unteren zwei Dritteln der Fläche breit eingedrückt, glänzend und etwas verworren punktiert, gegen den dritten Zwischenraum steil ansteigend, die Punkte der Reihen im allgemeinen kleiner, die anliegenden Schüppchen mehr gelbrot und etwas dichter gestellt.

Das Weibchen ist über dem Epistomalrand kreisförmig eingedrückt, der Eindruck im unteren Teil glänzend, poliert und unpunktiert.

Typen im Naturhistorischen Museum Luxemburg und in meiner Sammlung.

Fundort: Kati, 1913.

Sur la structure et l'évolution de l'univers.

par *A. Gloden.*

Nous donnons dans ce qui suit un aperçu sur quelques importantes théories modernes concernant la structure géométrique et l'évolution de l'univers. Il s'agit de la théorie d'*Einstein* qui a vu le jour en 1917, de celle de *de Sitter* qui fut proposée peu après la même année, et de celle de *Lemaître* qui fut publiée en 1927. Nous exposerons d'abord les faits, puis nous verrons dans quelle mesure les théories s'accordent avec ceux-ci.

Pendant de longs siècles le problème de la structure de l'univers revêtait un caractère philosophique. Il en était nécessairement ainsi avant l'invention de ces puissants moyens d'investigation du ciel que constituent les lunettes et les télescopes. Dès que ces instruments furent utilisés en astronomie, le problème entra dans la phase scientifique.

Nous devons les résultats acquis aujourd'hui sur ce sujet principalement à l'astronome anglais W. Herschel et à l'astronome russe Struve. Ils ont fait des recherches statistiques sur les étoiles et mis en relief le rôle de la Voie lactée dans la constitution de l'univers.

La Voie lactée et la distribution des étoiles.

La Voie lactée forme un ruban nébuleux sur la voûte céleste. Elle semble s'arrêter des deux côtés à l'horizon, mais en réalité elle se prolonge dans l'hémisphère austral et forme tout autour de la voûte céleste une ceinture circulaire.

Si l'on dessine sur un globe les limites de la Voie lactée et qu'on y porte la position des 6000 étoiles visibles à l'œil nu, il y en a 1200, c'est-à-dire, un cinquième du nombre total, qui tombent à son intérieur; c'est surprenant. Si l'on porte sur le

globe toutes les étoiles de la 1re grandeur stellaire jusqu'à la 9e inclusivement, le nombre des étoiles à l'intérieur de la Voie lactée devient énorme. Bien plus, si, au lieu de tracer d'abord les limites de la Voie lactée, on porte sur un globe toutes les étoiles jusqu'à la 9e grandeur, leur distribution montre parfaitement non seulement l'aspect général de la Voie lactée, mais encore ses ramifications et ses variations d'éclat.

L'Univers Galactique: ses dimensions.

Il en résulte que la Voie lactée est liée d'une façon intime à la constitution de l'Univers. On considère toutes les étoiles qui semblent rassemblées dans la Voie lactée comme formant un système; on l'appelle univers galactique ou Galaxie. Le soleil en fait partie. Herschel avait d'abord admis que l'univers galactique avait la forme d'un disque plat, mais aujourd'hui on considère plutôt cette forme comme étant celle d'une lentille ou d'un ellipsoïde de révolution aplati.

On a déterminé aussi les dimensions de cet univers en déterminant la distance des objets les plus lointains qu'on considère comme en faisant partie.

On a trouvé pour le diamètre: 300.000 années-lumière;
pour l'épaisseur: 4.000 années-lumière.

Rappelons qu'en astronomie on emploie principalement les unités de longueur suivantes:

1. La *distance de la terre au soleil* = 150.000.000 km (distance moyenne).

2. L'*année-lumière,* c'est-à-dire l'espace franchi par la lumière à la vitesse de 300.000 km/s en une année; une année-lumière vaut: 300.000×86.400×365 km, ce qui représente plus de 63 000 fois la distance de la terre au soleil. L'étoile la plus voisine de la terre est Proxima Centauri; la lumière met environ 3 ans et 8 mois pour nous en parvenir, et elle parcourt un espace d'à peu près 35 000 milliards de km.

3. Le parsec (mot formé par la réunion des mots parallaxe et seconde, abrégés), l'unité astronomique la plus récente; c'est la distance à laquelle il faut se placer dans le plan médiateur du segment formé par les centres de la terre et du soleil pour voir ce segment sous un angle d'une seconde. Un parsec vaut 3,2 années-lumière.

Avec cette nouvelle unité, les dimensions de la Galaxie s'expriment par les nombres suivants:

diamètre: 92.000 parsecs;
épaisseur: 1.200 parsecs.

L'univers galactique comprend un nombre d'étoiles entre 1 et 2 milliards. Mais, à côté des étoiles, il existe d'autres objets

célestes non moins importants. Ce sont les nébuleuses qui, comme l'indique leur nom, sont des taches blanchâtres occupant dans le ciel parfois des étendues énormes. Certaines de ces nébuleuses se «résolvent», si on les examine au télescope, en une multitude d'étoiles, très voisines les unes des autres; ce sont des amas d'étoiles. D'autres sont irrésolubles en étoiles, même dans les instruments les plus puissants. Ce sont les nébuleuses proprement dites. L'univers galactique se compose donc d'étoiles, d'amas d'étoiles et de nébuleuses.

Les univers-îles.

Quand on a réussi à déterminer la distance des nébuleuses, on a constaté qu'un certain nombre, en raison de leur distance énorme, ne pouvaient être considérées comme appartenant à l'univers galactique. La plus proche de celui-ci, mais qui n'est plus considérée comme en faisant partie, est à une distance de 310.000 parsecs, et on en a découvert qui sont à une distance de 36.300.000 parsecs; c'est le cas de l'Amas de Leo.

Ces nébuleuses sont appelées extragalactiques. Elles ont presque toutes la forme spirale et on en connaît près d'un million. Elles semblent fuir la Galaxie et avoir une tendance à se grouper vers ses pôles.

Elles sont, en somme, des univers ayant une individualité comme notre univers galactique. Elles ont la même composition générale que le nôtre; par exemple, dans la nébuleuse du Triangle on découvre des étoiles, des amas d'étoiles et des nébulosités de plus faible étendue.

Ces univers, distincts de l'univers galactique, sont appelés univers insulaires ou univers-îles. L'univers tout entier est formé de l'ensemble de ces univers-îles parmi lesquels il faut ranger aussi notre univers stellaire.

Mais, si l'on peut faire une séparation entre ces univers de second ordre au point de vue géométrique, il faut tout de même considérer qu'ils ne sont pas des mondes fermés l'un par rapport à l'autre. Des échanges d'énergie rayonnante peuvent avoir lieu, et les phénomènes physiques se déroulent dans chacun d'eux dans le même espace-temps.

Récession des nébuleuses spirales.

Une découverte importante avait été faite dès 1919. Les nébuleuses très éloignées paraissaient en général douées de vitesses radiales d'éloignement, et cette vitesse semblait augmenter avec la distance.

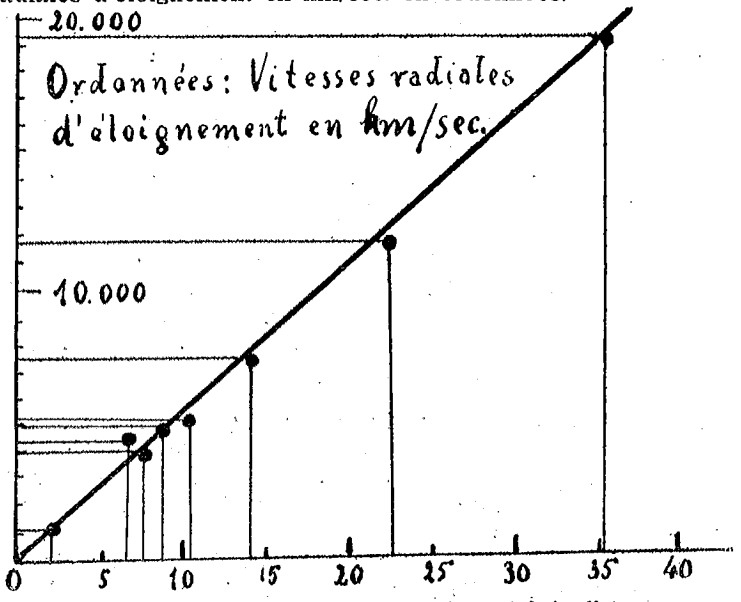
On appelle vitesse radiale une vitesse dans la direction du soleil. Une vitesse radiale peut être une vitesse d'approche ou une vitesse d'éloignement.

On connaissait, en 1925, la vitesse radiale de plus de 40 nébuleuses. On trouvera, sur le tableau ci-après, les données numériques concernant la distance et la vitesse radiale d'éloignement de quelques nébuleuses extragalactiques.

		Distance	Vitesse radiale (d'éloignement)
1.	Amas de la Vierge	$1{,}8 \cdot 10^6$ ps	890 km/s
2.	„ de Pisces . .	$6{,}9 \cdot 10^6$	4630
3.	„ de Pégase. .	$7{,}2 \cdot 10^6$	3810
4.	„ du Cancer . .	$9{,}1 \cdot 10^6$	4820
5.	„ de Persous . .	$10{,}9 \cdot 10^6$	5230
6.	„ de Coma . .	$14{,}4 \cdot 10^6$	7500
7.	„ d'Ursa major .	$22{,}9 \cdot 10^6$	11800
8.	„ de Leo . . .	$36{,}3 \cdot 10^6$	19600

L'abréviation ps signifie parsec; par exemple, l'Amas de la Vierge est à une distance de 1,8 millions de parsecs.

Nous avons représenté graphiquement ces résultats, en portant, dans un système d'axe de coordonnées rectangulaires, les distances en millions de parsecs en abscisses, et les vitesses radiales d'éloignement en km/sec. en ordonnées.



Recession des spirales proportionnellement à la distance.
Abscisses: Distances en millions de parsecs.

Le tableau et le graphique montrent clairement un accroissement de la vitesse radiale d'éloignement avec la distance. Entre ces deux quantités il existe une relation linéaire, et on peut énoncer la loi suivante:

La vitesse radiale d'éloignement des nébuleuses est proportionnelle à la distance.

C'est la loi de Hubble et Humason.

On a calculé le taux d'accroissement de la vitesse: 560 km/sec. pour une augmentation de distance d'un million de parsecs. Si l'on compare la vitesse radiale de l'Amas de la Vierge par exemple avec celle de la terre dans son mouvement autour du soleil (30 km/sec.), on constate que celle de la nébuleuse considérée est à peu près 30 fois plus grande.

Sur le graphique, les points représentatifs sont très voisins d'une droite déterminée par deux d'entre eux, ce qui met bien en évidence la relation linéaire entre la vitesse et la distance.

Explication de la récession des spirales par l'effet Doppler-Fizeau et *détermination des vitesses radiales.*

La distance des nébuleuses n'a pas été déterminée directement, mais par une méthode photométrique qui ne sera pas décrite ici.

Quant à la vitesse radiale des nébuleuses, elle a pu être déterminée par la comparaison de leur spectre avec celui donné par une source terrestre (un tube à hélium). Pour expliquer cette détermination, nous rappelerons brièvement quelques faits spectroscopiques.

On sait que, si l'on fait tomber la lumière du soleil sur un prisme, on obtient à la sortie les 7 couleurs de l'arc-en-ciel formant ce qu'on appelle un spectre continu. Mais, si la fente est très fine et l'appareil très dispersif, on remarque que ce spectre, en apparence continu, est sillonné de raies noires, appelées raies d'absorption. Fraunhofer a désigné ces raies par les lettres A, B..., la raie désignée par A se trouvant la première du côté du rouge. Deux raies sont particulièrement remarquables et faciles à repérer parce qu'elles sont très voisines l'une de l'autre; ce sont les raies H et K qui se retrouvent dans le spectre du calcium ionisé (Ca^+).

Si l'on compare le spectre d'une nébuleuse avec celui d'une source de lumière terrestre donnant aussi les raies H et K, on constate dans beaucoup de cas un déplacement de ces raies vers le rouge. Ce déplacement des raies spectrales vers le rouge peut s'expliquer par le phénomène Doppler-Fizeau.

Voici d'abord un exemple tiré de l'acoustique où ce phénomène entre en jeu. Si un train s'approche d'un observateur im-

mobile, le sifflet de la locomotive semble émettre un son plus aigu; s'il s'éloigne, le son émis semble plus grave à l'observateur. La hauteur du son est déterminée par sa fréquence; si la source sonore s'approche de l'observateur, la fréquence N augmente, si, au contraire, elle s'éloigne, la fréquence diminue. Comme la longueur d'ordre est liée à la fréquence (et à la vitesse du son) par la formule

$$\lambda = \frac{V}{N},$$

les variations se font en sens inverse pour la longueur d'onde. Si donc la source sonore s'approche, la longueur d'onde diminue; si elle s'éloigne, la longueur d'onde augmente. Et les réciproques sont vraies: Par exemple, si la longueur d'onde diminue, on en peut conclure que la source s'approche.

Ce qui a été dit au sujet de l'effet Doppler-Fizeau pour un phénomène sonore, s'applique à un phénomène lumineux. Ce sont seulement les valeurs des grandeurs, λ, V, et N, qui changent.

Si le déplacement spectral se fait vers le rouge, c'est-à-dire, vers les grandes longueurs d'onde, on peut dire que la source de lumière s'éloigne de l'observateur.

On peut calculer la vitesse d'éloignement par la formule de Doppler, appliquée au cas où l'observateur est immobile, la source s'éloignant:

$$\lambda' = \lambda \cdot \frac{c + v}{c}$$

désigne la vitesse de la lumière = 300.000 km/sec., λ et λ' sont les longueurs d'onde d'une raie déterminée du spectre de comparaison et de la raie correspondante du spectre de la nébuleuse. v représente la vitesse d'éloignement.

Considérons la loi de Hubble et Humason comme exacte (voir plus loin page 8), et voyons comment elle a amené les astronomes à modifier les théories sur la structure et l'évolution de l'univers en faveur jusqu'à cette date.

A. Théorie d'Einstein.

Einstein a appliqué sa théorie de la relativité à l'univers. Il a introduit deux constantes, l'une k' se rattachant à la constante newtonienne de la gravitation par la formule

$$k' = \frac{8\pi k}{c^2},$$

l'autre λ, appelée constante cosmogonique, restant indéterminée. Einstein suppose ensuite, contrairement à ce qui était ad-

mis jusqu'alors, que l'espace est sphérique et que seulement le temps est infini, ceci conformément à la conception antérieure. Il suppose de plus que le rayon de l'univers est constant, et en même temps il fait d'autres hypothèses sur la matière et l'énergie rayonnante de l'univers. Il établit finalement la liaison suivante entre la constante cosmogonique λ et la densité moyenne de la matière, ρ :

$$\lambda = \frac{k'\rho}{2}$$

et, comme il trouve par ailleurs.

$$\lambda = \frac{1}{R^2},$$ R étant le rayon de l'univers,

il établit la formule que voici permettant de calculer le rayon de l'univers R, connaissant la densité moyenne ρ :

$$R^2 = \frac{2}{k'\rho} (1)$$

Si nous partons de la définition de $\rho = \frac{M}{V}$ (M, masse totale, V volume total) et si nous introduisons la valeur de $V = 2\pi^2 R^3$ (ce n'est pas celle de la géométrie habituelle), il vient

$$R^2 = \frac{2\ V}{k'M} = \frac{2 \cdot 2\pi^2\ R^3}{k'M} = \frac{4\pi^2\ R^3}{k'M} \text{ ou}$$

$$R = \frac{k'M}{4\ \pi^2} (2)$$

Cette formule exprime R en fonction de la masse totale de l'univers, k' étant une constante connue.

Dans la théorie d'Einstein, admettant que l'univers, sphérique, est à rayon constant, on ne peut expliquer la récession des spirales. Dans le cas de l'univers d'Einstein, les vitesses d'éloignement des nébuleuses devraient être compensées par des vitesses d'approche, ce qui n'est pas le cas.

B. Théorie de de Sitter.

De Sitter, partant aussi des équations qu'Einstein avait obtenues en appliquant la théorie de la relativité à l'univers, en a tiré une autre solution cosmogonique. Il trouve un espace sphérique dont le rayon augmente avec le temps, mais moyennant une hypothèse qui prive de tout intérêt sa conclusion; cette hypothèse consiste à supposer que $\rho = o$, c'est-à-dire, que l'univers est vide de matière, ce qui est manifestement en désaccord avec la réalité.

C. *Théorie de Lemaître.*

Lemaître a repris les équations d'Einstein, et tout en conservant une partie de ses hypothèses, a montré qu'elles admettent encore une solution en supposant que le rayon R est une fonction du temps. Il suppose de plus que la relation d'Einstein

$$\lambda = \frac{k' \rho}{2} \quad \text{(voir page 23)}$$

reste vérifiée et il trouve comme résultat R exprimé en fonction du temps. Il démontre mathématiquement que l'univers d'Einstein (à rayon constant) est instable.

Objections à la théorie de Lemaître.

Si la théorie de Lemaître a fait abandonner celle d'Einstein dans sa forme primitive et aussi celle de de Sitter, comme étant seule compatible avec la récession des nébuleuses spirales, elle n'est pourtant pas entièrement satisfaisante. Elle donne lieu notamment aux deux objections que voici:

1) Elle explique aussi bien une contraction qu'une dilatation de l'univers. On en peut inférer seulement que, si à l'origine l'univers se dilatait, il se dilate toujours, et que, si au commencement il se contractait, il se contracte toujours.

A cette objection on peut répondre qu'à l'origine les conditions physiques étaient telles qu'elles déterminaient une dilatation. Mais alors, quelles étaient ces conditions? Ce point n'est pas encore élucidé.

2) Une deuxième objection semble aussi avoir du poids. Une des conclusions, auxquelles arrive Lemaître, est que la masse totale au repos de l'univers est constante et qu'il n'y a pas de transformation de matière en rayonnement.

Ceci ne paraît pas être en accord avec les faits. Par exemple, si des positrons traversent une couche de matière d'une épaisseur suffisante, leur passage s'accompagne d'un rayonnement très intense, 50 fois plus intense que dans le cas des électrons négatifs. Certains physiciens, dont J. Thibaud, admettent que ce rayonnement est dû à la dématérialisation du positron avec libération de l'énergie totale

$$W = m_0 \times c^2,$$

m_0 étant la masse au repos du positron et c la vitesse de la lumière.

Objections contre la loi de Hubble.

a) Nous avons, dans ce qui précède, considéré la loi de Hubble comme interprétant un fait réel absolument garanti. Elle

n'est pourtant établie qu'en se basant sur des déterminations de distances où l'erreur est très grande. Certains critiques prétendent qu'une loi obtenue avec des données tellement peu certaines n'a pas de valeur, et ils n'admettent pas comme un fait la récession systématique des nébuleuses spirales.

b) Si la loi de Hubble était exacte, il arriverait une distance à laquelle la vitesse des nébuleuses atteindrait celle de la lumière. On peut calculer que cette distance correspond à environ 540 millions de parsecs. Pour une distance plus grande, la vitesse serait supérieure à celle de la lumière qui, d'après la théorie de la relativité, constitue une vitesse limite.

c) La vitesse de translation des étoiles est généralement de 15—40 km/sec. Comment expliquer le grand écart entre les vitesses des étoiles et celles des nébuleuses?

Si la première objection semble fondée, on peut dire, quant à la deuxième, que la loi de Hubble peut bien cesser de se vérifier après une certaine distance, et que, si l'on suppose qu'elle reste valable pour toutes les distances, que les limites de l'univers sont telles que l'hypothèse d'Einstein au sujet de la vitesse de la lumière n'est pas mise en défaut. Pour ce qui est de la troisième objection, on peut pourtant comprendre pourquoi une nébuleuse à plus grande distance a une vitesse d'éloignement plus grande; celles qui étaient animées de plus grandes vitesses à l'origine, sont aussi arrivées à des distances plus grandes.

Objections contre l'interprétation exclusive de la récession des nébuleuses spirales par l'effet Doppler-Fizeau.

Le décalage des raies spectrales vers le rouge peut s'expliquer par l'effet Doppler-Fizeau. Mais il y a d'autres causes que les vitesses radiales relatives qui peuvent produire le déplacement vers le rouge des raies spectrales des nébuleuses. Nous n'en mentionnerons que celle qu'on pourrait appeler le «vieillissement» des photons (grains de lumière). *)

Voici en quoi il consiste: Le rayonnement, franchissant des distances énormes, subit une diminution d'énergie par effet Compton. Si un photon rencontre un électron libre ou faiblement lié, il lui communique une partie de son énergie et continue son chemin dans une autre direction avec une énergie moindre. Si $h \times N$ représente l'énergie du photon incident, h étant la constante de Planck et N la fréquence, celle du photon «diffusé» s'exprime par le produit $h \times N'$, N' étant infé-

*) Voir à ce sujet, une intéressante note de Fid. Dutry, Bulletin de la Société Belge d'Astronomie, mars 1936, p. 68—70.

rieur à N. Comme les longueurs d'onde varient en sens inverse des fréquences, au photon qui nous atteint après le choc avec un électron correspondra une longueur d'onde plus grande. Cet effet doit donc donner, comme l'effet Doppler, un déplacement des raies spectrales vers le rouge.

On peut faire remarquer que la probabilité d'une rencontre d'un photon avec un électron est très petite, vu la dissémination de la matière dans l'espace et l'existence des espaces intératomiques. A mi-chemin de la nébuleuse extragalactique la plus proche, les astrophysiciens admettent qu'il existe encore un électron par dm^3. En outre, cette manière de voir n'a pas donné jusqu'ici de vérifications numériques.

Conclusion.

Il me semble qu'on doit retenir comme un fait la récession des nébuleuses spirales en même temps que la loi de Hubble. La théorie d'Einstein est à rejeter comme n'expliquant pas que la vitesse radiale d'éloignement des spirales est proportionnelle à la distance. Celle de de Sitter donne bien un univers sphérique dont le rayon augmenterait avec le temps, seulement cet univers serait vide de matière. La théorie d'Einstein aussi bien que celle de de Sitter sont à rejeter. Lemaître a eu le mérite de démontrer que l'univers d'Einstein est instable, mais la théorie est encore susceptible d'être perfectionnée, toutes les difficultés n'ayant pas été résolues.

Valeurs numériques du rayon de l'univers.

Pour terminer, nous indiquerons les valeurs numériques qu'assignent aux rayons de l'univers la théorie d'Einstein et celle de Lemaître. Ces valeurs ne sont pas connues avec une grande précision, en raison de la valeur peu approchée qu'on trouve pour ρ, densité moyenne de la matière.

D'après la formule (1) d'Einstein (page 6), le rayon de l'univers est compris entre 200 millions et 10.000 millions de parsecs, c'est-à-dire, le diamètre entre 400.000.000 ps et 20.000.000.000 ps. Le diamètre de l'univers serait donc compris entre 4.350 et 217.400 fois le diamètre de la Galaxie.

Lemaître trouve pour le rayon initial: $300 \cdot 10^6$ parsecs;
. . . . . rayon actuel: $1000 \cdot 10^6$ parsecs.

Les valeurs données par les 2 théories diffèrent, comme on le voit, d'une manière considérable.