

# Intervention Jean Philippe Uzan

## “Lentilles gravitationnelles faibles : Applications en cosmologie”

Claude Maury, Mai 2016

Le lundi 7 décembre 2015 l'A.E.I.S. accueillait Jean-Philippe Uzan, Directeur de Recherche au C.N.R.S et directeur adjoint de l'Institut Henri Poincaré, également membre de l'I.A.P. pour l'écouter sur le thème ‘Lentilles gravitationnelles faibles : Application en Cosmologie’.

La synthèse que nous avons rédigé de sa conférence comprend deux documents :

1. Une présentation de l'intervention de Jean Philippe Uzan suivie d'un compte rendu des échanges qui ont suivis,
2. Un complément technique, pour ceux qui, bien que non spécialistes des questions traitées, et notamment de la Relativité générale, voudraient approfondir le sujet.

Le texte çï-dessous constitue le premier document.

*Il est sans doute utile d'éclairer l'intervention de Jean Philippe Uzan par quelques éléments rapides sur le fond des sujets abordés, la cosmologie d'une part, la relativité générale d'autre part, en notant que c'est la vision renouvelée de l'espace-temps apportée par la relativité générale qui est le fondement des modèles cosmologiques modernes.*

*Au delà de l'observation naturaliste de la position des étoiles ou agrégats d'étoiles, nous disposons par la mesure du décalage spectral vers le rouge d'une vision de l'univers dans sa profondeur, en rapport avec son expansion. Le diagramme de Hubble qui visualise la relation, quasi-linéaire dans l'univers proche, entre le décalage spectral de la lumière émise et la distance estimée d'un objet, confirme ainsi l'expansion de l'univers<sup>1</sup> sur la période récente.*

---

<sup>1</sup> Le décalage spectral ou redshift  $z$  est lié à la dynamique d'expansion de l'univers par une formule simple. Si  $a(t)$  représente l'échelle de l'univers - le facteur d'échelle à l'instant d'émission, un instant  $t$  du passé - et  $a(t_0)$  l'échelle actuelle - le facteur d'échelle à l'instant actuel  $t_0 > t$  - de valeur plus importante dans le cas d'une expansion, la relation s'écrit  $z(t) = a(t_0)/a(t) - 1$ . On peut montrer que la relation entre le redshift et une certaine mesure de distance, renseigne sur la fonction  $z(t)$ , donc sur l'historique des facteurs d'échelle  $a(t)$  et les taux d'expansion  $H(t) = 1/a da/dt$  aux différentes époques. En particulier, à l'instant actuel et dans l'univers récent donc proche ( $z=0$ ), nous aurons  $1/(1+z) dz/dt = dz/dt \approx H(t_0)$  soit encore  $z \approx [H(t_0)/c] c[t_0-t]$ , instaurant une relation quasi linéaire entre redshift et distance, le coefficient  $H(t_0)$  étant la constante de Hubble. En réalité, le taux d'expansion n'est pas constant. De plus l'écriture précise de la relation exige le choix de la mesure de distance mobilisée : distance angulaire, ou encore une distance luminosité.

*La théorie de la relativité générale qui introduit un espace à quatre dimensions dont la courbure locale est liée au champ gravitationnel, permet, à partir de l'hypothèse d'un univers homogène et isotrope à grande échelle, d'élaborer des modèles cosmologiques variés proposant selon les cas une expansion indéfinie ou le passage à terme à une phase de contraction. Elle nous révèle en particulier que tout l'univers n'est pas totalement accessible à nos observations.*

*Dans ce contexte l'un des axes majeurs des efforts scientifiques a été de multiplier les mesures et les observations, ce qui a permis la découverte de nouveaux objets et d'établir une cartographie visuelle de toutes les sources d'émission, même si les potentialités d'exploration du ciel sont très loin d'avoir été exploitées en totalité.*

*L'idée, dans l'analyse de ces observations, de tenir compte des effets gravitationnels de déviation des trajectoires des rayonnements électromagnétiques, est récente. Elle permet de moduler ou affiner cette analyse. Elle apporte également de nouveaux outils d'investigation pour appréhender les hétérogénéités locales de l'univers, par exemple pour cartographier la matière noire, ou encore pour tester l'isotropie de l'expansion, ou même la validité à une échelle cosmologique de la théorie de la relativité générale.*

*Cet apport est ici illustré de plusieurs manières. Il devrait dans quelques années, avec l'apport des observations de satellites spécialisés, permettre une progression importante de notre connaissance de la distribution des masses dans l'univers, et plus précisément celle de la matière noire.*

Jean Philippe Uzan évoque en introduction de son intervention, un texte de Jon Fosse (Kant), qui traite des interrogations d'un jeune garçon sur la nature de l'univers. Celui-ci s'angoisse en constatant son incapacité à choisir entre "penser" un univers infini ou un univers fini, question à laquelle son père, malgré sa bonne volonté est incapable de répondre.

Jean Philippe Uzan, en retient que l'accroissement des connaissances est une manière de se rassurer sur beaucoup de choses, observation qui d'une certaine manière éclaire son sujet.

### **Le sujet de l'exposé**

1- La cosmologie s'applique, comme on le sait, à traiter deux questions de l'ordre de la physique théorique

- établir des modèles de l'univers, éventuellement modifiables selon les théories adoptées (gravitation, nature de la matière...), en accord avec les observations astrophysiques.
- Extrapoler ces modèles pour en déduire les visions possibles de Mondes conformes au modèle retenu

La comparaison aux observations est, malgré sa difficulté, essentielle, pour tenter de valider les modèles de l'univers que l'on construit. Elle implique de bien connaître les conditions de

propagation de la lumière, dont on sait depuis la relativité générale qu'elle est affectée par le passage au voisinage d'éléments massiques.

2- L'exposé présenté évoque une série de travaux réalisés ces dernières années avec l'aide d'étudiants en thèse, autour des effets dits de "lentilles gravitationnelles", correspondant à l'interprétation de changements géométriques observés affectant la propagation des rayons, du fait du passage à proximité de masses concentrées ou diffuses.

Un certain nombre d'équations assez complètes sont présentées, pas nécessairement compréhensibles en dehors d'un public averti. Mais il est tout de même utile de les montrer, dès lors qu'elles donnent une idée des conditions dans lesquelles se développe le raisonnement.

3- Le point de départ de ces travaux est au fond assez simple ; toute l'information que nous disposons sur l'univers provient du rayonnement électro-magnétique des corps célestes : la compréhension fine de la propagation de ces ondes dans un environnement rarement homogène, donne une clé pour se faire une idée de la distribution de la matière, et obtenir des éléments sur l'isotropie de l'expansion de l'univers.

4- La relation entre l'observateur et une émission lointaine, est comme on le sait à apprécier au sens large dans l'espace-temps. Dès lors que la lumière se propage (dans le vide) à une vitesse constante finie, l'ensemble des événements observables à partir d'un emplacement donné, se situe dans un cône de lumière (au moins au sens topologique), qui en délimite l'extension.

Ce premier constat montre qu'il existe des limites à l'observation à partir d'un point donné dont on ne peut s'abstraire. Les avancées réalisées dans les années 60-70 sur la théorie des trous noirs ont élargi cette observation, puisqu'on considère aujourd'hui que certaines zones de l'univers sont intrinsèquement non-observables (au sens où aucun rayon lumineux généré dans ces zones ne peut nous parvenir).

5- Pour aller plus loin on doit préciser la structure de ce cône de lumière, qui réunit des lignes géodésiques de l'espace-temps convergeant vers l'observateur.

On dispose pour déterminer la métrique, des *équations d'Einstein*. Elles relient localement le tenseur d'Einstein  $G$  résumant la courbure de l'espace-temps et le tenseur  $T$  énergie-impulsion. Les ondes électromagnétiques se déplacent selon des *géodésiques nulles* de cette métrique, c.a.d. des géodésiques le long desquelles l'élément métrique élémentaire  $ds$  vaut zéro<sup>2</sup>.

6- Au départ, dans un espace vide et homogène, la lumière se propage en ligne droite selon les équations de Maxwell (champ de l'optique géométrique). Mais le contenu matériel non uniforme est associé par l'équation d'Einstein à des variations locales de métrique,

---

<sup>2</sup> la métrique de la relativité, restreinte ou générale, est en effet une métrique "lorentzienne" ou "pseudo-riemannienne", dans laquelle la forme quadratique définissant le carré de l'élément infinitésimal de "longueur"  $ds$  peut être négative ou nulle.

lesquelles vont déformer les trajectoires des rayons lumineux. Celles ci seront toujours des géodésiques nulles de l'espace-temps, mais leur géométrie ne sera plus la même.

7- Plusieurs types d'effets sont envisageables autour d'une géodésique particulière

- effet sur les positions perçues (déviations)
- effets sur l'extension angulaire perçue des objets et la distance estimée.
- effets sur la forme des objets regardés,

effets qui pourront être appréciés à partir d'une équation appelée "équation de déviation géodésique"

Dès lors en effet que les rayons extrêmes ont connu des destinées différentes, une galaxie à extension spatiale appréciable, peut voir son extension angulaire et sa forme modifiées (augmentation ou réduction de l'angle solide, rotation, distorsion), par rapport à ce qu'elles seraient dans un univers par ailleurs homogène.

8- On dégage ainsi ce qu'on appelle un effet de lentille gravitationnelle faible (Weak lensing), qui est devenu depuis quelques années un outil important en cosmologie, parce qu'il permet d'accéder aux variations locales de la métrique de l'espace temps, révélatrices d'hétérogénéités de distribution de matière lumineuse ou non.

Les images du ciel révèlent au niveau de l'observation fine la réalité de ces phénomènes, En partant de la connaissance d'un univers structuré en galaxies, amas de galaxies, filaments, on peut chercher à faire apparaître des effets statistiques - par exemple des corrélations entre déformations, qui permettent de s'affranchir de notre ignorance de départ sur la forme des éléments.

- On a ainsi le moyen de faire apparaître une distribution non homogène de matière noire inaccessible autrement. Des débuts de cartographie ont été effectués depuis les années 1996-2000, et cet effort cartographique est actuellement en plein développement, à partir du télescope franco-canadien à Hawaï. Un projet de satellite dédié à ce type d'observation - le projet Euclid, piloté par Yannick Mellier, de l'observatoire de Paris - est prévu pour un lancement en 2020.
- Le même effet permet d'espérer tester l'isotropie de l'expansion
- L'analyse des faisceaux lumineux très fins émis par les chandelles standards que sont les supernovae fait également espérer pouvoir évaluer précisément la dispersion de la relation redshift/distance estimée (dispersion des points sur le diagramme de Hubble) et la mettre en relation avec les effets de weak lensing.

### Éléments mathématiques mobilisés

1- Il n'est pas certain qu'une plongée même limitée dans les équations et le formalisme mathématique utilisé apporte une compréhension notable des démarches suivies, vis à vis en tout cas d'auditeurs pas nécessairement avertis du sujet. *Le lecteur voulant aller plus loin pourra se reporter au document de compléments techniques associé à cette synthèse.*

Les développements qui suivent donnent simplement des indications sur le formalisme utilisé et sur les grandeurs mobilisées par la relativité générale, bien connues des spécialistes du sujet:

- *tenseur de Riemann*, ou tenseur de courbure. Tenseur d'ordre 4, il contient l'information complète sur la courbure de l'espace temps ; il possède 20 composantes indépendantes.
- *tenseur de Ricci*. Tenseur d'ordre 2 symétrique, c'est une contraction du tenseur de Riemann. Il possède 10 composantes indépendantes. Dans le weak lensing, il est lié aux déformations isotropes du faisceau lumineux introduit par les masses de matières traversées (convergence).
- *tenseur de Weyl*. Tenseur d'ordre 2 sans trace, complémentaire au tenseur de Ricci ; il possède également 10 composantes indépendantes. Dans le weak lensing, il est lié aux distorsions du faisceau lumineux (effets de marée) introduit par les masses de matière à proximité (cisaillement)
- *tenseur d'Einstein*. Tenseur d'ordre 2 symétrique, combinaison du tenseur de Ricci et du tenseur métrique. L'un des termes de l'équation d'Einstein, reliant la géométrie au contenu matériel.
- *équation géodésique* ; cette équation contrôle la dynamique de l'écart progressif entre deux géodésiques lumière convergeant sur l'oeil de l'observateur, l'une des deux géodésiques étant prise comme référence. C'est une équation différentielle homogène du second ordre ; elle fixe l'accélération de l'écart au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'observateur, dans l'espace et donc dans le temps. Elle fait intervenir le tenseur de Riemann en chaque point de la géodésique prise comme référence.
- *matrice de déformation* (matrice de Jacobi). Attachée en un point de la géodésique de référence, elle exprime le passage entre la forme angulaire perçue d'un objet placé en ce point et sa forme "réelle", appréciée, dans un plan perpendiculaire à la ligne de visée, en distance physique ou co-mobile.
- *équation de Sachs* ; cette équation contrôle la dynamique de la *matrice de déformation*, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'observateur sur la géodésique de référence. Elle dérive de l'équation géodésique, et est donc aussi une équation différentielle homogène du second ordre, exprimant toujours l'équivalent d'une accélération. Elle fait intervenir, en chaque point de la géodésique, une matrice appelée *matrice optique*, dont l'expression s'établit à partir du tenseur de courbure en ce point. Cette matrice est en somme la projection du tenseur de Riemann sur "l'écran"<sup>3</sup> de l'observateur transporté sur le point concerné ; elle se décompose en une partie "Ricci" et une partie "Weyl" et cette dernière, en une partie mode "E" et une partie mode "B", en analogie avec la décomposition du tenseur de champ électromagnétique.

---

<sup>3</sup> "projected Riemann tensor"

Ces éléments confirment, à qui n'en aurait pas eu conscience, la forte dépendance entre la relativité générale et des mathématiques de géométrie différentielle assez pointues (dont l'expression est au départ locale).

2- Autres éléments pris en compte:

- L'effet **Sachs-Wolfe** (Equation de Sachs) est le nom donné à l'effet selon lequel une zone légèrement plus dense et légèrement plus chaude de l'univers peut apparaître aujourd'hui plus froide que les zones environnantes. Ceci provient du fait que le rayonnement issu des zones les plus denses subit un décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle plus important, et que sous certaines conditions, ce décalage vers le rouge compense le fait que le rayonnement était plus chaud que celui des zones environnantes
- Classification de Bianchi: Cette classification, fondée sur celle des algèbres de Lie réelles de dimension 3 est utilisée en cosmologie pour distinguer les espace-temps homogènes de dimension 3+1. Le cas général correspond à univers homogène, mais dont l'expansion est anisotrope, c'est-à-dire dont le taux d'expansion est différent suivant trois directions orthogonales.
- Univers de Friedman, Lemaître. La métrique de Friedmann-Lemaître permet de décrire un espace-temps de géométrie homogène et isotrope. En cosmologie, cette métrique est utilisée pour la description de l'évolution de l'univers aux grandes échelles. Elle constitue l'outil principal amenant la construction du modèle cosmologique standard : la théorie du Big Bang.
- Perturbations linéaires modifiant la métrique de Friedmann-Lemaître. Elles introduisent dans l'expression de la métrique<sup>4</sup> des termes perturbatifs de nature scalaire, vectorielle ou tensorielle. Des considérations d'invariance par changement de coordonnées réduisent le nombre de degrés de libertés des perturbations à six<sup>5</sup>

### Illustration de avancées en analyse des effets de lentille stochastiques

1- Des avancées dues à la méthode des lentilles gravitationnelles ont été réalisés - ou sont envisagés - dans un certain nombre de domaines. Citons, parmi celles abordées par Jean-Philippe Uzan :

- comparaison des corrélations angulaires de déformation - donnant accès aux corrélations sur le potentiel gravitationnel - et des corrélations angulaires de densité de matière ; vérification de leur compatibilité, ce qui permet de construire un test de la relativité générale aux échelles astrophysiques.
- mise à l'épreuve de l'isotropie de l'expansion de l'univers, à partir de l'étude de la présence des modes E et B de la partie Weyl des matrices optiques et des corrélations affectant ces modes.
- analyse au second ordre des dispersions de la relation redshift/distances (diagramme de Hubble) sur des supernovae.

---

<sup>4</sup> celle qui donne la valeur du carré de l'élément métrique élémentaire  $ds$ , dont la valeur est, rappelons le, indépendante du système de coordonnées choisi.

<sup>5</sup> les perturbations "physiques" se résument donc à la donnée de six fonctions indépendantes sur l'espace-temps.

Nous évoquerons ici le dernier cas, à partir de l'exposé qu'en a fait Jean-Philippe Uzan et de l'article Pierre Fleury et al. 2015 qu'il a cité. Les deux premiers renvoient à des travaux avec Francis Bernardeau d'une part, Cyril Pitrou et Thiago Pereira d'autre part.

2- Les diagrammes de Hubble relient le redshift observé d'un objet à la distance le séparant de l'observateur. La distance considérée peut être, selon les cas, la distance angulaire ou la distance luminosité. Dans le choix du diagramme, on privilégie la distance qui est la plus aisément calculable, soit la distance luminosité dans le cas de "chandelles standard" telles que les supernovae. L'ajustement d'un diagramme aux modèles cosmologiques permet de vérifier leur plausibilité et d'en estimer les paramètres.

3- La course à la précision des mesures, qui permet d'espérer une estimation de plus en plus fine de ces paramètres, implique que l'on comprenne de mieux en mieux leur déterminants : Certaines négligences acceptables quand on se devait se contenter de mesures à 10% près, ne peuvent plus être admises si l'on veut exploiter correctement des mesures à 1% .

4- Il en est ainsi des effets du weak lensing sur la valeur de la distance<sup>6</sup> d'un objet de redshift donné. Les calculs montrent que la convergence et dans une moindre mesure le cisaillement modifient la valeur de cette distance, par rapport à celle qui serait observée pour ce même redshift si rien ne s'interposait entre l'objet et l'observateur qu'un champ gravitationnel uniforme.

5- il est donc important de bien comprendre et évaluer l'impact des hétérogénéités de l'univers sur la valeur de la distance à travers les effets de lentilles faibles. Dans cet effort de compréhension, les modèles où les hétérogénéités sont représentées par des champs *continus* d'écart aux moyennes, ont montré leurs limites ; notamment dans le contexte de faisceaux lumineux fins émis par des objets très lointains et très lumineux. De tels faisceaux en effet parcourent essentiellement du vide, et rencontrent épisodiquement des noyaux matériels denses.

6- Des modèles d'univers où la distribution de matière est représentée partiellement de façon discrète ont donc vu le jour. Tels les modèles dit "fromage suisse" ; l'univers y est vu comme un univers de Friedmann-Lemaître (uniforme, isotrope et en expansion) parsemé de "trous" comportant en leur centre une certaine masse. Ces modèles ont été la base de simulations de type "ray-tracing" et ont fourni de premières évaluations.

7- Pierre Fleury, Julien Larena et Jean-Philippe Uzan ont tenté au contraire une approche analytique : L'évolution de la matrice de déformation au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'observateur en "remontant" un faisceau lumineux n'est plus contrôlée par un processus purement déterministe ; intervient un élément stochastique, représentant la succession aléatoire des divers environnements (noyaux traversés, noyaux proches, ...) rencontrés. Dans l'espace des paramètres en jeu - qui comprennent les composantes de la matrice - ,

---

<sup>6</sup> nous ne précisons pas ici, pour simplifier, s'il s'agit de distance angulaire ou distance luminosité, puisque ces distances sont liées

tout se passe comme si l'on avait affaire à un *processus de diffusion*, amenant un paquet de "particules" partant d'une même position dans cet espace à se disperser progressivement. Les différents rayons lumineux convergeant vers l'observateur en provenance, par exemple, d'un échantillon de supernovae, et les différentes séquences de matrices de déformation qui leur sont respectivement associées, sont considérées comme des réalisations particulières de ce processus stochastique.

8- L'arsenal des mathématiques des processus stochastiques est alors invoqué. Moyennant certaines hypothèses sur les aléas mobilisés - caractère gaussien, bruit "blanc", .. - les auteurs aboutissent à une équation de Fokker-Planck, équation aux dérivées partielles déterministe donnant - toujours au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'observateur en remontant le faisceau - l'évolution de la densité de probabilité de trouver une "particule" sur telle ou telle position. De l'équation de Fokker Planck, équation sur l'évolution des probabilités, on en déduit des équations sur les moments : moyenne, variance, ... En fin de compte, les auteurs aboutissent à des équations générales donnant l'évolution, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'observateur sur un même rayon lumineux, de la moyenne et de la dispersion de la distance angulaire<sup>7</sup>.

9- Les auteurs appliquent enfin ces équations générales au cas spécifique du modèle "fromage suisse", ce qui leur permet notamment de passer du paramètre de position sur le rayon lumineux qui intervenait jusque là dans les équations, au paramètre "physique" qu'est le redshift. Ils sont alors en mesure de calculer analytiquement la valeur de la moyenne et de la dispersion de la distance pour un redshift donné, en fonction de différentes configurations du "fromage suisse", ce qui était le but recherché

10- La comparaison de ces résultats analytiques avec ceux obtenus directement par simulations de type "ray-tracing" montre une bonne correspondance aux niveaux des moyennes. Mais la dispersion des valeurs de distances, pour un redshift donné, apparaît nettement sous-estimée par les calculs analytiques. Les hypothèses de gaussianité et de bruit brownien ayant permis le passage à l'équation de Fokker-Planck semblent en cause ; le problème reste donc ouvert de trouver un modèle analytique plus élaboré.

## Conclusion

L'utilisation des effets de lentille gravitationnelle apporte un nouvel outil, très en vogue actuellement en cosmologie, dans l'étude des grands structures. Cet outil va trouver un développement nouveau au travers du satellite EUCLID, projet conçu à partir des propositions faites il y a quinze ans pour tester la relativité générale à l'échelle de l'astrophysique et l'hypothèse de l'isotropie de l'expansion de l'univers.

Le satellite Euclid est ainsi prévu pour apporter, après 2020.

- une vision sur 15000° carrés
- une mesure de la déviation vers le rouge pour 70 millions de galaxies avec une amélioration de la précision d'un facteur 10 à 40

---

<sup>7</sup> Ainsi page 15 de l'article version arXiv , "To our knowledge, it is the first time that such a general equation for the evolution of the angular distance in an inhomogeneous universe is derived"



# Échanges avec Jean Philippe Uzan

## Suite à son exposé sur les “Applications en cosmologie des lentilles gravitationnelles faibles :”

Claude Maury, janvier 2016

**Question:** Sur la partie stochastique que j'ai le mieux suivie, il apparaît, à partir d'hypothèses sur la granularité de la distribution de matière, que l'on arrive à estimer la dispersion de la relation redshift/distance en travaillant sur les supernovae. Vous montrez qu'il y a une influence de la distribution de cette matière sur le diagramme de Hubble.

La réciproque supposerait, si elle est concevable, que l'on sache bien mesurer la distance des supernovae, observer la dispersion sur des grands nombres et à l'inverse de remonter par effet inverse sur la distribution de matière noire. Est-elle envisageable?

**Réponse** Vous posez le problème inverse (qui est le plus difficile). Pour être franc nous n'en sommes pas là.

Il y a aujourd'hui un dogme, celui de la cosmologie de précision (François Bouchet). Ce que nous montrons c'est que l'augmentation de la précision des mesures n'est pas suffisante pour améliorer la finesse d'interprétation de la cosmologie. À partir d'un certain moment, la modélisation que l'on emploie (univers homogène isotrope) n'est plus valable. La question est de trouver des observables qui nous révèlent que la modélisation que l'on emploie cesse d'être pertinente. Les faisceaux fins révèlent que pour certaines observables c'est une erreur d'ignorer les hétérogénéités de matière, au niveau de précision atteint.

Pour prendre en compte des barres d'erreur passées à l'ordre du % (contre 10% auparavant) il faut nécessairement repenser le calcul des observables. On en est à un premier constat, mais on n'est pas capable de prendre le problème à l'envers, même si ce serait l'idéal...

Il serait intéressant d'avoir des milliers de données de supernovae et à partir de la dispersion des amplifications d'obtenir des données interprétables sur la distribution des grands vides dans l'univers pour essayer dans un second temps de construire de modèles cohérents avec ces mesures. On en est pour le moment à un stade préliminaire, avec des problèmes comme celui de la gaussianité, mais l'espoir est permis pour les dix années à venir.

**Question:** Avec des marges d'erreur passées de 10% à 1% pouvez vous affirmer aujourd'hui que l'univers n'est pas isotrope?

**Réponse:** On peut faire des analyses statistiques par champs d'observation (supernovae). mais on ne dispose que de 3 champs d'analyse. Sous ces limitations (avec un modèle standard d'interprétation de la luminosité à 5 %) on est compatible avec une expansion isotrope avec une marge de 10%. On se fonde sur une hypothèse de géométrie simple (sans effet des objets) que l'on teste comme hypothèse de référence.

**Question:** Vos travaux demandent-ils de gros calculs sur ordinateurs?

**Réponse:** Tout est analytique au départ (on écrit les formules avec du papier et des crayons). Si les équations sont énormes c'est qu'on fait des décompositions en harmoniques sphériques (ce qui peut être automatisé avec des logiciels de type Mathematica) pour pouvoir faire des calculs et obtenir des courbes (corrélations modes D et E) Les formulations analytiques donnent des pages de termes assez malcommodes à manier. La question est alors de voir s'il n'y a pas un terme dominant, ce qui est le cas. On peut par exemple ordonner les termes en fonction du nombre de dérivées sur la voute céleste. Si vous pensez en termes d'harmoniques sphériques, plus vous avez de dérivées, plus vous avez de termes dont l'effet en  $1/l$  est faible.

Pour aller dans le sens d'un régime linéaire, je regarde les termes qui ont le moins de dérivées, les différents types de couplage, pour parvenir à constater l'existence d'un terme dominant. Dans un long article sur ce sujet nous avons conclu sur la fin en mettant en avant un seul terme pour faire des calculs. Ce résultat va dépendre du spectre initial des perturbations et du nombre de sources par niveaux de redshift, données de type numérique. On passe alors sur Mathematica...

**Question** On nous présenté le diagramme  $\lambda$  et  $\omega$  m: est-ce sur ce diagramme que l'on teste la platitude? Ne faut-il pas faire attention aux tests de platitude, en raison d'effets et de décalages perturbateurs?

**Réponse:** Tout à fait. Mais on a la chance d'une constante cosmologique élevée de l'ordre de 0,7, donc les effets perturbateurs sont assez faibles. Si cela n'était pas le cas on pourrait croire qu'il y a une constante cosmologique négative et peut-être une courbure spatiale. L'interprétation des données dépend de toute la structure de l'univers, car on interprète les observations dans le modèle (et non en dehors). On simule un catalogue de supernovae imaginaires, avec des barres d'erreurs similaires à celles que l'on fait dans les observations, et on prend en compte les paramètres cosmologiques que l'on connaît nettement (?). On

passer le tout à quelqu'un qui fait les calculs et aboutit aux ellipses présentées. On sait sur ce jeu de données que l'hypothèse homogène et isotrope conduit à cette erreur entre 2 et plusieurs sigmas. Ceci prouve que pour analyser ce genre d'observations il faut nécessairement analyser ce genre d'effets.

**Question:** J'ai le souvenir personnel d'avoir été ébloui par la carte de la matière sombre. Est-ce ou non en rapport avec le weak lensing?

**Réponse:** Oui, ça dérive du weak lensing: on établit cette carte dans le cadre de la relativité générale et on est sûr que l'équation de Poisson tient. On considère que l'on sait mesurer les effets des lentilles gravitationnelles. On fait alors des sections par ligne de redshift et par ligne de visée, une mesure du contraste de densité par tranches, ce qui permet de reconstruire la distribution de la matière noire (toujours en admettant la validité de la relativité générale).

On ne peut guère tester dans ces conditions la validité de la relativité générale, supposée vraie au départ. Comment alors tester la relativité générale sans être à même de percevoir la matière noire? On perçoit un arbitraire puisqu'il faut relier la distribution des galaxies à la distribution de matière totale.

Pour aller plus loin il faut connaître les champs de vitesse, qui donnent le gradient du potentiel gravitationnel. Les effets de lentille gravitationnelle vont être liés au laplacien de la somme des deux potentiels gravitationnels, le champ de vitesse au gradient du champ gravitationnel, et avec ces trois observables on peut tester ce genre d'hypothèse. 27:25  
D'ici quelques années on aura les observations pour travailler dans ce sens.

**Question:** Si je comprends bien (?) la relativité générale apporte une garantie, qui permettra d'avoir bientôt une carte en 3 D de la matière noire.

**Réponse:** C'est bien cela. On va faire ces tests, et soit on valide la relativité générale et on confirme l'hypothèse de la matière noire, soit on trouve une faille et on devra revoir notre modélisation de l'univers. Comme on ne saisit pas la nature de la matière noire, on cherche des tests d'auto-cohérence des modèles utilisés, et non à tester un par un les modèles.

**Question:** je souhaite revenir sur la question que vous avez posée immédiatement après votre exposé: faudrait-il complexifier la présentation et traduire aussi fidèlement que possible le savoir des spécialistes, ou à l'inverse simplifier pour être plus abordable?

Je plaiderai spontanément pour la seconde option (c'est un point de vue personnel) en recommandant deux choses en amont et en aval de la partie la plus scientifique de l'exposé:

- Un rappel au départ des grandes interrogations de la cosmologie moderne (ce qui s'est introduit de manière diffuse dans votre exposé) qui permet de préciser la place du nouvel outil présenté.
- Une explicitation en conclusion des apports actuels ou à venir des approches de lentilles gravitationnelles (ce qui a été fait, mais succinctement)

**Question:** Existe-t-il un rapport entre les phénomènes des lentilles gravitationnelles et la recherche d'images doubles de galaxies? (si la chose a un sens)

**Réponse:** Tous les développements présentés s'appuient sur l'hypothèse d'une seule géodésie (parcours du rayon lumineux), ce qui écarte toute idée d'image double. On peut simplement trouver dans des cas très particuliers des points de bifurcation, qui peuvent dédoubler l'image d'une source très localisée. Il existe par contre des effets très particuliers liés aux trous noirs (rayons tournant plusieurs fois autour des trous noirs...)

La question des images doubles se pose sur un registre très différent: si on suppose que l'univers est fermé, il est imaginable de voir la même galaxie à deux moments de son histoire. Comme on n'a pas jamais vu ce type d'images, on est conduit à supposer une taille minimale considérée comme égale au moins à 0,94 fois l'univers observable

On peut même montrer que si la taille de l'univers est supérieure à 1,15 fois celle de l'univers observable, on ne sait plus distinguer entre univers fini ou infini (ce qui renvoie à une forme de métaphysique) . Il n'y a plus de preuve observationnelle.

**Question:** L'AEIS organise en février son colloque, à l'occasion du centenaire de la parution de deux articles d'Einstein sur la relativité générale et sur la théorie quantique du rayonnement qui marque la naissance de deux disciplines, qui n'existaient pas. La cosmologie n'était à ce moment qu'un champ de spéculation scientifique, et la physique des particules en restait à une vision sommaire des atomes.

En 100 ans on a construit le modèle standard pour les particules qui passe comme exemplaire. Ne doit-on pas penser que la cosmologie observationnelle a atteint aujourd'hui un niveau de rigueur et de précision époustouflant?

**Réponse:** l'avancée présentée découle de l'apport de nouvelles observations, en particulier du satellite Planck, qui a permis de bâtir des projets convaincants pour les agences de financement.

**Observation:** dans ce contexte notre Colloque va permettre de prendre la mesure de ce qui s'est passé et les perspectives

**Question:** Pourquoi est-on limité à trois champs seulement de supernovae?

**Réponse:** Ceci résulte du faible nombre des télescopes utilisables (Hawaï, VLT,...) ce qui ne permet pas d'observer tout le ciel. C'est le satellite EUCLID, qui va permettre de changer d'échelle, et de mettre en oeuvre l'outil gravitationnel à partir d'une collecte de données sur les supernovae. On avait imaginé de lancer un satellite dédié aux supernovae

**Question:** Tient-on compte du temps de trajet de la lumière, qui renvoie vers le passé?:

**Réponse:** effectivement on travaille sur des distances (décalage spectral) qui racontent une histoire. On voit l'univers à différentes époques.

**Question:** Peut-on savoir ce qu'est l'univers à l'instant présent?

**Réponse:** C'est ce qu'on essaie de faire...

**Question:** Est-on à même de construire des projections?

**Réponse:** Sur le principe oui, mais ça reste très spéculatif

**Question:** Une observation sur le modèle stochastique et sur vos interrogations sur le modèle gaussien? On étudie des bruits non gaussiens qui s'appuient sur des solutions fractales à dimensions différentes de deux, notamment au laboratoire de physique statistique de l'ENS en physique et hydrodynamique et on trouve des instabilités autour de phénomènes d'hypo ou hyper-diffusion. Peut-être dans l'atmosphère le bruit n'est-il pas gaussien. Par exemple en atmosphère le bruit n'est pas gaussien.

**Réponse:** On a beaucoup discuté avec des mathématiciens et aujourd'hui il n'y pas de consensus. On peut faire des mesures et des théories ont été développées par Georges et Bouchot .

En l'absence de nouvelles questions la réunion se conclut par des remerciements à l'intervenant.