

ÉPREUVE ORALE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES 2018

FILIERE PC

DOSSIER n° 4.1

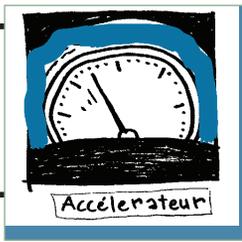
« Les accélérateurs de particules du futur »

Ce dossier est constitué d'un article décrivant les divers types d'accélérateurs de particules envisagés pour les années à venir.

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes, **en vous appuyant sur vos connaissances**, vous ferez une synthèse du sujet, soulignerez et explicitez les principaux concepts physiques abordés ainsi que les ordres de grandeur évoqués dans le document, le cas échéant.

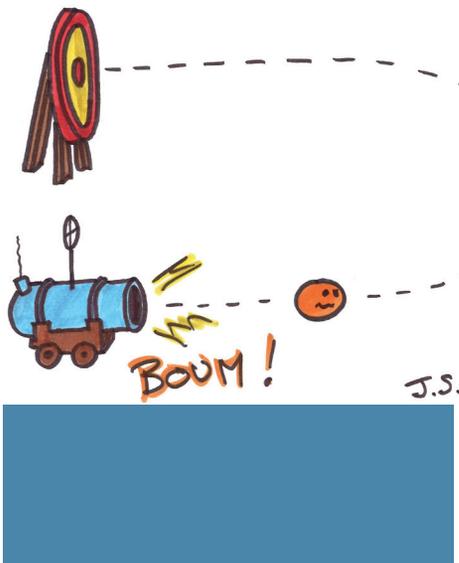
Remarques :

- *L'usage de la calculatrice est interdit pendant la phase de préparation.*
- *A l'issue de l'épreuve, tous les documents (brouillons, présentation, notes diverses) doivent être impérativement remis à l'examineur.*
- *Le dossier proposé est constitué de reproductions de textes ou d'extraits de textes scientifiques d'origines variées. Ces documents, comme tout document scientifique, peuvent être critiqués, voire contenir des erreurs. Si tel est le cas, cela ne doit pas gêner l/la candidat(e) au cours de sa préparation. Au contraire, il/elle pourra le mentionner au cours de l'exposé ou de la discussion avec l'examineur.*
- *Certaines parties de textes peuvent faire appel à des notions qui ne figurent pas au programme des classes préparatoires. Les candidats pourront s'attacher à expliciter les phénomènes physiques élémentaires mis en jeu, et pourront s'appuyer sur les encadrés ou annexes s'ils existent, pour mieux assimiler ces notions. Dans tous les cas, aucune connaissance hors programme ne sera attendue par l'examineur de la part du candidat ou de la candidate.*



Accélérateur

Les accélérateurs de particules du futur



Les grands accélérateurs de demain se préparent aujourd'hui : chaque nouveau projet nécessite des développements technologiques importants et de gros investissements, tant en ressources qu'en personnel. En conséquence, le temps séparant l'idée d'un nouvel appareillage de sa réalisation puis de sa mise en service s'allonge considérablement et peut facilement dépasser la dizaine d'années. Ainsi, certains chercheurs travaillaient déjà au début des années 1990 sur ce qui allait devenir le LHC alors que l'exploitation scientifique de cet accélérateur n'a véritablement commencé que le 30 mars dernier. En parallèle, le concept de « Super-LHC » (SLHC) génère déjà un effort soutenu de recherche-développement (R&D) dans de nombreux laboratoires : il s'agit de voir comment les performances nominales du LHC (que l'accélérateur mettra certainement plusieurs années à atteindre) pourraient être améliorées de manière significative à l'échelle d'une dizaine d'années. On parle d'une multiplication par dix du taux de collision ce qui augmenterait d'autant la quantité de données enregistrées par les expériences ATLAS et CMS.

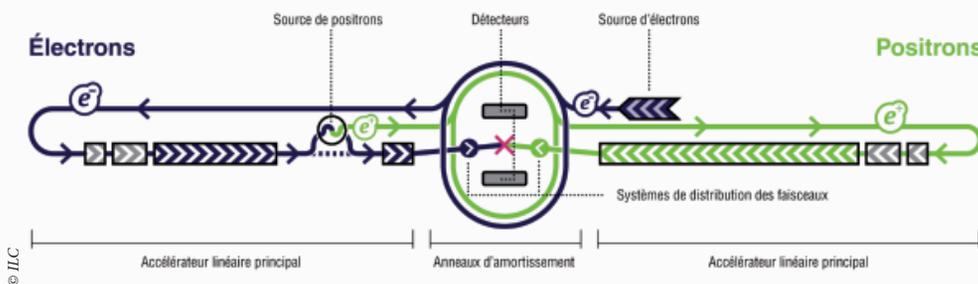
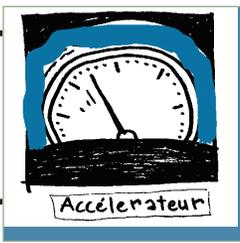


Schéma de l'ILC : une fois produits, les paquets d'électrons (en bleu), sont « mis en forme » dans un anneau de stockage avant d'être envoyés au départ de la section d'accélération. Cette dernière comporte une déviation qui permet de récupérer une partie des électrons qui sont envoyés sur une cible faite dans un matériau dense (comme le tungstène) pour produire des positrons (en vert). Ces derniers sont ordonnés en paquets homogènes dans un anneau de stockage similaire à celui des électrons avant d'être accélérés dans la seconde section droite. Les deux faisceaux se rencontrent finalement au centre du détecteur.

De nombreux projets d'accélérateurs sont donc actuellement sur la table. Tous ne sont évidemment pas au même stade d'avancement. Certains n'existent que sur le papier ou peignent à trouver un nombre suffisant de « supporters ». La limitation des moyens

humains, techniques et financiers rend nécessaire un arbitrage au niveau mondial ; pour l'Europe, c'est le CERN qui établit les priorités au niveau scientifique. Certaines collaborations ont déjà rassemblé assez de main-d'œuvre pour commencer à tester les technologies nécessaires pour atteindre leurs objectifs. Cette phase de validation s'accompagne de l'écriture de rapports techniques très détaillés qui permettent ensuite d'obtenir un financement des organismes de tutelle et l'implication de laboratoires importants.

Le projet de « futur collisionneur linéaire » au sens large a un statut assez particulier : considéré depuis des années comme l'accélérateur à construire en priorité pour aller au-delà des résultats du LHC, son coût et sa complexité ralentissent son développement, tout comme les retards du calendrier du grand collisionneur du CERN – les caractéristiques de cette nouvelle machine dépendront en partie des découvertes faites au LHC. L'ILC (« International Linear Collider ») bénéficie néanmoins de l'implication de nombreux groupes de par le monde (environ 300 équipes, soit plus de 700 personnes travaillant sur l'accélérateur et plus de 900 sur les projets de détecteurs) ce qui lui permet de continuer à aller de l'avant malgré les difficultés. Actuellement, aucun nouveau projet de grand accélérateur n'a été formellement accepté et financé.



Les accélérateurs de particules du futur

Pourquoi construire de nouveaux accélérateurs ? La réponse est évidente : pour mieux comprendre la structure de la matière et le monde des particules élémentaires. Pour atteindre ce but, il faut mettre au point des dispositifs expérimentaux susceptibles de révéler une physique nouvelle tout en étant technologiquement au point et suffisamment « bon marché » pour déboucher en quelques années sur des réalisations concrètes.

Plusieurs directions sont explorées en parallèle :

- l'accumulation de quantités plus importantes de données afin d'améliorer la précision des résultats actuels, ou de chercher des effets rares auxquels les expériences d'aujourd'hui ne sont pas sensibles ;
- l'augmentation de l'énergie des collisions pour produire des particules plus massives ou en plus grand nombre ;
- l'utilisation de particules différentes (muons ou photons) dans les collisionneurs ou de faisceaux très intenses de neutrinos pour accéder à de nouveaux tests du Modèle Standard ou étudier des effets inaccessibles auparavant.

Dans la suite, nous passons en revue un certain nombre de projets, sans chercher à établir une hiérarchie tranchée entre eux ni pronostiquer lesquels seront effectivement réalisés. Dans tous les cas, les « heureux gagnants » auront certainement évolué entre maintenant et leur mise en service. Relire cet article d'ici une dizaine d'années – et comparer son contenu à la situation réelle de la physique des hautes énergies à ce moment-là – vaudra certainement le détour !

Le « futur » collisionneur linéaire

Pour prolonger les découvertes espérées au LHC – boson(s) de Higgs, particules ou effets au-delà du Modèle Standard, etc. – les physiciens peuvent utiliser les informations produites lors de collisions à hautes énergies entre des électrons et des positrons. En effet, contrairement aux protons, ces particules sont élémentaires et leurs interactions produisent des événements moins compliqués et plus propices à des mesures précises. Cette séparation entre « collisionneurs à découvertes » (pp ou p \bar{p}) et « machines de précision » (e⁺e⁻) n'est pas nouvelle : les bosons W[±] et Z⁰, médiateurs avec le photon (γ) de l'interaction électrofaible, ont été découverts au Sp \bar{p} S (collisions p \bar{p}) en 1983 avant d'être étudiés au LEP (collisions e⁺e⁻) de 1989 à 2000 – voir Élémentaire 6.

Si les résultats du LHC sont encore à venir, on sait déjà que les études du boson de Higgs ou de la Nouvelle Physique ne pourront être menées que si les collisions électron-positron atteignent ou dépassent l'énergie de 500 GeV, soit un gain d'un facteur 2,5 ou plus par rapport au record du LEP (209 GeV). On apprécie encore mieux le défi à relever si l'on se souvient que ces particules légères perdent de l'énergie par **rayonnement synchrotron** lorsqu'elles circulent dans des anneaux de stockage. Cet effet augmente très rapidement avec l'énergie des faisceaux si bien que la technologie des collisionneurs circulaires doit être abandonnée pour les électrons, faute

Rayonnement synchrotron

Lorsqu'une particule chargée se déplace dans un champ magnétique le long d'une trajectoire courbe, elle suit un mouvement non uniforme au cours duquel elle perd de l'énergie sous forme de rayonnement synchrotron. Le taux auquel ce phénomène se produit est proportionnel à la quantité

$$\left(\frac{E}{mc^2}\right)^4 \times \frac{1}{r^2}$$

où E est l'énergie de la particule, m sa masse et r le rayon de la trajectoire de la particule. La puissance quatrième intervenant dans le premier facteur fait que la perte d'énergie augmente très vite avec l'énergie du faisceau et est beaucoup plus importante pour des électrons que pour des protons par exemple. Doubler l'énergie multiplie la perte par 16 et cette dernière est, à énergie constante, 11 mille milliards de fois plus importante pour un faisceau d'électrons que pour un faisceau de protons. C'est pour cela que le « L » (pour « Linéaire ») de « ILC » et « CLIC » (voir page suivante) est aussi important : déjà, lors de la première phase du LEP, les électrons perdaient à chaque tour 180 MeV sous forme de radiation synchrotron. D'où la complexité et la puissance du système de compensation d'énergie mis en place pour maintenir l'accélérateur en fonctionnement nominal. La seconde phase du LEP a vu l'énergie des collisions augmenter de manière importante (de 92 à 209 GeV) mais il est impossible technologiquement de continuer dans cette voie. Pour atteindre voire dépasser 500 GeV il faudrait construire un collisionneur immense ou limiter de manière drastique les courants de particules en circulation dans l'anneau. La perte d'énergie par rayonnement synchrotron se manifeste dès qu'il y a une accélération. Ainsi, une particule qui gagne de l'énergie dans un accélérateur linéaire grâce à la présence d'un champ électrique est également soumise à cet effet. Cependant, la puissance rayonnée reste négligeable devant celle qui est communiquée à la particule pour tous les accélérateurs actuels et futurs. En effet, le rapport entre ces deux quantités vaut :

$$P_{\text{rayonnée}} / P_{\text{communiquée}} \sim 4 \cdot 10^{-15} \times \text{champ accélérateur (MeV/m)}.$$

Contrairement au cas des accélérateurs circulaires, ce résultat ne dépend pas de l'énergie du faisceau.



Les accélérateurs de particules du futur

Un champ électrique de **30 millions de volts par mètre** correspond à environ dix fois la valeur dite « de claquage » au-dessus de laquelle l'air devient conducteur, ce qui se traduit par la formation d'éclairs. Ce phénomène dangereux est évité dans les accélérateurs en maintenant l'appareillage sous un vide poussé, ce qui permet également de minimiser les chocs entre les particules et les molécules d'air résiduelles.

Technologies supraconductrices

Pour créer des champs électromagnétiques puissants il faut des courants électriques élevés. À température ambiante, tous les composants des circuits ainsi que les fils dissipent de l'énergie par effet Joule. Si cette propriété est bien utile pour fabriquer des radiateurs, les pertes qu'elle provoque limitent les possibilités des accélérateurs. Pour la contourner, il faut employer des matériaux supraconducteurs (par exemple des alliages à base de niobium) et descendre à des températures très basses de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. Dans ces conditions, l'effet Joule et ses inconvénients associés — en particulier l'émission de chaleur — disparaissent dans les supraconducteurs et toute la puissance électrique peut être utilisée par les technologies accélératrices.

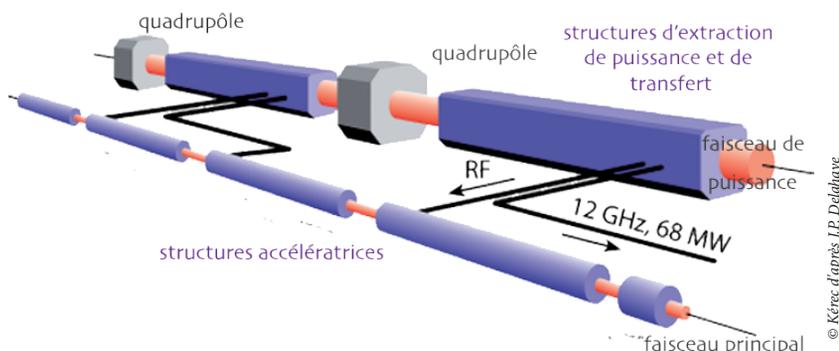
de pouvoir compenser les pertes qui affecteraient les particules à chaque tour.

Une solution consiste donc à maintenir électrons et positrons sur une trajectoire rectiligne, ce qui ne va pas sans poser quelques problèmes. En effet, à énergies finales égales, un accélérateur circulaire est moins long qu'une machine linéaire puisqu'une augmentation importante de l'énergie peut être obtenue par l'accumulation de petites accélérations produites chaque fois que les particules traversent une zone particulière de l'anneau. De plus, cette configuration permet d'utiliser les mêmes faisceaux pendant longtemps et de produire de nouvelles collisions à chaque tour. Dans le cas d'un accélérateur linéaire, les paquets de particules sont perdus après un seul passage au centre du détecteur.

Schématiquement, le futur collisionneur électrons-positrons « ILC » sera donc composé de deux sections rectilignes en face-à-face. Pour limiter leur taille, le champ électrique accélérateur devra dépasser les **30 millions de volts par mètre** grâce à l'utilisation de **technologies supraconductrices**. Néanmoins, les sections mesureront tout de même près de 15 km de long pour une énergie de collision de 500 GeV ! Dans un second temps, cette valeur pourra être doublée pour atteindre 1 TeV ; ce gain sera obtenu en augmentant la valeur des champs électriques et en allongeant les sections accélératrices d'une dizaine de kilomètres chacune.

Puisque les particules produites ne sont utilisées que lors d'un seul croisement des faisceaux (elles sont ensuite canalisées hors de la région d'interaction puis dirigées sur des blocs absorbateurs), il convient de s'assurer que ce dernier a lieu dans de bonnes conditions et produit en moyenne autant de collisions que possible. Pour cela, électrons et positrons sont regroupés dans des paquets contenant chacun environ 10 milliards de particules et dont la taille est compressée au maximum au point d'interaction : 5 nanomètres de haut pour 640 de large à l'ILC ! Les difficultés associées sont multiples : produire plus de cent mille milliards de positrons chaque seconde (on attend environ 14 000 croisements

Schéma montrant le principe d'accélération de CLIC : le « faisceau de puissance » d'électrons, très intense mais d'énergie limitée à quelques GeV au plus, circule parallèlement au faisceau principal qui doit être accéléré d'une dizaine de GeV à 1,5 TeV. Les transferts d'énergie du premier faisceau (ralenti) vers le second (accélééré) ont lieu dans des zones dédiées, réparties le long de la longue section droite accélératrice.



© Kéris d'après J.P. Deléglise



Les accélérateurs de particules du futur

de paquets par seconde) ; les **refroidir** ; les transporter tout au long du collisionneur ; enfin s'assurer que les deux minuscules faisceaux se croisent bien au centre du détecteur.

Si l'ILC est le projet de collisionneur linéaire de nouvelle génération le plus avancé – la phase de R&D devrait se terminer en 2012 avec la publication d'une description complète de l'accélérateur et du détecteur – il n'est pas le seul. La collaboration CLIC (« Compact Linear Collider »), dans laquelle le CERN joue un rôle moteur, étudie une technologie complètement différente, potentiellement prometteuse mais dont la faisabilité demande à être démontrée. Dans ce schéma, dit « à deux faisceaux », la puissance nécessaire pour accélérer le faisceau principal est puisée dans un autre faisceau très intense d'électrons relativistes qui circule en parallèle. Le ralentissement de ce faisceau de puissance produit de l'énergie qui est fournie au faisceau principal sous forme d'impulsions radiofréquence (RF). En théorie, une machine d'une cinquantaine de kilomètres de long au total (comme quoi, le mot « compact » n'a pas le même sens en physique des particules que dans le langage courant !) pourrait fournir des collisions électrons-positrons à 3 TeV.

CLIC a plusieurs années de retard par rapport à l'ILC (sa phase d'étude est prévue pour durer jusqu'à 2016) mais, sur le papier, ses performances pourraient être supérieures. Les deux projets sont donc en concurrence directe – « il ne devra en rester qu'un ! » – ce qui ne va pas sans tension étant donnés les enjeux liés au futur collisionneur linéaire. Heureusement, le climat s'est détendu ces dernières années avec la reconnaissance de synergies entre les deux collaborations, concrétisée par la création de groupes de travail communs et la signature conjointe de déclarations d'intention. Si au final les deux technologies apparaissent viables, le choix dépendra des résultats du LHC : selon ce que les scientifiques auront appris de la Nouvelle Physique, ils seront à même de dire quel accélérateur correspond le plus à l'orientation qu'ils veulent donner à leurs recherches.

Les super usines à mésons B

Comment faire pour obtenir des informations sur le contenu d'une boîte fermée par un cadenas ? La manière la plus naturelle est de l'ouvrir pour regarder à l'intérieur. Si l'on n'a pas la clé, on peut casser la boîte et identifier les morceaux éparpillés pour découvrir ce qu'elle cachait : c'est la stratégie des collisionneurs hadroniques comme le LHC. Mais on peut aussi procéder de manière plus indirecte (et moins violente) en agitant la boîte : le bruit produit apporte des renseignements sur son contenu. Mais l'information obtenue est seulement partielle : différents scénarios de Nouvelle Physique peuvent provoquer des bruits très similaires. Il faut donc réaliser le plus de tests possible pour faire un tri entre les différents modèles en concurrence.

C'est la voie suivie par les « usines à mésons B » de première génération – BaBar aux États-Unis et Belle au Japon – qui ont collecté des données

Refroidir

La température d'un gaz est reliée à l'agitation microscopique des molécules qui le composent. Plus sa température est élevée, plus le mouvement associé est énergétique. Par analogie, la mise en forme de paquets de particules, processus au cours duquel leurs propriétés sont uniformisées avec une grande précision, est appelée « refroidissement ». Toute la difficulté est de réduire la dispersion en énergie tout en maintenant les paquets denses.



Implantation proposée (en rouge) pour l'accélérateur SuperB sur le site du laboratoire de Frascati au sud de Rome.

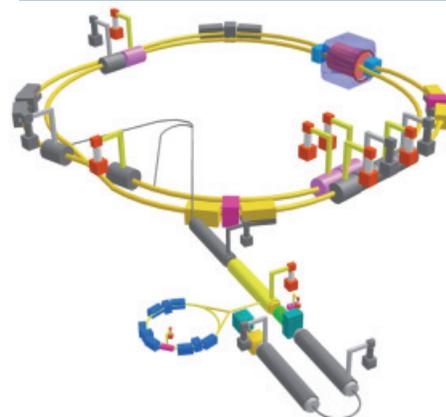


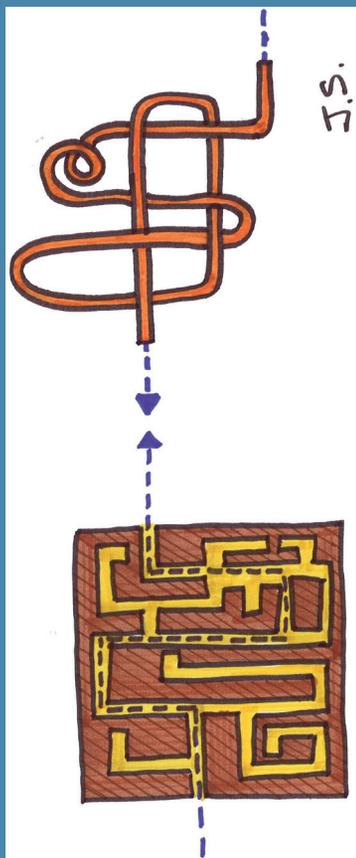
Schéma de l'accélérateur Super KEK-B avec le détecteur Belle-2. Au premier plan on peut voir la zone où les faisceaux d'électrons puis de positrons (obtenus après collisions d'électrons sur une cible) sont produits et mis en forme avant d'être injectés dans les deux tubes à vide du collisionneur (en jaune) qui se croisent au centre du détecteur (cylindre rouge sur fond bleu en haut à droite). Les objets colorés le long de l'anneau représentent les aimants de courbure et les zones d'accélération des particules.



Les accélérateurs de particules du futur

Luminosité

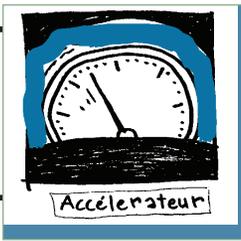
En physique des particules, chaque processus susceptible de se produire lors d'une collision, par exemple l'annihilation d'un électron et d'un positron en une paire de muons de charges opposées, a une certaine probabilité d'occurrence. Dans une expérience, le taux de ce processus (c'est-à-dire le nombre de fois où il se produit chaque seconde) est égal à cette probabilité multipliée par une quantité appelée luminosité. Plus elle est élevée, plus l'accélérateur est productif. La luminosité est proportionnelle au courant des faisceaux qui circulent dans les tubes à vide et augmente lorsque la section des paquets diminue. Elle dépend donc beaucoup de la qualité du guidage des particules au point de croisement et du contrôle que les opérateurs de l'accélérateur ont des propriétés des faisceaux à cet endroit.



au cours de la décennie 2000. Ces expériences réalisent des collisions électron-positron à une énergie particulière (environ 10,6 GeV), nettement inférieure aux records du LEP, mais qui permet d'étudier une classe de particules, les mésons B, produits en abondance à cette énergie grâce à la présence d'une résonance le $\Upsilon(4S)$ qui se désintègre en BB. Les nombreux résultats obtenus par ces deux collaborations ont bénéficié des performances des deux accélérateurs associés, PEP-II et KEK-B, qui ont battu des records de **luminosité** : des milliards de collisions intéressantes ont été enregistrées. Malgré leurs efforts, ni BaBar ni Belle n'ont réussi à mettre en échec le Modèle Standard : tous les tests effectués donnent des résultats en accord avec ses prévisions, une fois les incertitudes théoriques et de mesure prises en compte. Pour avoir une chance de voir leur quête couronnée de succès, les prochaines expériences devront donc chercher à mettre en évidence de petits effets ou des corrections très fines à des quantités bien connues. Cela passe nécessairement par l'accumulation de plusieurs dizaines de fois plus d'événements que BaBar ou Belle n'en ont enregistré. Pour parvenir à ce résultat en seulement quelques années de prise de données, il faut des accélérateurs bien plus « généreux » : les « super-usines à mésons B » actuellement en phase de R&D tablent sur une luminosité (et donc un taux de collision) 100 fois supérieure aux records actuels.

Deux voies sont possibles pour parvenir à ce résultat : soit augmenter fortement les courants des deux faisceaux, soit conserver les courants au niveau de ceux atteints à PEP-II et KEK-B de manière routinière et jouer sur d'autres paramètres pour augmenter la luminosité. La première solution a de nombreux désavantages : plus les faisceaux sont intenses, plus ils sont difficiles à contrôler, plus la puissance électrique nécessaire (et donc le coût de fonctionnement de l'accélérateur) est élevée et plus le bruit de fond parasite induit par leur passage est important. C'est pourquoi un consensus s'établit autour de la seconde alternative, portée par le projet SuperB à dominante italienne et à laquelle la collaboration Belle-2 qui se fédère autour de groupes japonais semble se rallier après avoir exploré l'autre voie en profondeur. Des simulations numériques, validées en 2008-2009 par des tests sur l'accélérateur de plus basse énergie (collisions à 1,02 GeV) DAΦNE, situé à Frascati au sud de Rome, ont montré qu'il était possible de créer et de contrôler des « micro-faisceaux » d'électrons et de positrons très denses. Ces faisceaux sont comprimés au point de croisement pour donner des « nano-faisceaux » afin d'obtenir la probabilité de collisions la plus élevée possible. Ces développements promettent des gains de luminosité importants et valables sur de longues périodes.

SuperB et Belle-2 travaillent actuellement d'arrache-pied à la définition des caractéristiques de leurs accélérateurs et des détecteurs associés. Ces derniers devront en effet être capables de « digérer » un flot colossal de données tout en maintenant pendant au moins cinq ans un niveau de performances aussi bon que ceux atteints par BaBar et Belle.



Les accélérateurs de particules du futur

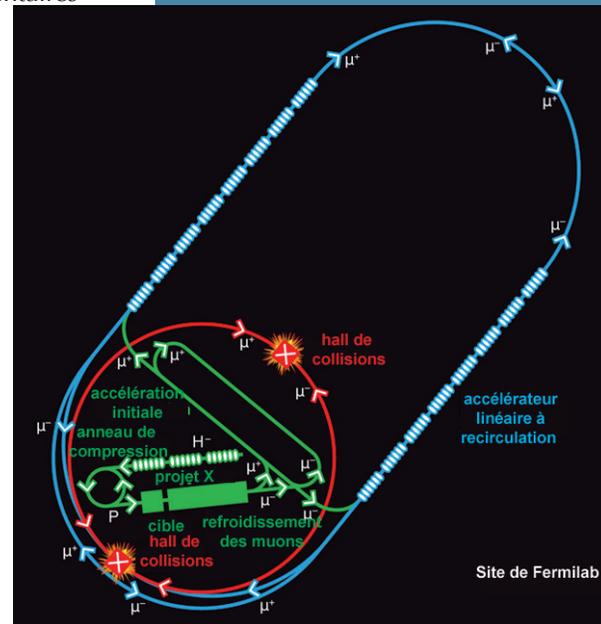
Collisionneurs à muons & usines à neutrinos

Le muon – voir « Détection » – est le lepton chargé de la seconde famille des particules élémentaires. Cousin de l'électron, il est environ 207 fois plus massif que ce dernier et donc bien moins sujet aux pertes d'énergie par rayonnement synchrotron. Ainsi, un collisionneur de muons à une énergie de 4 TeV (valeur suffisante pour potentiellement révéler des effets inaccessibles au LHC puisque les muons sont des particules élémentaires alors que les collisions entre protons font intervenir leurs constituants, les quarks, qui n'emportent chacun qu'une fraction de l'énergie totale) ne ferait que deux kilomètres de diamètre environ, soit 4 fois moins que le LEP/LHC. De plus, le taux de production directe du boson de Higgs (H) lors de collisions lepton-antilepton ($e^+e^- \rightarrow H$ ou $\mu^+\mu^- \rightarrow H$ par exemple) est proportionnel au carré de la masse des leptons. Cette propriété permettra peut-être de produire des bosons de Higgs en abondance dans un collisionneur muon-muon.

Alors, dans le muon, tout est bon ? En fait il y a un hic de taille : le muon n'est pas une particule stable... Sa durée de vie est même plutôt courte : 2,2 μ s au repos et seulement 42 ms à 2 TeV une fois les effets relativistes pris en compte ! Toute la difficulté du collisionneur à muons découle de cette remarque : comment créer, mettre en forme et exploiter au mieux une quantité suffisante de ces particules, le tout en quelques centièmes de seconde ?

Bien que ce défi semble rédhibitoire, il a été relevé par différentes équipes de chercheurs, en particulier américaines, qui travaillent sur un tel projet de collisionneur. Une compagnie privée, Muons Inc., implantée à Batavia près du laboratoire **Fermilab**, promeut même ce type d'accélérateurs ainsi que les technologies associées. Si le calendrier d'une telle machine est encore plus lointain que celui de l'ILC (on parle d'un démarrage de la prise de données autour de 2030), la phase de R&D bat actuellement son plein.

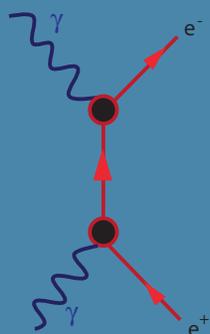
Les muons n'existant pas en quantité abondante dans la nature, il faut donc commencer par les produire. Pour cela on utilise des protons accélérés à quelques dizaines de GeV qu'on envoie sur une cible de mercure. Parmi les produits de ces collisions on trouve des pions chargés qui sont sélectionnés à l'aide d'un très fort champ magnétique (de l'ordre de 20 teslas). Ces mésons, instables également, se désintègrent presque toujours en une paire muon + antineutrino muonique. Cette procédure de conversion protons \rightarrow muons a un rendement de l'ordre du pourcent et fournit des particules aux propriétés très hétérogènes : le faisceau ainsi produit ressemble à une « grosse patate » dont les particules sont éparpillées sur une distance de l'ordre du mètre. De plus, les impulsions des muons ont une dispersion de presque 100% autour de la valeur la plus probable qui est de l'ordre de 200 MeV/c.



Implantation possible pour un collisionneur à muons sur le site de Fermilab, délimité par les pointillés. La partie en vert correspond à la production des muons suivie de leur organisation en paquets homogènes. Ces particules sont ensuite accélérées dans le « circuit » bleu où des neutrinos sont émis à mesure que des muons se désintègrent. Enfin, la partie rouge correspond à l'anneau de collisions où les faisceaux énergétiques se croisent en deux emplacements où sont installés des détecteurs.



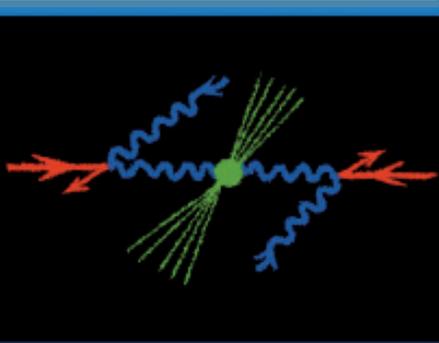
Les accélérateurs de particules du futur



Bien que les photons soient de masse nulle, ils transportent une énergie importante qui, lors d'une collision photon-photon est convertie pour partie en énergie de masse : les particules créées sont massives. L'énergie restante est distribuée aux produits de la collision (ici $\gamma\gamma$ donne e^-e^+).

Exemples de motivation pour construire un collisionneur photon-photon

Par exemple, le boson de Higgs tel qu'il est décrit par le Modèle Standard peut être créé directement lors d'une collision $\gamma\gamma$ (deux photons s'annihilent en un boson de Higgs et rien d'autre) alors que sa « fabrication » dans un collisionneur de matière (e^+e^- comme l'ILC ou pp comme le LHC) demande donc plus d'énergie. De plus, les paires de particules chargées (bosons W, quark et antiquark top, etc.) sont produites plus abondamment dans un collisionneur $\gamma\gamma$: les processus mis en jeu ne sont pas les mêmes que lors de l'interaction électron-positron par exemple.



Dans un collisionneur à photons des électrons (en rouge) interagissent avec des photons du laser (en bleu). Ceux-ci, déviés et devenus énergétiques, entrent en collision (vert) au centre du détecteur (non représenté ici).

À ce stade, il faut donc « freiner » les particules les plus rapides et « pousser » les plus lentes pour les grouper en paquets denses, puis « refroidir » le faisceau (étape qui, pour éviter de perdre trop de temps, devra avoir lieu en quelques microsecondes, soit sur une distance de 500 mètres environ), et enfin accélérer l'ensemble dans une série d'accélérateurs linéaires et de synchrotrons. Au final, le but est d'injecter de l'ordre de 10^{14} muons par seconde dans l'anneau où ils produiront des collisions pendant quelques centaines de tours, jusqu'à ce que la plupart de ces particules se soient désintégrées.

Même après s'être désintégré, un muon reste intéressant. En effet, il donne un électron et surtout deux neutrinos, un antineutrino électron et un neutrino mu. Un collisionneur à muons est donc également une « usine à neutrinos » dont les faisceaux, très intenses et produits dans de longues sections droites dédiées, permettraient d'améliorer la connaissance de ces particules encore largement mystérieuses. Une idée serait d'envoyer ces faisceaux vers des détecteurs éloignés de plusieurs milliers de kilomètres afin d'étudier leurs oscillations (ICPACKOI). Si le coût d'un collisionneur à muons est considéré comme trop élevé au moment de décider de sa réalisation, une possibilité intermédiaire serait de se rabattre sur une « simple » usine à neutrinos. Un grand nombre des composants de l'accélérateur est commun aux deux approches (production et mise en forme des faisceaux de muons, anneaux de stockage, zones rectilignes pour obtenir beaucoup de neutrinos, etc.) mais le dispositif coûteux permettant aux paquets d'entrer en collision efficacement ne serait pas nécessaire ; de plus, accélérer les muons à 50 GeV (au lieu de 2 TeV) suffirait pour ce type d'application.

Un autre élément à prendre en compte pour ce type d'accélérateur est la radioactivité qu'un tel équipement pourrait induire. Celle-ci se manifeste à deux niveaux, l'un assez classique et l'autre plutôt inattendu. Tout d'abord, les collisions entre le faisceau intense de protons et la cible de mercure produisent beaucoup de neutrons. Leur flux équivaut à, voire dépasse, celui d'une centrale nucléaire et nécessite donc une protection spécifique. Dans le même ordre d'idée, l'accélérateur doit être enterré suffisamment profondément (une centaine de mètres environ) pour que tous les muons soient absorbés avant d'arriver à la surface en cas de perte complète d'un faisceau. Plus surprenant, le flux des neutrinos produits est également potentiellement dangereux. Bien que ces particules n'interagissent presque pas avec la matière (ce qui explique pourquoi elles passent quasiment inaperçues même dans les détecteurs les plus performants), leur nombre est tellement élevé (de l'ordre de mille milliards de milliards par an) que la radioactivité accumulée n'est pas négligeable. À l'endroit où le faisceau sort de terre avec une taille d'environ un mètre carré, le taux mesuré annuellement serait comparable au seuil d'exposition maximum du personnel qualifié travaillant dans un grand laboratoire comme le CERN ! Cet emplacement devra donc être choisi avec soin (et clairement signalé) si une telle machine devait être construite un jour : le mieux serait qu'il soit à l'intérieur du périmètre réservé, toujours mis en place pour ce genre d'installation.



Les accélérateurs de particules du futur

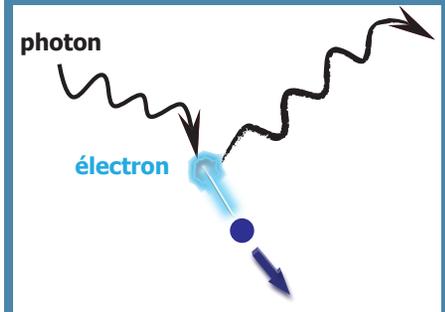
Collisionneur à photons

Parmi les propositions d'accélérateurs exotiques, certains utilisent des faisceaux de photons pour les collisions : ce sont les collisionneurs $e\gamma$ ou $\gamma\gamma$. Comme toujours, la motivation pour construire de telles machines est à chercher au niveau de la physique. De plus, étudier les mêmes réactions dans des environnements très différents donne des points de vue complémentaires sur leurs caractéristiques et permet donc de mieux les comprendre.

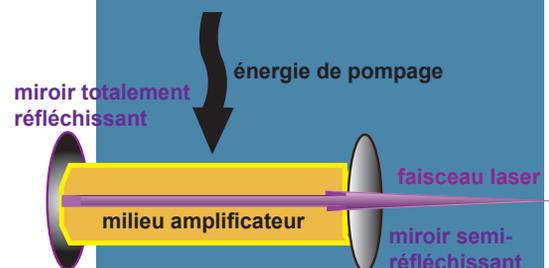
Le photon est une particule stable, abondante dans l'Univers. Par contre, sa neutralité électrique oblige les scientifiques à ruser pour obtenir des collisions satisfaisantes puisque les photons sont insensibles aux champs électriques et magnétiques utilisés pour accélérer et piloter les paquets de particules chargées dans les accélérateurs. Un collisionneur $\gamma\gamma$ utilise donc deux faisceaux d'électrons, conditionnés et guidés pour se croiser au point d'interaction, au centre du détecteur. Quelques millimètres avant cet endroit, les électrons interagissent par **diffusion Compton inverse** avec un **laser** ; les photons ainsi produits emportent une fraction importante de l'énergie des particules incidentes tout en se propageant globalement dans la même direction que ces dernières — les électrons sont finalement déviés hors du détecteur par de puissants champs magnétiques. Des collisions ont donc lieu, avec une luminosité comprise entre 15 et 30 % de celle du collisionneur de leptons correspondant. Le laser, d'une puissance de 100 kW environ, émet un flash de quelques joules d'énergie synchronisé avec le passage des paquets de particules chargées. Comme chaque diffusion affecte 1 photon sur 1 milliard en moyenne, sa lumière est stockée dans une cavité optique afin d'être réutilisée, le taux de croisement étant de l'ordre de 15000 par seconde.

Les difficultés d'un tel collisionneur sont nombreuses. Au point d'interaction, il y a un mélange de collisions photon-photon, photon-électron, photon-positron et électron-positron. De plus, il faut éviter que les paquets d'électrons ou de positrons (perturbés par leur traversée du faisceau laser et dont les particules se retrouvent avec des énergies très variées) ne finissent leur course dans le détecteur, au risque de brouiller la signature de la collision $\gamma\gamma$, voire d'endommager les instruments de mesure.

Un **laser** est un appareil qui produit une lumière très particulière. Les photons qui la composent ont tous des propriétés voisines : on parle de cohérences spatiale et temporelle. Cette lumière, obtenue par émission stimulée (un phénomène qui permet de multiplier le nombre de photons d'énergie donnée en les faisant interagir avec les électrons du « milieu amplificateur », des molécules de gaz bien sûr mais également des liquides, des solides ou des plasmas), est maintenue dans une cavité optique par des miroirs partiellement réfléchissants afin que l'amplification ait lieu à chaque passage des photons réfléchis au travers du gaz. Ce processus est analogue à l'effet Larsen qui survient lorsque micro et haut-parleur sont trop rapprochés : un bruit, même très atténué, est capté par le micro puis retransmis par le haut-parleur et donc capté à nouveau par le micro. Le processus se poursuit, produisant à la fin un son désagréable caractéristique. La lumière laser a des propriétés extrêmement intéressantes qui expliquent son exploitation tant dans les laboratoires de recherche que dans l'industrie ou le commerce. La gamme de longueurs d'onde dans laquelle on peut créer des lasers s'allonge sans cesse : des micro-ondes, on est passé à l'infrarouge, puis au visible, à l'ultraviolet et finalement aux rayons X. 2010 est l'année du cinquantenaire du laser – le premier fut mis en service en Californie en mai 1960 par Theodore Maiman. De nombreuses manifestations sont organisées à cette occasion – voir le site <http://50ansdulaser.com/> pour plus de détails.



L'effet Compton est la diffusion d'un photon sur une particule de matière, par exemple un électron appartenant au nuage électronique d'un atome. Sous l'effet du choc, le photon est dévié et son énergie modifiée, ce qui se traduit par un changement de la fréquence de l'onde électromagnétique associée. Ce phénomène a été baptisé en l'honneur du physicien américain Arthur Compton qui l'a utilisé pour prouver expérimentalement l'existence du photon. La **diffusion Compton inverse** est la même réaction, mais on rajoute cet adjectif lorsque c'est l'électron qui est plus énergétique que le photon (et vient donc lui « taper dessus »), lui transmettant en partie son énergie et sa quantité de mouvement.





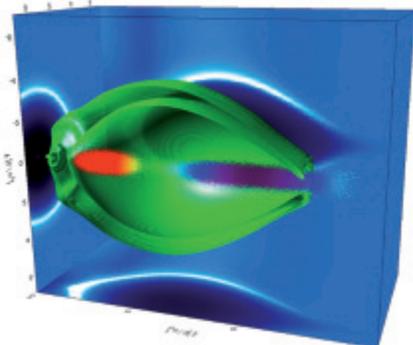
Les accélérateurs de particules du futur

Taux de collision élevé

La probabilité que deux particules entrent en collision décroît comme l'inverse du carré de l'énergie de la collision. Toutes choses égales par ailleurs, accroître l'énergie d'un collisionneur fait donc automatiquement baisser le taux d'événements enregistrés. Pour compenser ce tour joué par la Nature, les équipes qui travaillent sur des projets d'accélérateurs s'efforcent d'augmenter en proportion la luminosité, c'est-à-dire les conditions dans lesquelles les collisions ont lieu : paquets plus denses, courant plus élevé dans les faisceaux, etc. Les nouvelles machines sont donc plus complexes à mettre au point et plus difficiles à piloter ce qui se traduit en particulier par de forts bruits de fond.

Plasma

Dans des conditions normales, un gaz est formé de molécules neutres. Si on lui apporte suffisamment d'énergie, par exemple en le chauffant, on peut briser ces molécules, produisant ainsi un plasma, un milieu dans lequel circulent des charges électriques libres, positives (ions) comme négatives (électrons). Celles-ci interagissent entre elles. Elles sont sensibles aux champs électromagnétiques extérieurs et en créent elles-mêmes de nouveaux ! Elles permettent également la conduction du courant, ce qui donne aux plasmas des propriétés particulières. Il y a des plasmas naturels (étoiles, aurores polaires, éclairs, etc.) et d'autres artificiels : dans certaines lampes, dans l'industrie des matériaux (par exemple pour réaliser des soudures), ou encore dans les réacteurs d'étude de la fusion nucléaire.



© FACET

Une simulation informatique de la future expérience FACET utilisant deux paquets d'électrons. L'avant du premier paquet ionise la vapeur de lithium pour créer un plasma ; ensuite le cœur du paquet produit le sillage dans le plasma (contours verts). Le second paquet (en rouge) va surfer sur le sillage et être accéléré au double de son énergie initiale en environ 1 mètre.

page 48

Bien que le coût d'un collisionneur spécialisé dans les collisions $\gamma\gamma$ soit annoncé par ses promoteurs comme étant inférieur à celui de l'ILC, seule une minorité de physiciens souhaite qu'un tel accélérateur voie le jour avant le futur collisionneur linéaire dont le champ d'action est plus vaste. Un compromis consisterait à construire cette dernière machine de façon à la modifier pour que des photons puissent également y entrer en collisions – le surcoût associé devrait être limité. Par contre, des études de prospective à très long terme semblent privilégier un collisionneur gamma-gamma multi-TeV par rapport à son équivalent électron-positron (ou muon-antimuon d'ailleurs). En effet, les équations décrivant de telles machines leptoniques n'ont pas de solution satisfaisante : impossible de conjuguer un **taux de collision élevé** avec un niveau de bruit de fond et une consommation électrique raisonnables. Utiliser des photons pourrait permettre de diminuer le bruit de fond (un des problèmes principaux pour tous les nouveaux concepts d'accélérateurs) et de résoudre ces mêmes équations. Tous ces éléments sont encore spéculatifs : ils devront être confirmés ou rejetés par des études futures.

Accélération de particules par plasma

Les accélérateurs de particules d'aujourd'hui doivent atteindre des énergies si élevées que, malgré les progrès continus et importants des dispositifs d'accélération, leur taille ne cesse d'augmenter. Ainsi, comme nous l'avons vu plus haut, les projets ILC et CLIC devraient faire plusieurs dizaines de kilomètres de long. C'est pour cela que d'autres voies sont aujourd'hui explorées, avec comme objectif d'obtenir un gradient d'accélération bien supérieur – et donc de raccourcir la taille des futures machines. Une piste intéressante, suivie par des équipes européennes et américaines, consiste à utiliser un **plasma**.

Un tel milieu est riche en charges libres, positives comme négatives, qui se déplacent au hasard. Si on arrive à les ordonner de manière à créer une onde électromagnétique cohérente dans le plasma, celle-ci pourrait accélérer très violemment (jusqu'à mille fois les capacités d'un accélérateur linéaire actuel) un paquet de particules chargées le traversant, à la manière d'un surfeur profitant d'une vague parfaite. Prenons comme exemples les projets californiens FACET (au SLAC) et BELLA (à Berkeley) qui ont récemment bénéficié d'un financement supplémentaire dans le cadre du plan de relance américain.

- FACET : un paquet dense d'électrons créé dans l'accélérateur linéaire de SLAC pénètre dans une zone contenant un gaz, par exemple du lithium. L'avant du paquet, fortement chargé, crée le plasma ; un sillage de charges s'y forme et est repoussé à mesure que le paquet progresse. L'inhomogénéité de charges à l'intérieur du plasma (déficit/excès de charges négatives devant/derrrière le paquet) crée un fort champ électromagnétique qui accélère l'arrière du paquet. En 2007, l'énergie des électrons a ainsi été doublée en moins d'1 m (42 à 85 GeV en 84 cm), au prix toutefois d'une perte significative au niveau de l'homogénéité du



Les accélérateurs de particules du futur

paquet puisque les particules à l'avant ont été ralenties. De nouvelles expériences sont en préparation dont le but est d'obtenir le même genre d'effet mais avec deux paquets séparés : le premier générerait le plasma et le champ accélérateur dont bénéficierait le second pour lequel les propriétés (densité, etc.) seraient ainsi préservées lors de la phase de gain d'énergie.

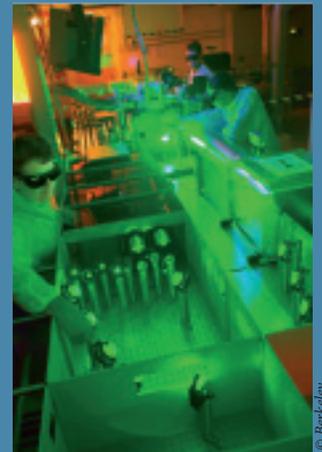
- BELLA : l'expérience utilise un laser qui produit des impulsions très courtes mais extrêmement puissantes (50 fois plus que la foudre). La lumière laser est injectée dans un plasma d'hydrogène où elle produit un sillage d'électrons similaire à celui observé à SLAC. Par contre, les particules accélérées sont des électrons libres du plasma lui-même. L'objectif du programme est double : tout d'abord passer de 0 à 10 GeV en 80 cm (soit l'équivalent d'un champ accélérateur de 12 à 13 milliards d'électron-volts par mètre), puis ensuite faire fonctionner dix accélérateurs de ce type l'un derrière l'autre pour arriver à 100 GeV, l'ensemble produisant au final des paquets de particules plus denses dans le cas de FACET.

Le laboratoire Louis Leprince-Ringuet (LLR), situé sur le campus de l'École Polytechnique, travaille également sur des expériences d'accélération par laser, en collaboration avec le groupe SPL du Laboratoire d'optique appliquée (LOA) de l'ENSTA (École Nationale Supérieure de Techniques Avancées). En particulier, GALOP (Groupe d'Accélération par LAser et Ondes Plasma) a observé en 2008 que les paquets d'électrons accélérés par onde plasma peuvent avoir une dispersion en énergie inférieure au pourcent.

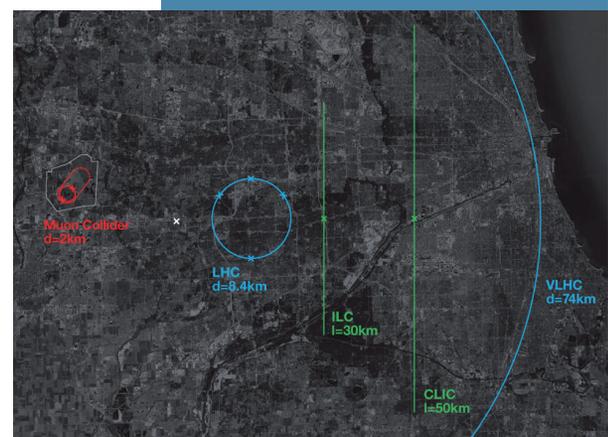
De nombreuses avancées technologiques seront nécessaires pour que ce type d'accélération atteigne une maturité suffisante dans la prochaine décennie. Néanmoins, le jeu en vaut la chandelle car l'objectif est d'obtenir un champ électrique accélérateur de plusieurs GeV/m voire plusieurs dizaines de GeV/m sur une longue distance permettant d'atteindre l'énergie souhaitée. Ces valeurs sont à comparer aux objectifs de l'ILC (30 MeV/m) et de CLIC (60 MeV/m).

Et bien d'autres encore ...

En conclusion, de nombreux projets d'accélérateurs sont actuellement dans les cartons, à des stades de développement plus ou moins avancés. En plus des difficultés techniques liées à la mise au point de leur machine, la plupart de ces équipes doivent résoudre des difficultés plus terre-à-terre : trouver des gens disponibles pour y travailler, des financements et un laboratoire d'accueil qui fasse consensus. Le « **Projet X** », porté par Fermilab, n'a pas ce problème : il s'agit d'un accélérateur à protons de 8 GeV qui servira à la physique des neutrinos et de banc-test pour des activités de R&D liées aux collisionneurs à muons ou au « très grand collisionneur à hadrons » (VLHC), un hypothétique et lointain successeur des accélérateurs LHC et SLHC.



Une équipe au travail sur le laser de 40 térawatts de Berkeley.



Comparaison des tailles des collisionneurs de particules, en service (LHC) ou étudiés (ILC, CLIC, un collisionneur à muons et le VLHC). Dans cette vue d'artiste, les différents accélérateurs sont tous implantés sur une image satellite d'une partie de la côte du Lac Michigan (USA), région où est situé le laboratoire Fermilab visible sur la gauche.

Le « **Projet X** » doit renouveler en profondeur le complexe accélérateur de Fermilab ce qui explique qu'il ait été difficile de lui donner un nom porteur de sens dès le début, d'où le choix, temporaire pensait-on, de la lettre « X » pour le désigner. Avec le temps cette dénomination a fait son chemin, les scientifiques appréciant la part de mystère qui lui est attachée. Bien que le projet soit beaucoup mieux défini aujourd'hui, il est probable qu'il garde son nom initial(e) !