

LA COSMOLOGIE ET LA RELATIVITE GENERALE AU SECONDAIRE II AU SERVICE DE LA MOTIVATION DES ELEVES POUR LA PHYSIQUE

Alice Gasparini, Andreas Müller et Laura Weiss

Université de Genève

À l'occasion du centenaire de la relativité générale (novembre 2015), le pôle national de recherche SwissMAP (« The Mathematics of Physics ») a lancé un projet pédagogique visant à introduire auprès des élèves des écoles secondaires (collèges, gymnases, lycées) les notions de base de la relativité générale et de la cosmologie moderne. Ce projet a abouti à un cours et un livre (Gasparini & Müller, 2017, Gasparini, 2018) dont l'originalité est celle d'avoir un niveau de transposition se situant entre le « zéro équations » adressé au large public et la géométrie tensorielle réservée aux spécialistes universitaires : il se base uniquement sur les notions de mathématiques et physique enseignées au secondaire postobligatoire.

Le but de ce projet est donc avant tout de donner une idée aux élèves de certains sujets à la pointe de la recherche contemporaine en physique, tout en consolidant certaines connaissances acquises dans les cours de physique scolaire (comme la mécanique newtonienne, l'optique géométrique, l'électrostatique). Ce choix répond entre autres aux résultats de l'étude « Relevance of Science Education » (ROSE) qui prouve que de manière générale et dans des nombreux pays, les élèves montrent un intérêt significativement plus prononcé pour les sujets liés à l'astrophysique et à la physique des phénomènes extrêmes – les trous noirs et l'évolution de univers (Sjøberg & Schreiner, 2007 ; Sjøberg & Schreiner, 2010 ; Lelliott & Rollnick, 2010 ; Baram-Tsabari & Yarden, 2012) – qu'aux thèmes traditionnellement enseignés en classe. En outre des études montrent que les élèves qui ont suivi des cours traitant des sujets de physique moderne, en plus du cursus standard, améliorent leur apprentissage des contenus comme la physique newtonienne ou l'électrostatique (Baumert et al., 1998). Par ailleurs Levrini et Fantini (2013) soulignent comment l'excès de simplification, dans le but de rendre un sujet plus accessible, peut avoir des effets négatifs pour la compréhension des élèves. Par conséquent, dans la construction du cours de cosmologie et relativité générale, notre but a été de simplifier les notions au niveau mathématique tout en maintenant un niveau conceptuel relativement élevé par rapport au public visé.

La création de ce cours (puis du livre qui l'a repris et amplifié (Gasparini, 2018)) a eu la chance de s'étendre sur trois années exceptionnelles pour la cosmologie moderne avec en particulier la première détection historique des ondes gravitationnelles. Ce cours peut être dispensé dans sa version intégrale, telle que présentée dans le livre, sur deux semestres à raison de 2 périodes par semaine, par exemple dans le cadre d'un cours d'option complémentaire (OC PY) du collège genevois. Mais il constitue également une « boîte à outils », où les contenus et/ou les exercices peuvent être choisis de manière ponctuelle, et insérés selon le niveau dans un cours de discipline fondamentale (DF PY), ou encore d'option spécifique de physique et application des mathématiques (OS PY-AM). Il comprend 9 chapitres, allant de l'introduction à l'astrophysique jusqu'aux ondes gravitationnelles, en passant par l'effet de lentille gravitationnelle, les trous noirs et les équations cosmologiques. Sept annexes le complètent afin d'intégrer et/ou d'approfondir les notions complémentaires dont l'élève pourrait avoir besoin pour une compréhension aisée du sujet principal. Chaque chapitre possède une série d'exercices y relatifs avec leur correctif, documents librement disponibles sur le site SwissMAP.

Le niveau des exercices et des notions varie selon les chapitres :

- dans les premières séries, on trouve des activités ne demandant pas de connaissances préalables spécifiques en physique et faisant travailler les élèves sur des notions comme les transformations

- d'unités, les ordres de grandeurs ou la proportionnalité, évidemment en lien avec l'astrophysique ;
- dans toutes les séries, la plupart des exercices et des activités se base sur les contenus de mécanique, d'ondes, d'électricité et de chaleur du curriculum DF PY ;
 - une partie des exercices des séries relatives aux derniers chapitres demandent des connaissances plus spécifiques en mathématiques des 3^{ème} et 4^{ème} années, comme l'intégration et la dérivation des fonctions ;
 - quelques exercices demandent des connaissances simples en programmation numérique et applications mathématiques.

De plus, les sujets traités constituent une base idéale pour le développement de travaux de maturité.

EXEMPLE DE PARCOURS THÉMATIQUE : EFFET DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE

Nous présentons ici, en tant qu'exemple d'application remarquable des idées à la base de la relativité générale, l'effet de lentille gravitationnelle. Ce sujet, introduit au chapitre 5, a le double intérêt de permettre aux élèves de comprendre les effets de la gravitation en particulier la déformation de l'espace-temps et la déviation de la lumière et de découvrir un phénomène utilisé aujourd'hui dans l'exploration de l'univers car il permet de détecter la présence de la matière noire, insensible à l'interaction électromagnétique et donc « invisible » par les télescopes. Le parcours thématique débute par les notions de courbure traitées au chapitre 4, puis continue avec les approches simplifiées du chapitre 5 et se termine, si les élèves ont un niveau mathématique suffisant, avec le calcul du profil de la lentille optique équivalente. Le nombre de séances investies dépend fortement du niveau et de la motivation du groupe d'élèves à qui le cours est destiné. L'analogie optique permet de visualiser le phénomène avec une lentille en forme de pied de verre à vin, ce qui apporte à ce cours – globalement théorique et mathématisé – une représentation concrète.

La courbure de Gauss

Le chapitre 4 introduit les notions de courbure de Gauss en un point et de courbure totale d'une surface¹ à deux dimensions et vise à familiariser l'élève avec propriétés des surfaces courbes, en particulier avec le comportement des géodésiques parallèles.

¹ En relativité générale, la notion de *surface* s'étend à tout espace de dimension supérieure à deux.

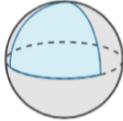
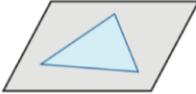
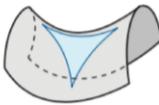
Courbure	positive	nulle	négative
Exemple d'espace 2D	sphère 	plan 	selle 
Propriété	fermé	euclidien	ouvert
Géodésiques parallèles	convergent	ne se croisent jamais	divergent
Périmètre du cercle de rayon r	$< 2\pi r$	$= 2\pi r$	$> 2\pi r$
Surface de la sphère de rayon r	$< 4\pi r^2$	$= 4\pi r^2$	$> 4\pi r^2$
Volume de la sphère de rayon r	$< \frac{4}{3}\pi r^3$	$= \frac{4}{3}\pi r^3$	$> \frac{4}{3}\pi r^3$
Somme des angles du triangle	$> 180^\circ$	$= 180^\circ$	$< 180^\circ$

Fig. 1 : Tableau récapitulatif des propriétés des espaces courbes. Crédit : Gasparini A. (2018)

Une attention particulière est prêtée à la surface représentant le potentiel gravitationnel d'une concentration de masse/énergie à symétrie sphérique, où la courbure est positive dans la partie centrale (en jaune dans la figure ci-dessous) et négative dans la zone périphérique (verte dans la figure ci-dessous). Les élèves peuvent constater par eux-mêmes cette propriété à l'aide d'un plastique représentant la forme du potentiel et d'un ruban coloré : deux géodésiques parallèles divergent si elles passent dans la zone à courbure négative, elles convergent si elles passent dans la zone à courbure positive.

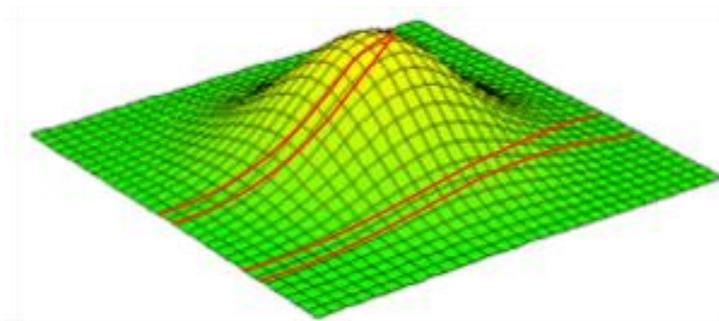


Fig. 2 : Le potentiel gravitationnel d'une concentration de masse/énergie à symétrie sphérique dans un espace bidimensionnel. Les géodésiques parallèles divergent là où la courbure est négative, convergent là où elle est positive. Crédit : Gasparini A. (2018)

La relativité générale d'Einstein a introduit l'idée que la présence de masse/énergie déforme l'espace-temps et dévie la lumière. Par analogie avec l'effet des lentilles optiques, on nomme « lentille gravitationnelle » une concentration de masse (par exemple une galaxie, un trou noir ou une étoile massive) qui a pour effet de dévier la lumière. Dans le chapitre sur l'effet de lentille gravitationnelle, la

question est donc de trouver l'expression de l'angle de déviation α de la trajectoire d'un rayon de lumière passant près d'une masse *grave*².

Approches simplifiées

Ce problème peut être abordé avec des collégiens de plusieurs manières. Le premier exercice de la série 5 utilise l'analyse dimensionnelle et permet de trouver la formule de α de manière simple, sans facteur numérique. Pour résoudre l'exercice, les élèves sont invités à schématiser la situation : un rayon de lumière provenant d'une source lointaine s'approche d'une masse M , sa trajectoire est déviée par la présence de la masse. De quels paramètres peut dépendre cette déviation ?

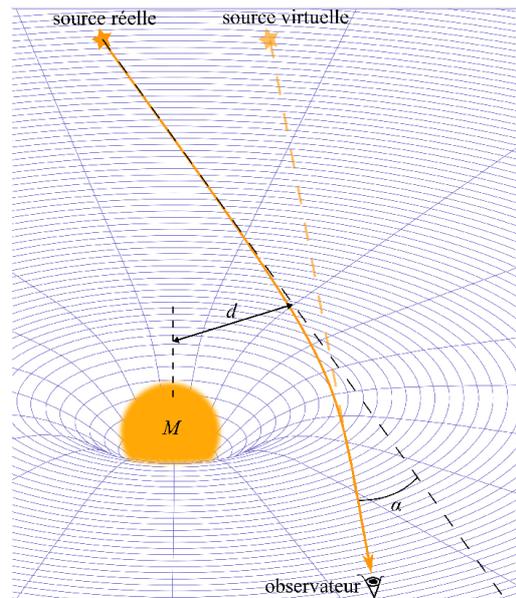


Fig. 3 : La trajectoire d'un rayon de lumière provenant d'une source lointaine suit la déformation de l'espace-temps par une masse M . Crédit : Gasparini A. (2018)

A partir de leurs connaissances, les élèves peuvent citer la masse M , la constante de gravitation G , la vitesse de la lumière c , et la « distance » de passage d , soit la distance entre la masse M et la droite représentant la direction de provenance du rayon. Ce dernier paramètre permet d'introduire le terme de « *paramètre d'impact* », concept très important en physique car tout autant central que transversal.

Pour trouver l'angle de déviation, on cherche une combinaison de puissances entières de ces paramètres (n , m , p et q), telle que les unités se compensent car l'unité des angles est adimensionnelle

$$a_g \propto G^m M^n \times c^p \times d^q$$

$$[\text{m}^3 \times \text{s}^{-2} \times \text{kg}^{-1}]^m \times [\text{kg}]^n \times [\text{m} \times \text{s}^{-1}]^p \times [\text{m}]^q = 1 \quad \text{D} \quad \text{m}^{3m+p+q} \times \text{s}^{-2m-p} \times \text{kg}^{-m+n} = 1^0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m = n \\ 3m + p + q = 0 \\ -2m - p = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m = n \\ 3m + p + q = 0 \\ p = -2m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m = n \\ m + q = 0 \\ p = -2m \end{cases}$$

² Avec le terme masse *grave* on entend la grandeur ayant le rôle de « charge » gravitationnelle, analogue à la « charge » coulombienne en électrostatique. Elle se différencie de la masse *inerte* qui représente une mesure de la résistance des corps aux changements de vitesse, et n'est pas spécifiquement liée à l'interaction gravitationnelle. À cette date, aucune expérience n'a pu constater de différence entre masse grave et masse inerte.

La solution la plus simple non nulle est donnée par $m = n = 1$, $p = -2$ et $q = -1$:

$$a_g \propto GM \times c^{-2} \times d^{-1} = \frac{GM}{c^2 d}$$

Cette formule diffère d'un facteur 4 de celle obtenue en utilisant les équations tensorielles d'Einstein $\alpha_E = 4GM/c^2 d$, mais elle est accessible même aux élèves de première année. Une dérivation de la formule de l'angle de déviation à partir de la physique newtonienne se trouve dans la section 5.1 du livre : cette démonstration est plus avancée car elle demande la connaissance du formalisme vectoriel, de la dérivation et de l'intégration des fonctions, et elle donne une formule de l'angle de déviation : $\alpha_N = 2GM/c^2 d$, qui diffère d'un facteur 2 par rapport à celle relativiste. Ce facteur 2 a une importance historique, notamment dans les mesures de l'angle de déviation de la lumière faites par Eddington lors de l'éclipse totale solaire de 1919. Bien que peu précise, ce fut cette expérience qui rendit Einstein célèbre.

Analogie optique

Ainsi, la simple dérivation dimensionnelle permet d'expliquer la dépendance *inverse* $\alpha_g \propto 1/d$, qui constitue la clé pour comprendre le phénomène de lentille gravitationnelle. Il est utile d'analyser avec les élèves la situation parallèle d'une lentille optique convergente, où la dépendance linéaire de la distance entre le rayon incident et l'axe optique $\alpha \propto d$ mène à la présence d'un foyer optique, comme illustré dans la figure ci-dessous.

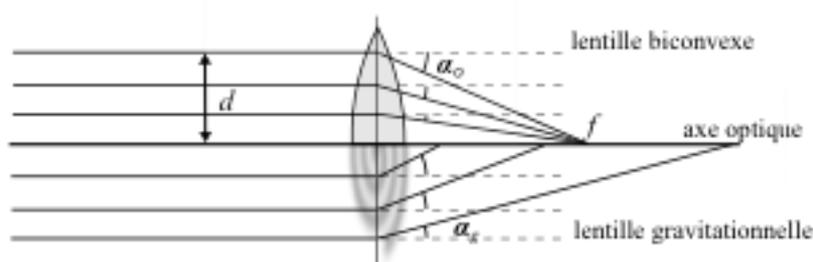


Fig. 4 : Comparaison de l'effet d'une lentille gravitationnelle avec celui d'une lentille optique convergente, sur des rayons parallèles. Crédit : Gasparini A. (2018)

D'autre part, puisque dans le chapitre 4 les élèves ont pu constater que la courbure est négative autour d'une masse avec un potentiel gravitationnel à symétrie sphérique (Fig. 2), ils ont les éléments pour comprendre que la déviation en $1/d$ traduit le comportement divergent des géodésiques parallèles.

La question de savoir s'il existe une forme de lentille optique capable de reproduire cette déviation en $1/d$ surgit spontanément dans la majorité des classes, et la réponse se trouve dans l'exercice 7 de la série 5, où les lois de la réfraction et une intégration sont déployées pour obtenir cette dépendance : un profil d'allure logarithmique, semblable à celui d'un « pied de verre à vin » est celui recherché.

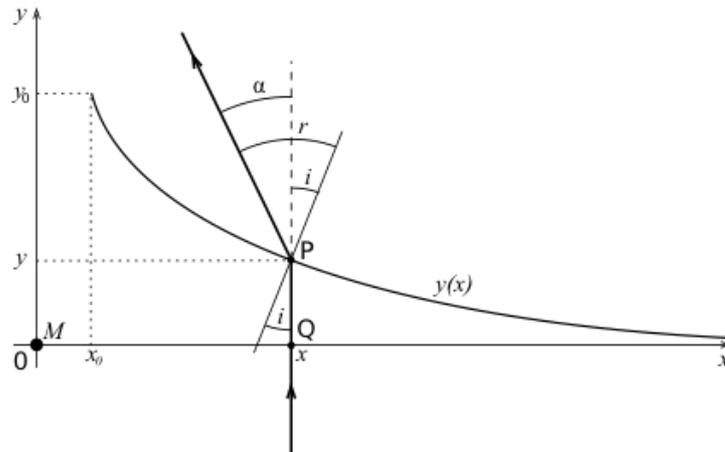


Fig. 5 : Trajectoire d'un rayon de lumière passant au travers d'une lentille optique avec un profil de « pied de verre à vin ».
Crédit : Gasparini A. (2018)

L'idée est que, en supposant l'approximation des « petits angles » ($\sin \alpha \cong \alpha$), si l'angle de réfraction r est proportionnel à l'angle d'incidence i , et si l'on veut qu'en s'approchant de l'axe optique (l'axe y dans la figure ci-dessus) la déviation augmente (r augmente) comme on le voit dans la Fig. 4, on doit avoir un profil qui forme un angle toujours plus grand avec le rayon incident (direction de l'axe y).

Selon le degré des élèves, l'exercice du calcul du profil de la lentille peut être abordé ou pas.

Dans tous les cas, l'expérience permettant de visualiser l'image d'une source ponctuelle à travers la reproduction optique d'une lentille gravitationnelle est une activité qui peut facilement être pratiquée en classe.

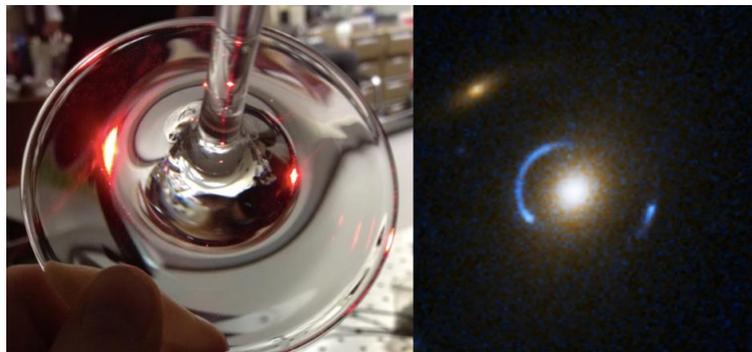


Fig. 6 : À gauche, une image de source ponctuelle vue au travers d'un pied de verre à vin. À droite, l'image de lentille gravitationnelle SDSS J120540.43+491029.3. Crédit : Hubble, NASA. La similitude entre les images lumineuses de la source est clairement visible

Ainsi, les élèves peuvent « tester » eux-mêmes les conditions pour l'observation d'un anneau, d'une croix d'Einstein ou d'arcs gravitationnels (ces derniers comme dans la Fig. 6).

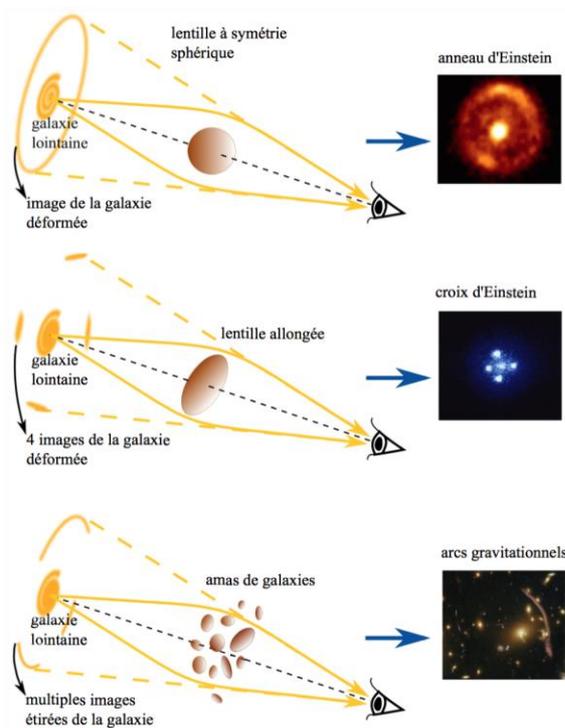


Fig. 7 : Schématisation des trois types de strong lensing, permettant d’observer des images d’anneaux, croix d’Einstein, ou d’arcs gravitationnels. Crédit: Gasparini A. (2018) et Hubble, NASA

Dans le cas d’alignement entre observateur O, lentille L et source S, la formule donnant le rayon d’Einstein θ (il s’agit bien d’un angle même s’il est appelé « rayon ») en fonction de la masse de la lentille et des distances entre la source et la lentille s’obtient à partir de celle de l’angle de déviation, en utilisant la loi des sinus et l’approximation des petits angles.

$$q @ \sqrt{\frac{4GM \times D_{SL}}{c^2 D_{SO} \times D_{LO}}}$$

Cette démonstration est accessible aux élèves ayant des bases de trigonométrie. La formule ci-dessus est démontrée dans la section 5.3 du livre et utilisée par les astronomes pour estimer la masse de la lentille, y compris celle de la matière noire, puisque c’est la masse *grave* de la lentille qui cause le phénomène. En effet, les distances peuvent être estimées à partir des redshifts de la source et de la lentille et le rayon d’Einstein est une quantité mesurable, normalement inférieure à la seconde d’arc.

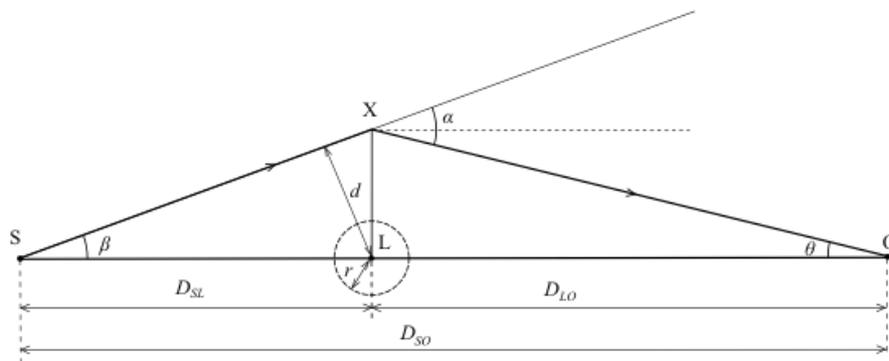


Fig. 8 : Schématisation du parcours d’un rayon de lumière dans une situation de strong lensing donnant lieu à un anneau ou une croix d’Einstein : le point S représente la source de lumière (une galaxie lointaine), le point O l’observateur et L est la lentille (une galaxie ou un amas de galaxies). La révolution de 360° autour de l’axe OS du point X représente l’image virtuelle de la source S, sous forme d’anneau. L’angle d’observation θ est nommé « rayon d’Einstein ». Crédit : Gasparini A. (2018)

La croix d'Einstein

À la suite de cette séquence, on peut se demander quels problèmes les élèves qui ont suivi le cours pourraient résoudre par eux-mêmes. Il s'agit bien là de mesurer si le cours n'a été qu'informatif sur l'astrophysique et certaines méthodes mathématiques d'approche de celle-ci (ce qui pourrait être un objectif en soi) ou s'il a pu donner aux élèves des compétences mobilisables dans la résolution de problèmes. Pour répondre à cette question, nous proposons un exercice de l'examen semestriel du cours d'OC PY du semestre d'hiver 2017-18 qui demandait de calculer la masse de la lentille produisant la croix d'Einstein.

Voici son énoncé :

La photo de la croix d'Einstein ci-contre date de 1990 et est la plus précise jamais produite de cet objet. Les 4 images qui forment la croix ont un redshift de 1,7, ce qui correspond à une distance de 3Gpc, alors que la galaxie au centre a un redshift de 0,0394.

De plus, on a mesuré la distance angulaire moyenne entre les quatre images de la croix et le centre (que nous pouvons considérer comme une bonne estimation du rayon d'Einstein associé) : 0,8 secondes d'arc (0,8").

- Expliquer (1) quel est le phénomène à la base de cette observation, (2) quelles sont les conditions pour que cette image en forme de croix se produise.
- En utilisant la loi de Hubble, vérifier que la distance entre la galaxie et le centre de l'image est environ 0,2Gpc.
- En déduire la distance entre la galaxie au centre (L) et la source des 4 images (S).
- Calculer le rayon d'Einstein correspondant à la croix en radians.
- Ecrire la formule reliant ce rayon d'Einstein à la masse de la galaxie au centre de l'image.
- En déduire une estimation de la masse de la galaxie au centre de l'image en kg puis en masses solaires.

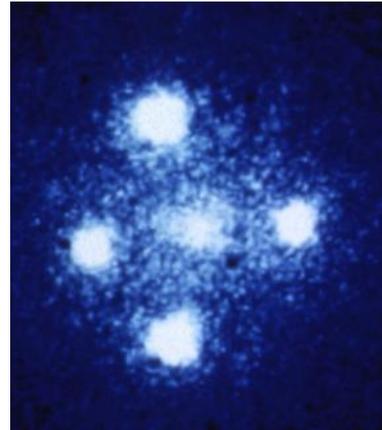


Fig. 9 : La croix d'Einstein. Credit: NASA, ESA, and STScI

Comme on le voit, seule la question a) demande une réponse faisant appel uniquement à la compréhension du phénomène. La réponse attendue est : (1) il s'agit du strong lensing : la lumière provenant d'une galaxie source lointaine S est déviée par la présence d'une masse importante (dans ce cas une autre galaxie) qui joue le rôle de lentille gravitationnelle L. (2) Si l'observateur O, la lentille L et la source S sont parfaitement alignés, O voit un anneau (si L a une symétrie sphérique), ou une croix (si L n'a pas une symétrie parfaitement sphérique). Il peut voir aussi des arcs si L est un amas de galaxies.

Quant aux questions suivantes, elles font appel à des calculs plus ou moins immédiats, c'est-à-dire demandent soit d'appliquer des formules avec les données du problème comme pour la question b) ou de faire preuve d'une certaine aisance avec les différentes notions étudiées.

Cet examen semestriel a été réussi par la totalité des 8 élèves du groupe, tous issus de classes de PY DF, avec des notes s'étageant de 4,0 à 5,0, alors que leur moyenne à la fin du semestre a été entre 4,2 et 5,4 (moyenne de 4,7).

Cela est un indice que, malgré la difficulté de certains concepts et leur préparation moins approfondie en physique de base, des élèves motivés peuvent être initiés à la cosmologie moderne.

Il nous alors semblé intéressant d'interroger les élèves eux-mêmes sur leur ressenti par rapport à ce cours.

L'OPINION D'ÉLÈVES AYANT SUIVI LE COURS OC PY DE COSMOLOGIE

Nous avons sollicité des élèves volontaires pour répondre à quelques questions sur leur perception du module *Astronomie et Cosmologie* de ce cours OC PY, qui en comptait trois autres : *Ondes*, *Radioactivité* et *Relativité restreinte*. Le cours de Cosmologie a été donné sur un semestre et les élèves de cette volée ont pu traiter les sujets des six premiers chapitres uniquement. Deux filles et deux garçons ont accepté de se prêter à un entretien individuel semi-directif qui a duré environ une heure. Cette méthode d'entretien, issue de la sociologie et des recherches qualitatives (voir par exemple Combessie, 1996), part d'un canevas de questions (voir annexe), mais laisse, au contraire d'un questionnaire, une grande latitude au répondant qui peut aborder les sujets qui l'intéressent. Toutefois, à la différence de l'entretien libre, l'intervieweur garde la main sur les questions posées qui ramènent la discussion au thème à traiter.

En ce qui concerne leur orientation, trois élèves avaient choisi l'option spécifique (OS) biologie-chimie pour les raisons suivantes : une fille, M, projette d'étudier la médecine, l'autre fille, S, la chimie à l'EPFZ et un garçon, F, la biologie à l'Université de Genève. L'autre garçon, Me, a choisi l'option économie-droit, et pense s'orienter vers des études à l'EPFL après une année sabbatique à l'étranger pour consolider son anglais. Les quatre jeunes se disent intéressés par la physique, les trois premiers ayant hésité à la prendre en OS. Bien que pour tous le choix de l'OC physique était surtout lié à la possibilité de continuer à étudier cette discipline en 4^e année, pour Me la présence du module *Cosmologie* a été décisive dans son choix.

Les mathématiques du cours

Tous les quatre se disent satisfaits par les contenus du module de *Cosmologie* : ils ont trouvé ce cours bien structuré et accessible. En particulier, ils expriment un point de vue positif sur les mathématiques nécessaires pour le suivre, alors que le débat sur les liens physique-mathématiques dans l'enseignement reste d'actualité, certains accusant la deuxième d'être responsable du désamour des élèves pour la première (voir par exemple Colsaët, 2009 et le débat à la suite de cet article). Voici leurs remarques :

M affirme : « Les maths nécessaires [pour suivre ce cours] n'ont pas été pas compliquées pour la physique, le cours DF suffit, même pas besoin de ce cours : on n'avait pas vu les ondes en DF mais les bases étaient bien expliquées cela ne m'a pas posé de problème. [Ce cours] a amélioré un peu mes maths même si ce ne sont pas des maths compliquées. [Après ce cours] je donne plus d'importance aux maths, car j'en vois des applications concrètes et que cela est utile pour le monde réel ». Pour certains aspects, M et F ont même trouvé qu'il aurait été intéressant d'avoir plus de démonstrations : « J'aurais aimé savoir comment Einstein a trouvé, voir les calculs ... » affirme F.

Me affirme : « Même en maths 1, j'en savais assez pour suivre. Mais on peut dire que l'OC m'a aidé pour le cours de maths, car même s'il n'y avait pas de réelles difficultés, ce cours fait revoir des notions ». En physique aussi « cela m'a bien aidé, car on a repris plein de notions, ça m'a fait un rappel ».

De son côté S, bien qu'elle trouve les maths et le niveau du cours largement accessibles, estime avoir quand même « gagné en familiarité : on savait de quoi on parlait, les devoirs permettaient de comprendre. Le cours était bien conçu. Il ne faut pas avoir peur des maths, il suffit de se mettre dedans et c'est super intéressant ».

« En physique, les maths prennent du sens – selon F – les maths décrivent la physique et la physique décrit le monde réel : une fois on a d'abord prouvé un théorème, ensuite on découvre que cela correspond à une situation physique ».

Des contenus en lien avec la recherche actuelle

Par ailleurs, les quatre jeunes ont bien apprécié d'avoir le cours de *Cosmologie* distribué pour leur relecture personnelle : « J'ai trouvé le polycopié de cosmo très utile – affirme M – cela permet de lire plus loin aussi. », alors que S se dit « contente de ce document, que je relirai par la suite ». La passion de leurs enseignants pour la matière enseignée a aussi été importante : « Les profs passionnés c'est génial –

affirme M – parfois la pédagogie est moins bien mais quand il y a les deux, passion et pédagogie, c'est le mieux. ». Même s'il avait beaucoup lu sur l'Astronomie et la Cosmologie auparavant, Me constate que « parfois les livres sont trop compliqués. Alors que dans ce cours j'ai vraiment compris en profondeur les notions, par exemple la théorie du Big Bang et l'expansion du vide ».

Mais surtout, ce qui a fasciné ces jeunes a été le fait d'apprendre des contenus à la limite des connaissances actuelles : « ce cours m'a captivé - déclare Me - toutes ces questions sans réponses, comme les trous noirs : on ne peut pas savoir car soit c'est trop compliqué pour notre niveau d'élèves, soit les scientifiques ne savent pas. [...] On traitait de questions qui me revenaient et dont on ne parlait dans aucun autre cours... une introduction à l'infini, à des notions qui nous donnaient une vraie ouverture d'esprit, des distances gigantesques, des vitesses incroyables !! »

En sachant que seuls les six premiers chapitres ont pu être abordés avec cette volée d'élèves, parmi les sujets plus plébiscités on trouve « le redshift et l'effet Doppler cosmologique » (S), « [la structure de] l'espace-temps, la matière noire, ce qui concerne de nouvelles théories qu'on ne connaît pas encore bien, à la limite des connaissances » (F), mais surtout le chapitre sur les trous noirs (F, M, S, Me). F affirme que ce chapitre « change la manière de penser. Le fait que la masse de tout l'univers correspond à celle d'un trou noir de la taille de l'univers... Il y a vraiment des choses à comprendre ! ». « Les trous noirs sont mystérieux et on a envie de comprendre – déclare S – cela permet aussi de réaliser qu'on a des stéréotypes faux ». Alors que M connaissait déjà un peu le sujet : « Je connaissais déjà un peu, j'avais lu et trouvé que c'était plus intéressant, j'avais plein de questions. J'avais aussi déjà suivi un cours facultatif sur les ondes gravitationnelles et j'avais beaucoup aimé ! »

Enfin ce module a changé pour tous les quatre leur vision de la recherche scientifique, mais aussi celle du rôle des mathématiques dans la science, leur montrant d'une part l'importance des observations actuelles, d'autre part à quel point les mathématiques et la physique sont complémentaires pour pouvoir progresser dans la compréhension de l'univers.

« Au CO j'avais appris que toute la Terre est cartographiée – Me déclare – mais en ce qui concerne l'univers je constate tout ce qu'on ne sait pas encore. Il y a encore beaucoup à apprendre et à découvrir et c'est ça qui est passionnant. [...] Cela a ouvert ma vision, car dans ces matières il y a encore beaucoup à faire, à chercher. »

M affirme : « Pour l'astronomie cela a élargi et approfondi ma vision sur des faits et sur la théorie. (...) Les planètes s'éloignent, l'univers s'agrandit, notre horizon devient plus petit. Je trouve passionnant ! Mais nous sommes confrontés à nos limites. Ce sont des sujets magiques presque... ».

« Cela a changé ma vision de l'Astronomie, j'avais surtout des stéréotypes – confie S – car les recherches sont toujours en cours et il y a de nouvelles découvertes. C'est très exigeant ! ».

Pour terminer, comme clin d'œil, relevons qu'un point fort du module a été selon trois des quatre élèves la sortie à l'observatoire de St Luc ainsi que le chemin des planètes, un moment de partage où élèves et enseignants ont appris à se connaître sous un autre jour. Ce qui montre que les élèves, même quand ils étudient des sujets pointus, restent des jeunes.

CONCLUSION

En conclusion, la séquence sur l'effet de lentille gravitationnelle que nous avons parcourue, tout en n'étant qu'un exemple des nombreuses thématiques transversales possibles à partir du matériel didactique proposé, montre comment, en s'appuyant d'une part sur l'intérêt que les élèves ont a priori pour l'astrophysique et la cosmologie, d'autre part sur des connaissances mathématiques limitées, il est possible de leur faire expérimenter un chapitre de la physique moderne. Les entretiens avec les élèves confirment les impressions des enseignants que les mathématiques ne s'érigent pas en obstacle dans ce cas à la découverte de nouveaux concepts en physique. Au contraire l'enseignement de la physique moderne peut éventuellement réconcilier certains élèves avec les mathématiques en leur redonnant du sens.

RÉFÉRENCES

- Baram-Tsabari, A. & Yarden, A. (2012). Characterizing children's spontaneous interests in science and technology. *International Journal of Science Education*, 27(7), 803-826.
- Baumert, J., Bos, W., & Watermann, R. (1998). TIMSS/III, *Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich*. Berlin : Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- Colsaët, F. (2009). Maths et physique, compagnes depuis toujours. *Cahiers pédagogiques*, 469, 47-48.
- Combessie, J.-C. (1996). *La Méthode en sociologie*, Paris : La Découverte.
- Gasparini, A. (2018). *Cosmologie & relativité générale, Une première approche*. Lausanne : PPUR. Repéré à <http://www.ppur.org/produit/876/9782889152094/Cosmologie%20%20relativite%20generale%20>
- Gasparini, A & Müller, A. (2017). *Cosmologie & relativité générale, Activités pour les élèves du Secondaire II*, SwissMAP, Université de Genève. Repéré à <http://nccr-swissmap.ch/education/highschool/GRcourse>
- Lelliott, A. & Rollnick, M. (2010). Big Ideas: A review of astronomy education research 1974-2008. *International Journal of Science Education*, 32(13), 1771-1799.
- Levrini, O. & Fantini, P. (2013). Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. *Science & Education*, 22, 1895-1910.
- Sjøberg, S. & Schreiner, C. (2007). *Reaching the minds and hearts of young people: What do we know about their interests, attitudes, values and priorities? What about the interest for space science?* Bern: International Space Science Institute.
- Sjøberg, S. & Schreiner, C. (2010). *The ROSE project: An overview and key findings*», Oslo, Norway: University of Oslo.

ANNEXE : QUESTIONNAIRE SEMI-DIRECTIF AUX ÉLÈVES DU COURS OC PY COSMOLOGIE

Questionnaire sur le cours de Cosmologie (4OC01)

- a) Notes sur les coordonnées de l'entretien : date, heure, lieu
- b) Notes sur qui est l'élève : sexe
- c) Questionnaire semi-directif
1. Quel est ton OS ?
 2. Quelles sont tes notes de maturité (d'année) en physique DF 3^e, en maths niveau ? :
 3. Quels sont tes projets d'études après la maturité ?
 4. Pourquoi as-tu choisi l'OC physique ? Savais-tu que l'OC porterait entre autres sur la Cosmologie (et l'Astronomie) ?
 - a. si oui est-ce une des raisons de ton choix de l'OC ?
 - b. si non as-tu été content ou mécontent quand tu as appris que l'OC traiterait d'Astronomie et de Cosmologie ?
 5. Quel intérêt portes-tu sur les sujets liés à l'Astronomie (en général, indépendamment du cours suivi) ?
 6. Quel intérêt portes-tu sur les sujets liés à la Cosmologie (en général, indépendamment du cours suivi) ?
 7. Est-ce que le cours OC Cosmologie a changé ton intérêt vers l'Astronomie et/ou la Cosmologie ?
 8. Est-ce que le cours OC Cosmologie a significativement changé tes connaissances en Astronomie/Cosmologie ?
 9. Est-ce que tu avais les compétences de base (maths et physique) nécessaires pour comprendre le cours OC Cosmologie ?
 10. Est-ce que le cours OC Cosmologie a amélioré tes compétences dans les sujets de physique étudiés dans les cours DF (lois de Newton, gravité, ondes, électromagnétisme, optique, ...)
 11. Est-ce que le cours OC Cosmologie a amélioré tes compétences en mathématiques (trigonométrie, résolution d'équations, fonctions, calcul, ...) ?
 12. Est-ce que les documents distribués au cours t'ont aidé à mieux comprendre les sujets traités ?
 13. Est-ce que tu trouves la structure et l'organisation du cours t'ont bien aidé à comprendre les sujets traités ?
 14. Quel a été le sujet de ce cours que tu as le plus apprécié et pourquoi ?
 15. Quel a été le sujet de ce cours que tu as le moins apprécié et pourquoi ?
 16. Quel a été le point fort de ce cours et pourquoi ?
 17. Quel a été le point faible de ce cours et pourquoi ?
 18. Est-ce que ce cours a changé ta vision de l'Astronomie/ de la physique/ des mathématiques ?
 19. Est-ce que ce cours a changé ta vision de la recherche scientifique ?