

Bennu: Partikel-Ejektionen und Chimera-Zustände in einem frustrierten System

Periodizität der Partikel-Ejektionen auf Bennu

Die Raumsonde **OSIRIS-REx** entdeckte 2019, dass der Asteroid **Bennu** regelmäßig kleine Partikel von seiner Oberfläche ins All schleudert ¹ ². Eine detaillierte Analyse der Ereignisse zeigt deutliche **periodische Muster** in Bezug auf Bennus Rotation: Die meisten Auswürfe fanden **während des lokalen Nachmittags/Abends** (etwa 3,5–6 Stunden nach Mittag) auf Bennu statt ³. Bennu rotiert alle ~4,3 Stunden einmal, und tatsächlich häufen sich Partikel-Ejektionen in der **späten Nachmittagsphase** – also wenn die Oberfläche maximal aufgeheizt wurde und sich wieder abzukühlen beginnt ⁴. Diese Korrelation mit der Rotationsperiode deutet darauf hin, dass **thermische Spannungen** eine Rolle spielen: Während Bennus Tag-Nacht-Zyklus erhitzen sich Felsbrocken tagsüber und kühlen nachts ab, was zu Rissen und Abplatzungen führen kann. Die Häufung der Ejektionen am späten Tag (nach starker Aufheizung) untermauert thermisches Zerbersten als Ursache ⁴.

Eine weitere auffällige Beobachtung war der zeitliche Zusammenhang mit Bennus **Sonnenabstand**: Die größten Auswurf-Ereignisse traten alle kurz nach **Perihel** (Sonnennähe) auf. Insbesondere wurden drei besonders energetische Partikelausbrüche am 6. Januar, 19. Januar und 11. Februar 2019 registriert – also innerhalb weniger Wochen nach Bennus Perihel Anfang Januar ⁵. Diese drei Auswürfe erfolgten in etwa im **Zwei-Wochen-Takt** ⁶ ⁷. Missionswissenschaftler vermuteten daher zunächst, dass Bennus **Orbitposition** und verstärkte Solarheizung nahe dem Perihel die Aktivität begünstigen könnten ⁸. *Tatsächlich* zeigt eine Modellrechnung, dass in Bennus Bahn **Mikrometeoroiden** nahe dem Perihel rund fünfmal häufiger einschlagen als am Aphel, mit ca. biweekly (14-tägiger) Frequenz für genügend energiereiche Impakte ⁹. Die drei größten Auswurf-Ereignisse stimmen zeitlich mit solchen berechneten Meteoroideneinschlägen überein ⁹. Somit könnten **Meteoriteneinschläge** in Kombination mit der stärkeren thermischen Beanspruchung bei Sonnennähe die großen Partikelauswürfe ausgelöst haben. Insgesamt gilt: Bennus Partikelaktivität zeigt Periodizitäten sowohl über den **Rotationszyklus** (Tagesverlauf) – vermehrte Ejektionen am späten „Nachmittag“ ³ ⁴ – als auch möglicherweise über den **Umlauf um die Sonne**, mit gehäuften Ausbrüchen in Nähe des **Perihels** ⁵ ⁸.

Elektrostatische Levitation auf Asteroiden

Neben mechanischen Prozessen kommt auch **Elektrostatik** als Mechanismus für Partikelbewegung auf luftlosen Körpern in Betracht. Auf der **Mondoberfläche** wurde z.B. schon lange ein schwebender Staubnebel („horizon glow“) beobachtet, der auf elektrostatisch aufgeladene und abgehobene Staubteilchen zurückgeführt wird ¹⁰. Durch **Sonneneinstrahlung** und den **Solarwind** laden sich Regolith-Körner elektrisch auf; das daraus resultierende **elektrische Feld** an der Oberfläche kann feine Partikel abstoßen, wenn die elektrostatische Kraft die Gewichtskraft (Mikrogravitation) überwindet ¹¹ ¹². Die Frage lautet: *Ab welcher Feldstärke „bricht“ die Gravitation eines Asteroiden für ein Staubkorn zusammen?*

Das hängt von der Asteroiden-Gravitation und Partikeleigenschaften ab. Bennu hat eine sehr geringe Oberflächenschwerkraft (Größenordnung 10^{-5} bis 10^{-4} g_{erde}), doch **Haft- und Kohäsionskräfte**

zwischen Staubkörnern sind dennoch erheblich. Theoretische Abschätzungen zeigen, dass trotz schwacher Gravitation **relativ starke elektrische Felder nötig** sind, um geladenen Staub von der Oberfläche zu lösen ¹³. Modelle, die Mond-ähnliche Kohäsion annehmen, ergeben für Asteroiden wie Eros oder Itokawa, dass **Mikrogravitation erst bei Feldstärken im Bereich von einigen 10^2 - 10^3 V/m ausgehebelt wird** (je nach Korngröße) ¹³ ¹⁴. Auf Bennu selbst kommen natürliche elektrische Felder durch Photoelektronen-Emission vermutlich nur in die Größenordnung von **zig Volt pro Meter** auf der Tagseite ¹⁵ – genug, um äußerst feine Körner anzuheben, aber nicht, um zentimetergroße Kiesel auszustoßen. Eine aktuelle Simulation von Hartzell et al. (2022) zeigte, dass bei **geringer Partikel-Kohäsion** immerhin Körnchen von einigen **Zehntel Millimetern** Größe elektrostatisch vom sonnenbeschienenen Bennu-Untergrund abheben könnten, während bei hoher Kohäsion nur **mikrometergroße** Staubpartikel losreißen würden ¹⁶. Auf der **Nachtseite** ist das Feld etwa tausendmal schwächer, sodass dort elektrostatisches Abheben praktisch nicht stattfindet ¹⁵. Insgesamt liegt die *Schwelle*, an der elektrostatische Abstoßung die Gravitation eines Kleinkörpers übertrifft, also im **höheren zweistelligen bis dreistelligen Volt-pro-Meter-Bereich** – abhängig von Teilchengröße und Oberflächenkohäsion. Natürliche Felder auf Asteroiden erreichen diesen Bereich vermutlich nur unter günstigen Umständen. Folglich wird **elektrostatische Levitation** zwar als Mechanismus für das Abtransportieren von feinstem Staub auf Asteroiden diskutiert, spielt aber für Bennus beobachtete **grobe Partikel-Ejektionen** wahrscheinlich keine dominante Rolle ¹⁷ ¹⁸.

Chimera-Zustände in granularer Materie

Der Begriff **Chimera-Zustand** bezeichnet in der Dynamik komplexer Systeme ein paradoxes Muster, bei dem innerhalb eines *gleichen Systems* gleichzeitig geordnete (synchronisierte) und ungeordnete (desynchronisierte) Bereiche koexistieren. Dieses Phänomen ist ursprünglich aus gekoppelten Oszillatoren oder Neuronen-Netzwerken bekannt, findet aber auch **Analoga in physikalischen Vielteilchensystemen**. Insbesondere in der **granularen Materie** – Ensembles von vielen Körnern – wurden Zustände beobachtet, die einer **gleichzeitigen festen und gasförmigen Phase** entsprechen. Ein Beispiel liefert ein Experiment mit vertikal vibrierenden Granulat-Mischungen: Hier bildeten sich Muster, bei denen ein Teil der Körner als dicht gepacktes, kollektiv oszillierendes „Bett“ agiert, während direkt daneben andere Körner ungeordnet umherfliegen wie ein Gas ¹⁹. Mit anderen Worten, ein **granularer „Gas“** koexistierte neben einem **geordnet schwingenden Haufen** von Partikeln unter identischen äußeren Bedingungen ¹⁹. Weitere Versuche zeigten ähnliche **Phasentrennungen innerhalb eines Kornsystems** – etwa das Auftreten von stabilen, festen Domänen neben mobilisierten, flüssigen Bereichen in einer vibrierenden Monolage von Glasperlen ²⁰. Diese koexistenten Zustände bleiben oft über lange Zeit bestehen und stellen ein Nichtgleichgewichts-Analogon einer **Phasenkoexistenz** dar, jedoch induziert durch die **dynamische Anregung** (Vibration) statt durch Temperatur. Solche Befunde belegen, dass **gleichzeitig gebundene und gasförmige Subsysteme** in einem granulären System existieren können – im Prinzip **Chimera-artige Zustände**, bei denen Ordnung und Chaos nebeneinander persistieren.

Fazit: Bennu als „atmende“ Chimera?

Asteroid Bennu zeigt Anzeichen, ein **frustriertes System am Rande zweier Phasen** zu sein. Im Normalfall ist Bennu's Oberfläche ruhig und gravitativ gebunden (vergleichbar einem „festen“ Zustand), doch spontan und regelmäßig werden Partikel frei – ein Verhalten wie ein **ausgasendes** oder „freies“ System. Diese **Koexistenz von Bindung und Emission** erinnert an einen **Chimera-Zustand**, bei dem ein Teil des Systems geordnet bleibt, während ein anderer Teil in einen angeregten, quasi-chaotischen Zustand übergeht. Tatsächlich könnten Bennus Partikelauwürfe als **„atmende Chimäre“** interpretiert werden: Die Aktivität ist **intermittierend** – möglicherweise getrieben durch periodische externe Bedingungen (Rotation, Sonnenabstand) – so dass Bennu gewissermaßen in Phasen „ausatmet“ (Staub

ausstößt) und dazwischen wieder "einatmet" (Partikel fallen zurück oder bleiben gebunden) ² ⁴ . Unterstützt wird diese Analogie durch entsprechende Beispiele in der granularen Physik, in denen Systeme am **kritischen Phasenübergang** zwischen solid-artig und gas-artig oszillieren und beide Verhaltensweisen zugleich zeigen ¹⁹ . Bennu befindet sich also möglicherweise an der Schwelle eines solchen dynamischen Übergangs – ein reales astrophysikalisches **Chimera-System**, das uns hilft, die **frustrierte Dynamik** (gleichzeitige Stabilität und Instabilität) besser zu verstehen.

Quellen: Bennu-Partikel auswürfe beobachtet von OSIRIS-REx ² ⁴ ; periodische Muster (Rotation, Perihel) aus Missionsdaten und Modellierung ⁵ ³ ⁸ ; elektrostatische Abhebeschwelen für Staub auf Asteroiden ¹³ ¹⁶ ; Chimera-ähnliche Phasenkoexistenz in granularen Experimenten ¹⁹ ²⁰ .

¹ ⁸ NASA's OSIRIS-REx spacecraft finds particles flying off asteroid Bennu – Spaceflight Now
<https://spaceflightnow.com/2019/03/19/nasas-osiris-rex-spacecraft-finds-rocks-erupting-off-asteroid-bennu/>

² ⁴ Where Rocks Come Alive: OSIRIS-REx Observes an Asteroid in Action - OSIRIS-REx Mission
<https://www.asteroidmission.org/?latest-news=where-rocks-come-alive-osiris-rex-observes-an-asteroid-in-action>

³ ⁵ ⁶ ⁷ ⁹ 2064.PDF
<https://www.hou.usra.edu/meetings/asteroidscience2019/pdf/2064.pdf>

¹⁰ ¹⁴ (PDF) Electrical Activity and Dust Lifting on Earth, Mars, and Beyond
https://www.researchgate.net/publication/226573367_Electrical_Activity_and_Dust_Lifting_on_Earth_Mars_and_Beyond

¹¹ ¹² ¹⁵ ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸ Lofty Goals: Can Electric Fields Lift Particles Off an Asteroid's Surface? - AAS Nova
<https://aasnova.org/2022/04/22/lofty-goals-can-electrostatic-lofting-lift-particles-off-an-asteroids-surface/>

¹³ Electrostatic charging and motion of dust near the surface of an asteroid | Solar System Research
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0038094614010018>

¹⁹ Phase-coexisting patterns, horizontal segregation, and controlled convection in vertically vibrated binary granular mixtures - PubMed
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29448482/>

²⁰ epub.uni-bayreuth.de
<https://epub.uni-bayreuth.de/761/1/Goetzendorfer-thesis.pdf>