

Naissance et mort des étoiles en laboratoire : les disques d'accrétion

Christophe Gissinger (christophe.gissinger@phys.ens.fr)

Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

Les disques d'accrétion sont composés de gaz et de poussière en orbite autour d'étoiles naissantes ou de trous noirs. En plus de cette rotation, ces disques transportent également de la matière vers l'objet central et sont donc essentiels pour comprendre la formation et la fin de vie des étoiles. Un mystère persiste : comment d'énormes quantités de matière peuvent-elles tomber vers le centre, défiant les lois de conservation du moment cinétique ? La réponse pourrait résider dans la turbulence, un état chaotique du gaz qui permet une dissipation d'énergie efficace. Grâce à des expériences en laboratoire, les scientifiques explorent le rôle du magnétisme dans la création de cette turbulence et son impact sur l'accrétion de matière.

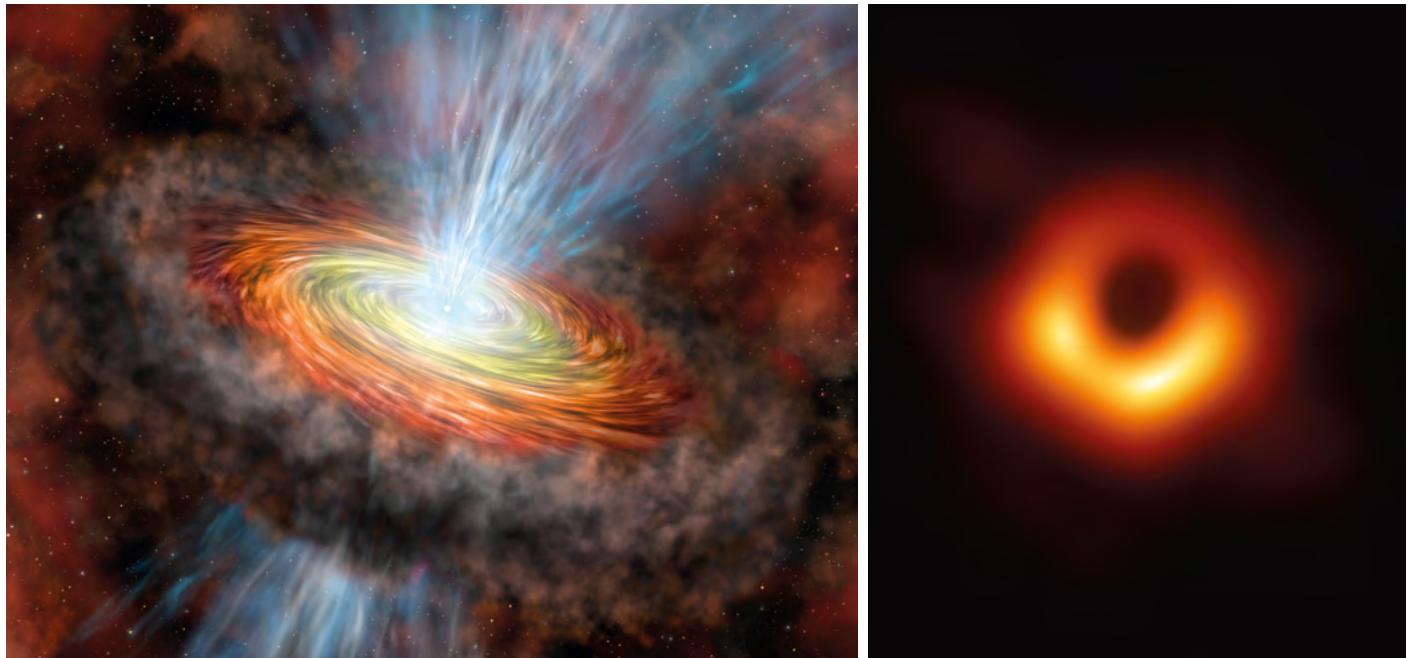
Les disques astrophysiques sont des structures fascinantes de matière en orbite autour d'un objet central, présentes dans de nombreux systèmes cosmiques. Lors de la formation d'une étoile, le gaz et la poussière environnantes s'effondrent sous l'effet de la gravité, formant un disque mince de matière qui « spirale » vers la protoétoile (voir la figure 1). Ce processus se produit aussi autour des trous noirs, engloutissant toute la matière environnante et générant l'intense luminosité observée au centre des galaxies. Comprendre ce mécanisme est donc crucial pour expliquer la naissance et la mort des étoiles, mais cette compréhension se heurte à un défi : la quantité de matière qui tombe vers le centre est beaucoup, beaucoup plus grande (par 14 ordres de grandeur !) que ce qui est prévu par les lois de conservation du moment cinétique. En effet, dans un disque, la quantité fondamentale caractérisant une parcelle de gaz est son élan de rotation, ou moment cinétique par rapport au centre du disque, noté $\vec{\Gamma} = \vec{x} \times m\vec{V}$, où m est la masse de la parcelle de gaz considérée, \vec{V} sa vitesse orbitale et \vec{x} sa position par rapport au centre. Si aucune force extérieure n'agit, le moment cinétique du disque doit rester constant. Les gigantesques taux d'accrétion observés ne sont donc possibles

que s'il existe un mécanisme puissant qui transporte efficacement ce moment cinétique vers l'extérieur du disque, permettant à la matière de tomber rapidement jusqu'au centre.

L'explication la plus convaincante est l'apparition de turbulence, un état chaotique et tourbillonnant du gaz qui engendre une importante dissipation d'énergie et provoque ainsi une redistribution significative de moment cinétique au sein du disque. Cet état est extrêmement difficile à décrire théoriquement mais peut être reproduit en laboratoire. C'est pourquoi les disques d'accrétion font l'objet d'une intense recherche expérimentale. On espère y modéliser le transport de moment cinétique et ainsi mieux comprendre comment de telles quantités de gaz et de matière peuvent être accrétées sur l'objet central, levant ainsi le voile sur les conditions de formation et de fin de vie des étoiles. Dans cet article, nous verrons comment deux études expérimentales récentes ont permis d'identifier d'une part le rôle du magnétisme dans l'apparition de turbulence dans les disques astrophysiques, et d'autre part comment cette turbulence dissipe l'énergie et transporte d'énormes quantités de matière vers les protoétoiles ou les trous noirs.

Observations et contraintes théoriques

L'une des caractéristiques emblématiques des disques est leur profil de rotation. Tous les disques s'organisent en équilibrant en tout point deux forces principales, données ici par unité de masse. La force gravitationnelle GM/r^2 (où G est la constante gravitationnelle, M la masse de l'objet central, et r la distance au centre du disque), dirigée vers le centre du disque, attire la matière vers l'objet central. La force centrifuge U^2/r (U étant maintenant la vitesse orbitale), tend à la repousser vers l'extérieur. Ces deux forces, appliquées sur chaque parcelle de gaz en mouvement, s'équilibrent et déterminent la vitesse de rotation du gaz, qui décroît avec la racine carrée de la distance au centre : $U \propto 1/\sqrt{r}$. Ce type de rotation est appelé képlérien et constitue le comportement universel des disques d'accrétion. Outre cette rotation orbitale, les observations indiquent également un afflux significatif de gaz et de matière vers le centre, un processus appelé accrétion. Pour comprendre simplement ce phénomène malgré la conservation du moment cinétique, il suffit d'invoquer la présence de la viscosité, qui est une mesure de la résistance d'un fluide à s'écouler due aux frottements internes



1. Gauche : Vue d'artiste de la protoétoile W33A montrant le disque d'accrétion (jaune/orange) et les jets d'écoulement magnétisés (bleu) [International Gemini Observatory/Lynette Cook - W33A Accretion Disk, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=139429837>]. Droite : Image d'un trou noir, dont le disque d'accrétion est visible en jaune [Event Horizon Telescope Collaboration].

entre ses molécules. Plus un fluide est visqueux, plus il s'écoule lentement et difficilement, comme le miel par rapport à l'eau. Dans un disque, la viscosité crée des frottements entre les couches de fluide tournant à des vitesses différentes. Ce frottement entraîne un transfert d'énergie et de moment cinétique du gaz, qui ralentit et finit par tomber vers le centre en spirant.

Le principal problème – et l'aspect le plus fascinant des disques d'accrétion – est que les taux d'accrétion observés sont incroyablement élevés, impliquant un transport massif de matière vers l'intérieur du disque, impossible à expliquer par la seule dissipation visqueuse : il faudrait que la viscosité des gaz astrophysiques soit 10^{14} fois plus forte qu'elle est réellement. Les astrophysiciens en ont déduit qu'il doit exister un mécanisme plus efficace. Une hypothèse convaincante est le transport par la turbulence : si le gaz suit en moyenne une rotation képlérienne, l'écoulement présente également des mouvements chaotiques et des fluctuations imprévisibles marquées par des variations rapides de vitesse et de direction. Cette turbulence accroît la dissipation en transférant l'énergie des grandes échelles vers les petites échelles, où la viscosité moléculaire peut finalement la dissiper de manière efficace.

Cela pourrait ainsi expliquer les taux élevés d'accrétion observés. Il est bien établi que la turbulence augmente le transport de certaines quantités. Par exemple, remuer fortement un café permet de mélanger rapidement le sucre, et l'air chauffé monte plus efficacement dans une pièce lorsque le flux d'air est turbulent. Dans un disque, l'intensité de la turbulence est déterminée par le nombre de Reynolds, défini comme $\mathfrak{R} = UR/v$, où R est le rayon caractéristique du disque, U sa vitesse de rotation caractéristique et v la viscosité du fluide. Les nombres de Reynolds très élevés des disques d'accrétion ($\mathfrak{R} \sim 10^{12}-10^{15}$) impliquent des écoulements fortement turbulents. On s'attend donc à ce que la turbulence des disques permette un transport efficace du moment cinétique pour que la matière tombe vers l'objet central massif.

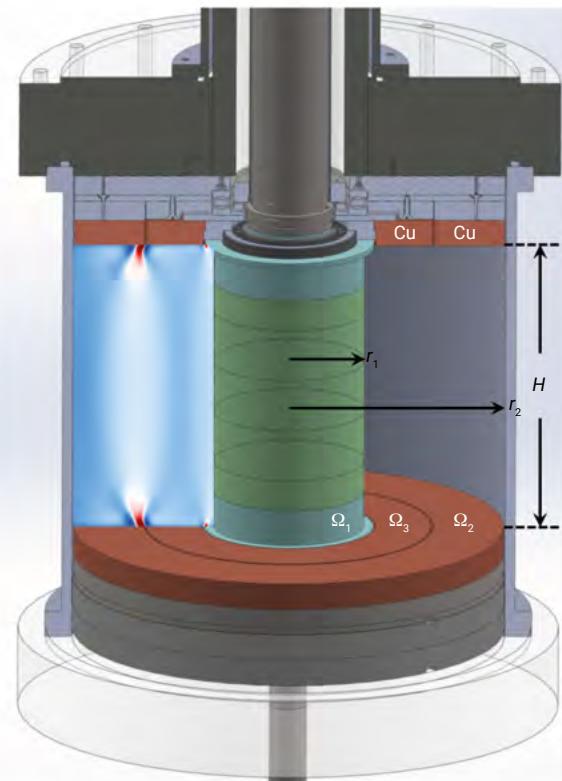
Mais les astrophysiciens ont plusieurs problèmes avec cette théorie. Un disque képlérien, avec une vitesse orbitale décroissant selon la racine carrée de la distance au centre, est naturellement très stable. Depuis plus d'un siècle, on sait qu'un tel écoulement ne peut être déstabilisé par la force centrifuge seule (un résultat obtenu par Lord Rayleigh en 1917). Cela le distingue des autres écoulements astrophysiques (intérieur des étoiles, galaxies ou océans

planétaires), où des instabilités simples peuvent expliquer la turbulence. Actuellement, il n'y a pas de consensus sur le mécanisme exact pour transformer un disque képlérien stable en un écoulement chaotique et turbulent. De plus, nous ignorons si cette turbulence peut augmenter suffisamment le transport de matière pour expliquer l'accrétion observée. Dans ce contexte, les expériences de laboratoire se concentrent sur deux questions essentielles : d'une part, comment un disque képlérien peut-il devenir turbulent ? D'autre part, le transport de moment cinétique par la turbulence peut-il expliquer les énormes taux d'accrétion observés autour des trous noirs et des étoiles en formation ? Récemment, des réponses simples à ces questions ont émergé grâce à deux expériences de laboratoire significatives, abordées dans les sections suivantes de cet article.

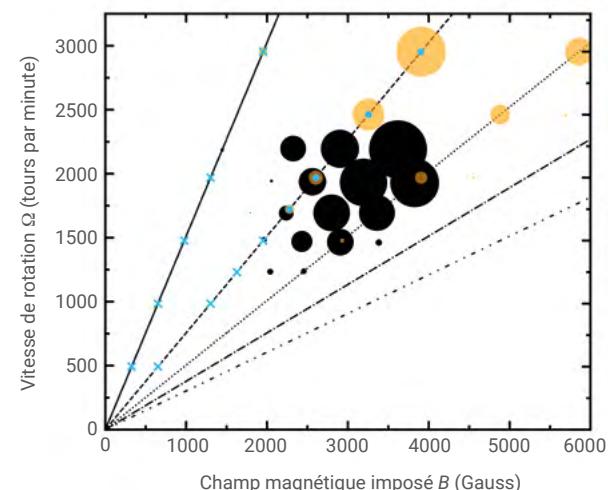
En quête de l'instabilité magnétorotationnelle

Depuis 30 ans, de nombreuses théories ont été proposées pour expliquer l'origine de la turbulence dans les disques képlériens. La plus populaire est l'instabilité magnétorotationnelle (ou instabilité MRI pour *MagnetoRotational Instability*), développée

>>>



a b



2. (a) Dispositif expérimental utilisé par l'équipe de Princeton.
(b) Résultats montrant l'apparition de l'instabilité MRI. Le diamètre des points noirs est proportionnel à l'intensité de la turbulence engendrée par l'instabilité MRI (ici mesurée par induction magnétique). L'écoulement ne devient instable que si le champ magnétique imposé B et la vitesse de rotation Ω sont suffisamment élevés. (Figure adaptée de Ji et al., *Physical Review Letters* (2022)).

>>>

par Steve Balbus et John Hawley dans les années 90. Cette théorie exploite le fait que les disques sont constitués de gaz ionisés, conducteurs d'électricité et sensibles aux champs magnétiques (ce qu'on appelle un plasma). Dans ces conditions, des courants électriques (représentés par leur densité de courant J) et des champs magnétiques (B) peuvent circuler dans le plasma et se combiner pour engendrer une nouvelle force agissant sur le fluide, la force de Laplace $\vec{F}_B = \vec{J} \times \vec{B}$ (par unité de volume).

La théorie MRI est particulièrement élégante : la rotation du plasma induit d'abord des courants électriques et un champ magnétique dans le disque (un peu comme la dynamo d'un vélo). Ce magnétisme, via la force de Laplace, rétroagit sur le plasma, déstabilise la rotation du disque et engendre de la turbulence. Les mouvements turbulents dissipent alors suffisamment d'énergie pour que la matière chute rapidement vers l'objet central du disque. Devenue la pierre angulaire de la compréhension des disques astrophysiques, cette théorie a été confirmée par de nombreuses simulations numériques, mais dans des conditions très idéalisées. Cela a conduit, depuis environ 15 ans, à une intense activité de recherche visant à observer cette instabilité dans un écoulement réel, en laboratoire.

L'expérience Princeton-MRI, développée à l'Université de Princeton, vise à étudier l'instabilité MRI dans un environnement contrôlé. L'idée est relativement simple (voir figure 2a) : le dispositif utilise deux cylindres concentriques en rotation pour modéliser le disque d'accrétion. Le cylindre interne représente la partie proche de l'objet central (comme un trou noir), et l'espace entre les cylindres est rempli de Galinstan, un alliage métallique liquide composé principalement de gallium, d'indium et d'étain. Le Galinstan, conducteur d'électricité, réagit aux champs magnétiques et simule ainsi le plasma astrophysique. En choisissant minutieusement les vitesses de rotation des deux cylindres, il est possible de créer une rotation orbitale du fluide proche de la rotation képlérienne. Mais sans force gravitationnelle intense, cette rotation, dite quasi képlérienne, ne décroît pas exactement comme la racine carrée de la distance. Elle respecte néanmoins un critère crucial : comme le profil képlérien, elle est stable selon le critère de Rayleigh, ce qui signifie qu'elle ne devient pas naturellement turbulente, même à vitesse maximale. Selon la théorie de l'instabilité MRI, le fluide doit être soumis à un champ magnétique pour déclencher la turbulence.

En 2022, l'équipe de Princeton a confirmé ce mécanisme en plaçant l'expérience entre de grandes bobines de Helmholtz générant un champ magnétique vertical intense. La figure 2b montre que lorsque le champ magnétique dépasse 0,2 Tesla (2000 Gauss), des fluctuations soudaines apparaissent dans l'écoulement, indiquant que l'écoulement devient instable (à condition de tourner vite). En très bon accord avec la théorie, ce résultat expérimental majeur confirme pour la première fois la prédition théorique de Balbus et Hawley sur le rôle du magnétisme dans le déclenchement du processus d'accrétion des disques.

Le transport de moment cinétique par la turbulence

L'expérience de Princeton, optimisée pour observer l'instabilité MRI, diffère néanmoins considérablement des disques astrophysiques : la rotation n'est pas véritablement képlérienne et l'écoulement, bien que fluctuant, n'est pas pleinement turbulent. Cette approche se limite à reproduire l'état initial d'un disque, au seuil de la turbulence, sans permettre de comprendre comment cette turbulence favorise ensuite l'accrétion de matière. Pour cela, il faut plutôt modéliser l'état final du disque,

mais il est manifestement difficile de reproduire en laboratoire le puissant champ gravitationnel qui provoque l'accrétion des disques astrophysiques. Cela peut sembler, à première vue, un argument décourageant concernant les expériences en laboratoire. Heureusement, la conservation du moment cinétique implique que lorsque la matière spirale vers l'intérieur, elle transfère son moment cinétique vers les parties extérieures du disque. Ainsi, avec un dispositif rotatif bien conçu et des mesures précises, ce transfert de moment cinétique peut parfaitement être reproduit et étudié en laboratoire, même en l'absence d'accrétion gravitationnelle.

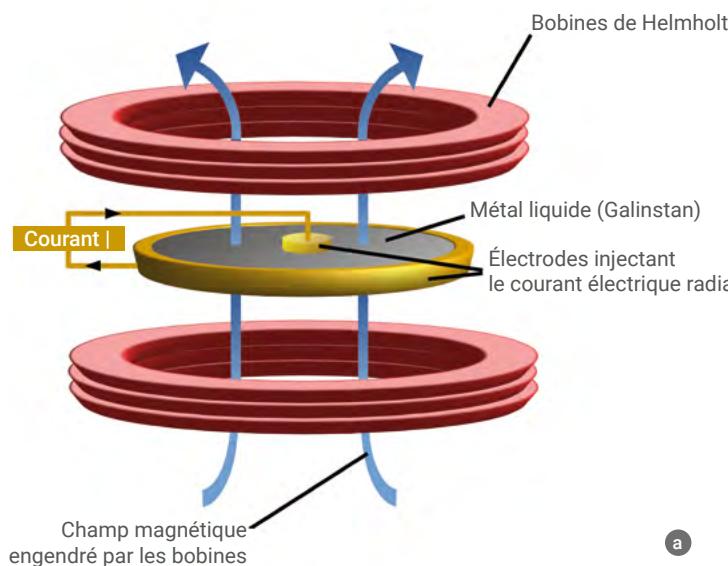
C'est précisément l'objectif de l'expérience KEPLER, développée à l'École normale supérieure de Paris, qui a permis de recréer en laboratoire un disque fin, magnétisé, avec un écoulement turbulent en rotation képlérienne. Comme cela est montré sur la figure 3a, cette expérience utilise, là encore, deux cylindres concentriques remplis de Galinstan, avec, cependant, plusieurs différences cruciales. Premièrement, les cylindres ne tournent pas, car l'expérience exploite les propriétés électromagnétiques du métal liquide. Un courant puissant de plusieurs centaines d'ampères est injecté radialement entre les cylindres et un champ magnétique vertical est appliqué, créant une force de Laplace azimutale qui provoque une rotation rapide du métal liquide sans

nécessiter la rotation des cylindres. Les bords de l'expérience ne jouent plus de rôle prépondérant dans la rotation, car la friction qui s'y exerce se limite à une mince couche et n'influe pas sur le mouvement dans le cœur de l'écoulement, une condition plus proche des disques d'accrétion astrophysiques. Avec une hauteur de seulement 1,5 cm pour un diamètre de 40 cm, l'expérience reproduit également la géométrie des disques fins. Mais surtout, ce forçage magnétique joue un rôle tout à fait analogue au champ gravitationnel des disques ! En effet, la force volumique de Laplace $F_B = IB/(2\pi rh)$ (où I est le courant total injecté) remplace la gravité et s'équilibre avec l'inertie du fluide. La faible épaisseur du disque fait que les variations de vitesse sont essentiellement portées par la direction verticale, si bien que la force d'inertie qui s'exerce sur le fluide prend la forme $F_I \propto \rho U^2/h$, où ρ est la masse volumique du gaz, plutôt que $\rho U^2/r$. L'équilibre $F_B \sim F_I$ conduit ainsi à un profil de rotation exactement képlérien $U \propto 1/r$ comme cela est illustré sur la figure 3b. Enfin, et c'est le point le plus important, pour le transport, cette force crée un écoulement de plusieurs m/s et on y observe un très haut niveau de turbulence sans avoir à recourir à l'instabilité MRI. Les deux caractéristiques de fort courant et de disque fin sont donc cruciales pour obtenir une véritable turbulence képlérienne.

Le « régime ultime » de Kraichnan

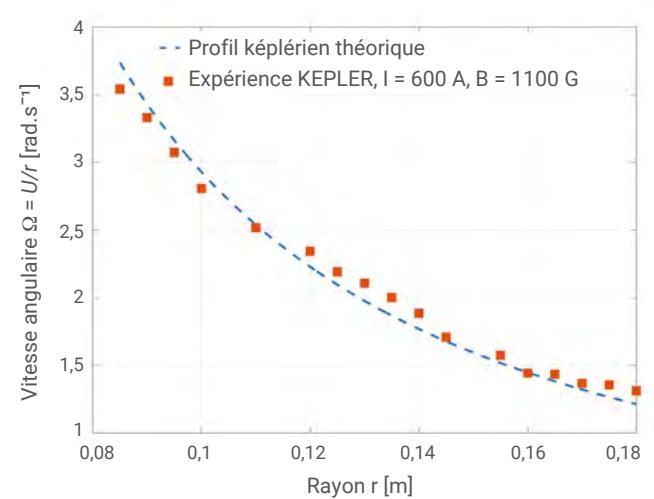
Cette modélisation fidèle d'un disque d'accrétion a permis de caractériser pour la première fois, en 2022, le transport de moment cinétique par la turbulence képlérienne. La figure 4 montre l'évolution du flux de moment cinétique traversant l'expérience, obtenu à partir de mesures précises des différentes composantes de vitesse de l'écoulement. Une augmentation de cette quantité indique que les parties internes du fluide perdent du moment cinétique et le transforment vers l'extérieur. Dans un disque réel, c'est précisément ce transfert accru de moment cinétique vers l'extérieur qui permet à la matière de s'accréter sur l'objet central. Cette mesure est normalisée par le transport effectué par la viscosité du fluide, un indicateur appelé nombre de Nusselt, qui s'écrit $Nu = J/(2\nu\Omega r^2)$ où J est le flux radial de moment cinétique, Ω la vitesse angulaire du fluide, ν sa viscosité et r la distance au centre. Lorsque Nu vaut 1, le transport est faible et entièrement dû à la dissipation visqueuse tandis que $Nu > 1$ indique une augmentation du transport de moment cinétique. Cette efficacité est tracée en fonction du nombre de Reynolds \mathfrak{R} défini précédemment qui mesure l'intensité de la turbulence. En montrant comment Nu évolue avec \mathfrak{R} , on observe comment la turbulence améliore le transport de moment cinétique par rapport au cas visqueux.

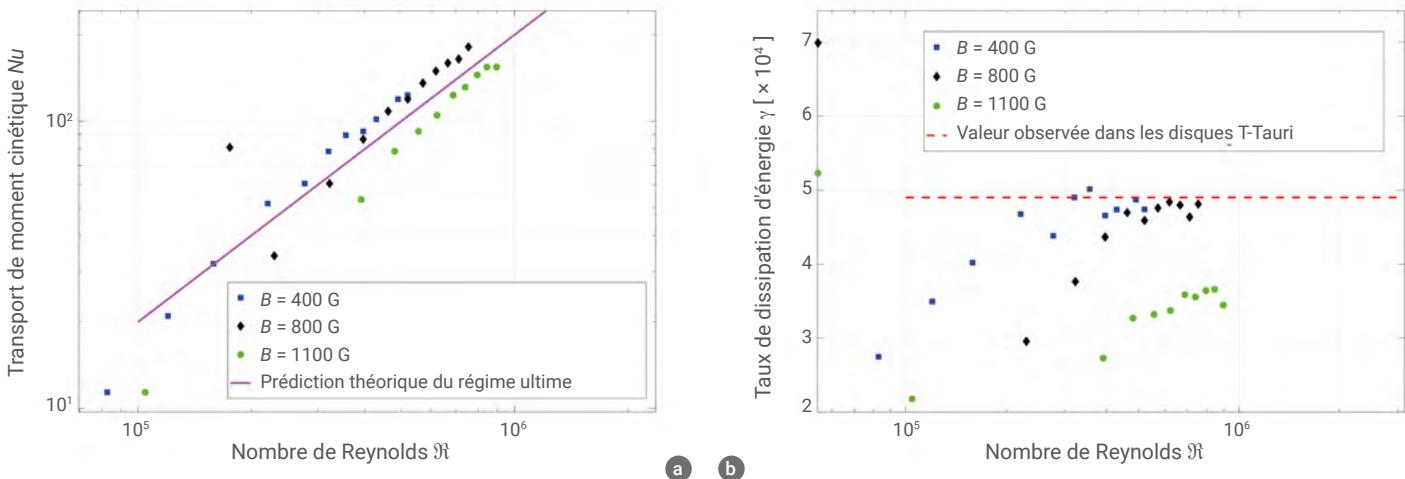
>>>



3. (a) Dispositif expérimental de l'expérience KEPLER (Paris).

(b) Profil de rotation de la vitesse mesurée dans l'expérience, démontrant l'existence d'une rotation képlérienne. Figure adaptée de Vernet et al., *Physical Review Letters* (2022).





4. (a) Transport de moment cinétique (Nu) en fonction du nombre de Reynolds \mathfrak{R} . Pour \mathfrak{R} grand, les données expérimentales suivent très bien la prédiction historique du régime ultime de Kraichnan.
(b) Dissipation d'énergie (équivalent du taux d'accrétion) obtenue dans l'expérience, en très bon accord avec la valeur médiane issue des observations (lignes pointillées rouge) pour les disques de type T-Tauri. (Figure adaptée de Vernet et al., *Physical Review Letters* (2022)).

>>>

La figure 4a montre une augmentation significative de Nu jusqu'à 300 lorsque $\mathfrak{R} \sim 10^6$, ce qui démontre que la turbulence améliore considérablement le transport dans le disque. Plus important encore, cette augmentation suit une loi précise où Nu augmente linéairement avec \mathfrak{R} . Prédit par Robert Kraichnan en 1962 pour le transport de chaleur, ce comportement linéaire, appelé « régime ultime », n'avait jamais été observé auparavant pour le transport de moment cinétique. Cette loi est cruciale car, lorsqu'elle est vérifiée, la quantité de moment cinétique transportée est indépendante de la viscosité, ce qui correspond au mode de transport le plus efficace jamais prévu. Autrement dit, dans l'expérience KEPLER, le moment cinétique est entièrement transféré par les fluctuations de vitesse, sans aucune contribution de la viscosité moléculaire. Les astrophysiciens suspectent depuis longtemps que ce transport optimal doit être à l'œuvre dans les disques pour expliquer des taux d'accrétion si importants.

Mais pourquoi ce régime n'a-t-il jamais été obtenu auparavant ? La réponse réside dans la manière dont le moment cinétique est injecté. Dans des expériences classiques comme celle de Princeton, la rotation du liquide est due aux frottements entre les cylindres en rotation et le fluide, ce qui nécessite l'usage de la viscosité. Par conséquent, le transfert de moment cinétique dépend toujours, en partie, de cette viscosité, ce qui diffère de la réalité astrophysique où le moment cinétique n'est pas

introduit de manière aussi localisée aux bords du disque. Dans l'expérience KEPLER, le moment cinétique est injecté en volume par la force magnétique, ce qui élimine totalement le rôle de la viscosité aux bords. Cela permet d'obtenir un mode de transport non visqueux, où le rôle des fluctuations de vitesse domine dans le transfert de moment cinétique, offrant une représentation plus fidèle des conditions réelles des disques astrophysiques.

Une nouvelle contrainte pour la théorie des disques d'accrétion

Ce régime ultime, indépendant de la viscosité, est suffisamment universel pour s'appliquer à divers systèmes. Ainsi, malgré les différences substantielles existant entre le métal liquide de l'expérience et les plasmas astrophysiques, des prédictions fiables sont possibles. Les calculs (que l'on ne détaille pas ici) montrent que le transport de moment cinétique est toujours lié à une dissipation d'énergie normalisée $\gamma = 2Nu/\mathfrak{R}$. Cette quantité γ intéresse beaucoup les expérimentateurs car elle peut être obtenue à partir des observations astrophysiques (elle est directement liée aux taux d'accrétion observés), mais aussi à partir des mesures expérimentales de Nu . L'expérience KEPLER, avec sa valeur Nu/\mathfrak{R} constante, fournit donc une prédiction directe, à savoir $\gamma \sim 5 \times 10^{-4}$ (figure 4b). De manière surprenante, cette valeur correspond exactement aux

valeurs de γ observées dans les disques autour de certaines protoétoiles dites T-Tauri, où l'on dispose de bonnes estimations (la ligne rouge pointillée). Cela met en lumière l'intérêt crucial d'atteindre le régime ultime de Kraichnan en laboratoire. Ce régime, étant asymptotique, garantit qu'un écoulement restera dans cet état lorsque \mathfrak{R} augmente. Ainsi, contrairement aux expériences de Taylor-Couette classiques, aucune extrapolation n'est nécessaire entre l'expérience de laboratoire ($\mathfrak{R} \sim 10^6$) et les disques astrophysiques ($\mathfrak{R} \sim 10^{14}$). Cet accord entre expérience et observations est important car il confirme de manière spectaculaire que les énormes taux d'accrétion observés dans les disques s'expliquent parfaitement par une turbulence pleinement développée qui possède les trois propriétés suivantes : un transport turbulent indépendant de la viscosité et des conditions aux bords, un profil moyen képlérien, et un disque suffisamment fin. Cette expérience fournit donc de nouvelles contraintes pour les futurs modèles théoriques visant à expliquer les disques d'accrétion.

Conclusion

En quelques années, l'image générale de la formation et de l'évolution des disques d'accrétion s'est nettement clarifiée : l'instabilité MRI initie la turbulence, cette turbulence amplifie radicalement le transfert du moment cinétique en suivant un régime de transport ultime sans contribution de la

viscosité moléculaire, ce qui conduit finalement à une accrétion massive de gaz et de matière sur les protoétoiles ou les trous noirs. Les expériences comme celles de Princeton et de Paris illustrent parfaitement le rôle des modèles de laboratoire dans notre compréhension de ces structures essentielles de l'Univers.

Mais les progrès fulgurants des observations pourraient bien compliquer cette image simple à l'avenir. Par exemple, on sait désormais qu'une petite partie des disques est trop froide pour se comporter comme des plasmas, ce qui rend l'instabilité MRI inopérante. De plus, de récentes découvertes ont montré que le niveau de turbulence dans certains disques est nettement plus faible que ce que l'on pensait. Ces observations pourraient remettre en cause le rôle hégémonique de la turbulence et de la MRI depuis 30 ans et forcer les chercheurs à trouver d'autres explications pour l'accrétion de matière autour de certains trous noirs et étoiles.

Les modèles expérimentaux devront donc fournir de nouvelles modélisations plus précises des disques. Par exemple, il a été proposé que la compressibilité et les vitesses supersoniques dans les disques jouent un rôle crucial. Les ondes de choc générées par ces vitesses pourraient créer des conditions favorables à l'accrétion en redistribuant le moment cinétique de manière plus efficace. Une autre théorie récente suggère que des écoulements verticaux peu turbulents permettent l'accrétion en extrayant de la masse et du moment angulaire du disque grâce à des champs magnétiques puissants. Ces nouvelles perspectives montrent que notre compréhension des disques d'accrétion est en pleine évolution, et que les modèles doivent continuellement s'adapter aux nouvelles données. Il est donc fort probable que notre compréhension des disques évolue encore considérablement au cours des prochaines années. Ce qui semble aujourd'hui être l'aboutissement d'une longue quête pourrait en réalité n'être que le début de nombreuses découvertes fascinantes à venir. ■



- <https://physics.aps.org/articles/v15/115>
- www.scholarpedia.org/article/Accretion_discs
- <https://physics.aps.org/articles/v15/134>