

plus vous tirez sur un quark pour le faire sortir du proton, plus la force de rappel est grande. Mais à des énergies extrêmes ou dans les conditions de densité ou de température très grandes, il se pourrait que les quarks soient libérés. Au début de l'Univers, les quarks et les gluons n'étaient pas confinés à l'intérieur des protons.

Toutefois, pour qu'une particule existe, pour qu'on puisse la voir, il faut qu'elle interagisse. Si des particules n'interagissent pas, ou très peu, elles peuvent échapper à toute observation et le sens du mot «exister» devient très compliqué. Ainsi les propriétés des neutrinos, qui n'interagissent que très peu avec la matière, nous sont inconnues. Voir une particule, c'est aussi déterminer ses propriétés...

LA MASSE MANQUANTE

Une énigme de l'Univers est liée à cette observation de particules. Les mouvements des objets les uns par rapport aux autres dans l'Univers obéissent à la loi de la gravitation universelle ; à partir de la dynamique des objets, elle détermine la quantité de masse nécessaire pour que les objets restent liés. Ainsi, dans notre Galaxie, les étoiles tournent autour du centre de la galaxie ; en utilisant les lois de Newton et de Kepler, on calcule la masse totale de notre Galaxie. Or dans notre Galaxie, la masse visible des étoiles et de la poussière interstellaire n'est que dix pour cent de la masse qu'il faut pour maintenir les objets ensemble : 90 pour cent de la masse de notre Galaxie échappe à toute détection.

Peut-être cette masse n'interagit-elle pas, mais alors elle ne permettrait pas d'expliquer pourquoi les objets stellaires sont liés. Il se pourrait que la masse manquante soit constituée de planètes encore invisibles. Il n'est pas exclu non plus que la masse manquante soit le fait de particules élémentaires qui n'interagissent essentiellement que par les forces gravitationnelles. Ce pourraient être les neutrinos s'ils ont une masse, ou des particules que l'on n'a pas encore découvertes dans les accélérateurs... Les trous noirs, une autre possibilité, ne sont détectables que par des effets indirects, par exemple un effet de lentille gravitationnelle, c'est-à-dire de courbure des rayons lumineux. Tout ce qui pourrait avoir une masse est un candidat.

LA NAISSANCE DE LA MASSE

Les masses des particules restent un grand mystère : pourquoi les particules ont-elles une masse ? Et comment la pré-

voir ? La théorie la plus satisfaisante actuellement, le modèle standard, rend compte de toutes les propriétés observées des particules : leurs interactions et leur comportement lorsqu'elles entrent en collision.

Toutefois on ne sait pas calculer leur masse. La solution viendra peut-être d'un chaînon manquant, prévu par le modèle standard, qui s'appelle la particule de Higgs, du nom du physicien anglais Peter Higgs. Aux tout premiers instants de l'Univers, les particules sont sans masse et c'est lorsque leur énergie décroît en dessous d'une valeur liée à la masse de la particule de Higgs (probablement une centaine de giga-électronvolts), un dixième de seconde après la création de l'Univers, que les particules acquièrent leur masse. Le modèle standard prévoit aussi comment cette particule de Higgs doit se désintégrer en des particules connues, par exemple les bosons Z et W. L'étude de ces désintégrations permettra à la fois de se convaincre de l'existence de cette particule et de mesurer sa masse.

Il n'est pas certain que le modèle standard soit l'explication définitive. Il se pourrait que la structure des particules de Higgs soit un peu plus complexe que celle prévue dans le modèle standard minimal, et qu'il existe plusieurs particules de Higgs, mais dans l'ensemble, on sait assez bien comment on doit les rechercher. Heureusement qu'on le sait assez bien parce qu'on s'attend à ce que sur les milliards de collisions que produira le futur collisionneur à hadrons du CERN on puisse n'extraire que quelques particules de Higgs : une aiguille dans une meule de foin. Pour cette recherche, quelques deux à trois mille physiciens travaillent sur la détection de la particule de Higgs dans un effort mondial sans précédent.

LA GRANDE UNIFICATION, AVEC LA MASSE

Un vrai impossible actuel est l'unification de la gravitation aux trois autres forces d'interaction. Le médiateur de la gravitation est le graviton que l'on n'a pas trouvé ; peut-être ne le trouvera-t-on jamais. On essaie actuellement de voir les ondes gravitationnelles. Un projet franco-italien, Virgo, devrait voir le jour vers l'an 2000 pour détecter des ondes gravitationnelles qui viendraient de catastrophes dans l'espace, de collisions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons par exemple.

Une onde gravitationnelle induit des changements des longueurs dans l'espace. La longueur d'un objet varie légè-

rement, très légèrement, quand passe une onde gravitationnelle. Imaginez un objet d'une longueur égale à la distance entre la Terre et la Lune : la variation de la longueur au passage de l'onde de gravitation sera inférieure à la taille d'un atome...

Cette notion de masse d'une particule ne traduit que notre ignorance de ce qui se passe à l'intérieur. Pour la charge électrique il n'en est pas autrement. La théorie de la renormalisation montre qu'à chaque niveau de complexité, on arrive à dégager des lois physiques pratiquement indépendamment de ce qui se passe en dessous. On sait bien que derrière cette complexité, il y a des constituants plus élémentaires, mais on arrive à se débarrasser de cette physique en prenant un petit nombre de paramètres, dégagés des lois, qui résument ce qui se passe à des échelles plus petites. Ainsi la température et la pression intègrent notre connaissance des lois qui régissent les collisions entre atomes. Similairement la masse, la charge électrique d'une particule élémentaire, cache notre ignorance des phénomènes à une échelle plus petite.

LA DÉRAISONNABLE EFFICACITÉ DES MATHÉMATIQUES

Nos connaissances sur les particules élémentaires reposent sur des modèles mathématiques d'une grande finesse. Yang, prix Nobel de Physique, a écrit : «On ne sait pas comment, mais la Nature choisit un petit sous-ensemble des magnifiques mathématiques créées par l'Homme. C'est ce sous-ensemble que les théoriciens de la physique essaient d'exploiter».

Plus les siècles passent, plus l'efficacité conjointe de la physique et des mathématiques semble se consolider à travers des expériences dont on prévoit le résultat et qui font apparaître d'autres choses, lesquelles ouvrent des pistes pour aller encore plus loin dans la recherche mathématique. La déraisonnable efficacité des mathématiques reste une énigme, un mystère, du domaine de la métaphysique.

Michel SPIRO est Chef du service de physique des particules au Commissariat à l'Énergie Atomique à Saclay.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 10 avril 1996, à 9 heures.

Les comités d'éthique servent-ils la démocratie?

PHILIPPE LAZAR

À la suite de la première fécondation *in vitro* pratiquée en France, les pouvoirs publics ont pris, en 1983, la décision de créer un Comité consultatif d'éthique des sciences de la vie et de la santé, chargé de «donner son avis sur les problèmes moraux soulevés par la recherche dans les domaines de la médecine, de la biologie et de la santé». Parmi ses modalités d'intervention, il devait – responsabilité tout à fait originale pour une instance officielle – organiser chaque année une conférence publique sur «les questions importantes se rapportant à ses travaux». Un pas important était ainsi accompli dans le sens de l'association de la population tout entière à la réflexion éthique. Le comité s'est fort bien acquitté de la mission qui lui était ainsi confiée d'informer les citoyens, prenant notamment l'heureuse initiative d'inviter des élèves et des étudiants à assister aux Journées annuelles d'éthique et faisant à cette occasion un remarquable effort de présence dans plusieurs villes autres que la capitale.

Onze années plus tard, la loi du 29 juillet 1994 recrée, à peu près dans les mêmes termes, un comité portant le même nom que le précédent. Mais, différence majeure, cette loi stipule que le comité doit désormais non seulement exprimer des avis, mais aussi «publier des recommandations». Il est donc chargé – et cela de sa propre initiative! – de guider les citoyens sur ce qu'il convient de faire et de ne pas faire en matière d'utilisation des découvertes biomédicales. Par une subtile nuance de rédaction, un pas vers ce qu'il faut bien appeler une certaine forme de normalisation a été ainsi accompli, sans que l'on en mesure parfaitement, semble-t-il, toutes les implications.

Personne ne peut nier qu'il est, dans une société, des situations dans lesquelles il convient que la collectivité nationale établisse le droit, c'est-à-dire définisse ce que sont les transgressions de comportement non admises et passibles de sanctions. La loi est l'instrument démocratique qui permet de le faire, sous l'autorité de la représentation nationale. Confier la tâche de préparer ces interdits à un comité de Sages constitue indéniablement une



Philippe Lazar.

atteinte, même si elle n'est que partielle, aux prérogatives légitimes du Parlement.

On peut se demander si, plus profondément encore, l'initiative en question ne contredit pas la notion même de réflexion éthique *en tant que telle*. Qu'est-ce, en effet, qu'une réflexion collective de cette nature? N'est-elle pas, avant tout, la confrontation de points de vue *différents* face à une situation nouvelle, engendrée par des progrès de la connaissance qui suscitent des interrogations d'ordre moral? Et n'est-ce pas la *maïeutique* qui permet, à partir de ces interrogations, de parvenir à des décisions individuelles ou collectives qui constituent le cœur même de cette réflexion partagée?

Dès lors, est-il judicieux de gommer, pour partie, le processus social qui permet, à partir d'opinions quelquefois radicalement opposées, de parvenir à des compromis acceptables entre les citoyens, à une tolérance réciproque fondée sur un effort de compréhension en profondeur du point de vue de l'autre? N'y a-t-il pas un grave danger pour la démocratie à atténuer ainsi le rôle du *débat* entre les citoyens, cet élément fondateur du contrat social?

POUR UNE ÉTHIQUE PAR LE DÉBAT

D'autres évolutions étaient-elles possibles et sont-elles encore concevables? Il faudrait pour cela que le Comité national d'éthique change délibérément de modalités de fonctionnement et revienne à ce qui devait constituer sa fonction essentielle : éclairer les citoyens sur les *problèmes* posés et non leur «souffler» des solutions toutes faites. Il suffirait, à cette fin, qu'il fasse *systématiquement* instruire de façon contradictoire chaque dossier par au moins deux groupes indépendants de rapporteurs, puis qu'il rende publiques leurs conclusions respectives en mettant en valeur à la fois leurs probables convergences et leurs inévitables divergences. Il créerait ainsi, pour les citoyens et leurs représentants légitimes, un espace de libres débats, issu de ses propres réflexions, à l'image même des nouvelles libertés potentielles de pensée et d'action qu'apporte en permanence le mouvement de la science.

Le débat d'éthique n'a pas pour objet de «contenir» les avancées du savoir. Il offre, tout au contraire, une exceptionnelle occasion de faire partager par les citoyens les joies, les difficultés et les responsabilités qu'elles engendrent. Il peut contribuer à la promotion de l'ambitieux projet de société que nous assignait naguère Jacques Monod : promouvoir une véritable «éthique de la connaissance». Il ne saurait, dans cette perspective, être institutionnellement accaparé par des «spécialistes», quels que soient leur compétence et leur désir de bien faire.

Est-ce là une utopie? On peut certes le penser, mais les utopies de cette nature ne sont-elles pas le fondement même de l'espace politique et social que l'on appelle, précisément, la *démocratie*?

Philippe LAZAR est directeur général de l'INSERM.

Philippe LAZAR, *L'éthique biomédicale en question*, éditions Diana Lévi.

Les tables astronomiques

DENIS SAVOIE

Les Tables pruteniques, qui datent du XVI^e siècle, furent performantes, grâce à quelques concours de circonstances heureux.

La prévision de la position des astres dans le ciel est l'objectif des astronomes depuis l'Antiquité. Pour ce faire, il leur fallait établir des modèles prédictifs des mouvements planétaires, fondés sur leurs observations. Au II^e siècle avant notre ère, l'astronome et mathématicien grec Hipparque inaugure la grande période de l'astronomie grecque grâce à ses modèles géométriques et à ses observations. Au II^e siècle de notre ère, Ptolémée reprend ce travail et perfectionne le modèle d'Hipparque.

Observant la révolution des planètes dans le ciel, Ptolémée en déduisait leurs périodes de révolution et les variations par rapport à ces périodicités. L'*Almageste* de Ptolémée est l'une des œuvres les plus gigantesques de l'histoire des sciences : y sont accumulées des milliers de valeurs, issues de calculs trigonométriques, et donnant les positions des planètes et de centaines d'étoiles au fil des siècles.

Au XII^e siècle, l'Occident découvre les tables planétaires dans la traduction de l'*Almageste*. Le développement de l'astronomie, stimulé par l'intérêt des notables pour l'astrologie, suscite la production de nouvelles tables astronomiques. Aux XII^e et XIII^e siècles, ces tables sont généralement traduites de l'arabe.

Puis, vers 1320, apparaissent dans les milieux astronomiques parisiens des tables commandées par le roi Alphonse X de Castille : ce sont les Tables alphonsines. Comme les autres, elles ne sont que colonnes de chiffres, et doivent leur succès au «mode d'emploi» qui en facilite l'interprétation. L'engouement est tel qu'à partir du XIV^e siècle, elles supplantent toutes les autres. Si leur utilisation est plus aisée, leur précision n'est guère meilleure que celle des tables précédentes : les valeurs

numériques sont recopiées et les erreurs se répètent.

En 1543, Copernic publie *De revolutionibus*, qui contient également des tables astronomiques. Dans cet ouvrage, la Terre cesse d'être le centre de l'Univers ; elle y est remplacée par le Soleil. Reprenant les données de l'*Almageste*, Copernic effectue un changement de repère : il remplace la Terre fixe par le Soleil et met la Terre et les planètes en mouvement autour du Soleil. Pour établir ses tables, Copernic se contente d'un

nombre d'observations très réduit, et ne porte aucun jugement critique sur les observations de ses prédécesseurs. Il choisit des observations qui ont une importance historique ou d'autres qui ne s'éloignent pas trop de ses propres résultats.

Ainsi, pour établir l'excentricité de l'orbite terrestre (le décalage entre le centre de l'orbite terrestre et le Soleil), il n'utilise que trois observations : une faite par Ptolémée, une par Albategnius, un astronome arabe du IX^e siècle, et une qu'il réalise en 1515. Ces trois valeurs sont assez voisines, mais semblent indiquer une diminution de l'excentricité : Copernic construit une loi de variation de l'excentricité compatible avec ces trois points, et il en déduit des valeurs intermédiaires – fausses, puisque l'excentricité ne varie pas comme il l'imagine. Copernic établit un système planétaire où presque tous les paramètres orbitaux varient en fonction du temps. Il s'efforce de justifier tous les écarts entre les observations et sa théorie.

Dans le système de Copernic, les planètes décrivent des cercles autour du Soleil. En réalité, le système copernicien est encombré d'épicycles (de petites trajectoires circulaires superposées au mouvement général), fluctuations minimes qui ont pour objet de compenser les irrégularités apparentes.

Copernic reste prisonnier de l'astronomie ptoléméenne, car il fait une confiance absolue aux observations de ses prédécesseurs. Il complique sa belle mécanique, pour adapter son modèle aux observations, sans imaginer qu'elles peuvent être entachées d'erreurs. La notion d'erreur expérimentale est inconnue.

L'année 1551 marque un tournant dans l'histoire des tables planétaires. C'est l'année de la publication des Tables pruteniques, dues à l'astronome allemand Erasm Reinhold. Ce sont les premières fondées sur l'hypothèse de Copernic. Bien que Reinhold ne semble pas avoir cru à l'hypothèse héliocentrique, il passe sept années de sa vie à recalculer, à compléter et à corriger les données publiées dans le *De revolutionibus*. La précision de ses tables est 1 000 fois supérieure à celle des tables de Copernic. Il prétend que l'on peut désormais prévoir la position des étoiles et des planètes sur des siècles.

Cette affirmation était erronée, car les erreurs, minimes lorsque les tables furent établies, devaient s'amplifier inéluctablement au cours du temps.

NICOLAI COPERNICI									
Mantis prothaphæreses.									
Numeri cometarum		Prothaphæreses cometarum		Scripturae prothaphæreses		Parallaxes cometarum		Eccentricitates cometarum	
Gra.	Min.	Gra.	Min.	Scr.	Min.	Par.	Min.	Ecc.	Min.
1	57	0	32	0	0	1	8	0	8
6	54	1	5	0	1	1	10	0	17
9	51	1	37	0	7	1	24	0	35
12	48	2	8	0	15	4	31	0	33
15	45	2	39	0	28	5	38	0	41
18	42	3	10	0	43	6	45	0	50
21	39	3	41	0	57	7	52	0	59
24	36	4	11	1	13	8	58	1	8
27	33	4	43	1	34	10	5	1	16
30	30	5	10	2	1	11	11	1	25
33	27	5	38	2	31	12	16	1	34
36	24	6	6	2	3	13	22	1	43
39	21	6	33	3	33	14	20	1	52
42	18	6	58	4	1	15	31	2	1
45	15	7	23	4	37	16	35	2	11
48	12	7	47	5	16	17	39	2	20
51	9	8	10	6	2	18	42	2	30
54	6	8	32	6	50	19	45	2	40
57	3	8	53	7	39	20	47	2	50
60	0	9	12	8	30	21	49	2	0
63	297	9	30	9	27	22	50	2	11
66	294	9	47	10	25	23	48	2	22
69	291	10	1	11	38	24	47	2	34
72	288	10	19	12	33	25	44	2	46
75	285	10	32	13	38	26	40	2	59
78	282	10	43	14	40	27	35	4	11
81	279	10	50	16	4	28	30	4	24
84	276	10	56	17	24	29	21	4	36
87	273	11	1	18	45	30	12	4	50
90	270	11	5	20	8	31	0	5	5

1. Les tables astronomiques, telle celle-ci de Copernic, indiquaient des listes de valeurs numériques permettant de calculer la position de toutes les planètes quelle que soit la date.