

Dissertation
submitted to the
Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics
of the Rupertus Carola University of
Heidelberg, Germany
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

M.S. Physicist: Amara Lynn Graps
born in: Honolulu, Hawaii, U.S.A.

Oral Examination: 18th July 2001

Io Revealed
in the
Jovian Dust Streams

Referees: Prof. Dr. Eberhard Grün
Prof. Dr. Dietrich Lemke

The dust wakes out of its slumber and I follow its passage.

From volcanoes on moons, through comet breezes,
Atop bookshelves in rooms, expelled by human sneezes,
From disks of new stars into emerald-blue planets,
The dust is a piece of me, or am I a piece of dust?

We fly from the ecliptic brightness, feel comforted by the local fluff, and
drink a ceylon tea at the cosmic tea table with our friends from β Pic.
They don't laugh at my jokes, but I smile anyway.

Amara Lynn Graps

Abstract

Io Revealed in the Jovian Dust Streams

The Jovian dust streams are high-rate bursts of submicron-sized particles traveling in the same direction from a source in the Jovian system. Since their discovery in 1992, the Jovian dust streams have been observed by three spacecraft: Ulysses, Galileo and Cassini. The work presented here describes an emerging electrodynamical picture of the Jovian dust streams as they appear inside and outside of the Jupiter environment. The source of the Jovian dust streams is Jupiter's moon, Io, in particular, dust from Io's volcanoes. Charged Io dust, traveling on trajectories from Io's location, is shown to have some particular signatures in real space and in frequency space.

The Jovian dust stream dynamics in the frequency-transformed Galileo spacecraft dust measurements show different signatures, varying, orbit-to-orbit during Galileo's last 29 orbits around Jupiter. The varying frequencies from orbit-to-orbit are dependent on the spacecraft and dust detector geometry, on the local plasma conditions, and on Io itself, most likely its volcanoes' activity. The presence of Io's orbital rotational frequency demonstrates that Io is a localized source of charged dust particles and a confirmation of Io's role as a localized charged dust source arises through the modulation effects. This time-frequency analysis is the first direct evidence that Io is the source of the Jovian dust streams. I provide additional frequency evidence of Io recorded by Cassini and Galileo during an August 2000 Jovian dust streams 'storm'.

Several aspects of the dust stream particles' dynamics in real space can be understood if the particle's charge is varying, via the different currents generated as the dust particle samples the plasma while traveling. One application I show is matching the travel time of a stream particle during the December 2000 joint Galileo-Cassini dust stream measurements, where the two spacecraft were located inside (Galileo) and outside (Cassini) of the Jovian magnetosphere. To match these measurements, the smallest dust particles could have the following range of parameters: radius: 6 nanometers, density: 1.35–1.75 g/cm³, initial charge potential: 1–4 V, secondary electron emission yield: 3.0, dependent on a maximum electron energy 300 eV, and a photoelectron emission yield: 0.1–1.0, which produce dust particle speeds: 220\450 km s⁻¹ (Galileo\Cassini) and charge potentials: 5.5\6.3 V (Galileo\Cassini).

Zusammenfassung

Ios "Fußabdruck" in den Staubströmen des Jupiter

Die Staubströme des Jupiter bestehen aus kollimierten Staubteilchen, die von einer Quelle im Jupitersystem ausgehen. Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1992 wurden sie mit Staub-Instrumenten auf den drei Raumsonden Ulysses, Galileo und Cassini untersucht. Die vorgelegte Arbeit beschreibt ein elektrodynamisches Bild der Staubströme wie sie sich innerhalb und außerhalb der Jupiterumgebung zeigen. Die Quelle der Stromteilchen sind die Vulkane auf Jupiters Mond Io. Es wird gezeigt, daß elektrisch geladener Staub von Io, der sich auf bestimmten Bahnen fortbewegt, charakteristische Eigenschaften im realen und im Frequenzraum besitzt.

Die mit der Raumsonde Galileo gewonnenen und frequenz-transformierten Daten der Staubströme zeigen verschiedene Charakteristika, die deutliche Variationen von Umlauf zu Umlauf der Sonde um Jupiter während der letzten 29 Umläufe zeigen. Diese Variationen von Umlauf zu Umlauf sind von der Meßgeometrie für Staubteilchen, von den lokalen Plasmabedingungen, und von Io selbst – höchstwahrscheinlich von seiner Vulkanaktivität – abhängig. Das Vorhandensein von Ios Umlauffrequenz um Jupiter demonstriert, daß er wie eine lokalisierte Quelle für geladene Staubteilchen wirkt, wie durch Modulationseffekte bestätigt wird. Diese Zeit-Frequenzanalyse ist der erste direkte Nachweis, daß Io die Quelle der Jupiter-Staubströme ist. Zusätzliche Evidenz für Io gibt die Frequenzanalyse von Staubdaten, die mit Cassini und Galileo während eines "Staubsturmes" im August 2000 gewonnen wurden.

Einige Aspekte der Dynamik der Stromteilchen im realen Raum lassen sich durch veränderliche Teilchenladungen verstehen, die über verschiedene elektrische Ströme erzeugt werden, wenn die Teilchen sich durch das Plasma in der Jupiter-Magnetosphäre bewegen. Eine untersuchte Anwendung ist die Flugzeit der Stromteilchen während gemeinsamer Messungen von Galileo und Cassini im Dezember 2000, bei denen sich die zwei Raumfahrzeuge innerhalb (Galileo) bzw. außerhalb (Cassini) der Jupiter-Magnetosphäre befanden. Zur Erklärung dieser Messungen müssen die Staubteilchen die folgenden Eigenschaften haben: Radius 6 nm, Dichte 1.35 bis 1.75 g cm⁻³, anfängliches Potential: 1 bis 4 Volt, Sekundärelektronenausbeute: 3.0 (abhängig von der maximalen Elektronenenergie im Plasma 300 eV), Ausbeute für Photoelektronen-Emission: 0.1 bis 1.0. Am Ort von Galileo bzw. Cassini liefern diese Geschwindigkeiten der Staubteilchen von 220 bzw. 450 km sec⁻¹ sowie Ladungspotentiale von 5.5 bzw. 6.3 V.

TABLE OF CONTENTS

Chapter 1: Introduction	1
1.1 Why Dust?	1
1.2 Jovian Dust Streams History	2
1.3 Thesis Statement	6
Chapter 2: In-Situ Measurements	9
2.1 Dust Instruments	9
2.2 Detection of Jovian Dust Streams	10
2.3 Jupiter Millennium Mission	14
Chapter 3: Jovian Dust Streams as Frequencies	17
3.1 Why Frequency Analysis?	17
3.2 Methods of Time-frequency analysis	17
3.3 Frequency-transformed Galileo Data	20
Chapter 4: Modeling	37
4.1 Jupiter's Magnetic Field	37
4.2 Jupiter's Plasma	45
4.3 Torus-Magnetosphere Coupling	50
4.4 Dust Particle Densities	51
4.5 Dust Particle Optical Properties	51
Chapter 5: Charging	57
5.1 Charging Processes	57
5.2 Equilibrium Potential & Charging Times	64
5.3 Dominant Currents	67
5.4 Cassini-Galileo Joint Measurements Currents	67

Chapter 6: Dynamics	73
6.1 Charged Particle Forces	73
6.2 Ejection from the Jovian Magnetosphere	75
6.3 Traveling SO _x Dust Particle Forces	84
6.4 Dust Velocities vs. Distance	87
6.5 Material Property Explorations	93
Chapter 7: Synopsis	99
Chapter 8: Going Further	103
8.1 Ulysses Time-Freq Analysis	103
8.2 Particle's Trajectory Errors	103
8.3 A More Appropriate Magnetic Field	105
Bibliography	107
Appendix A: Periodogram Derivation	113
Appendix B: Frequency-Transformed Galileo Data	115
Appendix C: Corotation	123
C.1 Derivation of the Corotation Electric Field	123
C.2 Derivation of the Magnetosphere Boundary	125
Appendix D: Field Emission and Electrostatic Disruption	127
List of Figures	128
List of Tables	130
Acknowledgements	131