

天聞

中華民國 111年
冬季號



中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>

台灣之光

ALMA 第一頻段接收機



位於智利的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列。

©中研院天文所/王為豪

ALMA

第一頻段接收機的科學願景

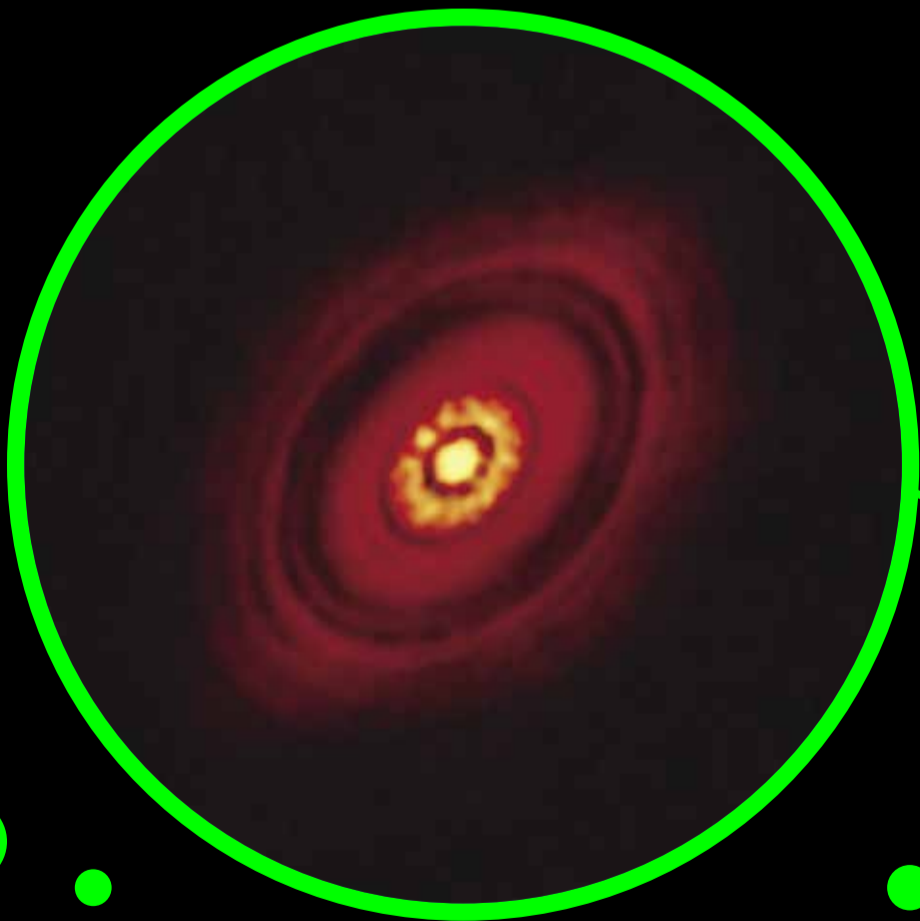
作者 顏士章

探索宇宙的起源是阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（簡稱 ALMA）的主要科學目標，包括研究行星與恆星的誕生、遙遠星系的形成和演化等等。在配備第一頻段接收機之後，ALMA 將能觀測頻率 35 – 50 GHz、相當於波長 8.6 – 6 毫米的電磁波，更深入地探測行星誕生之地——原行星盤，以及偵測更遙遠、更高紅移的星系。

行星形成——從微小的塵埃開始

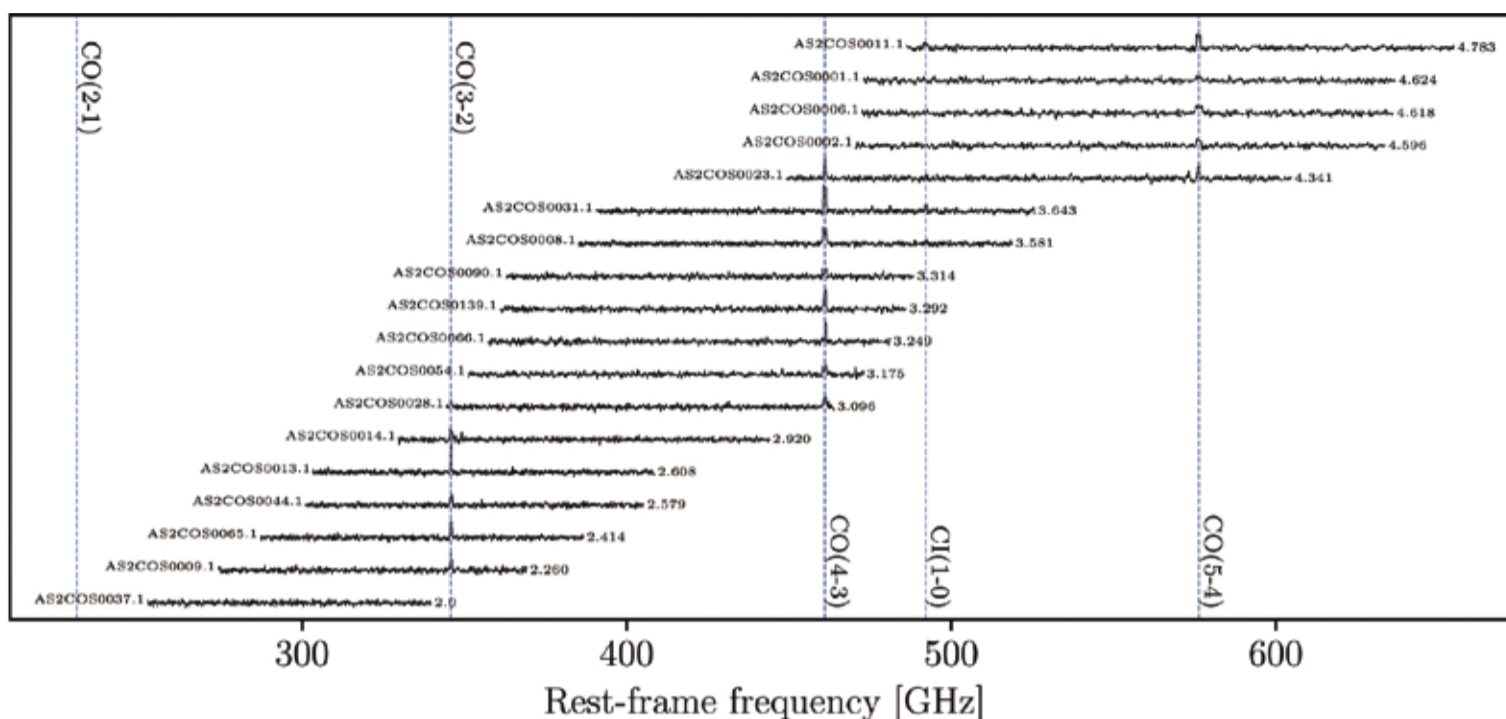
環繞在年輕恆星周圍的原行星盤充滿著塵埃與氣體，在現今主流的行星形成理論——核心吸積（core accretion）中，行星就是由原行星盤內微小的塵埃逐漸凝聚、成長而形成的。最初，這些塵埃顆粒只是微米大小，在原行星盤內運動的過程中，碰撞到其他塵埃進而凝聚成更大的塵埃顆粒，逐漸從微米成長到毫米、甚至是公分大小，進而成為公里級的微行星。當然塵埃在成長的過程中也不會一路順遂，如果盤內塵埃的密度太低，彼此就會難以相遇碰撞，若是碰撞的速度太快，塵埃顆粒則很可能會碎裂。因此，了解原行星盤內塵埃的大小與分佈是研究行星形成理論的重要課題之一。

不同大小的塵埃顆粒在不同波長的發光能力不同，大的塵埃比小的塵埃更容易在長波長發光，一般來說觀測的波長就相當於可以探測的塵埃大小，所以第一頻段接收機讓 ALMA 可以偵測原行星盤內大小為數毫米至將近一公分的塵埃顆粒。此外，塵埃比較不會吸收和散射長波長的光線，所以長波長的觀測可以更深入地探測原行星盤的內部結構。金牛座 HL 星周圍的原行星盤，是天文學家們相信正在形成行星的地方，其中一圈又一圈環狀條紋，非常可能是誕生中的行星擾動原行星盤所造成的。利用特大天線陣（簡稱 VLA）觀測波長 7 毫米的連續譜，可以看到最內圈的內部結構，那裡有著公分大小的塵埃顆粒，並且有塵埃正在集結成塊，在核心吸積的理論中，這是邁向行星形成的重要一步。ALMA 有著比 VLA 更好的觀測條件，透過高靈敏度的第一頻段接收機，將可更快、更有效率地揭露各個原行星盤內的塵埃分佈，以解答行星的起源。



由 ALMA 和 VLA 所觀測到的金牛座 HL 星周圍的原行星盤。暗紅色和黃色的影像分別是 ALMA 1.3 毫米和 VLA 7 毫米連續譜的觀測結果，可分別追蹤較小和較大的塵埃顆粒分佈。

©Carrasco-Gonzalez, et al.; Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF.



這些來自不同星系的光譜都是 ALMA 在第三頻段 (84~113 GHz) 所接收到的，因為紅移效應，原本靜止頻率在 250 至 650 GHz 之間的一氧化碳 (CO) 旋轉能階 3-2、4-3 和 5-4 的譜線，波長都變長，落到 ALMA 的第三頻段。©Chen, C.-C., et al., 2022, ApJ, 929, 159

探索來自早期宇宙的訊號

星系的形成需要氣體，提供足量的氣體可觸發蓬勃的恆星形成，也可讓星系中心的黑洞活躍地成長，所以測量早期宇宙的氣體含量與分佈，可以幫助我們了解星系的形成與演化。因為光的傳遞需要時間，觀測遙遠的星系就像是搭乘了時光機，讓我們可以探測早期的宇宙。由於宇宙膨脹所產生的紅移效應，來自遙遠星系的光譜波長會變長，紅移到頻率比較低的波段，所以我們可以在低頻波段搜尋遙遠星系的分子譜線，探測早期宇宙的氣體含量。

雖然氫是宇宙中含量最豐富的元素，但是氫分子在低溫的狀態下很難被激發而極少發出電磁波訊號，其他豐度較低的分子，例如一氧化碳 (CO)，即使在低溫也容易被激發而輻射，因此就成了天文學家探測星際間分子氣體的常用工具。這些低溫的一氧化碳分子在靜止的情況下，依據躍遷能階的高低，所發出的電磁波訊號約分佈在頻率 100 到數百 GHz 以上。當遙遠星系內的一氧化碳分子發出電磁波訊號，它們的波長就會因紅移效應而變長，從而在較低頻率的波段接收到。上圖為 ALMA 在第三頻段 (84~113 GHz) 所觀測到的光譜，這些光譜都來自不同紅移的遙遠星

系，當我們修正過紅移效應之後，就會發現這些在第三頻段接收到的訊號，其實是這些星系在更高頻率所發出一氧化碳譜線。這些星系當中，最高的紅移約 4.8，相當於大霹靂之後 12 億年就存在的天體。而這些一氧化碳譜線若是從更早期、更遙遠的星系發射出來，就會紅移到更低的頻率，例如在大霹靂之後數億年就形成、紅移 11-15 的星系，它發出一氧化碳旋轉能階 6-5 的譜線，就會紅移到 ALMA 的第一頻段。因此，安裝了第一頻段接收機之後，ALMA 將可以開始探索更早期的宇宙了。

即將正式上線的第一頻段接收機

除了觀測原行星盤內的塵埃和高紅移星系的分子氣體，ALMA 第一頻段接收機還可以偵測游離的氫原子、複雜的碳鏈分子、星際間的磁場強度等等，對於研究恆星形成、脈衝星、銀河系中心、宇宙中的星系團等課題皆能提供相當寶貴的資料。驗證第一頻段接收機的科學測試觀測預計將於 2022 年底或 2023 年初展開，測試成功後 ALMA 第一頻段接收機就會正式上線，到時候再來跟大家介紹 ALMA 在第一頻段有什麼新的研究成果，敬請期待！



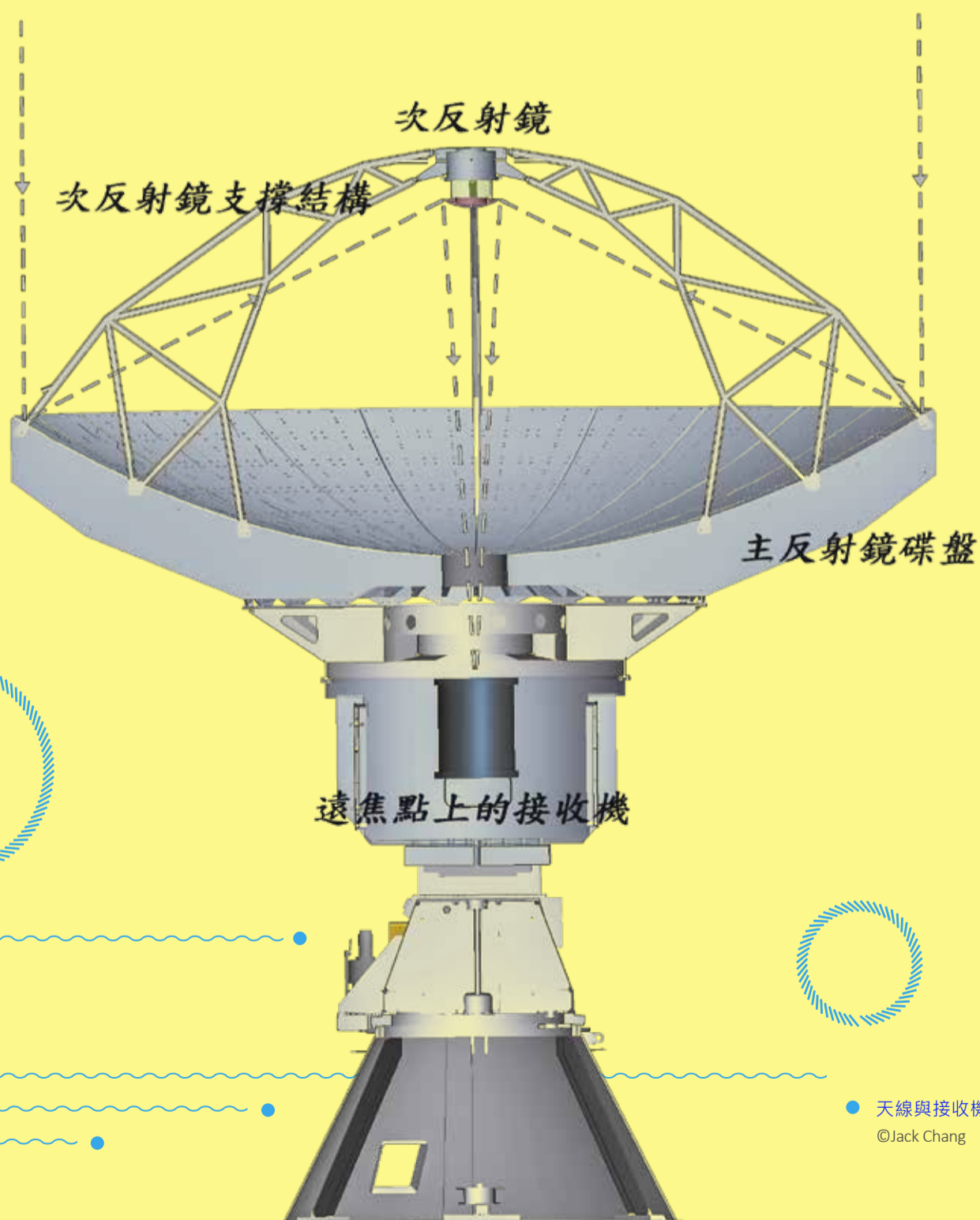


ALMA

第一频段接收機 知多少？

作者 章朝盛·黃翎杰·黃裕津

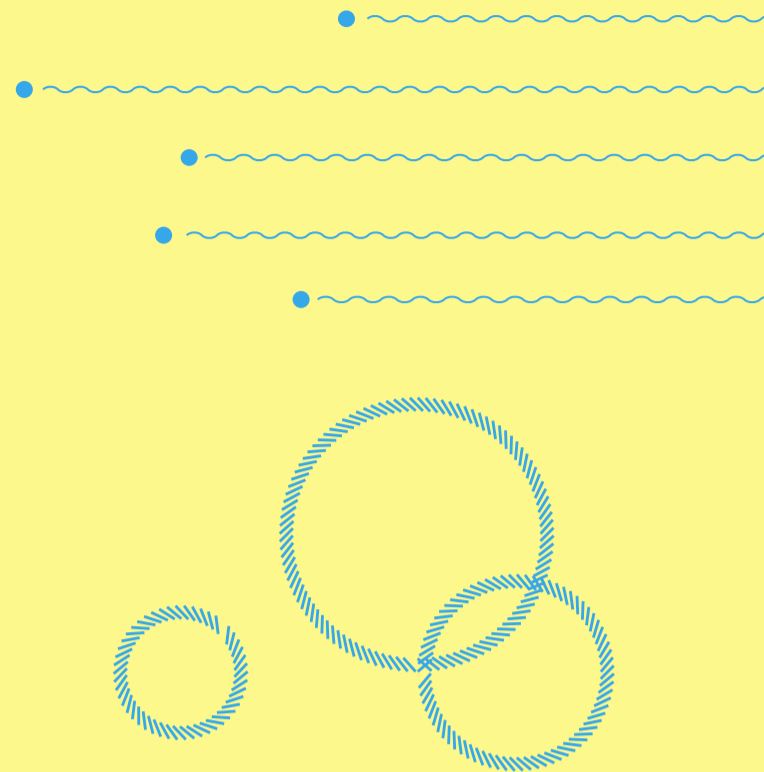
由本所領導的國際團隊，在臺灣研發組裝的 ALMA「第一频段接收機」（簡稱 Band 1），現已成功安裝在智利的 ALMA 天線上，並成功接收到天體訊號。ALMA 由北美、歐洲及亞洲共 26 國合作，於智利北部海拔 5000 公尺的阿塔卡瑪沙漠中建置 66 座高精度天線，是目前世界最大的望遠鏡。ALMA 目前配備 8 個不同頻段的接收機，範圍涵蓋 84 GHz 到 950 GHz，並規劃最終將有 10 個頻段的接收機。第一频段是目前尚未安裝接收機的频段之一，能夠涵蓋频段 35 GHz 至 50 GHz（對應波長約 6 到 8.5 毫米），其超廣頻寬範圍內的極低雜訊特性，成為這個世代最靈敏的接收機之一。



● 天線與接收機接收電磁波訊號示意圖。
©Jack Chang



● 第一頻段接收機的低溫前級模組（上）和室溫前級模組（下）在臺灣中科院的實驗室進行組裝測試。
 © 中研院天文所 / 中科院航空所



ALMA 為什麼要分成十個頻段？

接收機的頻寬受到架構中各元件的限制，對 ALMA 使用的外差式（heterodyne）毫米與次毫米波接收機來說，同一接收機最高頻率與最低頻率的比值極限大約是 1.6-1.7，在這個條件下，並考慮地球大氣的吸收頻帶與天文中重要的譜線頻率，ALMA 十個頻段規劃如下，其中，Band 1 是其中比值最大的：

ALMA Band	最低頻率 (GHz)	最高頻率 (GHz)	高低頻比值
1	35	50	1.43
2	67	90	1.34
3	84	116	1.38
4	125	163	1.30
5	163	211	1.29
6	211	275	1.30
7	275	373	1.36
8	385	500	1.30
9	602	720	1.20
10	787	950	1.21

在 500 GHz 以下，ALMA 避過了 60 GHz 與 119 GHz 的氧氣吸收帶，以及 380 GHz 的水氣吸收帶，在相對穿透不佳的 500 GHz 以上頻段，選擇了幾個相對穿透較佳的大氣窗口（Band 9 及 Band 10）。在低於 35 GHz 頻段，因為頻率與另一個位於北美的特大天線陣（VLA 或稱 JVLA）重疊，所以 ALMA 並沒有規劃更低頻率接收機。

除了頻率不同，這十個接收機都一樣嗎？

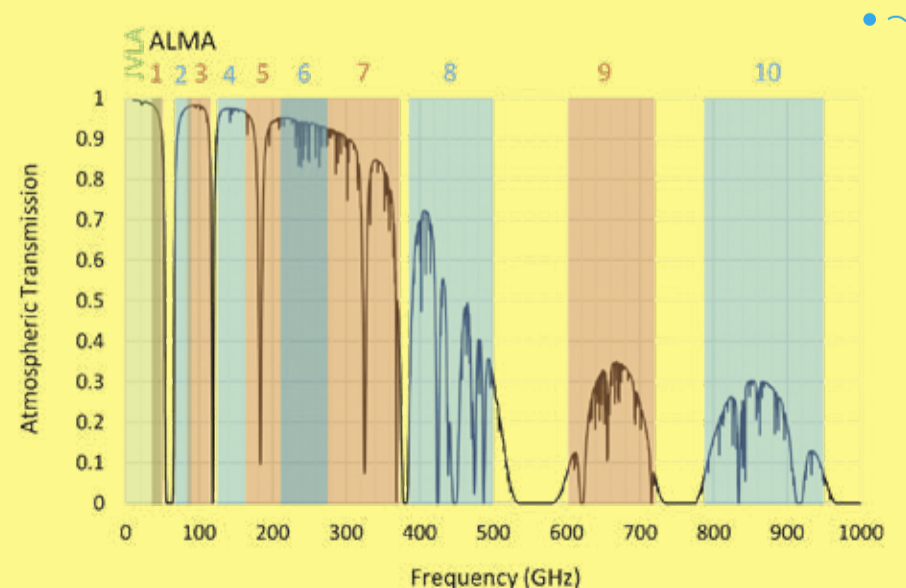
大致以 100 GHz 為界，較高頻的 Band 3 到 10 頻段是使用超導混頻器配合中頻低溫低雜訊放大器作為主要接收元件，較低頻的 Band 1 與 2 是使用半導體放大器為主要的接收元件。超導混頻器一般的工作溫度在 4 K（攝氏 -269 度）左右，半導體放大器則在 15 K 左右，所以超導接收機對絕熱構造要求會較嚴苛。

除此之外，Band 1 接收機是採用單一帶頻觀測（single-sideband），而 Band 3 到 8 是採用兩帶頻觀測（two-sideband），Band 9 與 10 是雙帶頻觀測（double-sideband）。單一帶頻觀測是指僅取混頻器降頻時的其中一個帶頻，雙帶頻觀測是指降頻時兩個帶頻同時取下且在同一中頻出口輸出，兩帶頻觀測也是兩個帶頻同時取下，但卻使用帶頻分離的方式，將兩個帶頻分別於不同出口輸出訊號。

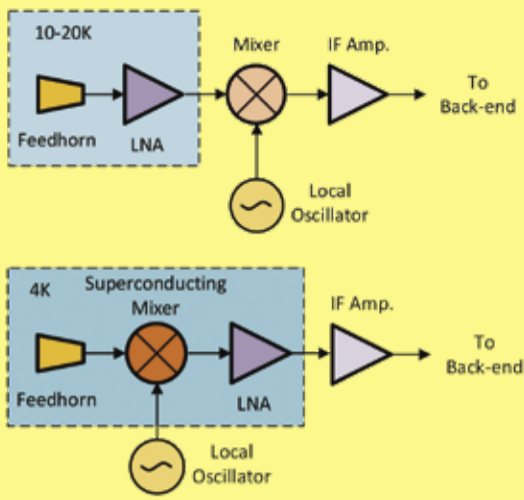
為什麼 Band-1 不像 Band-3 到 10 使用超導元件，且混頻器不需要在低溫下才能工作？

現在電波天文接收機所使用的是以鈮（Nb）為基礎的超導元件，科學家發現超導狀態下的 Nb 對次毫米波段信號有靈敏反應，且雜訊相當低。因為 Nb 在約 9K 以下會進入超導狀態，所以超導混頻器必須在約 4K 的極低溫下工作。

Band 1 這頻段在過去半導體技術還不發達的時代，也曾經有以超導混頻器為基礎的接收機，但其靈敏度並沒有比在次毫米波段優異，在



ALMA 基地（海拔 5040 公尺）大氣穿透率與 ALMA 及 JVLA 接收機頻段。© 章朝盛，大氣穿透率依據 ALMA 網站資料繪製。



(上) Band 1、2 接收機架構；(下) Band 3-10 接收機架構。© 章朝盛

1980 年代半導體技術突飛猛進，可工作頻率越來越高、元件雜訊越來越低之後，低頻的接收機慢慢被以半導體放大器與混頻器為基礎的架構取代。相較於超導元件，半導體元件不會受到工作溫度侷限，具有更高的動態範圍，且可以提供更大的中頻頻寬，直接提升接收系統的靈敏度。所以 Band 1 所採用的半導體混頻器可以在室溫也可以在低溫下工作，以系統設計而定。Band 1 因為低溫低雜訊放大器提供足夠高的增益，為了簡化低溫系統，所以放置在室溫段。

天文觀測裡的雜訊是什麼？有辦法完全沒有雜訊嗎？雜訊溫度又是什麼？

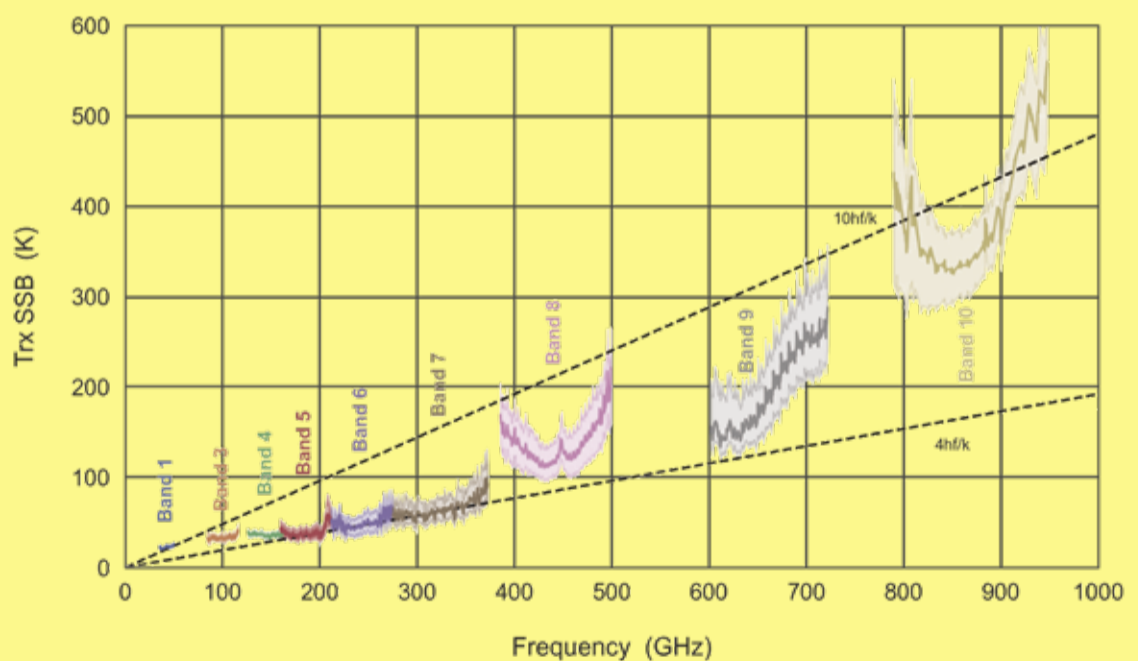
天體訊號在傳播到被接收機偵測的過程中，會與路徑上所有物體產生交互作用，所以當我們接收到訊號時，可以得知的訊息除了產生訊號的天體之外，在天文學家巧妙的利用之下，也可以推測我們與天體之間物質的性質。但在訊號進入大氣層後，因為天文學家對大氣層以內的資訊沒有興趣，所以把這些從大氣層到接收機內的交互作用統稱為雜訊，主要雜訊源是大氣、望遠鏡與接收機，雜訊如果太大會使天體訊號無法辨識。

雜訊是一種能量，在接收機系統中它的大小一般以溫度 T 來表示，它代表的能量 P 可以經由 $P=kTB$ 來計算，其中 k 是波茲曼常數、 B 為頻寬 (Hz)。在科學家的研究下發現，在毫米波與次毫米波段大氣層中的主要雜訊來源是氧氣與水氣的吸收。望遠鏡反射面的材質與精確度，以及聚焦的方式，都會多少引入環境溫度的熱雜訊。接收機雜訊主要來自放大器與混頻器元件的雜訊，與訊號傳輸的介質損耗。接收機雜訊在現今科技下，大約是在四到十倍的量子極限 (quantum limit)。量子極限是指外差式接收機在測不準原理限制下，所能達到的最低雜訊。

為什麼接收機要在低溫中工作？低溫低雜訊放大器跟一般放大器有什麼不同？是為了低溫才把望遠鏡放在高山上嗎？

當試著收集訊號時，各種手段都不可避免的會傷害訊號的品質，也就是添加了雜訊進入訊號，這些雜訊粗略可以分為熱雜訊與非熱雜訊，讓元件在極低溫工作是為了抑制接收機元件中的熱雜訊，因為熱雜訊強度是與絕對溫度成正比，在 10 K 下工作熱雜訊量就是 300 K 室溫下的 1/30。低溫低雜訊放大器強調它可以在極低溫 (一般指絕對溫度 77 K 以下) 下正常工作，並以低雜訊為設計重點。但非熱雜訊則與元件工作溫度無關，所以在 10K 下工作總雜訊並沒有辦法減低為 1/30。以砷化鎵與磷化銦半導體元件來說，當工作溫度降至 10 — 20 K 後，繼續降溫對元件雜訊改善並不會有太大助益。

一般天文台是使用以液態氦為冷媒的冷凍機，氦的沸點在一大氣壓下約為 4.2K，在適當的絕熱構造設計下，便能夠讓接收機的關鍵元件降至極低溫。對這溫度來說，外界環境溫度無論是攝氏 0 度 (絕對溫度 273 K) 還是 30 度 (絕對溫度 303 K)，差異並不大，望遠鏡放在高山上只要是為了減少大氣對訊號的吸收，尤其是水氣的影響。



ALMA 接收機雜訊溫度。©John Carpernter(Band 3-10)、章朝盛 (Band 1)

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！



發行人 | 彭威禮 執行主編 | 周美吟 美術編輯 | 王韻青、楊翔伊 執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆
 發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所 天聞季報版權所有 | 中研院天文所 ISSN | 2311-7281 GPN | 2009905151
 地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 (臺北市羅斯福路四段 1 號) 電話 | (02) 2366-5415 電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw