

Bruno Touschek Memorial Lectures

1961-2011 From **AdA** to **SuperB**
Anniversary Brochure

Versione italiana
Version française
English version

LAL
Orsay

LNF
Frascati



Bruno Mazoyer - LAL Orsay

LAL
LABORATOIRE
DE L'ACCELERATEUR
LINEAIRE

INFN
Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare
Laboratoire National de Frascati



<http://www.lnf.infn.it/conference/btml2011>

Bruno Touschek Memorial Lectures

AdA the first electron-positron storage ring



COMUNE DI FRASCATI

COMMUNE D'ORSAY

1961-2011 from **AdA** to **SuperB**



Scientific twinning Frascati-Orsay



Speakers

C. Bernardini	Univ. Sapienza, Roma
J. Haïssinski	LAL, Orsay
G. Pancheri	LNF, Frascati
R. Petronzio	Univ. Tor Vergata, Roma
P. Raimondi	LNF, Frascati
G. Salvini	Univ. Sapienza, Roma
A. Skrinsky	BINP, Novosibirsk
A. Stocchi	LAL, Orsay

Thursday December 1st, 2011
10:00 a.m.

Bruno Touschek auditorium

Advisory Committee

C. Bernardini	Univ. Sapienza, Roma
U. Dosselli	LNF, Frascati
M. Greco	Univ. Roma Tre
G. Salvini	Univ. Sapienza, Roma
A. Stocchi	LAL, Orsay

Organizing Committee

N. Arnaud
D. Babusci
R. Bassoli
H. Bilokon (chair)
L. Bonolis
R. Centioni
M. C. D'Amato
G. Pancheri
C. Sciacca



A.d.A.

Secretary: Maria Cristina D'Amato

www.lnf.infn.it/conference/btmi2011

Table des matières

Avant-propos	4
Chap. 1 INFN – LE LABORATOIRE NATIONAL DE FRASCATI	5
Chap. 2 LE LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE	8
Chap. 3 LA VILLE DE FRASCATI	12
Chap. 4 LA VILLE D'ORSAY	15
Chap. 5 AdA & BRUNO TOUSCHEK	18
Chap. 6 AdA À ORSAY	24
Chap. 7 SUPERB	28
Crédits	31

AVANT-PROPOS

Il y a cinquante ans, le premier anneau de stockage électron-positron au monde, l'Anello di Accumulazione (AdA), commençait à fonctionner à Frascati au Laboratoire National de l'INFN. AdA a été conçu par le théoricien autrichien Bruno Touschek, qui en février-mars 1960, a proposé ce projet d'accélérateur novateur qui a été approuvé rapidement par le LNF. Construit en moins d'un an par une équipe d'ingénieurs, de techniciens et de physiciens, dont une partie venait juste de terminer la construction d'un puissant synchrotron à électrons de 1100 MeV, AdA a commencé à fonctionner en février 1961.

Pour célébrer cette réalisation historique, le Laboratoire National de l'INFN de Frascati (en Italie) et le Laboratoire IN2P3/CNRS de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay (en France, là où AdA a fonctionné avec succès comme collisionneur pour la première fois), organisent conjointement le 1er décembre 2011 à Frascati, une conférence intitulée « From AdA to SuperB ». Ce sera un événement spécial dans le cadre de la série d'événements « Bruno Touschek Memorial Lectures ».

La conférence comporte deux parties : la première, dirigée vers la communauté scientifique, est consacrée à l'histoire des collisions électron-positron et au nouveau projet SuperB ; la seconde, organisée aux Ecuries de la Villa Aldobrandini à Frascati, commencera par un séminaire grand public sur SuperB. Puis les maires de Frascati et d'Orsay jetteront les bases d'un jumelage scientifique entre les deux villes.

Le Directeur du Laboratoire INFN de Frascati

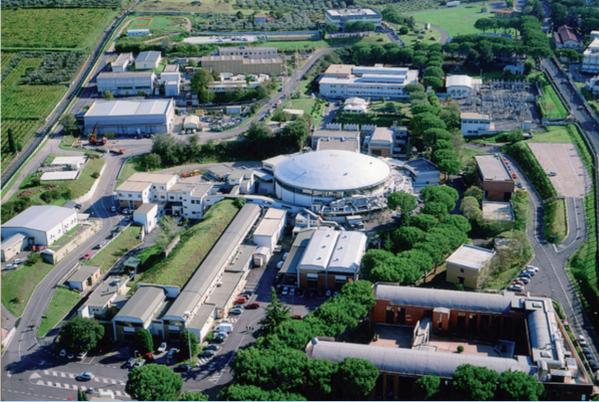
Umberto Dosselli

Le Directeur du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

Achille Stocchi

CHAPITRE 1

INFN – LE LABORATOIRE NATIONAL DE FRASCATI



Vue aérienne du LNF.

Le Laboratoire National de Frascati (LNF) a été le premier organisme de recherche créé en Italie pour étudier la physique nucléaire et subnucléaire avec des accélérateurs. Aujourd’hui, il constitue le plus grand laboratoire de l’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), l’organisme qui promeut, coordonne et finance la recherche publique, dans le domaine de la physique nucléaire et subnucléaire.

La construction du LNF remonte à 1955, une période de grands bouleversements pour la physique des particules. Au cours des décennies précédentes, les physiciens avaient étudié la structure et les transformations des noyaux et ils commençaient juste à découvrir la nature de leurs composants. De plus, les expériences sur les rayons cosmiques avaient montré l’existence de nouvelles particules, absentes de la matière ordinaire. L’INFN confia au LNF la tâche de construire des accélérateurs de particules capables de sonder les constituants des noyaux et de produire ces nouvelles formes de matière en laboratoire.

Depuis, le LNF a été un acteur majeur dans tous les secteurs de recherche de l’INFN : la physique des accélérateurs, la physique nucléaire et subnucléaire,

la physique du rayonnement cosmique et la physique utilisant la lumière synchrotron. Actuellement, le personnel du laboratoire est composé de chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs, pour un total de 348 personnes. Par ailleurs, environ 450 visiteurs italiens et étrangers participent chaque année aux activités scientifiques sur place.

L'atout principal du LNF est sa capacité à construire des accélérateurs de particules. Cette activité a commencé en 1957 avec le Synchrotron de 1100 MeV, la machine la plus puissante de l'époque, puis a continué avec AdA et ADONE pour aboutir à l'actuelle DAΦNE, un vrai succès puisqu'il s'agit de la machine qui détient le record mondial de luminosité instantanée à basse énergie. Actuellement, le LNF accueille en plus SPARC, un laser à électrons libres construit en collaboration avec l'ENEA et le CNR, et FLAME, un laser à très haute puissance utilisé pour étudier des techniques innovantes d'accélération des particules.

Les compétences techniques et scientifiques du Département Accélérateurs du LNF sont uniques en Italie, et rares en Europe ; elles sont une richesse que l'INFN met également au service de la société. Ainsi, en plus de ses activités liées à la recherche fondamentale, le Département Accélérateurs (environ 90 personnes) a participé à la réalisation d'un accélérateur de protons et d'ions carbone pour la thérapie médicale au Centro Nazionale per la Adroterapia Oncologica (CNAO) à Pavie, et à la construction d'un laser à électrons libres pour les rayons X (SPARX), qui sera utilisé pour des études de structure de la matière, en biologie, et en science des matériaux à l'Université de Tor Vergata.

Au côté du Département Accélérateurs, et avec le soutien des Services Techniques et Administratif, on trouve la Division Recherche, composée de 180 employés et associés : des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens engagés dans les activités de recherche à Frascati et dans des collaborations internationales. Au LNF, deux expériences sont actuellement en fonctionnement : KLOE, qui étudie les différences de comportement entre matière et antimatière, et le détecteur d'ondes gravitationnelles NAUTILUS. Le LNF participe également aux expériences en cours au CERN de Genève, au FERMILAB à Chicago, au SLAC à Stanford (Californie), au TJLAB en Virginie, à DESY en Allemagne, ainsi qu'aux laboratoires INFN de Legnaro, du Gran Sasso et du Sud (à Catane). L'étroite collaboration avec ces autres centres de recherche permet une confrontation permanente des chercheurs et des techniciens avec leurs homologues étrangers, confrontation qui est nécessaire et à la base du maintien de la qualité élevée de la recherche en Italie.

La présence d'accélérateurs sur place et les collaborations internationales citées ci-dessus ont beaucoup apporté à l'ensemble du laboratoire, tout en motivant les meilleurs physiciens, ingénieurs et techniciens à venir travailler à Frascati. Grâce à cette richesse culturelle il a été possible de créer des activités complémentaires à la recherche en physique des hautes énergies. Citons par exemple, l'utilisation de la lumière synchrotron émise par les électrons de DAΦNE ; l'utilisation des faisceaux d'électrons, de positrons et de photons, extraits de l'injecteur de DAΦNE ; la recherche en sciences des matériaux ; les applications médicales et spatiales ; le développement de nouveaux détecteurs ; les techniques d'imagerie ; le développement d'optiques pour les rayons X ; la dosimétrie des radiations et le contrôle de l'environnement ; la gestion de réseaux informatiques ; enfin la construction de centres de calcul avancé.

De plus, depuis des années, le LNF est actif dans le domaine de la vulgarisation de la culture scientifique avec des programmes d'éducation conçus pour les établissements scolaires et le grand public : visites guidées des expériences ; stages pour les étudiants ; « Incontri di Fisica » (« Rencontres avec la Physique ») pour les enseignants du secondaire auxquelles s'ajoutent des cours, séminaires, ou encore rencontres avec les auteurs d'ouvrages de vulgarisation scientifique. Ces activités sont organisées au LNF ainsi que dans les écoles et les institutions scientifiques à l'échelle nationale.



Vue d'ensemble de l'accélérateur DAΦNE.

CHAPITRE 2

LE LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE



Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) est un gros laboratoire de recherche fondamentale centré sur la physique « des deux infinis » : d'un côté l'étude des composants ultimes de la matière, les particules élémentaires ; de l'autre, la cosmologie avec l'histoire, la composition et l'évolution de l'Univers. Comme son nom l'indique, le LAL est depuis sa fondation en 1956 étroitement lié aux accélérateurs de particules, tant sur le plan de la physique qu'au niveau des développements technologiques associés.



Entrée du LAL.

Le LAL est une unité mixte de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Paris-Sud. Les physiciens du laboratoire sont donc soit des chercheurs du CNRS, soit des enseignants-chercheurs. De façon générale, le LAL est très impliqué dans les activités d'enseignement à tous les niveaux – licences, masters, écoles d'ingénieurs – et une dizaine d'étudiants y débutent une thèse chaque année. En plus de la recherche, le LAL s'investit beaucoup dans les activités de vulgarisation qui s'adressent aux scolaires et aux étudiants, à leurs professeurs ainsi qu'au grand public. Deux exemples : la revue *Élémentaire* (<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr>) dont le comité de rédaction était formé en majorité de personnels du LAL et le partenariat de longue date

du laboratoire avec l'association Sciences-ACO (<http://www.sciencesaco.fr>) dont la mission principale est de faire visiter l'Anneau de Collisions d'Orsay (ACO), un ancien accélérateur du LAL maintenu en l'état et inscrit à l'inventaire supplémentaire des Monuments Historiques.

Le LAL compte environ 120 chercheurs répartis en une douzaine de groupes. Les équipes les plus nombreuses travaillent sur ATLAS et LHCb, deux expériences du LHC (au CERN en Suisse). Comme toujours, les contributions du LAL vont des développements techniques (design, construction, mise en service et maintenance de détecteurs) aux analyses de physique les plus pointues. Côté cosmologie, l'expérience phare est actuellement le satellite Planck, lancé au printemps 2009 et qui a balayé plusieurs fois l'ensemble du ciel pour mesurer les caractéristiques du rayonnement de fond diffus cosmologique, émis 300 000 ans après le Big Bang lorsque l'Univers est devenu transparent. Après avoir contribué à l'ordinateur de bord du satellite ainsi qu'au détecteur HFI, l'équipe du laboratoire se concentre maintenant sur l'extraction des résultats de physique qui seront publiés dans les prochains mois. Au-delà du CERN et de l'espace, le LAL est présent dans de nombreux grands projets internationaux : les expériences DØ et BaBar aux Etats-Unis ; l'observatoire Pierre Auger en Argentine ; les détecteurs NEMO successifs au laboratoire souterrain de Modane (dans le tunnel du Fréjus) ; l'interféromètre géant Virgo pour la détection directe d'ondes gravitationnelles en Italie ; la recherche de matière noire et d'énergie noire avec LSST ou BAO-radio. Le LAL prépare également le futur avec des développements pour le programme d'amélioration des détecteurs du LHC, le futur collisionneur linéaire, l'expérience JEM-EUSO sur la station spatiale internationale et le projet SuperB d'usine à saveurs de nouvelle génération en Italie.

Si le grand accélérateur linéaire qui a donné son nom au laboratoire a été arrêté fin 2004 puis démantelé, l'engagement du LAL dans le domaine des accélérateurs de particules est toujours resté important. Aujourd'hui, le LAL achève la construction d'un accélérateur d'électrons de 10 MeV, PHIL, dont les activités de R&D permettront le développement des injecteurs de demain. PHIL sera également ouvert à une large communauté d'utilisateurs qui pourront y réaliser des expériences sur faisceau. De plus, le LAL a la responsabilité de la fabrication et du conditionnement des 640 coupleurs du laser à électrons libres de nouvelle génération XFEL qui sera construit à DESY en Allemagne. Ce marché de plusieurs millions d'euros nécessite un partenariat fort entre le laboratoire et des industriels comme Thales. D'autre part, le LAL a lancé

la construction d'une source compacte de rayons X innovante, ThomX, qui fournira des faisceaux dans un bâtiment proche du laboratoire. Cet équipement d'excellence (labellisé EQUIPEX mi-2011) aura de nombreuses applications, du médical à l'étude non-invasive d'œuvres d'art. De par sa taille réduite et son coût relativement modique, ThomX est susceptible d'intéresser de nombreux laboratoires ou industriels dans le monde. Des activités plus fondamentales sont également en cours, comme par exemple la mise au point de faisceaux d'émission record avec la ligne ATF-2 au Japon.

Les succès du laboratoire reposent en premier lieu sur des services techniques et administratifs de grande qualité, regroupant au total 200 ingénieurs et techniciens. Les services électronique, mécanique, informatique et études et réalisations d'accélérateurs développent, réalisent, installent et maintiennent des éléments essentiels des expériences dans lesquelles le LAL est engagé, à la fois localement et dans les plus grands laboratoires du monde. Les services du personnel, financier, missions ou encore infrastructure et logistique, gèrent le personnel du laboratoire et permettent la réalisation dans les meilleures conditions de tous les projets du LAL.

L'histoire du LAL est très riche, comme l'ont montré les festivités à l'occasion du cinquantenaire du laboratoire en 2006. Construit sous l'impulsion du professeur Yves Rocard du laboratoire de physique de l'Ecole Normale Supérieure autour d'un grand accélérateur linéaire à la pointe des technologies de l'époque, le LAL a obtenu ses premiers succès dès le début des années 1960. Citons en particulier l'observation des premières collisions électron-positron en 1963 dans l'anneau AdA – construit au laboratoire INFN de Frascati (Rome) et transporté à Orsay pour bénéficier de l'injecteur du LAL – et le démarrage de l'Anneau de Collisions d'Orsay (ACO) en 1965. Après avoir permis des mesures très importantes en physique des particules, ACO puis Super-ACO verront les débuts de l'utilisation du rayonnement synchrotron dans de nombreuses expériences de physique (science des matériaux, observation de réactions chimiques, etc.). Le Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique naîtra ainsi du LAL en 1973 et en deviendra indépendant en 1985. Aujourd'hui, le LURE est devenu le synchrotron SOLEIL sur le plateau de Saclay, une source de lumière de troisième génération extrêmement performante.

Jusqu'au début des années 1970, le LAL a réalisé des expériences locales sur des anneaux de collisions alimentés par le grand accélérateur linéaire dont l'énergie maximale était de 2,3 GeV. La série s'est close avec le détecteur DM-2

sur le collisionneur DCI (« Dispositif de Collisions dans l'Igloo »). En parallèle se sont développées des collaborations sur des expériences extérieures, en premier lieu au CERN. Ainsi, le LAL a activement participé à l'expérience Gargamelle sous l'impulsion de son directeur, André Lagarrigue. Plus d'un million de clichés d'événements furent réalisés dans cette chambre à bulles ; quelques-uns permirent en 1973 la découverte des « courants neutres », une prédiction essentielle du Modèle Standard électrofaible. Le partenariat avec le CERN s'est intensifié dans les années 1980-1990 avec la découverte des bosons W et Z (expérience UA2 sur le collisionneur proton-antiproton $S\bar{p}\bar{p}S$) suivie des mesures précises de leurs caractéristiques et de leurs propriétés (expériences ALEPH et DELPHI sur le collisionneur électron-positron au LEP). Aujourd'hui, l'engagement du LAL envers le CERN est illustré par son implication dans les expériences ATLAS et LHCb sur le LHC.

L'histoire du LAL est donc une grande aventure ponctuée de nombreuses réussites sur les plans scientifique, technique, et humain. Bien loin de se reposer sur son passé, le laboratoire est pleinement impliqué dans les grands défis actuels : recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard, compréhension des lois qui gouvernent l'Univers et études de ses caractéristiques, applications sociétales issues de recherches fondamentales, etc. Il se prépare ainsi un futur prometteur, riche de découvertes et d'avancées scientifiques, fondamentales comme appliquées.



Le photoinjecteur PHIL.

CHAPITRE 3

LA VILLE DE FRASCATI



Commune de Frascati : province de Rome

La ville de Frascati est située dans une zone qui était occupée à l'époque de la Rome antique par des villas – en particulier celle de Cicéron – et sur l'emplacement des faubourgs de l'ancienne ville latine de Tusculum. Considérée comme la perle des Châteaux Romains (« Castelli Romani »), pour sa magnifique position géographique et aussi pour ses particularités archéologiques, historiques, artistiques et environnementales, Frascati – dont le nom est cité pour la première fois dans le Liber Pontificalis vers le milieu du IXe siècle – acquit de l'importance après la destruction de Tuscolo, en 1191. Après différentes péripéties qui eurent comme personnages principaux Cola di Rienzo, le pape Pie II Piccolomini – qui fit édifier les premiers remparts de la ville –, le cardinal Guillaume d'Estouteville, Lucrece Borgia, Lucrece della Rovere et Marcantonio Colonna, Frascati devint propriété de la famille Farnese et en 1538 le pape Paul III Farnese lui décerna le titre de cité (« civitas »).

À partir de la deuxième moitié du XVIe siècle, certains des personnages les plus importants de la Chambre Apostolique y firent édifier leur résidences, de belles demeures avec une fonction de représentation : les villas Aldobrandini, Tuscolana (La Rufinella), Lancellotti et Falconieri. Elles sont décorées des œuvres des meilleurs architectes et artistes de l'époque, comme Le Bernin, Borromini, Della Porta, Maderno, le Cavalier d'Arpin, Le Dominiquin et Pier Leone Ghezzi. Grâce à ces splendeurs, Frascati a représenté une étape obligée des voyageurs du « Grand Tour » au XVIIIe siècle et dans la première moitié du XIXe siècle ; et les œuvres d'artistes tels que Gaspar van Wittel, Robert Hubert, Charles de Chatillon ou Claude Lorrain permettent encore aujourd'hui de mesurer l'attrait de cette ville sur les grandes personnages qui l'ont visité. Les écrits de Goethe, Scott, Stendhal, Charles De Brosses, Mark Twain, Erik Ibsen, George Sand ou Emile Zola en témoignent également. En 1856, sous le pontificat de Pie IX, la ligne ferroviaire Rome-Frascati – la première inaugurée dans la région Lazio et l'une des premières en Italie – accroissant ainsi les échanges commerciaux et le

flux de touristes vers la ville. Malheureusement, la deuxième guerre mondiale a représenté une blessure profonde pour Frascati, violemment bombardée par les avions alliés le 8 septembre 1943 à cause de la présence dans la ville du haut commandement allemand du Centre-Sud. La majeure partie du centre ville de Frascati fut alors détruite. L'anniversaire du « Jour de la Mémoire » est célébré chaque année ; ce jour-là, depuis 1999, la Mairie invite des villes martyres de la guerre pour un jumelage de Paix symbolique. Par ordre chronologique, les villes suivantes ont été conviées à participer aux commémorations : Cassino, Marzabotto, Gernica, Hanoi, Mostar, Hiroshima, Sant'Anna di Stazzema, L'Aquila, Sant'Eusanio Forconese, Isernia, Lanciano.



Vue de Frascati.

Après la guerre, une importante reconstruction du tissu urbain a été menée tandis que, à partir des années 1950, s'est développé à Frascati un des plus importants pôles de recherche scientifique en Europe. Dans cette zone se trouvent les laboratoires de l'Institut National de Physique Nucléaire (INFN-LNF) ; des Organismes pour les Nouvelles Technologies, l'Energie et l'Environnement (ENEA) ; l'ESRIN, un centre de l'ESA en Italie ; de nombreux instituts du Conseil National des Recherches (CNR), de l'Institut National d'Astrophysique (OAR, IASF et IFSI) ; ainsi que les centres de calcul de la Banque d'Italie. Actuellement, Frascati est jumelée avec Saint-Cloud, Bad Godesberg, Kortrijk et Windsor & Maidenhead.

Depuis la fin des années 1990, de nombreuses actions publiques ont été réalisées dont la plus importante a été la rénovation, par Massimiliano Fuksas, des Écuries Aldobrandini du XVII^e siècle, transformées en un pôle moderne, culturel et multi-fonction, inauguré le 8 avril 2000. Ces réalisations, qui s'ajoutent aux fascinants sites archéologiques et aux belles demeures Renaissance, font la réputation d'une ville qui ne trouve pas d'égale par son importance historique, la beauté de ses paysages, ses richesses architecturales et sa gastronomie, dont fait partie le fameux vin de Frascati, connu et apprécié partout dans le monde.



Villa Aldobrandini.

CHAPITRE 4

LA VILLE D'ORSAY



Commune d'Orsay : présentation d'Orsay

L'histoire d'Orsay débute sous les Mérovingiens en 754 mais c'est en 999, au moment des guerres féodales, que l'existence du village d'Orsay est mentionnée pour la première fois. La construction de l'église romane dédiée à Saint-Martin commence en 1151. Vers le début du XVe siècle, la famille Raguier entreprend de bâtir un château à Orsay, démoli au cours de l'histoire. Charles Boucher, descendant de la famille, élu Prévôt des marchands de Paris, préside aux travaux d'assainissement du « quai de la Grenouillère » à Paris. En son honneur, Louis XIV donne à ce lieu le nom de quai d'Orsay, qui deviendra plus tard symbole de la diplomatie française. L'actuelle Bouvêche a été construite au XVIIe siècle.



La Bouvêche.

La naissance officielle de la Commune a lieu en 1790. Dès 1815, les progrès sociaux vont s'accélérer pour la ville (création d'un hospice et d'une école pour les plus pauvres) et s'accompagnent de progrès techniques : la ligne de train est prolongée de Bourg-la-Reine à Orsay. En 1873, Orsay s'urbanise et la mairie actuelle est édifiée. En 1901, Orsay compte 1 850 habitants. Dans l'entre-deux-guerres, l'aménagement du territoire et l'urbanisation d'Orsay continuent avec la création de zones pavillonnaires. Ainsi, au fil des siècles, Orsay a su modifier son visage, passant de l'état de simple bourg à celui d'une commune en plein essor.

Aux portes de Paris, et à celles de la vallée de Chevreuse, Orsay bénéficie d'une situation géographique très privilégiée en Île-de-France. Desservie par deux gares RER, un vaste réseau routier et autoroutier et proche de gares TGV et aéroports, elle est pleinement intégrée au dynamisme francilien.

« Ville – village », Orsay compte environ 17 000 habitants sur un territoire de 776 hectares (ha) dont 20 ha d'espaces verts et 60 ha d'espaces boisés classés. La ville est animée par un tissu associatif riche et diversifié avec près de 200 associations. Elle compte six crèches, six écoles maternelles, cinq écoles élémentaires, trois collèges, deux lycées, un Centre Hospitalier. La politique culturelle y est relayée grâce à une salle de spectacle et à un cinéma notamment.



La ville d'Orsay, vue du toit de la Mairie.

Orsay est membre de la Communauté d'Agglomérations du Plateau de Saclay (CAPS) qui regroupe 10 communes et représente au total 100 000 habitants, 4 000 entreprises et 13 zones d'activités économiques. L'enjeu de cette Communauté d'Agglomérations est de maximiser la qualité du service rendu à tous et de mutualiser des moyens pour gagner en efficacité à moindre coût (mise en réseau des bibliothèques et médiathèques, transfert de la voirie). La vie économique locale est très riche. Plus de 600 sociétés, commerces, artisans et professions libérales exercent leur activité à Orsay.

La faculté des Sciences occupe 236 hectares du campus d'Orsay, sur un site exceptionnel de 136 ha de bois contenant des espèces rares classées et un jardin botanique. Elle accueille plus de 9 500 étudiants, 1 500 enseignants et chercheurs, 1 650 personnels administratifs et techniciens ainsi que 1 500 thésards. La formation et la recherche couvrent la biologie, la chimie,

l'informatique, les mathématiques, la physique et les sciences de la Terre et de l'Univers.

C'est en 1954 que des terrains sont recherchés dans la vallée de Chevreuse pour permettre l'extension de l'Institut du Radium dirigé par Irène Joliot-Curie. L'indépendance de la faculté des sciences d'Orsay est reconnue en 1965. Actuellement, plus de 120 laboratoires y mènent à des recherches couvrant les principales spécialités de la science actuelle. L'implantation du campus sur le territoire d'Orsay, à proximité du CEA de Saclay et des laboratoires du CNRS, a drainé vers la région de nombreux établissements (instituts, laboratoires, Grandes Ecoles, etc.) qui ont renforcé la vocation universitaire et scientifique du plateau de Saclay et de la Vallée de l'Yvette.

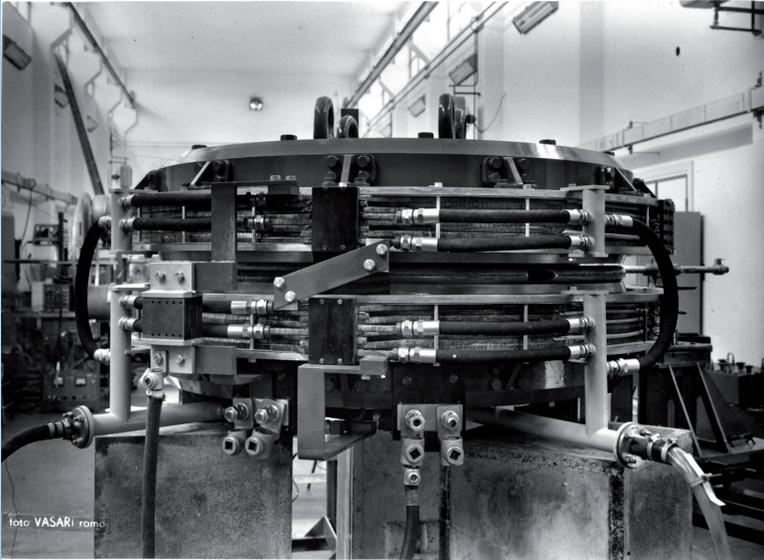
A la croisée de Paris, de la vallée de Chevreuse, et en plein cluster scientifique, Orsay est par définition une ville ouverte. Ouverte sur l'Europe et soucieuse de développer ses relations internationales, Orsay a mis en place des liens privilégiés avec trois communes : Kempen (Allemagne), Vila Nova de Paiva (Portugal) et Dogondoutchi (Niger). Deux jumelages européens et une coopération décentralisée avec l'Afrique pour s'ouvrir aux autres, interagir, mutualiser et s'enrichir de toutes les cultures.



Mairie d'Orsay.

CHAPITRE 5

AdA ET BRUNO TOUSCHEK



AdA.

En 1960, au LNF, le physicien Bruno Touschek proposa de réaliser un prototype d'accélérateur totalement novateur : AdA, un anneau de stockage où électrons et positrons circuleraient en sens contraires dans le même tube à vide et entreraient en collision des centaines de millions de fois par seconde. À côté des nouvelles possibilités offertes par l'étude des processus d'annihilation matière-antimatière, un collisionneur a l'avantage de rendre l'énergie totale des deux faisceaux disponible pour la création de nouvelles particules, à travers un processus de conversion basé sur l'équivalence masse-énergie résumée par l'équation d'Einstein $E=mc^2$. La proposition de Touschek soulignait l'avantage « cinématique » offert par des collisions dans le centre de masse, poursuivant ainsi une idée de Rolf Widerøe datant de 1943 – idée dont Widerøe avait parlé à Touschek et qu'il protégea même plus tard par un brevet.

A la fin des années 1950, les scientifiques américains cherchaient à obtenir des collisions dans le centre de masse, au repos avant et pendant celles-ci, via le projet Princeton-Stanford d'anneaux d'électrons tangents. Ce concept était novateur

par rapport aux accélérateurs traditionnels où un seul faisceau est utilisé pour heurter une cible fixe et où une bonne partie de l'énergie initiale est consommée par le mouvement du centre de masse. Toutefois, l'idée de Touschek de produire des collisions particule-antiparticule dans leur centre de masse représentait un progrès fondamental par rapport au projet américain, qui ne donnait accès qu'à une partie des états finaux physiques. On peut « sentir » cet effet dont l'origine est purement quantique en remarquant qu'un état initial composé de deux électrons a une charge électrique négative double qui doit être conservée lors du processus de collision. Au contraire, la charge électrique totale est nulle dans le cas d'une collision électron-positron et la Mécanique Quantique permet alors d'atteindre plus d'états finaux, équilibrés entre matière et antimatière.

Sous la direction de Bruno Touschek, une petite équipe composée de Carlo Bernardini, Giorgio Ghigo et Gianfranco Corazza se lança dans le projet AdA et démarra sa construction. La structure de AdA consistait en une chambre à vide toroïdale de 160 cm de diamètre, intégrée dans un aimant de 8,5 tonnes dont la fonction était de maintenir sur une trajectoire circulaire des faisceaux d'énergie pouvant atteindre 200 MeV. Giancarlo Sacerdoti était en charge de l'aimant et Mario Puglisi (assisté par Antonio Massarotti et Dino Fabiani) s'occupait de la cavité radiofréquence, nécessaire pour maintenir l'énergie des faisceaux de particules. Giuseppe Di Giugno et Ruggero Querzoli rejoignirent plus tard l'équipe d'origine.

Le 27 février 1961, les premiers électrons circulèrent dans AdA. Le défi à relever fut d'assurer au faisceau une durée de vie suffisante sur de longues périodes. Pour cela, un vide extrême, bien meilleur que les niveaux accessibles avec les connaissances technologiques de l'époque, était nécessaire dans AdA. C'est Gianfranco Corazza qui atteignit cet objectif. De plus, à l'époque, personne n'avait encore produit ni stocké de faisceau de positrons et la possibilité de faire entrer en collision ces particules avec des électrons circulant sur la même trajectoire circulaire mais en sens opposé était loin d'être assurée. Des études préliminaires, menées plus tard après le transfert d'AdA à Orsay, mirent en évidence de nouvelles propriétés de physique des accélérateurs, en particulier au niveau des interactions entre les particules d'un même faisceau. On découvrit en particulier que la durée de vie d'un faisceau diminue avec l'augmentation de la densité spatiale de particules. Touschek comprit que ce phénomène (connu aujourd'hui sous le nom d'effet Touschek) était dû aux interactions entre particules voisines, lesquelles perdaient de l'énergie et finissaient par être expulsées du faisceau. Des techniques de contrôle des

faisceaux basées sur des modulations de champs électromagnétiques furent mises au point pour limiter cette perte.

Ada prouva qu'il était possible de stocker des électrons et des positrons dans un anneau pendant des heures, mais il ne fut pas possible d'observer des réactions d'annihilation avec production de nouvelles particules. Toutefois, la preuve finale de la réalité des collisions entre faisceaux fut fournie par l'observation de la production de photons lors des interactions électron-positron. C'est sur ce résultat que se termina l'expérience AdA au printemps 1964. A cette époque, le projet de construire un anneau plus grand d'énergie 1 500 MeV, ADONE, avait déjà été approuvé. ADONE entra en service au LNF en 1967.

Vue d'AdA.



Ada eut une vie scientifique courte, mais il représente une étape importante dans l'histoire de la science. De nombreux collisionneurs électron-positrons furent construits après AdA. Cette configuration devint un des principaux outils d'étude en physique des hautes énergies. Son utilisation atteint un sommet à la fin des années 1980 avec le LEP, le plus grand collisionneur électron-positron au monde, construit au CERN dans un tunnel souterrain de 27 km de circonférence et qui fut un instrument scientifique de grande précision qui confirma l'existence de trois familles de quarks et de leptons.

Le concept de collisions matière-antimatière a également conduit aux collisions quark-antiquark provoquées dans des collisionneurs proton-antiproton ainsi qu'aux collisions proton-proton dans le Grand Collisionneur à Hadrons (LHC) du CERN actuellement en fonctionnement. Avec le LHC, une machine dont l'énergie par faisceau atteindra au final 7 TeV, les physiciens

espèrent obtenir des avancées dans différents domaines, dont la recherche du boson de Higgs et celle d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard, comme les particules supersymétriques.

Qui était Bruno Touschek ?

Bruno Touschek a été l'un des plus importants physiciens de la deuxième moitié du XXe siècle. Il a utilisé sa connaissance de la physique théorique et l'expérience acquise en Allemagne avec Widerøe pour concevoir, proposer et construire le premier collisionneur matière-antimatière au monde et ainsi améliorer notre connaissance du monde dans lequel nous vivons.

Né à Vienne en 1921, étudiant brillant, Touschek se trouva en grande difficulté après l'annexion de l'Autriche par l'Allemagne en mars 1938 à cause de l'origine juive de sa mère. Il réussit néanmoins à obtenir son baccalauréat et à s'inscrire à l'Université, mais il dut de nouveau interrompre son cursus à cause de questions raciales. Grâce à des amis il put continuer ses études à Hambourg où personne ne connaissait ses origines. Là-bas, il dut exercer plusieurs métiers en complément de sa scolarité afin de survivre.

En 1943, il fut invité par Widerøe à participer à la construction d'un béatatron. De 1943 à 1945, Touschek rédigea et collabora à de nombreuses publications en physique des accélérateurs de particules, et il déposa également des brevets.

Quand Touschek fut arrêté par la Gestapo en mars 1945, Widerøe alla lui rendre visite en prison, lui amenant de la nourriture, des livres et des cigarettes. Après avoir miraculeusement échappé à la mort pendant un transfert vers le camp de concentration de Kiel, Touschek réussit à obtenir le diplôme de l'université de Gottingen et commença à travailler à l'institut Max Planck.

En février 1947, il déménagea à Glasgow où il avait obtenu une bourse d'études au Département des Recherches Scientifiques et Industrielles, où il travailla avec un autre grand expert en accélérateur, Philip I. Dee. En 1949, après avoir soutenu sa thèse de doctorat, il fut nommé maître de conférence à l'Université de Glasgow, et il conserva ce poste jusqu'en 1952 quand il déménagea à Rome où habitait une des ses tantes maternelles, Adele, dont le diminutif était "Ada". Il commença alors à fréquenter la communauté scientifique romaine et, quand il obtint un poste de chercheur à l'Institut national de Physique Nucleaire, il décida de rester définitivement en Italie. Trois ans plus tard, il revint à Glasgow pour épouser Elspeth Yonge, la fille d'un professeur de zoologie très connu à l'Université de Glasgow qui lui donna deux enfants.

Depuis l'automne 1959, Touschek insistait sur l'importance de l'exploration de la physique des processus d'annihilation électron-positron. Les discussions en cours à Rome et à Frascati sur les développements concrets de la physique e^+e^- avaient inspiré des articles scientifiques, écrits par Laurie Brown et Francesco Calogero ou Raoul Gatto et Nicola Cabibbo. Le 7 mars 1960, Touschek donna une conférence au Laboratoire National de Frascati dans laquelle il détaillait pour la première fois un plan d'étude systématique des collisions électron-positron et la manière d'obtenir ces dernières en utilisant un seul anneau magnétique dans lequel des paquets d'électrons et de positrons circuleraient avec la même énergie mais en direction opposée. En moins d'un an, Touschek et ses collaborateurs réalisèrent le prototype de l'accélérateur matière-antimatière AdA (Anello di Accumulazione). Par une heureuse coïncidence, le nom de la machine était le même que le diminutif de la tante de Touschek, Adele (Ada), à laquelle Touschek était très attaché depuis ses premières visites en Italie, dans les années 1930.



Bruno Touschek.

Quelle fut l'idée de Touschek ?

Le génie de Bruno Touschek fut non seulement de concevoir AdA et de comprendre comment construire ce collisionneur, mais aussi de proposer son idée au bon moment et dans un lieu approprié. Le synchrotron de Frascati venait juste d'être terminé et la réalisation de ce projet avait nécessité de grands efforts scientifiques, technologiques et organisationnels. Le laboratoire, les chercheurs et les techniciens étaient donc déjà disponibles. De plus, à cette période, on cherchait partout dans le monde de nouvelles technologies capable d'atteindre des énergies plus élevées que celles offertes par les accélérateurs traditionnels. Ainsi, la communauté scientifique était prête à accueillir l'idée de Touschek.

L'histoire de la physique subnucléaire depuis les années 1960 montre clairement comment l'étude des collisions électron-positron de haute énergie a été l'un des principaux outils pour l'étude de la structure intime de la matière, confirmant les attentes de Bruno Touschek au niveau de la richesse des interactions électron-positron dans tous les nouveaux domaines d'énergie.

AdA représente une étape importante dans l'histoire de la science et marque les débuts de l'un des outils les plus performants pour repousser les frontières de l'infiniment petit. Après sa mise en route en 1961, AdA fut transférée à Orsay, en France, où l'Accélérateur Linéaire démontra qu'il était l'injecteur électron-positron idéal pour améliorer la luminosité de AdA, permettant ainsi de nombreux progrès en physique des anneaux de stockage, en particulier la découverte de l'effet Touschek.

Plus tard, Touschek suivit avec un grand intérêt les phases de conception et construction d'ADONE (1965-1967), étudiant en particulier la physique des faisceaux.

Bon dessinateur, Touschek réussit à croquer le monde académique de son époque avec beaucoup d'ironie : « Bruno avait un don naturel pour les caricatures, qu'il dessinait avec un stylo sur le premier papier qu'il trouvait, lors de sessions d'examens à l'Université, ou pendant les réunions ou les discussions de travail ; ces caricatures mettent en scène les activités de l'INFN ou du Laboratoire de Frascati » (Edoardo Amaldi).



Caricature de Bruno Touschek représentant le physicien T. D. Lee, prix Nobel de Physique 1957 pour la découverte de la violation de la parité dans les interactions faibles.

CHAPITRE 6

AdA À ORSAY



Vue de l'injecteur de l'accélérateur linéaire d'Orsay (Archives du LAL, Orsay).

Au début de l'été 1962, AdA fut transféré en France, au LAL, le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) à Orsay, près de Paris, où un accélérateur linéaire de haute intensité, le LINAC, était disponible. Ce déménagement permit d'obtenir la première preuve expérimentale de collisions électron-positron dans un anneau de stockage, ouvrant ainsi la voie vers une nouvelle ère en physique de l'infiniment petit.

Tout avait commencé par une visite de Pierre Marin (1927-2002) au LNF. Après un séjour au CERN, Pierre Marin, qui joua plus tard un rôle de premier plan dans la contribution française aux constructions d'accélérateurs dans l'Europe de l'après-guerre – en particulier avec la machine ACO – était en train de réfléchir à l'orientation de ses recherches lorsque quelqu'un lui dit qu'à Frascati « [il] se passait des choses qui intriguaient les esprits ». Pendant l'été 1961, Pierre Marin séjourna à Frascati et comprit que AdA était « un vrai bijou ». Le 19 septembre 1961, il rédigea un rapport sur sa visite dans lequel il envisageait une collaboration entre Frascati et Orsay.

La visite de Marin fut suivie par des échanges de lettres entre Frascati et Orsay. Le 22 décembre 1961, André Blanc-Lapierre, le directeur du LAL, écrivit à Italo Federico Quercia, directeur du Laboratoire de Frascati, que des études préliminaires en vue de construire un anneau de stockage pour électrons et positrons de 1,3 GeV avaient commencé et proposa une visite de scientifiques français d'Orsay très prochainement. François Fer, Pierre Marin et Boris Milman se rendirent ainsi à Frascati début 1962. Pendant leurs discussions avec Carlo Bernardini et Bruno Touschek, l'idée de déplacer AdA à Orsay et d'obtenir une luminosité plus élevée grâce à la haute intensité du LINAC d'Orsay, se concrétisa. Au début du mois d'avril, la décision de déménager AdA au LAL fut prise et son transfert à Orsay organisé.

Début juillet 1962, AdA fut emballé sur un gros camion qui devait traverser les Alpes avec un tube à vide complètement pompé et des batteries qui pouvaient alimenter les pompes pendant trois jours : à cette époque, des mois étaient nécessaires pour obtenir le vide extrême demandé par AdA et on ne pouvait pas perdre un temps précieux à le reproduire de nouveau en partant de la pression atmosphérique une fois arrivé au LAL.

June 28th, 1962
2015/S.

Prof. F. PERRIN
Haute Commissaire à
l'Énergie Atomique
69, rue de Varenne
P A R I S

Dear Professor Perrin,

I enclose a list of material for the second convoy Frascati-Orsay, which will presumably leave Rome on the 4th of July and should arrive in Paris on the 7th.

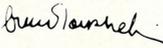
We very much hope that there will be no difficulties at the customs but, in case of emergency, we would much appreciate the help so kindly offered by you to Prof. E. Amaldi.

The present operation is most critical since it contains the vacuum chamber at 5×10^{-10} mm. The ideal solution would be if some competent official at the Modane customs office could be informed before hand.

I will take the liberty of wiring you the exact (as near as possible) time at which the convoy can be expected to pass the frontier.

With best thanks for your kindness and interest,

Yours sincerely,



(B. Touschek)

EE:pp

Lettre de Touschek à Francis Perrin, annonçant le départ de AdA à Orsay en juillet 1962 (Archive Touschek, Département de Physique, Université La Sapienza Rome).

Lorsque le camion arriva à la frontière franco-italienne, les douaniers voulurent inspecter l'intérieur de l'anneau de stockage. Que contenait-il donc ? « Du vide et le meilleur possible », fut la réponse. Pas suffisante pour les douaniers zélés. Il fallut des interventions diplomatiques au plus haut niveau pour que AdA puisse traverser la frontière entre l'Italie et la France avec son vide encore intact. Selon Jacques Haïssinski, qui a travaillé sur AdA à Orsay pour sa thèse de doctorat, « l'intervention de Francis Perrin, alors Haut Commissaire à l'Energie Atomique, fut nécessaire pour surmonter cet obstacle ». Carlo Bernardini se souvient aussi des interventions côté italien, avec Edoardo Amaldi, Directeur du Département de Physique de Rome, qui avait contacté le Ministre italien des Affaires Étrangères, et à travers lui, les autorités françaises.

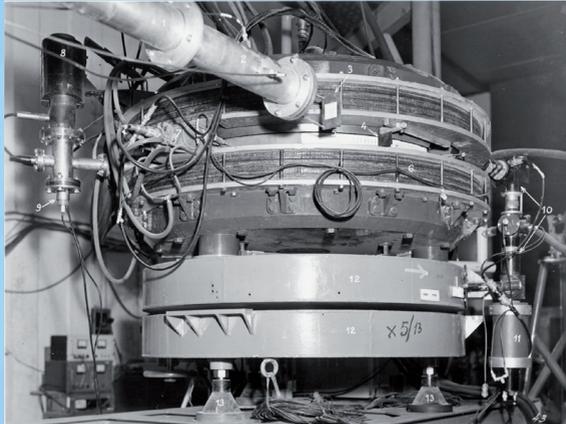


*Pierre Marin (à droite)
et Jacques Haïssinski.*

En août 1962, AdA fut installé à Orsay. Au cours de cette opération, AdA fut presque écrasé contre un mur alors qu'il était transporté par un puissant pont roulant vers son emplacement final. C'est Pierre Marin qui, alerté par les cris de l'équipe italienne, courut vers le pupitre de commande et appuya sur les boutons qui évitèrent l'accident. Plus tard, un détecteur, en train d'être déplacé à proximité de l'anneau AdA, bascula et cassa le pied du même Pierre Marin. Aucune de ces péripéties ne put tempérer l'enthousiasme et le dynamisme du groupe franco-italien, dont Jacques Haïssinski devint membre durant l'automne 1962.

À Orsay, grâce à l'accélérateur linéaire, des collisions électrons-positrons furent observées ainsi que des effets importants de dynamique des faisceaux.

L'un d'eux est l'effet Touschek, immédiatement compris par Touschek lui-même. Cet effet, qui limite la luminosité de toute machine, se manifeste par une diminution progressive de la durée de vie des faisceaux alors que le nombre de particules stockées augmente. C'est encore un des effets qui limitent la durée de vie des faisceaux dans les accélérateurs d'aujourd'hui.



AdA au LAL.

Ainsi, AdA a ouvert la voie pour d'autres machines qui permettront de découvrir plus tard de nouvelles particules fondamentales et amèneront à la confirmation expérimentale du Modèle Standard.

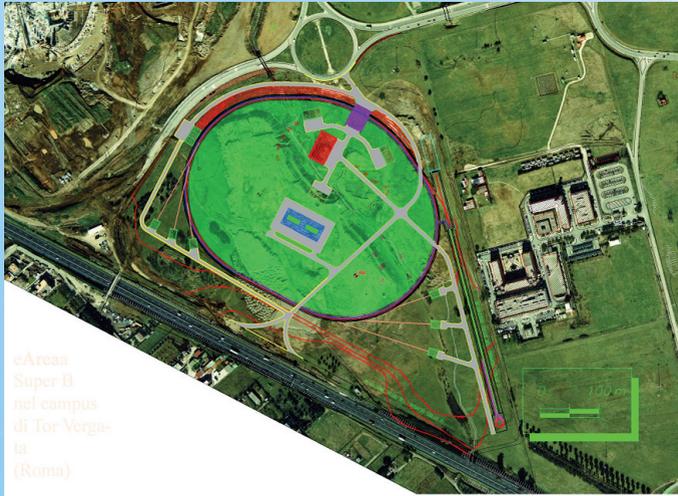


Le Café de la Gare à Orsay aujourd'hui. C'est là que Bruno Touschek a passé une nuit de mars 1963 à faire des calculs expliquant le phénomène qui provoquait la diminution de la durée de vie des faisceaux de l'accélérateur AdA fonctionnant alors à Orsay. Ce phénomène qui a reçu le nom « d'effet Touschek » est aujourd'hui connu par tous les constructeurs d'accélérateurs.

CHAPITRE 7

SuperB

L'usine à saveurs SuperB est un grand centre international de recherche en physique, fondamentale comme appliquée. Proposé par l'INFN, il est classé premier dans la liste des 14 projets phares sélectionnés par le Ministère italien de la Recherche et approuvés par le CIPE, l'organisme en charge du développement des grandes infrastructures sur le long terme. Le projet comporte la construction d'un grand anneau accélérateur, dans lequel se heurteront électrons et positrons, situé dans une zone d'environ 30 hectares du campus de l'Université de Rome Tor Vergata, étroitement reliée au Laboratoire National de Frascati de l'INFN situé à quelques kilomètres.



Vue d'artiste de l'accélérateur SuperB sur le site de l'Université Tor Vergata.

L'objectif scientifique principal de SuperB est d'apporter des éléments de réponse sur certaines des grandes questions de la physique contemporaine. Par exemple, les mécanismes qui ont conduit à la disparition de l'antimatière au début de l'histoire de notre Univers (juste après le Big Bang), ou les caractéristiques des forces qui lient les composants fondamentaux de la matière. Le programme de recherche de SuperB est totalement complémentaire de celui de LHC, le grand collisionneur du CERN, car les deux accélérateurs explorent deux frontières différentes de la physique expérimentale des hautes énergies : l'intensité (SuperB) et l'énergie (le LHC). SuperB vise à augmenter la

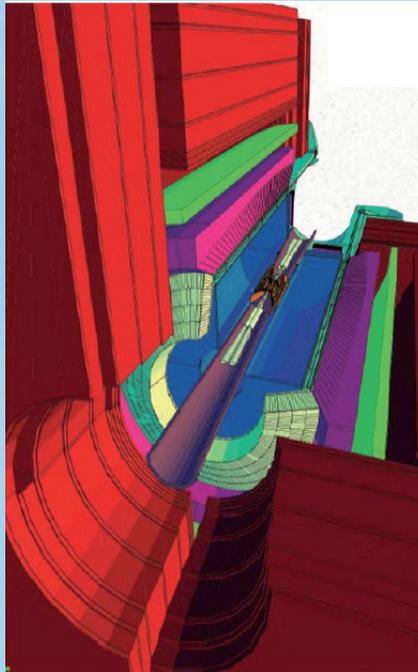
fréquence de collision des faisceaux de particules et donc le taux de production de phénomènes physiques extrêmement rares et pas encore étudiés. Au LHC par contre, c'est l'énergie des collisions qui a été augmentée de façon très importante, ouvrant ainsi la voie à l'observation directe de la nouvelle physique que l'on s'attend à voir apparaître dans ces conditions. Le gain en luminosité (c'est-à-dire sur le nombre de collisions par seconde) attendu avec SuperB est basé sur des idées développées en Italie et testées par le Département Accélérateurs du Laboratoire National de Frascati de l'INFN, avec la machine DAΦNE.

SuperB fournira également des technologies nouvelles et des outils avancés pour la recherche en physique de la matière, en biologie, en nanotechnologies et en biomédecine. En effet, SuperB donnera à une vaste communauté scientifique pluridisciplinaire la possibilité d'utiliser des lignes de lumière situées le long du collisionneur. Dans ces zones expérimentales, la « lumière synchrotron » émise par les particules pendant leur parcours dans l'accélérateur sera collectée. Des faisceaux de lumière avec des caractéristiques uniques de cohérence et de collimation permettront de visualiser des structures biologiques ou inorganiques avec une résolution jamais atteinte et de prendre des « micro-instantanées » de processus biochimiques en cours. Ils pourront être utilisés dans la construction de nanostructures ou de composants électroniques. Ils seront également utiles pour la synthèse de nouveaux médicaments ou de matériaux innovants. Ce n'est donc pas par hasard que l'Institut Italien de Technologie (IIT) a participé à la phase de gestation du projet SuperB et sera dans le futur un des utilisateurs de l'accélérateur comme source de lumière à haute brillance. Le choix de construire SuperB à Tor Vergata conduira naturellement à des collaborations avec les organismes de recherche proches géographiquement ainsi qu'avec l'ensemble de la communauté académique italienne.

Pour la première fois, un accélérateur est conçu dès le début pour satisfaire en même temps des besoins de physique fondamentale et appliquée. SuperB représente donc une opportunité historique de rencontre entre ces deux importantes communautés internationales et en même temps offre la possibilité de mettre en valeur des secteurs majeurs de la recherche italienne. Le projet s'insère naturellement dans le cadre des collaborations internationales et contribuera à renforcer le poids de l'Europe dans la physique des hautes énergies, dont le laboratoire CERN à Genève est déjà le fer de lance. Pour souligner l'importance de cette initiative, il faut rappeler qu'une communauté

scientifique de plus de mille chercheurs, ingénieurs et techniciens travaillera à temps plein au bon fonctionnement de SuperB et à l'exploitation de ses données.

Le projet, dont le coût se monte à quelques centaines de millions d'euros, a reçu un financement de 250 millions d'euros inscrit dans le plan de programmation économique du CIPE. L'énorme quantité de données produite par le détecteur de physique fondamentale – ainsi que par les recherches multidisciplinaires liées à la machine – sera stockée, reconstruite et analysée par un réseau de ressources informatiques, distribuées dans le monde entier. En particulier, de nouveaux grands centres de calcul et de tri des données seront construits dans plusieurs régions d'Italie du Sud et viendront s'ajouter au centre de calcul du CNAF – l'un des 11 centres de calcul principaux de la grille de calcul mondiale utilisée pour la reconstruction et l'analyse des données du LHC ; le CNAF dépend de la section INFN de Bologne. Ces nouveaux centres de calcul apporteront une aide précieuse pour le développement des réseaux informatiques liés aux services locaux.



Simulation de la région d'interaction du collisionneur SuperB.

Crédits

Cette brochure a été réalisée par les Laboratori Nazionali di Frascati (INFN, <http://www.lnf.infn.it/public>, LNF) et le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (IN2P3/CNRS & Université Paris Sud, <http://www.lal.in2p3.fr>, LAL).

Textes

Nicolas ARNAUD – LAL, narnaud@lal.in2p3.fr

Danilo BABUSCI – LNF, danilo.babusci@lnf.infn.it

Romeo BASSOLI – Ufficio Comunicazione INFN

Luisa BONOLIS – Associazione per l'Insegnamento della Fisica
& Scuola di Storia della Fisica

Rossana CENTIONI – Ufficio Comunicazione e Informazione Scientifica LNF

Giulia PANCHERI – LNF

Commune de FRASCATI

Commune d'ORSAY

Traductions

Monica VARVELLA, Verba In Itinere, <http://www.proz.com/profile/759269>

Maquette graphique et mise en page

Dominique BONY & Bruno MAZOYER – SIST/LAL

Crédits des illustrations

P. 5, 7, 20: Archives SIDS-LNF

P. 8, 11, 24, 27: Archives LAL

P. 13, 14: Archives Commune de Frascati

P. 15, 16, 17: Archives Commune d'Orsay

P. 18: Photo Vasari, Roma

P. 22, 23: avec l'autorisation de la famille Touschek

P. 25: Archives Touschek, Département de Physique, « Sapienza Università di Roma »

P. 26: avec l'autorisation de la famille Haïssinski

P. 27: L. Bonolis, 2011

P. 28: Division Accélérateurs du LNF

P. 30: SuperB

