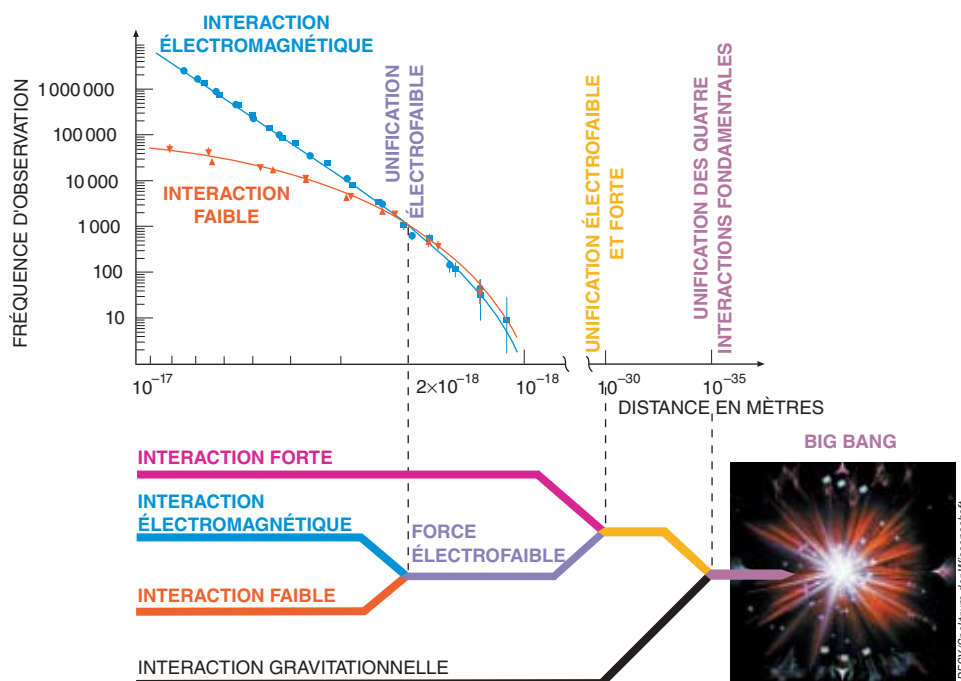


cation des quatre forces fondamentales. Aujourd'hui, la théorie la plus prometteuse est celle de la supersymétrie : chacune des particules élémentaires du modèle standard serait dotée d'un «compagnon supersymétrique». Ces derniers auraient été invisibles jusqu'à présent parce qu'ils n'interagiraient qu'à très haute énergie. Si cette hypothèse est pertinente, ces nouvelles familles de particules élémentaires seront détectables dans des accélérateurs plus puissants, tels le LHC (pour *Large Hadron Collider*), le grand collisionneur de hadrons en construction au CERN, près de Genève, et dans TESLA, un accélérateur linéaire d'électrons et de positons, dont la construction est prévue à Hambourg.

Les résultats obtenus à HERA confirment d'ores et déjà quelques-unes des hypothèses du modèle standard. Premièrement, les quarks et les électrons sont vraiment des particules ponctuelles, ou, du moins, leur diamètre ne dépasse pas un millième du diamètre du proton, soit 10^{-18} mètre. Aurions-nous enfin atteint la limite ultime de la démarche atomiste, qui nous a fait décomposer la matière en molécules, les molécules en atomes, les atomes en nuages électroniques et en noyaux, les noyaux en protons et en neutrons, et ces derniers en quarks ? Deuxièmement, nous pouvons exclure l'existence d'interactions fondamentales dont la portée excéderait 1 000 fois le rayon du proton. Troisièmement, en plus des trois dimensions d'espace qui nous sont familières, il ne peut en exister plus de trois autres, enroulées sur elles-mêmes, dont le rayon dépasserait 10^{-18} mètre (les physiciens supposent en effet qu'il pourrait exister des dimensions supplémentaires enroulées sur elles-mêmes suivant un certain rayon). Grâce aux transformations en cours sur HERA, la recherche de ces dimensions cachées sera bientôt possible avec une résolution spatiale meilleure encore.

Mer de quarks et de gluons

Malgré ces améliorations, les physiciens n'auront pas la possibilité d'observer à HERA l'unification de l'interaction forte et de l'interaction électrofaible. Toutefois, l'exploration de la structure du proton livre déjà des informations sur la nature de l'interaction forte. Ainsi les physiciens des



4. LES FRÉQUENCES de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible ont été représentées sur ce graphique. Quand les distances mises en jeu dans les collisions sont supérieures à la portée de l'interaction faible (2×10^{-18} mètre), l'interaction électromagnétique l'emporte sur l'interaction faible. Quand ces distances sont inférieures, les interactions électromagnétique et faible jouent des rôles comparables. Les deux interactions sont alors deux manifestations différentes d'une même interaction, l'interaction électrofaible. Pour des distances encore plus petites, les quatre interactions fondamentales de la nature s'unissent en une seule et même force originelle, qui aurait régné juste après le Big Bang (en bas).

expériences H1 et Zeus ont mesuré avec précision l'intensité de l'interaction forte entre quarks, et ont établi la loi qui lie la constante de couplage forte et la distance. Ces résultats ont confirmé ce que prévoit la chromodynamique quantique : la constante de couplage forte augmente très vite avec la distance.

Examinons une des méthodes de mesure employées. En plus des jets de particules émis lors de la diffusion d'un électron par un quark, un autre jet de particules, constitué de gluons est émis. Ces particules médiatrices de l'interaction forte sont émises au cours du choc avec une probabilité proportionnelle à la constante de couplage forte, c'est-à-dire à la «force» qui s'exerce entre les quarks. Les physiciens exploitent ces émissions de gluons pour déterminer comment la constante de couplage forte dépend de la distance. Ils mesurent la fréquence de ces émissions de gluons en fonction du transfert de quantité de mouvement. Leurs résultats confirment les prévisions de la chromodynamique quantique pour des distances comprises entre 10^{-16} et 10^{-18} mètre. Qu'elles aient été obtenues à HERA ou ailleurs, toutes les données coïncident avec ce que pré-

voit la théorie de la chromodynamique quantique, qui semble décrire correctement les interactions fortes.

HERA a été construit notamment pour explorer la structure du proton, objectif que les physiciens des expériences H1 et Zeus ont atteint aujourd'hui. Les incertitudes qui caractérisent les résultats de leurs études sont comprises entre deux et cinq pour cent, alors que les transferts de quantité de mouvement mis en jeu dans ces collisions couvrent plusieurs ordres de grandeur. Jamais des résultats aussi précis n'avaient été obtenus.

L'accélérateur permet aussi l'étude des transferts de petites quantités de mouvement, et les expérimentateurs ont eu la surprise de constater que le proton contient un très grand nombre de quarks et de gluons dont la quantité de mouvement est réduite. Dans les conditions d'observation ordinaires, on ne voit que les trois «quarks de valence», c'est-à-dire les trois quarks dont les quantités de mouvement sont importantes et qui sont à l'origine de la charge du proton. Toutefois, si l'on chausse des «lunettes» qui sélectionnent les seuls constituants dont la quantité de mouvement est inférieure à un pour cent de celle du proton, alors

LE MODÈLE STANDARD

LEPTONS

 Électrons
Masse :
0,0005 giga-électronvolt

 Neutrino électronique
Masse < 3 électronvolts

 Muon
Masse :
0,1 giga-électronvolt

 Neutrino muonique
Masse <
0,0002 giga-électronvolt

 Muon
Masse :
1,8 giga-électronvolt

 Neutrino tau
Masse <
0,0007 giga-électronvolt

QUARKS

 Quark Up
Masse :
0,004 giga-électronvolt

 Quark Down
Masse :
0,007 giga-électronvolt

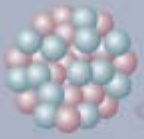
 Quark charmée
Masse :
1,3 giga-électronvolt

 Quark étrange
Masse :
0,15 giga-électronvolt

 Quark Top
Masse :
174 giga-électronvolts

 Quark Bottom
Masse :
4,2 giga-électronvolts

Aujourd'hui, on connaît 12 constituants élémentaires de la matière – six quarks et six leptons. Tous les atomes sont faits d'un nuage électronique et de deux sortes de quarks (*up* et *down*), qui constituent les noyaux. Quelle que soit leur nature, les interactions se traduisent toujours par l'échange de particules médiatrices. Ainsi, le photon est la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique ; les gluons sont les particules médiatrices de l'interaction forte entre quarks ; les bosons W et Z celles de l'interaction faible ; les gravitons, dépourvus de masse, celles de l'interaction gravitationnelle.

	Gluon	Photon	Bosons W et Z	Graviton
Particule médiatrice de	...l'interaction forte	...l'interaction électromagnétique	...l'interaction faible	...l'interaction gravitationnelle
Interagit avec :	...quarks, gluons	...quarks, leptons chargés, bosons W	...quarks, leptons	...toutes les particules
Responsable de	...la cohésion des protons, des neutrons et des noyaux atomiques 	...des propriétés chimiques, électriques et magnétiques 	...de la radioactivité, des réactions nucléaires dans le Soleil 	...de la cohésion de la Terre, du Soleil et du système planétaire 

DES

des multitudes de quarks et de gluons apparaissent. Cette découverte donne une toute nouvelle image de la «vie intérieure des protons».

Certes, longtemps avant la construction d'HERA, les physiciens savaient déjà que les quarks d'un proton émettent des gluons, lesquels sont susceptibles, à leur tour, d'engendrer d'autres gluons ou des paires quark-antiquark. Cependant, la majorité d'entre eux pensait que le nombre de gluons et de paires quark-antiquark qui coexistent avec les quarks de valence était limité : on considérait que le proton était quasiment vide. Aujourd'hui, les physiciens réalisent que, loin d'être vide, le proton est rempli d'une soupe bouillonnante de gluons et de paires quark-antiquark, où des particules se créent et s'annihilent en permanence. Ce bouillonnement de particules nous fait penser que l'existence de cette mer de quarks et de gluons dans le proton est liée au phénomène du confinement.

HERA a fourni un autre résultat étonnant. On pensait qu'au cours de collisions violentes, les protons du faisceau donneraient une multitude de nouvelles particules. Or, les physiciens ont constaté qu'environ 15 pour cent des protons survivent apparemment sans dommages aux chocs qu'ils subissent. On ignore comment les protons résistent, mais le phénomène prouve que l'interaction forte a une propriété encore inconnue qui serait responsable du confinement des quarks et des gluons au sein du proton.

Le secret des forces fondamentales

Les expériences menées à HERA stimulent la collaboration entre expérimentateurs et théoriciens. Ainsi, les groupes H1 et Zeus ont modifié leurs expériences afin d'explorer des quantités de mouvement encore plus faibles. De leur côté, les théoriciens ont créé des modèles pour décrire les nuages

de gluons observés par les expérimentateurs au cours des collisions. Peut-être comprendra-t-on bientôt pourquoi les collisions à haute énergie ne produisent jamais de quarks ou de gluons isolés, et pourquoi tant de protons résistent aux chocs.

Résumons les résultats obtenus avec HERA : grâce à cet accélérateur, les physiciens ont sondé avec des électrons la structure du proton et la nature des forces fondamentales, avec une précision jamais atteinte auparavant. Ils ont exploré de nouvelles échelles de distance et constaté que les interactions électromagnétique et faible s'y comportent comme le prédit le modèle standard. Aux grandes distances, l'interaction électromagnétique l'emporte sur l'interaction faible, mais ces interactions tendent à s'équilibrer aux courtes distances, ce qui indique leur origine commune. La partie du modèle standard qui décrit l'interaction forte – la chromodynamique quantique – a, elle aussi, été confirmée

avec une précision inégalée à courte distance. Les expériences menées à HERA ont aussi révélé la structure complexe du proton : outre trois quarks de valence qui portent la majeure partie de sa quantité de mouvement, il contient un plasma très dense de gluons et de paires quarks-antiquarks dont la quantité de mouvement est faible. Le nombre de protons qui survivent aux collisions surprend. Ces deux dernières observations changent notre regard sur l'énigme du confinement des quarks et des gluons au sein du proton.

Il y a 100 ans déjà, l'étude de la particule médiatrice de l'interaction électromagnétique avait bouleversé la physique. Max Planck cherchait à représenter par une formule la répartition du rayonnement électromagnétique d'un corps noir, et, pour ce faire, il disposait de lois imparfaites qui ne s'appliquaient que dans certains domaines d'énergies. Planck n'atteignit son objectif qu'après avoir fait l'hypothèse que l'énergie du rayonnement électromagnétique varie par quantités discrètes, par quanta. Ce concept marquait la naissance de la mécanique quantique. Il fallut encore 50 ans pour que l'on puisse calculer, dans le cadre de l'électrodynamique quantique, le rayonnement électromagnétique d'une particule chargée. Aujourd'hui, le même formalisme et les mêmes méthodes de calcul nous servent à calculer, dans le cadre de la chromodynamique quantique, les rayonnements électromagnétique, faible et fort des quarks et des gluons à très courte distance. Les résultats obtenus à HERA devraient encore nous aider à répondre aux questions ouvertes : que deviennent ces rayonnements à grande distance ? Quelle est la structure du proton ? Quelle est la cause du confinement des quarks ?

Robert KLANNER, professeur de physique expérimentale à l'Université de Hambourg, est aujourd'hui directeur de la recherche du centre DESY.

Klaus RITH et Andreas SCHÄFER, *Le spin des nucléons*, in *Pour la Science*, n° 262, août 1999.

Harald Fritzsch, *L'infiniment petit en physique*, in *Pour la Science*, n° 278, décembre 2000.

Chris Llewellyn SMITH, *Le grand collisionneur de hadrons*, in *Pour la Science*, n° 275, septembre 2000.



Partager la connaissance
sur l'eau et la santé
sous l'égide de
28 experts internationaux.

**3 Prix de Recherche de
100.000 F, chacun
15.245€**



**Projet Evian
"Hydratation
et santé humaine"**



**Projet Volvic
"Oligo-éléments
et santé humaine"**
(Fe, F, Zn, I, Si, Se, Mn, Cu ...)



**Projet Badoit
"Minéraux
et santé humaine"**
(Ca, Mg, K, Na ...)

CARACTÉRISTIQUES DES PROJETS

Le projet doit s'inscrire dans une perspective d'amélioration de la santé. Il peut porter sur tous domaines de la recherche fondamentale ou appliquée, de l'épidémiologie, ou de la santé publique, mais devra répondre aux 2 critères d'originalité et d'utilité pour la santé.

LES CANDIDATS CONCERNÉS

- Laboratoire, groupement de laboratoires ou organisme de recherche public ou privé.
- Chercheur en thèse ou enseignant, post-doctorat ou attiré, de moins de 40 ans, appartenant à une structure de recherche.

LE JURY

Il est constitué des 28 membres du Comité Scientifique du Centre Evian Pour l'Eau.

DOSSIER DE CANDIDATURE

Auprès du Centre Evian Pour l'Eau :

Dr Viviane de la Guéronnière, 60, bld du Maréchal Joffre - 92340 Bourg la Reine,
Sur notre site internet **www.centre-evian.com**

Date limite de remise des dossiers : 30 JUILLET 2001