

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE :
UNE THÉORIE
EN AVANCE SUR
SON TEMPS

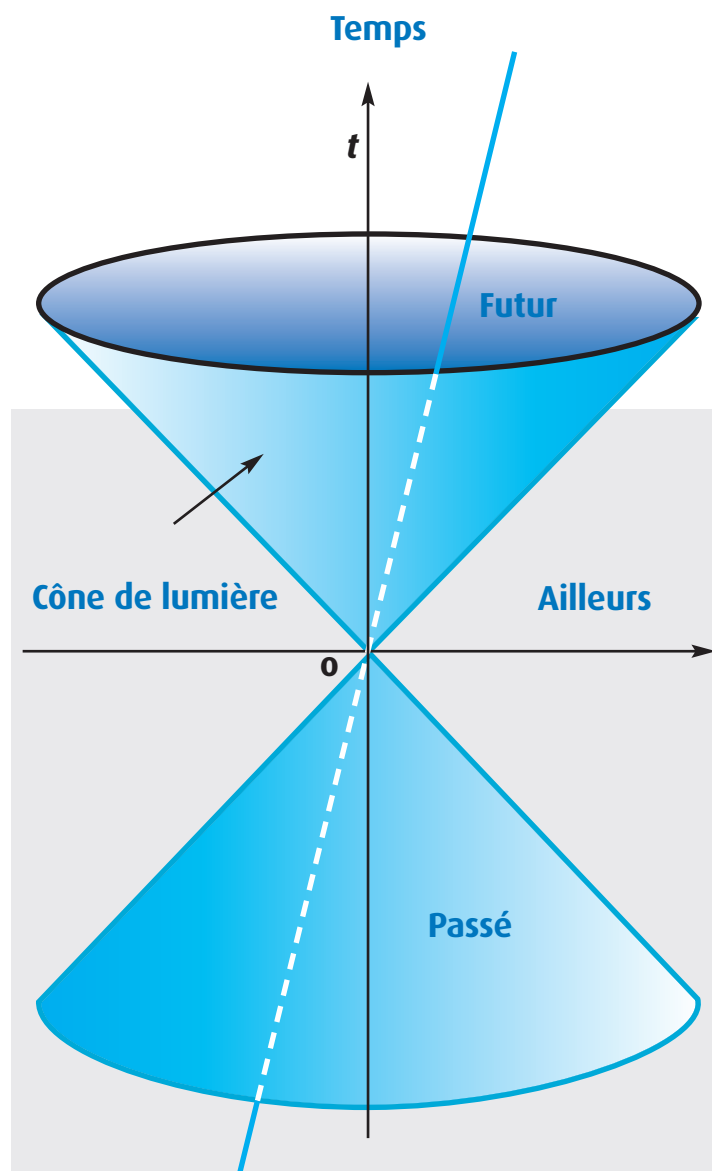
A la fin du XIX^e siècle la théorie de Newton de la gravitation est dite universelle. Tout – ou presque – y est compris, les observations des planètes obéissent quasiment parfaitement aux trajectoires calculées. La théorie, conceptuellement simple, est admise ; elle s'appuie sur un espace absolu, un espace mathématique qui n'est autre que celui de la géométrie euclidienne, une base conceptuelle solide, des observables bien définies.

L'INVENTION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Tout va bien ! Sinon Mercure qui refuse de se plier à la discipline newtonienne : une « anomalie ». De nombreux travaux seront menés de la seconde partie du XIX^e au début du XX^e pour la faire rentrer dans les rangs : lumière zodiacale, hypothèse d'une planète perturbatrice, loi de Hall modifiant celle de Newton ; sans vrai succès ! On s'en contente, car il ne s'agit que d'une anomalie qui ne concerne que quelques décimales.

Après 1905, dans un dernier chapitre à un article de fond sur la restreinte, Albert Einstein expose son projet d'une théorie de la gravitation « relativiste ». Pour lui, la nouvelle cinématique, la relativité que l'on dira bientôt « restreinte » pose problème. Tandis que la théorie électrodynamique de Maxwell est de fait cohérente avec cette cinématique, tel n'est pas le cas de la théorie de la gravitation de Newton qui est basée sur la cinématique newtonienne, galiléenne : ce sont donc deux cinématiques que plaque la physique d'alors sur l'Univers, pour Einstein c'est inadmissible.

Dès 1907, il décide de construire une théorie de la gravitation « relativiste », bâtie sur la *restreinte*, ce sera la relativité générale. Exigeant, il ne souhaite pas limiter sa théorie aux repères inertiels liés à l'espace absolu de Newton, il veut l'élargir à tous les repères qu'ils soient ou non inertiels, accélérés ou non, il veut intégrer, libérer tous les mouvements. Il ne croit pas, après Ernst Mach, à l'espace absolu de Newton, « ce fantôme ». Il repense les expériences de Galilée à la tour de Pise, de Newton sur le pendule : tous les corps tombent pareillement et l'on ne peut distinguer localement l'accélération de la gravitation, c'est « le principe d'équivalence ». Il exigera que sa théorie soit généralement covariante, ce qui signifie que ses équations peu-



Trajet d'un rayon lumineux vu par l'observateur 0. Sur cette représentation schématique de l'espace de la physique, seul l'intérieur du cône est accessible. La lumière se déplace sur le cône local. Dans "l'ailleurs" les vitesses sont supérieures à celles de la lumière et donc interdites. En théorie newtonienne l'ensemble du plan serait totalement accessible (il n'y aurait pas "d'ailleurs").

vent être écrites dans tout système de coordonnées. Déjà il prévoit la déviation de la lumière ainsi que le décalage des raies par la gravitation et espère pouvoir rendre compte de l'anomalie newtonienne, l'avance du périhélie de Mercure.

En 1912, c'est un virage décisif, Einstein a accepté les analyses d'Hermann Minkowski, le temps propre, l'espace-temps minkowskien. Guidé, aidé par son ami et collègue Marcel Grossmann, Einstein travaille à la construction d'une théorie de la gravitation basée sur un espace riemannien ; un espace-temps riemannien particulier dans la mesure où la « métrique », la « norme » d'un vecteur de l'espace-temps, et donc le temps propre (généralisation de la distance) peut être nulle ; ce que symbolise déjà le cône d'espace-temps de la restreinte. Seuls passé et futur font partie de l'espace-temps physique mais non pas ce que l'on a nommé « l'ailleurs ». C'est l'impact de la présence de la vitesse de la lumière non seulement dans les équations d'addition, mais aussi dans la structure même de l'espace-temps.

De 1913 à 1914, Einstein proposera, avec l'aide de Grossmann, plusieurs « esquisses » de sa théorie qui ne conviennent pas. Après bien des difficultés, des hésitations, des fausses pistes, les « bonnes » équations de champ sont publiées le 25 novembre 1915. Ces équations comportent deux membres : $R_{\mu\nu} = X.T_{\mu\nu}$ celui de gauche décrit la géométrie, la structure mathématique de l'espace-temps riemannien ; celui de droite, la distribution de matière T que l'on posera le plus souvent *a priori*, (X est la constante de gravitation), « *un bâtiment, notera Einstein, dont une aile est faite de marbre fin (membre de gauche) tandis que l'autre aile est faite de bois vulgaire (membre de droite)* ».

En 1917, visant une cosmologie statique, Einstein a dû modifier, à la marge, ses équations de champ en y ajoutant la constante cosmologique λ .

Einstein s'est donc départi de l'espace absolu, du temps absolu, des repères inertiels de la théorie newtonienne. L'espace n'est plus défini à l'avance, l'espace-temps (courbé) est à construire. Les équations de la relativité générale, c'est en somme une machine à construire des espace-temps adaptés à la question posée : autant d'espace-temps que de problèmes résolus. L'espace-temps solution de la relativité générale, c'est la représentation d'un champ de gravitation.

Largement basée sur des principes, la relativité générale sera vue comme une théorie mathématique, métaphysique... que de critiques en perspective ! Où est la physique ? où sont les applications ? À quoi ça sert ? Einstein ne semble pas s'intéresser aux faits physiques. En fait ils sont cachés dans ses principes, d'équivalence, de relativité. Mais le juge suprême, c'est l'expérience ! Einstein est absolument ferme sur ce point... mais dans le temps de la construction théorique, des observations.

LES TESTS « CLASSIQUES »

Ainsi, le calcul du périhélie de Mercure lui a permis de voir tout au long de ses esquisses, s'il était ou non au bout de ses peines et le 18 novembre 1915, une semaine avant de poser ses équations de champ définitives il fait à nouveau ce calcul qui confirme qu'il a enfin les bonnes équations : 43" d'arc par siècle !

En décembre, Einstein écrit à Arnold Sommerfeld : « *Ce sont là les découvertes les plus précieuses que j'ai faites dans ma vie. [...] Le résultat du mouvement du périhélie de Mercure me donne une grande satisfaction. Comme nous est utile la précision pédantesque de l'astronomie dont je me suis souvent moqué dans mon for intérieur !* »

C'est que la relativité générale est très proche, trop proche de la théorie newtonienne. L'anomalie newtonienne de Mercure est si faible et c'est alors le seul ancrage observationnel de "la générale"... Encore faut-il préciser que ce n'est pas par hasard si Mercure sort des sentiers newtoniens, mais parce qu'elle est de toutes les planètes la plus proche du Soleil et qui, donc, subit le champ de gravitation le plus important. Les champs forts, c'est - ce sera, cinquante ans plus tard ! - le domaine de la théorie d'Einstein...

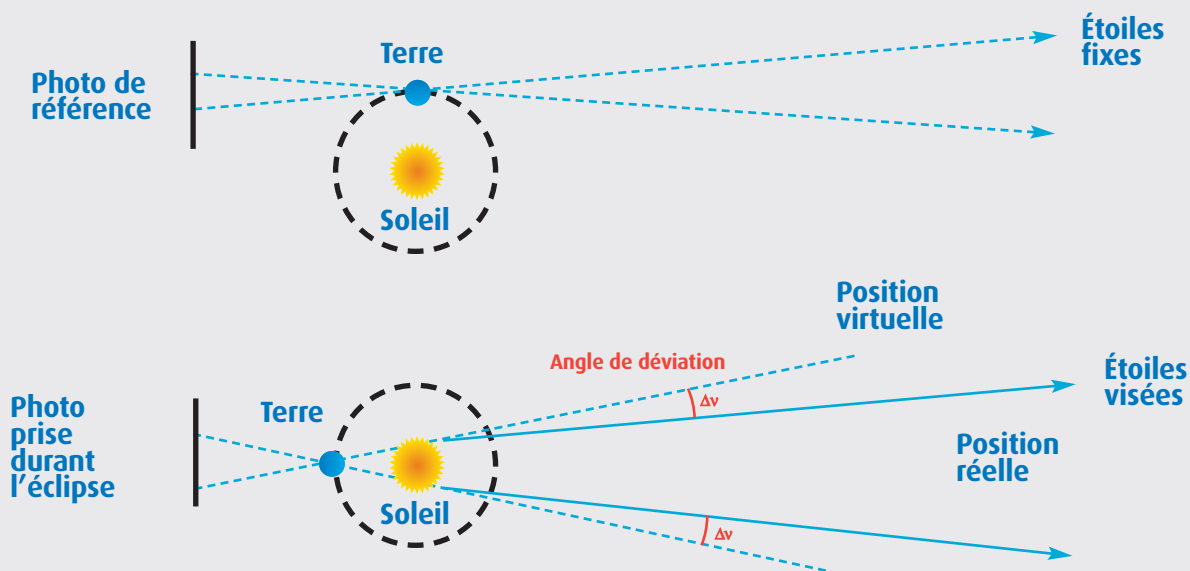
Dès 1911, Einstein a voulu que soit vérifié la prédiction de la courbure des rayons lumineux aux bords du Soleil. Il a

convaincu Erwin Finlay-Freundlich, un astronome allemand, de s'y consacrer. Non seulement Freundlich mais bien d'autres astronomes ont tenté ces mesures, comme William Wallace Campbell. De nombreuses expéditions seront tentées dès 1912 ; sans succès, le mauvais temps, la guerre n'ont pas permis de conclure.

Einstein s'est départi de l'espace absolu, du temps absolu, des repères inertiels de la théorie newtonienne.

En 1919, grâce aux convictions d'Arthur Stanley Eddington, aux efforts de Frank Dyson Royal astronome à Greenwich, deux expéditions astronomiques sont dépêchées au Brésil, en Afrique, afin de mesurer pendant une éclipse la déviation de la lumière au bord du Soleil ; les conditions astronomiques sont alors excellentes car, durant l'éclipse, le Soleil passe devant les Hyades riches en étoiles très brillantes, ce qui est essentiel pour ces mesures particulièrement complexes. Des étoiles dont on doit comparer les positions pendant et après l'éclipse car le passage du Soleil a dû dévier leurs rayons. Sur ces plaques photographiques on cherchera à déceler une déviation minime, de 1",75 d'arc, prévue par la théorie d'Einstein. La conclusion d'Eddington est formelle : la prédiction d'Einstein est vérifiée !

La séance exceptionnelle réunissant à Londres la Royal Society et la Royal Astronomical Society, le 6 novembre 1919, est consacrée aux résultats des expéditions anglaises. Alfred Whitehead a donné une description quelque peu hagiographique



de cette réunion où fut célébré le dramatique triomphe de la relativité générale : « *L'atmosphère d'intense émotion, note Whitehead fut précisément celle du drame grec. Nous formions le chœur qui commente les décrets du destin, tels qu'ils sont révélés par le cours de l'événement suprême. Il y avait un élément dramatique dans le très scénique, très traditionnel cérémonial avec, en arrière plan, le portrait de Newton pour nous rappeler que la plus grande des généralisations de la science venait maintenant, après plus de deux siècles, de recevoir sa première modification. Nul intérêt personnel ne se trouvait en jeu : une grande aventure de la pensée venait enfin d'aborder heureusement au rivage.* »

Einstein donne de très nombreuses conférences dans le monde entier, c'est la gloire, et pour la relativité générale, une période faste qui sera vite oubliée. Des années vingt aux années soixante, la théorie traversera une période sombre.

Pourtant, dix ans plus tard les conclusions de 1919 seront mises en cause par Finlay-Freundlich de retour d'une expédition à Sumatra. Eddington lui-même doute : "la lumière est une chose étrange, écrit-il, et nous devons reconnaître que nous n'en savons pas autant à ce sujet que nous le pensions en 1919." Il n'en reste pas moins confiant dans l'avenir.

Quant au troisième test, le décalage des raies par un champ de gravitation, les nombreuses mesures qui en sont faites s'avèrent extrêmement difficiles à interpréter. Il faudra attendre 1960, et les expériences de Robert Pound et Glen Rebka pour se convaincre de la justesse de la prédiction.

LA TRAVERSÉE DU DÉSERT

En 1955, à Berne où l'on fête les cinquante ans de la restriction, les conclusions de Robert Trumpler, un astronome chargé de faire le point sur les tests de la générale sont réservées : « *la confirmation de la théorie par les observations solaires*

Déflexion des rayons lumineux par le Soleil. En haut, les trajets sont rectilignes, tandis qu'en bas ils sont déviés par le champ de gravitation solaire. Les deux photos permettent de déterminer l'angle de déviation Δv .

n'est pas très convaincante » concluant néanmoins « *que globalement les observations confirment la théorie* ». Tout au moins ne sont-elles pas favorables à un retour à la théorie de Newton... qui continue néanmoins à bien se porter.

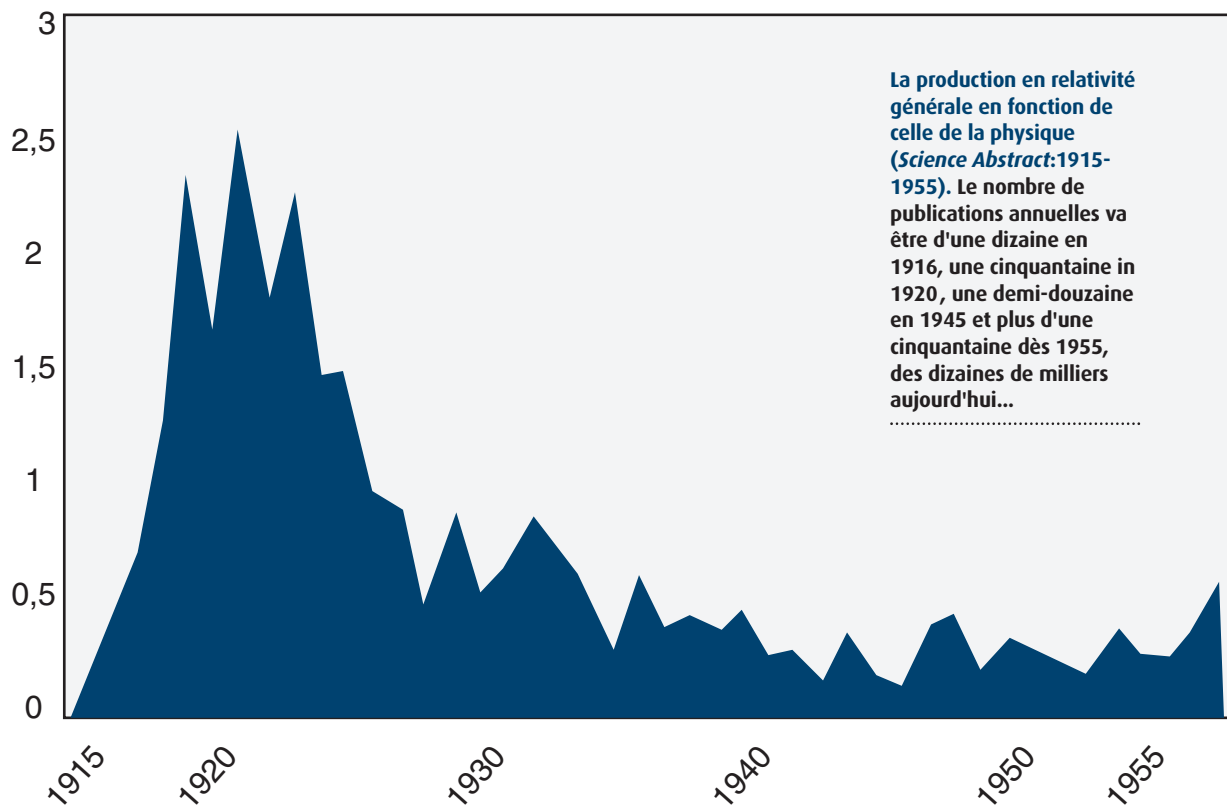
Einstein lui-même remarquera à plusieurs reprises, en 1942 par exemple dans la préface du livre de Peter Bergmann, son assistant, que sa théorie « *a joué un rôle plutôt modeste jusqu'alors quant à la corrélation des faits empiriques* ». Tout en insistant sur son attrait particulier lié à sa consistance interne et à la simplicité logique de ses axiomes.

Aucun nouveau test, aucune observation ou expérience probante ne sera faite ni même envisageable avant 1960...

Les raisons de ce manque d'intérêt sont multiples, observationnelles, comme nous l'avons vu, mais aussi bien conceptuelles et techniques. La théorie sera tout aussi difficile à vérifier qu'à comprendre. La relativité générale sera longtemps un cénacle quelque peu fermé, celui des relativistes, mal-vus par leurs collègues avant tout séduits par les théories quantiques, infiniment plus prometteuses.

La complexité de la théorie oblige alors les relativistes à se contenter de solutions approchées, basées sur des concepts newtoniens. Ainsi suppose-t-on qu'à l'infini les espace-temps sont "plats", minkowskiens, et *de facto* on utilise les coordonnées newtoniennes - distance, temps absolu. Ce qui est d'ailleurs tout à fait suffisant pour trouver les formules des tests classiques et justifier les observations.

Longtemps, de très nombreuses interprétations douteuses, parfois inexactes, des théories de la relativité vont circuler, et même dominer le monde relativiste. On en reste alors souvent, jusqu'aux années soixante sinon même soixante-dix à une interprétation néo-newtonienne de la relativité, à la fois suffisante pour l'astronomie, mais pas vraiment "relativiste". La signification des coordonnées est alors au centre du problème : temps absolu, espace absolu, rigidité sont *de facto* uti-



lisés, ce qui est contraire aux bases de la théorie. Par ailleurs, l'espace "physique" de la relativité générale n'est alors autre que celui de la théorie newtonienne, la banlieue solaire, essentiellement celle de l'astronomie de position.

LES SOURCES DU RENOUVEAU

Le champ cosmologique, c'est sans doute, en 1929, l'effet Hubble, l'expansion de l'Univers, et plus tard, avec Georges Lemaître le big-bang. Mais bien avant, de nombreuses solutions cosmologiques apparaissent, d'Einstein, de Wilhem de Sitter, d'Alexandre Friedmann, de Lemaître, de Howard Robertson. Elles s'appuient sur une distribution de matière homogène et isotrope. Il s'agit de solutions mathématiquement simples, exactes et générales et non pas approchées. C'est l'occasion de travailler la théorie, de mieux comprendre ce que c'est qu'un espace-temps, ce que c'est qu'une "singularité"... La cosmologie, ce sera un espace pour penser la relativité générale.

Certains physiciens, tels Robert Oppenheimer, Karl Schwarzschild, Richard Tolman s'intéressent à la cosmologie. Les petites collines que l'on discerne dans la courbe des publications (voir figure ci-dessus) autour des années 1930 sont liées à cet intérêt. Il y est bien entendu question de l'interprétation théorique de l'expansion mais aussi de celle de la structure de l'espace-temps. Étudier l'espace-temps c'est évidemment fondamental, car en relativité générale un espace-temps n'est pas « donné » comme l'est celui de Newton, il doit être construit ; c'est l'ensemble des trajectoires possibles - ce qui ne sera d'ailleurs clair que bien plus tard. En dehors des solutions cosmologiques, on ne dispose que de fort peu de solutions des équations de champ qui soient exactes et générales et relativement simples ! au premier rang desquelles la solution de Schwarzschild.

Dès 1916 Karl Schwarzschild a en effet résolu les équations

de champ du vide autour d'une distribution de matière sphérique. Cette source matérielle peut aussi bien être le Soleil qu'une étoile, une planète, n'importe quel objet sphérique, soit-il concentré en un point. L'étude détaillée de la solution de Schwarzschild sera longue, complexe, tortueuse. Durant cette période de très nombreux articles lui seront consacrés, souvent insuffisants, parfois inexacts, rarement novateurs, toujours problématiques. C'est, avec le champ cosmologique, un domaine essentiel d'études qui doit permettre de mieux comprendre la théorie. La solution de Schwarzschild c'est à l'évidence le paradigme, l'exemple-clef de la théorie d'Einstein ; il donnera à la fin des années soixante naissance au concept de trou noir. C'est avec et grâce à la cosmologie la source du renouveau, d'une nouvelle interprétation, avant tout topologique, de la théorie d'Einstein.

Non sans raisons, ce sont les cosmologues qui vont s'embarquer dans cette voie. Il s'agit de comprendre la question des singularités et avant tout des deux singularités que l'on rencontre en cosmologie ou dans la solution de Schwarzschild. L'une au cœur de ces solutions, c'est en leur centre, le big-bang pour la cosmologie, en $r = 0$ pour ce qui concerne la solution de Schwarzschild une singularité qui n'est pas très différente de celle du potentiel de gravitation en $1/r$ de la théorie de Newton. L'autre, la singularité de Schwarzschild, restera longtemps incomprise, donnant lieu à des interprétations inexacts, très longtemps acceptées par l'ensemble de la communauté. La singularité de Schwarzschild apparaît très près du centre de la solution. Pour tous, y compris Einstein, il s'agirait d'une barrière impénétrable, d'un « cercle magique », comme l'appelle Eddington. Bien que certains travaux montrent à l'évidence que certaines trajectoires, en particulier ra-

diales, peuvent la traverser, le dogme de l'impenétrabilité domine jusqu'aux années soixante. Même si aucun corps connu n'est assez lourd, assez dense pour que cette singularité puisse s'exprimer dans la réalité physique, il n'en demeure pas moins que l'espace-temps n'est pas clairement défini. Pourtant dès 1933, Lemaître démontre qu'il ne s'agit pas d'une singularité, un article fort peu lu à l'époque - car écrit en français et publié dans une revue belge - qui n'en sera pas moins la source de travaux essentiels réalisés pour la plupart par des cosmologues. Cet article est à la base de la possibilité de l'effondrement gravitationnel qu'Oppenheimer théoriserait d'un point de vue physique en 1939, juste avant la guerre.

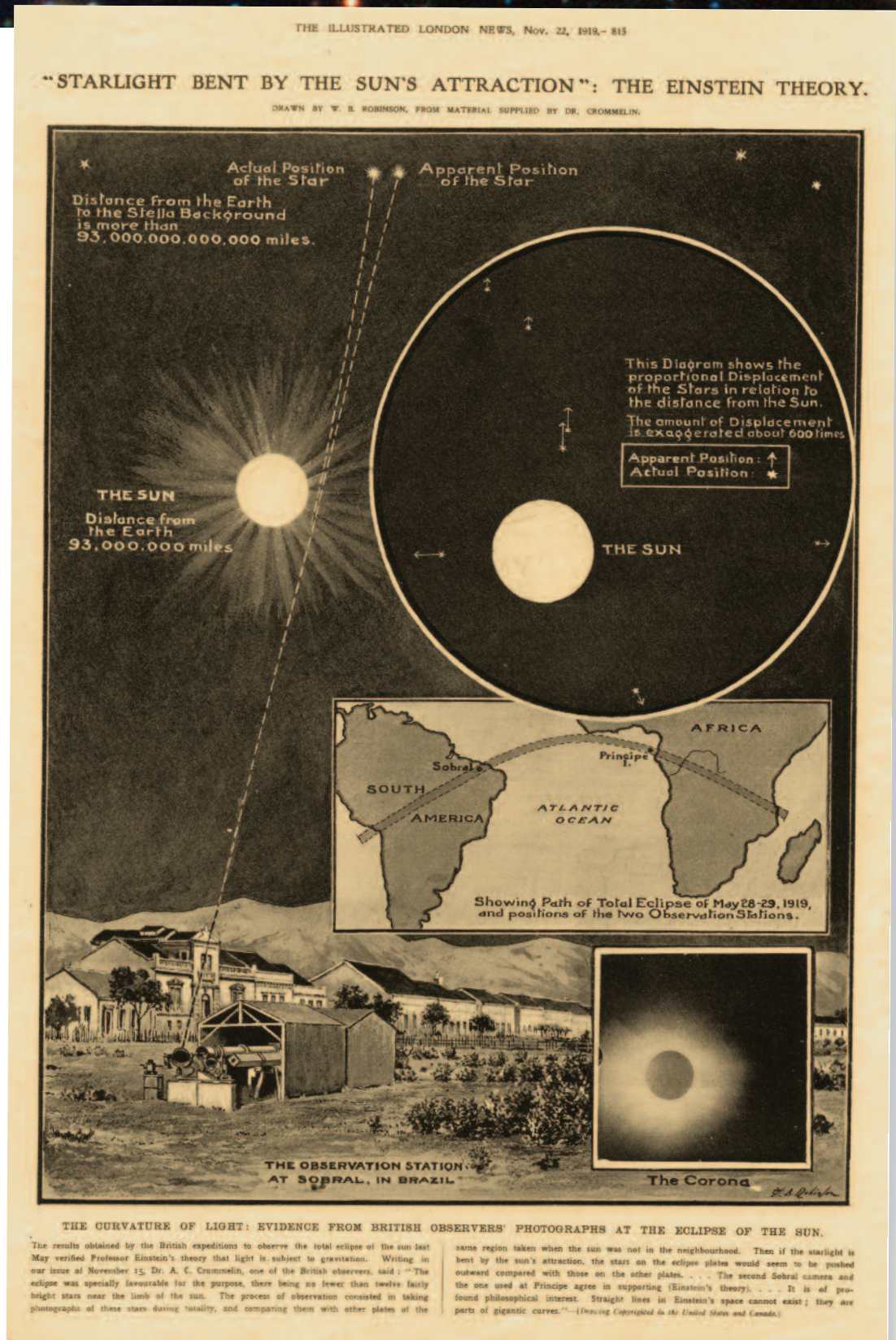
LE RENOUVEAU

En 1960, Martin Kruskal, un mathématicien soutenu par John Wheeler, proposera une interprétation topologique de la solution de Schwarzschild, qui, basée sur la question des singularités et celle de la structure topologique de l'espace-temps, impliquera, en particulier grâce aux travaux de Roger Penrose et de Stephen Hawking une ré-interprétation de la relativité générale.

La même année, le troisième test, le décalage gravitationnel des raies, était enfin validé avec une bonne précision dans le cadre de l'expérience - terrestre - de Pound et Repka.

En 1963 a lieu à Dallas, un colloque "historique" qui réunit pour la première fois relativistes et astrophysiciens. Il y est avant tout question d'objets étranges, "exotiques", quasars, étoiles à neutron, pulsars. C'est l'astrophysique relativiste qui doit beaucoup à la cosmologie. La route est ouverte qui permet le renouveau de la relativité générale.

L'espace de la relativité générale sera désormais les champs forts, jusqu'alors inaccessibles, techniquement, théoriquement aussi bien que matériellement. La relativité générale



Montage de l'ensemble des éléments des expéditions de 1919 paru dans *l'Illustrated London News* : le chemin de l'éclipse totale, la couronne solaire durant l'éclipse et la station de Sobral dont les clichés ont permis de vérifier la loi de déviation.

rale était en fait en avance sur les techniques astronomiques, astrophysiques, dont elle est aujourd'hui une des bases théorique. De la banlieue solaire à l'Univers, de l'astronomie de position à l'astrophysique relativiste, une théorie en avance sur son temps. ■