

ANNALES DE L'I. H. P.

D. W. SCIAMA

L'observation et la cosmologie

Annales de l'I. H. P., tome 17, n° 1 (1961), p. 25-36

http://www.numdam.org/item?id=AIHP_1961__17_1_25_0

© Gauthier-Villars, 1961, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'I. H. P. » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/legal.php>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

L'observation et la cosmologie

par

D. W. SCIAMA (1).

Introduction. — Le but de l'observation en cosmologie est double :

- (i) déterminer les valeurs de grandeurs particulières intéressantes à la fois en cosmologie et en astrophysique;
- (ii) déterminer la structure à grande échelle de l'Univers dans l'espace et le temps.

Nous considérerons les résultats obtenus dans ces deux programmes successivement.

1. Grandeurs particulières. — *a. La constante de Hubble τ .* — Celle-ci détermine la vitesse d'expansion actuelle de l'Univers suivant la loi

$$v = \frac{r}{\tau}.$$

La valeur de cette grandeur est manifestement incertaine, la principale difficulté se trouvant dans l'établissement d'une échelle de distance précise pour les galaxies. La discussion la plus récente est due à Sandage (*Ap. J.*, t. 127, 1958, p. 513). Ses considérations sont trop compliquées à reproduire ici, mais il apparaît que τ vérifie probablement les inégalités suivantes :

$$3 \cdot 10^{10} > \tau > 10^{10} \text{ années.}$$

(1) Conférence faite à l'Institut Henri Poincaré le 5 mai 1959. Texte anglais traduit par M^{me} L. Bouche.

Ainsi τ est du même ordre de grandeur que l'âge de la Voie Lactée (Hoyle *H. R. Symposium. X General Assembly I. A. U.*, Moscow).

b. La densité moyenne de matière ρ dans l'Univers. — Une limite inférieure de ρ peut être déduite des masses des galaxies. Une discussion récente par Oort (*Solway Conference*, 1958) conduit à $\rho > 3 \cdot 10^{-34}$ g/cm³. Des limites supérieures peuvent être données du fait de l'absence d'absorption optique ou radioélectrique appréciable dans l'espace intergalactique (DUFAY, *Galactic Nebulae and Interstellar Matter*, 1947; FIELD, *Ap. J.*, t. 129, 1959, p. 536). Si le gaz intergalactique, qui est certainement surtout de l'hydrogène, est ionisé à moins de 10 %, alors les observations radioélectriques impliquent que

$$\rho < 6 \cdot 10^{-29} \text{ g/cm}^3.$$

Si d'autre part, l'ionisation dépasse 10 %, alors les observations optiques entraînent que

$$\rho < 2 \cdot 10^{-27} \text{ g/cm}^3.$$

Cette dernière condition paraît être la bonne, puisque les études cosmologiques de modèles stationnaires ou en évolution suggèrent que le gaz intergalactique est considérablement ionisé. La raison de cela est que dans les modèles en évolution le gaz serait ionisé dans sa première phase chaude, tandis que dans le modèle stationnaire la matière nouvellement créée sera certainement sous la forme de protons et d'électrons séparés plutôt que sous celle relativement complexe et peu stable d'atomes d'hydrogène. Dans les deux types de modèles la durée de recombinaison est si longue pour des températures raisonnables, qu'on s'attendrait à ce que cet état d'ionisation soit maintenu (*cf.* aussi Mc CREA, *Endeavour*, t. 17, 1958, p. 5). Il peut être possible de détecter un tel gaz ionisé par une expérience de satellite, en cherchant le photon Lyman- α naissant d'une recombinaison. Si un tel gaz ionisé existe, il paraît avoir une importance astrophysique, puisqu'il sera certainement le siège d'un champ magnétique. Un tel champ magnétique pourrait avoir une influence dynamique importante sur les rayons cosmiques, et être aussi l'origine des champs magnétiques dans les galaxies qui ont certainement une condensation du gaz intergalactique.

En définitive, nous notons que les inégalités pour ρ et τ sont compa-

tibles avec la relation désirable mentionnée dans l'article précédent, c'est-à-dire

$$G \rho \tau^2 \sim 1.$$

2. La structure de l'Univers. — *A priori* la structure à grande échelle de l'Univers pourrait être extrêmement compliquée. Cependant, comme dans d'autres branches de la physique, le plus grand progrès se fait en partant des hypothèses les plus simples et qui ne sont pas incompatibles avec tout fait bien établi. Nous commençons donc par supposer que sur une certaine échelle de grandeur l'Univers a une structure simple. L'échelle de grandeur qu'on doit adopter pour que cela soit vrai même approximativement est initialement inconnue et devra être déduite de l'observation, mais nous pourrions espérer éventuellement découvrir par la théorie ce qui la détermine. Pour nous donner un point de départ, nous supposerons ici que l'unité de base d'une structure simple est un amas de galaxies, que nous appellerons une particule.

Les hypothèses de simplicité qu'on fait d'habitude peuvent se réduire aux suivantes (WALKER, *J. London, Math. Soc.*, t. 19, 1944, p. 219.)

Chaque particule voit toujours une distribution isotrope des particules autour d'elle.

Nous appellerons ceci le principe cosmologique ou CP. On peut déduire du CP que toutes les particules décriront le système de la même manière. Dans un tel univers, on ne peut distinguer ni position, ni direction, c'est-à-dire, on ne peut pas dire où l'on est ni dans quelle direction on regarde. Cependant, on peut parler du temps, car la densité de la particule sera variable en général, si bien que sa densité servira d'horloge.

Bien sûr, nous n'attendons pas que le CP soit exactement vérifié même par nos particules complexes. On a besoin d'un certain procédé de moyenne statistique, mais, encore une fois, l'échelle de cette moyenne n'est pas déterminée *a priori*. A la fois, pour l'observation et la théorie, nous sommes en face d'une difficile question, mais encore pour nous donner un point de départ, supposons que le CP est satisfait exactement. Alors on peut montrer (BRUDI, *Cosmology*, Cambridge,

1952) que la métrique de l'Univers peut être écrite sous la forme de Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2(t) (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2)}{\left(1 + \frac{1}{4} kr^2\right)^2}, \quad \dots (1)$$

où $R(t)$ (le facteur d'expansion) est une fonction arbitraire du temps et k (la courbure spatiale en unité de R^{-2}) a les valeurs possibles $+1$, 0 , -1 .

Avec cette forme de la métrique les coordonnées d'une particule (r, θ, φ) , sont indépendantes de t (repère entraîné) et les trajets des rayons lumineux sont donnés comme d'habitude par $ds^2 = 0$.

De plus, pour une particule donnée $dr = d\theta = d\varphi = 0$ si bien que $dt = ds$, ce qui signifie que t mesure le temps propre de chaque particule.

Nous devons maintenant mentionner l'effet causé par une nouvelle hypothèse de simplification. Celle-ci consiste à joindre au CP l'affirmation que *chaque particule voit toujours la « même » distribution de particule autour d'elle*. Ceci est connu comme le principe parfait cosmologique ou PCP (BONDI et GOLD, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, t. 108, 1948, p. 252). Dans ce type d'univers plus limité, on ne plus parler du temps. Le nombre des métriques possibles est maintenant rigoureusement réduit. Les seules possibilités sont :

(i) $R = \text{Cte}$, k arbitraire (univers d'Einstein);

(ii) $R = e^{\frac{t}{\tau_0}}$, $k = 0$, $\tau_0 =$ une constante (Univers de De Sitter) ... (2)

Puisque l'Univers d'Einstein est statique ($R = \text{Cte}$), il ne contient pas de décalage vers le rouge, donc si le PCP est correct l'Univers doit se conformer à la métrique de De Sitter. C'est la métrique de la théorie de l'état stationnaire (BONDI et GOLD, *loc. cit.*; HOYLE *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* t. 108, 1948, p. 372; t. 109, 1949, p. 365; Mc CREA *Proc. Roy. Soc.*, t. 206, 1951, p. 562), dans lequel la densité de matière est maintenue à une valeur constante par la création continuelle de nouvelle matière.

Le but des observations est de déterminer $R(t)$ et k . R peut être déterminé par un développement de Taylor où nous connaissons $\dot{R} \left(= \frac{dR}{dt} \right)$,

\ddot{R} , ... à l'instant présent. Nous connaissons déjà \dot{R} approximativement, puisque

$$\frac{\dot{R}}{R} = \frac{1}{\tau}.$$

Le principal problème immédiat pour les observateurs maintenant est de déterminer k et le paramètre accélération \ddot{R} .

D'un intérêt plus immédiat que le comportement exact de $R(t)$ est la question : l'Univers est-il stationnaire ou en évolution? Dans cet article nous discuterons les observations qui sont directement en rapport avec cette question. Une discussion plus détaillée du problème expérimental total a été donnée par l'auteur dans *Vistas in Astronomy*, t. 3, London, 1959.

(i) RELATION ENTRE LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE ET LA MAGNITUDE APPARENTE POUR LES GALAXIES. — La relation observée est linéaire pour les galaxies voisines, correspondant à la loi de Hubble $v = \frac{r}{\tau}$. Cette partie de la relation détermine seulement \dot{R} et ne permet pas de choisir entre le PCP et le CP. Pour obtenir une relation non linéaire appréciable, qui contienne \ddot{R} , on doit observer les galaxies éloignées, qui sont malheureusement très faibles. Néanmoins Humason, Mayall et Sandage (*Ap. J.*, t. 61, 1956, p. 97) et Baum (*Ap. J.*, t. 62, 1957, p. 6) ont réussi à mesurer des magnitudes apparentes pour un décalage vers le rouge de 0,2 et 0,4 respectivement — une région dans laquelle la non-linéarité théorique devrait être appréciable.

Malheureusement, comme l'a montré Miss Scott (*Ap. J.*, t. 62, 1957, p. 5) on ne peut tirer aucune conclusion de ces observations puisqu'elles impliquent des effets substantiels de sélection. Le principal effet vient de l'inévitable sélection de galaxies à grandes distances dont l'éclat absolu tend à être plus grand que la moyenne. On doit tenir compte de cet effet en convertissant les magnitudes apparentes en distances, mais cette conversion ne peut être faite actuellement avec la précision désirée pour décider entre le PCP et le CP. C'est seulement quand nous aurons une connaissance certaine de la fonction de luminosité pour les galaxies et de leurs distributions dans les amas que ce problème de conversion sera résolu.

(ii) RELATION ENTRE LE NOMBRE DES GALAXIES ET LEUR MAGNITUDE APPARENTE. — Dans son premier ouvrage sur les galaxies, Hubble a essayé de déterminer cette relation. On sait maintenant que ses résultats sont erronés, et l'intérêt s'est porté sur les comptes des radio-sources, dont on pense que la plupart sont extragalactiques. En ce moment, il existe de sérieuses divergences entre les résultats de différents observateurs. Heureusement des antennes améliorées entrent actuellement en fonction et l'on attend des résultats plus sûrs, bientôt, de Cambridge, de Manchester et d'Australie.

Je dois cependant prendre une précaution supplémentaire. Il semble que la relation entre la magnitude apparente et le nombre de galaxies sera difficile à interpréter en termes de modèles théoriques. C'est en partie parce que la relation est sensible aux fluctuations de hasard dans la distribution des sources, et en partie parce qu'il y a une énorme diffusion dans l'éclat absolu des radio-sources (peut-être autant que dans le rapport de 10^8 à 1). Cette situation serait améliorée si la raie de 21 cm des sources éloignées pouvait être détectée, puisqu'on aurait alors un effet Doppler à relier aux autres observations.

(iii) DISTRIBUTION D'ÂGE DES GALAXIES. — Dans les théories d'univers en évolution, les galaxies étaient toutes formées à peu près au même moment cosmique. Selon ces théories, les galaxies auraient une gradation d'âge en rapport avec la distance, du fait que les temps-lumière considérés sont de plus en plus grands. D'autre part, selon la théorie d'Univers stationnaire, la distribution d'âge des galaxies serait la même partout (et, en fait, exponentielle). Par suite, toute gradation d'une propriété *intrinsèque* d'une galaxie avec la distance suffirait à invalider la théorie de l'état stationnaire.

Deux telles gradations ont été en fait proposées. La première est celle appelée effet Stebbins-Whitford (*Ap. J.*, t. 108, 1948, p. 413), selon lequel les galaxies sont *intrinsèquement* plus rouges aux grandes distances qu'aux petites. Cette affirmation implique que le décalage vers le rouge a été corrigé, mais comme l'a montré de Vancoeurs (*C. R. Acad. Sc.*, t. 227, 1948, p. 466) et BONDI, GOLD et SCIAMA (*Ap. J.*, t. 120, 1954, p. 597) cette correction est erronée, parce qu'elle est étalonnée sur une galaxie voisine particulière, M 32, qui, en fait, a un spectre différent de ceux des galaxies éloignées.

Un travail récent par Whitford et Code (*Ap. J.*, t. 61, 1956, p. 352; *Sky and Telescope*, t. 16, 1957, p. 222; *P. A. S. P.*, 1959) a donné du poids à cette critique, puisqu'ils ont trouvé qu'une estimation directe de la correction du décalage vers le rouge ne laisse aucun effet Stebbins-Whitford.

La seconde gradation suggérée est que les amas éloignés tendent à être plus riches en galaxies que les amas proches (Just, *Ap. J.*, t. 129, 1959, p. 268). Cependant cette suggestion est prématurée, car Just n'a pas tenu compte de toutes les sources d'erreur possibles. J'apprends (Just, Communication privée) qu'il a l'intention de faire une étude plus large du problème, dans laquelle il tiendra compte de toutes les sources d'erreurs connues.

Il faudrait insister sur le fait que l'absence d'une gradation n'est pas une preuve en faveur de la théorie de l'état stationnaire, à moins que cette absence se rapporte à des distances dont le temps-lumière est comparable à l'échelle de temps de l'évolution galactique. Une méthode plus sûre pour confirmer la théorie de l'état stationnaire serait de déterminer la distribution d'âge des galaxies voisines et de la comparer avec le résultat théorique (exponentiel). Cette méthode peut être possible bientôt, puisque notre connaissance de l'évolution stellaire et de l'âge des amas d'étoiles s'améliore rapidement.

(iv) PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MODÈLES RIVAUX. — *a. La formation et la distribution des galaxies.* — La dérivation des modèles de Robertson-Walker est basée sur l'hypothèse que l'univers est homogène. On considère cette homogénéité comme exacte pour les besoins des mathématiques, en pratique elle a seulement une réalité statistique. La version statistique de l'hypothèse n'a jamais été établie d'une façon précise : il est habituel de se référer aux moyennes dans une « région suffisamment grande » (*cf.* NEYMAN et SCOTT, *J. Roy. Stat. Soc.*, 1958). Cependant, cette région peut être assez grande pour qu'on ait à distinguer l'univers spatial à un instant (la carte du monde) et l'univers comme nous le voyons sur notre cône de lumière passée (l'image du monde). L'homogénéité se rapporte aux moyennes prises dans des régions de la carte du monde, tandis que les observations relatives à l'homogénéité ont trait à l'image du monde. Par conséquent, l'hypothèse d'homogénéité peut être difficile à prouver (sauf dans le modèle de l'état stationnaire,

où les moyennes dans l'image du monde et dans la carte du monde sont les mêmes). De plus, il n'y a rien dans l'état actuel de la théorie qui puisse indiquer la grandeur de la région qu'on doit échantillonner pour faire une expérience adéquate.

Donc, sur un terrain purement théorique, il est important d'essayer de calculer les propriétés des irrégularités « locales » qui peuvent apparaître dans l'Univers. Bien sûr il n'est pas nécessaire de faire valoir son importance du point de vue expérimental : les irrégularités (sans doute amas et peut-être super-amas de galaxies) sont, pour ainsi dire, le point de rencontre commun de l'astrophysique et de la cosmologie.

Il y a eu des tentatives variées pour expliquer la formation des galaxies dans des modèles évolutifs d'Univers (LEMAITRE, *Rev. Mod. Phys.*, t. 21, 1949, p. 35; GAMOW, *K. Dansk. Vid. Selsk.*, t. 27, n° 10, 1953). Selon ces théories, il y eut une période de temps déterminée pendant laquelle les conditions physiques de l'Univers furent favorables à l'apparition de ce processus. Malheureusement, ces théories se heurtent à la difficulté venant du fait qu'il ne peut pas apparaître de petites perturbations des modèles homogènes dans les intervalles de temps disponibles (BONNOR, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, t. 117, 1957, p. 104; *Ann. Inst. H. Poincaré*, t. 15, 1957, p. 158), si bien qu'on devra invoquer de grandes perturbations. Cela conduit aussi à de nouvelles difficultés, l'une technique, l'autre de principe. La difficulté technique est que personne ne sait comment expliquer la condensation gravitationnelle en présence du mouvement de compression fortement turbulent qui est nécessaire pour fournir de grandes fluctuations de densité. La difficulté de principe est que les caractéristiques de ce mouvement violent (par exemple le nombre de Mach, ou le spectre de la turbulence) ne sont pas déterminées par la théorie, mais sont implicites comme conditions initiales de l'état de l'Univers à $t \sim 0$. Ces difficultés, bien que pas suffisamment sérieuses pour exclure les modèles évolutifs, se sont élevées le long de tout calcul détaillé des propriétés des galaxies qui pouvaient être comparées avec l'observation.

La situation est différente dans la théorie de l'état stationnaire, où les deux difficultés peuvent être évitées (SCIAMA, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, t. 115, 1955, p. 3). Il est vrai qu'on a encore besoin d'une grande perturbation locale de densité (par un facteur ~ 4), mais cela peut être accompli sans une violente turbulence de compression. La

raison est que dans un état stationnaire les galaxies existent à tout moment (ou pas du tout!). Ces galaxies préexistantes vont perturber gravitationnellement le gaz intergalactique d'une façon *systématique*, et ainsi produire une forte augmentation de densité sans créer en même temps une turbulence violente. Le critérium habituel de Jeans peut être employé de façon approximative, pour décider si une instabilité gravitationnelle apparaîtra dans ces régions denses.

La difficulté sur les conditions initiales est éliminée par l'hypothèse que le système est dans un état stationnaire. Cette hypothèse est si exigeante qu'elle conduit à une détermination des propriétés moyennes des galaxies sans l'introduction d'aucun paramètre arbitraire. Il faudrait insister sur le fait que si loin que les calculs soient poussés, ils ne tiennent pas compte nécessairement de tous les facteurs. Par exemple, les champs magnétiques ont été ignorés, alors que, comme le gaz intergalactique est probablement fortement ionisé, ils peuvent avoir un effet dynamique important sur le processus de condensation; voir MESTEL et SPITZER (*Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, t. 116, 1956, p. 503) pour le problème stellaire correspondant. L'objet du calcul n'est pas alors de donner une explication complète de la formation des galaxies, mais plutôt de décrire un modèle qui montre comment l'hypothèse d'un état stationnaire peut conduire à des résultats précis sur les propriétés moyennes des galaxies. Ces calculs devraient être conduits dans deux directions. D'abord tous les facteurs importants seraient inclus, ensuite, serait étudiée la distribution des propriétés galactiques par leurs valeurs moyennes.

En dépit de l'âpreté du calcul, ses conséquences sont en parfait accord avec l'observation. Les principaux résultats théoriques sont :

Masse moyenne d'une galaxie (distribution bimodale) (g).....	$2 \cdot 10^{13}$ ou $6 \cdot 10^{14}$
Distance moyenne entre les galaxies (cm)....	4 à $10 \cdot 10^{23}$
Vitesse propre d'une galaxie isolée (cm/s)....	$4 \cdot 10^7$
Nombre maximal de galaxies dans un amas...	10^4
Nombre relatif des amas contenant n galaxies	
($n < 10^4$) (α , constante connue).....	$\frac{\alpha}{n^2}$
Nombre moyen de galaxies par amas.....	10
Pourcentage de galaxies isolées.....	10

Donc dans une sphère de rayon 10^8 années lumière, il y aura 100 000 amas contenant ensemble 10^6 galaxies le nombre d'amas contenant un millier ou plus de galaxies, est environ 100, et le nombre en contenant 10^4 est environ 10. Aucun de ces résultats n'est en contradiction avec les données expérimentales plutôt incertaines.

b. La formation et la distribution des éléments. — La première tentative pour relier la formation des éléments à des considérations cosmologiques a été faite par Gamow en 1946. Il obéissait au fameux ordre d'Eddington : « Allez trouver un endroit plus chaud » (EDDINGTON, *The Internal Constitution of the Stars*, 1926, p. 301). L'endroit plus chaud de Gamow était constitué de l'Univers tout entier à des temps proches de $\tau = 0$. Il suggéra qu'à ces moments, la densité et la température étaient favorables à la formation des éléments de l'hydrogène (ou des neutrons) comme un résultat de réactions thermonucléaires. Ceci conduisit à la théorie α, β, γ de la formation des éléments (ALPHER, BETHE et GAMOW, *Phys. Rev.*, t. 73, 1948, p. 803). L'état de cette théorie et ses nombreuses variantes ont été revues en 1954 (*Les processus nucléaires dans les Astres*, Liège, 1954, 1^{re} partie).

L'objet de la théorie α, β, γ était de trouver un ensemble de conditions de densité et de température compatibles avec les équations du champ d'Einstein, qui en accord avec les taux connus de réactions nucléaires, devrait conduire à la distribution d'abondance des éléments observée. Malgré la liberté permise par les équations d'Einstein, le programme rencontra bientôt des difficultés. La plus directe naquit de l'instabilité des noyaux de poids atomiques 5 et 8. Cette instabilité agit comme un goulot de bouteille dans le processus de formation, et en dépit de nombreux essais pour l'éviter, il semble bien empêcher la formation d'un nombre appréciable d'éléments plus lourds que l'hélium.

De plus, on a découvert la preuve indirecte que la formation des éléments a commencé probablement depuis que la Voie Lactée s'est formée (en addition à la conversion de H en He dans beaucoup d'étoiles). Nous pouvons mentionner ici la découverte de Tc dans les étoiles S par Merrill. Tc est « l'élément manquant » (nombre atomique 43), et son isotope qui a la vie la plus longue a une période de $2 \cdot 10^5$ années seulement. Une preuve supplémentaire vient du fait que les jeunes étoiles semblent contenir plus d'éléments que les vieilles, ce qui indique

que la concentration interstellaire des éléments lourds augmente avec le temps.

Ces considérations suggèrent l'adoption d'une hypothèse différente, par laquelle on essaie de rendre compte de la proportion relative des éléments entièrement en termes de processus nucléaires dans les divers types d'étoiles connues. Le modèle de l'état stationnaire naturellement, exige absolument ce point de vue. De récents développements dans notre connaissance des données nucléaires et dans notre compréhension de l'évolution stellaire ont tellement accéléré les progrès dans ce problème, que la « genèse nucléaire » est devenue maintenant une branche bien définie de l'astrophysique. Comme ses techniques n'ont rien à voir avec la cosmologie (il n'en est pas de même de ses résultats!), il n'est pas nécessaire d'exposer ce travail ici. Le lecteur intéressé trouvera une vue d'ensemble dans l'article de BURBIDGE, BURBIDGE, FOWLER et HOYLE (*Rev. Mod. Phys.*, t. 29, 1957, p. 547).

Il faudrait insister sur le fait que, si cette supposition est couronnée de succès, c'est-à-dire si l'on pouvait rendre compte de tous les détails de la courbe d'abondance et de ses variations de place en place par la synthèse des éléments dans les étoiles, les modèles évolutifs de l'Univers ne seraient pas réfutés, puisqu'on peut certainement choisir des conditions initiales dans ces modèles, telles que dans les premières périodes l'ensemble de la formation d'élément soit négligeable. D'autre part, si la synthèse stellaire n'est pas une source adéquate d'éléments lourds, le modèle de l'état stationnaire sera rejeté. Il sera intéressant de voir si le modèle de l'état stationnaire survit à cette épreuve.

(v) POSSIBILITÉS FUTURES :

- a. Observations radio de 21 cm, des amas de galaxies éloignées;
- b. Études de la corrélation de la distribution des amas (NEYMANN et SCOTT, *Handbuch der Physik*, vol. 53), devrait décider entre le PCP et le CP;
- c. Études de la corrélation de la magnitude absolue, du type spectral et de la morphologie des galaxies (MORGAN and MAYALL, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, t. 69, 1957, p. 291), devrait conduire aux déterminations d'âge et de distance;
- d. Travail supplémentaire sur les galaxies et la formation d'élément;
- e. Observation hors de l'atmosphère terrestre.

