



Aventures CosmoVerse

L'expansion de l'univers: Le décalage vers le rouge cosmique



En classe

Introduction: l'effet Doppler



Professeur :

Bonjour, chers élèves ! Aujourd'hui, j'ai une petite surprise pour vous. Je veux que vous fermiez les yeux et que vous écoutiez attentivement.

[Le son de la sirène d'une ambulance qui roule à vive allure, qui s'approche, puis s'éloigne]



Professeur :

Très bien, ouvrez les yeux. Est-ce que quelqu'un peut décrire ce qu'il vient d'entendre ?



Élève 1 :

On aurait dit une sirène d'ambulance, mais la tonalité changeait au fur et à mesure qu'elle passait.



Élève 2 :

Oui, ça commençait par des aigus et ça devenait de plus en plus grave au fur et à mesure qu'elle s'éloignait.



Professeur :

Exactement ! Mais saviez-vous que la tonalité de la sirène de l'ambulance elle-même n'a jamais changé ? Ce que tu as entendu, c'est un décalage perçu du son dû à l'effet Doppler.



Élève 3 :

Quel effet ?



Professeur :

L'effet Doppler ! Il est défini comme le changement apparent de fréquence d'une onde causé par le mouvement relatif entre la source de l'onde et l'observateur. Lorsque l'objet émettant l'onde se rapproche de l'observateur, les ondes se regroupent, ce qui entraîne une fréquence plus élevée. Lorsqu'il s'éloigne, les ondes s'étirent, d'où une fréquence plus basse.



Élève 4 :

C'est donc pour cela que le son de la sirène de l'ambulance a semblé se modifier lorsqu'elle est passée près de nous ?

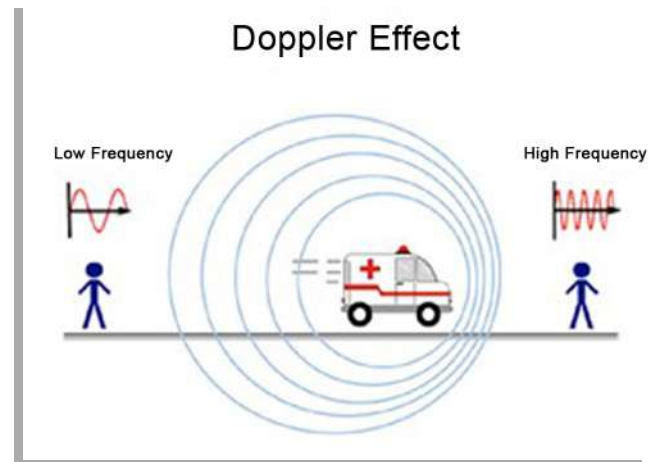


Figure 1: Comment les fréquences des ondes sonores sont affectées (et perçues) lorsqu'une sirène s'approche ou s'éloigne d'un individu.



Professeur :

Tout à fait ! Voici une façon plus simple de se représenter la chose. Imaginez un insecte dans une flaque d'eau. Chaque fois que l'insecte bouge ses bras et ses jambes, il fait des vagues. Si l'insecte reste immobile, les vagues s'étendent uniformément. Mais si l'insecte bouge, les vagues se regroupent dans la direction où il se déplace et s'étalent dans la direction opposée. C'est l'effet Doppler !



Élève 3 :

C'est super ! Mais pourquoi est-ce important?



Professeur :

Excellente question ! L'effet Doppler ne concerne pas seulement les ambulances. Il a de nombreuses applications. Par exemple, la police utilise des radars pour déterminer la vitesse des véhicules en mouvement. Ils envoient des fréquences micro-ondes qui rebondissent sur les voitures. Lorsque ces fréquences reviennent, elles peuvent être différentes en raison du mouvement de la voiture. Cette différence permet de déterminer la vitesse du véhicule.



Élève 2 :

Ils utilisent donc l'effet Doppler pour donner des contraventions pour excès de vitesse?



Professeur :

Exactement ! Et voici un fait amusant : pour une lecture plus précise, les policiers doivent se tenir face à un véhicule arrivant sur eux. S'ils se placent sur le côté, ils peuvent obtenir une vitesse légèrement différente parce que le véhicule ne se déplace pas exactement vers le radar.



Professeur :

L'effet Doppler a également des applications médicales puisqu'il est utilisé dans les échocardiographies pour évaluer la vitesse et la direction du flux sanguin.



Élève 2 :

Attendez un peu ! Le son n'est qu'une onde, n'est-ce pas ? Cela signifie-t-il que l'effet Doppler s'applique également à la lumière?



Professeur :

Brillante observation ! Oui, c'est vrai. Et c'est là que les choses deviennent cosmiquement intéressantes. Pour bien comprendre ce qui se passe avec la lumière, tu dois rejoindre Quark sur son vaisseau spatial de l'imagination. Prêt pour une aventure interstellaire?



Élèves :

Oui!!!



Le vaisseau spatial de l'imagination

Le décalage vers le rouge cosmique

[Bruit d'un moteur de voiture qui passe en trombe]



Quark :

Regardez en bas ! Nous sommes en vol stationnaire au-dessus d'une autoroute. Tu vois cette voiture bruyante ?

[Sound of a car engine revving and zooming past]



Élève 1 :

Oui ! Comme l'ambulance en classe. Au fur et à mesure qu'elle s'approche, le ton monte et dès qu'elle s'éloigne, le ton baisse.



Quark :

Exactement! C'est l'effet Doppler en action. Et si je te disais que la même chose se produit avec la lumière ? Voici le « Luminoscope ».

[Bruit d'un appareil qui s'enclenche]



Élève 1 :

Whoa! Mes yeux... Tout ce que je vois semble si éclatant.



Quark :

Le Luminoscope augmente la sensibilité de vos yeux à la lumière. Regardez la voiture maintenant.



Élève 3 :

Elle est... légèrement bleue quand elle vient vers nous et devient légèrement rouge quand elle s'éloigne!



Quark :

C'est vrai ! Tout comme les ondes sonores, les ondes lumineuses peuvent être comprimées et étirées. Cela modifie la couleur de la lumière. Maintenant, regarde ce magnifique arc-en-ciel.



Quark :

Chaque couleur que vous voyez représente une fréquence différente dans le spectre électromagnétique. Le bleu a une fréquence plus élevée, tandis que le rouge a une fréquence plus basse.



Figure 2: Manière avec laquelle les fréquences des ondes lumineuses (couleurs) sont affectées lorsqu'une voiture s'approche ou s'éloigne d'un individu. Source: documentaire de Discovery Channel « Into the universe ».

Lorsque quelque chose dans l'espace se rapproche de nous, nous observons un décalage vers le bleu. Mais lorsqu'il s'éloigne, nous observons un décalage vers le rouge.

 **Élève 3 :**

Donc, les galaxies qui s'éloignent de nous apparaissent... rouges ?

 **Quark :**

Exactement ! Voyageons à travers l'univers.

[Vrombissement des moteurs du vaisseau spatial, des étoiles filent à toute allure]

 **Quark :**

Où que l'on regarde, la plupart des galaxies semblent décalées vers le rouge. Cette observation, faite pour la première fois par Edwin Hubble, indique qu'elles s'éloignent de nous. Plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne rapidement. Cela nous indique que notre univers est en expansion, comme nous l'avons appris au cours de nos précédentes aventures.

 **Élève 3 :**

Mais... attendez. Là-bas ! Cette galaxie n'est pas rouge. Elle est bleue!

 **Quark :**

Ah, la galaxie d'Andromède, notre voisine galactique. Alors que la plupart des galaxies lointaines s'éloignent en raison de l'expansion de l'univers, les galaxies voisines comme Andromède, liées par la gravité, peuvent se rapprocher de nous, de sorte que sa vitesse de chute vers nous est supérieure à la vitesse d'expansion de l'univers, d'où le décalage vers le bleu.

 **Élève 1 :**

Que se passera-t-il dans le futur?

 **Quark :**

Dans environ cinq à sept milliards d'années, Andromède entrera en collision avec notre Voie lactée. Imaginez deux majestueux danseurs, qui tournent en spirale et virevoltent, leurs étoiles s'entre-croisant mais se touchant rarement. Un ballet cosmique de lumière et de gravité. Cette danse titanesque donnera naissance à une nouvelle galaxie, union de deux grandes entités cosmiques.

 **Élève 4 :**

C'est si fascinant... Mais comment les scientifiques ont-ils pu voir ces couleurs sans le Luminoscope?

 **Quark :**

Excellente question ! Pour le savoir, il faut rencontrer les brillants cerveaux qui sont à l'origine de ce que l'on appelle la spectroscopie!

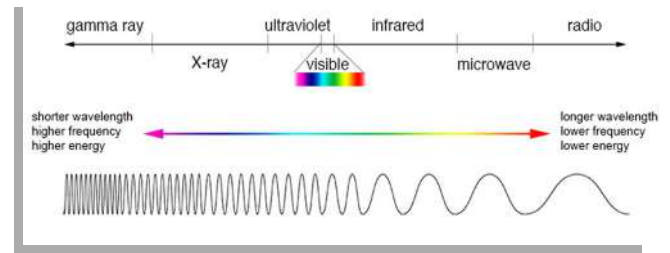


Figure 3: Comparaison de la longueur d'onde, de la fréquence et de l'énergie du spectre électromagnétique. (Source : Imagine the Universe de la NASA)

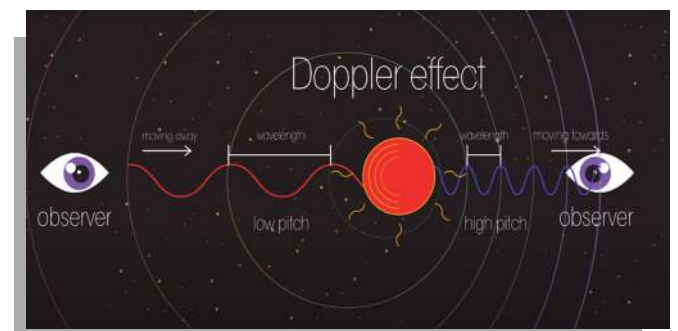


Figure 4: L'effet Doppler en action. Source: Bing Rijper.



Rencontre avec un chercheur

Spectroscopie et décalage vers le rouge cosmique



Quark :

Bienvenue dans la salle des esprits brillants, où nous rencontrons les plus grands scientifiques de tous les temps ! Aujourd'hui, nous avons deux invités très spéciaux : Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff, les pionniers de la spectroscopie!



Bunsen :

Bonjour, jeunes explorateurs!



Kirchhoff :

C'est un plaisir de vous rencontrer.



Élève 1 :

Messieurs, nous avons appris ce qu'est le décalage vers le rouge et nous sommes curieux de savoir comment les scientifiques ont réussi à voir l'effet de décalage vers le rouge.



Bunsen :

Ah, une question brillante ! Pour comprendre cela, il faut d'abord se plonger dans la structure atomique. Les atomes sont les éléments constitutifs de la matière, composés de protons, de neutrons et d'électrons.



Kirchhoff :

Oui, et tandis que les protons et les neutrons restent dans le noyau, les électrons se déplacent autour d'eux. Mais ils ne se déplacent pas n'importe où. Ils existent dans des états d'énergie très spécifiques, un peu comme les marches d'un escalier.



Élève 2 :

Les électrons peuvent donc se déplacer entre ces marches?

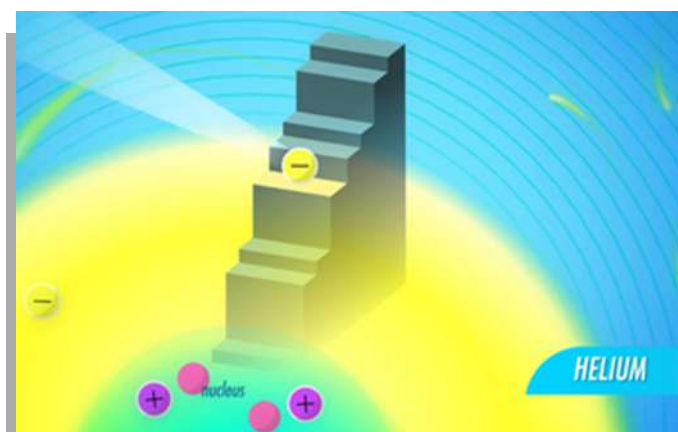
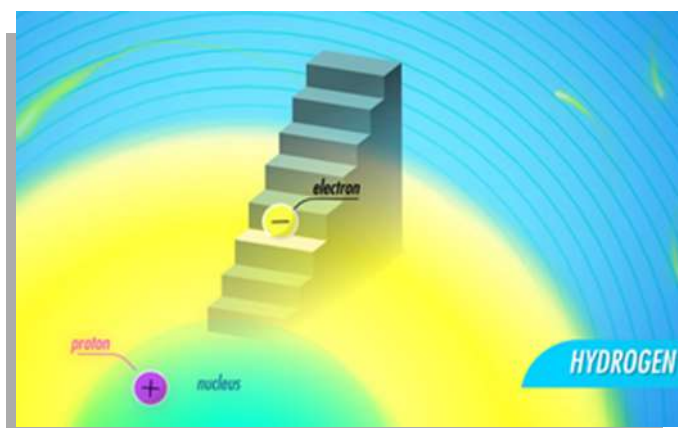


Figure 5: Analogie de la structure atomique de l'hydrogène et de l'hélium avec celle d'un escalier. Source: PBS Digital Studios.



Bunsen :

Précisément ! Mais pour cela, ils ont besoin d'une quantité exacte d'énergie. La lumière fournit cette énergie. Si la lumière a la bonne quantité d'énergie, un électron l'absorbera et passera à la marche supérieure.



Élève 3 :

Et que se passe-t-il quand il redescend?



Kirchhoff :

Il émet une lumière d'une couleur ou d'une énergie spécifique. Les atomes ont des marches différentes, donc ils émettent des couleurs différentes.



Quark :

Cette capacité à déterminer les couleurs émises par les différents éléments est la base de la spectroscopie!



Élève 4 :

Mais quel est le rapport avec le décalage vers le rouge?



Bunsen :

Pour comprendre cela, il faut comprendre les spectres d'absorption. Chaque substance chimique possède un ensemble unique de couleurs appelé raies spectrales. Lorsque la lumière provenant d'objets célestes, comme notre Soleil, atteint la Terre, elle n'arrive pas uniformément. Certaines longueurs d'onde ou couleurs sont manquantes.



Kirchhoff :

C'est exact. Ces longueurs d'onde manquantes se manifestent par des lignes sombres sur le spectre. Ce schéma de lignes sombres est unique pour chaque élément, comme une empreinte digitale.



Élève 2 :

Ces raies sombres nous renseignent donc sur la composition de l'étoile?



Bunsen :

Tout à fait ! Par exemple, notre Soleil émet de la lumière dans différentes longueurs d'onde. Mais en raison des éléments qu'il contient, comme l'hydrogène, certaines longueurs d'onde spécifiques sont absorbées. C'est ce qui explique les raies sombres caractéristiques du spectre du Soleil.



Élève 3 :

Quel est le rapport avec les autres étoiles ou galaxies?



Kirchhoff :

Excellente question ! Prenons l'exemple de l'hydrogène, qui est abondant dans notre Soleil. L'hydrogène émet des longueurs d'onde très spécifiques. Sur Terre, lorsque nous observons le Soleil, nous voyons ces longueurs d'onde spécifiques. Mais lorsque nous observons des galaxies lointaines, dont les étoiles sont également composées d'hydrogène, nous remarquons quelque chose de particulier.



Élève 3 :

Les longueurs d'onde sont décalées?



Bunsen :

Exactement ! Par exemple, si l'on compare le spectre de l'hydrogène de notre Soleil à celui d'une étoile lointaine, on constate que les raies sont les mêmes, mais qu'elles sont décalées vers le rouge sur le spectre de l'étoile lointaine.



Élève 3 :

L'hydrogène de cette galaxie lointaine émet donc la même lumière, mais lorsqu'elle nous parvient, elle est décalée vers le rouge?



Kirchhoff :

Précisément. La clé est le mouvement et l'expansion de l'espace. Lorsque la lumière parcourt de grandes distances cosmiques, l'expansion de l'univers étire ses longueurs d'onde, ce qui les rend plus longues et donc plus rouges.

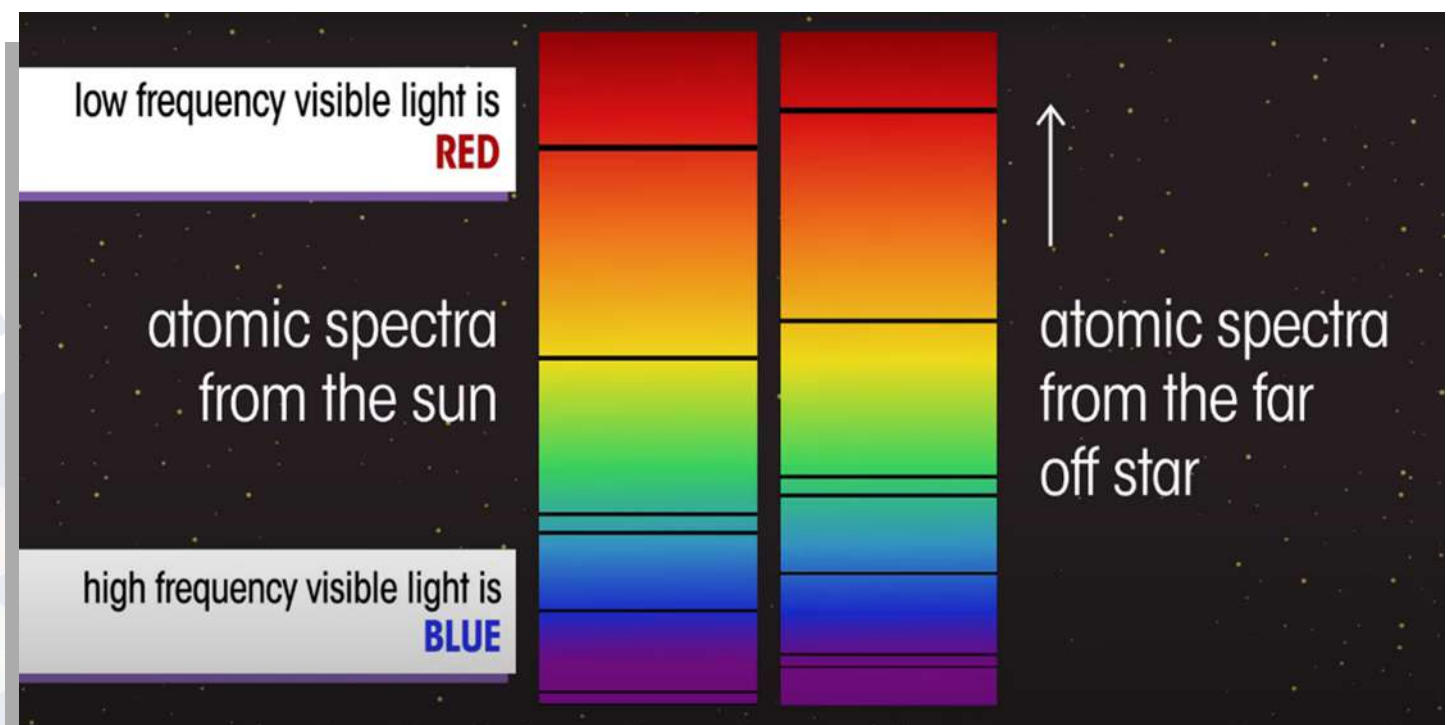


Figure 6: Spectre atomique du Soleil et spectre atomique d'une étoile lointaine. Source: Bing Rijper.

Élève 4 :

C'est comme si l'univers nous racontait son histoire à travers ces lignes spectrales!

Élève 1 :

C'est fascinant ! Mais comment avez-vous mesuré ces couleurs avec précision?

Bunsen :

Nous avons utilisé un outil appelé spectromètre, qui permet de distinguer et de mesurer les couleurs spécifiques ou les longueurs d'onde émises ou absorbées par les atomes. En attachant un spectromètre à un télescope, on peut déterminer la composition d'étoiles, de galaxies et de nébuleuses lointaines.

Élève 4 :

Avec la spectroscopie, on peut donc « goûter » l'univers?

Kirchhoff :

C'est une belle façon de le dire ! Oui, nous pouvons en effet goûter la boulangerie cosmique et savourer ses différentes saveurs.

Bunsen :

Rappelez-vous que l'univers parle en couleurs et en longueurs d'onde. Avec les bons outils et de la curiosité, vous pouvez écouter et décoder ses histoires.

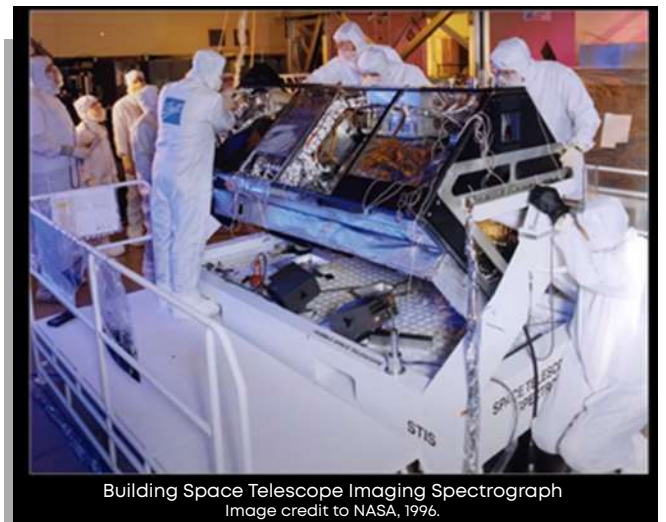


Figure 7: Construction du spectrographe imageur du télescope spatial. Source: NASA, 1996.





Activité: Un spectromètre simplifié



Objectif :

Construire un spectromètre simplifié en utilisant du matériel commun pour observer différentes sources lumineuses. Inspiré de [Exploratorium](#).



Temps de préparation : 10 minutes



Temps pour l'activité : 45 minutes



Matériel nécessaire :

- Un disque compact (CD)
- Un tube en carton d'au moins 30 centimètres de long et de 7.5 à 10 centimètre de diamètre
- Deux couvercles pour le tube en carton. Cela peut être soit deux morceaux de carton assez grands pour couvrir chaque extrémité du tube, soit les couvercles plastique qui viennent avec un tube d'expédition en carton.
- Scalpel de bricolage
- Bande adhésive
- Accès à une lumière fluorescente
- Scie
- Guide de découpe (fait pour un tube de 3 pouces) - voir PDF [inclut](#)
- Accès à une imprimante



Procédure :

- Imprimer le guide de découpe et l'enrouler autour d'une extrémité du tube, le fixer avec le ruban adhésif. Modifier si nécessaire l'échelle du guide pour qu'il fasse tout le tour du tube sans se chevaucher (le document fourni est à l'échelle d'un tube de 3 pouces de diamètre) (voir figure 8).
- Utiliser la scie pour couper le tube en diagonale comme indiqué sur le guide de découpe. La découpe fera pencher le CD à un angle approximatif de 30° à partir de l'extrémité du tube (voir figure 9).



Figure 8.



Figure 9.

- Utiliser le scalpel pour découper une fenêtre d'observation (le carré noir sur le guide de découpe). Enlever à présent le guide de découpe (voir figure 10).

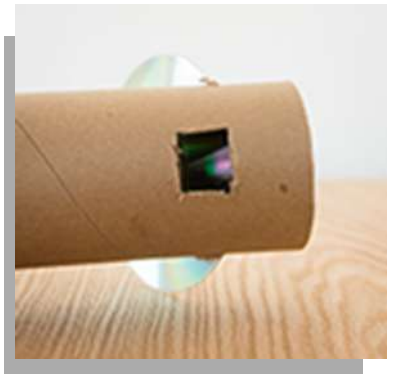


Figure 10.

- Ensuite, couper une fente nette de moins de 1 mm de large et moins de 5 cm de long dans un des couvercles du tube. Attacher le couvercle avec la fente (avec du ruban adhésif si c'est un morceau de carton) sur l'extrémité opposée à la fente pour le CD. Tenir le tube comme indiqué sur la figure 11, la fente doit se trouver en position horizontale.
- Attacher le second couvercle à l'autre extrémité du tube, derrière le CD, pour éviter toute lumière parasite.
- Insérer le CD dans la fente diagonale pour qu'il reflète la lumière de la fente nette jusqu'à la fenêtre d'observation (voir figure 11).



Figure 11.

⚠ Remarques :

- Placer le tube en position verticale avec le fenêtre d'observation en bas, devant vous, et la fente nette en haut avec la source lumineuse en dessus.
- Presser votre œil devant la fenêtre d'observation.
- Cherchez à voir, sur le CD, une ligne lumineuse nette, divisée en bandes colorées : c'est le spectre lumineux de la lumière fluorescente réfléchi sur le CD.
- Ajuster votre angle d'observation pour trouver la meilleure position pour l'observation du spectre lumineux.
- Expérimenter le tube avec diverses sources lumineuses (par exemple: ampoule à incandescence, LED, lumière du soleil par la fenêtre, etc.) et observer les différents spectres.



Observations et discussion:



Professeur :

Maintenant que nous avons observé le spectre d'une lampe fluorescente, quelles différences avez-vous remarqué lorsque vous avez pointé le spectromètre sur d'autres sources lumineuses?



Élève 1 :

Le spectre de l'ampoule à incandescence semblait plus chaud, avec plus de rouges et de jaunes.



Professeur :

Exactement ! Les ampoules à incandescence émettent de la lumière en chauffant un filament métallique, ce qui donne un spectre de couleurs plus chaudes. Qu'en est-il des ampoules LED?



Élève 2 :

J'ai remarqué qu'il y avait plus de bandes bleues et vertes dans le spectre en observant la lumière des LED.



Professeur :

C'est une excellente observation ! Les lampes LED fonctionnent différemment et ont souvent un spectre de couleurs plus froid. Et qu'as-tu observé avec la lumière du soleil?



Élève 3 :

La lumière du soleil m'a semblé la plus équilibrée. J'ai pu voir une large gamme de couleurs allant du rouge au violet.



Professeur :

La lumière du soleil, ou lumière naturelle, est souvent considérée comme une « lumière blanche » parce qu'elle contient un spectre équilibré de couleurs. Grâce à notre spectromètre, nous pouvons décomposer cette lumière et en voir les différentes composantes.



Élève 4 :

C'est incroyable que des sources de lumière différentes puissent avoir des spectres aussi variés!



Professeur :

En effet ! Et tout comme nous avons observé ces différences sur Terre, les astronomes utilisent des principes similaires pour étudier la lumière des étoiles et des galaxies, ce qui nous aide à décoder les mystères de l'univers.

Conclusion :

Professeur :

Avant de conclure ce que nous avons appris aujourd'hui, quelqu'un peut-il me dire (voir figure 12) quelle est la position de la galaxie A dans le graphique « Vitesse de la galaxie en fonction de la distance » et pourquoi elle est positionnée là par rapport aux autres galaxies?

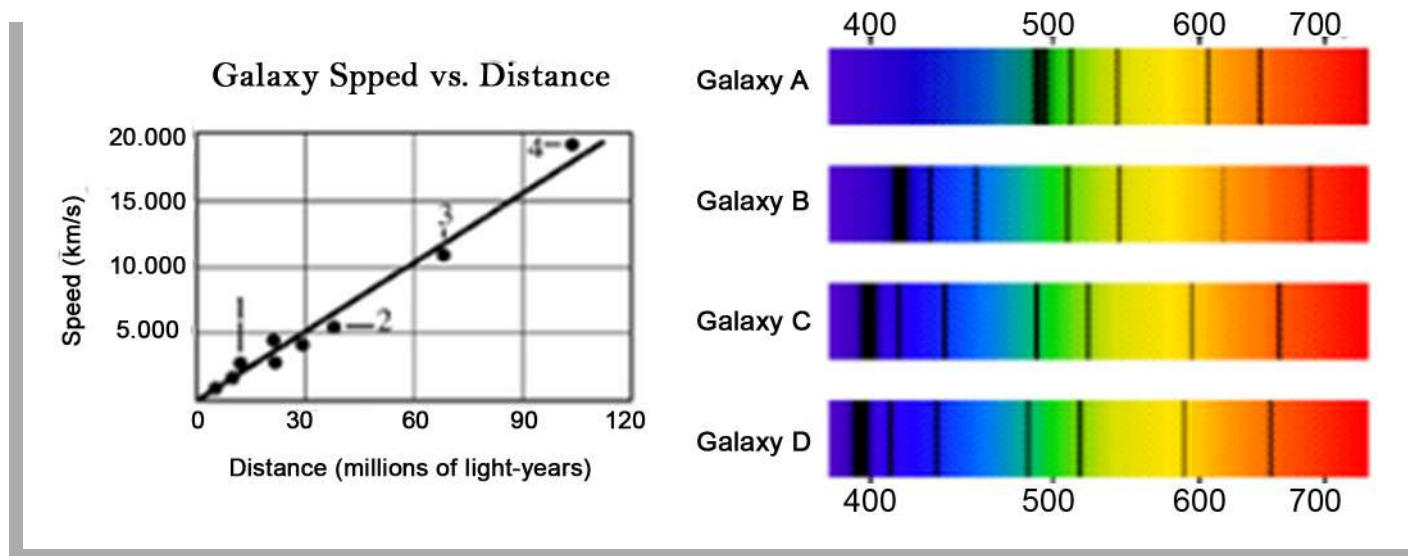


Figure 12.

Élève 1 :

La bonne réponse est : La galaxie A serait à l'emplacement n°4. La galaxie A est la plus « décalée vers le rouge » parce que les bandes d'absorption noires du spectre sont situées plus vers l'extrémité rouge du spectre par rapport aux autres galaxies. Par conséquent, la galaxie A est celle qui s'éloigne le plus de la Terre.

Professeur :

Bravo, élève 1 ! Aujourd'hui, dans notre aventure CosmoVerse, nous avons quitté les sons familiers de la salle de classe pour nous rendre dans le vaste cosmos et découvrir les mystères du décalage vers le rouge cosmique. Guidés par le vaisseau spatial de l'imagination de Quark et la lucidité de Bunsen et Kirchhoff, nous avons exploré l'effet Doppler, la danse des électrons en spectroscopie et les signatures lumineuses uniques des galaxies. Grâce à l'observation et à l'expérimentation pratique, nous avons constaté que même dans l'immensité de l'univers, avec de la curiosité et les bons outils, nous pouvons déchiffrer ses secrets les plus complexes.



Bibliothèque cosmique (en anglais)



Videos :

[How the Doppler effect works](#)

[What is Doppler Effect? Ambulance siren and Police Radar Gun](#)

[What is REDSHIFT?](#)

[Red shift | Astrophysics](#)

[Doppler Effect, Red Shift & The Big Bang Theory](#)

[GCSE Physics - What is Red Shift?](#)

[Red shift | Scale of the universe Khan Academy](#)

[Light: Crash Course Astronomy](#)

[Introduction to spectroscopy | Khan Academy](#)

[Spectroscopy, Explained](#)

[Redshift: Motion and colour](#)



Interactive :

[Analyzing Light: Spectrum of the Star Altair](#)

[Cosmological RedShift Simulator](#)

[Readymag: Redshift](#)



Website :

[Spectroscopy: Reading the Rainbow](#)

[Spacebook: Redshift](#)



Documentaries :

[Journey to the Edge of the Universe](#)

[Everything and Nothing](#)

[Atom: Clash of Titans](#)



Articles :

[What is cosmological redshift?](#)

[ESA: What is 'red shift'?](#)



Infographics

[What is Cosmological RedShift?](#)

Glossaire

Effet Doppler: Changement de fréquence ou de longueur d'onde d'une onde concernant un observateur, dû au mouvement relatif entre la source de l'onde et l'observateur.

Décalage vers le bleu: Diminution de la longueur d'onde de la lumière émise par un corps céleste en approche, indiquant un mouvement vers l'observateur.

Décalage vers le rouge cosmique: Déplacement de la lumière des objets célestes vers l'extrémité rouge du spectre, indiquant que l'objet s'éloigne de l'observateur.

Spectre électromagnétique: Toute la gamme des longueurs d'onde ou des fréquences du rayonnement électromagnétique, y compris les ondes radio, les micro-ondes, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma.

Spectre d'absorption: Gamme de longueurs d'onde (ou de couleurs) de la lumière qu'une substance absorbe. Elle apparaît sous forme de lignes sombres sur un spectre continu.

Spectre d'émission: Gamme de longueurs d'onde (ou de couleurs) de la lumière émise par une substance.

Mécanique quantique: Théorie fondamentale de la physique qui décrit le comportement de la matière et de l'énergie à l'échelle des atomes et des particules subatomiques.

Spectromètre: Appareil utilisé pour mesurer les propriétés de la lumière sur une partie spécifique du spectre électromagnétique.

Spectroscopie: Étude des interactions entre la matière et le rayonnement électromagnétique, souvent utilisée pour déterminer la composition des matériaux.



This article/publication is based upon work from COST Action CA21136 – “Addressing observational tensions in cosmology with systematics and fundamental physics (CosmoVerse)”, supported by COST (European Cooperation in Science and Technology)

COST (European Cooperation in Science and Technology) is a funding agency for research and innovation networks. Our Actions help connect research initiatives across Europe and enable scientists to grow their ideas by sharing them with their peers. This boosts their research, career and innovation.

www.cost.eu

