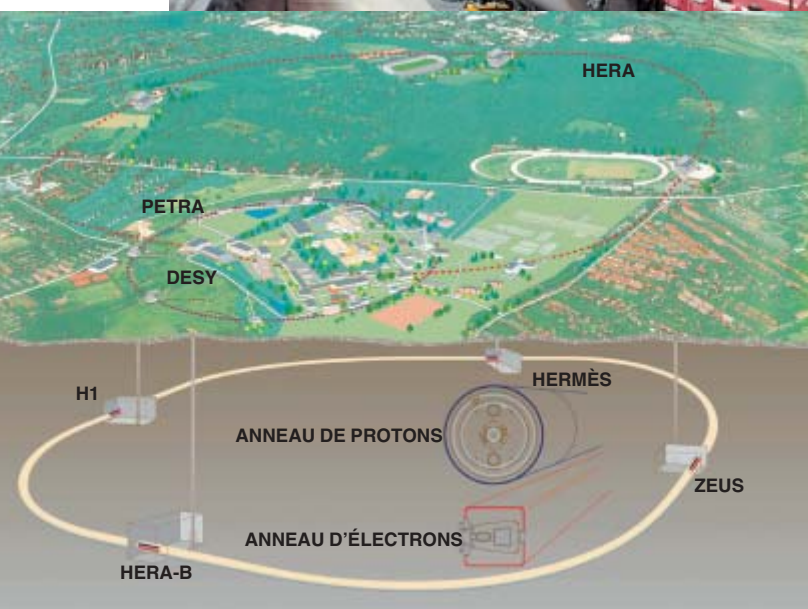
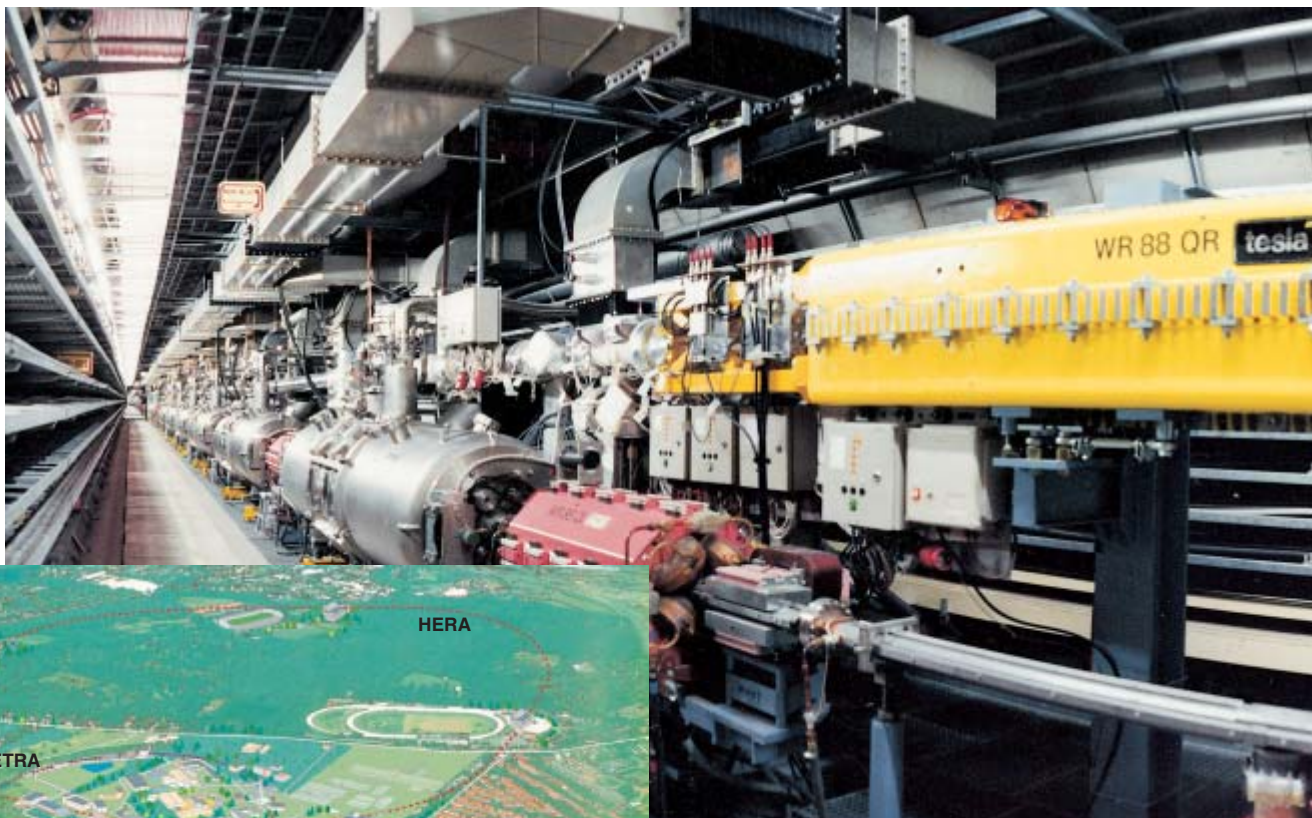




2. LE SYNCHROTRON DESY est localisé au Nord-Ouest de Hambourg. Long de plus de six kilomètres, le tunnel de l'accélérateur HERA, passe sous plusieurs quartiers résidentiels, sous des zones industrielles et sous un grand jardin public. Plus ancien que celui d'HERA, l'anneau collisionneur de PETRA encercle les bâtiments du Centre de recherches DESY. Le collisionneur HERA est le seul collisionneur où des électrons et des protons entrent en collision à haute énergie.

des électrons y entrent en collision à une énergie aussi importante. Un électron est une particule «élémentaire», ce qui signifie qu'on ne lui connaît pas de constituants plus petits que lui. Ses interactions sont parfaitement connues, et son caractère ponctuel en fait une sonde idéale pour explorer les structures de particules plus grosses que lui. En comparaison avec lui, le proton est un «immense» assemblage de 10^{-15} mètre de diamètre. Les expériences faites à Hambourg pour l'étude des forces responsables de la cohésion du proton complètent celles qui sont menées dans les deux autres grands accélérateurs : le LEP, le grand collisionneur pour électrons et positons du CERN, à Genève, et le TEVATRON, l'accélérateur à protons et anti-protons du Fermilab, près de Chicago.

Les électrons accélérés à HERA ont environ dix fois plus d'énergie que les

dans le passé pour explorer la structure du proton. Ainsi HERA est une sorte de «supermicroscope électronique» capable de révéler en détail l'intérieur du proton. On y découvre des structures quelque 2 000 fois plus petites que le proton lui-même, c'est-à-dire de l'ordre de 0,000 000 000 000 000 5 mètre ! Sans une telle précision, on ne pourrait étudier les interactions entre électrons et quarks, ou encore celles que subissent les quarks constitutifs du proton. Cette «résolution» du microscope électronique HERA est un inestimable atout pour l'étude des forces fondamentales, car plus les distances explorées sont petites, plus les physiciens ont de chances de découvrir un jour la nature de la force à l'origine de la formation de l'Univers.

Le modèle standard décrit l'ensemble des connaissances avérées sur le monde subatomique. Il est fondé

électrons et les muons (des cousins massifs de l'électron) utilisés

sur les briques élémentaires de la matière – six quarks et six leptons – et définit les règles auxquelles elles sont soumises. Toutes ces particules élémentaires sont ponctuelles, c'est-à-dire qu'aucune expérience n'a pu mettre en évidence un effet dû à leur volume. Le modèle standard contient aussi des particules intermédiaires, qui «véhiculent» les interactions. Ainsi, aucune interaction électromagnétique ne se déroule sans qu'un photon intermédiaire soit mis en jeu. De même, l'interaction faible est véhiculée par les bosons W et Z, deux particules massives qui, du point de vue des physiciens, ne forment qu'un seul et même «boson vectoriel». Au nombre de huit, les gluons véhiculent l'interaction forte. Notons finalement, qu'il est aussi possible d'inclure la gravitation dans le modèle standard. Si l'on adopte ce point de vue, alors une quatrième particule intermédiaire, le graviton, s'ajoute au trois autres. Elle véhicule l'interaction gravitationnelle.

Dans le modèle standard, l'intensité de chacune des quatre interactions dépend de certaines propriétés des particules, que l'on pourrait qualifier de «charges généralisées». Dans le cas de l'interaction électromagnétique, cette charge généralisée est tout simplement la charge de l'électron ; c'est la masse dans le cas de la gravitation. Dans le cas de l'interaction faible, la charge généralisée est la «charge faible» et, dans celui de l'interaction forte, c'est la «charge forte», que l'on nomme la «couleur». Si ces deux derniers termes nous semblent quelque peu abstraits, c'est que nous ne sommes pas confrontés au quotidien aux effets des interactions faibles et fortes !

Couplages variables

Les différentes charges associées aux interactions se mesurent en unités différentes ; la masse est mesurée en grammes, la charge électrique en coulombs. Toutefois, pour que l'on puisse comparer les différentes forces, les physiciens des particules utilisent des constantes de couplage sans dimension (c'est-à-dire préparées pour être sans unité) : plus une constante de couplage est grande, plus l'émission de particules intermédiaires est importante et plus l'interaction est forte. Comme nous allons le voir, ces constantes de couplage sans dimension ne sont pas des constantes fondamentales dont la valeur serait fixée : elles varient.

La constante de couplage de l'interaction électromagnétique est connue sous le nom de constante de structure fine de Sommerfeld. Sa valeur est d'environ $1/137$ aux énergies habituelles, une valeur notablement inférieure à 1. Sans une valeur aussi faible, les physiciens n'auraient pu appliquer la «méthode perturbative», la seule qu'ils ont trouvée pour résoudre les équations de la théorie quantique de l'électromagnétisme, nommée électrodynamique quantique. Les prédictions qu'ils ont faites grâce à la méthode perturbative sont si précises – 12 décimales après la virgule – que l'électrodynamique quantique est devenue la théorie la mieux vérifiée de toute la physique ! Impressionnés par ce succès, les physiciens des particules se sont inspirés de l'électrodynamique quantique quand ils ont construit les théories qui décrivent les quatre autres forces.

La masse des particules intermédiaires détermine la façon dont une interaction dépend de la distance (ou de l'énergie mise en jeu par l'interaction). Quand elle est nulle, comme c'est le cas pour le photon (la particule de l'interaction électromagnétique) et le graviton (la particule de l'interaction gravitationnelle), la portée de l'interaction est infinie. C'est ce qui explique que ces deux types de forces soient omniprésentes à l'échelle macroscopique, dans notre vie quotidienne. Les masses des bosons de l'interaction faible W et Z sont environ 100 fois supérieures à celle du proton. Pour cette raison, la portée de l'interaction faible n'excède pas le centième du diamètre du proton, c'est-à-dire environ 2×10^{-18} mètre.

Quant à la portée de l'interaction forte, elle est encore plus petite, de l'ordre du diamètre du proton, soit 10^{-15} mètre. Ce fait peut surprendre puisque les gluons ont, comme le photon ou le graviton, des masses nulles. Toutefois, il n'y a qu'aux distances très inférieures au diamètre du proton, que la constante de couplage de l'inter-

action forte devient très inférieure à 1. On peut alors, comme en électrodynamique quantique, considérer qu'une seule particule intermédiaire véhicule l'énergie de l'interaction. Les équations de la chromodynamique quantique (la théorie quantique des interactions fortes) se résolvent alors comme celles de l'électrodynamique quantique. En revanche, pour des distances supérieures, la multiplication des interactions des gluons accroît à tel point la constante de couplage de l'interaction forte, que les trois quarks vectoriels qui constituent le proton sont indissociables. Jusqu'à présent, les physiciens ne sont pas parvenus à expliquer de façon satisfaisante ce phénomène de «confinement» des quarks et des gluons au sein du proton. Ils pourraient y parvenir grâce aux nouveaux résultats qu'ils espèrent obtenir d'HERA.

Au sein d'HERA, lorsqu'un électron très énergétique heurte un proton, il émet une particule intermédiaire qui interagit avec les constituants du proton (il s'agit d'un photon ou d'un boson vectoriel). La quantité de



3. LE DÉTECTEUR ZEUS enregistre les particules issues des collisions entre les électrons et les protons de très haute énergie cinétique qui circulent dans HERA. Ultrasensible, ce détecteur haut comme une maison identifie les particules issues du choc en reconstituant leurs trajectoires.