

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/24302> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Verdolini, Silvia

Title: Modeling interstellar bubbles : near and far

Issue Date: 2014-02-20

Modelli di bolle interstellari: vicino e lontano

La vita delle stelle

Le stelle sono gli elementi fondanti dell'universo. Contribuiscono alla maggior parte della luce che vediamo nel cielo stellato e sono raggruppate in galassie. Una galassia, come la nostra Via Lattea, contiene tipicamente cento miliardi di stelle e nell'universo sono presenti cento miliardi di galassie.

Le stelle sono sfere di gas tenuto insieme dalla forza di gravità. Ciascuna stella ha un proprio ciclo di vita: nasce ed evolve fino a che non arriva alla sua morte. Per la maggior parte della loro vita le stelle bruciano idrogeno nel loro interno per produrre energia che viene emessa come luce. La stessa luce che ci permette di vedere le stelle nel cielo stellato o che durante il giorno illumina e permette la vita sulla Terra. Gli astronomi classificano le stelle a seconda della loro massa, in quanto essa determina molte delle loro proprietà, come la durata della loro vita e l'evoluzione. Vengono raggruppate in stelle di piccola massa, più conosciute, e di grande massa, sulle quali abbiamo ancora molto da scoprire.

Stelle di piccola massa, come il nostro Sole, hanno una vita lunga e stabile che dura più di 10 miliardi di anni. Al contrario, le stelle massive, nonostante abbiano tanto più carburante da bruciare (possono avere da decine fino a centinaia di volte la massa del Sole) riescono a raggiungere un'età molto inferiore. Questo succede perché emettono molta più luce rispetto alle stelle di piccola massa bruciando il loro carburante energetico molto più velocemente. Il risultato è una vita di 'solo' qualche milione di anni.

Le stelle di grande massa ionizzano il gas presente nei loro dintorni creando un plasma che emette a lunghezze d'onda ultraviolette, infrarosso e radio. Inoltre durante la loro vita arricchiscono il mezzo interstellare (il materiale presente fra le stelle in una galassia) rilasciando materiale nei loro dintorni, prima attraverso forti venti stellari e alla fine del loro ciclo di vita con esplosioni di supernove. Le stelle di grandi massa e l'impatto che esse hanno nell'ambiente che le circonda sono il soggetto di questa tesi.

La nascita di una stella

Le stelle si formano da una nube tiepida di gas, chiamata *nube molecolare*, che consiste principalmente di idrogeno e una piccola quantità di molecole. Queste nubi molecolari sono supportate da forze termiche, di turbolenza o magnetiche che agiscono contro la forza di gravità, mantenendo la nube in uno stato di equilibrio. Quando questo equilibrio

viene a mancare a favore della gravità, si creano delle instabilità che innescano il collasso gravitazionale della nube.

Questo processo genera un nucleo di materia denso, dove la stella verrà a formarsi, che continua ad attrarre parte del gas circostante. Il restante materiale si distribuisce in un disco o viene espulso attraverso getti di gas perpendicolari a ciascuna faccia del disco. Una volta che il nucleo della stella ha raggiunto la densità necessaria ad iniziare la fusione dell'idrogeno nel suo centro, una nuova stella si è formata.

Questo scenario descrive gli stadi iniziali di evoluzione delle stelle di piccola massa, ma non è ancora chiaro se la stessa sequenza di eventi si applichi anche alle stelle di grande massa. A causa della loro breve vita e alla loro presenza in minor numero sono infatti più difficili da osservare e quindi da studiare e capire. Inoltre, quando nascono, si trovano al centro di una nube molto densa che non permette alla luce emessa dalla stella di passare, celandole alla nostra vista.

Regioni H II e bolle interstellari

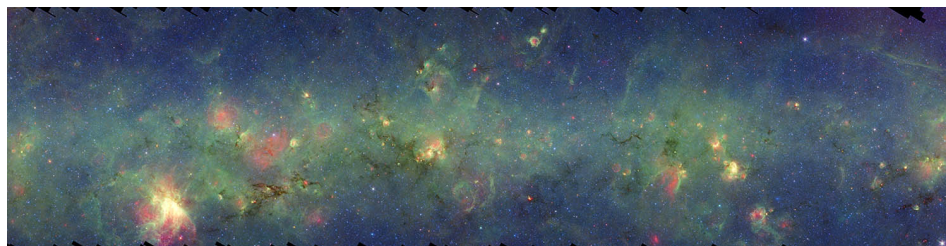


Figura 1 – Immagine infrarossa di polvere e radiazione stellare dell'interno della Via Lattea. In blu PAH (IRAC 3.6 μm), in verde PAH (IRAC 8 μm), e in rosso grani di polvere caldi (MIPSGAL 24 μm). Crediti: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Wisconsin.

Nonostante queste difficoltà, esiste uno stadio osservabile nella formazione delle stelle di grande massa, ovvero quando la stella nascente emette una frazione considerevole di fotoni ultravioletti ad alte energie capace di ionizzare una parte del gas circostante. Gli astronomi chiamano questo oggetto regione H II (pronunciato *regioneacca secondo*). Queste regioni sono composte principalmente da idrogeno, pertanto il nome (il termine H II si riferisce all'idrogeno ionizzato: un atomo di idrogeno senza un elettrone), con una temperatura di circa 10,000 K. La luce emessa dalle regioni H II fornisce un indizio diretto sull'ambiente in cui stelle di grande massa si formano.

Oltre a ionizzare l'idrogeno (e altri elementi) nei loro dintorni, la radiazione ultravioletta proveniente dalla stella eccita gli idrocarburi policiclici aromatici (PAH, dall'acronimo inglese) rendendoli fluorescenti nell'infrarosso. I PAH sono molecole composte da atomi di carbonio legati in anelli esagonali organizzati in strutture a nido d'ape e circondati da atomi di idrogeno. La stessa radiazione scalda anche i grani di polvere (minuscole pezzi di particelle solide composte principalmente da carbonio, silicio e ossigeno) che a

loro volta irradiano l'energia assorbita a lunghezze d'onda maggiore. Entrambi PAH e polvere si trovano nel mezzo interstellare insieme all'idrogeno.

I risultati di questi processi fisici si possono ammirare nelle spettacolari immagini del piano galattico fatte dallo *Spitzer Space Telescope* (vedi Figura 1). Una caratteristica di rilievo è la complessità e varietà delle strutture presenti attorno alle stelle di grande massa. Mentre alcune regioni si presentano spazialmente estese e con morfologie complesse, altre sono più piccole con forme più regolari. Le regioni H II di cui parlavamo prima sono contenute dentro queste strutture tridimensionali che prendono il nome di bolle essendo vuote al centro. Grazie al *Milky Way Project*, un'iniziativa di partecipazione del pubblico nella ricerca scientifica, le bolle conosciute nell'infrarosso sono arrivate a circa 5100, un numero dieci volte maggiore rispetto a quelle precedentemente conosciute dagli astronomi.

Espansione di regioni H II come palloncini

Una delle domande a cui si cerca di dare una risposta in questa tesi riguarda l'evoluzione nel tempo delle regioni H II. L'espansione di una regione H II è simile al gonfiarsi di un palloncino: più aria si soffia nel palloncino, più esso cresce. In termini fisici, la pressione all'interno del palloncino aumenta rispetto all'ambiente. In maniera simile, una stella, aumentando la pressione nei suoi dintorni, accumula il gas circostante in un guscio che si espande (la bolla).

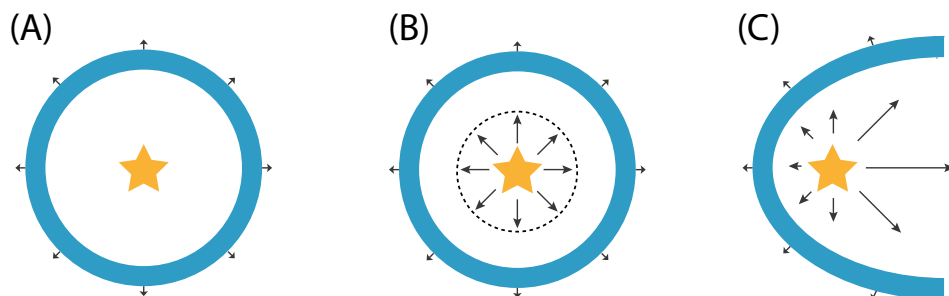


Figura 2 – Rappresentazione schematica di regioni H II: (A) dovute ad una sovrappressione del gas ionizzato; (B) dovute ai venti stellari; e (C) in presenza di un gradiente di densità nel mezzo (chiamato modello a flusso di champagne). Crediti: Bram Ochsendorf.

L'origine di tale incremento di pressione intorno alla stella è ancora in discussione. Secondo alcuni è la conseguenza diretta della sola radiazione della stella, mentre altri dicono che sia dovuto ai venti stellari. In Figura 2 vengono mostrate, in maniera schematica, le possibili soluzioni proposte negli anni per spiegare la fisica delle regioni H II. Se il gas che circonda la stella è omogeneo, la forma della regione H II risulterà sferica; come nei casi (A) e (B) di Figura 2. (A) mostra il caso più semplice in cui la stella ionizza il mezzo attorno ad essa. Il gas ionizzato, essendo a temperature e pressione maggiore rispetto all'ambiente circostante, si espande. Tale espansione avviene sotto forma di un

fronte d'onda che spazza il materiale circostante. (B) mostra la struttura di una regione H II in presenza di un vento stellare. La velocità del vento è circa 2000 km s^{-1} . Una velocità così alta crea un secondo fronte d'onda all'interno della regione H II. (C) illustra il caso in cui il mezzo interstellare ha un gradiente di densità (la densità è maggiore in una direzione rispetto alla stella e diminuisce gradualmente verso l'altra). In questo caso, la regione H II non è più sferica ma ha una forma simile ad una cometa (tipo paraboloide). Il gas all'interno della regione H II viene rilasciato verso l'apertura, dando il nome modello a flusso di champagne.

Regioni H II UltraCompatte

Il primo stadio di evoluzione di una regione H II viene chiamato UltraCompatto. Il Capitolo 2 di questa tesi si basa su uno studio di questi oggetti. Analizzando in dettaglio la regione H II G29.96-0.02, creata da un vento stellare esaminando la mancanza di emissione di raggi X. Osservazioni dell'emissione di raggi X e dello spettro della stella vengono usate come parametri per la creazione di modelli idrodinamici con lo scopo di capire la fisica di queste regioni. Questi modelli includono gli effetti dovuti alla foto-ionizzazione del mezzo interstellare, al vento stellare, ai processi radiativi, all'iniezione di massa e all'onda d'urto dovuta al movimento della stella.

I nostri risultati mostrano che i modelli a flusso di champagne sono i migliori per spiegare la morfologia e la dinamica del gas. Inoltre, l'iniezione di massa nel gas caldo è necessaria per raffreddare il gas fino alle temperature osservate nei raggi X.

Regioni H II polverose

Nel Capitolo 3 presentiamo una classe di regioni H II che si formano secondo il modello a flusso di champagne. Il nostro scopo è spiegare la forma ad arco dell'emissione dei grani di polvere osservata all'interno delle regioni H II. Proponiamo che questa struttura osservata a $24 \mu\text{m}$ sia il risultato dell'interazione fra la pressione di radiazione dalla stella con la polvere contenuta nel flusso di gas ionizzato, chiamiamo questa struttura *onda di polvere*. Mostriamo che nel caso del modello a flusso di champagne il gas ionizzato raggiunge velocità grandi abbastanza per creare le condizioni adatte alla formazione di una *onda di polvere*. Tali modelli riescono anche a riprodurre la varietà di morfologie di regioni H II osservate e i tipici profili di emissione.

Da stelle a galassie

Le galassie sono composte da miliardi di stelle. Esistono due tipi principali di galassie, ellittiche e a spirale. In questa tesi prendiamo in analisi le galassie a spirale in quanto formano continuamente stelle, per questo vengono chiamate in inglese galassie *star-forming*. Siccome le stelle di grande massa hanno una vita breve, è importante che siano in formazione continua in una galassia per poterle osservare e studiare. La Figura 3 mostra M51, una tipica galassia a spirale. È composta da un centro (detto *bulge*) e da un disco in cui

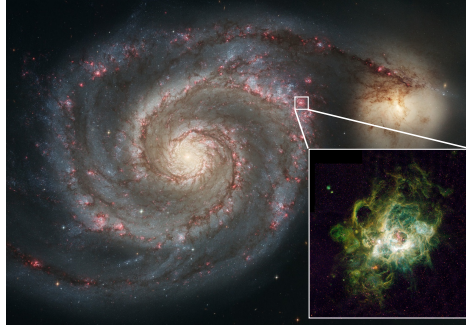


Figura 3 – Composizione artistica della relazione fra una galassia a spirale e una regione H II. La galassia a spirale sullo sfondo è M51, le zone in rosso sono regioni H II. L'immagine piccola è NGC 604, una regione H II gigante in M33.

si estendono i bracci di spirale. Lungo i bracci di spirale ci sono numerose stelle in formazione e molte regioni H II. Nella stessa figura c'è anche NGC 604, una regione H II gigante in M33, un'altra galassia più vicina a noi. Lo zoom della figura non è reale, ma dà un'idea della relazione fra una galassia a spirale e una regione H II e delle loro grandezze. Le regioni H II sono responsabili della maggior parte della luce proveniente da galassie *star-forming*. Essendo la maggior parte delle galassie molto lontane da noi è impossibile risolverle come in Figura 3 e appaiono quindi come delle macchie di luce. Per capire le caratteristiche principali delle galassie è importante studiare regioni H II nella nostra galassia e in galassie vicine, estrapolando le informazioni trovate localmente ai casi lontani.

Nel **Capitolo 4** prendiamo in esame due regioni H II in NGC 6822, una galassia vicina. Le osservazioni e i modelli di queste regioni possono essere utilizzate per capire milioni di galassie nell'universo. Le informazioni che deriviamo sono delle proprietà fisiche, come l'età, la dimensione e la densità dell'ambiente. Questi parametri sono importanti per capire l'interazione delle stelle di grande massa con il loro ambiente, i meccanismi di espansione del gas ionizzato e il collegamento fra galassie *star-forming* e regioni H II.

Galassie lontane

Poiché la luce viaggia a una velocità costante, la luce proveniente da galassie molto lontane impiega molto tempo a raggiungerci. Osservare queste galassie lontane significa quindi guardare indietro nel tempo e vedere la storia dell'universo. È così che gli astronomi studiano la formazione ed evoluzione delle galassie, un argomento molto caro agli scienziati. È quindi cruciale per spiegare l'evoluzione delle galassie capire le proprietà delle galassie lontane e paragonarle a quelle vicine individuando somiglianze e differenze.

Nei **Capitoli 5 and 6** cerchiamo di studiare queste somiglianze e differenze usando dei principi e dei modelli semplici. I rapporti di emissione di linee, quali $[O III]/H\beta$ and $[N II]/H\alpha$, vengono adottati in maniera empirica per distinguere diversi meccanismi

di ionizzazione nelle galassie. Tuttavia, per avere un'interpretazione dettagliata di questi diagnostici sono necessari dei calcoli che tengano in considerazione la struttura interna delle regioni H II. I risultati cambiano a seconda delle assunzioni fatte sull'importanza relativa della pressione di radiazione e dei venti stellari all'interno delle regioni H II. Abbiamo, quindi, costruito dei modelli di regioni H II includendo ed escludendo la pressione di radiazione e i venti stellari. Inoltre, utilizzando un codice che genera popolazioni sintetiche di regioni H II abbiamo creato delle galassie che possono essere confrontate con le osservazioni.

Da questa analisi possiamo concludere che la scelta dei parametri fisici ha un ruolo principale nel determinare il valore finale dei rapporti delle linee di emissione.

Un passo più vicini per risolvere il grande puzzle

Questa tesi, come ogni altro lavoro scientifico, non ha alcuna aspettativa di risolvere tutte le grandi domande ancora irrisolte in astronomia. Aspettando che arrivi il prossimo Galileo, Newton o Einstein a rivoluzionare il mondo della fisica, un semplice astronomo, come me, deve essere in grado di dividere i grandi problemi in piccoli lavori. È comunque importante avere in mente il grande puzzle. Ecco le grandi domande dell'astronomia moderna collegate a questo lavoro: come si formano le galassie e come si sviluppano fino a diventare le galassie che osserviamo oggi? Come si formano le stelle nelle galassie? Cosa ne determina la loro massa?

Questo lavoro mira, in maniera più specifica, a capire la formazione di stelle di grande massa e la loro influenza sull'ambiente circostante durante l'evoluzione dell'universo. Il mio piccolo contributo consiste nello studio della storia della formazione stellare e nel modo in cui stelle di grande massa determinano l'evoluzione delle galassie. In particolare, ho analizzato osservazioni ottiche di galassie *star-forming* derivando le condizioni fisiche del gas nelle regioni H II associate con stelle di grande massa. Inoltre, ho simulato numericamente l'espansione dinamica delle regioni H II dovuta a venti stellari e alla sovra-pressione del gas ionizzato. Infine ho paragonato varie teorie con osservazioni di regioni H II e bolle interstellari per determinare quale sia più appropriata a descrivere questi oggetti.