

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1. Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par [Eclydre](#).
2. Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :
 - la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue (Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - <https://cnum.cnam.fr>)
 - la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.
3. Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :
 - les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.
4. Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)
5. L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.
6. Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	Langevin, Paul (1872-1946)
Titre	Atomes et étoiles
Adresse	Paris : CNAM, 1927
Collation	1 vol. ([1]-32 f.) ; 31 cm
Nombre de vues	68
Cote	CNAM-BIB Ms 249
Sujet(s)	Atomes Étoiles Astrophysique
Thématique(s)	Énergie Histoire du Cnam
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	29/10/2026
Date de génération du PDF	29/10/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://calames.abes.fr/pub/cnam.aspx#details?id=Calames-2017427184241171
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?MS249

A° C. 12

P. Langevin

Atomes et Etoiles

MS 249

Conférences au Conservatoire A. et M.



Ms 249

~~40C.12~~



LA PHYSIQUE MODERNE ET SES APPLICATIONS

- ATOMES ET ETOILES -

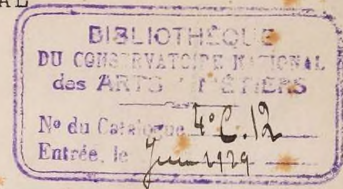
DEUX CONFERENCES DE

P. LANGEVIN



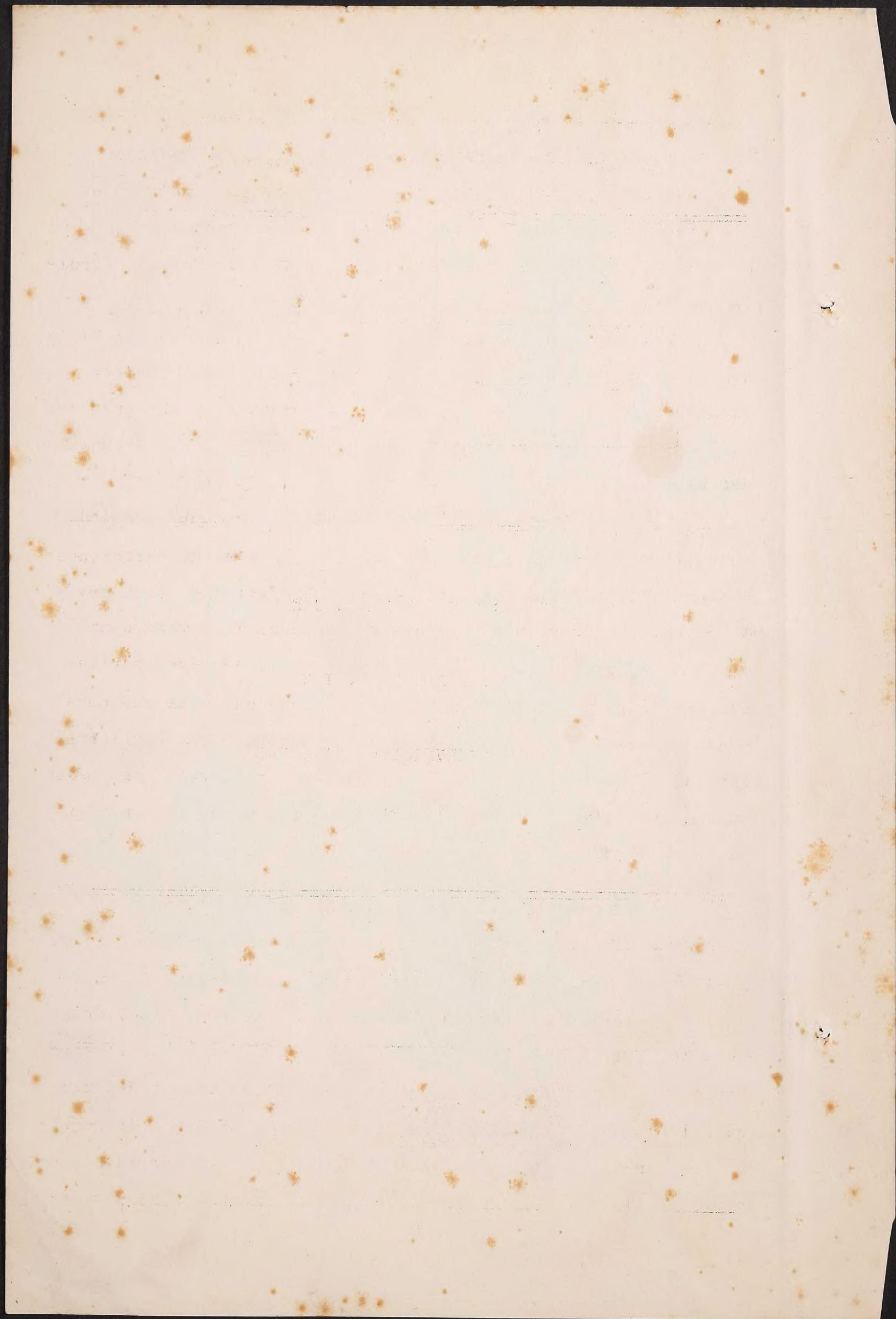
AU CONSERVATOIRE NATIONAL

DES ARTS & METIERS



Mars 1927.

Rédaction des Elèves
10, Rue Vauquelin, Paris, V^e.





Le titre " Atomes et étoiles " de ces deux conférences peut paraître un peu prétentieux. Il promet beaucoup plus que je ne pourrai tenir. Il m'a été proposé par mon ami Jean PERRIN pour conclure cette série de conférences et je l'ai accepté à titre de symbole de la liaison de plus en plus étroite qui existe entre la physique et l'astronomie.

Je vais prendre comme sujet l'examen de cette liaison, l'examen de ce qu'on a pu obtenir du côté astronomique comme vérifications et confirmations des résultats obtenus dans ces vingt-cinq dernières années au point de vue de la structure des atomes.

L'Astrophysique forme maintenant un pont continu entre la physique et l'astronomie. Il n'y a plus de différence essentielle entre le laboratoire et l'observatoire. L'observatoire est un laboratoire qui dispose de tout l'univers comme champ d'expérience et qui peut étudier des phénomènes portant sur des temps incomparablement plus grands que ceux que nous pouvons manier dans les expériences de laboratoire. Les termes successifs dans la série des étoiles nous présentent les phases successives d'une évolution qui se poursuit dans des temps que nous essaierons d'évaluer.

Cette liaison entre la physique et l'astronomie n'est pas nouvelle; notre physique, qui date du XVII^{ème} et du XVIII^{ème} siècle, s'est développée après la mécanique et la mécanique céleste. La mécanique rationnelle que nous appellerons dans la suite l'ancienne mécanique est issue autant de l'astronomie que de la physique. C'est le souci de suivre et d'expliquer les mouvements des astres qui a conduit NEWTON à introduire le principe de la masse invariable et de l'accélération proportionnelle à la force et à l'inverse de la masse. Il y a eu

1

2

dans tout le développement de la mécanique céleste, entre la fin du XVII^{ème} et le milieu du XIX^{ème} siècle, des confirmations absolument éclatantes de l'ancienne mécanique, obtenue en associant au principe fondamental de la masse invariable la loi d'attraction ou loi de gravitation de NEWTON, en vertu de laquelle deux corps s'attirent avec une force f :

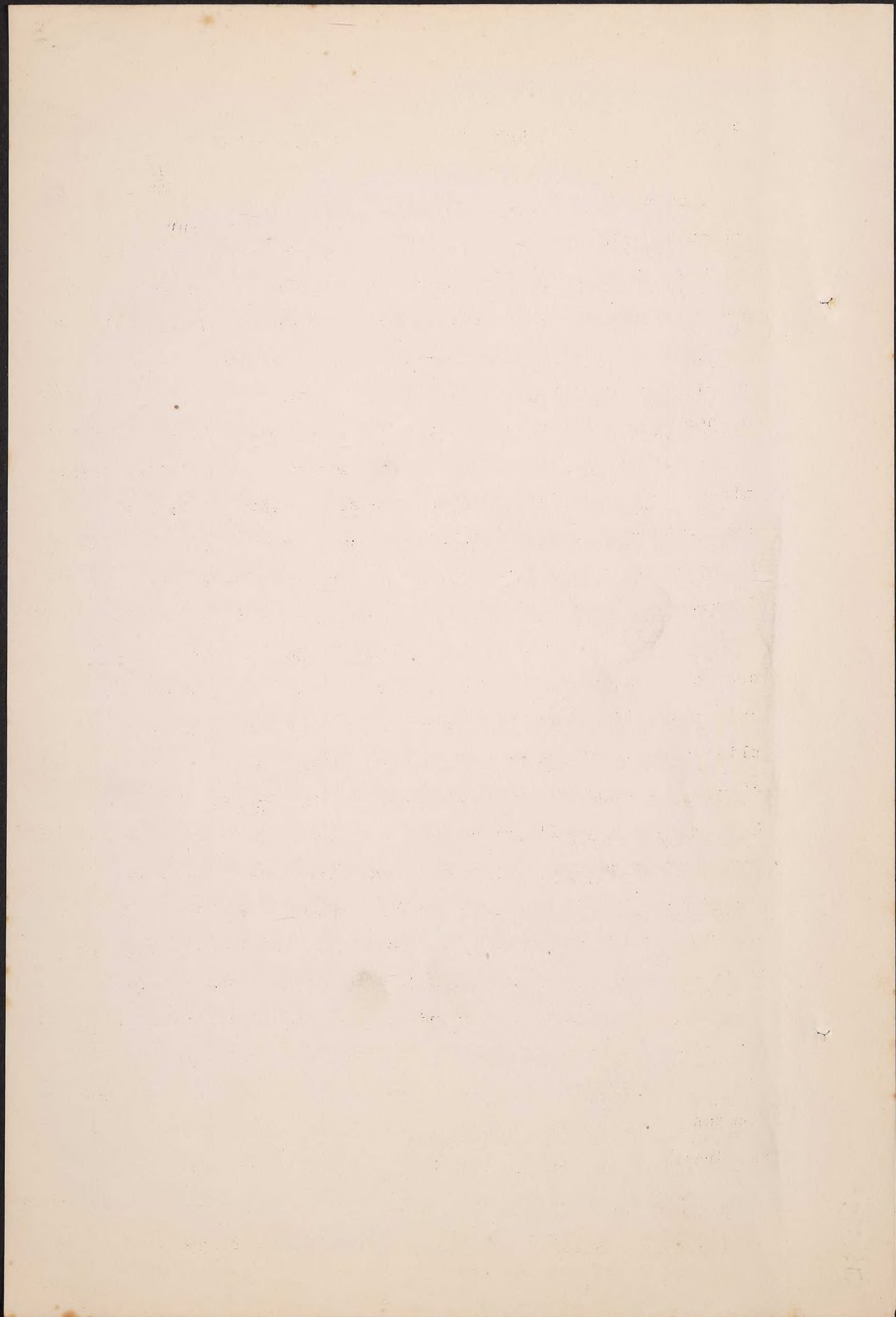
$$f = G \frac{M m}{r^2}$$

r étant la distance des deux corps, M et m leur masse d'inertie et G une constante.

Cette constante G de gravitation peut être déterminée par des expériences terrestres, (CAVENDISH); elle a pour valeur $6,67.10^{-8}$ C.G.S. Sa connaissance permet alors de mesurer les masses des astres, et en particulier de peser la Terre.

Comme cela s'est produit toujours dans l'histoire des sciences, quand on s'est trouvé en possession d'une explication qui réussit dans un certain domaine, on a cherché à l'appliquer à tous les domaines de la physique. Avec la mécanique céleste on a cru tenir la Vérité ; on l'a appelée mécanique rationnelle et on l'a placée au dessus de la physique. LAPLACE, notamment, après avoir obtenu des confirmations dans d'autres domaines, l'a introduite en capillarité. Il concevait la physique comme la science des atomes et pensait qu'on la connaîtrait toute quand on connaîtrait les lois d'action entre les atomes.

Cela a très bien réussi, tout au moins au début, par exemple dans la théorie cinétique de la matière où celle-ci est envisagée comme composée d'atomes ou de molécules en état constant d'agitation, agitation d'autant plus violente que la température est plus élevée. Cette théorie a également très bien réussi dans le cas des gaz où les molécules sont très éloignées les unes des autres. On a pu ainsi interpréter les





les lois des gaz parfaits, (lois de MARIOTTE et de GAY-LUSSAC)

On peut résumer les résultats de la théorie cinétique sous la forme du très remarquable théorème d'équipartition de l'énergie cinétique donné par MAXWELL, en vertu duquel l'énergie totale dont disposent les molécules d'un gaz, (toutes pareilles ou bien différentes), se partage entre elles de façon à ce que chaque molécule de masse m et de vitesse v ait la même force vive moyenne $\overline{mv^2}$. La force vive mv^2 d'une molécule, que je vais compter projetée sur une direction déterminée, va augmenter et diminuer suivant les hasards des chocs, mais sa valeur moyenne $\overline{mv^2}$ sera la même quelle que soit la molécule envisagée. Si la molécule est grosse, elle ira lentement; si elle est petite, elle se déplacera rapidement. De plus cette valeur moyenne $\overline{mv^2}$ est proportionnelle à la température absolue T :

$$\overline{mv^2} = r T \quad \text{avec} \quad r = \frac{R}{N} = 1,37 \cdot 10^{-10} \text{ c.g.s.}$$

Cela rend très bien compte de toutes les propriétés des gaz pris en masse. Quand le gaz est plus comprimé, il y a entre les molécules des actions permanentes en dehors des chocs, et ces actions permettent d'interpréter les écarts à la loi de MARIOTTE.

Nous sommes ainsi descendus des astres aux atomes. Nous pouvons, inversement, remonter des atomes aux étoiles.

En examinant les étoiles, on peut être renseigné sur leur état et leur nature par un grand nombre de faits. On peut, en effet, observer leur mouvement, leur éclat et leur spectre lumineux. Tout d'abord, nous pouvons connaître leur masse. Cette détermination a été faite d'abord dans le cas des étoiles doubles très nombreuses, par exemple Sirius et son compagnon. Sirius est la plus belle étoile de la constellation du Grand Chien; elle est double et les mouvements assez compliqués des deux étoiles s'expliquent en admettant qu'elles gravitent

[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]

1

1

l'une autour de l'autre en raison de leur attraction newtonnienne. Leurs trajectoires sont des ellipses décrites autour de leur centre de gravité considéré comme fixe. On peut mesurer les vitesses de circulation et les dimensions des orbites; en appliquant la troisième loi de KEPLER, on peut déterminer la somme des masses de Sirius et de son compagnon.

$$M_1 + M_2 = \frac{(a_1 + a_2)^3}{p^2}$$



a_1 et a_2 étant les demi-grands axes des deux étoiles, et p la période de révolution. Pour ces calculs on prend en général comme unité de masse la masse du Soleil

$$\odot = 1,985.10^{33} \text{ g.}$$

comme unité de temps l'année, et comme unité de distance le diamètre de l'orbite terrestre : 150.000.000 Kms. On peut donc obtenir la masse totale $M_1 + M_2$, et comme les masses sont en raison inverse des vitesses maxima sur les orbites, on peut calculer M_1 et M_2 .

On a pu ainsi déterminer les masses des étoiles doubles visuelles.

On a pu aussi déterminer les masses d'un très grand nombre d'autres étoiles non doubles par la méthode d'ADAMS que nous examinerons plus loin. Cette méthode basée sur l'examen spectrophotométrique de la lumière qui nous vient des étoiles permet de trouver la masse d'une étoile non double par comparaison avec des étoiles doubles du même type.

Les étoiles ont été classées par types, qui vont des plus chaudes, (étoiles bleues), aux plus froides, (étoiles rouges). La notation de cette classification est compliquée pour des raisons historiques. A partir des plus chaudes les différents types sont désignés par les lettres B, A, F, G, K, M, N, ... avec 9 indices intermédiaires entre deux lettres consécutives pour les types intermédiaires. Dans chaque type, il y a des

étoiles naines et des étoiles géantes et même des avortons. Voilà les masses moyennes des étoiles naines des principaux types exprimées en unités astronomiques, c'est à dire par leur rapport à la masse du soleil.

Type	B ₀	B ₅	A ₀	A ₅	F ₀	F ₅	G ₀	G ₅	K ₀	K ₅	M ₀
Masse	10	8,3	6	4	2,5	1,5	1	0,76	0,68	0,62	0,59
Vitesse moyenne	6,3			10,5	14,4						

La masse décroît régulièrement des plus chaudes aux plus froides. Nous serons conduits à considérer comme vraisemblable que ces différents types représentent les stades successifs de l'évolution d'une étoile. Ainsi, à mesure qu'elles se refroidissent, les étoiles perdent de leur masse. Ces variations relatives de masse sont presque insignifiantes vis-à-vis des variations des autres grandeurs astronomiques; les masses des étoiles sont toutes comprises entre 0,1 ☉ et 100 ☉.

En examinant les conceptions de Mr. EDDINGTON, nous comprendrons pourquoi des masses très différentes de celles-ci seraient instables. "Si un physicien, sur une Terre dont l'atmosphère serait constamment chargée de nuages, n'ayant par conséquent jamais vu d'étoiles, cherchait les conditions de stabilité d'une grande masse de matière, il trouverait comme limites 10^{33} et 10^{35} gr., c'est à dire les limites entre lesquelles sont comprises les masses de la quasi-totalité des étoiles".

En même temps que leur masse, nous pouvons déterminer la vitesse des étoiles. Prenons d'abord la vitesse radiale déterminée au moyen de l'effet DOPPLER. Si une étoile qui émet ou absorbe une raie de fréquence ν ou de longueur d'onde λ :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{\nu}$$

s'approche de nous, il se produit pour cette raie le même phénomène que celui qu'on observe quand une locomotive qui siffle

s'approche puis s'éloigne de nous. Le son est plus élevé (fréquence plus grande) lorsque la locomotive s'approche que lorsqu'elle s'éloigne. De même, lorsqu'on regarde le spectre d'une étoile, les raies sont déplacées vers les hautes fréquences, (violet), si l'étoile s'approche de nous, et vers les basses fréquences si elle s'éloigne. La variation de fréquence $\Delta\nu$ a pour valeur :

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v}{c}$$

Comme on connaît ν et c , on obtiendra la vitesse radiale v en mesurant $\Delta\nu$. On constate que les vitesses moyennes vont en croissant quand les masses diminuent en passant des étoiles chaudes aux étoiles froides. En faisant le produit mv^2 , on trouve que la force vive moyenne a une valeur constante (approximativement).

La voie lactée n'est que la vue par la tranche de la nébuleuse dans laquelle nous nous trouvons. Les étoiles qui composent cette nébuleuse peuvent être assimilées aux molécules d'un gaz ; les chocs n'interviennent pas ou tout au moins très rarement, (novae). Mais les étoiles agissent les unes sur les autres par attraction et cela suffit pour assurer, en gros, l'équipartition de l'énergie. Les observations montrent qu'il n'y

a cependant pas tout à fait équipartition ; tout se passe comme s'il y avait eu, au début, deux courants d'étoiles dans notre nébuleuse. Les observations de Mr. KAPTEYN sur les vitesses tangentiellles des étoiles semblent montrer qu'elles se séparent en deux catégories correspondant à deux courants qui se sont interpénétrés, et qu'il subsiste actuellement des traces de ces mouvements primitifs. Le brassage n'est pas encore complet. Notre nébuleuse peut être conçue comme analogue à l'une de ces nébuleuses spirales que nous observons à des distances de millions d'années de lumière. Il est vraisemblable que nous sommes dans une nébuleuse spirale qui sera homogène quand l'agi-

[Faint, illegible text covering the majority of the page, likely bleed-through from the reverse side.]

tation thermique sera établie.

Les physiciens ont essayé d'aller plus loin dans l'application de la mécanique rationnelle et de la mécanique céleste dans les différents domaines de la physique. Si cela a bien réussi en théorie cinétique, cela n'a pas réussi du tout en électromagnétisme.

Nos atomes sont constitués par des électrons et des protons formant un édifice stable. On cherche actuellement à développer une conception planétaire de l'atome où les électrons gravitent autour d'un noyau central ^{positif} très dense. Les actions à partir desquelles nous voulons construire la mécanique intraatomique sont des actions d'origine électromagnétique auxquelles on a voulu imposer la seule loi de COULOMB

$$f = k \frac{m.m'}{r^2}$$

identique à la loi de NEWTON.

Mais, si nous n'avions que cette loi-là, nous n'obtiendrions rien qui soit conforme à la réalité. Pour construire la mécanique intraatomique, il a fallu modifier la mécanique rationnelle. La finesse plus grande de nos moyens d'investigation et les domaines nouveaux dans lesquels ils s'appliquent nous ont obligé à remanier la mécanique rationnelle et à lui faire subir trois modifications essentielles.

1^o). Au point de vue de la relativité, qui considère l'ancienne mécanique comme une première approximation applicable seulement aux faibles vitesses.

2^o). Au point de vue des quanta.

3^o). Au point de vue de Mr. Louis DE BROGLIE, dont la mécanique ondulatoire en voie de réalisation constitue la dernière retouche à la mécanique rationnelle et qui sera aux mécaniques anciennes ce que l'optique physique a été à l'optique géométrique.

[The page contains extremely faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side. The text is organized into several paragraphs, with some lines appearing as bold or indented. There are also some small, dark marks or artifacts on the page, particularly on the right side.]



1^o. MODIFICATION DE LA MÉCANIQUE AU POINT DE VUE DE LA RELATIVITÉ.

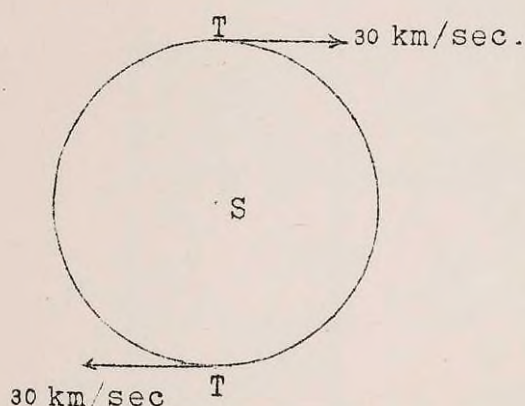
Le point de vue de la relativité est issu du fait que, tandis que NEWTON et LAPLACE croyaient à une transmission instantanée des actions à distance, il n'a pas été possible de conserver cette conception en électromagnétisme. Les actions entre charges électriques se propagent avec la vitesse c de la lumière sous forme d'ondes électromagnétiques. Cela change la situation et même cela la change beaucoup.

Si nous étudions la propagation de ces ondes sous la forme la plus familière que nous connaissons : lumière et ondes hertziennes, nous trouvons des résultats très singuliers. La vitesse de propagation de la lumière autour d'une source lumineuse est complètement indépendante du mouvement de cette source. La meilleure démonstration de cette indépendance de la vitesse de propagation et du mouvement de la source a été tirée par Mr. DE SITTER de l'observation des étoiles doubles spectroscopiques. Les étoiles doubles spectroscopiques sont trop lointaines pour qu'on puisse distinguer les deux astres, mais leur mouvement de rotation fait qu'elles se rapprochent et qu'elles s'éloignent successivement de nous. Les raies spectrales se balancent autour de leur position moyenne. On peut en déduire le mouvement des deux étoiles et voir qu'il obéit aux lois de la gravitation de NEWTON. Mr. DE SITTER a montré que si la vitesse de la lumière émise par ces étoiles dépendait de leur mouvement, on ne verrait pas du tout ce qu'on voit dans leur spectre. Les différences de vitesse de la lumière émise à différentes époques se conserveraient en chemin et se poursuivraient pendant des temps énormes. Des signaux arriveraient avant d'autres partis avant eux. On ne recevrait plus dans l'ordre d'émission et cela brouillerait tout.

Ce qui est beaucoup plus surprenant, c'est que, non seulement la vitesse de propagation est la même dans toutes les

[Faint, illegible text covering the majority of the page, likely bleed-through from the reverse side.]

directions, mais encore que cette isotropie de propagation se trouve être indépendante du mouvement de l'observateur. Si nous prenons deux observateurs ayant une assez grande vitesse relative l'un par rapport à l'autre, par exemple la Terre à six mois d'in-



tervalle, où la vitesse relative est de 60 km/sec., on constate que la vitesse de la lumière venant d'une étoile est la même. C'est le résultat de l'expérience de MICHELSON.

Quelque répugnance qu'aient eue des esprits chagrins à admettre ce résultat, nous sommes aujourd'hui tout à fait certains que le résultat de l'expérience de MICHELSON est définitivement acquis. Les expériences de MILLER qui ont voulu mettre en doute cette affirmation sont tout à fait incohérentes et sont infirmées par les nouvelles expériences faites au Mont Wilson par KENNEDY et d'autre part par PICCARD en Belgique. Que l'on fuit devant la lumière ou que l'on se précipite au devant d'elle, sa vitesse de propagation reste la même.

On a été obligé de remanier certaines notions fondamentales, en particulier la notion de temps, et de construire une nouvelle cinématique. L'expérience de MICHELSON n'a d'ailleurs été qu'un prétexte, la nécessité de la nouvelle cinématique était contenue dans les lois de l'électromagnétisme. A cette nouvelle définition du "temps", à cette nouvelle cinématique, correspond une nouvelle dynamique dans laquelle la masse n'a plus une valeur constante. La quantité de mouvement d'un corps animé de la vitesse v doit être représentée par :

$$\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} v$$

m_0 étant la masse au repos et $\beta = \frac{v}{c}$ le rapport de la vitesse du corps à la vitesse de la lumière. Si l'on veut considérer la

quantité de mouvement comme le produit de la vitesse par la masse il faut admettre que cette masse m :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

varie avec la vitesse v . Lorsque v se rapproche de la vitesse c de la lumière, la masse devient infinie. La vitesse de la lumière apparaît comme une limite que la vitesse de la matière ne peut pas dépasser. Cette nouvelle dynamique ne présentera d'écarts appréciables avec l'ancienne que si le rapport β est appréciable, comme c'est le cas pour les particules électrisées en mouvement dans l'atome.

L'expérience spectroscopique concernant les atomes est venue confirmer la nécessité d'employer cette nouvelle dynamique.

A côté de la variabilité de la masse, la nouvelle mécanique présente un autre aspect, fondamental, celui de l'inertie de l'énergie.

Dans l'ancienne dynamique, la masse, synonyme de quantité de matière, restait toujours constante, et d'autre part, l'énergie susceptible de se transformer restait néanmoins toujours constante. L'ancienne mécanique admettait donc le principe de conservation de la masse et le principe de conservation de l'énergie. La nouvelle mécanique est au fond plus simple : à ces deux principes indépendants elle substitue un seul principe en affirmant que la masse d'un corps est une manifestation de son énergie interne. L'énergie interne d'un corps est proportionnelle à sa masse.

$$E = m c^2$$

Si l'on prend comme unité de vitesse la vitesse de la lumière, comme on l'a proposé, $c = 1$, $E = m$; l'énergie est égale à la masse aux points de vue de nature, entité, et mesure.

Cette inertie de l'énergie nous donne la clef de la variation de la masse avec la vitesse. L'augmentation est due à la masse de l'énergie cinétique. Comme l'énergie au repos est égale à $m_0 c^2$, l'énergie cinétique sera :



$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (\text{aux faibles vitesses})$$

Cette inertie de l'énergie a des conséquences très importantes. Il y a quinze ans j'ai pu en déduire l'interprétation des écarts à la loi de PROUT. L'Hélium dont l'atome est formé de quatre atomes d'Hydrogène a une masse plus faible que la somme des masses des atomes qui l'ont créé.

$$H = 1,008$$

$$He = 4,00$$

La différence de $\frac{1}{125}$ s'interprète par la perte d'énergie sous forme de rayonnement lors de la formation de l'atome d'Hélium. M. JEAN PERRIN a vu dans cette transformation la façon la plus vraisemblable d'expliquer l'origine de l'énergie solaire. La transformation, dans le Soleil, de l'Hydrogène en Hélium fournit des quantités d'énergie suffisantes pour expliquer le maintien de l'émission solaire pendant le milliard d'années des périodes géologiques. Les condensations ultérieures des atomes d'Helium en atomes plus lourds ne fournissent que des quantités d'énergie minimales par rapport à la condensation de l'Hydrogène.

Si l'énergie des étoiles est due uniquement à cette condensation, elles perdraient au total $\frac{1}{125}$ de leur masse au cours de leur évolution et seraient ensuite "mortes" au point de vue rayonnement. Cette explication ne paraît pas suffisante, car les étoiles semblent perdre la presque totalité de leur masse.

A côté de la conception de M. PERRIN sur l'origine de l'énergie des astres se trouve une autre conception qui consiste à admettre que la matière peut disparaître complètement en se

transformant en rayonnement; la matière mourrait ainsi dans la lumière. De même, il est vraisemblable que la genèse de la matière se ferait par le processus inverse.

Dans les étoiles, nous assistons ainsi à la mort de la matière; nous pouvons comprendre qu'une étoile s'étirole et meure en perdant jusqu'à 99/100 de sa masse. Nous disposons ainsi pour expliquer l'origine de l'énergie stellaire, d'une source "bien plus illimitée" d'énergie rayonnante.

Chaque fois que le Soleil perd l'énergie E , il perd une masse m :

$$m = \frac{E}{c^2}$$

On peut mesurer l'énergie que la Terre reçoit du Soleil et calculer ensuite celle que le Soleil envoie tout autour de lui ; on arrive à une émission de

$$5,62.10^{33} \text{ ergs par seconde.}$$

La perte de masse correspondante est

$$\frac{5,62.10^{33}}{9.10^{20}} = 6.10^{12} \text{ grammes} = 6.10^6 \text{ Tonnes.}$$

Le Soleil perd par seconde six millions de tonnes de sa masse.

Capella perd par seconde une masse 100 fois plus grande, soit 5.10^8 Tonnes. L'étoile δ de Céphée perd encore 5 fois plus, et une étoile (γ) de la constellation de la Poupe perd 50 fois plus, soit

$$2,6.10^{37} \text{ ergs par seconde, ou bien}$$

$$3.10^{10} \text{ Tonnes par seconde.}$$

Dans ces conditions, on conçoit ce que peut être cette évolution des étoiles et on peut arriver à une évaluation du temps pendant lequel elle s'est poursuivie.

Nous allons rester dans le domaine de l'astronomie en abordant la relativité généralisée. Le succès de la relativité restreinte reste particulièrement brillant dans la conception de l'inertie de l'énergie, mais Mr. EINSTEIN a voulu la rendre plus

générale, et interpréter non seulement l'électromagnétisme et la mécanique mais aussi les actions de gravitation. Il a voulu comprendre la proportionalité mystérieuse entre l'action de la gravitation et la masse d'inertie.

Il y est arrivé en abandonnant la vieille conception euclidienne de l'espace. Si la Terre gravite autour du Soleil, ce n'est pas parce que le Soleil attire la Terre et modifie son mouvement, mais c'est parce que les propriétés de l'espace dans lequel se meut la Terre, qui sont déterminées par ce qu'il contient, sont telles que la Terre doit décrire une ellipse. La présence de matière déforme l'espace par rapport à ce qu'il serait à grande distance de toute masse. Pour représenter ceci par une image, l'espace à grande distance de toute masse peut être considéré comme euclidien et assimilé à un plan. Une bille lancée sur ce plan roulera en ligne droite; il faudra une force pour la dévier de sa trajectoire rectiligne. Mais, en présence du Soleil, l'espace n'est plus euclidien; il est incurvé. Le plan est devenu une cuvette et la bille lancée tourne dans cette cuvette. La loi de gravitation est la loi d'inertie dans l'espace déformé.

Cette conception a conduit à des conclusions qui ont été expérimentalement vérifiées. D'abord la loi de gravitation qui n'est plus celle de NEWTON conduit à des lois de mouvement des planètes qui ne sont plus celles de KEPLER. On prévoit un mouvement du périhélie des orbites, en particulier du périhélie de Mercure : 43 secondes par siècle. Ceci a été vérifié exactement par les observations astronomiques. La lumière, qui est une forme de l'énergie au même titre que la matière, sera également déviée dans cette cuvette. Un rayon lumineux venant d'une étoile et passant dans l'espace incurvé au voisinage du Soleil sera dévié. La position apparente d'une étoile sera modifiée par le voisinage du Soleil.



(Cette prévision a été vérifiée par les observations pendant les éclipses.)

Une troisième confirmation de cette théorie est fournie par l'examen des spectres des étoiles. La théorie de la relativité généralisée prévoit en effet que dans un tel spectre les raies, du fait qu'elles sont émises dans une région où le potentiel de gravitation est grand, doivent être déplacées vers le rouge, exactement comme s'il y avait un effet DOPPLER supplémentaire. Cet effet, correspondant à un éloignement de $1/2$ km. par seconde pour le Soleil, est difficilement observable sur les spectres solaires, mais il a été constaté avec précision pour le compagnon de Sirius dont la masse est grande par rapport au rayon. Le déplacement des raies vers le rouge y est 31 fois plus grand que sur le Soleil.

Nous sommes maintenant, dans l'application des résultats de la relativité généralisée, sur un terrain extrêmement solide, et nous ne devons pas considérer comme sérieuses les objections qu'on a voulu récemment soulever à propos de nouvelles expériences au mont Wilson. Il n'y a pas actuellement de chapitre de la physique où l'on ne soit obligé d'employer et d'utiliser la relativité.

Il y a encore quelque chose de plus. Non seulement la relativité généralisée nous fait concevoir les propriétés de l'espace comme déterminées par la matière qu'il y a dedans, mais la théorie cosmogonique qui la prolonge nous fait concevoir l'espace-même comme créé par la matière présente.

Il faut aussi abandonner l'idée de l'espace infini ; l'espace est fermé, comme l'est, à deux dimensions, la surface d'une sphère. Nous trouvons là une sorte de satisfaction à savoir que nous sommes chez nous. Si nous revenons à l'image du plan et de la cuvette pour nous représenter l'espace euclidien

[Faint, illegible text covering the majority of the page, likely bleed-through from the reverse side.]

2-3-21

et l'espace incurvé par la présence de matière, si la cuvette devient une sphère, l'espace non-euclidien devient fini. Les géomètres savent ce qu'est, à trois dimensions, l'équivalent de la sphère: c'est un espace de RIEMANN, une hypersphère.

De même qu'en nous déplaçant "en ligne droite" sur une sphère nous parcourons un grand cercle et nous revenons à notre point de départ, de même, dans notre espace fermé, en nous déplaçant en ligne droite nous reviendrons à notre point de départ. Mais le rayon de courbure de notre espace est énorme. On a pu en faire l'évaluation d'après la théorie de Mr.EINSTEIN.

C'est en créant de la matière qu'on a créé l'espace, et les dimensions de celui-ci sont déterminées par la quantité de matière qu'il contient. Si nous appelons a le rayon de cet espace fermé et M la masse totale de l'univers, la relation fondamentale de Mr.EINSTEIN nous dit que a est proportionnel à la masse M .

$$a = \frac{\kappa}{2\pi^2} M \quad \text{avec} \quad \kappa = \frac{8\pi G}{c^2}$$

G étant la constante de la gravitation.

Nous ne connaissons pas la masse totale M de l'univers, nous connaissons seulement la densité moyenne de matière au voisinage de notre région. L'évaluation en a a été faite par Mr.DE SITTER en calculant le volume du domaine exploré par l'astronomie, ($20 \cdot 10^6$ années de lumière ; une année de lumière vaut 10^{13} km.), et la masse des étoiles qui y sont contenues. Les accidents que représente la condensation de la matière sous forme d'étoiles se superposent à ce que serait l'espace si la matière était répartie d'une manière continue. On a ainsi trouvé une densité ρ de l'ordre de 10^{-25} à 10^{-26} gr./cm³. Un gramme est contenu dans 10^{25} cm³, c'est à dire dans un cube de quelques milliers de kilomètres de côté. Le volume d'une sphère à trois dimensions est :

$$2\pi^2 a^3$$



MS 249
SH

Y

Y

et la masse totale :

$$M = 2\pi^2 a^3 \rho$$

On trouve donc :

$$a = \frac{c}{\sqrt{4\pi G \rho}} = 10^{20} \text{ à } 10^{27} \text{ cm.}$$

ou bien 10^8 à 10^9 années de lumière.

Il est d'ailleurs très probable que notre coin d'univers est particulièrement riche en matière. La densité moyenne est probablement plus faible et le rayon a probablement plus grand. Suivant nos évaluations, un rayon lumineux mettrait quelques milliards d'années à en faire le tour. Cet univers fermé ne nous étouffe donc pas trop.

Cette conception de l'univers fini intervient d'une façon fondamentale dans l'étude de la genèse et de la disparition de la matière et de sa transformation en rayonnement. Le volume de l'univers est d'autant plus grand que le nombre d'atomes qu'il contient est plus grand, tandis qu'il ne varie pas lorsque la quantité de rayonnement change. Lorsqu'un atome disparaît, le volume diminue; inversement, lorsque du rayonnement disparaît pour former un atome, le volume augmente. Pour un atome d'hydrogène de masse m_0

$$m_0 = \frac{1}{N} = \frac{1}{6,06 \cdot 10^{23}}$$

la variation de volume δV est égale à :

$$\delta V = \frac{3m_0}{\rho} = 500 \text{ cm}^3 \text{ et probablement plus.}$$

Quand un atome d'hydrogène apparaît, le volume de l'univers augmente d'un demi-litre.

Nous voyons donc que l'enchevêtrement de l'astronomie et de la physique est constant. Nous sommes partis de l'astronomie et de la mécanique céleste, nous sommes descendus à l'atome et nous remontons aux étoiles.

800

Y

2

Y

21



Après avoir montré comment la nécessité d'adapter à la physique atomique et électronique et aux lois du rayonnement les principes de la mécanique rationnelle a conduit à modifier du point de vue de la relativité ceux-ci, et comment un retour vers l'astronomie avait apporté les plus belles confirmations de la nécessité de ces modifications, je voudrais me placer à un second point de vue, le point de vue des quanta dont l'apparition est à peu près contemporaine de l'apparition de la relativité, et qui a aussi conduit à des transformations profondes de la mécanique.

Je vais présenter tout de suite les résultats auxquels on est arrivé; je n'aurai pas le temps de refaire tout l'historique des difficultés qui se sont présentées pour interpréter les phénomènes qui intéressent à la fois la matière et le rayonnement et qui ont conduit aux théories de quanta.

Pour comprendre les échanges d'énergie entre la matière et la lumière (lumière au sens le plus large du mot : depuis les ondes hertziennes jusqu'aux rayons γ), dans un récipient en équilibre de température, pour comprendre aussi la spectroscopie, il a fallu modifier très profondément nos conceptions.

Sachant que la matière est composée de grains d'électricité, protons et électrons, et que les atomes et molécules sont des édifices planétaires construits avec ces grains, on a cherché à leur appliquer les lois de la mécanique, pour comprendre comment ces grains peuvent émettre et absorber du rayonnement. Mais tandis que l'application de la mécanique ancienne au système solaire explique bien les lois de ses mouvements, on se heurte, pour le système atomique, à des difficultés insurmontables. Au point de vue de la mécanique ancienne, on admet que l'énergie d'un système peut varier d'une manière continue; l'énergie du mouvement de rotation de la Terre autour du Soleil peut changer d'un instant à l'autre, et elle change en effet, (frottements

[Faint, illegible handwriting covering the page]

du aux marées, etc...). La somme de l'énergie potentielle représentée par le travail nécessaire pour éloigner la Terre du Soleil et de l'énergie cinétique de la Terre peut subir des variations continues.

Si l'on applique une telle mécanique aux systèmes planétaires atomiques et à leur échanges d'énergie avec ce que nous appelons le "rayonnement noir" - rayonnement qui s'établit dans un four à une température déterminée ou bien à l'intérieur d'une étoile - on est conduit à admettre une densité d'énergie infinie à toute température, résultat qui n'a aucun sens au point de vue physique.

L'issue de cette difficulté a été trouvée par PLANCK; ses conceptions ont été développées par ses continuateurs notamment par BOHR. Au lieu de supposer que ces systèmes atomiques planétaires sont susceptibles de prendre une énergie variable d'une manière continue comme le veut la mécanique classique et comme on l'admet en mécanique céleste, il suppose que ces systèmes ne peuvent exister que sous des états en nombre déterminé et sans transition continue des uns aux autres. Il y a des "niveaux" d'énergie séparés les uns des autres par une quantité finie d'énergie et chacun des systèmes ne peut exister que dans ces niveaux.

PLANCK l'avait admis dans ce qu'il appelait son résonateur, constitué par un point matériel pouvant osciller librement autour de sa position d'équilibre. Ce système ne pouvait exister qu'avec des énergies formant une progression arithmétique, chaque terme séparé du suivant par un quantum d'énergie de valeur déterminée.

Cette idée développée par PLANCK et par ses continuateurs est celle que nous devons admettre. La mécanique ondulatoire la retrouve d'ailleurs logiquement sous une forme plus

générale et plus immédiate. Le passage d'un niveau à un autre s'effectue avec échange d'énergie sous forme de rayonnement. Quand il absorbe du rayonnement son énergie augmente d'une quantité déterminée, quand il émet du rayonnement son énergie diminue d'un certain nombre de quanta.

C'est en développant les conséquences de cette hypothèse que PLANCK et ensuite EINSTEIN ont pu retrouver par le raisonnement, pour la densité d'énergie du rayonnement noir, des résultats entièrement conformes à l'expérience.

Les lois de ce rayonnement se présentent sous deux aspects :

1^o) Aspect global. Dans un four à la température T , où la force vive moyenne d'un atome ou d'une molécule dans une direction déterminée est

$$rT \quad \text{avec} \quad r = \frac{R}{N}$$

la densité totale de l'énergie présente sous forme de rayonnement n'est pas du tout infinie - cela n'aurait d'ailleurs aucun sens physique - mais est proportionnelle à T^4 .

$$u = a T^4$$

C'est la loi empirique de STEFAN, retrouvée théoriquement par BOLTZMANN. La valeur du coefficient a est

$$a = 7,65 \cdot 10^{-15}$$

Cette densité croît très vite : à 1 degré absolu, elle est extraordinairement petite; à un million de degrés elle est fantastique : 10 milliards d'ergs par centimètre cube.

De même la densité du rayonnement qui sort par une ouverture percée dans la paroi du four ou de celui qui est émis par la surface extérieure d'une étoile est proportionnelle à T^4 .

Du fait qu'il existe du rayonnement à l'intérieur d'un récipient, il s'exerce sur les parois une pression appelée

pression de radiation. Même si le récipient est vide, avec des parois formées de matières non volatiles, il est soumis à une pression qui tend à le dilater. L'existence de cette pression de radiation, prévue par MAXWELL, a été vérifiée expérimentalement sur des miroirs. On peut facilement démontrer que pour un rayonnement distribué d'une manière isotrope, cette pression a pour valeur le tiers de la densité de l'énergie à l'intérieur du récipient.

$$p = \frac{1}{3} a T^4$$

Pour 1 degré absolu $p = 2,9 \cdot 10^{-15}$ baryes ou 10^{-21} atmosphère. A la température de 1 million de degrés, $p = 2550$ atmosphères. A 40 millions de degrés, qui est la température de la très grande majorité des étoiles, cela fait une pression de $3 \cdot 10^9$ atm. Nous aurons à utiliser plus loin ces résultats.

2°) Distribution dans le spectre. A côté de l'étude de la densité globale du rayonnement, il y a intérêt à étudier sa distribution dans le spectre, c'est-à-dire à déterminer la densité d'énergie relative à chaque fréquence. Dans un petit intervalle de fréquence dv , l'énergie est

$$u_\nu dv$$

et l'énergie totale sera la somme d'expressions semblables que nous écrivons sous forme d'intégrale

$$\int u_\nu dv$$

depuis les fréquences hertziennes jusqu'aux rayons γ .

La théorie déduite par PLANCK et EINSTEIN de la conception des niveaux d'énergie des atomes a conduit à une valeur théorique de u_ν .

Quand un atome ou une molécule émettent un rayonnement de fréquence ν , ils diminuent d'énergie et passent de l'état W_1 à l'état W_2 . La fréquence ν émise est proportionnelle à la perte d'énergie ; elle est d'autant plus grande

1847

1847

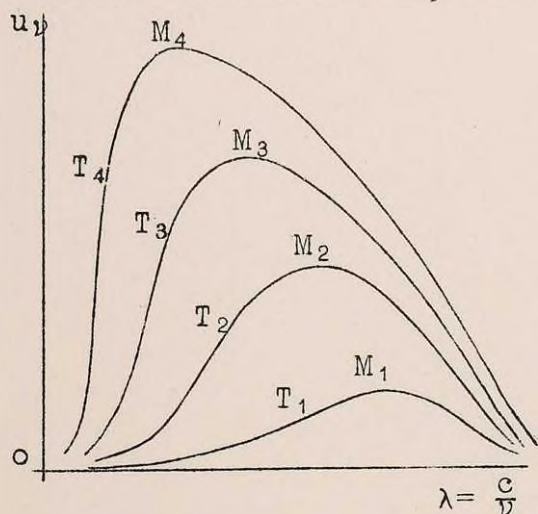
1847



que le paquet d'énergie est plus gros. Le coefficient de proportionnalité est la constante de PLANCK h , constante universelle dont le rôle fondamental en physique apparaît de plus en plus. Si les deux niveaux W_1 et W_2 sont voisins, la fréquence émise est basse; si, au contraire, ils sont très différents, la fréquence émise est du domaine des rayons X ou des rayons γ . La valeur théorique de u_ν déduite de cette théorie a pour expression :

$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

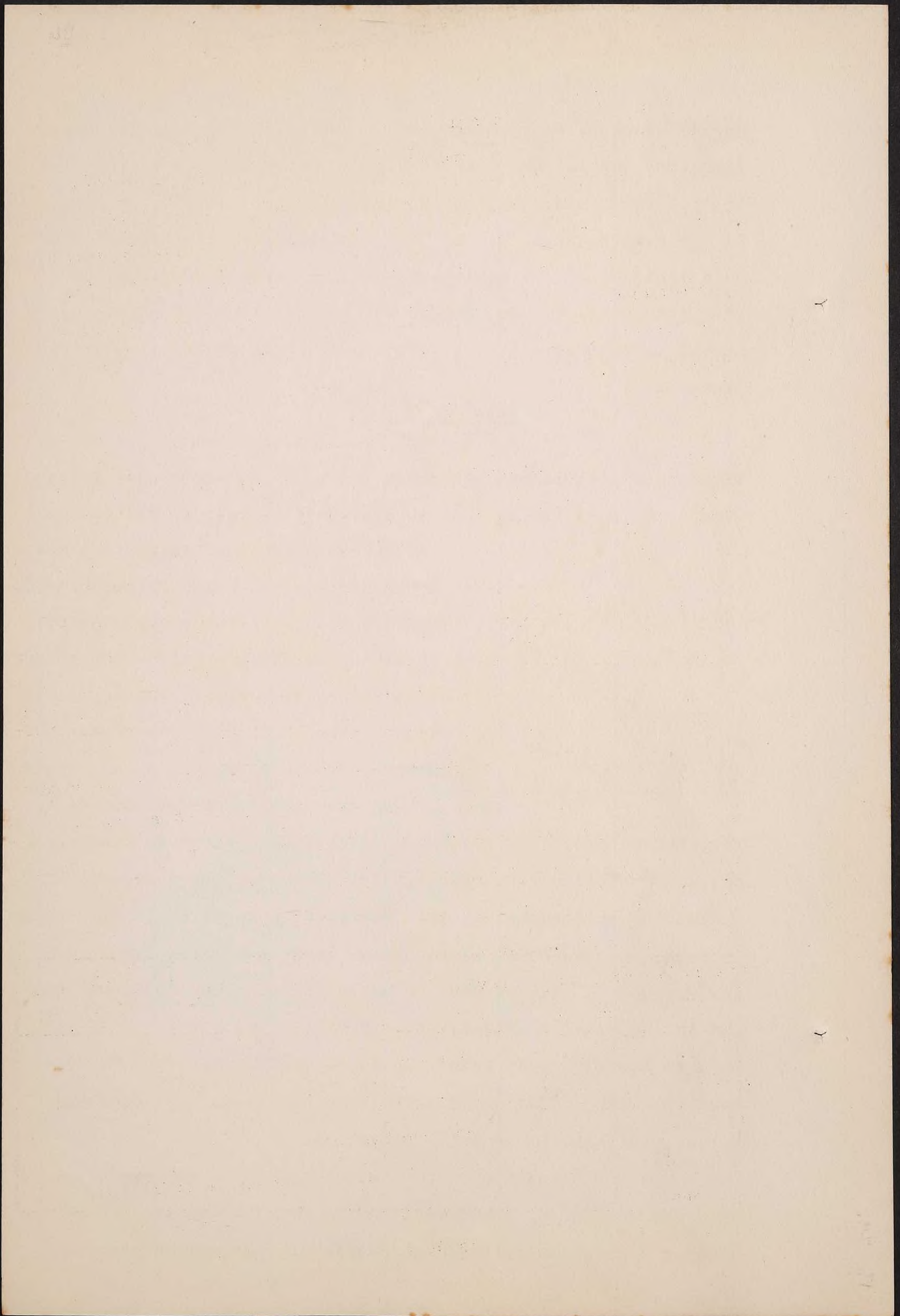
expression entièrement confirmée par la comparaison avec l'expérience. La densité u_ν est sensiblement nulle pour les basses



fréquences (grandes longueurs d'onde) d'une part, et pour les fréquences élevées (courtes longueurs d'onde) d'autre part. Elle présente à chaque température un maximum pour une radiation autour de laquelle le rayonnement se trouve concentré comme composition spectrale. A mesure que la

température croît, la fréquence de maximum devient de plus grande. A l'intérieur d'un four, quand la température s'élève, les radiations prédominantes, les "couleurs" passent de l'infra-rouge au rouge, au jaune, au bleu, etc... jusqu'à l'ultra-violet et aux fréquences plus élevées. Pour une température de 5.700° qui est la température effective de la surface du soleil et du cratère de certains arcs électriques, le maximum est dans le jaune verdâtre: $\lambda = 5.10^{-5}$ cm.; c'est même pour cela que notre oeil est le plus sensible à cette radiation.

A l'intérieur des étoiles, pour une température de 6 millions de degrés, le maximum serait dans le domaine des rayons X mous ; pour 40 millions de degrés, la longueur d'onde du



maximum serait celle des rayons X pénétrants (10^{-8} cm). Dans cette fournaise intrastellaire, il y a bien de la lumière et des rayons γ , mais la partie la plus importante du rayonnement est formée par les rayons X ; la matière y est donc soumise à une action ionisante intense.

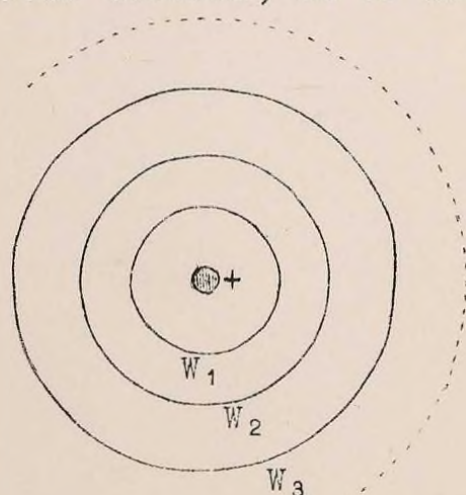
Comme première application de ces résultats, nous voyons que pour connaître la température d'un corps noir ou d'une étoile dont nous recevons la lumière, il n'est pas nécessaire de recevoir la totalité du rayonnement émis, mais qu'il suffit d'analyser la distribution dans le spectre de ce qu'on reçoit et de déterminer la longueur ^{d'onde} optimum. Si la courbe obtenue a la même forme que celle du rayonnement noir, avec un maximum dans le jaune verdâtre, on peut considérer que le rayonnement de l'étoile est celui d'un four à 6.000° . On déduit ainsi la température effective des étoiles qui est très inférieure à leur température interne. En effet, l'étoile perd constamment de l'énergie vers les espaces interstellaires; il y a donc une chute de température entre l'intérieur et l'extérieur.

C'est à ce point de vue (température effective), que se distinguent entre eux les différents types d'étoiles, à partir des étoiles bleues jusqu'aux étoiles rouges. Les résultats qu'on a pu obtenir sont les suivants.

Type	Température effective	Type	Température effective	Type	Température effective
N	2.700°	K ₀	4.000°	A ₀	10.000°
M	3.000°	G ₅	5.000°	B ₅	13.500°
K ₅	3.300°	G ₀	5.600°	B ₀	20.000°
K ₂	3.500°	F ₀	7.500°	O	25.000° 35.000°

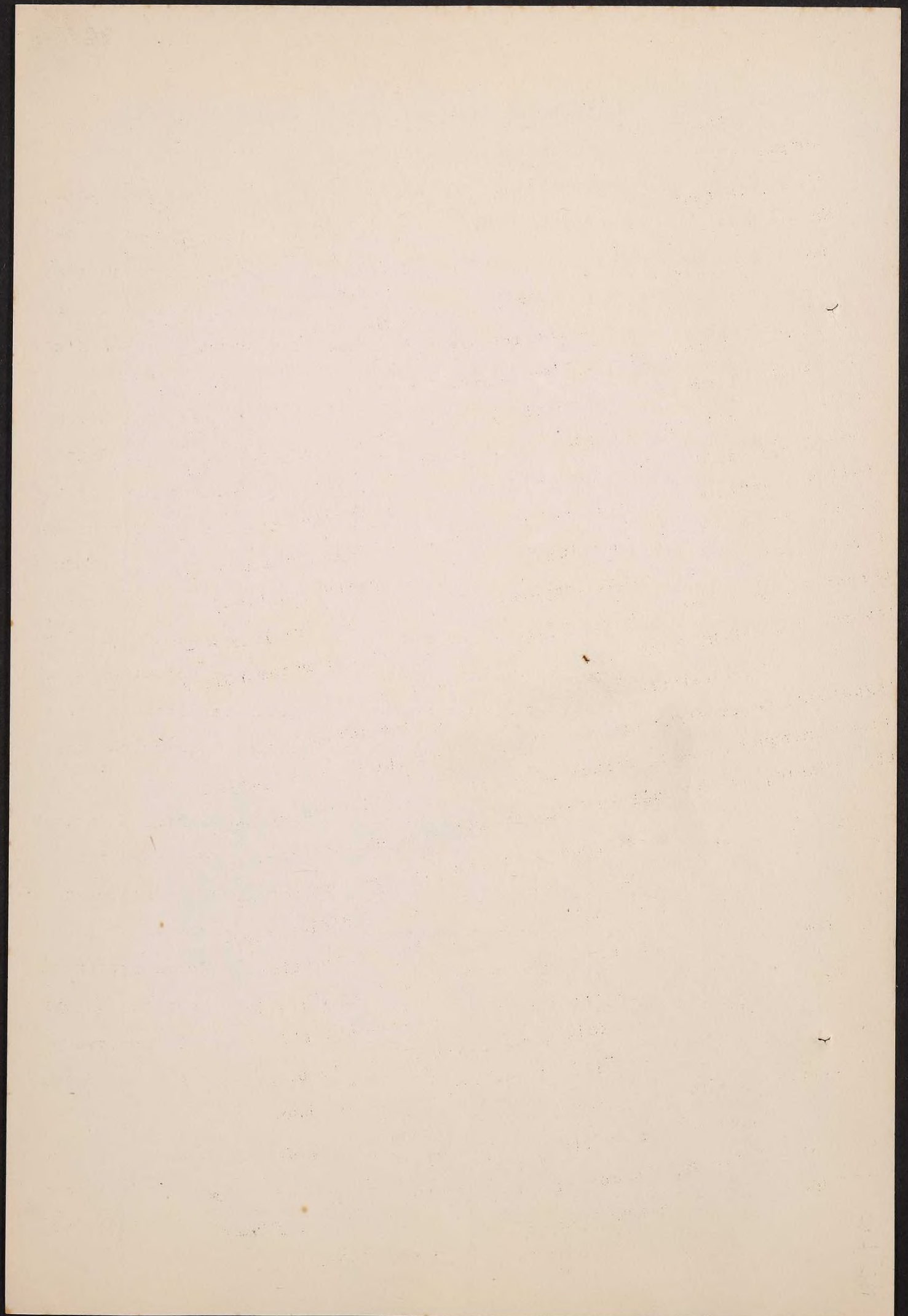
Cette conception des niveaux d'énergie dans l'atome et des échanges d'énergie par quanta qui permet de nous rendre compte de la composition du rayonnement noir est venue éclairer d'un jour tout à fait nouveau l'ensemble de la spectroscopie. En effet, c'est précisément parce que les atomes ne peuvent se trouver que dans certains niveaux d'énergie et parce qu'ils émettent une fréquence déterminée en sautant de l'un de ces niveaux à un autre, que si l'on examine un spectre d'émission, (vapeur de mercure par exemple), on ne trouve que des raies brillantes occupant des positions définies. Si l'atome était susceptible d'une série continue d'états, le spectre présenterait une série continue de fréquences. Inversement, ces atomes placés sur le trajet d'une lumière ayant un spectre continu, (venant d'un four à haute température ou d'une étoile) absorberont les raies spectrales qu'ils peuvent émettre: raies noires inversées de FRAUENHOFER dans le spectre solaire.

Le développement de ces idées, en relation avec l'hypothèse de la structure planétaire, a abouti à une représentation remarquable de la structure de l'atome. BOHR a développé cette théorie, et le modèle d'atome d'hydrogène qu'il a donné se



compose d'un noyau central chargé positivement de la quantité d'électricité $+e$ et d'un électron susceptible de plusieurs états d'énergie $W_1, W_2, W_3, \dots$. Lorsque l'atome est à l'état non excité, il est au niveau le plus bas W_1 à 1 quantum. Il peut absor-

ber 1, 2, $\dots, n$ quanta et passer aux états excités $W_2, W_3, \dots$, etc... Inversement, il peut réémettre des radiations en retombant aux niveaux inférieurs. On appelle spectre de BALMER celui qu'on obtient quand l'atome retombe aux niveau W_2 en venant



des états plus excités. Quand il existe à l'état W_1 non excité il ne peut pas absorber la série de BALMER.

IONISATION. L'excitation de l'hydrogène (qui existe ordinairement à l'état de molécule) fournit d'abord un spectre de bandes; puis la molécule se sépare en deux atomes et on obtient le spectre de l'atome. Si l'excitation augmente, on peut aller jusqu'au départ de l'électron (ionisation) ; il ne reste plus alors que des noyaux positifs.

L'énergie correspondant à cette séparation (potentiel d'ionisation) peut se mesurer par le travail qu'on doit fournir à l'électron pour l'emmener à grande distance du noyau, soit eV . Le potentiel d'ionisation V pour l'atome d'hydrogène est de 13,5 volts. Ce phénomène d'ionisation peut se produire pour tous les atomes lorsqu'on les place dans des rayonnements de plus en plus énergiques, (quanta de fréquence de plus en plus élevée). Pour chaque atome on mesure un potentiel d'ionisation ; il est plus faible pour les métaux alcalins et alcalino-terreux que pour l'hydrogène mais atteint 25,2 volts pour l'hélium.

Ces atomes ionisés une fois peuvent l'être à nouveau si l'excitation augmente. Cela n'est évidemment pas possible pour l'hydrogène, mais cela se produit pour les autres atomes comme, par exemple, le cadmium qui comporte 2 électrons K , 8 électrons L , 8 dans le groupe M et deux électrons périphériques. Le calcium ionisé une fois Ca^+ peut être excité et fournit alors un spectre particulier (important dans le spectre solaire : raies h et k de FRAUENHOFER), puis ionisé une seconde fois, Ca^{++} , et donner un autre spectre.

Si le rayonnement est de plus en plus intense avec des quanta de plus en plus gros, il peut arracher les électrons successifs et dépouiller le noyau de ses carapaces d'électrons.



Les enveloppes successives s'en vont et l'atome se réduit à sa plus simple expression. Il résiste d'autant mieux que la charge centrale Z_e du noyau est plus grande. Dans la fournaise intrastellaire, il est très probable que les quanta sont suffisamment gros pour dépouiller complètement les noyaux jusqu'au rang 25, (Mn). Entre le rang $Z = 25$ et $Z = 50$, (Ir), il ne reste que le noyau et les électrons K ; entre $Z = 50$ et $Z = 70$, il reste les électrons K et L ; enfin, entre les Terres rares et l'Uranium, il reste en plus quelques électrons M.

DENSITÉ DES ÉTOILES.

Les atomes ainsi déshabillés peuvent atteindre une densité fantastique; en effet, les dimensions de cette région K sont en raison inverse de Z . Si nous prenons les atomes qui jusqu'au rang 50 sont réduits à cette seule couche, (état analogue à celui de l'hélium), les dimensions de leurs orbites seront 50 fois plus petites que celles de l'hélium et leur volume sera 125.000 fois plus petit. Comme, de plus, leur masse est à peu près proportionnelle à Z , leur densité atteindra des valeurs considérables. Ceci nous permettra de comprendre pourquoi, bien que la densité du Soleil soit voisine de celle de l'eau, sa matière se comporte comme un gaz parfait : les atomes sont tout petits et ont toute la place de se mouvoir. Nous pouvons aussi comprendre pourquoi certaines étoiles (le compagnon de Sirius) ont des densités de l'ordre de 60.000 ; il ne reste dans ces astres que de la purée de noyaux et d'électrons.

Ces notions d'ionisation de l'atome quantifié sont donc fondamentales pour comprendre les phénomènes de l'astrophysique.

ÉQUILIBRES DE DISSOCIATION.

En présence de rayonnement des atomes, qui peuvent absorber et émettre, vont se partager d'une manière statistique

entre les divers états d'énergie dont ils sont susceptibles. De même, les électrons se partageront entre les atomes suivant leurs affinités (mesurées par les potentiels d'ionisation) , exactement comme dans une réaction chimique l'équilibre s'établit suivant les affinités). La théorie cinétique ou la thermodynamique nous permettent de calculer pour l'hydrogène, à chaque température et à chaque pression, la proportion des atomes dans les états W_1 , W_2 , ... W_n ,... Mr.SAHA, physicien hindou, a été le premier à faire la chimie des atomes en présence de rayonnement et à calculer, pour chaque température et pour chaque pression, la proportion des atomes des différentes espèces dans les différents états d'ionisation. On peut ainsi rendre compte, d'une manière très remarquable, de ce qui concerne les différents spectres des étoiles.

EXAMEN DES SPECTRES STELLAIRES.

Les différents spectres stellaires se distinguent entre eux d'abord par la courbe qui représente la répartition de l'énergie entre les fréquences et ensuite par les raies brillantes ou obscures.

Avant les étoiles rouges, nous trouvons les nébuleuses obscures qui n'envoient aucune lumière, puis les nébuleuses diffuses ou planétaires dont la lumière formée de raies brillantes n'est pas un rayonnement spontané mais probablement un rayonnement de fluorescence provoqué par la proximité ou la présence en leur centre d'une étoile brillante. Ces nébuleuses laissent passer la série de BALMER ; elles contiennent l'hydrogène à l'état W_1 non excité.

C'est aux étoiles du type N que commence l'émission. Leur spectre est un spectre de bandes émis par des molécules à l'état de combinaisons chimiques complexes. Aux étoiles du type K , il n'y a plus que des raies : spectres des atomes à

[The text on this page is extremely faint and illegible. It appears to be a multi-paragraph letter or report, with some lines possibly starting with words like "I have", "The", and "In". There are also some lines that look like they might be part of a list or a table, but the details are completely lost.]

l'état neutre. Dans les étoiles G apparaissent les raies d'atomes ionisés, en particulier le calcium ionisé (Ca^+). Quand on continue à monter, l'hydrogène excité apparaît; les étoiles du type F au type A ne présentent plus que les raies de l'hydrogène, les métaux étant trop fortement ionisés. Pour les étoiles B (15.000 à 20.000 degrés), comme Algol, l'hydrogène n'existe plus; il est passé à l'état de noyau. Il ne reste dans le spectre que les raies de l'hélium excité: ce sont des étoiles à hélium. Enfin dans les étoiles O, on trouve le spectre de l'hélium ionisé.

Nous voyons donc apparaître et se succéder, à mesure que la température augmente, les raies spectrales dans l'ordre que nous pouvions prévoir.

MESURES DES DISTANCES.

Comme autres applications, je vais donner une série de résultats astronomiques que cette dynamique des quanta nous permet de comprendre et d'interpréter.

Pour un certain nombre d'étoiles, les plus rapprochées, nous pouvons mesurer directement la parallaxe, c'est à dire l'angle sous lequel de l'étoile on voit l'orbite terrestre. Cet angle est de l'ordre d'une fraction de seconde. Connaissant cette parallaxe, nous en déduisons la distance de l'étoile. Nous trouvons ainsi les distances suivantes:

α du Centaure	4	Années de lumière.
Véga de la Lyre	20	" " "
Sirius	12	" " "
Capella α du Cocher	56	" " "

Si les étoiles sont plus éloignées, il faut, pour trouver leur distance, employer un autre procédé, procédé spectroscopique du à Mr. ADAMS, astronome américain. Mr. ADAMS a montré qu'on peut trouver la distance d'une étoile en étudiant la lumière qu'elle nous envoie.

Pour une même grandeur absolue l'énergie que nous recevons d'une étoile décroît comme le carré de sa distance. Si nous trouvons que deux étoiles ont des grandeurs visuelles différentes, cela peut être du à ce qu'elles ont :

- 1^o) La même grandeur absolue et des distances différentes,
- 2^o) La même distance et des grandeurs absolues différentes.

L'observation du spectre permet de connaître la grandeur absolue. Si deux étoiles ont exactement le même spectre (même rapport entre les intensités de deux raies différentes quelconques, raies brillantes et raies noires), on peut en conclure qu'elles ont même grandeur absolue : même masse, même température effective et même composition de la chromosphère. L'examen spectrophotométrique des étoiles, poursuivi à Harvard et à Cambridge (près de Boston), nous fournit les grandeurs d'un très grand nombre d'étoiles. En comparant avec des étoiles de distance connue on déduit la distance des étoiles lointaines, et cela va ainsi jusqu'au bout du monde.

Les amas globulaires dispersés comme les Pléiades, au voisinage de la voie lactée, sont à une distance de 220 année de lumière.

Les amas dispersés du Cocher à 5000 années-lumière

Les amas dispersés de l'Aigle à 11000

Les amas dispersés du Cygne à 25000

Pour les amas fermés on trouve des distances de 30000 à 160000 années de lumière. L'ensemble de ces amas autour de la Voie lactée constitue une couronne dont le rayon est de 300000 années de lumière.

On a pu aller plus loin et déterminer la distance des nébuleuses spirales en appliquant la méthode précédente aux Novae qui apparaissent dans ces nébuleuses, car ces dernières

MS 249





ne nous envoient qu'un spectre continu. On trouve pour la nébuleuse d'Andromède une distance de 600.000 années de lumière avec un diamètre de 23.000.

Il y a des nébuleuses qui sont à 20 millions d'années de lumière, mais comme le rayon de l'univers est de l'ordre d'un milliard d'années de lumière, on voit qu'il y a encore de la place.

DIMENSIONS DES ÉTOILES.

Il est facile de connaître le diamètre des étoiles quand on connaît leur distance et leur grandeur absolue. La grandeur absolue fournit l'énergie totale rayonnée et la température effective donne le pouvoir émissif par cm^2 ; on en déduit donc la surface d'émission et le diamètre de l'étoile. On trouve, en fonction du diamètre solaire (3.10^6 km.), les diamètres des étoiles suivantes:

Bételgeuse	α	de la constellation d'Orion	220	diam. sol.
Antarès	α	du Scorpion	110	- -
Aldébaran	α	du Taureau	44	- -
Capella	α	du Cocher	26	- -
β Andromède			40	- -

Ce sont les étoiles géantes.

Sirius			1,2	diam. sol.
Procyon	α	du Petit Chien	1,8	- -
Altair	α	de l'Aigle	1,4	- -
Soleil			1	- -

Ce sont les étoiles naines. On trouve ainsi parmi les étoiles les plus usuelles deux paquets : les naines, du même ordre de grandeur que le soleil, et les géantes, de diamètre 30 fois plus grand donc de volume 27.000 fois plus grand que les naines.

Densité des étoiles.

Connaissant leur masse et leurs dimensions on peut calculer leur densité. La densité des étoiles géantes est extrêmement faible: Capella a la densité de l'air. Pour Bételgeuse, dont la valeur du diamètre (220 Soleil) a été confirmée par les mesures directes de Mr. MICHELSON au moyen d'une méthode

interférométrique, (diamètre apparent 0,05 seconde d'arc), on ne connaît pas sa masse, mais on a des raisons d'admettre pour toutes les étoiles de ce type qu'elle est de l'ordre de 10 fois celle du soleil ; sa densité serait donc de 10^{-6} .

Il y a encore d'autres raisons de penser que la densité de Bételgeuse ne peut pas être plus grande. Si on admettait pour une telle étoile la densité du Soleil, la théorie de la relativité généralisée montrerait que son univers serait fermé; la lumière qu'elle enverrait retomberait sur elle; le déplacement vers le rouge des raies du spectre serait tel qu'on ne verrait plus rien.

La plus naine des étoiles connues est le compagnon de Sirius dont la grandeur absolue est de 11,3 , (limite des télescopes: 15); c'est une étoile du type F a 8.000^0 . Connaissant le rayonnement total qu'elle émet, on peut calculer son rayon: on trouve 19.000 km. Connaissant d'autre part sa masse, on calcule sa densité qu'on trouve égale à 61.000, densité énorme qui peut s'expliquer par l'existence à l'intérieur de l'étoile d'atomes dépouillés de leurs carapaces électroniques. Cette grande densité du compagnon de Sirius s'est trouvée confirmée par la mesure de l'effet EINSTEIN pour cette étoile. L'effet de déplacement des raies vers le rouge prévu par la théorie de la relativité généralisée est ici 31 fois plus grand que pour le Soleil, équivalent à un effet DOPPLER de 20 km/sec. On a trouvé expérimentalement un déplacement correspondant à un effet DOPPLER de 19 km./sec.

Ces résultats importants ont pu être confirmés et dépassés par l'étude de l'équilibre intérieur des étoiles.

Ce problème n'est pas nouveau; il y a 40 ans, LAYN avait fait la théorie de l'équilibre d'une étoile en la considérant comme un gaz parfait, mais il n'avait tenu compte, pour

[Faint, illegible handwriting throughout the page, likely bleed-through from the reverse side.]

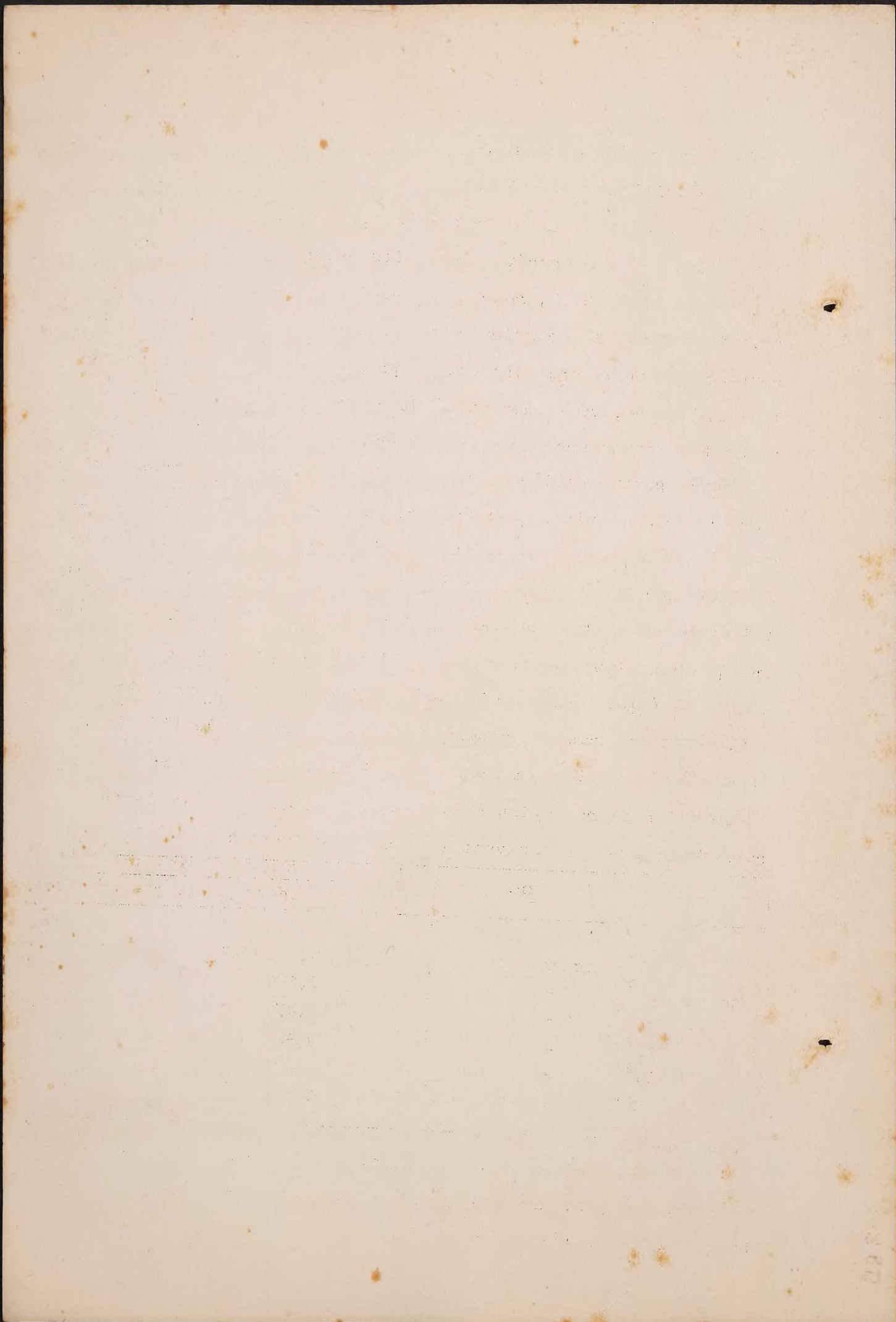
équilibrer la gravitation que de la pression aérostatique et non de la pression de radiation. Cette théorie, prolongée par EMDEN, (théorie des étoiles polytropiques), n'a pas donné des résultats capables d'interpréter les faits expérimentaux.

EDDINGTON, reprenant une idée de SCHWARTZSCHILD, a fait intervenir la pression de radiation et la pression du gaz pour compenser la gravitation. La pression de radiation, comme la température, va en diminuant du centre à la périphérie; de plus, les atomes sont presque entièrement déshabillés, le gaz est donc presque entièrement composé d'électrons, de masse moléculaire très réduite. En tenant compte alors de la masse totale de l'étoile, des lois des gaz, de l'absorption de la lumière et de la température externe, EDDINGTON a pu calculer la loi de distribution de la température à l'intérieur de l'étoile. Il a montré que dans tout le volume de celle-ci, la pression de radiation joue à peu près le même rôle par rapport à la pression du gaz, et que ce rapport dépend de la masse totale de l'étoile. Appelons $M = 10^n$ la masse de l'étoile et ρ le rapport de la pression de radiation à la pression du gaz; ρ varie très rapidement avec n suivant le tableau suivant :

Masse = 10^n gr.	$\rho = \frac{\text{pression de radiation}}{\text{pression du gaz}}$
10^{30} grammes	0,0000016
10^{33} —	0,106
10^{34} —	0,570
10^{35} —	0,850
10^{36} —	0,950
10^{38} —	0,990

Au dessous de 10^{30} grammes la pression de radiation n'intervient pas. Lorsque la masse augmente, la pression de radiation joue un rôle de plus en plus important. Lorsqu'elle

MS 249



dépasse 10^{34} grammes, la pression de radiation est prépondérante, ($p > 50\%$), et l'étoile devient instable.

On comprend alors pourquoi la masse des étoiles est toujours du même ordre de grandeur, (10^{33} à 10^{35} gr.). Quand elle tend à devenir plus grande, l'étoile devient instable et forme une étoile double. les morceaux restent dans les limites 10^{33} à 10^{35} grammes.

EDDINGTON trouve comme température à l'intérieur des étoiles: 10 millions de degrés pour Capella, 39,5 millions de degrés pour le Soleil et environ 40 millions de degrés pour la plupart des étoiles naines. Pour les étoiles à grande densité, il faut admettre des températures beaucoup plus élevées.

EDDINGTON a pu prouver que, tant qu'on peut lui appliquer les lois des gaz parfaits, l'énergie totale rayonnée par une étoile ne dépend que de sa masse. Ce fait, d'abord vérifié pour les étoiles géantes, est aussi vérifié pour les étoiles naines comme le Soleil dont la densité est celle de l'eau. Dans ces étoiles les atomes sont tellement petits qu'ils ont la liberté des molécules d'agitation d'un gaz parfait malgré leur forte concentration.

J'aurais voulu donner quelques indications sur l'évolution des étoiles et sur l'origine de l'énergie rayonnée: formation d'hélium à partir de l'hydrogène ou bien destruction complète de la matière. Le fait que nous constatons une grande diminution de masse à mesure que l'étoile évolue et se refroidit est l'argument le plus important en faveur de la seconde hypothèse. Où cette matière est-elle engendrée? C'est ce que nous ne savons pas.

