# Densidad de partículas en el entorno del asteroide (65803) Didymos debido a su rápida rotación

N.E. Trógolo<sup>1,2,3</sup>, A. Campo Bagatin<sup>3</sup> & F. Moreno<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías, Universidad de Alicante, España

<sup>4</sup> Instituto de Astrofisica de Andalucia, CSIC, España

Contacto / nair.trogolo@unc.edu.ar

**Resumen** / El sistema asteroidal cercano a la Tierra (65803) Didymos orbita alrededor del Sol con un semieje mayor de 1.64 ua y es el objetivo de las futuras misiones espaciales DART (NASA) y Hera (ESA). Es un sistema binario compuesto por un asteroide primario, Didymos, de 780 m de diámetro y un satélite, Dimorphos, de 160 m. El primario tiene un periodo de rotación corto (2.26 h) y una baja densidad estimada (2170 kg m<sup>-3</sup>), lo que lleva a proponer que es un objeto formado por agregados gravitacionales y cuya forma posee un abultamiento en los polos y en el ecuador (asteroides tipo top - shape). En la región ecuatorial de estos asteroides, la aceleración centrípeta puede ser lo suficientemente grande como para superar la gravedad local y permitir que regolito sea expulsado de la superficie. En este trabajo estudiamos bajo qué condiciones este proceso es posible en Didymos, la dinámica de las partículas expulsadas y computamos la densidad de masa en órbita en el entorno del sistema. El análisis se realiza con un código numérico que integra la ecuación de movimiento de las partículas en un marco de referencia rotante, no inercial, centrado en el asteroide primario. Se considera un modelo de forma poliédrica para Didymos, compuesto por 1996 caras y 1000 vértices.

**Abstract** / The near-Earth binary asteroid (65803) Didymos orbits the Sun with a semi-major axis of 1.64 au and is the target of future DART (NASA) and Hera (ESA) space missions. The system is composed of a primary asteroid, Didymos, 780 m in diameter and a satellite, Dimorphos, 160 m in diameter. The primary has a short rotation period (2.26 h) and a low estimated density ( $2170 \text{ kg m}^{-3}$ ), which leads to propose that it is an object formed by gravitational aggregates and whose shape has a bulge at the poles and at the equator (top-shape asteroids). In the equatorial region of these asteroids, the centripetal acceleration can be large enough to overcome the local gravity and allow regolith to be ejected from the surface. In this work we study under which conditions this process is possible in Didymos, the dynamics of the ejected particles and compute the orbit mass density around the system. The analysis is performed by a numerical code that integrates the equation of motion of the particles in a rotating, non-inertial reference frame centered on the primary asteroid. A polyhedral shape model for Didymos, composed of 1996 faces and 1000 vertices, is considered.

Keywords / minor planets, asteroids: individual (Didymos) - methods: numerical

#### 1. Introducción

(65803) Didymos es un sistema binario de asteroides cercanos a la Tierra (NEA) y es el objetivo de las futuras misiones espaciales DART (NASA) y Hera (ESA). Mediante observaciones de radar y ópticas se ha determinado los parámetros físicos del sistema, así como un modelo de forma para el primario, Didymos, donde muestra apariencia de diamante o top – shape. Esta información ha sido publicada en el Didymos Reference Model (ESA) (Fang & Margot, 2012; Naidu et al., 2020; Scheirich & Pravec, 2009). La masa total del sistema es  $M_T = 5.258 \times 10^{11} \pm 0.54 \times 10^{11}$  kg, con una relación de masa entre el secundario y el primario de  $M_S/M_P = 0.0093 \pm 0.0013$ . El tamaño de Didymos en sus ejes principales es  $832 (\pm 3 \%) \times 835 (\pm 3 \%) \times 786 (\pm 5 \%)$  km y se estima que es un asteroide tipo S con una densidad de 2170  $\pm$  350 kg m<sup>-3</sup> y un periodo de rotación corto 2.2600  $\pm$  0.001 h. Dado su tipo espectral, y considerando que sus análogos de meteoritos son condritas ordinarias,

con una densidad típica superior a 3 000 kg m<sup>-3</sup>, Didymos es probablemente un *rubble – pile* o agregado gravitacional, en otras palabras, un asteroide no monolítico, formado por reacumulación de pequeños fragmentos que se generaron posterior a una colisión catastrófica entre asteroides. En la región ecuatorial de estos asteroides, la fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas puede superar la atracción gravitatoria del asteroide, resultando en una aceleración local neta dirigida hacia afuera, lo que les permite abandonar la superficie a velocidad cero y evolucionar dinámicamente en el sistema.

En este trabajo analizamos bajo qué circunstancias la eyección de regolito ocurre y su posterior evolución dinámica. Además, proporcionamos una estimación de la cantidad de material presente en el entorno del sistema. Las predicciones del modelo podrán probarse mediante datos de las misiones DART y Hera, lo que hace que este sea un sistema particularmente interesante para estudiar.



Figura 1: Gravedad superficial en el modelo de forma poliédrico utilizado para Didymos compuesto por 1996 caras y 1000 vértices.

#### 2. Metodología

Con el fin de estudiar el proceso de despegue de partículas de la superficie del asteroide Didymos, hemos desarrollado un código numérico capaz integrar la ecuación de movimiento de una partícula que inicialmente se encuentra en reposo en la superficie y que está expuesta al campo central generado por el primario, a las perturbaciones gravitacionales del secundario y del Sol, y a la presión de radiación solar (PRS). Además, al tratarse de un marco de referencia rotante, es necesario considerar la fuerza centrípeta y coriolis. Inicialmente, las partículas se ubican en el centro geométrico de las caras triangulares del modelo de forma del asteroide, compuesto por 1996 caras y 1000 vértices (Ver Fig. 1), y en cada paso de integración se estudia la condición de despegue, es decir, si la sumatoria de las fuerzas mencionadas es positiva. Alrededor del asteroide se traza una grilla en latitud y longitud, que se expande en bines radiales. En estas celdas 3D se calculará la densidad de masa de partículas acumulada al final del tiempo de integración. En base a las trayectorias de las partículas hemos definido cuatro posibles estados finales: ES1) partículas que despegan de la superficie y al cabo de un tiempo vuelven a aterrizar, ES2) partículas que permanecen en órbita, ES3) partículas que se acretan en el secundario y ES4) partículas que escapan del sistema.

#### 3. Simulaciones

Realizamos tres simulaciones diferentes que nos permitieron comparar la evolución de las partículas posterior al despegue:

- Simulación durante 30 días cerca del pasaje del sistema por el perihelio  $(S_1)$ .
- Simulación durante 30 días cerca del afelio  $(S_2)$ .
- Simulación durante una órbita heliocéntrica completa, 2.11 años (S<sub>3</sub>).

Para ello, adoptamos los valores para los parámetros físicos descriptos en la Sección 1 y los parámetros orbitales que se detallan a continuación. El semieje mayor de la órbita del binario establecido en  $a_B = 1190.0$  m y una excentricidad  $e_B = 0.03$ . La órbita heliocéntrica del sistema respecto al plano de la eclíptica tiene



Figura 2: Densidad de masa en órbita respecto a la distancia radial. r = 0 m corresponde al centro de Didymos,  $r \sim 430$  m a la superficie. Gráfico adaptado de (Trógolo et al., 2022).



Figura 3: Densidad de masa en órbita alrededor de Didymos respecto a la colatitud. Gráfico adaptado de (Trógolo et al., 2022).

valores de  $a_H = 1.64$  ua,  $e_H = 0.38$  y una inclinación  $i_H = 3.40^\circ$  (JPL Small-Body Database Browser: http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi). En cuanto a las propiedades de la partículas, se asume un valor de referencia para la tasa de producción de masa de dM/dt = $1 \text{ kg s}^{-1}$ . Se adopta un valor en concordancia con el rango estimado para asteroides activos (Jewitt et al., 2015) debido a que este parámetro es desconocido en Didymos. Los tamaños de partículas simuladas siguen una distribución de acuerdo a la ley de potencias  $n(r) \propto r^{\kappa}$ , con un índice  $\kappa \sim -3.5$  (Sánchez & Scheeres, 2014). Los radios límites de la distribución son  $r_{min} = 0.0001$  cm y  $r_{max} = 1.0$  cm. Se utilizaron tres diferentes radios:  $r_1 \sim 5 \ \mu m, r_2 \sim 0.1 \ mm \ y \ r_3 \sim 2 \ mm;$  los cuales han sido seleccionados dividiendo el intervalo  $[r_{min}, r_{max}]$  en tres partes siguiendo la ley de potencias propuesta. La densidad asociada a estas partículas es  $3500 \text{ kg m}^$ típica de las condritas ordinarias.

## 4. Resultados

En primera instancia, analizaremos la distribución de partículas que al final del tiempo de integración están en el estado final ES2. La Fig. 2 muestra la densidad de masa de partículas respecto a la distancia radial -medida desde el centro de Didymos- hasta el centro de cualquier celda espacial 3D. Notar que dichas curvas comienzan en  $\sim 430$  m, ya que ahí yace la superficie del asteroide. El eje y representa la densidad de masa integrada en todas las latitudes y longitudes. Las tres curvas de colores representan las diferentes simulaciones: durante el afelio (verde), durante el perihelio (salmón) y para una órbita completa (púrpura). En los tres casos se observa una nube de partículas que se extiende hasta 600 m aproximadamente, cuya densidad disminuye a medida que nos alejamos de la superficie del asteroide.

Existe una notoria diferencia en densidad en el momento en que el asteroide pasa por el perihelio, con respecto al afelio (relación de masa del disco 4/9). Esto se debe a que la presión de radiación solar barre las partículas más pequeñas de un modo más eficiente cuando el asteroide está próximo al Sol. Por otro lado, se observa que la simulación en una órbita completa arroja resultados similares a los observados durante el pasaje por el perihelio. Esto ocurre debido a que hemos fijado como punto de partida en  $S_3$  una fecha cercana al perihelio, y al completar una órbita, el momento final de la simulación es precisamente cerca del pasaje por el perihelio. Esto muestra que no existe una diferencia significativa en realizar simulaciones en 30 días contra $\sim$ 770 días (2.11 años) y que el factor crucial es la posición en la órbita heliocéntrica donde se encuentra el sistema al momento de realizar "la observación".

Si se observa la distribución de la densidad de masa respecto a la colatitud, es decir integrada sobre todos los radios y longitudes, puede observarse que las partículas se sitúan alrededor del plano ecuatorial y lo hacen de forma asimétrica, debido a las asimetrías propias de la topología del primario (Ver Fig.3).

El porcentaje de partículas que alcanzan los diferentes estados finales fueron computados en cada simulación, así como el tiempo de vida medio en órbita. En  $S_1$  encontramos que más del 90% de las partículas terminan en el estado ES1, entre el 0.03 y 1.55% (dependiendo de su tamaño) en ES2, un  $0.22\,\%$  en ES3 y  $\sim 8\,\%$  escapan del sistema (ES4). En  $S_2$  más del 95 % vuelven al primario (ES1), entre el 0.04 y 3.17% terminan en ES2, cerca del 0.45% en ES3 y un 0.5% en ES4. Se observa que estos resultados dependen del tamaño de las partículas, ya que en el rango de los micrómetros domina la PRS. En el caso de aquellas partículas que permanecen en órbita (ES2), representadas en las Fig.2 y 3, el tiempo de vida medio en órbita es ~ 52 h en  $S_1$ , ~ 125 h en  $S_2$  y ~ 38 h en  $S_3$ . Para  $S_3$  tenemos un mayor porcentaje de partículas que luego de pasar cierto tiempo en órbita, vuelven a aterrizar en la superficie de Didymos. Las posiciones de aterrizaje pueden verse en el mapa de color de la Fig. 4, donde zonas rojizas se corresponden con una mayor densidad de partículas que aterrizan. Hemos visto que el disco de partículas se ubica en la región ecuatorial del asteroide, por lo que es de esperar que la mayor parte de los aterrizajes se produzcan allí. Además, el abultamiento ecuatorial propicia colisiones en esa región por tener mayor altitud. Es importante notar que aquellas partículas que regresan a la superficie, y se sitúan cerca del ecuador, son un reservorio para futuras eyecciones de masa, sin embargo, no ocurriría lo mismo con aquellas que aterrizan a medianas o altas latitudes.

#### 5. Resumen y discusión

En este trabajo modelamos la dinámica de las partículas expulsadas de la superficie de Didymos, con su modelo de forma poliédrico, debido a su rápida rotación. Las simulaciones muestran que al considerar el periodo de giro actual (2.26 h) y los parámetros físicos nominales,



Figura 4: Proyección en el plano YZ de partículas que aterrizan nuevamente en el asteroide (ES1). Z = 0 corresponde al plano ecuatorial.

el asteroide es capaz de expulsar regolito de las regiones ecuatoriales. El estado final de las partículas eyectadas depende fuertemente de su tamaño, partículas más pequeñas  $(r_1)$  son más susceptibles a escapar del sistema por PRS. En general, todas las simulaciones muestran que más del 90 % de partículas que despegan regresan a la superficie (EF1). Este proceso de eyección-caída sería constante y logra un estado estacionario en  $\sim 27$  días, por este motivo coinciden las densidades de masa para  $S_1$  y  $S_3$  en la Fig. 2. Las partículas que caen a la superficie serían un reservorio para ser expulsadas con posterioridad, lo que mantendría el proceso activo, sin embargo podría ocurrir que el reservorio de partículas del orden de micrómetros eventualmente se agote por influencia de la PRS. Superficies sin regolito fino (polvo) han sido observadas previamente en asteroides con características similares como Ryugu y Bennu (Michikami et al., 2019). Por otra parte, las partículas que permanecen en órbita alrededor del asteroide forman un disco en el plano ecuatorial, cuyas partículas tienen órbitas altamente inestables, con tiempos de vida medios entre 38 y 125 h. Además hemos visto que existe una correlación entre el tiempo de vida medio y el tamaño de partícula, siendo las más grandes capaces de permanecer más tiempo en órbita. Para los radios de partículas considerados en nuestro trabajo, la cantidad de masa total en órbita dependerá de la posición en la órbita heliocéntrica del sistema binario, en otras palabras, del momento en que se realice la observación. Cerca del perihelio la PRS expulsará más partículas y por consiguiente la masa total en órbita será menor.

### Referencias

- Fang J., Margot J.L., 2012, AJ, 143, 24
- Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J., 2015, Asteroids IV, 221–241
- Michikami T., et al., 2019, Icarus, 331, 179
- Naidu S.P., et al., 2020, Icarus, 348, 113777
- Sánchez P., Scheeres D.J., 2014, M&PS, 49, 788
- Scheirich P., Pravec P., 2009, Icarus, 200, 531
- Trógolo N.E., et al., 2022, LPI Contributions, LPI Contributions, vol. 2678, 1895