Première partie

Relativité, Ondes de l'Univers

Présentation

La première partie de l'ouvrage est consacrée à certaines vérifications expérimentales récentes ou applications des équations de la Relativité générale : c'est l'équation d'Einstein, clé de voûte de cette théorie, admirable de simplicité formelle, qui va être en œuvre, de façon directe ou indirecte, dans toute cette partie.

La Relativité générale « succédait » à la Relativité restreinte ; cette dernière associait le postulat de la relativité galiléenne, posant l'équivalence, dans la formulation des lois physiques, des référentiels en mouvement relatif uniforme, au postulat de la constance, pour tout observateur, de la vitesse de la lumière dans le vide. La combinaison des deux postulats aboutissait aux transformations de Lorentz et à une structure de l'espace-temps « plate », dite de « Minkowski » avec une métrique uniforme, sans courbure ; la gravitation en était absente. Or nombre d'aspects de l'astrophysique et de la cosmologie ne peuvent bien sûr être traités sans intégrer la gravitation, et c'est Einstein qui, a apporté, en 1916, les compléments nécessaires pour surmonter ce problème.

Lorsque Einstein voulut aborder les problèmes du mouvement des corps massifs soumis à la gravitation, il a été amené à considérer un espace-temps ayant une structure plus complexe, présentant une courbure, courbure dont les caractéristiques pouvaient ne pas être uniformes. Dans cette réflexion, la question de l'équivalence des référentiels (vis-à-vis de la formulation des lois de la nature) était à nouveau posée : l'équivalence des référentiels en déplacement uniforme les uns par rapport aux autres pouvait-elle être généralisée à de nouvelles relations entre référentiels, animés par exemple de mouvements relatifs accélérés ? Voire à des référentiels reliés de manière quelconque ?

Dans l'introduction de son article de 1916 sur les fondations de la Relativité générale, Einstein fait une référence à Ernst Mach, disparu cette année là. Ce dernier avait émis l'idée que le mouvement d'un corps, quel qu'il soit, inertiel ou accéléré, était relatif, en ce sens qu'il ne pouvait se définir que par rapport aux autres corps présents dans l'Univers. Mach avait illustré ce postulat par une expérience de pensée que l'on peut décrire ainsi :

1. une fusée est en mouvement inertiel rectiligne et uniforme, car supposée suffisamment loin de toute autre masse pour que la gravitation soit négligeable. Si son réacteur est mis en marche, l'intérieur de la fusée est soumis à une force inertielle produite par l'accélération ;

2. supposons que l'ensemble de l'Univers, c'est-à-dire des corps qui le composent, à l'exception de la fusée, soit soudain soumis à une accélération constante ; qu'en résulte-t-il pour la fusée ? Mach postule que, à l'intérieur de la fusée, sera aussitôt ressentie une accélération égale et opposée à celle qui anime l'univers.

Dans le premier cas le mouvement de la fusée est accéléré par ses moteurs ; dans le second cas il n'est soumis à aucune force apparente, donc censé rester au repos ou en mouvement uniforme. Cependant un observateur présent dans la fusée ne pourra faire aucune différence entre les deux situations, ce qui établit leur équivalence du point de vue des lois physiques : seul le mouvement relatif de la fusée et des autres corps entre en jeu.

En citant Mach, Einstein reprend cette expérience de pensée sous une forme un peu différente, en considérant deux corps en rotation relative. Mais il en considère une seconde : celle-ci montre l'équivalence, du point de vue d'un observateur, entre un référentiel accéléré dans un univers sans gravitation (cas semblable au premier cas de Mach décrit précédemment) et un référentiel soumis à gravitation : les forces inertielles apparaissant dans le premier référentiel se comportent comme des forces gravitationnelles. C'est une conclusion qui s'impose suite à la constatation de « l'universalité de la chute libre » selon laquelle, dans un champ gravitationnel, les corps accélèrent de la même manière, quelles que soient leur masse et leur nature.

Einstein eut donc une double intuition ; d'une part, qu'il fallait pouvoir écrire les lois de la nature de façon indépendante de tout référentiel particulier ; d'autre part, que l'espace – plus exactement l'espace-temps – était doté de propriétés qui contrôlaient les mouvements des corps massifs et les trajets des rayons lumineux et qu'il fallait décrire l'espace selon ces propriétés. Pour mettre en application cette double intuition, il sut tirer parti des géométries non-euclidiennes et de l'invention des tenseurs. Les géométries non euclidiennes avaient été introduites au XX^e siècle, notamment par Bernhard Riemann en 1854. L'invention des tenseurs, du moins le premier exposé systématique du calcul tensoriel, est due à deux italiens, R. Ricci et T. Levi-Civita, dans leur publication de 1900. Le calcul tensoriel fournissait un outil idéal ; les tenseurs et les équations tensorielles décrivent en effet les propriétés locales d'un espace dans leur nature intrinsèque, indépendamment de tout référentiel, et notamment les métriques des espaces non-euclidiens.

Einstein s'engouffra dans cette voie pour développer la théorie de la Relativité générale. Deux tenseurs fondamentaux étaient ainsi mobilisés : un tenseur d'ordre 2, $G_{\mu\nu}$, porte le nom d'Einstein, il décrit des propriétés géométriques de l'espace-temps sur un évènement donné, déduites mathématiquement du champ tensoriel métrique au voisinage de cet évènement, et donc du champ gravitationnel dans ce même voisinage. Le second, $T_{\mu\nu}$, est le tenseur d'énergie impulsion, exprimant les propriétés du contenu matériel sur le même évènement, en terme de densités d'énergie et d'impulsion, de flux d'énergie et de contraintes exercées, de type pression.

L'équation d'Einstein est une relation de proportionnalité entre les deux tenseurs, valable sur tous les points de l'espace-temps : $G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$; *k,* constante de couplage, tire sa valeur $8\pi G/c^4$ de la nécessité de retrouver la limite newtonienne (soit l'équation de Poisson, liant le champ gravitationnel au champ de densité) lorsque le champ gravitationnel devient faible. Cette équation couronne la Relativité générale ; elle est l'outil de base de tous les calculs dans ce domaine.

Notons enfin une sorte de prix à payer dans le passage entre les deux Relativités ; à savoir les répercussions d'ordre métrologique de la présence d'un champ gravitationnel non uniforme. En Relativité générale, la longueur d'une règle « rigide », sur une position spatiale fixe dans un référentiel, ne peut plus être évaluée indépendamment de cette position et de l'instant de la mesure. De même, est-il impossible, en général, de faire en sorte que deux horloges mécaniquement semblables puissent rester synchrones tout au long de leur « ligne d'univers ». Ces impossibilités disparaissent, en première approximation, *localement,* c.-à-d. dans une région de l'espace-temps suffisamment petite pour que le champ métrique, et donc le champ gravitationnel, puissent y être considérés comme uniformes : on retrouve alors les conditions qui prévalaient en Relativité restreinte, où un observateur pouvait synchroniser ses horloges sur tout l'espace et où la longueur d'une règle pouvait être associée aux différences *x-x', y-y', z-z'* entre les coordonnées de ses extrémités.

Des premiers éléments de preuve – déterminants dans l'acceptation de la Relativité générale à l'époque – étaient apportés très vite. Ainsi en est-il de la précession du périhélie de Mercure ; un écart significatif, par rapport à ce que l'on pouvait déduire de la théorie newtonienne, avait déjà été mentionné et évalué par Le Verrier en 1859. Ainsi également la valeur de la déviation de la lumière, en provenance d'une étoile en arrière plan, observée lors de l'éclipse de 1919. Mais d'autres conséquences n'ont été attestées par l'observation que bien après, la dernière en date fut celle des ondes gravitationnelles en 2015 seulement. La raison essentielle est que la détection de ces éléments de preuve appelait des moyens techniques d'une puissance et d'une précision que les physiciens n'ont acquises que très récemment. Ces conséquences concernent des phénomènes d'astrophysique et autres aspects relevant de la structure à grande échelle de l'Univers. Il s'agit notamment de l'existence d'ondes gravitationnelles, du phénomène de lentilles gravitationnelles et de l'existence et de l'origine des trous noirs.

Les quatre premiers chapitres de cette partie sont consacrés aux ondes gravitationnelles et aux effets de lentilles. Il s'agit de phénomènes bien différents, mais cependant que l'on peut réunir par le fait qu'ils manifestent tous deux *des perturbations de la géométrie de l'espace-temps*, par rapport à une géométrie de référence : dans le premier cas, cette géométrie de référence est celle d'un espace-temps *vide* alors que dans le second cas, elle est celle d'un espace-temps rempli de matière. Pour les ondes gravitationnelles, il s'agit de perturbations de nature *tensorielle,* les seules dont la théorie montre qu'elles peuvent « se propager » dans le vide. Pour les effets de lentilles, il s'agit de perturbations induites par l'inhomogénéité spatiale du champ de matière (ou d'énergie). Elles sont principalement de nature *scalaire*, du moins lorsque l'espace-temps « de fond » est isotrope et la distribution de matière pas trop éloignée d'une distribution uniforme, et bien sûr, en l'absence d'interactions avec des ondes gravitationnelles. Le dernier chapitre est consacré aux apports du satellite Planck à la cosmologie. Notons, sans entrer ici dans le détail, qu'on y retrouve les thèmes des chapitres précédents, à travers le fond diffus cosmologique et l'image que l'on en perçoit.

1. Ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles ont été prédites par Einstein, *comme conséquences* de sa célèbre équation. Les calculs montrant la possibilité de telles ondes ont été présentés dans un article paru dès 1916, et ont été repris ensuite en 1918. Dans les deux articles la démarche est la même : Einstein linéarise son équation, en supposant que la métrique de l'espace-temps ne s'écarte que très peu de celle d'un espace-temps qu'il appelle alors « galiléen », et que nous désignons maintenant par l'espace-temps de Minkowski. Le système d'équations obtenu comprend une équation d'onde, telle que décrite par la physique ondulatoire classique, assortie de conditions restreignant le champ des solutions possibles. De ces calculs, Einstein déduit les propriétés générales de ces solutions : combinaisons d'ondes planes, polarisées, se propageant dans le vide, à la vitesse de la lumière ; il établit par quels types de systèmes matériels de telles ondes peuvent être générées ; il présente les formules donnant, dans cette approximation linéaire, l'amplitude de ces ondes, mesurée loin de leurs sources, dans le vide, ainsi que la puissance qu'elles transportent, en fonction des caractéristiques des systèmes émetteurs. Einstein, à la fin de l'article de 1918, envisage l'action d'un train d'ondes gravitationnelles sur un système matériel. Mais avait-il imaginé que, cent ans plus tard, les ondes gravitationnelles seraient détectées ?

Il faut noter que des solutions exactes aux équations de la Relativité générale – des solutions de l'équation d'Einstein – ont pu être trouvées dans certains cas : les solutions, par exemple, exprimant la structure géométrique d'un trou noir isolé (métriques de Schwarzschild, de Kerr), ou encore celles exprimant la structure géométrique d'un univers homogène et isotrope (métriques de Friedmann-Lemaître). Il ne s'agit cependant que de cas particuliers, où de fortes symétries interviennent. Hors de tels contextes, les physiciens passent par des simplifications et des approximations. C'est le cas pour le calcul des équations d'ondes gravitationnelles. L'approximation linéaire, présentée plus en détail dans le chapitre 1 (premier exposé de Patrice Hello), s'est avérée suffisante pour établir les formules rendant compte du phénomène, lorsque généré par un système émetteur où le champ gravitationnel reste faible et dont la dynamique reste lente. Par exemple un système stellaire binaire loin de la coalescence. Mais cette approximation linéaire s'avère insuffisante pour modéliser et pouvoir interpréter le signal émis lors de la coalescence de tels systèmes, et il faut alors pouvoir affronter les non-linéarités de l'équation d'Einstein. C'est l'objet d'une partie du chapitre 2 (chapitre rédigé sous la responsabilité de Jean

Pierre Treuil à partir de l'exposé de Luc Blanchet), que d'approcher dans leur principe les méthodes mises en œuvre à cette fin.

Les ondes gravitationnelles ouvrent une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers, et il est bien sûr essentiel de bien connaître la variété des sources d'émissions, et de pouvoir spécifier les détecteurs adaptés. Le chapitre 1 décline ainsi quelques grands types de sources, contextes d'émission ou de détection : ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires, mais seulement détectables, pour le moment, lors de leur coalescence ; ondes gravitationnelles émises lors de l'effondrement gravitationnel dans certaines explosions de supernovae ; ondes gravitationnelles émises par des étoiles à neutrons isolées, mais de forme non complètement isotrope ; ondes gravitationnelles d'un fond stochastique, composé d'un éventuel fond d'origine cosmologique (traces des fluctuations primordiales et de la période d'inflation) et d'un fond diffus (analogue, dans le domaine électromagnétique, du fond diffus infrarouge) provenant de la superposition d'ondes émises par des sources trop lointaines et nombreuses pour être individuellement distinguées. Sur ce même thème, le chapitre 2 se focalise spécifiquement sur les systèmes binaires d'objets compacts, tels les couples d'étoiles à neutrons, de trous noirs stellaires, de trous noirs supermassifs aux centres des galaxies, ainsi qu'aux estimations qui ont pu être faites dans le passé concernant la fréquence des coalescences détectables de ces objets. Il faut dire que tout système constitué d'au moins deux corps gravitationnellement liés émet des ondes gravitationnelles, le point important étant cependant la nécessité de corps très massifs pour que la puissance émise ne soit pas négligeable. À titre d'exemple, Roger Penrose évoque le cas du couple Soleil-Jupiter où l'énergie dissipée est celle d'une lampe de 40 watts ; par comparaison la coalescence de deux trous noirs stellaires détectée par LIGO en septembre 2015 avait soutenu, sur une durée de 0.28 secondes, une puissance moyenne de 10^{48} watts !

Le chapitre 3 (second exposé de Patrice Hello) présente brièvement cette première détection d'ondes gravitationnelles, faite conjointement, aux Etats-Unis, par les deux détecteurs LIGO de Hanford et Livingston. Le même chapitre mentionne les outils statistiques qui ont permis de s'assurer de la réalité astrophysique de l'événement, complétant le chapitre 1 qui dresse un tableau du principe de ces détecteurs, de la nature des différents « bruits » qu'il faut réduire pour espérer un rapport signal sur bruit acceptable, et de la longue course à la réduction progressive de ces bruits.

Depuis août 2017 le détecteur européen VIRGO est opérationnel, le trio LIGO/VIRGO permettant désormais de connaître précisément la direction des sources émettrices. Il faut rappeler que rien, pour le moment, ne permet d'anticiper la survenue imminente de tels événements : il faut simplement faire que les détecteurs soient « à l'écoute » et que les ordinateurs puissent en permanence, sur la fenêtre temporelle d'observation, décoder les signaux reçus. Dans l'avenir cependant, le détecteur spatial du projet LISA, travaillant sur des fréquences d'ondes plus basses, sera capable de détecter les ondes émises par un système binaire plusieurs années avant sa coalescence, ce qui permettra de prévoir cette dernière avec une très grande précision.

2. Les trous noirs

Si la survenue de la coalescence d'un système binaire était légitimement espérée, sa nature – la coalescence de deux trous noirs stellaires – semble avoir été une surprise. L'origine de cette surprise ne tient pas tant au fait qu'un tel évènement ait eu lieu – les estimations antérieures du taux de coalescence de trous noirs stellaires étaient entachées de grandes incertitudes, supérieures à celles effectuées pour les couples d'étoiles à neutrons : elle réside principalement dans les masses en jeu, de l'ordre de 30 masses solaires pour chacun des deux trous noirs.

Mais c'est bien l'existence de trous noirs qui se trouvait ainsi directement observée à l'aide de cette nouvelle sonde. Ces objets n'ont pas été explicitement évoqués dans les chapitres de cette première partie, mais ils sont l'une des conséquences majeures de la théorie relativiste. Ils résultent des solutions (des équations d'Einstein) à symétrie sphérique *dans le vide*, établies par S. Schwarzschild en 1916. Il calcule la distance au centre d'un astre à partir de laquelle l'attraction gravitationnelle donne à l'espace-temps une courbure capable de retenir la lumière. Cette distance, appelée « rayon de Schwarzschild » a une importance capitale : si l'astre est suffisamment compact pour être inclus dans une sphère ayant ce rayon, alors les rayons lumineux émis par l'astre seront déviés vers le centre d'attraction. On a alors affaire à un trou noir. A titre d'exemple, pour être un trou noir, un astre de la masse de la Terre devait avoir un rayon de 8,9 m. Et un astre de la masse du soleil, un rayon de 2,95 km.

Notons que, dans un premier temps, Schwartzschild avait calculé le rayon qui porte son nom dans la cinétique non relativiste où c est une vitesse non limitative. Ce rayon trouve son origine dans une réflexion sur la vitesse de libération d'un corps gravitant en orbite autour d'un astre, donc dans le calcul de la distance en deçà de laquelle un corps animé d'une vitesse égale à celle de la lumière ne peut s'échapper à l'infini. Il faut rappeler que de telles idées, couplant les lois de Newton avec une conception corpusculaire de la lumière, avait déjà été évoquées à la fin du XVIII^{e} siècle par John Michell, puis par Pierre Simon de Laplace.

L'application des équations de la Relativité générale permet de bien décrire la structure de la géométrie de l'espace-temps contenant le trou noir, tant externe qu'interne. Elle a donné lieu à de nombreux développements, introduisant notamment les notions d'horizon, de singularité centrale, d'ergosphère, en prenant en compte la présence d'un moment cinétique (rotation, métrique et trous noirs de Kerr).

3. Lentilles gravitationnelles

Juste après l'avènement de la Relativité générale, différents travaux ont recherché des solutions particulières aux équations d'Einstein fondant des modèles théoriques d'univers vides ou de contenu homogène. Donc dans une approche purement mathématique (géométrique). Mais la cosmologie moderne se fixant pour but de rendre compte de l'histoire de l'Univers réel se devait d'intégrer les développements de la physique et d'appliquer les équations relativistes à un univers inhomogène à de multiples échelles. Dès lors que le niveau de précision dépasse un certain seuil, il devient notamment important de comprendre comment se construit l'image que nous percevons en provenance d'objets et de phénomènes lointains, sachant que les rayons lumineux qui forment cette image ne dépendent pas seulement de la source émettrice, mais sont affectés dans leur trajet par le contenu matériel et la structure géométrique des milieux traversés. C'est le défi des chercheurs qui étudient ainsi les effets de lentilles gravitationnelles que de convertir en faveur d'une meilleure connaissance, ce qui pourrait paraître à priori purement négatif, à savoir toutes les transformations (convergence ou divergence, déformations diverses) imposées à l'image par la matière intermédiaire rencontrée.

Le chapitre 4 (rédigé sous la responsabilité de Jean Pierre Treuil à partir de l'exposé de Jean-Philippe Uzan) aborde en premier le principe de ces analyses, dont les fondements remontent eux aussi aux articles d'Einstein de 1916 et aux premiers tests de la Relativité générale : la déviation d'un rayon lumineux par un corps massif tel que le Soleil. Plus largement, le cône lumineux provenant d'un objet céleste et « enveloppant » en quelque sorte, une galaxie, est courbé par l'effet relativiste de la masse de cette galaxie, et fournit à l'observateur au delà de la galaxie, une image agrandie et éventuellement déformée de l'objet émetteur. Mais cette présentation est encore trop simple car en réalité le faisceau lumineux parvenant à l'observateur passe à travers, ou à côté, d'une succession de sur-densités ou de sous-densités et c'est la somme de ces modifications successives que cet observateur réceptionne. L'outil théorique qui permet de raisonner sur ces transformations et de les exploiter (après les avoir mesurées dans une région du ciel par des approches statistiques) est l'*équation de Sachs* dont le chapitre 4 donne la forme et la filiation à partir des équations contrôlant les trajets lumineux (équations des géodésiques et de déviation géodésique).

Dans leur principe, de telles études opèrent par comparaison : comparaison des images réellement observées (ou de grandeurs, éventuellement statistiques, qui leur sont liées) avec les images ou grandeurs qui *seraient observées* dans un univers hypothétique pour lequel on dispose d'un *modèle,* et que l'on peut donc calculer. Ces études procèdent donc d'une part de mesures de plus en plus performantes, et d'autre part de la mise en œuvre d'outils mathématiques lourds que les physiciens utilisent avec pragmatisme, en commençant par des modèles simples, pour atteindre progressivement des modèles prenant en compte la complexité de la réalité.

Le chapitre 4 expose ainsi comment sont calculées, à partir de l'équation de Sachs, les caractéristiques du champ de transformation des images (convergence, cisaillement) qui seraient celles d'un modèle d'univers construit sur celui de Friedmann-Lemaître (i.e. homogène et isotrope) auquel sont imposées des variations continues de densité introduisant de faibles inhomogénéités. De même, peut-on calculer, toujours à partir de la même équation, ces mêmes caractéristiques dans un modèle d'univers *non isotrope*, où le rythme d'expansion dépendrait de la direction d'observation. Enfin, ce chapitre aborde également, pour des objets très lointains et dont on ne reçoit qu'un faisceau lumineux très fin, les biais que les effets de lentilles introduisent dans le calcul des distances à partir du redshift – du décalage de la fréquence lumineuse vers le rouge. Les astrophysiciens sont en effet lancés dans une course pour la précision dans les mesures de distances, dont l'enjeu est primordial pour la connaissance des paramètres cosmologiques. Or, à l'échelle de ces rayons lumineux très fins, le modèle d'un champ continu de variations de densité n'est plus tout à fait pertinent ; il faut alors se tourner vers le paramétrage d'une distribution (discontinue) de grains de matière dans un univers vide.

4. Vers un modèle standard de la cosmologie : les résultats du satellite Planck

Le projet Planck a été imaginé en 1992. L'Agence spatiale européenne l'adopta en 1996, et le lancement a eu lieu en 2009. Le projet est essentiellement une cartographie des rayonnements venus du « fond du ciel », dans une bande de fréquence très étendue, et couvrant, en particulier, les fréquences permettant de cartographier les infimes variations directionnelles des propriétés du fond diffus cosmologique (CMB), au cœur de l'étude de l'Univers primordial et de la lumière fossile. Planck fait suite à deux autres entreprises successives ayant eu également comme objectif l'étude du fond diffus cosmologique, savoir COBE (fin des années 1980) et WMAP (2001), en portant la résolution angulaire à un niveau de précision inégalé.

Le satellite Planck a été arrêté en 2013. Il a apporté une moisson d'informations, qui s'exprime, après le recueil des données, leurs traitements et leur traduction, par des cartographies très variées de l'ensemble de la sphère céleste. Les résultats scientifiques obtenus à partir de ces cartographies font l'objet d'une série de publications référencées sous la Planck collaboration. François Bouchet, qui fait partie de l'équipe franco-italienne à l'origine du projet et qui en a été un des acteurs principaux, présente, au chapitre 5, les modalités de recueil et de traitement des données qui ont conduit à cette avancée scientifique cruciale pour le modèle standard de la cosmologie, le modèle ΛCDM en y intégrant l'hypothèse de l'inflation.

Le chapitre 5 (texte de François Bouchet) résume ainsi quelques conclusions importantes ; citons ici celles concernant l'isotropie à grande échelle du fond diffus et son caractère gaussien ; citons encore les fourchettes encadrant à 68 % et 95 % les estimations des paramètres du modèle standard. En particulier, une grande attention a été portée sur le paramètre de « platitude » spatiale Ω_K ; donc en envisageant un modèle ΛCDM étendu, dans lequel ce paramètre pourrait ne pas être rigoureusement égal à 0 ; les estimations laissant, à priori, la valeur de Ω_K non fixée, et intégrant plusieurs sources, donne ainsi pour cette valeur une moyenne de 0.0008 dans une fourchette à 95 % entre -0.0039 et +0.0040. Ce résultat conforte sérieusement l'hypothèse de l'inflation, qui prédit une platitude quasi-nulle. Citons enfin les tests de « non-gaussianité » concernant différentes variantes des modèles d'inflation ; les scénarios les plus simples (dynamiques induites par un seul champ scalaire avec « roulement lent ») prédisent des fluctuations primordiales de métrique – découlant de fluctuations quantiques – presque gaussiennement distribuées : les tests effectués sur les données de Planck sont compatibles avec de telles distributions et semblent donc privilégier de tels scénarios.

5. Conclusion

En se basant sur les équations de la Relativité générale, qui ignorent la constante de Planck, et sur les propagations d'ondes électromagnétiques et gravitationnelles, les articles de cette première partie se situent dans un courant classique et déterministe, comme le confirment ces différents éléments. Les ondes gravitationnelles sont des ondes au sens de la physique classique, sans nécessité expérimentale de faire intervenir une éventuelle description quantique basée sur la notion de graviton. Elles avaient été prédites par les équations d'Einstein en 1916, soit une décennie avant l'élaboration des premiers formalismes de la mécanique quantique avec Heisenberg et Schrödinger. Leur détection elle-même, un siècle après la prévision théorique, montre que la Relativité générale reste indépendante de toute approche quantique, et n'a toujours pas été surpassée. Ainsi, le courant classique et déterministe, défendu par Einstein, occupe toujours une place importante en physique, avec toutefois une composante chaotique pouvant avoir un rôle majeur, ce à côté du courant quantique probabiliste, qui s'est extrêmement développé, et est abordé dans les deux prochaines parties.

Il faut constater, en outre, que les physiciens qui sont à l'origine de ces théories sont partis, pour les établir, de postulats inspirés par une réflexion approfondie sur les phénomènes physiques. Puis ils ont fait confiance aux résultats des développements mathématiques. Ainsi, Einstein constatant que son équation de la gravitation avait la structure d'une équation d'ondes n'hésite pas à prédire la découverte d'ondes gravitationnelles ; la nature ondulatoire de la propagation de la gravitation était implicite dans la structure des tenseurs de l'équation d'Einstein. On ne peut qu'être admiratif devant les capacités prédictives des théories, compte tenu du nombre très limités de postulats sur lesquels elles se fondent. Cette réflexion vaut aussi pour la Mécanique quantique, ce qui place ces constructions au sommet des capacités de l'esprit humain.

Le comité de lecture de l'AEIS[1]

(1) Jean-Pierre Treuil, Gilbert Belaubre, Claude Elbaz et Jean Schmets