

Physikalische Grundlagen von komplexen Plasmen

Der Materiezustand der sogenannten komplexen Plasmen wird seit ihrer Entdeckung im Jahre 1994 von mehr als hundert wissenschaftlichen Gruppen weltweit erforscht. Unter bestimmten Bedingungen nehmen Mikrometergroße Partikel im Plasma eine stabile regelmäßige räumliche Konfiguration ein, die einem klassischen Kristallgitter ähnelt. An diesen sogenannten Plasmakristallen konnte man erstmals Effekte wie das Schmelzen und die Kristallisation auf dem Niveau der Bewegung einzelner Teilchen experimentell untersuchen. Gegenüber anderen Systemen haben komplexe Plasmen folgende wichtige vorteilhafte Eigenschaften:

- Die Dynamik wird völlig von den Mikroteilchen dominiert.
- Typische Zeitskalen von relevanten physikalischen Effekten betragen $1/100 - 10$ Sekunden.
- Die mittleren Teilchenabstände liegen im Millimeterbereich, wobei die Wechselwirkung elektrostatisch erfolgt.
- Komplexe Plasmen sind transparent für optisches Licht.
- Die Mikroteilchen können mit normalen Videokameras beobachtet werden.

Diese Eigenschaften ermöglichen eine vollständige kinetische Untersuchung von statistischen physikalischen Phänomenen (wie z.B. Turbulenz, Wellenausbreitung, Schmelzen, Kristallisation, etc.) auf "atomarem" bzw. kinetischen Niveau und erlauben uns das komplexe Plasma als Modellsystem für Festkörper und Flüssigkeiten anzusehen.

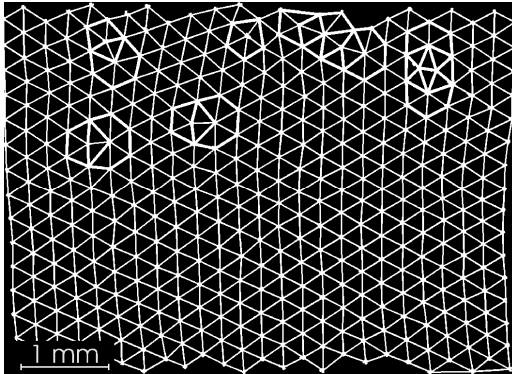
Zusätzlich ergeben sich durch inhomogene bzw. anisotrope Plasma-Bedingungen, oder Ladungsfluktuationen und -kannibalismus, verschiedene sogenannte Nicht-Hamiltonischen Effekte, neue physikalische Bedingungen, Instabilitäten und eine Vielzahl weitere Effekte, welche das komplexe Plasma als solches interessant machen.

Schwerelosigkeit ist ein zwingend erforderlicher Teil in der Forschung komplexer Plasmen. Die Mikropartikel sind ca. 10^9 mal schwerer als Atome, mit Größen wie Staubteilchen, deshalb spielt die Schwerkraft eine sehr wichtige Rolle und führt zu einer Belastung und Inhomogenität des Systems. Das MPE hat die Untersuchung komplexer Plasmen unter Schwerelosigkeit sehr früh in der Historie dieses neuen Forschungszweiges angegangen, genau genommen war die Idee der Kristallisation eines komplexen Plasmas ohne Schwerkraft der Beginn der Arbeiten am Institut. 1996 begann dann die eigentliche Ära der Schwerelosigkeitsexperimente mit Parabelflügen, direkt gefolgt von einer Höhenforschungsraketen-Kampagne. Seit 2001 hat das Institut ein permanentes Labor auf der Internationalen Raumstation ISS. Hierbei handelt es sich um eine enge Kooperation mit dem russischen Akademieinstitut for High Energy Densities, IHED, in Moskau. PKE-Nefedov war das erste Langzeit-Experiment für komplexe Plasmen auf der ISS, operationell für $4 \frac{1}{2}$ Jahre. Seit Januar 2006 ist das Nachfolgelabor PK-3 Plus erfolgreich in Betrieb.

Außer im Labor kommen komplexe Plasmen in weiten Teilen des Universums vor und die besonderen Eigenschaften dieses Systems definieren die grundlegende Dynamik bei der Sternentstehung, planetaren Ringen, Polarlichtern, etc.

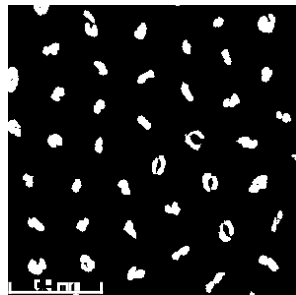
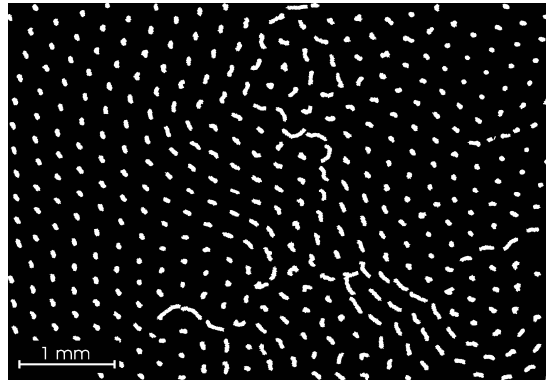
Schmelzen von Plasmakristallen

Phasenübergänge lassen sich in komplexen Plasmen ideal untersuchen, durch die speziellen Eigenschaften der Beobachtung der einzelnen „Atome“, der Mikropartikel. Im Folgenden sind die unterschiedlichen Phasen im Schmelzübergang dargestellt:



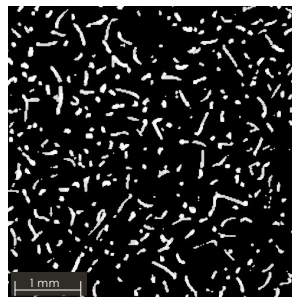
“Kristalline” Phase : charakterisiert durch hohe Ordnung mit wenigen Gitterdefekten. Gezeigt sind die Bewegungen der Partikel (weiße Punkte) innerhalb einer Sekunde. Zur Verdeutlichung der kristallinen Struktur sind die Punkte durch weiße Linien verbunden.

“Flow and floe“ Phase : charakterisiert durch die Koexistenz von Inseln geordneter Struktur (floes) und systematischer gerichteter Teilchenbewegung (flows) (erinnert an Eisschollen im Meer). Gezeigt ist die Bewegung der Partikel (weiße Punkte) innerhalb von zwei Sekunden.



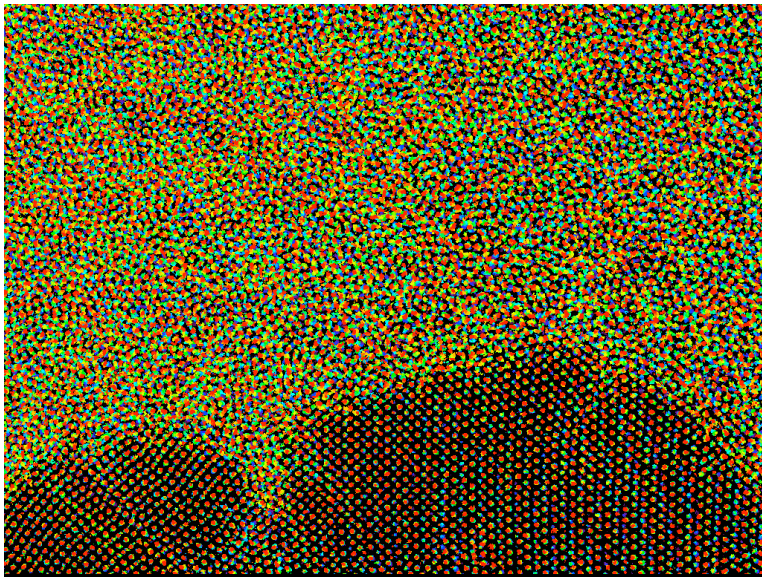
“Vibrational” Phase : charakterisiert durch zunehmende Oszillationsamplituden der Partikel. Gezeigt ist die Bewegung der Partikel (weiße Punkte) in einem kleineren Ausschnitt des Kristalls innerhalb von 0.06 Sekunden.

“Ungeordnete” Phase : charakterisiert durch schnelle Bewegung der Partikel (weiße Linien), sowie deren Stöße. Gezeigt ist die Bewegung der Partikel innerhalb von 0.02 Sekunden. Es ist keine Ordnung mehr zu erkennen.



Rekristallisation

Auch der umgekehrte Übergang von flüssig nach fest lässt sich im komplexen Plasma auf dem fundamentalsten, dem kinetischen Level, untersuchen. Mit sehr kleinen Mikropartikeln ($\sim 1 \mu\text{m}$ \varnothing) lassen sich ausreichend große 3-dimensionale komplexe Plasmen im Labor herstellen. Der Phasenübergang kann dann durch eine Änderung der Plasmabedingungen gestartet werden. Eine Verfolgung der Kristallisationsfront gibt dann ganz neue Einblicke in die physikalischen Prozesse, die an der Grenze zwischen der kristallinen und der flüssigen Phase ablaufen.

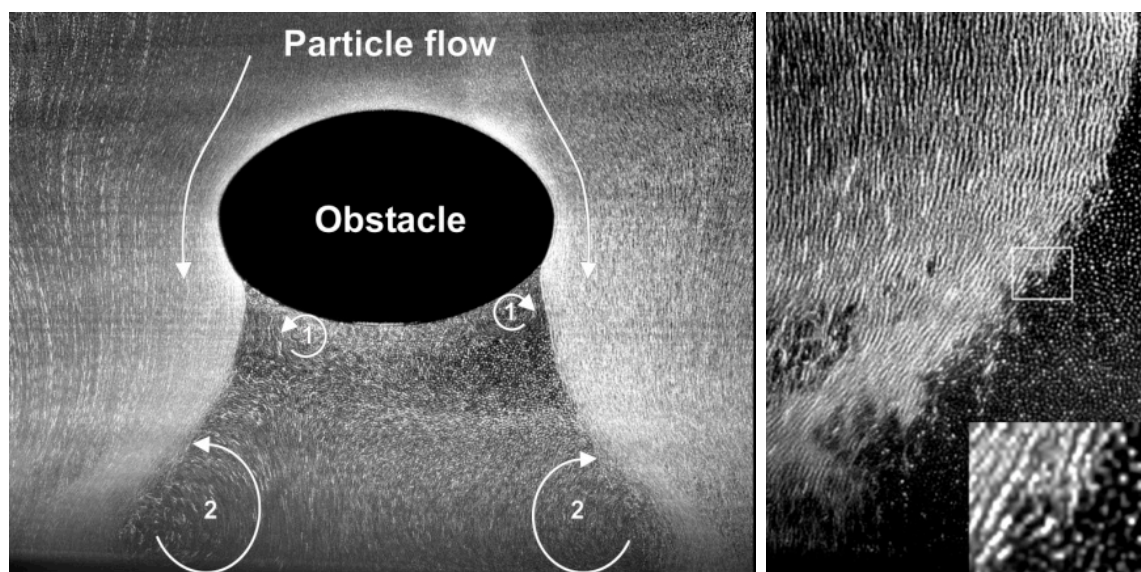


Die Grafik zeigt die Kristallisationsfront in einem komplexen Plasma (die Partikelpositionen sind farbkodiert von grün am Beginn der Trajektorie bis rot am Ende, d.h. kühlere bzw. kristalline Partikel erscheinen als roter Punkt, heißere in der flüssigen Phase sind mehrfarbig).

Übergang zur Turbulenz

Kinetische Untersuchungen von Flüssigkeiten sind einer der Hauptgebiete in denen komplexe Plasmen wesentliche Beiträge zum physikalischen Verständnis liefern könnten. Flüssige Plasmen könnten als machtvolles neues Werkzeug für die Untersuchung von Flüssen in Flüssigkeiten auf Nanoskala dienen, beinhaltend sowohl den wichtigen Übergang von kollektivem flüssigem zum individuellen kinetischen Verhalten, als auch nichtlineare Prozesse auf Skalen, die bisher noch nicht für Messungen zugänglich waren. Von besonderem Interesse sind sowohl die mikroskopischen Mechanismen, die das nicht-Newtonische und viskoelastische Verhalten von Flüssigkeiten begleiten, als auch kinetische Untersuchungen von hydrodynamischen Instabilitäten und dem Übergang zur Turbulenz – das (laut Feynman) bedeutendste ungelöste Rätsel der Flüssigkeitsdynamik. Individuelle Teilchenbeobachtungen können wichtige neue Einblicke liefern, z.B. ob und wie die grundlegenden hydrodynamischen Instabilitäten (z.B. Kelvin-Helmholtz und Rayleigh-Taylor) überleben oder sich auf Skalen von Teilchenabständen anpassen.

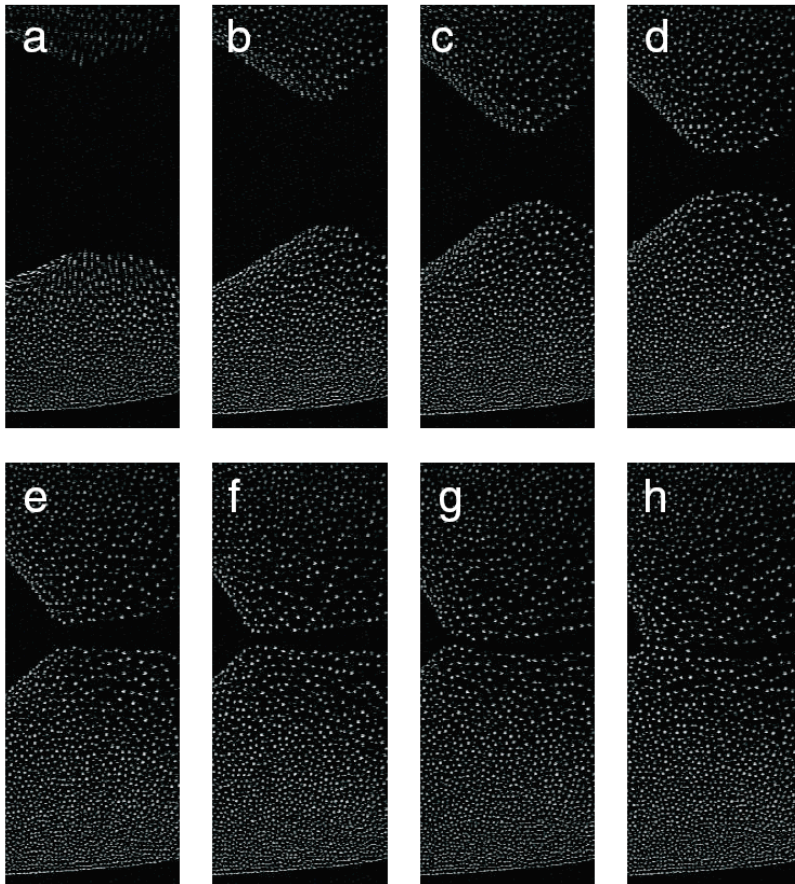
Ein erstes Experiment konnte hierzu in unseren Labors durchgeführt werden. Wir beobachten die Strömungseigenschaften eines komplexen Plasmas um ein Hindernis (Void), die Schattenregion darunter und die Wechselwirkung der fließenden mit den ruhenden Partikeln. Man erkennt deutlich das Aufbrechen des laminaren Flusses auf dem Einzelteilchen-Niveau, so dass die Dynamik dieses sehr interessanten Überganges im Detail untersucht werden konnte.



Die Abbildung links zeigt die Flusseigenschaften des komplexen Plasmas um ein Hindernis herum (in diesem Fall einer partikelfreien Zone, dem Void) mit Hilfe einer Langzeitbelichtung. Das Bild rechts zeigt eine Kurzaufnahme der Partikelbewegung an der Grenzschicht unterhalb des Hindernisses. Deutlich ist hier das Aufbrechen des laminaren Flusses zu erkennen.

Koaleszenz

In einem homogenen komplexen Plasma produziert mit dem PKE-Nefedov Labor auf der Internationalen Raumstation ISS konnte erstmals der Verschmelzungsprozess zweier komplexer Plasmatropfen untersucht werden. Die kollidierenden komplexen Plasmawolken bemerken einander viel früher als sie sich berühren. Die Wolken werden deformiert, die Oberflächen flachen ab und die Annäherungsgeschwindigkeit verringert sich bei der Annäherung. Am Zeitpunkt der Koaleszenz verschwindet sie. Dieses Verhalten zeigt die Existenz einer Randschicht voraus, die die komplexe Plasmawolke umgibt.



Sequenz von aufeinanderfolgenden Bildern zeigt die Koaleszenz zweier komplexer Plasmatropfen.