

Laborexperimente und numerische Simulationen von Trägheitswellen in einer rotierenden Kugelschale

Sandy Dahley

Dissertation, Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre, BTU Cottbus-Senftenberg

Kurzzusammenfassung

Geo- und astrophysikalisch motivierte Strömungen lassen sich in homogen rotierenden und geschichteten nichtrotierenden Fluidexperimenten untersuchen. In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zu Trägheitswellen und Wellenattraktoren in zwei Geometrien, einer Kugelschale und einem rechteckigen Tank gezeigt. Trägheitswellen entstehen in einer homogenen rotierenden Flüssigkeit. Sie entstehen durch das Wechselspiel zwischen Trägheit und Corioliskraft. Durch Rotation der Kugelschalen in Form einer Sinus-Kurve, werden die Teilchen in der Flüssigkeit aus ihrer Ruhelage gezwungen. Die Corioliskraft treibt die Teilchen in ihre Ausgangsposition zurück, wobei ihre Trägheit sie darüber hinaus lenkt. Dieser Prozess führt zu einer Oszillation und interne Wellen entstehen. Werden diese Wellen an gekrümmten Grenzflächen mehrfach reflektiert, folgen diese Wellenstrahlen charakteristischen Pfaden und werden fokussiert, den sogenannten Wellenattraktoren. Interne Grenzschichten vom Wellenattraktortyp sind erst seit wenigen Jahren experimentell bestätigt. Numerische Simulationen und Laborexperimente helfen, offene Fragen zu beantworten.

Für die Untersuchung von Wellenattraktoren in geschichteten Medien wird der rechteckige Tank mit einer schrägen Wand am Royal Netherlands Institute for Sea Research auf Texel genutzt. Hier werden durch die periodische hin- und her Bewegung des Tanks interne Wellen in einem geschichteten Fluid angeregt. Mit der Laser Doppler Anemometrie wird das Geschwindigkeitsprofil senkrecht zum Wellenattraktor hinsichtlich Turbulenzverhalten und Phasenverschiebung bei verschiedenen Anregungsfrequenzen erstmals vermessen und beschrieben.

Viele geophysikalische Anwendungen mit planetaren Skalen motivieren den Einsatz von sphärischen Geometrien. Mit dem Kugelspaltexperiment an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg wird die Anregung und Ausbildung der Wellenphänomene sowie der internen Grenzschichten untersucht. Das hier vorgestellte Kugelspaltexperiment besteht aus zwei rotierenden konzentrisch angeordneten Kugelschalen. Innen- und Außenkugelschale rotieren mit der mittleren Winkelgeschwindigkeit Ω . Durch eine Modulation der Rotationsgeschwindigkeit ($0 \leq \omega \leq 2\Omega$) an der Innenkugel in Form einer Sinus-Kurve werden Wellen erzeugt, die an den gekrümmten Rändern des Modells mehrfach reflektiert werden und somit bestimmten Bahnen folgen. Für den Vergleich mit numerischen Untersuchungen werden verschiedene Visualisierungen und Messtechniken spezifiziert. Das Experiment zeigt, dass für hinreichend hohe Oszillationsamplituden die höher Harmonischen an Bedeutung gewinnen. Die stationäre Komponente der Strömung besteht aus einem prograden zonalen Jet, der sich zylindrisch und tangetial an der Innenkugel, parallel zur Rotationsachse, formt. Dieser nimmt mit sinkender Ekman-Zahl an „Schärfe“ zu. Mit der Particle Image Velocimetry kann bewiesen werden, dass der Jet mit höherer Anregungsfrequenz instabil wird. Weiter wird in der Arbeit gezeigt, wie ein Wellenattraktor experimentell in der Kugelschale mittels der Empirischen Orthogonalfunktion detektiert werden kann. Die Ergebnisse werden mit einer zweidimensionalen numerischen Untersuchung nachgebildet, wobei wesentliche Aspekte detaillierter erforscht werden. So erlaubt die numerische Simulation die Untersuchung in Parameterbereichen mit Instabilitäten, die für die experimentelle Untersuchung schwer zugänglich sind. Diese zeigen sich bei hohen Oszillationsamplituden, bei denen die Grenzschichten an der Innenkugel instabil werden und lokale Görtlerwirbel während der prograden Phase der Anregung auslösen, was für den Übergang zur Turbulenz in der Kugelspaltströmung von Bedeutung ist.

Laboratory experiments and numerical simulations of inertial waves in a rotating spherical shell

Sandy Dahley

Dept. of Aerodynamics and Fluid Mechanics, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany

Abstract

Geo- and astrophysical motivated flows can be studied in rotating homogeneous and non-rotating stratified fluid experiments. This thesis shows investigations of inertial waves and wave attractors in two geometries, a rotating spherical shell and a rectangle basin with stratified fluid. Inertial waves occur in a rotating homogeneous fluid. These waves are the result of a subtle interplay between inertial and Coriolis force. The angular velocity of the inner sphere varies in form of a sinus function. The particles experiences a restoring forcing, called Coriolis force $\vec{F}_c = 2\vec{\Omega} \times \vec{u}$ and deflects from their rest position and drive them back to their initial positions at which they overshoot. This process caused an oscillation and inertial waves occur. In case of multiple reflections e.g. on the curved boundary of a spherical shell, wave rays follow certain orbits and the wave energy is focused, called wave attractors. Generally wave attractors point to internal boundary layers, are detached from the boundaries and have been verified in experiments for the last two decades.

For studying wave attractors in stratified fluid, we use the tank experiment with one sloping wall at the Royal Netherlands Institute for Sea Research (NIOZ). The sideways oscillating tank generates waves in a stratified fluid. By using the Laser Doppler Velocimetry we do a first attempt to detect and measure these wave attractors. For the first time we investigate the velocity profile vertical to the attractor concerning turbulence behavior and phase shift at different forcing frequencies.

Any geophysical process of planetary scale motivates the use of spherical geometry. The spherical shell experiment at the Brandenburg University of Technology Cottbus - Senftenberg (BTU CS) shows the generation and formation of wave phenomena and internal boundary layers. The spherical shell experiment consists of two concentric rotating shells. The inner and outer sphere rotate with angular velocity Ω . The velocity of the inner sphere is modulated ($0 \leq \omega \leq 2\Omega$), a so-called longitudinal libration, generating waves they are multiple reflects on the curved boundaries and follows certain orbits. Different visualizations and measurement techniques are used for comparison with numerical simulations. For sufficiently large libration amplitudes higher harmonics also become important. We also find a vertical stationary shear layer, touching the inner sphere's equator. This steady component increases with increasing Ekman number. With Particle Image Velocimetry we demonstrate the instability of this stationary jet with increasing forcing frequencies. Further we detect an attractor in the spherical shell using the Empirical Orthogonal Functions. These findings are reproduced in a 2D numerical simulation of the flow. Thereby, certain aspects can be studied numerically in greater detail. One aspect is the scaling factor of the width of the internal shear layers and the width of the steady jet depending on the Ekman number. We also want to know the partitioning of the kinetic energy between the forced wave, its harmonic and the mean flow. Finally, the numerical simulations allow the study of parameter domains with instabilities, too local to be found in the experiment. These instabilities are shown for strong libration amplitudes, where the boundary layer on the inner sphere becomes unstable. Thus, during the prograde phase of the forcing, local Görtler vortices are triggered. This instability is important for the transition to turbulence of the spherical shell flow.

These results of this work in numerical simulations and experimental investigations will help to answer open questions of this scientific field.