

Mecánica Celeste, Maestría PEDECIBA-Física

Tabare Gallardo
Departamento de Astronomía, IFFC, Udelar

Abstract

En este curso aprendemos a determinar las perturbaciones orbitales generadas por diferentes fuerzas y a entender como evolucionan las órbitas en grandes escalas de tiempo. Aplicaremos métodos analíticos y semianalíticos.

El programa oficial esta en http://www.pedeciba.edu.uy/fisica/Programasbasicas/2011_Mecanica_celeste.pdf

La que sigue es la **edición 2020** del curso con bibliografía actualizada y reordenamiento y jerarquizacion de algunos temas. Puede sufrir algunos ajustes, revise la fecha al pie de pagina.

1. Ecuaciones planetarias

1. Ecuaciones de Gauss en (R,T,N) y (V,S,N): instantáneas Murray and Dermott (1999)[cap 2.9] y Burns (1976) y medias Gallardo and Venturini (2010). Aplicaciones.
2. Ecuaciones planetarias de Lagrange: método de variacion de parámetros, Portilla (2001)[cap 14.5], Brouwer and Clemence (1961)[cap XI] y Roy (2005)[cap. 7]. Ver discusión en Murray and Dermott (1999)[cap 6.8].

2. Funcion perturbadora

Murray and Dermott (1999)[cap 6]

1. No esfericidad del cuerpo central.
2. Desarrollo de la función perturbadora planetaria. Limitaciones.
3. Identificación de terminos seculares, resonantes y de corto periodo. Uso de manipuladores algebraicos.

3. Formulación Hamiltoniana

1. Introducción: Schwichtenberg (2019)
2. Hamiltoniano y variables canónicas en dinámica orbital: Valtonen and Karttunen (2006)[cap 4], Murray and Dermott (1999)[cap 2.10].
3. Obtencion de las ecuaciones planetarias de Lagrange a partir de las canonicas: Valtonen and Karttunen (2006)[cap 9]
4. Espacio de fase extendido y aplicación al caso asteroidal: Nesvorný et al. (2002)
5. Hamiltoniano de N cuerpos masivos Morbidelli (2002)[cap 1], Malhotra (2012).
6. Sistemas Hamiltonianos: Hilborn (1994)[cap 8] o Korsch et al. (2008)[cap 2].

4. Teoría secular analítica

(Murray and Dermott, 1999, cap 7)

1. Proceso de eliminación de variables rápidas. Teoría de perturbaciones, (Ferraz-Mello, 2007, cap 6), (Shevchenko, 2017, cap 2).
2. No esfericidad del cuerpo central.
3. Asteroide perturbado por 1 o mas planetas, caso plano y espacial.
4. Elementos propios y forzados.
5. Teoría secular planetaria. Frecuencias fundamentales. Plano invariante de Laplace. Déficit de momento angular.
6. Resonancias seculares: Knezevic et al. (1991), (Malhotra, 1998, cap 4).
7. Hamiltoniano secular para asteroide perturbado por sistema planetario.
8. Dinámica Lidov-Kozai: Shevchenko (2017) para perturbador exterior y Saillenfest et al. (2016) o Gallardo et al. (2012); Vinson and Chiang (2018) para perturbador interior.
9. Dinámica de satélites y plano de Laplace.
10. Sistema de 2 planetas caso plano y espacial: Murray and Dermott (1999)[cap 7] y Beaugé et al. (2012).

5. Teoría secular semianalitica

1. Algoritmo de media numérica.
2. Partícula test perturbado por 1 planeta.
3. Efecto de la excentricidad e inclinación del planeta: elementos propios y forzados.
4. Evolución secular de sistema planetario.
5. Teoría sintética de sistema planetario: Carpino et al. (1987); Bretagnon (1990),
6. Teoría semianalitica de resonancias seculares.
7. Dinámica Lidov-Kozai numérica: Bailey et al. (1992); Thomas and Morbidelli (1996); Gallardo et al. (2012)
8. Limite de validez de la teoría secular analítica y numérica.

6. Resonancias de movimientos medios

1. Función perturbadora clásica Murray and Dermott (1999)
2. Aproximación analítica caso plano: Malhotra (1998), Morbidelli (2002)[cap 9], Lei and Li (2020)
3. Teoría semianalitica espacial de libraciones: Schubart (1964); Roig et al. (1998); Gallardo (2020)
4. Evolución secular del movimiento resonante: Gallardo et al. (2012); Saillenfest et al. (2016, 2017)

7. Temas opcionales

1. Teoría de Opik: Gallardo (2007)
2. Dinámica de satélites, plano de Laplace
3. Dinámica en entornos de baja gravedad

4. Caos en el Sistema Solar: Laskar (2003); Dvorak et al. (2005); Lecar et al. (2001)
5. Integradores numéricos en dinámica orbital
6. Migración planetaria
7. Dinámica Lidov-Kozai excéntrica
8. Resonancia spin-órbita

Libros generales para consulta

Brouwer and Clemence (1961); Murray and Dermott (1999); Morbidelli (2002); Roy (2005); Lopez Garcia (2018); Mikkola (2020), Dvorak and Lhotka (2013), Zadunaisky (2009).

References

- Bailey, M.E., Chambers, J.E., Hahn, G., 1992. Origin of sungrazers - A frequent cometary end-state. *A&A* 257, 315–322.
- Beaugé, C., Ferraz-Mello, S., Michtchenko, T.A., 2012. Multi-planet extrasolar systems — detection and dynamics. *Research in Astronomy and Astrophysics* 12, 1044–1080. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1674-4527%2F12%2F8%2F009>, doi:10.1088/1674-4527/12/8/009.
- Bretagnon, P., 1990. An iterative method for the construction of a general planetary theory. *A&A* 231, 561–570.
- Brouwer, D., Clemence, G.M., 1961. *Methods of Celestial Mechanics*.
- Burns, J.A., 1976. Elementary derivation of the perturbation equations of celestial mechanics. *American Journal of Physics* 44, 944–949. URL: <https://doi.org/10.1119/1.10237>, doi:10.1119/1.10237, arXiv:<https://doi.org/10.1119/1.10237>.
- Carpino, M., Milani, A., Nobili, A.M., 1987. Long-term numerical integrations and synthetic theories for the motion of the outer planets. *A&A* 181, 182–194.
- Dvorak, R., Freistetter, F., Kurths, J., 2005. *Chaos and Stability in Planetary Systems*. volume 683. doi:10.1007/b94975.
- Dvorak, R., Lhotka, C., 2013. *Celestial Dynamics: Chaoticity and Dynamics of Celestial Systems*.
- Ferraz-Mello, S. (Ed.), 2007. *Canonical Perturbation Theories - Degenerate Systems and Resonance*. volume 345 of *Astrophysics and Space Science Library*. doi:10.1007/978-0-387-38905-9.
- Gallardo, T., 2007. Notes on The Opik Method. URL: <http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/opikguara.pdf>.
- Gallardo, T., 2020. Three-dimensional structure of mean motion resonances beyond Neptune. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 132, 9. doi:10.1007/s10569-019-9948-7, arXiv:1912.04676.
- Gallardo, T., Hugo, G., Pais, P., 2012. Survey of Kozai dynamics beyond Neptune. *Icarus* 220, 392–403. doi:10.1016/j.icarus.2012.05.025, arXiv:1205.4935.

- Gallardo, T., Venturini, J., 2010. A secular relativistic model for solar system's numerical simulations. [arXiv:1008.0799](#).
- Hilborn, R.C., 1994. Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers.
- Knezevic, Z., Milani, A., Farinella, P., Froeschle, C., Froeschle, C., 1991. Secular resonances from 2 to 50 AU. *Icarus* 93, 316–330. doi:10.1016/0019-1035(91)90215-F.
- Korsch, H., Jodl, H.J., Hartmann, T., 2008. Chaos.
- Laskar, J., 2003. Chaos in the Solar System. *Annales Henri Poincaré*; 4, 693–705. doi:10.1007/s00023-003-0955-5.
- Lecar, M., Franklin, F.A., Holman, M.J., Murray, N.J., 2001. Chaos in the Solar System. *ARA&A* 39, 581–631. doi:10.1146/annurev.astro.39.1.581, [arXiv:astro-ph/0111600](#).
- Lei, H., Li, J., 2020. Multi-harmonic Hamiltonian models with applications to first-order resonances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3115>, doi:10.1093/mnras/staa3115. staa3115.
- Lopez Garcia, F., 2018. Apuntes de Mecanica Celeste Clasica. URL: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87281>.
- Malhotra, R., 1998. Orbital resonances and chaos in the solar system, in: In: Lazzaro D, et al. (eds), *Solar System Formation and Evolution*, ASP Conference Series, pp. 37–63.
- Malhotra, R., 2012. Orbital resonances in planetary systems. *Encyclopedia of Life Support Systems - Celestial Mechanics* 6, 31.
- Mikkola, S., 2020. *Gravitational Few-Body Dynamics: A Numerical Approach*.
- Morbidelli, A., 2002. Modern Celestial Mechanics: aspects of solar system dynamics. URL: <http://www.oa.eu/morby/celmech.pdf>.
- Murray, C.D., Dermott, S.F., 1999. *Solar System Dynamics*.
- Nesvorný, D., Ferraz-Mello, S., Holman, M., Morbidelli, A., 2002. Regular and Chaotic Dynamics in the Mean-Motion Resonances: Implications for the Structure and Evolution of the Asteroid Belt. *Asteroids III* , 379–394.
- Portilla, J.G., 2001. *Elementos de Astronomia de Posicion*.
- Roig, F., Simula, A., Ferraz-Mello, S., Tsuchida, M., 1998. The high-eccentricity asymmetric expansion of the disturbing function for non-planar resonant problems. *A&A* 329, 339–349.
- Roy, A.E., 2005. *Orbital Motion*.
- Saillenfest, M., Fouchard, M., Tommei, G., Valsecchi, G.B., 2016. Long-term dynamics beyond Neptune: secular models to study the regular motions. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 126, 369–403. doi:10.1007/s10569-016-9700-5, [arXiv:1611.04457](#).

- Saillenfest, M., Fouchard, M., Tommei, G., Valsecchi, G.B., 2017. Study and application of the resonant secular dynamics beyond Neptune. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 127, 477–504. doi:10.1007/s10569-016-9735-7, arXiv:1611.04480.
- Schubart, J., 1964. Long-Period Effects in Nearly Commensurable Cases of the Restricted Three-Body Problem. *SAO Special Report* 149.
- Schwichtenberg, J., 2019. No-Nonsense Classical Mechanics: A Student-Friendly Introduction. No-Nonsense Books. URL: <https://books.google.com.uy/books?id=cIiXDwAAQBAJ>.
- Shevchenko, I.I., 2017. The Lidov-Kozai Effect - Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy. volume 441. doi:10.1007/978-3-319-43522-0.
- Thomas, F., Morbidelli, A., 1996. The Kozai Resonance in the Outer Solar System and the Dynamics of Long-Period Comets. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 64, 209–229. doi:10.1007/BF00728348.
- Valtonen, M., Karttunen, H., 2006. The Three-Body Problem.
- Vinson, B.R., Chiang, E., 2018. Secular dynamics of an exterior test particle: The inverse Kozai and other eccentricity-inclination resonances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474, 4855–4869. doi:10.1093/mnras/stx3091, arXiv:1711.10495.
- Zadunaisky, P., 2009. Introducción a la Astrodinámica. Teoría y Métodos Numéricos. URL: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/publicaciones/introduccion-la-astrodinamica-teoria-y-metodos-numericos>.