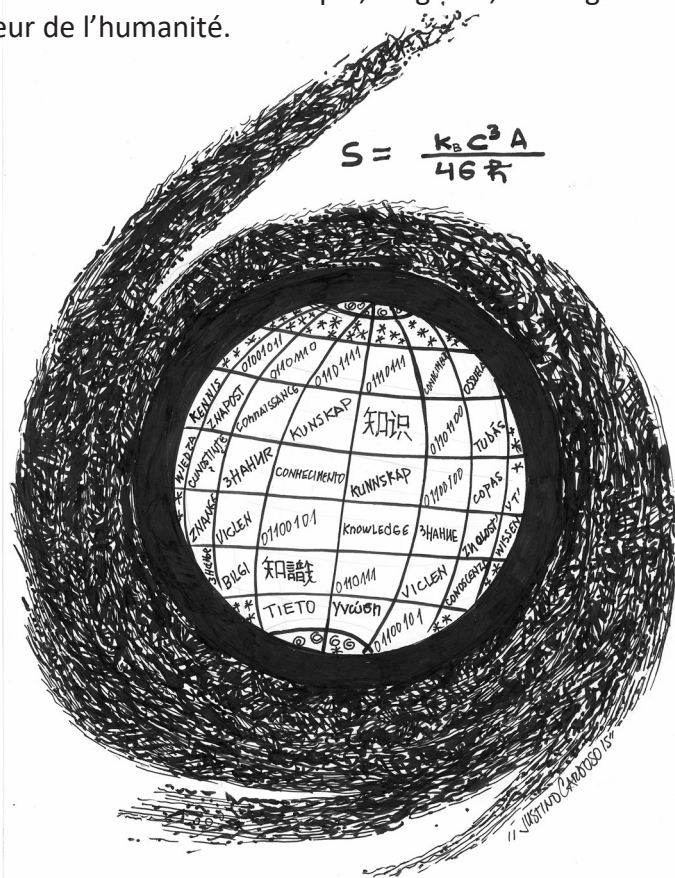
Par exemple, lorsque l'artiste mozambicain Justino Cardoso a produit les œuvres présentées dans ce volume, c'était son premier voyage en dehors de l'Afrique. Il n'avait jamais eu de contact

avec la physique ou les physiciens avant d'arriver au CERN, et la collision entre la créativité artistique et scientifique a donné des résultats remarquables, je suis sûr que vous en conviendrez. S'engager avec les artistes permet au CERN d'atteindre un public que nous ne pourrions vraisemblablement pas cibler. Quand nous avons organisé une performance de danse inspirée par la science au CERN, nous avons attiré des personnes qui autrement ne seraient pas venus dans un laboratoire de physique. De plus, lorsque nous avons programmé une nuit de comédie, pour évoquer un sujet légèrement différent sur l'échelle artistique, plus de la moitié du public nous a avoué n'être jamais venue au CERN auparavant. Mais ces personnes sont maintenant susceptibles d'y revenir.

Et voici mon quatrième message clé : pour la science et pour l'art, nous avons besoin d'un espace ouvert dans la société.

Nous avons besoin de liberté et de confiance pour performer, réfléchir et s'exprimer. La science et l'art ont besoin de tout ça. Tim Berners-Lee, par exemple, a eu la liberté et la confiance nécessaires pour pouvoir développer quelque chose. Cette liberté lui a été donnée par l'institut pour lequel il a travaillé, et ce qu'il a fait a été autant créatif qu'une œuvre d'art. Il aurait pu développer n'importe quoi, mais ce fut le World Wide Web.

Pour conclure : la science a la responsabilité de se rendre accessible au public, de s'engager et d'orienter le débat public sur les enjeux majeurs qui ont un fondement scientifique. La science se doit d'être responsable et de répondre de ses actes, en particulier dès qu'elle est financée par le secteur public. La science a le devoir de respecter les normes éthiques les plus élevées. La science soutient presque tous les aspects de la vie moderne, qu'elle soit économique, sociale, culturelle ou humanitaire. Dans la science, il n'existe pas de discriminations ethnique, de genre, de langue ou de religion. Bref, la science représente le meilleur de l'humanité.

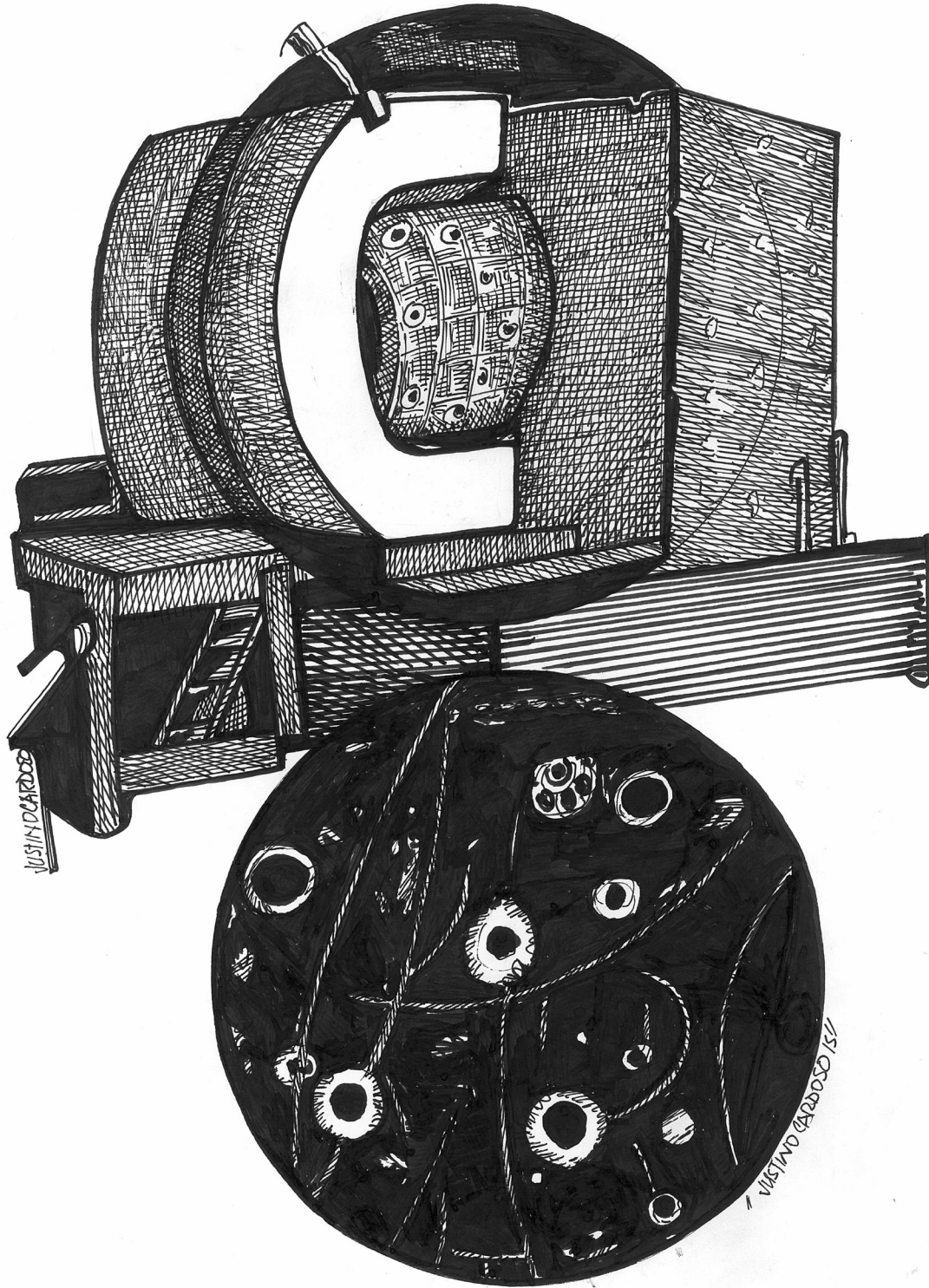


BLACK HOLE ENTROPY

“Knowledge and black holes” Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

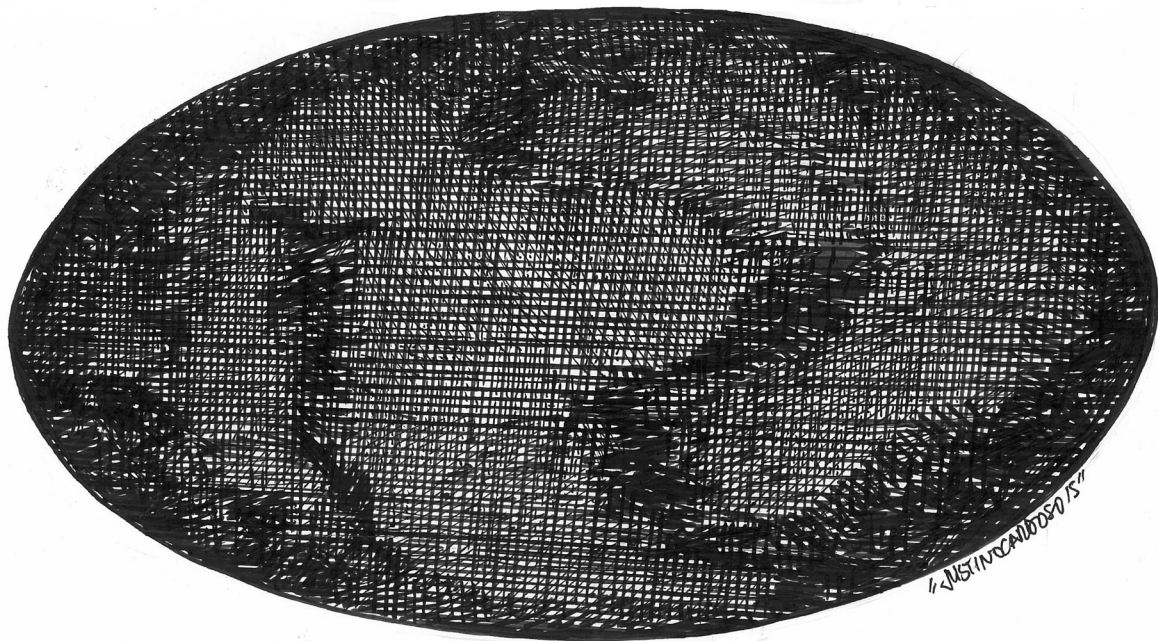
Selon la compréhension actuelle des physiciens sur la nature des trous noirs, l'information est perdue quand la matière tombe dans un trou noir. Mais existe-t-il une façon de récupérer cette connaissance perdue ? (légende de John Ellis)





**“Gargamelle and the neutral currents”** Justino António Cardoso 2015, encre de Chine

*En juillet 1973, une découverte révolutionnaire a été annoncée dans l’Auditorium principal du CERN par André Lagarrigue et ses collègues du groupe Gargamelle : au synchrotron de protons du CERN (PS), ils avaient montré l’existence des courants neutres avec les images fournies par la chambre à bulles Gargamelle. Cette découverte a confirmé la théorie électrofaible. Gargamelle, dont le « corps » se trouve maintenant dans le jardin de Microcosme, était une énorme chambre à bulles d’un poids d’environ 1000 tonnes qui contenait 18 tonnes de fréon liquide.*



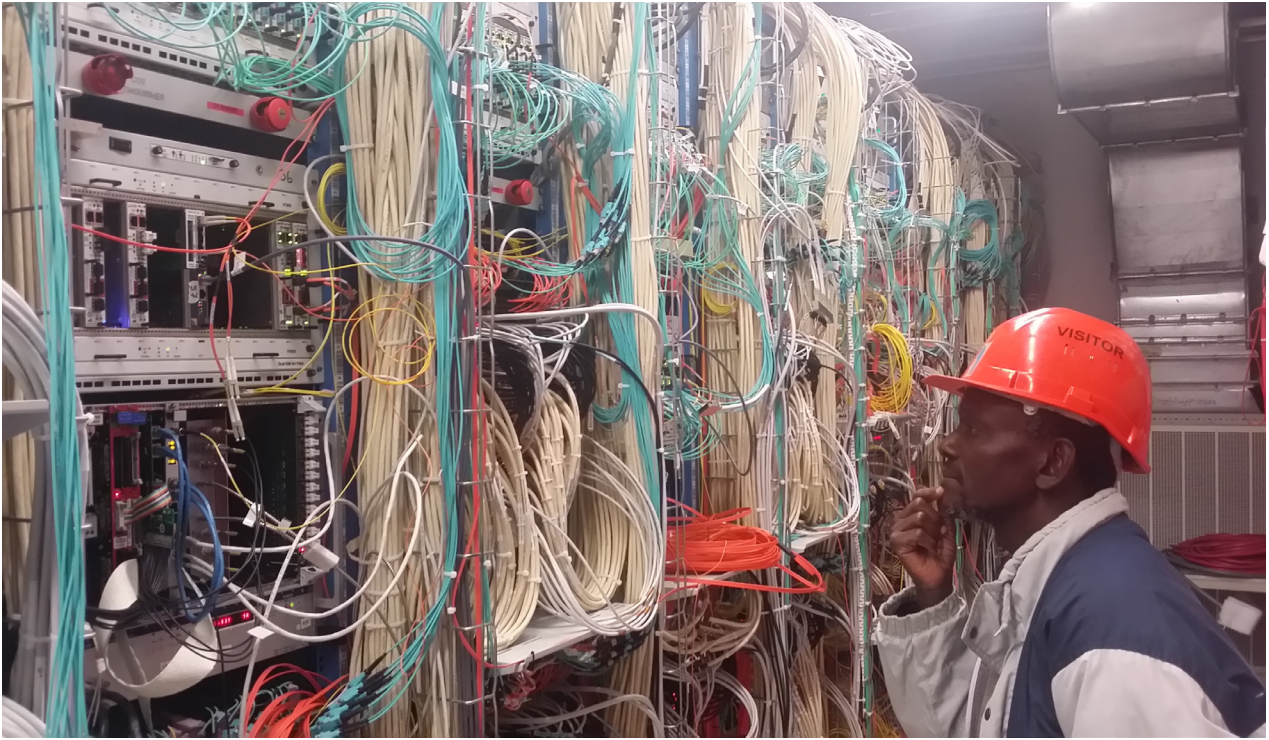
$$I = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

|   |
|---|
| BLACK BODY<br>RADIATION<br><br>RADIAÇÃO DO CORPO<br>NEGRO |
|---|

**"Cosmic radiation"** Justino António Cardoso 2015, *encre de Chine*

*L'Univers est plein d'un rayonnement micro-onde de fond cosmique qui a été émis lorsque l'Univers était très jeune : les irrégularités de rayonnement montrées dans cette carte sont à l'origine de la structure de l'Univers. (légende de John Ellis)*





Justino António Cardoso au CERN en visite à l'expérience CMS (Photo : José Carlos Rasteiro Da Silva)



Justino António Cardoso au CERN avec Sergio Bertolucci et Marilena Streit-Bianchi  
(Photo : Bettina Hamoudi)





Justino António Cardoso avec John Ellis (Photo : Marilena Streit-Bianchi)

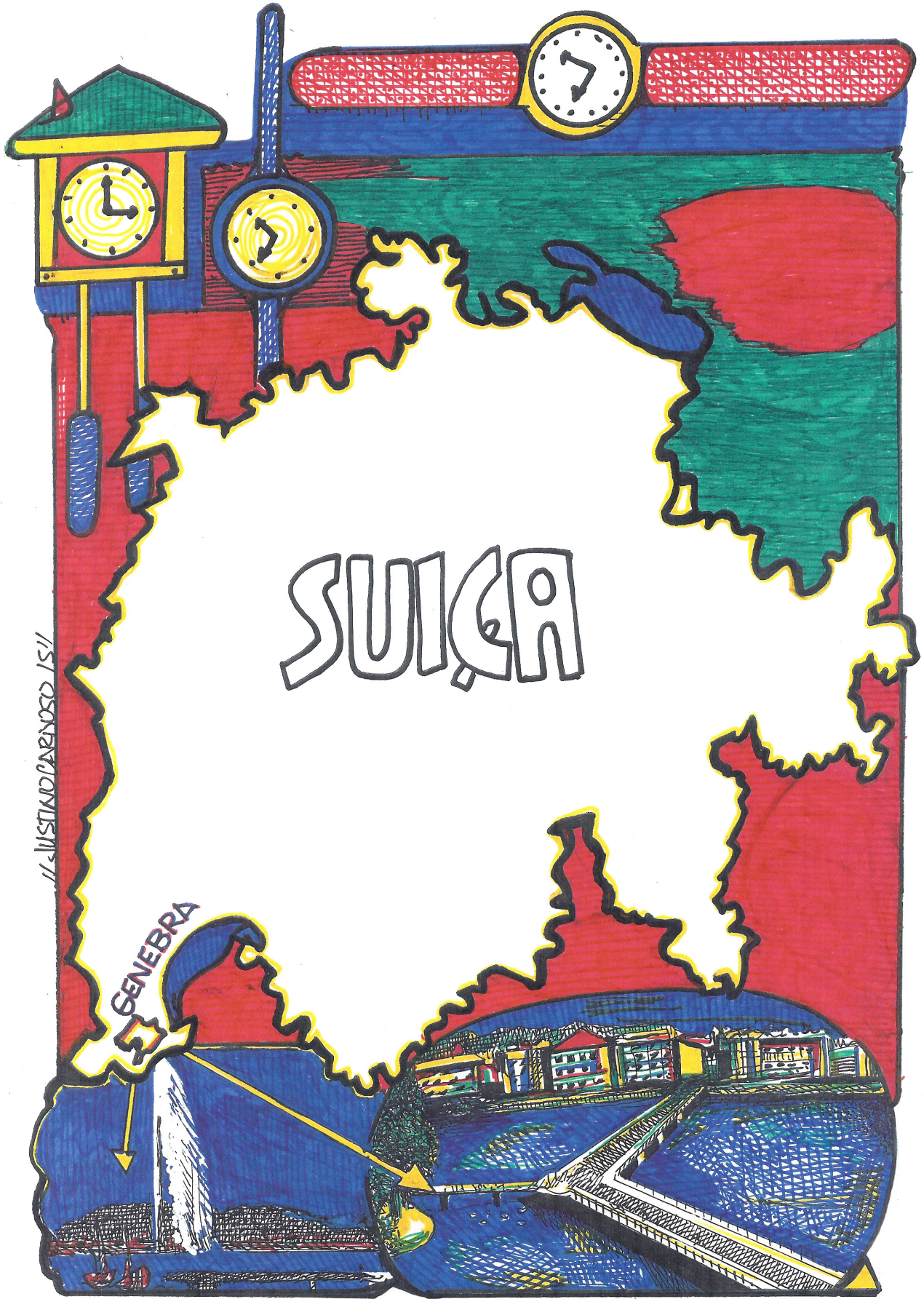


Justino António Cardoso avec João Penedones Fernandes (Photo : Marilena Streit-Bianchi)



Justino António Cardoso avec à sa droite Jack Steinberger, Prix Nobel de Physique en 1988 avec Leon Lederman et Melvin Schwartz, et à sa gauche Jean Michel Laurent, physicien de la collaboration CAST. (Photo : Marilena Streit-Bianchi)





// ILUSTRAÇÃO CARLOS IS //

SUIÇA

GENEVA