

Das frustrierte System: Eine theoretische Modellierung der Partikelemissionen des Asteroiden (101955) Bennu als granularer Chimera-Zustand unter dem Einfluss elektrostatischer und thermischer Kopplung

1. Einleitung: Der Paradigmenwechsel der aktiven Asteroiden

1.1 Die Entdeckung der Aktivität auf Bennu durch OSIRIS-REx

Die traditionelle Taxonomie des Sonnensystems, die eine strikte Trennung zwischen inerten, felsigen Asteroiden und volatilen, aktiven Kometen vorsah, wurde in den letzten Jahrzehnten zunehmend in Frage gestellt. Diese Grenze erodierte endgültig mit der Ankunft der NASA-Raumsonde OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer) am erdnahen Asteroiden (101955) Bennu Ende 2018. Wenige Tage nach dem Einschwenken in den Orbit machten die Navigationskameras der Sonde eine Entdeckung, die das Verständnis kleiner Himmelskörper fundamental veränderte: Bennu emittiert aktiv Partikel. Es handelt sich dabei nicht um die kontinuierliche Ausgasung eines Kometen, sondern um diskrete, episodische Auswürfe von cm-großem Regolith, die den Asteroiden als "aktiven Asteroiden" der B-Klasse klassifizieren.¹

Diese Beobachtung, die ursprünglich als Gefahr für die Sonde angesehen wurde, entpuppte sich als ein Fenster in die komplexe Geophysik von "Rubble Pile"-Asteroiden (Trümmerhaufen-Asteroiden). Die emittierten Partikel, deren Durchmesser von Millimetern bis zu etwa zehn Zentimetern reichen, folgen komplexen dynamischen Pfaden: Einige entweichen dem mikrogravitativen Einflussbereich Bennus vollständig, während andere in temporäre Umlaufbahnen eintreten oder nach kurzer Zeit auf die Oberfläche zurückfallen.² Diese Prozesse deuten auf eine Oberfläche hin, die sich fernab eines statischen Gleichgewichts befindet und stattdessen durch eine fragile Balance konkurrierender Kräfte geprägt ist.

1.2 Die Hypothese des "Frustrierten Systems"

In diesem Bericht schlagen wir einen neuen theoretischen Rahmen vor, um die Phänomenologie Bennis zu beschreiben: Wir modellieren die Oberfläche des Asteroiden als ein "frustriertes System", das einen "Chimera-Zustand" aufweist. Der Begriff der Frustration stammt ursprünglich aus der Physik der kondensierten Materie (z.B. Spingläser) und beschreibt Systeme, in denen aufgrund konkurrierender Wechselwirkungen nicht alle lokalen Bindungsenergien gleichzeitig minimiert werden können. Auf Bennu manifestiert sich diese Frustration durch das Zusammenspiel dreier fundamentaler physikalischer Regime:

1. **Gravitative Kompaktion:** Die extrem schwache Selbstgravitation (in der Größenordnung von $10^{-5} g$) versucht, das granulare Material in einer "gejammed" (verklemmten) statischen Packung zu halten.⁴
2. **Kohäsive Bindung:** Van-der-Waals-Kräfte vermitteln eine extrem schwache Bindung zwischen den Regolith-Partikeln, deren makroskopische Kohäsion auf lediglich 0,1 bis 1,0 Pascal geschätzt wird.⁶ Diese Kräfte dominieren bei kleinen Partikelgrößen, sind aber bei cm-großen Objekten oft vernachlässigbar im Vergleich zu Störungen.
3. **Repulsive Exzitation:** Thermische Spannungen durch den Tag-Nacht-Zyklus und elektrostatische Aufladung durch den Sonnenwind erzeugen repulsive Kräfte, die der Gravitation und Kohäsion entgegenwirken.⁸

Das System kann weder vollständig in den Ruhezustand relaxieren (aufgrund der ständigen Energiezufuhr durch die Sonne) noch vollständig expandieren (aufgrund der gravitativen Bindung).

1.3 Der Chimera-Zustand in granularen Medien

Wir postulieren, dass die beobachteten Partikelemissionen die makroskopische Signatur eines "granularen Chimera-Zustands" sind. In der Theorie nichtlinearer dynamischer Systeme beschreibt ein Chimera-Zustand das verblüffende Phänomen, dass in einem Netzwerk identischer, gekoppelter Oszillatoren spontan eine Symmetriebrechung auftritt: Ein Teil des Systems verbleibt in einem kohärenten (synchronisierten) Zustand, während ein anderer Teil in einen inkohärenten (desynchronisierten, chaotischen) Zustand übergeht.¹⁰ Übertragen auf Bennu entspricht die "kohärente Phase" dem stabilen, rotierenden Regolith-Bett, während die "inkohärente Phase" durch die mobilisierten, ballistischen Partikelwolken repräsentiert wird. Diese Koexistenz von Festkörper- und Gas-Verhalten in einem gekoppelten Medium ist das zentrale Thema dieser Untersuchung.

2. Analyse der OSIRIS-REx Daten: Periodizitäten und Korrelationen

Um das Modell des Chimera-Zustands zu validieren, ist eine präzise Analyse der raumzeitlichen Verteilung der "Inkohärenz" (der Aktivität) erforderlich. Die Daten der OSIRIS-REx-Mission, insbesondere die hochauflösenden Aufnahmen der Navigationskameras (NavCam), liefern hierfür die empirische Grundlage. Sie zeigen, dass die Aktivität nicht stochastisch verteilt ist, sondern Muster aufweist, die Rückschlüsse auf die

zugrundeliegenden Treibermechanismen zulassen.

2.1 Zeitliche Periodizität und lokale Sonnenzeit (LST)

Eine der signifikantesten Erkenntnisse aus der Analyse der drei größten Eruptionseignisse (6. Januar, 19. Januar und 11. Februar 2019) sowie zahlreicher kleinerer Events ist die starke Korrelation mit der lokalen Sonnenzeit (Local Solar Time, LST).

Die Daten zeigen eine klare Präferenz für Ejektionen im späten Nachmittag. Konkret ereigneten sich die energetischsten Ereignisse im Zeitfenster zwischen **15:00 und 18:00 Uhr LST**.¹² Dieses Muster ist von entscheidender Bedeutung für die Identifikation des physikalischen Auslösers. Wäre die Aktivität rein durch den maximalen thermischen Schock beim Sonnenhöchststand (Mittag) getrieben, müsste das Maximum früher liegen. Die Verzögerung deutet auf einen Prozess hin, der eine thermische Trägheit beinhaltet – die Hitzewelle muss in das Gestein eindringen, um dort Spannungen aufzubauen, oder die Dehydratation von Phyllosilikaten benötigt eine gewisse Akkumulation von thermischer Energie.¹²

Zusätzlich korreliert dieser Zeitpunkt mit der Rotationsgeometrie Bennus. Da der Asteroid retrograd rotiert, entspricht der späte Nachmittag der "führenden Hemisphäre" (Leading Hemisphere) in seiner Bahn um die Sonne. Dies ist die Seite, die statistisch gesehen dem höchsten Fluss an mikrometeoritischen Einschlägen ausgesetzt ist.¹² Die Autoren der Primärstudien merken an, dass diese Koinzidenz Meteoriteneinschläge als Auslöser plausibel erscheinen lässt. Allerdings argumentieren wir, dass die scharfe zeitliche Eingrenzung auf den Nachmittag (und nicht den gesamten führenden Sektor) gegen Impacts als *alleinige* Ursache spricht. Ein rein externer Trigger würde eine gleichmäßigere Verteilung über die gesamte exponierte Hemisphäre zeigen. Die Konzentration auf den späten Nachmittag favorisiert interne Mechanismen wie thermischen Ermüdungsbruch (Thermal Fatigue), der genau in diesem Zeitfenster maximale Oberflächenspannungen vorhersagt.⁹

Interessanterweise zeigt sich neben der Hauptaktivität am Nachmittag auch eine diffuse Hintergrundaktivität auf der Nachtseite (18:00 bis 06:00 Uhr LST).¹³ Analysen der Trajektorien von sechs gravitativ gebundenen Partikeln ergaben, dass drei davon auf der Nachtseite starteten. Dies deutet auf einen sekundären Mechanismus hin, den wir im Kontext des Chimera-Modells als "Resonanzeffekt" oder "Nachhall" interpretieren: Partikel, die am Nachmittag ausgeworfen wurden, fallen in der Nacht zurück auf die Oberfläche und lösen durch ihren Impuls sekundäre Ejektionen aus (Stick-Slip-Kaskaden), die das System in einem dauerhaft angeregten Zustand halten.¹³

2.2 Korrelation mit der heliozentrischen Distanz

Die Intensität des Chimera-Zustands – also das Verhältnis von aktiver zu inaktiver Masse – scheint direkt mit dem solaren Energieeintrag zu skalieren.

Die massivsten beobachteten Ereignisse (6. und 19. Januar 2019) traten kurz nach dem Perihel-Durchgang Bennus auf (10. Januar 2019), als der Asteroid seinen geringsten Sonnenabstand von ca. 0,9 au erreichte.¹⁴ In dieser Phase ist sowohl der thermische Fluss als auch der Druck des Sonnenwindes maximal. Als sich Bennu im Laufe der Mission seinem

Aphel (1,35 au) näherte, nahm die Frequenz und Magnitude der Ereignisse signifikant ab. Während der orbitalen Phase C (August bis September 2019) wurden gezielte Langzeitbelichtungen durchgeführt, um nach Aktivität im Aphel zu suchen.¹⁶ Die deutliche Reduktion der Aktivität in größerer Sonnenentfernung ist ein starkes Indiz dafür, dass die "Frustration" des Systems thermisch moduliert wird.

Im Vergleich zu anderen aktiven Asteroiden wie (3200) Phaethon, der in Sonnennähe Massenverlusten von 10^3 bis 10^4 kg pro Periheldurchgang aufweist, ist Bennus Massenverlust mit etwa 10^{-4} g/s extrem gering.¹² Dies deutet darauf hin, dass Benu sich in einem "marginalen" Chimera-Zustand befindet – nah am kritischen Punkt, aber nicht in einem Zustand katastrophaler Ausgasung oder Auflösung.

2.3 Energetik und Partikeldynamik

Die Analyse der kinetischen Energie der Auswürfe liefert quantitative Rahmenbedingungen für unser Modell.

Das Ereignis vom 6. Januar setzte schätzungsweise 270 mJ an Energie frei, während das Ereignis vom 11. Februar etwa 8 mJ freisetzte.¹² Diese Energien sind im planetaren Maßstab winzig, im Kontext eines mikrogravitativen Haufens jedoch signifikant. Die Geschwindigkeiten der Partikel variierten von wenigen Zentimetern pro Sekunde bis zu über 3 m/s.² Da die Fluchtgeschwindigkeit auf Benu nur etwa 20 cm/s beträgt, führt dies zu einer Bifurkation der Partikelschicksale:

1. **Escape-Fraktion:** Schnelle Partikel verlassen das System und entziehen ihm Energie (evaporative Kühlung des granularen Gases).
2. **Bound-Fraktion:** Langsame Partikel verbleiben im System, fallen zurück und führen Energie (Impuls) wieder in das granulare Gitter zurück.

Dieser Rückkopplungsmechanismus ist essentiell für die Aufrechterhaltung des Chimera-Zustands, da die zurückfallenden Partikel als stochastische "Treiber" wirken, die lokale Instabilitäten an anderen Orten der Oberfläche auslösen können.

3. Das Medium der Frustration: Geophysikalische Eigenschaften des Benu-Regoliths

Um Benu als frustriertes System zu verstehen, müssen wir die Materialeigenschaften definieren, die die Kopplung zwischen den "Oszillatoren" (den Gesteinsbrocken) bestimmen. Benu ist kein Monolith, sondern ein "Rubble Pile" – ein gravitativ gebundenes Aggregat aus Trümmern.¹⁷

3.1 Der "Jammed State" in der Mikrogravitation

Die Oberflächenbeschleunigung auf Benu beträgt im Mittel etwa 10^{-5} m/s² (Mikrogravitation).¹⁹ In terrestrischen granularen Systemen ist die Schwerkraft die dominierende Kraft, die eine dichte Packung ("Jamming") erzwingt. Auf Benu ist diese

stabilisierende Kraft fast vernachlässigbar. Experimente in Mikrogravitation (z.B. Parabelflüge) zeigen, dass der Phasenübergang vom fluiden zum festen Zustand ("Jamming Transition") unter diesen Bedingungen bei deutlich geringeren Packungsdichten auftritt als auf der Erde.²⁰ Das bedeutet, dass das Material auf Bennu sich permanent nahe am kritischen Punkt befindet. Es ist "gerade so" stabil. Eine minimale Störung – sei es durch thermische Expansion oder elektrostatische Repulsion – kann ausreichen, um den lokalen Phasenübergang von "fest" (jammed) zu "fluid" (unjammed) auszulösen. Dies erklärt die hohe Sensitivität des Systems.

3.2 Kohäsion als kritischer Schwellenwert

Damit ein Rubble Pile wie Bennu mit seiner Rotationsperiode von 4,3 Stunden stabil bleibt und nicht am Äquator auseinanderfliegt, ist eine gewisse Kohäsion notwendig. Analysen der Oberflächenneigungen und der Stabilität von "Terrassen" und "Wällen" deuten auf eine globale kohäsive Stärke von lediglich **0,1 bis 1,0 Pascal** hin.⁶ Zum Vergleich: Trockener Sand auf der Erde hat Kohäsionswerte, die um Größenordnungen höher liegen können, wenn Feuchtigkeit im Spiel ist, aber selbst trockenes Pulver hat oft höhere effektive Kohäsion durch Verzahnung. Auf Bennu dominieren schwache Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Kontaktpunkten der Partikel.

Diese extrem niedrige Kohäsion wurde eindrucksvoll durch das TAG-Manöver (Touch-and-Go) bestätigt. Der Sammelkopf der Sonde drang in den Regolith ein, als ob es sich um eine Flüssigkeit handelte, und stieß auf fast keinen Widerstand.⁷ Dies bestätigt, dass die Oberfläche mechanisch eher einem viskosen Fluid nahe dem Erstarrungspunkt gleicht als einem festen Boden.

3.3 Die Anomalie der fehlenden Feinfraktion

Ein weiteres Indiz für die Frustration des Systems ist das Fehlen von feinem Staub (< cm) auf der Oberfläche. Thermische Trägheitsmessungen und Bilder zeigen eine Oberfläche, die von groben Boulders dominiert wird.²³ Auf Asteroiden wie Eros finden sich "Teiche" aus feinem Staub ("Dust Ponds"), die auf Bennu fehlen. Dies deutet auf einen effizienten Abreinigungsmechanismus hin – vermutlich elektrostatische Levitation (siehe Abschnitt 4) –, der die feinsten Partikel entfernt oder in den Untergrund "siebt" (Perkolation). Das Resultat ist eine Oberfläche, die "gepanzert" ist mit groben Körnern, was die Kontaktmechanik verändert: Weniger Kontaktpunkte bedeuten höhere Spannungskonzentrationen pro Kontakt, was die Wahrscheinlichkeit für thermische Brüche (Fatigue) erhöht.²³

4. Elektrostatische Levitation: Feldstärken und Lofting-Mechanik

Ein zentraler Bestandteil der Aufgabenstellung ist die Untersuchung der elektrostatischen Levitation. In unserem Chimera-Modell fungiert das elektrische Feld als der "Modulator", der die effektive Gewichtskraft und Kohäsion der Partikel reduziert und so das System

destabilisiert.

4.1 Die Interaktion mit dem Sonnenwind-Plasma

Bennu besitzt kein eigenes Magnetfeld und keine Atmosphäre, sodass seine Oberfläche direkt mit dem Sonnenwind interagiert. Dies führt zur Ausbildung einer Plasmaschicht (Debye-Sheath) um den Asteroiden.

- **Tagseite (Photoelektrische Aufladung):** Auf der sonnenbeschienenen Seite dominiert der photoelektrische Effekt. UV-Photonen der Sonne schlagen Elektronen aus dem Regolith, was zu einer positiven Aufladung der Oberfläche führt. Es bildet sich eine "Photoelektronenschicht" aus, die sich einige Meter über die Oberfläche erstreckt.⁸
- **Nachtseite (Elektronenbeschuss):** Auf der Nachtseite fehlt die UV-Strahlung. Hier treffen die thermischen Elektronen des Sonnenwinds (die schneller sind als die Ionen) auf die Oberfläche und laden diese negativ auf.²⁶
- **Terminator-Effekte:** Die stärksten elektrischen Felder werden am Terminator (der Tag-Nacht-Grenze) erwartet, wo der Übergang von positiver zu negativer Aufladung starke lokale Gradienten erzeugt.²⁸

4.2 Quantitative Feldstärken und Debye-Längen

Um zu beurteilen, ob elektrostatische Kräfte cm-große Partikel heben können, müssen wir die Feldstärken quantifizieren.

- **Feldstärke (E):** Simulationen für Asteroiden wie Bennu (oder das ähnliche Objekt 2016 HO3) prognostizieren Feldstärken auf der Tagseite von etwa **2 V/m**. In der Nähe des Terminators oder in beschatteten Kratern (durch differentielle Aufladung) können diese Werte auf **10 bis 20 V/m** ansteigen.²⁸ Extremere Modelle, die für die Mondoerfläche entwickelt wurden, sprechen teilweise von kV/m in mikroskopischen Spalten, aber für das makroskopische Feld im Sonnenwind bei 1 AU sind die moderateren Werte realistischer.
- **Debye-Länge (λ_D):** Die Debye-Länge ist das Maß für die Abschirmung elektrischer Ladungen im Plasma. Im Sonnenwind bei 1 AU beträgt die Debye-Länge typischerweise **10 bis 20 Meter**.²⁹ Dies bedeutet, dass das elektrische Feld der Oberfläche weit in den Raum hinausreicht und Partikel auch noch in einigen Metern Höhe beeinflussen kann (im Gegensatz zur sehr dünnen Schicht in der Ionosphäre der Erde).

4.3 Das Lofting-Problem für cm-Partikel

Die elektrostatische Kraft F_E auf ein Teilchen ist $F_E = Q \cdot E$, wobei Q die Ladung des Teilchens ist. Damit ein Partikel "abhebt" (Levitation), muss F_E größer sein als die Summe aus Schwerkraft (F_g) und Kohäsion (F_c).

Für ein Partikel mit 1 cm Radius auf Bennu:

- $F_g \approx 10^{-7}$ N (basierend auf Dichte $\sim 2 \text{ g/cm}^3$ und $g \sim 10^{-5} \text{ m/s}^2$).
- F_c dominiert bei kleinen Partikeln, ist aber bei cm-Größe oft die entscheidende Hürde, wenn "Brücken" zwischen Körnern existieren.

Forschungsergebnisse (z.B. Hartzell et al.) zeigen, dass für **cm-große Partikel** die notwendigen Feldstärken, um Kohäsion und Gravitation *allein* zu überwinden, unter normalen Sonnenwindbedingungen kaum erreicht werden.¹⁹ Elektrostatik ist hocheffizient für Mikron-Staub (was das Fehlen der Feinfraktion erklärt), aber um einen 5 cm großen Stein zu heben, reicht die Kraft meist nicht aus.

4.4 Die kooperative Rolle: Der "Popcorn-Effekt"

Daher schlagen wir vor, dass die Elektrostatik in unserem Chimera-Modell nicht der alleinige Treiber, sondern ein Katalysator ist. Das elektrische Feld übt einen ständigen negativen Druck auf die Partikel aus. Es reduziert die Normalkraft, mit der ein Partikel auf seine Nachbarn drückt. Dies verringert die effektive Reibung und die Schwelle, ab der andere Kräfte (wie thermische Spannungen) eine Bewegung auslösen können.⁸

Wir nennen dies den "Popcorn-Effekt": Das elektrische Feld heizt das System vor (reduziert die Bindung), und ein thermischer Knall (Thermal Crack) lässt das Teilchen schließlich springen.

5. Chimera-Zustände in Granularen Medien: Die Fest/Gasförmig-Koexistenz

Der theoretische Kern dieses Berichts ist die Identifikation von Bennus Oberflächenaktivität als einen **Chimera-Zustand**.

5.1 Definition des Chimera-Zustands

Ein Chimera-Zustand ist ein Phänomen in Netzwerken gekoppelter Oszillatoren, bei dem trotz identischer Parameter und symmetrischer Kopplung eine spontane Aufspaltung in Domänen unterschiedlicher Dynamik erfolgt: Ein Teil schwingt synchron (kohärent), ein anderer asynchron (inkohärent).¹⁰

Auf Bennu übersetzen wir dieses abstrakte Konzept in die Sprache der granularen Physik:

- **Oszillatoren:** Die Regolith-Partikel.
- **Synchroner Zustand (Kohärent):** Das "gejammte" Regolith-Bett, das starr mit dem Asteroidenkörper rotiert. Die Partikel sind in Phase (relative Geschwindigkeit null).
- **Asynchroner Zustand (Inkohärent):** Die Wolke aus ausgeworfenen Partikeln. Jedes Teilchen bewegt sich auf einer individuellen, chaotischen Bahn. Sie sind "entkoppelt" vom Gitter.

5.2 Mechanismus der Phasen-Koexistenz

Wie kann ein solcher Zustand stabil sein? Warum explodiert nicht der ganze Asteroid ("globales Gas") oder bleibt ganz starr ("globaler Festkörper")?

Die Antwort liegt in der Intermittenz der Kraftketten. In granularen Medien wird mechanische Spannung nicht homogen, sondern entlang diskreter Ketten von Kontaktpunkten übertragen. Wenn thermische Spannungen oder Vibrationen das System treiben, brechen diese

Kraftketten nicht überall gleichzeitig. Das Versagen ist lokalisiert.

Ein "Thermal Crack" oder eine lokale elektrostatische Entladung bricht eine spezifische Kraftkette. Nur die Partikel, die von dieser Kette gehalten wurden, werden "befreit" (fluidisiert) und in den inkohärenten Zustand (die Gasphase) überführt. Der Rest der Oberfläche bleibt durch die verbleibenden Kraftketten stabilisiert (gejammed).³³

5.3 Stick-Slip-Dynamik und Selbstorganisierte Kritikalität

Die zeitliche Struktur der Emissionen auf Bennu – Perioden der Ruhe unterbrochen von plötzlichen Ausbrüchen – ist charakteristisch für **Stick-Slip-Dynamik** (Haftgleiten). Dies ist derselbe Mechanismus, der Erdbeben verursacht, hier jedoch angewandt auf ein mikrogravitatives Geröllfeld.

- **Stick-Phase:** Thermische Energie wird als elastische Spannung im Gestein gespeichert. Kohäsion und Reibung halten das System fest.
- **Slip-Phase:** Die Spannung überschreitet die lokale Scherfestigkeit (moduliert durch die elektrostatische Entlastung). Es kommt zu einer lawinenartigen Neuordnung ("Avalanche"), bei der kinetische Energie freigesetzt wird und Partikel ausgestoßen werden.³³

Die Verteilung der Ereignisgrößen (viele kleine, wenige große) folgt wahrscheinlich einem Potenzgesetz (Power Law), was ein starkes Indiz für ein System in einem Zustand **selbstorganisierter Kritikalität (SOC)** ist.³⁶ Bennu balanciert sich selbst am Rande der Instabilität: Jedes Ereignis entspannt das System lokal, aber die kontinuierliche Energiezufuhr (Sonne) lädt es wieder auf.

6. Seismologie und globale Oszillationen: Der "Atem" des Asteroiden

Ein faszinierender Aspekt des Chimera-Modells ist die mögliche Kopplung der lokalen Ejektionen an globale Moden des Asteroiden.

6.1 Der "Breathing Mode" (Atmungs-Mode)

Rubble-Pile-Asteroiden sind keine starren Körper, sondern können als visko-elastische Aggregate schwingen. Die fundamentalste Schwingungsmoden ist der "Breathing Mode" (radiale Oszillation), bei dem der Asteroid periodisch expandiert und kontrahiert.³⁹ Theoretische Modelle legen nahe, dass thermische Schocks (z.B. durch das schnelle Aufheizen beim Sonnenaufgang oder das Abkühlen beim Sonnenuntergang) seismische Wellen erzeugen können. Aufgrund der starken Dämpfung in einem porösen Medium (Rubble Pile) klingen diese Wellen schnell ab, können aber Resonanzen anregen.⁴⁰

6.2 Seismische Effizienz und Energiekopplung

Die seismische Effizienz (ϵ_s) beschreibt, welcher Anteil der Einschlag- oder Bruch-Energie in seismische Wellen umgewandelt wird. Für poröse Asteroiden wird

ϵ_s oft auf 10^{-5} bis 10^{-4} geschätzt.⁴¹

Selbst bei dieser geringen Effizienz kann ein thermischer Riss ("Thermal Quake"), der einige Joule freisetzt, lokale Beschleunigungen erzeugen, die in der Mikrogravitation von Bennu (10^{-5} g) relevant sind. Wenn die seismische Welle die Oberfläche erreicht, kann sie Partikel, die bereits durch elektrostatische Kräfte "gelockert" sind, in den Weltraum katapultieren. Dies würde erklären, warum Aktivität oft korreliert auftritt: Eine globale Schwingung (der "Atem") moduliert die lokale Stabilitätsschwelle über die gesamte Oberfläche hinweg.⁴⁰

7. Das integrierte Modell: Thermisch-Elektrostatisch-Gravitative Kopplung

Zusammenfassend schlagen wir folgendes integriertes Modell für den Chimera-Zustand auf Bennu vor:

7.1 Der Energiekreislauf

1. **Aufladung (Vorbereitung):** Während der Rotation durch den Sonnenwind lädt sich die Oberfläche auf. Das elektrische Feld ($E \approx 2\text{--}20$ V/m) reduziert die effektive Anpresskraft der Partikel ("elektrostatische Levitation light"). Das System wird "geschmiert".
2. **Spannungsaufbau (Laden):** Der Tag-Nacht-Zyklus induziert thermische Gradienten in den Felsblöcken. Spannung baut sich auf (Stick-Phase).
3. **Trigger (Zündung):** Am späten Nachmittag (15:00–18:00 LST) ist die thermische Welle tief genug eingedrungen, um Brüche auszulösen. Ein "Thermal Fatigue"-Ereignis lässt einen Stein platzen.
4. **Ejektion (Slip/Chimera):** Der Bruchimpuls, verstärkt durch die bereits reduzierte effektive Schwerkraft (durch Elektrostatik) und möglicherweise unterstützt durch seismische Wellen, wirft Partikel aus. Eine lokale "Gasblase" entsteht auf der "festen" Oberfläche.
5. **Relaxation (Feedback):** Partikel entweichen oder fallen zurück. Rückfallende Partikel erzeugen Sekundärstöße, die weitere (kleinere) Ejektionen auf der Nachtseite triggern.

7.2 Tabelle: Kräftebilanz eines 1 cm Regolith-Partikels auf Bennu

Die folgende Tabelle illustriert die "Frustration" – das Ringen der Kräfte um die Vorherrschaft.

Kraftart	Größenordnung (N)	Abhängigkeit	Rolle im Chimera-Modell
Gravitation (F_g)	$\sim 10^{-7}$	Masse, Radius	Stabilisator: Erzwingt das "Jamming" (feste Phase).
Kohäsion (F_c)	$\sim 10^{-5}$ – 10^{-4}	Kontaktfläche, "Sauberkeit" (σ)	Haupt-Stabilisator: Bindet Partikel,

			verhindert Fluidisierung.
Elektrostatik (\$F_E\$)	$\sim 10^{-8} - 10^{-7}$	Ladung, E-Feld (\$2-20\$ V/m)	Destabilisator: Reduziert Normalkraft, senkt die Schwelle.
Thermischer Stress (\$F_T\$)	Variabel (Transiente Impulse)	ΔT , Mineralogie	Trigger: Liefert den kinetischen Impuls für den Phasenübergang.
Strahlungsdruck (SRP)	$\sim 10^{-9}$	Oberfläche, Albedo	Sortierer: Entfernt kleinste Stäube, hinterlässt grobes Korn.

Anmerkung: Die elektrostatische Kraft allein ist oft kleiner als die Kohäsion ($F_E < F_c$). Dies stützt die These, dass F_E kooperativ mit F_T wirken muss, um die Ejektion zu ermöglichen.

8. Implikationen und Ausblick

Das "Frustrierte System" Benu ist mehr als nur eine Kuriosität; es ist ein Labor für die Physik granularer Materie unter Extrembedingungen.

8.1 Vergleich mit Ryugu und Kometen

Im Gegensatz zu Kometen, deren Aktivität durch Sublimation getrieben wird (hydrodynamischer Outflow), ist Bennus Aktivität ein "trockener", mechanischer Prozess. Im Vergleich zum Asteroiden Ryugu, der morphologisch ähnlich ist aber weniger aktiv scheint, könnte Benu sich in einem anderen Stadium der "Ermüdung" befinden – oder seine Oberflächenchemie (Hydratation der Phyllosilikate) begünstigt thermische Brüche stärker.¹²

8.2 Bedeutung für Planetary Defense

Für Abwehrmissionen (wie DART) oder Landemissionen ist dieses Modell kritisch. Eine Oberfläche im Chimera-Zustand ist unberechenbar. Ein kinetischer Impaktor könnte statt einer Impulsübertragung eine lokale Fluidisierung (Verpuffung der Energie in granularer Reibung) auslösen. Ein Lander könnte auf einer scheinbar festen Oberfläche landen, die bei Kontakt in einen fluiden Zustand übergeht (wie beim TAG-Manöver beobachtet), weil er das fragile Gleichgewicht der Frustration stört.⁷

8.3 Fazit

Die Analyse der OSIRIS-REx-Daten durch die Linse der Komplexitätsforschung offenbart Benu als einen **Granularen Chimera**. Die beobachteten Periodizitäten, die energetischen

Grenzen und die selektive Partikelgrößenverteilung lassen sich konsistent erklären, wenn man die Oberfläche nicht als statischen Monolithen, sondern als frustriertes Netzwerk betrachtet, das durch den thermischen Atem der Sonne und die elektrische Spannung des Sonnenwinds ständig an der Schwelle zwischen Ordnung (Fels) und Chaos (Partikelwolke) gehalten wird.

Quellenintegration:

Dieser Bericht basiert auf der Synthese der bereitgestellten Forschungsschnipsel, insbesondere der Beobachtungsdaten von Lauretta et al. und Hergenrother et al. 12, den elektrostatischen Modellen von Hartzell et al. 26, sowie den theoretischen Grundlagen zu Chimera-Zuständen 10 und granularer Physik in Mikrogravitation.²⁰

Referenzen

1. Where Rocks Come Alive: OSIRIS-REx Observes an Asteroid in Action, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://news.arizona.edu/news/where-rocks-come-alive-osiris-rex-observes-asteroid-action>
2. OSIRIS-REx sees Bennu spewing stuff into space | The Planetary Society, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://www.planetary.org/articles/osiris-rex-update-bennu-ejection>
3. Introduction to the Special Issue: Exploration of the Activity of Asteroid (101955) Bennu - NIH, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7540007/>
4. (PDF) Behaviors of lunar regolith simulants under varying gravitational conditions, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/396114451_Behaviors_of_lunar_regolith_simulants_under_varying_gravitational_conditions
5. Scaling forces to asteroid surfaces: The role of cohesion - arXiv, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://arxiv.org/pdf/1002.2478>
6. The dynamic geophysical environment of (101955) Bennu based on OSIRIS-REx measurements - PMC - NIH, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7323631/>
7. Properties of the asteroid Bennu's surface based on contact measurements and their implications, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://curation.isas.jaxa.jp/symposium/abstract/2022/S22-10_Scheeres.pdf
8. COMPUTATIONAL PREDICTIONS OF ELECTROSTATIC LEVITATION ABOUT ASTEROID BENNU. C. M. Hartzell¹, M. Zimmerman², and D. S. Lauretta³, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://www.hou.usra.edu/meetings/asteroidscience2019/pdf/2065.pdf>
9. Thermal Fatigue as a Driving Mechanism for Activity on Asteroid Bennu - PMC, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7507781/>
10. Macroscopic, artificial active matter | National Science Open (NSO), Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.nso-journal.org/articles/nso/full_html/2024/04/NSO20240005/NSO2

[0240005.html](#)

11. (PDF) Controlling chimeras - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/273456033_Controlling_chimeras
12. (PDF) Episodes of particle ejection from the surface ... - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/337819678_Episodes_of_particle_ejection_from_the_surface_of_the_active_asteroid_101955_Bennu
13. AAAS - Sciences and Exploration Directorate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://science.gsfc.nasa.gov/sed/content/uploadFiles/publication_files/LaurettaHergenrother2019.pdf
14. Meteoroid Impacts as a Source of Bennu's Particle Ejection Events - Rowan Digital Works, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://rdw.rowan.edu/context/see_facpub/article/1045/viewcontent/Connolly2020_JGRPlanets_Meteoroid.pdf
15. Initial Orbit Determination and Event Reconstruction From Estimation of Particle Trajectories About (101955) Bennu - PMC - PubMed Central, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7540059/>
16. OSIRIS-REx Proximity Operations and Navigation Performance at (101955) Bennu, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210025791/downloads/OSIRIS_REx_ProxOps_and_Nav_Performance_final.pdf
17. The strength of regolith and rubble pile asteroids - UCF College of Sciences, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://sciences.ucf.edu/class/wp-content/uploads/sites/23/2018/02/MAPS_cohesion.pdf
18. The geophysical environment of Bennu - SwRI Boulder Office, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www2.boulder.swri.edu/~bottke/Reprints/Scheeres_2016_Icarus_276_116_Geophysics_Bennu.pdf
19. The Dynamics of Near-Surface Dust on Airless Bodies - CCAR, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://ccar.colorado.edu/scheeres/scheeres/assets/ThesesAbstracts/hartzell_dissertation.pdf
20. Granular jamming and rheology in microgravity - arXiv, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://arxiv.org/html/2507.08674v2>
21. Behaviors of lunar regolith simulants under varying gravitational conditions - PMC, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12489093/>
22. Lessons Learned From OSIRIS-REx at Bennu: Implications for the Regolith and Cohesion Properties for the Surface of Apophis. K. J, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://www.hou.usra.edu/meetings/apophis2022/pdf/2031.pdf>
23. Dynamics of levitating dust particles near asteroids and the Moon - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/258796956_Dynamics_of_levitating_dust_particles_near_asteroids_and_the_Moon

24. Asteroid (101955) Bennu's weak boulders and thermally anomalous equator - PMC, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7544501/>
25. E-Glider: Active Electrostatic Flight for Airless Body Exploration - NASA, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/04/niac_2016_phasei_quadrelli_e_glider_tagged.pdf
26. Lofty Goals: Can Electric Fields Lift Particles Off an Asteroid's Surface? - AAS Nova, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://aasnova.org/2022/04/22/lofty-goals-can-electrostatic-lifting-lift-particles-off-an-asteroids-surface/>
27. of the Moon and Mars., Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160013625/downloads/20160013625.pdf>
28. Three-dimensional Particle-in-cell Simulations of the Solar Wind Interaction with Asteroid 2016 HO 3 - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/372459127_Three-dimensional_Particle-in-cell_Simulations_of_the_Solar_Wind_Interaction_with_Asteroid_2016_HO_3
29. The multi-scale nature of the solar wind - PMC - PubMed Central, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6934245/>
30. Electrostatic forces on grains near asteroids and comets - EPJ Web of Conferences, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2017/09/epjconf162466.pdf>
31. From Order to Chimeras: Unraveling Dynamic Patterns in Active Fluids with Nonlinear Growth - arXiv, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://arxiv.org/html/2412.14729v2>
32. UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182940/Permanent-dynamics-of-particle-like-solutions-in-out-of-equilibrium-systems.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
33. Stick-slip Dynamics in Penetration Experiments on Simulated Regolith - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/357258265_Stick-slip_Dynamics_in_Penetration_Experiments_on_Simulated_Regolith
34. On the earthquake potential of creeping faults: Insights from lab-scale fault analogues | Request PDF - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/258617989_On_the_earthquake_potential_of_creeping_faults_Insights_from_lab-scale_fault_analogues
35. Stick-slip Dynamics in Penetration Experiments on Simulated Regolith - Semantic Scholar, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://www.semanticscholar.org/paper/Stick-slip-Dynamics-in-Penetration-Experiments-on-Featherstone-Bullard/0f948a5f193f188def0746d57724566dc6dec6c7>
36. Intermittency between avalanche regimes on grain piles - PubMed, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30011504/>
37. arXiv:2210.09046v1 [cond-mat.stat-mech] 13 Oct 2022, Zugriff am Dezember 26,

- 2025, <https://arxiv.org/pdf/2210.09046>
38. PHYSICAL REVIEW RESEARCH 3, 023206 (2021) Desynchronization of jammed oscillators by avalanche - William Gilpin, Zugriff am Dezember 26, 2025, http://www.wgilpin.com/papers/gilpin_physrevresearch_2021.pdf
 39. Microgravity and the respiratory system - ERS Publications, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://publications.ersnet.org/content/erj/43/5/1459>
 40. Segregation on small rubble bodies due to impact-induced seismic shaking - Journals, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://royalsocietypublishing.org/rspa/article/480/2292/20230715/101258/Segregation-on-small-rubble-bodies-due-to-impact>
 41. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids - ResearchGate, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.researchgate.net/publication/261327010_Thermal_fatigue_as_the_origin_of_regolith_on_small_asteroids
 42. Session 9a: Impact Effects - UNOOSA, Zugriff am Dezember 26, 2025, https://www.unoosa.org/documents/pdf/smpag/PDC2021_Presentation_Day4/IAA-PDC-21-09a-MASTERFILE.pdf
 43. Frustration Induced Chimeras and Motion in Two Dimensional Swarmalators - arXiv, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://arxiv.org/html/2501.05135v1>
 44. Asteroid mission hints at the nature of rubble-pile asteroids—and how to deflect them - NIH, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10636298/>
 45. Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu - PubMed, Zugriff am Dezember 26, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31806784/>