

# ALMA

## Una nuova finestra sull'Universo

di Jan Brand

ALMA Regional Centre Italiano  
INAF-Istituto di Radioastronomia,  
Bologna

**È** stato inaugurato il 13 marzo, il più grande e – ad un costo stimato di 1.4 miliardi di dollari US – il più costoso telescopio terrestre mai costruito: l'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Posizionato sul ventoso altopiano di Chajnantor, ad un'altitudine di 5.000 m nel deserto di Atacama nel nord del Cile, uno dei luoghi più aridi del pianeta dove l'aria è così rarefatta che sono necessarie scorte di ossigeno per operare in sicurezza, ALMA è una testimonianza della tenacia e dello spirito di collaborazione degli astronomi e promette spettacolari passi avanti in tutti i campi della ricerca astronomica. È rivoluzionario sotto tutti gli aspetti: le dimensioni del progetto, le antenne, i ricevitori e l'elettronica all'avanguardia. E tante sono le aspettative che, con la sua attività, contribuisca a migliorare la nostra comprensione dell'Universo.

### Cos'è ALMA

ALMA, che opera a lunghezze d'onda (sub)millimetriche (0.3 – 9.6 mm, una volta completato), non è un telescopio nell'accezione tradizionale del termine, ovvero di un singolo elemento che raccoglie la radiazione (i fotoni) emessa da corpi celesti, ma un insieme ("array") di 66 antenne paraboliche, che grazie alle tecniche dell'*interferometria*, operano assieme come se fossero un unico strumento.

ALMA consiste di un "array principale" di cinquanta antenne da 12 m di diametro e di un "array compatto", chiamato appunto "Atacama Compact Array" (ACA), costituito da dodici antenne da 7 m di diametro e quattro da 12 m (Figura 1).

Le sedici antenne dell'ACA sono preservate in una configurazione compatta (con distanze massime tra le antenne di circa 250 m), mentre le antenne dell'array principale possono essere spostate tra le circa 200 piattaforme disseminate nell'ALMA Operations Site (AOS) sull'altopiano di Chajnantor, a costituire una grande varietà di configurazioni, con antenne separate anche di 16 km tra loro. Quando la costruzione sarà completata, ogni antenna sarà equipaggiata con

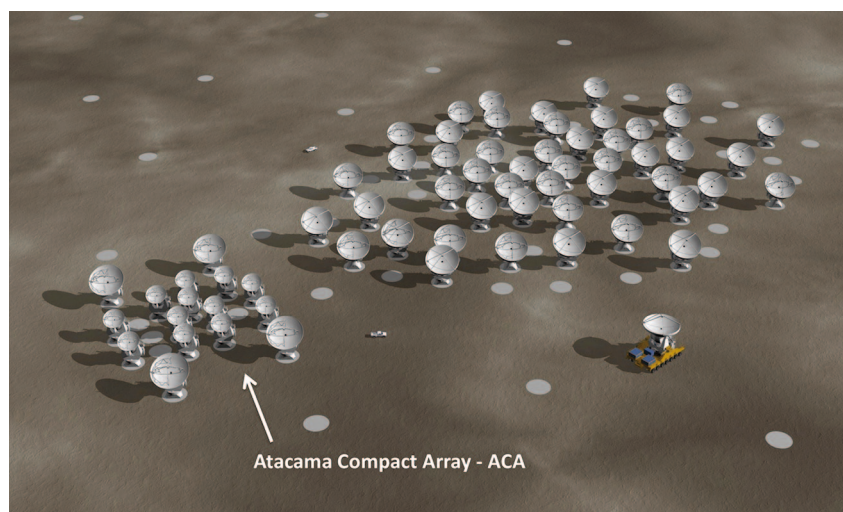


Figura 1 - Simulazione del main array di ALMA con le antenne da 12 m (in configurazione compatta) e dell'ACA  
© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

photo © ESO/S. Gulsard





dieci ricevitori operanti in differenti bande di frequenza, in corrispondenza con alcune delle finestre spettrali in cui l'atmosfera terrestre è trasparente alla radiazione proveniente dallo spazio. La tabella riportata di seguito presenta un sommario delle capacità di ALMA utili ai fini scientifici.

**Antenne: risoluzione e sensibilità**

Sia il grande numero di antenne che la possibilità di posizionarle su un ampio intervallo di distanze fanno di ALMA uno strumento potente in termini di potere risolutivo (la capacità di distinguere i dettagli degli oggetti osservati) e di sensibilità (la capacità di raccogliere fotoni). Per un singolo telescopio la risoluzione è proporzionale al rapporto tra la lunghezza d'onda in cui opera e il diametro del disco o dello specchio.

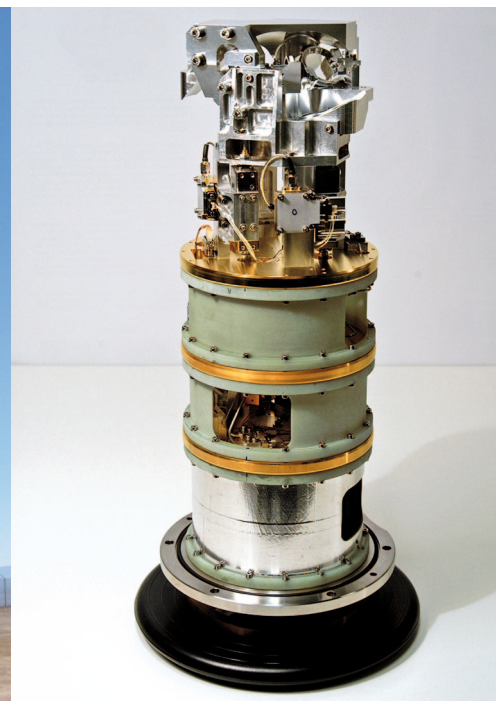
Ad esempio, un'antenna da 12 m di ALMA ha risoluzione di circa 20 secondi d'arco alla lunghezza d'onda di 1 mm. Un telescopio come il Telescopio Nazionale Galileo (TNG) a La Palma, con un diametro di 3,6 m, operante nel vicino infrarosso (circa 2 µm), ha una risoluzione di 0,14 sec. d'arco. Per ottenere un simile valore alle frequenze in cui opera ALMA sarebbe necessaria un'antenna

dal diametro di 2 km! Chiaramente, costruire una superficie riflettente di simili dimensioni non è realistico. Questo problema può essere aggirato costruendo un array di molte antenne di piccole dimensioni. Combinando i segnali delle singole antenne è possibile riprodurre le capacità di una singola antenna di diametro pari alla massima distanza tra le antenne.

La risoluzione di un tale telescopio detto "interferometro" non dipende dal diametro delle singole antenne, ma solo dalla distanza (*baseline*) tra esse. Pertanto, nella sua configurazione più compatta (con *baseline* massima di 200 m) ALMA raggiunge la risoluzione di 1 sec. d'arco a 1 mm di lunghezza d'onda; nella sua più larga configurazione (con *baseline* massima di 16 km) ALMA raggiunge la risoluzione di 13 milli-sec. d'arco. Osservare a lunghezze d'onda più o meno lunghe può rispettivamente

| Banda          | Frequenza (GHz) | Lunghezza d'onda (mm) | Risoluzione Angolare (sec.d'arco) | Struttura massima (sec.d'arco) |
|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 <sup>a</sup> | 31.3-45         | 6.7-9.6               | 0.10-7.9                          | 93                             |
| 2 <sup>a</sup> | 67-90           | 3.3-4.5               | 0.05-3.8                          | 53                             |
| 3              | 84-116          | 2.6-3.6               | 0.04-3.0                          | 37                             |
| 4              | 125-163         | 1.8-2.4               | 0.03-2.1                          | 32                             |
| 5              | 163-211         | 1.4-1.8               | 0.02-1.6                          | 23                             |
| 6              | 211-275         | 1.1-1.4               | 0.015-1.24                        | 18                             |
| 7              | 275-373         | 0.8-1.1               | 0.012-0.93                        | 12                             |
| 8              | 385-500         | 0.6-0.8               | 0.008-0.68                        | 9                              |
| 9              | 602-720         | 0.4-0.5               | 0.006-0.45                        | 6                              |
| 10             | 787-950         | 0.3-0.4               | 0.004-0.35                        | 5                              |

Parametri fondamentali dell'array principale di ALMA. La risoluzione angolare è data per le configurazioni più compatta (*baseline* massima 200 m) e più estesa (*baseline* massima 16 km) dell'array, per la frequenza centrale di ogni banda. L'ultima colonna fornisce la massima estensione approssimativa di una struttura visibile in ogni banda. <sup>a</sup> da realizzare in futuro



peggiore o migliorare la risoluzione. Scegliendo la lunghezza d'onda e la configurazione dell'array, gli osservatori possono studiare i propri obiettivi scientifici su un ampio intervallo di scale angolari. Quanti fotoni un interferometro possa raccogliere è direttamente proporzionale alla superficie di raccolta totale. Quindi, più antenne sono nell'array, più fotoni sono raccolti e più alta è la sensibilità raggiungibile.

Grazie al grande numero di antenne, ALMA ha una sensibilità così alta da poter osservare oggetti molto più deboli a parità di tempo, o gli stessi oggetti in meno tempo, rispetto agli altri telescopi esistenti dello stesso tipo. Una caratteristica degli interferometri è che le scale angolari più ampie osservabili

dipendono dalla *più breve* distanza tra le antenne. A causa del fatto che le antenne non possono essere collocate infinitamente vicine tra loro (la minima distanza per antenne di 12 m di diametro è di circa 15 m), l'emissione su scale angolari più grandi di quella corrispondente alla minima *baseline* è filtrata. Le antenne più piccole dell'ACA possono avvicinarsi di più rispetto a quelle dell'array principale e permettono quindi di osservare oggetti astronomici più estesi. In aggiunta, le quattro antenne da 12 m di diametro dell'ACA possono indipendentemente misurare la brillantezza assoluta degli oggetti operando come antenne singole (informazione che un interferometro non può raccogliere).

### In cima alle Ande

Affinché ALMA possa operare opportunamente, i segnali (ovvero ampiezza e fase dell'onda elettromagnetica) ricevuti da ciascuna antenna devono essere tra loro combinati ("correlati") in modo che possano arrivare ad un computer (il "correlatore") con la medesima fase. Questo richiede di

conoscere con estrema accuratezza la lunghezza del cammino che il fronte d'onda percorre tra l'antenna e il computer dove avviene la combinazione dei segnali. Ciò è tutt'altro che semplice, ed è complicato dal fatto che il fronte d'onda può essere distorto dal vapore acqueo nell'atmosfera, causando un ritardo nella trasmissione del segnale. Il ritardo è diverso da un'antenna all'altra a causa della distribuzione non uniforme del vapore nell'atmosfera e alla sua variabilità nel tempo. Per poter efficacemente correlare i segnali è necessario correggere in tempo reale tali ritardi misurando, per mezzo di radiometri collocati in ciascuna antenna, il quantitativo di vapore acqueo sopra ad ogni antenna.

Per minimizzare gli effetti dell'atmosfera, le antenne sono collocate ad alta quota: all'AOS, ALMA si trova al di sopra del 40% dell'atmosfera, e sopra a più del 95% del vapore acqueo, se confrontato con un sito a livello del mare. Un simile ambiente non è favorevole per gli esseri umani, e pertanto ALMA è controllato in

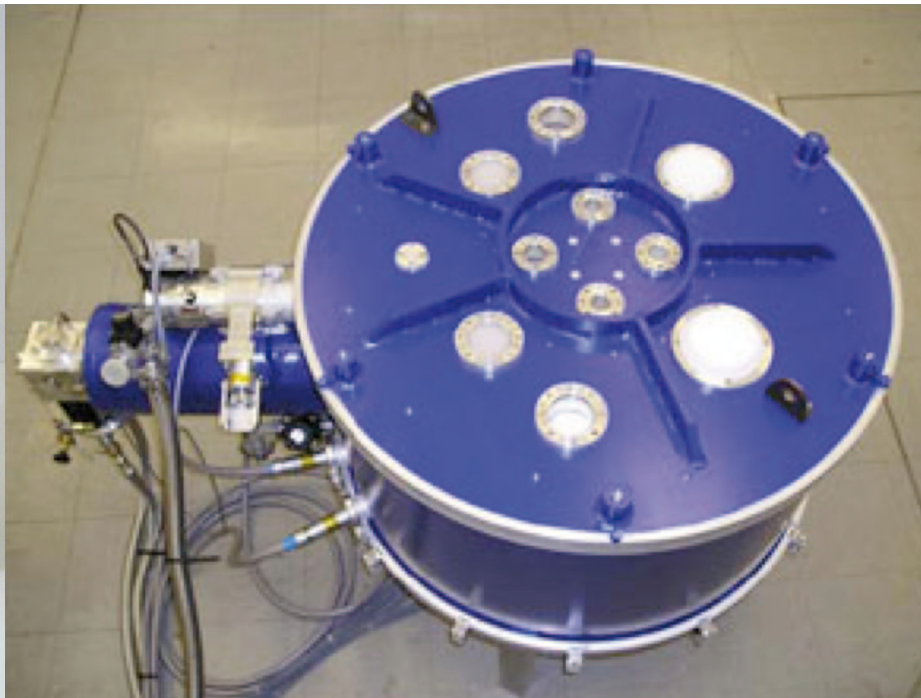
*Sopra, da sinistra*

Figura 2- Veicolo per il trasporto delle antenne. © ESO/P. Martinez

Figura 3a – la cartuccia del ricevitore di banda 9. © ESO/NOVA

Figura 3b– Criostato che contiene le 10 cartucce dei ricevitori. © STFC Technology.





remoto dall'Operations Support Facility (OSF) a 2.900 m di quota. Se le antenne necessitano di manutenzione vengono trasportate all'OSF. Le antenne da 100 tonnellate vengono spostate per mezzo di speciali veicoli disegnati appositamente (Figura 2).

### Una collaborazione globale

È chiaro che un progetto di tale entità non può essere condotto da una sola nazione, o da un solo organismo internazionale come ESO<sup>1</sup>. Infatti ALMA è risultato di una partnership tra Europa (attraverso ESO), Nord America (USA e Canada) e Est Asia (Giappone e Taiwan), in collaborazione col Cile che fornisce il sito del telescopio. Il progetto (costruzione, operazione, sviluppo) è coordinato dal Joint ALMA Observatory (JAO) che ha sede a Santiago. Tutti i partner erano già presenti in Cile con altri

progetti astronomici e osservatori (la regione desertica nel nord del Cile è uno dei migliori siti astronomici al mondo) e durante l'ultima decade del 20mo secolo pianificavano indipendentemente la costruzione di telescopi operanti nel (sub)millimetrico. A causa dei costi enormi di una simile impresa, si è concluso che collaborare fosse l'unico modo per raggiungere l'obiettivo. Un primo accordo ("memorandum of understanding") fu siglato nel 1999 tra la National Science Foundation (per gli USA) e ESO (per l'Europa) e un accordo tri-laterale che include anche il Giappone è stato firmato nel 2006.

### Il progetto dell'antenna

Il carico del progetto e la costruzione delle antenne è stato ripartito tra i partner: USA e Europa avrebbero costruito 25 antenne ciascuno per l'array principale, mentre al Giappone sarebbe toccata la costruzione dell'ACA. Inutile dire che le richieste tecniche per le antenne sono molto severe. Devono essere in grado di puntare entro 2 sec. d'arco in ciascuna posizione del cielo, di fare un puntamento

relativo con un'accuratezza di 0.6 sec. d'arco, e la loro superficie deve essere accurata entro 25  $\mu\text{m}$ , e queste specifiche devono resistere alle condizioni climatiche dell'AOS. Ognuno dei tre partner ha disegnato e prodotto un prototipo d'antenna, che è stato provato in un sito in New Mexico (USA) prima che venisse prodotto in serie. Tutte le antenne sono ricoperte da sensori che monitorano le deformazioni dovute a temperatura e vento e che sono poi corrette automaticamente aggiustando la posizione di ciascuno dei pannelli da cui la superficie è costituita.

Le antenne approvate sono state divise in pezzi, spedite in Cile e trasportate all'OSF, dove sono state riassemblate e sottoposte a ulteriori test dall'unità Assembly, Integration and Verification (AIV) prima di essere trasportate all'AOS.

Nel sito ad alta quota vengono integrate all'array e il loro funzionamento è verificato nuovamente come parte del processo di Commissioning and Science Verification (CSV). Un'antenna viene accettata dal progetto solo una volta che le sue performances rimangono entro le specifiche nelle condizioni climatiche ostili dell'altopiano di Chajnantor.

### Front end e ricevitori

Come menzionato prima, ogni antenna di ALMA è equipaggiata con dieci ricevitori (Figura 3a). Come le antenne, anche i ricevitori sono strumenti all'avanguardia. Sono alloggiati in un criostato tenuto a temperature fino a 4 K per ridurre il rumore, e collocati al fuoco Cassegrain di ciascuna antenna (Figura 3b). È presente un alloggiamento per ciascuna delle dieci cartucce cilindriche dei ricevitori. I singoli ricevitori sono sviluppati in laboratori in sei diversi Paesi. Il Regno Unito, la Francia e l'Italia stanno portando avanti uno studio per lo sviluppo dei ricevitori di banda 2 (vedi tabella).

<sup>1</sup> ESO, "European Southern Observatory", è l'organizzazione intergovernativa costituita da 15 Stati membri per la ricerca astronomica nell'emisfero australe. ESO gestisce tre siti osservativi di rilevanza mondiale nel deserto cileno di Atacama, tra cui ALMA. I quartieri generali di ESO sono a Garching presso Monaco di Baviera.

## Il coinvolgimento italiano

C'è un notevole coinvolgimento italiano in ALMA, dal punto di vista industriale, gestionale, tecnico e scientifico. L'Italia è stata coinvolta fin dall'inizio per la sua partecipazione in ESO. Le antenne europee sono costruite dal consorzio AEM, che è composto da Thales Alenia Spazio (Francia e Italia), MT-Mechatronics (Germania) e European Industrial Engineering (Italia) e ha così una forte partecipazione italiana.

L'osservatorio di Trieste è stato coinvolto nello sviluppo dell'ALMA control software, mentre l'osservatorio di Arcetri (FI) ha contribuito al disegno e alla produzione di varie componenti meccaniche ed elettroniche, in particolare per il correlatore. Uno dei direttori di ALMA (dal 2003 al 2008) è stato un italiano così come sono gli attuali European Programme Scientist, e il responsabile per l'European ALMA Regional Centre. E molti italiani operano ad ESO come tecnici e esperti di software per il progetto. Infine uno dei nodi dell'ALMA Regional Centre europeo è a Bologna.

## Struttura organizzativa

La struttura di gestione per ALMA è piuttosto complessa, ma la comunità astronomica ha principalmente a che fare con i cosiddetti ALMA Regional Centre (ARC), collocati in ciascuna delle tre regioni (Europa, Nord America e Giappone). L'ARC europeo è composto da sette nodi regionali in varie località europee coordinati da un nodo centrale presso ESO a Garching in Germania. Uno dei nodi si trova a Bologna, ospitato

dall'Istituto di Radioastronomia e finanziato dall'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica).

Il nodo italiano fornisce assistenza agli utenti ALMA (principalmente italiani, ma non solo), esperienza tecnica e supporto scientifico, sia nella preparazione dei progetti osservativi, sia nell'analisi dati dopo l'osservazione. Il personale ARC (2 membri dello staff IRA, 5 post-doc e un sistemista) forma la comunità scientifica con seminari, tutorial, scuole e workshop.

## Osservare con ALMA: "Early Science"

Anche nelle prime fasi di realizzazione, quando ancora il numero di antenne e ricevitori era limitato, ALMA era già molto più potente di qualsiasi altro strumento operante a lunghezze d'onda millimetriche. Perciò il JAO ha aperto un bando per la presentazione di progetti osservativi quando erano disponibili solo sedici antenne con quattro ricevitori ciascuna; queste antenne potevano essere utilizzate solo in

una configurazione compatta, con distanze massime di 125-400 m, e con ulteriori limiti sugli intervalli spettrali e sulla risoluzione spettrale. Questa prima serie di osservazioni di "Early Science" (chiamata *Ciclo 0*) è iniziata nel settembre del 2011. Una seconda serie (il *Ciclo 1*) è stata avviata nel gennaio 2013, con trentadue antenne disponibili, una maggiore flessibilità spettrale, e *baseline* massime tra 160 m e 1 km. È stato offerto anche l'utilizzo del Compact Array.

Le richieste di tempo osservativo si preparano utilizzando l'apposito software Java, chiamato *Observing Tool*, con cui presentano la giustificazione scientifica e i requisiti tecnici delle osservazioni proposte. Un *Time Allocation Committee* (TAC) internazionale valuta le richieste, mentre la fattibilità scientifica viene controllata separatamente. Le richieste accettate passano alla seconda fase, in cui le osservazioni previste vengono dettagliate in piccole unità autosufficienti, dette "scheduling

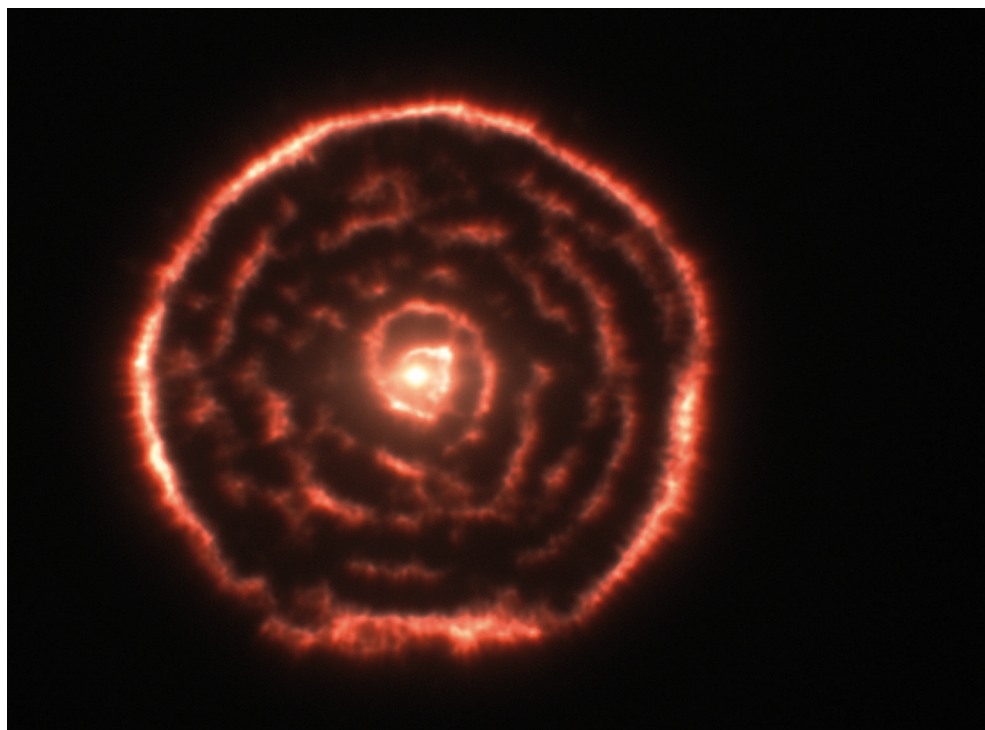


Figura 4. Immagine della stella evoluta R Scapitoris, circondata da involucri di gas freddo (dati ALMA, Ciclo 0; 345 GHz; ESO Comunicato Stampa 1239)

© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/M. Maercker et al

blocks" (SBs), ognuna delle quali può essere eseguita in circa 30-60 minuti. Le osservazioni vengono programmate con schedulazione dinamica, cioè scegliendo per l'esecuzione il programma i cui parametri (frequenza, risoluzione e sensibilità) si adattano meglio alle condizioni del momento. I dati vengono trasmessi all'archivio dati dell'OSF, e successivamente al Santiago Central Office, che li inoltra in copia ai tre Regional Centre. Se i dati rispettano i criteri di qualità richiesti, viene applicata una pipeline di riduzione, e il tutto viene inviato al *principal investigator* (PI). Il PI ha l'esclusiva sui dati per dodici mesi; successivamente, i dati diventano pubblici e accessibili a chiunque nell'archivio ALMA.

### Scienza con ALMA - Primi risultati

ALMA è stato progettato per osservare "l'Universo freddo": le radiazioni a lunghezze d'onda (sub) millimetriche provengono principalmente da gas e polvere a basse temperature (fino a

qualche centinaio di K). ALMA è quindi adatto ad osservare l'universo molto giovane, quello in cui le galassie avevano un alto contenuto di polveri; il suo sguardo penetra nel profondo delle culle della formazione stellare, che sono oscure in luce visibile, ma molto intense nella zona (sub)millimetrica dello spettro elettromagnetico. Può osservare molecole nello spazio interstellare, nelle comete e nelle atmosfere planetarie; può osservare direttamente perfino pianeti che stanno nascendo attorno alle stelle più vicine.

Mentre ALMA viene completato, sono in fase di pubblicazione i primi risultati dell'Early Science. Ci sono già le prime sorprese, di cui un bell'esempio è mostrato in Figura 4. Vi si osservano le conseguenze della perdita di massa di una vecchia stella, R Sculptoris (al centro dell'immagine).

Al termine della loro esistenza queste stelle perdono molta materia sotto forma di un denso vento stellare. In tal modo contribuiscono in modo significativo al serbatoio

di materia da cui hanno origine le successive generazioni di stelle e sistemi planetari (ed eventuali forme di vita). Il loro studio è quindi importante per molte ragioni.

Nell'immagine ALMA si vede un anello esterno di gas e polvere, che era stato osservato in precedenza con altri strumenti. La novità mai osservata in precedenza è rappresentata dalla materia che si vede all'interno dell'anello, che mostra un andamento a spirale fra la stella e l'anello stesso. Modelli numerici indicano che una tale distribuzione può essere causata dalla presenza di una stella compagna, finora sconosciuta, che imprime al vento una struttura a spirale.

Queste osservazioni sono state svolte quando erano state installate meno della metà delle antenne previste, e gli astronomi sono impazienti di vedere quali entusiasmanti risultati potrà ottenere l'array completo.

*(Traduzione del testo a cura di Marcella Massardi e Giovanna Stirpe)*

### Jan Brand

È nato nel 1956 a L'Aia (Paesi Bassi). Nel 1980 si è laureato in astronomia e fisica all'Università di Leida, dove ha anche svolto il dottorato, ottenendo il Ph. D. nel 1986, con una tesi intitolata "The Velocity Field of the Outer Galaxy".

Prima di stabilirsi all'Istituto di Radioastronomia a Bologna, ha lavorato all'Università di Maryland (USA), al Max-Planck-Institut für Radioastronomie a Bonn (Germania) e all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (Firenze).

Dal 1992 è a Bologna, prima come precario e dal 2002 come Primo Ricercatore. I suoi interessi scientifici sono nel campo della fisica e chimica del mezzo interstellare e della formazione stellare. È coordinatore dell'ALMA Regional Centre a Bologna dalla sua creazione nel 2005.



### Per approfondire:

Italian ARC: <http://www.alma.inaf.it/>

ESO: <http://www.eso.org/>

ALMA Observatory: <http://www.almaobservatory.org/>