

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research



Ziane Achour University of Djelfa
Faculty of Exact Sciences and Computer Science
Physics department

Order n°:.....



THESIS
presented to obtain

Doctorate in Sciences

Option: Physics

Specialty: Fundamental Physics

Presented by:

DJENIDI Abderrazak

**Evolution of the concept of time in modern physical
theories**

Defended on: 02 / 07 / 2024

Jury members:

| | | | |
|--------------------|-------|-------------------------------------|---------------|
| DEROUICHE Yazid | Prof. | University of Djelfa – Ziane Achour | President |
| MAACHE Mostefa | Prof. | University of Djelfa – Ziane Achour | Supervisor |
| MESSELMY Farid | Prof. | University of Djelfa – Ziane Achour | Co-Supervisor |
| AKKA Ali | MCA | ENS of Boussaâda | Examiner |
| ABBASSI Ahmed | MCA | ENS of Boussaâda | Examiner |
| RAHOU Djamel | MCA | University of Djelfa – Ziane Achour | Examiner |
| BOUHLAL Abdelhalim | Prof. | University of Djelfa – Ziane Achour | Guest |

University year: 2023/2024

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ziane Achour de Djelfa
Faculté des Sciences Exactes et Informatique
Département de Physique



N° d'Ordre:

THÈSE

Présentée pour obtenir le diplôme de :

Doctorat Es-Sciences

Filière: **Physique**

Spécialité: **Physique Fondamentale**

Présentée par:

M. DJENIDI Abderrazak

*Evolution du concept du temps dans les théories
modernes de la physique*

Soutenue le: 02/7/2024-1445/12/26

Membres du jury:

| Nom et prénom | Grade | Établissement | Qualité |
|---------------------------|-------|------------------------------------|--------------|
| <i>DEROUICHE Yazid</i> | Prof. | Université de Djelfa –Ziane Achour | Président |
| <i>MAACHE Mostefa</i> | Prof. | Université de Djelfa –Ziane Achour | Encadrant |
| <i>MESSELMY Farid</i> | Prof. | Université de Djelfa –Ziane Achour | Co-encadrant |
| <i>AKKA Ali</i> | MCA | ENS de Boussaâda | Examineur |
| <i>ABBASSI Ahmed</i> | MCA | ENS de Boussaâda | Examineur |
| <i>RAHOU Djamel</i> | MCA | Université de Djelfa –Ziane Achour | Examineur |
| <i>BOUHLAL Abdelhalim</i> | Prof. | Université de Djelfa –Ziane Achour | Invité |

Année Universitaire:2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

En l'absence de mes parents, que Le Bon Dieu les Accepte dans Son Vaste Paradis, et à l'occasion du cinquantenaire de notre union, je dédie ce travail, combien épouvantable, à **ma femme** qui a su me soutenir sans relâche pendant toutes mes études supérieures, notamment au Magister et au Doctorat.

Je lui dois toute ma reconnaissance et toute ma gratitude . . .

Remerciements

Remercier quelqu'un pour son aide et encouragement c'est toujours insuffisant. Mais puisque c'est un rituel inévitable, en guise de reconnaissance et de gratitude, je le fais, humblement ...

Tous mes remerciements vont d'abord et avant tout à mes chers Professeurs, Mostefa MAACHE et Farid MESSELMY, pour leurs dévouement, disponibilité et suivi, sans quoi ce travail n'aurait pas vu le jour ! C'est grâce à eux qu'un vieux de 70 ans a pu accéder au titre de « Docteur » ; Merci infiniment, chers amis !

Un autre ami et frère, et pas les moindres, mérite toute ma gratitude, pour son suivi plein d'encouragement et d'enthousiasme, comme s'il était lui-même qui allait obtenir le Doctorat, Professeur Mokhtar FODILI. Je n'oublierais jamais tes inquiétudes et tes soucis pour moi.

L'effort de mon frère Halim, dès le début de ma recherche dans ce sujet combien lui est cher est à applaudir, et sa joie le jour de ma soutenance reste gravée dans ma mémoire.

Que mon cher ami Jamal trouve ici le témoignage de ma profonde et solide amitié.

J'adresse mes vifs remerciements à Messieurs DEROUICHE, ABBASSI et AKKA pour avoir accepté d'évaluer et d'enrichir ce travail.

Bien sûr, un travail de quatre ans ne peut pas se réaliser sans l'aide et la contribution de beaucoup d'amis et collègues ; j'en cite notamment mon petit frère Najib, ma fille Halima, ma chère sœur Maria, et toutes celles et tous ceux qui m'ont félicité, avec une joie très lisibles sur leurs visages ou dans leurs voix au téléphone !

Je termine, car « la star vient en dernier », par les membres de ma très chère famille, qui ont sauté de joie, ont lancé de longs youyous, m'ont submergé de leurs bisous, parce que « Papy » a enfin obtenu son Doctorat ! Ce sont des moments inoubliables que Dieu m'a offerts en votre compagnie ; Mille merci à tout un chacun de vous !

ملخص

شهد تاريخ الفيزياء الحديثة تطورًا عميقًا في مفهوم الزمن. يستكشف هذا العمل هذه التحولات من خلال تسليط الضوء على التطورات المفاهيمية الرئيسية التي أعادت تعريف كيفية فهم الفيزيائيين للزمن. في بداية القرن العشرين، اعتبرت الميكانيكا الكلاسيكية لنيوتن الزمان ككيان مطلق وثابت، مستقلاً عن أي مراقب. إلا أن ظهور نسبية أينشتاين الخاصة في عام 1905 غير هذا التصور بشكل جذري، بحيث أدخلت النسبية مفهوم تمدد الزمن، مما يضع إشكالية الزمن المطلق. بعد ذلك أعادت النسبية العامة، التي صاغها أينشتاين في عام 1915، تعريف الجاذبية كإحناء في الزمكان. وهذا ارتباط جوهري بين المكان والزمان، جعل الزمن عنصرًا ديناميكيًا يمكن أن يتأثر بوجود المادة والطاقة. كما أضاف ظهور الميكانيكا الكمية، في النصف الأول من القرن العشرين طبقة معقدة أخرى إلى فهمنا للزمان. إذ أثار الاختلاف الكمي تساؤلات حول مفهوم الزمان كمتغير مستمر واقترح أنه، على نطاقات مجهرية، قد يكون الزمان متقطعًا. في الختام، حولت الفيزياء الحديثة مفهوم الزمان التقليدي إلى كيان معقد، نسبي، معوج، وأحيانًا حتى متقطع. تستمر هذه التطورات في إثارة النقاش والبحث المكثف، فاتحةً آفاقًا جديدة على كيفية تصورنا للزمن.

الكلمات المفتاحية: الزمن، النسبية، الزمكان، الانفجار العظيم، الفيزياء الكمية، الكمبيوتر الكمي.

Résumé

L'histoire de la physique moderne a été marquée par une évolution profonde de la conception du temps. Cet abstract explore cette transformation en mettant en lumière les principaux développements conceptuels qui ont redéfini la manière dont les physiciens comprennent le temps. La mécanique classique de Newton a établi, au début du 20^{ème} siècle, le temps comme une entité absolue et immuable, indépendante de tout observateur. Cependant, l'avènement de la relativité restreinte (Einstein, 1905) a radicalement transformé cette vision. Elle a introduit le concept de dilatation temporelle, montrant que le temps est relatif à la vitesse de l'observateur, remettant ainsi en question l'universalité du temps absolu. La relativité générale (Einstein, 1915) a ensuite redéfini la gravité comme étant une courbure de l'espace-temps. Cela a mis en évidence le lien intrinsèque entre l'espace et le temps, faisant du temps un élément dynamique qui peut être influencé par la présence de matière et d'énergie. Pendant la première moitié du 20e siècle, l'émergence de la mécanique quantique a ajouté une autre couche complexe à notre compréhension du temps. L'incertitude quantique a remis en question la notion de temps comme une variable continue et a suggéré que, à des échelles microscopiques, le temps pourrait être discontinu. En conclusion, la physique moderne a métamorphosé la notion traditionnelle du temps en une entité complexe, relative, courbée et parfois même discrète. Cette évolution continue de susciter des débats et des recherches approfondis, ouvrant de nouvelles perspectives sur la façon dont nous percevons le temps.

Mots clés: Temps, Relativité, Espace-temps, Big Bang, Physique quantique, Ordinateur Quantique.

Abstract

The history of modern physics has been marked by a profound evolution in the conception of time. This abstract explores this transformation by highlighting the key conceptual developments that have redefined how physicists understand time. At the beginning of the 20th century, Newton's classical mechanics had established time as an absolute and unchanging entity, independent of any observer. However, the advent of Einstein's special relativity in 1905 radically transformed this view. Relativity introduced the concept of time dilation, showing that time is relative to the velocity of the observer, thus challenging the universality of absolute time. General relativity, formulated by Einstein in 1915, then redefined gravity as a curvature of space-time. This highlighted the intrinsic connection between space and time, making time a dynamic element that can be influenced by the presence of matter and energy. The emergence of quantum mechanics in the first half of the 20th century added another complex layer to our understanding of time. Quantum uncertainty questioned the notion of time as a continuous variable and suggested that, at microscopic scales, time might be discontinuous. In conclusion, modern physics has metamorphosed the traditional notion of time into a complex, relative, curved, and sometimes even discrete entity. This ongoing evolution continues to stimulate debates and in-depth research, opening new perspectives on how we perceive time.

Keywords: Time, Relativity, Space-time, Big Bang, Quantum Physics, Quantum Computer.

Table des matières

| | |
|---|------------|
| Dédicaces | II |
| Remerciements..... | III |
| Abstract | IV |
| Table des matières | VII |
| Liste des Figures et Tableaux | IX |
| Introduction | 1 |
| Chapitre I Temps dans la physique classique..... | 6 |
| I.1 Mécanique Newtonienne et analytique | 7 |
| I.1.1 Antiquité :..... | 7 |
| I.1.2 Mécanique Newtonienne..... | 7 |
| I.1.3 Mécanique analytique | 12 |
| I.2 Thermodynamique et flèche du temps | 17 |
| Chapitre II Temps dans la physique moderne..... | 23 |
| II.1 Relativité | 24 |
| II.1.1 Implications physiques | 25 |
| II.2 Physique quantique | 35 |
| II.3 Cosmologie | 39 |
| II.3.1 Big Bang | 43 |
| II.3.2 Trous noirs | 44 |
| II.3.3 Trous blancs | 52 |
| II.3.4 Trous de ver | 56 |
| Chapitre III Théories contemporaines | 58 |
| III.1 Gravitation quantique | 59 |
| III.1.1 Théorie des courbes | 59 |
| III.1.2 Théorie des cordes | 59 |
| III.2 Gravitation à boucles | 62 |
| III.2.1 Temps imaginaire | 64 |
| III.2.2 Intrication quantique..... | 66 |
| III.2.3 Informatique quantique | 67 |

| | |
|---|------------|
| III.2.4 Inexistence du temps ! | 67 |
| III.3 Débats actuels et théories émergentes | 69 |
| Conclusion | 73 |
| Références..... | 75. |

Liste des Figures et des Tableaux

Figures :

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Horloge astronomique de Prague..... | 11 |
| Figure I.2 Flèche du temps. | 19 |
| Figure II.1 Représentation schématique de l'espace de Minkowski dans un diagramme bidimensionnel..... | 28 |
| Figure II.2 Illustration de l'expérience de Michelson-Morley. | 33 |
| Figure II.3 Visualisation du trou noir supermassif M87* et de son disque d'accrétion, prise le 10 avril 2019..... | 44 |
| Figure II.4 Représentation visuelle du processus de formation de jets..... | 48 |
| Figure II.5 Jet émanant du noyau de la galaxie M87. | 49 |
| Figure II.6 Nasa / Goddard Space Flight Center / Jeremy Schnittman and Brian P. Powell. | 54 |
| Figure II.7 Schéma d'un trou de ver. | 56 |

Tableaux :

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 Comparaison entre réponses Barbour-Smolin, sur la réalité du temps..... | 16 |
| Tableau II.1 Comparaison Transformations Lorentz et Galilée | 31 |



Introduction

Le temps, de par sa notion complexe, peut être défini de différentes manières selon le contexte.

En philosophie, le temps est considéré comme une notion plus complexe qui peut être liée à des concepts tels que la mémoire, la réflexion, la perception, et la conscience. C'est une dimension subjective en étroite relation avec l'expérience humaine et à la perception de l'environnement. Saint Augustin (354-430) a écrit dans ses Confessions : « Je sais ce que c'est que le temps, si personne ne me le demande ; mais je ne le sais plus, si je veux l'expliquer à qui me le demande » [52].

En psychologie, le temps est un concept lié à la perception et à la mémoire, ainsi qu'à des notions telles que l'attention, la mémoire de travail, et la temporalité [36].

En physique, le temps est défini comme une dimension permettant de décrire les changements dans l'univers. C'est un élément fondamental de la physique théorique lié aux notions d'univers et de la durée. Il est utilisé pour mesurer les événements qui se produisent dans l'espace et dans le temps [1, 29, 32].

Les travaux actuels des physiciens, biologistes, psychologues, sociologues, et finalement de tous les philosophes, convergent vers un objectif commun : comprendre l'essence de ce concept que nous expérimentons dans la vie quotidienne et que nous appelons "temps". Néanmoins, les conceptions que ces chercheurs se forgent du "temps" semblent de plus en plus divergentes au fil de leurs investigations [52].

Aujourd'hui, c'est la physique qui présente le regard audacieux et déconcertant sur le temps. De Galilée à Einstein, ensuite de l'antimatière aux supercordes, la physique n'a cessé de creuser le sujet du temps jusqu'à arriver à des perspectives vertigineuses :

- L'Univers a-t-il été précédé par le temps ?
- Comment a-t-il été mis en marche ?
- Serait-il capable d'inverser sa direction, d'interrompre ou de reprendre son cours?
- Est-t-il envisageable de parler de plusieurs "temps" simultanément ? [34].

Bien que le temps soit perçu par tous comme une notion fondamentale de la nature et de la physique, des interrogations persistent, demeurant sans réponse.:

- Qu'est-ce que le temps ?
- Comment le définir et le mesurer ?
- Le temps est-il le même pour tous les observateurs ?
- Le temps a-t-il un début et une fin ?

Ces questions ont fasciné les philosophes, les scientifiques et les artistes depuis l'Antiquité, et leurs réponses font justement l'objet de notre présent travail de recherche.

En physique, le temps, appelé "objectif", se réduit à une question de grandeur et de mesure, définies par rapport à un phénomène périodique (cycle jour-nuit, vibration caractéristique d'un atome), ou par une évolution à un taux suffisamment (solidification d'un solide dans des conditions spécifiques, décroissance de l'activité d'un matériau radioactif). L'unité de temps officielle dans le Système international est la seconde (et ses multiples), bien que le mouvement périodique servant de base à cette unité ait changé au fil de l'histoire. La conception du temps a évolué au fil des siècles et continue à évoluer aujourd'hui, sous l'impulsion de découvertes scientifiques majeures [30, 31].

Le temps, qu'il soit considéré dans son sens commun ou tel qu'il est étudié en physique, implique d'autres notions telles que : le changement-évolution, les trois phases (présent, passé, futur), l'instant, le flux et l'écoulement, la mémoire, l'irréversibilité-direction, la durée, la chronologie, la simultanéité, la continuité, la causalité, la dimension, la périodicité.

Il est rare de trouver l'ensemble de ces déterminations réunies dans une notion globale du temps. On parle, donc plus pertinemment de "figures du temps". Prenant pour exemple, la propriété d'irréversibilité, qui est absente du temps en mécanique classique ; elle définit solidement et le temps thermodynamique et la notion de temporalité. Cette dernière intervient dans plusieurs systèmes philosophiques qui considèrent le temps que vit la conscience comme une réalité essentielle [38].

Ainsi, le temps se présente sous différentes figures, chacune avec des propriétés hétérogènes : le temps tel qu'il est perçu à nos échelles, souvent mal représenté par le temps newtonien ; puis, la figure de la variation pure à l'échelle de Planck. Il n'y a pas de

contradiction entre ces deux manifestations si l'on admet, comme le suggère Mach, que le temps émerge comme une syntaxe du changement. Si le temps est une abstraction issue de la considération du mouvement des choses, c'est peut-être parce que le temps et le changement entretiennent des relations qui varient en fonction des échelles.

Il est intéressant de noter qu'une telle conjecture pourrait renverser la définition bien connue du Livre IV de la Physique d'Aristote, selon laquelle le changement est la mesure du temps, et non l'inverse. Cela permettrait également de justifier l'idée de nombreux physiciens selon laquelle le temps est défini par ce que mesurent les horloges [14].

Dans cette thèse, nous allons voir comment la notion du temps a évolué au cours de l'histoire de la physique, en passant par trois grandes étapes : le temps classique, le temps relativiste et le temps quantique. Nous verrons comment chaque théorie physique propose une conception différente du temps et quelles sont les conséquences sur notre compréhension du monde. Nous terminerons par quelques questions actuelles et perspectives futures sur le mystère du temps.

La notion du temps était, au départ très simple et intuitive. Le temps était considéré comme une entité absolue et éternelle, qui s'écoulait de façon uniforme et indépendante de tout autre phénomène [9].

La formalisation de la notion de temps a été initiée par la physique classique au XVII^e siècle. Galilée (1564-1642) a été le premier à introduire le temps en tant que grandeur physique fondamentale, une grandeur mesurable capable de structurer des expériences et d'être reliée mathématiquement[7]. C'est ainsi que la dynamique moderne a vu le jour. Newton (1642-1727) a été le premier à fournir, dans ses Principia, une définition du temps en mécanique : le temps s'écoule de manière uniforme, il est universel et absolu, progressant du passé vers le futur selon un cours immuable.

Or, une révolution complète, annoncée en 1905 par la relativité restreinte d'Albert Einstein (1879-1955), a montré que le temps n'était pas une entité absolue et éternelle, mais qu'il dépendait en réalité de l'observateur. C'est-à-dire que le temps pouvait s'écouler différemment pour différents observateurs selon leur mouvement relatif. Il peut donc s'étirer ou se contracter en fonction de la vitesse et de la gravité[17].

La théorie de la relativité générale, annoncée par Einstein en 1915, explique la gravité par une courbure de l'espace-temps, elle-même expliquée par la présence de masses

et d'énergies. Elle montre que le temps s'écoule plus lentement dans les régions à gravité élevée par rapport aux régions à gravité faible.

Au cours du XX^e siècle, la notion du temps en physique a continué à évoluer grâce à de nouvelles théories, comme la théorie quantique du temps, la théorie des cordes, etc. [1, 14].

Tout au long de ce travail, nous explorons les différentes étapes de cette évolution en se référant aux travaux de certains des plus grands physiciens de l'histoire, et ce, en discutant les aspects suivants :

- Objectivité/subjectivité du temps : Est-ce que le temps est une réalité objective, qui ne dépend pas de l'observateur, ou est-ce simplement une construction subjective de notre esprit ?

- Écoulement du temps : Pourquoi le temps donne l'impression de s'écouler d'une manière uniforme et inévitable ?

- Relativité du temps : La notion traditionnelle d'un temps absolu et universel a été remise en question par la théorie de la relativité d'Einstein, qui a montré que le temps dépend de la vitesse de l'observateur et à la gravité.

- Temps quantique : En physique quantique, le temps est considéré comme un opérateur quantique, ce qui suggère une conception radicalement nouvelle.

- Direction du temps : Pourquoi le temps se déplacer, semble-t-il, toujours du passé vers le futur ; jamais dans le sens inverse ?

Ces problématiques montrent que la notion du temps est encore largement incomprise et suscite des débats et des recherches à travers plusieurs domaines.

C'est cette multitude de définitions, de considérations et de tentations de comprendre la « réalité » du temps qui nous a incité à faire de la lumière sur l'évolution de la notion du temps pendant les différentes périodes de développement de la physique moderne [40].

Chapitre I

Temps dans la physique classique

I.1 Mécanique Newtonienne et analytique

I.1.1 Antiquité :

Saint Augustin a dit au sujet du temps :

Si l'on ne me demande pas ce qu'il est, je le vois clairement, mais si l'on m'interroge, je ne sais plus ! [49].

A. H. Zewail (1946-2016. Prix Nobel de chimie en 1999) a, de sa part, dit : « Probablement, les trois questions qui ont occupé l'humanité depuis de milliers d'années, relatives au temps sont : Qu'est-ce que c'est que le temps ? Pourquoi il s'écoule dans une direction précise, et non d'autres, et comment arrive-t-on à le comprendre et l'expliquer ? Et c'est la première question qui est la plus compliquée ! » [53].

Au départ, le principe de continuité était prépondérant et dominant jusqu'au 19^{ème} siècle. Cette continuité apparaissait dans l'ensemble des lois de la physique, avec les concepts de l'espace continu, considéré comme composé d'une infinité de points homogènes ; et du temps continu, composé lui aussi d'un nombre infini d'«instants» homogènes qui s'écoule à une vitesse constante, uniformément dans toutes les directions de l'univers[4].

I.1.2 Mécanique Newtonienne

Galilée fut le premier à considérer le temps comme une grandeur mesurable permettant de relier les expériences mathématiquement, et ce au cours de l'étude de la chute des corps. Prenant le temps pour paramètre fondamental, il trouve que la vitesse d'un corps en chute libre est directement proportionnelle à la durée de la chute. Ainsi, le temps est représenté par une ligne (ensuite, par une ligne orientée dans un seul sens, appelée : Flèche du temps), constituée d'une succession d'instantanés infinitésimaux [8, 13].

Le concept de temps "scientifique" émerge, au début du XVII^e siècle, avec la révolution de la mécanique. Grâce à la formulation mathématique du système Galileo-Newton, le temps est considéré comme un cadre absolu. Pour la mécanique classique, le temps et l'espace sont des éléments indépendants d'un référentiel "régalien" : les phénomènes physiques y sont expliqués comme des conséquences des lois entièrement subordonnées au couple espace - temps. Cette conception offre une formalisation simple et élégante de la causalité, intuitive pour le non-scientifique.

Isaac Newton (1642-1727), vers 1665, a établi, en observant la chute des corps sous l'effet de la gravité la première formulation claire de la physique mathématique du temps : un temps linéaire, représentant une horloge universelle.

Pour le physicien en mécanique classique, le calcul différentiel joue un rôle crucial en construisant et en définissant le concept de temps instantané, qui établit de manière définitive les relations de causalité et de logique (les lois de la Nature). Cette conceptualisation du temps était initialement géométrique ; 1. La mécanique analytique de Lagrange (1736-1813) a contribué à affiner la compréhension du mouvement en se basant sur la vision newtonienne du temps.

La théorie newtonienne considère le temps absolu et uniforme, indépendamment de ce qui se passe dans l'univers. Cette notion du temps est fondée sur la loi de gravitation, qui décrit la manière dont les corps se comportent dans l'espace selon leurs position, vitesse et accélération.

Newton a aussi distingué deux types de temps, absolu et relatif:

Le temps absolu : le temps réel mathématique, qui existe par lui-même et est indépendant par nature, sans relation avec quoi que ce soit d'externe, et il s'écoule de manière uniforme et continue, appelé aussi "durée". Newton en dit : [Le temps mathématique réel absolu par lui-même et par nature, s'écoule de manière uniforme indépendamment de tout facteur externe, autrement dit sous un autre nom, le temps continu], ce qui signifie que ce temps est indépendant du mouvement de la matière dans l'espace, qu'il est homogène et continu, et qu'il est infini, chaque moment étant précédé par d'autres moments et suivi par d'autres moments, les événements se déroulant en lui, et qu'il a une dimension unique, la longueur, semblable à une ligne droite infinie, et qu'il s'écoule uniformément.

Le temps relatif, selon Newton, est celui apparent et commun, que nous utilisons dans notre vie quotidienne, où nous mesurons la durée par le mouvement, cette mesure pouvant être précise ou approximative, et qui repose sur les heures, les jours, les mois, il est donc une mesure sensorielle externe du temps absolu. Newton dit : “ Et le temps relatif apparent commun peut être perçu par le mouvement comme une expression courante utilisée à la place du temps réel, où nous mesurons une partie de la durée à partir du

mouvement, cette mesure étant parfois approximative et parfois précise; par exemple, l'heure, le jour, le mois, l'année". [8]

La mécanique newtonienne est un modèle fondé sur des principes de mécanique classique qui a été très utile pour expliquer et prédire les mouvements des corps sur une échelle macroscopique. Cependant, pour la recherche sur la notion du temps, la mécanique newtonienne présente plusieurs limites [47] :

1. Elle n'explique pas les phénomènes relatifs à la théorie de la relativité d'Einstein, qui a montré que le temps et l'espace sont interconnectés et dépendent du référentiel observateur.

2. Elle considère le temps comme un paramètre absolu et uniforme, alors que la relativité générale montre que le temps est relatif et dépend de la gravité.

3. Elle ne peut pas expliquer les phénomènes quantiques, tels que la superposition et l'interférence, qui suggèrent que le temps n'est pas un paramètre uniforme et absolu.

Le temps classique repose sur des postulats qui sont remis en cause par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein au début du XX^e siècle.

Selon cette théorie, le temps :

- Le temps est relatif à l'état de mouvement des observateurs. Il n'est pas absolu ;
- N'est pas indépendant de l'espace, mais forme avec lui un continuum quadridimensionnel appelé espace-temps ;
- Ne s'écoule pas de manière uniforme, mais se dilate ou se contracte selon la vitesse des observateurs ou la gravité qui s'exerce sur eux ;
- N'est pas irréversible, mais peut être inversé dans certaines situations hypothétiques comme imaginé dans le cas du voyage dans le temps ;
- Ne permet pas de définir une simultanéité universelle, mais seulement une simultanéité relative à chaque référentiel [2].

Voici deux réponses différentes données par deux savants contemporains, en réponse à la question sur la réalité du temps [50].

Tableau I.1 Comparaison réponses *Barbour* et *Smolin*

| Pr Barbour J. * | Pr Smolin L. ** |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Le temps est lorsque les choses changent. • Le temps est simplement un ensemble complexe de règles qui contrôlent notre perception et le changement. • Le temps peut être déduit des choses. • Le temps est dans l'instant. | <ul style="list-style-type: none"> • Le temps est l'aspect le plus réel de notre perception du monde. • Le temps non causal des enfants est le plus réel du monde. • L'espace est un concept émergent et approximatif. • Les lois et la nature évoluent dans le temps. |

Le temps classique repose sur des postulats qui sont remis en cause par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein au début du XX^e siècle.

Selon cette théorie, le temps :

-Est relatif à l'état de mouvement des observateurs, il n'est pas absolu ;

-N'est pas indépendant de l'espace, mais forme avec lui un continuum quadridimensionnel appelé espace-temps ;

- Ne s'écoule pas de manière uniforme, mais se dilate ou se contracte selon la vitesse des observateurs ou la gravité qui s'exerce sur eux ;

- N'est pas irréversible, mais peut être inversé dans certaines situations hypothétiques comme dans la situation imaginée du voyage dans le temps ;

- Ne définit pas une simultanéité universelle, mais seulement une simultanéité relative à chaque référentiel.

* Barbour, J. (1999) - The End of Time. Oxford University Press, Oxford.

** Smolin L., (2013) - Time Reborn. Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company, Boston

Le temps classique présente ainsi des limites et des paradoxes qui ont conduit à élaborer une nouvelle conception du temps plus adaptée aux phénomènes physiques observés à l'échelle microscopique ou cosmologique. Toutefois, il reste une approximation valide et utile pour décrire les phénomènes physiques courants à l'échelle humaine.

Le temps classique est la conception du temps qui prévaut dans la physique newtonienne, celle qui décrit les phénomènes mécaniques à l'échelle macroscopique. Il permet de définir des notions comme la durée, l'instant, l'intervalle de temps ou la simultanéité. Il se mesure à l'aide d'horloges qui sont supposées synchronisées et identiques dans tout l'univers.

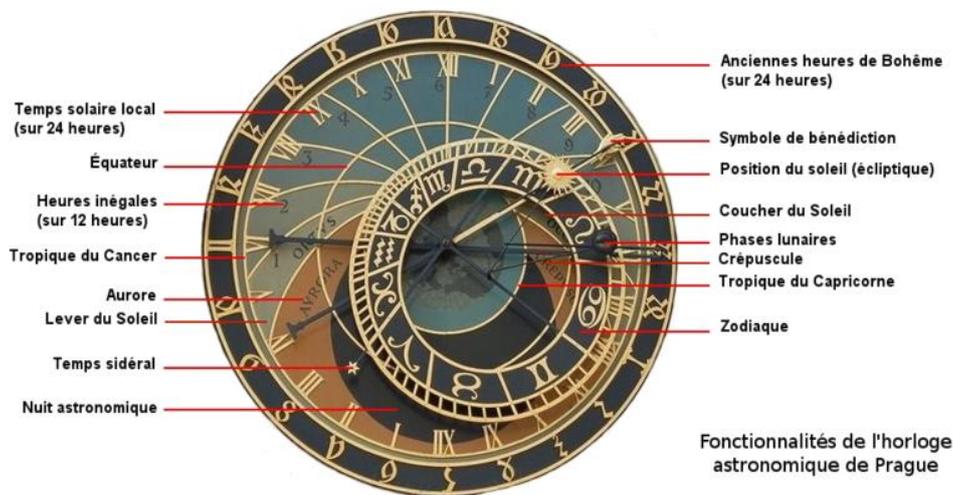


Figure I.1 Horloge astronomique de Prague

Cette horloge est un exemple de la manière dont les humains ont cherché à mesurer le temps depuis des siècles (1410). Elle montre comment le temps a été divisé en différentes unités et affiché de manière visuelle. C'est l'une des plus anciennes horloges astronomiques encore en fonctionnement. Elle est composée de plusieurs parties distinctes qui fonctionnent ensemble pour indiquer l'heure, la phase de la lune et la position du soleil, ainsi que d'autres informations astronomiques.

En résumé, la mécanique newtonienne a des limites pour la recherche sur la notion du temps, car elle ne peut pas expliquer les phénomènes relatifs à la relativité générale et à la mécanique quantique.

La mécanique des corps célestes est un domaine de la physique qui étudie les mouvements des corps dans l'espace, tels que les planètes, les étoiles et les comètes. Elle se base sur les lois de Newton qui décrivent les interactions gravitationnelles entre les corps

célestes. Les méthodes de détermination du temps incluent l'observation des phénomènes astronomiques tels que les éclipses et les transits, ainsi que l'utilisation de la navigation par satellite (GPS) et d'horloges atomiques ultra-précises [42, 44, 50].

La théorie de la Relativité Générale (Einstein, 1916), proposée pour remplacer la théorie newtonienne, définit la gravitation comme une déformation de l'espace-temps causée par les masses et toute forme d'énergie. Les corps se déplacent dans cette Espace-temps courbe en suivant des trajectoires appelées géodésiques. On pourrait alors se demander pourquoi la théorie de Newton est encore utilisée pour les applications courantes. La raison en est que la théorie de Newton est une excellente approximation de la Relativité Générale dans de nombreuses situations. En pratique, la Relativité Générale n'est nécessaire que dans des conditions où les champs gravitationnels sont très intenses, comme autour des objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons) ou lors de l'étude de phénomènes à l'échelle cosmique où les effets de courbure de l'espace-temps sont significatifs. En dehors de ces cas, la Relativité Générale est souvent introduite sous forme d'une perturbation par rapport à la théorie newtonienne, dans ce qu'est appelée la théorie post-newtonienne.

Il convient de noter que la Relativité Générale a été confirmée par de nombreuses expériences et observations durant les 100 années passées, dont la dernière est la détection des ondes gravitationnelles, ce qui a valu à Weiss, Barish et Thorne le Prix Nobel en 2017. Cependant, une description cohérente de la gravitation dans le contexte de la physique quantique reste encore à élaborer [5].

I.1.3 Mécanique analytique

La mécanique analytique, branche de la physique, étudie les mouvements des systèmes en termes de coordonnées généralisées et d'équations différentielles.

Elle offre, en particulier le formalisme lagrangien et hamiltonien, une perspective mathématique élégante pour étudier la dynamique des systèmes physiques en relation avec le temps. La symétrie temporelle et la conservation de l'énergie sont des concepts clés qui émergent de cette approche, contribuant à une compréhension approfondie de la notion du temps en physique.

Les principes fondamentaux de la mécanique analytique :

I.1.3.1 Principe de moindre action

Concept fondamental en physique, d'une grande importance en mécanique analytique. Il a été formulé par Pierre Louis Maupertuis (1698-1759), et repris et étendu par Leonhard Euler (1707-1783) et Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Ce principe est souvent utilisé pour optimiser les trajectoires d'un système physique.

En effet, le principe de moindre action indique que le chemin réel suivi par un système physique entre deux points dans l'espace-temps est celui pour lequel l'intégrale de l'action est minimale.

L'action (S) est définie comme l'intégrale du lagrangien (L) sur une trajectoire entre deux points dans le temps t_1 et t_2 :

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt \quad (\text{I.1})$$

Où :

- q représente les coordonnées généralisées du système,
- \dot{q} représente les dérivées par rapport au temps des coordonnées généralisées ($\dot{q} = dq/dt$),
- L est la fonction lagrangienne, qui est définie comme la différence entre l'énergie cinétique (T) et l'énergie potentielle (U) du système : $L = T - U$.

Mathématiquement, le principe de moindre action peut être formulé comme l'équation d'Euler-Lagrange :

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = 0 \quad (\text{I.2})$$

Les équations du mouvement du système sont données par cette équation. Les trajectoires optimales du système dans l'espace-temps sont fournies par les solutions de ces équations.

Schéma illustratif : Imaginez un système se déplaçant d'un point A à un point B dans l'espace-temps. Le chemin suivi par le système est représenté par une courbe. Le principe de moindre action stipule que la courbe réelle suivie par le système est celle pour laquelle l'action (schématisée par l'aire sous la courbe du lagrangien) est minimale.

I.1.3.2 Equations de Lagrange

Elles permettent de décrire le mouvement d'un système en termes de coordonnées généralisées, en tenant compte du temps.

Les équations de Lagrange, énoncées par Joseph-Louis Lagrange entre 1736 et 1813, représentent les principes fondamentaux de la mécanique analytique. La formulation Hamiltonienne, étroitement liée à la formulation Lagrangienne de manière inhérente, constitue une autre approche plus puissante de la mécanique analytique. Ces deux formulations représentent des fondements essentiels de la physique théorique, avec de nombreuses applications dans plusieurs domaines en physique.

La formulation Lagrangienne a un rôle primordial en théorie quantique des champs relativistes, notamment dans la quantification des théories de jauge de Yang-Mills. Elle offre également une approche flexible pour aborder la théorie concernant des particules élémentaires, ainsi que la théorie des cordes.

Dans ce contexte, la formulation Lagrangienne de la théorie quantique, exprimée sous forme d'intégrale de chemin selon Feynman, reste un outil des plus puissants à ce jour. Ceci nous permet d'aborder des problèmes complexes tels que l'évaporation des trous noirs et ceux liés à la cosmologie quantique, comme l'ont démontré Stephen Hawking (1942-2018) et James Hartle (1939-2023).

Les équations de Lagrange ont une origine complexe, résultant de divers travaux, notamment de Descartes (1596-1650), d'Euler (1707-1783) et de d'Alembert (1717-1783).

Le calcul infinitésimal de Newton (1643-1727) et Leibniz (1646-1716), en plus de la mécanique newtonienne ont été largement appliqués au XVIIIe siècle pour aborder divers problèmes en mécanique des solides et en mécanique céleste. Cependant, les calculs se trouvent de plus en plus pénibles et longs, à cause de la multiplication des équations différentielles et de leurs méthodes de résolution spécifiques. Ceci est devenu préoccupant, et une vision générale et unificatrice faisait défaut.

D'Alembert a démontré que l'on peut ramener des problèmes de dynamique à des problèmes de statique, tandis qu'Euler, en s'appuyant sur les travaux des frères Bernoulli (Jacques :1655-1705 ; Jean :1667-1748), a introduit un calcul général afin de déterminer des extrema de fonctions de fonctions, au lieu de fonctions de nombres, appelées par la suite fonctionnelles, comme c'était le cas des isopérimètres et la brachistochrone.

Dans le premier cas, il s'agit de trouver la surface maximale pour un périmètre donné (à périmètre égal, la surface d'un carré est plus grande qu'un rectangle). Dans le second, on cherche la courbe de descente la plus rapide pour un point pesant, qui est une cycloïde.

Lagrange, en introduisant la géométrie analytique, a réalisé pour la mécanique ce que Descartes avait fait pour la géométrie. Il a pu formuler une représentation générale des équations de la mécanique qui unifiaient plusieurs problèmes spécifiques de mécanique, comme le faisaient les équations de droite et de plan dans la géométrie cartésienne. Les méthodes de résolution de ces problèmes se trouvaient ainsi standardisées, et ça permettait de démontrer des théorèmes de mécanique automatiquement applicables à de larges classes de systèmes mécaniques.

Ainsi, la mécanique s'est vue transformée en géométrie analytique, et ce en étroite relation avec le calcul différentiel et intégral, ce qui nous permet de dériver équations de mouvement de tout système, à partir de la détermination des extrema d'une fonctionnelle.

Dans le contexte de la compréhension de la notion du temps, les équations de Lagrange peuvent être utilisées pour modéliser et analyser les mouvements d'un système physique en fonction du temps.

Pour illustrer cela, prenons l'exemple d'un pendule simple :

Un pendule simple est constitué d'une masse suspendue à une tige sans frottement. L'équation du mouvement pour un pendule simple peut être obtenue à partir des équations de Lagrange.

L'énergie cinétique (T) et l'énergie potentielle (U) d'un pendule simple peuvent être exprimées en fonction des coordonnées généralisées du système. En utilisant ces énergies dans le principe de moindre action, les équations de Lagrange peuvent être dérivées.

L'énergie cinétique d'un pendule simple est donnée par :

$$T = \frac{1}{2} ml^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (\text{I.3})$$

L'énergie potentielle gravitationnelle est donnée par :

$$U = mgl(1 - \cos\theta) \quad (\text{I.4})$$

Où m est la masse de la particule, l est la longueur de la tige, g est l'accélération due à la gravité, et θ est l'angle formé par la tige avec la verticale.

Le principe de moindre action nous permet d'obtenir les équations de Lagrange pour ce système. Ces équations permettent de décrire le comportement du pendule en fonction du temps, et ce par l'observation de l'évolution de l'angle θ du pendule au fil du temps. Les équations de Lagrange fournissent une description mathématique précise de la dynamique du système, permettant ainsi de prédire et d'analyser le mouvement du pendule à différents moments. On peut ainsi comprendre comment la variable temporelle intervient dans l'évolution de ce système physique particulier.

La puissance fondamentale de la formulation Lagrangienne des équations se montre par le fait qu'elle reste invariante même si l'on change de système de coordonnées. Ceci permet de ramener plusieurs types d'équations différentielles, données en coordonnées cartésiennes, sphériques ou autres, à quelques cas fondamentaux connus pour faciliter leur solution. Ainsi, elle démontre que les théorèmes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement sont automatiquement valides pour ces équations différentielles.

Effectivement, la validité des lois de conservation, établie d'abord pour des points matériels, est aussi prouvée pour le champ électromagnétique, après avoir exprimé les équations de Maxwell en Lagrangien, ce qui est fort heureusement possible.

Les équations de Maxwell décrivent le comportement des champs électromagnétiques et sont traditionnellement formulées comme un ensemble de quatre équations différentielles partielles. Il est toutefois possible, comme vu plus haut, de les exprimer sous forme d'un Lagrangien, qui est une fonction mathématique utilisée en mécanique analytique pour décrire le mouvement d'un système dynamique.

Le Lagrangien L pour le champ électromagnétique est donné par :

$$L = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + A_{\mu}j^{\mu} \quad (\text{I.5})$$

$F^{\mu\nu}$ est le tenseur du champ électromagnétique, défini comme la dérivée extérieure du potentiel vecteur A_{μ} :

$$F^{\mu\nu} = \partial^{\mu}A^{\nu} - \partial^{\nu}A^{\mu} \quad (\text{I.6})$$

A_{μ} est le potentiel vecteur électromagnétique.

J^μ est le vecteur densité de courant.

Les indices μ et ν varient de 0 à 3, représentant les composantes temporelles et spatiales du champ et du potentiel.

Les équations d'Euler-Lagrange pour ce Lagrangien conduisent aux équations de Maxwell sous forme covariante :

L'équation de Gauss pour le champ électrique :

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu \quad (\text{I.7})$$

L'équation de Gauss pour le champ magnétique :

$$\partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0 \quad (\text{I.8})$$

L'équation de Faraday :

$$\partial_\mu F_{\nu\lambda} + \partial_\nu F_{\lambda\mu} + \partial_\lambda F_{\mu\nu} = 0 \quad (\text{I.9})$$

L'équation d'Ampère-Maxwell :

$$\partial_\mu \tilde{F}_{\nu\lambda} = J^\lambda \quad (\text{I.10})$$

Ici, $\tilde{F}^{\mu\nu}$ est le dual du tenseur du champ électromagnétique, défini comme

$$\tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} F_{\alpha\beta} \quad (\text{I.11})$$

Avec $\varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta}$ étant le tenseur de Levi-Civita.

C'est grâce au théorème de Noether, qui lie l'invariance du Lagrangien sous certaines transformations de symétries à l'établissement de lois de conservation, que la situation est profonde, avec des implications significatives en théorie quantique des champs et en mécanique quantique.

Ainsi, on arrive à définir une fonction appelée Hamiltonienne qui représentera une énergie, satisfaisant une loi de conservation, au cas où l'on pourra formuler une équation différentielle avec des variables non directement liées aux positions d'un système de particules, mais dérivant d'un Lagrangien invariant par translation dans le temps.

Il est à noter qu'il est possible de généraliser les équations de Lagrange, initialement établies dérivées pour un système de points matériels. En effet, on peut généraliser les équations obtenues en utilisant un système de coordonnées arbitraire. Ceci signifie que des

équations différentielles décrivant l'évolution de plusieurs types de systèmes physiques, comme des courants électriques dans des circuits oscillants ou des populations d'animaux dans un écosystème, prennent la même forme que celles d'un système mécanique de points. On parlera ainsi de système mécanique / dynamique dès qu'on arrive à formuler sous forme Lagrangienne un système d'équations différentielles du second ordre par rapport au temps.

I.2 Thermodynamique et flèche du temps

La flèche du temps, liée intrinsèquement à l'irréversibilité des processus physiques, implique des concepts fondamentaux tels que l'entropie.

En 1812, Fourier (1768-1830) publie sa Théorie analytique de la chaleur, une œuvre importante qui contribue à la compréhension des phénomènes thermiques.

En 1824, Sadi Carnot (1796-1832) réalise une analyse scientifique approfondie du moteur à vapeur, posant ainsi les bases de la thermodynamique.

En 1850, Clausius et Kelvin ont formulé la première loi de la thermodynamique (connue aussi sous le nom de loi de conservation de l'énergie).

Dans la même année, Clausius (1822-1888) a annoncé la notion d'entropie, exprimée par la 2^{ème} loi de la thermodynamique.

L'entropie, et plus généralement les équations thermodynamiques, attribuent au temps une direction, et ce en prenant en considération la notion d'irréversibilité. Selon le second principe de la thermodynamique, dans un système isolé l'entropie ne peut que croître dans le temps. Cela signifie que les processus naturels tendent vers des états où l'entropie est maximale, ce qui se traduit par une augmentation de désordre ou de chaos dans le système. Ainsi, la notion d'entropie fournit une flèche du temps en distinguant le passé du futur à travers la direction irréversible vers un accroissement de l'entropie.

La flèche du temps est intrinsèquement liée à l'irréversibilité des processus physiques, et elle est souvent associée à l'entropie, qui n'est autre qu'une mesure du chaos ou du désordre d'un système. Selon le second principe de la thermodynamique, l'entropie d'un système isolé ne cesse d'augmenter avec le temps, ce qui se traduit par une direction préférentielle des processus physiques.

Cette irréversibilité est en contraste avec les lois fondamentales de la physique qui sont, en principe, réversibles. Cependant, les conditions initiales spécifiques et l'énorme nombre de particules dans un système macroscopique rendent la plupart des processus physiques irréversibles dans la pratique.

La **flèche du temps** s'exprime donc à travers l'évolution de l'entropie, qui symbolise la tendance tout à fait naturelle des systèmes à aller vers des états plus désordonnés. Bien que les lois fondamentales de la physique soient symétriques par rapport au temps, la flèche du temps émerge grâce aux conditions initiales et à l'énorme nombre de particules, créant une direction préférentielle dans le déroulement des événements.

La flèche du temps fait référence à l'écoulement du temps unidirectionnellement du passé vers le futur. En physique, elle est associée à l'augmentation de l'entropie dans un système. L'entropie est une mesure du désordre ou de l'incertitude dans un système, et elle augmente toujours avec le temps. Cette asymétrie temporelle entre le passé et le futur est un sujet de recherche actif en physique [25].

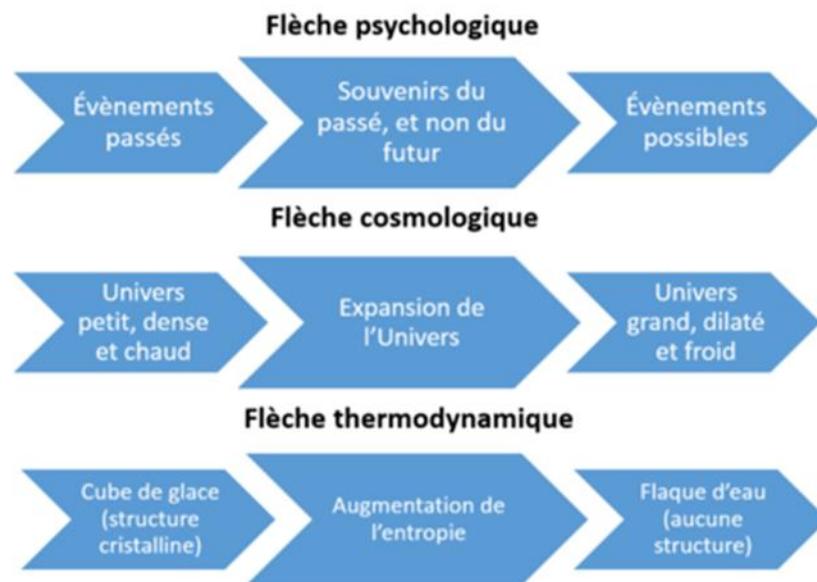


Figure 0.2 Flèche du temps.

L'écoulement du temps, notamment incarné par la flèche du temps, constitue un défi majeur tant pour les physiciens que pour les philosophes en termes d'interprétation. En effet, la physique fondamentale, moderne comme classique, repose sur des schémas réversibles dynamiques qui ne permettent pas de distinguer le passé du futur. Cette

contradiction avec notre perception quotidienne de l'irréversibilité a suscité des questionnements profonds.

Pour aborder cette problématique, Ludwig Boltzmann (1844-1906) a développé, vers la fin des années 1860, la "physique statistique" qui décrit le comportement des systèmes à l'échelle macroscopique, observables donc à l'échelle humaine, qui émanent d'un ensemble de variables à l'échelle microscopique (au niveau moléculaire voire atomique) dont le nombre assez élevé pour rendre impossible de les connaître toutes. Ainsi, une approche statistique est nécessaire, où le hasard et la probabilité deviennent des composantes essentielles de la représentation humaine du monde.

Dans cette perspective, l'écoulement du temps n'est autre que l'évolution d'un système, de l'état le moins probable vers le plus probable.

De nombreuses équations de la physique montrent une symétrie (par rapport à une "inversion du temps"), ce qui est caractéristique de toutes les équations décrivant les phénomènes à l'échelle microscopique. Ainsi, si l'on inversait l'enregistrement d'une expérience physique à l'échelle microscopique, il serait impossible de distinguer si cet enregistrement est visionné à l'endroit ou à l'envers. Cette symétrie temporelle est une caractéristique fondamentale des lois physiques qui opèrent au niveau microscopique.

A l'autre échelle, macroscopique donc, des phénomènes ne se déroulent pas de manière réversible dans le temps. Par exemple, un œuf se casse, en tombant d'une certaine hauteur ne pourra jamais rebondir sur la table dans son état initial. De même, la transmission de chaleur entre deux corps se fait toujours du corps chaud vers le corps froid, jamais inversement. L'évolution de l'entropie lors des échanges de chaleur, traitée par la seconde loi de la thermodynamique, postule que l'entropie d'un système isolé ne pourra jamais diminuer, ce qui établit une asymétrie temporelle fondamentale.

Cette problématique que Ludwig Boltzmann a tenté d'expliquer est la suivante : Des phénomènes, réversibles à l'échelle microscopique, peuvent, paradoxalement, conduire à l'échelle macroscopique, à une flèche du temps évidente. Pour cela, Boltzmann a développé la physique statistique, domaine où les probabilités ont un rôle primordial. Selon cette approche, à l'échelle microscopique, le comportement individuel des constituants, tels que les atomes, est erratique et peut être fidèlement modélisé de manière probabiliste. Cependant, même un simple objet comme une aiguille contient des nombre astronomique

d'atomes, et notre incapacité à connaître précisément leur configuration microscopique signifie que nous ne pouvons caractériser le système qu'avec une certaine incertitude.

Dans le cas où la cohésion d'un tel système est perturbée, les interactions entre les particules « dilue » l'information connue dans l'incroyable complexité de la procédure d'évolution du système. C'est ainsi que la physique quantique, qui s'intéresse aux interactions à l'échelle la plus fine de la matière, propose une explication basée sur l'idée de complexité pour expliquer la flèche du temps observable à l'échelle macroscopique.

L'entropie indique le sens d'évolution d'une réaction à l'échelle macroscopique. Le degré d'irréversibilité d'un processus est exprimé par la croissance de l'entropie dans le temps. Cependant, la flèche du temps et sa direction semblent cohérentes, dans le contexte de notre vie de tous les jours, que ce soit à travers nos sens, ou à travers le prisme de la physique. Néanmoins, au XIXe siècle les "énergistes" critiquaient l'incohérence qu'ils percevaient dans l'atomisme et particulièrement dans la thermodynamique. Pour eux, à l'échelle microscopique, la réversibilité semblait aller à l'encontre du temps. Faux, car confondent la flèche du temps avec le concept d'irréversibilité. Par contre, Newton avait bien compris que ces deux concepts étaient distincts. Le fait de penser à remonter le temps, à annuler son déroulement et inverser le cours des événements est tout simplement contre-intuitive. La thermodynamique fournit des preuves concrètes de cette irréversibilité.

La lumière piégée dans un trou noir constitue un exemple illustratif en physique relativiste. Elle suit une trajectoire fermée dans l'espace-temps, où le temps semble figé ou annulé pour elle. Les photons semblent ainsi pouvoir remonter le cours du temps. Cependant, il ne s'agit que de spéculation plus que de réalité scientifique, car seul le domaine de la science-fiction séduit les gens en imaginant pouvoir accomplir un voyage dans le passé.

La thermodynamique, et plus généralement la physique quantique nous révèlent que ce sont les conditions initiales qui donne une explication au grand mystère de l'Univers. En effet, la flèche du temps exprime ou incarne, de manière quelque peu énigmatique, l'aspect important et crucial des conditions initiales vis-à-vis de l'évolution dans un système, qui bascule du réversible vers le déterminisme chaotique.

Ainsi, le problème relevant des conditions initiales demeure entier. Néanmoins, de nouvelles pistes de réflexion fascinantes sur le temps s'ouvrent devant les chercheurs. Ces réflexions pourraient éventuellement nous aider à franchir les limites actuelles imposées

par les modèles théoriques, que ce soient scientifiques ou philosophiques, en nous guidant vers la construction ou la découverte d'un "temps causal unifié". Cela représenterait un pas significatif vers une plus profonde compréhension de la nature du temps et de son rôle dans l'Univers.

En effet, la flèche du temps a un rôle incontestable dans la conceptualisation moderne du temps, aussi bien dans les sciences que dans d'autres domaines. La physique ne définit pas une seule flèche du temps universelle : d'autres domaines comme la biologie introduisent également leur propre conception immuable du déroulement des événements, et on peut même envisager une flèche du temps d'ordre psychologique, propre à nos expériences individuelles.

Dans le domaine de la physique, on a pu mettre en évidence plusieurs flèches du temps, chacune adaptée à un champ disciplinaire spécifique. Parmi celles-ci, on peut citer :- La flèche gravitationnelle : évoquée notamment dans les phénomènes d'effondrement « stellaire » ;

- la flèche radiative : Pour laquelle l'extinction est le destin inévitable de toute source radiative ;

- La flèche thermodynamique : Elle traduit l'accroissement de l'entropie dans les systèmes isolés ;

- La flèche quantique : Elle traite des aspects particuliers de l'évolution temporelle en physique quantique.

En effet, dans le domaine du nano-monde et de la mécanique quantique, la flèche du temps peut sembler inversée par rapport à notre intuition quotidienne. Au niveau quantique, les phénomènes observés suggèrent que le sens du temps peut être perçu comme allant du futur vers le passé. Cela découle des particularités des interactions quantiques, où des phénomènes tels que l'intrication et l'effondrement de la fonction d'onde peuvent sembler indiquer une direction temporelle distincte. Cette perception renversée de la flèche du temps dans le domaine quantique illustre la complexité et la richesse des aspects temporels de notre univers à différentes échelles.

Chapitre II

Temps dans la physique moderne

II.1 Relativité

La théorie de la relativité, développée par Einstein au début du 20^e siècle, est l'une des plus célèbres théories de la physique moderne. On en compte deux théories de la relativité, restreinte et générale, reposant toutes les deux sur le principe de la relativité annoncé par Galileo en 1636. La théorie de la relativité a changé beaucoup de notions liées à la terminologie fondamentale de la physique, dont : le temps, l'espace, la masse et l'énergie. Elle a créé un bond qualificatif dans la physique théorique et l'astronomie dès son lancement au début du 20^{ème} siècle. Elle a réajusté les bases théoriques de la mécanique newtonienne datée de 200 ans.

Dans les premières années du XX^e siècle, Einstein s'est efforcé de concilier électromagnétisme de Maxwell et principe de relativité de la mécanique classique. Sa solution consiste à reformuler radicalement notre compréhension de l'espace et du temps, et ce, en introduisant le nouveau concept « espace-temps » qui remplace les notions traditionnellement distinctes d'espace et de temps. Selon cette nouvelle perspective, un changement de référentiel dans l'espace-temps entraîne une transformation du temps en partie en espace, et vice versa.

Cette fusion de l'espace et du temps explique pourquoi, quand elles se déplacent à grande vitesse dans l'espace, les horloges ralentissent leur rythme. Cette « dilatation temporelle relativiste » est un phénomène régulièrement observé sur des particules élémentaires instables, comme les muons. Ces derniers sont des électrons lourds, produits soit naturellement en haute atmosphère par le rayonnement cosmique, soit artificiellement lors de collisions entre particules accélérées à haute énergie. La dilatation temporelle relativiste se manifeste lorsque ces muons se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière, prolongeant ainsi leur durée de vie perçue depuis notre perspective terrestre [30].

La théorie de la relativité a modifié :

- La notion newtonienne du mouvement, en annonçant que tout mouvement est relatif
- La notion du temps, d'absolu à relatif, et de devenir une quatrième dimension intégrée dans les trois dimensions de l'espace ;
- Le temps et l'espace sont devenus une seule chose, appelée espace-temps, après qu'ils étaient traités comme deux choses différentes ;

- Le temps dépend de la vitesse des corps et de la gravité du milieu où bouge le corps;
- La dilatation et la contraction du temps sont devenus un nouveau concept pour comprendre l'univers.

La relativité restreinte (Einstein, 1905), a fourni une explication aux difficultés rencontrées pour l'interprétation des résultats de l'expérience de Michelson & Morley (1887) [44], concernant la vitesse de la lumière. Cette expérience, basée sur la diffraction de la lumière dans différentes directions, a contredit la loi de la vitesse relative, qui considère que si une voiture roule à une vitesse très proche de celle de lumière, à environ 99%, la lumière des phares de la voiture devrait avoir une vitesse proche du double de la vitesse de la lumière, contredisant la théorie de la relativité qui postule la constance de la vitesse de la lumière et son indépendance de la vitesse relative.

Quant à la théorie de la relativité générale (Einstein, 1907-1915, publiée en 1916, et avec la contribution d'autres savants après 1915, elle donne l'actuelle conception de la gravité dans la physique moderne.

II.1.1 Implications physiques

Les transformations de Lorentz, qui décrivent la manière dont les grandeurs physiques (temps, espace, vitesse) se transforment entre deux référentiels en mouvement relatif dans le cadre de la relativité restreinte, peuvent être comparées aux transformations de Galilée de la mécanique classique.

On utilise les transformations de Galilée pour passer d'un système de coordonnées à un autre, dans le cas où les deux systèmes sont en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. Elles décrivent les relations entre les coordonnées spatiales et temporelles dans deux référentiels inertiels.

Cependant, nous nous retrouvons contraints de remplacer les transformations de Galilée par celles de Lorentz de la relativité restreinte, au cas où les vitesses relatives entre les référentiels approchent celle de la lumière, et par conséquent les transformations de Galiléenne sont plus valables. En effet, les transformations de Lorentz tiennent en compte et les effets de la dilatation temporelle et ceux de la contraction des longueurs qui se produisent à des vitesses relativistes ; des phénomènes absents dans les transformations de Galilée.

Ainsi, bien que les transformations de Lorentz généralisent les transformations de Galilée pour inclure les effets de la relativité restreinte, elles présentent également des similitudes conceptuelles dans la manière dont elles relient les grandeurs physiques entre différents référentiels.

Tableau II.1 Comparaison entre Transformations de Lorentz et de Galilée

| Transformation de Lorentz | Transformation de Galilée |
|--|---|
| $\begin{aligned} t' &= \gamma(t - vx/c^2) \\ x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$ | $\begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$ |

En relativité restreinte, la coordonnée temporelle est affectée par le changement de référentiel, contrairement au cadre classique où elle était considérée comme absolue. Le temps n'étant plus absolu, mais relatif à chaque observateur. Cette relativité du temps implique une autre relativité, celle de la notion de simultanéité entre deux événements. En effet, deux événements simultanés dans un référentiel peuvent ne plus l'être dans un autre référentiel.

Le facteur γ qui apparaît dans les transformations de Lorentz entraîne des phénomènes remarquables, comme la dilatation des durées ou la contraction des distances. Ces effets sont observés lorsque les vitesses relatives entre les référentiels sont significatives par rapport à la vitesse de la lumière.

En adoptant la nouvelle notion de l'espace-temps, et ce en renonçant aux notions d'un espace et d'un temps absolus, la relativité restreinte instaure la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels galiléens. La vision classique se voit ainsi éliminée, remportant avec elle l'idée de l'existence de l'éther, imaginé auparavant comme support mécanique à la propagation des ondes lumineuses. La relativité restreinte a ainsi profondément modifié notre compréhension de l'espace, du temps et de la nature fondamentale de la lumière.

La géométrie de Riemann (1826-1966), emploie le tenseur métrique qui décrit l'espace de Minkowski (1864-1909). Elle a servi de base pour la théorie de la relativité d'Einstein.

On exprime généralement ce tenseur métrique sous la forme:

$$ds^2 = [(dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 - c^2(dt)^2], \text{ où :}$$

- ds^2 : l'intervalle espace-temps.
- c : la vitesse de la lumière dans le vide.
- dt : la différence de temps entre deux événements.
- dx_1, dx_2, dx_3 : les différences de position spatiale dans les directions x_1, x_2 et x_3 .

En relativité restreinte, cette formule exprime la distance entre deux événements dans l'espace-temps à quatre dimensions. Les termes au carré indiquent que nous considérons les distances quadratiques, et le signe négatif devant le terme temporel ($c^2 (dt)^2$) reflète la différence fondamentale entre les dimensions spatiales et temporelles.

Cette expression, souvent appelée la "forme quadratique de Minkowski", est essentielle pour décrire les distances et les intervalles dans l'espace-temps en relativité restreinte. Elle permet de prendre en considération les effets de la dilatation temporelle et de la contraction spatiale qui résultent des transformations de Lorentz.

En utilisant cette géométrie de l'espace-temps, Einstein a pu développer une solution géométrique aux transformations de Lorentz tout en préservant les équations de Maxwell (1831-1879), qui décrivent les phénomènes électromagnétiques. Cette approche unifiée a été un élément clé dans le développement de la théorie de la relativité restreinte, fournissant un cadre mathématique puissant pour la compréhension des phénomènes physiques à grande vitesse et à haute énergie.

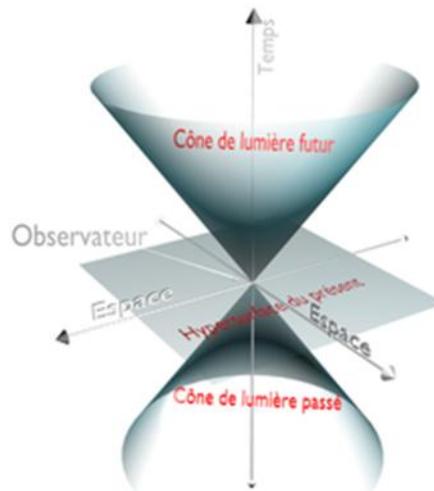


Figure 0.1 Représentation schématique de l'espace de Minkowski dans un diagramme bidimensionnel.

L'espace de Minkowski (appelé aussi espace-temps de Minkowski ou même espace-temps de Poincaré-Minkowski), joue un rôle fondamental en géométrie comme en relativité restreinte. Cet espace mathématique, espace affine pseudo-euclidien à quatre dimensions, modélise l'espace-temps de la relativité restreinte. Les propriétés géométriques de cet espace correspondent aux phénomènes physiques décrits par cette théorie. Parmi ces phénomènes, on peut citer : la structure de l'espace et du temps, les effets de la dilatation temporelle et la contraction spatiale observés à des vitesses relativistes.

C'est Isaac Newton qui a initié la géométrisation de la physique, voire même avant lui, où les concepts physiques étaient souvent exprimés en termes géométriques. Dans le cas de la relativité restreinte, cette approche géométrique est d'une importance particulière, puisqu'elle permet de représenter le temps comme étant intrinsèquement lié à l'espace réel. De plus, les abstraites propriétés de la relativité restreinte permettent une schématisation intuitive et élégante dans la géométrie euclidienne de l'espace de Minkowski. Cette géométrisation a également été cruciale pour le développement ultérieur de la relativité générale, où elle a fourni des bases conceptuelles importantes pour la compréhension de la gravitation en tant que courbure de l'espace-temps.

L'espace-temps de Minkowski, avec l'espace-temps de **de Sitter** et de l'espace-temps anti **de Sitter**, présente, en géométrie lorentzienne, une symétrie maximale, parmi trois variétés. Dans le cadre de la relativité générale, et en l'absence de constante cosmologique, il représente une solution aux équations d'Einstein pour le vide.

La théorie d'Einstein a pour hypothèse fondamentale, qu'en ce qui concerne les lois de la physique, tous les référentiels d'inertie sont équivalents. Cette théorie, remarquable par sa simplicité et son élégance, démontre que la mesure du temps varie d'un référentiel d'inertie à un autre, et, par conséquent le temps universel et absolu n'existe pas. Chaque référentiel d'inertie possède ainsi sa propre perception du temps.

La théorie de la relativité d'Einstein, considère le temps comme une dimension qui, interconnectée avec l'espace, forme l'espace-temps. Le temps n'étant pas absolu, il est plutôt relatif à la vitesse et à la gravité. Les observateurs en mouvement relatif peuvent percevoir le temps différemment, ce qui conduit aux effets de dilatation temporelle. De plus, la gravité influe sur la perception du temps, ce qui est illustré par le phénomène de dilatation temporelle gravitationnelle.

Tout physicien donne au temps une importance cruciale lors de la formalisation des systèmes et des lois de la Nature. Avec l'avènement de la théorie de la relativité, et après être considéré comme un simple paramètre, le temps a pris une toute nouvelle importance.

Au XIXe siècle, divers problèmes et contradictions ont incité les physiciens à réexaminer la mécanique classique. Henri Poincaré, dans son ouvrage *La Valeur de la Science*, offre une perspective historique intéressante sur cette évolution. Cependant, c'est avec Albert Einstein, et principalement avec la théorie de la relativité restreinte, que survient le changement le plus significatif en ce qui concerne la conception du temps.

En 1902, Henri Poincaré publie *La Science et l'Hypothèse*, paru chez Flammarion dans la collection "Bibliothèque de philosophie scientifique". Cet ouvrage, davantage d'épistémologie que de physique, remet en question de nombreux postulats de la physique de son époque, tels que le concept de temps absolu, d'espace absolu, et l'importance de l'éther.

Il est plausible que cet ouvrage ait influencé Albert Einstein dans sa réflexion qui a abouti à la publication de son article fondateur sur la théorie de la relativité restreinte en 1905. Cependant, Einstein a poussé cette réflexion au-delà des idées de Poincaré en éliminant toute référence à un temps absolu. Contrairement à Poincaré, qui juxtaposait le temps absolu et le temps apparent, Einstein a rejeté l'idée même d'un temps absolu.

Il est universellement connu que la théorie de la relativité d'Einstein a causé une révolution dans la notion de temps [50]. Pour appréhender le bouleversement conceptuel

relatif au temps, il suffit de considérer qu'Albert Einstein entreprend de concilier deux théories jusqu'alors incompatibles, voire contradictoires : la mécanique classique et l'électromagnétisme. La première exprime le principe de relativité, déjà formulé par Galilée, tandis que la seconde stipule notamment que la vitesse de la lumière est constante, indépendamment du mouvement de la source qui l'émet, ce qui implique une non-relativité fondamentale.

Pour unifier ces deux approches, Einstein va non seulement élaborer, mais également redéfinir les concepts de temps et d'espace (ainsi que les notions de mouvement et de vitesse). Le temps et l'espace, désormais considérés comme un couple indissociable dans l'espace-temps de Minkowski, deviennent intimement liés aux propriétés générales des phénomènes. Cette démarche constitue une rupture fondamentale avec la mécanique classique, qui reposait sur la conception d'un temps absolu et immuable.

Temps, espace et matière sont pour Einstein intrinsèquement liés les uns aux autres. L'ordre habituel de causalité se retrouve ainsi renversé: ce ne sont plus le temps et l'espace qui servent de cadre aux phénomènes impliquant la matière, mais plutôt les corps qui influent principalement sur le temps et l'espace eux-mêmes. Le temps retrouve de ce fait une matérialité et une importance que Newton lui avait retirées.

Dans cette perspective, l'ordre des événements, la succession, est étroitement lié à la causalité, et plus particulièrement aux propriétés de la lumière. Immanuel Kant avait déjà entrevu cette idée, bien que partiellement, mais il croyait que la simultanéité était déterminée par une relation de causalité réciproque.

Cette vision est certainement peu intuitive pour la plupart des gens : un temps qui se dilate ou se contracte semble irréel. Pourtant, c'est ce concept qui permet d'expliquer des phénomènes tels que l'avance du périhélie de la planète Mercure ou les lentilles gravitationnelles, tout en restant compatible avec notre observation quotidienne du monde. Les trous noirs illustrent de manière spectaculaire les propriétés théoriques du temps relativiste lorsqu'ils sont considérés à des vitesses proches de celle de la lumière.

Le lien entre l'espace et le temps a également pour conséquence que la notion de simultanéité perd son caractère absolu : tout dépend de l'observateur. Ce phénomène n'est pas non plus évident dans le sens commun, car il n'est observable que lorsque les observateurs se déplacent l'un par rapport à l'autre à des vitesses relativement élevées par rapport à celle de la lumière. En général, la théorie de la relativité nous indique que le

temps objectif du physicien est variable (ce qui se traduit localement en termes d'espace-temps). La mesure du temps diffère d'un référentiel à un autre lorsque leurs vitesses respectives diffèrent.

Aujourd'hui, les équations des théories physiques considèrent le temps comme relatif. Elles sont symétriques par rapport à une translation dans le temps. Le théorème de Noether, publié en 1918 par Emmy Noether, montre que cette propriété implique l'existence d'une quantité conservée, l'énergie, quelle que soit la nature des interactions entre objets.

Avec les avancées théoriques et pratiques remarquables de la relativité, de nouvelles questions sur la nature intime du temps ont émergé. Beaucoup de ces questions portent sur son écoulement, ce qui les rapproche des interrogations habituelles de l'homme sur le temps.

Le temps relativiste découle de la théorie de la relativité d'Einstein, donc de la physique qui décrit les phénomènes à des vitesses proches de celle de la lumière ou dans des champs de gravité intenses. Ainsi, le temps n'est pas une grandeur absolue et universelle, mais une grandeur relative et locale. Le temps relativiste dépend de l'état de mouvement et de la position des observateurs, outre la distribution de masse et d'énergie dans l'univers. Le temps relativiste varie selon les référentiels et se manifeste par des effets comme la dilatation du temps, le décalage vers le rouge gravitationnel ou le paradoxe des jumeaux.

Le temps relativiste repose sur des postulats qui sont vérifiés par de nombreuses expériences et observations. Selon ces postulats :

- La vitesse de la lumière est constante dans le vide et indépendante du mouvement de sa source ou de son observateur ;
- Les lois physiques sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels ;
- L'espace et le temps forment un continuum quadridimensionnel appelé espace-temps;
- La gravitation est une manifestation de la courbure et de l'espace-temps.

Le temps relativiste présente donc une vision plus générale et plus cohérente du temps que le temps classique. Cependant, le temps relativiste pose aussi des difficultés

conceptuelles et philosophiques sur la nature du temps, son rapport à l'espace, à la causalité ou à l'existence.

La relativité restreinte a fourni une explication aux difficultés rencontrées pour l'interprétation des résultats de l'expérience de Michelson & Morley (1887) [44], concernant la vitesse de la lumière. Cette expérience, basée sur la diffraction de la lumière dans différentes directions, a contredit la loi de la vitesse relative, qui considère que si une voiture roule à une vitesse très proche de celle de lumière, à environ 99%, la lumière des phares de la voiture devrait avoir une vitesse proche du double de la vitesse de la lumière. Or, la théorie de la relativité postule que la vitesse de la lumière est constante et ne dépend pas de la vitesse relative.

L'expérience de Michelson fait référence à une série d'expériences scientifiques menées par le physicien américain Albert A. Michelson dans le but de mesurer la vitesse de la lumière et de détecter le mouvement de la Terre à travers l'éther, un hypothétique milieu censé remplir l'espace.

La première expérience significative de Michelson est connue sous le nom d'expérience d'interféromètre de Michelson, réalisée pour la première fois en 1881. L'interféromètre de Michelson est un instrument optique qui divise un faisceau lumineux en deux et les fait voyager dans des directions perpendiculaires avant de les faire se recombiner. En mesurant les interférences résultantes, Michelson espérait détecter le déplacement de la Terre à travers l'éther, suggérant ainsi une "brise d'éther".

Cependant, les résultats de l'expérience ont montré l'absence de déplacement par rapport à l'éther, ce qui a été interprété comme un signe que l'éther n'existait probablement pas. Ces résultats ont également été importants pour le développement de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, car ils ont remis en question la compréhension classique de l'espace et du temps.

En 1887, Michelson a mené une version améliorée de l'expérience, connue sous le nom d'expérience de Michelson-Morley, avec Edward Morley. Cette expérience a également abouti à des résultats montrant l'absence de mouvement de la Terre à travers l'éther, ce qui a constitué un élément clé dans le développement de la physique moderne. C'est dans l'histoire de la physique une des plus importantes et une des plus célèbres expériences, elle valut à Michelson le prix Nobel de physique en 1907 [44].

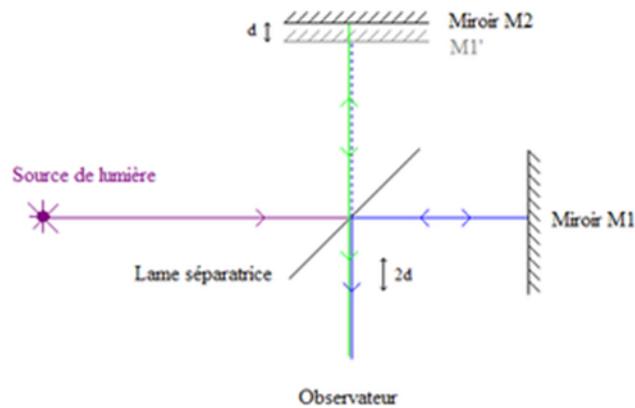


Figure 0.2 Illustration de l'expérience de Michelson-Morley.

Ainsi, les expériences de Michelson ont joué un rôle important dans la transition de la physique classique à la théorie de la relativité d'Einstein.

Équation de la relativité restreinte [17]:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 \quad (\text{II.3})$$

Cette équation fondamentale de la physique, formulée par Albert Einstein en 1905, lie l'énergie (E) d'une particule à sa masse (m) et sa quantité de mouvement (p). Elle montre comment l'énergie et la masse sont liées et dépendent de la vitesse de la particule. Cette équation a conduit à la notion de dilatation du temps et à la relativité du temps en fonction de la vitesse.

- E : l'énergie totale de la particule. Ses énergies : cinétique (due à son mouvement) et potentielle (due à sa masse). Elle dépend donc de la masse et de la quantité de mouvement de la particule.

- m : la masse au repos de la particule.

- c : la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s).

- p : la quantité de mouvement de la particule.

Cette équation montre que l'énergie totale d'une particule est composée de deux termes : le terme $(mc^2)^2$, qui représente l'énergie de repos liée à la masse, et le terme $(pc)^2$, qui représente l'énergie cinétique liée à la quantité de mouvement.

Il est important de noter que cette équation est valide uniquement pour les particules dont la masse au repos est nulle, comme les photons. Pour les particules massives, la masse au repos (m) est différente de zéro, et par conséquent, l'énergie de repos (mc^2) contribue à l'énergie totale de la particule.

Par exemple, deux horloges synchronisées ne le seront plus si l'une d'elles est mise en mouvement. Cette théorie a été confirmée par des expériences comme l'expérience des jumeaux de Langevin et l'expérience de Hafele-Keating [24].

Le paradoxe des jumeaux : Le paradoxe des jumeaux est un scénario de pensée qui montre comment la relativité restreinte peut conduire à des effets de vieillissement différents pour des jumeaux qui se séparent et se rejoignent à des vitesses différentes. Selon la relativité restreinte, le temps s'écoule plus lentement pour un observateur en mouvement par rapport à un observateur au repos. Ainsi, un jumeau qui voyage à grande vitesse dans l'espace vieillira plus lentement qu'un jumeau resté sur Terre. Ce scénario a été popularisé par le film "Interstellar" [43].

La théorie du champ gravitationnel basée sur la relativité est appelée la relativité générale. Cette théorie a été élaborée par Albert Einstein, qui lui a donné sa forme définitive en 1915. Elle décrit comment la gravité affecte le temps et l'espace, telle que la présence de masse et d'énergie courbe l'espace-temps, ce qui affecte la façon dont le temps s'écoule. Par exemple, le temps s'écoule plus lentement à proximité d'un objet massif comme une étoile ou une planète. Cette théorie a été confirmée par des expériences comme l'observation de l'effet Shapiro [17].

"La plus belle des théories." C'est ainsi que Lev Davidovitch Landau, dans le deuxième tome de son monumental Cours de physique théorique en dix volumes, qualifiait la théorie de la relativité générale. Ce titre éloquent résume parfaitement l'admiration que cette théorie suscite chez de nombreux physiciens. Carlo Rovelli, dans son ouvrage "Sept brèves leçons de physique", utilise également cette expression évocatrice pour introduire ses réflexions sur cette théorie fascinante.

Équation du temps propre en relativité générale

$$d\tau^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (\text{II.4})$$

Cette équation représente l'élément d'intervalle spatio-temporel ($d\tau$) d'un objet en mouvement dans un champ gravitationnel. Elle est basée sur la métrique de l'espace-temps

$(g_{\mu\nu})$ qui décrit la courbure de l'espace-temps en présence de masses. Elle montre comment le temps est influencé par la gravité et comment il varie en fonction de la position et de la vitesse de l'observateur.

C'est une équation fondamentale qui permet de décrire la mesure du temps dans un espace-temps courbé par la présence de masses ou d'énergies. Elle joue un rôle essentiel dans la compréhension de la nature du temps dans le cadre de la relativité générale.

Dans cette équation :

* $d\tau$ représente l'élément de temps propre, c'est-à-dire le temps mesuré par une horloge en mouvement le long d'une trajectoire spécifique dans l'espace-temps courbé. Le temps propre est une mesure intrinsèque du temps qui est liée à l'horloge elle-même.

* $g_{\mu\nu}$ est un élément de la métrique de l'espace-temps, qui décrit la courbure de l'espace-temps causée par la distribution de la matière et de l'énergie. La métrique est représentée par une matrice symétrique à quatre dimensions qui contient des termes décrivant la géométrie de l'espace-temps courbé.

* dx^μ et dx^ν représentent les éléments infiniment petits de déplacement dans les différentes dimensions de l'espace-temps. Les indices μ et ν prennent les valeurs de 0, 1, 2 et 3, qui correspondent aux dimensions temporelles et spatiales.

En se déplaçant dans un champ gravitationnel, le temps propre mesuré par une horloge en mouvement le long d'une trajectoire spécifique peut varier par rapport au temps mesuré par une autre horloge en mouvement différemment dans l'espace-temps.

La métrique de l'espace-temps $g_{\mu\nu}$ est déterminée par les équations d'Einstein, qui relient la distribution de la matière et de l'énergie à la courbure de l'espace-temps. Ainsi, en résolvant les équations d'Einstein pour un système physique donné, on peut obtenir la métrique correspondante et, par conséquent, déterminer comment le temps propre évolue le long des trajectoires dans cet espace-temps courbé.

II.2 Physique quantique

La mécanique quantique a été développée au cours des premières décennies du XXe siècle. Face aux limites de la physique classique pour expliquer adéquatement le comportement des atomes, notamment les interactions entre la matière et la lumière, un nouveau formalisme révolutionnaire a émergé : le formalisme quantique. Cette approche

novatrice a depuis lors influencé de manière significative toutes les branches de la physique, démontrant ainsi sa fécondité et son importance dans notre compréhension du monde.

En 1875, Hendrik Lorentz (1853-1928) découvrit la transformation qui porte son nom, une découverte également réalisée en 1887 par Woldemar Voigt (1850-1919). Cette transformation est utilisée dans la théorie de la relativité restreinte, en remplacement des équations de transformation de Galilée. Cette théorie repose sur le postulat selon lequel la vitesse de la lumière est constante quel que soit le référentiel d'inertie à partir duquel elle est mesurée.

Le temps quantique est la conception du temps qui découle de la physique quantique, c'est-à-dire la physique qui décrit les phénomènes à l'échelle atomique ou subatomique. Selon cette conception, le temps n'est pas une grandeur continue et déterministe, mais une grandeur discrète et probabiliste. Il dépend de l'état et de l'observation des systèmes physiques, ainsi que de leur évolution selon les principes d'incertitude et de superposition. Il varie selon les niveaux d'énergie et se manifeste par des effets comme le tunneling, la non-localité ou l'intrication.

Le temps quantique repose sur des postulats qui sont vérifiés par de nombreuses expériences et observations. Selon ces postulats, le temps est un paramètre externe et non dynamique qui intervient dans l'équation de Schrödinger ; le temps est irréversible car il définit un ordre chronologique entre le passé et le futur ; il existe une durée minimale pour produire un changement d'état appelée temps de Planck.

Le temps quantique présente donc une vision plus fondamentale et plus complexe du temps que le temps classique ou relativiste. Néanmoins, il pose aussi des difficultés conceptuelles et philosophiques sur la nature du temps, son rapport à l'espace, à la causalité ou à l'existence.

Il y a près d'un siècle, en 1925, Max Planck, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac et Niels Bohr ont initié et formalisé la mécanique quantique. Leurs équations ont profondément influencé le monde d'aujourd'hui. La première révolution quantique est à l'origine de toute l'électronique moderne.

Dans la continuité des découvertes révolutionnaires du XIXe siècle, la recherche entame depuis les années 80 une seconde révolution.

Au laboratoire Système de Référence Temps-Espace de l'Observatoire de Paris, Carlos Garrido Alzar exploite le phénomène d'intrication quantique pour accroître la précision du système de positionnement et de navigation à l'aide d'une nouvelle génération d'horloges atomiques compactes.

Pour célébrer l'année 2024 comme étant « l'année de la physique » et marquer un siècle de physique quantique, il est pertinent de revenir sur les innovations permises par le quantique et d'aborder les questionnements suivants :

- Dans quelle mesure le quantique constitue-t-il également une révolution technologique ?

- Quelles sont ses promesses et dans quelle mesure la physique quantique pourrait-elle bouleverser notre société ?

- Comment peut-on utiliser le spin squeezing pour améliorer les performances des horloges atomiques ?

- Quels sont les usages actuels de la mécanique quantique ?

- Quel est l'état actuel de la révolution quantique ? (CNRS Le journal, janvier 2024)

- A quoi les technologies quantiques peuvent-elles servir ? (The Conversation, 2023)

- Quelles applications inédites pourrait-on attendre de la seconde révolution quantique ? (Alain Aspect, La Recherche, 2022) ; Téléportation quantique ; l'internet quantique ; etc.

Au cours du XXe siècle, deux des théories les plus remarquables de la physique ont vu le jour :

- La première, la relativité générale, est l'œuvre d'Albert Einstein seul. Elle trouve son application dans les phénomènes à l'échelle cosmique, traitant de l'infiniment grand ;

- La seconde, la mécanique quantique, est le fruit de la collaboration de plusieurs éminents esprits du XXe siècle. Elle s'applique aux phénomènes à l'échelle subatomique, abordant l'infiniment petit.

Ces deux théories ont conféré à la physique une place prépondérante, considérée comme la "reine des sciences". Cependant, malgré leur immense succès individuel, elles

sont en désaccord fondamental entre elles. Les tentatives pour les unifier dans une théorie globale, appelée "théorie du tout", se heurtent à des obstacles insurmontables.

La physique quantique est une théorie physique qui décrit le comportement des particules à l'échelle subatomique. Selon cette théorie, le temps est une variable continue et lisse, mais il y a des phénomènes quantiques qui défient notre compréhension commune du temps. Par exemple, dans l'effet tunnel quantique, une particule peut traverser une barrière énergétique sans avoir suffisamment d'énergie classique pour le faire. Ce phénomène a été confirmé expérimentalement et remet en question notre compréhension commune du temps et de la causalité [20].

Équation de Schrödinger [20]:

$$\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \mathcal{H}\Psi \quad (\text{II.5})$$

Cette équation, formulée par le physicien autrichien Erwin Schrödinger en 1925, est l'équation fondamentale de la mécanique quantique. Elle décrit l'évolution temporelle d'une fonction d'onde (Ψ) d'un système quantique. Elle montre comment les états quantiques évoluent dans le temps, notamment lors de la mesure et de l'observation.

Dans cette équation :

* i est l'unité imaginaire, qui est la racine carrée de -1. Elle est introduite pour tenir compte de la nature ondulatoire des particules en mécanique quantique.

* \hbar (h barre) est la constante de Planck réduite, qui est égale à la constante de Planck (h) divisée par 2π . Elle apparaît dans l'équation de Schrödinger pour rendre compte des effets quantiques à l'échelle microscopique.

* $\partial\Psi/\partial t$ est la dérivée partielle de la fonction d'onde Ψ par rapport au temps t . La fonction d'onde Ψ est une fonction mathématique qui décrit l'état quantique du système.

* H est l'opérateur hamiltonien, qui représente l'énergie totale du système. Il agit sur la fonction d'onde Ψ et décrit comment cette dernière évolue dans le temps.

En utilisant cette fonction d'onde, on peut calculer les propriétés physiques du système, telles que les valeurs attendues des observables (position, impulsion, énergie, etc.) et les probabilités de mesurer certaines grandeurs lors d'une expérience.

Cette équation régit le comportement des particules subatomiques, telles que les électrons, les protons ou les neutrons, et permet de calculer la probabilité de trouver une particule dans un certain état quantique à un moment donné.

Etant une équation aux dérivées partielles, elle relie la variation spatiale et temporelle de la fonction d'onde Ψ , et décrit comment la fonction d'onde évolue dans le temps en fonction de l'opérateur hamiltonien H .

La solution de l'équation de Schrödinger donne la fonction d'onde Ψ qui décrit complètement l'état quantique d'un système donné à un instant donné.

Cette équation a révolutionné notre compréhension du monde microscopique et a ouvert la voie à de nombreuses avancées en physique quantique [20].

Elle illustre différents aspects de l'évolution de la notion du temps en physique, allant de la relativité restreinte à la relativité générale et à la mécanique quantique. Elle reflète les avancées théoriques qui ont conduit à une compréhension plus profonde du temps dans le contexte physique.

En outre, elle permet de calculer les probabilités et les valeurs attendues des observables à partir de la fonction d'onde du système.

L'une des inégalités fondamentales de la physique quantique, connue sous le nom d'inégalité d'Heisenberg, établit un lien intrinsèque entre l'incertitude sur le temps de vie d'un système quantique et la précision de la mesure de son énergie. Cette inégalité stipule que plus on connaît avec précision l'énergie d'une particule, moins on est en mesure de déterminer avec précision son instantanéité dans le temps, et vice versa. Ces implications sont particulièrement significatives dans le domaine de la physique des particules : les interactions entre particules, souvent assimilées à des collisions, sont caractérisées par des durées extrêmement courtes, engendrant ainsi une incertitude considérable sur l'énergie échangée. Conformément à l'équation célèbre de $E=mc^2$ d'Einstein, qui établit une équivalence entre masse et énergie, cette incertitude énergétique peut donner lieu à la création spontanée de nouvelles particules, un phénomène qui, du point de vue externe, semble surgir de nulle part.

II.3 Cosmologie

La genèse du temps (Big Bang) et l'expansion de l'univers

L'interrogation sur les limites de l'écoulement temporel, s'il y a un commencement ou une fin, a suscité l'intérêt de nombreux scientifiques, transcendant les disciplines et touchant aux multiples croyances sur l'origine et la destinée de l'univers.

D'un point de vue scientifique, les observations, interprétées à la lumière de la théorie de la relativité générale, ont conduit à l'élaboration de la théorie du Big Bang. Selon cette théorie, l'univers aurait connu un commencement, où le temps, l'espace et la matière auraient émergé dans leur forme actuelle.

Selon les connaissances actuelles, le temps relativiste aurait débuté il y a environ 13,7 milliards d'années. La notion même d'un commencement temporel pose des défis conceptuels, car la question « qu'y avait-il avant le début du temps ? » semble dépourvue de sens.

Parmi les observations soutenant la théorie du Big Bang - qui fournit une explication cohérente à ces phénomènes - on compte le décalage vers le rouge du spectre lumineux émis par les étoiles lointaines, ainsi que la découverte d'un rayonnement cosmique provenant de toutes les directions de l'univers, correspondant à un rayonnement du corps noir à une température de 2,73 kelvins.

Tous ces questionnements conduisent à une interrogation plus vaste sur la définition d'un temps cosmique, c'est-à-dire le temps général qui prévaut dans l'Univers.

Dans la physique newtonienne, le temps absolu occupe ce rôle central ; cependant, son existence même exclut la possibilité de tout phénomène également absolu à une échelle cosmique - l'Univers physique. Ainsi, la notion d'un temps cosmique comme étant absolu semble aujourd'hui erronée, notamment à la lumière des concepts de la relativité générale.

La théorie de la relativité, précisément, ne propose pas de cadre préconçu concernant un tel temps cosmique : au cours du XXe siècle, de nombreuses théories cosmologiques ont été avancées. Parmi celles-ci, ce sont les modèles associés à la théorie du Big Bang qui semblent les plus plausibles, car ils sont les plus conformes aux principes généraux de la relativité. Ce sont également ces modèles qui offrent les meilleures formalisations d'un

temps cosmique et permettent d'étudier l'évolution de l'Univers : le déroulement du temps y est cohérent du point de vue humain, car il est linéaire et unidirectionnel.

Effectivement, la définition d'un temps cosmique dans le cadre du Big Bang a soulevé une nouvelle énigme : en remontant le cours du temps, on atteint une limite infranchissable connue sous le nom de temps de Planck. Avant ce moment dans l'histoire cosmique, les théories actuelles atteignent leurs limites et la connaissance devient inaccessible à toute extrapolation, car la science a besoin de temps et d'espace pour opérer. Face à cette perspective, quelles voies la science peut-elle emprunter ? Quels indices logiques peut-elle nous fournir, alors qu'elle prédit l'effondrement de ses propres fondations ? Il semble que l'invention d'un nouveau cadre conceptuel soit nécessaire, si tant est qu'une telle entreprise soit envisageable.

Une question riche d'enseignements concerne la nature de l'écoulement du temps depuis son tout premier instant, le célèbre temps de Planck : ce flux temporel est-il régulier ? Le système newtonien imposait un temps rigide, tandis que la relativité introduit un temps élastique, redéfinissant ainsi le concept de manière complexe, conférant au temps un double rôle de référentiel et de substance malléable.

Par ailleurs, nous pouvons interroger le sens de cet écoulement temporel. Intuitivement, nous concevons le temps comme unidirectionnel, progressant du passé vers le futur, une marche en avant que notre langage reflète avec une grande richesse. Toutefois, de nombreuses lois physiques sont mathématiquement réversibles par rapport à la flèche du temps.

Le temps dispose de plusieurs échelles de temps, de l'infiniment petit avec la physique quantique, à l'infiniment grand avec l'expansion de l'univers.

Les échelles de temps dans l'univers varient considérablement, couvrant des ordres de grandeur impressionnants :

À l'échelle quantique, des phénomènes se produisent à des niveaux de temps extrêmement courts, mesurés en fractions de secondes, voire en attosecondes (10^{-18} secondes).

La physique quantique décrit le comportement des particules subatomiques, où des événements tels que les transitions électroniques se produisent à cette échelle temporelle. À l'échelle atomique, les processus moléculaires et les réactions chimiques peuvent se

dérouler en femtosecondes (10^{-15} secondes). La biologie, avec des événements tels que la division cellulaire, se situe à l'échelle des secondes à des heures.

Passant à l'infiniment grand, l'évolution cosmique se mesure en milliards d'années. L'expansion de l'univers, initiée par le Big Bang, se déroule sur une échelle de temps cosmique. Les changements dans la structure à grande échelle de l'univers, tels que la formation des galaxies et des amas de galaxies, se produisent sur des centaines de millions à des milliards d'années.

Ainsi, l'univers présente une diversité remarquable d'échelles de temps, chaque domaine étant régi par des lois physiques spécifiques qui dictent la dynamique des événements à cette échelle particulière.

La vitesse limite, qui ne peut être dépassée (du moins jusqu'à preuve du contraire), est équivalente à la vitesse de la lumière dans le vide, notée c , soit environ 299 792 458 m/s. Cette constante fondamentale de l'univers physique intervient directement dans divers phénomènes physiques courants, notamment la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, dont la lumière fait partie. Même dans l'air, la propagation de ces ondes se fait à une vitesse légèrement inférieure mais toujours proche de c . Par conséquent, c'est parfois utilisé comme une unité de référence pour exprimer des vitesses ou mesurer des distances extrêmement grandes, comme la distance de la Terre au Soleil, qui est d'environ 150 millions de kilomètres ou 8 minutes-lumière.

Les mesures précises du temps, ainsi que les corrections nécessaires selon la théorie de la relativité, sont essentielles pour le fonctionnement des systèmes de positionnement tels que le GPS. Cela est dû à la nécessité d'une grande précision dans les mesures de temps, sur lesquelles reposent ces systèmes. Par exemple, les temps d'arrivée des signaux électromagnétiques des satellites sont utilisés pour calculer les distances à ces satellites et, par conséquent, déterminer la position.

La définition de la seconde est basée sur des critères très précis : elle est définie comme étant égale à 9 192 631 770 périodes de la radiation de transition entre les deux niveaux hyperfins d'énergie de l'état fondamental de l'atome de césium 133. Cette définition de la seconde sert de fondement à la définition de l'unité d'espace, le mètre, qui est défini comme la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant $1/299\,792\,458$ seconde.

Différentes échelles de temps en physique, allant du temps de Planck à l'âge de l'univers :

1. **Temps de Planck** : 5.39×10^{-44} secondes
2. **Temps quantique** : 10^{-23} secondes
3. **Temps atomique** : de l'ordre de 10^{-15} secondes
4. **Temps humain** : de l'ordre de secondes à années
5. **Âge de l'univers** : Environ 13,8 milliards d'années

II.3.1 Big Bang

Le Big Bang est le modèle cosmologique dominant qui explique l'origine de l'univers observable. Il suggère que l'univers a commencé à partir d'un état extrêmement chaud et dense il y a environ 13,8 milliards d'années et qu'il n'a cessé de s'étendre depuis. Le terme "Big Bang" a été inventé par l'astronome britannique Fred Hoyle lors d'une émission de radio de la BBC en 1949, mais le concept lui-même trouve ses racines dans le travail de scientifiques tels que Georges Lemaître (1894-1966) et Edwin Hubble (1889-1953).

Pour cette théorie, on pense que l'univers a débuté à partir d'un état extrêmement petit, chaud et dense connu sous le nom de singularité. Cependant, les lois de la physique, telles que nous les comprenons actuellement, s'effondrent à ce stade.

L'univers a commencé à s'étendre rapidement à partir de la singularité initiale. Cette expansion est en cours et est soutenue par les observations des galaxies s'éloignant les unes des autres.

À mesure que l'univers s'expandait et refroidissait, il est entré dans une phase où les atomes pouvaient se former. Environ 380 000 ans après le Big Bang, les protons et les électrons se sont combinés pour former des atomes d'hydrogène neutres, permettant aux photons de voyager librement dans l'espace. Le vestige de ce rayonnement initial est le fond cosmique micro-ondes (CMB), observable dans tout l'univers aujourd'hui.

Pendant les premières minutes qui ont suivi le Big Bang, les conditions étaient extrêmement chaudes et denses, permettant la synthèse d'éléments légers tels que l'hydrogène, l'hélium et de petites traces de lithium.

Au fil du temps, la matière s'est agglomérée sous l'influence des forces gravitationnelles, formant des structures telles que des galaxies, des étoiles et des amas de galaxies.

La théorie du Big Bang a connu un grand succès en expliquant un large éventail d'observations, telles que l'abondance des éléments légers dans l'univers, le rayonnement cosmique micro-ondes et la structure à grande échelle du cosmos. Elle est devenue le modèle cosmologique standard, soutenu par un ensemble substantiel de preuves, bien que certains détails de l'univers primitif fassent encore l'objet de recherches et de raffinements continus grâce à des observations et des études en cours.

II.3.2 Trous noirs

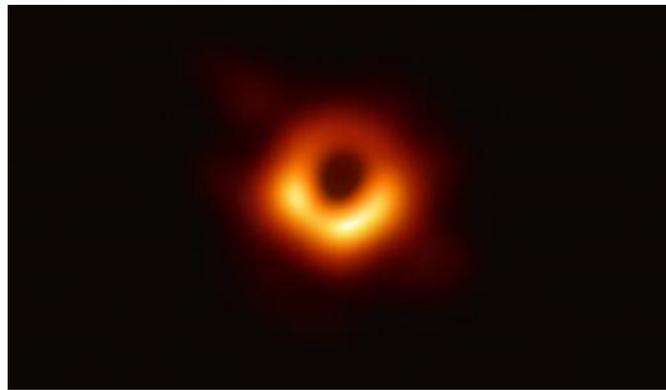


Figure II.3 Visualisation du trou noir supermassif M87* et de son disque d'accrétion, prise le 10 avril 2019.

Les trous noirs sont des objets astrophysiques extrêmement denses dont la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper de leur champ gravitationnel. Ces objets sont formés à partir des restes d'étoiles massives en fin de vie ou par la fusion de deux étoiles compactes.

Concernant la genèse des trous noirs, le phénomène est bien établi et parfaitement décrit par la relativité générale : lorsqu'une étoile d'au moins trois fois la masse du Soleil arrive en fin de vie, en épuisant leur combustible nucléaire, elle s'effondre sur elle-même, sous l'influence de leur propre gravité. Lors d'une supernova, une explosion d'une ampleur colossale, les couches externes d'une étoile sont éjectées dans l'espace interstellaire. Pendant ce temps, le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même, devenant extrêmement dense. Dans certains cas, cette densité est telle qu'elle forme un objet connu sous le nom de trou noir. Ce trou noir est caractérisé par une région appelée "horizon des événements",

une frontière à sens unique au-delà de laquelle rien ne peut échapper, ni rayonnement ni matière. Une fois qu'un objet traverse cet horizon, il est irrémédiablement attiré vers le centre du trou noir. La physique telle que nous la connaissons cesse de s'appliquer à une singularité.

Les trous noirs ne peuvent pas être directement observés car ils n'émettent pas de lumière. Cependant, leur présence peut être déduite par l'observation des effets gravitationnels qu'ils exercent sur la matière environnante.

Néanmoins, les trous noirs peuvent devenir visibles lorsqu'ils interagissent avec la matière environnante. Lorsqu'un trou noir attire de la matière, celle-ci peut former un disque d'accrétion chaud émettant des radiations détectables.

Du point de vue de la thermodynamique, les trous noirs sont également des objets d'étude. En 1974, Stephen Hawking a appliqué la théorie quantique des champs à l'espace-temps courbé de la relativité générale. Ce faisant, il a fait une découverte révolutionnaire : contrairement aux prédictions de la mécanique classique, les trous noirs peuvent émettre un rayonnement, aujourd'hui connu sous le nom de rayonnement de Hawking. Ce rayonnement est similaire à un rayonnement thermique. De plus, cette émission de rayonnement implique que les trous noirs perdent de la masse au fil du temps.

Hawking a appliqué la théorie quantique des champs pour calculer l'entropie des trous noirs, démontrant ainsi qu'il est possible de définir rigoureusement une température associée au rayonnement émis par ces objets. Selon les équations de la thermodynamique des trous noirs, l'entropie d'un trou noir est directement proportionnelle à la surface de son horizon. Toutefois, l'interprétation microscopique de cette entropie reste un problème ouvert, bien que la théorie des cordes ait réussi à fournir des éléments de réponse partiels à cette question.

Le rayonnement de Hawking se présente sous la forme d'un spectre de corps noir. Par conséquent, il est possible d'attribuer une "température" au trou noir, qui est inversement proportionnelle à sa taille. Ainsi, plus le trou noir est massif, plus sa température est basse. Par exemple, un trou noir de la taille de la planète Mercure aurait une température similaire à celle du rayonnement de fond diffus cosmologique, soit environ 2,73 kelvins. Les trous noirs stellaires, ayant une masse plus importante, ont une température encore plus basse, de l'ordre de quelques microkelvins, ce qui rend impossible leur détection directe lorsqu'ils s'évaporent.

Cependant, pour les trous noirs moins massifs, leur température est plus élevée, ce qui entraîne une perte d'énergie significative. Cette perte d'énergie conduit à une diminution de leur masse sur des échelles cosmologiques. Par exemple, un trou noir de quelques millions de tonnes s'évaporerait en moins de l'âge de l'Univers. Au fur et à mesure que le trou noir s'évapore, il devient plus petit et donc plus chaud. Certains astrophysiciens ont suggéré que l'évaporation complète de ces trous noirs produirait un flash de rayons gamma, ce qui pourrait servir de signature de l'existence de trous noirs de très faible masse, appelés trous noirs primordiaux.

La possibilité de l'existence des trous noirs n'est pas exclusivement déduite de la relativité générale. La quasi-totalité des autres théories de la gravitation physiquement réalistes prévoient également leur existence. Cependant, la relativité générale, contrairement à la plupart de ces autres théories, non seulement prédit l'existence des trous noirs, mais également postule qu'ils se formeront partout où une quantité suffisante de matière peut être comprimée dans une région de l'espace.

À titre d'exemple, si l'on comprimait le Soleil dans une sphère d'environ trois kilomètres de rayon (environ quatre millièmes de sa taille), il se transformerait en un trou noir. De même, si la Terre était comprimée dans un volume de quelques millimètres cubes, elle deviendrait également un trou noir.

Les trous noirs sont des objets fascinants en astrophysique, et leur étude continue à repousser les limites de notre compréhension de la gravité, de l'espace-temps et de la nature de l'univers.

Le trou noir est un objet astrophysique singulier caractérisé par son invisibilité, son extrême compacité et l'incapacité pour toute matière d'en sortir. La matière qui pénètre dans un trou noir est condensée en un point central unique, formant ce que l'on appelle une singularité gravitationnelle. À cet endroit, nos concepts traditionnels du temps et de l'espace perdent leur validité, s'effondrant dans un domaine où les lois de la physique telles que nous les connaissons ne s'appliquent plus.

Il s'agit d'une zone de l'espace-temps délimitée par un "endroit" où est concentrée une très grande densité d'énergie par unité de volume appelée "horizon des événements". Etant donné le champ gravitationnel important de cette zone, tout objet passant trop près de l'horizon des événements va être attiré, puis précipité à l'intérieur du trou noir sans jamais pouvoir en ressortir.

En 2019, une première image d'un trou noir a été capturée, marquant une avancée significative dans l'observation des phénomènes astrophysiques. Depuis lors, une autre image de ce même trou noir a été diffusée, révélant le champ magnétique aux abords de l'objet. De plus, en 2022, les scientifiques ont pu observer un autre trou noir supermassif, situé au centre de la Voie lactée.

Selon les avancées scientifiques les plus récentes, le trou noir le plus proche de la Terre connu est désigné sous le nom de Gaia BH1. Il se situe à moins de 1600 années-lumière de notre planète, et sa masse est estimée à environ 10 fois celle du Soleil.

Pour se faire une idée de ce qu'est un trou noir, la NASA propose une comparaison : imaginez la masse d'une étoile, 10 fois plus massive que notre propre Soleil, confinée dans une sphère de la taille de la ville de New York.

Les trous noirs possèdent un champ gravitationnel d'une intensité extrême, empêchant toute matière d'en échapper, y compris la lumière. C'est pourquoi ils demeurent optiquement invisibles. Cependant, la matière qui est absorbée par un trou noir peut être détectée car elle est chauffée à des températures extrêmement élevées. Cette matière forme alors un disque d'accrétion, ressemblant à un halo lumineux sur les rares images de trous noirs dont nous disposons.

Il existe quatre grandes catégories de trous noirs, classées en fonction de leur masse : les trous noirs stellaires, les supermassifs, les intermédiaires et les primordiaux (ou micro trous noirs). La présence et la fréquence de chaque type de trou noir sont étroitement liées aux conditions et aux probabilités de leur formation.

II.3.2.1 Trous noirs stellaires

De masses comprise entre 10 et 24 fois la masse du Soleil se forment lorsqu'une étoile suffisamment massive subit un effondrement gravitationnel sur elle-même.

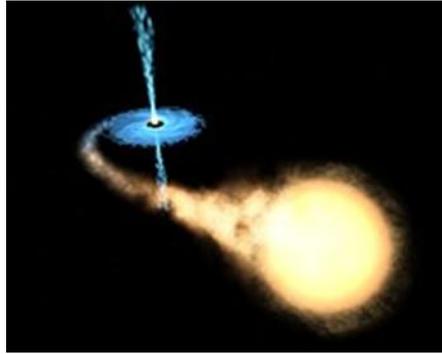


Figure II.4 Représentation visuelle du processus de formation de jets.

À l'intérieur d'un système binaire constitué d'un trou noir et d'une étoile compagne, le gaz de cette dernière est arraché par le champ gravitationnel du trou noir et dirigé vers celui-ci. Lorsque le gaz s'approche du trou noir, il forme un disque d'accrétion, à partir duquel le jet est alimenté en matière.

Un trou noir de masse solaire aurait un diamètre d'environ 6 kilomètres. Les trous noirs stellaires ont une masse équivalente ou supérieure à trois fois celle du Soleil. Ils résultent de l'effondrement gravitationnel du noyau des étoiles massives après l'épuisement de leur combustible nucléaire. En effet, lorsque les réactions thermonucléaires dans le cœur d'une étoile massive prennent fin, souvent à cause de l'épuisement de leur carburant, cela peut déclencher une supernova. Ce processus peut laisser derrière lui un noyau en effondrement rapide, formant éventuellement un trou noir stellaire.

Une étoile de masse nominale (avant sa perte de matière en fin de vie) de 20 masses solaires a une probabilité d'environ 40% de s'effondrer en un trou noir, cependant une étoile de 40 masses solaires a une probabilité proche de 100%.

En 1939, Robert Oppenheimer a démontré que si le noyau d'une étoile a une masse supérieure à une certaine limite, connue sous le nom de limite d'Oppenheimer-Volkoff et équivalant à environ 3,3 masses solaires, la force gravitationnelle devient prépondérante par rapport à toutes les autres forces, conduisant à la formation inévitable d'un trou noir.

L'effondrement conduisant à la formation d'un trou noir peut générer des ondes gravitationnelles, qui sont détectées à l'aide d'instruments comme l'interféromètre VIRGO et les deux interféromètres de LIGO. Au cours des années 2020, les trous noirs stellaires

sont observés dans des systèmes binaires X et des microquasars, et sont parfois associés à l'émission de jets similaires à ceux observés dans certains noyaux actifs de galaxies.

II.3.2.2 Trous noirs supermassifs

Situés au cœur des galaxies, les trous noirs supermassifs sont d'énormes entités, avec des masses dépassant souvent un million de fois celle du Soleil. Certains peuvent même être encore plus massifs ; par exemple, un trou noir de 40 milliards de masses solaires a été mesuré (selon une étude publiée sur la plateforme arXiv.org le 24/07/19). La formation de ces trous noirs supermassifs reste un sujet de débat au sein de la communauté scientifique. Il est raisonnable de supposer que la formation de ces géants cosmiques s'effectue sur des échelles de temps considérables, compte tenu de leur taille impressionnante.

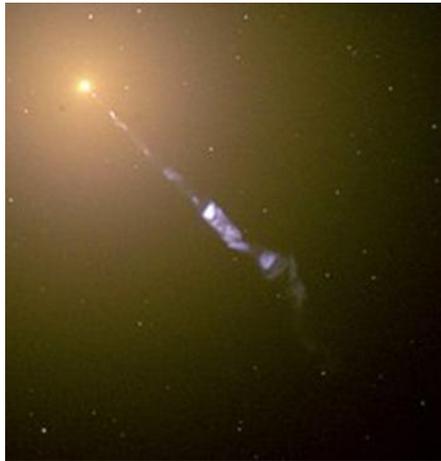


Figure 0.5 Jet émanant du noyau de la galaxie M87.

Le jet provenant du centre de la galaxie M87 est probablement engendré par la présence de M87*, un trou noir supermassif dont la masse est estimée à environ 6,8 milliards de masses solaires. Seul un côté du jet est observable, celui dirigé vers notre direction, apparaissant nettement plus lumineux que le contre-jet. Ceci est dû à l'effet de décalage vers le bleu, augmentant significativement sa luminosité, tandis que le contre-jet subit un décalage vers le rouge.

Les trous noirs supermassifs, avec des masses variant entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires, sont situés au centre des galaxies. Notre propre galaxie, la Voie lactée, héberge un tel trou noir nommé Sagittarius A*.

La masse d'un trou noir galactique est généralement d'environ un millième de la masse de la matière présente dans le bulbe galactique.

La formation des trous noirs de très grande masse, de l'ordre d'un milliard de masses solaires, observés dans l'Univers lointain, s'est produite de manière trop rapide pour correspondre à l'effondrement d'étoiles massives. Il est suggéré qu'ils pourraient résulter de l'effondrement direct de nuages de gaz gigantesques présents peu après le Big Bang, aboutissant à la formation de trous noirs initiaux avec des masses de l'ordre de dix à cent mille fois celle du Soleil. Ces trous noirs auraient ensuite grandi aux dépens du gaz et des étoiles environnantes.

En 2021, une équipe de l'université du Texas a découvert un trou noir supermassif au centre de Lion I, une galaxie naine sphéroïdale faisant partie du Groupe local. Pesant 3,3 millions de masses solaires, il est comparable en masse au trou noir supermassif situé au centre de la Voie lactée.

II.3.2.3 Trous noirs intermédiaires

À mi-chemin entre les deux précédents, de masse entre 100 et 10 000 masses solaires, découverts dans les années 2000. Pour la première fois, une preuve directe de leur existence a été observée en septembre 2020.

La formation des trous noirs intermédiaires pourrait être expliquée par une réaction en chaîne : une collision d'étoiles au sein d'amas très denses entraînerait une accumulation d'étoiles très massives, dont l'effondrement donnerait naissance à des trous noirs de masse intermédiaire.

Stephen Hawking a mis en évidence un paradoxe remarquable : les trous noirs ne sont pas des entités totalement noires, car ils émettent des particules et peuvent s'évaporer, jusqu'à disparaître complètement. Ce phénomène se manifeste sous la forme d'un rayonnement, connu sous le nom de rayonnement de Hawking.

Bien que l'existence de trous noirs intermédiaires ait été largement acceptée par la communauté des astronomes au début des années 2000, le faible nombre de candidats observés et l'ambiguïté de certains signaux continuent à susciter des débats quant à l'existence de cette catégorie de trous noirs.

En 2017, Bulent Kiziltan, directeur de recherche au Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, a affirmé avoir détecté un trou noir intermédiaire d'une masse comprise entre 1400 et 3700 fois celle du Soleil au sein de l'amas globulaire 47 Tucanae.

II.3.2.4 Trous noirs primordiaux

Les trous noirs primordiaux, également appelés micro-trous noirs ou trous noirs quantiques, sont théoriquement envisagés avec une masse aussi faible que 2×10^{-8} kg. Ils auraient émergé durant le Big Bang, d'où leur qualification de « primordiaux », résultant de l'effondrement gravitationnel de petites sur-densités dans l'univers primordial.

Dans les années 1970, les physiciens Stephen Hawking et Bernard Carr ont étudié un mécanisme potentiel de formation de trous noirs dans l'univers primordial. Ils ont avancé l'idée de l'existence d'une multitude de mini-trous noirs, nettement plus petits que ceux issus de l'effondrement stellaire. La densité et la répartition en masse de ces trous noirs restent incertaines et dépendent largement des conditions de l'inflation cosmique, une phase d'expansion rapide dans l'univers primordial.

Ces micro-trous noirs, s'ils existent, émettraient un rayonnement gamma pouvant potentiellement être détecté par des satellites tels que INTEGRAL. Cependant, la non-détection de ce rayonnement a permis de poser des limites supérieures sur l'abondance et la répartition en masse de ces trous noirs primordiaux.

Une hypothèse avancée vers le milieu de 2019 suggère que la mystérieuse neuvième planète hypothétique du système solaire pourrait être en réalité un trou noir.

Concernant la genèse des trous noirs, le phénomène est bien établi et parfaitement décrit par la relativité générale : Lorsque une étoile dont la masse est au moins trois fois celle du Soleil arrive en fin de vie, elle subit un effondrement gravitationnel sur elle-même. Ce processus entraîne une explosion spectaculaire connue sous le nom de supernova, au cours de laquelle les couches externes de l'étoile sont éjectées dans l'espace interstellaire, tandis que son cœur se contracte et devient extrêmement dense, formant ainsi un trou noir. Ce trou noir est caractérisé par un "horizon", une frontière à sens unique au-delà de laquelle rien, ni rayonnement ni matière, ne peut échapper.

Le rayonnement puise de l'énergie (gravitationnelle) du trou noir, ce qui diminue sa masse effective. Le trou noir s'évapore donc lentement, tandis que la radiation de Hawking s'échappe de sa surface. Cette radiation est extrêmement faible, et en théorie, un trou noir

d'une masse solaire mettrait 1058 milliards d'années à s'évaporer complètement – alors que l'univers n'a même pas 14 milliards d'années.

Cette évaporation pose également un autre problème théorique difficile à résoudre et en lien avec l'« intrication quantique » (un processus par lequel des particules deviennent inextricablement liées). Les particules émises par le rayonnement de Hawking sont intriquées avec l'état quantique décrivant le trou noir. Mais, si le trou noir finit par complètement s'évaporer – et donc par disparaître – cela mettrait fin à l'état quantique permettant aux particules du rayonnement de Hawking de s'intriquer. Paradoxe ...

II.3.3 Trous blancs

Les trous blancs sont des concepts théoriques en physique, liés à la relativité générale. À l'opposé des trous noirs qui ont une force gravitationnelle si intense qu'aucune lumière ne peut en échapper, les trous blancs sont hypothétiquement des régions de l'espace-temps d'où rien ne peut entrer, mais seulement sortir.

Conformément aux prédictions de la relativité générale, les trous blancs sont considérés comme l'opposé des trous noirs : tandis que les trous noirs ne peuvent qu'absorber la matière et la lumière, les trous blancs ne peuvent que les expulser. Ainsi, alors qu'il est impossible de s'échapper d'un trou noir, il est tout aussi impossible de pénétrer dans un trou blanc, également appelé « fontaine blanche ». Pour beaucoup, ces objets exotiques ne seraient que des curiosités mathématiques. Cependant, certains scientifiques commencent à prendre très au sérieux l'idée de leur existence, car ils ont développé un scénario convaincant pour expliquer leur formation : selon cette théorie, les trous blancs constitueraient le stade ultime de l'évolution des trous noirs.

Cependant, il est important de noter qu'ils ne sont pas largement acceptés comme des objets astrophysiques réels. Ils sont plutôt considérés comme des solutions mathématiques aux équations de la relativité générale d'Einstein.

En supposant l'existence des trous blancs, ils violeraient la seconde loi de la thermodynamique, qui stipule que l'entropie (ou le désordre) ne peut jamais diminuer dans un système isolé. Ils semblent violer cette loi en expulsant de la matière tout en conservant une entropie basse.

Les modèles théoriques indiquent que les trous blancs seraient extrêmement instables et difficiles à former. La plupart des astrophysiciens pensent que si de tels objets existaient, ils ne pourraient pas se former naturellement.

Certains modèles théoriques suggèrent que les trous blancs pourraient être liés aux trous noirs, formant un ensemble appelé un "trou de ver traversable". Cependant, la faisabilité de tels objets demeure incertaine.

Le physicien italien Carlo Rovelli, du Centre de physique théorique est à l'origine, avec d'autres chercheurs, du scénario de formation des trous blancs et l'auteur d'un récent livre sur ces astres énigmatiques. Il établit que les équations de la gravité quantique à boucles permettent de calculer précisément la masse de ces trous blancs : de l'ordre du microgramme.

Comme pour les trous de ver, les trous blancs restent des objets théoriques fascinants. Les physiciens continuent à explorer ces concepts, en recherchant des solutions aux équations de la relativité générale qui pourraient décrire des situations hypothétiques impliquant des trous blancs.

La détection des trous blancs, encore hypothétiques, établirait la gravité quantique et pourrait expliquer l'origine de la matière noire.

Toutefois, aussi séduisante soit-elle, l'hypothèse de la formation des trous blancs laisse une interrogation de taille : si les trous noirs se transforment fatalement en fontaines blanches, pourquoi ne les voit-on pas s'illuminer autour de nous l'un après l'autre ? En réalité, cette apparente contradiction trouve une explication parfaite dans le cadre de la relativité générale, où le temps est une dimension flexible. Un objet massif courbe l'espace-temps autour de lui de telle manière qu'il ralentit le temps. Par exemple, sur Terre, le temps s'écoule plus lentement au niveau de la mer que dans les régions montagneuses, où la gravité est moindre.

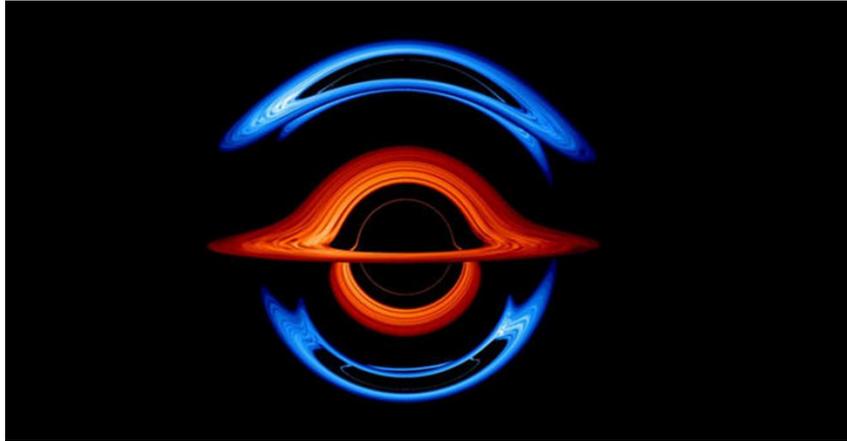


Figure II.6 Nasa / Goddard Space Flight Center / Jeremy Schnittman and Brian P. Powell.

Bien sûr, sur notre planète, l'effet est infime. « Mais dans un trou noir, la différence devient énorme : un temps très court proche de l'horizon correspond à un temps très long loin de ce dernier. Ainsi, le temps du rebond, qui n'excède pas quelques millisecondes pour le trou noir lui-même, peut correspondre à plusieurs milliards d'années pour un observateur éloigné », explique Aurélien Barrau, du Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie³. Résultat : si l'on ne voit pas de trous noirs s'embraser dans le ciel, c'est parce que, dans notre espace-temps à nous, ils n'en ont pas encore eu le temps.

II.3.3.1 À la recherche des trous noirs primordiaux

Doit-on alors faire définitivement une croix sur l'observation de ces hypothétiques trous blancs et renoncer du même coup à mettre à l'épreuve le modèle développé par les scientifiques ? Pour ceux issus de gros trous noirs, même de quelques masses solaires, inutile en effet d'espérer : ces derniers ne devraient se transformer que si la durée du temps soit largement supérieur à l'âge de l'Univers. Mais à côté de ces monstres, il existerait une myriade de petits trous noirs qui pourraient déjà avoir entamé leur transformation. Car ceux-ci perdent constamment une partie de leur masse à cause d'un phénomène d'évaporation mis en évidence par le Britannique Stephen Hawking. « Par un effet lié aux fluctuations quantiques du vide, ils rayonnent de la lumière et leur masse diminue de plus en plus rapidement, jusqu'au point où peut se produire la transition quantique qui les fait devenir trous blancs », précise Carlo Rovelli.

De tels trous noirs suffisamment petits pour subir une évaporation assez rapide sont forcément des trous noirs primordiaux, des astres encore hypothétiques qui seraient nés juste après le Big Bang, quand l'Univers était très dense et très chaud. À cette époque, des accumulations localisées de matière auraient conduit à la formation de ces astres de masses et de tailles extrêmement variées, parmi lesquels certains seraient minuscules. C'est donc sur ces trous noirs originels, certes encore jamais observés, que les astronomes focalisent leur attention, dans l'espoir de détecter des indices de leur transformation en trou blanc.

II.3.3.2 Comment les observer ?

Comment ces fontaines blanches pourraient-elles se manifester? La première possibilité réside dans le fait que l'événement pourrait être très violent, dans ce cas le trou noir explose brutalement en transformant une grande partie de sa masse en rayonnement. « D'après les calculs, l'explosion libérerait un flot de photons gamma, sous la forme de flashes intenses et brefs. Il est donc probable que certains sursauts gamma observés, très rapides et très énergétiques, viennent de l'explosion et la transformation d'un trou noir en un trou blanc », souligne Aurélien Barrau. Selon lui, il serait même possible de faire la distinction entre ces deux phénomènes. En fait, les signaux provenant des trous blancs présenteraient devraient exhiber un caractère très distinctif: un décalage vers le rouge dû à son mouvement d'éloignement, un objet lointain voit sa lumière décalée vers le rouge – différent des autres astres. En accumulant de grandes quantités de données sur les sources gamma enregistrées par de multiples instruments, on pourrait peut-être mettre en évidence un effet lié aux trous blancs.

Mais tous les trous noirs ne sont pas destinés à exploser violemment. Ayant évaporé la quasi-totalité de leur masse, certains d'entre eux deviendraient alors de minuscules et paisibles trous blancs, imperceptibles car n'émettant quasiment plus de rayonnement et dotés d'une espérance de vie très longue. « Les équations de la gravité quantique à boucles permettent de calculer précisément la masse de ces trous blancs : de l'ordre du microgramme. Cela peut paraître négligeable mais mis bout à bout, tous ces trous blancs pourraient contribuer de façon importante à la matière noire », s'enthousiasme Carlo Rovelli. Cette matière invisible, qui constituerait environ 27 % du contenu de l'Univers et dont la nature demeure mystérieuse, ne révèle sa présence aux astronomes que par ses effets gravitationnels. Avec les trous blancs, c'est une nouvelle piste qui s'ouvre pour tenter de résoudre ce mystère. Étant donné leur très faible masse, la détection de ces trous blancs

serait extrêmement difficile. Mais le chercheur et son équipe réfléchissent d'ores et déjà à des détecteurs hyper sensibles capables d'une telle prouesse.

II.3.4 Trous de ver

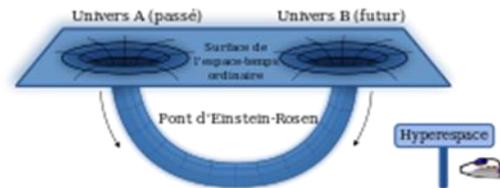


Figure II.7 Schéma d'un trou de ver.

Les trous de ver (wormholes, en anglais) sont des concepts théoriques en physique, spécifiquement en relativité générale d'Albert Einstein. Leur possibilité est discutée au sein de la communauté scientifique.

Un trou de ver est une solution aux équations de la relativité générale qui pourrait théoriquement relier deux points distincts de l'espace-temps. Cela pourrait créer un raccourci, ou un pont, entre deux régions de l'univers, permettant un voyage d'un point à un autre plus rapidement que la vitesse de la lumière. Ces structures hypothétiques ont été envisagées pour la première fois par le physicien théoricien John Archibald Wheeler (1911-2008. Physicien théoricien américain, spécialiste de la relativité générale. Il a sensiblement influencé les recherches sur les trous noirs).

Bien que les équations de la relativité générale permettent l'existence théorique des trous de ver, il n'y a actuellement aucune preuve expérimentale de leur existence. Ils restent donc principalement des objets mathématiques théoriques.

II.3.4.1 Trous noirs et trous de ver

Un trou de ver est un concept fascinant en astrophysique décrit par la relativité générale. Imaginez un raccourci à travers l'espace-temps, un tunnel reliant deux régions distinctes. D'un côté, il se manifesterait comme un trou noir, et de l'autre côté, comme un trou blanc. Pour mieux visualiser, pensez à une feuille de papier pliée sur elle-même dans un espace à trois dimensions. Le trou de ver permettrait un voyage direct du point A au

point B en un temps considérablement réduit par rapport à un déplacement linéaire à la surface de la feuille.

La théorie de la relativité générale permettrait l'existence théorique de ces configurations. Tandis que dans le contexte de l'astrophysique un tel phénomène n'est jamais irréalisable car aucun processus physique connu jusqu'à ce jour ne semble permettre sa formation.

Ces entités, bien que conformes aux prédictions de la relativité générale, semblent totalement inatteignables dans la pratique, car aucun processus connu ne semble permettre leur formation.

Les trous de ver théoriques sont souvent instables. Leur maintien nécessiterait l'existence d'une forme exotique de matière, souvent appelée "matière exotique", ayant des propriétés qui défient celles de la matière ordinaire.

Certains modèles de trous de ver suggèrent que pour les stabiliser, une forme d'énergie négative pourrait être nécessaire. Cela soulève des questions sur la faisabilité physique de ces structures, car l'énergie négative n'a pas été observée et contredit nos connaissances actuelles. Ainsi, les trous de ver demeurent un domaine de recherche actif en physique théorique.

Les deux physiciens Juan Maldacena (Institute of Advanced Study de Princeton) et Xiao-Liang Qi (Université de Stanford) concluent une récente étude que tout cela est en train de s'éclaircir. En effet, ces résultats offrent des éléments de compréhension sur la façon dont des trous de ver pourraient exister dans une théorie quantique de la gravitation, et ce en résolvant le « paradoxe de l'information » de Hawking.



Chapitre III

Théories contemporaines

III.1 Gravitation quantique

III.1.1 Théorie des courbes

La théorie de la relativité restreinte et générale d'Albert Einstein a redéfini notre compréhension de l'espace et du temps. Les lois de la physique s'expriment dans un espace quadridimensionnel de Minkowski englobant les trois dimensions usuelles de l'espace et une du temps. Le temps est considéré comme une dimension propre à l'espace-temps, formant une "courbe" en présence de masse et d'énergie. Les objets en mouvement suivent des trajectoires courbes à travers cet espace-temps déformé qu'on les appelle des Géodésiques. Dans le contexte de la relativité générale, l'espace se caractérise principalement par sa courbure locale, conformément à la géométrie Riemannienne. Einstein a habilement utilisé ces concepts, car ils lui permettent d'exprimer la masse des particules. En effet, la présence d'une masse se traduit par une propriété géométrique de l'espace-temps qui le courbe. La théorie de la relativité, issue d'un effort de compréhension théorique, a été confirmée par de nombreuses expériences. Jean-Pierre Petit explore ces concepts de courbure et de relativité de manière remarquablement bien exposée dans deux de ses bandes dessinées.

III.1.2 Théorie des cordes

En physique théorique, la théorie des cordes explore l'idée que les particules fondamentales sont en réalité des cordes vibrantes, évoluant dans un espace-temps à plusieurs dimensions.

Contrairement à la vision classique des particules comme des points, la théorie des cordes propose que les particules fondamentales soient des cordes unidimensionnelles vibrantes. La nature et la fréquence des vibrations déterminent les propriétés des particules.

La théorie des cordes cherche à unifier les quatre forces fondamentales de la nature, à savoir :

- la force gravitationnelle ;
- La force électromagnétique ;
- La force nucléaire forte ;
- La force nucléaire faible.

Elle propose une vision cohérente où ces forces émergent des interactions entre les différentes vibrations des cordes.

D'un point de vue mathématique, la théorie des cordes nécessite des dimensions supplémentaires par rapport aux quatre dimensions de l'espace-temps que nous percevons, selon les travaux d'Edward Witten pour que cette théorie soit cohérente avec la théorie de la relativité et celle de la mécanique quantique il faudrait qu'il existe 11 dimensions (10 dimensions d'espace et une du temps). Ces dimensions supplémentaires sont souvent supposées être compactifiées ou enroulées sur elles-mêmes à des échelles très petites (comme le suggèrent les théories de Kaluza-Klein), échappant ainsi à notre perception directe.

Il existe plusieurs versions de la théorie des cordes, notamment :

- La théorie des cordes bosoniques ;
- La théorie des supercordes de type I et de type IIA ;
- La théorie des supercordes hétérotiques.

Ces versions ont des caractéristiques spécifiques, mais elles partagent l'idée fondamentale des cordes vibrantes.

À ce jour, la théorie des cordes n'a pas été confirmée expérimentalement, en partie en raison des énergies extrêmement élevées nécessaires pour tester directement ces idées. Cependant, elle continue d'être une perspective intrigante pour la recherche en physique théorique.

En utilisant la théorie des cordes les physiciens ont pu reproduire des modèles et des formules déjà connus, citons comme exemple la formule de Berkestein qui suggère une limite de la quantité d'information qui peut être contenue dans une région d'espace, l'entropie des trous noirs établie par Hawking. Mais elle a échoué à répondre à des questions ouvertes en cosmologie, à savoir l'existence de la matière noire et l'énergie noire.

Selon la théorie des cordes, le temps n'est pas une quantité fondamentale mais plutôt un phénomène émergent de la géométrie de l'espace-temps en tant que surface d'action des cordes. Cette perspective a ouvert de nouvelles voies de recherche en physique théorique pour comprendre la nature du temps. Aujourd'hui, la "théorie des cordes" semble réussir là où toutes les théories précédentes ont échoué. Elle bouleverse donc notre conception de la matière, de l'espace et du temps. C'est l'histoire complète de cette révolution en cours - où les particules élémentaires se révèlent être comme des morceaux infinis de corde, où l'espace-temps se déchire, se répare et se plie dans dix dimensions invisibles, et où le

BigBang et les trous noirs prennent des formes inattendues - que l'un de ses acteurs éminents nous raconte ici.

Dans un article de revue, Rovelli (2011 ; voir également : 2010) examine les principaux domaines de la physique fondamentale et indique pourquoi, selon lui, les progrès (notamment dans la voie de l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique) seront ouverts en acceptant la non-existence du temps. Cela est compris dans le sens de l'abandon de la variable temporelle, c'est-à-dire le paramètre mathématique t , dans les équations physiques écrites au niveau le plus fondamental. L'auteur montre que cette option peut également être suivie en relativité générale, en mécanique quantique (Rovelli, 1990), et aussi en gravité quantique en boucles (Rovelli, 1991), où l'objectif est d'unifier ces deux dernières théories. Julian Barbour (1999) parle de la non-existence du temps en termes similaires (voir également, entre autres, Da Costa et Sant'Anna, 2001) [23].

Récemment, avec la création des ordinateurs quantiques, plusieurs phénomènes étranges faisant intervenir le temps ont été observés. Citons d'abord le travail mené par Lesovik G. B et al [40] ; dans lequel il a été démontré que la flèche du temps peut être inversée. En effet, il a été montré qu'il est possible de concevoir un algorithme quantique capable d'inverser un état quantique donné. L'utilisation de cet algorithme sur un ordinateur quantique IBM permet aux scientifiques de démontrer expérimentalement des dynamiques temporelles inverses pour un électron dispersé à travers une impureté à deux niveaux. Un autre phénomène a été le sujet de l'article de Dumitrescu, P.T. et al [15]. Dans ce travail, les physiciens ont créé une phase de matière remarquable et jamais vue auparavant en faisant briller une séquence d'impulsions laser inspirée des nombres de Fibonacci sur des atomes à l'intérieur d'un ordinateur quantique. La phase présente les avantages de deux dimensions temporelles bien qu'il n'y ait toujours qu'un seul flux temporel singulier.

La théorie des cordes est une tentative ambitieuse de comprendre la nature fondamentale de l'univers, mais elle suscite également des débats et des critiques. Certains scientifiques la considèrent comme une voie prometteuse vers une théorie du tout, tandis que d'autres estiment que d'autres approches pourraient être plus fructueuses.

III.2 Gravitation à boucles

(Ou gravitation quantique à boucles) (LQG, pour Loop Quantum Gravity en anglais)

C'est une approche théorique dans le domaine de la physique théorique qui vise à intégrer les principes de la relativité générale d'Albert Einstein avec les concepts de la mécanique quantique. Elle propose une vision quantique de l'espace-temps, en particulier de la gravité.

Dans la LQG, l'espace-temps n'est pas continu, mais quantifié, c'est-à-dire qu'il est constitué de "boucles" ou de réseaux discrets. Cette approche découle de la tentative de discrétisation de l'espace et du temps à des échelles extrêmement petites, appelées échelles de Planck.

La LQG utilise une approche canonique pour la quantification, en partant d'une formulation hamiltonienne classique de la relativité générale. Cela signifie que la théorie quantique est construite en partant des équations fondamentales classiques de la gravité.

Au lieu de traiter l'espace-temps comme une entité continue, la LQG quantifie l'aire et le volume des régions de l'espace. Ces quantités sont considérées comme discrètes et composées de quantités élémentaires.

Elle suggère que l'espace-temps a une structure granulaire à très petite échelle, et prédit l'existence de quantités minimales mesurables, telles que des aires et des volumes quantifiés. De plus, la LQG a des implications sur la nature de l'espace-temps près de la singularité de l'origine de l'univers (par exemple, le Big Bang), en évitant les singularités infinies prédites par la relativité générale classique.

La LQG diffère d'autres tentatives de quantification de la gravité, telles que la théorie des cordes. Elle propose une approche basée sur les champs de connexions et les réseaux, plutôt que sur les particules élémentaires ou les cordes.

La gravitation quantique à boucles est une théorie en développement, et les chercheurs explorent encore ses implications et testent ses prédictions. Bien qu'elle ait progressé dans la compréhension de la gravité à des échelles quantiques, la LQG n'a pas encore été pleinement validée expérimentalement, et son intégration avec d'autres aspects de la physique fondamentale reste un domaine actif de recherche.

Selon les équations d'Einstein, la matière concentrée au centre d'un astre devient telle qu'il finit par se former une singularité, un point où la densité d'énergie et la courbure de l'espace-temps deviennent infinies. Mais ces infinis ne peuvent pas avoir de réalité physique et sont au contraire le signe des limites de la théorie.

Pour résoudre un tel problème, la gravitation quantique à boucles stipule que l'espace est soumis aux phénomènes quantiques : comme la matière est composée d'atomes, l'espace lui-même est formé de grains individuels, ou quantas. Ainsi, l'espace ne peut pas être divisé à l'infini. On ne peut pas aller au dessous du seuil 10^{-35} mètre. Et comme rien ne peut être plus petit que ce quantum d'espace, la singularité disparaît définitivement. En effet, Dans les trous noirs, quand la matière s'effondre sur elle-même elle atteint ces échelles de taille, elle ne peut pas se concentrer davantage. « Il se produit alors un changement fondamental. L'espace-temps génère en quelque sorte une force répulsive d'origine quantique qui s'oppose à l'effondrement et fait rebondir la matière », avance Carlo Rovelli. Lors de cette transition quantique, similaire à celles qui se produisent dans le monde des particules élémentaires, la géométrie de l'espace-temps s'inverse, permettant à la matière qui se contractait auparavant d'être désormais expulsée. C'est ainsi que les trous noirs peuvent évoluer pour devenir des trous blancs, rejetant la matière qui s'était effondrée en leur sein.

Crédible, ce scénario mis en équations par la gravité quantique à boucles donne du poids à l'existence de ces fontaines blanches. Qui plus est, il permet non seulement de régler le problème de la singularité des trous noirs mais aussi d'éliminer le fameux paradoxe de l'information posé par ces derniers et longtemps débattu par les physiciens. En effet, quand un objet tombe dans un trou noir, l'information qu'il porte avec lui semble perdue à tout jamais puisque rien en théorie ne peut ressortir d'un trou noir. Dès lors, ces ogres cosmiques constitueraient les seules régions de l'Univers où l'information n'est pas conservée. Mais si le destin d'un trou noir est de finir en trou blanc, alors le paradoxe est résolu simplement : toute l'information séquestrée par le trou noir se retrouve libérée par le trou blanc.

La découverte de signaux en provenance de trous blancs serait une avancée majeure. Non seulement elle prouverait l'existence de ces astres mais, en confirmant la prédiction de la gravitation quantique à boucles, elle permettrait pour la première fois aux astronomes d'établir la nature quantique de l'espace-temps. « La recherche de ces signatures

observationnelles est primordiale pour pouvoir affiner nos méthodes de calcul et construire une théorie de gravitation quantique qui décrit correctement notre Univers », souligne Etera Livine, du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon qui travaille sur les développements mathématiques de la gravitation quantique à boucles.

Cette théorie a aujourd'hui le vent en poupe par rapport à d'autres théories de gravitation quantique, comme la théorie des cordes. Car ses prédictions convaincantes ne s'arrêtent pas à l'existence des trous blancs. Il y a quelques années, cette même théorie a permis en effet de résoudre un autre problème, posé cette fois par le Big Bang. Tout comme au cœur des trous noirs, la relativité générale prédit l'apparition d'une singularité au début de l'Univers, lorsque toute la matière était concentrée dans un volume minuscule. De la même manière, la gravité quantique à boucles supprime cette singularité en décrivant comment l'Univers, d'abord en contraction, aurait rebondi avant de rentrer dans sa phase d'expansion actuelle. Là encore, les astronomes tentent de prédire les traces qu'aurait pu laisser ce grand rebond dans le fond diffus cosmologique, la première lumière de l'Univers émise 380 000 ans après le Big Bang. « Vu leurs très faibles niveaux d'intensité, de telles signatures ne seraient pas détectables par les instruments actuels. Mais nous avons bon espoir que les expériences futures pourront permettre de tester ce modèle », confie Aurélien Barrau. La gravitation quantique à boucles pourrait alors bouleverser notre vision de l'Univers.

III.2.1 Temps imaginaire

Pour résoudre certains problèmes de physique quantique, on peut représenter le temps sous forme imaginaire, en utilisant des nombres complexes. Stephen Hawking a proposé l'utilisation du temps imaginaire pour décrire les événements qui ont eu lieu peu après le Big Bang.

Dans son livre "L'Univers dans une coquille de noix", Stephen Hawking a popularisé la notion de temps imaginaire. Mathématiquement, le temps imaginaire est la rotation de Wick du temps réel, ce qui signifie que les coordonnées sont multipliées par l'unité imaginaire i . Dans ce contexte, le temps réel peut être représenté comme une ligne horizontale et le temps imaginaire dans la direction verticale. Ce concept a été introduit afin de résoudre certains problèmes physiques en mécanique quantique et en cosmologie. Par exemple, si nous utilisons l'espace-temps imaginaire, la singularité du Big Bang sera supprimée et le Big Bang deviendra un espace-temps continu à quatre dimensions.

Le concept de "temps imaginaire" est souvent associé à la physique théorique, en particulier à la théorie quantique et à la théorie des cordes. Le temps imaginaire n'est pas une idée intuitive, mais plutôt une extension mathématique utilisée dans certaines formulations théoriques pour simplifier les calculs et résoudre des problèmes complexes.

Dans le contexte de la mécanique quantique, l'utilisation du temps imaginaire est souvent liée à la fonction d'onde, qui décrit l'évolution d'un système quantique. Schrödinger, dans son équation d'onde, a introduit le temps imaginaire (exprimé comme i , l'unité imaginaire où $i^2 = -1$) pour rendre les calculs plus gérables. L'équation de Schrödinger avec le temps imaginaire est appelée l'équation de Schrödinger imaginaire.

L'idée derrière l'introduction du temps imaginaire est qu'elle peut simplifier certains calculs en transformant des équations différentielles complexes en équations algébriques plus simples. Une fois que les calculs sont effectués dans le temps imaginaire, la solution peut être transformée de nouveau dans le temps réel.

Dans le contexte de la théorie des cordes, les physiciens utilisent également le temps imaginaire dans des calculs mathématiques complexes. Les intégrations de chemin, qui décrivent toutes les trajectoires possibles d'une corde entre deux points dans l'espace-temps, peuvent être plus facilement traitées en utilisant le temps imaginaire.

Il est essentiel de noter que le temps imaginaire n'a pas une interprétation physique directe en tant que "temps réel" tel que nous le percevons. C'est plutôt un artifice mathématique utile dans certaines approches théoriques pour rendre les calculs plus agréables et faciliter la résolution de problèmes complexes. Ces manipulations mathématiques ont souvent conduit à des prédictions physiques précises qui ont été vérifiées expérimentalement.

Le temps imaginaire d'Hawking, est la dimension du temps orthogonale à celle que nous connaissons et qui détermine la forme que va prendre l'univers dans son développement historique spatio-temporel. Contrairement à la temporalité fléchée et irréversible que nous connaissons, le temps imaginaire peut potentiellement s'écouler dans le sens de l'expansion de l'univers, ou dans le sens de sa contraction. Ainsi un univers qui après sa naissance connaîtrait une période d'expansion suivie d'une période de contraction, ressemblerait à une sphère dans l'espace-temps à 5 dimensions incluant le temps imaginaire. Un univers qui connaîtrait une expansion infinie aurait la forme d'un entonnoir

commençant par l'extrémité pointue d'une singularité et dont le cône d'expansion s'étend à l'infini...

Cependant Stephen Hawking élimine ces possibilités de singularités + expansion infinie car elles impliqueraient un vide théorique quant à l'origine ou la fin de l'univers ou qui impliquerait l'intervention d'un créateur. Il a donc conjecturé un univers sans-bord, et qui n'a ni début, ni fin, ni singularité initiale ou finale, où les lois physiques seraient suffisantes pour expliquer tous les scénarii d'univers possibles.

Dans l'hypothèse d'un univers sans bord, la forme de l'histoire de l'univers est nécessairement sphérique avec des pôles plus ou moins aplatis, selon les familles de conditions initiales considérées qui conditionne l'intensité et la durée de l'expansion initiale.

Ce modèle de cosmologie quantique de S. Hawking et Neil Turok a permis d'émettre des hypothèses sur les conditions initiales compatibles avec l'univers plat que nous observons aujourd'hui, et l'existence de conditions permettant l'émergence de la vie.

L'univers connaîtrait donc des cycles qui débuteraient et se termineraient par une phase où les lois quantiques dominent où le temps devient purement imaginaire. L'espace est courbé à tel point qu'il n'y a plus de flèche du temps, le temps s'écoule indifféremment dans un sens ou dans un autre avant que ne se produise une nouvelle phase d'expansion où la flèche du temps émerge.

III.2.2 Intrication quantique

C'est un phénomène fascinant de la physique quantique dans lequel deux particules (comme des photons ou des électrons) deviennent étroitement liées de manière à ce que l'état d'une particule soit directement lié à celui de l'autre, même si elles sont séparées par de grandes distances. Cela signifie que le changement de l'état d'une particule affectera instantanément l'état de l'autre, indépendamment de la distance qui les sépare.

L'intrication quantique a été initialement conceptualisée dans le cadre de l'expérience de pensée d'Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) en 1935. Le phénomène a été confirmé expérimentalement dans diverses expériences depuis, dont certaines impliquent la mesure de la polarisation des photons intriqués.

Ce paradoxe a été formulé afin de mettre en évidence ce qui semblait être une contradiction dans la mécanique quantique, ou du moins une contradiction avec au moins l'une des trois hypothèses suivantes :

1. L'impossibilité pour un signal de dépasser la vitesse c (causalité relativiste) ;
2. La mécanique quantique est complète et décrit entièrement la réalité (pas de variables cachées) ;
3. Les deux particules éloignées forment des éléments indépendants de la réalité (Non localité).

Le principe du paradoxe est de mesurer simultanément (dans un intervalle de temps suffisamment court pour que l'information n'ait pas le temps de se propager d'une particule à l'autre) deux grandeurs s'excluant, telles que la position et la vitesse, ce qui serait en violation avec les inégalités d'Heisenberg, et qui donnerait plus d'information que ce que la mécanique quantique prétend décrire, pour prouver que cette théorie est incomplète.

Einstein propose ensuite d'améliorer la mécanique quantique en introduisant une théorie utilisant des variables cachées.

Un aspect particulier de l'intrication quantique est qu'elle défie l'intuition classique et remet en question certaines notions de causalité et de réalité locale. Elle a été utilisée dans des expériences de téléportation quantique, où l'état quantique d'une particule est transféré instantanément à une autre particule éloignée sans déplacement physique.

L'intrication quantique joue également un rôle essentiel dans le champ émergent de l'informatique quantique, où elle est exploitée pour la création de bits quantiques (qubits) qui peuvent représenter des états superposés et entrelacés, permettant ainsi un traitement de l'information potentiellement plus puissant que les systèmes classiques.

III.2.3 Informatique quantique

C'est une branche de l'informatique qui exploite les principes de la mécanique quantique pour effectuer des calculs. Contrairement à l'informatique classique, qui utilise des bits traditionnels pour représenter des états binaires (0 ou 1), l'informatique quantique utilise des bits quantiques ou "qubits". Les qubits peuvent exister dans des états superposés, ce qui signifie qu'ils peuvent représenter simultanément les états 0 et 1.

Les qubits peuvent exister dans plusieurs états simultanément, ce qui permet aux ordinateurs quantiques d'effectuer des calculs sur de nombreux états en parallèle.

Les qubits peuvent être intriqués, créant des liens quantiques entre eux. Les changements dans l'état d'un qubit intriqué se répercutent instantanément sur l'autre, même s'ils sont séparés par de grandes distances.

Les qubits peuvent être désentrelacés pour résoudre des problèmes de manière plus efficace. L'informatique quantique tire parti de cette capacité pour résoudre certains types de problèmes plus rapidement que les ordinateurs classiques.

Les opérations effectuées sur les qubits sont représentées par des portes quantiques. Ces portes manipulent l'état des qubits pour effectuer des opérations de calcul. Lorsque l'état d'un qubit est mesuré, il "s'effondre" dans l'un des états 0 ou 1, avec des probabilités déterminées par les règles de la mécanique quantique.

Certains domaines d'application comprennent la factorisation d'entiers (avec des implications en cryptographie), la simulation de systèmes quantiques complexes, et l'optimisation de problèmes logistiques et combinatoires. Cependant, les ordinateurs quantiques sont encore en cours de développement, et il reste des défis importants à relever, tels que la correction d'erreurs quantiques, pour les rendre pratiques à grande échelle.

Cette perspective a ouvert de nouvelles voies de recherche en physique théorique pour comprendre la nature du temps. Récemment, avec la création d'ordinateurs quantiques, plusieurs phénomènes étranges impliquant la notion de temps ont été observés. Citons d'abord le travail réalisé par Lesovik G. B et al [37]; dans lequel il a été montré que la flèche du temps peut être inversée. En effet, il a été démontré qu'il est possible de concevoir un algorithme quantique capable d'inverser un état quantique donné. L'utilisation de cet algorithme sur un ordinateur quantique IBM permet aux scientifiques de démontrer expérimentalement une dynamique temporelle inverse pour un électron dispersé à travers une impureté à deux niveaux [15]. Un autre phénomène a fait l'objet de l'article de Dumitrescu, P.T. et al [16]. Dans ce travail, les physiciens ont créé une phase de la matière remarquable, jamais vue auparavant, en illuminant une séquence d'impulsions laser inspirée des nombres de Fibonacci sur des atomes à l'intérieur d'un ordinateur quantique. La phase présente les avantages de deux dimensions temporelles malgré qu'il n'y ait toujours qu'un seul écoulement singulier du temps.

III.2.4 Inexistence du temps !

La question de l'existence ou de l'inexistence du temps est un sujet complexe qui a été débattu par des philosophes, des scientifiques et des théologiens à travers les siècles.

La physique moderne, notamment la relativité restreinte et la relativité générale d'Albert Einstein, a radicalement changé notre compréhension du temps. Selon la relativité, le temps n'est pas absolu mais dépend du référentiel de l'observateur et de la gravité à proximité. Dans certaines situations extrêmes, comme près d'un trou noir, le temps peut sembler se comporter de manière très différente de notre expérience quotidienne.

Cependant, le temps demeure une composante fondamentale de notre expérience quotidienne, et il est utilisé comme base pour de nombreux domaines de la science et de la technologie. La question de l'inexistence du temps est souvent traitée dans le cadre de la théorie physique et de la métaphysique spéculative, et ces idées peuvent souvent être difficiles à concilier avec notre expérience quotidienne du temps.

III.3 Débats actuels et théories émergentes

Réconcilier physique quantique et relativité générale

D'après les équations d'Einstein, en effet, la concentration de la matière qui s'accumule au centre de l'astre devient telle qu'il finit par se former une singularité, un point où la densité d'énergie et la courbure de l'espace-temps deviennent infinies. Mais ces infinis ne peuvent pas avoir de réalité physique et sont au contraire le signe des limites de la théorie.

Pour aller plus loin et tenter de supprimer ce problème, la gravitation quantique à boucles stipule que l'espace lui-même est soumis aux phénomènes quantiques : de la même manière que la matière est composée d'atomes, l'espace est constitué de grains individuels, ou quantas, minuscules mais de taille finie. Ainsi, dans cette vision, l'espace ne peut pas être divisé à l'infini. Il est impossible de descendre sous la barre des 10^{-35} mètre. Et comme rien ne peut être plus petit que ce quantum d'espace, la singularité disparaît purement et simplement : au cœur du trou noir, quand la matière en effondrement sur elle-même atteint ces échelles de taille, il lui est impossible de se concentrer davantage. « Il se produit alors un changement fondamental. L'espace-temps génère en quelque sorte une force répulsive d'origine quantique qui s'oppose à l'effondrement et fait rebondir la matière

», avance Carlo Rovelli. Au cours de cette transition quantique extrêmement brève - comme celles qui s'opèrent dans le monde des particules élémentaires -, la géométrie de l'espace-temps elle-même s'inverse, permettant à la matière qui auparavant se contractait d'être désormais expulsée. C'est ainsi que les trous noirs sont amenés à devenir des trous blancs, recrachant la matière qui s'était effondrée en leur sein.

Crédible, ce scénario mis en équations par la gravité quantique à boucles donne du poids à l'existence de ces fontaines blanches. Qui plus est, il permet non seulement de régler le problème de la singularité des trous noirs mais aussi d'éliminer le fameux paradoxe de l'information posé par ces derniers et longtemps débattu par les physiciens. En effet, quand un objet tombe dans un trou noir, l'information qu'il porte avec lui semble perdue à tout jamais puisque rien en théorie ne peut ressortir d'un trou noir. Dès lors, ces ogres cosmiques constitueraient les seules régions de l'Univers où l'information n'est pas conservée. Mais si le destin d'un trou noir est de finir en trou blanc, alors le paradoxe est résolu simplement : toute l'information séquestrée par le trou noir se retrouve libérée par le trou blanc.

La gravitation quantique à boucles, développée à la fin des années 1980 par les deux physiciens Lee Smolin et Carlo Rovelli, est l'une des tentatives les plus abouties pour réconcilier la théorie de la relativité générale d'Einstein et la physique quantique. La première décrit la déformation de l'espace et du temps sous l'effet de la matière à l'échelle de l'Univers. Dans ce cadre, la géométrie, variable, de cet espace-temps détermine les mouvements de la matière qu'on interprète comme étant dus à une force gravitationnelle. La seconde explique comment les particules élémentaires interagissent à l'échelle de l'infiniment petit.

Mais la relativité générale ne dit rien des particules élémentaires, tout comme la mécanique quantique ignore totalement les étoiles et autres galaxies. Parvenir à unifier ces deux visions dans une seule et même théorie dite de « gravité quantique » constitue ainsi un des défis majeurs de la physique actuelle pour mieux comprendre le monde qui nous entoure. À commencer par les trous noirs. Dans ces astres en effet, les deux théories se trouvent forcément mêlées puisqu'à la fois le champ gravitationnel qu'ils exercent est très fort et la matière y est concentrée à l'extrême. « C'est pour cette raison que la relativité générale échoue à elle seule à répondre à une question pourtant simple : que devient la matière qui tombe au cœur d'un trou noir ? », résume Carlo Rovelli.

La théorie des cordes est une théorie physique qui postule que les particules élémentaires ne sont pas des objets ponctuels, mais plutôt des cordes vibrantes de dimension infiniment petite. Selon cette théorie, le temps n'est pas une quantité fondamentale, mais plutôt un phénomène émergent de la géométrie de l'espace-temps en tant que surface d'action des cordes. Cette perspective a ouvert de nouvelles voies de recherche en physique théorique pour comprendre la nature du temps [22].

La découverte de signaux en provenance de trous blancs serait une avancée majeure. Non seulement elle prouverait l'existence de ces astres mais, en confirmant la prédiction de la gravitation quantique à boucles, elle permettrait pour la première fois aux astronomes d'établir la nature quantique de l'espace-temps. « La recherche de ces signatures observationnelles est primordiale pour pouvoir affiner nos méthodes de calcul et construire une théorie de gravitation quantique qui décrit correctement notre Univers », souligne Etera Livine, du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon qui travaille sur les développements mathématiques de la gravitation quantique à boucles.

Cette théorie a aujourd'hui le vent en poupe par rapport à d'autres théories de gravitation quantique, comme la théorie des cordes. Car ses prédictions convaincantes ne s'arrêtent pas à l'existence des trous blancs. Il y a quelques années, cette même théorie a permis en effet de résoudre un autre problème, posé cette fois par le Big Bang. Tout comme au cœur des trous noirs, la relativité générale prédit l'apparition d'une singularité au début de l'Univers, lorsque toute la matière était concentrée dans un volume minuscule. De la même manière, la gravité quantique à boucles supprime cette singularité en décrivant comment l'Univers, d'abord en contraction, aurait rebondi avant de rentrer dans sa phase d'expansion actuelle. Là encore, les astronomes tentent de prédire les traces qu'aurait pu laisser ce grand rebond dans le fond diffus cosmologique, la première lumière de l'Univers émise 380 000 ans après le Big Bang. « Vu leurs très faibles niveaux d'intensité, de telles signatures ne seraient pas détectables par les instruments actuels. Mais nous avons bon espoir que les expériences futures pourront permettre de tester ce modèle », confie Aurélien Barrau. La gravitation quantique à boucles pourrait alors bouleverser notre vision de l'Univers.

Aujourd'hui, la "théorie des cordes" semble en passe de réussir là où toutes les précédentes théories ont échoué : ce faisant, elle bouleverse notre conception de la matière, de l'espace et du temps. C'est l'histoire pleine de rebondissements de cette révolution en

marche - où les particules élémentaires s'avèrent semblables à d'infinis bouts de ficelle, où l'espace-temps se déchire, se répare, se replie en dix dimensions invisibles, où le Big-Bang et les trous noirs prennent des formes inattendues - que nous raconte ici l'un de ses éminents acteurs.

Après la relativité générale et la mécanique quantique, l'avenir appartient-il à la "théorie des cordes" ? [22].

Dans un article de synthèse, Rovelli (2010, 2011) passe en revue les grands domaines de la physique fondamentale et indique pourquoi, de son avis, les progrès à venir (en particulier dans la voie de l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique) seront ouverts par l'acceptation de l'inexistence du temps. Cela s'entend dans le sens de l'abandon de la variable temporelle, c'est-à-dire du paramètre mathématique t dans les équations de la physique écrites au niveau le plus fondamental. Cet auteur montre qu'on peut suivre cette option en relativité générale, en mécanique quantique [46], et également en gravitation quantique à boucles, où l'on cherche à unifier ces deux dernières théories.

Ainsi, il préface son livre « L'ordre du temps », paru le 06/09/2023 : Depuis quelques années, ma recherche s'est concentrée sur les trous blancs, les petits frères des trous noirs que nous voyons par centaines dans le ciel. Je vais parler de ce qui se passe sur le bord de ces trous noirs, cette surface que l'on appelle l'horizon, où le temps semble s'arrêter et l'espace se déchirer. Puis de leurs profondeurs, où le temps et l'espace se dissolvent. Jusqu'au point où le temps se renverse. Jusqu'au point où naissent les trous blancs.

Je ne sais pas si l'hypothèse que les trous noirs se transforment en trous blancs est juste. Je ne sais même pas si les trous blancs existent vraiment, mais c'est l'idée que je veux raconter.

Julian Barbour (1999) parle de l'inexistence du temps en termes analogues (voir aussi parmi d'autres DaCosta et Sant'Anna, 2001) [23].

Conclusion

La notion du temps en physique a connu, et connaît toujours une évolution interminable depuis des siècles, à mesure que la compréhension de la physique s'est développée, passant d'une conception absolue et universelle à une conception relativiste et quantique. Cependant, des questions fondamentales sur la nature du temps restent ouvertes et continuent d'être explorées par les physiciens du monde entier.

Nous avons vu que le temps en physique n'est pas une notion unique et universelle, mais qu'il existe différentes conceptions du temps selon les théories physiques considérées :

- Le temps classique est le temps de la mécanique newtonienne, qui considère le temps comme une grandeur absolue et indépendante de la matière et de l'espace.

- Le temps relativiste est le temps évoqué par la théorie de la relativité d'Einstein, qui considère le temps comme une grandeur relative et locale, dépendant de l'état de mouvement et de la position des observateurs, ainsi que de la distribution de l'énergie et de la masse dans l'univers.

- Pour le temps quantique, relatif à la physique quantique, le temps est une grandeur discrète et probabiliste, dépendant de l'état et de l'observation des systèmes physiques, ainsi que de leur évolution selon les principes d'incertitude et de superposition.

Ces différentes conceptions du temps sont compatibles entre elles dans certaines limites ou approximations, mais elles posent aussi des problèmes ou des paradoxes quand on essaie de les unifier ou de les généraliser.

Par exemple :

- Comment concilier le caractère continu du temps relativiste avec le caractère discret du temps quantique ?

- Comment expliquer l'irréversibilité du temps quantique avec la symétrie temporelle du temps relativiste ?

- Comment définir un ordre chronologique entre des événements qui peuvent être simultanés ou non selon les référentiels ?

Ces questions constituent le pivot sur lequel tourne la recherche actuelle en physique fondamentale, qui cherchent à élaborer une théorie plus générale et plus cohérente du temps.

Parmi les pistes explorées, on peut citer :

- la théorie des cordes ;
- la gravitation quantique à boucles ;
- la géométrie non commutative.

Ces théories tentent notamment de trouver une réponse aux questions suivantes :

- Quelle est l'origine et la fin du temps ?
- Quelle est la nature et le sens de la flèche du temps ?
- Quel est le rôle du temps dans l'émergence et l'évolution de la complexité ?

Ces questions sont aussi d'ordre philosophique ou métaphysique, car elles touchent à des notions comme l'existence, la causalité ou le libre arbitre. Elles nous invitent à réfléchir sur notre rapport au temps en tant qu'êtres humains conscients et créatifs.

Elles nous montrent que la notion du temps dépasse l'aspect d'une mesure objective et universelle, et évoque une expérience subjective et singulière.

Enfin, la nature du temps est un sujet de recherche passionnant et en constante évolution. Sa notion a toujours été difficile à cerner, en dépit de l'abondance des études et des débats autour de ce sujet. Les physiciens sont arrivés à attribuer au temps un concept opératoire sans pour autant pouvoir définir exactement ce terme. Nous cherchons toujours la réponse à cette éternelle question :

En donnant l'heure, les horloges indiquent quoi au juste ?!

REFERENCES

- [1] Alleaume, R., L'intrication Quantique et l'Espace-Temps, La Recherche. Sept.21, 2021.
- [2] Barbour, J., The Nature of Time, dans Scientific American, Jul. 2018
- [3] Barrau, A., Gravitation quantique: Où on est-on?, futura-sciences.com ; 28/9/2016
- [4] Bergson, H., Durée et simultanéité
- [5] Beust, H., Gravitation-Galaxies, cours IPAG-UGA, Grenoble, Sept.23
- [6] Bobroff, J., La mécanique quantique pour les nuls, interview 23/02/2019
- [7] Bouhhal, A., العدد 02 مجلة دراسات إنسانية واجتماعية 2018, المكان والزمان في فكر أينشتاين
- [8] Bouhhal, A., إبيستمولوجيا كانط والفيزياء المعاصرة , 2016
- [9] Callender, C., The History and Philosophy of Time. The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edition 2020
- [10] Carroll M. Sean, The Arrow of Time in a Nutshell, 2017.
- [11] Damour, Th., L'écoulement du temps est une illusion
- [12] Davies, P., Le temps est une illusion? Pour La science, numéro collector, Lepommier, site: éditions-lepommier. Fr. , 2019.
- [13] Davies Paul C.W. , المفهوم الحديث للمكان والزمان
- [14] De Saint-Ours, A., La disparition du temps en gravitation quantique. In *Philosophia Scientiae*. 5 (15-3), 177-196. 2011.
- [14bis] Djenidi A., Maache M., Messelmi F. -The evolution of the concept of time in modern physics. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, Curitiba, v.4, n.1, p. 370-383, 2023
- [15] Dumitrescu, P. T., Bohnet, J. G., Gaebler, J. P. Hankin, A, Hays, D., Kumer, A., Neyenhuis, B., Vasseur, R. & Potter, A. C., Dynamical topological phase realized in a trapped-ion quantum simulator. *Nature* (607), 463-467. 2022.
- [16] Einstein, A., Zur Elektrodynamikbewegter Körper, *Annalen der Physik*, (17), 891-921. (1905).
- [17] Einstein, A.. Die Grundlage der allgemeinen Relativitäts theorie, *Annalen der Physik*, (49), 769-822, 1916.

- [18] Ellis, George F.R., Time in Cosmology, dans General Relativity and Gravitation, août 2014.
- [19] Esclangon, B.E., La notion de temps. Temps physique et Relativité. La dynamique du point matériel.
- [20] Feynman, R., The Feynman Lectures on Physics. Quantum Mechanics, Addison-Wesley, 1965.
- [21] Geraint, F. L., & Brendon, J. B., Detection of the cosmological time dilation of high-redshift quasars, Nature Astronomy, (7), 1265–1269, 2023.
- [22] GREENE, B., The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory, W.W.Norton&Company, 1999
- [23] Guy, B., Le temps : son inexistence, ses autres propriétés. hal-01286466, 2016.
- [24] Hawking, S. W., A brief history of time: From the big bang to black holes. Bantam Books, 1988.
- [25] Hawking, S. W., The Direction of Time. Proceedings of the 1974 International School of Subnuclear Physics, Erice, Italy, 1974.
- [26] Hawking, S. W., The Universe in a Nutshell, Bantam Press., 2001.
- [27] Hawking, S. W. & Ellis, G., The large scale structure of space-time, Cambridge University Press., 1973.
- [28] Heidegger, M., Le temps ordinaire se montre dans la présentification de l'aiguille qui avance, Être et Temps., 1927.
- [29] Khadraoui M., مجلة البدر, مفهوم الزمن بين الفلسفة والفيزياء , 01 العدد 10 المجلد 2017 .
- [29bis] Khadraoui M, 10 العدد. مجلة بشائر العلوم مقاربتان في محاولة لتقسيم الزمن و في تحديد مفهومه , أبريل 2024
- [30] Klein, E., Le temps de la physique, Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études transdisciplinaires, n° 12 - Février 1998
- [31] Klein E. - Qu'est-ce que le temps, Bayard, Paris, 2019.
- [32] Klein E. - Les tactiques de Chronos, Flammarion, Paris, 2004.

- [33] Lachieze-Rey M. - L'espace-temps ce n'est pas de l'espace et du temps, 2015.
- [34] Ladj R. & Khadraoui M., Epistemological and educational study of the time's concept and how to the university students understand it. Case of Algerian students. Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 12, No.4, Dec. 2018.
- [35] Lesovik, G. B., Sadovskyy, I. A., Suslov, M. V., Lebedev, A. V. & Vinokur, V. M., Arrow of time and its reversal on the IBM quantum computer, Scientific Reports volume 9, 4396. 2019.
- [36] Le temps, voyage aux frontières de la physique. La Recherche hors-série , <https://www.larecherche.fr/parution/dossiers-20>, 2017.
- [37] Matthew F. - Why does time go forward?, Symmetry Magazine, avril 2019.
- [38] Mermin, D., The Concept of Time in Physics. Nature 135, 203-205. 1935
- [39] Muller R. - Time Travel in Physics, Physics Today, janvier 2016
- [40] Paty, M., Réflexions sur le concept de temps, Revista de Filosofía, Madrid, 25(1) ,53-92, 2001.
- [41] Penrose Roger - Le temps, un éternel recommencement. La Recherche, interview. PRICE Huw - The Flow of Time, Nature, avril 2016
- [42] Reignier, J.. Réflexions sur l'espace et le temps, en physique classique et quantique, Annales Fondation Louis de Broglie, (29), 2004.
- [43] Robertson, H.P., Kinematics and World-Structure, Astrophysical Journal, (82), 284; 1935.
- [44] Rouaud, M., Einstein's Elevator: World Lines, Michelson-Morley Experiment and Relativistic Paradox, Physics, 4(3), 892-911, 2022.
- [45] Rovelli, C., The Emergence of Time in Quantum Gravity. Scientific American, 2018
- [46] Rovelli C. - La naissance de la pensée physique, Dunod, 2023.
- [47] Saint Augustin Traduit par Robert A. D., Les Confessions, XI, 14, Flammarion Gf ; Edition Avec Dossier, 2020.
- [48] Simchi, H., The Concept of Time: A Grand Unified Reaction Platform. Journal of Modern Physics, (13), 206-224, 2022.

[49] Sinatra A. – Introduction à la Mécanique quantique, cours, 2008.

[50] Watanabe Satosi - Le concept de temps en physique moderne et la durée pure de Bergson
- Revue de Métaphysique et de Morale, 56e Année, No. 2, pp. 128-142. Presses Univ. de
France, Avril-Juin 1951

[51] Zewail A. H., Time (Al Zaman, in Arabic), Book Series, Dar Al Shorouk, Cairo, 2007.