

Guide utilisateur du logiciel

SpoutnX

Version 7.0

Présentation:.....	1
1: Installation:.....	2
1.1 : Windows :.....	2
1.2 : MacOS :.....	2
2: Première utilisation de SpoutnX:.....	2
2.1: Explication rapide du fonctionnement du logiciel.....	2
3: Explication par module:.....	3
3.1: Dilatation temporelle:.....	3
3.1.1 : Différentes sortes de dilatations temporelles :.....	3
3.1.2 : Contraction des longueurs :.....	4
3.2: Accélération:.....	4
3.3: Effets de la relativité sur la lumière:.....	4
3.3.1: Déviation d'un photon et lentille gravitationnelle:.....	5
3.3.2: Effet Shapiro:.....	5
3.3.3: Effets de la vitesse sur la lumière.....	6
3.3.4: Décalage spectral:.....	6
3.4: Caractéristiques d'un trou noir:.....	6
3.4.1: Trou noir de Schwarzschild:.....	7
3.4.2: Trou noir de Kerr:.....	7
3.5 : Précessions :.....	8
3.5.1: Précession géodétique et effet Lense-Thirring.....	8
3.5.2: Précession du périastre.....	8
3.6: Ondes gravitationnelles.....	8
3.6.1: Calculs de base.....	8
3.6.2: Modélisation des ondes gravitationnelles.....	9
4: Fonctionnalités diverses.....	11
4.1: Option «Ajouter sa propre métrique»:.....	11
4.2: Outil de calcul du moment cinétique:.....	11
5: Problèmes et bugs:.....	11

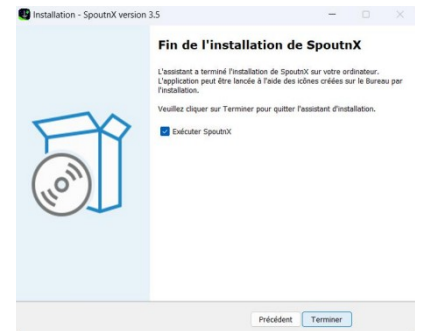
Présentation:

SpoutnX est un petit logiciel gratuit qui permet de résoudre des problèmes mathématiques en utilisant la relativité générale et la relativité restreinte. Développé bénévolement, il n'en est qu'à ses débuts et devrait se voir agrémenter de nombreuses fonctionnalités dans les prochaines semaines et mois.

1: Installation:

1.1 : Windows :

Tout d'abord, téléchargez l'installateur de SpoutnX depuis le site <https://spoutnx.wixsite.com/spoutnx>, sous la forme d'un fichier en .exe. Double-cliquez dessus, et commencez par choisir votre langue. Après avoir accepté la licence, choisissez ensuite le dossier où sera installé le logiciel. Par défaut, il se trouve dans le dossier programmes(x86) de windows. Si vous désirez le changer, veillez à le remplacer par un dossier non protégé par les droits administrateurs, et ce même si vous avez un compte administrateur sur la machine. Attention! L'installateur de SpoutnX ne supprime pas les anciennes versions du logiciel, vous devez le faire manuellement si une ancienne version est déjà installée sur votre ordinateur. Ensuite, terminez l'installation et lancez SpoutnX.



1.2 : MacOS :

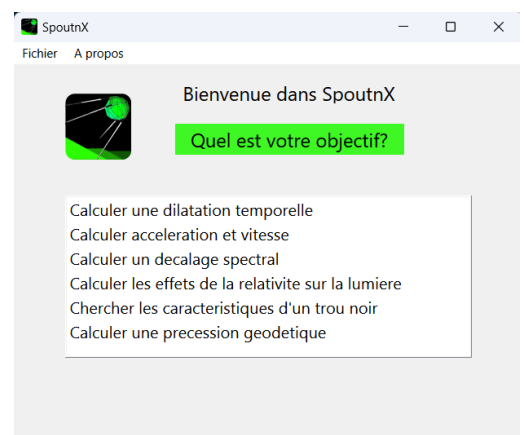
En premier, téléchargez l'archive .dmg depuis le site web <https://spoutnx.wixsite.com/spoutnx> Double-cliquez dessus et acceptez la licence. Ensuite, faites glisser l'icône de SpoutnX vers l'alias du dossier Application, pour installer le logiciel.

2: Première utilisation de SpoutnX:

Lancez d'abord le logiciel. A la première ouverture, cela peut prendre quelques secondes. Le logiciel va créer un petit dossier dans votre répertoire utilisateur, qui contiendra ensuite toutes vos données. Une fois ouvert, vous pouvez changer la langue du logiciel. Pour cela, allez dans l'onglet «fichier» en haut à droite, puis dans «préférences/réglages». Cliquer sur l'onglet «changer de langue » à gauche. Vous pouvez ensuite choisir entre espagnol, français, et anglais. Vous devrez redémarrer le logiciel pour que la langue soit changée.

2.1: Explication rapide du fonctionnement du logiciel

Le Logiciel a un fonctionnement très simple: Lorsque vous arrivez sur la page d'accueil, vous commencez par choisir un «objectif» parmi 6 pour le moment. Cela ouvre une seconde fenêtre, où vous pouvez dans certains cas affiner cet objectif. Puis, dans cette même fenêtre, vous aurez à saisir les données essentielles à la résolution du problème. Ex: Choix de la métrique à utiliser, masse d'un objet, moment cinétique, coordonnée, etc. Les données à rentrer ne sont que des chiffres, pas de puissances, ni d'opérations (x, +, -, /). Toutes les équations sont réalisées avec les coordonnées sphériques. Si vous ne comprenez pas des termes, il y a dans certains cas des liens vers des pages Wikipédia avec des boutons (voir photos), pour vous permettre de mieux comprendre. Sinon, il y a également les explications plus loin dans ce document, qui peuvent vous éclairer. Après cela, vous pouvez cliquer sur «calculer» pour terminer la résolution. Cela ferme la fenêtre qui était actuellement



ouverte, et cela ouvre une fenêtre appelée «Résultats». Ensuite, en fonction des caractéristiques de votre problème, un ou plusieurs résultats sous forme numérique s'affichent, ainsi que les équations qui ont permis de les calculer. Pour certains «objectifs», vous verrez apparaître un bouton «visualiser», permettant de voir le problème sous un autre angle, de manière plus interactive avec des graphiques, des schémas, etc. Sur la fenêtre des résultats, vous pouvez également voir les données que vous avez tapées, en rappel, ainsi qu'un bouton permettant de revenir à la fenêtre des caractéristiques du problème. La fenêtre d'accueil, reste ouverte tout au long de la résolution. Elle vous permet notamment de sauvegarder vos résultats fraîchement calculés. Pour cela, allez dans l'onglet «Fichier» en haut à gauche, puis «Enregistrez sous». Cela vous permettra d'enregistrer un fichier dans l'emplacement de votre choix sur votre ordinateur, au format .sptx, qui est le format de fichier de SpoutnX. Vous pourrez ensuite ré-ouvrir votre fichier en allant dans l'onglet «fichier» puis «ouvrir». Cela ré-ouvrira la fenêtre des résultats. A noter que certaines des équations et fonctionnalités du logiciel n'ont pas été vérifiées expérimentalement, et n'ont pas été décidées comme incontestables par les scientifiques du monde entier.

3: Explication par module:

3.1: Dilatation temporelle:

3.1.1 : Différentes sortes de dilatations temporelles :

Le module «Dilatation temporelle» permet de calculer une dilatation temporelle soit à cause de l'attraction gravitationnelle d'un objet, soit à cause d'une vitesse. Pour commencer par la vitesse, l'effet est calculable suivant plusieurs métriques: La métrique de Schwarzschild, la métrique de Minkowski, et votre métrique personnelle. Nous n'aborderons pas dans cette section ce dernier cas. Pour rappel, la métrique de Schwarzschild décrit un espace-temps courbé par un objet de masse M , statique, tel qu'une planète ou un trou noir. Pour notre problème, on considère que l'objet test est en orbite autour de cet objet de Schwarzschild. On travaille sur des coordonnées sphériques, et en exploitant les symétries du problème, on peut les limiter aux coordonnées de temps, de longitude, et d'altitude. Après avoir validé le choix de la métrique, on voit apparaître trois encadrés, pour remplir du texte. Le logiciel commence par nous demander la masse de l'objet de Schwarzschild, puis la vitesse angulaire de l'objet, et enfin sa distance de l'objet attirant (altitude). Attention! Pour

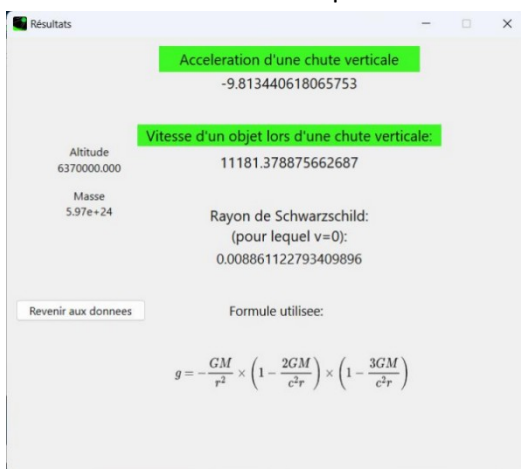
chacun des encadrés où vous avez à taper des informations, rentrez-les uniquement en chiffres, sans puissances ou inconnues. Une lettre dans un encadré empêcherait le logiciel de calculer. Ensuite, appuyez sur calculer. La fenêtre des résultats s'affiche, et affiche le coefficient auquel le temps propre de l'observateur s'écoule plus vite que celui de l'objet ayant une vitesse. Ex: si le résultat est 1.00286555, cela signifie que le temps propre de l'observateur s'écoule 1.00286555 fois plus vite que celui de l'objet en mouvement. Pour la dilatation temporelle due à la gravitation, il suffit de cliquer sur l'onglet « A cause d'un objet massif » au début du problème. Ensuite, rentrez la masse de l'objet massif, ainsi que la coordonnée radiale (l'altitude). Tout est calculé avec la métrique de Schwarzschild. Après avoir appuyé sur «Calculer», vous voyez s'afficher la même fenêtre que pour l'autre type de dilatation temporelle, avec le résultat et la formule utilisée.

3.1.2 : Contraction des longueurs :

Ce module permet aussi de calculer l'effet de contraction des longueurs en relativité restreinte. En effet, plus un objet va vite, plus sa longueur semble contractée pour un observateur éloigné. Dans la première page de la fenêtre Caractéristiques du module Dilatation temporelle, tout en bas, on peut voir un bouton nommé « Calculer la contraction des longueurs ». Après avoir cliqué dessus, le logiciel vous demande de remplir la vitesse de l'objet, en m.s, ainsi que sa taille réelle, en mètres, lorsqu'il est immobile par rapport au référentiel. Après avoir cliqué sur « Calculer », le logiciel affiche la valeur de la nouvelle longueur de l'objet, en mètres ainsi que la formule utilisée.

3.2: Accélération:

Le module «Accélération» permet de calculer l'accélération d'un objet lors d'une chute verticale vers un objet plus



massif, comme un trou noir ou une planète, ainsi que sa vitesse à chaque instant de sa chute libre. Il n'est calculable pour l'instant qu'avec la métrique de Schwarzschild. Le logiciel commence par vous demander de rentrer la masse de l'objet attirant, ainsi que l'altitude de l'objet par rapport à celui-ci. Après avoir appuyé sur le bouton «calculer», vous voyez s'afficher la fenêtre «résultats», qui affiche une valeur ainsi que la formule. La valeur trouvée est négative. C'est tout à fait normal du fait que l'altitude r diminue au cours du temps. La valeur s'exprime en m.s-2.

Ex: Si l'on prend comme valeur une altitude r=6371000m, et une masse m=6x10²⁴ce qui correspond aux caractéristiques de la terre, on trouve environ -9.81 m/s². Or, cela correspond bien à la valeur de

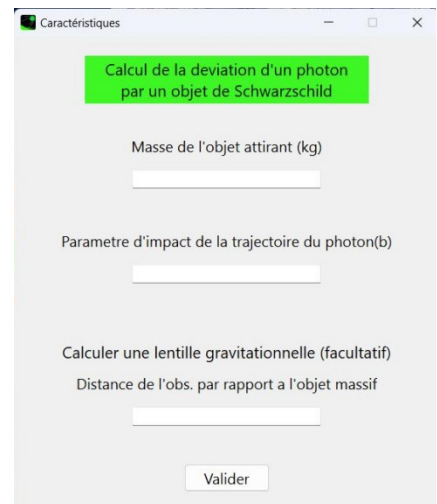
d'accélération gravitationnelle de la terre. Le logiciel affiche également la valeur de la vitesse, en m/s, ainsi que le rayon de Schwarzschild de l'objet massif, pour lequel la vitesse de l'objet test est égale à 0. Ce rayon, c'est l'horizon d'un trou noir, c'est l'endroit où l'espace temps devient courbé à l'infini, et qu'aucun retour en arrière n'est possible (pas applicable pour un autre objet qu'un trou noir donc). Ces calculs ne sont valables qu'à l'intérieur de la matière.

3.3: Effets de la relativité sur la lumière:

Ce module permet de calculer la déviation de la lumière à cause de la gravitation, de calculer l'effet Shapiro, ainsi que les effets de la vitesse sur la lumière.

3.3.1: Déviation d'un photon et lentille gravitationnelle:

Lorsqu'un photon passe près d'un objet massif, la déformation de l'espace-temps le dévie de sa trajectoire initiale. Pour calculer cette déviation, le logiciel commence par vous demander la masse de l'objet attirant, ainsi que le paramètre d'impact de la trajectoire du photon. Si on trace une droite perpendiculaire à la trajectoire du photon avant d'être dévié, et passant par le centre de l'objet massif, alors le paramètre d'impact est la longueur entre la trajectoire du photon et cette droite. Cette longueur est donc perpendiculaire aux deux droites. Ainsi, après avoir rentré ces données, vous pouvez cliquer sur calculer. Avant cela, le logiciel vous propose également de calculer une lentille gravitationnelle. C'est un effet qui déforme l'image d'un objet lumineux lointain pour un observateur si un objet massif se trouve entre lui et la source de lumière. Dans certains cas, cela peut conduire à l'apparition d'un arc lumineux autour de l'objet



massif, appelé anneau d'Einstein ou rayon d'Einstein. C'est ce rayon que le logiciel vous propose de calculer. Vous pouvez choisir de le calculer ou non. Si vous ne voulez pas le calculer, il vous suffit de ne rien rentrer dans les champ de texte dédiés et le logiciel n'en prendra pas compte. Le logiciel vous propose donc de rentrer la distance entre l'observateur et l'objet massif. Après avoir appuyé sur calculer, la fenêtre des résultats s'affiche. Vous avez donc le résultat de la déviation de votre rayon lumineux par l'objet massif, exprimé en radians. Pour un résultat supérieur à 2π , le logiciel n'est plus juste, puisque cela signifie que le rayon lumineux ne pourra plus jamais s'échapper de l'attraction de l'objet massif. Vous avez en dessous la formule utilisée, puis plus bas encore la valeur du rayon (ou anneau) d'Einstein, exprimé en mètres. Vous pouvez aussi voir

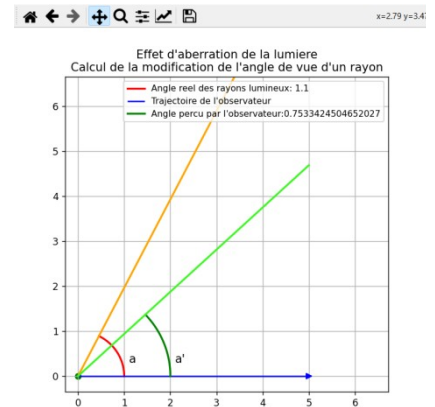
apparaître un bouton «Visualiser». Il permet de visualiser la déviation du photon de manière interactive. Il ouvre une fenêtre avec un graphique sur lequel on peut voir la trajectoire du photon, d'abord droite, puis déviée par l'objet massif représenté par un point. La déviation sur le graphique est faite en fonction des résultats obtenus précédemment. Par exemple, si vous avez calculé une déviation de 2.6rad, alors l'angle de la déviation sur le graphique sera de 2.6 rad.

3.3.2: Effet Shapiro:

L'effet Shapiro est l'effet de retard de la propagation des ondes électromagnétiques dans le champ gravitationnel d'un objet massif par rapport au temps calculé en l'absence de cet objet. En clair, cela signifie que si on envoie un photon d'un objet A à un objet B, il mettra plus de temps à arriver si il y a un objet massif à proximité de sa trajectoire. C'est ce retard que le logiciel peut calculer. Ainsi, dans la fenêtre des caractéristiques, il commence par vous demander la masse de l'objet massif, la distance entre l'objet A et l'objet massif, la distance entre l'objet B et l'objet massif, ainsi que la distance entre l'objet massif et le point de la trajectoire du photon où le photon est le plus proche de l'objet massif. En clair, c'est la longueur du segment perpendiculaire à la trajectoire du photon, dont l'une des extrémités passe par le centre de l'objet massif. Après avoir appuyé sur «Calculer», le résultat apparaît, avec la valeur du retard provoqué par l'objet massif, en secondes, ainsi que la formule utilisée.

3.3.3: Effets de la vitesse sur la lumière

En relativité restreinte, la vitesse peut avoir des effets sur la lumière: On parle par exemple de l'effet Doppler-Fizeau. C'est le fait que, si l'émetteur d'un rayon lumineux s'éloigne de l'observateur, le rayon paraîtra décalé vers le bleu, et vice-versa si l'émetteur se rapproche de l'observateur. Sa fréquence va donc être modifiée par la vitesse. La vitesse engendre aussi l'effet d'aberration de la lumière: C'est le fait que plus un observateur se rapproche de la vitesse de la lumière, plus son champ de vision semble se contracter devant lui: si son champ de vision à l'arrêt est de 120° par exemple, il n'est plus que de 98° à une vitesse de 40% celle de la lumière. Cela ne veut pas dire qu'il voit moins de chose, cela signifie que les images des objets semblent plus contractées et plus lumineuses devant lui. Ainsi, SpoutnX permet de calculer ces deux effets. Dans la fenêtre Caractéristiques, après avoir cliqué sur l'onglet «effets de la vitesse sur la lumière», le logiciel vous demande de rentrer la différence de vitesse entre l'observateur et l'émetteur, en m/s. Cela correspond à la vitesse de l'émetteur, si vous vous placez dans le référentiel de l'émetteur, et vice-versa. Vous ne pouvez pas rentrer de valeur négative, cela fausserait les calculs. Par contre, pour l'effet Doppler, dans le cas où l'émetteur s'éloignerait de l'observateur, il faut faire attention au signe: Pour trouver la vraie valeur de la fréquence reçue, il faut faire la différence entre la valeur de la fréquence réelle et la nouvelle valeur calculée par le logiciel, puis la soustraire à la valeur de la fréquence réelle. Après avoir tapé la valeur de cette vitesse, le logiciel vous demande aussi l'angle de vue de l'observateur à l'arrêt, pour l'aberration de la lumière, et la valeur de la fréquence du rayon lumineux émis par l'émetteur, pour l'effet Doppler. Si vous ne connaissez pas une de ces deux valeurs, rentrez 1, pour permettre au logiciel de calculer quand même. Vous pouvez ensuite appuyer sur «Calculer», afin d'ouvrir la fenêtre des résultats. Celle-ci, affiche donc la valeur.



3.3.4: Décalage spectral:

Le module «Décalage spectral» permet de calculer un décalage vers le rouge d'un signal, sous l'effet de la déformation de l'espace-temps par un objet massif. En effet, une onde électromagnétique qui passe à proximité d'un objet de Schwarzschild, voit sa longueur d'onde se décaler vers le rouge. C'est par exemple le cas pour les trous noirs: A proximité de l'horizon, le décalage spectral devient infini. Pour revenir à nos calculs, le logiciel commence par demander à l'utilisateur de rentrer la masse de l'objet attirant, ainsi que la distance à laquelle se situe le rayon lumineux de l'objet attirant. Comme pour le module «Accélération», les calculs sont faits à partir de la métrique de Schwarzschild. Après avoir appuyé sur «Calculer», la fenêtre «Résultats» s'ouvre et affiche la valeur du décalage spectral, en mètres.

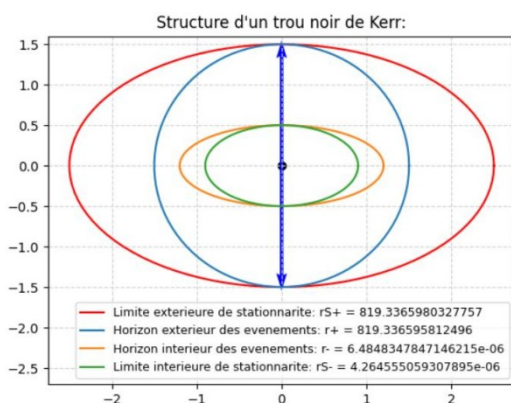
3.4: Caractéristiques d'un trou noir:

Le logiciel permet de chercher les caractéristiques d'un trou noir de Schwarzschild, c'est à dire un trou sphérique, statique, non chargé, ainsi que les caractéristiques d'un trou noir de Kerr, qui est un trou noir de Schwarzschild ayant une rotation sur lui-même.

3.4.1: Trou noir de Schwarzschild:

Après avoir validé «trou noir statique et immobile», vous devez rentrer dans le logiciel la masse du trou noir, ainsi que la distance entre l'observateur et le trou noir (son altitude). Vous pouvez ensuite appuyer sur «Calculer» pour ouvrir la fenêtre des résultats. Le logiciel affiche la valeur du rayon de Schwarzschild, qui est l'horizon du trou noir, en mètres, la valeur du scalaire de Kretschmann, ainsi que le rayon de la dernière orbite stable du trou noir. Vous pouvez aussi voir un bouton «rayonnement de Hawking». Il permet de calculer la température du trou noir: Les trous noirs émettraient un très faible rayonnement thermique. Il calcule également le temps d'évaporation du trou noir, en secondes: si un trou noir émet un rayonnement, il perd de l'énergie, il y a donc forcément un moment où il n'a plus d'énergie à rayonner. Il faut garder à l'esprit que le rayonnement de Hawking n'a jamais été prouvé, et reste à l'état de théorie. Revenons sur la fenêtre des caractéristiques du problème. Il y a également une fonction qui permet de calculer la masse d'un trou noir en fonction d'un décalage spectral. On l'ouvre par un bouton qui ouvre une nouvelle fenêtre «Caractéristiques». Il suffit ensuite de taper la valeur du décalage spectral en mètres, ainsi que la distance entre l'émetteur du rayonnement et le trou noir. La fenêtre des résultats affiche la valeur de la masse du trou noir, en kilogrammes, le rayon de Schwarzschild, ainsi que la formule utilisée.

3.4.2: Trou noir de Kerr:



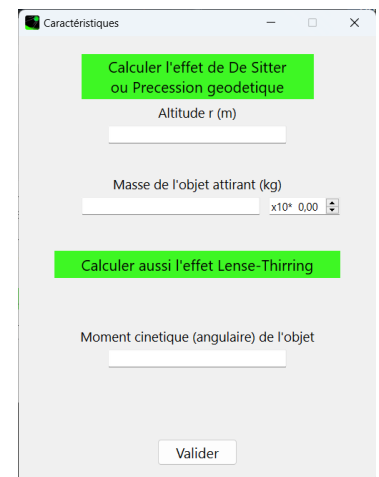
Si le trou noir est en rotation, cela signifie qu'il possède un moment cinétique. Dans la fenêtre «Caractéristiques», vous devez donc remplir la valeur de ce moment, en N.m, la masse du trou noir, en kg, ainsi que la valeur de la colatitude par rapport à laquelle vous voulez vous placer. Un trou noir de Kerr a plusieurs limites de Stationnarité: il a autour de lui une zone ellipsoïdale qui s'appelle l'ergosphère: si un photon traverse cette zone, il peut en ressortir, et même en ressortir avec plus d'énergie que lorsqu'il est rentré. Le logiciel calcule (en m) le rayon de toutes ces limites de stationnarité: horizon extérieur des événements, horizon intérieur des événements, limite extérieure de Stationnarité, limite intérieure de stationnarité. Il calcule également le paramètre de spin du trou noir, ainsi que le taux de rotation. Pour finir, il affiche la valeur du rayon de Schwarzschild, ainsi que le type de trou noir de Kerr : lent, rapide, extrême. Dans le cas d'un trou noir de Kerr extrême, il affiche aussi le rayon de la dernière orbite stable (ISCO), ainsi que l'énergie par unité de masse d'une particule à l'ISCO. Tous ces résultats sont affichés dans la fenêtre «Résultats». Cette fenêtre affiche également un bouton «Visualiser», qui permet de visualiser les limites de stationnarité du trou noir sur un graphique, de manière plus visuelle. Il affiche donc la hiérarchie des différentes limites, et en légende, les valeurs calculées précédemment.

3.5 : Précessions :

3.5.1: Précession géodétique et effet Lense-Thirring

Ce module calcul la précession géodétique et l'effet Lense-thirring. Une précession est le nom donné au changement graduel de la direction de l'axe d'un objet. La précession géodétique, aussi appelée effet de De Sitter, est due à la déformation de l'espace-temps par un objet massif. Ainsi, lorsqu'un corps est en orbite circulaire autour de cet objet, il possède une vitesse angulaire de précession, notée Ω , qui correspond à la vitesse à laquelle l'objet s'incline, au cours du temps. Ainsi, le logiciel nous demande d'abord de rentrer la masse de l'objet massif, ainsi que la coordonnée radiale du corps test (la distance entre l'objet massif et lui) dans la fenêtre « Caractéristiques ». Les calculs sont calculés avec la métrique de Schwarzschild. Ensuite, la fenêtre des résultats affiche la vitesse angulaire de précession, comme expliqué avant, en rad/s, ainsi que la valeur de l'angle correspondant à l'inclinaison du corps après une orbite autour de l'objet massif, en radians. Ce module permet aussi de calculer dans la même fenêtre la valeur de l'effet Lense-Thirring, pour une particule en orbite autour d'un corps massif en rotation. Comme pour l'effet de De Sitter, l'effet Lense-Thirring est du à la déformation de l'espace-temps. En effet, un corps en rotation entraîne l'espace-temps avec lui quand il tourne, ce qui a pour conséquence de dévier la trajectoire d'une particule en chute libre vers son centre, ou encore d'accroître la vitesse de rotation d'une particule en orbite autour de lui. C'est cette dernière conséquence qui est calculée par SpoutnX, avec la métrique de Kerr.

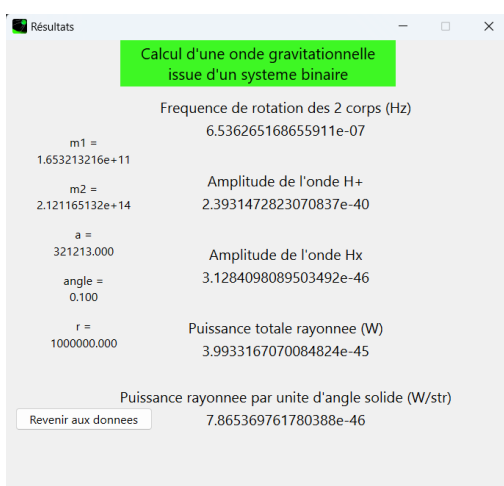
Ainsi, le logiciel commence par demander de taper le moment cinétique du corps massif, et affiche ensuite le gain de vitesse de la particule en orbite, sous forme de rad/s.



3.5.2: Précession du périastre

Chaque objet en orbite autour d'un astre possède un périastre. C'est le point de l'orbite le plus proche de l'objet qui l'attire. Il se trouve que la relativité prédit le fait que ce point, au fil du temps et des orbites, ait un mouvement de précession autour de l'astre attirant, du fait de la déformation de l'espace-temps. Près de nous, on voit ce phénomène pour la planète Mercure autour du soleil (on appelle aussi ce phénomène Décalage du périhélie de Mercure). On peut calculer cet effet dans notre logiciel. Pour ça, il faut d'abord lui fournir la masse du corps attirant, l'excentricité de l'orbite de l'objet, ainsi que la longueur du demi-grand axe de l'orbite de l'objet. Dans la fenêtre des résultats, le logiciel calcule la précession du périastre à chaque révolution, en radians.

3.6: Ondes gravitationnelles



Calcul d'une onde gravitationnelle issue d'un système binaire	
Fréquence de rotation des 2 corps (Hz)	
6.536265168655911e-07	
m1 =	
1.653213216e+11	
m2 =	Amplitude de l'onde H+
2.121165132e+14	2.3931472823070837e-40
a =	
321213.000	Amplitude de l'onde Hx
angle =	3.1284098089503492e-46
0.100	
r =	Puissance totale rayonnée (W)
1000000.000	3.9933167070084824e-45
Puissance rayonnée par unité d'angle solide (W/str)	
7.865369761780388e-46	

3.6.1: Calculs de base

Une onde gravitationnelle est une ondulation qui se propage dans le tissu de l'espace-temps, et qui est due à une distorsion brève et violente de celui-ci. Cette onde peut déplacer énormément d'énergie. Il y a différents phénomènes qui en produisent, comme par exemple deux étoiles formant un système binaire, une étoile en cours

d'implosion sur elle-même, ou encore un pulsar asymétrique. SpoutnX propose de calculer les ondes gravitationnelles créées par un système binaire. Ainsi, le logiciel commence par demander la masse des 2 corps concernés, la distance entre les 2 objets, ainsi que l'angle de vue de l'observateur en coordonnée radiale et la distance de l'observateur par rapport au système. La fenêtre des résultats affiche la fréquence de l'onde gravitationnelle, les deux amplitudes de l'onde, ainsi que la puissance totale rayonnée par l'onde et la puissance rayonnée par unité d'angle solide. Cela correspond à la puissance rayonnée par steradians (W/str).

3.6.2: Modélisation des ondes gravitationnelles

Dans la version 7, SpoutnX inclue une nouvelle fonctionnalité, qui permet d'étudier plus précisément les ondes gravitationnelles produites par un système binaire. Le logiciel calcule l'évolution de la vitesse des objets, l'évolution de la distance entre les objets et l'évolution de la puissance des ondes gravitationnelles produites, au cours du temps. En pratique, le logiciel calcule ces variables une première fois selon les données fournies par l'utilisateur, puis les recalcule ensuite à chaque orbite du système binaire.

Pour lancer cette modélisation, il faut se rendre dans le module Ondes Gravitationnelles, compléter la fenêtre des Caractéristiques et afficher les résultats. A partir de là, on accède aux caractéristiques de la modélisation grâce à un bouton «Modélisation». A partir de là, il est nécessaire de rentrer plusieurs données pour permettre au logiciel de calculer précisément les variables ci-dessus. Dans le module Ondes Gravitationnelles, hors modélisation, les valeurs sont calculées une seule fois, à un instant précis. Ainsi, lorsqu'on rentre la distance entre les corps du système binaire, on rentre la distance à l'instant que l'on veut étudier, notamment dans le cas où l'orbite du système est elliptique, puisque cette distance varie en fonction du temps. Comme énoncé plus haut, dans la modélisation, le logiciel calcule les variables une fois par orbite. Dans le cas d'un système binaire ayant une orbite elliptique, il est donc nécessaire de connaître la plus petite distance possible entre les objets, c'est à dire la distance au périastre, pour calculer précisément la valeur de l'attraction entre les corps. C'est pourquoi dans la fenêtre modélisation, le logiciel propose à l'utilisateur de rentrer cette distance entre les 2 corps au périastre. Par défaut, le logiciel affiche la valeur tapée précédemment dans la fenêtre Caractéristiques du module. Évidemment, si l'orbite des objets est circulaire, la question ne se pose pas et il n'est pas nécessaire de modifier la valeur.

On peut voir que dans la fenêtre des Caractéristiques de la modélisation, le logiciel affiche la période théorique de l'orbite du système. Il faut préciser qu'il est préférable que la valeur de cette période soit petite (idéalement inférieure à 24h), ce qui implique que la distance entre les objets doit être petite, proportionnellement à la masse des objets. Si la période est trop grande, il est probable que les calculs n'aboutissent pas. De la même manière, il est très important que la masse des objets du système binaire soient comparables, pour la même raison. Par exemple, il n'est pas pertinent d'étudier le système terre-

Soleil avec ce module, car le soleil est beaucoup plus lourd que la Terre.

Lorsqu'on regarde la variation de la puissance des ondes gravitationnelles d'un système binaire au cours de sa vie, on se rend compte que cette puissance reste environ stable pendant une très grande partie de sa vie, et que ce n'est que sur les dernières orbites du système binaire que cette puissance augmente de manière exponentielle. Aussi, il n'est pas spécialement pertinent de calculer cette puissance à chaque orbite du système binaire lorsque elle reste environ stable. C'est pourquoi en réalité, SpoutnX ne calcule pas toutes les variables à chaque orbite, mais échelonne les calculs toutes les n orbites. Lorsque la distance entre les objets a sensiblement diminué, le logiciel diminue le nombre d'orbites entre chaque calcul, jusqu'à calculer les variables à chaque orbite sur la fin de la simulation. Le nombre d'orbites entre chaque calculs au début de la simulation est modifiable par l'utilisateur, dans la fenêtre des Caractéristiques. Par défaut, le logiciel calcule une valeur de lui-même, selon une formule tout à fait expérimentale. Si la valeur vous semble étrange, vous pouvez donc la modifier facilement. Il faut cependant garder à l'esprit qu'une valeur trop grande diminuera la précision des résultats finaux, et qu'une valeur trop petite risque de décupler le temps que prendra le logiciel pour terminer la simulation.

La valeur par défaut est en théorie calculée pour que la simulation se termine en quelques minutes (moins de 5min), sur un ordinateur possédant un processeur assez récent, ayant une fréquence maximale de plus de 2GHz. Il faut bien comprendre que le temps que prendra la simulation dépend uniquement de la fréquence du processeur, et non de son nombre de cœurs ou de la quantité de mémoire ram de l'ordinateur. Il est donc conseillé de lancer la simulation en ayant au préalable réglé la fréquence du processeur sur une valeur proche de sa fréquence maximale (sur un ordinateur portable, il est pertinent de désactiver l'économiseur de batterie si celui-ci est activé).

Dans la fenêtre des Caractéristiques de la modélisation, vous pouvez choisir les variables que vous voulez calculer, grâce à des checkboxes. Les variables calculées par l'ordinateur sont donc la puissance des ondes gravitationnelles, la distance entre les 2 corps, la vitesse du 1^{er} objet, et celle du 2^e. A noter que diminuer le nombre de variables calculées ne diminuera pas le temps d'exécution du programme.

Pour lancer la simulation, il ne reste plus qu'à appuyer sur le bouton Calculer. Vous pouvez suivre son avancement à l'aide d'une barre de progression en bas de la fenêtre (il peut arriver que cette barre ne fonctionne pas, ce qui n'empêche pas la simulation de se dérouler normalement).

Si toutes les étapes ont été suivies, après quelques minutes, la modélisation arrive à son terme. Vous verrez alors s'afficher plusieurs graphiques, représentant les variables que vous avez choisies, en fonction du temps. Vous pouvez ensuite exporter ces graphiques en différents formats, dont png, svg, pdf. Analysons rapidement, la courbe de la puissance des ondes gravitationnelles d'un système binaire type. On voit que sur une grosse partie du graphique, la puissance augmente très largement en fonction du temps. Ce n'est que sur la fin (la partie droite) que l'on peut voir que cette puissance augmente de manière exponentielle. On peut également lire grâce à cette courbe le temps qu'il faudra aux corps pour coalescer, c'est à dire fusionner, en regardant la valeur du temps pour laquelle la courbe de la puissance devient presque verticale. En passant le curseur de votre souris sur la courbe, vous pouvez connaître avec précision ses coordonnées sur les axes du graphique, en regardant en haut à droite.

Dans la fenêtre des Caractéristiques de la Modélisation, vous pouvez également voir un bouton «Enregistrer les données». Il permet d'enregistrer toutes les valeurs des variables calculées par le logiciel dans un fichier excel, (xlsx) afin de pouvoir travailler dessus à l'aide d'un autre logiciel que SpoutnX. En réalité, toutes les valeurs ne sont pas enregistrées dans ce fichier (cela produirait un fichier beaucoup trop volumineux) mais un très grand échantillon des données est quand même enregistré.

Cette fonctionnalité est probablement la plus complexe du logiciel SpoutnX, si vous détectez un bug, si vous avez des interrogations, ou même simplement l'envie d'échanger autour de celle-ci, n'hésitez-pas à nous contacter, via les réseaux sociaux ou par mail.

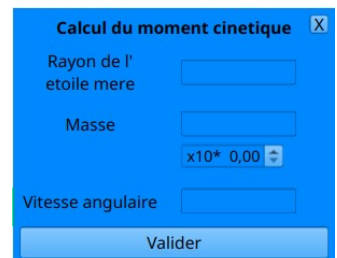
4: Fonctionnalités diverses

4.1: Option «Ajouter sa propre métrique»:

Dans l'onglet en haut «Réglages», vous pouvez voir la mention «Ajouter une métrique»: Cela peut vous permettre de taper une métrique personnelle, qui n'est pas présente dans le logiciel. Vous ne pouvez en rentrer qu'une: si vous en rentrez une à nouveau, l précédente sera effacée. Les données persistent même après la fermeture du logiciel. Vous devez donc taper les valeurs de votre métrique en chiffres, sans inconnues, ainsi que le nom que vous voulez lui donner. Vous pouvez taper vos valeurs pour les 4 coordonnées: temporelle, radiale, colatitude, longitude: (t, r, θ, ϕ) . Pour l'instant elles ne sont utilisées que dans le module «Dilatation temporelle». C'est une fonctionnalité encore expérimentale.

4.2: Outil de calcul du moment cinétique:

Dans certaines fonctionnalités du logiciel, comme dans le calcul des caractéristiques d'un trou noir de Kerr, il est nécessaire de fournir au logiciel la valeur du moment cinétique (aussi appelé moment angulaire) d'un astre, et cela peut parfois être complexe à calculer. C'est pourquoi il existe un outil dans SpoutnX qui permet de calculer cette variable. Pour cela, il faut appuyer sur le bouton dont le logo est une sphère verte, dans la fenêtre Caractéristiques (pour les modules concernés évidemment). Cela ouvre l'outil, en bleu foncé. Ainsi, pour calculer le moment cinétique d'un astre, l'outil demande à l'utilisateur la masse de cet astre (en kg), sa vitesse angulaire (en rad/s), et son rayon (en m). Si l'on analyse un trou noir, il est nécessaire de comprendre que le rayon attendu ici est le rayon de sa singularité, et non le rayon de l'horizon des événements (qui n'a pas de réelle existence physique). Or, il est rare que l'on connaisse le rayon de la singularité d'un trou noir avec précision. Cependant, on sait aujourd'hui que le moment cinétique d'une étoile se conserve lorsqu'elle implose en trou noir (aux imprécisions près). Il est donc possible d'entrer dans le logiciel le rayon de l'étoile mère du trou noir. On considère ici que l'étoile perd pas ou peu de masse lors de son implosion. Après avoir tapé les valeurs, il suffit de cliquer sur terminer pour fermer l'outil. La valeur calculée sera automatiquement prise en compte dans l'encart destiné au moment cinétique.



5: Problèmes et bugs:

SpoutnX est un logiciel encore jeune, il est donc probable qu'il comporte encore de nombreux bugs et erreurs. Aussi, veuillez excuser ces possibles désagréments. Mais surtout, aidez à les corriger! Pour cela, vous pouvez envoyer un mail à l'adresse spoutnx23@gmail.com, ou nous contacter sur Instagram. C'est très important pour améliorer SpoutnX.

Cependant, si vous rencontrez soudainement des problèmes avec le logiciel, il est possible, comme pour tout logiciel, et indépendamment du code source, qu'il y ait eu un bug lors de l'utilisation. Commencez donc évidemment par redémarrer le logiciel. Si le problème persiste, assurez-vous de n'avoir déplacé aucun fichier du logiciel. Si ce n'est pas le cas, tentez de le réinitialiser. Pour cela, sur windows, ouvrez votre explorateur de fichier, puis allez dans le répertoire C:\, puis dans Utilisateurs\. Ensuite, ouvrez votre dossier utilisateur, qui porte votre nom d'utilisateur, et vous devriez normalement voir un dossier nommé SpoutnX. Si vous avez enregistré une

métrique dans le logiciel, pensez à la noter, puis **supprimez complètement le dossier**. Lorsque vous rouvrirez le logiciel, vous aurez un profil utilisateur propre, neuf, et sans bugs. En dernier recours, si les problèmes persistent, désinstallez SpoutnX et réinstallez-le.