

Gravity wave emission from jet systems in the differentially heated rotating annulus experiment

Internal gravity waves are fully recognised for the relevant role they play in the atmospheric and oceanic dynamics of our planet. These waves, characterised by small-scale wavelengths, permeate the atmosphere and can lead to energy and momentum flux. When gravity waves propagate upwards, the momentum flux can become divergent due to wave breaking processes and consequently be a source for the large scale flow. Over the past decades, several studies have successfully investigated generation, propagation, and dissipation of gravity waves. Although several phenomena are nowadays reasonably well explained, others still remain unclear and, therefore, an active research topic. One of the least understood aspects is the emission of gravity waves from jet and front systems in the atmosphere, which are regions where significant wave activity has been frequently observed. Although many studies have established the importance of these non-orographic sources, the mechanisms responsible for wave emissions are still not fully understood. The complexity of the three-dimensional flow pattern, where a large number of interacting processes occur, and distribution of the sources over large areas point towards the need for laboratory experiments and idealised numerical simulations. Indeed, experiments and simulations can help with the correct interpretation of the fundamental dynamical processes in a simplified, but yet realistic flow.

In this thesis, we propose an experimental laboratory investigation of gravity waves generated from baroclinic jets and fronts using a differentially heated rotating annulus. This experiment consists of a rotating annular tank made of three concentric compartments filled with water, which is held to a constant warm/cold temperature in the outer/inner ring, respectively. Thanks to the radial temperature difference and the rotation about its axis, resembling each one of the fundamental forcing of the planetary atmospheric circulation, this experiment is a well established model of the atmosphere and it has been used for many years to investigate different aspects of its dynamics. Our study, however, reveals that the classical set-up of this experiment, usually showing an aspect ratio of about one, is not a particularly favourable configuration to investigate atmosphere-like emission of gravity waves from baroclinic jets due to an unrealistic ratio between stratification, measured by the buoyancy frequency N , and rotation, measured by the Coriolis parameter f . This ratio is much greater than one for the atmosphere but less than one for the classical annulus, and this difference is crucial when studying gravity waves. Indeed, no proof of gravity waves emission from jets has been found in the classical experiment thus far. Based on this, we offer two modifications of the original experiment to obtain configurations suitable for our purposes.

The first uses the same geometrical configuration, i.e. a tall and narrow annulus, but with the introduction of salinity stratification, which increases N up to values that reach $2 < N/f < 6$. The second solution follows the numerical simulations¹ where a new shallower tank, called the atmosphere-like annulus, was proposed. The newly built tank has a much larger horizontal diameter which leads to a more atmosphere-like $N/f > 1$.

With the use of the Particle Image Velocimetry measurement technique and temperature sensors, the flow at different depths is investigated. Gravity waves are observed along the baroclinic jet in both experimental set-ups, their properties, together with the conditions for their emission and propagation, are examined in detail. In particular, the regions of the regime diagram for which the gravity waves with the largest amplitude can develop are identified. Subsequently, four possible generation mechanisms—i.e. shear instability, lateral wall instabilities, convection, and spontaneous emission—are analysed and matched with the properties of the waves. Despite the differences between both experimental configurations the gravity wave signature shows many similarities suggesting that similar generation processes occur in both cases. Finally, the energy partition among large- and small-scale wave phenomena is shown. The resemblance of the spectra obtained for the atmosphere-like annulus with the ones measured in the atmosphere is noteworthy, therefore proving that this experimental configuration is well suited for the investigation of multi-scale dynamics.

¹Sebastian Borchert, Ulrich Achatz, and Mark D Fruman. “Gravity wave emission in an atmosphere-like configuration of the differentially heated rotating annulus experiment”. In: *Journal of Fluid Mechanics* 758 (2014), pp. 287–311.

Schwerewellenabstrahlung von Strahlströmen im differentiell geheizten rotierenden Annulus Experiment

Interne Schwerewellen spielen eine wichtige Rolle für die atmosphärische und ozeanische Dynamik unseres Planeten. Diese Wellen zeichnen sich durch kurze Wellenlängen aus, durchdringen die Atmosphäre und sorgen für einen Impuls- und Energiefluss. Im Falle einer Ausbreitung nach oben, kann durch Wellenbrechen Impuls und Energie auf die großräumige Strömung übertragen werden. In den letzten Jahrzehnten haben viele Studien die Erzeugung, Ausbreitung und Dissipation von Schwerewellen untersucht und obwohl einige Phänomene heutzutage gut erklärt sind, bleiben andere nach wie vor unklar und daher ein aktives Forschungsthema. Einer der nur wenig verstandenen Aspekte ist die Abstrahlung von internen Schwerewellen in atmosphärischen Strahlströmen und Wetterfronten, in denen häufig signifikante Schwerewellenaktivität beobachtet werden kann. Obwohl viele Studien die Bedeutung dieser nicht orographischen Quellen belegen, sind die Mechanismen, die für die Wellenemission verantwortlich sind, noch nicht vollständig geklärt. Die Komplexität des dreidimensionalen Strömungsfeldes, in dem wichtige Wechselwirkungsprozesse ablaufen und auch die großräumige Verteilung der Quellen für Schwerewellen legen nahe, Laborversuche und idealisierte numerische Simulationen durchzuführen. Diese helfen bei der korrekten Interpretation der grundlegenden dynamischen Prozesse in einem vereinfachten, aber dennoch realistischen Szenario. In dieser Arbeit schlage ich eine experimentelle Laboruntersuchung von Schwerewellen vor, die im Bereich von baroklinen Jetströmungen und Fronten in einem differentiell geheizten und rotierenden Annulus erzeugt werden. Dieses Experiment besteht aus einem rotierenden ringförmigen Tank mit drei koaxialen Zylindern. Diese Bereiche sind mit Wasser gefüllt und der Außen- bzw. Innenring kann auf einer konstanten Temperatur (innen kalt und außen warm) gehalten werden. Dank der radialen Temperaturdifferenz und der Drehung des Tanks um seine Symmetrieachse, ist dieses Experiment ein etabliertes Analogon der Atmosphäre und wird seit vielen Jahren verwendet, um verschiedene Aspekte der atmosphärischen Zirkulation zu untersuchen. Unsere Studie zeigt jedoch, dass der klassische Aufbau dieses Experiments, der normalerweise ein Seitenverhältnis von etwa Eins aufweist, keine besonders günstige Konfiguration für die Untersuchung von Schwerewellen darstellt. Dies liegt im Wesentlichen an einem unrealistischen Verhältnisses zwischen der Auftriebsfrequenz N und dem Coriolis-Parameters f . Dieses Verhältnis ist viel grösser als Eins für die Atmosphäre, aber kleiner als Eins für das klassische Annulus Experiment und dieser Unterschied ist entscheidend, wenn Schwerewellen entstehen sollen. Tatsächlich wurde im klassischen Experiment bisher kein Nachweis der Schwerkraftwellabstrahlung gefunden. In der vorliegenden Arbeit biete ich zwei Modifikationen des ursprünglichen Experiments an, um Konfigurationen zu erhalten, die für Schwerewellenabstrahlung geeignet sind. Die erste verwendet dieselbe geometrische Konfiguration, d.h. einen hohen und schmalen Aufbau, jedoch mit einer zusätzlichen Salz-Schichtung, die N/f auf Werte von 2-6 erhöht. Eine zweite, bereits von¹ vorgeschlagene Variante besteht aus einem neu gebauten, flachen Tank, genannt atmosphärenähnlicher Annulus, dessen Verhältnis N/f auch ohne zusätzliche Salz-Schichtung größer als Eins ist. Dies kann durch theoretische Überlegungen gefunden werden und wurde auch durch numerische Simulationen bestätigt². Mit der Particle-Image-Velocimetry Messtechnik und Temperatursensoren untersuche ich in meiner Studie die Strömung in verschiedenen Tiefen. In beiden Versuchsaufbauten werden entlang des baroklinen Jets Schwerewellen beobachtet, deren Eigenschaften sowie die Bedingungen für ihre Emission und Ausbreitung detailliert untersucht werden. Insbesondere werden die Parameterbereiche identifiziert, für die sich eine reproduzierbare Schwerewellenausbreitung finden lässt. Anschließend werden vier mögliche Erzeugungsmechanismen, nämlich Scher- und Grenzschichtinstabilität, Konvektion und spontane Emission analysiert und mit den Eigenschaften der beobachteten Wellen abgeglichen. Trotz der Unterschiede zwischen den beiden genannten Experimentkonfigurationen zeigt deren Schwerewellensignatur viele Ähnlichkeiten, die darauf hindeuten, dass in beiden Fällen ein ähnlicher Entstehungsmechanismus vorliegt. Schließlich wird die Energieaufteilung zwischen verschiedenen Wellen und Skalen aus Experimentdaten bestimmt. Die Ähnlichkeit der für den atmosphärenähnlichen Annulus gefundenen Energiespektren mit denen der realen Atmosphäre ist bemerkenswert. Letzteres zeigt, dass diese experimentelle Konfiguration für die hier durchgeführte Untersuchung der Multiskalendynamik von Schwerewellen ausgezeichnet geeignet ist.

¹Sebastian Borchert, Ulrich Achatz, and Mark D Fruman. "Gravity wave emission in an atmosphere-like configuration of the differentially heated rotating annulus experiment". In: *Journal of Fluid Mechanics* 758 (2014), pp. 287–311.