AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 15, octobre 2016

Penser sans modèle ?
Emergence, créativité, sérendipité

Res-Systemica, volume 15, article 12

Autour de l'"anomalie" des sondes Pioneer

François Dubois

contribution reçue le 15 octobre 2016

13 pages

Creative Commons

Autour de l'"anomalie" des sondes Pioneer

François Dubois [a,b]

[a] *Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques, Cognitifs Et Techniques*
ENSAM - ParisTech, 151 Bd de l'Hôpital, Paris 13ème, France.

[b] *Professeur de Mathématiques*
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France.
francois.dubois@math.u-psud.fr

15 octobre 2016 [1]

Résumé.
Nous présentons quelques éléments du périple des sondes Pioneer 10 et 11, premiers satellites à quitter le système solaire. Puis la découverte d'une anomalie dans leurs trajectoires et la résolution de ce problème, après près de trente cinq années de travail de toute une communauté de scientifiques et d'ingénieurs.

Around Pioneer's spacecraft "anomaly"

Abstract
We present some elements of the journey of Pioneer 10 and 11 probes, the first satellites to leave the solar system. Then the discovery of an anomaly in their trajectory and the resolution of this problem, after nearly thirty five years of work of a community of scientists and engineers.

Mots-clés : ingénierie, thermique, modélisation, simulation numérique, gravitation.
Classification AMS : 37M05, 93C41

[1] Cette contribution fait suite à un exposé de même titre proposé lors des journées de l'AFSCET au Moulin d'Andé "Penser sans modèle ? Emergence, créativité, sérendipité", le samedi 21 mai 2016.

1) Le premier survol de Jupiter

Evoquons rapidement l'histoire des deux sondes Pioneer 10 et 11. Avec un parfait lancement de Pioneer 10 le 3 mars 1972 tout d'abord. Cette petite sonde de trois à quatre mètres d'envergure (figure 1) est avant tout une antenne de près de trois mètres de diamètre. Pioneer 10 a été le premier engin automatique fabriqué par l'homme à survoler Jupiter le 3 décembre 1973 après un voyage de plus de dix huit mois (figures 2, 3 et 4) Surtout, grâce à la vitesse acquise par le rebond de sa trajectoire en passant au large de Jupiter, Pioneer 10 est le premier engin humain envoyé sur une orbite hyperbolique, donc destiné à quitter le système solaire...

Cet événement a suscité un enthousiasme réel chez un grand nombre d'acteurs du projet, entre autres ! Nous ne détaillons pas l'histoire de la plaque (figures 5 et 6) proposée par Carl Sagan (1934 - 1996) avec un message destiné aux éventuels extra-terrestres qui pourraient intercepter Pioneer dans le futur (voir par exemple le livre de Wolverton [16]). Pour information, le message graphique destiné aux extra-terrestres représenté à la figure 5 a eu bien du mal à être compris par les scientifiques humains !

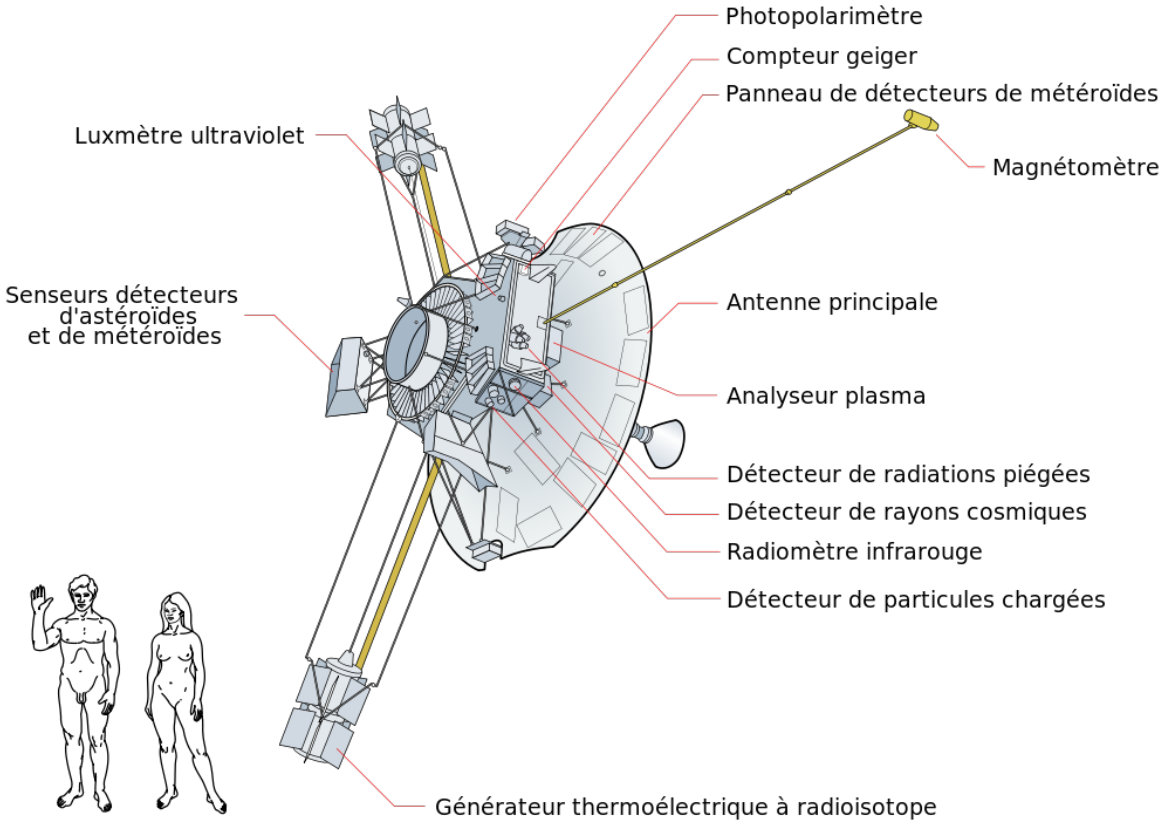

Figure 1. Vue générale de Pioneer 10 (source image : Nasa).

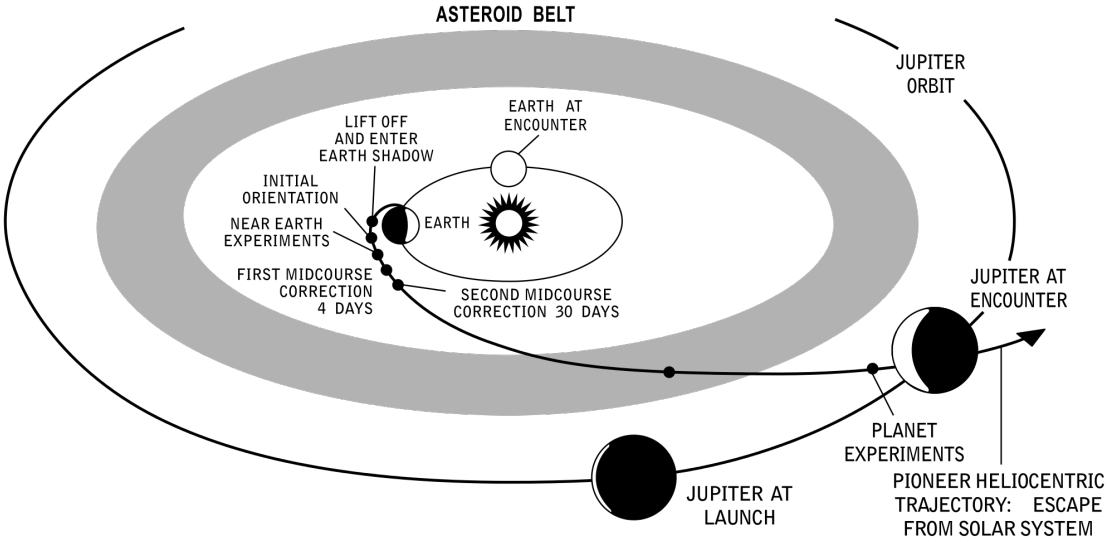

Figure 2. Trajectoire de la sonde Pioneer 10 vers Jupiter (source image : Nasa).

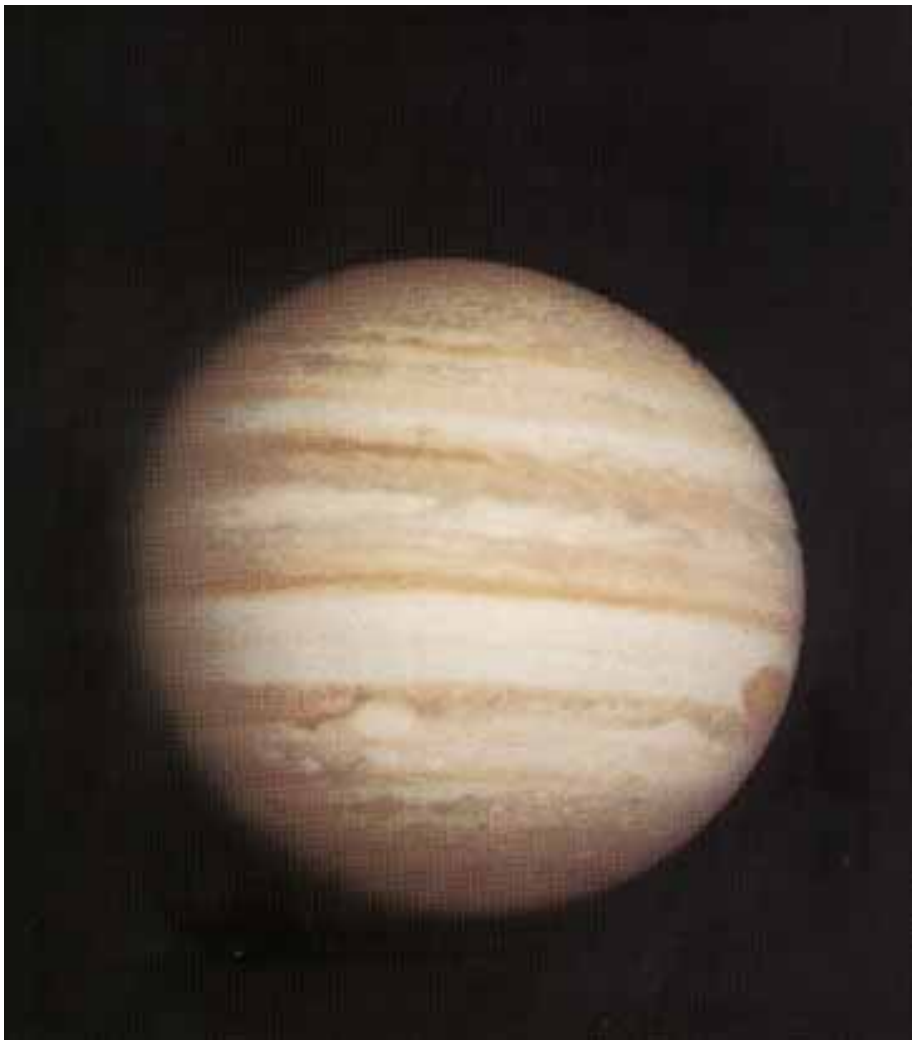

Figure 3. Photo de Jupiter prise par Pioneer 10 (source image : Nasa).

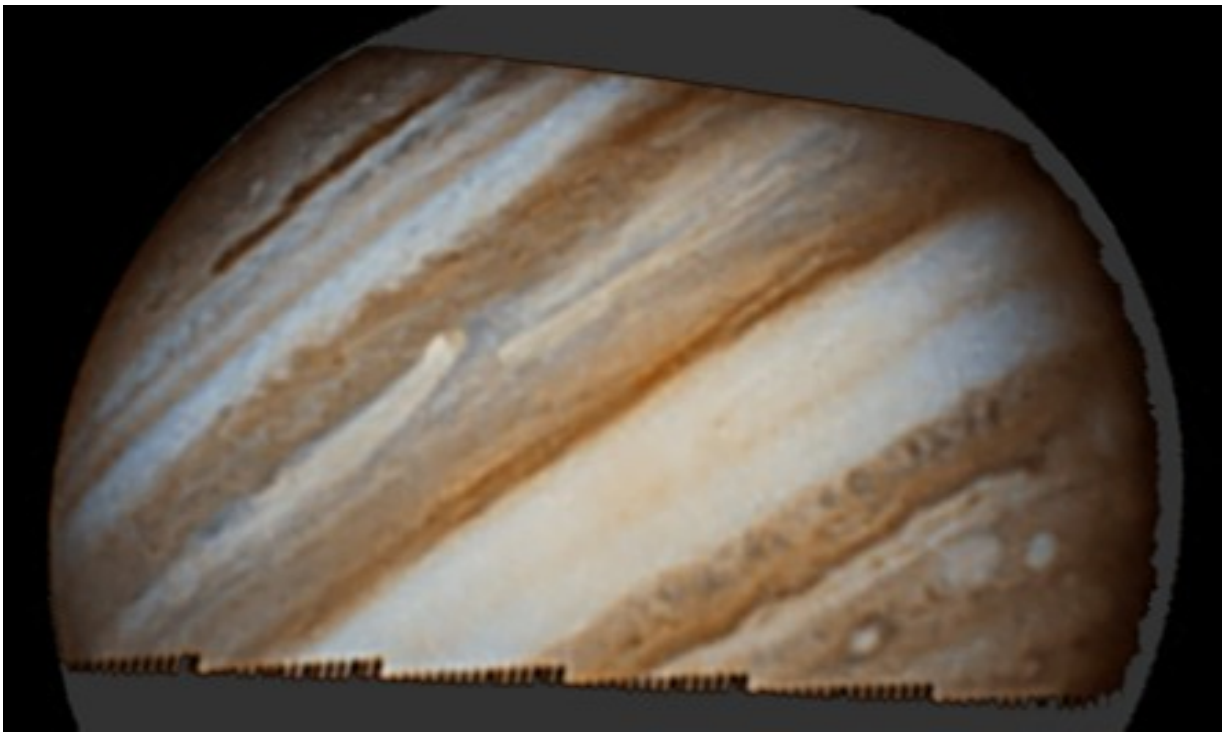

Figure 4. Jupiter vu par Pioneer 10 le 3 décembre 1973 (source image : Nasa).

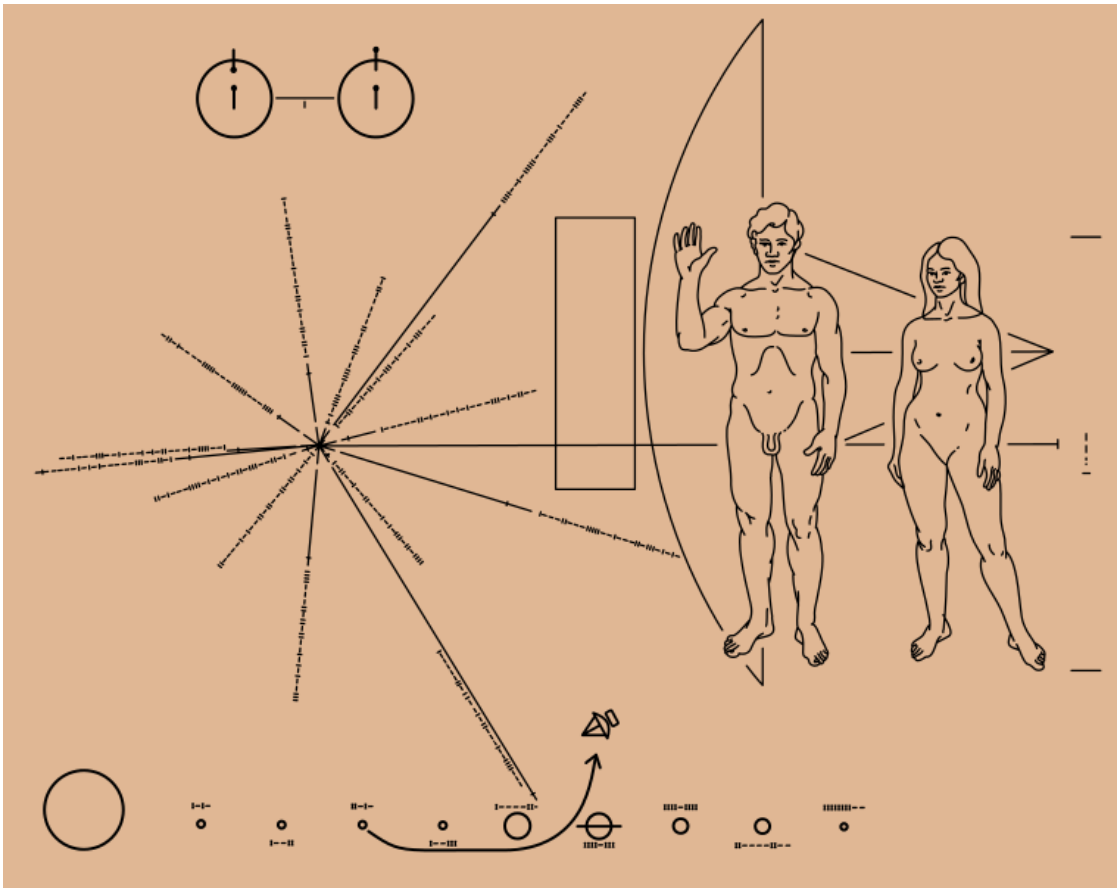

Figure 5. Le message de la plaque de Pioneer 10 et 11 (source image : Nasa).

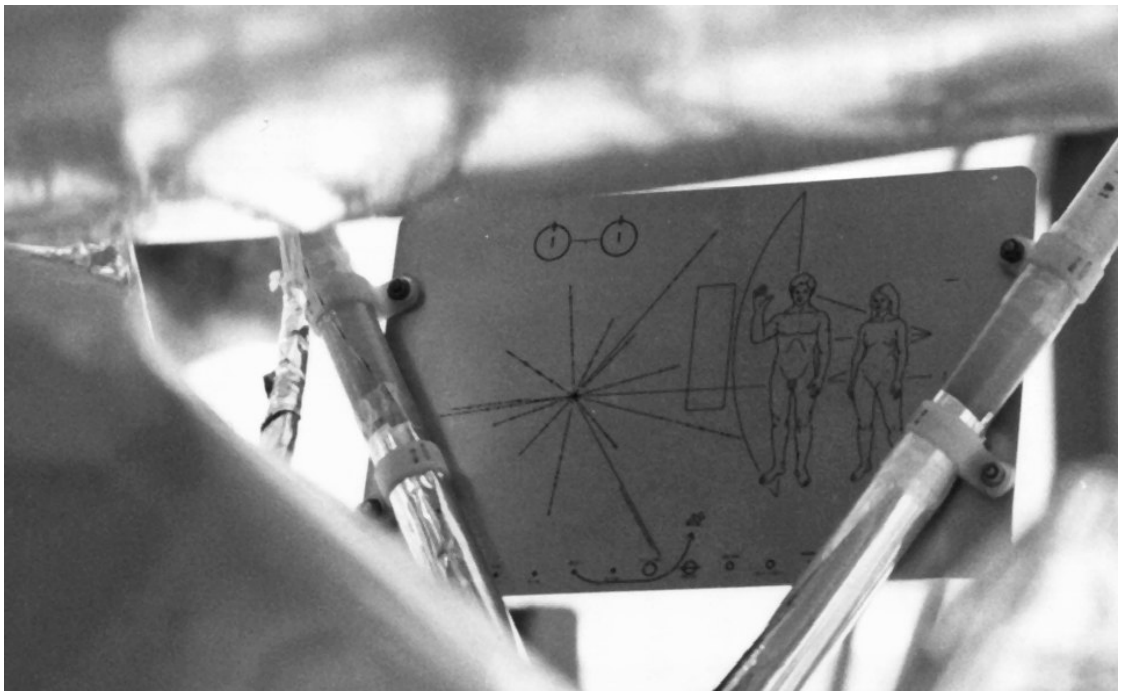

Figure 6. Intégration de la plaque sur la sonde Pioneer 10 (source image : Nasa).

Figure 7. Jupiter vu par Pioneer 11 le 2 décembre 1974 (source image : Nasa).

Pioneer 11, lancé le 5 avril 1973 par une fusée Atlas-Centaur, passe au large de Jupiter le 2 décembre 1974 (figure 7). Puis, avec l'aide de l'effet de fronde de Jupiter et un alignement des planètes Jupiter et Saturne, Pioneer 11 passe au large de Saturne le 01 septembre 1979 (figures 8 et 9). Il quitte lui aussi le système solaire.

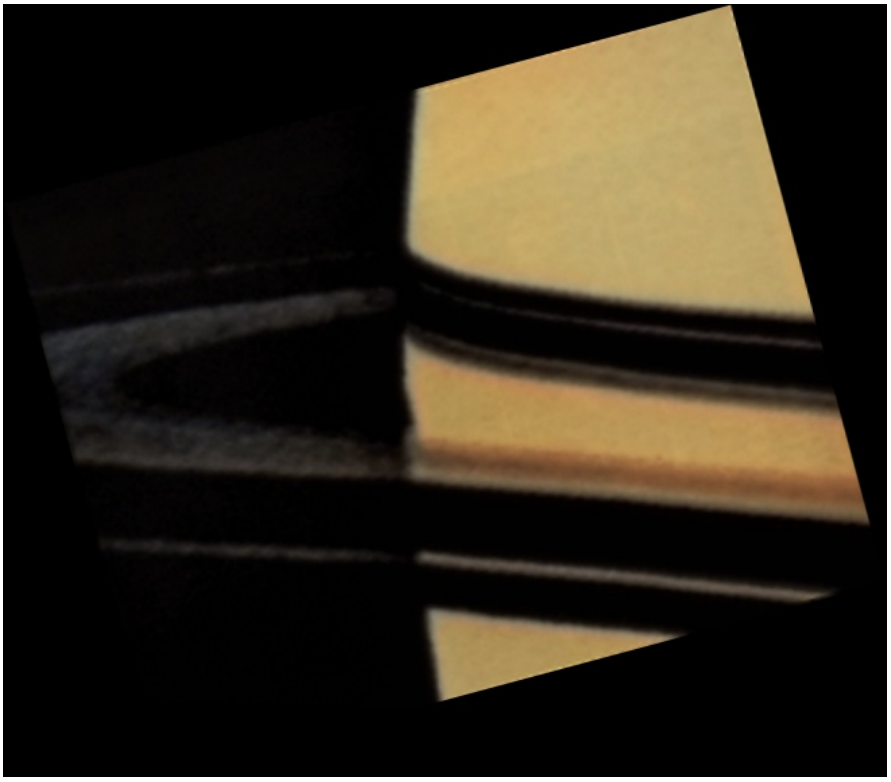

Figure 8. Saturne vu par Pioneer 11 le 01 september 1979 (source image : Nasa).

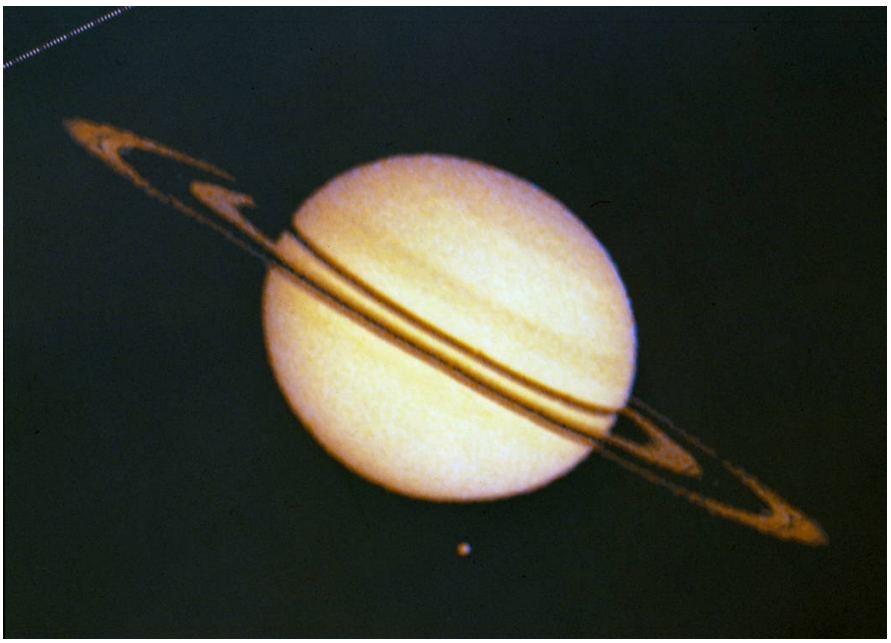

Figure 9. Saturne et Titan vus par Pioneer 11 le 2 september 1979 (source image : Nasa).

Ensuite, Jupiter et Saturne ont été visitées par les sondes Voyager, entre 1979 et 1982. La sonde Cassini survole Jupiter en décembre 2000 puis est mise en orbite autour de Saturne en 2004. A l'heure où j'écris ces lignes, la mission est prévue pour durer jusqu'en 2017... au moins ! La sonde New Horizons, en route pour Pluton (atteinte en juillet 2015), survole Jupiter en février 2007. La sonde Juno s'est mise en orbite autour de Jupiter en juillet 2016. Notons que Voyager 2 a visité aussi Uranus (1986) et Neptune (1989).

2) Une anomalie de la trajectoire

Chronologie de la fin de mission des sondes Pioneer. Le 13 juin 1983, Pioneer 10 dépasse l'orbite de Neptune. Le 29 september 1995, Don Savage, depuis les "Headquarters" de la NASA à Washington, annonce la fin de la mission Pioneer 11 [12] : "After nearly 22 years of exploration out to the farthest reaches of the Solar System, one of the most durable and productive space missions in history will come to a close. Now beyond the orbit of Pluto and more than four billion miles from Earth, NASA's unmanned Pioneer 11 spacecraft is heading out into interstellar space. Because the spacecraft's power is too low to operate its instruments and transmit data, on September 30 NASA will cease daily communications with the spacecraft. At that distance, faint signals from Pioneer 11 traveling at the speed of light take over six hours to reach Earth. [...]"

La fin officielle de la mission Pioneer 10 est actée le 31 mars 1997. Jusqu'au 17 février 1998, Pioneer 10 est l'objet fabriqué par l'homme le plus éloigné de la Terre (69.419 ua). Puis la sonde Voyager 1, qui va plus vite, le dépasse. Le 2 mars 2002, une opération de réception de télémesure (39 minutes) est réussie. Des données sont reçues depuis une distance de 79,83 ua. Dernière réception réussie de télémesure le 27 avril 2002, depuis une distance de 80,22 ua (plus de 12 milliards de kilomètres) et durant 33 minutes. La réception d'un dernier signal, très faible, en provenance de Pioneer 10 a lieu le 23 janvier 2003. Enfin, le 7 février 2003, une dernière tentative infructueuse de contact avec la sonde. Le 30 décembre 2005, Pioneer 10 est à 89,7 ua du Soleil.

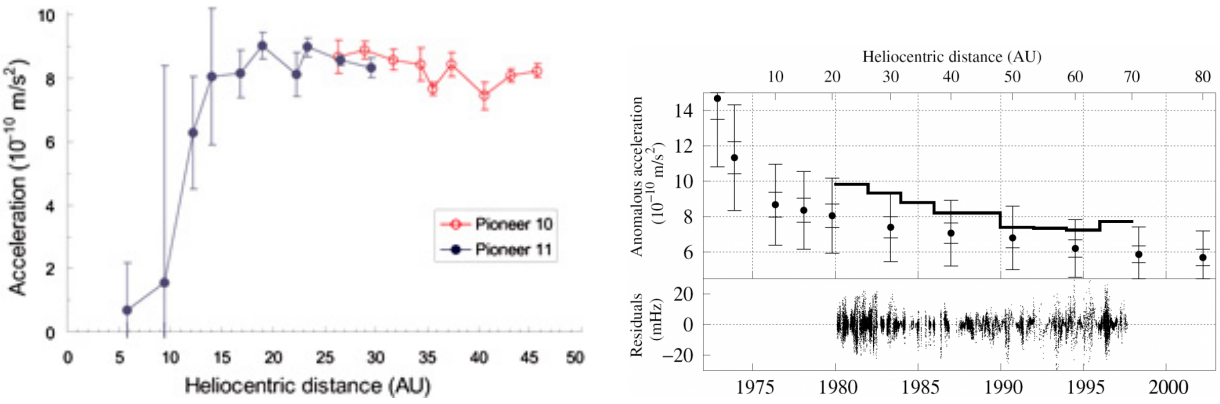

Figure 10. Accélération résiduelle $a_p \simeq (8.74 \pm 1.33)\, 10^{-10}\, m/s^2$ dépouillée des télémesures des sondes Pioneer, par une modélisation de l'effet Doppler radiométrique à l'origine des données (selon Turyshev, Toth *et al.* [13, 14]).

Une difficulté non prévue surgit au milieu de ce temple du rationnel. Une différence entre la trajectoire observée et la trajectoire attendue des sondes Pioneer 10 et 11 est détectée grâce à une analyse très précises des télémesures dès les années 1980. Elle est étudiée sérieusement depuis 1994 (voir par exemple Anderson *al* [1] ou Murphy [10]). Avec des données recueillies jusqu'en 2003, les scientifiques de la NASA auront dépouillé quarante années d'observations. Ils mettent en évidence une accélération de la sonde, pas tout à fait correctement modélisée par les lois de Newton, même aidé par Einstein !

Figure 11. Quelques acteurs de la traque de Pionner 10 : Edward Murphy, Slava Turyshev et Viktor Toth (de gauche à droite). Sources : www.thegreatcourses.com, *Le Monde*, 24 juin 2013 et www.quora.com.

L'accélération résiduelle de Pioneer 10 ($a_p \simeq (8.74 \pm 1.33)\, 10^{-10}\, m/s^2$) est une accélération environ 10 milliards de fois plus petite que l'accélération ressentie sur terre... soit le millionième de l'accélération de gravité vue en 2015 par Rosetta-Philae sur la comète Tchourioumov-Guerassimenko (voir par exemple Hilchenbach et Rosenbauer [6])

Devant cette observation non prévue, les scientifiques ont recherché deux classes de causes possibles : "causes banales" ou "nouvelle physique". Parmi les causes banales, les effets classiques négligés ou mal modélisés dans l'analyse initiale, les erreurs de mesure, une poussée par une fuite de gaz, le rayonnement de chaleur inhomogène... Parmi les causes liées à une nouvelle physique, un effet gravitationnel, la remise en cause du principe d'équivalence qui exprime que la masse inertielle et la masse gravifique sont égales quel que soit le corps. En d'autres termes, il s'agit de remettre en cause que tous les objets sont affectés de la même manière par la gravité, et une expérience pédagogique comme celle menée sur la Lune en août 1971 (figure 12).

Dans un document de 165 pages [13] du Jet Propulsion Laboratory (2010), Turyshev and Toth proposent une analyse cartésienne des diverses causes possibles pour l'accélération résiduelle des sondes Pioneer. Les forces non gravitationnelles externes à la sonde, comme la pression de radiation solaire, le vent solaire, l'interaction avec les environnements plané-

taires, les champs magnétiques interplanétaires, la traînée due à la poussière interplanétaire... Ou les forces non gravitationnelles ayant une origine à bord, liées à la modélisation des manœuvres, d'autres sources de dégazage, les forces de recul thermiques ou la force de recul due aux ondes radio.

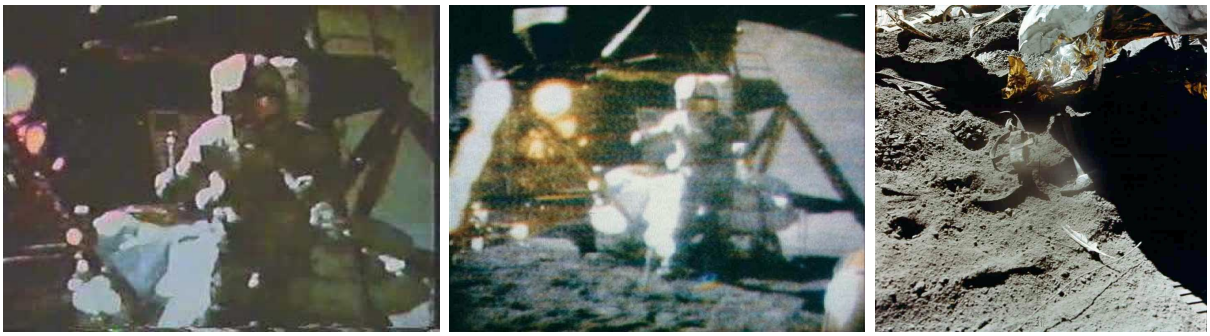

Figure 12. Expérimentation du principe d'équivalence sur la Lune (David Scott, mission Apollo 15, 02 août 1971). On lâche un marteau et une plume sur la Lune. Lequel des deux objets arrive le plus rapidement au sol ? (source image : Nasa).

Parmi les sources d'erreur systématiques internes au véhicule spatial : l'expulsion de masse qui induit une propulsion, la chaleur générée par les générateurs radio-isotopiques, le refroidissement radiatif non-isotrope de la sonde ou la force de réaction aux ondes radio. Enfin les forces gravitationnelles dues à une distribution de matière inconnue dans la ceinture de Kuiper [1]. Rappelons que la ceinture de Kuiper est une zone du système solaire similaire à la ceinture d'astéroïdes, mais au-delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 55 ua, composée principalement de petits corps, "restes" de la formation du système solaire.

Le mystère des mesures de l'anomalie de gravitation des sondes Pioneer n'est pas sans rappeler la rotation "anormale" des galaxies. Si on essaie de comprendre les mesures de la rotation de la galaxie M33 par exemple, dans le cadre de la théorie classique de la gravitation, on observe un écart important entre la théorie de Newton et les observations comme celles de Corbelli et Salucci [3]. L'explication usuelle est de conserver la théorie de Newton mais de changer les sources de matière en introduisant avec Zwicky dès 1933 [17], une source complémentaire pour le champ de gravitation : de la matière invisible ("matière noire"), serait la "source manquante" dans les équations...

D'autres auteurs proposent de modifier les lois physiques du champ de gravitation. On parle alors de "théories de la gravitation modifiées" pour expliquer la vitesse de rotation anormale des galaxies. Les deux candidates les plus crédibles sont d'une part la théorie "MOdified Newtonian Dynamics" (MOND) de Moti Milgrom [8] et la théorie de la gravitation modifiée "scalar-tensor-vector" (MOG) de John Moffat [9].

Pour l'"anomalie Pioneer", nous sommes encore dans le système solaire, c'est à dire à toute petite échelle en comparaison de la Voie Lactée, elle même à petite échelle par rapport à l'ensemble de l'univers. En toute cohérence avec l'observation des trajectoires des planètes, les théories classiques de la gravitation doivent pouvoir s'appliquer !

3) Un problème d'ingénierie !

Si le catalogue à la Prévert de Turyshev et Toth [13] n'a pas exclu les forces non gravitationnelles ayant une origine à bord, il a négligé l'impulsion des photons. En effet, Pioneer 10 et 11 emmenaient en fait un micro-moteur photonique ! L'origine de ce moteur résulte d'un couplage subtil entre la source d'énergie à bord et la géométrie de la sonde. L'idée de l'équipe Brésilo-Portugaise composée de Frederico Francisco, Orfeu Bertolami, Paulo J.S. Gil, et Jorge Páramos [4, 5] est simple à décrire. A bord des sondes Pioneer se trouve un générateur d'énergie thermoélectrique à radio-isotope. Les sources radio-isotopiques émettent des rayonnements électromagnétiques. Compte tenu de la géométrie non-convexe de la sonde (voir les figures 14, 15 et 16), une partie non négligeable tappe l'antenne d'émission puis rebondit à de multiples reprises. Cette réflexion conduit à une différence d'impulsion entre les deux faces de l'antenne qui crée une force de direction liée à l'axe de l'antenne, qui reste pointée vers la terre, c'est à dire le soleil avec une excellente approximation... L'accélération supplémentaire semble justement indiquer la direction du soleil ! D'où une source supplémentaire de confusion dans l'analyse des données.

Figure 13. Quelques acteurs de la découverte d'un micro-moteur dans les sondes Pioneer : Frederico Francisco, Orfeu Bertolami, Paulo J.S. Gil et Jorge Páramos (de gauche à droite). Sources : faraday.fc.up.pt, tv.up.pt, www.researchgate.net et faraday.fc.up.pt.

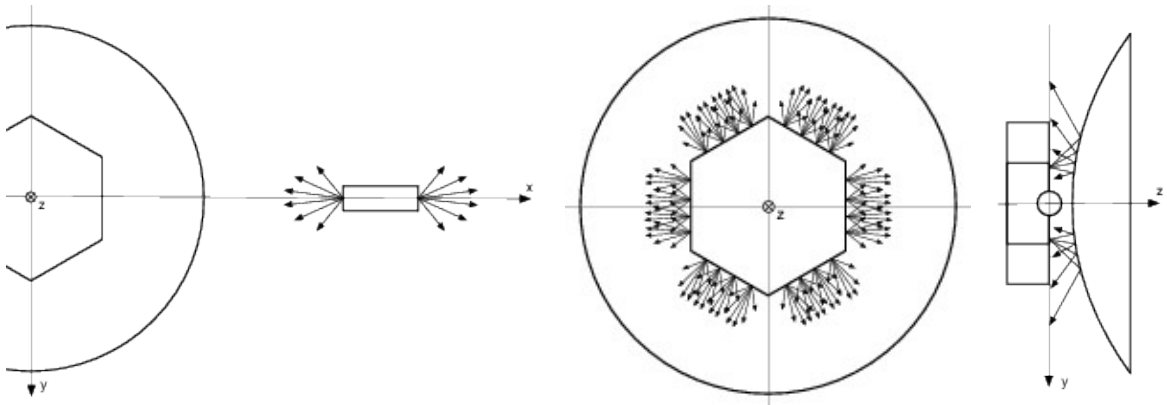

Figure 14. Processus de réflexion des photons émis par le générateur isotopique, d'après Francisco, Bertolami, Gil et Páramos [5].

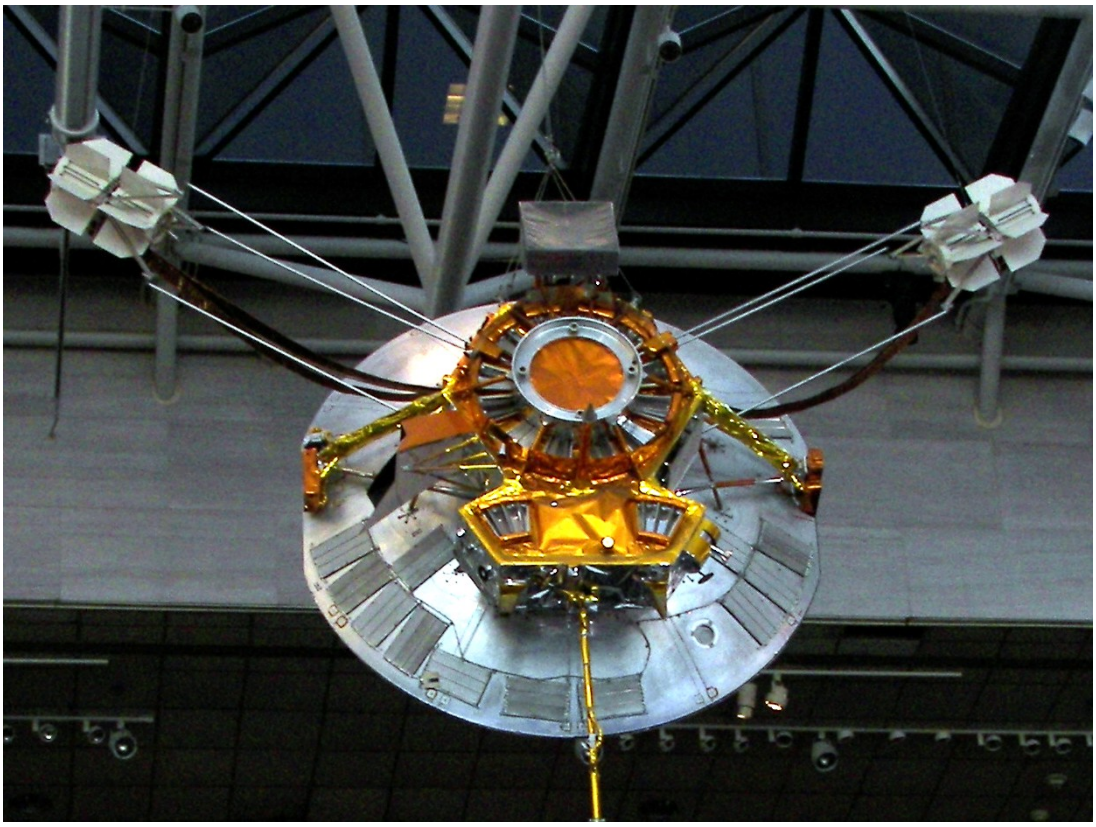

Figure 15. Vue d'un modèle de Pioneer 10 resté à Terre au National Air and Space Museum de Washington (source image : Wikipedia).

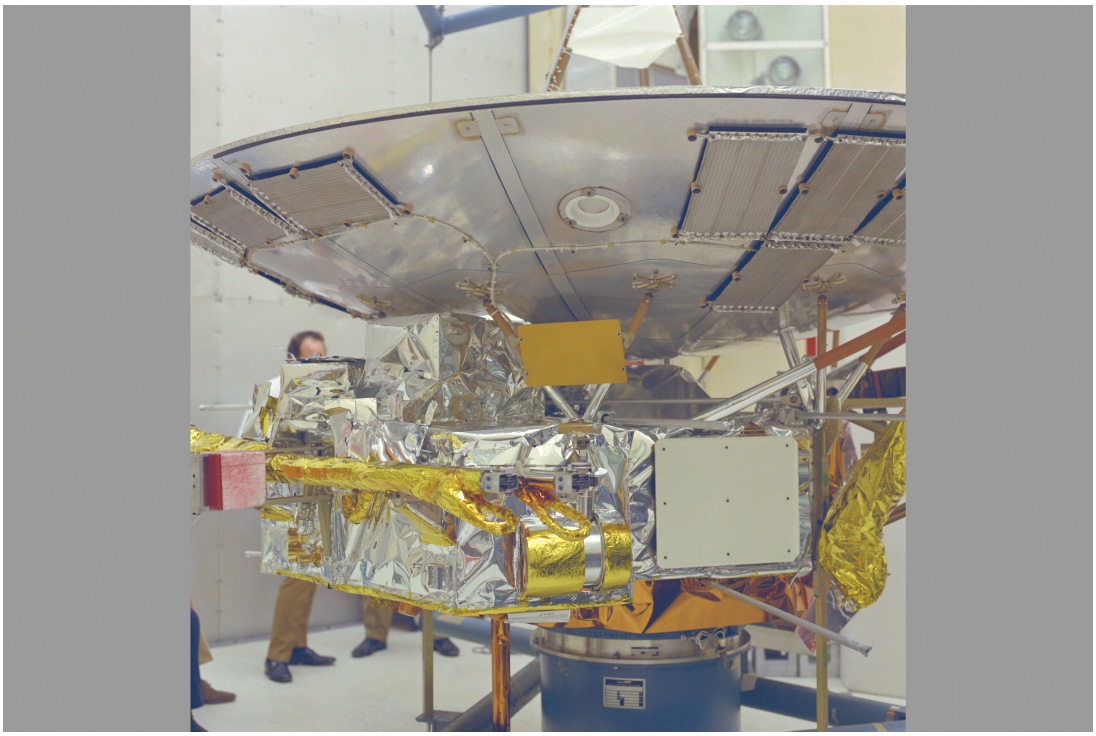

Figure 16. Pioneer 10 au cours de son intégration (source image : Nasa).

Un autre modèle de simulation du micro-moteur a été proposée par Turyshev et son équipe [15]. Puis confirmée par une troisième équipe (Benny Rievers et Claus Lämmerzahl [11]) qui fut peut être la première à publier sur ce sujet ! Ils ont conçu un modèle aux éléments finis à l'aide du logiciel commercial "Ansys". Nous sommes dans le cadre classique de la résolution d'un problème d'ingénierie !

4) Penser sans modèle ?

En conclusion, la confrontation entre expérience et modèle théorique permet de savoir quelle confiance on peut avoir dans les données expérimentales, mais également dans le modèle théorique ! De plus, si l'objet est très loin, il ne reste plus que les modèles ! Noter ici qu'un système technique créé par l'homme est toujours mal connu. De plus, les modèles numériques des ingénieurs sont compliqués et souvent de mise en œuvre délicate.

Devant une anomalie d'un système technologique comme les sondes Pioneer, nous observons qu'il y a une réelle tentation de se référer aux nouvelles théories, en cours de validation. Dans des cas similaires, le rêve est même d'inventer la nature avec l'hypothèse de la matière noire ou de l'énergie noire, proposée par Huterer et Turner [7] , pour expliquer l'accélération de l'expansion à grande échelle dans l'univers...

Dans le cas de Pioneer, la technique la plus traditionnelle, fondée sur les modèles de la physique bien connus de tous les scientifiques, et un modèle numérique permettant la résolution approchée, impossible sinon avec les seuls moyens de l'analyse et la résolution exacte des équations, aura permis de comprendre l'écart entre une "vraie" chute libre entre les planètes et un mouvement accompagné d'une micro-poussée. On retrouve pour cet exemple une nouvelle déclinaison du vieil adage : "Le diable se loge toujours dans les détails". On ne peut pas penser à tout lors du dimensionnement d'un objet technique. Les couplages entre les effets sont parfois inattendus.

Pour le cas de l'étude de l'anomalie des sondes Pioneer, la référence aux modèles aura été permanente, ainsi que la confrontation avec l'observation. En septembre 2011, Michel Bitbol a donné un exposé à l'Institut des Systèmes Complexes, rue Lhomond à Paris. Avec la science moderne en première personne (voir par exemple son article [2] sur Francisco Varela), il n'y a plus d'"observateur sujet" qui fait rouler des "boules objets"... A notre question concernant l'"objet" de la science d'aujourd'hui, sa réponse est : "le modèle !"

References

[1] J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto, and S.G. Turyshev, "Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration", *Physical Review Letters*, vol 81, p. 2858-2861, 1998.

[2] M. Bitbol, "Une science de la conscience équitable ; l'actualité de la neurophénoménologie de Francisco Varela", *Intellectica*, vol. 43, p. 135-157, 2006.

[3] E. Corbelli, P. Salucci, "The Extended Rotation Curve and the Dark Matter Halo of M33", *Monthly Notices of the Royal Astronical Society*, vol. 311, p. 441-447, 2000.

[4] F. Francisco, O. Bertolami, P.J.S. Gil, J. Páramos, "Estimating radiative momentum transfer through a thermal analysis of the Pioneer anomaly", *Space science reviews*, volume 151, p. 75-91, 2010.

[5] F. Francisco, O. Bertolami, P.J.S. Gil, J. Páramos, "Modelling the reflective thermal contribution to the acceleration of the Pioneer spacecraft", *Physics Letters B*, volume 711, p. 337-346, 2012.

[6] M. Hilchenbach, H. Rosenbauer, "Mission Philae - Mit Mechanik zu den Anfängen des Sonnensystems", *Kultur & Technik*, vol. 4, p. 18-21, 2004.

[7] D. Huterer, M.S. Turner, "Prospects for probing Dark Energy via supernova distance measurements", *Physial Review D*, vol. 60, , 081301, 1999.

[8] M. Milgrom, "A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis", *The Astrophysical Journal*, vol. 270,p. 365-370, 1983.

[9] J.W. Moffat, "Scalar-tensor-vector gravity theory", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2006, issue 3, article 04, 2006.

[10] E.M. Murphy, "A Prosaic Explanation for the Anomalous Acceleration Seen in Distant Spacecraft", *Physical Review Letters*, vol 83, p. 1890, 1999.

[11] B. Rievers, C. Lämmerzahl, "High precision thermal modeling of complex systems with application to the flyby and Pioneer anomaly", *Annalen der Physik*, vol. 523, no 6, p. 439, 2011.

[12] D. Savage, http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/text/pioneer-11_endops.txt

[13] S. Turyshev, V.T. Toth, "The Pioneer Anomaly", *arxiv.org/abs/1001.3686*, 2010.

[14] S. Turyshev, V.T. Toth, J. Ellis, C.B. Markwardt, "Support for temporally varying behavior of the Pioneer anomaly from the extended Pioneer 10 and 11 Doppler data sets", *Physical Review Letters*, vol. 107, issue 8, 081103, august 2011.

[15] S. Turyshev, V.T. Toth, G. Kinsella, S.C. Lee, S. Lok, J. Ellis, "Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly", *Physical Review Letters*, vol. 108, 241101 (2012).

[16] M. Wolverton, *The depths of space : the story of the Pioneer planetary probes*, Joseph Henry Press, Washington, DC, USA, 2004.

[17] F. Zwicky, "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln", *Helvetica Physica Acta*, vol. 6, p. 110-127, 1933.