

Hypothese: Alfvén-Wellenresonanz und Phaethons Staubemission

Überblick: Asteroid **3200 Phaethon** gilt als „aktiver Asteroid“ – er zeigt bei Sonnennähe ein kometenähnliches Verhalten mit einem Staub- bzw. Gasschweif und ist Ursprung des Geminiden-Meteorstroms. Üblicherweise werden solche Ausgasungen auf thermische Effekte (z.B. Aufheizen und Ausgasen von Material) zurückgeführt. Die hier untersuchte Hypothese schlägt jedoch vor, dass **Resonanzeffekte mit Alfvén-Wellen im solaren Plasma** Phaethons anomale Staubemission auslösen. Im Folgenden werden vier Aspekte dieser Hypothese recherchiert: (1) Plasmawellen in Sonnennähe laut Parker Solar Probe und STEREO, (2) mechanische Resonanzfrequenzen von porösem Regolith (Phaethons Oberfläche), (3) Modelle zu *Dusty Plasma*-Solitonen (Staub-Plasma-Ein-Wellenpakete) und nichtlinearen Kopplungen, sowie (4) die JAXA-Mission DESTINY+ und ihre Instrumente zur Untersuchung von Staub-Plasma-Interaktionen.

1. Plasmawellen in Sonnennähe (<0,2 AU): Daten von Parker Solar Probe und STEREO

Parker Solar Probe (PSP): Die NASA-Raumsonde Parker Solar Probe liefert seit 2018 direkte Messungen des Sonnenwinds im Nahbereich der Sonne (Perihel bis ~0,05–0,1 AU). Bereits in ~0,2 AU Entfernung wurden **intensive Alfvén-wellenartige Fluktuationen** im Magnetfeld registriert, die sich in schnellen Richtungsumschlägen („Switchbacks“) zeigen ¹ ². Parker Solar Probe misst mit dem *FIELDS*-Instrument elektrische und magnetische Plasmawellen in einem breiten Frequenzbereich bis in den kHz-Bereich. Tatsächlich wurden in der inneren Heliosphäre **ionen-akustische Wellen** (Longitudinalwellen im Plasma) mit Frequenzen von **ca. 1–10 kHz** beobachtet ³. So berichteten bereits die Helios-Sonden in den 1970er Jahren (bis ~0,3 AU) über Ionenschall-Wellen im Bereich 1–10 kHz ³. Neuere PSP-Daten bestätigen, dass solche **Ion-akustischen Plasmawellen um ~3 kHz** nahe der Sonne häufig auftreten ⁴. Diese Wellen treten meist parallel zum Sonnenwind-Magnetfeld auf und gehen einher mit *Alfvénischen* Turbulenzen. Interessanterweise scheinen große Amplituden-Alfvén-Wellen nahe der Sonne gelegentlich **Ionenschallwellen „triggern“**, z.B. durch nichtlineare Zerfallsinstabilitäten ⁵. Parker Solar Probe hat zudem den Bereich innerhalb der **Alfvén-Oberfläche** der Sonne erreicht (d.h. näher als der Punkt, wo der Sonnenwind erstmals schneller als die Alfvén-Geschwindigkeit wird) ⁶. In diesem *magnetisch dominierten* Bereich wurden weiterhin plasmakinetische Wellen wie z.B. **kinetische Alfvén-Wellen (KAW)** detektiert ⁷. Typische lokale Plasma-Frequenzen in ~0,2 AU Abstand sind: Ion-Plasma-Frequenz $f_{pi} \approx 4$ kHz, Elektron-Plasma-Frequenz $f_{pe} \approx 200$ kHz ⁸. Damit liegen **Alfvén-Moden und akustische Wellen** im kHz-Bereich deutlich unterhalb der Elektronen-Oszillationen, was Parker Solar Probe durch In-situ-Spektren bestätigt. Insgesamt zeigen die Parker-Daten, dass der junge Sonnenwind (<0,2 AU) sehr **Alfvénisch** geprägt ist (starke magnetische Fluktuationen) ⁹ und dass zugleich **hochfrequente elektrostatische Wellen** bis in den unteren kHz-Bereich omnipräsent sind ³. Diese Frequenzen entsprechen genau dem genannten Bereich von 1–10 kHz.

STEREO: Die *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO-A und -B) sind zwei NASA-Raumsonden (Start 2006), die die Sonne auf Erdnähe (~1 AU) umkreisen, jedoch nicht so weit zur Sonne vordringen wie Parker. Dennoch liefern sie „historische“ Vergleichsdaten: STEREO verfügt über das Instrument **S/WAVES (Stereo/Waves)**, das elektrische Wellen und Radiostrahlung im Bereich von **2,5 kHz bis 16 MHz**

erfasst ¹⁰. Damit kann STEREO sowohl lokale Plasmawellen im kHz-Bereich als auch entfernte solare Radioemissionen (MHz) detektieren. In ~ 1 AU typischer Sonnenwinddichte liegt die lokale Plasmafrequenz (Elektronen) um $\sim 20\text{--}30$ kHz, sodass STEREOs untere Grenzfrequenz von 2,5 kHz sogar **ionen-akustische Wellen** und andere Niederfrequenz-Moden im Sonnenwind empfangen kann. Während STEREO vor allem für Radiobursts (z.B. Typ-III-Bursts) genutzt wurde, zeigen die Daten, dass es **kontinuierliche Spektren bis hinunter in den kHz-Bereich** aufzeichnet ¹¹. Konkrete Alfvén-Wellen (MHD-Moden) lassen sich in solchen Daten schwer direkt identifizieren, da reine Alfvénwellen eher niedrige Frequenzen (mHz–Hz) haben. Allerdings deutet die Präsenz von Ionenschall- und **Plasmawellen um einige kHz** auch bei 1 AU (vgl. Wind- und STEREO-Daten) auf entsprechende Energie in diesem Band hin ³. **STEREO lieferte zudem wichtige Beobachtungen von Phaethons Ausgasung:** Die *SECCHI/HI*-Kamera von STEREO-A beobachtete 2009 und 2012 bei Phaethons Perihel (0,14 AU) einen schwachen Schweif aus sehr kleinen Partikeln ¹². Diese Beobachtung bestätigte, dass **nahe der Sonne Staub aus Phaethon ausströmt**, obwohl STEREO keine direkten Plasmafeld-Daten so nah an der Sonne hat. Zusammenfassend ergänzen die STEREO-Daten das Bild: Plasmawellen im kHz-Bereich sind auch bei 0,5–1 AU verbreitet, und die Alfvén-Turbulenz der Sonne überträgt sich in diesen Frequenzbereich (u.a. durch nichtlineare Kopplungen), was im Nahbereich von Parker Solar Probe noch ausgeprägter ist ⁵.

2. Mechanische Resonanzfrequenz von porösem Regolith auf Phaethon

Die Oberfläche von Phaethon besteht vermutlich aus **lockerem, hochporösem Regolith** (staubiges Gesteinsmaterial ähnlich Asteroiden oder dem Mond). Die Frage ist, ob dieses Material Resonanz auf periodische Anregungen (z.B. durch Plasmawellen) im Bereich von 1–10 kHz zeigen könnte. Allgemein hängt die *mechanische Resonanz* granularer Materialien von Faktoren wie Korngröße, Packungsdichte, Porosität und Kontaktkräften ab. Laborexperimente zeigen, dass **ungeschlossene Körneransammlungen Resonanzen im Kilohertz-Bereich** aufweisen können. Beispielsweise beobachteten Valenza et al. (2010) an mit lockerem Granulat gefüllten Hohlräumen in Schwingungs-Experimenten **deutliche Resonanzspitzen zwischen 1 und 5 kHz**, wo der gleiche Hohlraum ohne Granulat nur eine einzelne Resonanz hatte ¹³. Durch das lose Granulat treten also zusätzliche Eigenmoden im **Ultraschall-Frequenzband (ca. 1–5 kHz)** auf, abhängig von Feuchte und Packungsgrad ¹³. Auch andere Untersuchungen granularer Medien berichten von charakteristischen Resonanzfrequenzen um $\sim 1\text{--}2$ kHz – etwa ein **Resonanzpeak bei $\sim 1,8$ kHz** in Messungen der dynamischen effektiven Masse von Pulvern ¹⁴. Für sehr lockere, poröse Regolith-Simulanten (z.B. Mondstaub-Simulant) wurden in Vibrationstests ebenfalls niederfrequente (<100 Hz) „**Flüssigwerden**“ **bei 20–40 Hz** festgestellt ¹⁵; doch feinere Strukturen im kHz-Bereich sind schwieriger direkt zu messen. Es ist plausibel, dass **hochporöser Asteroiden-Regolith** (Porosität $>50\%$, schwache Kornbindungen) *akustische Wellen* mit Geschwindigkeiten von wenigen 100 m/s oder weniger unterstützt. Bei einer typischen Korngröße von $\sim 0,1\text{--}1$ mm könnten die *Eigenschwingungen* eines Regolith-„Pakets“ dann im kHz-Bereich liegen. Die vorhandenen Studien deuten an, dass eine Überlappung mit **Alfvén-Wellen-Frequenzen von 1–10 kHz** möglich ist: d.h. ein vibrierendes loses Kornmedium kann in diesem Bereich resonant angeregt werden ¹³. Sollte also ein externer periodischer Krafttreiber – etwa ein wechselndes elektromagnetisches Feld durch eine Alfvén- oder Plasmawelle – mit $\sim$ kHz auf Phaethons Oberfläche einwirken, könnte das Regolith **mechanisch mitschwingen**. Im Resonanzfall würde das die Schwingungsamplitude stark erhöhen. Eine solche Resonanzanregung könnte dazu führen, dass feine Staubkörner die Bindung zur Oberfläche verlieren (ähnlich wie Vibration Strukturen entstauben kann). Zusammengefasst gibt es Hinweise, dass **poröses Regolith KHz-Resonanzen** besitzt und somit *empfänglich* für solare Plasmawellen in diesem Frequenzband sein könnte.

3. *Dusty Plasma Solitons*: Kopplung von Plasmawellen und losem Oberflächenmaterial

In Plasmen, die geladene Staubpartikel enthalten (sogenannte „**dusty plasmas**“ oder komplexe Plasmen), können sich spezielle Wellenphänomene ausbilden. Ein *Soliton* ist eine nichtlineare, lokalisiertes Wellenpaket, das stabil propagiert. **Dusty-Plasma-Solitonen** sind in Theorie und Labor gut untersucht: Staubteilchen im Plasma ermöglichen **Staub-akustische Wellen** (DAW) – das sind akustische Dichtewellen, bei denen die trägen Staubpartikel die Rückstellkraft liefern ¹⁶. Solche Wellen können sich nichtlinear zu **Solitären Wellen (Solitions)** oder Stoß-ähnlichen Strukturen formen ¹⁷ ¹⁸. Relevante Beispiele in der Natur sind *Staub-Plasma-Wellen* in **planetaren Ringen, Kometenschweif und Asteroidenzonen** ¹⁹ ¹. Theoretische Arbeiten zeigen, dass **Staubplasmen ein ideales Medium für Solitonen** sind ²⁰: Durch die Präsenz von geladenem Staub kommen neue Eigenmoden hinzu und nichtlineare Plasma-Gleichungen (KdV, KP, ZK etc.) besitzen in diesem Kontext Soliton-Lösungen ²⁰.

Im Kontext *Asteroid + Plasma + Staub* gibt es Parallelen zu Kometen: Ein **aktiver Asteroid** wie Phaethon, umgeben von ausströmenden Staubpartikeln, bildet ein *Staub-Plasma-Gemisch* im Sonnenwind. Modelle aus der Kometen- und Meteoritenphysik legen nahe, dass **nichtlineare Kopplungen zwischen elektromagnetischen Plasmawellen und Staubwolken** auftreten können. Ein konkretes Beispiel: Im **Meteoritenschweif** (Ionosphäre) können Hochfrequenz-Elektromagnetwellen über **Modulationsinstabilitäten** niederfrequente **Staub-Dichtewellen** anregen ²¹ ²². Morozova & Popel (2021) zeigen, dass in Meteorschweif die modulierte Kopplung von EM-Wellen zu **Staub-akustischen Störungen** führt, welche Frequenzen im akustischen Hz-kHz-Bereich haben ²¹ ²³. Übertragen auf Phaethon bedeutet das: Alfvénische Plasmawellen (die das elektromagnetische Feld im Sonnenwind oszillieren lassen) könnten durch **Wechselwirkung mit dem geladenen Staub** Staubwellen oder **solitäre Dichtepulse** in der ausströmenden Staubwolke erzeugen. Eine solitäre Staubwelle wäre z.B. ein kompaktes **Staub-Auswurf-Paket**, das sich vom Asteroiden ablöst. Bisher gibt es keine *publizierten* spezifischen Modelle, die Phaethons Staubemission als *Dusty Plasma Soliton* beschreiben. Dennoch stützen allgemeine Untersuchungen die Möglichkeit: **Staubkörner in Plasmen können Wellen tragen, Stöße bilden und wechselwirken**, z.B. wurden im Labor **Vorläufer-Solitonen** beobachtet, wenn ein Staubplasma supersonisch an einem Hindernis vorbeiströmt ²⁴ ²⁵. Ein Asteroid im schnellen Sonnenwind könnte analog *Staubwellen* an seiner Schattenseite bilden (ähnlich wie Bugwellen). Zudem kann die **Ladung der Staubkörner dynamisch variieren**, wodurch Rückkopplungen entstehen: Theoretiker wie Shukla et al. (1990er) zeigten, dass die Variation der Staubladung zusätzliche Instabilitäten und Solitonen erzeugen kann ²⁶. Insgesamt gilt: **Dusty-Plasma-Solitonen** sind ein bekanntes Phänomen und werden in Umgebungen wie **Asteroidenzonen, Kometenschweif und planetaren Ringen** erwartet ¹⁹ ¹. Konkrete Simulationen zur Kopplung „Alfvénwelle ↔ Regolithstaub“ auf Phaethon stehen noch aus. Die Hypothese ist jedoch physikalisch plausibel: Eine **Alfvén-Welle im Sonnenwind** könnte über wechselnde elektromagnetische Kräfte den **lockeren Oberflächestaub in Schwingung versetzen**. Bei Resonanz (siehe Abschnitt 2) würde der Staub teils aufgeladen und abgestoßen, wodurch **solitäre Staub-Ausbrüche** („Staub-Solitonen“) entstehen könnten, die als plötzliche Emission beobachtet werden.

Hinweis: Neueste Beobachtungen (2022/23) deuten an, dass Phaethons **Schweif hauptsächlich aus atomarem Natrium-Gas** bestehen könnte, nicht aus Staub ²⁷ ²⁸. In diesem Szenario würde erhitztes Natrium aus dem Gestein verdampfen (ähnlich *Ausgasen*) und Staub nur sekundär mitreißen. Selbst wenn dies zutrifft, spielt das Plasmaumfeld eine Rolle: Die geladenen Natrium-Ionen könnten die **elektrostatische Lofting-Mechanik** unterstützen ²⁹ ³⁰. Kimura et al. (2022) argumentieren, dass mobile Alkali-Ionen (Natrium) die elektrische Aufladung der Oberfläche erhöhen und so **Mikrometer-Staub elektrostatisch abheben** lassen können ²⁹. Auch dies ist eine Form der Kopplung zwischen Plasma (Ionisierung) und Staubemission, wenn auch quasi-stationär statt wellengetrieben. Zukünftige

Messungen sollen klären, welche Rolle solche *Plasma-Staub*-Wechselwirkungen bei Phaethons Aktivität spielen.

4. JAXA-Mission DESTINY+: Instrumente für Staub-Plasma-Interaktionen

Die Mission **DESTINY+** (geplanter Start ~2028, Vorbeiflug ~2030) der japanischen Raumfahrtagentur JAXA ist explizit darauf ausgelegt, Asteroid Phaethon und seine Umgebung *in situ* zu untersuchen ³¹ ³². Ihr Wissenschaftsziel ist es u.a., den **Mechanismus der Staubejection** von Phaethon zu enthüllen ³³. Dafür trägt DESTINY+ **drei Hauptinstrumente** ³⁴, die synergistisch *Staub-Plasma-Interaktionen* erfassen können:

- **Destiny+ Dust Analyzer (DDA)**: Dies ist das zentrale Instrument, um Staubpartikel in Phaethons Nähe direkt zu erfassen und zu analysieren. DDA ist ein **stoßmassenspektrometrischer Staubdetektor**, ähnlich denen auf Cassini oder Stardust, jedoch mit erweiterten Fähigkeiten. Jeder eintreffende Staubpartikel wird durch einen *Trajektoriesensor* erfasst, der **Flugbahn und Geschwindigkeit** bestimmt, und durch die darauf folgende Kollision mit dem Detektor erzeugt er ein **Plasma aus Ionen und Elektronen**, das per **Zeitflug-Massenspektrometer (TOF)** analysiert wird ³⁵ ³⁶. Wichtig im Kontext Staub-Plasma: DDA misst **die primäre elektrische Ladung des einfliegenden Partikels** noch vor dem Aufprall ³⁵. Das bedeutet, man erhält Daten darüber, wie stark das Staubkorn aufgeladen war – ein direktes Indiz für Plasmaeinwirkung (ein im Sonnenwind geladenes Korn). Weiterhin bestimmt DDA die **Masse** des Partikels (aus Impuls und resultierender Plasmaionisation) und die **elementare Zusammensetzung** aus dem Massenspektrum des Impact-Plasmas ³⁵ ³⁶. Somit kann DDA z.B. feststellen, ob viele **leichte Alkali-Ionen** (wie Na⁺, K⁺) aus dem Staub freigesetzt werden, was auf enthaltene flüchtige Stoffe schließen lässt – oder ob das Staubkorn schon im Raum durch UV und Plasma teilweise „gebacken“ wurde. Für die Hypothese bedeutet das: **DDA kann überprüfen, ob die Staubkörner von Phaethon ungewöhnlich geladen sind** (was auf elektromagnetische Abschlüge hindeuten würde) und ob gehäufte Ankunftszeiten oder Geschwindigkeitsgruppen auf **gepulste Auswurfmechanismen** schließen lassen. Z.B. wenn Alfvén-Resonanzen stoßweise Staub lösen, könnte DDA diese *Staubpakete* als zeitlich gebündelte Treffer registrieren. Auch die gemessene Geschwindigkeit der Partikel (DDA Trajectory Sensor) verrät etwas über den **Ejektionsimpuls** – resonante Vibrationen könnten Staub nur mit geringer Fluchtgeschwindigkeit abwerfen, während explosive Gasfreisetzung höhere Geschwindigkeiten erzeugt. DDA liefert also *direkt* die physikalischen Parameter der Staub-Plasma-Interaktion: Ladung der Körner (durch Plasmaaufladung), Impact-Plasma-Energie (korreliert mit Geschwindigkeit und Masse) und Zusammensetzung (z.B. Hinweis auf verdampftes Natrium oder auf mineralische Oberfläche) ³⁵ ³⁶.
- **TCAP – Telescopic Camera for Phaethon**: Eine hochauflösende monokulare Kamera, die während des nahen Vorbeiflugs (~500 km Abstand) Phaethons Oberfläche abbildet ³⁷ ³⁸. Sie ist auf die **Topographie und aktive Gebiete** ausgelegt. TCAP könnte *indirekt* Hinweise auf Staub-Plasma-Wechselwirkung liefern, indem sie z.B. **Staubjets oder lokalisierte Ausgasungsquellen** sichtbar macht. Wenn resonante Schwingungen Staub freisetzen, erwartet man eventuell an bestimmten Kraterhängen oder Äquatorregionen vermehrte Erosion – TCAP könnte Veränderungen oder frisches Material dort fotografisch festhalten. Außerdem erlaubt der Vergleich von beleuchteter vs. schattiger Seite, ob elektrostatische Effekte (Tag-Nacht-Ladung) eine Rolle spielen.

- **MCAP – Multiband Camera for Phaethon:** Diese Kamera beobachtet Phaethon in mehreren Spektralbändern (UV/vis/IR) und kann so verschiedene Mineral- und Gasemissionen unterscheiden ³⁷ ³⁸. Sie wird insbesondere nach **Ausströmendem Material** suchen – z.B. einem **Staubschleier oder Natrium-Gas**. Für solitonische Effekte relevant: MCAP könnte kurze **Aufhellungen** oder **Strahlen** um Phaethon detektieren, falls ein Plasmawellen-getriebenes Staubausschuss-Ereignis auftritt. In verschiedenen Wellenlängen lässt sich auch unterscheiden, ob es sich um neutralen Staub (Sonnenlichtreflexion), ionisierten Staub/Plasma (evtl. Emissionslinien) oder Gas handelt. Damit können Resonanz-Effekte identifiziert werden – etwa ob *gepulste* Staubbemission im Takt solarer Schockwellen erfolgt.

Weitere Sensorsysteme an Bord sind der Raumsonde-Körper und Kommunikation selbst, die zwar keine ausgewiesenen Plasma-Instrumente tragen (DESTINY+ hat **keinen dedizierten Magnetometer oder Partikeldetektor** laut bisheriger Nutzlastplanung ³⁴), aber *telemetrieintern* könnte man z.B. elektrostatische Aufladungen oder Abbremsen durch Staub detektieren. Insgesamt ist die **Sensorik von DESTINY+ darauf ausgelegt, Staub-Plasma-Interaktionen aus verschiedenen Blickwinkeln zu beurteilen:**

- *In situ* durch direkte Staubanalyse (DDA),
- *Remote Sensing* durch Beobachtung von Staub/Gas um den Asteroiden (MCAP) und Veränderungen/aktiven Zonen auf der Oberfläche (TCAP).

Sollten tatsächlich **solitonische oder resonante Auswurfeffekte** stattfinden, erwartet man Indizien wie: **schubweise Partikelströme** (DDA-Trefferstatistik), **charakteristische Partikel-Ladungen oder -Größen** (deutet auf bestimmtes Abhebe-Szenario) und **örtlich begrenzte Emissionsgebiete** (TCAP/MCAP-Bilder). Die Kombination der Instrumente erlaubt es, zwischen verschiedenen Mechanismen zu unterscheiden – z.B. kontinuierlichem Staubausschuss vs. periodischen Eruptionen ³⁹ ⁴⁰.

Fazit: DESTINY+ ist hervorragend ausgestattet, um die Hypothese der Alfvén-Wellen-induzierten Staubbemission zu überprüfen. Sollte Phaethons Staub tatsächlich durch Resonanz mit solaren Plasmawellen losgerüttelt werden, **dürften DDA und die Kameras eindeutige Signaturen dafür finden** – von resonanten Frequenzmustern im Staubfluss bis hin zu lokal korrelierten Oberflächenphänomenen. Die Mission wird somit eine entscheidende Datengrundlage liefern, um thermische Effekte gegen Plasma-Resonanz-Effekte als Ursache von Phaethons Aktivität abzuwägen.

Quellen:

- Parker Solar Probe Ergebnisse (Plasmawellen, Alfvén-Turbulenz) ³ ⁵ ⁹
- STEREO S/WAVES Frequenzbereich ¹¹; STEREO-HI Beobachtung Phaethon-Schweif ¹²
- Resonanz in granularen Medien (Labor) ¹³; Granularmaterial ~kHz-Resonanz ¹⁴
- Dusty Plasma Wellen & Solitonen (Theorie) ¹⁷ ²⁰ ²¹
- Elektrostatischer Staubausschuss (Phaethon-Modell) ²⁹
- DESTINY+ Missionsbeschreibung & Instrumente ³⁵ ⁴¹ ³⁷
- NASA/JPL Illustration Phaethon (Ausgasung bei Sonnennähe) ²⁸ ²⁷ (Abbildung oben).

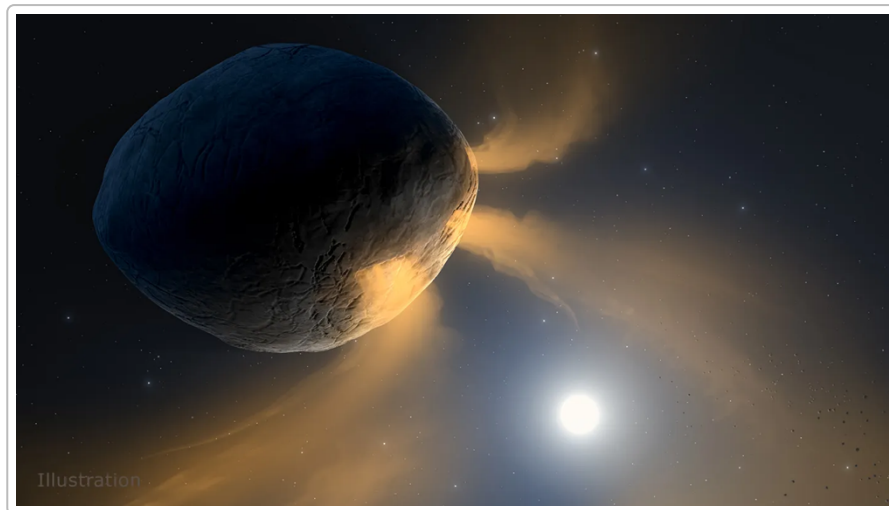


Illustration: Phaethon erhitzt sich am Perihel; Natrium verdampft und bildet einen Koma/Schweif (gelblich dargestellt). Solche Ausgasungen könnten auch Staub mitreißen – DESTINY+ wird dies näher untersuchen ²⁸ ⁴⁰ .

- 1 9 20 Transverse instability of dust acoustic solitary waves for the coupled Zakharov-Kuznetsov equation in magnetized two-ion-temperature dusty plasma - ScienceDirect
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096007792501416X>
- 2 6 Parker Solar Probe: Crossing the Alfvén Surface - NASA SVS
<https://svs.gsfc.nasa.gov/4958/>
- 3 4 5 Proton-Acoustic Wave Effects on the Relaxation of Proton Transverse Heating in Magnetized Plasmas
<https://arxiv.org/html/2509.08106v1>
- 7 Alfvén waves in the solar corona: resonance velocity, damping ...
<https://www.nature.com/articles/s41598-024-77975-6>
- 8 Measurement of Magnetic Field Fluctuations in the Parker Solar ...
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JA028543>
- 10 STEREO WAVES (SWAVES) Radio Intensity Spectra, both Ahead ...
[https://heliophysicsdata.gsfc.nasa.gov/WS/hdp/1/Spase?](https://heliophysicsdata.gsfc.nasa.gov/WS/hdp/1/Spase?ResourceID=spase%3A%2F%2FNASA%2FNumericalData%2FSTEREO%2FSWAVES%2FDS%2FCombined%2FPT1M)
ResourceID=spase%3A%2F%2FNASA%2FNumericalData%2FSTEREO%2FSWAVES%2FDS%2FCombined%2FPT1M
- 11 [PDF] STEREO/WAVES Calibration and Measurement Algorithm Document
https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/publications/CMAD/swaves/STEREO_SWAVES_CMAD_20250210.pdf
- 12 29 30 33 [2204.09385] Electrostatic Dust Ejection From Asteroid (3200) Phaethon With the Aid of Mobile Alkali Ions at Perihelion
<https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2204.09385>
- 13 Effect of granular media on the vibrational response of a resonant structure: theory and experiment - PubMed
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21110572/>
- 14 Dynamic Effective Mass of Granular Media | Phys. Rev. Lett.
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.058001>
- 15 [PDF] New Insights into Regolith Physical Properties
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/1406.pdf>
- 16 17 18 Microsoft Word - Freeman RH _JSOC_Q4_ 2024A
https://opsjournal.org/DocumentLibrary/Uploads/Freeman%20RH_JSOC_Q4_2024A.pdf
- 19 Solitons in dusty plasmas with positive dust grains | Physics of ...
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/15/3/033701/1015240/Solitons-in-dusty-plasmas-with-positive-dust>
- 21 22 23 Modulational Interaction in a Dusty Plasma of Meteoroid Wakes | Geomagnetism and Aeronomy
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0016793221060116>
- 24 [PDF] arXiv:1511.02063v2 [physics.plasm-ph] 12 Apr 2016
<https://arxiv.org/pdf/1511.02063>
- 25 Experimental Observation of Precursor Solitons in a Flowing ...
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27176247/>
- 26 [PDF] Waves and Instabilities in Dusty Plasmas - University of Iowa Physics
<https://homepage.physics.uiowa.edu/~rmerlino/RF03dusty.pdf>
- 27 28 Asteroid's Comet-Like Tail Is Not Made of Dust, Solar Observatories Reveal - NASA
<https://www.nasa.gov/solar-system/asteroids-comet-like-tail-is-not-made-of-dust-solar-observatories-reveal/>

31 32 34 DESTINY+ - Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/DESTINY%2B>

35 36 meetingorganizer.copernicus.org

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU25/EGU25-19660.html?pdf>

37 38 39 40 41 Deep space exploration technology demonstrator (DESTINY*) - Planetary
Exploration Research Center

<https://www.perc.it-chiba.ac.jp/en/projects/destiny-plus/>