



Universiteit
Leiden
The Netherlands

The puzzle of protoplanetary disk masses

Miotello, A.

Citation

Miotello, A. (2018, March 7). *The puzzle of protoplanetary disk masses*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/61006>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/61006>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:

<http://hdl.handle.net/1887/61006>

Author: Miotello, A.

Title: The puzzle of protoplanetary disk masses

Issue Date: 2018-03-07

RIASSUNTO

*Il cosmo é dentro di noi.
Siamo fatti di materia stellare.
Noi siamo il modo in cui l'universo può conoscere se stesso.*
Carl Sagan

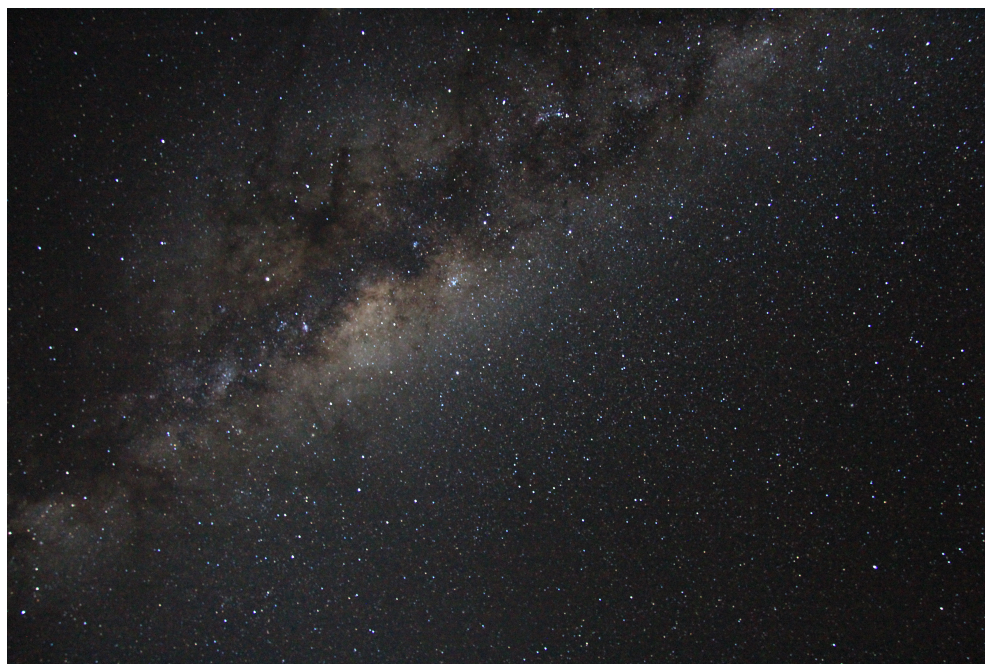


Figure 9.1: Fotografia del centro galattico e della Via Lattea ottenuta il 26 Marzo 2017 in una notte di luna nuova a Cerro Paranal in Cile (la fotografia é stata scattata dall'autrice con una macchina fotografica Reflex ed un'esposizione di 30 secondi).

FIn dall'inizio della storia dell'umanità, gli uomini hanno alzato gli occhi al cielo stellato e si sono interrogati sul significato di quello stupendo spettacolo (vedi Figura 9.1). Le più antiche civiltà in varie parti del mondo, dall'Egitto alla Cina, dall'Oceania all'America del Sud, hanno dato vita a miti e leggende legati alle costellazioni e alle nebulosità che riuscivano ad identificare nel cielo. Anche in Europa, in varie epoche storiche, poeti, pittori e artisti si sono ispirati agli eventi celesti. Lo stupore davanti al cielo stellato è stato sempre accompagnato dal desiderio di comprendere il legame tra l'umanità e l'universo. Questa domanda non ci ha abbandonato, anche ora che la scienza e la tecnologia si sono sviluppate e siamo in grado di spiegare la struttura chimica e fisica di molti oggetti astronomici. La scienza ci ha rivelato che la connessione tra il cosmo e la nostra esistenza è ancora più profonda di quanto si potesse immaginare in una visione pre-scientifica. Ad esempio, la conoscenza della nostra galassia ci ha permesso di scoprire che tutti i fenomeni che accadono nella Via Lattea, dalla presenza di un buco nero alle esplosioni di supernova fino alla particolare localizzazione del nostro Sistema Solare, hanno cooperato a permettere che la vita si sviluppasse sulla Terra fino allo stato attuale. Inoltre, lo zoo - sempre in crescita - di pianeti scoperti recentemente attorno ad altre stelle ci ha permesso di paragonare le caratteristiche di questi "exo-pianeti" con quelle del nostro sistema planetario. Nonostante la statistica elevata, sembra che la configurazione del Sistema Solare sia "speciale". Basandosi sulle osservazioni di exo-pianeti, la combinazione di una stella come il Sole e di un pianeta come Giove ha la probabilità di accadere una volta su un milione. I modelli teorici ci dicono invece che Giove è stato probabilmente un elemento chiave per lo sviluppo del nostro Sistema Solare.

Formazione stellare e dischi protoplanetari

La domanda ancora aperta riguardo la nostra origine è strettamente legata alla formazione stellare e planetaria. Come nascono le stelle ed i pianeti che orbitano attorno ad esse? Quali sono le condizioni iniziali necessarie per generare un sistema planetario simile al nostro? Che ruolo giocano la morfologia e la composizione chimica nella formazione ed evoluzione di questi sistemi?

A grandi scale la formazione stellare inizia con la creazione di strutture filamentari all'interno di giganti nubi molecolari. Le osservazioni hanno mostrato che i filamenti sono strutture elongate all'interno delle quali si possono trovare parecchie dozzine di fibre più piccole che infine collasseranno sotto l'effetto della propria gravità e si frammenteranno in nuclei densi. Questi ultimi vengono chiamati *nuclei prestellari*, dato che il loro collasso porterà alla formazione di una o più stelle. Mentre il collasso procede, per la conservazione del momento angolare, una struttura rotante a forma di disco viene generata e permette l'accrescimento di materiale sulla protostella in formazione (Figura 9.2). Questa struttura è chiamata *disco protoplan-*

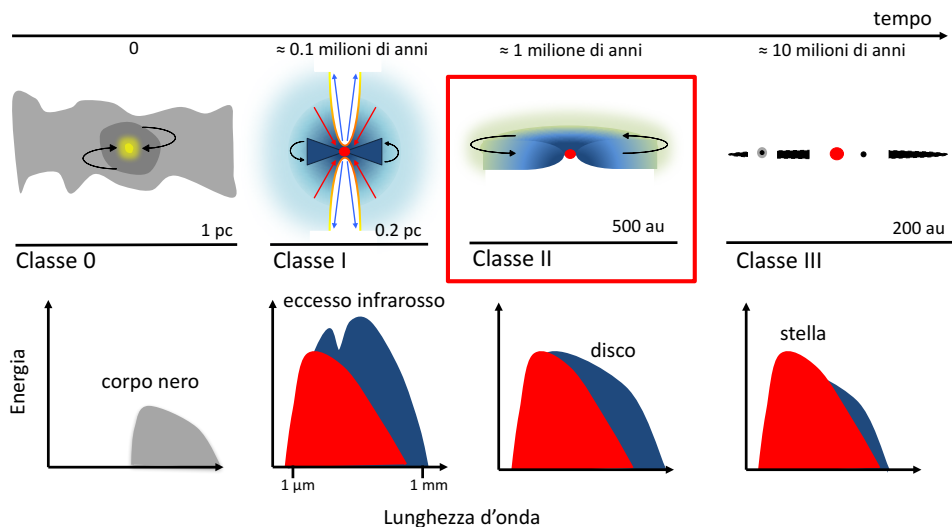


Figure 9.2: Rappresentazione schematica della formazione stellare e planetaria in un contesto isolato. Nel pannello superiore vengono presentate le varie classi evolutive, mentre nel pannello sottostante vengono mostrate le caratteristiche osservative legate ad ad ogni fase attraverso una semplificazione della SED (Distribuzione di Energia Spettrale). Questa tesi si concentra sulla fase di una stella di pre-sequenze principale circondata da un disco, chiamata Classe II.

etario dato che rappresenta anche il luogo dove i pianeti - come la Terra e gli altri elementi del Sistema Solare - vengono generati.

I dischi evolvono da una fase iniziale nella quale sono ancora immersi nel loro involucro (oggetti di Classe 0 e Classe I), ad uno stadio tipico nel quale essi sono ricchi di gas ed il loro involucro é stato dissipato (oggetti di Classe II), fino ad una fase piú evoluta dove essi sono poveri di gas ed al loro interno oggetti estesi, come pianeti ed asteroidi, devono già essersi formati (oggetti di Classe III). Come mostrato dallo schema in Figura 9.2, da un punto di vista osservativo la forma della Distribuzione Spettrale di Energia (SED) può darci informazioni sulla fase evolutiva degli oggetti osservati. Questa tesi si focalizza sullo studio dei dischi protoplanetari di Classe II, quindi ricchi di gas, attraverso la modellizzazione della loro componente gassosa ed attraverso il paragone con nuove immagini di gas e polvere in dischi ottenute con l' Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)¹, vedi Figura 9.3).

¹ALMA é un partenariato internazionale dello European Southern Observatory (ESO), della Fon-

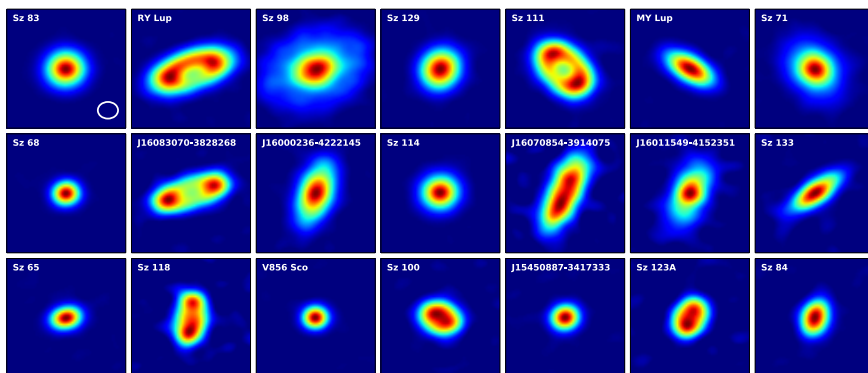


Figure 9.3: “Zoo” dei dischi protoplanetari osservati con ALMA nella regione di formazione stellare in Lupo. Queste immagini mostrano l’emissione termica della polvere a $890\ \mu\text{m}$ causata dalla presenza di grani millimetrici nei dischi (Credit: M. Ansdell).

Domande aperte nello studio dei dischi protoplanetari

Una delle proprietà fondamentali dei dischi è la loro *massa* totale, dato che essa determina la loro evoluzione e le caratteristiche dei pianeti si che andranno a formare. Nonostante ciò, le masse dei dischi non sono ancora state determinate accuratamente tramite osservazioni. I dischi sono composti per il 99 % della loro massa da gas, e da polvere - per il restante 1% della massa - che però domina l’emissione osservabile. La maggior parte della massa di polvere risiede in grani della dimensione del millimetro, che non necessariamente sono ben mescolati con il gas. Proprio per questo la determinazione della massa del gas e della polvere dovrebbe essere fatta indipendentemente. Ci si aspetta che la maggior parte della massa del disco sia nella forma di gas molecolare, in particolare di idrogeno molecolare (H_2). Tuttavia le righe dell’ H_2 non sono facilmente eccitate e quindi osservabili alle basse temperature a cui si trova la maggior parte del materiale nei dischi. Di conseguenza, tradizionalmente la presenza di gas nei dischi è stata rilevata tramite righe di emissione del monossido di carbonio (CO), che invece vengono eccitate facilmente alle condizioni termo-fisiche trovate nei dischi. Tuttavia l’emissione di queste righe è generalmente otticamente spessa, quindi è difficile sfruttarla per determinare le masse dei dischi in maniera accurata e dipende dai modelli utilizzati. Le principali domande affrontate da questa tesi di dottorato sono le seguenti:

dazione Nazionale Scientifica negli U.S.A. (NSF) e dell’ Istituto Nazionale di Scienze Naturali (NINS) del Giappone, insieme al NRC (Canada), NSC e ASIAA (Taiwan), e KASI (Repubblica di Korea), in cooperazione con la Repubblica del Cile.

-
- Qual'è il miglior tracciante della massa dei dischi protoplanetari? Possono gli isotopologi ² meno abbondanti del CO essere una soluzione? È possibile che il deuterio di idrogeno (HD) sia una buona alternativa e quali sono le sue limitazioni?
 - Come possono osservazioni - presenti e future - ottenute con ALMA essere usate per determinare la massa di un numero statisticamente interessante di dischi?
 - Qual'è la vera frazione di massa in gas e polvere nei dischi e come la sua determinazione è contaminata dal fatto che parte del carbonio e dell'ossigeno possano essere bloccati in materiale refrattario?

Questa tesi e le sue prospettive future

Determinare la massa di gas nei dischi protoplanetari è stata la domanda che ha guidato questa tesi di dottorato fin dalla sua nascita. Gli isotopologi del CO sono stati considerati come promettenti traccianti della massa per molti anni e con l'avvento di ALMA il loro rilevamento è diventato routine.

La domanda ancora aperta è se effetti chimici, che agiscono selettivamente su diversi Isotopologi, giochino un ruolo importante nel regolare le abbondanze relative tra i diversi isotopologi del CO e nella determinazione della massa dei dischi. L'isotopologo più raro, il C¹⁸O, è infatti distrutto dalla radiazione UV più velocemente del classico monossido di carbonio, il ¹²C¹⁶O. Questa tesi inizia quindi la sua investigazione da un punto di vista teorico. Successivamente un insieme di osservazioni degli isotopologi del CO in dischi sono state rese disponibili dalla *Survey di Dischi in Lupus* con ALMA. La griglia di modelli presentati nel Capitolo 3 sono quindi stati paragonati con le osservazioni e alcuni progetti motivati dai dati osservati sono stati realizzati.

- Nel Capitolo 2 la fotodissociazione selettiva degli isotopologi, ovvero il processo che principalmente controlla le abbondanze relative degli isotopologi del CO nella zona del disco dove esso emette, è stata trattata in modo accurato per la prima volta in un modello fisico-chimico di dischi chiamato DALI. La chimica, il bilancio termico ed il trasporto radiativo del continuo e delle righe sono stati considerati contemporaneamente con un network chimico che tratta ¹³CO, C¹⁸O e C¹⁷O come specie indipendenti. Il risultato principale è che processi chimici selettivi degli Isotopologi portano ad avere regioni del disco dove la

²Gli isotopologi sono molecole che hanno come unica differenza la loro composizione isotopica. Semplicemente, l'isotopologo di una specie chimica ha almeno un atomo con un numero di neutroni differente dalla molecola madre.

frazione delle abbondanze di diversi isotopologi é molto diversa dalla frazione isotopica degli elementi. Di conseguenza, assumere queste frazioni con i valori costanti ottenuti dalle frazioni isotopiche può portare a sottostimare le masse dei dischi di più di un ordine di grandezza.

- Nel capitolo 3 la piccola griglia di modelli usata nel Capitolo 2 é stata espansa. Più di 800 modelli sono stati lanciati per coprire un spettro di parametri stellari e del disco molto più ampio. I flussi integrati delle righe di emissione sono stati simulati per diversi isotopologi del CO nelle basse transizioni rotazionali e per varie inclinazioni del disco. Questo capitolo mostra che combinando i flussi totali di riga del ^{13}CO e del C^{18}O é possibile ricavare la massa totale dei dischi, anche se con incertezze non trascurabili in paragone a studi precedenti. Queste incertezze possono essere ridotte se l'estensione radiale e verticale e l'inclinazione del disco sono note da dati osservativi. Infine, le intensità di linea totali per diversi isotopologi del CO e per varie transizioni rotazionali sono fornite e fittate con semplici relazioni analitiche. Sono stati anche investigati gli effetti provocati sia dalla bassa abbondanza di carbonio nello stato gassoso, che di basse frazioni di massa di gas su massa di polvere.
- Nel capitolo 4 la griglia di modelli presentati nel capitolo 3 é stata utilizzata per analizzare il continuo e le righe degli isotopologi del CO ($^{13}\text{CO } J = 3 - 2$ e $\text{C}^{18}\text{O } J = 3 - 2$) osservati nei dischi in Lupus. Le masse del gas dei dischi sono state calcolate per 34 sorgenti, espandendo il gruppo di 10 dischi studiati precedentemente. Questo capitolo mostra che in generale le masse di gas basate sul CO sono estremamente basse per dischi che orbitano stelle di tipo solare, spesso più basse di una massa di Giove se l'abbondanza di carbonio non é ridotta. Di conseguenza, le frazioni di massa di gas-su-polvere sono molto più basse del valore atteso 100 che é osservato nel mezzo interstellare, oscillando principalmente tra 1 e 10. Masse del gas e frazioni di massa di gas-su-polvere basate sul CO così basse possono indicare una perdita di gas molto rapida, o, alternativamente, un'evoluzione chimica che sequestrerebbe il carbonio dal CO per bloccarlo in molecole più complesse o in oggetti solidi più grandi. La prima ipotesi implicherebbe che la formazione di pianeti giganti debba essere rapida o rara, mentre per il secondo scenario le implicazioni sui tempi scala della formazione planetaria sarebbe meno ovvia.
- Nel capitolo 5 un'altra fondamentale proprietà dei dischi é stata investigata con i modelli DALI, ovvero la distribuzione di densità superficiale del gas Σ_{gas} . Per comprendere l'evoluzione dei dischi, l'importanza relativa dei vari processi coinvolti in essa e la formazione dei pianeti, sarebbe cruciale costringere Σ_{gas} in maniera solida dalle osservazioni. Questo capitolo si domanda se i profili radiali delle righe del ^{13}CO , come quelli osservati recentemente con

ALMA, possano essere utilizzati per derivare il profilo di densità superficiale del gas. Paragonando i risultati ottenuti con i modelli DALI, troviamo che i profili radiali del ^{13}CO seguono i profili di densità nella zona intermedia del disco. L'emissione cala a raggi molto piccoli a causa dello spessore ottico e nelle zone esterne del disco, a grandi raggi, a causa del freeze-out e del fatto che il self-shielding è inefficiente.

- Nel capitolo 6 il network chimico in DALI è stato espanso con l'aggiunta della chimica semplificata del deuterio in modo da poter simulare le righe del HD. L'obiettivo è quello di esaminare la robustezza del HD come tracciante della massa dei dischi, in particolare l'effetto della massa del gas e della estensione verticale del disco sulle righe infrarosse dell'HD. Troviamo che la determinazione della massa basata sul HD ha un'incertezza moderata. Osservazioni del HD dovrebbero essere quindi considerate come un importante obiettivo scientifico per future missioni nel lontano infrarosso, come ad esempio SPICA.

Le conclusioni principali di questa tesi sono:

1. La fotodissociazione selettiva degli isotopologi del CO deve essere considerata nei modelli quando si simula l'emissione degli isotopologi rari. Altrimenti le righe di emissione del C^{18}O potrebbero essere sovrastimate e le masse del gas sottostimate fino a un ordine di grandezza o più.
2. La massa di gas nei dischi può essere misurata combinando l'intensità integrata delle righe del ^{13}CO e del C^{18}O , anche se con incertezze non trascurabili, fino a due ordini di grandezza per dischi molto massivi.
3. Le masse del gas nei dischi in Lupus misurate dall'emissione del CO risultano essere molto basse, spesso minori di una massa di Giove, e le frazioni globali di massa del gas rispetto alla massa della polvere oscillano tra 1 e 10. Questo può essere interpretato come rapida perdita di gas da parte del disco, oppure come rapida evoluzione chimica.
4. La forma della distribuzione superficiale di densità nei dischi può essere caratterizzata da osservazioni spazialmente risolte di ^{13}CO , se lo spessore ottico, il freeze-out e il self-shielding sono considerati propriamente nei modelli.
5. L'emissione del HD nel lontano infrarosso può essere usata per determinare la massa dei dischi con una moderata incertezza che dipende principalmente dalla struttura verticale del disco. Questo tipo di osservazioni dovrebbe essere considerato come un importante obiettivo scientifico per future missioni nel lontano infrarosso.

Il quesito sulla massa gassosa dei dischi protoplanetari rimane irrisolto. Gli isotopologi del CO sono ancora dei promettenti candidati come traccianti della massa dato che la loro rilevazione é routine per ALMA, ma hanno bisogno di essere calibrati. Questa tesi mostra che il processo di fotodissociazione selettiva é importante per una buona interpretazione degli isotopologi del CO come traccianti di massa. Tuttavia, la fotodissociazione, almeno per il caso di TW Hya e probabilmente per altri dischi, non é il fenomeno principalmente responsabile delle righe di emissione cosí tenui osservate negli isotopologi del CO. D'altra parte, la riduzione dell'abbondanza di carbonio in forma gassosa, che deve ancora essere investigata in maniera piú precisa, potrebbe esserne la causa principale. Dove va a finire il carbonio? La rilevazione di molecole leggermente piú complesse, come ad esempio gli idrocarburi C_2H e $c-C_3H_2$, potrebbe essere una soluzione per la calibrazione delle masse in gas derivate dal CO. Un'altra opzione é quella di allargare il campione di dischi in cui il [CI] é stato rilevato e ciò permetterebbe di determinare l'abbondanza di carbonio volatile negli strati superficiali del disco. Infine, se la principale transizione rotazionale dell'HD potrà essere osservata a risoluzione spettrale abbastanza alta con SPICA, la sua rilevazione fornirá una misura della massa dei dischi indipendente dal CO.

Determinare la massa totale dei dischi é una sfida, ma é cruciale tentare di risolvere questo enigma dato che essa é una delle proprietà fondamentali che bisogna costringere per poter comprendere come i pianeti si formano, a partire dal nostro pianeta Terra fino all'immensa varietà di esopianeti osservati attorno ad altre stelle.