

Grande Ourse

Astronomes Amateurs de la Côte (ASTRAC) | Observatoire de Marcelin, Morges
www.astrac.ch | info@astrac.ch

Bulletin no 22

Edition 2021

GPS, Kepler, Newton et Einstein

Comment les théories de la physique moderne ont permis la création d'un outil que nous utilisons tous les jours : le GPS.

Rappel des théories sur les orbites des planètes

Kepler a démontré que les orbites des planètes étaient elliptiques. Newton a permis de comprendre les lois qui gouvernent le mouvement des planètes et expliquent l'orbite essentiellement elliptique. Ces lois ont permis à Laplace de calculer les perturbations des orbites dues à l'attraction entre les planètes, menant à la découverte de Neptune suite aux calculs de Leverrier. Et finalement, Einstein a revu en profondeur les lois de la gravitation dans la théorie de la relativité générale ce qui a permis d'expliquer de très petites anomalies dans l'orbite de Mercure. (nb : ces découvertes sont détaillées dans Les Nouvelles de l'ASTRAC de janvier et février 2021). Tout cela est fascinant mais semble loin des préoccupations quotidiennes, parfois le public se demande à quoi sert la science fondamentale

Rappel sur les théories de la relativité

Avant d'en venir au GPS, un petit rappel sur les deux théories d'Einstein. Rappelons qu'en science le mot « théorie » n'a pas le sens d'hypothèse qu'on lui donne dans la vie courante. **Une théorie scientifique désigne un ensemble de lois et d'explications cohérentes et confirmées par l'expérience avec une certaine précision.**

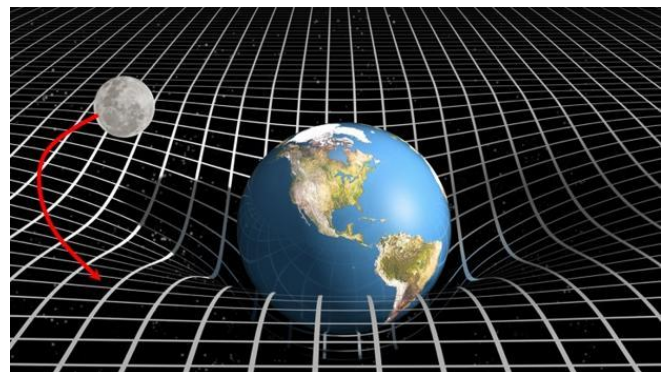
Relativité restreinte

La théorie de la relativité restreinte (1905) est une théorie de l'espace et du temps qui permet d'assembler la théorie de l'électromagnétisme et les lois de conservation de l'énergie et du moment

(masse x vitesse) de manière cohérente. **Elle démontre que notre perception (notre mesure) du temps et de l'espace dépend de notre vitesse de déplacement par rapport à l'objet mesuré.** Nous n'avons pas eu besoin de la relativité restreinte pour le mouvement des planètes.

Relativité générale

La théorie de la relativité générale (1915) est une théorie de la gravité. **Elle modélise la gravité par une déformation de l'espace-temps** (des deux, pas juste de l'espace). De manière simplifiée, cette déformation fait que les corps célestes suivent une pseudo ligne droite (une géodésique) car c'est le chemin de moindre effort dans un champ gravitationnel. Evidemment cette géodésique a la forme d'une ellipse, avec de petites nuances dans les cas de forte gravitation comme Mercure.

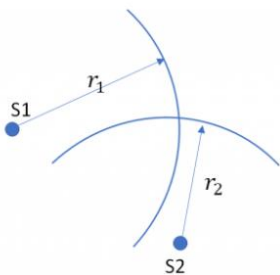


Le GPS

Mais quels sont les liens avec le Global Positioning System GPS ?

Principes de base

Tout le monde sait que le GPS permet de connaître notre position grâce à des signaux satellites. Le principe de base est simple : si vous connaissez votre distance exacte à deux objets (au sol) et la position de ces deux objets, il suffit de tracer un cercle de la distance en question centré sur chaque objet, et vous obtenez deux positions possibles. Si l'une d'entre elles est en mer et que vous avez les pieds au sec, vous savez que l'autre position est la bonne.

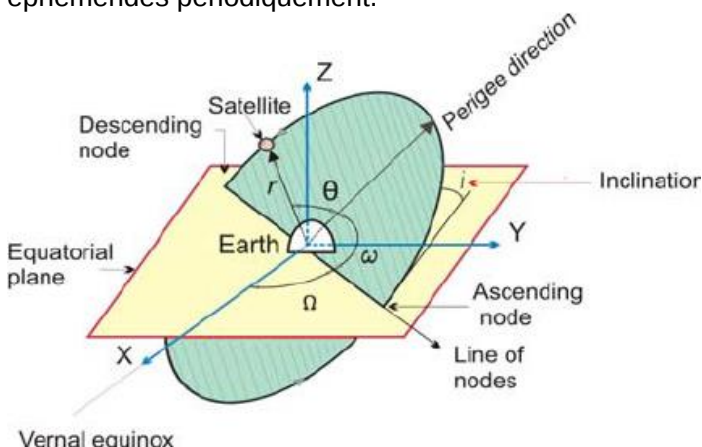


Le GPS fait la même chose mais par rapport à des satellites : deux positions sont identifiées, mais une est dans l'espace et peut être ignorée. Mais il y a quelques problèmes pratiques : il faut

connaître la position des satellites au mètre près alors qu'ils circulent à 3km/s. Il faut aussi connaître votre distance au satellite au mètre près. Ils sont à 20'000 km de vous au moins, difficile d'utiliser un mètre pliable.

Position, théorie de Kepler et de Newton

Les positions des satellites sont connues dans le court terme par les lois de Kepler – l'orbite et la **position** des satellites dans leur orbite **est transmise** par les satellites et également par le réseau GSM, **sous forme de 6 nombres** par satellite : **ses éphémérides**. Ces nombres permettent de calculer la position du satellite, comme il est possible de calculer la position d'une planète. Mais évidemment le satellite est soumis à de petites perturbations par la Lune et par les irrégularités de l'attraction terrestre, en cela il suit les lois de Newton. L'orbite des satellites est en permanence mesurée depuis la Terre et les nombres sont périodiquement adaptés. Donc les lois de Kepler permettent ces prévisions et celles de Newton nous forcent à considérer les perturbations et mettre à jour les éphémérides périodiquement.



Mesure de la distance

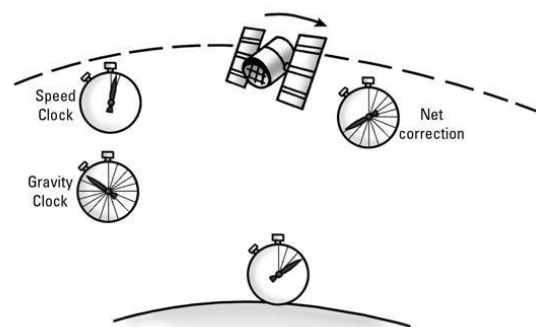
La mesure de la distance au satellite est en théorie très simple. On mesure le temps de propagation d'un signal électromagnétique qui se déplace toujours à la vitesse de la lumière dans le vide, selon la théorie de la relativité restreinte (il y a une correction pour la traversée de l'atmosphère mais elle est assez bien connue).

Détail pratique, il faut que le temps d'émission et le temps de réception soient les deux parfaitement connus. A la vitesse de la lumière, une différence de 1 microseconde cause une erreur de 300m! Pas pratique pour un avion qui cherche à s'aligner sur la piste d'atterrissage. Nous savons construire des horloges d'une précision fantastique ... mais pas les réduire à la taille et au prix d'un composant de téléphone mobile. C'est là que le système GPS est génial. **En utilisant au moins 4 satellites, il est possible de déterminer la dimension du temps et des 3 dimensions de l'espace**, simplement en connaissant le temps exact de l'envoi du signal depuis les satellites -ce que le satellite fournit. Il n'y a donc pas un satellite qui donne l'heure et 3 autres la position, mais bien **un jeu de 4 équations qui déterminent les coordonnées d'espace-temps**. En pratique on préfère avoir 6 ou 7 satellites pour une meilleure précision (chaque mesure ayant une certaine erreur) et pour qu'ils soient bien distribués dans le ciel.

Effets expliqués par les théories de la relativité

Et la relativité dans toute cela ?

Nous avons vu que la gravité était expliquée par une déformation de l'espace-temps. Cette déformation fait tourner le satellite autour de la Terre. Mais **la gravité fait aussi ralentir les horloges**. Un tout petit peu. Le satellite étant à 20'000 km de la surface de la Terre, la gravité y est quatre fois plus faible. Les horloges sont moins ralenties que sur Terre. La différence est de 45 microsecondes par jour. Soit plus de 13 km à la vitesse de la lumière ! Il a donc fallu tenir compte de ce facteur expliqué par la relativité générale.



D'autre part le satellite avance relativement vite (3km/s). On est très loin de la vitesse de la lumière, donc l'effet relativiste expliqué par la relativité restreinte est très faible. Notre mesure d'une horloge qui bouge à cette vitesse est trop rapide de 7

microsecondes par jour, dans l'autre sens que l'effet de la gravitation. Le résultat est une différence de 38 microsecondes par jour. **Les horloges à bord des satellites ont été réglées pour compenser ces différences.** De plus leur temps est mesuré en permanence depuis le sol et de petites corrections à appliquer sont aussi transmises avec les coordonnées des orbites de chaque satellite.

Conclusion

Nous voyons qu'un objet d'usage très courant n'a été possible que grâce aux théories de Kepler, Newton et Einstein, dont la plupart ont été faites dans le cadre de l'astronomie, sans application pratique immédiate. Même la mesure de la vitesse de la lumière a d'abord été réalisée avec succès grâce aux satellites de Jupiter. Bien sûr d'autres sciences ont aussi été nécessaires pour le développement du GPS : l'électromagnétisme de Maxwell et la théorie

quantiques pour le développement des semi-conducteurs. Toutes ces sciences ont été développées sans savoir à quoi elles allaient servir. Il faut se rappeler que l'ampoule électrique n'a pas été développée par quelqu'un qui cherchait à faire une meilleure bougie, mais suite aux travaux de nombreux scientifiques et expérimentateurs qui en premier lieu cherchaient uniquement à mieux comprendre notre monde.

J.-M. Lugin

Sources : Cours GPS

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLGvhNliu1ubyEOJga50LJMzVXtbUq6CPo>, Wikipedia et divers articles pour valider les chiffres des corrections du temps.

<https://www.telesens.co/2017/07/17/calculating-position-from-raw-gps-data/> Ephémérides des satellites GPS:

<https://www.gnssplanning.com/#/satellites>

'Oumuamua et Borissov : Qui sont-ils ?

Ce sont les premiers objets interstellaires jamais observés qui n'appartiennent pas à notre système solaire.

En 2017, le 18 octobre, le premier objet a été observé par un astronome de l'Université de Hawaï. Il a reçu le nom de : «**'Oumuamua**» ce qui signifie en hawaïen : « un messager de loin arrivé en premier », d'où son appellation.



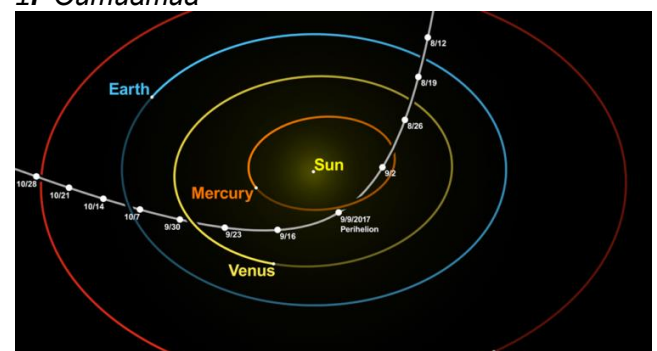
1I 'Oumuamua (= Interstellaire) - vue d'artiste

Sa vitesse excessive : 26 km/sec. ne permet même pas au Soleil de le maintenir sur une orbite fermée. Il ne reviendra jamais. Mais alors d'où vient-il ? De la constellation de la Lyre ? De Véga ? En tout cas il erre depuis des centaines de millions d'années.

Depuis toujours notre système solaire est traversé par des corps interstellaires, mais en détecter un est exceptionnel. Car ces objets sont très sombres (magnitude 22,2) - très petits et hyper rapides. **1I 'Oumuamua n'a pas de queue-pas de chevelure,**

il ne transporte pas de glace malgré son voyage dans le vide interstellaire où la température est de qq °K et où l'espace est riche en H₂ et H₂O. On l'a identifié grâce à sa brillance variable, qui est multipliée par 10x toutes les env. 7.3 heures, alors que les astéroïdes de notre système solaire ont une variance de brillance de 10 à 20% Les astronomes en conclurent qu'il s'agissait d'un objet tournant, de env. 100 m. de diamètre et d'une longueur d'env. 800 m. **Si on a pu le détecter c'est qu'il a passé près de la Terre** (60 millions de km). L'analyse de la variance de sa brillance suggère que ce corps a une forme très effilée et qu'il présente vers la Terre tantôt une face large, tantôt un côté très étroit. 'Oumuamua n'est pas une comète car il ne montre aucune perte de masse, il est vraisemblablement constitué de roches riches en métaux, pauvres en glace. L'hypothèse d'une origine artificielle est pour le moment fortement récusée. Ce que l'on a observé c'est une variation de sa vitesse due aux forces gravitationnelles exercées par le Soleil et ses planètes, ainsi que par une force non gravitationnelle résultant de la pression de radiation exercée par la lumière du Soleil.

Ci-après les caractéristiques orbitales de 1I 'Oumuamua



3 astronomes proposent que 'Oumuamua serait né de l'agglomération de particules de poussières dans la chevelure d'une comète active et s'en serait détaché (phénomène observé dans la chevelure de Tchouri). Ces structures pourraient piéger un peu d'eau qui se transformerait en glace lors de leur formation, et se sublimerait instantanément à l'approche d'une étoile.

C'est aussi grâce aux instruments de plus en plus performants, et aux observations scrupuleuses (programme Pan-Starrs depuis 2010) que d'autres objets seront détectés. Suite à quelques raisonnements probabilistes les chercheurs ont estimé que le nombre de ces visiteurs interstellaires pourraient s'élever à 1 corps tous les 10 UA au cube, soit environ 10'000 dans une sphère centrée sur le Soleil et de rayon allant jusqu'à Neptune (30 UA). En fait 'Oumuamua est juste un objet de forme étrange venu d'ailleurs.

Grande question : A quand la prochaine visite ?

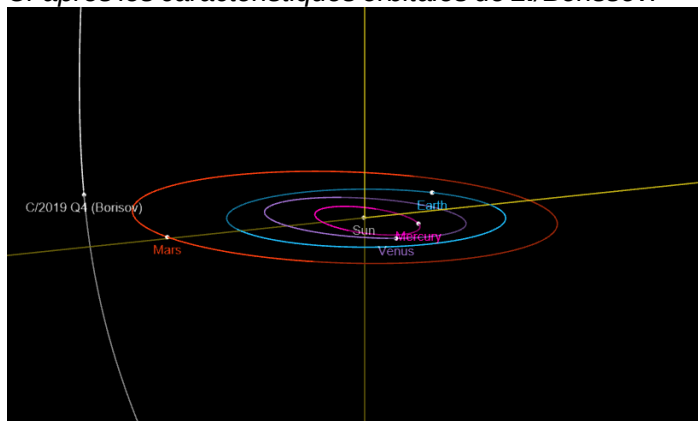
La réponse ne se fit pas trop attendre puisqu'en août (30.08) 2019 déjà, **un astronome amateur** (Gwennadi Borissov), avec son télescope, fait maison, **découvre un deuxième objet appelé : 2I/Borissov.**



Vue d'artiste

Cet objet est encore plus rapide : env. 30 km/ sec., il a une trajectoire encore plus excentrique, mais ressemble plus à une comète par sa forme. En mars 2020 Hubble a observé une augmentation de sa brillance alors qu'un petit bloc de noyau s'en est décroché- phénomène souvent observé sur une comète. 2I/Borissov a "frôlé" la Terre à une distance d'env. 3,8 UA, avec une élongation de 38°, et il s'est trouvé à 2,01 UA du Soleil le 8 décembre, observation du télescope Hubble.

Ci-après les caractéristiques orbitales de 2I/Borissov.



Autre question : Serait-ce un de ces objets en dehors de leur système natal et qui tend à les éparpiller à travers les galaxies, et jusque vers les systèmes stellaires, comme au temps de la formation de notre système il y a 4,5 milliards d'années ?

Vu l'aspect chaotique de cette dynamique et les déviations de la trajectoire de ces objets errants, sous l'influence du champ gravitationnel des étoiles rencontrées, il est impossible de dire depuis combien de temps ces objets dérivent et d'où ils viennent et où ils vont. Mais plus on détectera de ces visiteurs insolites, plus on améliorera notre compréhension de ces bolides. Et aussi certaines observations obligeront les chercheurs à affiner ou revoir leur compréhension de la formation des systèmes planétaires.

Evocation de la panspermie

D'après certaines estimations un tel objet frapperait notre planète tous les 200-300 millions d'années. Mais de tels objets se disloqueraient et se vaporiseraient dans l'atmosphère.....auraient-ils pu atteindre le sol et apporter la vie ? Température, rayons cosmiques, choc à son arrivée dans l'atmosphère terrestre après des millions d'années, les cellules vivantes à l'ADN si fragile, profondément enfouies dans la roche survivraient-elles à ces conditions extrêmes ? Ainsi les questions demeurent: où ? comment la vie surgit-elle ?

Et la suite ?

Pour mieux comprendre ces objets I, le plus important est d'en trouver d'autres. **Au Chili se construit l'observatoire « Vera Rubin »** dont le télescope sera doté d'un miroir collecteur de 8,4 m et d'un détecteur de 3 x 10 milliards de pixels. Chaque image de cette gigantesque caméra couvrira une aire de 40x la Lune. Ainsi cet observatoire devrait repérer un certain nombre de visiteurs interstellaires, en plus des astéroïdes, comètes de la ceinture de Kuiper. Et bientôt on pourra, peut-être, savoir combien d'entre eux ressemblent à 'Oumuamua, ou à Borissov ?

L'idéal serait d'envoyer une sonde spatiale comme sur Tchouri. Mais quels obstacles !!! : temps très court- vitesse- objets petits et peu lumineux- et disparaissant en quelques mois.

Cependant vers 2028 des ingénieurs, aidés de techniques toujours plus élaborées, et secondés par des chercheurs passionnés, pleins d'idées, enverront une station au point de Lagrange (comme pour le JWST) distant de 1,2- 1,5 millions de km, pour percer les secrets de ces visiteurs interstellaires.

F. Grandjean

Source : Pour la Science, novembre 2020, Wikipédia