

Partikelemissionen auf Bennu: Sonnenzeit-Korrelation, elektrostatische Levitation und Oszillationen

Korrelation der Ejektionen mit der lokalen Sonnenzeit (LST)

Die OSIRIS-REx-Beobachtungen zeigen deutlich, dass Bennus Partikel-Auswurfereignisse bevorzugt am späten lokalen Nachmittag auftreten ¹. Insbesondere fanden die drei größten registrierten Ejektionen (6. und 19. Januar sowie 11. Februar 2019) alle zwischen ca. 15:00 und 18:00 Uhr lokaler Sonnenzeit statt ¹. Dieses Muster ist *nicht* konsistent mit einem unmittelbaren Ausgasen oder Zerschellen genau zum Temperaturmaximum um Mittag, sondern weist auf einen verzögerten Effekt hin. Die Verzögerung bis in den Nachmittag impliziert einen Prozess mit **thermischer Trägheit**: Entweder muss die Wärme erst in die Gesteinsoberfläche eindringen, um Spannungen aufzubauen, oder z.B. in Tonmineralen gebundenes Wasser benötigt eine ausreichende Akkumulation von Wärmeenergie, bevor es freigesetzt wird. Mit anderen Worten – hätte allein der maximale thermische Schock zur Mittagszeit die Ejektionen ausgelöst, müsste deren Aktivitätsgipfel früher liegen. Dass sie erst am Nachmittag kulminieren, stützt vielmehr Modelle wie **thermische Spannungsrisse (thermal stress fracturing)** oder dehydrationsgetriebene Ausgasungen, bei denen die **thermische Verzögerung** eine entscheidende Rolle spielt. Die späte Nachmittagszeit entspricht außerdem Bennus *führende Hemisphäre* (Leading Hemisphere) in seiner Umlaufbahn (durch die retrograde Rotation), die verstärkt Mikrometeoritenstaub ausgesetzt ist. Einige Forscher merken an, dass diese Koinzidenz Meteoroid-Einschläge als mögliche Auslöser nahelegt; doch die enge Eingrenzung auf den späten Nachmittag (nicht etwa breiter verteilt über die führende Seite) spricht dafür, dass thermisch bedingte Effekte mit Verzögerung dominieren. Insgesamt deuten die OSIRIS-REx-Daten also auf einen **thermo-mechanischen Mechanismus** hin, der mit zeitlicher Verzögerung auf die Sonnenheizung reagiert – etwa thermische Ermüdung des Gesteins, die am Nachmittag ihren kritischen Punkt erreicht, sodass gespeicherte mechanische Energie plötzlich in Form von Partikelauswürfen freigesetzt wird ². Dies stützt die Interpretation, dass Bennus Ejektionen durch thermische Trägheit und Materialermüdung getrieben sind, anstatt rein sofortiger Sublimation oder Impakt-Ereignisse.

Schwellenwerte für elektrostatische Levitation (1–5 cm Partikel)

Bennu besitzt nur eine extrem schwache Schwerkraft – die Oberflächenfallbeschleunigung beträgt in Äquaturnähe lediglich etwa $2.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ($\approx 26 \mu\text{m/s}^2$) ³. Ein 1–5 cm großer Partikel hat daher nur ein Gewicht in der Größenordnung von Mikro-Newton. Zum Beispiel würde ein ~5 cm Brocken (Masse ca. 50–100 g bei $\sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ Dichte) weniger als 10^{-5} N wiegen. Allerdings wirken auf kleine Regolithstücke **kohäsive Haftkräfte** durch Van-der-Waals-Bindungen, die trotz geringer absoluter Stärke auf Bennus Oberfläche relevant sind. Die makroskopische Kohäsion zwischen Regolithkörnern wird auf etwa 0,1 bis 1,0 Pa geschätzt ⁴. Für einen zentimetergroßen Partikel ergibt das eine Adhäsionskraft in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-3} N – um **Größenordnungen höher** als sein Gewicht unter Bennus Mikrogravitation. Diese Haftung dominiert also die Bindung kleiner Brocken an der Oberfläche, selbst wenn die Schwerkraft kaum Halt bietet ⁴.

Um einen solchen Partikel **elektrostatisch anzuheben**, müsste die nach oben gerichtete Coulomb-Kraft $Q \cdot E$ (Ladung mal elektrisches Feld) **sowohl die Gravitation als auch die Kohäsion** übersteigen. Unter solarem UV-Licht laden sich Oberflächen von Airless Bodies positiv auf; dennoch sind die resultierenden E-Felder begrenzt. Typische elektrische Feldstärken über sonnenbeschienenem Regolith liegen im Bereich einiger hundert bis tausend Volt pro Meter (z.B. $\sim 10^3$ V/m) ⁵, keinesfalls Millionen von Volt pro Meter. Eine grobe Abschätzung verdeutlicht das Problem: Selbst wenn ein 1–5 cm Partikel durch Photoeffekte auf ~ 10 – 100 Volt Oberflächenpotential aufgeladen wird, trägt er nur eine Ladung von vielleicht 10^{-11} – 10^{-9} C. Um damit eine Kraft von $\sim 10^{-3}$ N (zum Brechen der Kohäsion) zu erzeugen, wäre ein Feld in der Größenordnung von 10^6 – 10^7 V/m erforderlich – **völlig unrealistisch** hoch in natürlicher Umgebung. Dementsprechend erwarten klassische Modelle der elektrostatischen Staubbildung, dass nur sehr feine Partikel levitieren können. Simulationen einer Bennu-Oberfläche bestätigen, dass bei **sehr niedriger Kohäsion allenfalls Partikel von Zehntelmillimeter-Größe** elektrostatisch entweichen könnten, während bei höherer Kohäsion nur mikrometergroßer Staub vom E-Feld abheben kann ⁶. Hartzell et al. (2022) kommen zu dem Schluss, dass elektrostatisches **Lofting** allein **nicht genügt**, um die von OSIRIS-REx beobachteten zentimetergroßen Auswurf-Objekte zu erklären ⁶ ⁷. Vielmehr könnten elektrische Ladungen allenfalls **sehr kleine Körner** selektiv entfernen und in der Schwebe halten, jedoch keine 1–5 cm Felsstücke aus dem Regolith lösen ⁷. Dies impliziert, dass Bennus große Partikelemissionen entweder durch andere Primärprozesse (Thermik, Impakte, Druckaufbau durch Gas) verursacht werden – wobei die elektrostatische Abstoßung höchstens als *sekundärer* Auslöser wirkt, der bereits instabiles Material endgültig lossprengt ⁸. In einem solchen **“frustrierten” System** fungiert die Ladung also eher als letzter Anstoß für Partikel, die an der Schwelle zum Losbrechen stehen, statt als alleinige Ursache ⁹.

Globale Oszillationen (“Breathing Modes”) und Chimera-Zustände

Unter **“Breathing Modes”** versteht man globale Eigenschwingungen eines Körpers, bei denen er als Ganzes periodisch expandiert und kontrahiert (analog zum Grundmode einer Kugel in der Seismologie). Für *Rubble-Pile*-Asteroiden wie Bennu stellt sich die Frage, ob solche globalen Schwingungen – trotz der losen, körnigen Struktur – existieren und messbare Effekte haben. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass auch ein Lockerschüttel-Körper niederfrequente **Normalmoden** besitzen kann, die erstaunlich **lang anhaltend** schwingen, da tieffrequente Wellen in granularen Medien weniger gedämpft werden ¹⁰. Insbesondere könnten kräftige Einschläge Schwingungen mit Frequenzen nahe den niedrigsten Eigenmoden des Asteroiden anregen ¹¹ ¹². Simulationsstudien (z.B. mittels diskreter Massen-Feder-Modelle) zeigen, dass ein ausreichend großer, aber nicht-katastrophaler Impakt Bennu in **globale Vibration** versetzen könnte ¹¹ ¹³. Dabei werden Phänomene wie **antipodale Fokussierung** beobachtet – d.h. die Stoßwellen konzentrieren sich am gegenüberliegenden Punkt – und es werden insbesondere die langsamsten Moden (inklusive radiale “breathing”-Oszillation und niedrigste Biegeschwingungen) angeregt ¹³. Entscheidend ist: Solche globalen Oszillationen können lokal die Oberflächenbeschleunigung **über** Bennus Schwerkraftniveau treiben. Quillen et al. (2019) zeigen, dass in einem gewissen Regime die durch einen Impakt ausgelösten Schwingungen an einigen Stellen g überschreiten und somit Material vom Boden heben können ¹⁴. Konkret wären Vibrationen am Einschlagsort selbst, am Antipodenpunkt und an topographisch herausragenden Zonen (etwa Bennus Äquatorwulst) am stärksten ¹³ ¹⁴. In diesen Regionen könnten Regolithpartikel durch die Schüttelbewegung kurzzeitig **schwerelos** werden, “hüpfen” oder sogar in Ballistik übergehen ¹⁵, während an ruhigeren Stellen des Asteroiden die Partikel in Ruhe bleiben. Da das Schwingungsenergie-Spektrum bei Anregung weniger tiefer Moden *nicht homogen* über den Körper verteilt ist, würden manche Oberflächenbereiche wesentlich stärker durchgerüttelt als andere ¹⁶. Dies könnte ein **lokales Auflockern und Fließen des Regoliths** verursachen (Rutschungen, Slumping), möglicherweise verbunden mit kleinräumigen Partikelauwürfen, während benachbarte Gebiete weiterhin fest

“verbacken” bleiben ¹⁴. Genau hier zeigt sich eine Analogie zum **Chimera-Zustand**: Ein Teil des granularen Systems gerät in einen inkohärenten, dynamischen Zustand (fliegende bzw. nicht mehr **„gejamte“** Partikel), während der Rest synchron im ruhigen, kohärenten Zustand verharrt ¹⁷ ¹⁸. Mit anderen Worten *koexistieren* lokal flüssig-ähnliche (gasförmige) und festkörperartige Phasen nebeneinander – das charakteristische Merkmal eines Chimera-Zustands in gekoppelten Oszillator-Netzwerken ¹⁷ ¹⁸.

Dieses Konzept lässt sich für eine **agentenbasierte Simulation** nutzen, in der jedes Partikel zwischen zwei Zuständen wechseln kann: “gefangen/verklemt” (**jammed**) vs. “frei fliegend”. Globale Oszillationen oder periodische Einflüsse (etwa durch den Tag/Nacht-Zyklus, rotatorische Beschleunigung oder wiederkehrende seismische Erschütterungen) liefern den *Takt*, der die Übergänge triggert. Überschreitet die lokal erfahrene Schwingbeschleunigung oder Spannung einen kritischen **Schwellenwert**, so wechselt ein Partikel in den *fliegenden* Zustand; fällt die Anregung wieder unter die Halteschwelle, sedimentiert es zurück in den *gejamten* Zustand. Auf diese Weise könnte Bennu als quasi “atmender” Körper modelliert werden ¹⁹, bei dem ständig Teile der Oberfläche zwischen Ordnung und Unordnung oszillieren ²⁰. Tatsächlich wurde Bennus beobachtetes Muster – stabile Phasen, unterbrochen von plötzlichen Partikelauwürfen – mit einem **fragilen Gleichgewicht nahe eines Phasenübergangs** verglichen ²⁰. Die **frustrierte Dynamik** eines solchen Systems, das permanent an der Grenze zwischen fest und fluid pendelt, erklärt die stoßweise Aktivität als Ergebnis eines dynamischen Gleichgewichts ²⁰. Globale “*Breathing Modes*”-Schwingungen könnten demnach als kollektiver Taktgeber wirken, der lokale Chimera-Zustände triggert – also bestimmte Stellen des Asteroiden temporär “desynchronisiert” (regolithfluidisiert), während der Rest synchron fest bleibt. Dieses Verständnis untermauert die Logik für eine Simulation `bennu_chimera.py`, in der Regolith-Partikel agentenbasiert je nach lokalem Stressor zwischen „**jammed**” und „**flying**” hin- und herwechseln und so das emergente Muster eines granularen Chimera-Zustands auf Bennu reproduzieren.

Quellen: Die Analyse stützt sich auf OSIRIS-REx Missionsdaten und entsprechende Studien (z.B. Lauretta *et al.*, 2019) ¹ ²¹, Schätzungen physikalischer Parameter (Gravitation, Kohäsion) aus der Literatur ⁴ ³, Simulationsergebnisse zur elektrostatischen Staubhebung ⁶ ⁷ sowie Modellsimulationen zu seismischen Schwingungen von Rubble-Pile-Asteroiden ¹³ ¹⁴. Diese integrierte Sichtweise erlaubt es, Bennus beobachtete Aktivität als Zusammenspiel von thermischer Trägheit, elektrostatischen Effekten und globalen Oszillationen in einem **granularen, frustrierten System** – einem möglichen Chimera-Zustand – zu interpretieren ²⁰.

¹ ²¹ NASA's OSIRIS-REx Mission Explains Bennu's Mysterious Particle Events - OSIRIS-REx Mission

<https://www.asteroidmission.org/?latest-news=nasas-osiris-rex-mission-explains-bennus-mysterious-particle-events>

² ⁸ ⁹ ¹⁹ ²⁰ SucheGemini_Bennu Chimera-Zustände und Asteroiden-Dynamik.txt

file:///file_00000000bc1c71f5b60bd14a5a5ae191

³ Global map of slope distributions across Bennu. The slope...

https://www.researchgate.net/figure/Global-map-of-slope-distributions-across-Bennu-The-slope-arrows-show-the-direction-of_fig1_331886974

⁴ ¹⁷ ¹⁸ Bennu_ Chimera-Zustände und Asteroiden-Dynamik.pdf

file:///file_00000000830071f5abc15c0660a91475

⁵ ⁶ ⁷ 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/>

10 11 12 13 14 15 16 Impact Excitation of a Seismic Pulse and Vibrational Normal Modes on Asteroid Benu and Associated Slumping of Regolith - PMC
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7477816/>