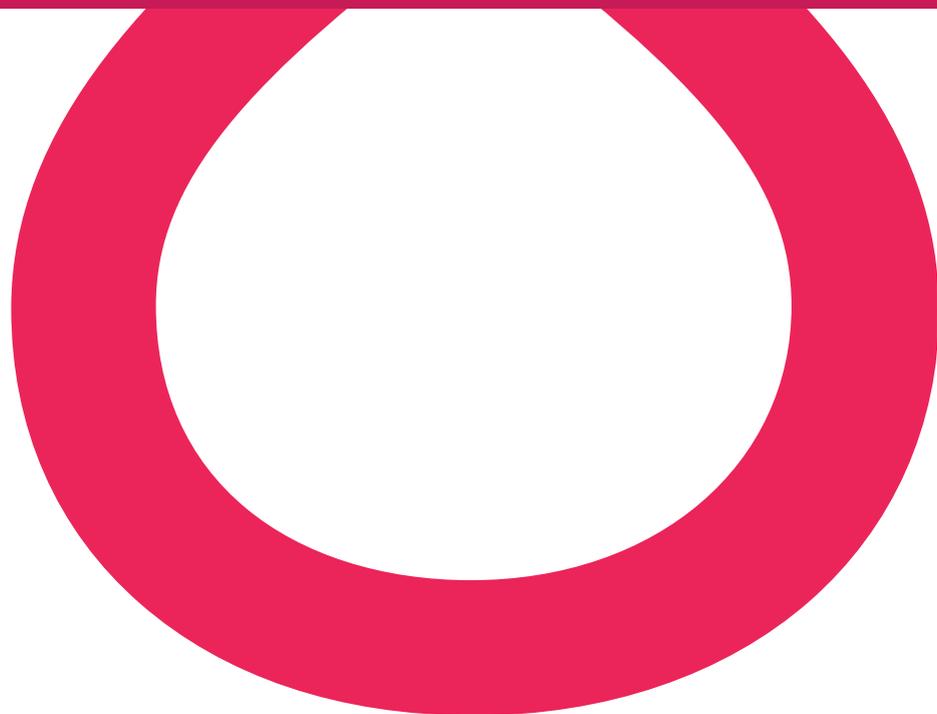


PASSEPORT POUR LES
DEUX INFINIS

VERS L'INFINIMENT PETIT



DUNOD

SOMMAIRE

Ont participé		
	Une particule, c'est gros comment ?	4
	Du détecteur à la mesure	6
	Les forces fondamentales	8
Nicolas Arnaud	Une formule célèbre : $E = Mc^2$	10
Ursula Bassler	De l'atome au noyau	12
Dominique Boutigny	Les noyaux, protons et neutrons	14
Yann Coadou	Zoologie des noyaux atomiques	16
Sébastien Descotes-Genon	Les quarks	18
Antoine Drouart	La soupe de quarks et de gluons	20
Marie-Pauline Gacoin	Les accélérateurs de particules	22
Sophie Kerhoas-Cavata	Le photon	24
Hervé de Kerret	Les neutrinos	26
Étienne Klein	L'antimatière	28
Fabrice Piquemal	Le Modèle Standard	30
Francesco Polci	Le boson de Higgs	32
François Richard	Au-delà du Modèle Standard	34
Philippe Rosnet	L'unification des forces	36
Patrick Roudeau	La gravitation quantique	38
Perrine Royole-Degieux	Les coulisses d'une expérience	40
Yves Sacquin	Le LHC	42
François Saint-Jalm	Les chasseurs de particules	44
Julien Serreau	La soupe primordiale de l'Univers	46
Gaëlle Shifrin	Les premiers résultats d'ATLAS et de CMS	48
Jean-Luc Sida	Comprendre l'antimatière	50
Viola Sordini	Les neutrinos de Chooz	52
Michel Spiro	Le futur du LHC	54
Anna Thibeau	Les prochains accélérateurs	56
Benoît Viaud	Le plus vaste ordinateur du monde	58
Daniel Vignaud	L'énergie nucléaire	60
	Voir et soigner avec des particules	62
	« Voir » la matière grâce au rayonnement synchrotron	64
	Composants élémentaires de la matière	66
	Glossaire	67

VERS L'INFINIMENT PETIT

Un jour, il y a près de 10 mille ans, un jeune berger gardait son troupeau par une chaude nuit d'été dans une vallée du croissant fertile au moyen orient. Depuis que le léopard noir avait tué plusieurs de ses brebis il veillait chaque nuit pour protéger ses animaux et chaque nuit, malgré sa peur, il admirait l'infinie beauté de la voûte céleste. Comme ses parents avant lui et comme les parents de ses parents avant ses parents et comme tous ses ancêtres depuis la nuit des temps il s'interrogeait sur ces myriades de mondes fascinants qui tournoyaient au-dessus de sa tête. Partout où il portait le regard il voyait des milliers d'étoiles. Il se sentait si petit et perdu dans cette immensité. Il se sentait aussi petit et perdu que les cirons sur la croûte du fromage qu'il avait mangée la veille. Souvent il passait de longs moments à regarder ces êtres minuscules pour lesquels la croûte du fromage semblait tout un monde. Comme ses parents avant lui et comme les parents de ses parents avant ses parents et comme tous ses ancêtres depuis la nuit des temps il s'interrogeait sur ces myriades de mondes fascinants que constituaient chaque chose autour de lui, des moisissures sur des aliments avariés aux fourmis sous chaque pierre...

Ainsi, depuis que l'Homme est Homme, il s'interroge sur sa place dans l'Univers entre ces immensités qui l'englobent et ses mini-mondes qu'il découvre en observant ce qui l'entoure. Chacun de nous a très tôt exploré du regard son environnement, ouvrant des yeux ronds sur les grands espaces de la voûte céleste ou plissant les yeux pour distinguer les détails des choses très petites, se sentant tour à tour lilliputien puis Gulliver.

Pour pouvoir voir plus loin ou plus petit, l'Homme s'est fabriqué des outils. Les loupes sont connues depuis l'antiquité et sont utilisées pour voir des choses trop petites à l'œil nu comme le remarque Sénèque au 1^{er} siècle avant J.-C. Puis, il faut attendre le XVI^e siècle pour que la première lunette permette à Galilée d'explorer l'infiniment grand ou que le premier microscope donne accès à l'infiniment petit.

Depuis, l'Homme n'a eu de cesse de poursuivre cette double exploration de son monde vers l'Univers le plus lointain ou vers les éléments les plus petits en construisant des machines de plus en plus extraordinaires comme l'ELT au Chili ou le LHC à Genève.

Ce livre vous convie à cette double exploration de l'infiniment petit dans les pages qui suivent et de l'infiniment grand si vous retournez ce livre.

Ainsi, ce livre vous racontera comment, en regardant le plus loin possible et en explorant les plus petites échelles de notre Univers, on finit par voir l'origine de toute chose et découvrir les particules et les lois qui régissent notre Univers.

Bon voyage à la découverte des deux infinis !

Philippe Chomaz, directeur de l'Institut de Recherche
sur les lois Fondamentales de l'Univers

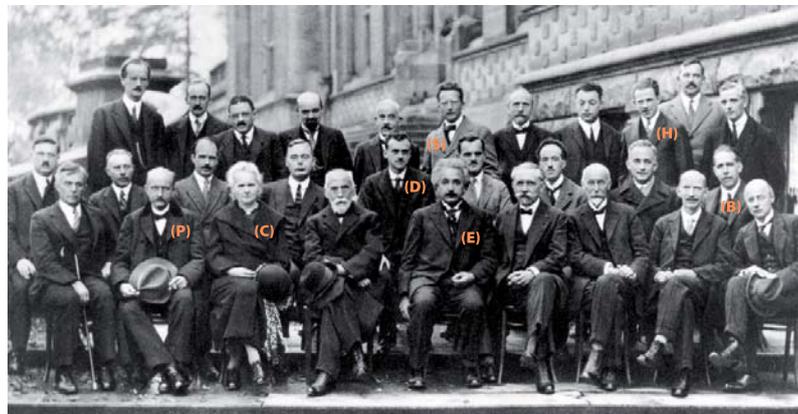
UNE PARTICULE, C'EST GROS COMMENT ?

La physique de l'infiniment petit cherche à observer des détails toujours plus fins de la structure de la matière. À chaque étape sont apparus de nouveaux objets, que les physiciens se sont empressés d'étudier !

Participants au
5^e congrès Solvay
en 1927

Ce congrès, baptisé du nom de son mécène l'industriel belge Ernest Solvay, avait pour thème « électrons et photons ». C'est là que la mécanique quantique – très différente de la physique dite « classique » – a été acceptée par la communauté des scientifiques.

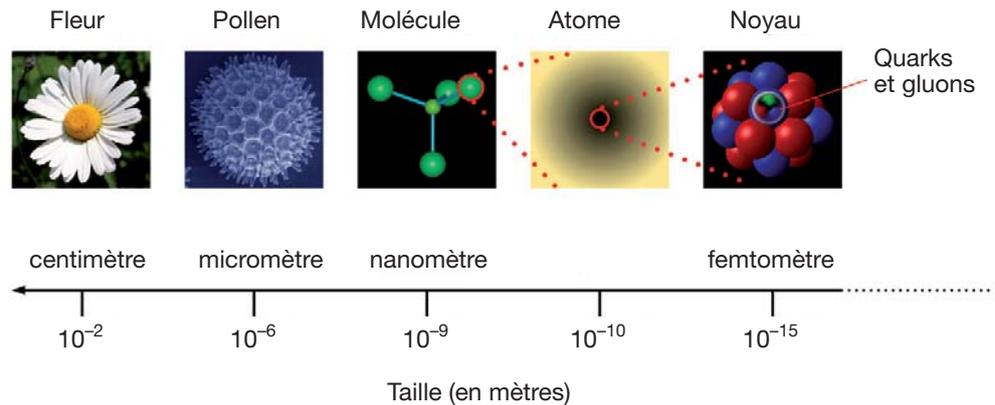
Signe particulier de cette conférence : 17 des 29 participants avaient obtenu ou allaient obtenir un prix Nobel ! Parmi eux on peut citer Niels Bohr (B), Marie Curie (C), Paul Dirac (D), Albert Einstein (E), Werner Heisenberg (H), Max Planck (P) ou encore Erwin Schrödinger (S).



Les physiciens passent leur temps à raisonner en termes d'ordre de grandeur : quelle est la vitesse typique d'une voiture ? La taille habituelle d'un grain de sable ? La distance entre deux planètes du système solaire ?

En effet, pour modéliser un phénomène, il faut savoir identifier les éléments pertinents et les décrire en utilisant les outils appropriés, tout en négligeant ce qui est trop petit, trop gros, trop lent ou trop rapide. Ainsi, pour étudier la course d'une voiture sur un circuit automobile, inutile de s'intéresser à la rotation de la Terre autour du Soleil (les échelles de distance et de temps sont bien trop grandes) ou au mouvement des grains de poussière dans la boîte à gants (les mêmes échelles sont bien trop petites). Et ce n'est pas la peine de recourir à la mécanique quantique ou à la relativité générale pour déterminer si la voiture sortira de la route au prochain virage !

Pour comprendre les distances associées à l'infiniment petit, commençons par nous, les êtres humains. Notre taille typique est de l'ordre du mètre – eh oui, voilà comment les physiciens nous considèrent, que nous mesurons un mètre soixante ou deux mètres... Chacune de nos cellules est un million de fois



plus petite, et avec un grossissement cent fois supérieur (un cent-millionième de mètre), vous pouvez distinguer l'ADN qui est au cœur de leurs noyaux.

Grossissez encore dix fois, et vous atteignez le milliardième de mètre : c'est la distance entre deux atomes d'une molécule. Les atomes eux-mêmes sont dix fois plus petits. Ils sont constitués d'électrons et d'un noyau atomique de taille dix mille fois plus modeste (cent millièmes de milliardième de mètre), constitués de protons et de neutrons eux-mêmes dix fois plus petits. On arrive alors au millionième de milliardième de millimètre.

Plongeons encore plus profondément dans la matière. Les neutrons et les protons sont constitués de quarks dont on ne connaît pas la taille (au moins mille fois plus petite que celle des protons). On ignore également celle des électrons. Jusqu'à présent, les expériences semblent indiquer que les quarks et les électrons sont ponctuels et donc élémentaires... Le sont-ils vraiment, ou la résolution de nos expériences est-elle encore trop faible pour mettre en évidence leur structure ? Personne ne le sait.

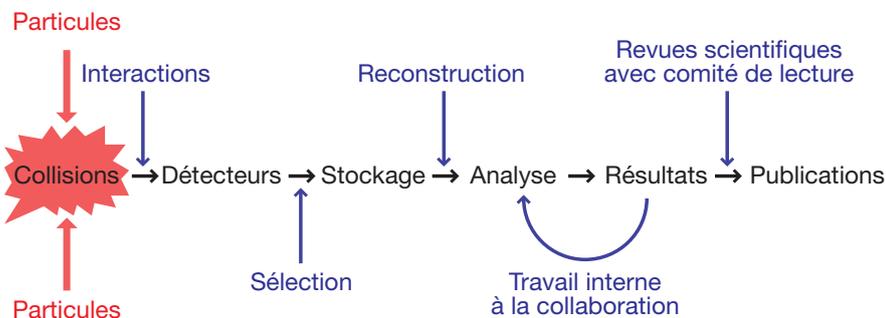
À chaque niveau de détails sa discipline scientifique : physique des matériaux, chimie, physique atomique, physique nucléaire, physique des particules... Toutes ces échelles de distance ont une contrepartie en termes d'énergie. Car plus on veut sonder la matière sur de courtes distances, plus il faut fournir d'énergie aux projectiles employés, et plus les accélérateurs nécessaires sont de taille importante. Voilà qui explique pourquoi les physiciens des particules, dans leur course à l'infiniment petit, se sont aussi lancés dans des expériences toujours plus grandes – jusqu'au LHC, dont les détecteurs ont la taille d'immeubles de plusieurs étages.

D'une fleur aux quarks : vers l'infiniment petit

À chaque échelle de longueur correspondent de nouveaux détails qui apportent des informations supplémentaires sur la structure de la matière. En-deçà du nanomètre, les figures sont des représentations et non pas des photos réelles. La physique de l'infiniment petit explore un large domaine qui part de l'angström (un dixième de milliardième de mètre, la taille caractéristique d'un atome) et s'arrête actuellement au niveau du milliardième de milliardième de mètre. Les échelles plus petites se dérobent encore à l'expérience et leur contenu éventuel est un mystère.

DU DÉTECTEUR À LA MESURE

L'analyse des données d'un détecteur de physique des particules nécessite une compréhension profonde des instruments de mesure, l'écriture de programmes informatiques complexes et la maîtrise d'outils mathématiques de pointe.



En physique subatomique, on essaie de mesurer au plus près les caractéristiques des particules comme leurs masses ou leurs manières de se désintégrer. Une mesure réussie se mijote comme un bon petit plat. Il faut

des ingrédients de qualité, les particules, fournies par le producteur-accelérateur. Les ustensiles, ou détecteurs, sont performants et connus dans leurs moindres détails.

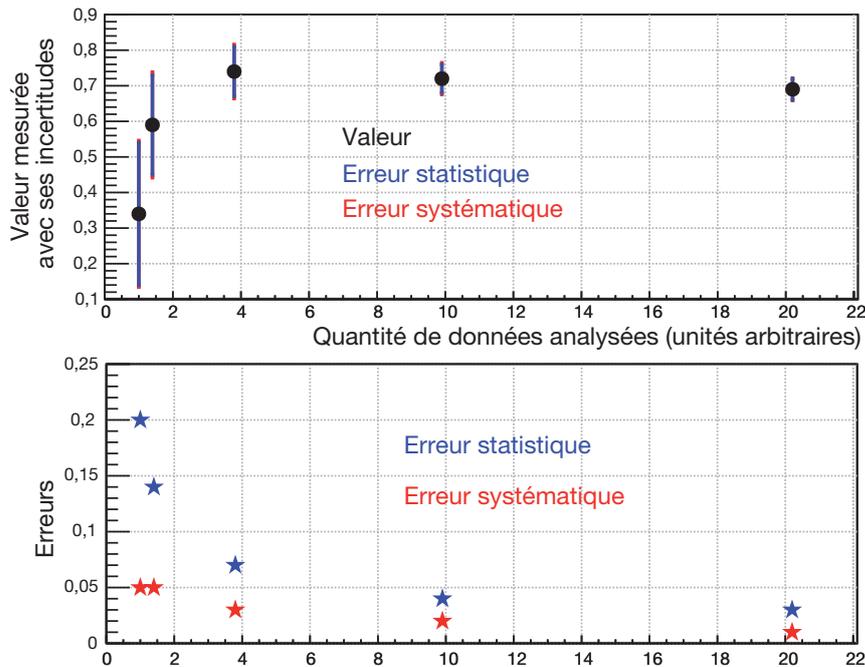
Quant aux recettes, elles évoluent sans cesse en fonction des demandes des scientifiques et des performances des instruments. Certaines améliorent des résultats obtenus ailleurs tandis que d'autres s'aventurent en terrain inconnu, guidées par des calculs théoriques. À peine rendue publique, une nouvelle étude subit les critiques de chercheurs du monde entier, désireux de la comprendre et d'évaluer sa qualité. Les mêmes exigences sont présentes en interne : tant qu'une collaboration (c'est-à-dire l'ensemble des personnes, parfois plusieurs milliers, travaillant sur une même expérience) n'est pas convaincue par un résultat, il ne sort pas de sa « cuisine » !

Si les analyses de physique sont complexes et variées, elles suivent les mêmes étapes. En amont, un accélérateur prépare de grandes quantités de particules qui s'entrechoquent au centre de détecteurs et produisent de nouvelles particules, finalement détectées. Les instruments de mesure ont une structure en poupées russes : de l'intérieur (point de collision) vers l'extérieur, plusieurs appareillages complémentaires se succèdent. Ils sont chargés de mesurer les caractéristiques

Différentes étapes d'une analyse de données

De nombreuses étapes séparent les collisions entre particules dans le détecteur de la publication des résultats de physique. Une fois sélectionnés, les événements intéressants sont stockés sur disque, interprétés (on parle de reconstruction) puis étudiés en détails.

Cette dernière étape peut durer longtemps : l'analyse doit faire ses preuves à l'intérieur de la collaboration avant que ses résultats ne soient rendus publics.



Amélioration d'une mesure au cours du temps

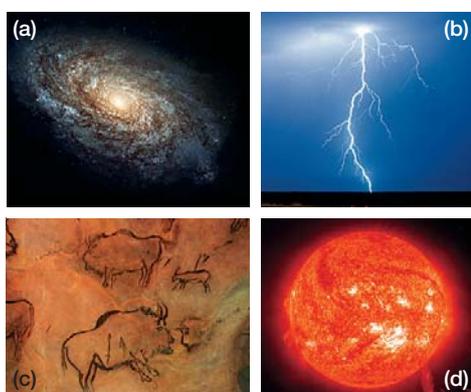
Évolution d'une vraie mesure expérimentale au cours du temps grâce à l'accumulation des données et aux progrès des techniques d'analyse. L'axe des abscisses (échelle arbitraire) donne la quantité de données utilisées pour obtenir le résultat. Entre le premier et le dernier point, séparés par 8 ans, le nombre d'événements analysés a été multiplié par plus de 20 ! Le graphique du haut montre les valeurs mesurées (en noir) avec les erreurs statistiques (en bleu) et systématiques (en rouge) associées. L'évolution des incertitudes avec le temps est détaillée en dessous. L'erreur statistique décroît à mesure que le nombre d'événements augmente : on passe de 20 % à 3 %. L'erreur systématique reste presque constante. Négligeable au départ, sa contribution est du même ordre que l'erreur statistique pour la dernière mesure.

(énergie, vitesse, masse) des particules qui les traversent ce qui permet de les identifier et de remonter aux processus physiques qui leur ont donné naissance.

Même si les détecteurs sont aujourd'hui gigantesques, ils sont toujours construits avec une seule finalité : comprendre les phénomènes qui se produisent en leur centre lors des collisions. Leurs données sont traitées par de puissants ordinateurs et stockées sur de gros disques durs, accessibles du monde entier *via* internet. L'informatique est omniprésente : chaque mesure demande une grande puissance de calcul, partagée par des centaines de machines en réseau. Il faut séparer les quelques événements cherchés (le signal) de tous les autres (le bruit de fond). Une mesure (par exemple la probabilité qu'une particule se désintègre en deux autres particules plus légères) est toujours accompagnée de son erreur, ou incertitude. Contrairement au langage courant, ce terme n'est pas employé pour indiquer que les scientifiques se sont peut-être trompés. Au contraire, il vise à prouver que ceux-ci sont conscients des limites de leur résultat et qu'ils sont capables d'estimer la taille de l'écart entre la vraie valeur – inconnue – et celle qu'ils ont calculée. Si une interaction entre particules obéit à des lois de probabilité précises, la Nature « pioche » au hasard lors de chaque collision parmi toutes les combinaisons possibles, un peu comme lors d'un tirage du loto. Ce caractère aléatoire se retrouve dans l'incertitude statistique qui vient du fait que l'analyse est basée sur un nombre limité d'événements. L'erreur systématique prend en compte la précision du détecteur et les caractéristiques de la méthode suivie pour obtenir le résultat.

LES FORCES FONDAMENTALES

Les physiciens décrivent tous les phénomènes de l'Univers grâce à quatre interactions, ou forces, fondamentales. Si deux d'entre elles, la gravité et l'électromagnétisme, nous sont assez familières, les deux autres, les interactions « forte » et « faible », sont spécifiques du monde de l'infiniment petit.



Les 4 interactions fondamentales à l'œuvre

(a) La gravité explique l'évolution des galaxies et aussi la chute des corps.

(b) L'interaction électromagnétique combine l'électricité (ici la foudre) et le magnétisme. (c) L'interaction faible gouverne

de nombreuses désintégrations radioactives dont celle du carbone-14, utilisée par exemple pour dater l'art pariétal. (d) Enfin, l'interaction forte est responsable de la cohésion des noyaux et également de réactions de fusion dans les étoiles.

Dans la vie courante, pour déplacer un objet, nous devons habituellement le toucher en lui appliquant une force de contact. Il existe également des forces s'exerçant à distance, par exemple lorsque deux aimants s'attirent ou se repoussent.

Toutes ces forces s'interprètent en termes de quatre interactions fondamentales, chacune transmise par une ou plusieurs particules appelées « bosons intermédiaires ». Deux particules, par exemple des électrons, interagissent entre elles

en échangeant certains de ces bosons intermédiaires. Suivant la masse de ce(s) boson(s), l'interaction agira à plus ou moins grande portée – plus leur masse est grande, plus la portée est courte.

Si deux objets se repoussent ou s'attirent électriquement, c'est parce qu'ils ont chacun une charge électrique. Là encore, nous retrouvons la même règle à l'échelle subatomique. Une particule qui est affectée par une interaction possède une charge associée – charge qui n'est pas toujours aussi simple que la charge électrique.

Examinons à présent les quatre forces fondamentales. La gravitation est celle que nous connaissons le mieux dans notre vie quotidienne, mais c'est aussi l'interaction la plus faible. Elle est indécélable à l'échelle atomique, et on ne sait pas encore la traiter dans le formalisme de la mécanique quantique qui décrit les trois autres forces. Son boson intermédiaire serait une particule de masse nulle appelée graviton, qui reste à découvrir. C'est la masse qui joue ici le rôle de charge, et la force est toujours attractive.