

STRATIFICATION DE L'UNIVERS

Jean-Marie SOURIAU *

SOMMAIRE

Nous proposons un modèle d'univers de Friedmann-Lemaître, à courbure positive, où la répartition des Q.S.O. fait apparaître une zone singulière, occupant un équateur de l'hypersphère spatiale. Nous étudions la possibilité qu'il s'agisse d'une zone de contact matière-antimatière. Interprétées dans ce modèle, les observations des Q.S.O. font apparaître une stratification parallèle à l'équateur. Cette anisotropie universelle semble perceptible jusque dans la répartition des galaxies.

79/P.1151 (Version révisée du Preprint 79/P.1129, Juillet 1979). DECEMBRE 1979

* Centre de Physique Théorique - CNRS, et Université de Provence, Marseille.

Recherche effectuée en collaboration avec Henri-Hugues FLICHE et Roland TRIAY.

N.B. La présente rédaction regroupe des résultats exposés par l'auteur aux réunions suivantes :

- Journées Relativistes, Université d'Angers, 28 avril 1979
- Symposium Einstein, Collège de France, 6 juin 1979.
- Colloque A. Visconti, "Interactions Fondamentales", Centre de Physique Théorique de Marseille, 6 juillet 1979

Adresse Postale : C.N.R.S. - LUMINY - Case 907
Centre de Physique Théorique
F-13288 MARSEILLE CEDEX 2
France

1. GEOMETRIE DE LA COSMOLOGIE RELATIVISTE

Un premier niveau de la Relativité Générale est l'hypothèse qu'il existe, en chaque point x de l'Univers quadridimensionnel U_4 , un tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ de signature (+ ---), apte à décrire aussi bien la gravitation que l'optique, selon les règles suivantes :

- 1°) Les lignes d'univers des masses qui gravitent sont des géodésiques ; leur temps propre δ est donné par

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- 2°) Les signaux lumineux se propagent selon des géodésiques isotropes.

Ce niveau est suffisant pour l'interprétation de deux observations essentielles en cosmologie : a) le redshift des objets éloignés (galaxies ou quasars), b) le rayonnement cosmologique.

- a) Soit L_1 la ligne d'Univers d'un objet observé, L_2 celle de la Terre (Figure I). La règle des géodésiques isotropes fournit une bijection $\lambda_1 \mapsto \lambda_2$ (entre la date d'émission λ_1 d'un signal lumineux et sa date terrestre λ_2 d'observation) qui ne dépend que de la géométrie de la figure. Par conséquent, la relation $\nu_1 d\lambda_1 = \nu_2 d\lambda_2$ entre fréquence d'émission ν_1 et d'observation ν_2 d'un signal périodique, écrite

$$(1) \quad \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{d\lambda_2}{d\lambda_1} = 1+z$$

montre que le rapport ν_1/ν_2 doit être indépendant de

E R R A T A

STRATIFICATION DE L'UNIVERS

par

Jean-Marie SOURIAU

<u>PAGE</u>	<u>LIGNE</u>	<u>AU LIEU DE</u>	<u>LIRE</u>
4	5	$\lambda \sim 1 \mu m$	$\lambda \sim 1 mm$
5	18-19	le nombre de photons de la pression....	le nombre de photons est conservé ; l'énergie perdue par les photons est égale au travail de la pression de....
5	avant- dernière	+ $\lambda g \mu v \dots$	- $\lambda g \mu \phi \dots$
9	5	3×10^5	3×10^{-5}
14	footnote L. 2	de son redshift..	de leur redshift ..
37	21	10 Mpc	4 Mpc

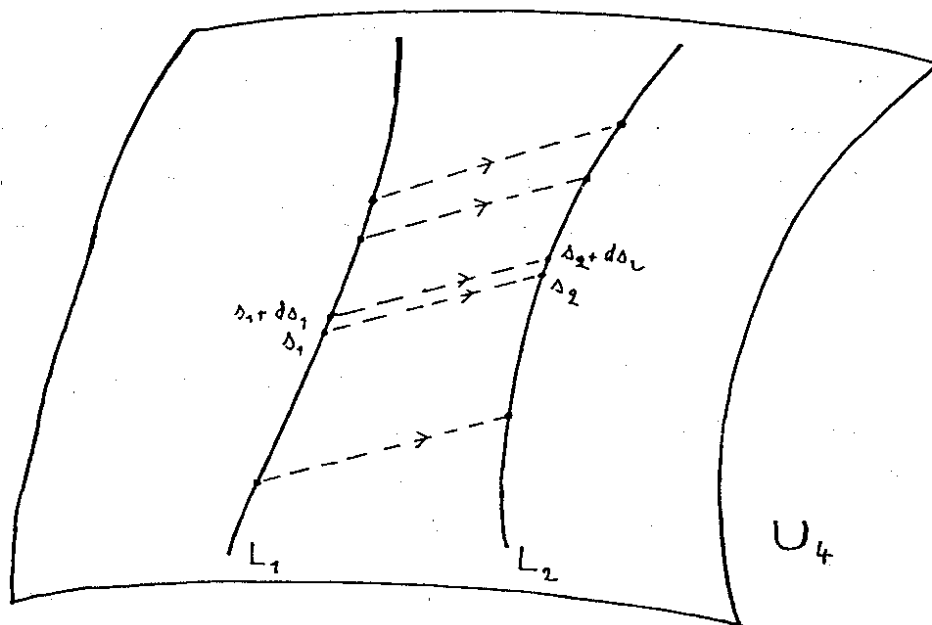


FIG. I

γ_L ; le nombre γ qui le caractérise étant appelé redshift.

L'observation confirme cette interprétation: dans certains quasars, on peut observer des raies extrêmes du spectre de l'hydrogène : la raie Lyman α dans l'ultra-violet lointain ($\lambda = 0.1216 \mu m$), la raie radio due à la structure hyperfine ($\lambda = 21 \text{ cm}$) ; le rapport des fréquences est supérieur à 1 700 000, et la constance de γ est vérifiée à la précision des mesures ($\sim 1/1000$), ceci pour des valeurs de γ atteignant 2 ou 3.

L'effet ainsi interprété géométriquement est le redshift cosmologique ; si on tient à le considérer comme la superposition d'un effet Doppler (cinématique) et d'un effet Einstein (gravitationnel), on est obligé de faire appel à un référentiel arbitraire, donc sans intérêt physique.

b) En 1823, Olbers avait remarqué que, dans un univers homogène, le fond du ciel devrait être uniformément brillant. Ce paradoxe fut résolu en 1965 par Penzias et Wilson, observant effectivement un fond uniformément brillant, mais dans l'infra-rouge lointain ($\lambda \sim 1 \mu m$) ; là-aussi, il y a redshift.

On sait que ce rayonnement cosmologique diffère peu de celui d'un corps noir, et peut donc être décrit par un quadrivecteur unitaire U^μ (le "référentiel du rayonnement") et une température absolue T ($T \sim 2.8^\circ K$).

U^μ diffère peu de la quadrivitesse de la Terre (400 kms/s environ). Si on admet que la possibilité d'observer un rayonnement de corps noir est un fait universel -et non réservé à notre planète et à notre époque- une analyse géométrique simple (SOURIAU, R4) conduit aux résultats suivants :

1°) Le vecteur-température de Planck $\Theta^\mu = U^\mu/T$ est un vecteur Killing-conforme : la dérivée de Lie associée du tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ est proportionnelle à $g_{\mu\nu}$; le (demi-) groupe de difféomorphismes engendré par le vecteur Θ^μ est constitué de transformations conformes de l'Univers U_4 .

2°) Le vecteur $S^\mu = T^3 U^\mu$ et le tenseur $T^{\mu\nu} = T^4 [U^\mu U^\nu - \frac{1}{4} g^{\mu\nu}]$ ont chacune une divergence riemannienne nulle. L'interprétation physique est claire : en effet, avec des unités convenables, S^μ est le flux d'entropie du rayonnement, $T^{\mu\nu}$ son tenseur d'énergie ; par conséquent, le rayonnement n'échange avec la matière ni entropie, ni énergie, ni impulsions, ni moment.

Il s'agit évidemment d'une approximation : on a observé l'excitation de molécules organiques par ce rayonnement (C N par exemple) : mais ces inter-

actions sont localisées dans certaines régions internes des galaxies, et l'interprétation la plus simple de la non-interaction est fournie par l'hypothèse du confinement de la matière dans une petite partie du volume de l'Univers. De fait, on n'observe pas de matière intergalactique, sauf dans quelques amas denses.

3°) Enfin la même analyse montre que le redshift d'un objet, la température T_1 du rayonnement observé au voisinage de la source et la température T_2 au voisinage de la Terre sont liés par la relation

$$(2) \quad 1+z = \frac{T_1}{T_2}$$

qui montre que l'Univers se refroidit -puisque les redshifts observés sont positifs.

Ainsi se trouve expliqué le paradoxe thermodynamique d'un univers en expansion coexistant avec un rayonnement ayant les apparences d'un équilibre. Un bilan énergétique détaillé est possible, au niveau classique comme au niveau quantique : le nombre de photons de la pression de radiation dans l'expansion volumique de l'Univers.

Le deuxième niveau de la Relativité Générale permet de considérer matière et rayonnement comme sources du champ gravitationnel, selon l'équation d'Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

où $R_{\mu\nu}$ est le tenseur de Ricci, R la courbure contractée,

- Localement, l'Univers est le produit cartésien d'une droite (décrite par le "temps universel" t) et d'une variété riemannienne V_3 ("l'espace") sur laquelle les galaxies sont pratiquement fixes en projection (Fig.II). La métrique d'Univers est du type Robertson-Walker

$$(3) \quad ds^2 = dt^2 - R(t)^2 d\sigma^2$$

$d\sigma^2$ désignant la métrique de V_3 .

- V_3 est une variété à courbure constante, au sens de Riemann. Si on la suppose géodésiquement complète et simplement connexe ⁽¹⁾, elle possède un groupe G_6 d'isométries, agissant transitivement ; trois cas sont possibles, selon le signe de sa courbure K :

$K < 0$: G_6 est isomorphe au groupe de Lorentz, V_3 est difféomorphe à $\mathbb{R}^3$ (géométrie de Lobatchevsky).

$K = 0$: V_3 est isométrique à l'espace euclidien $\mathbb{R}^3$, G_6 est le groupe des déplacements euclidiens.

$K > 0$: V_3 est isométrique à une hypersphère S_3 , la composante neutre de G_6 est le groupe spécial orthogonal $SO(4)$ (géométrie de Riemann).

- Le nombre $R(t)$, figurant dans (3), est une fonction elliptique du temps t , inversement proportionnelle à la température du rayonnement ; sa dérivée logarithmique

⁽¹⁾ L'étude détaillée se trouve dans WOLF (R15). Si on renonce à la simple connexité, des possibilités pittoresques sont offertes pour V_3 (espace projectif, espaces lenticulaires, bouteilles de Klein, etc.).

$$(4) \quad H = \frac{R'(t)}{R(t)}$$

est le paramètre de Hubble, dont la valeur actuelle H_0 , fournie en principe par l'observation, est encore discutée ; la valeur suivante

$$(5) \quad H_0 \sim 100 \text{ km/s/Mpc}, 1/H_0 \sim 10^{10} \text{ années(-lumière)}$$

semble plausible.

On peut normaliser R en lui attribuant la valeur actuelle 1 ; il est alors défini par la formule

$$(6) \quad t = \frac{1}{H_0} \int \frac{R dR}{\sqrt{P(R)}}$$

avec

$$(7) \quad P(R) = \lambda R^4 - k R^2 + \Omega R + \alpha$$

Les paramètres sans dimensions $\lambda, k, \Omega, \alpha$ liés par la relation de normalisation

$$(8) \quad \lambda - k + \Omega + \alpha = 1$$

ont les valeurs suivantes :

$$(9) \quad \lambda = \Lambda / 3H_0^2 \quad (\text{constante cosmologique réduite})$$

$$(10) \quad k = K / H_0^2 \quad (\text{courbure réduite})$$

$$(11) \quad \Omega = 8\pi G \rho_0 / H_0^2, \quad \rho_0 \text{ étant la densité moyenne de matière à l'époque actuelle (} \Omega = \text{ paramètre de densité) ;}$$

$$(12) \quad \alpha = \frac{8\pi^3 G k_B^4}{45 \hbar^3} \frac{T_0^4}{H_0^2}$$

(k_B = constante de Boltzmann, $2\pi\hbar$ = constante de Planck).

Ce terme, qui prend en compte le rayonnement comme source du champ, est de l'ordre de 3×10^5 ; il devrait être augmenté si on voulait prendre en compte d'éventuels neutrinos thermiques de divers types, supposés de masse nulle.

- Ce modèle contient ceux de Lemaître (approximation $\alpha = 0$), Friedmann (en choisissant de plus $\lambda = 0$), et Gamow (en négligeant λ , k et Ω devant α , approximation purement radiative valable aux hautes températures éventuelles du big-bang).

- On remarque que l'homogénéité et l'isotropie spatiales ont été obtenues ici sans avoir à être postulées (grâce à l'action du groupe G_6) ; on peut en induire, à priori, que la répartition d'objets lointains d'un type donné (quasars en particulier) doit être homogène dans le ciel -ce qui semble vérifié en première approximation (voir WEBSTER, R14) Mais nous reviendrons sur cette question au § 5 .

2. DETERMINATION DES PARAMETRES COSMOLOGIQUES
PAR LES DONNEES OPTIQUES DES QUASARS.

Un modèle cosmologique étant choisi, on peut calculer en fonction du redshift z d'un objet et de sa magnitude apparente m la puissance qu'il rayonne; par conséquent, un échantillon homogène d'objets devra vérifier une certaine relation redshift-luminosité ; relation qui se réduit, pour les petites valeurs de z , à la relation de Hubble :

$$(13) \quad \log_{10} z = \frac{m}{5} + C^t$$

quel que soit le modèle choisi.

Effectivement, pour un échantillon de galaxies soigneusement choisi, le diagramme de Hubble ($m, \log_{10} z$) est concentré au voisinage d'une droite de pente 0.2. Ce qui confirme la théorie, mais ne permet de connaître la valeur d'aucun paramètre cosmologique : les redshifts des galaxies sont trop petits pour déceler une déviation significative de l'approximation linéaire.

Les quasars (ou plus généralement les Q.S.O.) ont une grande dispersion en luminosité intrinsèque (voir leur diagramme de Hubble, Fig. III) ; mais les grandes valeurs de redshift qu'ils peuvent présenter (jusqu'à $z = 3.53$) permettent cependant de les utiliser pour une étude statistique. La méthode que nous avons proposée à cet effet (FLICHE-SOURIAU, R4) repose sur la construction de diagrammes magnitude absolue-volume ; nous renvoyons à la publication citée pour une description détaillée de cette méthode. Résumons :

Pour chaque modèle, les quasars du catalogue permettent de construire le diagramme (M, V) correspondant ; si le modèle est correct, ce diagramme doit avoir l'allure donnée sur la Figure IV (obtenue par simulation numérique). On constate que de nombreux modèles conduisent à des diagrammes qui s'en écartent significativement, ce qui permet de les éliminer.

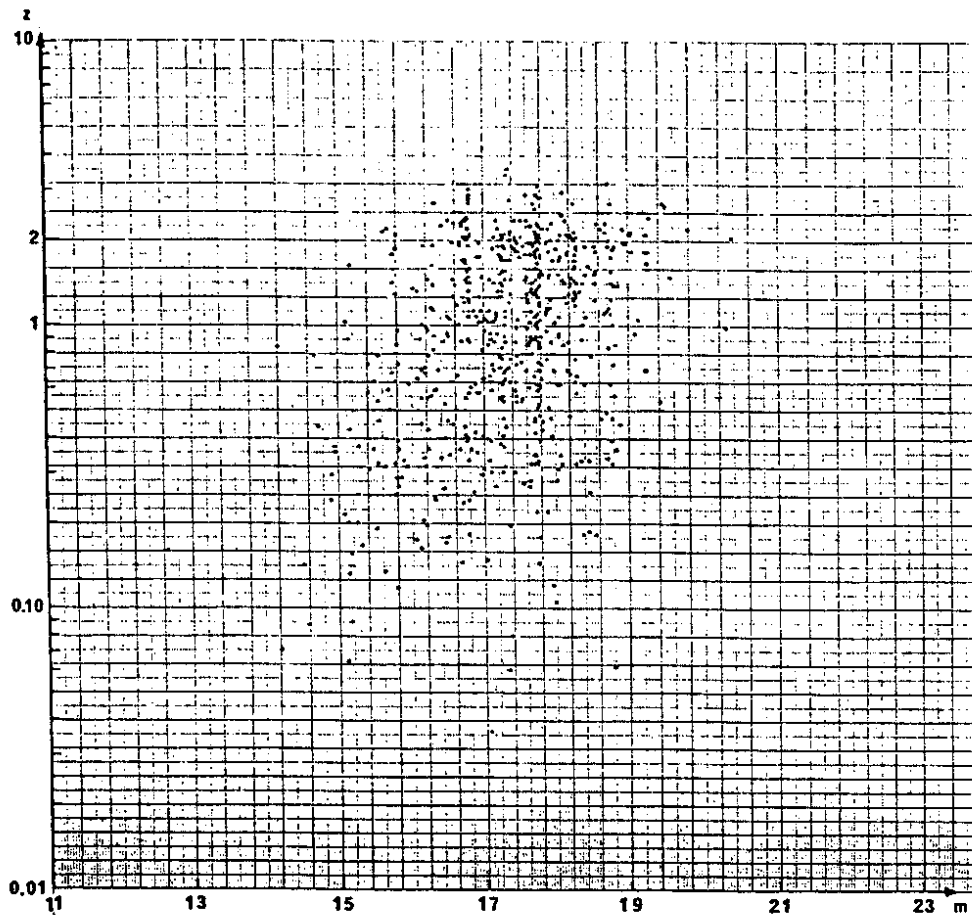


Fig. III

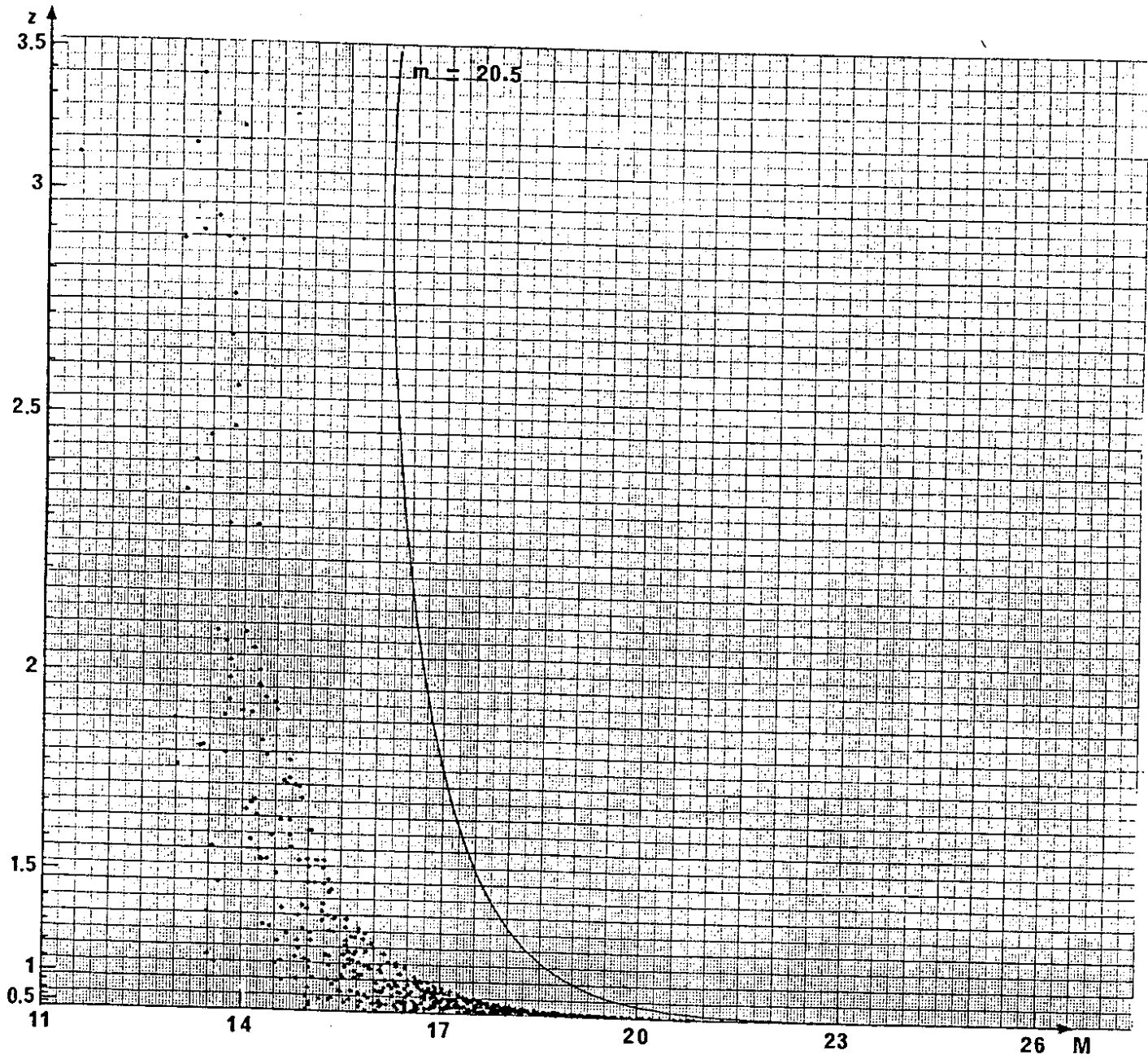


Fig. IV

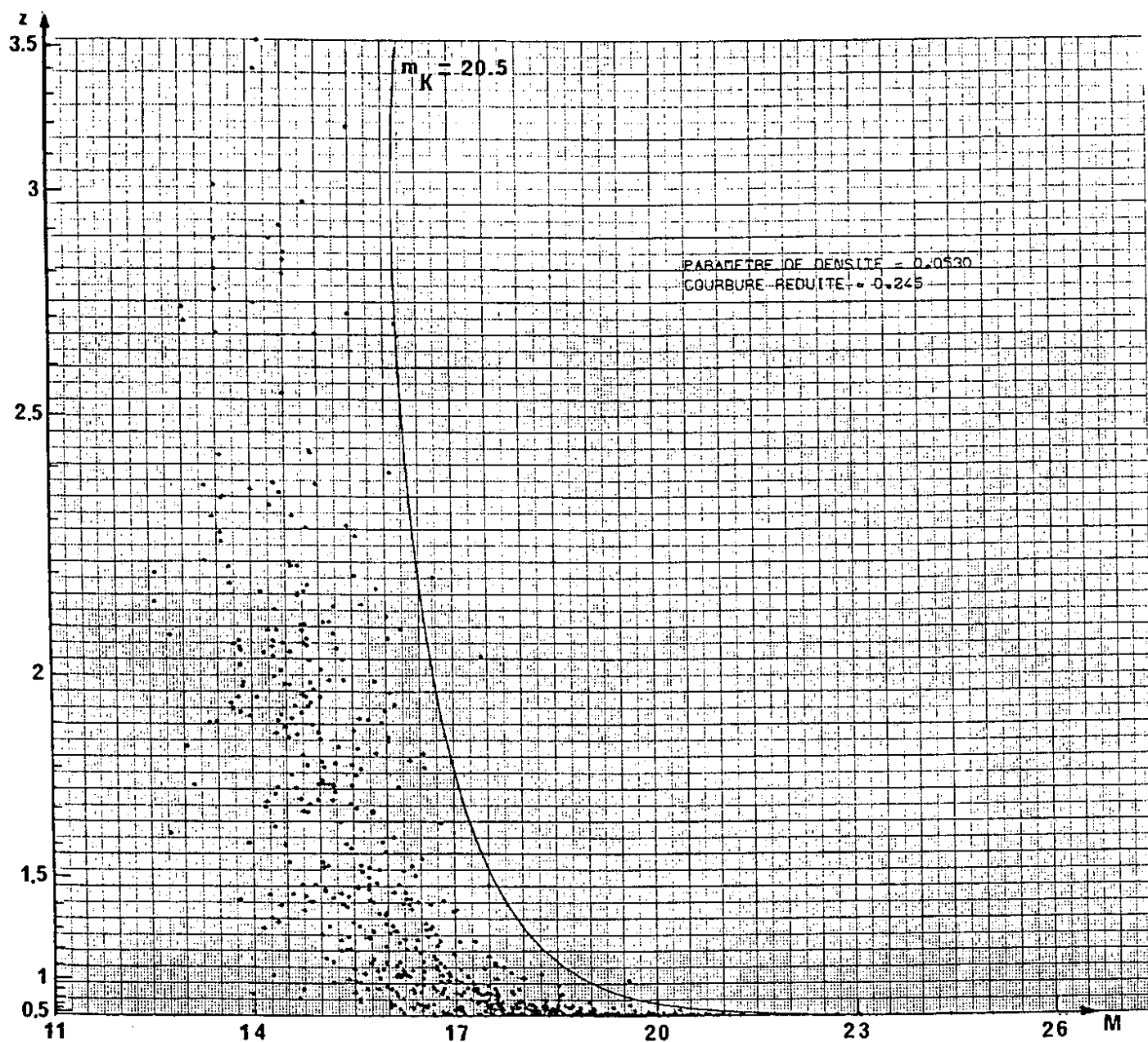


Fig. V

Le résultat est donné par la Figure VI : seule subsiste, dans le plan des paramètres cosmologiques (Ω, k) une région relativement restreinte ; le diagramme correspondant à une valeur centrale

$$(14) \quad \Omega = 0.053 \quad k = 0.245 \quad \lambda = 1.19$$

est donnée sur la figure V .

Ainsi, la répartition des Q.S.O. indique que la courbure de l'Univers est positive -donc qu'il n'existe qu'une quantité finie de matière, et que la constante cosmologique est aussi positive. (voir la relation (8)). On peut vérifier qu'un tel modèle donne une réponse satisfaisante à tous les autres tests cosmologiques dont on dispose (densité de la matière galactique, âge des galaxies, diamètre apparent des radio-sources étendues).

Bien entendu, il est permis d'imaginer que les quasars observés à grand redshift, donc dans une période ancienne de l'histoire de l'Univers, avaient des propriétés différentes de celles d'aujourd'hui, en luminosité par exemple ⁽¹⁾. Il est clair que les résultats de l'analyse présentée ici reposent sur l'hypothèse que ces effets évolutifs ne jouent pas un rôle prépondérant.

⁽¹⁾ On notera cependant que le spectre des quasars ne semble pas dépendre significativement de son redshift: quand l'observation le permet, on y décèle essentiellement un spectre d'hydrogène (raie Lyman α , pic à deux photons) et des raies brillantes, notamment celles du carbone, de l'oxygène et de l'azote : un spectre composite, obtenu par une méthode colorimétrique, est représenté sur la Figure VII. Il s'éloigne peu du spectre ultraviolet d'un objet proche (3 C 273) obtenu par observation extra-atmosphérique (satellite + fusée).

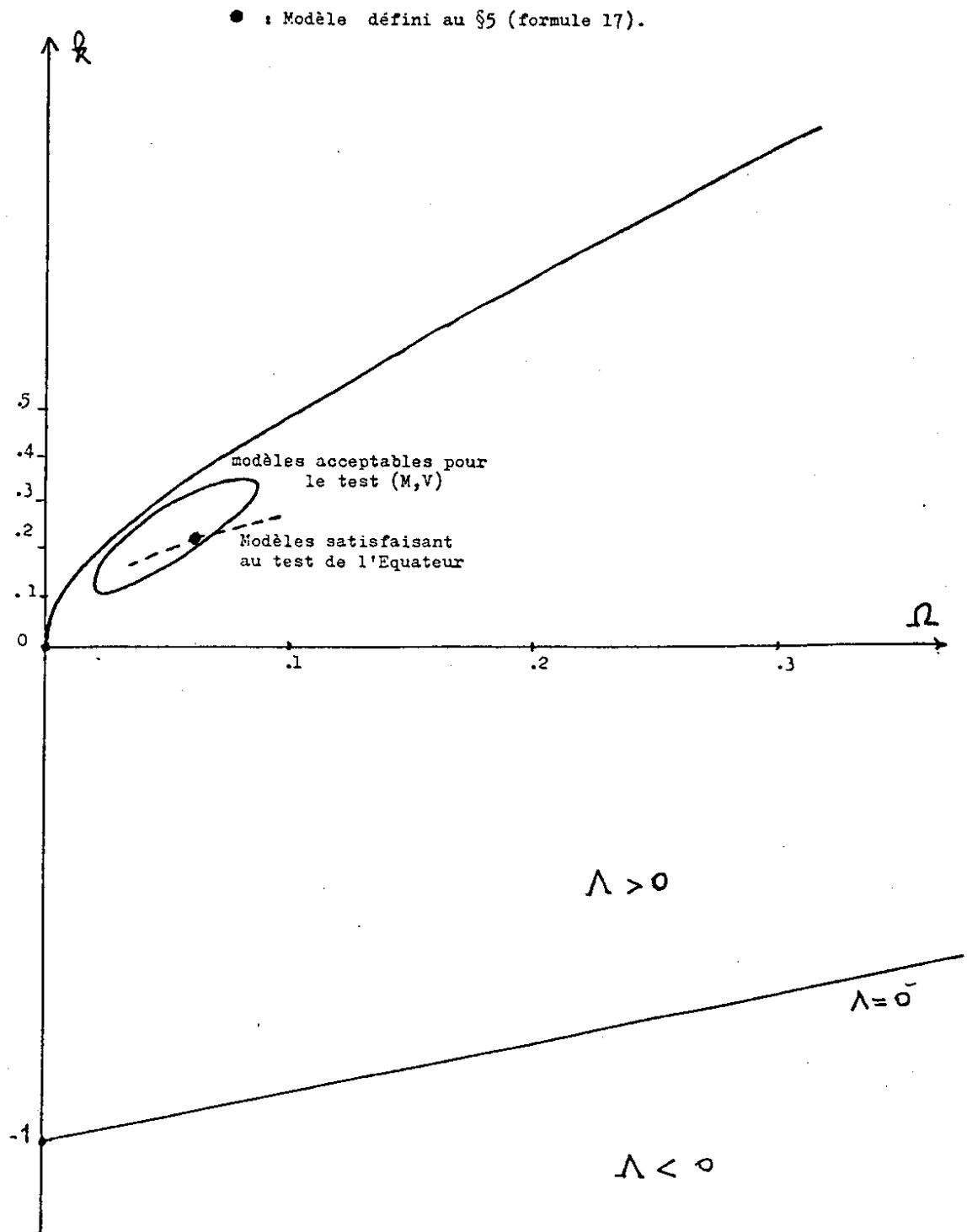


Fig. VI

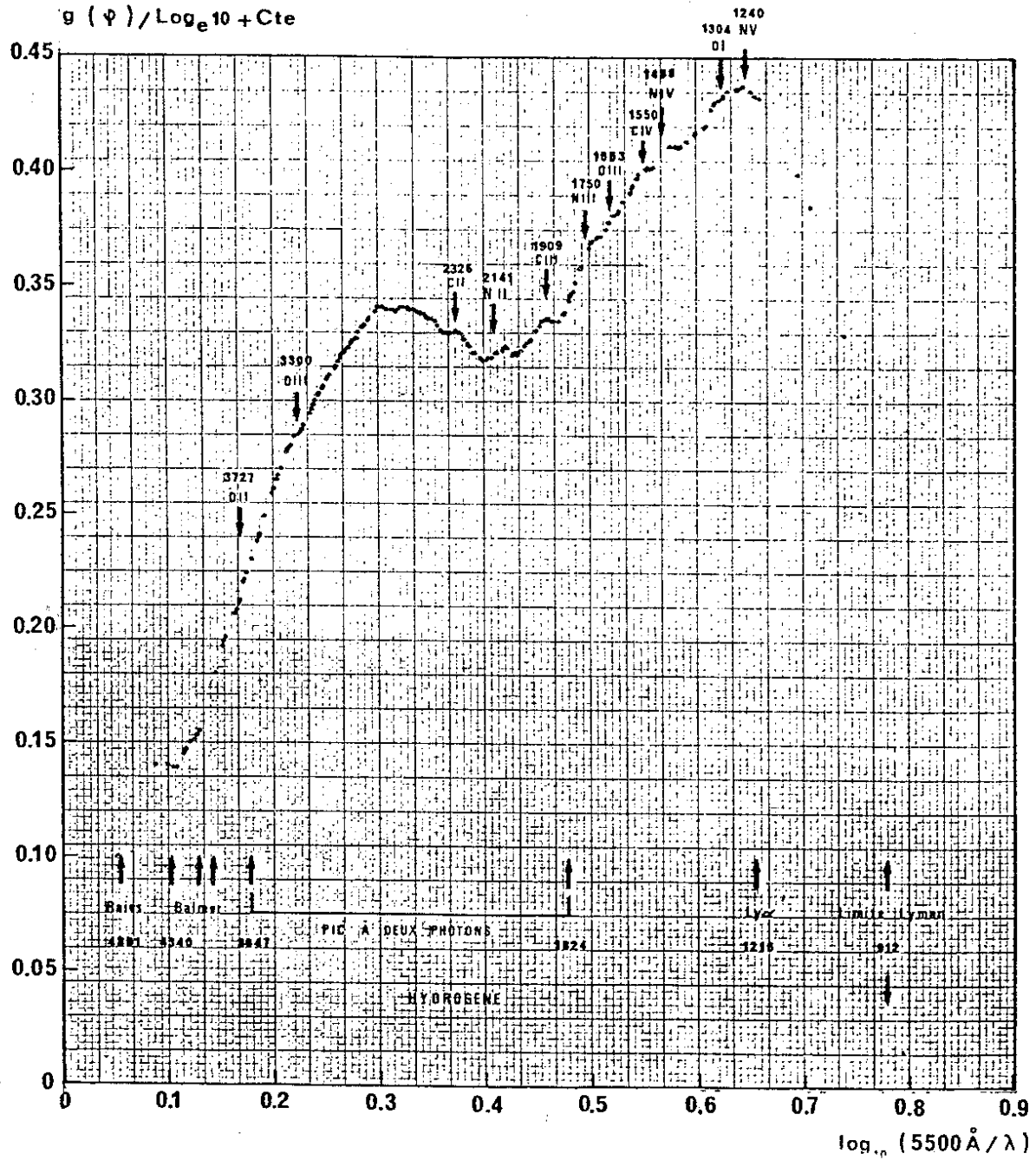


Fig. VII

3. L'ANTIMATIÈRE DANS UN UNIVERS SPHERIQUE

Les modèles cosmologiques relativistes peuvent, a priori, être extrapolés vers l'avenir comme vers le passé -tant que l'opération est mathématiquement possible. Dans le cas du modèle établi ci-dessus l'avenir se présente comme une expansion éternelle de type exponentiel (la constante cosmologique jouant alors le rôle prépondérant), le passé s'arrête à une date initiale où la température était infinie (big-bang).

La symétrie de ces modèles (définie par le groupe G_6 introduit au §1) est stable : en effet, les solutions des équations d'Einstein voisines d'un modèle de Friedmann ont été étudiées par LIFSCHITZ & KHALATNIKOV (R 7) ; les perturbations se classent en trois types (variations de densité, fluctuations tourbillonnaires, ondes gravitationnelles) qui sont tous amortis au cours du temps par l'expansion. L'étude a été reprise par FLICHE (R 3) dans le cas d'un modèle de Lemaître : la stabilité est plus marquée, l'expansion étant favorisée par une constante cosmologique positive.

Ce résultat jette évidemment un doute sur la possibilité de prolonger la symétrie vers le passé jusqu'au big-bang : il est possible -notamment dans le cas d'une courbure positive- que l'état initial soit fortement anisotrope, et que la symétrie observée actuellement soit simplement un effet évolutif.

- Une caractéristique importante de l'Univers actuel est sa neutralité électrique quasi-absolue : en effet, si le nombre de particules chargées positivement (protons

essentiellement) différerait du nombre de particules négatives (électrons) par un facteur de $\pm 10^{-40}$, la répulsion électrostatique l'emporterait sur l'attraction gravitationnelle, qui deviendrait inobservable. On peut remarquer d'ailleurs qu'un univers électriquement chargé ne peut pas présenter la symétrie G_6 ⁽¹⁾.

Il est séduisant d'interpréter cette neutralité en supposant que toute la matière a été créée par paires dans la période initiale chaude ; dans l'évolution ultérieure la neutralité électrique locale est assurée par la longue portée des interactions électro-magnétiques -mais la neutralité baryonique ou leptonique peut être violée localement, pour peu que la matière se dispose en régions séparées, comportant respectivement matière et antimatière.

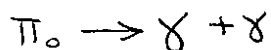
Une telle théorie a été proposée notamment par O. KLEIN (R 6) ; R. OMNES (R 8) a montré que les réactions d'annihilation se produisant sur les surfaces de contact matière-antimatière tendent à minimiser l'aire de contact et à créer une émulsion à cellules de plus en plus grandes.

Une variante de ce scénario peut s'envisager dans le cas d'un univers à courbure positive, pouvant être initialement anisotrope : les paires créées dans le chaos initial disparaissent progressivement par annihilation quand l'univers se refroidit ; mais cette disparition

⁽¹⁾ Les charges électromagnétique et gravitationnelle n'ont pas les mêmes possibilités de symétrie à cause de leurs statuts géométriques différents.

doit s'arrêter si la répartition baryonique initiale n'est pas rigoureusement isotrope ; la possibilité la plus simple pour le stade terminal est évidemment celle où matière et antimatière remplissent respectivement deux hémisphères de S_3 ; de l'anisotropie initiale, ne subsiste alors qu'un témoignage dipolaire. Une telle configuration est particulièrement stable, puisque la surface de contact -un équateur de S_3 - est une surface minima, qui se présente d'ailleurs comme un plan pour un observateur proche.

Cependant les réactions d'annihilation se produisant sur l'équateur ne peuvent pas "vider" complètement son voisinage, en raison de la stabilité gravitationnelle du modèle de Friedmann évoquée plus haut, qui tend à uniformiser la densité de matière/antimatière dans tout l'Univers. Par conséquent l'équateur doit être une source permanente de rayons γ , dûs à la décomposition des mésons π_0 produits dans l'annihilation:



Effectivement, le fond continu des rayons γ , observé dans la zone 35 MeV-200 MeV par le satellite SAS2, s'analyse en deux composantes ; l'une, dont la symétrie décèle l'origine galactique, s'étend au-delà de 200 MeV; l'autre, obtenue par différence, apparaît comme extragalactique, et présente un spectre rapidement décroissant jusque vers 150 MeV. Un tel spectre est compatible avec l'origine $p\bar{p}$ de ce rayonnement, compte tenu du redshift d'une source supposée équatoriale. FICHTEL, SIMPSON & THOMPSON (R 2) estiment d'ailleurs que cette composante du rayonnement γ est effectivement un témoin de réactions

d'annihilation matière-antimatière, et concluent : "(This emission) must be considered a major open question, and further high sensitivity measurements of the intensity, uniformity and energy spectrum are very important".

Il semble donc que le modèle proposé ici élimine les principales difficultés que l'on oppose traditionnellement à la cosmologie symétrique (voir G. STEIGMAN, R 12).

4. ESSAI DE LOCALISATION DE L'ANTIMATIÈRE

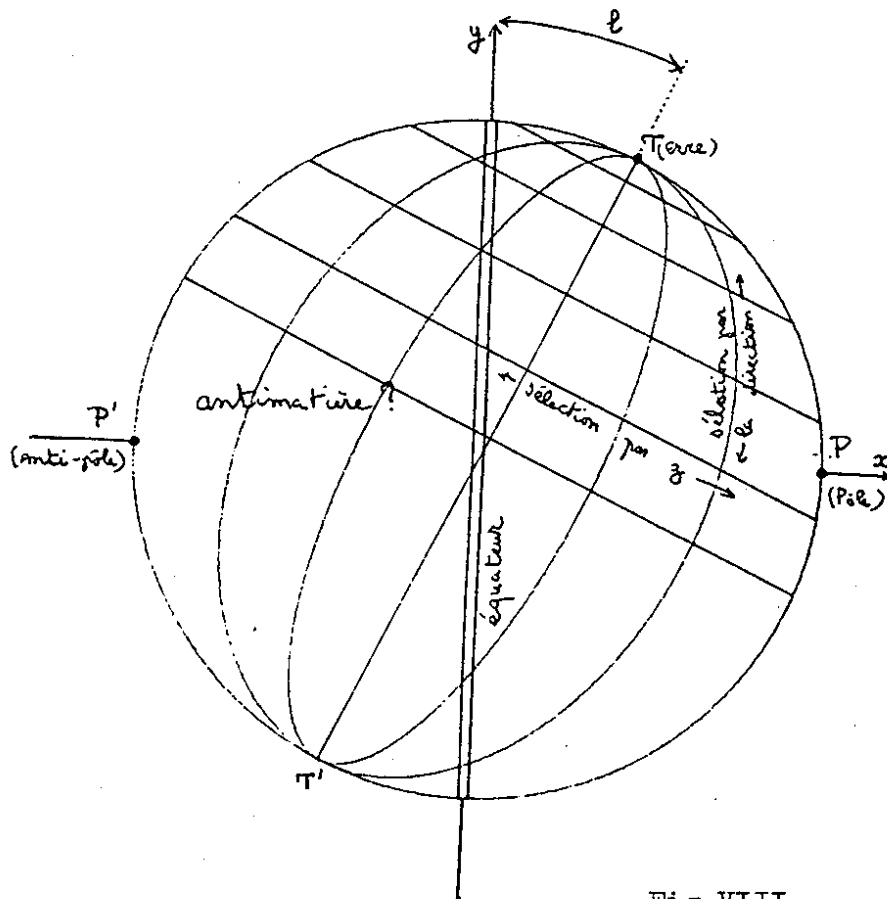


Fig.VIII

PARAMETRES .

Adoptons donc l'hypothèse de travail selon laquelle l'univers est une sphère S_3 , dont matière et antimatière occupent deux hémisphères (figure VIII). Dans une telle cosmologie, il faut déterminer en plus des paramètres Ω et k du modèle de Friedmann-Lemaître (paramètre de densité et courbure réduite), trois paramètres supplémentaires qui permettent de localiser la zone équatoriale de contact entre matière et antimatière.

Nous choisirons la latitude cosmique de la Terre, ℓ (figure VIII) et les coordonnées équatoriales (α = ascension droite, δ = déclinaison) fixant la direction d'observation du pôle cosmique P (figure VIII), centre de l'hémisphère de matière.

A priori, ℓ peut prendre toute valeur comprise entre 0 et $\pi/2$; mais les valeurs élevées sont peu probables : en utilisant la métrique de S_3 , on vérifie que la variable aléatoire $2\ell + \sin 2\ell$ est équipartie entre 0 et π ; d'où résulte qu'il y a une probabilité 9/10 pour que ℓ soit inférieure à $53^\circ 39'$, 99/100 pour que ℓ soit inférieure à $73^\circ 29'$; la valeur médiane de ℓ est $23^\circ 49'$.

Il se trouve que les redshifts des Q.S.O. atteignent la valeur 3.53, ce qui correspond, dans les modèles envisagés au §2, à une distance angulaire de la Terre de l'ordre de 90° . Il est donc très probable que la zone observable de l'Univers rencontre l'hémisphère d'antimatière, donc que nous observons un certain nombre d'anti-quasars".

OBSERVATION DIRECTE DE L'EQUATEUR

Dans les spectre des Q.S.O. de grand redshift, on observe souvent des raies d'absorption, parfois plusieurs systèmes de raies, correspondant à des redshifts multiples (voir PERRY, BURBIDGE & BURBIDGE ,R 9).

En règle générale, ces raies sont extrêmement fines, ce qui suggère de les interpréter comme un témoignage du passage de la lumière dans un nuage gazeux interposé.

Il existe cependant au moins trois exceptions : dans le cas des objets PHL 5200, RS 23, Q 1246-057, on observe au contraire des raies d'absorption extrêmement larges -dépassant même la largeur de raie observée dans les gaz relativistes émis lors des explosions de supernovae.

On peut interpréter ce fait de deux manières : soit comme la trace du passage de la lumière dans un nuage gazeux en agitation relativiste permanente (ces raies sont stables depuis une dizaine d'années qu'on les observe), soit dans un nuage de très grande profondeur -suffisante pour que ses diverses parties, entraînées par l'expansion, aient des redshifts différents.

Il semble que ce soit cette interprétation qui soit la plus probable dans le cas d'un quatrième objet (MC 3, ou 1331+170) où une raie d'absorption Lyman α , super-large à basse résolution, peut se résoudre en raies multiples, dont la plus intense peut être détectée en radio-astronomie (R 16) ; l'observation des raies à 1216 Å et 21cm avec le même redshift (à 1/1000 près) identifie à coup sûr l'hydrogène et confirme la valeur du redshift.

Quelle que soit l'interprétation adoptée, on peut faire l'hypothèse que ces objets sont des antiquasars, et que les raies d'absorption "exotiques" que l'on observe sont produites dans la zone équatoriale.

En utilisant le modèle de Friedmann-Lemaître évalué plus haut, on peut donc porter sur la sphère S_3 quatre points de la zone équatoriale (calculés en fonction de la direction de visée et du redshift d'absorption de chaque objet). Les trois premiers suffisent pour déterminer cet équateur ; on obtient ainsi une évaluation des trois paramètres cosmologiques qui le fixent :

$$(15) \quad \ell \sim 24^\circ, \quad \alpha \sim 5^h 45^m, \quad \delta \sim +6^\circ$$

on constate ensuite que le 4ème objet appartient pratiquement à l'équateur ainsi déterminé.

Dans l'Annexe , nous donnons une liste de tous les objets identifiés comme antiquasars, avec les redshifts d'absorption prévus ; le fait que l'on ne dispose que de 4 observations dans ce tableau peut s'expliquer par des difficultés pratiques (dans la plupart des cas, Lyman α sort de la fenêtre atmosphérique ; la raie à 21 cm exige un continuum radio suffisamment intense de l'objet primaire).

OBSERVATION DE L'EQUATEUR PAR MANQUE D'OBJETS

Comme nous l'avons vu au § 3 , il est probable que la densité dans la zone équatoriale ne diffère pas significativement de la densité générale ; l'existence de nuages gazeux dans cette région peut donc s'interpréter

par un non-fonctionnement du processus de condensation de la matière en galaxies (processus encore inconnu, qui est généralement supposé s'être produit à un stade primordial).

S'il en est ainsi, une zone relativement large entourant l'équateur doit être dépourvue d'objets condensés, et cet effet doit pouvoir être mis en évidence par un manque de Q.S.O.

Pour étudier cet effet, nous avons choisi un plongement de la sphère S_3 dans l'espace numérique $\mathbb{R}^4$, de sorte que le pôle cosmique P et la Terre T (figure VIII) aient respectivement pour coordonnées

$$(16) \quad P : (1, 0, 0, 0) \quad T : (\sin \ell, \cos \ell, 0, 0)$$

Le modèle de Friedmann-Lemaître permet de calculer, pour chaque objet de direction céleste et de redshift connu, ses 4 coordonnées (x, y, z, t) de sa place sur $S_3 [x^2 + y^2 + z^2 + t^2 = 1]$.

L'équateur doit alors apparaître comme un manque d'objets au voisinage de $x=0$; c'est effectivement ce qu'on observe, en utilisant les valeurs des 5 paramètres cosmologiques indiquées plus haut.

Bien entendu, on peut utiliser cet effet pour optimiser les 5 paramètres au voisinage de la valeur indiquée. Un indice particulièrement simple et efficace pour cette optimisation, est le suivant : on classe les valeurs de x , on mesure la largeur de l'intervalle contenant 0, et on compte le nombre d'objets situés dans les bandes adjacentes de même largeur.

Après optimisation, on fait apparaître une zone équatoriale sans Q.S.O., de largeur angulaire proche

de 2° - correspondant à une largeur métrique de 200Mpc.

Le nombre d'objets contenus dans les bandes adjacentes de même largeur est de 16+18 ; la probabilité d'obtenir un tel résultat "par hasard" peut être évaluée à $(2/3)^{16+18-2}$, et est donc inférieure à 10^{-5} .

Ces résultats sont obtenus avec les objets suivants :

- 1°) Les objets du catalogue BURBIDGE, CROWNE & SMITH (R 1) qui comportent un redshift et une magnitude;
Nous avons tenu compte des corrections de PERRY, BURBIDGE ET BURBIDGE (R 9).
- 2°) Les trois catalogues JAUNCEY, WRIGHT, PETERSON, CONDON (R 5).

3°) Le catalogue SRAMEK & WEEDMAN (R 11).

Bien entendu nous avons pris en compte tous les objets qui figurent dans ces documents (au total 719).

Nous avons d'abord déterminé l'équateur avec le premier catalogue seulement (627 objets); aucun des objets pris en compte ultérieurement n'a "bouché" l'équateur; mais il est apparu des objets de part et autre, qui ont amélioré l'indice.

L'existence d'une bande équatoriale sans Q.S.O. semble donc un fait significatif -à condition qu'il ne s'agisse pas d'un effet de sélection.

Pour examiner cette question, il est utile de visualiser les calculs précédents, en portant dans un plan les deux premières coordonnées x, y attribuées à chaque objet (voir ci-dessus).

Le diagramme ainsi obtenu est évidemment une projection orthogonale de la sphère S_3 sur un 2-plan équatorial;

il se trouve que cette projection a la propriété de conserver l'équipartition des objets ⁽¹⁾, et par conséquent que les effets de sélection apparaissent par la différence entre le diagramme obtenu et un diagramme de points distribués aléatoirement dans un disque.

Deux effets de sélection sont prévisibles a priori :

- Une sélection par le redshift (plus ou moins grande facilité d'identifier telle ou telle raie à un redshift donné), par la distance, et par l'âge de l'objet au moment où on l'observe. Ces divers effets se conjuguent ici pour donner une sélection indexée par la variable γ ; sur le diagramme, les points de même redshift se situent sur une corde perpendiculaire au diamètre TT' (figure VIII).
- Une sélection par la direction : les observations sont (encore actuellement) plus nombreuses dans l'hémisphère Nord de la Terre que dans l'hémisphère Sud ; elles sont impossibles au voisinage du plan galactique. De plus certaines directions ont été privilégiées par des sondages systématiques dans de petites régions du ciel (notamment dans le cas des observations au prisme ou réseau objectif, qui décèlent environ 15 Q.S.O. par degré carré).

(1)

Le théorème précis est le suivant : l'image de la mesure riemannienne d'une sphère S_{n-1} , plongée dans $\mathbb{R}^n$, par la projection sur un $(n-2)$ -plan diamétral est égale au produit par 2π de la mesure riemannienne dans la boule B_{n-2} ; le cas particulier $n=3$ constitue la méthode qui a permis à Archimède de calculer l'aire des calottes sphériques, et par conséquent l'aire 4π de la sphère S_2 .

Sur le diagramme, les points de même direction sont situés sur une demi-ellipse de grand axe TT' (figure VIII).

Le diagramme observé est représenté sur la figure (IX): le vide équatorial y est nettement visible.

L'effet de la sélection par la distance et le redshift est évident (apparence de bandes orthogonales à TT') ; certaines traînées elliptiques de grand axe TT' manifestent les sondages systématiques dont nous venons de parler. Mais on ne voit pas quels facteurs de sélection -ou conjugaison de tels facteurs- pourraient faire apparaître une bande équatoriale vide: ceci signifierait une difficulté particulière d'observer les objets de redshift z compris entre 0.85 et 0.91 si l'on vise la direction de l'anti-pôle P' (Ophiuchus) ; mais de redshift compris entre 3.52 et 3.63 si on vise dans une direction perpendiculaire - avec bien entendu toutes les valeurs intermédiaires.

Indiquons pour terminer que l'optimisation du vide équatorial ne permet pas de déterminer complètement le modèle : si la direction du pôle cosmique est assez précise, il existe dans l'espace des trois autres paramètres (Ω, k, ℓ) un arc de courbe dont tous les points conduisent pratiquement au même résultat. La projection de cette courbe sur le plan (Ω, k) est indiquée sur la figure VI ; on voit qu'elle coupe la zone des "modèles acceptables" déterminée par les diagrammes $(M-V)$. Pour mettre cette compatibilité en évidence, nous avons représenté sur la figure IX chaque Q.S.O. par un cercle dont l'aire

Vue de l ' Univers

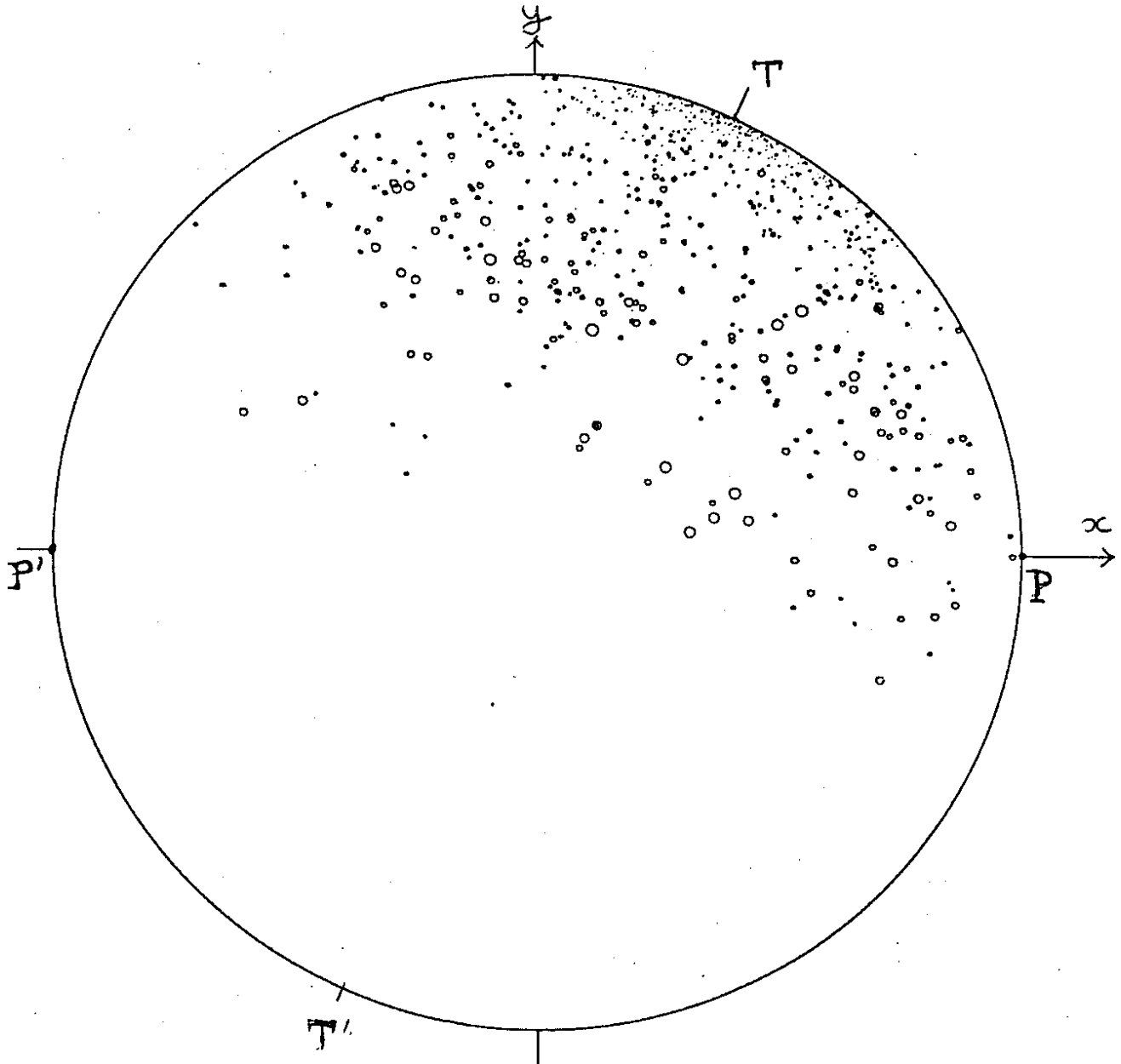


Fig. IX

est proportionnelle à sa puissance rayonnée ⁽¹⁾. On constate -comme sur les diagrammes (M-V)- que les objets les plus brillants sont très homogènes. ⁽²⁾.

(¹) Le calcul est effectué à l'aide du modèle par les méthodes du § 2 ; la K-correction a été perfectionnée pour tenir compte du rôle des raies spectrales dans la magnitude m_v ; voir FLICHE (R3). Les Q.S.O. sans mesure de magnitude sont désignés par un point.

(²) La sélection de ces objets est manifeste ; en particulier, il manque des objets brillants de redshift $z < 1$. Effectivement, on ne fait pas actuellement de recherche systématique de tels objets ; il pourrait donc exister quelques dizaines d'objets de ce type, d'émission radio négligeable, confondus avec des étoiles ; ils seraient faciles à identifier par observation extra-atmosphérique en ultra-violet lointain. Une autre éventualité serait une diminution universelle de l'intensité maximum des quasars, ayant commencé il y a 7×10^9 années environ.

5. STRATIFICATION DE L'UNIVERS

=====

L'Univers que nous venons d'étudier possède la symétrie $SO(4)$ du modèle de Friedmann-Lemaître en ce qui concerne la densité ; pour la composition, cette symétrie est brisée, et il ne subsiste que le sous-groupe stabilisateur de l'équateur, à savoir $SO(3)$ ⁽¹⁾.

Cette symétrie est donc compatible a priori avec des anomalies de composition, réparties selon des orbites de $SO(3)$; orbites qui sont des surfaces d'équation $x = C^k$ avec les notations du §4 . La surface $x=0$ est l'équateur ; les surfaces $x = C^k$ ($x > 0$) sont des sphères centrées sur le pôle cosmique P -qui constitue lui-même l'orbite singulière $x=1$.

Effectivement, le diagramme de la figure |X fait apparaître des zones sans objets, selon des cordes parallèles à l'équateur ; la plus visible est située à $x=0.15$ ($\ell \sim 9^\circ$). Si on suppose qu'elle correspond à un effet réel, on peut l'utiliser pour perfectionner l'optimisation. Ceci donne un choix plus précis des paramètres, qui fait apparaître de nouvelles bandes. On met ainsi en évidence tout un réseau, qui peut être optimisé en utilisant comme test la somme des indices calculés comme au §4.

On obtient ainsi un maximum très pointu, correspondant à l'optimisation simultanée des diverses bandes;

(¹) Qui ici peut se définir comme le groupe des isométries de la sphère S_3 qui laissent fixes les points P et P' .

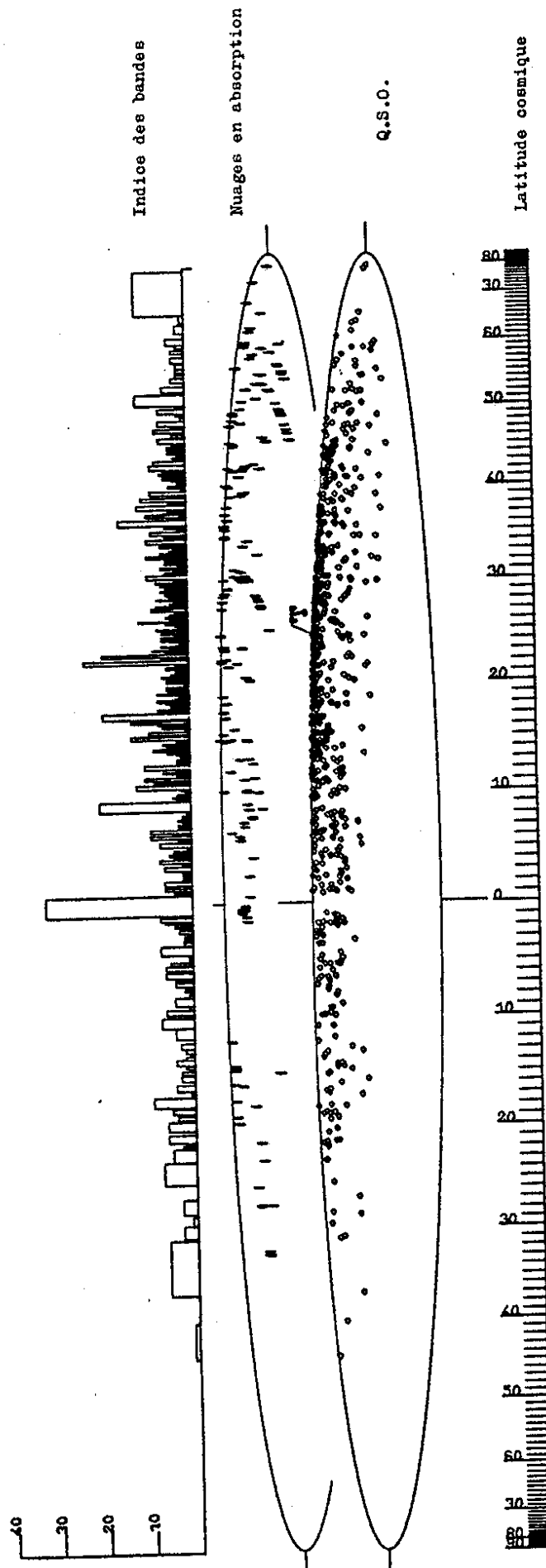


Fig. X

maximum qui définit les divers paramètres cosmologiques avec une précision de l'ordre du millième. On trouve ainsi :

$$(17) \quad \left\{ \begin{array}{lll} \Omega = 0.062, & k = 0.209, & \lambda = 1.147 \\ \ell = 24^{\circ}22' & \alpha = 5h\ 45mn & \delta = + 5^{\circ}\ 34' \end{array} \right.$$

Les paramètres Ω , k se situent dans la zone des modèles "acceptables" pour le test (M,V) du §2 (voir la fig.VI), et par conséquent satisfont les divers tests cosmologiques. La latitude cosmique de la Terre ℓ est voisine de la médiane (§4), et nous situe donc à une place "quelconque" dans l'Univers. Les coordonnées α et δ du Pôle cosmique désignent un point de la constellation d'Orion, à 2.5° de Bételgeuse. Si quelque objet singulier matérialisait ce Pôle, il serait observable en ce point avec un red-shift $z \sim 2.36$ (voir la fig. IX).

Un fait remarquable de cette optimisation, c'est que la bande centrale est effectivement équatoriale: sans qu'aucune contrainte spécifique ait été imposée, l'optimisation ci-dessus lui attribue la valeur médiane $\alpha = -0.008$ ($\ell = 0^{\circ}\ 02'$), soit 0 à la précision indiquée.

Pour une meilleure lisibilité, le diagramme IX a été reproduit sur la figure X, transformé par une affinité de rapport 1/10 ; au-dessus de chaque bande est représenté l'indice défini au §4, qui facilite l'identification.

On constate que la stratification qui apparaît n'est pas confinée au voisinage de l'équateur, mais semble s'étendre partout où la densité des objets observés est suffisante pour pouvoir la détecter. Il existe notamment des bandes très marquées au voisinage de la Terre; elles sont plus visibles sur la figure XI, qui est un agrandissement de cette région.

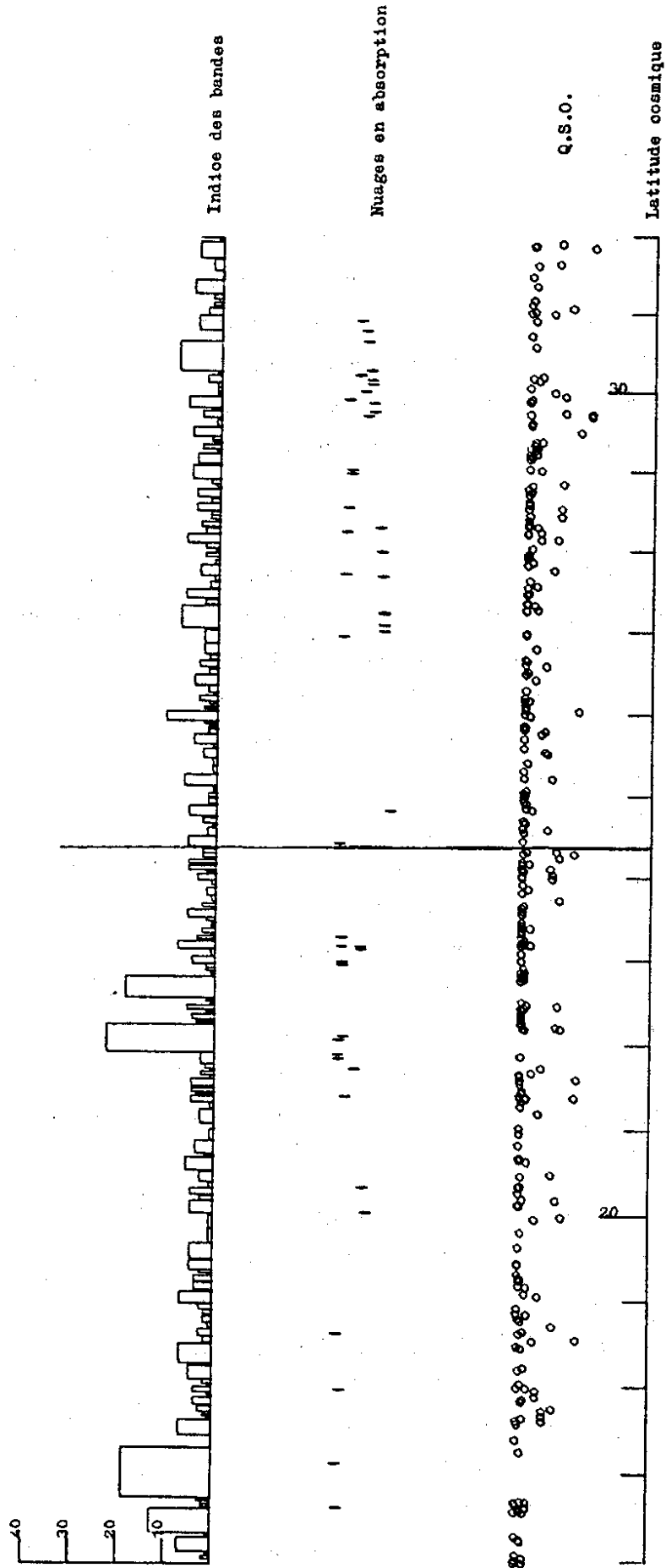


Fig. XI

INTERPRETATION

Le fait que ces bandes, comme l'équateur, soient observables sur un tel diagramme implique évidemment qu'elles sont stables ; en effet les divers objets qui bordent chacune d'elles sont observés à des dates différentes, pouvant remonter au-delà de 15×10^9 années. Elles apparaissent donc comme des témoins "fossiles" d'une structure primordiale.

Comme dans le cas de l'équateur, on peut envisager qu'il s'agit de régions où le processus de condensation de la matière en galaxies n'a pas fonctionné -ou encore qu'il a fonctionné avec une efficacité moindre. Corrélativement, il doit donc exister dans ces régions des nuages gazeux. Il est naturel d'envisager ces nuages comme responsables des raies d'absorption des quasars, ou tout au moins d'un certain nombre d'entre elles ; ce qui permettrait d'expliquer un certain nombre de particularités : l'existence fréquente de raies Lyman α multiples ; le fait que les redshifts d'absorption ne sont pas régulièrement réparties ; et simplement la fréquence du phénomène -trop grande pour être explicable par de simples interpositions de nuages appartenant à des galaxies interposées (voir PERRY & al, R 9).

L'article cité contient un catalogue de redshifts en absorption, que nous avons porté sur les figures X et XI⁽¹⁾ ; on constate effectivement que ces nuages se situent préférentiellement dans les bandes ; mais il semble que de meilleures données soient nécessaires, car dans beaucoup de cas les identifications mêmes des raies sont assez douteuses.

(¹)

Nous avons éliminé les raies d'absorption de redshift très proche de celui d'émission, que l'on peut rapporter à un phénomène localisé au Q.S.O. même.

EXISTE-T-IL UNE STRATIFICATION DES GALAXIES ?

Pour savoir si ce phénomène de stratification est encore perceptible au niveau des galaxies, on peut évidemment tenter la même analyse. Mais la différence d'échelle avec le cas des Q.S.O. fait apparaître un nouveau phénomène qu'il est nécessaire de prendre en compte : le "mouvement propre" des objets.

Différentes observations (anisotropie du rayonnement cosmologique, anisotropie Rubin-Ford de la distribution des redshifts des galaxies environnantes) suggèrent une vitesse propre de notre Galaxie de l'ordre de 300 à 600 km/s ; ce phénomène s'insère probablement dans une dynamique générale des galaxies, qu'il est nécessaire de prendre en compte pour interpréter correctement les redshifts comme indicateurs de distance.

En attendant la réalisation d'un tel programme, on peut se livrer à une recherche "naïve" d'une stratification des galaxies, en procédant comme suit. :

Soit N la direction normale à la stratification recherchée (figure XII); pour chaque galaxie G visible dans la moitié du ciel entourant N , désignons par α l'angle GTN, par ξ l'abscisse de la projection de G sur TN (évaluée à partir de α et du redshift γ de la galaxie à l'aide de la loi de Hubble ; on tient compte de la correction Doppler associée à la vitesse $\vec{V}$ de la Terre); afin d'éviter l'incertitude sur la constante de Hubble H_0 , ξ est évalué en km/s.

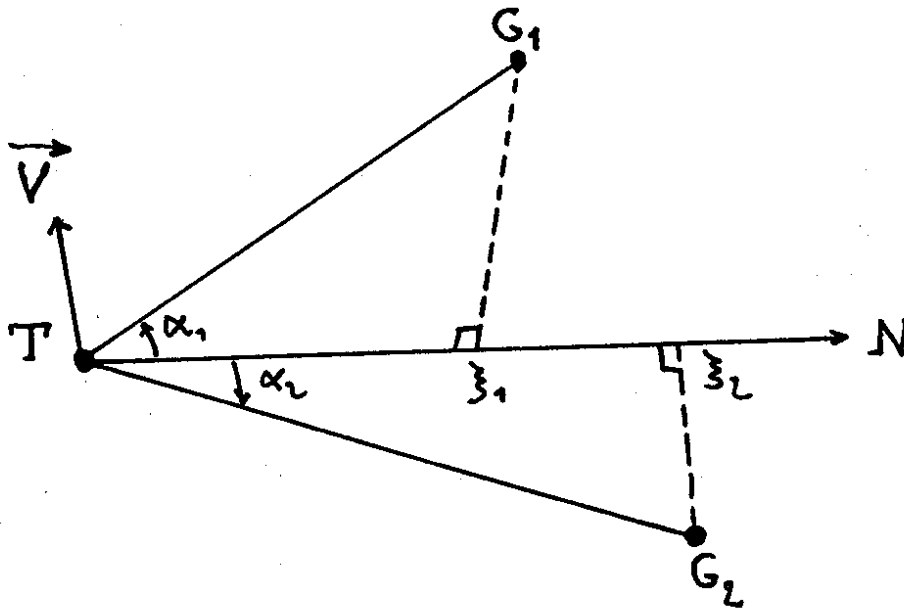


Fig.XII

On peut, pour un catalogue donné de galaxies, construire le diagramme $(\xi, 1 - \cos \alpha)$, dont la densité est assez régulière. Sur un tel diagramme, les sondages dans une direction du ciel (généralement celles des principaux amas) donnent des points concentrés au voisinage d'une droite horizontale ; les points équidistants de la Terre se groupent sur des demi-droites issues du point $(\xi = 0, \alpha = 90^\circ)$; quant à la stratification cherchée, elle doit apparaître par bandes verticales.

Nous avons traité de la sorte le catalogue de G. & A. de VAUCOULEURS (R13), qui donne les redshifts

de 2713 galaxies.

On voit apparaître une zone moins dense au voisinage de la valeur $\xi = 540$ km/s, qui est optimisée par le choix suivant des paramètres :

Vitesse de la Terre $\vec{V}$ par rapport à la bande :

(18) 590 km/s dans la direction (22h20 mn, + 61°)

Direction de la normale N :

(19) (5h 45mn, + 4°40')

Elle se présente alors sous la forme d'une bande très nette, entre les valeurs $\xi = 523$ km/s et $\xi = 552$ km/s (voir la figure XIII) ; les zones adjacentes de même largeur comportent respectivement 22 objets (devant) et 26 (derrière) ; la position dans le ciel de ces objets est indiquée sur la figure XIV.

La collecte de nouvelles données permettra de savoir si ce phénomène n'est pas un artefact dû à la puissance de l'algorithme d'optimisation.

Dans ce cas, elle indiquerait qu'une moitié du ciel est traversée par une zone sans galaxies, d'épaisseur $\frac{1}{3}$ Mpc, que l'on observe jusqu'à l'incidence de 85° - donc sous une épaisseur de 10 Mpc.

Notons que la direction de cette bande coïncide avec celle de la stratification des Q.S.O., à 1° environ (cf. (17) et (19)) ; et que la vitesse de la Terre par rapport à cette bande (18) est proche de celle déduite de l'effet RUBIN-FORD (les deux vecteurs ont même longueur et font un angle de 30°).

On peut mettre en évidence d'autres bandes par la même méthode, notamment pour $\xi = 750$ km/s, 1250 km/s, - 1450 km/s ; mais elles sont plus éloignées, comportent moins d'objets et apparaissent donc comme moins significatives.

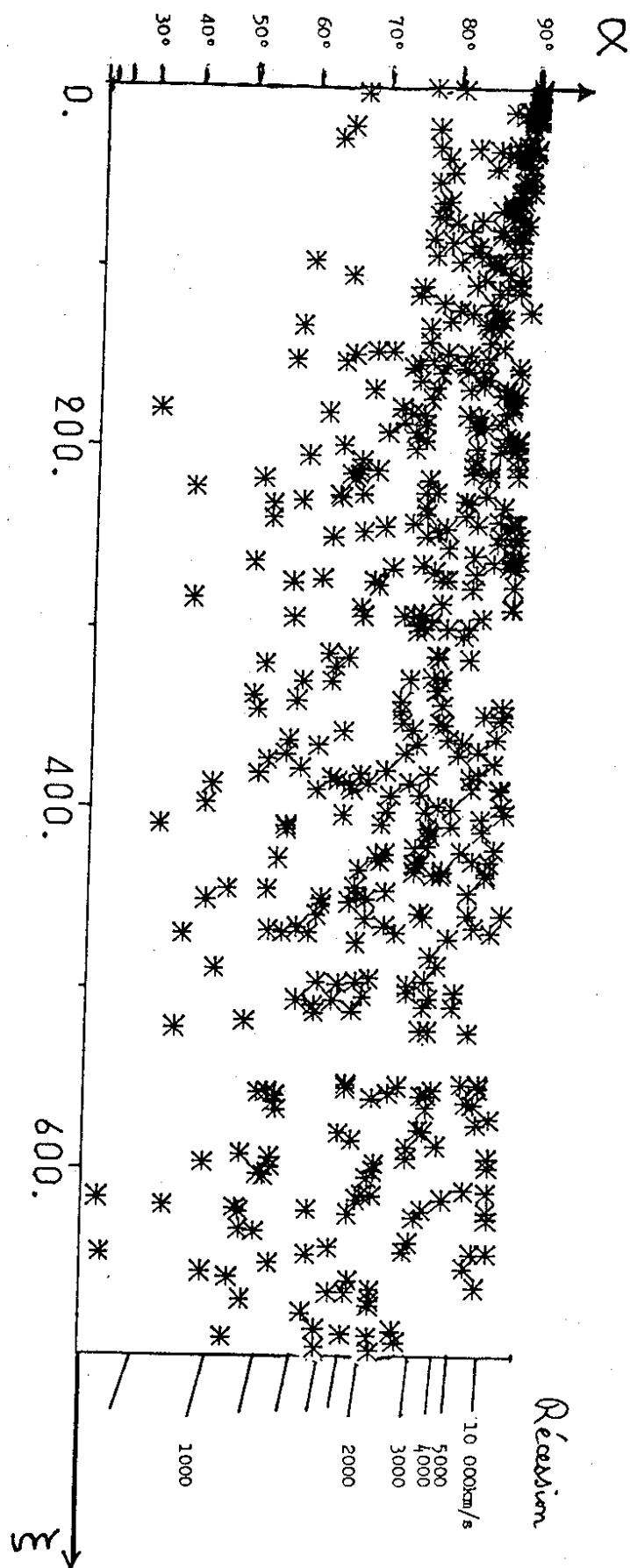


Fig. XIII

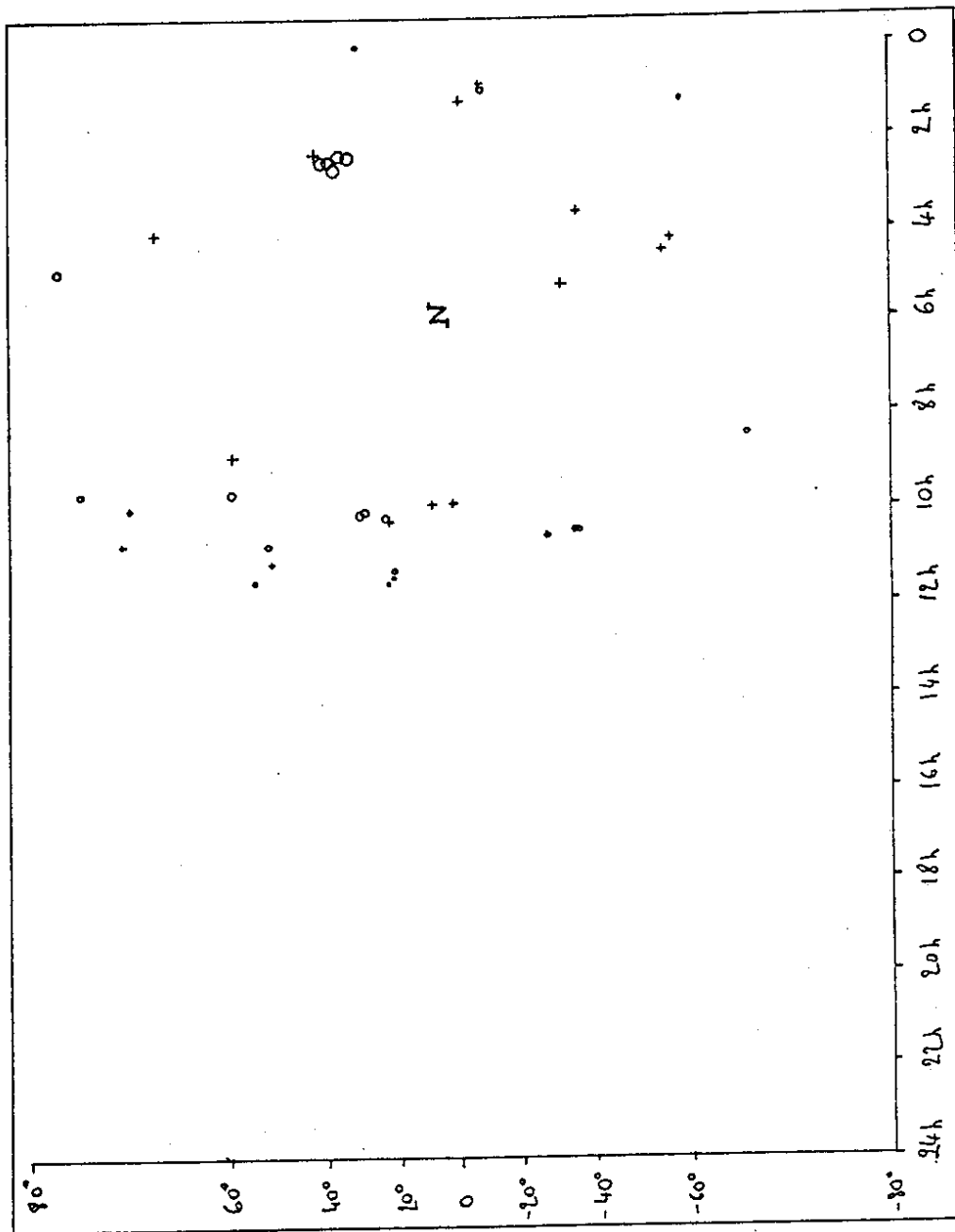


Fig.XIV

6.

CONCLUSIONS

=====

Les faits établis ici sont les suivants :

Il existe un modèle relativiste d'univers, à constante cosmologique positive et à structure spatiale hypersphérique S_3 , qui est compatible avec les divers tests observationnels et qui fait apparaître :

- 1°) Un partage de S_3 en deux hémisphères séparés par une zone équatoriale sans Q.S.O., d'une largeur de 2° .
- 2°) Une stratification de l'univers par zones sans Q.S.O., parallèles à cet équateur. Si les raies d'absorption des Q.S.O. indiquent des nuages gazeux, ceux-ci se situent de façon privilégiée dans ces zones.

Une étude préliminaire indique que cette stratification peut se poursuivre, à échelle fine, parmi les galaxies.

Les propriétés qui apparaissent ainsi sont très sensibles aux paramètres du modèle - et les fixent à quelques millièmes près à la valeur indiquée ci-dessus (17).

Un tel modèle, sans aucun paramètre ajustable, est particulièrement vulnérable. Si les propriétés observées persistent après la prise en compte de nouveaux objets (ainsi que cela s'est déjà produit) les implications cosmologiques seront extrêmement précises.

Par ailleurs, nous avons proposé une interprétation du partage de l'univers en deux par la coexistence de matière et d'antimatière. Cette hypothèse est étayée par les observations de rayons γ diffus dans le domaine 35MeV - 200MeV.

Nous avons indiqué un mécanisme cosmogonique - la création de paires dans un big-bang fortement anisotrope - qui pourrait conduire à une telle situation.

Une telle cosmologie n'est pas incompatible avec les théories qui laissent prévoir une certaine dissymétrie matière-antimatière, comme une instabilité possible du proton. Elle fournit simplement une majoration de ces effets que l'on peut éventuellement prendre en compte.

Enfin , ainsi que l'a fait remarquer ZE'LDOVICH (R 17) , l'existence d'une constante cosmologique positive pourrait être prise en compte par une théorie fondamentale des champs.

ANNEXE

OSO	ASCENSION DROITE	DECLINAISON	V	Z (EM)	Z (ABS) PRÉVU
1801+010	18 1 43.34	+ 1 1 18.4	19.00	1.522	[.86 .93]
1629+120	16 29 24.60	+12 2 16.0	18.50	1.782	[.93 1.01]
1700+180	17 0 45.00	+18 2 .0	17.50	1.424	[.93 1.01]
1635+159	16 35 33.20	+15 55 12.0	19.00	2.140	[.94 1.02]
1634+176	16 34 1.80	+17 41 18.0	18.00	1.897	[.96 1.03]
1622+158	16 22 57.60	+15 52 16.0	18.00	1.409	[.96 1.03]
1756+237	17 56 56.50	+23 43 55.0	18.00	1.721	[.96 1.04]
1556+245	15 56 41.22	-24 34 11.3	.00	2.813	[.97 1.05]
1542+042	15 42 29.80	+ 4 17 6.2	.00	2.182	[.98 1.05]
1547+105	15 47 34.60	+10 34 1.0	18.00	1.309	[.99 1.07]
1548+114	15 48 21.80	+11 29 48.0	19.00	1.901	[.99 1.07]
1548+116	15 48 20.10	+11 36 15.0	.00	1.920	[.99 1.07]
1559+173	15 59 4.83	+17 22 33.7	18.00	1.944	[1.00 1.08]
1635+266	16 35 34.70	+26 40 18.0	.00	1.830	[1.02 1.10]
1702+298	17 2 10.90	+29 51 5.0	19.14	1.927	[1.03 1.11]
1623+268	16 23 44.80	+26 51 27.0	.00	2.480	[1.04 1.12]
1624+269	16 24 3.10	+26 57 33.0	.00	2.180	[1.04 1.12]
1524+101	15 24 21.60	+10 9 32.0	18.00	1.358	[1.04 1.12]
1508+055	15 8 14.95	- 5 31 49.1	17.00	1.191	[1.05 1.13]
1540+180	15 40 3.53	+18 5 39.6	18.00	1.662	[1.05 1.13]
1545+209	15 45 29.10	+20 54 35.0	.00	1.810	[1.06 1.14]
1511+103	15 11 3.50	+10 22 39.0	17.00	1.546	[1.08 1.16]
1606+289	16 6 38.60	+28 59 38.0	.00	2.620	[1.09 1.17]
1606+289	16 6 9.90	+28 57 12.0	19.00	1.989	[1.09 1.17]
1605+288	16 5 18.30	+28 51 54.0	.00	1.710	[1.09 1.17]
1454+060	14 54 2.58	- 6 5 40.4	18.03	1.249	[1.09 1.17]
1604+290	16 4 52.80	+29 3 32.0	.00	1.970	[1.09 1.18]
1517+176	15 17 57.80	+17 36 46.0	17.50	1.390	[1.10 1.19]
1502+106	15 2 .18	+10 41 21.3	19.50	1.833	[1.11 1.19]
1449+012	14 49 12.63	- 1 15 18.4	18.00	1.314	[1.11 1.20]
1523+214	15 23 12.00	+21 26 .0	18.90	1.924	[1.12 1.20]
1456+092	14 56 56.90	+ 9 16 8.0	18.50	1.991	[1.12 1.21]
2044+168	20 44 30.78	-16 50 9.4	16.90	1.943	[1.13 1.22]
2021+330	20 21 26.90	-33 3 25.0	19.90	1.470	[1.13 1.22]
1448+232	14 48 6.00	-23 17 .0	.00	2.221	[1.14 1.23]
1628+363	16 28 57.70	+36 19 36.0	17.50	1.254	[1.14 1.23]
1611+343	16 11 47.93	+34 20 20.9	17.50	1.401	[1.14 1.23]
1620+356	16 20 39.78	+35 38 25.0	18.50	1.473	[1.14 1.23]
1517+239	15 17 12.00	+23 58 .0	16.40	1.901	[1.16 1.24]
1556+335	15 56 59.43	+33 31 47.4	17.00	1.650	[1.16 1.25]
1633+382	16 33 30.63	+38 14 9.5	18.00	1.814	[1.16 1.25]
1440+232	14 40 8.00	-23 16 32.0	18.00	2.221	[1.17 1.26]
1505+219	15 5 12.00	+21 54 .0	17.60	2.130	[1.17 1.27]
1442+101	14 42 50.55	+10 11 13.0	17.57	3.530	[1.18 1.27]
1504+217	15 4 1.50	+21 42 3.0	.00	1.680	[1.18 1.27]
1430+178	14 30 10.56	-17 48 23.2	.00	2.331	[1.19 1.28]
2059+034	20 59 8.80	+ 3 29 49.0	18.00	1.460	[1.20 1.29]
1525+314	15 25 17.40	+31 25 46.5	19.10	1.380	[1.21 1.30]
2040+374	20 40 7.00	-37 24 48.0	17.00	2.276	[1.22 1.32]
1435+172	14 35 40.50	+17 13 47.0	18.00	1.470	[1.25 1.35]
1416+067	14 16 39.09	+ 6 42 20.8	16.79	1.436	[1.28 1.38]
1421+122	14 21 4.69	+12 13 26.7	16.50	1.604	[1.29 1.38]
1403+085	14 3 21.88	- 8 33 56.8	.00	1.763	[1.31 1.41]
2126+158	21 26 26.69	-15 51 51.5	17.30	3.280	[1.32 1.42]
2121+053	21 21 14.80	+ 5 22 27.0	17.50	1.878	[1.32 1.42]
1429+199	14 23 21.40	+19 59 33.0	.00	1.770	[1.33 1.44]
1423+202	14 23 33.40	+20 16 12.0	.00	2.190	[1.34 1.44]
1416+159	14 16 28.40	+15 55 28.0	17.00	1.472	[1.34 1.44]
1423+203	14 23 37.10	+20 22 59.0	.00	1.880	[1.34 1.44]
1359+058	13 59 4.00	- 5 53 26.0	18.00	1.986	[1.34 1.44]
1421+201	14 21 36.90	+20 8 50.0	.00	2.190	[1.34 1.45]
2055+440	20 55 41.00	-44 0 40.0	17.00	2.063	[1.35 1.45]
1402+044	14 2 30.00	+ 4 29 54.7	18.50	3.200	[1.35 1.45]
2005+403	20 5 59.54	+40 21 2.0	19.50	1.736	[1.35 1.46]
2116+358	21 16 22.00	-35 49 6.0	17.00	2.341	[1.36 1.46]
2134+004	21 34 5.28	+ 0 28 25.0	18.00	1.936	[1.38 1.48]
2112+407	21 12 6.00	-40 42 .0	18.00	2.543	[1.38 1.48]
2120+168	21 20 25.40	+16 51 56.0	17.96	1.805	[1.39 1.49]
2143+156	21 43 44.40	-15 41 5.0	18.50	2.055	[1.42 1.53]
1346+036	13 46 8.00	- 3 38 4.0	17.00	2.344	[1.42 1.53]
2146+133	21 46 46.37	-13 18 26.7	19.50	1.800	[1.44 1.55]
2136+141	21 36 37.37	+14 10 .4	18.50	2.427	[1.47 1.58]
1337+013	13 37 30.40	- 1 22 38.0	18.50	1.607	[1.49 1.61]
1421+330	14 21 .00	+33 0 .0	16.50	1.904	[1.50 1.62]
2144+362	21 44 29.90	-36 15 51.0	17.80	2.081	[1.51 1.63]
2200+238	22 0 7.75	-23 49 42.1	18.50	2.118	[1.56 1.67]
1354+258	13 54 48.39	+25 52 5.5	18.50	2.032	[1.57 1.69]
1334+119	13 34 41.40	+11 55 29.0	18.00	1.760	[1.59 1.71]
2158+101	21 58 48.80	+10 9 23.0	17.70	2.730	[1.62 1.74]
1318+113	13 18 31.00	-11 23 .0	18.00	2.308	[1.63 1.75]
1331+170	13 31 10.10	+17 4 24.0	16.00	2.081	[1.67 1.79]
2212+299	22 12 25.14	-29 59 20.7	17.50	2.703	[1.68 1.81]
2204+408	22 4 54.00	-40 51 .0	.00	3.180	[1.69 1.82]
1318+113	13 18 49.61	+11 22 30.8	19.13	2.171	[1.73 1.86]
1309+056	13 9 2.00	- 5 36 7.0	17.00	2.180	[1.74 1.87]
1432+488	14 32 .00	+48 53 .0	19.20	1.940	[1.76 1.90]
1334+285	13 34 36.10	+28 35 42.0	18.74	1.908	[1.77 1.91]
2219+394	22 19 53.00	-39 28 14.0	17.00	2.022	[1.80 1.93]
2225+055	22 25 54.02	- 5 34 16.6	17.70	1.981	[1.80 1.94]
1634+627	16 34 22.40	+62 44 9.0	.00	2.170	[1.81 1.95]
1300+243	13 0 36.00	-24 18 30.0	17.00	2.259	[1.81 1.95]
1631+627	16 31 42.00	+62 44 49.0	.00	1.960	[1.81 1.95]
2225+404	22 25 31.00	-40 24 50.0	17.00	2.020	[1.86 1.99]
2227+394	22 27 38.00	-39 28 32.0	.00	3.450	[1.87 2.01]
2228+405	22 28 10.90	-40 33 32.0	.00	3.150	[1.88 2.02]
1307+181	13 7 36.60	+18 9 39.0	.00	2.120	[1.92 2.07]
1246+057	12 46 38.00	- 5 42 44.0	17.00	2.212	[2.01 2.16]
2256+017	22 56 24.59	+ 1 47 35.6	18.50	2.663	[2.27 2.45]

Redshifts prévus pour les " anti-quasars"

- Références -

- R 1 BURBIDGE G.R., CROWNE A.H., SMITH H.E., Ap.J.suppl.33,
p. 113 (1977).
- R 2 FICHEL C.E., SIMPSON G.A., THOMPSON D.J., Ap.J.222,
p. 833 (1978).
- R 3 FLICHE H.H., Thèse de Doctorat (à paraître).
- R 4 FLICHE H.H., SOURIAU J.M., Astron. and Astrophys., 78,
p. 87 (1979).
- R 5 JAUNCEY D.L., WRIGHT A.E., PETERSON B.A., CONDON J.J.,
Ap.J.229, p. 73 (1979).
- R 6 KLEIN O., Science 171, p. 339 (1971)
- R 7 LIFSHITZ E.M., KHALATNIKOV I.M., Adv. in Phys., (G.B.
Transl.), 46, P. 85 (1963).
- R 8 OMNES R., Astron. and Astrophys., 11, p. 450 (1971).
- R 9 PERRY J.J., BURBIDGE E.M., BURBIDGE G.R., Publ.Astr.Soc.
Pacific, 99, p. 337 (1978).
- R 10 SOURIAU J.M., Colloques Internationaux CNRS, 237, p. 59
(1974).
- R 11 SRAMEK R.A., WEEDMAN B.W., Ap.J. 221, p. 468 (1978).
- R 12 STEIGMAN G., Ann.rev.Astr. Astrophysics, 14, p. 339 (1976).
- R 13 de VAUCOULEURS G., de VAUCOULEURS A., CORWIN H.G., 2nd.
Ref. Catal. of bright galaxies, Un. of Texas Press,
Austin (1976).
- R 14 WEBSTER A., Month. Notices Roy. Ast. Soc., 179, p. 511
(1977).
- R 15 WOLF J.A., Spaces of Constant Curvature, Mc.Graw Hill
(1967).
- R 16 WOLFE A.M., DAVIS M.M., La Jolla & Arecibo Preprint (1979).
- R 17 ZEL'DOVICH Y.B., Usp.Fiz.Nauk 95, p. 200 (1968).

