

Antonio Garufi

Il gas che forma i pianeti visto con nuovi occhi

Planet-forming gas seen with new eyes

INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. La formazione dei pianeti avviene attorno alle neonate stelle nei dischi protoplanetari. Questi dischi sono composti da gas e polvere e la loro composizione chimica detterà quella delle atmosfere planetarie. Lo studio della parte gassosa di questi dischi risulta perciò fondamentale per capire sotto quali condizioni può nascere un pianeta abitabile ed è il principale obiettivo della survey ALMA-DOT condotta dai ricercatori dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri.

Parole chiave. Formazione planetaria, dischi protoplanetari, astrochimica.

Fino al 1994 i pianeti del Sistema Solare erano gli unici conosciuti. Oggi sappiamo dell'esistenza di alcune migliaia di pianeti rotanti attorno ad altre stelle e diverse stime statistiche concordano nel concludere che la maggioranza delle stelle, almeno di quelle simili al Sole, ospita almeno un pianeta. Tuttavia i sistemi planetari osservati finora sono molto diversi tra loro e la geometria del Sistema Solare (quattro pianeti terrestri all'interno e quattro giganti all'esterno) è quanto meno rara. Da questi risultati gli scienziati che studiano la formazione dei pianeti hanno tratto due semplici conclusioni: la formazione planetaria in Natura è agevole ma i processi coinvolti sono molteplici e vari.

Abstract. Planets form around newly born stars in protoplanetary disks. These disks are made up of gas and dust and their chemical composition will affect that of planetary atmospheres. Therefore, study of the gas in protoplanetary disks is fundamental toward an understanding of the conditions under which a habitable planet can form. This is a primary aim of the ALMA-DOT survey carried out by the researchers of the Arcetri Astrophysical Observatory.

Keywords. Planet formation, protoplanetary disks, astrochemistry.

Until 1994, the planets of the Solar System were the only known ones. Today, several thousand planets orbiting stars other than the Sun are known. Several statistical studies indicate that the majority of Sun-like stars host at least one planet. However, the observed planetary systems are very different from each other and the morphology of the Solar System (four rocky planets closer in and four giant planets farther out) is rather rare. From these findings, scientists in



Le culle dei pianeti sono i dischi protoplanetari. Queste strutture di gas e polvere si formano nei primi istanti di formazione della stella attraverso l'appiattimento del materiale rimasto in rotazione senza collassare sulla stella stessa. Per gli standard di osservazione astronomica, i dischi protoplanetari sono oggetti molto piccoli misurando al più un centinaio di volte la distanza tra la Terra e il Sole. Sono inoltre strutture piuttosto effimere avvenendo la loro dissipazione in meno di 10 milioni di anni. Questi due elementi rappresentano due sfide per gli astronomi osservativi impegnati nello studio della formazione planetaria. Infatti fotografare l'ambiente in cui nascono i pianeti necessita risoluzioni angolari molto buone ed è possibile su appena qualche centinaio di stelle, quelle abbastanza vicine da poter essere osservate e abbastanza giovani da ospitare ancora un disco protoplanetario.

La formazione planetaria coinvolge due componenti ben distinte. Da un lato vi è la polvere, che attraverso la coagulazione per forze elettrostatiche cresce in dimensione fino a formare oggetti di diversi km, e dall'altro vi è il gas, che risentendo di questi nuclei solidi iniziali accresce per gravità fino a formare le atmosfere planetarie. Il metodo per osservare queste due componenti non è lo stesso. Per la polvere viene osservata l'emissione continua infrarossa e micro-onde mentre per il gas è necessario concentrarsi su lunghezze d'onda specifiche, quelle a cui un determinato atomo o molecola emette per transizioni strutturali. Studiare le molecole nei dischi è di fondamentale importanza perché la composizione atmosferica dei pianeti che può potenzialmente consentire la vita dipende dalla distribuzione di esse al momento della formazione planetaria.

the community of planet formation have concluded that this phenomenon is easy for Nature, although the processes involved are varied.

The birthplaces of planets are the protoplanetary disks. These gaseous and dusty structures form right after star formation through the flattening of the material left over from the gravitational collapse that forms the star. In the framework of astronomical observations, these disks are relatively small, extending up to a hundred times the distance between Earth and Sun at most. Furthermore, they are short-lived structures, with a timescale of 10 million years at most. These two elements represent a challenge for observers working in the planet formation field. In fact, imaging the planet-formation environment requires very high angular resolution and can only be carried out on a few hundred stars, those close enough to be imaged and young enough to still host a protoplanetary disk.

Planet formation involves two components. On one hand, dust grows for grain coagulation up to objects of kilometers in size, while on the other hand gas accretes for gravity onto these dusty cores. Dust is observed through the IR-to-millimeter continuum emission while gas is detected through the specific wavelengths at which an atom or molecule emits for structural transitions. Understanding the distribution of molecules within the disk is pivotal since it will strongly affect the conditions of the planetary atmosphere, which will in turn determine the possible development of life.

The Atacama Large Millimeter Array (ALMA), located on the Chajnantor plateau in Chile, is the first instrument allowing us to map the molecular distribution of protoplanetary disks with

L'Atacama Large Millimeter Array (ALMA), locato sull'altopiano Chajnantor in Cile, è il primo strumento al mondo in grado di mappare la distribuzione molecolare nei dischi protoplanetari con la giusta risoluzione angolare. Tuttavia ad oggi le *survey* effettuate si sono concentrate sulla molecola osservabile più abbondante, il monossido di carbonio (CO), offrendo solo una visione parziale della composizione chimica dei dischi. Uno degli obiettivi più ambiziosi del gruppo di formazione planetaria dell'Osservatorio di Arcetri è di ottenere mappe di molteplici molecole all'interno di uno stesso oggetto così da comprendere meglio quale 'pacchetto' viene consegnato alle neonate atmosfere planetarie. Particolare fascino esercitano le prime molecole complesse, ed in particolare quelle contenenti carbonio, in quanto esse rappresentano le primissime strutture che andranno a formare aminoacidi via via più complessi. In questo senso, il programma ALMA-DOT si prefigge di osservare, tra le altre, la formaldeide (H_2CO) e il metanolo (CH_3OH), vale a dire due delle molecole organiche semplici da cui si formano quelle complesse.

I risultati della *survey* ALMA-DOT hanno superato le più rosee aspettative. Innanzitutto, queste osservazioni hanno consentito di vedere la struttura del gas anche in dischi molto giovani che sono ancora immersi in ciò che resta della nuvola che ha formato la stella centrale. Solitamente questa struttura estesa inquina completamente le osservazioni del disco quando queste sono effettuate col CO. Le osservazioni di ALMA-DOT mostrano invece come la formaldeide, il monossido di carbonio (CS) e il cianuro (CN) traccino essenzialmente il disco consentendo così di filtrare l'emissione estesa. Si è rivelato sorprendente come la formaldeide

a sufficient angular resolution. Nevertheless, most of the surveys carried out so far have focused on the most abundant among the observable molecules, carbon monoxide (CO), providing only a partial view of the chemical composition of disks. One of the ambitious goals of the planet formation group at the Arcetri Observatory is to map multiple molecular lines from the same target so as to understand what "package" is delivered to the newly born planetary atmospheres. Much of the focus is currently on complex molecules, and in particular those containing carbon, as these structures will act to form the simplest amino acids. In this regard, the ALMA-DOT campaign aims at observing, among other things, formaldehyde (H_2CO) and methanol (CH_3OH), which are among the simple organic molecules which give rise to more complex ones.

The surprising results of the ALMA-DOT survey have allowed us to image the gas in disks that are still embedded in the natal cloud. Typically, this structure prevents the observation of the disk when observations are performed with CO. Instead, the ALMA-DOT observations show that formaldehyde, carbon monosulfide (CS), and cyanide (CN) trace the disk by filtering out the extended emission. Surprisingly, formaldehyde and carbon monosulfide show the same line brightness and spatial distribution, while cyanide behaves differently.

Furthermore, the ALMA-DOT observations show that all the targets probed reveal an inner region with dimmed molecular emission. This could be partly due to the optically thick nature of both dust and gas but may also suggest that the chemistry driving the formation of these molecules differs in the disk's inner region. It is therefore clear that the location within the disk

e il monossido di carbonio, pur avendo un peso e una struttura abbastanza diversi, mostrino lo stesso flusso integrato e la stessa distribuzione spaziale. Invece il cianuro si comporta diversamente.

Le osservazioni di ALMA-DOT mostrano inoltre come tutti gli oggetti osservati abbiano una zona interna in cui l'emissione molecolare è fortemente soppressa. Questo potrebbe in parte essere dovuta alla natura otticamente spessa della polvere e del gas nelle zone interne del disco ma anche che la chimica che porta alla formazione di queste molecole non sia la stessa all'interno del disco. È evidente dunque che il luogo di nascita nel disco di un pianeta sia fondamentale per determinare quali molecole siano più o meno abbondanti nella sua atmosfera. Il metanolo e l'acqua, altre due molecole ricercate nel programma ALMA-DOT, rimangono molto elusive per via della debolezza intrinseca delle loro righe. Il metanolo è stato però tenuemente rivelato in un oggetto, per quanto il disco in questione sia straordinariamente esteso e brillante. Questa rivelazione è d'avanguardia in quanto rappresenta la seconda rivelazione mai avvenuta di questa molecola in un disco protoplanetario.

Il gruppo di formazione planetaria di Arcetri si prefigge di continuare il programma ALMA-DOT richiedendo in futuro altro tempo osservativo con ALMA. L'obiettivo principale sarà osservare oggetti meno straordinari, deviando di fatto il trend attuale per cui solo oggetti molto estesi e massivi sono stati osservati, con il fine di ottenere una visione più completa della distribuzione molecolare nei dischi protoplanetari al momento della nascita dei pianeti.

where the planet forms will affect the chemical composition of its atmosphere. Methanol and water, also probed by the ALMA-DOT survey, turned out to be very elusive molecules because of the weakness of their lines. Nonetheless, methanol has been marginally detected in one target, although the disk in question is particularly extended and massive. This finding is rather unique since it is only the second time that methanol has been detected in a protoplanetary disk.

The planet formation group in Arcetri aims to carry on the ALMA-DOT program by requesting more observation time at ALMA in the future. The main goal will be to observe less extraordinary objects, breaking through the bias for which only extended and massive disks have been observed. This will allow us to obtain a complete view of the molecular distribution in protoplanetary disks when planets form.

Antonio Garufi is a researcher at the Arcetri Astrophysical Observatory. After defending his PhD thesis at ETH Zurich, he worked at the Universidad Autonoma de Madrid and then came to the Arcetri Observatory with a research grant. During his career, he has worked on several observational aspects related to planet formation, and in particular in the context of optical and near-IR polarimetric observations with VLT/SPHERE.

Antonio Garufi è un ricercatore dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Dopo aver completato il Dottorato di Ricerca presso l'ETH di Zurigo, ha lavorato presso l'Universidad Autonoma de Madrid e poi si è trasferito con un assegno di ricerca all'Osservatorio di Arcetri. Nella sua carriera, ha affrontato diversi aspetti della formazione planetaria da un punto di vista osservatorio e in particolare nel contesto di osservazioni polarimetriche nell'ottico e vicino infrarosso con VLT/SPHERE.

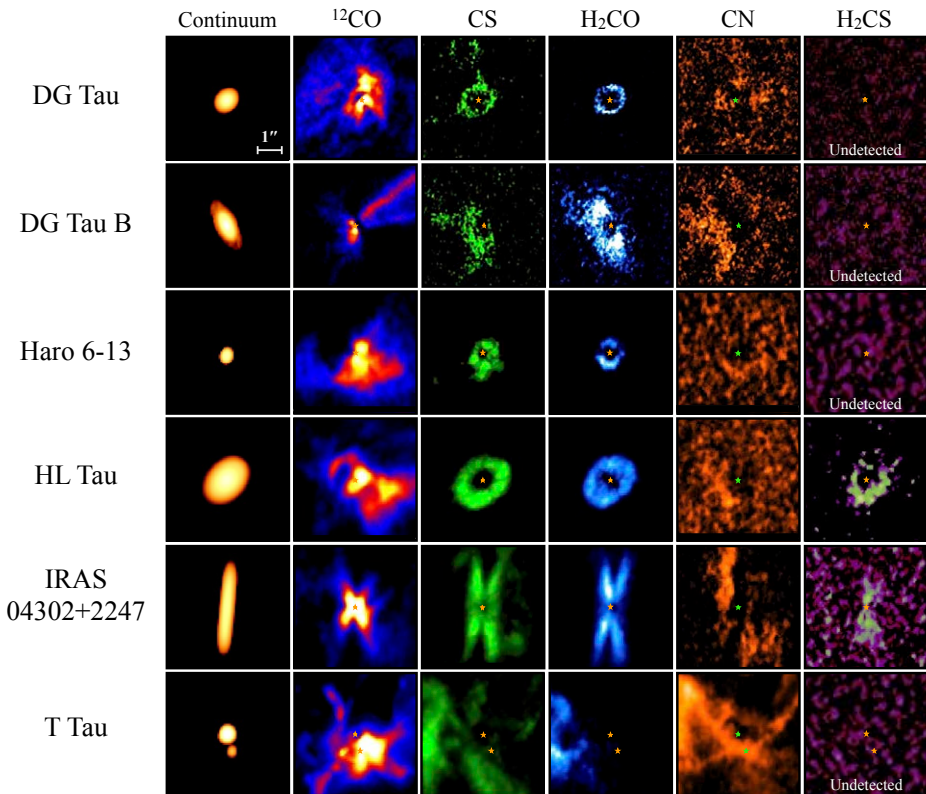


Figura 1. Raccolta di mappe dalla survey ALMA-DOT. Ogni riga è un diverso oggetto. Ogni colonna è una diversa componente tracciata: da sinistra a destra, polvere, monossido di carbonio, monossido di carbonio, formaldeide, cianuro e tioformaldeide. La stella è nel centro di ogni immagine. La barra orizzontale nel primo pannello indica una scala spaziale di 140 volte la distanza tra Terra e Sole.

Figure 1. Collection of maps from the ALMA-DOT survey. Each row is a different target and each column a different probed component. From left to right: dust, carbon monoxide, carbon monoxide, formaldehyde, cyanide, and thioformaldehyde. The star is at the center of each image. The horizontal bar in the first panel indicates a spatial scale of 140 times the distance between Earth and Sun.