

Claudia Toci¹, Daniele Galli²

Spaghetti spaziali in salsa magnetica

Space spaghetti in magnetic sauce

¹Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze, Via G. Sansone 1, I-50019 Sesto Fiorentino

²INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, I-50125 Firenze

Sommario. Le nubi di materia interstellare nelle quali avviene la nascita di nuove stelle sono molto più complesse di quanto si è creduto fino ad oggi. Mentre i dati raccolti dai telescopi da terra e dallo spazio evidenziano la struttura filamentare delle nubi cosmiche e la loro stretta relazione con il campo magnetico galattico, gli astronomi teorici cercano di spiegarne l'origine e le caratteristiche fisiche con modelli magnetoidrodinamici sempre più elaborati.

Parole chiave. Materia interstellare, campi magnetici galattici

Le nubi di materia interstellare nelle quali avviene la nascita di nuove stelle sono molto più complesse di quanto si è creduto fino ad oggi. Mentre i dati raccolti dai telescopi da terra e dallo spazio evidenziano la struttura filamentare delle nubi cosmiche e la loro stretta relazione con il campo magnetico galattico, gli astronomi teorici cercano di spiegarne l'origine e le caratteristiche fisiche con modelli magnetoidrodinamici sempre più elaborati.

Il ciclo evolutivo delle stelle presenta molte analogie con quello degli esseri viventi, nonostante, ovviamente, l'enorme differenza nei tempi che caratterizzano i

Abstract. Recent observations show that the internal constitution and dynamics of Galactic molecular clouds, the sites of star formation, are much more complex than previously thought. As observers realize that the interstellar medium of Galaxies is more spaghetti-like than cloud-like, theoreticians are required to explain several puzzling features observed in these cosmic structures with increasingly elaborate magnetohydrodynamic codes.

Keywords. Interstellar matter, Galactic magnetic fields

Recent observations show that the internal constitution and dynamics of Galactic molecular clouds, the sites of star formation, are much more complex than previously thought. As observers realize that the interstellar medium of Galaxies is more spaghetti-like than cloud-like, theoreticians are required to explain several puzzling features observed in these cosmic structures with increasingly elaborate magnetohydrodynamic codes.



due processi. Le nubi molecolari sono spesso denominate «la placenta delle stelle» poiché esse costituiscono la riserva di materia che permette lo sviluppo dell'embrione (protostella) e che poi viene disperso dopo la nascita della stella. Tuttavia la parola placenta, che in latino significa focaccia e in greco indica qualcosa di piatto e liscio, è un termine inappropriato per descrivere la struttura filamentare delle nubi molecolari come viene evidenziata dalle più recenti osservazioni.

Già da diversi anni è noto che le nubi di gas atomico diffuso (che costituiscono il cosiddetto *cold neutral medium*), studiate principalmente mediante la riga di assorbimento dell'idrogeno atomico a 21 cm, hanno una distribuzione spaziale molto complessa caratterizzata da strutture simili a fogli corrugati e nastri intrecciati. Ma solo da poco tempo, grazie alle spettacolari immagini ottenute dal satellite Herschel dell'Agenzia Spaziale Europea (lanciato nel 2009), è stato dimostrato con straordinaria evidenza che questa complessità morfologica caratterizza anche le dense nubi molecolari nelle quali avviene la formazione di nuove stelle. Ma non è tutto: grazie al satellite Planck (un'altra missione dell'Agenzia Spaziale Europea) è stato possibile confrontare la morfologia del campo magnetico galattico su grande scala nelle nubi molecolari (dedotta da misure di polarizzazione della polvere interstellare) con la distribuzione di materia nei filamenti, rivelando una strettissima corrispondenza tra le due componenti (Fig. 1). Perciò, nelle regioni di formazione stellare in cui finora gli astronomi ritenevano che la materia interstellare fosse distribuita in nubi con addensamenti locali sparsi, gli occhi infrarossi di Herschel e Planck hanno osservato intricati grovigli di filamenti simili a ciuffi di capelli o piatti di spaghetti: in breve, una struttura simile, su una

Astronomers have often compared the life cycle of stars to that of living beings. Despite the vast difference in timescales, the two processes present some analogies: for example, molecular clouds are to stars what the maternal placenta is to fetuses, a reservoir of nutrients to ensure the development of the embryo (protostar) to be disposed of after birth. However, this analogy now reveals a subtle flaw: while placenta is the Latin word for pancake, and in Greek indicates a smooth and flat object, astronomers are now confident that molecular clouds are neither smooth nor flat, but much more 'filamentary' and 'sponge-like' than previously thought.

It was already known that the diffuse, atomic gas (the so-called cold neutral medium), mostly observed through the HI 21-cm line absorption, had a complex spatial distribution, taking the shape of corrugated sheets or ribbons with overlapping knots. Now, thanks to the spectacular capabilities of the Herschel submillimeter Space Observatory, launched by the European Space Agency in 2009, it is well established that this complexity of shapes also extends to the dense molecular clouds from which stars form. And this is not all: thanks to the Planck satellite (another European Space Agency mission) it has been possible to compare the morphology of the Galactic large-scale magnetic field (deduced from the polarized emission of interstellar dust) with the distribution of matter in the filaments, revealing the close connection between the two components (Fig. 1).

In star-forming regions where astronomers previously pictured fluffy clouds, Herschel and Planck's infrared eyes have revealed intricate networks of intertwined filaments, tufts of hair, or

scala ridotta, alla «ragnatela cosmica» che caratterizza la distribuzione della materia oscura nell'Universo. Si pensa che questa complessità di forme rifletta una corrispondente complessità di flussi di materia interstellare, costituiti da moti turbolenti del gas e «stiramenti» del campo magnetico galattico, processi la cui interazione non è pienamente compresa da un punto di vista teorico.

Secondo il quadro teorico corrente, i filamenti che compongono una nube molecolare accumulano continuamente materia dall'ambiente circostante fino a raggiungere un valore critico della massa per unità di lunghezza. Oltre questo limite i filamenti diventano instabili (un processo chiamato *instabilità varicosa*, ancora una volta in analogia con un processo fisiologico) e frammentano la nu-

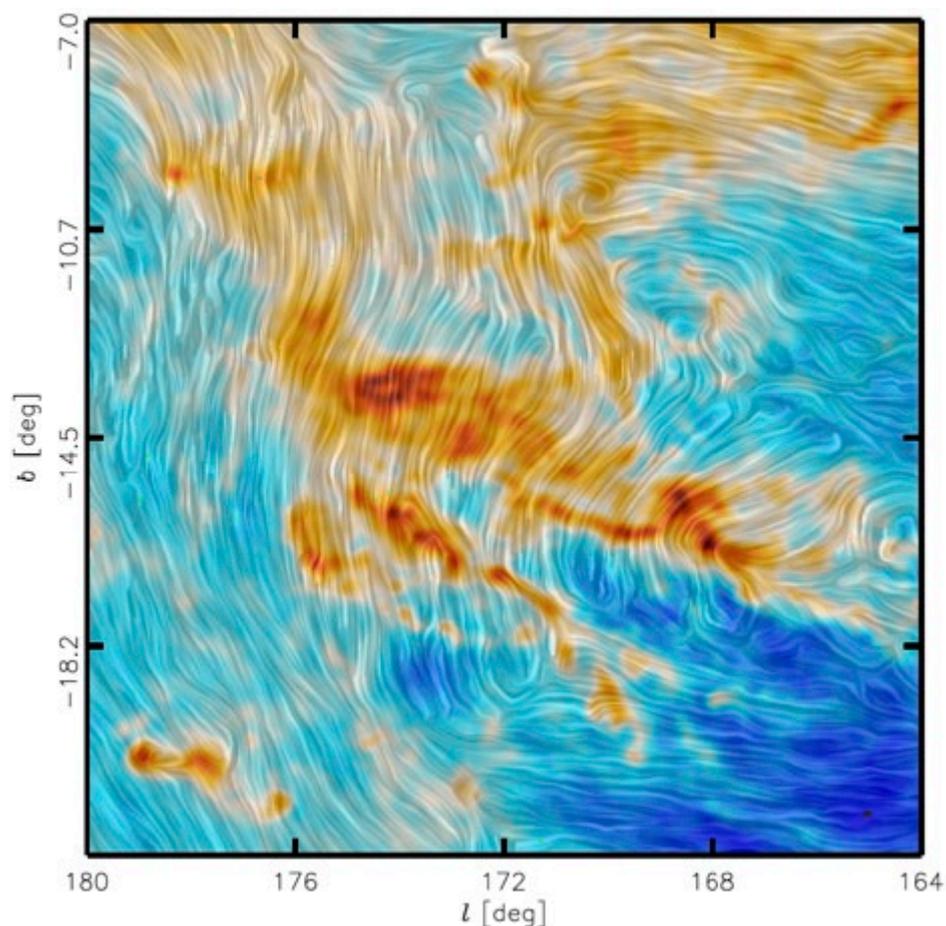


Figura 1. Mappa del campo magnetico nella nube molecolare del Toro ottenuta dal satellite Planck. La scala di colori mostra la densità di materia per unità di area, distribuita in filamenti (colore rosso) e striature (colore azzurro); il 'panneggio' in grigio evidenzia le linee di forza del campo magnetico (Planck Collaboration).
Figure 1. Magnetic field and column density measured by Planck towards the Taurus Molecular Cloud. The colors represent column density. The 'drapery' pattern indicates the orientation of magnetic field lines (Planck Collaboration).

be producendo una serie di condensazioni approssimativamente equidistanti. A loro volta, le condensazioni così formate possono diventare gravitazionalmente instabili, e formare una stella, un sistema multiplo o un ammasso di stelle. Questa sequenza di eventi, che gli astronomi hanno cercato da tempo di osservare in tutte le sue fasi, trasforma in alcuni milioni di anni il filamento iniziale in una 'collana' di stelle, che richiama alla mente un filo di perle. Le attuali osservazioni (ottenute sia con il satellite Herschel sia con radiotelescopi da terra) hanno portato molti elementi a favore di questo quadro teorico, ma allo stesso tempo hanno messo in evidenza alcuni aspetti inattesi e sorprendenti. Per prima cosa, tutte le nubi filamentari osservate da Herschel sembrano avere lo stesso spessore (circa 0.03 pc), nonostante la densità e altre caratteristiche fisiche possano variare anche per più di due ordini di grandezza da un filamento all'altro; in secondo luogo, i filamenti stessi non sono le unità fondamentali delle nubi molecolari, ma sono a loro volta costituiti da 'fili' o 'fibre' simili tra loro per cinematica e composizione chimica, strettamente attorcigliati come gli spaghetti che compongono una corda. Entrambe queste caratteristiche sono al momento inspiegate.

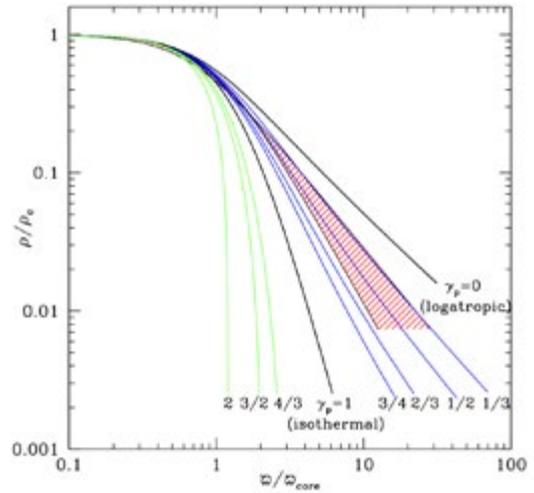
Un primo passo nello studio e modellizzazione delle nubi filamentari è stato intrapreso da una dottoranda dell'Università di Firenze, Claudia Toci, che ha pubblicato in due articoli scientifici i risultati della sua tesi di laurea svolta sotto la supervisione di Daniele Galli dell'Osservatorio di Arcetri. Il primo lavoro dimostra l'inadeguatezza dei modelli tradizionali per le nubi filamentari, che generalmente assumono un'equazione di stato isoterma e non sono in grado di riprodurre i profili radiali di densità osservati da Herschel. Secondo questi modelli, i dati posso-

plates of spaghetti: in short, a structure replicating on a small scale the web-like cosmic fabric of the Universe. It is believed that such a complexity of shapes reflects a complexity of flows: turbulent shear motions and magnetic stretching are plausibly at play, but both processes are poorly understood, let alone their interplay. If turbulent motions are responsible for the filamentary structure of the cosmic clouds, the nature of these turbulent motions is profoundly affected by the compressibility and magnetization of the interstellar medium, a different situation from the familiar turbulence of ship wakes or boiling water.

According to the current picture, when the individual filaments composing a molecular cloud accumulate enough mass per unit length (by accretion from the ambient medium), they become gravitationally unstable and fragment into equally-spaced condensations called cores. Again in analogy with human physiology, the process is called «varicose» instability. Each core is then subject to further fragmentation and collapse, ultimately forming one or more stars. In a few million years, this sequence of events leads to the transformation of the filament into a necklace of stars like beads on a string, a theoretical scenario that observers have been trying to test for a long time. Recent observational results (by the Herschel Space Observatory and ground-based radio telescopes) have provided additional support for this picture, but have also uncovered several new puzzles. Firstly, the sample of filamentary clouds observed by Herschel appear to be characterized by identical width, of the order of 0.03 pc, despite a variation of the peak density and other physical characteristics of over two orders of magnitude. Secondly, the filaments appear to be made of many thread-like subfilaments called «fibers» with

Figura 2. Profili di densità radiale (normalizzati alla densità centrale) di filamenti cilindrici autogravitanti con esponente politropico 2, 3/2, 4/3 (curve verdi) e 1/3, 1/2, 2/3, 3/4 (curve blu). Le curve a tratto spesso mostrano i profili di densità di modelli con equazione di stato isoterma e logotropica (con pressione proporzionale rispettivamente alla densità e al logaritmo della densità). L'area tratteggiata corrisponde ai profili di densità osservati nei filamenti della regione di formazione stellare denominata IC5146.

Figure 2. Radial density profiles (normalized to the central density) of self-gravitating cylinders with polytropic exponent 2, 3/2, 4/3 (green curves) and 1/3, 1/2, 2/3 and 3/4 (blue curves). The thick solid lines show the density profiles of a model with an isothermal and a logotropic equation of state (with pressure proportional to density and logarithm of the density, respectively). The hatched area corresponds to the observed mean density profile of filaments in the star-forming region IC5146.



no essere ben spiegati assumendo un'equazione di stato più 'soft', come quella che descrive la pressione di una sovrapposizione di onde di Alfvén a controbilanciare l'autogravità del filamento (Fig. 2). Questi modelli politropici sono stati generalizzati nel successivo lavoro per includere gli effetti di un campo magnetico elicoidale avvolto lungo il filamento. La tensione magnetica risultante produce una forza di 'strizzamento' che altera il profilo radiale di densità promuovendo allo stesso tempo l'instabilità varicosa che spezza il filamento in frammenti equidistanti.

similar kinematics and chemical composition, woven into tight bundles. The physical origin of both characteristics is currently unknown.

A first step towards an understanding of the physical properties of filamentary clouds was undertaken by a student of the University of Florence, Claudia Toci (supervised by D. Galli of the INAF- Arcetri Astrophysical Observatory), who summarized the results of her master thesis in two recently-published papers. The first study demonstrated the inadequacy of traditional models for self-gravitating filaments based on a simple isothermal equation of state, which fail to reproduce the observed radial density profiles (Fig. 2). The data appear to demand a 'softer' equation of state, such as could be expected for a structure supported by a superposition of Alfvén waves, rather than by thermal pressure. These polytropic models were further developed in a follow-up study in which the effects of a large-scale helical magnetic field were included. The hoop stresses associated with the latter may result in significant squeezing of the filament, and promote the onset of fierce varicose instabilities that eventually break the filament into several sub-pieces.

Despite their extreme idealization, these studies clearly indicate that the Galactic magnetic field is a crucial and powerful agent, able to forge and shape the dense gas of molecular clouds. The telescopes of the ALMA submillimeter array in the Chilean Andes, now in full operation, will soon be able to provide new and valuable elements for a theoretical and observational framework that is becoming increasingly more complex as data are collected and analyzed.

Nonostante l'estrema idealizzazione, questi due studi preliminari indicano chiaramente che il campo magnetico galattico è uno dei principali agenti (anche se probabilmente non l'unico) che controllano la morfologia e la dinamica della materia interstellare. I telescopi dell'array submillimetrico ALMA nelle Ande cilene, da poco inaugurati, saranno presto in grado di aggiungere nuovi e preziosi elementi a un quadro osservativo e teorico che sembra farsi sempre più complesso.

Bibliografia

Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2015, arXiv:1502.04123
Toci, C., Galli, D. 2015, MNRAS, 446, 2110
Toci, C., Galli, D. 2015, MNRAS, 446, 2118

Claudia Toci. Studentessa di dottorato presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze. Oltre allo studio della formazione stellare si occupa di divulgazione della Fisica e dell'Astronomia.

Daniele Galli. Astronomo all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, si occupa principalmente di formazione stellare e della magnetoidrodinamica della materia interstellare.

Bibliography

Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2015, arXiv:1502.04123
Toci, C., Galli, D. 2015, MNRAS, 446, 2110
Toci, C., Galli, D. 2015, MNRAS, 446, 2118
Claudia Toci. PhD student at the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence. Her main research interest is star formation. She is also involved in activities for school-children and young people.
Daniele Galli. Astronomer at the Arcetri Astrophysical Observatory. He works on the physics of the interstellar medium and the role of magnetic fields in the process of star formation.