

L'hypothèse de l'atome primitif

Autor(en): **Lemaitre, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **125 (1945)**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90449>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

L'hypothèse de l'atome primitif

par

M. le chanoine G. LEMAITRE, professeur à l'Université de Louvain

Introduction

L'hypothèse de l'atome primitif est une hypothèse cosmogonique suivant laquelle le monde actuel a résulté de la désintégration radio-active d'un atome.

J'ai été amené à formuler cette hypothèse, il y a une quinzaine d'années, en me laissant guider par des considérations thermodynamiques qui cherchaient à interpréter la loi de la dégradation de l'énergie dans le cadre des théories quantiques. Depuis lors, la découverte de l'universalité de la radio-activité, montrée par les désintégrations artificiellement provoquées, ainsi que l'établissement de la nature corpusculaire des rayons cosmiques, manifestée par l'action qu'exerce sur ceux-ci le champ magnétique terrestre, ont rendu plus plausible une hypothèse qui assignait une origine radio-active à ces rayons ainsi qu'à toute la matière existante.

Je pense donc que le moment est venu de présenter la théorie sous forme déductive. Je vous montrerai d'abord comment elle échappe aisément à quelques grosses objections qui tendraient à la faire écarter d'emblée. Je m'efforcerai ensuite d'en déduire les conséquences avec assez de détails pour pouvoir montrer qu'elle rend compte, non seulement des rayons cosmiques, mais encore de la structure actuelle de l'univers, formé d'étoiles et de nuées gazeuses organisées en nébuleuses elliptiques ou spirales, qui sont groupées parfois en grands amas de quelques centaines de nébuleuses, mais qui le plus souvent sont constituées de nébuleuses isolées, qui se séparent les unes des autres, suivant le mécanisme connu sous le nom d'expansion de l'univers.

Il est indispensable, pour l'exposé de mon sujet, que je vous rappelle quelques notions géométriques élémentaires, telle que celle de l'espace fermé de Riemann, qui a conduit à celle de l'espace de rayon variable, ainsi que certains aspects de la théorie de la relativité, particulièrement l'introduction de la constante cosmologique et de la répulsion cosmique qui en est la conséquence.

L'espace fermé

Tout espace partiel est un espace ouvert; il est compris à l'intérieur d'une surface, sa frontière, au delà de laquelle il y a une région extérieure. L'habitude que nous avons de telles régions ouvertes nous incite à penser qu'il en est nécessairement ainsi, quelque grandes que soient les régions considérées. C'est à RIEMANN que l'on doit d'avoir montré que l'espace total peut être fermé. Pour expliquer cette notion d'espace fermé, le plus simple est d'en faire une représentation en petit dans un espace ouvert. Imaginons dans un tel espace une sphère, à l'intérieur de laquelle nous allons représenter tout l'espace fermé. Sur la surface de la sphère, chaque point de l'espace fermé sera supposé représenté deux fois, en deux points A et A', qui seront, par exemple, deux points antipodes, c'est-à-dire deux extrémités d'un même diamètre. Si nous joignons ces deux points A et A' par une ligne située à l'intérieur de la sphère, cette ligne doit être considérée comme une ligne fermée, puisque les deux extrémités A et A' sont deux représentations distinctes d'un seul et même point. La situation est tout à fait analogue à ce qui se passe pour la planisphère de Mercator, où les points du 180^me méridien sont représentés deux fois au bord est et au bord ouest de la carte. On peut donc circuler indéfiniment dans l'espace sans jamais être amené à en sortir.

Il importe de remarquer que les points représentés par la surface de la sphère, à l'intérieur de laquelle nous avons représenté tout l'espace, ne se distinguent par aucune propriété des autres points de l'espace, pas plus que le 180^me méridien pour la carte géographique. Pour nous en rendre compte, imaginons que nous déplaçons la sphère, de telle façon que le point A vienne en B et le point antipode A' vienne en B'. Nous supposons alors que tout le segment AB et tout le segment A'B' sont deux représentations d'un même segment de l'espace fermé. Nous aurons donc une

partie de l'espace qui était déjà représenté à l'intérieur de la sphère initiale qui est maintenant représenté une seconde fois à l'extérieur de celle-ci. Supprimons, comme inutile, la représentation intérieure, il nous restera une représentation complète de l'espace à l'intérieur de la nouvelle sphère. Dans cette représentation, les contours fermés se souderont en un point qui est représenté deux fois, à savoir par les points B et B' mentionnés plus haut, au lieu de se souder comme précédemment aux points A et A'. Ceux-ci ne se distinguent donc par aucune propriété essentielle.

Remarquons que, lorsque nous modifions la sphère extérieure, il peut se faire qu'un contour fermé qui coupait la première sphère ne coupe plus la seconde ou, plus généralement, qu'un contour ne coupe plus la sphère limite en un même nombre de points. Il est pourtant évident que le nombre de points d'intersections ne peut varier que d'un nombre pair. Il y a donc deux sortes de contours fermés qui ne peuvent être déformés l'un dans l'autre par une déformation continue. Les premiers peuvent être réduits à un point, ils ne coupent pas la sphère extérieure ou la coupent en un nombre pair de points; les autres ne peuvent être réduits à un point, nous les appellerons les contours impairs, puisqu'ils coupent la sphère en un nombre impair de points.

Si, dans un espace fermé, nous nous éloignons d'une surface que nous pouvons supposer horizontale, en partant vers le haut, nous pourrons, en parcourant un contour impair, revenir à notre point de départ par la direction opposée, sans avoir dévié ni à droite ni à gauche, ni en avant ou derrière, sans avoir traversé le plan horizontal passant par le point de départ.

L'espace elliptique

Voilà l'essentiel de la topologie de l'espace fermé. Il est possible de compléter ces notions topologiques en y introduisant, comme dans une carte géographique, des échelles variant d'un point à l'autre et d'une direction à l'autre. On peut faire cela de telle façon que tous les points de l'espace et toutes les directions y soient parfaitement équivalentes. On obtient alors l'espace homogène de RIEMANN, ou espace elliptique. La ligne droite est

un contour impair de longueur minimum. Deux points quelconques la divisent en deux segments dont la somme a une longueur, la même pour toute droite, et appelée le tour de l'espace.

Tous les espaces elliptiques sont semblables entre eux. Ils peuvent être décrits par comparaison avec un d'entre eux. On choisit comme espace typique celui où le tour de la droite est égal à $\pi = 3,1416$. Dans tout espace elliptique, les distances de deux points sont égales aux distances correspondantes de l'espace typique multipliées par un nombre R appelé le rayon de l'espace elliptique considéré. Les distances dans l'espace typique, dit espace de rayon un, sont appelées les distances angulaires. Les distances vraies ou distances linéaires sont donc le produit du rayon de l'espace par les distances angulaires.

L'espace de rayon variable

Lorsque le rayon de l'espace varie avec le temps, on obtient un espace de rayon variable. On peut imaginer que des points matériels y sont répartis uniformément et que des observateurs situés sur ces points y font des observations spatio-temporelles. La distance angulaire des divers observateurs demeure invariable, les distances linéaires varient donc proportionnellement au rayon de l'espace. Tous les points de l'espace sont parfaitement équivalents. Par un déplacement d'ensemble, on peut amener un quelconque d'entre eux au centre de la représentation. Les mesures faites par les observateurs sont donc aussi équivalentes, chacun d'eux se fait de l'univers la même représentation.

Si le rayon croît avec le temps, chaque observateur voit tous les points qui l'entourent s'éloigner de lui, et cela avec des vitesses qui sont d'autant plus grandes qu'ils sont plus éloignés. C'est ce qui est observé pour les nébuleuses extra-galactiques qui nous entourent. Le rapport constant de la distance à la vitesse a été déterminé par Hubble et Humason. Il est égal à

$$T_H = 2 \cdot 10^9 \text{ années.}$$

Si on fait un graphique portant en abscisse les valeurs du temps et en ordonnée les valeurs du rayon, on obtient une courbe dont la sous-tangente au point représentant l'instant actuel est précisément égale à T_H .

L'atome primitif

Voilà les notions géométriques qui nous étaient indispensables. Nous allons maintenant imaginer que l'univers entier a existé sous la forme d'un noyau atomique qui remplissait uniformément un espace elliptique de rayon convenable.

Anticipant sur ce qui va suivre, nous admettrons que lorsque l'univers avait une densité de 10^{-27} gr./cm³, le rayon de l'espace était d'un milliard d'années de lumière, c'est-à-dire de 10^{27} cm. La masse de l'univers est donc de 10^{54} grammes. Si cet univers a eu jadis une densité égale à celle de l'eau, son rayon était alors réduit à 10^{18} cm, soit une année lumière. Chaque proton y occupait une sphère d'un ångström environ, soit 10^{-8} cm. Dans un noyau atomique, les protons sont en contact et leur rayon est de 10^{-13} cm, soit donc cent mille fois plus petit. Le rayon de l'univers correspondant est donc 10^{13} cm., c'est-à-dire une unité astronomique.

Il ne faut naturellement pas attacher trop d'importance à cette description de l'atome primitif, description qui devra peut-être être modifiée lorsque nos connaissances des noyaux atomiques seront plus parfaites.

Les théories cosmogoniques se proposent de rechercher des conditions initiales idéalement simples d'où a pu résulter, par le jeu naturel des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité. Il semble difficile de concevoir des conditions plus simples que celles qui régnaient lorsque toute la matière était unifiée en un noyau atomique. L'avenir des théories atomiques nous dira peut-être un jour, jusqu'à quel point un noyau atomique doit être considéré comme un système où des particules associées conservent encore quelque individualité propre. Le fait que des particules peuvent sortir d'un noyau, lors des transformations radio-actives, ne prouve certes pas que ces particules y préexistaient comme telles. Les photons sortent d'un atome dont ils n'étaient pas des constituants, les électrons apparaissent là où ils n'étaient pas et les théoriciens leur dénie une existence individuelle dans le noyau. Les protons ou les particules alpha y existent sans doute davantage. Lorsqu'ils sortent, leur existence devient pourtant plus indépendante et leurs degrés de liberté plus nombreux. Aussi leur sortie, lors des transformations radio-actives, est-elle un cas typique de dégradation de l'énergie; avec une aug-

mentation du nombre de quanta indépendants ou augmentation de l'entropie.

Que l'entropie augmente avec le nombre des quanta, est évident dans le cas de la radiation électromagnétique en équilibre thermodynamique. Dans la radiation noire, en effet, l'entropie et le nombre total des photons sont l'un et l'autre proportionnels à la troisième puissance de la température. Quand donc on mélange des radiations de températures différentes et qu'on laisse s'établir un nouvel équilibre statistique, le nombre total des photons a augmenté. La dégradation de l'énergie se manifeste comme une pulvérisation de l'énergie. La quantité totale d'énergie se maintient, mais elle se répartit en un nombre de quanta toujours plus grand, elle se brise en fragments toujours plus nombreux.

Si donc, par la pensée, on veut essayer de remonter le cours des temps, on doit s'attendre à trouver jadis l'énergie concentrée en un nombre moindre de quanta. La condition initiale doit être un état de concentration maxima. C'est en essayant de formuler cette condition qu'a germé l'idée de l'atome primitif. Qui sait si l'évolution des théories du noyau ne permettra pas un jour de considérer l'atome primitif comme un quantum unique?

Formation de nuées

Nous imaginons l'atome primitif comme remplissant uniformément l'espace de rayon très petit (astronomiquement parlant). Il n'y a donc pas de place pour des électrons superficiels, l'atome primitif était en quelque sorte un isotope du neutron. Cet atome est conçu comme n'ayant existé qu'un instant; il est en effet instable et, dès son existence, il se brise en morceaux, qui se brisent à leur tour; entre les morceaux jaillissent des électrons, des protons, des particules alpha. Il en résulte une augmentation du volume; la désintégration de l'atome est donc accompagnée d'une augmentation rapide du rayon de l'espace, que les fragments de l'atome primitif remplissent toujours uniformément. Quand les morceaux sont devenus trop petits, ils cessent de se briser; quelques-uns, comme l'uranium, se désintègrent encore maintenant, lentement, avec une vie moyenne de quatre milliards d'années, nous laissant un maigre échantillon de la désintégration universelle de jadis.

Dans cette première phase de l'expansion de l'espace, partant asymptotiquement d'un rayon pratiquement nul, nous avons des particules animées de vitesses énormes (par suite du recul lors de l'émission des rayons) qui sont plongées dans de la radiation, dont l'énergie totale est, sans doute, une fraction notable de l'énergie massique des atomes.

L'effet de l'expansion rapide de l'espace est d'atténuer cette radiation et aussi de diminuer les vitesses relatives des atomes. Ce dernier point demande quelque explication. Imaginons qu'un atome ait, suivant le rayon de la sphère dans laquelle nous nous représentons l'espace fermé, une vitesse radiale plus grande que la vitesse normale pour l'endroit où il se trouve. Alors cet atome s'écartera davantage du centre que la particule matérielle idéale qui a la vitesse normale. L'atome gagnera donc progressivement des régions où sa vitesse est moins anormale, et sa vitesse propre, c'est-à-dire son excès sur la vitesse normale, diminuera. Le calcul montre que la vitesse propre varie ainsi en raison inverse du rayon de l'espace. Nous devons ainsi nous attendre, dans la première période de l'expansion, à une atténuation notable des vitesses relatives des atomes. Il arrivera donc, au moins de temps en temps, par suite de chances favorables, que les chocs entre atomes deviendront assez modérés pour ne plus donner lieu à des transformations atomiques ou des émissions de radiations, mais que ces chocs seront des chocs élastiques réglés par les électrons superficiels et tels que les considère la théorie des gaz. Nous obtiendrons donc, au moins localement, un commencement d'équilibre statistique, c'est-à-dire la formation de nuées gazeuses. Ces nuées gazeuses auront encore, l'une par rapport à l'autre, des vitesses considérables, et ces nuées seront mélangées aux radiations qui ont été elles-mêmes atténuées par l'expansion.

Ce sont ces radiations qui subsisteront jusqu'à nos jours sous forme de rayons cosmiques, tandis que les nuées gazeuses auront donné lieu aux étoiles et aux nébuleuses par un mécanisme qu'il nous reste à expliquer.

La répulsion cosmique

Pour cela, il nous faut dire quelques mots de la théorie de la relativité.

Lorsque EINSTEIN a établi sa théorie de la gravitation, ou théorie généralisée, il a admis, sous le nom de principe d'équivalence, que les notions de la relativité restreinte étaient valables approximativement dans un domaine suffisamment petit. Dans la théorie restreinte l'élément différentiel des mesures spatio-temporelles a pour carré une forme quadratique des quatre coordonnées, dont les coefficients ont des valeurs spéciales constantes. Dans la généralisation, cet élément sera encore la racine carrée d'une forme quadratique, mais les coefficients, désignés collectivement sous le nom de tenseur métrique, varieront de place en place. La géométrie de l'espace-temps est alors la géométrie générale de RIEMANN à trois plus une dimensions. Les espaces de rayons variables sont un cas particulier de cette géométrie générale lorsqu'on y introduit l'hypothèse de l'homogénéité spatiale ou de l'équivalence des observateurs.

Il peut se faire que cette géométrie ne diffère qu'apparemment de celle de la relativité restreinte. C'est ce qui arrive lorsque la forme quadratique peut se transformer, par un simple changement des coordonnées, en une forme à coefficients constants. On dit alors, avec RIEMANN, que la variété correspondante, c'est-à-dire l'espace-temps, est plan. Il faut pour cela que certaines expressions, exprimées par les composantes d'un tenseur à quatre indices appelé le tenseur de RIEMANN, s'annulent toutes en tout point. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, le tenseur de RIEMANN exprime l'écart à la planarité. Le tenseur de RIEMANN se calcule au moyen des dérivées secondes du tenseur métrique. A partir du tenseur de RIEMANN à quatre indices, il est aisé d'obtenir un tenseur qui n'a que deux indices comme le tenseur métrique; on l'appelle le tenseur de RIEMANN contracté. On peut aussi obtenir un scalaire, le tenseur de RIEMANN totalement contracté.

En relativité restreinte, un point libre décrit une droite d'un mouvement uniforme, c'est le principe d'inertie. On peut encore dire d'une façon équivalente qu'il décrit une géodésique de l'espace-temps. Dans la généralisation, on suppose encore qu'un point libre décrit une géodésique. Ces géodésiques ne sont plus représentables par un mouvement rectiligne uniforme; elles représentent maintenant le mouvement du point sous l'action des forces de gravitation. Comme le champ de gravitation est causé par la présence de la matière, il faut qu'il y ait une relation entre la densité de répar-

tition de la matière et le tenseur de RIEMANN qui exprime l'écart à la planarité. La densité est elle-même considérée comme la composante principale d'un tenseur à deux indices appelé le tenseur matériel; on obtient ainsi comme expression possible du tenseur matériel $T_{\mu\nu}$ en fonction du tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ et des deux tenseurs de RIEMANN, contracté $R_{\mu\nu}$ et totalement contracté R :

$$T_{\mu\nu} = a R_{\mu\nu} + b R g_{\mu\nu} + c g_{\mu\nu}$$

où a , b et c sont trois constantes.

Mais ceci n'est pas tout, il doit exister certaines identités entre les composantes du tenseur matériel et ses dérivées. Ces identités peuvent être interprétées, pour un choix convenable des coordonnées, choix correspondant d'ailleurs aux conditions pratiques des observations, comme exprimant les principes de conservation: celui de l'énergie et celui de la quantité de mouvement. Pour que de telles identités soient satisfaites, il n'est plus possible de choisir arbitrairement les valeurs des trois constantes. Il faut prendre $b = -a/2$. Il reste donc seulement deux constantes. La théorie ne peut prévoir ni leur grandeur ni leur signe. C'est à l'observation seule qu'il appartient de les déterminer.

La constante a est liée à la constante de gravitation. Lorsqu'en effet on applique la théorie aux conditions qui se rencontrent dans les applications (en particulier le fait que les vitesses astronomiques sont faibles en comparaison de la vitesse de la lumière) et qu'on profite de ces conditions pour introduire des coordonnées qui facilitent la comparaison avec l'expérience, on trouve que les géodésiques diffèrent du mouvement rectiligne uniforme par une accélération qui peut s'interpréter comme une attraction en raison inverse du carré des rayons et qui est exercée par les masses représentées par le tenseur matériel. Ceci n'est que l'effet principal prévu par la théorie; celle-ci prévoit de petits écarts qui, dans des cas favorables, ont été confirmés par l'observation.

On obtient un bon accord avec les observations planétaires en négligeant le terme en c . Cela ne prouve pas que ce terme ne puisse avoir des conséquences expérimentales. En effet, dans les conditions qui ont été employées pour obtenir la loi de Newton comme une approximation de la théorie, le terme en c fournirait une force variant, non pas en raison inverse du carré de la dis-

tance, mais proportionnellement à celle-ci. Cette force pourrait donc avoir une action marquée pour de très grandes distances, alors que pour les distances des planètes son action serait négligeable. Aussi le rapport c/a , désigné habituellement par la lettre λ , est-il appelé la constante cosmologique. Lorsque λ est positif, la force additionnelle proportionnelle à la distance est appelée la répulsion cosmique.

La théorie de la relativité a ainsi unifié la théorie de NEWTON. Chez NEWTON, il y avait deux principes posés indépendamment l'un de l'autre : l'attraction universelle et la conservation de la masse. Dans la théorie de la relativité, ces principes prennent une forme quelque peu modifiée, tout en étant pratiquement identiques à ceux de NEWTON dans les cas où ceux-ci avaient été confrontés avec les faits. Mais l'attraction universelle est maintenant une conséquence de la conservation de la masse. La grandeur de la force, c'est-à-dire la constante de la gravitation, est déterminée expérimentalement.

La théorie indique encore que la constance de la masse a pour conséquence, en outre de la force newtonienne de gravitation, une répulsion proportionnelle à la distance, dont la grandeur et même le signe ne peuvent être déterminés que par l'observation, et par l'observation mettant en jeu de grandes distances.

La répulsion cosmique n'est pas une hypothèse spéciale introduite pour éviter des difficultés se présentant dans l'étude de l'univers. Si EINSTEIN l'a réintroduite dans son mémoire cosmologique, c'est parce qu'il se souvenait l'avoir arbitrairement laissé tomber lorsqu'il avait établi les équations de la gravitation. Cette constante s'impose logiquement dans le développement de la théorie. La supprimer revient à la fixer arbitrairement en lui donnant une valeur particulière : zéro.

L'univers de Friedmann

La théorie de la relativité nous permet de compléter notre description de l'univers de rayon variable en y introduisant des considérations dynamiques. Nous nous le représentons comme précédemment à l'intérieur d'une sphère dont le centre est un point que nous pouvons choisir arbitrairement. Cette sphère n'est pas le

bord du système, c'est le bord de la carte ou de la représentation que nous nous en faisons. C'est l'endroit où les deux demi-droites opposées se soudent en une droite fermée. La répulsion cosmique se manifeste comme une force proportionnelle à la distance au centre de la représentation. Quant à l'attraction gravifique, on sait que, dans le cas d'une distribution respectant la symétrie sphérique autour d'un point, et c'est bien le cas dans lequel nous nous trouvons, les régions plus éloignées du centre que le point considéré n'ont aucune influence sur le mouvement de celui-ci; quant aux points intérieurs, ils agissent comme s'ils étaient concentrés au centre. En vertu de l'homogénéité de la répartition de la matière, la densité est constante; la force d'attraction résultante est donc simplement proportionnelle à la distance, tout comme la répulsion cosmique.

Il existe donc une certaine densité, que nous appellerons la densité d'équilibre ou la densité cosmique, pour laquelle les deux forces se font équilibre.

Ces considérations élémentaires permettent de se rendre compte dans une certaine mesure du résultat que donne le calcul et qui est contenu dans l'équation de FRIEDMANN :

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = -1 + \frac{2M}{R} + \frac{R^2}{T^2}.$$

Le dernier terme représente la répulsion cosmique (c'est le double de la fonction des forces de cette répulsion). T est une constante dépendant de la valeur de la constante cosmologique et pouvant remplacer celle-ci. L'avant-dernier terme est le double du potentiel d'attraction due à la masse intérieure. Le rayon de l'espace R est la distance à l'origine d'un point de distance angulaire $\sigma = 1$. Si on multiplie l'équation par σ^2 , on aura l'équation correspondante pour un point à distance quelconque.

Ce qui est remarquable dans l'équation de FRIEDMANN, c'est le premier terme -1 du second membre. Les considérations élémentaires que nous venons d'exposer permettraient de lui donner une valeur quelconque constante : c'est la constante d'énergie dans le mouvement s'effectuant sous l'action des deux forces. La théorie complète fixe cette constante et lie ainsi les propriétés géométriques aux propriétés dynamiques.

L'équation d'Einstein

Lorsque, en vertu des équations, le rayon R demeure constant, on se trouve dans le cas de l'univers en équilibre ou univers d'EINSTEIN. On déduit aisément de l'équation de FRIEDMANN, les conditions de l'univers en équilibre :

$$R_E = \frac{T}{\sqrt{3}}; \quad \rho_E = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{T^2}; \quad M = \frac{T}{\sqrt{3}}.$$

Dans ces formules, les distances sont calculées en temps de lumière, ce qui revient à prendre la vitesse de la lumière c égale à un; mais en outre, l'unité de masse est choisie de telle façon que la constante de gravitation soit aussi égale à un. Il est facile de passer aux valeurs numériques en C.G.S. en rétablissant dans les formules les constantes c et G de façon à satisfaire aux équations de dimension. En particulier, si on prend T égal à $2 \cdot 10^9$ années, comme nous le supposons dans un instant, on trouve que la densité ρ_E est égale à 10^{-27} g./cm³.

Ces considérations peuvent s'étendre à une région où la distribution n'est plus homogène, et où même la symétrie sphérique n'est plus vérifiée, pourvu que la région considérée soit de petites dimensions. On sait en effet que dans une petite région, la mécanique newtonienne est toujours une bonne approximation. Il faut naturellement, en appliquant la mécanique newtonienne, tenir compte de la répulsion cosmique; mais, à part cette modification facile, il est parfaitement légitime d'utiliser l'intuition acquise par la pratique de la mécanique classique et son application à des systèmes plus ou moins compliqués. On peut, entre autres, se rendre compte que l'équilibre dont nous venons de parler est instable, et que même l'équilibre peut se rompre de façons opposées dans une région et dans une autre.

Peut-être est-il nécessaire de mentionner ici que l'équation de FRIEDMANN n'est rigoureusement exacte que si la masse M demeure constante. Lorsqu'on tient compte de la radiation qui circule dans l'espace et aussi des vitesses propres des particules qui s'entre-croisent à la façon des molécules dans un gaz, et donnent lieu, comme dans un gaz, à une pression, il est nécessaire de tenir compte, dans l'évaluation de la masse ou de l'énergie, du travail de cette pression lors de l'expansion de l'espace. Mais il est mani-

feste qu'un tel effet est généralement négligeable, comme d'ailleurs des recherches détaillées l'ont montré.

Signification des amas de nébuleuses

Nous sommes maintenant en état de reprendre la description que nous avons commencée, de l'expansion de l'espace à la suite de la désintégration de l'atome primitif. Nous avons montré comment, dans une première période d'expansion rapide, il avait dû se former des nuées gazeuses animées de grandes vitesses propres. Nous allons maintenant supposer que la masse M est légèrement plus grande que $T/\sqrt{3}$. Le second membre de l'équation de FRIEDMANN pourra donc devenir petit, mais ne pourra pas s'annuler. Nous pourrions donc distinguer dans l'expansion de l'espace trois phases. La première expansion rapide sera suivie d'une période de ralentissement, au cours de laquelle l'attraction et la répulsion se feront sensiblement équilibre. Enfin la répulsion l'emportera définitivement sur l'attraction, et l'univers entrera dans la troisième phase, celle de la reprise de l'expansion sous l'action dominante de la répulsion cosmique.

Considérons plus en détail la phase d'expansion lente. Les nuées gazeuses ne sont sans doute pas réparties d'une façon parfaitement uniforme. Considérons dans une région suffisamment petite, et cela simplement au point de vue de la mécanique classique, le conflit entre la force de répulsion et l'attraction qui se font presque équilibre. Nous voyons aisément que, par suite des fluctuations locales de la densité, il y aura des régions où l'attraction l'emportera finalement sur la répulsion, et cela malgré le fait que nous avons supposé que, pour l'univers dans son ensemble, c'est le contraire qui se produit. Ces régions où l'attraction a prévalu retomberont donc sur elles-mêmes, lorsque l'univers entrera dans la période de reprise de l'expansion. Nous obtiendrons un univers formé de régions de condensations qui se séparent les unes des autres. Ces régions de condensations ne seraient-elles pas les nébuleuses elliptiques ou spirales? Nous reviendrons à cette question dans un instant.

Remarquons qu'il pourra encore se faire, quoique d'une façon plus rare, que de larges régions, où la densité ou la vitesse d'expansion diffère quelque peu de la moyenne, hésitent entre l'expan-

sion et la contraction et demeurent en équilibre, alors que l'univers a repris l'expansion. Ces régions ne pourraient-elles pas être identifiées avec les amas de nébuleuses, qui sont constitués de plusieurs centaines de nébuleuses situées à des distances relatives les unes des autres qui sont une douzaine de fois moindres que celles des nébuleuses isolées? Suivant cette interprétation, ces amas sont constitués de nébuleuses qui se sont attardées dans la phase d'équilibre; ils représentent un échantillon de la répartition de la matière, telle qu'elle était réalisée partout, lorsque le rayon de l'espace était une douzaine de fois plus petit qu'il ne l'est actuellement, lorsque l'univers passait par l'équilibre.

Remarque de W. DE SITTER

Cette interprétation donne l'explication d'une coïncidence remarquable, sur laquelle W. DE SITTER a fortement insisté jadis. Calculant le rayon de l'univers dans l'hypothèse qui porte son nom, c'est-à-dire en négligeant la présence de la matière et en introduisant dans les formules la valeur T_H donnée par l'observation de l'expansion, il obtenait un résultat qui ne diffère guère de ce qu'on obtient, dans l'hypothèse toute différente d'un univers d'EINSTEIN, en introduisant dans les formules la valeur observée de la densité de la matière. L'explication de cette coïncidence est, suivant notre interprétation des amas de nébuleuses, que pour une valeur du rayon qui est une douzaine de fois le rayon d'équilibre, le dernier terme de la formule de FRIEDMANN l'emporte largement sur les autres. La constante T qui y figure est donc pratiquement égale à la valeur observée T_H ; mais comme, d'autre part, les amas sont un fragment d'univers d'EINSTEIN, il est légitime d'employer pour eux la relation existant entre la densité et la constante T . Pour $T = T_H$, on trouve, comme nous l'avons vu, que la densité dans les amas doit être 10^{-27} g./cm³, qui est la valeur donnée par l'observation. Cette observation est basée sur les comptes de nébuleuses et sur l'estimation de leur masse indiquée par leur vitesse spectroscopique de rotation.

En plus de cet argument d'ordre quantitatif, l'interprétation proposée rend compte de faits, d'ordre qualitatif, importants. Elle explique pourquoi les amas ne présentent pas de condensations centrales marquées et ont des formes vagues, avec des extensions

irrégulières, toutes choses qu'il serait difficile d'expliquer, s'ils formaient des structures dynamiques contrôlées par des forces dominantes, comme c'est manifestement le cas pour les amas d'étoiles ou les nébuleuses elliptiques et spirales. Elle rend compte aussi d'un fait manifeste qui est l'existence de larges fluctuations de densité dans la répartition des nébuleuses, même en dehors des amas. Il doit y avoir, en effet, si l'univers vient de passer par un état d'équilibre instable, toute une gamme de transition, depuis les amas proprement dits qui sont encore en équilibre, en passant par des régions où l'expansion, sans être arrêtée, a pourtant été retardée, de telle façon que ces régions ont une densité supérieure à la moyenne.

Cette interprétation permet de fixer à un milliard d'années la valeur du rayon au moment de l'équilibre et donc à 10^{10} années lumière la valeur actuelle du rayon. Comme les télescopes américains prospectent l'univers jusqu'à une distance d'un demi-milliard d'années-lumière, on voit que cette région observée constitue déjà un échantillon d'une grandeur nullement négligeable comparé à l'espace entier; il est donc légitime d'espérer que les valeurs du coefficient d'expansion T_H et de la densité, obtenues pour ce domaine restreint, sont représentatives de l'ensemble. La seule indétermination qui subsiste est celle qui est relative au degré d'approximation avec laquelle la situation d'équilibre a été approchée. C'est de cette valeur que dépend l'estimation de la durée de l'expansion. Peut-être sera-t-il possible d'estimer cette valeur par des considérations statistiques sur la fréquence relative des amas, comparés aux nébuleuses isolées.

Vitesse propre des nébuleuses

Il nous faut maintenant revenir à la question de la formation des nébuleuses à partir des régions de condensation.

Nous avons vu que les vitesses propres, ou vitesses relatives, des nuées gazeuses devaient être fort grandes. Lorsque certaines d'entre elles, à cause d'une densité un peu trop grande, forment un noyau de condensation, elles retiendront plus aisément les nuées qui ont à peu près la même vitesse que ce noyau. La vitesse propre de la nébuleuse sera donc déterminée par la vitesse du

noyau de condensation. Les nébuleuses qui se sont formées par un tel mécanisme doivent avoir de grandes vitesses relatives. C'est ce qu'on observe, en effet, dans les amas de nébuleuses. Dans celui qui a pu être le mieux étudié, celui de Virgo, la dispersion des vitesses autour de la vitesse moyenne est de 600 km./sec. Cette vitesse propre a dû être la vitesse propre de toutes les nébuleuses au moment du passage par l'équilibre. Pour les nébuleuses isolées, cette vitesse a été réduite au douzième environ, par suite de l'expansion, par le même mécanisme que nous avons expliqué à propos de la formation des nuées gazeuses.

Formation des étoiles

La densité des nuées est, en moyenne, la densité d'équilibre 10^{-27} g./cm³. Pour cette densité de répartition, une masse telle que celle du soleil occuperait une sphère d'une centaine d'années-lumière de rayon. Ces nuées n'ont aucune tendance à se contracter. Pour qu'une contraction due à la gravitation puisse s'y amorcer, il faut que leur densité soit notablement accrue. C'est ce qui pourra arriver si deux nuées viennent à se rencontrer avec de grandes vitesses. Le choc sera alors un choc mou donnant lieu à de l'ionisation et à une émission de radiation. Les deux nuées s'aplatiront l'une sur l'autre en restant en contact, la densité sera facilement doublée et la condensation sera définitivement amorcée. Il est clair qu'une telle condensation peut donner lieu par des mécanismes connus à un système solaire ou une étoile simple ou multiple. Ce qui caractérise le mécanisme auquel nous sommes amenés, c'est l'énormité des dimensions de la nébuleuse gazeuse dont la condensation formera l'étoile. Cette circonstance rend compte de la grandeur du moment angulaire, lequel se conserve durant la condensation, et dont la valeur ne pourrait être nulle ou négligeable que si les circonstances initiales étaient ajustées d'une façon tout à fait invraisemblable. La moindre rotation initiale doit donner naissance à une rotation énergique du système concentré, rotation incompatible avec la présence d'un corps unique, mais supposant, soit des étoiles multiples tournant l'une autour de l'autre, soit simplement une étoile avec une ou plusieurs grosses planètes tournant dans le même sens.

Distribution des densités dans les nébuleuses

Voici comment nous pouvons nous représenter l'évolution des régions de condensations. Les nuées commencent par tomber vers le centre et à décrire un mouvement d'oscillation suivant un diamètre de part et d'autre de ce centre. Au cours de ces oscillations elles se rencontreront avec des vitesses de plusieurs centaines de km./sec. et donneront lieu à des étoiles. En même temps la perte d'énergie, due à ces chocs mous, modifiera la distribution des nuées et des étoiles déjà produites, de telle façon que le système se condensera davantage. Il semble bien que ce phénomène puisse être soumis à l'analyse mathématique. Il faudra naturellement introduire certaines hypothèses de nature à simplifier le modèle de façon à rendre le calcul possible et aussi de façon à éliminer artificiellement des phénomènes secondaires. Il n'y a guère de doute qu'il n'y ait moyen d'obtenir ainsi la loi de répartition finale des étoiles formées par le mécanisme décrit plus haut. Comme la distribution de l'éclat est connue pour les nébuleuses elliptiques et qu'on peut en déduire la distribution des densités dans la nébuleuse, on voit qu'un tel calcul est susceptible de conduire à une vérification décisive de la théorie.

Les spirales

Une des complications auxquelles je faisais allusion à l'instant est la présence éventuelle d'un moment angulaire notable. En l'excluant, nous avons restreint la théorie aux condensations respectant la symétrie sphérique, c'est-à-dire les nébuleuses sphériques ou légèrement elliptiques. Il est facile de voir quelle modification apportera la présence d'un moment angulaire notable. Il est évident qu'on obtiendra, en outre d'une région centrale analogue aux nébuleuses elliptiques, un système plat analogue à l'anneau de Saturne ou aux systèmes planétaires; en d'autres termes quelque chose de semblable aux nébuleuses spirales. Dans cette théorie, le type spiral ou elliptique de la nébuleuse est une question de chance; il dépend de la valeur fortuite du moment angulaire dans la région de condensation. Il ne peut plus y être question d'une évolution d'un type en un autre. Il en est d'ailleurs de même pour les étoiles où le type de l'étoile est fixé par la valeur

accidentelle de sa masse, c'est-à-dire de la somme des masses des deux nuées dont la rencontre a produit l'étoile.

Distribution des étoiles super-géantes

Si les spirales ont cette origine, il doit en résulter que les étoiles se sont formées par rencontre de nuées en deux processus bien distincts. Tout d'abord, et surtout dans la région centrale, les nuées se rencontreront dans leur mouvement radial; c'est le phénomène que nous avons invoqué pour les nébuleuses elliptiques. Le mouvement préférentiel de KAPTEYN en est sans doute une indication. Mais en outre de ce processus relativement rapide, il doit y avoir un processus plus lent de formation d'étoiles, à partir des nuées qui ont échappé à la région centrale par suite de leur moment angulaire. Celles-ci se rencontreront dans un mouvement de va-et-vient de part et d'autre du plan de la spirale. L'existence de ces deux processus d'âges différents est peut-être l'explication du fait qu'on ne rencontre pas d'étoiles super-géantes dans les nébuleuses elliptiques et dans le noyau des spirales, mais qu'on ne les observe que dans la région extérieure des spirales. On sait en effet que les étoiles rayonnent de l'énergie provenant de la transformation de leur hydrogène en hélium. Les étoiles super-géantes rayonnent tant d'énergie qu'elles ne peuvent maintenir ce débit que pendant une centaine de millions d'années. On comprendrait ainsi que pour les étoiles les plus anciennes, les super-géantes se soient éteintes faute de combustible, tandis qu'elles luisent encore là où elles se sont formées récemment.

L'uniformité de l'abondance des éléments

Mais sans doute vaut-il mieux ne pas nous laisser entraîner prématurément à essayer de suivre la théorie dans de tels détails, et de nous borner pour l'instant aux conséquences les plus générales de l'hypothèse de l'atome primitif. Nous avons vu que la théorie rend compte de la formation des étoiles dans les nébuleuses. Elle explique aussi une circonstance fort remarquable qui a pu être mise en évidence par l'analyse des spectres des étoiles. Il s'agit de la composition quantitative de la matière, ou de l'abondance relative des divers éléments chimiques, qui est la même

dans le soleil, dans les étoiles, sur la terre et dans les météorites. Ce fait est une conséquence nécessaire de l'hypothèse de l'atome primitif. Des produits de désintégration d'un atome se trouvent naturellement dans des proportions bien définies, par les lois des transformations radio-actives.

Les rayons cosmiques

Enfin, nous avons dit en débutant que les radiations produites pendant les désintégrations, durant la première période de l'expansion, pouvaient rendre compte des rayons cosmiques. Ces rayons sont doués d'une énergie de plusieurs milliards d'électrons-volts; nous ne connaissons aucun phénomène se réalisant actuellement qui soit capable de tels effets. Ce à quoi ces rayons ressemblent le plus, ce sont les rayons produits lors des désintégrations radio-actives actuelles, mais les énergies individuelles mises en jeu sont énormément plus grandes. Tout cela convient à des rayons d'origine super-radio-active. Mais ce n'est pas seulement par leur qualité que se distinguent ces rayons, c'est aussi par leur quantité totale. En effet, il est facile, à partir de leur intensité observée, qui est donnée en ergs par cm., de déduire leur densité d'énergie en divisant par c , puis leur densité en g. par cm³ en divisant encore par c^2 . On trouve ainsi 10^{-33} g./cm³ soit le millième environ de la densité actuelle de la matière existant sous forme d'étoile. Il semble impossible d'expliquer une telle énergie, qui représente un pour mille de toute l'énergie existante, si ces rayons n'ont pas été produits par un processus qui a mis en jeu toute la matière existante. En fait cette énergie a dû, au moment de sa formation, être plus grande encore, puisqu'une partie a pu être absorbée et que le reste a été réduit par suite de l'expansion de l'espace. On voit ainsi que l'intensité totale observée pour les rayons cosmiques est bien ce à quoi il faut s'attendre.

Conclusion

L'objet d'une théorie cosmologique est de rechercher des conditions initiales idéalement simples, d'où a pu résulter par le jeu des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité.

Je pense vous avoir montré que l'hypothèse de l'atome primitif satisfait aux règles du jeu. Elle ne fait appel à aucune force qui ne soit connue par ailleurs, et elle rend compte de toute la complexité du monde actuel en expliquant par une seule hypothèse l'existence des étoiles et leur arrangement en galaxies, l'expansion de l'univers et l'exception locale à cette expansion présentée par les amas de nébuleuses, et enfin le grandiose phénomène des rayons ultra-pénétrants, véritablement « cosmiques » puisqu'ils sont les témoins de l'activité primitive du Cosmos et nous ont conservé, en se propageant pendant des milliards d'années dans l'espace admirablement vide, le souvenir de l'âge super-radio-actif; comme les fossiles nous témoignent des âges géologiques, ces rayons fossiles nous racontent ce qui s'est passé avant que les étoiles n'aient commencé à se former.

Je ne prétendrai certes pas que cette hypothèse de l'atome primitif soit dès à présent prouvée et je serais déjà fort heureux si elle ne vous apparaissait ni absurde ni invraisemblable. Lorsque les conséquences qui en résultent, spécialement en ce qui concerne la loi de répartition des densités dans les nébuleuses, auront pu être calculées avec assez de détails, il sera sans doute possible de se prononcer définitivement pour ou contre.