◆ Résumé de l'Hypothèse d'interprétation en couches de la lumière appliquée aux courbes de rotation des galaxies spirales

Dans ce projet, une hypothèse optique–structurelle concernant les courbes de rotation des galaxies spirales est proposée. Plutôt que de postuler d'emblée l'existence d'une masse invisible, on suggère que la platitude des courbes de rotation pourrait, au moins en partie, résulter du mélange de la lumière provenant des différentes couches de la galaxie, de la diffusion de la lumière du centre galactique par la poussière et le gaz interstellaires, et du moyennage spectral le long d'une même ligne de visée. Dans ce cadre, la signature Doppler des couches internes, plus rapides, peut apparaître dans le spectre des régions externes et faire paraître la vitesse réelle des étoiles du bord artificiellement plus élevée.

---

1) Introduction au problème de la matière noire et à la mesure de la rotation galactique

L'un des principaux indices en faveur de l'existence de la « matière noire » est constitué par les courbes de rotation des galaxies. Ces courbes sont obtenues à partir de la lumière de la galaxie, et non à partir de l'observation directe du mouvement des étoiles.

1.1. Comment mesure-t-on la rotation d'une galaxie à partir de sa lumière ?

Lorsqu'un objet massif comme une galaxie est en rotation, un côté du disque galactique se rapproche de nous, tandis que le côté opposé s'éloigne.

Grâce à **l'effet Doppler** appliqué à la lumière :

- la lumière provenant de la partie de la galaxie **qui se rapproche de nous** est légèrement décalée vers des longueurs d'onde **plus courtes** → elle devient plus bleue (*blueshift*) ;
- la lumière provenant de la partie **qui s'éloigne de nous** est légèrement décalée vers des longueurs d'onde **plus longues** → elle devient plus rouge (*redshift*).

Dans le spectre de la lumière émise par les gaz et les étoiles de la galaxie, les raies spectrales bien connues (par exemple les raies de l'hydrogène) sont donc légèrement décalées vers le bleu du côté qui se rapproche, et légèrement décalées vers le rouge du côté qui s'éloigne.

En mesurant l'amplitude de ce décalage Doppler :

- on détermine **le sens de rotation** de la galaxie ;

• et, à partir de cette valeur, on calcule **la vitesse linéaire de rotation** des étoiles et du gaz à différentes distances du centre.

De cette manière, pour chaque distance radiale $r$au centre de la galaxie, on obtient une vitesse de rotation $v(r)$, et l'on peut tracer un diagramme appelé **courbe de rotation galactique**.

1.2. Attente théorique contre observation

Dans un disque gravitationnel « ordinaire », où la masse est principalement concentrée au centre (comme dans le Système solaire, où la masse dominante est celle du Soleil), on s'attend à ce que la vitesse orbitale diminue avec la distance au centre selon la relation :

$$v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Cependant, pour de nombreuses galaxies spirales, les courbes de rotation obtenues à partir des observations Doppler montrent que :

$$v(r) \approx \text{constant}$$

Autrement dit, les étoiles et le gaz dans les régions externes tournent à une vitesse presque égale à celle des régions intermédiaires, alors que la masse visible (étoiles et gaz du disque) n'est pas suffisante pour produire de telles vitesses.

Pour expliquer cet écart, le concept de **« matière noire »** a été introduit : une masse invisible, distribuée dans le halo de la galaxie, qui fournirait la gravitation supplémentaire nécessaire à ces hautes vitesses de rotation.

Néanmoins, jusqu'à présent, aucune particule de matière noire n'a été détectée directement, et ce fait a motivé une réévaluation du processus d'observation et de l'interprétation des courbes de rotation, avec un regard plus critique et plus précis.

---

2) Nature de l'observation lumineuse et ses limites

La vitesse de rotation des galaxies n'est pas mesurée à partir du mouvement réel des étoiles elles-mêmes ; nous ne voyons jamais directement la position ou le déplacement des étoiles d'une galaxie lointaine. Ce que nous observons, c'est uniquement **la lumière**. Et l'ensemble des déductions vitesse, structure du disque, et même existence de la matière noire repose sur l'analyse spectrale de cette lumière.

Or, sur son trajet jusqu'au télescope, la lumière :

- traverse des distances extrêmement grandes,

- passe à travers différentes couches de gaz et de poussière,
- traverse à plusieurs reprises des phénomènes de diffusion, d'absorption, de réflexion et de changement de trajectoire,
- et finit par être **mélangée**, dans un même « pixel » du détecteur du télescope, avec la lumière d'autres sources.

Cela signifie que :

La vitesse de rotation que nous calculons à partir de la lumière n'est pas nécessairement égale à la vitesse réelle des étoiles à cette position.

La ligne de visée dirigée vers le bord d'une galaxie traverse plusieurs couches structurelles, et la lumière reçue est une **moyenne** de l'émission de ces couches.

2.1. Accumulation de lumière de plusieurs couches sur une même ligne de visée

Une galaxie n'est pas une structure monocouche. Lorsqu'un télescope vise un point donné au bord du disque galactique, il reçoit en réalité la lumière **combinée** de plusieurs régions et couches :

- la couche mince du disque (*Thin Disk*),
- la couche épaisse du disque (*Thick Disk*),
- une partie des bras spiraux,
- la lumière du halo stellaire,
- la lumière diffusée provenant du centre.

Chacune de ces couches possède une **vitesse orbitale différente**, mais leurs contributions lumineuses se combinent le long du trajet.

De façon symbolique :

$$I_{\text{obs}}(\lambda) = \sum_i I_i(\lambda, v_i)$$

où $I_i$est l'intensité lumineuse de la couche i et $v_i$la vitesse effective associée à cette couche.

En pratique, les télescopes enregistrent donc **une moyenne spectrale** de plusieurs couches, et non la vitesse d'une couche unique.

2.2. Limites de la résolution spatiale et spectrale

Même les télescopes les plus avancés, en raison de l'énorme distance qui nous sépare des galaxies, dans chaque pixel de l'image, les télescopes additionnent :

- la lumière de **milliers d'étoiles**,
- provenant de **centaines de couches différentes**.

Ce phénomène est désigné en astrophysique sous le nom de ***Beam Smearing***. Dans de telles conditions, la raie Doppler observée est affectée par :

- l'intensité relative de chaque couche,
- la diffusion de la lumière le long du trajet,
- le contraste de brillance entre les couches,
- ainsi que de petites déflexions du trajet de la lumière.

Conclusion importante :

La vitesse apparente n'est pas nécessairement égale à la vitesse réelle de la couche externe.

2.3. Effet combiné de la lumière sur la vitesse apparente

Si une couche plus lumineuse mais plus rapide est combinée, sur une même ligne de visée, avec une couche plus faible et plus lente, le spectre final :

- est **principalement dominé** par la couche la plus lumineuse,
- **représente moins fidèlement** la vitesse de la couche externe,
- et **ressemble davantage** à la vitesse des couches internes.

Il s'agit précisément du phénomène qui jouera un rôle clé plus loin dans la section consacrée à l'hypothèse principale.

---

3) Structure multicouche de la galaxie et importance

Les galaxies spirales sont, du point de vue spatial et dynamique, des structures **multicouches**. Chaque couche contient une population d'étoiles et de gaz aux propriétés différentes, et chacune présente un comportement distinct en termes de vitesse orbitale, de luminosité et de densité. La connaissance de ces couches est essentielle, car :

La lumière observée au bord de la galaxie est un **mélange** de l'émission de ces différentes couches, et non pas uniquement celle des étoiles externes.

3.1. Couche mince du disque (*Thin Disk*)

Cette couche :

- constitue la partie la plus **fine** du disque galactique,
- contient des étoiles relativement **jeunes et lumineuses**,
- possède une **forte densité** dans le plan principal du disque,
- et présente des **vitesses orbitales relativement élevées**.

Une grande partie de la lumière galactique dans le domaine visible provient de cette couche mince du disque.

3.2. Couche épaisse du disque (*Thick Disk*)

Cette couche se situe à des hauteurs plus grandes, au-dessus et au-dessous du plan principal du disque.

Ses caractéristiques :

- densité plus faible,
- étoiles plus **âgées** et **moins lumineuses**,
- vitesses orbitales légèrement plus basses,
- présence plus étendue le long des lignes de visée.

La lumière issue de cette couche est plus faible, mais comme elle occupe un volume important, elle contribue de manière **non négligeable** à la lumière totale observée.

3.3. Région centrale et renflement (*Central Region & Bulge*)

Le centre de la galaxie est l'une de ses régions les plus énergétiques et les plus lumineuses.
Cette zone comprend :

- une population extrêmement dense d'étoiles,
- des étoiles très brillantes,
- des gaz chauds et ionisés,

- un champ gravitationnel intense,
- une rotation plus rapide que dans les couches externes.

L'intensité lumineuse du centre est de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fois supérieure à celle des régions externes. Cette différence de luminosité est l'un des facteurs essentiels de la **« domination de la lumière interne »** sur la lumière provenant des zones périphériques.

3.4. Bras spiraux (*Spiral Arms*)

Les bras spiraux :

- contiennent des régions de formation stellaire très actives,
- abritent des nuages de poussière et de gaz variables,
- regroupent des étoiles jeunes et extrêmement lumineuses,
- présentent une structure fortement inhomogène.

Les bras redistribuent la lumière de manière non uniforme dans différentes directions et, sur certaines lignes de visée, ils provoquent une **diffusion et un renforcement local de la luminosité**.

3.5. Halo stellaire (*Stellar Halo*)

Le halo stellaire est une structure étendue comprenant :

- des étoiles très anciennes,
- extrêmement peu lumineuses,
- dispersées dans un volume important entourant le disque galactique.

Bien que la contribution lumineuse individuelle de ces étoiles soit faible, leur large répartition spatiale fait du halo un composant non négligeable dans la lumière totale intégrée de la galaxie.

3.6. Synthèse : importance de la structure en couches

Ces couches :

- ont des luminosités différentes,
- ont des vitesses orbitales différentes,

- ont des densités différentes,
- et apparaissent sur une même ligne de visée commune.

Par conséquent, la lumière observée au bord de la galaxie n'est **pas uniquement** celle des étoiles situées localement à ce rayon :

$$I_{\text{obs}} = I_{\text{thin}} + I_{\text{thick}} + I_{\text{bulge}} + I_{\text{halo}} + I_{\text{scattered}}$$

Cela signifie fondamentalement que :

Nous ne voyons jamais la vitesse « d'une seule couche », mais une vitesse apparente issue de la combinaison de plusieurs couches aux luminosités différentes.

---

4) Rôle de la diffusion de la lumière dans la poussière et le gaz galactiques (version révisée)

Jusqu'ici, nous avons vu que :

- la galaxie possède une structure multicouche,
- la lumière observée est une moyenne de l'émission de ces couches,
- la ligne de visée vers le bord de la galaxie traverse plusieurs couches.

Dans cette section, nous nous intéressons au mécanisme clé qui fournit une voie physique pour la **« pénétration » de la lumière centrale** dans les régions externes.

4.1. La poussière interstellaire comme milieu principal de diffusion

La poussière galactique est constituée de particules extrêmement fines (silicates, carbone et autres composés), principalement concentrées dans :

- le plan du disque,
- les bras spiraux.

Ces grains :

- **absorbent** la lumière des étoiles,
- en **diffusent** une partie dans d'autres directions,
- et produisent une **lumière diffuse** (*diffuse light*) dans différentes régions du disque.

Dans un tel milieu :

- les photons émis par le centre de la galaxie

- peuvent, après plusieurs diffusions successives, apparaître avec des directions nouvelles, qui, du point de vue du télescope, correspondent à des zones enregistrées comme « régions externes du disque ».

Ainsi :

Une partie de la lumière observée à la périphérie visible de la galaxie ne provient pas nécessairement des étoiles de cette région, mais peut être de la lumière diffusée en provenance du centre.

4.2. Rôle de l'hydrogène neutre (H I)

En plus de la poussière, de vastes nuages d'hydrogène neutre (H I) :

- sont abondants dans les régions externes des galaxies,
- possèdent une densité relativement faible, mais un volume extrêmement important.

La diffusion de la lumière dans le gaz H I n'est pas, prise isolément, aussi forte que la diffusion par la poussière, mais :

- le trajet de la lumière à l'intérieur de la galaxie est très long,
- la lumière peut traverser plusieurs nuages de H I,
- les petits effets de diffusion le long du trajet de la lumière peuvent **s'additionner**.

En conséquence, le gaz H I joue, de manière **cumulative**, un rôle dans la formation d'un fond de lumière diffuse dans les régions externes de la galaxie.

4.3. Luminosité diffuse galactique (*Diffuse Galactic Light*)

La combinaison :

- de la diffusion dans la poussière,
- et de la diffusion/dispersion dans le gaz H I,

conduit à ce que l'on peut appeler une **luminosité diffuse galactique** :

- une lumière qui ne provient pas directement d'une étoile bien définie,
- mais qui résulte de la diffusion et de la redistribution des photons dans le milieu interstellaire,
- et qui peut apparaître dans des zones de l'image qui ne coïncident pas avec la position réelle de la source d'origine.

Dans les régions externes de la galaxie, cela signifie que :

- une partie de la lumière correspond bien aux étoiles situées dans cette zone,
- et une autre partie est constituée de lumière diffusée provenant des couches internes.

Cette « **contamination lumineuse** » peut, dans l'analyse Doppler, faire apparaître la signature de vitesse des couches internes dans le spectre des régions externes.

4.4. Conséquence pour la mesure de la vitesse de rotation

Si, le long d'une même ligne de visée :

- les étoiles externes sont peu lumineuses et relativement lentes,
- mais que la lumière diffusée depuis le centre **très lumineux** de la galaxie (où la vitesse orbitale est plus élevée) entre dans cette même ligne de visée,

alors :

- le spectre final dans cette région sera **largement dominé** par la lumière des couches internes,
- la contribution spectrale des étoiles externes sera **noyée dans la moyenne**.

Dans ce cas, la vitesse déduite du spectre reflète davantage la dynamique interne que la vitesse réelle des étoiles de bord. Et la vitesse apparente est alors tirée vers la vitesse des couches centrales. C'est précisément cette idée qui sera formulée explicitement dans la section suivante :

Le mélange de la lumière des couches internes rapides avec celle des couches externes plus lentes transfère la signature Doppler de la couche interne vers le bord.

---

5) Formulation de l'hypothèse « d'interprétation en couches de la lumière »

Dans cette section, l'idée proposée est exprimée sous la forme d'une **hypothèse explicite et discutable**. Cette hypothèse ne cherche pas à nier l'existence d'une masse supplémentaire, mais pose d'abord la question suivante :

Les vitesses apparentes au bord d'une galaxie, ont-elles été correctement interprétées, du point de vue optique et structurel, avant d'y ajouter un nouveau terme gravitationnel ?

5.1. Formulation qualitative de l'hypothèse

L'hypothèse d'interprétation en couches de la lumière peut se résumer ainsi :

La vitesse de rotation élevée inférée, à partir du spectre lumineux, pour les régions externes des galaxies, pourrait être, dans une mesure significative, le résultat du mélange de la lumière des couches internes plus rapides avec celle des couches externes plus lentes, de sorte que la signature Doppler des couches internes apparaisse dans le spectre de la région de bord et fasse paraître la vitesse réelle des étoiles externes plus grande qu'elle ne l'est en réalité.

Autrement dit :

- la lumière des couches internes (centre galactique et disque mince), en raison de leur forte luminosité et de la diffusion dans la poussière et le gaz, représente une part importante du spectre enregistré dans les régions externes ;
- la lumière des couches externes, en raison de leur faible luminosité et de leur densité plus basse, contribue moins au spectre final.

Dans ces conditions :

Le mélange de la lumière des couches internes rapides avec celle des couches externes lentes transfère la signature Doppler de la couche interne vers le bord.

En conséquence, la vitesse apparente au bord, telle qu'elle est tracée sur la courbe de rotation, n'est pas nécessairement égale à la vitesse orbitale des étoiles réellement situées dans cette région.

5.2. Formulation symbolique simple

Pour une ligne de visée donnée dans la région externe d'une galaxie, on peut écrire l'intensité spectrale observée, de façon approchée, sous la forme :

$$I_{\text{obs}}(\lambda) \approx I_{\text{out}}(\lambda, v_{\text{out}}) + I_{\text{in}\to\text{out}}(\lambda, v_{\text{in}})$$

où :

- $I_{\text{out}}(\lambda, v_{\text{out}})$: contribution lumineuse des étoiles et du gaz **réellement situés** dans la région externe, avec une vitesse orbitale v_{out}.
- $I_{\text{in}\to\text{out}}(\lambda, v_{\text{in}})$: contribution lumineuse **diffusée** en provenance des couches internes (centre et disque interne) qui, à cause de la diffusion dans la poussière et le gaz, apparaît sur cette même ligne de visée et porte la signature Doppler associée à la vitesse interne v_{in}.

Si:

$$I_{\text{in}\to\text{out}} \gg I_{\text{out}}$$

c'est-à-dire si la contribution lumineuse des couches internes domine celle des étoiles externes, alors :

- le spectre Doppler observé représente principalement v_{in}, et beaucoup moins fidèlement v_{out}.

En pratique, la vitesse effective extraite du spectre peut s'écrire comme une moyenne pondérée :

$$v_{\text{eff}} \approx \frac{I_{\text{out}}\, v_{\text{out}} + I_{\text{in}\to\text{out}}\, v_{\text{in}}}{I_{\text{out}} + I_{\text{in}\to\text{out}}}$$

Si $I_{\text{in}\to\text{out}}$est dominant et que $v_{\text{in}} > v_{\text{out}}$, alors :

$$v_{\text{eff}} \approx v_{\text{in}}$$

et la vitesse apparente au bord est artificiellement tirée vers la vitesse des couches internes.

5.3. Lien avec la courbe de rotation plate

Si ce mécanisme est actif sur une fraction significative des rayons externes de la galaxie, alors :

- la vitesse effective $v_{\text{eff}}(r)$reste fortement influencée par les couches internes,
- les différences réelles de vitesse entre les différentes couches sont **lissées** dans la moyenne spectrale,
- et la courbe de rotation obtenue à partir de ces vitesses apparentes peut devenir **quasi plate**, même si la vitesse réelle $v_{\text{out, real}}(r)$ des couches externes diminue avec le rayon.

En d'autres termes, cette hypothèse suggère que :

Une partie du caractère plat des courbes de rotation galactiques peut résulter du moyennage lumineux et de la contamination du spectre des couches externes par la lumière des couches internes, et non nécessairement de l'existence d'une masse invisible.

5.4. Portée de l'hypothèse

Cette hypothèse :

- **ne rejette pas** l'existence de la matière noire de façon absolue,
- mais insiste sur un point **méthodologique préalable** :

Avant d'ajouter de nouveaux termes gravitationnels, il faut évaluer dans quelle mesure les vitesses apparentes au bord peuvent être le produit de la combinaison lumineuse des différentes couches de la galaxie.

Si une modélisation détaillée montre que :

- la part de lumière diffusée depuis le centre,
- et le rapport $I_{\text{in}\to\text{out}}/I_{\text{out}}$,

suffisent à reproduire les courbes plates observées, alors une partie du problème de la rotation galactique pourrait être expliquée **sans** recourir à une masse invisible.

---

6) Synthèse et conclusion

Dans le cadre de la cosmologie standard, les « courbes de rotation plates des galaxies » sont considérées comme l'un des arguments observationnels les plus forts en faveur de la matière noire.

Cependant, l'ensemble de ces conclusions repose sur une chaîne conceptuelle :

1. la lumière reçue de différentes régions de la galaxie,
2. sa conversion en spectre et la mesure du décalage Doppler,
3. l'interprétation de ce décalage comme une vitesse orbitale locale,
4. le calcul de la masse dynamique à partir de cette vitesse,
5. la comparaison avec la masse lumineuse,
6. et enfin la déduction d'une masse manquante (matière noire).

L'hypothèse d'« **interprétation en couches de la lumière** » intervient au cœur de cette chaîne et pose la question suivante :

Dans quelle mesure les vitesses extraites du spectre lumineux représentent-elles fidèlement la dynamique réelle des couches externes d'une galaxie ?

6.1. Cœur des résultats de l'hypothèse

Compte tenu :

- de la structure multicouche des galaxies,
- de la luminosité dominante du centre et du disque interne,
- de la diffusion de la lumière dans la poussière interstellaire et le gaz d'hydrogène neutre,
- et du moyennage spectral le long d'une même ligne de visée (***beam smearing***),

l'hypothèse proposée suggère que :

1. La lumière enregistrée depuis la région de bord d'une galaxie est une **combinaison** de l'émission des étoiles externes et de la lumière diffusée en provenance des couches internes.
2. Si la contribution lumineuse des couches internes dépasse celle des étoiles réellement situées au bord, alors la signature Doppler des couches internes apparaîtra dans le spectre de la région externe.
3. Dans ce cas, la vitesse effective extraite du spectre sera plus proche de la vitesse des couches internes que de la vitesse réelle des orbites externes.
4. Ce mécanisme peut conduire à un **aplatissement artificiel** de la courbe de rotation, sans qu'il soit nécessaire, a priori, d'ajouter une masse invisible.

6.2. Place de cette hypothèse dans la discussion sur la matière noire

Cette hypothèse ne prétend pas fournir un substitut complet à tous les modèles de matière noire, et ne nie pas globalement l'existence possible de celle-ci. Elle insiste plutôt sur un point **méthodologique** :

Avant de conclure à l'existence d'une nouvelle composante de masse dans l'Univers, il est nécessaire de vérifier, autant que possible, que les vitesses déduites du spectre lumineux représentent fidèlement la dynamique réelle de la couche à laquelle on les attribue. Si les effets optiques et structuraux (mélange des couches, diffusion dans la poussière, luminosité diffuse) ne sont pas pris en compte avec suffisamment de précision dans la modélisation des courbes de rotation, une partie de la « masse manquante » pourrait en réalité être le résultat d'une interprétation incomplète ou biaisée des signaux lumineux, plutôt que de l'absence d'une nouvelle composante matérielle.

6.3. Perspectives de recherche

L'hypothèse d'« interprétation en couches de la lumière » n'est pas un modèle achevé reposant sur des simulations numériques et des calculs détaillés, mais :

- un **cadre conceptuel**,
- et une **question ouverte** pour des travaux ultérieurs.

Les pistes possibles pour la suite (qui ne sont ici qu'esquissées, et non développées) incluent :

- la modélisation numérique du transfert de lumière dans un disque multicouche contenant de la poussière,
- l'estimation quantitative de la contribution de la lumière diffusée par le centre,
- la simulation des courbes de rotation **apparentes** en présence d'une luminosité diffuse,
- la comparaison systématique entre galaxies fortement poussiéreuses et galaxies peu poussiéreuses.

Le but de cette hypothèse est de montrer que :

Même à un niveau très préliminaire, on peut concevoir des scénarios dans lesquels une partie de « l'anomalie dynamique » attribuée à la matière noire trouve en réalité son origine dans l'optique et la structure multicouche des galaxies. En ce sens, cette hypothèse ne constitue pas une fin de débat, mais plutôt une invitation à réexaminer plus en détail la relation entre **lumière, structure et dynamique** dans les galaxies spirales.