

Abstract

In this thesis, I am going to tackle two distinct but connected problems: the meridional circulation and gap formation in protoplanetary disks (PPDs), and the moon formation processes in circumplanetary disks (CPDs). The thesis is divided into two parts. The first part, composed of three chapters, is supposed to be an introductory part, where I explain the physical background of the aforementioned problems and the numerical techniques that have been implemented. In the second part, I will present the details and the results of the two projects I have been most involved in during my Ph.D., the first investigating moon formation, and the second investigating protoplanetary disk dynamics.

In particular, in Chapter 1, I will first introduce the notion of exoplanets and explain their characteristics and classifications. I will then go through the most accepted theories for the formation of protoplanetary disks, providing also analytical toy models to explain the concepts of momentum transport. A few examples of PPD observations will also be treated. Following, we will see how terrestrial and giant planets are thought to form in those disks, presenting a couple of theories and how they are connected to each other.

In Chapter 2, moon formation will be treated. In particular, I will show the data we have regarding moon systems in our Solar System, as the characteristics of those satellites will guide our formation models. A few examples of how moons could be detected also around exoplanets will be provided. Then, moons are supposed to form in Circumplanetary Disks, and this is why I will explain the theories and the numerical models that investigate the dynamics and the structure of CPDs and the moon formation process happening in situ. We will not forget about other moon formation mechanisms, which will be briefly mentioned.

In Chapter 3, the last of the introductory part, I will go through all the numerical methods used in the community and in our projects. First, N-body methods will be shown, with particular attention to time integration and approximate methods, but a paragraph will also be dedicated to Keplerian System integration and close-encounter treatments. Then, I will review the methods used to solve the equations of Fluid Dynamics or, more specifically, Magneto Hydro-Dynamics. I will first introduce SPH methods and then spend more time on grid methods, which are the ones that have been implemented in our projects. I will then spend a few words about the radiative transfer solver we used. A section of the chapter will be dedicated to the codes that I have used during my Ph.D., mentioning our N-body integrator, then GENGA, GIZMO, and especially PLUTO. I will also explain what kind of

computational resources we used during our projects. Last, but not least, we implemented some specific analysis methods for our problems. First, I will introduce the concept of Population Synthesis, used to study the outcomes of a huge number of simulations, then I will show the methods we used to reduce the dimensionality of our problem and to build a Machine Learning framework for our analysis.

Chapter 4 will be the first to deal with the results of one of our projects about moon formation in CPDs. First, I will introduce all the other projects I have worked on in the field and their results. Then, I will introduce the N-body integrator we used in our Population Synthesis framework and all its details. Last, the results will be shown. In particular, I will discuss the mass distribution of the satellite systems produced by our model, the location of the moons, their architectures, and, finally, the chances we would have to observe them around exoplanets. I will conclude with a discussion about the prescriptions we implemented, the differences with previous works, more details about the numerical methods, and some possible future developments.

Chapter 5, the last one, will describe our work regarding meridional circulation and gap formation in magnetized and radiative protoplanetary disks. Some of the numerical methods will have been already introduced, nevertheless, some more details will be given, especially about the physical model we decided to investigate and the boundary conditions we implemented. In the results section, I will show some considerations about initial conditions and equilibrium, then I will explain our results regarding the meridional circulation strength with or without magnetic fields, the different gap opening mechanisms, and the effect of different thermodynamical models. The accretion onto circumplanetary disks and the effects of resolution will also be discussed. I will then briefly discuss the results, their biases, and possible future developments as well.

Zusammenfassung

Meine Dissertation befasst sich mit zwei unterschiedlichen, aber trotzdem zusammenhängenden physikalischen Problemen: Einerseits der meridionalen Zirkulation und der Entstehung von Lücken (gaps) in protoplanetaren Scheiben (PPD) und andererseits den Entstehungsprozessen von Monden in zirkumplanetaren Scheiben (CPD). Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert: Im einführenden ersten Teil, bestehend aus drei Kapiteln, stelle ich die genannten Probleme in ihren physikalischen Kontext und beschreibe die angewandten numerischen Methoden. Im zweiten Teil stelle ich detailliert die Methoden und Resultate der beiden Projekte vor, mit denen ich mich während meines Doktorats hauptsächlich beschäftigte: Im ersten geht es um die Entstehung von Monden; im zweiten um die Dynamik protoplanetarischer Scheiben.

Im ersten Kapitel führe ich den Begriff des Exoplaneten ein und erläutere die Eigenschaften solcher Körper und deren Klassifizierungen. Anschliessend beleuchte ich den wissenschaftlichen Stand theoretischer Modelle zur Bildung protoplanetarischer Scheiben. Anhand von analytischen Spielzeugmodellen werde ich das Phänomen des Impulstransports erklären. Ebenfalls werden einige Beispiele für Beobachtungen protoplanetarischer Scheiben behandelt. Anschliessend stelle ich mehrere Theorien zur Entstehung von Gesteins- und Riesenplaneten in solchen Scheiben vor.

Das zweite Kapitel behandelt die Entstehung von Monden. Hier zeige ich den Stand des Wissens über die Mondsysteme unseres eigenen Sonnensystems auf, da ich ihre physikalischen Eigenschaften bei der Entwicklung der Entstehungsmodelle benutze. Auch zeige ich beispielhaft auf, wie es gelingen könnte, Monde von Exoplaneten zu entdecken. Da vermutet wird, dass Monde in zirkumplanetaren Scheiben entstehen, werde ich die Theorien und numerischen Modelle erklären, mit denen ihre Dynamik und Struktur untersucht wird einschliesslich der darin stattfindenden Entstehungsprozesse von Monden. Schlussendlich nenne ich noch kurz einige alternative Theorien, die die Entstehung von Monden erklären sollen.

Das dritte Kapitel schliesst den einleitenden Teil der Arbeit ab; hier werden alle numerischen Verfahren vorgestellt, welche von der wissenschaftlichen Gemeinschaft und auch in unseren Projekten angewandt werden. Zuerst werden N-Körper-Methoden vorgestellt. Vor allem befasse ich mich hier mit Zeitintegration und Näherungsverfahren, aber ein Abschnitt ist auch der Integration von keplerschen Systemen und der Auflösung von Zusammenstössen gewidmet. Anschliessend diskutiere ich Verfahren, die für das Lösen von fluiddynamischen Problemen einschliesslich der magnetohydrodynamischen Gleichungen verwendet werden.

Nach einer Einführung über SPH-Methoden stelle ich eingehend Gittermethoden vor, welche in unseren Projekten angewandt wurden. Ausserdem stelle ich kurz den von uns verwendeten Solver für Strahlungstransport vor. Ein Abschnitt ist ausserdem den Codes gewidmet, die ich während meiner Doktorarbeit verwendet habe, nämlich unserem eigenen N-Body-Integrator, GENGA, GIZMO und besonders PLUTO. Ebenfalls erwähne ich die Computercluster, die wir für unsere Projekte verwendet haben. Schlussendlich implementierten wir auch spezielle Analysemethoden für unsere Probleme. Zuerst werde ich das Konzept der Populationssynthese vorstellen, das zur Analyse der Ergebnisse einer grossen Anzahl von Simulationen verwendet wird; dann werde ich die Methoden aufzeigen, die wir verwendet haben, um die Dimensionalität unseres Problems zu reduzieren, um den Einsatz von maschinellem Lernen zu ermöglichen.

Kapitel 4 wird das erste sein, das sich mit den Ergebnissen eines unserer Projekte über die Entstehung von Monden in zirkumplanetaren Scheiben beschäftigt. Zunächst werde ich alle anderen Projekte dieses Bereichs vorstellen, mit denen wir uns beschäftigt haben, und deren Resultate diskutieren. Dann erkläre ich detailliert den N-Körper-Integrator, den wir für die Populationssynthese verwendet haben. Zum Schluss präsentiere ich die Resultate. Insbesondere werde ich die Massenverteilung der in unserem Modell entstehenden Satellitensysteme, die Lage der Monde, und schliesslich auch die Wahrscheinlichkeit ihrer Beobachtung diskutieren. Wir schliessen mit einer Diskussion über die verwendeten Methoden, Unterschiede zu früheren Arbeiten, weiteren Einzelheiten über die numerischen Verfahren und mögliche zukünftige Entwicklungen.

Im letzten, fünften Kapitel, werden unsere Arbeiten zur meridionalen Zirkulation und Entstehung von Lücken in magnetisierten und strahlenden protoplanetaren Scheiben beschrieben. Einige der numerischen Methoden sind bereits in vorangehenden Kapiteln enthalten, dennoch werden hier weitere Einzelheiten erwähnt, im Besonderen das physikalische Modell betreffend, das wir untersucht haben und die verwendeten Randbedingungen. Im Abschnitt über die Resultate werde ich einige Überlegungen zu den Anfangsbedingungen und zum physikalischen Gleichgewicht anstellen; dann werde ich unsere Ergebnisse bezüglich der Stärke der meridionalen Zirkulation sowohl mit als auch ohne Magnetfelder, der verschiedenen Entstehungsmechanismen von Lücken und der Auswirkungen verschiedener thermodynamischer Modelle erläutern. Die Akkretion auf zirkumplanetare Scheiben und die numerischen Auswirkungen der Auflösung werden ebenfalls diskutiert. Die Resultate werde ich dann kurz diskutieren, wo ich auch auf systematische Fehler und schliesslich auf zukünftige Entwicklungen eingehen werde.