



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks**

Cazzoletti, P.

### **Citation**

Cazzoletti, P. (2019, December 12). *Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/81821>

Version: Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/81821>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/81821> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Cazzoletti, P.

**Title:** Not so smooth after all: resolving dust and gas structures in protoplanetary disks

**Issue Date:** 2019-12-12

# Riassunto

Fin dal principio della sua esistenza, l'umanità si è sempre interrogata sulla propria origine e posto nell'universo. Le stelle e le costellazioni hanno dato origine ad innumerevoli leggende e miti, che in molti casi hanno lasciato traccia nei nomi che stelle e costellazioni ancora portano. Nessuno oggi penserebbe che quelle storie siano realmente accadute, ma evidenziano chiaramente l'intuizione dei popoli di ogni epoca che le risposte alle domande sulla nostra origine e sul nostro posto nell'universo siano da ricercare nell'osservazione e nello studio dei cieli. Con il progredire della scienza, quest'ultima affermazione è rimasta vera. Telescopi sono continuamente costruiti in tutto il mondo e lanciati nello spazio con l'obiettivo di poter osservare meglio quegli stessi cieli e rispondere a quelle stesse domande. In particolare, come è iniziata la vita?

Nell'immensità dell'universo, vi è un unico luogo in cui sappiamo per certo che la vita abbia avuto origine: il pianeta Terra. Fino a circa 25 anni fa, nessun pianeta era conosciuto al di fuori del sistema solare. Nel 1995, tuttavia, il primo *esopianeta* è stato scoperto, e da allora è stata confermata l'esistenza di più di 4000 nuovi esopianeti. Questa esplosione di scoperte spalanca a nuove e promettenti possibilità verso la comprensione dell'origine della vita. In particolare risulta critico comprendere come i pianeti si formino dal punto di vista fisico e chimico .

Il percorso che conduce dalle nubi molecolari, come quella mostrata in Fig. 6.15, ai pianeti è complicato e richiede numerosi processi fisici e chimici a diverse scale (vedi Fig. 1.2). Per questo motivo, molti aspetti di questo percorso non sono ancora ben compresi. È tuttavia chiaro che la formazione di stelle e pianeti comincia dalle nubi molecolari. Il 99% di queste nubi è composto di gas molecolare e l'1% di polvere. Alcune nubi sono gravitazionalmente instabili: questo significa che la loro massa è troppo grande perché possa essere supportata dalla pressione del gas di cui sono composte. Di conseguenza, queste nubi collassano sotto l'effetto della loro stessa gravità. Durante il collasso, esse iniziano a ruotare sempre più velocemente per effetto della conservazione del



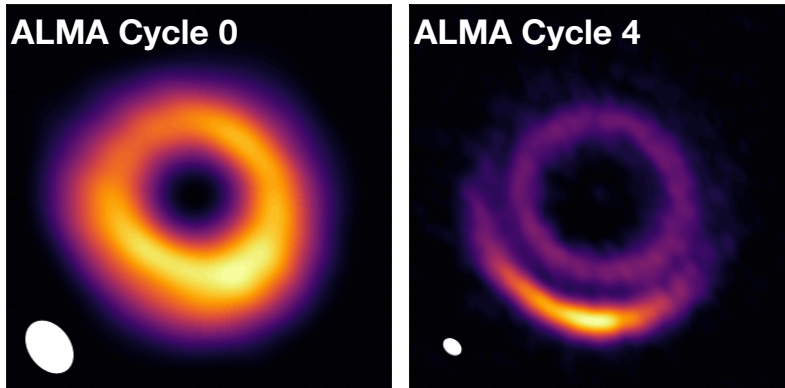
**Figure 6.15:** Vista della componente di polvere delle nubi nella regione di formazione stellare Corona Australis. Le nubi più dense sono in grado di bloccare efficacemente la luce proveniente dalle stelle più lontane. Credito & Copyright: Fabian Neyer.

momento angolare, fino a quando, ad un certo punto, la forza centrifuga è in grado di impedire l'ulteriore collasso del materiale. Viene dunque a formarsi una struttura a disco. Queste strutture sono chiamate *dischi protoplanetari*, e sono la culla della formazione dei pianeti.

A questo punto, la polvere nei dischi protoplanetari può crescere dalle dimensioni di minuscoli granelli di sabbia a ciottoli, massi e pianetesimi, ovvero il componente fondamentale dei pianeti rocciosi e dei nuclei dei pianeti gassosi. Una volta formati, i pianeti interagiscono con il resto del materiale dei dischi scavando solchi e cavità, creando anelli ed eccitando onde.

Fino a circa 10 anni fa tali strutture non potevano essere osservate dalla Terra, a causa della limitata risoluzione spaziale dei telescopi di vecchia generazione. Era come guardare un dipinto da lontano: le grandi forme sono visibili, ma i dettagli sono nascosti e non distinguibili. Allo stesso modo, i dischi apparivano uniformi e simmetrici. Avvicinandosi al dipinto, tuttavia, più dettagli diventano chiari, e quando si è abbastanza vicini si possono distinguere anche i singoli tratti di pennello (per esempio, vedi Fig. 6.16). Ciò che ci ha permesso di "avvicinarci" ai dischi protoplanetari sono state le capacità senza precedenti di un nuovo potente telescopio: l'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Se osservati con le piene capacità di ALMA, i dischi non sono più uniformi e simmetrici, ma presentano diverse strutture e una varietà di morfologie, anche più di quanto ci saremmo aspettati.

Oltre ad ALMA, altri telescopi e strumenti, come VLT/SPHERE e Gemini/GPI, sono stati costruiti per cercare pianeti ancora immersi nei dischi protoplanetari. È interessante notare che, contro le aspettative, solo una manciata



**Figure 6.16:** Immagini del disco protoplanetario attorno a HD 135344B, a diverse risoluzioni. A sinistra, la primissima osservazione ALMA con una risoluzione di  $0.''25$  ( $\sim 30$  au) resolution, apparentemente di un singolo anello leggermente asimmetrico. A destra, le più recenti osservazioni ALMA dello stesso oggetto, con una risoluzione spaziale di  $0.''06$  ( $\sim 8$  au): a questa risoluzione, è possibile distinguere più sottostrutture, e cioè un anello interno e simmetrico ed una struttura esterna azimutalmente asimmetrica.

di pianeti è stata fino ad ora rilevata.

L'ubiquità delle sottostrutture nei dischi protoplanetari, combinata alla mancanza di pianeti osservati sfidando l'interpretazione delle sottostrutture come originate dall'interazione tra disco e pianeti. In particolare, le domande alle quali questa tesi cercherà di rispondere sono le seguenti:

- Possono le sottostrutture nei dischi protoplanetari essere originate da fenomeni che non siano l'interazione tra dischi e pianeti?
- Che tipo di informazioni possono darci le sottostrutture nei dischi protoplanetari riguardo alle proprietà fisiche dei dischi?
- C'è qualche legame tra le sottostrutture nel gas e quelle nella polvere, o ci forniscono informazioni indipendenti?
- Fino a che punto sono le proprietà dei dischi dovute all'evoluzione, rispetto che alle condizioni iniziali?

## Questa tesi e le prospettive future

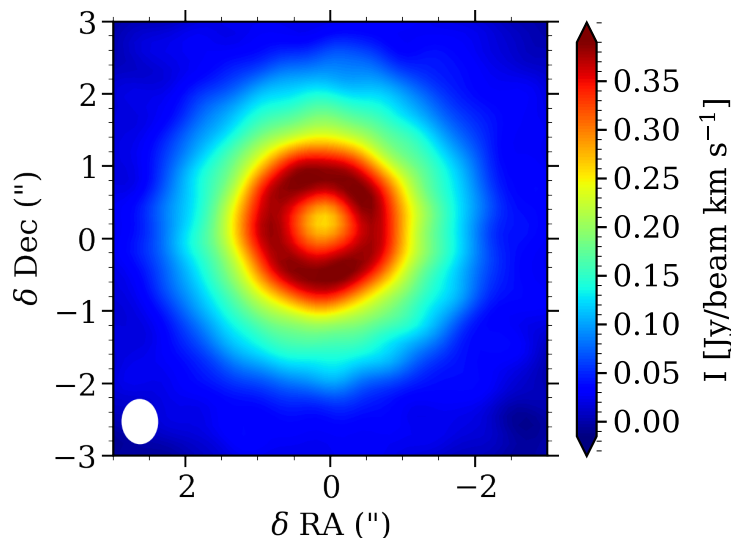
Il Capitolo 1 di questa tesi fornisce una introduzione generale della teoria della formazione di stelle e pianeti. Vengono spiegate le fasi che portano dalle nubi ai

dischi, e i meccanismi fisici che giocano un ruolo nella crescita ed evoluzione dei grani di polvere. Vengono anche presentati i telescopi e gli strumenti numerici utilizzati per l'analisi dei dati.

Il Capitolo 2 presenta uno studio delle strutture del disco attorno a GG Tau A. La particolarità di questo disco protoplanetario è che esso non ruota intorno ad una singola stella, ma intorno ad una binaria (viene per questo chiamato *circumbinario*). Il disco circumbinario GG Tau A mostra un anello molto sottile situato a  $\sim 200$  au dalle stelle centrali. La regione tra le stelle e l'anello è completamente priva di polvere e della maggior parte del gas, poiché il materiale è stato spinto fuori dall'interazione gravitazionale con le stelle. L'interazione tra la compagna stellare ed il disco è molto simile a ciò che accadrebbe se, invece di una stella, fosse presente un pianeta massiccio. A seconda della massa del compagno, tuttavia, i calcoli teorici prevedono una diversa posizione dell'anello. La posizione dell'anello dipende anche dall'orbita della stella. Eseguendo una serie di simulazioni idrodinamiche e confrontando i risultati con le osservazioni del disco ed il moto stellare, si conclude che l'orbita stellare che meglio si adatta ai vincoli osservativi è un'orbita disallineata rispetto al piano del disco.

I Capitoli 3 e 4 si concentrano su un altro oggetto specifico, HD 135344B (vedi Fig. 6.16). Fin dalle primissime osservazioni con ALMA, il disco attorno a HD 135344B è apparso molto interessante, con una grande cavità interna di  $\sim 50$  au ed un anello di polvere simile a quello di GG Tau A, ma più piccolo, come ci si aspetterebbe se fosse scolpito da un pianeta. Un'altra differenza rispetto a GG Tau A è il fatto che il disco HD 135344B non è simmetrico, ma è più luminoso nella regione sud. Inoltre, osservando la luce proveniente dalla stella centrale e diffusa dal disco, è possibile osservare due braccia a spirale molto luminose, che sono state generalmente spiegate con la presenza di due ulteriori pianeti. Il Capitolo 3 presenta osservazioni del disco effettuate ad alta risoluzione con ALMA. Esse evidenziano che quello che nelle precedenti osservazioni sembrava essere un anello asimmetrico, appare invece ad alta risoluzione come 2 strutture: un anello interno simmetrico ed una asimmetria esterna a forma di banana, interpretabile come un vortice. L'estremità dei bracci a spirale si trova molto vicina al centro dell'asimmetria (pannello centrale di Fig. 3.1): proponiamo quindi che i bracci a spirale siano provocati dal vortice, e non da pianeti aggiuntivi. In questa spiegazione è richiesto un solo pianeta, che scava l'anello interno. Questo scenario è in accordo con il fatto che, nonostante gli sforzi, nessun pianeta sia stato ancora identificato nelle regioni esterne dell'HD 135344B.

Il capitolo 4 presenta osservazioni del disco intorno all'HD 135344B ad una risoluzione ancora maggiore e ad una diversa lunghezza d'onda: questa volta,



**Figure 6.17:** La struttura a forma di anello dell'emissione del CN osservata attorno aTW Hya.

l'anello interno e l'asimmetria esterna sono chiaramente distinguibili. Inoltre, combinando le nuove osservazioni con le precedenti, viene effettuato uno studio del vortice a più lunghezze d'onda. Questo approccio permette di ottenere informazioni su molte proprietà dei granelli di polvere all'interno del vortice. Ad esempio, è chiaro che i grani sono più grandi nel vortice rispetto al resto del disco: è quindi probabile che la polvere al suo interno stia crescendo fino a dimensioni maggiori, potenzialmente originando una popolazione di pianetesimi. Anche la massa del vortice viene misurata e, all'interno delle incertezze, risulta compatibile con lo scenario in cui è il vortice a originare le spirali.

I primi tre capitoli si concentrano principalmente sulle strutture in polvere. Il Capitolo 5 si focalizza invece sul gas, e in particolare sulle emissioni del CN. Avendo una tra le linee di emissioni più brillanti nei dischi, il CN risulta essere una molecola particolarmente interessante da studiare. Ciò che lo rende ancora più interessante è il fatto che le osservazioni spazialmente risolte di dischi protoplanetari mostrano sempre strutture ad anello (vedi Fig. 6.17). Sono anche questi anelli dovuti ad un pianeta? Esiste una correlazione con gli anelli di polvere? Per rispondere a queste domande, l'emissione del CN è stata simulata in una griglia di modelli utilizzando il codice DALI. La conclusione è che il CN mostra sempre una emissione ad anello, anche in dischi senza sottostrutture.

L'origine di questi anelli è infatti chimica. La reazione che porta a questa particolare emissione, inoltre, dipende fortemente da alcune proprietà del disco, come la sua dimensione, massa, la variazione del suo spessore con il raggio, e anche dall'emissione ultravioletta della stella centrale. Pertanto, osservando il CN nei dischi protoplanetari, quindi, le dimensioni e la luminosità dell'anello possono essere utilizzate per ottenere informazioni su queste proprietà.

Il Capitolo 6, infine, si concentra sulle osservazioni ALMA di polvere e gas non più in singoli dischi, ma in più dischi appartenenti ad una singola regione di formazione stellare, Corona Australis (CrA), mostrata in Fig. 6.15. Si ritiene che la CrA sia una regione giovane, e come tale ci si aspetta mostri dischi relativamente grandi e luminosi come altre regioni della stessa età quali Lupus. Tuttavia, nessun disco è stato rilevato nel gas, e i dischi di polvere sembrano essere deboli e piccoli, paragonabili a quelli di una regione 10 volte più vecchia del Lupus, ovvero Upper Sco. Tuttavia, nuovi spettri VLT/X-Shooter degli oggetti osservati con ALMA sembrano confermare la loro giovane età. La domanda sul motivo della bassa luminosità dei dischi resta aperta, ma due opzioni principali sono possibili. La prima possibilità è che in CrA abbiano avuto luogo due distinti eventi di formazione stellare, a distanza di alcuni milioni di anni l'uno dall'altro. In alternativa, la luminosità e le dimensioni dei dischi osservati oggi dipendono fortemente dalle condizioni iniziali (e.g. dalla rotazione del nucleo) presenti nelle primissime fasi del processo di formazione delle stelle. Ulteriori osservazioni saranno necessarie per distinguere gli scenari. In particolare, se i dischi attorno agli oggetti più giovani della regione fossero osservati e trovati anch'essi meno luminosi del solito, sarebbe un chiaro segno che le condizioni iniziali giocano un ruolo importante rendendo i dischi piccoli e meno massicci fin dall'inizio.

Ad oggi non è chiaro se le strutture osservate siano dovute a pianeti già formati o a qualche altro meccanismo. Fino ad ora solo un pianeta è stato "fotografato" all'interno di un disco, ma osservazioni future potrebbero osservare anche altri pianeti associati a queste strutture. Nel frattempo, nuovi promettenti approcci stanno diventando sempre più comuni per dedurre indirettamente la presenza di pianeti in dischi, e si riveleranno critici nel prossimo futuro. Le perturbazioni sul moto del gas indotte dai pianeti, ad esempio, sono già state utilizzate in alcuni casi, e la stessa tecnica può ora essere applicata a più sistemi. Inoltre, l'emissione proveniente da dischi circumplanetari associati a protopianeti, così come le emissioni associate al loro accrescimento sui pianeti stessi, sono state recentemente rilevate rispettivamente con ALMA e MUSE. Anche tali osservazioni potrebbero diventare più comuni in futuro.

Nel frattempo, nuovi studi a diverse lunghezze d'onda di dischi protoplan-



etari, come quello effettuato per HD135344B, possono fornire preziose informazioni sulle proprietà all'interno delle sottostrutture, inclusi i vortici. In particolare, il legame tra i vortici e le spirali devono essere studiati in maggior dettaglio in un campione più ampio di dischi, anche sfruttando la sensibilità e la risoluzione spaziale di ALMA a frequenze più alte.

Questi studi sono critici per comprendere se le sottostrutture nei dischi siano o meno il luogo di nascita di nuovi pianeti. In conclusione, ci diranno se la varietà delle strutture osservate alle lunghezze d'onda del millimetrico sia legata o meno alla diversità delle proprietà dei sistemi esoplanetari e, in ultima analisi, alla nostra origine.

