

## Formación de asteroides binarios mediante eventos súbitos de aceleración rotacional

Autoría: Po-Yen Liu (po-yen.liu@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por: Adriano Campo

Bagatin y Paula Gabriela Benavidez Lozano

Centro: Universidad de Alicante

Fecha de lectura: 12 de noviembre de 2025

Los asteroides binarios constituyen una fracción significativa de la población de pequeños cuerpos del Sistema Solar. En particular, entre los asteroides cercanos a la Tierra se observa que una proporción notable de rotadores rápidos presenta satélites, lo que sugiere una relación directa entre el estado rotacional de un asteroide y la formación de sistemas binarios. El marco teórico más aceptado atribuye este proceso al efecto YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack), un torque radiativo que puede acelerar gradualmente la rotación de un asteroide hasta alcanzar el límite de fisión rotacional. Sin embargo, este mecanismo presenta varias limitaciones físicas. En primer lugar, es altamente sensible a la forma del cuerpo, ya que pueden producirse deformaciones globales significativas cuando el asteroide se aproxima, pero aún no ha alcanzado, el límite de estabilidad rotacional. Además, existe un efecto de autolimitación asociado al inicio de la pérdida de masa: debido a la conservación del momento angular, la velocidad de rotación del primario disminuye inmediatamente tras comenzar la eyección de material, alejando al sistema del estado crítico. Como consecuencia, resulta difícil mantener un flujo continuo de material capaz de generar un entorno circumasteroidal suficientemente denso como para formar un satélite estable.

Esta tesis doctoral explora un escenario alternativo para la formación de asteroides binarios basado en aceleraciones rotacionales súbitas, producidas por eventos impulsivos como impactos subcatastróficos o encuentros de marea. El objetivo principal del trabajo es investigar si este tipo de eventos puede llevar a un asteroide tipo *rubble-pile* directamente a un estado supercrítico de rotación capaz de desencadenar fisión rotacional y, posteriormente, la formación de un satélite.

Para abordar este problema se desarrolló un enfoque numérico que combina simulaciones dinámicas detalladas con un marco estadístico de evolución colisional. En primer lugar, se construyeron modelos realistas de agregados gravitacionales utilizando PKDGRAV (*Parallel K-D tree GRAvity code*), un código N-cuerpos ampliamente utilizado para el estudio de la dinámica de pequeños cuerpos, en combinación con su implementación del método de elementos discretos suaves (*Soft-Sphere Discrete Element Method*, SSDEM). Este esquema permite modelar explícitamente las interacciones de contacto entre los componentes del agregado, incluyendo fuerzas normales y tangenciales, fricción y disipación de energía durante las colisiones,

lo que resulta esencial para reproducir de forma realista el comportamiento mecánico de asteroides tipo *rubble-pile*. Con el fin de generar estructuras internas más realistas que las obtenidas mediante empaquetamientos de esferas ideales, se desarrolló el algoritmo SHEXSSPY (*Shattering Experiments to Synthetic Shapes through Photogrammetry*). Este método utiliza fragmentos reales obtenidos en experimentos de impacto de alta velocidad sobre objetivos de basalto realizados en el *NASA Ames Vertical Gun Range*. Las formas de estos fragmentos se reconstruyen mediante fotogrametría y se utilizan como bloques constituyentes de agregados gravitacionales sintéticos.

A partir de estos agregados se realizaron experimentos numéricos en los que el cuerpo progenitor experimenta un incremento súbito de momento angular que lo lleva más allá del límite de estabilidad rotacional. Las simulaciones muestran que este proceso genera una eyección rápida de material desde la región ecuatorial, formando un entorno denso de fragmentos gravitacionalmente ligados. En escalas temporales de decenas de horas, las colisiones inelásticas y la autogravedad permiten la reacumulación de este material en uno o más embriones satelitales. Las interacciones gravitatorias posteriores conducen típicamente a estados triples transitorios y finalmente a la supervivencia de un único secundario en una órbita compacta.

Los resultados obtenidos reproducen propiedades observadas en sistemas binarios de asteroides pequeños, como separaciones orbitales de unas pocas veces el radio del primario y relaciones de tamaño entre satélite y primario comparables a las observadas. Además, las simulaciones muestran que los secundarios pueden presentar morfologías bilobuladas o de tipo binario de contacto, similares a algunos objetos observados en el Sistema Solar, como el satélite Selam del sistema binario del asteroide (152830) Dinkinesh, observado recientemente por la misión Lucy.

Para evaluar la plausibilidad de este mecanismo en entornos realistas, se desarrolló además un modelo Monte Carlo denominado *Impact-Induced Asteroid Spin Alteration* (IIASA), que simula la evolución rotacional de asteroides en el cinturón principal bajo la acción de impactos. Este modelo permite estimar la probabilidad de que un asteroide experimente eventos de aceleración angular capaces de desencadenar fisión rotacional. Los resultados indican que impactos subcatastróficos tardíos en la historia colisional de un objeto pueden proporcionar incrementos de momento angular suficientes para producir episodios supercríticos de rotación.

En conjunto, los resultados de esta tesis sugieren que la aceleración rotacional impulsiva constituye un mecanismo natural y eficiente para la formación de asteroides binarios, complementario al escenario clásico dominado por el efecto YORP. Este marco proporciona además predicciones observacionales sobre la estructura interna de los satélites, su morfología y la procedencia del material que los compone, aspectos que podrán ser contrastados con futuras observaciones astronómicas y misiones espaciales dedicadas al estudio de sistemas binarios de asteroides.

Tesis disponible en <https://drive.google.com/file/d/1J8hBQ-T1U1MGzqBveC4mMBNEmplYRJPm/view?usp=sharing>