

# PREFAZIONE

L'Atacama Large millimetre / submillimeter Array è il riferimento mondiale per le osservazioni dell'Universo nel millimetrico e submillimetrico. L'osservatorio ALMA è stato progettato e costruito per realizzare osservazioni in grado di trasformare gli orizzonti scientifici nei campi della formazione di stelle e pianeti e l'evoluzione del mezzo interstellare in tutto l'Universo. Sin dall'inizio delle attività scientifiche, ALMA ha svolto questo ruolo cruciale fornendo agli astronomi una nuova ricchezza di dati scientifici di qualità senza precedenti su una varietà di oggetti astrofisici. Un elemento fondamentale della partnership ALMA è il suo piano di sviluppo dello strumento a lungo termine, per continuare a mantenere questa struttura all'avanguardia nella ricerca astrofisica. L'Italia, in quanto Stato membro dell'ESO, ha accesso diretto a questo osservatorio fenomenale. Per garantire il miglior utilizzo possibile di questa struttura da parte della comunità scientifica italiana, INAF ha sostenuto il concetto di iALMA: una proposta che ha nei suoi obiettivi l'ottimizzazione dell'analisi dei dati ALMA attraverso la collaborazione tra astrofisici sperimentali e osservatori con particolare attenzione alla formazione di giovani ricercatori, lo sviluppo delle capacità di supporto dell'ALMA Regional Center italiano e il design e l'ingegnerizzazione di nuove tecnologie per i futuri upgrade di ALMA. iALMA è stato approvato dal Ministero come Progetto Premiale 2012 (CUP C52I13000140001), con uno stanziamento di circa 3,5ME.

Questa pubblicazione descrive alcune delle attività e dei principali risultati raggiunti da iALMA negli ultimi anni. Da parte mia, desidero ringraziare tutte le persone di grande talento, in una vasta gamma di discipline e ruoli, che hanno collaborato insieme per rendere iALMA un incredibile successo.

*Leonardo Testi  
European ALMA Operations Manager*

## ENG > FOREWORD

The Atacama Large Millimetre/submillimetre Array is the flagship observatory for the observations of the Universe at millimetre and submillimetre wavelengths. It was designed and built to allow transformational discoveries in the fields of star and planet formation and the evolution of the interstellar medium throughout the Universe. Since the start of Science Operations, ALMA has fulfilled its role as a transformational observatory, providing astronomers with a new wealth of unprecedented quality scientific data on a variety of astrophysical objects. A key element of the ALMA partnership is a long term instrument development plan, to continue to maintain this facility at the forefront of astrophysical research. Italy, as an ESO Member State, has direct access to this phenomenal facility. To ensure the best possible use of this facility by the Italian scientific community, INAF supported the concept of iALMA: a proposal to optimize the analysis of the ALMA data through the collaboration between laboratory astrophysicists and observers, with a special focus on training young researchers, to develop the support capability of the Italian ALMA Regional Centre Node, and to develop new technologies for future ALMA upgrades. iALMA was approved by the Ministry as a Progetto Premiale 2012 (CUP C52I13000140001), with an allocation of about 3.5ME.

This booklet describes some of the activities and key achievements of iALMA over the last few years. From my side, I wish to thank all the highly talented people, in a broad range of disciplines and roles, who have collaborated together to make iALMA a stunning success.

*Leonardo Testi  
European ALMA Operations Manager*







# ALMA

Atacama Large  
Millimeter/submillimeter  
Array : osservare l'universo  
oscuro per svelare l'origine  
del cosmo e della vita.

Atacama Large  
Millimeter/submillimeter  
Array : observing the dark  
universe to reveal the origins  
of life and the universe.

## IL PLATEAU

ALMA si trova nel mezzo del deserto dell'Atacama sull'altopiano chiamato Chajnantor. Una posizione privilegiata per ascoltare l'Universo lontano: a 5000 metri sopra il livello del mare con una aridità estrema. Per la relativa vicinanza all'equatore ALMA può osservare quasi tutto il cielo (87%) includendo gran parte dell'emisfero nord. Nella lingua Kunza, pre-spagnola, Chajnantor significa luogo della partenza. Anche gli atacamegni venivano a guardare l'Universo da questo luogo eccezionale ma al contrario dei greci e poi di tutte le culture occidentali che si concentrano sulle luci, questo popolo osservava il buio denso, tra una stella e l'altra, scrutando lo stesso universo oscuro e freddo che osserviamo oggi con ALMA: un osservatorio per capire l'origine dell'Universo e della vita. Per le sue caratteristiche fisiche e la relativa accessibilità questo plateau è senza dubbio uno dei luoghi migliori del nostro pianeta per osservare il cielo, per questo molte strumentazioni astrofisiche stanno popolando Chajnantor e i dintorni.

Anche se desertici, i luoghi dove sorgono questi telescopi sono tutt'altro che trascurati nella cultura andina e i luoghi di ALMA sono considerati sacri. Per questo il consorzio ha abbracciato completamente la sua responsabilità sociale e conduce varie attività per mantenere un buon rapporto di vicinato e per assicurare le comunità con cui convive. Forse l'attività con il più alto impatto sociale è l'impegno nello sviluppo del settore educativo nel villaggio più vicino, Toconao. La scuola pubblica patrocinata da ALMA che si distingue per il programma di scienza e di inglese si è presto trasformata in una delle migliori del Cile. Questa esperienza estremamente positiva sta diventando un modello per molte scuole della municipalità di San Pedro de Atacama e verrà replicata grazie ad ALMA e ad



altri partner istituzionali. Un'altra fondamentale ricaduta è quella sull'ambiente accademico cileno attraverso le numerose collaborazioni tra ALMA e la rete delle università. In Cile l'astrofisica è senza dubbio la scienza con la più alta prospettiva di eccellenza e impatto globale e l'inizio delle operazioni di VLT, APEX e ALMA hanno promosso la crescita di una nuova e variegata generazione di astronomi cileni. Infine ALMA ha messo in opera una connessione in fibra ottica da San Pedro de Atacama a Calama, una sorta di autostrada digitale dove i dati scientifici prodotti dall'osservatorio vengono distribuiti. Questa nuova infrastruttura fa da training per compagnie private che continuano a migliorare le infrastrutture di telecomunicazione in città e nei villaggi della zona.

## ENG > THE PLATEAU

ALMA is located in the middle of the Atacama Desert on the Chajnantor plateau. Its privileged position is ideal for listening to the distant Universe, at 5000 meters above sea level and with extreme aridity. Due to its proximity to the equator, ALMA can observe most of the sky (87%), including most of the northern hemisphere. In the pre-Spanish Kunza language, Chajnantor means "place of departure". The Atacamegni would come to look at the Universe from this exceptional place, but unlike the Greeks and all of the Western cultures that have focused on lights, these people observed the dense darkness between one star and another, scanning the same dark and cold Universe that we observe today with ALMA: an observatory to understand the origins of life and the Universe. Due to its physical characteristics and relative accessibility, this plateau is undoubtedly

one of the best places on our planet to observe the sky, which is why many astrophysical facilities are populating Chajnantor and its surroundings. Despite being abandoned, the places where these telescopes are located are far from being neglected in the Andean culture, and the ALMA sites are considered to be sacred. For this reason, the consortium has fully embraced its social responsibility and carries out various activities in order to maintain a good neighborly relationship and to reassure the communities "with which it lives". The activity with possibly the highest social impact is the commitment to the development of the educational sector in the nearest village, Toconao. The public school sponsored by ALMA, which stands out for its science and English program, soon became one of the best schools in Chile. This extremely positive experience is becoming a best practice for many schools in the municipality of San Pedro de Atacama, and will be replicated thanks to ALMA and other institutional partners.

Thanks to the numerous collaborations between ALMA and the network of universities, the Chilean academic environment also benefited greatly. In Chile, astrophysics is undoubtedly the science with the highest perspective of excellence and global impact; the start of VLT, APEX and ALMA operations have promoted the growth of a new and diverse generation of Chilean astronomers. Finally, ALMA has implemented a fiber optic connection from San Pedro de Atacama to Calama, a sort of digital highway through which scientific data produced by the observatory are distributed. This new infrastructure is a driving force for private companies that continue to improve the telecommunication infrastructure in the city and in the villages of the area.

# ALMA: PIÙ DELLA SOMMA DELLE PARTI

L'Atacama Large Millimetre/submillimetre Array (ALMA) ha rivoluzionato lo studio della formazione ed evoluzione di galassie, stelle e sistemi planetari extrasolari e per lo studio della chimica delle molecole organiche nello spazio interstellare. ALMA è il frutto della partnership tra ESO (in rappresentanza dei suoi stati membri), NSF (USA) e NINS (Giappone) insieme con NRC (Canada), NSC e ASIAA (Taiwan) e KASI (Repubblica di Korea) in cooperazione con la Repubblica del Cile. Partner diversi come le diverse antenne, lavorando insieme contribuiscono a questo progetto che riesce a generare un valore maggiore rispetto al valore delle singole parti. Le 66 antenne sparpagliate sul plateau, distanti fino a 16 km l'una dall'altra, lavorano all'unisono per formare infatti un interferometro. Facendo ciò ALMA è molto più potente che la somma delle sue parti, funzionando come un telescopio gigante ed esteso quanto l'intero gruppo di antenne. Allo stesso modo ciascun partner dai quattro continenti contribuisce a questo progetto in modo unico e irripetibile. Il Cile contribuisce principalmente attraverso il meraviglioso sito messo a disposizione del consorzio. Le politiche nazionali sostengono appieno questo sviluppo e centinaia di cileni in prima persona mettono la propria professionalità al servizio di questa impresa contribuendo come scienziati, ingegneri, manager e nei ruoli di supporto. L'Europa, il cui contributo è gestito dall'ESO, ha contribuito per più di un terzo ai costi di costruzione di ALMA. Dal punto di vista tecnologico e scientifico, attraverso università e centri di ricerca, ha partecipato largamente alla riuscita di ALMA. Tra i prodotti europei: le 25 antenne da 12 metri, i mezzi che trasportano le antenne, alcuni edifici (residenza, OSF Technical Building), i ricevitori delle bande 5, 7 e 9, i front end dei criostati. Il contributo asiatico copre invece un quarto dei costi di costruzione di ALMA e viene gestito dall'Osservatorio Nazionale del

Giappone (NAOJ National Astronomical Observatory of Japan). Entrando nella collaborazione nel 2004 questo partner porta con sé una estensione delle capacità osservative con l'Atacama Compact array (ACA) che rende possibile osservare l'emissione di nubi diffuse di gas e polvere. Oltre a ciò ricordiamo i ricevitori delle bande 4, 8, 10. Il contributo nord americano (Stati Uniti e Canada) viene coordinato da NRAO ovvero l'Istituto di Radioastronomia Americano. Il nord America ha contribuito nella stessa misura dell'Europa ai costi di costruzione di ALMA e tra gli altri contributi al progetto ci sono: 25 antenne da 12 metri, i ricevitori delle bande 3 e 6, il correlatore, vari componenti del frontend, gli oscillatori locali del backend e l'AOS Technical Building. Ogni partner ha anche supportato gli scienziati attraverso la messa in opera di nodi dedicati ad ALMA (ARC- ALMA Regional Center).

## ENG > ALMA: MORE THAN THE SUM OF ITS PARTS

The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) revolutionized the study of the formation and evolution of galaxies, the study of star formation and extrasolar planetary systems, and the study of the chemistry of organic molecules in interstellar space. ALMA is a partnership of ESO (representing its member states), NSF (USA) and NINS (Japan), together with NRC (Canada) and NSC and ASIAA (Taiwan) and KASI (Republic of Korea), in cooperation with the Republic of Chile. Different partners and different antennas work together and contribute to this project, creating a greater value than the value of the individual parts. Indeed, ALMA's 66 antennas, which are scattered on the plateau and are distant up to 16 km from each other, work in unison to form an interferometer. In doing so, ALMA is much more powerful than the sum of its parts: it functions



as a giant telescope and is as extensive as the entire group of antennas. Each partner from each of the four continents contributes to this project in a unique and unrepeatable way. Chile's main contribution has been through the wonderful site they have provided to the consortium. Chilean national policies fully support this development, and hundreds of Chileans themselves have put their professionalism at the service of this enterprise by contributing as scientists, engineers, managers and in supporting roles. Europe, whose participation is managed by ESO, has contributed to more than a third of ALMA's construction costs. From a technological and scientific point of view, with its universities and research centers, it has contributed to ALMA's success in a significant way. Among the European products: the 25 12-meter antennas, the vehicles that transport the antennas, a few buildings (residence, OSF Technical Building), the receivers of Bands 5, 7 and 9, as well as the frontends of the cryostats. The Asian contribution covers a quarter of ALMA's construction costs and is managed by the NAOJ (National Astronomical Observatory of Japan). Having joined the collaboration in 2004, this partner extend the observation capabilities using the Atacama Compact array (ACA), which makes it possible to observe the emission of diffuse clouds of gas and dust. In addition, they have provided the receivers for Bands 4, 8 and 10. The North American participation (United States and Canada) is coordinated by the American NRAO: National Radio Astronomy Observatory. North America has contributed to the same extent as Europe to the construction costs of ALMA, and have also provided: 25 12-meter antennas, the receivers for Bands 3 and 6, the correlator, various components of the frontend, the local oscillators for the backend and the AOS Technical Building. Each partner has also supported scientists through the setup of nodes dedicated to ALMA called ARC-ALMA Regional Centers.



## ACA

Le diverse antenne di ALMA: l'array principale di cinquantaquattro antenne da 12 metri viene completato dall'Atacama Compact Array (ACA) costituito da dodici antenne da 7 metri e quattro antenne da 12 metri. Nella foto tre antenne di ACA: a sinistra una parabola da 7 metri e di seguito due parabole da 12 metri.

The different ALMA antennas; the main array of fiftyfour 12-meter antennas is completed by the Atacama Compact Array (ACA) consisting of twelve 7-meter and four 12-meter antennas. Three ACA antennas are shown in the picture: on the left a 7-meter dish, as well as two 12-meter dish.



## LE ANTENNE

La parte più visibile e più maestosa di ALMA sono le 66 antenne: cinquantaquattro di esse con un diametro di 12 metri e dodici più piccole con un diametro di 7 metri. In più 4 antenne da 12 metri completano ALMA nella modalità 'single dish'. Le antenne di ALMA non sono solo tra le più precise al mondo grazie a una perfetta superficie parabolica ma sono anche mobili ed estremamente robuste. La posizione delle antenne viene infatti modificata e adattata alle necessità dell'osservazione. Per questa necessità sono stati progettati e costruiti due autocarri, così particolari che gli è stato dato un nome: Otto e Lore. Lunghi 20 metri, larghi 10, pesanti 130 tonnellate e dotati di 28 ruote, questi giganti gentili sono in grado di posizionare le antenne sugli "attacchi" con una precisione millimetrica mantenendo le antenne accese anche durante il trasporto.

### ENG > THE ANTENNAS

The most visible and majestic part of ALMA consists of the 66 antennas: 54 antennas with a diameter of 12 meters and 12 smaller antennas with a diameter of 7 meters. In addition, four 12-meter antennas complete ALMA in its "single dish" mode. The ALMA antennas are not only among the most precise in the world thanks to a perfect parabolic surface, but they are also mobile and extremely robust. The position of the antennas is in fact modified and adapted to the needs of each observation. For this purpose, two trucks were designed and built, and were deemed so special that they were both given a name: Otto and Lore. 20 meters long, 10 meters wide, weighing 130 tons and equipped with 28 wheels, these gentle giants are able to position the antennas on their bindings with millimeter precision, such that the antennas can keep operating even during transport.

# I RICEVITORI

Sotto le eteree parabole di ALMA si trovano i pesanti criostati, potenti frigoriferi che mantengono a temperature basse ( $-269^{\circ}\text{C}$ ,  $-253^{\circ}\text{C}$ ,  $-183^{\circ}\text{C}$ ) e costanti il cuore di ALMA, ovvero i suoi ricevitori. Questi sono chiamati anche cartridge, ovvero cartucce, poiché proprio come pallottole possono essere caricati o estratti dal criostato attraverso un ingegnoso meccanismo che semplifica le procedure di manutenzione.

Ogni criostato ha 10 alloggiamenti dove vengono inserite le 10 cartucce che operano dai 35GHz ai 950GHz (8.6mm - 0.32 mm). Ogni banda ha un insieme di requisiti veramente impegnativi.

Il meccanismo estremamente competitivo che porta i diversi gruppi sperimentali di tutto il mondo a contendersi lo sviluppo di questi ricevitori ha fatto sì che tali requisiti fossero sempre raggiunti e anzi, le prestazioni reali si sono dimostrate sempre migliori delle più rosee aspettative. Per questo motivo i prototipi dei ricevitori di ALMA stanno popolando i radiotelescopi di tutto il mondo migliorando le loro sensibilità e la qualità delle osservazioni.

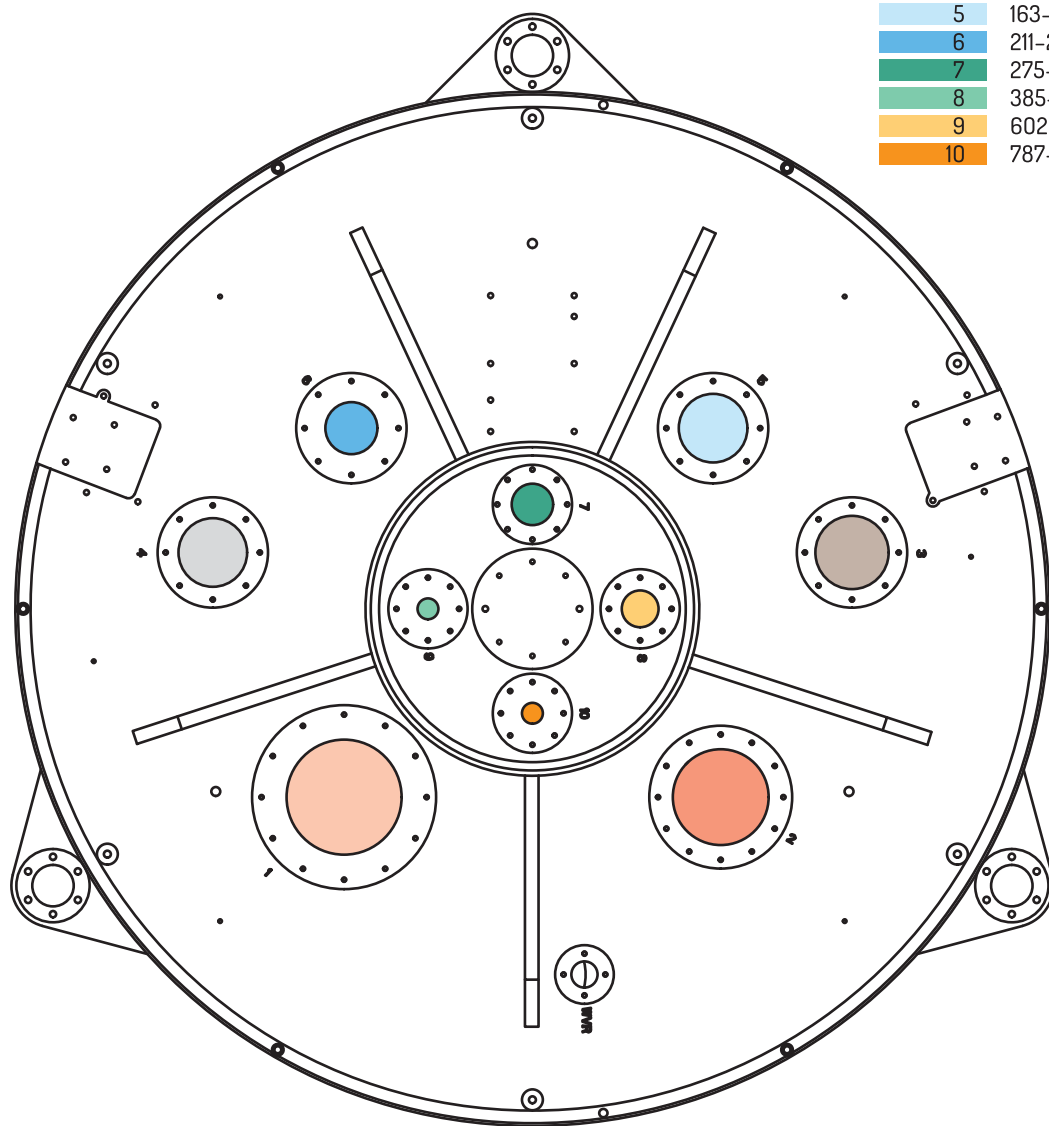
Sempre ai piedi dell'antenna, a 5058 metri di quota, il segnale analogico in uscita dalle cartridge viene abbassato in frequenza e poi digitalizzato per essere inviato tramite chilometri di fibra ottica al correlatore che si trova nell'AOS Technical Building. Questo supercomputer, uno dei più veloci al mondo, è in grado di operare con una velocità di 17 milioni di miliardi di calcoli al secondo e con 134 milioni di processori combinando continuamente i segnali delle 2016 coppie di antenne.

## ENG > THE RECEIVERS

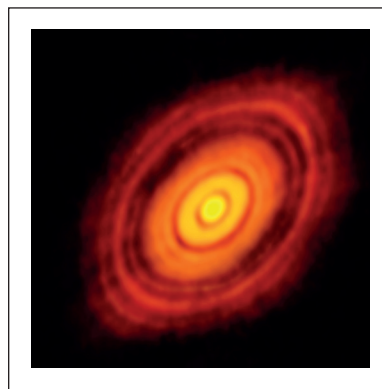
Below the ethereal ALMA dishes, we find the heavy cryostats: these powerful refrigerators keep ALMA's heart, namely its receivers, at low and constant temperatures ( $-269^{\circ}\text{C}$ ,  $-253^{\circ}\text{C}$ ,  $-183^{\circ}\text{C}$ ). The receivers are also called cartridges because just like bullets, they can be loaded or extracted from the cryostat through an ingenious mechanism that simplifies maintenance procedures. Each cryostat has 10 slots where the 10 cartridges, operating from 35 GHz to 950 GHz (8.6mm - 0.32mm), are inserted. Each band has a set of highly demanding requirements. However, the extremely competitive process that makes the various experimental groups around the world compete for the development of these receivers, has ensured that these requirements have always been achieved; indeed, ALMA's actual performance has always been better than the most optimistic expectations. For this reason, ALMA receiver prototypes are populating radio telescopes around the world, improving their sensitivity and the quality of observations. At the antenna's foot, at an altitude of 5058 meters, the analog signal coming out of the cartridges is lowered in frequency, then digitized and sent via kilometers of optical fiber to the correlator located in the AOS Technical Building. This supercomputer, one of the fastest in the world, is able to operate with a speed of 17 million billion calculations per second and with 134 million processors, continuously combining the signals of the 2016 pairs of antennas.



BANDA	GHz
1	35-50
2	65-90
3	84-116
4	125-163
5	163-211
6	211-275
7	275-373
8	385-500
9	602-720
10	787-950



## LA SCIENZA



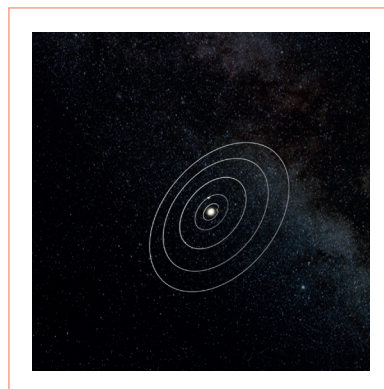
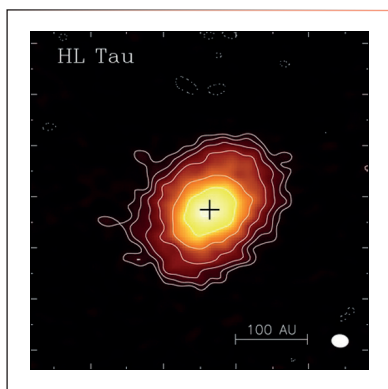
Immaginate di essere stati quasi ciechi per quattro secoli e poi finalmente inforcare un paio di occhiali capaci di svelare un universo finora solo immaginato. Grazie all'elevata sensibilità ed ad un potere risolutivo senza precedenti, ALMA consente di rispondere ad alcune delle domande più profonde sulle origini ed evoluzione del nostro cosmo. I campi in cui sta producendo risultati unici e spettacolari sono molteplici:

**COSMOLOGIA E UNIVERSO AD ALTO REDSHIFT** - Dopo il Big Bang, l'Universo è un luogo oscuro, freddo e costituito solo da elementi leggeri: idrogeno, elio, litio e berillio. Solo dopo circa 400 milioni di anni si accendono le prime antichissime stelle che bruciando, come fornaci atomiche, creano elementi sempre più pesanti. È solo grazie ad ALMA che possiamo osservare la polvere formata da questa primordiale fusione termonucleare degli elementi leggeri. Ma non solo: ALMA permette di capire come dalle stelle si siano formate le prime galassie e come queste evolvano nel tempo.

**GALASSIE E NUCLEI GALATTICI ATTIVI** - ALMA riesce a produrre immagini molto dettagliate del gas molecolare nei diversi tipi di galassie esistenti nell'Universo. Questo permette di esplorare in regioni molto vicine al buco nero centrale la relazione tra formazione delle stelle e caratteristiche di questo gas, il carburante principale di questi oggetti.

**SISTEMI PLANETARI** - ALMA può misurare tutte le fasi della formazione planetaria fotografando ad alta riso-





luzione dischi protoplanetari embrionali, misurando la temperatura di pianeti in formazione e misurando direttamente pianeti giganti e come questi pianeti “ripuliscono” la loro orbita. Nelle immagini: HL TAU prima e dopo le osservazioni di ALMA e la stessa regione osservata dal telescopio spaziale Hubble.

**STELLE E SOLE** - ALMA gioca un ruolo fondamentale per sciogliere l'enigma sulla formazione delle stelle. Infine, ALMA può, senza scottarsi, puntare direttamente il Sole come strumenti a più alta frequenza non fanno, studiarne l'atmosfera, i suoi filamenti e prominente.

#### ENG > SCIENCE

Imagine you had been nearly blind for four centuries, and you finally get a pair of glasses capable of revealing a Universe that had so far only been imagined. Thanks to an unprecedented resolution and sensitivity ALMA allow to answer our deepest questions about the origin and the evolution of our Universe.

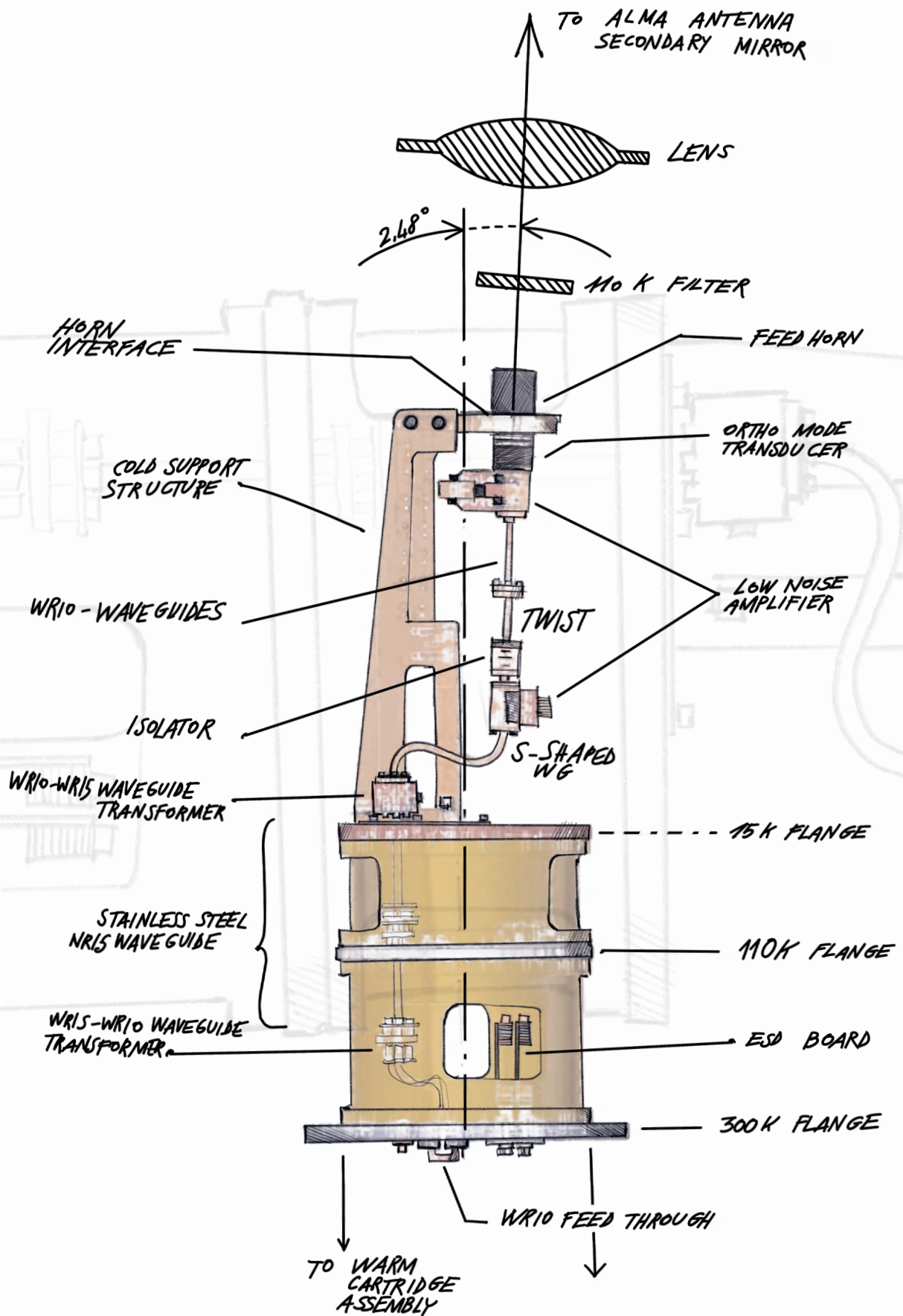
**COSMOLOGY** - After the Big Bang and decoupling, the Universe was a dark, cold place made up of only light elements: hydrogen, helium, lithium and beryllium. Only after about 400 million years do the first ancient stars light up, which create increasingly heavier elements as they burn. With ALMA we observe the dust formed by the thermonuclear fusion of light elements. Measuring this ancient dust would be the best evidence of these

first ancient stars. Moreover with ALMA we are understanding how galaxies formed from ancient stars and how they evolved.

**GALAXY AND GALACTIC NUCLEI** - ALMA is able to produce very detailed images of the molecular gas in the different types of galaxies existing in the Universe. This allows to explore in extreme regions the relationship between star formation and this gas, the main fuel of these objects.

**PLANETARY SYSTEMS** - ALMA can reveal all phases of planetary formation by photographing embryonic protoplanetary disks at high resolution, measuring the temperature of planets in formation and directly measuring giant planets and how these planets “clean up” their orbit. Moreover ALMA is able to reveal the presence of complex carbon-based organic molecules necessary for life, confirming that the Solar System is not the only one with the potential to host life. Images: HL TAU before and after ALMA and the same region by Hubble Space Telescope.

**STARS AND SUN** - ALMA plays a fundamental role solving the puzzle of star formation. Finally, ALMA can point directly at the Sun without getting burned (this is not the case for higher frequency instruments), and can therefore study the solar atmosphere and the structure of solar prominences and filaments.





## LA CARTRIDGE

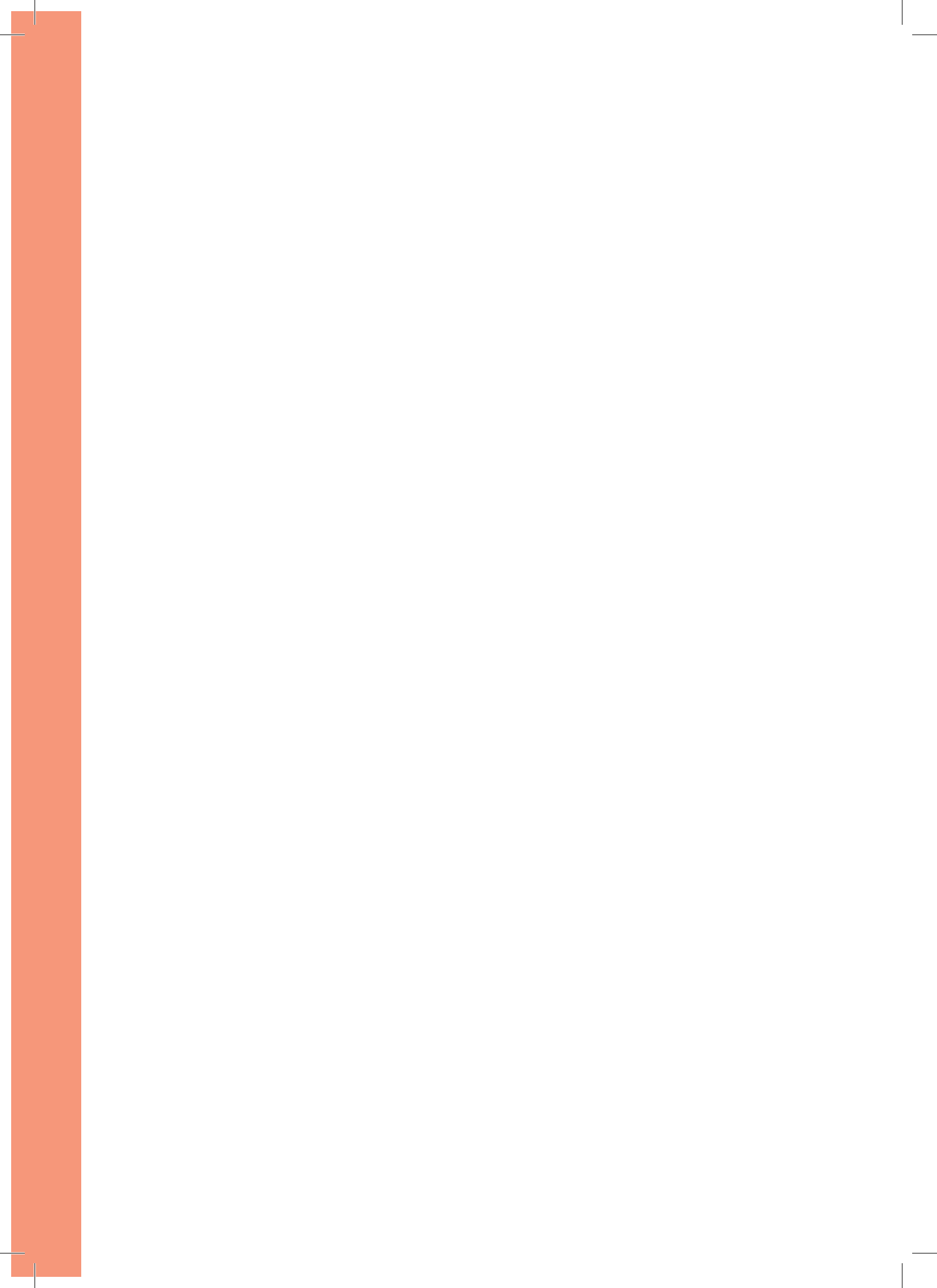
Disegno concettuale del prototipo di ricevitore in banda 2 estesa presentato alla Preliminary Design Review di ALMA nel novembre 2017. Il prototipo ha permesso al consorzio internazionale di dimostrare l'adeguatezza delle tecnologie sviluppate per gli scopi scientifici di ALMA dimostrando anche per la prima volta al mondo la possibilità di costruire ricevitori con sensibilità ed estensione in frequenza prima impensabili.

### ENG > THE CARTRIDGE

Conceptual design of the prototype for the extended Band 2 receiver presented at ALMA's Preliminary Design Review in November 2017. This prototype has allowed the international consortium to demonstrate the adequacy of the technologies developed for the scientific purposes of ALMA; it also demonstrated, for the first time in the world, the possibility of building receivers with previously unimaginable sensitivity and frequency range.

Credits: Stefano Rini.





# IL CONTRIBUTO ITALIANO

L'Italia è parte del progetto ALMA fin dall'inizio in quanto stato membro dell'organizzazione intergovernativa ESO. L'INAF, l'Università e l'industria italiana sono profondamente coinvolte in tutte le fasi del progetto: design, ingegnerizzazione, messa in opera e ovviamente l'utilizzo scientifico. L'ALMA science Operation è supportato in Europa dai nodi regionali chiamati ALMA Regional Center (ARC) uno dei quali si trova proprio all'Istituto di Radioastronomia di Bologna dell'INAF.

L'osservatorio ALMA è nella fase di transizione verso la Full Science e sta entrando quindi nel pieno delle attività osservative ma già da ora sono in corso studi e pianificazioni per identificare le priorità tecniche e scientifiche per lo sviluppo delle future capacità di ALMA. In questo contesto prende vita il progetto premiale iALMA, finanziato dal MIUR nel 2014. L'obiettivo primario di questa iniziativa è, ancor oggi, quello di consolidare la partecipazione italiana ad ALMA, la più grande infrastruttura mondiale per l'osservazione dell'Universo attualmente in funzione e si concentra sullo sviluppo di una banda 2 estesa e il relativo caso scientifico. L'ALMA Science Advisory Committee, raccoglie questa idea e include in modo preminente nella pianificazione delle attività il completamento del corredo di ricevitori con l'unico ancora mancante, la cosiddetta banda 2 estesa, ossia un canale di osservazione tra 67 e 90 GHz con possibilità di estensione in frequenza fino a 116 GHz.

Il progetto iALMA resta attivo e vitale grazie a finanziamenti ESO e all'esperienza accumulata dai ricercatori dell'INAF lavorando alla definizione accurata del caso scientifico e agli sviluppi di nuove tecnologie per la banda 2 estesa.

Italian industry have been deeply involved in all phases of the project: design, engineering, implementation, as well as scientific use. The ALMA Science Operations are being supported in Europe by a network of regional nodes called ALMA Regional Centers (ARC), one of which is located at INAF's Institute of Radio Astronomy in Bologna.

The ALMA observatory is in the transition phase towards Full Science and is entering into full observational activities, but studies and planning are already underway to identify the technical and scientific priorities for the development of future ALMA capabilities. In this context, the iALMA award project funded by the MIUR came to life in 2014. The primary objective of this initiative is, still today, to consolidate Italy's participation in ALMA, which is the largest, currently-operating global infrastructure for observing the universe. It focuses on the development of an extended Band 2 and its related scientific case. The ALMA Science Advisory Committee has welcomed this initiative and includes, in the planning of activities, the completion of the receiver kit with the only receiver that is still missing, the so-called Extended Band 2 receiver, which will allow observations between 67 and 90 GHz with the possibility of a frequency extension of up to 116 GHz.

The iALMA project is active and vital thanks to ESO funding and the experience accumulated by INAF researchers. It works on the accurate definition of the scientific case, on the development of new technologies for the extended Band 2 receiver.

## ENG > THE ITALIAN CONTRIBUTION

Italy has been part of the ALMA project since the beginning of the project as a member of the ESO intergovernmental organization. INAF, Italian universities and the

## PERCHÉ UNA BANDA 2 ESTESA?

Una banda 2 estesa è estremamente rilevante per le tre priorità scientifiche definite nell'*ALMA Development Roadmap*: origine delle galassie, origine della complessità chimica e origine dei pianeti. Una banda 2 estesa può aiutare a raggiungere questi obiettivi; un esempio è il frazionamento del deuterio che costituisce un tracciante estremamente sensibile sia dell'evoluzione del gas interstellare nelle fasi più fredde e dense immediatamente prima della formazione di una protostella sia della snowline nei dischi protoplanetari. Il frazionamento del deuterio è un processo molto importante che può portare ad aumenti dell'abbondanza di molte specie deuterate di un fattore di  $10^{13}$  volte superiore all'abbondanza cosmica del deuterio. Estendendo la banda 2 di ALMA avremo un eccellente strumento per gli studi di deuterazione perché solo con questa banda super estesa si riusciranno a osservare le transizioni fondamentali delle principali specie deuterate traccianti di gas denso che vengono utilizzate per ricavare le condizioni fisiche e chimiche dei nuclei pre-stellari.

### ENG > WHY AN EXTENDED BAND?

A wide Band 2 system is extremely relevant to the three main scientific priorities defined in the ALMA Development Roadmap: the origins of galaxies, the origins of chemical complexity and the origins of planets. A broad Band 2 can help to achieve these goals. As an example the deuterium fractionation that provides an extremely sensitive probe of the evolution of interstellar gas through its coldest, densest phase immediately prior to the formation of a protostar, as well as the CO snowline in protoplanetary disks. Deuterium fractionation can result in increases in the abundance of many deuterated species by a factor of  $10^{13}$  above the cosmic deuterium to hydrogen ratio. The ALMA Band 2 is the most powerful band for deuteration studies since we can observe the ground-level transitions of main dense gas species that are used to trace the physical and chemical conditions of pre-stellar cores.







# UN CASO SCIENTIFICO ITALIANO

Uno dei principali obiettivi scientifici di ALMA è comprendere la chimica correlata alle molecole organiche complesse (COM) nello spazio e, in particolare, il loro ruolo come blocchi costitutivi di molecole prebiotiche in sistemi esoplanetari. C'è una forte evidenza che l'acqua sulla Terra sia arrivata dopo la formazione del pianeta. Lo scenario attualmente favorito prevede che i pianeti interni del Sistema Solare siano stati bombardati da corpi ghiacciati provenienti dalle regioni esterne, a causa della riorganizzazione delle orbite dei quattro pianeti principali (Giove, Saturno, Urano e Nettuno). Questi piccoli corpi gelati portano sulla terra non solo acqua ma anche dei composti organici complessi imprigionati nel ghiaccio. Un meccanismo simile si vede nelle comete e nei meteoriti dove sappiamo essere presenti simili "impurità" mescolate con acqua e monossido di carbonio. Anche la glicina, il più semplice degli amminoacidi, è stata trovata in quantità non trascurabili. La particolarità delle COM risiede nella loro origine: si ipotizza infatti che le proto-stelle irradiano vigorosamente nell'ultravioletto la materia circostante. Questa materia si trova allo stato liquido fino a una distanza chiamata snow line oltre la quale è troppo freddo e i componenti volatili (acqua, diossido di carbonio, ammoniaca, metano, metanolo) ghiacciano. La materia solida ha scarse probabilità di riorganizzarsi in qualcosa di diverso ma questo mix di acqua, metanolo e ammoniaca, proprio perché sollecitata dall'emissione ultravioletta, si può trovare allo stato liquido anche oltre questa snow line e dare eventualmente origine a molecole organiche complesse che poi solidificano rapidamente rimanendo intrappolate nel ghiaccio. Questo meccanismo potrebbe spiegare la grande abbondanza di materia organica sulle comete e potrebbe anche essere un importante indizio per comprendere il meccanismo della formazione dei pianeti. Gli esperimenti in laboratorio di irraggiamento

di ghiaccio hanno confermato la possibilità di produrre COM in questo modo, ma la misura di molecole complesse è estremamente difficile utilizzando tecniche spettroscopiche convenzionali. La banda 2 estesa di ALMA potrà misurare direttamente in cielo la presenza di tali molecole, infatti allargando la copertura in frequenza fino a 67 GHz saremo in grado di tracciare composti come la glicina in sistemi solari simili al nostro permettendoci di tracciare l'origine di molecole prebiotiche nello spazio. Oltre a questo enorme passo avanti, la banda 2 potrà contribuire a molti casi scientifici ben avviati: permetterà di caratterizzare il ruolo del gas denso e freddo nell'evoluzione di particolari galassie vicine; svelerà la fisica dei buchi neri producendo immagini molto più definite di quelle raccolte da EHT in M87; riuscirà a studiare le regioni di formazione stellare a piccole scale usando righe di emissione molecolari prodotte da maser.

## ENG > AN ITALIAN SCIENTIFIC CASE

One of the main scientific objectives of ALMA is to understand the chemistry of complex organic molecules (COM) in space and, in particular, their role as building blocks of prebiotic molecules in exoplanetary systems. There is strong evidence that water on Earth came after the formation of the planet. The currently favored scenario predicts that the inner planets of the Solar System have been bombarded by icy bodies from the outer regions, due to the reorganization of the orbits of the four main planets (Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune). These small frozen bodies carry not only water but also complex organic compounds trapped in the ice onto Earth. A similar mechanism is seen in comets and meteorites, where we know that similar "impurities" mixed with water and carbon monoxide are present.

Glycine, the simplest amino acid, was also found in significant quantities. The peculiarity of the COMs lies in their origin; indeed it is hypothesized that protostars irradiate the surrounding matter vigorously in the ultraviolet. This matter is in the liquid state up to a distance called "the snow line" beyond which it is too cold, and the volatile components (carbon dioxide water, ammonia, methane, methanol) freeze. The solid matter has a low probability of reorganizing itself into something different, but this mix of water, methanol and ammonia can be found in the liquid state even beyond this snow line, precisely because it is stimulated by ultraviolet emission. It eventually gives rise to complex organic molecules that remain trapped in the ice and thus solidify quickly. This mechanism could explain the great abundance of organic matter on comets, and could also be an important clue to understanding the mechanism of planet formation. Experiments in the laboratory of ice irradiation have confirmed the possibility of producing COM in this way, but the measurement of complex molecules is extremely difficult using conventional spectroscopic techniques. ALMA's extended Band 2 will be able to measure the presence of these molecules directly in the sky; in fact by widening the frequency coverage up to 67 GHz, we will be able to trace compounds like Glycine in solar systems similar to ours, allowing us to trace the origin of prebiotic molecules in space. In addition to this giant leap forward, Band 2 will be able to contribute to many well-established scientific cases: it will allow us to characterize the role of dense and cold gas in the evolution of particular nearby galaxies; it will reveal the physics of black holes through images with micro-arcsecond resolution with a sensitivity better than EHT in M87; it will allow to study the stellar formation regions at small scales using molecular emission lines produced by maser.



## VISIONI ESTESE

La nuova sfida di ALMA è quella di completare finalmente le sue funzionalità mettendo al fuoco della antenne cilene l'ultimo radiometro mancante, ossia la banda 2. Uno strumento di nuova generazione capace di osservare il cielo con una sensibilità e una larghezza di banda mai ottenute in precedenza. INAF risponde a questa sfida con l'investimento di professionalità e risorse nella definizione di un caso scientifico solido, nelle infrastrutture dei laboratori nazionali e soprattutto nella prototipazione di un ricevitore tra 67 e 116 GHz, ossia un ricevitore capace di vedere oltre le frequenze originariamente pensate per la banda 2, estendendo così le capacità tecniche e scientifiche di ALMA.

Con le sue due sedi dell'Osservatorio Astronomico di Arcetri (OAA) e dell'Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna (OAS), INAF lavora a questo progetto tecnologico in collaborazione con ESO con l'obiettivo ambizioso e importante di riuscire a immaginare, sviluppare, assemblare e calibrare il prototipo del futuro ricevitore mancante. Attorno a questa eccitante opportunità si sono avvicinate altre istituzioni e oggi possiamo contare su una prestigiosa e coesa collaborazione internazionale guidata da ESO. Oltre a INAF per l'Italia, sono presenti l'Università di Manchester e il Rutherford Appleton Laboratory per l'Inghilterra, l'Università di Chalmers per la Svezia, l'Osservatorio Astronomico Nazionale del Giappone e l'Università del Cile.

I diversi studi finanziati da ESO e il finanziamento italiano del progetto iALMA hanno permesso di completare la fase di design e di prototipazione. INAF insieme a ESO e al resto della collaborazione ha brillantemente superato la Preliminary Design Review di ALMA. È un passo importante e obbligato, questo, perché dimostra che i risultati degli studi di fattibilità, delle ricerche e le tecnologie sviluppate fino a oggi sono in linea con le aspettative per il completamento dell'osservatorio ALMA. Soprattutto, la dimostrata possibilità di costruire un ricevitore che osserva il cielo con una larghezza di banda impensabile fino a qualche anno prima ha aperto nuove strade per la scienza e la tecnologia 'millimetrica'. Per la complessità e i tempi stretti di sviluppo del progetto è stato necessario coniugare, nella sua gestione, la tipica flessibilità nello sviluppo di tecnologia di frontiera al rigore tipico di un approccio strutturato caratterizzato dalle best practices di System Engineering e Project Management. Le professionalità di INAF negli ambiti

nell'Integrazione, nel VVT (Verifica, Validazione e Test), nella criogenia, nel design di componenti passivi hanno reso possibile questa impresa e hanno catalizzato attorno a INAF le altre eccellenze internazionali del consorzio. Il successo del prototipo in banda 2 estesa ha innescato studi di fattibilità per futuri aggiornamenti di ALMA per estendere le bande di osservazioni anche degli altri canali di ricezione. L'estensione dell'intervallo delle frequenze di osservazione è senza dubbio la sfida di frontiera per la tecnologia alle onde millimetriche e permette di estendere la visione che abbiamo dell'Universo osservato da ALMA. Oltre a continuare a sviluppare le tecnologie necessarie per il raggiungimento delle 'performance' richieste da ALMA, INAF, insieme all'università di Chalmers e a NOVA (Netherlands Research School for Astronomy, Olanda), ha costituito una collaborazione per proporsi e affrontare i prossimi passi per affrontare la Critical Design Review e quindi la produzione dei 73 ricevitori in banda 2 estesa necessari. Anche questa fase è strategica per l'Italia per le possibili ricadute industriali, tecnologiche e scientifiche.

## ENG > FUTURE PERSPECTIVES

ALMA's new challenge is to finally complete its functionality by placing the last missing radiometer, namely Band 2, at the focus of the Chilean antennas. This new generation instrument is capable of observing the sky with a sensitivity and bandwidth that have never previously been reached. INAF responds to this challenge with the investment of energy and resources in the definition of a solid scientific case, in the infrastructures of national laboratories, and above all in the prototyping of a receiver between 67 and 116 GHz, i.e. a receiver capable of seeing beyond the originally planned frequencies for Band 2, thus extending the technical and scientific capabilities of ALMA.

With its two institutes: the Arcetri Astronomical Observatory (OAA) and the Astrophysics and Space Science Observatory of Bologna (OAS), INAF works on this technological project in collaboration with ESO with the ambitious and important goal of being able to imagine, develop, assemble and calibrate the prototype for this future receiver. Other institutions have gathered around this exciting opportunity, and today we can count on a

prestigious and cohesive international collaboration led by ESO. In addition to INAF for Italy, in fact, there are the University of Manchester and the Rutherford Appleton Laboratory for England, the University of Chalmers for Sweden, the National Astronomical Observatory of Japan and the University of Chile.

The various studies funded by ESO and the Italian funding for the iALMA project have allowed us to complete the design and prototype phase. INAF, together with ESO and the rest of the collaboration, has brilliantly passed ALMA's Preliminary Design Review. This is an important and obligatory step, because it shows that the results of feasibility studies, research and technologies developed to date are in line with expectations for the completion of the ALMA observatory. Above all, the demonstrated possibility of building a receiver that observes the sky with a bandwidth that was unthinkable up until a few years ago, has opened up new avenues for millimeter science and technology. Due to the complexity and tight development deadlines of the project, it was necessary to combine, in its management, the typical flexibility in the development of frontier technology with the typical rigor of a structured approach characterized by the best practices of System Engineering and Project Management. The professionalism of INAF in the areas of Integration, in VVT (Verification, Validation and Test), in cryogenics, in the design of passive components, have made this venture possible and have catalyzed the other international excellence of the consortium around INAF.

The success of the extended Band 2 prototype has triggered feasibility studies for future ALMA updates in order to also extend the observation bands of the other receiving channels. The extension of the range of observation frequencies is, without any doubt, the frontier challenge for millimeter wave technology and allows us to extend the vision we have of the Universe observed by ALMA. In addition to the continuous development of the technologies needed to achieve the 'performance' required by ALMA, INAF, together with the University of Chalmers and NOVA (Netherlands Research School for Astronomy, the Netherlands), has formed a collaboration to propose and address the next steps needed for the Critical Design Review and the production of the necessary 73 extended Band 2 receivers. This phase is also strategic for Italy due to the possible industrial, technological and scientific repercussions.

# IL CONTRIBUTO ITALIANO ALL'ARC

Le potenti antenne di ALMA sono ambite dagli astronomi di tutto il mondo, che competono per il loro utilizzo. Quando si apre una call di osservazione, i vari gruppi di scienziati propongono le loro idee, che vengono poi valutate e selezionate. Le osservazioni sono poi eseguite dagli astronomi di ALMA e in seguito inviate agli ALMA Regional Center (ARC) che in Europa, in Nord America e in Giappone sono gli avamposti di ALMA nel mondo. L'ARC Europeo comprende 7 nodi regionali coordinati da un nodo centrale che si trova al quartier generale dell'ESO in Germania. Il nodo italiano è ospitato dall'Istituto di Radioastronomia di Bologna (IRA), parte di INAF. Il ruolo dell'ARC italiano è quello di informare gli scienziati sulle possibilità di operazione di ALMA, facilitare la preparazione delle proposte osservative e consegnare i dati ai referenti della proposta osservativa oltre che partecipare ad attività di sviluppo dello strumento stesso. Per un anno i dati saranno a esclusiva disposizione dei Principal Investigator delle proposte; oltre questo periodo diverranno patrimonio di tutta la comunità scientifica e potranno essere liberamente utilizzati. Gli ARC si occupano anche di archiviare e conservare tutte le osservazioni di ALMA.

Le proposte osservative capitanate da istituti italiani sono circa il 9% delle proposte europee. Tra queste proposte ne vengono selezionate circa un decimo per le osservazioni effettive.

L'ARC italiano sostiene e sviluppa le nuove potenzialità di ALMA come ad esempio la misura dell'emissione polarizzata e le osservazioni nella modalità VLBI (Very Large Baseline Interferometer).

## ENG > THE ITALIAN CONTRIBUTION TO ARC

The powerful ALMA antennas are sought after by astronomers from all over the world, who compete for their use. When an observation call is open, various groups of scientists propose their ideas, which are then evaluated and selected.

The observations are then performed by ALMA astronomers and the data are subsequently sent to the ALMA Regional Centers (ARC), which in Europe, North America and Japan are the ALMA outposts in the world.

The European ARC includes 7 regional nodes coordinated by a central node located at the ESO headquarters in Germany. The Italian node is hosted by the Institute of Radio Astronomy of Bologna (IRA), which is part of INAF. The role of the Italian ARC is to inform scientists about ALMA's operation capabilities, to facilitate the preparation of the observational proposals, and to deliver the data to the proposal's investigators. For one year, the data are exclusively available to the Principal Investigators of the proposals; beyond this period they become available to the entire scientific community and can be freely used. The ARCs also deal with archiving and storing all of the ALMA observations. The observational proposals led by Italian institutes constitute about 9% of the European proposals. Among these proposals, about one tenth are selected for actual observations. The Italian ARC supports and develops the new capabilities of ALMA, such as the measurement of polarized emission and observations in VLBI (Very Large Baseline Interferometer) mode.





## DESIGN

La cartridge integrata e calibrata nel laboratorio Cryowaves pronta per la Preliminary Design Review di ALMA.

This cartridge was integrated and calibrated in the Cryowaves laboratory and is ready for ALMA's Preliminary Design Review.

# I LABORATORI INAF PER ALMA

Il Laboratorio di Astrofisica Sperimentale dell'Osservatorio Astrofisico di Catania dell'INAF è dotato di un impianto ionico che crea e accelera ioni veloci che simulano i raggi cosmici di bassa energia, e di una camera a ultra alto vuoto nella quale si possono accrescere e bombardare film sottili di molecole in fase solida. Uno degli obiettivi del progetto iALMA è quello di potenziare le tecniche di analisi disponibili nel laboratorio migliorando la sensibilità del sistema di misura in modo da rivelare le molecole complesse meno abbondanti che si formano in seguito al bombardamento con ioni veloci. Le molecole organiche complesse si possono formare quando molecole semplici in fase solida vengono bombardate dai raggi cosmici a bassa energia. Questo processo è osservato nelle regioni di formazione stellare, e riprodurlo in laboratorio è di fondamentale importanza per capire i meccanismi alla base della formazione delle molecole nell'Universo.

Il ruolo strategico delle tecnologie a microonde in Italia è indubbiamente cresciuto grazie all'impegno in ALMA, in SKA (Square Kilometer array), in SRT (Sardinia Radio Telescope) e nella rete dei radiotelescopi nazionali, nonché grazie allo sviluppo di esperimenti di cosmologia sperimentale come il satellite Planck e più recentemente l'esperimento LSPE/STRIP dell'Agenzia Spaziale Italiana. Per lo stesso motivo la criogenia sperimentale ha acquisito un ruolo indispensabile, poiché i rivelatori devono essere opportunamente raffreddati per raggiungere il livello di sensibilità richiesto da casi scientifici sempre più spinti. La criogenia e le tecnologie a microonde sono così strettamente collegate e dipendenti l'una dall'altra che possiamo parlare di Cryowaves technologies, ovvero una nuova branca del sapere scientifico-tecnologico che mira a sviluppare tecnologie e facility per costruire e operare ricevitori e antenne a banda larga nel radio e nel millimetrico a temperature criogeniche. In questo scenario nasce nel 2015 il laboratorio Cryowaves presso l'Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio (OAS) di Bologna, eccellenza italiana per questo tipo di tecnologie. Parte del finanziamento iALMA è stato utilizzato per potenziare il laboratorio Cryowaves, che oggi è in grado di affrontare le sfide tecnologiche tra le più impegnative che la scienza può richiedere come la banda 2 estesa per ALMA. Un passo essenziale nel progetto di un ricevitore radio,

a microonde e a onde millimetriche è costituito dalla caratterizzazione elettromagnetica dei componenti che lo costituiscono. Sono componenti critici e fondamentali per le prestazioni del ricevitore, soprattutto per la sua sensibilità, ovvero la capacità di rivelare segnali debolissimi come i segnali celesti. Il gruppo di Radioastronomia dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (OAA) dell'INAF è attivo da diverso tempo nello sviluppo di componenti di front-end a microonde frequenze tra 300MHz e 300GHz. È dotato di laboratori e strumentazione per la completa e precisa caratterizzazione di componenti attivi (amplificatori) e passivi (antenne, filtri, polarizzatori), utilizzati nei front-end dei ricevitori radio per i radiotelescopi italiani e, grazie al progetto iALMA, ha aggiornato la strumentazione per rendere il laboratorio competitivo a livello internazionale. È proprio la competenza nella progettazione elettromagnetica e la conoscenza approfondita della componentistica a microonde che lo rende il luogo ideale anche per la caratterizzazione e la misura dei componenti del ricevitore in banda 2.

## ENG > INAF LABORATORIES FOR ALMA

The Laboratory of Experimental Astrophysics at INAF's Catania Astrophysical Observatory is equipped with an ion implant that creates and accelerates fast ions that simulate low energy cosmic rays, and with an ultra-high vacuum chamber in which one can grow and bombard thin films of solid phase molecules. One of the objectives of the iALMA project is to enhance the analytical techniques available in the laboratory by improving the sensitivity of the measurement system, so as to reveal the less abundant complex molecules that form following the bombardment with fast ions. Complex organic molecules can be formed when simple solid-phase molecules are bombarded by low-energy cosmic rays. This process is observed in the regions of star formation, and reproducing it in the laboratory is fundamentally important for understanding the mechanisms underlying the formation of molecules in the Universe.

The strategic role of microwave technologies in Italy has undoubtedly grown thanks to the commitment in ALMA, SKA (Square Kilometre Array), SRT (Sardinia Radio

Telescope) and the national radio telescope network, as well as the development of cosmology experiments like the Planck satellite and more recently the Italian Space Agency's LSPE / STRIP experiment. For the same reason, the experimental cryogenics has acquired an indispensable role since the detectors must be appropriately cooled to reach the level of sensitivity required by scientific cases that are ever more stringent. Cryogenics and microwave technologies are so closely connected and dependent on each other that we can talk about Cryowave technologies, which is a new branch of scientific-technological knowledge that aims to develop technologies and facilities to build and operate broadband receivers and antennas in the radio and in the millimeter range at cryogenic temperatures. In this context, the Cryowaves laboratory was born in 2015 at the Astrophysics and Space Science Observatory (OAS) of Bologna, an Italian excellence for this type of technology. Part of the iALMA funding was used to upgrade the Cryowaves laboratory, which today is able to tackle the most challenging technological challenges that science can demand, such as the extended Band 2 for ALMA. An essential step in the design of a radio, microwave and millimeter wave receiver is the electromagnetic characterization of its components. These are critical and fundamental components for the receiver's performance, above all for its sensitivity, that is the ability to detect very weak signals like space signals. The Radio Astronomy Group of INAF's Arcetri Astrophysical Observatory (OAA) has been active for some time in the development of microwave frontend components designed to work at frequencies between 300 MHz and 300 GHz. It is equipped with laboratories and instrumentation designed for the complete and precise characterization of active components (amplifiers) and passive components (antennas, filters, polarizers), used in the frontends of radio receivers for Italian radio telescopes. Thanks to the iALMA project, it has updated the equipment to make the laboratory competitive at the international level. It is precisely the expertise in electromagnetic design and in-depth knowledge of microwave components that make it an ideal place for the characterization and measurement of the components of the Band 2 receiver.



Atacama Large Millimeter/submillimeter Array  
Istituto Nazionale di Astrofisica  
European Southern Observatory  
National Astronomical Observatory of Japan  
Chalmers University of Technology  
Netherlands Research School for Astronomy  
University of Chile  
University of Manchester  
Rutherford Appleton Laboratory

> [www.almaobservatory.org](http://www.almaobservatory.org)  
> [www.inaf.it](http://www.inaf.it)  
> [www.eso.org](http://www.eso.org)  
> [www.nao.ac.jp](http://www.nao.ac.jp)  
> [www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)  
> [www.nova-astronomy.nl](http://www.nova-astronomy.nl)  
> [www.uchile.cl](http://www.uchile.cl)  
> [www.manchester.ac.uk](http://www.manchester.ac.uk)  
> [www.stfc.ukri.org](http://www.stfc.ukri.org)

AA.VV.

*iALMA: scienza e tecnologia italiana per ALMA*

Progetto grafico e copertina: Davide Coero Borga

Redazione: Sara Ricciardi

Crediti immagini: Inaf/Eso/Fabrizio Villa

© 2019 Media Inaf, Istituto nazionale di astrofisica

Tutti i diritti sono riservati