

SOCIÉTÉ

ASTRONOMIQUE

DE LYON



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 2 — 1974

ERRATA

Notes concernant la revue n° 1, nouvelle série.

- 1- Le texte de la conférence sur la voie lactée est dû à M. le Professeur Charles Fehrenbach, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur de l'Observatoire de Haute-Provence.
- 2- Au verso de la couverture, à la place de «coupelles» jumelées de l'Observatoire de Lyon, il faut lire «coupoles».

SEANCE CINEMATOGRAPHIQUE
du VENDREDI 3 MAI 1974

Le 3 mai 1974, la Société Astronomique de Lyon a consacré une séance exceptionnelle à la projection de cinq films prêtés par les Services Américains d'Information et de Relations Culturelles du Consulat des Etats-Unis d'Amérique à Lyon.

Près de trois cents personnes ont assisté à ces projections en présence de Monsieur le Consul général des Etats-Unis, de Monsieur le Directeur de l'Observatoire de Lyon par intérim, de Monsieur le représentant du Conseil général et diverses personnalités.

En présentant la séance, Monsieur le Président de la Société Astronomique remercia tous ceux qui contribuèrent à la réalisation et au succès de cette soirée : au Consulat des Etats-Unis, aux vêtements Charles et à M. Brossette pour l'Optique St-Genis.

Monsieur le Consul général des Etats-Unis répondit par une allocution dont on lira les termes ci-contre.

La projection coupée par un entracte d'une dizaine de minutes, présenta successivement :

- 1 - PUISSANCE DE DIX : court métrage d'environ dix minutes mais peut-être le plus intéressant par la réflexion que suscitaient les passages de l'infiniment grand à l'infiniment petit.
- 2 - PUIITS DE LA VIE.
- 3 - LE SATELLITE ERTS.
- 4 - L'OBSERVATOIRE DE KITT-PEAK, malheureusement en version originale mais témoignant bien de la vie d'une journée dans un observatoire, de la mise au point des instruments à l'observation qui la suit et la couronne.

puis

- 5 - RENDEZ-VOUS AVEC LE SOLEIL.

Terminée vers 23 heures, nul doute que cette séance nous a apporté des informations pour en profiter longtemps.

Albert CICERON

le 3 mai 1974

Monsieur le Président, Mesdames, Mesdemoiselles, Messieurs,

Je vous remercie beaucoup d'avoir voulu, cette année encore, organiser une soirée consacrée à des films documentaires scientifiques américains.

Vous procurez ainsi au public initié -les membres de votre éminente société astronomique- et moins initié, comme moi-même, la possibilité de se renseigner sur les derniers développements réalisés par mon pays dans les domaines de la recherche fondamentale et de son application aux problèmes sociaux et économiques.

Tels les alchimistes d'antan, nous pouvons nous pencher sur les influences de l'eau et du soleil dans le monde où nous vivons, afin de trouver, grâce aux progrès de la science, en éliminant les séquelles de la pollution qui parfois l'accompagnent, une vie meilleure, une vie plus pleine.

Je sais, Monsieur le Président, que votre société s'intéresse tout particulièrement à de telles questions et je vous en félicite très vivement.

PHOTOMETRIE

La mesure (ou l'estimation) de l'éclat des astres est aussi ancienne que les catalogues de positions.

Les anciens avaient classé les étoiles suivant une échelle décroissante de 1 à 6 (6 correspondant à la limite visuelle directe). Quelques catalogues célèbres :

- Catalogue d'Hipparque (-150).
- Catalogue de Ptolémée (150), contenant 1020 étoiles et dont la traduction arabe a donné l'Almageste.
- Catalogue d'Argelander (1859-62), contenant 300 000 étoiles (jusqu'à $m = 9$) et prolongé jusqu'à la déclinaison 61° Sud par le Cordoba Durchmusterung.

La méthode employée est la méthode des degrés qui consiste à comparer les étoiles deux par deux.

Echelle de Pogson (1850)

Il a été constaté (J. Herschel - 1830), qu'à une différence de 5 magnitudes correspond un rapport 100 dans les énergies lumineuses. On pose donc :

$$m = m_0 - 2,5 \log E$$

C'est une échelle naturelle car si on écrit :

$$E = a^{m_0 - m}$$

on trouve pour la valeur a :

$$a \approx 2,6$$

Or cette valeur est à rapprocher du nombre $e = 2,72$ qui intervient dans les phénomènes physiques.

Procédés actuels de photométrie

Photographie -

Dès l'invention de la photographie, les applications en astronomie ont été envisagées car on avait enfin un procédé de mesure objectif. Les progrès ont été immenses.

Avantages : intégration de l'énergie
conservation des documents
mesures simultanées d'un champ

Inconvénients : non-linéarité de la réponse
seuil limite

Mais le procédé est encore utilisé de nos jours.

Photoélectricité - Trois sortes d'effet :

- effet voltaïque découvert par Becquerel.

Une force électromotrice se développe sous l'effet de l'éclairement.

- effet photoconductif (Smith).

La résistance d'un sel (SPb par exemple) varie avec l'éclairement. Cet effet couvre une gamme importante de longueurs d'ondes (plusieurs microns).

- effet photoémissif (Hertz).

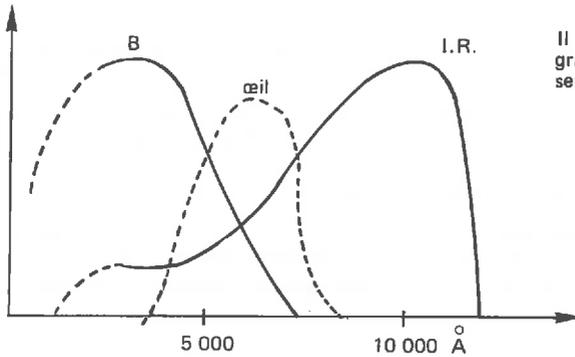
C'est un effet quantique qui relève de l'équation d'Einstein

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - w$$

- avec v = vitesse de l'électron expulsé
 $h\nu$ = quantum (énergie du photon incident)
 w = énergie d'extraction de l'électron

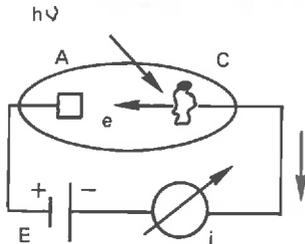
La sensibilité spectrale est surtout étendue vers les courtes longueurs d'ondes et ne dépasse pas actuellement 1 à 1,2 microns vers l'infrarouge.

Quelques exemples de sensibilité spectrale :



Il existe actuellement une grande variété de courbes de sensibilité spectrale.

Cellule photoélectrique -



Dans une ampoule vidée de gaz on met en regard (voir figure) :

- une anode A
- une plaque émissive C (cathode)

Les photons reçus par C expulsent des électrons qui sont accélérés par le champ électrique et vont sur A.

Il y a passage de courant électrique i .

i est proportionnel au flux lumineux.

Photomultiplicateurs -

Pour les flux faibles il faut amplifier le signal électrique : on a recours au phénomène de multiplication des électrons.

Un électron accéléré vient frapper une cible et expulse δ électrons secondaires qui à leur tour viennent frapper une autre cible, etc...

Au bout de n cibles on obtient δ^n électrons pour un électron primaire : le gain est donc $G = \delta^n$

On obtient ainsi pour G des valeurs de l'ordre de 10^7 à 10^8 .

L'ensemble cathode, multiplicateurs, anode est placé dans une ampoule vide : c'est un photomultiplicateur. Une tension d'alimentation de plusieurs centaines de volts est nécessaire pour accélérer les électrons.

Etude fine du phénomène -

Si on analyse le phénomène suivant le temps on remarque que le courant d'un PM est en fait produit par une succession d'impulsions de hauteurs différentes et de largeur qui peut s'exprimer en 10^{-9} à 10^{-8} secondes.

La répartition dans le temps est la même que celle des photons incidents (de nature aléatoire en astronomie), mais on peut penser immédiatement que la largeur

non négligeable des impulsions provoque, lorsque l'intensité augmente, un nombre de plus en plus grand de coïncidences d'impulsions.

Il y a donc lieu de considérer plusieurs modes de mesures suivant le flux d'énergie.

a) Flux faibles - Comptage.

On compte les impulsions tant qu'elles sont bien individualisées, mais à partir d'un certain taux de coïncidences, le comptage perd de sa précision (quelques 10^4 par seconde).

b) Flux forts - Intégration.

On a alors intérêt à mesurer la quantité d'électricité reçue à l'anode en changeant un condensateur pendant un temps déterminé.

Chacun de ces deux procédés a son avantage dans un domaine qui lui est propre,

le comptage pour les flux faibles
l'intégration pour les flux forts

Photométrie - Observations

La lumière qui nous vient des étoiles parcourt un trajet qui dégrade l'information en vertu de plusieurs phénomènes. Voici les principales causes :

- absorption interstellaire
- absorption atmosphérique
- réflexion sur les miroirs
- rendement des couches photoélectriques

Absorption interstellaire -

La loi varie en fonction inverse de la longueur d'onde mais elle ne semble pas dépendre beaucoup de la direction d'observation : seule l'intensité change.

Elle est plus forte dans le plan galactique qu'aux pôles.

L'espace interstellaire n'est pas vide mais contient des molécules et des poussières et l'absorption sera d'autant plus élevée que la masse de matière traversée sera plus grande. On écrit :

$$A(\lambda) = kf(\lambda) \Delta M$$

- $A(\lambda)$ = absorption totale sur le trajet en magnitudes
- ΔM = masse de matière traversée (sans l'atmosphère)
- $f(\lambda)$ = loi d'absorption
- λ = longueur d'onde du rayonnement

Le traitement de cette absorption est très délicat car il a fallu :

- a) déterminer la loi $f(\lambda)$ par la mesure d'étoiles plus ou moins rougies mais dont la répartition spectrale au départ était très bien déterminée (étoiles chaudes).
- b) trouver un procédé de correction pour reconstituer le rayonnement initial.

Absorption atmosphérique - Droite de Bouguer

L'étoile mesurée se trouve à une certaine distance zénithale; donc la masse d'air traversée dépend du moment d'observation. On écrit :

$$m^z = m^{(0)} + k(\lambda) \sec z$$

- $k(\lambda)$ = est l'absorption au zénith
- $m^{(0)}$ = est la magnitude hors atmosphère
- m^z = est la magnitude mesurée
- $k(\lambda)$ dépend des conditions atmosphériques et peut varier d'une nuit à l'autre.

On trace la droite de Bouguer par l'observation de la même étoile suivant plusieurs valeurs de la distance zénithale.

Causes d'absorption :

- Diffusion moléculaire : loi de Rayleigh-Cabannes en $1/\lambda^4$

Elle explique le bleu du ciel, les courtes longueurs d'ondes sont plus diffusées et si on regarde le ciel assez loin du soleil, c'est la lumière diffusée que nous percevons, donc la lumière est plus bleue.

- Absorption sélective

Exemple : UV absorbé par ozone (pour $\lambda \leq 2800 \text{ \AA}$)
R et IR absorbés par H₂O, O₂, etc...

- Absorption instrumentale

Les différents miroirs sont cause d'absorption propre et de diffusion : une partie importante de la lumière est perdue (15 % ou plus).

- Rendement quantique de la photocathode.

C'est le rapport du nombre d'électrons émis au nombre de photons absorbés.

Ce rapport dépend de la longueur d'onde et peut varier dans de très larges limites, mais le maximum ne dépasse guère 20 %.

On arrive donc au traitement général des données.

On mesure une quantité X_m d'énergie lumineuse définie pour une certaine longueur d'onde. Il faut remonter à X_{vrai} .

$$X_{\text{vrai}} = X_{\text{mesuré}} + \sum \Delta X$$

$\sum \Delta X$ représente les différentes corrections à appliquer.

Les mesures en photométrie sont donc très délicates et une erreur maximum de 1 % demande des précautions extraordinaires.

P. MIANES

R. Prud'homme : A QUOI PEUT BIEN SERVIR L'ASTRONOMIE ?

C'est une question bien souvent posée à tous ceux qui s'intéressent à l'Astronomie, mais aussi à propos de la plupart des disciplines que l'on englobe sous le terme général de «Recherche fondamentale» telles que Recherche Nucléaire, Recherche spatiale, Explorations polaires.

Notre réponse sera assez ambiguë : pour le commun des mortels les recherches «actuelles» n'ont certainement aucune application immédiate et peuvent paraître parfaitement inutiles.

Par contre ces recherches qui répondent à peu de questions mais en soulèvent continuellement de nouvelles, obligent les chercheurs astronomes, physiciens, chimistes, électroniciens, à penser de nouvelles théories, imaginer de nouvelles expériences. Ceci les amène à créer de nouveaux instruments ou à perfectionner des techniques existantes pour parfaire leurs expériences.

Un jour ou l'autre ces instruments ou ces techniques attirent l'attention d'artisans, techniciens, ingénieurs qui les améliorent et trouvent un emploi pratique. Après parfois quelques années, ou quelques générations, la Recherche Fondamentale de Papa ou de Grand Papa débouche petit à petit dans la vie courante, à la maison ou à l'usine, et bien souvent la plupart des gens ignoreront quel chemin tortueux a été suivi par un procédé ou un appareil devenu indispensable entre la première lueur dans le cerveau des chercheurs et l'utilisation actuelle.

«Les chercheurs» car généralement la rumeur publique attribue à tel ou tel génie une invention sensationnelle alors que ce génie n'est bien souvent que celui qui a eu une vue assez large pour faire la synthèse des idées et des travaux de ses nombreux prédécesseurs, l'invention ne naît pas d'un coup, elle procède par étapes, les unes rapides, les autres très lentes.

L'Astronomie a été de tout temps un puissant moteur pour l'avancement des sciences et des techniques, quelquefois à l'origine directe de certaines applications pratiques, elle a le plus souvent obligé les hommes à perfectionner des techniques issues d'autres disciplines (physique, chimie...) pour satisfaire leur besoin de savoir toujours plus ! En voici quelques exemples.

Navigation - Géographie -

Dès l'Antiquité les hommes ont créé des instruments pour parfaire leur observation du ciel (cercles divisés, astrolabe...) et ils se sont vite rendu compte que, par l'observation du ciel, ils pouvaient préciser leur position, en particulier en mesurant la hauteur de la polaire au-dessus de l'horizon. Quelques points de repère aidant (alignements d'étoiles, passage d'étoiles, repère au zénith suivant la saison) ils pouvaient, tant que les voyages étaient localisés à la Méditerranée ou à une navigation côtière, repérer grossièrement leur position. Mais dès le XVe siècle les navigateurs réclament un moyen qui leur permette de mieux faire le point, il est aisé de se repérer en latitude, mais la longitude ne peut être qu'estimée grossièrement par comparaison avec la vitesse et la direction du navire, pour ne pas risquer de se perdre, le navire navigue autant que possible, le long des parallèles. L'intérêt des gouvernements de puissances maritimes conduit à proposer des prix pour le perfectionnement de la science de la navigation, et à créer des observatoires pour la recherche : Leyde, Paris, Greenwich. Voici quelques dates :

1474 - Régiomantanus crée un almanach qui permet un point assez grossier par observation des positions de la Lune parmi les étoiles.

1679 - Première publication par Picard et Cassini, en France, de la «Connaissance des Temps» permettant, par l'observation, l'occultation des satellites de Jupiter, d'avoir une heure plus précise, donc de mieux connaître la longitude. De cette époque datent de grands progrès dans l'établissement des cartes.

1775 - Tables Lunaires de Tobias Mayer, permettent de faire le point en mer avec une précision inférieure à 1/2 degré.

Dès cette époque, des progrès spectaculaires sont fait en technique horlogère : 1670, Huygens applique aux horloges un régulateur de temps à pendule ; 1676, Hookes applique aux montres l'échappement à ancre. En même temps le sextant se substitue à l'Astrolabe pour la mesure de hauteur du soleil et des étoiles au-dessus de l'horizon. Les navigateurs ont enfin une technique sûre pour faire le point. Les progrès ont duré plusieurs siècles !

La Mécanique horlogère arrivée à son maximum à la fin du 19^e siècle, fait constater aux astronomes des irrégularités dans le mouvement de la Terre, les physiciens leur fourniront des étalons de temps plus précis (électroniques, oscillations atomiques).

La radio permet de plus une distribution plus universelle de l'heure et, récemment, un point direct avec des dispositifs tels que le Loran ou le Radar, mais la Navigation Astronomique conserve toute sa valeur.

La théorie des marées -

L'origine du phénomène de la marée fut entrevue par Képler, la première explication scientifique est due à Newton qui se base sur ses lois de la gravitation universelle. C'est Laplace en 1773 qui formulera les premières équations dynamiques en imaginant le principe des oscillations forcées.

En 1872 Lord Kelvin réalise la première machine qui, partant de relevés des hauteurs pendant quelques jours, permet de prédire pour une année les heures et niveaux des marées en un point déterminé de la côte.

Ces déterminations servent au trafic dans les ports et le long des côtes des océans, mais également aux touristes pour les heures de baignade ou de pêche.

Optique -

Le principal mérite de Galilée est d'avoir eu l'idée d'observer le ciel avec une lunette, observant les montagnes de la Lune et les satellites de Jupiter, il amorça une révolution dans la science astronomique.

Les successeurs perfectionnèrent les Lunettes mais étaient gênés par les aberrations chromatiques. De là naquit l'idée d'appareil sans aberration, utilisant un miroir sphérique, les premiers furent construits par des astronomes, Gregory, Cassegrain, Newton dont le premier télescope avait un miroir de 32 mm !

Les premiers objectifs achromatiques furent réalisés en 1756 par l'opticien anglais Dollon.

L'astronomie gourmande de perfectionnement amena Foucault à remplacer le bronze des miroirs par du verre argenté, et à imaginer une nouvelle méthode de contrôle. Les métallurgistes du 20^e siècle apportèrent un perfectionnement important avec la disposition sous vide d'un mince film d'aluminium dont le pouvoir réflecteur dure beaucoup plus longtemps que celui de l'argent.

Toute l'optique a profité de ces travaux : jumelles, appareils photo, microscopes, etc...

Cinéma -

En 1874, l'astronome français Janssen fait réaliser son revolver photographique pour enregistrer les phases successives du passage de Vénus devant le soleil en décembre de la même année.

Le principe en est repris et perfectionné par Marey en 1882 pour étudier le vol des oiseaux. On a un moyen pratique de «décomposer» le mouvement, il sera donné aux frères Lumière, en 1875, de réaliser pratiquement la «restitution» du mouvement, ils créeront leur premier cinématographe qui décomposera le mouvement d'après la réalisation de Janssen, et le reconstituera à la projection avec la même mécanique.

La Lumière -

Le fait que la lumière se transmette avec une vitesse finie, et non infinie comme on le croyait auparavant, fut découvert par Ole Rømer en 1676 au cours d'observations des éclipses de Jupiter, l'écart entre les tables de Cassini et l'observation lui montrèrent que la lumière met environ 20 minutes pour traverser l'orbite de la Terre.

La découverte du phénomène d'aberration qui donne un parcours apparent elliptique aux étoiles, par Bradley, confirma les constatations de Rømer.

Huygens, vers la fin du 17^e siècle, jeta les bases de la théorie ondulatoire, celle-ci fut développée par Young en 1802 puis perfectionnée par des Physiciens, des Mathématiciens, des Astronomes.

La Spectrographie -

La décomposition de la lumière par le prisme fut découverte par Newton en 1664.

En 1800 W. Herschell découvre l'infra-rouge et Ritter en 1801 met en évidence qu'il existe un rayonnement ultra-violet.

En 1802 Young expose sa théorie ondulatoire de la lumière qui permet d'expliquer le phénomène des anneaux de Newton et la coloration des lames minces.

En 1814 Fraunhofer perfectionne l'expérience de Newton et découvre que le spectre solaire est sillonné de milliers de raies sombres. Ces raies lui serviront pour classer les verres, dont sont faits les prismes, par ordre d'indice de dispersion, ce qui permet d'améliorer la fabrication des ensembles achromatiques.

Bunsen et Kirchhoff mettent en évidence que ces raies caractérisent les spectres des corps simples et, en 1861 font la première analyse spectrographique de l'atmosphère du soleil, l'analyse spectrochimique et l'astrophysique font leurs premiers pas.

L'astronomie utilise largement cette technique qu'elle a contribué à perfectionner, mais l'industrie métallurgique ne saurait guère s'en passer pour produire des alliages de haute qualité et de caractéristiques régulières.

Les chimistes et biochimistes utilisent aussi largement la spectrographie, ainsi que l'effet Raman qui en est un dérivé.

Il faut noter que l'hélium fut découvert dans l'atmosphère du soleil par la spectrographie 20 avant qu'on ne le trouve sur notre Terre, et ceci par Janssen et Lockyer.

Les mathématiques -

Leur développement est dû, dans les débuts et jusqu'au 17^e siècle, principalement au besoin des astronomes d'avoir un outil pour expliquer les mouvements de la terre et des planètes, déjà développé à l'époque de Kepler et Galilée ; cette science prend un élan décisif avec Newton (théories de la gravitation qui est le départ de la dynamique) et Descartes, nous trouvons ensuite Lagrange, Laplace, Lalande, Arago, Le Verrier célèbre par la découverte de Neptune, et bien d'autres.

Quelques autres exemples -

L'astronomie vient aider les historiens et les archéologues pour préciser la date de phénomènes cités par les anciens (calcul de l'époque d'éclipses de soleil), du passage de certaines comètes périodiques dont celle de Halley.

C'est aussi l'astronomie qui a permis de vérifier certains aspects de la Relativité généralisée d'Einstein (déviations de la lumière par les masses importantes, courbure d'espace entraînant l'avance du périhélie de Mercure...) ce qui a aidé les physiciens pour le calcul des accélérateurs géants dans lesquels les protons sont lancés à des vitesses proches de celle de la lumière.

Elle a permis également de prévoir les perturbations des trajectoires pour les engins spatiaux, ce qui a permis entre autre, la stabilisation des engins de télécommunication sur orbite géostationnaire.

Des expériences de Foucault avec le pendule et le gyroscope, pour mettre en évidence la rotation de la terre, sont nés le gyrocompas (indispensable aux navires et aux sous-marins) et les pendules de précision qui permettent de mesurer les variations de la gravitation terrestre près des masses de densité importantes (montagnes, gisements métalliques importants).

Beaucoup d'autres exemples pourraient être cités qui montreraient que l'astronomie finit toujours par servir à quelque chose et à tous !!

R. PRUD'HOMME

L'influence de l'Astronomie
sur la pensée philosophique contemporaine (**)

Conférence du 26 janvier 1974

par M. H. ANDRILLAT, Professeur à l'Université des Sciences et
Techniques du Languedoc

S'il est une science qui se prête à la réflexion philosophique, c'est bien l'astronomie. Les observations couvrent désormais des milliards d'années-lumière et explorent du même coup un passé très reculé de l'univers. La cosmologie est donc de nature à nous obliger à repenser, sous l'angle de la science moderne, les concepts philosophiques fondamentaux, espace, temps, origine et devenir de l'univers, place de la vie, de l'homme et de sa pensée.

Au début de ce siècle, sous l'impulsion de la pensée d'Einstein, la cosmologie devait connaître un tournant décisif de son histoire. Jusque là étude descriptive de l'univers à grande échelle, elle se voulait désormais une véritable explication du monde qui nous entoure. Après des siècles de balbutiements où, contre les fausses évidences de son expérience première, l'homme renonça successivement à croire qu'il vivait sur terre plate, puis sur une terre fixe située au centre du monde, la cosmologie n'eut d'autre prétention, jusqu'à la fin du siècle dernier, que l'explication du mouvement des astres du système solaire par la loi de Newton (attraction de deux corps proportionnellement à leurs masses et à l'inverse du carré de leur distance).

Science triomphante de la fin du siècle dernier, la mécanique céleste, par la précision avec laquelle elle prévoyait la position des planètes et des comètes, pouvait laisser croire que les concepts qu'elle utilisait présentaient un très haut degré de vérité. C'étaient ceux d'un espace absolu, tridimensionnel et euclidien, donc sans courbure et infini et d'un temps également absolu s'écoulant d'un passé infini à un futur infini. La mécanique y était régie par le principe de Galilée qui posait, par rapport à certains systèmes de référence dits inertiels, le mouvement *uniforme* du point libre (non soumis à l'action d'une force). Par rapport à plusieurs systèmes de référence, une longueur était un invariant, comme d'ailleurs l'était aussi une durée. Enfin, pour expliquer le mouvement orbital d'une planète, il fallait avoir recours à la force newtonienne d'attraction solaire qui, à chaque instant, la déviait de sa trajectoire rectiligne inertielle qu'elle aurait dû suivre, en tant que particule libre, selon le principe de Galilée.

Avec les progrès de l'astronomie qui faisait entrer en scène le monde des étoiles, la cosmologie aurait pu garder ce caractère de description mécaniste du monde : décrire le mouvement des étoiles après avoir décrit celui des astres du système solaire.

Mais Einstein vit dans la cosmologie la recherche d'une structure générale de l'univers, d'une vérité d'ordre, accessible à la raison humaine, mais dépassant de beaucoup le simple bilan descriptif de son contenu. Pour cela, il fallait remettre en cause les principes et les concepts mêmes de la mécanique newtonienne. Déjà, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, il avait dû renoncer au caractère absolu du temps et à l'invariance de la durée. Sa théorie de la relativité générale allait plus loin. Elle détruisait la notion d'espace absolu euclidien pour représenter l'espace réel.

Suivant le principe de Mach, l'espace (ni le temps) ne pouvait préexister à l'aventure de l'existence et sa géométrie était déterminée par son contenu matériel. Ainsi, au voisinage d'une masse, l'espace était courbe et il n'était plus besoin de faire appel à la mystérieuse action à distance de la force newtonienne pour expliquer la gravitation. Une généralisation du principe de Galilée suffisait : la particule libre décrivait la *géodésique* de l'espace (mouvement rectiligne uniforme dans le cas particulier de l'espace euclidien). C'était la loi des géodésiques dont l'application quantitative permettait de retrouver tous les résultats de la théorie de Newton.

Pour aborder l'étude de la cosmologie, Einstein posa encore le principe d'une distribution uniforme de la matière dans l'espace, que la découverte ultérieure du monde extragalactique devait si bien confirmer. A grande échelle, l'uniformité de la nature l'emporte sur sa diversité locale. Ce principe d'uniformité était le coup de grâce porté au concept d'espace euclidien. Un univers matériel infini uniforme aurait présenté en chacun de ses points un potentiel de gravitation infini.

Un univers courbé sur lui-même, dont la géométrie se ferme à l'image de la surface d'une sphère, levait au contraire cette difficulté car son volume restait fini. Tel fut donc le premier *modèle* d'univers qu'Einstein construisit à partir des équations (Equations du Champ)

(**) Le lecteur qui désirerait approfondir ces passionnantes questions trouvera grand profit à lire la remarquable étude épistémologique de Jacques Merleau-Ponty : «*Cosmologie du XXe siècle*». Chez Gallimard.

qui lui avaient servi à établir la théorie de la relativité générale, expressions directes du *principe de Mach* qui relie la géométrie de l'espace à sa densité matérielle et du *principe cosmologique* selon lequel les lois de la physique doivent être les mêmes en tout point de l'espace et doivent, par suite, être exprimées à l'aide d'équations tensorielles.

Mais la grande découverte de la cosmologie fut sans conteste celle du «royaume des galaxies» par Hubble en 1924 et, dans les années qui suivirent, la confirmation de leur mouvement général de récession, traduisant la fantastique expansion de l'univers.

Devant ce fait, le modèle statique d'Einstein devenait périmé et, avec lui, l'ancestrale idée d'un univers immuable. Aux mathématiciens de déduire des équations du champ les solutions dynamiques d'univers, les modèles à géométrie variable avec le temps cosmique, par l'intermédiaire de la célèbre fonction $R(t)$, souvent appelée assez improprement le rayon de l'univers.

Les solutions de Robertson, pourtant si prometteuses, apparurent à l'époque (c'était vers les années 30) bien décevantes. Ne laissaient-elles pas en effet le choix entre une infinité de modèles, avec toute la gamme des géométries possibles, univers elliptiques refermés sur eux-mêmes et finis, univers infinis euclidiens ou infinis hyperboliques ?

Les essais de choix arbitraires furent nombreux. Milne fut ainsi conduit à prendre comme fonction $R(t)$ la variable t elle-même, interprétant alors la singularité $t = 0$ qui annule à la fois le temps et l'espace comme l'acte divin de la création.

Plus durable fut la tentative de Gold et Bondi. Ils généralisèrent le principe cosmologique, en posant que les lois de la physique étaient les mêmes non seulement en chaque point de l'espace à un instant donné mais encore à tout instant. Ce principe «parfait», plus restrictif, déterminait la fonction $R(t)$ qui apparaissait alors commela fonction exponentielle $R(t) = R_0 \cdot e^{H_0 \cdot t}$. Le modèle correspondant est dit stationnaire, en ce sens que, malgré l'expansion de sa géométrie au cours du temps, il reste à chaque instant identique à lui-même, avec les mêmes lois physiques et des constantes fondamentales indépendantes du temps cosmique. C'est ainsi notamment que la densité de matière reste constante dans ce modèle et que l'expansion doit donc être compensée par la *création continue* de la matière. Modèle idéal pour les philosophes, le modèle stationnaire, dont l'étude fut parachevée par Hoyle, est le seul qui, du point de vue épistémologique, soit capable d'assurer la plénitude de la connaissance universelle, à partir de l'expérience nécessairement momentanée que nous pouvons avoir du monde qui nous entoure.

Aujourd'hui, cependant, les progrès de l'astronomie et notamment l'apport de la radioastronomie obligent à renoncer au modèle stationnaire, au profit des modèles à explosion primordiale. Le rayonnement de 3°K récemment découvert n'est-il pas en effet le résidu actuellement très refroidi par l'expansion du rayonnement initial à très haute température de la «boule de feu» primordiale ?

Ainsi le désarroi des années 30 devant la multiplicité des modèles possibles en relativité générale a fait place aujourd'hui à une attitude toute différente. Nous voyons au contraire dans cette multiplicité la preuve de l'extrême potentialité des équations d'Einstein ; à l'expérience et à l'observation le soin de cerner le problème et de dégager la solution représentative du monde réel !

Nous avons aujourd'hui la quasi certitude que l'univers a passé par la singularité de l'explosion primordiale. Demain, nous préciserons, par l'observation, sa géométrie et nous saurons s'il est fini ou infini.

La question du temps semble conduire par contre à des problèmes plus subtils. La représentation mathématique du temps est à l'image de la représentation de l'espace (application de l'ensemble des instants cosmiques sur l'ensemble des points d'une droite, ou l'ensemble des nombres réels, avec sa propriété de continuité, sa structure d'espace vectoriel, sa relation d'ordre total). N'est-ce pas d'ailleurs le principe de Galilée lui-même qui ramène la mesure des durées à celle des longueurs ? Parce que le temps passe, il est impossible de superposer deux durées pour dire qu'elles sont égales mais, d'après le principe de Galilée, deux durées seront égales si elles correspondent à des trajets égaux d'une particule libre quelconque, repérée dans un système de référence inertiel.

D'après la théorie d'Einstein de la relativité restreinte, la relativité des durées et, partant, de la simultanéité de deux événements, n'est physiquement sensible que si les éléments en présence ont de grandes vitesses relatives les uns par rapport aux autres.

A l'échelle cosmique, les vitesses propres des étoiles et a fortiori des galaxies, éléments de notre univers, sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière. Il en résulte que leurs temps propres sont identiques et définissent un seul et même temps, le temps cosmique.

C'est la structure du temps cosmique que nous cherchons à analyser.

Le passage du temps est une irréductible propriété qui tient au caractère *matériel* du monde de nos expériences (une solution de la forme $t = \text{constante}$ ne serait possible que pour une particule ayant une vitesse supérieure à celle de la lumière).

Le sens du passage, la flèche du temps, trouve une explication seulement à l'échelle cosmique. C'est l'image de l'évolution de l'univers, conformément au second principe de la thermodynamique. C'est le passage vers l'état de plus grande dégradation de l'énergie (d'entropie maximale), le passage de l'ordre au désordre. Cet effet d'évolution cosmique explique l'irréversibilité des phénomènes locaux. Ce n'est pas contraire aux lois de la physique (particulières et réversibles) que la statue brisée se reconstitue spontanément, c'est seulement très improbable dans un univers en expansion, en évolution entropique conforme au second principe.

Mais l'immense étendue de l'univers laisse sa chance à l'improbable. Cà et là, rarement, des phénomènes peuvent se produire à contre-courant de l'évolution universelle. Tel est, peut-être, le phénomène de la vie qui, sous l'extraordinaire diversité de ses manifestations, apparaît essentiellement comme une organisation, une mise en ordre de ses éléments adaptés à certaines fonctions, marche vers l'ordre, éphémère certes, tôt ou tard submergée par la marche au désordre de l'univers tout entier. A la limite de cette idée, une expansion indéfinie de l'univers traduirait finalement l'échec de toutes les tentatives de vie, alors qu'une limite à l'expansion et le passage à une phase de contraction traduiraient la transformation totale ou quasi totale de la matière inerte en matière vivante, avec renversement du sens de l'entropie. La pensée, véritable couronnement de la vie, présente le même sens d'évolution qu'elle. A l'échelle de nos expériences, la statue brisée ne sera reconstituée que par un être pensant.

Si donc le temps n'est que la traduction de l'évolution irréversible de l'univers conformément au second principe, un univers en expansion monotone (par exemple le modèle stationnaire) explique bien la flèche du temps. Mais une singularité, l'explosion primordiale par exemple, parce qu'elle annule, avec $R(t) = 0$, toute la géométrie et toute la physique de l'espace, pose un problème très difficile. Ou bien elle est une rupture dans la relation avant-après, donc une rupture du temps, à cause de la discontinuité des phénomènes physiques qu'elle introduit. Ou bien, elle n'est que l'image d'un état hyperdense de l'univers ($R(t)$ très petit mais non nul), assurant physiquement la liaison entre une phase préalable de contraction de l'univers et la phase d'expansion que nous lui connaissons. Mais si nous devons conserver le second principe thermodynamique, la flèche du temps (passage de l'ordre au désordre) doit être retournée pour la phase de contraction, qui n'apparaît alors que comme l'image du seul phénomène d'expansion dont l'origine redevient une rupture du temps. Ou bien, nous conservons le même sens à la flèche du temps mais il faut alors renoncer au second principe pendant la phase de contraction. Alors qu'est-ce à dire ? Univers vivant ? ...

Le problème est d'autant plus aigu que les observations semblent bien converger vers la solution d'un modèle à explosion primordiale. L'espoir d'une réponse est entrevu par les études récentes des singularités de l'espace-temps, élaborées à l'occasion de la théorie des trous noirs. Si le devenir inéluctable de certaines étoiles massives est de disparaître derrière l'horizon de leur sphère de Schwarzschild et s'il est vrai que le trou noir est un véritable univers indépendant du nôtre, pourquoi notre propre univers ne serait-il pas, lui aussi, une singularité d'un cosmos d'ordre supérieur, inobservable pour nous ? Le temps à considérer serait alors le temps de cet univers d'ordre supérieur, où les singularités du nôtre ne seraient que des phénomènes ordinaires n'y introduisant aucune rupture.

Distinction entre le concept d'univers et celui d'univers des observables, hiérarchie d'univers, singularités de l'espace-temps, à quels vertiges la science moderne ne nous conduit-elle pas ?

Mais, hormis le modèle stationnaire où l'échantillonnage est conforme au tout, notre angoisse philosophique reste la même devant l'existence des singularités ou celle d'un temps infini qui bornent nos possibilités de connaissance dans les deux cas.

Peut-être notre savoir futur saura-t-il transgresser ces difficultés. Alors à quelle soif de connaissance et à quelle joie intellectuelle les générations de demain ne sont-elles pas promises ?

Mais, en l'état actuel de nos connaissances, peut-être devons-nous conclure sur une note plus nostalgique. Peut-être toute connaissance est-elle illusoire d'un monde qui ne se livre à nous que par ses apparences. Avouons tout au moins qu'elles furent bien belles ces tentatives pour le connaître !

H. ANDRILLAT

Société Astronomique de Lyon

69230 Saint-Genis-Laval

Sommaire

- 1 – Séance cinématographique
- 2 – Allocution de M. le Consul général des Etats-Unis
- 3 – Conférence de M. P. Mianes
- 7 – Conférence de M. R. Prud'homme
- 10 – Conférence de M. H. Andriolat

Notre couverture :

garde-temps du début du siècle (Ø : 25 cm)

Observatoire de Lyon - Cliché M. BALLY

Prix : 5 F