

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※

※

※ 大小麥哲倫星系內分子雲之探討 ※

※ Investigation of Molecular Complex in the Magellanic Clouds ※

※

※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC-89-2119-M-032-001

執行期間：89年12月01日至90年10月21日

計畫主持人：秦一男 einmann@astro.phys.tku.edu.tw

計畫參與人員：范榮坤、鍾元振

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：淡江大學物理系

中華民國九十一年四月二十三日

大小麥哲倫星系內分子雲之探討

Investigation of Molecular Complex in the Magellanic Clouds

計畫編號：NSC 89-2119-M-032-001

執行期限：89 年 12 月 1 日至 90 年 10 月 31 日

主持人：秦一男 淡江大學物理系 einmann@astro.phys.tku.edu.tw

計畫參與人員：范榮坤、鍾元振 淡江大學物理系

一、中文摘要

大小麥哲倫雲(Large and Small Magellanic Clouds; LMC & SMC)是距離本銀河系(Milky Way)最近的兩個衛星星系；因此，大小麥哲倫星系的形成與演化和本銀河系有密不可分的關係。就化學元素形成的觀點來看，兩者仍然處於演化的早期階段，這是因為它們內部恆星形成的速率(star formation rate)較慢。透過對大小麥哲倫星系的研究，我們有機會瞭解本銀河系早期的環境，對研究本銀河系，甚至是宇宙的歷史有無法取代的重要性。

為了能對大小麥哲倫雲能有系統性的研究分析，我們針對各式各樣星際介質的物理與化學性質，及其與周圍環境的交互作用做完整的觀測與分析，這當中包括黑暗星雲、行星狀星雲、及超新星殘骸等。另一方面也將對不同同位素的豐度做精密的測量，以釐清我們對星球演化模型及核合成反應的認知。

關鍵詞：大小麥哲倫星系、分子雲、黑暗星雲、行星狀星雲、超新星殘骸、核合成反應

Abstract

Temperature, density, metallicity, and radiation field are important parameters that characterize the physical and chemical state of molecular clouds. In order to understand the physics and chemistry of them, it is necessary to observe and analyze molecular clouds in a variety of environments and to combine observational data with results from model calculations. Observationally, it is possible to vary the first two parameters (i.e., temperature and density) within our Milky Way by observing clouds in different locations. The metallicity, however, does not change drastically in the Galactic plane. As two of the closest galaxies to the Milky Way, Magellanic Clouds provide a unique environment. Their low metallicity indicates that they are still in the early evolutionary stage of chemical elements, probably because of their low star-forming rate. We thus intend to observe a large variety of molecular clouds, including molecular dark clouds, planetary nebulae (PNe), and supernova remnants (SNRs) which have yet been studied in such an environment. Furthermore, observing and analyzing abundances of elements and isotopes in Magellanic Clouds will provide us the unique

opportunity to understand the history of our own Galaxy, and even of our Universe.

Keywords: Magellanic Clouds; Molecular Clouds; Dark Cloud; Planetary Nebula; Supernova Remnant; Nucleosynthesis

二、計畫緣由與目的

在描述分子雲(molecular cloud)的物理及化學性質時，溫度(temperature)、密度(density)、金屬含量(metallicity)與輻射場強度(radiation field intensity)是幾個具有影響性的關鍵參數。為了能真正了解它們的特性，尤其是它們和周圍星球及星際介質間的交互作用，我們必需觀測處在各式各樣環境下的分子雲，並進一步與理論相結合，以釐清這些物理量和分子雲特性間的關係。單就觀測上而言，在本銀河系內並不難發現一些樣本，彼此間相隔遙遠，而且具有相當程度不同的溫度與密度；但在銀河系的盤面上，各分子雲間的金屬含量相差卻是很有限的。在這一點上，大小麥哲倫星系提供一個很好的機會。大小麥哲倫星系是本銀河系三個衛星星系中的兩個，(另一個位在本銀河系中心的後方，所以不利於觀測)，並且具有下面兩個十分重要的特性：

● 低金屬含量 (low metallicity)

和本銀河系相比，大小麥哲倫星系的金屬含量分別各只有約三分之一與十分之一(Westerlund 1991)。就化學元素形成的觀點來看，如果本銀河系是處在演化成熟的階段，則大小麥哲倫星系無疑仍然處於演化的早期階段，這是因為它們內部恆星形成的速率(star formation rate)較慢。單就這一點而言，大小麥哲倫星系內的環境和早期的本銀河系，甚至和宇宙的歷史(相當於紅移較大的星系)是有相當程度的相似性的。

● 高輻射場強度 (high UV radiation field)

目前在大小麥哲倫星系內的恆星形成速率(star formation rate)是較本銀河系來的大，因此，其輻射場的強度也就相對的提高了。

在低金屬含量及高輻射場強度的影響下，大小麥哲倫星系內的星際塵埃與氣體的質量比(dust-to-gas mass ratios)也較本銀河系內的值來的低。大小麥哲倫星系可以說是一個現成的“天文物理實驗室”；在這個實驗室裡，我們可以對分子雲的特性做各式各樣的測試，這對於我們在天文物理及天文化學方面的了解有不可取代的重要性。

除了上面所提的幾點因素之外，在觀測上大

小麥哲倫星系還具有一項優點：它們到地球間的距離是確定的。在天文觀測上，我們都只能得到各物理量在觀測者附近的投影，唯有在知道它們的距離後，才能得知這些天體的實際狀況；以天體的大小及發光強度這兩個基本的物理量為例，天文學家僅能測得天體的張角及亮度，而對距離測定的準確度便決定了我們對待測天體的了解。就本銀河系內的分子雲而言，其距離的分布由數百到數萬光年不等，若無適當的條件(如已知距離的前景與背景星)，在最基本的量測上就可以產生兩個數量級的誤差。反觀大小麥哲倫星系，它們的距離分別為 50 kpc 及 60 kpc，兩者本身的大小尺度和此相比是微不足道的，也就省去了測量距離所產生的不確定性。

在研究分子雲的物理及化學特性時，大小麥哲倫星系雖然具有上述的優點，但對它們的研究卻是從約十幾年前開始才比較活躍，這主要肇因於儀器方面的限制。首先，分子雲的觀測需要高靈敏度的毫米波望遠鏡，這幾年來微波工程的進步大大提升了望遠鏡的靈敏度。其次，大小麥哲倫星系位於南半球的天空中，所有的觀測都必需在南半球進行，但大部分的天文研究都位於北半球，在南半球只有澳洲有比較進步的研究工作；而澳洲雖然在電波天文學上有優良的傳統，但由於地理條件上的限制，使得它在這方面的發展都集中在波長較長的分米波。在南美洲的智利，則主要依靠美國及歐洲的支持，在很早就設有先進的觀測設備，但重點仍以光學方面的研究為主，其間只短暫的設有一口徑 60 cm 的毫米波望遠鏡，不管是在靈敏度或解析能力上都有不足。此一狀況在 1987 年才得以改變。

1987 年由瑞典與歐洲南天天文台(European Southern Observatory; ESO)合作，在 ESO 位於智利的 La Silla 觀測站上架設了一座直徑 15 m 的毫米波望遠鏡 *SEST* (Swedish-ESO Sub-millimetre Telescope)，開啟了研究上的新頁。因為有這樣的一個新儀器，再加上天文學家們對大小麥哲倫星系的研究都有相當大的興趣，為避免惡性競爭及觀測時間的重複浪費，自然的便有“ESO-*SEST* Key Programme on Magellanic Clouds”的誕生。自 1993 年起，這個計劃的部分結果才陸續發表(e.g. Israel *et al.* 1993; Rubio *et al.* 1993)。

1995 年春(南半球的秋天)，就在 ESO-*SEST* Key Programme on Magellanic Clouds 的觀測部分接近尾聲之際，*SEST* 又將原有的 Schottky 接收機換上新的 SIS 接收機，使它的靈敏度又提高了三倍以上，這表示觀測的效率可因此而提高近十倍；我們也在此時逐漸投入大小麥哲倫星系內的分子雲研究 (Chin *et al.* 1997)。以舊有的工作為基礎，我們更得以在一些特別的領域中取得先機，其中包含了氘(deuterium)的觀測。

總體而言，目前國際間對大小麥哲倫星系的研究正方興未艾，這當中包含傳統的光學與無線電波觀測，但也加入新的紅外與 X-射線觀測。在 1998 年七月來自全球各地的研究工作者聚集在加拿大的 Victoria，假 University of British Columbia 舉辦了一場 IAU Symposium 190：“New Views of the

Magellanic Clouds”，會中討論了最新的觀測結果以及各種理論模型(ref. *Proc. of IAU Symposium 190 “New Views of the Magellanic Clouds”*)。在這些研究工作當中，我們的觀測因為具有較好的訊噪比(signal-to-noise ratio)，可以在毫米波的領域中得到比其他工作群更好的結果，這對於進一步的分析以及和理論工作的比較是十分重要的。舉例來說，我們在會議中提出唯一一篇關於大小麥哲倫星系內同位素研究的論文，這是其他研究團隊所無法達到的 (Chin 1999)。

三、結果與討論

為了能徹底了解分子雲的物理及化學特性，本計劃致力於尋找一些尚未在大小麥哲倫星系內被觀測過的特殊分子雲，以及利用多波段的觀測，來避免在分析上做過多的假設。

3.1 黑暗星雲 (Dark Clouds)

在過去的幾年當中，因為太空計劃在質與量上都有長足的進步，大小麥哲倫星系也被許多人造衛星列為觀測的目標。當中 X-ray 的觀測算是十分重要的。

首先 Wang *et al.* (1991) 注意到 X-ray 輻射似乎來自相當大的天區，而在 30 Dor 附近有較複雜的結構。1994 年，Snowden & Petre (1994) 利用德國

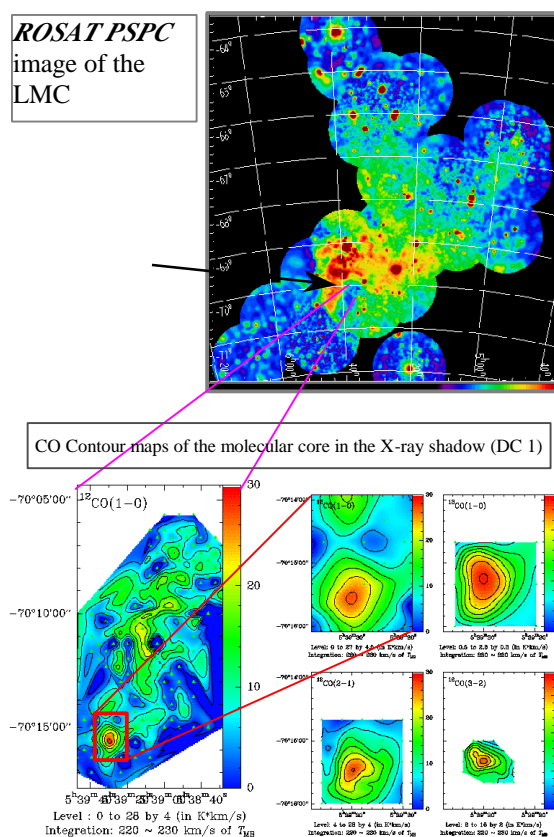


圖 1：圖的上半部為 X-ray 人造衛星 *ROSAT* (*Röntgen Satellit*) 所觀測的大麥哲倫星系，方框中即為 X-ray 輻射的陰影結構。下半部為本計劃利用毫米波望遠鏡 *SEST* 的觀測結果。

的 X-ray 人造衛星 *ROSAT* (*Röntgen Satellit*) 發現一個 X-ray 輻射的陰影結構 (圖 1)。根據計算, 在那裡的物質必需要有 $N_H \cong 1.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 的密度 (column density) 才能造成這樣的吸收 (Larson 1981), 這個值遠大於 Luks & Rohlfs (1992) 利用 HI 21 cm 放射譜線觀測所測得的氫原子密度; 這個區域也不存在電離氫的輻射 (HII emission)。1997 年我們利用近紅外線觀測這個區域, 並未發現來自高溫氫分子的輻射。這些證據引導我們, 在這個區域必定存在著低溫的分子雲, 很可能是一些黑暗星雲 (dark clouds)。若能找到它們, 並進一步研究它們的特性, 這將是在本銀河系之外第一個對黑暗星雲的研究, 對我們了解分子雲的特性十分重要。而且, 這些高密度的黑暗星雲很可能正是孕育恆星的搖籃。

目前我們在這方面的工作已經得到一些初步的結果: 發現了一些瀰漫的分子雲, 以及一些高密度的黑暗星雲核心 (圖 1)。而其他研究團隊如日本名古屋大學, 也曾嘗試利用其建造於智利四米口徑的毫米波望遠鏡 *Nanten* (南天) 來觀測同一個天區, 但並未發現預期中的分子雲。這是因為我們使用的 *SEST* 口徑大的多, 才有足夠的靈敏度。這再度證明本計劃是的方向正確, 而且是無法被取代的。在過去的一年裡, 我們利用智利的 15 m 的毫米波望遠鏡 *SEST* 得到相當豐碩的數據, 初步的內容已利用參加研討會的機會發表 (Chin *et al.* 2001), 進一步的分析結果正在撰寫論文中。

3.2 行星狀星雲 (Planetary Nebulae) 與超新星殘骸 (Supernova Remnants)

行星狀星雲 (planetary nebulae, PNe) 是低質量星球在演化末期形成的環狀雲氣; 至於大質量星球在演化末期會造成超新星 (supernovae) 爆炸, 形成超新星殘骸 (supernova remnants, SNRs)。不論是行星狀星雲或是超新星殘骸, 形成的過程和母恆星本身氣體損耗的數量與速率, 及和週遭氣體間的交互作用有密切的關係, 而內部的氣體主要來自於母恆星, 也就是說, 其元素與同位素豐度正好反映了母恆星內的同位素含量。我們計劃對大小麥哲倫星系內的行星狀星雲與超新星殘骸做有系統的觀測, 主要包含兩部份:

● 外觀分析 (morphology)

我們利用 *SEST* 觀測這些行星狀星雲與超新星殘骸的 CO(1-0) 及 (2-1) 放射譜線, 以測定它們的溫度、氣體密度等物理性質, 配合我們已經得到來自哈柏太空望遠鏡 (Hubble Space Telescope, *HST*) 的數據 (Chu *et al.* 1999), 以進一步了解母恆星氣體噴射與週遭氣體塵埃間的交互作用。在以往雖然已有類似的研究, 但都僅止於本銀河系內, 而大小麥哲倫星系內的星際氣體具有迥然不同於本銀河系內的特性, 這是第一次研究在這樣環境下的氣體交互作用。在報告撰寫期間, 我們又得到最新的 X-ray 衛星 *Chandra* 的觀測數據, 最近將把來自各個波段的觀測結果統合起來, 相信可以讓我們對發生在此環境下的物理機制有更深入的了解。

● 同位素分析 (isotope analysis)

除了極少數原子序小的化學元素 (如氫、氦、鋰、鈹) 是在大霹靂 (Big Bang) 時便形成外, 絕大多數的元素及其同位素都是在星球內部, 為維持其能量來源而透過核融合反應所形成的。定性上天文學家已能解釋大部分元素的合成, 定量上卻仍然存在很多疑點。研究這些大小麥哲倫星系內行星狀星雲與超新星殘骸的同位素含量可以幫助我們了解在低金屬含量 (low metallicity) 的環境下, 恆星在合成同位素的能力上和本銀河系內的不同 (Chin 1999; Chin *et al.* 1999)。

總體而言, 我們在了解分子雲的特性時, 大小麥哲倫星系的研究提供本銀河系所沒有的訊息, 對了解過去恆星形成的歷史, 星系與分子雲的演化有不可取代的重要性。

四、計畫成果自評

本計劃成果和原計劃的相符程度在 90% 以上。但因為新的觀測儀器及數據的推陳出新, 不但使本計劃得以達成預期的目標, 甚至如前一節中關於「超新星殘骸」的報告, 還因為加入最新的 X-ray 衛星 *Chandra* 的觀測數據, 讓我們在原來的可見光與毫米波所提供的訊息外, 更有機會了解高溫氣體的表現。(X-ray 輻射主要來自於高溫的星際氣體或恆星大氣, 但在大小麥哲倫星系的距離 - 十六萬光年 - 主要為高溫的星際氣體)

因此, 本計劃的兩個主要觀測對象 - 黑暗星雲及超新星殘骸 - 都得到預期中的結果。由於這在它們各自所屬的天體中都是很特殊的狀況, 因為以往的觀測都僅侷限於本銀河系內。除了將第一手的資料在國際研討會中發表外 (Chin *et al.* 2001; 亦由本計劃項下補助), 目前正在做最後的分析整理, 將於最近分別發表於學術期刊上。

在此同時, 為了讓學生對天文觀測有基本的認識, 我們原先申請在本計劃項下採購光學望遠鏡做一些基本的訓練。光學觀測和電波觀測有其根本上的不同, 但包括各種天球座標的認識及轉換, 追蹤系統的熟悉, 尤其是在大氣折射及減光效應的了解與修正上, 兩者都必須面對類似的課題。而對剛進入天文領域的學生而言, 光學觀測畢竟是比較容易掌握的。雖然很遺憾的, 這一部份未能得到國科會的支持, 但在本校支持下我們仍然達成部分目標。下學年起將有四年級的同學加入本團隊, 希望在未來能為國內的天文研究加入新的生力軍。

五、參考文獻

All papers in the *Proc. of IAU Symposium 190 New Views of the Magellanic Clouds*, eds. Chu, Y.-H., Suntzeff, N.S., Hesser, J.E., and Bohlender, D.A., published by Astronomical Society of the Pacific
Chin, Yi-nan, Henkel, C., Whiteoak, J.B., and Blondiau, M. 2001, in *Dwarf Galaxies and their Environment*, p. 23

- Chin, Yi-nan 1999, in *Proc. of IAU Symposium 190 New Views of the Magellanic Clouds*, eds. Chu, Suntzeff, Hesser, and Bohlender, p. 279
- Chin, Yi-nan, Henkel, C., Whiteoak, J.B., Millar, T.J., Hunt, M.R., and Lemme, C. 1997, *Astron. & Astrophys.* **317**, 548
- Chu, Y-H. *et al.* 1999, in *Proc. of IAU Symposium 190 New Views of the Magellanic Clouds*, eds. Chu, Suntzeff, Hesser, and Bohlender, p. 143
- Israel, F.P., Johansson, L.E.B., Lequeux, J., Booth, R.S., Nyman, L.-Å., Crane, P., Rubio, M., de Graauw, Th., Kutner, M.L., Gredel, R., Boulanger, F., Garay, G., and Westerlund, B.E. 1993, *Astron. & Astrophys.* **276**, 25
- Luks, Th. & Rohlfs, K. 1992, *Astron. & Astrophys.* **263**, 41
- Rubio, M., Lequeux, J., Boulanger, Booth, R.S., Garay, G., F., de Graauw, Th., Israel, F.P., Johansson, L.E.B., Kutner, M.L., and Nyman, L.-Å. 1993, *Astron. & Astrophys.* **271**, 1
- Snowden, S. & Petre, R. 1994, *Astrophys. J. Letter* **436**, 123
- Wang, Q., Hamilton, T., Helfand, D. J., & Wu, X 1991, *Astrophys. J.* **374**, 475
- Westerlund B.E. 1991, *Astron. & Astrophys. Rev.* **2**, 29