Séminaire Janet.
Mécanique analytique
et mécanique céleste

Evry Schatzman

Quelques questions relatives à la dynamique des amas de galaxies

Séminaire Janet. Mécanique analytique et mécanique céleste, tome 4 (1960-1961), exp. n° 5, p. 1-8
<http://www.numdam.org/item?id=SJ_1960-1961__4__A5_0>

25 février 1961

QUELQUES QUESTIONS RELATIVES À LA DYNAMIQUE DES AMAS DE GALAXIES

par Evry SCHATZMAN

1. Présentation.

On rappelle tout d'abord la classification des galaxies, en elliptiques, spirales, galaxies de type S0, et irrégulières.

Il existe naturellement des problèmes dynamiques propres aux galaxies (problème des bras spiraux). Cependant, pour l'essentiel, et à des exceptions près, que nous examinerons tout à l'heure, les galaxies sont des figures en rotation.

Au moyen du spectrographe, on peut mesurer les vitesses radiales, et trouver ainsi (au moins en principe) le champ de vitesse dans une galaxie. Si le plan de la galaxie est incliné sur le plan tangent à la sphère céleste $(i \neq 0)$, on observe des vitesses + et - par rapport à la vitesse moyenne, indication d'une rotation.

La détermination de la masse d'une galaxie peut être menée à bien, à condition de tenir compte du mieux possible de la répartition de matière dans la galaxie. Cette opération n'a pu être faite que pour un petit nombre d'objets.

On trouvera ici une récapitulation des valeurs obtenues par ce procédé :

.../...

Galaxie	Type	V_R	distance (parsecs)	$\left(\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{M}_\odot}\right)$	$\left(\frac{L}{L_\odot}\right)$	$\frac{(\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot)}{(L/L_\odot)}$
NGC 2903	S	640	6×10^6 ou $7,9 \times 10^6$	$3,7 \times 10^{10}$ $4,9 \times 10^{10}$		5,5 4,2
NGC 7479	SB	2421	$35,2 \times 10^6$	$2,22 \times 10^{10}$		
NGC 3504	SB	1539	$19,8 \times 10^6$	9×10^9		0,7 (1)
NGC 1097	SB	1307	$16,1 \times 10^6$	$0,5$ à $1,3 \times 10^{10}$		(2)
NGC 1365	SB	1658	$20,1 \times 10^6$	$2,2$ à $3,4 \times 10^{10}$		
NGC 5055	Sb	560	$10,3 \times 10^6$	$7,6 \times 10^{10}$		2
NGC 3556	Sc	735	$10,3 \times 10^6$	$1,1$ à $1,7 \times 10^{10}$		1,1 à 1,6
LMC	SB ?		$6,9 \times 10^4$	$3,8 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9$	2,0
SMC				$1,6 \times 10^9$	$8,6 \times 10^8$	1,9
M 31	Sb		$8,3 \times 10^5$	$3,2 \times 10^{11}$	2×10^{10}	16
M 33	Sc		8×10^5	$6,9 \times 10^9$	$2,3 \times 10^9$	3
M 81	Sb		$2,6 \times 10^6$	$1,4 \times 10^{11}$	$8,6 \times 10^9$	16
NGC 3115	E 7	423	$5,6 \times 10^6$			27

(1) $\mathfrak{M}$ comprend seulement la masse de la barre, L la luminosité de toute la galaxie
(2) masses des noyaux seulement

On donne en même temps les valeurs du rapport $(\mathfrak{M}/L)$ qui permettent, en l'absence de connaissance de $\mathfrak{M}$, de tirer $\mathfrak{M}$ du rapport $(\mathfrak{M}/L)$, L étant connu.

2. Galaxies doubles.

Une détermination de la masse des galaxies dans les galaxies doubles est une méthode très attrayante, car elle doit donner la masse totale des galaxies.

Cependant, en l'absence évidente d'une connaissance de l'orbite, on doit recourir à des méthodes statistiques. Cette méthode a été employée par HOLMBERG (1950) et par PAGE (1952). On suppose l'orbite circulaire, et on fait l'ypothèse de l'isotropie de la loi de distribution des inclinaisons des orbites, et, sur l'orbite, de la position des 2 galaxies.

LIMBER (1960) a rassemblé les données relatives au rapport $(\mathfrak{M}/L)$ dans les galaxies doubles. De toutes façons, les données cinématiques et géométriques donnent une limite inférieure de $\mathfrak{M}$, donc une limite inférieure de $\mathfrak{M}/L$. Certaines galaxies semblent donc avoir un quotient $(\mathfrak{M}/L)$ élevé. De toutes façons, il semble bien que $(\mathfrak{M}/L)$ est plus grand pour les elliptiques que pour les spirales.

L'explication des valeurs élevées de $(\mathfrak{M}/L)$ peut être dans la dynamique des amas de galaxies.

3. Galaxies multiples.

Il existe un certain nombre d'objets multiples remarquables.

AMBARZOUMIAN a attiré l'attention sur ces objets multiples, qui probablement ne sont pas des systèmes stables. Si les mouvements ne sont pas quasi périodiques, le système doit évoluer, l'état final étant la formation d'un système double, les autres objets partant à l'infini, ou se réunissant au système double.

De plus, certains systèmes multiples peuvent être d'énergie positive (hypothèse d'Ambarzoumian).

Si l'on considère un système de 3 galaxies a, b, c, AMBARZOUMIAN considère les rapports de distance

$$\frac{ab}{ac}, \quad \frac{ab}{bc} \quad \text{et} \quad \frac{ac}{bc} \quad .$$

Si ces rapports sont du même ordre de grandeur, le système est du type Trapèze (du nom du Trapèze d'Orion).

Si on ne peut trouver 3 rapports de distances du même ordre de grandeur, on dit qu'il s'agit d'un système de type usuel. Si le plus grand des rapports est compris entre 2,5 et 3, on dit que le système est de type intermédiaire.

Sur 132 galaxies multiples étudiées par HOLMBERG, 87 appartiennent au système trapèze, 18 sont intermédiaires, 27 sont du type usuel.

La recherche systématique des systèmes multiples remarquables a été rendue possible grâce à l'atlas de Palomar.

On peut citer le sextet de Seyfert, le quintet de Stefan, ainsi que le quintet PA 649 décrit par VORONTZOV-VELYAMINOV.

AMBARZOUMIAN a étudié dans les systèmes d'étoiles multiples des chaînes d'étoiles. Les BURBIDGE ont photographié une chaîne de 5 galaxies, PA 714, identifiée par VORONTZOV-VELYAMINOV. Ce dernier système est sans doute à 250×10^6 parsecs environ.

Les systèmes chaîne sont particulièrement instables. Un système de cette nature ne peut exister sous cet aspect que pendant un temps de l'ordre de la période du mouvement orbital,

$$t \simeq 2\pi \cdot \frac{6 \times 10^4 \times 3{,}09 \times 10^{18}}{5 \times 10^7 \times 3{,}15 \times 10^7} \simeq 10^9 \text{ ans}$$

4. Théorème du viriel.

Le théorème du viriel a été démontré par POINCARÉ. On trouve :

$$\frac{1}{2}\frac{d^2 I}{dt^2} = \underbrace{2\mathcal{T} + \Phi}_{\text{viriel}} \qquad \Phi = -G\sum \frac{m_i\, m_j}{r_{ij}}$$

$$I = \sum m_j\, r_j^2 \qquad \text{(moment d'inertie)} \quad .$$

Si le système est stationnaire (statistiquement)

$$2\mathcal{T} = -\Phi \quad .$$

Ce résultat est notamment vérifié pour une étoile double à mouvement circulaire.

Application aux galaxies multiples.

$$\mathcal{T} + \Phi = + \frac{\Phi}{2} < 0 \quad \text{pour un système stationnaire.}$$

Un système typiquement non stationnaire est un système d'énergie positive.

AMBARZOUMIAN constate que les masses des galaxies des systèmes multiples, calculées dans l'hypothèse de la stationnarité, sont systématiquement plus grandes par un facteur 3 que celles calculées pour les galaxies doubles. Si $\mathfrak{M}$, $\mathcal{T}$, Φ sont les masses, énergie cinétique et énergie potentielle calculées dans l'hypothèse de la stationnarité, on trouve qu'en changeant $\mathfrak{M}$ en $\lambda\mathfrak{M}$, l'énergie totale est changée en

$$\mathcal{T}' + \Phi' = \Phi\lambda(\lambda - \frac{1}{2}) \quad .$$

On trouve une énergie positive dès que $\lambda < \frac{1}{2}$. Avec la valeur $\lambda \simeq \frac{1}{3}$ indiquée par AMBARZOUMIAN, on aurait donc, dans la majorité des cas, des systèmes d'énergie positive.

Le cas du quintet de Stefan mérite une attention particulière, en raison des renseignements nombreux que l'on a sur lui.

Etudié par les BURBIDGE (1959), le quintet de Stefan a fait l'objet d'une nouvelle étude par LIMBER et MATHEWS (1960).

Les BURBIDGE l'ont trouvé d'énergie positive ; LIMBER et MATHEWS mettent en doute ce résultat.

L'essentiel de la discussion porte sur les points suivants :

a. Masse. - On a les résultats suivants :

NGC	Type	V_R	hypothèse sur $\mathfrak{M}/L$ variante 1	hypothèse sur $\mathfrak{M}/L$ variante 2	$\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$	$V_R - V_G$	variante 3 $\mathfrak{M}/2$	variante 3 $\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$	V
7317	E4	7014	60	100	1×10^{12}	+ 175	20	3×10^{11}	249
7318 a	E2	6916	60	100	$1,7 \times 10^{12}$	+ 77	20	5×10^{11}	151
7318 b	SBb	5916	20	20	$0,5 \times 10^{12}$	- 923	20	5×10^{11}	-849
7319	SBb	6935	20	20	$1,5 \times 10^{12}$	+ 96	20	$1,5 \times 10^{11}$	170
7320	Sc	-	5	5	$1,4 \times 10^{12}$	-	5	$0,4 \times 10^{12}$	

On voit que les masses sont anormalement élevées. Même si l'on prend des $\mathfrak{M}/L$ plus faibles, les masses restent très grandes.

b. Statistique des facteurs de projection :

- pour l'énergie cinétique

$$\langle 2\mathcal{T} \rangle = \langle 3 | \Sigma \, \mathfrak{M}_i \, v_{ri}{}^2 | \rangle \qquad v_{ri} \text{ : vitesse radiale}$$

- pour l'énergie potentielle,

$$-\langle \Phi \rangle = \frac{2}{\pi} \sum_{\text{paires}} G \frac{\mathfrak{M}_i \, \mathfrak{M}_j}{r'_{ij}} \qquad r'_{ij} \text{ : séparation apparente}$$

c. Hypothèse que NGC 7318 a et b forment une galaxie double et que la vitesse de NGC 7318 est dirigée suivant la ligne de visée.

L'hypothèse (b) donne pour les variantes 1 , 2 et 3 :

$$1 : \; 2T/-\Omega = 2.3$$

$$2 : \; 2T/-\Omega = 1.4$$

$$3 : \; 2T/-\Omega = 5.6 \quad .$$

Dans ce cas, le système serait d'énergie positive (cas 3 particulièrement).

L'hypothèse (c) est justifiée par la relation :

$$\mathfrak{M}_a + \mathfrak{M}_b = \frac{1}{G} r' \, V_r^2 \, f^{-1}$$

avec

$$f = \cos^2 \omega \, \sin^2 i (1 - \sin^2 \omega \, \sin^2 i)^{1/2}$$

(i , inclinaison ; ω , angle avec ligne des noeuds),

$$\bar{f} = \frac{3\pi}{32} = 0.295$$

on trouve (variante 1)

$$\mathfrak{M}_a + \mathfrak{M}_b = 2.2 \; 10^{12} \; \mathfrak{M}_\odot$$

et on calcule

$$\mathfrak{M}_a + \mathfrak{M}_b = 1.9 \; 10^{12} \; f^{-1} \; \mathfrak{M}_\odot$$

ce qui donne $f = 0.86$ (valeur maximum : $f = 1$).

On trouve alors en calculant $2T'$ et $-\Omega'$ pour 3 galaxies, plus le système double considéré comme un tout,

$$1 : \quad 2T' / -\Omega' = 0.74$$

$$2 : \quad 2T' / -\Omega' = 0.37$$

$$3 : \quad 2T' / -\Omega' = 3.28 \quad .$$

L'hypothèse que le système est stationnaire n'est pas absurde. Cependant on notera le résultat avec la variante (3), qui paraît conduire aussi à une énergie positive.

AMBARZOUMIAN suppose que 7318 b quitte le système.

d. Nature des difficultés physiques : elles concernent l'âge des galaxies.

Si $t \simeq 10^9$ ans, il est difficile d'expliquer le type spectral global, qui implique une proportion notable de géantes rouges, produites par l'évolution d'étoiles de masses relativement faibles (4,5$\odot$ environ).

5. Les grands amas de galaxies.

a. Présentation (voir iconographie).

b. On peut essayer d'appliquer le théorème du viriel aux grands amas de galaxies. Si on les suppose en état stationnaire, on peut en déduire la masse des galaxies qui les composent.

Si on admet que les régions centrales d'un amas sont en équilibre comme une sphère isotherme, on peut poser

$$\begin{cases} \rho = \rho_0 \, \theta \\ r = \alpha \, r_1 \end{cases}$$

où α est une longueur caractéristique et ρ_0 la densité centrale.

On trouve

$$\alpha^2 = \frac{\overline{w^2}}{12\pi \, G\rho_0} \quad .$$

On mesure α et w , et on calcule ρ_0 .

La densité par unité de surface est, pour une sphère isotherme

$$\sigma_0 = 6.06 \, \alpha \, \rho_0 \quad .$$

Dans Virgo, on trouve ainsi $\overline{\mathfrak{M}} = 8.10^{11}$ ⊙ ; dans Coma, après élimination des grandes vitesses, $\mathfrak{M} = 4.10^{11}$ ⊙ ; sans élimination, $\mathfrak{M} = 10.10^{11}\ \mathfrak{M}_\odot$.

On trouve alors

$$\frac{\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot}{L/L_\odot} : \quad \text{Coma} : \quad 260 \text{ ou } 650$$

c. Hypothèse d'Ambarzoumian. - Ces valeurs anormalement élevées sont dues au fait que les systèmes sont d'énergie positive (Théorème du viriel non applicable).

BIBLIOGRAPHIE

[1] LIMBER (D. N.) and MATHEWS (W. G.). - The dynamical stability of Stephon's quintet, Astrophys. J., 132, 1960, p. 286.

[2] La structure et l'évolution de l'Univers. 11e conseil de Physique [1958. Bruxelles]. - Bruxelles, R. Stoops, 1958 (Institut international de Physique Solvay).