

# **Questions sur l'hypothèse de la matière noire**

**Conférence du 6 juin 2009 UNESCO**

**Jean-Jacques Szczeciniarz**

**Université Paris Diderot Paris 7**

**Département HISTOIRE ET PHILOSOPHIE DES SCIENCES**

## **Introduction**

**Il semble que nous disposions de théories extraordinairement développées qui parviennent à se synthétiser les unes les autres, les unes par rapport aux autres. Nous disposons d'une théorie cosmologique positive à fort contenu spéculatif, mais c'est sans doute la vocation de la cosmologie, mais aussi de beaucoup de théories scientifiques actuelles comme les mathématiques. Ces théories possèdent des confirmations observationnelles théorisées et impressionnantes qui font de la cosmologie une science à part entière dans la tradition du XIX et XX è siècles.**

**D'un autre côté il semble tout aussi fortement que des fissures très importantes se sont développées dans l'intérieur des théories les plus développées. Les théories scientifiques si puissantes et développées soient-elles, rencontrent plus que des difficultés, comme s'il fallait apprendre à vivre longuement avec des théories contradictoires voire en crise.**

**Sans doute que les critères scientifiques et épistémologiques dans lesquels nous raisonnons sont-ils tout aussi minés que la cohérence des théories sur lesquelles elles réfléchissent. En même temps, c'est une réflexion sociologique superficielle que je vous livre, les théories scientifiques ont atteint des niveaux de transmission grand public très remarquable, qui tiennent à l'allure qu'elles prennent, aux formules qu'elles utilisent, aux habits dans lesquels elles se présentent.**

**Tel est le cas des théories actuelles de l'Univers et de l'hypothèse qui s'y rapporte : celle de la masse cachée et de la matière noire ainsi que de son corrélat l'énergie noire. même si celle-ci intervient différemment.**

**Je voudrais essayer de poser le problème en des termes plus conceptuels sans faire appel par ailleurs à des arguments trop fortement formalisés**

La première ambiguïté de l'hypothèse que nous examinons, celle de la masse cachée, ou matière noire ensuite, tient évidemment au mot et au terme d'invisible. Toute théorie scientifique digne de ce nom va au-delà des phénomènes visibles, perceptibles pour en trouver une explication qui n'est que rarement de même niveau que le sensible qu'elle explique. Pour dire les choses simplement le modèle explicatif n'est presque jamais dans les choses même qu'il modélise. C'est une évidence pour un mathématicien : il travaille sur des objets ô combien résistants et difficiles sans que ceux-ci ne soient visibles dans les phénomènes physiques perceptibles.

Mais et c'est sans doute là que joue le deuxième aspect de l'ambiguïté dans un premier temps, il s'agit d'une supposition d'existence physique d'un objet qui n'est pas mathématique, et qui est caché au sens d'indélectable. C'est un élément physique de même rang ontologique que les autres éléments matériels et pourtant il n'est pas détecté sinon observable. Et en un sens précis il n'est même pas certain que je puisse en détecter directement les conséquences de l'existence.

Cependant et c'est là le troisième aspect de l'ambiguïté il joue un rôle théorique et argumentatif certain dans les différentes explications astrophysiques ou cosmologiques où il intervient.

C'est cette situation que je voudrais non pas clarifier, je n'en ai pas tous les moyens, mais essayer de mettre en problème conceptuel.

## **Platon**

La thèse est que le monde invisible est le monde des idées mathématiques dont il est difficile de construire l'organisation et la nature des effets qu'il produit dans et sur le monde physique. Deux modèles d'explication ont dominé le platonisme : participation et imitation. Pour la cosmologie c'est patent : les Grecs pensent le cosmos et l'organisation du cosmos dans son détail supposent une géométrie et une arithmétique généralisée. Nous sommes avec le platonisme dans une situation symétrique inverse de celle que nous allons commenter aujourd'hui. L'ordre cosmologique vient des idées géométriques et arithmétiques (Pythagorisme) la matière est ce qui comme support de réalisation doit être en quelque sorte malgré elle organisée voire domptée. Ce qui est invisible, non sensible, disait Platon ce sont les idées mathématiques : nous ne pouvons les saisir que par une activité de l'âme.

## **Aristote**

Le grand système cosmologique développé par Aristote dans le *Traité du Ciel* implique lui aussi corrélativement au système de sphères homocentriques un anticosmos exactement symétrique du cosmos réel précisément pour équilibre par des contre sphères les sphères qui dans leur rotation homocentrique entraînent les planètes (les cinq que nous détectons à l'œil nu).

Dans ces deux cas nous avons affaire aux deux formes de ce que je vais appeler le temps de cette conférence l'invisibilité : l'invisibilité mathématique l'ordre des structures donné par les mathématiques, l'invisibilité physico-cosmologique corrélatrice du modèle, ou encore déduite des exigences de la cohérence du modèle.

La première existe toujours et est en droit global ou dense dans la théorie, la seconde n'est pas toujours présente elle est de nature très différente car son existence présente une forme locale de cohérence et parfois une forme globale d'incohérence.

## **Newton et l'éther.**

Le statut de l'hypothèse de **l'éther newtonien** est du plus haut intérêt. Newton pour faire face (en simplifiant grandement) aux difficultés d'une explication imposée par une physique cartésienne dominante du contact, de l'attraction réintroduit une matière support chargé de véhiculer la force d'attraction. Ici un cadre théorique et philosophique général impose une forme de cohérence qui est en contradiction avec la nouveauté du concept dynamique produit.

## **Kant**

### **Contre la cosmologie**

*De quel type épistémologique relève l'hypothèse de la matière noire voire de l'univers invisible à laquelle nous avons affaire ?*

**A-Un des premiers à avoir recours à la matière noire est le célèbre astronome suisse Fritz Zwicky** qui a mesuré vers 1933, la vitesse de dispersion des galaxies dans les amas et montré que la masse visible était bien trop petite pour maintenir la cohérence gravitationnelle de l'amas à de telles vitesses.

Dans ce cas le recours à la matière noire est le recours à un complément de masse manquante, sur la base de la même situation théorique : un ensemble d'explications fondées ici sur la gravitation : on observe une dispersion hors de doute, on observe un maintien de cohérence d'une structure ici un amas avec un mouvement général de dispersion observé, et d'un autre côté la cohérence de la structure. On ne remet en question ni la dispersion, ni sa vitesse, des galaxies dans un amas, ni le maintien de la structure malgré cette dispersion, ni la masse visible. La force théorique de conviction est telle que l'on recourt à une hypothèse faible (?) qui complète l'ensemble de la théorie et de ses présupposés. On remarque qu'il s'agit d'une masse de matière destinée à rendre possible l'application de la gravitation comme maintien de la cohérence.

*Remarque 1*

Les arguments hypothétiques théoriques et les observations de l'autre côté emportent la conviction et fondent la cohérence théorique suffisamment

*Remarque 2*

D'où le recours à la matière noire comme à une hypothèse destinée à compléter l'argument même si la vraisemblance de cette hypothèse reste insuffisante

Il est plus économique de ne pas remettre en doute les premiers arguments cités et de compléter par un argument qui n'est pas de même niveau ni observationnel ni théorique. Ni observationnel car la matière n'a pas été détectée par Zwicky, ni théorique le lien théorique avec le reste de la théorie n'est pas déductif mais se présente sous la forme d'une hypothèse auxiliaire.

*Remarque 3*

Et c'est un argument qui joue également, supposer un objet indétectable dans l'état actuel des observations reste dans le domaine du plausible car telle est l'histoire de l'astronomie qu'elle est pleine de situations similaires (perturbations qui supposent un corps que l'on détecte plus tard Pluton par exemple).

*Remarque 4*

Mais en l'occurrence l'hypothèse est à la fois plus déterminée et douteuse. Car il s'agit d'une matière dont on exige qu'elle vienne jouer un rôle gravitationnel et qui est invisible.

**B\_ Il existe deux sortes de matière noire** : une matière noire baryonique car encore de nos jours près de 90% des baryons ne sont pas identifiés, et de la matière noire non-baryonique.

L'abondance des éléments légers, formés essentiellement lors du Big Bang, comme l'hélium et le deutérium, a permis de déterminer la densité des baryons dans l'univers. La densité totale des baryons dans l'Univers doit être de  $\rho = 4,5\%$ . Or la matière visible ne contient que 10% de ces baryons . Où pourraient se cacher les autres ?

**C Reprenons la théorie qui, les arguments théoriques qui conduisent à la supposition de la matière noire.**

L'origine des étoiles se trouve dans l'instabilité gravitationnelle. Dès qu'une masse de gaz a atteint une masse critique, la densité croît de façon exponentielle, la masse s'effondre et en un temps de chute libre ou presque l'étoile est née.

Mais la croissance des structures est tellement lente que l'on peut se demander si l'âge de l'Univers a été suffisant pour former les galaxies visibles aujourd'hui.

Un ensemble d'arguments plus solides aboutissent comme précédemment à l'exigence et à l'hypothèse de la matière noire.

*Je voudrais réinsister sur la situation épistémologiquement paradoxale dans laquelle se trouve la théorie astrophysique qui fait appel à la matière noire.*



1° Il existe un décalage un écart entre ce que prédit la théorie en masse de matière dans l'Univers et ce qui est détecté par les observations

On se trouve dans le cas d'une non confirmation expérimentale et pourtant la théorie ou plutôt l'ensemble des présupposés théoriques et des théories qui ont rendu possible la prédiction ne se trouvent pas falsifiés ou réfutés.

Bien plus on forge un nouveau concept ou une nouvelle notion destinée à combler le vide laissé par l'observation non concluante.

2° Mais le paradoxe épistémologique va beaucoup plus loin. De cette hypothèse auxiliaire destinée à combler le vide observationnel on ne sait rien non plus.

« Jamais autant de travaux et d'articles n'auront été écrits en astrophysique sur une matière dont on ne connaît rien ou presque. « S'agit -il vraiment de masquer notre ignorance ? » p. 158. de Françoise Combes *Mystères de la formation des galaxies* Dunod 2008

3° Je serais tenté de dire que la matière noire occupe une place épistémologique laissée en creux et je voudrais dans un premier temps décrire la forme de cette hypothèse sans me prononcer sur la validité de celle-ci.

La formation des galaxies requiert l'existence d'une matière peu ordinaire, tel est sans doute le thème le plus argumenté en faveur de la matière noire.

L'ensemble de l'argument prend place dans les développements théoriques qui interprètent le Big Bang.

Je suivrai maintenant cette chronologie cosmologico-théorique.

D-1° les ensembles de matière en cours de formation, tels que les galaxies, les amas de galaxies, les amas d'amas, se sont formés à partir des fluctuations de densité de matière et de rayonnement.

Celles-ci sont beaucoup mieux connues grâce aux observations de fond de rayonnement cosmologique micro-onde rayonnement de corps noir fossile vestige du Big-Bang.

a) C'est là un premier bloc théorique, **il faut admettre la théorie du Big-Bang et les conséquences dont on vient de donner certaines.**

**L'Univers devait être homogène juste après le Big Bang.**

b) Les premières grandes structures se sont condensées à partir de fluctuations de densité de matière et de rayonnement.

Le satellite américain WMAP a étudié à grande échelle les anisotropies du fond de rayonnement. Il apparaît que le fond de rayonnement millimétrique domine dans le ciel, les fluctuations sont imprimées comme des rides sur un fond homogène .

c) comme quand on étudie un élément observationnel il faut parvenir à l'abstraire des autres éléments qui contribuent au résultat observé. (Tout comme les premiers observateurs des mouvements des planètes ont dû soustraire les éléments perturbateurs qui venaient du propre mouvement de la Terre, parallaxe)

d) Ainsi a-t-on dû soustraire une composante dipolaire. Après ces étapes **il est possible de mettre en évidence des petites fluctuations de température du fond cosmologique**

*Là encore sur le plan de la construction d'une hiérarchie épistémologique nous admettons l'essentiel de l'histoire thermique de l'Univers. Les anisotropies nous renseignent sur la formation des structures.*

*Jusqu'ici je tiens qu'il y a bien une « homogénéité de l'explication » Les normes vérificatrices et les exigences admissibles pour ce genre de théories de l'observation ne sont pas remises en question.*

Au départ l'Univers est très chaud et dominé par le rayonnement, la matière est ionisée. C'est le plasma de protons et d'électrons qui interagissent étroitement avec les photons et les diffusent. L'Univers est opaque.

***La physique nucléaire qui intervient pour décrire cette phase de synthèse des éléments est une branche de la physique bien établie et ne dépend pas de paramètres mal connus***

e) l'Univers se refroidit au cours de l'expansion jusqu'à la température de 3000 degrés Kelvin environ, les protons et les électrons se recombinent en atomes d'hydrogène et l'Univers devient neutre. Les photons ne sont plus diffusés par les particules chargées et se déplacent ensuite en ligne droite, l'Univers devient transparent. nous possédons un certain nombre de confirmations expérimentales (observationnelles) de cette évolution.

On peut remonter depuis aujourd'hui où ce rayonnement est refroidi à la température de 2,7 degrés Kelvin à cette surface opaque.

Et les échelles caractéristiques des *maxima* et des *minima* de ces oscillations nous renseignent sur la nature de la matière et leur taille angulaire observée aujourd'hui sur la géométrie de l'Univers.

2°Une fois admis la théorie de l'expansion et les formes de ses conséquences rappelées plus haut considérons le développement des structures.

**Le principal moteur à l'origine de la formation de structures est la gravité, relayée par des instabilités qui vont faire s'écrouler les structures sous l'effet de leur propre gravité. dès qu'une masse de gaz atteint sa masse critique, la densité croît de façon exponentielle et le nuage s'effondre et un temps de chute libre ou presque l'étoile est née.**

Les ions sont étroitement couplés avec les photons et ceux-ci par leur forte pression empêchent l'effondrement gravitationnel. La matière baryonique doit attendre son découplage d'avec les photons, la recombinaison pour entamer son effondrement.

Quand survient cette recombinaison ?

c'est avec la réponse à cette question que s'introduit l'exigence de l'hypothèse de la matière noire (ou exotique).

**E-a) les atomes d'hydrogène se recombinent à une température de 3000 degrés K environ. Quand la température de l'Univers était-elle à 3000 degrés K environ ?**

1-Juste après le Big Bang la température du rayonnement dépasse les millions de degrés. puis l'Univers se refroidit par expansion jusqu'à atteindre la température du corps noir cosmologique mesurée aujourd'hui au niveau de 3 degrés K.

Remarque

L'ensemble de ces théories n'a pas à être remis en cause.

2- la température des corps noirs est inversement proportionnelle à la longueur d'onde caractéristique qu'il émet.

**Rappelons-nous.**

*Protons et neutrons sont les briques constitutives des noyaux au sein desquels leur cohésion se fait par la force nucléaire qui est appelée interaction forte. Tant que la température est au-dessus 10 milliards de degrés les noyaux restent dissociés en protons et neutrons car leur énergie d'agitation reste supérieure à l'énergie d'interaction forte qui tente de les regrouper. Il est donc nécessaire que la température soit plus faible pour que la force nucléaire l'emporte sur cette agitation. De plus la force de fusion des noyaux n'agit que sur des distances courtes contrairement à la gravitation. Alain Mazure et Vincent Le Brun Matières et antimatière Dunod 2009*

*Enfin les neutrons sont des particules instables ils se transforment en protons via l'interaction faible, leur durée de vie n'est que de 10 mn environ. Les conditions pour que le mariage entre neutrons et protons se fasse sont très restrictives, tout doit se passer dans les toutes premières minutes de l'Univers.*

**On arrive en abondance de masse de l'ordre de 75% pour l'hydrogène et 25% pour l'hélium le reste (tritium, béryllium, lithium et leurs isotopes étant présents).**

**On connaît avec une précision très bonne le contenu total en baryons de l'Univers.**

Ce sont ces baryons qui peuplent le cosmos que l'on observe. On doit retrouver ce contenu à toute époque cosmique

La densité de baryons issue de la nucléosynthèse primordiale qui rend excellemment compte des proportions observées, densité corrigée de l'expansion de l'Univers conduit à la valeur actuelle pour le paramètre densité :  $\Omega_{b-Tot}$

$$\Omega_{b-Tot} \text{ -4,4\%}$$

*Le total de tous les baryons contenus en son sein ne représente que 4 à 5% du contenu nécessaire pour expliquer l'expansion telle que nous la connaissons.*

**3° Reprenons la chronique avec la même question : quel est le statut épistémologique et ontologique de l'hypothèse de la matière noire.**

Nous retrouvons la matière noire un peu plus loin : une dilution inéluctable du contenu énergie matière se produit sous l'effet de l'expansion. Pour la matière formée de particules, la densité diminue quand le volume augmente. Pour les photons (particules constituant le rayonnement) non seulement leur densité diminue comme pour les particules ordinaires, mais également leur énergie. Décalage vers le rouge cosmologique.

D'où un déclin plus rapide pour l'énergie contenue dans le rayonnement que pour l'énergie contenue dans la matière. Le rayonnement qui jusqu'alors dominait la densité d'énergie se voit peu à peu rattrapé par la matière. On arrive à une époque dite d'égalité matière-rayonnement à partir de laquelle la matière l'emporte .par exemple. *Alain Mazure Vincent Le Brun.*

Cela se produit à un décalage spectral  $z_{eq}$  qui peut s'exprimer en fonction des densités de matière et de rayonnement dans l'Univers présent.

**(avec les valeurs mesurées par l'instrument WMAP pour les paramètres de densité on obtient  $z_{eq} = 3000$  , âge d'environ 60000 ans après le Big Bang).**

**A l'aide du spectre de puissance des mesures des températures. Quantité mathématique permettant de repérer si à une échelle donnée des caractéristiques identiques existent partout dans la carte examinée. Outil statistique, l'horizon acoustique se manifeste par un signal significatif à l'échelle prédite. La prédiction a été confirmée par le satellite WMAP.**

*Un exemple de confirmation observationnelle.* Un autre élément de la théorie a été confirmé. Transformant la valeur prédite de 450 millions d'années lumière en angle  $\theta$  on obtient précisément pour l'horizon acoustique une valeur égale à  $\theta$  environ 1 degré.

C'est pour préciser ce que l'on a vu plus haut l'angle pour lequel on observe un pic de signal très élevé dans la mesure du spectre de puissance des températures. menée par le satellite WMAP. On a une confirmation classique d'une prédiction par une observation.

« La détection de ces pics acoustiques résultat de la croissance des perturbations primordiales d'origine quantique engendrée au cours de la phase d'inflation de l'Univers sont l'un des plus grands succès du modèle cosmologique moderne. » Alain Mazure et Vincent Le Brun *ibid.* p. 77.

A ce niveau la question ne joue pas de la masse cachée. Cette hypothèse reste neutre pour certains aspects de la théorie. Mais même là il peut être trouvé des implications.

Les astrophysiciens sont en quête des baryons. Leur présence modifie la vitesse du son qui intervient dans la propagation des ondes. Cette vitesse est est fonction de la densité des baryons. Plus la densité est importante moins la vitesse du son est élevée. L'horizon acoustique sera d'autant plus petit que la fraction de matière baryonique sera élevée.

La mesure des pics dans le spectre de puissance de la température dépend de la quantité de baryons dans l'Univers à l'époque de la recombinaison. On a la valeur de la densité baryonique mesurée à l'époque présente donnée par WMAP :  $\Omega_b = 4,4\%$

*Cette valeur comme le soulignent les astrophysiciens, est obtenue par une méthode totalement indépendante de celle que fournit l'étude de la nucléosynthèse primordiale et elle donne une valeur remarquablement proche.*

Les mesures de température du CMB permettent de déterminer le contenu total en énergie/matière caractérisé par le paramètre  $\Omega_T$  et le contenu total en matière  $\Omega_m$  ramené à l'époque actuelle l'analyse faite par le WMAP conduit au résultat suivant

$$\Omega_T = 100 \% \quad \Omega_b = 4,4 \% \quad \Omega_m = 23 \%$$

#### *Remarque*

La répartition est la même que celle que considère la théorie constituée avec donc la confirmation de la masse manquante. Le système de la théorie implique donc l'existence d'une masse cachée.

Cette supposition est un élément de la théorie et permet de produire des explications. De plusieurs ordres.

Les unes qui n'impliquent rien d'autre que la pure supposition elle-même. J'admets les calculs de la quantité totale de matière à partir de la nucléosynthèse et complémentaiement la quantité de matière baryonique. Sans compter les déductions, certaines détaillées, d'autres plus générales portant sur la chronique cosmologique de l'Univers.

Les autres mettent en question les propriétés négatives de la masse cachée ( masse noire) à savoir qu'elle ne rayonne pas.

Il peut paraître rationnel dans cette situation épistémologique pour une science observationno-théorique de chercher une confirmation expérimentale à venir.

Si l'on en croit l'histoire de la cosmologie des tentatives ont été faites avec le neutrino : on avait cru tenir un élément de la masse noire.(cf. aussi Dirac)



Comme je l'ai remarqué sur les thèses des astrophysiciens l'hypothèse de la matière noire outre qu'elle assure une cohérence que j'appelle partielle ou locale est assez bien précisée dans son niveau propre d'ignorance.

C'est la matière noire qui domine le budget de masse de l'Univers et à l'échelle du Cosmos c'est la gravitation qui est la seule force à laquelle est sensible cette matière noire.

### **On peut analyser la position de l'hypothèse dans les simulations.**

*Mazure ibid.*

Dans les simulations, on s'est efforcé de mettre en place les structures de la matière noire. Les lois de la gravitation sont connues il n'y a pas d'autre interaction et l'on néglige dans un premier temps d'exposé l'effet de la matière ordinaire sur la matière noire. « L'interaction gravitationnelle ne subit aucun écrantage » p. 104. Pour la gravitation il n'y a pas d'équivalent des charges électriques opposées et chaque particule est donc sensible à toutes les autres quelle que soit la distance les séparant.

Il faut pour calculer la nouvelle position d'une particule donnée faire l'addition de toutes les forces créées par les milliards de ses congénères et appliquer les lois de la dynamique. Le nombre d'opération est proportionnel au carré du nombre de particules.

Problème 1. La matière noire est formée de particules élémentaires dont on ignore la masse exacte mais qui peut dépasser  $10^{-29}$  kg. Il faut reproduire l'évolution de cette matière sur des échelles de plusieurs millions d'années-lumière, ce qui représente des masses de l'ordre de dizaines de millions de milliards de fois celle du Soleil..

Simuler l'évolution de  $10^{80}$  particules durant 14 milliards d'années. Il faudrait des millions d'années de calcul.

*L'idée est de parvenir à simuler l'évolution des baryons pour essayer de savoir où se trouvent ceux qui manquent à ce jour.*

Dernier aspect positif: la matière noire joue un rôle crucial dans la formation des galaxies. La nature de cette matière et de son interaction avec les autres particules détermine la proportion de grande et petites structures qui vont pouvoir se former dès le début de l'univers. *Mazure* p. 129

Cette matière n'est pas seulement nécessaire pour expliquer la masse manquante dans les galaxies et les amas mais elle a un rôle profond à jouer.

### **F-Nécessité de la matière noire. (au sens épistémologique)**

La mesure quantitative du fond micro-onde a permis de déterminer l'amplitude des fluctuations primordiales de densité. à l'époque de la dernière diffusion des photons. Ces fluctuations sont si petites en valeur de densité qu'elle ne pourrait pas donner naissance à des galaxies aujourd'hui si la matière n'était faite que de baryons Ils sont ionisés pendant les premières centaines de milliers d'années après le Big-Bang restent couplés aux photons dont la pression empêche l'effondrement des structures. Les baryons ne peuvent participer à l'effondrement qu'après la recombinaison des ions en gaz neutre 300000 ans après le Big-Bang

D'où l'affirmation : « Il est absolument nécessaire que ces fluctuations se développent plus tôt dans un milieu qui n'interagit ni avec les photons ni avec les autres composants de l'Univers, si ce n'est par les forces de gravité. Ce milieu a été nommé « masse noire »

Il existe de nombreuses confirmations expérimentales du modèle CDM.

Les arguments les plus lourds tiennent donc pour résumer à ce que les processus de dissipation de formation d'étoiles rendent tout à fait improbable une coïncidence entre matière noire et matière visible. On appelle comme on l'a vu la différence entre la masse visible et la matière noire le biais  $b$ , le rapport entre les deux densités. Les grandes cartographies de tranches d'Univers ont montré que cette quantité est égale à 1, i. e. il n'y a pas de biais à grande échelle, mais ce n'est plus vrai au niveau des galaxies. On a donc des résultats sur cette matière noire. Par exemple qu'elle est plus concentrée que la matière visible dans les amas de galaxies.

Il est remarquable que des analyses complexes de la composition de cette matière noire aient été essayées. Je les rappelle : elle serait constituée de neutrinos. Ces particules interagissent par l'interaction faible avec le reste de la matière. Il n'a pas été possible de mesurer la masse des neutrinos mais par un phénomène d'oscillation. Les modèles actuels mettent une limite supérieure à la masse des neutrinos. Ils ne peuvent contribuer plus de  $\Omega_\nu = 12\%$  au contenu de l'Univers.

L'essentiel de la masse doit être constituée de particules froides non-relativistes, lors de leur découplage thermique, pour former les grandes structures avec un spectre compatible avec les observations.

Candidat discuté le neutralino. Particule relique du Big-Bang (40 GeV)

Les accélérateurs ne sont pas assez puissants pour fournir l'énergie disponible et créer ces particules si massives. Autre hypothèse celle des neutrinos stériles qui n'interagiraient avec les autres particules que par leur masse et la gravité.

Certains auteurs pensent que le fort taux de détection de rayons gamma à 511 KeV vers le centre galactique pourrait être la manifestation de l'annihilation de particules légères de matière noire.

**G- La force d'entraînement de l'hypothèse va jusqu'à des tentatives de** remise en question des théories de base. La force de certains modèles d'explication semble impliquer que l'on soit amené à faire des choix au sein de construction théoriques quitte à sacrifier une cohérence ou plutôt une non confirmation observationnelle massive.

Des explications qui introduisent des théories avec des dimension supplémentaires à notre espace : Kaluza Klein, cordes. L'idée est que la gravité est la seule force qui peut se propager à des dimension supplémentaires. ce qui la rend plus faible que les autres d'où son utilisation tentée pour expliquer la matière noire, qui serait une manifestation dans notre espace de l'existence des autres dimensions. Toutes les interactions qui nous sont familières (électromagnétiques, interactions forte et faible) seraient situées dans l'espace à trois dimensions, seule la gravité s'étendrait dans les autres.

## *Envoi*

On est dans la même situation épistémologique pour l'énergie noire. Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, il faut postuler l'existence d'une composante du contenu énergie/matière ayant une action répulsive que les cosmologues appellent énergie noire (car elle donne une accélération tout en restant non identifiée).

## **Conclusion**

Qu'y a-t-il de si extraordinaire dans ces hypothèses ?

A Epistémologiquement

Organisation de l'hypothèse Sont-ce des hypothèses *ad hoc* ?

avec implications diverses

- a) obtenir une confirmation observationnelle. Construction d'objets physiques non identifiés.
- b) tout en développant les conséquences structurant pour l'ensemble de la problématique théorique
- c) la situation est telle qu'elle peut amener remise en question de la physique
- d) remise en question des modèles cosmologiques. je cite ici Penrose « Mordehai Milgrom émettait l'étonnante hypothèse qu'il puisse ne pas exister de matière noire mais plutôt que la dynamique de la gravitation newtonienne soit modifiée différemment que par les préceptes d'Einstein, les effets de la gravitation étant accrus d'une certaine manière pour les faibles accélérations. Bien que cette idée semble très bien expliquer les faits observés elle ne se présente pas encore sous la forme d'une théorie cohérente » *The road to reality* 2004 Milgrom « Dynamics with a non standard inertia -acceleration relation an alternative to dark matter » *Annals Physics* 229

e) développement des théories mathématiques

$\Omega ?$