

La Genèse de la Théorie de la Relativité De Copernic à Einstein

Albert Bijaoui
Observatoire de la Côte d'Azur

Conférence donnée

-le 11 décembre 2002 dans le cadre de la Société d'Astronomie de la Côte d'Azur
à Cannes

-le 18 février 2003 à l'observatoire de Nice

-Le 12 Mars 2004 à l'Association Valeri à Nice

La théorie de la relativité est toujours introduite en partant du résultat négatif de l'expérience de Michelson. De ce fait, Einstein aurait déduit la constance de la vitesse de la lumière et introduit le principe de relativité.

Mais qu'est ce que l'expérience de Michelson? Quelles sont les raisons qui ont amené à la construire? Pourquoi son résultat négatif mettait en cause la mécanique de Galilée? Pourquoi la constance de la vitesse de la lumière s'est imposée comme la seule interprétation correcte?

Pour répondre à ces questions il est indispensable de partir de la théorie de l'héliocentrisme introduite par Copernic

2

L'idée de cette étude m'est venue en lisant la biographie de François Arago par Maurice Daumas, *Arago ou la Jeunesse de la Science*, Belin, 1986. Au détour d'une page, Daumas signale qu'Arago fut l'auteur d'une expérience qui allait annoncer la théorie de la relativité.

Ce passage m'avait intrigué. Je pensais que le biographe avait été emporté par son sujet. Maurice Daumas fut un très grand historien des sciences et il était étonnant que sa phrase n'avait pas un fond de réalité. Cela m'a amené à me pencher sur les origines expérimentales de la relativité. Après avoir écrit en 1999 un article sur cette expérience pour la *Jaune et la Rouge*, revue des polytechniciens, je me suis attaché à essayer d'avoir une vision plus large.

Jean Eisenstaedt, dans *Les chemins de l'espace-temps*, publié par CNRS/édition en 2002, a fait un travail en profondeur sur les origines de la théorie de la relativité et mit particulièrement en valeur l'expérience d'Arago, première pierre d'un long chemin qui amena à l'établissement de cette théorie.

Plan de l'exposé

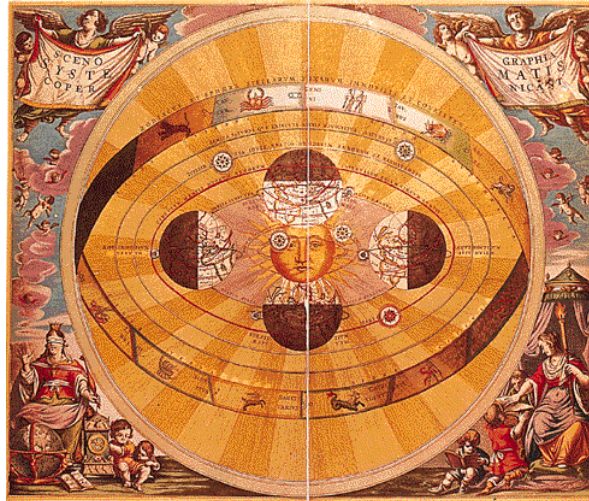
- Géocentrisme ou Héliocentrisme
- L'aberration des étoiles
- L'expérience d'Arago
- L'entraînement partiel de l'éther
- De Fizeau à Mascart
- L'expérience de Michelson
- Lorentz – Poincaré – Einstein
- Les leçons à tirer

3

Ce chemin prend racine dans le vieux débat entre géocentrisme et héliocentrisme. Grâce à Bradley, l'héliocentrisme sembla prouvé : les étoiles avaient toutes un mouvement apparent qui résultait de la vitesse de la Terre autour du Soleil. Arago fut le premier à avoir exploité cet effet pour étudier la nature de la lumière. Le résultat obtenu a conduit d'une part Laplace à postuler la constance de la vitesse de la lumière et d'autre part Fresnel à introduire la notion d'entraînement de l'éther. Vingt ans après, Arago reprit ce sujet en montant une expérience de mesure de la vitesse de la lumière. Ce fut Fizeau qui y arriva, dix ans plus tard. Dans la foulée, Fizeau mit en évidence en laboratoire l'entraînement de l'éther. De nombreux physiciens vont poursuivre ces travaux. Mascart montra qu'en fait, on ne pouvait pas mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. L'expérience de Michelson le démontra d'une manière plus claire. Ce résultat a conduit Fitzgerald et Lorentz à la notion de contraction des longueurs. Poincaré redéfinit les bases d'une nouvelle mécanique. C'est Einstein qui éclaircit la théorie en évacuant la notion d'éther. Finalement, au cours des siècles, beaucoup de savants ont crû avoir réussi à expliquer la nature, mais de nouvelles théories, sur des bases totalement différentes, ont balayé leurs conclusions.

De l'héliocentrisme à l'aberration des étoiles

Le système de Copernic



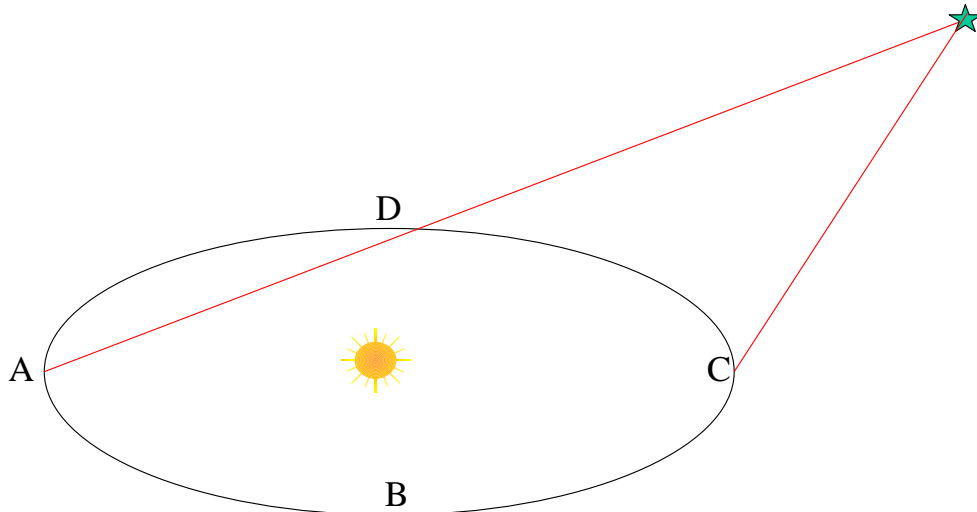
NICOLAS COPERNIC
Le système de Copernic (gravure du XVII^e s.).

5

Lorsque l'ouvrage fondamental de Copernic, *De Revolutionibus Novarum*, est publié, son auteur, un chanoine polonais, est décédé. Il y avait travaillé de nombreuses années, mais il savait que son ouvrage allait totalement à l'encontre de toutes les croyances religieuses de l'époque. Il fallait des arguments extrêmement solides pour s'y opposer. Dans l'esprit de toutes les religions, la Terre et les cieux ont été créés par Dieu pour l'Homme. Tous les événements célestes, par conséquent, lui sont liés. Mettre la Terre en satellite autour du Soleil conduit à contester cette place donnée à l'Homme par Dieu, ou d'autres divinités, il faut donc un dossier solide pour le plaider.

À l'époque de Copernic le Mécanique est une science tout à fait dans les limbes. Du point de vue du mouvement, le système de Ptolémée, reconnu par l'Église ne choquait pas les esprits. Or Copernic n'avait comme preuve de son système que le fait qu'il décrivait plus simplement les mouvements des astres. C'était bien peu pour une révolution culturelle.

La parallaxe des étoiles

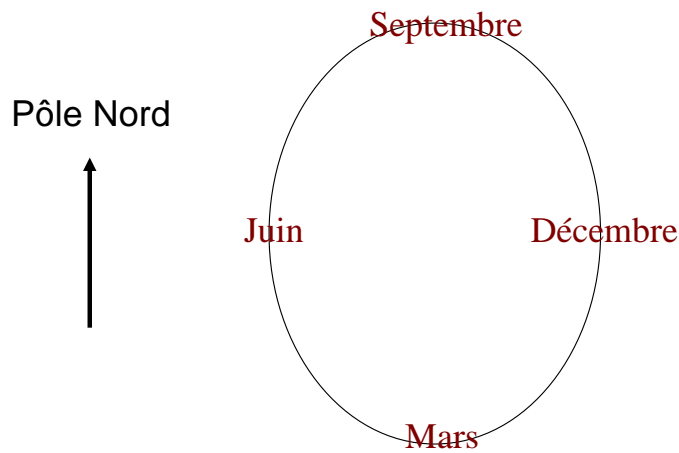


6

En fait, Copernic pensait qu'il existait une possibilité pour vérifier sa théorie : mettre en évidence le mouvement apparent des étoiles dû à la variation de la position de la Terre pendant l'année.

Si les étoiles sont fixes par rapport au Soleil, la Terre ne les voit pas sous le même angle selon l'époque. Cet effet est appelé parallaxe stellaire. Or aucun effet n'a été perçu par les astronomes. Le seul mouvement identifié par Hipparque correspondait à la *précession des équinoxes*, due au basculement de l'axe de rotation de la Terre. À cette époque, on pensait c'est la sphère céleste sur laquelle les étoiles étaient fixées qui basculait lentement.

Positions dans le ciel (Polaire)

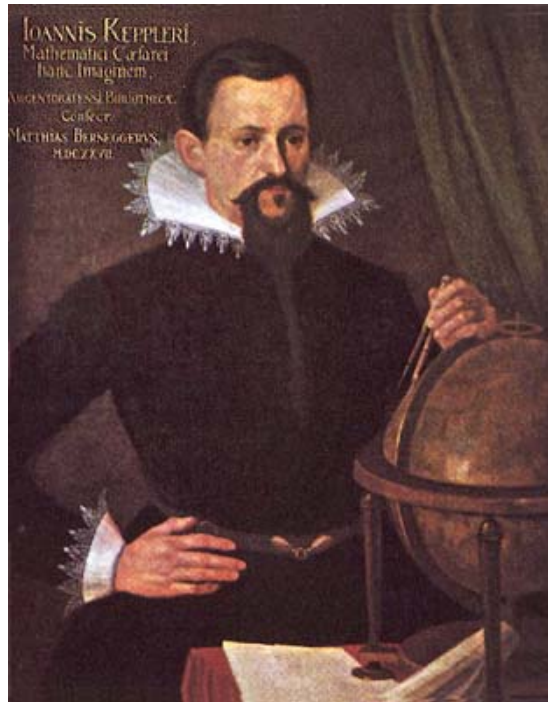


7

Voilà le mouvement que l'on devait observer pour l'étoile Polaire. Ce mouvement était difficilement détectable car il fallait une référence fixe. L'étoile polaire était l'une des bonnes cibles, parce qu'on pouvait l'observer à l'aide d'une lunette fixe, calée dans la direction de la rotation des étoiles, définissant une direction céleste constante. On pouvait aussi observer les étoiles avec une lunette en station verticale. On observait alors le déplacement relatif de l'étoile par rapport au zénith au cours de l'année.

À l'œil nu, Tycho-Brahé, dans son observatoire danois d'Uraniaborg, n'avait pu rien mettre en évidence. Ce grand astronome renonça au système de Copernic, plaidant pour un système intermédiaire pour lequel l'alternance jour-nuit venait de la rotation de Terre, mais le Soleil tournait en un an autour de la Terre, pour expliquer les saisons.

Les Lois de
Kepler
→ en faveur
du système de
Copernic

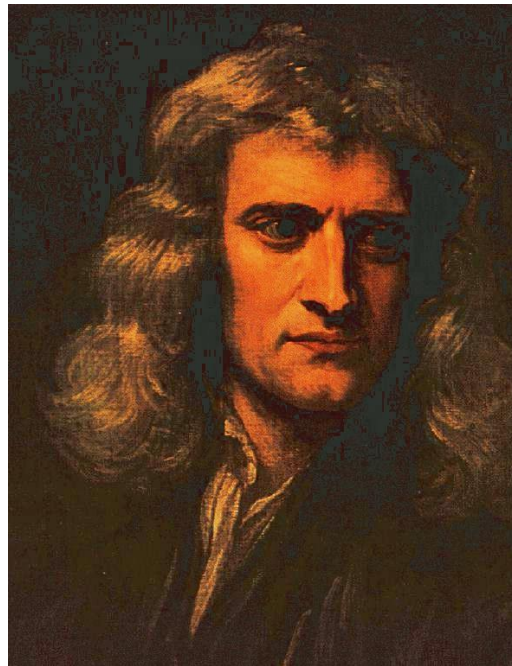


8

L'élève de Tycho-Brahé, Jean Kepler, en exploitant les observations de la planète Mars, allait introduire une nouvelle lumière dans le mouvement des planètes. Grâce à l'utilisation de méthodes numériques nouvelles, il montra que la trajectoire de cette planète, et d'une manière générale de toutes les planètes, obéissait à des lois simples dans le cadre du système de Copernic.

Cela ne démontrait pas l'héliocentrisme, mais ces lois allaient ouvrir la voie à de nombreux travaux mathématiques pour leur interprétation.

Newton et la
Gravitation
Universelle
→
Interprétation
des
mouvements
planétaires



9

L'élite des savants du 17^{ième} siècle allait s'y consacrer. Galilée avait donné les bases de la mécanique, mais les fondements de la dynamique étaient insuffisants pour interpréter le mouvement des planètes. Grâce au calcul des fluxions, très similaire au calcul différentiel introduit parallèlement par Leibniz, Isaac Newton (portrait) réussit à induire que le mouvement des planètes résultait d'un phénomène général, *la Gravitation Universelle*.

Dans le cadre du système de Copernic, en utilisant des principes de physique universels les mouvements des corps célestes ne semblaient plus avoir de mystère. En un peu moins de deux siècles, les savants étaient parvenus à percer l'un des plus grands secrets de la nature. De ce fait cela rompait le lien mystique entre les cieux et l'Homme.

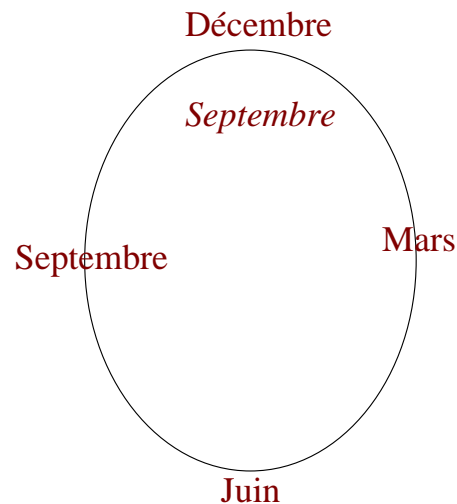
Mais la preuve n'était pas encore apportée.

Les observations

- Picard sur l'étoile polaire
- Flamsteed

Il y a un écart de 90° dans le mouvement relatif de l'étoile !

Pôle Nord



10

Il semble que cela soit l'anglais Hooke qui observa le premier un mouvement en cours d'année de l'étoile γ Draco par rapport à la verticale. Picard fit aussi une série d'observations similaires sur l'étoile polaire. Ce personnage a joué un rôle essentiel dans la création de l'observatoire de Paris en 1667. C'est lui qui recruta les grands savants étrangers qui donnèrent dès l'origine tant de prestige à cet institut : le niçois Dominique Cassini, le danois Roemer et le hollandais Huyghens. Picard fut aussi l'un des pères de la géodésie moderne. Il mesura la France et réduisit tant sa surface que Louis XIV dira qu'il lui a supprimé plus de territoires qu'il en aurait pris aux armées ennemies.

Picard montra, à Uraniaborg, que l'étoile Polaire avait un mouvement de plus d'un dizaine de secondes d'arc par rapport au pôle au cours de l'année.

Flamsteed, premier astronome royal de Greenwich, effectua de nombreuses observations, avec une meilleure précision grâce à une lunette, montrant que la polaire avait un mouvement d'environ $40''$. Il pensa avoir identifié la parallaxe de cette étoile.

Roemer montra que ce n'était pas possible car il y avait un décalage de trois mois dans le mouvement dans l'hypothèse d'un mouvement dû à la parallaxe. Pour Cassini ce mouvement était aberrant, introduisant l'expression associée à ce phénomène : *l'aberration des étoiles*.

Mesures de Molyneux/Bradley

- Sur γ Draco
- Détermine parfaitement le mouvement de l'étoile par rapport à la verticale

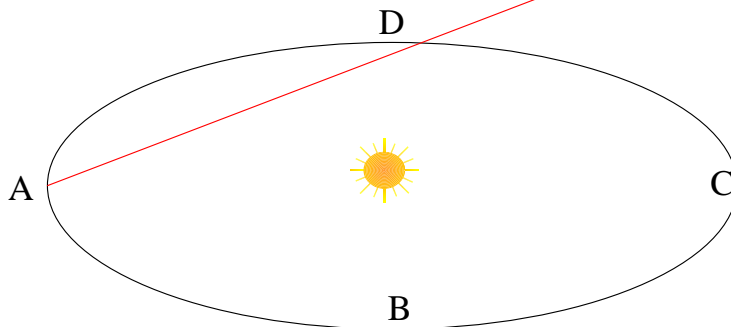


11

Il fallait revenir aux observations pour bien comprendre cette aberration. L'anglais Molyneux installa dans sa maison un secteur zénithal de près de 8m de long pour avoir des mesures précises, qu'il commença en décembre 1725 sur γ Draco. Son ami, le révérend Joseph Bradley (portrait) vint le visiter une quinzaine de jours après et ils constatèrent le déplacement de cette étoile. Ils se mirent à observer plusieurs autres étoiles, qui semblèrent toutes montrer le même phénomène. Ils en déterminèrent les caractéristiques essentielles : similitude avec la parallaxe, avec un décalage de 3 mois (90° sur l'orbite terrestre), amplitude de près de 40 secondes d'arc.

Interprétation de Bradley

- Il s'agit d'une composition du mouvement de la Terre avec celle de la lumière venant de l'étoile★
- La vitesse est maximum en B



12

Bradley raconta que c'est sur un voilier, pendant une fête nautique, qu'il eut la clé de l'énigme. Il s'était aperçu que la direction de la girouette au sommet du mat variait avec la direction du bateau. En discutant avec le capitaine, il comprit qu'il s'agissait d'un phénomène général. La girouette suivait non pas la direction du vent, mais celle résultant de la composition de la vitesse du vent avec celle du bateau.

Dans la théorie de la lumière en vogue à l'époque, celle de l'émission de Newton, la lumière était formée de corpuscules émis par la source. Roemer à l'Observatoire de Paris avait montré que cette lumière semblait se propager dans l'espace à une vitesse finie. Par conséquent, la direction de l'étoile résultait de la composition de la vitesse de la lumière avec celle de la Terre.

C'est au moment où la Terre avait la vitesse la plus grande par rapport à l'étoile que la position était extrême. Cela expliquait parfaitement le décalage de 90° observé.

Conséquences

- La constante de l'aberration est en adéquation avec les valeurs connues de la vitesse de la lumière et de la parallaxe solaire
- L'aberration « prouve » la propagation de la lumière à vitesse finie
 - La précision est améliorée
- L'aberration « prouve » le système de Copernic

13

Il est facile de calculer l'amplitude du mouvement. Elle fait intervenir le rapport v/c où v est la vitesse de la Terre et c la vitesse de la lumière. La vitesse de la Terre sur son orbite est directement lié à la distance de la Terre au Soleil, souvent ramené en angle sous lequel la Terre est vue du Soleil (parallaxe solaire). Les calculs de Bradley montraient que le mouvement était en parfaite adéquation avec les valeurs connues de la parallaxe solaire et de la vitesse de la lumière.

Ceci dit, il fallait accepter que la lumière se déplaçait à une vitesse finie et qu'ainsi la thèse de Roemer, concernant le mouvement des satellites galiléens de Jupiter, était exacte. La cohérence des résultats plaidaient bien sûr en cette faveur. Inversement, la précision de la mesure de la vitesse de la lumière était améliorée.

Il fallut admettre que la Terre se déplaçait par rapport aux étoiles avec un mouvement quasi circulaire autour du Soleil. Aucune explication sérieuse n'avait pu être fournie dans le cadre du géocentrisme.

Cette communication de Bradley à la *Philosophical Royal Society* de 1728 marqua ainsi une date fondamentale dans la compréhension de notre monde. Désormais, les astronomes pouvaient développer les théories dans le cadre copernicien, sans émettre de conditionnel sur la validité de ce système.

De l'expérience d'Arago
à
Celle de Fizeau

Les théories de la lumière

- **Théorie ondulatoire de Huyghens**
 - La lumière est un phénomène ondulatoire
 - Propagation plus lente dans un milieu réfringent
 - Principe de Fermat
- **Théorie de l'émission de Newton**
 - La lumière est formée de corpuscules
 - Propagation plus rapide dans un milieu réfringent
 - Principe de moindre action



15

À l'époque de Bradley, et pendant plus d'un siècle, deux théories très différentes allaient être mises en oeuvre pour interpréter les phénomènes lumineux:

-**La théorie ondulatoire** apparaissant avec Descartes et Fermat. Elle reçut un cadre plus complet avec Christian Huyghens (tableau). Dans cette théorie la lumière était une onde qui se propageait dans un milieu élastique nommé éther. Cette onde se propageait plus lentement dans un milieu réfringent. Fermat interpréta les lois de la réfraction de Snell-Descartes en indiquant que pour aller d'un point A extérieur au milieu au point B intérieur la lumière choisissait le chemin le plus court en temps.

-**La théorie de l'émission** de Newton pour lequel la lumière était formée de corpuscules. Arrivés au contact d'un milieu réfringent les corpuscules de lumière subissaient une sorte d'attraction. De ce fait ils allaient plus vite dans un milieu réfringent. Maupertuis modifia le principe de Fermat en intégrant sur la vitesse, ce qui conduisit au *principe de moindre action*. Ce principe avait amené Lagrange au développement de la mécanique analytique.

Même si cette dernière théorie ne pouvait expliquer les anneaux de Newton, c'est elle qui était mise en avant à la fin du 18^{ème} siècle, en particulier par Laplace qui donna une brillante interprétation de la double réfraction du spath d'Islande dans ce cadre.

L'expérience d'Arago

- Invariance de l'aberration
- Prisme devant une lunette
- Déviation : $D=(n-1)A$
 - Si n est proportionnelle à la vitesse dans le prisme, la déviation varie avec la vitesse
- Résultat négatif

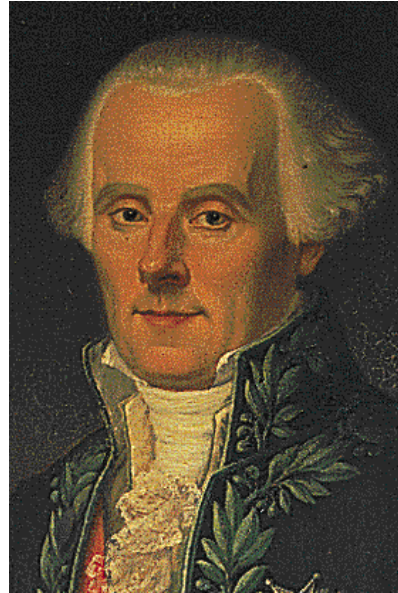


16

En 1805, alors élève à l'École Polytechnique, François Arago obtint un poste de secrétaire-bibliothécaire à l'Observatoire de Paris. Le Bureau des Longitudes le plaça sous la responsabilité de Jean-Baptiste Biot, jeune membre de l'Institut, professeur au Collège de France et grand disciple de Laplace. Ils reprirent les travaux de Borda sur la réfraction des gaz, d'un grand intérêt dans les observations astronomiques. Ce travail inspira à Arago l'idée d'observer l'aberration annuelle des étoiles avec un prisme, pour voir si la réfraction avait un effet sur le mouvement. Il avait remarqué que l'aberration annuelle de toutes les étoiles conduisait à une vitesse de lumière constante. L'interposition d'un prisme conduisait à modifier cette vitesse dans le prisme, donc l'indice. La déviation dépendant de l'indice, on devait s'attendre à un petit effet. Arago interposa un prisme de $45'$, ce qui était suffisant d'après ses calculs pour observer un effet, or il ne détecta aucun déplacement dans la limite de ses erreurs. Il effectua une prédiction pour un prisme d'angle plus grand, toujours dans le cadre de la théorie de l'émission. Il rédigea un mémoire en 1806, avant de partir pour l'Espagne reprendre avec Biot le projet d'extension de la Méridienne de Méchain. Ce mémoire présenté à l'Académie fut transmis aux rapporteurs Lagrange et Laplace, qui allait le laisser de côté jusqu'au retour d'Arago en 1809. Laplace l'invita alors à reprendre l'expérience. En 1809 les mesures furent réalisées avec un prisme achromatique d'un angle de 10° , ce qui était largement suffisant pour voir un effet, d'après les calculs d'Arago, repris par Lagrange et Laplace. Ce fut l'échec : aucun changement n'était visible dans la valeur de l'aberration. Arago reprit l'expérience en 1810 avec un prisme de 22° , et il ne perçut aucun effet.

Conséquences

- **Perplexité de Laplace (1812)**
 - L'œil n'est sensible qu'à des corpuscules ayant une vitesse bien définie ?
 - La vitesse de la lumière est constante ?
- **Falsification de la théorie de l'émission**
 - Dans la théorie ondulatoire la vitesse de la lumière est liée au milieu qui sert de support appelé éther



17

Laplace fut très perplexe de ce résultat. Il hésita entre deux explications, soit que l'œil ne put percevoir que des grains de lumière ayant une vitesse donnée, soit que la vitesse de la lumière fut constante. Ce fut plutôt la première hypothèse que retint Laplace dans son grand ouvrage, *l'Exposition du Système des Mondes*:

"L'aberration des étoiles dépend de la vitesse de leur lumière combinée avec celle de la Terre dans son orbite ; elle ne serait donc pas la même pour tous les astres, si leurs rayons parvenaient à nous avec des vitesses différentes. Il serait difficile, vu la petitesse de l'aberration, de connaître exactement par ce moyen, ces différences ; mais la grande influence de la vitesse de la lumière sur sa réfraction, en passant dans un milieu diaphane, fournit une méthode très précise pour déterminer les vitesses respectives des rayons lumineux. Il suffit pour cela de fixer un prisme de verre au devant de l'objectif de la lunette et de mesurer la déviation qui en résulte dans la position apparente des astres. On a reconnu de cette manière que les vitesses de la lumière directe et réfléchi de tous les objets célestes et terrestres étaient exactement les mêmes. Les expériences qu'Arago a bien voulu faire à ma prière ne laisse aucun doute sur ce point de physique important à l'astronomie en ce qu'il prouve la justesse de l'aberration des astres.

"La vitesse de la lumière des étoiles n'est pas, relativement à un observateur, la même dans tous les points de l'orbite terrestre. Elle est la plus grande lorsque son mouvement est contraire à celui de la Terre ; elle est la plus petite quand les deux mouvement conspirent. Quoique la différence qui en résulte dans la vitesse relative d'un rayon lumineux ne s'élève qu'à un cinq millième environ de la vitesse totale, cependant elle peut produire des changements sensibles dans la déviation de la lumière qui traverse un prisme. Des expériences très précises, faites par Arago, ne les ayant point fait apercevoir, on doit en conclure que la vitesse relative d'un rayon lumineux homogène est constamment la même, et probablement déterminée par la nature du fluide qu'il met en mouvement dans nos organes pour produire la sensation de lumière. Cette conséquence paraît encore indiquée par l'égalité de vitesse de la lumière émanée des astres et des objets terrestres, égalité qui, sans cela, serait inexplicable. Est-il invraisemblable de supposer que les corps lumineux lancent une infinité de rayons doués de vitesses différentes, et que les seuls rayons dont la vitesse est comprise dans certaines limites ont la propriété d'exciter la sensation de lumière, tandis que les autres ne produisent qu'une chaleur obscure."

Interférométrie et la nature ondulatoire de la lumière

- Les franges d'Young
- De lumière sur de la lumière donne de l'obscurité !



18

Nous étions en 1811, la théorie de l'émission étaient la théorie dominante. Pourtant plusieurs faits expérimentaux, bien connus, accréditaient plutôt la thèse de la nature ondulatoire de la lumière. Par exemple, en Angleterre, Thomas Young avait découvert l'interférométrie. Les lumières provenant de deux trous éclairés par la même source conduisaient à une tache présentant des franges alternativement noires et blanches. De la lumière sur de la lumière conduisait à de l'obscurité. Ce phénomène s'expliquait très bien dans le cadre de la théorie ondulatoire et il restait mystérieux dans celui de l'émission.

Arago allait s'engager dans cette voie, sous l'influence des travaux d'Etienne, Louis Malus. En observant la réflexion du Soleil dans une mare à travers un spath d'Islande, Malus s'était aperçu que de simples réflexions pouvaient polariser la lumière. Il était même possible de faire ainsi disparaître totalement la lumière. La polarisation cristalline, associée à la biréfringence, était connue depuis de longues années. Elle était interprétée dans la théorie de l'émission par Laplace. La polarisation par simple réflexion par contre était difficilement explicable dans cette théorie.

Arago reprenant des travaux de Newton sur les lames minces, découvrit en 1811 les phénomènes de polarisation chromatique et de polarisation rotatoire. Ceci lui permit de construire un polariscope avec lequel il allait découvrir la polarisation des halos de la Lune et du Soleil, l'existence de points neutres dans la polarisation du ciel, la polarisation des mers lunaires ... Il eut l'idée d'examiner la polarisation des gaz, des liquides et des solides sur leur bord, et montra ainsi en 1814 la nature gazeuse du Soleil.

Collaboration Arago Fresnel

- Interférométrie en lumière polarisée
- Nature transverse des ondes lumineuses
- L'éther de Fresnel
- Lettre de Fresnel à Arago (1816)



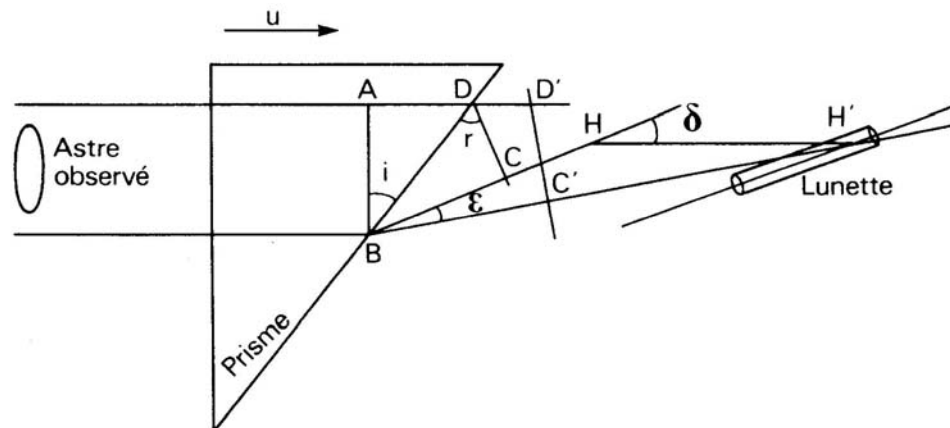
19

Arago acquit ainsi une nouvelle célébrité. Ce fut probablement cela qui allait conduire en 1814 Augustin Fresnel à le contacter pour qu'il jugea quelques uns de ses travaux d'optique. Il commença à lui envoyer un mémoire sur l'aberration annuelle des étoiles, qu'Arago refusa de publier, car il ne contenait aucune information nouvelle par rapport aux travaux de Bradley. Fresnel soumit ensuite un second mémoire sur l'interférométrie à partir de trous. Arago accepta de publier ce travail dans le cadre des *Annales de Chimie et de Physique*, dont il assurait l'édition avec Gay-Lussac, bien qu'il n'apportait que peu d'informations par rapport aux travaux de Thomas Young.

Cette publication encouragea Fresnel qui voulut poursuivre ses travaux d'optique pour valider la théorie ondulatoire de la lumière qu'il mettait au point. Un concours fut organisé par l'Académie des Sciences pour la meilleure expérience prouvant la nature de la lumière. Fresnel le remporta brillamment avec sa célèbre expérience de la diffraction à distance finie. Poisson fut ébranlé et revint à la séance suivante en prouvant, par la théorie ondulatoire, qu'au centre de l'ombre du disque occulté l'intensité était exactement celle à l'extérieur du disque, ce qui fut effectivement vérifié. Ce ne fut pas pour autant que les partisans de la théorie de l'émission renoncèrent. Laplace, Biot, Cauchy n'allèrent jamais accepter la théorie ondulatoire.

Arago et Fresnel collaborèrent d'une manière extrêmement fructueuse, en montant des expériences nouvelles d'interférométrie, autant de pierres dans le jardin des partisans des corpuscules de lumière. Ils aboutirent à l'une des plus importantes expériences de la physique : l'absence d'interférences dans le cas de la lumière polarisée. Si chaque voie d'un interféromètre avait une lumière de polarisation contraire, aucune frange n'était visible.

L'entraînement partiel de l'éther



- Le résultat négatif → l'entraînement partiel de l'éther par le prisme
- Formule de Fresnel

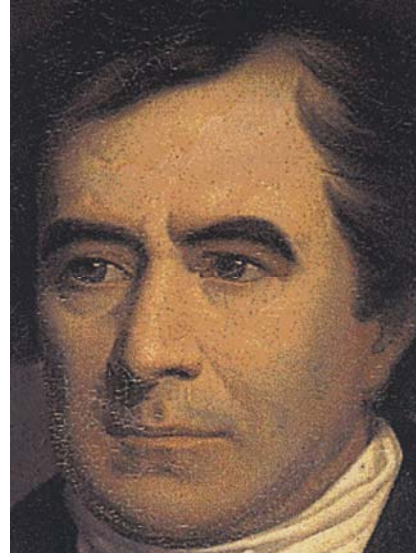
20

Fresnel en déduisit la nature transverse de la lumière, contrairement au modèle d'ondes longitudinales. Arago, lui, fut perplexe. Cette attitude est souvent mal comprise, mais l'existence d'une onde transverse impliquait la transmission de la lumière dans un milieu pourvu d'une grande rigidité, alors que les ondes longitudinales se transmettaient dans un milieu élastique. Il fallait donc introduire un éther cristallin, revenant ainsi à une théorie d'Aristote qui avait été rejetée par les astronomes à partir des travaux de Copernic.

Pendant ces années d'intense collaboration, Arago a eu bien sûr l'idée de demander à son ami d'interpréter dans le cadre ondulatoire son expérience d'aberration des étoiles avec un prisme. Fresnel lui répondit dans une lettre célèbre, qui fut publiée dans les *Annales de Chimie et Physique*. P. Costabel en a fait une analyse remarquable, montrant d'ailleurs quelques erreurs dans la figure illustrant la démonstration. Fresnel expliqua à Arago que s'il n'avait rien vu, c'était en raison de l'existence d'un entraînement partiel de l'éther par le prisme. Il déduisit une formule explicite de ce phénomène, à partir de l'existence de l'absence d'effet constaté par les astronomes.

La mesure directe de la vitesse de la lumière

- Proposition d'Arago en 1838
- Méthode basée sur un miroir tournant



21

En 1838 Arago prit connaissance du travail de l'anglais Wheastone pour la mesure des vitesse de l'électricité (1834). Il en déduisit un montage permettant de mesurer enfin la vitesse de la lumière en laboratoire. Bien sûr Roemer l'avait estimé indirectement en 1676 à l'Observatoire de Paris, à partir du mouvement des satellites galiléens de Jupiter. À partir de l'aberration annuelle, une autre valeur plus précise avait été déduite par Bradley, la parallaxe solaire étant déterminée de manière indépendante. Mais ce n'était que des mesures indirectes, dans le vide spatial. La théorie de l'émission et celle des ondes différaient de manière radicale sur la valeur de la vitesse dans un milieu réfringent. Dans la première théorie, la lumière allait plus vite, alors que dans la seconde c'était le contraire. Mesurer la vitesse dans un tel milieu, comme l'eau ou le verre, présentait donc un enjeu scientifique essentiel. Malgré tous les succès remportés par la théorie ondulatoire, les partisans de la théorie de l'émission ne se décourageaient pas. Pour Arago, la mesure de la vitesse de la lumière constituait une expérience décisive, comme il les aimait.

Le montage était difficile, basé sur des miroirs tournant à très grande vitesse. L'artisan Gambey avec lequel il avait développé de nombreux instruments, n'était plus aussi habile. Arago se dispersait dans de nombreuses activités, et il n'avait pas le temps de réaliser cette expérience qu'il estimait cruciale. En 1843, il contacta Louis Bréguet, petit-fils du grand horloger Abraham Bréguet pour réaliser cette expérience. Néanmoins, malade et se dispersant dans ses nombreuses tâches, il ne put aboutir.

Un grand événement de science spectacle

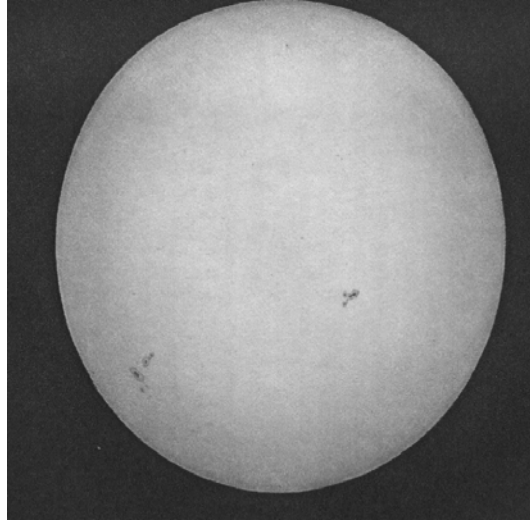


Arago annonce la découverte de Daguerre
lors de la séance publique de l'Académie des Sciences du 19 août 1839.

22

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences en 1830, Arago innova en organisant des séances publiques et en créant les Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences. Il se battit pour aider les savants, obtenant par exemple une pension pour Louis Daguerre et les héritiers de Nicéphore Niépce, pour l'invention de la photographie qu'il divulgua de manière spectaculaire à l'Académie le 19 Août 1839.

Fizeau & Foucault photographie le Soleil (1845)



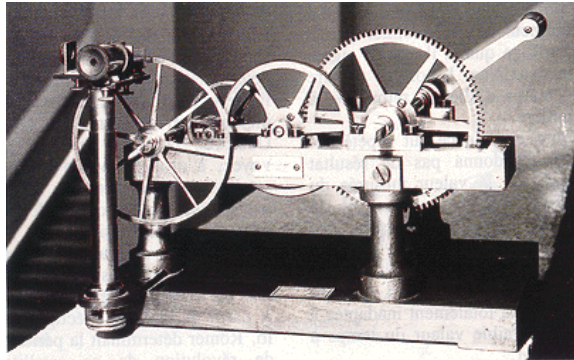
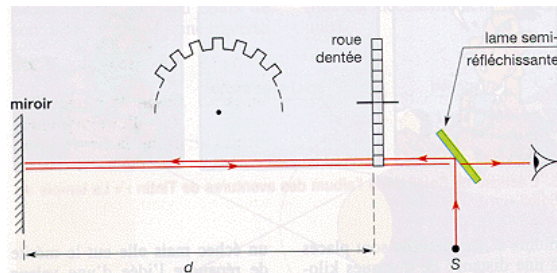
23

Deux jeunes étudiants en médecine, Armand Fizeau et Léon Foucault, assistaient à cette séance historique. De ce fait ils se lancèrent ensemble dans des expériences de photographie. Ils étaient en relation régulière avec Arago qui leur fournissait conseils et quelques moyens. Passionnés par cette nouvelle discipline, ils allaient réaliser en 1845 la première photographie du Soleil confirmant l'existence de l'assombrissement centre-bord, et par conséquent sa nature gazeuse.

Il faut noter la qualité de la résolution. Des taches apparaissent. Pour cela les deux savants avaient construit un héliostat qui permettait de suivre le mouvement du Soleil pendant l'exposition.

Fizeau mesure la vitesse de la lumière

- Expérience de Fizeau avec une roue dentée (1848)
- Expérience de Foucault (1849)



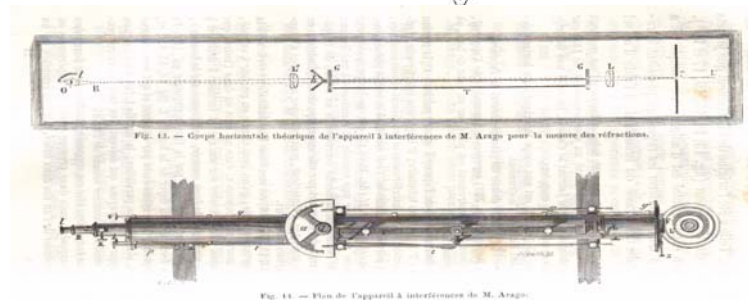
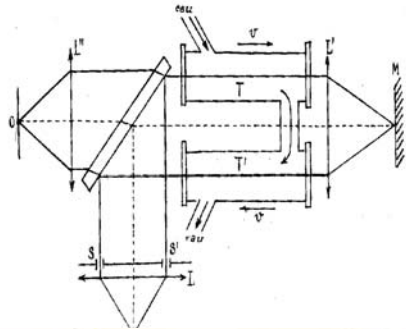
24

Arago, presque aveugle, laissa les jeunes savants reprendre alors son expérience de détermination de la vitesse de la lumière en laboratoire. Fizeau eu l'idée de remplacer le miroir tournant par une roue dentée. Le montage devint plus aisé, et en 1849, il aboutit à la mesure tant souhaitée, avec un instrument construit par Gustave Froment. Arago savoura d'autant plus ce succès que peu après Foucault en utilisant un miroir tournant améliora la mesure de son ami. Quelques mois plus tard Foucault coiffa son jeune ami sur le fil en montrant que le rapport des vitesses dans l'eau et dans l'air était conforme à la prédiction faite à partir de la théorie ondulatoire. Ce fut le coup de grâce pour les rares partisans restants de la théorie de l'émission.

Expérience de Fizeau (1850)

- Validité de la formule de Fresnel :

$$U = V(1 - 1/n^2)$$



25

Arago ressortit alors la lettre que lui avait envoyée Fresnel en 1818 sur l'entraînement de l'éther. Il suggéra à Fizeau d'essayer de mettre en évidence l'entraînement de l'éther à travers un courant d'eau. Ce fut une expérience très délicate, que réussit Fizeau en 1851, en utilisant le réfractomètre différentiel qu'avait conçu Arago en 1817. L'effet était totalement conforme à la prédiction de Fresnel. Cette théorie devint donc la référence. Elle complétait la théorie ondulatoire de la lumière, sans lui être nécessaire.

De Fizeau à Mascart

- Impact de l'expérience de Fizeau
- Nouvelles expériences sur l'aberration
 - Hoek : séparation en deux chemins
 - Airy : télescope rempli d'eau
- Expériences de Eleuthère Mascart
 - Expériences type Arago
 - Expériences avec des réflexions
 - Conclusion : aucun effet détecté
 - Mise en cause de l'entraînement de l'éther

26

L'expérience de Fizeau suscita un très grand intérêt dans le monde. Young avait émis l'hypothèse d'un éther non entraîné par le mouvement de la Terre. Avec Fresnel, le concept d'un entraînement partiel était né et il semblait vérifié. D'autres, comme Ritz plus tard, émirent l'idée d'un entraînement total.

De nouvelles expériences de cette nature furent montées dans les années 1860, comme celles du hollandais Hoek et de l'italien Respighi. Airy réalisa une expérience d'aberration annuelle avec un télescope rempli d'eau (1871). Toutes ces expériences étaient basées sur la réfraction et elles confirmèrent la formule de Fresnel.

Mascart fit des expériences très variées à l'École Normale Supérieure. Plusieurs d'entre elles étaient basées sur la réfraction, mais il eut aussi l'idée de monter des expériences avec des réflexions qui donnèrent des résultats en contradiction avec la théorie de Fresnel.

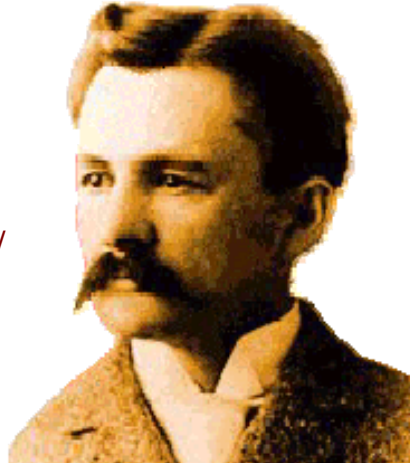
Dans l'introduction du premier article Mascart revint longuement sur l'expérience d'Arago et la théorie de Fresnel qui en avait résulté. Il conclut dans son premier mémoire : *"Les phénomènes de réflexion de la lumière, de diffraction, de double réfraction rectiligne et de double réfraction circulaire sont également impuissants à mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre quand on opère avec la lumière solaire ou avec une source de lumière terrestre."* A la fin de son second mémoire il nota : *"La conclusion de ce mémoire serait donc que le mouvement de translation de la Terre n'a aucune influence appréciable sur les phénomènes d'optique produits avec une source terrestre ou avec la lumière solaire, que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen d'apprécier le mouvement absolu d'un corps et que les mouvements relatifs sont les seuls que nous pouvons atteindre."*

Sans doute ce travail ouvrait la voie à l'expérience de Michelson. Eleuthère Mascart, nommé directeur de la météorologie nationale, n'a pu poursuivre ces expériences.

De l'expérience de Michelson
à
l'article d'Einstein 1905

Albert Michelson

- Début de Michelson
 - Mesure de la vitesse de la lumière (1879)
- Michelson à Berlin
- Michelson à Paris
 - Rencontre Michelson / Mascart / Cornu
- L'expérience de Michelson-Morley



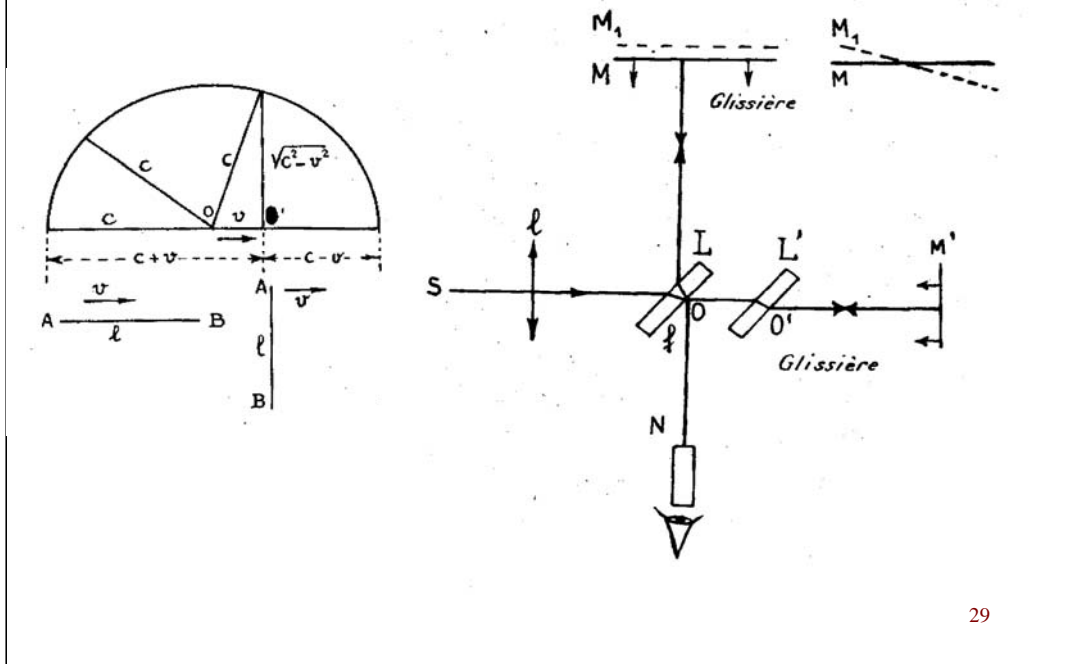
28

Albert Michelson est né en 1852 à Strzelno à l'époque en Prusse, actuellement en Pologne. Quelques années sa famille émigra en Amérique dans le Nevada. Ce fut dans le cadre de la marine américaine que Michelson réalisa en 1879 sa première expérience, la mesure de la vitesse de la lumière avec la méthode Arago-Foucault. Il en améliora sensiblement la précision. Il démissionna de l'armée et vint en 1881 passer deux années en Europe.

Michelson monta à Berlin son expérience de la détermination du vent d'éther, expérience qu'il reprit aux États-Unis en 1887 avec Morley.

Il visita aussi Paris où il rencontra Mascart, mais aussi Cornu et Lippman à l'École Polytechnique.

L'expérience de Michelson



29

L'apport essentiel de Michelson par rapport à l'expérience d'Arago consistait dans la suppression de tout réfracteur. Il s'agissait bien d'examiner l'effet de la vitesse de l'observateur par rapport à la lumière, mais son interféromètre, basé sur des miroirs, conduisait à une interprétation plus immédiate du résultat, qui falsifiait la théorie de Fresnel.

Il était facile d'évaluer les trajets optiques des lumières passant sur chaque voie de l'interféromètre. Si l'ensemble avait une vitesse v par rapport à la source, un déphasage existait, conduisant à un décalage des franges au foyer. Par le décalage des franges, il s'agissait de comparer des sources ayant différents mouvements relatifs par rapport à la Terre. Le résultat fut négatif.

Sur la figure de gauche, on a représenté les vitesses de la lumière à considérer dans les différentes directions dans le cas d'aucun entraînement d'éther (mécanique galiléenne).

Sur le miroir semi transparent L le faisceau est divisé en deux parties. Chacun de ces faisceaux se réfléchit sur un miroir, M et M' . Après réflexion ou transmission à nouveau avec L , on reçoit les faisceaux interférés en N . Si l'interféromètre est équilibré, les chemins optiques sont identiques. Si l'image virtuelle M_1 du miroir M' est parallèle à M , on observe une teinte plate. En inclinant un peu on fait apparaître les franges.

Dans l'hypothèse d'aucun entraînement on devait voir un déplacement des franges selon la vitesse de la Terre par rapport à la source. Or on ne vit rien, comme s'il y avait un entraînement total. Ce résultat était totalement en accord avec les conclusions de Mascart.

La transformation de Lorentz

- Contraction des longueurs (Fitzgerald)
- Expression de cette contraction
 - Transformation de Lorentz



30

Pour interpréter ce résultat, l'américain Fitzgerald introduisit l'idée d'une contraction des longueurs (1887).

Indépendamment le Hollandais Lorentz formalisa cette contraction dans le cadre d'une théorie de l'électrodynamique de l'électron. La transformation de Lorentz était définie.

Poincaré et la relativité

- Groupes de transformation
- Équation de Maxwell et transformation
- Transformation de Lorentz
- Constance de la vitesse de la lumière
- Principe de la relativité

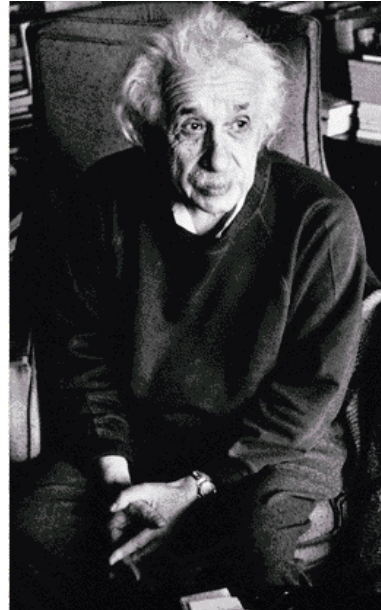


31

Henri Poincaré reprit le problème à la base en introduisant les groupes de transformation. Il relia la transformation de Lorentz à l'équation de Maxwell, montrant que c'était cette transformation qui rendait invariante cette équation. Il postula la constance de la vitesse de la lumière et introduisit le principe de relativité du temps et de l'espace. Il n'y avait plus d'espace et de temps absolus.

Einstein conclut en 1905

- Effet photoélectrique
 - Retour aux corpuscules de lumière
- Inutilité de la notion d'éther
- Considère le problème de la synchronisation des horloges



32

Poincaré était toujours gêné par la notion d'éther. Einstein comprit, à partir de la théorie des quanta de Planck, que la nature de la lumière n'était pas une simple onde se déplaçant dans l'éther. Il interpréta la linéarité de l'effet photoélectrique dans ce cadre. Cela le conduisit à rejeter la notion d'éther, considérant qu'il s'agissait d'une théorie inutile.

Il reprit les idées de Poincaré dans un exposé très clair basé sur le problème de la synchronisation des horloges. Son article de 1905 est considéré comme l'acte de naissance de la théorie de la relativité.

Les enseignements

- Des théories fausses ont pu interpréter correctement des observations
 - Théorie de Bradley de l'aberration
 - Théorie de l'émission de la lumière
 - L'entraînement partiel de l'éther
- Rien ne prouve la validité d'une théorie
- Une théorie incorrecte a prouvé l'héliocentrisme !
 - Il existe, bien sûr, une théorie relativiste de l'aberration des étoiles.

33

La théorie de la relativité est donc née à la suite d'un long cheminement. De nombreuses théories ultérieurement falsifiées ont été rencontrées :

-Celle de Bradley de l'aberration annuelle, basée sur la composition de la vitesse de la lumière avec celle de la Terre. Elle est fautive puisque la vitesse de la lumière est constante. Il existe bien sûr une théorie relativiste de l'aberration. La différence est très faible, mais mesurable, et mesurée.

-Celle de l'émission a pu paraître pendant plus d'un siècle comme le meilleur cadre pour expliquer les phénomènes lumineux. La théorie quantique est loin d'être un retour de cette théorie. La théorie de l'émission a été très utile, en particulier pour introduire le principe de moindre action et par delà la mécanique analytique

-Celle de l'entraînement partiel de l'éther, type même de phénomène prouvé un moment par l'expérience, mais qui se trouve ensuite falsifié. La notion elle-même d'éther est toujours en question. Certains y voient dans la constante cosmologique. Quand à la notion d'ondes transverses ce n'est plus qu'un modèle mathématique. Pourtant les ondes radios, tout le monde connaît!

En fait, comme l'a souligné Karl Popper rien ne prouve la validité d'une théorie. Au contraire, le rôle du scientifique doit consister à essayer de la falsifier, en montant des expériences adéquates.

Enfin il est curieux de constater que l'héliocentrisme, qui mettait en question les bases de la relation entre l'Homme et les cieux, a été « confirmé » par une théorie en partie incorrecte. Certes l'aberration des étoiles bien due au mouvement de la Terre par rapport aux étoiles, mais il ne s'agit pas d'une composition de vitesse. La théorie relativiste est basée sur la variation de l'angle sous lequel est vue l'étoile en appliquant la transformation de Lorentz. L'écart avec la théorie de Bradley est très faible, heureusement car autrement on aurait mis plus de temps avant de comprendre.