

Staub in Reih und Glied

Das erste wissenschaftliche Experiment auf der ISS diente dazu, das Verhalten staubiger Plasmen zu erforschen.

>> Markus Thoma und Michael Kretschmer

Derzeit wartet die Welt neugierig auf den bevorstehenden Start des Spaceshuttles Discovery. Hier zu Lande ist die Spannung besonders groß, denn Thomas Reiter fliegt als der erste deutsche Astronaut ins All, der einige Monate auf der Internationalen Raumstation ISS bleiben soll. Reiter soll die »Expedition 13«, bestehend aus dem Kosmonauten Pawel Vinogradow und dem Astronauten Jeffrey Williams, verstärken, wodurch die ISS-Besatzung – nach langen Jahren zu zweit – wieder auf die ursprünglich vorgesehenen drei Mann aufgestockt wird.

Mit drei Astronauten auf der Raumstation, betonen offizielle Stellen, lasse sich dort endlich wieder ein umfangreicheres Wissenschaftsprogramm bewältigen. Schließlich sei die Station vor allem zu Forschungszwecken gebaut worden.

Diesen Standpunkt können wir voll und ganz unterstützen, denn wir sind mit der Forschung auf der Raumstation auf besondere Weise verbunden: Unser Plasmakristall-Experiment »Nefedow« (PKE-Nefedow) war 2001 das erste wissenschaftliche Experiment auf der ISS überhaupt.

Ein Kosmos voller Plasma

PKE-Nefedow, ein Minilabor in Form einer kleinen schwarzen Tonne, hatte mehr als vier Jahre lang zum Inventar der Raumstation gehört. Es diente dort der Erforschung von komplexen Plasmen. Wir vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching hatten das Experiment zusammen mit unseren Partnern vom russischen Akademie-Institut für hohe Energiedichten (IHED) entwickelt, gebaut und betreut.

Ende Juli 2005 führte der russische Kosmonaut Sergej Krikaljev den letzten Versuch damit durch, bevor die Apparatur stillgelegt wurde.

Begonnen hatte alles Anfang 2001: Da ging PKE-Nefedow auf der ISS in Betrieb. Der Zusatz »Nefedow« im Namen erinnert an Anatoli Nefedow, den kurz vor dem Start verstorbenen Projektleiter am IHED. Von Anfang an verfolgten wir mit diesem Minilabor das Ziel, die Eigenschaften staubiger Plasmen zu erforschen. Ursprünglich hatten wir das Experiment auf der Raumstation Mir betreiben wollen.

Weil die Russen die Station im Jahr 2000 jedoch aufgaben, wurde PKE-Nefedow auf die Internationale Raumstation »umgeleitet«. Somit gelangten wir zu der



GLOSSAR

Ein Plasma ist in der Physik ein ionisiertes Gas aus elektrisch geladenen Atomrümpfen und Elektronen. Plasmen entstehen bei hohen Temperaturen (zum Beispiel in der Sonne), elektrischen Entladungen (etwa in Neonröhren oder Blitzen) oder infolge ionisierender Strahlung wie in stellaren Emissionsnebeln (zum Beispiel: Orionnebel).

Die Atomrümpfe stoßen im Plasma sehr häufig und heftig zusammen. Dadurch erhalten sie Energie, die sie als Licht (bestimmter Wellenlängen) wieder abgeben. Im Alltag begegnen uns Plasmen beispielsweise in einer Kerzenflamme oder einer Leuchtstoffröhre.

Ehre, das erste naturwissenschaftliche Experiment auf der ISS mit durchzuführen.

Was muss man sich unter einem staubigen Plasma vorstellen? Als Plasma bezeichnet man in der Physik ein ionisiertes Gas, dessen Atome ihre Elektronen teilweise oder ganz verloren haben. Es entsteht beispielsweise bei hohen Temperaturen oder starken elektrischen Entladungen, wenn die Atome mit derart großen Geschwindigkeiten aufeinander prallen, dass sie in positiv geladene Atomrümpfe (Ionen) und negative Elektronen aufbrechen. Ein solcher Zustand mag uns auf der Erde zunächst exotisch erscheinen, aber: Im Kosmos sind Plas-



NASA

men die Normalität. Alle Sterne, auch unsere Sonne, bestehen aus heißem Plasma. Das sind 99 Prozent der sichtbaren Materie! Physiker bezeichnen den Plasmazustand häufig als vierten Aggregatzustand der Materie – nach fest, flüssig und gasförmig.

Komplexe Plasmen, auch staubige Plasmen genannt, enthalten neben Elektronen, Atomrümpfen und neutralen Atomen zusätzlich noch mikroskopisch kleine Staubteilchen. Diese laden sich innerhalb des Plasmas elektrisch auf, weil sich die freien Elektronen auf der Oberfläche der Staubkörner anlagern. Jedes Korn kann dabei bis zu hunderttausend

Elektronen »sammeln«. Die stark negative Ladung der Staubteilchen bewirkt, dass sie sich mittels der elektrostatischen Kraft, der Coulomb-Kraft, untereinander abstoßen. Hält man die Teilchen im Labor jedoch durch äußere elektrische Felder zusammen – wie wir das bei PKE-Nefedow getan haben –, so ordnen sie sich unter bestimmten Bedingungen in einer regelmäßigen Struktur an. Man spricht dann von einem Plasmakristall. Die Existenz solcher Kristalle war bereits 1986 theoretisch vorhergesagt worden. Acht Jahre später gelang es erstmals, sie herzustellen – im Rahmen eines Forschungsprojekts, an dem das Deutsche

Die ISS wurde vor allem deshalb ins All gebracht, um wissenschaftliche Experimente an Bord durchzuführen. PKE-Nefedow war das erste davon.

Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie das MPE beteiligt waren.

Um einen Plasmakristall zu erzeugen, verwenden Physiker meist spezielle Kammern, in denen Edelgase – Neon oder Argon – bei niedrigem Druck mittels elektrischer Entladungen in den Plasmazustand gebracht werden. Anschließend gibt man Plastik- oder Silikatkügelchen hinzu, deren Durchmesser zwischen >

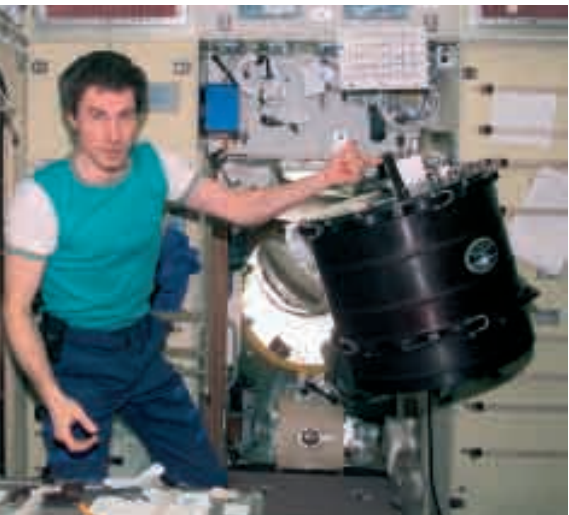
Die sichtbare Materie im All besteht zu 99 Prozent aus gewaltigen Plasmakugeln, den Sternen. Das bedeutet, dass fast die gesamte sichtbare Materie in Form des »vierten Aggregatzustands« vorliegt.

> einem und zehn Mikrometern liegt. Durch Beleuchtung mit einem Laserstrahl kann der entstehende Plasmakristall mit einer Kamera direkt beobachtet werden.

Wozu ist das gut? Zum einen interessieren sich die Forscher dafür, wie sich solche Kristalle bilden und welche Struktur sie aufweisen. Zum anderen wollen sie deren physikalische Eigenschaften kennen lernen – etwa, wie sich das Kristallgitter zum Schwingen anregen lässt oder unter welchen Bedingungen es schmilzt. Solche Untersuchungen bieten die einmalige Gelegenheit, Kristallisationsvorgänge auf der Ebene einzelner Teilchen zu untersuchen. Damit lassen sich physikalische Abläufe in Festkörpern, Flüssigkeiten und in der Plasmaphysik besser verstehen.

Allgegenwärtige Verschmutzung

Überdies gibt es im Weltraum zahllose Objekte, wo Plasmen und Staub gleichzeitig vorkommen. Dazu zählen Kometen mit ihren Plasma- und Staubschweif, interstellare Staubwolken, die in Emissionsnebeln eingebettet sind, und Staubscheiben um junge Sterne. In diesem Zusammenhang sind auch die »Speichen« in den Saturnringen (S. 38) erwähnenswert, von denen man heute glaubt, dass es sich um staubige Plasmen handelt, die sich im Magnetfeld des Saturns



NASA/ESA

ausrichten. Experimente wie das unsere können entscheidende Einblicke in das Verhalten all dieser Systeme gewähren.

Auch in der Technik spielen staubige Plasmen eine wichtige Rolle. So werden Mikrochips heute hauptsächlich im Rahmen eines Ätzverfahrens in Plasmareaktoren hergestellt. Dabei entsteht Staub, der die Oberflächen der Mikrochips kontaminieren und unbrauchbar machen kann. Es ist daher von großem Interesse, die Bildung und Zusammenlagerung der Staubkörner und ihre Wechselwirkung mit dem Plasma besser zu verstehen.

Anfangs wurden Experimente mit staubigen Plasmen auf der Erde durchgeführt. Das war nicht günstig, da die Schwerkraft dabei stört: Der Kristall ist unter irdischen Gravitationsbedingungen auf eine dünne Schicht von wenigen Millimetern oberhalb des Bodens der Plasmakammer beschränkt, in der das umgebende elektrische Feld stark genug ist, die geladenen Partikel in der Schwebe zu halten. Außerdem beeinflusst die Schwerkraft die Struktur und das Verhalten des komplexen Plasmas, sodass man verzerrte und deformierte Kristalle er-

hält. Präzisionsexperimente müssen deshalb unter Schwerelosigkeit durchgeführt werden.

Das hatten wir schon früher versucht, zum Beispiel mit Plasmaexperimenten an Bord von Parabelflügen (Dauer der Schwerelosigkeit zirka 20 Sekunden), auf Texas-Forschungsraketen (sechs bis acht Minuten Schwerelosigkeit) und in der Raumstation Mir (zeitlich unbegrenzte Schwerelosigkeit, aber mit sehr vereinfachter Apparatur). Erst PKE-Nefedow erlaubte es jedoch, komplexe Plasmen systematisch, detailliert und langfristig unter Schwerelosigkeit zu erforschen. Die Abwesenheit der Gravitation ermöglicht die Herstellung großer, ungestörter Kristalle und versetzt uns in die Lage, jene schwachen Kräfte zu studieren, die im Plasma auf die Mikroteilchen wirken.

West kooperiert mit Ost

Dass die Apparatur gebaut wurde und auf die Internationale Raumstation gelangte, verdanken wir einer intensiven Zusammenarbeit von MPE und IHED. 1998 nahm das MPE den Kontakt mit dem damaligen russischen Forschungs- und Technologieminister – und jetzigen Direktor des IHED – Wladimir Fortow auf, um die Weichen für das Projekt zu stellen. Die Kooperation sah vor, dass die deutsche Seite den Experimentaufbau fertigt und liefert, während die Russen den Transport zur und den laufenden Betrieb auf der ISS übernahmen.

Mühelos hebt Kosmonaut Sergej Krikaljew die rund fünfzig Kilogramm schwere PKE-Apparatur an einem Finger hoch – die Schwerelosigkeit macht´s möglich. Das Foto entstand an Bord der Internationalen Raumstation.

Mit dem Bau des Experiments, den das DLR finanzierte, beauftragten wir die Firma Kayser-Threde in München. Nach der Fertigstellung der Apparatur im Jahr 1999 und einigen Tests wurde die erste ISS-Mannschaft – bestehend aus den Russen Yuri Gidzenko und Sergej Krikaljev sowie dem Amerikaner William Shepherd – an dem Experiment ausgebildet. Am 26. Februar 2001 startete ein Progresstransporter vom Weltraumbahnhof Baikonur und brachte PKE-Nefedow auf die ISS.

Videos für die Forscher

Zur Betreuung des Experiments führen Wissenschaftler unserer Einrichtung zwei- bis dreimal pro Jahr ins Kontrollzentrum Korolov in Moskau. Dort programmierten sie den Computer auf der Raumstation mit jeweils aktuellen Befehlsfolgen zur Steuerung der Plasmaversuche. Der Rechner arbeitete diese dann vollautomatisch ab. Die Besatzungsmitglieder, die hierfür speziell trainiert waren und mit den Wissenschaftlern im Kontrollzentrum in Funkverbindung standen, konnten während des Versuchs einige Parameter verändern, sofern das erforderlich war – etwa den Gasdruck oder die Menge der ins Gas injizierten Partikel. Eine CCD-Kamera zeichnete Bilder und Filme von den Experimenten auf, die anschließend auf Videobändern gespeichert, beim nächsten Besatzungswechsel auf die Erde zurückgebracht und in den Instituten in Garching und Moskau ausgewertet wurden.

Bereits bei den ersten Versuchen zeigte sich eine erstaunliche Vielfalt an komplexen Phänomenen im Plasma, zum Beispiel eine scharf begrenzte partikelfreie Zone im Zentrum der Kammer. Sie kommt vermutlich dadurch zu Stande, dass in der Kammermitte die meisten Plasmaionen entstehen und anschließend von dort nach außen strömen, wobei sie die Staubteilchen mit sich reißen. Die Mechanismen, die dabei eine Rolle spielen, sind noch nicht völlig verstanden. Derzeit führen zahlreiche Forscher-

Staubige Plasmen treten im Weltall sehr häufig auf. Ein besonders schönes Beispiel sind die aus Plasma und Staub bestehenden Schweife von Kometen, die Menschen seit jeher in ihren Bann ziehen.

Der Aufbau des Experiments

Das Herzstück von PKE-Nefedow ist die Plasmakammer. In ihr wird mittels einer hochfrequenten Wechselspannung (zirka 14 Megahertz) ein zylinderförmiges Argonplasma mit vier Zentimeter Durchmesser und drei Zentimeter Höhe erzeugt. Die Kammer enthält Fenster zur Beobachtung der Mikroteilchen.

Ein Gassystem regelt den Druck in der Plasmakammer zunächst zwischen 0,1 und 1 Millibar ein. Anschließend werden bis zu eine Million Plastik Kügelchen in das Plasma gebracht. Der Durchmesser dieser Partikel beträgt lediglich wenige Mikrometer (= millionstel Meter). Mit zwei Videokameras, die an den Teilchen gestreutes Laserlicht aufzeichnen, lassen sich diese Mikroteilchen beobachten. Gesteuert wird



MPE

das Ganze von einem eingebauten Computer sowie vom irdischen Kontrollzentrum aus.

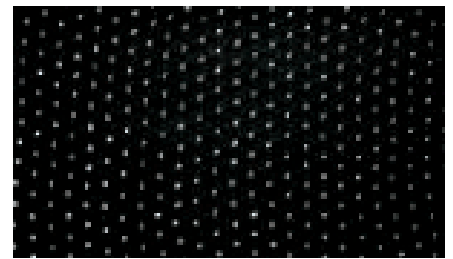
Der Experimentaufbau ist in einem tonnenförmigen Container untergebracht. Aus Platz- und Gewichtsgründen sind alle Komponenten möglichst kompakt angeordnet. Der Container schützt die ISS-Besatzung im Fall eines Unfalls vor herumfliegenden Glassplittern, die unter Schwerelosigkeit sehr unangenehm sein können.



PHILIPP KELLER



BEIDE FOTOS: MPE



Während eines Parabelflugs,

bei dem das Plasmakristallexperiment PK-4 getestet wird, warten die Autoren dieses Artikels gespannt auf die Schwerelosigkeit (links). Plasmakristalle sehen in Videoaufnahmen häufig recht unspektakulär aus (oben), der hier gezeigte hat eine hexagonale Struktur mit 0,2 Millimeter Teilchenabstand.

> gruppen auf der ganzen Welt Laborversuche und theoretische Untersuchungen sowie Computerberechnungen durch, um die Beobachtungen zu erklären.

Ein unerwartetes, sehr interessantes Resultat ergab sich, als der Kosmonaut Juri Baturin versehentlich Mikropartikel in das Argongas innerhalb der Plasmakammer injizierte, ohne dieses vorher in den Plasmazustand zu versetzen. Da die Partikel – anders als unter irdischen Schwerkraftbedingungen – in der Kammer schwebten, war es ihnen möglich, sich frei in alle Richtungen zu bewegen. Innerhalb des Bruchteils einer Sekunde lagerten sich mehrere hunderttausend von ihnen zusammen und bildeten ein großes Agglomerat. Diese schnelle Zusammenklumpung ist nur dadurch er-

klärbar, dass die Teilchen sich durch Reibung elektrisch aufluden und anschließend gegenseitig anzogen. Derselbe Effekt könnte auch für die ersten Stadien bei der Bildung von Planeten in protoplanetaren Staubscheiben verantwortlich sein.

Die Suche geht weiter

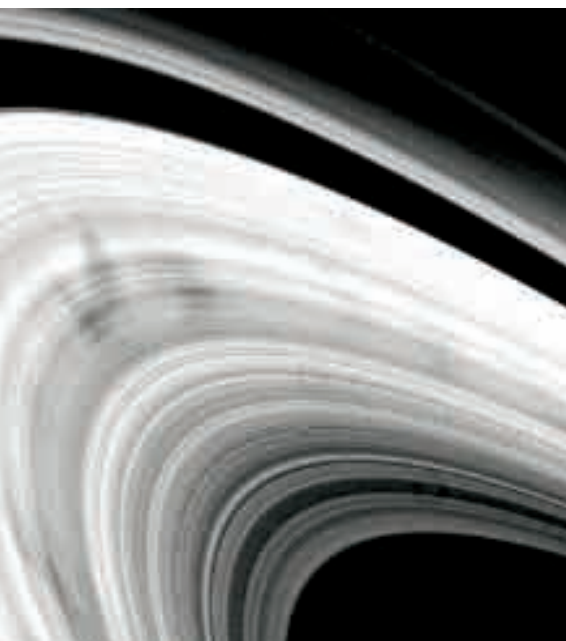
PKE-Nefedow oder ähnliche Experimente erlauben es also, die Planetenentstehung im Labor nachzustellen und auf diese Weise systematisch zu untersuchen. Erste Vorexperimente hierzu laufen bereits.

Auch nach Abschluss des letzten Versuchs mit PKE-Nefedow ist die Erforschung komplexer Plasmen auf der ISS noch längst nicht beendet. Am 21. Dezember 2005 startete das wesentlich verbesserte Nachfolgeexperiment PK3-Plus von Baikonur aus zur Raumstation und ging Mitte Januar dort in Betrieb. PK3-Plus, das ebenfalls vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt finanziert wird, dürfte in den nächsten Jahren Messergebnisse mit bislang unerreichter Präzision liefern und unbekannte Phänomene in komplexen Plasmen enthüllen. Ob PKE-Nefedow mit einem späteren Shuttleflug zur Erde zurückgebracht wird oder als Abfall in einem Progress-

Transporter in der Erdatmosphäre verglüht, haben die Verantwortlichen bisher noch nicht entschieden.

Darüber hinaus arbeitet das MPE zusammen mit dem IHED an einer neuen Plasmakammer mit dem Namen PK-4. Sie besteht aus einer Glasröhre und soll helfen, die Strömungen in komplexen Plasmen zu untersuchen. Unter bestimmten Bedingungen verhalten sich Staubteilchen in komplexen Plasmen nämlich wie eine Flüssigkeit, was dazu genutzt werden kann, physikalische Prozesse in Strömungen zu untersuchen. PK-4 wird von Esa und DLR unterstützt und könnte 2008 auf die Raumstation kommen. Es gab bereits mehrere Parabelflugtests mit dieser neuen Apparatur, an denen auch wir mit Begeisterung teilnahmen (oben).

Schließlich überprüft die Esa zusammen mit mehreren europäischen Instituten, ob sich ein Langzeitlabor auf der Raumstation realisieren lässt, das der Erforschung komplexer Plasmen dient. Dieses Labor mit dem Namen International Microgravity Plasma Facility (IMPF) könnte innerhalb des europäischen Welt-raumlabor Columbus untergebracht werden. Ob und wann das passiert, steht allerdings in den Sternen. Der derzeitige Zustand der Shuttleflotte lässt es höchst ungewiss erscheinen, ob das Columbus-Labor jemals zur Raumstation transportiert werden wird. <<



NASA/JPL/SSI

Nach wie vor nicht völlig

verstanden sind die »Speichen« in den Saturnringen. Auch sie bestehen wahrscheinlich aus staubigem Plasma. Wie sie zu Stande kommen, bleibt im Detail noch zu klären.

Markus Thoma und **Michael Kretschmer** forschen am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching; Thoma ist leitender Projektwissenschaftler, Kretschmer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei dem PK-4-Experiment.