

Pryngles: Un Paquete Python para el Modelamiento de Firmas Fotométricas de Satélites y Anillos Exoplanetarios

Contexto/Propósito: La presencia de anillos y satélites, al interior de nuestro Sistema Solar, nos hace pensar en la posibilidad de observar estas estructuras alrededor de exoplanetas [1-3]. Investigaciones han explorado los efectos que producirían dichas estructuras sobre las curvas de luz en sus sistemas y la resolución instrumental necesaria para su detección [4-8]. Esto ha impulsado el desarrollo de Pryngles [9], un paquete orientado al modelamiento de estas firmas fotométricas mediante la discretización de superficies. En su primera versión se introdujo la interfaz RingedPlanet, modelando únicamente sistemas estrella-planeta-anillo desde un marco de referencia planetocéntrico [10-11]. Extendiendo la capacidad del paquete a sistemas extrasolares arbitrarios, presentamos avances en el desarrollo de su nueva interfaz, System.

Métodos: Se ha realizado 1) la reestructuración completa a la arquitectura modular del paquete, 2) la migración a una gestión centralizada de los elementos discretos basada en pandas, 3) la incorporación del paquete de integración Rebound y 4) la adaptación de métodos hacia un marco de referencia baricéntrico. Evaluamos la capacidad del paquete frente a la interfaz RingedPlanet para sistemas simples y estamos próximos a iniciar las pruebas frente a modelos analíticos y paquetes externos [12-14] para sistemas arbitrarios. Además, realizamos estimaciones en Reflexión Difusa y Tránsito para un exosatélite (Tabla 1), explorando su detectabilidad.

	R	M	a (AU)	e
Star	$1 R_{\odot}$	$1 M_{\odot}$	—	—
Planet	$1 R_{\text{Saturn}}$	$1 M_{\text{Saturn}}$	0.3	0
Moon	$1 R_{\oplus}$	$1 M_{\oplus}$	0.001	0

Tabla 1. Configuración de parámetros, sistema Sol-Saturno-Tierra

Resultados: Logramos reproducir con precisión (ϵ *lessim* 10^{-6}) las curvas de luz modeladas por RingedPlanet en sistemas simples; sin embargo, incorporar la dinámica orbital y gestión de las discretizaciones ha disminuido considerablemente la eficiencia computacional. Esperamos replicar pronto los efectos de Polarización y Scattering [11], entre otros. Cuantificamos las firmas en Reflexión Difusa y Tránsito del satélite, alcanzando ordenes de $\sim 10^{-3}$ ppm y ~ 100 ppm, respectivamente (Fig. 1). Dichas magnitudes reflejan mayor correlación con parámetros como distancia a la estrella, tamaño del cuerpo, naturaleza de la órbita y la orientación de la línea de visión. Aunque no determinamos la representatividad del sistema dentro de las variedades más probables, su reproducción permite visualizar la capacidad del paquete.

Figura 1. Curvas de Reflexión Difusa (izquierda) y Tránsito (derecha). Línea de visión paralela al plano de la órbita. Se visualiza tránsito secundario del planeta, así como tránsitos periódicos del satélite.

Discusión: Los efectos de Tránsito llegarían a ser detectables dentro de la resolución de telescopios como TESS y PLATO (~ 100 ppm) [6,7,12]. Alcanzando precisión sub-ppm será posible discernir trazas de Reflexión Difusa con fiabilidad en una variedad de sistemas más amplio. Estas capacidades también limitan los tiempos de observación, restringiendo aquellos sistemas resolubles. La optimización de Pryngles nos permitirá 1) analizar la diversidad, viabilidad y estabilidad de los sistemas [15], 2) implementar técnicas en variaciones de tránsito [16,17], 3) incorporar modelos de emisividad multibanda [1], 4) mapear superficies/atmosferas y 5) ajustarlas a modelos de composición y dinámica [7].

Conclusión: Bajo su nueva interfaz, Pryngles promete contribuir ampliamente en la investigación exoplanetaria, facilitando la revisión, reproducción y motivación de observaciones en búsqueda de estas señales. Su versatilidad ofrece la posibilidad de incorporar métodos complementarios que caracterizan sus fuentes, enriqueciendo la comprensión en los procesos de formación y evolución planetaria. Nos mantenemos expectantes de la primer detección en anillos y satélites exoplanetarios.

Referencias :

[1] Isella, A., Benisty, M., Teague, R., Bae, J., Keppler, M., Facchini, S., & Pérez, L. (2019). Detection of Continuum Submillimeter Emission Associated with Candidate Protoplanets. *\apjl*, 879(2), L25. doi:10.3847/2041-8213/ab2a12

[2] Teachey, A., Kipping, D. M., & Schmitt, A. R. (2018). HEK. VI. On the Dearth of Galilean Analogs in Kepler, and the Exomoon Candidate Kepler-1625b I. *\aj*, 155(1), 36. doi:10.3847/1538-3881/aa93f2

- [3] Kipping, D., Bryson, S., Burke, C., Christiansen, J., Hardegree-Ullman, K., Quarles, B., ... Teachey, A. (2022). An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i. *Nature Astronomy*, 6, 367–380. doi:10.1038/s41550-021-01539-1
- [4] Barnes, J. W., & Fortney, J. J. (2004). Transit Detectability of Ring Systems around Extrasolar Giant Planets. *\apj*, 616(2), 1193–1203. doi:10.1086/425067
- [5] Zuluaga, Jorge I., Kipping, D. M., Sucerquia, M., & Alvarado, J. A. (2015). A Novel Method for Identifying Exoplanetary Rings. *\apjl*, 803(1), L14. doi:10.1088/2041-8205/803/1/L14
- [6] Sucerquia, M., Alvarado-Montes, J. A., Zuluaga, J. I., Montesinos, M., & Bayo, A. (2020). Scattered light may reveal the existence of ringed exoplanets. *\mnras*, 496(1), L85–L90. doi:10.1093/mnras/slaa080
- [7] Teachey, Alex. (2024). Detecting and Characterizing Exomoons and Exorings (Handbook of Exoplanets, 2nd Edition). arXiv E-Prints, arXiv:2401.13293. doi:10.48550/arXiv.2401.13293
- [8] Heller, R. (2018). Detecting and Characterizing Exomoons and Exorings. In H. J. Deeg & J. A. Belmonte (Eds.), *Handbook of Exoplanets* (p. 35). doi:10.1007/978-3-319-55333-7_35
- [9] Zuluaga, Jorge I., Sucerquia, M., & Alvarado-Montes, J. A. (2022). Pryngles: PlanetaRY spaNGLES.
- [10] Zuluaga, J. I., Sucerquia, M., & Alvarado-Montes, J. A. (2022). The bright side of the light curve: A general photometric model of non-transiting exorings. *Astronomy and Computing*, 40, 100623. doi:10.1016/j.ascom.2022.100623
- [11] Veenstra, A. K., Zuluaga, J. I., Alvarado-Montes, J. A., Sucerquia, M., & Stam, D. M. (2024). A general polarimetric model for transiting and non-transiting ringed exoplanets. arXiv E-Prints, arXiv:2404.16606. doi:10.48550/arXiv.2404.16606
- [12] Hippke, M., & Heller, R. (2022). Pandora: A fast open-source exomoon transit detection algorithm. *\A*, 662, A37. doi:10.1051/0004-6361/202243129
- [13] Luger, R., Lustig-Yaeger, J., & Agol, E. (2019). planetplanet: General photodynamical code for exoplanet light curves.
- [14] Kreidberg, L. (2015). batman: BAsic Transit Model cAlculatioN in Python.
- [15] Alvarado-Montes, J. A., Zuluaga, J. I., & Sucerquia, M. (2017). The effect of close-in giant planets' evolution on tidal-induced migration of exomoons. *\mnras*, 471(3), 3019–3027. doi:10.1093/mnras/stx1745
- [16] Simon, A., Szatmáry, K., & Szabó, G. M. (2007). Determination of the size, mass, and density of “exomoons” from photometric transit timing variations. *\A*, 470(2), 727–731. doi:10.1051/0004-6361:20066560
- [17] Kipping, D. M., Fossey, S. J., & Campanella, G. (2009). On the detectability of habitable exomoons with Kepler-class photometry. *\mnras*, 400(1), 398–405. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15472.x

Nivel de formación

Pregrado

Autores primarios: ZULUAGA CALLEJAS, Jorge Ivan (Universidad De Antioquia); NUMPAQUE, Sebastian (Universidad de Antioquia)

Presentador: NUMPAQUE, Sebastian (Universidad de Antioquia)