

Dem Kometenplasma auf der Spur

Untersuchung der Plasmaumgebung des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko

K.-H. Glaßmeier, K. Ostaszewski, C. Götz, C. Koenders, *Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, Technische Universität Braunschweig*

Kurzgefasst

- Plasma am Kometen
- Rosetta Mission
- Hybrid Plasmasimulationen

Die Plasmaumgebung eines Kometen wird bestimmt von der Interaktion zwischen dem Sonnenwind und den schweren kometaren Ionen. Mit der Annäherung des Kometen an die Sonne sublimiert vor allem Wassereis von der Oberfläche und das entstehende Gas wird ionisiert. Die Addition dieser schweren Ionen zum Sonnenwindfluss führt zu einer Ablenkung der Sonnenwindprotonen und einer Modifikation des interplanetaren Magnetfeldes. Abhängig von der Anzahl an kometaren Ionen bilden sich so verschiedene Strukturen aus.

Mit der Rosetta Mission konnten diese Strukturen und ihre Evolution während der Reise des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko durch das Sonnensystem vermessen werden. Das Rosetta Plasma Consortium [1] bietet dabei die Möglichkeit in-situ Messungen am Ort des Raumfahrzeuges durchzuführen und kann die Dichten und Geschwindigkeiten verschiedener Ionen und Elektronen, sowie Magnitude und Richtung des Magnetfeldes bestimmen. Allerdings sind die Messungen aufgrund der Trajektorie und Geschwindigkeit Rosettas stark beschränkt und bedürfen weiterer Anhaltspunkte zur Interpretation.

Dieses kann durch die Durchführung numerischer Plasmasimulationen geschehen. Da am Kometen die zu untersuchenden Strukturen von der gleichen Größenordnung wie der Ionengyrationsradius sind, kann hier nicht mehr in einem reinen Fluidbild, welches die Bewegung der einzelnen Ionen nicht inkorporiert, vorgegangen werden, stattdessen werden Hybridsimulationen bevorzugt. Dabei werden die Ionen, hier also Protonen und Wasserionen, als Partikel betrachtet, während die Elektronen ein ladungsneutralisierendes Fluid darstellen. Dies bietet gegenüber reinen Partikelsimulationen den Vorteil von stark verkürzten Rechenzeiten mit nur geringen Einschränkungen in der Beschreibung der physikalischen Prozesse.

Der in diesem Projekt verwendete Simulationscode wurde bereits genutzt um Vorhersagen für die

Rosetta Mission zu treffen und hat so maßgeblich zur Planung der Missionsphasen beigetragen. Nach Ende der Mission im September 2016 werden nun die Daten mit Hilfe von numerischen Plasmasimulationen ausgewertet und interpretiert. Dabei können die Simulationen sowohl als Parameterstudien genutzt werden, als auch um einen globalen Kontext für die Ein-Punkt-Messungen des Raumfahrzeuges zu geben.

Die überraschende Entdeckung von niederfrequenten Wellen [6] konnte zunächst nicht erklärt werden, da die Frequenz nicht im erwarteten Bereich lag. Allerdings konnten diese Wellen in Simulationen [4] rekreiert werden, wobei sich herausstellte, dass sie nur an Orten erhöhter Wasserionendichte und erhöhter Stromdichte entstehen. Dies ist erklärbar mit einer Instabilität, die durch zum elektrischen Feld orthogonale Ströme hervorgerufen wird. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für das auftreten von niederfrequenten Wellen, die sich in Form von Wellenfronten bewegen und somit für einen Beobachter in Ruhe eine zu den Daten passende Oszillation im Magnetfeld hervorrufen. Die Kenntnis über die Entstehung dieser Wellen trägt maßgeblich zum Verständnis der gesamten Interaktionsregion bei [2,4].

Auch großskalige Strukturen, wie die Verformung des interplanetaren Magnetfeldes durch den Einfluss des kometaren Plasmas konnten vermessen und mit Hilfe von Simulationen interpretiert werden [5].

Während der Mission wurde festgestellt, dass die Bugstoßwelle des Kometen einen größeren Abstand vom Nukleus hat als von früheren Simulationen vorhergesagt. Diese Diskrepanz konnte nun aufgeklärt werden. Im Gegensatz zu früheren Simulationen enthält der verbesserte Hybridcode nun die Elektronenimpaktionisation als zusätzlichen Ionisationsmechanismus. Dies führt nicht nur zu einer Erhöhung der Plasmadichte, sondern auch zu einer signifikanten Änderung im Sonnenwindgeschwindigkeitsprofil sowie im Bugstoßwellenabstand. Bei hohen Ausgasungsraten kann dies dazu führen, dass der Bugstoßwellenabstand sich von 4500 km auf 7500 km vergrößert. Der Effekt der Elektronenimpaktionisation auf Plasmagrößen wie Sonnenwindgeschwindigkeit und -dichte (u_{sw} und n_{sw}), sowie kometare Ionen- und -dichte (n_{sw}) sind in Abbildung 2 exemplarisch dargestellt. Auch die anisotrope Ausgasung hat einen vergrößernden Effekt auf die subsolare Ausdehnung der kometaren Plasmaumgebung, da der sonnenzugewandte Teil des Kometen stärker ausgast als der sonnenabgewandte Teil.

Die Rosetta Observierungen enthalten viele physikalisch interessante Vorkommnisse. Eines ist die Detektion eines sogenannten Outburst, einer explosionsartigen Freisetzung großer Mengen von Staub und Gas am Nukleus. Der Einfluss dieser transienten Events soll nun mit Hilfe von Hybridsimulationen untersucht werden. Einerseits hat die erhöhte Neutralgasdichte einen unmittelbaren Effekt auf die Ionendichte, beeinflusst allerdings auch indirekt das Magnetfeld [3]. Bisher gibt es keine Erklärung für dieses Verhalten, weshalb Hybridsimulation zum besseren Verständnis beitragen können. Weiterhin wird bei solchen Events eine große Menge an Staubteilchen freigesetzt, die die Plasmaumgebung stark verändern, da Ladungen auf den Staubteilchen um ein vielfaches höher sind als die Ladungen der Ionen. Der Einfluss von Staub kann auch zur Erzeugung neuer Wellenmoden beitragen.

Um diese Pläne zu realisieren soll der Code an Schlüsselstellen verbessert und stabilisiert werden, unter anderem durch Implementierung einer neuen Lösungsmethode für die zugrunde liegenden Differentialgleichungen.

Ziel des Projektes ist also ein besseres Verständnis der kometaren Plasmawechselwirkungen zu erlangen, indem Daten und numerische Plasmasimulationen genutzt werden. Nur mit Hilfe beider Methoden kann eine fundierte Analyse der Begebenheiten und physikalischen Prozesse gelingen.

WWW

<http://www.igep.tu-bs.de>

Weitere Informationen

- [1] C. Carr et al., *Space Science Reviews* **128**, 629-647 (2007). doi:10.1007/s11214-006-9136-4
- [2] K.-H. Glassmeier, *Phil. Trans. R. Soc. A* **375**, 20160256 (2017). doi:10.1098/rsta.2016.0256
- [3] R. Hajra et al., *Astronomy & Astrophysics*, (2016). doi:10.1051/0004-6361/201730591
- [4] C. Koenders et al., *Astronomy & Astrophysics* **594**, A66 (2016). doi:10.1051/0004-6361/201628803
- [5] C. Koenders et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **462**, S235-S241 (2016). doi:10.1093/mnras/stw2480
- [6] I. Richter et al., *Annales Geophysicae* **33**, 1031-1036 (2015). doi:10.5194/angeo-33-1031-2015
- [7] K. Ostaszewski, *Technische Universität Braunschweig*. Masterarbeit (2017).

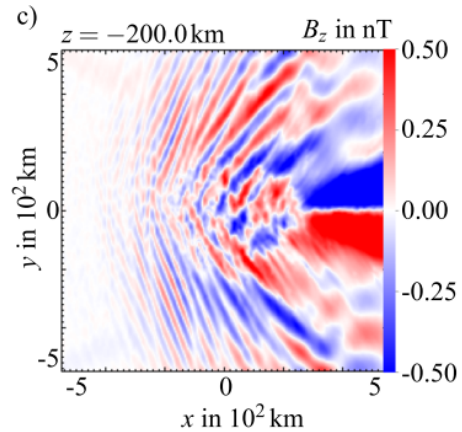


Abbildung 1: Ergebnis einer numerischen Plasmasimulation zur Interpretation von niederfrequenten Wellen an einem schwach ausgasenden Kometen. Dargestellt ist eine Magnetfeldkomponente in einer Schnittebene 200 km unter dem Kometen, welcher sich im Ursprung befindet. Die Wellen sind hier besonders gut zu erkennen, da die kometare Ionendichte sehr hoch ist. Aus [4].

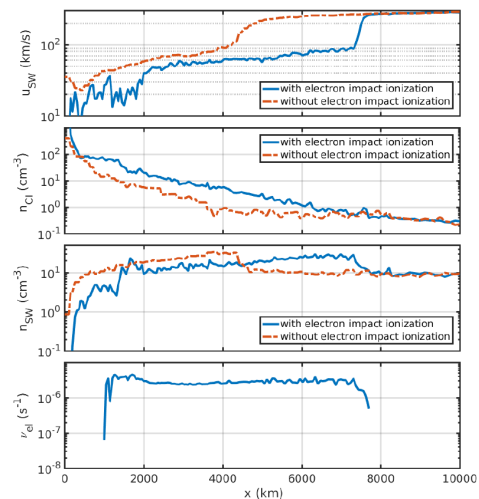


Abbildung 2: Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Elektronenimpaktionisation. Dargestellt sind die Verläufe unterschiedlicher Plasmamaparameter in Abhängigkeit des Abstandes zum Kometen sowohl die lokale Ionisationsrate. Aus [7].